

應用以自然為本的解決方案

降低鐵路系統氣候變遷衝擊之初探

運輸能源與環境組 楊家銘、賴宜弘、蕭為元、鄔德傳、朱珮芸

研究期間：民國112年6月至112年12月

摘要

聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, 下稱 IPCC)於 2021 年 8 月發布第 6 次評估報告 (The 6th Assessment Report, 下稱 AR6), 第二工作小組並於 2022 年 2 月發布《衝擊、調適與脆弱度》報告(AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability), 提醒氣候變遷不僅影響生態物種, 更危及人類社會的糧食、水資源、健康及都市發展, 而人類社會活動也會影響氣候與生態系, 導致氣候變遷衝擊、風險越來越複雜及難以管理, 建議國際加強保育、修復生態系, 才能提升整體氣候韌性。我國為因應全球氣候變遷並確保國家永續發展, 立法院於 2023 年 2 月 15 日公布施行「氣候變遷因應法」, 該次修法特別新增氣候變遷調適專章, 除強化氣候變遷調適能力建構並與科學研究接軌, 亦應強化因應氣候變遷相關環境、災害、設施、能資源調適能力, 提升國家整體因應氣候變遷之韌性。相較依賴人造工程抵禦氣候變遷威脅, 自然生態系可為人類提供調節功能, 因此, 國際公私部門近年提倡以自然為本的解決方案(Nature-based Solutions, 簡稱 NbS)做為氣候變遷調適重要解決方案之一。

本研究針對應用 NbS 於鐵公路系統蒐集國內外相關資料進行探討分析，並就 NbS 抵禦氣候變遷影響和長期危害，進而強化鐵公路系統韌性，透過本研究研析成果可知氣候變遷對於全球衝擊影響已為不可逆趨勢，而國內運輸系統多位於山區、臨海或位處缺乏良善排水系統的低窪區域，以自然為本的解決方案提升其調適能力以及韌性實有其需要，爰建議鐵公路設施權管機關後續可追蹤國際調適趨勢推廣以自然為本的解決方案應用，亦可參考美國作法提出以自然為本的解決方案規劃路徑圖並增加相關資金挹注，以利加速落實以自然為本的解決方案實務應用、研擬以自然為本的解決方案指引及配套措施開發。本計畫成果後續亦可於鐵道系統強化調適能力之探討及建構運輸管理機關(構)之調適專業能力等兩案合辦計畫相關調適策略中繼續納入參考應用。

關鍵詞：

氣候變遷、調適策略、以自然為本的解決方案

一、緒論

1.1 研究緣起

自十八世紀工業革命開始後，人類活動大量使用化石燃料，進而排放大量溫室氣體且對自然環境影響逐漸增加，進而加劇極端氣候(Climate Extreme)事件的變化，也對長期氣候變遷(Climate Change)產生影響，現今觀察到的極端氣候亦可能成為未來的常態氣候事件。

IPCC 於 2021 年 8 月發布第 6 次評估報告 (AR6)，第二工作小組並於 2022 年 2 月發布《衝擊、調適與脆弱度》報告(AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability)¹，提醒氣候變遷不僅影響生態物種，更危及人類社會的糧食、水資源、健康及都市發展，而人類社會活動也會影響氣候與生態系，導致氣候變遷衝擊、風險越來越複雜及難以管理，建議國際加強保育、修復生態系，才能提升整體氣候韌性。相較依賴人造工程抵禦氣候變遷威脅，自然生態系可為人類提供調節功能，因此，國際公私部門近年提倡以自然為本的解決方案(Nature-based Solutions, 簡稱 NbS)做為氣候變遷調適重要解決方案之一。

以自然為本的解決方案(Nature-based Solutions, NbS)最早由國際自然保育聯盟(The International Union for Conservation of Nature, IUCN)²提出並定義：「可有效、能調適的應對社會挑戰，同時提供人類福祉和生物多樣性效益，為永續管理和恢復自然或改造生態系統的保護行動」，在《衝擊、調適與脆弱度》(AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability)中，亦提醒氣候變遷不僅影響生態物種，更危及人類社會的糧食、水資源、健康及都市發展，

NbS 是生物多樣性公約(CBD)的基礎，旨在保護或恢復自然並以支持傳統建造的基礎設施系統，並可以減少災害風險及提供更具彈性和成本更低的服務。根據 2020 年《可持續發展目標報告》(Sustainable Development Goals Report)³ 中，在 168 個簽署聯合國綱要公約自定貢獻(Nationally Determined Contribution, NDC)或氣候承諾的國家中，已有近 2/3 的《巴黎協定》簽署國，將 NbS 納入國家氣候調適與減緩計畫。

另在世界銀行報告⁴ 中，自 2012 年以來已將 NbS 納入 60 個國家/地區，通過各種案例研究、指導說明和指南讓 NbS 成為主流，旨在加強對自然資源的保護及瞭解，例如通過植被穩定斜坡、壘石護坡和紅樹林進行海岸保護及有效的排水，同時提高交通基礎設施和社區的恢復力。因此運輸基礎設施權管機關、專業人員和學術界都能瞭解 NbS 的概念，並與利害關係人交流和宣導 NbS 解決方案的好處。NbS 需要各機關(構)部門之間的相互協調，進而整合 NbS 的運輸政策管理需要採用更全面的方法，包括和水利機關、環境專家及當地居民在內的各種參與者進行溝通協調。

鑑於全球生物多樣性喪失與生態系統服務下降，長期將影響人類福祉，國際間逐漸廣泛探尋與生態系統合作之方法，以有別於傳統的工程解決方案，期望能在減緩與調適氣候變遷影響時，也同時能夠保護自然生態系統與生物多樣性。因此本研究擬透過分析國際氣候變遷與以自然為本的解決方案調適策略趨勢，探討鐵公路系統未來應用以自然為本的解決方案做為調適選項，以厚植我國氣候變遷調適能力。

1.2 研究項目與方法

本研究之工作項目說明如下：

1. 分析國際氣候變遷及 NbS 調適策略趨勢

聯合國政府間氣候變遷專門委員會(IPCC)於 2023 年 3 月發布第 6 次評估報告綜合報告(Synthesis Report of the IPCC 6th Assessment Report, SYR)⁵，該報告明確指出當前調適行動儘管取得了部分進展，但差距依然存在，部分部門和地區對於弱勢群體造成不成比例的影響，此外缺乏氣候知識和數據，也阻礙了調適的進展。

NbS 係由國際自然保育聯盟(The International Union for Conservation of Nature, IUCN)於 2008 年提出，希望藉由 NbS 與自然生態系合作，以解決重大社會挑戰為目標，包含糧食安全、氣候變遷、人類健康、災害風險、社會和經濟發展、環境惡化與生物多樣性流失等，協助達到氣候調適與生態保育等目標。

為瞭解國際間最新以自然為本的解決方案調適策略之趨勢，本研究蒐集包含 IPCC 及 IUCN 等組織最新出版綜合報告等資料，做為鐵路系統未來應用以自然為本的解決方案之基礎資料以及調適策略應用之參據。

2. 探討以自然為本的解決方案氣候變遷調適之相關準則與案例

以自然為本的解決方案全球標準(Global standard for NbS)是為了促進廣泛應用以及提高設計與實施水準，並不是為了達到某種特定結果或成效的標準，此標準具有 8 項準則，分別為社會挑戰、多面向綜效設計、生物多樣性淨增長、經濟可行性、包容性

