

國道橋梁震後特別檢測與緊急補強

宋裕祺*、洪曉慧、劉光晏、陳俊仲、賴明俊、許家銓

摘要

國道高速公路為臺灣交通路網主要之生命線，為確保國道高速公路橋梁結構於震後受損或有受損之虞，致影響行車安全時，應辦理特別檢測作業及緊急補強等必要措施，使交通衝擊減至最低，維持震後交通生命線之通達。本文參考國內現行公路相關規範與養護手冊規定為研究出發點，並考量實際橋梁管理維護單位執行面之可行性，就震後特別檢測啟動時機、震後特別檢測作業流程及其檢測內容項目，以及震後橋梁損害緊急補強工法與應變策略等課題，探討國道橋梁震後特別檢測流程並提出初步研究建議。研究目標為彙編相關震後特別檢測與緊急補強工法資料，提供橋梁養護管理執行單位在執行工作業務時參考。目前研究工作仍在執行期內，計畫期間將持續仰賴具實務檢測經驗的養護執行單位提供具體建議回饋給研究單位，確保完成之研究成果除符合規範和養護手冊要求外，並滿足國道橋梁震後特別檢測業務執行需求。

關鍵字：橋梁、特別檢測、緊急補強

研究背景

台灣位於環太平洋地震帶，地震發生次數相當頻繁，當地震發生規模過大時對民生基礎設施與人民財產和社會經濟都可能造成很大的影響。以民國 88 年 9 月 21 日台灣地區發生芮氏地震規模達 7.3 的集集大地震為例，造成台灣中部地區相當重大的生命及財產損失，使人不得不懼於大自然無與倫比的力量，且地震更因其無法預先掌握測知的特性，如不審慎面對，往往造成更大的災害。有鑑於此，交通部於 89 年 4 月頒訂修正「公路橋梁耐震設計規範」相關章節，將地震分區由原來的四區調整提昇為兩區。由於國道高速公路為台灣地區南北交通的大動脈，對於國家整體經濟發展、國防安全及民生生活影響甚鉅；為防範於未然，對於中山高速公路及第 2 高速公路等已完工通車之橋梁結構物應以交通部頒「公路橋梁耐震設計規範」及其函頒修正之各章節，重新檢核及評估國道高速公路之新舊橋梁結構物，對於不符合最新耐震設計規範之橋梁進行耐震補強，期能於日後大地震發生時將損害減少至最低程度，並成功擔負起大地震後緊急救災之生命線道路重任。

「國道高速公路（通車路段）橋梁耐震補強工程計畫」經行政院 93 年 1 月指示，依照民國 93 年 1 月經濟建設委員會研商結論「建議同意先行辦理本計畫所列第 1 期工程，執行期程自民國 93 年度至 98 年度止；至於本計畫第 2、3 期工程則請交通部於第 1 期工程完成前，另就工程經費、效益及財務計畫重新檢討修正後，再提報行政院審議。」交通部國道高速公路局（簡稱高公局）於 97 年 12 月依前述指示，就第 2、3 期工程經費、效益及財務計畫重新檢討修正後呈報交通部，交通部於 98 年 1 月提報行政院審議；審議結果指示「如確有執行之必要及急迫性，應請另案成立新興建設計畫」。高公局遂依據上述指示，並以交通部 97 年新頒「公路橋梁耐震設計規範」及 98 年 6 月部頒修訂內容為評估補強標準，續辦未完成之原第 2、3 期工程橋梁耐震補強，將其合併為「國道高速公路橋梁耐震補強工程 - 第 2 期工程計畫」。行政院經濟建設委員會於 99 年 3 月邀請相關單位研商，獲致結論，指示依據所列原則暨與會各單位意見，整體評估重新檢討計畫並補充相關資料後，再循程序報核。其中「請交

通部確實依據院長 99 年 1 月裁示內容與方向配合辦理，即針對本案路段狀況較多或風險較高的橋梁，先進行分類或分等級後，按輕重緩急，視政府財況情形調整施作等原則再加研議；本案建議交通部國家財政資源之有效利用，從整體規劃與維生路網系統健全性角度為出發點，研提具體可操作性的指標作為依據，綜合考量系統之風險性、財務可行性、功能性，及審慎評估具急迫性及危險性的橋梁後，據以排定優先順序及提出各種可能方案之比較分析」。高公局續依據上述指示，綜合考量各路段橋梁結構之耐震能力「耐震指標」及震損之社會成本「交通衝擊指標」，據以排定耐震補強之優先順序，做為各路段耐震補強優先順序擬訂之參考，依據前述分析評估結果，並考慮路網特性，將第 2 期計畫分為 3 個優先路段逐步執行，並建議先行辦理第 1 優先路段；第 1 優先路段為國道 3 號汐止系統至竹南路段；第 2 優先路段為國道 3 號新化至燕巢系統及國道 10 號全線（含高雄支線及旗山支線）；第 3 優先路段為國道 3 號基隆汐止段、國道 3 號南港聯絡線、國道 3 甲台北聯絡線、國道 5 號南港至石碇路段、國道 3 號燕巢九如段及國道 8 號台南環線。本建設計畫奉行政院 99 年 11 月核定；經建會於 99 年 10 月委員會議討論，獲致結論：「為提升國道橋梁耐震能力，本案規劃於 100~103 年賡續辦理國道高速公路橋梁耐震補強工程，交通部已綜合考量國道各路段橋梁結構耐震能力及震損之社會成本，據以排定橋梁耐震補強之優先順序，原則同意。請交通部滾動檢討、彈性因應調整施作範圍，並加速辦理」。林同棧工程顧問股份有限公司受高公局委託辦理「高速公路橋梁耐震補強後續路段評估與研究」，其中有關「國道橋梁震後特別檢測與緊急補強」之相關研究服務事宜，為計畫工作成果嚴謹與研究內容之周延，委請財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心辦理，研究計畫擬參考國外橋梁震後檢測作法，就國內公路相關規範與養護手冊規定，探討國道橋梁震後特別檢測作業現況，提供國道橋梁震後特別檢測流程研究建議，並就震後橋梁損害緊急補強工法與應變策略提出建設性參考建議。國道橋梁震後檢測工作主要目的在，為確保國道高速公路橋梁結構於震後受損（或有受損之虞），致影響行車安全時，應辦理特別檢測工作及緊急補強等必要措施，使交通衝擊減至最低，維持震後交通生命線之通達。

橋梁震後可能的損壞模式與橋梁檢測構件分類

本節概要探討橋梁在地震發生後可能的損壞模式，有助於瞭解震後特別檢測內容和項目應有之重點。參考國家地震工程研究中心研究報告(NCREE-99-055)「九二一集集大地震全面勘災報告-橋梁震害調查」報告，在此次調查災區內近千座橋梁中，輕微至中度損壞者約佔 17%，而嚴重損壞者（含不能通行者）約 20 餘座。嚴重損壞者之破壞模式主要可概括如下：落橋、橋面版破壞、橋搭破壞、主梁破壞、主梁移位、支承破壞、接頭破壞、橋柱剪力破壞、橋柱撓曲破壞、橋柱撓剪破壞、橋柱傾倒或移位、基礎破壞和橋台破壞等(如圖 1 所示)。另外，在輕微損壞橋梁中，有些損壞模式亦常見包括橋台後方填土由於地震而沉陷、由於擠壓而造成橋面隆起、伸縮縫錯位或擠壓、防落裝置損壞、帽梁受損和附屬設施損壞。雖然九二一集集大地震對台灣中部地區之交通設施造成了重大損失，但由於台灣西部之主要幹線，如中山高速公路、台一線、台十七線等均位於車籠埔斷層以西且距離較遠，因此並未造成重大之災情。相較之下，1994 年美國之北嶺地震及 1994 年日本之阪神地震，其對交通設施之衝擊遠大於九二一大地震。觀察九二一集集地震震災情形，歸納震後橋梁損壞基本原因包括：(1)橋梁經過斷層將無法避免落橋，橋墩傾斜或傾倒以及橋墩斷裂等。此類破壞模式為九二一集集大地震造成落橋最大之原因。(2)近斷層地震之強度遠高於我國現有橋梁規範之設計值，以 921 九二一集集大地震為例，受到嚴重損壞之橋梁大都距離斷層十公里以內。近斷

層地震對長跨結構亦具有極大之破壞力，例如集鹿大橋之損壞。(3)足夠之支承座長可使簡支橋梁免於因橋柱產生大位移或斜交之扭轉而落橋。橋柱之剪力破壞將造成脆性破壞或落橋，應加以避免，例如烏溪橋。(4)設計及施工良好之防落裝置可避落橋之發生，例如龍門大橋無防落裝置因而落橋。對於偏心之結構系統，其接頭之設計應加以更保守之考慮。(5)由斷裂之結構桿件可看出其施工細節多不符目前耐震設計之規定。此次地震倒塌之橋梁多簡支梁系統，因此其破壞模式以支承損壞及落橋居多，但橋柱所承受之地震地亦較小。如果這些倒塌橋梁為連續梁或剛構架，橋柱將承受較大之地震力，而其破壞模式亦將有所不同。



埤豐橋落橋（斷層通過）



一江橋落橋（斷層通過）



名竹橋落橋（斷層通過）



龍門大橋落橋（無防落裝置）



集鹿大橋主橋面版破壞



光龍橋主梁移位破壞



炎峰橋主梁破壞



石園橋止震塊破壞



東豐橋主梁移位無止震塊



新溪南橋支承破壞



烏溪橋剪力破壞



桶頭橋橋柱撓剪破壞

圖 1 橋梁震後可能的主要損壞模式

而橋梁震後特別檢測內容和項目，除需考量震後橋梁可能的損壞模式外，主要可由橋梁型式和基本構件分類進行分項檢測，橋梁型式參考公路橋梁耐震設計規範及橋梁管理資訊系統，可分為梁橋、桁架橋、拱橋、斜張橋、吊橋、 π 橋等。依照檢測位置將構件做適度分類，一般公路橋梁構件如表 1，在制訂國道橋梁震後特別檢測內容和項目時，可參考使用。

表 1 公路橋梁構件分類

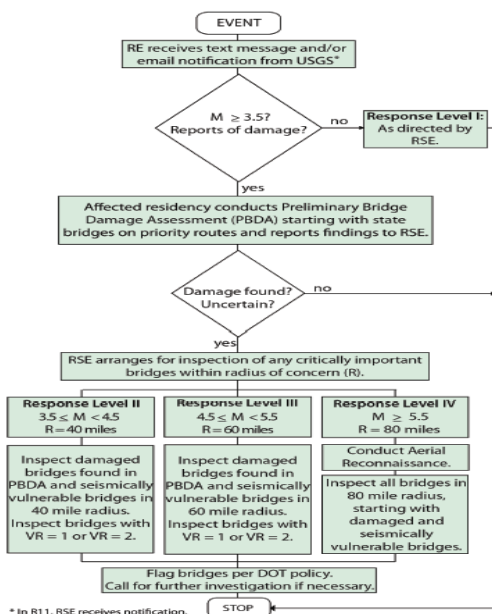
(1)引道路堤	(8)面層	(15)支承/支承墊
(2)引道護欄	(9)橋面排水設施	(16)防震設施
(3)河道	(10)緣石及人行道	(17)伸縮縫
(4)引道護坡	(11)欄杆及護牆	(18)主構件(大梁)
(5)橋台基礎	(12)橋墩/橋基保護設施	(19)次要構件(橫隔梁)
(6)橋台	(13)橋墩基礎	(20)橋面板
(7)翼牆/擋土牆	(14)橋墩墩體/帽梁	(21)其他

註：

- 第(8)項面層為橋面板上之鋪面，如摩擦層、瀝青鋪面等。
- 止震塊、拉桿、剪力鋼棒等相關減震及防落措施，均為檢測項目(16)所涵蓋之範圍，惟隔減震支承應歸為第(15)項支承/支承墊之檢測項目。
- 第(21)項其他為標誌架、照明設備、隔音牆、維修走道等橋梁附屬設施。

國外橋梁震後檢測流程和項目參考

本研究蒐集橋梁工程先進國家包括美國和日本之相關資料，參考研擬適用性並用以探討台灣國道橋梁震後特別檢測與緊急補強作為，於本節進行概要說明。以美國紐約州橋梁震後檢測手冊內容為例，其橋梁震後檢測程序流程如圖 2，其依照不同地震震度進行檢測作業分階段與分級，對於較大的地震震度可能產生較大損傷程度，採取想對積極和詳細的震後調查作為。而美國加州交通運輸局制訂之震後檢測手冊裡提供之橋梁震後檢測表格，如圖 3(a)，則可供訂定橋梁震後檢測內容和項目參考。在美國華盛頓州也有針對橋梁震後安全評估提供具體作業辦法，和美國紐約州類似，針對橋梁震後檢測作業，也制訂一系列流程供橋梁檢測人員參考使用，如圖 3。在日本也因為地震發生頻繁，其對於橋梁震後檢測的工作要求也有相當可供國內參考的資料，參考日本道路協會和日本東北地方整備局道路部制訂之手冊，可發現日本在橋梁震後檢測內容和項目要求相較於美國更為詳細但繁瑣，圖 3(b)為日本在阪神地震過後研提之橋梁震後檢測表格，其要求之檢測項目，對於震後特別檢測工作係要求時間與可行性的前提下是否適用，使用值得進一步探討。



Type	Aerial Reconnaissance (Response Level IV)	Preliminary Bridge Damage Assessment (PBDA)	Special Post-Earthquake Bridge Inspection (SPEBI)	Further Investigation
Objective	'Global' perspective	Route reconnaissance	Detailed Post-Earthquake Bridge Inspection	Special study to address a particular concern
Scope	All bridges in affected area	All bridges in affected area, starting with priority routes.	Site-specific. Table 4-1 shows bridges to inspect for a given magnitude.	Site-specific, as needed
Inspection Method	Helicopter or small fixed wing aircraft	Drive-through with quick stop at each bridge	Bridge inspection vans, MPT & special access equipment if needed	Any special equipment that is needed
Personnel	1 or 2 DOT managers	Residency staff	Bridge Inspection Teams with supplemental TL's, if needed	Specialists e.g. Structural, Geotechnical, Metallurgical
Timeframe	Immediate (within 24 hours)	Immediate (within hours)	Start a.s.a.p. (usually within 8 hours) and continue as necessary	Subsequent to a SPEBI
Outcome	<ul style="list-style-type: none"> Determine the extent of damage Identify impassible routes & traffic bottlenecks Locate bridges that have major damage or are obviously unsafe Suggest priority for ground assessments 	<ul style="list-style-type: none"> Determine the extent of damage Identify impassible routes & traffic bottlenecks Close collapsed or dangerous bridges Recommend SPEBI bridge inspection for damaged or suspect bridges. 	<ul style="list-style-type: none"> Flag if necessary Close collapsed or dangerous bridges Recommendations for restriction, repair, or further investigation. Reopen bridges deemed safe that were closed as a precautionary measure during PBDA 	<ul style="list-style-type: none"> Flag as necessary Detailed analysis Provide specific recommendations on necessary restrictions and/or repair Approximate cost estimate for remedial work
Deliverable	Reconnaissance report with photos and/or video	PBDA Form (one line per bridge)	SPEBI Report Daily Summary Report (DSR)	Special engineering report

圖 2 美國紐約州橋梁震後檢測程序流程及應變等級說明

SAMPLE POST-EARTHQUAKE EVALUATION FORM

POST EARTHQUAKE BRIDGE EVALUATION FORM		Sheet Number _____	
Inspector's Name _____ Affiliation _____		Date _____ Time _____	
Earthquake Name _____ Country _____ Region _____			
DESCRIPTION OF BRIDGE		DESCRIPTION OF DAMAGE	
Bridge Name _____ Br # _____ Route # _____ Location _____ Bridge Bearing _____ Length _____ Number of Spans _____ Simple Spans _____ Continuous _____ Hinges yes <input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> locations in spans _____ River King <input type="checkbox"/> RR King <input type="checkbox"/> Interchange <input type="checkbox"/> Other _____		Overall Rating _____ No Damage <input type="checkbox"/> Minor Damage <input type="checkbox"/> Moderate Damage <input type="checkbox"/> Major Damage <input type="checkbox"/> Collapse <input type="checkbox"/> Dropped Spans yes <input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> spans _____ Span Movement _____ Girder Damage _____ Other Superstructure Damage _____ Indications of soil movement _____	
Suspension <input type="checkbox"/> Cable Stay <input type="checkbox"/> Steel Truss <input type="checkbox"/> Steel Arch <input type="checkbox"/> Steel Box Girder <input type="checkbox"/> Steel I Girder <input type="checkbox"/> Concrete Box Girder <input type="checkbox"/> Concrete T Girder <input type="checkbox"/> Concrete Slab <input type="checkbox"/> Precast Girder <input type="checkbox"/> Concrete Arch <input type="checkbox"/> Timber Arch <input type="checkbox"/> Timber Truss <input type="checkbox"/> Timber Girder <input type="checkbox"/> Bascule <input type="checkbox"/> Lift <input type="checkbox"/> Swing <input type="checkbox"/> Other _____			
BEARING TYPES		Damage Location Description	
<input type="checkbox"/> Roller <input type="checkbox"/> Plane Sliding <input type="checkbox"/> Rocker <input type="checkbox"/> Curved Sliding <input type="checkbox"/> Knuckle <input type="checkbox"/> Disc <input type="checkbox"/> Leaf <input type="checkbox"/> Elastomeric <input type="checkbox"/> Link <input type="checkbox"/> Isolation/Damping		Restraint Hinge Joint _____ Bearings Shear Key Abutment _____ Bent Bent Cap _____ Column _____ Footing _____	
Abutments Seat Type <input type="checkbox"/> Diaphragm <input type="checkbox"/> Other _____ Piers Concrete Walls <input type="checkbox"/> Single Col. <input type="checkbox"/> Multicol. <input type="checkbox"/> Steel Tower <input type="checkbox"/> Single Col. <input type="checkbox"/> Multicol. <input type="checkbox"/> Other _____ Foundations spread <input type="checkbox"/> pile <input type="checkbox"/> pileshaft <input type="checkbox"/> caisson <input type="checkbox"/> other _____ Retrofit yes <input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> Shear Keys <input type="checkbox"/> Catcher Blocks <input type="checkbox"/> Restraints <input type="checkbox"/> Abutments _____ Bents _____ Other _____		Roll # _____ Frame # _____ Photo Log _____	
Additional Comments _____			

SKETCH DAMAGE

(a)美國加州交通運輸局

緊急点検-応急調査 調査(その1)

橋名	橋管理番号	橋の構造形式	橋の長さ	所在地
路線名	路線番号	橋の形式	橋の形式	所在地
路線種別	種別	橋の形式	橋の形式	所在地
上部構造形式	下部構造形式	橋の形式	橋の形式	所在地
部材	支保脚種別	竣工年	出稼年	調査日
最近完成年度	最近調査年	調査年度	調査年度	調査年度

項目	項目	項目	項目	項目	項目	項目	項目
橋脚	橋脚	橋脚	橋脚	橋脚	橋脚	橋脚	橋脚
1. 橋脚	2. 橋脚	3. 橋脚	4. 橋脚	5. 橋脚	6. 橋脚	7. 橋脚	8. 橋脚
0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1
1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3
1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4

(b)日本東北地方整備局道路部

圖 3 研究參考之美國和日本橋梁震後檢測表格

國內公路相關規範與養護手冊要求

目前國內已有公路相關養護、檢測及補強規範與橋梁管理單位制訂之養護手冊，提供橋梁管理養護單位參考執行橋梁震後特別檢測業務，在探討現況及研擬研究建議過程中，並須就國內公路相關規範與養護手冊基本要求進行瞭解，本文將以目前相關養護、檢測及補強規範包括交通部於民國 101 年 2 月頒布之「公路養護規範」、民國 97 年 12 月頒布之「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」及高公局於民國 101 年完成之「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範(草案)」，配合高公局於民國 91 年 9 月制訂並於民國 102 年 2 月修訂之「高速公路養護手冊」、公路總局民國 101 年 3 月制訂之「公路養護手冊」，就相關養護、檢測及補強規範與養護手冊制訂概要及其與橋梁震後特別檢測業務相關內容先分別摘錄敘明如下。

(1)公路養護規範

交通部於民國 101 年 2 月頒布之「公路養護規範」，係參考修正交通部於民國 92 年 3 月修訂頒布之「公路養護手冊」，鑑於部頒技術規範應為原則性、政策性或訓示性之技術規定為原則，如屬實際操作面之詳細規定，應由各執行單位制定，故據此提列原則性之技術性規定編訂成「公路養護規範」。該規範目的在於提供各級公路養護管理機關，施行公路及其附屬設施養護作業之依循，以維持公路行車安全及舒適。採原則性規定，適用於各級公路之養護作業。公路經過市區道路部分，其附設於道路之人行道、人行陸橋、人行地下道、排水溝渠、標誌、號誌、照明、景觀設施及植栽等設施，由該市區道路主管機關之養護管理者，從其自訂之規定辦理養護。規範內容係以民國 92 年交通部頒「公路養護手冊」，及 100 年交通部臺灣區國道高速公路局「高速公路公路養護手冊」為藍本，並參考 2007 年美國 AASHTO “Maintenance Manual for Roadways and Bridges, 4th Edition”，與日本道路協會「道路維持修繕要綱」等相關文件彙編而成。內容係以基本性與通盤性之規定為原則，公路養護管理機關應按本規範，考量其特殊需求訂定養護制度與養護手冊，其養護作業標準以

不低於本規範規定為原則。本規範未規定者得依其他相關規範或參考最新技術辦理。而有關「臨時橋梁或臨時支撐」及「施工中交通安全設施」之養護規定，因係屬施工階段之設施，由工程主辦機關於契約文件內規定，不納入該規範。就橋梁震後特別檢測部分，於規範第五章「橋梁」，內容提及公路養護單位除依第二章辦理橋梁巡查外，應進一步針對橋梁進行檢測。檢測類別包括定期檢測和特別檢測，其中特別檢測為當重大事故或災害發生後，為了解損傷程度及防止災害擴大而實施之檢測。特別檢測之頻率係於重大事故、災害發生後或巡查發現異狀及各級公路養護單位認為必要時辦理之。特別檢測之內容可由公路養護管理機關視事故、災害之嚴重狀況或巡查發現特殊異狀之情形，訂定檢測項目。

(2) 公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範

交通部於民國 97 年 12 月頒布之「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」，適用於公路一般性鋼結構橋梁之檢測、評估與維修補強作業。其他特殊性橋梁如斜張橋、 π 型橋、鋼拱橋、活動橋與臨時便橋等及跨度超過 150 公尺者，因其結構行為較為複雜或重要性不同，除依本規範所列之原則與重點進行檢測、評估與維修補強外，另需考慮其特性，採取適當之方法。檢測部分係以交通部頒布「公路養護手冊」、台灣省政府住宅及都市發展局「混凝土、鋼橋一般檢測手冊」、「混凝土、鋼橋特殊檢測概要手冊」與交通部台灣區國道高速公路局「公路橋梁一般目視檢測手冊」為藍本，並配合當時橋梁管理系統訂定之。規範之維修與補強部分主要參考交通部高速鐵路工程局「鐵路鋼結構橋梁之檢測及補強原則」、日本道路協會「道路橋補修便覽」與道路公團「維持修繕要領」，以及美日其他相關報告與手冊，再配合國內現況訂定之。檢測評估作業係以交通部台灣區國道高速公路局「公路橋梁一般目視檢測手冊」的 D.E.R.U. 系統為基本架構，判定標準則採台灣省政府住宅及都市發展局「混凝土、鋼橋一般檢測手冊」的 A.B.C.D. 系統，以使現場檢測人員可具體明確了解所應檢查的項目與重點，同時對於檢測項目可做較標準化及一致性的規定，避免遺漏部分檢查項目或流於主觀意識。規範條文採原則性規定，各橋梁管理單位可依實際需求及人力，酌予調整。至於橋梁檢測、評估與維修補強作業之實際執行細節及步驟，則列於解說中，使工程人員有所依循，並可依現場實際情況進行工程專業判斷。橋梁檢測以目視為主，惟部分橋梁之損傷並不容易由目視檢測察覺，其檢測結果無法判定橋梁之整體安全性。故經本規範目視檢測結果判定為安全之橋梁，仍需依檢測人員之專業判斷，決定是否需進一步進行詳細之檢測與評估。

該規範於第五章「特別檢測」內容提及，特別檢測為橋址發生地震災害、土石流災害、水災、火災及其他重大事故後之災害後檢測。特別檢測包括三個階段：(1) 緊急勘查；(2) 搶修階段之檢測；(3) 復舊階段之檢測。緊急勘查目的在了解道路是否可通行，以作為是否須進行限速、限重或封橋等緊急措施之判斷依據。根據緊急勘查結果，橋梁管理機關可視需要進行進一步之搶修階段之檢測與復舊階段之檢測。搶修階段之檢測目的係為掌握全盤性受災狀況，並提供是否須進行搶修之判斷依據；復舊階段之檢測目的係為提供是否須進行復舊之判斷依據。並於第 5.2 節，述及地震後特別檢測，說明橋梁所在地區發生地震後，橋梁管理機關應依事先訂定之檢測作業相關規定進行地震特別檢測。地震特別檢測包括三個階段：(1) 震後緊急勘查；(2) 搶修階段之檢測；(3) 復舊階段之檢測。

(3) 公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範(草案)

高公局於民國 101 年完成之「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範(草案)」，綜觀規範內容架構係參考「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」，其中第四章「特別檢測」與「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」第五章「特別檢測」內容類似，就特別檢測適用時機和地震後特別檢測要求相同。

(4)高速公路養護手冊

高公局於民國 91 年 9 月訂定「高速公路養護手冊」，提供各養護單位依循手冊相關準則進行養護作業。交通部頒布「公路養護手冊」技術標準規範後，高公局隨即改依部頒標準規範進行養護工作。民國 99 年 4 月 25 日發生國道 3 號 3.1K 邊坡崩塌事件後，為因應全球氣候變遷異常天然災害頻繁，經交通部檢討現有養護手冊實有重新修訂之必要，且手冊之修訂應由各機關自行制定。高公局遂修訂養護手冊，以民國 91 年 9 月版為修訂藍本，將章節內容彙整撰編，強化橋梁、鋪面、邊坡及隧道檢測、監測等作業方法及規定，並檢視各項各類檢查表格、巡查報告表等，期能提供養護人員作業參考，簡化作業時程並提升作業效率。並於民國 102 年 2 月第一次修訂。

