

氣候變遷風險因子於鐵公路風險評估探討之 先期規劃

A Preliminary Planning for the Discussion on the Climate Change Risk Factor of Risk Assessment for Highway-Railway System

綜合技術組 蕭為元、楊家銘、曾佩如、朱珮芸

研究期間：民國 111 年 1 月至 112 年 7 月

摘要

全球暖化造成氣候變遷影響正持續發生，鐵公路系統為國家維持正常運作與社會經濟發展的基礎設施，在面對氣候變遷可能帶來的衝擊，必須及早妥善因應，才能降低生命財產損失。本研究以氣候變遷風險因子(如強降雨、高溫、暴潮、海平面上升...等)對鐵公路系統之影響(如坡災、淹水、軌道挫屈...等)為範疇，探討不同氣候變遷風險因子對國內鐵公路系統之影響相對程度及關注程度，進行後續研究議題之優先排序。經本研究綜合分析，強降雨對鐵公路系統衝擊影響最大，其衝擊影響包含坡地災害、淹水及橋梁沖刷等。在公路系統部分，氣候變遷風險因子衝擊依序為強降雨、暴潮及海平面上升、高溫；在鐵路系統部分，氣候變遷風險因子衝擊依序為強降雨、高溫。

本所過去已針對氣候變遷之坡災及淹水風險進行探討，爰本研究針對強降雨導致橋梁沖刷、暴潮/海平面上升、高溫等氣候變遷風險因子及衝擊對鐵公路之影響，提出後續調適研究課題建議，以做為後續年度調適研究計畫方向之參考。

關鍵詞：氣候變遷、高溫、強降雨、海平面上升、暴潮、橋梁沖刷

一、前言

1.1 研究緣起

鐵公路系統為國家維持正常運作與社會經濟發展的基礎設施，在面對氣候變遷可能帶來的衝擊，必須及早妥善因應，才能降低生命財產損失。爰本所自 102 年起，辦理鐵公路氣候變遷調適風險評估系列研究，於 104 年底完成鐵公路系統因應氣候變遷坡災及淹水之風險評估及建置鐵公路氣候變遷風險評估資訊；自 105 年起至 108 年期間，將相關風險評估資訊提供予鐵公路管理機關參考，並辦理氣候變遷調適專業知識教育訓練，推廣氣候變遷調適概念，使相關機關實際運用於設施管理業務。109 年將鐵公路氣候變遷風險評估資訊移轉予鐵公路權管機關做後續業務應用。

鑒於本所前開研究主要著重探討鐵公路系統因應氣候變遷強降雨之坡災風險及淹水風險，然氣候變遷風險因子除強降雨外，尚包含高溫、暴潮及海平面上升...等，其對不同運輸系統之影響程度亦不同，另 111 年 1 月 19 日本所「未來 5 年(111-115)施政主軸 Road Map、112 年合作研究計畫先期審議暨 111 年計畫亮點成果行銷討論會議」之會議結論，111 年自辦計畫有必要通盤探討不同氣候變遷風險因子對運輸系統之影響，以做為後續年度調適研究計畫方向之參考。

經洽詢海空運管理機關初步了解，民航局、桃機公司、港務公司已就各權管設施(機場、港埠)積極規劃或已辦理相關調適研究。因此，本自辦研究之研究範疇以鐵公路系統進行探討，以掌握其主要氣候變遷風險因子，並提出後續研究方向。

1.2 研究目的

研究目的係探討氣候變遷風險因子對鐵公路系統之影響，並依影響相對程度進行研究議題之優先排序，以做為後續本所氣候變遷調適研究之基礎。

1.3 研究項目與方法

本研究以氣候變遷風險因子(如強降雨、高溫、暴潮、海平面上升...等)對鐵公路系統之影響(如坡災、淹水、軌道挫屈...等)探討為範疇，辦理之工作項目如下：

1. 蒐集國內外氣候變遷風險因子對鐵公路系統影響相關資料：透過文獻蒐集或訪談，蒐集國內外氣候變遷風險因子(如強降雨、高溫...等)對鐵公路系統影響(如淹水、坡災、軌道挫屈...等)等相關資料。
2. 探討不同氣候變遷風險因子對國內鐵公路系統之影響相對程度：
 - (1) 盤點氣候變遷風險因子對鐵公路系統之影響程度。
 - (2) 蒐集鐵公路管理機關經常性關注之氣候變遷因子影響課題。
 - (3) 依影響相對程度及鐵公路管理機關關注程度，進行後續研究議題之優先排序。
3. 研提本所後續鐵公路系統因應氣候變遷調適研究課題之建議。

二、文獻回顧

近年來科學研究證實，全球暖化造成氣候變遷影響正持續發生，其將導致極端天氣事件發生頻率更為頻繁，發生的時間可能拉長或驟變，強度也可能增加或加速，例如強降雨、強風與高溫的強度可能增加，海平面上升速度加快等。鐵公路系統是與民眾生活息息相關之維生基礎設施，在氣候變遷下可能造成鐵公路系統面臨更嚴峻的氣候風險，導致路線中斷或民眾生命財產損失。因此透過掌握氣候變遷因子之衝擊影響，進一步研提妥適之調適因應作為，已成為當前及未來之重要課題。

