113-004-6217
IOT-111-TCF004

公路系統規劃階段強化調適能力之探討(2/2)
—強化調適能力作為與指引

交通部運輸研究所

中華民國 113 年 5 月

113-004-6217
IOT-111-TCF004

公路系統規劃階段強化調適能力之探討(2/2)
—強化調適能力作為與指引

著者：吳清如、吳柏萱、韋懿軒、章惟傑、鍾文祥、楊斯堯
曾佩如、朱珮芸、徐偉誌、蕭為元

交通部運輸研究所

中華民國 113 年 5 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

公路系統規劃階段強化調適能力之探討.（2/2）：強化調適能力作為與指引 / 吳清如, 吳柏萱, 韋懿軒, 章惟傑, 鍾文祥, 楊斯堯, 曾佩如, 朱珮芸, 徐偉誌, 蕭為元著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民113.05
面 ; 公分
ISBN 978-986-531-594-8(平裝)

1.CST: 公路管理 2.CST: 運輸系統

557 113006031

公路系統規劃階段強化調適能力之探討(2/2)－強化調適能力作為與指引

著　　者：吳清如、吳柏萱、韋懿軒、章惟傑、鍾文祥、楊斯堯
曾佩如、朱珮芸、徐偉誌、蕭為元
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：105004 臺北市松山區敦化北路 240 號
網　　址：www.iot.gov.tw (中文版＞數位典藏＞本所出版品)
電　　話：(02)2349-6789
出版年月：中華民國 113 年 5 月
印 刷 者：全凱數位資訊有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 65 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所網站
定　　價：520 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸科技及資訊組・電話：(02)2349-6789
國家書店松江門市：104472 臺北市中山區松江路 209 號•電話：(02)2518-0207
五南文化廣場：400002 臺中市中區中山路 6 號•電話：(04)2226-0330

GPN：1011300567　　ISBN：978-986-531-594-8（平裝）
著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）
本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<table>
<tr><td colspan="4">出版品名稱：公路系統規劃階段強化調適能力之探討(2/2)－強化調適能力作為與指引</td></tr>
<tr><td>國際標準書號（或叢刊號）
ISBN978-986-531-594-8(平裝)</td><td>政府出版品統一編號
1011300567</td><td>運輸研究所出版品編號
113-004-6217</td><td>計畫編號
111-TCF004</td></tr>
<tr><td>本所主辦單位：運輸能源及環境組
主管：朱珮芸
計畫主持人：曾佩如(前組長)、朱珮芸
研究人員：徐偉誌、蕭為元
聯絡電話：(02)23496870
傳真號碼：(02)27120223</td><td colspan="2">合作研究單位：鼎漢國際工程顧問股份有限公司
計畫主持人：吳清如
研究人員：吳柏萱、韋懿軒、章惟傑、鍾文祥、楊斯堯
地址：110 臺北市信義區松山路 130 號 5 樓
聯絡電話：(02)27488822</td><td>研究期間
自 111 年 2 月
至 111 年 12 月</td></tr>
<tr><td colspan="4">關鍵詞：氣候變遷、調適策略、運輸系統、公路系統、韌性</td></tr>
<tr><td colspan="4">摘要：

全球暖化導致氣候變遷現象日益增加，對運輸系統帶來的衝擊與影響也愈顯嚴重。各運輸系統中以公路與民眾生活最息息相關，公路規劃係依循相關法規及規範辦理，惟公路規劃機制及規範於氣候變遷情境下極端事件的調適仍有不足之虞。運輸系統氣候變遷調適行動的性質接近養生之長期調整工作，若公路系統規劃階段能融入氣候變遷調適理念，將有效提升面臨未來極端事件之因應能力。

本所以 2 年期辦理「公路系統規劃階段強化調適能力之探討」計畫，第 1 年期完成運輸系統調適策略滾動檢討，並研提公路系統規劃階段強化調適能力之機制與方法。

本計畫延續前期研究之成果，蒐集與分析國外運輸系統最新調適發展趨勢，以引導國內各運輸系統設施權責機關（構）之調適作為能與國際接軌；探討公路系統規劃階段強化調適能力之作為，據以研提公路系統規劃階段強化調適能力指引，供公路系統設施權責機關參考，俾提升公路系統因應氣候變遷之調適能力；同時持續辦理調適專業知識教育訓練工作，以利各部屬設施管理機關（構）人員推動調適相關業務。</td></tr>
<tr><td>出版日期</td><td>頁數</td><td>定價</td><td>本 出 版 品 取 得 方 式</td></tr>
<tr><td>113 年 5 月</td><td>370</td><td>520</td><td>凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。</td></tr>
<tr><td colspan="4">備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。</td></tr>
</table>

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS

INSTITUTE OF TRANSPORTATION

MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: A Study of Enhancing Highway System's Adaptive Capacity in the Planning Phase(2/2) – Enhance the Adaptive Capacity Action and Adaptation Guidelines			
ISBN(OR ISSN) ISBN 978-986-531-594-8 (pbk.)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011300567	IOT SERIAL NUMBER 113-004-6217	PROJECT NUMBER 111-TCF004

DIVISION: Transportation Energy and Environment Division
DIVISION DIRECTOR: Pei-Yun Chu
PRINCIPAL INVESTIGATOR：Pei-Ju Tseng (Former Division Director), Pei-Yun Chu
PROJECT STAFF: Wei-Chih Hsu, Wei-Yuan Hsiao
PHONE: 886-2-23496870
FAX: 886-2-27120223

PROJECT PERIOD
FROM February 2022
TO December 2022

RESEARCH AGENCY: THI Consultants lnc.
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ching-Ru Wu
PROJECT STAFF: Bo-Syuan Wu, Yi-Hsuan Wei, Wei-Chieh Chang, Wen-Shiang Chung, Ssu-Yao Yang
ADDRESS: 5F, No. 130, Sung-Shan Road, Taipei, Taiwan, R.O.C.
PHONE: 886-2-27488822

KEY WORDS: climate change, adaptation strategy, transportation system, road system; resilience

ABSTRACT:

Global warming has led to an increase in climate change, and its impact and effect on the transportation system have become serious. The road systems are the most closely related one towards people's daily lives among the entire transportation system. However, existing planning mechanisms and associated specifications of road infrastructure have not adequately considered climate change adaptation. If the concept of climate change adaptation can be incorporated into the road infrastructure planning stages, its ability to respond to extreme weather events will be effectively enhanced.

We conduct a two-year project of "A Study of Enhancing Highway System's Adaptive Capacity in the Planning Phase." In the first year, we will complete a rolling review of the transportation system adaptation strategy and develop mechanisms and methods to strengthen adaptation capabilities in the highway system planning stage.

This project continues the results of previous research, collects, and analyzes the foreign newly trends of adaptation development in transportation systems, and guides the adaptation actions of domestic transportation system facilities authorities to be in line with international standards. It also explores ways to strengthen adaptation capabilities in the highway system planning stage. As a basis, we will develop guidelines for strengthening adaptation capabilities in the planning stage of the highway system for reference by the authorities responsible for the highway system facilities, leading to enhanced highway system adaptation capabilities in response to climate change. Additionally, training sessions were held to strengthen the transportation administration's understanding of adaptation.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE
May 2024	370	520

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

目錄

第一章 緒論.....1-1

1.1 計畫緣起與目的.....1-1

1.2 工作項目.....1-3

1.2.1 全程（110－111 年）工作項目.....1-3

1.2.2 第 1 年期（110 年）已完成工作項目.....1-4

1.2.3 第 2 年期（111 年）工作項目.....1-4

1.3 研究範疇.....1-6

1.4 第 2 年期（111 年）計畫流程.....1-7

1.5 報告名詞與定義.....1-8

第二章 運輸系統因應氣候變遷調適趨勢.....2-1

2.1 國際氣候變遷調適發展趨勢.....2-1

2.1.1 國際氣候變遷調適新趨勢.....2-1

2.1.2 國際氣候變遷調適標準.....2-12

2.2 氣候壓力對我國運輸系統之影響.....2-17

2.2.1 全球暖化與臺灣氣候變遷趨勢.....2-17

2.2.2 氣候壓力對運輸系統之衝擊.....2-18

2.3 先進國家運輸系統調適策略及措施.....2-24

第三章 公路規劃階段強化調適能力之文獻.....3-1

3.1 公路系統韌性之定義.....3-1

3.2 國外公路系統規劃階段之調適指引.....3-5

3.3 國外公路系統規劃階段之調適選項.....3-31

3.4 國外公路系統規劃階段之調適實務案例.....3-46

3.5 國內可借鏡處.....3-56

第四章 公路規劃強化調適能力作為建議.....4-1

4.1 前期相關研究成果摘述.....4-1

4.2 滾動檢討作業說明.....4-12

4.3 公路系統規劃階段強化調適能力之機制.....4-15

4.3.1 公路系統規劃流程融入調適概念之框架.....4-15

4.3.2 第一階段：蒐集與分析氣候變遷相關資料.....4-17

4.3.3 第二階段：初步評估影響調適能力之氣候風險因素 4-22
4.3.4 第三階段：執行氣候變遷風險評估 4-24
4.3.5 公路跨運輸系統強化調適介面整合機制 4-27
4.4 公路系統規劃階段強化調適能力之方法 4-32
4.4.1 公路系統氣候衝擊鏈分析方法 4-32
4.4.2 公路系統氣候變遷風險評估之方法 4-35
4.4.3 公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項 4-40
4.4.4 面對未來氣候高度不確定之決策方法 4-46
4.5 小結 4-51
第五章 公路系統規劃階段強化調適能力指引 5-1
5.1 研擬流程 5-1
5.2 架構及內容 5-3
第六章 結論與建議 6-1
6.1 結論 6-1
6.2 建議 6-4
參考文獻 參-1
附錄 1 計畫摘要
附錄 2 審查意見辦理情形
附錄 3 公路系統規劃階段強化調適能力指引
附錄 4 計畫簡報

表目錄

表 2.1-1　氣候變遷風險評估前置作業內容 2-14
表 2.1-2　氣候變遷風險因子篩選舉例 2-15
表 2.2-1　各種排放情境下的增溫幅度推估表 2-17
表 2.2-2　公路系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表 2-19
表 2.2-3　鐵路系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表 2-21
表 2.2-4　空運系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表 2-22
表 2.2-5　海運系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表 2-23
表 2.3-1　氣候風險矩陣填寫步驟說明 2-29
表 2.3-2　氣候危害發生頻率分級標準 2-29
表 2.3-3　氣候風險衝擊程度評分標準 2-30
表 2.3-4　公路系統調適措施一覽表 2-31
表 2.3-5　鐵路系統調適措施一覽表 2-31
表 2.3-6　機場設施調適措施一覽表 2-32
表 2.3-7　港埠設施調適措施一覽表 2-33
表 3.2-1　《氣候變遷調適策略規劃實務指引－淹水災害》之編撰架構 3-5
表 3.2-2　《氣候變遷、極端天氣事件與公路系統：實務指引》之編撰架構 3-9
表 3.2-3　氣候壓力因素對公路系統的影響 3-12
表 3.2-4　《今日的道路，調適的明日指引》之編撰架構 3-14
表 3.2-5　《脆弱度評估及調適機制》之編撰架構 3-17
表 3.2-6　《公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計－專業實務指引》架構 3-22
表 3.2-7　韌性設計操作步驟與內容 3-23
表 3.2-8　《面對氣候變遷下之交通規劃：DMDU 指引》之編撰架構 3-26
表 3.2-9　國外公路系統規劃階段調適指引之重點綜理表 3-29
表 3.3-1　從海岸水利學相關案例分析中之經驗學習 3-33
表 3.3-2　從河岸氾濫相關案例分析中之經驗學習 3-34
表 3.3-3　從鋪面和土壤相關案例分析中之經驗學習 3-35
表 3.3-4　從機電系統相關案例分析中之經驗學習 3-35
表 3.4-1　MPO 大都會區規劃組織研究之調適策略說明表 3-54

表 4.1-1　公路系統間交界處強降雨衝擊之溝通及協調機制 4-11
表 4.2-1　前期研究成果滾動檢討重點彙整表 4-14
表 4.3-1　氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析項目一覽表 4-18
表 4.3-2　公路系統及跨其他運輸系統強化調適介面整合機制各階段作業 4-30
表 4.4-1　影響公路系統氣候韌性之因素一覽表 4-33
表 4.4-2　公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表 4-43
表 5.2-1　本指引架構及內容說明表 5-4

圖目錄

圖 1.4.1　第 2 年期（111 年）計畫工作流程 1-7
圖 2.1.1　IPCC 對於氣候衝擊風險的定義 2-4
圖 2.1.2　氣候風險因子暴露、危害及脆弱度之相互作用 2-5
圖 2.1.3　日本調適架構及各單位角色 2-10
圖 2.1.4　地方調適計畫步驟 2-11
圖 2.1.5　ISO 14091 架構示意圖 2-12
圖 2.1.6　簡易氣候變遷衝擊鏈示意圖 2-15
圖 2.2.1　氣候變遷對公路系統的影響 2-20
圖 2.2.2　氣候變遷對鐵路系統的影響 2-21
圖 2.2.3　氣候變遷對空運系統的影響 2-22
圖 2.2.4　氣候變遷對海運系統的影響 2-23
圖 2.3.1　氣候變遷對維生基礎設施的威脅 2-25
圖 2.3.2　愛爾蘭的氣候變遷調適計畫體系示意圖 2-25
圖 2.3.3　愛爾蘭運輸部門氣候變遷調適策略研擬流程 2-26
圖 2.3.4　氣候風險矩陣填寫步驟 2-29
圖 2.3.5　氣候風險樹狀圖 2-30
圖 3.1.1　連續天氣事件對運輸系統的衝擊 3-4
圖 3.2.1　面對氣候變遷之調適策略規劃實務操作流程圖 3-6
圖 3.2.2　面對未來不確定性對應之概念 3-8
圖 3.2.3　調適基本架構 3-11
圖 3.2.4　調適工程設計研擬流程 3-14
圖 3.2.5　脆弱度評估框架概念圖 3-19
圖 3.2.6　公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計操作流程圖 3-23
圖 3.2.7　IDB 氣候變遷風險評估方法 3-28
圖 3.3.1　早期階段將氣候變化因素納入專案開發 3-32
圖 3.3.2　調適研究之 5 個基本要素 3-32
圖 3.3.3　生命海岸線調適措施示意 3-33
圖 3.3.4　以自然為本生態元素與結構元素之風險程度適用性 3-37
圖 3.3.5　植被示意圖 3-38

圖 3.3.6 防波堤示意圖 3-38
圖 3.3.7 海欄示意圖 3-39
圖 3.3.8 袋狀海灘示意圖 3-39
圖 3.3.9 養灘示意圖 3-40
圖 3.3.10 沙丘示意圖 3-40
圖 3.3.11 海島國家應用調適方法以降低沿海地區氣候風險 3-45
圖 3.4.1 拉姆尼沼澤保護區內潮汐流受阻的鹹水沼澤和遭入侵蘆葦的位置 3-48
圖 3.4.2 以自然為本--控制洪水和侵蝕的解決方案 3-49
圖 3.4.3 索格斯河閘門工程計畫的組成 3-50
圖 3.4.4 生物滯留之舉例 3-52
圖 3.4.5 因海平面上升而抬高道路的例子 3-53
圖 4.1.1 公路系統規劃階段強化調適能力機制示意圖 4-3
圖 4.1.2 公路系統規劃階段氣候衝擊鏈分析圖-山區公路（強降雨） 4-6
圖 4.1.3 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-山區公路（強風） 4-6
圖 4.1.4 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-山區公路（高溫） 4-7
圖 4.1.5 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-平原公路（強降雨） 4-7
圖 4.1.6 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-平原公路（強風） 4-8
圖 4.1.7 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-平原公路（高溫） 4-8
圖 4.1.8 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-平原公路（暴潮/風浪、海平面上升） 4-9
圖 4.2.1 滾動檢討調適作為作業流程 4-13
圖 4.3.1 公路系統規劃作業流程融入調適理念之框架（I） 4-15
圖 4.3.2 公路系統規劃作業流程融入調適理念之框架（II） 4-16
圖 4.3.3 資料蒐集分析階段納入調適作業流程 4-18
圖 4.3.4 氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析作業程序說明 4-20
圖 4.3.5 固定暖化情境之參考基準、基期與增溫情境與時程 4-21
圖 4.3.6 方案研擬與評估階段納入調適作業流程 4-22
圖 4.3.7 初步評估影響調適能力的氣候風險因素作業程序說明 4-23
圖 4.3.8 工程研究與評估納入調適作業流程 4-25
圖 4.3.9 氣候變遷風險評估程序說明 4-25
圖 4.4.1 IPCC 對於氣候衝擊風險的定義 4-33

圖 4.4.2　公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖示例 4-35
圖 4.4.3　簡易風險矩陣 4-38
圖 4.4.4　面對未來不確定性之決策概念 4-47
圖 4.4.5　情境規劃 8 步驟 4-48
圖 4.4.6　調適路徑示意圖 4-49
圖 4.4.7　穩健決策（RDM）過程 4-50
圖 5.1.1　「公路系統規劃階段強化調適能力指引」編訂作業流程圖 5-1

第一章 緒論

1.1 計畫緣起與目的

1. 計畫緣起

自 18 世紀工業革命以來，全球社會、經濟、科技及交通快速發展，人類活動使用大量的煤炭、石油等化石燃料，使大氣中的溫室氣體逐年增加，形成全球暖化現象。而因全球暖化所導致的氣候變遷現象，例如高溫、乾旱、強降雨之頻率與強度增加，帶來的衝擊與影響愈顯嚴重。

為強化各領域因應氣候變遷的調適能力，我國於 104 年 7 月公布施行《溫室氣體減量及管理法》[1]（以下簡稱《溫管法》[1]），其中第 13 條明定中央目的事業主管機關應研議調適策略，並配合每年提送調適成果。就運輸系統之氣候變遷調適工作而言，前揭事項涉及不同運輸系統設施權責機關（構），係屬部層級之施政策略方向，爰由本所於 107 年至 108 年度研議運輸系統氣候變遷調適上位策略，並於 109 年至 110 年滾動檢討，以確保運輸系統之調適策略能與時俱進。

行政院環境保護署（現為環境部，以下同略）亦依循 106 年 2 月行政院核定的《國家因應氣候變遷行動綱領》[2]（以下簡稱《氣候變遷行動綱領》之指導），分就八大調適領域彙整研提《國家氣候變遷調適行動方案（107-111 年）》[3]（以下簡稱《調適行動方案（107-111 年）》），其中，運輸系統之調適行動計畫係屬「維生基礎設施領域」調適之一環。前述行動方案已屆期，環境部已啟動《國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年）》[2]規劃作業，並請各運輸系統設施權責機關（構）配合研提下一階段調適行動計畫。

各運輸子系統中尤以公路系統與民眾之生活最為息息相關。我國公路系統之規劃係依循相關法規及規範辦理，惟既有之公路系統規劃機制及相關規範對於氣候變遷調適之考量仍有不足之虞，公路系統一旦營運中斷對於經濟與民生之衝擊不言可喻。依據本所之前期研究成果顯示，運輸系統氣候變遷

---

[1] 「溫室氣體減量及管理法」已修正為「氣候變遷因應法」，並於 112 年 2 月 15 日經總統公布施行。

[2] 配合氣候變遷因應法，原《我國氣候變遷調適行動方案（112-116 年）》已調整名稱及年期為《國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年）》，於 112 年 10 月 4 日行政院核定。

調適行動性質接近養生之長期調整工作，爰公路系統更需於規劃階段及早融入氣候變遷調適之理念，以有效提升面臨極端天氣事件之因應能力。

承上，第 1 年期(110 年)計畫完成運輸系統調適策略滾動檢討，並研提公路系統規劃階段強化調適能力之機制與方法。本計畫延續前期研究之成果，持續掌握國際最新調適趨勢，以引導國內各運輸系統設施權責機關（構）之調適作為能與國際接軌；研提公路系統規劃階段強化調適能力指引，供公路設施權責機關參考，俾提升公路系統因應氣候變遷之調適能力；深化各運輸系統設施權責機關（構）人員對氣候變遷與調適的認識，持續辦理調適專業知識教育訓練，以利運輸系統調適相關業務之推動。

2. 計畫目的

綜上，本計畫之主要目的如下：

(1) 探討公路系統於規劃階段可強化調適能力之作為(機制與方法)，研究成果提供公路設施權責機關應用參考。

(2) 研擬公路系統規劃階段強化調適能力指引，提供公路設施權責機關參考，以利其務實檢視與調整規劃設計之相關法規或規範，進而強化公路系統之整體調適能力。

(3) 辦理教育訓練，提升各運輸系統設施權責機關（構）人員的氣候變遷調適專業知識。

1.2 工作項目

本計畫以 2 年的時間探討公路系統規劃階段如何強化調適能力。第 1 年（110 年）主要工作在於探討公路系統於規劃階段考量強化調適能力之機制與方法，包括針對各國規劃階段考量的氣候變遷調適議題與規劃指引進行回顧與探討、探討國內現行規劃階段考量之氣候變遷調適、風險管理方法，針對強降雨對國內公路系統間交界處衝擊，提出溝通協調機制之建議；第 2 年度（111 年）則依第 1 年之研究成果研提公路系統規劃階段強化調適能力指引，俾供未來公路設施權責機關檢討與調整規劃設計相關法規或規範之參考應用。

以下分述全程與各年期之工作項目。

1.2.1 全程（110－111 年）工作項目

本計畫全程（110-111 年）之工作項目如下：

1. 滾動檢討我國運輸系統調適策略。
2. 盤點我國現有運輸系統調適行動計畫，提出未來強化方向建議。
3. 研析公路系統規劃階段強化調適能力之機制與方法。
   (1) 蒐集國內外相關文獻，研析公路系統規劃階段之調適發展方向及趨勢，提出於國內之上位應用建議。
   (2) 探討影響韌性強度之因素，並研提強化調適能力之機制、方法與作為。
   (3) 公路系統及公路跨其他運輸系統介面整合調適議題探討。
4. 辦理氣候變遷專業知識推廣課程規劃及教育訓練。
5. 配合環保署（現為環境部）安排時程，完成彙提「國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年）」之維生基礎設施領域行動方案(112-115 年)（初稿）。
6. 完成 109-110 年運輸系統因應氣候變遷調適成果彙整及檢討。
7. 完成公路系統規劃階段強化調適能力指引。

1.2.2 第 1 年期（110 年）已完成工作項目

1. 滾動檢討我國運輸系統調適策略

   (1) 蒐集分析目前國外最新調適策略及調適措施發展趨勢。

   (2) 依據本所前期相關研究成果，參考國外最新調適發展趨勢並檢視各部屬設施權責機關（構）現行調適作為，滾動檢討調適策略，提出我國最新運輸系統調適策略。

2. 盤點我國現有運輸系統調適行動計畫，提出運輸系統調適行動計畫之強化方向建議。

3. 探討公路系統規劃階段影響韌性強度之因素，研提強化調適能力之機制與方法。

   (1) 研析公路系統規劃階段之調適發展方向及趨勢。

   (2) 蒐集現行國內公路系統規劃階段調適方法。

   (3) 研提強化調適能力之機制與方法。

   (4) 提出公路系統規劃階段因氣候變遷加劇強降雨對公路系統間交界處衝擊之溝通協調機制建議。

4. 召開專家學者座談會。

5. 針對階段研究成果，辦理氣候變遷專業知識推廣課程規劃及教育訓練。

1.2.3 第 2 年期（111 年）工作項目

第 2 年期的工作項目係依據全程的工作項目，考量第 1 年期已完成之工作內容，進行辦理：

1. 賡續蒐集與分析目前國外運輸系統調適發展趨勢。

2. 探討公路系統規劃階段強化調適能力之作為。

   (1) 蒐集國外公路系統規劃階段強化調適能力作為相關文獻。

   (2) 研提國內公路系統規劃階段調適作為之建議。

   (3) 提出公路系統及公路跨其他運輸系統強化調適介面整合機制建議。

3. 研提公路系統規劃階段強化調適能力指引。

4. 辦理「公路規劃強化調適能力指引」專家學者座談 1 場次，透過與實務機關及專家學者交流提供指引修正建議，提升本計畫之周延性。

5. 辦理「氣候變遷調適資訊分享與調適行動計畫研擬」、「運輸系統因應氣候變遷調適發展趨勢與公路系統強化調適能力作為」2 場次教育訓練課程，強化部屬機關(構)氣候變遷調適能力建構。並進行與會人員問卷調查分析（含滿意度調查與性別統計分析），盤點推廣教育成果。

6. 其它工作項目

(1) 辦理與《溫管法》第 13 條及施行細則第 11 條等相關規定、《氣候變遷行動綱領》、《變遷調適行動方案》等相關配合事項，如完成 111 年運輸系統因應氣候變遷調適成果彙整及檢討、彙提「國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年)」之維生基礎設施領域行動方案（112-115 年)（初稿）等。

(2) 前期期末審查意見回覆之建議於第 2 年期（111 年）納入辦理事項如下：

① 國內所提出的調適行動計畫缺少氣候衝擊分析與風險評估之情形，加強實例說明，以利公路設施主管機關理解與應用。

② 回顧近年國外相關極端氣候災害，如中國大陸鄭州的淹水事件，以及德國暴雨洪災大概是印象最深刻的，請掌握該國政府是否有進行檢討，抑或研議因應作為等相關資訊，並納入文獻回顧。

③ 有關國際氣候變遷調適策略及措施發展趨勢，建議可針對 110 年聯合國氣候峰會（COP26）決議提及調適內容，深入探討並納入文獻回顧。

④ 公路系統規劃階段強化調適能力之機制與作業方法，考量可行性研究與綜合規劃部分在工作項目中，其資料之廣度或深度、分析之精度或尺度本就有層次上的差別，因此，對於將氣候變遷因素納入既有規劃流程的構想可進一步思考，探討是否適合分列屬於可行性研究的項目，以及屬於綜合規劃的項目，經研究後再提出建議。

⑤ 我國國土屬島國與日本類似，日本於 2018 年 6 月頒布「氣候變遷調適法」並依該法制定「氣候變遷調適計畫」，建議蒐集與本計畫相關之日本方面資料並納入文獻回顧。

⑥ 與臺灣同樣常面臨水患威脅的荷蘭，為解決洪水問題，荷蘭發展出「還地於河」的觀念。如同公路以往是以運輸為主，面對社會變遷發展，與時俱進發展出「人本交通」概念。面對氣候變遷議題，建議從源頭出發，在設計理念上提出前瞻性思維。

(3) 針對計畫重要成果，製作可供展示之海報電子檔。

(4) 本計畫成果投稿於國內研討會「中華民國運輸學會 2022 年年會暨學術論文國際研討會」(民國 111 年 12 月 1~2 日)，投稿之題目為：「公路系統規劃階段強化調適能力方法之初探」。

(5) 本計畫已完成中英文版計畫摘要。

(6) 綜整摘要說明 110 年研究計畫累積成果。

(7) 其他與本計畫有關之臨時配合事項（含前期計畫之諮詢服務等）。

1.3 研究範疇

本計畫主要工作項目之研究範疇界定如下：

1. 有關「蒐集與分析目前國外運輸系統調適發展趨勢」工作項目：研究範疇延續前期調適系列研究之設定，考量設施範疇包含重大鐵公路(含國道、快速公路、省道、高鐵、臺鐵)、商港及國際機場等次系統，相關研究成果可供各運輸系統設施權責機關（構）辦理調適業務之參考。

2. 有關「探討公路系統規劃階段強化調適能力之作為」工作項目：本項工作主要探討公路系統於規劃階段強化因應氣候變遷調適能力的作為。進一步界定研究範疇如下：

(1) 「公路系統」係指國道、快速公路及省道等公路系統。

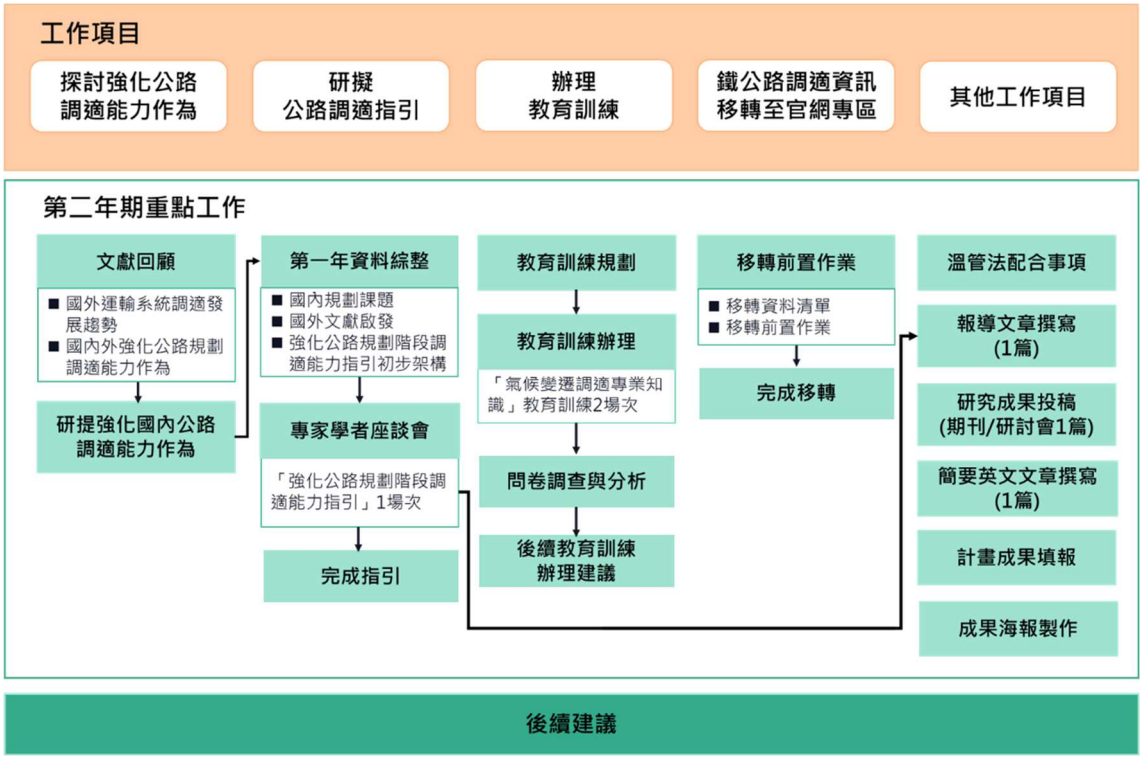
(2) 「規劃階段」係指路線可行性研究（或先期規劃）階段及綜合規劃階段。

(3) 「作為」聚焦於機制、流程、方法。

1.4 第 2 年期（111 年）計畫流程

第 2 年期已於期中階段綜整第一年蒐集之國內公路規劃階段面臨的調適課題與國外文獻的啟發，擬訂「公路系統規劃階段強化調適能力指引」的架構並初步完成指引內容建議。

期末階段已完成「公路系統規劃階段強化調適能力指引」，並透過辦理專家學者座談會蒐集各單位對指引之建議，進一步強化指引內容，同時結合計畫成果撰寫文章與發表研究成果，並以此階段成果撰寫報導文章。計畫期間配合辦理《溫管法》第 13 條與施行細則 11 條等相關規定之事項。計畫整體工作流程如圖 1.4.1。



資料來源：本計畫繪製。

圖 1.4.1 第 2 年期（111 年）計畫工作流程

1.5 報告名詞與定義

為使本報告內容利於閱讀，且聚焦於氣候變遷調適上，以下針對報告之重要名詞進行定義與說明。名詞之定義來自政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）於 2012 年出版的《促進氣候變遷調適之風險管理－針對極端事件及災害報告（Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, SREX）》、2014 年出版之第五次評估報告（the IPCC's Fifth Assessment Report, AR5）、2022 年出版之第六次評估報告（the IPCC's Sixth Assessment Report , AR6）與《溫管法》（112 年 2 月 15 日已修正為《氣候變遷因應法》）第 3 條之用詞定義。

1. 氣候（Climate）

平均天氣狀態，或在更嚴格意義上，則被定義為對某個時期（從幾個月到幾千年乃至幾百萬年不等）相關變數的均值和變率進行統計描述。根據世界氣象組織的規定，求出這些變數均值的時間長度一般為 30 年。相關變數通常指地表變數，如溫度、降雨和風。廣義上的氣候是指氣候系統的狀態，包括其統計學意義上的描述（AR5：綜合總結報告第 119 頁）。

2. 氣候變遷（Climate change）

指氣候狀態的變化，這種變化可根據氣候特徵的均值和/或變率的變化進行識別（如採用統計檢驗方法），且這種變化會持續一段時間，通常為幾十年或更長時間。氣候變遷可能由自然的內部過程或外部強迫造成，如太陽活動週期的改變、火山噴發以及人類活動對大氣成分或土地利用的持續改變等（AR5：綜合總結報告第 120 頁）。

3. 極端氣候（Climate Extreme）

原稱為極端天氣事件或極端氣候事件（Extreme Weather or Climate Event），有三種定義方式，一是當氣候數值高於或低於門檻值的事件，二是該氣候數值達特定絕對值（例如：危險標準），或可定義為該事件發生的可能性或頻率極低。極端天氣事件和極端氣候事件可透過特定的時間尺度區別，極端天氣事件發生的時間範圍介於一天內到幾周；極端氣候事件則發生在更長的時間尺度，且可以是幾個（極端或非極端）天氣事件的累積（例如，一個季節內累積數日低於平均降雨量的天氣事件而導致乾旱）（SREX：第 116

頁及第 117 頁）。

4. 氣候變遷調適（Climate change adaptation）

指人類系統，對實際或預期氣候變遷衝擊或其影響之調整，以緩和因氣候變遷所造成之傷害，或利用其有利之情勢。調適包括預防性及反應性調適、私人和公共調適、自主性與規劃性調適等（《溫管法》第 3 條）。

5. 危害（Hazard）

係指可能發生的自然或人為物理事件、趨勢或物理影響，並可造成生命損失、傷害或其它健康影響以及可能造成財產、基礎設施、生計、服務提供、生態系統及環境資源的損害和損失（AR5：綜合總結報告第 124 頁）。

6. 暴露度（Exposure）

人員、生計、物種或生態系統、環境功能、服務，資源、基礎設施或經濟、社會或文化資產處在有可能受到不利影響的區域之程度（AR5：綜合總結報告第 123 頁）。

7. 脆弱度（Vulnerability）

易受負面影響的傾向或習性。脆弱度包括各類概念和因素，如對傷害敏感或易受傷害、缺乏應對和適應的能力（AR5：綜合總結報告第 128 頁）。

8. 調適能力（Adaptive capacity）

指某個系統、組織、人類及其他生物針對潛在的損害、機會或後果進行調整、利用和應對的能力（AR5：綜合總結報告第 118 頁）。

9. 風險（Risk）

風險通常用於指那些對生命、生活、健康、生態系統和物種、經濟、社會和文化資產、服務（包括環境服務）和基礎設施有負面後果，且結果不確定的可能性（AR5：綜合總結報告第 127 頁）。

10.風險管理（Risk management）

透過計畫、行動與政策降低風險的可能性與不確定性或回應後果(AR5：綜合總結報告第 127 頁）。

11.韌性（Resilience）

某社會、經濟和環境系統處理災害性事件、趨勢或擾動，並在回應或重組的同時保持其必要功能、定位及結構，同時保持其適應、學習和改造等的能力（AR5：綜合總結報告第 127 頁）。

12. 作為（Responses）

氣候變遷因應作為簡稱作為（Responses），包含調適（Adaptation）和減緩（Mitigation），皆被視為調節風險的手段（AR6：衝擊、調適與脆弱度第 102 頁）。

第二章 運輸系統因應氣候變遷調適趨勢

IPCC 於 2021 年公布《AR6：物理科學基礎報告》[4]，報告中對未來可能發生的氣候危機提供了相當詳細且全面的評估，內容嚴厲地警告未來全球可能的氣候危機，各領域均難以置身事外。運輸系統為影響民生經濟的基礎設施，先進國家針對其運輸系統均採長期計畫持續因應並滾動檢討。

本章內容分為 3 節：2.1 節回顧國際氣候變遷調適發展趨勢；2.2 節蒐集與分析氣候變遷對我國運輸系統之衝擊，最後於 2.3 節綜整先進國家運輸系統調適策略及措施。

2.1 國際氣候變遷調適發展趨勢

本節回顧國際氣候變遷調適最新趨勢及國際標準，供各運輸設施管理機關(構)辦理調適業務之參考，同時亦做為本計畫後續研擬公路系統因應氣候變遷調適指引之基礎。

2.1.1 國際氣候變遷調適新趨勢

為接軌國際氣候變遷調適理念及潮流，本小節摘述 2021 年於英國蘇格蘭格拉斯哥辦理的 COP26 及 IPCC AR6 所揭示之有關重點，並蒐集歐盟及日本之氣候變遷調適策略供參考。

1. COP26 揭示的調適重點

締約國大會（Conference of the Parties, COP）為聯合國氣候變遷綱要公約（United Nations Framework Convention On Climate Change, UNFCCC）的最高決策機構。自 1995 年於德國柏林召開第 1 次大會後，爾後每年召開大會，最主要的目的係在確保締約國的碳排量，以減緩氣候變遷。

早期的大會著重於減少碳排放量的方式，包含產業轉型、能源來源改變、行為調整，以及科技應用等方法。直至第 21 屆大會（COP21），調適議題開始備受各國重視。COP21 通過《巴黎協定》做為 2020 年後規範全球溫室氣體排放與因應氣候變遷調適之重要國際協定。

第 26 屆大會（COP26）的重要議程之一是回顧《巴黎協定》及評估各國進展，目標為促使各國於本世紀中葉實現零排放、2030 年前加大減排力度

和速度並做出承諾。

COP26 回顧《巴黎協定》第 2 條[1]，承認氣候變遷是人類應共同關注之議題，並針對《巴黎協定》第 7 條[2]氣候調適體系下之調適策略、調適資金融資等議題進行討論與報告。其中，針對調適工作提出建議事項，要者如下：

(1) 強調擴大行動及支持之急迫性，包含資金、能力建構及技術轉移，以加強韌性、減少脆弱度並提升調適能力，同時考量優先性及發展中之締約國需求。

(2) 迄今所提交之調適資訊交流及國家調適方案，有助於理解與執行調適行動計畫及其優先性。

(3) 締約國需將調適觀念納入地方、國家及區域性計畫。

(4) 強調落實《巴黎協定》於全球調適目標達成之重要性。

(5) 請 IPCC 向 COP 提交 AR6 的成果，包含評估相關的調適需求。

(6) 呼籲研究單位進一步探討氣候變遷對於全球、區域和地方之影響、因應對策和調適需求。

同時，考量資金來源為調適計畫得以推動的重要關鍵，針對調適計畫之財務進一步提出數項重要建議：

(1) 目前為氣候變遷調適所提供之資金，不足以應對發展中之締約國日益惡化之氣候變遷影響。

(2) 為因應發展中締約國之需求，敦促已開發之締約國緊急且大幅增加氣候融資、技術轉讓和建構調適能力之支援，包括制定、實施國家調適計畫和調適交流。

(3) 調適基金對於氣候變遷調適提供之專業支持極為重要，邀請已開發之締約國長期認捐。

(4) 回顧《巴黎協定》第 9 條第 4 款，敦促已開發締約國在 2025 年之前，將其向發展中締約國所提供的氣候調適資金整體供應量增加為 2019 年之 1 倍，藉此實現減緩和調適之平衡。

[1] 「巴黎協定」第 2 條：維持本世紀全球溫升低於 2℃並努力限制溫升低於 1.5℃（相較工業革命前）。
[2] 「巴黎協定」第 7 條：締約國應建立調適能力、強化回復力與降低脆弱度之全球調適目標。

(5) 為了提供氣候變遷調適計畫所需資源，呼籲締約國多邊開發銀行、其他金融機構和私營部門加強融資，並鼓勵締約國為調適計畫持續發展創新方法及工具，以利從民間組織籌集調適資金。

2. IPCC AR6 揭示的調適重點

IPCC 於 2021 年 8 月 9 日所公布的《AR6：物理科學基礎報告》指出，目前觀測到前所未見的氣候變遷程度，證據顯示極端天氣事件受暖化影響將更為劇烈。續於 2022 年 2 月 28 日公布之《AR6：衝擊、調適與脆弱度》[5]強調氣候變遷衝擊及風險將變得更為複雜，且更難以管理。諸多氣候危害將同時發生，進而導致複合性的整體風險及橫跨各領域及區域的連動性風險，而妥適的調適作為可降低氣候風險。

我國國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫（TCCIP）」科學團隊因應該報告的公布，公布《IPCC 氣候變遷第六次評估報告「衝擊、調適與脆弱度」之科學重點摘錄》[6]，揭示現行調適及其效益，摘述重點如下：

(1) 在各領域及區域，都已觀察到調適規劃及其推動的明顯進展，並產生了多重效益。然而，調適進展的分布不均，且存在調適缺口。許多行動優先考慮降低目前及短期的氣候風險，進而降低了轉型性調適的機會。

(2) 可行且有效的調適選項是存在的，將能降低人類及自然風險。在不同領域及區域間，短期內執行調適選項的可行性將有差異。在特定的背景、領域及區域，已有紀錄證實調適於降低氣候風險是有效的，但其效益將因逐漸升溫而有所減少。回應社會不平等問題的整合性、多領域解決方案，並根據氣候風險做出有所區別且跨系統的因應措施，可提升不同領域的調適可行性及效益。

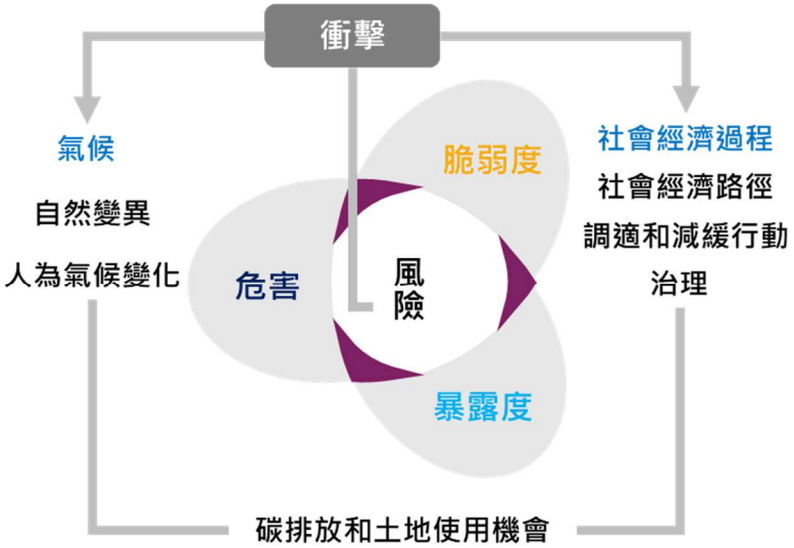
(3) 部分人為調適已達到軟性限制，但可透過解決財務金融、治理、體制及政策等一系列限制予以克服。部分生態系統已達到調適的硬性限制。隨著全球暖化加劇，損失及損害將增加，且額外的人類及自然系統將達到不可突破的調適硬性限制。

(4) 自 AR5 公布後，橫跨眾多領域及區域的不當調適證據有所增加。不當的氣候變遷因應作為可能導致脆弱度、暴露度及風險的困境，如需修

正將有困難且代價高昂，同時加劇現有的不平等。不當調適可透過彈性、跨領域、包容式、長期的調適行動規劃與執行予以避免，並為許多領域及系統帶來效益。

(5) 執行、加速及維持人類系統與生態系統調適的關鍵是其「推動條件」，包括政治承諾與落實、體制框架、政策及工具，並需有明確目標及優先事項、強化對衝擊與解決方案的知識、調動並取得妥適財務金融資源、監測與評估、包容式治理程序。

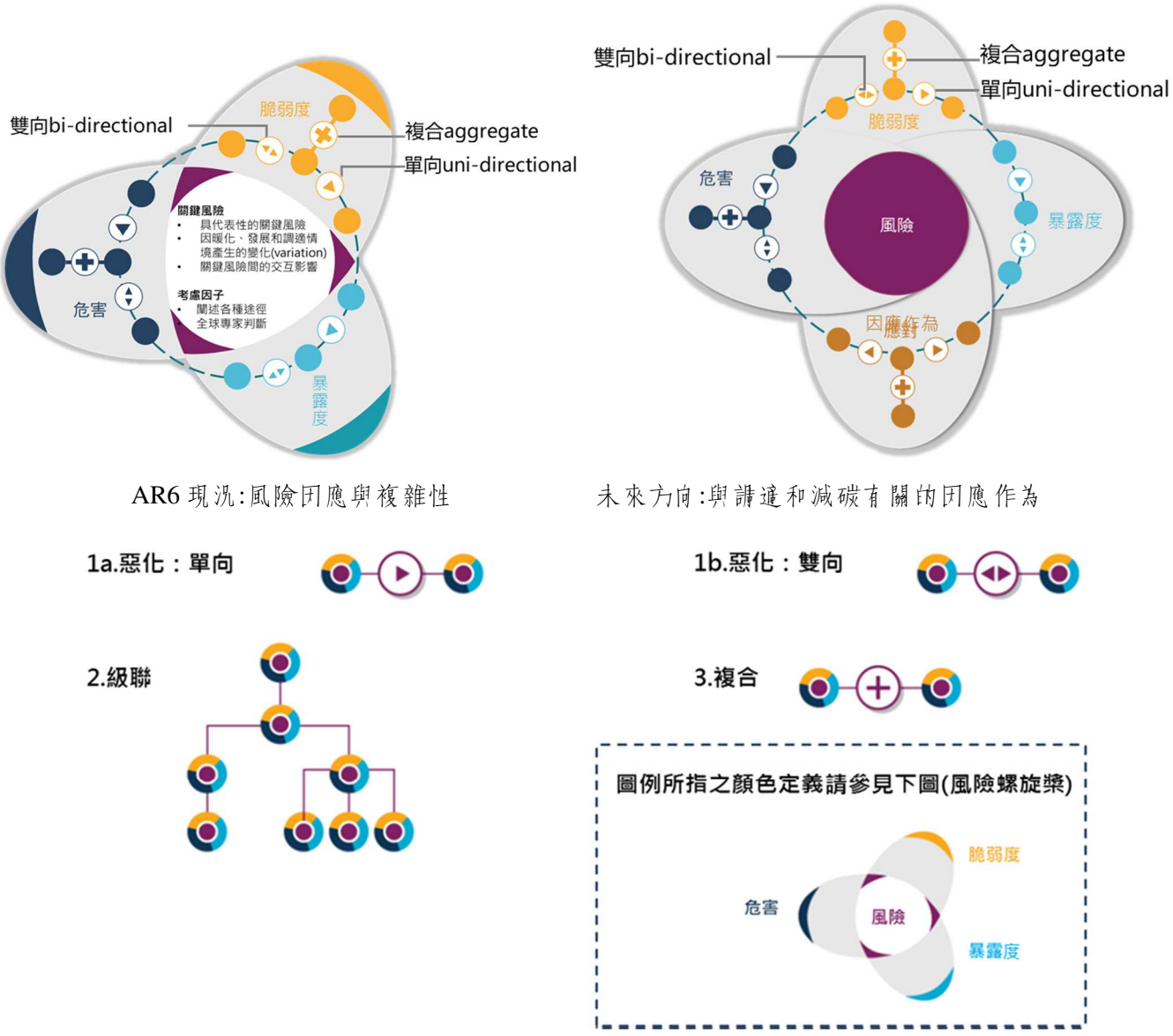
此外，IPCC 所揭示的「氣候變遷調適」之操作概念係為「在氣候變遷的情境之下對於『氣候衝擊風險』進行有效的管理」。於 IPCC 第五次評估報告(AR5)已指出「氣候衝擊風險」取決於 3 種主要因素－暴露度(exposure)、脆弱度（vulnerability）及危害（hazard），3 種因素的交集決定了風險，風險的大小與內容係依據 3 者的互動關係來決定，參見圖 2.1.1。



資料來源：IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022.

圖 2.1.1 IPCC 對於氣候衝擊風險的定義

不同的風險決定因素之間的交互作用會加劇影響，如惡化（可分為單向或雙向，如圖 2.1.2 的 1a 及 1b）、級聯（cascade）（一個事件觸發其他事件，如圖 2.1.2 的 2）、或複合（獨立風險決定因素同時發生，如圖 2.1.2 的 3）等影響。而該報告於所提出的未來方向說明圖中，增加了與調適和減碳有關的因應作為（response）所產生的影響因素，且影響因素之間增加了單向惡化、雙向惡化、複合及級聯之相互作用關係。



資料來源：IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022

圖 2.1.2 氣候風險因子暴露度、危害及脆弱度之相互作用

IPCC AR6 報告中特別強調「因應作為」的重要性，並指出透過因應作為可以調節風險。依據 AR5 所提出之氣候風險衝擊圖可知，現階段氣候風險產生來自「風險決定因素（determinants）」間的相互作用，即危害、暴露度和脆弱度之交互作用決定了風險的大小與內容，然而，該報告書進一步強調，未來風險的決定因素除了危害、暴露度及脆弱度之外，亦包含因應作為。由於氣候變遷衝擊及風險之複雜性增加，針對氣候風險評估和管理越來越重要，因此風險決定因素中不同角色（role）對於風險相關之影響、調適及脆弱度為該報告之特色及研究重點。

此外，IPCC AR6 提出「氣候韌性發展」係為降低溫室氣體排放並且強化永續發展的調適行動過程。其重點著眼於每個社會決策，以及針對這些決策的行為所累積的結果，有賴於政府、私人企業及公民社會共同完成。「氣候韌性發展」概念之重點如下：

(1) 從氣候危機發展邁向氣候韌性的三大元素包含：氣候、生態系及人類社會，3 者缺一不可。而氣候、生態系及人類社會之密切交集，成為減緩氣候變遷衝擊及風險的關鍵所在。

(2) 關於人類系統轉型的行動，包含透過調適或減緩以因應全球暖化的衝擊，目標係在人類系統轉型同時強化保護及復育生態系統，如運用生態系統為本的措施來達到生態系統轉型，最終期能透過人類系統及生態系統的同步轉型來抑制全球暖化，降低風險同時並發展氣候韌性。

3. 歐盟氣候變遷調適策略（2021 年）

歐盟執委會（European Commission, EC）於 2021 年公布新一期的氣候變遷調適策略（Forging a Climate-resilient Europe–the New EU Strategy on Adaptation to Climate Change）[7]，以「於 2050 年蛻變為具備氣候韌性的社會」為願景，針對現有調適行動提出 3 項主要的政策革新方向。

(1) 更智慧化的調適：加強知識基礎，以應對不確定性與潛在風險

① 拓展調適知識領域

調適決策制定應基於最新科學研究、數位科技與氣候服務，以了解氣候變遷傷害與社會經濟脆弱性、社會不平等間之關係；並應建立

有效和具包容性的治理機制。EC 將透過哥白尼計畫[3]、歐洲海洋觀測數據網絡[4]（European Marine Observation and Data Network）等專案，促進各成員國知識共享、縮減氣候變遷的知識缺口。

② 收集氣候相關風險與損害數據

氣候相關風險與損害數據對提高氣候風險評估準確性至關重要，然現階段相關量化數據仍較缺乏。EC 將敦促風險數據中心訂定記錄與蒐集氣候相關風險與損害數據之準則及規範，並期望以公私協力方式蒐集和共享此類數據。

③ 強化歐洲氣候調適平台（European Climate Adaptation Platform, Climate-ADAPT）做為權威性調適知識與數據平台之角色

Climate-ADAPT 提供彙整與分析的數據，支持歐洲氣候調適決策。EC 將進一步擴展平台功能，透過結合各領域資訊來源，強化其做為氣候影響與調適知識、數據平台之角色，並發展監測及回報機制。

(2) 更系統化的調適：支持各公私部門與治理層級間的調適政策制定

① 促進調適策略之跨域合作

EC 將與各成員國共同研擬國家調適策略指導方針，在促進區域及跨境合作時，亦確保氣候風險管理政策之連貫性。此外，訂立氣候韌性評估框架與適當指標，提升調適監測、回報與評估機制水準。

② 培養個人及地方政府尺度之氣候韌性能力

為協助調適策略由計畫階段轉變為實際行動，歐盟將試驗性成立調適政策支持機構，依據歐盟市長公約[5]（EU Covenant of Mayors）提供各地方政府技術支援，協助制定、實施地方層級調適策略與計畫。

③ 整合氣候韌性能力於國家財政架構

極端天氣事件發生後之救濟與重建將大幅增加政府支出，惟現行之歐盟國家財政架構僅在有限範圍內含括氣候變遷風險。因此，EC 將致力於開發氣候相關風險對公共財政潛在影響之評估方法、氣候壓力

[3] 哥白尼計畫是歐盟的環境監測專案暨資料開放平台，透過衛星針對大氣、海洋、土地、氣候變遷、國家安全、緊急應變等面向進行實時動態監測，以大量地球觀測和地面資料為決策者提供數據。

[4] 歐洲海洋觀測數據網絡，成員包含來自歐洲各地約 120 個組織，透過協力進行海洋觀察，收集地質、海洋棲息地、人類活動等大 7 主題數據。並依國際標準處理相關數據，免費開放予使用者。

[5] 歐盟市長公約（EU Covenant of Mayors）是一項集結歐盟各國領先推動氣候變遷減緩與調適行動之地方政府的行動，其首長代表透過簽署公約承諾致力於實現歐盟所訂之減排、氣候韌性建構目標。

測試工具與模型等。並與各成員國共同研議如何於國家財政架構及預算編列中，納入氣候變遷風險對國家經濟與財政影響之量化評估結果。

④ 提倡以自然為基礎的調適策略

歐盟近年大力推動「以自然為本的解決方案」（Nature-based Solutions, NbS），旨在以保護、永續管理、復育自然或改善生態系等方式，有效而彈性地因應氣候變遷、用水安全、食物安全及民眾健康等各項挑戰，以兼顧人類福祉和生物多樣性。

(3) 更迅速的調適：全面加速調適行動之開展

① 加速推行具體調適行動

相較於實際推行調適行動，歐盟現行措施仍以意識喚起、組織變革及政策制定為主。EC 將透過更多輔助工具的開發，例如：結合現有氣候服務資料庫的快速反應決策支援系統，協助決策者、相關從業者加速推行調適行動。

② 降低建築與基礎設施面臨的氣候相關風險

基礎設施之生命週期長達數十年，惟現有的多數設施無法妥善應對不斷變化的氣候條件。為最大程度降低氣候變遷衝擊風險並維持成本效益，針對基礎設施之投資應以具備氣候韌性為原則。EC 已為未來的主要基礎設施制定全面性氣候防護指南，並與各個歐盟標準化組織[6]合作更新基礎設施安全及性能管理標準。未來將持續更新氣候防護指南，並擴大應用於其他歐盟基金[7]資助之基礎設施開發計畫。

③ 確立保險做為氣候風險移轉機制之核心

氣候變遷衝擊已為全球政府、企業及人民資產帶來不穩定之風險，尤以經濟損失為最。EC 研議透過加強自然災害保險於各成員國的普及程度、鼓勵用戶投資調適行動之國家災害保險計畫、促進政府機關、保險業者及其他利害關係人間對話及合作、提倡氣候保險產品措施，應對與日俱增的氣候風險。

---

[6] 以歐洲標準委員會（European Committee for Standardization）、歐洲電子技術標準委員會（European Committee for Electrotechnical Standardization）、歐洲電信標準協會（European Telecommunications Standards Institute）三大組織為主，旨在促進各成員國間標準化合作。

[7] 依歐盟多年期財政架構（Multiannual Financial Framework 2021-2027）所訂，包含投資歐盟旗艦計畫（InvestEU）、歐洲設施連接基金（Connecting Europe Facility）、歐洲區域發展基金（European Regional Development Fund）、凝聚基金（Cohesion Fund）、公正轉型基金（Just Transition Fund）等專案及投資基金。

4. 日本氣候變遷調適策略（2018 年）[8]

日本於 2018 年 6 月頒布「氣候變遷調適法」，日本政府依據該法第 7 條第 1 款制定「氣候變遷調適計畫」，並於同年 11 月 27 日經內閣決議通過。為因應氣候變遷調適計畫內容，2020 年提出氣候變遷影響評估，並在 2021 年進行檢視。日本將調適計畫區分為七大領域別，調適基本策略與地區調適計畫說明如下：

(1) 調適七大領域及基本策略

日本氣候變遷調適領域別為七大領域：農業、林業和漁業；水環境、水資源；自然生態系；自然災害、沿海地區；健康；產業、經濟活動；國民生活、都市生活。而調適計畫包含七大基本策略：

① 調適所有相關措施均納入氣候變遷的概念。

② 以科學知識為基礎氣候變遷調適。

③ 彙整研究機構的智慧、健全基礎資訊。

④ 推動地區性的氣候變遷調適。

⑤ 因應不同議題，深化人民對氣候變遷調適的了解，以使氣候變遷調適更易推動。

⑥ 提供技術提升開發中國家的調適能力。

⑦ 確保相關行政機構密切合作的制度。

(2) 調適架構

日本調適架構針對參與單位明確界定，並規範其權責及所擔任之角色。參與單位包含中央政府、地方政府、國立環境研究所、企業及個人等。

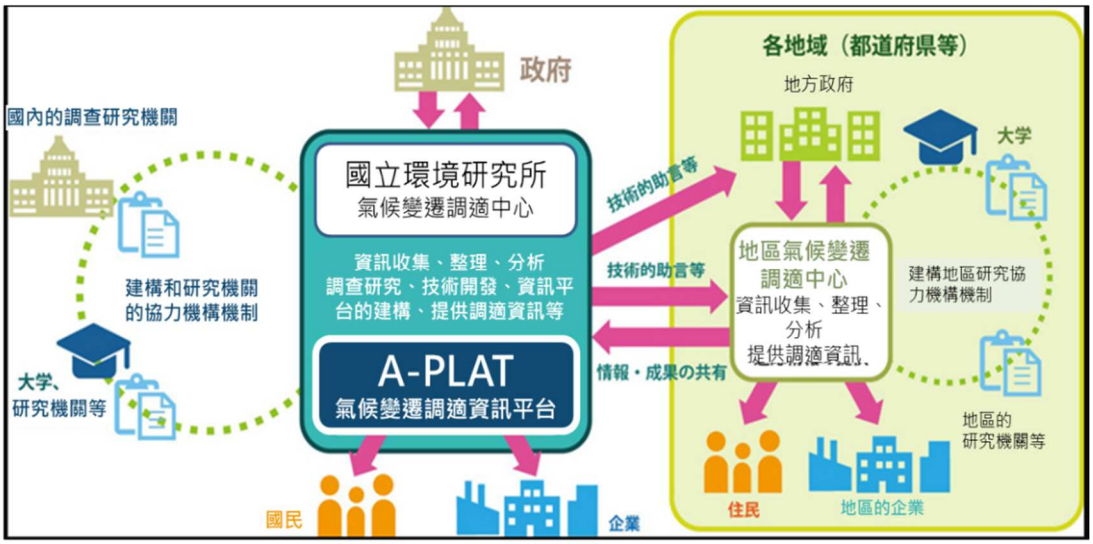
① 中央政府需針對七大領域制定氣候變遷調適計畫。透過將科學證據與氣候變遷、衝擊及相關調適策略彙整，以達有效應用，並需制訂及推動綜合對策以因應調適需求。

② 地方政府需根據當地自然及社會條件擬訂並推動地區氣候變遷調適計畫，促進地區之相關利害關係人調適。

③ 國立環境研究所需蒐集中央政府氣候變遷衝擊與調適之相關資訊，並提供地方政府和地方調適中心資訊及技術支援。另外也需促進國際合作、推動相關企業採取調適作為及調適事業的展開。

④ 企業需根據本身性質推動氣候變遷調適，並推動調適相關產業。

⑤ 國民需落實調適行動，以協助調適策略進行。



資料來源：國立環境研究所，https://www.nies.go.jp/sosiki/tekiou.html#tab1，2021。

圖 2.1.3 日本調適架構及各單位角色

(3) 地區調適計畫

地區調適計畫主要包含四大項目：計畫基本事項、區域特徵、氣候變遷影響資訊、調適對策相關資訊。地區調適計畫分為下列 8 個步驟：

① 地區氣候變遷調適計畫擬訂準備

透過對氣候變遷之了解及對當地的願景，討論希望未來調適後風貌，根據結論擬訂調適目標和方針。

② 氣候變遷衝擊的整理

整理過去因氣候變化或氣候現象造成之衝擊案例，並歸納其發生原因。

③ 未來氣候變遷衝擊影響整理

模擬未來因氣候變化或氣候現象可能產生的衝擊。

④ 影響評估的實施

透過討論後選定對地方政府有較高優先度之領域和細項。依據重要性、緊急性、確信度 3 項指標評估該衝擊是否需優先解決，並由地方政府及外部專家學者組成審議會進行評估。

⑤ 既有氣候變遷衝擊之對應能力整理

針對具有較高處理優先度的議題，蒐集既有相關對策以及因應未來氣候變遷之能力等資訊。依照整理結果，分為 3 項結果：既有的對策可完全因應未來衝擊、必須要擬訂新的對策、新對策可之後再行討論等。

⑥ 調適策略的檢討

擬訂新對策之情況下，需蒐集具體調適對策資訊，並檢討未來因應方式。

⑦ 綜整步驟①到步驟⑥的資訊，擬訂地區調適計畫

⑧ 確認地區調適計畫施行狀況

確認地區調適計畫所記載之調適對策施行狀況，由外部專家學者審議會，或取得完整施行單位之相關文件，進行資料評估。

資料來源：日本環境省，地方行政機關擬訂氣候變遷調適計畫指引，2018。

圖 2.1.4 地方調適計畫步驟

2.1.2 國際氣候變遷調適標準

國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO)於 2019 年發布《ISO 14090 氣候變遷調適－原則、規定與指導》，針對如何研擬調適策略的流程與注意重點提出指導，本系列研究已於「運輸系統因應氣候變遷調適之研究」計畫中回顧該標準重點，並於前一年期計畫（110 年）持續追蹤與回顧於 2021 年發佈的《ISO 14091 氣候變遷調適－脆弱度、衝擊與風險評估指引》(Adaptation to Climate Change－Guidelines on Vulnerability, Impacts and Risk Assessment)[9]，該標準說明如何執行氣候變遷風險評估，協助組織辨識與瞭解氣候變遷的影響並支援決策，該標準之架構如圖 2.1.5。以下依序摘述其重點：

資料來源：International Organization for Standardization, ISO 14091 Adaptation to Climate Change－Guidelines on Vulnerability, Impacts and Risk Assessment, 2021。

圖 2.1.5 ISO 14091 架構示意圖

1. 氣候風險的概念

氣候變遷風險係指氣候變遷可能對社會、經濟與環境帶來的衝擊。風險評估的主要組成包含：危害、系統對危害的暴露度與敏感度、可能的氣候變遷衝擊、無調適作為的未來風險等。氣候變遷風險評估的目的係：

(1) 提升組織對氣候變遷後果的意識。

(2) 辨識影響系統敏感度、暴露度與調適能力的因子並排序風險。

(3) 辨識可執行的調適措施與須採取調適行動的時間點。

(4) 追蹤風險的變化、監控與評估調適，掌握調適措施的成效。

氣候變遷的風險評估需應用價值判斷（value-based judgement），因衝擊的評估經常使用不同計算單位，如節省的損害成本、生命年數等。另外，在風險臨界點的設定上如無過往的數據可參考，也需應用價值判斷。

2. 氣候變遷風險評估前置作業

氣候變遷風險評估涵蓋許多工作，評估前須先進行表 2.1-1 之前置作業。其中，時間範疇的選擇可能受資料的可取得性、氣候變遷長期衝擊的不確定性與衝擊間可能的相互交集等影響。組織可設定多個時間範疇，例如不久的過去（過去 30 年）、現況、不久的將來（未來 30 年）與較久遠的將來等。整體來說，不久的將來比較久遠的將來適合用於研擬調適策略。風險評估的時間範疇設定建議應採取至少 30 年（世紀中）。針對海平面上升或壽年較長的設施（例如橋梁），則建議採用 100 年做為評估範疇（約世紀末）。

3. 執行氣候變遷風險評估

(1) 篩選衝擊與建立衝擊鏈：執行風險評估需了解因果關係，計畫團隊應篩選氣候風險因子（表 2.1-2），建立衝擊鏈（圖 2.1.6）與辨識衝擊可能帶來的連續影響。以農業為例，降雨量減少（危害）對於小型農地（暴露度）造成的衝擊為可用水量減少（衝擊），其衝擊影響的程度依據作物品種需求之用水量而有所差異（敏感度）。

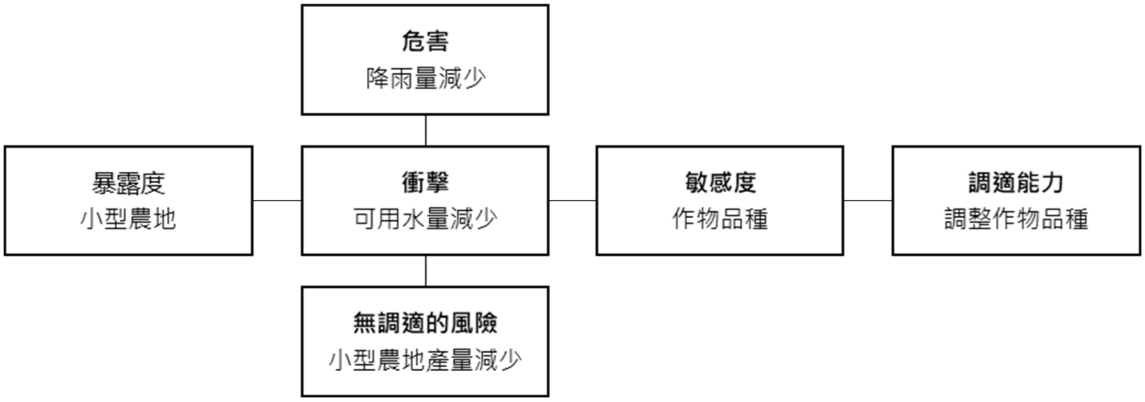
表 2.1-1 氣候變遷風險評估前置作業內容

項目	內容
1. 界定前後關係	組織需先進行下列工作，訂定範疇、目標與期望的產出： ■辨識面臨風險的系統，系統的敏感度、暴露度與調適能力 ■辨識哪種危害可能影響面臨風險的系統，挑選進一步於風險評估分析的危害，並列舉所需的資料 ■辨識與風險評估相關的既有或規劃的流程與活動 ■辨識既有的氣候變遷、脆弱度、衝擊、風險與衝擊評估資料 ■辨識並將利害關係人納入評估流程為重要的準備工作 ■盤點評估所需的資源，例如金融、人力、技術與資訊/數據等 ■辨識影響風險系統的外在因素，如社會經濟變化、土地使用變化、市場變化、政策與機關變化、技術發展、全球環境變化等
2. 辨識目標與期望的成果	組織執行風險評估的主要原因係彌補資訊的缺口： ■訂定風險評估的目標、期望的成果與可支持或輔助精進的流程 ■辨識風險評估應解決的資訊缺口 ■盤點成果可如何被應用 ■決定風險評估成果的呈現方式 ■納入專家、機關、利害關係人的參與，支持調適的決策 ■辨識目標群眾並知會風險評估期望的成果與應用
3. 成立計畫團隊	成立計畫團隊執行風險評估，並由具決策權的人員領導，以應用評估成果並導入所需資源。團隊可包含外部專家並具備下列知識： ■組織、風險系統及兩者間的關係 ■風險系統的狀況，例如地理位置、供應鏈、上、下游關係等 ■氣候變遷與產生的衝擊
4. 訂定範疇與評估方法	計畫團隊需考量下列因素並訂定風險評估範疇： ■資料精度 ■相關的族群 ■需納入的危害類型 ■評估的地點 ■評估的地理與時間精度 ■評估使用的方法，例如質化、量化或混合方法 ■風險評估可使用的資源，例如人力、財務等
5. 設定時間範疇	設定時間範疇時需考量： ■風險系統的壽年 ■風險系統在面臨氣候變遷上達到臨界值的時間點 ■啟動調適行動因應衝擊的時間點
6. 蒐集相關資訊	蒐集可取得的危害、敏感度、暴露度、氣候變遷衝擊、脆弱度評估、調適能力、既有風險評估與風險管理工具等
7. 制定一個執行計畫	完成上述 6 個步驟後，計畫團隊需研擬執行風險評估的計畫，執行計畫應包含工作項目、負責人員與期程規劃
8. 透明度	評估流程應透明（方法、決策流程與不確定性的處理、優勢與劣勢）
9. 參與機制	利害關係人的參與可有助於風險評估的完整性

資料來源：International Organization for Standardization, ISO 14091 Adaptation to Climate Change－Guidelines on Vulnerability, Impacts and Risk Assessment, 2021.

表 2.1-2 氣候變遷風險因子篩選舉例

風險組成	風險因子	指標
危害	降雨	連續 3 個月的總降雨量
暴露度	小型農地	某區域內的小型農地數
敏感度	作物品種	種植不耐旱作物的農地比例
調適能力	轉換為韌性作物的能力	可投入種植新品種作物的收入比例



資料來源：International Organization for Standardization, ISO 14091 Adaptation to Climate Change－Guidelines on Vulnerability, Impacts and Risk Assessment, 2021.

圖 2.1.6 簡易氣候變遷衝擊鏈示意圖

計畫團隊列出可能的氣候變遷衝擊，並考量其他地區的衝擊是否會影響風險系統（例如系統間的相依性、供應鏈等）。計畫團隊可應用矩陣表列出可能的危害，對應的敏感度、暴露度等。

建立衝擊鏈有助於理解視覺化、系統化與優先化影響系統風險因子，指出各項危害會造成的直接與間接衝擊。

(2) 辨識指標

指標係做為特定狀態的資訊參數（parameter），如狀態無法測量，則使用替代的指標。指標應為量化、質化或半量化，以評估氣候變遷的衝擊，篩選指標時須考量：①地理範圍與精度、②時間軸、③代表性、④可複製性、⑤可行性。

(3) 取得與管理數據

現況與未來氣候情境的取得至關重要。數據取得的方式可包含專家判斷、測量、統計、問卷與模型。取得的數據需確認品質方才應用。應用的數據應建立資料庫做系統化的管理，以掌握數據狀態與細節。

(4) 聚合指標與風險組成

組織可選擇是否聚合指標與風險組成，此步驟非必要。

(5) 評估調適能力

風險評估應評估調適能力，如未評估調適能力，則被歸類為氣候變遷衝擊評估。調適能力可由多個面向評估，如組織能力、技術能力、金融能力、生態能力等。

(6) 解析與評估發現

瞭解所辨識的風險並回饋至風險評估的目標。

(7) 分析跨部門依賴性

衝擊鏈可分析個別部門間的依賴性，獲取更完整的資料。

(8) 報告與溝通氣候變遷風險評估結果

彙整氣候變遷衝擊評估結果並與利害關係人溝通。

4. 回報與溝通執行氣候變遷風險評估

(1) 氣候變遷風險評估報告

報告應提供風險評估的目標說明、應用的方法、主要的發現、解析評估結果所需的背景知識等。

(2) 溝通氣候變遷風險評估結果

評估結果依據溝通的族群選取適用的溝通方式。

(3) 回報結果做為調適規劃基礎

風險評估係做為調適規劃、主流化與導入調適策略與措施的基礎。回報風險評估結果時應考量可理解性並提供建議。可理解性係指參與調適規劃的人員就算沒有參與風險評估也可瞭解風險評估的內容;建議則應包含如何縮小辨識的風險缺口，提供調適流程與規劃等。

2.2 氣候壓力對我國運輸系統之影響

極端天氣事件往往伴隨運輸系統服務功能失靈的風險，近年來的科學研究證明，全球暖化的全面衝擊正在持續發生，在氣候變遷的環境下，極端天氣事件發生的頻率更頻繁，事件的時間可能拉長、縮短與驟變，強度也可能增加或加速，如強降雨、強風與高溫的強度增加以及海平面上升的速度加快。氣候條件的變化導致運輸系統面臨更複雜且嚴峻的氣候風險，如何掌握氣候變遷風險，進一步妥適調適因應氣候衝擊，已成為當前及未來全球運輸系統規劃、設計、營運、維護及管理的重要議題。

2.2.1 全球暖化與臺灣氣候變遷趨勢

IPCC AR6 對於全球增溫的推估係以排放情境為基礎，以 1850-1900 年為基準時，在極低度排放情境中 2081-2100 年全球平均地表溫度很可能升高 1.0˚C 至 1.8˚C；在中度排放情境為升高 2.1˚C 至 3.5˚C；而在非常高度排放情境則為升高 3.3˚C 至 5.7˚C。

因此，至少到本（21）世紀中葉前，全球地表溫度將會持續升高。除非在未來幾十年內大幅減少二氧化碳及其他溫室氣體排放量，否則全球升溫將在 21 世紀超過 1.5˚C 和 2˚C（參見表 2.2-1）。

表 2.2-1 各種排放情境下的增溫幅度推估表

排放情境 / 增溫幅度影響		極低度排放 (SSP1-1.9)	低度排放 (SSP1-2.6)	中度排放 (SSP2-4.5)	高度排放 (SSP3-7.0)	非常高度排放 (SSP5-8.5)
各排放情境在不同時間點之增溫幅度	近期 2021-2040	1.5 (1.2,1.7)	1.5 (1.2,1.8)	1.5 (1.2,1.8)	1.5 (1.2,1.8)	1.6 (1.3,1.9)
	中期 2041-2060	1.6 (1.2,2.0)	1.7 (1.3,2.2)	2.0 (1.6,2.5)	2.1 (1.7,2.6)	2.4 (1.9,3.0)
	長期 2081-2100	1.4 (1.0,1.8)	1.8 (1.3,2.4)	2.7 (2.1,3.5)	3.6 (2.8,4.6)	4.4 (3.3,5.7)
各排放情境超過特定增溫幅度之時間點	1.5°C	2025-2044	2023-2042	2021-2040	2021-2040	2018-2037
	2°C	不會超過	不會超過	2043-2062	2037-2056	2032-2051
	3°C	不會超過	不會超過	不會超過	2066-2085	2055-2074
	4°C	不會超過	不會超過	不會超過	不會超過	2075-2094

資料來源：臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台網站。

IPCC 於 110 年 8 月 9 日發表《AR6：物理科學基礎報告》，綜整國際最

新科學研究文獻，就「當前氣候狀態」、「可能的未來氣候」等主題加以探討。為求與國際同步接軌，臺灣氣候變遷科學團隊因應此報告公布，由國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫（TCCIP）」、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象局、臺灣師範大學地球科學系及國家災害防救科技中心等單位共同發表《IPCC 氣候變遷第六次評估報告（AR6）之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告》，說明未來氣候推估之情境。

臺灣於 2100 年（21 世紀末）的氣候變遷發展，在全球暖化最劣情境（SSP5-8.5，即表 2.2-1 所指之非常高度排放情境）下之推估如下：

- 臺灣各地氣溫未來推估將持續上升，且未來極端高溫事件中，各地高溫 36℃以上日數增加，全球暖化最劣情境（SSP5-8.5）下，21 世紀末之年平均氣溫可能上升超過 3.4℃。
- 臺灣極端降雨變化趨勢較全球劇烈，臺灣年最大 1 日暴雨強度有增加趨勢，全球暖化最劣情境（SSP5-8.5）21 世紀末平均年增加幅度約為 41.3%。
- 臺灣年總降雨量未來推估有增加的趨勢，在全球暖化最劣情境（SSP5-8.5）下，21 世紀末臺灣平均年總降雨量增加幅度約為 31%。
- 臺灣颱風個數、強颱比例、降雨改變率將受到影響。全球暖化最劣情境（Representative Concentration Pathways 8.5, RCP8.5）下，21 世紀末影響臺灣颱風個數將減少約 55%、強颱比例將增加約 50%、降雨改變率將增加約 35%。

2.2.2 氣候壓力對運輸系統之衝擊

1. 公路系統

公路系統支援重要社會經濟、維生、醫療等活動之運輸服務，隨著氣候變遷及極端天氣事件的頻率增加，公路系統面臨的氣候風險逐漸升高。道路設計標準如係依據某一範圍的氣候狀態加以訂定，當氣候狀態超出範圍時，道路將面臨衝擊。回復道路功能所需的成本或提高道路設計標準、安全系統及改建等都是重大的支出。

依據《國家氣候變遷調適政策綱領》[10]，國內較易受氣候變遷影響之山區公路建設多沿河谷開鑿構築，在暴雨作用下，容易受到邊坡滑動崩塌的威脅；亦常因河谷沖蝕加劇而危及道路路基，中斷公路系統；若河川上游發生

洪水、土石流等，則沖刷裸露基礎之橋梁；下游橋梁之橋墩、橋面也易遭洪水、土石流沖毀或掩埋;如降雨量超過排水設計,則會面臨道路淹水的問題;而高溫引發的熱空氣與高水溫除容易腐蝕橋墩，也造成公路鋪面軟化與損壞。

以下摘錄前期計畫之研究成果，將公路系統區分為路段、路廊及路網3種不同的尺度，分別說明其在氣候變遷環境下面臨的潛在氣候衝擊，參見表2.2-2。

表 2.2-2 公路系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表

公路系統尺度	公路系統組成	氣候壓力因素	對於公路系統的直接衝擊
路段	結構（包含橋梁及隧道）	強降雨	土壤含水量過高影響道路邊坡、隧道口的結構強度
			強降雨沖刷橋梁基礎
		強風	強風影響橋梁結構
		暴潮/風浪	暴潮/風浪加劇橋墩的沖刷
	基礎/地表下	強降雨	路基受沖蝕掏空
		海平面上升	加劇路基的沖刷
	排水	強降雨	排水不良造成淹水
	橫斷面	強降雨	道路的橫斷面，面臨強風暴雨沖刷等影響
	材料	高溫	鋪面材料軟化與標線變形
路廊	周邊環境	強降雨	路廊因地表逕流溢淹，影響周邊排水系統與生態環境
		強風	路樹傾倒造成道路中斷
		高溫	引發邊坡野火
路網	替代道路	強降雨	替代道路數量低，強降雨時可能面臨運輸中斷
		暴潮/風浪	海浪越堤溢淹災害，海岸線退縮，淘刷公路底部基座
		海平面上升	替代道路被淹沒
	交通場站	強降雨	交通場站聯外道路淹水，造成運輸中斷
		暴潮/風浪	交通場站聯外道路淹水，造成運輸中斷

參考資料：公路系統規劃階段強化調適能力之探討，本所，110 年、本計畫彙整。

資料來源：交通部公路總局、蘋果新聞網。

圖 2.2.1 氣候變遷對公路系統的影響

2. 鐵路系統

高溫、海平面上升、強降雨、颱風氣旋等劇烈天氣現象發生頻率與強度的提高，將對鐵路系統營運帶來衝擊。

以臺鐵系統而言，氣候變遷將可能造成下列影響：(1) 溫度上升、熱脹效應致軌道擠壓變形、挫屈，影響列車行車安全、(2) 強降雨引發的坡地災害、淹水潛勢與風險增加、(3) 強降雨造成軌道或隧道淹水、(4) 強降雨造成邊坡或隧道落石、坍方、(5)路基、橋梁因地表逕流沖蝕、洪水沖刷受損、(6) 車站或其聯外道路因強降雨淹水或受坡災衝擊、(7) 架空電車線因高溫、強風受損、(8) 列車因強降雨、強風而無法正常行駛、(9) 臨海設施因暴潮/風浪或海平面上升而淹水或淹沒。

高鐵系統則可能面臨：(1) 強降雨引發的坡地災害、淹水潛勢與風險增加、(2) 路基、橋梁因地表逕流沖蝕、洪水沖刷受損、(3) 車站或其聯外道路因強降雨淹水或受坡災衝擊、(4) 架空電車線因高溫、強風受損、(5) 列車因強降雨、強風而無法正常行駛。

以下摘錄前期計畫之研究成果，將鐵路系統組成概分為軌道構造 (包含橋梁、軌道、隧道)、場站及設施等分別說明，參見表 2.2-3。

表 2.2-3 鐵路系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表

鐵路系統組成	氣候壓力因素	對於鐵路系統的直接衝擊
軌道構造（包含橋梁、軌道、隧道）	強降雨	橋梁鋼鐵結構腐蝕
		橋梁及基樁沖刷
		橋面板變位或傾倒
		橋墩及橋面板結構破壞
		隧道排水系統設施阻塞沖蝕
		隧道路基流失
		鐵軌腐蝕
		軌道破壞或淤積
		軌道路基破壞及流失
	高溫	軌道彎曲變形
車站或其聯外道路	強降雨	車站淹水，乘客無法進出車站
調車場、維修設施、支援設備和其他	強降雨	列車無法正常行駛
	強風	列車無法正常行駛
		架空電車線受損
	高溫	架空電車線受損
	暴潮/風浪	臨海設施淹水或淹沒
	海平面上升	臨海設施淹水或淹沒

資料來源：重大鐵公路建設氣候變遷調適策略與脆弱度評估指標之研究，本所，102年、本計畫彙整。

資料來源：ETtoday 新聞雲、今日新聞。

圖 2.2.2 氣候變遷對鐵路系統的影響

3. 空運系統

氣候變遷對空運系統可能造成的影響包括：(1) 陸側設施及客貨運業務因淹水、強風、雨水或暴潮/風浪沖刷及沖擊而受損或無法作業、(2) 空側設施因淹水、強風、雨水、暴潮/風浪沖刷及沖擊、高溫等而受損或無法作業、(3) 航機因強降雨、跑道積淹水、強風、高溫而無法正常起降、(4) 航機因強降雨、強風而損壞、(5) 機場聯外道路因強降雨淹水或落石、坍方、(6) 臨海設施因暴潮/風浪沖刷及沖擊而受損。

根據《臺灣氣候變遷科學報告 2017》[11]及《IPCC 氣候變遷第六次評估報告（AR6）之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告》，全球暖化可能導致 21 世紀末颱風侵臺比例約增 50%，且發展為強烈颱風的機率增加，降雨強度亦呈現增加的趨勢（在最劣排放情境下，豪雨強度約增 41.3%），高溫超過 36℃日數約增 48.1 日，上述變化意味著空運系統將受到更強烈的衝擊。

以下將空運系統組成分為空側設施、航站和陸側設施、支援設備和其他分別說明，請參見表 2.2-4。

表 2.2-4 空運系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表

空運系統組成	氣候壓力因素	對於航空系統的直接衝擊
空側設施	強降雨	鋪面結構的損壞和惡化
		鋪面表面毀損
		排水能力負荷
	高溫	電力照明系統負荷
	強風	
航站和陸側設施	強降雨	阻礙聯外運輸、流通、裝載和停車
		地面基礎破壞
		建築物和結構受損
	高溫	建築物和結構受損
支援設備和其他	強降雨	機場聯外道路因淹水或落石、坍方阻斷
		航機因強降雨、跑道積淹水而無法正常起降
	高溫	電氣系統故障或短缺
		火災風險增加
	高溫	導航和衛星信號失真
	強風	通信系統故障提高
	暴潮/風浪	臨海設施因暴潮/風浪沖刷及沖擊而受損
備註：「空側」泛指機場內供航空器起飛、降落及地面活動區域，相較於供旅客使用區域「陸側」而言。		

資料來源：臺灣桃園國際機場公司、本計畫彙整。

資料來源：中時新聞網、臺南市歸仁區公所。

圖 2.2.3 氣候變遷對空運系統的影響

4. 海運系統

氣候變遷對海運系統產生的衝擊包含多種面向，強降雨會導致聯外功能受損，造成交通受阻；強風則影響設備操作、航班停駛、設施設備損壞；海平面上升或暴潮/風浪會導致港區設備損毀淹沒、碼頭受損、船舶無法靠泊作業等影響。

由歷史天氣事件顯示，我國港口主要常因颱風來襲，造成暴潮/風浪、強風、強降雨等情形，迫使航班停駛及造成碼頭與設備損壞及聯外道路淹水中斷營運。

表 2.2-5 海運系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表

海運系統組成	氣候壓力因素	對於海運系統的直接衝擊
港口	強降雨	聯外道路淹水中斷營運
	強風	影響設備操作、航班停駛
	暴潮/風浪	碼頭與設備損壞
	海平面上升	船舶無法靠泊

資料來源：本計畫彙整。

資料來源：中時新聞網、蘋果即時。

圖 2.2.4 氣候變遷對海運系統的影響

2.3 先進國家運輸系統調適策略及措施

因應氣候變遷之衝擊，本節蒐集國外近期之運輸系統/部門的調適策略及措施，供國內運輸系統採取調適策略及本計畫研議公路系統規劃階段強化調適能力作為之參考。

1. 蘇格蘭氣候變遷計畫—運輸系統調適策略（2019 年）

蘇格蘭於 2019 年公布新一期的氣候變遷調適計畫（Climate Ready Scotland: Second Scottish Climate Change Adaptation Programme 2019-2024）[12]，彙整各相關部門的調適計畫。其中亦針對維生基礎設施於氣候變遷環境下可能面臨之威脅（圖 2.3.1）研擬調適策略。

(1) 公路

公路為蘇格蘭的經濟與民生的重要資產，為確保其氣候韌性，除定期維護與監測外，也同時藉由執行土石流研究計畫，以降低公路的坡地傷害脆弱度。上述土石流研究計畫所辨識的高風險邊坡地點即納入改善計畫，該研究計畫係採定期更新的做法以利持續監控及掌握風險。

此外，持續監測與蒐集公路淹水資訊，以辨識易淹水路段與其影響，研擬工程改善方案。在橋梁沖刷上，導入管理機制，透過巡檢、監測、檢測與記錄等一系列的作為，建構風險管理與決策改善計畫的基礎。

(2) 鐵路

透過蘇格蘭總理的《第六控制期目標水平設定》（Scottish Ministers' High Level Output Specification, Control Period 6）提高鐵路系統的永續性與韌性，在不同階段與設施導入提升韌性的作為，並持續監控在氣候變遷下的表現。

(3) 機場與商港

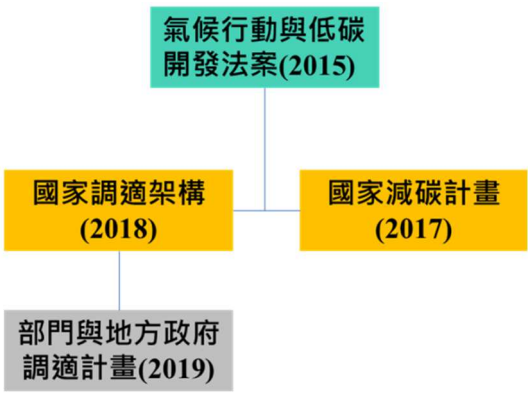
依據《第 2 期國家運輸策略》（National Transport Strategy 2），機場與商港在因應氣候變遷上，應針對強降雨、強風等發生頻率的增加與溫升等研擬對應的調適行動方案。

資料來源：Scottish Government, CLIMATE READY SCOTLAND: Second Scottish Climate Change Adaptation Programme 2019-2024, 2019.

圖 2.3.1 氣候變遷對維生基礎設施的威脅

2. 愛爾蘭運輸部門氣候變遷調適計畫（2019 年）

愛爾蘭的氣候變遷調適計畫層級如圖 2.3.2 所示。依據 2015 年發布的《氣候行動與低碳開發法案》（Climate Action & Low Carbon Development Act）所研擬的國家調適架構的規範，愛爾蘭交通部於 2019 年公布《運輸部門調適計畫》（Transport Climate Change Sectoral Adaptation Plan）[13]。

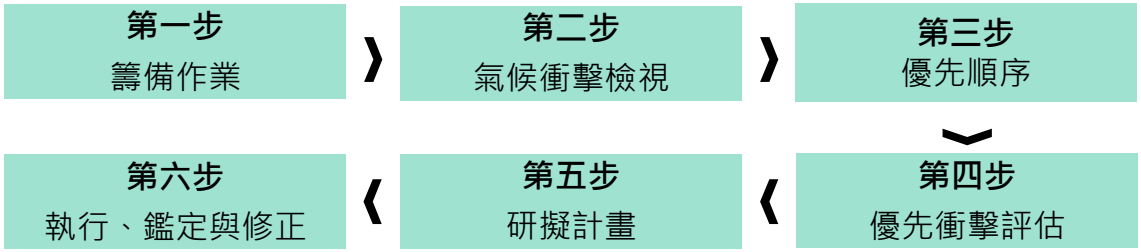


資料來源：Department of Transport, Tourism and Sport, Transport Climate Change Sectoral Adaptation Plan, 2019.

圖 2.3.2 愛爾蘭的氣候變遷調適計畫體系示意圖

該氣候變遷調適計畫的研擬流程如圖 2.3.3 所示。首先在第一步與第二步辨識氣候衝擊對運輸系統可能造成之無法承受的衝擊，以完善籌備後續的

調適研擬程序，第三步以政策目的與目標決定氣候衝擊的優先考量順序，第四步則是進一步就第三步辨識的順序做完整暴露度、敏感度與調適能力評估，第五與第六步則是依據辨識的衝擊與脆弱度研擬調適目標、目的與行動方案，決定行動方案執行的優先性。



資料來源：Department of Transport, Tourism and Sport, Transport Climate Change Sectoral Adaptation Plan, 2019.

圖 2.3.3 愛爾蘭運輸部門氣候變遷調適策略研擬流程

運輸部門的調適目標設定為：「保全運輸設施不受氣候變遷的衝擊以持續支援經濟、社會與環境發展目標」。在此目標下衍生 3 個調適標的：

(1) 增加氣候變遷對運輸系統衝擊的理解，包含跨部門之間的相互影響，並縮小部門間的認知差異。

(2) 輔助運輸系統的利害關係人辨識與決定氣候變遷風險對既有與規劃中的設施資產的優先順序，並研擬對應的調適作為。

(3) 規劃中的運輸設施需在投資計畫中研擬極端氣候的韌性作為與長期調適需求。

運輸部門的調適行動計畫可分為三大類型：

(1) 軟性（soft）

軟性的調適為措施、規定或管理系統的調整。例如，策略性地調整土地使用，以因應氣候變遷帶來的洪水或水域水流的變化。另外，在規劃與開發程序中與其他相關部門合作，以整體性地掌握氣候變遷的衝擊與強化因應措施、將氣候變遷調適相關條款納入國家運輸設施投資計畫內或與利害關係人、跨部門單位共同合作相關研究，以更全面地管理與因應氣候變遷的衝擊。

(2) 綠色（green）

綠色的調適為利用生態特性提升人類與自然系統在氣候變遷衝擊下的韌性。舉例而言，增加都市區域的綠色空間以蓄留洪水，或強化沙丘系統（dune systems）以做為海岸暴潮/風浪侵蝕的屏障等。

(3) 灰色（grey）

灰色調適指技術或工程的氣候變遷因應作為。例如，將位於高淹水潛勢地區的路段架高，或因應海平面上升設置海牆等。

該調適行動計畫係愛爾蘭 2050 年轉型為氣候韌性經濟的一環，多數的調適行動係由運輸系統利害關係人（如設施提供者或服務營運者）執行，且視為標準營運與商業規劃流程的一部分。成本效益決策調適方案可做為執行與否之依據，並可用於評估採取軟性、綠色或灰色的調適方案。

調適作為的成本通常高昂，特別是針對關鍵設施（可能因路網特性與範圍有成本差異），在有些情況下，最好的方案（或最具成本效益的）可能是不執行調適作為，或是採取軟性的政策，而許多時候調適的政策都屬跨部門，需與其他機關、部門與利害關係人合作，以提高整體調適效益。

目前為止，愛爾蘭運輸部門氣候變遷調適計畫針對前述 3 個調適標的所研擬的調適行動皆屬於「軟性」行動。

3. 日本氣候風險評估及運輸系統調適措施

日本獨立行政法人國際協力機構(Japan International Cooperation Agency, JICA）是日本對外實施政府開發援助（official development assistance）的主要執行機構之一，長期以來透過專案形式於財務上及技術上支持開發中國家因應氣候變遷風險。

JICA 根據 IPCC AR5 中之調適概念定義，於 2019 年訂定《氣候風險評估及調適指南》(Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation）[14]。

上述指南之內容涵蓋氣候風險概念、氣候風險評估程序、氣候變遷對各部門之影響以及調適措施建議等。以下摘述其中有關氣候風險評估程序及基礎設施調適措施建議：

(1) 氣候風險評估程序

JICA 專案流程始於提案階段，由受援助的開發中國家正式邀請，開啟雙邊協商，其後依序經可行性研究、專案內容評估、調適策略規劃與設計、專案執行與管理等階段。其中，氣候風險評估應於「可行性研究」階段執行。

① 氣候風險評估準備流程

a. 釐清專案目標、投入項目、執行單位、區位、受益對象、時程等候六大必要事項，並與地方利害關係人取得共識。

b. 制定數據蒐集計畫，確認二手資料與實地調查應蒐集之資料。依專案區位及性質，區分與氣候風險要素相關之資料細項。

c. 審查現行二手資料真實性、資料來源可靠程度。

d. 進行實地調查蒐集必要資料及數據，並召開公聽會、工作坊與地方政府及居民交流，以了解基地現況及氣候風險。

② 氣候風險評估執行流程

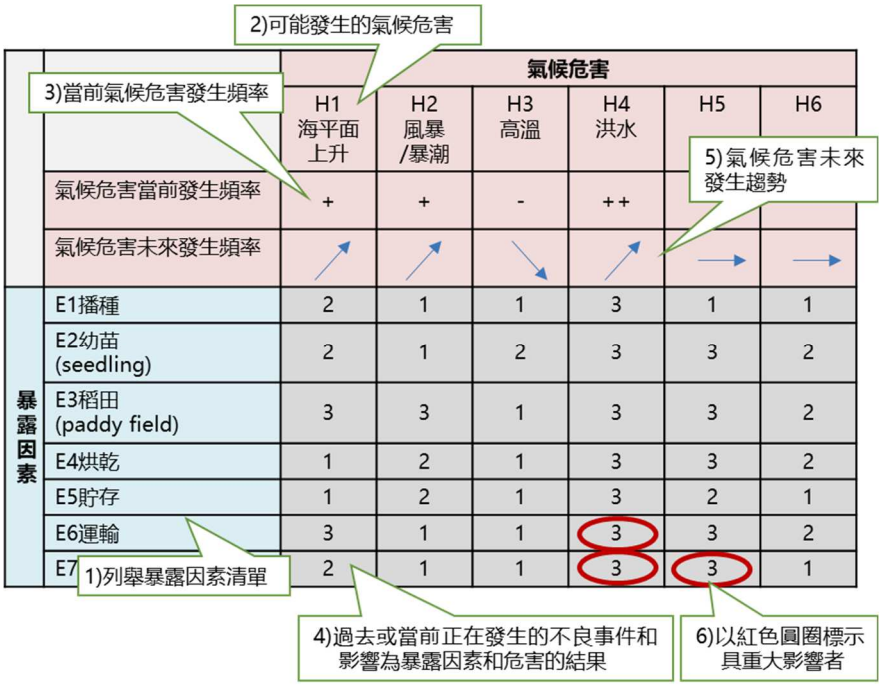
a. 與地方執行機關確認專案架構，諸如專案目標、投入項目、執行單位、區位、受益對象、時程等六大必要事項，並預先訂定氣候風險評估之時程。

b. 運用「氣候風險矩陣」指認相關風險，如圖 2.3.4。

c. 基於氣候風險矩陣指認將對專案執行造成重大衝擊的氣候風險，建立氣候風險樹狀圖（climate risk tree），如圖 2.3.5。

d. 選取將對專案執行造成重大衝擊之氣候風險，擬訂相應的調適措施，再由效益、財務及技術可行性兩面向，分析調適措施實行之優先次序，依序補充於氣候風險樹狀圖中。

e. 擇優先次序高之調適措施研擬細部計畫。



		氣候危害					
		H1 海平面上升	H2 風暴/暴潮	H3 高溫	H4 洪水	H5	H6
	氣候危害當前發生頻率	+	+	-	++		
	氣候危害未來發生頻率	↗	↗	↘	↗	→	→
暴露因素	E1播種	2	1	1	3	1	1
	E2幼苗 (seedling)	2	1	2	3	3	2
	E3稻田 (paddy field)	3	3	1	3	3	2
	E4烘乾	1	2	1	3	3	2
	E5貯存	1	2	1	3	2	1
	E6運輸	3	1	1	3	3	2
	E7	2	1	1	3	3	1

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

圖 2.3.4 氣候風險矩陣填寫步驟

表 2.3-1 氣候風險矩陣填寫步驟說明

操作步驟	說明	備註
1	詳列專案區位內暴露度之潛在風險因子。	
2	詳列專案區位內相關氣候危害。	
3	以「＋」、「－」形式填寫氣候危害發生的頻率。	頻率標準如表 2.3-2
4	以評分形式評估氣候風險衝擊程度。	評分標準如表 2.3-3
5	以箭頭形式描述各項氣候危害未來發展趨勢。	
6	(框選將對專案執行造成重大風險與衝擊之風險因子。	
7	指認可能對專案執行造成重大衝擊之氣候風險。	

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

表 2.3-2 氣候危害發生頻率分級標準

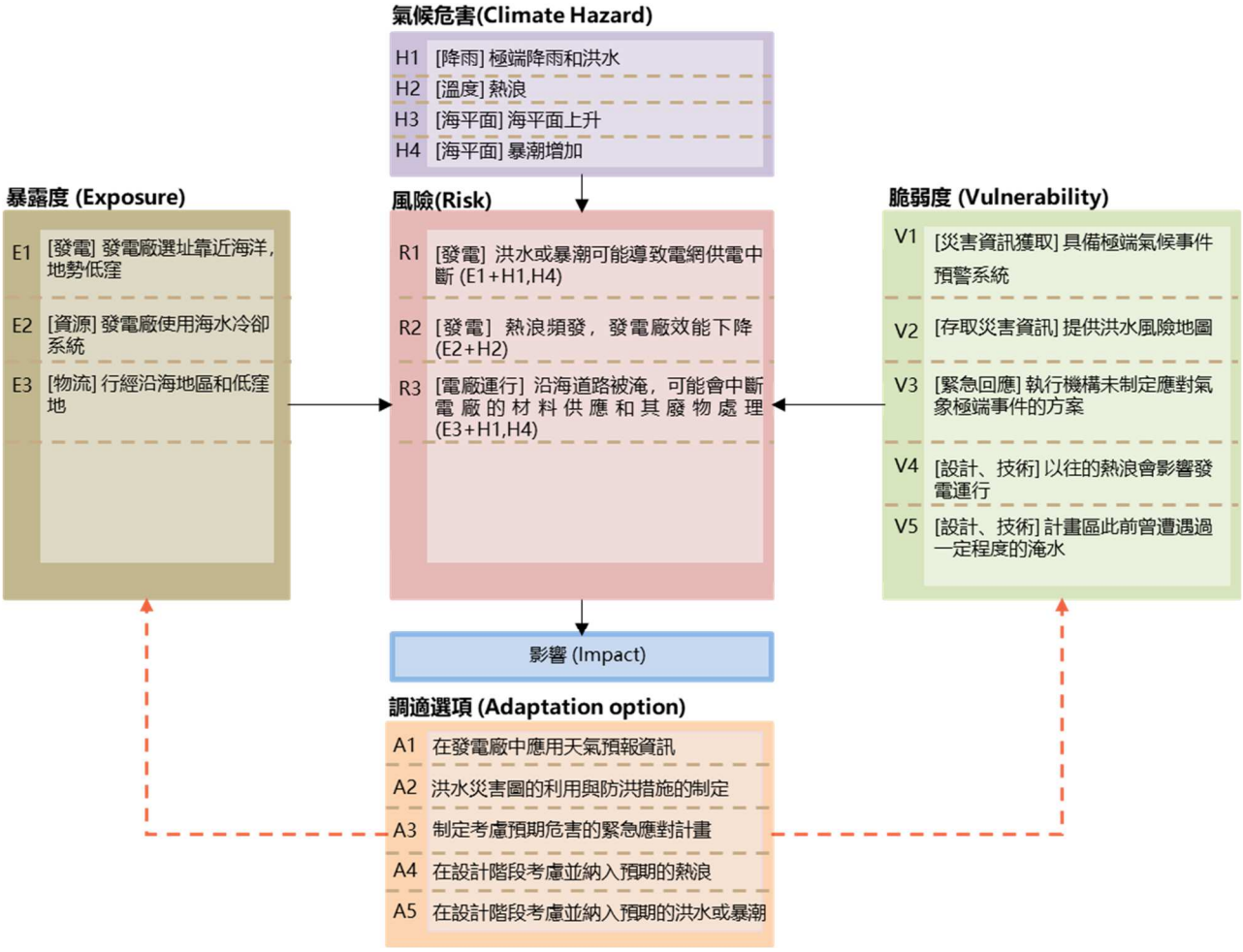
發生頻率	定義	示例
＋＋	經常發生	過去 20 年內發生次數超過 10 次
＋	有時發生	過去 20 年內發生次數超過 5 次
－	幾乎未發生過	過去 20 年內發生次數少於 1 次

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

表 2.3-3 氣候風險衝擊程度評分標準

衝擊程度	定義	示例
3	氣候事件迄今影響重大，無法解決	特定區域受洪水淹沒，長達數月無法正常供水
2	氣候事件迄今影響程度中等，難以處理	特定地點部分被洪水淹沒，基礎設施無法運作，但於 1 週內恢復原狀並正常供水
1	氣候事件迄今影響程度較小，已受控制	特定地點部分被洪水淹沒，基礎設施暫時關閉，但可立即恢復並正常供水
0	氣候事件迄今影響程度輕微，可忽略不計	特定地點部分暫時被洪水淹沒，但基礎設施運行未受影響，供水未曾中斷

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.



