

出國報告（出國類別：考察）

橋梁耐震、檢測及公路防災技術交流考察報告

服務機關：交通部高速公路局北區養護工程分局

姓名職稱：王昭明 副分局長

派赴國家：美國

出國期間：111年10月26日至111年11月4日

報告日期：112年1月20日

摘要

報告名稱：橋梁耐震、檢測及公路防災技術交流考察報告

主辦機關：交通部高速公路局

連絡人/電話：王昭明/02-27936555

出國人員：王昭明

出國類別：考察

出國地點：美國

出國期間：111 年 10 月 26 日至 111 年 11 月 4 日

分類號/目：H0/綜合類（交通）

關鍵詞：美國加州運輸署（California Department of Transportation, CADOT 簡稱 Caltrans）、橋梁檢測（Bridge Inspection）、橋梁檢測國家標準（National Bridge Inspection Standards, NBIS）

內容摘要：交通部高速公路局自民國 91 年起即與加州運輸署簽訂雙邊合作協議，除雙方人員交流互訪外，亦曾辦理「臺美公路與橋梁工程研討會」由雙方交通部層級官員共同與會進行交流，對於本國公路與橋梁工程技術提昇、臺灣國際能見度提昇，均有莫大助益。2022 年第三季以來，新冠疫情趨緩，國際交流逐漸活絡，爰在臺美雙邊既有合作協議架構下重啟技術交流，並進行第五次雙邊合作協議換約之討論。本次考察，包括傳統 I 型梁結構橋梁檢測、新型斜張橋新建及其設計理念、新修訂美國橋梁檢測國家標準等，均納入考察範圍。本次考察，特別感謝加州運輸署橋梁檢測南區辦公室趙青主任協助安排行程。

目錄

壹、目的	1
貳、考察行程	2
參、考察紀要	3
一、加州運輸署業務及 NBIS 簡介.....	3
(一) 加州運輸署南加州辦公室參訪	3
(二) NBIS (National Bridge Inspection Standards) 簡介	9
二、阿蒂西亞高架橋火害調查 (The Artitia OH, Fire damages and repairs)	11
三、第六街高架橋 (The Sixth Street Bridge) 改建現勘及經驗分享	14
四、傑拉德戴斯蒙大橋 (Gerald Desmond Bridge) 改建及檢測設施現勘	21
五、加州 39 號公路 31 英里處橋梁沖刷/耐震能力提升改建計畫現勘 (State Route 39 North Fork San Gabriel River Bridge Scour Migration/Seismic Retrofit)	30
肆、心得與建議	34
一、心得	34
二、建議	35
伍、附錄	
一、阿蒂西亞高架橋竣工圖	
二、阿蒂西亞高架橋 2021 年定期檢測紀錄	

壹、目的

交通部高速公路局自民國 91 年起即與加州運輸署簽訂雙邊合作協議 (Agreement on The Mutual Collaboration between California Department of Transportation and Taiwan Area National Freeway Bureau, Republic of China)，雙邊合作協議每期五年，迄今已四次換約。合作協議有效期間，除雙方人員交流互訪外，亦曾辦理「臺美公路與橋梁工程研討會」由雙方交通部層級官員共同與會進行交流，對於本國公路與橋梁工程技術提昇、臺灣國際能見度提昇，均有莫大助益。2022 年第三季以來，新冠疫情趨緩，國際交流逐漸活絡，爰在臺美雙邊既有合作協議架構下重啟技術交流，並進行第五次協議換約之討論。

貳、考察行程

自 2019 年末 Covid-19 新冠肺炎疫情席捲全球以來，各國均祭出移動管制、在家上班（working from home）等措施，防範疫情擴散。美國雖然自 2022 年中開始鬆綁相關管制措施，但大部分機關、公司行號，多數仍維持在家上班。本次考察，雖然事前已預排相關參訪行程，但受到加州運輸署員工多數仍維持在家上班影響，實際行程有所調整，如下表。

日期	星期	行程概述
臺灣時間 10/26	三	臺北飛洛杉磯
美國時間 10/26	三	下午抵達洛杉磯
美國時間 10/27	四	阿蒂西亞高架橋火害調查
美國時間 10/28	五	第六街高架橋（The Sixth Street Bridge）改建
美國時間 10/29	六	資料整理
美國時間 10/30	日	資料整理
美國時間 10/31	一	傑拉德戴斯蒙大橋改建及檢測設施現勘
美國時間 11/1	二	加州運輸署南加州辦公室參訪
美國時間 11/2	三	加州運輸署業務及美國橋樑檢測國家標準介紹
美國時間 11/3	四	加州 39 號公路 31 英里處橋梁沖刷/耐震能力提升改建計畫現勘及返臺
臺灣時間 11/4	五	返抵臺灣

參、考察紀要

一、加州運輸署業務及 NBIS 簡介

(一) 加州運輸署南加州辦公室參訪

加州政府的總部位於加州中北部的沙加緬度郡 (Sacramento County)，加州運輸署¹ (California Department of Transportation，簡稱 Caltrans) 亦位於沙加緬度郡。由於加州為美國西部經濟重鎮，主要產業包括電腦及電子、航太、醫療器材，生物科技、生命科學、資料處理、電腦軟體及系統設計、運輸設備及環境工程，另農業、醫療、觀光及建築業亦為加州重要產業，倘將加州視為單一經濟體，則為世界第 5 大經濟體²。加州面積 423,970 平方公里，約為臺灣 12 倍大。加州運輸署負責全州鐵路、捷運、公路、航空、大眾運輸、運輸規劃與管理、運輸基礎設施維護等工作，員工人數約 15,000，除白人外，西班牙裔、拉丁美裔約佔 35%、亞洲裔約佔 8 %。



圖 1 加州首府及加州運輸署位於沙加緬度郡，離
本次參訪之洛杉磯仍有 7 小時車程

¹ 美國為聯邦制國家，U.S. Department of Transportation 為國家層級，一般譯為美國交通部；至於 California Department of Transportation 為州政府層級，有譯為加州運輸「部」、加州交通「局」、亦有譯為加州運輸「署」者。參照我國中央行政機關組織基準法第 6 條規定，署、局同屬三級機關，但二者唯一差別，一般認為在於，署擁有自行規劃政策權利，局則無。考量美國行政體制（聯邦、州）、加州運輸主管部門掌管業務及權限、國人對我國行政層級認知、參考之前同性質出國報告，本文將 California Department of Transportation 譯作加州運輸署。

² 網頁瀏覽：外交部領事事務局，<https://www.boca.gov.tw/sp-foof-countrycp-03-107-79acc-04-1.html>，瀏覽日：20221127。

加州由於幅員廣大，為有效規劃與管理各地運輸事務，又將全加州劃分為 12 個分區（或稱分署），各個分區置有 Director。與橋梁檢測有關業務，主要歸營運與維修部門主管，該部門負責全加州將近 24,364 公里長之公路維護、1,416 平方公里相當於整個新竹縣面積大小之公路路權管理、13,063 座州際公路橋梁，以及 12,200 多座郡、市政府轄管橋梁。其下之結構維護與調查部門（Structure Maintenance and Investigations），又分為六個辦公室，包括 1.北加州結構調查辦公室（Office of Structure Investigations-North）；2.南加州結構調查辦公室（Office of Structure Investigations-South）；3.結構設計與分析辦公室（Office of Structural Design and Analysis）；4.橋梁資產管理辦公室（Office of Bridge Asset Management）；5.特殊檢查辦公室（Office of Specialty Inspections）；6.收費橋梁檢查辦公室（Office of Structure Investigations-Toll Bridges）等 6 個辦公室。本次考察係由南加州調查辦公室安排行程及接待，故參訪區域以加州南部洛杉磯郡內橋梁為主。

