

出國報告（出國類別：開會）

參加2024國際橋梁會議 出國報告

服務機關：交通部高速公路局中區養護工程分局

姓名職稱：黃俊豪副分局長

派赴國家/地區：美國/德州聖安東尼奧

出國期間：113年6月1日至6月8日

報告日期：113年8月27日

公務出國報告摘要

頁數：51

報告名稱：參加2024國際橋梁會議出國報告

主辦機關：交通部高速公路局

出國人員姓名/服務機關/職稱/電話：

黃俊豪/交通部高速公路局中區養護工程分局/副分局長/04-2251-9181

出國類別：開會

出國期間：113年6月1日至6月8日

出國地點：美國德州聖安東尼奧

關鍵詞：橋梁、運輸

內容摘要：

公路係維持民生需求與促進社會及經濟發展之必要設施，而橋梁更為其中之重要關鍵，爰如何確保橋梁之服務功能處於正常狀態，向為各國政府施政重點。我國位於板塊交界，並處熱帶及亞熱帶之交會區域，地震、豪雨、颱風頻繁，兼且受全球氣候變遷影響，相關洪澇亦出現持續加劇情形，凡此均對橋梁設計、建設及維護管理帶來挑戰。隨著世界各國於橋梁領域之經驗持續累積，加以相關技術發展及科技應用不斷演進，爰透過本出國計畫前往美國德州聖安東尼奧參加2024國際橋梁會議，藉以了解國外於橋梁生命週期各階段面臨之課題與發展趨勢及應用情形，並綜整相關新知提出心得。

目次

目錄	I
圖目錄	II
表目錄	V
第一章 出國目的	1
第二章 行程概要	1
第三章 會議內容	2
3.1 議程簡介	2
3.2 會議議題	3
3.3 展場簡介	10
3.4 會議內容摘述	11
第四章 沿途交通設施簡介	39
4.1 公共運輸設施	39
4.2 道路及橋梁設施	42
4.3 其他設施	44
第五章 心得及建議	45
4.1 心得	45
4.2 建議	48
參考文獻	49

圖目錄

圖 1、IBC 2024 會場大廳	3
圖 2、IBC 2024 會議 APP	9
圖 3、IBC 2024 Keynote Session 概況	9
圖 4、產品攤位展示概況	10
圖 5、競賽獲獎海報展示概況	10
圖 6、美國橋數前 10 大州之橋數及橋況不佳比率概況	11
圖 7、德州橋況不佳橋數及結構缺陷佔比變化	11
圖 8、TxDOT 轄管橋梁維護管理架構	12
圖 9、TxDOT 分享其於增進內部維修能力之經驗	12
圖 10、TxDOT 分享其於 UHPC 方面之經驗	12
圖 11、TxDOT 橋梁遭佔用並衍生火害案例	13
圖 12、TxDOT 於箱梁側縫增設防阻設施	13
圖 13、TxDOT 之數位交付計畫及效益	14
圖 14、Fern Hollow Bridge 倒塌情形	15
圖 15、各項分析因子之重要性比較	16
圖 16、賓州收費公路委員會先導計畫建置之橋梁 3D 模型	17
圖 17、Delaware Memorial Bridge 橋面劣化修補情形	18
圖 18、採 UHPC 及 LMC 之成本比較	19
圖 19、Delaware Memorial Bridge 採 UHPC 完成橋面更換	19
圖 20、碳排比較(未考慮橋面重置及交通衝擊)	20
圖 21、Sunshine Skyway Bridge 主跨照片	20
圖 22、Sunshine Skyway Bridge 監測儀器佈設	21
圖 23、Sunshine Skyway Bridge 伸縮縫監測視覺化儀表	21
圖 24、錨碇室之除濕裝置	24

圖 25、Robert Street Bridge	26
圖 26、Robert Street Bridge 及其傳統檢測作業情形	27
圖 27、混凝土裂縫及剝落自動偵測結果	28
圖 28、採用共享平台進行劣化規模量測及記錄	28
圖 29、Robert Street Bridge 採新檢測模式帶來之效益	29
圖 30、無縫式橋面銜接 CRCP 系統及示意	30
圖 31、UHPC 與傳統混凝土之力學行為比較	31
圖 32、美國 UHPC 橋梁互動地圖	31
圖 33、UHPC 與傳統混凝土之成分比較	31
圖 34、UHPC 於橋梁領域之應用情形變化	32
圖 35、UHPC 應用於構件間之接合	32
圖 36、UHPC 應用於橋面接合	32
圖 37、UHPC 應用於橋面板重置	33
圖 38、UHPC 應用於梁端修復	33
圖 39、採用 UHPC 減少 27%重量之案例	33
圖 40、採用 UHPC 增長 25%橋跨之案例	34
圖 41、採用 UHPC 減少梁深之案例	34
圖 42、採用 UHPC 減少主梁數量之案例	34
圖 43、採用 UHPC 增加單跨長度進而減少落墩之案例	35
圖 44、UHPC 設計相關規範	35
圖 45、Hernando De Soto Bridge 及主跨鋼梁斷裂情形	35
圖 46、Hernando De Soto Bridge 主跨鋼梁斷裂情形	36
圖 47、現場樣本於焊道頂部觀察到之裂縫	36
圖 48、FHWA 請各州檢測具有 T1 鋼板之 NSTM 橋梁	37
圖 49、符合 FHWA 於 2021 年 12 月 13 日備忘錄之橋梁數	37

圖 50、美國聯邦公路信託基金之燃料稅收入持續減少	38
圖 51、威斯康辛州因應燃料稅收入停滯調漲車輛註冊費	38
圖 52、聖安東尼奧之道路系統及公車路網	39
圖 53、聖安東尼奧之停車轉乘站及位置分佈	39
圖 54、聖安東尼奧之轉運中心及位置分佈	40
圖 55、聖安東尼奧之轉運中心	40
圖 56、利用公車 APP 掃描站牌 QR-Code 可顯示等候時間.....	41
圖 57、聖安東尼奧市區公車附掛自行車及車內概況	41
圖 58、聖安東尼奧市區公車之日票及無障礙設施	41
圖 59、聖安東尼奧之共享單車	42
圖 60、聖安東尼奧之電動滑板車	42
圖 61、410 號州際公路.....	42
圖 62、410 號州際公路之預力梁橋及密排梁橋.....	43
圖 63、35 號州際公路進行之高架橋工程.....	43
圖 64、行人穿越道設置之按鈕式號誌	44
圖 65、聖安東尼奧機場之非接觸式飲水機	44
圖 66、聖安東尼奧機場廁所供大眾回饋使用意見之 QR-Code	44

表目錄

表 1、出國行程表	1
表 2、IBC 2024 大會議程	2
表 3、各類別之研討議題	3

第一章 出國目的

橋梁為路線跨越地形阻隔、維持區域發展之重要關鍵設施，其阻斷時，由於不易於短時間內恢復，因此除會對用路人造成重大不便外，亦會對社會及經濟帶來重大衝擊，爰如何確保其服務功能處於正常狀態，向為世界各國政府之施政重點。

我國位處板塊交界，地震事件頻繁，加以位於熱帶及亞熱帶交界，經常遭受豪雨、颱風侵襲，兼且受全球氣候變遷影響，相關洪澇亦出現持續加劇情形，凡此均對橋梁設計、建設及維護管理帶來挑戰；於此同時，隨著經驗不斷累積、科技持續發展，各類有利於橋梁建設及維護管理之技術不斷推陳出新；綜此，為了解相關領域之技術發展及應用情形，爰辦理本出國計畫，期藉以了解國外於橋梁各生命週期階段之最新技術及發展情形，俾供相關機關(構)參考。

第二章 行程概要

本次出國計畫係前往美國德州聖安東尼奧參加「賓州西部工程師協會」(Engineers' Society of Western Pennsylvania, ESWP)主辦之「2024 國際橋梁會議」(International Bridge Conference 2024, IBC 2024)，計畫期間為民國 113 年 6 月 1~8 日，出國行程如表 1。

表 1、出國行程表

113 年		行程	起迄或停駐地點
月	日		
6	1~2	前往美國聖安東尼奧	臺灣桃園→美國舊金山 →美國聖安東尼奧
6	3~5	參加研討會	美國聖安東尼奧
6	6~8	返回臺灣	美國聖安東尼奧→休士頓 →舊金山→臺灣桃園

第三章 會議內容

為促進橋梁相關技術發展及交流應用，並培育年輕橋梁工程師，ESWP 每年舉辦國際橋梁會議，本年度會議於德州聖安東尼奧萬豪河心酒店 (Marriott Rivercenter) 舉辦，會議議程及相關內容如后。

3.1 議程簡介

本會議分 6 大類，分別為 Keynote Session、Featured State Session、Proprietary Session、Technical Session、Special Session、Workshop，多數場次於 6 個場地 (G、H、I、J、K+L、M) 同時進行，議程如表 2，大廳概況如圖 1。

表 2、IBC 2024 大會議程

時間	113/6/3	113/6/4	113/6/5
0800 ~1000	Keynote Session(G+H)	Technical Session(G) Technical Session(H) Technical Session(I) Technical Session(J) Workshop(K+L) Workshop(M)	Technical Session(G) Technical Session(H) Technical Session(I) Technical Session(J) Workshop(K+L) Workshop(M)
1030 ~1200	Featured State Session(G+H) Proprietary Session(I)	Technical Session(G) Technical Session(H) Technical Session(I) Technical Session(J) Workshop(K+L) Workshop(M)	Technical Session(G) Technical Session(H) Technical Session(I) Technical Session(J) Workshop(M)
1330 ~1500	Featured State Session(G+H) Proprietary Session(I)	Technical Session(G) Technical Session(H) Technical Session(I) Technical Session(J) Workshop(K+L) Workshop(M)	-
1530 ~1730	Special Session(G) Special Session(H) Special Session(I) Special Session(J) Workshop(K+L) Workshop(M)	Technical Session(G) Technical Session(H) Technical Session(I) Technical Session(J) Workshop(K+L) Workshop(M)	-

註：括號內為會議室代碼



圖 1、IBC 2024 會場大廳

3.2 會議議題

本次會議計有 118 場次，各類別之議題如表 3，其中場次最多者為 Technical Session，其次為 Special Session。此外，為響應環保，本次會議並未提供紙本論文，另於會議前提供導覽 APP，並於會議後提供論文電子檔。

表 3、各類別之研討議題

項次	類別	議題名稱
1	Featured State Session	(1) IBC 24-FS01: Introduction (2) IBC 24-FS02: Preserving Texas Bridges (3) IBC 24-FS03: Preserving Texas' Trusses (4) IBC 24-FS04: I-35 NEX Central Project: Delivering Elevated Lanes in a Constrained Corridor (5) IBC 23-FS05: Concrete Deck Practices and Discussion of Results of Domestic Scan (6) IBC 23-FS06: Bridge Inspection Program in Texas (7) IBC 23-FS07: TxDOT' s Plan for Digital Delivery (8) IBC 23-FS08: TxDOT' s Bridge Design for Expedited Construction

2	Proprietary Session	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-01: High Load Multi-Rotational Disk bearings for the Skillman Street Arch Bridge (2) IBC 24-02: Lateral Slide of Permanent Panel Bridges to Minimize Traffic Impact (3) IBC 24-03: Fibre Composite Pedestrian Bridges on the Dominion Trail (4) IBC 24-04: Leveraging UAS, AI, and Digital Twin Technology to Transform Bridge Inspection: Robert Street Bridge (5) IBC 24-05: Two Coat Inorganic Coating System for Steel Bridges (6) IBC 24-06: Implementing F3148 Fixed Spline Fastening and The Combined Method
3	Special Session- Young Attendees	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-SS01: Commercial St. Bridge: Finite Element Modeling of a Steel Delta Frame Structure for Accelerated Bridge (2) IBC 24-SS02: Springville, UT 1600 South - Bridge C 1093 over UPRR/UTA (3) IBC 24-SS03: Texas DOT - Bridge Construction & Maintenance (4) IBC 24-SS04: P3 Pathway Projects in PA
4	Special Session- Current Topics and Issues for Bridge Owners	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-SS05: DelDOT' s Implementation of Risk-Based Inspection Intervals (2) IBC 24-SS06: Mitigating Fire Hazards at Texas Bridges (3) IBC 24-SS07: Human-centric AI for Trustable Bridge Inspection and Maintenance Planning
5	Special Session- State DOT Bridge Program Updates	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-SS09: Louisiana Department of Transportation & Development Bridge Program (2) IBC 24-SS10: Texas DOT Bridge Program (3) IBC 24-SS11: Bridges - A Keystone of Pennsylvania Infrastructure (4) IBC 24-SS12: Show Me Bridges at the Missouri Department of Transportation
6	Special Session- T1 Steel Inspection, Testing, and Repair Strategies	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-SS13: Inspection and Testing Access for T1 Steel (2) IBC 24-SS14: Kentucky' s T-1 Steel Inspection Program (3) IBC 24-SS15: Jennings Randolph T1 Steel Inspection, Findings, and Indication Remediation (4) IBC 24-SS16: Performance Qualification of UT Technicians for T1 Inspections

7	Technical Session- Suspension Rehabilitation Design	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-07: Pittsburgh's Three Sisters Bridges Rehabilitation-Historic Bridge Rehabilitation Lessons Learned (2) IBC 24-08: Repair & Rehabilitation of Historic Suspension Bridges Great & Small (3) IBC 24-09: Suspension Bridge Rehabilitation and Preservation Constructability Challenges (4) IBC 24-10: Rehabilitation of the 1870/1914 Waco Suspension Bridge (5) IBC 24-23: Proposed Improvements to North American Main Cable Dehumidification Systems (6) IBC 24-24: Deck Replacement and Strengthening of the Throgs Neck Bridge (7) IBC 24-25: Completion of First UHPC Deck Rehabilitation on Entire Suspension Bridge
8	Technical Session- Materials & Research	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-11: Strengthening of White Bayou Bridge with FRP Composites (2) IBC 24-12: Performance of Carbon Fiber Strand in a Maine Cable Stay Bridge (3) IBC 24-13: Industry Engagement Survey for UHPC Beam End Encasement Options for the Construction of New Steel Bridges (4) IBC 24-14: Can the Application of Higher Strength and Corrosion Resistant Reinforcement Improve the Crack Control Performance of Bridge Decks and Provide Improved Durability and Service-Life? An Illinois DOT Case Study will be Presented.
9	Technical Session- Cable Stay	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-15: Load Rating of The Gerald Desmond Bridge (2) IBC 24-16: Construction engineering of the US 181 Harbor Bridge Replacement main spans (3) IBC 24-17: Case Study of the Rehabilitation and Preservation of Two Ohio River Cable Stay Bridges (4) IBC 24-18: I-395 Signature Bridge - Construction Engineering of Precast Arches and Stayed Spans
10	Technical Session- Innovative Construction Techniques	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-19: Protection Level 3 application on Internal PT for large precast segmental bridge (2) IBC 24-20: Preliminary Fatigue Evaluation of a 100-Year-old Double Level Bridge (3) IBC 24-21: Predicting Bridge Health: Machine Learning-Based Condition Rating from Element-Level Inspections (4) IBC 24-22: An Overview of the I-95 Bridge Collapse, Emergency Repairs, and Bridge Replacement

11	Technical Session- Construction Engineering	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-26: Construction of the US 60 Bridge over the Cumberland River (2) IBC 24-27: Brightline Trains Florida: Rail Structure and Construction Innovations over 160 miles of Railroad (3) IBC 24-28: High-Load Jacking for Truss Bearing Replacement at the Pulaski Skyway (4) IBC 24-38: Falls Creek Bridge: Design For a Mountainous Site Washed Out by Atmospheric River (5) IBC 24-39: Falls Creek Bridge: Accelerated Bridge Construction With Precast, Launching and Lateral Sliding (6) IBC 24-40: Walk Bridge Project: The design journey of replacing a historic movable rail bridge in a busy Northeast Corridor, from bridge type selections to creating an aesthetic structure reflecting the community of Norwalk, Connecticut (7) IBC 24-50: Shop Assembly and Steel Erection on the New Nice/Middleton Bridge (8) IBC 24-51: Complex Steel Erection Procedure for Curved Girders and Substantial Simple Spans (9) IBC 24-52: Innovative Construction for a Complex Site (10) IBC 24-63: The Replacement of the Park Avenue Viaduct: Micropile Foundations and Innovative Construction Techniques (11) IBC 24-64: Value Engineered Solution for the Replacement of a Highly Skewed Heavily Traveled Urban Bridge (12) IBC 24-65: Don' t Judge a Bridge by Its Span Length: West Montgomery Avenue Bridge Replacement Project (13) IBC 24-66: Constructability Reviews – an invaluable part of the process
12	Technical Session- Foundation Design & Analysis	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-44: Widening an Interprovincial Bridge over the Ottawa River (2) IBC 24-45: New River Draw Bridge Design and Analysis for Cooper E80 Locomotive Loads (3) IBC 24-46: The Value of Value Engineering
13	Technical Session- Rehabilitation Design	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-35: Suspended Truss Span Rehabilitation of Wind Shear Devices (2) IBC 24-36: Rehabilitation of the Historic Union Bridge over the Ottawa River (3) IBC 24-37: Bringing New Life to an Old Bridge through Effective Teamwork (4) IBC 24-75: Deck Removal for the I-75 Bridge over the Rouge River (5) IBC 24-76: Rigid-Frame Bridge Seismic Retrofits on TransCanada Highway (6) IBC 24-77: A Case Study on Retrofitting of a Box Girder Bridge with CFRP and External Tendons