資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

圖 2.3.5 氣候風險樹狀圖

(2) 運輸系統及設施調適措施建議

① 公路

公路設施受氣候變遷影響顯著，氣溫與降雨型態轉變亦將連帶導致道路、橋梁等基礎設施建造與維護成本增加。公路系統之具體調適措施建議如表 2.3-4 所示。

表 2.3-4 公路系統調適措施一覽表

主要面向	次分類	調適措施
社會環境	基礎設施發展	▪ 強化現有基礎設施結構以保護相關設備 ▪ 重新設計或配置道路設施 ▪ 執行護岸工程以保護防波堤、防洪堤 ▪ 提升排水能力以應對強降雨、土壤沖蝕 ▪ 以瀝青混凝土做鋪面材料時，應考慮未來溫度的變化 ▪ 確保通往醫院、避難設施及分發醫療物資之道路暢通
	公路系統設計	▪ 整體路網規劃時，納入脆弱度、氣候風險衝擊之評估 ▪ 預留足夠的道路空間做為洪水、乾旱等事件之緩衝區 ▪ 引進氣候風險預警系統、改善危害地圖
自然環境	生態系維護	建置動植物環境友善設施，協助物種遷移（防護網、生態廊道等）

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

② 鐵路

日本鐵路系統的營運，於長期受氣候條件威脅的情況下，已累積包含專案規劃、經營管理、系統技術、標準制定等領域之豐富經驗。鐵路系統之具體調適措施建議如表 2.3-5。

表 2.3-5 鐵路系統調適措施一覽表

主要面向	次分類	調適措施
社會環境	基礎設施發展	▪ 執行邊坡穩定工程 ▪ 重新調整鐵路及隧道路線 ▪ 建置或改善污水處理設施 ▪ 研擬地鐵出入口之防洪措施 ▪ 整修鐵路沿線鋼橋 ▪ 實行生命週期成本分析以替換脆弱度高之資產

表 2.3-5 鐵路系統調適措施一覽表（續）

主要面向	次分類	調適措施
社會環境	鐵路系統設計	▪ 提供危害地圖予政府機關、鐵路營運商及乘客 ▪ 建置邊坡坍方及落石監測告警系統，與列車控制系統連動 ▪ 建置地下疏散導引系統 ▪ 引進應變指南，提供列車改道或其他運行模式指引 ▪ 繪製鐵路基礎設施及軌道脆弱度地圖 ▪ 加強天氣狀況、基礎設備使用情形監測 ▪ 以地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）建置極端事件警報系統與天氣預報地圖 ▪ 與鐵路公司及營運商共同研擬極端事件應變計畫

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

③ 機場

機場設施之設計壽年可長達百年，故於基礎設施規劃階段即應確保將氣候風險納入長期評估及規劃重點。機場設施具體調適措施建議如表 2.3-6 所述。

表 2.3-6 機場設施調適措施一覽表

主要面向	次分類	調適措施
社會及自然環境	基礎設施發展	▪ 高風險地區之機場設施設計準則、施工計畫、緊急應變計畫等 ▪ 整建機場跑道，針對跑道長度及方向進行必要之調整 ▪ 遷移重要機場設備至高於海平面之處 ▪ 維護備用電力系統、強化配電設施 ▪ 建置滯洪池以應對極端降雨情形
	營運管理計畫	▪ 整合潛在極端氣候事件於緊急飛行計畫中（例如：由目視飛行轉換至儀器飛行、替代航線安排等） ▪ 制定機場緊急應變計畫及危害地圖，應包含休息、餐飲、通訊等基礎服務提供 ▪ 多樣化機場聯外大眾運輸系統 ▪ 研議機場能見度改善措施、強化班機起降系統 ▪ 依據機場跑道鋪面狀況，限制航線貨物裝載量 ▪ 檢討高風險地區之土地使用計畫

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

④ 港口

基於港口做為物流供應鏈基礎設施的角色，針對港埠設施及機能之氣候風險評估更顯重要。港埠設施具體調適措施建議如表 2.3-7。

表 2.3-7 港埠設施調適措施一覽表

主要面向	次分類	調適措施
社會環境	基礎設施發展	▪ 維護防波堤及繫泊設施結構及功能 ▪ 協同相關組織確保污水處理系統正常運作，並定期評估設備效率 ▪ 密切監測海域天氣狀況，並確保資訊共享 ▪ 引進揚塵控制及預防系統 ▪ 研擬道路設施防洪對策 ▪ 研議淤沙控制措施，處理航道淤積問題 ▪ 執行沿海護岸、港口疏浚工程
	營運管理計畫	▪ 檢討及更新港口營運持續計畫（Port Business Continuity Plan, Port and Harbor BCP），納入氣候風險評估方法 ▪ 考量生命週期成本，規劃港口更新開發時程 ▪ 於港口管理機構開設氣候變遷培訓課程 ▪ 增進對氣候變遷調適相關產品及貿易供應鏈之了解 ▪ 製作危害地圖，加強地方政府及鄰近社區之應變能力

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

第三章 公路規劃階段強化調適能力之文獻

公路系統為維繫社會經濟發展的重要基礎設施，一旦其功能受損或失能影響社會經濟甚鉅，此外，公路系統亦經常扮演其他維生基礎設施，例如發電廠、水庫等的聯外支援角色，全球氣候變遷導致公路系統面臨較更加複雜且嚴峻的氣候風險，如何及早提升公路系統因應氣候變遷的調適能力實屬當務之急。

氣候變遷調適的理念有待全面融入既有以及新建公路系統全生命週期各項作業過程中，以強化公路系統的氣候韌性。相關文獻顯示，新建公路系統時若能在規劃階段即融入氣候變遷調適的理念，將可得到最佳的調適效果。近年來先進國家以及國際公路專業組織均強調規劃中的公路相關專案應採全生命週期的觀點審視氣候風險，並採取適當的調適選項措施避免或降低氣候風險，亦提出許多相關的指引文件引導實務作業。

本章內容計分為 5 節：3.1 節探討公路系統韌性之定義；3.2 節蒐集國外公路系統規劃階段之調適指引；3.3 節彙整國外公路系統於規劃階段建議的調適選項；3.4 節引介國外公路系統規劃階段的調適實務案例；最後，於 3.5 節綜理國內可借鏡之處。

3.1 公路系統韌性之定義

強化公路系統之氣候變遷調適能力意即強化公路系統之氣候韌性。本節透過相關文獻探討公路系統韌性之定義，再參考該定義進行後續文獻之蒐集及回顧，以符合研究主題。

1. 美國運輸研究學會（Transportation Research Board, TRB）：韌性納入運輸規劃與評估（2020 年）

為協助各州政府在氣候變遷的威脅下將韌性納入長期運輸規劃，TRB 於 2020 年發布《韌性納入運輸規劃與評估》（Incorporating Resilience into Transportation Planning and Assessment）[15]做為調整規劃流程的參考依據。

該研究指出具韌性與不具韌性的運輸系統之主要差異為：不具韌性的運輸系統專注於達成與維持營運，具韌性的運輸系統則需在平常與面臨事件衝擊時皆可持續營運。

為達到持續營運的目標，需辨識運輸系統的關鍵因子並提供每項資產面對極端事件時可持續營運與積極應變的能力。規劃者需針對規劃地區最容易受到衝擊的危害改善運輸系統的韌性。

該研究進一步由規劃的角度提出韌性運輸系統的組成要素包含：

(1) 耐受能力（absorptive capacity）：系統承受與維持正常營運的能力。

(2) 回復能力（restorative capacity）：系統受衝擊後可快速回復正常營運的能力。

(3) 公平出入（equitable access）：系統受衝擊時可提供整個社區的人民公平出入的服務。

(4) 調適能力（adaptive capacity）：系統受衝擊時可改變與因應以維持正常營運的能力。

就長期規劃而言，提升耐受能力的作為可包含強化運輸設施，如因應淹水可建設防洪牆或提升綠色基盤設施調整道路排水；提升回復能力的作為可包含投資設備、人員並可投入不同的合作機制，以確保系統受衝擊時可快速回復；提升公平出入的方式則是增加運輸服務，如增加大眾運輸的路線與班次，提供偏鄉的運輸服務等；提升調適能力則是增加運輸系統的備援力。

2. 美國運輸學會（TRB）：投資運輸系統韌性：明智選擇的框架（2021 年）

為協助美國各州政府在嚴峻的氣候變遷威脅下進一步思考投資運輸韌性，TRB 於 2021 年發布《投資運輸系統韌性：明智選擇的框架》（Investing in Transportation Resilience: A Framework for Informed Choices）[16]做為各州政府思考投資運輸韌性決策之參考。該研究指出韌性的定義係「準備和調整以因應不斷變化的情況、承受運輸中斷並迅速從中復原的能力」。

為期具體評估運輸系統的韌性，該研究透過綜整各州的實務經驗與研究報告，發現實踐和研究上的落差，且為推進實踐各州運輸韌性之進展，彙整實務上採用之框架與韌性評估方法，以提供決策者於運輸韌性投資決策之參考。

雖然該研究承認目前為止尚無單一指標或一組指標可用來計算運輸系統的韌性，即韌性的衡量方式實際上需因個案而異。然一般而言各界大致同意以「風險」做為衡量「韌性」的依據，而風險基本為「危害發生機率」、「因危害發生失能的機率」以及「該後果所衍生總成本」等三項之乘積。

3. 英國運輸研究實驗室（Transport Research Laboratory, TRL）：公路：提升韌性產業指南（2019 年）

英國 TRL 於 2019 年出版《公路：提升韌性產業指南》(Roads: An Industry Guide to Enhancing Resilience）[17]，針對公路系統在持續變動的環境下如何提升韌性的作為與支援工具提出專業的建議。摘述如下：

(1) 韌性公路系統的概念

該指南將韌性定義為「可承受、因應與回復的能力」，而具韌性的公路系統可在受衝擊時依然維持其基礎運輸能力（essential services）。並進一步指出韌性公路系統的要素包含以下四項：

① 備援力（redundancy）：系統的替代道路或是備用的運輸容量。

② 可靠力（reliability）：系統可在多種狀況下維持營運。

③ 耐受力（resistance）：系統的物理耐受力。

④ 回復力（recovery）：系統受到衝擊時的應變與回復能力。

在氣候變遷日漸嚴峻的狀況下，如極端天氣事件的發生頻率增加，則系統的回復時間將受影響，導致無法維持在一個平衡的韌性點(圖 3.1.1)。故透過另外三個因子(備援力、可靠力與耐受力)提升系統韌性至關重要。

提高公路系統韌性的直接效益為改善營運安全、減少營運受影響與設施受損等發生，間接效益則是讓仰賴運輸系統的民眾、社區、產業與其他維生基礎設施等都可持續運作。

(2) 韌性公路系統的建立

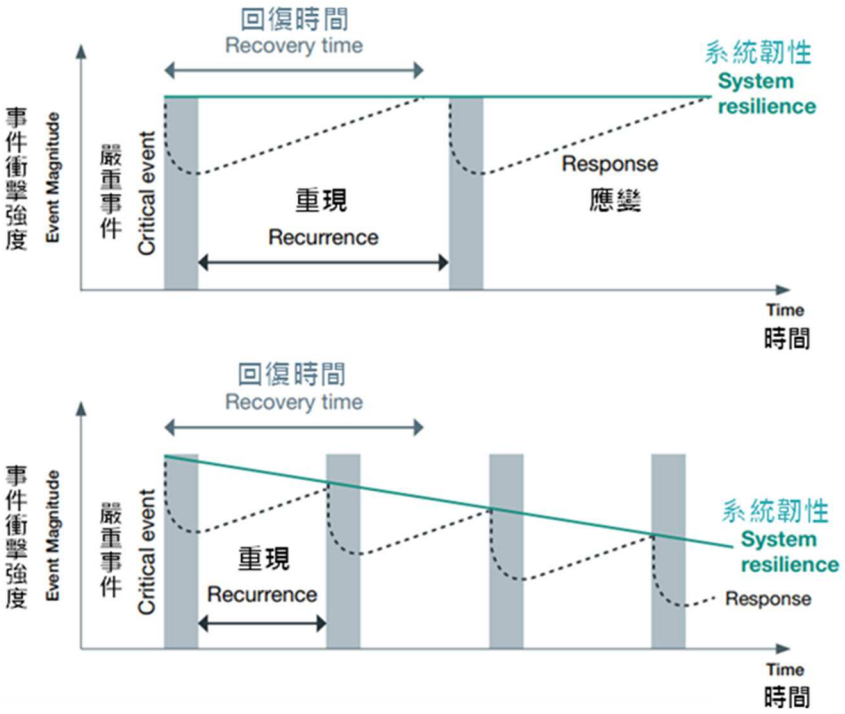
為進一步推動調適，以經濟的角度量化韌性行動的成本效益甚為重要，透過量化韌性行動可節省的維護與修繕成本，鼓勵設施權責機關在考量投入成本的前提之下投入韌性提升作為。

另外一個提升系統韌性的作為則是將韌性的概念導入公路設施與管理。公路設施的韌性管理涉及到多種資產，如路段、鋪面、隧道、橋梁、土建、邊坡、號誌等。以管理面看則是應用價值鏈（value chain）於每一個階段（規劃、設計、建設、營運等）納入韌性的概念，此作法須與利害關係人合作，建立較全面的考量，以利韌性行動的推動執行。

至於如何於公路系統規劃階段納入韌性的概念？

由於公路規劃階段的決策通常包含建設的目標（如效益）與設計方案等。此階段的決策雖由國家政府決定，但也受地方社區與企業等的影響。如系統的韌性可在此階段即被納入考量將可達到最大的效果，例如，在建設目標與設計方案就納入韌性概念與考量。

針對所研擬之方案再進一步評估其經濟、社會與環境影響，此項評估作業由設施權責機關與相關機關依標準化之評估準則共同執行。評估的項目可包含新建、更新系統的韌性與該方案對其他既有或社區韌性的影響。



資料來源：Sarah Reeves, Mike Winter, Dominic Leal and Alison Hewitt, Roads: An Industry Guide to Enhancing Resilience, TRL and The Resilience Shift, UK, 2019.3.

圖 3.1.1 連續天氣事件對運輸系統的衝擊

3.2 國外公路系統規劃階段之調適指引

本節蒐集國外有關公路規劃階段如何將氣候變遷衝擊與韌性納入的指引文件，做為研提國內公路系統於規劃階段調適指引之參考。前期計畫分別就較早發展調適概念的美國、歐洲與加拿大等國家的公路系統氣候變遷調適規劃指引進行回顧；本期計畫持續補充上述規劃指引提及之調適重點，並另蒐整符合我國國情或適用於亞洲地區之調適規劃指引進行回顧，包含日本及美洲開發銀行發布之調適規劃指引。

茲依上述指引之出版時間依序說明如下：

1. 日本國土交通省：氣候變遷策略調適規劃實務指引－淹水災害（2010 年）

日本國土交通省於 2010 年發布《氣候變遷調適策略規劃實務指引－淹水災害》（Practical Guidelines on Strategic Climate Change Adaptation Planning－Flood Disasters）[18]，該指引適用於都市化程度高、土地使用強度因社會及經濟發展逐漸增強、生產設施及人員集中於沖積平原，且尚未制訂有效防洪措施的亞洲及大洋洲國家，透過指引可協助其因應氣候變遷衝擊。為因應淹水災害提出氣候變遷調適策略規劃的實務指導原則，指引架構如表 3.2-1。

表 3.2-1 《氣候變遷調適策略規劃實務指引－淹水災害》之編撰架構

章節	標題	標題
1	**Overview**	**前言**
1.1	Purpose of the Guidelines	指引目的
1.2	Concept of Developing Adaptation Measures	發展調適措施的概念
1.3	Handling Uncertainties	應對不確定性
2	**Understanding Climate Change and its Impacts**	**瞭解氣候變遷及其影響**
2.1	Collecting and Sorting Past Precipitation and Other Data	蒐集和分類過去的降雨量和其他數據
2.2	Projecting Precipitation	預測降雨量
2.3	Projecting Sea Level Rise	預測海平面上升
2.4	Collecting and Sorting Basin and Other Data	蒐集並區分低窪地區和其他資料
2.5	Understanding Hazards, Vulnerabilities and Risks	瞭解危害、脆弱度及風險
3	**Developing Adaptation Measures**	**發展調適措施**
3.1	Setting Goals for Flood Management Measures	設定淹水管理措施目標

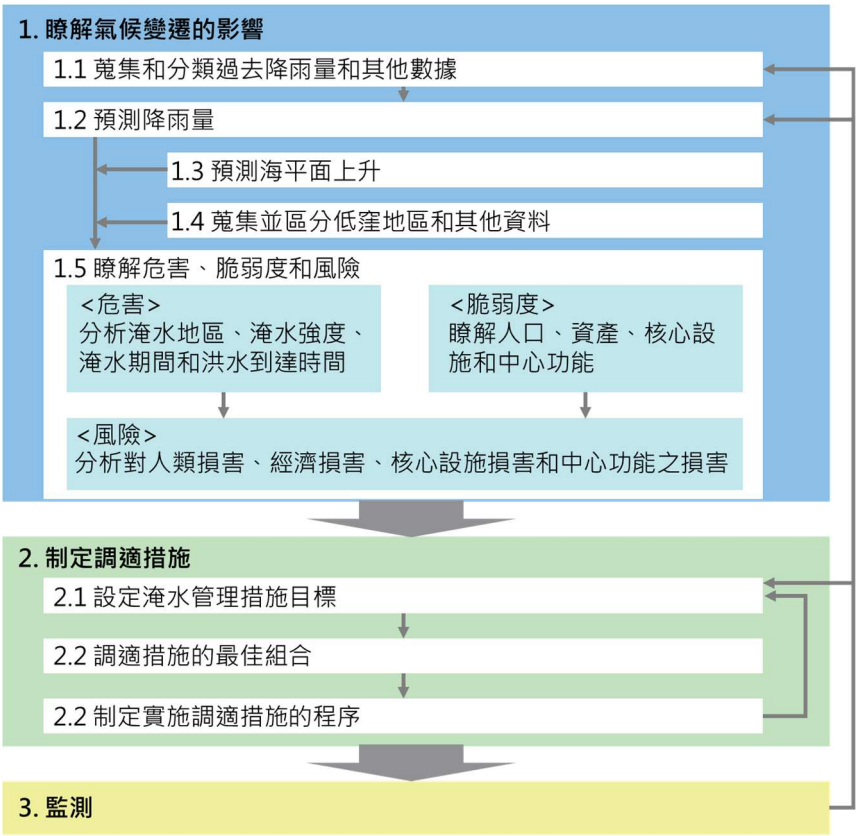
表 3.2-1 《氣候變遷調適策略規劃實務指引－淹水災害》之編撰架構（續）

目錄	標題	標題
3.2	Optimal Combination of Adaptation Measures	調適措施的最佳組合
3.3	Developing Procedures for Implementing Adaptation Measures	制定實施調適措施的程序
4	**Monitoring**	**監測**

資料來源：Practical Guidelines on Strategic Climate Change Adaptation Planning -Flood Disasters , River Bureau（Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan）, 2010.10.

該指引旨在指導從事河流和水資源流域管理之實務操作人員因應氣候變遷導致強度不斷增強且頻繁之淹水災害，並根據日本積累之經驗、策略及科技，制定調適方法之機制與流程。

指引第 1.2 節提出面對氣候變遷之調適策略規劃實務操作主要流程（詳見圖 3.2.1）可分為 3 階段，以下依序摘錄第 1 階段及第 2 階段步驟之重點，做為本計畫撰擬「公路系統因應氣候變遷調適指引」之參考：



資料來源：Practical Guidelines on Strategic Climate Change Adaptation Planning -Flood Disasters, River Bureau（Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan）, 2010.10.

圖 3.2.1 面對氣候變遷之調適策略規劃實務操作流程圖

(1) 第 1 階段：瞭解氣候變遷的影響

① 步驟 1：蒐集和分類過去降雨量及其他數據

首先必須收集降雨資料並透過地面、雷達及衛星偵測降雨分析。其次，應根據預測未來社會經濟條件之變化中，從多種全球化情境中選擇一個合適的全球暖化情境。在該情景下，評估所需的降雨量預測應包括全球氣候模型（GCM）在內的氣候模型預測結果，並通過降尺度和降雨量統計之分析來完成。該預測方法可能包含各種不確定性，因此應採取適當的彈性方法來應對。

② 步驟 2：預測降雨量、海平面上升及其他相關資料

應蒐集和記錄數據，包含海平面上升預測以及低窪地區、河流和洪氾區之相關數據及資料。

③ 步驟 3：瞭解危害、脆弱度和風險

應瞭解淹水地區之危害、脆弱度及風險。通過分析未來淹水的危害、脆弱度和風險將如何變化，可以獲得制定調適措施的基本資料。

具體而言，首先應先確定降雨量等外力條件、考核目標年限和防洪建設階段等。其次，應進行洪水逕流分析（flood runoff analysis）、河道洪水氾濫和洪水擴散分析（flood propagation calculation）；另外，也需分析隨時間變化之淹水深度和持續淹水時間。下一步，應瞭解評估目標年份淹水地區的重要資產、關鍵基礎設施和中樞功能等社會經濟狀況。

其結果可用於瞭解和分析淹水發生的可能性，並做出假設，降低其對人類損傷、經濟損失、核心設施和遭淹沒地區之中樞功能損害等影響。

(2) 第 2 階段：制定調適措施

① 步驟 4：設定淹水管理措施目標

在制定調適措施時，應先設定總體目標，以確定目標年份實施洪水管理措施的原則。

② 步驟 5：調適措施的最佳組合

為達成調適目標，應通過風險分析等手段，從減少損害效果、成本、對區域社會和環境的影響、實用性等方面著手，對不同調適措施進行綜合規劃及評估。

③ 步驟 6：制定實施調適措施的程序

在操作過程中必要時應考慮居民意見調整措施。依循此方法制定的調適措施應彈性並根據監測結果和預測精準度採取滾動式調整，建議使用 PDCA 循環（PDCA Cycle）之彈性方法，隨時間推移進行重新評估，參見圖 3.2.2。

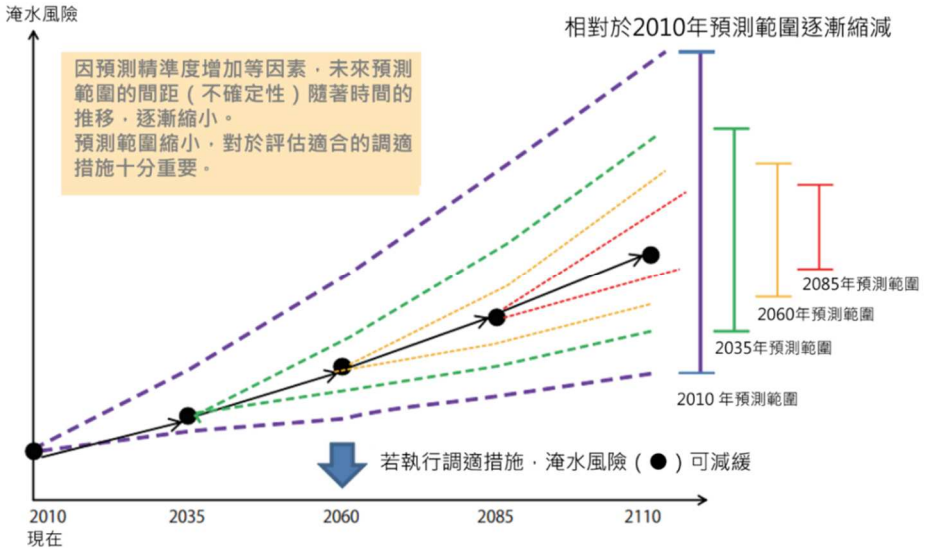
該指引指出制定調適措施的方法需具備彈性，以充分調適變化之不確定性，並透過氣候變遷評估結果以及運用 PDCA 循環而提升之預測精準性。PDCA 循環包含四大概念：計畫（Plan）、執行（Do）、查核（Check）、行動（Act）。該指引的 PDCA 循環涵蓋針對調適措施執行（Do）之檢查（Check），以及依據氣候變遷監測結果之檢查(Check)，此外，使用 PDCA 循環時，充分瞭解下列資訊十分重要：

① 與氣候變遷相關的最新知識。

② 人口、土地利用之變化等社會狀況。

③ 防洪設施之發展。

④ 後續資金投入能力。



資料來源：Practical Guidelines on Strategic Climate Change Adaptation Planning -Flood Disasters, River Bureau（Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan）, 2010.10.

圖 3.2.2 面對未來不確定性對應之概念

2. 美國運輸研究學會（TRB）－美國國家協作公路研究計畫（National Cooperative Highway Research Program, NCHRP）：氣候變遷、極端天氣事件與公路系統：實務指引（2014 年）

為協助公路規劃人員了解公路系統面對氣候變遷與極端天氣事件可能受到的衝擊，提升公路系統長期調適能力，NCHRP 於 2014 年發布《氣候變遷、極端天氣事件與公路系統：實務指引》（Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide）[19]第 2 版，架構如表 3.2-2。

表 3.2-2 《氣候變遷、極端天氣事件與公路系統：實務指引》之編撰架構

章	標題	標題
1	**Introduction and Purpose**	**前言與目的**
	Why is this Guide Needed?	為何需要此指引
	What is Adaptation?	何謂調適
	Who Should Read What?	誰應閱讀哪一部分
2	**Framework for Adaptation Planning and Strategy Identification**	**調適規劃與策略辨識的架構**
	What Are the Steps for Adaptation Planning?	調適規劃有什麼步驟
	What Is the Relationship Between Climate Change and Transportation Planning?	氣候變遷與運輸規劃間的關係
	How Does the Framework Fit into the Organization of the Guide?	調適架構與此指引架構如何對應
3	**Projected Changes in the Climate**	**氣候變遷預測**
	What Do Climate Models Do?	氣候模型的功用
	What Are Emission Scenarios?	何為排放情境
	What Is Climate Sensitivity?	何為氣候敏感度
	Can Regional Climate Be Modeled?	區域氣候可被模擬嗎
	What Will the Climate Be Like in 2050?	2050 年的氣候如何
	What about Sea-Level Rise?	海平面上升的狀況
	Where Are Climate Data and Advice Available for a Specific State?	哪裡可找到可使用的氣候數據與建議
	What Needs to be Known about Climate Forecasting with Models?	使用氣候預測模型需知
4	**How Could Changes in Temperature Affect Road Assets?**	**氣溫改變如何影響公路資產**
	How Could Changes in Precipitation Affect Road Assets?	降雨改變如何影響公路資產
	How Could Sea-Level Rise Affect Road Assets?	海平面上升如何影響公路資產
	How Could Greater Hurricane Intensity Affect Road Assets?	颶風/颱風強度增加如何影響公路資產

表 3.2-2 《氣候變遷、極端天氣事件與公路系統：實務指引》之編撰架構（續）

章	標題	標題
4	How Could Climate Stressors Affect Ecological Systems?	氣候壓力源如何影響生態系統
	What Are the Types of Adaptation Strategies that Can Be Considered by Transportation Agencies	運輸機關可考量哪些種類的調適策略
	Summary	結論
5	**Vulnerability Assessments and Risk Appraisals for Climate Adaptation**	**氣候調適的脆弱度評估與風險評估**
	What Is the Difference between Vulnerability and Risk?	脆弱度與風險的差異
	Why Consider Climate-Related Risk?	為何要考量氣候相關風險
	What If Probabilities Are Not Available?	如果沒有概率資料怎麼辦
	How Can the Results of Risk Assessment Be Portrayed without Probabilities?	在沒有概率資料時如何評估風險
	What If Probabilities Are Available or Could Be Developed?	如果有概率資料或可計算概率資料
	How Can Climate Change Scenarios Be Used to Account for Uncertainty in Decision Making?	決策時如何使用氣候變遷情境代表不確定性
	Summary	結論
6	**Climate Change and Project Development**	**氣候變遷與計畫研擬**
	How Can Climate Adaptation Be Considered in Environmental Analysis?	如何在環境分析中考量氣候變遷調適
	How Is Engineering Design Adapted to Constantly Changing Climate?	工程設計如何因應持續變化的氣候
	Summary	結論
7	**Other Agency Functions and Activities**	**其他機關功能與行動**
	How Could Climate Change and Extreme Weather Events Affect Construction?	氣候變遷與極端天氣事件如何影響建造
	How Could Climate Change and Extreme Weather Events Affect Operations and Maintenance?	氣候變遷與極端天氣事件如何影響營運與維護
	What Role Can Asset Management Play in an Agency's Climate Adaptation Activities?	資產管理在機關的氣候調適行動中可擔任的角色
	How Should Coordination with Other Organizations and Groups Work When Considering Adaptation Strategies?	如何與其他組織/團體合作調適策略

資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.

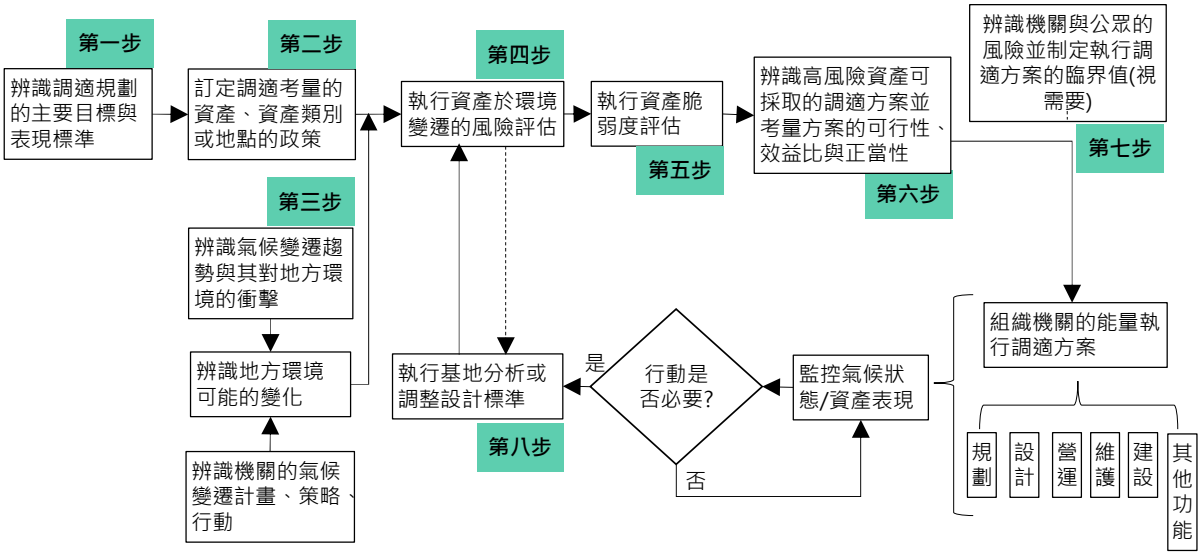
該指引提出一個調適的架構，並依序說明如何將調適程序與公路建設計畫之規劃流程結合，概述如下：

(1) 調適架構

調適架構分為 8 個步驟，首先掌握系統與資產在氣候變遷下的狀態與受到之衝擊，做為調適方案與後續工程設計研擬的基礎，如圖 3.2.3。該指引提出進入調適工程評估的過程需先評估計畫的區位與氣候變遷對該區位環境可能產生的影響，需特別注意鄰近的敏感地區，也需要辨識計畫所有的利害關係人與既有的調適政策，以評估調適設計在執行上可能碰到的衝突與機會，並評估調適計畫需要的力度。

在計畫需求上則要區分新建與改建計畫，如是新建計畫，設計上需考量設施的使用年期，如是改建計畫，則需考量既有設施的剩餘壽年，以利評估設施在使用期間可能面臨的氣候壓力因素。

氣候因素含平均氣候狀態（如平均溫度、降雨量）及極端事件，可影響運輸系統的設計、建造、維護與營運。該指引預測的氣候壓力因素包含溫升、降雨量增加、颶風/颱風強度增加、海平面上升等，對公路的影響如表 3.2-3。



資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System: Practitioner's Guide and Research Report, 2014.

圖 3.2.3 調適基本架構

表 3.2-3 氣候壓力因素對公路系統的影響

氣候壓力因素	對設施的影響	對營運/維護的影響
極端高溫變化	▪ 設施提前損壞 ▪ 公路因挫屈與車轍破損 ▪ 橋梁因熱脹冷縮承受壓力	▪ 影響建設作業 ▪ 橋梁營運效率受影響與維護成本增加
降雨量改變	▪ 提高坡災與土石流風險 ▪ 提高淹水風險 ▪ 土壤含水量過高影響道路、橋梁與隧道的結構強度	▪ 因淹水、土石流等事件造成封路、延遲
極端降雨增加與暴風雨變化	▪ 極端降雨沖刷道路，可能造成道路永久封閉 ▪ 極端降雨損壞隧道、涵洞、公路 ▪ 強風與極端降雨沖刷橋梁 ▪ 強風影響電纜、號誌等	▪ 因淹水、土石流等事件造成封路、延遲 ▪ 工地發生侵蝕，影響建設計畫 ▪ 強風影響公路正常營運，並可能造成意外風險
海平面上升	▪ 沿海道路受侵蝕 ▪ 隧道或道路淹沒 ▪ 鹽分加速隧道提前損壞	▪ 海岸公路淹水與損壞 ▪ 暴潮/風浪暴露度提升 ▪ 隧道與低窪設施淹水風險增加
颶風/颱風強度增加	▪ 設施損壞與無法營運增加	▪ 淹水影響運輸系統正常營運 ▪ 颶風/颱風造成道路損壞

資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System: Practitioner's Guide and Research Report, 2014.

(2) 將調適程序納入公路建設計畫之規劃流程

因州政府交通局每年需考量大量計畫，包含建設、維護、營運等，較難針對所有計畫進行評估，但如是因應氣候變遷所做的長期建設計畫、工程標準調整或營運作為，需較嚴謹的評估氣候壓力因素與其影響。評估的程度會因法規、可蒐集到的數據與資訊而有差異。

該指引亦指出過往工程設計上在思考未來氣候的影響時多以歷史數據為依據或做為預測基礎，但此作法在氣候變遷環境下已不適用。在此變化下需思考工程設計如何將韌性納入考量，即進入調適工程評估的過程。

調適工程評估包含六大步驟,適用於設施新建或改建計畫,說明如下:

① 回顧環境、機關特性與計畫需求

首先評估計畫的區位與氣候變遷對該區位環境可能產生的影響,需特別注意鄰近的敏感地區,如濕地、河流、湖與海等水源,容易淹水的低窪地區,以及可能有崩塌風險的高邊坡。

此外,也需要辨識計畫所有的利害關係人(如聯邦政府、州政府、地方政府等)與既有的調適政策,以評估調適設計在執行上可能碰到的衝突與機會,並評估調適計畫需要的力度。

最後,需瞭解計畫需求,如為新建計畫,設計上需考量設施的使用年期,如為改善計畫,則需考量既有設施的剩餘壽命,以利完整評估設施在使用期間可能面臨的氣候壓力。

② 依據資產種類辨識可能受氣候影響的設計參數

辨識資產類別,如橋梁、涵洞、排水設施、邊坡、鋪面或防洪牆等,並分析可能影響的氣候壓力(分為直接與間接壓力),以利評估可能的設施方案與參數。

③ 回顧過往氣候趨勢、取得或計算氣候預測

取得過往氣候趨勢,以設定計算氣候變化的基準,同時需取得或計算氣候預測資料並評估設計參數(現階段尚有難度),如無適用之預測資料,需思考替代方案。

④ 辨識會受氣候變遷影響的設計組成

辨識設計中的脆弱度與各設計參數會產生的影響,以利後續調適方案的研擬。

⑤ 研擬調適方案

依據第 4 步驟辨識的脆弱度研擬調適方案,並評估方案內涵。

⑥ 視需要執行成本效益評估

以步驟 3 蒐集的氣候預測評估第 5 步驟辨識出的調適方案,建議應用成本效益評估分析各調適方案,以用於機關決策調適計畫的優先性,並考量長期的調適策略。

資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System: Practitioner's Guide and Research Report, 2014.

圖 3.2.4 調適工程設計研擬流程

3. 歐洲公路主管機關會談（Conference of European Directors of Roads）：今日的道路，調適的明日指引（2015 年）

針對公路系統如何因應氣候變遷帶來的衝擊，歐洲公路主管機關會談（Conference of European Directors of Roads, CEDR）於 2015 年發布《今日的道路，調適的明日指引》（ROADAPT：Roads for Today, Adapted for Tomorrow Guidelines）[20]闡述未來氣候的不確定會如何影響公路系統，以及如何將調適融入公路系統決策流程。指引架構如表 3.2-4。

表 3.2-4 《今日的道路，調適的明日指引》之編撰架構

章節	標題	標題
0	**Executive summary**	**摘要**
1	**Introduction**	**前言**
1.1	Purpose of the ROADAPT guidelines	ROADAPT 指南之目的
1.2	Structure of the ROADAPT guidelines	ROADAPT 指南之結構
1.3	How to use the ROADAPT guidelines	如何使用 ROADAPT 指南
2	**Climate change effects on roads**	**氣候變遷對公路的影響**
2.1	Extreme weather effects on roads	極端天氣對公路的影響
2.2	The world's climate is changing	世界氣候正在改變
2.3	Effects of climate change for roads	氣候變遷對公路的影響
3	**Risk management for roads in a changing climate**	**氣候變遷下的公路風險管理**
3.1	Road owners demands	公路權責機關之需求
3.2	The RIMAROCC framework	RIMAROCC 框架
3.3	The ROADAPT structure	ROADAPT 結構
4	**The ROADAPT guidelines**	**ROADAPT 指南**
4.1	Part A – Guidelines on the use of data for the current and future climate for road infrastructure	A 部分-道路基礎設施針對當前和未來氣候數據之使用指南

表 3.2-4 《今日的道路，調適的明日指引》之編撰架構（續）

目錄	標題	標題
4.2	Part B – Performing a quickscan on risk due to climate change	B 部分-快速掃描氣候變遷造成的風險
4.3	Part C – Performing a GIS-aided vulnerability assessment for roads	C 部分-透過 GIS 輔助執行公路脆弱度評估
4.4	Part D – Performing a socio economic impacts analysis	D 部分-進行社會經濟影響分析
4.5	Part E – Selection of adaptation measures and strategies for mitigation	E 部分-選擇調適措施和減緩策略
5	**Conclusions**	**結論**
6	**Acknowledgement**	**致謝**
7	**References**	**參考文獻**

資料來源：ROADAPT Roads for today, adapted for tomorrow Guidelines, Centre for Effective Dispute Resolution, 2015.

針對以下 5 項工作提出指引文件：

(1) 應用現況與未來氣候資料

掌握現況與未來的氣候資料為氣候變遷調適工作的重要基礎。資料蒐集應用分為下列 4 個步驟：

① 步驟 1：辨識威脅與相關的氣候變數，參考的年期與時間。

② 步驟 2：蒐集步驟 1 相關氣候變數的現況與未來資料並確認資料的品質與可應用性。

③ 步驟 3：選取要使用的氣候預測或情境資料。

④ 步驟 4：進一步處理氣候數據資料，以利在風險評估上可使用。

(2) 快速掃描公路系統氣候變遷風險

透過快速掃描公路系統在氣候變遷下的風險可先初步篩選出較關鍵的影響，以利進入脆弱度評估與調適策略研擬的程序。快速掃描的方法立基於應用所有掌握到的數據、專業知識與經驗。此項工作係透過工作坊的方式辦理，每個工作坊所需時間約半日，共 3 個工作坊：

① 工作坊 1：辨識後果，參與者辨識公路面對氣候威脅的可能後果（如損壞、中斷等）。

② 工作坊 2：辨識機率、最高風險與區域，參與者辨識氣候威脅的技術資訊。

③ 工作坊 3：辨識調適行動方案，參與者依據工作坊 1 與 2 的討論辨識調適行動方案。針對不可承受的風險辨識調適行動方案。在研擬調適行動方案時須考量受威脅系統的壽年、養護頻率，在調適方案與養護上取得平衡。

(3) 執行詳細脆弱度評估

應用分析工具評估公路系統在氣候變遷環境下的脆弱度，建議可採取 GIS 輔助評估與呈現脆弱度，操作步驟如下：

① 辨識相關的脆弱度因子。

② 建立 GIS 資料清單並蒐集資料，補足缺漏資料。

③ GIS 評估與脆弱度分數計算。

透過降低系統脆弱度的調適方案，可再反映於脆弱度地圖上。

(4) 執行社會經濟衝擊評估

依據第 2 或第 3 項指引辨識的風險或脆弱度評估因極端事件影響公路系統正常營運時產生的社會與經濟衝擊。極端事件可能影響設施本身或整體交通狀況，皆影響營運。在社會與經濟衝擊上主要評估交通效率（efficiency）。建議可以 3 種層次評估：

① 路網層次：評估因路網中斷影響到的交通成本。

② 區域層次：評估因路網中斷以及受連帶影響的成本。

③ 系統層次：評估整個經濟系統因路網中斷產生的成本。

(5) 選取調適策略

透過掌握公路系統資產現況與未來的韌性，選取適用的調適策略，調適策略可由多個調適措施所組成，並可透過措施的排序輔助選取。

4. 美國聯邦公路管理局（Federal Highway Administration，FHWA）：脆弱度評估及調適機制（2017 年）

美國聯邦公路管理局於 2017 年發布《脆弱度評估和調適機制》（Vulnerability Assessment and Adaptation Framework）第 3 版[21]。出版該文件的目的為協助運輸部門及其合作夥伴評估在極端天氣事件和氣候變遷影響下，運輸基礎設施和系統的脆弱度。文件中說明執行脆弱度評估所涉及的主要步驟，並於各步驟提供 2010 至 2017 年間操作之實務案例（即期間美國聯邦公路管理局補助各州辦理之氣候變遷調適先導性計畫）做為參考，該文

件之章節架構如表 3.2-5，章節係結合脆弱度評估之流程進行(參見圖 3.2.5）撰擬。

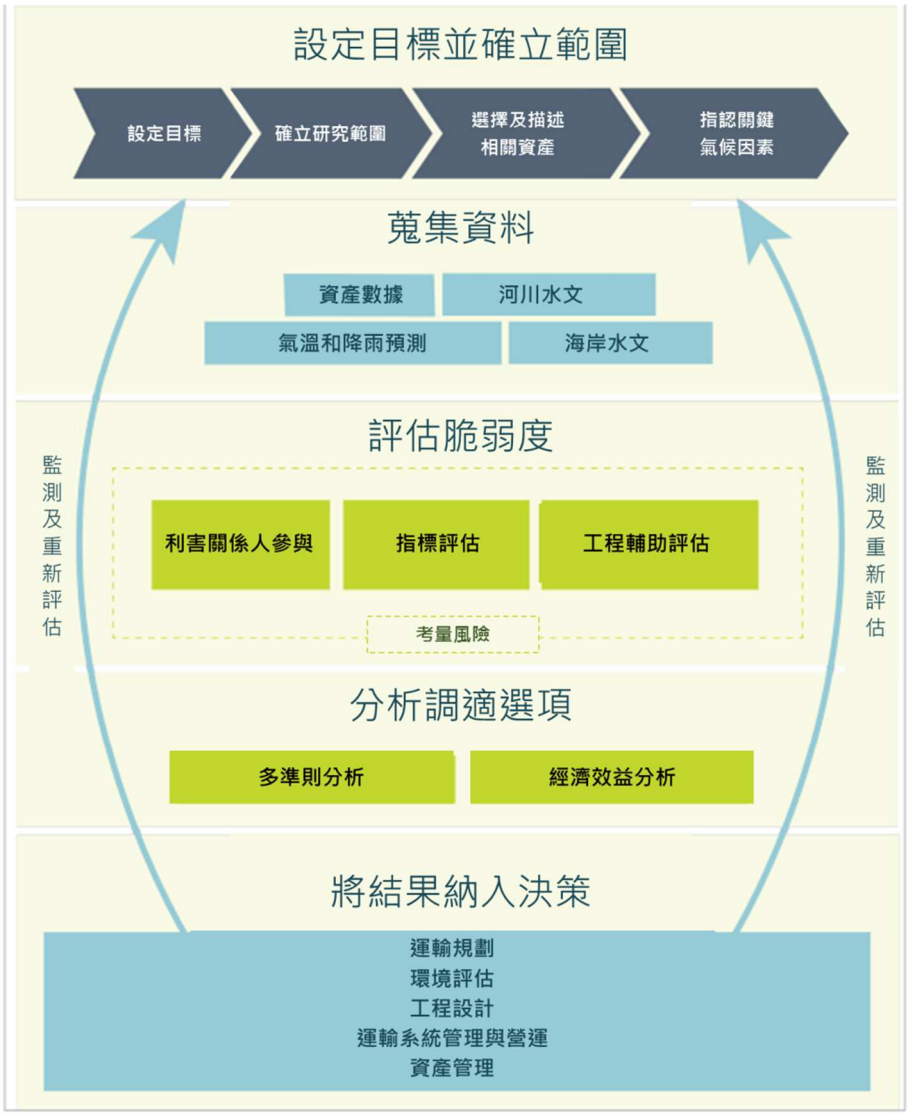
表 3.2-5 《脆弱度評估及調適機制》之編撰架構

章節	標題	標題
	Executive Summary	**摘要**
	Introduction	**介紹**
1	**Articulating Objectives And Defining Study Scope**	**設定目標並確立範圍**
1.1	Articulating Objectives	設定目標
1.2	Defining Study Scope	確立研究範圍
1.3	Selecting and Characterizing Relevant Assets	選擇及描述相關資產
1.4	Evaluating Asset Criticality	評估資產重要性
1.5	Identifying Key Climate Variables to Study	指認關鍵氣候因素
1.6	Selecting Climate Variables to Study	選擇研究之氣候因子
1.7	Asset Sensitivity to Climate Stressor(s).	資產對氣候壓力的敏感度
2	**Obtaining Asset Data For The Vulnerability Assessment**	**為脆弱度評估作業蒐集資產資料**
	Asset Types, Sources, and Characteristics	資產類型、來源和特色
3	**Obtaining Climate Data For The Vulnerability Assessment**	**取得氣候脆弱度評估之資料**
3.1	Temperature and Precipitation Projections	氣溫和降雨量預測
3.2	Riverine Hydrology	河川水文
3.3	Coastal Hydrology	海岸水文
3.4	Sea Level Rise Projections	海平面上升預測
3.5	Storm Surge Analysis	暴潮分析
4	**Assessing Vulnerability**	**評估脆弱度**
4.1	Stakeholder Input Approach	利害關係人參與方法
4.2	Indicator-Based Desk Review Approach	指標評估(基於指標的之二手資料回顧)
4.3	Engineering Informed Assessments	工程輔助之評估
4.4	Considering Risk	考量風險
5	**Identifying, Analyzing, And Prioritizing Adaptation Options**	**確認、分析並將調適選項進行排序**
5.1	Using Multi-Criteria Analysis to Evaluate Adaptation Options	使用多準則分析來評估調適選項
5.2	Using Economic Analysis to Evaluate Alternative Adaptation Options	使用經濟效益分析選擇調適選項
5.3	Scope of an Economic Analysis	經濟效益分析規模
5.4	Costs and Benefits to Consider	需考慮之成本與效益

表 3.2-5 《脆弱度評估及調適機制》之編撰架構（續）

目錄	標題	標題
5.5	Types of Economic Analysis	經濟分析的類型
5.6	Incorporating Risk into Economic Analysis	將風險納入經濟分析
6	**Incorporating Assessment Results In Decisionmaking**	**將評估結果納入決策**
6.1	Incorporating Results into Transportation Planning	將結果納入交通規劃
6.2	Incorporating Results into Project Development and Environmental Review	將結果納入開發項目及環境評估
6.3	Incorporating Results into Project Level Design and Engineering	將結果納入設計項目及工程項目
6.4	Incorporating Results into Transportation Systems Management and Operations, Maintenance, and Emergency Management	將結果納入運輸系統管理和營運、維護及災害管理
6.5	Incorporating Results into Asset Management	將結果納入資產管理
6.6	Monitor and Revisit	監測及重新評估
7	**CONCLUSIONS**	**結論**
Appendix A	**Summary of Resources**	**資源摘要**
Appendix B	**Glossary**	**詞彙表**
Appendix C	**Description of FHWA Climate Resilience Pilots**	**FHWA 氣候韌性案例**

資料來源：Vulnerability Assessment and Adaptation Framework, Federal Highway Administration Office Of Planning, Environment, & Realty, 2017.



資料來源：Vulnerability Assessment and Adaptation Framework, Federal Highway Administration Office Of Planning, Environment, & Realty, 2017.

圖 3.2.5 脆弱度評估框架概念圖

指引建議之脆弱度評估框架分為六大步驟，依序說明如下：

(1) 設定目標並確立範圍

進行脆弱度評估第一步是設定目標，並決定評估之範圍。建立一個明確的研究目標有助於脆弱度評估，可將無關的資料收集及分析最小化。在多數情況下，主管機關僅有有限的時間及資源，因而無法分析及評估整體運輸系統。

(2) 蒐集資料

必須蒐集的資料取決於研究目標和脆弱度評估的範圍。主管機關可能要維持追蹤主要資產數據，如道路、橋梁等，通常是脆弱度的主要評估焦點。

提供各種資料來源說明如何獲取預測未來氣候數據的資料。該指引概述主管機關如何取得溫度、降水、水文、洪氾區、海平面和暴潮變化預測的方法，從取得氣候資料的基本方法開始，進而描述方法細節，有助於更深入分析。

(3) 評估脆弱度

運輸系統中的脆弱度是運輸資產或系統對氣候變遷影響之敏感度、在極端氣候影響下的暴露度以及調適能力[1]。通常為了評估脆弱度，主管機關使用極端氣候因素來識別和評估資產或系統的暴露度、敏感度和調適能力，以評估其脆弱度，並按照氣候對資產或系統的影響分配風險等級。

風險是一種同時衡量資產遭受特定影響的機率，並測知環境影響嚴重性或後果的度量。該指引將評估脆弱度的三種方法做簡易敘述。前兩種方法，利益相關者參與和指標評估（基於指標的之二手資料回顧）（Desk Review），主要用於系統級別或區域分析，而第三種方法，工程輔助評估（engineering-informed assessment），側重於特定的運輸資產。因涉及的利益相關者的類型、所需資料形式以及最終脆弱度評估結果的格式不同，每種方法都會有所不同。這些方法並非互斥。

(4) 分析調適選項（Adaptation options）

在評估脆弱度後，主管機關便可以確定、分析並排序調適選項。調適選項可以是自然的、結構的或基於政策的，範圍可以從特定地點到區域。提供執行機關使用多準則分析法及經濟效益分析兩種方式來評估調適選項。多準則評估法包含在一系列定性和定量標準中比較調適選項。多準則評估法的其中一個優點是執行機關較好評估無法輕易被量化或以貨幣表示的部分，如對環境或社區的影響。

[1] IPCC AR4 脆弱度:乃系統易受或無法處理氣候變遷（包括氣候易變性與氣候極端事件）負面效應影響的程度。脆弱度是系統暴露度於氣候變異之特性、大小與速率、系統敏感與系統調適能力的函數。

經濟效益分析可以透過釐清調適選項潛在的長期成本及效益，幫助機構評估調適選項並排序。經濟效益分析可以透過單獨比較調適方法，並與當前政策和實施情形進行比較，以衡量調適選項的成本和效益。

(5) 將結果納入決策

將脆弱度評估結果整合到現有的交通項目和流程中，可確保研究結果在計畫執行中得到應用。此規範簡易敘述將結果有效地納入策略運輸規劃；開發計畫和環境評估；設計項目及工程項目、運輸系統營運管理及災害管理；資產管理。

(6) 監測及重新評估

對氣候風險的理解不斷演變。因此，極端氣候影響調適是一種需要持續監測及評估的重複性過程。各機構應建立監測和評估流程，以評估根據評估結果制定的調適策略和其他的新措施成功與否。隨著新的氣候科學和資料出現，各機構可能需要重新評估脆弱度。監測和評估過程可能會確定重新評估原始脆弱度評估中使用的假設、基礎數據或需要的方法。監測和評估的結果可用於定期重新評估和完善調適策略及流程，以確保運輸基礎設施持續保持韌性。

5. 加拿大英屬哥倫比亞省交通局（British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure, BCMOTI）：公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計－專業實務指引（2020 年）

因應氣候變遷的不確定性，BCMOTI 於 2020 年提出新版《公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計－專業實務指引》（Professional Practice Guidelines – Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia）[22]，該指引定義氣候調適措施為可減少基礎設施的脆弱度以因應極端氣候影響的措施。透過整合氣候調適策略及措施設計和建造的基礎設施，以應對特定的氣候變遷衝擊，指引架構如表 3.2-6。

編撰該指引之主要的目的是希望為交通工程專業人員提供公路建設專業實務操作指南，以因應氣候變遷對於公路系統的衝擊。

因應氣候變遷的不確定性，指引第 1 版於 2016 年出版，透過滾動式檢討更新，提出了更多實用的操作工具及策略細節描述等，最新內容已納入第 2 版（目前最新版）並於 2020 年出版。

表 3.2-6 《公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計－專業實務指引》架構

章節	標題	標題
1	**Introduction**	**前言**
1.1	Purpose of These Guidelines	指引目的
1.2	Role of Engineers and Geoscientists BC	出版者的角色定位 (加拿大英屬哥倫比亞省認證工程師)
1.3	Introduction of Terms	專有名詞介紹
1.4	Scope and Overview of these Guidelines	本指引之範圍與概述
2	**Roles and Responsibilities**	**角色與責任**
2.1	Common Forms of Project Organization	專案組織構成的常見形式
2.2	Responsibilities	責任權屬
3	**Guidelines for Professional Practice**	**專業實務操作指引**
3.1	Overview	整體概述
3.2	Define the Project	專案確立
3.3	Conduct the Climate Change Risk Assessment	執行氣候變遷風險評估
3.4	Identify and Incorporate Adaptation Measures	指認及整合氣候調適措施
3.5	Document Process and Decisions	書面紀錄過程及決策結果
4	**Quality Management in Professional Practice**	**專業實務之品質管理**
4.1	Quality Management Requirements	品質管理要求
5	**Professional Registration & Education, Training, and Experience**	**專業人員註冊、教育培訓和實務經驗**
6	**References and Related Documents**	**參考來源與相關文件**

資料來源：Engineers and Geoscientists BC, Professional Practice Guidelines –Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia, 2020.

該指引強調氣候調適措施不僅限於增加基礎設施能力或強度，還可包括：增強營運和維護管理能力、運用不同的建築材料或方法、選擇不同的基地位置、分階段降低臨界值事件被觸發的可能性、進一步研究或更詳細的分析，或監測可增強氣候變遷韌性的項目及相關數據。

基礎設施設計階段可應用的調適措施可分為五大類：現狀設計、彈性設計、穩健設計、觀察法、低或無悔策略。該指引亦指出儘管專業人員遵循了本指引中定義的建議操作標準來執行氣候風險評估保證聲明，仍不能保證特定的設計在將來的氣候條件下不會出現問題，顯示氣候變遷風險評估與調適為滾動式的工作，需持續依據可掌握的氣候條件與設施狀態調整。

資料來源：Engineers and Geoscientists British Columbia, Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia, 2020.

圖 3.2.6 公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計操作流程圖

主要操作流程分為五大步驟，如表 3.2-7 所示。

表 3.2-7 韌性設計操作步驟與內容

步驟	內容
1. 業主/所有者提出需求說明書	需求說明書應明確概述專案所需且適用的風險評估水準。由業主/所有者指認氣候風險容忍度，反映對公路基礎設施的設計、建造、營運和維護現況與對氣候預測數據的可取得性、設施服務水平，以及使用壽命的認知
2. 確立公路設施因應氣候變遷韌性設計之計畫	為評估氣候風險，同時整合調適策略與既有公路規劃設計，需指認專案所需環境背景資料及相關細節： ■ 環境區位特徵：了解氣候變遷下環境區位特徵對當前和未來的公路基礎設施的影響 ■ 列出關鍵基礎設施項目組件：可包含道路（車道數）、橋梁、排水及滯洪設施、防波堤與擋土牆等 ■ 指認與氣候無關的設計因素（drivers）：指認出與氣候無關的設計因素的目的為建立一個基本設計方案。該基本方案可做為對照組，提供評估任何潛在氣候變遷對公路壽年的影響 ■ 依據各專案不同的環境區位特徵，指認在各種氣候壓力因素下應納入考量的氣候參數，如降雨（強度、頻率）、溫度（均溫、最高溫、最低溫）、風（平均風速、最大陣風、風向）、海平面（潮位、暴潮/風浪）、河水（水位、流量、沖刷量）等。 ■ 選擇團隊關鍵成員：依據專案特性，選擇具備特定專業能力與知識的成員組成專案小組 ■ 確立主要利害關係人：透過專案小組與主要利害關係人一同參與研討，指認氣候變遷帶來的潛在影響及設施因其變化而產生的後果 ■ 確認專案評估期程：公路專案有相對較長的服務年限及壽年。由於氣候變遷，許多氣候參數都呈現年均值增加或減少與出現越來越高的極端值的趨勢，故選出影響公路服務年限的預估氣候數據為關鍵

表 3.2-7 韌性設計操作步驟與內容（續 1）

步驟	內容
3. 設施風險等級評估	風險評估的第一部分，是指認與評估與計畫範圍內直接相關的風險。為達成此目的建議透過專業認證人員（qualified professional）執行此過程，專業認證人員應具有合理的風險評估能力水準，若有需要，可進一步執行氣候變遷風險評估。主要執行步驟如下： ■ 確立目標與標的：風險評估標的應包含有關公路容量、安全性、可靠性、耐用性、設施壽年等設計目標以及其他影響業主對氣候風險容忍度的要素 ■ 選擇風險評估方法：評估公路基礎設施氣候風險的常用工具包含「PIEVC 工程協議- 用於氣候變遷基礎設施脆弱度評估」（2020）、FHWA 脆弱度評估評分工具（VAST）（2019）以及加拿大英屬哥倫比亞省工程師和地球科學家氣候變遷資訊網站（Engineers and Geoscientists BC 2019）。任何基礎建設的承載力或預期表現應在脆弱度評估開始時確定，如此才有機會調整高風險的基礎建設 ■ 選擇基礎設施項目組件：基礎設施項目組件可被單獨定義亦可群組，或是兩者具備。單獨列出項目組件可產出更詳細的風險評估，但需花費額外的精力和成本。因此，專業簽證工程師（engineer of record）應決定投入精力與適當平衡兩者 ■ 選擇和確定特定氣候參數：應由專業認證人員選擇和確認與設計有關的氣候參數及臨界值，確認所列之個別氣候參數至少影響一處基礎設施項目組件，同時紀錄經確認後之特定氣候參數清單 ■ 指認並歸納基礎設施與氣候之間的相互作用：針對所列之基礎設施項目組件對應特定氣候變化參數的每種組合，應由專業認證人員和風險評估團隊指認氣候事件所導致的相互作用類型，用以預測可能造成的風險 ■ 確定氣候可能造成的風險：在基礎設施設計和氣候變化的背景下，氣候風險可做為衡量基礎設施項目組件對於氣候變遷的負面影響及其脆弱度

表 3.2-7 韌性設計操作步驟與內容（續 2）

步驟	內容
4.指認及整合氣候調適措施	氣候調適措施意指可減少基礎設施的脆弱度以因應極端氣候影響的措施。透過整合氣候調適策略及措施設計和建造的基礎設施，以應對特定的氣候變遷衝擊。氣候調適措施不僅限於增加基礎設施能力或強度，還可包括：增強營運和維護管理能力、運用不同的建築材料或方法、選擇不同的基地位置、分階段降低臨界值事件被觸發的可能性、進一步研究或更詳細的分析，或監測可增強氣候變遷韌性的項目及相關數據。指認及整合氣候調適措施的主要執行步驟： ■ 行使專業判斷：工程及地球科學專業人士無法否認氣候變遷對於其專業工作的潛在影響，故須考量氣候變遷因素並納入既有工作程序，評估該資訊在其專業工作中的應用方式，並紀錄專業判斷的結果 ■ 指認氣候調適策略（或措施）選項：基礎設施設計階段可應用的調適措施可分為五大類：現狀設計、彈性設計、穩健設計、觀察法、低或無悔策略 ■ 有效的溝通：通常實施氣候變遷調適措施不會單由專業簽證工程師做所有決定。在專案小組討論時，應思考如何將重要且高技術性資訊有效地傳達給很少或沒有技術知識或經驗的決策者，以達成有效的溝通 完成氣候調適計畫與韌性設計方法：一旦確定調適措施後，必須向業主和其他適合的決策者提供相關訊息，包含氣候調適措施清單（對應各基礎設施可能面臨的氣候風險）、說明如何應用氣候調適措施、成本估算及討論可能影響調適措施施行之其他相關議題
5.書面紀錄過程及決策結果	記錄整合氣候調適策略與公路系統設計的過程與相關的重要資訊。此步驟除了滿足相關協會章程和品質管理要求外，也可協助： ■ 制定並執行營運和維護計畫 ■ 維護監測計畫 ■ 處理升級或翻修事宜 ■ 若因極端事件而導致損害，可執行相關調查確認責任歸屬 專業認證人員應負責監督本指引中概述的風險評估的設計、準備和實施，並透過填寫所需的文件知會客戶。值得注意的是，儘管專業人員遵循了本指引中定義的建議操作標準來執行氣候風險評估保證聲明，仍不能保證特定的設計在將來的氣候條件下不會出現問題

資料來源：Engineers and Geoscientists British Columbia, Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia, 2020.

6. 美洲開發銀行交通規劃調適指引（2021 年）

為協助運輸系統規劃人員瞭解面對氣候變遷可能遭受的衝擊，且在面對高度不確定的情況下如何因應，以提升運輸系統長期調適能力，美洲開發銀行（Inter-American Development Bank, IDB）於 2021 年發布《面對氣候變遷下之交通規劃：DMDU 指引》[23]（A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate）。該指引描述如何應用「在高度不確定性之下的決策方法」（Decision Making Under Deep Uncertainty, DMDU），以協助 IDB 會員國（包含美國及拉丁美洲 28 國、歐洲 16 國和亞洲 4 國）針對該國運輸系統進行氣候變遷風險評估，指引架構如表 3.2-8。

表 3.2-8 《面對氣候變遷下之交通規劃：DMDU 指引》之編撰架構

章	標題	標題
1	**Introduction**	**前言**
2	**Iterative Risk Management and General Implications in Transportation Risk Analysis**	**迭代風險管理和交通風險分析的意涵**
	Iterative Risk Management	迭代風險管理
	IDB's Disaster and Climate Change Risk Assessment Methodology for IDB Projects	IDB 專案的災害與氣候變遷風險評估方法
	Risk Management and DMDU in Transportation	風險管理和 DMDU 應用於交通運輸
3	**What Is New with Climate Change?**	**最新氣候變遷的資訊**
	Information about Current and Future Climate	關於當前和未來氣候的資訊
	What We Know about the Earth's Climate	我們對地球氣候的瞭解
	How Climate Change Will Impact Transportation	氣候變遷將如何影響交通運輸
	Sources of Information on Current and Future Climate	當前和未來氣候的資訊來源
	Key Takeaways	本章重要觀念
4	**DMDU Methods Applied to Transportation**	**DMDU 方法應用於交通運輸**
	"Predict-then-Act" and DMDU	「先預測後行動」和 DMDU
	Alternative DMDU Approaches	替代 DMDU 方法
	Basic DMDU Principles	基本 DMDU 原則
	Decision Framing—First Step of All DMDU Analysis	決策框架— 所有 DMDU 分析法的第一步

表 3.2-8 《面對氣候變遷下之交通規劃：DMDU 指引》之編撰架構（續）

章	標題	標題
4	Method 1: Scenario Planning	方法一：情境規劃
	Method 2: Adaptive Pathways	方法二：調適路徑
	Method 3: Robust Decision Making (RDM)	方法三：穩健決策 (RDM)
5	**Implications and Recommendations**	**結論與建議**
	When to use which method	何時使用何種方法
	List of consultants and tools	諮詢顧問和工具清單

資料來源：A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, Inter-American Development Bank, 2021.

該指引為 IDB 專案提供災害與氣候變遷風險評估方法，描述如何將 DMDU 結合風險評估方法且應用於運輸規劃。DMDU 為近年新興的決策方法，該指引介紹 3 種方法包含情境規劃（scenario planning）、調適路徑（adaptive pathways）及穩健決策（Robust Decision Making），運用於不確定性高之風險管理背景下制定決策。

IDB 風險評估方法包含建立篩選過程、定性及定量分析，如圖 3.2.7，並透過專家提供指導，以利專案團隊於專案的不同階段進行氣候變遷風險評估。

針對 IDB 專案之風險評估方法可分為 3 階段：

(1) 第 1 階段：篩選

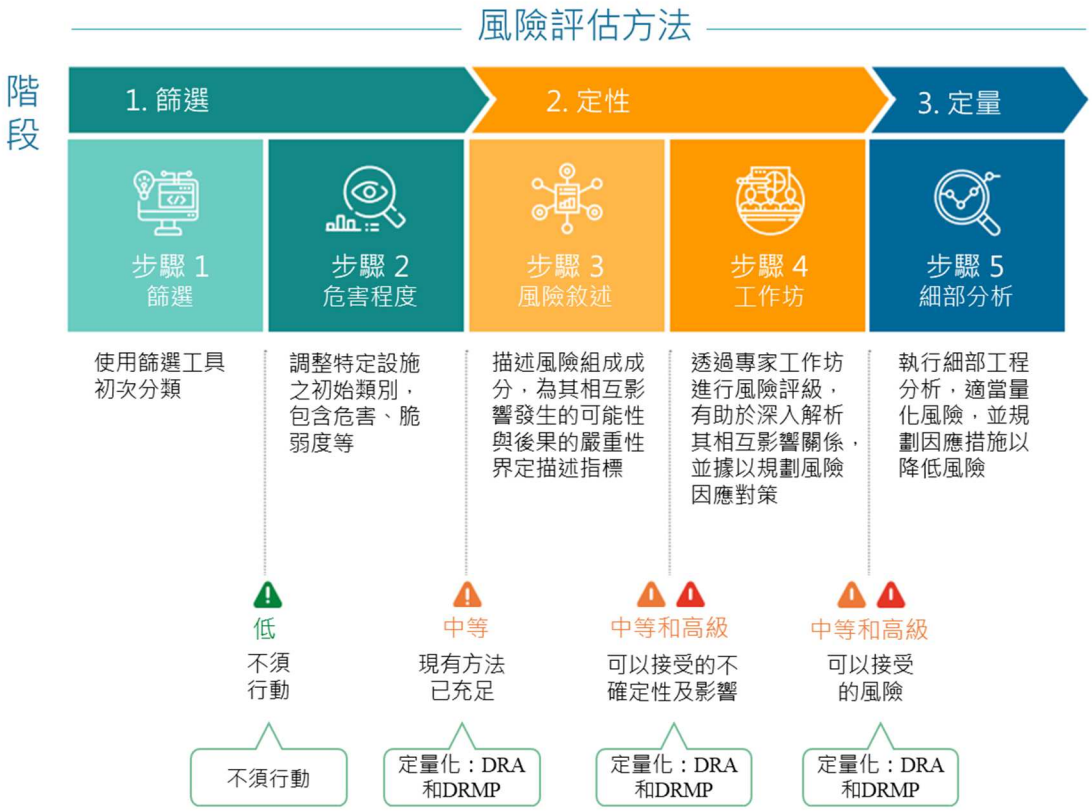
篩選包括 2 步驟，說明如下：

① 步驟 1：進行風險分類與篩選

第 1 步應考量可能會影響專案的潛在氣候風險進行風險分類。風險分類可透過問卷調查和相關風險資訊平台資料等做分類，從而識別跨空間尺度之潛在風險。

② 步驟 2：危害程度

第 2 步為指認與專案相關的臨界值和危害/脆弱度。危害和脆弱度是使用 3 個主要維度進行分類，代表關於物理特徵、人口和服務的潛在負面影響。



備註：災害風險評估（Disaster Risk Assessment, DRA）；災害風險管理計畫（Disaster Risk Management Plan, DRMP）

資料來源：A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, Inter-American Development Bank, 2021.

圖 3.2.7 IDB 氣候變遷風險評估方法

(2) 第 2 階段：定性評估

定性評估包含 2 步驟，說明如下：

① 步驟 3：風險敘述

基於上述數據、文獻之回顧，以及針對專案設計所記錄有關災害和風險管理之知識情報，描述風險組成成分，為其相互影響發生的可能性與後果的嚴重性界定描述指標。

② 步驟 4：工作坊

基於專家意見之風險評估需求，蒐集相關潛在項目及其社會經濟結果的定性資料。該資料可以透過執行工作坊過程綜整災害/風險專家及專案技術團隊之意見。

(3) 第 3 階段：定量評估

定量評估包含細部分析模擬氣候風險對於專案可能造成的影響，說明如下：

① 步驟 5：細部分析

細部分析包括運用氣候模型模擬自然災害對物理系統的影響。此階段以科學和數學的方式，研究專案暴露於天然災害時將如何執行。專業認證人員應負責監督本指引中概述的風險評估的設計、準備和實施，並告知客戶。

7. 國外公路系統規劃階段調適指引之重點綜理

從以上蒐整之國外公路系統的調適規劃指引上可發現主要的重點相似，包含需考量現況與未來的氣候資料，進行脆弱度或風險評估，藉由風險評估的結果研擬調適方案或措施，並視需要參考成本效益評估或依據公路管理機關可掌握之資源與價值判斷，選取適合導入的調適選項或措施。

此外，新建計畫需考量設施壽年，改建計畫則需考量設施剩餘壽年。強化公路系統調適能力的措施甚為多元，包括增強營運和養護能力、運用新材料或工法、改變地點、降低臨界值事件發生機率、精進監測等，國外公路系統規劃階段調適指引之重點綜理如表 3.2-9。

表 3.2-9 國外公路系統規劃階段調適指引之重點綜理表

公路調適規劃指引	調適步驟說明					
	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步	第六步
日本國土交通省	瞭解氣候變遷及其影響	制定調適措施	監測	--	--	--
美國運輸研究學會（TRB）-國家協作公路研究計畫（NCHRP）	回顧環境、機關特性與計畫要求	依據資產種類辨識可能受氣候影響的設計參數	回顧過往氣候趨勢、取得或計算氣候推估	辨識會受氣候變遷影響的設計組成	研擬調適選項	視需要執行成本效益評估
歐洲公路主管機關會談（CEDR）	應用現況與未來氣候資料	初步檢視公路系統氣候變遷風險	執行詳細脆弱度評估	執行社會經濟衝擊評估	選取調適策略	--

表 3.2-9 國外公路系統規劃階段調適指引之重點綜理表（續）

公路調適規劃指引	調適步驟說明					
	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步	第六步
美國聯邦公路管理局（FHWA）	設定目標並確立範圍	蒐集資料	評估脆弱度	分析調適選項	將結果納入決策	監測和重新評
加拿大英屬哥倫比亞省交通局（BCMOTI）	業主提出需求說明書	韌性設計專案確立	設施風險等級評估	指認及整合氣候調適措施	書面記錄過程及決策結果	--
美洲開發銀行（IDB）	進行風險分類與篩選	指認與專案相關的臨界值和危害/脆弱度	風險敘述	工作坊	細部分析	--

資料來源：本計畫彙整。

3.3 國外公路系統規劃階段之調適選項

本節蒐集國外在公路系統規劃階段的調適選項（adaptation options），做為研提國內公路系統於規劃階段調適作為建議之基礎。本計畫目的之一為廣泛蒐整可應用於公路系統規劃階段強化調適能力之作為，而從國外文獻回顧發現，國外調適研究及實務案例報告所採用的調適選項頗為多元，調適選項的涵蓋面從上到下包括：策略（strategies）、方法（approaches）、解決方案（solutions）及措施（measures）等。

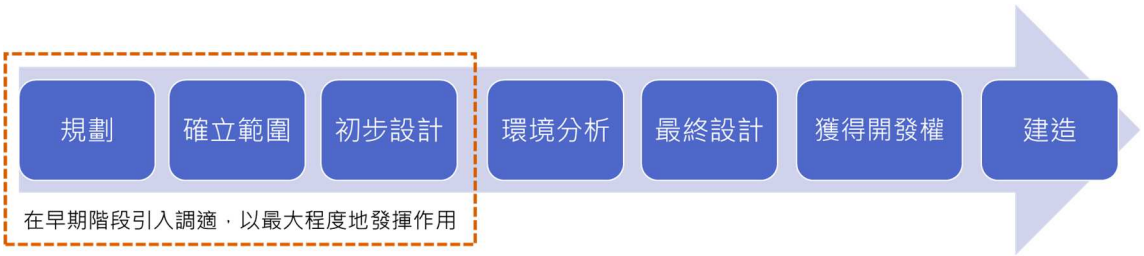
為說明目前在公路實務操作上可行之調適選項及內容，本計畫以前期計畫蒐整之美國聯邦公路管理局（FHWA）於 2017 年提出的調適選項類別做為基礎；本計畫除了補充及更新上述 FHWA 提及之調適選項及重點內容外，另補充 FHWA 於 2019 年提出之《以自然為本提升海岸公路韌性的解決方案》，並蒐整 IPCC 於 2022 年 2 月發布最新 AR6 報告中綜整之國際上應用於公路系統之調適選項類別，包括硬保護（hard protection）、調整與升級（accommodation and advance）、搬遷（migration）與生態系統的調適方法及以自然為本的解決方案（Ecosystem-based Adaptation approaches, EbA & Nature-based Solutions, NbS）。說明如下：

1. 美國聯邦公路管理局（FHWA）－以綜合方法提升專案開發的氣候韌性（2017 年）

為協助實務人員利用氣候變遷數據評估氣候對交通運輸資產的影響並進行工程評估和設計，以指認出具潛力的調適方案，FHWA 於 2017 年出版《以綜合方法提升專案開發的氣候韌性》（Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development）[24]。

該報告綜整 FHWA 從近期研究和先導計畫中吸取的經驗和創新方法，以協助美國交通運輸機構因應氣候變遷和極端天氣事件。該報告旨在促使將因應氣候變遷需考慮之因素納入一系列運輸工程設計專案，以利實務操作人員了解管理的資產如何容易受到氣候變遷的影響，哪些調適措施將有效地提高韌性與如何實際應用選擇的措施。

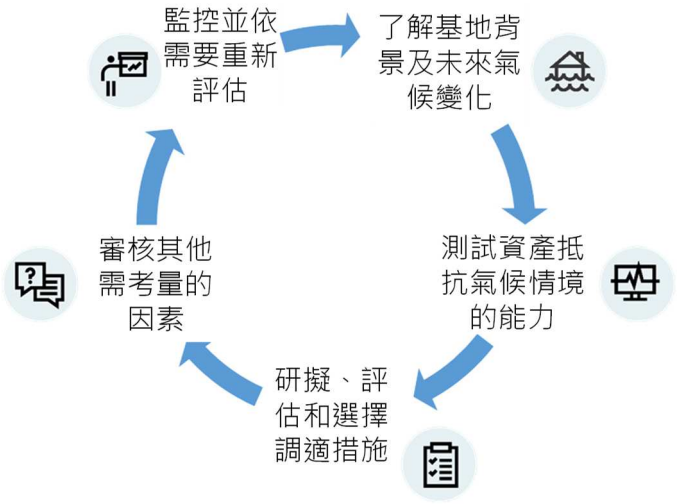
專案開發的早期階段，如規劃、界定範圍、初步設計工程，應考慮氣候變遷的影響和調適，以確保氣候韌性被整合在專案設計，如圖 3.3.1 所示。



資料來源：Federal Highway Administration, Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development, 2017.

圖 3.3.1 早期階段將氣候變化因素納入專案開發

任何調適研究應包括 5 個基本要素，如圖 3.3.2。



資料來源：Federal Highway Administration, Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development, 2017.

圖 3.3.2 調適研究之 5 個基本要素

目前有多種資源可取得氣候預測數據，同時提供操作指南說明如何選擇和解釋未來氣候情景、模型和預測。建議實務操作者可從運用 IPCC 的最近一期氣候變遷評估報告取得最新氣候情境模擬資料以及從水文預報（DCHP）網站下載溫度和降雨預估。

該報告描述了 4 個工程學科在氣候變遷下的氣候敏感性與可借鏡的過往分析評估與調適經驗，包含：

(1) 海岸水利學（coastal hydraulics）

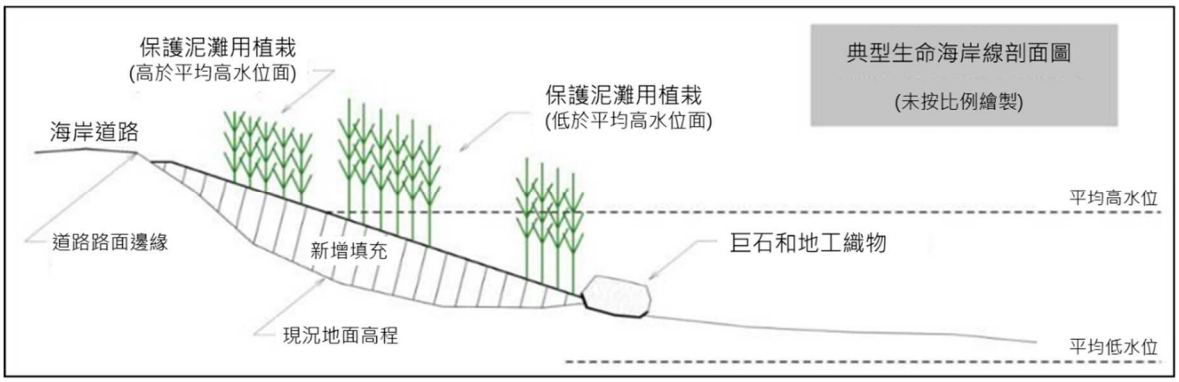
沿海地區暴潮/風浪中的波浪會以多種方式破壞沿海道路、橋梁、鐵路以及隧道，例如：(1) 波浪襲擊損壞公路、(2) 暴潮/風浪中的水流沖刷損壞公路和鐵路、(3) 直接侵蝕和海岸線倒退損壞公路、(4) 浪湧損壞橋面、(5) 波浪加速引起的結構破壞、(6) 隧道和道路因決堤而損壞。從海

岸水利學相關案例,在評估特定沿海資產的潛在調適方案過程中可借鏡處如表 3.3-1。

表 3.3-1 從海岸水利學相關案例分析中之經驗學習

分類	從案例分析中之經驗學習
對基礎設施的影響	海平面上升將逐漸使沿海交通運輸更加脆弱和功能不足
	不同類型的沿海結構基本上或多或少會受到海平面上升影響
	在颶風/颱風期間，海平面上升可能已導致美國一座主要橋梁的損壞
進行脆弱度評估	Saffir-Simpson 颶風/颱風類別量表不適用於許多沿海脆弱度評估
	海平面上升對高峰暴潮/風浪水平的影響可能是非線性的
	原有暴潮/風浪和海浪的模型適用於大型沿海項目
	評估沿海資產需要納入所有適合的工程學科
發展調適措施	沿海氣候變遷調適措施將類似於沿海地區改善對當今極端天氣事件的抵禦能力的工程策略
	如今許多沿海氣候調適措施已證明在經濟效益上可以做為其韌性措施，而隨著海平面上升，經濟上的理由也會日漸增多
	一般對於橋梁所提出的對策及改造措施可能無效
	有生命的海岸線（living shorelines）為保護道路的合適調適措施

資料來源：Federal Highway Administration, Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development, 2017.



資料來源：Federal Highway Administration, Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development, 2017.

圖 3.3.3 生命海岸線調適措施示意

(2) 河岸氾濫（riverine flooding）

河岸氾濫對道路與橋梁的威脅可能包括公路遭受洪水與決堤,河道的不穩定性、河道遷移及河床淤積等，如：(1) 碎屑堆積於車道上、(2) 因下游邊坡超越臨界點的水流條件，導致路堤受侵蝕、(3) 因雜物堵塞和增加的橫切面壓力，損壞橋軌和護牆、(4) 路堤侵蝕損壞道路鋪面、(5) 水

力抬升（hydraulic uplifting）損壞道路鋪面、（6）激烈的路堤侵蝕損壞路堤、（7）因車輛被洪水沖走或撞上毀損的車道造成的生命損失。在評估特定河岸氾濫的潛在調適方案的過程中的可借鏡處如表 3.3-2。

表 3.3-2 從河岸氾濫相關案例分析中之經驗學習

分類	從案例分析中之經驗學習
適當的運用降雨預測	使用歷史降雨數據集評估基礎設施時，工程師應考慮超出標準設計風暴的一系列水流事件
歷史數據在調適分析中的使用	降雨/逕流模型更適合合併未來的降雨預測，但是專家們需要更詳細的知識，以了解相應的降雨模式以及集水區流域在較長時間內對這些模式的回應
	在面積較大的流域中，高峰值暴雨流量的反饋可能非線性地隨著氣候變遷下的降雨趨勢，因高峰值流量的增加可能更多地取決於流域的特徵和對降雨動態的影響，而不是僅僅取決於降雨量的增加
發展調適方案	水力特性曲線可幫助說明資產在各種水流量情況下的現有或缺乏的氣候韌性
野火衝擊及調適能力	集水區內的野火導致暴雨流量急劇增加，並可能引發土石流
	因野火對流域損害的時間範圍很短，故降低發生極端暴雨流量的風險；因此，野火過後適合使用較低的風暴設計條件
	因野火發生的可能性相對低且擴大涵洞的成本高昂，故涵洞在因應野火上採取反應式調適在經濟效益上合理
	野火泥流流動增加暴雨流量並增加野火殘骸堵塞/河道淤積的風險，威脅河流沿岸的基礎設施

資料來源：Federal Highway Administration, Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development, 2017.

(3) 鋪面和土壤（pavement and soils）

人行道系統（人行道鋪面、基層、路基和人工土壤）及土壤和岩石坡度易受溫度，降雨和水分變化的影響，其影響方式如下：（1）極端溫度可能會對路面造成壓力，例如瀝青混凝土（AC）路面開裂、（2）降雨量會影響土壤濕度和地下水條件，影響坡度穩定性並導致土石滑坡。在評估道路鋪面及土壤潛在調適方案的過程中的可借鏡處如表 3.3-3。

表 3.3-3 從鋪面和土壤相關案例分析中之經驗學習

分類	從案例分析中之經驗學習
對鋪面的影響	溫度和降雨的變化可能會對鋪面性能產生廣泛影響，從而導致巨大的調適成本
	溫度和濕度的變化影響整個鋪面系統
	鋪面設計人員在評估現有鋪面系統和開發鋪面混合料設計時必須考慮氣候的不確定性
	氣候變遷將影響季節性貨車承載量政策
	儘管當前的氣候模型數據不能與當前鋪面設計和分析工具“隨插即用”，但實務人員可經常開發變通方法
對土石流和落石的影響	初步且整體評估氣候變遷對土壤穩定性的影響，不需詳細的數據
	為了確定氣候變遷是否會增加風化，實務人員必須考慮凍融循環頻率，溫度和降雨量的預測以及與上述事件相對應的時間點

資料來源：Federal Highway Administration, Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development, 2017.

(4) 機電系統（mechanical and electrical system）

機電系統有關的氣候敏感性，包括海平面上升、洪水潮和降雨增加帶來的洪水、溫度升高和強風等。在評估機電系統有關的潛在調適方案的過程中的可借鏡處如表 3.3-4。

表 3.3-4 從機電系統相關案例分析中之經驗學習

分類	從案例分析中之經驗學習
淹水	水可以從多個路徑進入機械和電氣室
	視覺化海平面上升和暴潮/風浪情境在竣工圖上疊圖以幫助溝通氣候威脅
溫升	可依據經驗，專業判斷與氣候情境來選擇關鍵溫度臨界值

資料來源：Federal Highway Administration, Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development, 2017.

