

# 鐵道系統強化調適能力探討之先期規劃

## A Preliminary Planning for the Discussion on Enhancing Railway System's Adaptive Capacity

運輸能源及環境組 徐偉誌、蕭為元、楊家銘、鄔德傳、  
朱珮芸

研究期間：民國 111 年 1 月至 112 年 12 月

### 摘要

運輸系統與民眾生活息息相關，在氣候變遷衝擊下，為避免運輸中斷影響民眾日常生活，運輸管理機關(構)需以前瞻性風險管理及調適策略，強化系統韌性以減少氣候傷害。本所於 2021 年至 2023 年針對公路系統辦理公路系統規劃階段強化調適能力之研究，探討公路系統強化調適能力之機制與方法，並完成公路系統規劃階段強化調適能力指引。

本所規劃於 2024 年至 2026 年續針對鐵道系統辦理強化調適能力探討之合作計畫，本研究為先期規劃。面對氣候變遷衝擊，鐵道系統也面臨諸多挑戰，如強降雨導致淹水、坡災、路基沖蝕；高溫可能導致軌道挫曲；強風可能導致架空電車線受損或列車翻覆；海平面上升或暴潮將沖蝕路基或淹水，而造成鐵道系統服務中斷。本研究透過國際文獻的蒐集，探討氣候變遷對鐵道系統的衝擊及相應的調適措施，並針對我國不同鐵道系統(高鐵、臺鐵、捷運、輕軌)特性，研析鐵道系統未來調適研究課題方向，分年期規劃未來 3 年鐵道系統強化調適能力探討合作計畫之主要工作項目，包括探討鐵道系統強化調適能力機制與方法，產製鐵道系統強化調適能力指引及相關應用案例研析。

關鍵詞：氣候變遷、鐵道系統、調適

# 鐵道系統強化調適能力探討之先期規劃

## 一、前言

### 1.1 研究緣起

自工業革命以來，人類對於化石能源的高度使用已造成大量溫室氣體的排放，對自然環境影響日益嚴重，並加劇極端天氣事件的發生。

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 日公布由第一工作小組完成的第六次氣候變遷評估報告第一冊(Sixth Assessment Report, AR6 WGI)，這份報告指出人為暖化造成的氣候變遷衝擊已經無法避免，全球氣溫持續上升，1880 年至 2012 年上升 0.85°C，至 2021 年氣溫已上升 1.07°C，預估到 2040 年將上升超過 1.5°C<sup>[1]</sup>。

臺灣氣候變遷科學團隊，包含國科會、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象署、臺灣師範大學地球科學系，以及國家災害防救科技中心，依據聯合國 IPCC AR6 評估最惡劣的溫室氣體排放情境，針對臺灣未來氣候變遷趨勢進行分析。結果顯示，臺灣未來將面臨更加嚴重的氣候變遷影響，以 1985 年至 2014 年為基期，到 2100 年時，臺灣的夏天將從平均 4.3 個月增加至 7 個月，冬天將由平均 2.3 個月減為 0。另至 2100 年，臺灣高溫超過 36°C 的日數將從基期年平均 0.29 日增加至 48.4 日，且枯水期降雨更少，年最大連續不降雨日數從基期年平均 43 日增至 91 日；惟豐水期降雨將更多，豪雨強度估計增加 41.3%，強颱比例將增加 50%<sup>[2]</sup>。

為因應氣候變遷可能帶來的衝擊，行政院於 2017 年 2 月核定「國家因應氣候變遷行動綱領」，明確揭示提升運輸、通訊及資訊系統等設施因應氣候變遷之調適能力<sup>[3]</sup>。因此，本所於 2018 年起開始辦理運輸系統調適上位策略研議及滾動檢討工作，提供運輸管理機關(構)辦理調適業務之參考。另考量各運輸子系統中，以公路系統與民眾之生活最為息息相關，一旦營運中斷對於經濟與民生之衝擊不言而喻。因

此於 2021 年至 2023 年辦理公路系統規劃階段強化調適能力之研究，探討公路系統於規劃階段強化調適能力之機制與方法，完成公路系統規劃階段強化調適能力指引，供公路設施權責機關參考，俾提升公路系統因應氣候變遷之調適能力。

考量鐵道系統亦是國家運輸系統重要的生命線之一，鐵道系統的安全性與服務性會受到極端天氣的影響，而調適工作能及早因應並減輕鐵道系統在氣候變遷下，對鐵道系統的衝擊影響。因此，本所規劃於 2024 年至 2026 年辦理鐵道系統強化調適能力探討之合作計畫，深入探討鐵道系統因應氣候變遷可能衝擊及調適對策，提供鐵道系統管理機關(構)參考，提升鐵道系統因應氣候變遷之調適能力。

本研究為鐵道系統強化調適能力探討合作計畫之先期規劃，目的係了解鐵道系統因應氣候變遷可能帶來的衝擊及調適作為，探討未來鐵道系統調適研究課題方向，做為本所研擬 2024 年至 2026 年鐵道系統強化調適能力案研究工作項目之參據。

## 1.2 研究項目

本研究針對國內高速鐵路、傳統鐵路、捷運及輕軌等不同鐵道系統因應氣候變遷衝擊及調適作為進行綜合探討，辦理之工作項目如下：

1. 蒐集及研析鐵道系統因應氣候變遷衝擊相關調適課題文獻資料。

透過國內外文獻回顧方式，了解及探討氣候變遷危害對鐵道系統的衝擊及相關調適作法。

2. 探討在氣候變遷衝擊下，不同鐵道系統未來調適研究課題方向。

依據不同鐵道系統(高鐵、臺鐵、捷運、輕軌)之特性，探討在氣候變遷衝擊下，鐵道系統未來調適研究課題方向(包含共通性及個別性)，以做為規劃鐵道系統調適能力研究工作項目之參考。