本章節蒐集國內外最新氣候變遷推估資訊，國內外氣候變遷情境風險因子對鐵公路系統影響等資料。

2.1 國際與臺灣氣候變遷趨勢推估

聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於 2021 年 8 月 9 日公布氣候變遷第六次評估報告-第一工作小組報告「AR6：物理科學基礎報告」，其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。該報告指出，人類對大氣、海洋及陸地暖化的影響是無庸置疑的，人為導致之氣候變遷已影響世紀各地許多極端天氣與氣候事件，極端事件(如熱浪、豪雨、乾旱、熱帶氣旋)的觀測及其受人為影響的證據均已強化。未來無論哪種排放情境，全球地表將持續增溫至少到本(21)世紀中，除非在幾十年內大幅減少二氧化碳及其他溫室氣體排放，否則全球暖化幅度將在 21 世紀超過 1.5°C 及 2.0°C^[1]。

為與國際接軌，由國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP)」、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象局、臺灣師範大學地球科學系及國家災害防救科技中心等

單位共同組成之臺灣氣候變遷科學團隊，依據 IPCC「AR6：物理科學基礎報告」，共同撰寫發表「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」^[2]，其中內容包含臺灣未來氣候推估之情境。

若以全球暖化最劣情境推估，臺灣於 2100 年(21 世紀末)的氣候趨勢推估情形如下：

1. 在氣溫部分，推估未來臺灣各地氣溫將持續上升，且在未來極端高溫事件中，各地高溫 36°C 以上的日數將增加。在最劣情境下，臺灣 21 世紀末之年平均氣溫可能上升超過 3.4°C。
2. 在降雨部分
 - (1) 暴雨強度：臺灣年最大 1 日暴雨強度有增加趨勢；在最劣情境下，推估 21 世紀末平均最大 1 日暴雨強度年增加幅度約為 41.3%。
 - (2) 年總降雨量：臺灣年總降雨量未來推估有增加的趨勢，在最劣情境下，推估 21 世紀末臺灣平均年總降雨量增加幅度約為 31%。
3. 在颱風部分，臺灣颱風個數、強颱比例、降雨改變率將受到影響。在最劣情境下，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%、颱風降雨改變率將增加約 35%。

2.2 臺灣氣候變遷衝擊

因應未來臺灣氣候趨勢推估，相較於現在極端天氣，可能會造成更大的衝擊，以下針對溫度、降雨、颱風、海平面上升的變化趨勢及其衝擊^[3]個別說明如下：

1. 溫度變化趨勢及其衝擊：未來溫度變化有升溫趨勢，將導致全臺水稻產量呈現減少趨勢，高山樹木適生區域呈現嚴重縮減趨勢；另公共衛生上，也可能導致埃及斑蚊分布範圍向北

持續擴大。

2. 降雨變化趨勢及其衝擊：極端降雨趨勢變化可以導致淹水及坡地災害。

(1) 淹水：在未來極端降雨情境下(最大 24 小時累積雨量之 95 百分位數值)，全臺除中部地區減少外，其他區域皆呈現增加趨勢。以臺北、宜蘭、臺南、高屏淹水發生機率為例，21 世紀末淹水機率皆有明顯增加趨勢。

(2) 坡地：坡地重點集水區在未來極端降雨情境下(最大 24 小時累積雨量之 95 百分位數值)，除中部山區外，其餘皆有明顯增加趨勢；以新店溪、曾文水庫集水區為例，坡地崩塌趨勢模擬呈現持平或略為增加趨勢。