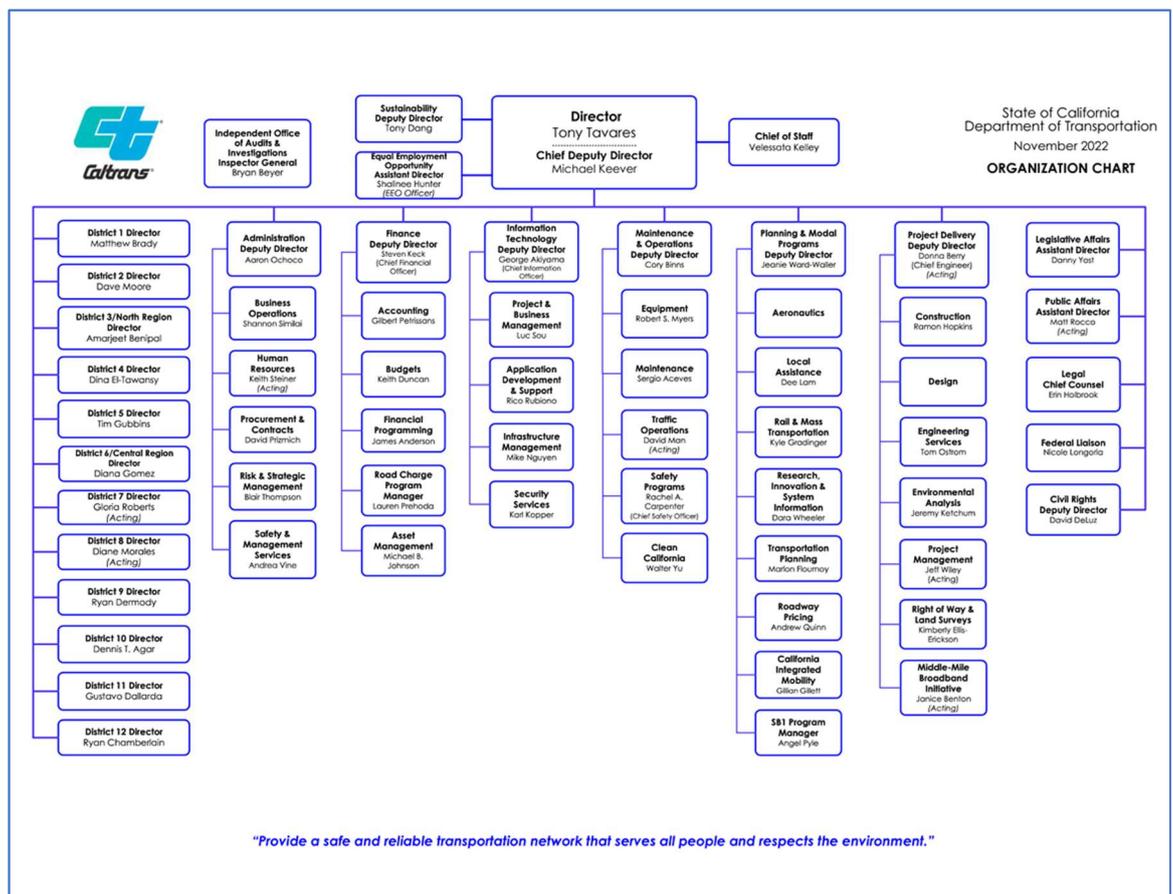


圖 2 加州運輸署組織架構圖

在南加州結構調查辦公室每一位負責橋梁檢測之資深工程師(Senior Engineer)轄管 6 位一般工程師，實際橋梁檢測業務由一般工程師執行，資深工程師負責橋梁檢測成果之審核，但複雜橋梁之檢查，資深工程師也會參與。部分橋梁檢測業務也會委託顧問公司辦理，委外辦理檢測之橋梁，加州運輸署負責 QA、QC，並抽委外數量 5%之橋梁自辦橋檢，將結果與顧問公司檢查結果作必對。另外，聯邦政府亦派駐有 2 位工程師長駐在加州，檢視 Caltrans 的橋梁檢測結果，如橋梁檢查結果經過聯邦人員檢視後認為品質不佳、未獲審核通過，聯邦政府將會扣減對加州政府之補助款。

橋梁檢測在工作分配上，會依據橋梁可近性、結構複雜程度、構件多寡、橋梁檢測所需時間給予綜合評值，再平均分配給工程師執行，以求每位工程師之工作量相當。一般作業是二週實地檢查、二週寫報告，每座橋梁檢查報告最慢三個月要提交，資深工程師會管控進度，確保按時交報告。在待遇方面，一般工程師月薪約 1 萬美金，且享有各類保險、休假等福利。

加州運輸署之員工並無屆齡退休規定，本次考察行程，有一位陪同考察之加州運輸署員工已 74 歲，仍可自行開車並獨自辦理橋檢及一般行政業務。橋檢工程師外出辦理橋梁檢測時，除了可派遣公務車之外，如係一般目視檢查，橋檢工程師多係使用私人車輛自行開車前往，停車時在車身兩側貼上磁性加州運輸署標誌，對外表達該車輛正執行公務即可。



圖 3 加州運輸署識別標誌



圖 4 加州運輸署員工自有車輛，貼上識別標誌即代表執行公務中

2019 年底新冠肺炎爆發，截至 2022 年 10 月美國已進入後疫情時代，各項防疫措施大幅鬆綁、不再強制戴口罩，但各產業員工仍以居家辦公為主。以加州運輸局橋梁檢測業務來說，檢測工程師依照既定橋梁檢測排程到現地辦理檢測後，只要把檢測結果上傳系統資料庫即可，資深工程師及部門主管，亦透過系統檢核檢測結果，故少有員工到辦公室上班。當天到加州運輸署位於洛杉磯之南加州辦公室，辦公室除留有駐衛警辦理人員查核、進出登記外，辦公室空空蕩蕩，約僅有 1% 的員工到辦公室上班。

加州運輸署高層雖有要求員工應回到辦公室上班，但員工工會³反對，工會主張過去兩年實施居家辦公，業務並無中斷亦無不良影響，故反對回到辦公處所辦公，目前勞資雙方仍持續協商中。

到加州運輸署南部辦公室參訪當天，只有結構設計與分析部門一位資深工程師到辦公處所上班，據其表示，其主要工作為審圖，數十年來已習慣辦公室作業環境，故雖然可以居家上班，但其仍每日通勤到辦公室上班。該工程師主要工作在檢核橋梁改善之設計結果（審圖）。其作業方式，是檢視第一版設計圖之後，在需要修正加註或補述的位置，以紅色筆跡修正，之後退請工程師修正，待修正進版後，再於第二版以螢光筆跡確認修正結果，進行多次審核確認無誤後，再辦理工程發包。

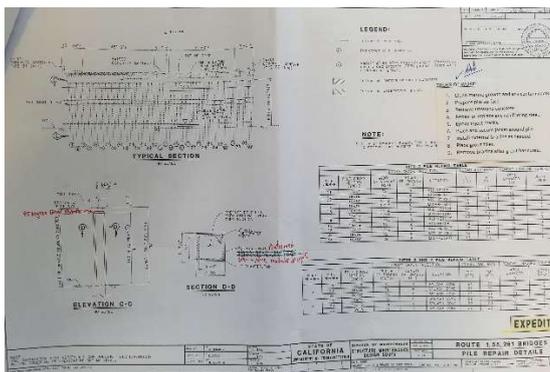


圖 5 審圖需修正處，以紅色標記

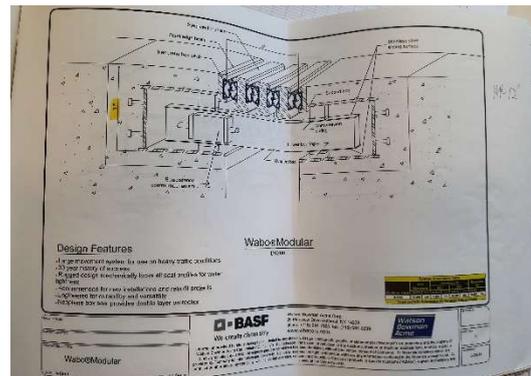


圖 6 圖面修正進版，以螢光色確認

加州運輸署基礎設施維護部門除了橋梁檢測（Inspection）外，另一重要工作是辦理橋梁承載能力評估（Load Rating）並協助各級政府辦理橋梁載重限制之發布（Posting, Notify Public），亦即 1. 檢測；2. 承載能力評估；3. 橋梁限重發布，三者係循環作業且為經常辦理事項。至於橋梁限重主要係針對重車，例如卡車、貨車、貨櫃車等大型車輛，除一般車輛外，大型農業用機具也列入限制範疇。橋梁承載能力評估結果，除了與設計、竣工時作比較，先期瞭解橋梁狀況作為爾後橋梁補強之依據外，同時也估算超額承載能力，作為必要時超重貨物車輛運輸路徑規劃之參考。

³ 美國公務員可組工會，公務員工會組織相當健全，與資方有談判能力。



圖 7 橋梁檢測、承載能力評估、公告橋梁限重為主管機關義務，且為循環作業⁴



圖 8 橋梁限重標誌，依據車種有不同限重

5

美國法典第 23 編公路編 (Title 23 of the United States Code) 對於行駛公路之車輛 (Vehicles) 載重限制作出規定，同時明文規定不得逾越聯邦橋梁公式 (Federal Bridge Formula) 規定之最大值，其理念包括車輛監理、橋梁結構安全雙重考量，也是辦理橋梁承載能力評估、維護公眾通行安全之基礎。美國在「法」位階授權下，各級公路主管機關基於工程專業考量對於橋梁結構安全、承載能力評估、限制重車通行，具有很大權限。在美國，橋梁限重 (Weight Limits) 為基本觀念，也是普世價值，FHWA 透過各種折頁宣導大型車輛、農機具通過橋梁的限重觀念。

⁴ 摘自 FHWA 發布之 Bridge Load Rating and Posting, Federal-aid Program Overview，宣導單張。

⁵ 取材自網路。

Common Bridge Load Posting Signs Compared to Common Agricultural Vehicles

VEHICLE TYPE AND APPROXIMATE WEIGHT	Small Tractor (GVW 5-8 tons)	Medium Tractor (GVW 15 tons)	Heavy Tractor (GVW 25 tons)	Medium Tractor (15 GVW tons) PUS (loaded Grain Cart (25 tons) = GVW44 tons)	Tractor Trailer Loaded (GVW 36 tons)
WEIGHT LIMIT 3 TONS	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
WEIGHT LIMIT 16 TONS	✓	✓	⊗	⊗	⊗
AXLE WEIGHT LIMIT 10 TONS	✓	✓	⊗	⊗	⊗
WEIGHT LIMIT 35T 44T 28T	✓	✓	⊗	⊗	⊗

* Vehicle type and weight are approximate and for illustrative purposes only. ✓ Safe to cross ⊗ Do not cross

Where can I get more information?

1. Your local or State transportation agency.
2. State oversize/overweight permitting offices. For a list of contacts for each State visit: http://ops.fhwa.dot.gov/freight/sw/permit_report/index.htm.
3. State- and locality- specific websites for load posted bridges. For example: https://idrivearkansas.com/?show=weight_restricted_hwys.
4. Your agricultural vehicle manufacturer.
5. FHWA's "Bridge Formula Weights" brochure. http://ops.fhwa.dot.gov/freight/publications/brdg_frm_wghts/bridge_formula_all_rev.pdf.
6. FHWA's Federal Size Regulations for Commercial Motor Vehicles guide. http://ops.fhwa.dot.gov/freight/publications/size_regs_final_rpt/size_regs_final_rpt.pdf.
7. Wisconsin DOT Implements of Husbandry (IoH) Study Group. <http://wisconsinidot.gov/Pages/dmv/agri-eq-veh/study.aspx>.