3. 研提鐵道系統強化調適能力探討合作計畫主要工作項目之規劃，並據以完成本所 3 年期合作計畫需求說明書之內容。

## 二、鐵道系統因應氣候變遷調適

面對全球暖化和氣候變遷挑戰，各國政府紛紛將減少運輸部門溫室氣體排放列為最重要的交通政策之一。在這個背景下，運具電動化、公共運輸發展，以及減少私人運具使用已成為主要趨勢。其中，鐵道系統做為一種安全、大量、準確、低能耗的綠色運具，受到廣泛的採用和積極的建設。

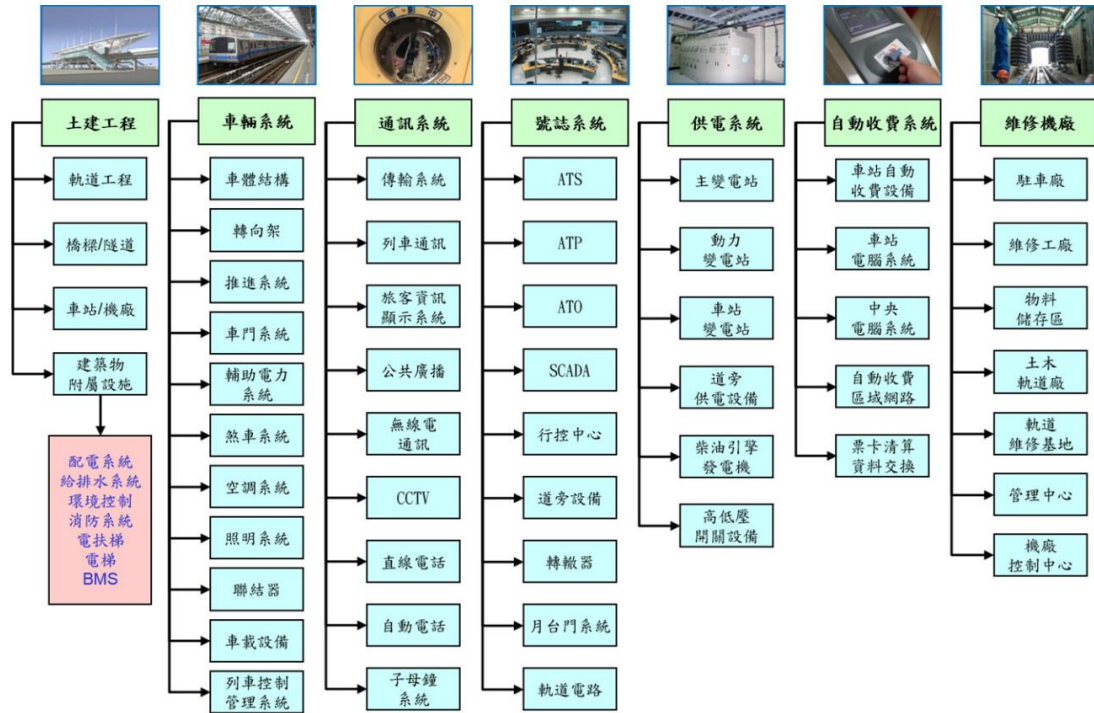
臺灣的地理與氣候環境因素對鐵道系統的影響顯著。標高 1,000 公尺以上的山區占總面積的 31.5%，100~1,000 公尺的坡地與丘陵占 38%。此外，臺灣常受到地震、土石流、颱風和洪水等天然災害的影響，且災害潛勢地區遍布全島，氣候變遷和極端天氣的衝擊進一步加劇了這些災害的發生頻率和規模。受到氣候變遷及極端天氣的衝擊，造成臺灣年平均溫度變化顯著上升、海平面上升及水環境危機，以及颱風與暴雨增加、極端降雨等天氣事件，加劇災害發生之頻率及規模。

因此，在探討鐵道系統未來調適研究方向前，本節將探討氣候變遷對鐵道系統的衝擊及相關調適作法。

### 2.1 鐵道系統

鐵道運輸係以動力車輛，牽引一節或數節車輛運輸旅客或貨物，可透過編組列車提高路線容量，並行駛於專用軌道路徑上，具有專用路權<sup>[4]</sup>。而鐵道系統是一個龐大的機具及系統之組合體，系統架構包括土木工程(軌道、橋梁/隧道、車站、配電系統等)、車輛系統、通信系統、號誌系統、供電系統、自動收費系統及維修機廠等<sup>[5]</sup>，如圖 1，列車行駛需仰賴系統中全部機具的協調配合方可順利地運轉。

我國鐵道系統主要包括高速鐵路、臺鐵、捷運及輕軌，其中高鐵主司城際長程運輸，高鐵與臺鐵合作分工中程運輸，都會區域內則以臺鐵、捷運及輕軌系統為主<sup>[6]</sup>。



資料來源：[5]

