113-068-6222
IOT-112-TCF003

公路系統因應氣候變遷強化調適能力案例研析(附冊)-公路系統規劃階段氣候變遷調適指引

交通部運輸研究所

中華民國 113 年 10 月

113-068-6222
IOT-112-TCF003

公路系統因應氣候變遷強化調適能力案例研析(附冊)-公路系統規劃階段氣候變遷調適指引

著者：吳清如、吳柏萱、林真德、孫玉慈、童新茹
朱珮芸、鄔德傳、賴宜弘、蕭為元、楊家銘

交通部運輸研究所

中華民國 113 年 10 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

公路系統因應氣候變遷強化調適能力案例研析(附冊)-公路系統規劃階段氣候變遷調適指引 / 吳清如, 吳柏萱, 林真德, 孫玉慈, 童新茹, 朱珮芸, 鄔德傳, 賴宜弘, 蕭為元, 楊家銘著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 113.10

面; 公分

ISBN 978-986-531-626-6(平裝)

1.CST: 公路管理 2.CST: 運輸系統 3.CST: 風險管理

557 113015500

公路系統因應氣候變遷強化調適能力案例研析(附冊)-公路系統規劃階段氣候變遷調適指引

著　　者：吳清如、吳柏萱、林真德、孫玉慈、童新茹、朱珮芸、鄔德傳、賴宜弘、蕭為元、楊家銘
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 10 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： 170 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：1011301420　　ISBN： 978-986-531-626-6（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：公路系統因應氣候變遷強化調適能力案例研析(附冊)-公路系統規劃階段氣候變遷調適指引</td></tr>
<tr><td>國際標準書號（或叢刊號）
ISBN978-986-531-626-6(平裝)</td><td>政府出版品統一編號
1011301420</td><td>運輸研究所出版品編號
113-068-6222</td><td>計畫編號
112-TCF003</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：朱珮芸
研究人員：鄔德傳、賴宜弘、蕭為元、楊家銘
聯絡電話：02-2349-6872
傳真號碼：02-2712-0223</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、林真德、孫玉慈、童新茹
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 112 年 3 月
至 112 年 12 月</td></tr>
<tr><td colspan="4">關鍵詞：氣候變遷因應法、氣候變遷調適、運輸系統、公路系統、案例研析</td></tr>
<tr><td colspan="4">摘要：

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》，並於 112 年 2 月公布修正為《氣候變遷因應法》，其中第 19 條明定中央目的事業主管機關應就易受氣候變遷衝擊之權責領域，訂定四年為一期之該領域調適行動方案，以因應氣候變遷下全球暖化衝擊。

各運輸次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之調適仍有不足之虞，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。

承上，本所於前期計畫已研擬「公路系統規劃階段調適指引」文本，為期進一步引導公路設施權責主管機關具體落實應用，本計畫持續蒐集與研析調適實務案例，並以實際案例演示風險評估與調適策略之機制與做法，提供公路設施權責主管機關參考，俾利其強化公路系統規劃設計及管理，提升公路系統調適能力；同時辦理公路調適專業知識教育訓練，以利國內調適相關業務之推動。</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 10 月</td><td>144</td><td>170</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: Case Studies of Enhancing Highway System's Adaptive Capacity to Climate Change (Appendix)- Guidelines for Climate Change Adaptation during the Highway System Planning Stage

ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
ISBN 978-986-531-626-6(pbk.)	1011301420	113-068-6222	112-TCF003

DIVISION: Transportation Energy and Environment Division
DIVISION DIRECTOR: Pei-Yun Chu
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Pei-Yun Chu
PROJECT STAFF: Deh-Juan Wu, I-Hung Lai, Wei-Yuan Hsiao, Chia-Ming Yang
PHONE: 886-2-23496872
FAX: 886-2-27120223

PROJECT PERIOD

FROM March 2023
TO December 2023

RESEARCH AGENCY: THI Consultants lnc.
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ching-Ru Wu
PROJECT STAFF: Bo-Syuan Wu, Jhen-De Lin, Yu-Ci Sun, Hsin-Ju Tong
ADDRESS: 5F, No. 130, Sung-Shan Road, Taipei, Taiwan, R.O.C.
PHONE: 886-2-27488822

KEY WORDS: Climate Change Response Act, climate change adaptation, transportation system, highway system, case study

ABSTRACT:

To strengthen Taiwan's resilience to climate change, "Greenhouse Gas Reduction and Management Act" ratified in July 2015 and the amendment to the "Climate Change Response Act" announced in February 2023, of which Article 19 requires the central industry's competent authorities to formulate and revise the Adaptation Action Programs for particular sectors, by corresponding sectors vulnerable to climate change impacts. The Adaptation Action Programs should be four years in each sector.

Among the entire transportation system, road systems are the most closely related to people's daily lives. 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.

Therefore, the Institute of Transportation（Ministry of Transportation and Communications）has developed the "Climate Change Adaptation Guidelines for Highway Systems in the Planning Phase." This project aims to collect and analyze practical cases of adaptation as a reference, to use an actual case to demonstrate the mechanisms and practices of risk assessment and adaptive strategies, and to guide the competent authorities in charge of highway facilities to implement their applications. Besides, training sessions were held to strengthen the competent authorities in charge of highway facilities to improve the highway system's adaptive capacities. This project also compiled an adaptation outcome report and capacity building report of the critical infrastructure field.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE
October 2024	144	170

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

目錄

摘要

壹、導讀 1-1

1.1 前言 1-1

1.2 名詞定義 1-4

1.3 氣候變遷調適基本概念 1-7

1.4 氣候變遷調適發展趨勢 1-12

1.5 指引結構及應用說明 1-15

貳、氣候變遷對公路系統的影響 2-1

2.1 全球暖化與氣候情境推估 2-1

2.2 臺灣氣候變遷趨勢 2-4

2.3 氣候壓力對公路系統之衝擊 2-6

參、公路系統規劃階段強化調適能力機制 3-1

3.1 公路系統規劃流程導入氣候變遷調適之框架 3-1

3.2 第一階段：蒐集與分析氣候變遷相關資料 3-3

3.3 第二階段：初步評估影響調適能力的氣候風險因素 3-6

3.4 第三階段：執行氣候變遷風險評估 3-9

3.5 本章重要觀念 3-17

肆、前置作業 4-1

伍、公路系統規劃階段氣候變遷風險評估作業方法 5-1

5.1 建構公路系統氣候衝擊鏈 5-1

5.2 執行公路系統氣候變遷風險評估方法 5-7

5.3 本章重要觀念 5-24

陸、公路系統調適選項及決策方法 6-1

6.1 公路系統因應氣候變遷之調適選項 6-1

6.2 面對高度不確定性之決策方法 6-16

6.3 本章重要觀念 6-21

柒、結語 7-1

7.1 結語 7-1
7.2 學習資源 7-2

參考文獻

附錄、公路系統規劃階段調適示範案例演示

表目錄

表 1-1　專有名詞定義彙整表 1-4
表 1-2　ISO 近 5 年發布有關氣候變遷調適之標準一覽表 1-13
表 2-1　IPCC AR4 至 AR6 之氣候情境比較表 2-2
表 2-2　各種排放情境下的增溫幅度推估表 2-3
表 2-3　我國公路系統面臨的潛在氣候衝擊綜理表 2-9
表 3-1　OO 公路計畫氣候變遷資料蒐集分析資訊綜理表 (OO 年採 OO 情境)示例 3-5
表 3-2　OO 公路路廊潛在氣候變遷風險說明表(OO 年採 OO 情境)示例 3-8
表 3-3　OO 公路計畫氣候變遷風險評估表(OO 年採 OO 情境)示例 3-11
表 4-1　氣候變遷相關資料蒐集與分析項目參考表 4-8
表 4-2　公路系統規劃階段氣候變遷風險評估之前置作業 4-12
表 5-1　可能性分級標準參考表 5-2
表 5-2　嚴重性分級標準參考表 5-3
表 5-3　風險評級標準參考表 5-5
表 6-1　公路系統氣候衝擊與調適選項類別對照表 6-7
表 7-1　國內氣候變遷調適相關資訊網站 7-2
表 7-2　國際氣候變遷調適資訊網站 7-3

圖目錄

圖 1-1　連續極端天氣事件對公路系統的衝擊 1-1
圖 1-2　公路系統建設流程 1-3
圖 1-3　氣候變遷風險的基本概念 1-7
圖 1-4　氣候變遷風險與調適作為（以公路系統為例） 1-8
圖 1-5　氣候變遷調適行動決策之基本要素 1-9
圖 1-6　氣候韌性發展概念圖 1-10
圖 1-7　調適及防（減）災的異同及關聯性 1-11
圖 1-8　本指引章節架構 1-15
圖 1-9　本指引應用索引 1-16
圖 2-1　IPCC AR6 之氣候情境框架 2-2
圖 2-2　國際趨勢：同時呈現排放情境&固定增溫情境 2-3
圖 2-3　固定暖化情境之參考基準、基期與增溫情境與時程 2-5
圖 2-4　公路系統之路段概念 2-7
圖 2-5　公路系統之路廊概念 2-7
圖 2-6　公路系統之路網概念 2-8
圖 2-7　各項氣候壓力對公路系統的衝擊 2-9
圖 3-1　公路系統規劃作業流程導入調適理念之框架（I） 3-1
圖 3-2　公路系統規劃作業流程導入調適理念之框架（II） 3-2
圖 3-3　「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」作業程序說明 3-4
圖 3-4　「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」作業程序說明 3-8
圖 3-5　「氣候變遷風險評估」作業程序說明 3-10
圖 5-1　IPCC 對於氣候變遷風險的定義 5-2
圖 5-2　氣候衝擊鏈分析示例說明 5-3
圖 5-3　山區公路氣候衝擊鏈分析示意圖（強降雨） 5-5
圖 5-4　平原公路氣候衝擊分析示意圖（暴潮/風浪、海平面上升） 5-6
圖 5-5　公路系統規劃階段氣候變遷風險評估作業方法 5-10
圖 6-1　以自然為本生態元素與結構元素之風險程度適用性 6-3
圖 6-2　海島國家應用調適選項以降低沿海地區氣候風險 6-5
圖 6-3　面對未來不確定性之決策概念 6-17

圖 6-4　情境規劃八步驟 6-18
圖 6-5　調適路徑示意圖 6-19
圖 6-6　穩健決策（RDM）過程 6-20

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。公路系統的氣候變遷調適，簡言之，即是「管理、處理及治理氣候變遷為公路系統所帶來的風險」。

欲強化公路系統因應氣候變遷的調適能力，於規劃階段即以全生命週期的觀點周延盤點規劃、設計、施工及後續養護管理各階段的潛在風險，及早納入規劃內容可達到最大調適效果。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導入管理、處理及治理氣候變遷風險的作為，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。

本指引屬框架層次指引，主要內容為引介理念、機制及方法，並輔以國內外案例加強說明。本指引旨在協助公路系統建設計畫於規劃階段（指可行性研究及綜合規劃階段）循既有的「資料蒐集分析」、「方案研擬與評估」以及「工程研究與評估」作業程序，適時嵌入「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」、「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」以及「氣候變遷風險評估」等工作，並將工作成果導入既有的「工程研究」、「維護計畫研析」以及「風險管理計畫研議」等作業之內容，透過一個由粗而細、由淺而深的程序掌握計畫的氣候變遷風險，並研擬妥適的調適選項以強化氣候韌性。

此外，綜合考量當前國內氣候變遷調適知識、技術及資訊等條件，本指引提出適合公路系統規劃階段採用的氣候變遷風險評估作業方法、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、施工及後續養護管理等各階段之氣候變遷調適作業。

本指引主要目的在協助熟練的公路專業規劃者，於專案規劃過程導入氣候變遷調適，除了公路專業規劃者之外，必要時建議與氣候科學專家及其他利害關係人一起工作。此外，本指引亦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，以從中獲得公路系統氣候變遷調適的知識。

壹、導讀

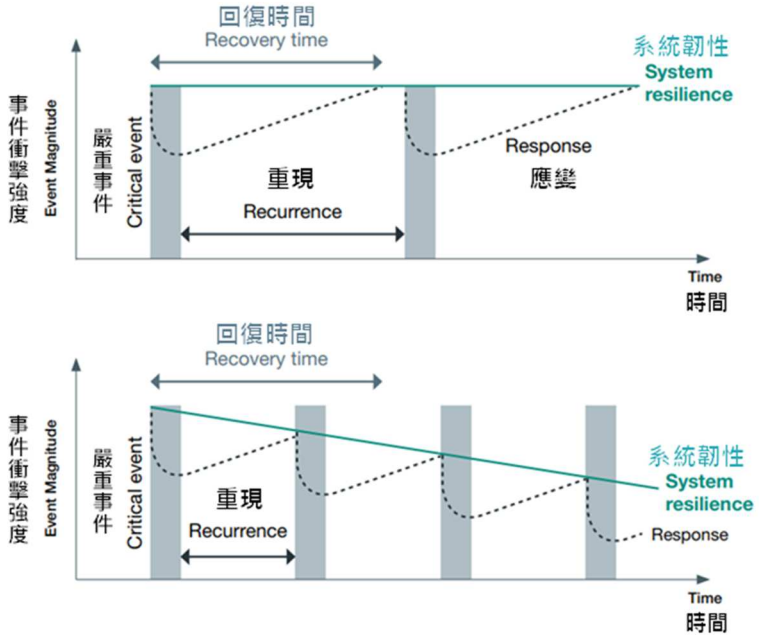
氣候變遷調適，簡言之，即是「管理、處理及治理氣候變遷為系統所帶來的風險」。於規劃階段強化公路系統因應氣候變遷的調適能力，即是在既有的規劃作業程序中導入管理、處理及治理氣候變遷風險的作為。

本章內容為導讀，說明指引之前言、名詞定義、氣候變遷調適的基本概念、國內外氣候變遷調適趨勢以及指引的章節架構及應用索引等，期有助於讀者閱讀本指引。

1.1 前言

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，應於公路系統規劃時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. 指引目的

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、系統性地導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。

3. 指引性質

本指引屬框架層次指引，主要內容為引介理念、機制及方法，並輔以國內外案例補充說明，期加強讀者的理解。

4. 指引內容

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導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導入公路系統規劃作業之流程、步驟及重要原則。

(2) 「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）的作業方式等。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。

5. 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）。

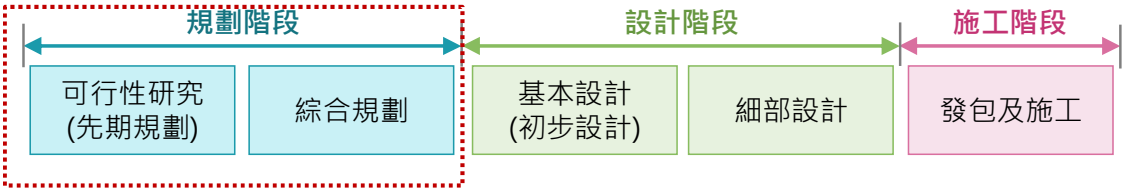


圖 1-2　公路系統建設流程

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，二規劃階段作業皆需依專案所掌握之資料精度及發現問題的具體程度導入氣候變遷調適的考量。

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，可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、施工及維護管理等各階段之氣候變遷調適工作。

6. 適用對象

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

(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）》、《氣候變遷因應法》（以下簡稱氣候法）以及行政院環保署（今環境部）於 112 年 3 月出版之《氣候變遷專有名詞手冊》等。

表 1-1　專有名詞定義彙整表

名詞	定義 [視需要以公路系統舉例說明]	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

名詞	定義 [視需要以公路系統舉例說明]	參考來源
情境 （Scenario）	對於未來將如何發展的一種合理的描述。情境是基於對於關鍵驅動力（例如技術變革率、價格）的一套連貫且具內部一致性的假設。但要注意的是，情境既不是預測（predictions）也不是預報（forecasts），而是用來提供對發展和行動所產生的可能後果的預視。	AR6 總結報告附件第 128 頁
氣候壓力 （Climatic impact-drive）	指影響社會或生態系統要素的物理性氣候系統條件（例如平均值、事件或極端值）。	AR6 總結報告附件第 122 頁
危害 （Hazard）	指可能發生的自然或人為物理事件、趨勢或物理影響，可能造成生命損失、傷害或其它健康影響及財產、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。 [例如，發生極端高溫、強降雨事件可能造成　山區土石崩塌，導致公路系統損壞。]	AR5：綜合總結報告第 124 頁
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。 [例如，既有道路的交通量，抑或是規劃新建中的重要聯外道路、轉運場站等。]	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。 [例如，某公路的部分路段位於土石流潛勢區，表該路段於土石流危害中的「脆弱度」。]	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。 [例如，公路的主管機關備具有評估、治理氣候變遷風險的能力、機制、工具、經費、人力…]	AR5：綜合總結報告第 118 頁
衝擊 （Impacts）	與氣候相關的風險對自然與人為系統產生的影響或後果，其衝擊可能是不利或有利的。	氣候變遷專有名詞手冊第 13 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

名詞	定義 [視需要以公路系統舉例說明]	參考來源
氣候變遷風險（Climate change risk）	指氣候變遷衝擊對自然生態及人類社會系統造成的可能損害程度。氣候變遷風險的組成因子為氣候變遷危害、暴露度及脆弱度。 [例如，因氣候變遷導致極端降雨（危害），造成位於土石流潛勢區（脆弱度），交通量大之唯一聯外道路（暴露度）面臨極高的氣候衝擊「風險」（危害、暴露度及脆弱度的交集），包括系統本身毀損的風險（直接風險），及系統聯外運輸功能中斷的風險，導致居民經濟受損的風險（間接風險）。]	氣候法第 3 條
氣候變遷調適（Climate change adaptation）	指人類與自然系統為回應實際、預期氣候變遷風險或其影響之調整適應過程，透過建構氣候變遷調適能力並提升韌性，緩和因氣候變遷所造成之衝擊或損害，或利用其可能有利之情勢。 [例如，因應上述氣候變遷風險，採取路段預警性封閉措施，並研擬區域道路交通改道計畫；同時，依據未來氣候變遷情境展開氣候變遷風險評估作業，依據風險評估結果研擬調適選項，展開各橋梁的改建評估，並研擬相關配套措施及後續檢討機制。]	氣候法第 3 條
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
風險評估（Risk assessment）	對於風險進行定性或定量的科學估計。	AR6：衝擊、調適與脆弱度第 2921 頁
調適選項（Adaptation options）	一系列可用於調適的策略和措施，其涵括廣泛的行動（actions），可分為結構的、制度的、生態的或行為上的行動。	AR6：衝擊、調適與脆弱度第 2898 頁
調適路徑（Adaptation pathways）	自然或人類系統向未來狀態的時間演化。路徑概念為從一定量和定性場景或潛在未來情境，到以解決方案為導向的決策過程，用以實現理想的社會目標。路徑方法通常側重於生物物理學、技術經濟或社會行為軌跡，並涉及不同規模的各種動態、目標和參與者。	氣候變遷專有名詞手冊第 19 頁
以自然為本的解決方案（Nature-based Solutions, NbS）	國際自然保育聯盟（IUCN）將 NbS 定義為：「可以有效且調適應對社會挑戰，提供永續管理及保護或復育自然之行動，進而為人類福祉及生物多樣性帶來效益。」	以自然為本的解決方案應對全球社會挑戰第 5 頁

資料來源：本指引彙整。

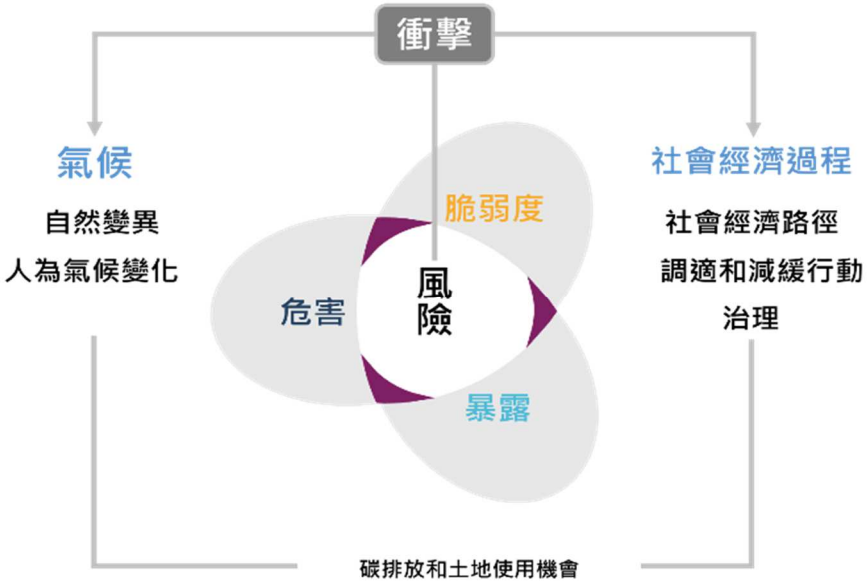
1.3 氣候變遷調適基本概念

依據《氣候變遷因應法》第 3 條，「氣候變遷調適」指人類與自然系統為回應實際、預期氣候變遷風險或其影響之調整適應過程，透過建構氣候變遷調適能力並提升韌性，緩和因氣候變遷所造成之衝擊或損害，或利用其可能有利之情勢。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」。

以下綜述氣候變遷風險、調適作為、調適決策、以及邁向氣候韌性發展以及調適與防（減）災的關聯等概念，建立閱讀指引的基本認知。

1. 氣候變遷風險

IPCC AR6 對於氣候變遷調適的核心操作概念延續自 AR5，其概念為「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」，並進一步指出「氣候衝擊風險」取決於三種主要因素－危害（Hazard）、暴露度（Exposure）及脆弱度（Vulnerability），三種因素的互動關係決定了風險的大小與內容，而氣候與社會經濟過程的變化則是造成危害度、暴露度及脆弱度改變的驅動因素，從而影響氣候風險（參見圖 1-3）。



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

圖 1-3　氣候變遷風險的基本概念

2. 氣候變遷調適作為

從實務面來看，氣候變遷調適作為即是管理、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（參見圖 1-4）。

聯合國氣候變化綱要公約（United Nations Framework Convention on Climate Change, 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「以自然為本的解決方案（Nature-based Solutions, NbS）」甚至有助於達成溫室氣體減緩的正面效益。

歐盟近年大力推動 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。

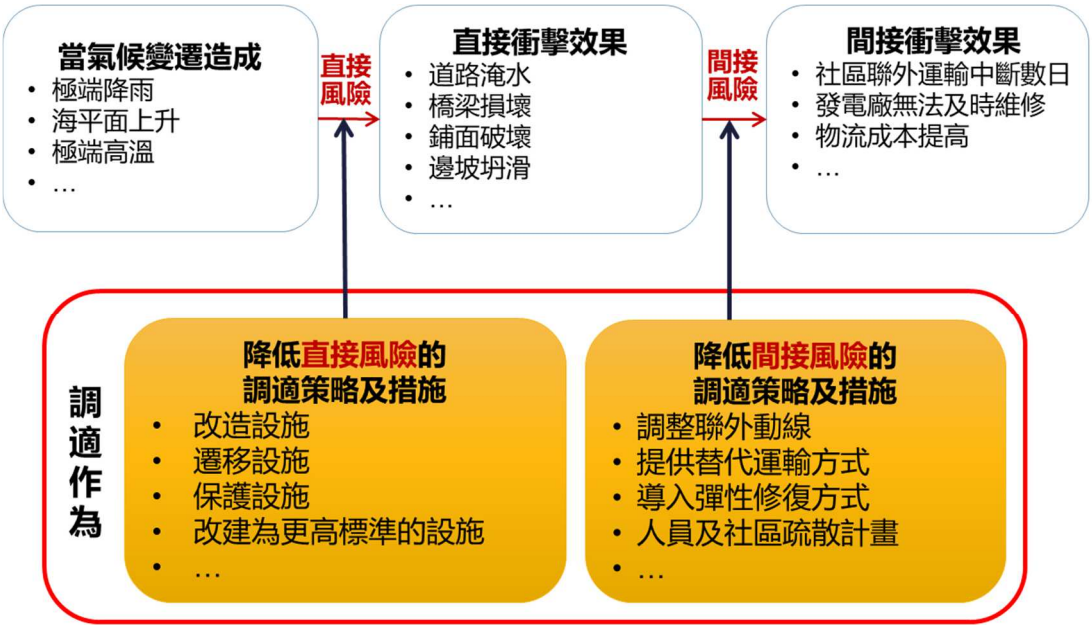


圖 1-4　氣候變遷風險與調適作為（以公路系統為例）

3. 調適決策

調適是一個調整適應的過程，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，歸納調適決策應涵蓋五項基本要素（參見圖 1-5），包括：

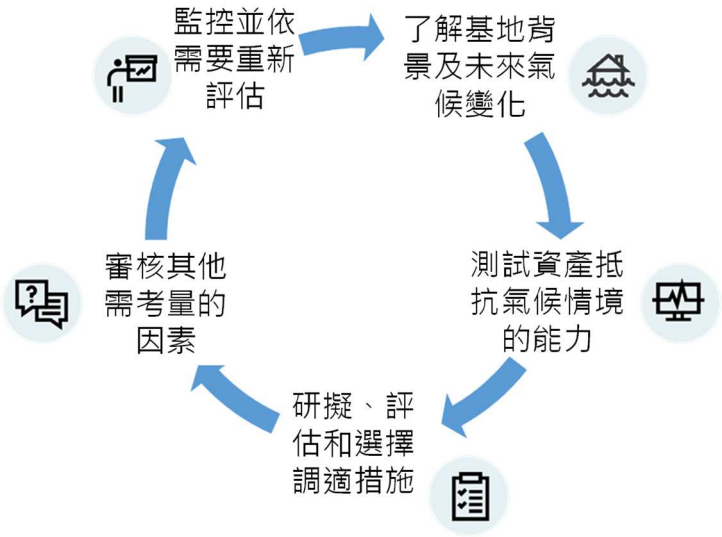
(1) 瞭解基地背景及未來變化。

(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　氣候變遷調適行動決策之基本要素

4. 從氣候危機邁向氣候韌性發展

IPCC AR6 指出「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，而三者之彼此互動方式實為減緩氣候變遷衝擊及風險的關鍵所在（參見圖 1-6）。

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。

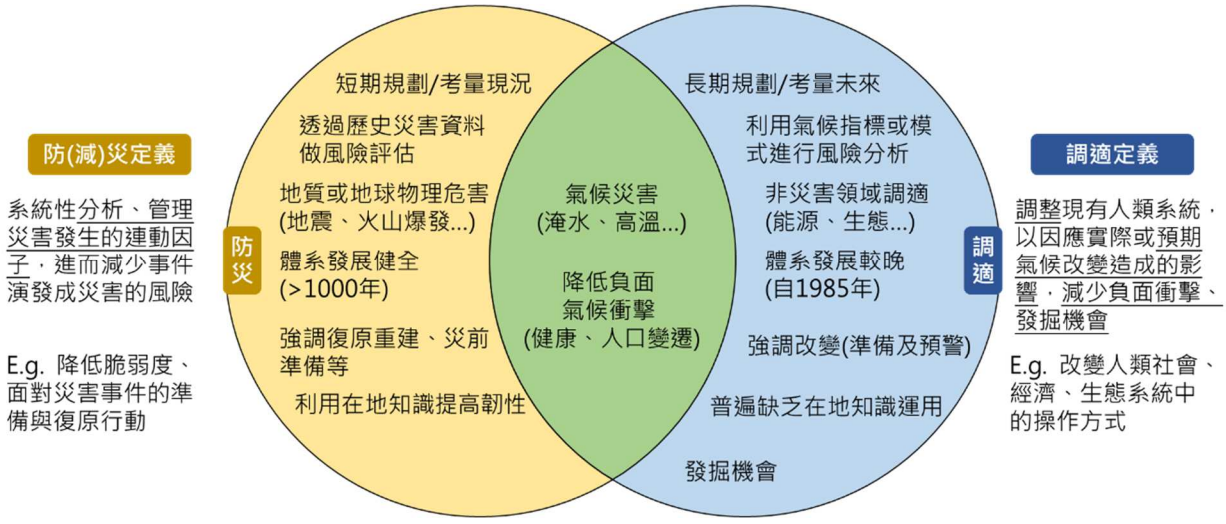
資料來源：IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022.