治理、在主要目標和其他多種效益間公平地權衡、適應性管理，以及具永續性、融入相關部門與利害關係者的行動框架與主流化。

本研究蒐集以自然為本的解決方案相關案例並探討因應氣候變遷及保護生物多樣性等方面的目標，並針對鐵公路系統探討及歸納導入以自然為本的解決方案適用性及限制條件，以做為未來鐵公路系統導入以自然為本的解決方案參考。

3. 研議鐵公路系統導入以自然為本的解決方案做為氣候變遷調適策略之準備工作

蒐整國內外以自然為本的解決方案相關案例，針對鐵公路系統導入以自然為本的解決方案做為氣候變遷調適策略所需辦理之前置作業，本研究探討包含因應氣候變遷調適之政策擬定、執行方法等，歸納未來推動以自然為本的解決方案之發展潛力與限制(如土地利用限制、氣候變遷不確定性、時間限制及成本效益分析等)，俾供鐵公路系統未來將以自然為本的解決方案納入調適策略方案之參考。

4. 研究成果彙整並做為鐵公路系統主管機關參考應用

蒐集國內外針對應用以自然為本的調適方法於鐵公路系統相關資料進行探討分析，並就以自然為本的調適方法抵禦氣候變遷影響，透過瞭解各國採行以自然為本的調適方法案例之內容，及其可應用性與效益，俾供相關機關做為參考應用。

二、NbS 簡介及鐵公路系統調適發展趨勢

以自然為本的解決方案係由國際自然保育聯盟於 2008 年提出至今已經逐漸形成全球標準，並於 2022 年聯合國生物多樣性大會第 15 次締約方大會(COP15)提出「昆明—蒙特婁全球生物多樣性架構」(Kumming-Montréal global biodiversity framework)及 2023 年聯合國氣候變化綱要公約第 28 次締約方大會(COP28)完成「氣候、自然和人類之聯合聲明」等重要共識之際，如何妥善運用以自然為本的解決方案發揮政策效益已為全球趨勢。國內係由國家發展委員會負責督導、審議及整合協調氣候變遷調適重要議題，並以農業部擔任以自然為本的解決方案諮詢窗口，建立跨域平台整合資源。本節蒐整以自然為本的解決方案定義與發展相關文獻分述如下：

2.1 以自然為本的解決方案簡介

2.1.1 以自然為本的解決方案之定義與發展

依據國際自然保育聯盟對於以自然為本的解決方案定義²，將其定義為：「保護、永續管理、復育生態系的行動，包含自然的或經改良的生態系，有效地、調適地因應社會挑戰，同時提供人類福祉及生物多樣性效益。」在環境和氣候變遷等議題上，調適和以自然為本的解決方案通常相互結合，傳統的技術解決方案往往需要大量的能源消耗和人力投入，而且可能對環境造成負面影響。NbS 概念框架如圖 2.1.1 所示：



資料來源：國際自然保育聯盟(IUCN)

圖 2.1.1 自然為本的解決方案概念框架

以自然為本的解決方案利用自然系統的特性，達到環境保護和氣候調適的目標。例如，在面對水資源短缺的情況下，傳統的技术解決方案可能包括建設大型水庫和引水工程，然而，這些解決方案可能對生態環境和社區產生負面影響；以自然為本的解決方案可能包括保護和恢復濕地、森林和河流，以提高水源的保水能力和水質。在國際自然保育聯盟於 2021 年提出的「驗證、設計、推廣架構」(A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS) 中，於檢視因應社會

挑戰時，應考量保護、特定議題、基礎設施、管理、恢復等基於生態系統各種方法，探尋解決方案，對人類福祉與生物多樣性做出貢獻。鑑於生物多樣性喪失與生態系統服務下降，長期將影響人類福祉，國際組織於思索因應氣候變遷時，有別於傳統的工程解決方案，逐漸廣泛探尋與生態系統合作之方法，以能在減緩與調適氣候變遷影響時，也同時能夠保護自然生態系統與生物多樣性，因此近 10 年來提出以自然為本的解決方案概念，應用於環境科學與自然保護領域。以自然為本的解決方案與僅是運用自然資源卻未考量生態系統功能的「源於自然的解決方案」(如：再生能源)，或是「受自然啟發的解決方案」師法自然卻未運作於生態系統之中(如：仿生工業設計)之核心宗旨不同，以自然為本的解決方案以生物多樣性及生態系統服務為核心，提供人類長期發展所需福祉效益。然而相較其他經時歷久的公共政策基礎，以自然為本的解決方案是相對較新的概念，仍在持續發展中。

2.1.2 以自然為本的調適方法之全球標準

以自然為本的解決方案概念有別於傳統的工程解決方案，廣泛探尋與生態系統合作之方法，以能在減緩與調適氣候變遷影響時，也同時能夠保護自然生態系統與生物多樣性，其目的與效益著眼於藉由生物多樣性效益與生態系統服務作為基礎，因應氣候變遷減緩與調適、防災、經濟與社會發展、公共衛生、糧食安全、水資源安全、生物多樣性等不同的社會挑戰，提供人類發展所需，長期帶來人類福祉效益。

雖然以自然為本的解決方案之需求與日俱增，但倘若濫用以自然為本的解決方案概念，在最壞的情況下仍可能破壞生物多樣性，侵蝕飲水和食物等生態系統服務。因此 IUCN 參考來自 100 多個國家 800 多名專家學者及實務界人士的意見，基於以自然為本的解決方案架構(Cohen-Shacham, 2016)⁷ 訂定全球標準，以「輔助自我評估」角度進行設計，包括 8 項標準及諸多相關指標，讓決策者可以評估介入措施的適當性、規模、經濟、環境和社會可行性，考慮其可能利益權衡，確保以自然為本的解決方案專案管理的透明度和適切性與發揮調適效果，以具科學基礎的方式推動，並增進與全球共識與承諾如 SDGs 或淨零排放之聯結，進而一致、可靠地進行以自然為本的解決方案之設計、驗證和擴大應用。

1. 標準 1: 社會挑戰(NbS effectively address societal challenges)

其目的在於確保以自然為本的解決方案的設計是為因應由可能或即將受到直接影響的利害關係人所辨識出的社會挑戰，尤其是利害關係人或以自然為本的解決方案之受益人均須參與辨識、評估、決策等過程，指標包括應優先考量與利害關係人最迫切相關的社會挑戰、清楚理解與記錄所應對的社會挑戰、以及辨識與設立基準並定期評估以自然為本的解決方案所產生的人類福祉。應建立具體、可測量、可行性、現實性、即時性的目標。

2. 標準 2: 依據規模進行規劃(Design of NbS is informed by scale)

其目的在於設計時，能事先考慮景觀動態的複雜性和不確定性，其範圍不僅包括生物物理或地理學，也包括經濟制度、政策架構及文化等。根據利害關係人對不同因素規模相互作用的情況來設計，在考慮景觀規模的部分特徵、本身情況和外部環境的基礎上進行評估。以自然為本的解決方案設計應認識到經濟、社會和生態系統之間的相互作用並做出回應調整，應與其他相關措施互補，並整合不同部門產生的協同作用，設計並應納入場地之外區域的風險辨識與管理。

3. 標準 3：生物多樣性淨增長(NbS result in a net gain to biodiversity and ecosystem integrity)

以自然為本的解決方案源於生態系統的產品與服務，因而強烈依賴生態系統的健康程度。生物多樣性喪失與生態系統的變化，對於該生態系統的功能與整體性均具有顯著影響。因此，以自然為本的解決方案設計與執行必須避免破壞系統的整體性，應該具前瞻性地努力加強生態系統的功能性與連結性，這樣做也能夠確保以自然為本的解決方案的長期韌性與永續發展。指標包括以自然為本的解決方案行動必須對基於證據的評估做出直接回應，評估內容應包括生態系統的現狀、退化及喪失的主要原因，辨識、設立基準並階段性評估清晰的、可測量的生物多樣性保護成效，監測並階段性評估以自然為本的解決方案可能對自然造成的不利影響，以及應辨識與加強生態系統整體性與

