

鐵公路氣候變遷調適行動方案之研究¹

RESEARCH OF CLIMATE CHANGE ADAPTATION ACTION PLAN OF RAILWAY AND HIGHWAY SYSTEMS

李仕勤 Shih-Chin Lee²

朱珮芸 Pei-Yun Chu³

曾佩如 Pei-Ju Tseng⁴

任雅婷 Ya-Ting Jen⁵

戴子純 Tzu-Chun Dai⁶

吳清如 Ching-Ru Wu⁷

(107 年 6 月 22 日收稿，107 年 11 月 2 日第 1 次修改，107 年 12 月 9 日第 2 次修改，
107 年 12 月 20 日定稿)

摘 要

行政院為提升並健全臺灣面對氣候變遷的調適能力，分別於 101 年及 103 年核定《國家氣候變遷調適政策綱領》與「國家氣候變遷調適行動計畫(102-106 年)」。另外，環保署依 104 年核定的《溫室氣體減量及管理法》擬訂《國家因應氣候變遷行動綱領》。依據上述綱領，運輸設施屬於維生基礎設施，調適目標為提升其因應氣候變遷之調適能力。在運輸設施中，鐵公路系統為重要維生基礎設施，對於國家經濟發展及民眾生活影響甚鉅。因氣候變遷衝擊日漸加劇，鐵公路系統受影響的風險不斷升高，設施調適能

-
1. 本文為交通部運輸研究所因應氣候變遷調適議題系列研究階段成果。
 2. 交通部運輸研究所綜合技術組副研究員(聯絡地址：10548 臺北市松山區敦化北路 240 號 9 樓；電話：02-23496876；E-mail: lee@iot.gov.tw)。
 3. 交通部運輸研究所綜合技術組副組長。
 4. 交通部運輸研究所綜合技術組組長。
 5. 鼎漢國際工程顧問股份有限公司規劃師。
 6. 鼎漢國際工程顧問股份有限公司副理。
 7. 鼎漢國際工程顧問股份有限公司副總經理。

力之提升至關重要。基於上述背景，本研究首先回顧國內外在鐵公路因應氣候變遷調適上之專注重點，其次，透過鐵公路風險地圖辨識高風險鐵路路段特性，進而訪談鐵公路管理機關了解其當前與未來規劃之調適作為，綜合上述資訊，分析與辨識調適缺口並研擬調適行動方案建議。研究成果可作為鐵公路研擬調適行動方案之參考。

關鍵詞： 鐵公路；氣候變遷；調適；行動方案

ABSTRACT

In order to strengthen Taiwan's adaptation capability, the Executive Yuan ratified "The Adaptation Strategies to Climate Change in Taiwan" and "The National Adaptation Action Plan to Climate Change (2013-2017)" in 2012 and 2014 respectively. In addition, the Environmental Protection Administration formulated "The National Climate Change Action Guidelines" in response to "The Greenhouse Gas Reduction and Management Action" promulgated in 2015. Under the "Guidelines", transportation infrastructures are classified as critical infrastructures. Among the transportation infrastructures, the railway and highway systems are essential systems for the nation's economy and people's everyday life, and it is important to ensure their resilience to climate change. This research reviewed national and international adaptation strategies, used the risk map to identify risk hotspots and interviewed railway and highway administration about their current and future adaptation measures to address adaptation issues and suggested adaptation action plan accordingly. The suggested actions plans act as reference for highway and railway administrations in drafting their adaptation action plans.

Key Words: *Railway and highway; Climate change; Adaptation; Action plan*

一、前 言

氣候變遷的主要現象包含氣溫上升、降雨型態改變、海平面上升、極端氣候事件發生的強度與頻率升高等，上述現象對鐵公路設施可能造成的衝擊包括公路鋪面隆起、鐵軌挫曲、邊坡崩塌、運輸場站與場站聯外道路淹水等，因而造成交通中斷，影響經濟與民眾生活。

為因應氣候變遷所產生之衝擊，國內與國際間近年來均積極發展風險評估方法、調適策略與調適行動計畫，藉以提升鐵公路設施面臨氣候變遷之調適能力。我國行政院亦分別於 101 年及 103 年核定《國家氣候變遷調適政策綱領》及「國家氣候變遷調適行動計畫(102-106 年)」。另外，環保署依 104 年核定的《溫室氣體減量及管理法》(以下簡稱《溫管法》)擬訂《國家因應氣候變遷行動綱領》。依據綱領，鐵公路被定義為維生基礎設施，

其政策內涵為提升設施之調適能力，而鐵公路之管理機關需研擬對應之調適行動方案。

欲研擬提升鐵公路設施調適能力之調適行動方案，需先釐清鐵公路設施面臨之最主要氣候變遷衝擊。根據交通部運輸研究所（以下簡稱運研所）^[1]之研究，鐵公路主要面臨之衝擊包含淹水與坡災。另外，也需釐清鐵公路可能受到影響的設施路段特性，以利本研究聚焦研擬對應之調適行動方案。

綜理上文，本研究首先回顧國內外調適策略上之重點；其次，應用鐵公路風險地圖辨識高風險路段之特性，並考量鐵公路管理機關當前已在執行之調適策略以及對於未來調適之規劃，最後，綜整上述分析，辨識調適缺口，對鐵公路設施提出建議之調適行動方案。

本文分為六節，除於本節說明研究背景與動機外，第二節回顧國內外之調適策略與相關研究，並分析我國可借鏡處，此一分析有助於本研究研提調適行動方案建議。第三節說明調適行動方案之研擬方法，包含風險地圖檢視、機關調適作為之分析方法等。第四節首先說明風險地圖主要高風險路段之分布特性，其次，綜整鐵公路管理機關在調適作為上之內容，提出調適缺口。第五節則提出鐵公路調適行動方案建議。第六節綜結本研究之成果，進行結論與建議。

二、國內外鐵公路氣候變遷調適重點回顧

為掌握全球氣候變遷調適計畫及發展趨勢，回顧國內外鐵公路氣候變遷調適策略與相關研究。回顧之對象包含美國、愛爾蘭、日本等。回顧內容包括鐵公路的氣候變遷調適方案研擬程序與重點，以及調適方案納入評估決策制定執行優先順序之做法；國內則回顧相關政策與運研所的調適系列研究案，包含脆弱度與風險評估方法。

2.1 調適策略重點

2.1.1 美國預警應變

美國聯邦運輸部 (U.S. Department of Transportation, DOT) 在 2014 年出版更新的「氣候調適計畫：確保設施與系統回復力」(Climate Adaptation Plan: Ensuring Transportation Infrastructure and System Resilience)^[2]，提供各運輸系統管理機關將調適策略納入相關建設計畫、營運與政策的指導原則，以持續提供民眾快速、安全、便利、高可及性的運輸服務。在氣候變遷下，具彈性 (flexibility) 的規劃與決策程序較過往更為重要，以因應不穩定的氣候對鐵公路設施產生的各種程度的影響。DOT 辨識氣候變遷對鐵公路設施的影響包含：

1. 因強降雨、海平面上升、暴風雨等事件頻率上升，造成地下隧道與低窪鐵公路設施淹水頻率的增加；
2. 海平面上升與暴風雨強度的增加縮短鐵公路設施的生命週期 (life cycle)；
3. 高溫與熱浪造成公路鋪面膨脹，進而導致公路龜裂並縮短設施生命週期；

4. 公路與橋梁為承受溫升與暴風雨需要高額的維護與建設成本；
5. 高溫造成瀝青公路龜裂並縮短其重置週期，導致交通中斷、壅塞與維護成本增加；
6. 強降雨或霜雪融化損害排水系統與暗溝 (culvert)，影響其排水效率；
7. 高溫造成鐵軌挫曲，造成鐵路服務中斷、車輛脫軌、影響旅行時間。

為因應上述衝擊，DOT 研擬 3 大優先調適策略，以提升設施回復力：

1. 規劃 (planning)：DOT 將確保聯邦運輸投資計畫決策程序中，將州運輸與都市運輸規劃是否有納入氣候變做為決策重點，以保障運輸系統可因應氣候變遷；
2. 資產管理 (asset management)：將氣候變遷變因與影響納入資產管理，所屬機關應評估其資產管理計畫的政策、準則與成效並納入氣候相關因子；
3. 工具 (tool)：DOT 將提供氣候變遷影響納入運輸決策所需之工具、案例分析、績效評估、最佳典範 (best practice) 等供所屬機關參考。

DOT 因應氣候變遷衝擊之政策為「將氣候調適策略納入運輸任務、計畫及操作中」。所有直屬機關皆有將氣候變遷衝擊納入既有系統及未來投資之責任。其中，FHWA 負責建造、維護國家公路、橋梁及隧道，並提供州及地方政府相關技術支援。FHWA 在 2010-2011 年與地方交通局合作執行「氣候變遷回復力示範計畫 (Climate Change Resilience Pilots)」^[3]，該計畫的目的為「建立美國公路系統氣候變遷衝擊及極端天氣事件下之脆弱度及風險評估架構，並發展調適方案」，2013-2015 年持續在 19 州執行回復力示範計畫。

2.1.2 愛爾蘭

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)」^[4]，其研擬之調適策略依氣候事件所產生之影響為基礎，短期調適策略以低成本之機制降低已知風險路段之脆弱度，中長期則需更多研究與成本效益評估，以評估調適計畫執行之優先順序；其鐵公路之調適策略重點包含：