圖 1-6　氣候韌性發展概念圖

5. 調適與防（減）災的異同及關聯性

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（參見圖 1-7）。

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，應考量將調適策略立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 1-7　調適及防（減）災的異同及關聯性

1.4 氣候變遷調適發展趨勢

1. 國際氣候變遷調適趨勢

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

隨著氣候變遷帶來的影響越發嚴重，全球對於調適規範的需求也日益增長，目前為止國際標準組織（International Organization for Standardization, ISO）已公布了四項氣候變遷調適相關標準（參見表 1-2）。

表 1-2　ISO 近 5 年發布有關氣候變遷調適之標準一覽表

ISO 編號	標準主題	公布年
ISO 14090	氣侯變遷調適－原則、規定與指引 Adaptation to climate change - Principles, requirements and guidelines	2019
ISO 14091	氣侯變遷調適－脆弱度、衝擊及風險評估指引 Adaptation to climate change - Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment	2021
ISO 14092	氣侯變遷調適－對地方政府和社區調適計畫之要求事項和指引 Adaptation to climate change - Requirements and guidance on adaptation planning for local governments and communities	2020
ISO 14093	氣候變遷地方調適計畫融資機制－基於績效之氣候韌性補助－要求事項和指引 Mechanism for financing local adaptation to climate change - Performance-based climate resilience grants - Requirements and guidelines	2022
ISO 14097	溫室氣體管理與相關活動－評估與報導氣候變遷相關投融資活動之原則及要求 Greenhouse gas management and related activities-Framework including principles and requirements for assessing and reporting investments and financing activities related to climate change	2021

資料來源：ISO, International Organization for Standardization, 最後檢視日期：2024.6.5。

其中，ISO14090 為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。該指引中提及調適計畫研擬的 10 大原則：

(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：調適導入組織政策、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。

ISO 14091 依循 ISO14090 的架構進一步延伸，提出脆弱度、衝擊及風險評估指引。指出風險評估為調適規劃、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《溫室氣體減量及管理法》(簡稱溫管法)，並於 112 年 2 月公布修正為《氣候變遷因應法》(簡稱氣候法)，新增氣候變遷調適專章，明定各級主管機關應推動之調適能力建構事項。

其中第 18 條規定中央主管機關與中央科技主管機關應輔導各級政府使用氣候變遷科學報告，進行氣候變遷風險評估，做為研擬、推動調適方案及策略之依據。據此，環境部刻正研訂《氣候變遷因應法施行細則》及《氣候變遷風險評估作業準則》，後續擬供各部會做為擬定符合自身使用的細部操作指引之參考。

1.5 指引結構及應用說明

本指引第一章為導讀（即本章），說明指引的研擬目的、氣候變遷調適基本知識、國內外趨勢以及指引結構；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導入公路系統之規劃流程，並說明各階段之作業程序；第四章衡酌 ISO 14090 等系列標準研擬前置作業；第五章則依據所建立之機制，進一步說明公路系統氣候變遷風險評估可採用的作業方法；第六章為公路系統調適選項及決策方法；第七章為結語，同時分享氣候變遷調適的學習資源；此外，於附錄進一步提供國內示範案例演示過程及成果，期有助於提升讀者對本指引內容之理解（參見圖 1-8）。

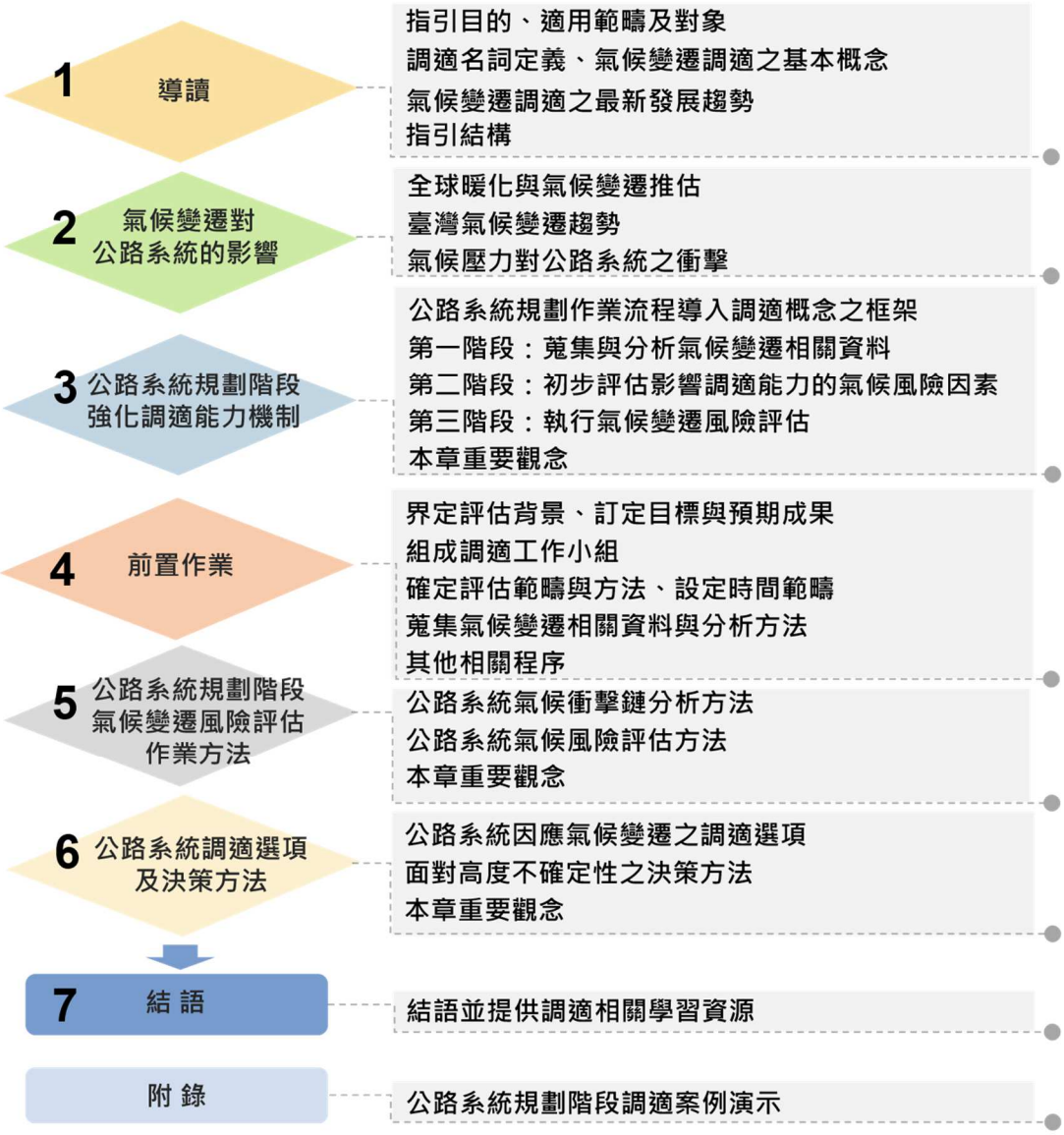


圖 1-8　本指引章節架構

此外，為利於本指引之應用，進一步採用使用者觀點將公路系統之規劃作業分為「資料蒐集分析」、「方案研擬與評估」及「工程研究與評估」三階段，依序逐項說明於各階段應導入之氣候變遷調適作為，以及導入該項作業時可查閱之作業程序、方法以及作業成果要求等內容所在之章節位置，便於使用者依需要快速查閱指引（參見圖 1-9）。

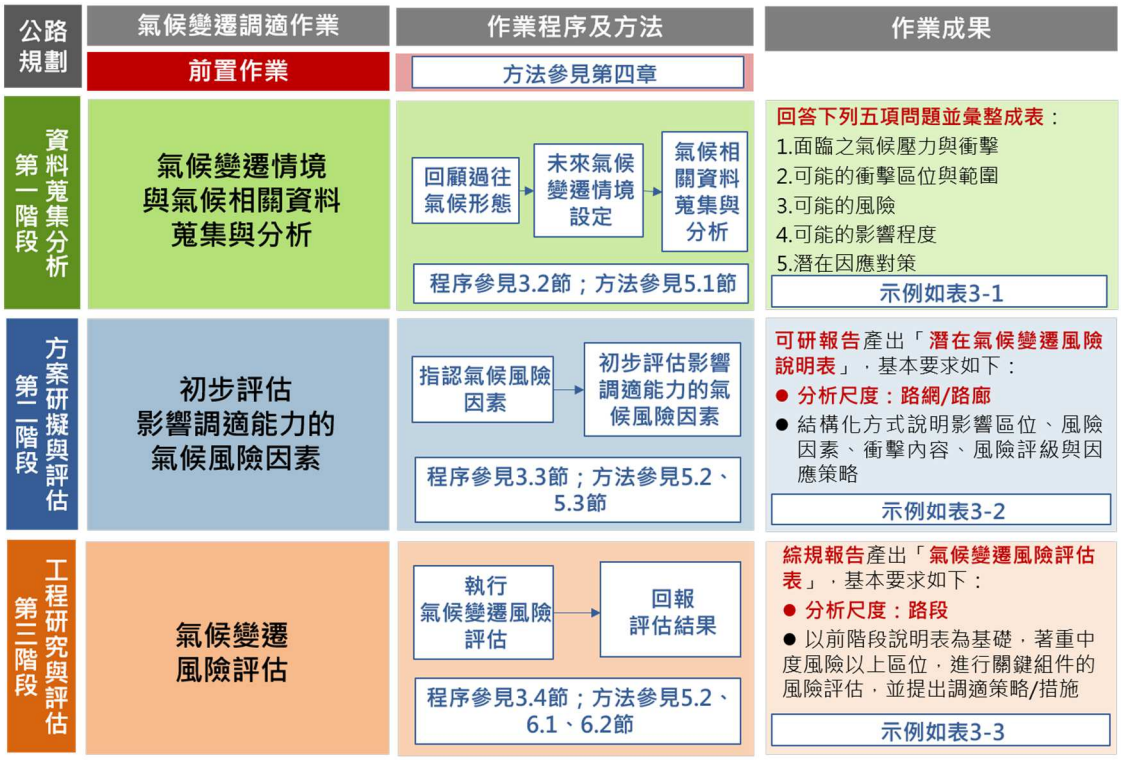


圖 1-9　本指引應用索引

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，而在氣候變遷的環境下，極端天氣事件發生的頻率增加，事件持續的時間可能拉長、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。

本章首先概述全球暖化與氣候情境推估資訊，接續說明臺灣氣候變遷的趨勢，最後針對公路系統面臨的重大氣候壓力類型，分就路段、路廊及路網等三種不同的尺度觀點闡述我國公路系統可能面臨的氣候變遷衝擊。

2.1 全球暖化與氣候情境推估

1. IPCC 氣候情境推估

IPCC 為負責集結全球氣候變遷相關科學成果之國際組織，每 5 至 7 年發布一次評估報告，提供國際氣候變遷相關科學成果與進展，做為各國決策與學術研究之參考。

IPCC 已分別於 1990 年、1995 年、2001 年、2007 年、2013 年發布第一次至第五次評估報告，並於 2021 至 2023 年間發布第六次評估報告（The 6th Assessment Report, AR6）。

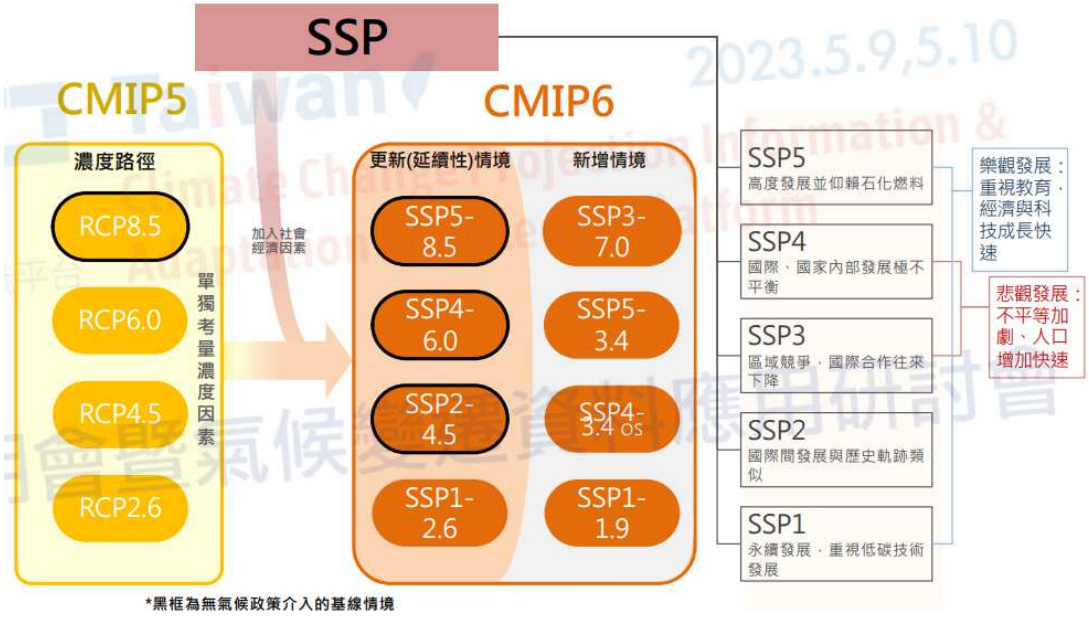
其中，從 AR4、AR5 到 AR6 所考量的氣候模式與氣候情境越來越多。2013 年發布之 AR5 報告以代表濃度路徑（Representative Concentration Pathways, RCPs）來推估未來氣候變遷情境，共提出 RCP2.6（暖化趨緩）、RCP4.5（低度暖化）、RCP6.0（中度暖化）與 RCP8.5（高度暖化）的四種假設情境。

2021 年發布之 AR6 報告採用的氣候情境則是結合「共享社會經濟路徑（Shared Socioeconomic Pathways, SSPs）與代表濃度路徑」，簡稱為 SSP 排放情境（SSP-RCPs），其中 SSPs 代表社會經濟發展、RCPs 代表溫室氣體排放或濃度變化所造成的輻射強迫力結果，兩者交織下的多元情境提供不同暖化路徑選項，例如 SSP1-2.6（低排放量/巴黎協議）、SSP2-4.5（中排放量/最有可能情況）、SSP3-7.0（高排放量/延續目前狀況）、SSP5-8.5（極高排放量/減碳失敗）等。

表 2-1　IPCC AR4 至 AR6 之氣候情境比較表

報告名稱	AR6	AR5	AR4
發布年	2021	2013	2007
模式資料	CMIP6	CMIP5	CMIP6
常用情境	多元情境提供不同暖化路徑選項(SSPx-x.x)	RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、 RCP8.5	B1、A1B、A2
空間解析度	更高解析度全球模式(60~125km)	100~250km	250~350 km
模式數	60 個	42 個	24 個

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：2023.10.31。



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：2023.10.31。

圖 2-1　IPCC AR6 之氣候情境框架

IPCC AR6 對於全球增溫的推估係以排放情境為基礎，以工業化前（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（參見表 2-2）。

表 2-2　各種排放情境下的增溫幅度推估表

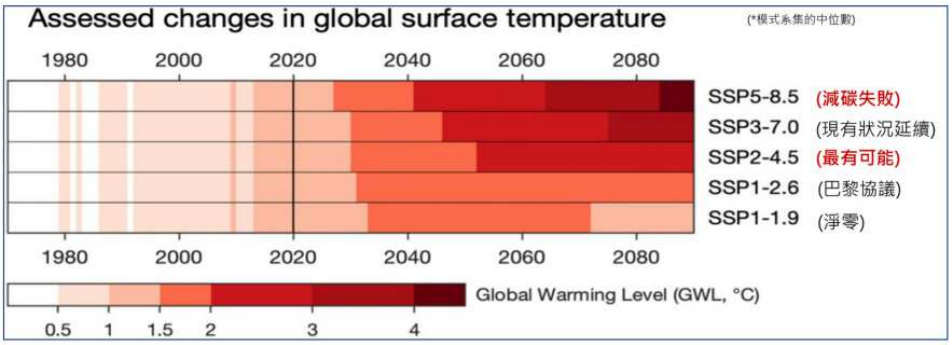
增溫幅度影響 \ 排放情境		極低度排放	低度排放	中度排放	高度排放	非常高度
各排放情境在不同時間點之增溫幅度	近期 2021-2040	1.5 (1.2,1.7)	1.5 (1.2,1.8)	1.5 (1.2,1.8)	1.5 (1.2,1.8)	1.6 (1.3,1.9)
	中期 2041-2060	1.6 (1.2,2.0)	1.7 (1.3,2.2)	2.0 (1.6,2.5)	2.1 (1.7,2.6)	2.4 (1.9,3.0)
	長期 2081-2100	1.4 (1.0,1.8)	1.8 (1.3,2.4)	2.7 (2.1,3.5)	3.6 (2.8,4.6)	4.4 (3.3,5.7)
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：2022.10.31。

2. 固定增溫（暖化）情境設定

由於 AR6 採用之 SSP 排放情境的設定複雜，且不同氣候模式對於同一個排放情境所反應的溫度變化差異也很大，為提高氣候情境應用性與理解性，IPCC 將上述情境簡化成不同程度的未來增溫幅度，稱為「全球暖化程度（Global Warming Level）」或「固定增溫情境」來呈現全球暖化推估結果。

依據 IPCC 推估，全球增溫 1.5℃約在 2030 年左右，增溫 2 ℃約在 2045 年左右，而增溫 4℃約在 2070 年左右。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。



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：2023.10.31。

圖 2-2　國際趨勢：同時呈現排放情境＆固定增溫情境

2.2 臺灣氣候變遷趨勢

1. 全球暖化與臺灣氣候變遷推估

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（NCDR）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 2-1 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（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. 國家調適應用情境設定

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 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」作為「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，可作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 2-3 所示：

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

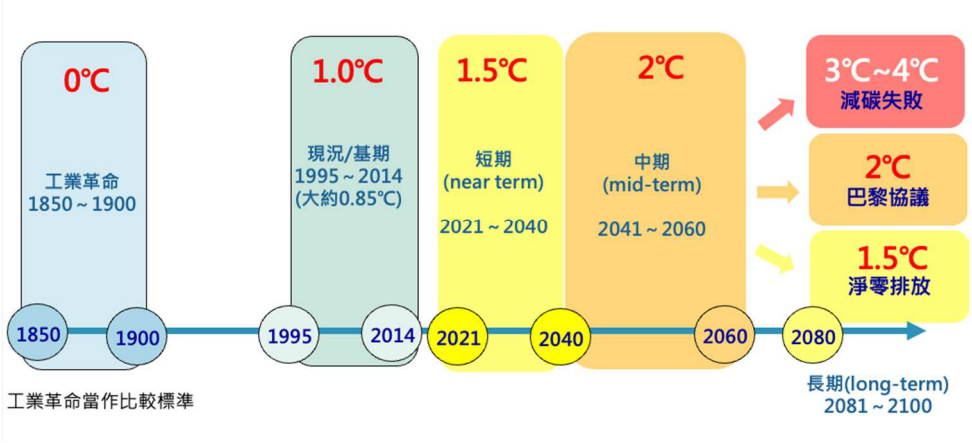
(2) 1℃：現階段氣候基期（1995-2014 年），可做為現有風險評估及其未來缺口的參考基準。

(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：環境部，國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年），民國 112 年。

圖 2-3　固定暖化情境之參考基準、基期與增溫情境與時程

2.3 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

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°C。

(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，就「路段」、「路廊」及「路網」三種不同的尺度觀點，探討公路系統可能面臨的氣候衝擊：

(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（cross-section）等單元組成，路段概念如圖 2-4 所示。

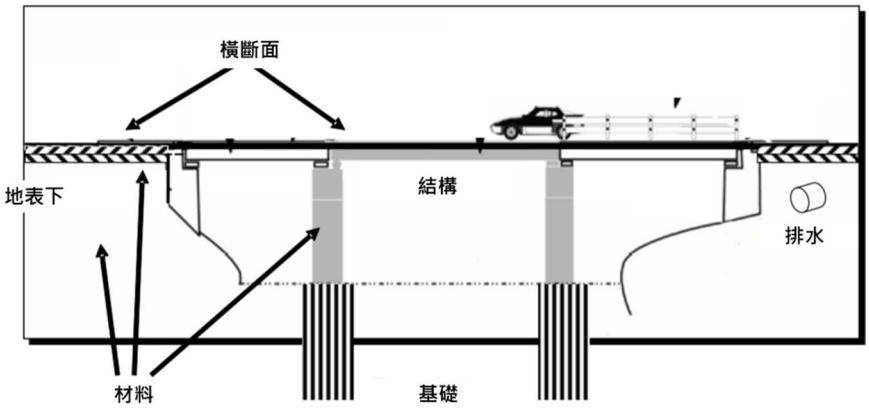
① 基礎/地表下：為耐受力的重要條件之一，設計取決於土壤組成、水表、設施重量與載重。

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。

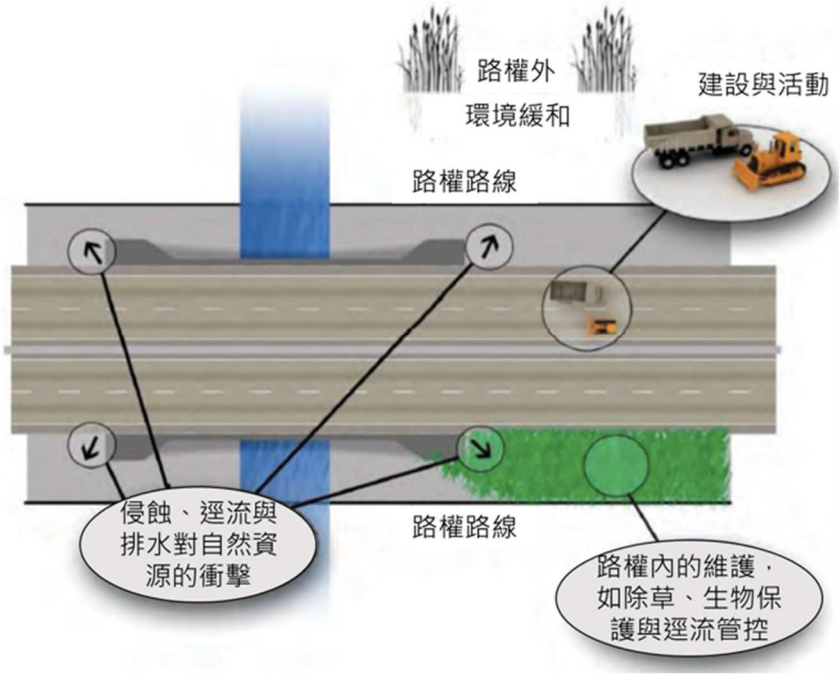


資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.

圖 2-4　公路系統之路段概念

(2) 路廊尺度

路廊尺度觀點指考慮氣候壓力如何衝擊潛在路線沿線及其周邊區域的自然和社會環境，包含水體、生態、社區及活動，綜理公路系統與周邊環境在氣候變遷下可能產生的變異及相互影響關係，路廊概念如圖 2-5 所示。

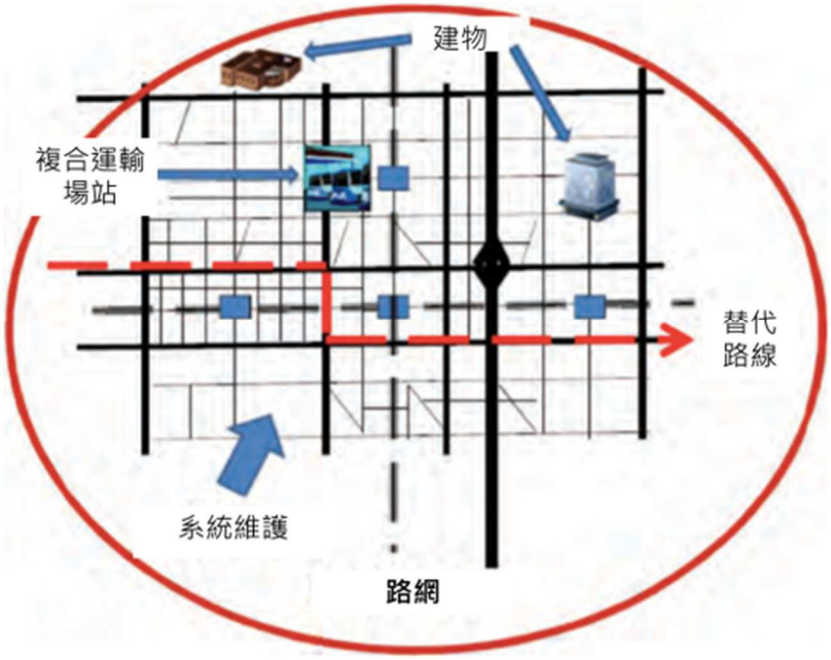


資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.

圖 2-5　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 2-6 所示。



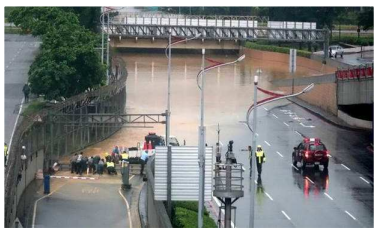
資料來源：National Cooperative Highway Research Program, Climate Change, Extreme Weather Events and the Highway System: A Practitioner's Guide, 2014.