該報告彙編了從以上 4 個學科中汲取的大量經驗教訓。其中一些主題涉及多個學科和氣候變遷傷害，例如氣候造成的壓力來源通常具有非線性影響；氣候變遷並不一定意味著設計標準應該改變；從業人員應同時考慮極端和增量變化；重要的是考慮不同氣候壓力因素之間的相互作用；在某些情況下，調適策略將與既有實施情形非常相似；調適管理可以幫助管理不確定性並減少超出範圍的風險。儘管調適策略是針對每個工程學科的，但各工程學科的調適選項相似：

(1) 管理和維護：維護現有設施以達成最佳性能，並透過進一步的準備來管理極端事件的因應。

(2) 增加備援力：確保設施機關提供的運輸服務可由其他替代方案提供。

(3) 保護：提供對抗氣候壓力的保護性物理屏障以減少或消除損害。

(4) 調整：修改或重新設計設施，以在氣候變遷的環境中有更佳的性能。

(5) 搬遷：將設施搬離氣候壓力來源，減少或消除暴露度於氣候壓力。

以上策略中的任何一個都可包含調適設計或調適管理元素，可依據需求逐步實踐調適策略。

2. 美國聯邦公路管理局（FHWA）－以自然為本提升海岸公路韌性的解決方案（2019 年）

因海平面上升、海岸侵蝕、暴風雨等，許多位於沿海的運輸系統皆受到衝擊。許多國家的運輸主管機關開始意識到傳統工程的限制及工程對生態的破壞，逐步採用 NbS 與生態保育之方式，或是自然結合工程之作法保護沿海的運輸系統。NbS 的作法為運用自然生態系統元素或其流程來減緩侵蝕、波浪災害、洪水危害，為一種替代傳統穩定海岸線與保護設施的方法。

FHWA 於 2019 年發布《以自然為本提升海岸公路韌性的解決方案》[25]（Nature-based Solution for Coastal Highway Resilience）說明如何運用以自然為本的解決方案（NbS）提高海岸公路在面對極端氣候與海平面上升衝擊時的氣候韌性。

(1) NbS 概述

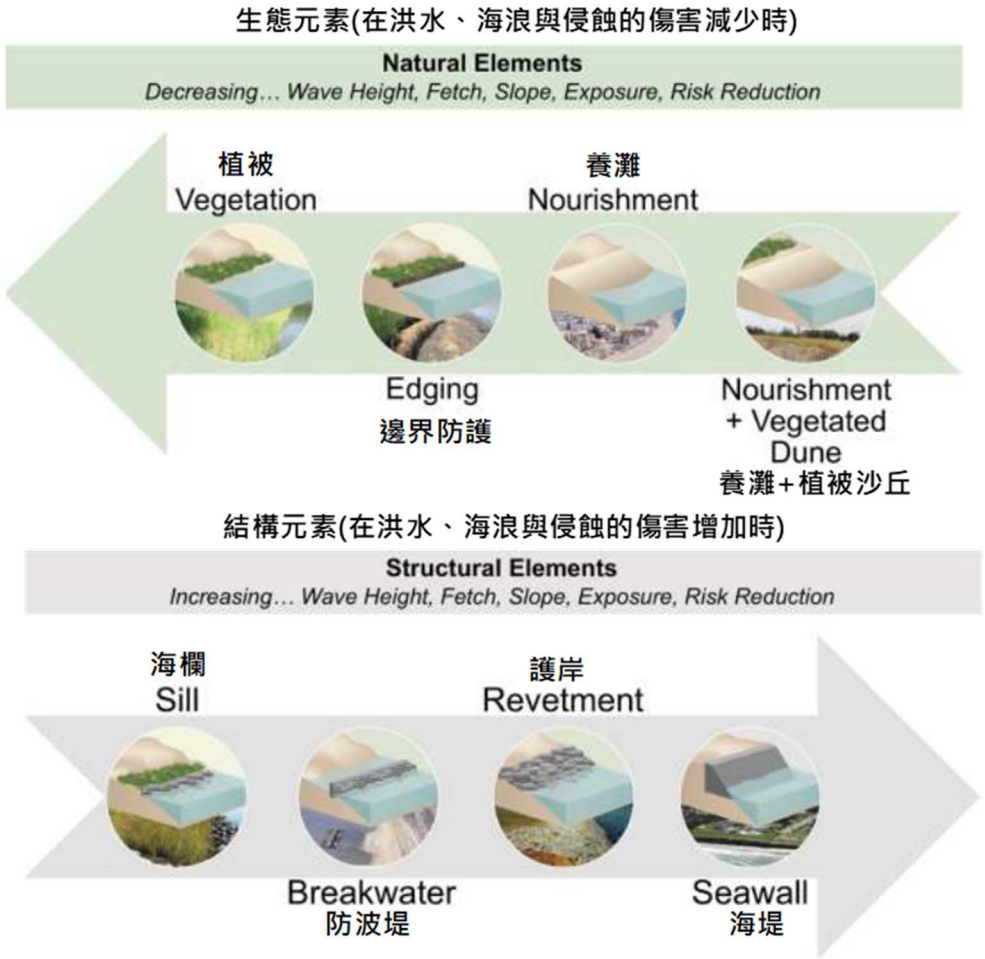
NbS 可做為氣候衝擊事件的第一線防禦，並提高沿海公路的調適韌性。利用結構物理和生物物理程序，與海岸生態組成的一個以自然為本的調適解決方案可減少沿海公路受洪水、波浪和海水侵蝕的情形。例如，潮汐沼澤、紅樹林和海岸林可減少沿海洪災且可有效的消散海浪的波浪能量（wave energy），減緩波浪與洪水對公路設施的破壞與侵蝕；礁石能消散波浪能量，並干擾波浪力（wave load），減少波浪傳播和越過海岸；海灘和沙丘能消散波浪能量並減少沿海洪水和極端事件的破壞。

NbS 成本低於或相等於傳統海岸線保護工程的初始成本，但是，此調適選項需一定程度的例行維護，而傳統的海岸線保護工程則不需要，可採用 NbS 調適選項在面對極端事件時的韌性較大。NbS 可適用於海浪侵蝕

風險較低的環境，工程工法則適用於海岸侵襲風險較高的環境，在決定應用的工法上可視海浪侵蝕的不同的程度而定，如圖 3.3.4 所示，並可適度採用混合方法（hybrid nature-based solution）。

NbS 有 4 項特性：（1）透過自然循環系統增強工程面對自然衝擊的韌性，（2）等於或低於工程工法的成本，（3）運用自然調適的方法去達成與工程工法一樣的目的，以及（4）相比於工程工法提供了更多自然美學上的效益。

海岸公路能否適合採用 NbS 需考量以下 6 點：（1）對於工程韌性與危害降低的需求，（2）該地生態與地質的條件符合度，（3）面對大浪的暴露度，（4）工程計畫的標的與成本效益，（5）需要的工程可靠性，以及（6）在地的政策與法規。



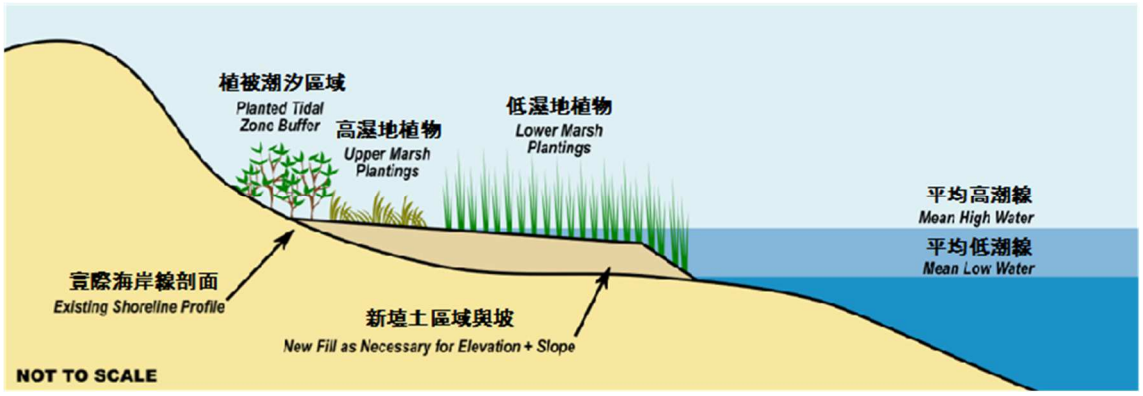
資料來源：Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, Federal Highway Administration, 2019、本計畫彙整。

圖 3.3.4 以自然為本生態元素與結構元素之風險程度適用性

運用於沿海公路的 NbS 為 6 類（參見圖 3.3.5~10），說明如下：

① 植被

提供各種生態效益，可改善水質並降低海浪侵蝕風險，同時為各種物種提供棲息地。

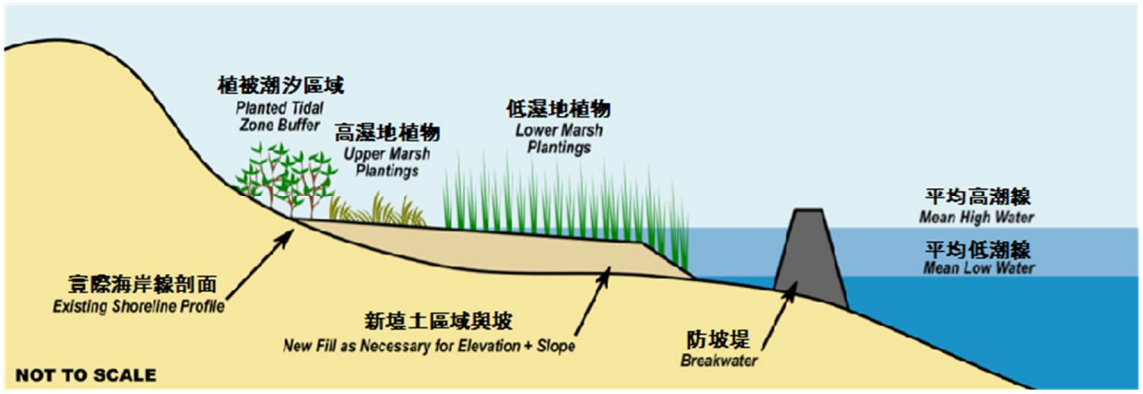


資料來源：Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, Federal Highway Administration, 2019、本計畫彙整。

圖 3.3.5 植被示意圖

② 防波堤

提供各種生態效益，可改善水質並降低海浪侵蝕風險，同時為各種物種提供棲息地，近海防波堤能減弱海浪波能。

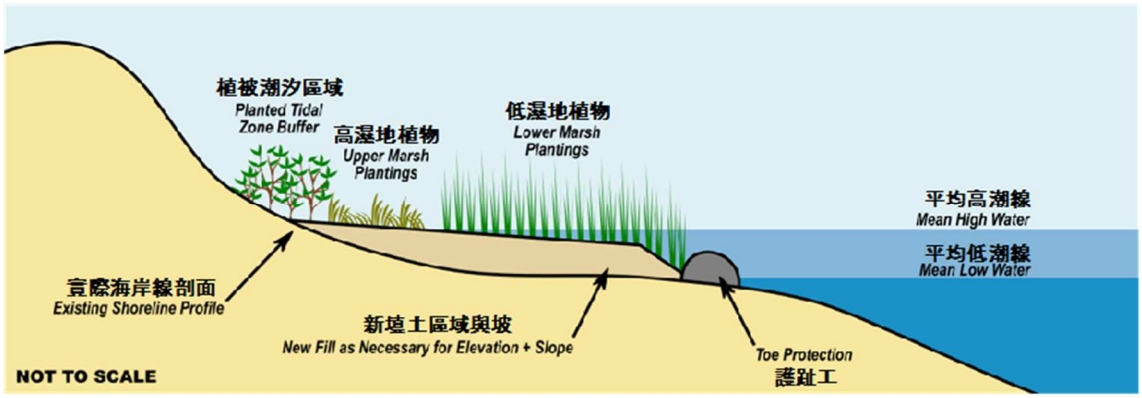


資料來源：Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, Federal Highway Administration, 2019、本計畫彙整。

圖 3.3.6 防波堤示意圖

③ 海欄(sill)

選擇適合該地生存條件的植物及沉積物，在適當的高度建立一個逐漸傾斜的平台為此區域植物維持生命。在邊緣提供護趾工保護，通常為岩石護岸的形式。

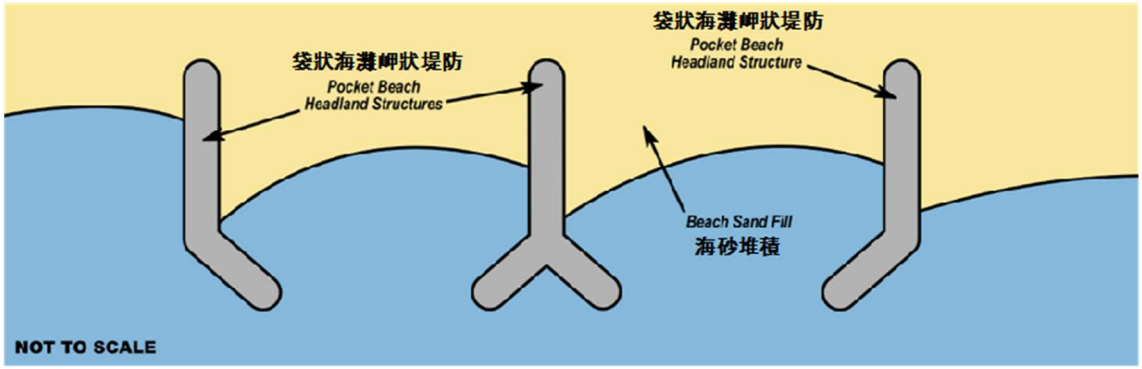


資料來源：Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, Federal Highway Administration, 2019、本計畫彙整。

圖 3.3.7 海欄示意圖

④ 袋狀海灘

結合養灘和岬狀堤防的工程方法能使海岸更穩定。

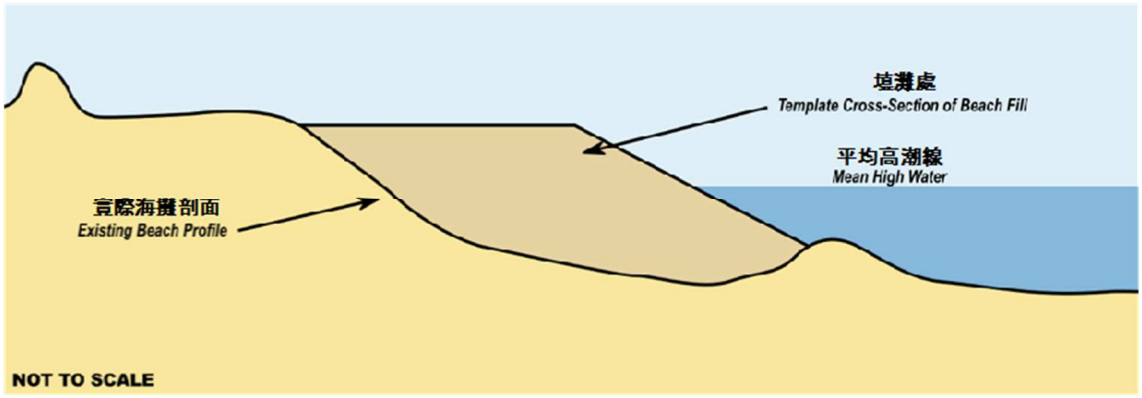


資料來源：Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, Federal Highway Administration, 2019、本計畫彙整。

圖 3.3.8 袋狀海灘示意圖

⑤ 養灘

養灘能改善棲息地，增加休閒和經濟價值，並降低海岸風險，有助於維持海岸線位置。

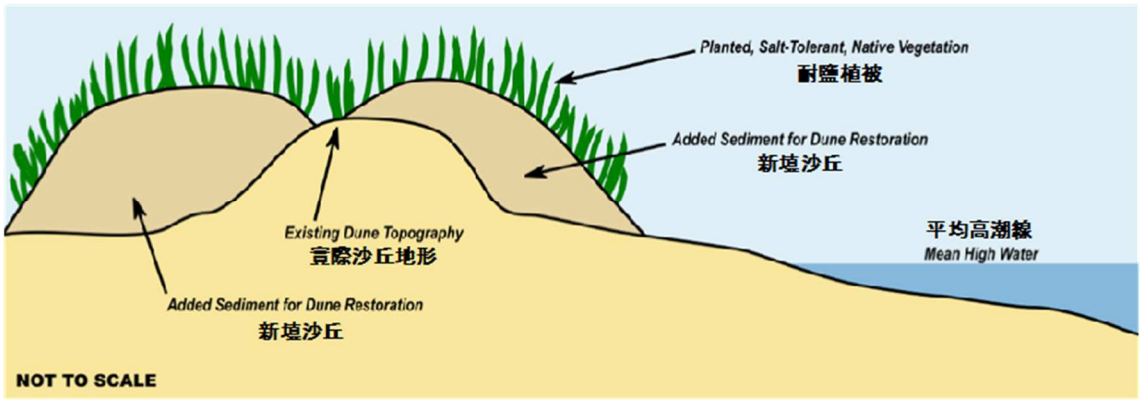


資料來源：Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, Federal Highway Administration, 2019、本計畫彙整。

圖 3.3.9 養灘示意圖

⑥ 沙丘

沙丘在颱風期間能降低海浪和洪水風險，特別是在與現有海灘或養灘工程結合使用時，此外，沙丘還能提供乾燥的海灘生物棲息地。



資料來源：Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, Federal Highway Administration, 2019、本計畫彙整。

圖 3.3.10 沙丘示意圖

(2) NbS 之操作流程

NbS 操作流程分為：（1）規劃、（2）現場區位評估、（3）設計注意事項、（4）政府許可、（5）建設、（6）監控、（7）維護和管理等，各步驟說明如下：

① 規劃

結合 NbS，於交通規劃階段需能系統化考慮整個規劃區域的狀態。交通規劃者在此階段可與關鍵利害相關人協調與合作，以增加效益和降低成本，並能夠充分運用生態邏輯，利用以自然為本的解決方案建設規劃方法。

② 現場區位評估

選擇一處具備適合應用以自然為本的調適方案的地點特性及韌性特性的區位，地點特性需理解場地歷史和場地條件；韌性特性則包括確定沿海公路的脆弱處並確定韌性需求（如洪水減緩、海浪減緩、減少水土流失、海岸線穩定等，也包括長期的海平面上升因應）。

③ 設計注意事項

NbS 包含廣泛的各種技術專長及整個應用實施過程，如常見的自然材料、技術工程和生態設計注意事項與資訊、結構設計、材料選擇、滿足生態需求、適應沿海環境等。

④ 政府許可

NbS 需政府單位審查，確保其合法性和許可性。

⑤ 建設

建設合約需允許創新的施工技術，如有敏感物種需避免侵擾、對於季節性生長期的植物則需要注意植被種植時間，而施工期間放置解釋性標誌則有助於沿海居民的支持與理解。

⑥ 監控

監控完工的以自然為本工程來衡量和評估其受到的影響，監控計畫包括 3 個關鍵：（1）確定設施目標、（2）設定相關的績效指標以及（3）選擇適當監控測量方法。

⑦ 維護和管理

維護要求因不同工法類型和設置而異，日常維護費用上 NbS 為最低的。運輸專業人員可以將監控結果做為改進管理策略之基礎，確保生態工程能隨著生態建設的現場條件或未來運輸需求的發展變化而調整。

3. IPCC AR6 綜整之公路調適選項（2022）

IPCC AR6 指出為因應氣候變遷加劇，世界各國目前已積極投入並展現出多元的調適選項。目前公路系統有多樣化適應選項可供選擇，包括升級基礎設施、調整或遷移關鍵公路資產等，而國外實務案例如大洋洲的公路系統調適包括改道、海岸保護、改善排水系統和升級基礎設施，證據顯示大多數調適選項皆能提供了良好的效益成本比。

此外，IPCC AR6 強調氣候變遷加劇複合與連動性風險，多樣化的調適選項內容及多元化組合方式極為適合因應現況所面臨的複合性氣候風險，個別公路專案選用多種調適選項分別應用於短中長期，為因應未來高度不確定性之通案作法。

本計畫依據 IPCC AR6 綜整的調適選項類別，摘錄目前國際上應用於公路系統之調適選項，主要可分為四大類，重點說明如下：

(1) 硬保護（hard protection）

硬保護係指以硬體設施及結構來做為保護，尤其是在沿海地區與海島國家經常採用硬保護來保護海岸。自過去以來，為避免海岸線侵蝕與沿海地區設施淹沒，海島國家在海岸保護基礎設施已投入巨資，一般來說，海島國家最常見的海岸保護措施為海堤，其次為防波堤結構和其他海岸保護設施。

多數海島國家已從過去的經驗習得，海岸保護策略在海岸線硬體設施及結構上，顯示出許多難以維護的問題，即使像馬爾地夫採取硬體設施及結構包圍整個島嶼，因局部海堤坍塌的發生率可能會迅速蔓延，仍不被視為長期的解決方案；另外，海堤和其他硬質海岸線結構會將海岸線侵蝕和將低地淹沒風險轉移到他處。因此，儘管海堤的建造速度快，但太平洋上許多沿海地區（特別是都會區）開始傾向於使用「軟性」海岸線結構來保護海岸。

此外，由於海平面上升因素，在未來海岸保護的傳統硬保護將變得越來越無效，這表明大多數島嶼海岸需要採取其他調適做法，以使其比過去幾十年的情況更具變革性。

(2) 調整與升級（Accommodation and advance as strategies）

藉由調整或升級（重新設計）公路關鍵基礎設施，以減少沿海洪氾對公路基礎設施的影響，如菲律賓和印尼部分沿海地區已透過建造高架結構抬升設施高程以防範淹水威脅。然而對於許多低度開發的海島國家因調整與升級之成本過高，在大多數情況下並未被視為一種普遍的選擇。

另外在部分已開發國家的沿海低地，填海造地（land reclamation）已經實施了數十年，此舉可以讓基礎設施免於洪氾威脅，並解決人口高速增長造成的土地短缺問題。

(3) 搬遷（Migration）

搬遷在實務上作法包括規劃搬遷及重新安置，由於需投入昂貴的經濟和社會成本，被視為不得已而為之的最終選項之一。

由於目前案例較少，尚無足夠的證據顯示其影響，且個案的一致性較低，又因結果具有高度的特定背景（如，在特定極端天氣事件的背景下，不可容忍風險程度高），故目前在應用上很少有高度「成功」案例。但該報告指出不「成功」的原因可能為氣候變遷之極端氣候事件高風險導致的調適限制，而非策略本身之因素。

(4) 基於生態系統的調適方法及以自然為本的解決方案（Ecosystem-based Adaptation approaches, EbA & Nature-based Solutions, NbS）

海島國家越來越關注以自然為本的調適方法，包含「基於生態系統的調適方法（EbA）」及「以自然為本的解決方案（NbS）」，這兩者皆受到大自然的啟發和支持，具有成本效益，同時提供環境、社會和經濟效益，並有助於提升氣候韌性。

在海島國家已有充分的證據顯示實施以自然為本的調適方法在因應氣候風險是有效的，因此 COP26 更加關注目前各國正採取之 NbS 成效，並積極投資 NbS 做為重要的氣候行動（actions）之一。但因缺乏監測和評估框架，故難以精準量化的其所帶來的共同效益（co-benefits），故針對這些調適方法所提供的環境和社會效益等仍待進一步研究。

① 基於生態系統的調適方法（EbA）

在國家和區域尺度上，過去的 EbA 方法應用主要側重於恢復或保護沿海和海洋生態系統（例如，珊瑚礁、紅樹林等），較少強調內陸森林。然而，近年該方法考量天然內陸森林提供的生態系統服務正在增加，透過整體流域綜合管理，以減低下游地區淹水危害與提升水體安全、減緩海岸侵蝕，並在最終達成保護海洋珊瑚礁生態系統的目的。

② 以自然為本的解決方案（NbS）

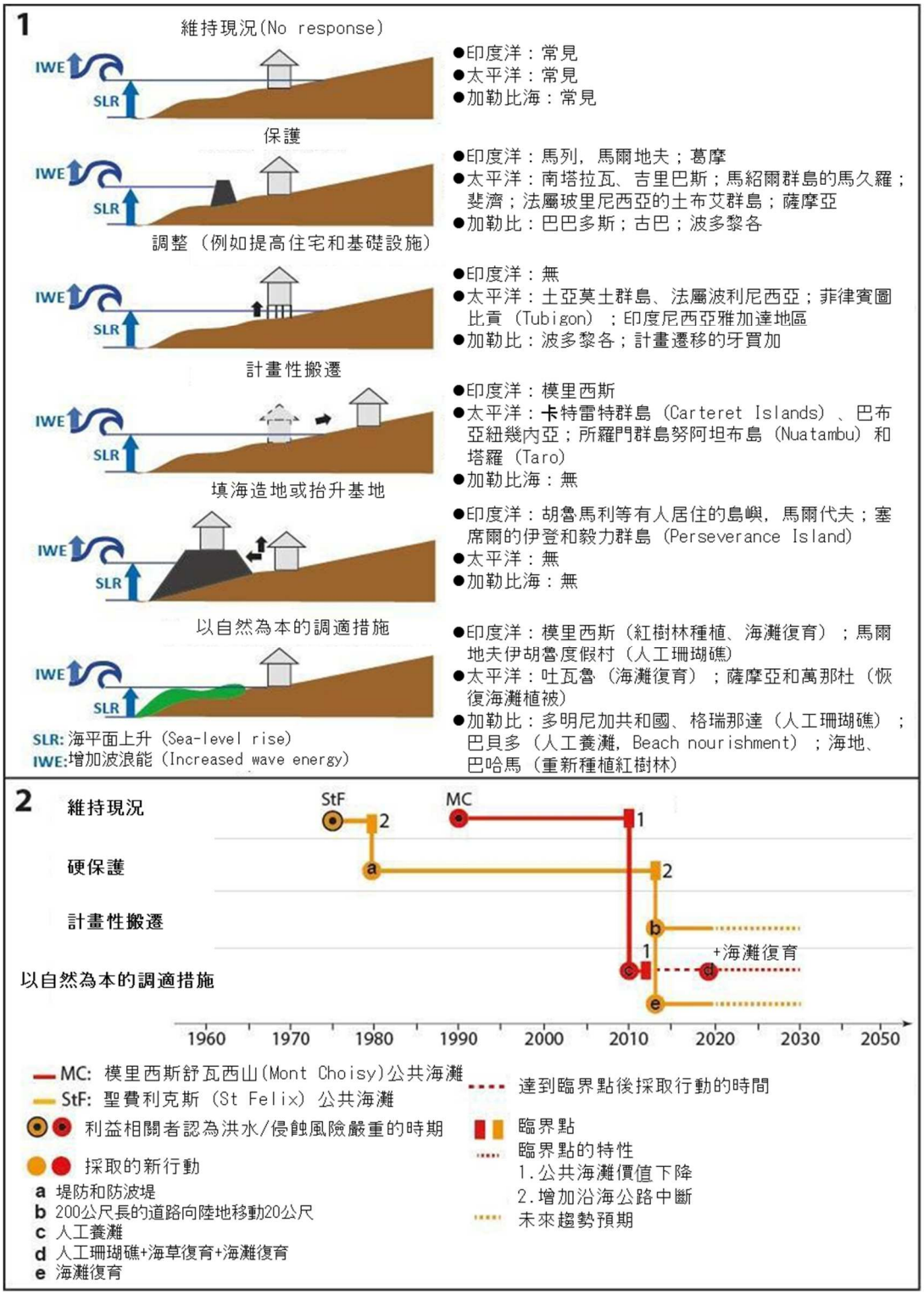
NbS 最早係由國際自然保育聯盟（International Union for Conservation of Nature, IUCN）提出並定義「為永續管理、保護、恢復或改善生態系統的行動，可有效及調適性的應對社會挑戰（例如氣候變化、糧食和水安全或自然災害），同時提供人類福祉和生物多樣性的效益」。IUCN 與聯合國環境署 2021 最新研究報告指出，採用 NbS 不僅有助於強化調適性以因應氣候風險，亦有助減少全球二氧化碳排放量。

從過去的幾十年的 NbS 成功案例經驗中發現，在海島國家或沿海地區（如，在旅遊勝地）實施了人工養灘，可減少海灘侵蝕及保護高度暴露度於沿海風浪的關鍵公路資產。

在選擇調適選項時，從業人員必須考慮其他因素，例如環境、經濟、社會、管理、更廣泛領域的環境和運輸系統以及機關優先事項。將這些考慮因素納入決策制定過程中，有助於對組織和社區的全面價值有更完整的理解。

一旦確定了調適選項，就應制定設施管理計畫（facility management plan），以確定實施調適措施的時間點並確保調適措施在氣候變遷下繼續依設計執行。有鑑於未來氣候變遷預測的不確定性，調適管理可確保計畫具有韌性。分階段的調適策略應納入整體資產管理策略中。

調適措施完工後，應監控設施的性能和區域氣候趨勢。由於未來土地使用變化、社會經濟變化等可能改變資產的功能用途、氣候預測數據會隨著時間的推移精進與工程的突破使新的調適措施的可行性提高或降低其他措施的成本，需滾動檢討調適措施。



資料來源：IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022.

圖 3.3.11 海島國家應用調適方法以降低沿海地區氣候風險

3.4 國外公路系統規劃階段之調適實務案例

本節引介美國麻薩諸塞州波士頓都會規劃組織（Boston Region Metropolitan Planning Organization, Boston Region MPO）針對里維爾市（Revere）1A 號公路的其中一段進行調適試點研究[26]，以實例說明規劃階段調適選項的研擬及選擇決策。

1. 研究背景

Boston Region MPO 長期關注氣候變遷對運輸系統的影響。隨著氣候變遷的影響加劇並變得更加明顯，將韌性納入交通基礎設施已成為麻薩諸塞州日益重要的優先事項。

波士頓地區具備韌性研究所需的基礎資料，包含波士頓交通局已完成交通資產的脆弱度評估，並制定了以行動為導向的韌性及減災計畫，以保護脆弱資產。該研究透過比對市政脆弱度防災報告和減災計畫中較易受破壞的路廊，優先評選出 12 條路廊。

12 條路廊中因考量沿海洪水風險模型（The Massachusetts Coast Flood Risk Model, MC-FRM）已完成，但尚未完成內陸風險模型，故從 6 條沿海路廊挑選，其中 1A 號公路位於索格斯河上的橋梁路段正在進行維修/重建的評估作業，故選擇做為研究示範點。

2. 環境區位與氣候風險

1A 號沿海公路對區域交通系統十分重要，屬主幹道位階，為國家公路系統（National Highway System, NHS）的一部分，是通往住宅區、教育區、娛樂區、商業區和工業區的疏散路線。北岸的居民前往波士頓、洛根機場（Logan Airport）及在里維爾的麻薩諸塞灣交通局站點（MBTA’s Wonderland Station）乘坐藍線皆須通過此道路。

另外，1A 號公路位於天然低窪地帶，且緊鄰沿海及河口洪水通道，極易受到漲潮、沿海風暴潮和暴雨造成的洪水以及海平面上升造成的洪水的影響甚鉅，因此 1A 號沿海公路面臨的氣候風險是亟待處理的課題。

3. 針對 1A 號沿海公路示範點研提調適選項

由於公路發生破壞後重建或維修成本極高，且將對該地區的經濟和社會造成影響，因此針對此議題提出以下 7 種調適策略：(1)無作為並撤出管理、

（2）以自然為本的解決方案、（3）索格斯河閘門工程、（4）防汛防洪保護措施（調整涵洞）、（5）防汛防洪保護措施（升級暴雨水泵站）、（6）防汛防洪保護措施（暴雨管制），以及（7）防汛防洪保護措施（改進資產）。依序說明如下：

(1) 無作為並撤出管理（Do nothing option and managed retreat）

無作為策略以規劃角度進行評估，重點關注不採取作為導致的廣泛後果，藉以引起人們的注意進而引發利益相關者討論。

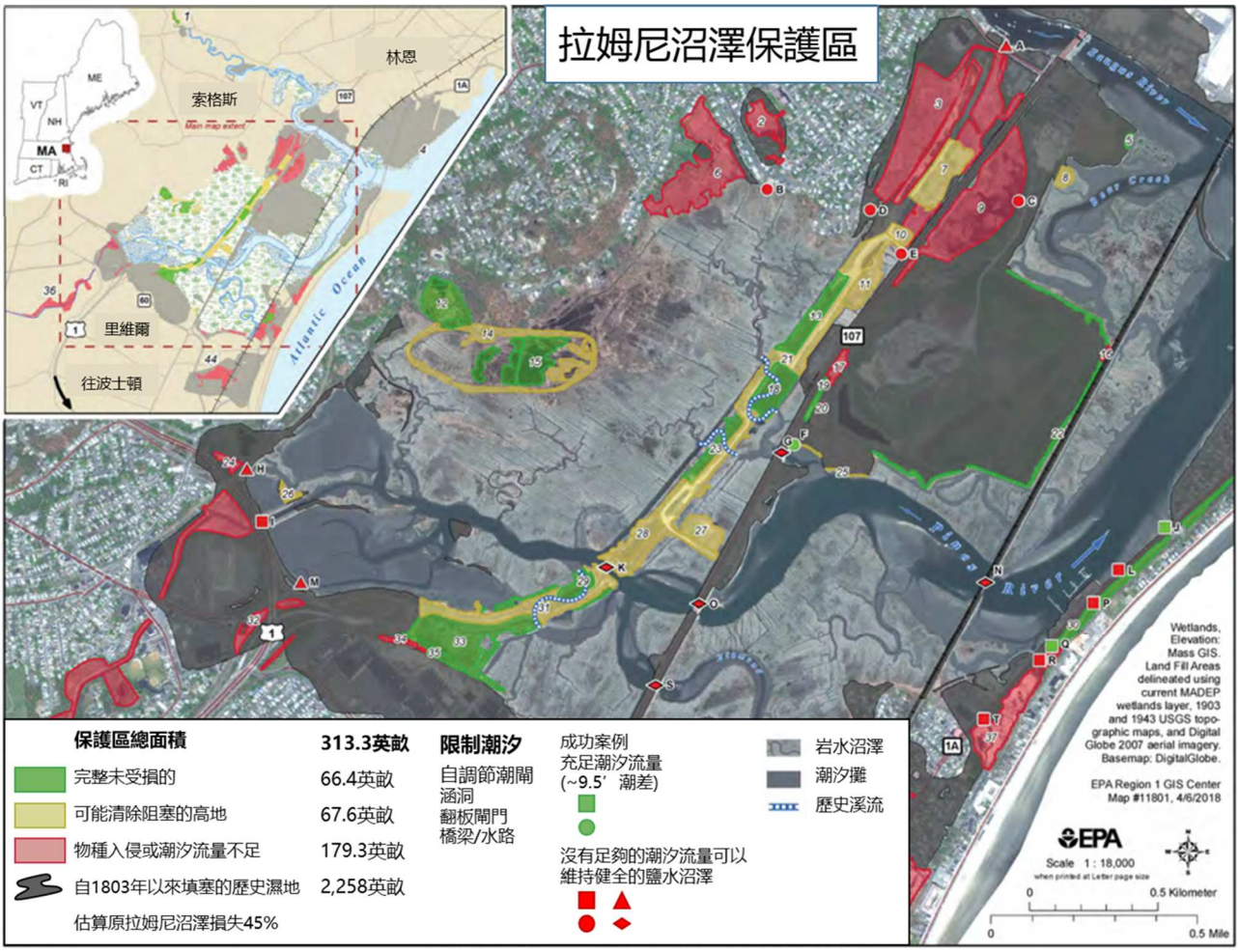
適用地點僅 1A 號公路之南段，因經過評估若全段採取無作為，預計自 2030 年開始，北部路段將頻繁遭受洪水氾濫，且將產生費用浩大的道路維護成本。預計無作為策略將對國家造成重大經濟損失，並對弱勢群體造成不利的社會影響。

(2) 以自然為本的解決方案（NbS）

經由人為設計與建造，以自然為基礎，和環境融為一體，並可低成本有效解決沿海公路韌性不足之方法。如果定期進行妥善維護，此種以自然為本的解決方案甚至可以做為中長期改善之策略。

例如：鹹水與周圍沼澤的潮汐交換不良導致蘆葦過度生長，超出鹹水沼澤地區，造成洪水儲量減少，沉積物增加，並加劇洪水。因此，保護被蘆葦侵占的沼澤地區可以增加蓄洪量並吸收部分波浪，透過修復鹹水沼澤以最小化洪水和磨邊（edging）之影響，使用椰殼卷（coir rolls）、護堤（berms）和海欄（sills）防止侵蝕，此外，達成預防和控制洪水之目的。

以自然為本的解決方案，成本因暴露度於波浪能的程度有所不同。暴露度於低波能量的海岸線成本範圍為每直線英尺（linear feet）100 至 200 美元，暴露度於中等能量的海岸線的成本為每直線英尺 200 至 500 美元，而暴露度於高能量波浪的海岸線，因為有可能需要施作護岸、防波堤等結構措施，每直線尺之成本為 600 至 1,200 美元。



資料來源：Metropolitan Planning Organization, Exploring Resilience in MPO-Funded Corridor and Intersection Studies, 2021.

圖 3.4.1 拉姆尼沼澤保護區內潮汐流受阻的鹹水沼澤和遭入侵蘆葦的位置

沼澤種植纖維原木，植物建立根系後可穩定海岸線	沼澤海欄可以保護鹽鹼灘免受侵蝕 這條海岸線結合珊瑚礁分解波浪能及新的沼澤植被以穩定並過濾沉積物

使用植被與較硬的海岸線結構（例如牡蠣礁或岩床）相結合的生活海岸線，可以增加穩定性並減少侵蝕，同時提供棲息地價值並增強沿海韌性

資料來源：Metropolitan Planning Organization, Exploring Resilience in MPO-Funded Corridor and Intersection Studies, 2021.

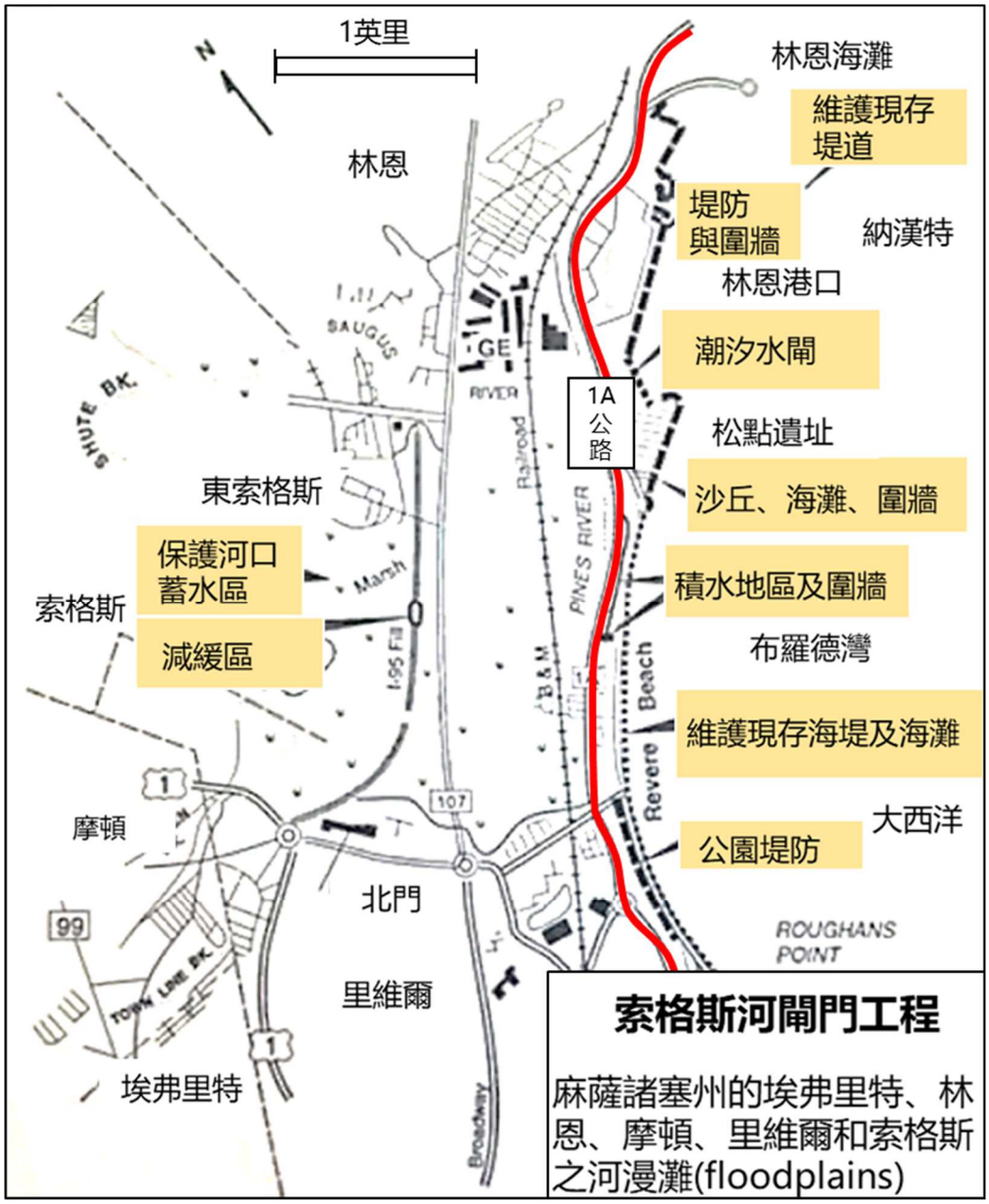
圖 3.4.2 以自然為本—控制洪水和侵蝕的解決方案

(3) 索格斯河閘門工程（The Saugus River Floodgate Strategy）

此策略是索格斯河地區防洪閘計畫之焦點，採取區域取向研究方法（regional approach）來應對氣候變遷和海平面上升，為埃弗雷特、林恩、馬爾登、里維爾和索格斯五個社區提供海岸保護。該計畫還可以恢復拉姆尼沼澤（Rumney Marsh）保護區，包括增強和重建自然潮位、河口上游以及濕地。

閘門和海岸線的改善可以保護住房、企業、交通基礎設施和環境資源，因此，MPO 工作人員建議協調 1A 號公路的韌性措施、橋梁維修愛德華茲將軍吊橋的重建計畫，以及區域索格斯河防洪閘計畫，以確保整合和共同利益。

此計畫之總成本為 2.31 億美元（按 2020 年幣值計算），其中，包括購買用於蓄洪的 1,650 英畝河口和恢復拉姆尼沼澤的額外成本。



資料來源：Metropolitan Planning Organization, Exploring Resilience in MPO-Funded Corridor and Intersection Studies, 2021.

圖 3.4.3 索格斯河閘門工程計畫的組成

(4) 防汛防洪保護措施-調整涵洞

1A 號公路極易受到海平面上升、風暴潮和極端降水影響，隨著氣候變遷，這些威脅在未來會顯著增加。因此，為避免涵洞和防潮水閘（tide gate）出現故障，需要對涵洞和防潮水閘的水力（hydraulic）和水文（hydrologic）進行排水評估。透過評估可以確定短期維修與中期改善涵洞大小之詳細內容，以幫助潮間帶沼澤間水流之交換，並保護 1A 號公路免受洪水和沖刷的影響。

但更改涵洞大小也可能造成反效果，如建設過大的涵洞可能會使過量水流通過上游，導致涵洞下游發生洪水氾濫，因此仍須通過流域評估。

更換涵洞的成本各不相同，取決於材料、尺寸和其他組件等。而更換主幹道上的涵洞成本通常較高，花費介於 50,000 美元至 100,000 美元之間，且實施時間較長，通常需要 2 至 3 年。

(5) 防汛防洪保護措施-升級暴雨抽水站

隨著海平面的上升，抽水站收集、輸送與排放雨水到水域的能力降低。應將排水口之預計水位位置提高，以因應漲潮或風暴潮，也建議於排水管安裝止回閥（check valves）防止倒流，並使用抽水輸送。

廊道（corridor）的長期防洪策略需要考慮氣候預測數據，及對暴雨抽水站進行詳細評估，瞭解抽水站的現有條件、容量和整體功能，進而改善設備增加抽水能力、提供緊急電源、重設排水口以及在脆弱度高之地區增加新的暴雨抽水站。

升級暴雨抽水站有助於防止該地區在未來遭受洪水和相關破壞，並使這些地區更快地從洪水中恢復，但對這些設施的監測和控制需要額外投入資源。暴雨抽水可以保護社區和資產，讓洪水更快地從一個地區排出。對於 1A 號公路的北部和南部路段，皆是不錯的短期、中期和長期策略投資。

升級暴雨抽水站是一項高成本的中期計畫，實施時間為 5 至 10 年，成本取決於系統組件，因此金額差異極大。

(6) 防汛防洪保護措施-暴雨管制

暴雨管理的最佳實踐旨在改變道路和其他不透水面的暴雨逕流，並且最大限度的減少污染徑流向當地水道排放。污染物可以通過植物過濾、沉降、生物吸收、滲透到下層土壤及植物和其他水生生物的養分吸收來去除。

暴雨控制包括滯洪池及蓄水池、人工濕地、生物滯留（bioretention）、生物過濾器，如濕潮溝（wet swales）和砂濾器（sand filters）。滯留及蓄水池更適合 1A 號公路南段的低窪地區。暴雨控制的成本因類型與規模而相異，其中高速公路滯洪池系統的成本從 100,000 美元到 200,000 美元不等。

暴雨抽水站	污水抽水站
暴雨抽水站	人工濕地包含小型池塘
濕地是雨水滯留的永久池。雨水徑流通過植物和其他水生生物的沉降和養分吸收進行過濾和處理	滯洪池要在雨水徑流停止後的某個時間將雨水完全排出

資料來源：Metropolitan Planning Organization, Exploring Resilience in MPO-Funded Corridor and Intersection Studies, 2021.

圖 3.4.4 生物滯留之舉例

(7) 防汛防洪保護措施-改進資產

根據洪水風險概率與深度圖，1A 號公路存在洪水風險，因此抬高道路可以確保 1A 號公路在未來之通行。預計 1A 號公路的北段將在 2030 年頻繁發生洪水，並隨著時間的推移惡化，且該路段中，毗鄰道路的房產數量有限，能大幅減少抬高路面所造成的排水問題或由淹水導致的房屋損毀，因此此路段是適合使用抬高策略的關鍵路段。然而，毗鄰 1A 號公路的部分居民會受到此選項的影響。

此策略將造成附近居民房產變為較低窪之區域，因而受到路面抬高所導致的水流影響，且車道處於較陡峭之斜坡上可能導致車輛無法駛入。

為防止高架道路使雨水排放到較低窪的住宅房產，市政當局經常使用暴雨抽水、暴雨清理排水管去除多餘的雨水，並使用暴雨管理裝置來儲存、處理和排放雨水。

將道路、橋梁、結構和公共設施抬高到預測的洪水高度以上不僅具有經濟效益，同時也可避免因 1A 號公路中斷或坍塌，造成道路壅塞及通勤時間延長所帶來的社會和心理影響，並可透過結合以自然為本的解決方案來輔助抬高路面計畫，以減少施工對於鄰近鹽鹼灘（saltwater marsh）、沼地（tidal flat）和魚類和鳥類保護區的生態影響。道路改造通常為高成本和長期的計畫，實施時間通常為 10 年或更長時間。

邁阿密海灘將道路抬高 2 英尺之施工圖

工人們在佛羅里達州邁阿密海灘將一條街道抬高了 2 到 3 英尺，以防止海平面上升對道路的迫害，每個街區的成本約為 200 萬美元

資料來源：Metropolitan Planning Organization, Exploring Resilience in MPO-Funded Corridor and Intersection Studies, 2021.

圖 3.4.5 因海平面上升而抬高道路的例子

表 3.4-1 MPO 大都會區規劃組織研究之調適策略說明表

編號	策略	策略說明	適用地點	策略影響	策略成本
1	無作為並撤出管理	關注不採取作為導致的廣泛後果，藉以引起人們的注意進而引發利益相關者討論	僅適用 1A 號公路南段（暫無迫切洪水問題地區）	對弱勢群體造成不利的社會影響	對國家造成重大經濟損失
2	以自然為本的解決方案（NbS）	以自然為基礎，和環境融為一體，並可低成本有效解決沿海公路韌性不足之方法	鹹水與周圍沼澤的潮汐交換不良導致蘆葦過度生長，超出鹹水沼澤地區，造成洪水儲量減少之地區	-	成本因暴露度於波浪能的程度有所不同
3	索格斯河閘門工程	採取區域取向研究來應對氣候變遷和海平面上升，包括增強和重建自然潮位、河口上游以及濕地	此策略是索格斯河地區防洪閘計畫之焦點，為五個社區提供海岸保護	閘門和海岸線的改善可以保護住房、企業、交通基礎設施和環境資源	總成本為 2.31 億美元
4	防汛防洪保護措施 -調整涵洞	對涵洞和防潮水閘的水力和水文進行排水評估，以幫助潮間帶沼澤間水流之交換，並保護 1A 號公路免受洪水和沖刷的影響	-	建設過大的涵洞會使過量水流通過上游，導致涵洞下游發生洪水氾濫	主幹道上的涵洞花費介於 50,000 美元至 100,000 美元之間，且實施時間通常需要 2 至 5 年
5	防汛防洪保護措施 -升級暴雨抽水站	將排水口之預計水位位置提高，於排水管安裝止回閥，並使用抽水輸送排水	對於 1A 號公路的北部和南部路段，皆是不錯的短期、中期和長期策略投資	可以保護社區和資產，讓洪水更快地從一個地區排出	高成本的中期計畫，實施時間為 5 至 10 年

表 3.4-1 MPO 大都會區規劃組織研究之調適策略說明表（續）

編號	策略	策略說明	適用地點	策略影響	策略成本
6	防汛防洪保護措施 -暴雨管制	透過滯洪池、溼地、砂濾器等暴雨儲存地，減緩暴雨對於路面之破壞	適合 1A 號公路南段的低窪地區	-	因類型與規模而相異，其中高速公路滯洪池系統的成本從 100,000 美元至 200,000 美元不等
7	防汛防洪保護措施 -改進資產	抬高路面以防道路積水	1A 號公路的北段（在 2030 年頻繁發生洪水）	附近居民房產變為較低窪之區域，容易受到從道路溢出之水流影響。車道較陡峭可能導致車輛無法駛入	高成本且長期之計畫，實施時間通常為 10 年或更長時間

資料來源：Metropolitan Planning Organization, Exploring Resilience in MPO-Funded Corridor and Intersection Studies, 2021.

3.5 國內可借鏡處

1. 國外公路系統規劃階段之調適指引

本計畫回顧國外公路系統規劃階段調適指引，綜整公路規劃階段應考量之面向，歸納發現各國的調適框架流程相似，均包含考量現況與未來的氣候資料、進行風險評估或脆弱度分析、依據風險評估的結果研擬調適選項等，惟在流程中可取得資料的蒐集與考量的細緻度、考量的時間軸，以及利害關係人合作的程度存在一定的差異性。

前期計畫已針對國內外文獻回顧進行比較，相對於國外公路規劃階段調適作為，國內公路主管機關尚未建立系統性氣候變遷調適機制與方法，較無法從整體面看到即將面對的挑戰，因此建議針對國內現有公路風險評估方法，引入氣候變遷調適應考量面向，或是將既有方法置於氣候變遷調適框架之內，量身訂做適合國內公路系統強化調適能力之機制與方法。

2. 國外公路系統規劃階段之調適選項

本計畫回顧適用於公路系統規劃階段之調適選項發現，國外調適研究及實務案例報告所採用的調適選項頗為多元，常見的調適選項類型包含管理及維護、增加備援、保護、調整、搬遷及以自然為本的解決方案等，而多樣化的調適選項類型及多元化組合方式極為適合國內因應現況所面臨的複合性氣候風險。

3. 國外公路系統規劃階段之調適實務案例

國外公路調適實務案例摘錄美國麻薩諸塞州波士頓都會規劃組織以專案探討里維爾市 1A 號公路如何強化韌性為例，該路段已被指認為重要且具高度氣候風險之路廊。該案例針對 1A 號公路研擬之調適選項頗為多元，共提出 7 種調適選項，包含無作為並撤出管理、以自然為本的解決方案、索格斯河閘門工程及防汛防洪保護措施等，並說明重點內容、適用地點、影響及成本等，提供一個完整的公路調適選項研擬過程供參考。

此外，該路段因應氣候變遷所盤點出的風險缺口，以「軟性」、「硬性」或綜合方法等規劃如何改善，並配合國際調適發展趨勢積極融入「氣候韌性」、「永續環境」之意涵，運用「以自然為本的解決方案」做為調適選項之一，可做為國內強化公路系統調適能力方法之參考。

第四章 公路規劃強化調適能力作為建議

為探討公路系統規劃階段強化調適能力應有的作為，前期計畫已初步研議將氣候變遷風險考量納入既有公路規劃流程的做法，嘗試於規劃階段強化公路系統全生命週期的調適能力。本年度計畫賡續彙整最新文獻，並透過專家訪談滾動檢討及補充相關內容，期進一步完善編擬指引之基礎。

本章內容計分為5節，各節主題依序為4.1節為前期相關研究重點摘述；4.2節說明前期成果滾動檢討之作業過程；4.3節說明公路系統規劃階段強化調適能力之機制；4.4 節說明公路系統規劃階段強化調適能力之方法；最後於4.5節綜整小結。

4.1 前期相關研究成果摘述

前期研究已經初步研擬公路系統規劃階段強化調適能力之機制與方法，並就公路系統規劃階段影響韌性強度之因素及調適方法加以探討；此外，並針對強降雨加劇對公路系統交界處衝擊與溝通協調機制提出建議。由於本年度計畫係延續性前期主題賡續研究，爰於本節先概述前期研究之相關重點，以利報告參閱。前期相關研究成果摘述如下：

1. 公路系統規劃階段強化調適能力之機制與方法

欲提升公路系統於氣候變遷環境下的調適能力，於規劃階段（含新建及改建）即需以全生命週期的觀點探討系統在規劃、設計、施工及後續的養護管理各階段的作業需要，預為考量以提高系統之氣候韌性。目前我國公路系統規劃階段流程雖尚稱完善，惟未能系統化地考量氣候變遷對系統及周邊區域的影響。前期計畫參考國外公路系統氣候變遷調適手冊與指引，初步研提將氣候變遷的因素融入既有規劃流程的構想如圖4.1.1，說明如下：

(1) 第一階段：資料蒐集

建議於此階段納入未來氣候變遷情境與氣候資料蒐集與分析之工作，規劃團隊可就建設計畫所在區域未來可能遭遇之氣候變遷影響進行資料蒐集。依據各專案不同的環境區位特徵，指認在各種氣候壓力因素下應納入考量的氣候參數，如降雨（強度、頻率）、溫度（均溫、最高溫、最低

溫）、風（平均風速、最大陣風、風向）、海平面（潮位、暴潮/風浪）、河水（水位、流量、沖刷量）等。

(2) 第二階段：方案研擬與評估

氣候變遷導致眾多氣候參數呈現年均值減少、增加或極端值推升的趨勢，故掌握影響公路服務年限的預估氣候數據為關鍵。此階段旨在辨識影響公路系統調適能力的氣候風險因素，俾利指認氣候變遷對本系統之關鍵影響與評估方案。

(3) 第三階段：工程研究與評估

於此階段納入氣候變遷風險評估作業，先就建設計畫設施之壽年與可取得之氣候數據資料設定評估期程（依據 ISO 14091 之建議，至少採取 30 年，如係壽年較長的設施，如橋梁，或評估變化較長期的氣候變遷因素，如海平面上升，則建議採取 100 年）。

風險評估作業由各工程面向考量與評估，並就辨識的各項風險建立風險基準（風險基準係指可承受的風險總量）。無超過風險基準需進入氣候變遷風險管理計畫之研議，以妥善因應風險；如有超過風險基準的風險項目，再就機關資源與預算決定維持原方案或研擬調適措施，如維持原方案，則進入氣候變遷風險管理計畫之研議，如研擬調適措施，則進行措施之研析及評估。

調適措施之類型包含：

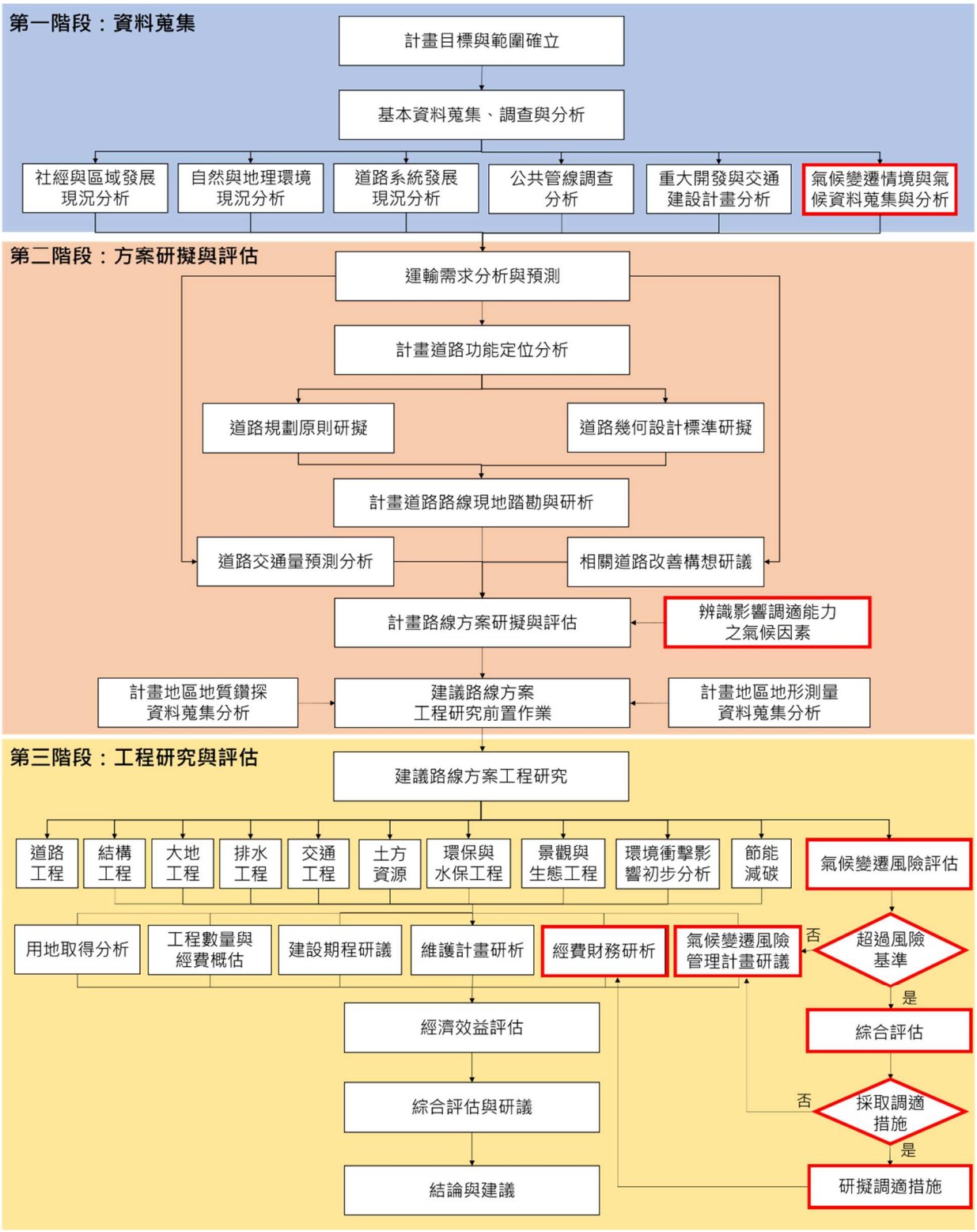
① 彈性設計：包含備援系統或預留可因應未來氣候變遷調整的空間，例如預留車道空間，做為未來排水之用。

② 穩健調適：可因應未來氣候變遷的強健設施方案。

③ 觀察法：持續觀察環境變化與設施狀況，依序導入調適作為。

④ 低或無悔調適：因應現況環境且可為未來氣候變遷建立基礎。

調適措施之研析，將由效益、財務及技術可行性等面向綜合評估，分析措施實行的優先次序。



資料來源：本所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討（1/2），110 年 12 月。

圖 4.1.1 公路系統規劃階段強化調適能力機制示意圖

2. 公路系統規劃階段影響韌性強度之因素及調適方法探討

(1) 研析方法

依據 IPCC 於 AR5 所揭示的「氣候變遷調適」，其操作的核心概念係為「在氣候變遷的情境之下對於『氣候衝擊風險』進行有效的管理」。AR5 進一步指出「氣候衝擊風險」取決於 3 種主要面向－暴露度、脆弱度及危害，3 種面相的交集決定了風險，風險的大小與內容係依據 3 者的互動關係來決定。

依據前述 IPCC AR5 的理論基礎以及 ISO 14091 的指引，並參考日本獨立行政法人國際協力機構（Japan International Cooperation Agency, JICA）於 2019 年訂定之《氣候風險評估及調適指南》，建構國內公路系統氣候衝擊鏈，藉以研析影響公路系統韌性強度之因素，並據以研擬對應的調適方法。分析項目包含：

① 氣候壓力因素：與氣候變遷有關的情況、事件或趨勢，可能對公路系統造成衝擊。影響臺灣公路系統之五大氣候壓力因素包含：強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪、海平面上升。

② 暴露因素：公路系統位於易受衝擊的地區（例如，淹水潛勢區、地質敏感區或坡災潛勢區等）。

③ 脆弱因素：公路系統本身容易受衝擊的特性，以及一旦失能可能影響的範圍及程度（例如，唯一維生聯外道路）。

為分析公路系統之氣候衝擊鏈，本計畫採用美國國家協作公路研究計畫（NCHRP）引用美國運輸學會（TRB）所建構的「公路系統」的概念框架為基礎，就路段、路廊及路網三種不同的公路系統尺度，探討公路系統在不同尺度下面臨的氣候衝擊與對應之調適選項。

三種不同的公路系統尺度及組成說明如下：

① 路段尺度：路段為最小單元的影響層級，主要由基礎、材料、結構、排水系統與橫斷面等單元組成。

② 路廊尺度：以路廊尺度來看，強降雨造成的淹水可能從路段擴及到路廊，影響周邊環境的水體與生態環境。

③ 路網尺度：路網尺度涉及整體公路系統的管理，主要以面臨氣候變遷環境下，公路彼此之間的連結性、跨系統場站的連結性、氣候影響的持續性及路網彼此之間的替代性為考量重點。

(2) 研析成果

前期計畫利用公路系統氣候衝擊鏈分析方法，針對不同的氣候壓力，考量不同環境區位條件，就路段、路廊、路網 3 種公路系統尺度觀點分析其氣候衝擊，並初擬氣候衝擊鏈分析方法，以下就山區公路系統及平原公路系統加以說明：

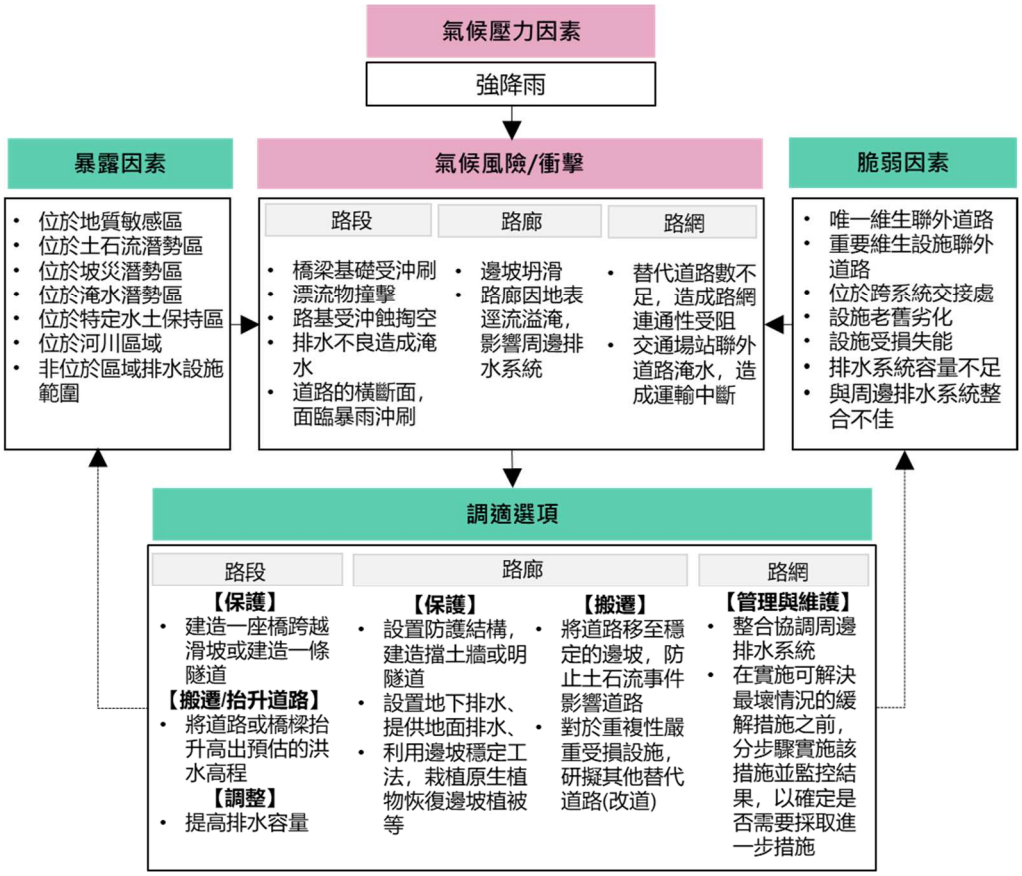
① 山區公路系統之氣候衝擊鏈分析

如圖 4.1.2~圖 4.1.4 山區公路系統氣候衝擊鏈分析圖可知，相較於其他氣候壓力因素，山區公路所面臨的強降雨加劇可能造成之氣候衝擊影響層面較多且可因應的調適選項也較為多元，加上國內山區公路的暴露因素與脆弱因素，亦可能加劇強降雨衝擊對於山區公路的影響程度。

此外，前期計畫透過訪談、工作坊及座談會等方式，與專家學者、公路設施機關與跨系統交界處主管機關進行氣候衝擊分析之綜合討論。公路專家和公路設施主管機關皆指出相較於其他氣候壓力因素，強降雨加劇對於山區公路的衝擊影響最為劇烈，也是國內公路系統目前應優先處理且急迫性高之極端氣候課題。

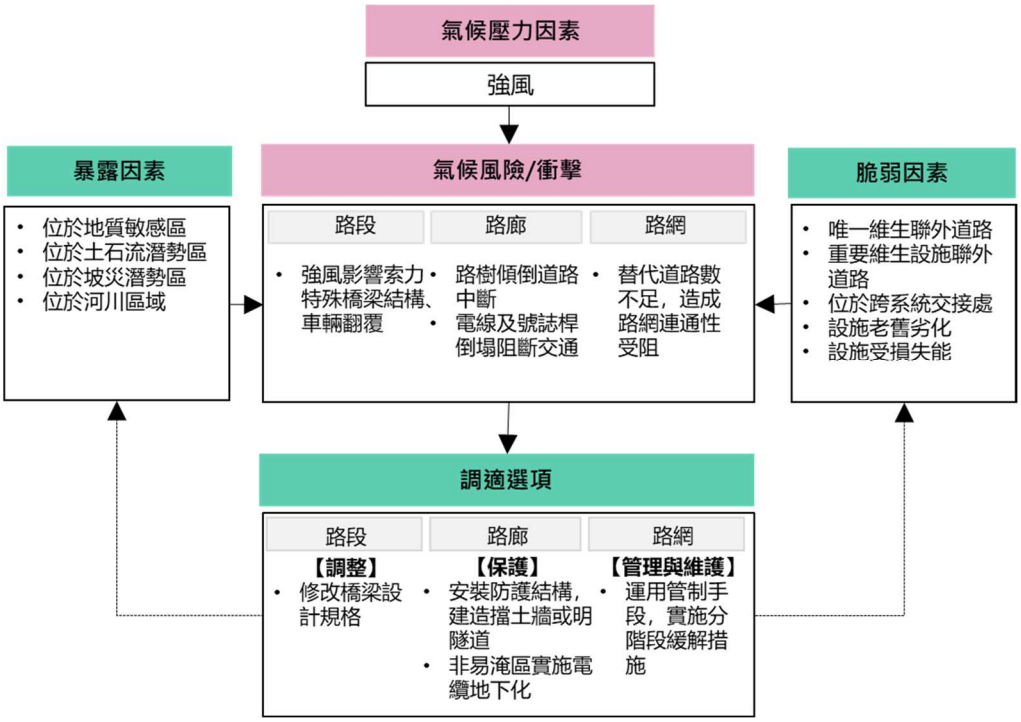
② 平原公路系統之氣候衝擊鏈分析

如圖 4.1.5~圖 4.1.8 平原公路系統氣候衝擊鏈分析可知，平原公路所面臨的強降雨、暴潮/風浪及海平面上升加劇相較於其他氣候壓力因素（如高溫、強風），可能造成之氣候衝擊與調適選項面向皆更為多元。加上國內平原公路多位於沿海地區、都會區或服務居住口密集區及重要產業園區等，一旦面臨強降雨、暴潮/風浪與海平面上升加劇衝擊，其影響程度更大、範圍更廣。



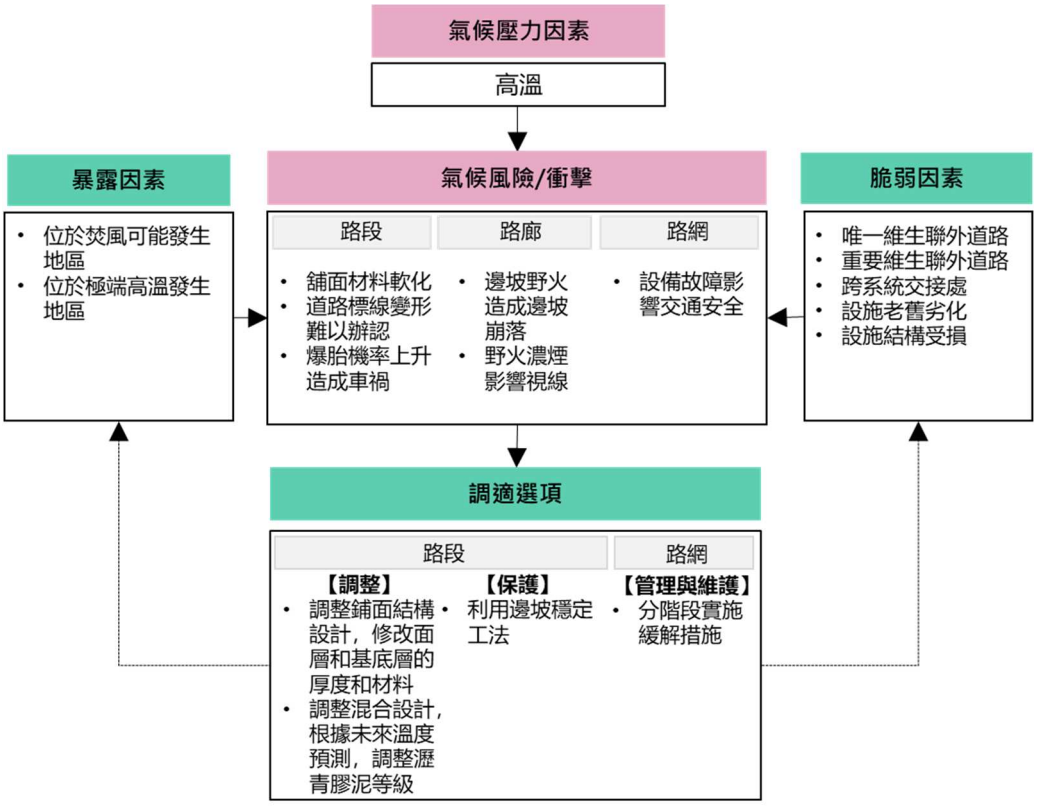
資料來源：本所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討（1/2），110 年 12 月。

圖 4.1.2 公路系統規劃階段氣候衝擊鏈分析圖-山區公路（強降雨）



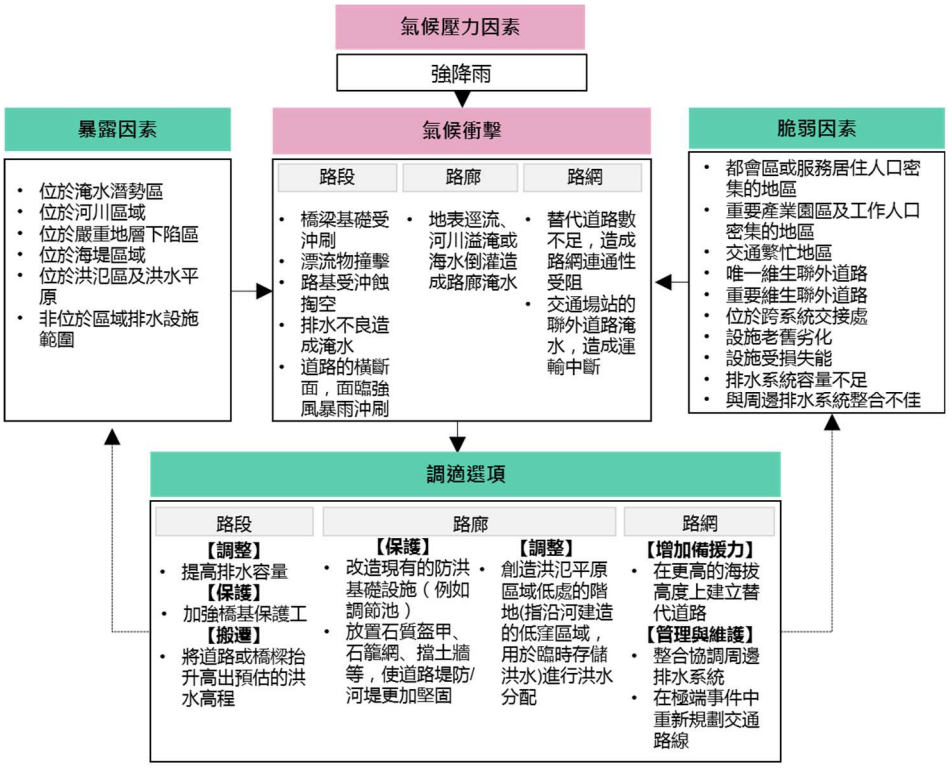
資料來源：本所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討（1/2），111 年 3 月。

圖 4.1.3 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-山區公路（強風）



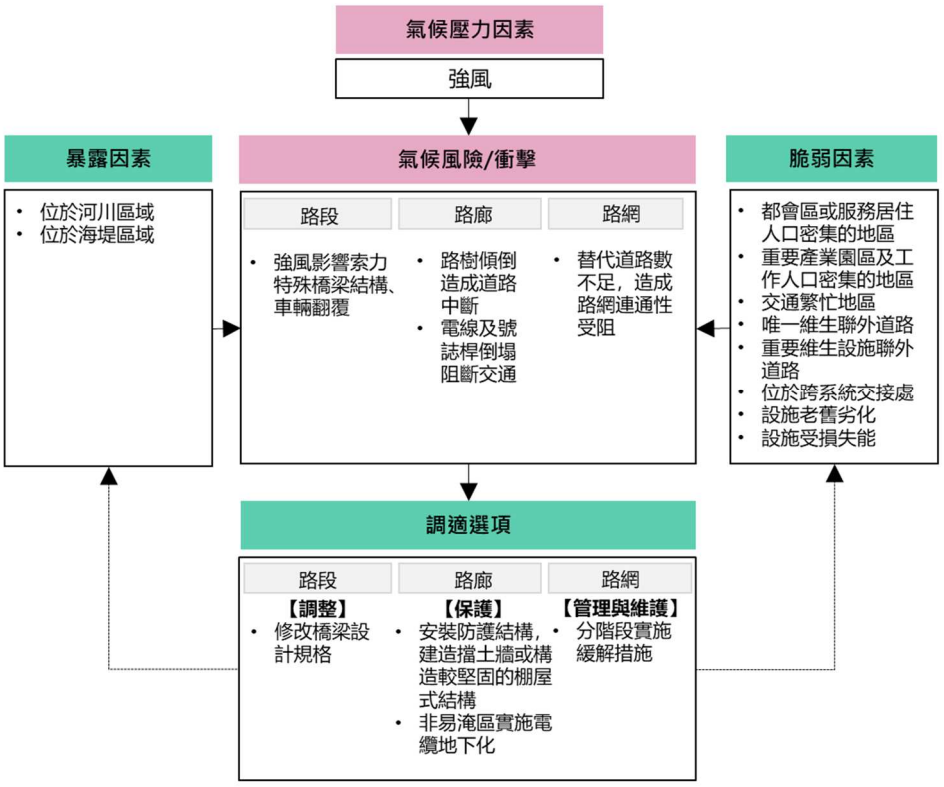
資料來源：本所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討（1/2），111 年 3 月。

圖 4.1.4 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-山區公路（高溫）



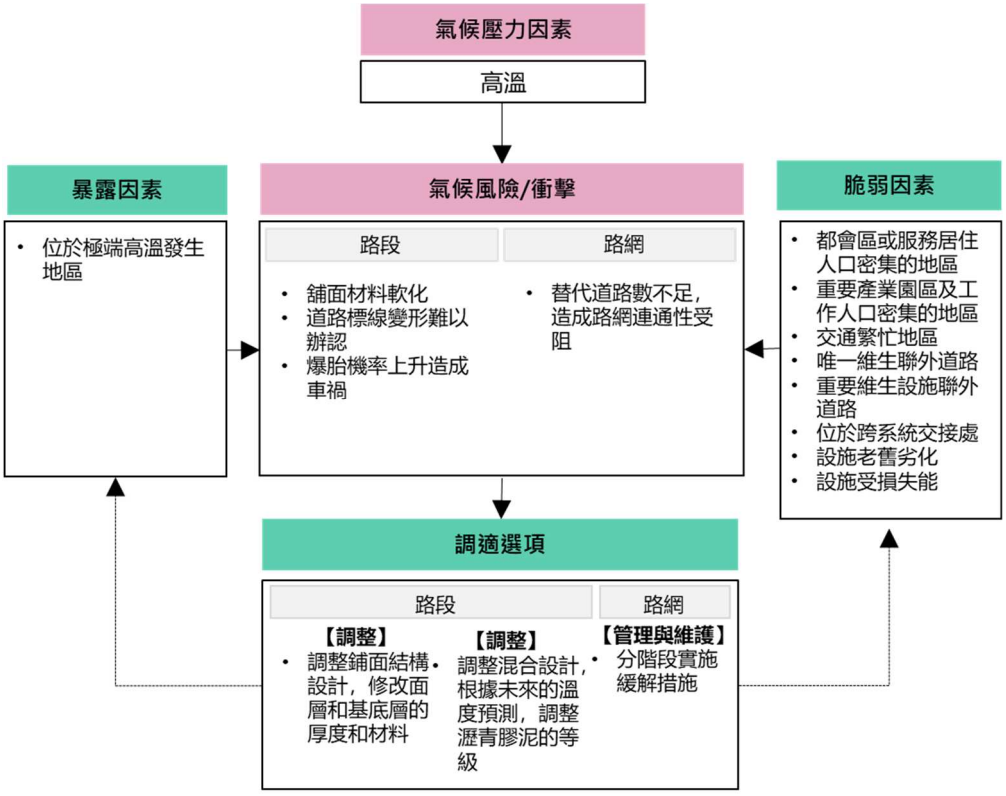
資料來源：本所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討（1/2），111 年 3 月。

圖 4.1.5 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-平原公路（強降雨）



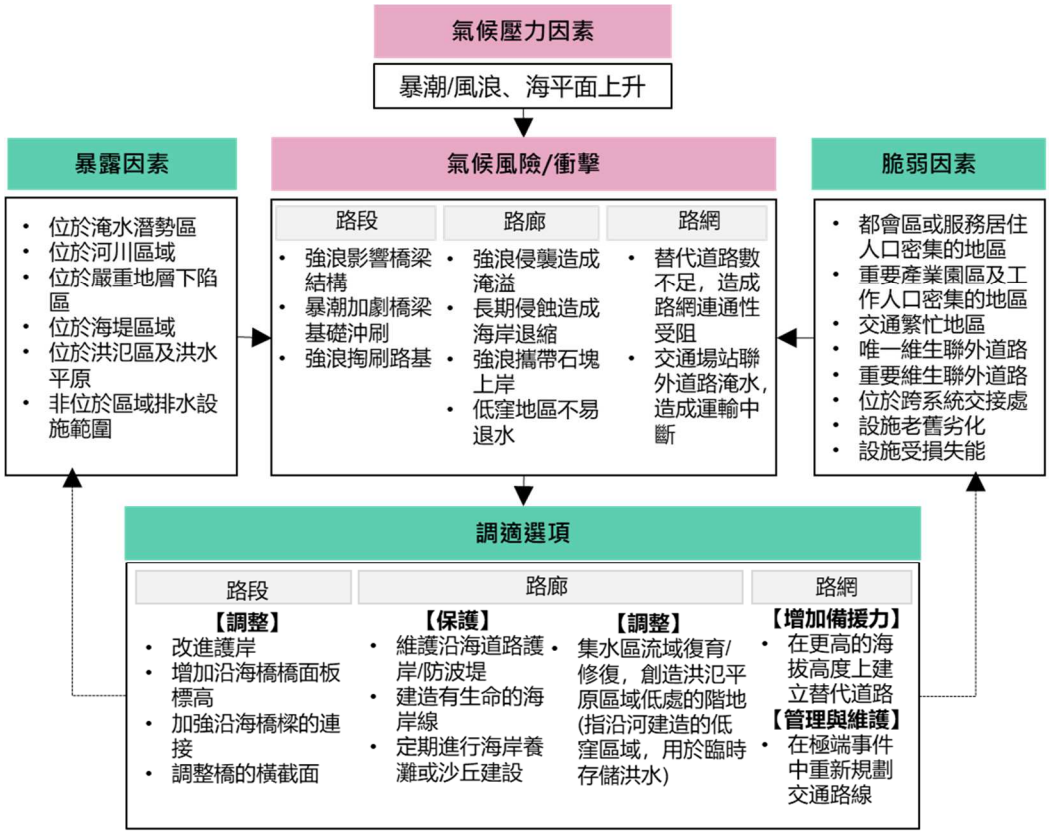
資料來源：本所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討（1/2），111 年 3 月。

圖 4.1.6 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-平原公路（強風）



資料來源：本所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討（1/2），111 年 3 月。

圖 4.1.7 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-平原公路（高溫）



資料來源：本所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討（1/2），111 年 3 月。

圖 4.1.8 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-平原公路
（暴潮/風浪、海平面上升）

3. 強降雨加劇對公路系統交界處衝擊與溝通協調機制

面臨極端天氣事件時，運輸系統間可能相互影響，導致系統無法正常營運。為解決跨公路運輸系統介面之調適課題，前期計畫首先盤點公路系統交界處之高淹水風險路段、分析淹水類型與成因，做為公路系統強化調適能力方向的基礎參考資料。

此外，考量水利署為因應氣候變遷造成的極端降雨事件，業於民國 107 年於《水利法》增訂逕流分擔與出流管制專章，規定應由土地開發義務人於基地內設置出流管制設施自行吸收因開發所增加之洪水量。因此，建議公路管理機關可善用此機制，於規劃階段提送出流管制規劃書至水利署，透過實質審查會議與水利署進行跨部會之溝通及協調。

(1) 公路系統交界處高淹水風險點位分析

透過本所建置之重大鐵公路風險地圖，盤點國道及快速公路交流道與公路系統交界處之高淹水風險衝擊路段，做為公路系統強化調適能力方向的基礎參考資料。

篩選標準以國道及快速公路交流道 500 公尺服務半徑為環域範圍，指認與公路系統交界處存在中高淹水風險衝擊之路段。分析結果指出，就國道與公路系統交界處而言，此類型路段多分布於國道 1 號及國道 3 號之交流道與省道台 1 線交界處；就快速公路與公路系統交界處而論，此類型路段多位於台 15 線、台 17 線與台 61 線，分布縣市以新北市、苗栗縣及彰化縣為主。

(2) 公路系統交界處淹水類型與成因

因強降雨造成的淹水可分為兩種類型：

① 內水淹水

強降雨發生時，因地勢平坦、排水系統不良，或降雨量超出排水系統設計標準，造成局部之積淹水，待降雨結束後淹水便逐漸消退，其淹水區域與降雨區域之重合度較高。

權責機關包含：高公局、公路局、國土管理署、地方政府。

② 外水淹水

河川上游集水區發生豪雨/暴雨時，當洪峰流量超出堤防設計標準，河川水位暴漲而溢堤或潰堤，以致洪水進入堤防保護區內。此類淹水經常發生於河川下游地勢較平坦之地區。此類型之淹水區域與最大降雨區域未必相同。

權責機關包含：高公局、公路局、水利署、地方政府。

(3) 公路系統交界處強降雨衝擊之溝通及協調機制

由於公路系統間交界處多涉及跨部會協調溝通，水利署為因應氣候變遷造成的極端降雨事件，民國 107 年 6 月 20 日於《水利法》增訂逕流分擔與出流管制專章，目的是規劃土地共同分擔降雨逕流，未來可有效提升土地耐淹能力。表 4.1-1 說明不同淹水類型可於規劃階段應用之溝通及協調機制。

表 4.1-1 公路系統間交界處強降雨衝擊之溝通及協調機制

交界處淹水類型	公路系統規劃階段之溝通及協調機制	權責機關
內水淹水	■ 出流管制計畫 （開發規模超過 2 公頃，共 21 種土地開發樣態，其中包含公路、鐵路及大眾捷運運輸系統之開發）	■ 公路局 ■ 高公局 ■ 水利署
外水淹水	■ 逕流分擔計畫 （目前尚未公告河川特定流域排水集水區域為逕流分擔實施範圍）	■ 水利署 ■ 地方政府

資料來源：本所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討（1/2），111 年 3 月。

4.2 滾動檢討作業說明

本計畫前期已初步研擬公路系統規劃階段流程納入氣候變遷思維的作法，並收斂主要影響國內公路系統的五大氣候壓力因素。本計畫以前期成果為基礎，經由文獻回顧及專家學者訪談，滾動檢討公路規劃階段強化調適能力之作為，以利研擬調適指引，作業程序參見圖 4.2.1，表 4.2-1 則綜理滾動檢討之重點。說明如下：

1. 再確立調適「作為」之研究範疇

由於氣候變遷調適作為涉及甚廣，為利於聚焦指引內容，本計畫將調適「作為」界定為調適「機制」及「方法」，說明如下：

(1) 機制

機制係指公路系統規劃方式或流程。目前我國公路系統規劃階段可分為「可行性評估」、「綜合規劃」2 階段，本計畫於前期研究將整體規劃流程概分為「資料蒐集」、「方案研擬與評估」及「工程研究與評估」等 3 階段，為因應氣候變遷發展趨勢並改善風險缺口，於規劃階段即納入調適思維，可視為一種調適作為。

(2) 方法

方法係指「氣候變遷風險評估的方法」及「調適選項」。前者係協助公路系統於規劃階段指認出風險缺口所使用的方法，如：風險評估、氣候衝擊鏈分析法...等；後者係指改善現況缺口以提升氣候韌性的各種方法，其涵蓋面從上到下包括：策略、方法、解決方案及措施等。於公路系統路段、路廊、路網因應氣候變遷盤點出風險缺口之後，以「軟性」、「硬性」或綜合方法改善，並呼應《AR6：衝擊、調適與脆弱度》之倡議，融入「生態平衡」、「永續環境」之意涵。

2. 文獻回顧啟示

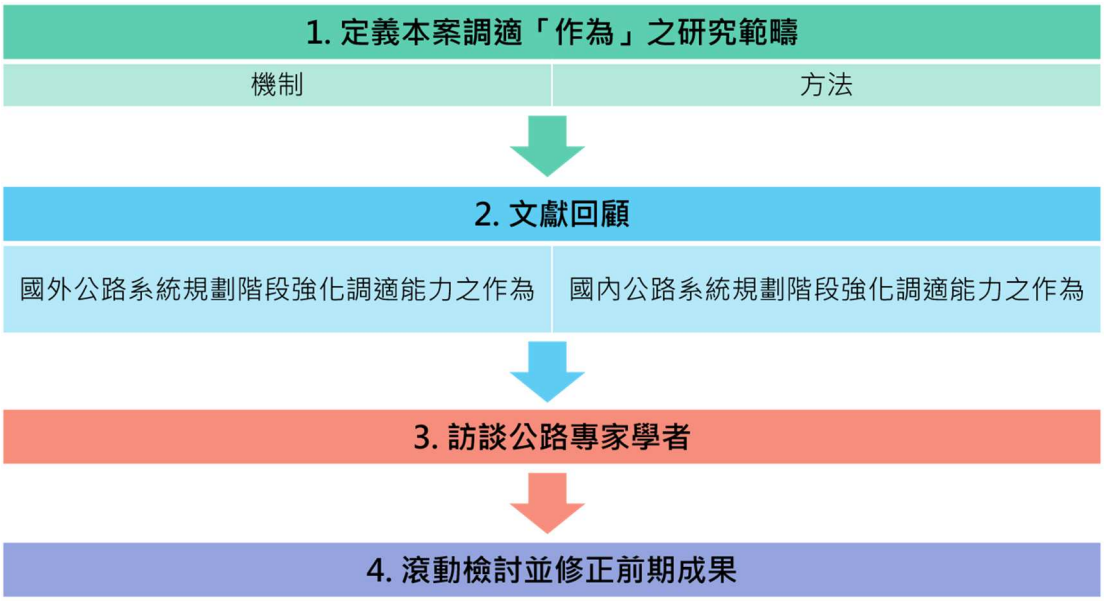
綜理前期計畫成果及委員建議，並依氣候變遷對運輸系統之衝擊、國際氣候變遷發展趨勢、國內外公路系統規劃階段強化調適能力之作為（機制、方法、規範）等類別進行文獻資料蒐集後，檢討修正前期計畫成果，檢討重點包含國際氣候變遷調適新趨勢、調適機制與流程優化、國外公路系統規劃階段的調適作為等。

3. 訪談公路專家學者意見

考量公路系統規劃階段調適涉及多項議題，為確保本計畫指引內容能切合機關及從業人員的需要，並編撰易讀、易懂、易遵循的指引架構及內容，本計畫以修正後的前期成果為基礎與公路規劃專家進行深度訪談，釐清國內公路系統規劃階段強化調適能力所面臨的問題以及解決方式。本計畫已於111年5月至8月間進行公路專家訪談，重點包含指引之定位、指引的使用者、調適機制與流程優化、國內公路系統規劃階段之調適作為等。

4. 滾動檢討並修正前期成果

綜理文獻回顧與公路專家學者之建議，滾動修正調適作為機制、調適方法及指引架構，並參酌專家學者所提之國內案例，適時補充於計畫成果，以利下階段研擬調適指引。



資料來源：本計畫繪製。

圖 4.2.1 滾動檢討調適作為作業流程

表 4.2-1 前期研究成果滾動檢討重點彙整表

構面		前期調適機制與方法重點	文獻回顧啟示	專家學者訪談意見重點
指引之定位及方向		• 指引為上位指導，做原則性論述。 • 指引使用者為公路權責機關與工程顧問公司。	• 指引架構需簡明易懂，包含前言介紹、氣候變遷對於公路系統的影響說明、指引採用的重要概念說明、整體架構簡介、個別步驟說明等。 • 適時引用實例補充說明，有助於讀者清楚理解所指涉內容之意旨。	• 對公路專家而言，研究範圍過於廣泛。配合本指引定位應以上位觀點作原則論述。 • 現階段由於調適知識尚待普及深化，建議先訂定上位指引原則推廣理念並發揮提醒之作用。 • 對工程顧問公司而言，理解目前先訂定上位指引原則，爾後期以顧問公司及部分公務單位一線人員之「實用性」繼續延伸。
調適作為	機制面	• 現行規劃階段分為資料蒐集、方案研擬與評估與工程研究與評估 3 階段。 • 將調適機制納入既有作業流程。	• 鼓勵利益相關者共同參與，如導入專家及相關機關(構)、地方團體及公民等於適合的階段參與討論。 • 針對各階段調適機制之工作項目內容加以說明，以利理解。 • 配合 ISO 14091 說明如何執行氣候風險評估之項目內容，調整第三階段納入之氣候風險評估細部流程。	• 認同所提出之機制整體流程架構具有操作可行性。 • 僅需微調第二階段之細部流程，於「計畫道路路線現地踏勘與研析」後新增「規劃原則與構想」。 • 建議補充第二階段之細部流程，於「建議路線方案工程研究前置作業」補充「水文」資料蒐集與分析。 • 操作流程應給予原則性指導，避免實務操作的僵化。
	方法面	• 辨識公路系統氣候變遷面臨的氣候壓力因素、暴露因素及脆弱因素。 • 建立及應用公路氣候衝擊鏈分析分法。	• IPCC AR6 綜整國際上應用於公路系統之調適選項，主要可分為四大類，包括硬保護、調整與升級、搬遷、以自然為本的調適措施。 • FHWA 綜整美國各州採用的公路調適選項可分為 5 類，包含管理和維護、增加備援力、保護、調整及搬遷。	• 我國公路規劃皆以議題式進行操作，嚴格來說國內案例仍有侷限性，尚無完整納入氣候變遷調適概念。僅提供台 20 南橫公路以及台 11 及台 21 線之國內氣候風險分析分法案例供參。 • 建議可補充國外氣候風險評估工具。 • 前期蒐整完整工程面的調適方法，建議「軟性」的調適手法亦可多加琢磨。
	其他	無。	• 蒐整國內公路規劃法令或相關技術手冊涉及強化調適之規範，但各項手冊並無明確就氣候變遷作為及規範提出指導原則。	• 建議未來國內公路規劃法令、技術手冊應配合調適新知、實務經驗與時俱進滾動修正。

資料來源：本計畫彙整。

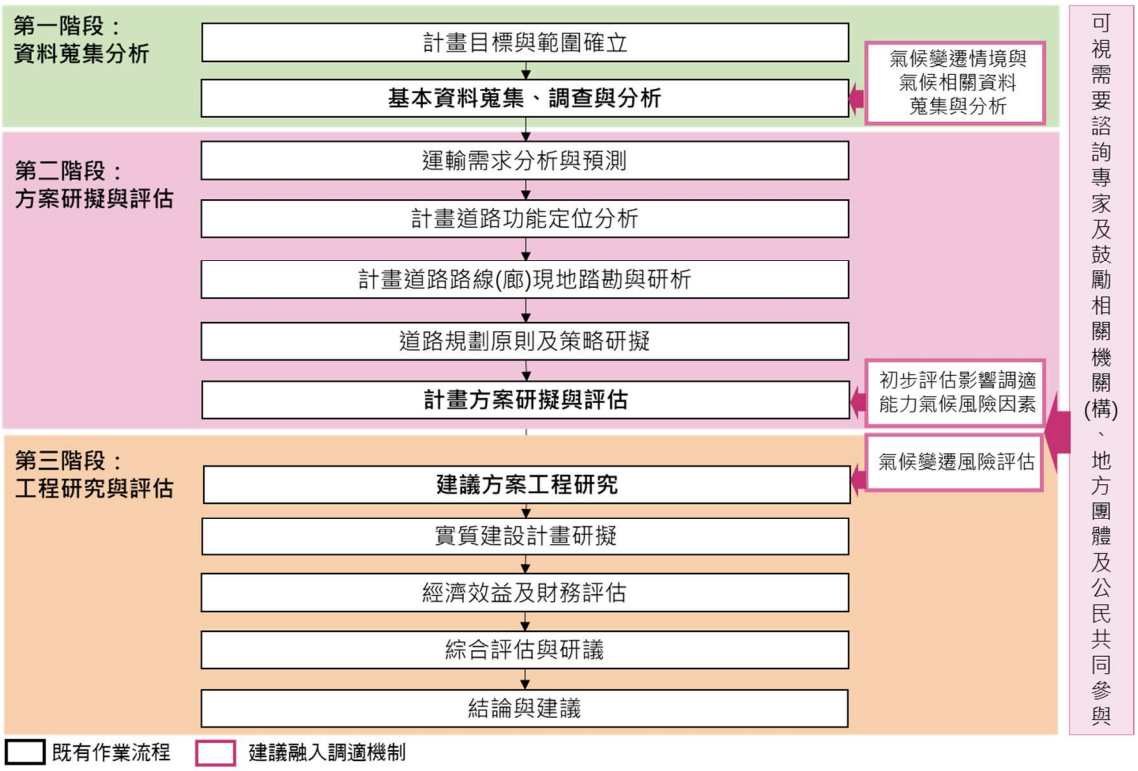
4.3 公路系統規劃階段強化調適能力之機制

我國公路系統規劃作業流程尚稱完善，惟尚未全面考量氣候變遷對公路設施及周邊地區的影響。本章參考國外公路系統氣候變遷調適指引與手冊，將氣候變遷調適考量融入公路系統之規劃流程，並說明其作業程序。

4.3.1 公路系統規劃流程融入調適概念之框架

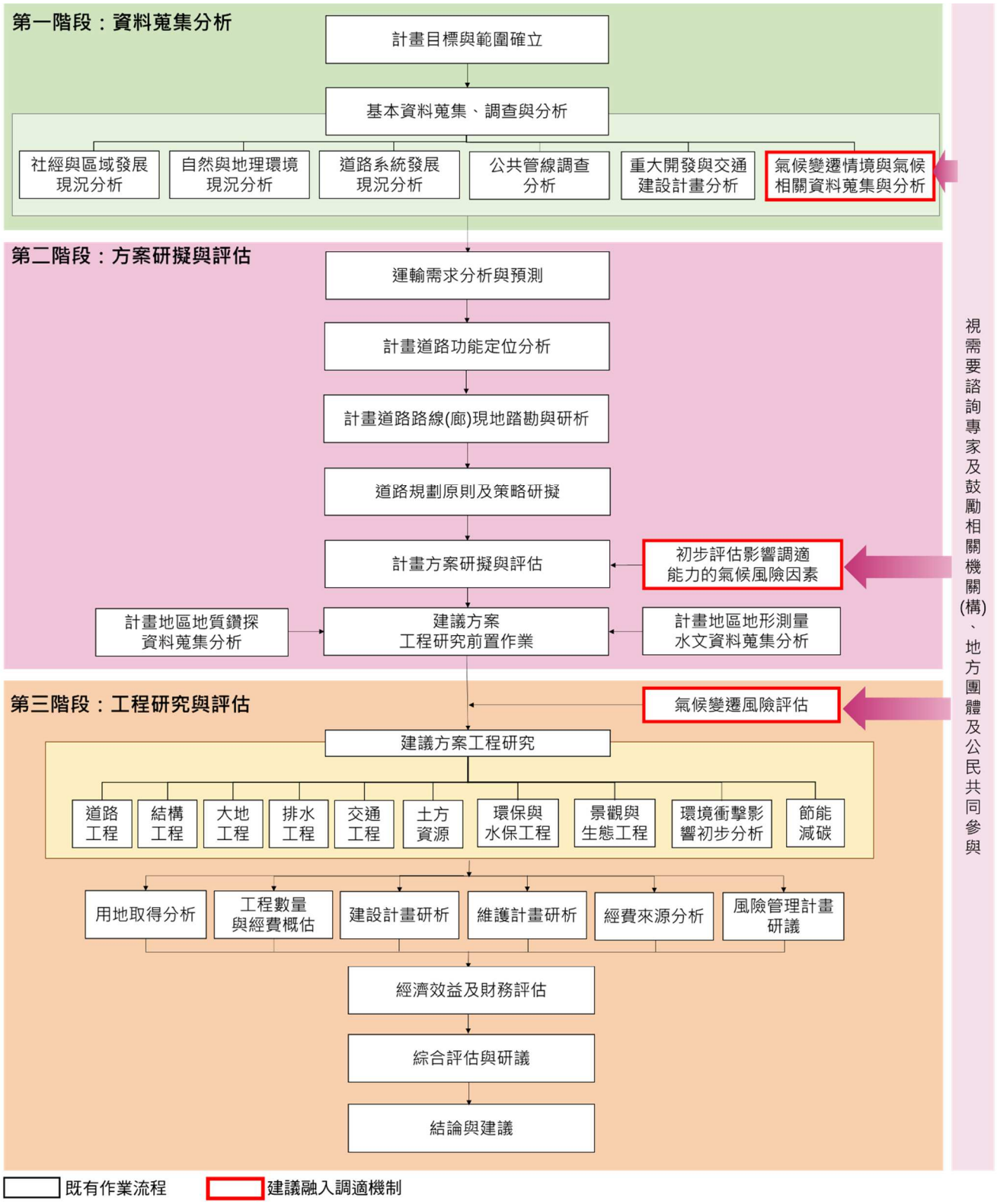
欲提升公路系統於氣候變遷環境下的調適能力，於規劃階段（含新建與改建）即應探討系統全生命週期於氣候變遷環境下的調適需要，以提升系統的氣候韌性。目前公路系統規劃階段的流程尚稱完善，惟未全面考量氣候變遷對設施與設施周邊區域的影響。本計畫參考國外公路系統氣候變遷調適指引與手冊，研提將氣候變遷的因素融入既有規劃流程的構想。

公路系統規劃作業流程可概分為資料蒐集分析、方案研擬與評估以及工程研究與評估 3 個作業階段。為了具體融入氣候變遷風險調適理念，建議於各作業階段皆增納氣候變遷調適相關作業程序（參見圖 4.3.1 及圖 4.3.2），說明如下：



資料來源：本計畫繪製。

圖 4.3.1 公路系統規劃作業流程融入調適理念之框架（I）



資料來源：本計畫繪製。

圖 4.3.2 公路系統規劃作業流程融入調適理念之框架（II）

4.3.2 第一階段：蒐集與分析氣候變遷相關資料

首先確立計畫範圍與目標，並據以蒐集所需之基本資料，含補充調查與分析。除了歷史與現況基本資料，包含地質、地形、氣候、水文等之外，為了強化公路系統因應氣候變遷的調適能力，應進一步針對計畫範圍未來氣候變遷推估的氣候資訊及因氣候變遷可能導致的環境變異進行探討研究。重點說明如下：

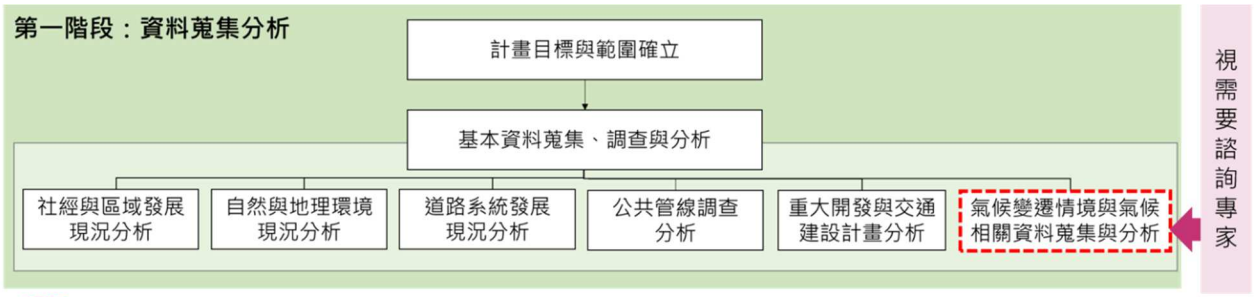
1. 增納「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」工作項目

本計畫建議於資料蒐集階段納入未來氣候變遷情境與氣候推估相關資料蒐集與分析之工作，規劃團隊可就建設計畫所在之區域未來較可能會受到的氣候變遷影響進行資料蒐集及分析（參見圖 4.3.3 及表 4.3-1）。

依據各專案不同的環境區位特徵，指認在各種氣候壓力因素下應納入考量的氣候參數，如降雨（強度、頻率）、溫度（均溫、最高溫、最低溫）、風（平均風速、最大陣風、風向）、海平面（潮位、暴潮/風浪）、河水（水位、流量、沖刷量）等。

視公路系統之區位特性，蒐集相關氣候變遷情境與氣候資料，如未來推估的平均氣溫、降水量及降雨日數、颱風、暴潮/風浪、強風等狀況，並蒐集研析可能衍生的環境變異情形，建議可參考經濟部水利署水利資料開放平台以及國科會（NSTC）與國家災害防救科技中心（NCDR）合作建立之臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）等網站取得最新之分析資料。

若專案有進一步研究分析需要，可與 NCDR 合作或視需要諮詢專家，為專案量身訂做氣候模擬預測及分析；除了公開資料之外，公路主管機關於計畫範圍內相關之歷史監測資料、養護紀錄、歷史災害紀錄等皆為氣候變遷調適規劃重要的基本資料來源。



資料來源：本計畫繪製。

圖 4.3.3 資料蒐集分析階段納入調適作業流程

表 4.3-1 氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析項目一覽表

工項	類別	細項	網站名稱	資訊內容	資料名稱	資料來源
氣候變遷情境與氣候相關資料（含環境變異）蒐集與分析	現況觀測資料	天氣及氣候觀測資料	交通部中央氣象署-觀測資料查詢	■ 提供國內各測站的歷史量測資料	測站氣壓、氣溫、相對溼度、風速、風向、降水量	https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp 最後檢視日期：2022.12.06
			交通部中央氣象署-颱風資料庫	■ 提供歷史颱風雨量及風量資訊查詢	■ 颱風雨量綜合資訊 ■ 各測站最大平均風與最大陣風長條圖	https://rdc28.cwb.gov.tw/ 最後檢視日期：2022.12.06
		水文資料	經濟部水利署水利規劃分署-區域排水整合型查詢系統	■ 提供區域排水相關圖資查詢	■ 區域排水範圍 ■ 區域排水範圍 ■ 嚴重地層下陷地區 ■ 洪水平原及洪氾區 ■ 一級海岸災害防治區	https://rdi-123.wrap.gov.tw/integration_wrpi_drainage/ 最後檢視日期：2022.12.06
			經濟部水利署防災資訊服務網	■ 提供水文觀測及防災預警資訊	■ 淹水警戒 ■ 河川水位警戒 ■ 水庫放流警戒	https://fhy2.wra.gov.tw 最後檢視日期：2022.12.06
			臺灣水災潛勢風險圖資應用服務平台	■ 提供淹水潛勢圖及淹水風險地圖	■ 第三代淹水潛勢圖	http://103.253.146.123/wra/riskmap-dev/ 最後檢視日期：2022.11.04

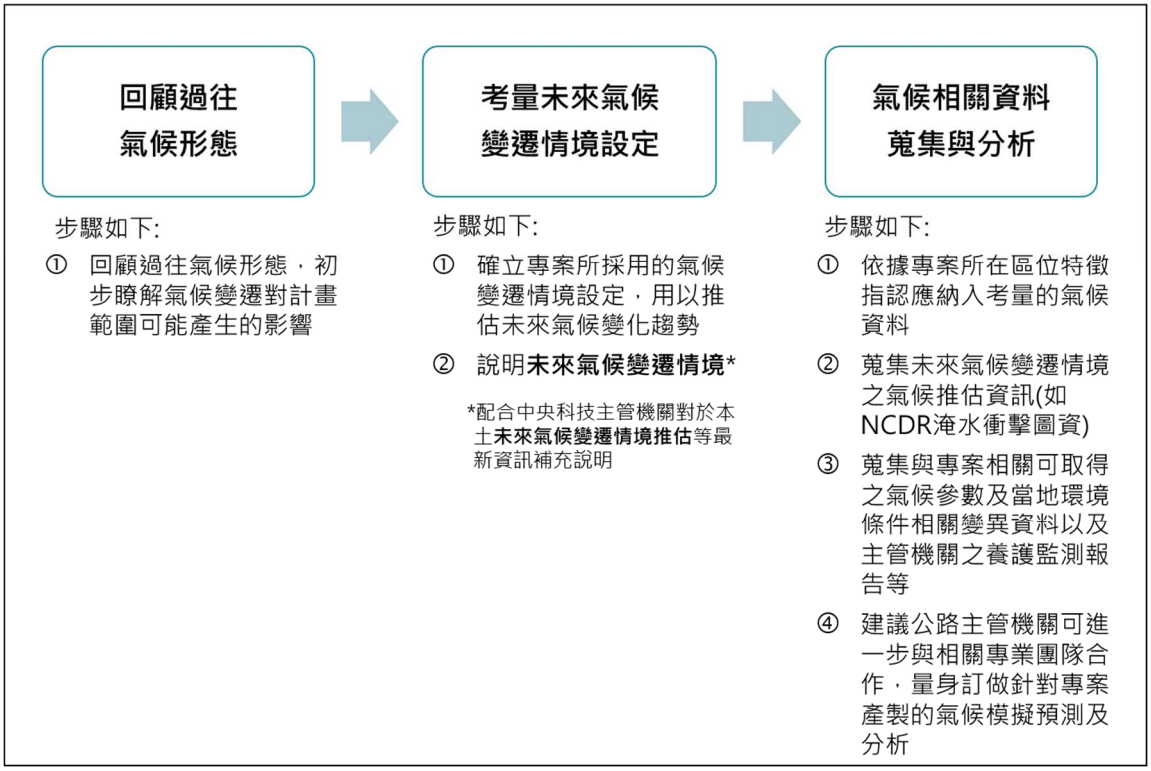
表 4.3-1 氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析項目一覽表（續）