連結性的機會，並整合到以自然為本的解決方案策略中。

4. 標準 4：經濟可行性(NbS are economically viable)

以自然為本的解決方案成功的關鍵因素取決於投資報酬率、干預措施的效率和有效性，以及成本與效益分配的平衡。此項標準要求在設計階段和監測實施階段充分考慮經濟可行性。為使方案具有永續性，必須認真考量經濟層面的問題，而且最需要考慮的是短期行動需要在長期(跨世代)目標和計畫的背景下制定。如果不能充分考慮經濟可行性，該方案可能會成為短期專案，完成項目後收益將隨時間不復存在，還可能使景觀和社區的狀況更加惡化。為了確保以自然為本的解決方案對資本市場與就業均有幫助，國際間逐漸開發具科學證據的自然價值評估工具，並且此亦能支持創新融資模式(包括混合融資)，進而增加長期成功的可行性。

5. 標準 5：包容性治理(NbS are based on inclusive, transparent and empowering governance processes)

此標準要求回應各利害關係人的關注事項，尤其回應利害關係人並主動讓他們參與，與開發自然資源的情況相似，仍應對在地社區及相關利害關係人進行能力建構，並建立鼓勵參與的輔導機制。良好的治理規劃不僅可減少干預措施的非永續風險，而且可以提高社會對以自然為本的解決方案正當性的認同感。相反地若僅有良好的執行規劃但缺乏治理方面的考量，將對利益分配與成本分擔的正當

性產生不利影響。

6. 標準 6：綜合衡量(NbS equitably balance trade-offs between achievement of their primary goal(s) and the continued provision of multiple benefits)

在土地和自然資源管理中，因為生態系統提供豐富的不同功能與效益，且對不同的個體而言價值均不相同，不可避免必須進行利益衡量，以能在符合目標的情況下有效和公平地進行管理。本標準要求以自然為本的解決方案決策者肯認利益衡量的必要性，並遵循公平、透明和包容的過程來協調和管理不同的時間和空間。為了進行利益衡量，也需要進行有可以信賴的評估方式以及盡可能充分揭露，並就受影響最大的利害關係人間必須達成共識。

7. 標準 7：調適管理(NbS are managed adaptively, based on evidence)

此標準之意旨在於要求以自然為本的解決方案的執行計畫應包含調適相關條款，並將調適視為有效利用生態系統恢復力的一種選擇。由於生態系統的複雜、動態和組織性質，在管理大多數生態系統時，存在一定程度的不確定性。這也意味著生態系統具有更大的恢復力，這為應對不可預計的社會、經濟或氣候事件提供了更廣泛的選擇。調適管理的基礎是利用基於科學證據的方法及傳統知識，定期監測和評價所提供的證據和事實。通過主動採用調適管理方法，並將投資冗餘和相關風險降至最低。監測與評

估方案並應用於以自然為本的解決方案的全生命週期。

8. 標準 8：主流化與永續性 (NbS are sustainable and mainstreamed within an appropriate jurisdictional context)

此標準要求以自然為本的解決方案在制定和實施的階段，應該納入長期永續發展的觀點，同時重視相關跨部門、國家和其他政策的實踐架構。以自然為本的解決方案主流化有多種方法，然而，所有方法都依賴於策略溝通和對外擴展。潛在的受眾包括個人(如公眾、學者)、機構(如公部門、企業和組織)和全球組織(如聯合國永續發展目標、《巴黎協定》)。

2.1.3 聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)- 「AR6：衝擊、調適與脆弱度」¹

IPCC 於 2022 年 2 月發布「AR6：衝擊、調適與脆弱度」報告中綜整國際上應用於運輸系統之調適選項類別，包括硬保護(hard protection)、調整與升級(accommodation and advance strategies)、搬遷(migration)與以生態為本的調適方法與以自然為本的調適方法(Ecosystem-based Adaptation approaches, EbA & Nature-based Solutions, NbS)。

IPCC AR6 綜整之運輸系統調適選項(2022)中指出為因應氣候變遷加劇，世界各國目前已積極投入並展現出多元的調適選項。目前運輸系統有多樣化適應選項可供選擇，包括升級基礎設施、調整或遷移關鍵公路資產等，而國外實務案例如大洋洲的公路系統調適包括改道、海岸保護、改善排水系統和升級

基礎設施，證據顯示大多數調適選項皆能提供良好的效益成本比。本計畫依據 IPCC AR6 綜整的調適選項類別，摘錄目前國際上應用於運輸系統之調適選項，主要可分為四大類，重點說明如下：

1. 硬保護(hard protection):係指以硬體設施及結構做為保護，尤其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. 以生態為本的調適方法與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生態為本的調適方法與以自然為本的調適方法可有效因應氣候風險，因此 COP26 更加關注各國所採用的以自然為本的解決方案，並積極投資以自然為本的解決方案做為重要的氣候行動(actions)之一。

IPCC AR6 亦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，個別專案選用多種調適選項可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。

2.2 鐵公路系統調適發展趨勢

為瞭解國內外運輸系統以自然為本的解決方案調適選項，本節彙整 2019 年美國聯邦公路管理局(Federal Highway Administration, FHWA) 「以自然為本提升海岸公路韌性的解決方案」⁸、2020 年美國國家協作公路研究計畫「將調適措施的成本效益納入極端天氣事件和氣候變遷的準備工作指引」(Incorporating the Costs and Benefits of Adaptation Measures in Preparation for Extreme Weather Events and Climate Change Guidebook)⁹、2022 年美國白宮「加速以自然為本的解決方案的機會：氣候進展、豐富自然、公平及繁榮的路徑圖」(Opportunities to accelerate nature-based solutions: a roadmap for climate progress, thriving nature, equity and prosperity)¹⁰，以及 2023 年城市交通轉型倡議(Transformative Urban Mobility Initiative, TUMI)發布的「以自然為本的解決方案運用於運輸領域」(Nature-based Solutions(NbS) in the Transport Sector)¹¹等文獻。研析國內外運輸系統以自然為本的解決方案調適選項與分析其調適選項(adaptation options)之重點及相關案例，分述如下：

2.2.1 美國聯邦公路管理局(FHWA)- 「以自然為本的解決方案以提升海岸公路韌性」⁸

配合國際調適趨勢正積極推廣強化以自然為本的調適方法運用，本計畫加強說明 FHWA 於 2019 年提出之「以自然為本的解決方案以提升海岸公路韌性」(Nature-based Solutions for Coastal Highway Resilience)，該文詳細說明如何應用以自然為本的調適方法於運輸系統提升韌性之具體做法，以及運用以自然為本的解決方案提高海岸公路在面對極端氣候與海平面上升

衝擊時的氣候韌性。

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，透過自然保育方式，或自然結合工程的手法，減緩侵蝕、洪水災害及波浪衝擊災害，來保護沿海運輸系統。以自然為本的解決方案運用於沿海公路可做為極端氣候衝擊事件的第一道防線，用結構物理和生物物理程序，減緩沿海公路受到洪水、波浪和海水的侵蝕。例如：潮汐沼澤、紅樹林和海岸林帶可減少沿海洪災且可有效地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；礁石亦能消散波浪能量，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氣候事件所造成的破壞。