For More Information:

U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration
Office of Operations
1200 New Jersey Avenue, SE
Washington, DC 20590
Toll-Free "Help Line" 866-367-7487
www.ops.fhwa.dot.gov

U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration
December 2016
FHWA-HOP-16-068

UNDERSTANDING BRIDGE WEIGHT LIMITS

Bridge Roadway Safety for Agricultural Vehicles

Transportation agencies rely on driver compliance to preserve and protect the Nation's 60,000 weight-restricted bridges. Crossing a bridge in a vehicle that exceeds the weight limit can damage both the bridge and your vehicle, meaning you or other bridge users may not be able to cross safely. If your vehicle damages a bridge, you may be held liable for the cost of repair.

圖 9 FHWA 透過折頁宣導橋梁限重觀念⁶

至於我國在重車管理，係在「道路交通管理處罰條例」下授權訂定之「道路交通安全規則」作出規範，就法規體系來說，我國偏向於以「車輛監理」方式看待重車，從歷次道路交通安全規則修正放寬重車噸數，係基於車輛工業發展逐漸成熟、車輛本體承載能力提升後修正放寬外，未見由公路工程、橋梁結構安全角度切入探討重型車輛對橋梁影響之討論，殊值可惜。

我國橋梁設計準則係在「公路橋梁設計規範」作規定，設計總軸重以 H20-44 或 HS20-44 為標準，高速公路採 1.25 倍超載、公路總局採 1.3 倍超載為橋梁設計標準，即便如此仍趕不上車輛監理賦予之容許軸重。工程設計與車輛監理，兩套法系仍有歧異。

⁶ 美國 FHWA 發布之宣導折頁。

設計規範總軸重(公噸)			國內法規車輛最大總軸重(公噸)				
H20-44 (M18)	1.25超載	1.3超載		前單軸 後單軸	前單軸 後雙軸	前雙軸 後雙軸	
18.25	22.81	23.73	大貨車	18.5	26	32	
設計規範總軸重(公噸)			國內法規車輛最大聯結總軸重(公噸)				
HS20-44 (MS18)	1.25超載	1.3超載		前單軸 後單軸	前單軸 後雙軸		
32.85	41.06	42.71	曳引車	35	43		
				後單軸	後雙軸	後三軸	
			半拖車	32.5	40	43	
			拖架	12	20	22	
			兼供曳 引之大 貨車	前單軸 後單軸	前單軸 後雙軸	前雙軸 後單軸	前雙軸 後雙軸
				34	46	40	52
	特種車	21.5	27.5	27.5	35		

圖 10 本表摘自林佑泰所撰碩士論文，頁 15⁷。

(二) NBIS⁸ (National Bridge Inspection Standards) 簡介

西元 1893 年，約莫南北戰爭結束後 30 年，在美國農業部 (U.S. Agriculture Department) 成立的美國道路調查辦公室 (U.S. Office of Road Inquiry)，可以說是美國聯邦公路總署 (Federal Highway Administration, FHWA) 以及美國現代橋梁檢測制度之濫觴。1910 年該辦公室成立公路橋樑及涵洞⁹部門 (Division of Highway Bridges and Culverts)，協助州級地方政府辦理橋梁設計及施工，該辦公室後來積極參與 1921 年成立之美國公路與運輸官員協會 (American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO) 及相關委員會運作，對於橋梁檢測方法及制度貢獻良多¹⁰。

1967 年 12 月 15 日，位於美國國道 35 號跨越俄亥俄河上的銀橋 (Silver Bridge) 發生斷裂導致 46 人死亡，促使美國國會在 1968 年發布之聯邦援助公路法¹¹ (Federal-

⁷ 林佑泰，「公路橋梁設計規範車輛載重與法規車輛限重策略之探討」，中國科技大學土木與防災碩士班碩士論文，111 年 6 月。該研究指出「部分法規車輛總軸重已明顯超過設計規範所採設計總軸重，因此，檢討其安全性有其必要」。

⁸ 美國橋梁檢測國家標準及相關作業程序、參考資料等，可於美國 FHWA 網站下載，詳 <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbis.cfm>。

⁹ 美國明確區分涵洞 (Culvert) 與隧道 (Tunnel)，差別在於有獨立結構、機電設施、照明設施者，為隧道，其餘則劃歸涵洞，分別管理。

¹⁰ Happy 50th Anniversary National Bridge Inspection Standards By Joey Hartmann and Richard Weingroff. https://www.fhwa.dot.gov/highwayhistory/national_bridge_inspection_standards.cfm

¹¹ 這部法令提供資金協助各州興建跨州之州際公路，並於該法明訂橋梁檢測專章，類似我國透過立法 (訂定特別法) 方式，由中央編列特別預算補助地方政府，透過財務協助，要求並引導政策方向。

Aid Highway Act 1968) 納入橋梁檢測專章，要求交通部長與州公路主管部門、相關學會、專家共同合作建立「橋梁檢測國家標準」(National Bridge Inspection Standards, NBIS)，以便對任何聯邦援助公路系統上的橋樑進行適當的安全檢查。

NBIS 自 1967 年開始發展迄今，歷經多次修正，2012 年 MAP-21¹² 法案，更擴大其適用範圍，只要是供公眾使用（不特定多數人）的橋梁均需辦理檢測，並納入原住民保留區或自治政府¹³ (Tribal Governments) 管轄橋梁，2012 年到 2021 年間，NBIS 進行大幅修正，除了擴大適用範圍、亦加嚴橋檢人員資格，最新版本於 2022 年發布施行。

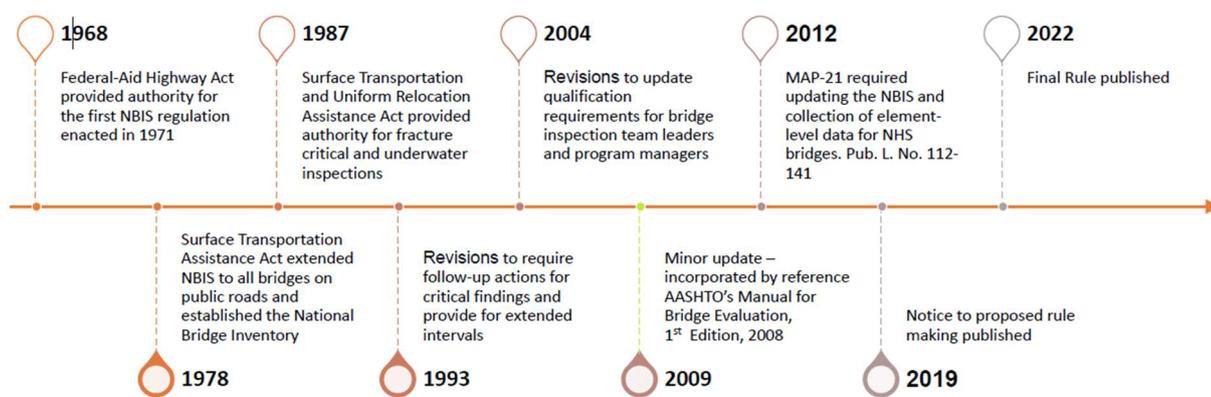


圖 11 美國 NBIS 發展進程¹⁴

美國橋梁檢測國家標準，依其章節概述如下：

1. 目的 (§650.301 Purpose)：頒布符合美國法令要求之公路橋梁安全檢測及評估標準，供各級政府遵循。
2. 適用範圍 (§650.303 Applicability)：供公眾使用之道路，包括各級政府、原住民（部落）自治保留區政府、聯邦政府管有之公路橋梁。如屬私有橋梁但兩側銜接供公眾通行之道路，以及在建橋梁但已部分開放通行者，均納入適用範圍。
3. 名詞定義 (§650.305 Definitions)：整部 NBIS 所涉各項專有名詞及英文縮寫之定義。

¹² 歐巴馬政府時代簽署之法案，全名為 Moving Ahead for Progress in the 21st Century Act (MAP-21)，該法案透過經費協助強化美國國家運輸基礎設施，並提高就業率。

¹³ 例如印地安保留區。

¹⁴ 摘自 Federal Highway Administration 發布之「Overview of the National Bridge Inspection Standards (NBIS) Final Rule」簡報。

4. 橋梁檢測組織及義務 (§650.307 Bridge inspection organization responsibilities)：包括聯邦政府 DOT、州政府 DOT、自治保留區政府，需就權責範圍內及轄管橋梁發展檢測制度及方法，並保留檢測紀錄。
5. 橋梁檢測人員資格 (§650.309 Qualifications of personnel)：負責橋梁檢測之計畫經理 (Program Manager) 必須是一個通過國家 (或州政府) 考試的專業工程師 (PE) 且有 10 年以上的橋梁檢測經驗，並需通過 FHWA 認證的橋梁檢測課程 (成績百分位 30% 以上為通過，亦即每次訓練刷掉 3 成)，2022 年版 NBIS 修正增加每五年需回訓 18 小時。
6. 橋梁檢測頻率 (§ 650.311 Inspection interval)：定期檢測 (Routine inspections) 不得逾 2 年 (48 個月)，但各州政府、自治區政府、聯邦主管機關得考量橋梁結構型式、結構設計、結構材料、橋齡、基礎沖刷情形、每日交通量、重車比率、橋梁承載能力評估等因素，訂定相關作業準則，加密橋梁檢測頻率 (少於 2 年)。
7. 橋梁檢測作業流程 (§650.313 Inspection procedures)：無論是初次檢測、定期檢測、水下檢測等作業，均需依照 AASHTO 頒布之檢測手冊辦理。另作業流程同時規範辦理橋梁檢測作業之品質管制 QC (Quality control)、品質保證 QA (Quality assurance)，透過程序性管制，確保檢測作業之準確性、一致性。
8. 橋梁檢測紀錄及資料庫 (§650.315 Inventory)：各州政府、自治區政府、聯邦主管機關必須建置橋梁檢測資料庫並加以維護、更新，同時要求在個別橋梁檢測後三個月內即需更新資料庫，另橋梁承載能力重新評估後，亦同。
9. 橋梁檢測作業參考文件 (§650.317 Incorporation by reference)：包括 AASHTO 發布之檢測手冊及相關參考文件。檢測手冊、參考文件皆可於美國交通部及 FHWA 網站下載。