1. 公路

改善公路服務品質、嚴謹記錄氣候事件於資料庫以進行數據分析與預測、評估公路改善計畫之成本效益等，其他的公路調適策略重點包含：

- (1) 辨認風險熱點並研提調適行動計畫，包含系統定時監測與立即改善機制；
- (2) 確保未來交通建設在規劃與建設階段皆將調適概念納入考量；
- (3) 持續編列預算進行調適相關研究，並確保研究結果有實質效益；
- (4) 持續與歐洲道路主管機關會議 (Conference of European Directors of Roads) 的氣候變遷技術小組進行技術交流；
- (5) 規劃與布建智慧運輸系統 (ITS)，提供用路者即時的氣候資訊，並與地區機關合作，以蒐集地區道路之氣候資訊；

- (6) 建立極端氣候小組座談會 (Severe Weather Group Forum)，以利運輸部門的利害關係人相互合作與溝通。

2. 鐵路

鐵路之調適策略重點包含後續研究課題、資料蒐集技術提升、決策支援系統與監測系統等提升：

- (1) 淹水頻率的增長對暗溝、橋墩、車輛、場站、軌道等設施影響劇烈，目前所蒐集之數據與 GIS 圖資並未區分淹水的類別，透過更全面蒐集淹水事件之辨別與影響，可研擬更完善之中長期調適策略；
- (2) 透過淹水風險地圖了解既有與未來之淹水風險地點，以研擬中長期調適策略；
- (3) 開發決策支援系統，評估海平面上升與暴雨對軌道之影響；
- (4) 評估修復因海岸侵蝕而受影響之軌道；
- (5) 持續投資軌道遠端監測系統，以管理資產。

2.1.3 日本

日本國土交通省於 2015 年發布「氣候變遷調適計畫 (国土交通省氣候變動適應計畫)」^[5]，參考英國、美國與澳洲的調適計畫內容，提出交通所面臨的課題以及調適策略。調適計畫以 10 年為規劃原則，將重點放在維護民眾生命財產安全、確保交通設施與系統可支持社會與經濟活動，以及維護民眾生活品質。調適策略重點考量包含：

1. 調適措施應具彈性：因氣候變遷與氣候預測存在不確定性 (uncertainty)，應發展一套可因應社會經濟發展情況與氣候改變情況調整的調適策略；
2. 將既有防災作為納入調適措施，改善其內容與執行強度；
3. 調適策略的擬定應考量未來的氣候變遷，而目前已執行的調適措施也會對未來的氣候變遷情境有影響，需一併考量；
4. 因氣候變遷所產生的影響複雜度高且因地區特性而有不同影響，應考量軟、硬體的搭配，如資訊傳遞、災害監視等，在資訊傳遞上，建置 ICT 系統，利用風險地圖針對高風險地區進行土地使用與居住人數的調整，並輔導當地居民具備調適概念與災害應變能力，降低地區危害度；
5. 為全方面且有效地執行調適措施，個案計畫應將氣候變遷納入考量，並逐漸改善交通設施的調適能力；
6. 透過生態工法進行調適，並在開發交通建設時考量地區生態多樣性，維護環境永續，透過增加透水鋪面，改善景觀與執行生態復育，達到降溫的效果，減少高溫的影響；
7. 因各地區地理特性與社會經濟上的差異，交通設施所面臨的脆弱度與暴露度亦有差異，調適策略應考量各地區居民與產業進行研擬。

2.2 調適策略納入審議與決策機制

目前我國在鐵公路計畫的審議機制與決策上，並未充分考量氣候變遷的衝擊，審議階段普遍以財務及經濟效益指標作為計畫推動優先順序之依據。由於調適類型計畫主要功能在於管控長期重大氣候變遷風險，雖然調適計畫不易凸顯立即、直接的經濟與財務績效，但其重要性與社會公益性顯已不容忽視。因此，本研究回顧美國與歐盟在調適計畫之審議機制，以及將調適個案計畫納入交通建設計畫編擬及決策體系，作為調適行動方案研擬之借鏡參考。

2.2.1 美國

美國運輸部發布之「調適方案決策評估程序」(Adaptation Decision-Making Assessment Process, ADAP)^[6]，提供決策者評估最適合之建設計畫，以生命週期成本、設施回復力、管理與行政組織等面向進行評估。ADAP 可用於評估既有設施在氣候變遷預測下的敏感度、新建計畫的設計等。ADAP 應於計畫規劃階段時採用，以確保決策者選取最合乎成本效益之方案，並定期檢視評估之分析與結論，以確保調適計畫符合現況發展，因土地使用與社會經濟之改變、氣候預測之精準、工程技術之進步等，皆對調適方案的經濟效益有所影響。ADAP 之設計可用於各種規模的公路設施改善與新建計畫。

2.2.2 歐盟

歐盟 WEATHER 計畫^[7] 判定使用一般的成本效益分析評估調適策略的經濟效益為不可行，主要的原因係：

1. 成本效益資料從缺，調適計畫之成本效益受地區情況影響，也因調適計畫之執行程度而產生差異，而估算需更深入的規劃與設計方可達到目的；
2. 氣候變遷規劃年期達 40 年到 50 年，要比一般規劃期更為遙遠，導致各種社經預測都趨於模糊與不確定；
3. 調適目標通常並非許多計畫執行之主要目的。

基於上述目標，歐盟採取較高等級之評估方法，以多準則評估方法，訂定 5 類評估準則，採用定量分級方式加以評估，以納入決策支援體系。成本係指運輸系統相關的調適計畫投資與營運成本，質化分級分為 4 級，0 為無成本、1 為低成本、2 為顯著的成本、3 為需多方面考量之高成本。外部效益分為正面與負面，調適所帶來之外部效益皆顯示為正面，包含提升車輛技術帶來之交通安全改善與能源使用減少。另外，透過調整土地使用，可提高生物多樣性並增加綠覆率等。可行性之評估亦分為 4 級，主要以技術成熟度與民眾接受度為主要評定基準。系統彈性之評估基準則為地區所面對之氣候災害強度。多準則評估需要多位專家意見以彌補成本與效益數據缺乏的情況，透過 5 大面向的評估，優先執行高得分的調適措施，以最大化調適措施效益。評估準則與分級簡述如表 1。

表 1 歐盟採用之調適策略評估準則

評估準則	分級	說明
成本	0~3	生命週期成本(可能無法預估)
效益	0~3	災害風險減輕程度
可行性	0~3	民眾接受度與技術成熟度
系統彈性	0~3	對於不同災害強度的調適彈性
外部效益	-3 ~+3	對於環境與社會造成之衝擊

資料來源：[7]。

2.3 我國調適作為

2.3.1 國家氣候變遷行動計畫 (102 年-106 年) —維生基礎設施領域行動方案

我國的維生基礎設施領域^[8] 包含供電系統、供油系統、供氣系統、供水及水利系統、交通系統與通訊系統。其中，交通系統在維生系統內扮演重要的三重角色：(1) 交通系統本身便是維生系統之重要元素；(2) 公路系統擔任其他維生系統輸配管線之備援系統；(3) 災害期間維生系統之修復與救援有賴暢通的聯外公路設施。因此，交通系統之調適行動方案，除維持交通本身所需擔任之維生功能外，其他重要維生系統之聯外公路系統，是否能夠在災害期間提供備援或維持修復之功能，也是鐵公路系統調適行動方案之重要考量。

1. 鐵公路設施脆弱度

鐵公路設施之脆弱度以暴露度、敏感度與適應力等 3 種指標綜合計算；分別就上述 3 個指標找出造成其值太高或太低的原因作為調適之課題，進一步找出結果產出的作用機制或關鍵因素，據以擬定具體可行且有效的調適措施。

因鐵公路設施大都建設於平原、山區及海邊，長期曝露於外在惡質環境中，故各項設施均屬高暴露度評等。在敏感度上，其他供油、供電與供水的維生基礎設施，仰賴交通設施作為供應運輸的功能，如果設施損壞，在災難發生時將導致人員及物資補給困難。在適應力上，雖交通設施已具備安全檢查與營運維護機制，但因氣候持續變動，外在環境持續變化，交通設施的適應力經評估後皆為中等。

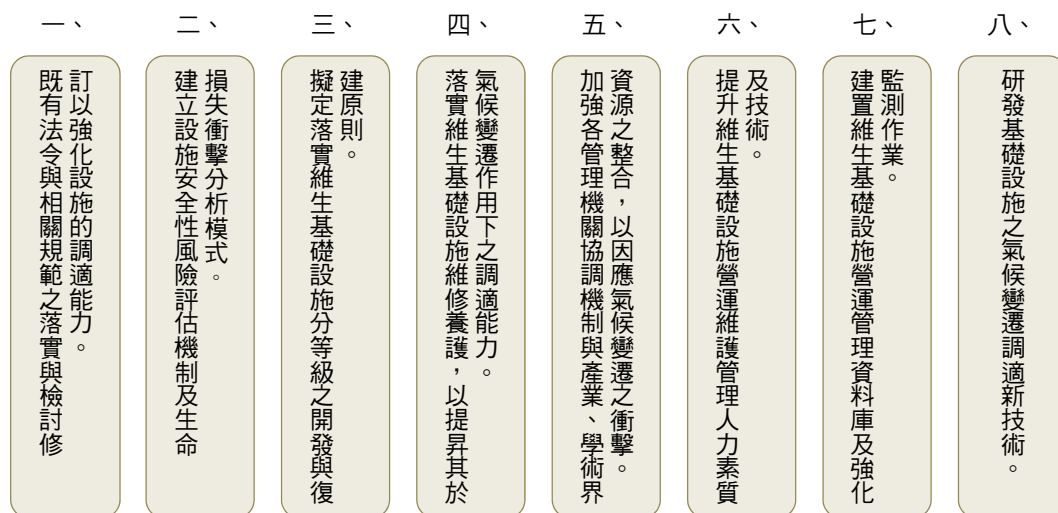
許多鐵公路建設係沿河谷而開鑿構築，歷年來在暴雨的作用下，一方面因為緊鄰山壁，因此容易受到邊坡滑動崩塌的威脅，另一方面也常因河谷的沖蝕加劇而危及道路路基，造成鐵公路系統的中斷。除了邊坡滑動與路基掏刷之外，氣候變遷導致降雨強度增強與頻率增加，基礎設施所承受之外部作用力較過往更為強烈，影響設施之回復力，並造成道路淹水，影響交通系統的正常運作。另外，橋梁多半為跨河構造物，在洪水來襲時必須承受嚴峻的挑戰。若河川之上游易發生洪水、土石流等災害，則對下游之河川跨越橋而言，

