

94-120-2107

行政院及所屬各機關出國報告
(出國類別:其他)

出席「第六屆國際橋梁工程 研討會」會議報告

服務機關:交通部運輸研究所
出國人 職 稱:副研究員
姓 名:巫柏蕙

出國地區:美國
出國期間:94年7月14日至7月21日
報告日期:94年12月20日

出席「第六屆國際橋梁工程研討會」會議報告

著 者：巫柏蕙

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：臺北市敦化北路 240 號

電 話：(02)23496880

出版年月：中華民國 94 年 12 月

版(刷)次冊數：初版一刷 7 冊

定 價：220 元

系統識別號：C09403778

行政院及所屬各機關出國報告提要

頁數：49 含附件：無

報告名稱：出席第六屆國際橋梁工程研討會會議報告

主辦機關：交通部運輸研究所

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

交通部運輸研究所/王管理師瓊琳/02-23496723

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

巫柏蕙/交通部運輸研究所/運輸工程/副研究員/02-23496826

出國類別： 1.考察 2.進修 3.研究 4.實習 5.其他（出席國際會議）

出國期間：94年7月14日至7月21日

出國地區：美國麻塞諸賽州波士頓

報告日期：94年12月20日

分類號/目：HO / 綜合類（交通類） HO / 綜合類（交通類）

關鍵詞：橋梁安全，高性能材料，系統可靠度模型，檢測評估計畫，劣化預測，落橋偵測，沖刷監測。

內容摘要：第6屆國際橋梁工程研討會之主題為「可靠、安全、永續」，3天的議程中包含了LRFD、橋梁管理系統、預鑄橋梁、橋梁非破壞檢測、橋梁美學等17個主題。本報告摘整會中發表之部分論文並介紹波士頓大眾運輸系統概況。

本文電子檔已上傳至出國報告資訊網

目錄

第一章 前言	1
1.1 出國目的.....	1
1.2 行程紀要.....	1
第二章 研討會及考察	3
2.1 橋梁安全 (Security)	3
2.2 高性能材料 (High-Performance Materials, HPM) 之應用.....	7
2.3 梁式橋的系統可靠度模型.....	12
2.4 德州後拉式橋梁檢測評估計畫	12
2.5 康州 (Connecticut) 之橋梁長期監測	14
2.6 虛擬無線基礎建設評估系統 (Virtual Wireless Infrastructure Evaluation System)	14
2.7 電子手提式橋梁檢測資料收集器	16
2.8 混凝土橋之劣化預測模式.....	16
2.9 德州落橋偵測系統 (Bridge Collapse Detection System)	19
2.10 橋梁沖刷監測計畫.....	20
2.11 橋梁管理.....	23
2.12 展覽會.....	24
2.13 波士頓大眾運輸系統.....	29
第三章 心得與建議	32
附錄一 議程	35
附錄二 會場照片	36
附錄三 波士頓大眾運輸系統照片	39

表目錄

表 1.1	出國行程紀要表.....	2
表 2.1	以功能為本的橋梁標準（恐怖份子威脅）.....	4
表 2.2	高性能結構混凝土性能特性等級.....	8
表 2.3	2003 年 AASHTO 委員會通過之 HPC 相關規定.....	9
表 2.4	2004 年 AASHTO 委員會通過之 HPC 相關規定.....	10

圖目錄

圖 2.1	結構因爆炸產生之構件壓力延時	7
圖 2.2	爆炸壓力波影響效應範圍.....	7
圖 2.3	管道鏡檢測：(a)在錨碇處操作管道鏡；(b)管道鏡影影像及記錄設備；(c)管道鏡影像	13
圖 2.4	智慧 (wise) 系統	15
圖 2.5	(a)智慧系統感應器連接器；(b)以智慧系統進行現地檢測	16
圖 2.6	開始腐蝕機率示意圖.....	19
圖 2.7	QIMB 橋面崩落	20
圖 2.8	天津大沽橋.....	25
圖 2.9	波士頓地鐵路線圖.....	30
圖 2.10	通勤火車路線圖.....	31
圖 2.11	MBTA 7 日通行票證.....	34

第一章 前言

1.1 出國目的

由於新技術的不斷發展及對公路功能需求的增長，運輸部門在資訊、研發與技術上都必須與時俱進以確保公路運輸系統之安全與效能，而如何使橋梁工程更好、更快及更耐久，更是現代橋梁工程師的共同目標與挑戰。世界已開發國家目前面臨的另一個挑戰為大量橋梁屆設計使用年限，然在預算、土地取得及交通維持等種種限制條件下，新建改建往往是萬不得已的最後選擇，故亦須應用最新技術進行維修補強，延長橋梁壽命。

臺灣四面環海，大氣中原本即存在諸多危害橋梁之腐蝕因子，而頻繁的地震、颱風、土石流，加上車輛超載及河川的超限利用，使國內近年來橋梁屢受重創。民國 89 年高屏大橋斷橋事件發生後，橋梁維護管理作業再獲各公路管理單位重視。本所自 88 年起奉交通部指示開發「臺灣地區橋梁管理系統」後，又續辦橋梁管理系統之維護管理、橋梁檢測制度方法及準則之建立及橋梁檢測人員之培訓等橋梁維護管理相關業務。國際橋梁工程研討會係由 TRB 及 FHWA 共同主辦，自 1978 年起約每 5 年舉辦一次，本次第 6 屆國際橋梁工程研討會於 2005 年 7 月 17 日至 20 日假麻塞諸賽州（Massachusetts）波士頓（Boston）Westin Copley Place 舉行，研討會主題為「可靠（reliability）、安全（security）、永續（Sustainability）」。為瞭解世界各國橋梁維護管理現況、最新檢測評估方法及其他橋梁工程技術領域之發展，本所由巫柏蕙副研究員代表出席。

1.2 行程紀要

本次出國行程自民國 94 年 7 月 14 日至 7 月 20 日，為期 7 天，主要行程為參加第 6 屆國際橋梁工程研討會，並同時考察波士頓地區之大眾運輸系統，詳細行程內容如表 1.1 所示。

表 1.1 出國行程紀要表

日期	地點	行程內容
7/14 (星期四)	臺北 - 芝加哥 - 波士頓	啟程經芝加哥轉機至麻塞諸賽州波士頓
7/15 (星期五)	波士頓	考察波士頓當地大眾運輸系統
7/16 (星期六)	波士頓	考察波士頓當地大眾運輸系統
7/17 (星期日)	波士頓	考察波士頓當地大眾運輸系統
7/18 (星期一)	波士頓	參加第 6 屆國際橋梁工程研討會歡迎會
7/19 (星期二)	波士頓	參加第 6 屆國際橋梁工程研討會
7/20 (星期三)	波士頓	參加第 6 屆國際橋梁工程研討會
7/21 (星期四)	波士頓 - 芝加哥	參加第 6 屆國際橋梁工程研討會。研討會結束後，下午搭機前往芝加哥進行私人行程

第二章 研討會及考察

本此行程除了參加第 6 屆國際橋梁工程研討會，同時考察波士頓當地之大眾運輸系統。本章 2.1 至 2.11 節摘整部分研討會中發表論文、2.12 為研討會現場展覽會介紹、2.13 則概述波士頓大眾運輸系統現況。

第 6 屆國際橋梁工程研討會為期 4 天，會議內容包括：歡迎會、18 場次技術研討會 (Technical Session)、3 場全員出席研討會(Plenary Session)、2 場午餐專題演講，而展覽會場約有 12 個單位設攤展出。詳細之會議議程詳附錄一。

18 場次技術研討會共有 17 個主題，分別為：

- (1) Advances in Load and Resistance Factor Design Research
- (2) Bridge Management System
- (3) Prefabricated Bridges
- (4) Nondestructive Evaluation of Bridge
- (5) Accelerated Construction
- (6) Seismic Design and Evaluation
- (7) Bridge Durability
- (8) Innovative Materials and Methods
- (9) Seismic Design and Retrofit
- (10) Bridge Health Monitoring
- (11) Innovative Methods
- (12) Extreme Events
- (13) Scour and Maintenance
- (14) Innovative Methods
- (15) Bridge Evaluation and Load Rating
- (16) Innovative Design and Research
- (17) Bridge Aesthetics

本次研討會會場提供研討會中發表之論文摘要書面資料及光碟檔案。以下茲摘述本研討會之部分技術議題內容。

2.1 橋梁安全 (Security)

無論材料、工法技術、外觀型式等如何演變，維護橋梁安全是最基本亦是最首要達成的目標，本次研討會在橋梁安全議題上除了設計方法、規

範的探討，也有防範恐怖份子攻擊的相關研究發表。

2001 年 9 月 11 日的恐怖攻擊發生後，美國國家安全當局蒐集的情資顯示加州及紐約的橋梁將面臨攻擊威脅，而在遭逮捕的恐怖份子嫌犯身上亦找到橋梁重要構件影片及破壞橋梁鋼纜所需設備的相關資料，許多州政府交通部及聯邦政府開始研究如何設計公路基礎建設（highway infrastructure），使其更能夠承受極端的（extreme）載重。

在過去，工程師在設計橋梁時不需要考量到恐怖攻擊這一類的安全問題，而關於恐怖份子採行的爆破策略會對橋梁造成何種影響的相關資料也相當有限，因此一項由七個州政府集資委託德州大學及相關領域專家進行的研究計畫，即提出一以功能為本（performance-based）的設計指導方針，如表 2.1 所示。

表 2.1 以功能為本的橋梁標準（恐怖份子威脅）

第 1 類（非常重要（very important）橋梁） 概念：每一結構構件必須設計能禁得起 2 種不同的情況（cases），即大載重伴隨可修復（repairable）損害及較小載重伴隨可忽略（negligible）損害。

情況 1（小載重）

設計載重：最可能的威脅情境係以所設計的各結構構件受下述攻擊為最壞狀況。

中型卡車炸彈（truck bomb）²

中型手置炸彈（hand emplaced explosive）

車輛撞擊所造成的中型靜載重

可接受的損害：

局部橋面版受損；支撐系統完整所受損害可忽略；考慮到結構贅餘度（structural redundancy）時，桁架/鋼纜/橋墩仍可承受設計載重；沒有無法修復的基礎不穩定及橋跨損失；

鋼梁最大撓度（deflection）小於長度的 5%，鋼筋混凝土梁則需小於 4%。

情況 2（大載重）

設計載重：最可能的威脅情境係以所設計的各結構構件受下述攻擊為最壞狀況。

大型卡車炸彈

<p>大型手置炸彈 (hand emplaced explosive) 車輛撞擊所造成的大型靜載重</p> <p>可接受的損害：</p> <p>局部橋面版受損；支撐系統完整所受損害輕微；無法承受設計載重，但容易修復；沒有無法修復的基礎不穩定及橋跨損失；</p> <p>鋼梁最大撓度 (deflection) 小於長度的 12% ，鋼筋混凝土梁則需小於 8%。</p>
<p><u>第 2 類 (重要橋梁)</u> 概念：必須設計能禁得起小載重且伴隨產生的損害應為可修復。</p> <p>設計載重：同第 1 類之情況 1</p> <p>可接受的損害：同第 1 類之情況 2</p>
<p><u>第 3 類 (稍微重要 (slightly important) 橋梁)</u> 概念：必須設計禁得起小載重且伴隨的損害不得超過一跨。</p> <p>設計載重：同第 1 類之情況 1</p> <p>可接受的損害：損害不超過一跨 (無逐漸倒塌之虞)</p>
<p><u>第 4 類 (無關重要 (insignificant) 橋梁)</u></p> <p>無標準</p>

¹ 部分第 1 類橋的設計爆破載重可能需要更多更詳細的威脅評估。

² 基於安全理由，準確的設計炸藥量已刪除。

上表係以橋梁重要性 (由橋梁管理者定之) 為基礎，針對設計載重建立受威脅程度的底線及其可接受的損害 (acceptable damage)。每一類的設計載重及可接受的損害都是經由恐怖攻擊威脅、可接受風險 (acceptable risk) 及可獲得資源 (available resources) 進行平衡評估 (balanced assessment) 而得，最可能之攻擊情境則是評估每一結構構件所受威脅而得。

透過實體安全 (physical security) 或現地佈設 (site layout) 等措施亦可消彌或降低橋梁受攻擊的威脅，然而由於可分配資源有限，上述措施佈設前，應就初置成本及長期維護、運作、更新成本進行成本效益分析。例如結構改建的初期成本相對高於安裝閉路電視 (closed-circuit television, CCTV)，但監控 CCTV 卻較結構硬化後的長期成本高。一般來說，實體安全及現地佈設可用以減少攻擊目標、增加辨識出恐怖份子的可能、將傷亡人數降到最低、增進緊急反應時間 (emergency response time)、增進大眾

信心、增進結構反應（structural response）等。常見的實體安全及現地佈設措施包括：

- 警察巡邏、看守（surveillance）、保衛
- 在控制盤、橋塔出入口、及維護區設置有鎖或無鎖的門禁系統
- 在重要區域（如檢查平台）設置入侵偵測系統
- CCTV 監控
- 維護人員證件的辨識流程及驗證
- 通報事件或可疑活動之緊急電話
- 高級警示系統，包括：警告標誌、燈、警笛，及橋跨損毀後可突起的警告路障
- 增進緊急狀況時之備用照明
- 去除隱藏的空間及清理長得過大的植物
- 去除橋下的停車空間
- 對未來新建橋梁的贅餘進行規劃，如以兩鄰近反向雙線道橋梁取代一四線道橋梁
- 避免具放大爆炸效應的建築物，如結構構件內凹（recess）或偏移（offset）、非必要的密閉空間（confined area）