14	Technical Session- Design & Analysis	<p>(1) IBC 24-32: Existing Pier Evaluation using Non-Linear Composite Concrete Modeling</p> <p>(2) IBC 24-33: Rehabilitation of the LA 47 over Intracoastal Waterway Gulf Outlet</p> <p>(3) IBC 24-34: Design of the Main Span for the Bogota MRT Line Viaduct</p>
15	Technical Session- Design & Analysis- Innovation	<p>(1) IBC 24-29: Triple I-Girder, Integral Steel Straddle Bent Application for I-10/US69 Beaumont Eastex</p> <p>(2) IBC 24-30: Pocket Track Viaduct Pier Strengthening and Rehabilitation</p> <p>(3) IBC 24-31: Data-Driven Preventive Maintenance and Service Life Increase of the Sunshine Skyway Bridge – Tampa FL, USA</p>
16	Technical Session- Design & Analysis-Urban Interaction	<p>(1) IBC 24-41: Jane Byrne Interchange: Complex Interchange in Historic Urban Environment</p> <p>(2) IBC 24-42: Bridge Rehabilitation in the Heart of Our Nation’s Capital</p> <p>(3) IBC 24-43: Pittsburgh International Airport Terminal Modernization- Construction overview and opening preview</p>
17	Technical Session- Movable Bridges	<p>(1) IBC 24-47: High Rise Bridge Grid Deck Replacement and Structural Repairs</p> <p>(2) IBC 24-48: Vehicle Collision Repairs to an Overhead Counterweight Rolling Lift Bridge</p> <p>(3) IBC 24-49: Collaboration to address Construction Challenges – The Loxahatchee River Bridge Rehabilitation</p>
18	Technical Session- Design & Analysis- Ped Bridge	<p>(1) IBC 24-53: An S-Curved Tied Arch – An Overnight Success: Design and Construction of the Northaven Trail Pedestrian Bridge</p> <p>(2) IBC 24-54: The Nancy Pauw timber shallow-arch footbridge</p> <p>(3) IBC 24-55: Curved, Variable Depth, Propped Cantilever, Post-Tensioned Bridge</p>
19	Technical Session- Asset Management	<p>(1) IBC 24-56: City of Pittsburgh Comprehensive Bridge Asset Management Program Overview</p> <p>(2) IBC 24-57: An Investigative Study on Extensive Transverse Deck Cracking – Two Twin Bridges</p> <p>(3) IBC 24-58: Inspection, Evaluation, and Rehabilitation of the Taylor Bridge Gusset Plates</p>
20	Technical Session- Digital Delivery	<p>(1) IBC 24-59: Pennsylvania Turnpike Commission: Pilot 3D Bridge Model Project</p> <p>(2) IBC 24-60: The Digital Puzzle: Working Together to Implement BIM Standards</p> <p>(3) IBC 24-61: Transitioning the Nation’s largest bridge inventory to Digital Delivery</p> <p>(4) IBC 24-62: Parameter-Driven Creation of 2D Traditional Style Drawings, 3D Models, and Analytical Models: A Quantum Leap in</p>

21	Technical Session- Design & Analysis-Arch	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-67: Innovative Hanger Replacement for the Sherman Minton Bridge (2) IBC 24-68: Engineering for Bridge Demolition - Recommended Best Practices (3) IBC 24-69: Design of the Hawk Falls Arch Bridge (4) IBC 24-70: New Tricks Used to Rehabilitate an Old Arch Bridge
22	Technical Session- Rail	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-71: Streamlining Infrastructure: Box Jacking for Trenchless Underpasses in North America (2) IBC 24-72: 120 Year Old Truss Replacement with 187 TPG Span (3) IBC 24-73: Valley of the Dons - Utilizing Long Span Segmental Bridges over the Environmentally Sensitive Terrain of the Don River (4) IBC 24-74: Replacement of Norfolk Southern Bridge N-680.20 over North Court Street in Circleville, Ohio
23	Technical Session- Construction Engineering- Demolition	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-78: Demolition Challenges of the Harry W Nice/Thomas "Mac" Middleton Bridge (2) IBC 24-79: Engineering and Execution of the I-74 Mississippi River Bridge Removal (3) IBC 24-80: Sequenced Removal of the Non-Redundant I-30 Bridge
24	Technical Session- Design & Analysis-Steel	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-81: Record Setting I-64 Kanawha River Bridge (2) IBC 24-82: Efficient Design of Modern Steel Highway Bridges (3) IBC 24-83: Standard Designs and Plans for Modern Steel Highway Bridges
25	Technical Session- Segmental	<ul style="list-style-type: none"> (1) IBC 24-84: Waxed Tendons for Fort Walton Beach Bridge Replacement Project (2) IBC 24-85: Evaluation, Design and Implementation of a Holistic Repair Strategy to Extend the Service Life of the Post-Tensioned I-526 Wando River Bridge (3) IBC 24-86: Brim Based Geometry Control in Cable Stayed Bridge Construction
26	Workshop	<ul style="list-style-type: none"> (1) W01: Routine and Special Permit Load Analysis to Ensure Bridge Safety (2) W02: Best Professional Practices for the Bridge Industry from around the World (3) W03: AASHTO COBS Workshop (4) W04: Ensuring Safety and Planning for what might seem unlikely during construction (5) W05: Structural Design with UHPC using AASHTO LRFD Guide Specification (6) W06: Bridge Preservation for Existing and New Bridges (7) W07: Emerging Technologies in Structural Health Monitoring (8) W08: UAS Applications for Bridge Inspections (NCHRP 12-122) (9) W09: BIM and Digital Twins: From 2D Deliverables to Intelligent Models

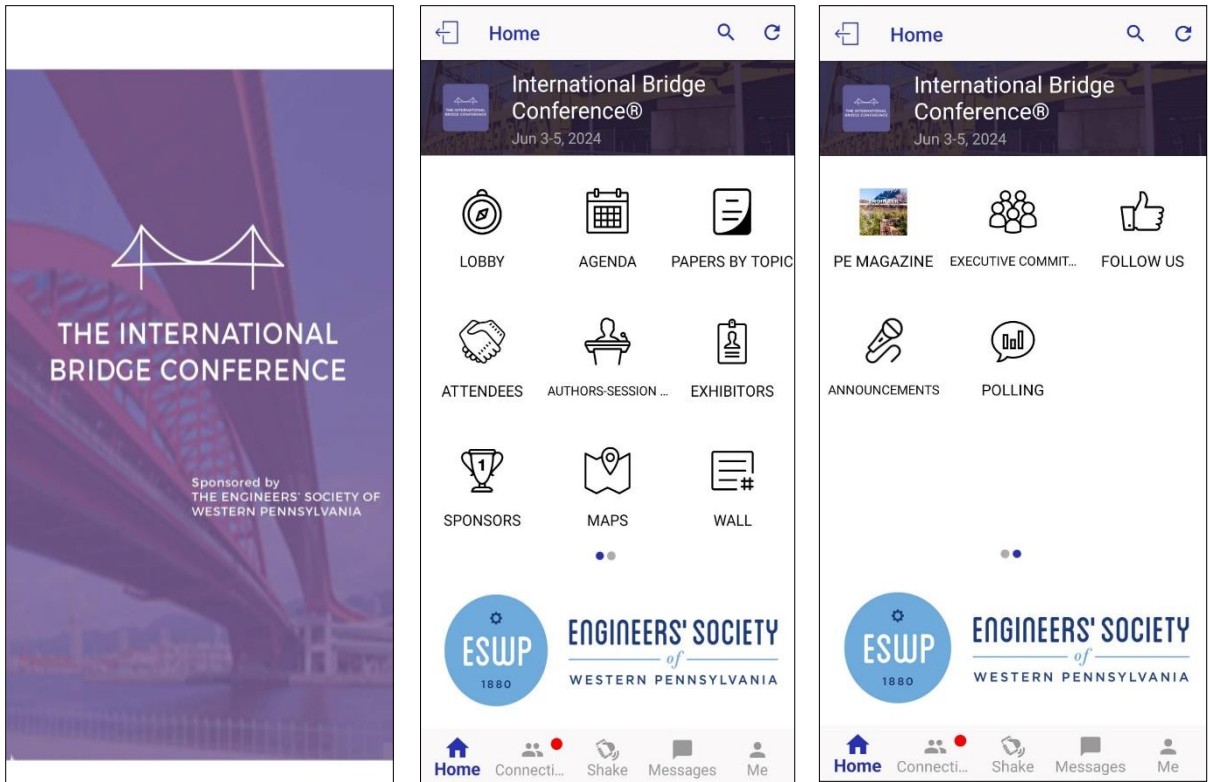


圖 2、IBC 2024 會議 APP

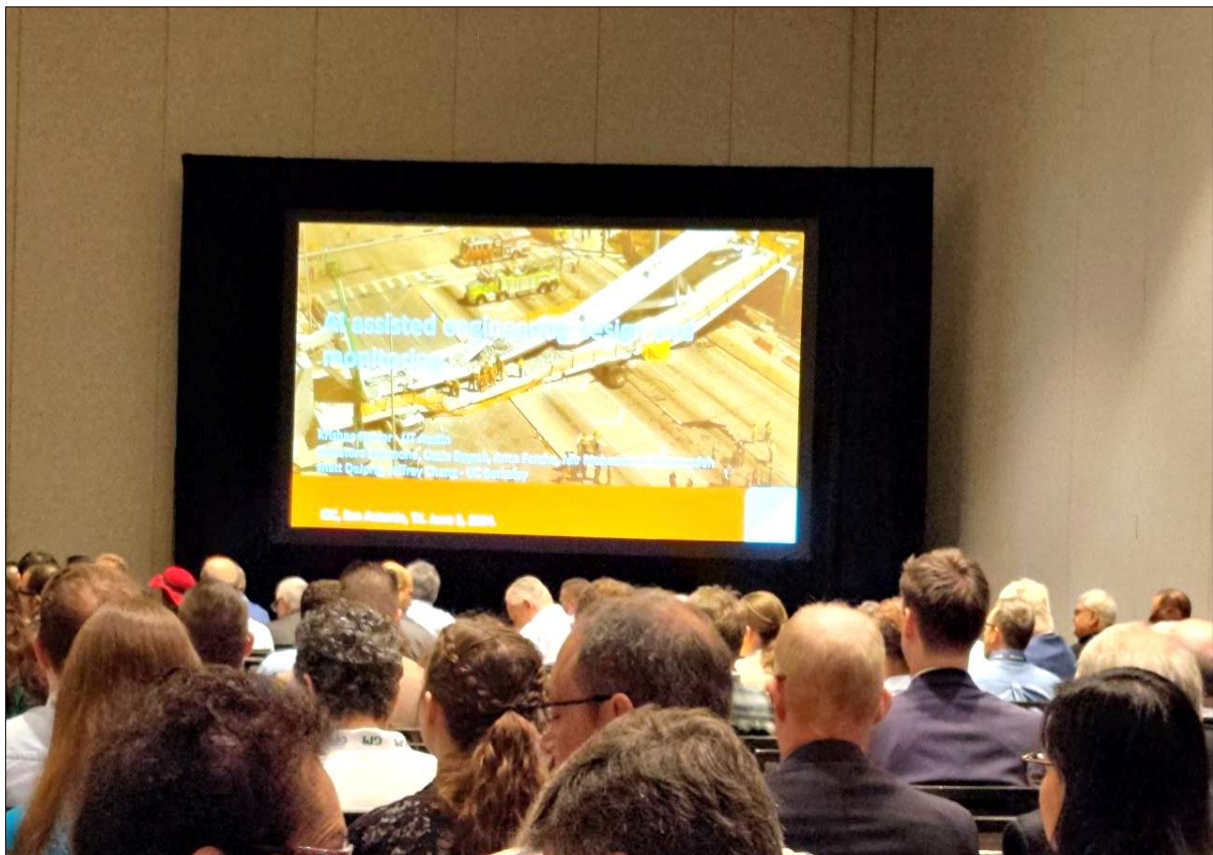


圖 3、IBC 2024 Keynote Session 概況

3.3 展場簡介

IBC 2024 除舉辦百餘場研討會議，並於會議室旁設置多個展區供民間廠商設置攤位介紹其產品或技術，此外，為鼓勵全世界學生參與 IBC，主辦單位特別於會議前舉辦競賽，獲獎學生除可免費參加 IBC(含交通及住宿)，主辦單位亦設置專區供獲獎學生陳列其成果海報並於現場解說。



圖 4、產品攤位展示概況

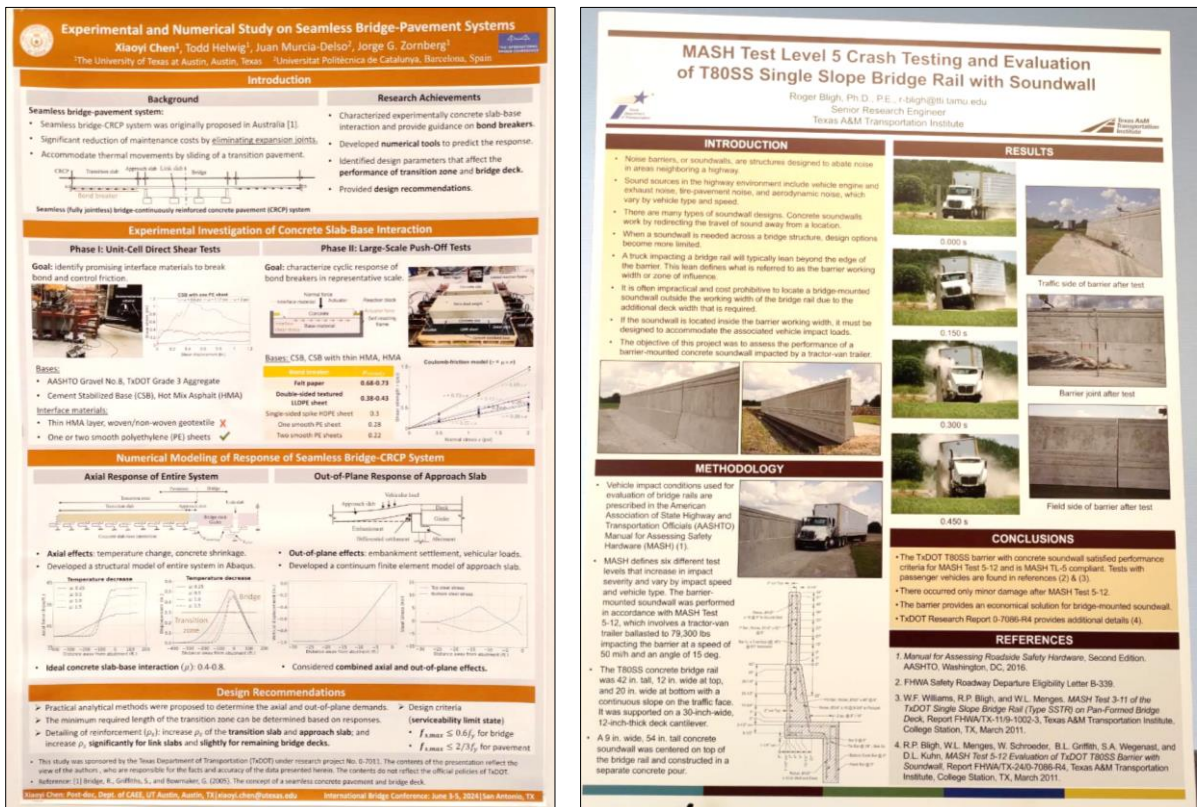


圖 5、競賽獲獎海報展示概況

3.4 會議內容摘述

一、特色州會議(Featured State Session)

(一)本年度特色州為德州，該州轄內橋梁約 5.6 萬座，其中 3.6 萬座由德州運輸部(TxDOT)維管，平均橋齡約 50 年，橋梁總數為各州之冠，橋況不佳比例約 1.3%，低於全美國平均值(7.8%)，近 5 年應維修橋數呈逐年下降趨勢。