圖 2-6　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 2-7　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、路廊及路網三種不同的尺度加以說明(參見表 2-3)。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 2-3　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 2-3　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	–

資料來源：本指引彙整。

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

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、風險評量及風險處理及執行等 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。

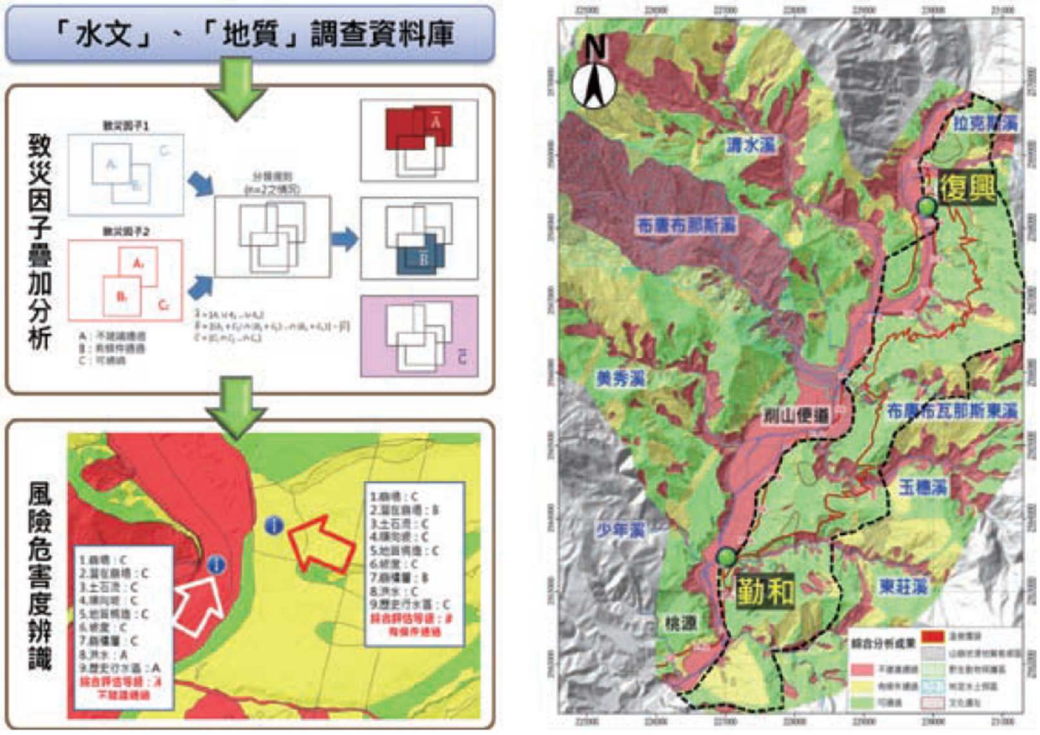
(2) 風險分析

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，以利作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如圖 1 所示。



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 1　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，作為路面高程設計之依據（參見圖 2）。

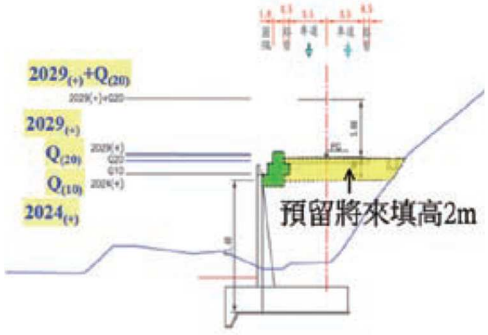


圖 2　路堤段考量河床淤高造成之溢淹

(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 南橫公路復建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

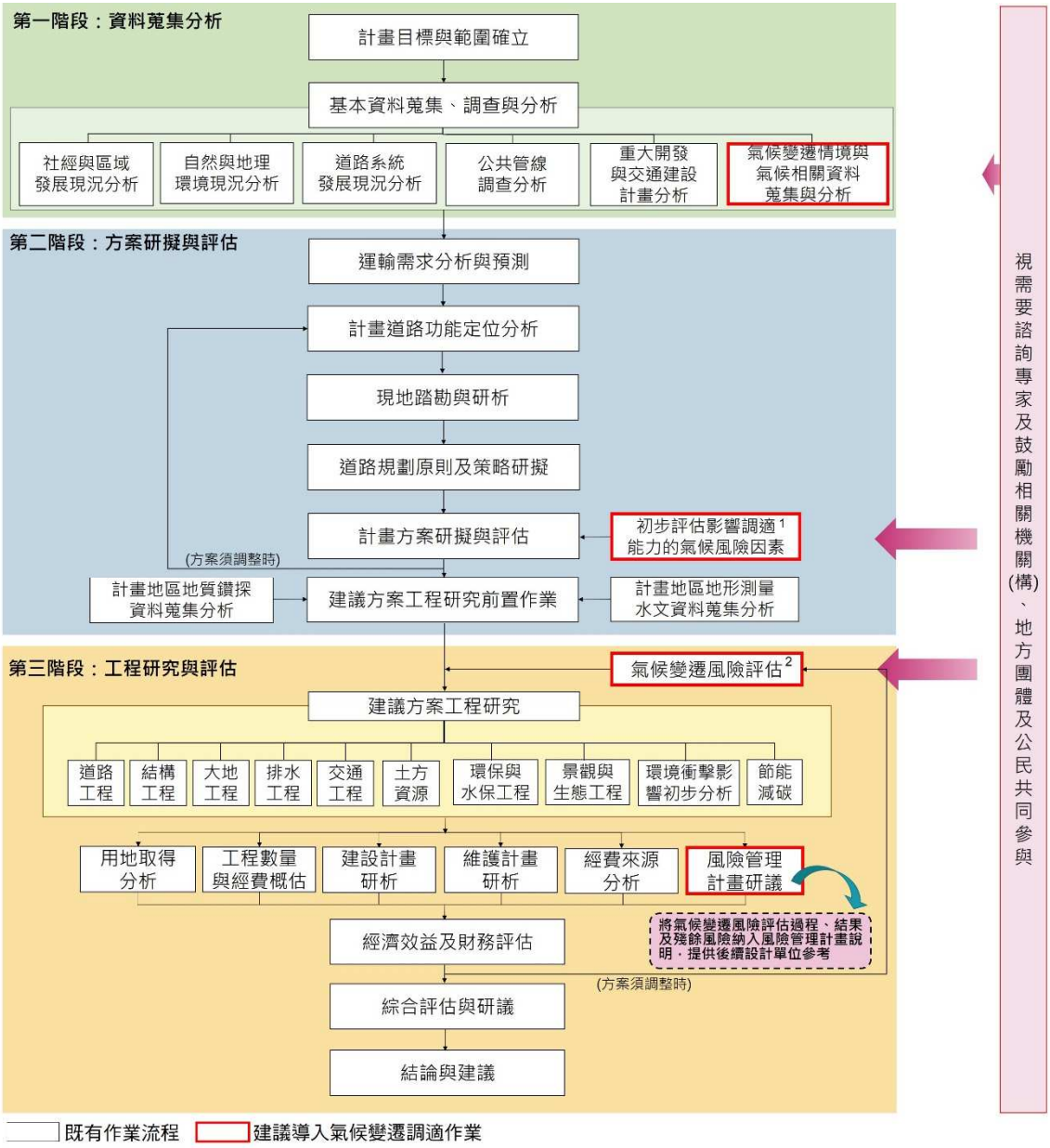
我國公路系統規劃作業機制尚稱完善，惟尚未全面考量氣候變遷對公路設施及周邊地區帶來的衝擊及風險。本章主要說明如何在公路系統規劃流程中導入氣候變遷調適作為，並說明其作業程序以及作業成果之基本要求。

3.1 公路系統規劃流程導入氣候變遷調適之框架

公路系統之規劃作業可概分為「資料蒐集分析」、「方案研擬與評估」以及「工程研究與評估」三階段，為強化公路系統的氣候變遷調適能力，建議於各階段均導入氣候變遷調適作為（參見圖 3-1 及圖 3-2）。

由於氣候變遷調適涵蓋許多工作，故執行前需進行充足的前置作業準備工作，以確保氣候變遷調適流程更為順暢（參見第四章前置作業）。

圖 3-1　公路系統規劃作業流程導入調適理念之框架（I）



註：1.可行性研究階段需執行「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」。

2.綜合規劃階段需執行「氣候變遷風險評估」。

圖 3-2　公路系統規劃作業流程導入調適理念之框架（II）

3.2 第一階段：蒐集與分析氣候變遷相關資料

公路系統規劃的第一階段為「資料蒐集分析」，此階段工作包含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。

為了強化公路系統因應氣候變遷的調適能力，除了歷史與現況基本資料，包含地質、地形、氣候、水文等之外，建議進一步針對計畫範圍未來的氣候變遷推估資訊以及因氣候變遷可能導致的環境變異進行資料蒐集與分析。

以下說明此一階段之調適作為、作業程序以及作業成果基本要求：

1. 調適作為：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與分析。

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，如未來推估的氣溫、降水量及降雨天數、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)以及氣候變遷災害風險調適平台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時，可與專業機構（例如 NCDR）合作或視需要諮詢相關領域專家，為專案量身訂做氣候模擬預測及分析資料。

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三個步驟（參見圖 3-3），說明如下：

(1) 步驟 1：回顧過往氣候形態

依據專案所在區位之環境區位特徵，蒐集過往氣候形態、歷史災害等資訊，以初步瞭解過往氣候條件對專案可能產生的影響，需特別注意環境敏感地區及災害潛勢地區，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，以掌握可能的氣候壓力因素；除了公開資料外，公路主管機關於計畫範圍內的相關養護紀錄、歷史監測資料、歷史災害紀錄等亦為重要資料來源。

(2) 步驟 2：未來氣候變遷情境設定

確立專案所採用的評估年期並進行氣候變遷情境設定，以說明未來氣候變化趨勢，氣候變遷情境設定可參考中央主管機關建議之國家調適應用情境設定，如專案有其他特殊情境設定需求，建議諮詢中央主管機關。

(3) 步驟 3：氣候相關資料蒐集與分析

依據專案所在環境區位特徵、設施性質及功能、設計使用年限及過去與未來可能面臨的氣候壓力因素（例如強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪及海平面上升等五大氣候壓力），研判所需蒐集之未來氣候推估資訊及相關環境變異資料，目前國內未來氣候變遷推估資料與圖資主要由國科會團隊產製，並持續產製最新 AR6 推估資料中。

所蒐集之未來氣候變遷推估資料應能與過往氣候形態氣候進行比較，初步判斷未來氣候壓力因素所造成之衝擊，以及衝擊之影響程度、區位及範圍等，透過此衝擊與影響的判斷過程，可以初步掌握所蒐集之氣候相關資料是否足供後續分析使用。

針對資料不足或無法研判資料蒐集需求等情形，建議與相關主管機關及領域專家研商討論。

本階段有關氣候變遷情境設定與過往及未來氣候變遷相關資料蒐集項目及資料蒐集分析方法，可參見第四章之說明。

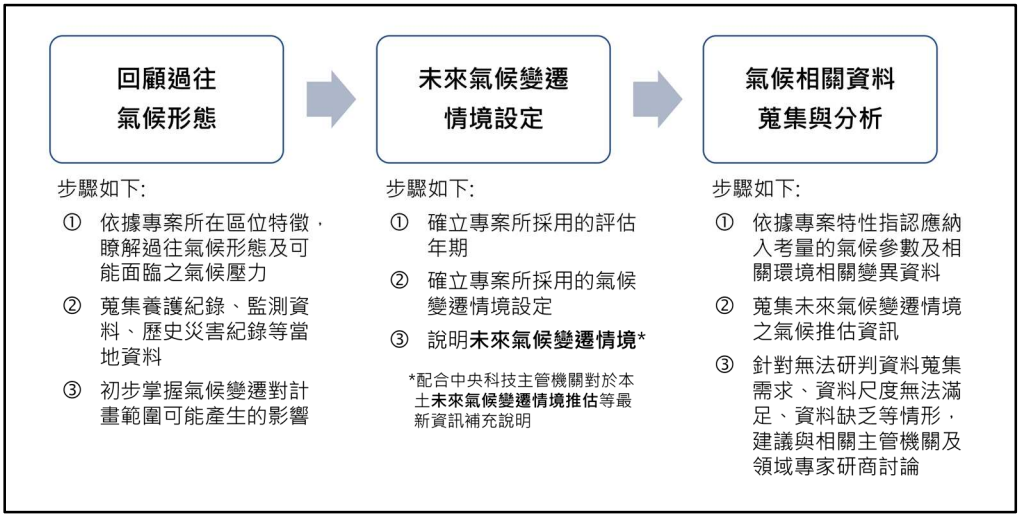


圖 3-3 「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」作業程序說明

3. 作業成果基本要求

經由上述作業程序，依據專案於所選用的未來氣候變遷情境，回答以下五項問題並彙整成表（格式參考表 3-1），以確認所蒐集之氣候變遷推估資料是否足夠，針對其中有疑義或無法確認之處，建議與相關主管機關及相關領域專家進行研商討論。

- 問題 1：未來專案及周邊地區將面臨那些氣候壓力？
- 問題 2：這些氣候壓力對於專案及周邊地區可能的影響是甚麼？那些區位、範圍相對易受影響？
- 問題 3：對於專案可能的風險是甚麼？
- 問題 4：可能的影響程度為何？
- 問題 5：有哪些潛在因應對策可運用？

表 3-1　OO 公路計畫氣候變遷資料蒐集分析資訊綜理表

(OO 年採 OO 情境)示例

氣候壓力	可能的衝擊	易受衝擊區位、範圍	風險研判	影響程度	潛在因應對策
強降雨	強降雨造成淹水衝擊公路設施	OO 區南側 OO 溪兩岸	因強降雨造成平面道路淹水，導致道路阻斷，居民無法進出	嚴重	加強道路排水
高溫	…				
…					

3.3 第二階段：初步評估影響調適能力的氣候風險因素

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。

為了強化公路系統因應氣候變遷的調適能力，建議於此階段開始評估影響各替選方案的氣候風險因素，一方面作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。

以下說明此一階段之調適作為、作業程序以及作業成果基本要求：

1. 調適作為：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、經過地層下陷地區等）以及公路系統暴露在氣候危害因素的程度（例如，既有公路系統之交通量、規劃新建於地勢低窪區域的轉運站）。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。

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二個步驟（參見圖 3-4），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、暴露與脆弱等因素。

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「暴露因素」著重於關注計畫方案可能坐落於對上述危害因素相對敏感區位的基礎設施，或保全對象可能因時間、空間因素而產生的變化，例如，規劃行經地質敏感地區更易因強降雨而致崩塌、行經地層下陷地區的公路因強降雨而遭致更高的淹水機率、沿海地區的公路系統更易受到海平面上升的威脅，抑或是行經既有公路系統之交通量多寡之程度等。

規劃階段考量的公路系統「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，山區社區唯一聯外道路行經順向坡區域、鄰近海岸的都會區重要聯外道路等，一旦敏感環境失控將產生可觀的社會成本。

(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，則建議透過組成調適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及其可能的影響面向、位置與可能性等。

調適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、中度風險以上區位。

針對初步評估指認之中度風險以上之課題提出可能的因應策略，若評估為高風險之方案，應考量該方案可能受威脅的系統壽年、養護頻率等因素，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見第四章之說明。

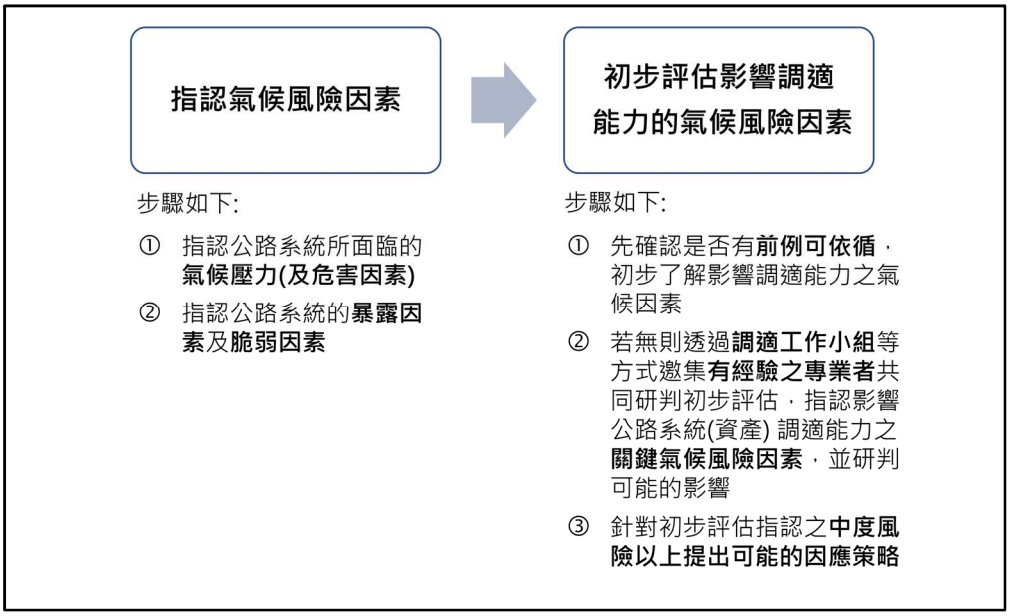


圖 3-4 「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」作業程序說明

3. 作業成果基本要求

配合公路專案計畫不同階段可取得資料之精細度差異，建議於可行性研究階段執行「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」，基本要求如下：

- 分析尺度：路網及路廊尺度。
- 初步評估主要的氣候風險因素：危害因素(Hx)、暴露因素(Ex)、脆弱因素(Vx)。
- 採結構化方式描述說明（影響區位、衝擊內容、可能性、嚴重性、風險評級、因應策略），並彙整成表（格式參考表 3-2）。

表 3-2 OO 公路路廊潛在氣候變遷風險說明表(OO 年採 OO 情境)示例

區位	危害因素	暴露因素	脆弱因素	潛在衝擊說明	可能性(L,5 級)	嚴重性(C,5 級)	風險評級	因應策略
OO 鄉東側	(H1)強降雨	(E1)聯外道路、交通量	(V1)土石流潛勢區	連續強降雨造成土石流中斷道路服務，影響居民生活	3	3	中	可快速修復的道路設計方式
OO 鄉南側	(H1)強降雨	(E1)電廠維修道路	(V2)土石流潛勢區	連續強降雨造成土石流中斷道路服務，影響電廠維運	4	4	中高	強化電廠維運配套措施
…								

3.4 第三階段：執行氣候變遷風險評估

公路系統規劃的第三階段為「工程研究與評估」，通常此一階段的工作包含建議方案工程研究、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）、經濟效益與財務評估等作業，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為「以前階段評估的影響調適能力之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」。

以下說明此一階段之調適作為、作業程序以及作業成果基本要求：

1. 調適作為：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，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。

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二個步驟（參見圖 3-5），說明如下：

(1) 步驟 1：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。

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。

由於國內現階段尚缺乏可量化並直接應用於公路規劃之氣候相關資訊，建議視需要與專業團隊合作，量身訂做針對專案產製的氣候模擬預測及分析，據此瞭解公路專案基礎設施關鍵組件與氣候參數間的相互影響。

(2) 步驟 2：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。

④ 依據評估結果視需要研擬調適選項。

建議將氣候變遷風險評估過程、結果及殘餘風險納入風險管理計畫說明，提供後續規劃設計單位參考。

本階段有關專案氣候變遷風險評估方法與研擬調適選項，可參見 4.4、5.1 及 5.2 節之說明。

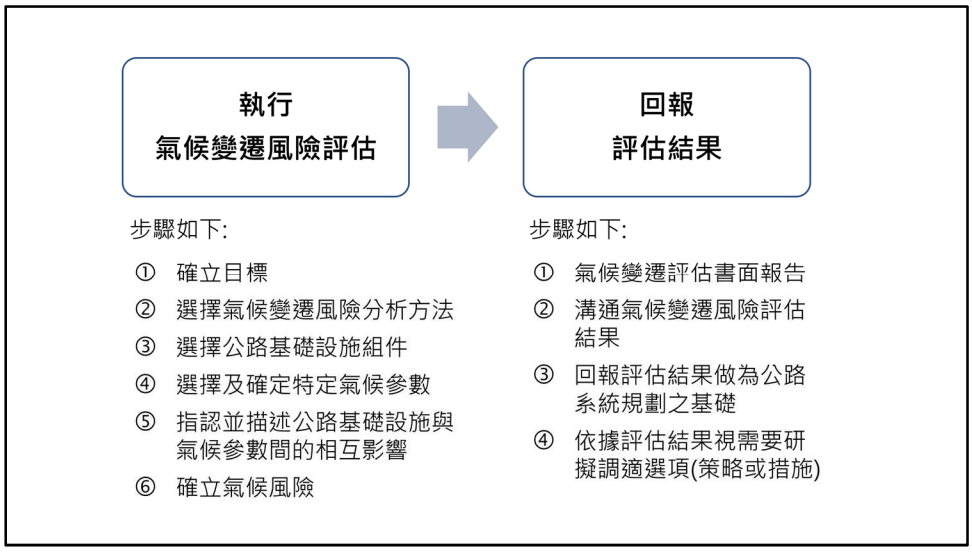


圖 3-5 「氣候變遷風險評估」作業程序說明

3. 作業成果基本要求

建議於綜合規劃階段執行「氣候變遷風險評估」，若無法於此階段取得分析所需之相關氣候參數，則可先採取半量化評估方式，透過專家工作坊針對路段尺度之關鍵組件進行風險評級，基本要求如下：

- 分析尺度：路段尺度。
- 重新檢討可行性研究階段所提出的「潛在氣候變遷風險說明表」，針對「中度風險」以上區位賡續進行風險評估作業。
- 確認面臨氣候風險區段的關鍵組件(Kx)(如橋梁、隧道、排水、路面…)。
- 進行關鍵組件的風險評估(考量發生機率及後果嚴重性)。
- 針對「中度風險」以上的組件提出調適策略或措施。

將上述風險評估作業結果彙整成表（格式參考表 3-3），作為該公路專案工程研究、維護計畫、風險管理計畫以及後續設計工作之參考依據。

表 3-3　OO 公路計畫氣候變遷風險評估表(OO 年採 OO 情境)示例

區位	關鍵組件	危害因素	暴露因素	脆弱因素	潛在衝擊說明	可能性(L,5 級)	嚴重性(C,5 級)	風險評級	調適策略(或措施)
OO 鄉東側(約 xxk~ook)	(K1)橋梁	(H1)強降雨	(E1)聯外道路、交通量	(V1)土石流潛勢區	橋梁因連續強降雨造成土石流，橋樑結構毀損	4	4	中高	(工程措施)導入可快速修復的橋梁設計
OO 鄉南側(約 xxk~ook)	(K2)隧道	(H1)強降雨	(E1)電廠維修道路	(V2)土石流潛勢區	連續強降雨造成土石阻斷隧道出口	2	2	中低	(管理措施)採半日單向通行，導入交通管理措施，利用時間排除土石
…									

公路系統規劃流程導入氣候變遷調適之框架案例

【公路規劃調適案例研析-荷蘭 InnovA58 公路擴建計畫】

本指引考量「蒐集與分析氣候變遷相關資料」、「執行氣候變遷風險評估」以及「因應氣候變遷調適選項」為公路系統規劃階段導入調適理念的重要環節，故進一步舉荷蘭 InnovA58 公路擴建計畫案例加以說明。該案例為美國聯邦公路管理局（FHWA）和荷蘭交通水利管理局（RWS）雙邊合作的示範計畫，主要目的為應用歐洲 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氣候變遷風險評估，並據以將氣候變遷調適考量納入後續建設採購的契約內容。為測試和改進上述兩種調適工具，乃以荷蘭 InnovA58 公路擴建計畫進行實證研究。

1. 研究背景

A58 高速公路位於埃因霍溫（Eindhoven）和布雷達市（Breda）之間，長度超過 50 公里，自 1989 年布雷達以南路段開通以來，國際貨運量持續成長，導致交通壅塞及路口事故頻繁發生，因此，RWS 決定將壅塞最嚴重的 7 公里和 28 公里路段（即蒂爾堡和埃因霍溫之間以及布雷達以南），雙向各新增一車道。

RWS 將該專案指定為創新「生活實驗室（Living Lab）」專案計畫，故命名為 InnovA58 公路擴建計畫，該計畫測試多個領域的創新導入，包括智慧交通、氣候變遷調適、社會設計（公眾參與）等，計畫目的之一為提高 A58 高速公路及其周圍環境在氣候變遷影響下的韌性，且透過實務經驗累積有助於國內高速公路更廣泛地應用調適框架及評估工具。以下介紹 InnovA58 計畫在應用調適規劃作業過程的主要發現。

2. 蒐集與分析氣候變遷情境與氣候相關資料

RWS 長期致力於因應海平面上升與河川淹水等水利工程重大課題，在整體區域洪水治理成果下，對於荷蘭海岸及河川周邊地區之防洪排水掌控度極高，故即使在氣候變遷下亦不會影響既有公路機能。此外，RWS 與荷蘭水利研究機構 Deltares 長期合作，對於在地水文及相關淹水模型及數據資料庫皆已建置完善，長期持續監測最新氣候相關資料並進行資料蒐集及分析，其分析結果發現 InnovA58 公路擴建計畫只需針對暴雨問題處理即可。

研究計畫使用荷蘭皇家氣象研究所（Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI）為荷蘭制定的四種氣候情境，其時間範疇涵蓋了 2050 和 2085 年。RWS 將重點關注於短延時強降雨事件，由於該類型事件不易被全球氣候模型模擬，根據 KNMI 研究發現，在 10 年和 50 年重現期的暴雨事件下，2050 年降雨量估計增加 22%，2085 年估計增加 40%，而 250 年重現期暴雨事件的降雨量未來增幅，將遠大於 10 年或 50 年重現期暴雨事件的降雨量未來增幅，顯示未來極端降雨事件將更加嚴峻。

3. 執行氣候變遷風險評估

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 辦理三個工作坊，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 人行地下道淹水。

(2) 脆弱度評估

工作坊運用快速掃描（Quickscan）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 圖可以辨別易受洪水影響的地點（如圖 1）。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。

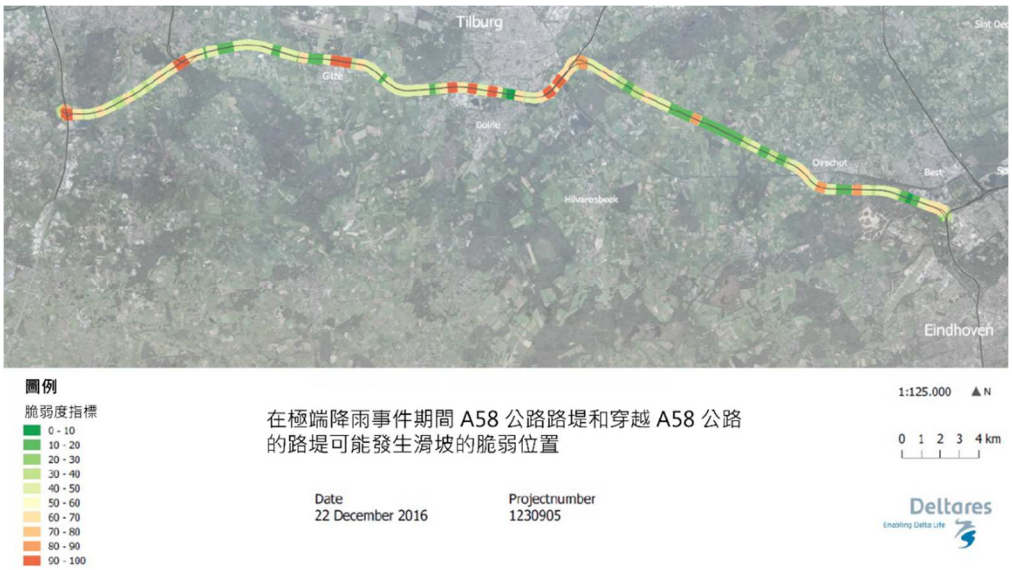


圖 1　可能因暴雨遭受洪水災害的脆弱地點

(3) 社會經濟影響評估

該分析方法是透過評估氣候相關事件導致的壅塞(與旅行時間損失有關)的經濟影響以及事件發生的可能性進行分析。

4. 因應氣候變遷之調適選項

(1) 調適措施

根據快速掃描、脆弱度評估及社會經濟影響評估三步驟的結果，針對 InnovA58 公路的五個關鍵氣候風險擬定了調適措施。為了檢查何時需要採取某些措施，表 1 提供措施之示例列表，以利後續將可能採取之調適措施繪製為調適路徑。

表 1　應對主要氣候風險之可能的調適措施列表

主要氣候風險	可能的調適措施（示例）
洪水導致基礎設施被淹沒	• 擴大現有橋梁的容量（加寬/加高） • 改善道路雨水排水的儲水功能（較緩慢地排入溪流） • 將道路墊高 • 調整道路設計，使可能被淹水道路改道 • 實現上游蓄水（「保留溝渠/溪流的空間」）
極端降雨導致基礎設施被淹沒	• 提高雨水排水系統的能力 • 使用排水溝而不是溝渠 • 確保道路縱向剖面的平整度 • 在道路下方或旁邊建造蓄洪池 • 使用「雨洪氾濫涵洞（pluvial flooding culverts）」
路堤侵蝕	• 保護路堤避免侵蝕
道路積水噴濺和水霧而降低行車安全	• 降低外側（緊急）車道高程以減少主要車道積水可能性 • 更好地管理和維護道路邊緣和雨水排水 • 提供道路上的調適照明/通知
極端降雨導致溪流和城市溢淹	• 儲存雨水並應用於乾旱期間 • 確保暴雨不會直接排入都市既有排水系統

(2) 調適（政策）路徑

調適（政策）路徑被用於可視化未來隨時間推移的多種可能的調適措施。從上述步驟產出 InnovA58 的調適措施清單，調適路徑呈現一個或多個調適措施的組合，以對應於不同氣候情景的不同時間尺度。如圖 2 根據氣候參數（例如降水強度）繪製有效的調適措施（一個或多個調適措施），並透過隨時間推移看到不同的「路徑」（極可能採取之調適措施組合及順序），以便為未來的氣候變化做好準備。

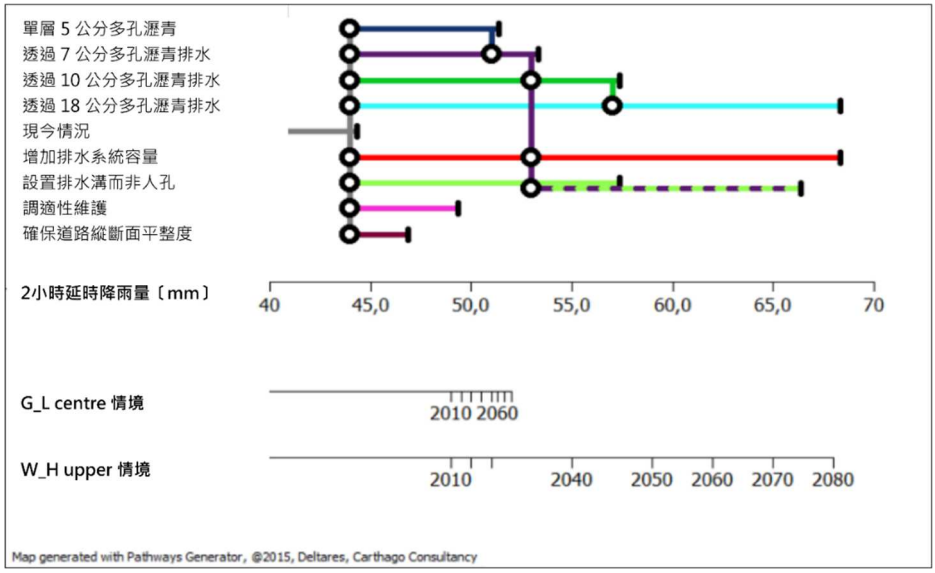


圖 2　InnovA58 調適（政策）路徑

運用調適「路徑」時的核心概念是「臨界點」，當達到某種措施的「臨界點」時，需要採取額外的行動來達成當初設定的目標，因此調適措施的多種組合提供了在未來可能的情境下達到所需目標的替代途徑。

(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。

5. 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：1.Federal Highway Administration, Resilient and Sustainable Transport - Dutch Style: An interim report on bilateral cooperation between FHWA and Rijkwaterstaat, 2017；2.Leijstra, M., Van Muiswinkel, K., Leendertse, W., & Bles, Development of a Climate Adaptation Strategy for the InnovA58 highway in the Netherlands. Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, 2018.