一般來說以自然為本的調適方法成本較低或相等於傳統保護工程的初始成本，以自然為本的調適方法亦適用於海浪侵蝕風險較低的環境，工程工法則適用於海岸侵襲風險較高的環境，在決定應用的工法上可視海浪侵蝕程度而定，並可適度採用混合方法(hybrid nature-based solutions)。以自然為本的調適方法工法具有 4 項特性：(1)透過自然循環系統增強工程面對自然衝擊的韌性、(2)等於或低於工程工法的成本、(3)運用自然調適的方法來達成與工程工法一樣的目的，以及(4)比工程工法提供更多自然美學效益。另海岸公路能否適合採用以自然為本的調適方法需考量以下 6 點：(1)對於工程韌性與危害降低的需求、

(2)該地生態與地質的條件符合度、(3)面對大浪的暴露度、(4)工程計畫的標的與成本效益、(5)工程可靠性，以及(6)當地的政策與法規。目前可運用於沿海的以自然為本的調適方法工法分為6類，說明如下：

1. 植被：提供各種生態效益，可改善水質並降低海浪侵蝕風險，同時為各種物種提供棲息地。
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浪能量。
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傾斜的平台為此區域植物維持生命。另在平台邊緣提供護趾工程保護，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：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。
6. 沙丘：沙丘在颱風期間能降低海浪和洪水風險，特別是在與現有海灘或養灘工程結合使用時。此外，沙丘還能提供乾燥的海灘生物棲息地。

2.2.2 美國白宮-「加速以自然為本的解決方案的機會：氣候進展、豐富自然、公平及繁榮的路徑圖」¹⁰

由於 COP26 及 COP27 各國皆積極推廣及投資「以自然為本的解決方案(NbS)」以做為重要的氣候行動，其中，COP27 將以自然為本的解決方案納為重點議題之一，在會中除了積極討論各國目前以自然為本的解決方案運用於氣候變遷調適行動之情形，更承諾 3.5 億美金的氣候投資基金，用於解決埃及、斐濟和非洲地區等國之氣候危機。同時，美國白宮於 COP27 會中首次發布該國以自然為本的解決方案路徑圖「加速以自然為本的解決方案的機會：氣候進展、豐富自然、公平及繁榮的路徑圖」，該文獻提出美國以自然為本的解決方案策略建議綱要計畫，用於指導該國充分運用以自然為本的解決方案潛力以因應氣候變遷、自然損失和不平等問題，並提供 250 億美元以上的資金支持以自然為本的解決方案之實施。

該報告指出氣候變遷加劇，使風暴、洪水、熱浪、乾旱及野火事件逐漸惡化，桑迪颶風期間，大自然的濕地為社區和屋主避免 6.25 億美元的損失，美國政府發現以自然為本的解決方案做為調適選項之益處，於 2022 年世界地球日，以自然為本的解決方案列為國家優先事項，為促進實施以自然為本的解決方案並確定聯邦政府利用以自然為本的解決方案的關鍵機會，該報告提供聯邦機關(構)包含 5 項重要關鍵建議的路徑圖，使以自然為本的解決方案有效發揮其成效。該計畫摘錄 5 項重要關鍵說明如下：

1. 更新政策：各機構應更新政策、指引、成本分攤、風險管理流程和效益成本分析，以促進以自然為本的解決方案之

推廣，如：加快聯邦許可和審查速度，減少機關成本分攤要求，加強以自然為本的解決方案在減輕危害之應用，考慮使用以自然為本的解決方案替選方案等。

2. 資金：在國內和國際的資助項目中應優先考慮以自然為本的解決方案，增加提供給以自然為本的解決方案之資金並加強資金取得便利性，促進民間投資，如：將以自然為本的解決方案納入現有資金計畫、替以自然為本的解決方案資金打造一站式服務並鼓勵民間投資以自然為本的解決方案等。
3. 聯邦資產：增加聯邦設施使用以自然為本的解決方案的設計、改造及管理，如：在聯邦設施中推廣以自然為本的解決方案及在聯邦設施資產中納入以自然為本的解決方案設計等。
4. 勞力(Work force)：優化以自然為本的解決方案的相關資源及培訓以支援聯邦機構和私部門創造良好就業機會，聯邦機構與勞工、學術和專業組織的夥伴關係可以為當前的勞力提供技術資源，並支援以自然為本的解決方案工作和設計標準的開發，如：聯邦機構間共享知識及能力並增加聯邦教育訓練及工具多樣性等。
5. 優先考慮研究、創新、知識和適應性學習(Prioritize research, innovation, knowledge, and adaptive learning)：因政策要求各機構依據證據進行決策，因此對於以自然為本的解決方案證據的認知差距可能使以自然為本的解決方案的推動

受阻，建議以研究、創新、知識和適應性學習之優先順序，並透過相關研究瞭解以自然為本的解決方案如何發揮最佳效果，如：減少認知差距、為創新提供獎勵及挑戰等。

國內在實務應用上對於硬保護和調整與升級之作法並不陌生，爰本研究建議配合國際調適趨勢積極推廣以自然為本的解決方案運用，亦可參考美國作法提出以自然為本的解決方案規劃路徑圖並增加相關資金挹注，以利加速落實 NbS 實務應用、研擬以自然為本的解決方案指引及配套工具開發等。

2.2.3 美國國家協作公路研究計畫-「將調適措施的成本效益納入極端天氣事件和氣候變遷的準備工作指引」⁹

因氣候變遷具有不確定性，相關的調適措施如能針對其效益進行量化以決定執行的優先性，並研擬預算編列與分配，可更合理地提升公路系統調適能力。為因應上述需求，美國國家公路協作研究計畫(National cooperative Highway Research Program)於 2020 年發布「將調適措施的成本效益納入極端天氣事件和氣候變遷的準備工作指引」，針對州運輸部門(state department of transportation, DOT)所提出的需求提供調適措施成本效益評估應用(cost and benefit analysis, CBA)所需之資源，將成本效益評估應用調整為較簡易與簡短的評估過程，以利州運輸部門應用 CBA 評估改善計畫的效益。

1. 將調適措施成本效益納入既有運輸規劃流程

目前許多州運輸部門已完成氣候風險與脆弱度評估，但目前一般來說皆尚未正式納入成本效益評估應用考量；尤其是在

與運輸規劃流程整合時，CBA 將是氣候風險及脆弱度評估與調適執行應用面之間連結的關鍵要素。

2. 成本效益的評估步驟

- (1) 定義問題/機會(define the problem/opportunity)：訂出需要解決的問題或可能的機會。
- (2) 定義範疇、事實與假設(define scope, develop facts and assumptions)：計畫包含的範疇，如地點、評估時間等。假設的資料可以提供 CBA 基準設定的標準。
- (3) 定義替代方案(define alternatives)：替代方案為可解決問題或達到目標的調適措施。其中一個替代方案需為零方案(status quo)，以做為比較基準。
- (4) 訂定每一個替代方案的假設價格(develop cost estimate for each alternative)：設施全生命週期的假設價格(如建設前、建設中與折舊等)。
- (5) 訂定量化與非量化效益(identify quantifiable and non-quantifiable benefits)：每個替代方案都會產生效益，做為未來衝擊規劃與設計時，效益通常是以避免的損失計算(losses avoided)，例如服務的中斷或受損，此類效益可貨幣化，但部分效益較難貨幣化，在評估時則以說明的方式納入。
- (6) 訂定替代方案的選擇原則(define selection criteria for alternatives)：訂定替代方案的選擇原則，成本效益評估可做為一個參考原則或是搭配其他參考原則。