其橋墩、橋面版易遭洪水、土石流沖毀或淹埋。同時位於山區邊坡易致災處之橋梁，也易因邊坡災害而阻斷，甚至壓毀橋梁。

理想狀況下，煉油廠、電廠、天然氣接收站、水庫、通訊基地台之聯外公路系統的淹水或坡災應維持較低風險，較能確保災害期間或之後能提供較通暢之服務，俾使修復或救援行動能夠順利進行。此外，機場與港口之正常營運也須仰賴其聯外運輸系統之正常運轉。

2. 調適行動計畫

依據「國家氣候變遷調適策略政策綱領」對維生基礎設施研擬之 8 大調適策略（如圖 1）及 16 項調適措施，相關機關應依據各維生系統之特性，研擬調適策略、目標、措施與對應之行動計畫。



資料來源：[8]。

圖 1 維生基礎設施調適策略

2.3.2 國家因應氣候變遷行動綱領 (106 年)

行政院環保署依 104 年公布施行之《溫管法》^[9] 第 13 條，擬訂《國家因應氣候變遷行動綱領》^[10] 及施政之總方針。行動綱領之訂定基本遵循「巴黎協定」，強調決策公開透明、財務機制建立、預警能力建構、氣候變遷認知提升等。綱領的願景為：「制定氣候變遷調適策略，降低與管理溫室氣體排放，建構能適應氣候風險之綠色低碳家園，確保國家永續發展」。其調適目標為強化我國面對氣候變遷之調適能力，以降低脆弱度，並強化韌性。與調適相關之原則如下：

1. 決策制定與落實公開透明，並考量各種環境議題的共同效益，在最低成本精神下，推動溫室氣體減量及氣候變遷調適策略。
2. 政府政策與個案開發行為，應將氣候變遷調適及減緩策略納入環境影響評估考量。

3. 強化科學基礎，建構全面預警能力，提升因應氣候變遷之調適作為及建構回復力發展。
4. 建立中央及地方政府夥伴關係、公私部門協力關係及溝通平台，具體推動在地化之調適及減緩工作。
5. 提升全民氣候變遷認知及技能，並積極協助民間團體推展相關活動及事項。

針對氣候變遷調適所研擬之策略面向包含：加強災害風險評估與治理、提升維生基礎設施韌性、確保水資源供需平衡與效能、確保國土安全，強化整合管理、防範海岸災害，確保永續海洋資源、提升能源供給及產業之調適能力、確保農業生產及維護生物多樣性、強化醫療衛生及防疫系統，提升健康風險管理等，鐵公路系統係屬提升維生基礎設施韌性面。

2.3.3 運研所系列研究

運研所自 102 年開始進行有關氣候變遷與運輸系統關聯的系列研究，整體研究參考國內外有關氣候變遷脆弱度及風險評估之研究文獻與經驗做法，聚焦於對重大鐵公路系統衝擊較大之氣候變遷影響因子—「降雨型態改變」，進行鐵公路系統脆弱度及風險分析，建立脆弱度及風險地圖。

相關計畫^[1,11] 參考國外之風險定義及水利署對氣候變遷下之水資源、淹水、土砂等災害風險評估，研擬風險評估方法。其中，脆弱度定義為潛在影響程度及設施調適能力之函數，以路段交通量與產值作為潛在影響程度指標，另以設施安全性、預警應變作為、替代道路數等，作為設施調適能力指標；危害度則考量設施本身型式及設施區位在不同降雨情境下，造成之坡地崩塌機率以及淹水危害程度作為災害潛勢分級；最後透過風險矩陣，評估各運輸設施在不同氣候變遷情境下之風險程度（如圖 2）。

104 年研究成果採用對稱式風險矩陣且設定各項指標權重均等，然而經檢視全臺設施可發現，在偏遠地區之產值及交通量較低，易有低估風險之可能，因此在考量區域公平性的原則下，「氣候變遷運輸設施風險評估暨風險資訊進階服務計畫」^[12] 檢討風險評估方法與風險評估指標，進行評估方法的強化與評估指標的調整，精進風險評估結果與精準度。

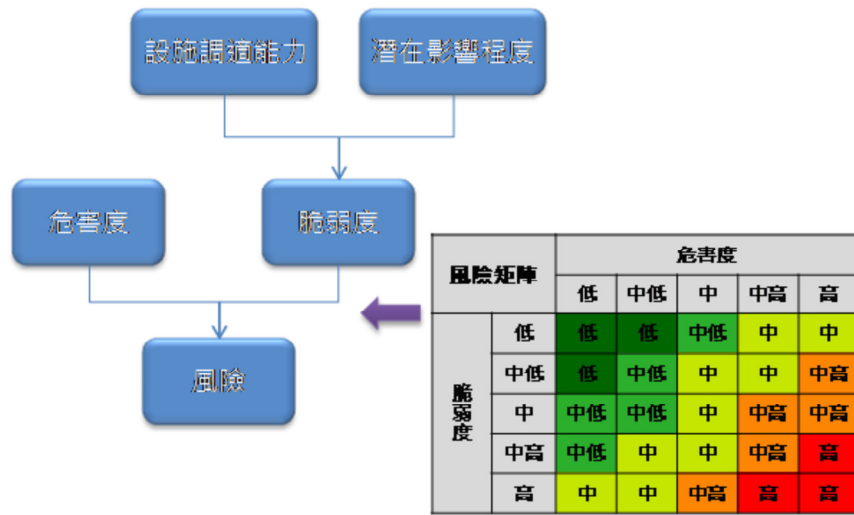
105 年計畫將風險矩陣調整偏向危害度，使高危害度路段得以適度被突顯；而為配合鐵公路管理機關對於有效型與公平型不同計畫考量，在各指標計算公式中均納入權重概念。

另外，考量脆弱度因子中的設施調適能力具有正向涵義，因而將原本負向表述之設施調適能力各指標，包含設施安全性、替代道路數及預警應變作為等，皆調整為正向表述。最後，在計算脆弱度因子時，再將設施調適能力指標等級進行轉換。相關指標如下各式：

$$\text{淹水／坡災風險} = f(\text{淹水／坡災危害度}, \text{脆弱度}) \quad (1)$$

$$\text{淹水／坡災危害度} = f(\text{淹水／坡災潛勢}, \text{淹水／坡災設施型式}) \quad (2)$$

$$\text{淹水／坡災脆弱度} = \text{Round}(\text{潛在影響程度} \times W6 + (6 - \text{淹水／坡災設施調適能力}) \times W7) \quad (3)$$



資料來源：[11]。

圖 2 風險評估流程與風險矩陣

其中：

$$\text{潛在影響程度} = \text{Round}(\text{產值} \times W1 + \text{交通量} \times W2) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{淹水／坡災設施調適能力} = & \text{Round}(\text{淹水／坡災設施安全性} \times W3 + \\ & \text{淹水／坡災預警應變作為} \times W4 + \text{替代道路數} \times W5) \end{aligned} \quad (5)$$

2.4 小結

本研究回顧國外調適策略，可發現各國所面臨之氣候變遷課題差異不大，大多國家皆將重點放在公、私部門與利害關係人間的合作與共識凝聚，以達到資源整合，有效落實調適計畫。此外，也將調適概念與交通建設相關計畫的各部門計畫整合，達到全面的調適。國外在短期計畫著重於低成本且可立即執行之計畫，中長期計畫則透過經濟效益評估決定計畫執行之優先性。因氣候變遷影響具不確定性，故國外的調適計畫皆強調計畫的彈性，以利計畫可因應環境之改變調整，持續達到調適效益。此外，許多國家也在調適策略中強化監測、資訊傳遞與預警應變之作為。

調適納入決策體系上，國外之做法係透過經濟評估後將調適計畫納入決策系統，以利編列預算與執行，美國公路總局的 ADAP 除了考量調適計畫經濟效益外，亦考量其他因素，如環境影響、民意等，並非單純考量效益評估之結果，以確保公益性。

綜言之，國外調適策略之研擬共有兩步驟的評估作業，第一步是發展風險評估指標，從大範圍的眾多道路設施中，篩選出高風險設施，作為優先改善標的。對於較重大的優先改善標的，須透過詳盡的工程方案分析，利用調適策略評估程序，方能選出最符合地區所