工項	類別	細項	網站名稱	資訊內容	資料名稱	資料來源
氣候變遷情境與氣候相關資料（含環境變異）蒐集與分析	現況觀測資料	地質及地形資料	農業部農業發展及水土保持署土石流防災資訊網	■ 提供土石流潛勢溪流分布與即時警戒資訊	■ 特定水土保持區 ■ 土石流潛勢溪流分布 ■ 大規模崩塌潛勢地區	https://246.swcb.gov.tw/ 最後檢視日期：2022.12.06
			經濟部地質調查及礦業管理中心地質資料整合資訊	■ 提供山崩與地滑地質敏感區、順向波等地質資訊	■ 地質圖資 ■ 環境地質資料	https://gis3.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/t3/index1.cfm 最後檢視日期：2022.12.06
			國家災害防救科技中心災害潛勢地圖網站	■ 提供國內包含土石流、山崩、淹水等坡地災害潛勢地圖	■ 土石流潛勢溪流分布 ■ 大規模崩塌災害潛勢地區 ■ 順向坡、落石、岩屑崩滑、岩體滑動等危險區 ■ 火山潛勢圖	https://dmap.ncdr.nat.gov.tw/ 最後檢視日期：2022.12.06
	未來推估資訊	未來氣候變遷情境與推估	TCCIP 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台	■ 提供未來氣候變遷情境下可能的強風、強降雨、高溫、暴潮/風浪等資料 ■ 提供台灣未來氣候變遷的模擬分析 ■ 提供未來氣候變遷情境下的坡地崩塌率	■ 淹水危害圖資、衝擊圖資 ■ 坡地危害圖資、衝擊圖資 ■ 海岸危害圖資、衝擊圖資	https://tccip.ncdr.nat.gov.tw 最後檢視日期：2022.12.06
		未來水文變化	經濟部水利署淹水潛勢及水災風險圖資	■ 提供未來氣候變遷情境下對於水文可能的變化，如水位、流量等	■ 淹水潛勢圖及水災風險地圖	https://fhy.wra.gov.tw/fhyv2/disaster/downloads 最後檢視日期：2022.12.06

資料來源：本計畫彙整。

2. 作業程序說明

公路規劃專案中有關「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」工作項目之作業大致可分為 3 步驟（參見圖 4.3.4），說明如下：



資料來源：本計畫繪製。

圖 4.3.4 氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析作業程序說明

(1) 步驟 1：回顧過往氣候形態

回顧過往氣候形態，初步瞭解氣候變遷對計畫範圍可能產生的影響，需特別注意環境敏感地區，如河川、湖與海等水體，以及容易淹水的低窪地區與可能有崩塌危險的山坡地等，取得與氣候風險相關的氣候參數、參考年期與時間，蒐集可取得之氣候相關資料並確認資料品質與可應用性。

(2) 步驟 2：考量未來氣候變遷情境設定

確立專案所採用的氣候變遷情境設定，說明未來氣候變遷情境。根據環境部之國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年）(核定本)，綜整 IPCC 氣候變遷第六次評估報告（AR6）各情境推估與科學模擬依據，並考量調適工作推動經驗檢討與操作之可行性，優先採「固定暖化情境」做為「國家調適應用情境」,「固定暖化情境」將推估期間與排放情境綜合考量，兼顧施政期程規劃與目標設定，可做為各部門進

行風險評估與辨別調適缺口之共同參考情境。

國家調適應用情境原則，相關情境說明如圖 4.3.5 所示：

① 0℃：工業革命時期（1850-1900），為全球暖化的起始點，做為固定暖化情境的參考基準。

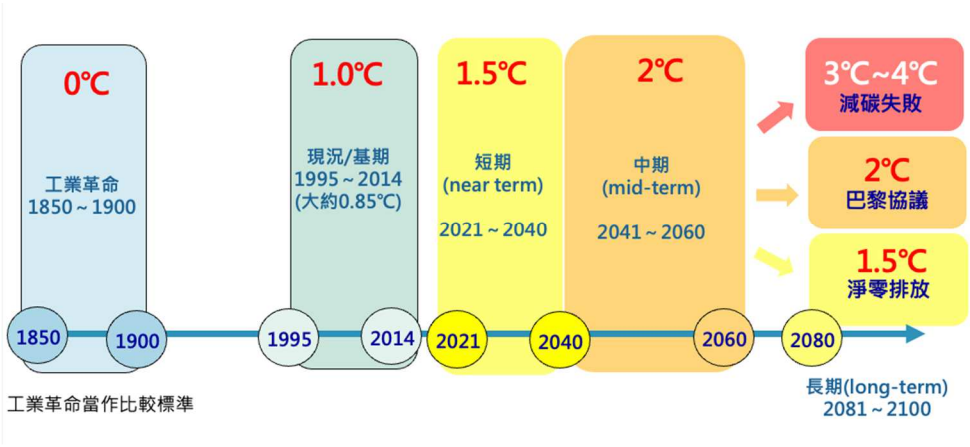
② 1℃：現階段氣候基期（1995-2014 年），可做為現有風險評估及其未來缺口的參考基準。

③ 1.5℃：近期（短期 2021-2040 年）的增溫情境。

④ 2℃：中期（中期 2041-2060 年）的增溫情境。

⑤ 3℃~4℃：考量 21 世紀末減碳失敗的增溫情境，將增溫 3℃~4℃（長期 2081-2100 年）之極端情境。

由於長期因受高度不確定性因素影響，建議可運用情境規劃等決策方法考量未來的多種可能。



資料來源：國家災害防救科技中心，國家氣候變遷調適行動計畫(112 年-116 年)推動方式研商會簡報-國際最新氣候調適資訊及氣候變遷情境設定之研析與建議，111 年。

圖 4.3.5 固定暖化情境之參考基準、基期與增溫情境與時程

(3) 步驟 3：氣候相關資料蒐集與分析

首先依據專案所在區位特徵指認應納入考量的氣候資料，蒐集未來氣候變遷情境之氣候推估資訊（參見表 4.3-1）。此外，建議蒐集與專案相關可取得之氣候參數及當地環境條件相關變異資料(如主管機關之養護監測報告)。若無適用之氣候資料，建議公路主管機關可進一步與相關專業團隊合作，針對專案產製所需的氣候模擬預測及分析資料。

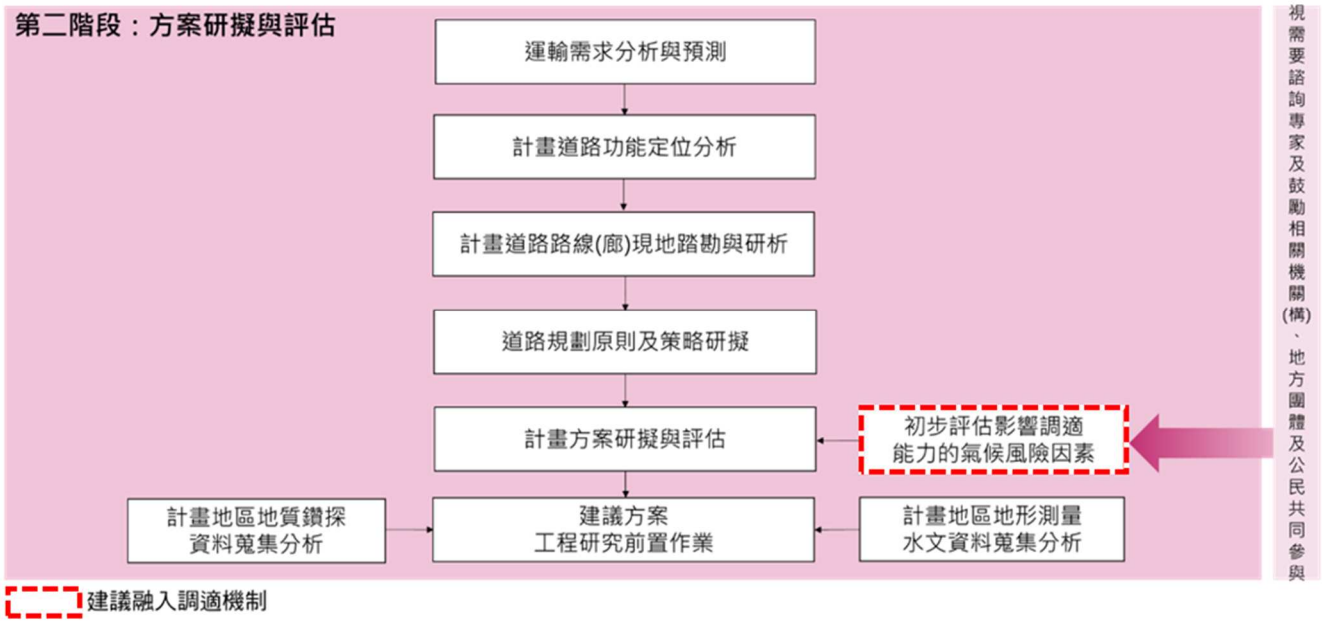
4.3.3 第二階段：初步評估影響調適能力之氣候風險因素

公路系統規劃的第二階段為方案研擬與評估，此階段工作包含進行運輸需求分析與預測，並對計畫道路功能定位進行分析、現地踏勘與研析、道路規劃原則及策略研擬，接著研擬與評估計畫方案並提出建議方案。建議於此階段開始評估影響各替選方案的氣候風險因素（參見圖 4.3.6），一方面做為方案研選之重要參考因素，同時也為執行專案氣候風險評估工作奠定基礎。重點說明如下：

1. 增納「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」工作項目

由於氣候變遷的影響，許多氣候參數都呈現年均值增加或減少，出現越來越高的極端值與季節性變異的趨勢，故初步評估在公路系統服務年限內可能影響氣候風險的關鍵因素為氣候變遷調適的重要工作。

前述關鍵因素可分為氣候壓力因素（例如，強降雨、強風、高溫等）、公路系統本身的脆弱因素（例如，材料缺乏耐候性、缺乏替代道路），以及公路系統暴露在氣候壓力因素的程度（例如，經過地層下陷地區增加強降雨導致的淹水）。由於此階段之資料以二手資料為主，可能尚缺乏精準性，建議儘量透過工作坊邀集有經驗的專業者及利害關係人共同研判評估，以初步掌握氣候變遷可能對專案的衝擊，並據以選擇避開高氣候風險的方案。



資料來源：本計畫繪製。

圖 4.3.6 方案研擬與評估階段納入調適作業流程

2. 作業程序說明

公路規劃專案中有關「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」工作項目之作業可分為 2 步驟（參見圖 4.3.7），說明如下：

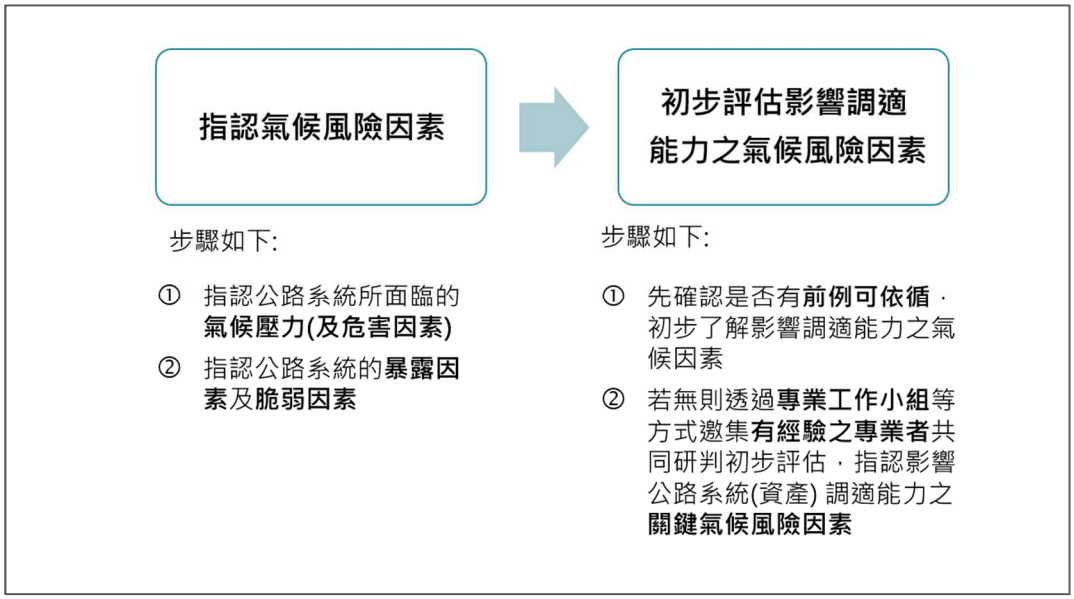


圖 4.3.7 初步評估影響調適能力的氣候風險因素作業程序說明

(1) 步驟 1：指認氣候風險因素

基於專案所掌握到的數據、專業知識及經驗，初步指認公路系統在面臨氣候變遷下未來可能面臨的氣候壓力及危害、暴露度與脆弱度等因素。

其中，影響臺灣公路系統之五大氣候壓力因素包含強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪及海平面上升等，這些氣候壓力因素如經研判可能對規劃中的公路系統造成危害，例如，強降雨造成土石流導致公路毀損或交通中斷，則屬於該專案在氣候變遷環境下的「氣候壓力因素」。

規劃階段所考量的公路系統的「暴露因素」著重於關注方案可能座落於對上述氣候壓力因素相對敏感的區位，例如，公路行經地質敏感地區更易因強降雨而致崩塌、公路行經地層下陷地區因強降雨而淹水的機率更高、沿海地區的公路系統更易受到海平面上升的威脅等。

規劃階段所考量的公路系統的「脆弱因素」主要為導致公路系統本身對氣候壓力缺乏抵禦能力的因素，例如，必須經過沿海地區的平面公路容易淹水、鋼構橋梁容易因高溫而變形；或是公路系統的功能在區域路網中

具有特殊地位，例如，係為山區社區的唯一的聯外道路、都會區的重要聯外道路等，一旦失能將發生可觀的社會成本等。

(2) 步驟 2：初步評估影響調適能力之氣候因素

先確認是否有前例可依循，初步瞭解影響該公路系統調適能力之氣候風險因素，若無前例或缺乏可靠的研判資料，則建議透過組成專案工作小組等方式邀集有經驗之專業者以及重要的利害關係人共同研判初步評估，指認影響公路系統（資產）調適能力之關鍵氣候風險因素。專業工作小組之主題可為：

① 工作小組討論主題 1：辨識公路資產面對氣候壓力因素下可能產生的氣候衝擊及影響。

② 工作小組討論主題 2：辨識機率、高風險區位。

針對不可承受的風險之區位，應考量該方案可能受威脅的系統壽年、養護頻率等因素，評估為高風險之方案，若有其他選擇應儘量迴避高氣候風險方案。

在計畫方案研擬及評估階段即應納入公路韌性考量，辨識公路系統在氣候變遷情境下可能面臨的氣候風險，有利於及早發現計畫方案未來可能面臨的氣候衝擊。

本階段有關專案氣候風險因素之指認與初步評估方法可參閱 4.4.1 節及 4.4.2 節之說明。

4.3.4 第三階段：執行氣候變遷風險評估

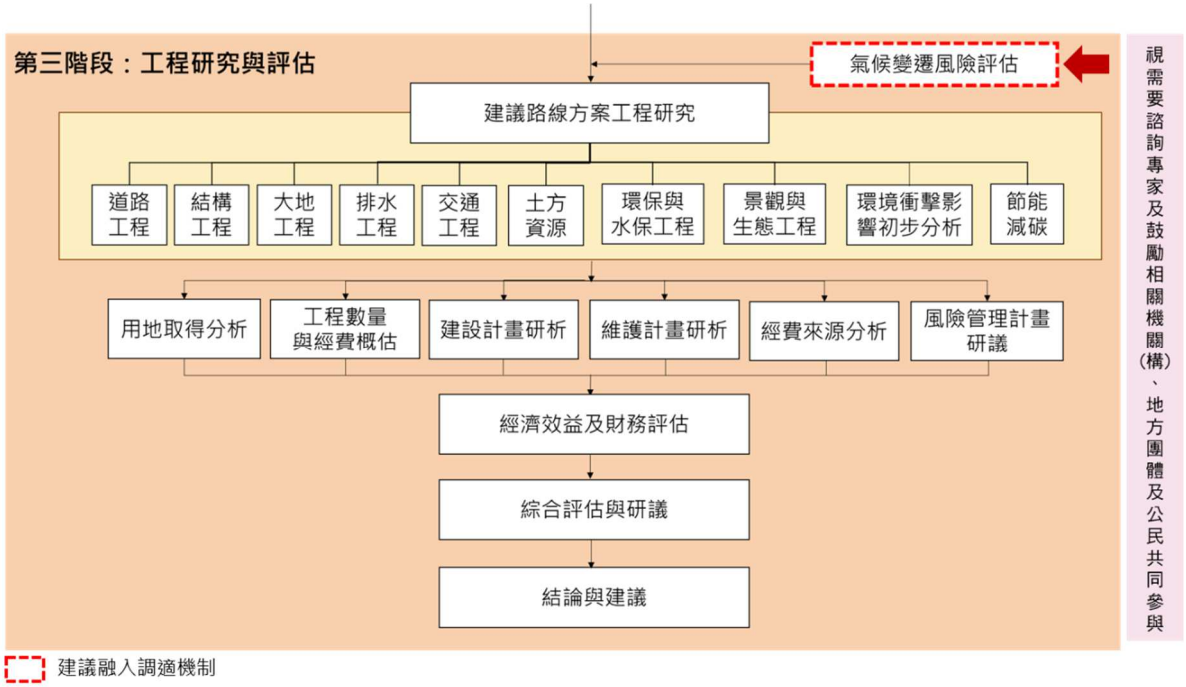
第三階段為建議方案工程研究、實質建設計畫研擬（包含用地取得分析、建設計畫研析、經費來源分析等）、經濟效益及財務評估等工作項目，透過研究分析提出綜合評估與研議，並提出結論與建議。

此階段強化調適能力之重點係在以前階段所評估的影響調適能力的氣候風險因素為基礎，執行氣候變遷風險評估，將風險評估結果納入工程研究、維護計畫以及風險管理計畫。重點說明如下：

1. 增納「氣候變遷風險評估」工作項目

建議於第三階段納入氣候變遷風險評估作業，因應氣候變遷的不確定性，且調適的措施亦可能面臨工程面及預算面的限制，故於「建議方案工程研究」

執行之前，即應啟動氣候變遷風險評估作業（參見圖 4.3.8），並將評估結果納入後續的規劃作業中，以利達到最大效果的公路系統韌性提升。

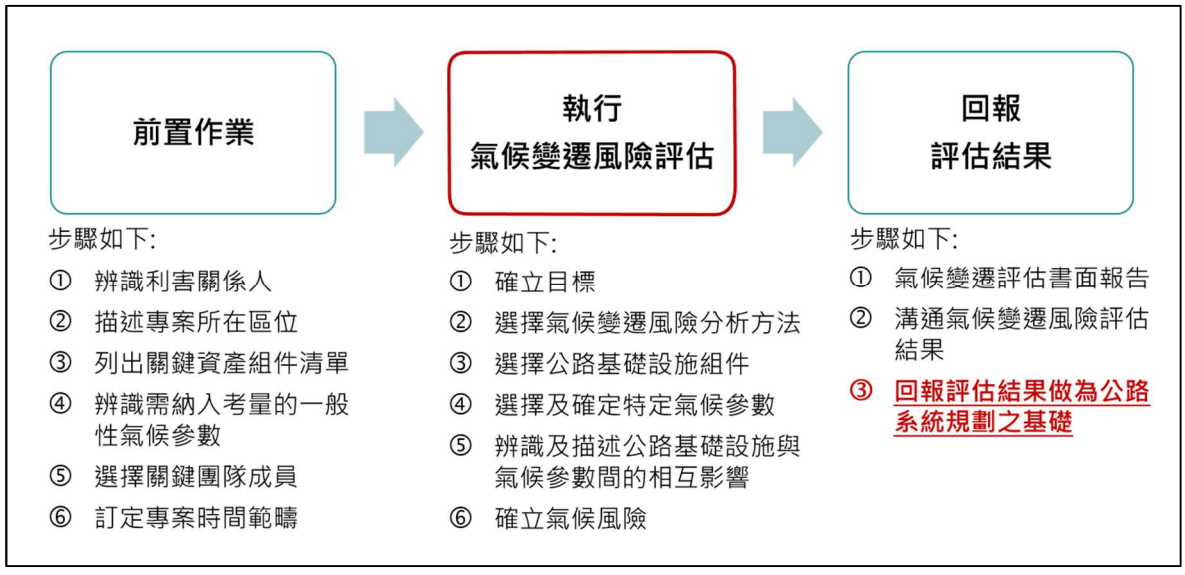


資料來源：本計畫繪製。

圖 4.3.8 工程研究與評估納入調適作業流程

2. 作業程序說明

公路規劃專案中有關「氣候變遷風險評估」工作項目之作業可分為 3 步驟（參見圖 4.3.9），說明如下：



資料來源：本計畫繪製。

圖 4.3.9 氣候變遷風險評估程序說明

(1) 步驟 1：前置作業

由於氣候變遷風險評估涵蓋許多工作，故執行前需進行氣候變遷風險評估前置作業。建議先就辨識利害關係人開始執行，透過與專案相關之利害關係人共同討論，列出關鍵資產組件清單、辨識需納入考量的氣候參數等，最後依據專案特性訂定時間範疇。

其中，時間範疇的選擇可能受資料的可取得性、氣候變遷長期衝擊的不確定性與衝擊間可能的相互交集等影響，因此建議可設定多個時間範疇，公路基礎設施如橋梁等有相對較長的使用壽命—通常為 50 年、75 年甚至 100 年。由於在氣候變遷之下，許多氣候參數顯示年均值有增加或減少的趨勢及更高和更頻繁的極端值，因此應依據公路的使用壽命選擇可取得之氣候數據資料來設定評估期程。作業流程如下：

① 辨識利害關係人（例如，地方政府、農業機關、水利機關..）。

② 描述專案所在區位。

③ 列出系統關鍵組件清單（例如，橋梁、涵洞、路段...）。

④ 辨識需納入考量的氣候參數（例如，雨量、溫度、風速...）。

⑤ 選擇關鍵團隊成員（例如，主管機關決策者、氣候科學專家、道路工程專家、大地專家...）。

⑥ 訂定專案評估之時間範疇。

(2) 步驟 2：執行氣候變遷風險評估

氣候變遷風險評估作業程序需在進入各工程面向考量前執行。執行風險評估主要目的是為辨識氣候衝擊可能對公路系統（資產）帶來的影響。首先應界定目標、選擇氣候變遷風險分析方法，依據專案特性及資料可及性選擇適合專案執行之氣候變遷風險評估方法，再選擇公路基礎設施組件及特定的氣候參數，以辨識及描述公路資產與氣候參數間的相互影響，最後透過以上評估結果確立專案所面臨的氣候風險。作業流程如下：

① 確立目標（例如，道路不中斷、道路中斷時間不超過 1 日...）。

② 選擇氣候變遷風險分析方法（參見 4.4.1 及 4.4.2 節）。

③ 選擇公路基礎設施關鍵組件。

④ 選擇及確定特定氣候參數。

⑤ 指認並描述公路基礎設施與氣候參數之間的相互影響（例如，強降雨造成公路橋梁沖刷、暴潮衝擊沿海公路...）。

⑥ 確立氣候風險

(3) 步驟 3：回報評估結果

氣候變遷風險評估係做為調適規劃、主流化與導入調適策略與措施的基礎，回報風險評估結果時應考量可理解性並提供建議，報告應提供風險評估的目標說明、應用的方法、主要的發現、解析評估結果所需的背景知識等。該步驟操作項目如下：

① 氣候變遷評估書面報告。

② 溝通氣候變遷風險評估結果。

③ 回報結果做為調適規劃基礎。

本階段有關專案氣候風險評估之方法可參閱 4.4.1 節及 4.4.2 節之說明。

4.3.5 公路跨運輸系統強化調適介面整合機制

公路系統為基礎運輸路網，肩負連結其他各項運輸系統的功能，面臨全球暖化導致的氣候變遷，極端天氣事件頻率增加，公路與其他運輸系統介面處亦可能因受到衝擊而失能，導致其他運輸系統服務中斷，本小節就公路系統之間及公路跨其他運輸系統處之強化調適介面整合機制進行探討。

1. 範疇說明

本計畫以等級較高之運輸系統為對象，討論公路系統之間以及公路跨其他運輸系統之調適介面整合機制，運輸系統之範疇界定如下：

(1) 公路系統：包含國道、快速公路、省道。

(2) 其他運輸系統可依類型分為軌道、機場、港口：

① 軌道：可細分為高鐵系統與臺鐵系統，跨公路系統之介面為各高鐵與臺鐵車站的聯外道路。

② 機場：以國際機場為探討對象，跨公路系統之介面為各國際機場的聯外道路。

③ 港口：以國際商港為探討對象，跨公路系統之介面為各國際商港的聯外道路。

而各類型運輸系統聯外道路所遭受到的氣候壓力因素包含了強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪、海平面上升等。

2. 強化調適介面整合機制研擬

依循前文 4.3.1 節之建議，公路系統之規劃將循 3 階段融入氣候變遷調適之理念（參見圖 4.3.1），倘使該公路系統之區位或是功能涉及其他運輸系統，則在規劃評估氣候風險時，需另行增加利害關係人或有關機關（單位）的合作與溝通協調作業，說明如下，並彙整如表 4.3-2。

(1) 第 1 階段：資料蒐集分析

若專案可能涉及跨運輸系統調適介面，於此階段需辦理以下作業：

① 確立跨運輸系統範圍

確認公路系統規劃作業涉及跨其他運輸系統，並具有跨系統介面要素，如各運輸系統之聯外道路新建或改建計畫。

② 確認利害關係人或有關機關（單位）

確認公路跨系統介面所涉及利害關係人或有關機關（單位），公路系統部分分為國道、快速公路、省道，涉及國道建設之主管機關為交通部高速公路局、涉及快速公路、省道建設之主管機關為交通部公路局；跨其他運輸系統部分分為軌道、機場、港口，軌道之跨系統介面以車站為主，涉及高鐵車站建設之主管機關為交通部鐵道局，營運機構為台灣高鐵公司；涉及臺鐵車站建設之主管機關為交通部鐵道局，營運機關為交通部臺灣鐵路管理局；涉及機場建設之主管機關為交通部民用航空局及桃園國際機場股份有限公司；涉及港口建設之主管機關為交通部航港局及臺灣港務股份有限公司（含基隆港務分公司、臺中港務分公司、高雄港務分公司、花蓮港務分公司）。涉及區域排水系統之主管機關為經濟部水利署，涉及市區道路系統之主管機關為內政部國土管理署，涉及氣候資料之主管機關為交通部中央氣象署及國家災害防救科技中心。

③ 資料蒐集與分析應建立於同一基準

配合在公路系統規劃的資料蒐集階段增加「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」步驟，在公路跨系統介面上，需確認利害關係人或有關機關單位所蒐集採用的資料與未來氣候變遷情境設定建立在同一基準上，避免後續階段在公路跨系統介面整合上因基礎不一致導致落差。

④ 建立氣候變遷情境相關資料流通、交換及共享機制

為達到資料蒐集採用與未來氣候變遷情境設定建立在同一基準上，跨系統介面有關機關單位應於平時或規劃作業起始時，建立氣候變遷情境相關資資料流通、交換、共享機制，避免資料掌握不完整、不對稱的情況產生。

(2) 第 2 階段：方案研擬與評估

若專案可能涉及跨運輸系統調適介面，於此階段需辦理以下作業：

① 辨識跨運輸系統範圍內之氣候風險因素

公路系統與跨運輸系統介面通常為整個基礎運輸維生系統之弱點所在，配合在公路系統規劃的方案研擬與評估階段增加「辨識影響調適能力之氣候風險因素」步驟，公路與跨運輸系統介面需指認氣候風險因素，並評估影響調適能力之因素。

② 利害關係人或有關機關單位需建立定期溝通平台或管道

在方案研擬與評估階段，需對方案與跨系統介面處進行研析，此階段需利害關係人或有關機關單位建立規劃作業時的定期溝通平台或管道，必要時應召開協商會議。

(3) 第 3 階段：工程研究與評估

若專案可能涉及跨運輸系統調適介面，於此階段需辦理以下作業：

① 針對跨運輸系統交界處進行氣候變遷風險評估

在公路跨運輸系統介面處因涉及至少 2 個以上的運輸系統建設，配合在公路系統規劃的工程研究與評估階段增加「氣候變遷風險評估」步驟，氣候變遷風險評估複雜性提高，需充分與利害關係人或有關機關單位協調確認。

② 跨系統交界處優先迴避高風險地區

在公路跨系統交界處，應優先迴避高風險地區，以利提高公路安全性與跨系統之連通性。

③ 提高運輸系統交界處因應氣候變遷衝擊的工程設計標準

公路系統與跨運輸系統交界處常為整個基礎運輸維生系統之弱點所在，聯繫著重要維生基礎設施，在工程研究與評估階段，針對運輸系統交界處的工程設計標準提高或將公路系統等級提高以強化調適能力。

④ 規劃與建構多層次備援運輸系統

針對交界處脆弱點周邊進行了解並補強連結，規劃與建構有層次的運輸系統間備援能力，如增加替代道路或替代運輸系統等，完善系統性跨運輸系統路網，進而產生互相支援的概念，成為一個完整的運輸體系。

表 4.3-2 公路系統及跨其他運輸系統強化調適介面整合機制各階段作業

階段	作業	利害關係人或單位
資料蒐集分析	跨運輸系統範圍確立	1.公路系統主管機關
	利害關係人或有關機關單位確認	1.跨運輸系統之主管機關 2.公路系統主管機關
	資料蒐集與分析建立於同一基準	1.跨運輸系統之主管機關 2.公路系統主管機關 3.水利機關 4.氣候資料提供機關
	有關機關單位應建立氣候變遷情境相關資料流通、交換、共享機制	1.跨運輸系統之主管機關 2.公路系統主管機關 3.水利機關 4.氣候資料提供機關
方案研擬與評估	辨識跨運輸系統範圍內之氣候壓力因素	1.跨運輸系統之主管機關 2.公路系統主管機關 3.氣候資料提供機關
	利害關係人或有關機關單位需建立規劃作業時定期溝通平台或管道	1.跨運輸系統之主管機關 2.公路系統主管機關

表 4.3-2 公路系統及跨其他運輸系統強化調適介面整合機制各階段作業（續）

階段	作業	利害關係人或單位
工程研究與評估	針對跨運輸系統交界處進行氣候變遷風險評估	1.跨運輸系統之主管機關 2.公路系統主管機關
	跨系統交界處優先迴避高風險地區	1.跨運輸系統之主管機關 2.公路系統主管機關
	提高運輸系統交界處因應氣候變遷衝擊的工程設計標準或維護管理方式改善	1.跨運輸系統之主管機關 2.公路系統主管機關
	規劃與建構多層次備援運輸系統	1.跨運輸系統之主管機關 2.交通部 3.公路系統主管機關

資料來源：本計畫彙整。

4.4 公路系統規劃階段強化調適能力之方法

本節延續 4.3 節提出之公路系統規劃階段調適機制，考量國內公路系統目前尚缺乏操作完整調適機制之相關經驗，故針對 4.3 節所述機制較為關鍵之步驟，提供國際上目前採用之調適方法供參考。本節首先說明如何建立公路系統氣候衝擊鏈用以初步評估氣候風險因素，接續介紹公路系統氣候風險評估之方法以指認風險缺口，並推介適用於公路系統的調適選項。最後，由於氣候變遷具有高度不確性，乃引介在未來高度不確定之下的決策方法，以協助決策過程順利進行。

4.4.1 公路系統氣候衝擊鏈分析方法

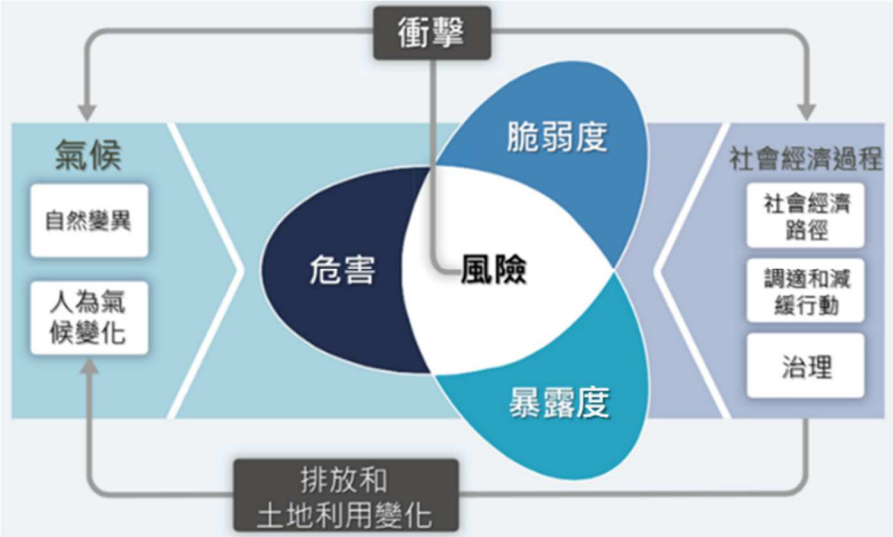
於氣候變遷風險評估作業中，如何解析氣候變遷對於公路系統的衝擊以及辨識風險組成為其中較為困難且重要的步驟之一，故參考 IPCC AR5 對於「氣候衝擊風險」的定義、ISO 於 2021 年發布之《ISO 14091 氣候變遷調適－脆弱度、衝擊與風險評估指引》及日本 JICA 出版之《氣候風險評估及調適指南》，建構公路系統氣候衝擊鏈分析方法提供國內公路系統規劃專案參考。

於規劃過程中建構公路系統氣候衝擊鏈有助於理解氣候衝擊及影響公路系統韌性強度之因素，進而據以規劃因應的調適選項。

1. 「氣候衝擊鏈」理論基礎

「氣候衝擊鏈」之建構理論基礎為 IPCC AR5 對於「氣候變遷調適」的操作概念及「氣候衝擊風險」的定義。依據 IPCC 於 AR5 所揭示的「氣候變遷調適」，其操作的核心概念係為「在氣候變遷的情境之下對於『氣候衝擊風險』進行有效的管理」。AR5 進一步指出「氣候衝擊風險」取決於 3 種主要因素－暴露度、脆弱度及危害，3 種因素的交集決定了風險，換言之，風險的大小與內容乃係依據三者的交互關係而定。

因此，決定公路系統氣候韌性的主要因素（變數）可採氣候壓力因素、暴露因素以及脆弱因素三者加以表述，公路系統氣候變遷調適即是有效管理上述 3 種因素，參見表 4.4-1。



資料來源：1.IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change；2.同舟共濟-臺灣氣候變遷調適平台，環境部，110.9.16 查詢。

圖 4.4.1 IPCC 對於氣候衝擊風險的定義

表 4.4-1 影響公路系統氣候韌性之因素一覽表

項目	內容說明
氣候壓力因素（同 IPCC 指稱危害）	與氣候變遷有關的情況、事件或趨勢，可能對公路系統造成衝擊。影響臺灣公路系統之五大氣候壓力因素包含：強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪、海平面上升
暴露因素（同 IPCC 指稱暴露度）	公路系統位於易受衝擊的地區（例如，淹水潛勢區、地質敏感區或坡災潛勢區等）
脆弱因素（同 IPCC 指稱脆弱度）	公路系統本身容易受衝擊的特性，以及一旦失能可能影響的範圍及程度（例如，唯一維生聯外道路）

資料來源：本計畫彙整。

2. 公路系統面臨的氣候壓力因素

氣候壓力因素（climate stressors）係指與氣候變遷有關的情況、事件或趨勢，可能對公路系統造成衝擊。依據 IPCC AR6 之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告[27]、交通部統計要覽交通天然災害概況近 5 年統計資料[28]及臺灣氣候變遷科學報告 2017－衝擊與調適面向[29]等，彙整影響臺灣公路系統之五大氣候壓力因素如下：

(1) 強降雨：颱風強度增強造成強降雨，區域型強降雨亦呈現增加趨勢

(2) 強風：颱風強度增強，造成強風及沿海巨浪增強

(3) 高溫：全球暖化持續進行，臺灣平均氣溫百年來增溫約 1.3℃

(4) 暴潮/風浪：海平面上升與颱風強度增強，加劇暴潮/風浪衝擊

(5) 海平面上升：全球平均海平面持續上升，臺灣平均海平面每年上升 3.4mm

4. 公路系統規劃階段氣候衝擊鏈之建構

由表 4.4-1 的分析可知，除了氣候壓力因素之外，公路系統的暴露因素（指系統所在區位條件）與脆弱因素（指系統本身特性）皆會影響系統將面臨的氣候衝擊程度。

因應各種影響公路系統韌性的因素，於規劃階段可著手思考對應的調適選項加以緩解或排除。FHWA 將調適選項分為的 5 種基本類型：包含保護、調整、搬遷、增加備援、管理及維護。

依據前述 IPCC AR5 的理論基礎，參考 ISO 14091 之指導，建構臺灣公路系統氣候衝擊鏈(參見圖 4.4.2)，藉以研析影響公路系統韌性強度之因素，並據以研擬對應的調適選項。

5. 公路系統氣候衝擊鏈分析方法之應用建議

建議以前期計畫所建議的氣候衝擊鏈分析示例說明做為公路專案基本範本之參考（參見前文之圖 4.1.5~圖 4.1.8）。各專案可應用氣候衝擊鏈分析方法，探討公路專案所面臨之氣候風險因素與潛在的氣候衝擊。

該操作過程建議透過專家及利益相關者組成專家工作小組共同討論，據以產出專屬各公路專案之氣候衝擊鏈分析成果。

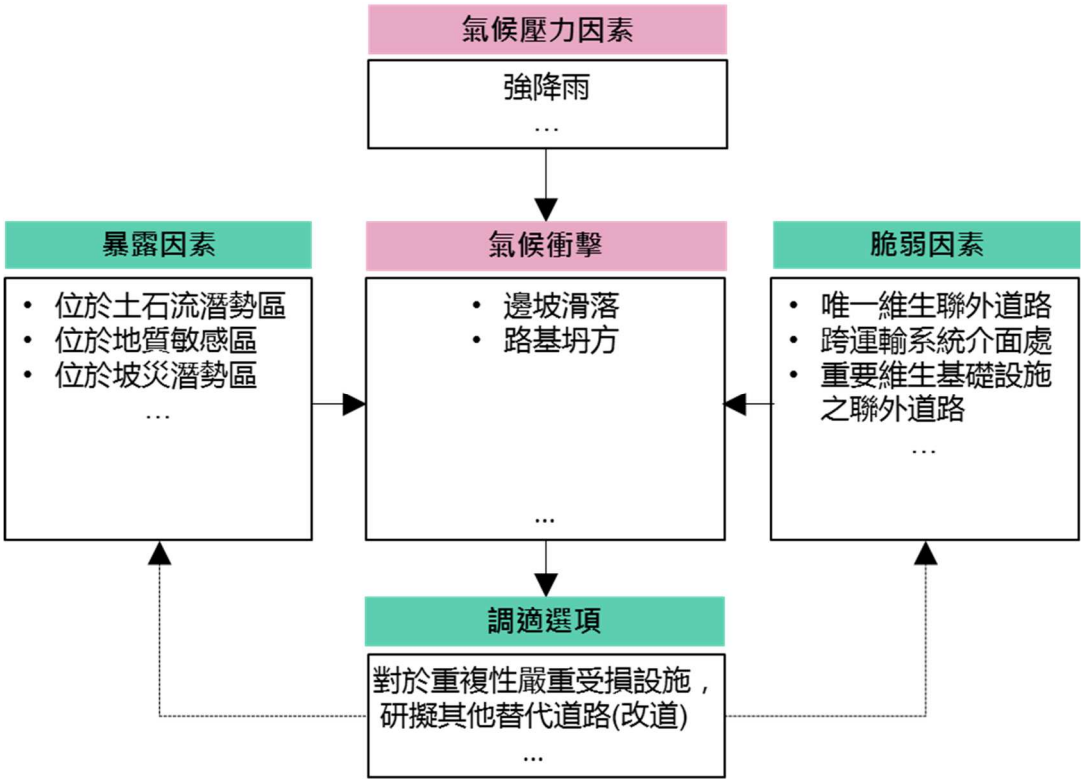


圖 4.4.2 公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖示例

4.4.2 公路系統氣候變遷風險評估之方法

氣候變遷風險評估依據可取得資料及評估量化程度，大致可分為偏質性及半量化之氣候風險評估（如，日本 JICA 氣候風險評估方法）和量化程度較高之氣候風險評估（如，加拿大英屬哥倫比亞省交通局應用於公路韌性設計之氣候風險評估方法），前者可適用於方案研擬與評估階段，在現況仍缺乏足夠數據難以進行量化分析或其能投入資源相對匱乏者使用；後者較適用於工程研究階段，特別是已確定方案後之工程規劃及基本設計，其公路專案之基礎設施韌性研究可取得足夠數據及分析工具，以進行量化分析者。

由於國內公路系統規劃階段包含可行性研究和綜合規劃，在執行氣候變遷風險評估時，可依據專案特性、可取得之資料及組織人力財務資源等因素，選擇較適合且具實務操作可行的氣候風險評估方法來執行。

以下摘述日本 JICA 氣候風險評估方法及加拿大英屬哥倫比亞省交通局之氣候風險評估方法步驟及重點內容：

1. 日本獨立行政法人國際協力機構(JICA):氣候風險評估及調適指引(2019年)

JICA 是日本對外實施政府開發援助（Official Development Assistance）的主要執行機構之一,長期以來透過專案形式於財務上及技術上支持開發中國家因應氣候變遷風險。JICA 根據 IPCC AR5 中之調適概念定義，於 2019 年訂定《氣候風險評估及調適指引》(Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation)。以下摘述其中有關氣候風險評估之建議：

(1) 氣候風險評估準備流程

JICA 專案之氣候風險評估係於「可行性研究」階段執行，準備流程步驟如下：

① 釐清專案目標、投入項目、執行單位、區位、受益對象、時程等六大必要事項，並與地方利害關係人取得共識。

② 制定數據蒐集計畫，確認二手資料與實地調查應蒐集之資料。依專案區位及性質，區分與氣候風險要素相關之資料細項。

③ 審查現行二手資料真實性、資料來源可靠程度。

④ 進行實地調查蒐集必要資料及數據，並召開公聽會、工作坊與地方政府及居民交流，以了解基地現況及氣候風險。

(2) 氣候風險評估執行流程

執行氣候風險評估的目的在於選取對專案執行造成重大衝擊之氣候風險,擬定相應的調適措施,再透過綜合分析評估調適措施之優先次序以利後續研擬行動計畫。氣候風險評估執行流程步驟如下：

① 與地方執行機關確認專案架構,諸如專案目標、投入項目、執行單位、區位、受益對象、時程等六大必要事項，並預先訂定氣候風險評估之時程。

② 運用「氣候風險矩陣」（參見前文之圖 2.3.4）指認相關風險。

③ 基於氣候風險矩陣指認將對專案執行造成重大衝擊的氣候風險，建立氣候風險樹狀圖（climate risk tree）（參見圖前文之 2.3.5）。

④ 選取將對專案執行造成重大衝擊之氣候風險，擬訂相應的調適措施，再由效益、財務及技術可行性兩面向，分析調適措施實行之優先次序，依序補充於氣候風險樹狀圖中。

⑤ 擇優先次序高之調適措施研擬執行計畫。

2. 加拿大英屬哥倫比亞省交通局（British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure）：公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計－實務指引（2020 年）

加拿大英屬哥倫比亞省交通局於 2020 年滾動檢討更新《公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計－實務指引》（Professional Practice Guidelines–Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia），針對公路系統氣候變遷調適之韌性設計提出最新的實務指導原則，以協助公路工程專業人員提升公路設施韌性因應氣候變遷對公路系統的衝擊。以下摘述其中之風險評估層級及氣候風險評估程序建議。

(1) 氣候風險評估分為 3 種層級

氣候風險評估分為 3 種級別，分別為篩選級風險評估（screening-level risk assessment）、脆弱度分析或評估（vulnerability analysis or assessment）、工程分析（engineering analysis），分述如下：

① 執行篩選層級之風險評估：透過廣泛蒐集氣候變遷風險的資料並彙整分析即可完成篩選層級之風險評估，透過較低成本的投入瞭解該專案是否需要採取更細部之風險評估及分析。風險評估內容包含選擇和歸納（characterize）重要基礎設施組件（infrastructure components）進行研究、確定可能影響基礎設施組件的關鍵氣候變數（variables）。篩選級風險評估至少要由專業團隊完成，以確保提供廣泛的視角和專業領域，增加結果可信度。

② 執行脆弱度分析或評估：確定重要的基礎設施組件和定義的氣候變遷參數之間的潛在相互影響（interaction）後，為其相互影響發生的可能性（和/或頻率）及發生故障（或損壞）後果的嚴重性評分，並描述產生的後果（參見圖 4.4.3）。

③ 執行工程分析：工程分析的目的是為提出設施可因應氣候變遷的調適能力、總承載力（total load）和總容量（total capacity）等量

化數據以利後續工程設計。工程分析有助於為脆弱的設施組件確定氣候變遷下設施的安全係數，從而增強設施韌性，並將風險降低到可接受的水準，且工程分析的結果有利於選擇調適措施。由於組件級別的工程分析通常既複雜又耗時，工程分析多適用於安全至關重要的組件、針對氣候風險的專業判斷存在分歧者，抑或存在許多不確定因素會降低對後續設計過程信心者操作。

備註說明：風險由兩個屬性的函數構成，包括發生故障（或損壞）的概率或可能性（probability），以及發生故障（或損壞）後果的嚴重性（severity）。根據設計團隊和利害關係人的定義，將依據嚴重性程度分數由 0 到 7 進行評分。

資料來源：Professional Practice Guidelines– Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia, EGBC.2020.

圖 4.4.3 簡易風險矩陣

(2) 針對公路基礎設施之氣候風險評估方法

在基礎設施設計和氣候變化的背景下，氣候風險可做為衡量基礎設施項目組件對於氣候變遷的負面影響及其脆弱度，主要步驟如下：

① 確立目標與標的：風險評估標的應包含有關公路容量、安全性、可靠性、耐用性、設施壽年等設計目標，以及其他影響公路專案對氣候風險容忍度的要素。

② 選擇風險評估工具：選擇公路基礎設施風險評估常用工具，加拿大評估公路基礎設施氣候風險的常用工具包含「PIEVC 工程協議 - 用於氣候變遷基礎設施脆弱度評估」（2020）、FHWA 脆弱度評估評分工具（VAST）（2019）等。

③ 選擇公路基礎設施組件：基礎設施組件可被單獨定義亦可群組，或是兩者具備。單獨列出設施組件可產出更詳細的風險評估，但需花費額外的精力和成本。

④ 選擇和確定特定氣候參數：應由專業人員選擇和確認與設計有關的氣候參數及臨界值，確認所列之個別氣候參數至少影響一處基礎設施項目組件，同時紀錄經確認後之特定氣候參數清單。

⑤ 指認並描述公路資產與氣候參數之間的相互影響：針對所列之基礎設施組件對應特定氣候變化參數的每種組合，應由專業人員和風險評估團隊指認氣候事件所導致的相互作用類型，用以預測可能造成的風險。

⑥ 確立氣候風險：在基礎設施設計和氣候變化的背景下，氣候風險可做為衡量基礎設施及組件在氣候變遷下的負面影響及其脆弱度。

3. 公路系統氣候變遷評估方法之應用建議

氣候變遷風險評估在實務操作上分為 3 層級，從篩選層次、定性到定量。由於產出定量評估過程通常需投入大量成本，為求以投入最少的資源快速指認出重大風險，建議先透過篩選層級風險評估初步掃描現況風險後，篩選出中高風險者，針對中高風險者進行定性評估，最後僅選出高風險之重大基礎設施進一步定量評估。

氣候變遷風險評估可依據專案特性、可取得之資料及組織人力財務資源等因素，選擇較適合且具實務操作可行的氣候風險評估方法來執行。

4.4.3 公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項

氣候變遷的調適選項涵蓋面由上而下可包含：調適策略（strategies）、調適方法（approaches）、解決方案（solutions）及調適措施（measures）等。面對全球氣候變遷下的高度不確定性因素，公路系統於規劃階段有必要衡酌各專案之計畫目標以及資源限制條件，妥予採取多樣化的調適選項類型及多元化組合方式，以因應未來所面臨的複合性氣候風險。

以下摘述 FHWA 因應氣候變遷調適所出版的報告內容提及之有關調適選項的重要內容，同時蒐整 IPCC AR6 綜整之國際間應用於運輸系統之調適選項類別，並依據國內公路系統面臨之五大氣候壓力因素彙整可選用的調適措施，供國內公路規劃專案研擬調適選項之參考。

1. FHWA－以綜合方法提升專案開發的氣候韌性（2017 年）

該報告出版的目的在於協助運輸工程設計專案納入氣候變遷調適作為，主要綜整 FHWA 從近期一系列氣候韌性研究和補助各州的先導型計畫中吸取的經驗，期協助交通運輸機構因應氣候變遷和極端事件。報告彙編了數個工程領域的調適策略與措施並將調適選項綜理歸納為以下 5 種類型：

(1) 管理和維護：維護現有設施以達成最佳性能，並透過進一步的準備來管理極端事件的因應。

(2) 增加備援力：確保設施機關提供的運輸服務可由其他替代方案提供。

(3) 保護：提供對抗氣候壓力的保護性物理屏障以減少或消除損害。

(4) 調整：修改或重新設計設施，以在氣候變遷的環境中有更佳的性能。

(5) 搬遷：將設施搬離氣候壓力來源，減少或消除暴露於氣候壓力。

以上任何一個類型調適選項都可包含調適設計或調適管理元素，該報告建議採取綜合方法，依據需求逐步實踐氣候變遷調適作為。

2. FHWA－以自然為本提升海岸公路韌性的解決方案（2019 年）

近年來許多國家沿海運輸系統面臨海平面上升、海岸侵蝕、暴潮等災害衝擊，並意識到傳統工程對生態的破壞及工程應用上的限制，因而逐步採用以自然為本的解決方案（NbS），透過自然保育方式或自然結合工程的手法，減緩侵蝕、洪水災害、波浪災害，來保護沿海公路系統。

(1) 運用於海岸公路以自然為本的解決方案常見的手法

以自然為本的解決方案（NbS）運用於沿海公路可做為氣候衝擊事件的第一線防禦，用結構物理和生物物理程序，與海岸生態組成的一個以自然為本的調適解決方案可減緩沿海公路受洪水、波浪和海水的侵蝕。例如，潮汐沼澤、紅樹林和海岸林可減少沿海洪災且可有效的消散海浪的波浪能量（wave energy），減緩波浪與洪水對公路設施的破壞與侵蝕；礁石能消散波浪能量，並干擾波浪力（wave load）；海灘和沙丘能消散波浪能量並減少沿海洪水和極端事件造成的破壞。NbS 常見的手法可分為 6 類：

① 植被：提供各種生態效益，可改善水質並降低海浪侵蝕風險，同時為各種物種提供棲息地。

② 防波堤：提供各種生態效益，可改善水質並降低海浪侵蝕風險，同時為各種物種提供棲息地，近海防波堤能減弱海浪波能量。

③ 海欄：選擇適合該地生存條件的植物及沉積物，在適當的高度建立一個逐漸傾斜的平台提供生物棲息地，並在邊緣提供護趾工保護，通常為岩石護岸的形式。

④ 袋狀海灘：結合養灘和岬狀堤防的工程方法能使海岸更穩定。

⑤ 養灘：能改善棲息地，增加休閒和經濟價值，並降低海岸風險，有助於維持海岸線位置減緩退縮。

⑥ 沙丘：在颱風期間能降低海浪和洪水風險，特別是在與現有海灘或養灘工程結合使用時；此外，沙丘還能提供乾燥的海灘生物棲息地。

該報告進一步指出 NbS 應用於公路具有以下 4 項特性：

① 透過自然生態系統增強工程面對自然衝擊的韌性。

② 等於或低於工程工法的成本。

③ 運用自然調適的方法達成與工程工法一樣的目的。

④ 相比於工程工法提供了更多自然美學上的效益。

3. IPCC AR6 綜整之運輸系統調適選項（2022 年）

2022 年 IPCC 發布之《AR6：衝擊、調適與脆弱度》指出為因應全球氣候變遷加劇，世界各國目前均積極投入並發展出多元的調適選項。該報告強調氣候變遷加劇複合與連動性風險，多樣化的調適選項內容及多元化組合方

式極為適合因應現況所面臨的複合性氣候風險，個別公路專案選用多種調適選項分別應用於短中長期，為因應未來高度不確定性之通案作法。

目前運輸系統有多樣化調適選項可供選擇，包括升級基礎設施、調整或遷移關鍵公路資產等，而國外實務案例如大洋洲的運輸系統調適包括改道、海岸保護、改善排水系統和升級基礎設施，證據顯示大多數調適選項在實務應用上皆能提供了良好的效益成本比。

依據 IPCC AR6 綜整的調適選項類別，以下摘錄目前國際上應用於運輸系統之調適選項（參見前文之圖 3.3.11），主要可分為四大類，包含：

(1) 硬保護：係指以硬體設施及結構來做為保護，尤其是在沿海地區與海島國家經常採用硬保護來保護海岸。

(2) 調整與升級：藉由調整或升級（重新設計）公路關鍵基礎設施，以減少沿海洪氾對公路基礎設施的影響。

(3) 搬遷：搬遷在實務上作法包括規劃搬遷及重新安置，由於需投入昂貴的經濟和社會成本，被視為不得已而為之的最終選項之一。

(4) 基於生態系統的調適方法及以自然為本的解決方案（EbA & NbS）：在海島國家已有充分的證據顯示實施以自然為本的調適方法在因應氣候風險是有效的，因此 COP26 更加關注各國正採取 NbS，並積極投資 NbS 做為重要的氣候行動（actions）之一。

4. 公路系統調適選項列舉說明

由於國內公路系統規劃階段目前尚無系統性考量氣候變遷調適，故進一步綜理國內外文獻，依據公路系統規劃階段不同的分析尺度，綜理可供參考的調適選項。考量接軌國際並兼顧國情，爰進一步將各調適選項依據國內風險管理及危機處理作業手冊之風險處理、美國 FHWA 及 IPCC AR6 的分類加以呈現。

針對強降雨、高溫、強風、暴潮/風浪及海平面上升五大氣候壓力彙整國內外案例，並就公路系統不同尺度分別說明可能造成的衝擊及對應的調適選項供參考，另依據 109 年行政院所屬各機關風險管理及危機處理作業手冊提及之風險處理方法類型、美國 FHWA 及 IPCC AR6 的調適類型加以分類並相互對照，以利決策者理解及應用（參見表 4.4-2）。

表 4.4-2 公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表

氣候壓力及危害因素		公路系統尺度	對公路系統的衝擊	調適選項(包含策略及措施等)	類別1	類別2	類別3
強降雨	地表逕流/河川溢淹	路段	排水不良造成道路淹水	• 提高排水容量	抑減	調整	調整與升級
			道路遭漂流物撞擊	• 將道路或橋梁抬升高出預估的洪水高程	抑減	搬遷	調整與升級
				• 放置石質盔甲、石籠網等，使道路堤防更加堅固	抑減	調整	硬保護
		路廊	河川溢淹造成路廊淹水	• 整合協調周邊排水系統	抑減	調整	調整與升級
		路網	聯外道路淹水造成運輸中斷	• 整合協調周邊排水系統	抑減	調整	調整與升級
			替代道路數不足，造成路網連通性受阻	• 對於重複性嚴重受損設施，研擬其他替代方案(如改道)	規避	搬遷	搬遷
	暴雨沖刷/土石流	路段	道路路基掏空	• 加強路基保護工	抑減	保護	硬保護
			橋梁基礎受沖刷	• 加強橋基保護工	抑減	保護	硬保護
			道路橫斷面受沖刷	• 調整道路或橋梁橫斷面	抑減	調整	調整與升級
		路廊	道路邊坡坍滑	• 將道路移至穩定的邊坡利用邊坡穩定工法，栽植原生植物恢復邊坡植被等 • 建造一座橋跨越滑坡或建造一條隧道	規避抑減	保護	搬遷、調整與升級
高溫	鋪面材料高溫軟化	路段	爆胎機率上升造成車禍	• 調整鋪面結構設計，修改面層和基底層的厚度和材料	抑減	調整	調整與升級
			道路標線變形難以辨認	• 調整混合設計，根據未來溫度預測，調整瀝青膠泥等級	抑減	調整	調整與升級

表 4.4-2 公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表（續）

氣候壓力及危害因素		公路系統尺度	對公路系統的衝擊	調適選項 (包含策略及措施等)	類別1	類別2	類別3
高溫	結構鋼材熱膨脹	路段	橋梁結構受損有安全疑慮	• 先評估補強或修復受損，若仍有安全疑慮建議建造一座新的橋梁取代之 • 預留構材與構材間的空間	移轉抑減	搬遷調整	硬保護、調整與升級
	邊坡野火	路段	邊坡野火造成鋼橋燒熔	• 鋼構噴防火被覆材	抑減	保護	調整與升級
		路廊	野火濃煙影響視線	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護	-
			邊坡野火造成邊坡崩落	• 利用邊坡穩定工法	抑減	保護	硬保護
		路網	替代道路數不足，造成路網連通性受阻	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護	-
強風	極端風速(強風和強陣風)	路段	影響索力特殊橋梁結構	• 修改橋梁設計規格	抑減	調整	調整與升級
		路廊	路樹、電線及號誌倒塌阻斷交通	• 安裝防護結構，建造擋土牆或構造較堅固的棚屋式結構 • 非易淹區實施電纜地下化	抑減	保護	硬保護
		路網	替代道路數不足，造成路網連通性受阻	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護調整	調整與升級
暴潮/風浪	路堤侵蝕/橋基挖蝕	路段	強浪掏刷路基暴潮/風浪加劇橋梁基礎沖刷	• 改進護岸調整橋的橫截面	抑減	調整	調整與升級
			強浪影響橋梁結構	• 增加沿海橋面板標高 • 加強沿海橋梁的連接	抑減	調整	調整與升級
	強浪攜帶石塊上岸	路廊	強浪攜帶石塊上岸阻斷道路交通	• 維護沿海道路護岸/防波堤	抑減	保護	硬保護

表 4.4-2 公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表（續）

氣候壓力及危害因素		公路系統尺度	對公路系統的衝擊	調適選項 (包含策略及措施等)	類別 1	類別 2	類別 3
暴潮/風浪	強浪侵襲造成淹溢	路廊	低窪地區不易退水，交通中斷時間拉長	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護調整	調整與升級
		路網	替代道路數不足，路網連通性受阻	• 在更高的海拔高度興建替代道路	移轉	增加備援力	調整與升級
			交通場站聯外道路淹水，運輸中斷	• 在極端氣候事件中重新規劃方案	抑減	管理和維護	調整與升級
海平面上升	海岸退縮	路段	長期侵蝕造成海岸退縮，海浪掏刷路基日益嚴重 海水鹽分加速道路毀損 海風的鹽分造成鋼梁鏽蝕	• 維護沿海道路護岸/防波堤 • 建造有生命的海岸線，定期進行海岸養灘或沙丘建設	抑減	保護	硬保護、以自然為本的調適措施
	強浪侵襲造成淹溢	路網	替代道路數不足，路網連通性受阻	• 在更高海拔高度上興建替代道路	移轉	增加備援力	調整與升級
			交通場站聯外道路淹水，運輸中斷	• 在極端氣候事件中重新規劃方案	抑減	管理和維護	調整與升級
備註	類別 1：依據 109 年行政院所屬各機關風險管理及危機處理作業手冊，風險處理方法包含：接受、規避、抑減及轉移。 類別 2：依據美國聯邦公路管理局（FHWA）提出調適選項類別包含:調整、保護、增加備援力、搬遷、管理和維護。 類別 3：依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會（IPCC）第六次評估報告綜整應用於運輸系統之調適選項類別包含:硬保護、調整與升級、搬遷及以自然為本的調適措施。						

資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.、CEDR Transnational Road Research Programme, ROADAPT Roads for today, adapted for tomorrow Guidelines, 2015.、交通部運輸研究所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討(1/2)，111 年 3 月。

5. 公路系統調適選項之應用建議

氣候變遷調適需從整體面及系統面切入，通常不會只透過單一調適選項就可以解決問題，需要因地制宜搭配多個調適選項。在實務應用上應就主管機關之資源與預算等進行綜合分析評估與建議，以輔助選擇維持原方案或研擬調適選項（含其重要性）。最終可由效益、財務及技術可行性等面向分析，提出調適選項實行之優先次序。

4.4.4 面對未來氣候高度不確定之決策方法

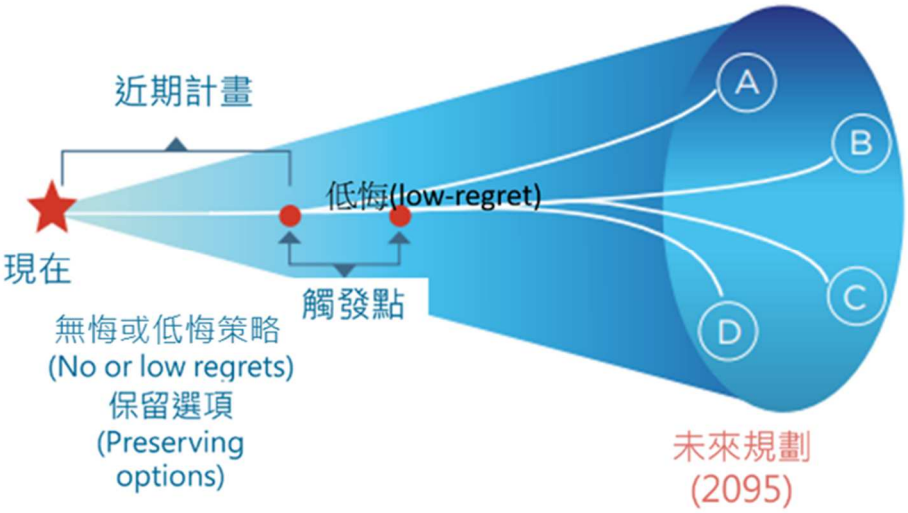
選擇調適選項時經常會面臨未來具有高度不確定性的課題，不確定性之因素包含：未來氣候趨勢變化之推估、人口及土地利用之變化等社會狀況、調適相關政策推動落實情形、最新調適技術發展及後續資金投入能力等，導致在決策過程遇到瓶頸。

面對氣候變遷與社會經濟發展之高度不確定性，應衡量相關領域之間的相互關係，並納入系統性的調適思維，例如考量未來可能各種情境之需求，據以研擬及排序的調適選項。因此，本節摘錄美洲開發銀行（IDB）於 2021 年發布《面對氣候變遷下之交通規劃：DMDU 指引》，提出在氣候變遷調適決策過程中，宜採「不確定性下的決策概念」（參見圖 4.4.4）思考如何研擬短中長期計畫。

考量未來有多種可能性的情況下的決策過程通常具有以下特性：

- 近期計畫以「無悔或低悔策略（no or low regrets）」凝聚共識：設定將於近期採取之調適行動，根據現況實際情形決定於未來幾個月或幾年內進行者，多以「無悔或低悔策略」以凝聚共識，「無悔或低悔策略」係指在面對高度不確定的情境時，不做「某事必然發生」的因應，卻為「即便不發生，也會覺得推動是有意義的」之處置，以確保憾事（後悔）發生的極小化。
- 持續監測觸發點（trigger points）並擬定因應行動：持續監測近期計畫的關鍵趨勢（key trends），當面臨特定趨勢（specific trends）時可能採取新的緊急行動，而這些特定趨勢通常被稱為觸發點、臨界點（tipping points）或臨界值（thresholders）。

- 採取不確定性的概念規劃未來：因應未來不確定性，未來的規劃將有多種可能。在高度不確定之下決策方法包含情境規劃、調適路徑及穩健決策。



資料來源：A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, Inter-American Development Bank, 2021.02.

圖 4.4.4 面對未來不確定性之決策概念

以下介紹「在高度不確定性之下的決策方法」(Decision Making Under Deep Uncertainty, DMDU)，有助於在不確定性高之風險管理背景下制定決策。DMDU 的 3 種方法包含情境規劃、調適路徑及穩健決策，依序說明如下：

1. 方法一：情境規劃（Scenario planning）

情境規劃注重於應對未來各種狀況的規劃方法，透過蒐集與專案之相關資料，研判假設各種未來可能情境，過程中可利用未來情境矩陣進行分析，並為可能情境建立適合的調適計畫。情境規劃共有 8 步驟（參見圖 4.4.5）。

(1) 步驟 1：確立計畫，確定專案所在地區的背景資料，並特別注意規劃重點、規劃範圍與區域現況。

(2) 步驟 2：辨識驅動因子，確定規劃範圍內的驅動因子和決策所面臨的挑戰。

(3) 步驟 3：針對驅動因子進行排序，以確定最關鍵的驅動因子。

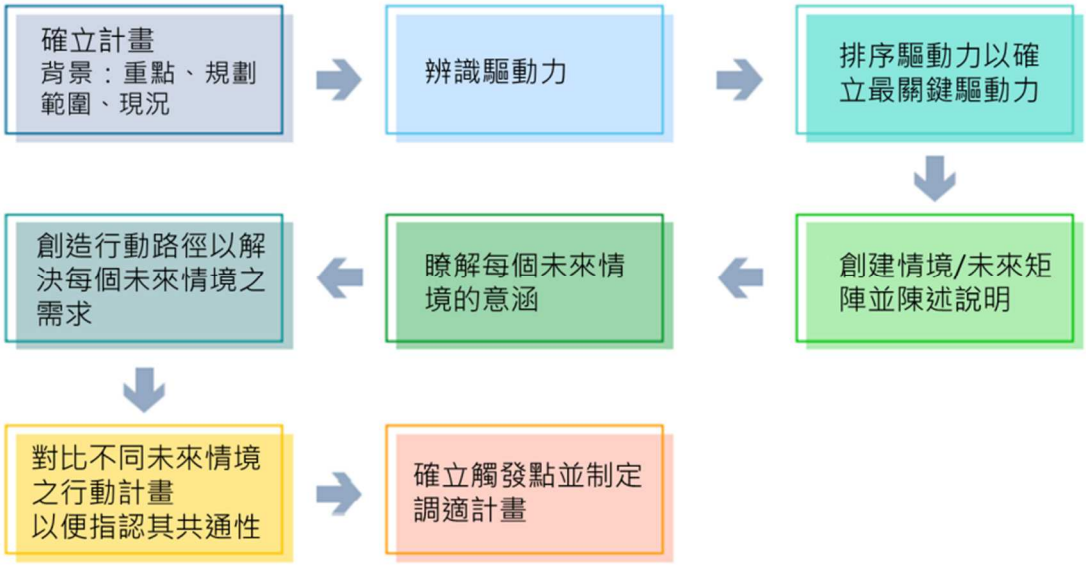
(4) 步驟 4：利用關鍵驅動因子創建未來情境矩陣，並針對該情境合理敘述。

(5) 步驟 5：瞭解每個未來情境的影響，使用定量分析後完整闡述每個情境的意涵。

(6) 步驟 6：規劃調適路徑以解決每個未來情境之需求。

(7) 步驟 7：比較並對比不同未來情境之行動計畫以便指認其共通性，此舉有助於確立未來共同行動。

(8) 步驟 8：確立觸發點（triggers points）並制定調適計畫。



資料來源：A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, Inter-American Development Bank, 2021.

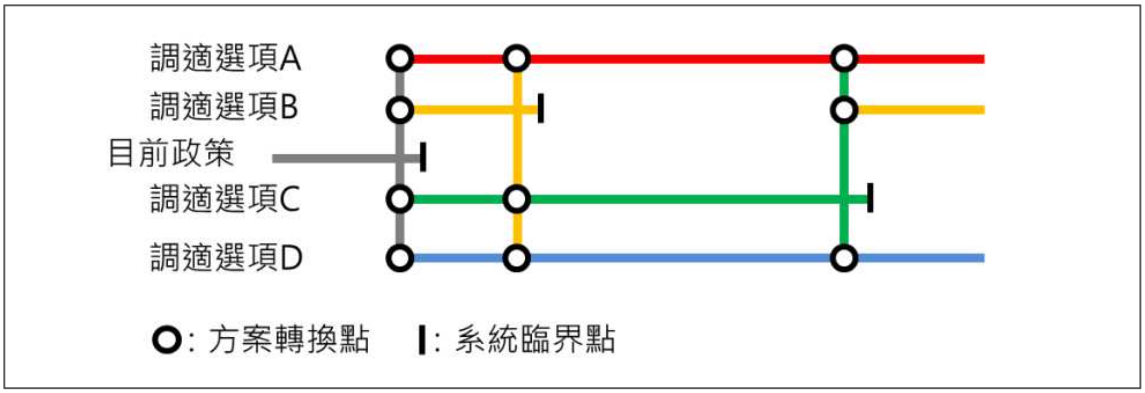
圖 4.4.5 情境規劃 8 步驟

2. 方法二：調適路徑（Adaptive pathways）

提出一系列可能發生之未來情境後，應對所提出之調適選項進行壓力測試，以找出在所有情境下都表現較好，且相對於其他選項具調適韌性。

在進行排序與選出多種表現較佳調適選項組合後，可依據其規劃調適路徑，其中各種調適選項之組合，即代表後續執行調適計畫時的「路徑（即可能採用之調適選項組合及其順序）」。採用調適路徑有助於瞭解調適選項配置的順序，以及如何減少其受到未來情境的不確定性影響。

由於可採行的調適選項往往有多種選擇，故可能產生的「路徑」亦可能為多種選項之組合，若將可能的路徑繪製成圖，便可產生調適路徑圖（參見圖 4.4.6）。



資料來源：Marjolijn Haasnoot, Jan H. Kwakkel, Warren E. Walker, Judith ter Maat, Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world, Global Environmental Change, 2013；氣候變遷調適行動計畫建構指引，國科會 TaiCCAT 計畫，民國 105 年。

圖 4.4.6 調適路徑示意圖

調適路徑包含以下關鍵步驟，說明如下：

(1) 辨識每個替代決策選項的危害級別（level of hazard），並根據計量辨識在何種級別時，該選項將不再提供足夠的性能。此可稱為該臨界點。

(2) 辨識危害情境的幅度（range），並注意每個情境可能達到臨界點的時間。

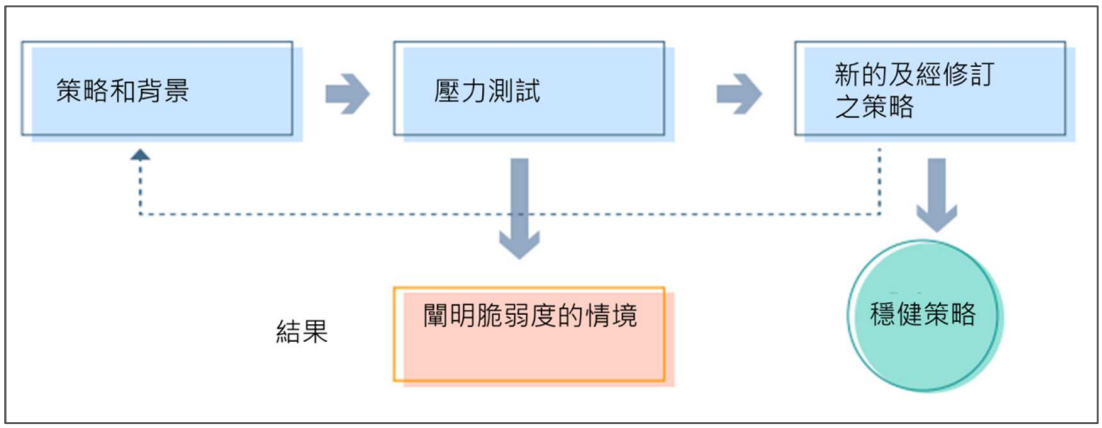
(3) 追踪每個情境如何逐步完成選擇序列。

(4) 訂定可辨識目前情境的指標。

3. 方法三：穩健決策（Robust Decision Making, RDM）

RDM 使用模擬模型來評估未來多種可能路徑中的建議調適選項，其計算生成一個包含模擬模型結果的大型數據庫，此數據庫中的每則紀錄都顯示一種調適選項在其中一個未來的表現，並可針對每個建議調適選項進行壓力測試。透過可視化和數據分析研究並歸納區分出各別調適選項是否能在未來可能條件下達成目標，根據這些條件闡明各別調適選項之脆弱度及利弊權衡。

在每個 RDM 步驟中，所產生的資訊都可能成為對於決策的挑戰，並造成要重新調整決策之狀況，該過程產生關鍵的可交付成果（deliverables），包括闡明策略脆弱度的情境、潛在的穩健策略，以及相互之間的利弊權衡，而其產出結果都代表在高度不確定性下需仰賴可信賴的資訊（見圖 4.4.7）。



資料來源：A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, Inter-American Development Bank, 2021.02.

圖 4.4.7 穩健決策（RDM）過程

4. 未來高度不確定之下的決策方法之應用建議

為協助決策者在未來高度不確定之下的研擬調適選項，可視專案特性及需求來選擇合適的決策方法。在操作 DMDU 的 3 種方法時要遵循「決策達成一致」之流程，即使決策各方對未來情境的各種條件可能性持有不同意見，仍要針對降低風險的行動決定達成一致，如此一來決策各方可認同某些選項比其他選項更穩健，即可在各種可能的未來取得成功。

4.5 小結

本章針對公路系統規劃階段調適機制關鍵之步驟，提供國際上目前採用之調適方法供參考。

考量國內在公路系統規劃階段執行氣候變遷風險評估時，可取得資料及評估成果之量化程度差異，蒐整質性/半量化及量化之氣候風險評估方法供國內參考，並說明各方法之流程步驟供參考。並提供國外適用於公路系統之調適選項，涵蓋面從上到下包括：調適策略、調適方法、解決方案及調適措施等。面對全球氣候變遷之下的高度不確定性因素，多樣化的調適選項類型及多元化組合方式極為適合因應現況所面臨的複合性氣候風險。

此外，決策者在研擬及選擇調適選項的過程中，通常會面臨未來具高度不確定性的課題，故引介「在高度不確定性之下的決策方法」(DMDU)，適用於不確定性高之風險管理背景下制定決策；其中，情境規劃和調適路徑為目前各國普遍採用的決策方法。

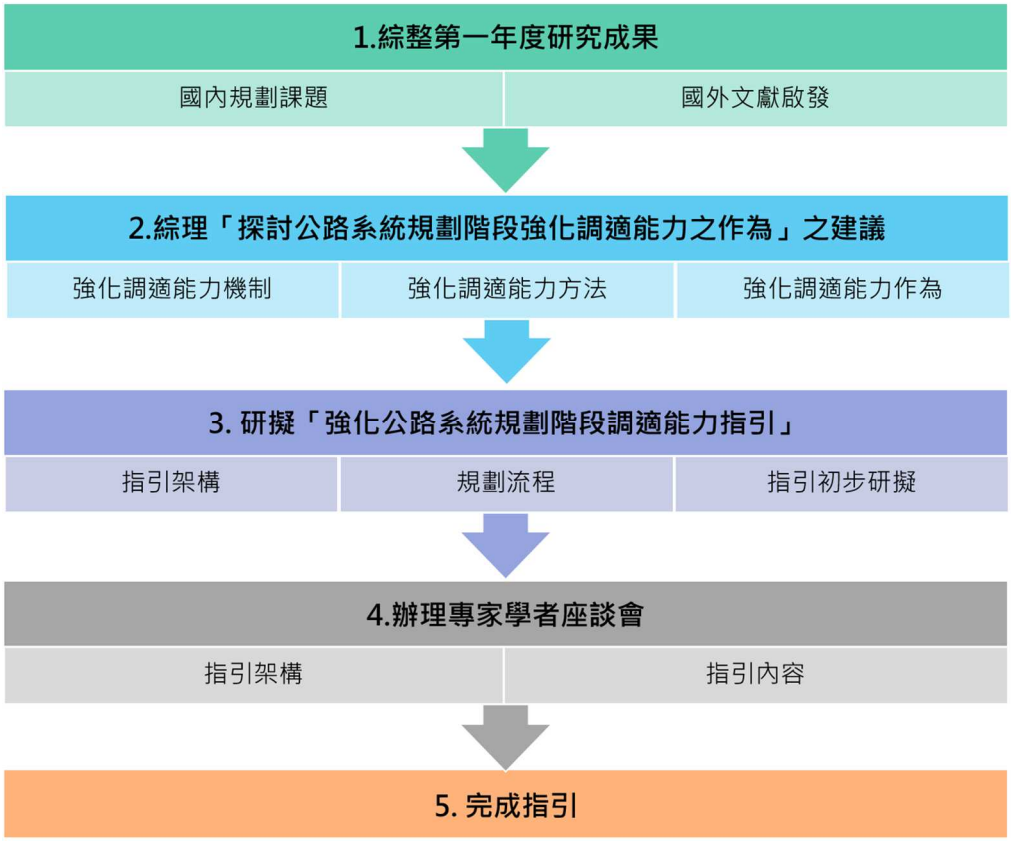
第五章 公路系統規劃階段強化調適能力指引

本章簡述公路系統規劃階段強化調適能力指引之研擬流程、架構與內容，內容計分為 2 節：5.1 節說明研擬流程；5.2 節說明架構及內容。完整指引詳見附錄 4。

5.1 研擬流程

為提升我國公路系統在氣候變遷下的調適能力，本計畫研擬調適指引建議供公路系統設施權責機關參考，以利其務實檢視與調整規劃設計之相關法規或規範，進而強化公路系統之整體調適能力。

「公路系統規劃階段強化調適能力指引」研擬作業流程如圖 5.1.1，工作步驟依據說明如下：



資料來源：本團隊繪製。

圖 5.1.1 「公路系統規劃階段強化調適能力指引」編訂作業流程圖

1. 綜理第一年度研究成果及「探討公路系統規劃階段強化調適能力之作為」之建議

綜理前期計畫研究成果及本計畫「探討公路系統規劃階段強化調適能力之作為」之研究成果做為指引內容的基礎。本計畫透過文獻回顧與公路專家訪談，再確認強化調適能力機制與方法之內容之可行性。

2. 研擬公路系統規劃階段強化調適能力指引

就前述研究成果研擬指引的架構、公路系統強化調適能力的規劃流程，初步研擬指引的內容。

考量公路系統規劃階段調適涉及多項議題，為確保本計畫指引內容能切合公路系統管理者、公路系統專案審查者、公路系統實務規劃者及其他利害關係人的需要，指引結構安排由淺入深，目標為編撰易讀、易懂、易遵循的指引架構及內容。

3. 辦理專家學者座談會

召開專家學者座談會，邀集交通部、公路機關、工程顧問公司等機關與單位就指引之架構、內容與專家學者進行討論交流，蒐集各專家與相關單位對「公路系統規劃階段強化調適能力指引」之建議，以強化指引內容。

本計畫已於 111 年 10 月 13 日辦理「公路規劃強化調適能力指引」專家學者座談會，討論重點包含指引架構與內容等。出席會議之專家學者皆認同本計畫提出指引架構與內容，認為整體方向正確，並肯定所提供之國外調適案例借鏡，並另提供國內實務案例操作說明，期能協助及引導機關深化調適理解，有助於後續調適工作執行及應用。

4. 完成指引

完成研擬「公路系統規劃階段強化調適能力指引」，提供公路於規劃階段強化調適能力之參考。指引已綜理文獻回顧與專家學者座談會之建議，調整前期指引架構與內容，並參酌專家學者所提之國內案例，適時補充於指引，有助於使用者清楚理解所指涉內容之意旨。

5.2 架構及內容

1. 指引目的

指引旨在協助公路系統權責機關與實務從業人員於規劃階段更全盤性、系統性地納入氣候變遷調適理念，以提升我國公路系統在氣候變遷下的調適能力，建構具備氣候韌性的公路系統。

2. 指引架構及內容

由於氣候變遷調適涉及層面極廣，該指引內容主要聚焦於公路系統規劃階段如何融入氣候變遷調適理念的「機制」及「方法」：

(1) 「機制」係指將氣候變遷調適融入公路系統規劃作業之流程與步驟。

(2) 「方法」係指於上述機制內所提及之工作項目應如何操作之方法，例如，執行氣候變遷風險評估及研擬調適選項（adaptation options）的作業方法等。前者係協助公路系統於規劃階段指認出風險缺口所使用的方法，如：風險評估、氣候衝擊鏈分析法…等。後者係指改善現況缺口以提升氣候韌性的各種方法，其涵蓋面從上到下包括：策略（strategies）、方法（approaches）、解決方案（solutions）及措施（measures）等。

指引於第一章導讀說明何謂氣候變遷調適的概念及原則，並蒐整國際氣候變遷調適趨勢；第二章概述臺灣的氣候變遷情境及氣候變遷對於公路系統的衝擊；第三章說明如何將氣候變遷因素融入公路系統之規劃流程，並說明各階段之作業程序；第四章延續所建立之機制，進一步針對機制中較為困難且關鍵之步驟提供國際調適目前採用之方法說明；第五章為結語，同時分享氣候變遷調適的學習資源，期有助於氣候變遷調適能力建構。（表 5.2-1）

表 5.2-1 本指引架構及內容說明表

章	節	標題	子標題	內容摘述
0	摘要			
1	導讀			
1	1.1	前言	1.緣起及目的	1.緣起：為何公路系統需因應氣候變遷調適 2.本指引之目的
			2.適用範疇	1.以省道、快速公路及高速公路為對象 2.主要適用於新建及改建之規劃作業階段 3.指引部分內容具廣泛應用價值
			3.適用對象	1.公路系統管理者：公路管理機關決策者、承辦人員 2.公路系統專案審查者：審查委員、審查作業人員 3.公路系統規劃專業者：專業顧問公司從業人員 4.其他利害關係人
	1.2	名詞定義	調適專有名詞定義	專有名詞定義說明包含氣候變遷、氣候變遷調適、韌性、風險、危害、暴露度、脆弱度、調適能力、風險管理等
	1.3	氣候變遷調適之基本概念	1.全球暖化衝擊與因應：減緩與調適	UNFCCC 於歷次公約會議指出面對全球暖化及氣候變遷現象的兩個主要策略為：減緩與調適
			2.氣候變遷調適	依據溫管法「氣候變遷調適」係指人類系統，對實際或預期氣候變遷衝擊或其影響之調整，以緩和因氣候變遷所造成之傷害，或利用其有利之情勢
			3.氣候變遷調適作為	實務面來看，氣候變遷調適即是管理、處理及治理氣候變遷為系統帶來的風險。因應氣候變遷用以調節氣候風險的各種手段，包含機制面、方法面、政策面等，均可視為調適作為
			4.氣候韌性發展	IPCC AR6 提出「氣候韌性發展」係為減低溫室氣體排放並且強化永續發展的調適行動過程
			5.調適關鍵要素	FHWA 指出任何調適研究應包括五項基本要素

表 5.2-1 本指引架構及內容說明表（續 1）

章	節	標題	子標題	內容摘述
1	1.4	氣候變遷調適最新發展趨勢	1.國際氣候變遷調適最新趨勢(IPCC)	IPCC AR6 摘述全球調適推動現況及其效益
			2.國際氣候變遷調適標準(ISO)	1.ISO 14090 重點摘述 2.ISO 14091 重點摘述
			3.國內氣候變遷調適推動現況與未來方向	從國內文獻摘錄調適推動現況與未來方向
	1.5	指引結構說明	章節架構	章節安排說明由淺入深，建議依序閱讀
2	氣候變遷對公路系統的衝擊			
2	2.1	臺灣氣候變遷推估資訊	1.全球排放情境與增溫幅度推估	IPCC AR6 推估至少到 21 世紀中葉前全球地表溫度將會持續升高
			2.臺灣氣候變遷推估	臺灣各地氣溫未來推估將持續上升，且未來極端高溫事件中，各地高溫 36℃以上日數增加
			3.國家氣候變遷情境設定	提出國內未來氣候變遷情境—以 1.5°C（短期）；2°C（中期）；3℃-4℃（長期）做為國內氣候變遷情境設定
	2.2	氣候變遷對公路系統之衝擊	1.臺灣公路系統面臨的氣候壓力	國內公路系統面臨的氣候壓力因素： 1.強降雨 2.強風 3.高溫 4.暴潮/風浪 5.海平面上升
			2.公路系統之概念與組成	「公路系統」之概念與組成說明： 1.路段尺度 2.路廊尺度 3.路網尺度
			3.氣候變遷對公路系統的潛在衝擊	1.將公路系統區分為路段、路廊及路網三種不同的尺度，分別說明其在氣候變遷環境下面臨的潛在氣候衝擊，並以表格方式呈現 2.臺灣山區公路面臨的衝擊案例：說明路廊複合型潛在危害評估-以台 20 線南橫公路勤和至復興鄉路段為例

表 5.2-1 本指引架構及內容說明表（續 2）

章	節	標題	子標題	內容摘述
3	公路系統規劃階段強化調適能力機制			
3	3.1	公路系統規劃作業流程融入調適概念之框架	公路系統規劃流程融入調適概念之框架	說明公路系統規劃流程融入調適概念的流程圖
	3.2	第一階段：蒐集與分析氣候變遷相關資料	1.增納「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」工作項目 2.作業程序說明	提供國內公開可取得之資料項目以及非公開資之項目及蒐集方法(如維護紀錄等)
	3.3	第二階段：初步評估影響調適能力之氣候風險因素	1.增納「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」工作項目 2.作業程序說明	建議透過專業工作小組會議，邀集有經驗之專業者共同研判初步評估，俾利指認氣候變遷對公路系統之關鍵影響與評估路線方案
	3.4	第三階段：執行氣候變遷風險評估	1.增納「氣候變遷風險評估」工作項目 2.作業程序說明	1.於「建議路線（廊）方案工程研究」執行之前即應啟動氣候變遷風險評估作業，並將評估結果納入後續的規劃作業中。 2.歐洲 DOADAPT 及美國 FHWA 調適框架實測 - 以荷蘭 InnovA58 公路擴建計畫為例
	3.5	公路跨其他運輸系統調適介面整合機制	公路跨其他運輸系統調適介面整合機制	公路規劃循三階段融入氣候變遷調適之理念，倘使該公路系統之區位或是功能涉及其他運輸系統，需另行增加利益相關者或有關機關單位的合作與溝通協調作業
	3.6	本章重要觀念	回顧本章重要觀念	說明如何於規劃流程融入調適以及各階段調適重點
4	公路系統規劃階段強化調適能力方法			
4	4.1	公路系統氣候衝擊鏈分析方法	1.「氣候衝擊鏈」理論基礎	「氣候衝擊鏈」之建構理論基礎為 IPCC AR5 對於「氣候變遷調適」的操作概念以及「氣候衝擊風險」的定義
			2.「氣候衝擊鏈」分析項目	「氣候衝擊鏈」之分析項目包含： 1.氣候壓力因素 2.暴露因素 3.脆弱因素

表 5.2-1 本指引架構及內容說明表（續 3）

章	節	標題	子標題	內容摘述
4	4.1	公路系統氣候衝擊鏈分析方法	3.公路系統所在環境區位與氣候壓力因素	公路系統之氣候衝擊類型及程度與所處區位地理環境有關，臺灣地區之山區與平原公路系統所面臨的氣候壓力因素有別
			4.公路系統氣候衝擊鏈分析方法之參考案例	提供示範氣候衝擊鏈分析方法： 1.山區公路系統之氣候衝擊鏈分析-強降雨 2.平原公路系統之氣候衝擊鏈分析-暴潮/風浪及海平面上升
			5.公路系統氣候衝擊鏈分析方法之應用建議	建議各專案應透過專家工作小組共同討論，據以產出專屬各公路專案之氣候衝擊鏈分析成果
	4.2	公路系統氣候風險評估之方法	1.日本獨立行政法人國際協力機構:氣候風險評估及調適指引（2019 年）	氣候風險評估之建議流程： 1.氣候風險評估準備流程 2.氣候風險評估執行流程
			2.加拿大英屬哥倫比亞省交通局:公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計－實務指引（2020 年）	1.針對公路基礎設施之風險評估層級及氣候風險評估程序建議 2.篩選層級之風險評估方法案例-以交通部運輸研究所鐵公路風險地圖為例
			3.公路系統氣候變遷評估方法之應用建議	針對中高風險者進行定性評估，最後僅選出高風險之重大基礎設施進一步定量評估
	4.3	公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項	1.FHWA－以綜合方法提升專案開發的氣候韌性（2017 年）	公路工程領域的調適選項綜理歸納為五種類型： 1.管理和維護 2.增加備援力 3.保護 4.調整 5.搬遷
			2.FHWA－以自然為本提升海岸公路韌性的解決方案（2019 年）	介紹運用於海岸公路以自然為本的解決方案常見的手法
			3.IPCC AR6 綜整之運輸系統調適選項（2022 年）	應用於運輸系統之調適選項，主要可分為四大類： 1.硬保護 2.調整與升級 3.搬遷 4.以自然為本的調適措施

表 5.2-1 本指引架構及內容說明表（續 4）

章	節	標題	子標題	內容摘述
4	4.3	公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項	4.公路系統調適選項列舉說明	提供公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表，以利決策者理解及應用
			5.公路系統調適選項之應用建議	1.說明實務應用通常需因地制宜搭配多個調適選項 2.如何研擬調適選項案例： 美國波士頓地區 MPO 研擬調適選項為例
	4.4	面對高度不確定性之決策方法	1.方法一：情境規劃	情境規劃注重於應對未來各種狀況的規劃方法，過程中可利用未來情境矩陣進行分析
			2.方法二：調適路徑	由於可採行的調適選項往往有多種選擇，故可能產生的「路徑」亦可能為多種選項之組合
			3.方法三：穩健決策	RDM 使用模擬模型來評估未來多種可能路徑中的建議調適選項
			4.未來高度不確定之下的決策方法之應用建議	為協助決策者在未來高度不確定之下研擬調適選項，可視專案特性及需求選擇合適的決策方法
	4.5	本章重要觀念	回顧本章重要觀念	提供國際上目前採用之調適方法的綜整說明
5	結語			
5	5.1	結語	結語	總結公路系統應及早於新建或改建之規劃階段，即應融入調適理念
	5.2	學習資源	學習資源	提供國內外常用的氣候變遷調適相關資訊網站列表
	參考文獻			

資料來源：本計畫彙整。

第六章 結論與建議

本計畫蒐集與分析目前國外運輸系統調適發展趨勢、探討公路系統規劃階段強化調適能力之作為，據以研提我國公路系統規劃階段強化調適能力指引，供公路系統設施權責機關參考應用，俾提升公路系統因應氣候變遷之調適能力；同時，協助各部屬設施管理機關（構）人員推動調適相關業務，持續辦理調適專業知識教育訓練工作。

以下綜理本計畫之研究結論，並提出運輸系統氣候變遷調適工作推動及後續公路系統調適研究方向之建議供參考。

6.1 結論

1.國際氣候變遷調適發展趨勢

綜整國際氣候變遷調適新趨勢可發現，國際上普遍來說依舊存在調適缺口尚待因應。然隨著氣候變遷影響加劇，氣候變遷衝擊及風險將變得更為複雜，完善的調適規劃勢在必行。另在調適規劃及資金準備的初期，即應考量調適及減緩行動間相互的關聯，以提高調適及減緩之綜效。

由於調適牽涉範圍廣，多需跨部會合作，可參考國際調適作法，如蘇格蘭及愛爾蘭的運輸部門在規劃與開發程序中加強與其他相關單位的合作，並將氣候變遷相關規範納入國家投資計畫內，鼓勵跨部門單位共同合作相關調適研究，以利更全面性管理及因應氣候變遷的衝擊。

2. 蒐集與分析國際公路系統氣候變遷調適文獻

本計畫回顧國際標準組織 2019 年發布之《ISO14090 氣候變遷調適—原則、規定與指導》、2021 年發布之《ISO14091 氣候變遷調適—脆弱度、衝擊與風險評估指引》，以及國外公路系統規劃階段調適指引，綜整公路規劃階段應考量之面向，歸納發現各國的調適框架流程相似，均包含考量現況與未來的氣候資料、進行風險評估或脆弱度分析、依據風險評估的結果研擬調適選項等，惟在流程中可取得資料的蒐集與考量的細緻度、考量的時間軸，以及利害關係人合作的程度存在一定的差異性；已做為本計畫研擬公路系統規劃階段強化調適能力指引之基礎。

另在回顧適用於公路系統規劃階段之調適選項發現，國外調適研究及實務案例報告所採用的調適選項頗為多元，常見的調適選項類型包含管理及維護、增加備援、保護、調整、搬遷及以自然為本的解決方案等，而多樣化的調適選項類型及多元化組合方式極為適合國內因應現況所面臨的複合性氣候風險。

3. 公路系統規劃階段強化調適能力機制

公路系統規劃階段之作業流程可概分為資料蒐集分析、方案研擬與評估，以及工程研究與評估 3 個作業階段。為具體融入氣候變遷風險調適理念，於各作業階段增加氣候變遷調適相關作業程序，詳以下說明。

(1) 第一階段：資料蒐集分析

建議於資料蒐集分析階段，增納未來氣候變遷情境與氣候推估相關資料的蒐集與分析工作；即規劃團隊可就建設計畫所在之區域，未來較可能會受到的氣候變遷衝擊進行相關資料蒐集及分析。

視公路系統之區位特性，蒐集相關氣候變遷情境與氣候資料，如未來推估的平均氣溫、降水量及降雨日數、颱風、暴潮/風浪、強風等狀況。其資料來源建議可參考經濟部水利署水利資料開放平台以及國科會（NSTC）與國家災害防救科技中心（NCDR）合作建立之臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）等網站取得最新之分析資料。

(2) 第二階段：初步評估影響調適能力之氣候風險因素

由於氣候變遷的影響，許多氣候參數都呈現年均值增加或減少，出現越來越高的極端值與季節性變異的趨勢，故初步評估在公路系統服務年限內可能影響氣候風險的關鍵因素為氣候變遷調適的重要工作。

建議儘量透過工作坊邀集有經驗的專業者及利害關係人共同研判評估，以初步掌握氣候變遷可能對專案的衝擊，並據以選擇避開高氣候風險的路線（廊）方案。

(3) 第三階段：氣候變遷風險評估

建議於第三階段納入氣候變遷風險評估作業，因應氣候變遷的不確定性，且調適的措施亦有工程極限與預算限制，故於「建議路線（廊）方案工程研究」執行之前即應啟動氣候變遷風險評估作業，並將評估結果納入後續的規劃作業中，以利達到最大效果的公路系統韌性提升。

4. 公路系統規劃階段強化調適能力方法

(1) 公路系統氣候衝擊鏈分析方法

其操作的核心概念係「在氣候變遷的情境之下對於『氣候衝擊風險』進行有效的管理」。「氣候衝擊風險」取決於 3 種主要面向－暴露度（exposure）、脆弱度（vulnerability）及危害（hazard），3 種面向的交集決定了風險，風險的大小與內容則依據 3 者的交互關係而定。為解析影響氣候衝擊風險之因素，本計畫提供氣候衝擊鍊風險分析方法，其項目包含氣候壓力因素、暴露因素、脆弱因素，說明如下：

① 氣候壓力因素：與氣候變遷有關的情況、事件或趨勢，可能對公路系統造成衝擊。影響臺灣公路系統之五大氣候壓力因素包含：強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪、海平面上升。

② 暴露因素：公路系統位於易受衝擊的地區（例如，淹水潛勢區、地質敏感區或坡災潛勢區等）的範圍及程度。

③ 脆弱因素：公路系統本身容易受衝擊的特性、以及一旦失能可能影響的範圍及程度（例如，唯一維生聯外道路）。

(2) 公路系統氣候風險評估之方法

氣候變遷風險評估依據可取得資料及評估量化程度，大致可分為偏質性及半量化之氣候風險評估和量化程度較高之氣候風險評估，前者可適用於方案研擬與評估階段，在現況仍缺乏足夠數據難以進行量化分析或其能投入資源相對匱乏者使用；後者較適用於工程研究階段，特別是已確定路線方案後之工程規劃及基本設計，其公路專案之基礎設施韌性研究可取得足夠數據及分析工具，以進行量化分析者。

(3) 公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項

由於國內公路系統規劃階段目前尚無系統性考量氣候變遷調適，故進一步綜理國內外文獻，依據公路系統規劃階段不同的分析尺度，綜理可供參考的調適選項，詳見第 3.3 節。

(4) 面對高度不確定性之決策方法

選擇調適選項時經常會面臨未來具有高度不確定性的課題，導致在決策過程遇到瓶頸。面對氣候變遷與社會經濟發展之高度不確定性，應衡量相關領域之間的相互關係，並納入系統性的調適思維，考量未來可能各種

情境之需求，據以研擬及排序合適的調適選項。面對高度不確定性之決策方法包含：

① 情境規劃（Scenario Planning）

② 調適路徑（Adaptive Pathways）

③ 穩健決策（Robust Decision Making, RDM）

5. 研擬公路系統規劃階段強化調適能力指引

公路系統規劃階段強化調適能力指引最核心的目的在協助熟練的公路專業規劃者，於專案規劃過程中融入氣候變遷調適的考量，在過程中除了既有的公路規劃知識之外，並可與氣候科學專家及公路系統的其他利害關係人一起工作。

該指引架構為第一章導讀說明何謂氣候變遷調適的概念及原則，並蒐整國際氣候變遷調適趨勢；第二章概述臺灣的氣候變遷情境及氣候變遷對於公路系統的衝擊；第三章說明如何將氣候變遷因素融入公路系統之規劃流程，並說明各階段之作業程序；第四章延續所建立之機制，進一步針對機制中較為困難且關鍵之步驟，提供國際調適目前採用方法之說明；第五章為結語，臚列蒐集國內外氣候變遷調適的學習資源，期能從有助於氣候變遷調適能力建構。研究成果詳見第 5.2 節及附錄 4。

6.2 建議

綜理本計畫執行過程中之觀察及發現，參考《國家因應氣候變遷行動綱領》之原則：「強化科學基礎…提升因應氣候變遷之調適作為及建構韌性發展。」與《溫室氣體減量及管理法修正草案總說明》(已修正為《氣候變遷因應法》，並於 112 年 2 月 15 日發布施行)之調適新增法條，提出後續調適工作推動建議與調適研究重點建議，分項說明如下：

1. 後續調適工作推動建議

以下就本計畫蒐集與辨識之調適課題與建議之調適策略推動順序提出後續調適工作推動建議，供運輸設施管理機關（構）與相關機關（構）參考：

(1) 調適預算與資金需於國內部會中長期預算籌編，爭取足夠的資金推動政府調適計畫優先事項並滿足調適工作的需求

國內的調適計畫目前較少有專門的調適預算或基金做執行,調適行動計畫與其他面向的行動計畫競爭資源,受預算研擬的流程與調適概念及知識尚未主流化的種種限制，尤其，調適行動計畫較不易反映短期效益，導致調適預算的推動有所困難，故需政府政策方向的介入與領導，推動調適預算編列的法源依據並落實調適主流化,以爭取足夠資金推動調適相關工作。

(2) 調適思維的推動與主流化

除了政府的領導，設施管理機關（構）的認同與向心力一樣重要，透過工作坊、培訓及訂定規範等，深化機關（構）對調適與系統韌性的認識與其重要性的認同。為了加強認同性，可透過工作坊、教育訓練等課程活動分享調適觀念,建議各機關(構)也應適時對內及對外宣導其調適作為。

另外，為加速推動調適工作，亦可將氣候變遷調適納入「部頒規範」或「採購契約」2 種方式,前者係依實務上面臨的情況直接修正部頒規範,後者為公路主管機關自行納入綜合規劃、設計之採購契約中。

(3) 加強推動跨部門整合與資訊共享

調適非單一部門之工作,透過跨部門的合作與資料共享有助於強化調適能力。例如，各系統的聯外道路、跨運輸系統的備援機制及整體的韌性運輸環境都需仰賴跨部門的合作,建議加強跨部門相關資料之分析應用並整合於一平台，以便快速掌握整體運輸系統的狀況讓執行單位參照，共同提升系統的衝擊耐受力，於受氣候變遷衝擊時，啟動共同應變，降低受天氣事件之衝擊。

2. 「公路系統規劃階段強化調適能力作為與指引」後續研究重點建議

為持續深化調適之科學研究並做為調適工作推動之基礎與參考,建議強化其上位指導功能，以利後續公路系統管理機關、目的事業主管機關（構）與相關機關（構）持續研究並提升調適能力：

(1) 針對國內公路系統氣候變遷風險評估之方法深入研究

目前國內公路管理機關較少執行氣候變遷風險評估之經驗,如何導入氣候變遷情境、執行風險評估，進而改善既有作為，係過程中最困難與關鍵的步驟。故建議後續可進一步透過案例研析與操作，提出符合國情之氣候變遷風險評估實務操作建議，做為國內調適作為推動之參考應用。

(2) 公路系統規劃階段強化調適能力指引之運用

建議公路管理機關透過研提公路系統調適計畫或案例，運用本指引所提出之強化調適能力機制與方法，於規劃階段著手思考對應的調適方法，強化公路系統之氣候韌性。

(3) 滾動檢討公路系統規劃階段強化調適能力指引

延續本期研究主題「強化公路系統規劃階段調適能力作為與指引」，建議我國公路系統之利害關係人透過做中學的過程，累積本土的調適經驗與知識。本指引只是一個開始，建議後續可賡續蒐集與研析臺灣公路系統氣候變遷調適的實務經驗，以及國外實務應用案例，據以滾動檢討指引內容。

(4) 調適研究資料共享與互惠

因應氣候變遷之衝擊，許多部會亦積極辦理調適議題相關研究，建議未來本系列研究可強化與其他有關部會之交流（如國科會、經濟部水利署等），以跨部門研究成果厚植公路系統規劃階段強化調適能力的資源基礎。

參考文獻

1. 溫室氣體減量及管理法，民國 104 年 7 月（112 年 2 月 15 日總統華總一義字第 11200010681 號令修正公布名稱：氣候變遷因應法及全文 63 條）。

2. 行政院環境保護署(現為環境部)，國家因應氣候變遷行動綱領，民國 106 年（行政院 112 年 11 月 3 日核定「國家因應氣候變遷行動綱領」(核定本))。

3. 行政院，國家氣候變遷調適行動方案（107-111 年)，民國 108 年。

4. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, 2021.

5. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, 2022.

6. 國科會、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象署、臺灣師範大學地球科學系、國家災害防救科技中心，IPCC 氣候變遷第六次評估報告（AR6)「衝擊、調適與脆弱度」之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告，民國 111 年。

7. European Commission, Forging a Climate-resilient Europe – the New EU Strategy on Adaptation to Climate Change, 2021.

8. 國家災害防救科技中心，日本氣候變遷調適策略，https://dra.ncdr.nat.gov.tw/Frontend/Disaster/StrategyDetail/BAL0000037。

9.the International Organization for Standardization, ISO 14091 Adaptation to Climate Change－Guidelines on Vulnerability, Impacts and Risk Assessment, 2021.

10.國家發展委員會，國家氣候變調適政策綱領，民國 101 年。

11.國家災害防救科技中心，臺灣氣候變遷科學報告 2017-物理現象與機制，民國 106 年。

12.Scottish Government, Climate Ready Scotland: Second Scottish Climate

Change Adaptation Programme 2019-2024, 2019.

13.Department of Transport, Tourism and Sport, Transport Climate Change Sectoral Adaptation Plan, 2019.

14.Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

15. Weilant, S., Strong, A., Incorporating Resilience into Transportation Planning and Assessment. The RAND Corporation, 2019.

16.National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Investing in Transportation Resilience: A Framework for Informed Choices, 2021.

17.Reeves, S., Winter, M., Leal, D., and Hewitt, A. May. Rail: An Industry Guide to Enhancing Resilience Primer. TRL and Resilience Shift, UK, 2019.

18.River Bureau（Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan）, Practical Guidelines on Strategic Climate Change Adaptation Planning -Flood Disasters, 2010.

19.National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.

20.Conference of European Directors of Roads, Roadapt: Roads for Today, Adapted for Tomorrow Guidelines, 2015.

21.Federal Highway Administration, Vulnerability Assessment and Adaptation Framework, 2017.

22.Engineers and Geoscientists British Columbia, Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia，2020.

23.Inter-American Development Bank, A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, 2021.

24.Federal Highway Administration, Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development, 2017.

25.Federal Highway Administration, Nature-Based Solutions for Coastal

Highway Resilience: an Implementation Guide, 2019.

26.Boston Region Metropolitan Planning Organization, Exploring Resilience in MPO-Funded Corridor and Intersection Studies, 2021.

27.國科會、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象署、臺灣師範大學地球科學系、國家災害防救科技中心，IPCC 氣候變遷第六次評估報告（AR6）之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告，民國 110 年。

28.交通部，交通統計要覽：附錄-12 交通天然災害概況，民國 108 年。

29.國家災害防救科技中心，臺灣氣候變遷科學報告 2017-衝擊與調適面向，民國 106 年。

附錄 1

計畫摘要

附錄 1 計畫摘要

一、計畫緣起與目的

1. 計畫緣起

為健全各領域因應氣候變遷的調適能力，我國於 104 年 7 月公布施行《溫室氣體減量及管理法》(以下簡稱《溫管法》，已修正為「氣候變遷因應法」，並於 112 年 2 月 15 日經總統公布施行)。《溫管法》第 13 條明定中央目的事業主管機關應進行調適策略之研議，並配合每年提送氣候變遷調適成果。前揭事項在運輸系統上涉及不同運輸設施權責機關（構），係屬交通部層級之施政策略方向，爰需對於整體運輸設施有上位政策之探討。

為提升國內運輸系統調適能力，交通部運輸研究所（以下簡稱本所）自 106 年起著手進行調適策略之研究，爾後持續透過蒐集國際調適新趨勢與作為、掌握國內機關調適相關工作推動狀況以及關注新科技之應用趨勢等，滾動檢討運輸系統調適策略。

運輸子系統中尤以公路系統與民眾之生活最為息息相關，惟我國既有之公路系統規劃機制及相關規範對於氣候變遷調適之考量仍有不足之虞，公路系統一旦營運中斷對於經濟與民生之衝擊不言可喻。爰公路系統更需於規劃階段及早融入氣候變遷調適之理念，以有效提升面臨極端事件之因應能力。

爰本所延續前期研究成果，持續掌握國際最新調適趨勢，引導國內各運輸系統設施權責機關（構）之調適作為能與國際接軌；研提公路系統規劃階段之調適指引建議，供公路系統設施權責機關參考，俾提升公路系統因應氣候變遷之調適能力；深化各部屬設施權責機關（構）人員對氣候變遷與調適的認識，持續辦理調適專業知識教育訓練，以利運輸系統調適相關業務之推動。

2. 計畫目的

綜上，本計畫之主要目的如下：

(1) 探討公路系統於規劃階段可強化調適能力之作為(機制與方法)，研究成果提供公路設施權責機關應用參考。

(2) 研擬公路系統規劃階段強化調適能力指引，提供公路設施權責機關參考，以利其務實檢視與調整規劃設計之相關法規或規範，進而強化公路系統之整體調適能力。

(3) 辦理教育訓練，提升各運輸系統設施權責機關（構）人員的氣候變遷調適專業知識。

二、重要工作成果

1. 國際氣候變遷調適發展趨勢

綜整國際氣候變遷調適新趨勢可發現，國際上普遍來說依舊存在調適缺口尚待因應。然隨著氣候變遷影響加劇，氣候變遷衝擊及風險將變得更為複雜，完善的調適規劃勢在必行。另在調適規劃及資金準備的初期，即應考量調適及減緩行動間相互的關聯，以提高調適及減緩之綜效。

由於調適牽涉範圍廣，多需跨部會合作，可參考國際調適作法，如蘇格蘭及愛爾蘭的運輸部門在規劃與開發程序中加強與其他相關單位的合作，並將氣候變遷相關規範納入國家投資計畫內，鼓勵跨部門單位共同合作相關調適研究，以利更全面性管理及因應氣候變遷的衝擊。

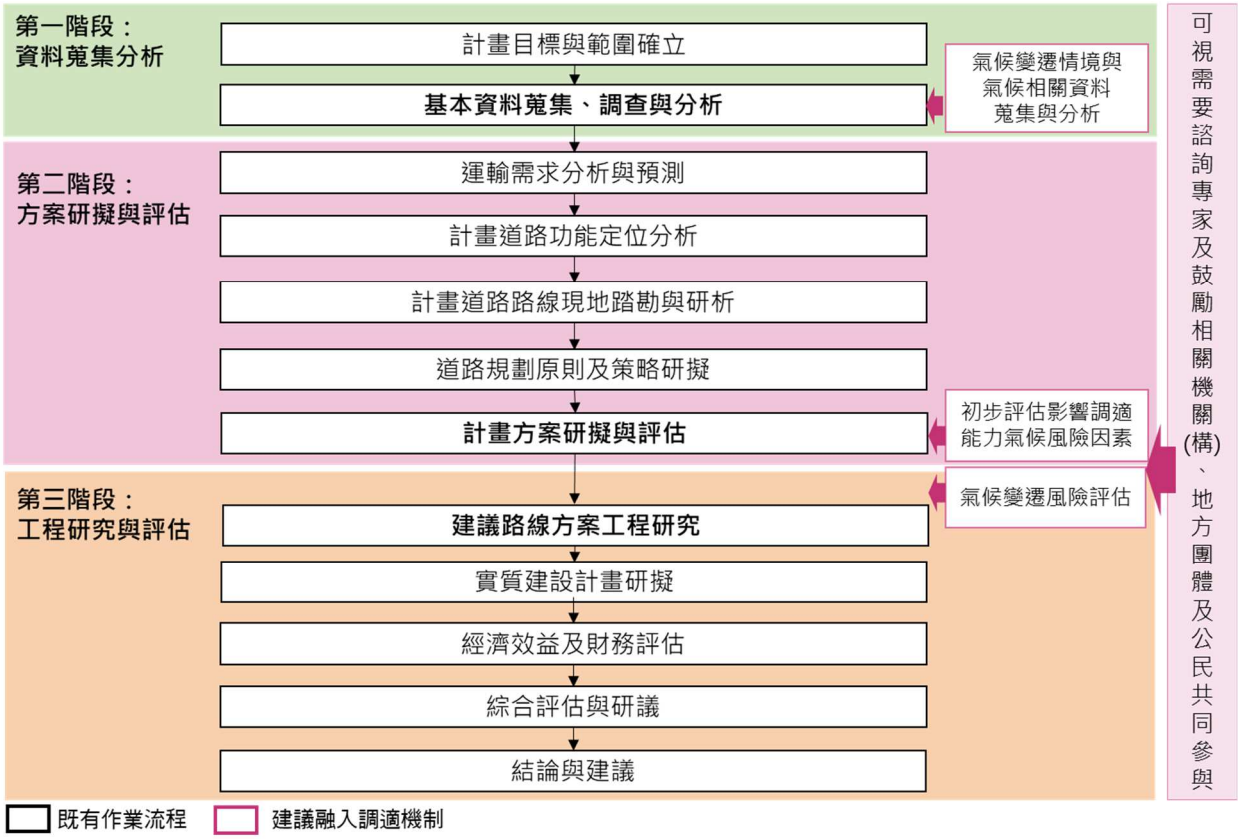
2. 蒐集與分析國際公路系統氣候變遷調適文獻

本計畫回顧國際標準組織 2019 年發布之《ISO14090 氣候變遷調適—原則、規定與指導》、2021 年發布之《ISO14091 氣候變遷調適—脆弱度、衝擊與風險評估指引》，以及國外公路系統規劃階段調適指引，綜整公路規劃階段應考量之面向，歸納發現各國的調適框架流程相似，均包含考量現況與未來的氣候資料、進行風險評估或脆弱度分析、依據風險評估的結果研擬調適選項等，惟在流程中可取得資料的蒐集與考量的細緻度、考量的時間軸，以及利害關係人合作的程度存在一定的差異性；已做為本計畫研擬公路系統規劃階段強化調適能力指引之基礎。

另在回顧適用於公路系統規劃階段之調適選項發現，國外調適研究及實務案例報告所採用的調適選項頗為多元，常見的調適選項類型包含管理及維護、增加備援、保護、調整、搬遷及以自然為本的解決方案等，而多樣化的調適選項類型及多元化組合方式極為適合國內因應現況所面臨的複合性氣候風險。

3. 公路系統規劃階段強化調適能力機制

公路系統規劃階段之作業流程可概分為資料蒐集分析、方案研擬與評估以及工程研究與評估 3 個作業階段（參見附圖 1.1）。



資料來源：本計畫繪製。

附圖 1.1 公路系統規劃作業流程融入調適理念之框架

為具體融入氣候變遷風險調適理念，於各作業階段增加氣候變遷調適相關作業程序（參見附圖 1.2），詳以下說明。

(1) 第一階段：資料蒐集分析

建議於資料蒐集階段增納未來氣候變遷情境與氣候推估相關資料的蒐集與分析之工作，規劃團隊可就建設計畫所在之區域未來較可能會受到的氣候變遷影響進行資料蒐集。

依據各專案不同的環境區位特徵，指認在各種氣候壓力因素下應納入考量的氣候參數，如降雨（強度、頻率）、溫度（均溫、最高溫、最低溫）、風（平均風速、最大陣風、風向）、海平面（潮位、暴潮/風浪）、河水（水位、流量、沖刷量）等。

視公路系統之區位特性，蒐集相關氣候變遷情境與氣候資料，如未來推估的平均氣溫、降水量及降雨日數、颱風、暴潮/風浪、強風等狀況，建議可參考經濟部水利署水利資料開放平台以及國科會（MOST）與國家災害防救科技中心（NCDR）合作建立之臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）等網站取得最新之分析資料。

(2) 第二階段：初步評估影響調適能力之氣候風險因素

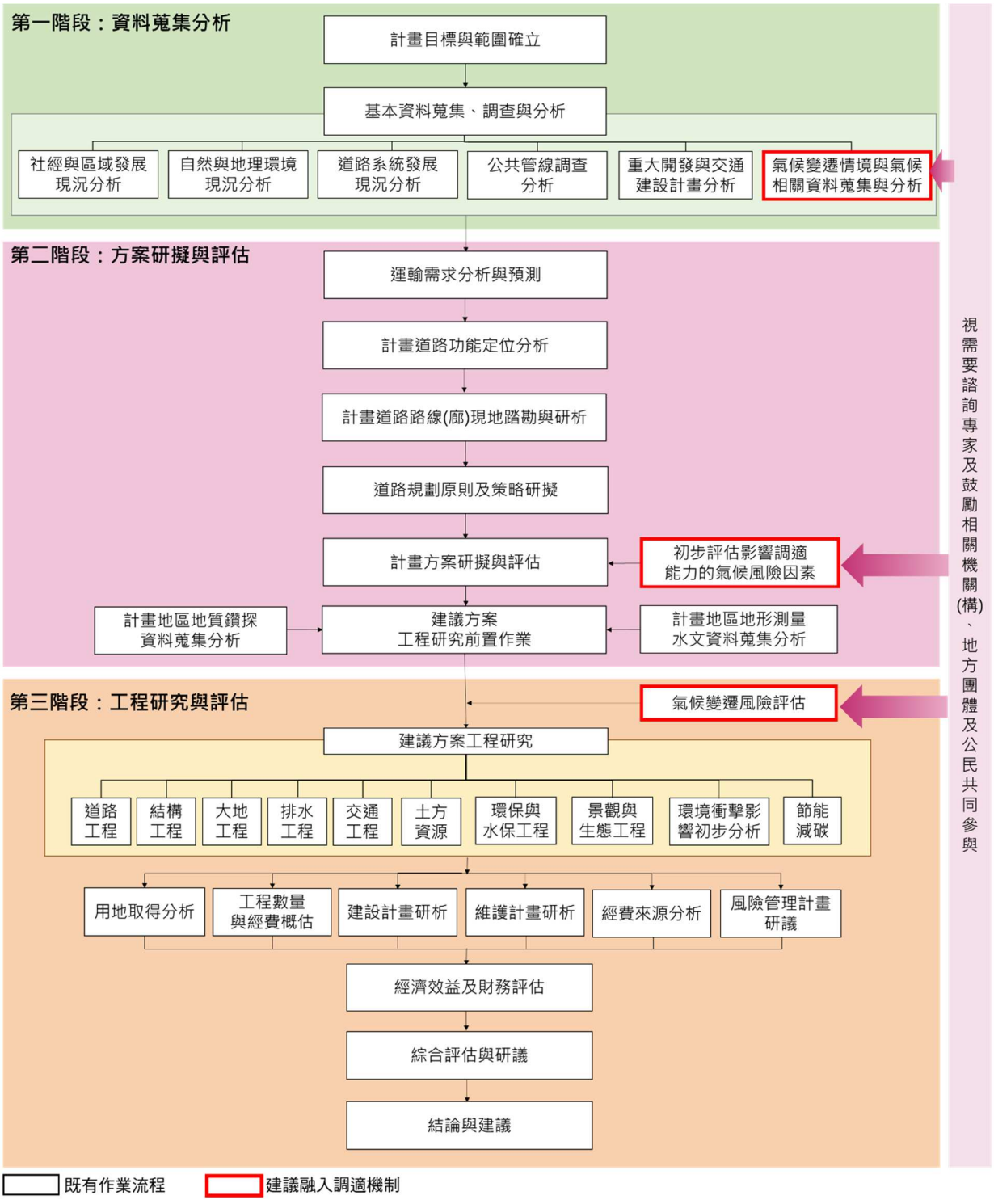
由於氣候變遷的影響，許多氣候參數都呈現年均值增加或減少，出現越來越高的極端值與季節性變異的趨勢，故初步評估在公路系統服務年限內可能影響氣候風險的關鍵因素為氣候變遷調適的重要工作。

前述關鍵因素可分為氣候危害因素（例如，強降雨、強風、高溫等）、公路系統本身的脆弱因素（例如，材料缺乏耐候性、缺乏替代道路）以及公路系統暴露在氣候危害因素的程度（例如，經過地層下陷地區增加強降雨導致的淹水）。由於此階段之資料以二手資料為主，可能尚缺乏精準性，建議儘量透過工作坊邀集有經驗的專業者及利害關係人共同研判評估，以初步掌握氣候變遷可能對專案的衝擊，並據以選擇避開高氣候風險的路線（廊）方案。

(3) 第三階段：氣候變遷風險評估

建議於第三階段納入氣候變遷風險評估作業，因應氣候變遷的不確定性，且調適的措施亦有工程極限與預算限制，故於「建議路線（廊）方案

工程研究」執行之前即應啟動氣候變遷風險評估作業，並將評估結果納入後續的規劃作業中，以利達到最大效果的公路系統韌性提升。



資料來源：本計畫繪製。

附圖 1.2 公路系統規劃階段強化調適能力機制說明圖

4. 公路系統規劃階段強化調適能力方法

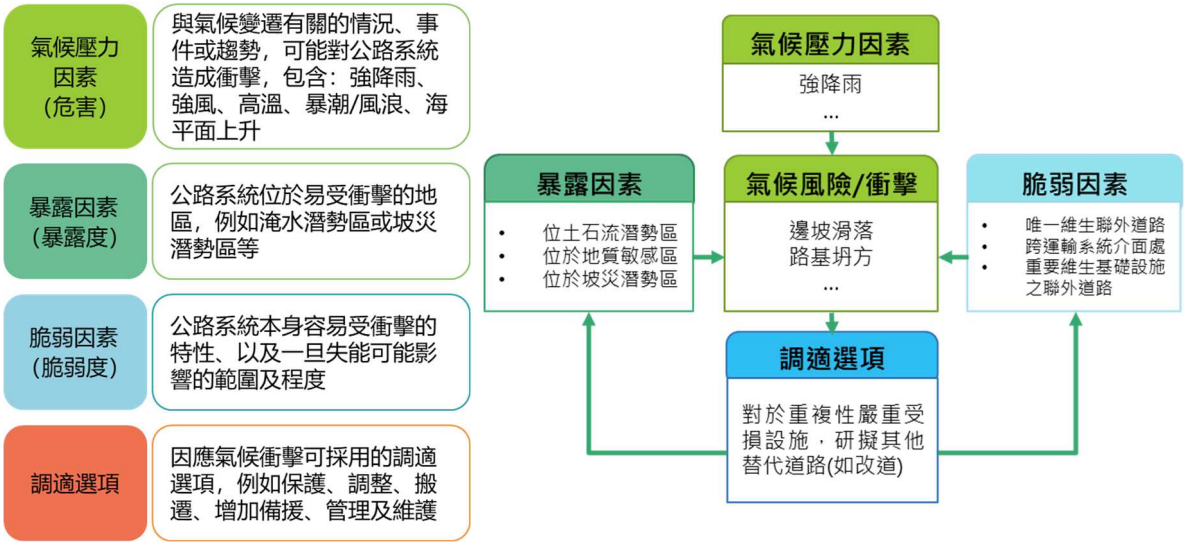
(1) 公路系統氣候衝擊鏈分析方法

其操作的核心概念係為「在氣候變遷的情境之下對於『氣候衝擊風險』進行有效的管理」。「氣候衝擊風險」取決於 3 種主要因素－暴露度（exposure）、脆弱度（vulnerability）及危害（hazard），3 種因素的交集決定了風險，風險的大小與內容則依據 3 者的交互關係而定。故氣候衝擊風險分析項目包含氣候壓力因素、暴露因素、脆弱因素，說明如下：

① 氣候壓力因素：與氣候變遷有關的情況、事件或趨勢，可能對公路系統造成衝擊。影響臺灣公路系統之 5 大氣候壓力因素包含：強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪、海平面上升。

② 暴露因素：公路系統位於易受衝擊的地區（例如，淹水潛勢區、地質敏感區或坡災潛勢區等）的範圍及程度。

③ 脆弱因素：公路系統本身容易受衝擊的特性，以及一旦失能可能影響的範圍及程度（例如唯一維生聯外道路）。



附圖 1.4 氣候衝擊鏈分析示例說明

(2) 公路系統氣候風險評估之方法

氣候變遷風險評估依據可取得資料及評估量化程度，大致可分為偏質性及半量化之氣候風險評估和量化程度較高之氣候風險評估，前者可適用於方案研擬與評估階段，在現況仍缺乏足夠數據難以進行量化分析或其能

投入資源相對匱乏者使用；後者較適用於工程研究階段，特別是已確定路線方案後之工程規劃及基本設計，其公路專案之基礎設施韌性研究可取得足夠數據及分析工具，以進行量化分析者。

國內公路系統規劃階段包含可行性研究和綜合規劃，在執行氣候變遷風險評估時，可依據專案特性、可取得之資料及組織人力財務資源等因素，選擇較適合且具實務操作可行的氣候風險評估方法來執行。

偏質性及半量化之氣候風險評估參考日本 JICA 氣候風險評估方法摘要如下：

① 準備流程：包含釐清專案目標、投入項目、執行單位、區位、受益對象、時程等六大必要事項；另外，要與地方利害關係人取得共識，並制定數據蒐集計畫、審查現行二手資料真實性、進行實地調查蒐集必要資料及數據等。

② 執行流程：先與地方執行機關確認專案架構，諸如專案目標、投入項目、執行單位、區位、受益對象、時程等六大必要事項，並在預先訂定氣候風險評估之時程後，運用「氣候風險矩陣」指認相關風險，建立氣候風險樹狀圖（climate risk tree），選取將對專案執行造成重大衝擊之氣候風險，擬訂相應的調適措施，由效益、財務及技術可行性兩面向，分析調適措施實行之優先次序，依序補充於氣候風險樹狀圖中。最後，擇優先次序高之調適措施研擬執行計畫。

量化程度較高之氣候風險評估參考加拿大英屬哥倫比亞省交通局應用於公路韌性設計之氣候風險評估方法，氣候風險評估分為篩選級風險評估（Screening-Level Risk Assessment）、脆弱度分析或評估（Vulnerability analysis or assessment）、工程分析（Engineering analysis）等 3 種層級，摘要如下：

① 執行篩選層級之風險評估：透過廣泛蒐集氣候變遷風險的資料並彙整分析即可完成篩選層級之風險評估，透過較低成本的投入瞭解該專案是否需要採取更細部之風險評估及分析。

② 執行脆弱度分析或評估：確定重要的基礎設施組件和定義的氣候變遷參數之間的潛在相互影響（interaction）後，為其相互影響發

生的可能性（和/或頻率）及發生故障（或損壞）後果的嚴重性評分，並描述產生的後果。

③ 執行工程分析：工程分析的目的是為提出設施可因應氣候變遷的調適能力、總承載力（total load）和總容量（total capacity）等量化數據以利後續工程設計。工程分析有助於為脆弱的設施組件確定氣候變遷下設施的安全係數，從而增強設施韌性，並將風險降低到可接受的水準，且工程分析的結果有利於選擇調適措施。

(3) 公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項

由於國內公路系統規劃階段目前尚無系統性考量氣候變遷調適，故進一步綜理國內外文獻，依據公路系統規劃階段不同的分析尺度，綜理可供參考的調適選項如附表 1。

附表 1 公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表

氣候壓力及危害因素		公路系統尺度	對公路系統的衝擊	調適選項 (包含策略及措施等)	類別 1	類別 2	類別 3
強降雨	地表逕流/河川溢淹	路段	排水不良造成道路淹水	• 提高排水容量	抑減	調整	調整與升級
			道路遭漂流物撞擊	• 將道路或橋梁抬升高出預估的洪水高程	抑減	搬遷	調整與升級
				• 放置石質盔甲、石籠網等，使道路堤防更加堅固	抑減	調整	硬保護
		路廊	河川溢淹造成路廊淹水	• 整合協調周邊排水系統	抑減	調整	調整與升級
		路網	聯外道路淹水造成運輸中斷	• 整合協調周邊排水系統	抑減	調整	調整與升級
			替代道路數不足，造成路網連通性受阻	• 對於重複性嚴重受損設施，研擬其他替代方案(如改道)	規避	搬遷	搬遷
	暴雨沖刷/土石流	路段	道路路基掏空	• 加強路基保護工	抑減	保護	硬保護
			橋梁基礎受沖刷	• 加強橋基保護工	抑減	保護	硬保護
			道路橫斷面受沖刷	• 調整道路或橋梁橫斷面	抑減	調整	調整與升級
		路廊	道路邊坡坍滑	• 將道路移至穩定的邊坡利用邊坡穩定工法 • 建造橋跨越滑坡或建隧道	規避抑減	保護	搬遷、調整與升級

附表 1 公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表（續 1）

氣候壓力及危害因素		公路系統尺度	對公路系統的衝擊	調適選項 (包含策略及措施等)	類別 1	類別 2	類別 3
高溫	鋪面材料高溫軟化	路段	爆胎機率上升造成車禍	• 調整鋪面結構設計，修改面層和基底層的厚度和材料	抑減	調整	調整與升級
			道路標線變形難以辨認	• 調整混合設計，根據未來溫度預測，調整瀝青膠泥等級	抑減	調整	調整與升級
	結構鋼材熱膨脹	路段	橋梁結構受損有安全疑慮	• 先評估補強或修復受損，若仍有安全疑慮建議建造一座新的橋梁取代之 • 預留構材與構材間的空間	移轉 抑減	搬遷 調整	硬保護、調整與升級
	邊坡野火	路段	邊坡野火造成鋼橋燒熔	• 鋼構噴防火被覆材	抑減	保護	調整與升級
		路廊	野火濃煙影響視線	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護	-
			邊坡野火造成邊坡崩落	• 利用邊坡穩定工法	抑減	保護	硬保護
		路網	替代道路數不足，造成路網連通性受阻	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護	-
強風	極端風速(強風和強陣風)	路段	影響索力特殊橋梁結構	• 修改橋梁設計規格	抑減	調整	調整與升級
		路廊	路樹、電線及號誌倒塌阻斷交通	• 安裝防護結構，建造擋土牆或構造較堅固的棚屋式結構 • 非易淹區實施電纜地下化	抑減	保護	硬保護
		路網	替代道路數不足，造成路網連通性受阻	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護 調整	調整與升級
暴潮/風浪	路堤侵蝕/橋基挖蝕	路段	強浪掏刷路基 暴潮/風浪加劇橋梁基礎沖刷	• 改進護岸調整橋的橫截面	抑減	調整	調整與升級
			強浪影響橋梁結構	• 增加沿海橋橋面板標高 • 加強沿海橋梁的連接	抑減	調整	調整與升級

附表 1 公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表（續 2）

氣候壓力及危害因素		公路系統尺度	對公路系統的衝擊	調適選項 (包含策略及措施等)	類別 1	類別 2	類別 3
暴潮/風浪	強浪攜帶石塊上岸	路廊	強浪攜帶石塊上岸阻斷道路交通	• 維護沿海道路護岸/防波堤	抑減	保護	硬保護
	強浪侵襲造成淹溢	路廊	低窪地區不易退水，交通中斷時間拉長	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護調整	調整與升級
		路網	替代道路數不足，路網連通性受阻	• 在更高的海拔高度建立替代道路	移轉	增加備援力	調整與升級
			交通場站聯外道路淹水，運輸中斷	• 在極端氣候事件中重新規劃方案	抑減	管理和維護	調整與升級
海平面上升	海岸退縮	路段	長期侵蝕造成海岸退縮，海浪掏刷路基日益嚴重 海水鹽分加速道路毀損 海風的鹽分造成鋼梁鏽蝕	• 維護沿海道路護岸/防波堤 • 建造有生命的海岸線，定期進行海岸養灘或沙丘建設	抑減	保護	硬保護、以自然為本的調適措施
	強浪侵襲造成淹溢	路網	替代道路數不足，路網連通性受阻	• 在更高海拔高度上興建替代道路	移轉	增加備援力	調整與升級
			交通場站聯外道路淹水，運輸中斷	• 在極端氣候事件中重新規劃方案	抑減	管理和維護	調整與升級
備註	類別 1：依據 109 年行政院所屬各機關風險管理及危機處理作業手冊，風險處理方法包含：接受、規避、抑減及轉移。 類別 2：依據美國聯邦公路管理局（FHWA）提出調適選項類別包含:調整、保護、增加備援力、搬遷、管理和維護。 類別 3：依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會（IPCC）第六次評估報告綜整應用於運輸系統之調適選項類別包含:硬保護、調整與升級、搬遷及以自然為本的調適措施。						

資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.、CEDR Transnational Road Research Programme, ROADAPT Roads for today, adapted for tomorrow Guidelines, 2015.、交通部運輸研究所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討(1/2)，111 年 3 月。

(4) 面對高度不確定性之決策方法

選擇調適選項時經常會面臨未來具有高度不確定性的課題，導致在決策過程遇到瓶頸。面對氣候變遷與社會經濟發展之高度不確定性，應衡量相關領域之間的相互關係，並納入系統性的調適思維，考量未來可能各種情境之需求，據以研擬及排序合適的調適選項。面對高度不確定性之決策方法包含：

① 情境規劃（Scenario Planning）

情境規劃注重於應對未來各種狀況的規劃方法，透過蒐集與專案之相關資料，研判假設各種未來可能情境，過程中可利用未來情境矩陣進行分析，並為可能情境建立適合的調適計畫。

② 調適路徑（Adaptive Pathways）

提出一系列可能發生之未來情境後，應對所提出之調適選項進行壓力測試，以找出在所有情境下都表現較好，且相對於其他選項具調適韌性。

在進行排序與選出多種表現較佳調適選項組合後，可依據其規劃調適路徑，其中各種調適選項之組合，即代表後續執行調適計畫時的「路徑（即可能採用之調適選項組合以及其順序）」。採用調適路徑有助於瞭解調適選項配置的順序，以及如何減少其受到未來情境的不確定性影響。

③ 穩健決策（Robust Decision Making, RDM）

RDM 使用模擬模型來評估未來多種可能路徑中的建議調適選項，其計算生成一個包含模擬模型結果的大型數據庫，此數據庫中的每則紀錄都顯示一種調適選項在其中一個未來的表現，並可針對每個建議調適選項進行壓力測試。透過可視化和數據分析研究並歸納區分出各別調適選項是否能在未來可能條件下達成目標，根據這些條件闡明各別調適選項之脆弱度及利弊權衡。

5. 公路系統規劃階段強化調適能力指引之架構

公路系統規劃階段強化調適能力指引最核心的目的在於協助熟練的公路專業規劃者，於專案規劃過程中融入氣候變遷調適的考量，在過程中除了既有的公路規劃知識之外，必要時建議與氣候科學專家及公路系統的其他利害關係人一起工作。

本指引於第一章導讀說明何謂氣候變遷調適的概念及原則，並蒐整國際氣候變遷調適趨勢；第二章概述臺灣的氣候變遷情境及氣候變遷對於公路系統的衝擊；第三章說明如何將氣候變遷因素融入公路系統之規劃流程，並說明各階段之作業程序；第四章延續所建立之機制，進一步針對機制中較為困難且關鍵之步驟提供國際調適目前採用之方法說明；第五章為結語，同時分享氣候變遷調適的學習資源，期能從有助於氣候變遷調適能力建構。（附表2）

附表 2 本指引架構說明表

章	節	標題	子標題
0	摘要		
1	導讀		
1	1.1	前言	1.緣起及目的
			2.適用範疇
			3.適用對象
	1.2	氣候變遷調適相關名詞定義	調適專有名詞定義
	1.3	氣候變遷調適之基本概念	1.全球暖化衝擊與因應:減緩與調適
			2.氣候變遷調適
			3.氣候變遷調適作為
			4.氣候韌性發展
			5.調適關鍵要素
	1.4	氣候變遷調適之最新發展趨勢	1.國際氣候變遷調適最新趨勢(IPCC)
			2.國際氣候變遷調適標準(ISO)
			3.國內氣候變遷調適推動現況與未來方向
	1.5	指引結構說明	章節架構

附表 2 本指引架構說明表（續 1）

章	節	標題	子標題
2	氣候變遷對公路系統的衝擊		
2	2.1	臺灣氣候變遷推估資訊	1.全球排放情境與增溫幅度推估
			2.臺灣氣候變遷推估
			3.國家氣候變遷情境設定
	2.2	氣候變遷對公路系統之衝擊	1.臺灣公路系統面臨的氣候壓力
			2.公路系統之概念與組成
			3.氣候變遷對公路系統的潛在衝擊
3	公路系統規劃階段強化調適能力機制		
3	3.1	公路系統規劃作業流程融入調適概念之框架	公路系統規劃流程融入調適概念之框架
	3.2	第一階段:蒐集與分析氣候變遷相關資料	1.增納「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」工作項目 2.作業程序說明
	3.3	第二階段:初步評估影響調適能力之氣候風險因素	1.增納「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」工作項目 2.作業程序說明
	3.4	第三階段:執行氣候變遷風險評估	1.增納「氣候變遷風險評估」工作項目 2.作業程序說明
	3.5	公路跨其他運輸系統調適介面整合機制	公路跨其他運輸系統調適介面整合機制
	3.6	本章重要觀念	回顧本章重要觀念
4	公路系統規劃階段強化調適能力方法		
4	4.1	公路系統氣候衝擊鏈分析方法	1.「氣候衝擊鏈」理論基礎
			2.「氣候衝擊鏈」分析項目
			3.公路系統所在環境區位與氣候壓力因素
			4.公路系統氣候衝擊鏈分析方法之參考案例
	4.2	公路系統氣候風險評估之方法	1.日本獨立行政法人國際協力機構：氣候風險評估及調適指引（2019 年）
			2.加拿大英屬哥倫比亞省交通局：公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計－實務指引（2020 年）
			3.公路系統氣候變遷評估方法之應用建議

附表 2 本指引架構說明表（續 2）

章	節	標題	子標題
4	4.3	公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項	1.FHWA－以綜合方法提升專案開發的氣候韌性（2017 年）
			2.FHWA－以自然為本提升海岸公路韌性的解決方案（2019 年）
			3.IPCC AR6 綜整之運輸系統調適選項（2022 年）
			4.公路系統調適選項列舉說明
			5.公路系統調適選項之應用建議
	4.4	面對高度不確定性之決策方法	1.方法一：情境規劃
			2.方法二：調適路徑
			3.方法三：穩健決策
			4.未來高度不確定之下的決策方法之應用建議
	4.5	本章重要觀念	回顧本章重要觀念
5	結語		
5	5.1	結語	結語
	5.2	學習資源	學習資源
	參考文獻		

資料來源：本計畫彙整。

三、建議

本節綜理本計畫執行過程中之觀察及發現，參考《國家因應氣候變遷行動綱領》之原則：「強化科學基礎...提升因應氣候變遷之調適作為及建構韌性發展。」與《溫管法》之調適法條，提出後續調適工作推動與調適研究議題建議，分項說明如下：

1. 後續調適工作推動建議

以下就本計畫蒐集與辨識之調適課題與建議之調適策略推動順序提出後續調適工作推動建議，供運輸設施管理機關（構）與相關機關（構）參考：

(1) 調適預算與資金需於國內部會中長期預算籌編，爭取足夠的資金推動政府調適計畫優先事項並滿足調適工作的需求。

(2) 調適思維的推動與主流化，加強中央地方各設施管理機關（構）及全民對於調適的認同性，可透過工作坊、教育訓練等課程活動分享調適

觀念，各機關（構）也應適時對內及對外宣導其調適作為。 另外，亦可採取將氣候變遷調適考量納入「部頒規範修正」或「納入採購契約」2 種方式，前者係依實務上面臨的情況直接修正部頒規範，後者為公路主管機關自行納入綜合規劃、設計之採購契約中，而這兩者方式皆可有效的加速推動調適工作。

(3) 加強推動跨部門整合與資訊共享，建議加強跨部會相關資料之蒐集與分析應用並整合於一平台，以便快速掌握整體運輸系統的狀況讓執行單位參照，有助於決策支援。

2. 後續調適研究議題建議

為持續深化調適之科學研究並做為調適工作推動之基礎與參考，就本計畫之研究主題：「強化公路系統規劃階段調適能力作為與指引」成果與觀察，建議後續公路系統管理機關（構）、目的事業主管機關與相關機關（構）研究與探討的調適議題：

(1) 後續可針對國內公路系統氣候變遷風險評估之方法深入研究。由於國內目前尚無執行氣候變遷風險評估之經驗，如何導入氣候變遷情境、執行風險評估，進而改善既有作為，係過程中最困難與關鍵的步驟。故建議進一步透過案例研析與本土研究提出符合國情之氣候變遷風險評估實務操作指引，做為國內調適作為推動之參考依據。

(2) 建議公路系統管理機關（構）透過研提公路系統調適計畫或案例，運用本指引所提出之強化調適作為，於規劃階段著手思考對應的調適方法，強化公路系統之氣候韌性。

(3) 延續本期研究主題「強化公路系統規劃階段調適能力作為與指引」，建議我國公路系統之利害關係人透過做中學的過程，累積本土的調適經驗與知識。本指引只是一個開始，建議後續可賡續蒐集與研析臺灣公路系統氣候變遷調適的實務經驗，以及國外實務應用案例，據以滾動檢討指引內容。

(4) 調適研究資料共享與互惠，建議未來調適之研究可積極與不同部會互動（如國科會、經濟部水利署等），互相交流合作與共享資訊，並參考其研究成果以強化研究能量。

Abstract

1. Background

To strengthen Taiwan's adaptive capacity to climate change, article 13 of "Greenhouse Gas Reduction and Management Act" ratified in July 2015 requires central authorities in charge of relevant industries to develop climate change adaptation strategies and regularly submit adaptation outcomes to the central competent authority. In terms of management of the national transportation system, the requirement concerns various administrations and thus should be planned and coordinated at the level of the Ministry of Transportation and Communications (MOTC).

To enhance the adaptive capacity of a domestic transportation system, the Institute of Transportation (IOT) has begun research on adaptation strategies for transportation sector since 2017 and has maintained regular reviews on the strategies to ensure their connection with international trends, relevant authorities' progress on implementing adaptation action plans, and the application of new technology.

Among the entire transportation system, road systems are the most closely related one towards people's daily lives. Any impairment or disruption to road systems will cause significant impacts on the economic and social aspects of the society. However, existing planning mechanisms and associated specifications of road infrastructure have not adequately taken climate change adaptation into consideration. If the concept of climate change adaptation can be incorporated into the road infrastructure planning stages, its ability to respond to extreme weather events will be effectively enhanced.

This project will review and revise adaptation strategies for transportation sectors based on current international trends on climate change adaptation, so as to improve the adaptive capacity of transpotration system to climate change. At the same time, this project will also develop adaptation guidelines for road systems in the planning stage, improving the adaptation ability of the relevant authorities. In

addition, to deepen the understanding of climate change and adaptation strategies by the personnel of the competent authorities of facilities under various ministries, professional adaptation knowledge training courses will also be provided. In summary, this project will:

(1) Explore ways to strengthen the adaptive capacity of road system in the planning stage, which provides a reference to the authorities in charge of road system facilities.

(2) Develop adaptation guidelines for the planning stage as a reference to the authorities in charge of road system facilities, so that they can review and revise relevant laws and regulations, thereby strengthening the adaptive capacity of road system.

2. Major results of the project

(1) Revising the existing mechanism of road infrastructure planning to reinforce adaptive capacity

The process of road system planning can be divided into three stages: data collection, route plan development and evaluation, and engineering feasibility study. In order to specifically incorporate the climate change risk adaptation concept into the process, adding relevant climate change adaptation procedures at each stage is recommended (see Figure 1), as shown below.

① Stage I: Collecting and analyzing climate change data

It is recommended that collection and analysis of future climate change scenarios and relevant data should be included at this stage. The planning team can collect data on possible impacts brought by climate change in areas where construction projects are located, and identify climate parameters that should be considered based on different environmental characteristics of each project

Depending on the location features of the road system, collect relevant climate change scenarios and climate data, such as the estimated future average temperature, precipitation and rainfall days, typhoons, storm tide,

wind waves, strong winds, etc. To collect the latest analyze data, it is recommended to use websites such as water resources open data website established by Water Resources Agency of the Ministry of Economic Affairs, and the Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform (TCCIP) established by Ministry of Science and Technology (MOST) and National Science and Technology Center for Disaster Reduction (NCDR).

② Stage II: Preliminary assessing climate risk factors affecting adaptive capacity

Affecting by change climate, many climatic parameters show an increase or decrease in annual average value, and there is a trend of higher extreme values and seasonal variation. Therefore, the preliminary assessment to key factors which will affect climate risk in the service life of road system is the key work during the adapting process.

It is recommended to invite experienced professionals and stakeholders through the workshop to jointly study and evaluate, so as to gain a preliminary understanding of the possible impact of climate change on the project, and then choose a route plan that avoids high climate risks.

③ Stage III: Implementing climate change risk assessment

It is recommended to add the climate change risk assessment in the third stage. In response to the uncertainty of climate change, and adaptation measures also have engineering limits and budget constraints. Climate change risk assessment should be started before " Engineering feasibility study of proposed route plan", and incorporate the assessment results into subsequent planning processes, so as to achieve the maximum effect of improving the resilience of the road system.

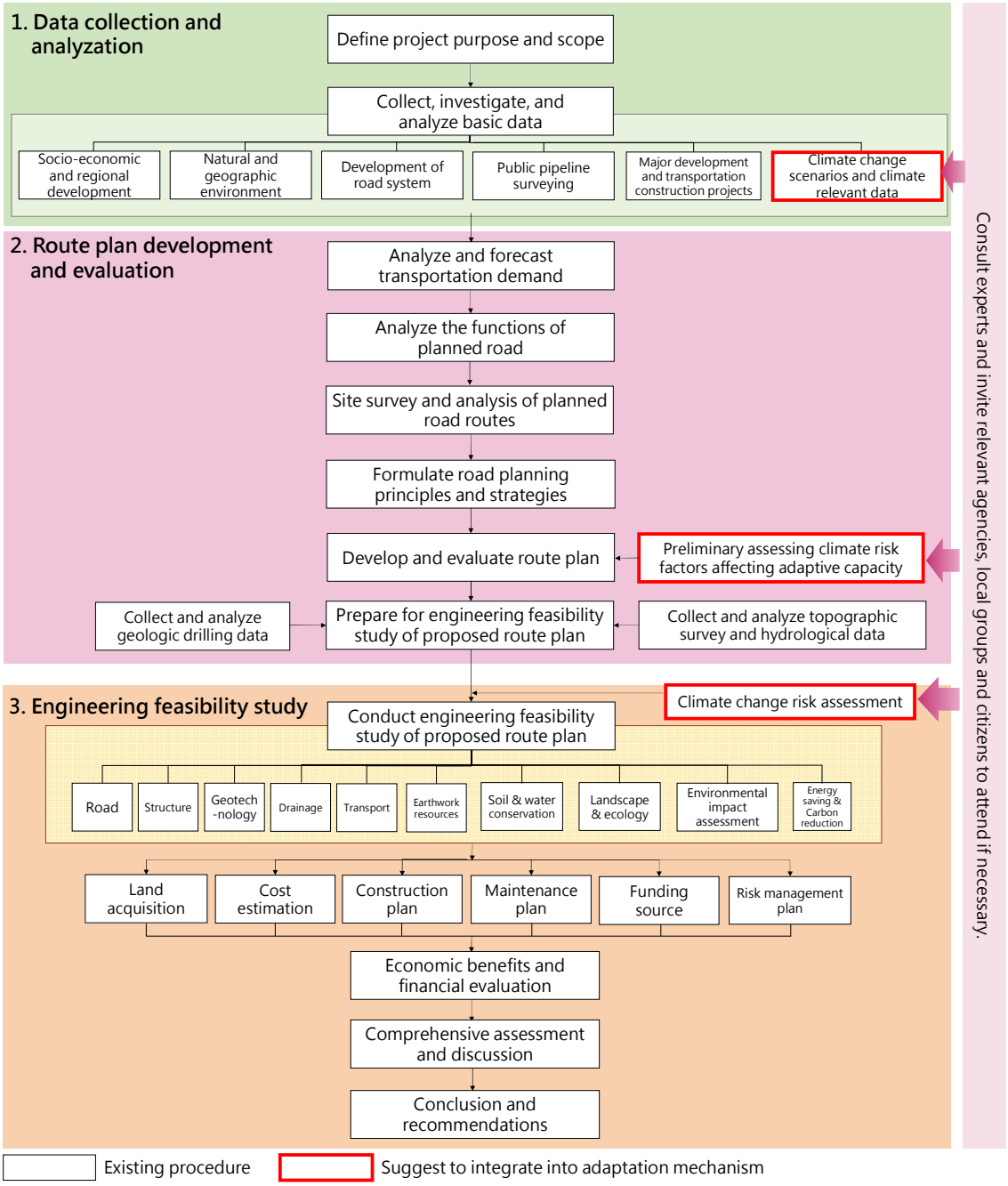


Figure 1. Schematic diagram of the revised road infrastructure planning mechanism for reinforcing adaptive capacity

(2) Methods of Strengthening Adaptive Capacity in Road System Planning Stage

① Methods of analyzing climate impact chain of road system

The core concept is "effective management of 'climate impact risk' in the context of climate change". "Climate impact risk" determines by three main factors - exposure, vulnerability and hazard. The interaction of the

three factors determines the magnitude and content of the risk. Therefore, the climate impact risk analysis includes climate pressure factor, exposure factor, and vulnerable factor, which are explained as follows:

a. Climate Pressure Factor: climate change related situations, events or trends that may impact the road system. The five major climate pressure factors affecting Taiwan's road system include: heavy rainfall, strong wind, high temperature, storm surge/wind wave, and sea level rise.

b. Exposure Factor: The extent to which the road system is located in vulnerable areas (for example, inundation potential areas, geologically sensitive areas or slope disaster potential areas, etc.).

c. Vulnerable Factor: The impact susceptibility of the road system, and the extent of the possible impact if paralyzed (for example, the only life-sustaining roads).

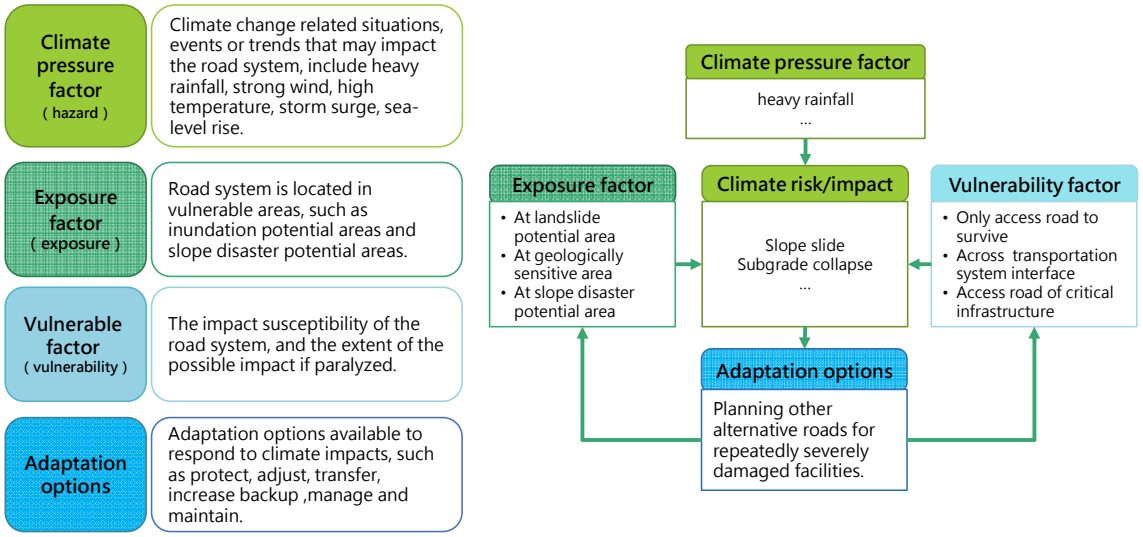


Figure 2. Illustration of a climate impact chain analysis

② Methods of assessing climate risk of road system

Climate change risk assessment can be roughly divided into partiality, semi-quantitative assessment and a higher degree of quantitative assessment based on data availability and the extent of quantification. The former can be applied to the stage of program development and evaluation,

and it is difficult to carry out quantitative analysis due to lack of sufficient data, or it can be used by those who are lacking in relavant resources; the latter is more suitable for the engineering research stage, especially the engineering planning and design after the route plan has been determined, which can obtain sufficient data and analysis tools for quantitative analysis.

③ Adaptation options for road systems to respond to climate change impacts

Since there is no systematic consideration of climate change adaptation in the planning stage of the road system in Taiwan, domestic and foreign literature are further reviewed, and according to the different analysis scales of the road system planning stage, adaptation options for reference are summarized in Table 1.

Table1. Road system climate impact and adaptation option comparison

Climate pressure and hazard factor		Road system scale	Impact to road system	Adaptation options (include strategies and measures)	Type1	Type2	Type3
Heavy rainfall	Surface runoff/ River flooding	Section	Poor drainage cause flooding	• Increase drainage capacity	Mitigate	Adjust	Adjust and upgrade
			Road hit by waveson	• Uplift road or bridge above estimated flood elevation	Mitigate	Transfer	Adjust and upgrade
				• Place stone armor, gabion nets, etc. to make embankment stronger	Mitigate	Adjust	Hard protection
		Corridor	River flooding affects corrider	• Coordinate adjacent drainage system	Mitigate	Adjust	Adjust and upgrade
		Network	Transport interruption cause by road flood	• Coordinate adjacent drainage system	Mitigate	Adjust	Adjust and upgrade
			The lack of alternative road cause road network connectivity obstructed	• Planning other alternative roads for repeatedly severely damaged facilities	Avoid	Transfer	Transfer

Table1.(continued)Road system climate impact and adaptation option comparison

Climate pressure and hazard factor		Road system scale	Impact to road system	Adaptation options (include strategies and measures)	Type1	Type2	Type3
Heavy rainfall	Torrential rain wash/ Landslide	Section	Subgrade be hollowed out	• Strengthen subgrade protection	Mitigate	Protect	Hard protection
			Bridge foundation be scoured	• Strengthen bridge foundation protection	Mitigate	Protect	Hard protection
			Road cross-section be scoured	• Adjust road or bridge cross-section	Mitigate	Adjust	Adjust and upgrade
		Corridor	Road slope collapse	• Move the road to a stable slope and use slope stabilization method, like plant native plants to restore the slope vegetation • Build a bridge or a tunnel across landslide	Avoid, Mitigate	Protect	Transfer, Adjust and upgrade
High temperature	Softening of paving materials under high temperature	Section	Increased chance of puncture causing crashes	• Adjust design of paving structural, modify thickness and material of pavement and substrate	Mitigate	Adjust	Adjust and upgrade
			Difficult to identify melting road markings	• Adjust mix design and asphalt binder grade based on the temperature forecasts	Mitigate	Adjust	Adjust and upgrade
	Thermal expansion of structural steel	Section	Security concerned of structure damaged bridge	• Assess reinforcement or repair the damage at first, and if there are still safety concerns, it is recommended to build a new bridge to replace the old one • Reserve more space between structural members	Transfer, Mitigate	Transfe, Adjust	Hard protection, Adjust and upgrade

Table1.(continued)Road system climate impact and adaptation option comparison

Climate pressure and hazard factor		Road system scale	Impact to road system	Adaptation options (include strategies and measures)	Type1	Type2	Type3
High temperature	Side slope wildfire	Section	Side slope wildfire cause steel bridge melting	• Spray fire protection material on steel structure	Mitigate	Protect	Adjust and upgrade
		Corridor	Wildfire smoke affects sight	• Implement mitigation measure in stages	Mitigate	Manage and maintain	-
			Side slope wildfire cause collapse	• Ues side slope stable construction	Mitigate	Protect	Hard protection
		Network	Equipment breakdown affects traffic safety	• Implement mitigation measure in stages	Mitigate	Manage and maintain	-
Strong wind	Extremely strong winds and strong gusts	Section	Influence the structure of bridge	• Revise the design of bridge specification	Mitigate	Adjust	Adjust and upgrade
		Corridor	Tree collapse cause traffic interrupted	• Installing protective structures such as retaining walls or other stronger shed-like structures	Mitigate	Protect	Hard protection
		Network	Facilities or traffic lights breakdown affect traffic safety	• Implement underground cables in non-flood areas • Implement mitigation measure in stages	Mitigate	Manage and maintain, Adjust	Adjust and upgrade
Storm surge / Wind wave	Embankment erosion /Bridge foundation scour	Section	Strong waves hollow out subgrade; Storm surges/wind waves exacerbate bridge foundation erosion	• Improve embankment and adjust bridge cross-sections	Mitigate	Adjust	Adjust and upgrade
			Strong waves affect bridge structure	• Increase the deck elevation of the coastal bridge • Enhance connective of coastal bridge	Mitigate	Adjust	Adjust and upgrade
	Strong waves carry rocks ashore	Corridor	Strong waves carry rocks ashore cause transport interruption	• Maintain coastal road embankment/ breakwater	Mitigate	Protect	Hard protection
	Inundation caused by strong waves	Network	The lack of alternative road cause road network connectivity obstructed	• Build alternative roads at higher sea-level altitudes	Transfer	Increase backup capacity	Adjust and upgrade

Table1.(continued)Road system climate impact and adaptation option comparison

Climate pressure and hazard factor		Road system scale	Impact to road system	Adaptation options (include strategies and measures)	Type1	Type2	Type3
Storm surge / Wind wave	Inundation caused by strong waves	Network	Access road of traffic station be flooded cause transport interruption	• Rerouting traffic during extreme weather events	Mitigate	Manage and maintain	Adjust and upgrade
Sea-level rise	Coastal recession	Section	Long-term erosion cause coastal recession, and waves are hollowing subgrade out more and more seriously; Seawater salinity accelerates road damage; Salty sea wind cause corrosion of steel beams	• Maintain coastal road embankment/ breakwater • Build a living coastline with regular coastal beaching or dune building	Mitigate	Protect	Hard protection, Nature-based adaptation measures
	Strong waves attack cause flooding	Network	The lack of alternative road cause road network connectivity obstructed	• Build alternative roads at higher sea-level altitudes	Transfer	Increase backup capacity	Adjust and upgrade
			Access road of traffic station be flooded cause transport interruption	• Rerouting traffic during extreme weather events	Mitigate	Manage and maintain	Adjust and upgrade
Remark	Type1: According to the Handbook for risk management and crisis handling of the Executive Yuan and affiliated agencies in 2019, risk handling methods include: accept, avoid, mitigate and transfer. Type2: According to the US Federal Highway Administration (FHWA), the categories of adaptation options include: adjust, protect, increase backup capacity, transfer, manage and maintain. Type3: According to the sixth assessment report of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the categories of adaptation options applied to the transportation system include: hard protection, adjust and upgrade, transfer and nature-based adaptation measures.						

Source: National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.、CEDR Transnational Road Research Programme, ROADAPT Roads for today, adapted for tomorrow Guidelines, 2015; A Study of Enhancing Highway System's Adaptive Capacity in the Planning Phase(1/2), 2021; A Study of Enhancing Highway System's Adaptive Capacity in the Planning Phase(2/2)(first draft of interim report), 2022.

④ Decision making methods facing high uncertainty

The selection of adaptation options is often faced with a high degree of uncertainty in the future, resulting in bottlenecks in the decision-making process. Faced with the high uncertainty of climate change and social and economic development, it is necessary to measure the interrelationships between related fields, incorporate systematic adaptation thinking. Consider the needs of various possible future scenarios, and develop and prioritize appropriate adaptation options accordingly. Decision-making methods facing high uncertainty include:

a. Scenario Planning: Focus on planning methods for dealing with various future situations, and research and simulate various possible future scenarios by collecting project-related data.

b. Adaptive Pathways: Taking an adaptation path helps to understand the priority of adaptation options and how to reduce the impact by uncertainty in future scenarios.

c. Robust Decision Making, RDM: A simulation model is used to evaluate proposed adaptation options in many possible future paths. It generates a large database of simulated model results, each record in this database shows how a adaptation option will perform in one of the future path, and can do stress tests for each suggested adaptation option.

(3) The framework of guideline for strengthening adaptive capacity in road planning stage

The core purpose of the guidelines for strengthening adaptive capacities in the road planning stage is to assist skilled professional road planners to incorporate climate change adaptation into the project planning process. In the process, in addition to the knowledge of road planning, its recommended that working with climate science experts and other stakeholders of the road system.

Chapter one introduces the concepts and principles of climate change adaptation, and summarizes the international climate change adaptation trends; Chapter two outlines the climate change scenario in Taiwan and the impact of

climate change to road systems; Chapter three explains how to integrate climate change factors into road system planning process, and the operating procedures of each stage; Chapter four followed the established mechanism, and further provides a description of the methods currently used in international adaptation for the more difficult and critical steps in the mechanism; Chapter five concludes this project and shares learning resources for climate change adaptation expecting to help building adaptive capacity. (figure 3)

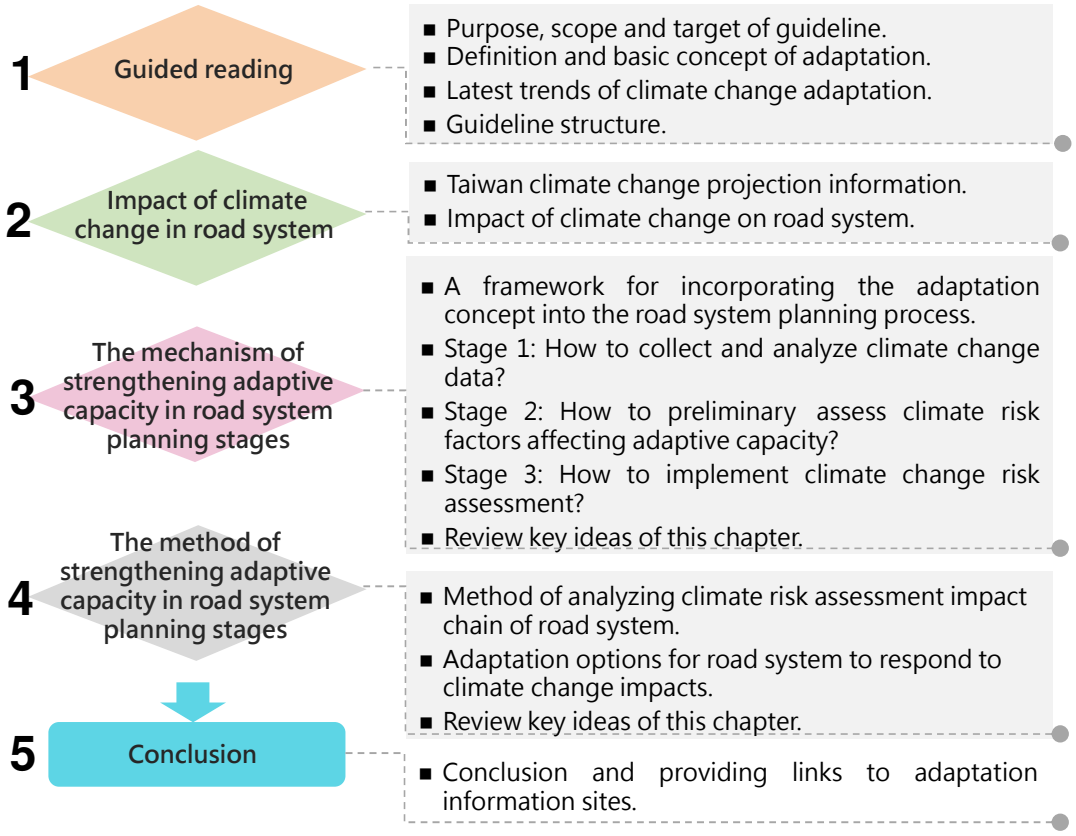


Figure3. Chapter structure of guideline

3. Recommendations

In order to continuously deepen the scientific research on adaptation and serve as a reference for the promotion of adaptation work, based on the research results and observations of this project, its recommending that the road system management authorities and the competent authorities conduct follow-up research issues on adaptation:

(1) Since there is currently no experience in implementing climate change risk assessments in Taiwan, how to introduce climate change scenarios and conduct risk assessments, and then to improve existing actions is the most difficult and critical step in the process. Therefore, it is recommended to further propose practical operational guidelines for climate change risk assessment in line with national conditions through case study analysis and local research, as a reference for the promotion of domestic adaptation.

(2) It is recommanded that the road system management authorities should use the enhanced adaptation actions proposed in this guideline to mitigate or eliminate the impact of climate change in the planning stage by developing a demonstration plan of strengthening the adaptive ability of road systems.

(3) Continuing the research theme of this project, "Strengthening the Adaptive Capacity and Guidlines in the Planning Stage of Road System", it is suggested that stakeholders of road system in Taiwan can accumulate local adaptation experience and knowledge through the process of learning by doing, then review and revise this adaptation guideline on a rolling basis.

(4) It is significant to facilitate data sharing and collaboration on adaptation research between authorities concerned, for instance, Ministry of Science and Technology, Water Resources Agency, etc. to elevate academic research capability in the field of climate change adaptation.

附錄 2

審查意見辦理情形

附錄 2 審查意見辦理情形

交通部運輸研究所合作研究計畫

■期中□期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：IOT-111-TCF004

計畫名稱：公路系統規劃階段強化調適能力之探討(2/2)－強化調適能力作為與指引

執行單位：鼎漢國際工程顧問股份有限公司

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
國立臺灣師範大學葉教授欣誠		
1.本研究的重點成果為調適指引，而指引的類型大致有 4 類，包含管理指引、規劃指引、工程指引及維護指引，就過往專家訪談建議已排除工程指引，又考量氣候變遷因應法強調公民參與的重要性，係具有治理的性質，故可推得本指引屬於管理、規劃類型，因此期中階段本案研究方向大致正確。	感謝委員肯定。	同意。
2.報告書 P3-15 關於從國外文獻與案例蒐集與分析後，如何應用(適用)於我國建議有較多的分析。	遵照辦理，已於期末報告加強說明，應用於我國的建議方向，詳見第 3.5 節。	同意。
3.報告書 P5-3 提到有關指引目錄的部分，建議於「國際氣候變遷調適趨勢」章節前將「氣候變遷調適」定義先說明清楚，因為許多第一線人員對於氣候變遷調適仍有認知缺口。	遵照辦理，已調整指引架構，並將氣候變遷調適相關名詞定義提至指引第 1.2 節。有關指引架構說明詳見第 5.2 節。	同意。
4.建議以 AR6 提出之 CRD(Climate Resilient Development)的概念鋪陳氣候變遷調適，強調希望與永續。	感謝委員建議，已於指引及報告書「國際氣候變遷調適最新趨勢」論述 IPCC AR6 WGII 調適重點摘要內容，並強調「氣候韌性發展」之積極意涵，詳見 P2-6 及附錄 3。	同意。
5.「調適」看似負面約束的概念，本質上其實是正向發展的意涵，IPCC AR6 於 WGII 中使用「氣候韌性發展」是有其考量，建議於指引內強調其為「發展」之正向積極意涵。		
6.指引架構大致可行，建議補充說明各章節架構規劃撰寫的內容。	遵照辦理，已於期末報告第五章重點摘錄指引架構及內容，完整指引詳見附錄 3。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
國家災害防救科技中心陳組長永明		
1.以 ISO 的角度來看調適指引可分為「氣候風險評估指引」與「氣候變遷調適指引」兩部分，近年來氣候變遷調適概念已逐漸為大眾了解並對應到各領域，但如何導入氣候變遷風險情境、執行風險評估進而改善既有作為係整個過程最困難與關鍵的步驟。本計畫提出幾種不同的風險評估工具，針對未來環境部研擬的國家氣候變遷應用情境，於指引內風險評估章節該如何納入?又或者如 ISO 一樣將風險評估視為操作層面，考量內容屬操作層次且較為複雜，因此另撰擬一本指引? 建議補充說明。	感謝委員建議，本計畫目的係研擬調適上位指引，其中針對風險評估將提供框架性的指引內容，重點為依據環境部提出的國家氣候變遷應用情境，提供評估程序供使用者參考，指引架構請參見第 5.2 節，指引之風險評估章節完整內容詳見附錄 3。	同意。
2. IPCC AR6 於 WGII 提及的氣候韌性發展並兼顧調適、減碳與永續發展對於我國推動調適工作是很重要的概念，上述概念該如何放到調適架構內使運輸部門了解何謂符合氣候韌性發展的調適選項? 建議補充說明。	(1)感謝委員建議，已於指引及報告書「國際氣候變遷調適最新趨勢」論述 IPCC AR6 WGII 調適重點摘要內容，並強調「氣候韌性發展」之積極意涵，詳見 P2-6 及附錄 3。 (2)已補充 IPCC AR6 WGII 所綜整之調適選項，其中亦包含符合氣候韌性發展之調適選項，如「以自然為本的解決方案」(NbS)於指引供各機關做參考，詳見附錄 3。	同意。
逢甲大學運輸與物流學系劉教授霈(含書面意見)		
1.本報告文獻收集完整，分析詳實敬表肯定。	感謝委員肯定。	同意。
2.建立具體可行的調適機制應為本計畫之重點，建議與公路運輸系統主管機關或營運單位訪談及研商，掌握氣候變遷的趨勢，辨識出運輸系統的脆弱度，建立公部門推動的可行機制，以找出最合宜的作法。	本計畫於前期(110 年)已針對公路主管機關進行訪談，依據前期訪談機關之建議，本期進一步訪談公路專家及相關工程顧問公司，以確保提出可行並兼具實用性的調適機制，且於研究過程辦理會議均邀請公路主管機關參與，專家訪談意見重點摘錄請見第 4.2 節，	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
	完整內容詳見期末報告附冊二。	
3.建議將 P2-15 表 2.1-2 之表述方式用更完整的說明供讀者閱讀，以增加其正面影響。	遵照辦理，表 2.1-2 係 ISO14091 文本中列舉之案例，已補充文本其文字說明論述，以利理解，詳見 P2-14。	同意。
4.高溫可能衍生山林火災在國內是否會成為風險因子，建議納入考量。	目前針對國內公路系統所面臨的氣候變遷壓力因子中，已納入高溫可能會造成邊坡野火的考量，請參見表 4.4-2。	同意。
國立高雄科技大學蘇助理教授育民		
1.報告書 P4-35～P4-37 氣候變遷衝擊調適選項對照表，在 P4-37 提到以 FHWA 相關資料整理，建議將氣候變遷衝擊與調適選項等相關用字與公路局、高公局等相關人員確認，以確認符合臺灣現況。	前期(110 年)計畫已完成公路機關訪談、工作坊及專家學者座談會。本期計畫持續蒐集各專家與相關單位之意見，目的係透過專家訪談與專家學者座談會進行討論與交流，提出可行的調適選項建議。 表 4.4-2 公路系統調適選項列舉說明，綜理國內外的調適選項以供參考。	同意。
2.同表 4.5-1 報告書 P4-32～P4-34，有關鋪面材料高溫軟化對公路系統的衝擊與調適選項內容建議與實務單位確認。		
3.報告書 4.5 節 P4-30～P4-35，調適選項建議可透過工作會議或專家訪談，與高公局與公路局確認我國可行且能執行的選項做為建議。		
4.報告書 P4-42 有關規範類的資料建議可保留，部頒規範的建議修正可以是一個提醒的功能，以建議高公局、公路局等主管機關可以滾動檢討。另考量與氣候變遷調適關聯性，表 4.7-1 建議增列「公路工程施工規範」、「柔性鋪面設計規範」。	有關交通部部頒之道路規範，依照委員意見及主席結論，於期末報告附冊二以提醒方式呈現，做為相關單位通盤檢視之參考。	同意。
交通部公路局陳副總工程師進發(含書面意見)		
1.簡報 P52-P54 提及路段、路廊、路網的尺度定義較為模糊，實務上推動有其困難性，建議再行檢視。	本計畫引用美國運輸學會所建構的公路系統概念框架為基礎，就路段、路廊及路網 3 種不同系統尺度作探討 。國內因國情不同，公路實務上較難以區分路段及路廊，由於對照表屬參考性質，建議視個案特性由公路專家選擇合適的	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
	系統尺度,再進行氣候衝擊分析即可。	
2.報告書 P2-34，有關交通部統計要覽交通天然災害概況歷年統計資料及臺灣氣候變遷科學報告 2017－衝擊與調適面向等，彙整影響臺灣公路系統之五大氣候壓力，可否協助蒐集併同納入本報告表 2.3-2 公路系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表內，以強化外在威脅因子的客觀性。	期末報告書中表 2.2-2 已將五大氣候壓力對於公路系統之影響納入考量,前期計畫(110年)透過文獻回顧蒐整國內外案例綜理該表,該表為已篩選在國內外公路實務案例上所面臨之氣候壓力因素之列表結果。	同意。
3.針對簡報 56 有關部頒規範建議修正事項，建議由五大氣候壓力因素檢核與公路系統規劃階段之關聯性，再確認所列規範是否有檢討的必要性。以公路排水設計規範為例，僅就開發部分施行出流、逕流管控，無法以整體公路系統考量世紀末容納逕流量。另公路橋梁設計規範、橋基保護工設計規範、交通工程規範、公路養護規範、公路邊坡大地工程設施維護與管理規範、公路橋梁檢測及補強規範等應思考目標年為何(年代或世紀)。	(1)本計畫研究範疇為規劃階段，分為可行性研究、綜合規劃 2 階段。關於部頒技術規範探討內容已涉及設計階段，為避免誤解將適度調整內容論述，由五大氣候壓力因素檢核與公路系統規劃階段之關聯性，以符合本計畫研究範疇。 (2)有關交通部部頒之道路規範依照委員意見及主席結論，以提醒或附錄方式呈現做為相關單位通盤檢視之參考。	同意。
4.目前風險評估納入作業機制大致包含「部頒規範修正」或「納入採購契約」2 類。前者係工程會依面臨狀況直接修正或交通部技監依其職權發動修正，後者為主管機關自行納入綜合規劃、設計契約中。	感謝委員提供寶貴意見,已納入結論與建議,詳見第 6.2 節。	同意。
5.簡報 P40，於第三階段納入「氣候變遷風險評估」實務上需耗費較多成本，且恐無翻案的可能性。建議於第二階段方案研擬與評估即納入氣候變遷調適的思維，確認目標年期後將潛在災害風險納入考量。	遵照辦理,依據委員意見調整簡報 P40,於第二階段方案研擬與評估即納入「氣候變遷風險評估」的調適思維。建議增納「初步評估影響調適能力之氣候風險因素」工作項目，做為路線方案研選之重要參考依據，詳見第 4.3.1 節。	同意。
6.報告書第 P2-34,圖 2.3.1 氣候變遷對公路系統的影響,引用 111 年 3 月 30 日自由時報及蘋果即時新聞報坡地	遵照辦理,配合委員意見更換案例照片，詳見圖 2.2.1。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
崩塌照與路面淹水，惟報告內容未加說明，據研判可能是鋒面過境或滯留造成連續降雨所致，與氣候變遷似難有因果關係。		
7.報告書 P3-6，第 10 行提及山河路橋之管理權責卻分屬眾多不同單位…，這當中較有爭議的是邊坡治理分工權責，提供目前行政院核定分工權責與實務運行的做法供參； (1)行政院 95 年 3 月 20 日院臺經字第 0950010423 號函核定「水庫集水區保育綱要」明訂：「有關道路水土保持部份，由道路主管機關依權責辦理(路權及上下邊坡不可分割之治理範圍)」，產生分工權責認定爭議。 (2)行政院秘書長 99 年 6 月 3 日院臺忠字第 0990098260 號函送「坡地崩塌防災權責分工表」。 (3)104 年 4 月 29 日行政院公共工程委員會「公共建設督導會報」再就有關分工權責，許俊逸主委裁示事項：「有關通案性之坡地防災問題，請農委會督導水土保持局依行政院秘書長 99 年 6 月 3 日院臺忠字第 0990098260 號函送「坡地崩塌防災權責分工表」之「3-1：山坡地治理，由農委會(水土保持局)主辦」，於組織業務職掌、水土保持法及水保工程專業範疇，評估技術面之綜合治理規劃，再由各權責機關、土地管理機關或水土保持義務人依法分工辦理或據以研提應變計畫。」 (4)交通部公路局所轄省道段發生大型邊坡坍滑問題，係由交通部公路局、農委會水土保持局、林務局於 98 年 2 月 10 日共同成立「大型邊坡坍滑路段整治聯繫會報」研商解決，迄今歷經協調成效良好。 (5)經濟部水利署現行「河川治理計畫」、「集水區治理計畫」，係以	感謝委員提供實務作為之寶貴資訊，已補充說明於國內相關文獻，請參見期末報告附冊二。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
「整體規劃、分工辦理」方式，交通部所屬公路單位與水利署所屬河川局一成立共同聯繫會報解決山河路橋共治問題。		
8.報告書 P3-16，案例中以 87 年的大學研究案針對台 11 及台 21 線，是否年代久遠並不適合當案例，原因 1 是未經 98 年莫拉克風災考驗，環境條件均已不同，原因 2 視台 11 線公路尚非是公路局列管之易致災道路，對氣候變遷之衝擊較敏感應該是浪襲，此節內容可再思考調整。	感謝指正，已配合委員意見調整國內案例，移除 87 年台 11 及台 21 線案例。	同意。
9.報告書 P4-10 提及水利法增訂逕流分擔與出流管制計畫，目前已有許多大型開發案面臨出流管制之困難，例如桃園機場出流至埔心溪案，經工程會 7 月公共建設督導會報主委指示經濟部水利署針對逕流分擔與出流管制計畫的實務操作再做檢討，因此很可能期末報告會有更新修正計畫內容請再做更新補充，以利實務操作。	感謝提供資訊，本計畫配合後續水利法最新內容，補充出流管制修法方向與原則說明，詳見期末報告附冊二。	同意。
公路局(含書面意見)		
1.報告書表 4.3-5 提出強降雨要做排水改善措施，如提高排水容量等，排水問題涉及河道淤積或非法抽地下水造成地層下陷，且地層下陷速率遠遠高於海平面上升，有關調適選項提及提高排水容量、抬高橋梁或路面，因為論述較為精簡，建議補充說明。	考量本計畫係屬上位指引層次，非手冊層次，故本案先以建議的形式做為初步成果供使用者參考應用。但因調適選項會因個案而有所不同，無法窮舉，建議依據專案特性，擬透過專家工作小組討論，量身規劃專案適合的調適選項。	同意。
2.報告書第 4 章表 4.5-1，調適選項請研究團隊再研議評估： (1)強降雨-路廊尺度-河川溢淹造成路廊淹水：調適選項為設置地下排水提供地面排水。如河川水位溢淹出堤防代表已超出該河川防洪保護標準，地面(下)排水將無法排入河川或區排。(例如中央管河川的防洪保護標準為 100 年重現期距、地方管河川以通過 25 年重現期距洪水設計)。	感謝指正，該表已全面檢視後調整，詳見表 4.4-2。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
(2)強降雨-路段尺度-道路橫斷面受沖刷：調適選項為調整道路或橋梁橫斷面。已完成的橋梁該如何調整斷面? (3)高溫-路段尺度-橋梁結構受損有安全之虞：調適選項為建造新橋，建議應先評估補強或修復。 (4)強風、暴潮之調適選項亦請檢視。		
3.國內部分地區抽取地下水情形嚴重，地表下陷速率遠較海平面上升為快，強降雨時造成下陷地區之內水無法排除，政府不可能無限制地挹注經費在抬高橋梁(路面)、加高堤防，調適選項應是針對氣候變遷，應排除如人為非法抽取地下水造成下陷地區之積淹水。	敬悉。本計畫探討之公路系統氣候衝擊主要係針對氣候變遷所造成的氣候壓力對於公路系統的衝擊，如強降雨導致公路排水不良造成淹水，而非地層下陷因素所致。	同意。
高速公路局		
1.針對報告書表 5.2-1 內容，初步檢視過於繁複，建議修正。	表 5.1 有關指引架構與內容，本計畫已於期末階段蒐集各專家與相關單位(包含公路設施權責機關、工程顧問公司等)之意見，透過專家訪談與專家學者座談會進行討論與交流，據以調整並強化指引架構及內容。	同意。
張委員垂龍(書面意見)		
1.中長程個案計畫下，先期作業大致可分為可行性研究、綜合規劃、基本設計、細部設計等 4 階段，其中可行性研究與綜合規劃主要著重在個案的方案選定(例如路廊、路線、線型)，至於個案的條件(例如縱/橫斷面、配置、乘載)與性質(例如材質組成、尺寸規格、結構強度)則屬於設計階段，而部頒技術規範就定位在該設計階段提供工程師於設計時應考量的標準與規定，因此，對於本計畫開宗明義的研究範疇(報告書 P1-7)，建議可以再適度調整。	本計畫研究範疇為規劃階段，分為可行性研究、綜合規劃 2 階段。關於部頒技術規範探討內容已涉及設計階段非本研究範疇，為避免誤解，擬將報告相關內容以提醒或附錄方式呈現。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
2.報告書 P4-42，有些屬於養護類的技術規範，例如公路養護規範、公路邊坡大地工程設維護與管理規範、公路橋梁檢測及補強規範等，在本計畫定位範疇上是否適用，建請釐清。		同意。
3.報告書 P4-45 及 4-46 研究團隊提出的技術規範修訂條文建議(表 4.7-3)，其中「氣候變遷情境」乙詞似過於抽象籠統，實務上反應在設計階段意指為何設計因素，以排水設計規範而言，相關因素如重現期距、雨量或流量、濾層材質等，本人建議參考原條文內容，宜再適度具體及明確化。	有關交通部部頒之道路規範部分內容已不符本計畫研究範疇，擬依照委員意見及主席結論，以提醒或附錄方式呈現做為相關單位通盤檢視之參考。	同意。
4.對於高溫現象，本計畫是否有相關建議，例如道路鋪面部分，在規劃設計階段，我們如何將調適觀念納入，建請說明。	建議在規劃 3 階段納入高溫影響的考量，即第一階段:資料蒐集分析階段納入氣候變遷情境，初步了解專案所在環境未來的溫度變化對於公路資產是否有影響、第二階段:初步評估影響調適能力之氣候風險因素，如高溫、第三階段:氣候變遷風險評估，將高溫做為氣候壓力因素，進行氣候衝擊鏈分析，提出氣候風險/衝擊及可因應之調適選項。	同意。
5.部頒規範係工程技術最高指導原則，惟考量一級公路的國道至六級公路的地區道路，在交通上、設計上及地域上差異甚大，故規範內容上採原則性、訓示性方式條列，細部規定則交由各公路管理機關自行訂定相關手冊或細則，以橋梁設計為例，公路橋梁設計規範為最上位，接著為高公局或公路局所訂之相關設計注意事項或準則，因此，建議研究團隊未來得進一步適度檢視兩局相關設計內規內容，提出提醒或修訂建言。	本計畫研究範疇為規劃階段，分為可行性研究、綜合規劃 2 階段。關於部頒技術規範探討內容已涉及設計階段，為避免誤解將適度調整並至於期末報告附冊二，以符合本計畫研究範疇。	同意。
6.後續工作重點包含提出「我國氣候變遷調適行動方案(112-116 年)」行動計畫，其中報告書 P2-53 特別注意到內容包含辦理示範計畫，在此請教研究團隊，目前是否有案例對象，初步規	(1)本計畫屬上位指導定位，工作項目未包含辦理示範計畫。 (2)後續工作重點為配合環境部期程，協助彙提各部屬	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
劃執行方式能否說明。	機關研提「我國氣候變遷調適行動方案(112-115年)」行動計畫初稿。	
台灣省土木技師公會(書面意見)		
1.前期相關研究成果摘述 P4-2 請再補充說明為何超過風險基準的項目，可就機關資源與預算決定維持原方案?此舉為機關開了方便之門致使氣候變遷風險管理淪於形式而無效果，建請再議。	由於期中報告前期成果 P4-2 部分論述尚未周全，本期計畫透過滾動檢討後已做調整，加強論述，補充如下:就機關資源與預算等進行綜合分析評估...，分析調適措施實施優先次序，詳見第 4.3.4 節。	同意。
2.前期相關研究成果摘述 P4-3 圖 4.1.1 公路系統規劃階段強化調適能力機制示意圖，第三階段：工程研究與評估最右端之氣候變遷風險評估，請再補充說明為何超過風險基準的項目，可就機關資源與預算決定維持原方案?此舉為機關開了方便之門致使氣候變遷風險管理淪於形式而無效果，建請再議。	同上，詳見第 4.3.4 節。	同意。
3.公路系統規劃流程融入氣候變遷調適理念 P4-16 圖 4.3.3 公路系統規劃階段強化調適能力機制說明圖，氣候變遷風險評估位階高於環境衝擊影響初步分析，似與法令之位階不符，建請再議。	圖 4.3.2 公路系統規劃作業流程融入調適理念之框架，主要目的是表達各階段融入調適作業程序而非法令位階之意。	同意。
4.第二階段：方案研擬與評估 P4-22 圖 4.3.8 辨識影響公路系統調適能力的氣候風險因素程序說明，藉由辦理工作坊邀集有經驗之專業者來指認影響公路系統(資產)調適能力之關鍵氣候因素，與專家學者會議何者較優，建請再議。	本計畫所提第二階段:方案研擬與評估辦理工作坊之目的為邀請專家學者共同討論，其內涵同專家學者會議。為增加用字理解，故改為專家工作小組，詳見第 4.3.3 節。	同意。
5.建議將地震、下雪、結冰等條件納入研究計畫。	本研究依據交通部統計要覽交通天然災害概況歷年統計資料及臺灣氣候變遷科學報告 2017－衝擊與調適面向等，彙整影響臺灣公路系統之五大氣候壓力，其內容不包含地震、下雪、結冰等。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
本所港灣技術研究中心(書面意見)		
1.本期中報告網羅國內外氣候變遷調適於公路系統相關作為及案例，資料豐富、脈絡清晰，團隊努力值得肯定。	感謝委員肯定。	同意。
2.同意本計畫於工程全生命週期規劃設計階段，即納入氣候變遷調適之觀點，以成本/影響力曲線來說，此階段之作為可用較小成本發揮更大的影響力。另團隊亦盤點現行交通部部屬機關之設施規劃設計相關規範，惟參照其他國家之運輸部門氣候變遷調適策略擬定層級，係以院會甚至國家整體角度來執行，故未來本調適指引是否有機會將層級拉高到交通部或是行政院等更高角度來進行調適策略檢視及內容撰寫，俾使本指引有更高位階及整體適用性。	前期計畫已完成滾動檢討運輸系統調適策略及措施，本期著重在研擬公路系統規劃階段的調適作為與指引。	同意。
本所運輸能源及環境組		
1.本案緣起係由公路系統規劃機制面思考公路管理機如何納入氣候變遷調適思維，因風險評估機制需視業務單位取得目標地區環境等資訊量及精確度，配套採用定量、半定量、定性等不同分析方法，因涉較多評估技術專業性，非本計畫指引能完整納入，先予述明。	敬悉。	同意。
2.因應氣候變遷調整運輸系統，需要從整個系統面向來看(區域治理)，區域運輸系統通常不會只透過一個調適選項就可以解決問題，需要因地制宜搭配多個配套的調適選項來綜合治理；此外，調適無作為也可以有其配套措施，如：介入、管理、監測、撤出，又如硬體無法處理改採軟性調適，指引可導入前述概念。	遵照辦理，於期末報告本文及指引已補充案例借鏡處，透過MPO 案例加強說明此概念，強調應從整個系統面向且因地制宜來思考多種調適選項的組合，詳見第 3.5 節及附錄 3。	同意。
3.科技部已於 111 年 7 月 27 日正式改制為國家科學及技術委員會(國科會)，報告書(P2-3、2-32、2-53、4-17、4-18、參考文獻)請一併修訂。機關名稱於報告首次應以全銜(如國家科學及技術委員會)出現(如 P2-3、3-14)	遵照辦理，已於期末報告檢視並修正機關名稱。	同意。
4.建議文獻回顧章節，可新增小結進行	遵照辦理，已增補小結，詳見	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
綜整、分析、歸納，摘錄各文獻重點及與計畫之關聯性。	第 3.5 節及第 4.5 節。	
5.本計畫多處出現調適機制、調適方法、調適作為、因應作為、調適選項、調適措施等用字，例如期中報告 P3-38 有調適選項與調適措施等交互出現，建議於報告書及指引中說明清楚，並全文檢視確認用字正確性與一致性。	(1)本計畫之目的之一為廣泛蒐整可應用於公路系統規劃階段強化調適能力之(因應)作為，而從國外文獻回顧發現，國外調適研究及實務案例報告所採用的調適選項頗為多元，調適選項(adaptation options)的涵蓋面從上到下包括：策略(strategies)、方法(approaches)、解決方案(solutions)及措施(measures)等，詳第 4.4.3 節。 (2)將檢視報告書同一意涵之用字統一，並於指引中加註名詞說明，以利理解，詳見附錄 3。	同意。
6.依本所出版品格式，本計畫多處表格有跨頁情形，表標題應於跨頁表頭出現並增(續)字樣，請檢視修正。	遵照辦理，已於期末報告修正表格標題。	同意。
主席結論		
1.研究團隊透過文獻蒐集及專家訪談方式探討公路系統強化調適能力作為及指引架構，同步滾動檢討強化調適能力機制(流程)，建議後續與實務應用機關溝通，以強化指引實用性。	前期(110 年)計畫已完成公路機關訪談、工作坊及專家學者座談會。本期計畫期中及期末階段持續蒐集各專家與相關單位之意見，透過專家訪談與專家學者座談會進行討論與交流，提出可行的調適選項建議。	同意。
2.團隊蒐集國外公路系統強化調適能力案例，請在報告書中強化案例提供可做為國內調適借鏡之處。	遵照辦理，已提供調適案例做為國內調適借鏡之處的說明，詳見第 3.5 節。	同意。
3.報告書 4.3 節公路系統規劃作業流程融入調適概念之流程圖請就委員意見進行修正。	遵照辦理，依據委員意見調整後，已進一步就教委員意見並依據討論內容修正流程圖，詳圖 4.3.1。	同意。
4.有關公路韌性強化事項，團隊已盤點交通部部頒之道路規範，因為部頒規範多採取原則性、指導性條列內容，	遵照辦理，交通部部頒之道路規範係由下而上從實務經驗回饋後評估是否進行調整，故	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
關於此部分可依委員建議以提醒或附錄方式提供給相關單位通盤檢視之參考。	本案僅就初步建議的觀點，提醒各主管單位應就其權責規範做通盤檢視與檢討。並依照委員意見及主席結論，以提醒或附錄方式呈現做為相關單位通盤檢視之參考。	
5.本計畫報告期中審查通過，請研究團隊依各與會委員與單位代表意見列表回應，並納入報告之修正，後續請研究團隊依本所出版品印製相關規定撰寫報告，於期中報告後納入每月工作會議查核事項。	遵照辦理，已提供期中審查意見表，並依據委員意見及所內出版品印製相關規定撰寫期末報告。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