3.5 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」至既有的規劃作業程序中。
- 建議未來公路系統規劃於以下各作業階段，包含資料蒐集分析、方案規劃評估以及工程規劃階段均導入氣候變遷調適作為：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。
- 本章所建議之「公路系統規劃階段強化氣候變遷調適能力機制」，主要目的在於補充現行公路系統規劃作業流程，期望協助熟練的公路系統專業規劃者於規劃過程中順利導入氣候變遷調適作為。
- 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，並鼓勵相關機關（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導入氣候變遷調適作為之後，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作為。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，方能有效地強化公路系統因應氣候變遷的調適能力。

肆、前置作業

公路系統規劃階段之氣候變遷調適作為，係在既有的「資料蒐集分析」、「方案研擬與評估」以及「工程研究與評估」規劃過程中，依序嵌入「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」、「初步評估影響調適能力氣候風險因素」以及「氣候變遷風險評估」等三階段工作，以便有系統地掌握氣候變遷風險，從而設法調整因應。

前述三階段工作可配合公路系統建設計畫之「可行性研究」及「綜合規劃」規劃作業過程，由粗而細、由淺而深地執行不同規劃尺度的「氣候變遷風險評估」，以引導公路專案於不同的規劃階段循序研擬妥適的調適選項。綜上所述，「氣候變遷風險評估」實為公路系統規劃階段調適作業的關鍵基礎工作。

由於「氣候變遷風險評估」作業所涉工作層面甚廣，所需知識亦甚為多元，恐已超出公路規劃專業者的專業技術範疇，為了協助專案順利執行各階段的氣候變遷風險評估，本指引參酌 ISO 14091 的內容，提醒各公路規劃專案於著手進行氣候變遷風險評估前應有的前置作業。

1. 界定評估背景、訂定目標與預期成果

有鑑於每項交通運輸系統行經路線之地理與氣候環境多有所不同，故在運輸系統自身定位以及因應氣候變遷調適上，均有其獨特的背景有待界定，因此對於計畫於前置作業上，須針對其獨特背景需先決定計畫於氣候變遷調適的範圍、目標，以及預計產出之結果。

基此，運輸系統主責機關(構)在進行風險評估時，應透過下列的考量因素來定義運輸系統於風險評估時之背景特性：

(1) 運輸系統面臨之風險：敘明運輸系統受氣候變遷之大致影響，包括對其敏感性、受暴露程度和調適能力的一般瞭解；

(2) 危害：辨識運輸系統可能遭受哪些氣候因子之危害，選擇將哪些危害納入風險評估，並指定所需資訊的類型；

(3) 流程：辨識現有或計畫中與風險評估相關的流程和活動，例如供應鏈評估等；

(4) 調適相關知識：運輸系統主責單位在辨識有關氣候變遷、影響與現有風險、現有影響評估方式，以及運輸系統主責單位內部對於調適能力可用的知識與人才；

(5) 利害關係人：在實際範圍內辨識相關利害關係人，以利於涉及利害關係人之風險時，可將相關資訊提供予利害關係人，並促進風險評估結果能被更廣泛的接受；

(6) 評估所需資源：確定財務、人力和技術資源以及資訊/資料的可用性；

(7) 外在因素：辨識對於運輸系統周遭可能遭遇風險系統的外部因素與影響(例如，計畫範圍周遭的人口變化、土地利用變化、調適技術發展狀況、政治和制度背景變化、經濟市場變化、全球發展趨勢等)；

(8) 法規義務，對他人的責任：辨識可能影響風險評估目標、流程或結果的法規或其他義務。

而在訂定目標及預期成果方面，運輸系統主責單位在因應氣候變遷極端氣候的挑戰時，對於將進行氣候變遷調適風險評估及後續之調適策略時，首先應確認欲達成之目標，以及擬達成的成果。因此，在確認目標與預期成果的階段時，運輸系統主責單位應辦理事項，包含：

(1) 確認風險評估的目標、預期結果，以及風險評估納入計畫的過程；

(2) 確認風險評估要解決之課題；

(3) 定義產生調適相關知識及結果之後續應用(例如，投入正在進行的調適工作，或是規劃新的調適方案)；

(4) 確認風險評估的描述方式與結果(例如風險地圖、脆弱度排名、風險及其相關因素的敘述性分析)；

(5) 讓風險評估所需之專家、機構以及利害關係人能參與其中；

(6) 於早期階段確定並告知利害關係者有關風險評估的過程以及預期結果。

2. 組成調適工作小組

公路系統之主責機關(構)在進行下一階段之前置作業前，應組成一個調適工作小組進行後續之風險評估。調適工作小組應該瞭解以下內容：

(1) 機關組織、公路系統面臨之風險，以及機關組織與運輸系統所面臨風險的的關係；

(2) 運輸系統面臨風險的環境(例如河川上下游關係、地理位置、監管義務、供應鏈等)；

(3) 運輸系統面臨氣候變遷及其一般可能之影響。

工作小組應由機關(構)內具有決策能力的人員擔任，並包括專家協助擬定行動計畫和確定目標。當公路主管機關的決策者儘早參與該過程時，將有助於氣候變遷的推動之外，機關(構)可以讓外部專家參與工作小組或擔任顧問角色。

此外，工作小組應應定期進行召會與溝通，以對於已進行評估之結果進行協調，並取得機關(構)的資源與決策者的支持。至於其他外部利害關係人若對於評估過程有興趣，亦可於評估開始時邀請其參與，並對於評估期間與評估結果進行驗證。工作小組亦應充分考慮性別差異，確保弱勢族群的意見表達，採取措施以確保相關意見能夠納入風險評估。

3. 確定評估範疇與方法、設定時間範疇

調適工作小組與機關(構)之決策者在確認風險評估之範疇時，應考量以下因素：

(1) 確認公路系統因應氣候變遷風險之特性；

(2) 評估符合計畫目標所需之詳細程度；

(3) 涉及的人口群體(例如農村社區、老齡者、原住民、女性/男性、勞動力者)

(4) 所包含之天然災害範圍(例如益淹區域、高溫、海平面上升等)及其性質（例如極端情況、平均值的變化和變異性）；

(5) 所評估之範疇區域（例如國家、地區、省份），是屬於單一地區，或是多個地區比較；

(6) 評估範疇的空間尺度(空間尺度的決定可能受限於可用於評估之數據資料所影響)；

(7) 評估所使用的方法(例如定量、定性、混合方法)；

(8) 可用於風險評估的資源(例如財務、人力)。

而在設定時間範疇方面，工作小組應考量因素，包含：

(1) 運輸系統存在風險的生命週期；

(2) 運輸系統面臨氣候變遷風險達到其臨界值的時間尺度；

(3) 採取調適策略/行動相對應的準備時間。

而在時間範圍的選擇上，可能會受到以下方面的影響：

(1) 數據資料的可用性，包括氣候預測；

(2) 預測氣候變遷影響的長期不確定性；

(3) 不同時間尺度內發生相互作用影響的可能性。

4. 蒐集氣候變遷相關資料與分析方法

進行「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」時，包含氣候變遷情境設定與過往及未來推估兩大類型氣候相關資料需要進行蒐集，氣候相關資料需根據專案特性蒐集，以供後續氣候變遷風險評估使用，本節概述進行氣候變遷情境設定與氣候相關資料蒐集時之注意事項以及針對資料不足時之處理方式，並提供可供參考之資料項目清單。

(1) 氣候變遷情境設定

進行氣候變遷情境設定前應確認專案之評估年期，評估年期建議參考公路設施設計年限及推估資料可取得性等加以設定，如《公路橋梁設計規範》明訂重要及必要之公路橋梁設計年限不小於 100 年，其他公路橋梁設計年限不小於 50 年，即可做為評估年期之參考依據；推估資料可取得性則需視國際及國內陸續產製釋出之推估資料年期是否符合各專案需求。

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 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」作為「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，可作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」以短期(2021~2040 年)升溫 1.5°*C*、中期(2041~2060 年）升溫 2°C、長期（2081~2100 年）升溫 3℃-4℃作為設定（參見 2.2 節臺灣氣候變遷趨勢)，如專案有其他特殊期間或情境設定需求，建議諮詢中央主管機關。

氣候變遷情境設定參考案例

以海平面上升分析為例，考量公路系統功能定位、重要程度、調適選項設計需求等，可有不同的情境設定。

氣候變遷情境設定參考案例彙整表

案例所在地	案例說明
美國德拉瓦州	使用 2100 年海平面上升高、中、低推估情境，評估德拉瓦州 1 號公路走廊的淹沒風險。
美國紐澤西州	使用 2050、2100 年海平面上升高推估情境，評估紐約大都會區域運輸網絡的淹沒風險。
美國奧勒岡州	使用 2050 年海平面上升高推估情境，情境條件主要用於設計調適選項。

(2) 研判資料蒐集項目及需求

資料蒐集項目可概略分為「歷史觀測及現況調查資料」與「未來氣候變遷情境推估資料」，且可依據天氣與氣候、水文、地文、防災預警與災害潛勢等進行細分。

由於資料蒐集項目種類繁多，因此建議可根據公路系統所處之環境區位條件以及所面臨之氣候壓力與氣候衝擊，判斷所需蒐集之資料項目。

針對公路所在區位之環境條件不同，需蒐集的資料也有所差異，例如以同樣面對臺灣常見之颱風而言，針對山區公路需蒐集土石流、大規模崩塌、山崩與地滑等資料，針對平原公路需蒐集淹水潛勢圖、地層下陷、區域排水等資料，針對跨河公路需蒐集河川流域相關資料，針對海岸公路需蒐集海平面上升、暴潮/風浪、海堤區域等資料。

公路專案應根據其所面臨之氣候壓力與氣候衝擊蒐集相關資料，例如針對強降雨造成之道路淹水衝擊，應蒐集降雨機率、強度之過往觀測及未來推估資料，以及與評估淹水相關的水文、地文資料等，然而當無法確認公路所面臨之氣候壓力與氣候衝擊為何時，則建議至少依據五大氣候壓力因素（強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪及海平面上升）進行蒐集。

「評估氣候變遷對於公路設施之影響時，需要考量哪些氣候參數？」，如何確認氣候參數資料蒐集需求是在資料蒐集項目決定之後面對的關鍵問題，例如以高溫而言，年均溫升溫 2°C 對於公路設施的影響為何？或者日高溫超過幾°C 持續超過幾日以上才會對於公路設施產生影響？此類問題部分需要透過各領域間更多知識交流方能釐清，包含領域過往經驗以

及相關研究證實，因此當團隊無法研判資料蒐集需求時，建議與資料主管機關及相關領域專家共同研商。

(3) 資料不足之處理方式

當推估資料缺乏特定項目時，應判斷該推估資料項目屬於「直接推估資料」或「加值推估資料」，直接推估資料可直接應用於衝擊與影響分析，如溫度、風速、降雨變化等，大多可透過 TCCIP 等公開網站取得，或洽 NCDR 等氣候資料產製單位取得；加值推估資料則屬於需要相關領域主管機關將直接推估資料加值處理後，方可應用於公路系統衝擊與影響分析者，如氣候變遷下的淹水深度、河川水位、崩塌潛勢等。以未來氣候變遷下之河川水位為例，河川主管機關需根據流域集水區之降雨推估資料，進一步模擬計算得到，因此當加值推估資料缺乏時，應進一步洽詢相關領域主管機關，確認是否有該領域之加值推估資料可供應用。

當推估資料缺乏特定年期，或者資料之時間、空間尺度無法滿足專案需求時，例如，專案需要 100 公尺網格尺度資料進行評估，而推估資料僅能提供 5 公里網格尺度資料，此時可以透過資料內插、外推、降尺度等方式進行處理，或者諮詢資料主管機關，針對專案產製所需的氣候推估資料。

此外，目前國內氣候資料供給面與公路調適需求仍存在落差，必要時建議各公路規劃專案實務以「實際可取得的最合適資料」替代無法取得的資料，例如，參考區位毗鄰的同類型規劃資料、相關的研究報告、利用其他參數進行推估等，若有此類情形建議附註說明清楚以取得認同。

為彌補知識資料缺口，建議各規劃專案盡量善用前揭所述之「組成氣候變遷調適工作小組」的機制，選擇妥適的小組成員以適度彌補規劃團隊的知識及資料的不足，例如涉及中央管河川及區域排水議題則邀請水利署擔任小組成員等。

國內氣候變遷調適相關資料說明

國內氣候變遷調適相關資料之主要來源，包含臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）及氣候變遷災害風險調適平台（Dr.A），由於國內資料仍持續產製中，應以平台最新資料為準，相關資料名稱及資料提供單位說明如下：

國內氣候變遷調適相關資料參考平台

平台名稱	資料類型	資料內容說明	資料提供單位
臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）	氣候指標未來推估資訊	提供全臺各網格區位在各種時期、情境、模式下之溫度及降雨指標推估資料	國家科學及技術委員會、國家災害防救科技中心（NCDR）
	氣候變遷調適加值圖資	提供淹水、坡地、海岸等不同災害領域之危害與衝擊推估資訊	
氣候變遷災害風險調適平台（Dr.A）	氣候變遷調適加值圖資	提供淹水、坡地、乾旱等災害之氣候變遷風險評估資訊	國家災害防救科技中心（NCDR）

表 4-1　氣候變遷相關資料蒐集與分析項目參考表

項目	細項	網站名稱	網站內容	資料名稱	資料來源
歷史觀測及現況調查資料	天氣及氣候觀測資料	氣候資料服務系統 -交通部中央氣象署	■ 提供國內各測站及氣候格點的歷史氣象觀測資料	■ 測站氣壓、氣溫、露點溫度、相對溼度、風速、風向、降水量	https://codis.cwb.gov.tw/
		颱風資料庫 -交通部中央氣象署	■ 提供歷史颱風雨量及風速觀測資料	■ 颱風雨量、風速綜合資訊 ■ 各測站雨量、風速極值	https://rdc28.cwa.gov.tw/
		臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(TCCIP) -國家科學及技術委員會、國家災害防救科技中心	■ 提供國內 25 個署屬測站及網格的歷史氣象觀測資料及加值指標	■ 溫度、雨量、風速、濕度、輻射 ■ 高溫日數、低溫日數、降雨日數、連續降雨日數、連續不降雨日數	https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ds_01.aspx (資料服務→互動圖表→過去變遷)
	水文資料	水文資訊網整合服務系統 -經濟部水利署	■ 提供河川及近海水文歷史觀測資料	河川 ■ 河川水位、流量、含砂量、地下水位 近海 ■ 潮位、風速、風向、氣壓、波高、波向、週期	https://gweb.wra.gov.tw/Hydroinfo/
		水利地理資訊服務平台 -經濟部水利署	■ 提供河川、區域排水、淹水潛勢及地層下陷等水利相關圖資	■ 河川區域 ■ 區域排水設施範圍 ■ 海堤區域 ■ 淹水潛勢區 ■ 地下水一級、二級管制區 ■ 地層下陷累積下陷量、平均下陷速率等值圖	https://gic.wra.gov.tw/Gis/

表 4-1　氣候變遷相關資料蒐集與分析項目參考表(續)

項目	細項	網站名稱	網站內容	資料名稱	資料來源
歷史觀測及現況調查資料	水文資料	海岸地區基本資料庫及資訊服務平台 -內政部國家公園署	■ 提供海岸、海岸保護及海岸防護等海岸地區相關圖資	■ 海岸基本圖資 ■ 海岸保護區、沿海保護區 ■ 海岸防護區(一級、二級海岸防護區之災害防治區與陸域緩衝區) ■ 海域用地區位許可	https://coastal.cpami.gov.tw/coastalweb/
		臺灣水災潛勢風險圖資應用服務平台 -經濟部水利署	■ 提供淹水潛勢圖資及淹水風險相關資訊	■ 淹水潛勢圖 ■ 淹水風險地圖	https://wra.bse.ntu.edu.tw/flood-riskmap/
	地文資料	地質資訊平台 -經濟部地質調查及礦業管理中心	■ 提供基本地質、地質資源、地質災害等地質調查圖資	■ 地質圖 ■ 地質敏感區(地下水補注、地質遺跡、山崩與地滑、活動斷層) ■ 環境地質(順向坡、山崩、落石、岩屑崩滑、岩體滑動、河岸侵蝕)	https://www.gsmma.gov.tw/nss/p/G001a
		土石流及大規模崩塌防災資訊網 -農業部農村發展及水土保持署	■ 提供土石流潛勢溪流及大規模崩塌潛勢地區分布等坡地災害圖資	■ 土石流潛勢溪流分布 ■ 大規模崩塌潛勢地區	https://246.swcb.gov.tw/
	防災預警與災害潛勢	防災資訊服務網 -經濟部水利署	■ 提供水利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
		土石流及大規模崩塌防災資訊網 -農業部農村發展及水土保持署	■ 提供土石流及大規模崩塌即時警戒資訊	■ 土石流警戒 ■ 大規模崩塌警戒	https://246.swcb.gov.tw/

表 4-1　氣候變遷相關資料蒐集與分析項目參考表(續)

項目	細項	網站名稱	網站內容	資料名稱	資料來源
歷史觀測及現況調查資料	防災預警與災害潛勢	海岸防護計畫專區 -內政部國家公園署	■提供各縣市海岸防護計畫之海岸災害潛勢區位	■暴潮溢淹潛勢 ■海岸侵蝕潛勢 ■地層下陷潛勢	https://coastal.cpami.gov.tw/coastalweb/CoastalProtection.aspx
		3D 災害潛勢地圖 -國家災害防救科技中心	■提供包含淹水、土石流、大規模崩塌、土壤液化、斷層、颱風風浪、海嘯溢淹、火山等災害潛勢圖資	■淹水潛勢圖 ■土石流潛勢溪流 ■大規模崩塌災害潛勢地區 ■斷層與土壤液化潛勢圖 ■颱風風浪危害圖 ■海嘯溢淹潛勢圖 ■火山潛勢圖 ■歷史淹水及坡地災害位置	https://dmap.ncdr.nat.gov.tw/
未來氣候變遷情境推估資訊	氣候指標未來推估資訊	臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(TCCIP) -國家科學及技術委員會、國家災害防救科技中心	■提供全臺各網格區位在各種時期、情境、模式下之溫度及降雨指標推估資料	溫度指標 ■均(低、高)溫改變量 ■日夜溫差 ■暖(冷)晝(夜)天數 ■日高(低)溫最大(小)值 ■極端高(低)溫持續指數 降雨指標 ■降雨量改變率 ■雨日、雨日總降雨量、降雨強度 ■年最大一日降雨量 ■年最大連續五日累積降雨量 ■年最長連續降雨日 ■年最長連續不降雨日 ■國內各雨量站在不同重現期與降雨延時下之暴雨改變率	https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ (資料服務→互動圖表→未來推估/氣候變遷降雨頻率分析/氣候圖集)

表 4-1　氣候變遷相關資料蒐集與分析項目參考表(續)

項目	細項	網站名稱	網站內容	資料名稱	資料來源
未來氣候變遷情境推估資訊	氣候變遷調適加值圖資	臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(TCCIP) -國家科學及技術委員會、國家災害防救科技中心	■ 提供淹水、坡地、海岸等不同災害領域之危害與衝擊推估資訊	淹水災害 ■ 區域累積雨量變化率 ■ 淹水發生機率 ■ 淹水最烈事件	https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ark.aspx (調適百寶箱)
				坡地災害 ■ 流域累積雨量變化率 ■ 崩塌率	
				海岸災害 ■ 海面風速 ■ 颱風風浪高 ■ 颱風暴潮高度	
		氣候變遷災害風險調適平台(Dr.A) -國家災害防救科技中心	■ 提供淹水、坡地、乾旱等災害之氣候變遷風險評估資訊	■ 淹水災害風險圖 ■ 坡地災害風險圖 ■ 乾旱災害風險圖	https://dra.ncdr.nat.gov.tw/

註：網站資料最後檢視日期：2023.10.31。

資料來源：本指引彙整。

5. 其他相關程序

參酌 ISO 14090 系列標準有關前置作業之描述，除前揭已描述之界定評估背景、訂定目標與預期成果、組成氣候變遷調適工作小組、確定評估範疇與方法、設定時間範疇、蒐集氣候變遷相關資料與分析方法之外，尚有制定執行計畫、確保評估過程的透明、設計妥善的參與機制等程序。

(1) 制定執行計畫：即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等內容。

(2) 確保評估過程的透明：整體風險評估過程，包含如方法、決策流程與不確定性的處理等，應力求公開透明，以昭公信。

(3) 設計妥善的參與機制：妥善的參與機制能提供利害關係人表述意見之機會，利害關係人的參與除了可提供專業知識以提升風險評估的完整性，且有利於提高共識並產出高品質的決策結果。

整體公路系統規劃階段氣候變遷風險評估前置作業如表 4-2 所述。

表 4-2　公路系統規劃階段氣候變遷風險評估之前置作業

項目	作業內容
1. 界定評估背景	■掌握公路系統規劃專案內容 ■確認風險評估作業與專案規劃流程之關係（參見第 3 章） ■辨識可能影響該公路系統的氣候危害 ■盤點利害關係人（如機關、團體） ■掌握氣候變遷與調適相關知識，包含研究結果與當地知識 ■盤點作業所需的資源，例如財源、人力、技術與資訊/數據等 ■辨識影響公路系統的外在因素，如社經變化、土地利用變化、市場變化、政策與制度變化、技術發展、全球環境變化等
2. 訂定目標與預期成果	■訂定風險評估的目標、預期成果 ■確認風險評估成果的呈現方式（如風險分析表、熱點圖） ■確認風險評估成果的應用方式（如制定調適行動計畫）
3. 組成氣候變遷調適工作小組	■小組領導者應由具決策權的人員擔任 ■小組可包含外部專家及利害關係人 ■小組應具備下列基本知識： • 了解公路系統規劃專業 • 了解氣候變遷與其產生的氣候衝擊
4. 確定評估範疇與方法	■確認評估的公路系統及其系統組件 ■確認公路系統的功能定位、服務對象與可能受計畫影響的族群 ■確認需納入評估的危害類型 ■界定評估的地點/區域 ■界定評估的空間尺度，取決於資料可取得程度與精細度 ■界定評估所使用的方法，例如定性、定量或混合方法
5. 設定時間範疇	時間範疇設定建議採取至少 30 年，針對海平面上升或壽命較長的系統和設施，則可採用 100 年做為範疇，其他考量因素如下： ■公路系統壽命年限 ■氣候相關推估資料的可取得性 ■預測長期氣候變遷影響的不確定性 ■氣候衝擊達到公路系統關鍵臨界值的時間點 ■採取調適行動以因應氣候衝擊的時間點
6. 蒐集氣候變遷相關資料與分析方法	多方蒐集可取得的相關資訊，包含氣候衝擊及其影響、公路系統調適能力、既有風險評估及風險管理工具以及相關計畫等
7. 制定執行計畫	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. 確保評估過程的透明	整體風險評估過程應公開透明（如方法、決策流程與不確定性的處理等）
9. 設計妥善的參與機制	妥善的參與機制能提供利害關係人表述意見之機會，利害關係人的參與除了可提供專業知識以提升風險評估的完整性，且有利於提高共識並產出高品質的決策結果

資料來源：本指引參考 ISO 14091 彙整。

伍、公路系統氣候變遷風險評估作業方法

在氣候變遷的情境之下，未來公路系統面臨的氣候條件不同於過往，依循歷史經驗的規劃內容勢必面臨更嚴苛的氣候挑戰，故需於規劃階段導入氣候變遷調適作為，期望藉此掌握氣候變遷風險並綢繆因應之道。

考量當前國內氣候變遷調適知識、技術及資訊等現實條件，本章引介公路系統規劃階段可採行的風險評估作業方法，包含氣候變遷相關資料蒐集與分析、氣候衝擊鏈分析以及氣候變遷風險評估方法供各專案參考。

除了本章所引介的方法之外，各專案仍可依據其資源及技術條件選用其他適合的方法。此外，上述方法不限於規劃階段使用，公路系統的全生命週期，包含設計、施工及後續養護管理各階段之氣候變遷調適作業均宜參用。

5.1 建構公路系統氣候衝擊鏈

進行氣候變遷風險評估時，需掌握氣候變遷為公路系統帶來的「衝擊內容」為何，並瞭解風險的基本組成，才能據以採取妥適的調適選項。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）2023 年出版之《氣候風險評估及調適措施考量指引》，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應用參考。

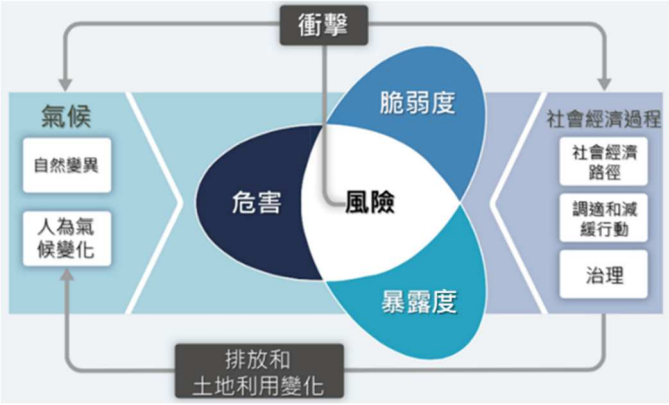
應用氣候衝擊鏈分析方法可協助專案在缺乏足夠量化數據資料的情況下辨識及分析潛在的氣候變遷衝擊與風險組成因素。分析過程建議由前述「氣候變遷調適工作小組」共同討論，產出專屬各該公路規劃專案之更完整的氣候衝擊鏈。