於該手冊第七章「橋梁」內容，第 7.3.2 節「橋梁檢測類別」第 3 項述及特別檢測為颱風(地區侵襲)、大豪雨(地區 24 小時累計雨量 200mm 以上)、地震(地區震度 4 級以上)等災害後，或火災、車撞等人為破壞後，可能損傷橋梁結構安全或行車安全，或其他臨時需要所做之不定期檢測。檢測重點針對災後或事故後或其他目的，探討是否造成橋梁功能損傷，是否需維修、補強及決定維修、補強方法。檢測時機為颱風、豪雨、地震等天災，或火災、車撞等人為事故後為之。檢測方式為天災或人為事故後，由橋梁檢測人員(必要時應增加人員協助)以目視或簡單之量測器具進行檢測。橋梁檢測人員應於天災或人為事故後，能安全到達現場作業，並先以電話回報初步檢視情形，以判斷後續交通管制措施之必要性，並在 3 工作天內完成檢測及製作檢測報告。檢測項目視天災或人為事故造成橋梁構件劣化情形，或其他臨時需要檢測目的而定。檢測結果應登錄高公局「橋梁管理資訊系統」內，並列印應附表「交通部台灣區國道高速公路局工程處橋梁特別檢測評估表」，如表 2。

(5)公路養護手冊

「公路養護手冊」源起於民國 76 年由交通部頒布，為因應近年來全球氣候異常天然災害頻傳，養路技術亦有所增進，且各類型道路交通特性不同其相應之養護項目及性質，檢視組織規模及人力狀況，擬訂「交通部公路總局省道公路養護手冊」，以落實公路養護權責。手冊依省道公路養護需求及特性，分別就養路巡查、已完工之路基及邊坡、鋪面、橋梁、隧道、排水設施、交通工程設施、交控設施、沿線路權內附屬設施、景觀及植栽等各項設施及其分類構造物，敘明其內容、養護注意事項、檢測或清查作業及相應之養護方法等，並訂明各項公路設施之巡查方式、頻率項目、注意事項與各類參考表格供參。此外，為因應近年來異常氣候常致重大公路災害，亦強化橋梁檢測、橋墩保護等作業規定，及增列邊坡監測系統巡查項目，部分項目因應科技發展，或委由專業技術顧問公司辦理檢測，俾以進行更詳盡之檢查及建議報告，提升管養作業效能，以確保用路人安全。

該手冊於第五章「橋梁」5.3.2 節「檢測類別及方式」第 2 項內容述及特別檢測，為由天災(如颱風、豪雨、地震等)或人為破壞因素(如火災或車輛撞損等)引起之災害，致可能損傷橋梁結構所做之不定期檢測。檢測重點在針對災後或事故後或其他目的，探討是否造成橋梁功能損傷及是否需維修、補強。並於 5.3.3 節說明針對震後特別檢測之檢測頻率二個原則為(1)震度 5 級地區橋梁基樁或沉箱有裸露者、受損尚未完成修復及施工中橋梁。(2)震度達 6 級以上地區所有橋梁。而特別檢測項目包含整體穩定性、上部結構、橋墩、橋台、基礎、引道擋土牆、橋台引道版、支承、伸縮縫、河道、橋墩保護設施、附屬設施等 12 項(如表 3)。

表 2 橋梁特別檢測評估表[高速公路養護手冊]

公路編號：

天氣狀況(晴/陰/雨)：

日期： 年 月 日

檢測單位	橋梁名稱	橋梁編碼	評估等級 /損壞程度			備註
檢測項目	損壞狀況	安全	須補強	危險		
整體穩定性	<input type="checkbox"/> 結構傾斜 <input type="checkbox"/> 沉陷 <input type="checkbox"/> 土壤液化	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
上部結構 (RC、PC)	<input type="checkbox"/> 大梁破壞 <input type="checkbox"/> 橋面板下陷 <input type="checkbox"/> 大梁位移有落橋潛勢	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
上部結構 (鋼構)	<input type="checkbox"/> 主構件受損 <input type="checkbox"/> 次要構件受損 <input type="checkbox"/> 橋面板下陷 <input type="checkbox"/> 大梁位移	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
橋墩(RC、PC)	<input type="checkbox"/> 傾斜沉陷 <input type="checkbox"/> 墩柱破壞 <input type="checkbox"/> 帽梁破壞	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
橋墩(鋼構)	<input type="checkbox"/> 傾斜沉陷 <input type="checkbox"/> 鋼板凹陷鼓脹 <input type="checkbox"/> 鋼柱破壞 <input type="checkbox"/> 帽梁破壞	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
橋台	<input type="checkbox"/> 翼牆損壞 <input type="checkbox"/> 橋台護坡坍塌 <input type="checkbox"/> 橋台傾斜位移	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
基礎	<input type="checkbox"/> 基礎傾斜 <input type="checkbox"/> 基礎沈陷 <input type="checkbox"/> 基礎殘餘水平變位	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
引道擋土牆	<input type="checkbox"/> 擋土牆牆身損壞 <input type="checkbox"/> 擋土牆傾斜	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
橋台(引道)	<input type="checkbox"/> 傾斜位移 <input type="checkbox"/> 結構受損 <input type="checkbox"/> 引道下陷	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
支承	<input type="checkbox"/> 裝置受損 <input type="checkbox"/> 傾斜滑動 <input type="checkbox"/> RC座破損 <input type="checkbox"/> 防落裝置受損	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
伸縮縫	<input type="checkbox"/> 縱向開離 <input type="checkbox"/> 左右錯離 <input type="checkbox"/> 上下落差 <input type="checkbox"/> 擠壓破壞	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
附屬設施	<input type="checkbox"/> 設施受損倒塌 <input type="checkbox"/> 管線受損 <input type="checkbox"/> 欄杆受損 <input type="checkbox"/> 胸牆受損 <input type="checkbox"/> 其他	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III		
評估過程附記事項：						
評估結果： <input type="checkbox"/> 安全可通車 <input type="checkbox"/> 緊急補強後可通行 <input type="checkbox"/> 危險禁止通行						
檢測人員：			主管：			

表 3 橋梁特別檢測評估表[公路養護手冊]

路線	橋梁名稱	天氣狀況			
檢測單位	檢測日期	橋梁編號			
竣工年月	檢測事由				
檢測項目	損壞狀況	評估等級 /損壞程度			備註
		安全	須補強	危險	
整體穩定性	<input type="checkbox"/> 結構傾斜 <input type="checkbox"/> 沉陷 <input type="checkbox"/> 土壤液化				
上部結構 (RC、PC)	<input type="checkbox"/> 大梁破壞 <input type="checkbox"/> 橋面板下陷 <input type="checkbox"/> 大梁位移有落橋潛勢				
上部結構 (鋼構)	<input type="checkbox"/> 主構件受損 <input type="checkbox"/> 次要構件受損 <input type="checkbox"/> 橋面板下陷 <input type="checkbox"/> 大梁位移				
橋墩(RC、PC)	<input type="checkbox"/> 傾斜沉陷 <input type="checkbox"/> 墩柱破壞 <input type="checkbox"/> 帽梁破壞				
橋墩(鋼構)	<input type="checkbox"/> 傾斜沉陷 <input type="checkbox"/> 鋼板凹陷鼓脹 <input type="checkbox"/> 鋼柱破壞 <input type="checkbox"/> 帽梁破壞				
橋台	<input type="checkbox"/> 翼牆損壞 <input type="checkbox"/> 橋台護坡坍塌 <input type="checkbox"/> 橋台傾斜位移				
基礎	<input type="checkbox"/> 基礎傾斜 <input type="checkbox"/> 基礎沈陷 <input type="checkbox"/> 基礎殘餘水平變位				
引道擋土牆	<input type="checkbox"/> 擋土牆牆身損壞 <input type="checkbox"/> 擋土牆傾斜				
橋台(引道)	<input type="checkbox"/> 傾斜位移 <input type="checkbox"/> 結構受損 <input type="checkbox"/> 引道下陷				
支承	<input type="checkbox"/> 裝置受損 <input type="checkbox"/> 傾斜滑動 <input type="checkbox"/> RC座破壞 <input type="checkbox"/> 防落裝置受損				
伸縮縫	<input type="checkbox"/> 縱向開離 <input type="checkbox"/> 左右錯離 <input type="checkbox"/> 上下落差 <input type="checkbox"/> 擠壓破壞				
河道	<input type="checkbox"/> 河道淤積 <input type="checkbox"/> 河道變寬 <input type="checkbox"/> 深水區改變 <input type="checkbox"/> 河床降低 <input type="checkbox"/> 橋基保護工破壞				
橋墩保護設施	<input type="checkbox"/> 完全沖毀 <input type="checkbox"/> 部份流失 <input type="checkbox"/> 嚴重位移 <input type="checkbox"/> 撞擊損傷				
附屬設施	<input type="checkbox"/> 設施受損倒塌 <input type="checkbox"/> 管線受損 <input type="checkbox"/> 欄杆受損 <input type="checkbox"/> 胸牆受損 <input type="checkbox"/> 其他				
評估過程附記事項：					
評估結果：					
限重(t)		限速(km/h)			
單位主管		檢測人員			
維修完成日期		維修後評估結果			
維修後限重(t)		維修後限速(km/h)			

國道橋梁震後特別檢測作業現況探討及初步研究建議

本文綜合前述提列可供橋梁震後特別檢測執行業務參考之國內公路相關規範與養護手冊內容，針對國道橋梁震後特別檢測作業現況進行探討並提出初步研究建議。鑑於交通部頒訂之養護與檢測和補強規範為原則性、政策性或訓示性之技術規定，因此實際操作面之詳細規定，係由各執行單位制定，以國道橋梁震後特別檢測業務而言，業務執行單位通常為各工務段工程人員和相關協力廠商，主要應參考高公局制訂之「高速公路養護手冊」要求執行公路養護工作。該手冊於第七章「橋梁」內容說明了所謂的特別檢測，為颱風(地區侵襲)、大豪雨(地區 24 小時累計雨量 200mm 以上)、地震(地區震度 4 級以上)等災害後，或火災、車撞等人為破壞後，可能損傷橋梁結構安全或行車安全，或其他臨時需要所做之不定期檢測。因此現況負責執行震後特別檢測之單位，啟動時機為只要地區震度達 4 級以上，即必須動員進行特別檢測工作，檢測之重點為探討地震是否造成橋梁功能損傷，是否需維修、補強及決定維修、補強方法，檢測方式係由橋梁檢測人員以目視或簡單之量測器具進行檢測，並以電話回報初步檢視情形，以判斷後續交通管制措施之必要性，並在 3 工作天內完成檢測及製作檢測報告。檢測項目視天災或人為事故造成橋梁構件劣化情形，或其他臨時需要檢測目的而定。檢測人員係參考表 2「特別檢測表」進行檢測資料填列，再將檢測結果登錄在高公局「橋梁管理資訊系統」內，始完成該次震後特別檢測之工作，綜整國道震後橋梁特別檢測現況作業流程如圖 4。

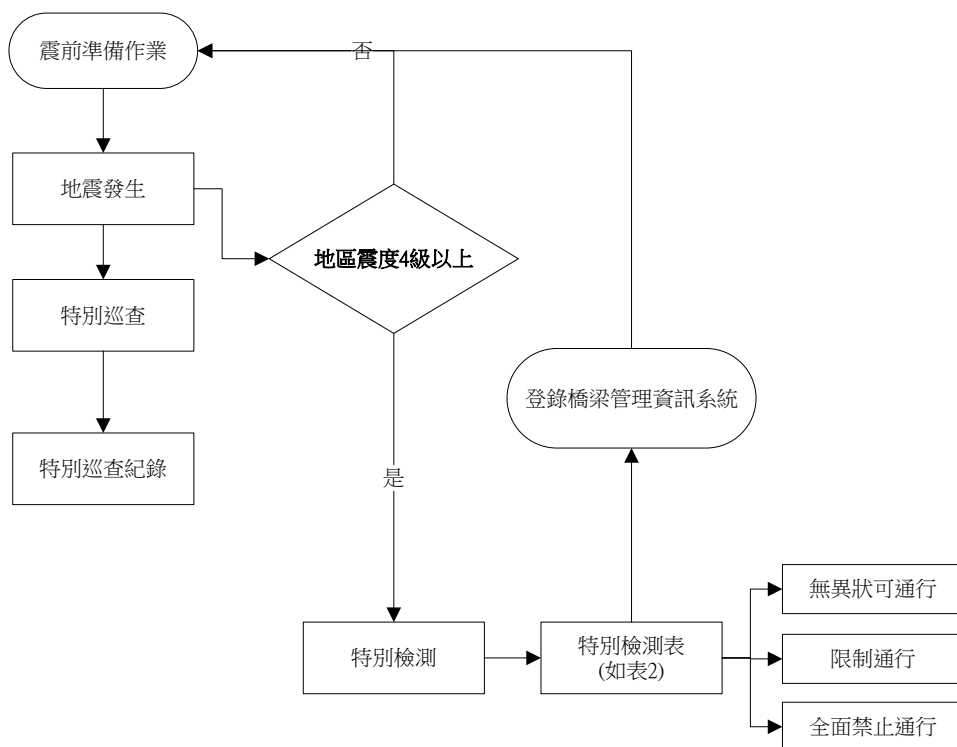


圖 4 國道震後橋梁特別檢測現況作業流程

在作業流程中，首先針對特別檢測啟動時機進行探討，目前國道橋梁震後特別檢測啟動時機為當地區震度達 4 級以上時，換言之，當地區之地表加速度範圍達到 25gal 以上時，橋梁特別檢測團隊即必須動員，由於震度 4 級(25gal-80gal)為台灣地區經常遇到的地震震度範圍，可理解目前國道橋梁震後特別檢測業務屬於經常動員執行的工作項目之一，然而由九二一集集大地震震後橋梁災損統計調查資料，並未有國道橋梁明顯災損的紀錄，直接驗證了國

道橋梁結構具有相當之耐震能力，此外，經初步與國道橋梁震後特別檢測業務執行單位討論，依執行震後特別檢測業務經驗，也顯示國道橋梁在目前定義之啟動時機，幾乎沒有因地區震度 4 級而造成國道橋梁結構性損傷之案例產生，表示目前定義之震後特別檢測啟動時機具有檢討空間，宜考量實際橋梁管理維護單位之動員能量適當調整，讓橋梁管理維護資源更有效率的運用。另一可探討的是震後特別檢測項目，目前高公局制訂之「高速公路養護手冊」就震後特別檢測工作提供了特別檢測表(如表 2)，對照公路總局「公路養護手冊」提供之橋梁特別檢測評估表(如表 3)，公路橋梁檢測表格額外包含河道和橋墩保護設施兩個項目外，其它項目基本上是相同的，均包括整體穩定性、上部結構、橋墩、橋台、基礎、引道擋土牆、橋台(引道)、支承和伸縮縫，執行特別檢測業務之檢測人員可依工程專業，依照檢測表項目填列安全、需補強或危險等三種評估等級和損壞程度表示檢測現況並做成檢測紀錄報表，因震後特別檢測之檢測重點係針對地震發生後，探討是否造成橋梁功能損傷，是否需維修、補強及決定維修、補強方法，加上檢測作業時間具有完成之時限，導致震後特別檢測項目必須適當考量可行性，過於繁瑣複雜或實際檢測作業上無法執行的檢測項目，在特別檢測工程實務宜適當予以考量排除或依實際工程實務執行面之可行性進行修正，在符合震後特別檢測之目的原則架構下，提高震後特別檢測作業執行效率。

另外值得一提的是，在「高速公路養護手冊」第二章「巡查制度」第 2.3 節「巡查方式」第 3 項說明的特別巡查，其為在颱風前後、降雨、地震或重大交通事故後，立即對高速公路構造物所作之檢查。依「高速公路養護手冊」提供之巡查項目分類表，針對特別巡查係要求各項設施之特別巡查手冊相關章節內容規定辦理實施，參考手冊提列之巡查項目和注意事項，針對橋梁工程而言，定期巡查和特別巡查之巡查項目和注意事項屬同一欄位說明，巡查項目區分混凝土上部結構、混凝土下部結構、鋼構橋、油漆、支承、伸縮縫和欄杆，巡查注意事項均屬劣化狀況之說明，與地震發生後可能造成橋梁構件產生的損壞模式不同，因此，在特別巡查之注意事項說明也提列參考高速公路養護手冊第七章「橋梁」辦理，對應前述橋梁震後特別檢測之內容，而特別巡查並未有巡查紀錄表格可供巡查人員填列，目前係由巡查人員就巡查狀況自行作簡易紀錄，因此特別巡查與特別檢測之要求，雖原則上屬於不同之作業要求，但同樣為地震發生後橋梁管理養護單位必須至橋梁現地執行之業務。

本文參考前述國內公路相關規範與養護手冊之要求規定為基本原則，針對國道橋梁震後特別檢測流程，提供初步研究建議之國道震後橋梁特別檢測作業流程如圖 5。針對震後特別檢測啟動時機，建議可參考現行「公路養護手冊」之要求，針對震後特別檢測之檢測頻率二個原則為(1)震度 5 級地區橋梁基樁或沉箱有裸露者、受損尚未完成修復及施工中橋梁。(2)震度達 6 級以上地區所有橋梁。而國道橋梁依歷次震後調查經驗，其耐震能力應不劣於一般公路橋梁，故國道橋梁震後特別檢測啟動時機研究建議可調整為當地區震度達 5 級以上時即啟動，而現行「高速公路養護手冊」對於特別巡查之時機，並無明確定義啟動時機，故研究建議當地區震度達 4 級以上時，可作為執行震後特別巡查之啟動時機。震後特別檢測和震後特別巡查主要不同，除了啟動時機不同，其檢測重點和項目也不同，巡查制度為確保國道高速公路各項設施之完善、行車順暢安全，隨時瞭解養護路段狀況並填具相關巡查報告表格陳報，如有重大特殊情況，則應以專案或緊急案件處理，以確保行車安全，而特別檢測為針對災後或事故後或其他目的，探討是否造成橋梁功能損傷，是否需維修、補強及決定維修、補強方法。本文初步研究建議提列兩者比較說明如表 4。而對於現行橋梁震後特別檢測表內之內容，本研究也初步合併部分項次並考量現地檢測作業的可行性調整部分檢測項目，初步研究建議修正之橋梁震後特別檢測表格如表 5。

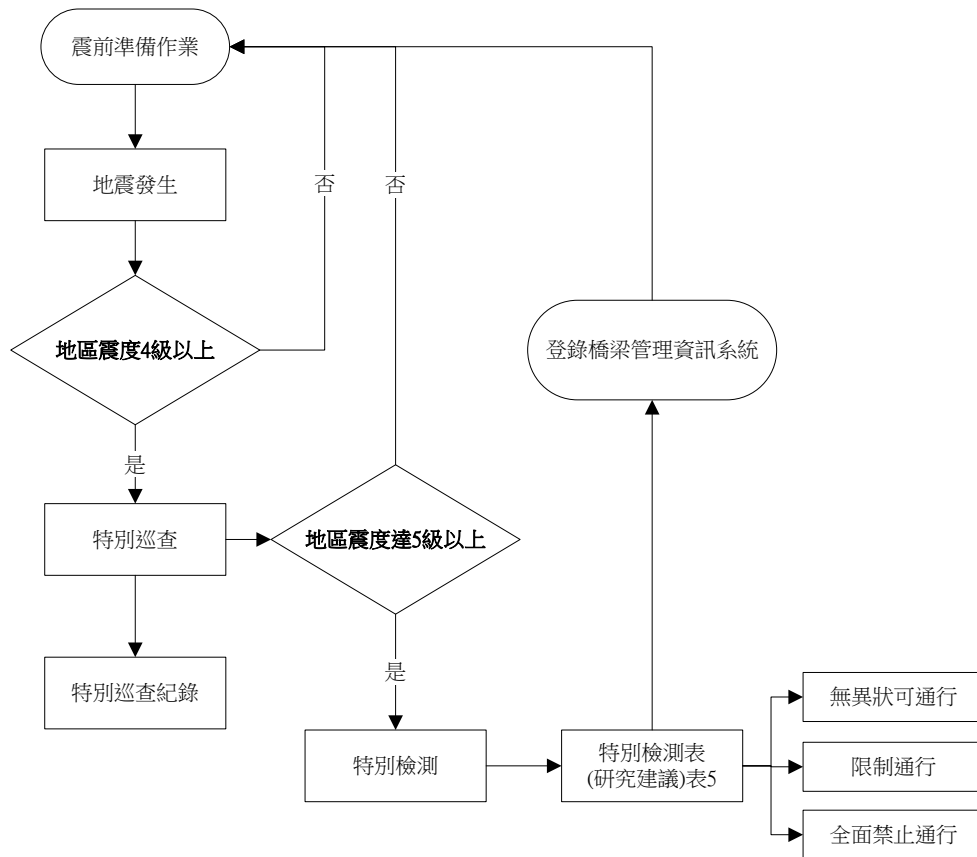


圖 5 國道震後橋梁特別檢測作業流程(本研究初步建議)

表 4 現行特別巡查和特別檢測之比較

比較項目	巡查制度(含特別巡查)	震後特別檢測
時機	在颱風前後、降雨、地震或重大交通事故後，立即對高速公路構造物作檢查。	颱風(地區侵襲)、大豪雨(地區 24 小時累計雨量 200mm 以上)、地震(地區震度 4 級以上)等災害後，或火災、車撞等人為破壞後，可能損傷橋梁結構安全或行車安全，或其他臨時需要所做之不定期檢測。
目的	為確保國道高速公路各項設施之完善、行車順暢安全。	為針對災後或事故後或其他目的，探討是否造成橋梁功能損傷，是否需維修、補強及決定維修、補強方法。
項目	各項設施之特別巡查請參照本「高速公路養護手冊相關章節內容規定辦理實施」。	參考橋梁特別檢測評估表。
執行方式	由養護單位正、副主管或指派工程司辦理。	由橋梁檢測人員(必要時應增加人員協助)以目視或簡單之量測器具進行檢測。

表 5 國道橋梁震後特別檢測評估表(本研究初步建議)

檢測單位		橋梁名稱		橋梁編碼	
路線名稱		里程		GPS 位置	
最近定期檢測年		最近耐震補強年			
檢測項目	損壞狀況	評估等級/損壞程度			備註
		安全	須補強	危險	
整體穩定性	<input type="checkbox"/> 落橋 <input type="checkbox"/> 結構傾斜 <input type="checkbox"/> 沉陷 <input type="checkbox"/> 土壤液化				
上部結構(RC、PC)	<input type="checkbox"/> 大梁破壞 <input type="checkbox"/> 橋面板下陷 <input type="checkbox"/> 大梁位移有落橋潛勢				
上部結構(鋼構)	<input type="checkbox"/> 主要構件受損 <input type="checkbox"/> 次要構件受損 <input type="checkbox"/> 橋面板下陷 <input type="checkbox"/> 大梁位移有落橋潛勢				
橋墩(RC、PC)	<input type="checkbox"/> 傾斜沉陷 <input type="checkbox"/> 墩柱破壞 <input type="checkbox"/> 帽梁破壞				
橋墩(鋼構)	<input type="checkbox"/> 傾斜沉陷 <input type="checkbox"/> 鋼板凹陷鼓脹 <input type="checkbox"/> 鋼柱破壞 <input type="checkbox"/> 帽梁破壞				
橋台	<input type="checkbox"/> 翼牆損壞 <input type="checkbox"/> 橋台護坡坍塌 <input type="checkbox"/> 橋台傾斜位移 <input type="checkbox"/> 胸牆損壞 <input type="checkbox"/> 背牆損壞				
基礎	<input type="checkbox"/> 基礎傾斜 <input type="checkbox"/> 基礎沉陷 <input type="checkbox"/> 基礎殘餘水平變位				
引道擋土牆	<input type="checkbox"/> 擋土牆牆身損壞 <input type="checkbox"/> 擋土牆傾斜				
引道版	<input type="checkbox"/> 傾斜位移 <input type="checkbox"/> 結構受損 <input type="checkbox"/> 引道下陷				
支承	<input type="checkbox"/> 裝置受損 <input type="checkbox"/> 傾斜滑動 <input type="checkbox"/> RC座受損 <input type="checkbox"/> 防落裝置受損 <input type="checkbox"/> 阻尼器受損				
伸縮縫	<input type="checkbox"/> 縱向開離 <input type="checkbox"/> 左右錯離 <input type="checkbox"/> 上下落差 <input type="checkbox"/> 擠壓破壞				
附屬設施	<input type="checkbox"/> 照明設施受損倒塌 <input type="checkbox"/> 管線受損 <input type="checkbox"/> 護欄受損 <input type="checkbox"/> 排水設施受損 <input type="checkbox"/> 其他				
評估過程附記事項：					
評估結果： <input type="checkbox"/> 無異狀可通行 <input type="checkbox"/> 限制通行 車速限制 (t)： 重量限制 (km/h)： 車道限制： <input type="checkbox"/> 全面禁止通行					
檢測人員：				主管：	

本研究初步建議之國道橋梁震後特別檢測評估表，於整體穩定性增加落橋項目，並略為修正橋台和引道版損壞狀況之檢測選項，且在支承檢測項目增加阻尼器損壞狀況，在附屬設施增加照明設施受損倒塌以及排水設施受損兩項損壞狀況描述選項，期待讓國道橋梁震後特別檢測評估表能更符合現況檢測需求，並提高震後特別檢測人員可參考表格填列檢測結果執行上之可行性。

震後橋梁損害緊急補強工法與應變策略

本研究除針對震後特別檢測流程和檢測項目進行探討之外，也針對震後橋梁損害緊急補強工法與應變策略提出研究建議，所謂震後橋梁緊急修復補強係指在實施結構永久性重建以前，防止災害持續擴大或發生二次災害，並恢復橋梁正常交通功能，而對結構物所採取的臨時性修復補強措施，如架設臨時支撐、臨時橋梁、填土夯實等。將依據此目的，針對相關震後橋梁緊急修復補強原則、分類、適用性進行說明，以作為震後橋梁緊急修復補強作業之參考。緊急修復補強之目的在儘速恢復橋梁交通輸送功能所實施之維修或補強工作，使災害對於社會及民眾的影響減至最低，因此在選用補強方案時，應以快速便捷為重點，而不以結構永久使用為考量。為達上述之緊急補強目的，建議依據(1)避免已經受損的構件再度惡化。(2)在短期時間內提供並確保橋梁的服務功能。(3)能夠迅速恢復橋梁的運輸機能。等三原則進行緊急修復補強工法之選擇。