圖 1 鐵道運輸系統架構

高速鐵路係指時速 200 公里以上，使用專用路權，全線無平交道、行車安全之鐵道系統。臺灣高速鐵路路線全長 350 公里，沿途設置南港、臺北、板橋、桃園、新竹、苗栗、臺中、彰化、雲林、嘉義、臺南、左營等 12 個車站。另為滿足系統列車維修、過夜停留與清潔整備及軌道、工務與電務維修需求，規劃設置北部汐止、中部烏日及南部左營等車輛基地 3 處，並於高雄燕巢設置總機廠 1 座；此外沿線規劃設置 5 處工電基地(其中已設置六家、烏日、太保、左營等 4 處)，供日常工務及電務維修作業使用，如圖 2。因臺灣地形山多平地少，且西部走廊人口密集，土地已高度利用，因此高鐵大部分均採高架結構形式闢建，其中橋梁及高架橋段約占 73%，隧道占 18%，其餘 9% 則採路堤/路塹型式<sup>[7]</sup>。



資料來源：[7]

圖 2 高鐵路線及場站配置圖

臺鐵係為傳統鐵路，截至 112 年底共有 241 站，除花蓮港站為純貨運站外，計有 69 個客貨運站，純客運站 171 站。臺灣鐵路營業里程 1,06 公里，環島鐵路網主線以縱貫線、臺中線、屏東線為西線，里程 551.2 公里，占總營業里程 52%；以宜蘭線、北迴線、臺東線及南迴線為東線，營業里程 423.3 公里，占 40%；而六家線、內灣線、集集線、沙崙線、深澳線、平溪線及花蓮港線等為支線，里程共計 90.5 公里，占 8%，如圖 3。西部幹線目前以中、短程旅客運輸為主，並積極朝向區域通勤輸運模式；東部幹線則以加強列車運能，縮短行車時間及提高乘車舒適性，提供通勤(學)及觀光旅客服務<sup>[8]</sup>。



資料來源：[8]

圖 3 臺鐵路網圖

我國捷運系統目前已正式營運者包括臺北捷運、新北捷運、桃園捷運、臺中捷運及高雄捷運。除機場捷運是為提供出入境國外旅客或國民之機場運送服務外，捷運主要目的係在都會區提供快速、安全、大量的運輸服務。依目前世界各大都市使用的大眾捷運系統之運能而言，可分為高運量捷運系統、自動化中運量捷運系統及輕軌系統<sup>[9]</sup>。

高運量捷運系統具有運量大、成本高之主要特性，通常採用一般鐵路系統之標準軌道及諸多類似之系統。由於發展歷史悠久，世界上大多數主要大城市採用，規格較一致，製造廠商普遍，因此系統成熟度高。然造價高，且系統受地形限制(坡度、轉彎半徑)較大，因此通常用於服務大型都會區市中心主要運輸走廊，或與主要衛星城鎮間大量通勤旅次，每小時單向運量可達 25,000~75,000 人次，例如臺北捷運淡水信義線、板南線等。



中運量捷運系統技術，採用高度自動化之營運操控系統以縮短發車間距；各廠商所開發系統多不盡相同，相容程度低而具有高度專利權。其採用之車輛較小，受地形之限制亦較小，一般適合中型城市主要幹道，大型都會區次要運輸走廊、較狹窄之道路，或道路坡度較大、彎度較大之地區，如臺北捷運文湖線。

輕軌運輸(LRT)系統係指以專用動力驅動之輕軌車輛，行駛於特定軌道路線，有時候並具有優先通行之大眾運輸系統。依行駛路線之需求、財務考量以及實地交通狀況，可混合規劃採用專用路權(A 型路權)、隔離路權(B 型路權)或共用路權(C 型路權)。在功能上是一種介於公車與捷運系統間，並可兼具兩系統特性之軌道運輸系統。輕軌系統每小時單向運量 3,000~20,000 人次，故一般輕軌系統介於高運量捷運與公車系統之間，亦即在傳統捷運與公車系統中有其提供服務之市場，在路廊未達捷運系統足夠運輸需求前，輕軌系統可提供比公車系統更大運能的服務。輕軌的特色為深入人群、融入都市建設與景觀，沒有專用路權，車站設計較為簡約，沒有封閉式的閘門，僅設置刷卡機供旅客進出站時刷卡搭乘，對於旅客來說是較為友善的綠色運具<sup>[10]</sup>。目前我國已營運路線包括淡海輕軌、安坑輕軌及高雄輕軌。

## 2.2 氣候變遷對鐵道系統的衝擊

現代城市的交通運輸如同是生存命脈，嚴重惡化的天氣將導致陸面交通中斷。以豪大雨造成淹水災害為例，臺灣交通基礎設施多以 200 年洪水頻率作為設計標準，過去 200 年才出現一次的洪水頻率，現在出現頻率已逐漸增加，且有可能成為新常態。鐵道運輸與公路運輸均屬於維生基礎設施，需強化耐受力與回復韌性。在調適作法上，除透過區域性排水外，本身也可強化設計標準、監測功能與應變措施，以及增加鐵道與公路互為交通替代方案，降低氣候變遷影響下的脆弱度，減少極端天氣事件下的負面衝擊。

美國加州立法分析人員辦公室(Legislative Analyst's Office, LAO)在 2022 年 4 月釋出一份氣候變遷對加州運輸系統的衝擊分析報告<sup>[11]</sup>，



報告指出氣候變遷對加州運輸部門產生的方式多元且嚴峻，包含破壞沿海鐵路、橋墩下海平面上升、高速公路受到土石流及暴雨侵襲，甚至是熱浪導致道路或軌道彎曲等。研究團隊認為現階段的交通基礎設施，需要透過修改或遷移等方式才可以確保使用，且未來的規劃、建設及維護過程也需要考慮氣候變遷的影響，以保持基礎設施的壽命。