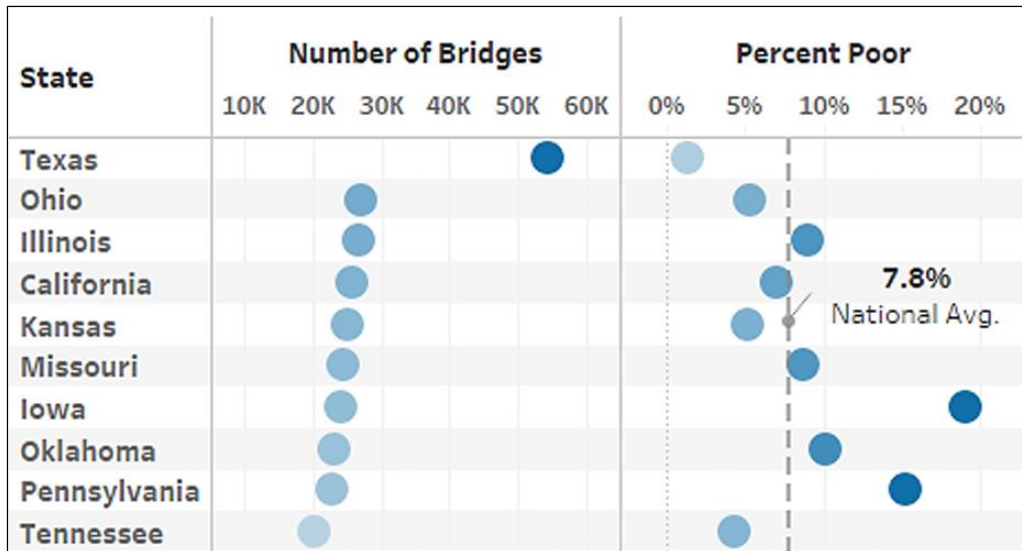


圖 6、美國橋數前 10 大州之橋數及橋況不佳比率概況

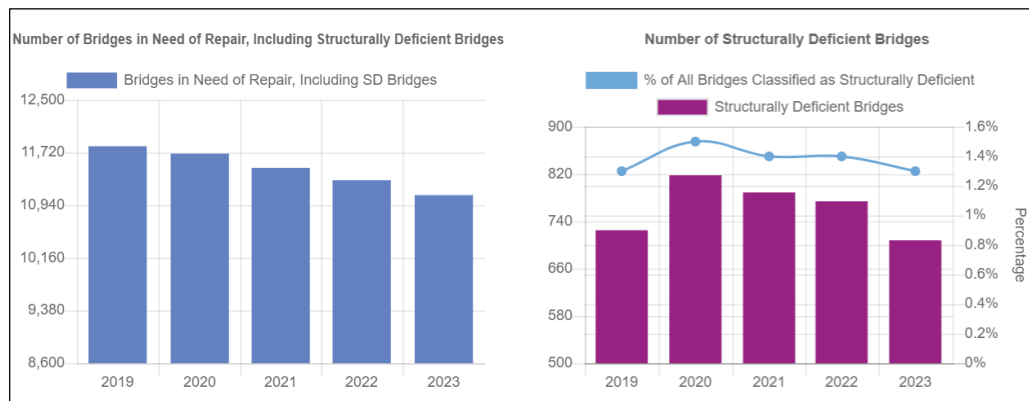


圖 7、德州橋況不佳橋數及結構缺陷佔比變化

(二)TxDOT 轄管橋梁當中，5%橋梁係自行檢測，餘 95%則委由橋檢公司辦理，其中例行檢測作業係由 20 家廠商辦理，非贅餘鋼製拉力構件(Nonredundant Steel Tension Member, NSTM)由 3 家辦理，水下檢測由 2 家辦理，每 4 年之總檢測費用約 2.5 億美元。

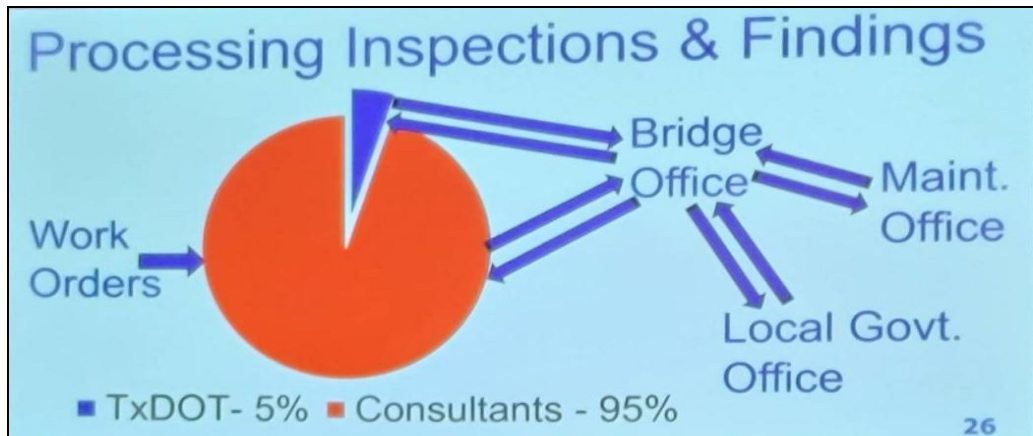


圖 8、TxDOT 轄管橋梁維護管理架構

(三)TxDOT 共進行 8 場演說，內容除橋梁施工、檢測、維修領域外，亦包含內部維修能力(In-House Repair Capability)、超高性能混凝土(UHPC)、佔用防阻、數位交付(Digital Delivery)等領域。

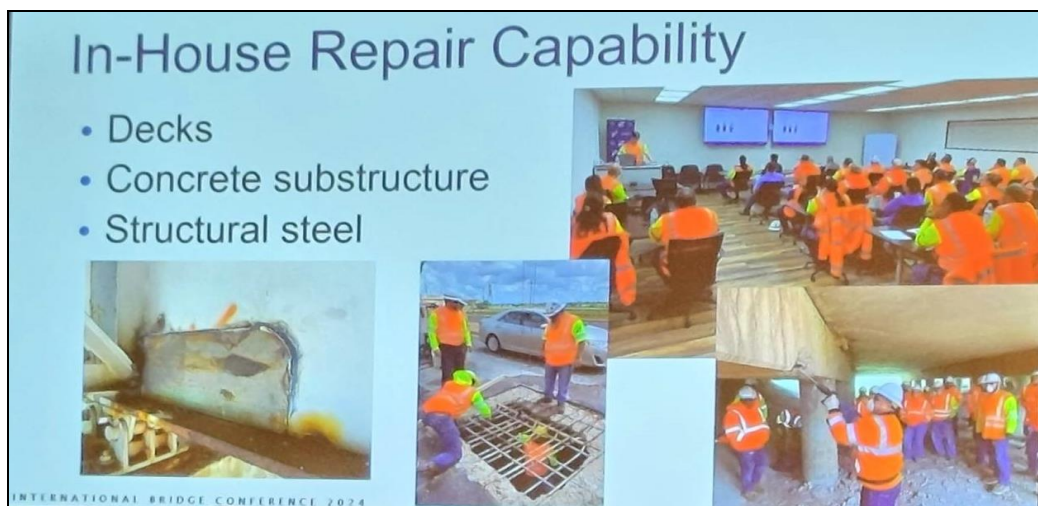


圖 9、TxDOT 分享其於增進內部維修能力之經驗

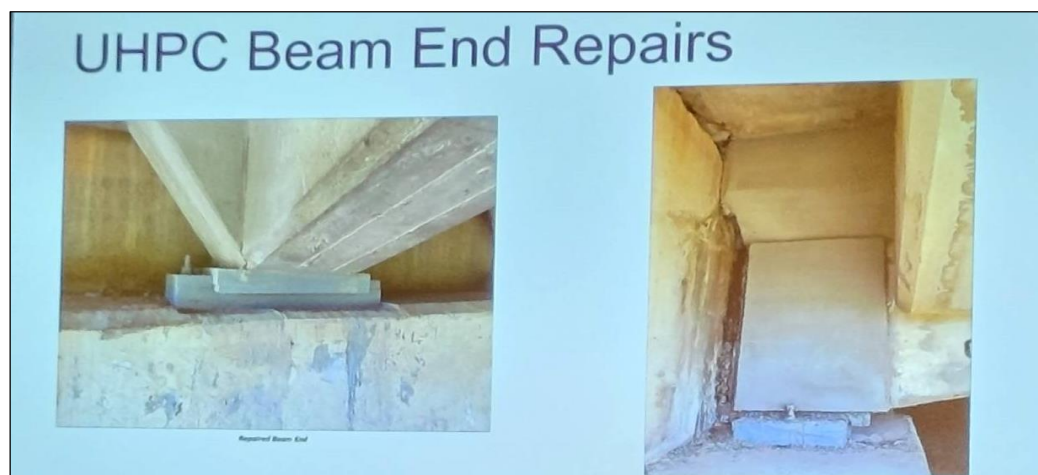


圖 10、TxDOT 分享其於 UHPC 方面之經驗

TxDOT Austin District

- Recurring fire damage to bridges near abutments
- Interior of segmental bridges

NATIONAL BRIDGE CONFERENCE 2024

San Antonio District

- San Antonio Y at Alamo Exit Ramp at SB IH35

NATIONAL BRIDGE CONFERENCE 2024

圖 11、TxDOT 橋梁遭佔用並衍生火害案例

Austin District

INTERNATIONAL BRIDGE CONFERENCE 2024

圖 12、TxDOT 於箱梁側縫增設防阻設施

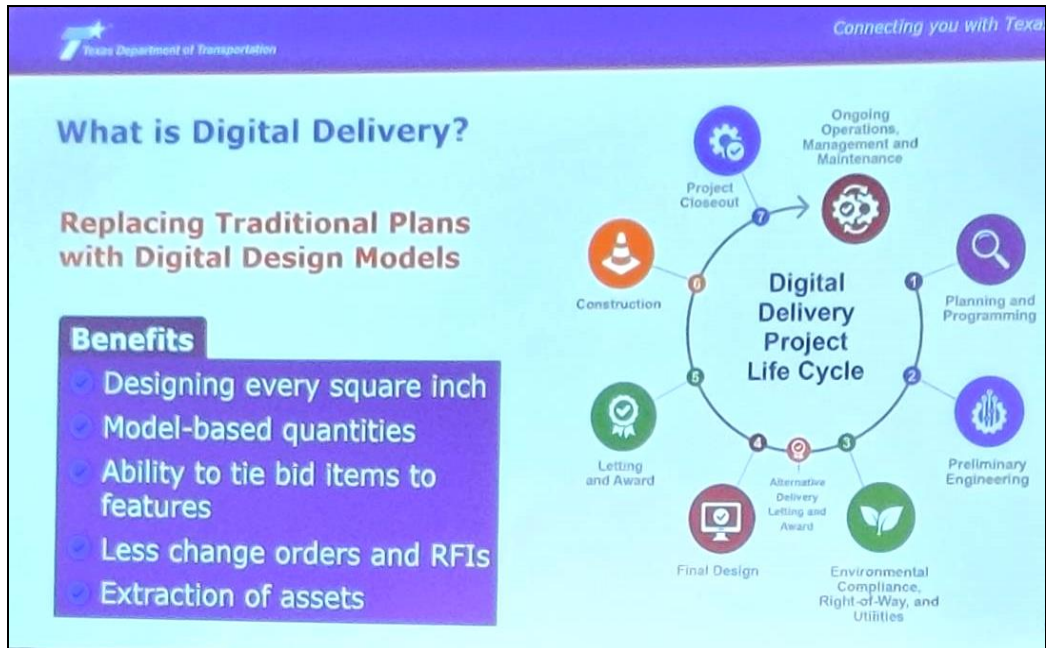


圖 13、TxDOT 之數位交付計畫及效益

二、技術會議(Technical Session)

(一) Technical Session 計 80 場次，議題包含資產管理、斜張橋、創新工法、新建工程、材料與研究、可移動橋梁、橋梁拆除、設計與分析、補強設計、懸索橋補強設計、T1 鋼板及檢測維修等，含括領域廣泛且內容極為豐富，惟因相關場次係於多個會議室同時進行，因此無法全數參與，僅能擇關聯較高之議題參與。

(二) 匹茲堡市綜合橋梁資產管理計畫概述 (City of Pittsburgh Comprehensive Bridge Asset Management Program Overview)

(1) 2022 年 1 月 28 日賓州匹茲堡 Fern Hollow Bridge 倒塌事件後，匹茲堡市長啟動橋梁資產管理計畫，除重新審查、評估其所轄橋梁安全狀況、維護優先順序、短期與長期維護資金需求，亦檢討組織架構及人力需求，並對橋梁使用壽命設定目標，相關之目標主要如下：

- ◆ 重要跨河橋梁之使用壽命為 160 年。
- ◆ 主要橋梁之使用壽命為 100-120 年。
- ◆ 其餘橋梁之使用壽命為 80-100 年。
- ◆ 橋面之使用壽命為 60 年。



圖 14、Fern Hollow Bridge 倒塌情形

(2) 在維護管理上，匹茲堡市除致力於減少封橋數量及降低橋況不佳橋數，具以下狀況之橋梁將優先納入維護：

- ◆ 每日平均卡車數量(ADT)較高之橋梁。
- ◆ 緊急搶修或消防期間之通道。
- ◆ 住宅區唯一聯外橋梁。

(3) 為加速回應維修需求，匹茲堡市除將橋梁結構及維護部門之員工總數從 7 名增加到 25 名，並組建內部橋梁維修人員，成員包含主管、領班、重型設備操作員、認證合格焊工、混凝土修整工。

(三)預測橋梁健康狀況：基於構件檢測評等之機器學習(Predicting Bridge Health: Machine Learning-Based Condition Rating from Element-Level Inspections)

(1) 美國橋梁約 62 萬座，其中經檢測後評屬「較差」者約佔 8%，為建立模型預測橋梁安全狀況，本研究收集 2,199 鋼橋之基本資料及檢測評等資料、2015~2021 年天氣數據，並採多種機器學習模型進行分析及比較。

(2) 本研究將 80%資料用於訓練模型，其餘 20%用於驗證，並採用線性迴歸、Lasso 迴歸、隨機森林(Random Forest)迴歸、支持向

量迴歸(SVR)、XGBoost 迴歸等預測模型，並以隨機森林模型效果最佳，R 平方值達 0.867，優化後之 R 平方值為 0.989。

(3) 進一步透過該模型分析後，對橋梁安全狀況影響最為顯著之因素為「Year_Built」(結構最初建造年份)，顯示新建年份對於鋼橋頗為重要，其次則為「Reconstruction_Year」(重建年期)及「Years Since Reconstruction」(自重建以來之年數)，顯示前次重大維護或重建以來之期間為鋼橋健康狀況之關鍵因素，再其次則為橋齡、橋長、橋寬及每日平均卡車數量(Average Daily Trucks, ADT)，顯示橋齡較高者、橋長或寬度較大者、重車交通量較高者，亦為需特別關注之重點。

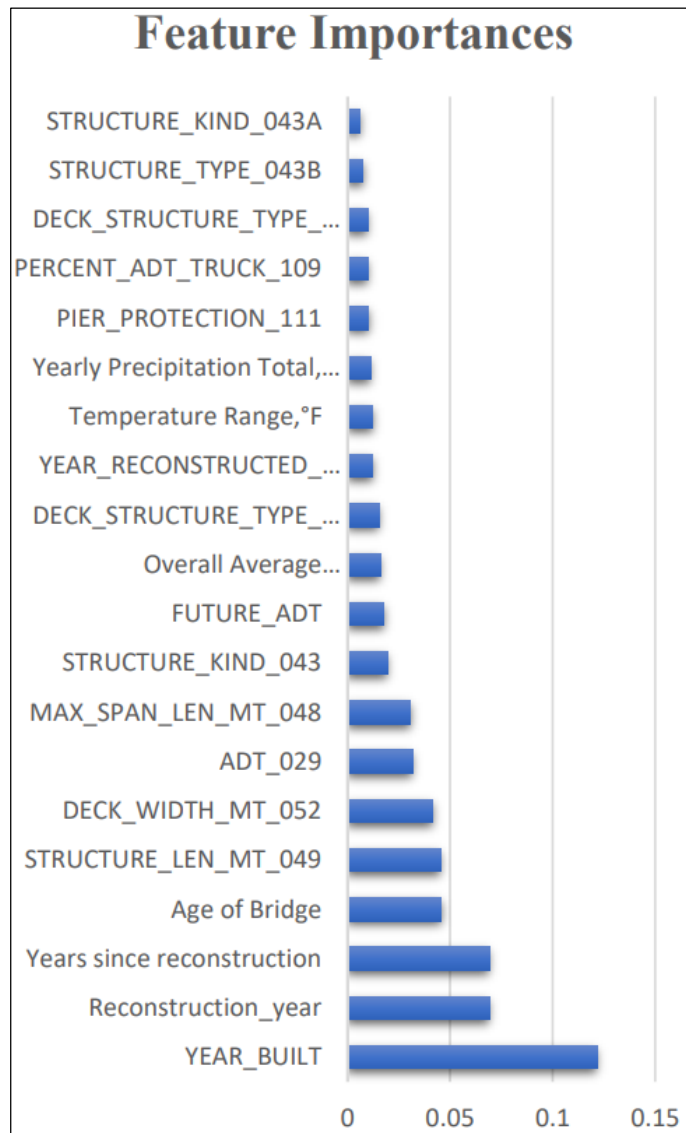


圖 15、各項分析因子之重要性比較

(四)賓州收費公路委員會：3D 橋梁模型先導專案(Pennsylvania Turnpike Commission: Pilot 3D Bridge Model Project)