另外，緊急修復補強亦須考量以較易取得之材料資源及勞力，迅速恢復運輸機能，讓救援輸送車輛得以通行，以利進行相關復原工作。依據上述三原則及震後特別檢測第二階段狀況，可將緊急修復補強概分為三種情形：包括(1)落橋緊急臨時橋梁組立：在災害狀況處置與快速診斷階段，若發現有落橋發生或震後快速診斷判定為需拆除重建之危險橋梁，必須進行封橋禁止通行，此時可搭建簡易臨時橋梁，以恢復國道交通功能。(2)局部構件損傷之補強：依據第二階段特別檢測表之結果，若橋梁之構件有顯著的損傷，且嚴重影響橋梁之安全性，必須禁止通行或限重通行，此時可透過緊急局部構件緊急修復補強工法進行加固修復，同時配合適度之限重通行，以迅速恢復橋梁之運輸功能，以利後續救援之作業。(3)確保行車安全之修復補強：經震後特別檢測調查結果，若橋梁之整體結構雖無立即危險，但可能影響行車安全時，應須立即採行相關緊急修復補強措施，其常見補強工項有橋面修復、伸縮縫修復等。表 6 為針對各構件相對於各損壞狀況之建議修復補強工法及修復補強後之橋梁管制建議，以提供相關橋管單位在進行緊急修復決策判斷時之參考。本研究參考相關資料綜合部分緊急修復補強工法於下作概要性的說明。

(1) 設置臨時橋梁

參考台灣營建研究院「重要橋梁搶修技術手冊」之研究成果，工法包括簡支鋼橋梁與桁架橋兩種型式，可供國道橋梁於震災發生後，若橋梁發生落橋或上部結構嚴重受損時可採用之臨時橋梁型式參考，以迅速恢復交通緊急運輸機能。

(2) 架設臨時支撐架

臨時支撐為以 H 型鋼架設於原有橋墩兩側或主梁下方，以作為因橋墩、帽梁或主梁損壞、破裂、挫屈而失去部份承载力之支撐與加固用。此工法仍為橋梁結構在受地震作用後，造成橋梁有立即危險或有二次災害發生的可能時所採用之臨時加固方法，以讓高速公路受災橋梁得以在最短時間內限制通行。然而若橋墩、橋面受損嚴重，亦可配合臨時支撐架及油壓千斤頂(將已產生變位之橋面頂回原位)，以全面取代原墩柱功能，此時，為顧及橋梁之安全

性，應詳細核算臨時搬之工程設計圖及結構計算書，而此項作業勢必延長搶修期限，因此，以臨時支撐全面取代原墩柱功能非緊急搶修之範疇。

(3) RC 橋柱緊急修復補強工法

鋼筋混凝土橋墩緊急修復補強是在橋墩發生撓力破壞、撓曲破壞處，以現有之材料或簡易之方法進行快速包覆補強，補強材可採用鋼板、混凝土、纖維等進行包覆。日本在阪神地震後，建議在橋柱破壞處兩側增厚 30cm 混凝土，並外包 12mm 之鋼板，且在鋼筋有挫屈之位置加設補強鋼筋，如此將能短暫提升橋柱之強度，以避免二次災害的發生，且亦可透過限制條件方式開放通行。

(4) 鋼橋柱挫屈部位緊急補強

鋼橋柱在受地震作用後如產生挫屈變形，將造成承载力嚴重不足，此時應立即架設臨時支撐，以降低橋柱之承载力，以避免餘震造成二次傷害。在架設支撐架後，可於挫屈部位焊接加勁材加固，如果挫屈變形相當嚴重，則可將損傷部位的鋼柱斷面切除，並用新鋼材進行替換，而新鋼材的連接宜採用焊接或高強度螺栓連接。

(5) 環氧樹脂灌注法

RC 結構物受到地震力的作用後，常常會造成混凝土裂縫或混凝土剝落的損傷情況，為了能快速有效的防止裂縫的擴大或造成滲水腐蝕的情形，可在震後立即採用環氧樹脂灌注工法進行修復補強，以預防鋼筋生銹使混凝土中性化，並使裂縫兩側分離混凝土面黏著復合，把疏鬆的混凝土重新黏結，以達加固效果。

(6) 添加補強加勁材或代替局部構件設置

鋼橋梁如有構件的局部損傷，如連接板產生裂痕、螺栓斷裂、斜撐構件挫屈等，可依據需求進行局部加勁或增設替代構件進行臨時性的緊急修復補強。在連接板或螺栓之損傷可藉由加勁板或增設接合板方式進行補強；如果為局部構件挫屈損傷，則可增設斜撐構件來補強原有受損之結構。

(7) 簡易防落設施

當帽梁支承座處或梁端產生嚴重裂縫或上部結構有位移產生，造成防落長度不足，而有落橋之疑慮時，可依據現場情況增補防落長度、加設止震塊或防震拉桿，以防止餘震造成落橋之二次災害發生。

(8) 路面修復

橋梁伸縮縫常因為各類型損傷造成上部結構產生位移導致間隙變大或高差之折角，此時宜採用覆工板進行路面修復；另外，在擋土牆後方之引道，也常因背填土沉陷或流失而造成嚴重凹陷，如有此現象亦應以碎石或瀝清進行回填，已確保道路得以安全通行。

最後針對震後橋梁損害應變策略，高公局內部已制訂「災害防救標準作業程序-橋梁災害應變處理程序」可供作業人員應變參考遵循，工務段應於平時即辦理橋梁震害防災準備工作，工務段平時應建妥各交流道間之「替代道路導引圖」，俾發生重大災害時，利用資訊可變標誌及透過廣播電台協助用路人改道行駛運用，「替代道路導引圖」之修正由。另外值得探討的應變課題為跨越斷層橋梁震害應變策略，藉由初步地質調查資料顯示，部分國道橋梁有跨越斷層之虞慮，因此本研究參考相關資訊正積極研擬此課題之應變策略。以九二一集集大地震為例，由於地震發生後公路系統因為橋梁破壞及道路破壞等因素而形成交通阻斷，在緊急救災的要求之下，必須針對各項救災相關人、車之通行，建立交通應變系統。一般交通應變措施的主要工作包括(1) 緊急搶通道路及研擬替代路線：在地震發生之後，負責搶修公路之單位，應按照公路災害事故處理程序作業手冊之規定，在時效內派出勘察受災狀況之勘

災人員，並迅速回報受災狀況；由受災狀況來判定搶修工作，並直接派遣工程隊及雇用當地之工程包商，馬上進行搶修工作。搶修目標在於達成可供小汽車通行為主。若無法在短期間內達成搶通之目標，則研擬替代路線。(2) 交通管制及可通行路線資訊：為確保救災之效率，對於受到交通阻斷之起迄點，必須盡快提供替代路線之資訊。此時，主要交通疏解工作在於迅速廣播呼籲民眾讓賑災車輛及救護車先行通過，各交通對外之可通行路線方面，應可按照災區之路網型態，將各級道路納入考慮，以便扮演重要的運輸路線之角色。

表 6 各構件相對於各損壞狀況之建議修復補強工法及修復補強後之橋梁管制建議

橋梁構件	損傷情況	緊急情況處置	建議緊急修復補強方案	緊急修復補強後 交通管制建議
上部結構	RC或PC梁產生0.5mm以上裂縫，且混凝土剝落	限制通車	環氧樹脂灌注	限制通車
	RC或PC梁支撐端產生裂縫破損、鋼筋(鋼腱)外露變形	禁止通行	臨時支撐固定並加設防落橋裝置	限制通車
	鋼副構件發生挫屈變形、破裂等明顯損傷	限制通車	添加補強加勁材	限制通車
	鋼橋之連結(續接)構材產生變形破損，螺栓鬆動或破壞	限制通車	添加補強加勁材或將受損構件銲接固定	限制通車
	鋼橋主構件發生挫屈變形破裂等明顯損傷	禁止通行	以臨時支撐加固、添加補強加勁材或加設局部構件	限制通車
	落橋或主梁斷裂	禁止通行	架設臨時橋梁	限制通車
	其它明顯損傷	限制通車	以臨時支撐加固	限制通車
支承及伸縮縫	支承(上部結構)位移、伸縮縫開離	限制通車	加設防落橋裝置、路面修復	維持通行
	其它明顯損傷	限制通車	上構以臨時支撐加固	限制通車
橋台	橋台牆身產生傾、位移或沉陷	限制通車	上構以臨時支撐加固	限制通車
	橋台牆身或翼牆混凝土產生裂縫、剝落或鋼外露	限制通車	上構以臨時支撐加固	維持通行
	橋台護坡產生大裂縫或局部側向移動導致背牆與背填土發生相	限制通車	鋪設鋼梁及覆工板或填土恢復交通	維持通行
	橋台因地盤沉陷、坍塌、液化產生嚴重變位、傾斜或結構體破	限制通車	上構以臨時支撐加固、加設防落橋裝置	限制通車
	其它明顯損傷	限制通車	上構以臨時支撐加固	限制通車
橋墩	RC或PC橋墩斜剪裂縫已貫穿混凝土造成混凝土局部剝落	禁止通行	上構以臨時支撐加固、環氧樹脂灌注工法、RC橋柱緊急加固補強工	限制通車
	RC帽梁混凝土裂縫、剝落	限制通車	上構以臨時支撐加固、環氧樹脂灌注工法	維持通行
	大規模混凝土剝落、底部鋼筋挫屈	禁止通行	上構以臨時支撐加固、環氧樹脂灌注工法、RC橋柱緊急加固補強工	限制通車
	鋼橋墩局部裂縫或挫屈	限制通車	上構以臨時支撐加固、鋼橋柱挫屈緊急補強工法	限制通車
	鋼橋墩鋼板嚴重凹陷、鼓震、縫及挫屈破斷	禁止通行	上構以臨時支撐加固、鋼橋柱挫屈緊急補強工法	限制通車
其它明顯損傷	限制通車	上構以臨時支撐加固	限制通車	
橋梁引道擋土牆	擋土牆牆身及基礎產生傾斜、位移或沉陷但無立即之危險	限制通車	上構以臨時支撐加固	維持通行
	擋土牆牆身混凝土裂縫或混凝土剝落鋼筋外露	限制通車	上構以臨時支撐加固、環氧樹脂灌注	維持通行
	擋土牆傾斜、坍塌、沉陷或結構體破壞嚴重	禁止通行	上構以臨時支撐加固	限制通車
	其它明顯損傷	限制通車	上構以臨時支撐加固	限制通車
基礎	基礎附近地盤產生液化或相對位移，造成基礎傾斜或位移	限制通車	上構以臨時支撐加固	限制通車
	垂直及側向載力不足	限制通車	上構以臨時支撐加固	限制通車
	其它明顯損傷	限制通車	上構以臨時支撐加固	限制通車
落橋或無法修復	產生落橋或損傷嚴重，無法透過支撐加固之式進行搶通	禁止通行	臨時橋梁設置	限制通車

結語

國道橋梁震後特別檢測工作為確保國道高速公路橋梁結構於震後受損或有受損之虞，致影響行車安全時，為了使交通衝擊減至最低，並維持震後交通生命線之通達必須採取的橋梁維護管理作為。本研究參考國外橋梁震後檢測作法，援引國內公路相關規範與養護手冊規定，來探討國道橋梁震後特別檢測作業現況，並提供國道橋梁震後特別檢測流程初步之研究建議，並就震後橋梁損害緊急補強工法與應變策略提出參考建議及後續研究方向。綜合而言，關於橋梁震後檢測工作，美國依照分級動員並提供給檢測人員較大之紀錄彈性，而日本在歷經幾次大地震後，對於橋梁震後檢測內容和項目要求則相對詳細和周全，可說美日各有利弊，因此，在彙編適合臺灣國道橋梁震後特別檢測流程和內容研究過程中，如何適當考量國內橋梁管養單位之動員能量並顧及應有的檢測品質和作業效率，是很值得探討的課題。初步研究建議之震後特別檢測流程(圖 5)，主要係參考高公局現行養護手冊內容，將現行特別巡查和特別檢測業務事項進行綜合，應能符合既有養護規範和手冊之要求，滿足橋梁震後特別檢測之目的，並可降低橋梁檢測人員業務執行上的負擔，期待能提高檢測效率和品質。另本研究目前提列的震後橋梁損害緊急補強工法與應變策略僅供初步參考，持續將針對跨越第一類活動斷層之國道橋梁研擬適合的防災策略，透過蒐集高公局各區工程處既有交維及替代道路等相關應變措施，重新審視合理性與可行性後，研擬應變策略架構和具體辦法。

參考資料

“Student Manual to Accompany Training Video on Post-earthquake Safety Evaluation of Bridges State of Washington”, 1996, Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc.

張荻薇、王炤烈，「震後橋梁之耐震診斷與震災復舊」，1999年，臺灣世曦股份有限公司。

「震後橋梁結構快速診斷手冊及補強手冊」，1999年，行政院公共工程委員會。

「臨時橋梁(含預警系統)施工技術手冊」，2004年，交通部科技顧問室。

「災時高效率及高經濟型橋梁補強及檢核技術之研發(震后橋梁補橋及檢核技術)」，2006年，交通部公路總局。

「道路震災對策便覽(震災復旧編)」，2006年，日本道路協會。

「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」，2008年，交通部。

「高速公路養護手冊」，2011年，交通部臺灣區國道高速公路局。

「公路養護手冊」，2012年，交通部公路總局。

「交通技術標準規範公路類公路工程公路養護規範」，2012年，交通部。

「道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き(案)」，2012年，日本東北地方整備局道路部。

「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範(草案)」，2012年，交通部臺灣區國道高速公路局。

Jerpme S., O'Connor and Sreenivas Alampalli, “Post-Earthquake Bridge Inspection Guidelines for New York State”, 2012, Technical Report MCEER-12-0003.

“Post-Earthquake Investigation Team (POQIT) Manual”, 2013, California Department of Transportation (Caltrans).

國道橋梁震損評估及其應用

葉錦勳、林祺皓、黃季暉、劉季宇、楊承道

國道高速公路為台灣地區主要的交通與經濟命脈，為確保用路人的安全與減低交通中斷引致的社會和經濟衝擊，主管機關需定期施行道路養護，並維持高速公路橋梁的耐震性能。本研究簡介由國家地震工程研究中心所研發之公路橋梁地震損失評估模式及其應用。為確保震損評估結果具實務應用價值，本文以九二一地震事件為例，以當時有較完整紀錄的損害公路橋梁為探討的標的，將震損評估結果與實際災情調查、修復費用和時間等相互比較，藉以驗證各項評估結果與實際調查值在容許的誤差範圍內。其次，以大甲斷層和彰化斷層破裂引致的大規模地震事件為例，說明橋梁震損評估結果的輸出資料與未來可能的應用領域，譬如地震早期損失評估可協助震後災情研判和提升應變效率；震後路網服務效能分析可作為主管機關擬訂防災規劃的參考。

前言

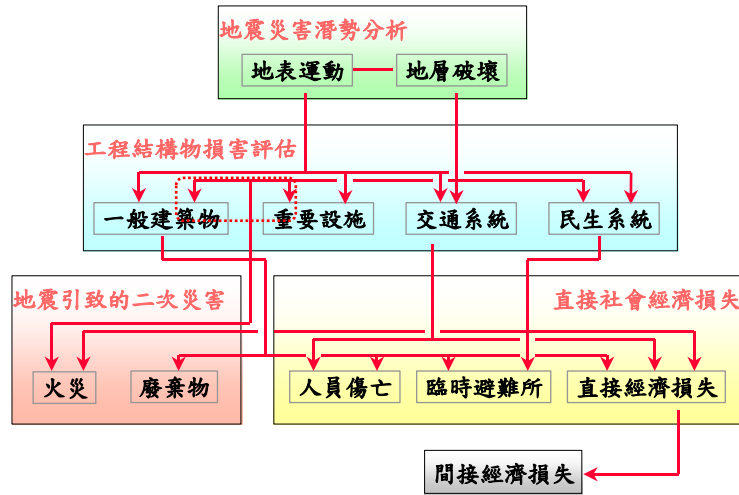
財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心近十多年來持續研發「台灣地震損失評估系統(TELES)」，提供各種地震災情推估、災情彙整及應變決策支援等相關的資訊服務，提升各級政府與民間企業關於震災風險評估與應變管理的能力(葉錦勳，2003；葉錦勳，2009)。TELES 的分析模組和流程架構可參考圖 1，大致包含地震災害潛勢分析、工程結構物損害評估、二次災害評估和社會經濟影響評估等；其中工程結構物又可細分為一般建築物、重要設施、交通與民生系統等。根據使用者的需求和評估對象的不同，開發分析參數與資料庫均可客製化的多個獨立的子系統，並已應用於財團法人住宅地震保險基金、內政部消防署、經濟部水利署、臺北市自來水事業處(施邦築等，2006)、交通部公路總局、臺灣鐵路管理局…等單位的委託研究計畫。探討主題包含進行單一地震境況模擬，作為防災規劃的依據(劉季宇等，2010；劉季宇等，2011；葉錦勳等，2013)；結合中央氣象局地震速報系統，開發早期損失評估技術，藉以啟動應變作業和協助災情研判(劉季宇等，2010；劉季宇等，2011；劉季宇等，2013)；以及整合台灣地區震源機率模型，進行機率式風險評估，作為住宅地震保險費率訂定(葉錦勳等，2010；葉錦勳等，2011；葉錦勳等，2012)和橋梁耐震補強排序的參考(公路總局，2008；中興工程，2013)…等。

民國 91 年曾協助林同棧工程顧問公司執行交通部高速公路局委託的「國道通車路段之橋梁的耐震分析與補強的經濟效益評估研究」，乃 TELES 第一次參與公路橋梁的震損評估，並初步整合震源機率模型，計算個別橋梁於耐震補強前後的年平均損失，作為推估直接經濟效益的依據。當時採用的震損評估模式主要係參考美國所研發的地震損失評估系統 HAZUS 99。首先進行典型橋梁分類，並依據個別橋梁的幾何特性、車行方向與橋柱帽梁的歪斜角、地盤種類等，調整震動與位移易損性曲線中值。台灣地區多數橋梁屬梁式橋，可依跨數、橋柱型式、上部結構連續性等概分為 7 大類，並將其它類型橋梁(如拱橋、吊橋、斜張橋等)歸為特殊橋梁。每一大類又依耐震設計年份，區分為傳統設計或經耐震設計等兩類。為擬訂合理的易損性曲線參數，該計畫也針對每一類別的橋梁進行側推分析，藉以擬訂超越不同損害狀態的易損性曲線的中值和變異數。

民國 94 至 96 年間協助台灣世曦工程顧問公司執行交通部公路總局(葉錦勳，2008)委託的「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」，探討對象為約兩千四百座的省道公路橋梁。有鑑於省道公路橋梁的設計、建造年代差異頗大，為較真實反映不同設計地震力之橋梁

的耐震能力，在擬訂各類典型橋梁的易損性曲線參數和調整個別橋梁的易損性曲線中值時，增加不同年份和震區劃分之等值設計地表加速度的設定。換言之，在擬訂典型橋梁的易損性曲線參數時，須先依其設計地表加速度值正規化至 0.23g 再取平均；反之，個別橋梁依其設計地表加速度值與 0.23g 的比值，調整其易損性曲線的中值。其次，為反映長橋與短橋在承受相同地震災害潛勢時的損害機率、修復費用和修復時間的差異，該計畫首度提出橋梁基本評估單元的概念，並依基本評估單元數修正橋梁整體的損害狀態機率和阻斷機率等，也依據結構系統修復費用微調修復所需時間。

圖 1 台灣地震損失評估系統之分析模組和分析流程



民國 100 年協助中興工程顧問公司(中興工程，2013)執行臺灣鐵路管理局委託的「環島鐵路整體系統安全提昇計畫(全線橋梁總檢查及耐震補強延壽規劃)」，有鑑於臺灣鐵路管理局所管轄與營運的鐵道屬封閉的系統，一旦路線上之橋梁損害須限速或中斷時，勢必影響鄰近和南北兩端之間的運輸。為合理推估修復費用、修復時間和營運中斷損失，以九二一地震和歷年颱風(莫拉克、芭瑪)事件引致橋梁損害為案例，先進行各項結構系統易損性、修復費用與修復時間之評估模式的參數校正；並以各主要幹線上之車站與車站相互間的單日營收矩陣為基礎，運用個別橋梁之震損評估結果(包含損害狀態機率、阻斷機率和平均阻斷時間)，綜合計算各車站和車站間(包含數個路段或數座橋梁)的阻斷機率和平均阻斷時間，進而合理推估整條鐵路幹線之營運中斷損失。

本文所採用的震損評估模式於本質上乃累積前述幾項大型委託計畫的研究成果，但受限於篇幅僅能擇要說明，將重點擺在新近研發的評估模式和參數校正，藉以提升各項評估結果的合理性和可靠度。

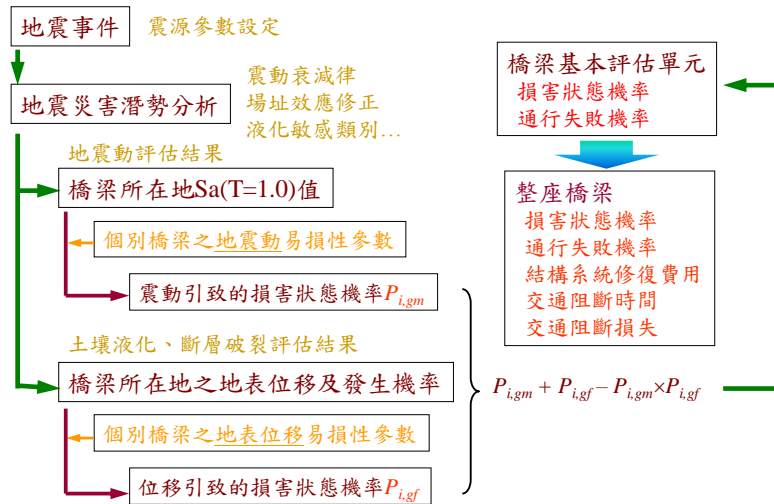
橋梁震損評估模式

TELES 目前採用的公路橋梁震損評估模式和分析流程示意圖可參考圖 2 所示。由於後續進行機率式地震風險評估時(葉錦勳等，2007)，乃以眾多推測地震事件之境況模擬結果為基礎，結合研究區域附近之震源機率模型，計算個別推測地震事件的年發生率並建置地震事件損失資料表，進而依機率和統計的理論計算年平均損失和損失年超越機率曲線等。因此，橋梁震損評估模式扮演重要角色。

為進行以境況模擬為基礎的地震風險評估，須將研究區域附近各種可能的震源和未來可能

發生的地震事件予以離散化，擬訂一組具代表性的推測地震事件。為有效進行批次境況模擬，推測地震事件的數量和震源參數設定必須考量風險暴露和潛在震源的特性與分佈(葉錦勳等，2010)。震源參數設定除地震規模、震央位置和震源深度外，須設定斷層線的走向和破裂長度；如為已知的活動斷層震源，尚須設定斷層破裂面的寬度和傾角等。通常依據地震規模和與斷層破裂面(或線)的最短距離，以及各地區的土壤性質，亦即震動衰減律和場址效應修正模式，計算各地區的震動強度。震動強度可以地表最大加速度或結構譜加速度來衡量。因結構系統損害須由其在地震作用下的反應大小來衡量；因此，橋梁震損評估模式中的易損性曲線宜以一秒週期的譜加速度作為評估參數。

圖 2 橋梁震損評估流程示意圖



地震引致的災害潛勢除地震動外，尚有地表的變形，如土壤液化、山崩和斷層破裂等引致的沉陷、側移或斷裂現象。為評估橋址所在地之土壤液化機率和可能引致的震陷量，可依照橋址附近之工程鑽孔資料判識其土壤液化敏感類別(葉錦勳，2003)。根據 NCEER 修正 Seed 法，配合 Iwasaki 所提土壤液化潛能指數和 Ishihara 的震陷量推估模式，葉錦勳(2003)已研擬，以地震規模、地表最大加速度和地下水位深度作為參數，各土壤液化敏感類別的液化潛能指數和震陷量推估式。

由九二一地震的勘災經驗可知：多數落橋或嚴重損害的橋梁乃座落於斷層破裂帶或其上盤；因此，如何描述破裂斷層兩側的地表變形，尤其是破裂面已出露地表時的情況，甚為重要。根據 Wells and Coppersmith (1994)的研究成果，假設已根據地震規模和斷層型態(正斷層、逆斷層或平移斷層)，推估斷層破裂時兩側的最大滑移量為 D ，葉錦勳等(2005)提出因斷層破裂引致地表永久位移 PGD 的推估式

$$PGD = \begin{cases} p \cdot f_H \cdot D \cdot \exp\left[-\frac{d}{d_{sr} \cdot f_H}\right] & \text{位於上盤} \\ p \cdot f_F \cdot D \cdot \exp\left[-\frac{d}{d_{sr} \cdot f_F}\right] & \text{位於下盤} \end{cases} \quad (1)$$

其中 f_H 和 f_F 分別為位於上盤、下盤的地表永久位移的調整係數，可表為 $f_F = |\alpha|/180$ ， $f_H = 1 - f_F$ ， α 為斷層破裂面的傾角； d_{sr} 為孕震帶頂部至地表的深度， D 為斷層兩側的最大滑移量， d 為場址到斷層破裂面的最短距離； D 、 d_{sr} 和 d 的單位均為公尺。在葉錦勳等(2005)研究報告中，式(1)的 p 乃反映地表破裂現象並非均勻或連續的，結構物恰好座落在地表破裂線上的機率；同時，因上、下盤所用指數函數的係數不同，可以反映地表永久位移量在上盤和下盤的衰減速率不同。

本研究為更真實描述斷層破裂現象和其對橋梁結構的影響，作以下修改：假設在斷層破裂面兩側 10 公尺以內的永久位移量均為 D ；因此，如橋梁有跨越斷層線的疑慮時，其可能承受的最大永久位移量即為 D 。當橋址到斷層破裂面的最短距離 d 大於 10 公尺時，以下式推估永久位移量 PGD

$$PGD = \begin{cases} \frac{1000}{d_{sr}} \cdot f_H \cdot D \cdot \exp\left[-\frac{d}{d_{sr} \cdot f_H}\right] & \text{位於上盤} \\ \frac{1000}{d_{sr}} \cdot f_F \cdot D \cdot \exp\left[-\frac{d}{d_{sr} \cdot f_F}\right] & \text{位於下盤} \end{cases} \quad (2)$$

d_{sr} 一般在兩公里到五公里之間，因此，在斷層破裂面上和其兩側地表的PGD有劇烈的變化。利用式(2)的PGD推估值代入位移易損性曲線公式，可得當位移為PGD時的損害狀態機率。為考慮地表破裂現象並非均勻或連續的，假設結構物恰好座落在地表破裂線上的機率 p 與場址到斷層破裂面的最短距離 d 有關，並可表為下式

$$p = 0.7 \cdot \exp\left[\frac{-d}{2000}\right] \quad (3)$$

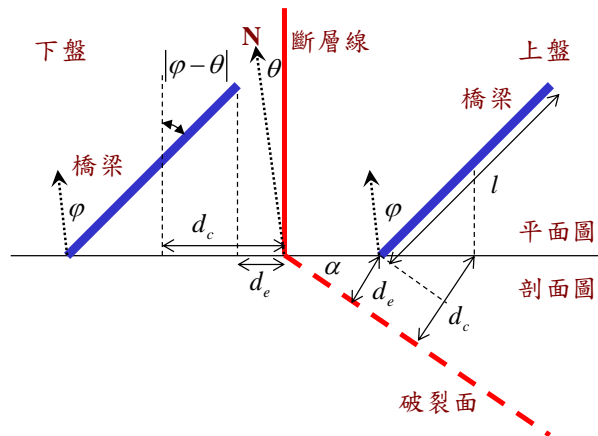
其中 d 的單位為公尺。式(3)中的 0.7 主要在反映斷層線(面)位置的不確定性。結構物因斷層破裂引致超越不同損害狀態的機率須乘以 p 。