研究單位利用美國軍方所開發的爆炸計算程式，計算結構構件的壓力延時（pressure-time history）如圖 2.1，並繪製出爆炸壓力波影響效應範圍如圖 2.2。為了研究可能的各種對策，研究單位變動各項相關因子（如跨距、淨高、材料強度、結構構件型式、尺寸及間距、炸藥量、炸藥放置位置等）進行分析，最後針對鋼筋混凝土柱、預力混凝土及鋼鈹梁、分段式箱梁（segmental box girder）、鋼桁架、斜張橋（cable-stayed）五類橋梁，提出防恐攻擊的建議。惟結論中亦提到基於安全的理由，橋梁的重要性（criticality）、確切的防恐設計標準及保護措施均不應公開。

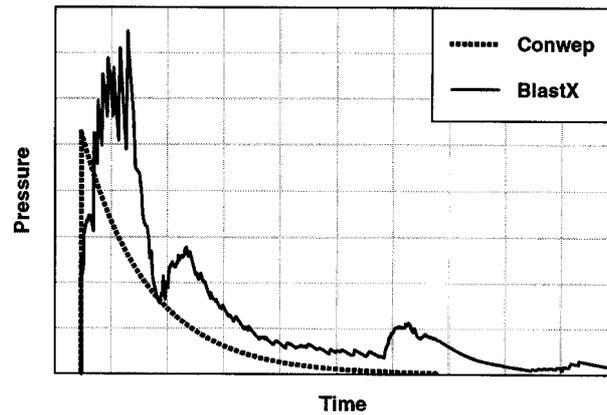


圖 2.1 結構因爆炸產生之構件壓力延時

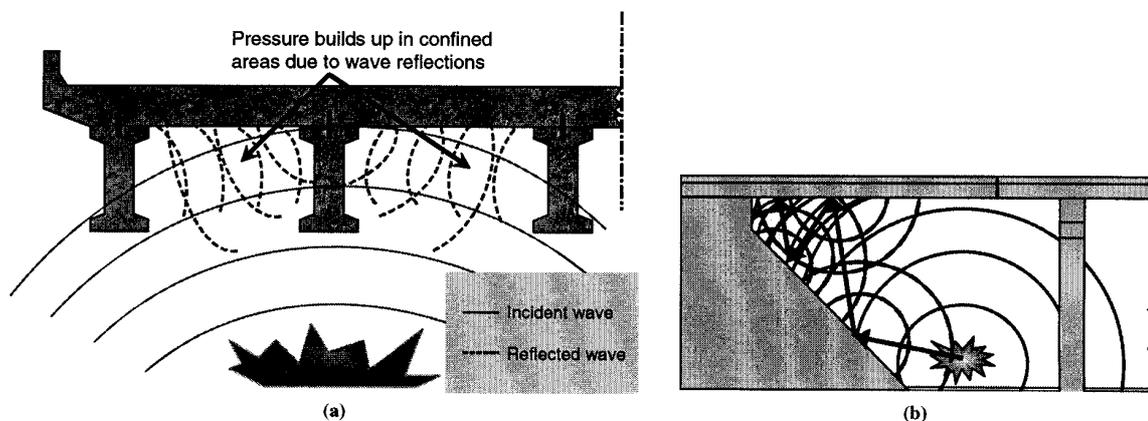


圖 2.2 爆炸壓力波影響效應範圍

2.2 高性能材料 (High-Performance Materials, HPM) 之應用

由於 HPM 較傳統橋梁材料有更好的力學性質及耐久性，就生命週期觀點而言也更具成本效益，因此過去 10 年來被大量應用於基礎建設。按 FHWA 的觀點，HPM 是使橋梁的設計與建造更快、更經濟、需要較少甚至不需維護及提供至少 100 年服務年限的關鍵因素，故 FHWA 在推動將研發出的 HPM 技術推廣應用於實際橋梁設計案中，也扮演著關鍵角色。美國 21 世紀運輸平衡法案 (The Transportation Equity Act for the 21st Century, TEA-21) 提出一項為期 6 年，經費達 12 億美元之創新橋梁研究及建設計畫 (Innovative Bridge Research and Construction Program, IBRCP)，該計畫已成功協助 FHWA 達成提高安全、增進產能、改善壅塞等政策目標，而後續延伸的第 7 年 (甚至可能的第 8 年)，IBRCP 基金又協助所有州政府交通部及數個聯邦或地區部門進行延長結構物的服務年限的工作，這其中與 HPM 相關的計畫就超過 275 個。Louis N 針對高性能混凝土 (HPC)、高性能鋼筋 (HPS) 及纖維強化高分子聚合物複合材料 (Fiber-Reinforced

Polymer composites, FRP composites) , 做了回顧與展望。

1.HPC

依據美國混凝土協會 (ACI) 的定義, HPC 是一種具多種特殊性能以滿足特定需求的混凝土, 它無法藉由傳統的成分、配比、澆置及養護獲得; FHWA 則以 4 種耐久性及 4 種強度參數定義 HPC, 每種定義參數都有相應的性能規範、試驗規範、性能量測程序及對性能有害之現地條件的相關建議, 詳見表 2.2。

表 2.2 高性能結構混凝土性能特性等級

Performance Characteristic ^a	Standard Test Method	FHWA HPC Performance Characteristic Grade ^b		
		1	2	3
Freeze-thaw durability ^f (F/T=relative dynamic modulus of elasticity after 300 cycles)	AASHTO T 161 ASTM C 666 Proc. A	70%≤F/T<80%	80%≤F/T<90%	90%≤F/T
Scaling resistance ^g (SR=visual rating of the surface after 50 cycles)	ASTM C 672	3.0≥SR>2.0	2.0≥SR>1.0	1.0≥SR≥0.0
Abrasion resistance ^g (AR=avg. depth of wear in mm)	ASTM C 944	2.0>AR≥1.0	1.0>AR≥0.5	0.5>AR
Chloride penetration ^f (CP=coulombs)	AASHTO T 277 ASTM C 1202	2500≥CP>1500	1500≥CP>500	500≥CP
Alkali-silica reactivity (ASR=expansion at 56 d) (%)	ASTM C 441	0.20≥ASR>0.15	0.15≥ASR>0.10	0.10≥ASR
Sulfate resistance (SR=expansion) (%)	ASTM C 1012	SR≤0.10 at 6 months	SR≤0.10 at 12 months	SR≤0.10 at 18 months
Flowability (SL=slump, SF=slump flow)	AASHTO T 119 ASTM C 143, and proposed slump flow test	SL>190 mm (SL>7-1/2 in), and SF<500 mm (SF<20 in)	500≤SF≤600 mm (20≤SF≤24 in)	600 mm<SF (24 in<SF)
Strength ^h (f _c =compressive strength)	AASHTO T 22 ASTM C 39	55≤f _c <69 MPa (8≤f _c <10 ksi)	69≤f _c <97 MPa (10≤f _c <14 ksi)	97 MPa≤f _c (14 ksi≤f _c)
Elasticity ^h (E _c =modulus of elasticity)	ASTM C 469	34≤E _c <41 GPa (5≤E _c <6x10 ⁶ psi)	41≤E _c <48 GPa (6≤E _c <7x10 ⁶ psi)	48 GPa≤E _c (7x10 ⁶ psi≤E _c)
Shrinkage ⁱ (S=microstrain)	AASHTO T 160 ASTM C 157	800>S≥600	600>S≥400	400>S
Creep ^j (C=microstrains/pressure unit)	ASTM C 512	75≥C>55/MPa (0.52≥C>0.38/psi)	55≥C>30/MPa (0.38≥C>0.21/psi)	30/MPa≥C (0.21/psi≥C)

Note: This table does not represent a comprehensive list of all characteristics that good concrete should exhibit. It does list characteristics that can quantifiably be divided into different performance groups. Other characteristics should be checked. One characteristic is sufficient for classification as an HPC.

^a For non-heat-cured products, all tests to be performed on concrete samples moist, submersion, or match cured for 56 days or until test age. For heat-cured products, all tests to be performed on concrete samples cured with the member or match-cured until test age. See Table 13 of the Henry Russell report for additional information and exceptions, or Table 2 in the FHWA publication located at <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/hpcdef.htm>.

^b A given HPC mix design is specified by a grade for each desired performance characteristic. A higher grade number indicates a higher level of performance. Performance characteristics and grades should be selected for the particular project. For example, a concrete may perform at grade 3 in strength and elasticity, grade 2 in shrinkage and scaling resistance, and grade 2 in all other categories.

^c Based on SHRP C/FR-91-103, p. 3.52.

^d Based on SHRP S-360.

^e Based on SHRP C/FR-91-103.

^f Based on PCA Engineering Properties of Commercially Available High-Strength Concretes, RD104.

^g Use lower strengths for decks and substructures.

^h Based on SHRP C/FR-91-103, p. 3.17. Modulus of elasticity is related to strength, and if a lower strength is specified for decks, the measure of effectiveness should be proportionally lower. See *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, Article 5.4.2.4.

ⁱ Based on SHRP C/FR-91-103, p. 3.25.

^j Based on SHRP C/FR-91-103, p. 3.30.

以橋梁構件而言，使用屬於 HPC 中之高強度混凝土（HSC）的最大效益在於延長跨距、減少上部結構深度、減少構件尺寸及消除 girder lines 以增加成本效益等，讓設計者在選擇橋梁尺寸及型式時更具彈性。在節省長期成本方面，HPC 還具抗凍融、低透水性、高抗磨性及抗鱗狀剝落（scaling resistance）等特性，而腐蝕速率甚至不到傳統混凝土的 10%。HSC 還容許承受更多的預應力，相對地增加了構件的承載力。

從相關的調查顯示，由於卜作嵐物質及爐石的添加，HPC 使用於橋面版之最小抗壓強度從 1990 年代中期的 4,000 psi 增加到目前的 4,000 6,000 psi；使用於梁的最小抗壓強度亦從 1990 年代中期的 5,000 6,000 psi 增加到目前的 6,000 psi。

AASHTO 近年來也藉 HPC 的優點修訂了材料、建造及橋梁設計規範，2003 2004 年相關委員會陸續通過了部分條款，將正式公布出版。（詳表 2.3 及表 2.4）。

表 2.3 2003 年 AASHTO 委員會通過之 HPC 相關規定

<p>At its 2003 Annual Meeting, the AASHTO Subcommittee on Bridges and Structures approved a number of revisions to the AASHTO LRFD Bridge Design and Construction Specifications for the 2004 editions, to facilitate the implementation of HPC. Please note the following is only a summary of the approved revisions. The revisions do not become official specification articles until they are published by AASHTO. Once codified, these revisions will have the following impact:</p> <p>DESIGN SPECIFICATIONS</p> <p>Recognize that concrete unit weight increases as concrete compressive strength increases (Table 3.5.1-1)</p> <p>Extend some provisions to concrete compressive strengths greater than 10.0 ksi (Articles 5.1 and 5.4.2.1)</p> <p>Allow concrete compressive strengths to be specified at ages other than 28 days (Article 5.3)</p> <p>Allow the use of ground granulated blast-furnace slag (Article C5.4.1)</p> <p>Allow higher cementitious materials content for high strength concrete (Article 5.4.2.1)</p> <p>CONSTRUCTION SPECIFICATIONS</p> <p>Introduce two new classes of HPC (Articles 8.2, 8.3.1, 8.4.1, 8.4.4, 8.6.6, 8.6.7, and 8.11.1)</p> <p>Allow the use of ASTM 1157 Blended Hydraulic Cement (Article 8.3.1)</p> <p>Allow a combined aggregate grading (Article 8.3.5 and a new Appendix)</p> <p>Allow the use of ground granulated blast-furnace slag (Articles 8.3.7, 8.4.4, and 8.6.4.1)</p> <p>Allow higher cementitious materials content for high strength concrete (Article 8.4.3)</p> <p>Recognize the use of 4x8-in. cylinders (Article 8.5.7.1)</p> <p>Allow concrete compressive strengths to be specified at ages other than 28 days (Articles 8.5.7.3 and 8.5.7.5)</p> <p>Require the use of match-cured cylinders for high strength precast concrete (Article 8.5.7.5)</p> <p>Ensure proper curing of HPC (Articles 8.6.4.1, 8.11.1, 8.11.3.5, 8.11.4, and 8.13.4)</p>