1. 「氣候衝擊鏈」理論基礎說明

「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 5-1）。IPCC 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」取決於三個主要面向－暴露度（exposure）、脆弱度（vulnerability）及危害（hazard），三個面向因素的交集

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。



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。

圖 5-1　IPCC 對於氣候變遷風險的定義

2.「氣候衝擊鏈」分析項目

「氣候衝擊鏈」（參見圖 5-2）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地區有關人員、生計、基礎建設、設備（例如，聯外道路、場站、交通量）的範圍及程度。

(3) 脆弱因素：公路系統本身容易受衝擊的傾向或習性（例如，淹水潛勢區、順向坡）。

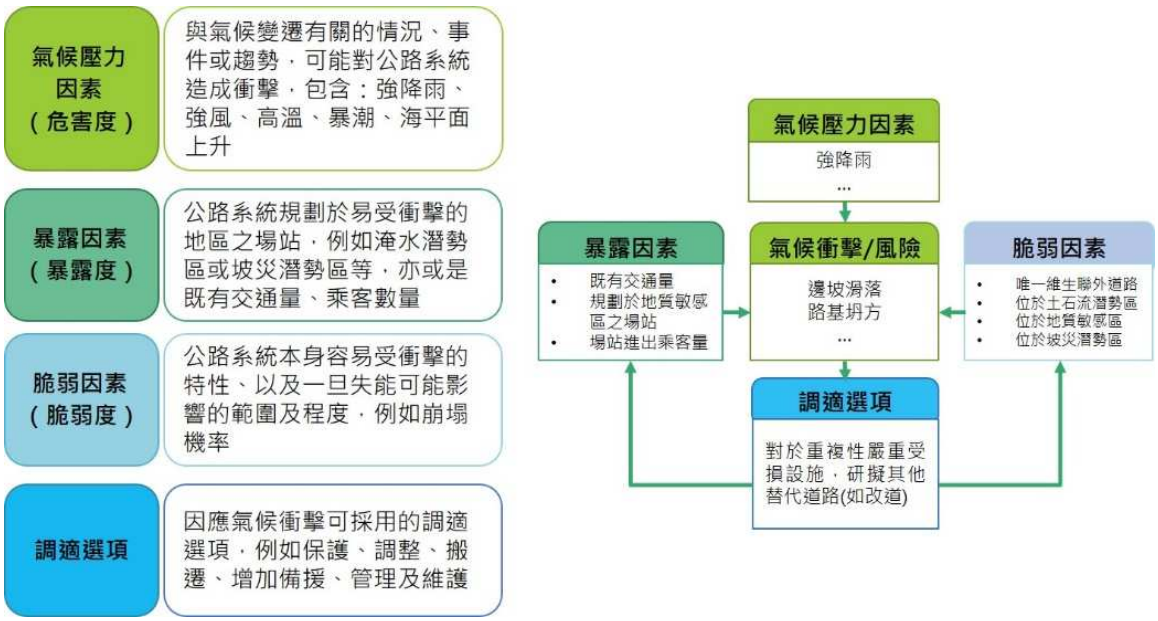


圖 5-2　氣候衝擊鏈分析示例說明

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不同。國內公路系統依路線行經環境條件可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）二類：

(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。

3. 公路系統氣候衝擊鏈分析示範說明

為說明氣候衝擊鏈分析方法，以下針對山區公路系統面臨強降雨以及平原公路系統面臨暴潮/風浪與海平面上升二種情形加以示範（參見圖 5-3、圖 5-4），各規劃專案可參考以下示範案例，依據規劃團隊及專案所掌握的專業知識及資訊，依實際需要建構其氣候衝擊鏈。

(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。

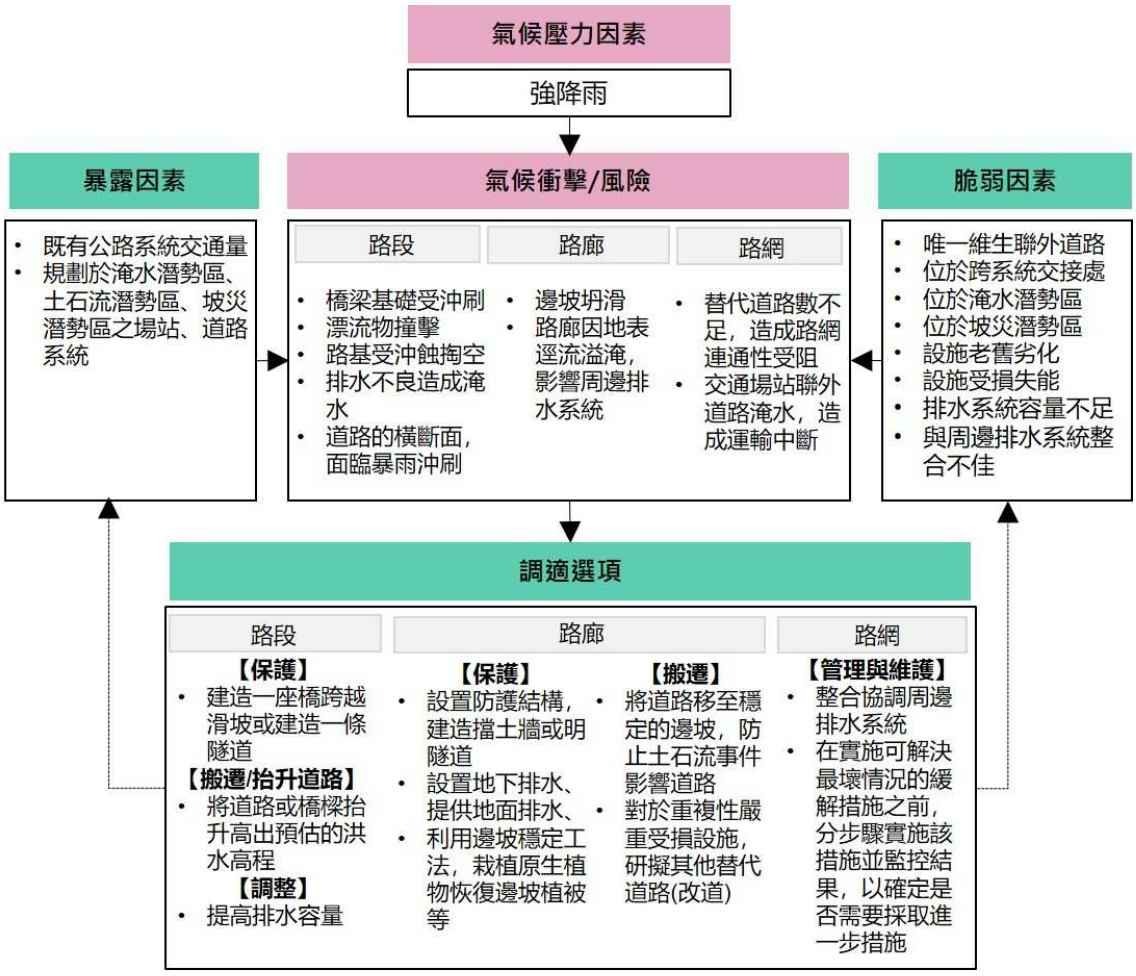


圖 5-3　山區公路氣候衝擊鏈分析示意圖（強降雨）

(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

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淘刷；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。

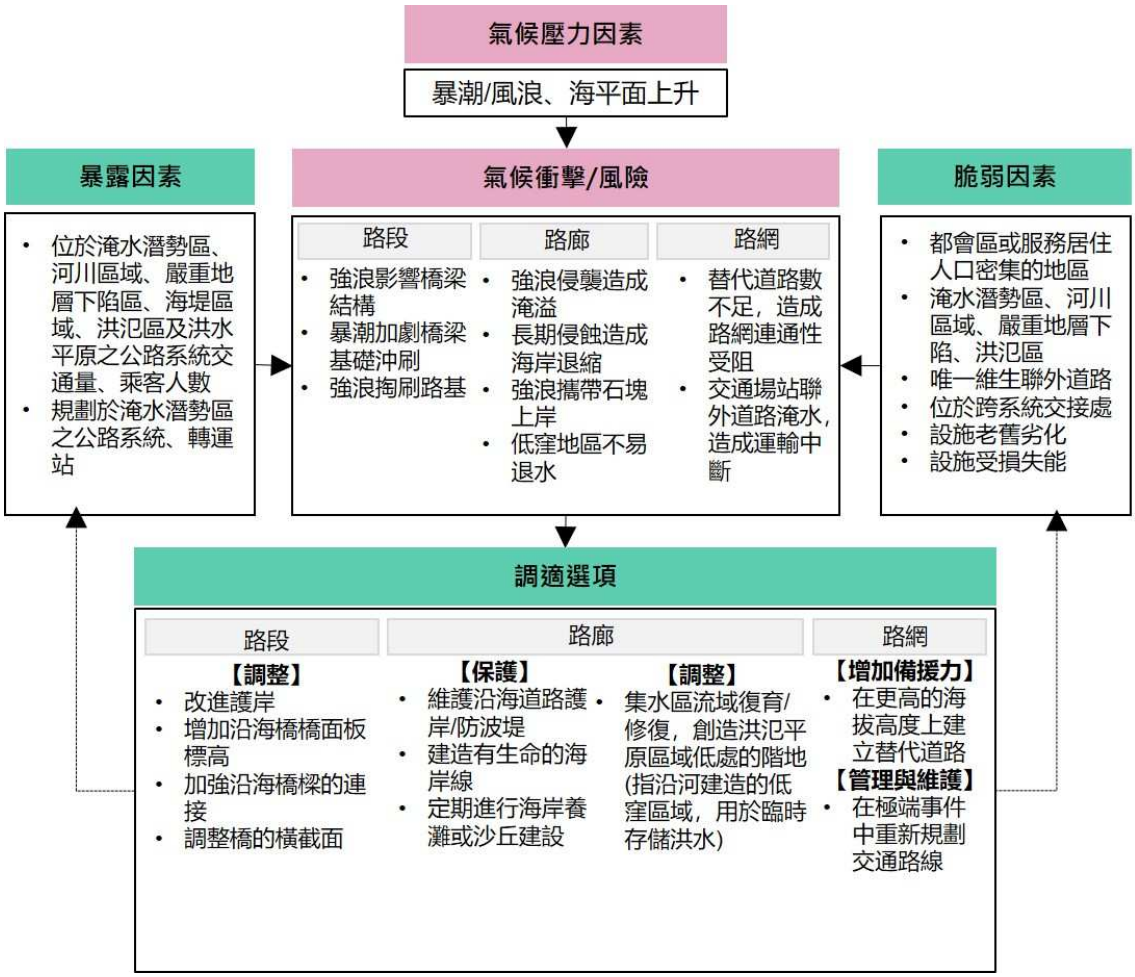


圖 5-4　平原公路氣候衝擊分析示意圖（暴潮/風浪、海平面上升）

5.2 公路系統氣候變遷風險評估方法

透過氣候衝擊鏈分析方法辨識出氣候變遷對於公路系統的衝擊並解析風險組成內容之後，接下來需進一步評估這些衝擊發生的「可能性」及「嚴重性」，始知氣候變遷風險的等級，方能決定合適的調適選項。

本節所述的氣候變遷風險評估方法旨在協助各公路規劃專案產出具有一致性的氣候變遷風險評估內容。此外，建議公路系統規劃階段的氣候變遷風險評估作業需由「氣候變遷調適工作小組」共同討論，透過討論過程取得共同的風險認知。

1. 風險評估方法概述

風險評估方法可分為定性、定量以及兩者結合。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：

(1) 定性評估方法

定性方法係以文字敘述分類等級，描述風險發生的可能性與影響程度。定性評估方法適用於缺乏足夠數據難以進行量化分析，或能投入資源相對匱乏的情形使用。

(2) 定量評估方法

定量評估方法係以實際數據描述風險發生的可能性與影響程度。定量評估方法通常適用於設計階段，在具有明確的理論依據、足夠的數據以及可用的工具的情形之下，可採定量評估方法。

(3) 混合方法（或半定量評估方法）

混合方法是定性和定量方法的結合，也可稱為半定量評估方法。半定量評估方法使用評分系統彌合了純粹描述性風險測量和數字測量之間的差距，常見的半定量方法是多準則加權指標模型，如地理資訊系統中經常使用多準則加權指標模型繪製風險地圖等。

目前為止，先進國家的運輸系統以及國內其他領域之氣候變遷風險評估多採定性或半量化評估方式辦理。

風險評估方法參考案例

依據專案需求、資料、技術的不同，可選用不同的風險評估方法。

風險評估方法參考案例彙整表

案例所在地	案例說明	方法
加拿大英屬哥倫比亞省	透過專家工作坊以評分量表(7 級)方式，評估 3 條高速公路路段各組成部分的風險。	半定量
荷蘭北布拉邦省	透過專家工作坊以評分量表(4 級)方式，評估 A58 高速公路各路段風險，並產出風險地圖。	半定量
美國賓夕法尼亞州	根據未來推估降雨量，透過 HEC-HMS、HEC-RAS 模型洪水量、洪水位等，並評估對公路和橋梁的影響。	定量
美國維吉尼亞州	透過 SLOPE/W 軟體，評估降雨量增加所造成之地下水位升高與土壤重量增加對於邊坡穩定性的影響。	定量

2. 公路系統規劃階段氣候變遷風險評估作業方法

氣候變遷風險評估作業係透過廣泛蒐集氣候變遷相關資料進行風險篩選，瞭解專案是否需要進一步採取全面的風險評估或進行工程分析，於專案的不同階段選擇不同精細度之氣候變遷風險評估有助於提高評估作業的效率（參見圖 5-5）。作業過程中若有需要建議諮詢相關專家，確保全面掌握重要風險，以增加結果可信度。

以下作業概分為三階段，完整程序計有五個步驟，各專案可視其資源條件執行，若發現無需進行下一步評估時應敘明理由：

(1) 階段一：風險篩選

風險篩選係透過廣泛蒐集氣候變遷風險的資料並彙整分析，以較低成本的投入，瞭解專案是否需要進行進一步之風險評估及分析，並確定後續進行氣候變遷風險評估需要投入多少工作。

① 步驟一：選定目標

進行風險篩選，至少應：

- 選擇欲研究的公路系統，並描述其系統組成與關鍵組件
- 辨識可能影響此公路系統的潛在氣候危害

此時可以透過歷史資料、問卷調查或查詢風險資訊平台等方式，辨識出可能會影響公路系統的潛在氣候危害，並盡可能的蒐集有關公路系統以及潛在氣候危害的二手資料。

② 步驟二：篩選分析

根據前述所蒐集的二手資料，初步研判潛在氣候危害可能對公路系統造成的影響及其潛在風險，例如根據公路系統的基礎資料（如地理位置、海拔高度、現有防洪措施）以及氣候危害的現成推估資料或專家意見（如海平面上升高度、淹水深度），進行初步風險研判。

當風險篩選結果顯示可能有中度或高度氣候風險時，應謹慎規劃全面的風險評估或進行額外的工程分析。此時可能需要擴大專案團隊，以提供額外的資訊或專業知識、進行額外的工程分析、更詳細的解析氣候變遷事件影響或採取任何其他行動。

(2) 階段二：風險評估

為進行全面的風險評估，需要將進行風險概念具體化、指標化，並透過專家工作坊進行風險評級，並規劃降低風險的因應策略，針對過程中證據不足或歧見之處，考量是否需要進行下一步之工程分析。

① 步驟三：風險描述

研析公路系統與氣候危害之間的潛在相互影響後，需要為其相互影響進行風險評分，此時需要針對風險組成成分進行解構並實施評分，通常會將風險表述為交互影響發生的可能性及後果的嚴重性，並透過兩者乘積的方式進行計算。

因此，需要分別定義描述可能性及嚴重性的指標，以及所有有關風險評分計算方式的細節，包含指標分級標準、指標分級閾值、指標權重及風險分級標準等。

② 步驟四：執行評估

完成可能性及嚴重性指標定義等風險描述作業後，接著需要透過專家工作坊進行風險評級，以深入解析公路系統與氣候危害之相互影響關係，並據以規劃因應對策以降低風險，專家工作坊以第四章所述之「氣候變遷調適工作小組」為主要成員，視需要邀請其他專家加入。

風險因應對策的制定，取決於對於公路系統與氣候危害之相互影響關係的理解，例如同樣是高風險情況，可能是高可能性或高嚴重性造成，當能更精準掌握此之間的數據差異時，將更能確定實際風險成因，選擇適當的因應對策。

此外，風險因應對策的制定，在很大程度上也取決於公路系統主管機關的氣候風險承受能力、財務能力等，因此務必與公路系統主管機關共同審查風險評估結果，並選定氣候風險因應對策。

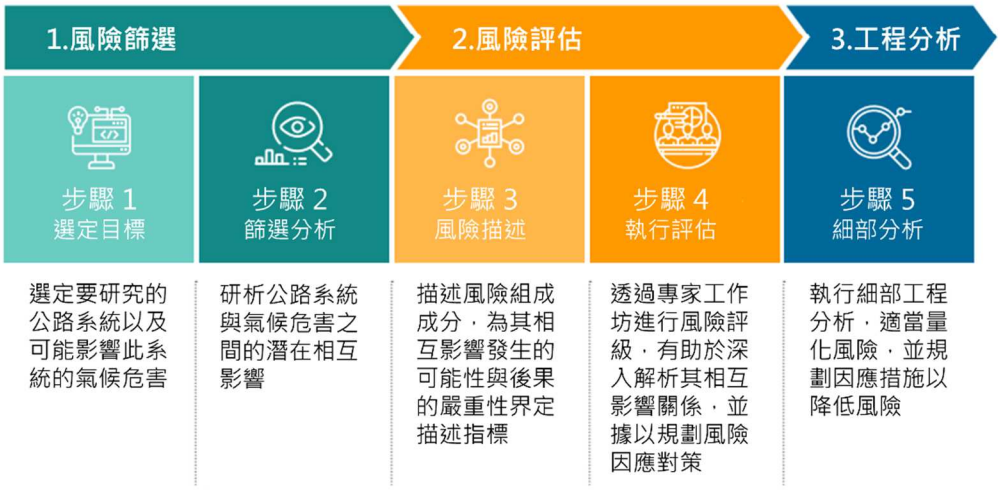
(3) 階段三：工程分析

在前述步驟評估公路系統與氣候危害之相互影響關係時，可能因為數據、證據不足而無法進行判斷，或者在專家工作坊進行風險評級時，專家之間對於評分的認知也可能有所分歧，此時可能需要進行額外的工程分析，以科學數據的角度彌補不足，工程領域主要包含結構、岩石土壤及水利等。

本階段評估作業可視資源時間條件採行，或建議於設計階段辦理。

① 步驟五：細部分析

工程細部分析是為得到公路系統對於氣候危害的總負荷、總容量與調適能力等量化數據以利工程設計，總負荷考量包括氣候與非氣候驅動因素的負荷，總容量為經包括老化、正常磨損及其他因素調整後的設計容量，當總負荷超過總容量時，系統就被視為是脆弱的，團隊透過工程細部分析，可以掌握總負荷與總容量兩者的差異數值，並據以規劃所能採行之結構性或非結構性因應措施。



資料來源：本指引參考自 Inter-American Development Bank, A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, 2021 & Engineers and Geoscientists British Columbia, Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia, 2020.

圖 5-5　公路系統規劃階段氣候變遷風險評估作業方法

3. 公路系統規劃階段氣候變遷風險評估評量參考標準

參考國內外的風險評量標準與分級方式，大多透過可能性（likelihood）與嚴重性（severity）相乘進行風險計算（如下公式），建議將公路系統規劃階段所發現的各項氣候變遷衝擊項目，進一步對於其可能性與嚴重性進行的評級，最後再透過風險矩陣方式評估風險。

$$風險(risk) = 可能性(likelihood) \times 嚴重性(severity)$$

在氣候變遷風險評估相關文獻中，針對可能性與嚴重性的量化與分級各有不同，分級的基本原則為使分級能夠有效區分風險差異，過多的分級只會將風險複雜化並徒費努力，常見的分級範圍從 3 級到 10 級，經驗顯示 5 級的分級量化通常可以達到足夠的分級效果。

(1) 可能性（likelihood）

可能性指的是發生某事件的機率或頻率，有些文獻會以概率（probability）表示，可能性可以區分為「氣候壓力發生之可能性」與「氣候衝擊發生之可能性」。例如以強降雨發生淹水災害而言，強降雨發生機率表示為「氣候壓力發生之可能性」，然而強降雨發生並不一定會導致某地淹水，可能因某地之地勢高低、排水系統強弱而有所區別，因此某地發生淹水之機率可另表示為「氣候衝擊發生之可能性」。

為瞭解氣候變遷對公路系統造成影響的可能性，可基於過去歷史事件紀錄和對未來可能發生機率的推估資料，透過專家進行評估。取決於歷史紀錄或推估資料的完備性與可用性，可能性可以是定性、半定量或定量的評估。

可能性評估指標的設定，可以依照專案所面臨的氣候壓力及氣候衝擊進行選擇，而指標的分級閾值可依照專案需求、資料精細度等進行設定，相關分級標準可參考表 5-1。

表 5-1　可能性分級標準參考表

半定量分級	可能性描述	參考基準	
		頻率	機率
1	幾乎不可能	過去 5 年沒有發生過，或在未來 50 年都不太可能發生	<10%
2	不太可能	過去 5 年可能發生過 1 次，或未來 25 至 50 年發生頻率可能增加 1 次	10-40%
3	可能	過去 5 年曾經發生過 1 次，但並非每年發生，未來 25 年頻率可能增加 1 次	40-60%
4	極有可能	過去 5 年每年至少發生 1 次，或未來每年發生頻率可能增加 1 次	60-90%
5	幾可確定	過去 5 年每年發生多次	>90%

資料來源：參考自 Queensland Government Department of Transport and Main Roads, Climate Change Risk and Adaptation Assessment Framework for Infrastructure Projects, 2020.

(2) 嚴重性（severity）

嚴重性指的是氣候衝擊對於公路系統產生影響之後果（consequence）的嚴重性，嚴重性可以區分為「氣候衝擊大小」與「對社會經濟造成之後果大小」。例如以淹水災害而言，淹水深度高低可表示為「氣候衝擊大小」，然而同樣淹水達 1 公尺的情況，相較發生在杳無人煙的地方通行道路，發生在車流頻繁的都市重要幹道，或某沿海部落的唯一聯外道路，都可能會造成更為嚴重的後果，此即可表示為「對社會經濟造成之後果大小」。

為瞭解氣候變遷對公路系統造成影響的嚴重性，氣候衝擊大小可根據未來氣候推估資料進行評估，對社會經濟造成之後果大小則可由多個面向進行考量，例如公路本身的損壞程度、服務中斷持續時間、對公路服務對象的社會及經濟影響、修復公路所需的財務預算等。

嚴重性評估指標的設定，可以依照專案所面臨的氣候衝擊、受衝擊的損壞程度以及受影響可能對社會經濟造成之後果等面向進行考量，指標的分級閾值同樣可以依照專案需求、資料精細度等進行設定，相關分級標準可參考表 5-2。

表 5-2　嚴重性分級標準參考表

半定量分級	嚴重性描述	參考基準	
		基礎設施服務	經濟
1	可忽略的	沒有基礎設施損壞，沒有服務變化	對區域經濟沒有影響
2	較低	地方基礎設施服務中斷，需要進行少量修復工作，基礎設施提前更新 10-20%	對區域經濟的影響很小
3	中等	少量的基礎設施損壞和服務中斷，可通過維護和小修恢復，基礎設施提前更新 20-50%	對地方經濟影響很大，對更廣泛的經濟有一定影響
4	重大	大多數的基礎設施損壞，嚴重影響基礎設施服務，基礎設施提前更新 50-90%	對地方經濟造成嚴重影響，且影響向更廣泛的地區傳播
5	災難性的	重要基礎設施和基礎設施服務永久性損壞/中斷，而需將服務轉移至其他網路，基礎設施提前更新 90%	對地方和區域經濟產生重大影響

資料來源：參考自 Queensland Government Department of Transport and Main Roads, Climate Change Risk and Adaptation Assessment Framework for Infrastructure Projects, 2020.