以往在計算橋梁受斷層破裂影響而損害時，僅以橋梁中心點為代表，推估其到斷層破裂面的最短距離 d_c ，以之代入式(1)或式(2)逕行計算橋梁可能遭受的永久位移量。由於國道高速公路橋梁多數長度頗大，僅以橋梁中心點的永久位移量恐無法精確反映其它部位受損的嚴重程度。為克服前述缺失，本研究利用橋頭和橋尾座標定出橋梁主要方位角 φ ，配合斷層走向 θ ，可得其夾角 $|\varphi - \theta|$ 。參考圖 3，假設橋梁中心點與破裂面的最短距離 d_c 已計算出來，則根據橋梁長度 l 、橋梁與斷層線的夾角 $|\varphi - \theta|$ 和斷層破裂面的傾角 α ，橋梁端點距斷層破裂面的最短距離 d_e 可以下式推估

$$d_e = \begin{cases} \max(0, d_c - 0.5 \cdot l \cdot \sin|\varphi - \theta| \cdot \sin\alpha) & \text{位於上盤} \\ \max(0, d_c - 0.5 \cdot l \cdot \sin|\varphi - \theta|) & \text{位於下盤} \end{cases} \quad (4)$$

如 d_e 小於 10 公尺，表示該橋梁有部分可能跨越斷層，其永久位移量為 D 。以 d_e 代入式(2)和式(3)可較精確地推估橋梁因斷層破裂引致永久位移的損害機率。

圖 3 橋梁與地表斷層線及斷層破裂面之相對位置示意圖



參考 HAZUS 99 技術手冊，橋梁的震損評估模式將損害狀態概分為無損害(D_1)、輕微損害(D_2)，中度損害(D_3)，嚴重損害(D_4)和完全損害(D_5)等五級。除此之外，為反映長橋和短橋在相同地震災害潛勢作用下的損害機率、修復費用和時間的差異，本研究假設整座橋梁乃由數個基本評估單元組成，且典型橋梁分類的易損性曲線參數皆針對一個基本評估單元來進行擬訂。連續橋梁以振動單元作為基本評估單元；簡支橋梁如無橋面版相關資訊，可假設三跨為一基本評估單元。參考圖 2，在推測地震事件作用下，可獲得橋址之災害潛勢，包含地表震動強度與地表永久位移量；其中地表震動強度以一秒週期的結構譜加速度來衡量，永久位移量和發生機率則分別依土壤液化和斷層破裂有不同的推估模式。先綜合考慮各種永久位移引致的損害狀態機率後，再與震動引致的損害狀態機率進行聯集。經由典型橋梁分類之易損性曲線參數和個別橋梁之調整係數(如 HAZUS 99 所提的 K_{3D} 、 K_{skew} 等)的計算，吾人可獲得個別橋梁之基本評估單元超越不同損害狀態的機率，分別為 \bar{F}_k ， $k = 2 \sim 5$ 。該基本評估單元為

輕微、中度、嚴重和完全損害的損害狀態機率分別為 $\bar{p}_k = \bar{F}_k - \bar{F}_{k+1}$, $k = 2 \sim 4$ 和 $\bar{p}_5 = \bar{F}_5$ 。

假設整座橋梁的基本評估單元數為 n ，其超越不同損害狀態的機率可表為 $F_k = 1 - (1 - \bar{F}_k)^q$ ，其中 q 值應隨各基本評估單元在地震時的相關性而定。若假設各基本評估單元的反應完全獨立，則 $q = n$ ；若各基本評估單元完全相依，亦即所有基本評估單元均遭受相同的損害，則 $q = 1$ 。實際情況應介於兩種極端之間，既非獨立亦非相依；因此，本研究假設 $q = \sqrt[3]{n/3}$ 且其值介於0.7和2之間，避免 q 值過大或過小造成不合理的現象。整座橋梁處於不同損害狀態的機率分別為 $p_k = F_k - F_{k+1}$ ($k = 2 \sim 4$)、 $p_5 = F_5$ 。

不同典型橋梁分類之單位橋面版面積的重建成本不同，須包含構件損害時的拆除或臨時便道的費用。一般而言，連續橋梁較簡支橋梁貴，特殊橋梁又比連續橋梁貴；深基礎橋梁較淺基礎橋梁的重建成本大。本研究依據以往橋梁因地震或颱風損害的修復費用，擬訂各典型橋梁分類之基本評估單元在不同損害狀態下的損失比 \bar{r}_k ($k = 2 \sim 5$)，其中損失比為修復所需費用與重建成本的比值。本研究假設經耐震設計橋梁的基礎，當僅上部結構完全損害時毋須拆除重建，因此，設定完全損害時的損失比為0.7。根據九二一地震和其它地震、颱風災害的勘災報告，在大多數情況下，處於完全損害或嚴重損害的跨數僅佔總跨數之一部分。考量同一事件中，不同損害程度的發生機率不同；且根據經驗判斷，設定不同損害狀態之基本評估單元數的上限值。本研究將地震引致橋梁修復費用表為

$$L_{str} = C \left\{ \min\left(1, \frac{9}{n}\right) \bar{p}_2 \bar{r}_2 + \min\left(1, \frac{7}{n}\right) \bar{p}_3 \bar{r}_3 + \min\left(1, \frac{5}{n}\right) \bar{p}_4 \bar{r}_4 + \min\left(1, \frac{3}{n}\right) \bar{p}_5 \bar{r}_5 \right\}$$

其中 C 為整座橋梁的重建成本， n 為基本評估單元數。換言之，無論橋梁多長，最多僅有三個基本評估單元處於完全損害，最多僅有五個基本評估單元處於嚴重損害，其餘依此類推；短橋的修復費用則回歸一般的推估模式。

國道路段阻斷損失推估模式

台灣地區國道高速公路採封閉系統方式建置，出入高速公路均須經由匝道(交流道)。匝道與匝道間如有任一區間因故封閉，則該匝道與匝道間的路段即無法使用；此時將影響周圍交通的通暢，增加旅行時間和行車距離。所增加的旅行時間和行車距離可轉換為經濟損失的金額，在此稱為阻斷損失。為評估高速公路局委託研究計畫「高速公路橋梁耐震補強後續路段評估與研究」之國道因橋梁損害而引致的阻斷損失，本研究將其依匝道和系統交流道劃分為88個路段。每一路段內可能包含一座或兩座以上的橋梁；在此假設任一座橋梁阻斷時，即影響整個路段的交通。其次，在大規模地震作用下，阻斷的路段常超過兩個以上；為簡化分析模式，暫時不考慮其相互間的影響。基於以上假設，可將問題的癥結點縮小到計算單一路段在推測地震事件下的平均阻斷損失。

首先推估個別橋梁的阻斷機率和阻斷時間，再進一步推估整體路段的阻斷機率和阻斷時間。在輕微損害下，車輛大多仍可通行；在中度損害下，有時因安全考量需封閉橋梁；在嚴重或完全損害下，橋柱可能已達降伏、橋面版可能斷裂或發生落橋現象等，橋梁阻斷機率極大。綜合考量各種損害狀態的定義和不確定性，假設在輕微、中度、嚴重和完全損害狀態下，橋梁基本評估單元的阻斷機率 \bar{f}_k , $k = 2 \sim 5$ ，分別為0.01、0.2、0.8和1.0。配合個別橋梁之基本評估單元的損害狀態機率 \bar{p}_k ，則基本評估單元的阻斷機率可表為 $\bar{p}_f = \sum_{k=2}^5 (\bar{f}_k \cdot \bar{p}_k)$ 。與整座橋梁之損害狀態機率的推估模式類似，整座橋梁的阻斷機率則可表為 $p_f = 1 - (1 - \bar{p}_f)^q$ ，其中 $q = \sqrt[3]{n/3}$ 且其值介於0.7和2之間， n 為基本評估單元數。

整座橋梁修復所需時間須包含其個別損害構件的修復時間。由於修復所投注的人力、機具和施工條件、順序等無法精確掌握，本研究假設在人力和機具充足的條件下，整座橋梁的各部分損害構件可平行修復；因此整座橋梁與單一基本評估單元的修復時間差異不大。其次，為考量整體橋梁修復工作量的差異，平均修復所需時間依修復費用微調，亦即 $T_{restor} = d \cdot$

$\sum_{k=2}^5(p_k \cdot t_k)$ ，其中 p_k 、 t_k 分別為橋梁損害狀態機率和修復所需時間； $d = (L_{str}/L_{ref})^{1/4}$ 為修復時間的調整係數，令 d 介於 0.5 和 1.5 之間； L_{ref} 為調整係數 d 之修復費用參考基準值，可依養護的權責單位和橋梁重要性而定，目前公路總局橋梁設為兩千萬元，高速公路局橋梁設為五千萬元。在已知橋梁損害的情況下，其平均修復時間 T_f 為 T_{restor} 除以損害的機率，亦即 $T_f = T_{restor} / \sum_{k=2}^5 p_k$ 。綜合言之，個別橋梁的平均阻斷時間以下式推估

$$T = p_f \cdot T_f$$

其中， p_f 和 T_f 分別為橋梁阻斷機率和已知損害條件下的修復時間。

假設單一路段包含兩座以上橋梁，該路段的通行機率為每一座橋梁皆可通行的機率；進一步假設個別橋梁的通行或阻斷乃互相獨立的事件，則該路段的阻斷機率 \hat{p}_f 可表為 $\hat{p}_f = 1 - \prod_j(1 - p_f^j)$ 。參考中興工程(2013)執行臺灣鐵路管理局委託研究計畫的推估模式，單一路段的平均阻斷時間 \hat{T} 為 \hat{T}_1 和 \hat{T}_2 兩推估式之較大值，其中 \hat{T}_1 和 \hat{T}_2 分別表為

$$\hat{T}_1 = \hat{p}_f \cdot \hat{T}_f$$

$$\hat{T}_2 = \max(p_f^j \cdot T_f^j, \forall j)$$

其中 \hat{p}_f 為路段的阻斷機率； \hat{T}_f 代表已知該路段阻斷時的平均阻斷時間，以下式推估

$$\hat{T}_f = \frac{\sum_j(p_f^j \cdot T_f^j)}{\sum_j p_f^j}$$

一般而言，如果路段內每一座橋梁的阻斷時間約略相等，以 \hat{T}_1 的推估結果較合理；反之，如有個別橋梁的阻斷時間特別長，則以 \hat{T}_2 推估結果較佳。

橋梁震損評估模式之合理性驗證

為使橋梁震損評估結果的各項數據能落實應用於實務上，震損評估模式和其所使用的參數值必須經過校正和驗證的程序，確保震損評估結果能合理地預測各種推測地震事件所造成的橋梁損害狀態、修復金額和修復時間等，更進一步方能合理地推估整體交通系統的震後服務效能和對社會、經濟的衝擊。台灣地區近年來災情最嚴重、紀錄最完整的地震事件為民國八十八年所發生的九二一地震，震央在南投縣集集鎮，芮氏規模達 7.3，造成震源附近多座橋梁毀損；因此，本文回顧當時具代表性之公路橋梁的損害案例，藉以校正各項評估模式所使用的參數值。

九二一地震發生時，國道高速公路已通車路段都位於車籠埔斷層下盤，受斷層破裂影響較小；僅部分近斷層、施工中的橋梁有程度不一的損害情況，因此無法作為橋梁震損評估模式和參數值的校正與驗證之用。本研究共整理 26 座於九二一地震時較具有代表性的損害公路橋梁，其中 16 座橋梁屬交通部公路總局管轄(參考表 1)，另有 10 座屬縣市管轄的橋梁(參考表 2)。於勘災調查報告中，大多僅能得知橋梁的損害描述、損害部位的照片或搶通過程等定性的描述，但欠缺修復或重建工程所需金額、搶通或修復所需時間等量化的數據。因此，本文僅就可收集到的資訊進行震損評估結果與實際災情比較。

前述 26 座損害的公路橋梁多數已進行耐震補強或拆除重建，其橋柱結構型式、橋面版尺寸、所屬典型橋梁類別等已改變。進行橋梁震損評估時，須以當時橋梁的結構和幾何屬性資料為基礎，還原九二一地震時的橋梁耐震能力。其次，由表 1 和表 2 可知，屬完全損害或嚴重損害的橋梁多位於車籠埔斷層附近或其上盤；因此，另外蒐集九二一地震後實際測量所得的斷層線圖資，藉以降低橋梁震損評估模式所需輸入之災害潛勢(尤其針對斷層破裂引致之地表變形推估)的模擬誤差。以下逐一針對橋梁損害狀態、修復時間和修復金額等，分別比較震損評估結果和實際災情紀錄的差異。

表 1 和表 2 中，實際橋梁損害狀態的判定標準乃依據震後結構系統的損害程度和通阻與否。如有橋柱斷裂或落橋現象，一律視為完全損害；需封橋無法即時修復通行者，視為嚴重損害；經緊急搶修後便可開放通行者，視為中度損害；有損害但不影響行車安全者，則視為輕微損害。震損評估結果的損害狀態乃依據評估所得的損害狀態機率，如完全損害的機率大於 0.5 視為完全損害；如超越嚴重損害的機率大於 0.5 但完全損害的機率小於 0.5，則視為嚴重損害；如超越中度損害的機率大於 0.5 但超越嚴重損害的機率小於 0.5，則視為中度損害；輕微損害依此類推。即使評估結果屬同一損害狀態，其推估所得的修復費用和重建成本的比值、阻斷機率、修復時間…等仍有極大的差異性。無論實際或評估的損害狀態皆屬橋梁損害程度的定性描述，如其差異在一個級距之內應可被接受。

表 1 比較公路總局管轄橋梁的實際損害狀態與評估結果，其中有 9 座橋梁的評估結果和實際情況一致，有 5 座橋梁低估損害狀態，有 2 座橋梁高估損害狀態。除集鹿大橋外，損害狀態的推估值和實際值都僅差一個級距。探究其原因可能為九二一地震當時集鹿大橋尚在興建中。集鹿大橋之主橋為二跨連續的斜張橋，屬特殊橋梁類別；因尚未完工，可能部分混凝土未達預期強度或鋼索張力尚未妥適調整等，導致地震時橋面版產生側向位移、支承毀損、橋塔混凝土開裂剝落、部分鋼索斷裂等損害情況。表 2 比較縣市管轄橋梁的實際損害狀態與評估結果，其中有 4 座橋梁的評估結果和實際情況一致，有 6 座橋梁低估損害狀態，並無高估損害的案例。除廣德橋外，損害狀態的推估值和實際值都僅差一個級距。探究其原因，廣德橋座落於斷層上盤，屬兩跨、單柱、簡支的梁式橋梁；唯一的橋柱立於彎曲河道，且周圍砂質土壤有部份砂湧現象掏空基礎。經研判其受地表變形而完全損害的機率頗高，如提高其所在地的液化敏感類別，可使評估結果與實際值較接近。

如表 3 所示，綜合比較公路總局和縣市政府管轄橋梁的損害狀態推估結果，其中半數(13 座)橋梁的評估結果與實際情況一致，其餘有 11 座低估、2 座高估損害狀態。除前述集鹿大橋和廣德橋外，評估結果與實際值的差異皆在一個級距之內，因此，評估結果應可反應橋梁的損害程度和分佈，具有參考價值。

公路總局管轄的橋梁有較完整的九二一地震勘災調查、研究報告和復建工程紀錄等文獻；縣市政府管轄的橋梁則較難尋獲相關資料。這些文獻多半以記錄橋梁損害情況、研究橋梁的損害原因為主，有助於研判橋梁的實際損害程度；至於橋梁復建工程的回顧，通常無法獲得詳細的修復時間和修復金額等資料。本文僅針對公路總局管轄橋梁進行修復金額和修復時間之評估結果與實際值的比較；其中集鹿大橋因九二一地震時尚未完工，其修復工程與後續的新建工程一併施作，難以分辨實際修復所需天數，因此不列入表中；磨坑一號橋和磨坑二號橋則查無實際修復金額和修復時間可供比較。

表 4 比較公路總局管轄橋梁於九二一地震後之實際修復金額與評估結果，其中，「原始推估結果」欄位的數值乃依據橋梁原始的結構型式和橋面版面積推估，「面積修正推估結果」欄位的數值則考慮重建後橋梁的尺寸可能改變，將「原始推估結果」的數值依橋面版面積比例調整。由於橋梁是否全部拆除重建、或僅修復損害的部分，主關機關可依實務需求決定且須考慮的因素眾多，並非純粹由震損評估模式可精確推估。以一江橋為例，重建後的橋面版面積為原橋的 2.73 倍；因此，如欲比較評估結果與實際修復費用，應將原始推估值乘以 2.73 倍較合理。再者，以東豐橋為例，雖未達全橋須拆除重建的損害程度，但顧及行車安全和修復費用比率過高等因素，主管機關決定在不影響交通的情況下，除緊急補強外，全橋分兩期拆除重建；因此，推估的修復金額未能反映全橋拆除重建的結果。若以實際修復金額的 0.5 倍至 2 倍範圍作為判斷評估結果的可信度，一江橋、桶頭橋、石圍橋、名竹大橋、烏溪橋和炎峰橋等嚴重或完全損害橋梁的評估結果大多在合理的範圍內。一般而言，修復費用之推估值乃基於損害狀態機率的推估結果，如果損害狀態可合理推估，則修復費用的推估值與實際

金額差異不大；否則，如高估或低估損害狀態也會連帶高估或低估修復費用。其次，越輕微的損害，其評估結果的變異性越大。譬如乾峰橋和信義橋的損害狀態同為中度損害，但損害評估結果的修復費用差異較大。

表 5 比較公路總局管轄橋梁於九二一地震後之實際修復天數和推估結果。表中「實際修復時間」為橋梁修復工程契約的工期(以日曆天計)，並非地震後至修復通車的時間。推估修復時間乃依據橋梁損害狀態機率的評估結果；因此，若高估或低估損害狀態，則也會連帶高估或低估修復時間。當橋梁超越輕微損害的機率小於 0.25 時，將視為無損害，其推估的修復金額和阻斷時間皆設為零。貓羅溪橋、光明橋和新溪南橋因推估的損害機率較小，並未列於表 4 和表 5 中。若以實際修復時間的 0.5 倍至 2 倍範圍作為辨識推估結果是否合理的標準，則差異超出此範圍的有東豐橋、乾峰橋和信義橋。原始的東豐橋於民國 51 年竣工，於民國 77 年完成拓寬工程；九二一地震後因損害嚴重且有落橋危險，已全部拆除重建。為不影響車流，採用半半施工法分兩階段重建，重建完工後改名為東勢大橋。第一階段先加固下游側舊橋，維持該部分橋面通車，並拆除重建上游側橋梁；第二階段利用新建完成之上游側新橋通車，再拆除重建下游側橋梁。因此，重建工期約為一般橋梁新建工程的 2 倍。乾峰橋和信義橋雖為中度損害，但其損害情況僅需簡易的修復工程即可，因此修復時間較短。

橋梁震損評估模式僅根據簡化的橋梁類別、幾何特性、地質條件和空間位置等資訊，但因依循合理的地震災害潛勢和橋梁耐震能力推估模式，以九二一地震進行案例分析可發現：個別橋梁的推估結果和實際損害狀態、修復金額、修復時間等雖有差異，但都在合理的誤差範圍內；因此，足以驗證本文所提橋梁震損評估模式和參數值的合理性。

表 1 公路總局管轄橋梁於九二一地震時之實際損害情況與評估結果比較

橋名	竣工年	結構類別	路線	管轄單位	與斷層關係	震度	損害狀態	評估結果
一江橋	61	4C	129 線	二區	跨斷層	6	完全	完全
桶頭橋	69	2C	149 線	二區	跨斷層	7	完全	完全
石圍橋	83	2C	台 3 線	二區	跨斷層	7	完全	完全
名竹大橋	79	2C	台 3 線	二區	跨斷層	7	完全	完全
延平橋	75	4C	台 3 線	二區	跨斷層	7	嚴重	完全
東豐橋 ¹	51	2C	台 3 線	二區	上盤	7	嚴重	嚴重
烏溪橋	50	2C	台 3 線	二區	跨斷層	7	完全	完全
炎峰橋	73	3C	台 14 線	二區	上盤	7	嚴重	嚴重
集鹿大橋 ²	91	8S	139 線	二區	上盤	7	嚴重	輕微
乾峰橋 ³	75	4C	136 線	二區	上盤	7	中度	嚴重
信義橋	70	2C	台 21 線	二區	上盤	6	中度	中度
磨坑一號橋	87	1S	台 16 線	二區	上盤	7	輕微	輕微
磨坑二號橋	85	1C	台 16 線	二區	上盤	7	中度	輕微
貓羅溪橋	88	6S	台 3 線	二區	下盤	5	輕微	無
光明橋 ⁴	53	8C	台 8 線	二區	上盤	6	輕微	無
新溪南橋	86	6S	127 線	二區	下盤	6	輕微	無

1. 重建後改名東勢大橋

2. 當時施工中

3. 目前已重建

4. 目前未通車

表 2 縣市政府管轄橋梁於九二一地震時之實際損害情況與評估結果比較

橋名	竣工年	結構類別	路線	管轄單位	與斷層關係	震度	損害程度	評估結果
龍門大橋	71	2C	投 53 線	南投	下盤	7	完全	嚴重
鯉魚大橋	77	2C	投 53 線	南投	下盤	7	嚴重	中度
廣德橋	66	2C	東山路二段	臺中	上盤	7	完全	中度
北坑橋	48	1C	中 129 線	臺中	跨斷層	6	嚴重	中度
大峰橋	82	3C	中 105 線	臺中	下盤	7	輕微	輕微
長庚大橋	76	2C	中 44-1 線	台中	跨斷層	7	完全	完全
普濟橋	68	4C	投 27	南投	上盤	6	輕微	輕微
平林橋	58	2C	投 19 線	南投	上盤	7	完全	嚴重
埤豐橋	80	2C	中 44 線 后東路	臺中	跨斷層	6	完全	完全
光龍橋	74	2C	129 線	臺中	上盤	6	嚴重	中度

表 3 公路橋梁於九二一地震時之實際損害數量與評估結果比較

損害狀態	完全	嚴重	中度	輕微	無	小計
實際數量	10	7	3	6	0	26
評估結果	8	5	5	5	3	26

表 4 公路總局管轄橋梁於九二一地震後之實際修復金額與評估結果比較

橋名	原始結構類別	修復後類別	實際修復金額	原始推估結果	修復前後面積比值	面積修正推估結果
一江橋	4C	3S	118.9	23.7	2.73	64.7
桶頭橋	2C	6S	103.5	46.1	1.83	84.5
石圍橋	2C	3S	71.0	55.2	1.29	71.3
名竹大橋	2C	6R	120.9	147.2	1.00	147.2
延平橋	4C	4C	16.0	38.6	1.00	38.6
東豐橋	2C	6S	425.0	170.9	1.00	170.9
烏溪橋	2C	7S	317.0	294.1	1.02	298.9
炎峰橋	3C	3R	133.4	125.7	1.00	125.7
乾峰橋	4C	4R	3.0	24.9	1.74	43.5
信義橋	2C	2R	2.1	23.7	1.20	28.5
磨坑一號橋	1S	1S		1.5	1.00	1.5
磨坑二號橋	1C	1C		3.7	1.00	3.7

單位：百萬元

表 5 公路總局管轄橋梁於九二一地震後之實際修復時間與評估結果比較

橋名	實際修復時間	推估修復時間	施工期間	工程內容
一江橋	191	180	2000/11/8~2001/5/8	全部原地重建，橋長 217 公尺，橋面寬 20 公尺
桶頭橋	269	231	2000/4/2~2000/12/27	全部原地重建，全長 220 公尺，主跨 70 公尺，寬度增加為 12 公尺
石圍橋	297	240	2000/2/21~2000/12/14	全部原地重建，總長 97 公尺，橋寬 24 公尺
名竹大橋	250	333	2000/3/30~2000/12/5	部分修復重建。橋梁修復長度 232.5 公尺，淨寬 18 公尺
延平橋	149	238	2000/4/15~2000/9/11	修復工程。修復 2 跨橋面、3 橋墩、1 橋台
東豐橋	659	196	2000/6/30~2002/4/20	採半半施工法分階段全部重建。總長 564.6 公尺，橋寬 30 公尺
烏溪橋	333	331	2000/4/16~2001/3/15	上部結構全部拆除重建，下部結構局部重建。上部結構，採用多跨連續 I 型鋼梁及鋼浪板系統，橋寬 26 公尺，長 634.58 公尺。新建基礎共 8 座，橋台 1 處，保留舊有沉箱基礎共 2x7 處
炎峰橋	331	216	2000/6/3~2001/4/30	修復工程。重建 4 跨上部結構、12 座橋墩、2 橋台
乾峰橋	30	127		修復工程。修復 3 橋墩、2 大梁、1 橋台
信義橋	36	110		修復工程。修復 5 橋墩
磨坑一號橋		12		修復工程。修復 1 橋台
磨坑二號橋		12		修復工程。修復 2 橋台

單位：天

國道橋梁地震損失評估案例

不同於九二一地震時的情況，台灣西部地區的國道路網已然成形，北、中、南各地區的國道高速公路均有跨越已知活動斷層的風險；尤其近年來國道高速公路多採高架道路的形式，對於地表震動和破裂現象將更為敏感；基於安全因素，一旦橋梁損害須封橋檢修或養護時，將導致交通壅塞或阻斷。前節已利用九二一地震後的橋梁勘災調查和修復工程紀錄驗證省縣道公路橋梁的地震損害評估模式，本節將針對「高速公路橋梁耐震補強後續路段評估與研究」計畫內的橋梁進行不同推測地震事件的損失評估，藉以了解大規模地震對國道橋梁可能造成的損害和對社會、經濟的衝擊。前述計畫內橋梁包含穿越橋、匝道橋和跨越橋等共計 1,155 座，已完成橋梁現況調查和資料收集(如竣工圖、鑽探報告、檢測維修記錄等)。根據橋頭與橋尾座標可計算橋梁主體的方位角，作為計算橋梁端點到斷層破裂面最短距離的依據。