□期中■期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：IOT-111-TCF004

計畫名稱：公路系統規劃階段強化調適能力之探討(2/2)－強化調適能力作為與指引

執行單位：鼎漢國際工程顧問股份有限公司

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
國立臺灣師範大學葉教授欣誠		
1.本計畫工項完成度很高，包括文獻回顧、分析、編製指引等品質皆不錯，值得讚許。	感謝委員肯定。	同意。
2.報告書 P1-10，關於 Climate Extreme 之翻譯與說明，建議參照 SREX 第 117 頁相關內容，再細緻化說明。	遵照辦理，依據委員意見參照 SREX 第 117 頁相關內容，補充 Climate Extreme 之定義說明，詳見報告書第 1.6 節、附錄 3 第 1.2 節。	同意。
3.報告書第 P3-10、P3-14，原文為 extreme weather event，應翻譯為極端「天氣」事件而非極端「氣候」事件。 4.針對天氣、氣候的陳述，前者時間尺度較短後者較長，本計畫為工程指引，應明確區分極端天氣事件與極端氣候事件之不同。	遵照辦理，已修正為極端「天氣」事件，詳見報告書 P3-10、P3-14。	同意。
5.建議指引加入一張整體性的引導圖示，說明氣候變遷調適考量與步驟。	感謝委員提供寶貴意見，已補充指引章節索引圖，詳見附錄 3 第 1.5 節。	同意。
6.建議調整 P4-19 步驟一的論述，「回顧過往氣候趨勢」這樣的寫法恐無法讓使用者區分防災與調適之差異，調適工作應回顧過往氣候變遷型態、研判未來氣候型態變化趨勢、因應未來氣候變遷而採取相關作為，而非只是防災、整備等因應措施。	(1)已調整報告書圖 4.3.4 內容論述，修改為「回顧過往氣候形態」及「考量未來氣候變遷情境設定」。調適與防災在操作上最大的差別為：調適係考量未來氣候變遷推估情境，探討未來調適缺口及調適因應方法。 (2)並於第一階段資料蒐集之步驟二加強說明：「確立專案所採用的氣候變遷情境設定，用以推估未來氣候	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
	變化趨勢」，詳見報告書第 4.3.2 節。	
交通部公路局陳副總工程司進發(含書面意見)		
1.指引建議補充操作名詞定義或統一名詞用法，包含氣候參數、氣候風險因素、氣候壓力因素等。	指引已統一名詞用法，並補充名詞說明，詳見附錄 3 第 1.2 節。	同意。
2.報告書 P4-2 有關氣候參數有加列流量，與 P4-4 五大氣候壓力因素不一致，是否定義不同亦或有其他考量，應該描述清楚。	氣候壓力因素係指本計畫所提之強降雨、強風、高溫、暴潮、海平面上升，而「流量」係強降雨所造成之河流流量改變，故屬氣候壓力因素下之氣候參數。已補充說明，詳見報告書 P4-1~P4-2、P4-17。	同意。
3.報告書 P4-2 第二階段宜統一稱呼方案研擬，尚不宜限縮為計畫路線(廊)方案研擬，因為有些個案計畫規模雖大但不涉及計畫路線，例如橋梁改建方案。	遵照辦理，由於報告書 P4-2 為前期成果摘述，本期已滾動檢討修正後為圖 4.3.2，並將「計畫路線(廊)方案研擬」修改為「計畫方案研擬」，詳見報告書 P4-16。	同意。
4.報告書 P4-2 第三階段何謂風險基準？如何建立？是否可用較易了解之說明來引導這一階段工作重點。	(1)「風險基準」係指可接受風險量，然實務上需要依個案計畫目標設定，亦屬價值觀判斷之樣態，而非直接給予風險基準。 (2)由於報告書 P4-2 為前期成果摘述，本期已刪除「風險基準」工作項目並滾動檢討修正流程圖，詳圖 4.3.2。	同意。
5.報告書 P4-6 研析成果說明建議修正意見： (1)圖 4.1.2 山區公路路廊之氣候衝擊(強降雨)，請增加路基淘空。 (2)圖 4.1.3 山區公路路段之氣候衝擊(強風)，請增加影響索力特殊橋梁結構、車輛翻覆、路廊加電線及號誌桿倒塌阻斷交通(如東部尼伯特颱風)、路網則比照圖 4.1.2 之路廊寫法。調適選項路段請增加列管制手段。 (3)圖 4.1.6 平原公路之氣候衝擊(強風)3 種公路系統尺度，建議均比照	圖 4.1.3~4.1.8 修正說明如下： (1)有關路基掏空已納入路段尺度(包含道路基礎及結構所面臨的氣候衝擊)，詳圖 4.1.2。 (2)其餘意見均已修正，詳圖 4.1.3~4.1.8。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
山區公路。 (4)圖 4.1.7 平原公路氣候衝擊(高溫)路網連通性受阻。 (5)圖 4.1.8 平原公路氣候衝擊(暴潮/風浪)對路廊之說明，請加列低窪道路區域不易退水，交通中斷時間加長。		
6.報告書 P4-3，圖 4.1.1 風險基準宜於第 2 階段方案研擬與評估階段導入，以利估算各方案之經濟效益。	由於報告書圖 4.1.1 為前期成果摘述，本期已刪除「風險基準」工作項目並滾動檢討修正流程圖，詳圖 4.3.2。	同意。
7.報告書 P5-6，指引架構第 3.3.3 節，第二階段作業程序說明應加註最高情境之「無開發投資經濟效益」，並於報告書 P5-8，指引架構第 4.4.4 節，詳細說明面對高度不確定性的決策方法，避免過於學術說法。	報告書第 5 章為指引架構概要說明，為避免重複論述，修正後內容詳見附錄 3，說明如下： (1)已補充附錄 3 第 2.1 節及圖 4.3.5 之論述說明「惟長期因受高度不確定性因素影響，建議可運用情境規劃等決策方法考量未來的多種可能。」 (2)由於調適須考量「未來的高度不確定性」，在實務應用上建議採用情境規劃等決策方法，思考在未來不同情境下的調適作為。調適行動應具備「彈性」，並可依據監測結果進行滾動式調整。	同意。
8.以下為問題請教： (1)重大建設計畫營運年期較長，通常為 100 年，以蘇花安東部陸路運輸為例，以 100 年為目標年，若採用目前環境部初步提出的國家未來氣候變遷情境設定，執行可行性研究階段，須進行經濟效益評估，惟調適做法的考量是否可能讓經費過高，導致於無法納入方案? (2)而蘇花安面臨之氣候壓力因素以強風、強降雨較具敏感性，面對強風又該如何處置?	(1)有關氣候變遷調適的經濟效益評估，鑒於目前資料較少，且許多災害資料以不可量化資料為多，依據經濟效益評估手冊之指導，無法納入經效評估之量化指標的內容，建議獨立章節說明。 (2)另外，國內有關氣候壓力因素之一：強風的本土性資料目前仍較為缺乏，建議公路主管機關可進一步	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
	相關專業團隊合作，針對專案產製所需的氣候模擬預測及分析資料。	
土木技師公會陳技師宣樺(含書面意見)		
1.報告書 P1-7，本計畫研究範疇屬於公路系統規劃階段，應與公共工程頒布《機關委託技術服務廠商評選及計費辦法》兩階段相對應，包含可行性研究與綜合規劃。	敬悉，本研究研究範疇包含可行性研究與綜合規劃可對應公共工程頒布規範之兩階段。	同意。
2.有關附錄 3 表 2-2 我國公路系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表意見如下： (1)附錄 3 P2-7 路段強降雨「土壤含水量過高影響道路、橋梁與隧道的結構強度」用詞建議修正； (2)另外華盛頓州 16 號幹線塔科馬海峽吊橋崩塌係風力造成橋梁共振而非氣候衝擊所致； (3)附錄 3 P2-8 美國加州比克斯比溪大橋(111 年 1 月科羅拉多大火)，是否為同一處，宜確認。	附錄 3 表 2-2 已修正，說明如下： (1)附錄 3 P2-7 已修正用詞，改為「土壤含水量過高影響道路邊坡、隧道口的結構強度」。 (2)由於氣候變遷會造成強降雨、強風等及極端天氣事件強度增強，故以國外風力造成橋梁共振因而吊橋崩塌為例。 (3)附錄 3 P2-8 已修正為美國加州比克斯比溪大橋案例為加州野火延燒造成，詳見附錄 3 第 2.2 節。	同意。
3.期末報告附冊二 P5-1 除了交通部頒布的相關規範外，公路系統開發還涉及《地質法》(地質敏感區)、《水利法》(跨河構造物、河川公地使用、河川治理計畫)、《水土保持法》…等，是否可於報告書補充說明。	規範檢討並非本計畫之工項，且規範的檢討應由下而上，非本計畫所能處理之尺度，因此相關內容置於附錄留待專業者參考使用。	同意。
4.報告書 P2-20 公路系統尺度定義較為模糊，例如：邊坡坍塌在路段上屬強降雨所造成之衝擊，但在路廊尺度上強降雨不會造成邊坡坍塌，宜確認。	已修正報告書表 2.2-2 刪除邊坡坍塌，詳見報告書表 2.2-2。	同意。
5.報告書 P6-1 公路系統在規劃階段納入氣候變遷調適能力的考量，惟在公路系統的養護維修上如何納入調適思維？	本研究之指引內容中所引介的方法可應用於公路養護維修，例如氣候衝擊鏈分析、風險評估方法等，惟尚待結合實務操作面細節研議作法。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
高速公路局		
1.高公局對於本次報告內容無意見，並同意葉委員所提名詞定義與詮釋對於指引具有重要性，建議團隊參採修正。	遵照辦理，依據委員意見參照 SREX 第 117 頁相關內容，補充 Climate Extreme 之定義說明，詳見報告書第 1.6 節、附錄 3 第 1.2 節以及相關內容。	同意。
公路局		
1.針對指引手冊所提的方法、流程，建議後續以案例說明整體操作流程，以利協助使用者了解其機制的內涵。	(1)指引所提之建議為提供國內公路機關之調適操作流程，惟目前尚無整體操作流程之完整案例。 (2)建議未來能推動公路調適示範計畫，加強國內調適實務推動及應用，並透過持續滾動修正指引以拉近理論方法與實務運用間之差距，以強化此指引之可操作性。	同意。
國立高雄科技大學蘇教授育民(書面意見)		
1.報告書第 1 章至第 3 章內容、架構、文獻彙整均十分清晰，井然有序，足以作為本研究以及未來研究參考借鏡之重要參考資料。	感謝委員肯定。	同意。
2.報告書圖 4.1.4、圖 4.1.7 在「氣候衝擊」裡的「路段」中，描述「道路標線融化難以確認」，建議改成「道路標線變形難以確認」。	已修正，詳報告書圖 4.1.4、圖 4.1.7 及附錄 3 表 4-4。	同意。
3.報告書圖 4.1.4、圖 4.1.7 在「調適選項」中「路段」裡的「調整」，描述「調整鋪面結構設計，修改路面和基質的厚度與材料」，建議修改成「調整鋪面結構設計，修改面層和基底層的厚度與材料」；在「調適選項」中「路段」裡的「調整」，描述「……調整瀝青粘合劑等級」，建議修改成「調整瀝青膠泥等級」。	已修正，詳報告書圖 4.1.4、圖 4.1.7 及附錄 3 表 4-4。	同意。
4.報告書 P4-44 對公路系統的衝擊中「道路標線融化難以辨認」修改成「道路標線變形難以辨認」；在調適選項中，描述「調整鋪面結構設計，修改路面和基質的厚度與材料」，建	已修正，詳報告書表 4.4-2 及附錄 3 表 4-4。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
議修改成「調整鋪面結構設計，修改面層和基底層的厚度與材料」；在調適選項中，描述「…調整瀝青粘合劑等級」，建議修改成「調整瀝青膠泥等級」。		
5.所有內文中的「科技部」建議修正成為「國科會」。	已檢視內文並修正，詳見報告書第 4.3 及 4.4 節。	同意。
交通部技監室張技監垂龍(書面意見)		
1.今年 11 月 COP27 氣候峰會有什麼重要結論?對於本研究計畫有什麼回饋?建請說明，未來可於下年度計畫內說明。	COP27 重點在於損害與損失基金的設立，其餘調適和減緩作為仍持續督促各國需有所進展，相關會議成果與本計畫之關聯較不具體。	同意。
2.報告書 3.1 節公路系統韌性之定義，裡面內容摘述美國 TRB 及英國 TRL 研究報告，惟最後未見本研究歸納結果，是否提出我們(或國內)自己對「公路韌性」的定義，建請衡酌。	本案廣泛蒐整公路系統韌性之定義，以英國 TRL 對「公路韌性」的定義：「可承受因應與回復的能力」及美國 TRB 的定義為「準備和調整以因應不斷變化、承受運輸中斷並迅速從中復原的能力」做為本案對於「公路韌性」定義的說明。	同意。
3.報告書 4.3 節公路系統規劃階段強化調適能力之機制，係本研究成果之一，一般對於規劃階段，即代表可行性研究與綜合規劃，爰進一步建議，我們能否研議將此機制融入目前的行政程序上，例如在行政院中長程個案計畫作業要點，抑或工程會工程計畫與經費審議作業要點等，明確列為應評估的項目。得建議主管機關於修訂時參考，這樣未來渠等要點之修訂頒布後，以利達到各執行單位(或顧問公司)遵從。	敬表贊同，樂觀其成。	同意。
4.調適概念在部頒相關技術規範已有所反應，只是未引用該字眼，例如在公路排水設計規範中，即要求設計時應考慮災損紀錄、洪水淹水資料等，且必要時應採保守方式推估，這樣的要求與調適該念相符，當然，未來在技術規範滾動檢討時機下，如何明確	敬悉，樂觀其成。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
其字眼，這部分部裡技監室會來衡量。		
5.調適的手段似乎都針對極端事件，且具個案性質，進行相關措施或應變方法(報告書表 4.4-2 所示)，惟對於公路系統而言，公路等級差異甚大，涵蓋一級的國道至六級的地區性道路，在設計上本就需視設施規模之經濟性與重要性考量，就如同建築物耐震設計秉持「小震不壞、中震易修、大震不倒」觀念，因此，我們在公路規劃上，除調適因素之外，我想經濟性、規模性，也須同時兼顧衡量。	敬表同意。	同意。
6.2030 及 2050 淨零碳排政策為國家整體目標，監察院在今年 11 月 24 日赴交通部年度訪視，業特別重申交通部扮演的重要角色，務必要執行達成，這部分希望貴所在這計畫內也能有所著墨，或者提出一些建議策略及措施。	敬悉。UNFCCC 指出調適策略為降低氣候衝擊影響的方法，以解決氣候變遷所帶來不可避免的衝擊，其中提及之部分調適策略，如以自然為基礎的解決方案(NbS)，甚至有助於達成溫室氣體減緩之正面效益。	同意。
國家災害防救科技中心陳組長永明(書面意見)		
1.本年度工作均依序達成，予以肯定。	感謝委員肯定。	同意。
2.文中國科會之縮寫已由 MOST 調整為 NSTC，建議期末報告與指引之文字進行更正。	已修正，詳見報告書第 4.3 節	同意。
3.指引「壹、導讀」內容考量公路系統規劃與設計很大部分須強調「防災與用路安全」，建議此章節在進行「調適」概念說明的同時，可以增加「防災」與「調適」在觀念上的異同之處，以協助參考此指引之利害關係人能在既有觀念與實務經驗上增加「調適」觀念。	已補充調適及防災的差異，詳見附錄 3 第 1.3 節。	同意。
4.指引「2.1 台灣氣候變遷推估資訊」名稱建議改為「2.1 全球暖化與台灣氣候變遷趨勢」以凸顯現有內容所整理之最新之全球與台灣在地之氣候變遷變化資訊(例如 IPCC 報告為全球資訊)。	已修正為「全球暖化與臺灣氣候變遷趨勢」，詳見報告書第 2.2 節及附錄 3 第 2.1 節。	同意。
5.指引「國家氣候變遷情境設定」之內	已修正「國家氣候變遷情境設	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
容引述(如圖 2.1)建議引用正式文件，例如環境部 111/4/29 跨部門協商之內容，或第三期國家氣候變遷調適行動方案(112-116)之正式文件。	定」圖片之引用來源，詳見附錄 3 圖 2.1。	
6.指引 2.2「氣候變遷對公路系統之衝擊」建議改成「氣候因子(或氣候壓力)對公路系統之衝擊」，因文中之氣候(或氣候因子)不完全等同於氣候變遷，氣候變遷衝擊需進行風險評估方能確認是否是因長期氣候變遷變化趨勢所導致。	已修正為「氣候壓力對公路系統之衝擊」，詳見報告書第 2.2 節及附錄 3 第 2.2 節。	同意。
7.指引 3.1 所提之三階段的調適概念框架，建議與環境部與 NCDR 提供各領域參考之「國家氣候變遷調適框架」(111/4/29 會議與調適行動方案草案)進行對接或勾稽，藉以呈現部門(公路系統)調適框架與國家調適框架之關聯性以及其獨特性。	本指引於第三階段提出之「執行氣候變遷風險評估」可對應「國家氣候變遷調適框架」之第一階段：辨識氣候風險與調適缺口，已補充本指引與國家調適框架之關聯性論述，詳見附錄 3 第 1.4 節。	同意。
8.指引 3.2 氣候資料收集部分，建議表 3.1 和表 3.2 進行整合。資料收集除了「未來推估」資訊外，現有「觀測資料」之收集(例如氣象局、水利署、水保局、台電…等相關單位觀測資料)亦可作為現況風險辨識與指認之數據(符合「回顧過往氣候趨勢」所需)。	表 3-1 已整併並補充修正表格內容，詳見附錄 3 第 3.2 節。	同意。
9.指引表 3-1「未來工址地質與地形變化」應不是國科會或 NCDR 所能提供(頂多是未來崩塌潛勢之分析方法與參考圖資)，建議文字內容再行確認。		同意。
10.指引 3.3「評估…氣候風險因素」與 3.4「執行氣候變遷風險評估」均有提到氣候參數、因子或是風險辨識相關流程，這兩階段容易重疊與混淆，建議嘗試釐清。例如，調適選項與行動最重要的關鍵「調適缺口確認」，會於哪一個階段進行評估與確認，建議釐清。	已補充指引與國家調適框架之關聯性論述，詳見附錄 3 第 1.4 節。有關國內調適推動過程分為二個階段(1)第一階段：辨識氣候風險與調適缺口、(2)第二階段：調適規劃與行動，指引建議於「執行氣候變遷風險評估」進行「調適缺口確認」。	同意。
11.指引 3.4「執行氣候變遷風險評估」所提之「氣候變遷風險評估方法」與	指引第三章重點為程序步驟，第四章引介方法，已補充說明	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
「4.1 衝擊鏈分析方法」、「4.2 風險評估方法」之關係為何？為建議使用或是參考方法，建議於 3.4 的文字內容可以對應與參照說明。	「執行氣候變遷風險評估」所提之「氣候變遷風險評估方法」與「4.2 風險評估方法」之關係，並增加圖 1.9 指引章節索引說明圖，詳見附錄 3 第 1.5 及 3.4 節	
12.指引第 4 章所整理之內容相對完整且具體，建議後續推動與說明過程，能廣泛收集業務單位之反饋意見，持續滾動修正以拉近理論方法與實務運用間之差距，以強化此指引之可操作性。	敬悉，後續依業務運作情形，適時啟動指引修正作業。	同意。
交通部路政司(書面意見)		
1.本計畫為延續性計畫，為使本計畫之研究成果能讓公路主管機關落實應用於公路新建與養護以因應極端氣候，建議應將研究成果與現有公路相關設計或養護規範調適；本次期末報告期末報告附冊二第五章雖有就公路設計規範內容進行探討，但提出之建議處置並無實質具體內容，建議應就規範標準提出較明確之修正條文內容，做為部內決策參據。	由於規範檢討並非本計畫之工項，且規範的檢討應由下而上，非本計畫所能處理之尺度，因此相關內容置於附錄留待專業者參考使用。	同意。
2.有關本次期末報告提出之建議調適案例，包括台 20 線、蘇花改、蘇花安、五楊高架及中橫臨 37 線，近期台 7 線北橫公路因尼莎颱風外圍環流造成阻斷，目前公路局刻正研議長期復建計畫，建議本計畫將重要輿情案例納入調適案例評估。	有關國內案例部分，建議未來與公路局討論是否能進一步合作公路調適示範計畫，以加強國內調適實務推動及應用，並透過持續滾動修正指引以拉近理論方法與實務運用間之差距，以強化此指引之可操作性。	同意。
本所運輸能源及環境組(含書面意見)		
1.有關本計畫工項鐵公路資訊平台移置，團隊已完成，惟所內因有網站資訊安全考量，因此未上線。	敬悉。	同意。
2.報告書 P4-18，地質資訊未來情境資料來源之提供單位，除國科會及 NCDR 外，也可能需要經濟部地質調查及礦業管理中心或在地相關公路管理機關(有鑽探資料及長期觀察)之協助，請再評估是否增列為資料來源	報告書表 4.3-1 已修正及補充表格內容，詳見報告書第 4.3 節。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
之提供單位。		
3.有關需求說明書之「對於將氣候變遷因素納入既有規劃流程的構想可進一步思考，探討是否適合分列屬於可行性研究的項目，以及屬於綜合規劃的項目，經研究後再提出建議」相關辦理事項，雖經本期研究，在規劃流程中不建議分列可行性研究項目及綜合規劃項目，仍請團隊於期末報告定稿補充說明本項辦理情形。	考量可行性研究與綜合規劃屬概規及詳規的關係，建議二階段之規劃過程皆依指引之建議融入調適理念，詳見附錄3第1.1節。	同意。
4.本計畫於111年10月13日辦理1場「公路規劃強化調適能力指引」專家學者座談會，請補充說明專家學者意見之參採情形。	已修正，詳見報告書第5.1節。	同意。
5.本期末報告審查會議簡報主要係以2年研究產出之指引來進行成果報告，完整呈現及說明指引內容，值得肯定；後續報告定稿本之簡報呈現，請補充各工項執行情形，較能完整呈現計畫執行成果。	遵照辦理，詳見報告書附錄4。	同意。
6.報告書圖、表、內容文字請通盤檢視修訂： (1)P2-9調適7大領域、P2-27之3大類型、P4-33之5大氣候壓力因素…等，請修訂為七大領域、三大類型、五大氣候壓力因素，其餘部分請通盤檢視修訂。 (2)P3-5表3.2-1、P3-22表3.2-6，目錄應調整為章節，1.0、2.0…章等，應調整為1、2…章；P5-6表5.2-1，第44章請修訂為第4章，其餘部分請通盤檢視修訂。 (3)國外文獻圖表請皆調整為中文字，如P2-26圖2.3-1、P3-33圖3.3.3、P3-37圖3.3-4，其餘部分請通盤檢視修訂。 (4)P3-19，圖3.2.5，監測及重新評估步驟重複。 (5)P3-32，內文提及圖3.4.10，然實際應為圖3.3.2。	(1)有關報告書P3-19，圖3.2.5為國外文獻的圖片翻譯，為忠於原意故無修改原圖。 (2)其餘意見均已修正，詳見報告書各章。	同意。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回應	本所審查意見
主席結論		
1.報告書 P3-30 羅列其他國家氣候變遷調適指引之機關(構)，惟 NCHRP 似乎為一項計畫名稱，宜釐清。	已修正並補充美國運輸研究學會(TRB)出版之國家協作公路研究計畫(NCHRP)，詳見報告書 P3-30。	同意。
2.請團隊詳細檢視本報告之名詞與定義，務求正確一致，以達到擬定指引之目的。	遵照辦理，已檢視期末報告之名詞與定義並確認正確一致。	同意。
3.指引導讀除了調適的概念外，請團隊補充調適與防災之異同，並補充簡易的引導大圖作說明。	已補充調適及防災的差異說明，並補充指引章節索引圖，詳見附錄 3 第 1.3 節及 1.5 節。	同意。
4.建議指引第四章內容後續廣泛蒐集業務單位之意見，滾動修正以強化指引的實務操作性。	敬悉。後續建議加強國內調適實務推動及應用，並透過持續滾動修正指引以拉近理論方法與實務運用間之差距，以強化此指引之可操作性。	同意。
5.本計畫經徵詢審查委員意見，期末報告審查通過，請鼎漢國際工程顧問股份有限公司依各委員及與會單位研提之口頭及書面意見整理「審查意見處理情形表」，且逐項說明回應辦理情形，並充分納入報告之修正，於 111 年 12 月 22 日(星期四)前提送期末修訂報告。	遵照辦理。	同意。

附錄 3

公路系統規劃階段強化調適能力指引

公路系統規劃階段強化調適能力指引

目錄

摘要……附 3-1

壹、導讀 …… 附 3-1-1

1.1 前言 …… 附 3-1-1

1.2 名詞定義 …… 附 3-1-3

1.3 氣候變遷調適基本概念 …… 附 3-1-5

1.4 氣候變遷調適最新發展趨勢 …… 附 3-1-10

1.5 指引結構說明 …… 附 3-1-13

貳、氣候變遷對公路系統的影響 …… 附 3-2-1

2.1 全球暖化與臺灣氣候變遷趨勢 …… 附 3-2-1

2.2 氣候壓力對公路系統之衝擊 …… 附 3-2-4

參、公路系統規劃階段強化調適能力機制 …… 附 3-3-1

3.1 公路系統規劃流程融入調適概念之框架 …… 附 3-3-1

3.2 第一階段：蒐集與分析氣候變遷相關資料 …… 附 3-3-3

3.3 第二階段：初步評估影響調適能力之氣候風險因素 …… 附 3-3-7

3.4 第三階段：執行氣候變遷風險評估 …… 附 3-3-9

3.5 公路跨其他運輸系統調適介面整合機制 …… 附 3-3-16

3.6 本章重要觀念 …… 附 3-3-17

肆、公路系統規劃階段強化調適能力方法 …… 附 3-4-1

4.1 公路系統氣候衝擊鏈分析方法 …… 附 3-4-1

4.2 公路系統氣候風險評估之方法 …… 附 3-4-7

4.3 公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項 …… 附 3-4-19

4.4 面對高度不確定性之決策方法 …… 附 3-4-34

4.5 本章重要觀念 …… 附 3-4-38

伍、結語 …… 附 3-5-1

5.1 結語 …… 附 3-5-1

5.2 學習資源 …… 附 3-5-2

參考文獻

表目錄

表 1-1　氣候變遷調適專有名詞定義彙整表 ..... 附 3-1-4
表 2-1　各種排放情境下的增溫幅度推估表 ..... 附 3-2-2
表 2-2　我國公路系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表 ..... 附 3-2-7
表 3-1　氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析項目一覽表 ..... 附 3-3-4
表 3-2　公路系統及跨其他運輸系統強化調適介面整合機制各階段作業 ..... 附 3-3-16
表 4-1　氣候風險矩陣填寫步驟說明 ..... 附 3-4-9
表 4-2　氣候危害發生頻率分級標準 ..... 附 3-4-9
表 4-3　氣候風險衝擊程度評分標準 ..... 附 3-4-9
表 4-4　淹水危害分級 ..... 附 3-4-15
表 4-5　坡災危害分級 ..... 附 3-4-15
表 4-6　產值分級 ..... 附 3-4-15
表 4-7　交通量分級 ..... 附 3-4-16
表 4-8　淹水-設施安全分級 ..... 附 3-4-16
表 4-9　坡災-設施安全分級 ..... 附 3-4-17
表 4-10　預警應變作為分級 ..... 附 3-4-17
表 4-11　鐵公路替代道路數分析設定 ..... 附 3-4-18
表 4-12　替代道路數等級界定 ..... 附 3-4-18
表 4-13　公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表 ..... 附 3-4-25
表 4-14　MPO 大都會區規劃組織研究之調適選項說明表 ..... 附 3-4-31
表 5-1　國內氣候變遷調適相關資訊網站 ..... 附 3-5-2
表 5-2　國際氣候變遷調適資訊網站 ..... 附 3-5-3

圖目錄

圖 1.1　連續極端天氣事件對公路系統的衝擊 ..... 附 4-1-1
圖 1.2　公路系統建設流程 ..... 附 4-1-2
圖 1.3　氣候衝擊風險的概念 ..... 附 4-1-7
圖 1.4　氣候衝擊風險的因應作為 ..... 附 4-1-7
圖 1.5　調適關鍵要素 ..... 附 4-1-8
圖 1.6　調適及防（減）災的異同 ..... 附 4-1-9
圖 1.7　IPCC 氣候韌性發展 ..... 附 4-1-10
圖 1.8　本指引章節架構 ..... 附 4-1-13
圖 1.9　本指引章節運用索引圖 ..... 附 4-1-14
圖 2.1　固定暖化情境之參考基準、基期與增溫情境與時程 ..... 附 4-2-3
圖 2.2　公路系統之路段概念 ..... 附 4-2-5
圖 2.3　公路系統之路廊概念 ..... 附 4-2-5
圖 2.4　公路系統之路網概念 ..... 附 4-2-6
圖 2.5　各項氣候壓力對公路系統的衝擊 ..... 附 4-2-7
圖 2.6　穩定廊帶風險危害辨識評估方法與成果 ..... 附 4-2-10
圖 2.7　路堤段考量河床淤高造成之溢淹 ..... 附 4-2-11
圖 3.1　公路系統規劃作業流程融入調適理念之框架（I） ..... 附 4-3-1
圖 3.2　公路系統規劃作業流程融入調適理念之框架（II） ..... 附 4-3-2
圖 3.3　資料蒐集分析階段納入調適作業流程 ..... 附 4-3-3
圖 3.4　氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析作業程序說明 ..... 附 4-3-6
圖 3.5　方案研擬與評估階段納入調適作業流程 ..... 附 4-3-7
圖 3.6　初步評估影響調適能力的氣候風險因素作業程序說明 ..... 附 4-3-9
圖 3.7　工程研究與評估納入調適作業流程 ..... 附 4-3-10
圖 3.8　氣候變遷風險評估程序說明 ..... 附 4-3-12
圖 3.9　可能因暴雨遭受洪水災害的脆弱地點 ..... 附 4-3-15
圖 4.1　IPCC 對於氣候衝擊風險的定義 ..... 附 4-4-2
圖 4.2　氣候衝擊鏈分析示例說明 ..... 附 4-4-3
圖 4.3　山區公路氣候衝擊鏈分析示意圖（強降雨） ..... 附 4-4-5
圖 4.4　平原公路氣候衝擊分析示意圖（暴潮/風浪、海平面上升） ..... 附 4-4-6

圖 4.5　JICA 氣候風險矩陣填寫步驟 ..... 附 4-4-8
圖 4.6　JICA 氣候風險樹狀圖 ..... 附 4-4-10
圖 4.7　簡易風險矩陣 ..... 附 4-4-12
圖 4.8　風險評估流程與風險矩陣 ..... 附 4-4-19
圖 4.9　以自然為本生態元素與結構元素之風險程度適用性 ..... 附 4-4-22
圖 4.10　海島國家應用調適選項以降低沿海地區氣候風險 ..... 附 4-4-24
圖 4.11　MPO 研究路廊所在區位 ..... 附 4-4-29
圖 4.12　1A 號沿海公路所在環境區位與氣候風險 ..... 附 4-4-30
圖 4.13　以自然為本，控制洪水和侵蝕的解決方案 ..... 附 4-4-32
圖 4.14　面對未來不確定性之決策概念 ..... 附 4-4-35
圖 4.15　情境規劃 8 步驟 ..... 附 4-4-36
圖 4.16　調適路徑示意圖 ..... 附 4-4-37
圖 4.17　穩健決策（RDM）過程 ..... 附 4-4-38

摘要

公路系統為維繫社會經濟發展的重要基礎設施，一旦其功能受損或失能影響社會經濟甚鉅。全球暖化的全面衝擊持續發生中，導致公路系統面臨前所未有的氣候衝擊風險，如何及早強化公路系統因應氣候變遷的調適能力實屬當務之急。

氣候變遷調適即是管理、處理及治理氣候變遷為系統帶來的風險。而欲於規劃階段強化公路系統因應氣候變遷的調適能力，最近的途徑即是在既有的規劃作業程序中納入管理、處理及治理氣候變遷風險的考量，亦即設法將氣候變遷調適「主流化（mainstreaming）」至公路系統的規劃程序之中。

本指引於公路系統規劃程序中引入氣候變遷調適作業，以補強化公路系統的氣候韌性，同時推介適合於公路系統規劃階段採用的氣候衝擊分析及氣候風險評估方法、調適選項以及面對不確定未來的決策方法等。值得一提的是，本指引所述之方法不限於規劃階段，亦可適用於公路系統的全生命週期，包含設計、施工、維護及改善等各階段之氣候變遷調適作業。

本指引最核心的目的在於協助熟練的公路專業規劃者，於專案規劃過程中融入氣候變遷調適的考量，除了公路規劃專家之外，必要時建議與氣候科學專家以及公路系統的其他利害關係人一起工作。此外，本指引也適合公路系統主管機關、業務相關機關、審查人員以及社會大眾閱讀，以從其中獲取公路系統氣候變遷調適的知識。期盼本指引有助於從根本處啟動建構我國公路系統氣候韌性的腳步。

本指引於第一章導讀說明氣候變遷調適的概念及原則，並蒐整國際氣候變遷調適趨勢；第二章概述臺灣的氣候變遷情境推估及氣候變遷對於公路系統的衝擊；第三章說明如何將氣候變遷因素融入公路系統之規劃流程，並說明各階段之作業程序；第四章延續所建立之機制，進一步針對機制中較為困難且關鍵之步驟提供國際調適目前採用之方法說明；第五章為結語，同時分享氣候變遷調適的學習資源，期能有助於公路系統及相關領域從業人員氣候變遷調適之能力建構。

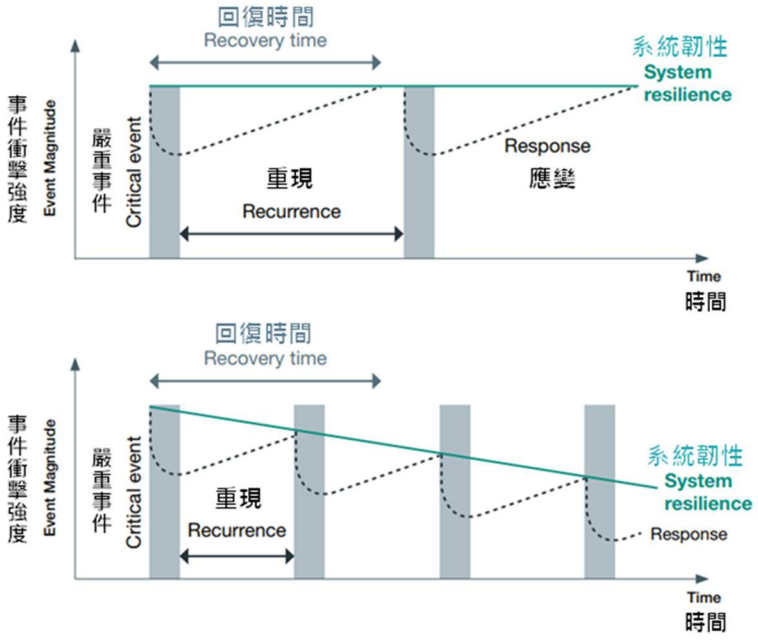
壹、導讀

1.1 前言

1. 緣起及目的

(1) 緣起：為何公路系統需要於規劃階段考量氣候變遷調適

- 公路系統為維繫社會經濟發展的重要基礎設施，一旦功能受損或失能影響社會經濟甚鉅。
- 全球暖化下極端天氣事件更加頻繁且趨於嚴峻，致使公路系統受衝擊後的回復時間不足，進而降低系統韌性（參見圖 1.1），為確保公路系統在氣候變遷的環境中可維持營運服務，應於公路系統規劃之初即納入氣候變遷調適的考量，以利提升其生命週期各階段的氣候變遷調適能力。



資料來源：Reeves, S., Winter, M., Leal, D., & Hewitt, A., Rail: An industry guide to enhancing resilience. Resilience Primer, 2019.

圖 1.1　連續極端天氣事件對公路系統的衝擊

(2) 目的

- 本指引旨在協助公路系統權責機關與實務從業人員於規劃階段更全盤性、系統性地納入氣候變遷調適理念，以提升我國公路系統在氣候變遷下的調適能力，建構備具氣候韌性的公路系統。
- 由於氣候變遷調適涉及層面極廣，本指引內容主要聚焦於公路系統規劃階段如何融入氣候變遷調適理念的「機制」及「方法」：
  - 「機制」係指將氣候變遷調適融入公路系統規劃作業之流程與步驟。
  - 「方法」係指於上述機制內所提及之工作項目之作業方式建議，例如，執行氣候變遷風險評估及研擬調適選項（adaptation options）的作業方法等。前者係協助公路系統於規劃階段指認出風險缺口所使用的方法，如：風險評估、氣候衝擊鏈分析法…等；後者係指改善現況缺口以提升氣候韌性的各種方法，其涵蓋面從上到下包括：策略（strategies）、方法（approaches）、解決方案（solutions）及措施（measures）等。

2. 適用範疇

(1) 以省道、快速公路及高速公路為主要對象

本指引主要依據國內高速公路、快速公路、省道系統之規劃程序進行編擬，然其他公路系統之規劃仍可參用。

(2) 主要適用於新建及改建之規劃作業階段

本指引適用於公路系統新建及改建之規劃階段，包含可行性研究及綜合規劃階段（參見圖 1.2）。

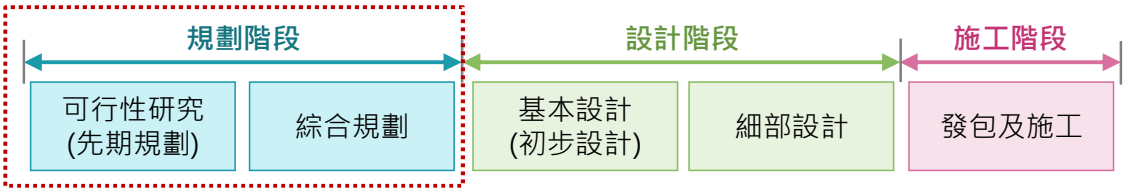


圖 1.2　公路系統建設流程

由於國內公路規劃實務上通常將可行性研究與綜合規劃視為同一計畫之概念規劃及詳細規劃，因此，二規劃階段均建議循本指引之機制及方

法如融入氣候變遷調適概念,依各階段所掌握之資料精度及問題具體程度執行氣候風險評估，並研擬調適選項。

欲提升公路系統之氣候變遷調適能力,於規劃階段即應以全生命週期觀點儘量周延盤點規劃、設計、施工及後續的養護管理各階段的氣候變遷調適需要，以達到最大調適的效果。

(3) 指引部分內容具廣泛應用價值

本指引內容所引介之調適理念及方法可廣泛應用於公路系統設計、施工及維護等各階段之氣候變遷調適工作。

3. 適用對象

(1) 公路系統管理者：公路管理機關決策者、承辦人員

協助公路系統管理者瞭解調適觀念及最新趨勢,以利快速與國際接軌並投入國內調適推動工作。

(2) 公路系統專案審查者：審查委員、審查作業人員

協助公路系統專案審查者瞭解如何透過審查機制強化公路調適,加速國內調適實務面推動工作。

(3) 公路系統實務規劃者：專業顧問公司從業人員

協助公路系統實務規劃者瞭解氣候變遷對公路系統的衝擊,提供如何強化調適能力之機制與方法。

(4) 其他利害關係人：與公路系統利害相關之機關人員、企業、社會大眾

協助其他公路系統利害關係人瞭解調適觀念及最新趨勢,促使調適觀念普及化。

1.2 名詞定義

為利於指引之閱讀，本節針對指引內容所提及之重要名詞進行定義（參見表 1-1）。名詞之定義分別來自「政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）」於 2012 年出版的促進氣候變遷調適之風險管理－針對極端事件及災害報告（Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, SREX）、2014 年出版之第五次評估報告（the IPCC's Fifth Assessment Report, AR5）、

2022 年出版之第六次評估報告（the IPCC's Sixth Assessment Report , AR6），以及溫室氣體減量及管理法(以下簡稱溫管法，於 112 年 2 月 15 日修正為《氣候變遷因應法》)第 3 條。

表 1-1　氣候變遷調適專有名詞定義彙整表

名詞	定義	參考來源
氣候 （Climate）	平均天氣狀態，或在更嚴格意義上，則被定義為對某個時期（從幾個月到幾千年乃至幾百萬年不等）相關變數的均值和變率進行統計描述。廣義上的氣候是指氣候系統的狀態，包括其統計學意義上的描述。	AR5：綜合總結報告第 119 頁
氣候變遷 （Climate change）	指氣候狀態的變化，這種變化可根據氣候特徵的均值和/或變率的變化進行識別（如採用統計檢驗方法），且這種變化會持續一段時間，通常為幾十年或更長時間。氣候變遷可能由自然的內部過程或外部強迫造成，如太陽活動週期的改變、火山噴發以及人類活動對大氣成分或土地利用的持續改變等。	AR5：綜合總結報告第 120 頁
極端氣候 （Climate Extreme）	原稱為極端天氣事件及極端氣候事件（Extreme Weather or Climate Event），有三種定義方式，一是當氣候數值高於或低於門檻值的事件，二是該氣候數值達特定絕對值（例如：危險標準），或可定義為該事件發生的可能性或頻率極低。 極端天氣事件和極端氣候事件可透過特定的時間尺度區別，極端天氣事件發生的時間範圍介於一天內到幾周；極端氣候事件則發生在更長的時間尺度，且可以是幾個（極端或非極端）天氣事件的累積（例如，一個季節內累積數日低於平均降雨量的天氣事件而導致乾旱）。	SREX：第 116 頁及第 117 頁
氣候變遷調適 （Climate change adaptation）	指人類系統，對實際或預期氣候變遷衝擊或其影響之調整，以緩和因氣候變遷所造成之傷害，或利用其有利之情勢。調適包括預防性及反應性調適、私人和公共調適、自主性與規劃性調適等。	溫管法第 3 條
危害 （Hazard）	係指可能發生的自然或人為物理事件、趨勢或物理影響，並可造成生命損失、傷害或其它健康影響以及可能造成財產、基礎設施、生計、服務提供、生態系統以及環境資源的損害和損失。	AR5：綜合總結報告第 124 頁

表 1-1　氣候變遷調適專有名詞定義彙整表（續）

名詞	定義	參考來源
暴露度（Exposure）	人員、生計、物種或生態系統、環境功能、服務，資源、基礎設施或經濟、社會或文化資產處在有可能受到不利影響的區域之程度。	AR5：綜合總結報告第 123 頁
脆弱度（Vulnerability）	易受負面影響的傾向或習性。脆弱度包括各類概念和因素，如對傷害敏感或易受傷害、缺乏應對和適應的能力。	AR5：綜合總結報告第 128 頁
調適能力（Adaptive capacity）	指某個系統、組織、人類及其他生物針對潛在的損害、機會或後果進行調整、利用和應對的能力。	AR5：綜合總結報告第 118 頁
風險（Risk）	風險通常用於指那些對生命、生活、健康、生態系統和物種、經濟、社會和文化資產、服務（包括環境服務）和基礎設施有負面後果，且結果有不確定的可能性。	AR5：綜合總結報告第 127 頁
風險管理（Risk management）	透過計畫、行動與政策降低風險的可能性與不確定性或回應後果。	AR5：綜合總結報告第 127 頁
韌性（Resilience）	某社會、經濟和環境系統處理災害性事件、趨勢或擾動，並在回應或重組的同時保持其必要功能、定位及結構，並保持其適應、學習和改造等的能力。	AR5：綜合總結報告第 127 頁
作為（Responses）	氣候變遷因應作為簡稱作為（responses），包含調適（adaptation）和減緩（mitigation），皆被視為調節風險的手段。	AR6：衝擊、調適與脆弱度第 102 頁

1.3 氣候變遷調適基本概念

1. 全球暖化衝擊與因應：減緩與調適

聯合國全球氣候變遷公約（United Nations Framework Convention on Climate Change，UNFCCC）於歷次公約會議指出面對全球暖化及氣候變遷現象的 2 個主要策略為：減緩與調適。分別說明如下：

(1) 減緩（Mitigation）：降低溫室氣體排放量

以人為干預的方式，減少溫室氣體的排放量或增加溫室氣體的儲存量，以減緩氣候變遷問題的發生速度或規模（例如：降低燃煤發電、採用再生能源發電、汰換節能設備、減少私有運具等）。

(2) 調適（Adaptation）：調整適應氣候變遷衝擊

為了因應實際或預期的氣候衝擊或其影響而在自然或人類系統所做的調整，以減輕危害或發展有利的機會（例如：加高堤防、從易受到因海平面上升而遭受衝擊的沿海地區撤離等）。

2. 氣候變遷調適

依據《溫管法》（112 年 2 月 15 日已修正為《氣候變遷因應法》）第 3 條，「氣候變遷調適」係指人類系統，對實際或預期氣候變遷衝擊或其影響之調整，以緩和因氣候變遷所造成之傷害，或利用其有利之情勢。

IPCC 則將調適分由兩個不同系統進行定義。於人類系統中，調適係為調整實際或預期的氣候及其影響的過程，以減緩傷害或利用具正面效益的機會；於自然系統中，調適則為調整實際或預期的氣候及其影響的過程，而人為介入可能有助於調整相關影響。

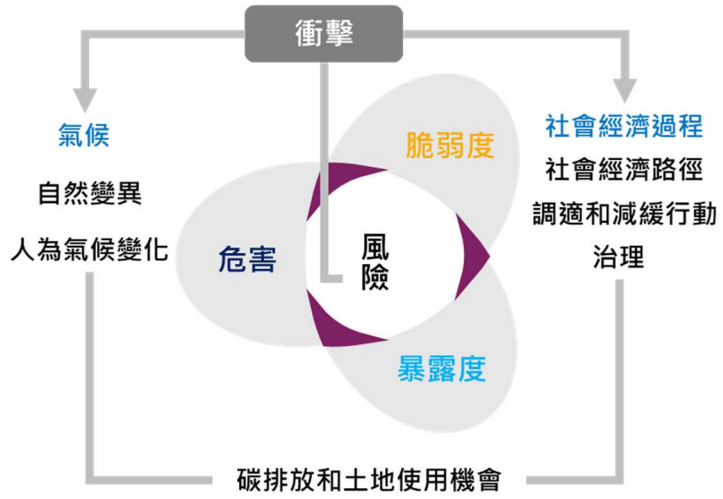
因此，調適並非行動的「結果」，而是考量氣候變遷所帶來之風險而調整系統的「過程」。

3. 氣候變遷調適作為

從實務面來看，氣候變遷調適即是管理、處理及治理氣候變遷為系統帶來的風險。因應氣候變遷用以調節氣候風險的各種手段，包含機制面、方法面、政策面等，均可視為調適作為。

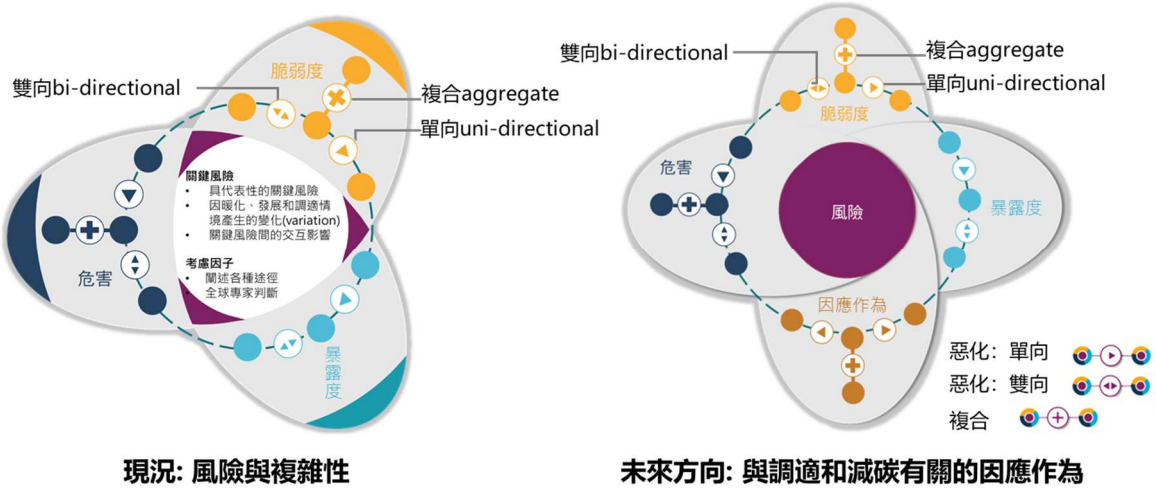
UNFCCC 指出調適策略為降低氣候變遷衝擊影響的方法，以解決氣候變遷所帶來不可避免的衝擊及損傷，其中部分的調適策略如「以自然為基礎的解決方案（Nature-based Solutions, NbS[1]）」甚至有助於達成溫室氣體減緩的正面效益。

[1] 歐盟近年大力推動「以自然為本的解決方案」（Nature-based Solutions, NbS），旨在以保護、永續管理、復育自然或改善生態系等方式，有效而彈性地因應氣候變遷、用水安全、食物安全及民眾健康等各項挑戰，以兼顧人類福祉和生物多樣性。



資料來源：IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022

圖 1.3　氣候衝擊風險的概念



資料來源：IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022

圖 1.4　氣候衝擊風險的因應作為

4. 調適關鍵要素

UNFCCC 指出調適決策架構包含觀察、評估、規劃、執行、監測與修正等 5 步驟。面對未來的不確定性，調適行動應具備彈性，並依據監測結果和預測精準度採取滾動式調整。

美國聯邦公路管理局（Federal Highway Administration, FHWA）從調適研究和先導計畫中吸取的經驗和創新方法，歸納調適行動應涵蓋 5 個基本要素，包括：

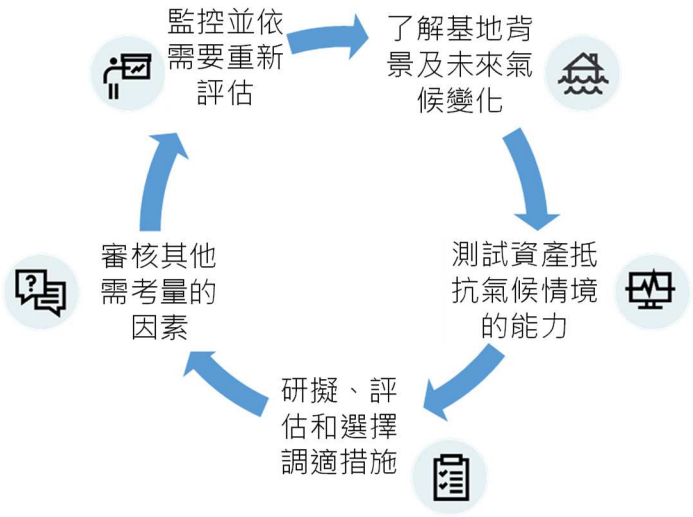
(1) 瞭解基地背景及未來氣候變化。

(2) 測試資產抵抗氣候情境的能力。

(3) 研擬、評估和選擇調適選項（包含調適策略及措施）。

(4) 審核其他須考量的因素。

(5) 監控並依需要重新評估。



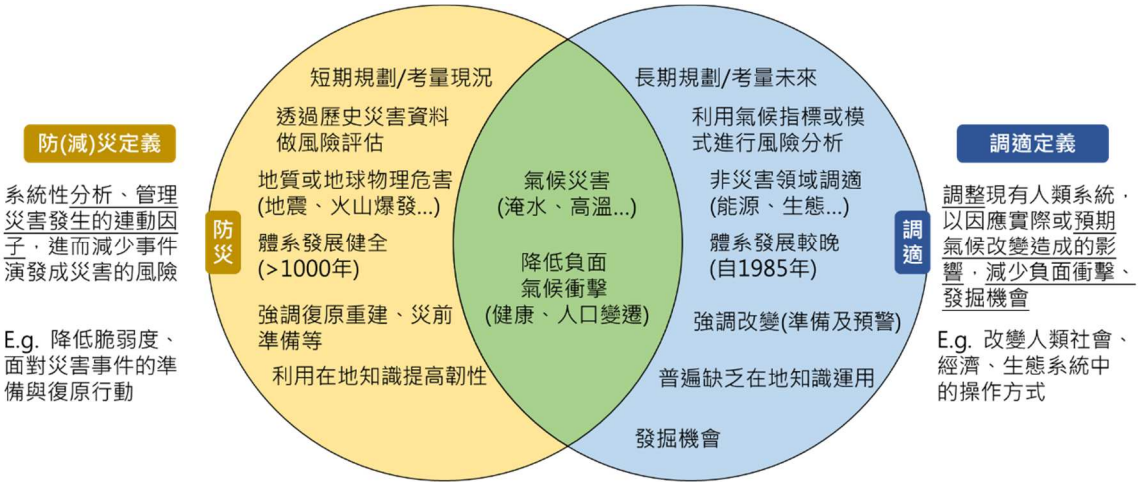
資料來源：Federal Highway Administration, Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development, 2017.

圖 1.5　調適關鍵要素

5. 調適及防（減）災的差異

調適與防災最大的不同之處，在於防災是根據過去致災原因（如歷史經驗），進行災害應變作為，而調適係考量未來氣候變遷情境，探討未來調適缺口及調適因應方法。

依據 110 年國家災害防救科技中心研究成果指出，國內因天災頻繁，從實務面防災經驗、組織體制與因應能力較調適更為成熟，應考量將調適策略利基於現有防災優勢上，推動綜效發展，以降低兩者間衝突或侷限的可能。



資料來源：國家災害防救科技中心，國家災害防救科技中心 110 年度成果發表會海報-防災調適知識建立-國內調適計畫分析與反思，民國 111 年。

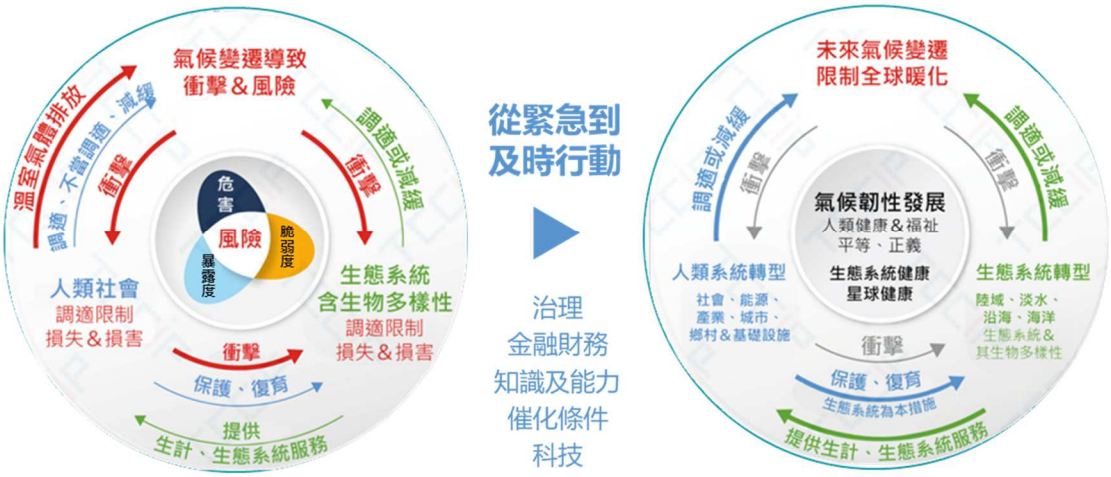
圖 1.6　調適及防（減）災的異同

6. 氣候韌性發展

IPCC AR6 提出「氣候韌性發展」係為減低溫室氣體排放並且強化永續發展的調適行動過程。其重點著眼於每個社會決策，以及針對這些決策的行為所累積的結果，有賴於政府、私人企業及公民社會共同完成。

從氣候危機發展邁向氣候韌性的三大元素包含：氣候、生態系以及人類社會，3 者缺一不可。而氣候、生態系以及人類社會之密切交集，成為了減緩氣候變遷衝擊及風險的關鍵所在。

關於人類系統轉型的行動，包含透過調適或減緩以因應全球暖化的衝擊，目標係在人類系統轉型同時強化保護及復育生態系統，如運用生態系統為本的措施來達到生態系統轉型，最終期能透過人類系統及生態系統的同步轉型來抑制全球暖化，降低風險同時並發展氣候韌性。



資料來源：IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022.

圖 1.7　IPCC 氣候韌性發展

1.4 氣候變遷調適最新發展趨勢

1. 國際氣候變遷調適最新趨勢

IPCC 於 2021 年 8 月 9 日所公布的《AR6：物理科學基礎報告》指出，目前觀測到前所未見的氣候變遷程度，證據顯示極端天氣事件受全球暖化影響將更為劇烈，未來全球可能面臨氣候危機且各領域均難以置身事外。續於 2022 年 2 月 28 日公開之《AR6：衝擊、調適與脆弱度》強調氣候變遷衝擊及風險將變得更為複雜，且更難以管理。諸多氣候危害將同時發生，進而導致複合性的整體風險以及橫跨各領域及區域的連動性風險，而妥適的調適作為可降低氣候風險。

我國國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫（TCCIP）」科學團隊因應該報告的公布，發布《IPCC 氣候變遷第六次評估報告「衝擊、調適與脆弱度」之科學重點摘錄》，摘述全球調適推動現況及其效益，包含：

(1) 調適推動有明顯進展。

(2) 調適選項是可行且有效的。

(3) 部分人為調適限制仍可突破。

(4) 不當調適作為可能導致困境。

(5) 推動條件是執行、加速調適的關鍵。

前述推動條件涵蓋需有明確目標及優先事項、強化對衝擊與解決方案的知識、調動並取得妥適財務資源等。

2. 國際氣候變遷調適標準

國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO)於 2019 年發布之《ISO 14090 氣候變遷調適－原則、規定與指導》(ISO 14090:2019 Adaptation to climate change－Principles, requirements and guidelines)，針對如何研擬調適策略的流程與注意重點提出指導；2021 年發布《ISO 14091 氣候變遷調適－脆弱度、衝擊與風險評估指引》(Adaptation to Climate Change－Guidelines on Vulnerability, Impacts and Risk Assessment)，說明如何執行氣候變遷風險評估，協助組織辨識與瞭解氣候變遷的影響並支援決策。

(1) ISO 14090 氣候變遷調適－原則、規定與指導

2019 發布了全球第一項針對氣候變遷調適的標準，旨在協助組織瞭解調適原則及提出框架，該架構可幫助組織針對面臨的氣候變遷風險研擬具效益且可付諸行動的調適計畫，適用已開始調適與剛開始考量調適的組織。

其中提及之調適 10 項原則為調適計畫之基礎，雖非強制性但極有助於調適計畫之整體執行面之效益：

① 改變思維：組織內所有層級的思維改變。

② 彈性：持續回顧、回應與因應新的狀態、環境、方法與方案。

③ 主流與深化：調適融入組織政策、計畫、流程等。

④ 穩健性:應用合適的方法與資料達到穩建的決策與調適行動方案。

⑤ 輔助原則：以適合的程度、規模執行調適以最大化效果。

⑥ 永續性：均衡考量經濟、社會與環境，並平衡現在與未來世代需求。

⑦ 減緩結合調適：調適也考量減緩氣候變遷的目標。

⑧ 系統性思考：釐清內、外部與兩者關聯的課題。

⑨ 透明度：氣候變遷調適的報告與溝通以透明與公開的態度提供給利害關係人。

⑩ 責任義務：組織清楚其在氣候變遷調適的責任。

(2) ISO 14091 氣候變遷調適－脆弱度、衝擊與風險評估指引

ISO 14091 指出風險評估係做為調適規劃、主流化與導入調適策略與措施的基礎，其主要組成要素包含：危害、系統對危害的暴露度與敏感度、可能的氣候變遷衝擊及無調適作為的未來風險等。為協助組織評估所面臨的氣候風險，以利後續研擬調適計畫。

該指引提出執行氣候變遷風險評估主要步驟，依序為：

① 篩選衝擊與建立衝擊鏈。

② 辨識指標。

③ 取得與管理數據。

④ 評估調適能力。

⑤ 解析與評估發現。

⑥ 分析跨部門依賴性。

⑦ 報告與溝通氣候變遷風險評估結果。

3. 國內氣候變遷調適推動現況

為強化國內各領域因應氣候變遷的調適能力，我國於 104 年 7 月公布施行溫管法，其中第 13 條明定中央目的事業主管機關應研議調適策略，並配合每年提送調適成果。環境部亦依循 106 年 2 月行政院核定的《國家因應氣候變遷行動綱領》之指導，分就八大調適領域彙整研提《國家氣候變遷調適行動方案》[2]。

環境部於 111 年 4 月「第三期國家氣候變遷調適行動方案推動方式研商會」提出新一期（112-115）調適框架，將國內調適推動過程分為二個階段並說明對應「調適六大構面」（包括「界定範疇」、「檢視現況」、「評估風險」、「綜整決策」、「推動執行」、「檢討修正」），說明如下：

(1) 第一階段：辨識氣候風險與調適缺口，對應調適構面包括「界定範疇」、「檢視現況」、「評估風險」。

(2) 第二階段：調適規劃與行動，對應調適構面包括「綜整決策」、「推動執行」、「檢討修正」。

本指引所提之強化調適能力之機制與方法可對應國內調適推動二個階

[2] 依據行政院 112.10.4 核定之《國家氣候變遷調適行動計畫》(112-115 年)，調整為七大領域。

段，在第一階段對應「評估風險」構面，建議運用「氣候風險評估的方法」辨識調適缺口，在第二階段對應「綜整決策」構面，建議運用「調適選項」及「面對高度不確定之下的決策方法」思考如何研擬短中長調適計畫。

1.5 指引結構說明

本指引第一章為調適基礎概念說明、第二章為氣候變遷對公路系統的衝擊、第三章及第四章提供公路系統於規劃階段因應衝擊之調適機制與方法、第五章為結語及學習資源。

圖 1.8　本指引章節架構

於公路系統規劃階段如融入氣候變遷調適能概念的過程中，可依據圖 1.9 之架構選擇參考之章節內容。首先建議於「公路系統規劃階段即融入氣候變遷調適概念」(參閱 3.1 節)；公路系統規劃作業流程可概分為 3 個作業階段，建議於第一階段增納「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」(參

閱 3.2 節），於第二階段增納「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」（參閱 3.3 節、4.1 節），於第三階段增納「執行氣候變遷風險評估」（參閱 3.4 節、4.2 節），最後將評估結果納入決策（參閱 4.3~4.4 節）。

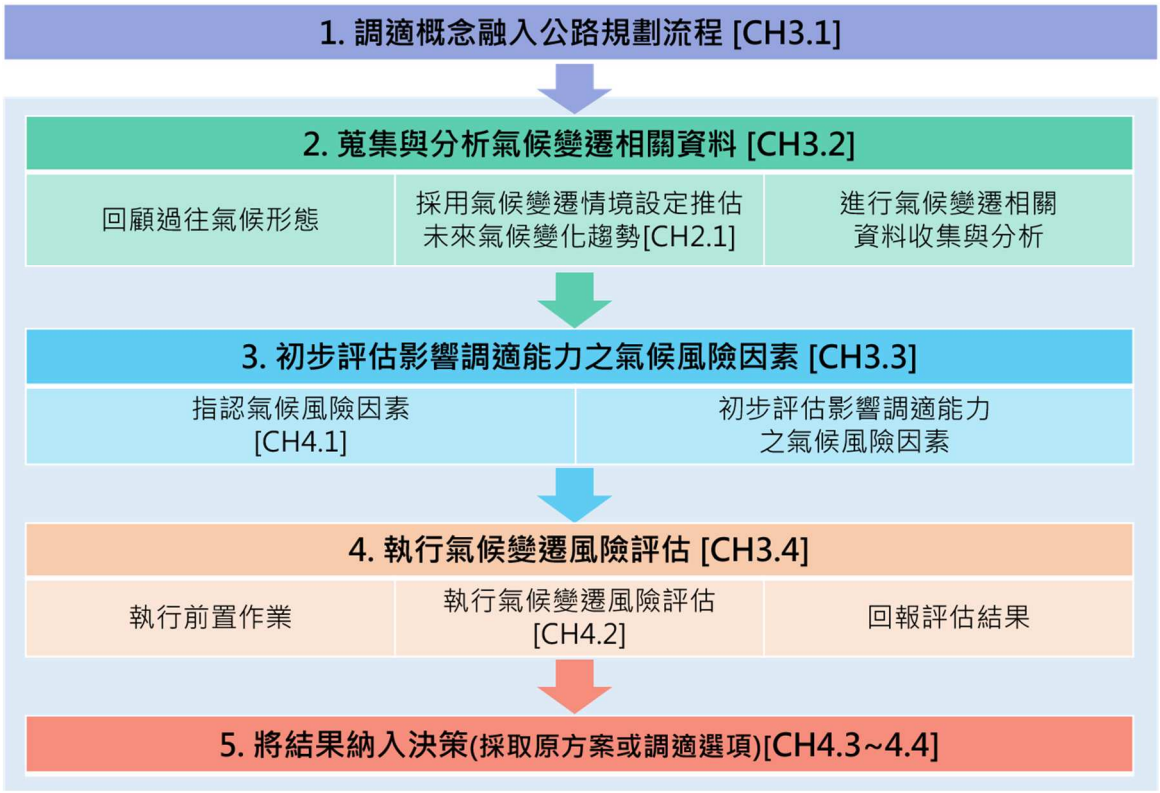


圖 1.9　本指引章節運用索引圖

貳、氣候變遷對公路系統的影響

全球暖化的全面衝擊正在持續發生，在氣候變遷的環境下，極端天氣事件發生的頻率增加，事件的時間可能拉長、縮短與驟變，強度也可能變化，如強降雨、強風、高溫的增強，以及海平面上升的加速，均將導致公路系統面臨更複雜且嚴峻的氣候衝擊風險。

本章首先說明我國氣候變遷的推估資訊，接續針對公路系統面臨的重大氣候壓力類型，分就路段、路廊及路網等 3 種不同的尺度說明我國公路系統可能面臨的氣候衝擊。

2.1 全球暖化與臺灣氣候變遷趨勢

1. 全球排放情境與增溫幅度推估

IPCC 氣候變遷第六次評估報告（AR6）對於全球增溫的推估係以排放情境為基礎，以 1850-1900 年為基準時，在極低度排放情境中 2081-2100 年全球平均地表溫度很可能升高 1.0˚C 至 1.8˚C；在中度排放情境為升高 2.1˚C 至 3.5˚C；而在非常高度排放情境則為升高 3.3˚C 至 5.7˚C。

因此，至少到本（21）世紀中葉前，全球地表溫度將會持續升高。除非在未來幾十年內大幅減少二氧化碳及其他溫室氣體排放量，否則全球升溫將在 21 世紀超過 1.5˚C 和 2˚C（參見表 2-1）。

2. 臺灣氣候變遷推估

IPCC 於 110 年 8 月 9 日發表《AR6：物理科學基礎報告》，綜整國際最新科學研究文獻，就「當前氣候狀態」、「可能的未來氣候」等主題加以探討。

臺灣氣候變遷科學團隊因應此報告公布，由國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）」、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象署、臺灣師範大學地球科學系及國家災害防救科技中心（NCDR）等單位共同發表《IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告》，說明未來氣候推估之情境。

表 2-1　各種排放情境下的增溫幅度推估表

排放情境 / 增溫幅度影響		極低度排放 (SSP1-1.9)	低度排放 (SSP1-2.6)	中度排放 (SSP2-4.5)	高度排放 (SSP3-7.0)	非常高度 (SSP5-8.5)
各排放情境在不同時間點之增溫幅度	近期 2021-2040	1.5 (1.2,1.7)	1.5 (1.2,1.8)	1.5 (1.2,1.8)	1.5 (1.2,1.8)	1.6 (1.3,1.9)
	中期 2041-2060	1.6 (1.2,2.0)	1.7 (1.3,2.2)	2.0 (1.6,2.5)	2.1 (1.7,2.6)	2.4 (1.9,3.0)
	長期 2081-2100	1.4 (1.0,1.8)	1.8 (1.3,2.4)	2.7 (2.1,3.5)	3.6 (2.8,4.6)	4.4 (3.3,5.7)
各排放情境超過特定增溫幅度之時間點	1.5°C	2025-2044	2023-2042	2021-2040	2021-2040	2018-2037
	2°C	不會超過	不會超過	2043-2062	2037-2056	2032-2051
	3°C	不會超過	不會超過	不會超過	2066-2085	2055-2074
	4°C	不會超過	不會超過	不會超過	不會超過	2075-2094

資料來源：臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台網站。最後檢視日期：2022.06.20。

臺灣於 2100 年（21 世紀末）的氣候變遷發展，在全球暖化最劣情境（SSP5-8.5，即表 2-1 所指之非常高度排放情境）下之推估如下：

- 臺灣各地氣溫未來推估將持續上升，且未來極端高溫事件中，各地高溫 36℃以上日數增加。全球暖化最劣情境（SSP5-8.5）下，21 世紀末之年平均氣溫可能上升超過 3.4℃。
- 臺灣極端降雨變化趨勢較全球劇烈，臺灣年最大 1 日暴雨強度有增加趨勢，全球暖化最劣情境（SSP5-8.5） 21 世紀末平均年增加幅度約為 41.3%。
- 臺灣年總降雨量未來推估有增加的趨勢，在全球暖化最劣情境（SSP5-8.5)下，21 世紀末臺灣平均年總降雨量增加幅度約為 31%。
- 臺灣颱風個數、強颱比例、降雨改變率將受到影響。全球暖化最劣情境（Representative Concentration Pathways 8.5, RCP8.5）下，21 世紀末影響臺灣颱風個數將減少約 55%、強颱比例將增加約 50%、降雨改變率將增加約 35%。

3. 國家氣候變遷情境設定

根據環境部之國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年）（核定本），綜整 IPCC 氣候變遷第六次評估報告（AR6）各情境推估與科學模擬依據，並考量調適工作推動經驗檢討與操作之可行性，優先採「固定暖化情境」做為「國家調適應用情境」，「固定暖化情境」將推估期間與排放情境綜合考量，兼顧施政期程規劃與目標設定，可做為各部門進行風險評估與辨別調適缺口之共同參考情境。

國家調適應用情境原則，相關情境說明如圖 2.1 所示：

(1) 0℃：工業革命時期（1850-1900），為全球暖化的起始點，做為固定暖化情境的參考基準。

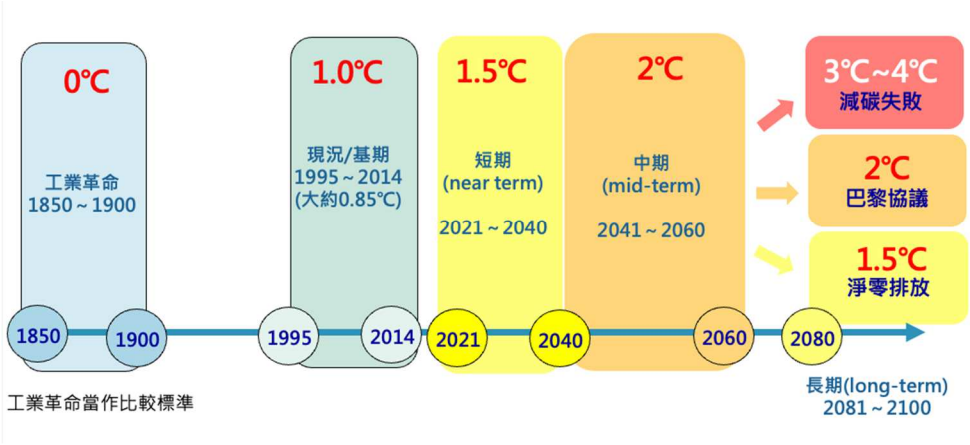
(2) 1℃：現階段氣候基期（1995-2014 年），可做為現有風險評估及其未來缺口的參考基準。

(3) 1.5℃：近期（短期 2021-2040 年）的增溫情境。

(4) 2℃：中期（中期 2041-2060 年）的增溫情境。

(5) 3℃~4℃：考量 21 世紀末減碳失敗的增溫情境，將增溫 3℃~4℃（長期 2081-2100 年）之極端情境。

由於長期因受高度不確定性因素影響，建議可運用情境規劃等決策方法考量未來的多種可能。



資料來源：國家災害防救科技中心，國家氣候變遷調適行動計畫(112 年-116 年)推動方式研商會簡報-國際最新氣候調適資訊及氣候變遷情境設定之研析與建議，民國 111 年。

圖 2.1 固定暖化情境之參考基準、基期與增溫情境與時程

2.2 氣候壓力對公路系統之衝擊

1. 臺灣公路系統面臨的氣候壓力

氣候壓力（climate stressors）係指與氣候變遷有關的情況、事件或趨勢，可能對公路系統造成衝擊。

依據臺灣氣候變遷科學團隊發表之《臺灣氣候變遷科學報告 2017－衝擊與調適面向》以及交通部統計要覽交通天然災害概況之統計資料，彙整影響臺灣公路系統之五大氣候壓力包含：

(1) 強降雨：颱風強度增強造成強降雨，區域型強降雨亦呈現增加趨勢。

(2) 強風：颱風強度增強，造成強風及沿海巨浪增強。

(3) 高溫：全球暖化持續進行，臺灣平均氣溫百年來增溫約 1.3℃。

(4) 暴潮/風浪：海平面上升與颱風強度增強，加劇暴潮/風浪衝擊。

(5) 海平面上升：全球平均海平面持續上升，臺灣平均海平面每年上升 3.4mm。

2. 「公路系統」之概念及組成

依據美國國家協作公路研究計畫（NCHRP）引用美國運輸學會（TRB）所建構的「公路系統」的概念框架為基礎，就路段、路廊及路網 3 種不同的公路系統尺度，探討公路系統在不同尺度下面臨的氣候衝擊。說明如下：

(1) 路段尺度

路段為最小單元的影響層級，主要由基礎、材料、結構（橋梁結構）、排水系統與橫斷面（cross-section）等單元組成，路段概念如圖 2.2。

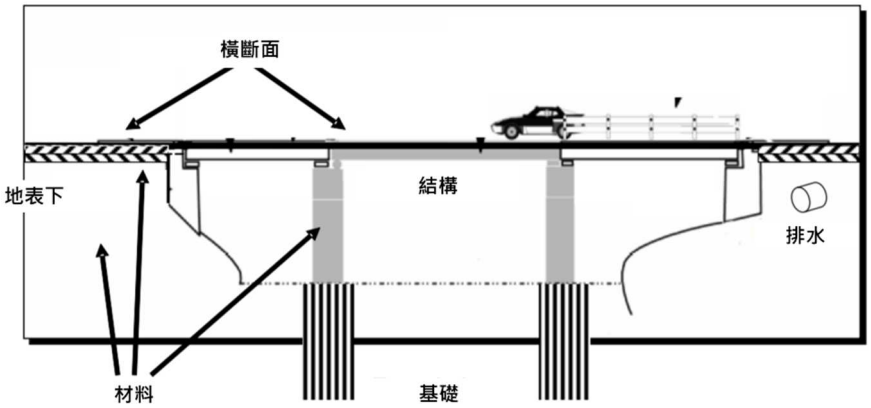
① 基礎/地表下：為耐受力的重要條件之一，設計取決於土壤組成、水表、設施重量與載重。

② 材料：材料的選取考量設計的功能與環境狀態，以道路來說需可以承受高溫，橋梁則需可以承受強風，濕度的改變與暴潮/風浪強度的增加等。

③ 橫斷面：公路橫斷面，可能因不同的設計標準而相互影響。

④ 排水系統：排水量能係依據預測的水量進行設計，但在氣候變遷的環境下，雨量與暴潮/風浪等發生的頻率與強度改變，影響設計的難度。

⑤ 結構：主要針對橋梁結構，特別是跨河橋在面臨氣候變遷環境下的暴潮與海浪沖刷加劇及河流漂流物對橋墩的撞擊。

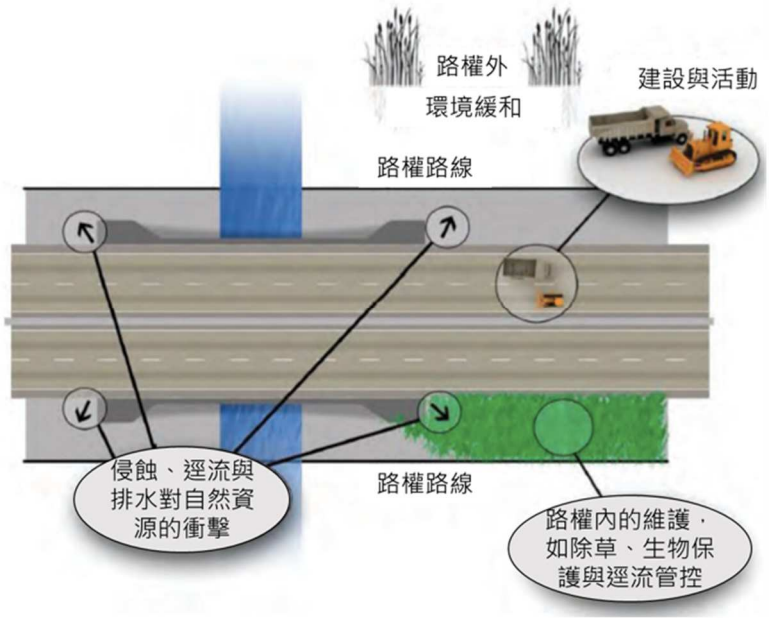


資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.

圖 2.2　公路系統之路段概念

(2) 路廊尺度

以路廊尺度來看，強降雨造成的淹水可能從路段擴及到路廊，影響周邊環境的水體與生態環境，路廊概念如圖 2.3。

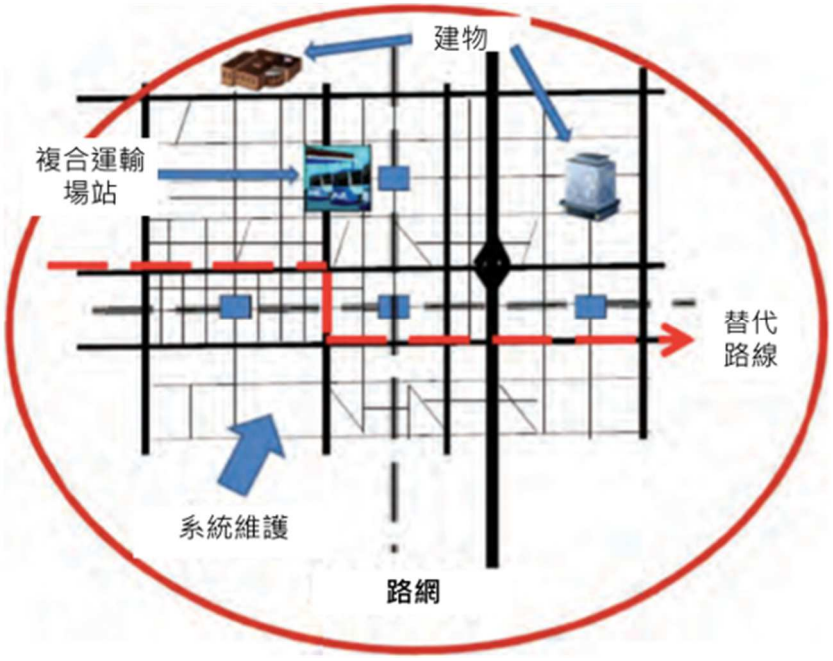


資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.

圖 2.3　公路系統之路廊概念

(3) 路網尺度

路網尺度涉及整體公路系統的管理，主要以面臨氣候變遷環境之下，公路彼此之間的連結性、跨系統場站的連結性、氣候影響的持續性，以及路網彼此之間的替代性為考量重點，路網概念如圖 2.4 所示。



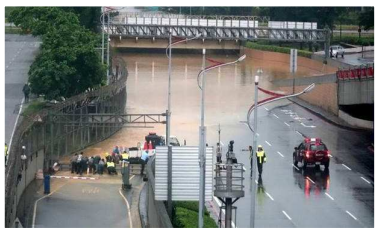
資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.

圖 2.4　公路系統之路網概念

3. 氣候壓力對公路系統的潛在衝擊

公路系統支援重要社會經濟、維生、醫療等活動之運輸服務，隨著氣候變遷及極端天氣事件的頻率增加，公路系統面臨的氣候風險逐漸升高。

依據《國家氣候變遷調適政策綱領》，國內較易受氣候變遷影響之山區公路建設多沿河谷開鑿構築，在暴雨作用下，容易受到邊坡滑動崩塌的威脅；亦常因河谷沖蝕加劇而危及道路路基，中斷公路系統；若河川上游發生洪水、土石流等，則沖刷裸露基礎之橋梁；下游橋梁之橋墩、橋面也易遭洪水、土石流沖毀或掩埋；如降雨量超過排水設計，則會面臨道路淹水的問題等。

		
強降雨導致桃園機場的聯絡道地下道淹水	颱風豪雨導致土石流沖刷造成后豐大橋斷裂	連日強降雨造成台 14 甲線路基掏空

資料來源：1. https://www.businessweekly.com.tw/focus/blog/16796。最後檢視日期：2022.10.20。

2.https://www.appledaily.com.tw/headline/20080916/SFT6HYXXUCTLVV7LWBCQT3BCXU/。最後檢視日期：2022.10.20。

3. https://thbu2.thb.gov.tw/thbu2/page?node=74055772-be35-4e7e-a3c4-f641bc7402e2。最後檢視日期：2022.10.20。

圖 2.5　各項氣候壓力對公路系統的衝擊

本指引透過國內外案例綜整公路系統在氣候變遷環境下所面臨的潛在氣候衝擊，並分就路段、路廊及路網 3 種不同的尺度說明氣候衝擊（參見表 2-2）。在全球氣候變遷加劇的情況下，公路系統面臨較更加複雜且嚴峻的氣候風險，如強降雨、強風、高溫、海平面上升與暴潮等氣候壓力將對公路系統造成衝擊，如何及早提升公路系統因應氣候變遷的調適能力實屬當務之急。

各項氣候壓力中，尤以強降雨加劇對於我國公路系統的衝擊影響最為劇烈，也是國內公路系統目前應優先處理且急迫性高之極端氣候課題。

表 2-2　我國公路系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表

尺度	公路系統組成	氣候壓力因素	對於公路系統的直接衝擊	國內外案例
路段	結構（包含橋梁及隧道）	強降雨	土壤含水量過高影響道路邊坡、隧道口的結構強度	台 20 線南橫公路-明霸克露橋(110 年 8 月 6 日水災)
			強降雨沖刷橋梁基礎	台 13 線后豐大橋(97 年辛樂克颱風)
		強風	強風影響橋梁結構	華盛頓州 16 號幹線塔科馬海峽吊橋(1940 年)
		暴潮/風浪	暴潮/風浪加劇橋墩的沖刷	台 9 線香蘭至三和段(107 年 9 月山竹颱風)

表 2-2　我國公路系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表（續）

尺度	公路系統組成	氣候壓力因素	對於公路系統的直接衝擊	國內外案例
路段	基礎/地表下	強降雨	路基受沖蝕掏空	台 14 甲線 18.6K 翠峰路段(108 年 5 月連續多日豪雨)
		海平面上升	加劇路基的沖刷	南迴公路臨海路段
	排水	強降雨	排水不良造成淹水	中山高速公路民雄交流道(102 年 8 月 29 日康芮颱風)
	橫斷面	強降雨	道路的橫斷面，面臨強風暴雨沖刷等影響	台 20 線南橫公路-明霸克露橋(110 年 8 月 6 日水災)
	材料	高溫	鋪面材料軟化與標線變形	國道 3 號南下後龍交流路段(夏季炎熱導致柏油路面溫度升高)
路廊	周邊環境	強降雨	路廊因地表逕流溢淹，影響周邊排水系統與生態環境	台 9 甲線、環山路及平廣路沿線(104 年蘇迪勒颱風)
		強風	路樹傾倒造成道路中斷	台 3 線桃園龍潭區中豐路高平路段以及龍新路段(110 年烟花颱風)
		高溫	引發邊坡野火	美國加州比克斯比溪大橋(111 年 1 月加州野火延燒)
		暴潮/風浪	海浪越堤溢淹災害，海岸線退縮，淘刷公路底部基座	台 9 線香蘭至三和段(107 年 9 月山竹颱風)
路網	替代道路	強降雨	替代道路數量低，強降雨時可能面臨運輸中斷	-
		海平面上升	替代道路被淹沒	-
	交通場站	強降雨	交通場站聯外道路淹水，造成運輸中斷	-
		暴潮/風浪	交通場站聯外道路淹水，造成運輸中斷	-

臺灣山區公路面臨的氣候衝擊與因應案例

【路廊複合型潛在危害評估-以台 20 線南橫公路勤和至復興鄉路段為例】

臺灣山區公路所面臨的複合型危害的衝擊，被視為公路工程界極大的挑戰。過去國內公路系統多為防災考量而初步探討氣候風險，且因實務操作上複合型危害之分析較為複雜，故多透過個案評估瞭解影響該路廊安全之潛在危害，並透過工程手段因應(如台 20 線南橫公路勤和至復興鄉路段進行道路復建工程)。

以下摘錄台 20 線南橫公路勤和至復興鄉路段之路廊複合型潛在危害評估案例，透過案例介紹供讀者進一步瞭解臺灣山區公路面臨的衝擊及國內目前公路系統在面對氣候衝擊之實務操作手法。

1. 案例背景

中華技術期刊 107 年專題報導「台 20 線南橫公路勤和至復興鄉路段複合災害之工程處理對策」，莫拉克風災於台 20 線桃源勤和至復興路段降下 2,578mm 之強降雨，造成荖濃溪河床淤高超過 30~40m，沿線道路及橋梁接覆滅於河床下，風災之後相關專家學者評估水文地質極不穩定，災害復建工程需考量崩塌、淤積、洪水及土石流等複合型災害。故先行辦理水文地質穩定性及穩定廊帶安全評估工作，釐清影響路廊安全之潛在危害，並採用水文序率分析妥善考量河床沖淤之變化，納入中期道路修復工程設計考量。

2. 國內實務作法

本案例係以風險辨識、風險分析、風險評量、風險處理及執行等 5 步驟評估區域環境極度不穩定的條件下，需以與傳統不同之設計準則進行道路復建工程。

(1) 風險辨識

鄰近環境地質敏感地區，山區地形陡峻，於颱風及暴雨侵襲下造成規模崩塌，合併洪水與土石流造成既有道路及聚落嚴重損毀，深受複合型災害之影響。

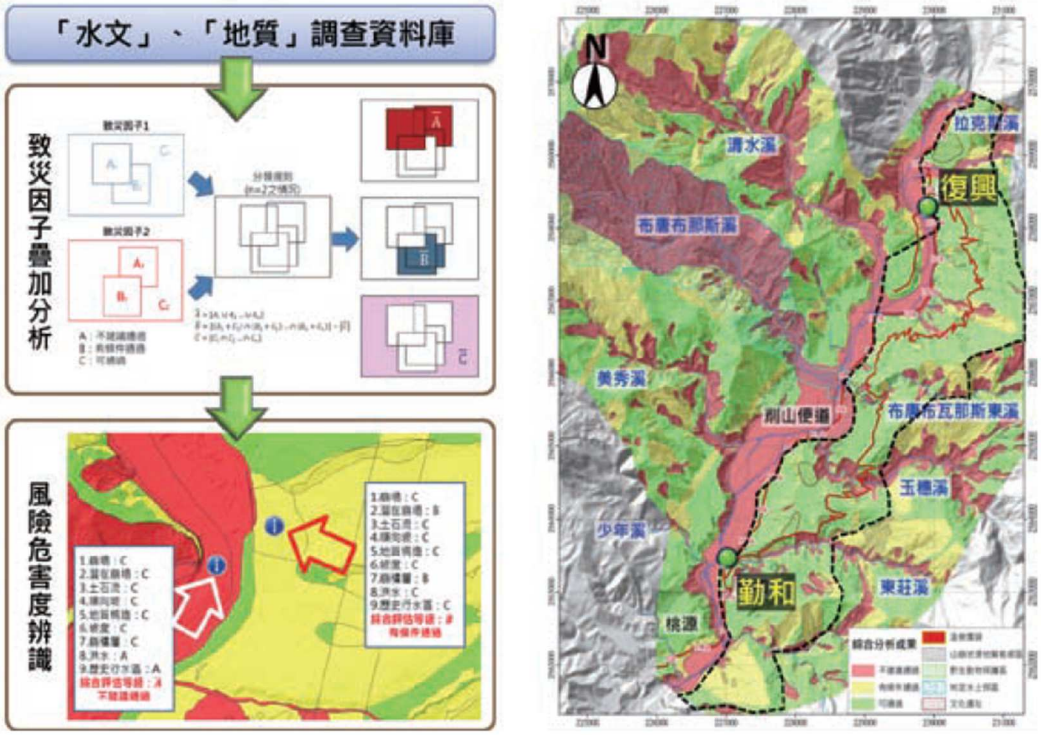
(2) 風險分析

台 20 線公路勤和至復興路段災後風險原因之探討包含：風災後形成大規模崩塌，地形地貌大幅改變，合併洪水與土石流造成既有道路及聚落嚴重損毀，深受複合型災害之影響。

(3) 風險評量

先行辦理水文地質穩定性及穩定廊帶安全評估，以利做為工程選線及規劃之參考。藉由地文、水文及環境等相關影響因子評估，辨識影響路廊安全之潛在危害，判斷水文地質環境敏感區位及災害潛勢，產製工址鄰近範圍之「環境地質圖」及「災害潛勢圖」。

後續進行穩定廊帶評估工作，輔以「致災因子邏輯套疊」分析影響因子，予以區分 A（不建議通過）、B（有條件通過）、C（可通過）3 類區塊，綜合判斷工址鄰近範圍穩定區域。透過穩定區塊串連構成路廊，續由路廊範圍規劃復建路線，穩定廊帶風險危害辨識評估方法與成果詳圖 2.6。



資料來源：中華技術期刊，台 20 線南橫公路勤和至復興鄉路段複合災害之工程處理對策，民國 107 年。

圖 2.6 穩定廊帶風險危害辨識評估方法與成果

(4) 風險處理

路堤段為防溢淹及沖刷考量，計畫道路除考量荖濃溪洪水位，尚須考量河床淤高造成之溢淹設計，以序率分析採用荖濃溪 20 年重現期洪水位，加上推估 10 年及 15 年淤積高程，做為路面高程設計之依據。如圖 2.7。

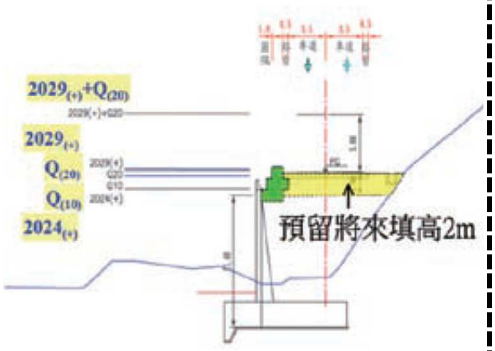


圖 2.7 路堤段考量河床淤高造成之溢淹

(5) 執行

該工程為「莫拉克風災修復工程的最後一哩路」，區域環境之水文地質非常不穩定，工程方案順應自然，設計準則與傳統考量標準不同，需多元考量各樣複合式災害潛勢及其影響，前期辦理水文地質穩定性及穩定廊帶安全評估，進行災害敏感區辨識、修復工程選線及方案評估，以利工程得以順利施工。

3. 案例可借鏡之處

臺灣山區公路面臨之複合型災害為重大工程挑戰之一，如台 20 南橫公路復健計畫在歷經莫拉克風災後，持續性將氣候災變風險視為關鍵課題，並將其納入規劃設計方案評估。

風險管理及危機處理雖於國內各機關政事推動已行之有年，但多數尚無執行氣候變遷風險評估之經驗。國內公路之自然災害風險評估做法適用於複合型災害評估，雖非系統化納入完整氣候變遷風險評估流程之操作案例，其採用的風險評量及風險處理的方法仍非常具有參考價值。

資料來源：中華技術期刊，台 20 線南橫公路勤和至復興鄉路段複合災害之工程處理對策，民國 107 年。

參、公路系統規劃階段強化調適能力機制

我國公路系統規劃作業流程尚稱完善，惟尚未全面考量氣候變遷對公路設施及周邊地區的影響。本章參考國外公路系統氣候變遷調適指引與手冊，將氣候變遷調適考量融入公路系統之規劃流程，並說明其作業程序。

3.1 公路系統規劃流程融入調適概念之框架

公路系統規劃作業流程可概分為資料蒐集分析、方案研擬與評估，以及工程研究與評估 3 個作業階段。為了具體融入氣候變遷風險調適理念，建議於各作業階段皆增納氣候變遷調適相關作業程序（參見圖 3.1 及圖 3.2），詳以下各節之說明。

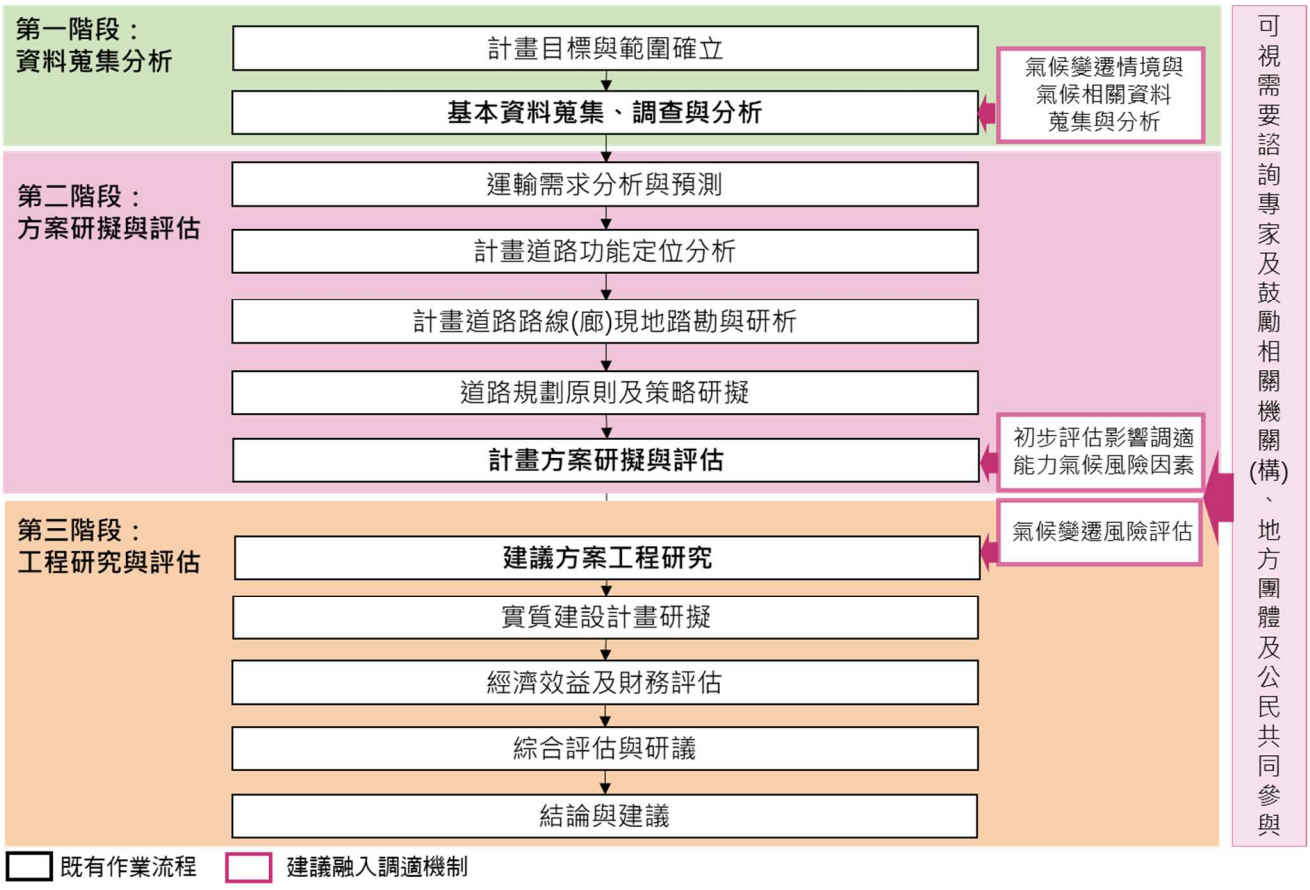


圖 3.1　公路系統規劃作業流程融入調適理念之框架（I）

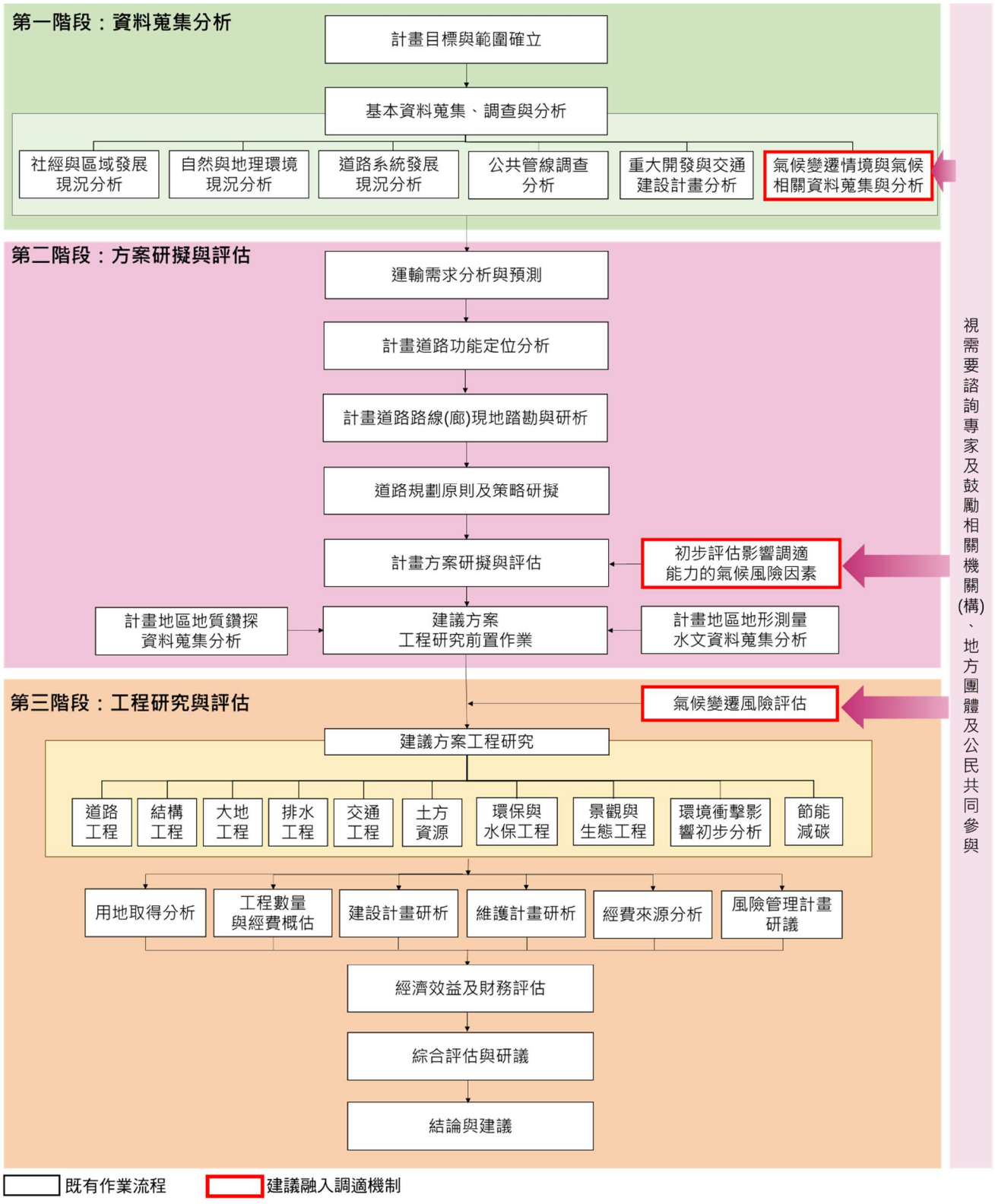


圖 3.2　公路系統規劃作業流程融入調適理念之框架（II）

3.2 第一階段：蒐集與分析氣候變遷相關資料

首先確立計畫範圍與目標，並據以蒐集所需之基本資料，含補充調查與分析。除了歷史與現況基本資料，包含地質、地形、氣候、水文等之外，為了強化公路系統因應氣候變遷的調適能力，應進一步針對計畫範圍未來氣候變遷推估的氣候資訊以及因氣候變遷可能導致的環境變異進行探討研究。重點說明如下：

1. 增納「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」工作項目

建議於資料蒐集階段增納未來氣候變遷情境與氣候推估相關資料的蒐集與分析之工作，規劃團隊可就建設計畫所在之區域未來較可能會受到的氣候變遷影響進行資料蒐集（參見圖 3.3、表 3-1）。

依據各專案不同的環境區位特徵，指認在各種氣候壓力因素下應納入考量的氣候參數，如降雨（強度、頻率）、溫度（均溫、最高溫、最低溫）、風（平均風速、最大陣風、風向）、海平面（潮位、暴潮/風浪）、河水（水位、流量、沖刷量）等。

視公路系統之區位特性，蒐集相關氣候變遷情境與氣候資料，如未來推估的平均氣溫、降水量及降雨日數、颱風、暴潮/風浪、強風等狀況，並蒐集研析可能衍生的環境變異情形，建議可參考經濟部水利署水利資料開放平台以及國科會（NSTC）與國家災害防救科技中心（NCDR）合作建立之臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）等網站取得最新之分析資料。

若專案有進一步研究分析需要，可進一步與 NCDR 合作或視需要諮詢專家，為專案量身訂做氣候模擬預測及分析；除了公開資料之外，公路主管機關於計畫範圍內相關之歷史監測資料、養護紀錄、歷史災害紀錄等皆為氣候變遷調適規劃重要的基本資料來源。

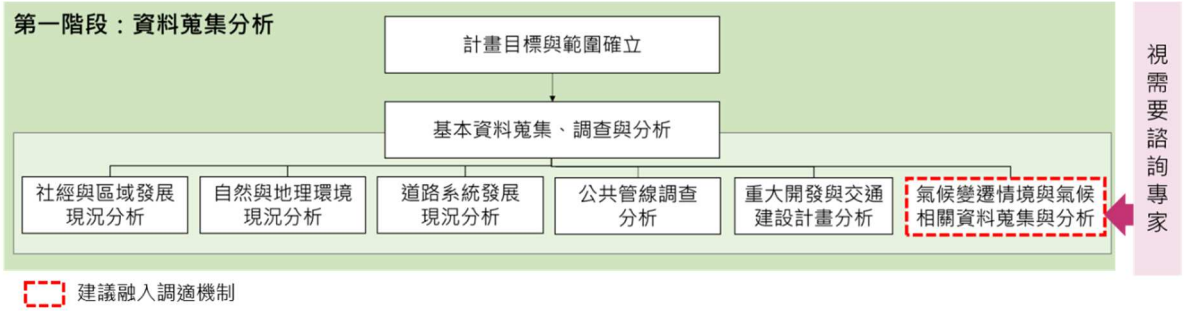


圖 3.3　資料蒐集分析階段納入調適作業流程

表 3-1　氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析項目一覽表

工項	類別	細項	網站名稱	資訊內容	資料名稱	資料來源
氣候變遷情境與氣候相關資料（含環境變異）蒐集與分析	現況觀測資料	天氣及氣候觀測資料	中央氣象署-觀測資料查詢	■ 提供國內各測站的歷史量測資料	測站氣壓、氣溫、相對溼度、風速、風向、降水量	https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp 最後檢視日期：2022.12.06
			中央氣象署-颱風資料庫	■ 提供歷史颱風雨量及風量資訊查詢	■ 颱風雨量綜合資訊 ■ 各測站最大平均風與最大陣風長條圖	https://rdc28.cwb.gov.tw/ 最後檢視日期：2022.12.06
		水文資料	水利規劃分署-區域排水整合型查詢系統	■ 提供區域排水相關圖資查詢	■ 區域排水範圍 ■ 區域排水範圍 ■ 嚴重地層下陷地區 ■ 洪水平原及洪氾區 ■ 一級海岸災害防治區	https://rdi-123.wrap.gov.tw/integration_wrpi_drainage/ 最後檢視日期：2022.12.06
			水利署防災資訊服務網	■ 提供水文觀測及防災預警資訊	■ 淹水警戒 ■ 河川水位警戒 ■ 水庫放流警戒	https://fhy2.wra.gov.tw 最後檢視日期：2022.12.06
			臺灣水災潛勢風險圖資應用服務平台	■ 提供淹水潛勢圖及淹水風險地圖	第三代淹水潛勢圖	http://103.253.146.123/wra/riskmap-dev/ 最後檢視日期：2022.11.04
		地質及地形資料	農業部農村發展及水土保持署土石流防災資訊網	■ 提供土石流潛勢溪流分布與即時警戒資訊	■ 特定水土保持區 ■ 土石流潛勢溪流分布 ■ 大規模崩塌潛勢地區	https://246.swcb.gov.tw/ 最後檢視日期：2022.12.06
			經濟部地質調查及礦業管理中心地質資料整合資訊	■ 提供山崩與地滑地質敏感區、順向坡等地質資訊	■ 地質圖資 ■ 環境地質資料	https://gis3.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/t3/index1.cfm 最後檢視日期：2022.12.06

表 3-1　氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析項目一覽表（續）

工項	類別	細項	網站名稱	資訊內容	資料名稱	資料來源
氣候變遷情境與氣候相關資料（含環境變異）蒐集與分析	現況觀測資料	地質及地形資料	國家災害防救科技中心災害潛勢地圖網站	■ 提供國內包含土石流、山崩、淹水等坡地災害潛勢地圖	■ 土石流潛勢溪流分布 ■ 大規模崩塌災害潛勢地區 ■ 順向坡、落石、岩屑崩滑、岩體滑動等危險區 ■ 火山潛勢圖	https://dmap.ncdr.nat.gov.tw/ 最後檢視日期：2022.12.06
	未來推估資訊	未來氣候變遷情境與推估	TCCIP 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台	■ 提供未來氣候變遷情境下可能的強風、強降雨、高溫、暴潮/風浪等資料 ■ 提供台灣未來氣候變遷的模擬分析 ■ 提供未來氣候變遷情境下的坡地崩塌率	■ 淹水危害圖資、衝擊圖資 ■ 坡地危害圖資、衝擊圖資 ■ 海岸危害圖資、衝擊圖資	https://tccip.ncdr.nat.gov.tw 最後檢視日期：2022.12.06
		未來水文變化	經濟部水利署淹水潛勢及水災風險圖資	■ 提供未來氣候變遷情境下對於水文可能的變化，如水位、流量等	■ 淹水潛勢圖及水災風險地圖	https://fhy.wra.gov.tw/fhyv2/disaster/downloads 最後檢視日期：2022.12.06