這份報告內容主要包含氣候災害影響基礎設施的方式、政府正在推動的解決方案，以及立法機構需要考慮的問題等三個部分。由於加州主要面臨高溫、乾旱、洪水、野火及沿海侵蝕等災害，因此運輸系統面臨的障礙，諸如既有設施因淹水無法運作、海平面上升而導致海水容易入侵路面、高溫導致路面龜裂等；因此某些道路需要打造更多排水系統、鐵路需要遷移至高處，以及道路需要更高的設計標準等。但困難的是，現有的材料無法滿足不斷變化的需求，如更耐久的瀝青鋪面或透水鋪面等。而加州政府過去幾年也進行脆弱度評估與需求評估等調適計畫，並將氣候變遷的數據納入全生命週期，且在 2018 年完成調查結果後，針對特定地區推動調適行動，2021 年 7 月更是通過「交通基礎設施氣候行動計畫」，做為計畫推動的整體原則。

英國 Arkell 與 Darch 早在 2006 年便發表《氣候變遷對倫敦運輸網絡的衝擊》報告<sup>[12]</sup>，針對氣候變遷對倫敦運輸系統可能的影響，模擬情境分析。該報告書指出，氣候變遷將使倫敦冬天變得暖而潮濕(大氣溫度將提高  $1^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$ )，夏天出現極端高溫且乾燥的氣候( $2^{\circ}\text{C} \sim 3.5^{\circ}\text{C}$ )，預估 2050 年倫敦每日最高溫超過  $25^{\circ}\text{C}$  的天數將會是現在的兩倍，再加上都市熱島效應，會使日夜溫差更為大，冬季增加最多 20% 的降雨量，夏季則會減少最多 40% 降雨量，暴雨強度也更加明顯，海平面上升及潮汐風險增加，預估潮汐和河水氾濫會影響泰晤士河通道區(Thames Gateway)的基礎建設，鐵路系統、道路及各車站局部淹水，鐵路與道路也會因高溫而損壞，旅客則因炎熱天氣更常身體不適。經由系統性評估後，倫敦研擬方案降低氣候變遷造成的運輸風險，包括建立永續排水系統、防水、更換自來水幹管，另外英國也提出因應氣候衝擊計畫，提供基本原則以建立各區域和部門因應策略。

除了上述各國的氣候變遷研究報告外，受到氣候變遷的影響，近幾年來也陸續發生極端天氣事件對鐵道營運產生較大影響的案例，例如 2022 年 7 月 19 日成為英國有紀錄以來最熱的一天，英格蘭中部的科寧斯比(Coningsby)測得 40.3°C 高溫，英國有 34 個地區氣溫都超過原本在 2019 年英國最高溫紀錄 38.7°C；英國氣象局(Met Office)表示，英國溫度幾乎不可能達到 40°C，但是溫室氣體增加導致氣候變遷，使這些極端溫度成為可能。極端高溫造成火車軌道彎曲，如圖 4，倫敦到東西海岸的主要線路都被迫取消。



資料來源：Network Rail Twitter

圖 4 薩福克郡(Suffolk)2022 年 7 月 19 日測得軌溫高達 62 度，極端高溫造成火車軌道挫屈變形

鐵道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。由於氣候變遷衝擊都會影響列車運行，以及其安全、舒適、維護和管理、乘客數量和業務收入，因此氣候變遷對鐵道營運的影響，需要結合考量構成鐵道系統的構件(如鐵道系統設備)及與之相關的各

種氣候因素(溫度、降雨、風等)進行探討，氣候變遷對鐵道系統可能的衝擊(包括但不限於)如表 1<sup>[13]</sup>。

表 1 鐵道系統面臨的潛在氣候衝擊彙整表

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

資料來源：[13]

以臺鐵系統而言，氣候變遷將可能造成下列影響：(1)溫度上升、熱脹效應致軌道擠壓變形、挫屈，影響列車行車安全、(2)強降雨引發的坡地災害、淹水潛勢與風險增加、(3)強降雨造成軌道或隧道淹水、(4)強降雨造成邊坡或隧道落石、坍方、(5)路基、橋梁因地表逕流沖蝕、洪水沖刷受損、(6)車站或其聯外道路因強降雨淹水或受坡災衝擊、(7)架空電車線因高溫、強風受損、(8)列車因強降雨、強風而無法正常行駛、(9)臨海設施因暴潮/風浪或海平面上升而淹水或淹沒<sup>[14]</sup>。

高鐵系統則可能面臨：(1)強降雨引發的坡地災害、淹水潛勢與風險增加、(2)路基、橋梁因地表逕流沖蝕、洪水沖刷受損、(3)車站或其聯外道路因強降雨淹水或受坡災衝擊、(4)架空電車線因高溫、強風受損、(5)列車因強降雨、強風而無法正常行駛<sup>[14]</sup>。

## 2.3 鐵道系統因應氣候變遷調適作為

依據國家氣候變遷調適框架<sup>[13]</sup>，將調適工作分為「辨識氣候風險與調適缺口」及「調適規劃與行動」等二階段，如圖 5，第壹階段「辨識氣候風險與調適缺口」包括調適課題辨識、現況風險盤點、未來風險及調適缺口辨識等工作，第貳階段「調適規劃與行動」則針對前述風險評估與調適缺口擬定具體目標，進行調適選項評估，逐步落實調適行動與監測，定期滾動檢討並公開成果說明國家調適進展<sup>[13]</sup>。



資料來源：[13]