(3) 風險評級

可能性與嚴重性指標、分級及閾值確認後，針對可能性與嚴重性選擇超過一個以上指標者，需要決定其加權方式，最簡單可以透過簡單算數平均進行計算，各專案亦可以依照各自對不同面向之重視程度，設定各專案所需之加權權重，例如針對嚴重性而言，由於某公路服務的是科學園區，因此專案主辦機關希望在評估經濟損失的指標上能夠提高權重。

可能性與嚴重性各項指標經過加權計算後，最後需要透過相乘方式計算其風險分數，並依照所得到的風險分數劃分為不同色帶與風險等級，而形成風險矩陣（參見表 5-3），風險等級建議以視覺化方式呈現更能顯示風險差異，而色帶的定義亦可依照各專案需求自行劃定，並不一定需要對稱呈現，例如某機關由於對風險承受度較低，因此相較於可能性，會更加看重嚴重性，此時可以將代表高風險的紅色色帶，向風險矩陣中的高嚴重性、低可能性方向偏移。

表 5-3　風險評級標準參考表

風險等級		嚴重性分級				
		可忽略的 1	較低 2	中等 3	重大 4	災難性的 5
可能性分級	幾乎不可能 1	1	2	3	4	5
	不太可能 2	2	4	6	8	10
	可能 3	3	6	9	12	15
	極有可能 4	4	8	12	16	20
	幾可確定 5	5	10	15	20	25

註：極低風險(1-2)、低風險(3-4)、中風險(5-9)、高風險(10-16)、極高風險(20-25)。
資料來源：參考自勞動部職安署，營造工程風險評估技術指引，民國 110 年 2 月。

4. 公路系統氣候變遷風險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三階段，從風險篩選、風險評估到工程分析。由於產出工程分析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氣候風險，建議先透過風險篩選初步掃描現況風險後，篩選出中、高風險者，針對中、高風險者進行風險評估，最後針對確實有需要進一步細部分析者進行工程分析，或建議於設計階段進行工程分析。

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，選擇適合且具實務操作可行的氣候風險評估方法來執行。

5.1 節所介紹的氣候衝擊鏈分析方法以及本節所述之風險評估方法可於工程規劃之「可行性研究」與「綜合規劃」作業中靈活運用：

(1) 可行性研究：以路網及路廊為分析尺度，執行「初步評估影響調適能力之氣候風險因素」，運用氣候衝擊鏈分析方法初步指認氣候風險因素，並透過「氣候變遷調適工作小組」之實務經驗初步評估公路系統未來將面臨的危害、暴露及脆弱因素，指認出中度風險級別以上區位，提出「路廊潛在氣候變遷風險說明表」，供路廊方案選擇參考。

(2) 綜合規劃：以路段為分析尺度，執行「氣候變遷風險評估」，針對可行性研究階段評估結果之中度風險級別以上區位，進一步詳細評估公路的重要組成、風險成因及風險程度，並與「氣候變遷調適工作小組」共同討論，提出「路線氣候變遷風險評估表」，供工程規劃及設計階段參考。

氣候風險評估方法之國際案例

【日本獨立行政法人國際協力機構：氣候風險評估及調適措施考量指引】

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 2023 年修訂《氣候風險評估及調適措施考量指引》（Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation measures consideration）。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：

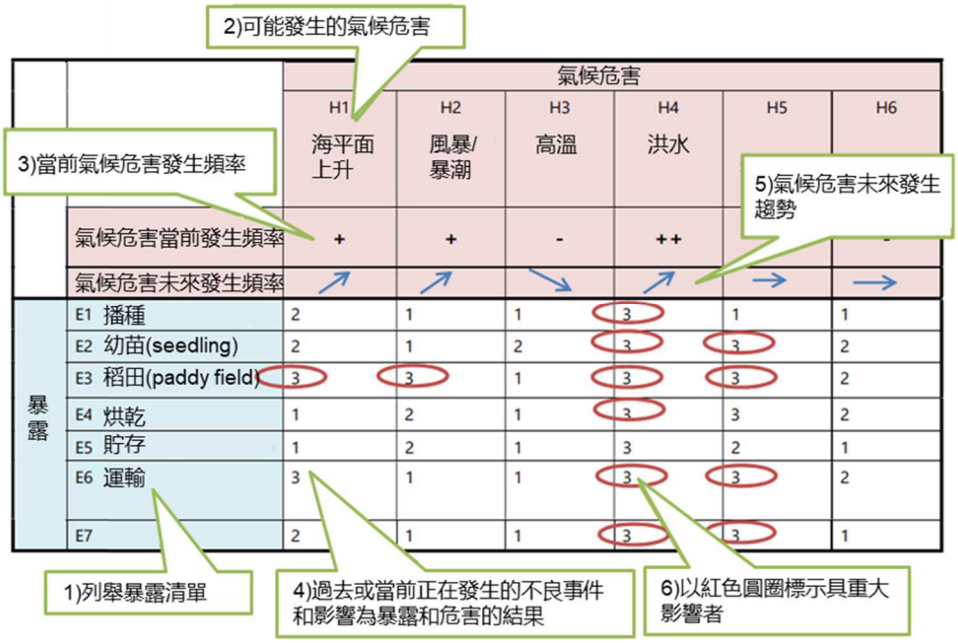
(1) 確認專案架構，諸如專案目標、投入項目、執行單位、區位、受益對象、時程等 6 大必要事項，並預先訂定氣候風險評估之時程。

(2) 運用「氣候風險矩陣」（參見圖 1）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 2）。

(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	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

圖 1　JICA 氣候風險矩陣填寫步驟

表 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
4	以評分形式評估氣候風險衝擊程度。	評分標準如表 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。	

表 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

表 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

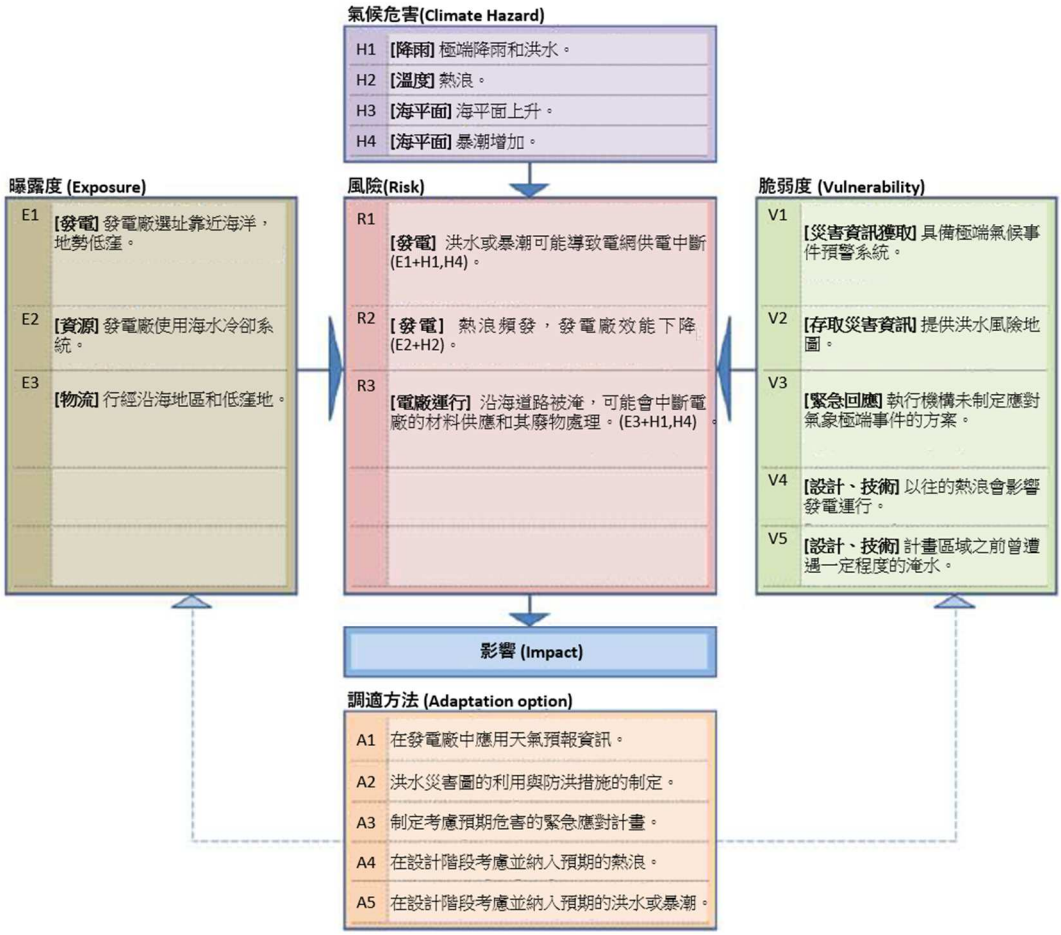


圖 2　JICA 氣候風險樹狀圖

資料來源：Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation measures consideration, 2023.

氣候變遷風險評估方法之國內案例

【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，脆弱度及暴露度指標中之產值、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；脆弱度及暴露度面向則分為（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 1 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 2 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 1　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 2　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

■ 脆弱度及暴露度指標

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 3 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 3　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 所示。

表 4　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 5 所示。

表 5　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 6 所示。

表 6　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，無法達到預警應變作用，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)

[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。

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 7 所示。

表 7　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 8。

表 8　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 9 所示。

表 9　替代道路數等級界定

脆弱度等級	高鐵	臺鐵	國道及快速道路	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 1 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)

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×W3+淹水/坡災預警應變作為×W4+替代道路數×W5) (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 1 所示。

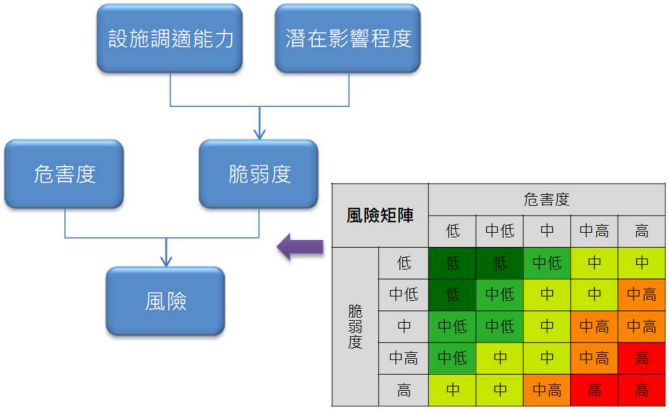


圖 1　風險評估流程與風險矩陣

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。

5.3 本章重要觀念

- 氣候變遷風險評估作業過程中，前置作業的準備為常常被忽略的一環，然而前置作業準備工作的完備程度，將大幅影響後續整體風險評估過程及結果的品質，因此，本指引提供前置作業的準備工作及注意事項供各專案參考。
- 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，且目前國內現階段可用於公路調適規劃之氣候數據相對有限，因此，本指引提供氣候變遷相關資料蒐集與分析分法，幫助專案進行氣候變遷情境設定與確認資料蒐集需求，並提供資料不足時之因應方式。
- 由於氣候變遷風險組成複雜且具不確定性，如何解析氣候變遷風險組成及氣候變遷對於公路系統的衝擊，為氣候變遷風險評估過程中較為困難且重要的步驟之一。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，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建構專案完整的氣候衝擊鏈。
- 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氣候風險，建議先透過風險篩選初步掃描現況風險後，篩選出中、高風險者進行風險評估，風險評估可根據資料、技術、經費、期程等限制因素，考量採取定性、半定量或定量評估方式，最後針對有需要進一步細部分析者進行工程分析。此外，考量國內現階段可用於公路調適規劃之氣候數據相對有限，加以規劃階段常面臨時間及資源限制，恐難以採用量化方法分析氣候衝擊，建議於規劃階段加強定性評估分析，著重氣候變遷風險辨識及揭露。

陸、公路系統調適選項及決策方法

本章蒐集國外在公路系統規劃階段的調適選項（adaptation options），供國內公路系統於規劃階段擬訂選項之參考。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。

此外，由於長期而言全球氣候變遷仍具有高度不確定性，公路系統於規劃階段有必要衡酌專案計畫目標以及資源限制條件，採多樣調適選項進行彈性組合，因此，本章亦引介「面對高度不確定性」之決策方法供參考。

6.1 公路系統因應氣候變遷之調適選項

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，以及 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五種類型：

(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（參見圖 6-1）：

(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四項特性：

(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 尚需考量以下六項條件：

(1) 對於工程韌性與危害降低的需求。

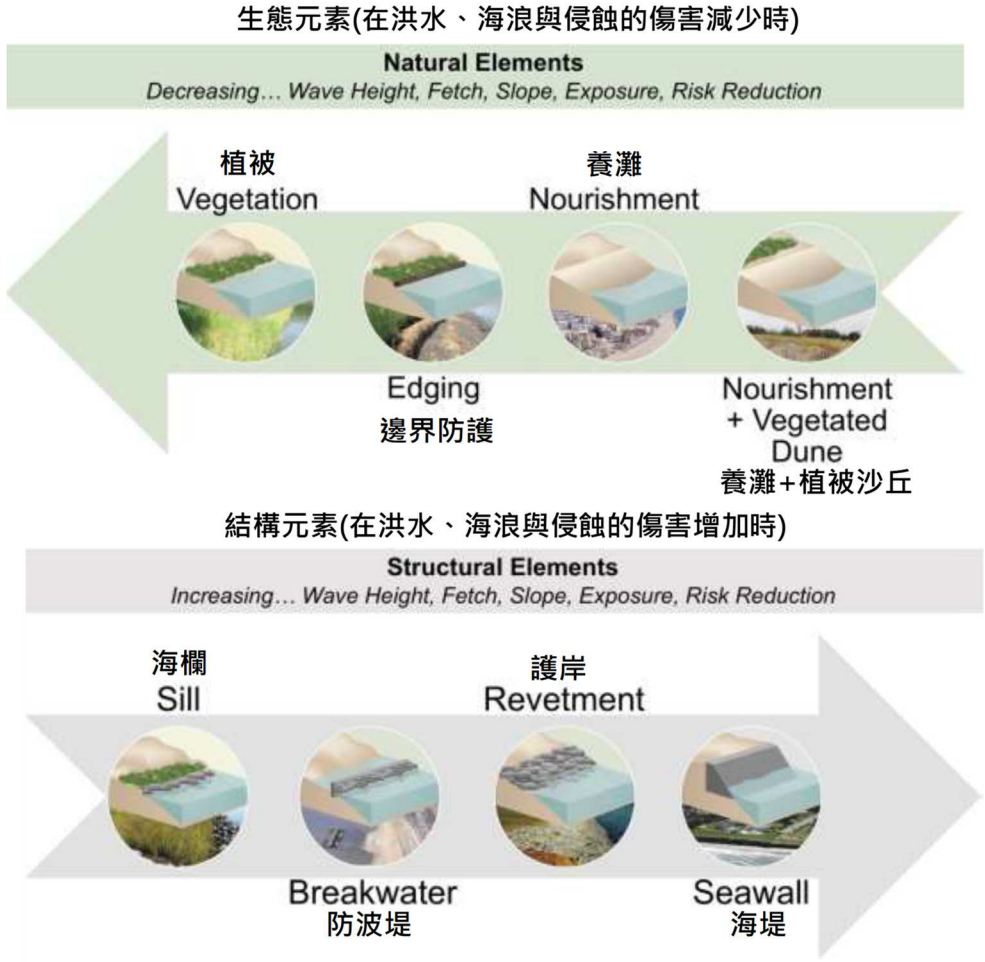
(2) 該地生態與地質的條件符合度。

(3) 面對大浪的暴露。

(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：Federal Highway Administration, Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, 2019.

圖 6-1　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。

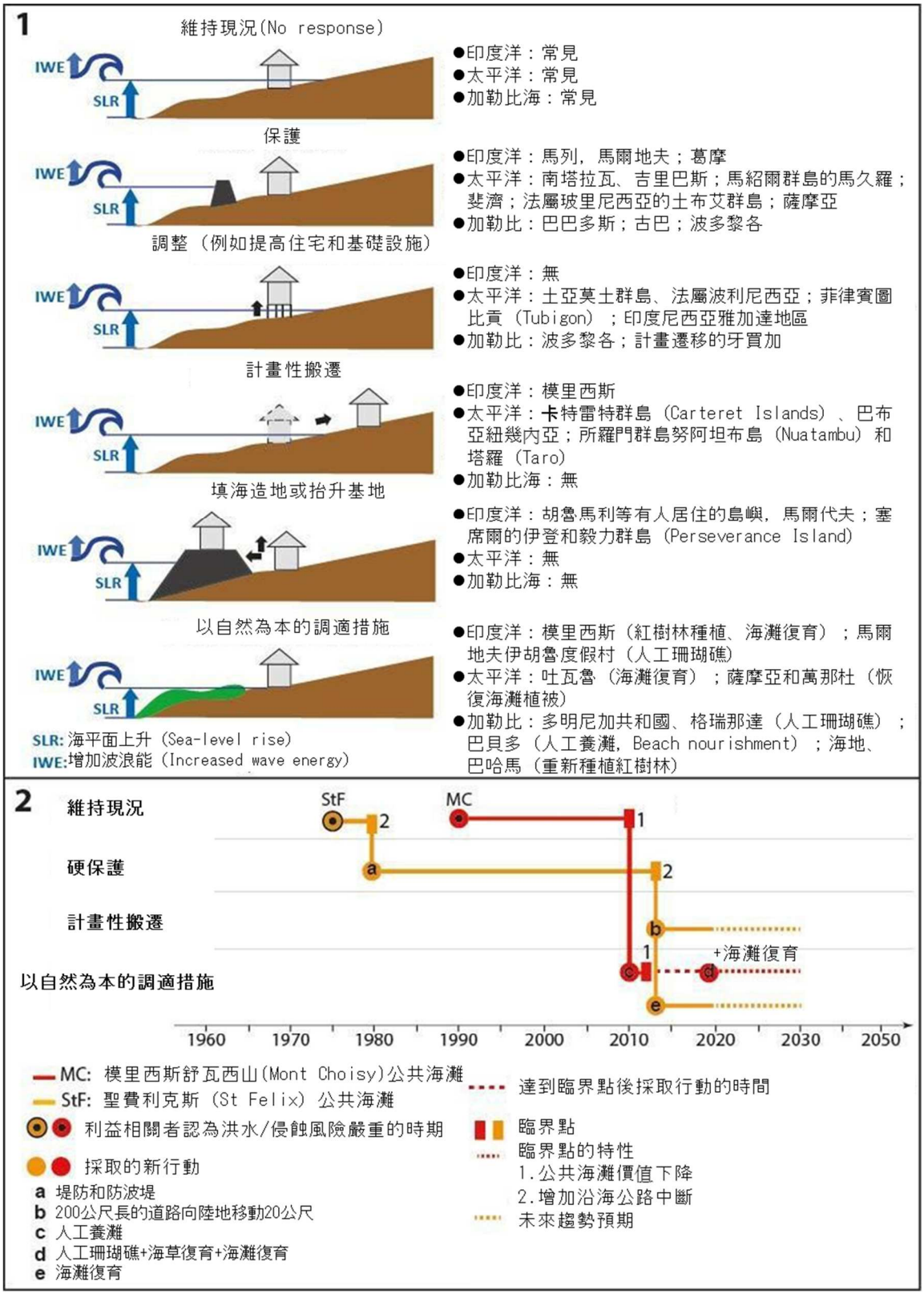
依據 IPCC AR6 綜整的調適選項類別，以下摘錄目前國際上應用於運輸系統之調適選項，主要可分為四大類（參見圖 6-2），包含：

(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) 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。



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

圖 6-2　海島國家應用調適選項以降低沿海地區氣候風險

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 2020 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 6-1）。

表 6-1　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
強降雨	暴雨沖刷/土石流	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舊的 • 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 6-1　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	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

表 6-1　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），民國 110 年 12 月、公路系統規劃階段強化調適能力之探討（2/2），民國 111 年 7 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（Metropolitan planning organization, 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，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（The 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性評估，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

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。

圖 1　MPO 研究路廊所在區位

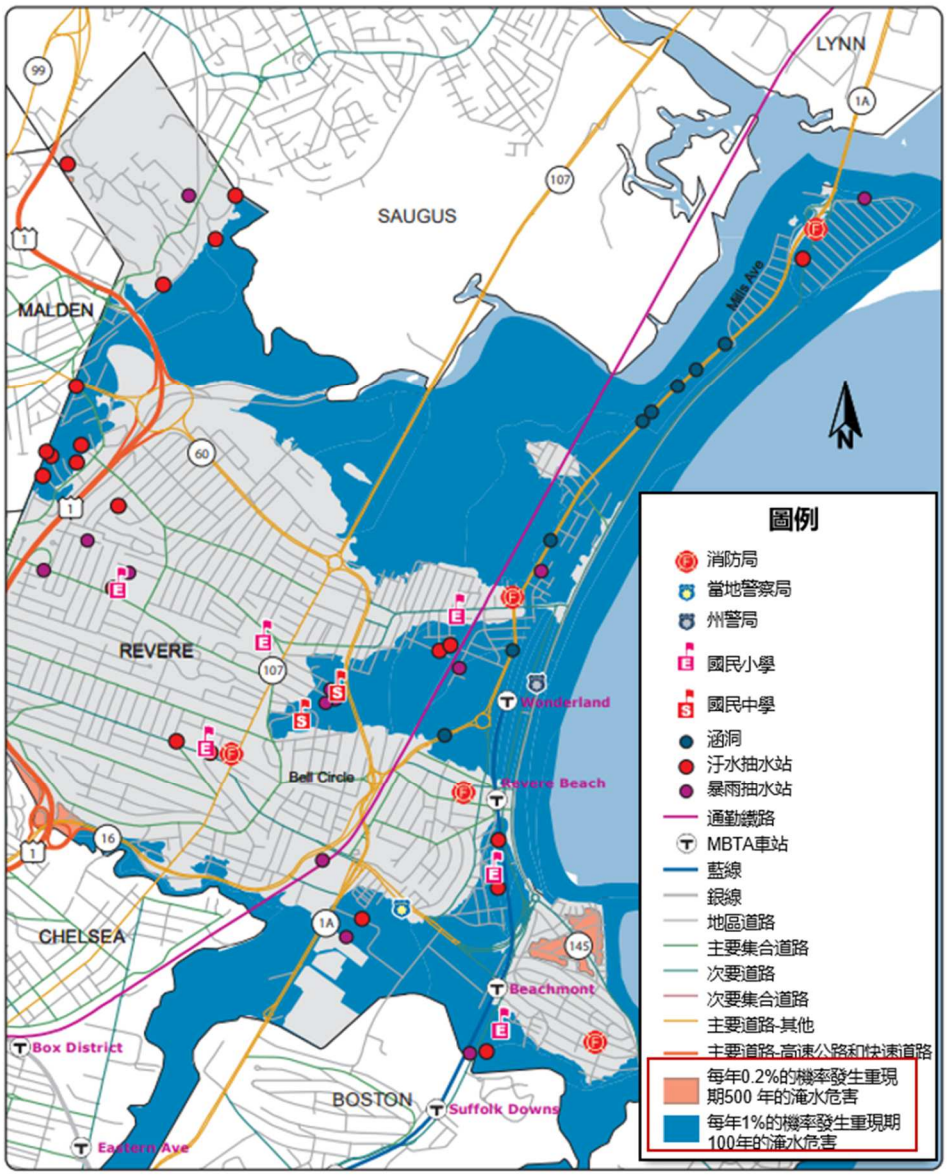


圖 2　1A 號沿海公路所在環境區位與氣候風險

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 1　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，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尺 200 至 500 美元，而暴露於高能量波浪的海岸線，因為有需要結構措施作為護岸、防波堤之可能，每直線尺之成本為 600 至 1,200 美元。

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

圖 3　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（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.

6.2 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。

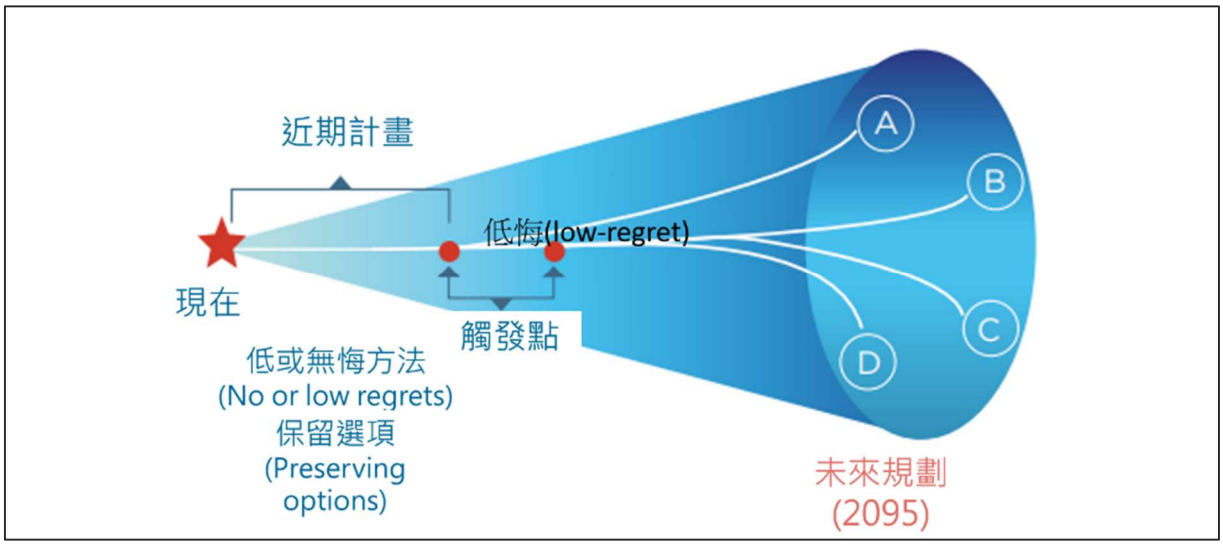
面對氣候變遷與社會經濟發展之高度不確定性，應衡量相關領域之間的相互關係，並納入系統性的調適思維，考量未來各種可能的情境需求，據以研擬及排序調適選項。因此，在氣候變遷調適決策過程中，宜採「不確定性下的決策概念」（參見圖 6-3）思考如何研擬短中長期計畫。

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：

(1) 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「低悔或無悔策略」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。

(2) 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臨界點（tipping points）、觸發點（trigger points）或臨界值（thresholders）。

(3) 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：Inter-American Development Bank, A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate, 2021.

圖 6-3　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 的三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），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，情境規劃共有八步驟（參見圖 6-4）：

(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。

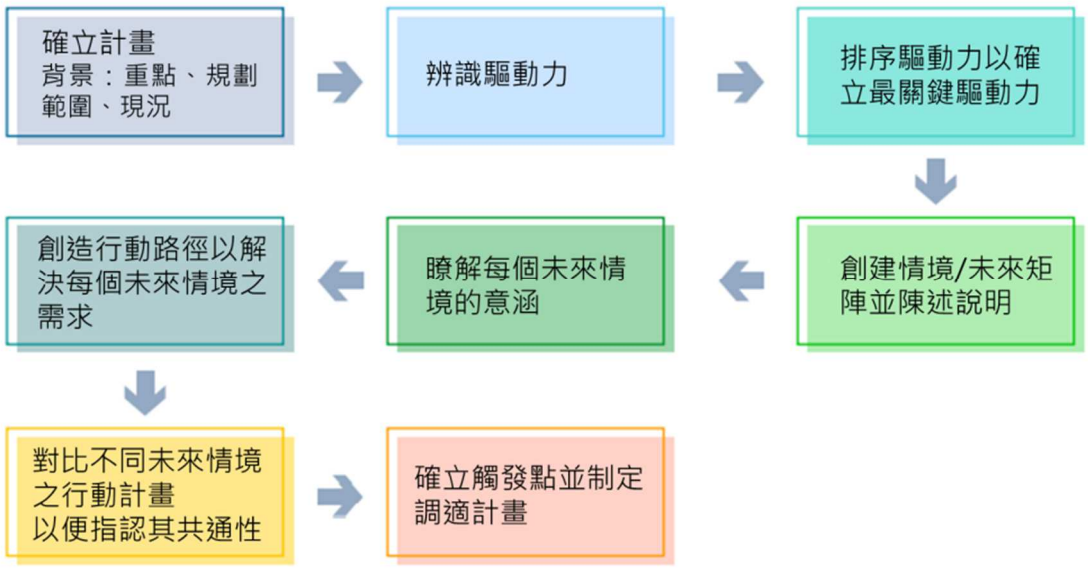
(4) 步驟 4：利用關鍵驅動因子創建未來情境矩陣，並針對該情境合理敘述。

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

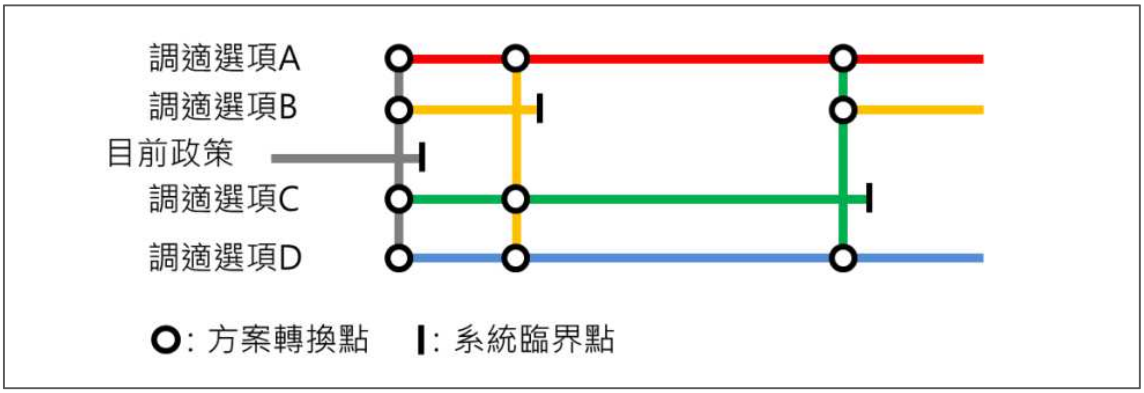
圖 6-4　情境規劃八步驟

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 6-5）。



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；國科會 TaiCCAT 計畫，氣候變遷調適行動計畫建構指引，民國 105 年。