表 2.4 2004 年 AASHTO 委員會通過之 HPC 相關規定

<p>At its 2003 Annual Meeting, the AASHTO Subcommittee on Bridges and Structures approved a number of revisions to the AASHTO LRFD Bridge Design and Construction Specifications for the 2004 editions, to facilitate the implementation of HPC. Please note the following is only a summary of the approved revisions. The revisions do not become official specification articles until they are published by AASHTO. Once codified, these revisions will have the following impact:</p> <p>DESIGN SPECIFICATIONS</p> <p>Recognize that concrete unit weight increases as concrete compressive strength increases (Table 3.5.1-1)</p> <p>Extend some provisions to concrete compressive strengths greater than 10.0 ksi (Articles 5.1 and 5.4.2.1)</p> <p>Allow concrete compressive strengths to be specified at ages other than 28 days (Article 5.3)</p> <p>Allow the use of ground granulated blast-furnace slag (Article C5.4.1)</p> <p>Allow higher cementitious materials content for high strength concrete (Article 5.4.2.1)</p> <p>CONSTRUCTION SPECIFICATIONS</p> <p>Introduce two new classes of HPC (Articles 8.2, 8.3.1, 8.4.1, 8.4.4, 8.6.6, 8.6.7, and 8.11.1)</p> <p>Allow the use of ASTM 1157 Blended Hydraulic Cement (Article 8.3.1)</p> <p>Allow a combined aggregate grading (Article 8.3.5 and a new Appendix)</p> <p>Allow the use of ground granulated blast-furnace slag (Articles 8.3.7, 8.4.4, and 8.6.4.1)</p> <p>Allow higher cementitious materials content for high strength concrete (Article 8.4.3)</p> <p>Recognize the use of 4x8-in. cylinders (Article 8.5.7.1)</p> <p>Allow concrete compressive strengths to be specified at ages other than 28 days (Articles 8.5.7.3 and 8.5.7.5)</p> <p>Require the use of match-cured cylinders for high strength precast concrete (Article 8.5.7.5)</p> <p>Ensure proper curing of HPC (Articles 8.6.4.1, 8.11.1, 8.11.3.5, 8.11.4, and 8.13.4)</p>

各州交通部及業界由過去超過 10 年使用 HPC 的經驗獲得信心，目前還有一些新的 HPC 在開發中，如自充填混凝土（self-consolidating concrete, SCC），具有極佳的流動性，且不需振動就可以振實到正常密度也不會析離，能減少人工及振動噪音，適用於高樓建築及橋梁工程；此外，挪威將輕質粒料應用於 HPC 配合設計已有 15 年的歷史，輕質 HPC 可以減輕結構物自重、增進工作性及水化，低密度特性可以降低地震力，雖然粒料成本較高，然而增加的成本卻可被版的強化及梁、墩、基礎尺寸的減少移轉；超高性能混凝土（ultrahigh-performance concrete, UHPC）目前正由 FHWA 進行相關試驗中。

2.HPS

HPS 獨特的化學及物理性質增進了鋼材的焊接能力、韌度（toughness）耐候性，使設計者與管理者可以節省相當的整體成本，目前較常見的為

Grade HPS 50W 及 HPS 70W , HPS 100W 較少見。

HPS 的高強度使設計者可減少梁的數量，相對地減輕重量及成本；或使用淺梁解決淨高限制；亦可增加跨距以減少落墩。在焊接方面，HPS 容許在各種狀況下焊接，因此不需要花額外的成本來控制焊接程序；由於幾乎不用預熱（preheating）或後熱（postheating），消除了發生氫脆（hydrogen-induced）的可能。在韌度方面，HPS 可以容忍較大的開裂，因此當結構不安全時，能有較多的時間去察覺與修補。在耐候方面，HPS 有較高的抗腐蝕性，因此只要在潮濕的區域塗裝即可。

HPS 在美國的應用非常成功，1997 年第一座 HPS 橋梁分別由 Nebraska 州及 Tennessee 州完成，至 2004 年美國境內已有超過 200 座 HPS 橋梁。HPS 相關的規範也陸續推動修訂中。

3.FRP Composites

FRP 複合材料是由纖維及樹脂組成，纖維可為玻璃質、人造纖維（aramid）或碳纖維，樹脂則可為聚脂（polyester）、乙烯基脂樹脂（vinylester）或環氧樹脂等。FRP 的強度是由纖維種類、體積比例、方向及樹脂種類、製造方法及連結材料等決定。FRP 在橋梁及結構方面的應用包括：橋版、在上部或下部結構以薄板、薄片或條帶型式進行連結修補、鋼筋（reinforcing bar）、預力腱、樁、梁及高價標誌結構修補。

FRP 與傳統材料相較，不僅重量輕、承載力高、吸能效果佳、抗疲勞，並具抗去冰鹽及其他化學物質腐蝕的能力，因此可降低長期維護成本。惟 FRP 的使用經驗相對較短，初置成本較鋼筋混凝土高，強度及勁度也有隨時間降低的趨勢。

約 10 到 15 年前，FRP 應用的可行性研究及研發工作開始進行，目前 FHWA 則致力於滿足 FRP 使用者在應用上的需求，尤其是推動 AASHTO 認可 FRP 版的材料、設計及成效評估規範；未來的 10 到 15 年，FHWA 計畫尋找新的 FRP 材料及研發奈米複合材料（nanocomposites），希望這些材料能更耐久、強度更高、耐損性更高、具自我偵測（self-inspecting）、自我修補（self-repairing）等能力。

美國每日有超過 1 百萬輛的車子行經目前安全但仍因結構狀況或功能喪失，而被評估為有缺陷的橋梁，其中超過 24,000 座橋梁屬於高容量的國道公路系統，若限制交通量將造成數百萬小時生產力的損失，也會增加國道公路的流動進而增加燃料的需求，換言之，儘速修復改善橋梁的承載力及狀況的需求日增。基於 HPM 的諸多優異特性，未來 HPM 在橋梁領域的

應用將可預期。

2.3 梁式橋的系統可靠度模型

系統可靠度是評估既有構造物之重要且有效工具，傳統上都以單一構件的評估為基礎而非整體結構，因此也都以單一構件的容許應力或極限彎矩作為可接受的標準。惟研究發現，整個結構系統的承載能力通常遠大於構件之設計載重，其間的差異主要歸因於系統行為，而可靠度分析的目的即在量化此一差異。設計橋梁或評估既有結構時，善用有效的系統可靠度及先進的結構分析方法是必須的。目前最新分析程序考慮到的是對橋梁中應力及應變有一數字正確但決定論的（deterministic）分析，而有數學方法可以計算各種理想（idealized）系統（並聯、串聯或組合）的可靠度。材料、科技及現地檢測方法的進步可以用於改善橋梁設計及評估，而計算整個橋梁結構的可靠度將能把實際的邊界條件、特定位置的載重及阻抗因子納入考量。

2.4 德州後拉式橋梁檢測評估計畫

位於 Austin 的德州交通部橋梁組鑑於 Florida 及其他州近來發現許多橋梁出現縱向後拉式鋼腱腐蝕問題，因此針對二座節塊橋（segmental bridge）及一座斜張橋，規劃了後拉式橋梁的評估計畫，作為後續政策擬定及延長耐久性的依據。此一計畫包含 4 個階段：

- 第 1 階段包括資料蒐集及詳細徹底的調查，以評估橋梁外表狀況。徹底調查的目的在辨識所有現存的潛在問題及發生位置，在這個階段調查蒐集的資訊將應用於第二階段進行深入評估所需試驗計畫之規劃。
- 第 2 階段為針對第一階段所發現的問題進行深入調查與評估。
- 第 3 階段為針對所發現的缺陷規劃維修計畫。
- 第 4 階段為發展及修正目前的設計、建造及調查流程與規範。

在 Florida 的橋梁鋼腱腐蝕經驗中發現，鋼腱損壞是肇因於伸縮縫缺陷及錨端灌漿不實；另磁通量（magnetic flux）、鋼腱振動及敲擊回音等試驗法的成效較有限，最好的方式是以非破壞試驗搭配有限度的侵入性（invasive）技術，如敲擊後拉鋼腱以檢測套管中之孔隙、孔隙目視檢查、以管道鏡（borescope）檢測後拉錨及灌漿模型（grouting mock-up）試驗（如圖 2.3）

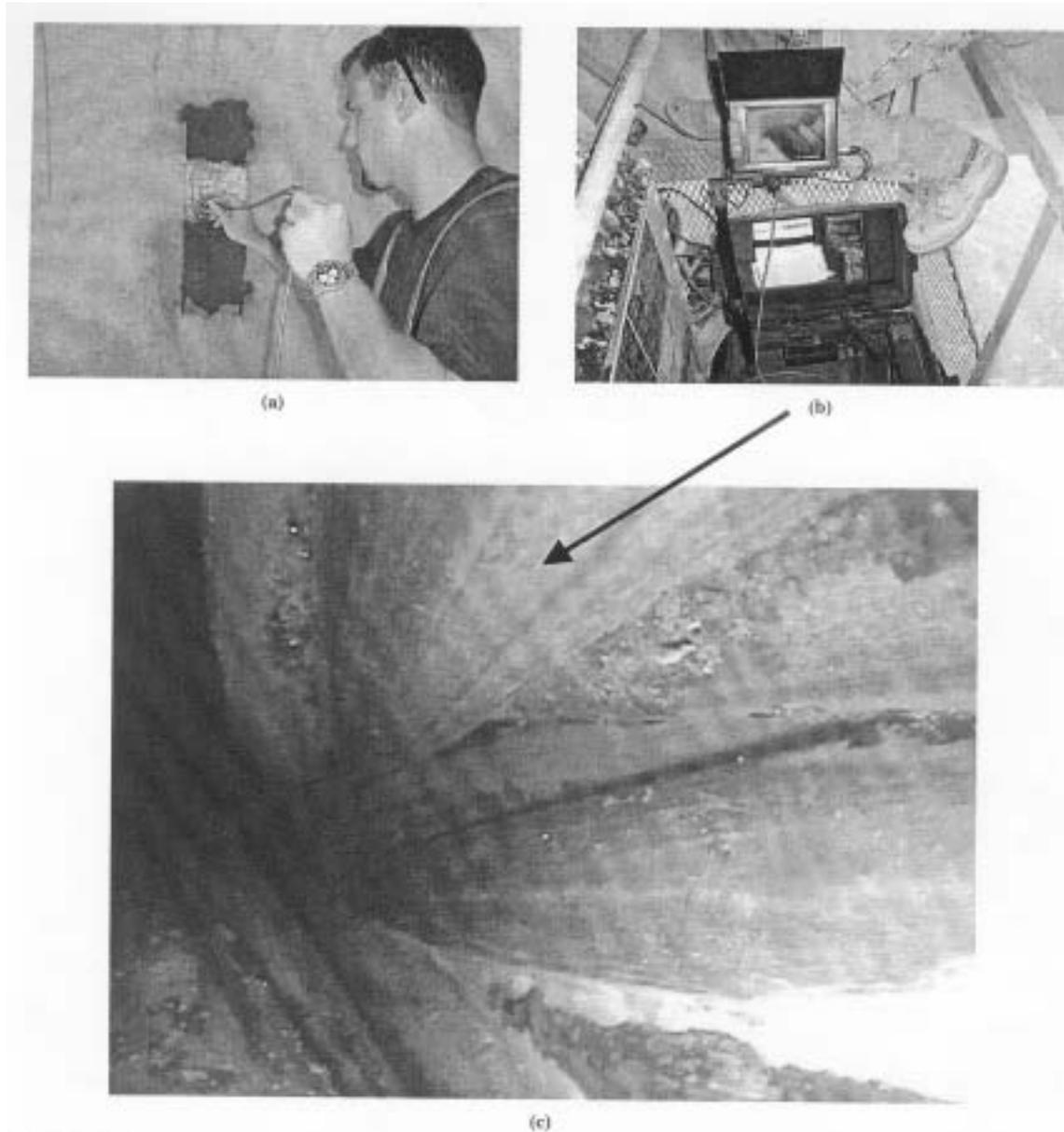


圖 2.3 管道鏡檢測：(a)在錨碇處操作管道鏡；(b)管道鏡影像及記錄設備；(c)管道鏡影像

在完成前述三座橋的調查評估後，對後續作業有以下建議：

1. 沿後拉鋼筋存在的孔隙應重新灌漿填封，以避免鋼腱腐蝕加劇。
2. 錨碇回填處 (pourback) 的所有孔隙都應該重新灌漿並確實封填以避免濕氣侵入。
3. 據乙烯套管可預防預力絞線受腐蝕，從套管上發現的開裂顯示，套管的包覆應該再加設計，以修理填封套管上的裂縫，避免濕氣侵入及可能發生的腐蝕。
4. 破損的排水管及堵塞的排水孔都應加以清理；應防止箱梁中存

在不流動的水，以避免鋼腱受腐蝕。

5. 至少 10% 的錨端應該做進一步的檢測，以精準確認喇叭型區（trumpet area）後拉鋼絞線的實際狀況。
6. 二座節塊橋應進行結構敏感度分析，以辨識出所有主要鋼腱，並對橋梁因腐蝕導致後拉鋼腱破壞時的行為有更進一步的瞭解，這些資訊對於後續工作計畫的規劃及維修順序的決定將有幫助。

2.5 康州（Connecticut）之橋梁長期監測

康州大學及交通部共同組成的研究團隊在過去的 20 年一直以非破壞方式監測及評估州內各種橋梁，透過 30 座以上橋梁的研究，提供橋梁相關維護所需資訊。現地監測一般可以協助較準確地界定維修更新的範圍，直接節省短期研究產生的費用及時間。研究團隊配合每座橋梁修調整改監測系統，應用不同的感應器（包括應力、溫度、傾斜振動）等，期以所蒐集的資料評估橋量性能，並瞭解長期監測對橋梁管理的幫助。