2. 作業程序說明

公路規劃專案中有關「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」工作項目之作業大致可分為 3 步驟（參見圖 3.4），說明如下：

(1) 步驟 1：回顧過往氣候形態

回顧過往氣候形態，初步瞭解氣候變遷對計畫範圍可能產生的影響，需特別注意環境敏感地區，如河川、湖與海等水體，以及容易淹水的低窪地區與可能有崩塌危險的山坡地等，取得與氣候風險相關的氣候參數、參考年期與時間，蒐集可取得之氣候相關資料並確認資料品質與可應用性。

(2) 步驟 2：考量未來氣候變遷情境設定

確立專案所採用的氣候變遷情境設定，說明未來氣候變遷情境。NCDR 因應國際上不斷更新的推估資料（如 AR4、AR5、AR6…），初步

提出國內可統一氣候情境設定，建議比照國際趨勢（如，AR6）採用固定暖化情境，NCDR 更進一步將排放情境與固定暖化情境對應，使其兼顧情境與期間，提出國內未來氣候變遷情境—以 1.5°C（短期 2021~2040 年）；2°C（中期 2041~2060 年）；3℃-4℃（長期 2081~2100 年）做為未來氣候變遷情境設定。

(3) 步驟 3：氣候相關資料蒐集與分析

首先依據專案所在區位特徵指認應納入考量的氣候資料，蒐集未來氣候變遷情境之氣候推估資訊（參見表 3-2）。此外，建議蒐集與專案相關可取得之氣候參數及當地環境條件相關變異資料（如主管機關之養護監測報告）。若無適用之氣候資料，建議公路主管機關可進一步與相關專業團隊合作，針對專案產製所需的氣候模擬預測及分析資料。

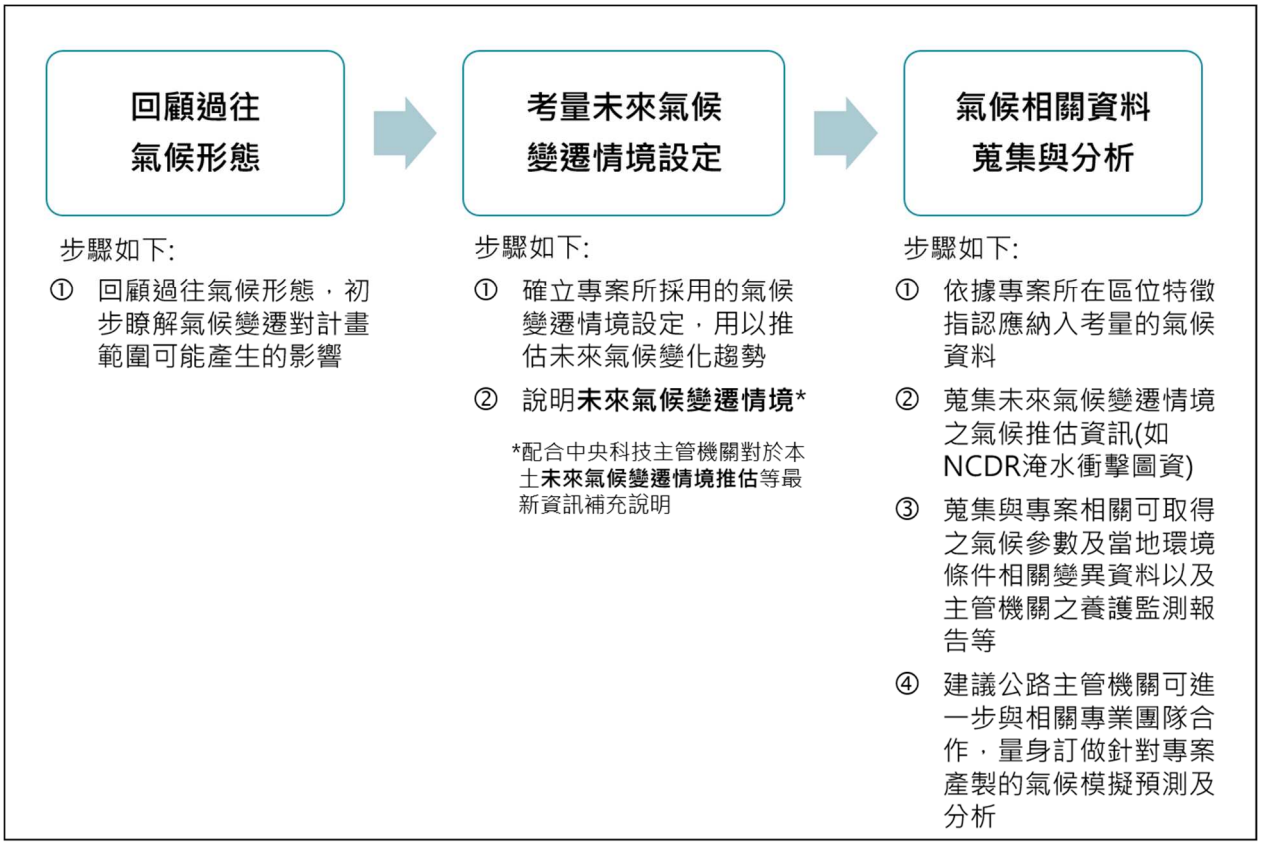


圖 3.4　氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析作業程序說明

3.3 第二階段：初步評估影響調適能力之氣候風險因素

公路系統規劃的第二階段為方案研擬與評估，此階段工作包含進行運輸需求分析與預測，並對計畫道路功能定位進行分析、現地踏勘與研析、道路規劃原則及策略研擬後，接著研擬與評估各替選方案並提出建議方案。建議於此階段開始評估影響各替選方案的氣候風險因素，參見圖 3.5，一方面做為方案研選之重要參考因素，同時也為執行專案氣候風險評估工作奠定基礎，重點說明如下：

1. 增納「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」工作項目

由於氣候變遷的影響，許多氣候參數都呈現年均值增加或減少，出現越來越高的極端值與季節性變異的趨勢，故初步評估在公路系統服務年限內可能影響氣候風險的關鍵因素為氣候變遷調適的重要工作。

前述關鍵因素可分為氣候危害因素（例如，強降雨、強風、高溫等）、公路系統本身的脆弱因素（例如，材料缺乏耐候性、缺乏替代道路）以及公路系統暴露在氣候危害因素的程度（例如，經過地層下陷地區增加強降雨導致的淹水）。由於此階段之資料以二手資料為主，可能尚缺乏精準性，建議儘量透過工作坊邀集有經驗的專業者及利害關係人共同研判評估，以初步掌握氣候變遷可能對專案的衝擊，並據以選擇避開高氣候風險的方案。

圖 3.5　方案研擬與評估階段納入調適作業流程

2. 作業程序說明

公路規劃專案中有關「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」工作項目之作業可分為 2 步驟（參見圖 3.6），說明如下：

(1) 步驟 1：指認氣候風險因素

基於專案所掌握到的數據、專業知識及經驗，初步指認公路系統在面臨氣候變遷下未來可能面臨的氣候壓力及危害、暴露度與脆弱度等因素。

其中，影響臺灣公路系統之五大「氣候壓力因素」包含強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪及海平面上升等，這些氣候壓力因素如經研判可能對規劃中的公路系統造成危害，例如，強降雨造成土石流導致公路毀損或交通中斷，則屬於該專案在氣候變遷環境下的「氣候危害因素」。

規劃階段所考量的公路系統的「暴露因素」著重於關注計畫方案可能座落於對上述危害因素相對敏感的區位，例如，公路行經地質敏感地區更易因強降雨而致崩塌、公路行經地層下陷地區因強降雨而淹水的機率更高、沿海地區的公路系統更易受到海平面上升的威脅等。

規劃階段所考量的公路系統的「脆弱因素」主要為公路設施本身對氣候壓力缺乏抵禦能力，例如，必須經過沿海地區的平面公路容易淹水、鋼構橋梁容易因高溫而變形;或是公路系統的功能在區域路網中具有特殊關鍵地位，例如，山區社區的唯一聯外道路、都會區的重要聯外道路等，一旦失能將發生可觀的社會成本。

(2) 步驟 2：初步評估影響調適能力之氣候風險因素

先確認是否有前例可依循，初步瞭解影響該公路系統調適能力之氣候風險因素，若無前例或缺乏可靠的研判資料，則建議透過組成專案工作小組等方式邀集有經驗之專業者及重要的利害關係人，共同研判初步指認及評估影響公路系統（資產）調適能力之關鍵氣候風險因素，以及其可能的影響面向、位置與可能性等。專業工作小組之主題建議如下：

① 工作小組討論主題 1：辨識公路系統（資產）面對氣候壓力因素下可能產生的氣候衝擊及影響。

② 工作小組討論主題 2：辨識機率、高風險區位。

針對不可承受的風險之區位，應考量該方案可能受威脅的系統壽年、養護頻率等因素，評估為高風險之方案，若有其他選擇應儘量迴避高氣候風險方案。

在計畫方案研擬及評估階段即應納入公路韌性考量，辨識公路系統在氣候變遷情境下可能面臨的氣候風險，有利於及早發現計畫方案未來可能面臨的氣候衝擊及影響。

本階段有關專案氣候風險因素之指認與初步評估方法可參閱 4.1 節及 4.2 節之說明。

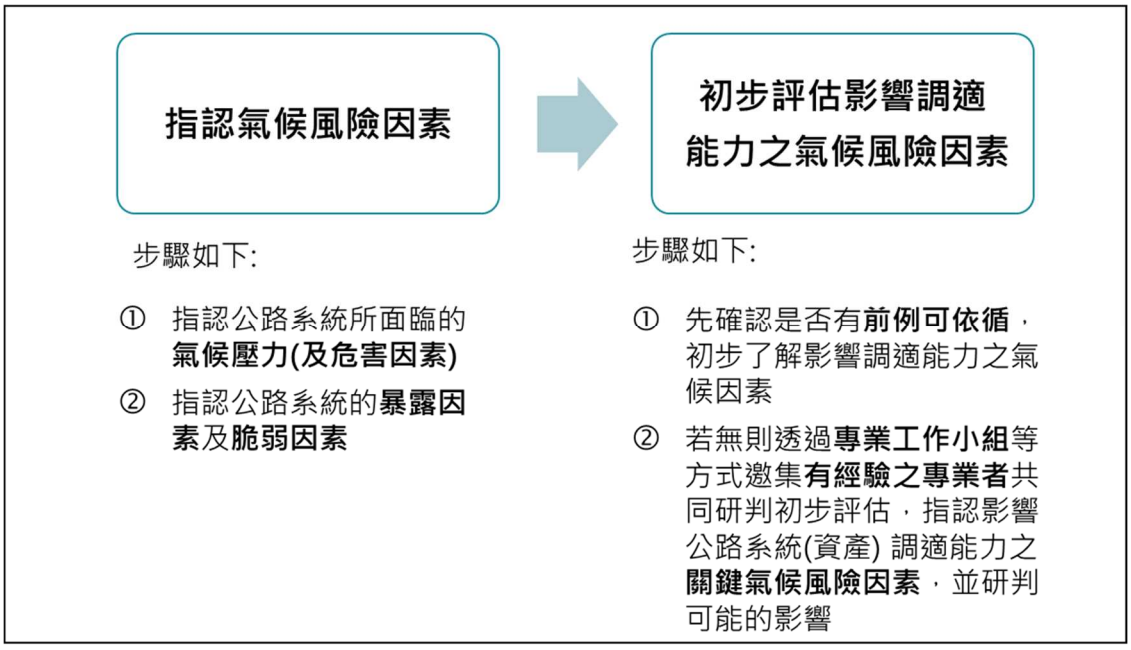


圖 3.6　初步評估影響調適能力的氣候風險因素作業程序說明

3.4 第三階段：執行氣候變遷風險評估

第三階段為建議路線方案工程研究、實質建設計畫研擬（包含用地取得分析、建設計畫研析、經費來源分析等）、經濟效益及財務評估等工作項目，透過研究分析提出綜合評估與研議以及結論與建議。

此階段強化調適能力之重點係在以前階段所評估的影響調適能力的氣候風險因素為基礎，執行氣候變遷風險評估，將風險評估結果納入工程研究、維護計畫及風險管理計畫。重點說明如下：

1. 增納「氣候變遷風險評估」工作項目

建議於第三階段納入氣候變遷風險評估作業，因應氣候變遷的不確定性，且調適的措施亦可能面臨工程面及預算面的限制，故於「建議方案工程研究」執行之前即應啟動氣候變遷風險評估作業（參見圖 3.7），並將評估結果納入後續的規劃作業中，以利達到最大效果的公路系統韌性提升。

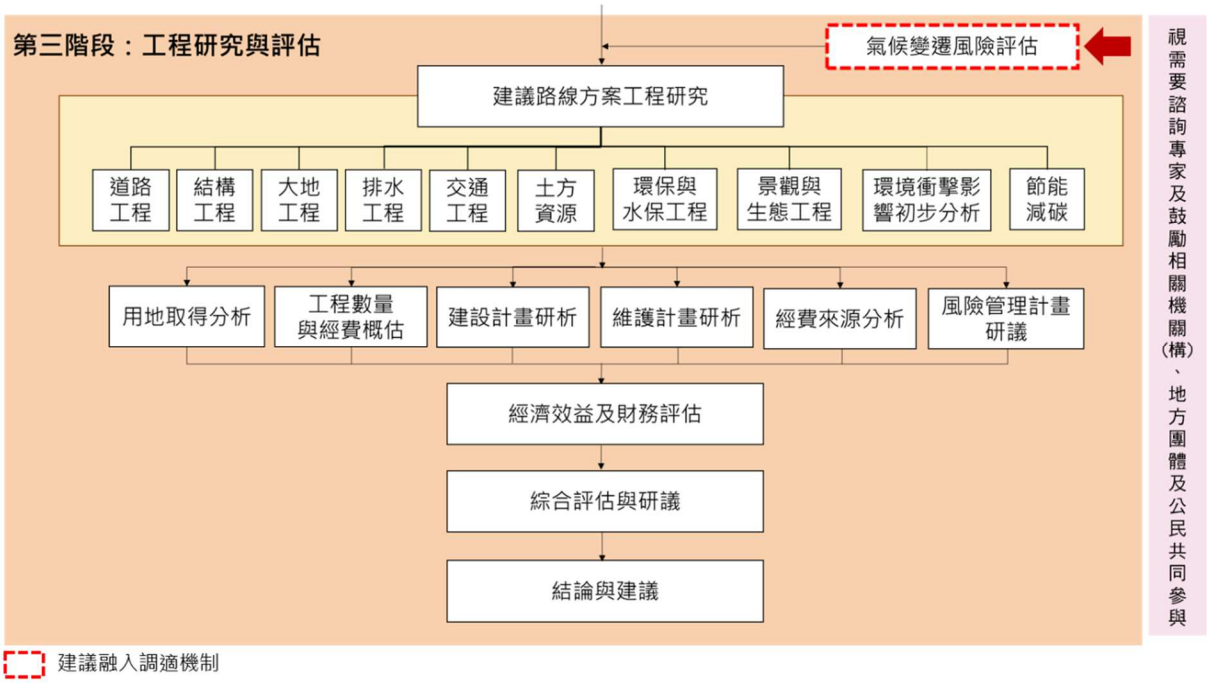


圖 3.7　工程研究與評估納入調適作業流程

2. 作業程序說明

公路規劃專案中有關「氣候變遷風險評估」工作項目之作業可分為 3 步驟（參見圖 3.8），說明如下：

(1) 步驟 1：前置作業

由於氣候變遷風險評估涵蓋許多工作，故執行前需進行氣候變遷風險評估前置作業。建議先就辨識利害關係人開始執行，透過與專案相關之利害關係人共同討論，列出關鍵資產組件清單、辨識需納入考量的氣候參數等，最後依據專案特性訂定時間範疇。

其中，時間範疇的選擇可能受資料的可取得性、氣候變遷長期衝擊的不確定性與衝擊間可能的相互交集等影響，因此建議可設定多個時間範疇，公路基礎設施如橋梁等有相對較長的使用壽命—通常為 50、75 甚至 100

年。由於在氣候變遷之下，許多氣候參數顯示年均值有增加或減少的趨勢，以及更高和更頻繁的極端值，因此應依據公路的使用壽命，選擇可取得之氣候數據資料來設定評估期程。

作業流程如下：

① 辨識利害關係人（例如，地方政府、農業機關、水利機關..）。

② 描述專案所在區位。

③ 列出系統關鍵組件清單（例如，橋梁、涵洞、路段...）。

④ 辨識需納入考量的氣候參數（例如，雨量、溫度、風速...）。

⑤ 選擇關鍵團隊成員（例如，主管機關決策者、氣候科學專家、道路工程專家、大地專家...）。

⑥ 訂定專案評估之時間範疇。

(2) 步驟 2：執行氣候變遷風險評估

氣候變遷風險評估作業程序需在進入各工程面向考量前進行。執行風險評估主要目的是為辨識氣候衝擊可能對公路系統（資產）帶來的影響。首先應界定目標、選擇氣候變遷風險分析方法，依據專案特性及資料可及性選擇適合專案執行之氣候變遷風險評估方法，再選擇公路基礎設施組件及特定的氣候參數，以辨識及描述公路資產與氣候參數間的相互影響，最後透過以上評估結果確立專案所面臨的氣候風險。

作業流程如下：

① 確立目標（例如，道路不中斷、道路中斷時間不超過 1 日...）。

② 選擇氣候變遷風險分析方法。（參見 4.2 節公路系統風險評估之方法）

③ 選擇公路基礎設施關鍵組件。

④ 選擇及確定特定氣候參數。

⑤ 指認並描述公路基礎設施與氣候參數之間的相互影響（例如，強降雨造成公路橋梁沖刷、強風造成沿海公路暴潮...）。

⑥ 確立氣候風險

(3) 步驟 3：回報評估結果

氣候變遷風險評估係做為調適規劃、主流化與導入調適策略與措施的基礎。回報風險評估結果時應考量可理解性並提供建議。報告應提供風險評估的目標說明、應用的方法、主要的發現、解析評估結果所需的背景知識等。該步驟操作項目如下：

① 氣候變遷評估書面報告。

② 溝通氣候變遷風險評估結果。

③ 回報結果做為調適規劃基礎。

本階段有關專案氣候風險評估之方法可參閱 4.1 節及 4.2 節之說明。

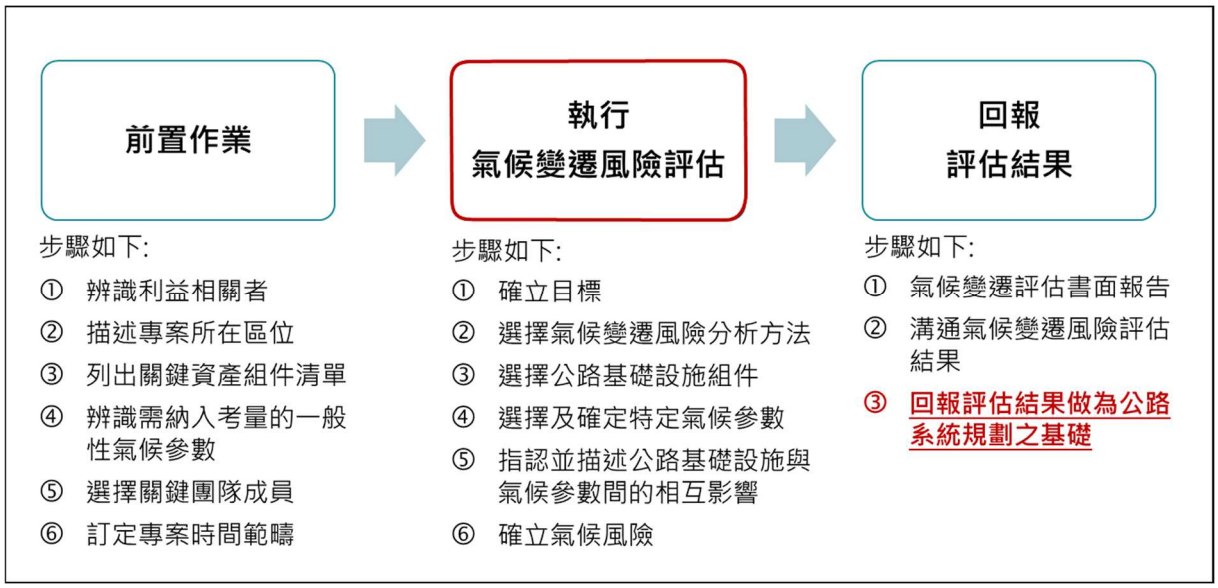


圖 3.8　氣候變遷風險評估程序說明

歐洲及美國公路韌性框架實測案例

【歐洲 ROADAPT 及美國 FHWA 調適框架實測

-以荷蘭 InnovA58 公路擴建計畫為例】

本案例摘錄自美國聯邦公路管理局(FHWA)和荷蘭交通水利管理局(RWS)合作完成之調適研究報告，係以荷蘭 InnovA58 公路擴建計畫為標的，應用歐洲 ROADAPT 方法和 FHWA 氣候調適框架所提出之分析框架及配套工具進行專案的氣候變遷脆弱度分析及風險評估，依據分析及評估結果研擬提升公路氣候韌性的創新作法，並據以納入後續建設採購的契約之中。重點說明如下：

1. 公路韌性框架及配套工具介紹

該項專案所應用的調適框架，包含歐洲道路主管會議（Conference of European Directors of Roads, CEDR）提出的 ROADAPT 方法及 FHWA 的氣候調適框架和配套應用工具。

ROADAPT 運用是基於風險評估方法來評估脆弱度和辨識調適策略。ROADAPT 方法涉及選擇當前和未來氣候數據、利益相關者所驅動的氣候變遷風險初步評估，稱之為快速掃描（quickscan）、基於 GIS 的脆弱度評估、社會經濟影響評估及研擬調適策略等。

FHWA 氣候調適框架主要係評估公路資產在氣候變遷及極端天氣事件之下的脆弱度，並將結果納入決策。該框架說明執行脆弱度評估的關鍵步驟，並提供如何透過不同程度的努力和資源執行該過程之說明。另外，可幫助交通規劃者執行敏感度分析（sensitivity analysis）、處理降尺度的（downscaled）氣候數據，以及對脆弱度評估（vulnerability assessment）進行評分。

2. 荷蘭 InnovA58 計畫之公路韌性實測結果

RWS 與獨立研究機構 Deltares 合作，使用 ROADAPT 框架以及 FHWA 的敏感度矩陣、脆弱度評估評分工具（Vulnerability Assessment Scoring Tool, VAST）分析 InnovA58 的脆弱度和調適策略。

(1) 氣候風險

Deltares 辦理 3 個工作坊，分別邀請 Innova58 計畫團隊、運營和維護人員以及當地政府，並使用 ROADAPT 快速掃描方法，開發當前風險矩陣，並

透過調整不同氣候影響情境發生可能性的高低，將其轉化為未來風險。工作坊中指認出 InnovA58 公路最嚴重的氣候風險依次為：

① 溪口的道路洪水氾濫。

② 洪水氾濫（pluvial flooding）：強降雨導致道路氾濫，地表逕流及地下水位升高、形成水坑等。

③ 涵洞尺寸過小造成的道路侵蝕。

④ 路邊長期積水導致路基侵蝕/承載能力喪失。

⑤ 極端降雨期間路基的滑坡/道路沉降（subsidence）。

⑥ 由於下雪、陣雨、水霧（spray）期間能見度受限，使駕駛安全性下降或喪失。

⑦ 道路積水超過 3 公分易打滑，造成駕駛員安全疑慮。

⑧ 人行地下道的淹水。

(2) 脆弱度評估

工作坊運用快速掃描完成風險矩陣後，Deltares 使用 ROADAPT 的脆弱度評估（Vulnerability Assessment, VA）和 FHWA 的 VAST 開發路段的脆弱度評分。Deltares 結合 Alterra 研究所、Blue Spot（RWS 早期洪水風險分析）的數據庫、現場訪談評估、道路排水系統記錄、道路與周邊地區的地形高程差異，以及是否存在涵洞和溝渠等因素，找出易遭受淹水災害的地點。透過 ROADAPT 工具的 GIS 輸出圖可辨別易受洪水影響的地點（如圖 3.9）。依據脆弱度程度分配顏色，綠色表示脆弱度相對較低，橙色表示脆弱度相對較高，並以紅色箭頭標記最易受損的五個地點：

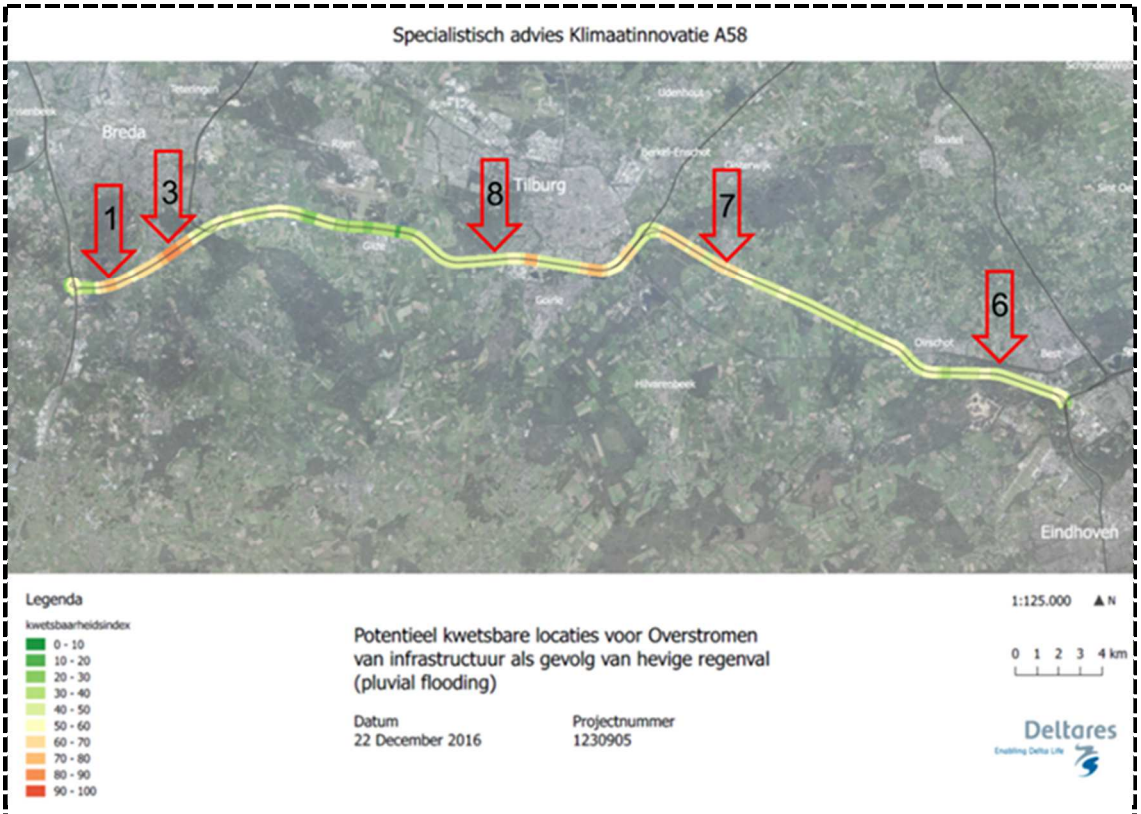
① 位於 A58 道路的 Kriekampen 停車場（如圖 3.9 的 6 號箭頭）

② 位於烏爾文豪特附近的 A58 道路（如圖 3.9 的 3 號箭頭）

③ Moergestel 附近的出入口坡道（如圖 3.9 的 7 號箭頭）

④ Galderse meren 湖泊靠近 A58 道路處（如圖 3.9 的 1 號箭頭）

⑤ A58 道路上穿越 Leij 生態通道處（如圖 3.9 的 8 號箭頭）



資料來源：Deltares。

圖 3.9 可能因暴雨遭受洪水災害的脆弱地點

(3) 建設採購契約文件具體納入氣候韌性考量

RWS 於 2017 年 4 月發布針對 InnovA58 計畫的詢價文件 (Request For Quotations, RFQ)。內容提及承包商須提出與公路氣候韌性相關的考量，包括為 Innova58 計畫制定穩健而靈活的氣候調適措施，並就如何將其整合提出建議。其中，要使用荷蘭皇家氣象研究所（Royal Dutch Meteorological Institute, KNMI）開發的氣候情景、RWS 氣候指引和調適路徑方法等，並對調適措施進行成本效益分析、分析措施對其他議題的潛在影響，例如噪音和生態影響，並將道路和周邊地區的氣候韌性結合納入考量。

RWS 將 Innova58 計畫依功能分為 3 組（packages）子計畫：

① 子計畫 1：道路功能所需的措施。

② 子計畫 2：改善道路功能的措施。

③ 子計畫 3：可與周圍環境措施配合，並符合溪谷報告（Stream Valley Report）[1]目標的措施。

RWS 打算要求利益相關者共同資助子計畫 1 以外的其他子計畫。

[1] 該報告由利益相關者制定，旨在改善自然、娛樂、文化歷史和景觀。

3. 案例可借鏡之處

公路系統於擴建改善規劃評估過程即應納入氣候變遷調適的考量，包含執行氣候風險指認與排序、脆弱度評估，並將風險評估的結果納入工程規劃設計的專業合約內容，以提升公路系統的氣候韌性。

資料來源：Federal Highway Administration, Resilient and Sustainable Transport - Dutch Style: An interim report on bilateral cooperation between FHWA and Rijkwaterstaat, 2017.

3.5 公路跨其他運輸系統調適介面整合機制

公路系統為基礎運輸路網，肩負連結其他各項運輸系統的功能，面臨全球暖化導致的氣候變遷，極端天氣事件頻率增加，公路與其他運輸系統介面處亦可能因受到衝擊而失能，導致其他運輸系統服務中斷。故公路系統之間及公路跨其他運輸系統處之強化調適介面整合值得特別關注。

上述其他運輸系統可依類型分為軌道、機場、港口：

- 軌道：可細分為高鐵系統與臺鐵系統，跨公路系統之介面為各高鐵與臺鐵車站的聯外道路。
- 機場：以國際機場為探討對象，跨公路系統之介面為各國際機場的聯外道路。
- 港口：以國際商港為探討對象，跨公路系統之介面為各國際商港的聯外道路。

公路系統之規劃乃係循 3 階段融入氣候變遷調適之理念，倘使該公路系統之區位或是功能涉及其他運輸系統，則在規劃評估氣候風險時，需另行增加利益相關者或有關機關單位的合作與溝通協調作業（參見表 3-2）。

表 3-2　公路系統及跨其他運輸系統強化調適介面整合機制各階段作業

階段	作業	利益相關者或有關機關單位
1.資料蒐集分析	■ 跨運輸系統範圍確立	1.公路系統主管機關
	■ 利益相關者或有關機關單位確認	1.公路系統主管機關 2.跨運輸系統之主管機關
	■ 資料蒐集與分析應建立於同一基準	1.公路系統主管機關 2.跨運輸系統之主管機關 3.水利機關 4.氣候資料提供機關

表 3-2　公路系統及跨其他運輸系統強化調適介面整合機制各階段作業（續）

階段	作業	利益相關者或有關機關單位
1.資料蒐集分析	■ 有關機關單位應建立氣候變遷情境相關資料流通、交換、共享機制	1.公路系統主管機關 2.跨運輸系統之主管機關 3.水利機關 4.氣候資料提供機關
2.方案研擬與評估	■ 辨識跨運輸系統範圍內之氣候壓力因素	1.公路系統主管機關 2.跨運輸系統之主管機關 3.氣候資料提供機關
	■ 利益相關者或有關機關單位需建立規劃作業時的定期溝通平台或管道	1.公路系統主管機關 2.跨運輸系統之主管機關
3.工程研究與評估	■ 針對跨運輸系統交界處進行氣候變遷風險評估	1.公路系統主管機關 2.跨運輸系統之主管機關
	■ 跨系統交界處優先迴避高風險地區	1.公路系統主管機關 2.跨運輸系統之主管機關
	■ 提高運輸系統交界處因應氣候變遷衝擊的工程設計標準	1.公路系統主管機關 2.跨運輸系統之主管機關
	■ 規劃與建構多層次備援運輸系統	1.交通部 2.公路系統主管機關 3.跨運輸系統之主管機關

3.6 本章重要觀念

- 於規劃階段強化公路系統因應氣候變遷調適能力的作為，並非取代既有的規劃作業程序，而是將氣候變遷調適的理念設法「內化」融入至既有的規劃作業程序中。因此，本指引旨在導入氣候變遷調適理念以改善公路系統規劃流程，同時引介可資應用的方法。
- 建議未來於公路系統各規劃階段，包含資料蒐集分析、方案規劃評估以及工程規劃等 3 階段均融入氣候變遷調適相關作業：第一階段增納「氣候變遷情境與氣候資料蒐集與分析」工作項目、第二階段增納「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」工作項目，於第三階段則增納「氣候變遷風險評估」工作項目。
- 上述公路系統規劃 3 階段強化氣候變遷調適能力機制，並非隨插即用（plug-and-play）的工具，而是規劃概念的提醒，期望引導熟練的公路系統專業規劃者於規劃過程中適時地融入氣候變遷調適的概念。

- 由於氣候變遷調適多涉及跨領域議題，建議於各階段可視需要諮詢專家、鼓勵相關機關（構）及公民共同參與。尤其，我國公路系統氣候變遷衝擊及調適之本土基礎研究尚屬缺乏，目前為止，有經驗的專家判斷對於氣候變遷調適工作而言，仍具有不可取代的重要性。
- 未來氣候條件仍將持續變化且具有高度的不確定性，故因應氣候變遷的調適措施或作為亦須隨變遷情形俱進。因此，氣候變遷調適除了關注「結果」，更關注「調適過程」。公路系統於規劃階段融入氣候變遷調適理念之後，後續的公路系統設計、建設及維護等均應納入氣候變遷調適理念及作法。而具有高氣候風險的公路系統於興建、營運階段應配合妥適的氣候風險監測計畫，依據監測結果反饋調整維護及監測作為，方能有效強化公路系統的氣候變遷調適能力。

肆、公路系統規劃階段強化調適能力方法

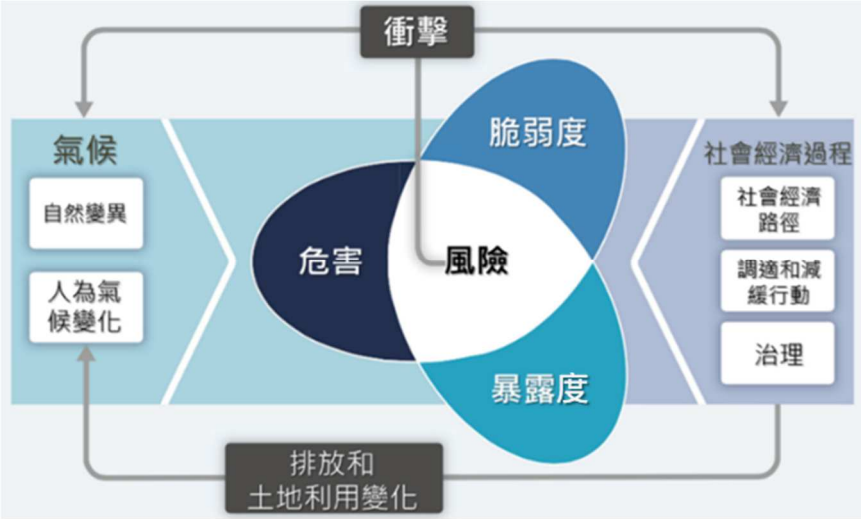
考量國內公路系統目前尚缺乏操作完整調適機制之相關經驗，故針對第參章所述機制中較為困難且關鍵之步驟，提供國際上目前採用之調適方法供參考。本章首先說明如何建立公路系統氣候衝擊鏈用以初步評估氣候風險因素，接續介紹公路系統氣候風險評估之方法以指認風險缺口，並推介適用於公路系統的調適選項，最後，由於氣候變遷具有高度不確性，乃引介在未來高度不確定之下的決策方法，以協助決策過程順利進行。

4.1 公路系統氣候衝擊鏈分析方法

於氣候變遷風險評估作業中，如何解析氣候變遷對於公路系統的衝擊以及辨識風險組成為其中較為困難且重要的步驟之一，本指引參考 IPCC AR5 對於「氣候衝擊風險」的定義、ISO 於 2021 年發布之《ISO 14091 氣候變遷調適－脆弱度、衝擊與風險評估指引》及日本獨立行政法人國際協力機構（JICA）出版之《氣候風險評估及調適指南》，建構公路系統氣候衝擊鏈分析方法，提供國內公路系統規劃專案參考。於規劃過程中建構公路系統氣候衝擊鏈有助於理解氣候衝擊以及影響公路系統韌性強度之因素，進而據以規劃因應的調適選項。

1. 「氣候衝擊鏈」理論基礎

「氣候衝擊鏈」之建構理論基礎為 IPCC AR5 對於「氣候變遷調適」的操作概念及「氣候衝擊風險」的定義（參見圖 4.1）。依據 IPCC 於 AR5 所揭示的「氣候變遷調適」，其操作的核心概念係為「在氣候變遷的情境之下對於『氣候衝擊風險』進行有效的管理」。AR5 進一步指出「氣候衝擊風險」取決於三種主要面向－暴露度（exposure）、脆弱度（vulnerability）及危害（hazard），三種面向的交集決定了風險（參見圖 4.1）。換言之，風險的大小與內容乃係依據三者的交互關係而定。



資料來源：1.IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change；2.同舟共濟-臺灣氣候變遷調適平台，環保署。

圖 4.1　IPCC 對於氣候衝擊風險的定義

2.「氣候衝擊鏈」分析項目

「氣候衝擊鏈」（參見圖 4.2）之分析項目包含：

(1) 氣候壓力因素：與氣候變遷有關的情況、事件或趨勢，可能對公路系統造成衝擊。影響臺灣公路系統之五大氣候壓力因素包含：強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪、海平面上升。

(2) 暴露因素：公路系統位於易受衝擊的地區（例如，淹水潛勢區、地質敏感區或坡災潛勢區等）的範圍及程度。

(3) 脆弱因素：公路系統本身容易受衝擊的特性，以及一旦失能可能影響的範圍及程度（例如，唯一維生聯外道路）。

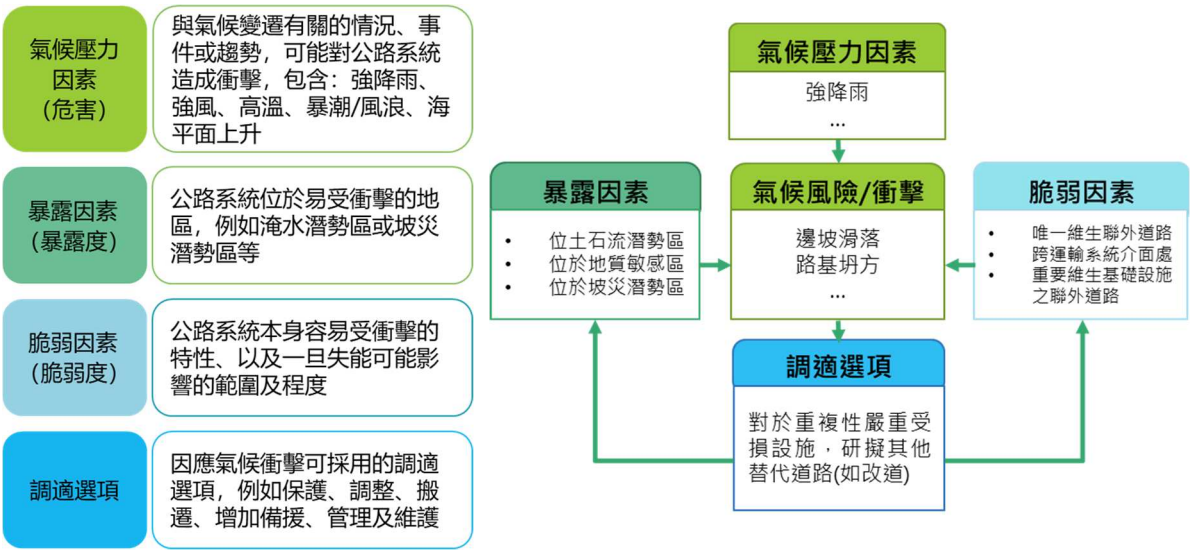


圖 4.2　氣候衝擊鏈分析示例說明

3. 公路系統所在環境區位與氣候壓力因素

公路系統之氣候衝擊類型及程度與所處區位地理環境有關，臺灣地區之山區與平原公路系統所面臨的氣候壓力因素有別。本指引蒐集在國內歷史極端天氣事件中公路系統所面臨的衝擊/風險，同時考量在氣候變遷環境之下，未來臺灣可能遭遇前所未有的氣候衝擊類型及程度，因此，亦適度蒐納國外公路系統氣候衝擊事件資料做為參考。

國內公路系統依路線行經環境條件區分為山區公路系統（位於丘陵區與山嶺區之公路）及平原公路系統（位於平原區之公路）2 類，彙整其面臨的氣候壓力因素如下：

(1) 山區公路系統面臨的氣候壓力因素包含強降雨、強風及高溫等。

(2) 平原公路系統面臨的氣候壓力因素則為強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪及海平面上升。

4. 公路系統氣候衝擊鏈分析方法之參考案例

為具體說明如何應用上述公路系統氣候衝擊鏈分析方法，以下針對國內公路系統面臨較嚴重之氣候壓力因素，包含山區公路系統面臨強降雨及平原公路系統面臨暴潮/風浪及海平面上升，示範氣候衝擊鏈分析方法（參見圖 4.3、圖 4.4）。後續公路實務操作者可依本指引所建議的氣候衝擊鏈分析圖做為基礎，產出專屬各公路專案之氣候衝擊鏈分析圖。

(1) 山區公路系統之氣候衝擊鏈分析-強降雨

相較於其他氣候壓力因素，強降雨加劇對於山區公路系統的衝擊影響最為劇烈，也是國內公路系統目前應優先處理且急迫性高之極端氣候課題。山區公路所面臨的強降雨加劇可能造成之氣候衝擊影響層面較多，且可因應的調適選項也較為多元，加上國內山區公路的暴露因素與脆弱因素，亦可能加劇強降雨衝擊對於山區公路的影響程度。

由山區公路系統氣候衝擊鏈分析可知，強降雨加劇可能造成地表逕流/河川溢淹及暴雨沖刷/土石流等危害因素，對於公路系統在不同尺度下（路段、路廊及路網）的氣候衝擊包含：在路段尺度可能加劇橋梁受沖刷或道路的橫斷面面臨暴雨沖刷，以及排水不良造成淹水；路廊尺度可能造成路廊邊坡坍滑或因地表逕流溢淹，影響周邊排水系統；路網尺度則可能因替代道路數不足，造成路網連通性受阻或交通場站聯外道路淹水，導致運輸中斷。

因應強降雨的調適選項類型包含調整、保護、搬遷、管理及維護。在路段尺度可透過建造一座橋跨越滑坡或建造隧道，或將道路或橋梁抬升高出預估的洪水高程，以減少波浪抬升和河川溢淹；在路廊尺度山區公路安裝邊坡防護結構或恢復邊坡植被等方式穩定邊坡以避免土石流;在路網尺度可透過整合協調周邊排水系統，或實施分階段緩解措施並持續監控該措施結果，以確定是否需要採取進一步措施。

(2) 平原公路系統之氣候衝擊鏈分析-暴潮/風浪及海平面上升

國內平原公路多位於沿海地區、都會區或服務居住口密集區及重要產業園區等，故平原公路面臨暴潮/風浪及海平面上升加劇相較於其他氣候壓力因素（如高溫、強風），可能造成之氣候衝擊影響層面較多。加上一旦面臨強降雨、暴潮/風浪與海平面上升加劇衝擊等複合式氣候壓力威脅，其影響程度更大、範圍更廣。

由平原公路系統氣候衝擊鏈分析可知，暴潮/風浪及海平面上升加劇可能造成路堤侵蝕、橋基挖蝕、強浪侵襲造成淹溢及海平面上升造成海岸退縮等，對於公路系統在不同尺度下（路段、路廊及路網）的氣候衝擊包含：在路段尺度可能造成路堤侵蝕影響橋梁結構或暴潮/風浪加劇橋梁沖刷；在路廊尺度可能因海水淹溢、海岸退縮而路基遭強浪掏刷；在路網尺度則可能因海水淹溢且替代道路數不足，造成路網連通性受阻等。

因應暴潮/風浪及海平面上升的調適選項類型包含調整、保護、增加備援、管理與維護。在路段尺度可透過改進護岸，增加沿海橋橋面板標高，以防止浪湧造成損害；在路廊尺度可透過維護沿海道路護岸/防波堤以防止波浪破壞；在路網尺度則可透過更高的海拔高度上建立替代道路，以及在極端天氣事件中重新規劃交通路線等方式，逐步緩解公路系統運輸中斷問題。

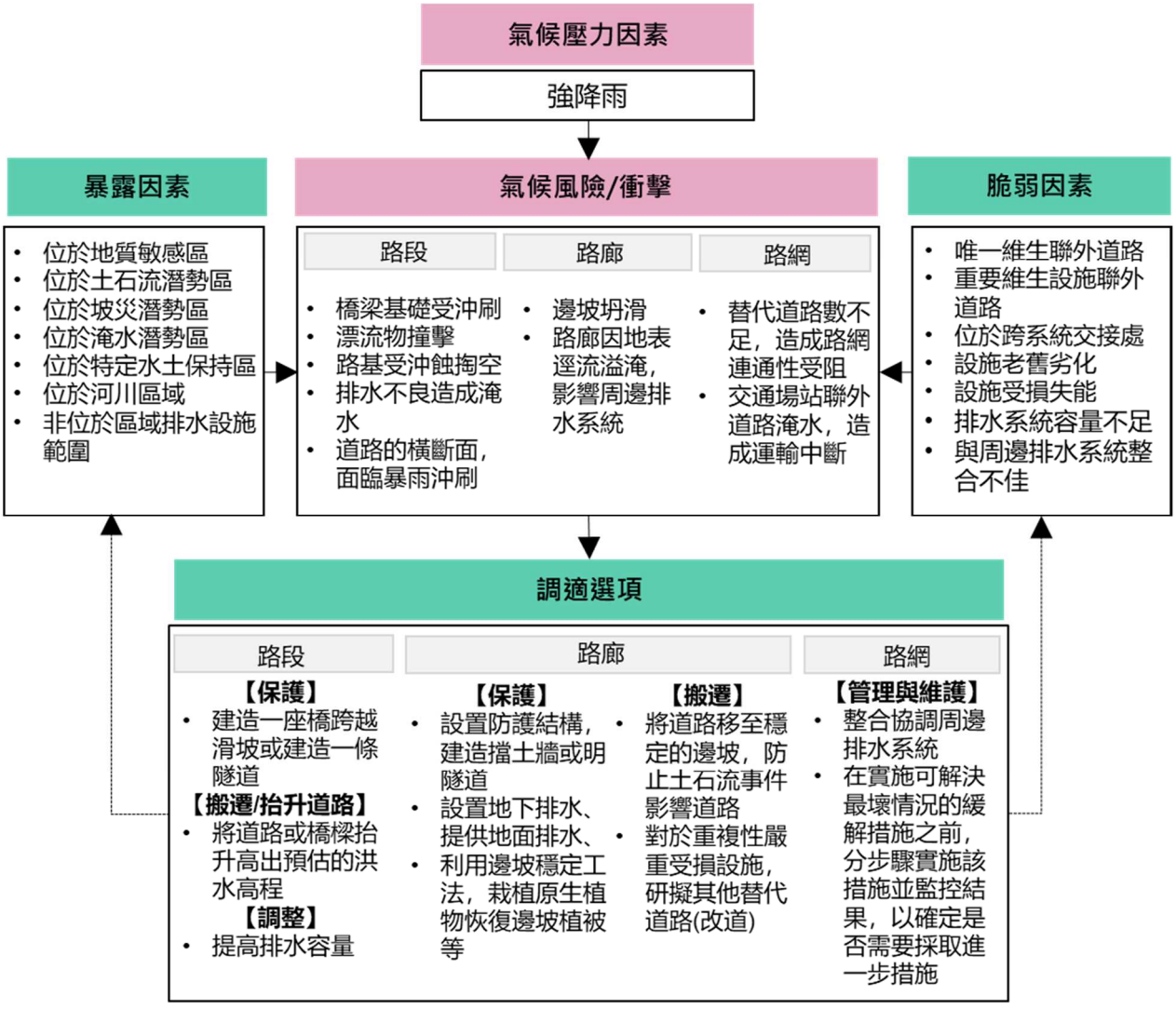


圖 4.3　山區公路氣候衝擊鏈分析示意圖（強降雨）

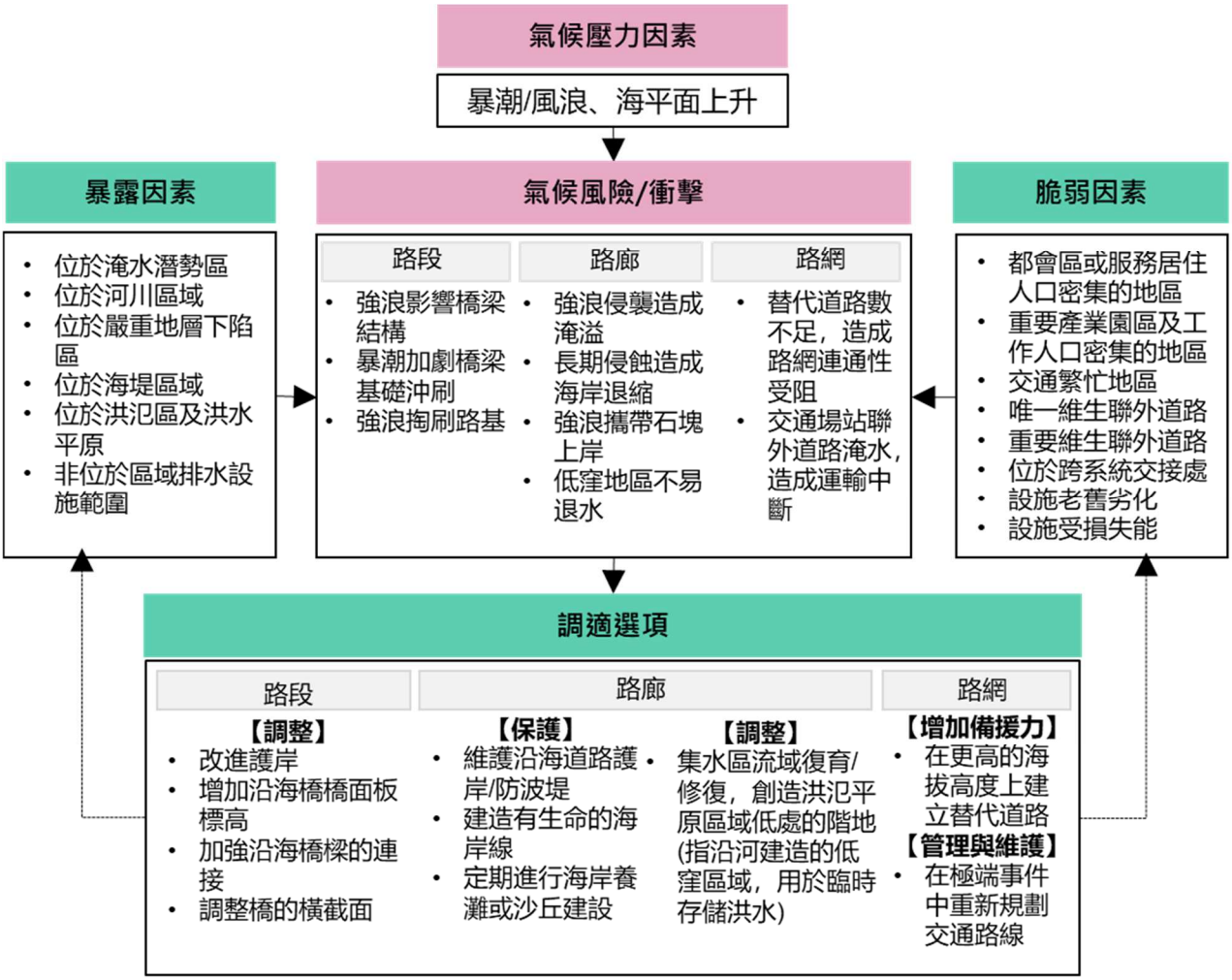


圖 4.4　平原公路氣候衝擊分析示意圖（暴潮/風浪、海平面上升）

5. 公路系統氣候衝擊鏈分析方法之應用建議

上述參考案例提出之公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖是透過國內外相關文獻彙整而成，可為公路規劃專案之參考。但由於目前國內公路在實務上仍較為缺乏調適相關研究與經驗，故調適選項多以國外調適案例綜整為主以供國內初步參考。

國內公路實務操作者可應用本指引所引介的氣候衝擊鏈分析方法，探討公路專案所面臨之氣候風險因素與潛在的氣候衝擊。該操作過程建議各專案應透過專家及利益相關者組成工作小組共同討論，據以產出專屬各公路專案之氣候衝擊鏈分析成果。

4.2 公路系統氣候風險評估之方法

氣候變遷風險評估依據可取得資料及評估量化程度，大致可分為偏質性及半量化之氣候風險評估（如，日本 JICA 氣候風險評估方法）和量化程度較高之氣候風險評估（如，加拿大英屬哥倫比亞省交通局應用於公路韌性設計之氣候風險評估方法）。前者可適用於方案研擬與評估階段，在現況仍缺乏足夠數據難以進行量化分析或其能投入資源相對匱乏者使用；後者較適用於工程研究階段，特別是已確定方案後之工程規劃及基本設計，其公路專案之基礎設施韌性研究可取得足夠數據及分析工具，以進行量化分析者。

由於國內公路系統規劃階段包含可行性研究和綜合規劃，在執行氣候變遷風險評估時，可依據專案特性、可取得之資料及組織人力財務資源等因素，選擇較適合且具實務操作可行的氣候風險評估方法來執行。

以下摘述日本 JICA 及加拿大英屬哥倫比亞省交通局之氣候風險評估方法步驟及重點內容：

1. 日本獨立行政法人國際協力機構：氣候風險評估及調適指引（2019 年）

日本獨立行政法人國際協力機構(Japan International Cooperation Agency, JICA）是日本對外實施政府開發援助（official development assistance）的主要執行機構之一，長期以來透過專案形式於財務上及技術上支持開發中國家因應氣候變遷風險。JICA 根據 IPCC AR5 中之調適概念定義，於 2019 年訂定《氣候風險評估及調適指南》(Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation)。以下摘述其中有關氣候風險評估之建議：

(1) 氣候風險評估準備流程

JICA 專案之氣候風險評估係於「可行性研究」階段執行，準備流程步驟如下：

① 釐清專案目標、投入項目、執行單位、區位、受益對象、時程等 6 大必要事項，並與地方利害關係人取得共識。

② 制定數據蒐集計畫，確認二手資料與實地調查應蒐集之資料。依專案區位及性質，區分與氣候風險要素相關之資料細項。

③ 審查現行二手資料真實性、資料來源可靠程度。

④ 進行實地調查蒐集必要資料及數據，並召開公聽會、工作坊與地方政府及居民交流，以了解基地現況及氣候風險。

(2) 氣候風險評估執行流程

執行氣候風險評估的目的在於選取對專案執行造成重大衝擊之氣候風險，擬定相應的調適措施，再透過綜合分析評估調適措施之優先次序以利後續研擬行動計畫。氣候風險評估執行流程步驟如下：

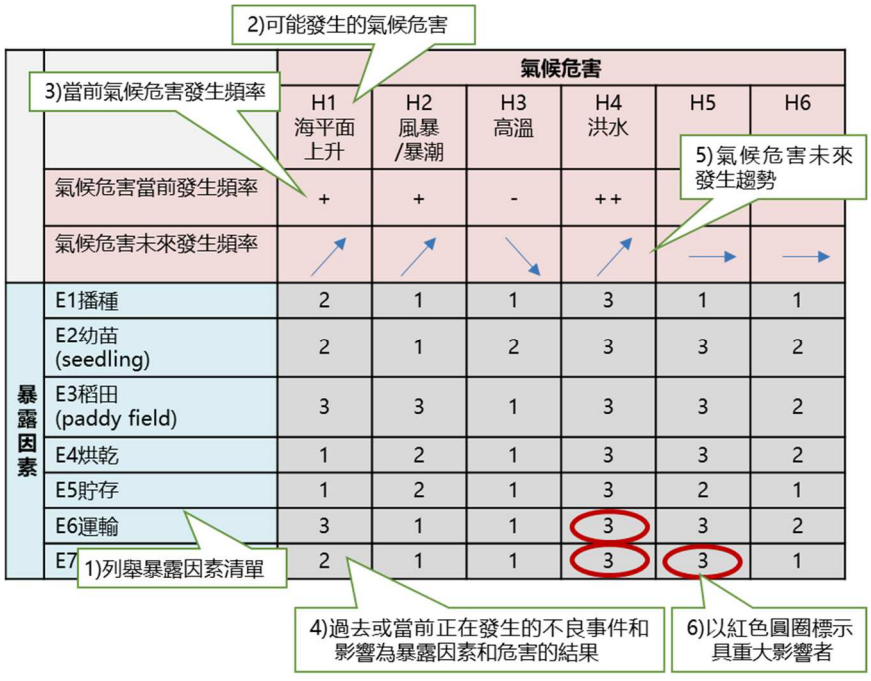
① 確認專案架構，諸如專案目標、投入項目、執行單位、區位、受益對象、時程等六大必要事項，並預先訂定氣候風險評估之時程。

② 運用「氣候風險矩陣」（參見圖 4.5）指認相關風險。

③ 基於氣候風險矩陣指認將對專案執行造成重大衝擊的氣候風險，建立氣候風險樹狀圖（climate risk tree）（參見圖 4.6）。

④ 選取將對專案執行造成重大衝擊之氣候風險，擬訂相應的調適措施，再由效益、財務及技術可行性兩面向，分析調適措施實行之優先次序，依序補充於氣候風險樹狀圖中。

⑤ 擇優先次序高之調適措施研擬執行計畫。



		氣候危害					
		H1 海平面上升	H2 風暴/暴潮	H3 高溫	H4 洪水	H5	H6
	氣候危害當前發生頻率	+	+	-	++		
	氣候危害未來發生頻率	↗	↗	↘	↗	→	→
暴露因素	E1播種	2	1	1	3	1	1
	E2幼苗 (seedling)	2	1	2	3	3	2
	E3稻田 (paddy field)	3	3	1	3	3	2
	E4烘乾	1	2	1	3	3	2
	E5貯存	1	2	1	3	2	1
	E6運輸	3	1	1	3	3	2
	E7	2	1	1	3	3	1

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

圖 4.5　JICA 氣候風險矩陣填寫步驟

表 4-1　氣候風險矩陣填寫步驟說明

操作步驟	說明	備註
1	詳列專案區位內暴露因素。	
2	詳列專案區位內相關氣候危害。	
3	以「＋」、「－」形式填寫氣候危害發生的頻率。	頻率標準如表 4-2
4	以評分形式評估氣候風險衝擊程度。	評分標準如表 4-3
5	以箭頭形式描述各項氣候危害未來發展趨勢。	
6	框選將對專案執行造成重大風險與衝擊之風險因子。	
7	指認可能對專案執行造成重大衝擊之氣候風險。	

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

表 4-2　氣候危害發生頻率分級標準

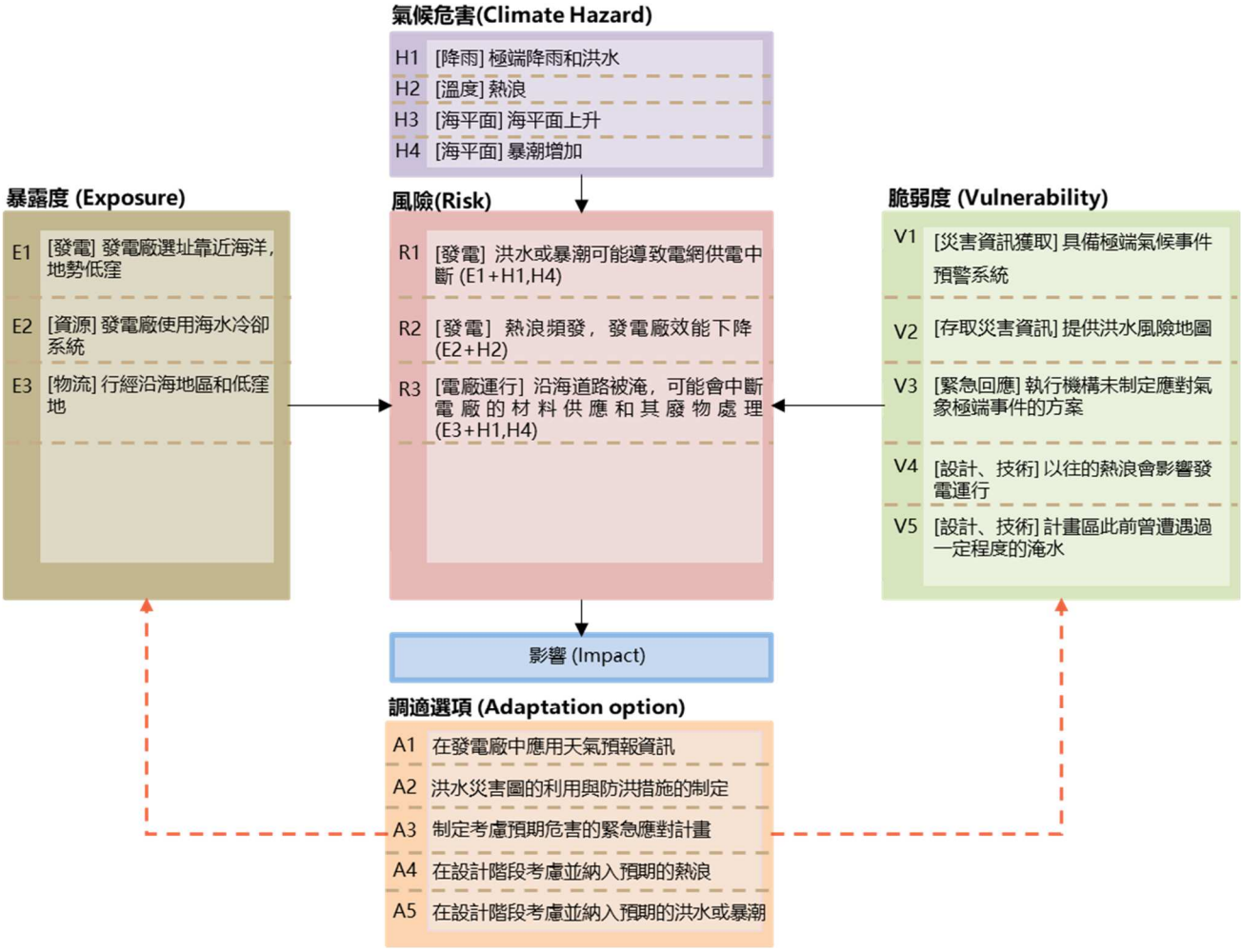
發生頻率	定義	示例
＋＋	經常發生	過去 20 年內發生次數超過 10 次
＋	有時發生	過去 20 年內發生次數超過 5 次
－	幾乎未發生過	過去 20 年內發生次數少於 1 次

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

表 4-3　氣候風險衝擊程度評分標準

衝擊程度	定義	示例
3	氣候事件迄今影響重大，無法解決	特定區域受洪水淹沒，長達數月無法正常供水
2	氣候事件迄今影響程度中等，難以處理	特定地點部分被洪水淹沒，基礎設施無法運作，但於 1 週內恢復原狀並正常供水
1	氣候事件迄今影響程度較小，已受控制	特定地點部分被洪水淹沒，基礎設施暫時關閉，但可立即恢復並正常供水
0	氣候事件迄今影響程度輕微，可忽略不計	特定地點部分暫時被洪水淹沒，但基礎設施運行未受影響，供水未曾中斷

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.



資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

圖 4.6　JICA 氣候風險樹狀圖

2. 加拿大英屬哥倫比亞省交通局（British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure）：公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計－實務指引（2020 年）

加拿大英屬哥倫比亞省交通局於 2020 年滾動檢討更新《公路交通建設面對氣候變遷的韌性設計－實務指引》（Professional Practice Guidelines–Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia），針對公路系統氣候變遷調適之韌性設計提出最新的實務指導原則，以協助公路工程專業人員提升公路設施韌性因應氣候變遷對公路系統的衝擊。以下摘述其中之風險評估層級及氣候風險評估程序建議。

(1) 氣候風險評估分為 3 種層級

氣候風險評估分為 3 種級別，分別為篩選級風險評估（screening-level risk assessment）、脆弱度分析或評估（vulnerability analysis or assessment）、工程分析（engineering analysis），分述如下：

① 執行篩選層級之風險評估：透過廣泛蒐集氣候變遷風險的資料並彙整分析即可完成篩選層級之風險評估，透過較低成本的投入瞭解該專案是否需要採取更細部之風險評估及分析。風險評估內容包含選擇和歸納（characterize）重要基礎設施組件（infrastructure components）進行研究、確定可能影響基礎設施組件的關鍵氣候變數（variables）。篩選級風險評估至少要由專業團隊完成，以確保提供廣泛的視角和專業領域，增加結果可信度。

② 執行脆弱度分析或評估：確定重要的基礎設施組件和定義的氣候變遷參數之間的潛在相互影響（interaction）後，為其相互影響發生的可能性（和/或頻率）及發生故障（或損壞）後果的嚴重性評分，並描述產生的後果（參見圖 4.7）。

③ 執行工程分析：工程分析的目的是為提出設施可因應氣候變遷的調適能力、總承載力（total load）和總容量（total capacity）等量化數據以利後續工程設計。工程分析有助於為較脆弱的設施組件確定氣候變遷下設施的安全係數，從而增強設施韌性，並將風險降低到可接受的水準，且工程分析的結果有利於選擇調適措施。由於組件級別的工程分析通常既複雜又耗時，工程分析多適用於安全至關重要的組件、針對氣候風險的專業判斷存在分歧者，抑或存在許多不確定因素會降低對後續設計過程信心者操作。

(2) 針對公路基礎設施之氣候風險評估方法

在基礎設施設計和氣候變化的背景下，氣候風險可作為衡量基礎設施項目組件對於氣候變遷的負面影響及其脆弱度，主要步驟如下：

① 確立目標與標的：風險評估標的應包含有關公路容量、安全性、可靠性、耐用性、設施壽年等設計目標，以及其他影響公路專案對氣候風險容忍度的要素。

備註說明：風險由兩個屬性的函數構成，包括發生故障（或損壞）的概率或可能性（probability），以及發生故障（或損壞）後果的嚴重性（severity）。根據設計團隊和利益相關者的定義，將依據嚴重性程度評分分數由 0 到 7 進行評分。

資料來源：Professional Practice Guidelines– Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia,EGBC.2020.

圖 4.7　簡易風險矩陣

② 選擇風險評估工具：選擇公路基礎設施風險評估常用工具，加拿大評估公路基礎設施氣候風險的常用工具包含「PIEVC 工程協議 - 用於氣候變遷基礎設施脆弱度評估」（2020）、FHWA 脆弱度評估評分工具（VAST）（2019）等。

③ 選擇公路基礎設施組件：基礎設施組件可被單獨定義亦可群組，或是兩者具備。單獨列出設施組件可產出更詳細的風險評估，但需花費額外的精力和成本。

④ 選擇和確定特定氣候參數：應由專業人員選擇和確認與設計有關的氣候參數及臨界值，確認所列之個別氣候參數至少影響一處基礎設施項目組件，同時紀錄經確認後之特定氣候參數清單。

⑤ 指認並描述公路資產與氣候參數之間的相互影響：針對所列之基礎設施組件對應特定氣候變化參數的每種組合，應由專業人員和

風險評估團隊指認氣候事件所導致的相互作用類型，用以預測可能造成的風險。

⑥ 確立氣候風險：在基礎設施設計和氣候變化的背景下，氣候風險可做為衡量基礎設施及組件在氣候變遷下的負面影響及其脆弱度。

3. 公路系統氣候變遷評估方法之應用建議

氣候變遷風險評估在實務操作上分為3層級,從篩選層次、定性到定量。由於產出定量評估過程通常需投入大量成本,為求以投入最少的資源快速指認出重大風險，建議先透過篩選層級風險評估初步掃描現況風險後，篩選出中高風險者，針對中高風險者進行定性評估，最後僅選出高風險之重大基礎設施進一步定量評估。

由於國內目前尚無執行氣候變遷風險評估之經驗,建議在執行氣候變遷風險評估時，可依據專案特性、可取得之資料及組織人力財務資源等因素，選擇較適合且具實務操作可行的氣候風險評估方法來執行。

篩選層級之風險評估方法案例

【鐵公路氣候風險評估方法-以交通部運輸研究所鐵公路風險地圖為例】

交通部運輸研究所於 102 至 108 年期間產製並維護鐵公路淹水及坡災風險地圖，運用危害及脆弱度指標之相互影響產出風險矩陣的結果，供國內鐵路公路機關做為風險評估之參考。以下就其氣候變遷情境設定、風險評估指標設定、風險評估流程及風險矩陣等加以說明：

1. 氣候變遷情境設定

考量運輸設施管理機關在風險評估、治理工程之需求上常以設施現況進行評估，因此，除氣候變遷模擬採用現況年（1980~1999 年）及未來年（2020 年~2039 年)氣候變遷情境設定外,脆弱度指標中之產值、交通量則採用現況年 107 年，未來年使用 125 年，設施資訊以設施管理機關與調查取得之最新資料為依據。

其中未來年（2020~2039 年）氣候推估情境背景採用未來能源供需平衡之 AR4-A1B 溫室氣體排放情境，並參考 NCDR 執行之 TCCIP 計畫現況年（1980~1999 年）與未來年（2020 年~2039 年）統計降雨尺度，搭配不同頻率分

析氣候變遷重現年期。

綜整鐵公路風險地圖 6 種氣候變遷風險評估分析情境，包含：

情境 1：現況 50 年降雨頻率重現年

情境 2：現況 100 年降雨頻率重現年

情境 3：現況 200 年降雨頻率重現年

情境 4：未來 50 年降雨頻率重現年

情境 5：未來 100 年降雨頻率之重現年

情境 6：未來 200 年降雨頻率之重現年。

2. 風險評估指標設定

鐵公路風險地圖的風險評估之考量不同設施資料細緻度與使用習慣，國道、快速公路、臺鐵以 100 公尺；高鐵以 250 公尺；省道以 500 公尺做為評估分析單元。

評估指標分為危害與脆弱度 2 個面向，其中危害面向依淹水、坡災個別評估；脆弱度面向則分為（1）潛在影響程度與（2）設施調適能力，潛在影響程度細分為（1）產值、（2）交通量；設施調適能力則細分為（1）設施安全性、（2）預警應變作為與（3）替代道路數。說明如下：

■ 危害指標

淹水危害與坡災危害採用相同降雨情境，分別模擬 50、100、200、500 年重現年，各別設定為現況和未來各 50、100、200 年重現年之 3 種情境。淹水危害以水利署製作之水災潛勢，將其模擬結果加上鐵公路設施性質與型式進行分級，如表 4-4 所示；坡災則以崩塌機率加上鐵公路設施型式進行分級，如表 4-5 所示。此危害僅能反應強降雨所導致水災、坡災危害，其中坡災為降雨所導致上邊坡發生淺層滑動、深層滑動、落石、岩屑崩落等情形之潛勢機率模擬，無法反應風化、地震等其他因素災害。

表 4-4 淹水危害分級

淹水危害	水災潛勢（公尺）				
	低 (0.3 以下)	中低(0.3~1)	中(1~2)	中高(2~3)	高(超過 3)
高架/河川橋/隧道/路堤	低	低	低	低	低
平面	低	中	高	高	高
地下	中低	中高	高	高	高

表 4-5 坡災危害分級

坡災危害	**坡災潛勢**				
	低	中低	中	中高	高
隧道	低	低	低	低	低
其他	低	中低	中	中高	高

■ 脆弱度指標

潛在影響程度包含產值及交通量。

① 產值

產值資料來自行政院主計總處「105 年工商及服務業普查」之鄉鎮市區統計資料-生產總額，考量經濟產業之預測不易掌握，本鐵公路風險地圖以運研所「第 5 期整體運輸規劃」預測之 125 年及業人口成長量，推算產值變化，做為未來年產值指標分析基礎。產值分級如表 4-6 所示，而介於鄉鎮界之路段則採較高標準認定，取其產值較高者。

表 4-6 產值分級

潛在影響等級	產值範圍（億元）
高(5)	>=1,500
中高(4)	300~<1,500
中(3)	55~<300
中低(2)	10~<55
低(1)	0~<10

② 交通量

基於公路與軌道建設之營運特性差異，指標設定公路建設為路段日交通量（PCU，小客車當量），軌道建設為站間日乘客數（人次）。現況年之「日交通量或每日乘客數」資料係採 107 年實際觀測資料，資料來自公路局、高公局、臺鐵局、鐵道局（引用自運研所運輸規劃支援系統）；

未來年是以運研所「第 5 期整體運輸規劃」預測之 125 年屏柵線交通量分析。

評估指標等級分為 5 級，鐵公路建設受到損壞或失能影響之交通量、乘客數與該建設之日交通量、乘客數相關，如交通量、乘客數較高，其敏感度等級亦越高，如表 4-7 所示。

表 4-7 交通量分級

潛在影響等級	高鐵站間日搭乘人數(人次)	臺鐵站間日搭乘人數(人次)	國道日交通量(PCU)	快速公路日交通量(PCU)	省道日交通量(PCU)
高(5)	10 萬以上	5 萬以上	20 萬以上	7 萬以上	3 萬以上
中高(4)	8 萬-10 萬	2.5 萬-5 萬	14 萬-20 萬	4 萬-7 萬	1.5 萬-3 萬
中(3)	6 萬-8 萬	1.5 萬-2.5 萬	8 萬-14 萬	2 萬-4 萬	8 千-1.5 萬
中低(2)	4 萬-6 萬	6 千-1.5 萬	4 萬-8 萬	8 千-2 萬	2 千-8 千
低(1)	4 萬以下	6 千以下	4 萬以下	8 千以下	2 千以下

設施調適能力包含設施安全性、預警應變作為及替代道路數。

① 設施安全性

設施安全性分為淹水及坡災 2 種類型，淹水以設施設計年期做為分級依據，依據設施排水規範做為分級界定。公路排水設計規範於 76 年頒布，迄今於 90 和 98 年歷經 2 次修訂，故以 76、90 和 98 年做為分級界定，並以 110 年計畫之調適未來年做為設施安全提升之保留值；鐵路依據鐵路修建養護規則首頒與修訂年期 49 年、70 年、85 年做為分級界定，同公路以 110 年計畫之調適未來年做為設施安全提升之保留值。其中，鐵路修建養護規則調整次數較多，排除輕微調整者後，僅選擇 70 年和 95 年 2 年，因為此 2 年之規範調整有大幅條文擴增，且多條條文與排水有關，淹水設施安全分級如表 4-8 所示。

表 4-8 淹水-設施安全分級

調適能力等級	公路年期	鐵路年期
低(1)	76 年前	49 年前
中低(2)	77~90 年	50~70 年
中(3)	91~98 年	71~95 年
中高(4)	99~109 年	96~109 年
高(5)	110 年後	110 年後

坡災則採納各設施單位之邊坡分級為設施安全指標，以臺鐵局主線邊坡分級資料納入坡災設施安全指標。依據邊坡分級 A 至 D 及無邊坡，分別給予調適能力等級 1 至 5 級分，坡災設施安全分級如表 4-9 所示。

表 4-9 坡災-設施安全分級

調適能力等級	邊坡分級[1]
低(1)	A
中低(2)	B
中(3)	C
中高(4)	D
高(5)	無邊坡、無分級

② 預警應變作為

在預警應變作為指標中，透過監測系統所在區位給予分級，但因監測系統並非所有路段皆有設置，而是視路段需求裝設，故採取正向認定方式，設定基本等級為 3 分，並依監測設備類別分為淹水與坡災。

若僅有監測而無對應作為，並不能達到預警應變作用，故給予等級中分級；重點監控路段給予等級中高分級；若能透過交通資訊顯示板（CMS）等系統，讓民眾可以及早自行避災或選擇其他路線，也給予等級中高分級；全線有完整監控系統者，給予等級高分級，分級如表 4-10 所示。

表 4-10 預警應變作為分級

調適能力等級	預警應變作為
中(3)	一般養護巡查/未設定行動值
中高(4)	重點監控/主動通報系統/有設定行動值
高(5)	全線監控

③ 替代道路數

應變能力之替代運輸指標係以鐵公路系統災時/後阻斷時，服務範圍內是否有替代道路，做為應變能力的評估標準。分析上考量各運輸系統服務特性，以功能相近之道路做為替代道路之選擇，如國、快道之替代道路為功能相近之國道、快速公路、省道；省道之替代道路為國道、省

[1] 邊坡分級分為 4 級，A 級坡：邊坡有明顯不穩定徵兆，需密切監測及巡查，並進行穩定狀態評估以及採取必要之緊急處理、修復或補強措施。B 級坡：邊坡有不穩定徵兆，需加強監測及巡查，並進行穩定狀態評估及必要修復或補強措施。C 級坡：邊坡無明顯不穩定徵兆，僅需定期巡查或視需要進行監測或修復措施。D 級坡：邊坡處於穩定狀況，僅需定期巡查。

道、縣道、鄉道、偏遠地區之產業道路；高鐵之替代道路為國道、快速公路及省道；臺鐵系統之替代道路包含國道、省道、縣道、鄉道、市區道路、產業道路等，替代道路數之分析設定彙整如表 4-11。

表 4-11 鐵公路替代道路數分析設定

系統	服務範圍設定原則	分析的服務半徑
國道	交流道的平均間距	5 公里
省道	沿線鄉鎮之平均長寬距離	2.5 公里
省道台 9 線	服務區域	宜花地區
高鐵	營運里程除以車站數	17.5 公里
臺鐵	營運里程除以車站數	2.5 公里

此項指標評估等級分為 5 級，當重大鐵公路系統替代道路數越多時，即代表當鐵公路系統受到氣候變遷影響而導致損壞或失能時，應變能力越高，如表 4-12 所示。

表 4-12 替代道路數等級界定

脆弱度等級	高鐵	臺鐵	國道及快速公路	省道
高(5)	≦3	≦2	≦1	≦1
中高(4)	3<X≦6	2<X≦4	1<X≦3	1<X≦3
中(3)	6<X≦8	4<X≦7	3<X≦5	3<X≦5
中低(2)	8<X≦11	7<X≦10	5<X≦8	5<X≦8
低(1)	>11	>10	>8	>8

3. 風險評估流程及風險矩陣

■ 風險評估流程

包括計算潛在影響程度、設施調適能力，再依此計算設施脆弱度，而後將危害與脆弱度透過風險矩陣，各別找出坡災與淹水風險，風險評估方法計算公式如下，風險矩陣與風險評估流程如圖 4.8 所示。

淹水/坡災風險 = f (淹水/坡災危害, 脆弱度) (1)

淹水/坡災危害 = f (水災/坡災潛勢,淹水/坡災設施型式) (2)

淹水/坡災脆弱度= Round (潛在影響程度×W6+(6-淹水/坡災設施調適能力)×W7) (3)

其中

潛在影響程度 = Round (產值×W1 + 交通量×W2) (4)

淹水/坡災設施調適能力 ＝Round (淹水/坡災設施安全性xW3+淹水/坡災預警應變作為xW4+替代道路數xW5) (5)

W1:產值在潛在影響程度權重，預設 0.5

W2:交通量在潛在影響程度權重，預設 0.5

W3:設施安全性在設施調適能力權重，預設 0.33

W4:預警應變作為在設施調適能權重，預設 0.33

W5:替代道路數在設施調適能力權重，預設 0.33

W6:潛在影響程度在脆弱度權重，預設 0.5

W7:設施調適能力在脆弱度權重，預設 0.5

■ 風險矩陣

包括計算潛在影響程度、設施調適能力，再依此計算設施脆弱度，而後將危害與脆弱度透過風險矩陣，各別找出坡災與淹水風險，風險評估方法計算公式如下，風險矩陣與風險評估流程如圖 4.8 所示。

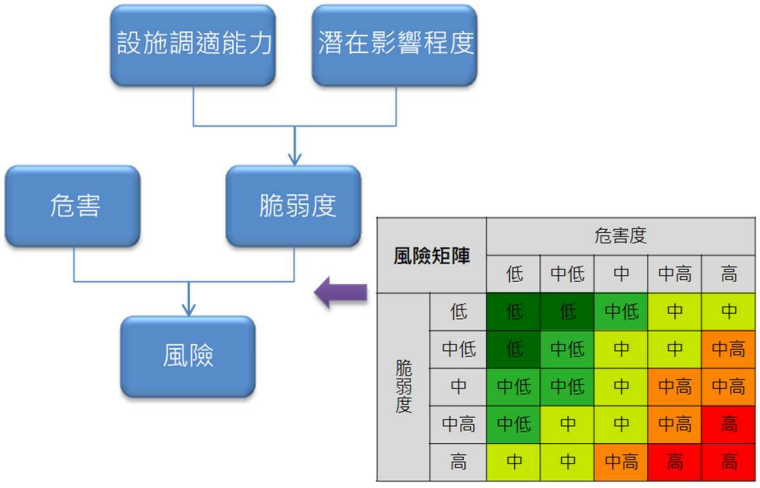


圖 4.8 風險評估流程與風險矩陣

資料來源：交通部運輸研究所，運輸系統調適策略研究，民國 109 年。

4.3 公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項

氣候變遷的調適選項（options）涵蓋面由上而下可包含：調適策略（strategies）、調適方法（approaches）、解決方案（solutions）及調適措施（measures）等。面對全球氣候變遷下的高度不確定性因素，公路系統於規劃階段有必要衡酌各專案之計畫目標以及資源限制條件，妥予採取多樣化的調適選項類型以及多元化組合方式，以因應未來所面臨的複合性氣候風險。

以下摘述美國聯邦公路管理局（FHWA）因應氣候變遷調適所出版的報

告內容提及之有關調適選項的重要內容，同時蒐整 IPCC AR6 綜整之國際間應用於運輸系統之調適選項類別，並依據國內公路系統面臨之五大氣候壓力因素彙整可選用的調適措施，供國內公路規劃專案研擬調適選項之參考。

1. FHWA－以綜合方法提升專案開發的氣候韌性（2017 年）

該報告出版的目的在於協助運輸工程設計專案納入氣候變遷調適作為，主要綜整 FHWA 從近期一系列氣候韌性研究和補助各州的先導型計畫中吸取的經驗，期協助交通運輸機構因應氣候變遷和極端天氣事件。報告彙編了數個工程領域的調適策略與措施並將調適選項綜理歸納為以下 5 種類型：

(1) 管理和維護：維護現有設施以達成最佳性能，並透過進一步的準備來管理極端事件的因應。

(2) 增加備援力：確保設施機關提供的運輸服務可由其他替代方案提供。

(3) 保護：提供對抗氣候壓力的保護性物理屏障以減少或消除損害。

(4) 調整：修改或重新設計設施，以在氣候變遷的環境中有更佳的性能。

(5) 搬遷：將設施搬離氣候壓力來源，減少或消除暴露於氣候壓力。

以上任何一個類型調適選項都可包含調適設計或調適管理元素，該報告建議採取綜合方法，依據需求逐步實踐氣候變遷調適作為。

2. FHWA－以自然為本提升海岸公路韌性的解決方案（2019 年）

近年來許多國家沿海運輸系統面臨海平面上升、海岸侵蝕、暴潮等災害衝擊，並意識到傳統工程對生態的破壞及工程應用上的限制，因而逐步採用以自然為本的解決方案（Nature-based Solutions, NbS），透過自然保育方式，或自然結合工程的手法，減緩侵蝕、洪水災害、波浪災害，來保護沿海公路系統。

以自然為本的解決方案（NbS）運用於沿海公路可做為氣候衝擊事件的第一線防禦，用結構物理和生物物理程序，與海岸生態組成的一個以自然為本的調適解決方案可減緩沿海公路受洪水、波浪和海水的侵蝕。例如，潮汐沼澤、紅樹林和海岸林可減少沿海洪災且可有效的消散海浪的波浪能量（wave energy），減緩波浪與洪水對公路設施的破壞與侵蝕；礁石能消散波浪能量，並干擾波浪力（wave load）；海灘和沙丘能消散波浪能量並減少沿海洪水和極端事件造成的破壞。NbS 常見的手法可分為六類：

(1) 植被：提供各種生態效益，可改善水質並降低海浪侵蝕風險，同時為各種物種提供棲息地。

(2) 防波堤：提供各種生態效益，可改善水質並降低海浪侵蝕風險，同時為各種物種提供棲息地，近海防波堤能減弱海浪波能量。

(3) 海欄：選擇適合該地生存條件的植物及沉積物，在適當的高度建立一個逐漸傾斜的平台提供生物棲息地，並在邊緣提供護趾工保護，通常為岩石護岸的形式。

(4) 袋狀海灘：結合養灘和岬狀堤防的工程方法能使海岸更穩定。

(5) 養灘：能改善棲息地，增加休閒和經濟價值，並降低海岸風險，有助於維持海岸線位置減緩退縮。

(6) 沙丘：在颱風期間能降低海浪和洪水風險，特別是在與現有海灘或養灘工程結合使用時，此外，沙丘還能提供乾燥的海灘生物棲息地。

該報告進一步指出 NbS 應用於公路具有以下 4 項特性：

(1) 透過自然生態系統增強工程面對自然衝擊的韌性。

(2) 等於或低於工程工法的成本。

(3) 運用自然調適的方法達成與工程工法一樣的目的。

(4) 相比於工程工法提供了更多自然美學上的效益。

而海岸公路是否適合採用 NbS 尚需考量以下 6 項條件：

(1) 對於工程韌性與危害降低的需求。

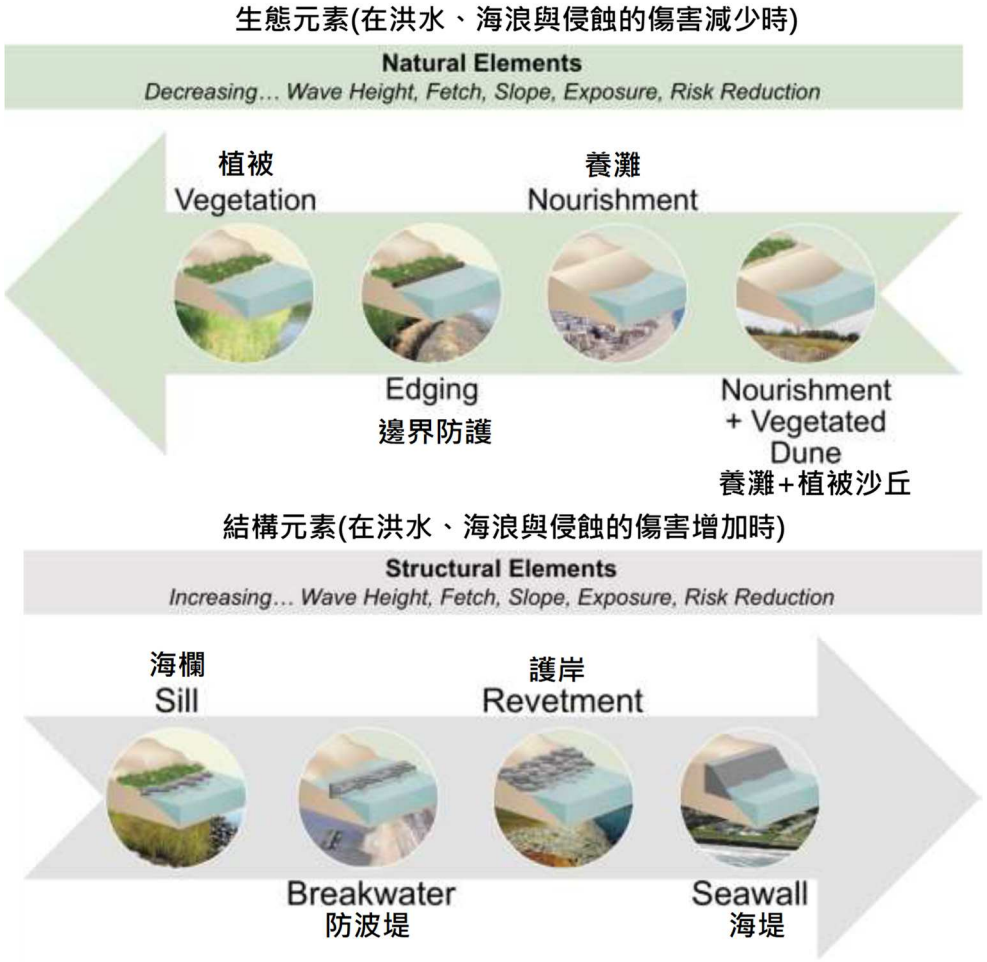
(2) 該地生態與地質的條件符合度。

(3) 面對大浪的暴露度。

(4) 工程計畫目標與成本效益。

(5) 需要的工程可靠性。

(6) 在地的政策與法規。



資料來源：Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, Federal Highway Administration, 2019.

圖 4.9　以自然為本生態元素與結構元素之風險程度適用性

3. IPCC AR6 綜整之運輸系統調適選項（2022 年）

2022 年 IPCC 發布之《AR6：衝擊、調適與脆弱度》指出為因應全球氣候變遷加劇，世界各國目前均積極投入並發展出多元的調適選項。該報告強調氣候變遷加劇複合與連動性風險，多樣化的調適選項內容及多元化組合方式極為適合因應現況所面臨的複合性氣候風險，個別公路專案選用多種調適選項分別應用於短中長期，為因應未來高度不確定性之通案作法。

目前運輸系統有多樣化調適選項可供選擇，包括升級基礎設施、調整或遷移關鍵公路資產等，而國外實務案例如大洋洲的運輸系統調適包括改道、海岸保護、改善排水系統和升級基礎設施，證據顯示大多數調適選項在實務應用上皆能提供了良好的效益成本比。

依據 IPCC AR6 綜整的調適選項類別，以下摘錄目前國際上應用於運輸系統之調適選項，主要可分為四大類，包含：

(1) 硬保護（hard protection）：係指以硬體設施及結構來做為保護，尤其是在沿海地區與海島國家經常採用硬保護來保護海岸。

(2) 調整與升級（accommodation and advance as strategies）：藉由調整或升級（重新設計）公路關鍵基礎設施，以減少沿海洪氾對公路基礎設施的影響。

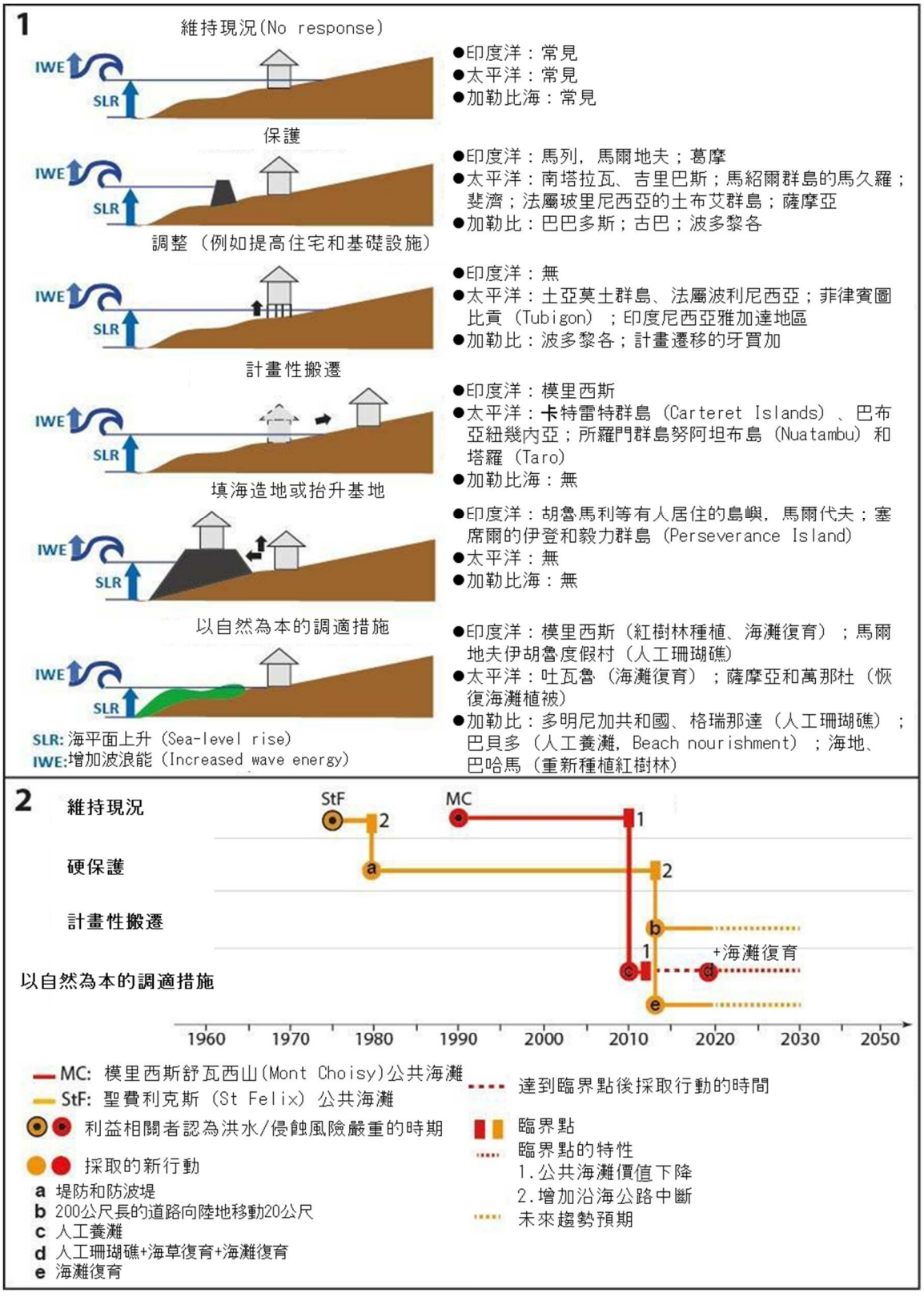
(3) 搬遷（migration）：搬遷在實務上作法包括規劃搬遷及重新安置，由於需投入昂貴的經濟和社會成本，被視為不得已而為之的最終選項之一。

(4) 基於生態系統的調適方法及以自然為本的調適方法（Ecosystem-based Adaptation approaches, EbA & Nature-based Solutions, NbS）：在海島國家已有充分的證據顯示實施以自然為本的調適方法在因應氣候風險是有效的，因此 COP26 更加關注各國正採取 NbS，並積極投資 NbS 做為重要的氣候行動（actions）之一。

4. 公路系統調適選項列舉說明

由於國內公路系統規劃階段目前尚無系統性考量氣候變遷調適，故進一步綜理國內外文獻，依據公路系統規劃階段不同的分析尺度，彙整可供參考的調適選項。考量接軌國際並兼顧國情，爰進一步將各調適選項依據國內風險管理及危機處理作業手冊之風險處理、美國 FHWA 及 IPCC AR6 的分類加以呈現。

針對強降雨、高溫、強風、暴潮/風浪及海平面上升五大氣候壓力彙整國內外案例，並就公路系統不同尺度分別說明可能造成的衝擊及對應的調適選項供參考，同時依據 109 年行政院所屬各機關風險管理及危機處理作業手冊提及之風險處理方法類型、美國 FHWA 及 IPCC AR6 的調適類型加以分類並相互對照，以利理解及應用（參見表 4-13）。



資料來源：IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022.