- (1) 1940 年初期收費公路每日約通行 6,600 輛汽車，惟目前已成長至每日逾 56.2 萬輛，隨著路網持續發展，相關設施資料不斷累積，為降低冗餘資訊、增進數據準確、減少內容錯誤、提高設計及施工階段視覺化能力與資料管理效能，賓州收費公路委員會於 2018 年開始就如何實現數位化交付(Digital Delivery)進行初步研究，並挑選該州之 Hatchery Road 進行先導試辦，該專案於 2023 年 8 月開始，預計於 2024 年 11 月完成。
- (2) 關於建模軟體，本案研究團隊(RETTEW)評估 2 種軟體(Bentley、Autodesk)之 3D 建模功能，最終雖然決定選用 Autodesk，惟因各軟體擅長功能有別，且運輸部門之需求多變，爰 RETTEW 認為目前市面上尚無可滿足各交通部門全數需求之軟體。
- (3) 關於交付成果，RETTEW 於評估過程中發現專案本身之最終目標存在一定程度不確定性，經廣泛討論及評估，決定除橋梁採 3D 模型外，其餘道路設施均採 2D 形式。

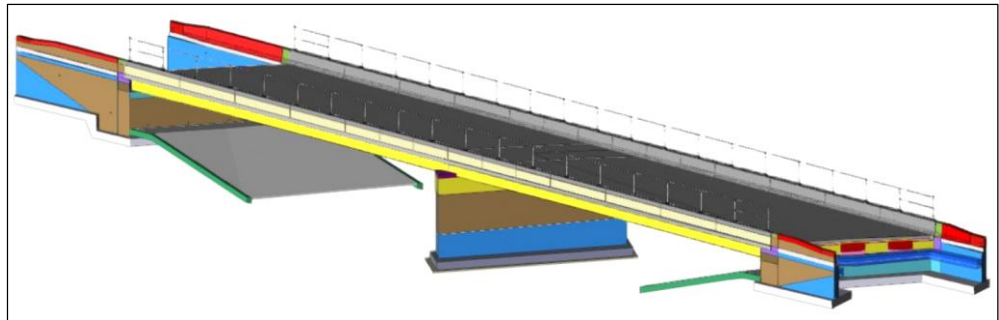


圖 16、賓州收費公路委員會先導計畫建置之橋梁 3D 模型

- (4) 關於 3D 橋梁模型，由於所有鋼筋均被建模，因此常發現鋼筋之間存有碰撞或干擾，RETTEW 爰思考是否需解決每個衝突，經討論，由於施工廠商常透過微調作法解決碰撞及干擾問題，此為實務上常見之微妙平衡，因此決定不特別處理。此外，該模型可呈現混凝土、鋼筋及透視圖，亦可單獨呈現單一構件之相關細節，並可於 3D 模型中進一步呈現以下內容：

- ◆ 混凝土構件之混凝土類別、混凝土強度、各構件體積。
- ◆ 鋼筋之明細表、直徑、間距、長度、相關標記。

(5) 相較傳統之 2D 資料，RETTEW 認為如拿捏得當，3D 模型可更準確及高效的進行衝突評估，並可更精準計算材料之體積及數量，甚至藉可視化功能了解施工性及未來維管衝突。

(五) 首次使用超高性能混凝土進行懸索橋全橋面修復(Completion of First UHPC Rehabilitation of Entire Suspension Bridge Deck)

(1) 特拉華紀念大橋(Delaware Memorial Bridge)為雙懸索橋，全長 3.3 公里，日平均交通量逾 8 萬，並由特拉華河灣管理局(DRBA)維管，該橋於 1951 年竣工，於 1969 年增設第 2 座平行橋，並同時針對第 1 座平行橋進行橋面板重建。

(2) 隨著橋梁持續使用，第 1 座平行橋之橋面不斷出現劣化現象，每年維護成本不斷增加，經採多種非破壞檢測技術(透地雷達、紅外線熱成像、高解析度視訊、移動聲學探測)進行檢測分析評估後，如採原本之混凝土橋面覆蓋方案，則仍需於 15 年內進行橋面更換，為盡可能避免增加重量，DRBA 爰將超高性能混凝土(UHPC)全橋面修復方案納入評估考量。



圖 17、Delaware Memorial Bridge 橋面劣化修補情形

(3) 美國於 2016 年首次將 UHPC 應用於橋面修復，其抗壓強度至少 18,000psi，最小拉伸強度 1,000 psi。典型橋面覆蓋層之使用

壽命為 10~30 年，且僅被視為保護層，而 UHPC 由於具有更高強度及更佳水密性，因此可用來加固強化橋面，預計使用壽命亦超過 30 年，此外，UHPC 與舊混凝土間具有極高粘結強度，因此只需去除老化橋面之頂層(通常為 1.5~2.5 英寸)並採用 UHPC 替換即可，交通衝擊期間也可因而大幅降低。經 DRBA 透過小規模先導專案就 UHPC 及乳膠改質混凝土(LMC)進行生命週期成本分析比較，由於 UHPC 之成本及交通衝擊均較低，因此 DRBA 決定採用 UHPC 方案進行全橋面維修，相關工程於 2022 年 9 月開工，並於 2023 年 11 月完工。

Year	UHPC			LMC		New Deck
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 1	Method 2	Precast
Life Span (years)	30	50	45	12	25	75
Thickness	1.75 inch	3.75 inch	2.5 inch (plus asphalt)	1.75 inch	3.75 inch	8.0 inch
NPC compared to lowest	171%	➔100%	121%	255%	193%	300%

圖 18、採 UHPC 及 LMC 之成本比較

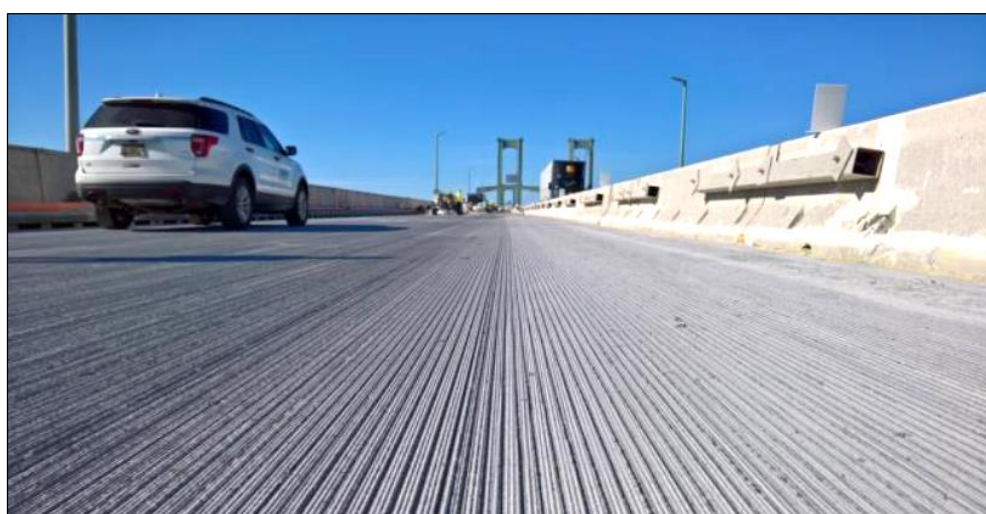


圖 19、Delaware Memorial Bridge 採 UHPC 完成橋面更換

- (4) 在碳排方面，UHPC 之水泥含量為傳統混凝土兩倍，且其成份亦包含鋼纖維，因此較傳統混凝土具有較高之碳排，但由於 UHPC 強度較高，故其用量少於傳統混凝土，且具有更長使用壽命，如加計生命週期內之橋面重置及其衍生之交通衝擊及社會成本，則 UHPC 之碳排將低於 LMC。

	Service Life (years)	Rel. CO₂ per year
8.0-inch Concrete Deck (uncoated reinf.)	50	100%
8.0-inch Concrete Deck (galvanized reinf.)	75	96%
8.0-inch Concrete Deck (stainless reinf.)	100	156%
1.5-inch LMC	15+	74%
2.0-inch UHPC	40+	93%
1.5-inch UHPC	30+	96%

圖 20、碳排比較(未考慮橋面重置及交通衝擊)

(六)陽光高架橋結構監測及數據驅動之預防性維護(Data-Driven Preventive Maintenance and Structural Monitoring of the Sunshine Skyway Bridge)

(1) Sunshine Skyway Bridge 於 1987 年竣工，全長 6.7 公里，為佛羅里達州之旗艦橋梁，其主跨採斜拉索搭配 2 座橋塔，每座橋塔各有 42 根斜拉索。1999 年，其索力系統出現令人擔憂之腐蝕及開裂，佛州運輸部(FDOT)爰針對該橋展開一系列監測。



圖 21、Sunshine Skyway Bridge 主跨照片

(2) 為了解橋梁結構健康狀況，FDOT 針對該橋進行腐蝕測試、GPS 調查、纜索振動測試、阻尼系統減震器測試，並建置數據驅動之預防性維護機制，整合加速度計、位移感測器、應變儀、GPS 裝置、氣象站、聲學感測器、水感測器、熱電偶，透過近百組感測器構成廣泛之網絡系統監控橋梁結構安全。

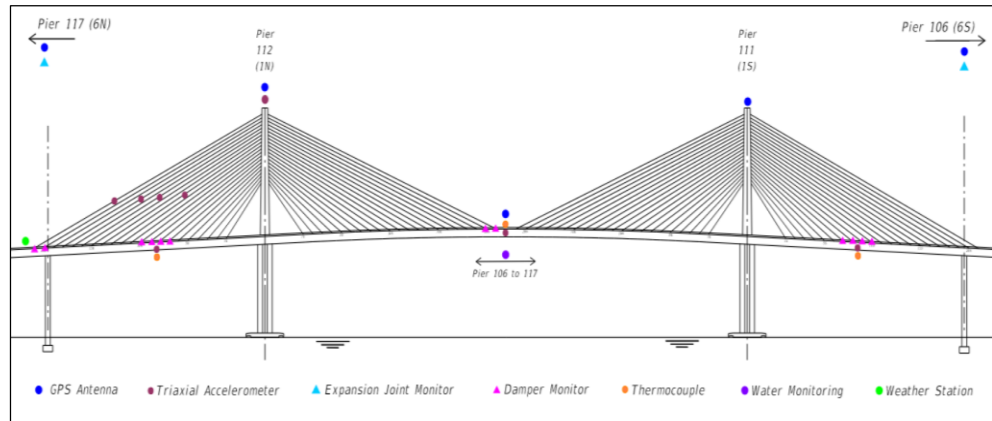


圖 22、Sunshine Skyway Bridge 監測儀器佈設

(3) 纜索監測方面，本橋之斜拉索共計 84 根，為詳細了解其動態行為，FDOT 目前已整合監測其中 12 根纜索，纜索之感測器以 5 Hz 取樣率運作，最大振幅範圍為 5cm。

(4) 伸縮縫監測方面，感測器以 0.1mm 解析度即時監測其變化，相關設備同時具備聲學監測功能，可連續監測噪音，並可利用視覺化之數據儀表確認。

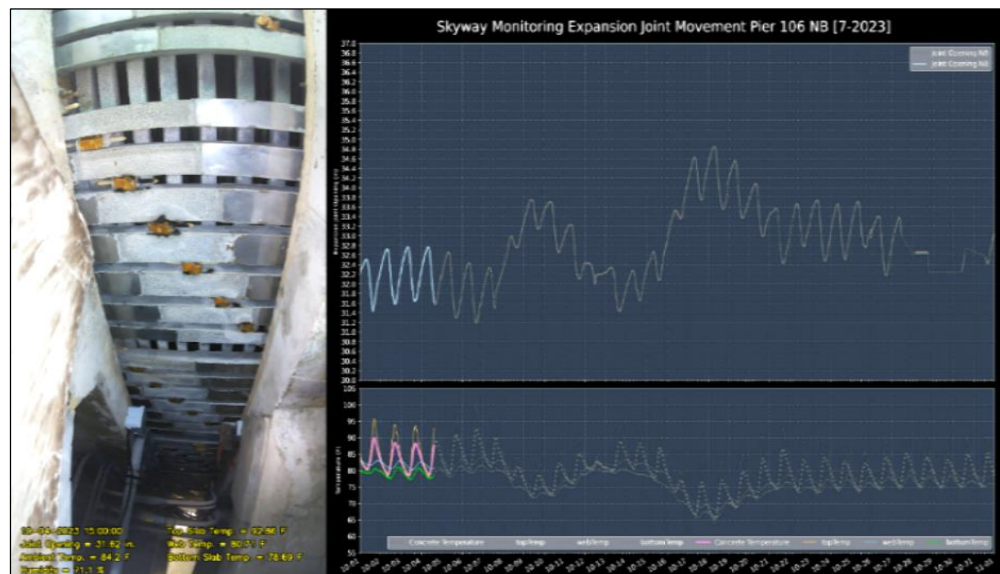


圖 23、Sunshine Skyway Bridge 伸縮縫監測視覺化儀表

(5) 水監測方案，鑑於水的存在將對後拉鋼鍵帶來威脅，FDOT 特建立水監測系統，並於容易存水區域設置感測器。

(6) 未來增進項目：

- ◆ 跨中撓度：FDOT 目前正開發主跨撓度監測系統，該系統可完全安裝於橋內，其準確性不受結構振動、惡劣天候、太陽風暴影響，且能追蹤日常溫度變化及活載重引起主跨撓度之變化。
- ◆ 拉錨應變計：FDOT 未來將接續監測纜索錨塊墊片之應變及應力，儘管該類感測器不會直接提供斜拉索張力，但可精確追蹤斜拉索張力，以快速了解相關變化。
- ◆ DIGITAL TWIN(數位分身、數位雙胞胎、數位孿生、數位雙生)：對於複雜橋梁之安全評估，有限元素模型(FEM)為不可或缺工具，FDOT 現正針對本橋梁建立 FEM 模型，並藉感測器之實際監測數據進行模型調校，期據以建立能更精準掌握橋梁動態行為之數位分身，以捕捉橋梁結構行為之細微，掌握橋梁對外力之反應，及關鍵部分之變化情形、性能與其剩餘使用壽命，進而確保橋梁結構安全。

(七)百年雙層橋之疲勞初評(Preliminary Fatigue Evaluation of a 100-Year-old Double Level Bridge)

(1) 本橋於 1910 年新建、1950 年改建，每天承載逾 25 萬名乘客，目前由長島鐵路(Long Island Railroad, LIRR)維運，因應甘迺迪機場改進計畫，該橋面臨改造或重建抉擇，為利決策，紐約州運輸部(NYS DOT)爰就相關構件進行疲勞評估。

(2) 疲勞壽命估算取決於載重循環次數、應力範圍、連接類型，為利進行疲勞評估，NYS DOT 開發 3D 有限元素模型，該模型可針對既存方案或改造方案等情境分析鋼梁之垂直活載分佈，並搭配米納法則(Miner's Rule)針對 57 個具代表性之主梁估算疲勞損耗及剩餘壽命。

(3) 為利驗證，NYSDOT 挑選具代表性之梁、柱設置應變計，並於尖峰時段量測應變及應力範圍，經評估，主構件之剩餘壽命均逾 60 年，綜此，為降低對乘客之衝擊且主構件尚可使用一定期間，NYSDOT 將保留既有構件方案進行後續改造。

(八)懸索橋修復及保護工程之挑戰(Suspension Bridge Rehabilitation and Preservation Constructability Challenges)

(1) 美國擁有世界上最古老之懸索橋，平均橋齡超過 70 年，隨著橋齡持續增加，相關橋梁之檢測、維護、修復及管理日益重要，根據實務經驗，該類型橋梁面臨之主要工程挑戰為主纜除濕、錨碇端除濕、主纜之測試與更換、手纜及支柱之測試與更換、纜箍重新鎖固及更換、鞍座螺栓更換等項。

(2) 主纜除濕方面，組成懸索橋之 3 個關鍵部位(主纜、錨碇端、塔架)不具贅餘，其發生故障時，並無其他路徑可傳遞荷載，因此橋梁將具立即倒塌之虞，其中最易受損者為主纜。主纜常由數千甚至數萬根單獨之高強度纜線組成，由於易受潮腐蝕，因此針對主纜除濕為有效作法，相關除濕最早係於 20 多年前由日本首次採用，目前全美國有 12 座橋梁已就主纜規劃安裝除濕系統。

(3) 錨碇端除濕方面，懸索錨碇端為懸索橋之關鍵且脆弱之元件，多數懸索橋係錨碇於岩石內或以混凝土重物錨固，錨碇室內之溫度通常較低，因此冷凝為持續存在之現象，且因地勢較低致常會有水體進入該空間，因此需設置抽水設施排水。水份是鋼材腐蝕及高強度鋼線出現氫脆(Hydrogen Embrittlement)現象之主要原因，一般鍍鋅材料常會在 25~30 年間消耗完畢，因此錨碇端斷線情形並不少見。工程師自 1980 年代以來即開始於錨碇端安裝除濕裝置並將該空間之相對濕度降低到 40% 以下，另因過量濕氣進入錨碇室時除濕裝置易失效，因此除了除濕之外，亦需搭配防水配套，並結合遠端監控及控制。