監測所蒐集到的大量資料必須謹慎系統化的處理，研究團隊將資料庫放在網站上供研究團隊人員使用。網站內容包括監測計畫的概要、橋梁描述及監測系統，也提供每月蒐集自各橋梁之資料一覽表。網站上每座橋梁的主要需求為：

- 橋梁及監測的描述。
- 用表格型式展示以月為單位的資料儲存及組織。
- 總結每月資料，供長期比對之用。
- 圖形化展示主要資料，顯示資料隨時間變化的情形。

2.6 虛擬無線基礎建設評估系統（Virtual Wireless Infrastructure Evaluation System）

透過非破壞試驗及分析進行系統辨識（system identification），是欲可靠評估結構所必要的，然而現地試驗或監測較為複雜、費時且勞力密集，缺乏務實的現地檢測技術阻礙了橋梁技術的研發。Daniel N. 等考量系統智慧（system intelligence）特性，設計研發一套虛擬無線基礎建設評估系統，系統針對各種結構現地試驗法及長期監測設計，利用各種電子式感應器量取靜載重、動載重應變、變位、撓度、溫度等資料，並結合電腦控制的多

頻道無線傳輸網路，由程式軟體控制系統進行資料擷取如圖 2.4，還提供對使用者友善（user-friendly）、圖形化的使用者介面監看量測結果。

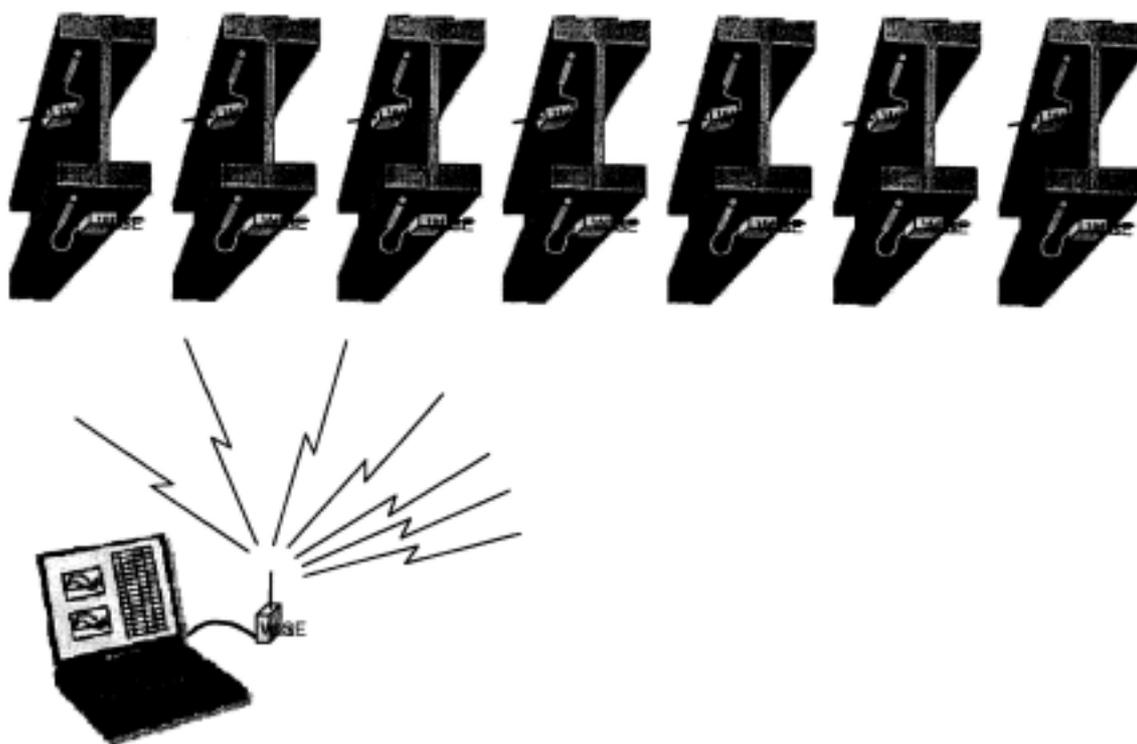
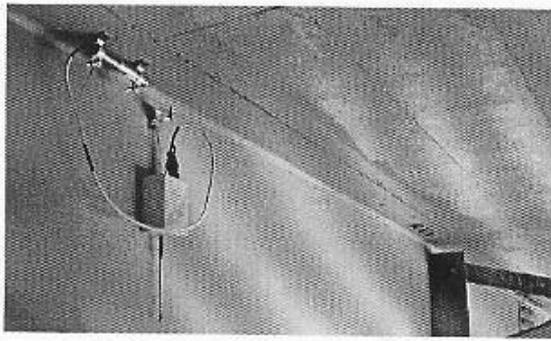


圖 2.4 智慧（wise）系統

感應器的資料由個別的無線電收發器（transceiver）單元（如圖 2.5(a)）傳輸至無線基地台，基地台再以 USB 接頭連接筆記型電腦（如圖 2.5(b)）。無線基礎建設評估系統與傳統系統的比較如下：

1. 全無線網路消除了纜線繞送（routing）及接線處（wring）易損的問題。
2. 無須增加硬體設備即可同時處理多種（理論上為無限種）感應器頻道。
3. 完全依靠軟體（software-based）的虛擬測試設備系統，排除了桌上型的實驗室設備及插電式硬體。
4. 在 sensor level 即有模式化資料儲存的能力。
5. 有充足的電力供運作，安裝後無須經常更換電池。
6. 每年充電或更換電池一次即可持續進行監測（health-monitoring）。
7. 費用變動與傳統資料擷取系統是可比較的。



(a)



(b)

圖 2.5 (a)智慧系統感應器連接器；(b)以智慧系統進行現地檢測

2.7 電子手提式橋梁檢測資料收集器

為評估構造物的狀況，正確、有效率的資料蒐集是絕對必要的，而以電子資料蒐集系統取代傳統的紙筆記錄正是簡化資料蒐集過程、增進資料正確度及強化資料管理的一種方法，因此賓州收費高速公路委員會（Pennsylvania Turnpike Commission, PTC）委託顧問機構發展一套手提式資料蒐集系統，系統需滿足以下 3 項要求：

1. 是一種對使用者友善的電子式系統，能夠在現場蒐集檢測資料，且幾乎毋須以打字方式輸入資料。
2. 能將蒐集的資料製作成更有組織且符合 FHWA、PTC 及賓州交通部要求的報告。
3. 能夠傳輸檢測資料至既有的橋梁資料庫（PTC 的橋梁管理系統）

PTC 一向委由顧問公司按國家橋梁檢測標準（National Bridge Inspection Standards, NBIS）辦理所轄 840 座橋梁的定期檢測工作，為了研發資料蒐集系統，PTC 選擇同一顧問公司執行兩個循環的兩年一度定期檢測，第 2 個循環檢測時以電子資料蒐集系統取代手寫報告，兩次檢測中大部分的檢測員皆維持不變，以確實比較兩種工具之差異。比較結果顯示，電子系統有下列優點，包括降低成本、有更佳的品保及品管、更容易取得檢測資訊等。

2.8 混凝土橋之劣化預測模式

1980 及 1990 年代，美國及英國境內需要維修的混凝土橋遽增，因此美國 60 萬座橋梁中，每年有 150 200 座面臨部分或全面崩塌。遠在橋梁崩塌前，混凝土斷面就可能因剝離而產生脫落現象。針對鋼筋腐蝕導致的混

凝土開裂及剝落，荷蘭之 G.C.M. Gaal 等提出一混凝土橋劣化預測模式。此研究假設混凝土腐蝕劣化的最主要機理是氯化物的侵入及碳化，惟碳化的影響在此研究中不列入討論。

氯化物侵入混凝土一般視為一種擴散過程，然以擴散模式計算出的混凝土表面氯化物濃度通常與實際濃度不同，這是因為表面區的裂縫、異質性 (heterogeneity)、循環暴露於除冰劑、部分飽和及沖刷所致，而前述現象會受太多未知因子影響，實務上要應用甚為困難。因此一般會以「有效 (effective)」表面氯化物濃度及「有效」擴散係數來取代 Fick 定律所定義的表面氯化物濃度及擴散係數，所有真實作用於結構上的已知或未知環境因子都將反應在有效氯化物濃度及有效擴散係數中。研究假設在除冰鹽環境中，擴散是氯穿過混凝土表面的主要傳輸機理，其他現象則已包含在有效氯化物濃度及有效擴散係數。

氯滲透入混凝土中通常以一維的擴散過程加以描述，數學上用 Fick 的第二擴散定律表示如下：

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

x：從混凝土表面起算之深度

t：時間

C (x,t)：時間 t 時，深度 x 處之擴散物質濃度

D：擴散係數

Colleparidi 等人是第一個將 Fick 第二擴散定律應用於氯侵入混凝土的研究團隊，Colleparidi 對 Fick 第二擴散定律提出的解析解 (analytical solution) 係在擴散係數及表面氯濃度為常數之條件下。半無限域單軸滲透作用之數學公式如下

$$C_{cl}(x,t) = C_{cl;i} + (C_{cl;s} - C_{cl;i}) \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{\sqrt{4D_{cl}t}} \right] \quad (2)$$

$C_{cl}(x,t)$ ：時間 t 時，深度 x 處之氯離子濃度

$C_{cl;i}$ ：混凝土中初始均一 (uniform) 之氯濃度

$C_{cl;s}$ ：表面之氯濃度

D_{cl} ：氯之擴散係數

混凝土之初始氯濃度是指新拌混凝土中來自拌合水、粘結料及粒料之氯濃度；錯誤機率方程式 (error function, erf) 及補充錯誤機率方程式 (complementary error function, erfc) 是不完全 gamma function 的特殊個案

1990 年中期以前，擴散係數一般被認為是常數，然而隨著水泥的水化程度增加，混凝土中之孔隙逐漸被填封或減少，抵抗氯離子的能力增加，擴散係數也隨之下降。事實上，有效擴散係數還會隨著暴露時間 (exposure time) 改變，因此必須引進由時間決定的 (time-dependent) 擴散係數 $D_{cl}(t)$ ，才能準確預測混凝土結構物之劣化狀況。

$$D_{cl}(t) = D_{cl;0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (3)$$

$D_{cl}(t)$ = 由時間決定之擴散係數

$D_{cl;0}(t)$ = 時間 t_0 時之參考擴散係數

t_0 = 參考時期 (reference period)

t = 暴露時間

n = 齡期係數 (aging coefficient)

如將 $D_{cl}(t)$ 代入式 (2) 可將時間變化因子納入滲透作用考量。

$$C_{cl}(x,t) = C_{cl;i} + (C_{cl;s} - C_{cl;i}) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{cl;0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \cdot t}} \quad (4)$$

然而如此將與 Fick 第二擴散定律「擴散係數為常數」的前提矛盾，因此須對式 (4) 進行積分，以求得擴散係數的歷時變化：

$$\int_0^t D_{cl}(t) dt = \frac{D_{cl;0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \cdot t}{1-n} \quad (5)$$

代入式 (4) 得

$$C_{cl}(x,t) = C_{cl;i} + (C_{cl;s} - C_{cl;i}) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot \frac{D_{cl;0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \cdot t}{1-n} \cdot t}} \quad (0 < n < 1) \quad (6)$$

在本研究中認為，式 (6) 對擴散係數的變化歷程描述最為準確。而除了擴散係數，結構物暴露於氯的時間、材料性質 (如飛灰、爐石的添加)、環境的潮濕程度等都將影響 Fick 定律的預測準確度。

研究最後依混凝土橋的特性、暴露條件、所選的劣化過程及劣化過程中不變的條件，提出了劣化速率預測方法，從 3 個資料庫擷取資料，包括：

第 1 個資料庫：約 3500 座荷蘭高速公路混凝土橋之建造或毀壞年度、橋面版尺寸；第 2 個資料庫：每年荷蘭新建橋梁之混凝土品質及設計資料；第 3 個資料庫：劣化模式所需用到的常數，如腐蝕電流、臨界氯濃度及齡期係數等。接著按個別橋梁的各項參數（包括：保護層厚度、擴散係數及表面氯濃度）決定開始腐蝕之機率。上部結構代表了橋梁大部分的混凝土表面，因此將按橋跨的剝落狀況決定。上述分析的結果如圖 2.6 所示，縱軸表示腐蝕開始之機率，即結構表面每一單位面積剝落之機率。透過荷蘭境內 81 座橋梁之驗證，本預測模式有相當之準確性。