3. 颱風變化趨勢及其衝擊：在最劣情境下，世紀末颱風風速平均增強約 8%；進行未來颱風風浪與颱風暴潮的衝擊模擬評估，對近海風浪及海岸暴潮可能帶來的衝擊說明如下：

(1) 風浪：全臺沿岸地區颱風風浪衝擊以東北部及東南部海岸衝擊較大。

(2) 暴潮：全臺沿岸地區颱風暴潮衝擊以北部、東北部及中部海岸衝擊較大。

4. 海平面上升變化趨勢及其衝擊：依據 IPCC AR6 之升溫 2°C 情境，將導致臺灣周邊海域海平面上升 0.5 公尺。

(1) 大臺北地區因海平面上升造成的溢淹主要發生在淡水河出海口一帶，在現有堤坊保護下，都市區域影響相對較小。

(2) 西南沿海以臺南地區為例，海平面上升可能導致地勢低窪地區有溢淹情形(以現有地形資料模擬)，溢淹較深區域以沿海養殖魚塭、濕地及沙洲較為顯著。

在法規部分，過去在「溫室氣體減量及管理法」(104 年 7 月 1 日

公布施行)中，調適部分內容僅列中央有關機關推動氣候變遷調適事項、中央目的事業主管機關研議調適策略等內容，然隨著國際及國內對氣候變遷調適逐漸重視，在 112 年 2 月 15 日公布施行之「氣候變遷因應法」已列有調適專章，並闡述科研之重要性；在「氣候變遷因應法」第 18 條第 1 項「中央主管機關與中央科技主管機關應進行氣候變遷科學及衝擊調適研究發展，並與氣象主管機關共同研析及掌握氣候變遷趨勢，綜整氣候情境設定、氣候變遷科學及衝擊資訊，定期公開氣候變遷科學報告」及第 18 條第 2 項「中央主管機關與中央科技主管機關應輔導各級政府使用前項氣候變遷科學報告，進行氣候變遷風險評估，作為研擬、推動調適方案及策略之依據。各級政府於必要時得依據前項氣候變遷科學報告，規劃早期預警機制及系統監測」。科技部預計 112 年底將發布氣候變遷科學報告，其中包含臺灣未來氣候變遷情境推估資料，環保署及科技部後續也將輔導各級政府使用該科學報告，以及早因應氣候變遷之衝擊。這也顯示相關氣候變遷風險因子之探討有其重要性。

2.3 氣候變遷風險因子對鐵公路系統影響

氣候變遷的主要現象包括氣溫上升、降雨型態改變、極端天氣事件發生的強度與頻率升高以及海平面上升，可能造成的影響包括：乾旱、熱浪、暴雨、暴潮、土石流、颱風、海水倒灌等^[4]。極端天氣常導致運輸系統服務功能中斷或失靈，近年來科學研究證明，氣候變遷將致使極端天氣事件發生頻率增加、影響規模擴大及衝擊強度增強，因此氣候變遷對鐵公路運輸系統也將帶來比過去更高、更廣泛的衝擊風險及影響。

2.3.1 公路系統

公路系統為社會經濟、維生及醫療等活動之重要運輸服務，隨著氣候變遷及極端事件的頻率增加，公路系統面臨的氣候風險逐漸升高。道路設計標準如依據原訂範圍的氣候狀態加以訂定，當氣候狀態超出

原訂範圍預設情況時，道路將面臨重大衝擊，回復道路原有功能所需成本或提高道路設計標準、安全系統及調整改建都將是重大支出。

依據「國家氣候變遷調適行動綱領」(101 年)^[4]，在公路系統上，目前國內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，造成公路系統中斷。若河川上游發生洪水、土石流等災害，將沖刷中、上游橋梁基礎導致裸露，後續極容易因地震而傾倒斷裂；另下游橋梁的橋墩、橋面也易遭洪水、土石流沖毀或掩埋。

美國國家合作公路研究計畫(National Cooperative Highway Research Program, NCHRP)為協助公路規劃人員了解公路系統面對氣候變遷及極端天候事件可能受到的衝擊，並提升公路系統長期調適能力，於 2014 年發布「氣候變遷、及極端天候事件與公路系統：實務手冊及研究報告」(Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System: Practitioner's Guide and Research Report)^[5]。該手冊提出進行調適工程評估的過程，需先評估計畫的區位與氣候變遷風險因子對該區位環境可能產生衝擊，氣候變遷風險因子包含平均氣候狀態(如平均溫度及降雨量等)及極端事件，可能影響運輸系統的設計、建造、維護與營運。該手冊預測的氣候變遷風險因子包含高溫變化、降雨型態改變、海平面上升、颶風強度增加等，將對設施及營運/維護產生衝擊，如表 2.3.1-1。

表 2.3.1-1 氣候變遷風險因子對公路系統的影響

氣候變遷風險因子		對設施衝擊	對營運/維護衝擊
極端高溫變化		● 設施提前損壞 ● 公路挫曲或產生車轍 ● 橋梁因熱脹承受額外壓力及產生位移	● 安全考量影響公路建設作業 ● 橋梁接點因熱漲效應影響橋梁營運及維護成本增加 ● 車輛爆胎風險增加
降雨型態改變	降雨量改變	● 坡災與土石流風險提高 ● 淹水風險提高 ● 土壤含水量過高影響道路、橋梁與隧道結構強度	● 因淹水、土石流等事件造成封路及服務延遲
	強降雨及暴風雨強度增加	● 強降雨沖刷道路恐影響道路永久封閉 ● 強降雨造成隧道、涵洞及道路損害 ● 強風及強降雨沖刷橋梁 ● 強風造成橋梁、標誌及纜線損害風險	● 因淹水、土石流等事件造成封路及服務延遲 ● 道路建設工程活動中斷 ● 強風影響公路正常營運，並可能造成意外風險
海平面上升		● 沿海道路受到侵蝕 ● 隧道或道路遭淹沒	● 海岸公路淹水及損壞 ● 暴潮暴露度提升 ● 隧道與低窪設施淹水風險增加
颶風強度增加		● 造成設施損壞及營運中斷	● 沿海道路淹水頻率增加 ● 淹水影響運輸系統營運 ● 更多沿海地區疏散撤離

資料來源：[5]及本研究整理

本所 111 年「公路系統規劃階段強化調適能力之探討(2/2)-強化調適能力作為與指引」計畫綜整相關文獻資料^[6]，公路系統在不同氣候變遷風險因子下，將對設施本身或行駛之車輛造成衝擊影響，如強降雨將導致邊坡災害、排水不及導致淹水、橋梁沖刷、路基受侵蝕掏空等；強風將導致路樹或號誌桿倒塌、車輛翻覆等；高溫可能導致鋪面材料軟化、道路邊坡野火、輪胎爆胎機率提高等；暴潮/風浪、海平面上升可能導致淹水溢淹、低窪地區淹水不易消退、掏空路基、影響橋梁結構等。如表 2.3.1-2。