圖 24、錨碇室之除濕裝置

- (4) 主纜之測試與更換方面，主纜通常由鋼絞線組成，相關損壞常發生在其與橋面之接合區域，該位置常因積聚道路污垢使得腐蝕加速，且該位置常不易檢查及清潔。主纜使用壽命取決於海洋環境、接合、纜索類型及維護情形，最長可達 40~60 年，隨著吊索逐漸老化，監測每根繩索之剩餘使用壽命非常重要，爰需定期測試，以確保纜線內芯不會因水份進入或工作負載而受損。
- (5) 手纜及支柱之測試與更換方案，懸索橋之手纜及支柱系統為通往懸索橋主纜之重要通道，此類系統一般於橋梁建造初期安裝，並可沿著主纜延伸到錨碇位置，一般每 2 年檢查 1 次。手纜常由鍍鋅鋼絞線組成，為評估其狀況，可測試其剩餘拉伸強度並評估 2 年 1 次檢查中看不到之內部鋼線，甚至可擇取小樣本(手纜總長度之 1% 以內)進行測試。
- (6) 纜箍鎖固及更換方面，纜箍主要將吊索連接到主纜，橋上所有載重均透過吊索及其連接構件將荷重轉移至主纜，纜箍多由兩半組成，並採鑄鋼結構透過螺栓緊固。隨著時間推移，纜箍鎖緊後，鍍鋅鋼線將被壓縮，纜索總直徑亦將減少，儘管此類

減少相對較小，但仍會導致纜箍螺栓失去張力，由於此類張力損失可能帶來嚴重後果，因此須依設定之頻率檢查纜箍螺栓並測量張力損失，如出現螺栓腐蝕，由於可能伴隨截面損失，因此必須重新鎖緊或更換。此外，考量螺栓之使用年限，更換新螺栓可能會比重新鎖緊更佳。

- (7) 鞍座螺栓更換方面，鞍座為弧形構件，主要承載其上方主纜，由於主纜承載著巨大重量，因此任何弧度變化都會產生巨大荷載，必須將其與鞍座夾緊，以防纜索滑動鞍座。此外，彎曲鞍座之兩半通常會使用多個螺栓夾緊，該類螺栓可提供摩擦阻力所需之拉力或摩擦力，以防電纜滑動，但用於夾緊之螺栓可能因而遭受嚴重腐蝕及截面損失，因此可適時更換。

(九) 北美橋梁主纜索除濕系統之改進建議(Proposed Improvements to North American Main Cable Dehumidification Systems)

- (1) 使用有效之主纜除濕系統(Dehumidification Plant Equipment, DPE)可大幅延長懸索橋主纜之使用壽命，日本明石跨海大橋為全世界第 1 座對主纜設置 DPE 之橋梁，設置 20 多年來，其每小時換氣 3.5 次，以提供主纜有效保護。目前北美已對部分懸索橋安裝主纜除濕系統，以利將排氣位置之相對濕度保持在 40% 以下，作者認為 DPE 應視露點運作，其中夏季應提供相對濕度 20% 之空氣，而冬季應提供相對濕度 10% 空氣。
- (2) 實務上，水份注入位置下方區域之水份較易清除，但上方區域則較難清除，因此，塔頂排氣口之相對濕度較高，但該部位之設置難度較高，因此作者認為應針對該部位之除濕持續改進。
- (3) 環境露點低於 DPE 製程空氣露點時，無法提供足夠乾燥空氣之機房可能會出現濕氣凝結情形；廢氣相對濕度遠低於 40% 時，提供極度乾燥空氣之機房可能會出現設備過度磨損情形，進而縮短預期使用壽命及消耗過多能源，因此透過設定值來控制 DPE 製程空氣之目標濕度非常重要。

三、其它 Session 及 Workshop

(一)IBC 2024 除 Featured State session 及 Technical Session 外，尚包含 Proprietary Session、Special session 及 Workshop，其中 Workshop 係針對特定主題進行 2~5 小時之雙向互動討論，由於相關場次係於多個地點同時進行且與 Technical Session 重疊，爰需有所取捨。

(二)利用最新技術轉變羅伯特街大橋之橋檢作業(Leveraging the Latest Technology to Transform Bridge Inspection: Robert Street Bridge)

(1) 羅伯特街大橋為 8 跨鋼筋混凝土拱橋，全長 436 公尺，主跨由拱肋組成，該橋位於明尼蘇達州之聖保羅市中心，於 1926 年新建，跨越 2 條鐵路、1 條道路及 1 條河流，目前由明尼蘇達州運輸部(MnDOT)維管。

(2) Robert Street Bridge 曾於 1989 年維修，惟其後仍不斷出現明顯劣化，該橋量體龐大且劣損數量繁多，由於勞動力持續短缺，因此採傳統檢測方式除將產生明顯之交通衝擊，且檢測人員需花費大量精力於測量、繪製缺陷草圖等平凡任務上，不但費時且昂貴，為提高檢測效率，MnDOT 爰嘗試改變檢測作業方式，期能運用新技術簡化工作流程及資料收集，並確保工程師能將時間運用於決策，而非收集資料。

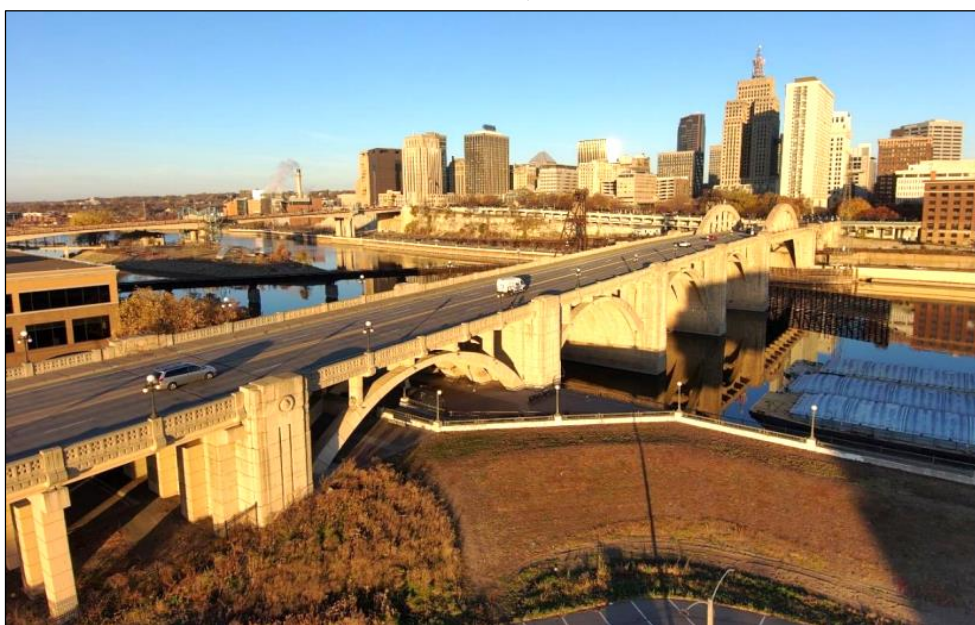


圖 25、Robert Street Bridge



圖 26、Robert Street Bridge 及其傳統檢測作業情形

(3) 因應前述挑戰，MnDOT 利用無人機拍攝之橋體表面照片建立詳細之數位分身(Digital Twin)，並搭配可共享之視覺化工具，建構可存儲資訊之中央儲存庫，發展出一模共檢之作業模式，特色如下：

- ◆ 使用具備人工智慧之無人機自動收集所有影像及數據。
- ◆ 對影像和地面控制點進行後處理，並就各跨建立數位分身。
- ◆ 數位分身除具高解析度，並可上傳至共享之視覺化平台，供多人於辦公室預先檢查橋梁狀況。
- ◆ 共享平台可一次觀看全橋，亦可觀看單一跨，團隊工程師於辦公室可利用共享之視覺化工具及自訂表格進行預檢，並可利用 AI 判釋模組自動檢測混凝土裂縫及剝落。

(4) 透過前述作業方式，檢測團隊可於辦公室先進行橋梁預檢，至於抵達現場後，主要任務係進行驗證預檢之劣化，不再是從頭到尾的記錄，此外，使用 AI 自動尋找劣化並透過自動化工具量化其損傷規模，亦為革命性突破。

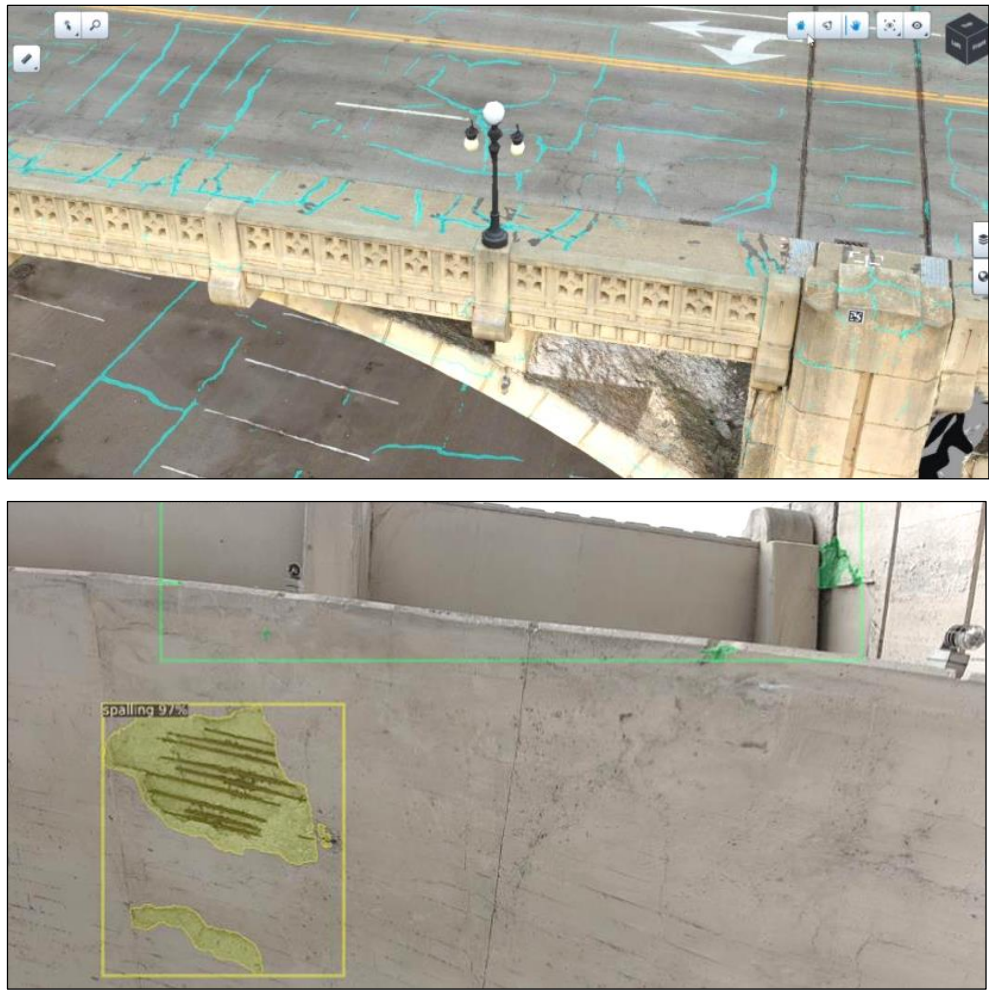


圖 27、混凝土裂縫及剝落自動偵測結果

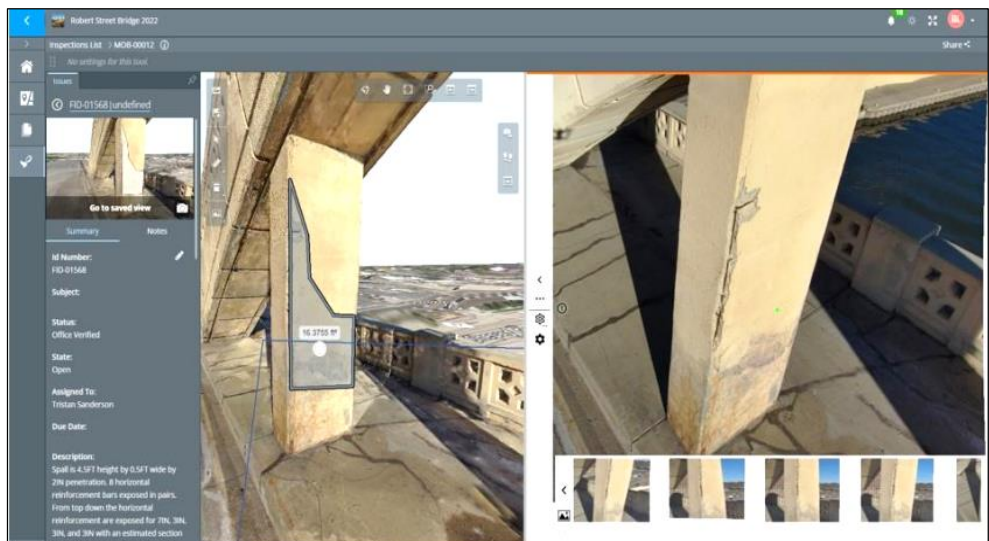


圖 28、採用共享平台進行劣化規模量測及記錄

(5) 本檢測模式之另一項特色，是可同時交由多人進行預先檢測，採用傳統方式派人搭乘橋檢車進行近距離檢測及記錄時，如

發生漏檢情形，往往只能返回現場重新確認，對於交通量大或不易進行近距離確認之部分，需額外付出的檢測時間、交通及社會成本非常可觀，如採用新型檢測方式，則可直接且快速地透過共享平台確認，且可供多人同時分工確認不同部位，亦可進行交叉比對，除節省時間及費用，並可避免影響交通，品質控制作業亦可於室內進行。

- (6) 本作業方式及流程，除大幅減少現場作業時間外，交通管制、車道封閉規模及其衍生之安全風險及社會成本均明顯下降，經估算，檢查時間減少 30%，而可供決策者使用之量化資料量增加近千倍，隨著 AI 自動判釋模組持續擴充至其他劣化類型，預估其效益將可持續提升。

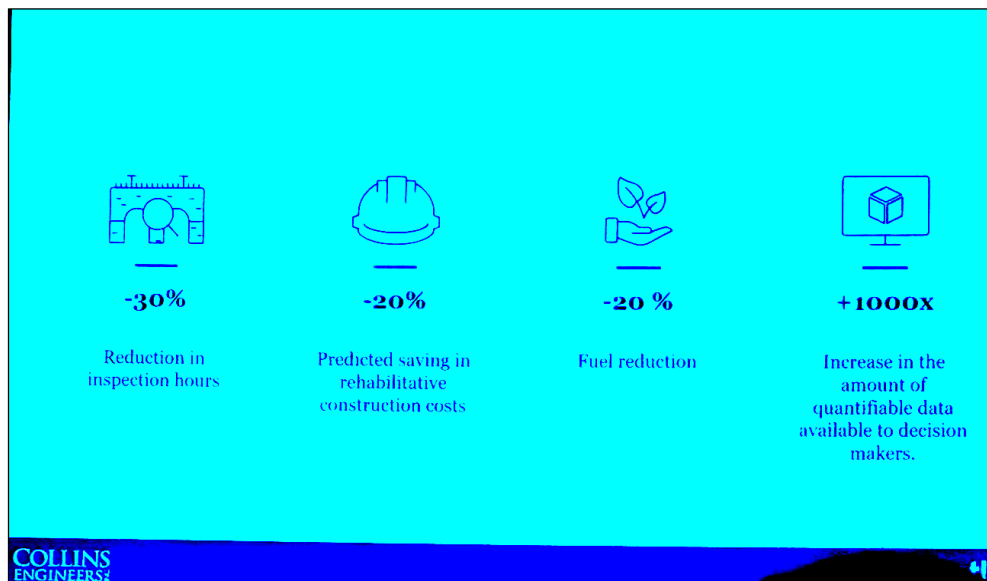


圖 29、Robert Street Bridge 採新檢測模式帶來之效益

(三)無縫式橋面系統之實驗與數值研究(Experimental and Numerical Study on Seamless Bridge-Pavement Systems)

- (1) 無縫式橋梁之概念最初於澳洲之高速公路實施，目前已擴及澳洲 50 多座橋梁，該無縫系統具有與連續鋼筋混凝土路面 (Continuously reinforced concrete pavement, CRCP)無縫連接之過渡區，適用於交通繁忙且重車多之路段。