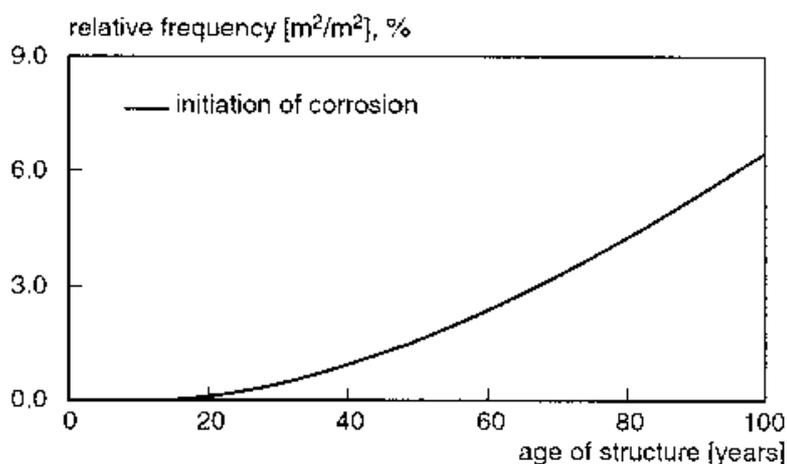


圖 2.6 開始腐蝕機率示意圖

2.9 德州落橋偵測系統（Bridge Collapse Detection System）

德州的 Queen Isabella Memorial Bridge（QIMB）全長 12,510 呎，共有 146 座橋墩，2001 年 9 月 15 日一艘駁船（barge）衝撞橋墩，當場造成一座橋墩及兩跨橋面崩落損毀（在橋梁封閉後，還增加了一座橋墩及橋面崩落），產生了一 160 呎的缺口，如圖 2.7，另有 8 名沒有注意到落橋的用路人掉落死亡。QIMB 於 2004 年 11 月重新開放，為了避免類似狀況再度發生，德州交通部在 QIMB 設置了落橋偵測系統，在全橋佈設光纖纜線並通電流，當橋跨崩落時電流即會中斷，系統將啟動，除了警示駕駛人，同時封閉橋梁、通知交通部及相關緊急服務人員。

這一類的系統目前並無設計標準出版，因此德州交通部廣徵相關學會專家學者之意見進行系統設計。系統的需求包括：簡單、可靠及使用非掩蔽式（off-the-shelf）的構件，非掩蔽式構件將使設施的維護更有效率。光纖纜線由於具傳輸距離長及不受閃電造成之電磁場變化的優點，加上振動式感應器、微波、雷射、聲納等還必須定期清潔以避免錯誤警報，因此本偵測系統選用光纖做為感應器。整個系統的建置共花費 842,861.80 美元，

後續並定期進行系統測試，測試成效十分良好。



圖 2.7 QIMB 橋面崩落

2.10 橋梁沖刷監測計畫

根據 FHWA 的報告，美國約有 59 萬座公路橋梁，其中有 484,546 座為跨水橋，而超過 26,472 座橋被宣告為有沖刷危險，當橋基經計算被判定為不穩定或發現有沖刷現象，橋梁即被認為有沖刷的危險。此外，美國崩塌橋梁中，有 60% 肇因於沖刷。根據 FHWA 之國家橋梁檢測標準，橋梁至少每 2 年應檢查一次，而需水下檢查者至少每 5 年應進行一次，若要延長檢測頻率必須經 FHWA 同意；至於已知有沖刷問題之橋梁，則建議增加檢測頻率。

FHWA 自 1988 年起開始進行國有橋梁沖刷評估計畫，計畫中將計有橋梁分為以下幾類：低風險 (low risk)、易受沖刷影響的 (scour susceptible)、基礎未知 (unknown foundation) 的及沖刷情況危險 (scour critical) 者。這個計畫包含監測所有的跨水橋以確認其沖刷弱點，同時確定其評估之優先性，各州政府交通部則依據 FHWA 提供的這些指導準則建立各自的評估計畫。根據此計畫最近 (2003) 的報告總結如下：有 484,546 座跨水橋，351,538 座橋屬於低風險，19,333 座橋易受沖刷影響，86,133 座橋基礎未知及 26,472 座橋為沖刷情況危險。基於經費及時間的限制，短期內不可能更新所有沖刷情況危險之橋梁，而應用一些沖刷對策對於恢復部分橋梁可能更具成本或時間效益。

根據 FHWA 的第 23 號水力工程通告 (hydraulic engineering circular, HEC-23) 「橋梁沖刷及溪流不穩定對策：經驗、選擇及設計準則」，沖刷

對策之定義為：對包括公路跨越河系的監測、控制、抑制 (inhibit)、改變、延遲，或將河川之不穩定性及橋梁沖刷問題減至最小。沖刷對策可以分成 3 種型式：水力、結構及監測，水力對策包括修正水流及採行保護對策以抵抗水流侵蝕的河道治理結構 (river training structure)，河道治理可以是橫向、縱向或跨越 (aerial) 結構；保護對策可以是護岸、護床或做局部保護 (local armoring)；護岸可為剛性、柔性或接合 (articulating) 型式。結構對策是對橋梁基礎的各種修正，包括加強基礎及橋墩的幾何形狀調整。

HEC-23 陳述一能於河川不穩定或發生沖刷時，適時安裝相關設備的行動計畫，橋梁沖刷情況危險者應予採行。行動計畫說明了因應沖刷問題的各种策略，而洪水發生期間或發生後的結構監測可以視為適當的對策之一。行動計畫的兩個主要要素為橋梁檢測之型式及頻率，與合宜的沖刷對策設計及建置時間表，一個行動計畫包括管理策略、檢測策略、橋梁關閉操作指南、替代策略及時間表，與其他各種計畫資訊。

監測可以幫助於早期發現潛在的沖刷問題，設計良好的監測計畫是具成本效益的沖刷對策。監測對策可分為固定、可攜式設備或目視監測三類，在 1993 年出版的 HEC-18 第二版，FHWA 首先推薦使用固定式監測設備及回聲測深儀 (sonic fathometer) 進行沖刷監測，之後 NCHRP 經過室內及現地實驗成果，推薦使用回聲測深儀及磁滑動軸環 (magnetic sliding collar devices)，這兩種皆屬固定式監測設備。

聲納沖刷監測器固定安裝在橋墩表面，並連接一資料擷取器，透過定期的資料擷取，記錄河床沖刷及回淤之歷程；磁滑動軸環是在橋墩柱表面裝上滑動桿，並將一軸環置於河床上，當河床被侵蝕，軸環便會下移，提供特定位置的沖刷深度。其他的固定式沖刷監測器如浮動裝置 (float out device) 係埋置於橋梁下部結構附近特定位置的不同深度，當沖刷發展至該處，裝置便會浮出水面並送出訊號；傾倒及振動感應器 (tilt and vibration sensor) 則可量測橋梁的移動情形。上述這些固定式監測設備可以單一或整合運用於同一座橋梁上，資料的擷取亦可以手動或以遙測發射器傳送。

沖刷監測計畫的發展及施行有下列步驟：

1. 可得資料回顧

回顧所有可得資料以評估過去、現在及潛在的沖刷狀況，這些資料包括空照圖、橋梁計畫、潛水及結構檢測報告、測深儀調查、地形圖、FEMA 水災保險計畫 (flood insurance studies)、所有設置之沖刷對策的詳細資料、土壤資料和鑽探報告、橋梁沖刷評估、熟悉橋址者 (包括橋梁維護工程師、地方官員及當地居民) 的觀察資料、鄰近橋梁之水力

及沖刷資訊。

2. 橋梁之水力、沖刷及穩定度分析

易受沖刷影響的橋梁仍須評估其沖刷弱點。水利工程師先評估沖刷現況，再估算橋梁的潛在沖刷，FHWA 的沖刷預測公式可從 HEC-18 查得，而這些公式需要橋梁的幾何及土壤資料和水力變數（variables），若水力變數無法取得則需進行水力分析，HEC-18 也提供了選擇水力模式的準則，水力模式的選擇與水道的複雜性、水流型式及橋梁的重要性有關，在某些情況水力變數可能藉一些簡單的公式獲得，但通常還是要由一維、二維或三維電腦模式取得。

若觀測到或潛在的沖刷情況出現，即需進行橋梁的穩定度分析。大地或結構工程師將對橋墩及橋基進行穩定度分析以提供沖刷下基礎的穩定度資訊，同時決定橋梁破壞的臨界深度及研究潛在的破壞機制。二次沖刷深度將被建立做為觸發門檻（trigger threshold）高程，當到達此高程，就必須採行規定之行動來防止進一步的沖刷，如裝置水力或結構對策，或保護用路人（如封閉橋梁或增加目視監測）。

3. 沖刷對策評估

HEC-23 提供選擇及設計各種沖刷對策的準則，沖刷監測往往是較受偏好的對策。對已計畫更新的橋梁而言，沖刷監測較傳統結構或水力對策經濟，且河道底部的保護措施還可能妨礙新橋的建造，另在水路中放置保護設施還可能導致環境相關的疑慮及複雜的許可爭議（permitting issues）。沖刷監測可以和其他種類的沖刷對策合併運用，如拋石（riprap）。

監測系統的選擇、位置及設計，端視經費、環境、建造及維護考量而定。沖刷監測系統為人稱道的優點包括：

- 設計及設置快速
- 較其他沖刷對策具成本效益
- 有助於後續橋梁更新的資料蒐集
- 監視器提供的資訊可能可以減少潛水檢測的次數
- 能量測沖刷及回淤的過程
- 發展事件發生時引導決策之行動計畫

4. 沖刷監測計畫設計

沖刷監測計畫係按個別橋址設計，資料依計畫的頻率擷取並可隨時下載，此外資料還會在緊急情況發生時自動警示橋梁管理者。監測設備

型式則依橋梁的幾何結構及河道特性決定。監測器在橋梁單元的位置需考慮維修的可及性（accessibility）、避免人為破壞及任何潛在的冰或岩層（debris）應力。近年來橋梁安全的提升使可及性成為主要課題；而可能妨害監測器的嚴苛環境條件（如冰、岩層及潮汐），也是選擇固定式設備材料所必須考量的。沖刷監測設備及計畫的設計可能要藉由許多技巧完成。監測計畫及規範可發展成為大型橋梁修復更新計畫中的一部份，但必須留意沖刷監測器安裝時機的選擇及建造過程中監測器的保護；在緊急狀況或經費許可的條件下，沖刷監測器的設置也可以單獨發包。

5. 沖刷監測計畫施行

沖刷監測計畫的施行可能是監測計畫中最困難的部分。在設計過程中，確認負責沖刷監測計畫的管理者群（owner's group）是很重要的，因為沖刷的監測及設計是多種技術的結合，加上 FHWA 的監測計畫及設備可能尚屬新創，由管理單位的哪個部門負責監管沖刷監測計畫就不一定明確。監管工作包括系統及計畫的設計、日常和緊急監測、資料分析和橋梁安全程度的決定、緊急狀況下決策之指揮鏈（chain of command）、維護、檢測、維修、負責橋梁持續監測及沖刷監測器運轉的資金，這些資料將被記錄在橋梁的沖刷監測計畫手冊及行動綱領中。在沖刷監測系統設置前發展出完整而有系統的計畫將可確保橋梁及用路人的安全。

另計畫必須定期修訂以確保資料蒐集分析之頻率、更新監測計畫中人員權責之改變，及確保替代路線及行動綱領為最新版本。

2.11 橋梁管理

具成本效益的（cost-effective）橋梁維護計畫必須全盤考量橋梁的性能及生命週期維護成本。目前許多決定最佳維護計畫的方法論都僅將生命週期成本最小化而限制了橋梁性能，以致規劃出的維護計畫可能無法滿足橋梁管理單位對橋梁性能的特定需求，因此劣化橋梁的生命週期維護計畫應視為多目標最佳化（multiobjective optimization）問題，並以基因演算法（genetic algorithm）求解。

科羅拉多大學 Min 等將橋梁目視檢測狀況、結構安全評估成果及累計的生命週期成本視為不可同時接受的條件（criteria），另有多項不同的維修策略可供選擇，接著以一多線性的計算模式（multilinear computational model），預測橋梁在未維修及維修狀況下的劣化時間曲線。在此計算模式中，相關參數被視為隨機變數（random variables）以反應複雜的劣化過程

各因子的不確定性，並採用 Monte Carlo 模擬 (simulation) 估算樣本的效能指標 (performance indicators) 及維護成本之平均值。實際驗證，經權衡所有必要之判斷基準 (如現況、安全及成本等) 進行明確的取捨分析 (trade-off analysis)，可獲得令人滿意的維護計畫策略。

2.12 展覽會

本次研討會於專題演講會場外尚有 12 個單位設攤進行計畫或專案的海報展示，茲簡介如下：

1. 紐約州 Rochester 市 Troup Howell 橋之置換

Troup Howell 橋為 I-490 公路跨越 Genesee 河及數條 Rochester 市中心街道之橋梁，因已劣化至需更新之程度，工程師開始尋求一可維持原有交通 (context-sensitive) 的更新方式。此橋址因位於該市天際線 (其中包括許多國際企業之大樓) 之最前緣，故此更新工程亦是美化的最佳機會。更新計畫的設計團對包括紐約州交通部、Erdman Anthony and Associates 公司及 H2L2 建築師事務所。美化委員會 (aesthetics committee) 由當地政府官員、鄰近地區代表、美國建築師學會 (American Institute of Architects) 會員及藝術家共同組成，整個設計過程中，委員會持續提供餽輸 (feedback)，確保所有的決策與環境相容，委員會的許多決定都在最終設計中被採行。新橋有 8 跨，在中央部分有一長 132 公尺之拱形橋跨橫越 Genesee 河，此拱形跨有 3 個鋼箱型彎梁 (rib)，採 Vierendeel 式支撐，並以扇形吊掛方式支撐橋版系統。主跨在許多地方都加強了美學上的設計，拱橋的錨碇端都退縮至河堤後，使民眾可以在鄰近橋梁的河岸散步；另透過照明及版梁雕塑加強引起散步者的視覺興趣。由於拱橋的設計及每日通過的大量交通，建造過程面臨了許多挑戰。結構的細部設計容許分段式建造，因此在施工中，橋梁仍維持開放。