本文以表 6 所列的三組震源參數進行案例分析，包含台灣中部地區的大甲斷層與彰化斷層分別錯動並引致芮氏規模 7.1 的地震，以及大甲斷層和彰化斷層一起破裂而引致芮氏規模 7.3 的地震。為探討斷層破裂對橋梁的影響，三個案例之震源深度皆假設為 8 公里且破裂面出露地表，斷層面傾角 30 度。

如前幾節所述，每一座橋梁根據其結構類別、設計地震力、座落地點的地質條件、地震規模、震源深度和到斷層破裂面最短距離等因素，可分別計算其損害狀態、阻斷機率、修復時

間和結構系統修復費用等。表 7 和圖 4 顯示個別國道橋梁於案例 3 的損害評估結果。由於案例 3 之損害橋梁數量眾多，表 7 僅列舉完全損害或嚴重損害且阻斷機率大於 0.5 的橋梁。由表 7 和圖 4 可知：完全損害的橋梁都為跨越斷層的橋梁，多數嚴重損害的橋梁座落於斷層上盤且鄰近破裂帶，為符合預期的評估結果。

其次，國道高速公路屬封閉的道路系統，須經由匝道進出高速公路。一旦匝道與匝道間的任一橋梁或道路阻斷時，該路段即喪失原有的運輸功能，且增加鄰近道路的交通量和旅運時間與距離等。本研究將前述計畫內的高速公路以交流道作為分界，概分為 88 個路段，每一路段可能包含一座或多座橋梁；並利用路網分析軟體，分別計算個別路段阻斷時的日平均損失，包含因阻斷而增加的旅行距離和時間的成本。綜合考慮個別橋梁的阻斷機率和阻斷條件下的平均修復時間，可得各路段的阻斷機率和平均修復時間，進而計算因交通阻斷引致的經濟損失。表 8 列舉國道部分路段於案例 3 之地震損失評估結果，由表中可知：在交通量較大的路段，其交通阻斷損失可能遠大於結構修復的費用。三個案例的震損評估結果，包含結構系統修復費用、交通阻斷損失和總損失等，如表 9 所示。以結構系統修復費用而言，案例 3 約比案例 1 和案例 2 的總和增加 20%；但就交通中斷損失而言，案例 3 約比案例 1 和案例 2 的總和增加 64%。

表 6 本計畫所含國道橋梁之地震損失評估案例的震源參數設定

	斷層名稱	地震規模	震源深度 (km)	破裂長度 (km)	破裂寬度 (km)	斷層面傾角(deg)
案例 1	大甲斷層	7.1	8	30.9	25	30
案例 2	彰化斷層	7.1	8	35.8	25	30
案例 3	大甲-彰化斷層	7.3	8	69.3	30	30

表 7 個別國道橋梁於案例 3 之地震損失評估結果範例

橋名	損害狀態	通行失敗機率	修復時間 (天)	修復費用 (百萬元)
大甲溪河川橋(南下)	完全	0.84670	313.82	209.913
大甲溪河川橋(北上)	完全	0.84673	314.07	210.626
甲南高架橋(東行)	完全	0.90101	306.50	188.688
甲南高架橋(西行)	完全	0.90098	306.50	188.677
彰化三號高架橋(北上)	完全	0.86697	335.46	245.906
彰化三號高架橋(南下)	完全	0.86696	335.47	245.901
龍崗南坑高架橋(北上)	嚴重	0.50902	96.75	115.401
龍崗南坑高架橋(南下)	嚴重	0.51141	101.13	134.721
碧山路高架橋(北上)	嚴重	0.51790	112.11	111.418
碧山路高架橋(南下)	嚴重	0.51796	112.04	111.420
南投高架橋(南下)	嚴重	0.51496	122.78	179.233
南投高架橋(北上)	嚴重	0.60293	164.91	259.746
東埔蚋溪河川橋(南下)	嚴重	0.59114	116.92	76.860
東埔蚋溪河川橋(北上)	嚴重	0.59071	116.81	76.801
清水溪河川橋(北上)	嚴重	0.61623	179.33	216.930
清水溪河川橋(南下)	嚴重	0.61657	179.68	218.100

(以上僅列舉包含超越嚴重損害且阻斷機率大於 0.5 的橋梁)

表 8 本計畫所含國道路段於案例 3 之地震損失評估結果範例

路段名稱	起點 交流道	終點 交流道	阻斷 機率	修復 時間	交通阻 斷損失	結構修 復損失
國 3_名間竹山段	竹山	斗六	0.999	113	639.9	1305.1
國 3_大甲彰濱段 4	龍井	和美	0.999	291	2,744.1	1004.1
國 3_霧峰草屯段 3	草屯	中興系統	0.999	74	1,049.5	905.1
國 3_南投名間段 1	中興	名間	0.997	100	909.9	794.2
國 3_南投名間段 2	名間	竹山	0.976	102	576.6	751.7
國 3_西湖大甲段 3	大甲	中港系統	0.998	267	3,250.2	521.2
國 3_霧峰草屯段 1	中投	霧峰	0.814	53	726.3	486.6
國 4_清水豐原段 2	清水端	中港系統	0.997	277	1,641.2	456.4
國 3_大甲彰濱段 2	中港系統	沙鹿	0.999	266	2,403.4	419.5
國 3_西湖大甲段 2	苑裡	大甲	0.971	36	277.5	406.3
...

表 9 本計畫國道路段於三個案例之地震損失評估結果比較

	斷層名稱	結構系統 修復費用	交通阻斷 時間與距離成本	總損失
案例 1	大甲斷層	2,993.0	4,560.2	7,553.2
案例 2	彰化斷層	5,146.3	8,403.0	13,549.3
案例 3	大甲-彰化斷層	9,731.8	21,318.7	31,050.5

單位：百萬元

地震早期損失評估之應用

地震早期損失評估(Early Seismic Loss Estimation, ESLE)技術，可於震後第一時間完成地震引致災損之推估，提供各單位應變人員參考，以協助提升震後緊急應變的效能。其基本概念如下：中央氣象局於震後極短時間內，完成資料分析並公布地震定位資訊，同時發送地震速報電子郵件供使用者加值使用。倘能事先建置地震損失模擬資料庫(Seismic Scenario Database, SSD)，則根據地震速報電子郵件的震源參數，與震央附近之速報站的最大地表加速度(PGA)實測值等資訊，可以快速自資料庫中篩選震源條件近似、且 PGA 之推估值與實測值最接近的模擬地震事件及其可能引致的災損推估結果。如此，可在極短時間內綜合考慮多個模擬地震事件的推估結果，一方面提供更具參考價值的災損數量和其可能的範圍，另一方面具容錯能力，避免地震定位資訊、震度衰減律或場址效應等評估模式的誤差累積(葉錦勳等，2004)。

依此概念，國震中心已具備相關技術，可以研發公路橋梁的地震早期損失評估模組，可在震後自動完成公路橋梁的災損推估，並可進一步規劃相關的雲端服務，將震損評估結果通報給公路主管單位的橋梁管理人員，其運作方式如圖 5 所示。TELES 地震早期損失評估子系統長駐於使用單位之電腦伺服器，隨時等待接收中央氣象局發送的地震速報電子郵件。當接收到電子郵件並解讀其格式內容無誤後，即觸發執行預設指令，並根據郵件內含的資訊自動篩選出條件最相符的數筆模擬地震事件，作為該地震最可能引致的後果。公路橋梁地震早期損失評估結果可包括前述各項評估結果，譬如個別橋梁所在地的震度、可能的損害狀態、阻斷機率等。

圖 4 本計畫所含國道橋梁於案例 3 之地震損失評估結果

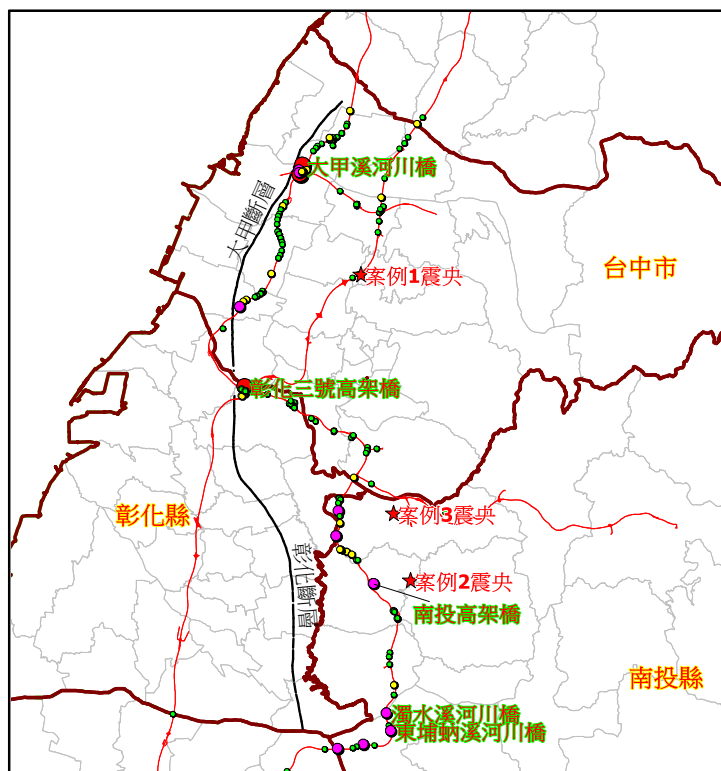


圖 5 公路橋梁地震早期損失評估及服務示意圖



公路橋梁地震早期損失評估的雲端服務，可規劃為兩個部分：一為客製化之橋梁災損的手機簡訊與電子郵件通報服務，前者提供災情概要，而後者可依工程處或工務段，分別整理各轄區內較詳細的橋梁災損推估結果，作為應變階段橋梁巡檢之規劃與排序的參考；一為地震早期損失評估資訊網，可進一步建置以網路地理資訊系統(Web-GIS)技術為基礎的資訊網站，提供線上即時的災情模擬結果的查詢、統計分析、地圖展示與主題圖繪製等服務，於實際災情未明前，可協助災情研判和各項救災資源調度。

公路橋梁之震後特別檢測，乃確保震後安全通行之必要工作，亦惟有仰賴適切之技術支援，方能貫徹執行。目前在實務運作上，各公路主管單位之工程處、工務段的橋梁管理人員，於地震後僅能依中央氣象局提供之有限的各地震度資訊，並自行詮釋以決定震後特別檢測的實施範圍與力度。綜合前述，公路橋梁地震早期損失評估對於震後特別檢測，應有極大

的助益。茲按照近、中、長程的技術需求不同，分別提出規劃建議如下：(1)近程方面，當務之急為發展震度推估與通報服務，協助各工程處、工務段，於震後獲得足夠精度之震度分布資訊，提升震後特別檢測的可操作性，便於排定執行順序及班表；(2)中程方面，進一步推估與通報各公路橋梁的可能損害程度與損害橋梁的分布，以使震後特別檢測工作更能掌握重點與時效，決策部門亦能夠推測公路系統的整體通阻情況；(3)長期而言，有必要建置一內含網路地理資訊系統(Web-GIS)為技術核心的資料庫、資訊網站與數值內容的雲端服務，整合公路系統與橋梁的震災資訊，研擬具體可行的地震災害應變管理模式和決策系統。以上說明，歸納如表 10 所列。

表 10 公路橋梁地震早期損失評估於公路橋梁震後特別檢測應用之規劃建議

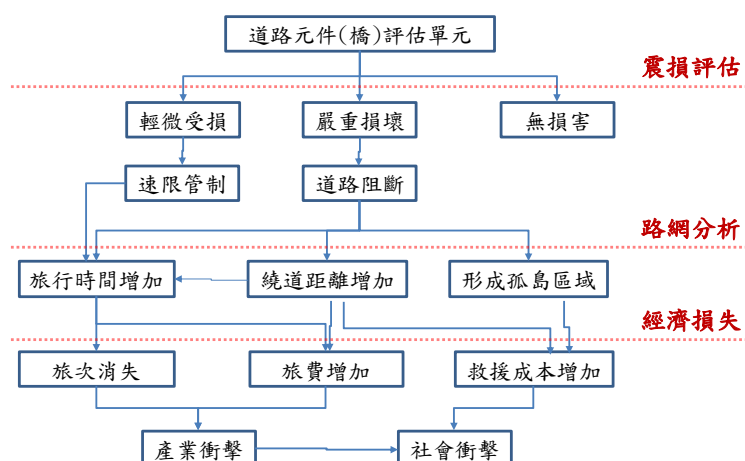
時程	項目	內容說明
近程	發展公路橋梁震度推估與通報服務	即時提供精確的震度分布資訊，通報各區工程處、工務段所管轄橋梁之橋址的震度，提升震後特別檢測的可操作性
中程	建置公路橋梁震損評估與行動通報系統	快速提供各橋梁震損評估結果，透過行動裝置 App 的推播技術，進行客製化通報並區分橋梁可能損害程度與分布，使震後特別檢測更能掌握重點
長程	建置整合式公路橋梁震災資訊雲端服務與決策管理系統	以 Web-GIS 為技術核心之資料庫、資訊網站與數值內容雲端服務，整合公路橋梁震災資訊、震後特別檢測與緊急處置之決策管理系統

國道橋梁防災規劃之應用

前述橋梁震損評估技術，可推估個別橋梁於模擬地震作用下可能的損害程度、修復或拆除重建所需的費用與時間等。當橋梁發生損害時，隨損害程度大致可區分兩種情況：如屬輕微損害則車輛依然可通行，但車道須縮減或限速；如屬嚴重損害或發生落橋、塌陷等現象，橋梁需封閉而導致交通阻斷。如能有效整合橋梁震損評估、路網分析與經濟損失評估等三項跨領域的技術，可對路網震後服務效能進行分析，並可協助防災規劃與風險管理。參考圖 6，路網分析接續震損評估技術的推估結果，在既有的路網系統中，部分路段因橋梁震損而必須封閉或者限速；利用運輸規劃技術，可評估路網內之車輛因繞行或壅塞而增加的旅行時間及距離，或推估是否因聯外道路完全阻斷而形成孤島區域。經濟損失評估則透過時間價值及行車耗損等貨幣化之轉換，將路網震損所引致的旅行時間增加、距離增加或因孤島區域而帶來的救援成本等轉化為等值的貨幣。

國道高速公路於路網系統中連接各大都會區、機場、港口等重要設施，是維繫民眾日常生活、商業活動、國際事務往來的關鍵運輸系統。國道高速公路與一般替代性較高的省道、縣道或市區道路不同，任一國道均可視為台灣地區之路網系統的骨幹，也是救災、消防、醫療、民生物資運送的重要維生路線。若任一國道路段因故損害而阻斷時，必然影響鄰近地區的交通；尤其是大規模震災後，勢必影響都會區內其它維生路線的功能和效率，對日常民生與救援行動均帶來巨大衝擊。如能於地震發生前，對台灣地區整體路網進行震後服務效能分析或沙盤推演，可以提供各公路主管單位具參考價值的資訊，規劃橋梁耐震補強、訂定優先搶修原則、選擇替代道路、進行交通疏導…等措施，有效降低地震引致的災害和人命傷亡。

圖 6 震後路網服務效能分析模組關聯圖



結語

國道高速公路為台灣地區交通路網的主幹，除提供民眾便捷的長途旅運、為經濟發展的重要命脈，更是重大災難後，救援、醫療、民生物資、復原重建等的運輸幹道；尤其大規模震災後，須擔負跨區救援和疏運的任務。因此，有必要於平時強化其各項設施的耐震能力。本文簡介國道高速公路橋梁的震損評估模式，也以九二一地震的橋梁勘災和修復紀錄校正其分析參數，確保評估結果的合理性。以大甲和彰化斷層發生大規模地震為例，顯示當橋梁損害程度較輕微時，經濟損失以結構系統的修復費用為主；但如橋梁嚴重損害而導致長時間的交通阻斷時，阻斷損失將遠大於結構系統的修復費用。未來橋梁震損評估技術，除可應用於地震早期損失評估和防災規劃上，也可結合震源機率模式進行機率式風險評估，探討最佳的耐震補強策略等。未來應將所有國道高速公路橋梁納入震損評估模式中，並持續更新橋梁基本資料，發展決策支援系統，強化應變、防災與風險管理能力。

參考文獻

- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994), "New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, and Surface Displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, pp. 974-1002.
- 交通部公路總局，2008，「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」期末報告，台灣世曦工程顧問股份有限公司，臺北。
- 施邦築、葉錦勳、劉季宇、柯孝勳、李維森、洪祥瑗，2006，「臺北區地下自來水管線地震危害度之研究」，臺北自來水事業處研究報告，計畫案號 09531065G15。
- 中興工程，2013，「環島鐵路整體系統安全提昇計畫(全縣橋梁總檢查及耐震補強延壽規劃)委託技術服務」，中興工程顧問股份有限公司。
- 葉錦勳，2002，「地震災害境況模擬方法與應用軟體整合研究」，國家地震工程研究中心，NCREE-02-009。
- 葉錦勳，2003，「台灣地震損失評估系統-TELES」，國家地震工程研究中心，NCREE-03-002。
- 葉錦勳、簡文郁、鍾立來，2004，「台灣震災早期評估系統之研發與應用」，*中國土木水利工程學刊*，第十六卷，第四期，第 609-620 頁。
- 葉錦勳、洪李陵、文慶霖，2005，「瓦斯系統之耐震損害評估及其應用」，國家地震工程研究中心，NCREE-05-021，國科會計畫編號：NSC 93-2625-Z-492-004。

- 葉錦勳，2006，「地震危害度分析與震災境況模擬技術整合研究(I)」，國家地震工程研究中心，NCREE-06-015，國科會計畫編號：NSC 94-2625-Z-492-002。
- 葉錦勳、簡文郁，2007，「地震危害度分析與震災境況模擬技術整合研究(II)」，國家地震工程研究中心，NCREE-07-040，國科會計畫編號：NSC 95-2625-Z-492-006。
- 葉錦勳，2008，「省道公路橋梁之震災風險評估與耐震補強排序」，台灣世曦委託計畫結案報告。
- 葉錦勳，2009，「台灣地震損失評估系統的研發與在地震早期損失評估暨風險評估之應用」，中國土木水利工程學會會刊，第36卷，第4期，2009年8月。
- 葉錦勳、簡文郁、林主潔、陳緯蒼、張毓文，2010，「住宅地震保險風險評估模型」技術手冊，財團法人住宅地震保險基金。
- 葉錦勳、林主潔、陳世良，2011，「強制住宅地震保險或其他議題之風險評估」，財團法人住宅地震保險基金。
- 葉錦勳、陳世良，2012，「不同風險分類類型對應住宅地震保險保費之差異研究」，財團法人住宅地震保險基金。
- 葉錦勳、施邦築、馬士元、劉季宇、黃李暉、陳世良、洪祥瑗、黃昱軒、林孝俞，2013，「大臺北地區發生大規模地震可能面臨之問題及整備作為評估」，研究報告，計畫編號 K102-023，內政部消防署，台北。
- 劉季宇、葉錦勳、張國鎮、洪祥瑗、黃李暉、劉燕妮、陳君隆、林主潔，2010，「公路橋梁地震早期損失評估資料庫建置與模組開發之研究(1/2)」研究報告，計畫編號 MOTC-IOT-098-H1EB001，交通部運輸研究所。
- 劉季宇、鍾立來、葉錦勳、王仁佐、周光武、洪祥瑗、陳筱安、陳振豪、尤信翰，2010，「自來水管線耐震分析及震後緊急應變措施之研究(1/2)」研究報告，計畫編號 MOEA-WRA-0990095，經濟部水利署。
- 劉季宇、葉錦勳、張國鎮、洪祥瑗、黃李暉、劉燕妮、林主潔、王冠又，2011，「公路橋梁地震早期損失評估資料庫建置與模組開發之研究(2/2)」研究報告，計畫編號 MOTC-IOT-099-H1EB003，交通部運輸研究所。
- 劉季宇、鍾立來、黃仲偉、葉錦勳、周光武、洪祥瑗、陳振豪、周志雄、蔡利群，2011，「自來水管線耐震分析及震後緊急應變措施之研究(2/2)」研究報告，計畫編號 MOEA-WRA-1000090，經濟部水利署。
- 劉季宇、鍾立來、葉錦勳、簡文郁、周光武、林祖榕、洪祥瑗、陳志欣、周寶卿、陳世良、林峻毅、黃仲偉、林祺皓，2013，「公共給水系統震災早期災損預警技術研究(1/2)」，研究報告，計畫編號 MOEA-WRA-1020117，經濟部水利署，台北。

國道橋梁維護管理與案例集介紹

詹穎雯¹、張嘉峰²、陳育聖³、簡臣佑⁴

- 1.財團法人臺灣營建研究院院長
- 2.財團法人臺灣營建研究院工程技術一組組長
- 3.財團法人臺灣營建研究院工程技術一組副工程師
- 4.財團法人臺灣營建研究院工程技術一組工程師

一、前言

橋梁，為國道不可或缺之結構物。國道跨越道路、河川、溪谷，需藉橋梁連接貫通；穿經城市都會區，亦多利用高架橋，以節省土地使用空間，並利交通運行之順暢。

橋梁潰損，除危害用路人生命與財產安全外，並影響社會經濟活動；且橋梁潰損後之維修或重建，均較新建工程增加費用與工期，故橋梁維護管理在國道管養中佔極重要之角色。

橋梁維護管理之目的，在如何及早發現橋梁劣化現象，並在橋梁結構或交通安全發生問題前，即能適時維修，維護公共安全。橋梁管理單位為善盡管理職責，維護橋梁結構、交通及用路人之安全，應有完善之橋梁管理制度以供管理單位依循。

維護管理首先應就橋梁特性進行了解，並對橋梁劣化原因進行確認、了解維修補強特性與確立維修補強原則。後續即以高公局既有資料撰寫之維修補強案例集作為管理單位參考依循之方向，以維橋梁之性能與安全。

二、橋梁維護管理的特性

2007年8月1日傍晚交通尖峰時刻，美國明尼蘇達州 I35 洲際公路跨河橋突然斷裂坍塌，此對世界各國的橋梁管理單位造成相當的震撼，以美國目前完備的橋梁管理制度與技術而言，亦會造成如此重大之事故，顯示其維護管理流程之環節上仍有改善的空間。造成此一橋梁失去穩定性之調查發現，發生事故前該橋梁正進行維護修繕工程，橋上堆置了重量頗大的施工材料，在此同時卻無相對應之安全評估或進一步之安全監測預警之工作設置，亦是造成此災害發生之原因。

由此可見，橋梁維護管理之流程與新建工程乃大相逕庭，橋梁維護管理作業雖屬其管理單位之例行性業務，然所涵蓋之工作項目與需考量之因素遠超過新建工程，其考量因素包括用路人特性、車輛種類、天候、時段等，相較於傳統新建工程，既有結構物之維護管理工程具下列特性。

1.強調功能評估的重要

工程人員必須透過檢、監測技術與模擬分析方法的輔助，於維護管理工程規劃設計前分析結構物之功能狀況，擬定維修補強對策；而在維護管理執行過程中，設施結構行為的監測結果需回饋分析原始設計之妥適性，並進行必要之調整；最後，維護管理成效更須藉檢、監測技術進行驗證。因此，功能評估是維護工程中最重要之一項工作，亦是其規劃、設計、施工，甚至驗收之關鍵。

2.強調介面與多元技術的整合

傳統新建工程屬線型操作，由基礎、下部結構、上部結構依續施工，各個技術環節獨立分工，介面單純。而維護管理工程係針對既有結構物所進行之工程行為，包括地工、材料、結構等不同工程技術必須同時進行且互相搭配，因此特別強調介面與各類工程技術之整合。此外，許多新技術、新材料、新工法亦勢必因應產生，如何正確的引用、設計，或驗證其效能亦為另一艱鉅任務。

3. 考量防災與抗災需求

臺灣地區地震頻仍，造成許多既有結構物之所在環境與設計當時差異甚多，因此有重新評估其安全性與補修需求的必要；加以國內耐震規範已因應921地震之強震特性作修正，而造成許多既有結構物之抗災能力不足，而有補修或功能提昇之需求。

4. 預算規劃與經濟效益評估模式的改變

有別於傳統新建工程以單一計畫作預算規劃，以投資所衍生之經濟成長與產值等作為經濟效益之評估依據，維護管理工程之預算規劃屬全面性，其涵蓋之工程數量較多，且跨越之執行期程較長，國家建設或更新計畫是先進國家較常採用的方式。而維護工程之經濟效益評估，常以生命週期成本分析模式，針對既有設施功能喪失所衍生之經濟損失與社會成本，進行經濟效益估算。

5. 採購與契約方式改變

傳統新建工程以成品採購與驗收為契約主體；維護管理工程則經常以既有設施功能為採購對象，而以功能評估結果作為驗收依據，因此，傳統新建工程契約將無法適用於維護管理工程。

6. 功能規範與系統驗證制度的應用

維護管理工程所使用之工法技術常因特殊目的而涉及專利，或因達成同一目的可使用之工法技術繁多，因此，可預見的，功能性規範將被大量採用，而為防止可能之歧見或弊端，國外先進國家大多以第三者或公正團體對新材料、新工法、新技術進行效能驗證，以輔助功能性規範之使用。

7. 資料與資訊管理系統的應用

維護管理工程之另一重要工作為資料的累積與管理，其不僅需要既有設施之原設計資料與使用狀況記錄，更需要一套完備的維護管理系統，以記錄、查詢、展示、輸出維護管理之執行成果。

8. 教育訓練的重要

對國內工程界而言，以上所述之維護工程特性幾乎全為新知識與概念，因此，如何於短時間內教育、培訓足夠的工程師、施工人員，甚至採購管理人員等，亦為維護管理工程之一重要工作。

維護工程包括養護、維修、補強、管理，甚至災時搶修、災後復建等項目，而其成效紀錄更可回饋至規劃、設計甚或投資面的檢討，在量的方面，維護工程將取代原有新建工程成為主軸工程項目；而在質的方面，以往新建工程較單純的施工程序與技術需求，也將轉變為施工程序複雜而且技術整合要求需因時、因地制宜的維護工程。綜上所述，維護管理工程由規劃、設計到施工階段，皆有別於傳統新建工程。就規劃而言，維護工程經費的取得與分配，需考量複雜的經濟面、環境面、管理面及技術面，甚至政治面等各個環節；就設計而言，維護管理工程不僅需對現有設施進行功能評估，檢視其設計與施工品質，並需分析其營運現況與外在環境，同時考量施工可行性，以達成其所需功能，並降低可能對社會、經濟、環境等各方面造成之衝擊；最後，就施工而言，維護管理工程的進行除需考量對工程之進度、成本、品質及安全衝擊外，對於使用者之安全性與服務性，及污染等外在環境影響，皆需加以考慮，並需考量工程之品質確保、品質確認，與驗收模式等。