圖 5 國家氣候變遷調適 2 階段框架

日本獨立行政法人國際協力機構(Japan International Cooperation Agency, JICA)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。其根據 IPCC AR5 中之調適概念定義，於 2019 年訂定《氣候風險評估及調適指南》(Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation)<sup>[15]</sup>，內容涵蓋氣候風險概念、氣候風險評估程序、氣候變遷對各部門之影響及調適措施建議等。在鐵道系統調適措施部分，日本鐵道系統的營運於長期受氣候條件威脅情況下，已累積包含專案規劃、經營管理、系統技術、標準制定等領域之豐富經驗。鐵道系統具體調適措施建議如表 2。

表 2 鐵路系統調適措施一覽表

| 主要面向 | 次分類    | 調適措施                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 社會環境 | 基礎設施發展 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 執行邊坡穩定工程</li> <li>● 重新調整鐵路及隧道路線</li> <li>● 建置或改善污水處理設施</li> <li>● 研擬地鐵出入口之防洪措施</li> <li>● 整修鐵路沿線鋼橋</li> <li>● 實行生命週期成本分析以替換脆弱度高之資產</li> </ul>                                                                                                                                                  |
|      | 鐵路系統設計 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 提供危害地圖予政府機關、鐵路營運商及乘客</li> <li>● 建置邊坡坍方及落石監測告警系統，與列車控制系統連動</li> <li>● 建置地下疏散導引系統</li> <li>● 引進應變指南，提供列車改道或其他運行模式指引</li> <li>● 繪製鐵路基礎設施及軌道脆弱度地圖</li> <li>● 加強天氣狀況、基礎設備使用情形監測</li> <li>● 以地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)建置極端事件警報系統與天氣預報地圖</li> <li>● 與鐵路公司及營運商共同研擬極端事件應變計畫</li> </ul> |

資料來源：[15]

鐵道系統較常面臨氣候變遷衝擊影響為強降雨與高溫，強降雨可能導致淹水、坡災、橋梁沖刷，高溫可能導致軌道挫曲。在調適新科技應用上，為因應高溫，可利用軌溫監測方式，如美國利用攝影機結合紅外線辨識軌溫的變化，如偵測到具風險的軌溫，則列車降速；或是使用溫度感測器及 LoRa 傳輸數據監控與傳輸軌溫、排水設施狀態、風速等將使鐵路更智慧及安全<sup>[16]</sup>；此外，也有採用軌道塗層的作法，以塗層之方式減少太陽光吸收，降低軌溫，例如美國運輸部為因應鐵道高溫挫曲採用鐵軌塗層於軌道二側之作法，其塗層為零揮發性有機化合物(Zero-volatile organic content)，以及百分百的無機塗層，基礎為鋁矽酸鹽(alkali-aluminosilicate)，特性為低度太陽能吸收<sup>[17]</sup>。

英國在鐵路因強降雨造成的淹水上以感應器結合物聯網的方式監控，此技術已在英國公路上廣泛使用，在鐵路的應用上則透過調整感應器規格與傳輸網絡等方式後進行測試。此作法的優點係可隨時掌握所有設施的排水狀況，並可透過監控與分析模式針對淤積與可能淹

水之排水設施安排養護之人力，有助於設施養護優先性的決策<sup>[18]</sup>。

此外，IPCC 於 2022 年 2 月底發布了氣候變遷第六次評估報告第二冊《衝擊、調適與脆弱度》(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<sup>[19]</sup>。該報告也發現，比起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，國際公私部門與公約近年紛紛將以自然為本解決的方案(Nature-based Solutions, NbS)視為重要解決方案之一。

NbS 係尋找與生態系統合作的方法，而不是僅僅依賴傳統的工程解決方案，可以幫助社會適應氣候變遷的影響。利用自然系統建設綠色城市還可以帶來顯著的能源節約和健康益處。舉例來說，生長在河、海交接潮間帶的紅樹林不僅具備儲存二氧化碳的功能，也能做為沿岸防洪的自然屏障。又例如在都市環境多植樹，一來可協助吸碳，更能淨化空氣、提供遮陰及幫助降溫。對運輸系統而言，如何善用 NbS 抵禦氣候變遷的影響和長期危害連帶強化氣候韌性，並了藉其發展潛力與限制性，後續也可做為鐵道系統調適研究的課題。

## 2.4 小結

透過文獻回顧，氣候變遷對鐵道系統的影響包括降雨強度增加或頻率提高，導致平原低窪地區淹水、山區面臨邊坡滑動和崩塌的威脅，以及河谷沖蝕加劇可能危及鐵軌路基，進而造成鐵道系統中斷；高溫可能導致軌道挫曲、強風可能導致架空電車線受損或列車翻覆、海平面上升或暴潮將沖蝕路基或造成淹水，這些影響亦將對鐵道系統的營運帶來巨大衝擊。

在鐵道系統相關調適作為上，可參考國家氣候變遷調適框架，於第壹階段先進行「辨識氣候風險與調適缺口」，包括調適課題辨識、現況風險盤點、未來風險及調適缺口辨識等工作，於第貳階段進行「調



適規劃與行動」，係針對前述風險評估與調適缺口擬定具體目標，進行調適選項評估，逐步落實調適行動與監測，定期滾動檢討；另參考日本獨立行政法人國際協力機構(JICA)於 2019 年訂定《氣候風險評估及調適指南》，鐵道系統調適，可於鐵道系統設計時，產製危害地圖或脆弱度地圖，建置預警系統，或者就現有設施可能面臨之氣候變遷衝擊，執行邊坡穩定工程、整修鐵路沿線鋼橋、研擬地鐵出入口之防洪措施等。此外，也可應用新科技，如因應軌道高溫，可利用感應器結合物聯網、軌溫監測、軌道塗層等技術；另以自然為本的解決方案(NbS)也是目前國際關注的調適選項之一，鐵道系統條是如何結合生態系統合作，以提高鐵道系統之氣候韌性，也是後續研究可關注課題。