2. 天津市大沽橋之設計

中國天津市目前正在進行海河區域的重新發展計畫，以復甦其市中心區。大沽橋位於重發展區中心，也是整個發展計畫的第一個專案，天津市要求一座能成為該市新地標的橋梁。大沽橋的最終設計為一與周遭環境互補之雙拱橋 (double arch)，如圖 2.8，雙拱一大一小，命名為日月橋 (Sun and Moon Bridge)。本橋址尚須考量建造深度 (construction depth) 最大容許垂直坡度及通航需求，最終設計方案皆滿足這些限制。

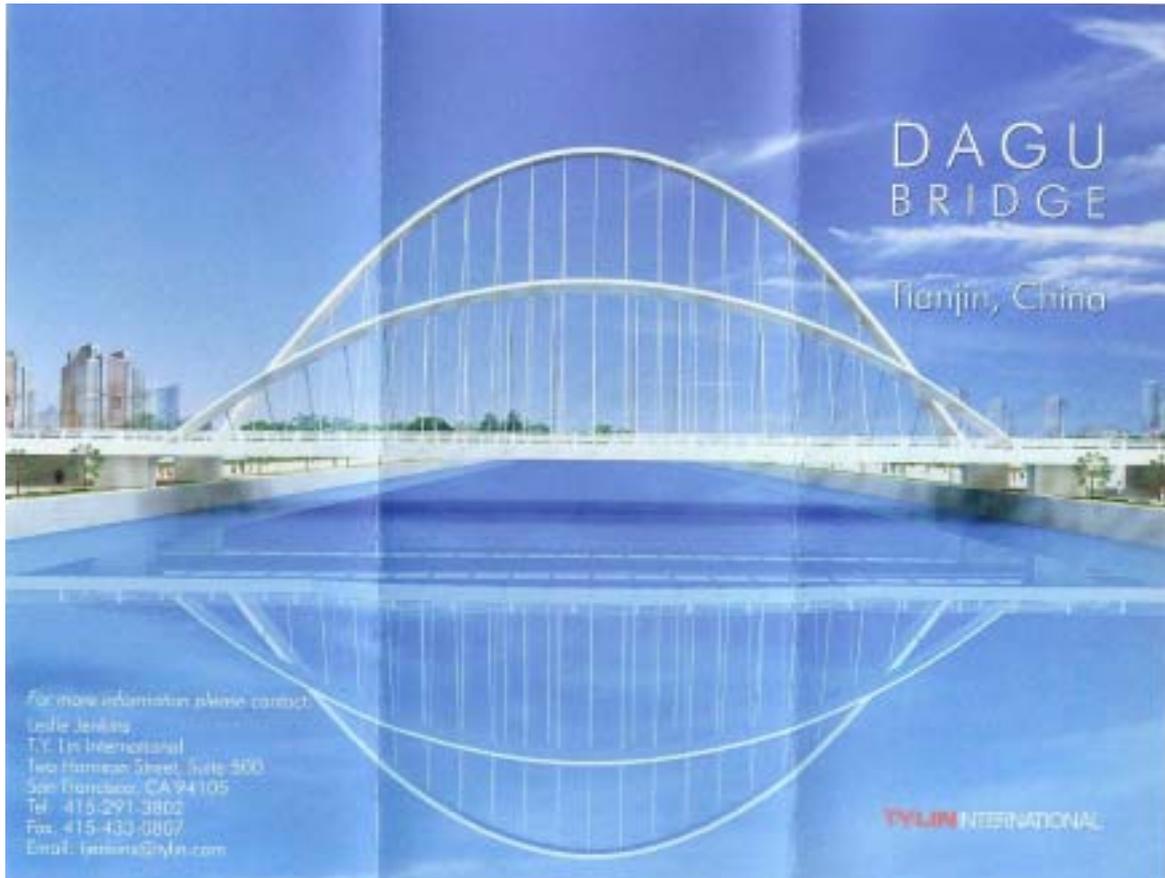


圖 2.8 天津大沽橋

3.澆置水中混凝土填封大型沈箱（麻州 Somerset 郡 Fall River 之 Brightman Street Bridge）

水中混凝土之設計是為了使混凝土有更好的坍度及工作性，因此 Brightman Street Bridge 橋墩沈箱在填封水中混凝土時，不論澆置或水下的流動都有效率。每一處水中混凝土的澆置有 16 呎厚，體積達 7,200 立方碼，水深 50 55 呎。混凝土由當地之拌合廠製作，卡車運送，利用一連串的固定式特密管自河岸泵送至沈箱。整個流程完成距混凝土最初計量（batching）已有 7 小時，而這段期間混凝土都應維持足夠的工作性與流動性。研討會現場展示包括：配比的發展（含文獻回顧及試拌之配比）；坍度、坍度流、坍度損失、初凝及終凝、水下流動、流失（washout）特性及抗壓強度等混凝土試驗結果；以版樁模型進行實體澆置（mock-up）的結果；實際澆置的方法、程序及現地監測結果；最後也說明比較實際澆置、實驗室澆置及實體試驗之混凝土品質試驗結果，與整個計畫所學到之經驗。

4.運輸安全行政部門之基礎建設安全評估工具

美國國土安全部之運輸安全行政部門（Transportation Security Administration, TSA）以其在增進航空運輸安全方面的發展聞名，TSA 同時負責保護美國公路系統免於威脅以增進商務。高知名度、具象徵意義、或國家重大之交通資產被視為政府計畫的主要部分，不過政府的計畫對較不

重要之交通資產安全也有輔助效果。TSA 和 FHWA、AASHTO 及其他工業專家共同合作，開發了公路橋梁、隧道及運轉中心的自我診斷單元 (self-assessment modules)，這些以網路為基礎 (web-based) 的工具提供了一致的方法進行自我診斷，對使用者而言不僅容易使用，也無須外加費用。這種工具係用以評估整體安全及 asset-specific practices and protocols，同時提供 stakeholder 評估威脅的方法以分析組織安全進而增進安全。TSA 將利用資料來分析一般緩和手段的基線 (baseline) 及各資產的最佳利用。此外，以現地專家的知識為基礎，TSA 併入了一弱點評分段 (session) 來協助使用者瞭解可能的緩和策略。此自我診斷工具及其他 TSA 的工具將對國家抵抗恐怖份子威脅有所幫助。更多資訊可從 www.tsa.gov/risk 網址上取得。

5. 增進運輸基礎建設安全之合作

降低防禦局 (Defense Threat Reduction Agency, DTRA) 及美國陸軍工兵團之工程研發中心 (U.S. Army Corps of Engineers' Engineer Research and Development Center, ERDC) 在基礎建設受爆破衝擊方面有許多設計及分析試驗之經驗；另外，DTRA 也發起開發一促進運輸組織與負責國家安全的軍方、國土防禦單位溝通之網址，透過此網址，橋梁弱點評估及一些如 Consequence Assessment Tool Set-Joint Assessment of Catastrophic Events (CATS-JACE) 模組等工具，還有特殊計畫或事件等資訊都可以共同分享。這個網站預期可提供更一致的資訊基礎以利用，並增進事件與執行中活動的合作。華盛頓州交通部目前正領導一運輸合資基金 (Transportation Pooled Fund) 計畫，名為「全尺寸 (full-scale) 預鑄、力混凝土桁架橋梁爆破試驗」，這個計畫建造全尺寸模型，測試爆破裝置位於橋版上方及下方時造成的衝擊。從各項試驗所得到的資訊將應用於發展改良之設計、檢修及因應對策。DTRA 與 ERDC 已同意共同合作此計畫。研討會現場有對前述網址之描述，並以華盛頓州交通部領導之爆破試驗為資訊分享實例。

6. TRB 合作研究計畫安全概要

國土安全的總統第 5 號指令 (Homeland Security Presidential Directive 5) 孕育出國家事件管理系統 (National Incident Management System) - 一個全國共通的方法，使聯邦、州、部落 (tribal) 及地方等各級政府，在準備、預防、因應及復原各種國內事件的發生時可以運作得更有效 (effectively) 及有效率 (efficiently)，不論事件的起因、規模與複雜程度。管理者正企圖降低運輸車輛及設施成為恐怖份子攻擊目標或工具之機會，並準備針對此可能性加以因應與復原。自 2001 年 9 月 11 日起，63 個在 TRB 合作研究計畫 (Cooperative Research Programs) 下與安全相關的計畫被核准，經費計 950 萬美元。AASHTO 運輸安全特別委員會及 APTA Executive Committee Security Affairs Steering Committee 負責指導合作研究計畫安全研究 (Security Research)；NCHRP 計畫專門小組 20-59 及地面運輸安全研究

(Surface Transportation Security Research) 提供技術監督及方案選擇之準則。63 個計畫中, 34 個已執行完畢, 23 個執行中, 6 個尚未訂約或準備中。在 [gulliver.trb.org/publications/dva/CRP-Security Research.pdf](http://gulliver.trb.org/publications/dva/CRP-Security%20Research.pdf) 有摘要文件; 在 www.trb.org/publications/dva/SecurityActivities.pdf 有 TRB 及各國家學院 (National Academies) 與此計畫有關之安全相關活動投影片。TRB 及各國家學院近年來有許多與此議題相關之資訊; TRB 的運輸系統安全網址 (www4.trb.org/trb/homepage.nsf/web/security) 則整合了許多相關資訊, 包括: 與討論此議題網址之連結、可採取之行動、指南及訓練機會, TRB 的運輸系統安全網址由 TRB 的重要運輸基礎建設保護委員會贊助。

7.使運輸隧道更安全和保險

美國將近 550 座公路及運輸隧道每天載運數以千計的人及貨物, 其中許多隧道還位於國家運輸路網的關鍵點, 然而相較於其他運輸基礎設施, 隧道更容易受某些危害之影響。運輸隧道面臨因火災、洪水、地震等天然災害而中斷的可能, 許多隧道已在設計或建造過程中納入這些天然災害的容許因子, 但較老舊隧道多半缺乏這些特性。隧道也可能受恐怖份子攻擊而中斷, 隧道會成為攻擊目標是因為: (a) 它對周圍區域的經濟很重要, 尤其當它是用來運輸貨物時; (b) 他在可預估的時間會有大量的人員在其中; (c) 密閉環境使爆炸、坍塌、洪水氾濫時可能造成的死傷更嚴重。運輸隧道因為屬於開放、可接近環境, 故為高風險、後果嚴重之目標。由於認識隧道的重要角色及其中斷可能造成的危害, 隧道的安全及保險議題成為國家安全意見交換時的重要部分。此研究計畫目標在引導隧道擁有者及操作運轉者, 以(a)保護隧道, 減少偏激事件造成之傷害; (b)使受損隧道能在較短時間內恢復所有功能。

8.綜合運輸基礎建設之風險管理

2003 年 2 月白宮報告 (White House Report) 「重要基礎建設及主要資產之實體保護的國家政策」, 已意識到國家的各型式交通系統與國內及全球經濟體之間密切地相互依賴。在過去 3 年, 顧問團與 TRB AASHTO FHWA 及數個州政府交通部共同發起建立一重要公路基礎建設風險評估指南, 提供運輸風險評估研討會, 並協助數州進行運輸風險評估。顧問團透過一 NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) 專門小組與 AASHTO、FHWA 及運輸安全學會 (Transportation Security Administration) 合作, 目前正在更新及擴充最初的指南以將其擴大適用於各類之運輸基礎建設。現在努力的目標是發展一多種型式 (multimodal) 運輸基礎建設風險管理指南, 提供州政府交通部及其他運輸實體 (entities) 一風險管理方法論, 以管理其設施之威脅、弱點及嚴重程度評估, 同時決定出具成本效益之對策來預防、檢查及降低多重型式基礎上資產所受的威脅。研討會現場提供目前努力的狀況, 包括執行過程中所學到的經驗。許多從全方位災害

(all-hazards) 觀點進行之風險評估所面臨相關特殊挑戰亦有摘整，包括恐怖主義對重要運輸基礎建設採取行動的風險。威脅評估、重要資產辨識、結構及運轉弱點評估 具成本效益的對策及合力的資源分派決策皆有展示。

9. 連接現在與未來 (Bridging Future Now)

傳統上快速的橋梁更換技術只限於橋梁預鑄構件現地裝配，而有了自進式模組運輸機 (self-propelled modular transporters, SPMTs)，包商現在有機會在現地組裝整個橋梁之上部結構。使用 SPMTs 可使橋梁快速而有效率地更換，不需要吊車、臨時或延伸便道，或因交通而延誤。橋梁在可掌握的環境中建造，將使完工後的品質最高化。SPMTs 有一些獨特的特徵，如不論橋梁尺寸皆可由單人操縱、具自進式推進動力、不論任何方向都有完全的移動自由度、可彈性地放在適當位置支撐橋梁的重要部分、裝配快速、每軸向的最大淨載重為 30 公噸、可利用標準拖車快速動員等。在規劃階段早期即考量運用此技術，將使計畫之節省成本解決方案完全發揮效益。