三、橋梁劣化之維修與補強

1. 橋梁劣化之原因

橋梁劣化可分為自然劣化與外力破壞兩種。自然劣化為混凝土結構物在其生命中無法避免之老化現象，劣化之速率依結構物所處之環境及使用、維護情況之不同而異。自然劣化雖無法避免，惟可藉防治技術延緩結構物劣化速率。

自然劣化，多為漸進形成，並非一朝一夕即時造成，故可藉定時之橋梁檢測發現構件劣化現象，及時進行維修或補強，恢復橋梁之外觀與功能。

外力破壞，可分為人為與自然環境兩種。人為破壞，造成橋梁損壞，如超高車撞擊跨越橋大樑墩柱、超載車輛造成橋面版及大樑產生裂縫、火害造成混凝土剝落及強度之降低等。自然環境破壞，造成橋梁構件損壞，如地震造成上部結構落橋、橋柱或基礎之損壞、颱風洪水造成基樁之裸露及結構之不穩定，甚或斷橋等。外力破壞，係一夕造成。外力通常相當大，常造成橋梁構件嚴重之破壞，影響橋梁結構及行車安全，需及時進行維修或補強，以免劣化繼續惡化，甚或造成潰壞或落橋。

2. 維修補強特性

橋梁受損後，基本上有維修(Repair)與補強(Rehabilitation)兩種處理方式。

「維修」旨在恢復結構物之既有強度與外觀，並防止繼續劣化，而「補強」則將受損之結構構件，除提升至未受損前之強度外，並超過構件原設計強度。應用上，「維修」主要係針對結構構件進行修復，進而達成整體結構修復之目的；而「補強」則係對結構構件或總體結構系統進行補強。

無論維修或補強，其目的在恢復結構物外觀、改良結構物耐久性、增加結構物強度及恢復功能；惟修復或補強之前，均應先確定結構物劣化之原因，待劣化原因確定後，方能研擬妥適之修復或補強方案。

維修補強方案，除應考量安全性、耐久性、經濟性、美觀性、生態環境及交通維持外，並應考量國內施工環境、能力，選擇較佳方案。

橋梁之維修補強，係於已通車之既有橋梁施工，故時間及空間多所限制，有別於新建工程。研擬維修補強方案時，並應考量下列維修補強作業之特性：

(1) 影響交通

維修補強，目的在維護既有橋梁，而既有橋梁於既有交通網擔任重要運輸角色，故維修補強作業可能影響交通，甚或需封閉交通施工，故維修補強應考量影響交通程度。

(2) 作業點多，每點工作量少

維修補強作業位置，通常以點之方式分佈，故作業點多，而每點工作量卻很少。例如支承墊老化或破損，為維耐震功能需予替換，或伸縮縫損壞，為維交通安全需予維修更新，而支承墊及伸縮縫係呈點的分佈，分散於整座橋梁，維修時每處工作量卻很少。

(3) 作業空間小、作業姿勢受限

維修補強作業，在修復既有橋梁結構，故作業空間多所限制，如換裝支承，作業空間小，且作業姿勢困難。

(4) 專業技術

維修補強作業不得有害既有橋梁，故應先詳查橋梁原設計條件、橋梁完工狀況，及橋梁現況，瞭解橋梁劣化所在，始能研擬妥適之維修補強方案。另維修補強亦應確認結構物強度及施工安全性，故維修補強，應具備較設計施築新橋為高之專業技術。

(5) 施工效率受限

維修補強作業空間受限，無法使用大型機械施工，多為人工配合小型機具作業，為勞力密集作業，施工效率低；且維修補強，一般為多職種之作業，每一職種每次作業時間及作業量均少，且為維持交通，作業時間有限，故施工效率受限。

(6) 單一作業位置施工

維修補強位置，多為點之分佈，為免多點同時施工，橋梁陷於不穩定狀態，危及橋梁結構安全，故施工時以單一維修位置施工為原則。

3. 維修補強原則

橋梁經安全檢測評估，發現劣化損壞或潛在危險時，應依下列原則，辦理維修補強：

(1) 承載能力補強之原則：其補強需求為承載能力不足，故其補強原則可藉限速、限重作初步處理，再以加大構件尺寸、加勁、基礎加強、增加構件等方式增加承載能力，或變更上部結構形式或降低上部結構重量，來滿足承載能力之需求。

(2) 耐洪能力補強之原則

- A.橋基保護工法及保護範圍應審慎評估：不當之橋基補強，可能改變河道、河相、或流向，產生新的弱勢河床面，造成局部沖刷加劇，危及橋基穩定性。
- B.河床保護工應以橋群為單位：河床保護工，應以整個河段或河系一併考量；避免保護上游橋梁，致下游橋梁河床降低，顧此失彼。
- C.橋基補強時，應同時考量橋基耐震能力之提昇：河床沖刷深度增加，將降低基礎之耐震能力，故提升耐洪能力時，應檢核耐震能力。
- D.河床保護工宜設於河床下，避免形成阻水構造物。
- E.應審慎評估河川與橋梁之變異性及施工可行性。

(3)耐震能力補強之原則

- A.中小型地震時，橋梁構件應維持在彈性範圍內，並具側向勁度，保持較小之變形，不致發生非結構性之損壞。
- B.強震時，橋梁構件容許發生非彈性變形，惟仍應具足夠之韌性，確保橋梁不致崩塌，造成人員傷亡。
- C.應同時考量橋梁上部結構、下部結構、及基礎，使整體結構耐震能力均衡提升。
- D.構件無法補強時，可變更橋梁結構系統，以反力分散或延長週期方式，減輕地震慣性力，如裝置隔減震設備，降低地震之慣性力，避免橋梁潰壞、落橋。

四、橋梁維護管理之耐久性考量

結構物之耐久性主要與環境條件、材料性質(混凝土、鋼筋與可能的輔助材料系統)與構造細部設計等三大因素相關。因此，如欲達一定目標使用年限，在不同環境條件下，應選用之材料性質與構造細部設計便將有所不同，環境條件越嚴苛，則應使用之材料等級與構造細部設計規格便越高。

從材料面觀點探討鋼筋混凝土橋梁結構耐久性問題，可歸納為鋼筋腐蝕與混凝土劣化兩部份，而兩者又會交互影響，其中以鋼筋腐蝕為重要指標。因為當鋼筋腐蝕發展到使混凝土脹裂後，腐蝕介質更可長驅而入引致鋼筋腐蝕一發不可收拾，此時不僅鋼筋因腐蝕而使斷面變小、拉力承受度變小；混凝土也因鋼筋銹蝕而脹裂導致更大裂縫甚而保護層剝落，致使構件整體承载力大幅滑落，引發安全上之顧慮。故知控制與預防鋼筋腐蝕，實為確保鋼筋混凝土結構耐久性之最關鍵因子，而控制混凝土中鋼筋腐蝕的重要因素又與混凝土劣化程度與大氣腐蝕介質濃度相關密切。鋼筋混凝土與環境因子相關的腐蝕劣化重要因素與指標如表 1 所示。

表 1、鋼筋混凝土腐蝕劣化之機構、要因與指標

劣化機構	劣化要因	劣化指標
中性化	二氧化碳	中性化深度 鋼材腐蝕量
鹽害	氯離子	氯離子濃度 鋼材腐蝕量
凍害	凍結溶解作用	凍害深度 鋼材腐蝕量
化學的侵蝕	酸性物質 硫酸離子	劣化因子滲透深度 中性化深度 鋼材腐蝕量
鹼質與粒料反應	反應性粒料	膨脹量
橋面版疲勞	大型車通行量	開裂量
梁構件疲勞	反覆荷重	累積損傷度 鋼材的龜裂長度

因此提升混凝土品質，減少其劣化程度與機率，使外在腐蝕介質不易侵入以降低鋼筋腐蝕速率，此為延長鋼筋混凝土結構整體壽命之最直接手段；另大氣腐蝕介質(水、氯鹽等)與混凝土中性化介質(二氧化碳、二氧化硫等)之含量也為影響鋼筋腐蝕之關鍵，腐蝕與中性化介質含量愈高腐蝕機率與速率也愈高，故而瞭解各種環境大氣中腐蝕介質之種類與含量，並對其於混凝土中滲透或擴散速率進行相應之研究與試驗，最後回饋於鋼筋混凝土橋梁之耐久性設計，使設計者能根據構造物所處環境之外在腐蝕因子特性，推求混凝土之相應品質與保護層厚度所需之要求，以確保構造物之耐久性可達使用年限。

台灣位處亞熱帶，四面環海，氣候炎熱潮溼，先天上就是容易腐蝕的環境，在此種高溫、高濕並帶有鹽分或有害污染物的大氣環境下，不論是鋼筋混凝土或鋼構造結構物均面臨了環境上嚴苛的考驗；加上地震、颱風頻繁，結構物超限使用情形普遍，使得裂縫產生，更加速了腐蝕因子擴散的通道。國內鋼筋混凝土橋(含預力混凝土橋)為台灣最主要之橋梁構造，約佔總數 90% 以上，由於台灣海岸線綿長，鋼筋混凝土橋腐蝕劣化案例中，以鹽害佔大多數，國內濱海地區鋼筋混凝土橋，橋齡往往不到 20 年即發生混凝土剝落且鋼筋銹蝕的狀況，甚至在離海岸現距離 100 公尺以內鹽害威脅較為嚴重的地方，橋齡不到 10 年就有腐蝕劣化的情況，因此，有關橋梁鹽害之維護管理應是未來一重要課題。

圖 1 為日本鹽害橋梁維護管理之流程[20]，其流程包含定期檢測、鹽害損壞原因、維修補強對策、追蹤調查及橋梁管理履歷保存等。而要進行鹽害劣化機制的建立，則有賴於完整之現況資料蒐集，包含外觀損傷狀況、內部鋼筋腐蝕狀況以及混凝土中性化與氯離子分佈情形等，混凝土中氯離子分佈情形可藉由鑽心取得混凝土圓柱試體，並利用切片方式量測不同深度處之氯離子濃度，透過氯離子擴散方程式之迴歸，如圖 2 所示，可進行鹽害劣化之評估。式(1)即為氯離子擴散方程式， C_0 為表面氯離子濃度， C_i 為混凝土原始之氯離子濃度， D 為擴散係數， x 為鋼筋之保護層厚度，至於引發鋼筋腐蝕之臨界氯離子濃度，可取 1.2 kg/m^3 ，或以日本土木學會制定之混凝土標準示方書中[21]，建議之式(2)~式(5)來推估其臨界值。

$$C(x,t) = (C_0 - C_i) \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right)\right) + C_i \quad \text{式(1)}$$

使用普通波特蘭水泥的情況

$$C_{\text{lim}} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad \text{式(2)}$$

使用高爐水泥、飛灰水泥的情況

$$C_{\text{lim}} = -2.6(W/C) + 3.1 \quad \text{式(3)}$$

使用低熱高爐水泥，早強波特蘭水泥的情況

$$C_{\text{lim}} = -2.2(W/C) + 2.6 \quad \text{式(4)}$$

使用矽灰水泥的情況

$$C_{\text{lim}} = 1.2 \quad \text{式(5)}$$

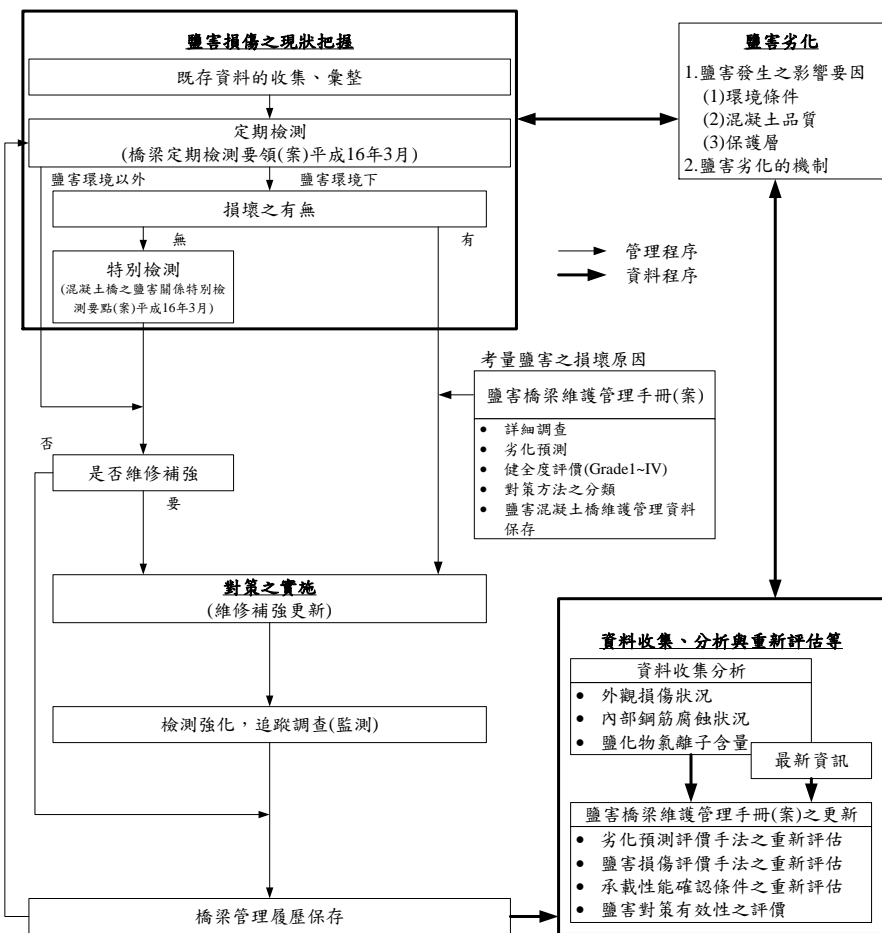


圖 1、橋梁鹽害維護管理之流程

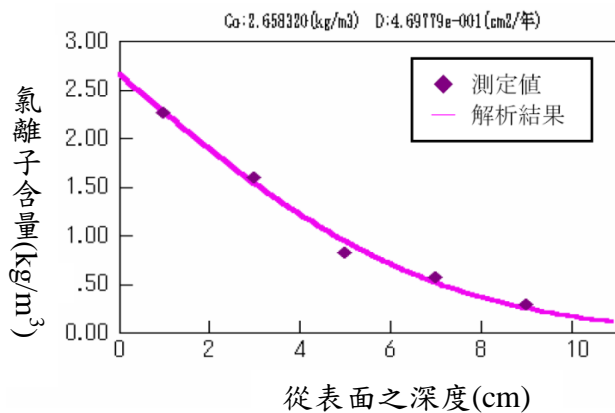


圖 2、氯離子分佈情形及擴散係數之迴歸

四、高速公路橋梁維修補強案例集說明

1. 案例集架構說明

目前國內並無相關案例集資料可供參考，故本文乃參考國外相關文獻，以作為高速公路維修補強案例集撰寫之依據。國外資料以日本道路協會撰寫之道路橋補修・補強事例集(2007年、2009年與2012年版)作為參考方向，此案例集之章節內容請參閱表2所示。參此案例集之架構，其第一部為說明橋梁維護管理之基本知識，第一章總則說明維護管理基礎、鋼構造物與混凝土構造物維護管理概念、日本橋梁設計標準之變遷；第二章說明不同構造之注意事項，並分為鋼構造物、混凝土構造物、基礎、伸縮縫、支承、護欄與附屬構件等。第二部即為維修補強案例之說明，其分為鋼構造物、混凝土橋面版、混凝土橋、下

部構造及支承、伸縮縫、附屬物等章節。各案例說明內容包含構造概要、劣化損傷狀況、損傷原因之推斷、維修補強方針、維修補強設計、施工方式、今後之對策與注意事項等。

表 2、道路橋補修・補強事例集章節架構

第 1 部 道路橋之維持管理	第 2 部 道路橋之修復補強事例
<p>第 1 章 總則</p> <p>1.1 總則</p> <p>1.2 維護管理基礎</p> <p>1.3 鋼構造物</p> <p>1.4 混凝土構造物</p> <p>1.5 標準之變遷</p> <p>第 2 章 構造不同之注意事項</p> <p>2.1 鋼構造物</p> <p>2.2 混凝土構造物</p> <p>2.3 基礎</p> <p>2.4 伸縮縫、支承、護欄與附屬構件</p>	<p>第 1 章 鋼構造物</p> <p>第 2 章 混凝土橋面版</p> <p>第 3 章 混凝土橋</p> <p>第 4 章 下部構造</p> <p>第 5 章 支承、伸縮縫、附屬物等</p>

本文參照日本道路協會出版之道路橋補修・補強事例集第一部與第二部之架構，研擬適合於高速公路維修補強案例集之架構，其分為兩篇第一篇為高速公路橋梁之維護管理、第二篇為高速公路橋梁維修補強工法案例。以上分述如下：

- (1)第一篇為高速公路橋梁之維護管理：此篇分為第一章一般說明與注意事項、第二章維修與補強基本原則、第三章常用維修與補強工法概述，上述內容乃參閱國內交通部或高公局頒佈之規範，包含公路養護手冊、高速公路養護手冊、公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範(草案)與公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範等進行撰寫，各章內容如下：
- A.第一章 一般說明與注意事項：針對高速公路維修補強之一般說明與其一般注意事項、橋梁檢測概述(分為檢測項目與檢測一般規定)、安全評估概述(分為橋梁承載能力、耐震能力、耐洪能力與疲勞安全之評估)。
- B.第二章 維修與補強基本原則：包含維修與補強基本原則之一般說明、緊急處置方式、維修補強原則、橋梁構材維修(分為鋼筋混凝土構材與鋼構材)、支承維護補修置換概述、伸縮縫之維修與置換概述、結構補強概述。
- C.第三章 常用維修與補強工法概述：本章分一般性結構維修工法與橋梁耐震與承載力補強工法說明常用工法，並於最後一節以工法類型與後續第二篇之高速公路橋梁維修補強工法案例建置表格以供參照。
- (A)一般性結構維修工法
- a.鋼筋混凝土結構橋梁：其相關常用工法依下圖 3 分別予以概述。

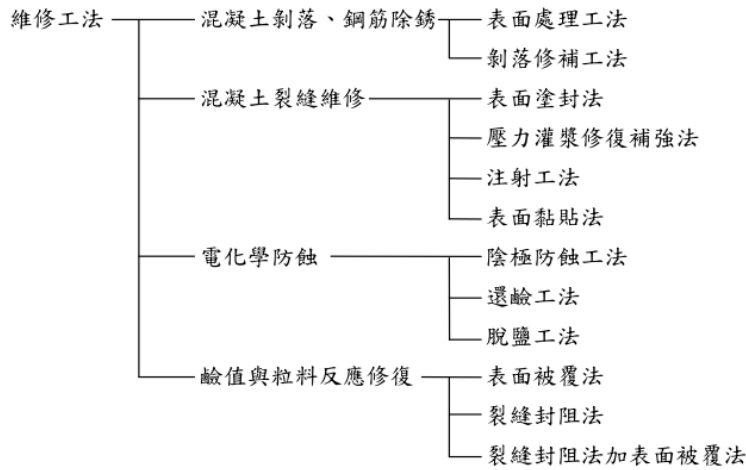


圖 3、鋼筋混凝土結構橋梁維修工法分類

- b. 鋼結構橋梁：分為鋼材焊接疲勞損傷維修(如矯正工法、開孔止裂工法)、鋼材防蝕系統劣化維修(如熱浸鍍鋅劣化維修、鋁鋅熔射劣化維修)，分別概述其常用之工法。
 - c. 鋼筋混凝土橋面板：分別針對橋面板混凝土劣化維修(如橋面板防水維修、橋面板疲勞劣化維修)與鉸接板損傷修復，分別概述其常用之工法。
 - d. 橋梁支承、伸縮縫與附屬設施：分別針對支承與伸縮縫概述其維修與置換方式。
- (B) 橋梁耐震與承載力補強工法
- a. 橋梁耐震補強工法：分別概述止震與防落設施補強工法、混凝土包覆補強工法、鋼板包覆補強工法、纖維包覆補強工法、增設連梁補強工法、基礎補強工法(如擴大基礎工法、增樁補強工法等)、結構系統補強工法(如位移拘束補強工法、慣性力分散補強工法等)。
 - b. 橋梁承載力補強工法：分別概述大梁增設斷面補強工法、大梁貼片包覆補強工法、外加預力補強工法與大梁撞損修復補強工法。
- (C) 常用維修與補強案例對照：如表 3 所示，針對上述橋梁一般與耐震與承載力補強工法類型與後續第二篇章節架構對應，以作為使用者閱讀時能搜尋工法資料。

表 3、常用維修與補強案例對照

常用維修與補強工法		案例編號	
一般性結構維修	1	混凝土裂縫維修工法	
	2	混凝土剝落修復	
	3	鋼筋鏽蝕及混凝土修復	
	4	鋼材焊接疲勞損傷維修工法	
	5	鋼材防蝕系統劣化維修工法 (鋼橋油漆塗裝劣化維修工法)	5.1
			5.2
	6	高強度螺栓接合劣化維修工法	
	7	橋面板混凝土劣化維修工法	
	8	鉸接板損傷修復工法	
	9	支承維修與置換工法	8.1
8.2			
8.7			
8.8			
10	伸縮縫維修與置換工法	8.9	
		8.10	

常用維修與補強工法			案例編號
			8.11
			8.12
			8.13
			8.14
			8.15
耐震或耐洪補強	11	止震與防落設施補強工法	8.6
			8.5
			8.4
			8.3
	12	混凝土包覆補強工法	7.2
			7.3
	13	鋼板包覆補強工法	7.4
	14	FRP 包覆補強工法	7.5
	15	鋼橋墩角隅補強工法	
	16	基礎補強工法	7.6
			7.7
			7.8
	17	結構系統補強工法	7.9
			7.1
18	河床與基礎保護工法	7.10	
		7.11	
		7.12	
		7.13	
		7.14	
承載力補強	19	大梁增設斷面補強工法	
	20	大梁貼片包覆補強工法	4.3
	21	外加預力補強工法	4.2
	22	大梁撞損修復補強工法	4.1
			4.2
23	橋面板增厚補強工法	6.1	

註 1：案例編號為粗體者為未來新增案例。

(2)第二篇 高速公路橋梁維修補強工法案例：分為第四章 鋼筋混凝土結構橋梁、第五章 鋼結構橋梁、第六章 鋼筋混凝土橋面板、第七章 橋梁下部結構、第八章 橋梁支承、伸縮縫、防落設施與附屬設施等。各章依表 3 之常用維修與補強工法名稱作為節名，若遇同類型再予以以(1)、(2)...進行編碼。

2.案例集案例說明：以下分別針對一般性結構維修工法與耐震與承載力補強工法分述一案例，以便說明案例集撰寫內容：

(1)一般性結構維修工法—支承維修與置換工法(2)

A.維修補強案例說明

案例編號	8.2
案例名稱	支承維修與置換工法(2)
橋梁結構型式	預力 I 型梁橋
劣化損傷狀況	支承墊破損
維修補強工法	橋梁支承墊抽換(不頂升)工法
橋址環境狀況	跨河橋(基隆河)
橋梁竣工年月	民國 年 月【資料收集中】
維修補強竣工年月	民國 98 年 9 月

B. 維修補強施工圖說

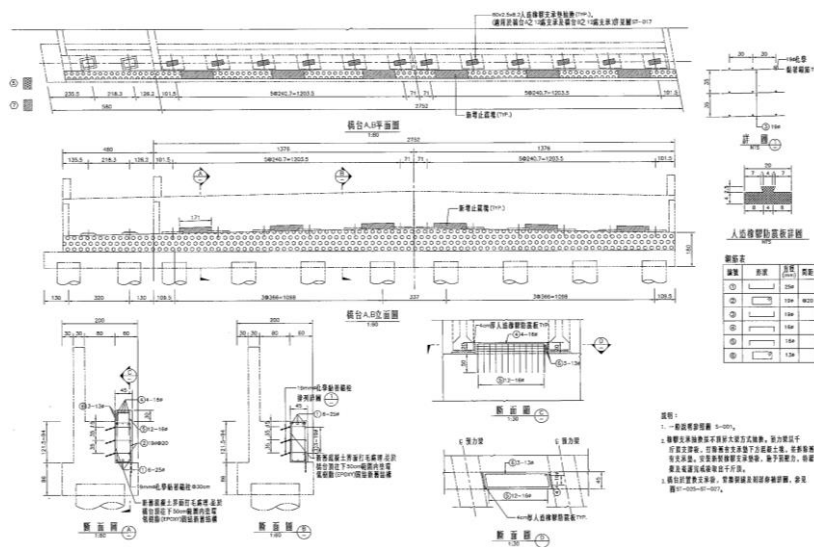


圖 4、橋梁人造橡膠支承墊抽換示意圖

C. 材料規定與施工檢驗重點

(A) 材料規定

- 鋼板材質需符合 CNS 8499 G3164 之 304 型規定。
- 人造橡膠材質需符合 ASTM D412、D395(B 法)、D2240、D1149、D429 及 D746 等檢驗規定，成品由工廠加工製成，並經過相關抽驗作業合格後再運至工地，並配合舊有支承墊之拆除作業後再行予以安裝。

(B) 施工檢驗重點

本案若橡膠及無收縮水泥砂漿基座均需更換者，即採不頂昇工法，支承墊更換前需先行使用千斤頂油壓設備同步微頂起(約 3~6 mm)橋面版大梁，故加壓過程需謹慎小心。

D. 施工步驟

本案例係就橋台處已變形之舊有橡膠支承墊予拆除並更換新品，施工主要工項包含安裝千斤頂油壓設備、拆除舊品、安裝新品及拆除千斤頂油壓設備等作業。

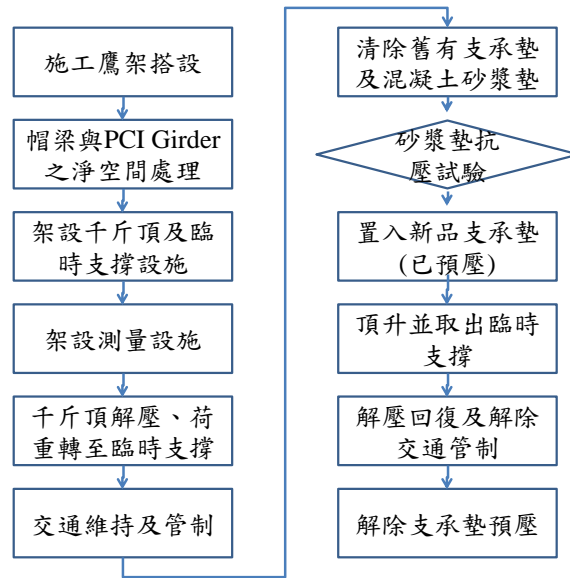


圖 5、支承墊抽換不頂升工法施工流程圖

(2)耐震與承載力補強工法－地震力分散裝置補強

A.維修補強案例說明

案例編號	7.1
案例名稱	地震力分散裝置補強
橋梁結構型式	預力箱型梁橋
劣化損傷狀況	抗震能力不足
維修補強工法	裝設地震力量分散裝置(STU)
橋址環境狀況	跨河橋(員林大排)
橋梁竣工年月	民國 93 年 1 月
維修補強竣工年月	民國 年 月【資料收集中】