二、阿蒂西亞高架橋火害調查 (The Artitia OH, Fire damages and repairs)¹⁵

本座橋梁編號 53C1744，位於洛杉磯郡康普頓市 (Compton City)，為 ARTESIA BLVD 上的高架橋，當地稱其為 Artesia Bridge。康普頓市是洛杉磯郡轄下成立較早、較古老的城市之一，依據 2020 年統計資料顯示，全市人口 95,740 人，非裔、拉丁美裔等人口高達人口總數 96%。ARTESIA BLVD 為連接當地工業區、地方道路與 91 號州道 (California State Route 91) 之重要聯絡道，該橋梁跨越鐵道、公路、河道，橋梁除供車輛通行外，兩側亦有人行道供民眾通行。

¹⁵ 本件取得完整之橋梁竣工圖及 2021 年所作橋梁定期檢測紀錄，如附錄。



圖 12Artesia Bridge 位置圖

橋梁下方橋台處長期散住多位遊民（homeless），橋下方有遊民撿拾而來之木材、廢輪胎、棄置家具等物品，用於搭蓋防寒遮蔽物，亦有帳棚等物。該橋梁於 2020 年因遊民生火取暖導致火害，據 Caltrans 資深橋梁檢測工程師口述，當時火害延時約 2-3 小時，因火勢猛烈，造成混凝土保護層剝脫，肉眼已可看到鋼筋；除此，亦造成鋼 I 型梁腹版、翼版，因高溫變型。



圖 13 鋼 I 型梁受火害高溫影響，腹版、翼版變形



圖 14 混凝土受高溫影響已剝脫，肉眼可見鋼筋

該橋梁自火害發生後迄今已 2 年仍持續封閉，尚未修復。現勘當日，仍有多處遊民帳棚、且有遊民居住其中。據 Caltrans 資深橋梁檢測工程師口述，遊民問題在加州甚為嚴重，由於加州經濟環境較優渥、加州政府對待遊民較為友善，鄰近州之州政府常將遊民整車載至加州野放，將遊民照顧管理責任轉嫁給加州政府。

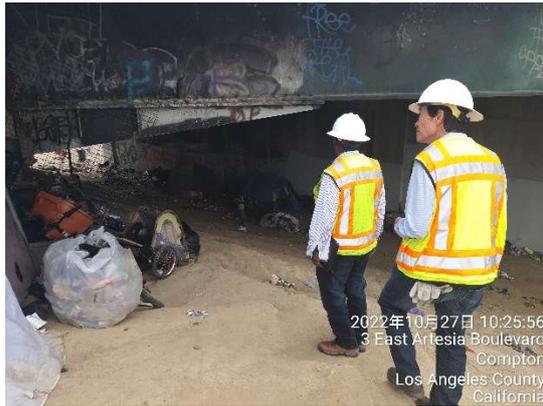


圖 15 高架橋下方遊民撿拾物品及塗鴉



圖 16 遊民生活物品及帳棚

該橋梁自火害封閉迄今已 2 年，遲未修復原因，係因該橋梁為市政府管轄橋梁，康普頓市政府因經費不足，已持續向州政府申請經費補助。康普頓市政府於 2022 年 11 月宣布，已爭取到 1,200 萬美元辦理橋梁修復工作。

該橋梁雖封閉禁止行車，但行人、自行車仍可通行，橋面護欄缺損、有可能造成行人跌落者，檢測人員均於檢測報告均加以註記並要求市政府改善。但其改善方式或有精進之處，例如橋梁護欄缺損，僅以欄桿且僅用鐵絲固定方式修復，究其原因，有可能是美國公路網太過發達、公路遍佈，對於非重要結構事項之維修，僅著重於功能，並未考慮美觀或一致性

橋面版坑洞部分用瀝青簡易覆蓋，避免坑洞持續擴大，惟有些坑洞已貫穿橋面版，剝落之混泥土塊約 1~2 個拳頭大小，但仍持續通行使用。



圖 17 橋梁已封閉，其阻絕設施已遭破壞



圖 18 護欄缺口以不同型式欄杆補強，僅以鐵線固定，易遭竊取破壞



圖 19 橋面版有明顯裂縫及坑洞



圖 20 坑洞約一個拳頭大小、已貫穿橋面版

三、第六街高架橋（The Sixth Street Bridge）改建現勘及經驗分享

第六街高架橋橫跨洛杉磯河（Los Angeles River）、聖塔安娜高速公路（Santa Ana Freeway ,US 101）、和金州高速公路（Golden State Freeway,I-5）、捷運路線（Metrolink）、聯合太平洋鐵路路線（Union Pacific railroad track）以及幾條當地街道，為加州市政府管有橋梁。

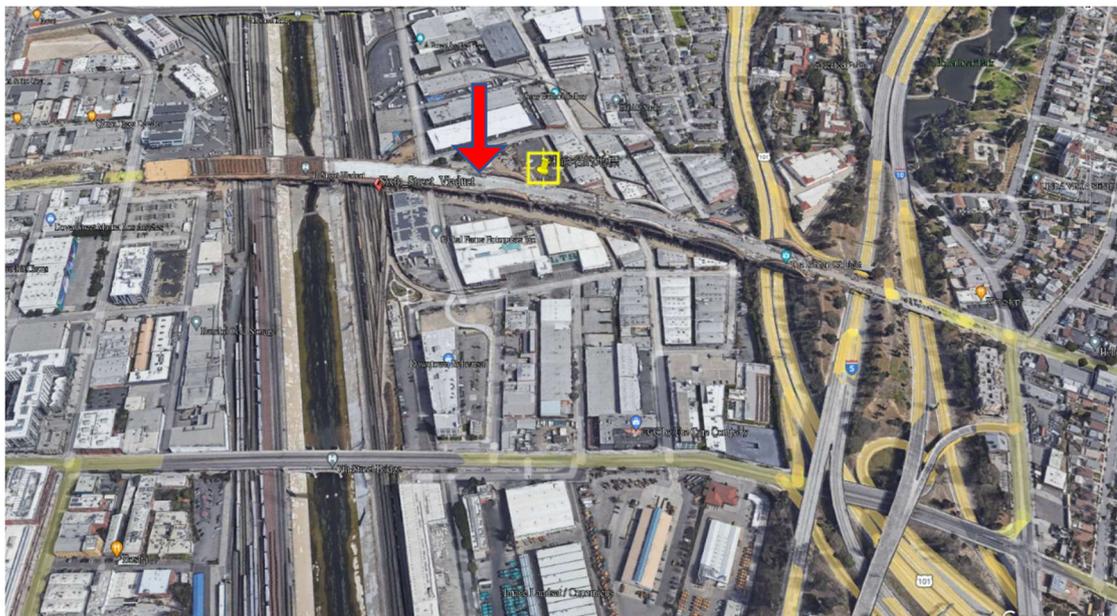


圖 21 第六街高架橋空拍圖¹⁶

¹⁶ 取材自 Google Earth。

橋面及下方之洛杉磯河為眾多好萊塢電影拍攝取景之處，以「洛杉磯第六街橋」(Sixth Street Bridge) 著稱，橋梁連接洛杉磯市中心 (Downtown Los Angeles) 和博伊爾高地 (Boyle Heights) 社區，自 1932 年啟用以來即為當地地標。如圖



圖 22 第六街高架橋舊橋，取材自網路¹⁷

第六街高架橋興建於 1930 年代並於 1932 年通車啟用，建成後 20 年即發現橋梁混凝土結構有鹼骨材反應 (alkali-silica reaction, ASR)，加州運輸署 1986 年橋梁調查發現該橋梁有資格列入國家史蹟名錄，但鹼骨材反應導致橋梁劣化情形，仍無法避免。

2007 年加州運輸署公布州政府所轄 1,620 座一般結構缺失橋梁以及 228 急迫需要改建橋梁均未含第六街高架橋，但加州運輸署仍建議洛杉磯市政府優先將第六街高架橋改善或重置新建。同年，2007 年洛杉磯市工程局發布報告指出，第六街高架橋在未來 50 年內遭遇地震倒塌之機率為 70%，較可接受之標準，橋梁倒塌機率為 2%或超過 50 年，高出甚多。

該橋梁在經過檢測後，因橋梁受到鹼骨材反應影響劣化嚴重，加州運輸署會同洛杉磯市政府提出橋梁改善方案，包括 1.零方案，維持現狀：政府主管部門必須持續辦理橋梁檢測，並維持通行，必要時須封閉橋梁；2.補強方案：下部結構部分就橋梁基礎、墩柱進行補強，上部結構部分，包括支承抽換、伸縮縫更換等。採補強方案，估計可延壽 30 年；3.橋梁改建方案：橋梁改建為斧底抽薪辦法，包括路

¹⁷ <https://www.laconservancy.org/locations/sixth-street-viaduct>

線規劃、橋梁型式等，均提出規劃構想。

前述方案經討論後，最終決定採橋梁改建，改建計畫在通過環評審查後，洛杉磯市政府辦理橋梁改建方案競圖，並在 2012 年 10 月決定採用 HNTB Corp. 提出之設計方案，於 2016 年 1 月封閉橋梁，進行拆除與重建，在歷經 6 年施工後，新橋於 2022 年 7 月通車。