圖 6-5　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。

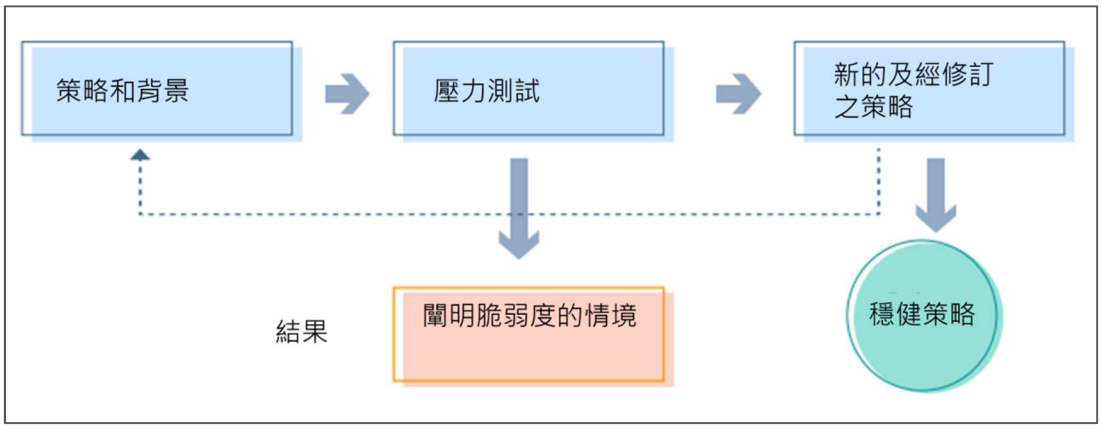
(3) 追踪每個情境如何逐步完成選擇序列。

(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它們之間的利弊權衡，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（參見圖 6-6）。



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

圖 6-6　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 的三種方法時要遵循「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。

6.3 本章重要觀念

- 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。

柒、結語

7.1 結語

- 當前全球處於氣候緊急狀態，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導入調適理念，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，透過方方面面的轉型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。

7.2 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 7-1、表 7-2）。

表 7-1　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)	https://www.ncdr.nat.gov.tw/
2	臺灣氣候變遷推估與資訊平台 (TCCIP)	https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/index.aspx
3	氣候變遷災害風險調適平台 (Dr.A)	https://dra.ncdr.nat.gov.tw/
4	中央研究院環境變遷研究中心	https://rcec.sinica.edu.tw/index.php
5	環境資訊中心	https://e-info.org.tw/
6	教育部防災教育資訊網資訊網	https://disaster.moe.edu.tw
7	NCDR 災害潛勢地圖網站	https://dmap.ncdr.nat.gov.tw/
8	農業部農村發展及水土保持署土石流及大規模崩塌防災資訊網	https://246.swcb.gov.tw/
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	https://www.gcrc.ntu.edu.tw/
12	教育部氣候變遷教學資訊平台	https://climatechange.tw/

註：最後檢視日期：2023.10.31。

資料來源：本指引彙整。

表 7-2　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/
2	政府間氣候變遷專家小組網站	http://www.ipcc.ch/
3	世界公路協會網站	https://www.piarc.org/
4	國際公路聯盟網站	https://irfnet.ch/
5	國際公路運輸聯盟網站	https://www.iru.org/
6	氣候調適知識交流網	http://www.cakex.org/
7	歐盟氣候變遷調適平台網站	http://climate-adapt.eea.europa.eu/
8	聯合國環境規劃署氣候行動網站	https://www.unenvironment.org/explore-topics/climate-action
9	美國環保署氣候變遷專頁	https://www.epa.gov/climate-research
10	美國聯邦公路管理局網站	https://highways.dot.gov/
11	美國加州調適 cal-adapt 平台	http://cal-adapt.org/
12	英國氣候變遷委員會網站	http://www.theccc.org.uk/
13	澳洲氣候變遷暨能源效率部網站	http://www.environment.gov.au/climate-change
14	瑞典氣候變遷調適網站	http://www.smhi.se/
15	荷蘭空間適應計畫	http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/
16	德國氣候變遷調適網站	http://www.umweltbundesamt.de/
17	法國氣候變遷調適網站	https://www.ecologie.gouv.fr/
18	芬蘭氣候變遷調適網站	https://www.ilmastopaneeli.fi/
19	丹麥氣候變遷調適網站	http://www.klimatilpasning.dk/
20	日本氣候變遷調適資訊平臺	https://adaptation-platform.nies.go.jp/
21	紐西蘭氣候變遷調適平臺	https://climateadaptationplatform.com/

註：最後檢視日期：2023.10.31。

資料來源：本指引彙整。

附錄、公路系統規劃階段調適示範案例演示

本示範案例屬於演示操作性質，針對已完成規劃作業（包含可行性研究與綜合規劃）之「西濱曾文溪橋段新建工程計畫」，依照本指引調適作業程序進行操作演示，演示過程及結果不影響原計畫案推動，先予敘明。

一、案例概述

本案例之計畫道路位於臺南市七股區、安南區交界，由省道西部濱海快速公路最南端銜接臺南市 2-7 號道路（台江大道），為跨越曾文溪之橋梁新建工程，其規劃路線長度約 3,381 公尺，屬於連絡道性質，預計完工後將建構完整的臺南市高快速公路交通路網，提供臺南市都會區、臺南科技工業區、安平港等完善的城際運輸聯外服務（參見附圖 1）。

本案例為已施工中的建設計畫，其推動過程如下所述：

① 可行性評估（更新評估）：105 年 9 月 30 日行政院核定。

② 綜合規劃：108 年 5 月 13 日交通部公路局原則同意。

③ 環境影響差異分析：108 年 5 月 29 日環評委員會審核修正同意。

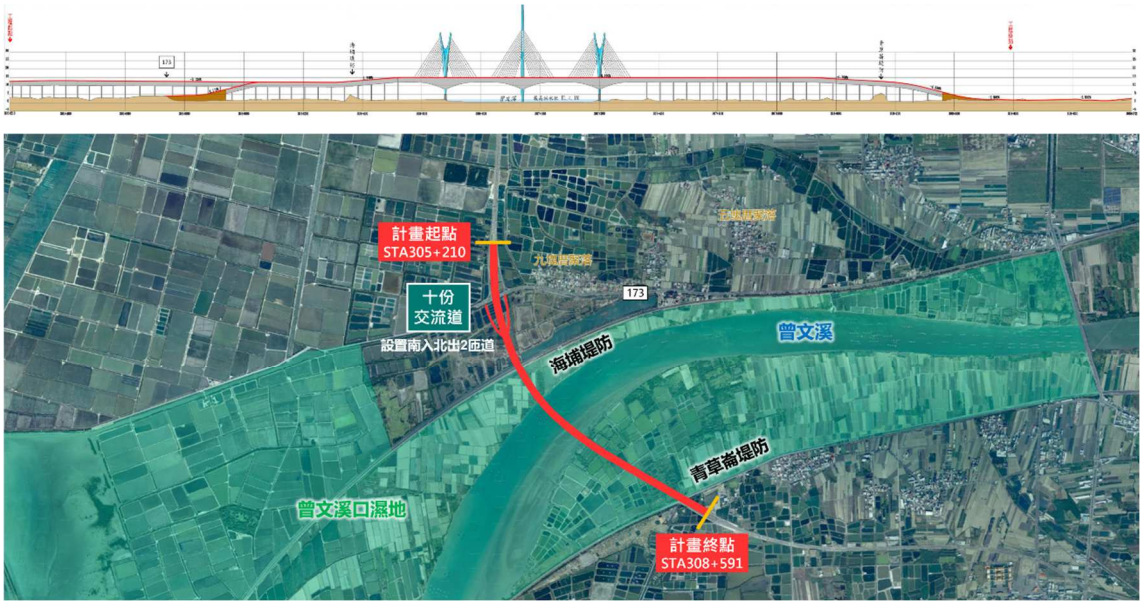
④ 建設計畫：109 年 5 月 1 日行政院核定。

⑤ 建設計畫（第 1 次修正）：111 年 8 月 19 日行政院核定。

⑥ 工程施工：111 年 12 月 4 日開工，預計 117 年 5 月 25 日完工。

附圖 1　案例區位圖

案例範圍鄰近台江國家公園，行經曾文溪口濕地之一般區域，距離出海口約 5 公里，需考量海岸類型災害之衝擊。此外，為提高道路興建可及性與服務效能，配合於十份交流道設置南入北出 2 匝道（市道 173 線南側），方便附近聚落居民由平面道路銜接上曾文溪橋，並於跨越青草崙堤防後，與臺南市 2-7 號道路採平面銜接（參見附圖 2）。



附圖 2　案例路線示意圖

本文以其規劃階段（可行性評估與綜合規劃）之作業內容為基礎，探討導入氣候變遷調適作業之操作方式。

二、前置作業

根據本指引指導，氣候變遷風險評估之前置作業包含界定評估背景、訂定目標與預期成果、組成調適工作小組、確定評估範疇與方法、設定時間範疇、多方蒐集相關資訊、制定執行計畫、確保評估過程的透明與設計妥善的參與機制等工作項目。由於本案例屬於演示操作性質，因此未制定後續利害關係人參與機制，以下針對其他各項前置作業簡要說明。

1. 界定評估背景

本案例以「西濱曾文溪橋段新建工程計畫」為例，分析案例範圍所面臨之海岸、河川與淹水等相關災害，在未來氣候變遷情境下可能產生之衝擊，並依照公路系統規劃階段氣候變遷調適指引導入調適作業程序，執行氣候變遷風險評估與研擬調適選項。

2. 訂定評估目標與預期成果

本案例公路系統根據《公路路線設計規範》，系統分類為省道快速公路，公路等級為三級路，中央主管機關交通部公路局定位其服務功能包含觀光、運輸及高速公路備災等三種功能，由於非屬於生命線，因此設定公路調適目標為「允許暫時失能」而無須於設計時排除所有風險，但於失能修復期間應有緊急應對措施（如規劃替代路線），並可於短時間內恢復通行功能。

本案例依照調適指引之調適作業程序進行氣候變遷風險評估，並針對中高風險路段、組件提出調適策略與措施，預期最終將根據調適指引所述之調適作業基本要求，產出氣候變遷風險評估表。

3. 組成調適工作小組

本案例之調適工作小組成員，除原工程規劃團隊之主管機關及規劃顧問公司外，另包含所涉環境區位主管機關、氣候相關資料提供機關等，小組成員如下：

- 公路設施權責機關：交通部公路局、南區公路新建工程分局
- 河川流域治理機關：經濟部水利署第六河川分署
- 氣候資料提供機關：國家災害防救科技中心
- 公路規劃顧問公司：台灣世曦工程顧問公司、易緯工程顧問公司
- 氣候變遷調適顧問團隊：鼎漢國際工程顧問公司

4. 確定評估範疇與評估方法

評估範疇之空間範圍部分，本案例以西濱快速公路台 61 線末端爲起點，跨越曾文溪銜接台江大道為終點進行橋梁佈設，然而本案例公路橋梁屬於跨河橋梁，因此在評估曾文溪於氣候變遷情境下之未來河川水文資訊時，應針對整體曾文溪流域集水區之降雨變化進行資料蒐集分析。

評估範疇之公路系統組件部分，可分為平面連絡道與高架橋梁（引橋段、邊橋段、主橋段），高架橋梁可再細分為橋面、排水、橋台、路堤、橋墩及基礎等。

氣候變遷風險評估方法部分，由於國內尚缺乏氣候變遷風險評估相關實務操作經驗，因此本案例採用半定量風險評估方法，以召開專家工作坊方式進行議題討論，最終執行風險評分作業，專家工作坊可以針對尚有疑義之調適相關議題進行討論，蒐整本土經驗，亦可在資料相對不足的情況下進行氣候變遷風險評估，適合國內公路領域現階段推動氣候變遷調適。

5. 設定時間範疇

設定評估時間範疇部分，由於本案例之計畫道路屬於重要公路橋梁，依據《公路橋梁設計規範》其設計年限不小於 100 年，另因考量目前公開之氣候推估資料多僅推估至本世紀末，故以規劃年（2016 年）至本世紀末（2100 年）為評估年期。

6. 蒐集相關資訊

由於本案例係針對已完成之公路規劃專案進行案例演示，因此在相關資訊蒐集部分除了河川流域治理計畫、調適規劃報告外，亦針對專案之綜合規劃、建設計畫等規劃報告進行蒐整，以利後續進行比較分析，本案例蒐集之相關報告書如下：

- 西濱快速公路曾文溪橋段新建工程綜合規劃（108 年）
- 西濱快速公路曾文溪橋段新建工程環境影響差異分析（108 年）
- 西濱快速公路曾文溪橋段新建工程建設計畫（第 1 次修正）（111 年）
- 曾文溪水系曾文溪治理規劃檢討（103 年）
- 曾文溪流域整體改善與調適規劃（1/2）（111 年）
- 曾文溪流域整體改善與調適規劃（2/2）（112 年）

7. 制定執行計畫

本案例擬透過專家工作坊方式，探討調適操作過程需討論之相關議題。並於下階段實際試操作氣候變遷風險評估，專家工作坊已於 112 年 10 月 11 日（四）召開，專家工作坊之討論議題如下：

- 確認氣候變遷相關資料蒐集與分析之完備性
- 辨識專案面臨之氣候壓力與衝擊，並指認相關氣候風險因素
- 研議適用於專案之風險評估指標、閾值與權重
- 執行氣候變遷風險評估作業
- 中高風險區域之調適策略與措施

附圖 3　專家工作坊照片

三、蒐集與分析氣候變遷情境與氣候相關資料

根據指引內容，於前置作業階段之篩選分析步驟期間，其工作項目主要包含回顧過往氣候形態、未來氣候變遷情境設定與氣候相關資料蒐集與分析三項，以下分別進行說明：

1. 回顧過往氣候形態

本步驟將依據案例所在環境區位特徵，瞭解過往氣候形態及可能面臨之氣候壓力，初步掌握氣候變遷對案例範圍可能產生的影響。

過往氣候資料蒐集部分，首先針對主要影響公路系統之五大氣候壓力（強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪及海平面上升）蒐集所需之歷史氣象觀測資料，接著針對跨河橋梁、鄰近出海口等區位特性，蒐集相關之歷史災害、災害潛勢等資訊（參見附表 1），各項資料說明詳如下述。

附表 1　過往氣候與環境變異資料彙整表

分類		資料名稱	空間尺度	時間尺度	單位	資料來源
氣候壓力	強降雨	年雨量	臺南測站	1971-2021	公釐	TCCiP
			曾文溪流域	1971-2021	公釐	TCCiP
	暴潮/風浪	颱風暴潮高度	臺南沿海	現況(1978-2017)	公尺	TCCiP
		颱風風浪高	臺南沿海	現況(1978-2017)	公尺	TCCiP
	強風	海岸風速	全臺沿海	現況(1978-2017)	公尺/秒	TCCiP
	高溫	年均溫	臺南測站	1971-2021	攝氏	TCCiP
		高溫大於 35°C 日數	臺南測站	1971-2021	天	TCCiP
河川水文		曾文溪河川基礎資訊	河道斷面、河口暴潮位(起算水位)、洪峰流量、流速、河床沖淤變化、計畫洪水位、計畫堤頂高、現況堤頂高、出水高			曾文溪水系曾文溪治理規劃檢討
歷史災害		近 5 年歷史淹水災點	全臺	2018-2022	-	NCDR 3D 災害潛勢地圖
災害潛勢		淹水潛勢圖(650mm/24hr)	臺南/40m 網格	2015	公尺	NCDR 3D 災害潛勢地圖
		暴潮溢淹潛勢圖(50 年重現期)	臺南沿海	2020	公尺	臺南市一級海岸防護計畫
		地層下陷潛勢	臺南市濱海陸地未達 2 公分/年、歷年累計下陷量未達 50 公分之中潛勢界限，故未繪製潛勢圖			臺南市一級海岸防護計畫

資料來源：本指引彙整。

(1) 河川基礎資訊

根據「曾文溪水系曾文溪治理規劃檢討」，曾文溪河口暴潮位採用 2.1 公尺作為起算水位，案例計畫路線約位於曾文溪河川斷面 11~斷面 12 位置處，所在河段為下降沖刷河段，造成沖刷主要因素為流路固定深槽下刷嚴重，重大洪水事件加重主深槽下切，其次為海岸線退縮導致河口段平均河床高程下降顯著，建置橋梁時應注意河床沖刷問題。斷面 12 現況堤頂與計畫堤頂差距 0.5 公尺以上，雖無須立即改建，惟日後橋梁新建或改建時，應配合改建至計畫堤頂高以上，其他相關資訊參見附表 2。

附表 2　河川斷面基礎資訊彙整表

斷面	累距 (m)	洪峰流量 (CMS)	水面寬 (m)	通水面積 (m^2)	流速 (m/s)	河床沖淤變化 (92-98) (m)	計畫洪水位 (m)	計畫堤頂高 (m)	左岸(青草崙)檢討 (m)		右岸(海埔)檢討 (m)	
									現況堤頂高	出水高	現況堤頂高	出水高
11	4792	13200	1581	7149	1.85	-0.9	4.08	6.69	6.52	2.44	6.58	2.50
12	5290	13200	1582	6578	2.01	-0.85	4.22	6.82	6.09	1.87	6.73	2.51

資料來源：經濟部水利署，曾文溪水系曾文溪治理規劃檢討，民國 103 年 7 月。

(2) 歷史災害與災害潛勢

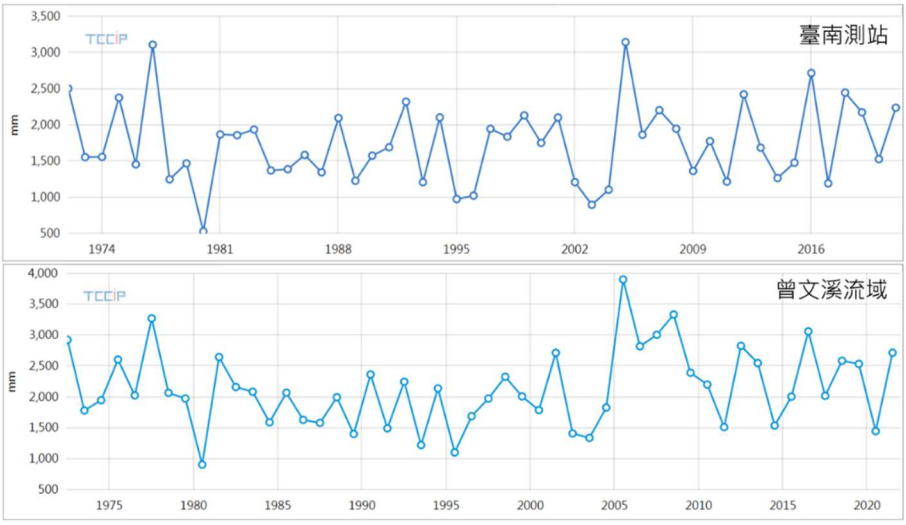
案例範圍周邊近 5 年歷史淹水災點與 650mm/24hr 淹水潛勢呈現相近的分布趨勢，皆集中於北側大塭寮排水及南側台江大道周邊魚塭，北側淹水潛勢深度約 0.3-0.5 公尺、南側約 0.3-1.0 公尺，50 年重現期暴潮溢淹潛勢則集中於案例範圍南北兩側靠海側，溢淹深度約 0-1.5 公尺。由於本案例之計畫道路於南北兩側皆預計增設與平面道路連接之匝道，因此降雨溢淹及暴潮溢淹可能會對計畫道路產生影響（參見附圖 4）。

歷史淹水災點　　淹水潛勢圖　　暴潮溢淹潛勢圖

附圖 4　歷史災害與災害潛勢圖

(3) 降雨

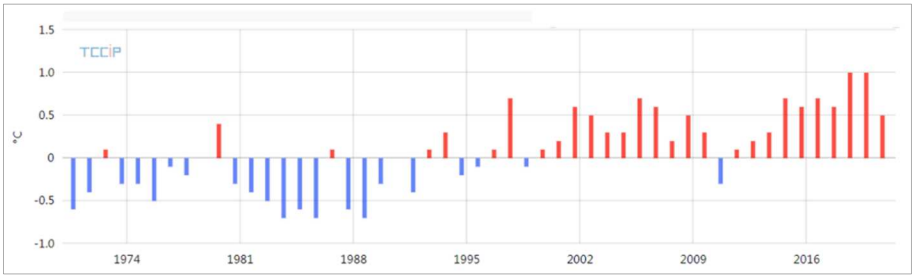
臺南測站過去 50 年年雨量約介於 1,000-2,500mm，曾文溪流域約介於 1,500-3,000mm，近 20 年有年雨量變化幅度增加趨勢（參見附圖 5）。



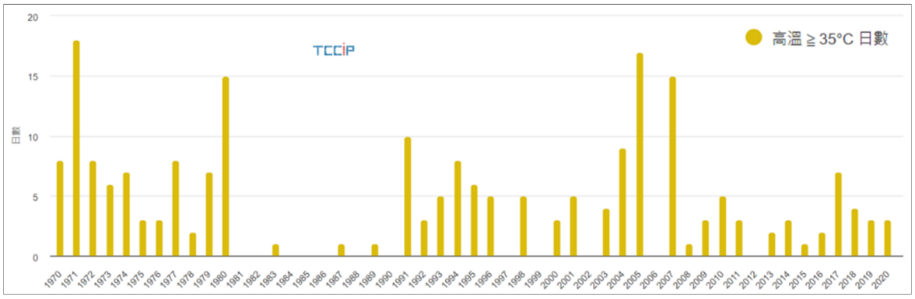
附圖 5　過去 50 年年累積雨量觀測值

(4) 溫度

臺南測站基年（1981-2010 年）年均溫為 24.3˚C，過去 50 年年均溫介於 23-25˚C，近 10 年有逐漸增加趨勢，約增加 0.5-1˚C（參見附圖 6）；高溫日數部分，過去 50 年高溫大於 35˚C 日數無明顯變化趨勢（參見附圖 7）。



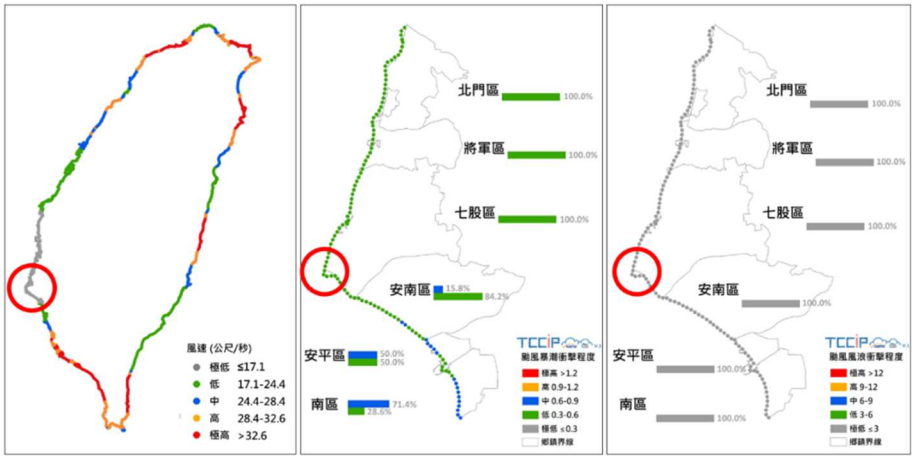
附圖 6　臺南測站過去 50 年年均溫觀測距平值



附圖 7　臺南測站過去 50 年高溫大於 35˚C 日數

(5) 颱風風速、暴潮與風浪

NCDR 根據 1978-2017 年 125 場颱風模擬結果，分析現況條件下之海面風速、暴潮高度及風浪高度，臺南沿海海面風速為低於 17.1 公尺/秒之蒲福風級極低風速；暴潮高度為 0.3-0.6 公尺之低衝擊程度；風浪高度為低於 3 公尺之極低衝擊程度（參見附圖 8）。



附圖 8　臺南沿海颱風風速、暴潮與風浪現況

2. 未來氣候變遷情境設定

本案例評估年期為規劃年（2016 年）至本世紀末（2100 年），參考環境部公布之國家調適應用情境，以世紀末最劣情境升溫 4˚C（減碳失敗）作為本案例之未來氣候變遷情境設定，另由於部分氣候推估資料仍為 AR5 資料格式，故針對尚未推出 AR6 資料格式之氣候推估資料，以世紀末最劣情境 RCP8.5（減碳失敗）作為情境設定。

3. 氣候相關資料蒐集與分析

根據主要影響公路系統之五大氣候壓力（強降雨、強風、高溫、暴潮/風浪及海平面上升）所蒐集之歷史氣象觀測資料、歷史災害及災害潛勢，將據其資料類型蒐集未來氣候變遷推估資料（參見附表 3），其中部分推估資料仍為 AR5 資料格式，且部分僅推估至世紀中，未來 NCDR 將陸續產製公開上架，各資料說明詳如下述。

附表 3　未來氣候變遷推估資料彙整表

分類	資料名稱	空間尺度	時間尺度	單位	資料來源
強降雨	極端降雨(650mm/24hr)發生機率	臺南/40m 網格	1.5˚C/2˚C/4˚C	危害度等級	Dr.A
	年最大日降雨最大值變化率	全臺/5km 網格	1.5˚C/2˚C/4˚C	%	TCCiP
	累積雨量變化率(6、12、24 小時延時)	曾文溪流域	RCP8.5 世紀中	%	TCCiP
暴潮/風浪	颱風暴潮高度	臺南沿海	RCP8.5 世紀末	公尺	TCCiP
	颱風風浪高	臺南沿海	RCP8.5 世紀末	公尺	TCCiP
海平面上升	海平面上升溢淹圖	臺南沿海	2˚C/4˚C	公尺	NCDR 從 IPCC AR6 報告看氣候變遷衝擊與調適簡報(111.03.25)
強風	海岸風速	全臺沿海	RCP8.5 世紀末	公尺/秒	TCCiP
高溫	年最大日高溫變化量	全臺/5km 網格	1.5˚C/2˚C/4˚C	攝氏	TCCiP
	極端高溫持續指數(HWDI)	全臺/5km 網格	1.5˚C/2˚C/4˚C	天	TCCiP

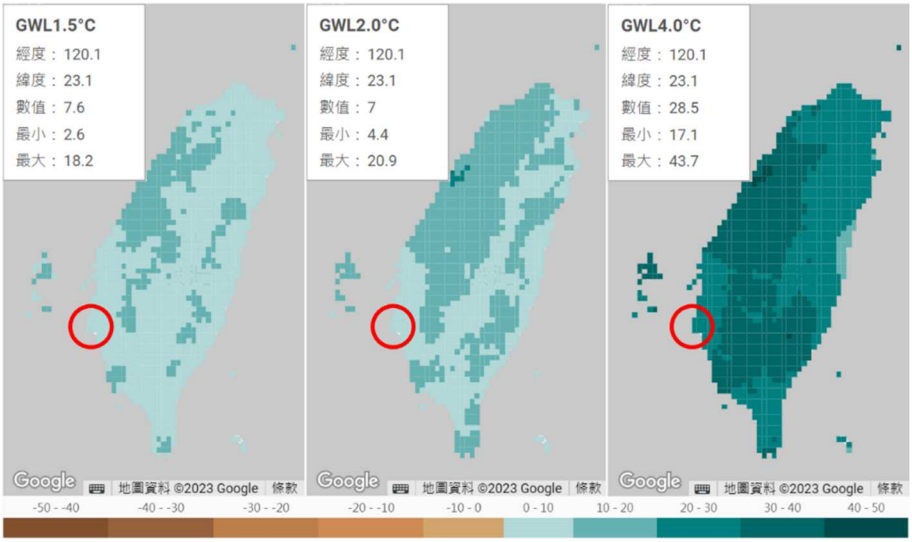
資料來源：本指引彙整。

(1) 強降雨

極端降雨事件（650mm/24hr）發生機率為針對 CMIP5 氣候情境資料之網格日資料中，日雨量超過 650 公釐之年降雨量最大值氣候事件進行頻率分析，並與淹水潛勢範圍套疊，因此資料空間尺度為 40 公尺網格，並以危害度等級方式呈現，危害度等級越大表示極端降雨發生機率越大、頻率越高，可反映降雨頻率之未來變化情形。結果顯示，案例範圍北側大塭寮排水及南側台江大道周邊於世紀末增溫 4˚C 情境下，皆呈現第一級危害度（參見附圖 9）。