表 2.3.1-2 不同氣候變遷風險因子對公路系統之衝擊

氣候變遷風險因子	衝擊
強降雨	● 排水不良導致淹水 ● 路基受侵蝕掏空 ● 道路橫斷面面臨暴雨沖刷 ● 漂流物撞擊 ● 橋梁基礎受沖刷 ● 邊坡坍滑 ● 路廊因地表逕流溢淹，影響周邊排水系統
強風	● 車輛翻覆 ● 路樹傾倒道路中斷 ● 電線及號誌桿倒塌阻斷交通
高溫	● 鋪面材料軟化 ● 道路標線變形難以辨識 ● 爆胎機率上升造成車禍 ● 邊坡野火造成邊坡崩落 ● 野火濃煙影響視線
暴潮/風浪、海平面上升	● 暴潮加劇橋梁基礎之沖刷 ● 強浪影響橋梁結構 ● 強浪掏刷路基 ● 強浪侵蝕造成溢淹 ● 長期侵蝕造成海岸退縮 ● 海浪將石塊或廢棄物攜帶上岸

資料來源：[6]及本研究整理

2.3.2 鐵路系統

美國聯邦運輸部(U.S. Department of Transportation, DOT)於 2014 年更新的氣候調適計畫 (Climate Adaptation Plan: Ensuring Transportation Infrastructure and System Resilience)^[7] 中提出氣候變遷對鐵路影響包括：

1. 因強降雨、海平面上升及暴風雨等災害頻率上升，導致地下隧道與低窪交通設施淹水頻率增加，需加強排水與抽水效能。
2. 海平面上升與暴風雨強度增加，縮短交通設施生命週期。
3. 橋梁為承受溫度上升與暴風雨需要額外維護與建設成本。

4. 強降雨與霜雪融化損害排水系統與暗溝，影響其效率運作。
5. 極端天氣事件提高事故發生頻率。
6. 高溫造成鐵軌挫曲，導致鐵路服務中斷及車輛脫軌事件，影響旅行時間。

愛爾蘭交通部於 2016 年提出「愛爾蘭交通部門發展氣候變遷回復力 (Developing Resilience to Climate Change in the Irish Transport Sector)」報告^[8]中，研擬因應氣候變遷風險因子致災所產生影響為基礎調適策略，如表 2.3.2-1 所示。

表 2.3.2-1 愛爾蘭鐵路系統受氣候變遷風險因子之衝擊影響

氣候變遷風險因子	既有衝擊	預測衝擊
強降雨	● 邊坡穩定度降低、土石流風險提高 ● 排水系統無法應付 ● 軌道關閉導致服務中斷 ● 班次中斷、超載 ● 軌道淹水防護需加強 ● 橋梁、軌道損壞 ● 場站淹水、關閉	● 班次中斷、超載 ● 軌道及橋梁損害增加 ● 低窪地區與次要場站淹水風險提高
強風	● 強風造成自動設備中斷 ● 樹木倒塌造成訊號與電力設備損壞 ● 場站結構損壞 ● 架空纜線於強風下影響營運 ● 強風對行車速限影響	● 超載造成延誤
高溫熱浪	● 軌道挫曲風險 ● 為防範軌道挫曲的全區速度限制 ● 設備過熱	● 班次中斷 ● 超載導致延誤
低溫	● 架空電力故障 ● 煞車系統受影響 ● 旅客於結冰月台、出入口滑倒風險 ● 架空纜線與軌道交接處損壞	● 班次中斷 ● 超載造成延誤
海平面上升	● 淹水與侵蝕對海岸鐵路設施損害	● 班次中斷 ● 超載造成延誤 ● 長期須考慮替代動線

資料來源：[8]及本研究整理

另歐盟 WEATHER 計畫^[9]為歐盟自 2009 年至 2012 年辦理系列氣候變遷計畫研究，參與國家包含德國、希臘、法國、義大利、奧地利及瑞士等國家，並以德國扮演最重要角色。相關因應氣候變遷風險因子對鐵路之衝擊類型及相關調適策略說明如表 2.3.2-2。

表 2.3.2-2 歐盟面對氣候變遷的調適策略

氣候衝擊 類型	區域	設施	措施	影響
一般防護措施				
暴雨、霜雪	全歐洲	鐵路	重新於山坡地種植防護林	保護交通設施與居住地
路網重新設計				
暴雨、乾旱、雪崩、霜雪	法國	鐵路	將氣候變遷納入鐵路規劃	鐵路設施資產
監督與維護				
洪水、冰雪、乾旱、暴雨、土石流、雪崩	全歐洲	鐵路	軌道植栽管理	全歐洲城際鐵路網
投資				
雪崩	北歐、中歐、東歐	鐵路	軌道道岔保護措施	減少冬天誤點頻率及電力消耗