鐵道系統可分為高速鐵路、傳統鐵路、捷運及輕軌，其中高鐵與臺鐵合作分工城際長程運輸及中程運輸，都會區域內鐵道運輸則以捷運及輕軌為主。因此，中、長距離行駛的高鐵、臺鐵，因行經不同區位，受氣候變遷衝擊種類及強度也不同；捷運及輕軌行駛範圍主要為都會區，僅需著重區域的氣候變遷衝擊，因此在後續鐵道系統調適研究方向規劃上，可將高鐵、臺鐵及捷運、輕軌分開探討。

### 三、未來研究方向

全球暖化導致氣候特性的改變並造成鐵道系統面臨更加複雜且嚴峻的氣候風險，是故，如何掌握氣候變遷風險，且進一步妥適調整因應氣候衝擊，已然成為全球鐵道系統規劃、設計、營運、維護及管理的重要議題。透過前述文獻回顧，本章節探討我國鐵道系統調適課題研究方向，並規劃 3 年期之鐵道系統調適研究工項，以做為本所 2024 年起委外合作研究計畫鐵道系統共通性調適研究重點項目之參據。

#### 3.1 課題初探

鐵道建設投資成本相當龐大，包括購置土地、鋪設軌道、購買車



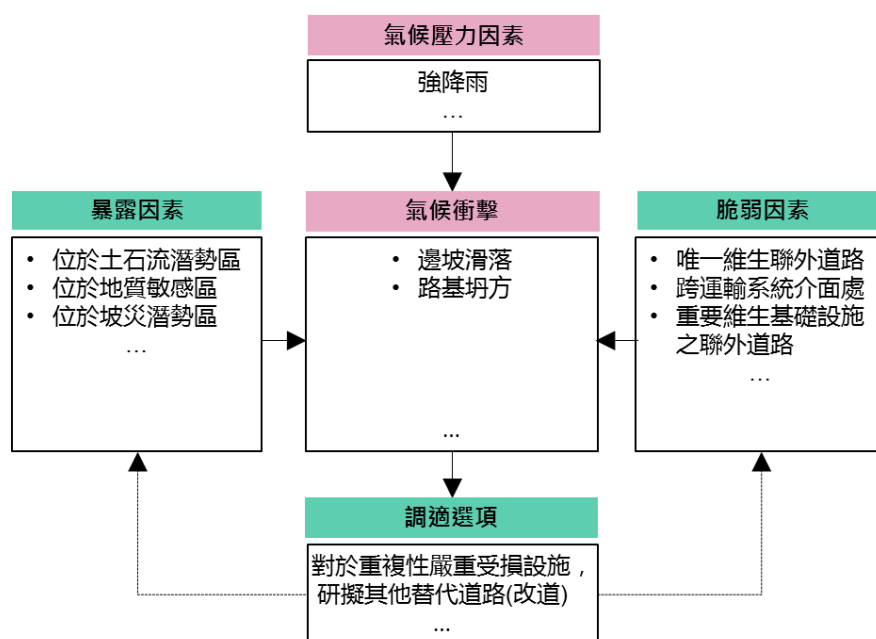
輛與終點設備，具有沉沒成本特性，即投資興建後很難移轉作其他用途；此外，鐵道的保養與維護費用也很龐大<sup>[4]</sup>。因此面對未來氣候變遷可能之衝擊，即應及早因應以降低鐵道運輸中斷之風險。針對新建或改建之鐵道系統，如欲提升鐵道系統於氣候變遷下的調適能力，於規劃階段(含新建及改建)即需以全生命週期的觀點探討系統在規劃、設計、施工及後續的養護管理各階段的作業需要，預為考量以提高系統之氣候韌性。針對現在已營運階段之鐵道系統，亦應進行風險評估，針對風險熱點及調適缺口預為因應，提升系統之調適能力。

行政院於 2017 年 4 月核定「前瞻基礎建設計畫」，其中包括建構安全便捷的「軌道建設」。因應綠色交通運輸趨勢，並著眼於將高鐵服務擴大整合其他交通系統，爰交通部針對未來 30 年發展需求，就全國鐵路網之建置，包括骨幹、城際、都會內鐵道建設做全面性規劃，分為五大主軸推動，分別為高鐵臺鐵連結成網、臺鐵升級及改善東部服務、鐵路立體化或通勤提速、都市興建捷運系統，以及中南部發展觀光鐵路，共計 40 項鐵道計畫<sup>[20]</sup>。

針對新建、改建之鐵道系統建設計畫，不論是高鐵、臺鐵、捷運或輕軌，即應規劃階段強化調適能力之機制與方法。在機制部分，參考本所前期公路系統調適指引研究，鐵道系統規劃作業流程可概分為資料蒐集分析、方案研擬與評估以及工程研究與評估 3 個作業階段。為了具體融入氣候變遷風險調適理念，建議於各作業階段皆增納氣候變遷調適相關作業程序，即在第一階段資料蒐集分析增納「氣候變遷情境與氣候相關資料蒐集與分析」工作項目，第二階段方案研擬與評估增納「初步評估影響調適能力的氣候風險因素」工作項目，第三階段工程研究與評估增納「氣候變遷風險評估」工作項目。

而方法則是針對就前述機制較為關鍵之步驟，提供國際上目前採用調適方法。首先可透過氣候衝擊鏈，如圖 6，初步評估影響鐵道系統之氣候風險因素，探討位於敏感區之暴露因素、設施本身脆弱性之脆弱因素，以及在高溫、強降雨等不同氣候壓力因素影響下，透過氣候風險評估方法指認風險缺口及可能造成之氣候衝擊，如坡災、淹水、