需的調適方案。一般至少會經過成本效益分析，但許多地區也會要求使用多準則評估或成本效果分析。

我國在面臨氣候變遷上，與國外同樣面臨強降雨、坡災等事件，造成鐵公路淹水、土石流阻斷交通、車站本身與其聯外道路阻斷等。經由國外的文獻回顧，可發現國外相當重視利害關係人之參與，透過與利害關係人合作與溝通，可進一步理解氣候變遷對區域的衝擊，並加強相關數據資料的蒐集效果；另外，在調適納入決策體系上，國外也積極透過質化結合量化之方式評估調適計畫之執行效益，較我國僅考量經濟效益的做法更為全面，亦為我國可借鏡處。

三、氣候變遷調適行動方案研擬方法

為較全面地了解鐵公路面臨氣候變遷下的調適缺口，以利研擬可提高設施回復力之調適行動方案建議，透過國外文獻回顧、風險地圖資料之蒐集與分析、鐵公路主管機關之訪談等方法，進行調適缺口分析與歸納並研擬方案，調適行動方案研擬流程如圖 3 所示；以下說明本研究之研究範疇與研究方法。

3.1 研究範疇界定

本研究所指之鐵公路系統係涵蓋國道、省道快速公路、一般省道、臺鐵主線(不含支線)，以及高鐵。

3.2 研究架構

3.2.1 鐵公路高風險路段檢視

本研究首先透過檢視高風險的路段，根據運研所 105 年研究計畫「氣候變遷運輸設施風險評估暨風險資訊進階服務計畫」^[12] 完成的風險地圖，以氣候變遷情境 6 (取未來 200 年重現年降雨模擬結果之淹水／坡災潛勢，與 120 年產值、交通量，以及設施現況進行風險評估) 下的風險地圖為基礎，透過檢視風險熱點之區位分布及各項風險評估指標表現，包括危害度指標、影響脆弱度指標之潛在影響程度及設施調適能力 (包括設施安全性、替代道路數、預警應變作為等)，分別針對各重要鐵公路系統之中高以上風險熱點進行剖析，作為調適缺口分析之參考資訊，並針對風險易致災熱點進行致災成因調查。

3.2.2 鐵公路當前調適作為

透過檢視 102-106 年調適行動計畫之辦理情況，進一步訪談鐵公路主管機關，了解鐵路管理機關當前之調適策略與未來之調適計畫，以利本研究辨識相對缺乏之調適作為。

3.2.3 調適建議行動方案之研擬

透過風險地圖之中高風險熱點分析與致災成因調查，以及訪談鐵公路主管機關當前之調適作為與未來之規劃，辨識調適缺口，並透過文獻回顧之啟發與主管機關之未來構想，研擬調適行動方案之建議。

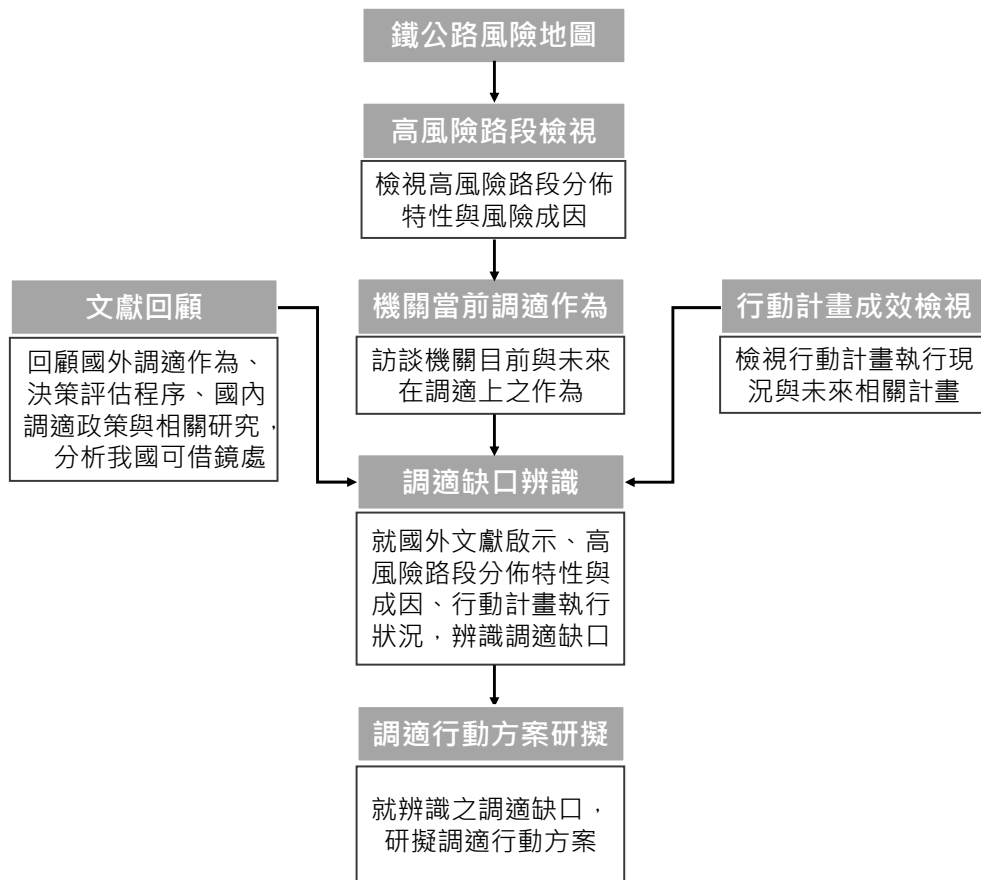


圖 3 調適行動方案研擬流程

四、調適缺口辨識成果

4.1 鐵公路高風險路段特性

鐵公路之淹水風險熱點累計里程均較坡災風險熱點長，且淹水風險熱點大多集中分布在西部地區縣市，東部則以宜蘭縣居多；坡災風險熱點則主要分布於山區及東部地區。承此分布特性，淹水風險熱點的潛在影響程度普遍較高（服務鄉鎮之產值及路線之日通過交通量大），坡災風險熱點則大多屬於中級以下潛在影響程度。然而，由於坡災排除與修復所

需時間與成本，往往較淹水災害來得長且大（特別是位於山區及東部地區之省道及臺鐵風險熱點），加上坡災風險熱點之替代道路數普遍稀少，一旦發生阻斷，即可能致使沿線聚落成為救災孤島。基於上述考量，縱使坡災風險熱點之潛在影響程度較小，但在未來的調適策略上，仍建議應優先改善設施防災能力，並設法縮短修復所需時間。而淹水風險熱點方面，則因災害排除與修復所需時間相對較短，因此在調適策略上或許應優先提升預警應變能力，透過採取災前預警應變作為，設法將災害發生時所可能受影響的程度（交通量）降低。

根據危害度指標（透過設施型式與淹水潛勢、坡災潛勢（崩塌機率）共同衡量），風險熱點所在之環境條件普遍不佳，其中淹水風險熱點大多位在淹水潛勢 1 公尺以上地區，且其設施型式均屬於平面或地下；坡災風險熱點所在地區的崩塌機率則都在 0.6 以上。基於上述特性，在未來的調適策略上除了應加強養護（巡查、監測等）外，與氣候變遷調適相關的設計規範及既有設施的防災能力，亦應將氣候變遷因素加以納入考量進行檢討或改善，以強化對高危害度的適應性。

在所處環境條件普遍不佳的情況下，致使淹水或坡災發生的癥結經常不是僅來自鐵公路設施本身那麼單純，如淹水問題往往尚與區域排水及周邊河川水系有關，坡災則與上端水土保持相關。在此特性下，如欲妥善改善災害的發生，勢必將涉及許多相關單位的協調與整合，例如水利署、地方政府、林務局、水保局…等。基此，建議未來應針對災害影響範圍較大或重複性致災熱點進行致災成因調查，並進行相關改善作為協調分工，同時強化跨單位間的協調整合機制，以助於確實提升災害管理及改善成效。

國道淹水風險熱點約有半數係位於交流道，臺鐵及高鐵亦有部分車站屬於淹水風險熱點，這些交流道與車站雖然有多數在實際上並非屬於平面型式，但由於設施之進出仍需仰賴車站聯外道路，因此即使車站本身不具淹水風險，一旦聯外道路發生積淹，系統服務同樣無法被正常使用，換言之，多數交流道及鐵路車站淹水風險熱點的問題係來自聯外道路。基於以上特性，未來應加強與設施聯外道路主管機關的溝通協調，合作強化聯外道路因應氣候變遷的調適能力，減少交流道及鐵路車站因聯外道路積淹問題而無法使用情形。

4.2 調適行動計畫成效檢視

透過檢視調適行動方案之成效，可以了解計畫之執行並研擬滾動精進之做法。鐵公路主管機關負責執行之行動計畫計有 10 項，有 6 項已執行完畢，1 項尚執行中，其餘 3 項則採另案執行之方式辦理；目前已執行完成的行動計畫多為鐵公路設施的規範建立或檢討（如高鐵局執行訂定「鐵路橋梁耐震設計性能規範（草案）」、公路總局執行「公路排水設計規範因應氣候變遷檢討服務計畫」）、風險評估（如臺鐵局執行「建置鐵路邊坡管理系統」納入鐵路安全行車 6 年計畫（104-109 年）辦理）以及監測管理等（如公路總局執行「公路防救災資訊系統維護管理及功能擴充服務」），以資料蒐集分析與工具準備作業為主，尚少涉及實際的設施調適工程或工法。