資料來源：[9]及本研究整理

鐵路系統因降雨強度增加或頻率提高，平原低窪地區容易造成淹水，山區易受到邊坡滑動崩塌的威脅，而河谷沖蝕加劇也會危及鐵軌路基，造成鐵路系統中斷。未來在高溫、海平面上升、強降雨及颱風等劇烈極端天候現象發生頻率與強度提高，將對鐵路系統營運帶來巨大衝擊。

綜合歸納，以臺灣鐵路系統而言，氣候變遷及極端天氣影響可能造成以下衝擊，如表 2.3.2-3：

1. 溫度上升及熱脹效應至軌道擠壓變形、挫屈，影響列車行車安全。

2. 強降雨

(1) 引發的淹水潛勢及坡地災害風險增加，導致軌道及隧道淹水，或造成邊坡或隧道落石及坍方。

(2) 路基及橋梁因地表逕流沖蝕、洪水沖刷受損。

(3) 車站或其聯外道路因強降雨淹水或受坡災衝擊，導致服務中斷。

3. 列車因強降雨及強風影響致無法正常行駛。

4. 架空纜線因高溫及強風受損。

5. 臨海設施因暴潮或海平面上升導致淹水或淹沒，使服務中斷。

表 2.3.1-2 不同氣候變遷風險因子對鐵路系統之衝擊

氣候變風險因子	衝擊
強降雨	● 軌道或隧道淹水 ● 邊坡或隧道落石、坍方 ● 路基、橋梁因地表逕流沖蝕、洪水淘刷受損 ● 車站或其聯外道路淹水或受坡災衝擊 ● 列車因強降雨、強風而無法正常行駛
強風	● 車輛翻覆 ● 路樹傾倒鐵路中斷 ● 電線及號誌桿倒塌影響交通
高溫	● 架空電車線受損 ● 軌道因高溫挫屈
暴潮/風浪、海平面上升	● 臨海軌道邊坡、護岸因暴潮淘刷及沖擊而受損、中斷 ● 臨海軌道因海平面上升而被淹沒

資料來源：[10]及本研究整理

三、不同氣候變遷風險因子之影響相對程度探討

為了解不同氣候變遷風險因子(高溫、強降雨、海平面上升、暴潮)對國內鐵公路之影響程度，透過本所過去研究計畫之問卷及單位訪談，蒐集彙整實務單位之實務看法；另也可透過鐵公路管理機關刻正辦理

之計畫，了解哪些氣候衝擊是該單位刻正處理，亦能間接判別氣候變遷因子之影響程度。

在公路系統部分，本所曾透過訪談、工作坊與座談會等方式，與專家學者、公路設施機關進行氣候衝擊分析之綜合討論^[10]、^[11]。

1. 山區公路部分，相對於其他氣候變遷風險因子，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元，加上國內山區公路的暴露因素與脆弱因素，亦可能加劇強降雨衝擊對於山區公路的影響程度。此外，公路專家和公路設施主管機關皆指出相較於其他氣候壓力因素，強降雨是國內公路系統目前應優先處理之極端氣候課題。
2. 平原公路部分，所面臨的強降雨、暴潮/風浪及海平面上升加劇相較於其他氣候壓力因素(如高溫、強風)，可能造成之氣候衝擊與調適選項面向皆更為多元。加上國內平原公路多位於都會區、服務居住口密集區、重要產業園區，或沿海地區等，一旦面臨強降雨、暴潮/風浪與海平面上升加劇衝擊，其影響程度更大、範圍更廣。

鐵路部分，參考「鐵路行車安全改善計畫」^[12]，臺鐵行車路線經過路塹或路堤邊坡，當颱風、豪雨來臨時，其強風與豪大雨，常使邊坡植被遭受嚴重破壞，而面臨土石滑落造成軌道掩埋之風險；另大量雨水沖刷也導致路基流失等危險情事發生，嚴重危及行車安全，故臺鐵也全面著手加固邊坡穩定設施與更新沿線排水系統，以促進鐵道行車安全。在未來氣候變遷情境下，強降雨可能加劇，導致坡災與淹水更為嚴重，因此，氣候變遷強降雨衝擊也將是鐵路系統未來應關注之重要課題。

除了盤點氣候變遷風險因子對鐵公路系統之影響程度外，也應蒐集鐵公路管理機關經常性關注之氣候變遷因子影響課題，後續議題研究規劃才能較符合實務需求。本所過去研究曾透過訪談與諮詢鐵公路

權管機關(構)(公路總局、高速公路局、臺鐵局、高鐵公司)，另也透過新聞資訊，了解各機關對極端天氣衝擊之關注情形，以及未來規劃採行之相關因應作為。

1. 公路總局

(1) 公路系統在面臨氣候變遷環境衝擊下，短延時強降雨對公路影響較大。

A. 路面不透水鋪面因短延時強降雨，使水無處消散，進而導致路面淹水；另短延時強降雨若使既有排水系統無法短時間消化，亦會造成公路淹水。

B. 「省道改善計畫(108-113 年)」項下「公路防避災改善」執行「因應氣候變遷公路調適改善計畫」中，計有防避災工程、防災管理及智慧化科技，對於坡災高潛勢路段，係以迴避取代原山坡路段做處理，例如蘇花改即採迴避方式，其他如台 7 線、台 20 線、台 21 線等易致災局部路段，亦採短隧道之迴避工程。在規劃路段之選線評估，儘量迴避在坡地不穩定區域選線。針對坡災高風險路段，也會採取科技技術，如無人機(UAV)、光達(LiDAR)3D 數值模擬及邊坡資訊管理系統，加強邊坡管理之監測^[13]。