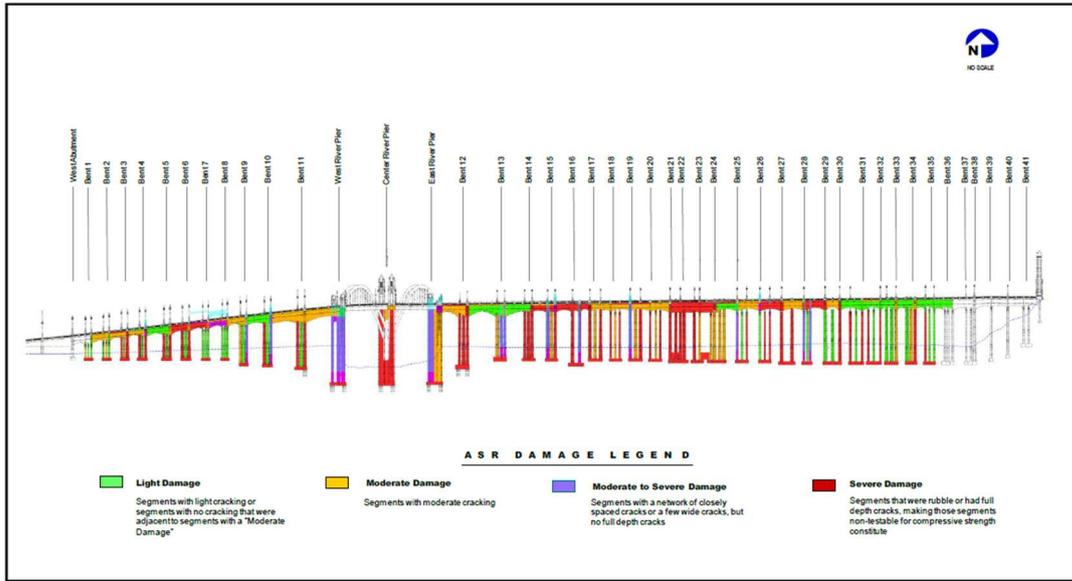


Figure 3 Level of Damage in Various Elements of the 6th Street Viaduct due to ASR

圖 23 第六街高架橋受鹼骨材反應劣化檢測結果¹⁸

¹⁸ Final Environmental Impact Report/ Environmental Impact Statement and Section 4(f) Evaluation of 6th Street Viaduct Seismic Improvement Project, prepared by State of California Department of Transportation (NEPA Lead Agency) and City of Los Angeles (CEQA Lead Agency).

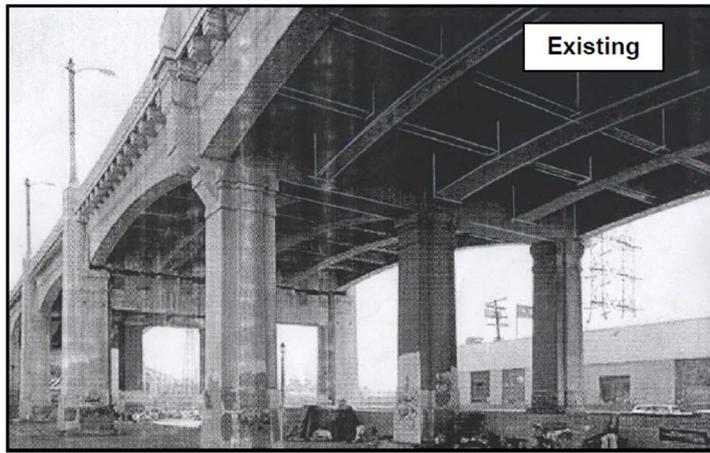


圖 24 橋柱補強規劃，下圖為補強後示意圖。但實際未採此方案，而係拆除重建¹⁹。

改建後第六街高架橋全長約 933 公尺，僅在橋兩端及自行車環道交接處各設一道伸縮縫，在中段部分設有一環道與當地街道連接，供自行車、行人上下高架橋使用。新橋橫斷面包括雙向 4 車道、兩側自行車道、兩側人行道等設施。新橋之快車道與自行車道間僅使用橡膠墊、導桿作為區隔使用，通車啟用後遭民眾批評對自行車使用者不夠安全，仍有汽車衝撞自行車之可能，設計者及政府部門則以該「遇有緊急狀況時，自行車道可供汽車緊急通行使用」作為回應。

¹⁹ 同註腳 18。

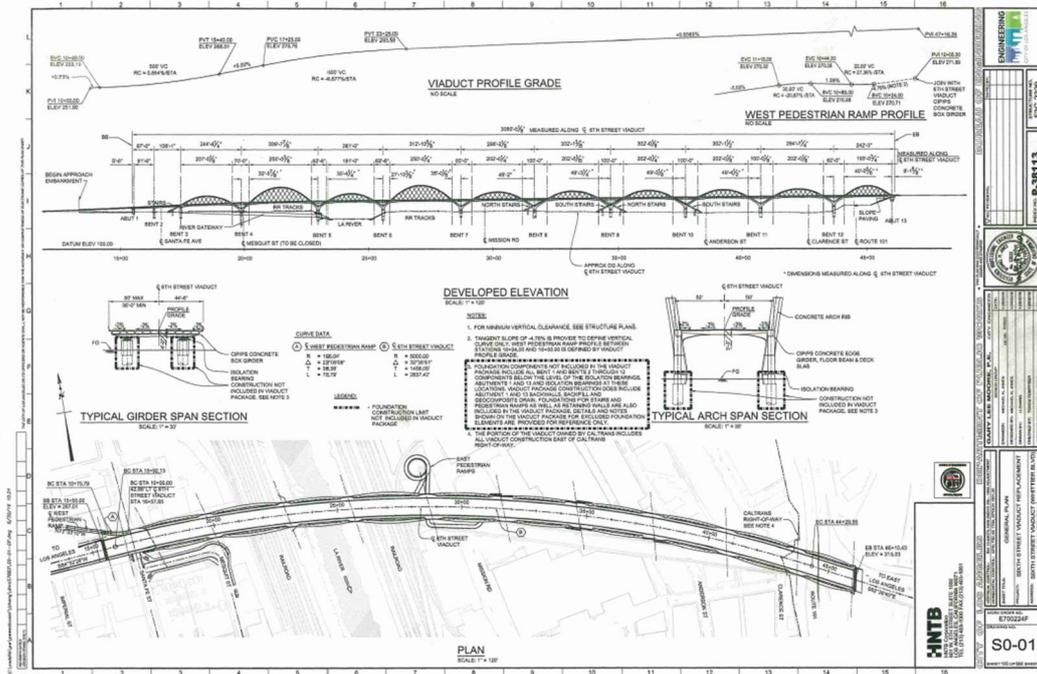


圖 25 第六街高架橋改建平面圖，該橋僅在橋西側、東側各設一道伸縮縫

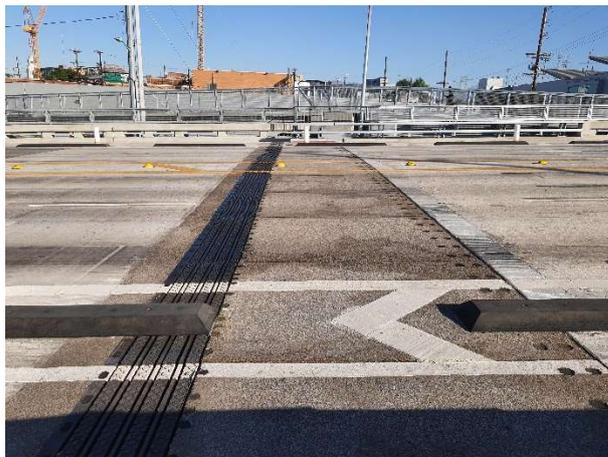


圖 26 橋梁西側伸縮縫



圖 27 橋梁東側伸縮縫

高架橋上自行車道除遭批評不夠安全外，其排水格柵間距較寬，如果是公路自行車等輪徑較小之自行車經過，可能有車輪陷落導致危害之疑慮。橋梁兩側設有防護圍籬阻攔，防止行人攀爬，但僅在跨越鐵路路段之防護圍籬較高，其餘路段之防護圍籬較矮，一般民眾仍可輕易攀越。另橋梁路燈基礎突出於人行道上，恐有撞擊風險。