- (7) 比較替代方案(compare alternatives)：相互比較方案，成本效益的矩陣比較通常包含益本比(benefit-cost ratio)、淨現值(net present value)與報酬率(return of investment)。此階段也應進行敏感度分析。
- (8) 回報成果與建議(report results and recommendations)：摘述評估結果與結論。結論所做出之方案建議應與成本效益與其他評估標準連結。

3. 將氣候變遷考量納入成本效益評估

將氣候變遷考量納入成本效益評估之作法需考量氣候模式與氣候情境，氣候情境可使用 IPCC 於 AR5 報告中所使用的第五期耦合模型相互比較項目 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) 之情境。為確保成本效益評估的準確性，需依據計畫所在區域及設施壽命評估選取合適氣候情境及年份，如：道路壽命為 15 至 20 年，則須考慮 20 年後的氣候型態變化。

4. 成本效益評估的參數

成本效益評估有許多參數，以建設為主的調適措施為例，其成本參數包含建置前的準備成本(如建照、土地取得等)、建設的成本、建設延遲產生的成本、每年的營運管理、折舊成本以及社會與環境成本等。另為評估相關金額及參數，建議參考工程報價、過往相似計畫紀錄及日常營運報表等。

調適措施的效益廣義為「避免災害影響」，包含生命與財產物理損害，調適措施所產生的效益包含節省修復或替換的成本，以運輸系統為例，道路、橋梁與隧道等主要設施受到天氣事件衝擊時，支持的設備為涵洞、堤防、圍欄及號誌等；應變與回復的成本節省則為天氣事件衝擊時之防護、替代設備及相關人事成本；其他的效益包含減少其他損害、降低地方經濟損失與運輸系統服務中斷或延遲的營運與時間成本損失等效益。上述效益可應用下列資料加以估算：

- (1) 歷史資料：機關過往因物理損害、應變與回復以及其他損害所造成的影響做為效益假設的數據。
- (2) 工程報告：以工程角度評估不同運輸設施受損的成本。
- (3) 運輸部門研究：運輸部門針對運輸設備的損害進行研究所產出之數據。
- (4) 軟體估算：可應用 FEMA BCA 或 Hazards U.S. Multi-Hazard (HAZUS-MH) 等軟體輔助估算天氣事件的影響。

除了直接的效益外，調適措施可產生的環境效益包含強化環境生態、復育生態系統、改善水質、建設開放蓄水空間等；運輸相關氣候調適專案還可提供環境及生態系統服務，以增加或改善自然界為人類和環境提供的有益服務。這些有益環境及生態系統服務包括提供食物、空氣品質、水質、野生動物棲息地、自然過程的調節（即洪水、乾旱和野火控制）、氣候以及用於娛樂或其他有益用途的開放空間。例如以生物窪地或雨水花園可以延緩和減少雨水徑流的流量，

減少主要道路上的滋擾性洪水，同時改善水質、空氣品質和美觀性。由該文獻可知調適規劃初期將著重於風險評估分析、調適計畫、法規調適與交通公平；之後進一步增加財務風險規劃需求及以自然為解方 NbS 的導入，後續則強調交通工具本體調適能力之新技術發展，歸納出運輸設施權管機關(構)應具備之調適專業能力至少應包含國家調適行動方案及國際發展趨勢、提出潛在對交通設施造成衝擊之氣候變遷危害因子、調適相關法規基本認識與修訂需求、瞭解以自然為解方的概念、及工程財務規劃概念。

2.2.4 全球性交通組織城市交通轉型倡議(TUMI)-「以自然為本的解決方案運用於運輸領域」¹¹

TUMI 係由德國聯邦經濟合作暨發展部(German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, BMZ)資助，透過研究協助德國國際合作機構(Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit, GIZ)及 C40 大城市氣候領導聯盟(C40 cities)等合作夥伴打造更具氣候友善、包容性、安全性和可負擔的城市運輸。

目前全球已有多國面臨「基礎設施缺口」，需要加強交通基礎設施，然而隨著氣候變遷影響加劇，若透過以往的傳統灰色基礎設施解決基礎設施不足之問題，只會使溫室氣體排放、氣候變遷、環境退化及生物多樣性喪失等負面影響惡化，因此，城市交通轉型倡議認為可以透過以自然為本的解決方案處理基礎設施不足之問題，並於 2023 年發布《以自然為本的解決方

案運用於運輸領域》，認為以自然為本的解決方案不僅可解決社會、經濟和生態永續問題、確保具較大重置價值公共資產之安全及保障城鎮居民健康安全，還具有增加休閒旅遊、減輕災害風險、創造就業和減少貧困、友善行人及自行車騎士之效果等，且以自然為本的解決方案相較傳統灰色基礎設施更具成本效益且製造更少碳足跡，實為運輸系統中重要的調適手段。該計畫針對該報告蒐集之各國以自然為本的解決方案案例，摘錄說明如下：

1. 智慧都市設計—韓國首爾的清溪川改造

韓國工業化時期，對於道路需求遽增，因此，位於首爾的清溪川被馬路包圍，最後，甚至連河川本身也被全面覆蓋改造為高架橋，原本的河川成為暗渠造成水質逐漸惡化，直至 2003 年，首爾為打造都市公園將其改造成藍綠走廊，清溪川改造後不僅成為天然空調、改善空氣品質及協助生態復育，其開放的水道甚至有助緩解城市淹水。由於清溪川改造後周邊道路容量減少，首爾政府為解決交通問題，擴展公車捷運系統網路(Bus Rapid Transit, BRT)，將其整合至公共運輸網路，清溪川周邊地區之私人運具逐漸消失、公共運輸更順暢、公共運具使用率提升，且行人和自行車騎士迅速增加。

從清溪川改造之案例發現，優先考慮行人及自行車騎士，重新分配道路空間，並透過綠色基礎設施為都市提供綠肺可有效減少溫室氣體排放、改善空氣品質、增強生物

多樣性以及打造具氣候韌性的運輸基礎設施服務。

2. 綠色廊道—哥倫比亞麥德林的綠色廊道

為改善大量使用混凝土導致的都市高溫課題，哥倫比亞麥德林(Medellín)在全市建設 30 條相互連接的綠色廊道，樹木可透過提供遮蔭、偏轉太陽輻射及釋放水分於大氣來減少建築環境熱量，相關研究指出其遮蔽之陰影表面峰值溫度可能比無陰影區域低 11°C 至 25°C，因此該方法使該市的氣溫降低 2°C 以上，預計 20 年內甚至可下降 4°C 至 5°C；該行動顯示在都市大面積種樹不僅可以固碳、淨化空氣、改善都市生物多樣性，還可有效減少都市熱島效應。麥德林的綠色廊道提供一致性的人行道及自行車道之體驗，透過樹木、植被、水體和綠化表面形成之天然空調，淨化空氣，提高旅途舒適性、安全性及體驗，加速都市道路轉型，朝向更重視行人及自行車騎士的模式發展。

3. 海岸淹水及侵蝕

沿海洪水易造成公路及鐵路基礎設施損壞，透過紅樹林(mangroves)、沙丘和珊瑚礁等沿海生態系統可作為天然屏障，有效對抗海平面上升、強風、強降雨或風暴潮等自然災害。

(1) 植被可防止山體滑坡和減緩海平面上升威脅—海地

海地部分地區的道路和高速公路系統受到暴雨、洪水、山體滑坡和暴風雨期間的海浪衝擊受損而無法通行，並導致其須支付昂貴的維修和維護費用；為減少

災害發生，海地透過復育丘陵植被、沼澤和沙丘等有助於穩定和保護海岸線的自然元素作為天然緩衝區保護道路基礎設施。

與傳統的洪水管理技術相比，以自然為本的解決方案不僅更具經濟效益，還具有快速執行及可與其他調適方法整合並同時執行之特性，如：若與傳統的混凝土防洪屏障同時實施，可替公路基礎設施提供更高水準的防洪保護標準。