C. 強降雨對於橋梁之影響在於河川水流侵蝕及土石流衝擊，因為橋梁跨河川，因此需考慮強降雨對於河川水位到橋梁間橋梁可以承受之極限值，設計時就必須注意重現期值；另在橋梁高程設計上，也需避免橋梁設計高度不足的問題。

(2) 高溫的影響：高溫易造成鋪面出現坑洞，影響民眾道路使用之舒適度，若要修復將提高公路的養護經費。此外，近年來，國內也針對道路鋪面進行材質相關研究。因應氣候

變遷，夏季高溫有增加趨勢，道路鋪面溫度往往高達 60°C 以上，一般採用瀝青材料 AC-20 軟化點約為 40°C~50°C，因此在夏季高溫曝曬下容易造成道路鋪面變形車轍等問題。因此若瀝青材質進行改良，使軟化點高於 60°C，相對於 AC-20 提高穩定度，使鋪面較能耐高溫，避免因高溫曝曬造成道路變形車轍等問題^[14]。

(3) 海平面上升的影響：海平面上升後，海岸退縮對公路系統造成的影響很大，會造成海水沖刷，擋土牆就會被侵蝕、掏空，也會形成災害，就需要進行修築。以東北角的台 2 線為例，海平面上升之後，海岸線明顯退縮，進而影響到公路的結構，近十年內也已持續在修築台 2 線近海段的結構。

(4) 暴潮的影響：台 2 線有部分路段在颱風來襲時，會受打上來的海水侵蝕。東部的台 9 線南興路段及多良路段過往也有海岸推縮問題，造成颱風來襲時海水侵蝕，但發現問題後已用工程方式改善。然而工程改善並不能無限上綱，在某種程度上，可以透過管理手段進行處理，例如為避免颱風來襲的海浪會打到車道影響行車安全，在颱風來襲前，可把車流導引到靠山側，並封鎖危險的方式處理。

2. 高速公路局

以目前國道養護經驗來看，影響最明顯為強降雨，另高溫也是必須考慮的課題。面對氣候變遷，需思考如何同時維持設施的服務品質及耐久性，以維持交通順暢不會造成衝擊，確保用路人有安全、舒適的行車環境。有關各氣候風險因子之影響說明如下：

(1) 強降雨的影響

A. 鋪面弱化、邊坡坍滑、橋墩遭衝撞、隧道滲水、交流

道淹水等，均會直接影響行車安全。

- B. 造成橋梁基礎沖刷，使基礎裸露影響橋梁結構安全。
- C. 強降雨超過既有排水設施設計容量，將造成淹水(如交流道)；若洪水位超過警戒值，需進行封橋，導致公路系統運輸功能中斷。
- D. 機電設施的影響主要是相關號誌設施。

(2) 高溫的影響

- A. 鋪面軟化、主線旁邊坡失火、服務區缺水等，影響行車安全及服務區營運。
- B. 高溫易使材料老、劣化，造成公路運輸系統管養成本增加，並縮短構造物使用年限。

(3) 暴潮的影響

將造成交流道下方地方連絡道淹水，使高速公路車輛無法行駛。

(4) 海平面上升的影響

- A. 將造成交流道下方地方連絡道淹水，使高速公路車輛無法行駛。
- B. 若海平面上升造成陸地退縮，嚴重時沿海公路系統避續進行改線，避免因海水位上升淹沒公路系統。

3. 臺鐵局

在氣候變遷下，臺鐵主要的課題為橋梁沖刷，有些 40-50 年以上之老舊橋梁的耐沖刷與防洪能力已減弱，因此在臺鐵局執行之「鐵路行車安全改善計畫」即將不符合河川治理計畫的橋梁及耐沖刷能力不足的橋梁進行改建及局部改善，其

他也包含局部河床穩定改善。

(1) 強降雨的影響

- A. 臺鐵面臨氣候衝擊之處理方式係與災害共存，如利用監控與監視系統，在強降雨襲擊下，雨量到達一定程度時會進行封橋與封路，讓列車暫時停駛，在強降雨衝擊過後視情況通車，而此方式臺鐵局也已運行多年。
- B. 在邊坡部分，若係屬可改善者，則會透過工程手法進行改善，若無法改善者，則加強監測。
- C. 在車站部分，新建置的車站皆以高排水標準進行排水系統的設計，故在排水系統上較無問題；在既有車站上，則是會調查淹水的原因，透過持續監測與改善排水系統等方式處理淹水課題。

(2) 高溫的影響

臺鐵局為避免因高溫造成鐵軌挫曲事件再次發生，已在鐵道鋼軌旁安裝高溫軌溫監測系統，採電子式監測鋼軌溫度，並即時傳送回工務分駐所監控。此外，也訂定高溫處置的標準作業程序，除有專人監測外，當軌溫超過 50°C，即通報轉知線上人員不得擾動軌道、準備降溫器材；55~60°C時，則派員機車查道、降溫器材及人員待命；60°C以上則實施降溫作業，必要地段通知列車慢行。