軌道挫曲等，並研提適用於該鐵道系統之調適選項(如保護、調整、搬遷、NbS 等)<sup>[20]</sup>。



資料來源：[14]

圖 6 氣候衝擊鏈分析圖示例

此外，考量鐵路系統為基礎運輸路網，肩負連結其他各項運輸系統的功能，面臨全球暖化導致的氣候變遷，極端天氣事件頻率增加，鐵道系統與其他運輸系統介面處亦可能因受到衝擊而失能，導致其他運輸系統服務中斷，因此針對鐵道系統之間及鐵道跨其他運輸系統處之強化調適介面整合機制，亦應進行探討。

另因不同鐵道系統服務範圍不同，如高鐵及臺鐵屬城際運輸，捷運、輕軌屬都會型運輸，在風險評估尺度及面臨氣候變遷衝擊即因服務範圍不同而有所差異。且各鐵道系統所在區位、設施形式、利害關係人之差異，受氣候變遷衝擊及相關調適作法亦有所差異。因此在後續鐵道系統強化調適能力之探討 3 年合作計畫，除鐵道系統共通性指導原則外，針對不同鐵道系統，也將區分為高鐵、臺鐵及捷運、輕軌兩類，分 2 年期個別進行細部探討。

### 3.2 研究工項規劃

為強化鐵道運輸管理機關(構)之調適能力，本所規劃辦理 3 年期鐵道系統強化調適能力相關研究，並產製一套鐵道系統強化調適能力指引，提供鐵道管理機關(構)辦理設施調適之參考。本研究透過蒐集探討國外鐵道系統調適相關研究，以及本所 2021 年至 2023 年公路系統規劃階段強化調適能力研究之探討課題及研究成果，規劃鐵道系統強化調適能力探討合作計畫 3 年期之分年計畫方向。

第 1 年期將通案性探討整體鐵道系統，透過蒐集國外鐵道系統調適相關文獻，了解鐵道系統強化調適能力作法，並依國內不同鐵道系統(含高鐵、臺鐵、捷運、輕軌)特性，探討氣候變遷衝擊影響鐵道系統韌性強度之因素，以及強化調適能力之機制與方法；第 2 年期將規劃調適指引架構，並針對鐵道系統之高鐵及臺鐵進行探討，以及其跨運輸系統之介面衝擊影響；第 3 年期將針對鐵道系統之捷運及輕軌進行探討，以及其跨運輸系統之介面衝擊影響，並完成鐵道系統強化調適能力指引及提出應用建議。

另合作計畫 3 年期主要工作項目初步規劃建議如下：

#### 1. 第 1 年主要工作項目

- 蒐集國外運輸系統氣候變遷調適相關文獻，研析運輸系統調適發展方向及趨勢，包含鐵道系統強化調適能力文獻、新科技應用調適情形、運輸系統調適案例等，並提出參考建議。
- 蒐集國內鐵道系統(含高鐵、臺鐵、捷運、輕軌)調適方法，探討氣候變遷衝擊影響鐵道系統韌性強度之因素。
- 研提鐵道系統因應氣候變遷強化調適能力之機制與方法。
- 規劃及辦理鐵道系統調適方法教育訓練。

#### 2. 第 2 年主要工作項目

- 蒐集文獻資料，研擬規劃鐵道系統(含高鐵、臺鐵、捷運、輕軌)調適指引章節架構。
- 研析高鐵與臺鐵強化調適能力作為。

- 研提高鐵及臺鐵之指引內容及應用案例研析。
- 探討氣候變遷對鐵道系統(臺鐵與高鐵)跨系統界面衝擊影響，提出溝通協調機制之建議。
- 規劃及辦理鐵道系統(臺鐵與高鐵)調適方法與案例教育訓練。

### 3. 第3年主要工作項目

- 研析捷運與輕軌強化調適能力作為。
- 研提捷運與輕軌之指引內容及應用案例研析。
- 探討氣候變遷對鐵道系統(捷運與輕軌)跨系統界面衝擊影響，提出溝通協調機制之建議。
- 綜整前一年度成果，完成鐵道系統調適指引，並提出指引應用建議。
- 規劃及辦理鐵道系統(捷運與輕軌)調適方法與案例教育訓練。

## 四、結論與建議

### 4.1 結論

1. 因應氣候變遷對運輸系統之衝擊影響加劇，本所前期已完成公路系統規劃階段強化調適能力探討。考量鐵道系統亦為重要維生基礎設施之一，且鐵道系統涉及運、工、機、電調適課題更為複雜，為強化鐵道運輸管理機關(構)之調適能力，爰有必要辦理鐵道系統強化調適能力探討之合作計畫，研提鐵道系統強化調適能力指引及相關應用案例，提供鐵道管理機關(構)辦理設施調適之參考應用。
2. 透過文獻回顧，本研究釐清氣候變遷對鐵道系統影響的風險因素，包括降雨強度增加或頻率提高，導致平原低窪地區淹水、山區面臨邊坡滑動和崩塌的威脅，以及河谷沖蝕加劇可能危及鐵軌路基，進而造成鐵道系統中斷；高溫可能導致軌道挫曲、強風可能導致架空電車線受損或列車翻覆、海平面上升或暴潮將沖蝕路基或造成淹水，這些影響亦將對鐵道系統的營運帶來巨大衝擊。
3. 本研究綜整國外(如美國、英國與日本等)鐵道系統調適相關文獻