(2) 透過以自然為本的解決方案抵禦洪水—英國倫敦

隨著氣候變遷影響加劇，倫敦洪水溢淹至街道的情形逐漸惡化，造成水質污染並侵蝕其他自然生態系統，因此倫敦在首都各地實施雨水花園、生態截流系統(bioswales)和透水鋪面。

透水鋪面由多孔混凝土製成，可讓水滲透路面進入土壤，而非成為地表徑流，其安裝成本及維護成本皆較低；生物窪地則是旨在濃縮和輸送雨水徑流，不僅可清除碎片及受污染的管道，還有利於補充地下水；雨水花園種植在院子里、街道或人行道上的淺盆地中，可吸收街道、人行道和屋頂徑流，吸水性較傳統草坪高，不僅適合在有洪水風險的地區使用，還可將其引入具洪水風險地區的上游，降低洪水風險。

透過海地及英國倫敦之案例瞭解，以自然為本的解決方案相較於單一用途的灰色基礎設施，具有更低的成本，且於極端事件發生後的維修成本也更低。回顧前述運輸系統之調適選項文獻發現，國外調適研究及實務案例報告所採用的調適選項頗為多元，IPCC AR6 綜整國際上運用於運輸系統的調適選項類

型包含包括硬保護(hard protection)、調整與升級(accommodation and advance as strategies)、搬遷(migration)與以生態為本的調適方法與以自然為本的調適方法(Ecosystem-based Adaptation approaches, EbA & Nature-based Solutions, NbS)等，而多樣化的調適選項類型及多元化組合方式極為適合國內因應現況所面臨的複合性氣候風險。

2.2.5 美國德州科博斯克里斯蒂大都會規劃組織(Corpus Christi Metropolitan Planning Organization)-「德州科博斯克里斯蒂市拉古納沿海公路對極端天氣的韌性及耐久性試驗專案」¹²

德州科博斯克里斯蒂市拉古納沿海公路對極端天氣的韌性和耐久性試驗專案(Resilience and durability to extreme weather pilot project: Laguna Shores Road in Corpus Christi, Texas)¹⁰；科博斯克里斯蒂大都會規劃組織(MPO)獲得聯邦公路局(FHWA)的資金支持，建置以自然為本工法的海岸線公路，以減少極端天氣所帶來負面衝擊影響。MPO 獲得了 FHWA 的 110,770 美元資助，並應用以自然為本的解決方案設計海岸線保護功能。其海岸線試辦建設保護設施計耗資約 18 萬美元，由科博斯克里斯蒂市資助。

該報告評估德州拉古納海岸的生物海岸線組成，為減少侵蝕並增強拉古納海岸道路氣候風險韌性，所蒐集資料包括海洋氣象分析、棲息地評估、水文測量和大地工程測試。並發展拋石(riprap)防波堤和礁球(reef ball)防波堤兩種方案，為道路和棲息地提供降低波浪衝擊及堅硬的基礎。並以沼澤填充(marsh fill)

概念提供額外的棲息地。替選方案為拋石防波堤沿著防波堤的陸地側放置用於種植沼澤草。相較拋石防波堤方案，礁球防波堤通常可以提供更大的波浪衰減。惟拋石防波堤可放置於較不平坦或傾斜表面上，而礁球(reef ball)防波堤則需置於平坦的表面以避免傾倒。該專案最終選擇拋石防波堤，其建造費用成本約為 179,000 美元。該報告亦建議在該工程結束後持續進行監測其成本效益，包括評估棲息地在施工期間狀態，以及在棲息地開發和穩定海岸線功效。

2.2.6 英國鐵路網公司(Network Rail)- 「調適路徑方法」¹³

英國鐵路網公司(Network Rail)為英國一家國營鐵路公司，負責英國鐵路基礎設施的管理、維護及英國重點車站之營運。鐵路網公司擁有部分線路的鐵軌、交通訊號、隧道、橋梁、平交道和車站等設施的所有權，客運和貨運業務則交由專營企業營運。2017 年鐵路網公司制定了天氣韌性與氣候變遷調適策略 (Weather Resilience and Climate Change Adaptation Strategy, WRCCA)¹⁴，為了支持其內部成員及合作夥伴了解氣候風險並採取調適行動，目前已制定了 3 份氣候變遷調適指引說明文件，其中 1 份文件主題為「調適路徑 (Adaptation Pathways Approach)」，該文件說明了預期氣候變遷將對鐵道產生廣泛影響，並且沒有單一解決方案可以在整個系統中建立韌性的情況下，調適路徑允許決策者對調適方案進行規劃及優先排序，有助於決策者重新審視決策。

英國鐵路網公司參考了 BS8631:2021 與 ISO14090:2019 等

國際標準中提到的調適路徑方法，初步提出下列 9 個制定調適路徑步驟：

1. 篩選和優先排序(Screening and prioritization)
2. 區域調適路徑研討會 (Regional Adaptation Pathways workshop)
3. 界定與規劃調適路徑評估(Scoping and planning Adaptation Pathways Assessments(APAs))
4. 調適路徑評估(Adaptation Pathways Assessments)
5. 調適路徑結果分析(Adaptation Pathways results analysis)
6. 經濟分析與投資規劃(Economic analysis and investment planning)
7. 參與(Engagement)
8. 策略規劃(Strategic Planning)
9. 制定策略文件(Produce strategy document)

該文獻亦建議未來鐵路建築和建築資產部門委託制定永續性建築設計中，可納入可持續排水系統和應用以自然為本的解決方案等行動來減少營運中碳排並增強氣候韌性。因該調適路徑方法使得決策較具有策略性、靈活且結構化，被認為是調適規劃的最佳實踐方法。調適路徑亦可視為是決策樹或是一套風險管理方案，其好處在於能夠在最佳時間採取行動，並減少過早或過晚採取行動的成本，根據可靠證據基礎和議定的優先原則，鐵道系統利害關係人可以共同探討各種調適選項的選擇與

規劃，提供更聯合、更全面的系統化方法。整體來說，英國在傳統鐵路系統氣候變遷調適發展相對較成熟，其餘非傳統鐵路(如高速鐵路、捷運系統、輕軌系統等)之氣候變遷調適，則依循傳統系統之基礎持續發展中。

2.2.7 以自然為本的調適方法做為鐵道基礎設施調適措施¹⁵

交通運輸持續受到水文氣象災害(hydrometeorological hazard, HMH)影響，其中鐵道基礎設施尤其易受氣候變遷負面影響，隨著氣候變遷加劇，氣候相關風險的強度、規模、持續時間和頻率將增加和惡化，極端天氣事件將成為常態。既有鐵道原有設計標準尚未將極端氣候納入評估考量，故當遭遇極端天氣事件可能導致其使用壽命縮減，進而影響鐵道服務及安全營運，並增加其維護及營運成本。鐵道系統需針對氣候變遷帶來的天氣挑戰制定相關調適措施，然而目前多以灰色解決方法(傳統技術與工程)做為應對措施，而未考量綠色解決方法(如：以自然為本的調適方法)。該文章中列舉目前鐵道系統所受衝擊與當前調適措施，針對可改以自然為本的調適方法應對者提出討論，增加調適措施新選項。鐵道基礎設施遭受氣候危害、當前使用的調適措施與可替代以自然為本的調適方法措施。該文章亦提供了一些非鐵路環境中使用以自然為本的調適方法的案例，這些案例亦可能適用於鐵路系統，如利用綠色走廊降溫、植被管理減少火災風險等。這些案例展示以自然為本的調適方法可提高鐵路基礎設施抵抗氣候變化能力方面的潛力。