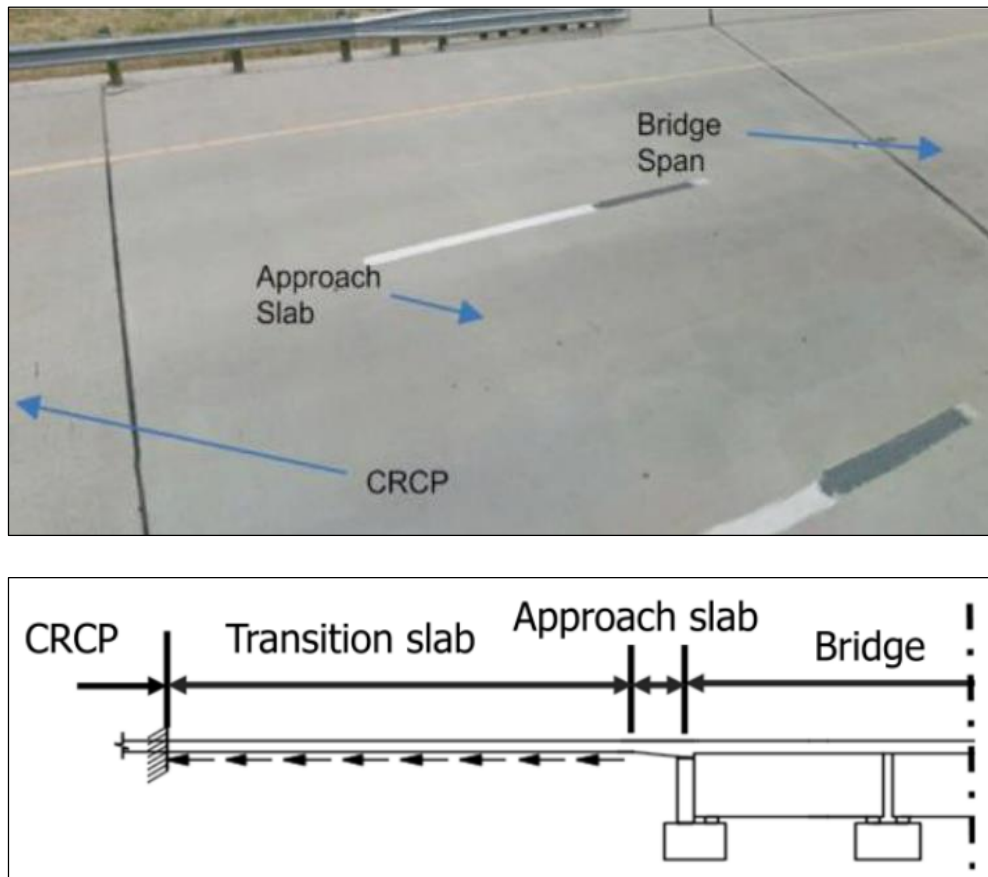


圖 30、無縫式橋面銜接 CRCP 系統及示意

(2) 無縫式橋面銜接 CRCP 系統無需伸縮縫，可完全消除伸縮縫更換衍生之成本及交通衝擊，並可提高行車舒適性，其橋面及 CRCP 間為連續之過渡區域，可適應收縮、熱應變、路堤沉陷及交通荷載引起之應力與形變，其中過渡區混凝土板與基礎間界面材料(又稱黏結劑)為重要關鍵。

(3) 溫度降低時體積收縮，因此無縫系統將產生拉力，此時過渡區之混凝土將面臨開裂風險，需將裂縫處最大鋼材應力控制在降伏強度 60% 以下，並將裂縫寬度控制在可接受限度。另因路堤沉陷可能導致基礎失去支撐，且其需同時承受車輛荷載，因此部分區域將出現負彎矩並導致張力，需特別留意其強度。

(四) 超高性能混凝土(UHPC)之結構設計

(1) UHPC 之機械性能及耐久性優於傳統混凝土，目前已逐漸應用於橋梁新建、維修及保護等領域，並於美國持續蓬勃發展。

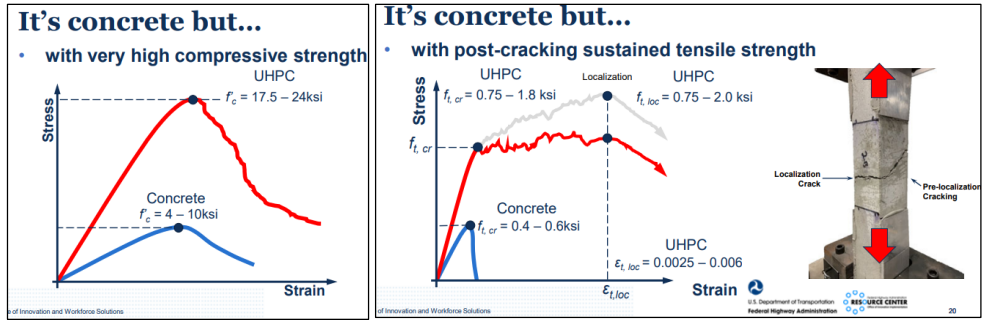


圖 31、UHPC 與傳統混凝土之力學行為比較

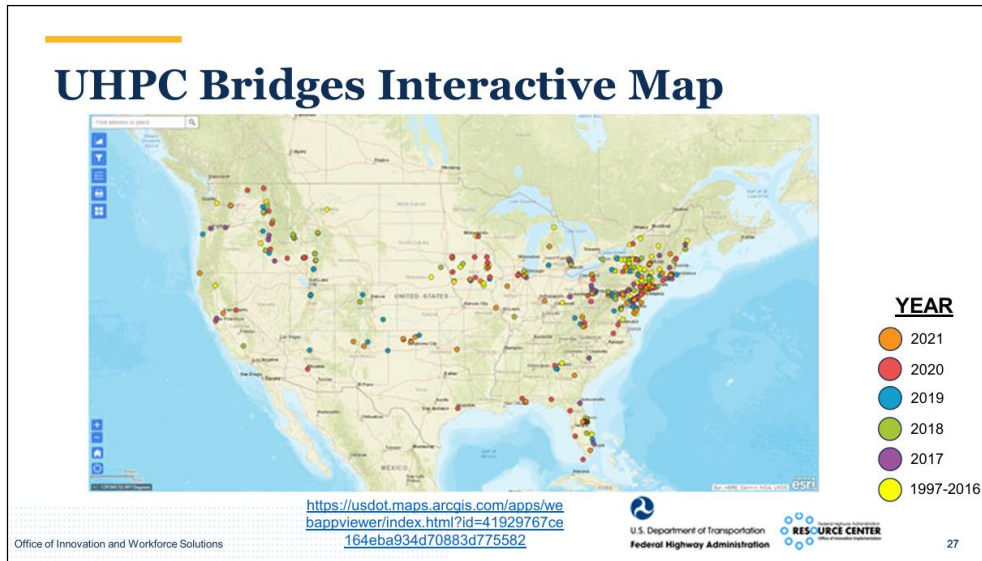


圖 32、美國 UHPC 橋梁互動地圖

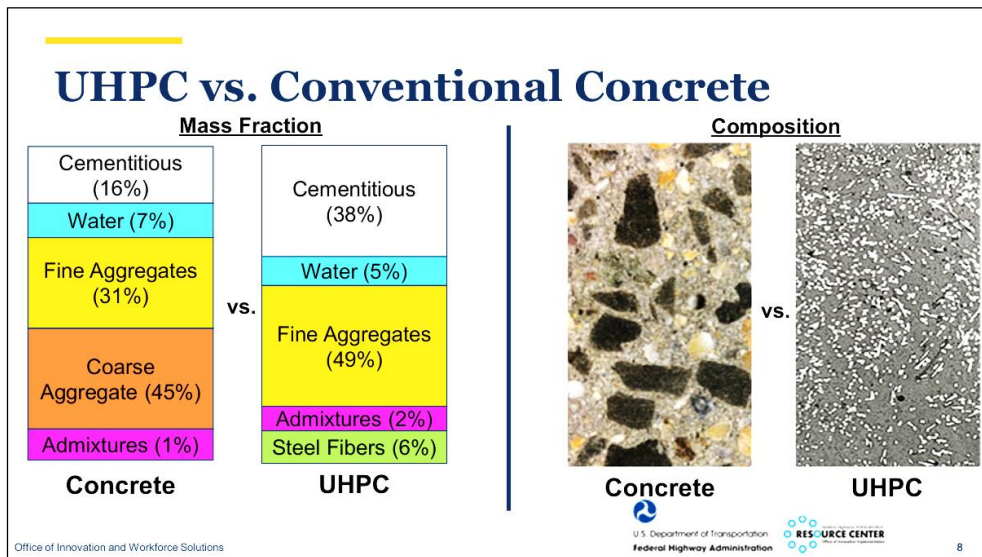
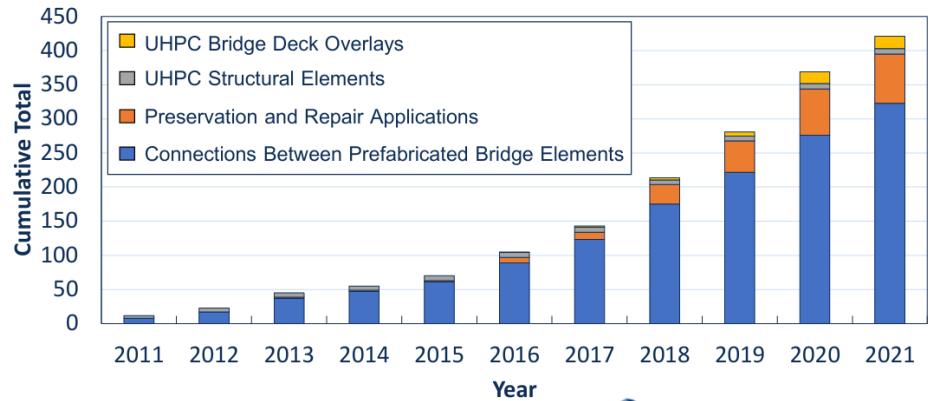


圖 33、UHPC 與傳統混凝土之成分比較

(2) UHPC 於早期主要運用於預鑄構件間之連接，目前則擴及修復或保護工程。

Applications for Bridges

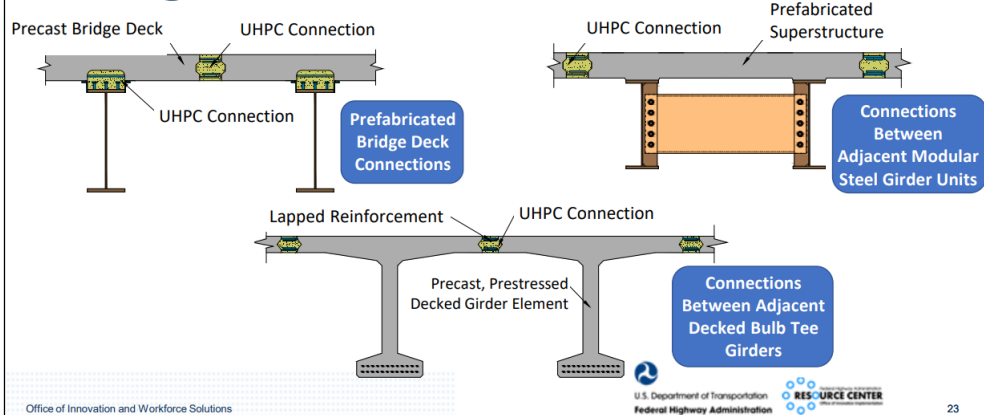


Office of Innovation and Workforce Solutions

U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration
RESOURCE CENTER
Office of Innovation and Workforce Solutions

圖 34、UHPC 於橋梁領域之應用情形變化

Connections Between Prefabricated Bridge Elements



Office of Innovation and Workforce Solutions

U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration
RESOURCE CENTER
Office of Innovation and Workforce Solutions

23

圖 35、UHPC 應用於構件間之接合

Where is it being used?



© 2019 NYSDOT.

© 2019 NYSDOT.

Source: FHWA.

圖 36、UHPC 應用於橋面接合

Where is it being used?



All Images Source: FHWA.



U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration

RES-OURCE CENTER

25

Office of Innovation and Workforce Solutions

圖 37、UHPC 應用於橋面板重置



U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration

RES-OURCE CENTER

26

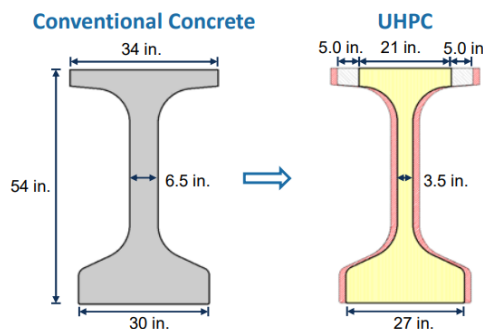
Office of Innovation and Workforce Solutions

圖 38、UHPC 應用於梁端修復

(3) 橋梁工程方面，採用 UHPC 除可減少總重量，並可減少梁深、增加橋梁跨度及減少落墩，相關設計規範亦於近期持續發佈。

Why UHPC Structural Elements?

- Can have **more efficient and higher strength** section



27%
decrease
in weight
per linear
foot

圖 39、採用 UHPC 減少 27%重量之案例

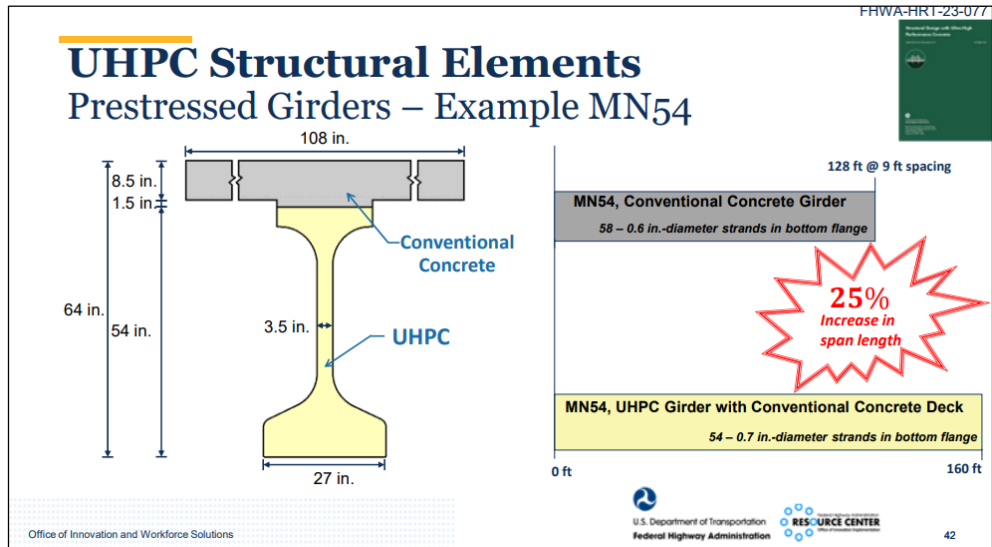


圖 40、採用 UHPC 增長 25% 橋跨之案例

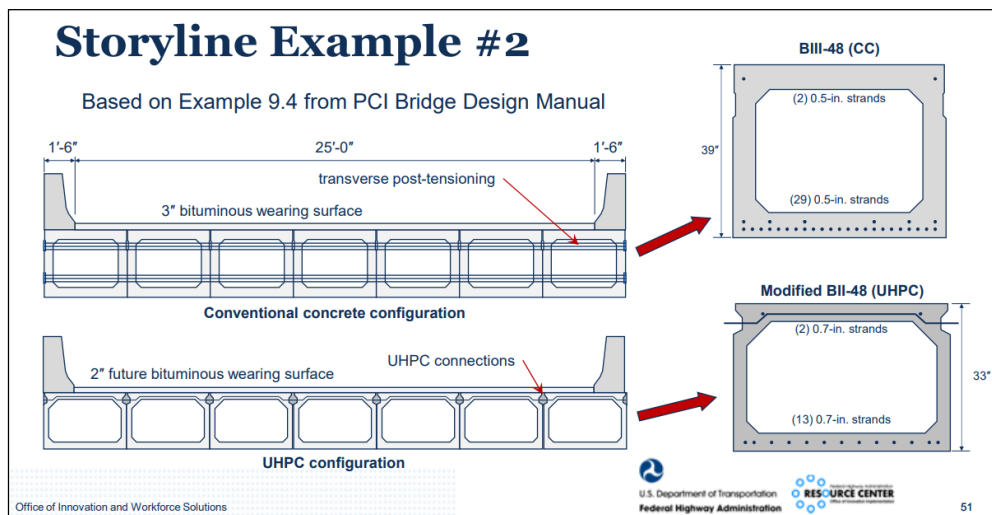


圖 41、採用 UHPC 減少梁深之案例

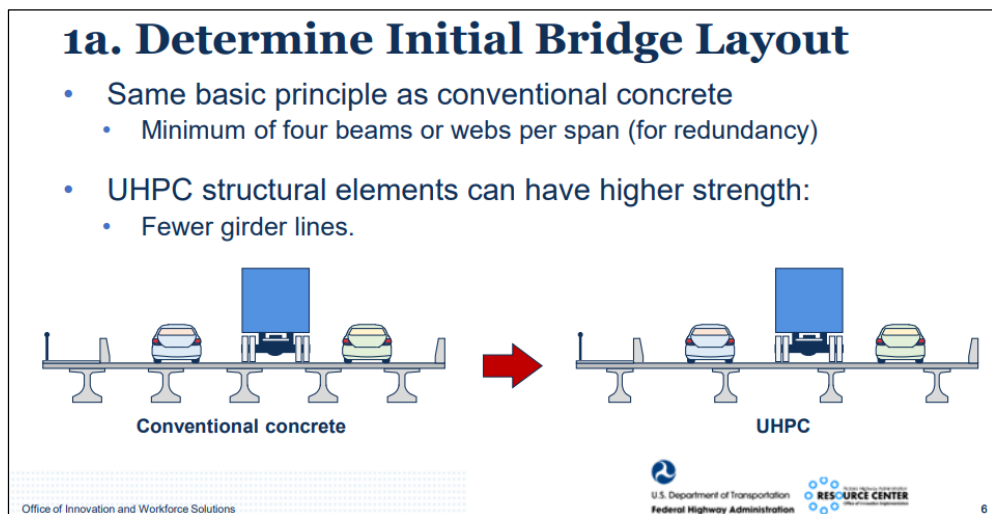


圖 42、採用 UHPC 減少主梁數量之案例

1a. Determine Initial Bridge Layout

- UHPC structural elements can have higher strength:
 - Longer spans (eliminating intermediate piers).