4. 高鐵公司

高鐵系統在面臨氣候變遷環境下，面對強降雨所帶來的衝擊最大。強降雨會造成河川橋之沖刷，並影響邊坡之穩定性。有關各氣候風險因子之影響說明如下：

(1) 強降雨的影響

- A. 邊坡坍塌、橋梁沖刷均會直接影響行車安全。
- B. 強降雨的流量若超過既有排水設施設計容量，將造成淹水。
- C. 強降雨也有路權外影響路權內的課題存在，雖公共工程委員會在臺鐵邊坡事件後，有要求權管機關應考量路權範圍外的邊坡，但這在實際的處理上有一定的困難。

(2) 高溫的影響

在軌道有裝設偵測計每日進行監控，如到達一定的高溫標準(50°C以上)，會進行列車降速與停駛措施。

經綜整前述氣候變遷風險因子對鐵公路系統之影響程度，以及鐵公路管理機關針對氣候變遷風險因子影響之關注程度，提出後續鐵公路系統氣候變遷風險因子衝擊研究之優先順序，說明如下：

1. 公路系統

高速公路局及公路總局均認為強降雨對高速公路、快速公路及省道等公路系統衝擊影響最大，也是國內公路系統目前應優先處理之極端氣候課題。其衝擊包括強降雨導致之坡地災害、道路淹水、橋梁沖刷等。

其次是暴潮與海平面上升，位於沿海地區之平原公路將受影響而造成淹水，此外，海平面上升可能因海岸退縮，導致沿海公路橋梁結構受損，也會增加暴潮風險。

另高速公路局認為高溫亦是應關注的課題，高溫會導致鋪面軟化、邊坡失火而影響行車安全，也會造成構造物老化、劣化，縮短使用年限；公路總局認為高溫易造成鋪面出現坑洞，影響民眾道路使用之舒適度。

2. 鐵路系統

臺鐵局及高鐵公司認為強降雨對鐵路系統衝擊影響最大，臺鐵主要衝擊為橋梁沖刷，因老舊橋梁的耐沖刷與防洪能力已減弱，因此在臺鐵局執行之「鐵路行車安全改善計畫」即針對橋梁進行改建及局部改善；另坡災及淹水之衝擊則會透過工程手法改善或利用監測及管理(如封橋、封路)，讓列車暫時停駛，保障行車安全。高鐵公司也認為強降雨會導致橋梁沖刷、邊坡坍塌而直接影響行車安全，另也會導致淹水之危害。

四、後續鐵公路系統因應氣候變遷調適研究課題建議

經本研究評估，強降雨導致坡地災害、淹水及橋梁沖刷對鐵公路之衝擊影響最大，其次在公路系統部分，依序為暴潮及海平面上升、高溫；在鐵路系統部分，其次為高溫。

本所自民國 102 年起，辦理鐵公路氣候變遷調適風險評估系列研究，已針對氣候變遷強降雨導致坡地災害及淹水對鐵公路系統之影響進行探討，並民國 104 年底，完成鐵公路系統因應氣候變遷坡災及淹水之風險評估及建置「鐵公路氣候變遷調適資訊」，於民國 105 年提供予鐵公路管理機關，做為其研提因應氣候變遷調適改善計畫之參考，以提升整體運輸系統韌性，緩和因氣候變遷所造成之傷害。民國 109 年將鐵公路氣候變遷風險評估資訊移轉予鐵公路權管機關，提供其做為後續業務應用。

以下針對強降雨導致橋梁沖刷、暴潮/海平面上升、高溫等氣候變遷風險因子對鐵公路系統之衝擊影響，通案性提出後續調適研究課題之建議。

1. 氣候變遷風險因子對鐵公路衝擊影響相關調適文獻蒐集：蒐集國內外氣候變遷風險因子對鐵公路系統之衝擊影響、風險

評估方法及調適作為等相關文獻、文件資料，並提出參考建議。

2. 蒐集國內鐵公路相關風險評估模式，分析模式中之氣象因子，並探討現有風險評估模式引用氣候變遷風險因子資料之可行性。
3. 探討氣候變遷風險因子情境資料需求，以及如何與國家災害防救科技中心產製之氣候變遷相關情境資訊進行橋接。
4. 蒐集並探討國內外氣候變遷風險因子對鐵公路系統之衝擊相關風險評估方法及風險管理機制，研提符合本土化之氣候變遷風險評估方法與風險管理機制建議。
5. 初步研析鐵公路系統因應氣候變遷風險因子衝擊之熱點區域。針對風險熱點區域與鐵公路管理機關進行意見徵詢，挑選幾處區位做為示範案例，以計畫研提之風險評估方法及風險管理機制進行案例分析。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 近年來科學研究證實，全球暖化造成氣候變遷影響正持續發生，其將導致極端天氣事件發生頻率更為頻繁，發生的時間可能拉長或驟變，強度也可能增加或加速。鐵公路系統是與民眾生活息息相關之維生基礎設施，在氣候變遷下可能是鐵公路系統面臨更嚴峻的氣候風險，導致路線中斷或民眾生命財產損失。爰本研究探討研析鐵公路主要氣候變遷風險因子及其衝擊影響，俾利研議後續調適課題建議，擇要如下：
 - (1) 公路系統在不同氣候變遷風險因子下，將對設施本身或行駛之車輛造成衝擊，如強降雨將導致邊坡災害、排水不及