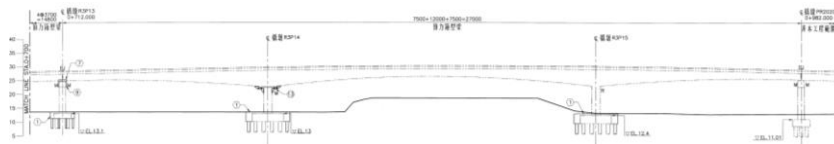


圖 6、案例橋梁立面圖

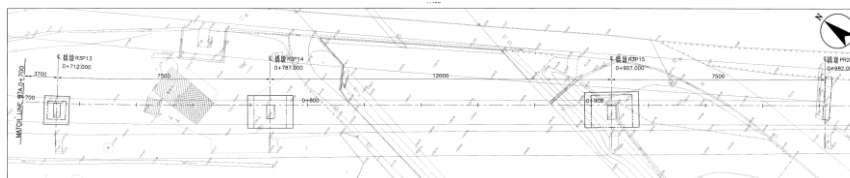


圖 7、案例橋梁平面圖

B.維修補強施工圖說

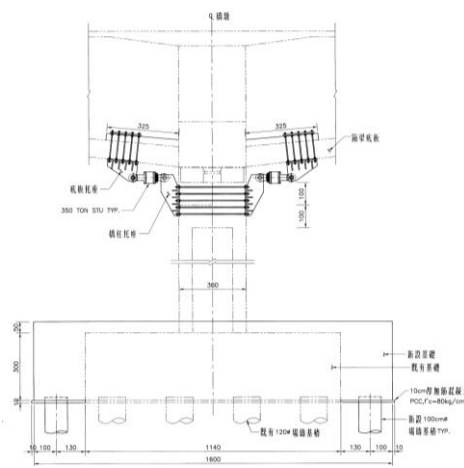
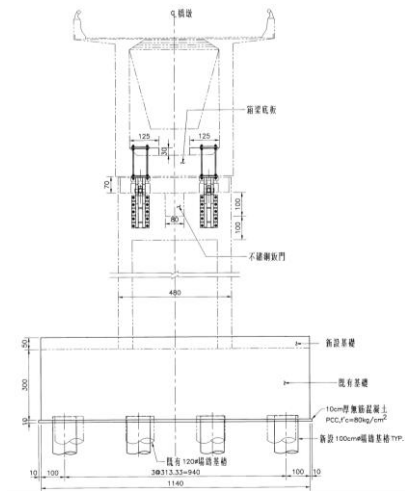


圖 8、案例橋梁 R3P14 地震力量分散裝置(STU)立面圖 圖 9、案例橋梁 R3P14 地震力量分散裝置(STU)側立面圖

C. 材料規定與施工檢驗重點

地震力量分散裝置(STU)由義大利 ALGA 公司生產製造。其設計及試驗要求如下：

- (A) 設計溫度：0~50℃
- (B) 最大拖曳力(Max. Drag Force)：10% 最大設計地震力
- (C) 最大設計地震力：350 T/組(每處橋墩設置 4 組)
- (D) 總位移量：±75 mm
- (E) 動力荷載最大位移量：±12 mm(最大設計地震力)
- (F) 慢速移動試驗中之速度(Slow Movement Velocity)：6.5 mm/hr
- (G) 快速移動試驗中之速度(Fast Travel Rate)：2 mm/sec

D. 施工步驟

本工程地震力量分散裝置(Shock Transmission Units, STUs)共計 16 組，分別安裝於案例橋梁(R3P14 / L1P9 / R1P16 / L2P11)四處墩柱上，每墩設置 4 座。

主要構造包含內部流體(Internal Fluid)及相關錨碇設施，主要設置於橋梁上部結構與下部結構之間，其功能為藉由流體阻尼力吸收地震力引致之瞬間作用力，使得上部結構與下部結構間形成剛性連接(Rigid Link)，並產生鎖定效果(Lock-up Effect)；而在常時狀態下(如溫差、潛變及乾縮等)所產生之小位移，則可在小於最大拖曳力下產生緩慢移動，使得結構保持在活動狀態。

地震力量分散裝置之施工與安裝係依據 AASHTO 規範第 32 章之規定辦理，承包商依據設計資料與參數及其採用之系統與工法，提出完整之設計計算書、施工詳圖、施工計畫、功能試驗及材料試驗檢驗報告、廠商資料及型錄、出廠證明及進出口文件等書面資料，經審查核可後施工，其施工步驟概述如下：

(A) 墩柱孔位放樣

考量墩柱之寬度為 3M，鑽孔行程遠高於箱梁底處(底版合計箱梁內補強墊塊約 1.2M)，且墩柱鑽孔為水平鑽孔(箱梁底則為垂直鑽孔)，其偏差預估將較大，故決定鑽孔作業先由墩柱開始，後續梁底之鑽孔依照墩柱實際孔位調整。

施工前先於欲安裝 STU 墩柱之前、後縱向面標定出中心線，依此中心線往左、右兩側平移 125cm 標定出下托架錨碇板中心線，詳圖 10 所示，每座托架分成 5 列(上至下列間距 27+2@30+27cm)與左右 2 排(行間距 40.4cm)共計 10 支鋼棒所固定。

因墩柱前後兩側箱梁底坡度有所差異，而上、下托架之相對位置空間需求為固定，為避免鑽孔位置不當造成日後上托架安裝時空間不足或過大，鑽孔之高程利用臨時樣架(尺寸依照上、下托架之相對空間位置)來做確定。

將臨時樣架對齊墩柱前後相對應之下托架錨碇板中心線進行上下平移，詳圖 11 所示，上托架錨碇板位置與箱梁底間至少保留 5cm 間隙，標示出每一側鋼棒高度位置，再取兩側較低之一側為鋼棒預設鑽孔高程。

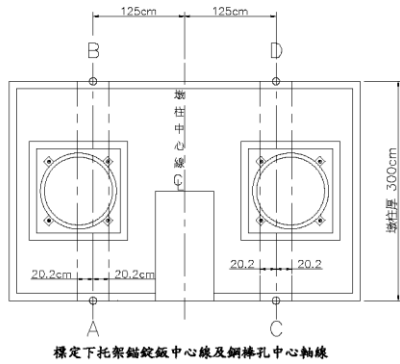


圖 10、墩柱鑽孔孔位放樣示意圖

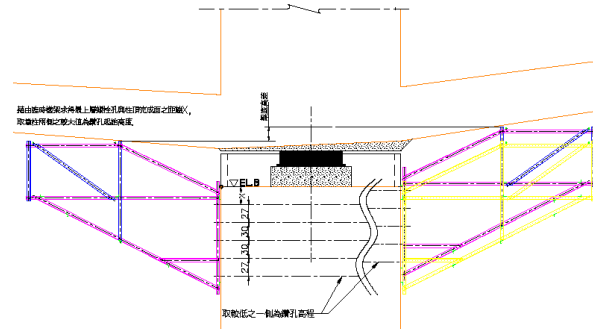


圖 11、臨時樣架示意圖

(B)墩柱鑽孔

墩柱鑽孔定位後，先以鋼筋探測儀器掃描該處鋼筋位置是否與鑽孔位置衝突，並適當平移孔位調整以避免傷及主筋影響結構強度。鑽孔作業委由專業廠商進行，控制其偏差在容許範圍內(半徑 3cm 內)，單一出孔位置若超出可接受範圍則由出孔端反向鑽孔修正，與原鑽入孔銜接。鑽孔完成後，另以等同(或略大於)鋼棒口徑之鋼管確認孔位是否足供鋼棒穿入之所需，詳圖 12 所示。

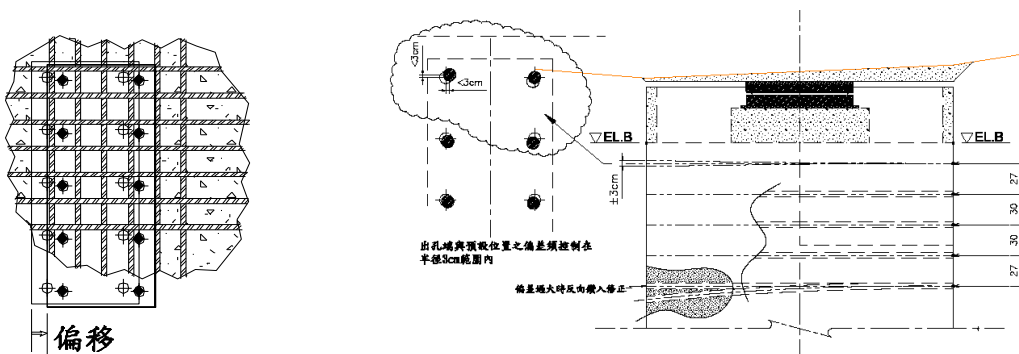


圖 12、地震力量分散裝置(STU)墩柱鑽孔施工示意圖

(C)梁底孔位放樣

箱梁內部底版於完成植筋及 R.C 加強墊後，依照下托架錨碇板中心線對應測設定出上托架中心軸線，透過既有之底版落水孔及測量儀器將箱梁外墩柱之相關基準線引入箱梁內部進行放樣量測，詳圖 13 所示。

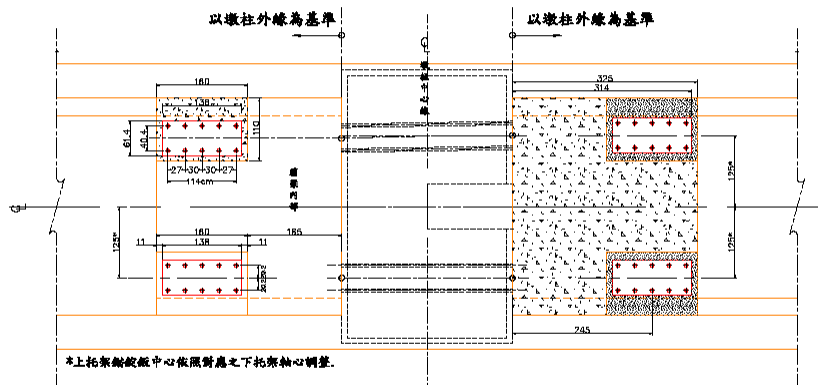


圖 13、地震力量分散裝置(STU)箱梁鑽孔定位施工示意圖

(D)箱梁底板鑽孔

於箱梁底板孔位放樣完成後進行鑽孔作業，如同墩柱之鑽孔。

(E)托架鑽孔加工及熱浸鍍鋅

墩柱及箱梁底板於鑽孔作業完成後，逐一將各托架實際之鑽孔位置摹繪於透明膠紙上並標記托架編號，回饋於鋼構加工廠進行托架之孔位核對及鉗孔作業。托架鉗孔完成後送往鍍鋅廠進行熱浸鍍鋅處理，完成後逐一標示托架編號運交工地進行安裝作業。

(F)鋼棒及鋼托架安裝

逐一將鋼棒置入墩柱鑽孔內並預留兩端相等之外露餘長，再將箱梁內之錨碇鈹(約 170kg/片)置入並對齊孔位，鋼棒一端先旋入螺帽後由另一端穿入底板孔內，使鋼棒垂掛於底板下方，如圖 14 所示。

安裝作業委由專業廠商進行，利用吊車配合輔助樣架將下托架(約 600kg/座)移至錨碇位置高度後，對準鋼棒孔位緩緩將鋼棒導入錨碇鈹孔內，旋入螺帽以防鋼棒脫離下托架，完成後將下托架推往墩柱面(保留約 5cm 間隙以利 STU 本體安裝時調整距離)。重複步驟進行墩柱另一端托架之安裝作業。

上托架安裝作業亦利用吊車配合輔助樣架將上托架(約 530kg/座)移至錨碇位置高度後，對準鋼棒孔位緩緩將鋼棒導入錨碇鈹孔內(錨碇鈹維持水平)，旋入螺帽以吊掛住上托架，完成後旋轉螺帽以調整上托架之高度及水平度，詳圖 15 所示。重複前述步驟完成另一側箱梁底上托架之安裝。



圖 14、鋼棒安裝施工示意圖



圖 15、上下托架安裝施工示意圖

(G)地震力量分散裝置(STU)安裝

於托架安裝完成後，進行 STU 本體(880KG/組)安裝，作業委由專業廠商進行，利用吊車及支撐托架將本體吊裝至上下托架間，對準本體兩側連接桿與托架之栓孔穿入固定栓桿，調整本體連接桿與托架栓孔間保持一定間隙，並經義大利指派之技師檢視逐一確認，完成地震力量分散裝置(STU)本體安裝作業。

(H)上下托架無收縮灌漿

待 STU 與上下托架間連接完成後，先將下托架錨碇板與墩柱之間隙進行封模灌注無收縮水泥砂漿作業，養護完成達到強度後旋緊螺帽固定下托架。

接著進行箱梁底與上托架錨碇板間隙紮筋封模作業，完成後灌注無收縮砂漿填滿空隙，養護完成達到強度後旋緊螺帽固定上托架。再次檢查並旋緊上下托架螺帽。

(I)外觀清潔及修補

上述安裝作業完成後，檢查上下托架及 STU 本體外觀是否有因施工中所造成之刮傷或污穢，著及進行清潔及防蝕油漆修補作業。

五、結論與建議

對於橋梁維護管理之耐久性考量需透過橋梁現地實際檢測及學理上之理論分析，方能獲得鹽害在鋼筋混凝土構造物中劣化情形，進一步對於結構物損傷提出修復補強之對策。故維護補強案例集撰寫之目的除第一篇之高速公路橋梁之維護管理，作為提供高公局新進工程司了解橋梁維護管理之基本知識外，亦藉由第二篇之橋梁維修補強工法案例提供相似案例修補之參考。

後續案例集撰寫之規劃除依據目前常用維修補強工法分類持續收集相關案例外，亦會針對各案例補充其施工常見問題與因應對策，以供案例引用時參考之用。

六、參考文獻

- [1] 張嘉峰，「交通設施生命週期評估技術整合與應用」，交通部運輸研究所，2005.11。
- [2] 張嘉峰，「設施生命週期評估技術整合與運用--公路附屬設施生命週期重要評估參數之建立」，2006.11。
- [3] 張嘉峰，「臺灣地區橋梁安全檢查、評估及監測執行程序之訂定」，交通部公路總局，2009.02。
- [4] 「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」，交通部，2008.12。
- [5] 「高速公路養護手冊」，交通部臺灣區國道高速公路局，100.02。
- [6] 「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範」草案委託研究計畫，交通部臺灣區國道高速公路局，2012.12。
- [7] 「公路養護手冊」，交通部，2003.03。
- [8] 「道路橋補修·補強事例集」，道路橋補修·補強編集委員會，2002。
- [9] 「既設橋梁之耐震補強工法事例集」，海洋架橋·橋梁調查會，2005.04。
- [10] 「道路橋補修補強事例集(2012年版)」，財團法人日本道路協會，2012.03。
- [11] 「道路橋補修補強事例集(2007年版)」，財團法人日本道路協會，2007.03。
- [12] 「道路橋補修補強事例集(2009年版)」，財團法人日本道路協會，2009.03。
- [13] 「橋梁檢測評估與補強」，李有豐、林安彥，2000。
- [14] 「既有混凝土結構物維修及補強技術手冊」，中國土木水利工程學會混凝土工程委員會，2005。
- [15] 「市區橋梁應用 FRP 補強手冊」，內政部營建署，2009.11。
- [16] 「橋梁常見之維修及補強工法介紹」，溫俊明，2011.03。
- [17] 「國道高速公路橋梁耐震補強工程(第一期)第 M11 標監造服務暨專業技術顧問服務報告書」，台聯工程顧問股份有限公司，2011.09。
- [18] 「國道高速公路橋梁耐震補強工程(第一期)第 M15A、M15B 及 M15C 標委託監造暨專業技術顧問服務報告書」，台灣世曦工程顧問有限公司，2009.12。
- [19] 「國道高速公路橋梁耐震補強工程(第一期)第 M13A 標委託監造暨專業技術顧問服務報告書」，建業工程顧問有限公司，2011.11。
- [20] 日本國土交通省東已地方整備局，「塩害橋梁維持管理手冊(案)」，平成 20 年。
- [21] 日本土木學會，「混凝土標準示方書(設計編)」，2012。

國道高速公路後續路段橋梁耐震補強工程計畫簡介

Introduction of the Taiwan Area National Freeway Bridge Subsequent Sections Seismic Retrofit Program

彭康瑜、吳明興、邱志晃、潘格平、陳威宇

一、前言

民國 88 年 9 月 21 日臺灣地區發生芮氏地震規模達 7.3 的集集大地震，造成中部地區相當重大的生命及財產損失，使人不得不懾於大自然無與倫比的力量，且因地震無法預先掌握測知的特性，如不審慎面對，往往造成更大的災害。

交通部臺灣區國道高速公路局(以下簡稱「高公局」)為防範於未然，隨即推動「國道高速公路(通車路段)橋梁耐震補強工程計畫」，以交通部「公路橋梁耐震設計規範」及其函頒修正之各章節，針對 89 年以前已通車國道路段橋梁，重新檢核及評估，對於不符合最新耐震設計規範之橋梁進行耐震補強，期能於日後大地震發生時，將損害減少至最低程度，並成功擔負起大地震後緊急救災之生命線道路重任。該計畫於 93 年 1 月奉行政院指示「同意先行辦理本計畫所列第 1 期工程，執行期程自民國 93 年度至 98 年度止；至於本計畫第 2、3 期工程則請交通部於第 1 期工程完成前，另就工程經費、效益及財務計畫重新檢討修正後，再提報行政院審議。」。

高公局依前述指示於 97 年 12 月第 1 期工程完成前，就第 2、3 期工程經費、效益及財務計畫重新檢討修正後呈報，行政院審議結果指示「如確有執行之必要及急迫性，應請另案成立新興建設計畫」。遂依據上述指示，並以交通部 97 年新頒「公路橋梁耐震設計規範」及修訂內容為評估補強標準，續辦未完成之原第 2、3 期工程橋梁耐震補強，將其合併為「國道高速公路(通車路段)橋梁耐震補強工程第 2 期工程計畫」。行政院經濟建設委員會於 99 年 3 月 9 日邀請相關單位研商，指示整體評估重新檢討計畫並補充相關資料後，再循程序報核。

高公局乃綜合考量各路段橋梁結構之「耐震指標」及「交通衝擊指標」，據以排定耐震補強之優先順序，並考慮路網特性，將第 2 期計畫分為 3 個優先路段逐步執行。該案奉行政院於 99 年 11 月 26 日核定辦理第 1 優先路段(國 3 汐止系統至竹南路段)，已完成耐震詳細評估與補強設計，目前刻正分 5 個施工標進行耐震補強施工作業中。

為持續檢討後續路段國道橋梁耐震標準，故針對前述第 2 期工程第 2、3 優先路段橋梁，及國道新建工程局於 921 集集大地震後，建議通案辦理檢討路段橋梁，同時針對經濟部地質調查所 2010 年公布新增第 1 類活動斷層對國道橋梁的影響，辦理「高速公路橋梁耐震補強後續路段評估與研究」(以下簡稱「本計畫」)，據以整體檢討後續路段的最適補強策略與建設計畫，賡續辦理國道橋梁耐震補強工作。



圖 1 國道橋梁耐震補強執行情形示意圖

二、計畫目標

我國永續發展策略綱領之願景是藉由資源的善用，使生態環境與經濟社會發展間之和諧得以妥善維護，期待國人能世代享有「永續的生態」、「適意的環境」、「安全的社會」與「開放的經濟」。其中，策略綱領所提之災害防救、產業發展、交通發展等，皆需依賴國內最重要交通生命線—國道高速公路耐震能力之全面提昇，並以風險管理的理念達到安全與經濟的雙贏。本計畫預定達成之四大目標如下：

- 於日後大地震侵襲時，達到減少損害、避免傷亡的主要目標；
- 結合已完成耐震補強之國道路網，建構臺灣高效率的地震救災緊急道路系統；
- 提供二十一世紀國家經濟持續發展所需之高安全性基礎交通建設；
- 透過「中度地震不壞、設計地震可修、最大考量地震不倒」耐震理念，達成國家整體防災之永續發展總目標。

三、計畫範圍與內容

依所蒐集之資料統計，本計畫之研究範圍詳見表 1 及圖 2，共計橋梁 1155 座。本計畫範圍含括的路段包含：

1. 國道高速公路橋梁耐震補強第 2 期工程第 2、3 優先路段(不含已於第 1 優先路段先行辦理的橋梁)。

- 2.國工局於集集大地震時「接近完工」與「下構已施工」之路段，建議通案辦理檢討之橋梁。
- 3.經濟部中央地質調查所2010公布新增第一類活動斷層，對國道影響之橋梁(不含已於第1優先路段辦理的橋梁)。
- 4.以上路段屬高公局管養之高速公路上方跨越橋。

表1 計畫範圍表

工作範圍	說明
第2期工程 (第2、3優先路段)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 國3甲台北聯絡線、國3南港聯絡線、基隆汐止段、新化九如段 ■ 國5南港石碇段、國8全線、國10全線
國工局建議通案辦理之路段	<ul style="list-style-type: none"> ■ 國3竹南草屯段、東西快漢寶草屯線(中興系統交流道4座橋)、草屯斗六段、雲林嘉義段、白河新化段、台南環線(新化系統交流道10座橋) ■ 國4全線、國5石碇頭城段
受經濟部中央地質調查所2010年公布新增第1類活動斷層影響路段	<ul style="list-style-type: none"> ■ 國道1號 86k+781~94k+947(新竹縣新埔鎮~新竹市東區)、144K+149~231K+098(苗栗縣三義鄉~雲林縣西螺鎮)、249K+471~250K+321(嘉義縣大林鎮)、343K+445~367K+752(高雄市岡山區~三民區) ■ 國道3號 188K+699~203K+244(彰濱快官段) ■ 國道6號全線

3.2 工作內容

本計畫工作內容，包括蒐集整理橋梁相關耐震設計竣工圖說、橋址地震資料、橋梁現況調查、耐震能力初步評估、排定評估補強優先順序、環境衝擊研究、工程經費效益評估、財務計畫、協辦事項及辦理專家學者座談會與教育訓練等。另針對已補強橋梁之地震特別檢測時機提出建議，以及彙編高速公路橋梁維修補強工法案例集。



圖2 計畫範圍圖

四、橋梁耐震補強性能準則

4.1 耐震補強之標準

1. 國道高速公路既有橋梁之耐震補強標準應以再服務年限達 50 年為原則，並應考慮河川沖刷與邊坡穩定之影響；於進行橋梁之耐震評估與補強設計時，若其補強工程費超過同型式橋梁新建工程費之 45%，則需進一步檢核評估補強設計之合理性。
2. 考量高速公路做為台灣最重要之生命線救災道路，本工程擬訂之橋梁耐震補強性能準則 (Seismic Performance Criteria)，如表 2 所示。

表 2 橋梁耐震補強性能準則

地震力等級	工址水平譜加速度係數		耐震理念	服務性能	損壞等級
中度地震: 設計地震/3.25	依行政區劃分		結構保持彈性	震後 正常通行	輕微
	回歸期 475 年地震之 1/3.25				
設計地震: 回歸期: 475 年 50 年超越機率: 10%	依行政區劃分		構件產生塑鉸，發揮容許韌性容量	震後 有限通行	可修復
	S_s^D	0.80、0.70、0.60、0.50			
	S_1^D	0.45、0.40、0.35、0.30			
最大考量地震: 回歸期: 2500 年 50 年超越機率: 2%	依行政區劃分		結構韌性容量完全發揮，但橋梁避免落橋、崩塌	震後 緊急通行	嚴重
	S_s^M	1.00、0.90、0.80、0.70			
	S_1^M	0.55、0.50、0.45、0.40			

(1) 地震力等級：中度地震、設計地震及最大考量地震 (MCE, Maximum Credible Earthquake) 等三級；依據現行交通部頒「公路橋梁耐震設計規範」之地震分區辦理。

(2) 服務性能 (Service Levels)：

- 震後正常通行 (Immediate)：地震後於 24 小時內，橋上交通可正常通行。
- 震後有限通行 (Limited)：地震後於幾天內，橋上可通行有限的交通 (如車道縮減、輕型救災車輛等)；橋上全面通行則需數個月的時間復舊搶修。
- 震後緊急通行 (Emergent)：地震後於幾天內，利用緊急臨時支撐系統 (可能需封閉局部交通搶修)，橋上可通行有限的交通 (如車道縮減、輕型救災車輛等)；橋上全面通行則需數個月的時間復舊搶修。

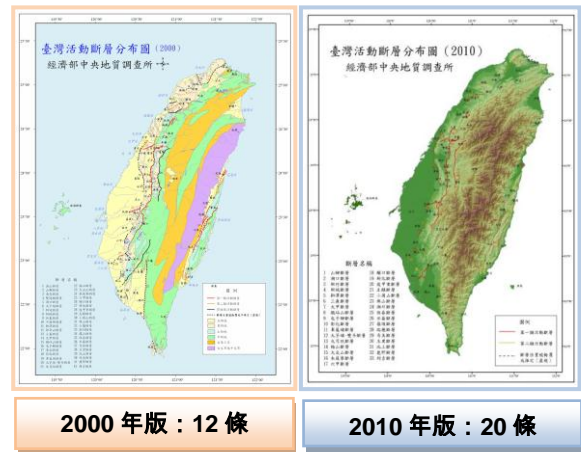
(3) 損壞等級 (Damage Levels)：

- 輕微 (Minimal)：地震時，橋梁結構保持在彈性階段。
- 可修復 (Repairable)：地震造成橋梁構件之損壞，可在不損失其主要功能下修復；如韌性構件產生塑鉸，發揮至容許韌性容量為限。
- 嚴重 (Significant)：地震可能造成橋梁構件之嚴重損壞，但不可崩塌 (No Collapse)，需封閉局部交通復舊搶修；如韌性構件產生塑鉸，發揮至極限韌性容量。