三、鐵公路系統應用以自然為本的解決方案研究規劃

從國外文獻回顧發現，國外調適研究及實務案例報告所採用的調適選項範圍較廣闊，調適選項(adaptation options)的涵蓋面從上到下可歸納主要為：策略(strategies)、方法(approaches)、解決方案(solutions)及措施(measures)等方面。經彙整前章文獻回顧有關鐵公路系統因應氣候變遷風險評估可知，高溫對於鐵公路廊設施設備之風險，以及強降雨對於鐵公路廊設施設備、易淹水潛勢區、土石流潛勢區、邊坡之影響，存在高度之風險。至於強風對於鐵公路廊設施設備、場站設施設備，以及植被等之影響，則屬中度風險。鐵公路系統之韌性主要是在氣候變遷的衝擊下，能夠維持其既有功能並提供安全、可靠的運輸服務，整體來說可以分為：抵抗氣候變遷極端天氣衝擊的能力、適應氣候變遷長期影響的能力及減輕氣候變遷影響的能力。世界各國近年來已陸續推動強化鐵公路系統韌性之能力，並依據系統特性、背景與環境，於生命週期各階段制定相關制度，進而發展相關制度與方法供相關權管單位遵循。本研究綜整相關文獻針對鐵公路系統相關資料進行探討分析，並就以自然為本的調適方法抵禦氣候變遷影響和長期危害，以強化鐵公路系統韌性，以下將針對應用以自然為本的解決方案研究規劃調適策略、調適能力及風險評估及對外溝通等方向說明相關規劃構想。

3.1 擬定調適策略

因應氣候風險及中度氣候風險可能導致之影響，其調適策略可以擬訂之方向與內容，簡述如下：

1. 於鐵公路沿線之土地，評估以自然為本的解決方案選擇適合當地

植生之植被，除於高溫期間能適度降低軌道的溫度之外，亦能創造鐵道沿線景觀，提升乘客在運送過程之愉悅性。就規劃之改善路線而言，宜針對相關基礎設施提高沿線之排水標準，並加強場站、路基、橋基、邊坡之結構與保護工程之外，於橋梁新建工程部分亦儘量減少橋梁落墩數量之設計。

2. 規劃相關接駁之替代方案，以因應鐵公系統於遭遇氣候因素可能導致疏運服務臨時中斷情況。鐵道系統係屬永續運輸系統之一，對於鐵道系統所具有之特性，應儘量對外宣導與說明，並與受新建工程影響之當地脆弱族群進行溝通，並提供必要之協助，以利獲得公眾對於基礎設施的投資與支持。

3.2 調適能力組成與評估

為使現況檢視內容及氣候變遷風險評估成果可作為未來調適缺口或熱點辨識之比較基線，建議鐵公路設施權管機關於執行檢視資源及現況氣候變遷風險時，包括下列項目：

1. 為檢視可掌握之資源，鐵公路設施權管機關應盤點氣候變遷調適領域之知識、技術、科學研究團隊或人力、財務能力、氣候變遷風險評估及調適計畫投入與管理機制情形等調適資源。
2. 評估現況氣候變遷風險，運用歷史氣候觀測相關資訊進行現況衝擊與脆弱度之量化或質化評估，包含經濟、社會、健康、環境、生態、文化、脆弱族群及部門等之衝擊程度與風險空間分佈情形。
3. 另考量以自然為本的解決方案及相關鐵公路設施需考量以採用100至200年進行設計，爰鐵公路設施權管機關應具備相關調適能力，將氣候變遷調適視為一個明確的核心戰略目標，並取得

組織高階管理團隊的策略聲明支持，積極從已歷經氣候變遷調適經驗之其他領域(例如電力、能源領域)學習經驗並建立跨領域合作夥伴關係，以提高因應未來氣候條件的準備。

3.3 對外溝通風險評估結果

鐵公路設施權管機關於完成氣候變遷風險評估，以及研提將以自然為本的解決方案工法納入調適策略後，宜就其成果與資料蒐集成果對外公開展覽與說明，以踐行資訊公開及公眾參與程序。建議鐵公路設施權管機關對外公開展示原則簡述如下：

1. 定期更新氣候變遷風險評估及以自然為本的解決方案調適策略之執行成果，並公開於官方網站供各界檢視。
2. 前揭所述執行成果，宜包括危害及衝擊評估之圖資、風險評估結果、調適行動落實情形、投入資源，以及有關機關(構)、學者、專家及民間團體之意見處理情形。

四、結論與建議

4.1 結論

本研究針對應用以自然為本的調適方法於鐵公路系統蒐集國內外相關資料進行探討分析，並就以自然為本的調適方法抵禦氣候變遷影響和長期危害，進而強化鐵公路系統韌性，並藉由瞭解其發展潛力與限制，透過瞭解各國採行以自然為本的調適方法案例之內容，及其可應用性與效益，俾供相關機關做為參考應用，協助其強化鐵公路系統之韌性。綜整結論如下：

1. 回顧以自然為本的調適方法相關文獻可知其定義、發展及相關準則擇要如下：

(1) 以自然為本的解決方案概念有別於傳統的工程解決方案，廣泛探尋與生態系統合作之方法，以能在減緩與調適氣候變遷影響時，也同時能夠保護自然生態系統與生物多樣性，其目的與效益著眼於藉由生物多樣性效益與生態系統服務作為基礎，因應氣候變遷減緩與調適、防災、經濟與社會發展、公共衛生、糧食安全、水資源安全、生物多樣性等不同的社會挑戰，提供人類發展所需，長期帶來人類福祉效益。以自然為本的調適工法具有 4 項特性：透過自然循環系統增強工程面對自然衝擊的韌性、等於或低於工程工法的成本、運用自然調適的方法來達成與工程工法一樣的目的，以及比工程工法提供更多自然美學效益。

(2) 國際自然保育聯盟參考各國多名專家學者及實務界人士的意見，

基於以自然為本的解決方案架構訂定全球標準，包括 8 項標準及諸多相關指標，讓決策者可以評估介入措施的適當性、規模、經濟、環境和社會可行性，考慮其可能利益權衡，確保以自然為本的解決方案專案管理的透明度和適切性與發揮調適效果。

(3) IPCC AR6 綜整國際上運用於運輸系統的調適選項類型包括硬保護(hard protection)、調整與升級(accommodation and advance as strategies)、搬遷(migration)與以生態為本的調適方法與自然為本的調適方法(Ecosystem-based Adaptation approaches, EbA & Nature-based Solutions, NbS)等，而多樣化的調適選項類型及多元化組合極為適合國內因應現況所面臨的複合性氣候風險。

2. 另針對運輸系統之調適選項、鐵公路系統應用以自然為本的解決方案適用性、限制條件及導入準備工作等文獻發現，國外調適研究及實務案例所採用的調適選項較為多元，說明如下：

- (1) 海岸公路能否適合採用以自然為本的調適方法需考量以下 6 點：對於工程韌性與危害降低的需求、該地生態與地質的條件符合度、面對大浪的暴露度、工程計畫的標的與成本效益、工程可靠性，以及當地的政策與法規。
- (2) 美國聯邦公路管理局亦採用以自然為本的解決方案運用於沿海公路，減緩沿海公路受到洪水、波浪和海水的侵蝕。在決定應用的工法上可視海浪侵蝕程度而定，並可適度採用混合方法。
- (3) 透過文獻彙析可知目前以自然為本的解決方案調適規劃主要仍為單一部門的短期規劃建構，而非長遠的調適計畫。以自然為本的解決方案的運作需要時間與空間的規劃，另須考量現行政