4.3 鐵公路管理機關調適措施重點

透過訪談鐵公路主管機關以進一步了解其當前之調適作為與對未來之規劃構想，以利提高調適建議行動方案對鐵公路主管機關之參考價值。以下綜理主管機關當前之調適作為：

1. 「維生基礎設施調適行動方案 (102-106) 年」為已執行完成的計畫，係以資料蒐集分析與工具準備作業為主，尚少涉及實際的設施調適工程。
2. 各鐵公路管理機關內部均已設有因應氣候變遷防災管理之相關單位，惟大多屬於任務編組；針對跨單位之防災管理或改善亦已建立協調機制與平台，惟來自路權外之致災成因改善分工協調不易，致使災害問題難以有效改善。
3. 各鐵公路管理機關於設施維護改善及推動氣候變遷調適時，均已導入「全生命週期」及「山河路橋共治」的概念。公路總局及臺鐵局近年更採取「與災害共存」方式，針對目前尚無法直接消除致災成因的災害熱點進行相關改善。
4. 目前除鐵道局尚在進行邊坡調查及分級外，其他單位均已採邊坡分級管理；針對風險熱點大多已設有監控或監測設施及防災預警機制。此外，機關普遍已辦理防災演練、教育訓練及防災相關手冊，部分機關更已建置設施維護管理系統、防救災資訊系統。風險及災害資訊傳遞方面，多透過媒體發布，部分單位更利用資訊看版、行動應用程式 (app)、細胞廣播服務 (CBS) 主動通知民眾。
5. 各鐵公路管理機關之未來調適措施重點，除了持續推動既有作為並維護既有監控、監測等設施功能外，亦多擬朝向更科技化之監測與管理方向發展，期藉此提升效率及預警準確性。

4.4 調適缺口辨識成果

綜合上述鐵公路高風險路段之分布特色，及調適計畫之執行成效與鐵公路主管機關當前與未來規劃之調適作為，並借鏡國外之調適策略，本研究分析與辨識下列鐵公路調適缺口。

1. 缺口 1：當前風險評估考量之災害類型與影響範疇相對單純

風險評估乃是研擬調適策略前的重要工作，有鑑於氣候變遷日益劇烈，對鐵公路系統帶來之威脅與衝擊亦日漸增加，為幫助各鐵公路管理機關能更快速全面掌握各系統在氣候變遷環境下的潛藏風險，運研所遂自 102 年起著手研究並建立全臺重要鐵公路氣候變遷風險評估方法，主要係聚焦於強降雨所帶來之淹水災害及坡災兩大類。然而就臺灣之氣候及地理環境而言，面臨之氣候變遷災害並不僅止於強降雨，可能還包括高溫、海平面上升、颱風帶來之暴風與暴潮等類型，而觀諸國外氣候變遷風險評估考量之風險，亦可發現經常含括高溫、海平面上升、強風等災害型態。此外，根據相關訪談及專家學者座談會所獲得之資訊指出，強降雨對鐵公路系統帶來的衝擊除了淹水與坡災之外，更重要的威脅乃是對橋梁造成的沖刷，惟既有風險評估範疇中並未考量此項目。

2. 缺口 2：風險評估方法與風險評估指標仍有強化空間

在風險評估指標上，目前運研所建立之風險評估方法，主要採用聯合國政府間氣候變遷委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 公布之 AR5 的方法，由「危害度」及「脆弱度」兩大指標共同評估而來。危害度指標主要係以「淹水/坡災潛勢」及「設施型式」進行分級；脆弱度指標則包括「潛在影響程度」及「設施調適能力」兩大次指標，藉由權重加權方式計算而得。其中「潛在影響程度」分別考量路段所在之鄉/鎮/市/區「產值水準」及路段本身之「交通量」；「設施調適能力」則根據設施本身的「設施安全性」、「替代道路數」及「預警應變作為」等現況進行評判。

根據文獻回顧，可知國外先進國家於進行氣候變遷風險評估時，大多會有利害關係人共同參與，我國對於利害關係人之參與則相對缺乏。此外，目前在風險評估上，亦有部分鐵公路系統在某些評估指標上存在資料不齊全之問題，對評估造成限制。

3. 缺口 3：缺乏氣候變遷調適計畫之評估工具

調適計畫之執行優先性需考量成本與效益，在極端氣候所致之災害發生頻率日益頻繁，衝擊程度也日漸提升的環境下，氣候變遷調適計畫的重要性及必要性也隨之增加，然而受到氣候變遷調適成本與效益估計不易等限制，目前國內的計畫審議決策過程大多未將調適成本納入考量，調適效益亦尚未有明確的估算方法，致使調適計畫的必要性不易具體表述，進而影響調適類計畫的推動與落實。反觀國外先進國家之作法，除了低成本且可立即執行之調適計畫會優先於短期執行外，中長期計畫大多會透過方案的評估決策機制來決定推動的優先性。根據文獻回顧之綜整，國外常見之評估方法包括「成本效益分析法」、「成本效果分析法」、「多準則評估法」等，而採用之評估因子則大多包含投資成本、社會/環境效益等，以上做法均可作為未來我國參考借鏡之方向。

4. 缺口 4：與既有設施結構物之安全性評估方法與標準有待建立

隨著氣候變遷程度日漸加劇，為確保既有鐵公路之耐洪/耐沖刷、防洪、排水能力足以承擔氣候變遷帶來的衝擊，各相關單位均應定期針對既有設施結構物的安全性進行檢視及管理。根據本研究至鐵公路相關單位之訪談，各單位普遍都會針對既有設施進行安全性檢視及管理，然而各單位的檢視頻率、檢測方法與標準均各不相同，因此對於既有設施在氣候變遷衝擊下的安全性確保程度與效果亦將有所差距。

5. 缺口 5：氣候變遷風險管理設備之效能與設置有待定期檢討

各鐵公路管理機關為確保系統服務安全無虞，於沿線高風險路段均設有相關的監控及監測設施等風險管理設備，例如 CCTV、雨量計、傾斜儀、變位感應器、風速計等。由於上述風險管理設備均有其耐用年限，使用過程中亦可能產生故障問題，因此有必要定期檢視確認設備之效能是否正常發揮。此外，根據以往經驗，高風險路段之數量與所在位置，經常會在災害侵襲後發生改變，因此亦有必要定期檢討上述風險管理設備之設置點位，以確實達到風險監控的目的。

6. 缺口 6：應強化建立風險管理相關標準作業程序

風險管理為氣候變遷調適的核心重點，如何透過管理方式將風險降低，為氣候變遷調適的重要課題。根據本研究之資料蒐集與訪談，國內鐵公路管理機關在近年歷經幾次重大氣候災害後，大多建立了災前、災中及災後相關的風險管理標準作業程序，例如採取封橋封路標準作業程序、雨量觀測指標及應變標準作業程序（注意／警戒／行動應變基準）、8-10 級風力應變標準等，而各單位普遍亦編有養護手冊，其中對於設施的巡查、檢測及監測內容等多有規範，惟規範的完整性及嚴謹度各不相同，例如部分單位分別針對巡查、檢測及監測的方式、頻率、項目、注意事項等內容，提供明確規範及檢查表格（鐵道局、高速公路局、公路總局）。

7. 缺口 7：氣候變遷風險管理效率有待提升

部分鐵公路管理機關為提升風險管理效率，於近年建置相關的智慧化資訊管理系統，例如公路總局之公路防救災資訊系統、高公局之邊坡全生命週期維護管理系統、高鐵公司之防災資訊系統（DPGIS）等；部分單位於此方面則相對缺乏。然而，即使不少單位已建置相關的資訊管理系統，但各機關建置系統之功能不盡相同。未來，各鐵公路管理機關除了可相互參考借鏡彼此的風險管理資訊系統外，隨著系統技術之進步，亦均有持續優化及擴充功能的空間。此外，根據實務經驗，部分災害風險熱點所在位置不易進行人工巡查、巡檢，進而導致風險管理及災害成因調查不易，此時則可利用相關之新技術進行風險管理並提升效率，例如利用無人航空載具（UAV）、空載光學雷達（Lidar）等。

8. 缺口 8：機關內普遍缺乏氣候變遷風險管理專責單位或人員

目前國內各鐵公路管理機關內，均設有可因應氣候變遷災害的中心或小組，然而上述組織性質均屬於臨時任務編組，而此種組織型態就機關內部之人力運用上，雖然具有相對彈性的優點，但對於重要經驗的傳承，卻相對容易隨著時間及人員的更迭而逐漸淡化甚至消逝，人才也因之容易產生斷層，將不利於氣候變遷調適的推動與落實。另一方面，調適的核心重點係為風險管理，但鐵公路管理機關內部人員背景多以土木工程為主，對於風險辨識、風險評估及改善策略的概念與能力的厚實度或將相對不足；而在缺乏氣候變遷職系與升遷制度的體制環境下，亦無法吸引並留住具備風險管理專業之人才，不利於氣候變遷人才庫的建立。

9. 缺口 9：氣候變遷災害之潛在影響程度（暴露度）應設法最小化

目前運研所建立之鐵公路氣候變遷風險評估方法，係由「危害度」及「脆弱度」兩大指標共同評估而來，其中危害度指標係以「淹水／坡災潛勢」及「設施型式」進行分級；脆弱度指標則包括「潛在影響程度」及「設施調適能力」兩大次指標，藉由權重加權方式計算而得。經由上述風險評估方法之說明，可知「潛在影響程度」係為影響風險高低之重要關鍵因子，而如何透過災害發生前的預警及災害發生時的應變來最小化潛在影響程度，即為氣候變遷調適的重要課題之一。為能降低氣候變遷災害之潛在影響程度，各鐵公路管理機關大多建置有防災預警設備與機制，例如高鐵公司之天然災害告警系統（DWS），即針對邊坡滑動、地震、落石等災害提供即時告警功能（與自動列車控制系統連結）；公路總局則已可掌握降雨量與臺 9 線邊坡崩塌之關係，透過預警性封路，大幅降低災害來襲當下