圖 4.10　海島國家應用調適選項以降低沿海地區氣候風險

表 4-13　公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表

氣候壓力及危害因素		公路系統尺度	對公路系統的衝擊	調適選項(包含策略及措施等)	類別1	類別2	類別3
強降雨	地表逕流/河川溢淹	路段	排水不良造成道路淹水	• 提高排水容量	抑減	調整	調整與升級
			道路遭漂流物撞擊	• 將道路或橋梁抬升高出預估的洪水高程	抑減	搬遷	調整與升級
				• 放置石質盔甲、石籠網等，使道路堤防更加堅固	抑減	調整	硬保護
		路廊	河川溢淹造成路廊淹水	• 整合協調周邊排水系統	抑減	調整	調整與升級
		路網	聯外道路淹水造成運輸中斷	• 整合協調周邊排水系統	抑減	調整	調整與升級
			替代道路數不足，造成路網連通性受阻	• 對於重複性嚴重受損設施，研擬其他替代方案(如改道)	規避	搬遷	搬遷
	暴雨沖刷/土石流	路段	道路路基掏空	• 加強路基保護工	抑減	保護	硬保護
			橋梁基礎受沖刷	• 加強橋基保護工	抑減	保護	硬保護
			道路橫斷面受沖刷	• 調整道路或橋梁橫斷面	抑減	調整	調整與升級
		路廊	道路邊坡坍滑	• 將道路移至穩定的邊坡利用邊坡穩定工法，栽植原生植物恢復邊坡植被等 • 建造一座橋跨越滑坡或建造一條隧道	規避抑減	保護	搬遷、調整與升級
高溫	鋪面材料高溫軟化	路段	爆胎機率上升造成車禍	• 調整鋪面結構設計，修改面層和基底層的厚度和材料	抑減	調整	調整與升級
			道路標線變形難以辨認	• 調整混合設計，根據未來溫度預測，調整瀝青膠泥等級	抑減	調整	調整與升級
	結構鋼材熱膨脹	路段	橋梁結構受損有安全疑慮	• 先評估補強或修復受損，若仍有安全疑慮建議建造一座新的橋梁取代之 • 預留構材與構材間的空間	移轉抑減	搬遷調整	硬保護、調整與升級

表 4-13　公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表（續）

氣候壓力及危害因素		公路系統尺度	對公路系統的衝擊	調適選項 (包含策略及措施等)	類別 1	類別 2	類別 3
	邊坡野火	路段	邊坡野火造成鋼橋燒熔	• 鋼構噴防火被覆材	抑減	保護	調整與升級
		路廊	野火濃煙影響視線	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護	-
			邊坡野火造成邊坡崩落	• 利用邊坡穩定工法	抑減	保護	硬保護
		路網	設備故障影響交通安全	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護	-
強風	極端風速(強風和強陣風)	路段	影響索力特殊橋梁結構	• 修改橋梁設計規格	抑減	調整	調整與升級
		路廊	路樹、電線及號誌倒塌阻斷交通	• 安裝防護結構，建造擋土牆或構造較堅固的棚屋式結構 • 非易淹區實施電纜地下化	抑減	保護	硬保護
		路網	替代道路數不足，造成路網連通性受阻	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護 調整	調整與升級
暴潮/風浪	路堤侵蝕/橋基挖蝕	路段	強浪掏刷路基 暴潮/風浪加劇橋梁基礎沖刷	• 改進護岸調整橋的橫截面	抑減	調整	調整與升級
			強浪影響橋梁結構	• 增加沿海橋橋面板標高 • 加強沿海橋梁的連接	抑減	調整	調整與升級
	強浪攜帶石塊上岸	路廊	強浪攜帶石塊上岸阻斷道路交通	• 維護沿海道路護岸/防波堤	抑減	保護	硬保護
	強浪侵襲造成淹溢	路廊	低窪地區不易退水，交通中斷時間拉長	• 分階段實施緩解措施	抑減	管理和維護 調整	調整與升級
		路網	替代道路數不足，路網連通性受阻	• 在更高的海拔高度興建替代道路	移轉	增加備援力	調整與升級
			交通場站聯外道路淹水，運輸中斷	• 在極端氣候事件中重新規劃方案	抑減	管理和維護	調整與升級

表 4-13　公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表（續）

氣候壓力及危害因素		公路系統尺度	對公路系統的衝擊	調適選項 (包含策略及措施等)	類別 1	類別 2	類別 3
海平面上升	海岸退縮	路段	長期侵蝕造成海岸退縮，海浪掏刷路基日益嚴重 海水鹽分加速道路毀損 海風的鹽分造成鋼梁鏽蝕	• 維護沿海道路護岸/防波堤 • 建造有生命的海岸線，定期進行海岸養灘或沙丘建設	抑減	保護	硬保護、以自然為本的調適措施
	強浪侵襲造成淹溢	路網	替代道路數不足，路網連通性受阻	• 在更高海拔高度上建立替代道路	移轉	增加備援力	調整與升級
			交通場站聯外道路淹水，運輸中斷	• 在極端氣候事件中重新規劃方案	抑減	管理和維護	調整與升級
備註	類別 1：依據 109 年行政院所屬各機關風險管理及危機處理作業手冊，風險處理方法包含：接受、規避、抑減及轉移。 類別 2：依據美國聯邦公路管理局（FHWA）提出調適選項類別包含:調整、保護、增加備援力、搬遷、管理和維護。 類別 3：依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會（IPCC）第六次評估報告綜整應用於運輸系統之調適選項類別包含:硬保護、調整與升級、搬遷及以自然為本的調適措施。						

資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.、CEDR Transnational Road Research Programme, ROADAPT Roads for today, adapted for tomorrow Guidelines, 2015.、交通部運輸研究所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討(1/2)，111 年 3 月。

5. 公路系統調適選項之應用建議

氣候變遷調適需從整體面及系統面切入，通常不會只透過單一調適選項就可以解決問題，需要因地制宜搭配多個調適選項。在實務應用上應就主管機關之資源與預算等進行綜合分析評估，以輔助選擇維持原方案或研擬調適選項與顯示其重要性。最終可由效益、財務及技術可行性等面向，分析調適選項實行之優先次序。

研擬調適選項以提升公路韌性

【美國麻薩諸塞州波士頓都會規劃組織（Metropolitan planning organization, MPO）針對里維爾市（Revere）1A 號公路其中一段進行調適試點研究】

美國麻薩諸塞州波士頓都會規劃組織（Boston Region Metropolitan planning organization, Boston Region MPO）針對里維爾市（Revere）1A 號公路的其中一段進行調適試點研究(圖 4.11)，以研究成果說明規劃階段調適選項的研擬及選擇決策。

1. 選擇 1A 號沿海公路為示範點之考量

美國波士頓都會規劃組織（Boston Region MPO）長期關注氣候變遷對運輸系統的影響。隨著氣候變遷的影響加劇並變得更加明顯，將韌性納入交通基礎設施已成為麻薩諸塞州日益重要的優先事項。

波士頓地區具備韌性研究所需的基礎資料，包含波士頓交通局已完成交通資產的脆弱度評估，並製定了以行動為導向的韌性及減災計畫，以保護脆弱資產。該研究透過比對市政脆弱度防災報告和減災計畫中較易受破壞的路廊，優先評選出 12 條路廊。

12 條路廊中因考量沿海洪水風險模型（The Massachusetts Coast Flood Risk Model, MC-FRM）已完成，但尚未完成內陸風險模型，故從 6 條沿海路廊挑選，其中 1A 號公路位於索格斯河上的橋梁路段正在進行維修/重建的評估作業，故選擇作為研究示範點。

2. 1A 號沿海公路所在環境區位與氣候風險(圖 4.12)

1A 號沿海公路對區域交通系統十分重要，屬主幹道位階，為國家公路系統（National Highway System, NHS）的一部分，是通往住宅區、教育區、娛樂區、商業區和工業區的疏散路線。北岸的居民前往波士頓、洛根機場（Logan Airport）及在里維爾的麻薩諸塞灣交通局站點（MBTA's Wonderland Station）乘坐藍線皆須通過此道路。

另外，1A 號公路位於天然低窪地帶，且緊鄰沿海及河口洪水通道，極易受到漲潮、沿海風暴潮和暴雨造成的洪水，以及海平面上升造成的洪水的影響甚鉅，因此 1A 號沿海公路面臨的氣候風險是亟待處理的課題。

Marina 以南的1A號公路

位於Mills Avenue 的
1A號公路

位於Marina的1A號公路
(道路東側)

1A號公路位於
Rick's Auto Collision之路段

1A號公路位於
MBTA Wonderland Station之路段

圖 4.11 MPO 研究路廊所在區位

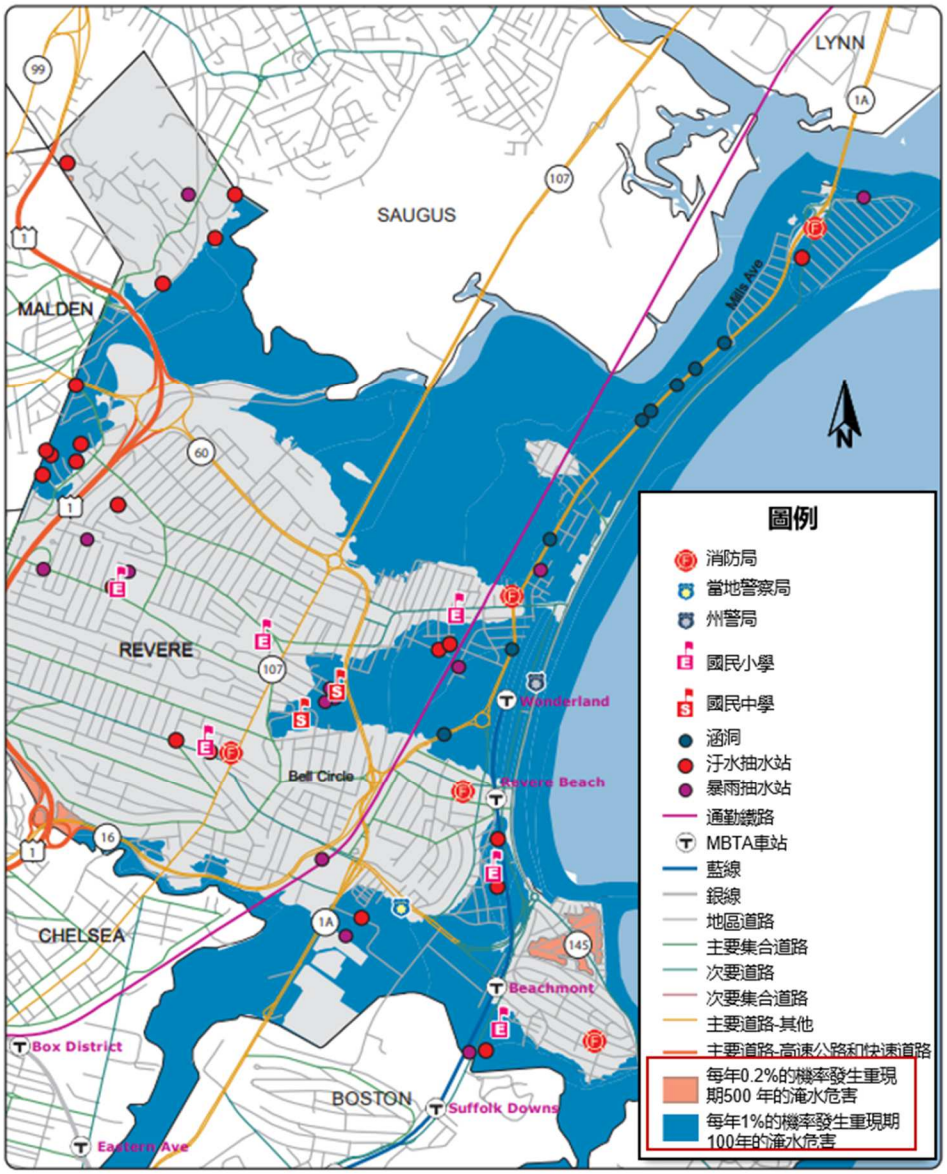


圖 4.12 1A 號沿海公路所在環境區位與氣候風險

3. 針對 1A 號沿海公路示範點研提 7 項調適選項

由於公路發生破壞後重建或維修成本極高，且將對該地區的經濟和社會造成影響，預期未來氣候危害將持續惡化，因此針對此議題研提 7 種調適選項，包含：(1) 無作為並撤出管理、(2) 以自然為本的解決方案、(3) 索格斯河閘門工程、(4) 防汛防洪保護措施（調整涵洞）、(5) 防汛防洪保護措施（升級暴雨水泵站）、(6) 防汛防洪保護措施（暴雨管制），以及 (7) 防汛防洪保護措施（改進資產）（參見表 1）。

表 4-14 MPO 大都會區規劃組織研究之調適選項說明表

編號	選項名稱	選項說明	適用地點	策略影響	策略成本
1	無作為並撤出管理	關注不採取作為導致的廣泛後果，藉以引起人們的注意進而引發利益相關者討論	僅適用 1A 號公路南段(暫無迫切洪水問題地區)	對弱勢群體造成不利的社會影響	對國家造成重大經濟損失
2	以自然為本的解決方案	以自然為基礎，和環境融為一體，並可低成本有效解決沿海公路韌性不足之方法	鹹水與周圍沼澤的潮汐交換不良導致蘆葦過度生長，超出鹹水沼澤地區，造成洪水儲量減少之地區	-	成本因暴露於波浪能的程度有所不同
3	索格斯河閘門工程	採取區域取向研究來應對氣候變遷和海平面上升，包括增強和重建自然潮位、河口上游以及濕地	此策略是索格斯河地區防洪閘計畫之焦點，為五個社區提供海岸保護	閘門和海岸線的改善可以保護住房、企業、交通基礎設施和環境資源	總成本為 2.31 億美元
4	防汛防洪保護措施 -調整涵洞	對涵洞和防潮水閘的水力和水文進行排水評估，以幫助潮間帶沼澤間水流之交換，並保護 1A 號公路免受洪水和沖刷的影響	-	建設過大的涵洞會使過量水流通過上游，導致涵洞下游發生洪水氾濫	主幹道上的涵洞花費介於 50,000 美元至 100,000 美元之間，且實施時間通常需要二到五年
5	防汛防洪保護措施 -升級暴雨抽水站	將排水口之預計水位位置提高，於排水管安裝止回閥，並使用抽水輸送排水	對於 1A 號公路的北部和南部路段，皆是不錯的短期、中期和長期策略投資	可以保護社區和資產，讓洪水更快地從一個地區排出	高成本的中期計畫，實施時間為 5 至 10 年
6	防汛防洪保護措施 -暴雨管制	透過滯洪池、溼地、砂濾器等暴雨儲存地，減緩暴雨對於路面之破壞	適合 1A 號公路南段的低窪地區	-	因類型與規模而相異，其中高速公路滯洪池系統的成本從 100,000 美元到 200,000 美元不等
7	防汛防洪保護措施 -改進資產	抬高路面以防道路積水	1A 號公路的北段（在 2030 年頻繁發生洪水）	附近居民房產變為較低窪之區域，容易受到從道路溢出之水流影響。車道較陡峭可能導致車輛無法駛入	高成本且長期之計畫，實施時間通常為 10 年或更長時間

■ 以自然為本的解決方案（NbS）

經由人為設計與建造，以自然為基礎，和環境融為一體，並可低成本有效解決沿海公路韌性不足之方法。如果定期進行妥善維護，此種以自然為本的解決方案甚至可以作為中長期改善之策略。

例如：鹹水與周圍沼澤的潮汐交換不良導致蘆葦過度生長，超出鹹水沼澤地區，造成洪水儲量減少，沉積物增加，並加劇洪水。因此，保護被蘆葦侵占的沼澤地區可以增加蓄洪量並吸收部分波浪，透過修復鹹水沼澤以最小化洪水和磨邊（edging）之影響，使用椰殼卷（coir rolls）、護堤（berms）和海欄（sills）防止侵蝕(圖 4.13)，此外，達成預防和控制洪水之目的。

以自然為本的解決方案，成本因暴露於波浪能的程度有所不同。暴露於低波能量的海岸線成本範圍為每直線英尺（linear feet）100 至 200 美元，暴露於中等能量的海岸線的成本為每直線英尺 200 至 500 美元，而暴露於高能量波浪的海岸線，因為有可能需要施作護岸、防波堤等結構措施，每直線英尺之成本為 600 至 1,200 美元。

<table>
<tr><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>沼澤種植纖維原木，植物建立根系後可穩定海岸線</td><td>沼澤海欄可以保護鹽鹼灘免受侵蝕，這條海岸線結合珊瑚礁分解波浪能及新的沼澤植被以穩定並過濾沉積物</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="2">使用植被與較硬的海岸線結構（例如牡蠣礁或岩床）相結合的生活海岸線，可以增加穩定性並減少侵蝕，同時提供棲息地價值並增強沿海韌性</td></tr>
</table>

圖 4.13 以自然為本，控制洪水和侵蝕的解決方案

■ 索格斯河閘門工程（The Saugus River Floodgate Strategy）

此策略是索格斯河地區防洪閘計畫之焦點，採取區域取向研究（regional approach）來應對氣候變遷和海平面上升，為埃弗雷特、林恩、馬爾登、里維爾和索格斯 5 個社區提供海岸保護。該計畫還可以恢復拉姆尼沼澤（Rumney Marsh）保護區，包括增強和重建自然潮位、河口上游以及濕地。

閘門和海岸線的改善可以保護住房、企業、交通基礎設施和環境資源，因此，MPO 工作人員建議協調 1A 號公路的韌性措施、橋梁維修愛德華茲將軍吊橋的重建計畫以及區域索格斯河防洪閘計畫，以確保整合和共同利益。此計畫之總成本為 2.31 億美元(按 2020 年美元計算)，其中，包括購買用於蓄洪的 1,650 英畝河口和恢復拉姆尼沼澤的額外成本。

4. 國內可借鏡之處

美國波士頓都會規劃組織（Boston Region MPO）以專案探討里維爾市 1A 號公路如何強化韌性，該路段被指認為重要且具高度氣候風險之路廊。該路段因應氣候變遷所盤點出的風險缺口，以「軟性」、「硬性」或綜合方法等規劃如何改善，並配合國際調適發展趨勢積極融入「氣候韌性」、「永續環境」之意涵，可作為國內強化公路系統調適能力方法之參考。

國外調適研究及實務案例報告所採用的調適選項頗為多元，該專案提出 7 種調適選項，包含無作為並撤出管理、以自然為本的解決方案、索格斯河閘門工程及防汛防洪保護措施等，並說明重點內容、適用地點、影響及成本等，提供一個完整的公路調適選項研擬過程供參考。

面對全球氣候變遷之下的高度不確定性因素，多樣化的調適選項類型及多元化組合方式極為適合因應現況所面臨的複合性氣候風險。

資料來源：Metropolitan Planning Organization, Exploring Resilience in MPO-Funded Corridor and Intersection Studies, 2021.

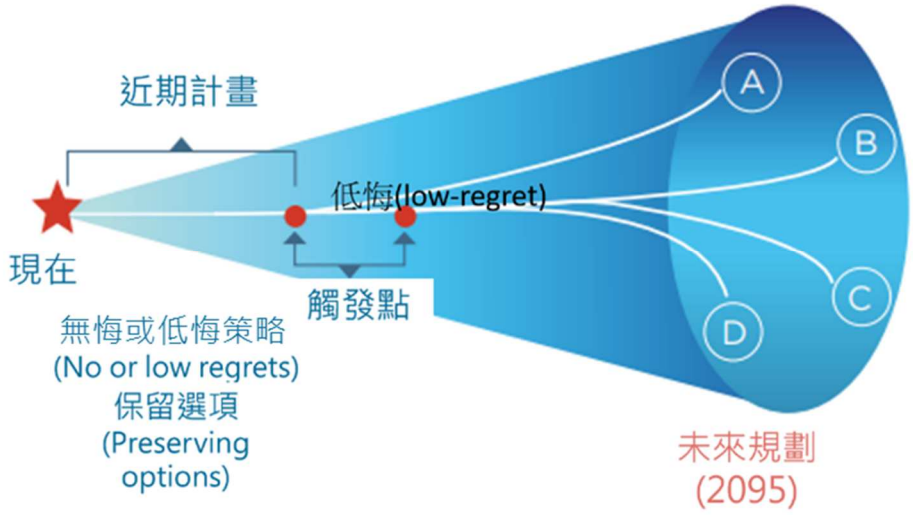
4.4 面對高度不確定性之決策方法

選擇調適選項時經常會面臨未來具有高度不確定性的課題，不確定性之因素包含：未來氣候趨勢變化推估、人口及土地利用之變化等社會狀況、調適相關政策推動落實情形、最新調適技術發展及後續資金投入能力等，導致在決策過程遇到瓶頸。

面對氣候變遷與社會經濟發展之高度不確定性，應衡量相關領域之間的相互關係，並納入系統性的調適思維，考量未來各種可能的情境需求，據以研擬及排序調適選項。因此，在氣候變遷調適決策過程中，宜採「不確定性下的決策概念」（參見圖 4.14）思考如何研擬短中長期計畫。

考量未來有多種可能性的情況下的決策過程通常具有以下特性：

- 近期計畫以「無悔或低悔策略（no or low regrets）」凝聚共識：設定將於近期採取之調適行動，根據現況實際情形決定於未來幾個月或幾年內進行者，多以「無悔或低悔策略」以凝聚共識。「無悔或低悔策略」係指在面對高度不確定的情境時，不做「某事必然發生」的因應，卻為「即便不發生，也會覺得推動是有意義的」之處置，以確保憾事（後悔）發生的極小化。
- 持續監測觸發點（trigger points）並擬定因應行動：持續監測近期計畫的關鍵趨勢（key trends），當面臨特定趨勢（specific trends）時可能採取新的緊急行動，而這些特定趨勢通常被稱為觸發點（trigger points）、臨界點（tipping points）或臨界值（thresholders）。
- 採取不確定性的概念規劃未來：因應未來不確定性，未來的規劃將有多種可能。在高度不確定之下決策方法包含情境規劃（scenario planning）、調適路徑（adaptive pathways）及穩健決策（robust decision making）。



資料來源：A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, Inter-American Development Bank, 2021.02.

圖 4.14　面對未來不確定性之決策概念

以下介紹「在高度不確定性之下的決策方法」(Decision Making Under Deep Uncertainty, DMDU)，有助於在不確定性高之風險管理背景下制定決策。DMDU 的 3 種方法包含情境規劃、調適路徑及穩健決策，依序說明如下：

1. 方法一：情境規劃（Scenario planning）

情境規劃注重於應對未來各種狀況的規劃方法，透過蒐集與專案之相關資料，研判假設各種未來可能情境，過程中可利用未來情境矩陣進行分析，並為可能情境建立適合的調適計畫，情境規劃共有 8 步驟（參見圖 4.15）：

(1) 步驟 1：確立計畫，確定專案所在地區的背景資料，並特別注意規劃重點、規劃範圍與區域現況。

(2) 步驟 2：辨識驅動因子，確定規劃範圍內的驅動因子和決策所面臨的挑戰。

(3) 步驟 3：針對驅動因子進行排序，以確定最關鍵的驅動因子。

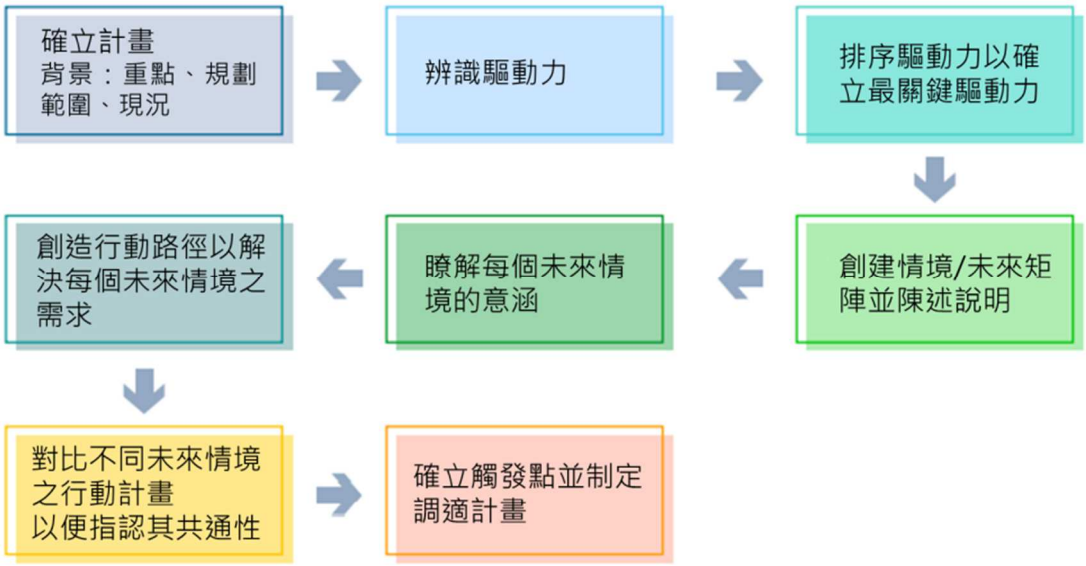
(4) 步驟 4：利用關鍵驅動因子創建未來情境矩陣，並針對該情境合理敘述。

(5) 步驟 5：瞭解每個未來情境的影響，使用定量分析後完整闡述每個情境的意涵。

(6) 步驟 6：規劃調適路徑以解決每個未來情境之需求。

(7) 步驟 7：比較並對比不同未來情境之行動計畫以便指認其共通性，此舉有助於確立未來共同行動。

(8) 步驟 8：確立觸發點（triggers points）並制定調適計畫。



資料來源：A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, Inter-American Development Bank, 2021.

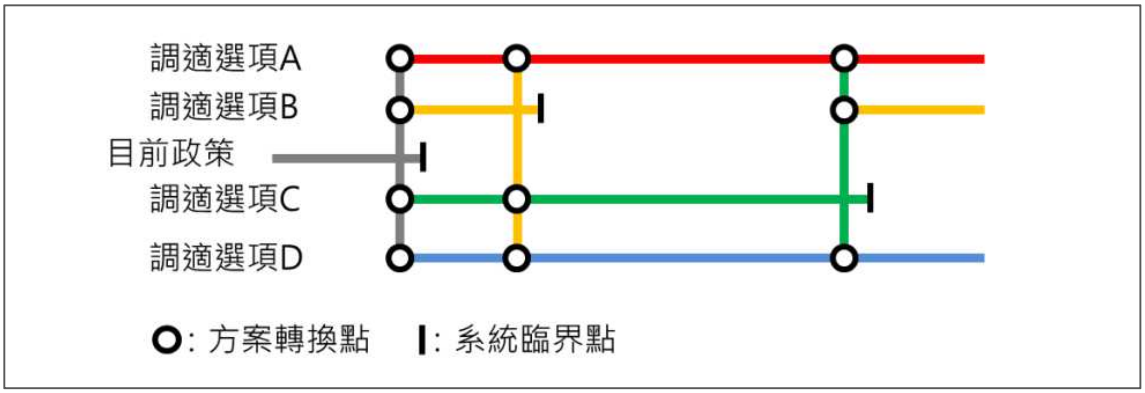
圖 4.15　情境規劃 8 步驟

2. 方法二：調適路徑（Adaptive pathways）

提出一系列可能發生之未來情境後，應對所提出之調適選項進行壓力測試，以找出在所有情境下都表現較好，且相對於其他選項具調適韌性的選項。

在進行排序與選出多種表現較佳調適選項組合後，可依據其規劃調適路徑，其中各種調適選項之組合，即代表後續執行調適計畫時的「路徑（即可能採用之調適選項組合以及其順序）」。採用調適路徑有助於瞭解調適選項配置的順序，以及如何減少其受到未來情境的不確定性影響。

由於可採行的調適選項往往有多種選擇，故可能產生的「路徑」亦可能為多種選項之組合，若將可能的路徑繪製成圖，便可產生調適路徑圖（參見圖 4.16）。



資料來源：Marjolijn Haasnoot, Jan H. Kwakkel, Warren E. Walker, Judith ter Maat, Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world, Global Environmental Change, 2013；氣候變遷調適行動計畫建構指引，國科會 TaiCCAT 計畫，民國 105 年。

圖 4.16　調適路徑示意圖

調適路徑包含以下關鍵步驟，說明如下：

(1) 辨識每個替代決策選項的危害級別（level of hazard），並根據計量辨識在何種級別時，該選項將不再提供足夠的性能。此可稱為該臨界點（tipping points）。

(2) 辨識危害情境的幅度（range），並注意每個情境可能達到臨界點（tipping points）的時間。

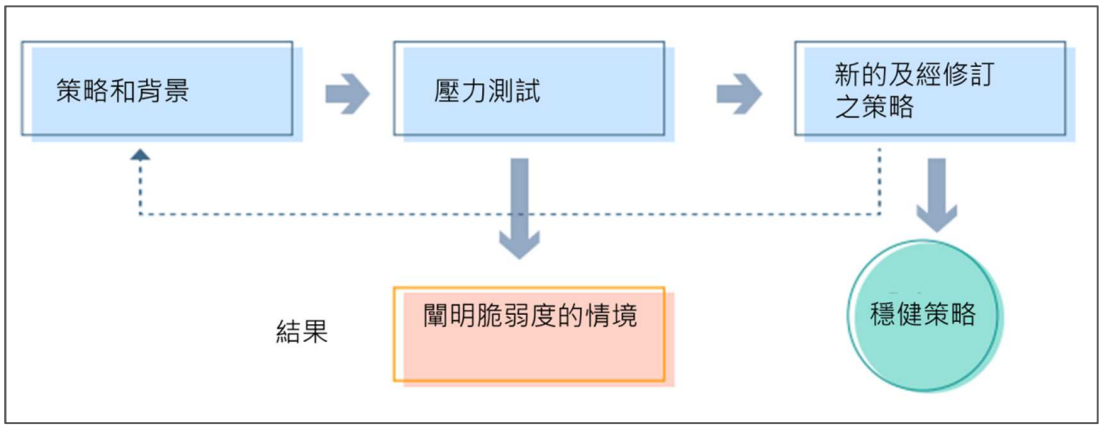
(3) 追踪每個情境如何逐步完成選擇序列。

(4) 訂定可辨識目前情境的指標。

3. 方法三：穩健決策（Robust Decision Making, RDM）

RDM 使用模擬模型來評估未來多種可能路徑中的建議調適選項，其計算生成一個包含模擬模型結果的大型數據庫，此數據庫中的每則紀錄都顯示一種調適選項在其中一個未來的表現，並可針對每個建議調適選項進行壓力測試。透過可視化和數據分析研究並歸納區分出各別調適選項是否能在未來可能條件下達成目標，根據這些條件闡明各別調適選項之脆弱度及利弊權衡。

在每個 RDM 步驟中，所產生的資訊都可能成為對於決策的挑戰，並造成要重新調整決策之狀況，該過程產生關鍵的可交付成果（deliverables），包括闡明策略脆弱度的情境、潛在的穩健策略以及其相互間的利弊權衡，而其產出結果都代表在高度不確定性下需仰賴可信賴的資訊。



資料來源：A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, Inter-American Development Bank, 2021.02.

圖 4.17　穩健決策（RDM）過程

4. 未來高度不確定之下的決策方法之應用建議

為協助決策者在未來高度不確定之下的研擬調適選項，可視專案特性及需求來選擇合適的決策方法。在操作 DMDU 的 3 種方法時要遵循「決策達成一致」之流程，即使決策各方對未來情境的各種條件可能性持有不同意見，仍要針對降低風險的行動決定達成一致，如此一來決策各方可認同某些選項比其他選項更穩健，即可在各種可能的未來取得成功。

4.5 本章重要觀念

- 考量國內公路系統規劃目前尚缺乏完整操作氣候變遷風險評估之經驗，而如何解析氣候變遷對於公路系統的衝擊以及風險組成則為其中較為困難且重要的步驟之一，因此建構公路系統氣候衝擊鏈分析方法提供國內公路系統規劃專案參考。然而，各專案應視計畫目標、計畫需求、基地條件、目標年氣候變遷推估，以及可用資源等條件等建構屬於專案的氣候衝擊鏈。
- 考量國內在公路系統規劃階段執行氣候變遷風險評估時，可取得資料及評估成果之量化程度差異，本指引提供質性/半量化及量化之氣候風險評估方法供國內參考，並說明各方法之流程步驟供參考。
- 本指引蒐整之調適選項的涵蓋面從上到下包括：調適策略（strategies）、調適方法（approaches）、解決方案（solutions）及調適措施（measures）

等。面對全球氣候變遷之下的高度不確定性因素，多樣化的調適選項類型及多元化組合方式極為適合因應現況所面臨的複合性氣候風險。

- 決策者在研擬及選擇調適選項的過程中，通常會面臨未來具高度不確定性的課題，本指引引介「在高度不確定性之下的決策方法」（Decision Making Under Deep Uncertainty, DMDU），適用於不確定性高之風險管理背景下制定決策；其中，情境規劃和調適路徑為目前各國普遍採用的決策方法。

伍、結語

5.1 結語

- 當前全球處於氣候變遷緊急狀態，採取因應作為調適氣候變遷的衝擊已刻不容緩。公路系統為重要基礎設施，一旦失能影響經濟民生甚鉅，而公路系統的氣候變遷調適即是管理、處理及治理氣候變遷為公路系統所帶來的風險。
- 於公路系統新建或改建規劃階段即融入調適理念，可獲致最大的調適效果。我國公路系統路網早已成形，但因應社會、經濟以及環境不斷變遷，既有公路系統仍有因應改建或重建之需要。本指引之編撰旨在引導未來公路系統規劃專案，不論是新建、改建或重建，採取具體的作法納入氣候衝擊分析、氣候風險評估等作業程序，以強化我國公路系統未來因應氣候變遷的調適能力。此外，本指引所推介的調適方法亦適用於既有公路系統的維護、管理、改善之氣候變遷調適工作。
- 公路規劃專案透過氣候變遷風險評估方法盤點公路系統之風險缺口後，需因應風險缺口研擬調適選項，而調適選項的規劃往往涉及高度不確定性決策環境。因應氣候變遷的不確定性，可依據專案需要以及資源條件情況選擇採用情境規劃、調適路徑或穩健決策。
- 氣候變遷調適重視調適結果的監控與回饋，是一個動態的過程，期望公路系統規劃專案之調適決策亦能建立事後觀察與監控的機制。
- 當前國際氣候變遷調適有強調融入「氣候韌性」、「永續環境」之倡議，期望從因應氣候風險到發展氣候韌性，並朝向永續發展的長遠目標邁進。
- 目前世界各國皆處於學習氣候變遷知識累積調適能力的階段，建議我國公路系統之利害關係人能透過做中學的過程，累積本土的調適經驗與知識。本指引只是一個開始，期望後續依據臺灣公路系統氣候變遷調適的實務經驗滾動檢討指引內容。

5.2 學習資源

目前全球都在學習如何因應氣候變遷，近年來不論是學術理論或實務案例均快速累積中，學習的腳步也無法停歇，不論是國內、聯合國或是先進國家皆有許多寶貴的知識與案例可供持續學習。以下蒐整國內外常用的氣候變遷調適相關資訊網站供參考（參見表 5-1、表 5-2）。

表 5-1　國內氣候變遷調適相關資訊網站

編號	名稱	網址
1	行政法人國家災害防救科技中心(NCDR)	http://ncdr.nat.gov.tw/
2	臺灣氣候變遷推估與資訊平台(TCCIP)	http://tccip.ncdr.nat.gov.tw/v2/index.aspx
3	中央研究院環境變遷研究中心	http://www.rcec.sinica.edu.tw/index.php
4	氣候變遷研究聯盟(CCLICS)	http://cclics.rcec.sinica.edu.tw/index.php
5	環境資訊中心	http://e-info.org.tw/
6	防災教育資訊網減災及氣候變遷調適教育資訊網	http://disaster.moe.edu.tw
7	NCDR 災害潛勢地圖網站	https://dmap.ncdr.nat.gov.tw/
8	行政院農業部農村發展及水土保持署土石流防災資訊網	http://246.swcb.gov.tw/index.aspx
9	災害管理資訊研發應用平台(DMIP)	http://dmip.tw/
10	災害示警公開資訊平台	https://alerts.ncdr.nat.gov.tw/
11	國立臺灣大學全球變遷研究中心	http://www.gcc.ntu.edu.tw/main.php
12	教育部氣候變遷教學平台	https://climatechange.tw/

表 5-2　國際氣候變遷調適資訊網站

編號	名稱	網址
1	聯合國氣候變化綱要公約調適網站	http://unfccc.int/2860.php
2	政府間氣候變遷專家小組網站	http://www.ipcc.ch/
3	歐盟氣候變遷調適平台網站	http://climate-adapt.eea.europa.eu/
4	聯合國環境規劃署氣候變遷網站	https://www.unenvironment.org/explore-topics/climate-change
5	美國加州調適 cal-adapt 平台	http://cal-adapt.org/
6	英國氣候變遷委員會網站	http://www.theccc.org.uk/
7	氣候調適知識交流網	http://www.cakex.org/
8	澳洲氣候變遷暨能源效率部網站	http://www.environment.gov.au/climate-change
9	瑞典氣候變遷調適網站	http://www.smhi.se/
10	荷蘭空間適應計畫	http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/en/
11	德國氣候變遷調適網站	http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/
12	法國氣候變遷調適網站	http://www.developpement-durable.gouv.fr/
13	芬蘭氣候變遷調適網站	http://ilmasto-opas.fi/fi/
14	丹麥氣候變遷調適網站	http://www.klimatilpasning.dk/
15	美國環保署氣候變遷專頁	https://www.epa.gov/climate-research

參考文獻

Intergovernmental Panel on Climate Change, Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, 2012.

Intergovernmental Panel on Climate Change, the IPCC's Fifth Assessment Report, 2014.

Intergovernmental Panel on Climate Change, the IPCC's Sixth Assessment Report , 2022.

行政院環境保護署(現為環境部)，國家溫室氣體減量法規資訊網，https://ghgrule.epa.gov.tw/greenhouse/greenhouse_page/23，民國 110 年。

International Organization for Standardization, ISO 14090:2019 Adaptation to climate change — Principles, requirements and guidelines, 2019.

the International Organization for Standardization, ISO 14091 Adaptation to Climate Change－Guidelines on Vulnerability, Impacts and Risk Assessment, 2021.

行政院環境保護署(現為環境部)，國家因應氣候變遷行動綱領，民國 106 年。

行政院，國家氣候變遷調適行動方案（107-111 年），民國 108 年。

Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, 2021.

國科會、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象署、臺灣師範大學地球科學系、國家災害防救科技中心，IPCC 氣候變遷第六次評估報告（AR6）之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告，民國 110 年。

National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide

中華技術期刊，台 20 線南橫公路勤和至復興鄉路段複合災害之工程處理對策，民國 107 年。

Federal Highway Administration, Resilient and Sustainable Transport - Dutch Style: An interim report on bilateral cooperation between FHWA and Rijkwaterstaat, 2017.

Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation, 2019.

British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure, Professional Practice Guidelines– Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia, 2020.

Federal Highway Administration, Synthesis of Approaches for Addressing Resilience in Project Development, 2017.

Federal Highway Administration, Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, 2019.

Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group II Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022.

Metropolitan Planning Organization, Exploring Resilience in MPO-Funded Corridor and Intersection Studies, 2021.

Inter-American Development Bank, A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, 2021.

附錄 4

計畫簡報

附錄 4 計畫簡報

交通部運輸研究所
Institute of Transportation, MOTC
公路系統規劃階段
強化調適能力之探討(2/2)
— 強化調適能力作為與指引
[計畫簡報]
Infrastructure Planning
Climate Change
Adaptive Capacity
Adaptation
鼎漢國際工程顧問
thi consultants inc.

OUTLINE
大綱
01 計畫執行概要
02 公路系統規劃階段調適指引
03 結論與建議
2

01

計畫執行概要

1.1 計畫背景與目的

1.2 計畫範圍與對象

1.3 工作項目與流程

1.4 期中審查意見辦理情形

1.5 工作項目與報告章節對應

The Greenhouse Gas Reduction and Management Act announced in 2015 requires the central industry competent authorities to develop climate change adaptation strategies, and regularly submit adaptation results to the central competent authority annually.

3

1.1 計畫背景與目的

計畫背景

- 過去1世紀人類活動大量使用化石燃料，形成全球暖化，助長極端天氣的衝擊與影響
- 為強化運輸系統調適能力，運研所於107-108年依《溫管法》研議調適策略，並於109至110年滾動檢討
- 環保署業依《溫管法》提報《國家氣候變遷調適行動方案(107-111 年)》，各部會刻正執行所屬之調適行動計畫，並著手研擬下一期行動計畫(112-116年)
- 目前公路規劃尚未全面考量氣候調適，**爰研議公路系統規劃階段融入調適之指引供參考**

計畫目的

蒐集與分析國外運輸系統調適發展趨勢

探討公路規劃階段強化調適能力之作為

研擬公路規劃階段強化調適能力之指引

4

1.2 計畫範圍與對象

公路系統規劃階段強化調適能力

- ■設施範圍
  - ▪ 國道/省道/快速公路
- ■規劃階段
  - ▪ 可行性研究
  - ▪ 綜合規劃

研究成果服務對象

- ■高公局/公路總局...

應用範圍

- ■強化公路系統氣候變遷調適能力

文獻回顧及其他配合事項

- ■設施範圍
  - ▪ 國道/省道/快速公路
  - ▪ 臺鐵/高鐵
  - ▪ 機場
  - ▪ 商港

研究成果服務對象

- ■高公局/公路總局
- ■鐵道局/臺鐵局/高鐵公司
- ■民航局/桃園機場公司
- ■航港局/港務公司

應用範圍

- ■辦理氣候變遷調適業務

5

1.3 工作項目與流程(1/4)

工作項目

探討強化公路調適能力作為 | 研擬公路調適指引 | 辦理教育訓練 | 鐵公路調適資訊移置官網專區及維護 | 其他工作項目

第二年期重點工作

文獻回顧
- ■國外運輸系統調適發展趨勢
- ■國內外強化公路規劃調適能力作為

↓

研提強化國內公路調適能力作為

第一年資料綜整
- ■國內規劃課題
- ■國外文獻啟發
- ■強化公路規劃階段調適能力指引初步架構

↓

專家學者座談會

「強化公路規劃階段調適能力指引」1場次

↓

完成指引

教育訓練規劃

↓

教育訓練辦理

「氣候變遷調適專業知識」教育訓練2場次

↓

問卷調查與分析

↓

後續教育訓練辦理建議

移置前置作業
- ■移置資料清單
- ■移置前置作業

↓

完成移置作業

溫管法配合事項

報導文章撰寫(1篇)

研究成果投稿(期刊/研討會1篇)

簡要英文文章撰寫(1篇)

計畫成果填報

成果海報製作

後續建議

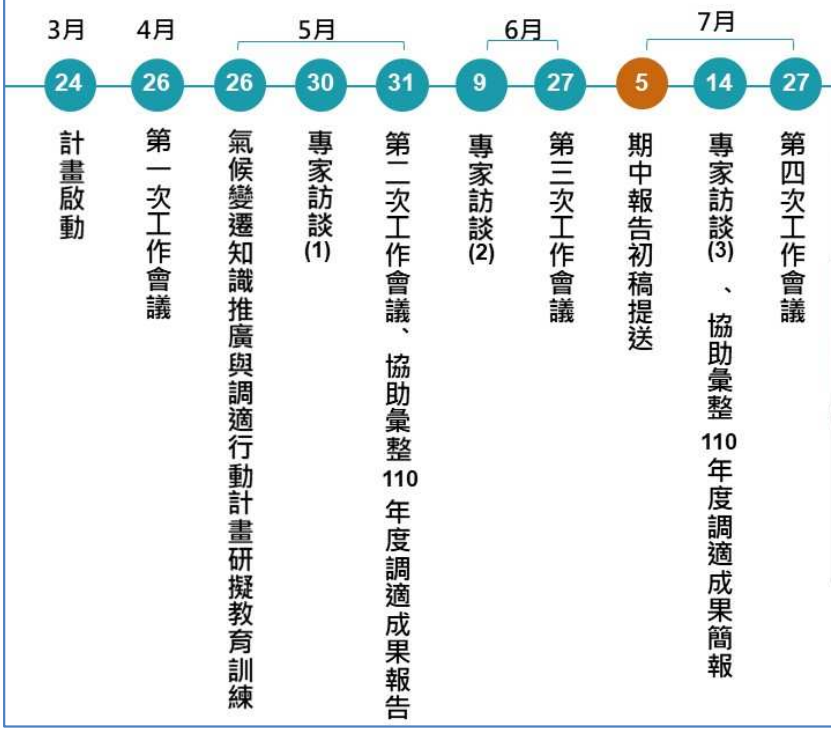
6

1.3 工作項目與流程(2/4)

本年度工作項目	工作月數	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月
	111年月份	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.蒐集與分析目前國外運輸系統調適發展趨勢											
2.探討公路系統規劃階段強化調適能力之作為											
3.研提公路系統規劃階段強化調適能力指引											
4.配合環保署彙整及檢討110年運輸系統因應氣候變遷調適成果											
5.辦理「強化公路規劃階段調適能力指引」專家學者座談會									※		
6.辦理氣候變遷專業知識推廣課程規劃及教育訓練				※				※			
7.「鐵公路氣候變遷調適資訊平台」之可公開資訊移置											
8.「鐵公路氣候變遷調適資訊平台」之可公開資訊移置-專區維運服務											
9.辦理與溫管法第13條及施行細則第11條等相關規定、國家因應氣候變遷行動綱領、國家氣候變遷調適行動方案等相關配合事項											
10.研究成果投稿											
11.製作可供於相關內部會議或活動展示之海報或影片電子檔											
12.撰寫1篇與本計畫相關之報導文章、1篇簡要英文文章											
13.其他與本計畫有關之配合事項											
提交期中報告初稿(111.7.5)						※					
提交期末報告初稿(111.11.7)										※	
提交期末報告定稿(111.12.31)											※

※決標日：111年3月24日

1.3 工作項目與流程(3/4)



線上教育訓練截圖紀錄

1.3 工作項目與流程(4/4)

- 8月 5 期中審查
- 8月 24 專家訪談(4)
- 9月 2 第五次工作會議
- 9月 15 運輸系統調適趨勢與公路調適能力作為教育訓練
- 10月 1 計畫成果投稿完成(中華民國運輸學會2022年會暨學術論文國際研討會)
- 10月 6 第六次工作會議
- 10月 13 公路規劃強化調適能力指引專家學者座談會
- 11月 7 期末報告初稿提送
- 12月 2 論文發表
- 12月 7 期末審查

線上教育訓練截圖紀錄

專家學者座談會

調適資訊平台資訊移置

1.4 期中審查意見辦理情形(1/2)

編號	審查意見	辦理情形
1	IPCC AR6於WGII提及的**氣候韌性發展並兼顧調適減碳與永續發展**對於我國推動調適工作是很重要的概念，上述概念**如何納入調適架構內**使運輸部門了解何謂符合氣候韌性發展的調適選項	• 於指引1.3節(氣候變遷調適**基本概念**)納入IPCC AR6 WGII倡議之「氣候韌性發展」之理念 • 於指引4.3節(公路系統因應氣候變遷衝擊之**調適選項**)納入符合氣候韌性發展之調適選項，如「以自然為本的解決方案」(NbS) • 於指引5.1節(**結語**)強調透過轉型邁向氣候韌性與永續發展的倡議
2	於第三階段納入「氣候變遷風險評估」實務上需耗費較多成本，且恐無翻案的可能性。**建議於第二階段方案研擬與評估即納入氣候變遷調適的思維**，確認目標年期後將潛在災害風險納入考量	**已調整作業框架**(參見指引3.1節)，於**第二階段**方案研擬與評估納入「氣候變遷風險評估」的調適思維
3	指引目錄建議於「國際氣候變遷調適趨勢」章節前將**「氣候變遷調適」定義**先說明清楚	指引已增列**1.2節(名詞定義)**
4	指引內的**風險評估章節如何納入**未來環保署研擬的**國家氣候變遷應用情境**	於指引2.1節(臺灣氣候變遷推估資訊)中**介紹國家情境**，並於4.2節(公路系統氣候風險評估之方法)中**提供可參考的評估程序**，引導公路專案依國家氣候變遷應用情境進行評估

1.4 期中審查意見辦理情形(2/2)

編號	審查意見	辦理情形
5	因應氣候變遷需要從整個系統面向來看，運輸系統問題通常**不會只透過一個調適選項就可解決**，需要**因地制宜搭配多個調適選項綜合治理**	已於**指引**4.3節(公路系統因應氣候變遷之調適選項)**內容強調概念**，並藉**案例加強說明**
6	建議**與實務應用機關溝通**，以強化指引實用性	研究過程進行**公路機關訪談、工作坊、專家學者座談會以及專家訪談**等，已納入實務應用機關之建議意見重點**綜理於報告**第4.2節
7	團隊蒐集國外公路系統強化調適能力案例，請於報告書中**加強說明案例可做為國內調適借鏡之處**	已**綜理於報告**第3.5節(國內可借鏡處)
8	**有關交通部部頒規範之相關評析內容納入附錄**，做為相關單位通盤檢視之參考	已**編入報告附冊**二之五(相關規範探討)

11

1.5 工作項目與報告章節對應

工作項目	報告章節
1. 蒐集與分析目前國外運輸系統調適發展趨勢	第二章
2. 探討公路系統規劃階段強化調適能力之作為	第三章、第四章
3. 研提公路系統規劃階段強化調適能力指引	第五章、附錄3
4. 辦理「公路系統規劃階段強化調適能力指引」專家學者座談會	附冊二
5. 辦理氣候變遷專業知識推廣教育訓練 (辦理2場)	附冊二
6.「鐵公路氣候變遷調適資訊平台」之可公開資訊移置	附冊二
7. 其它工作項目	
(1) 辦理與《溫管法》、《行動綱領》、《調適行動計畫(107-111年》相關事項	已配合業務辦理
(2) 完成計畫成果投稿	第一章
(3) 撰寫1篇報導文章	第一章
8. 因應運研所科技技化管考之需，協助填報相關研究成果	已填報

12

02

公路系統規劃階段強化調適能力指引

01 導讀

02 氣候變遷對公路系統的衝擊

03 公路系統規劃階段強化調適能力機制

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

05 結語

13

指引架構說明

1 導讀
- 指引目的、適用範疇及對象
- 調適名詞定義、氣候變遷調適之基本概念
- 氣候變遷調適之最新發展趨勢
- 指引結構

2 氣候變遷對公路系統的衝擊
- 臺灣氣候變遷推估資訊
- 氣候變遷對公路系統之衝擊

3 公路系統規劃階段強化調適能力機制
- 公路系統規劃作業流程融入調適概念之框架
- 第一階段:如何蒐集與分析氣候變遷相關資料
- 第二階段:如何初步評估影響調適能力之氣候風險因素
- 第三階段:如何執行氣候變遷風險評估
- 公路跨其他運輸系統調適介面整合機制
- 回顧本章重要觀念

4 公路系統規劃階段強化調適能力方法
- 公路系統氣候衝擊鏈分析方法
- 公路系統氣候風險評估之方法
- 公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項
- 面對高度不確定性之決策方法
- 回顧本章重要觀念

5 結語
- 結語
- 學習資源

14

01 導讀

目的、適用範疇及對象

緣起

為何公路需於規劃階段納入調適

全球暖化下極端天氣事件發生頻繁且造成的影響愈趨嚴峻，將導致系統韌性逐漸降低，為確保公路系統可持續營運，於規劃之初納入氣候調適可收最大效果

目的

撰擬指引之目的

協助指導公路權責機關與公路實務規劃人員在公路規劃階段全盤性、系統性的將氣候變遷調適納入考量

適用範疇

指引適用範疇

- 省道/快速公路/高速公路之新建及改建規劃作業階段
- 指引部分內容具廣泛應用價值，可運用於公路系統全生命週期各階段之調適

適用對象

指引適用對象

- 公路系統管理者
- 公路系統專案審查者
- 公路系統實務規劃者
- 其他利害關係人

01 導讀

名詞定義

氣候變遷（Climate change）

指氣候狀態的變化，這種變化可根據氣候特徵的均值和/或變率的變化進行識別（如採用統計檢驗方法），且這種變化會持續一段時間，通常為幾十年或更長時間

氣候變遷調適（Climate change adaptation）

指人類系統，對實際或預期氣候變遷衝擊或其影響之調整，以緩和因氣候變遷所造成之傷害，或利用其有利之情勢

極端氣候 （Climate Extreme）

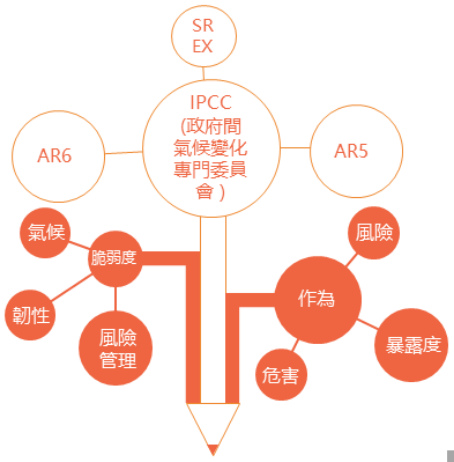
- 原稱為極端天氣事件及極端氣候事件（Extreme Weather or Climate Event）
- 有三種定義方式，一是當氣候數值高於或低於門檻值的事件，二是該氣候數值達特定絕對值（例如：危險標準），或可定義為該事件發生的可能性或頻率極低
- 極端天氣事件和極端氣候事件可透過特定的時間尺度區別，極端天氣事件發生的時間範圍介於一天內到幾周；極端氣候事件則發生在更長的時間尺度，且可以是幾個（極端或非極端）天氣事件的累積。

調適能力（Adaptive capacity）

- 個人、組織、區域及社會上所具有調適氣候變遷衝擊所需具備的能力
- 包含減少氣候變遷衝擊的能力、可利用的資源等

韌性（Resilience）

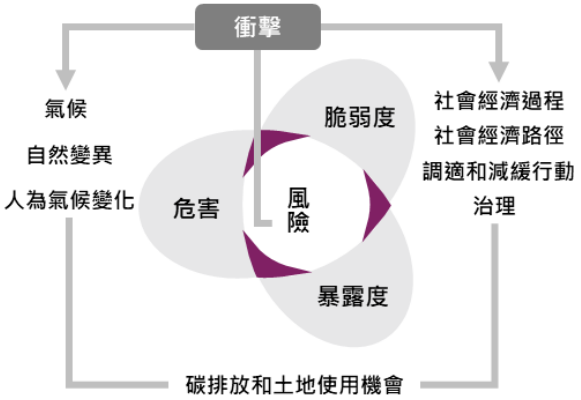
某社會、經濟和環境系統處理災害性事件、趨勢或擾動，並在回應或重組的同時保持其必要功能、定位及結構，並保持其適應、學習和改造等的能力



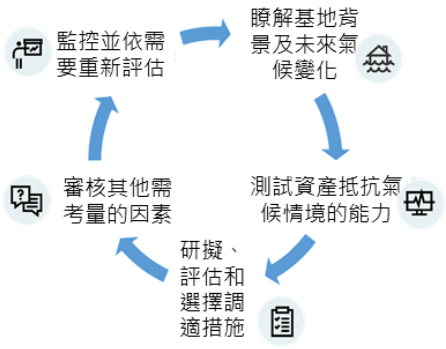
基本概念- 調適是一個調整的過程

01 導讀

UNFCCC指出調適決策架構包含觀察、評估、規劃、執行、監測與修正等5步驟，面對未來的不確定性，調適行動應具備彈性，並依據監測結果和預測精準度採取滾動式調整



IPCC氣候衝擊風險的概念

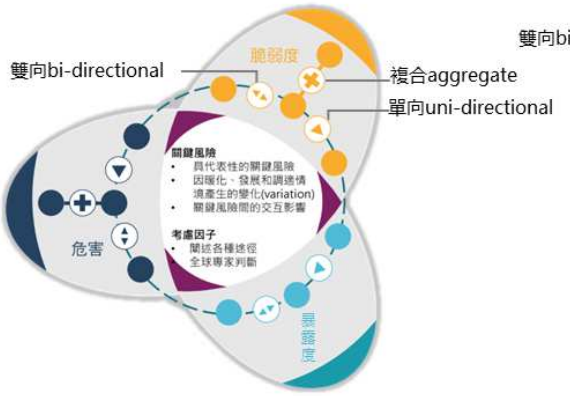


完整的調適應包含各項關鍵要素

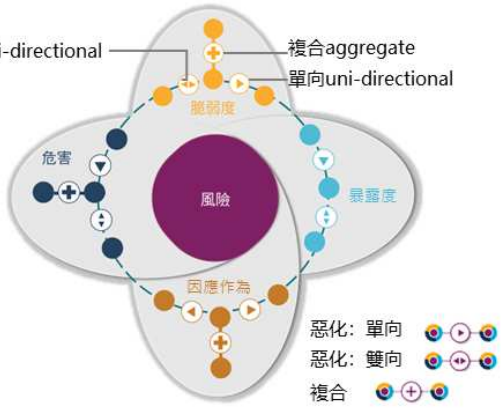
基本概念- 調適作為與減緩並行

01 導讀

UNFCCC指出調適策略為降低氣候變遷衝擊影響的方法，以解決氣候變遷所帶來不可避免的衝擊及損傷，其中部分的調適策略如「以自然為基礎的解決方案（Nature-based Solutions, NbS）」甚至有助於達成溫室氣體減緩的正面效益



現況: 風險與複雜性

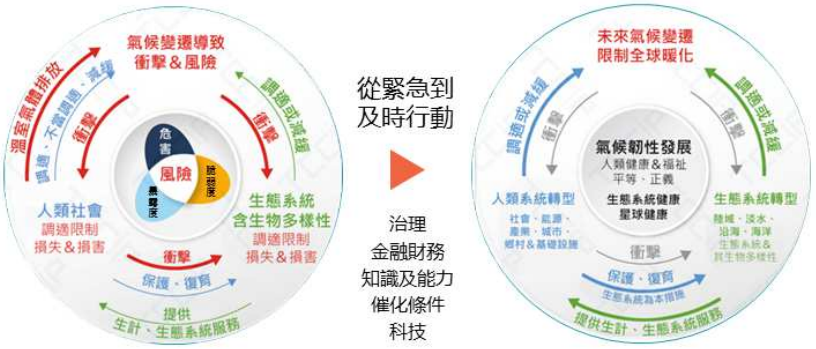


未來方向: 與調適和減碳有關的因應作為

01 導讀

基本概念- 轉型邁向氣候韌性發展

- IPCC AR6提出「氣候韌性發展」係為減低溫室氣體排放並且發展強化永續作為的調適策略過程。其重點著眼於每個社會決策及針對這些決策的行為所累積的結果，其有賴於政府、私人企業及公民社會共同完成
- 從氣候風險延伸至氣候韌性發展的構想，包含3大元素：氣候、生態系及人類社會，期透過人類系統及生態系統轉型以降低風險並發展氣候韌性



01 導讀

氣候變遷調適最新發展趨勢

國際標準組織近年持續推出氣候變遷調適相關標準

- ISO14090 2019年發布了全球第一項針對氣候變遷調適的標準：ISO14090 氣候變遷調適 - 原則、規定與指導
- ISO14091 2021年發布《ISO 14091 氣候變遷調適 - 脆弱度、衝擊與風險評估指引》

IPCC AR6 WGII觀察歸納全球調適實踐現況及其效益

- 調適推動有明顯進展
- 調適選項是可行且有效的
- 部分人為調適限制仍可突破
- 不當調適作為可能導致困
- 推動條件是其執行、加速調適的關鍵

依據溫管法所建構的機制持續推動調適工作

- 行動綱領
- 行動方案

02 氣候變遷對公路系統的衝擊

臺灣氣候變遷推估資訊

依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會(IPCC)第六次評估報告(AR6)的最惡劣的溫室氣體排放情境，臺灣氣候變遷科學團隊進一步研究公布臺灣於2100年的氣候變遷發展趨勢

高溫
高溫超過36℃日數由0.29日增為48.4日
夏天由4.3個月增為7個月
冬天由2.3個月到冬天消失

乾旱
枯水期降雨更少
年最大連續不降雨日數由43日增為91日

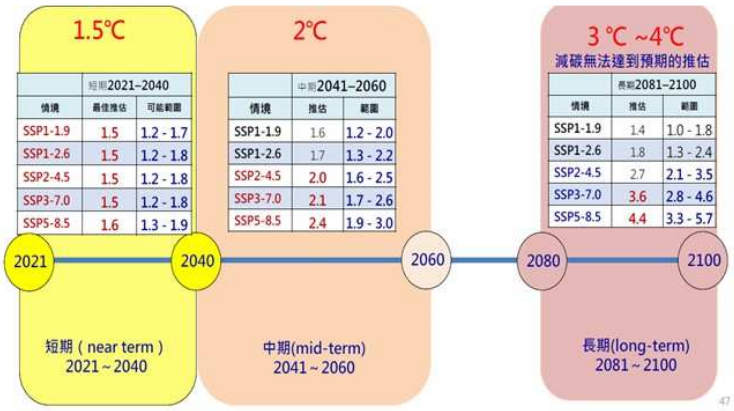
強降雨
豐水期降雨更多
豪雨強度約增41.3%

強颱
侵臺比例約增50%(AR5情境)
引致強降雨約增35%(AR5情境)

02 氣候變遷對公路系統的衝擊

國家氣候變遷情境設定

NCDR因應國際上不斷更新的推估資料，初步提出國內未來可採用的氣候變遷情境設定



備註：情境SSP在AR6係指社會經濟路徑：SSP1-1.9為最樂觀情境(達成淨零)；SSP2-4.5為中心路徑，沒有重大偏差(最有可能)；SSP5-8.5為最劣情境(減碳失敗)

資料來源：國家氣候變遷調適行動計畫(112年-116年)推動方式研商會簡報-國際最新氣候調適資訊及氣候變遷情境設定之研析與建議，國家災害防救科技中心，111年。

02 氣候變遷對公路系統的衝擊

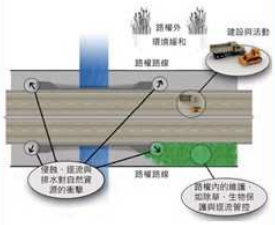
公路系統的組成

依據美國國家協作公路研究計畫（NCHRP）引用美國運輸學會（TRB）所建構的「公路系統」的概念框架為基礎，就路段、路廊以及路網3種不同的公路系統尺度，探討公路系統在不同尺度下面臨的氣候衝擊

路段尺度

從個別資產組件觀點，分析受氣候衝擊的風險，可細分為

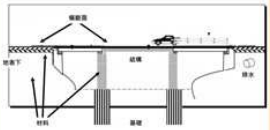
- 基礎/地表下
- 材料
- 橫斷面
- 排水
- 結構



路網尺度

涉及整體公路系統的管理，考量重點

- 公路彼此之間的連結性
- 跨系統場站的連結性
- 路網彼此之間的替代性



路廊尺度

由路段與周邊環境組成，強降雨造成的淹水可能從路段擴及到路廊，也影響周邊環境的水體與生態環境

23

02 氣候變遷對公路系統的衝擊

公路系統面臨的氣候壓力

指與氣候變遷有關的情況、事件或趨勢，可能對公路系統造成衝擊

交通部統計要覽交通天然災害概況歷年統計資料

臺灣氣候變遷科學報告２０１７
- 衝擊與調適面向

- 強降雨
- 強風
- 暴潮及風浪
- 高溫
- 海平面上升

24

氣候變遷對公路系統的潛在衝擊

02 氣候變遷對公路系統的衝擊

系統尺度	系統組成	氣候壓力因素	對於公路系統的直接衝擊	國內外案例
路段	結構(包含橋梁及隧道)	強降雨	強降雨造成的土壤含水量高影響道路、橋梁基礎	台20線南橫公路-明霸克露橋(110.8.6水災)
			強降雨沖刷橋梁基礎	台13線后豐大橋(97年辛樂克颱風)
		強風	強風影響橋梁結構	華盛頓州16號幹線塔科馬海峽吊橋(1940年)
		暴潮/風浪	暴潮/風浪加劇橋墩的沖刷	台9線香蘭至三和段(107 .9山竹颱風)
	基礎/地表下	強降雨	路基受沖蝕掏空	台14甲線18.6K翠峰段(108.5連續多日豪雨)
		海平面上升	加劇路基的沖刷	南迴公路臨海路段
	排水	強降雨	排水不良造成淹水	國道1號民雄交流道(102.8.29康芮颱風)
	橫斷面	強降雨	道路的橫斷面，面臨強風暴雨沖刷等影響	台20線南橫公路-明霸克露橋(110.8.6水災)
	材料	高溫	鋪面材料軟化與標線變形	國道3號南下後龍交流路段(夏季炎熱導致柏油路面溫度升高)

25

氣候變遷對公路系統的潛在衝擊

02 氣候變遷對公路系統的衝擊

系統尺度	公路系統組成	氣候壓力因素	對於公路系統的直接衝擊	國內外案例
路廊	周邊環境	強降雨	路廊因地表逕流溢淹，影響周邊排水系統與生態環境	台9甲線、環山路及平廣路沿線(104年蘇迪勒颱風)
		強風	路樹傾倒造成道路中斷	台3線桃園龍潭區中豐路高平路段以及龍新路段(110年烟花颱風)
		高溫	引發邊坡野火	美國加州比克斯比溪大橋(111.1加州野火)
路網	替代道路	強降雨	替代道路數量低，強降雨時可能面臨運輸中斷	-
		暴潮/風浪	海浪越堤溢淹災害，海岸線退縮，淘刷公路底部基座	
		海平面上升	替代道路被淹沒	-
	交通場站	強降雨	交通場站聯外道路淹水，造成運輸中斷	
		暴潮/風浪	交通場站聯外道路淹水，造成運輸中斷	

26

02 氣候變遷對公路系統的衝擊

案例

臺灣山區公路面臨的氣候衝擊與因應

路廊複合型潛在危害評估- 以台20線南橫公路勤和至復興路段為例

風險辨識
- 鄰近地質敏感地區
- 地形陡峻
- 暴雨侵襲下發生規模崩塌
- 合併洪水與土石流

風險分析
- 風災後大規模崩塌
- 地形地貌大幅改變

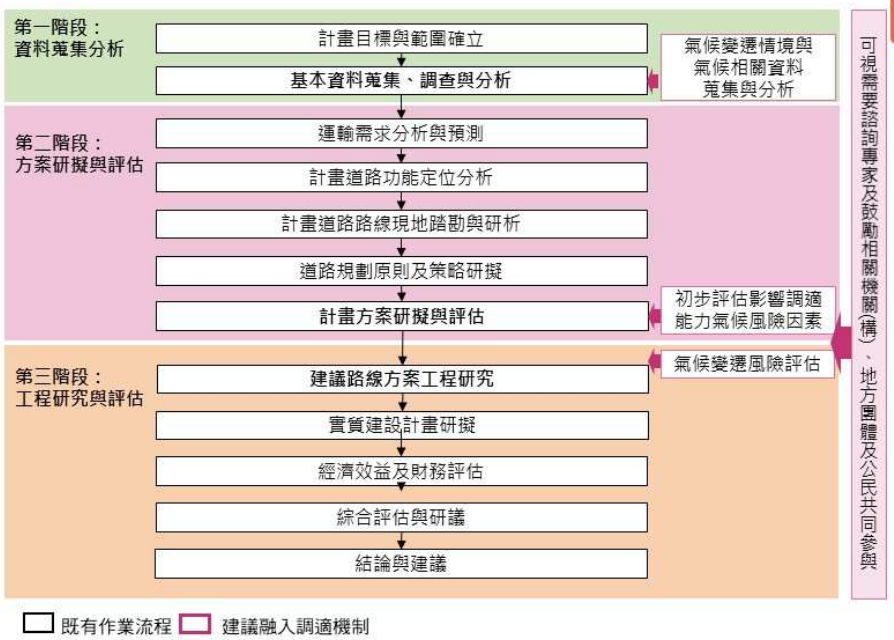
風險評量
- 地質、水文及環境影響因子評估
- 環境地質圖
- 災害潛勢圖
- 致災因子套

風險處理
- 路堤段因應溢淹及沖刷，道路設計除考量河川洪水位之外，尚考慮河床淤高造成之溢淹

資料來源：中華技術期刊，台20線南橫公路勤和至復興鄉路段複合災害之工程處理對策，民國107年

03 公路系統規劃階段強化調適能力機制

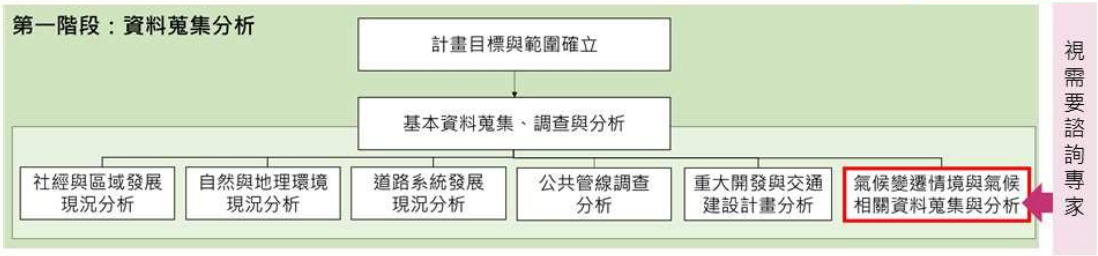
公路規劃流程融入調適概念框架



第一階段

蒐集與分析氣候變遷相關資料

03 公路系統規劃階段強化調適能力機制



項目名稱	資料範疇	調適能力提升考量	資料提供單位
氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析	未來氣候變遷情境及預測變化資料	蒐集未來情境下可能的強風、強降雨、高溫、暴潮等狀況	國科會與NCDR
		主要依據IPCC模擬全球大尺度未來的氣候變化，而NCDR會再進行降尺度至台灣範圍進行氣候變遷模擬分析	
	未來水文變化	蒐集未來情境下對於水文可能的變化，如水位、流量等	經濟部水利署
	未來工址地質及地形變化	蒐集未來情境下的敏感地質與山崩地滑、岩體滑動潛勢、土石流潛勢等狀況	國科會與NCDR
		蒐集未來情境下可能的地形變化（因侵蝕或極端事件）	

29

第一階段

蒐集與分析氣候變遷相關資料

03 公路系統規劃階段強化調適能力機制

回顧過往氣候形態 → **考量未來氣候變遷情境設定** → **氣候相關資料蒐集與分析**

步驟如下:

① 回顧過往氣候形態，初步瞭解氣候變遷對計畫範圍可能產生的影響

步驟如下:

① 確立專案所採用的氣候變遷情境設定，用以推估未來氣候變化趨勢

② 說明**未來氣候變遷情境***

*配合中央科技主管機關對於本土未來氣候變遷情境推估等最新資訊補充說明

步驟如下:

① 依據專案所在區位特徵指認應納入考量的氣候資料

② 蒐集未來氣候變遷情境之氣候推估資訊(如NCDR淹水衝擊圖資)

③ 蒐集與專案相關可取得之氣候參數及當地環境條件相關變異資料以及主管機關之養護監測報告等

④ 建議公路主管機關可進一步與相關專業團隊合作，量身訂做針對專案產製的氣候模擬預測及分析

30

第二階段

03 公路系統規劃階段強化調適能力機制

初步評估影響調適能力之氣候風險因素

第二階段

03 公路系統規劃階段強化調適能力機制

初步評估影響調適能力之氣候風險因素

指認氣候風險因素

步驟如下:

① 指認公路系統所面臨的**氣候壓力(及危害因素)**

② 指認公路系統的**暴露因素**及**脆弱因素**

初步評估影響調適能力之氣候風險因素

步驟如下:

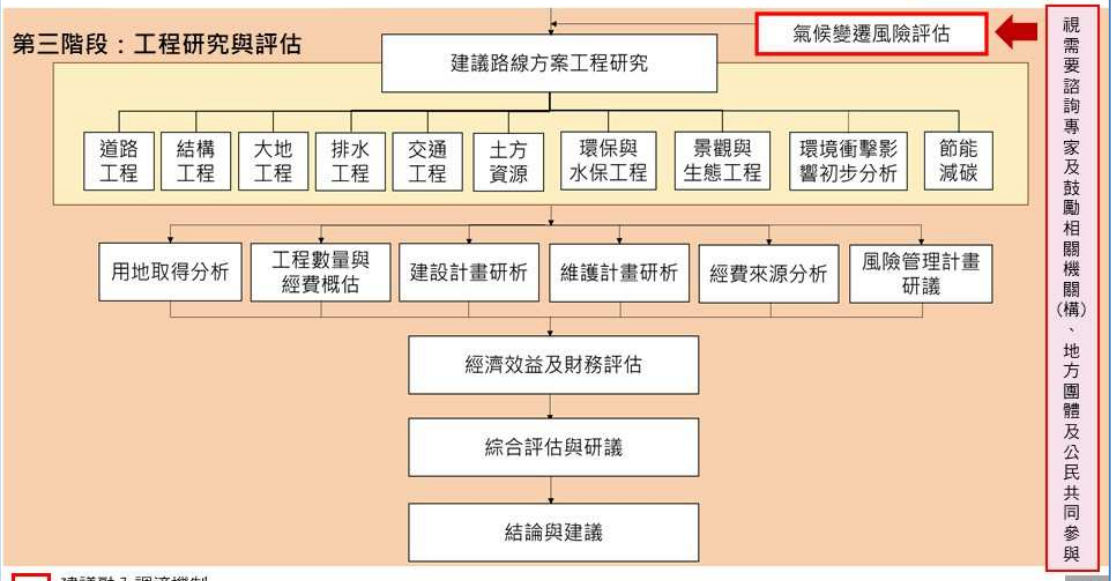
① 先確認是否有**前例可依循**，初步了解影響調適能力之氣候因素

② 若無則透過**專業工作小組**等方式邀集**有經驗之專業者**共同研判初步評估，指認影響公路系統(資產) 調適能力之**關鍵氣候風險因素**，並研判可能的影響

第三階段

執行氣候變遷風險評估

03 公路系統規劃階段強化調適能力機制



33

第三階段

執行氣候變遷風險評估

03 公路系統規劃階段強化調適能力機制

前置作業

步驟如下:

① 辨識利益相關者
② 描述專案所在區位
③ 列出關鍵資產組件清單
④ 辨識需納入考量的一般性氣候參數
⑤ 選擇關鍵團隊成員
⑥ 訂定專案時間範疇

執行氣候變遷風險評估

步驟如下:

① 確立目標
② 選擇氣候變遷風險分析方法
③ 選擇公路基礎設施組件
④ 選擇及確定特定氣候參數
⑤ 指認並描述公路基礎設施與氣候參數間的相互影響
⑥ 確立氣候風險

回報評估結果

步驟如下:

① 氣候變遷評估書面報告
② 溝通氣候變遷風險評估結果
③ **回報評估結果做為公路系統規劃之基礎**

34

03 公路系統規劃階段強化調適能力機制

公路跨系統的調適介面整合機制

公路跨系統調適介面類型可分為高鐵/臺鐵車站、國際機場、國際商港之聯外道路

第一階段 資料蒐集

- 跨運輸系統之功能及定位確立
- 利害關係人或相關機關單位指認
- 資料蒐集與分析應建立於同一基準
- 有關機關單位應建立氣候變遷情境相關資料流通共享

第二階段 方案研擬

- 針對跨運輸系統交界處進行氣候變遷風險評估
- 系統交界處優先迴避高風險地區
- 運輸系統交界處因應氣候變遷衝擊的工程設計標準提高
- 規劃多層次備援系統，建立系統間備援能力

第三階段 工程研究

- 跨運輸系統範圍內之氣候壓力因素辨識
- 利益關係人或機關單位需建立規劃作業時的定期溝通平台或管道
- 必要時應召開跨系統協商會議

35

03 公路系統規劃階段強化調適能力機制

案例

歐洲ROADAPT及美國FHWA調適框架實證應用

以荷蘭 InnovA58 公路擴建計畫為計畫標的，應用歐洲 ROADAPT 及 美國 FHWA 氣候調適框架進行氣候風險評估，依據評估結果，於建設計畫邀標文件中將提升公路氣候韌性的作法納入計畫需求

- 運用歐洲的調適框架ROADAPT快速掃描發現公路最嚴重的氣候風險
- 同時使用ROADAPT框架的脆弱度評估方法以及FHWA框架的脆弱度評估方法(VAST)比照確認

- 指認出5個最易受損的地點
- 公路擴建計畫邀標文件中要求承包商須納入氣候韌性考量，為InnovA58公路提出穩健而靈活的調適措施

36

03

公路系統規劃階段強化調適能力機制

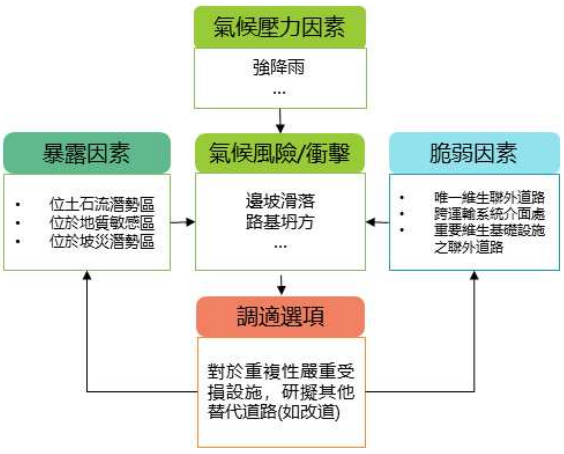
- 於規劃階段強化公路系統強化調適能力的作為，並非取代既有的規劃作業程序，而是將氣候變遷調適的理念設法「內化」及融入至既有的規劃作業程序中
- 建議未來於公路系統各規劃階段，包含資料蒐集分析、路線（廊）方案規劃評估以及工程規劃等3階段均融入氣候變遷調適相關作業
- 氣候變遷調適多涉及跨領域議題，建議於各階段可視需要諮詢專家、鼓勵相關機關（構）及公民共同參與
- 未來氣候條件仍將持續變化且具有高度的不確定性，故調適作為亦須隨變遷情形俱進，氣候變遷調適除了關注「結果」，更關注「調適過程」
- 後續的公路系統設計、建設及維護等均應納入氣候變遷調適理念，配合氣候風險監測反饋調整作為，方能有效強化公路系統氣候變遷調適能力

04

公路系統規劃階段強化調適能力方法

公路系統氣候衝擊鏈分析方法

氣候壓力因素(危害)	與氣候變遷有關的情況、事件或趨勢，可能對公路系統造成衝擊，包含：強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪、海平面上升
暴露因素(暴露度)	公路系統位於易受衝擊的地區，例如淹水潛勢區或坡災潛勢區等
脆弱因素(脆弱度)	公路系統本身容易受衝擊的特性、以及一旦失能可能影響的範圍及程度
調適選項	因應氣候衝擊可採用的調適選項，例如保護、調整、搬遷、增加備援、管理及維護

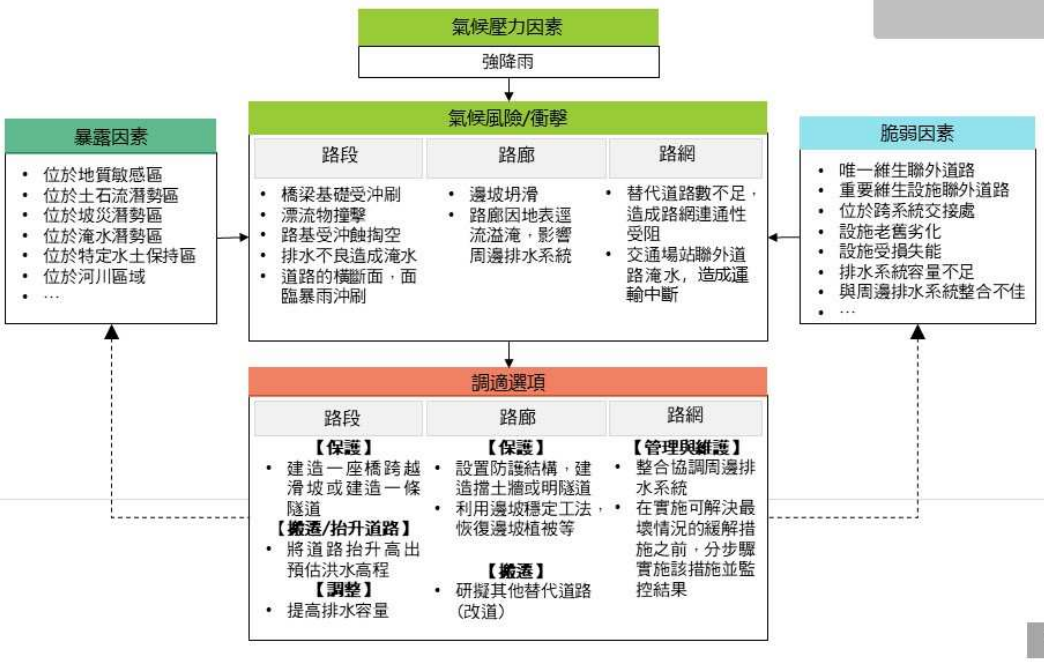


氣候衝擊鏈基本結構

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

公路系統氣候衝擊鏈分析方法

公路系統規劃階段氣候衝擊分析圖-山區公路(以強降雨為例)



39

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

公路系統氣候變遷風險評估方法

日本獨立行政法人國際協力機構(JICA)
- 氣候風險評估及調適指引(2019)

40

公路系統氣候變遷風險評估方法

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

3)當前氣候危害發生頻率

2)可能發生的氣候危害

5)氣候危害未來發生趨勢

		氣候危害					
		H1 海平面上升	H2 風暴/暴潮	H3 高溫	H4 洪水	H5	H6
	氣候危害當前發生頻率	+	+	-	++		
	氣候危害未來發生頻率	↗	↗	↘	↗	→	→
暴露因素	E1播種	2	1	1	3	1	1
	E2幼苗 (seedling)	2	1	2	3	3	2
	E3稻田 (paddy field)	3	3	1	3	3	2
	E4烘乾	1	2	1	3	3	2
	E5貯存	1	2	1	3	2	1
	E6運輸	3	1	1	3	3	2
	E7	2	1	1	3	3	1

1)列舉暴露因素清單

4)過去或當前正在發生的不良事件和影響為暴露因素和危害的結果

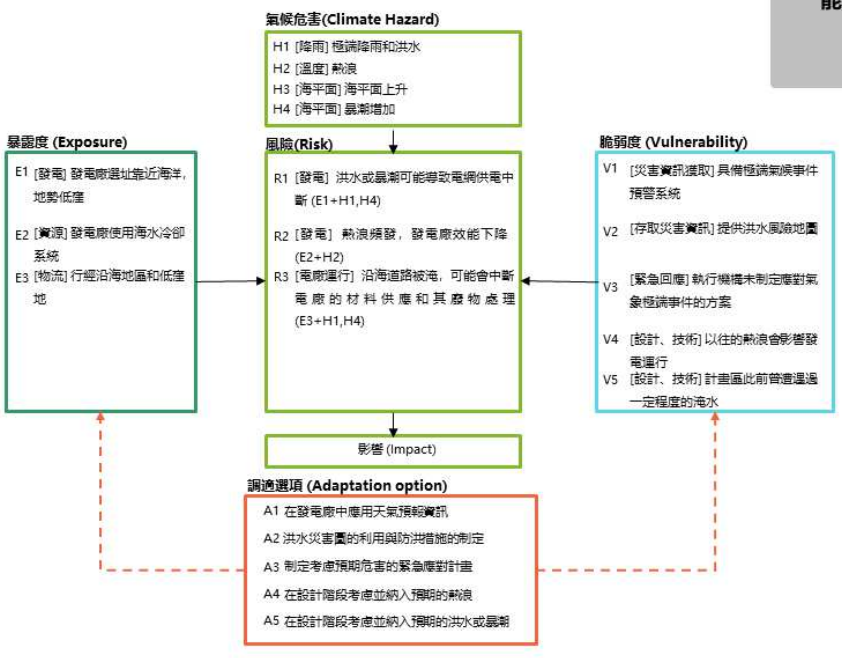
6)以紅色圓圈標示具重大影響者

氣候風險矩陣示意圖

41

公路系統氣候變遷風險評估方法

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法



氣候風險樹狀圖

42

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

公路系統氣候變遷風險評估方法

加拿大英屬哥倫比亞省交通局(BCMOTI)
- 公路面對氣候變遷的韌性設計–實務指引(2020)

氣候風險評估分為3種層級，分別為篩選級風險評估（Screening-Level Risk Assessment）、脆弱度分析或評估（Vulnerability analysis or assessment）、工程分析（Engineering analysis）

篩選級評估

- 透過廣泛蒐集氣候變遷風險的資料並彙整分析即可完成篩選層級之風險評估
- 透過較低成本的投入瞭解該專案是否需要採取更細部之風險評估及分析

脆弱度評估

確定重要的基礎設施組件和定義的氣候變遷參數之間的潛在相互影響（interaction）後，為其相互影響發生的可能性（和/或頻率）及發生故障（或損壞）後果的嚴重性評分，並描述產生的後果

工程分析

- 為提出設施可因應氣候變遷的調適能力、總承載力等量化數據以利工程設計
- 適用於安全至關重要的組件或專業判斷存在分歧的情形

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

公路系統氣候變遷風險評估方法

確立目標（與標的）

包含有關公路容量、安全性、可靠性、耐用性、設施壽年等設計目標

選擇風險評估工具

選擇公路基礎設施風險評估常用工具，加拿大評估公路基礎設施氣候風險的常用工具包含「PIEVC工程協議- 用於氣候變遷基礎設施脆弱性評估」（2020）、FHWA脆弱性評估評分工具（VAST）（2019）

選擇公路基礎設施組件

基礎設施組件可被單獨定義亦可群組
單獨列出設施組件可產出更詳細的風險評估，但需花費額外的精力和成本

選擇和確定特定氣候參數

應由專業人員選擇和確認與設計有關的氣候參數及臨界值，確認所列之個別氣候參數至少影響一處基礎設施項目組件，同時記錄經確認後之特定氣候參數清單

指認公路與與氣候參數之間的相互影響

針對所列之基礎設施組件對應特定氣候變化參數的每種組合，由專業人員和風險評估團隊指認氣候事件所導致的相互作用類型，以預測可能造成的風險

確立氣候風險

了解設施脆弱性，作為研擬調適選項之依據

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

案例

鐵公路氣候風險評估方法

-以交通部運輸研究所鐵公路風險地圖為例

氣候變遷情境設定

提供6種氣候變遷風險評估分析情境

3種現況降雨情境

現況50、100、200年降雨頻率重現年

3種未來降雨情境

未來50、100、200年降雨頻率重現年

風險評估指標設定

分為2個面向

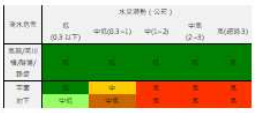
危害

依淹水、坡災個別評估

脆弱度

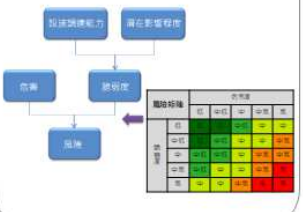
1.潛在影響程度與

2.設施調適能力



風險評估流程及風險矩陣

利用風險評估指標之危害度、脆弱度產出之矩陣作為參考之依據



04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

公路系統氣候變遷調適選項

美國聯邦公路總局(FHWA)

- 以綜合方法提升專案開發的氣候韌性 (2017)

管理及維護

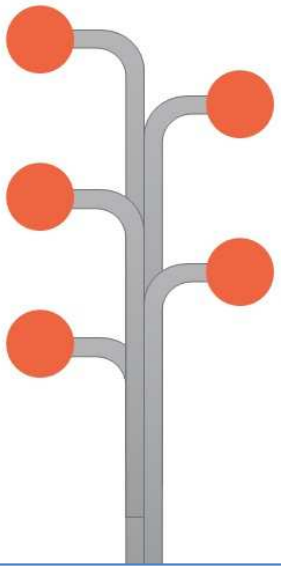
維護現有基礎架構以實現最佳性能，並進一步準備管理極端事件的影響

增加備援

確保基礎設施提供的運輸服務可由其他替代方案提供

保護

提供保護性物理屏障來減少或消除損害



調整

修改或重新設計基礎架構，以在氣候變遷壓力的環境中有更好的表現

搬遷

將基礎設施搬離氣候壓力來源，減少或消除暴露在氣候壓力風險

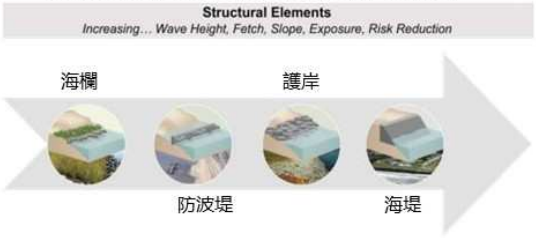
公路系統氣候變遷調適選項

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

美國聯邦公路總局(FHWA)
- 以自然為本提升海岸公路韌性的解決方案（2019）

生態元素 (在洪水海浪與侵蝕的傷害減少時)

結構元素 (在洪水海浪與侵蝕的傷害增加時)

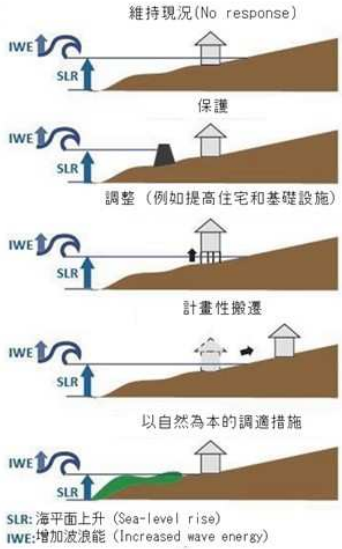


47

公路系統氣候變遷調適選項

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

IPCC AR6 WGII 綜整之運輸系統調適選項（2022）



48

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

公路系統氣候變遷調適選項

公路系統因應氣候變遷衝擊之調適選項對照表：以強降雨為例

氣候壓力及危害因素		公路系統尺度	對公路系統的衝擊	調適選項（包含策略及措施等）	類別1	類別2	類別3
強降雨	地表逕流/河川溢淹	路段	• 排水不良造成道路淹水	• 提高排水容量	抑減	調整	調整與升級
			• 道路遭漂流物撞擊	• 將道路或橋樑抬升高出預估的洪水高程	抑減	搬遷	調整與升級
				• 放置石籠盔甲、石籠網等，使道路堤防更加堅固	抑減	調整	硬保護
		路廊	• 河川溢淹造成路廊淹水	• 整合協調周邊排水系統	抑減	調整	調整與升級
		路網	• 聯外道路淹水造成運輸中斷	• 整合協調周邊排水系統	抑減	調整	調整與升級
			• 替代道路數不足，造成路網連通性受阻	• 對於重複性嚴重受損設施，研擬其他替代道路(改道)	規避	搬遷	搬遷
	暴雨沖刷/土石流	路段	• 道路路基掏空	• 加強路基保護工	抑減	保護	硬保護
			• 橋樑基礎受沖刷	• 加強橋基保護工	抑減	保護	硬保護
			• 道路橫斷面受沖刷	• 調整道路或橋梁橫斷面	抑減	調整	調整與升級
		路廊	• 道路邊坡坍滑	• 將道路移至穩定的邊坡 • 建造一座橋跨越滑坡或建造一條隧道	規避 抑減	保護	搬遷、調整與升級

類別1：依據109年行政院所屬各機關風險管理及危機處理作業手冊之風險處理方法

類別2：依據美國聯邦公路管理局（FHWA）調適選項類別

類別3：依據IPCC AR6綜整應用於運輸系統之調適選項類別

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

案例

美國波士頓都會規劃組織(MPO) 路廊與交會口之韌性研究

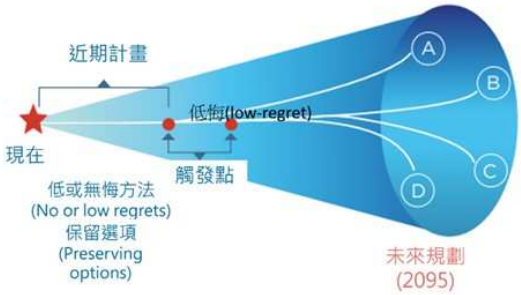
-針對1A沿海公路示範點研提7種調適選項

調適選項	適用地點	影響	成本
1.無作為並有管理地撤出	僅1A號公路南段(暫無迫切洪水問題地區)	對弱勢群體造成不利社會影響	造成國家重大經濟損失
2.以自然為本的解決方案	蘆葦過度生長，造成洪水儲量減少之地區	-	成本因暴露於波浪能的程度而有所不同
3.索格斯河閘門工程	索格斯河地區（加強社區提供海岸保護）	• 改善閘門和海岸線 • 保護基礎設施	費用約2.31億美元
4.防汛防洪保護措施-調整涵洞	-	過大涵洞導致下游發生洪水氾濫	• 主幹道涵洞費用介於5萬美元至10萬美元 • 實施時間2-5年
5.防汛防洪保護措施-升級抽水站	1A號公路北部和南部路段(可做短中長期策略投資)	• 保護社區和資產 • 增加洪水排出速度	• 高成本中期計畫 • 實施時間為5至10年
6.防汛防洪保護措施-暴雨管理	1A號公路南段低窪地區	-	• 因類型與規模相異 • 高速公路滯洪池系統 • 費用介於10萬-20萬美元
7.防汛防洪保護措施-改善資產	1A號公路北段（2030年洪患頻繁）	• 道路抬升造成周邊排水問題影響附近房舍 • 車道太陡，無法駛入	• 高成本長期計畫 • 實施時間通常10年以上

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

面對高度不確定性之決策方法

面對未來不確定性之決策概念



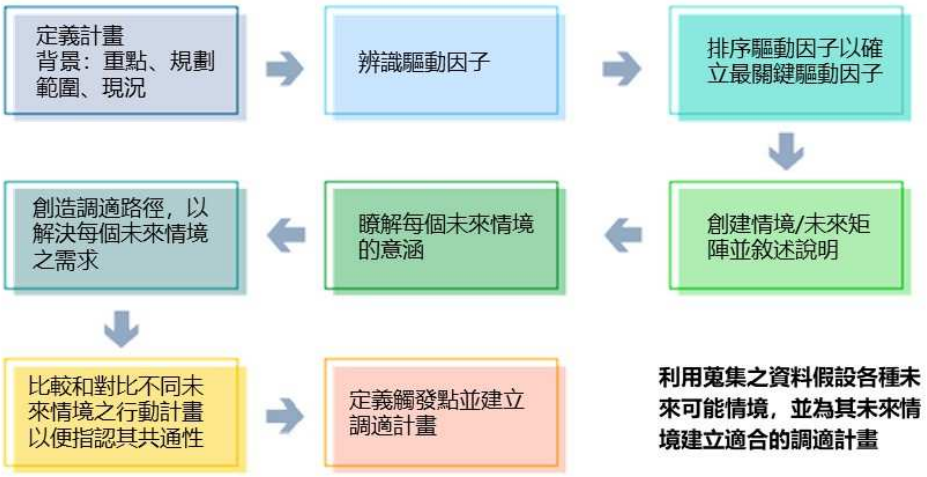
資料來源：A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, Inter-American Development Bank, 2021.02.

51

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

面對高度不確定性之決策方法

方法一：情境規劃（Scenario Planning）



利用蒐集之資料假設各種未來可能情境，並為其未來情境建立適合的調適計畫

52

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

面對高度不確定性之決策方法

方法二：調適路徑（Adaptive Pathways）

選擇具優勢的調適選項

提出一系列可能發生之未來情境後，對所提出之調適選項進行壓力測試，以找出在所有情境下都表現較好，且相對具韌性者

安排調適選項組合及順序

進行排序與選出多種表現較佳調適選項組合後，規劃安排其先後順序成為「路徑（即可能採用之調適選項組合以及其順序）」

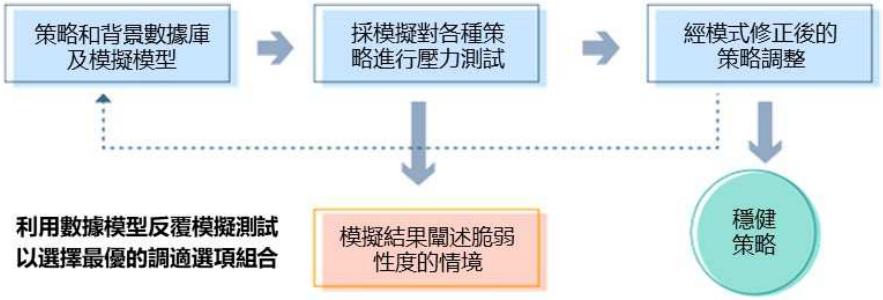
O：方案轉換點　|：系統臨界點

53

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

面對高度不確定性之決策方法

方法三：穩健決策（Robust Decision Making，RDM）



54

04 公路系統規劃階段強化調適能力方法

- 如何解析氣候變遷對於公路系統的衝擊以及風險組成為重要的步驟，因此本指引建構公路系統氣候衝擊鏈分析方法提供國內公路系統規劃專案參考
- 考量國內在公路系統規劃階段執行氣候變遷風險評估時，可取得資料及評估成果之量化程度差異，本指引提供質性/半量化及量化之氣候風險評估方法介紹
- 適用於公路規劃階段之調適選項十分多元，面對全球氣候變遷的高度不確定性因素，多樣化的調適選項及多元組合方式極為適合因應現況面臨的複合性氣候風險
- 本指引引介「在高度不確定性之下的決策方法」（Decision Making Under Deep Uncertainty, DMDU），適用於不確定性高之風險管理背景下制定決策；其中，情境規劃和調適路徑為目前各國普遍採用的決策方法

55

05 結語

氣候緊急狀態

全球氣候變遷導致面臨氣候緊急狀態，調適已刻不容緩，而氣候變遷調適即是管理、處理及治理氣候變遷為系統帶來的風險

公路調適能力提升

本指引旨在引導未來公路系統規劃專案強化調適能力，採取具體的作法如納入氣候衝擊分析、氣候風險評估等作業程序等

轉型氣候韌性發展

當前國際氣候變遷調適強調融入「氣候韌性」、「永續環境」，期望從因應氣候風險到發展氣候韌性，透過轉型朝永續發展的長遠目標邁進

滾動檢討調適指引

期望公路系統之利害關係人透過做中學的過程，累積本土調適經驗，後續依據臺灣公路系統氣候變遷調適的實務經驗滾動檢討指引內容

56

03

結論與建議

3.1 結論

3.2 建議

The Greenhouse Gas Reduction and Management Act announced in 2015 requires the central industry competent authorities to develop climate change adaptation strategies, and regularly submit adaptation results to the central competent authority annually.

57

3.1 結論

研究成果

- 完成公路系統規劃階段強化調適能力作為(含機制與方法)之探討
- 完成公路系統規劃階段強化調適能力指引
- 召開專家學者座談會
- 辦理氣候變遷專業知識教育訓練
- 完成研究成果發表

重要結論

- 公路系統規劃階段調適指引最核心之目的在於協助公路專業規劃者提於規劃過程融入調適考量，必要時建議導入氣候科學專家及其他利害關係人共同參與
- 建議於規劃階段即融入調適觀念，參考國外調適做法：先透過氣候變遷風險評估方法盤點公路系統之風險缺口後，研提調適選項
- 面對未來氣候變遷之高度不確定性，應衡量相關領域之間的相互關係，並納入系統性的調適思維，考量採用不確定下的決策概念，思考如何研擬調適短中長計畫
- 因應國際調適發展趨勢在調適推動上積極融入「氣候韌性」、「永續環境」之意涵，期能做為國內強化公路系統調適能力作為之參考

58

3.2 建議

氣候變遷調適工作推動

- 調適預算與資金需於國內部會中長程計畫預算籌編
- 調適思維推動與主流化，透過教育訓練等課程活動分享調適觀念
- 採取將調適作為「納入採購契約」或「納入部頒規範」修正，以加速調適工作推動

公路強化調適能力作為與指引

- 針對國內公路系統氣候變遷風險評估方法深入研究
- 強化公路系統規劃階段調適指引之應用，建議公路管理機關(構)運用本指引提出之調適作為研提公路系統調適示範計畫
- 從做中學的過程持續累積本土調適經驗與知識，滾動檢討上位指引

跨部門調適研究成果交流

- 建議加強跨部門整合平台之應用，透過推動跨部門整合與資訊共享，以跨部門研究成果厚植公路系統規劃階段強化調適能力之資源基礎

59

THANKS

簡 報 結 束 · 敬 請 指 教

鼎漢國際工程顧問股份有限公司

ISBN 978-986-531-594-8
00520
9789865315948
GPN：1011300567
定價 520 元