10. 橋梁之搬運：跨越地面及水上之障礙物

SPMTs 已被全世界用於置換及搬運各種鋼筋及混凝土橋，如拱橋 (bowstrings) 公路橋、鐵路橋等。配合專業工程師，SPMT 擁有一週、一天甚至更短的時間內將橋梁定位，使交通中斷時間最少。利用液壓、自進式平台拖車 (self-propelled platform trailer)、支撐結構、起重系統 (jacking system) 駁船 (barge) 及 project-built solutions，重達 6,000 公噸的橋梁能夠以縱向或橫向搬至正確位置，且精度在公釐範圍內。長期處理特殊任務需求的經驗，加上 SPMT 技術的進步，可確保工期 (相對即費用) 能減少最多的原計畫經費。研討會現場介紹了幾個計畫：(a) Demka 橋，在荷蘭 Utrecht，跨越 Amsterdam-Rhine Canal，係將舊橋更換為一座新橋，橋重 5,000 公噸，使用 192 軸 (axle lines) 之 SPMT；(b) 兩座公路橋，在比利時 Deurne，每座重 3,000 公噸，同時還有另外兩座在比利時 Wommelgem 的公路橋，每座重 1,800 公噸，分別使用 88 軸及 56 軸之 SPMT，只花了 82 小時即完成；(c) 兩座鐵路橋，在比利時 Ghent，每座重 900 公噸，以 40 軸之 SPMT 進行搬運。

11. 組合式液壓平台運輸車 (hydraulic modular platform transporters) 應用於佛州 Pensacola I-10 橋梁復原工程 (9.17 - 10.8, 2004)

佛州 Pensacola 的 I-10 橋為貿易重要孔道，每日約有 8,000 輛卡車通行。橋梁由 33x64 呎、300 噸重之橋跨組成。2004 年 9 月 Ivan 颶風肆虐的結果，有 66 跨位移數吋至 12 呎不等，而另外 58 跨則完全自橋墩掉落，受損情況主要發生在東行向的橋跨，在很多情況下這些橋跨相對於整座橋的確也被過度使用。此計畫的目標是要重新對準或放回 (reposition) 移位的橋跨，並自東行向起將完全從橋墩掉落的橋跨復位 (relocate)，這些工作要

在 24 日內完成。用來恢復橋梁交通的方法是使用兩組 nine-line、起重能力 450 噸之組合式液壓平台運輸車，運輸車放在一具牽引拖船（tending tugboat）之單重型甲板（single heavy deck）駁船。使駁船穩靜下來，以便組合式液壓平台運輸車能在橋跨下，並在橋梁縱向方向上，當放置橋跨時，組合式液壓平台運輸車自橋墩上舉起構件，橋跨被抬起至可自由移動並有足夠空間切割既有螺栓與更換底板（sole plate）的高度，接著降低橋跨高度放回原位，或從東行向橋完全移開，重新在西行向的新橋墩復位。組合式液壓平台運輸車的創新用法使上千萬的緊急計畫在 17 天完成，比原來規劃早 7 日，不但對商業及地區民眾有極大的節省效益，也緩和了需繞道 150 哩的不便。

12. 通往繁榮之橋（Bridges to Prosperity, B2P）

缺乏財富建造高級基礎建設的貧窮地區亟需協助以建造人行橋梁（footbridge），訓練職員及工人、促進技術及硬體的引進，並與政府及發展團體（development groups）締結關係，都會帶來與缺乏學校、市場及醫院的區域，可靠、經濟的接近機會。B2P 是一個獻身於完成此任務的組織，2001 年在伊索匹亞 Blue Nile 修復一座 350 年歷史的石造拱橋是 B2P 的第一個計畫，鑑於該計畫及其他數個在尼泊爾、印度計畫的成功，2003 年 B2P 與 Helvetas（瑞士最著名的非官方援助組織）在尼泊爾接受訓練，該計畫以當地技術建造了 1,200 座懸索橋；2004 年 B2P 應用此尼泊爾的技術及訓練方法，在伊索匹亞建造了 5 座新的人行橋，其中 3 座目前仍施工中，當地職員幾已完成訓練將可更獨立地完成施作。與道路當局的關係正加強中，此系統很快也將加上伊索匹亞道路部（Road Ministry）。B2P 目前正利用於尼泊爾及伊索匹亞所得到的經驗規劃在秘魯的運作，新職員最初將培養其快速整合秘魯文化及建築規範之技術，而估計 2 年內也可以達到獨立的程度。最後，B2P 的目標在普及可負擔（affordable）可靠的人行橋梁技術至世界上任何一個需要的地區，使百萬計的人可以更接近公共設施（services）與繁榮。

2.13 波士頓大眾運輸系統

此次參加會議同時考察波士頓之大眾運輸系統。波士頓的大眾運輸系統相當便利，以 Massachusetts Bay Transportation Authority（MBTA）所經營的地鐵 “The T” 為主體，該公司所經營的其他運輸工具還包括巴士、渡輪及通勤火車（commuter rail）。

1. 地鐵（Subway）

波士頓的地鐵建於西元 1897 年，是全美歷史最悠久的地鐵。目前共有紅、藍、綠、橘及銀五條營運路線，由於系統建立距今已逾 100 年，除了

近期完成之銀線及經改建者，列車及站體皆顯陳舊，站內混凝土版剝落、樓地板鋼筋鏽蝕、噴漿修補等情形隨處可見，多數站內照明、通風亦不充足。地鐵路線以公園街（Park St.）市中心交叉口（Downtown Crossing）、州（State）及市政中心（Government Center）四站為中心，呈放射狀分佈，離開中心方向稱為 outbound，反之則為 inbound，營運路線如圖 2.9 所示。車資給付則可以投現、代幣（token）或購買旅客通行票（Visitor Pass）。

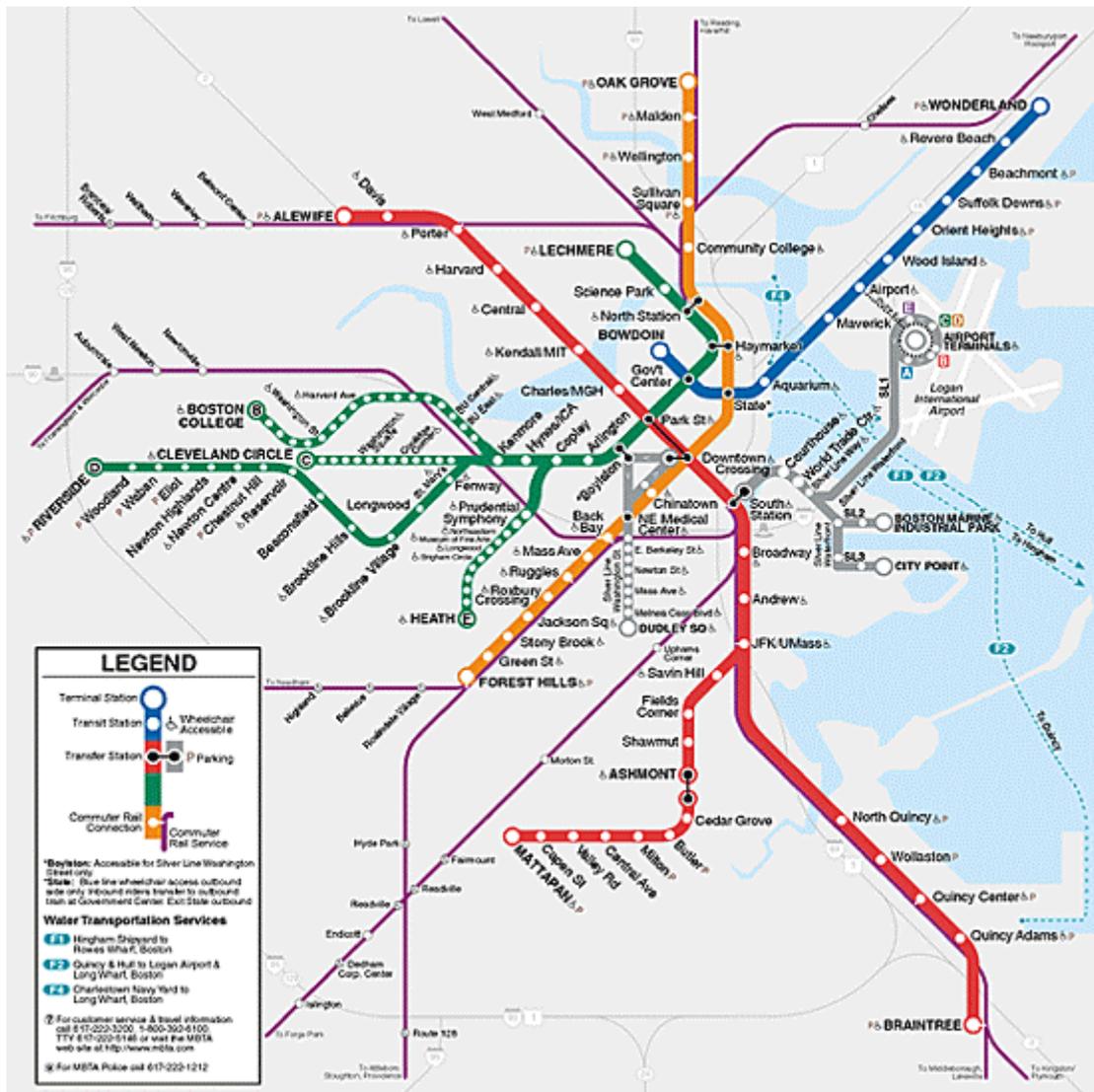


圖 2.9 波士頓地鐵路線圖

2. 巴士（Bus）

由於波士頓地鐵服務的範圍幾已涵蓋波士頓市區，巴士的路線多半是在不同的地鐵線、運具站（如地鐵站與火車站（Amtrak））或觀光景點間，班次與便利性相對低於地鐵。大部分路線的單程票價為 90 分美元。

3. 渡輪（Ferry）

波士頓為一海港城市，早期曾是美國的海運重鎮，惟現已被紐約取代，

第三章 心得與建議

本次參加第 6 屆國際橋梁工程研討會，個人有下列心得與建議：

1. 橋梁維護管理仍為橋梁工程界目前及未來努力的重點

從本次研討會的各議題可以發現，橋梁維護管理技術包括：材料、機具設備及工法等，都有新的進步但仍存在許多應用上的侷限，而這些限制都將是橋梁工程界努力的目標。

2. 橋梁新工法以快速、彈性為目標特性

快速已是橋梁新建工程的基本要求，而對既有橋梁之維修改建，維持既有交通或儘速恢復通車更是規劃時的首要目標，此外高度開發地區的橋梁工程，因為施工空間受限，機具、工法都必須有因地制宜的彈性，以降低對工地及周圍環境造成傷害之風險。

3. 高強度、高耐久性之高性能材料是未來橋梁材料之主流

自然環境的急速惡化使橋梁的使用壽命大幅下降，高性能材料是提昇橋梁力學性質及耐久性的重要指標，雖然完工後的維護管理亦很重要，然而環境因子終非人力所能控制，因此仍須從材料面來提高橋梁的耐候能力及強度。

4. 恐怖攻擊為橋梁安全面臨之新考驗

橋梁為開放空間，具數量多、地點分散、往來人車難以掌控之特性，加上可能造成大量傷亡、影響社會經濟活動甚鉅，是恐怖組織攻擊的絕佳目標，自亦是橋梁維護管理單位的艱鉅考驗。國內從臺灣地區橋梁管理系統建置以來，國防部門與橋梁主管機關對橋梁資料是否應列屬國防機密一直存有爭議，就目前之技術而言，透過衛星照片或電子地圖取得橋梁定位輕而易舉，而幾何資料及設計資料亦非恐怖攻擊之必要資料。由於對恐怖攻擊難以防範，除了對重要橋梁進行監控，美國國防及公路管理單位從另一個角度切入，積極分析各橋梁受攻擊的風險、不同爆破強度對橋梁可能造成的損害，同時研擬受攻擊後的因應對策，個人認為此一作法較為務實正面，值得國內橋梁相關單位借鏡。

5. 橋梁安全檢監測作業朝向無線化、自動化、資訊化發展，相關設施並應具易維護特性

資訊及通訊科技的快速進步，使橋梁管理作業更節省人力也有效率，

目前臺灣地區橋梁管理系統亦積極開發平板電腦版本，未來克服資訊安全問題後，甚至可透過無線網路即時將資料傳輸至主資料庫；而因應政府組織精簡及經費不足之情況，橋梁檢監測設施的選用，易於維護保養應列為主要考量項目之一。

6.劣化成因複雜，加上環境變數不易掌控，預測模式仍有許多應用上的侷限性

國內許多研究單位都曾提出橋梁劣化預測模式，惟近年來自然與人為環境皆變化迅速，劣化預測模式幾乎必須量身定做、因橋制宜，且隨環境變化調整相關參數，單一材料的劣化預測或評估，對橋梁整體安全狀態的評估幫助有限。

7.風險評估的概念與方法已被廣泛引入橋梁安全評估計畫

橋梁受損所造成的危害規模常常是是橋梁安全評估中，建議維護策略的主要考量，然而若能再加入風險評估分析，維修資源的分配將更為有效合理。惟風險評估所需背景資料之正確性影響風險評估結果甚鉅，經驗值若累積不足，風險評估只是徒具型式，應用價值不高。

8.沖刷是美國橋梁崩塌的主因，聯邦政府已有完整的沖刷監測規劃

沖刷問題近年來一直是橋梁管理單位的噩夢，由於河川治理屬於水利單位權責，橋梁管理單位僅能在基礎沖刷嚴重時進行補強措施。囿於公務單位人力、經費逐年緊縮，國內應規劃推動自動化之沖刷監測作業，透過簡易之監測設備，記錄沖刷變化並進而分析趨勢，以及早採取因應策略，降低橋梁崩坍風險。