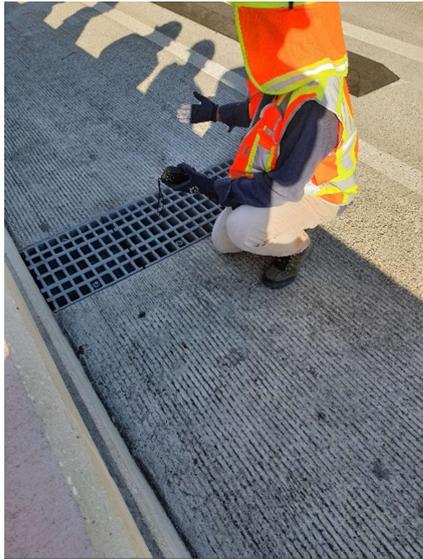


圖 28 設置於自行車道上之排水格
柵，間距較寬

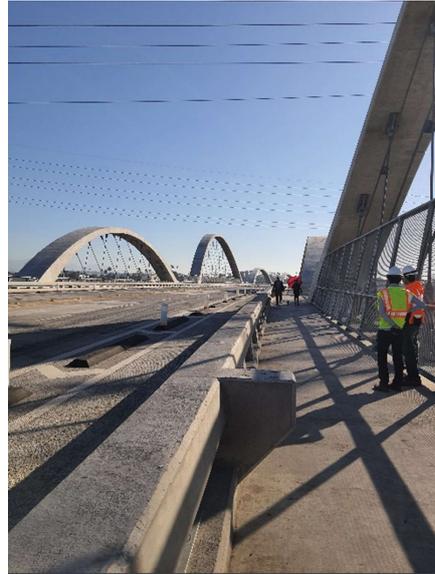


圖 29 跨越聯合太平洋鐵路路段之圍
籬高度較高，其餘圍籬高度低



圖 30 新建第六街高架橋配置有汽車、自行車、人行道、圍籬。圍籬高度視下方受保護
設施調整

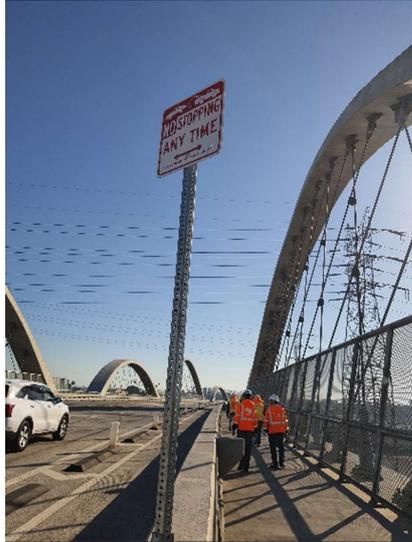


圖 31 跨越聯合太平洋鐵路路段圍籬較高



圖 32 跨越聯合太平洋鐵路路段圍籬較高，避免行人攀爬或丟棄異物影響鐵路安全。

該橋梁除了工程及營運上安全管理外，目前亦面臨跑酷族（Parkour）挑戰自我或民眾攀爬之風險，甚至有民眾建議應於橋梁兩端常態設置救護車，以應不時之需。



圖 33 民眾攀爬高架橋拱（一）²⁰



圖 34 民眾攀爬高架橋拱（二）²¹

²⁰ 取材自網路 https://twitter.com/boyle_hts/status/1549215820932210695

²¹ 同註腳 20。



圖 35 第六街大橋遠眺市區。橡膠墊右側為自行車道，完工後遭民眾批評不夠安全，快速行駛之車輛如有不慎跨越車道，仍有可能衝撞自行車。

四、傑拉德戴斯蒙大橋（Gerald Desmond Bridge）改建及檢測設施現勘

1968 年通車之傑拉德戴斯蒙大橋（Gerald Desmond Bridge）為一中承式（又稱直通式，Through Arch Bridge）鋼拱橋，連接長灘市區及長灘港（Port of Long Beach）。由於長灘港為僅次於美國洛杉磯之第二繁忙的貨櫃港，負責美國-亞洲貿易航線，隨著貨櫃輪大型化，現行貨櫃輪容量已為 1968 年之 6 倍大，舊橋高度不足以讓大型貨櫃輪通過，故加州運輸署會同長灘港管理機關提出改建計畫，所需經費最早規劃為 12.88 億美元，分別由聯邦基金負擔 6.75 億美元、長灘港負擔 1.17 億美元、洛杉磯郡都會運輸局（Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority）負擔 0.17 億美元、加州運輸署負擔 1.53 億美元、交通基礎設施融資與創新法案 TIFIA（Transportation Infrastructure Finance and Innovation Act）擔保融資 3.26 億美元，共同支應。但至 2021 年完工，已花費 17.15 億美元。



圖 36 傑拉德戴斯蒙大橋空拍（一）²²

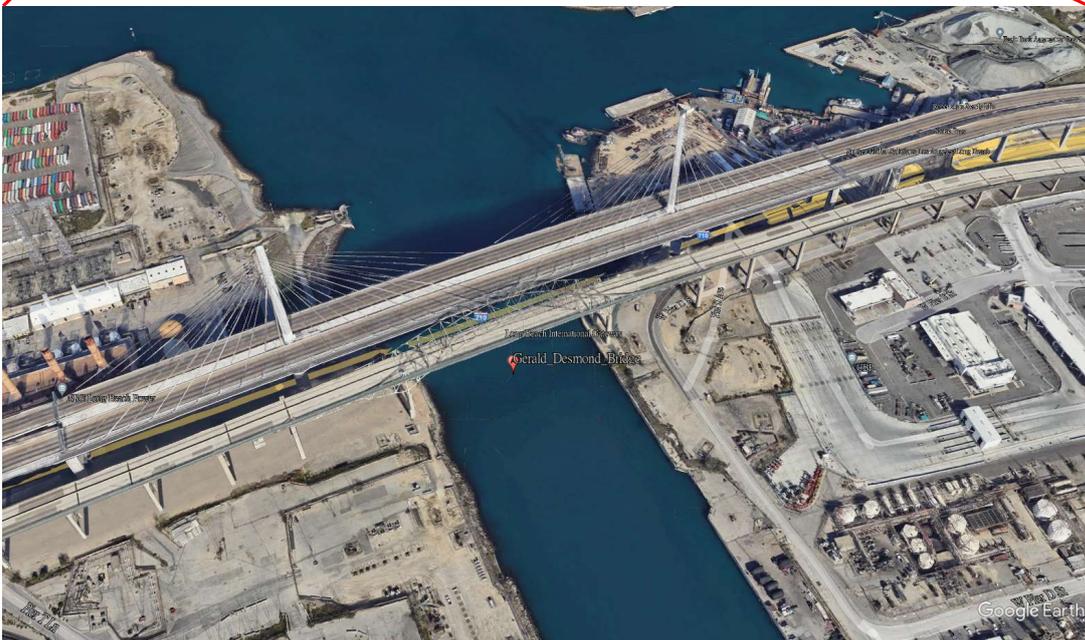


圖 37 傑拉德戴斯蒙大橋空拍（二）²³

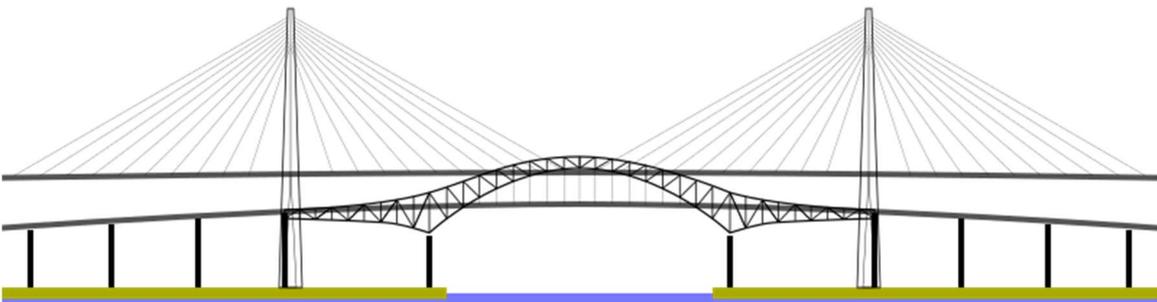


圖 38 新舊橋比較，中承式剛拱橋橋面版離海平面 47 公尺、新橋採雙塔協張橋，橋面版離海平面 62 公尺，允許現行最大貨輪通過。²⁴

²² 取材自 Google Earth.

²³ 同註腳 22。

²⁴ 取材自維基百科，https://en.wikipedia.org/wiki/Gerald_Desmond_Bridge

新橋於 2014 年 10 月開工，由加州運輸署協助監造，全案於 2021 年完工，完工後加州運輸署除辦理橋梁檢測工作外，橋梁營運管理將移由長灘港負責，新橋現已命名為長灘國際門戶大橋（Long Beach International Gateway Bridge）。



圖 39 新舊橋鳥瞰圖²⁵

長灘國際門戶大橋為雙塔斜張橋，全長 2,682 公尺、塔高 157 公尺、最長跨距 305 公尺、距離海平面（航道）高 62 公尺。橋梁於設計階段即考量檢測、維修需要，橋下設有檢測車、人行檢測步道。另因長灘港為重要港口，新橋為港口出入門戶，為維護安全，故同時考量恐怖攻擊危害，於主要設施如橋柱加設防恐鋼板、橋墩處亦設有鋼柱等保護設施，其防恐設計原則以及恐怖攻擊耐受度（例如汽車炸彈停在橋面，橋塔可抵抗多少噸黃色炸藥攻擊），據 Caltrans 工程師表示屬機密（confidential）文件，外人不得而知。



圖 40 鋼橋檢修工作車



圖 41 鋼橋下方，橋梁檢測用人行步道

²⁵ 取材自網路，<https://www.biggs-cardosa.com/index.php/projects/transportation/highway/gerald-desmond-bridge>



圖 42 斜張橋主塔防恐保護鋼板，設計原則及承受攻擊耐受度為機密。



圖 43 保護橋墩用之鋼柱



圖 44 鋼橋與引道橋混凝土箱型梁間之伸縮縫



圖 45 鋼橋與引道橋混凝土箱型梁間之伸縮縫側視圖



圖 46 由橋底部仰視主橋、引道橋間之伸縮縫



圖 47 圖左為舊橋、進行拆除中。圖右為新橋，已開放通車。



圖 48 由橋樑檢測維修車向西遠眺長灘港及航道，左側為拆除中之舊橋



圖 49 由橋梁檢測維修車俯視舊橋

長灘國際門戶大橋有兩座高度達 157 米高之橋塔，設計階段考量視覺效果及施工性，斷面採八角型設計。施工時，透過斷面四邊主要尺寸保持恆定、僅調整其餘四邊尺寸方式，建構下粗上細之橋塔，每一昇層模版只調整四邊之尺寸、提升施工速率。此種「菱形幾何」斷面，施工效率較圓形斷面高，且較容易收納管線於內部。

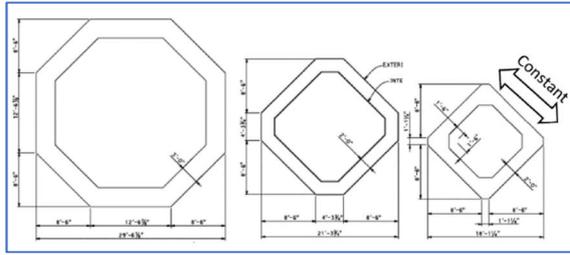


圖 50 Gerald Desmond 大橋橋塔斷面變化示意圖²⁶，採八角型設計。採用此種設計方案，在施工時每一昇層只要改變四個模版尺寸、另四邊模版尺寸保持恆定，可提高施工效率並有利管線佈設。