策法規、組織權責上限制，或以試辦方式小規模試行並觀察其成效並獲取相關經驗滾動檢討。

3. 本研究內容主要成果包含：(1)鐵公路系統應用以自然為本的調適方法相關文獻收集、(2)以自然為本的調適方法相關案例研析並瞭解其發展潛力與限制、(3)探討各國採行以自然為本的調適方法案例之內容，及其可應用性與效益，俾供相關機關做為參考應用。後續亦可於鐵道系統強化調適能力之探討及建構運輸管理機關(構)之調適專業能力等兩案合辦計畫相關調適策略中繼續納入 NbS 概念探討。

4.2 建議

考量氣候變遷對於全球衝擊影響已為不可逆趨勢，而國內運輸系統在多山、面海，或是位處缺乏良善排水系統的低窪區域，每逢極端高溫、強降雨，以及颱風季節的氣候壓力下，以自然為本的解決方案工法提升其調適能力以及韌性實有其需要。而國內在實務應用上對於硬保護和調整與升級之傳統作法並不陌生，後續亦可配合國際調適趨勢積極推廣以自然為本的解決方案應用，亦可參考美國作法提出以自然為本的解決方案規劃路徑圖並增加相關資金挹注，以利加速落實以自然為本的解決方案實務應用、研擬以自然為本的解決方案指引及配套措施開發。綜理本計畫研究過程中之觀察及發現，提出鐵公路系統納入以自然為本的解決方案調適工作之後續推動建議，分項說明如下：

1. 追蹤國際調適趨勢及發展

目前推動以自然為本的解決方案行動計畫氣候變遷調適的挑戰包括相關知識、資訊與量能不足、永續發展和氣候變遷以及人與自然關係上的變革性改變、環境變化與以自然為本的解決方

案成效的不確定性、空間與時間限制與政策法規、組織權責以及資金財務上的研擬。在政策法規、組織權責、資金財務及行政流程上，需要避免不當調適策略與行動，確立具賦能和維護生態系功能。面對目前的限制因素，建議對策包括政策支持、利害關係人的參與、知識差距的補足、資金供應、能力建構、治理有效性以及專案成效監測評估。建議鐵公路系統設施權管機關可邀請生態、工程及氣候變遷等跨領域之學者專家，並結合民間顧問公司實務經驗，透過工作坊及座談會形式，追蹤國際調適趨勢並整合相關資訊俾提供鐵公路系統設施權管機關參考應用，以彌補缺乏相關知識之調適缺口。因國內調適案例多為生態工法，應用以自然為本的解決方案案例較為缺乏，建議未來鐵公路系統設施權管機關可參考國外案例先行小規模試辦，透過試辦成效滾動檢討分析以自然為本的解決方案效益，做為後續推動經驗分享。

2. 建立跨領域夥伴關係

以自然為本的解決方案可納入做為鐵公路系統面臨氣候變遷所造成氣候風險時調適選項，以自然為本的解決方案除可降低氣候風險，於生態、水質及生物多樣性等方面亦有正面效用。惟運輸系統需要與跨領域建立夥伴關係：包括規劃、資助、設計和執行，並透過協作與合作，跨領域合作關係可帶來更多好處並提高執行可能性。因目前許多鐵公路系統設施權管機關較缺乏設計以自然為本的解決方案相關專業知識，爰建議納入跨領域合作夥伴關係發揮著相當重要作用，跨領域專家共同制定願景有助於成功實施可能性。財政支持能力、滾動檢討風險評估流程、相關以自然為本的解決方案開發工具、方法與執行，皆為推動運輸系統

參與。應對推動上的挑戰建議可透過提供正確資訊、教育訓練及量能提升，增加對以自然為本的解決方案正確認知，避免誤解或誤用內涵；促進跨域、參與、共學、共擔、互利、互信；建立操作案例，以開放創新與實驗了解案例進行中面臨的風險並配合監測與成效評估，獲取經驗以填補知識缺口並分享經驗。

3. 設施權責機關之承諾

有效的氣候變遷調適行動方案需要政策上的承諾、協調一致的多層次治理、體制框架、法律、政策和戰略等多方配合，並在組織上訂定明確的調適目標，組織內部在充足的金融和融資工具、跨多個政策領域的協調以及包容性的治理流程上提供行政與資源上的協助，方能在氣候變遷調適策略上具體落實。建議設施權責機關在鐵公路系統面臨氣候變遷調適所表現的決心與意志，對於以自然為本的解決方案工法納入調適策略方案後續推動具有舉足輕重的意義。另建議可參考聯合國環境署(UNEP)提出「以生態為本的調適方法(Ecosystem-based Adaptation, EbA)納入國家調適計畫準則內涵」有助改善瞭解與自然的關聯、確認以自然為本的解決切入點並比較與確認調適方案。美國聯邦政府亦有提出關於以自然為本的解決方案應用在各部門的指引，經由更新政策，並釋出資金，以聯邦設施和資產為主導，進行人力培訓，優先考慮研究、創新、知識及調適性學習。

參考文獻

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022.
2. Mittermeier, R A., Totten, M., Pennypacker, L.L., Boltz, F., Mittermeier, C.G., Midgley, G., Rodriguez, C.M., Prickett, G., Gascon, C., Seligmann, P.A. and Langrand, O., A Climate For Life: Meeting the Global Challenge, Washington DC: IUCN, 2008.
3. United Nations Statistics Division, Sustainable Development Goals Report, 2020.
4. Assessing the Benefits and Costs of Nature-Based Solutions for Climate Resilience: A Guideline for Project Developers World bank 2023
5. Intergovernmental Panel on Climate Change, Synthesis report of the IPCC sixth assessment report, 2023
6. Castellar, J. A., Popartan, L. A., Pueyo-Ros, J., Atanasova, N., Langergraber, G., Säumel, I., ... & Acuna, V. Nature-based solutions in the urban context: Terminology, classification and scoring for urban challenges and ecosystem services. Science of the Total Environment, 2021.
7. Cohen-Shacham, Emmanuelle, et al. "Nature-based solutions to address global societal challenges." IUCN: Gland, Switzerland, 2016.
8. Nature-based Solutions for Coastal Highway Resilience: an Implementation Guide, Federal Highway Administration, 2019.
9. National Cooperative Research Program, Incorporating the Costs and Benefits of Adaptation Measures in Preparation for Extreme Weather Events and Climate Change Guidebook, 2020.
10. The White house, Opportunities to accelerate nature-based solutions: a

- road map for climate progress, thriving nature, equity and prosperity, 2022
11. Ariadne Baskin, Nature Based Solutions (NBS) in the Transport Sector, Germany, Transformative Urban Mobility Initiative, 2023
 12. Resilience and Durability to Extreme Weather Pilot Project: Laguna Shores Roads in Corpus Christi, Texas, 2021.
 13. Network Rail, Weather Resilience and Climate Change Adaptation Strategy(WRCCA)-Adaptation Pathways Approach, 2023.
 14. Network Rail, Weather Resilience and Climate Change Adaptation Strategy(WRCCA), 2017.
 15. Blackwood, Lorraine, Fabrice G. Renaud, and Steven Gillespie. "Nature-based solutions as climate change adaptation measures for rail infrastructure." Nature-Based Solutions, 2022.
 16. 環境部，氣候變遷因應法，民國 112 年
 17. 行政院，國家因應氣候變遷行動綱領，民國 112 年