Conventional concrete → UHPC

Eliminating one support while maintaining same section height → may allow for more lanes underneath

Eliminating supports in water can help with scour issues

- Lighter superstructure (reducing demand on substructure).

圖 43、採用 UHPC 增加單跨長度進而減少落墩之案例

Specifications and References

- AASHTO LRFD *Guide Specifications for Structural Design with Ultra-High-Performance Concrete* (2024)
- FHWA-HRT-23-077 (2023) – *Structural Design with Ultra-High Performance Concrete*
- AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications* (9th edition, 2020)

Office of Innovation and Workforce Solutions

U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration

RESOURCE CENTER

46

圖 44、UHPC 設計相關規範

(五)具 T1 鋼板(T1 plate)橋梁之檢測及維修

- (1) 2021 年 5 月 11 日，美國 40 號州際公路之 Hernando de Soto Bridge 之主跨鋼梁出現斷裂情形，並進行緊急封閉。



圖 45、Hernando De Soto Bridge 及主跨鋼梁斷裂情形

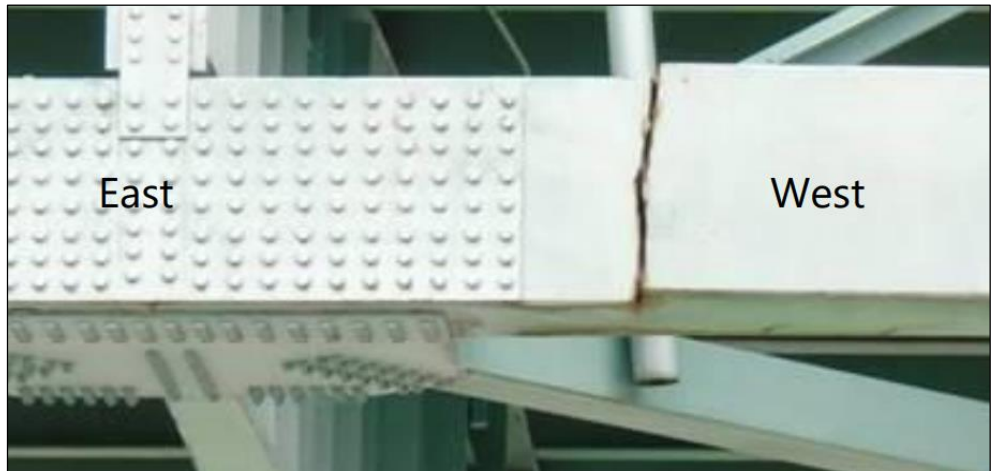


圖 46、Hernando De Soto Bridge 主跨鋼梁斷裂情形

- (2) 經非破壞性檢測，該橋鋼梁於拉力側之 T-1 鋼板存有氫裂紋，且於另 12 處對接焊縫位置亦發現氫裂紋，經專家評估，相關裂紋可能是早年鋼構製造技術受限致鍛造時不慎將氫氣引入焊縫所致，由於較細微，因此例行目視檢測並無法發現。



圖 47、現場樣本於焊道頂部觀察到之裂縫

- (3) Hernando De Soto Bridge 於 1973 年完工，長 2.9 公里，主跨長 274 公尺，為具斷裂關鍵構件之橋梁，該橋跨越密西西比河，為阿肯色州與田納西州間之重要橋梁，經養護機關查明斷裂原因並維修後，該橋雖於封閉後之第 83 天完全恢復通行，惟鑑於該橋之封閉已對周遭社會經濟發展造成重大衝擊，加以具有非贅餘鋼製拉力構件且材質採用 T1 鋼板之橋梁仍存在於全美許多州，因此 FHWA 於 2021 年 12 月 13 日發佈備忘錄，要求各州於 2024 年 3 月 31 日前針對具該風險橋梁之銲縫及

敏感部位進行檢測及確認。大型橋梁之銲縫數重輒逾千，目前各州大多採用超音波檢測(Ultrasonic Testing, UT)確認，部分州並開始進行補強工程。此外，參與釐清本案之調查團隊，認為較謹慎做法為每年針對關鍵部位進行 2 次定期檢查，並搭配每 10 年至少進行 1 次 UT。

Background and Objectives

- FHWA Memo (December 13, 2021)
 - Requires documented NDT for CJP butt welds in NSTMs fabricated from "T1" steel
- Performance Testing
 - While not required by the Memo, previous research had shown large variability from the current UT technician workforce
 - Important and costly decisions are made based on NDT results
 - Don't want to miss real defects
 - Don't want to fix defects that are not there

圖 48、FHWA 請各州檢測具有 T1 鋼板之 NSTM 橋梁

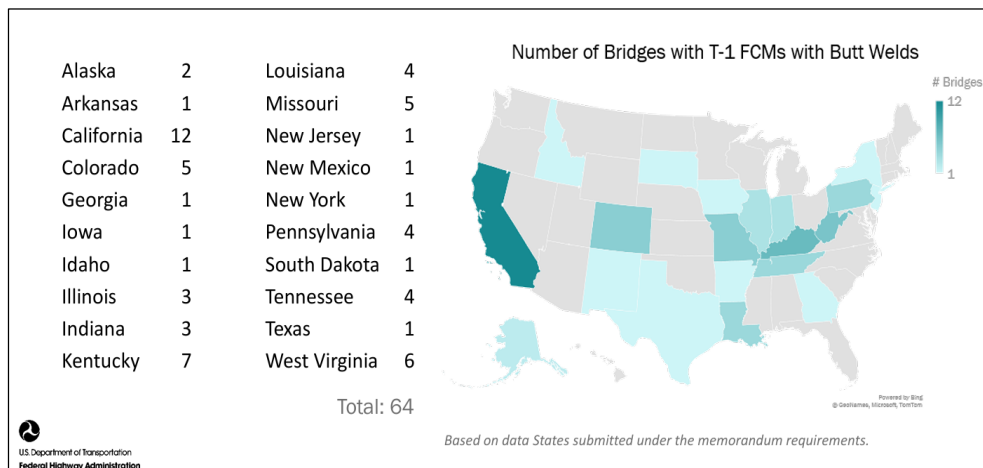


圖 49、符合 FHWA 於 2021 年 12 月 13 日備忘錄之橋梁數

(六)燃料稅收持續下降

(1) 燃料稅是美國高速公路和道路資金之主要來源，近年來，隨著汽車之燃油效率逐漸提高、電動車及油電混合車持續增進，各州政府之燃料稅收入正逐年下降，據估計，聯邦高速公路信託基金餘額預計於 2028 年耗盡，另經估計，未來 10 年各州公路維護平均預算將從 57 億降至 42 億美元，其中電動車滲透率

最高之加州，其未來 10 年之收入將因此減少超過 50 億美元，而俄勒岡州運輸部曾於去年 10 月表示，由於資金不足，因此削減高速公路之塗鴨清除、割草及垃圾清除預算，冬季之道路服務也會受到影響。隨著交通基礎設施持續老化與極端氣候等威脅，美國各州正面臨沉重挑戰。

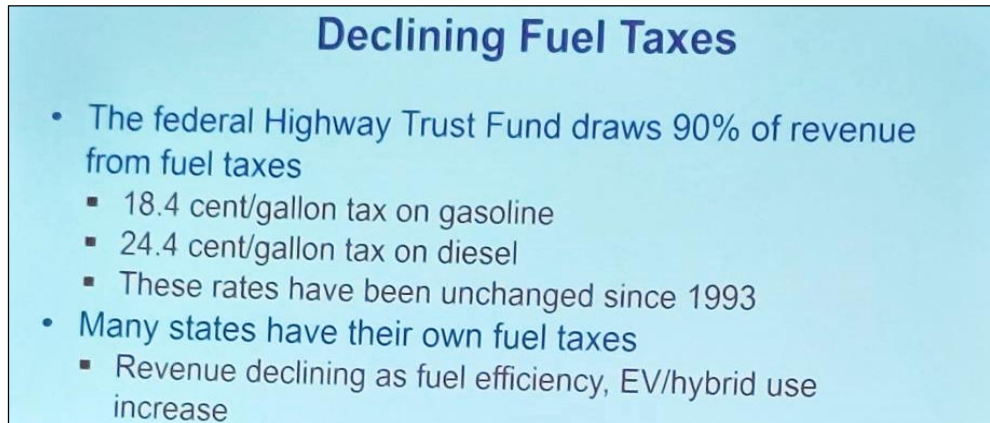


圖 50、美國聯邦公路信託基金之燃料稅收入持續減少

(2) 為了彌補收入損失，部分州政府開始嘗試因應措施，例如收取道路使用費(依行駛里程計費、或透過車載之 GPS 計費)、每年向電動車收取註冊費、增加燃料稅率、徵收電力銷售稅、調漲通行費，其中俄勒岡州是全美第 1 個試辦按里程收費計畫之州政府，而目前加州、猶他州及科羅拉多州亦進行類似嘗試，此外，部分州政府為彌補赤字，已開始向雇主徵收工資流動稅(每 100 美元工資徵收 0.6 美元)。

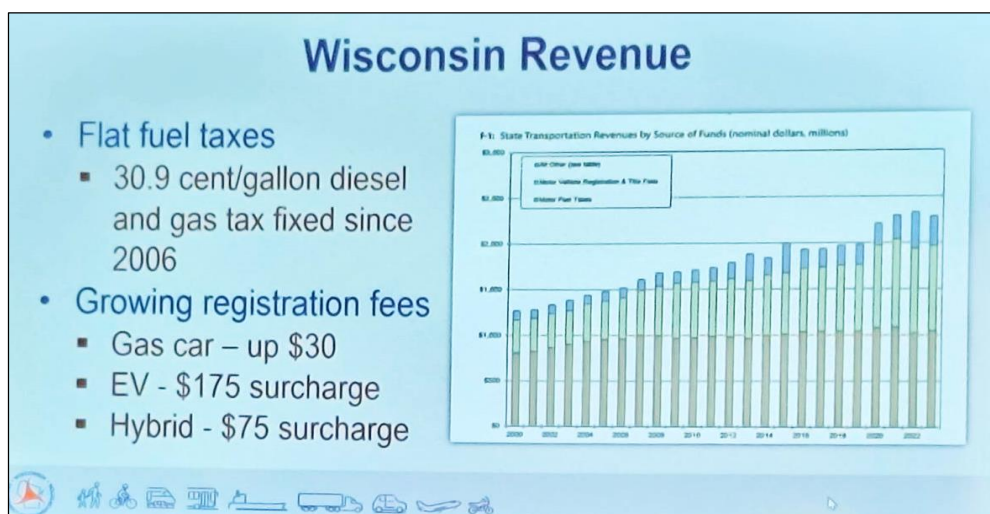


圖 51、威斯康辛州因應燃料稅收入停滯調漲車輛註冊費

第四章 沿途交通設施簡介

本次出國計畫未規劃考察行程，僅將沿途行經之公共運輸、道路橋梁及相關服務設施摘述如后。

4.1 公共運輸設施

聖安東尼奧道路系統大致以市區為中心搭配小環、大環及放射狀路網形成，小環為 410 號州際公路(Interstate 410)，大環為環路 1604(1604 Loop)，因應該路網結構，聖安東尼奧發展出之大眾運輸以公共汽車為主，其公車站分 3 種，分別為停車轉乘站(Park & Ride)、轉運中心(Transit Center)及一般之上下車站，其中 Park & Ride 及 Transit Center 設有建築站體，站內電子看板可自動顯示公車動態，並設置飲水機及廁所供使用；而 Park & Ride 周邊則提供免費停車空間，民眾可將私人運具停放至 Park & Ride 後改搭公車。

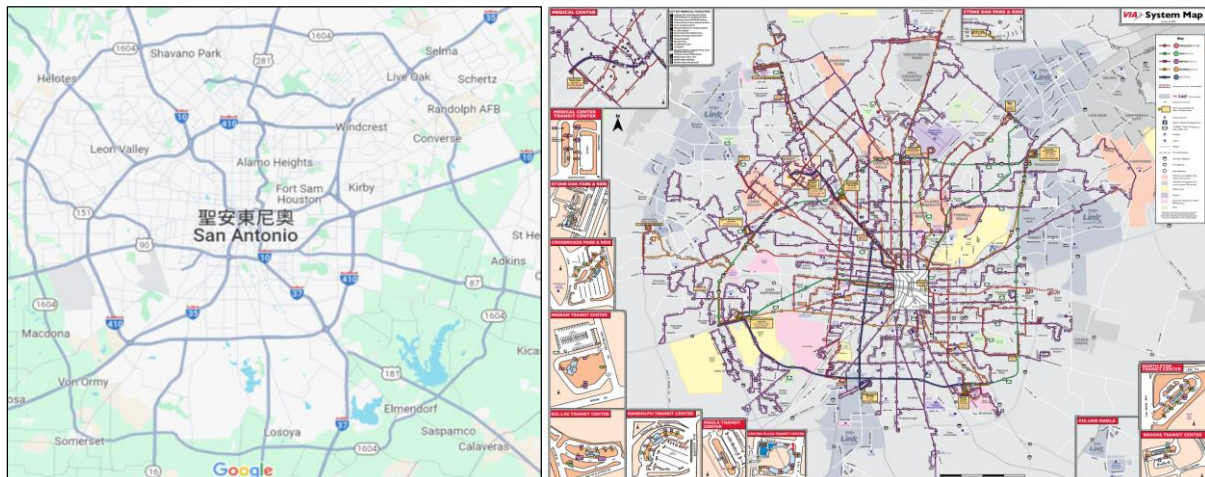


圖 52、聖安東尼奧之道路系統及公車路網



圖 53、聖安東尼奧之停車轉乘站及位置分佈



圖 54、聖安東尼奧之轉運中心及位置分佈

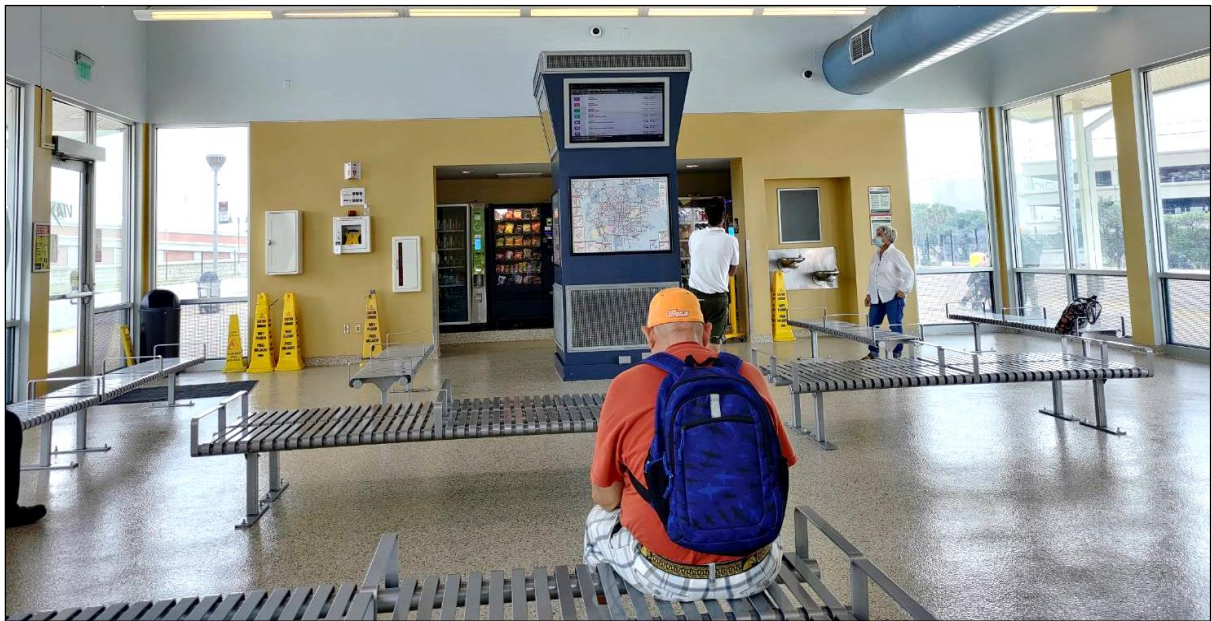


圖 55、聖安東尼奧之轉運中心

相較於 Park & Ride 及 Transit Center，一般之上、下車站僅有站牌，雖無公車動態自動顯示設施，惟民眾可利用個人手機安裝其 APP 並掃描站牌上之 QR-Code，即可於手機端顯示公車之預訂到達時間。此外，當地市區公車票種分成日票、7 日票、31 日票、學期票、年票等 5 種，其中日票可於車上購買，全票價格為 2.75 美元，購買後 24 小時內可無限次使用當地各路市區公車，車內提供免費無線網路服務，且車頭可附掛多台腳踏車，並具無障礙坡道，車內座椅向上折合後可供輪椅停靠，於當地搭乘公車期間，經常可見使用輪椅或助行器之民眾搭乘公車，且司機均耐心協助。另除公車外，當地街頭常可見共享單車及電動滑板車。整體而言，當地公共運輸設施覆蓋範圍廣大、服務頻率高、分佈普遍且價格親民，非常方便。