導致淹水、橋梁沖刷、路基受侵蝕掏空等；高溫可能導致鋪面材料軟化、道路邊坡野火、輪胎爆胎機率提高等；暴潮/風浪、海平面上升可能導致淹水溢淹、低窪地區淹水不易消退、掏空路基、影響橋梁結構等。

(2) 鐵路系統在高溫影響下，溫度上升及熱脹效應至軌道擠壓變形、挫屈，影響列車行車安全。強降雨將引發的淹水潛勢及坡地災害風險增加，導致軌道及隧道淹水，或造成邊坡或隧道落石及坍方；路基及橋梁因地表逕流沖蝕、洪水沖刷受損；以及車站或其聯外道路因強降雨淹水或受坡災衝擊，導致服務中斷。列車因強降雨影響致無法正常行駛。架空纜線因高溫受損。臨海設施因暴潮或海平面上升導致淹水或淹沒，使服務中斷。

2. 綜整氣候變遷風險因子對鐵公路系統之影響程度，以及鐵公路管理機關針對氣候變遷風險因子影響之關注程度，提出後續研究議題之優先順序說明如下：

(1) 強降雨對公路系統衝擊影響最大，其衝擊影響包含坡地災害、道路淹水及橋梁沖刷等；其次是暴潮及海平面上升對道路之衝擊；另高溫會導致鋪面軟化，影響行車安全。

(2) 強降雨對鐵路系統衝擊影響最大，其衝擊影響包含橋梁沖刷、邊坡坍滑及淹水；其次為高溫之衝擊，可能導致軌道挫曲，影響行車安全。

3. 本研究已蒐整相關文獻，分別探討國道、省道、臺鐵、高鐵因應氣候變遷可能受到之氣候變遷風險因子影響，並提出後續可研究之課題方向。

5.2 建議

1. 後續國家氣候變遷科學報告發布後，建議鐵公路管理機關(構)應自主評估，主動將氣候變遷情境納入權管設施之風險評估

及風險管理，以降低未來可能之衝擊。

2. 建議後續調適研究課題說明如下：

- (1) 氣候變遷風險因子於鐵公路因應氣候變遷衝擊之調適相關文獻蒐集。
- (2) 蒐集及探討國內鐵公路相關風險評估模式引用氣候變遷風險因子資料之可行性。
- (3) 探討氣候變遷風險因子情境資料需求，以及如何與國家災害防救科技中心產製之氣候變遷相關情境資訊橋接方式。
- (4) 研析氣候變遷風險因子於鐵公路因應氣候變遷衝擊之風險評估方法，研提風險管理機制建議。
- (5) 鐵公路氣候變遷風險因子/衝擊之示範案例。

3. 本研究係以宏觀角度，通盤性探討鐵公路系統可能面臨氣候變遷風險因子之衝擊影響，各單位應用時，應自行就設施權管區域，小尺度分析，並因地制宜地進行調整，以較符合實際業務需求。例如鐵公路系統各設施的型式、所在區位、設計標準、材料、維運、監測管理、設施使用年期等不同，受到各種不同氣候變遷風險因子之衝擊影響程度也不同。

參考資料

1. Climate Change 2021: The Physical Science Basis, IPCC, 2021.
2. IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告，國家科學及技術委員會等，110 年。
3. IPCC 氣候變遷第六次評估報告「衝擊、調適與脆弱度」之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷衝擊評析更新報告，國家科學及技術委員會，111 年。
4. 國家氣候變遷調適政策綱領，國家發展委員會，101 年。
5. Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System: Practitioner's Guide and Research Report, National Cooperative Highway Research Program, 2014.
6. 公路系統規劃階段強化調適能力之探討(2/2)-強化調適能力作為與指引，交通部運輸研究所，112 年。
7. Climate Adaptation Plan 2014: Ensuring Transportation Infrastructure and System Resilience, U.S. Department of Transportation, 2014.
8. Tourism and Sport. Developing Resilience to Climate Change in the Irish Transport Sector, Department of Transport, 2016.
9. WEATHER: Weather Extremes: Assessment of Impacts on Transport Systems and Hazards for European Region, Project funded under the 7th framework program of the European Commission, 2012.
10. 運輸部門氣候變遷調適策略研議計畫，交通部運輸研究所，108 年。
11. 公路系統規劃階段強化調適能力之探討(1/2)，交通部運輸研究所，111 年。
12. 鐵路行車安全改善計畫(第二次修正)(核定本)，臺灣鐵路管理局，111 年。

13. 省道改善計畫(108-113 年)，公路總局，107 年。
14. 粗級配瀝青混凝土鋪築於市區道路之成效分析，鋪面工程；17 卷 1 期，108 年。