圖 51 斜張橋橋塔採下寬上窄、八角型設計

加州位於環太平洋地震帶，美國西部海岸雖有為數不少之長跨距橋梁，但長灘國際門戶大橋為其中唯一之長跨距斜張橋。為提昇橋塔、橋面之耐震強度，以符合基本彈性設計，並利橋梁構件遭到地震或其他破壞後能容易維修，橋梁本體設有 34 個阻尼器，用以隔離各主要構件。

²⁶ Pavan Bharadwaj, <https://www.linkedin.com/pulse/bridge-replacement-project-case-study-gerald-desmond-pavan-bharadwaj>

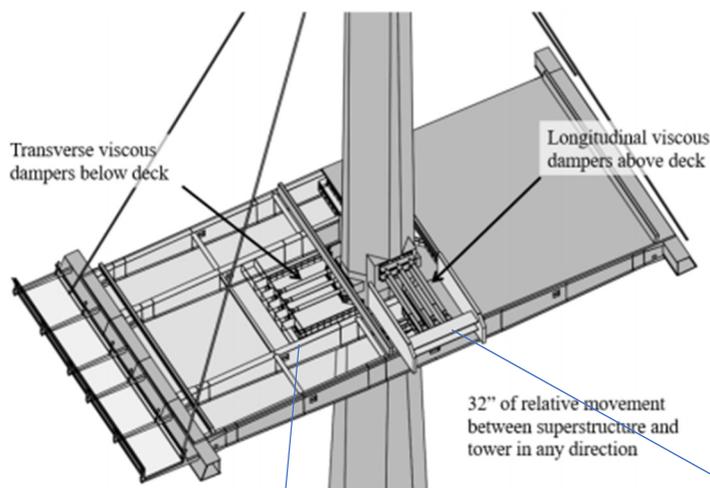


圖 52 橋面版縱向、橫向阻尼器示意圖²⁷

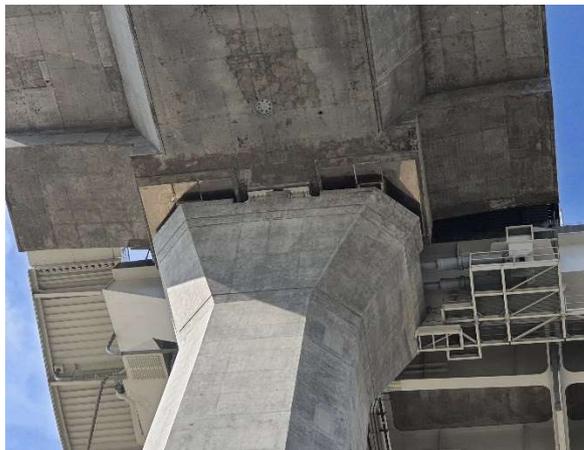


圖 53 設置於橋面版下的橫向阻尼器



圖 54 設置於橋面版上的縱向阻尼器

另為方便橋梁檢測、維修，鋼橋下方設有自走式檢測維修車，維修車上並置有剪刀式高空作業車，方便橋梁檢測與維修。檢測維修車上之欄杆間距甚大，雖有告示禁止工作人員站立欄杆上，但由於間距甚大，施工或橋梁檢測人員仍有由欄杆空隙翻落之風險。經詢問資深橋梁檢測工程師欄杆間距設計理念，渠表示護欄總高度符合規定，且假設「會進到檢測維修車之工作人員，均經過相當程度教育訓練，理論上，不會有人員翻落之風險」。但由照片可以看出，橋梁檢測維修車上各類管線雜亂，未有妥善整理，工作人員行走其中，確實有遭管線絆倒導致翻落之危險。

²⁷ 同註腳 26。

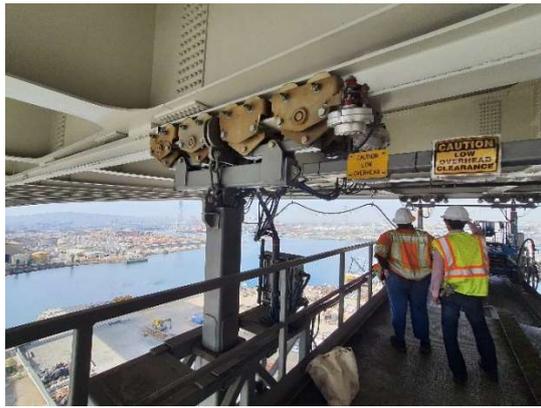


圖 55 自走式橋梁檢測維修車



圖 56 橋梁檢測維修車配備剪刀式高空作業車，據工程師表示不實用。維修車上管線雜亂，有改善空間。



圖 57 橋梁檢測車護欄間距甚大，雖有告示禁止站立在護欄上，但人員仍有翻落風險。



圖 58 橋梁檢測維修車護欄與人體高度比較示意



圖 59 橋面版下附掛之排水管，採用銲接鋼管



圖 60 橋面排水管穿過鋼樑

五、加州 39 號公路 31 英里處橋梁沖刷/耐震能力提升改建計畫現勘 (State Route 39 North Fork San Gabriel River Bridge Scour Mitigation/Seismic Retrofit)

加州運輸署自 2008 年就發現座落於加州 39 號公路 31 英里處，跨越聖蓋博河 (SAN GABRIEL RIVER) 之橋梁 (橋梁編號 53-2245) 基礎有沖刷問題，並提出基礎補強、河道護岸保護，甚至拆除改線重建等相關規劃，歷經 11 年 7 次的審查修正，最終改線重建方案於 2019 年獲得同意。

舊橋為三跨 I 型橋，全長 67.1 米，下部結構除兩側橋台外，有二基礎落墩在河道中，落墩於河道之基礎受到河道沖刷影響有安全上疑慮，且舊橋耐震能力不足，故加州運輸署提出防止橋梁沖刷及符合新耐震規定之改建計畫，計畫內容包括調整道路線型，改建為單跨鋼筋混凝土箱梁橋，以減少河道沖刷對橋梁之影響並提升耐震能力。

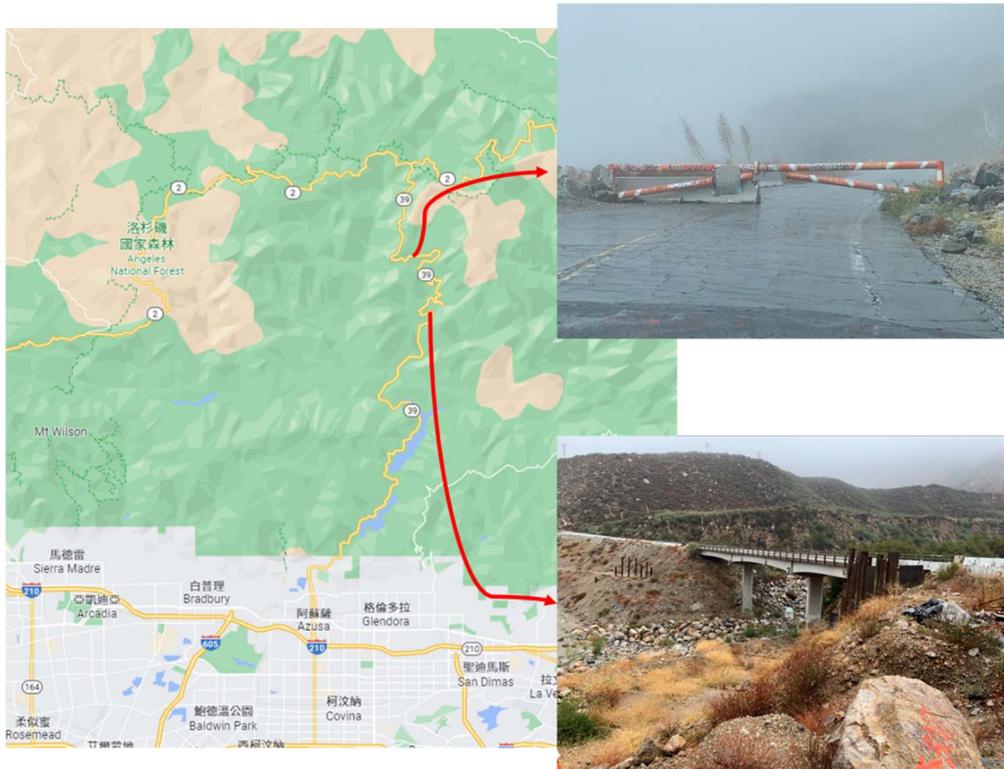


圖 61 右上，加州 39 號公路 38 英里處因邊坡坍塌，目前管制，禁止車輛通行。右下，31 英里處，舊橋現況，目前處於停工狀態。

新橋改建約 70 米，計畫自 2008 年提出後，歷經 11 年審查迄至 2019 年獲得環境部門（魚類及野生動物保護署，Department of Fish and Wildlife）審查許可，並於同年開工。