圖 56、利用公車 APP 掃描站牌 QR-Code 可顯示等候時間



圖 57、聖安東尼奧市區公車附掛自行車及車內概況



圖 58、聖安東尼奧市區公車之日票及無障礙設施



圖 59、聖安東尼奧之共享單車

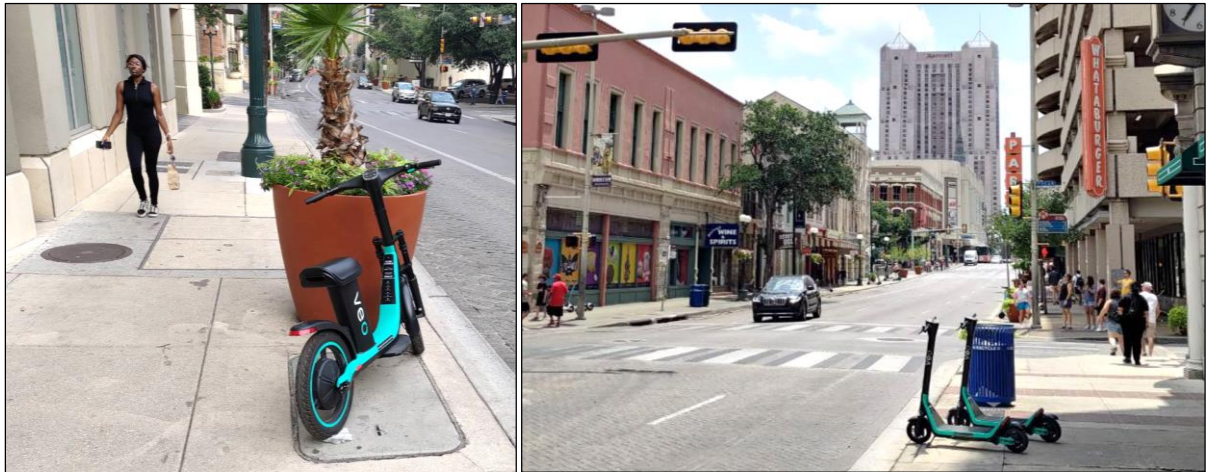


圖 60、聖安東尼奧之坐式及站立式電動滑板車

4.2 道路及橋梁設施



圖 61、410 號州際公路



圖 62、410 號州際公路之預力梁橋及密排梁橋

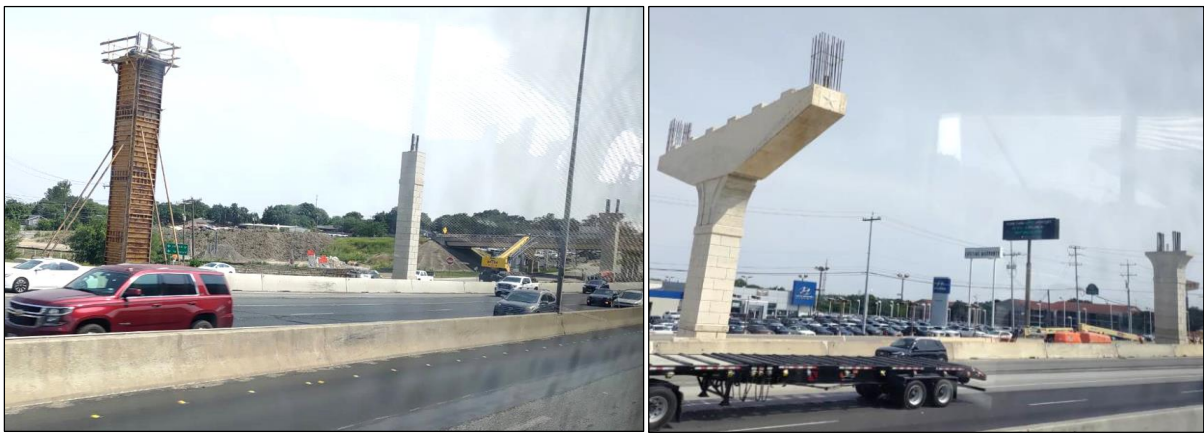


圖 63、35 號州際公路進行之高架橋工程

4.3 其他設施



圖 64、行人穿越道設置之按鈕式號誌



圖 65、聖安東尼奧機場之非接觸式飲水機



圖 66、聖安東尼奧機場廁所供大眾回饋使用意見之 QR-Code

第五章 心得及建議

本次 IBC 2024 計有百餘場論文發表，參與人員遍及產、官、學、研等領域，會議室旁並設置多個展區供民間廠商及學生設置攤位介紹其產品及研究成果，除供全世界橋梁相關領域人員相互交流外，亦特別提供舞台予各地之優秀年輕工程師一展所長，別具傳承意義，有幸參與本研討會議，實獲益良多，相關心得及建議如后。

5.1 心得

一、UHPC 於美國橋梁工程領域之運用正持續蓬勃發展

UHPC 材料之成本及碳排放量雖高於傳統混凝土，惟因其抗壓強度及抗拉強度均明顯優於傳統混凝土，且具備了更佳之耐久性、施工性及水密性，因此近十數年來，美國持續將 UHPC 應用於橋梁構件間之結合(例如伸縮縫與橋面板間之接合區域、橋梁鉸接板)，近年則逐步擴及至橋梁維修補強(端梁修補、橋面板局部取代)及新建工程領域，相關設計規範亦於近期陸續頒佈，據案例評估結果，UHPC 除可減少 27% 混凝土用量或增加橋梁跨徑 25%，並可縮小梁深或減少落墩，且具較高使用壽命，對於具外在限制(例如橋下淨高不足、需加大跨徑)之場域，UHPC 實為不錯選擇。此外，為促進 UHPC 發展及應用，FHWA 近年來持續彙整全美相關案例並製作互動地圖供外界參考，甚至夏威夷亦已有應用案例，顯示 UHPC 於橋梁相關領域之發展及應用已成為熱門議題。

二、結合 UAV 及 AI 劣化辨識之橋檢模式已落地成形

橋梁會因長期使用而逐漸老舊劣化，亦會因地震、豪雨及外力衝擊而受損，因此需定期巡檢並適時維護，才能維持其服務功能處於正常狀態，對於劣化數量繁多且交通量鉅大之老舊橋梁而言，其檢測及記錄作業均遠較一般橋梁來得費時，有鑑於此，為提高橋梁檢測作業效率並降低封閉車道進行橋檢作業衍生之交通衝擊，MnDOT 透過無人機拍攝橋體最新外觀並搭配視覺化軟體建立橋梁 3D 模型，成為可呈現

該橋梁表面狀況之數位分身(Digital Twin)，再利用 AI 辨識模組自動判釋及標註橋體之裂縫與剝落等劣化型態後，透過視覺化共享平台將相關資訊同時交由多位橋梁工程師進行專業研判及確認，發展出「先拍、再篩、後評」作業模式，該作法有別於一般之「檢評合一」作業模式(檢測、評估均為同組人)，與日本採行之「檢評分離」作法(先由高空作業人員於手臂可及之範圍內逐一紀錄，再交由橋梁專業人員評估)較近似，惟相關現場拍攝及紀錄作業均已由自動化工具取代，因此其作業效率、交通衝擊、成本、現場人員安全、資料整體性等方面均具一定優勢，加以橋體表徵可直接數化為資訊，不需花大量時間繪製圖說，且相關成果可同時供多位橋梁專家研判並進行多時期比對，實具多重效益。該作法應具一定成本，對於橋況一般之橋梁，儘管其是否具足夠效益尚待評估，但對於劣化繁多之橋梁，依據國外經驗其效益確可大幅增加。

三、針對型式特殊且重要性高之橋梁建立數位分身之作法逐漸普遍

對於結構型式特殊之老舊橋梁，鑑於其結構安全評估非常複雜，且最為關鍵之劣化往往不易由橋體表徵察覺，因此對於該類型橋梁，美國各州之運輸部門常搭配多種儀器及非破壞性技術進行檢測及監測，再藉由有限元素軟體(FEM)建立分析模型，並透過感測器之監測數據持續進行模型調校，進而逐步建立出能更為精準掌握橋梁動態行為之數位分身(Digital Twin)，不論是載重能力、結構安全、疲勞程度或殘餘使用壽命評估，均係藉由該方式進行，此外，由於相關模型建立及調校需時，因此對於結構型式特殊且重要性較高之橋梁，及早建立分析模式以利持續追蹤評估，已成為常見作法。

四、數位交付為時下運輸部門之熱門議題

隨著路網持續發展，公路設施相關資料也不斷增加，為利減少紙本、增進各設施間之資料整合運用及提升使用效率，近來年許多州政府之運輸部門正持續推動數位交付(Digital Delivery)計畫，期藉該計畫將傳統文件資料轉換為數化檔案，不論是單純將紙本資料轉換為 PDF

格式，或是將設計及竣工資料轉換為 2D 甚至 3D 之數位化格式，均屬於數位交付範疇。本次 IBC 2024 有許多與數位交付有關之論文，顯示數位交付為時下運輸部門之熱門議題，依據相關分享案例，由於數化過程產生之資料量非常龐大，且各設施之複雜程度及資料格式不一，加以各展示平台間之功能互異尚無法完全相容互通，因此許多運輸部門刻正透由小規模之試點計畫進行實地探索，儘管各州發展目標及進程不一，且目前尚無一致之共通化平台，惟仍可持續關注其後續發展及實際成效。

五、運輸部門均高度重視懸索橋之監測及保養維護並持續增進

懸索橋梁具大跨距且造型優美，惟其於檢測及維護方面之複雜程度遠超過一般橋梁，因此完備之安全檢測、監測及保養係確保該類橋梁安全的首要之務，綜觀 IBC 2024 相關論文，各運輸部門對於該類型橋梁之監測及維護均極為重視，主要採用之檢、監測項目包含腐蝕、纜索振動、伸縮縫變位及噪音、阻尼系統等，使用之監測儀器則包含加速度計、位移感測器、應變計、GPS、聲學感測器、水體感測器、溫度計、濕度計。另在保養維護方面，主纜及錨碇系統不具贅餘，當其受潮腐蝕致損壞時，將無其他路徑可傳遞荷載，因此主纜及錨碇端之除濕亦為其保養維護之重要項目，目前全美國已有 12 座橋梁針對主纜或錨碇系統規劃安裝除濕系統，以利將該空間之相對濕度保持在 40% 以下，特別是水份較難排除且可及性較低之上部區域。

六、無縫式橋梁之後續發展值得持續關注

橋面常為鋼筋混凝土構成之連續構造物，會隨溫度變化而伸長縮短，因此需設置伸縮縫，俾免橋面因反覆熱脹冷縮而快速受損，惟伸縮縫亦有其使用壽命，一旦損壞將立即影響行車安全及舒適，因此需適時更換，惟更換期間，由於敲除及重置作業需時，致常對既有交通運轉帶來明顯衝擊，爰更換伸縮縫向來均為第 1 線養護單位之棘手事項。本次 IBC 2024 介紹之無縫式橋梁，適用於交通繁忙且重車多路段，其原理主要係於橋梁段及路堤段之間設置過渡區，並藉由過渡區與

道路基礎間之界面材料吸收溫度引發之應變，而該過渡區亦需承受路堤沉陷與交通荷載引起之應力與形變，儘管相關分享資料有限，惟因該無縫式設計如適用將可對後續養護帶來重大便利，爰後續仍可持續關注其作法及成效，以利適時參考借鏡。

5.2 建議

- 一、UHPC 之強度、耐久性及水密性優於傳統混凝土，其於美國橋梁工程領域已累積相當使用經驗並持續蓬勃發展，建議可適時應用於橋梁及相關修建工程。
- 二、針對結構型式特殊之橋梁，除透過儀器及設備進行檢測與監測，亦可適時應用相關數據建立數位分身並持續調校，以利長期追蹤及評估其安全狀況。
- 三、運輸部門數位交付計畫發展情形、UAV 搭配 AI 劣化辨識之橋梁檢測作業、無縫式橋梁之應用等均為熱門或實用議題，建議可持續關注其後續發展情形。

參考文獻

- (1) Steven Austin “Preserving Texas Bridges” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (2) Mark Wallace “Bridge Inspection Program in Texas” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (3) Courtney Holle “TxDOT’s Plan for Digital Delivery” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (4) Scott Becher, Barritt Lovelace “Leveraging UAS, AI, and Digital Twin Technology to Transform Bridge Inspection: Robert Street Bridge” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (5) Daryn Sims “Texas DOT – Bridge Construction & Maintenance” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (6) Steven J. Austin “Mitigating Fire Hazards at Texas Bridges” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (7) Bernie Carrasco “Texas DOT Bridge Program” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (8) Richard Runyen “Bridges – A Keystone of Pennsylvania Infrastructure” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (9) Jennifer Laning “Inspection and Testing Access for T1 Steel” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (10) Jason Stith “Kentucky’s T-1 Steel Inspection Program” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (11) Andrew Adams “Jennings Randolph T1 Steel Inspection, Findings, and Indication Remediation” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (12) Benjamin Reeve “Repair & Rehabilitation of Historic Suspension Bridges Great & Small” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (13) Dan Rogers, Ryan Rago “Pennsylvania Turnpike Commission: Pilot 3D Bridge Model Project” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (14) Joshua Pudleiner, James Mandala, Barry Colford “Suspension Bridge Rehabilitation and Preservation Constructability Challenges” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (15) Richard Stevens, Rasmin Kharva “Preliminary Fatigue Evaluation of a 100-Year-old Double Level Bridge” International Bridge Conference Proceedings (2024)

- (16) Zeinab Bandpey, Ruel Sabellano, Mehdi Shokouhian “Predicting Bridge Health: Machine Learning-Based Condition Rating from Element-Level Inspections” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (17) Jonathan Morey, Stuart Rankin “Proposed Improvements to North American Main Cable Dehumidification Systems” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (18) Sam Boukaram, Shekhar Scindia, Abate Tewelde “Completion of First UHPC Deck Rehabilitation on Entire Suspension Bridge” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (19) Ivan Gualtero, Vincent Collie “Data-Driven Preventive Maintenance and Service Life Increase of the Sunshine Skyway Bridge – Tampa FL, USA” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (20) Louis Ruzzi, Eric Setzler, Alexandra Beyer “City of Pittsburgh Comprehensive Bridge Asset Management Program Overview” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (21) George Zimmer, Alexandra Beyer, Rama Krishnagiri, Jason Hastings, Kevin Lindell “An Investigative Study on Extensive Transverse Deck Cracking – Two Twin Bridges” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (22) David Garber, Rafic Helou “Structural Design with UHPC using AASHTO LRFD Guide Specification” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (23) Daniel Jensen, Courtney Holle “Transitioning the Nation’s largest bridge inventory to Digital Delivery” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (24) Xiaoyi Chen, Todd Helwig, Juan Murcia-Delso “Experimental and Numerical Study on Seamless Bridge-Pavement Systems” International Bridge Conference Proceedings (2024)
- (25) TxDOT Bridge Division “Report on Texas Bridges Fiscal Year 2020”
- (26) “I-40 Hernando deSoto Bridge Fracture Investigation FINAL REPORT” Prepared by Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc. October 2021.
- (27) Rob Connor, Jason Stith, Curtis Schroeder, Derek Soden “T-1 Steel, I-40 and the Way Forward” TRB Webinar: T-1 Steel, I 40 Bridge, and the Way Forward (2022)

- (28) FHWA Office of Bridges and Structures “Non-Destructive Evaluation of Fracture Critical Members Fabricated from AASHTO M244 Grade 100 (ASTM A514/A517) Steel” TRB Webinar: T-1 Steel, I 40 Bridge, and the Way Forward (2022)
- (29) <https://www.viainfo.net/>
- (30) <https://www.txdot.gov/business/resources/digital-delivery.html>
- (31) <https://www.linkedin.com/pulse/bridging-gap-how-norway-using-digital-twins>
- (32) <https://www.governing.com/finance/the-multibillion-dollar-implications-of-evs-for-state-budgets>
- (33) https://www-pewtrusts-org.translate.goog/en/research-and-analysis/articles/2024/07/03/how-electric-vehicles-could-affect-state-transportation-budgets?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=zh-TW&_x_tr_hl=zh-TW&_x_tr_pto=sc
- (34) <https://www.nts.gov/investigations/Pages/HWY22MH003.aspx>
- (35) Google(無日期), [聖安東尼奧公車轉運中心 Google 街景], 2024 年 8 月 20 日, 取自 <https://is.gd/vEVBZb>
- (36) Google(無日期), [聖安東尼奧公車轉運中心 Google 街景], 2024 年 8 月 20 日, 取自 <https://is.gd/WgyLAW>
- (37) Google(無日期), [聖安東尼奧停車轉乘中心 Google 街景], 2024 年 8 月 20 日, 取自 <https://is.gd/KcZvou>