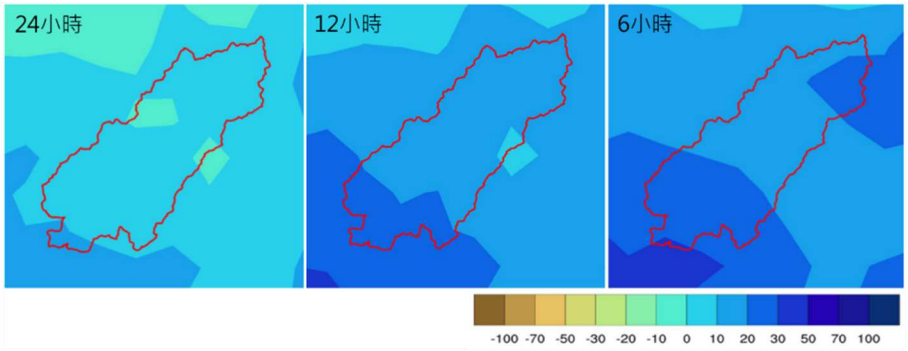
附圖 9　極端降雨事件（650mm/24hr）發生機率（危害度等級）

年最大日降雨量為一年當中降雨量最高的日降雨量，相當於一年當中極端降雨事件之降雨強度，其變化率可反映降雨強度之未來變化情形，資料空間尺度為 5 公里網格。結果顯示，案例範圍所在區域於世紀末增溫 4 ˚C 情境下，年最大日降雨量增加約 28.5%，可見極端降雨強度將大幅提升（參見附圖 10）。



附圖 10　年最大日降雨量變化率

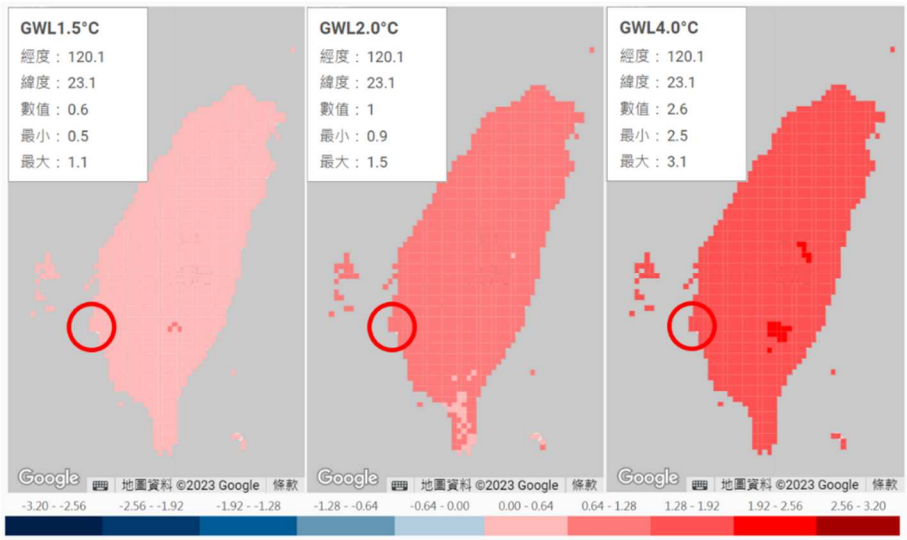
為分析極端降雨對於曾文溪流域洪峰流量及洪峰水位之影響，故參考曾文溪流域集水區前 30%事件 24 小時、12 小時、6 小時延時累積雨量變化率推估資料，此資料目前僅提供至世紀中推估。結果顯示，24 小時延時雨量約增加 5%、12 小時延時約增加 16%、6 小時延時約增加 20%，可見降雨延時越短降雨強度增加幅度越大之情形（參見附圖 11）。



附圖 11　曾文溪流域集水區世紀中前 30%事件各延時累積雨量變化率

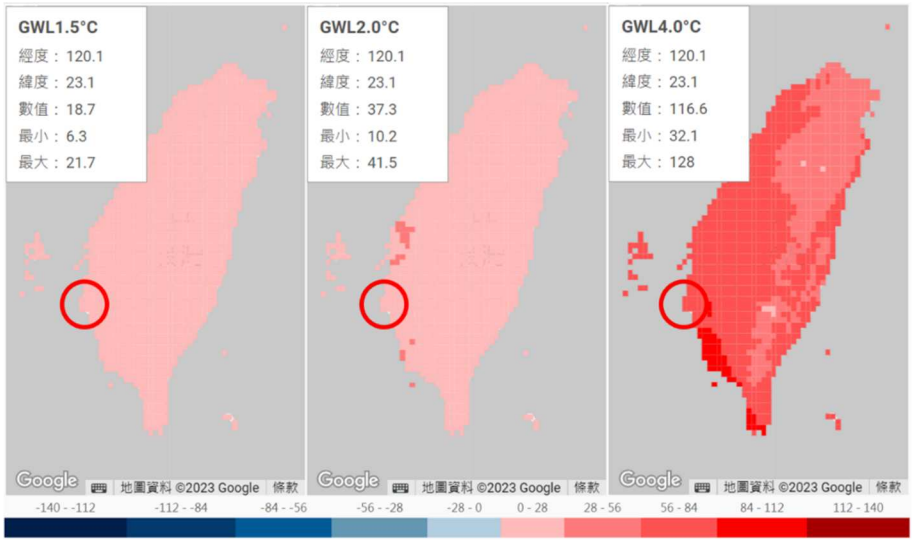
(2) 高溫

年最大日高溫為一年當中日高溫的最大值，資料空間尺度為 5 公里網格。結果顯示，案例範圍所在區域於世紀末增溫 4˚C 情境下，年最大日高溫增溫幅度約 2.6˚C（參見附圖 12）。



附圖 12　年最大日高溫變化量

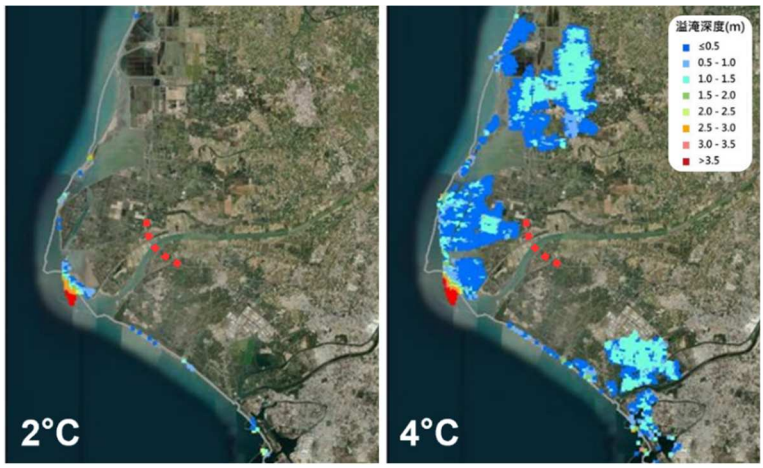
極端高溫持續指數 HWDI（Heat wave duration index）為一年之中連續 3 天以上日最高溫高於基期第 95 百分位數之事件總天數，資料空間尺度為 5 公里網格。結果顯示，案例範圍所在區域於世紀末增溫 4˚C 情境下，極端高溫日數將達到 116.6 天，表示一年當中約有 1/3 天數處在極端高溫之下（參見附圖 13）。



附圖 13　極端高溫持續指數（HWDI）變化量

(3) 海平面上升

根據 IPCC AR6 模式模擬結果，在升溫 2˚C 及 4˚C 的情境之下，可能導致臺灣周邊海域海平面上升達 0.5 及 1.2 公尺，在 4˚C 情境下，案例範圍北側可能發生約 0.5 公尺溢淹情形（參見附圖 14）。臺南市海平面上升溢淹推估圖參考自 NCDR 公開簡報資料，全臺灣海平面上升推估圖預計於 2023 年底推出。

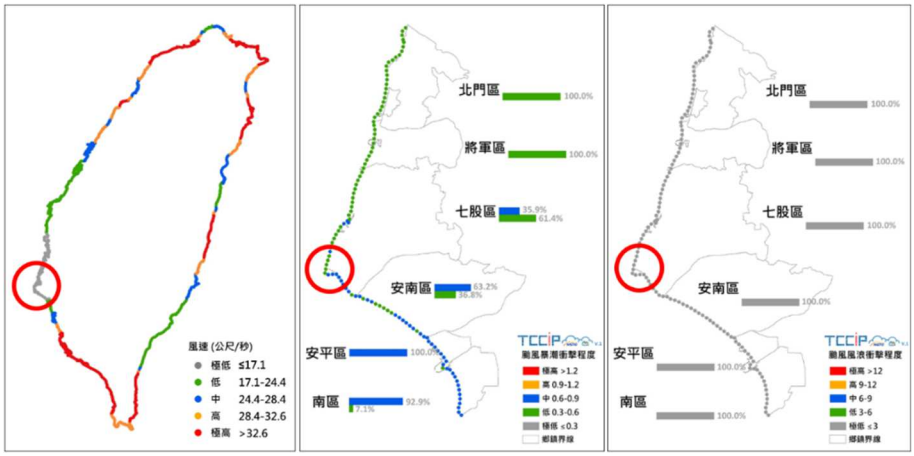


資料來源：國家災害防救科技中心，從 IPCC AR6 報告看氣候變遷衝擊與調適簡報，民國 111 年 03 月 25 日。

附圖 14　海平面上升溢淹推估圖

(4) 颱風風速、暴潮與風浪

根據 1978-2017 年 125 場颱風模擬結果，世紀末 RCP8.5 情境下之海面風速、暴潮高度及風浪高度，臺南沿海海面風速維持低於 17.1 公尺/秒之蒲福風級極低風速；暴潮高度有部分提升至 0.6-0.9 公尺之中衝擊程度；風浪高度則維持為低於 3 公尺之極低衝擊程度（參見附圖 15）。



附圖 15　臺南沿海颱風風速、暴潮與風浪世紀末推估

綜上所述，主要影響公路系統之五大氣候壓力因素，又以強降雨、暴潮及海平面上升三項氣候壓力，在氣候變遷情境下對於案例範圍之影響較鉅，造成之衝擊主要為平面道路溢淹及河川流速增強掏刷橋基河床，本階段僅初步研提相關潛在因應對策，後續將針對此三項氣候壓力進一步評估（參見附表 4）。

強風、風浪雖為影響公路規劃之重要氣候壓力因素，然而在現況及世紀末皆屬於極低等級之衝擊程度，顯示在氣候變遷情況下，現況與未來變化幅度差異不大，且在現況條件下，於原有公路規劃過程中即應有所考量，因此本此暫不針對強風、風浪進行後續評估；高溫部分，因高溫主要影響層面為鋪面材料軟化、結構鋼材熱膨脹，初步研判升溫幅度及高溫持續程度不致對本案例之計畫道路造成重大影響，且可透過調整鋪面材料、預留伸縮縫等方式處置，研判影響較為輕微，因此本次亦暫不針對高溫進行後續評估。

此外，針對強降雨所造成之河川氣候變遷衝擊部分，由於目前尚缺乏透過流域集水區累積雨量變化率推估資料產製出之未來洪峰流量及洪峰水位等水文資訊，為目前國內氣候變遷推估資料斷鏈之處，因此本案例僅就現況河川水文資訊與曾文溪流域累積雨量變化率推估資料，透過調適工作小組進行初步研判，尚存在一定程度不確定性。

附表 4　曾文溪橋新建計畫氣候變遷資料蒐集分析資訊綜理表

氣候壓力	可能的衝擊	易受衝擊區位、範圍	風險研判	影響程度	潛在因應對策
強降雨	1.地表逕流造成平面道路溢淹（內水） 2.河川越堤造成平面道路溢淹（外水） 3.強降雨造成河川流域達到洪峰，挾帶大量砂石撞擊橋墩，並掏刷橋基河床（流域）	1.地勢低窪地區 2.河道範圍（視流域土砂安定情況，擴大評估範圍至上游流域集水區）	1.道路淹水阻斷通行 2.橋台、引道受損阻斷交通 3.橋基損毀/裸露影響橋梁穩定性	嚴重	1.在可容許中斷時間內，擬妥替代方案，包含搭設便橋、規劃替代道路、預警性封閉等 2.加強路基/橋基保護工 3.減少落墩 4.加長深基礎
暴潮	海岸暴潮造成平面道路溢淹	沿海地區	道路淹水阻斷通行	可能嚴重	
海平面上升	海平面上升造成海岸線退縮，平面道路溢淹	沿海地區	道路淹水阻斷通行	可能嚴重	

資料來源：本指引彙整。

四、建構衝擊鏈

根據本指引內容，根據指引內容，執行風險評估作業階段之執行風險評級步驟，其工作項目包含指認氣候風險因素與初步評估影響調適能力的氣候風險因素兩項，以下分別進行說明：

1. 指認氣候風險因素

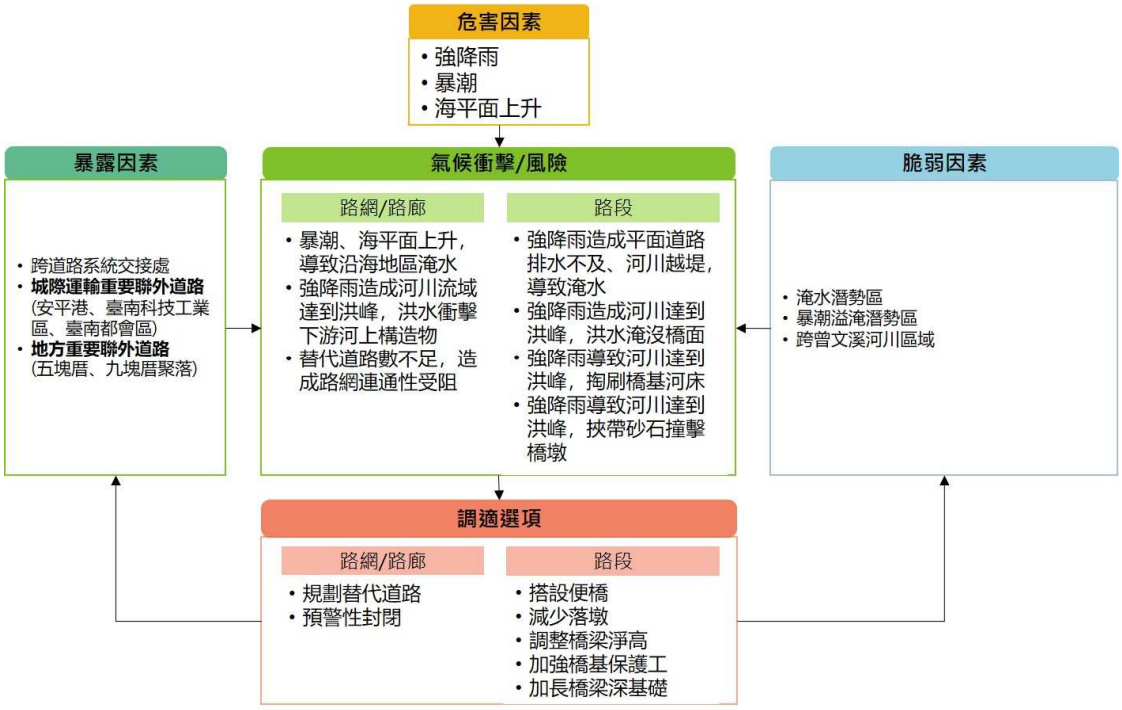
進行後續氣候變遷風險評估前，應指認影響本案例氣候變遷風險之因素，風險因素主要由危害、暴露度、脆弱度三項因素組成，並針對其風險與可能的調適選項，根據路網/路廊、路段尺度進行說明，再綜整為氣候衝擊鏈（參見附圖 16），以下針對氣候衝擊鏈各項內容進行說明：

(1) 危害因素：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。根據前階段之綜整分析，本案例以強降雨、暴潮、海平面上升三項氣候壓力因素作為危害因素。

(2) 暴露因素：公路系統位於易受衝擊地區的範圍及程度。本案例以跨道路系統交接處表示道路易受衝擊的特性，主要因高架橋梁與平面道路交接處，容易因道路淹水而影響上下匝道車輛通行；另外以地方及城際運輸重要聯外道路表示道路失能可能造成的影響等，分別服務了五塊厝、九塊厝等在地聚落及安平港、臺南科技工業區、臺南都會區。

(3) 脆弱因素：公路系統本身容易受衝擊、缺乏應對和適應的範圍及程度。本案例以淹水潛勢區、暴潮溢淹潛勢區、河川區域等災害敏感地區作為脆弱因素。

(4) 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。調適選項的擬定首先需考量道路功能定位，由於本案例公路調適目標為「允許暫時失能」，因此在調適選項擬定上應特別著重於在施能修復期間可採行之替代方案，強調軟性、管理面的調適選項。針對路網/路廊尺度之氣候衝擊，主要來自較大範圍之周邊區域，如海平面上升及暴潮，因此調適選項須聯同周邊路段共同規劃替代道路、施行預警性封閉；針對路段尺度之氣候衝擊，主要針對高架橋梁及平面道路本身，因此調適選項亦多與橋梁設計、配置與保護設施相關。



附圖 16　氣候衝擊鏈

2. 初步評估影響調適能力的氣候風險因素

根據上述氣候衝擊鏈分析結果，依照暴露因素所在區位不同，將案例範圍路廊依照兩側堤防切分為三段，並將脆弱因素、潛在衝擊及調適策略與之對應，其中南北兩側皆位於淹水潛勢區及暴潮溢淹潛勢區，且北側區域有海平面上升溢淹可能，主要衝擊為平面道路淹水；中間區域段位於河川區域範圍內，主要衝擊為橋梁受河川洪峰影響，造成洪水溢淹橋面、掏刷橋基河床、挾帶砂石撞擊橋墩等（參見附表 5）。

本案例採行專家工作坊進行半定量的潛在氣候風險初步評估。為進行風險評級，本案例採用風險的廣泛定義為發生事件的可能性與嚴重性的組合（乘積），初步選取本案的可能性與嚴重性之參考指標進行風險評估。可能性可區分為氣候壓力發生之可能性與氣候衝擊發生之可能性，指標方面參考 NCDR 產製之極端降雨事件發生機率（危害度等級）；嚴重性可區分為氣候衝擊大小與對社會經濟造成之後果大小，氣候衝擊大小指標以淹水深度代表，需綜合考量淹水潛勢圖、暴潮溢淹潛勢圖、海平面上升溢淹推估圖、極端降雨推估變化率及暴潮高度推估變化量等，進行淹水深度研判，對社會經濟造成之後果大小指標則以交通量為代表，參考綜合規劃報告書所做之交通量預測進行分級評定，各指標之分級閾值皆參考自可能性與嚴重性參考基準表（參見附表 6）。

各指標完成分級評定後，針對單一面向有超過一個指標以上者應進行加權計算，如本案例於嚴重性包含淹水深度及交通量兩項指標，本案例初步以算數平均法進行加權計算評分，最後再透過可能性與嚴重性矩陣相乘方式計算風險等級（參見附表 7），並計算各專家評級結果之平均值，或可透過討論共識決之方式評定最終風險評級，建議未來其他專案可依照各自需求，自行討論決定專案採用之評估指標、分級閾值及權重計算方式等。

根據專家風險評級結果顯示，案例範圍全區皆為中度風險等級，因此全區皆需接續進行氣候變遷風險評估作業。此外，由於目前尚缺乏透過流域集水區累積雨量變化率推估資料產製出之未來洪峰流量及洪峰水位等水文資訊，因此針對中間區域段河川區域之氣候變遷風險評估，僅為透過調適工作小組，就現況河川水文資訊與曾文溪流域累積雨量變化率推估資料所做之初步研判，尚存在一定程度之不確定性，後續待有關單位產製出未來洪峰流量及洪峰水位等水文資訊後，可再進行更詳細之風險評估。

附表 5　曾文溪橋路廊潛在氣候變遷風險說明表

區位	危害因素	暴露因素	脆弱因素	潛在衝擊說明	可能性 (5 級)	嚴重性 (5 級)	風險評級	調適策略
計畫起點至海堤	1. 強降雨 2. 暴潮 3. 海平面上升	1.跨道路系統交接處 2.城際運輸重要聯外道路 3.地方重要聯外道路	1.淹水潛勢區 2.暴潮溢淹潛勢區	強降雨、暴潮、海平面上升造成平面道路淹水	2.25	2.5	5.625 (中)	1.災時避免通行 2.規劃替代道路
海堤至青崙埔防草堤防		城際運輸重要聯外道路		強降雨造成河川達到洪峰，洪水溢淹橋面、掏刷橋基河床、挾帶砂石撞擊橋墩	2.75	3	8.25 (中)	1.搭設便橋 2.災時避免通行 3.規劃替代道路 4.減少落墩 5.調整橋梁淨高 6.加強橋基保護工 7.加長橋梁深基礎
青崙防草堤至計畫終點	1. 強降雨 2. 暴潮	1.跨道路系統交接處 2.城際運輸重要聯外道路 3.地方重要聯外道路		強降雨、暴潮造成平面道路淹水	2	2.5	5 (中)	1.災時避免通行 2.規劃替代道路

資料來源：本指引彙整。

附表 6　可能性與嚴重性參考基準表

半定量分級	可能性描述	嚴重性描述	參考基準		
			危害度等級	淹水水深 (m)	交通量 (PCU/時)
1	幾乎不可能	可忽略的	1	0.3-0.5	200 以下
2	不太可能	較低	2	0.5-1.0	200-800
3	可能	中等	3	1.0-2.0	800-1,500
4	極有可能	重大	4	2.0-3.0	1,500-3,000
5	幾可確定	災難性的	5	>3.0	3,000 以上

註：1.淹水水深分級基準參考淹水潛勢圖訂定；交通量分級基準參考交通部運研所鐵公路風險地圖訂定。

2.根據西濱曾文溪橋段新建工程綜合規劃報告書交通量預測，本案例之計畫道路雙向各車種合計之平日、假日尖峰小時交通量分別為 1473、992PCU/時。

附表 7　風險等級矩陣

風險等級		可能性分級				
		1	2	3	4	5
嚴重性分級	1	1	2	3	4	5
	2	2	4	6	8	10
	3	3	6	9	12	15
	4	4	8	12	16	20
	5	5	10	15	20	25

註：1.風險矩陣參考職安署《營造工程風險評估技術指引》。

2.極低風險(1-2)、低風險(3-4)、中風險(5-9)、高風險(10-16)、極高風險(20-25)。

五、執行風險評級

根據本指引內容，執行風險評估作業之執行風險評級步驟之工作項目包含執行氣候變遷風險評估與回報評估結果兩項，以下分別進行說明：

1. 執行氣候變遷風險評估

根據潛在氣候變遷風險評估結果，針對「中度風險」以上區位賡續進行風險評估作業，並將公路系統組件依照路段尺度再細分，如南北側區域可分為平面連絡道及高架路段，中間區域段橋梁可分為上部結構（橋面、排水）、下部結構（基礎、橋墩）等（參見附表 8）。

根據氣候變遷風險評估結果，除南北側區域之高架路段及高架引橋段不受平面道路淹水衝擊外，其餘區域段皆為中度風險等級，其中又以基礎、橋墩之風險等級較高，應特別注意河川洪峰對於基礎、橋墩造成的衝擊，在後續設計上注意基礎、橋墩之設計與保護，當結構發生損壞情事時，應立即啟動應變方案，如搭設便橋、規劃替代道路等，並進行快速修復。

因此，若以前開潛在衝擊的態樣，因應規劃設計階段與營運階段之調適措施，主要有：

(1) 規劃設計階段

針對基礎、橋墩方面，可採減少落墩、加強橋基保護工程、加強橋梁深基礎等調適措施；在橋面方面，建議可調整橋梁淨高方式；在排水方面，建議可加強橋面排水予以改善。

(2) 營運階段

在發生致災狀況前，宜於引道前端引導車輛避開通行本橋梁；針對周邊道路系統，規劃替代道路，以提供城際之運輸需求；若仍有通行需求時，可搭設便橋，提供臨時性之通行使用。

如同前一階段所述，中間區域段河川區域之氣候變遷風險評估，僅為透過調適工作小組，就現況河川水文資訊與曾文溪流域累積雨量變化率推估資料所做之初步研判，尚存在一定程度之不確定性，後續待有關單位產製出未來洪峰流量及洪峰水位等水文資訊後，可再進行更詳細之風險評估。

附表 8　曾文溪橋路段氣候變遷風險評估表

區位		危害因素	暴露因素	脆弱因素	潛在衝擊說明	可能性(5 級)	嚴重性(5 級)	風險評級	調適策略/措施
計畫起點至海埔堤防	既有高架路段	1.強降雨 2.暴潮 3.海平面上升	-	1.淹水潛勢區 2.暴潮溢淹潛勢區	-	-	-	-	-
	既有平面連絡道		1.跨道路系統交接處 2.城際運輸重要聯外道路 3.地方重要聯外道路		強降雨、暴潮、海平面上升造成平面道路淹水	2.25	2.5	5.625 (中)	1.災時避免通行 2.規劃替代道路
	高架引橋段(橋台)		-		-	-	-	-	-
海埔堤防至青草崙堤防	橋面		城際運輸重要聯外道路		強降雨造成河川暴漲淹沒橋面	1.75	3	5.25 (中)	1.災時避免通行 2.調整橋梁淨高
	排水				強降雨造成橋面排水不及產生積水	1.75	3	5.25 (中)	加強橋面排水
	基礎、橋墩				強降雨增加河川流速，掏刷河床、砂石帶撞擊橋墩	3	2.75	8.25 (中)	1.搭設便橋 2.災時避免通行 3.規劃替代道路 4.減少落墩 5.加強橋基保護工 6.加長橋梁深基礎
青草崙堤防至計畫終點	高架引橋段(橋台)	1.強降雨 2.暴潮	-		-	-	-	-	-
	既有平面連絡道		1.跨道路系統交接處 2.城際運輸重要聯外道路 3.地方重要聯外道路		強降雨、暴潮造成平面道路淹水	2	2.5	5 (中)	1.災時避免通行 2.規劃替代道路

資料來源：本指引彙整。

2. 回報評估結果

氣候變遷風險評估作業完成後，應將評估過程、評估結果及殘餘風險確實納入風險管理計畫說明，以提供後續設計、營運、養護單位參考。其中評估過程包含參與團隊成員、風險評估方法、蒐集之氣候相關資料、資產組件清單及團隊會議紀錄等；評估結果應特別針對中度風險以上區位及組件，說明其潛在衝擊與調適策略/措施，針對可能無法透過調適策略/措施處理之潛在衝擊，亦應以殘餘風險方式敘明清楚。

六、結論與建議

1. 由於國內公路領域氣候變遷調適尚在起步階段，因此本土化氣候相關資料、氣候變遷風險評估工具、經驗等尚不足，然而氣候變遷調適作業勢在必行，因此建議初期先採取半定量風險評估方法，調適工作小組透過召開專家工作坊討論相關議題，並執行氣候變遷風險評估作業，待氣候相關資料及評估工具等逐步成熟之後，再採取定量風險評估方法。

2. 調適工作小組成員建議以主辦機關為召集人，邀集工程規劃團隊、氣候相關資料提供機關及其他所涉環境區位之相關主管機關等組成調適工作小組，且應於調適工作初期成立，以利工程、水利、氣候變遷等各領域專業者能夠充分瞭解專案背景並進行領域知識交流，以完成氣候變遷風險評估作業。

3. 針對氣候相關資料不足、評估範圍較大、風險議題複雜或風險不確定性高之專案，建議可透過專家工作坊多次討論，逐步收斂專案氣候風險議題。有關專家工作坊之討論議題與範疇，建議參考如下：

   (1) 確認氣候變遷相關資料蒐集與分析之完備性。

   (2) 辨識專案面臨之氣候壓力與衝擊，並指認相關氣候風險因素。

   (3) 研議適用於專案之風險評估指標、閾值與權重。

   (4) 執行氣候變遷風險評估作業。

   (5) 中高風險區域之調適策略與措施。