的潛在影響程度(暴露度)，目前則進一步進行落石預警研究；臺鐵局則於曾發生過災害的路段設置預警系統，惟整體而言仍以人工通報方式為主。此外，各單位於每年汛期來臨前均會進行相關災害的兵推與實兵演練，以強化災害實際發生時的應變能力。風險資訊傳遞方面，各單位多透過媒體發布風險及災害訊息，部分單位則進一步利用資訊看版(CMS)、行動 App、細胞廣播服務(CBS)等傳遞訊息，藉此提高預警效果。

10. 缺口 10：設施防災能力是否足以承擔氣候變遷衝擊有待商榷

部分鐵公路系統設施之設計年期較早，例如國道 1 號臺中以北路段及國道 8 號、臺鐵西部幹線、省道臺 2 線、臺 7 線、臺 9 線、臺 12 線、臺 14 線…等。由於設計年期較早，容易存在不符合橋梁治理計畫之問題，且當初的防洪、耐洪/耐沖刷或排水設計標準相對較低，在氣候變遷日異嚴重的環境下，上述設施的防災能力恐將不足以抵擋強降雨帶來的相關災害衝擊。另一方面，氣候變遷係於 1990 年代開始在國際間被探討與重視，國內則自民國 99 年起才積極重視並著手建立「國家氣候變遷調適政策綱領」，因此，當前鐵公路設施之相關設計及養護規範，大多尚未將氣候變遷情境納入考量，部分規範內容亦不符合氣候變遷下的因應需求。然而，對於新建設施而言，如欲達到全面調適，則必須有全生命週期的考量，亦即於規劃、設計、興建及維護等各階段，都應該考量如何因應氣候變遷之衝擊，以確保設施的調適能力足以對抗未來的氣候變化；上述概念已落實在日本國土交通省的氣候變遷調適計畫(2015 年)。

11. 缺口 11：鐵公路氣候變遷調適技術有待持續與時俱進

科技的發展日新月異，加上國內至晚近才開始重視氣候變遷議題，因此鐵公路在因應氣候變遷的技術面上，尚存有頗大的研發空間。根據本研究訪談得知，各鐵公路管理機關於近年已逐漸重視有助於因應氣候變遷的相關技術應用，對於未來的調適作為，也都期望朝向更科技化與智慧化方向發展。例如不少鐵公路管理機關，均應用地理資訊系統來協助快速掌握災害資訊；高速公路局更結合雲端技術開發「邊坡全生命週期維護管理系統」；公路總局未來則擬進一步採用多音束量測技術測量橋梁淘刷程度，並研究發展落石預警系統。有鑑於科技發展一日千里，未來如能加強對新技術的掌握，並加以運用於鐵公路氣候變遷調適上，必定可提高鐵公路的調適能力，降低氣候變遷所可能帶來的風險。

12. 缺口 12：既有系統及防災設施有待持續維護並提升

鐵公路系統於面對氣候變遷衝擊時的設施韌性，係與設施本身的健全狀態有關，例如路基、邊坡、橋墩之穩定度等，因此有必要持續維護，並視需要予以補強或改善。除此之外，各鐵公路管理機關為確保系統具有一定程度之防災能力，於系統沿線均配置有相關的防災設施，其中用於防範淹水災害之相關防災設施包括排水設施、防水閘門、機械排水設備、人工溼地／滯洪池等；用於防範坡災災害之相關防災設施則有擋土牆、擋土排椿、坡面格梁／地錨／土釘、落石防護柵(網)、明隧道等。由於上述防災設施均有其耐用年限，而每當經歷過天然災害的侵襲後，亦均可能造成設施之損耗，因此有必要定期檢視確認設施之狀況是否仍然堪用，並且依檢視結果給予適當之維護或補強。

13. 缺口 13：與災害共存精神有待加強落實

國內的工程建設在過去有一段很長的時間，係秉持著人定勝天的思維進行維運，然而就在山區地質環境的脆弱性因 921 地震摧殘而提升後，加上近年多個帶來嚴重強降雨的風災侵襲影響，進而使得山崩及土石鬆動狀況更為嚴重，致使部分災害熱點經常出現重複致災的情形，讓國內各工程界開始思考並逐漸朝向順應自然的方式發展。儘管鐵公路管理機關在工程建設思維上已開始有所調整，但由於目前尚屬調整初期，因此仍有許多可進一步加強落實的空間。此外，受限於鐵公路部分設計規範尚未融入與災害共存概念所產生之限制，也使得鐵公路管理機關在執行氣候變遷調適作為時相對缺乏彈性。

14. 缺口 14：部分災點已無法避免持續發生災害

由於部分鐵公路路段行經之環境條件過於敏感脆弱，幾乎每逢豪大雨或風災侵襲，即必定發生嚴重程度不等之災害，例如臺 9 線南澳至和平路段，不僅嚴重影響交通運輸服務的安全性與可靠度，每年投入修復的人力與成本亦相當可觀。針對具有上述特性且旅運需求達一定程度以上之災害熱點，建議於未來可評估採取改線或遷站的方式因應。

15. 缺口 15：鐵公路氣候變遷調適之跨域協作與救災支援能力有待強化

鐵公路系統所面臨的淹水或坡災問題成因，往往不單純只是來自系統本身，有時甚至主要來自路權範圍外，例如內水積淹型的淹水問題主要係與下游區域排水容量有關；河川橋樑沖刷問題則與河川之整治相關；部分大型邊坡坍滑問題之主要成因，則與鐵公路路權範圍上方之山坡地治理有關，而上述問題之權責單位，至少將涉及水利署、農委會、林務局、地方政府等，顯見鐵公路氣候變遷調適的推動與落實過程，極需要跨域之間的協作。

五、調適行動方案研擬

調適行動方案依據上述辨識之缺口進行研擬，共分為評估工具面、風險管理面、設施韌性面、災後復建面及跨域整合面等 5 大面向，各面向之建議行動方案如下說明。

5.1 評估工具面

評估工具面包含風險評估之方法與可應用之協助工具，調適的缺口歸納與建議之行動方案說明如下：

1. 缺口 1：當前風險評估考量之災害類型與影響範疇相對單純

(1) 建議行動方案 1-1：擴大考量鐵公路系統於氣候變遷下的風險範疇

針對以上缺口說明，本研究建議未來應擴大考量鐵公路系統於氣候變遷下所面對的風險範疇，例如強降雨造成之橋梁沖刷、高溫、海平面上升、颱風帶來之暴風與暴潮等，以期能更全面考量氣候變遷對鐵公路系統所可能帶來的衝擊與威脅。

(2) 建議行動方案 1-2：持續研究氣候變遷所可能帶來的災害課題

考量調適需求會因氣候環境、氣候科學、鐵公路相關技術等條件而改變，建議後續可持續研究氣候變遷所可能帶來的災害課題，以利未來能依研究結果，持續將鐵公路在氣候變遷下所可能面臨的風險課題納入風險評估中。

2. 缺口 2：風險評估方法與風險評估指標仍有強化空間

(1) 建議行動方案 2-1：精進鐵公路氣候變遷風險評估方法及風險評估指標

建議未來可加強考量相關利害關係人之影響與其參與（如高風險淹水／坡災路段對周邊居民之影響，以及居民對該路段風險管理之了解與相關看法）；風險評估指標方面，則建議定期參酌國內外值得借鏡之作法，持續精進指標項目及設定方式。

(2) 建議行動方案 2-2：持續建立鐵公路氣候變遷調適資料庫

為協助鐵公路的風險地圖可每年定期更新，同時也為幫助評估指標之精進，以期使風險評估結果能更精確，建議鐵公路相關管理機關未來除應持續蒐集整理既有評估指標所需之相關資料外，亦應著手建立有助於提升風險評估結果之相關資料庫，例如設施高程、崩塌或淹水機率模擬等。

3. 缺口 3：缺乏氣候變遷調適計畫之評估工具

(1) 建議行動方案 3-1：研擬鐵公路氣候變遷調適計畫投資評估方法，並開發相關輔助工具

為期能具體呈現調適計畫之效益，以凸顯調適計畫的必要性，建議交通部著手研擬鐵公路氣候變遷調適計畫的計畫投資評估方法，並編擬相關手冊及應用軟體等輔助工具，作為鐵公路管理機關提出調適計畫或方案時之參考與運用。

(2) 建議行動方案 3-2：持續建立鐵公路氣候變遷調適資料庫

根據國內外經驗，編擬計畫投資評估手冊需要眾多數據資料作為支持基礎，例如相關投資建設成本、災害風險降低所帶來的社會或環境效益價值等，而以上數據資料均有賴相關單位之持續建立，因此建議相關單位應著手蒐集建設單位成本、歷次災害相關資料，如系統阻斷時間長短、生命財產損失、修復方式與成本等。

4. 缺口 4：既有設施結構物之安全性評估方法與標準有待建立

建議行動方案 4-1：制定既有設施結構物之安全性評估方法與標準

儘管不同鐵公路系統之設施結構物特性不盡相同，各單位之人力與預算條件亦有所差異，加上設施安全性檢測的技術不斷進步，為強化設施安全性檢測結果的可靠度，除建議各鐵公路管理機關未來能針對檢測方法與標準進行經驗交流外，更建議建立既有設施安全性的評估方法與標準。