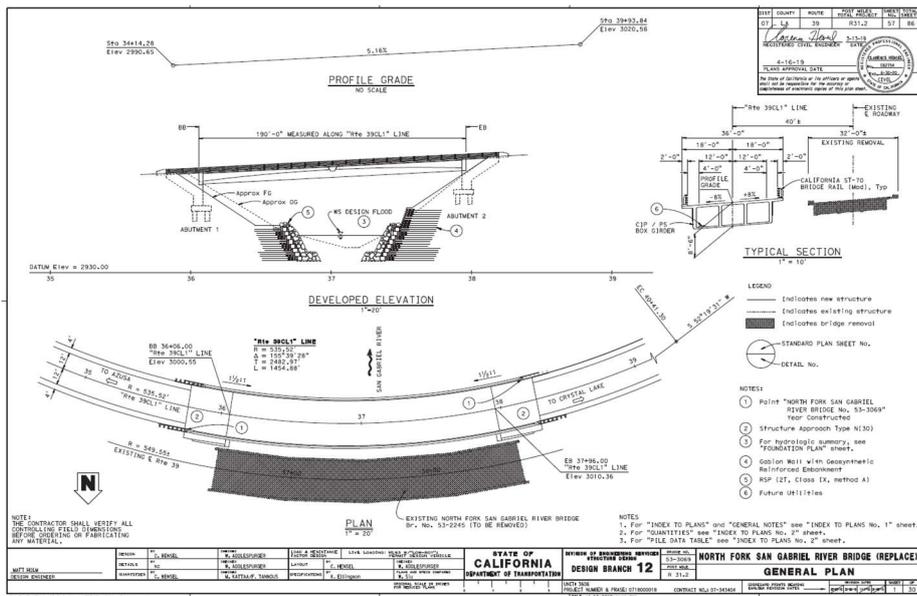


圖 62 North Fork San Gabriel River Bridge 新橋與河道剖面圖及新橋平面圖

該工程工地位於於洛杉磯郡山區聖蓋博水庫上游，山區除春、夏兩季健行、露營人潮較多外，鮮有人、車經過，屬於環境敏感區域，仍有黑熊、狐狸等野生動物於該區域繁衍，地區生態受到魚類及野生動物保護署的強力保護。開工後，隨即面臨嚴苛之環境保護要求，包括挖掘、工地用水等均受到嚴格管制，凡經工地使用之廢水均需外運，導致該工程開工迄今僅見材料進場、工地整理以及少部分因應橋臺保護之打樁工程。工程目前仍屬於停工狀態，承攬商目前已向市政府提起訴訟。



圖 63 舊橋與路面全景圖，圖左側為河道，目前為冬季枯水期

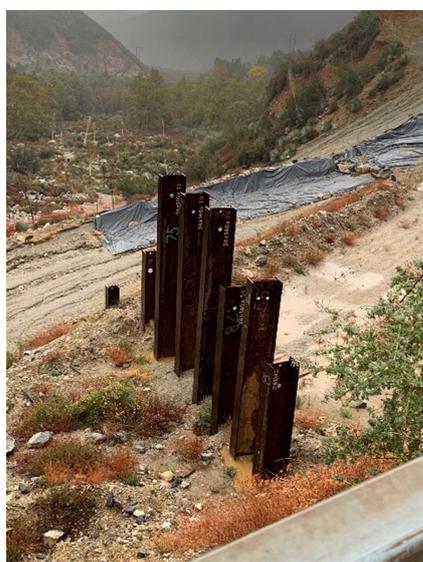


圖 64 工地除已完成施工便道、橋臺保護樁外，目前停工中。



圖 65 該工程雖已停工，惟工務所維持運作，亦派有工程師進行工地低度管理

加州 39 號公路位於山區路段，冬季降雪機率高，公路腹地較寬處，設有公路除雪用加鹽儲存桶，供養護車輛加鹽使用。32 英里至 38 英里路段下邊坡路基有坍塌現象，該公路除了橋梁改建計畫外，目前亦小規模以打設 I 型樁方式辦理路基保護及護欄改善工程中，以符合現行公路標準。各項改善工程施工過程，受到環保部門嚴格監督，包括既有樹木保護等。



圖 66 圖右，路基打設 I 型鋼，作基礎及護欄保護設施。圖左，受保護樹木圈圍供辨識，避免受到傷害。



圖 67 路基保護用之型鋼及除雪用鹽儲存桶



圖 68 受保護樹木圈圍供辨識

肆、心得與建議

一、心得

- (一) 橋梁檢測為公路主管機關重要業務之一，除了以「維持社會大眾通行安全」為基本原則、確保「供通行的橋梁都是安全、不安全的橋梁都是封閉」外，考量橋梁為公路重要設施，在公路營運管理財務面來說，橋梁為公路重要資產，辦理橋梁檢測實為「橋梁資產保護」手段之一，也是另一重要概念。建造一座橋梁所費不貲且時間長，對交通衝擊影響大，從總體社會效益及成本來看，將橋梁視為需要透過系統性維護跟保護的「資本密集型資產」，絲毫不為過。
- (二) 承上，由於政府機關或公路營運管理機關（構）財務有限，橋梁檢測除了滿足「安全」這一項基本要求外，透過橋梁檢測預先瞭解掌握橋梁狀況，就需補強改善部分預先且先期投入經費加以改善，可收未雨綢繆、橋梁延壽的效果。本次參訪發現，加州運輸署除了例行性橋梁檢測作業以及維修外，在新建橋梁結構設計上，已逐漸採取構件拆解、容易維修之概念進行橋梁設計。例如傑拉德戴斯蒙大橋，橋梁本體主要構件透過 34 個阻尼器隔震，構件遭受損害，得以最快時間進行損害構件維修或抽換，讓整座橋在全生命週期內能夠發揮效用，甚至能超過原規劃生命週期，繼續使用。
- (三) 各國橋梁檢測度不同，執行重點在於「落實執行」而已。美國 NBIS 明文規定品質控制 QC (Quality control)、品質保證 QA (Quality assurance)，透過程序性管制，確保檢測作業之準確性、一致性。交通部在民國 100 年訂定縣市政府橋梁維護管理作業及評鑑作業品質提升方案，對橋梁檢測作業，要求縣市政府須有自主品質控制 (QC)、品質保證 (QA) 的機制，各縣市政府透過採購程序由顧問公司執行橋梁檢測業務並負責品質控制 (QC)，進行橋梁檢測業務的同時，由縣市政府自辦或委託第三認證單位辦理品質保證 (QA)，完成 QC 與 QA 作業後，進行外部稽核 (Audit)，送交通部運研所（現為公路總局）納入「縣市政府橋梁維護管理作業及評鑑作業」之考評依據。而中央公路主管機關及管理機關對於所管橋梁檢測亦透過養護作業的考核、督導，確保橋梁檢測作業品質，有異曲同工之處。
- (四) 美國土木工程、營建管理市場規模龐大，橋梁檢測業務除由公部門自行辦理外，亦有委託顧問公司辦理者，個別橋梁基本資料、竣工圖、甚至最近一次檢測資料，在特定網站皆可查詢瀏覽、甚至下載。國家基礎設施安全與否皆對外充分揭露，透明度甚高。行政院訂頒橋梁維護管理作業要點，同樣訂有資料建置與開放等規定。
- (五) 工程建設與環境生態二者之競和，仍是難解之課題，以加州 39 號公路未達 70 米雙車道橋梁改建工程為例，工程部門與環保部門歷經 15 年拉鋸，迄今仍未完成，顯示環保部門未來仍在一定程度主導交通政策，甚至要求工程部門作出更多承諾，未來工程建設成本已非工程單一考量，勢必要投注更多環保、生態

之維持成本，如同國道建設從中山高到現在一直不停進化，國道 6 號及當初的蘇花高速公路計畫，均屬於第三代高速公路之規劃設計，規劃在山區採取橋梁或隧道方式，儘量降低對環境的衝擊，同時也有生物廊道的設計，惟因環保因素及社會情勢變遷，目前蘇花高速公路計畫已被蘇花改取代，以局部改善方式來解決東部對外公路交通需求。

二、建議

- (一) 臺灣早期重大關鍵基礎建設或重要橋梁曾有駐軍看守，但隨著解嚴、兩岸開放、承平長久一段時間後，重要設施由駐軍看守情況已不復見，衛戍營舍多已拆除。臺灣位處第一島鍊中樞，也為地緣政治衝突熱區，重要基礎設施如橋梁新建之規劃設計，在未來應將恐怖攻擊以及承受攻擊耐受度納入設計考量。如同傑拉德戴斯蒙大橋 (Gerald Desmond Bridge)、第六街高架橋 (The Sixth Street Bridge) 在設計過程中即將防恐鋼板、隔震支承、伸縮縫等個別構件，在遭遇攻擊或地震後，能夠快速維修抽換納入考量。臺灣地區現有重要橋梁，或可辦理「意外及脆弱性評估 (Vulnerability Assessment)」、「耐衝擊評估 (Impact Assessment)」，預先模擬遭受天災或人為攻擊之弱點，並預先規劃快速修復方式，以便災後能以最快速度回復原有交通運輸功能。
- (二) 在美國行之有年之橋梁承載能力評估 (Load Rating)，於我國係在「公路橋梁檢測及補強規範」第六章結構安全評估作規定。依據 6.1 一般說明規定「(第一項) 橋梁進行定期檢測或特別檢測後，對於安全有疑慮之橋梁進行詳細檢測及結構安全評估，作為是否需進行維修補強之依據。(第二項) 橋梁結構安全評估包括承載能力評估、耐震能力評估、耐洪能力評估及疲勞安全評估等，由公路養護管理機關、公路養護單位依需求辦理。」，亦即對於「安全有疑慮」之橋梁方需進行承載能力評估，在實務作業上稍嫌被動。未來建議當橋梁使用狀況變更，例如橋梁原規劃人行道改車道使用、橋梁段匝道因應交通需要由單車道改劃設為雙車道等，當使用現況與原設計不符時，即需辦理承載能力評估，確保安全。
- (三) 「重車為橋梁安全殺手」，目前國內公路系統橋梁前方少見有限重標誌，重車之取締以監理體系之道路交通管理處罰條例、道路交通安全規則為執法依據；至於在工程面以橋梁承載能力、橋梁安全出發為思考之車輛限重，二者在法規體系及位階上，尚待整合。另監理法規落實執行的強度，亦會直接影響重車超載情形，如何有效取締超載車輛，達到預先遏止超載的發生，亦是當前重車管理主要課題之一。
- (四) 當聯合國推動 SDGs、跨國企業推動 ESG、我國成立永續會，環境永續議題即成為顯學且擁有極大聲量，未來基礎建設與環境永續二者間之競爭與合作，如何不陷入空轉、虛耗，或許需要更上位的決策者掌握時間作政策決定。但由維護公共利益的角度來看，政府投注經費辦理公共設施維護、確保民眾通行安全與經濟發展，具有絕對的正當性及必要性。

附 錄