資料，以及本所前期公路系統規劃階段強化調適能力之研究成果，另考量不同鐵道系統(高鐵、臺鐵、捷運、輕軌)服務範圍不同，如高鐵及臺鐵屬城際運輸，捷運、輕軌屬都會型區域運輸，在風險評估尺度及面臨氣候變遷衝擊即因服務範圍不同而有所差異等，爰規劃未來 3 年鐵道系統強化調適能力探討合作計畫之計畫方向，說明如下：

- (1) 第 1 年期將通案性探討整體鐵道系統，透過文獻蒐集研析，探討國內外鐵道系統強化調適能力作法，包括新科技應用、相關調適案例等，並依國內不同鐵道系統(含高鐵、臺鐵、捷運、輕軌)特性，探討氣候變遷衝擊影響鐵道系統韌性強度之因素，研提鐵道系統因應氣候變遷強化調適能力之機制與方法。
- (2) 第 2 年期將規劃調適指引架構，研析高鐵與臺鐵強化調適能力作為，研提高鐵與臺鐵指引內容及應用案例研析。
- (3) 第 3 年期將研析捷運與輕軌強化調適能力作為，研提捷運與輕軌指引內容及應用案例研析，並完成鐵道系統強化調適能力指引及提出應用建議。

## 4.2 建議

1. 鐵道建設投資、營運、維護成本相當龐大，且具有沉沒成本特性，一旦投資建設完成，改變或遷移成本高昂。建議在鐵道建設規劃階段(含新建及改建)即需以全生命週期的觀點，探討系統在規劃、設計、施工及後續的養護管理各階段的作業需要，預為考量以提高系統之氣候韌性。針對現在已營運階段之鐵道系統，亦應進行風險評估，針對風險熱點及調適缺口預為因應，提升系統之調適能力。
2. 本所 2021 年至 2023 年已辦理完成公路系統規劃階段強化調適能力之研究計畫，相關研究課題成果可提供鐵道系統強化調適能力研究計畫參考，但因系統不同(如鐵道車輛需行駛於固定鐵道上；車輛行駛需行車控制系統、號誌系統、通訊系統配合等)、設施衝

擊類型不同(軌道、道碴、架空電車線、行車號誌)，氣候變遷衝擊影響方式及調適作法也不盡相同，因此公路系統調適研究成果不能完全引用。此外，不同鐵道系統服務範圍不同，且各鐵道系統所在區位、設施形式、利害關係人之差異，受氣候變遷衝擊及相關調適作法亦有所不同。因此，雖本所後續辦理鐵道系統強化調適能力探討合作計畫，將研提上位且通案性之鐵道系統強化調適能力指引，惟各鐵道單位應用時，建議仍需就不同鐵道系統之特性，更進一步深入個別探討。

3. 有鑑於新科技發展日新月異，建議鐵道系統未來相關調適作法也可尋求新材料或新工法，例如更透水的鋪面材料以減少水患、有效抑制升溫的塗料以防護高溫等。另也可以利用創新數位應用技術，協助運輸系統設施管理機關(構)在運輸系統構建前即預先掌握長期氣候風險及早採取避險與風險分散等管理作為。

## 參考資料

- [1] IPCC, Sixth Assessment Report- The Physical Science Basis, 2021.
- [2] 國科會、中央研究院環境變遷研究中心、交通部中央氣象署、臺灣師範大學地球科學系、國家災害防救科技中心，IPCC 氣候變遷第六次評估報告之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告，110 年 8 月。
- [3] 環境部，國家因應氣候變遷行動綱領，106 年 2 月。
- [4] 張有恆，現代運輸學[5 版]，110 年 1 月。
- [5] 交通部運輸研究所，2046 年我國軌道運輸發展願景，107 年 6 月。
- [6] 楊正君等，從全生命週期觀點探討軌道建設計劃之營運評估，國土及公共治理季刊，第 7 卷第 3 期，108 年 9 月。
- [7] <https://www.rb.gov.tw/showpage.php?lmenuid=3&tmenuid=93#gsc.tab=0>，交通部鐵道局網站(最後查詢日期：113 年 3 月 3 日)。
- [8] 臺鐵公司報告書，113 年 1 月。
- [9] 臺北都會區大眾捷運系統環狀線北環段及南環段暨周邊土地開發計畫可行性研究，臺北市政府捷運工程局，106 年 1 月。
- [10] <https://www.ntmetro.com.tw/basic/?mode=detail&node=34>，請問輕軌和捷運有什麼不同，新北捷運網站
- [11] Legislative Analyst's Office, Climate Change Impacts Across California Transportation, 2022.
- [12] B. P. Arkell and G. J. C. Darch, Impact of climate change on London's transport network, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer, Volume 159, Issue 4, 2006.
- [13] 國家氣候變遷調適行動計畫(112-115 年)(核定本)，112 年 9 月



- [14] 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  
(2/2)－強化調適能力作為與指引(期末定稿本)，111 年 12 月。
- [15] Japan International Cooperation Agency, Guidance on Climate Risk  
Assessment and Adaptation, 2019.
- [16] Federal Railroad Administration, Rail Moving America Forward,  
2019.
- [17] U.S. Department of Transportation, Low Solar Absorption Coating for  
Reducing Rail Temperature and Preventing Buckling, 2018.
- [18] Olivia Devan, TrackWater: Optimising railway drainage maintenance  
using IoT sensors, PWI Journal, Volume 137 Part 2, 2019.
- [19] IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability,  
2022.
- [20] 交通部鐵道局，前瞻基礎建設計畫-軌道建設推動規劃與成效，  
台灣經濟論衡，111 年。