5.2 風險管理面

風險管理面係管理辨識出的風險，將其影響與成本最小化，調適的缺口歸納與建議之行動方案說明如下：

1. 缺口 5：氣候變遷風險管理設備之效能與設置有待定期檢討

(1) 建議行動方案 5-1：定期體檢氣候變遷風險管理設備效能

建議鐵公路管理機關應針對相關風險管理設備之效能進行定期體檢，並依體檢結果給予適當的維護或更新。

(2) 建議行動方案 5-2：辦理邊坡、河川等環境安全調查與風險管理

為能持續並加強掌握鐵公路系統所處環境之安全狀態，建議應持續辦理邊坡、河川等環境安全相關調查，並進行相關的檢測、監測，以作為建置或擴充風險管理設備，以及是否有必要提升設施防災能力之重要參據。

(3) 建議行動方案 5-3：建置或擴充氣候變遷風險管理設備

鐵公路管理機關應配合風險評估及環境安全調查結果或實際災害發生情形，調整或增設風險管理設備。

2. 缺口 6：應強化建立風險管理相關標準作業程序

建議行動方案 6-1：建立風險管理相關標準作業程序

由於風險管理的成效與設施之巡查、檢測、監測制度，以及相關風險管理作業的完整性、嚴謹度、標準化有相當密切的關係，故建議上述制度與作業規範未臻完備的鐵公路管理機關，未來應加速建立相關標準作業程序，以提升風險管理的成效。

3. 缺口 7：氣候變遷風險管理效率有待提升

(1) 建議行動方案 7-1：規劃建置風險管理支援工具

綜合以上缺口說明，建議尚未建置風險管理支援工具之鐵公路管理機關於未來加速建置，已有相關管理系統之機關，則可持續優化及擴充系統功能。

(2) 建議行動方案 7-2：風險管理設備智慧化、自動化

為加強提升風險管理效率，相關之監測設備可逐步朝向自動化、智慧化方向發展，例如應用無人航空載具、空載光學雷達等技術、採用線上即時回報系統等。

4. 缺口 8：機關內普遍缺乏氣候變遷風險管理專責單位或人員

(1) 建議行動方案 8-1：成立氣候變遷調適專責單位

為改善上述臨時任務編組之缺點，促進氣候變遷調適工作的推動與落實，建議鐵公路管理機關未來可嘗試成立專責單位，單位之主要工作項目建議除了執行災害應變外，尚可包含辨識與納入最適之調適計畫、調適計畫納入預算申請、監督培訓與溝通需求、辨識與執行研究課題等。

(2) 建議行動方案 8-2：提升相關人員之氣候變遷風險管理概念與能力

為能全面提升風險辨識、風險評估及改善策略的概念與能力，建議教育部規劃氣候變遷調適相關教程，加強氣候變遷概念紮根；交通部則可持續針對河橋共治及坡地防災等議題，定期或不定期辦理研討會，向鐵公路管理機關介紹最新之國內外經驗及研究成果；鐵公路管理機關則應持續透過教育訓練加強經驗傳承，提升內部人員的相關知識與專業素質。

(3) 建議行動方案 8-3：建立氣候變遷相關職系制度

為能加強吸引並留住具備風險管理專業之人才，建議考試院於未來制定氣候變遷風險管理職缺及完整升遷制度，藉此促進鐵公路管理機關推動及落實氣候變遷工作的專業量能，並有助於累積國內氣候變遷人才庫。

5. 缺口 9：氣候變遷災害之潛在影響程度（暴露度）應設法最小化

(1) 建議行動方案 9-1：提升防災預警應變能力與效率

災前預警及災中應變能力效率的高低與影響對象及程度的大小為高度負相關，建議鐵公路管理機關於未來應設法提升防災預警應變能力與效率。相關作法除了持續辦理防災相關演練外，亦可視需求適度提升預警應變所需人力及裝備能量。同時也建議針對災害發生機率進行研究，以利用研究成果提升預警行動的成效；防災預警設施或系統及風險訊息傳遞方面，則可朝向自動化、即時化發展，例如採用自動防水閘門、災害即時告警系統、細胞廣播服務 (CBS) 或行動 App 等，以提升預警應變效率。

(2) 建議行動方案 9-2：規劃防災避難場所及替代路線、替代運具

避難場所及替代路線、替代運具的提供，有助於降低災害發生當下的影響程度，因此建議鐵公路管理機關應針對災害熱點，規劃防災避難場所及替代路線與替代運具，藉此將可能的傷害程度降到最低。

(3) 建議行動方案 9-3：加強與利害關係人（民眾）的溝通與教育

預警應變行動除了鐵公路管理機關的執行外，亦需要民眾的支持與配合，為能讓民眾了解與災害共存的防災思維，未來應加強與相關民眾的溝通及教育，讓民眾了解在氣候變遷的情況下，與災害共存以及與水共存的必要性。

5.3 設施韌性面

設施韌性面為設施在氣候變遷衝擊下仍可維持其功能之能力，調適的缺口歸納與建議之行動方案說明如下：

1. 缺口 10：設施防災能力是否足以承擔氣候變遷衝擊有待商榷

(1) 建議行動方案 10-1：辦理鐵公路設施耐洪／耐沖刷、防洪、排水能力之體檢、評估及改善

考量鐵公路部分設施設計年期較早，為確認路段之排水、橋梁之耐洪、地下段之防洪能力，是否足以承擔氣候變遷衝擊，建議鐵公路管理機關應定期針對設計年期較早之風險熱點，進行設施排水、耐洪、防洪能力之總體檢，尤其曾發生災害的重點橋梁或路段更應加強檢測，並進行安全性評估，最後根據評估結果進行相關改善，以確保設施之防災能力。

(2) 建議行動方案 10-2：鐵公路建設之規劃、設計、建造及養護，應將氣候變遷情境納入考量

為使鐵公路系統在氣候變遷下能達到全面調適，同時參考先進國家之作法，建議未來鐵公路建設的規劃、設計、建造及養護等階段，均應將氣候變遷情境納入考量，例如在規劃階段之選址，即應考量地質敏感程度；橋梁方面更應考慮整個流域與橋梁的關係（上游是否有土石流），以盡量降低未來可能面臨的氣候變遷衝擊程度，而方案評估亦應將調適成本納入考量，以確實反應計畫的投入。設計規範方面，除了建議提高設計標準，亦建議檢討部分規範內容，調整過往人定勝天的思維，加強融入與災害共存的概念，讓鐵公路管理機關在執行氣候變遷調適作為時能更有彈性。

2. 缺口 11：鐵公路氣候變遷調適技術有待持續與時俱進

(1) 建議行動方案 11-1：應用氣候變遷調適新知識、新技術

建議鐵公路管理機關應持續關注與氣候變遷調適相關之研究與技術，並設法應用於系統的調適作為上，藉此提升系統調適能力。

(2) 建議行動方案 11-2：編列充足預算執行調適新技術之研發

根據文獻回顧，國外先進國家在氣候變遷調適上除了應用新科技外，亦多會針對有助於強化氣候變遷調適之議題與技術，進行相關研究與開發。例如日本國土交通省之氣候變遷調適計畫（2015 年），即指出未來將開發土石流預警機制，並研究堤防新技術（提升設施防洪能力）及預防與減緩海岸侵蝕新技術…等。考量相關議題的研究與新技術的開發，往往需要投入大量的時間與人力，而國內目前已有運研所進行相關氣候變遷與橋梁冲刷等研究，但礙於經費之編列，部分重要研究計畫與新技術研發計畫有一定的執行困難。建議交通部於未來可針對交通運輸技術及氣候變遷調適之新技術投入鐵公路氣候變遷調適方面之相關研究，編列充足預算，以利相關新技術之研發。另外救災新技術的發展亦是一重要課題，如緊急救災橋的發展、發生重大災害時的救災機制與救災技術的發展、緊急應變時與民間的合作機制，以及在發生災後的通車的評估等，也是相關的重要課題；救災新技術的研發，可作為後續發展重點之一。

3. 缺口 12：既有系統及防災設施有待持續維護並提升

(1) 建議行動方案 12-1：行動方案定期體檢鐵公路系統既有防災設施

建議鐵公路管理機關應針對相關防災設施進行定期體檢，以確認設施狀況是否仍然堪用，以及是否仍足以因應氣候變遷衝擊。

(2) 建議行動方案 12-2：持續養護鐵公路系統及既有防災設施，並視需要提升防災能力

為期能延長防災設備之使用壽年，建議鐵公路管理機關應持續並確實進行養護工作，並根據定期體檢結果給予適當的翻新、修補或強化。此外，為維護鐵公路設施之安全，亦建議依據行動方案 2-1-2 之安全調查結果，針對路基、邊坡等施予適切的補強或改善。

5.4 災後復健面

災後修復為維持鐵公路系統功能之重點之一，但部分持續發生災害之路段應採取其他作為，調適的缺口歸納與建議之行動方案說明如下：

1. 缺口 13：與災害共存精神有待加強落實

(1) 建議行動方案 13-1：以降低設施標準方式建立中期復建機制

由於部分風險熱點的地質環境，在 921 地震及近年數個風災侵襲後呈現極度脆弱狀態，短期內恐無法回復到適合採取永久復建的條件，此時如採取永久復建的工程方式，除了修復時間長，所需成本龐大外，當下一次的災害來襲，極有可能再次發生落石或崩塌。承此特性下，建議此類災害熱點於未來可採取降低設施標準的方式修復，作為中期復建的手法，例如採用高時效、低成本的便道或便橋予以修復，提供基本通行功能，並輔以必要的時段或通行數量管理措施，以確保用路人安全。上述機制的建立與落實，除了各鐵公路管理機關的採行外，相關設計規範亦需要配合調整。初步建議應調整之規範包括公路路線設計規範、公路橋梁設計規範等。