9.橋梁維護管理應有通盤規劃及考量，成本最小不再是唯一要求

在維修經費有限的情況下，成本往往是決策的首要考量，然而橋梁劣化損壞的成因愈來愈複雜，頭痛醫頭、腳痛醫腳的因應方式，往往會隱沒了關鍵問題，最後遭致更嚴重的損失。美國在橋梁工程方面都規劃了長期的計畫，且逐年檢討修正方向，值得國內各主管機關借鏡。

10.新建橋梁造型講究美學並與周圍環境融合

近年來已開發國家在新建橋梁時不再僅要求其安全通行的基本功能，整體造型及與周遭環境的協調性亦是重點。國內雖亦逐漸開始重視橋梁美學，但往往未考慮與周遭環境協調的部分，如南二高的斜張橋，雖然造型特殊，可視之為地標，但將周圍地貌整體視之，卻顯突兀，尤其夜間燈光據研究還對周圍生物生態造成影響；另自是之後，斜張橋亦成為各地新建

橋梁的不二選擇，民眾及相關單位對橋梁美學方面的認知，顯然還有再教育的必要。

11. 多種大眾運輸工具整合，並將票證單一、彈性化，可增進觀光的便利性

波士頓當地由 MBTA 經營多種運具，這些運具各有其特色，也分別滿足大波士頓不同區域往來之需求。MBTA 販售之票種極具彈性，乘客可選購不同運具組合，並依停留日數而有 1、3、7 日或月票可選擇。以筆者 7 天 6 夜之行程安排為例，選擇 35 美元之 7 日 all-pass 票種(如圖 2.11 所示)，搭乘運具時向駕駛出示此票證即可，於波士頓期間即可不限次數隨意搭乘 MBTA 所經營的各種運具，對觀光客而言，不僅節省每次搭乘運具時的購票時間，免除準備零錢、查詢票價之不便，即使乘錯路線或運具，也不會有經濟上的壓力，非常便利實惠。目前國內臺北地區的悠遊卡已有類似之功能，若能將使用的區域及運具範圍再擴大，對增進觀光，特別是自助旅行市場，應有助益。



圖 2.11 MBTA 7 日通行票證

附錄

附錄一 議程

Sunday, July 17, 2005

4:30 p.m.-6:30 p.m. [Projects Showcase Poster Session \(light reception included\)](#)

Monday, July 18, 2005

8:30 a.m.-9:30 a.m. [Opening General Session](#)

9:30 a.m.-10:00 a.m. [Coffee and Tea Break](#)

10:00 a.m.-11:30 a.m. [Plenary Session 1: Security, Reliability and Sustainability](#)

11:45 a.m.-1:15 p.m. [Monday Lunch \(with speaker\)](#)

1:30 p.m.-3:00 p.m. [Technical Session 1: Advances in Load and Resistance Factor Design \(LRFD\) Research](#)

[Technical Session 3: Prefabricated Bridges](#)

[Technical Session 2: Bridge Management Systems \(BMS\)](#)

3:00 p.m.-3:30 p.m. [Coffee and Tea Break](#)

3:30 p.m.-5:00 p.m. [Technical Session 4: Advances in Load and Resistance Factor Design \(LRFD\) Practice](#)

[Technical Session 6: Accelerated Construction](#)

[Technical Session 5: Non-destructive Evaluation \(NDE\) of Bridges](#)

Tuesday, July 19, 2005

8:30 a.m.-10:00 a.m. [Plenary Session 2: Security, Reliability and Sustainability](#)

10:00 a.m.-10:30 a.m. [Coffee and Tea Break](#)

10:30 a.m.-noon [Technical Session 7: Seismic Design and Evaluation](#)

[Technical Session 8: Bridge Durability](#)

[Technical Session 9: Innovative Materials and Methods](#)

Noon-1:15 p.m. [Tuesday Lunch \(with speaker\)](#)

1:30 p.m.-3:00 p.m. [Technical Session 10: Seismic Design and Retrofit](#)

[Technical Session 11: Bridge Health Monitoring](#)

[Technical Session 12: Innovative Methods I](#)

3:00 p.m.-3:30 p.m. [Coffee and Tea Break](#)

3:30 p.m.-5:00 p.m. [Technical Session 13: Extreme Events](#)

[Technical Session 14: Scour and Maintenance](#)

[Technical Session 15: Innovative Methods II](#)

Wednesday, July 20, 2005

8:30 a.m.-10:00 a.m. [Plenary Session 3: Security, Reliability and Sustainability](#)

10:00 a.m.-10:30 a.m. [Coffee and Tea Break](#)

10:30 a.m.-noon [Technical Session 18: Bridge Aesthetics](#)

[Technical Session 16: Bridge Evaluation and Load Rating](#)

[Technical Session 17: Innovative Design and Research](#)

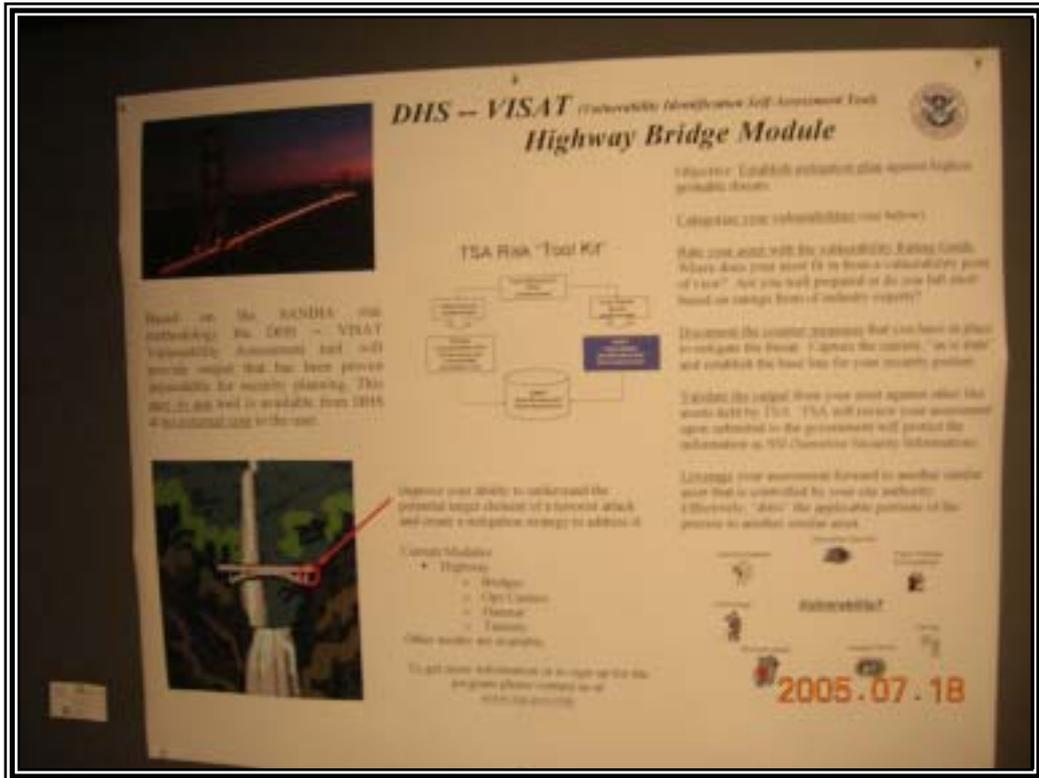
附錄二 會場照片



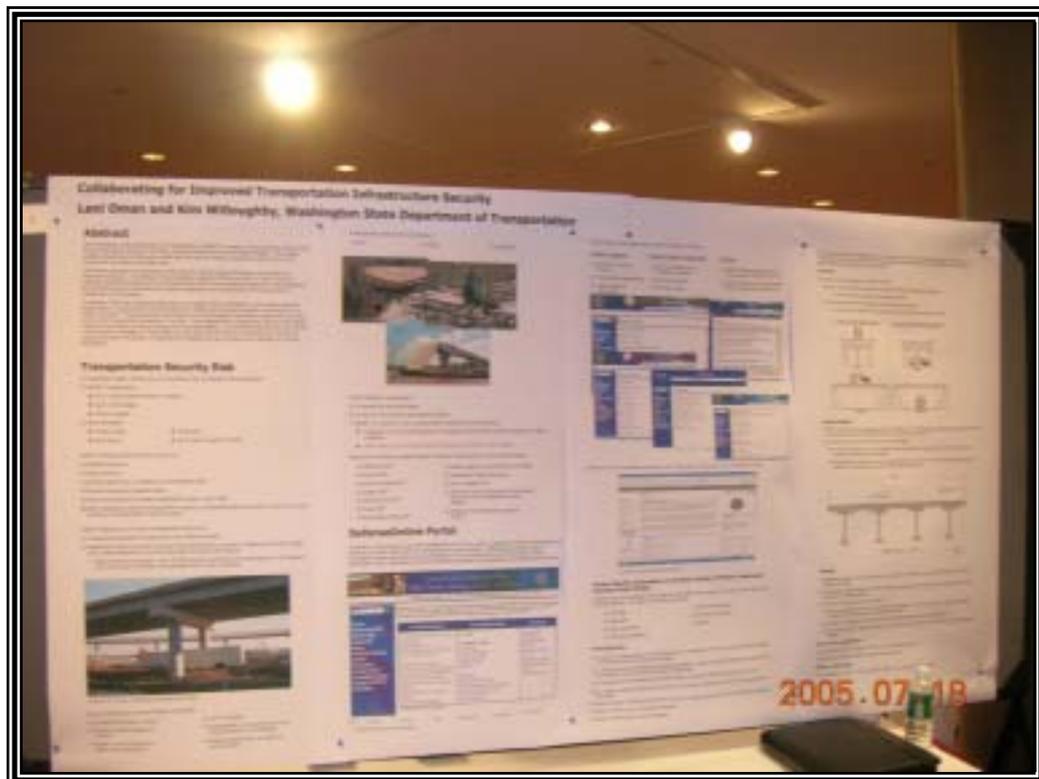
展覽會現場



研討會開幕式



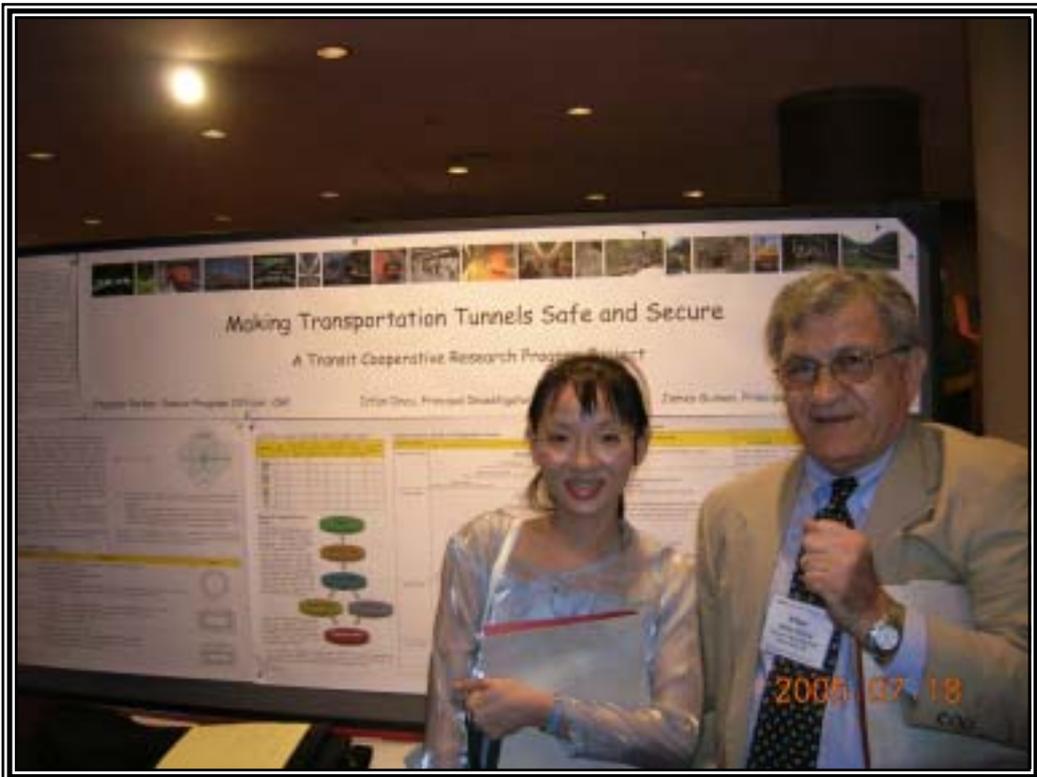
參展攤位海報 1



參展攤位海報 2



參展攤位海報 3



筆者與參展攤位廠商合影

附錄三 波士頓大眾運輸系統照片



MBTA 巴士 1



MBTA 巴士 2



通勤火車車站月台



觀光巴士



MBTA 渡輪



MBTA 地鐵



市區觀光馬車



Amtrak 月台



波士頓 Leonard P. Zakim Bunker Hill 橋 1



波士頓 Leonard P. Zakim Bunker Hill 橋 2