(2) 建議行動方案 13-2：加強導入抑制／防護／防治工法

由於鐵公路管理機關在工程建設上的思維尚在持續調整，因此可發現近年鐵公路坡災高風險易致災熱點之修復及養護作為，仍以抑止工法為主。抑止工法之社會成本高，且相對屬於人定勝天概念之工法，在氣候變遷挑戰日益嚴峻的環境下，國內鐵公路未來的災後復建方式，宜加強導入相對順應自然而軟性且具有彈性的抑制、防護、防治工法，一方面藉此降低修復成本，另一方面也避免高強度的抑止工法再次對脆弱的自然環境造成過多的負擔。

2. 缺口 14：部分災點已無法避免持續發生災害

建議行動方案 14-1：重複性嚴重致災熱點改線或遷站

當既有鐵公路設施面臨高度氣候變遷風險，且經評估確認各種改善更新以及其他技術與材料運用皆無法有效調適時，應評估路線改線或場站遷建，以確保運輸之安全與可靠。

5.5 跨域整合面

調適需跨領域的整合，以提高執行之效用，調適的缺口歸納與建議之行動方案說明如下：

1. 缺口 15：鐵公路氣候變遷調適之跨域協作有待強化

(1) 建議行動方案 15-1：持續落實山河路橋共治

根據過往經驗，強降雨產生的逕流或洪水冲刷，為誘發坡災的主要成因，而不良的地質條件及不當的工程規劃與設計，則進一步影響山河路橋系統的穩定度，進而產生道路阻斷、橋梁毀損等問題。基於以上密切的交互影響關係，在鐵公路坡災調適行動上，必須持續落實山河路橋共治，方能達到長治久安，與自然環境共生的目標。

(2) 建議行動方案 15-2：提高鐵公路氣候變遷調適跨域協調平台層級

由上述缺口說明可知，鐵公路氣候變遷調適的推動與落實過程極需要跨域之間的協作，惟既有相關聯繫機制與協調平台之效果不盡理想，故建議未來應提高鐵公路氣候變遷調適跨域協調平台層級，以期能提升協調成效，確實達成調適作為的妥善分工與執行。

(3) 建議行動方案 15-3：配合推動排水系統與交通路網整合

儘管鐵公路系統遭遇的淹水問題大多與區域排水系統有關，根本的解決之道主要在於完善的流域整體治理，然而在氣候變遷影響下，不僅強降雨發生日益頻繁，降雨強度亦大幅提升，且時常創造歷史新高。考量流域綜合治理計畫的推動落實並非一蹴可及，排水系統容量之提升亦有其上限，為落實順應自然、與災害共存的精神，建議鐵公路系統未來可配合推動排水系統與交通路網之整合，利用交通島及路網沿線節點設施空間（如國道休息站、匝道等），增設生態滯留單元／雨水花園、植生溝、滲透側溝/滲透陰井等低衝擊開發設施（low impact development，LID），藉此減少雨水逕流，可助於延滯或改善內水積淹問題之發生。

(4) 建議行動方案 15-4：提升重要維生基礎設施災害救援路線防災能力

為確保交通系統以外之重要維生基礎設施的聯外救援路線，在日漸嚴峻的氣候變遷環境下，仍能提供穩定而可靠的聯外交通服務，避免因聯外救災路線阻斷，而延宕重要維生基礎設施的修復；建議未來應針對重要維生基礎設施之災害救援路線的防災能力等級予以提升。

六、結論與建議

6.1 結論

本研究係針對全國性鐵公路系統於氣候變遷的情境下，透過檢視鐵公路風險地圖，辨識高風險之路段，結合鐵公路主管機關之訪談，進行調適缺口分析與致災原因的蒐集，進一步參考國外氣候變遷調適的作為，據以辨識調適之缺口與研擬相對應之調適行動方案。本研究之調適行動方案建議，可作為鐵公路主管機關未來研擬新一期調適行動計畫之參考，逐步提高鐵公路設施面臨氣候變遷之調適能力，以保障民眾之日常生活與國家之經濟發展。本研究具體成果說明如下：

在調適策略的研擬上，各國所面臨之氣候變遷課題差異不大，大多國家皆將重點放在公、私部門與利害關係人間的合作與共識凝聚，以達成資源整合，有效落實調適計畫。另外也將調適概念與交通建設相關計畫的各部門計畫進行整合（如土地使用），達到全面性調適。多數國家之短期計畫著重於低成本且可立即執行，如道路排水改善、道路鋪面與鐵軌耐高溫等工程，中長期計畫則透過經濟效益評估，決定計畫執行之優先性。

國外針對調適策略部分，除了透過數據統計探討脆弱度外，更加入發展評估工具與程序納入決策體系之概念，例如美國紐約州評估脆弱調適方案後，透過工程與成本分析納入決策系統。又如美國加州亦透過關係人評估優先性及成本分析等不同階段的決策過程，將調適方案逐一篩選落實為調適行動計畫，再經工程與成本分析，選擇最佳調適方案。歐盟之做法則是使用多準則評估方法，以五大面向：成本、效益、外部效益、彈性與可行性等進行調適措施之評估，將得分高之計畫優先納入決策及編列預算，彌補調適計畫在計算經濟效益上缺乏可應用數據之問題。有關將調適納入決策體系方面，國外之作法係透過經濟評估後，將調適計畫納入決策系統，以利編列預算與執行。

本研究係利用運研所風險地圖研究成果，針對國內中高以上風險熱點進行分析，並針對高風險易致災熱點進行成因調查，同時檢視「維生基礎設施調適行動方案(102-106) 年」中，有關鐵公路設施相關計畫內容與執行成果，以及鐵公路管理機關目前所採取之相關調適措施，作為研提鐵公路氣候變遷調適行動方案建議之重要基礎。

各鐵公路系統淹水易致災成因以「內水積淹型」及「系統型」最為常見，此類淹水問題改善的關鍵單位大多不是鐵公路管理機關，未來如欲加強提升調適能力，必須強化與相關單位的協調與分工。坡災方面，可看出當前修復、養護方向多以抑止工法為主，抑制工法及迴避型工程則相對少見。

由參考文獻回顧歸納所得之重要經驗與啟示，並依據鐵公路管理機關當前採行的重要調適措施，及前期風險地圖之中高以上風險熱點評估指標特性，本研究歸納出當前鐵公路設施在氣候變遷下的重要調適缺口，並針對各項缺口提出行動方案建議。

針對氣候變遷調適行動方案，本研究共研擬完成 5 大面向（包含設施韌性面、評估工具面、風險管理面、災後復建面及跨域整合面）之建議調適行動方案。

6.2 建議

本研究所參考的鐵公路系統氣候變遷風險評估方法，僅聚焦於強降雨所帶來之淹水及坡災兩類災害，然就臺灣之氣候及地理環境而言，尚有許多面向的影響；而觀諸國外氣候變遷風險評估，可發現經常包括高溫、海平面上升、強風等災害型態。此外，根據相關訪談及專家學者座談會得知，強降雨對鐵公路系統除了帶來淹水與坡災外，更重要的威脅乃是對橋梁造成的沖刷傷害。綜上考量，建議未來可逐步擴大考量氣候變遷導致的其他災害種類，例如：高溫與溫升、海平面上升、颱風帶來之暴風與暴潮等，另外也建議考量強降雨與坡災對橋梁所造成之影響。本研究考量近年來溫升的狀況日益嚴重，對公路可能造成路面鋪面龜裂或隆起、柏油融化等影響，對於鐵路則可能造成鐵軌挫曲，爰建議未來應優先針對溫升之影響，進行相關風險與調適策略研究。

考量調適需求會因氣候環境、氣候科學、鐵公路相關技術等條件而改變，建議後續可持續研究氣候變遷所可能帶來的災害課題，以利未來依據研究結果，持續將鐵公路在氣候變遷下所可能面臨的風險課題納入風險評估中。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所，重大鐵公路建設氣候變遷風險評估機制與調適資訊平台之研究(1/2)，民國 105 年。
2. U.S. Department of Transportation, *Climate Adaptation Plan 2014*, 2014.
3. Federal Highway Administration, “Climate Change Resilience Pilots”, 2011.
4. Department of Transport, Tourism and Sport, “Developing Resilience to Climate Change in the Irish Transport Sector”, 2016.
5. Cabinet Decision of Japan, “National Plan for Adaptation to the Impacts of Climate Change”, 2015.
6. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, “Adaptation Decision-Making Assessment Process”, 2016.
7. European Commission, “WEATHER: Weather Extremes: Assessment of Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions”, project funded under the 7th framework program of the European Commission, 2012.
8. 交通部，國家氣候變遷調適行動計畫(102-106 年)－維生基礎設施領域行動方案，民國 103 年。
9. 行政院環境保護署，「溫室氣體減量及管理法專區」，<https://www.epa.gov.tw/ghgact/938F2CA57D9159C6>，民國 107 年。
10. 行政院環境保護署，國家因應氣候變遷行動綱領，民國 106 年。
11. 交通部運輸研究所，重大鐵公路建設氣候變遷風險評估機制與調適資訊平台之研究(2/2)，民國 106 年。
12. 交通部運輸研究所，氣候變遷運輸設施風險評估暨風險資訊進階服務計畫，民國 106 年。