4.2 橋址鄰近活動斷層之地震力考量

依據經濟部中央地質調查所 2010 年 5 月公布的第一類活動斷層資料，相較於 2000 年版公告的 12 條外，新增 10 條，刪除 2 條 (卓山斷層、奇美斷層)，共 20 條，新增公告的 10 條第一類活動斷層有：新城斷層、三義斷層、大甲斷層、鐵砧山斷層、彰化斷層、大茅埔-雙冬斷層、六甲斷層、旗山斷層、瑞穗斷層、鹿野斷層，依據交通部頒「公路橋梁耐震設計規範」(98 年 6 月) 第 2.4 及 2.5 節規定，鄰近新增 10 條第一類活動斷層之橋梁，亦必須考量活動斷層之近域效應。

現階段，國家地震工程研究中心負責地震危害度分析之團隊，已檢討上述新增第一類活動斷層之地震調整因子(N_A 與 N_V)，分別採定值法(DSHA)與特徵地震的機率式地震危害度分析(PSHA)，依行政區域劃分與依距離斷層遠近，研擬設計地震(475年)與最大考量地震(2500年)之近域效應設計參數，並已納入交通部102年11月「公路橋梁耐震性能設計規範草案-複審成果報告書」。



依據複審規範(草案)，無論是採行政分區或斷層影響距離，須新增考慮近斷層效應之橋梁數量均相當龐大，如何整體考量其它優選排序因子，研擬納入後續路段優先辦理第一期工程之原則，是本計畫重要的關鍵課題。

4.3 預鑄節塊橋梁之耐震性能考量

921地震後，考量陸地上斷層錯動之震源深度較淺，引致較大的垂直地表加速度，交通部89年版公路橋梁耐震設計規範即將垂直地震力的影響納入設計考量。102年「公路橋梁耐震性能設計規範草案-複審成果報告書」(第4.3.4與4.3.6節)亦規定不規則橋梁或近斷層工址之重要橋梁應考慮垂直地震力之影響。

考量預鑄節塊橋梁上部結構之預力混凝土箱形梁，於垂直地震力作用下，其節塊間之接合面開展(joint opening)不僅會降低箱梁斷面容量，其殘餘開展間隙亦會影響後續橋梁之維護。近年來，美國加州大學San Diego分校在Caltrans的支持下，推動多項預鑄節塊結合之分析、設計及試驗的研究案，已獲得具體的進展。本計畫研究範圍內有3座預鑄節塊橋梁，其距離第一類活動斷層最近約2公里，故參考相關最新研究成果，針對國道預鑄節塊橋梁之節塊接合(segment joint)行為，探討後續耐震評估補強之性能準則建議。

根據上述研究案及現行交通部頒「公路橋梁耐震設計規範」，本計畫預鑄節塊橋梁上部結構之耐震補強性能準則初步建議，如表3所示，摘要說明如下：

表3 預鑄節塊箱形梁橋耐震性能準則(初步建議)

地震力等級	節塊接合面行為	評估標準
設計地震 回歸期：475年 50年超越機率：10%	接合面無開展	解壓彎矩 M_{dc}
最大考量地震 回歸期：2500年 50年超越機率：2%	接合面開展 鋼腱預力損失 震後無法完全閉合	混凝土應變 $\epsilon_c < 0.003$ 或 鋼腱應力 $f_{pt} < 0.78f_u$ 時 相對應轉角

1. 採用適當的預鑄節塊非線性有限元素模型，進行整體橋梁單元之縱向非線性側推分析或時間歷時動力分析。
2. 藉由該預鑄節塊橋梁之耐震性能曲線，求得設計地震與最大考量地震等效地表加速度下相對應之節塊接合面彎矩與轉角。

- 初步建議設計地震時接合面彎矩小於解壓彎矩 M_{dc} (斷面最外側之混凝土壓應力為零)；最大考量地震下允許接合面開展，但須確保預力鋼腱保持彈性(鋼腱應力 $f_{pt} < 0.78f_u$)， f_u 為預力鋼腱極限應力，且混凝土未壓碎(混凝土應變 $\epsilon_c < 0.003$)。
- 若上述接合面彎矩或轉角大於目標性能點相對應之斷面彎矩或轉角，表示該預鑄節塊橋梁不符合耐震性能目標，須進行適當的耐震補強。

五、橋梁耐震補強考量重點

5.1 橋梁耐震能力分析評估方法

橋梁耐震能力之詳細評估方法有兩種：(1)橋梁各部位之容量和需求比值法(C/D 比值法)、(2)橋梁側推評估法(Lateral Push-over Analysis)。容量和需求比值法著重於個別部位之結構行為，而忽略了不同部位之交互影響，但因其方法較簡單且能清楚掌握構件補強重點，既有橋梁各主要構件之耐震能力評估可採用此方法。側推評估法則考量整座橋梁受逐漸增加之側力作用，到達倒塌時之力-變形行為分析，故其乃著重於變形容量而非強度，並以採非線性靜力分析法(Nonlinear Static Analysis, NSA)為主，橋梁耐震能力評估流程，如圖 5 所示。

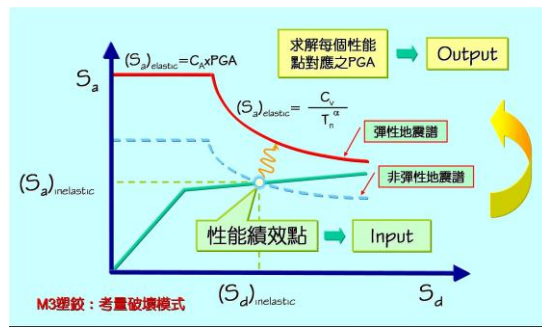
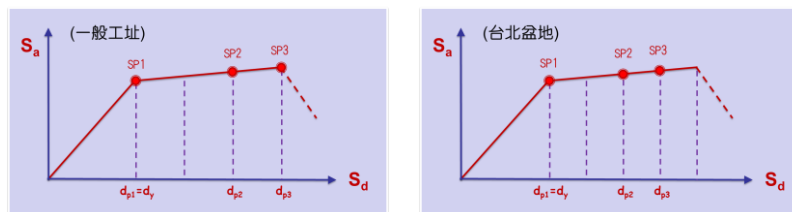


圖 3 耐震評估求得結構性能點對應的地表加速度

求出橋梁在各種破壞模式下(不同之耐震性能點，如圖 4)對應之地表加速度後，再以危害度評估之觀念，求出橋梁在預期服務年限內所對應之設計地表加速度，以此為標準評估橋梁耐震能力是否足夠，若發現既有橋梁之耐震能力不足，則應予以耐震補強或改建新橋，以提高其耐震能力；其中，補強設計需要依據橋梁不同之破壞模式進行，且需確保補強後橋梁之其它部位不致因應力重新分配而導致破壞。



註：圖中之 $d_{p2} = d_y + \frac{d_{p3} - d_y}{1.5}$ ，SP1、SP2及SP3分別代表中度地震、設計地震及最大考量地震之結構耐震性能標準，其耐震理念、服務性能及損壞等級請參見表2。

圖 4 一般工址與台北盆地之結構耐震性能標準

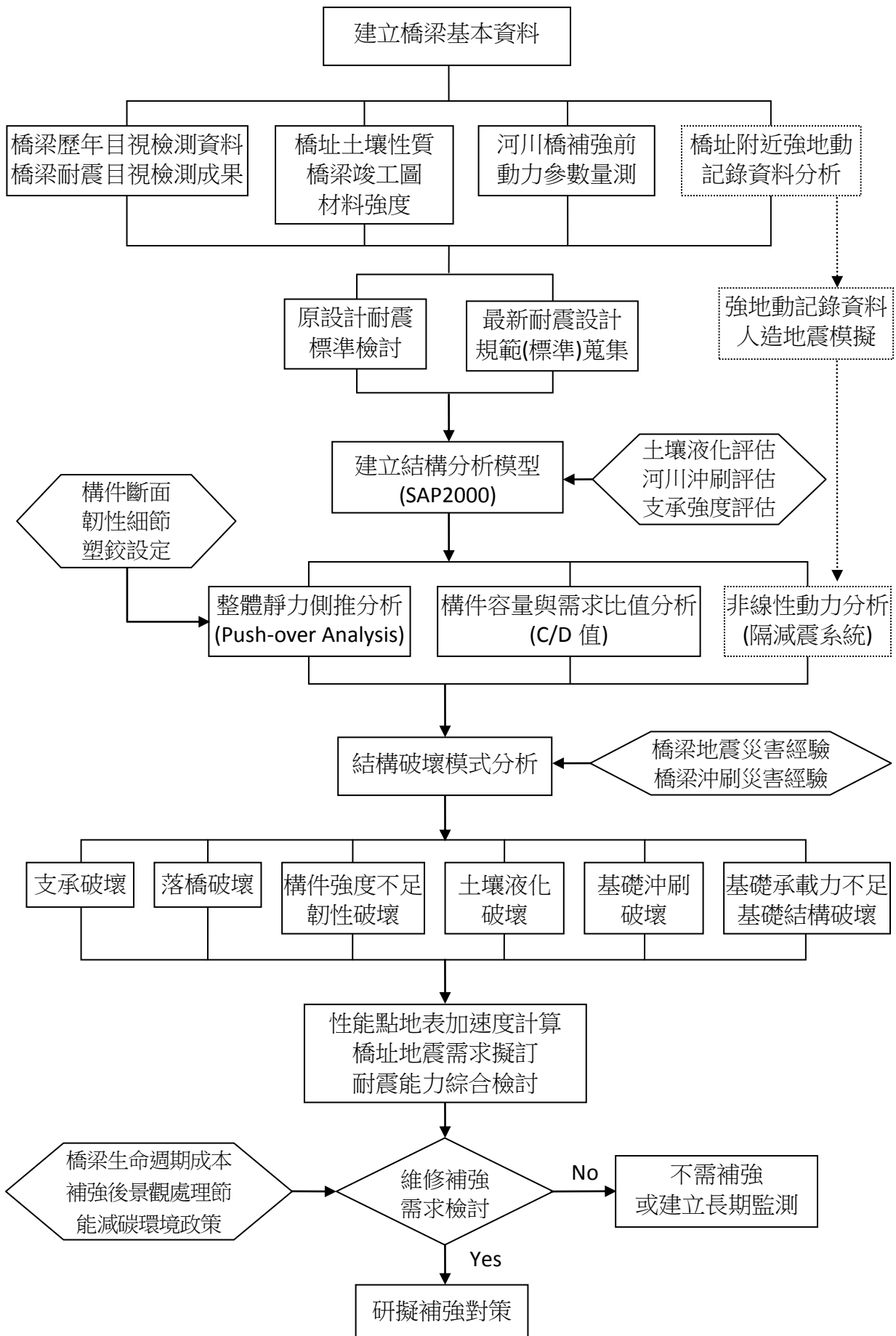


圖 5 國道高速公路橋梁耐震能力評估流程圖

5.2 耐震補強設計基本策略

國道高速公路既有橋梁於進行耐震補強之規劃與設計時，為滿足「國道橋梁為台灣地區生命線救災道路」之耐震補強定位，採用系統補強、增加構件或構件補強等三種策略來思考時，宜把握下列基本策略，參見圖 7 所示：

1. 耐震能力不足之橋梁進行補強時，應尋找最適當且經濟的方法，將耐震能力提昇至足夠之標準。
2. 依據詳細耐震能力評估之結果，來進行耐震補強分析與設計，以及支承系統之改善。
3. 橋梁耐震補強的方法很多，包括增加構材的韌性或強度、增設止震塊、增加梁端防落長度、設置防落橋設施、基礎補強、地盤改良、降低液化潛能及改變橋梁結構系統等，應妥為靈活運用。
4. 橋梁經耐震補強分析與設計後，為檢核無其它耐震弱點產生，必要時應再次進行詳細耐震能力評估，以確保整體耐震能力均已提昇至足夠之標準。
5. 補強計畫將使橋梁上部結構、下部結構及基礎構造等整體結構系統耐震能力之均衡提昇。
6. 原則上將藉由橋柱的補強，來增進橋梁之強度與韌性，使橋梁得以抵抗更大之地震。



7. 增設妥適及具耐衝擊性的防止落橋裝置，以防止支承破壞所可能產生之落橋事件。



8. 系統補強對策：在工址地質條件符合規範的要求下，得檢討採變更橋梁結構系統之可行性(含施工性及補強效益)，以反力分散、增加阻尼(阻尼器)或週期延長(隔震支承)來減輕地震慣性力。



9. 位移拘束工法：對橋長小於 100 公尺且交角小於 15 度之短跨橋梁，宜考量橋台之地震動力反應(Dynamic Response)與土壤之阻尼效應，橋台之結構強度若有不足，則予以補強，考量橋台補強之施工費用與交通衝擊較低，是此工法最大的優點。

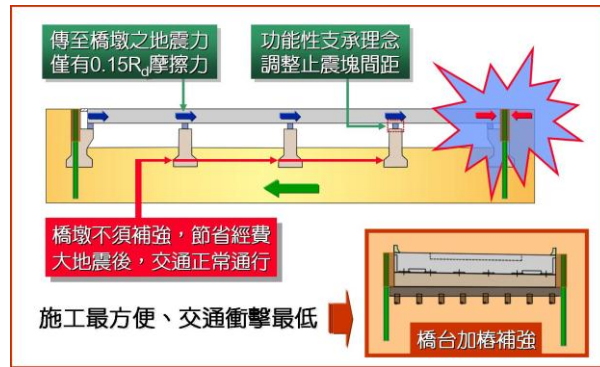


圖 6 中小型橋梁位移拘束工法示意圖

10. 既有橋梁在交通路網上擔負著重要的運輸責任，故在進行補強作業時，應儘量避免交通中斷；既有橋梁的周遭環境已長時間維持於安定的狀態，無論是生態、環境、鄰近居民或橋下空間利用等，於補強作業進行時皆須妥善予以考量，儘量降低甚或採迴避策略對其之衝擊，此為補強工程與新建工程最大不同之處。

另外，補強工程之施工條件受到：(1)作業位置多及施工量少、(2)作業空間小及姿勢受限、(3)專業技術性高之限制，施工效率較一般新建工程為低，另補強作業位置係以點的方式佔大多數，為避免補強作業危害結構安全，補強之位置不宜在施工中長時間處在不安定的狀態，施工時應儘量避免各補強位置同時進行作業，亦即施工時宜以單一位置進行補強為原則。

目前，美國、日本之橋梁耐震補強技術，在面對一次又一次的大地震襲擊與考驗後，皆感仍有所不足而持續發展與改進，考量橋梁結構系統之特性與國內施工環境之限制，如何在核定之計畫預算限制下，考量橋梁生命週期成本之理念，研擬最佳的橋梁耐震補強方案，是本計畫未來執行之重點工作。原則上將考量每座橋梁之結構特性及耐震需求，就傳統耐震補強工法，以及美國、日本已成功運用之新材料與新工法，依據圖 7~圖 9 之選擇流程，有系統地探討下列各種補強方案：

- **構件補強方案：**橋柱補強、帽梁補強、基礎補強。
- **增加構件方案：**增設止震設施(RC 止震塊、鋼製止震裝置)、增設防震拉條、加長防落長度。
- **系統補強方案：**隔減震補強、地震力分散裝置、位移拘束工法、功能性支承補強理念。

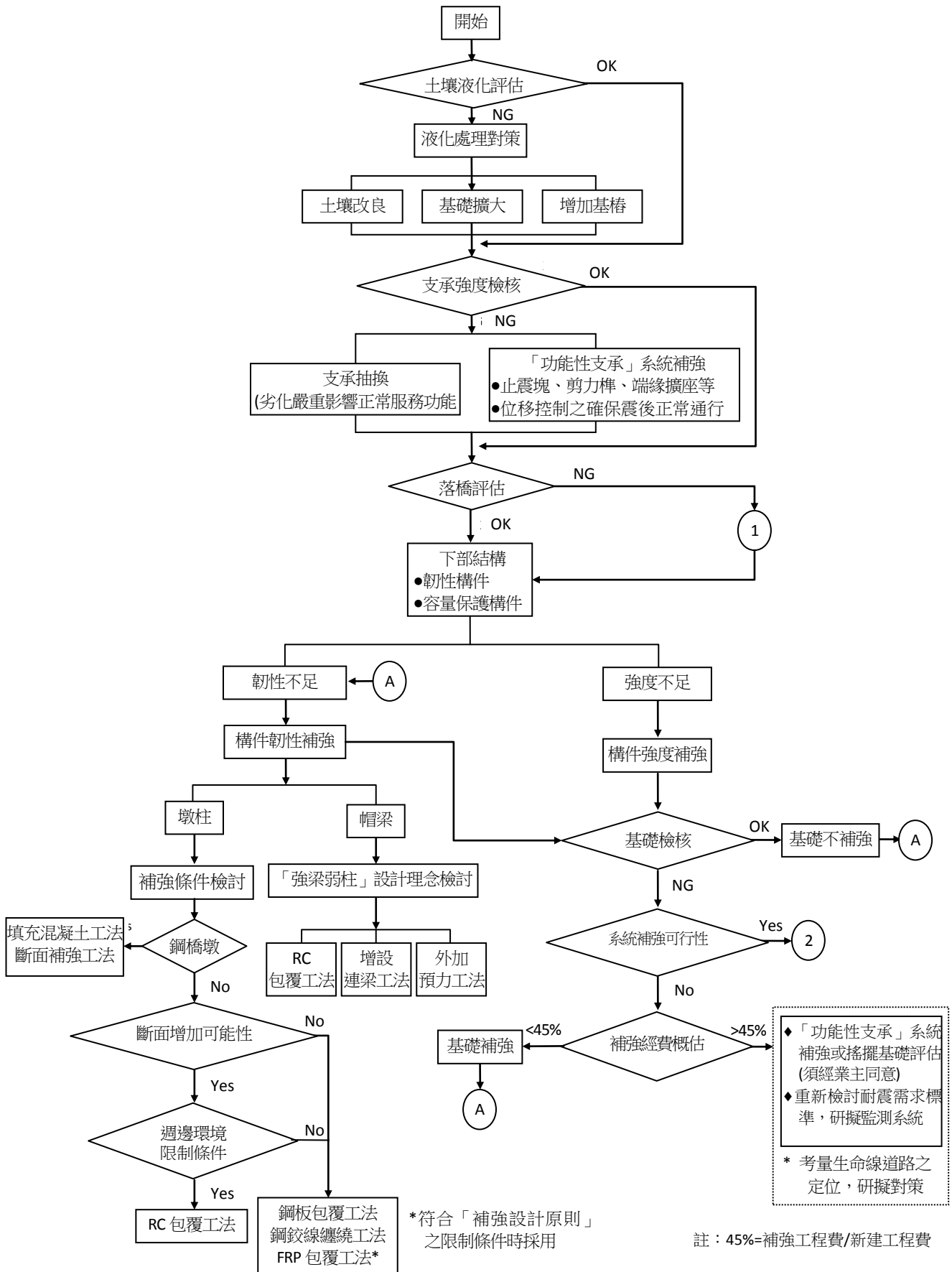


圖 7 國道高速公路橋梁耐震補強對策

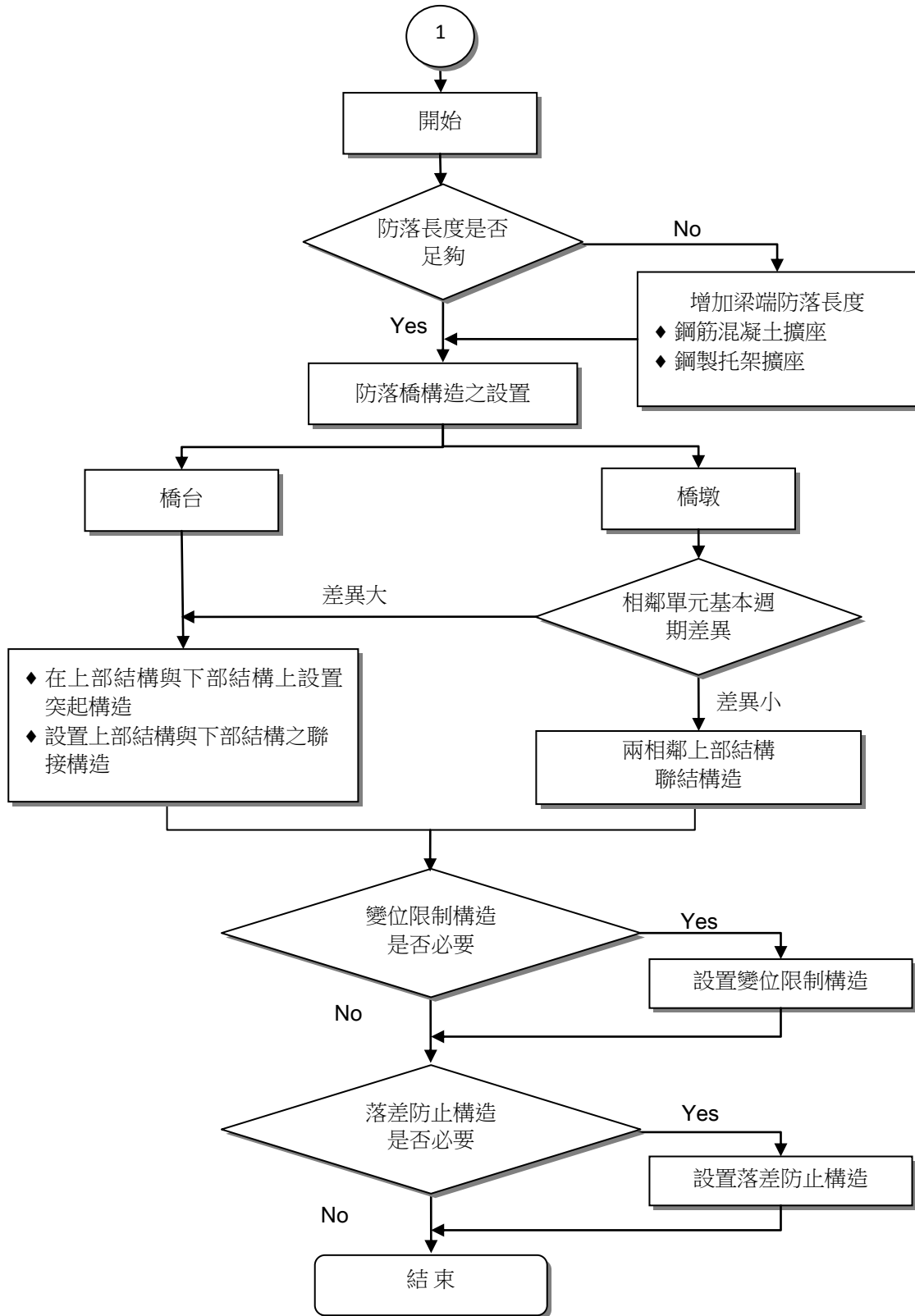


圖 8 防止落橋對策之選定流程

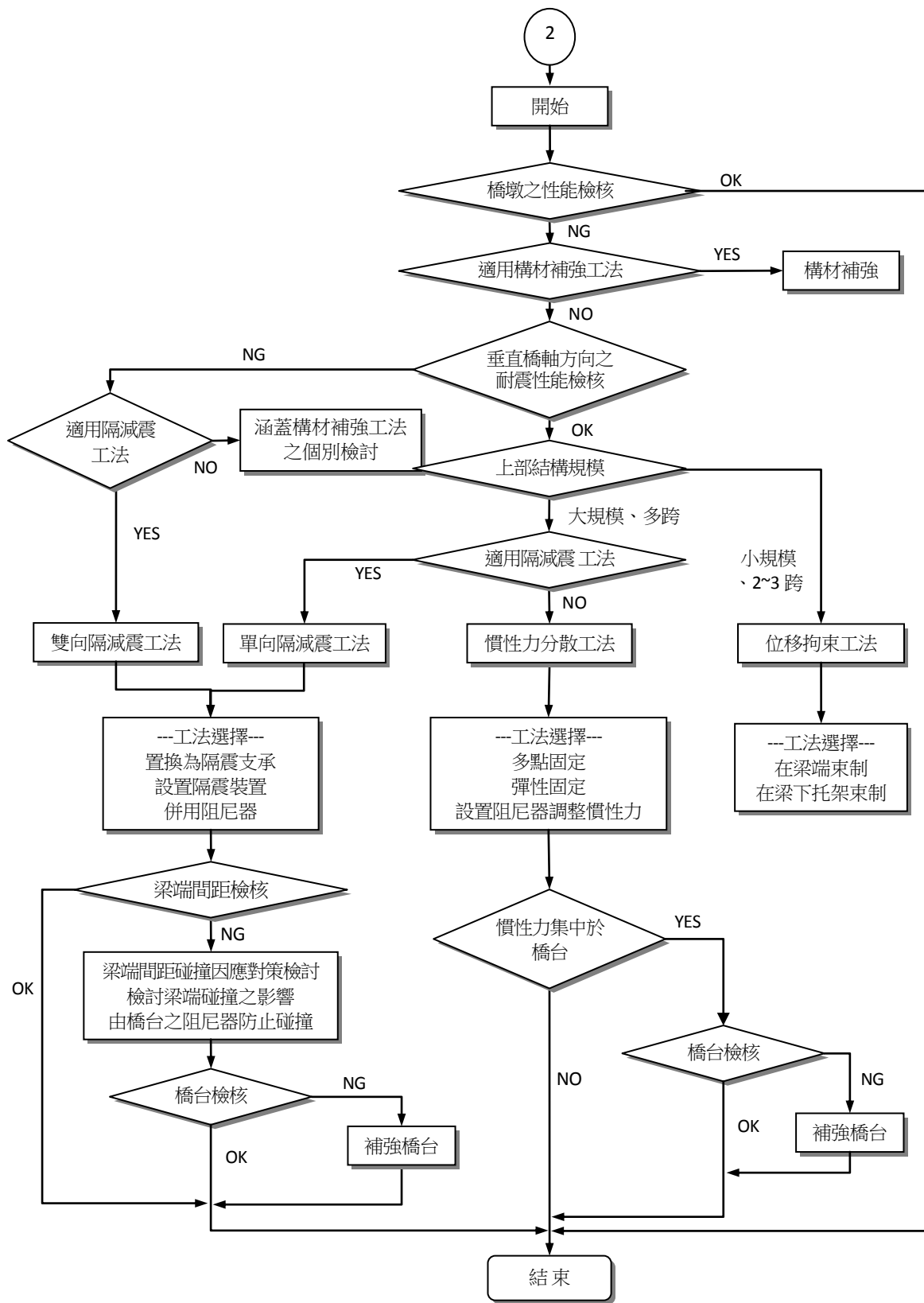


圖 9 橋梁整體結構系統補強工法選擇流程

5.3 橋梁沖刷潛勢初步評估

由於本計畫橋梁眾多，可行性研究階段需能以快速且適切保守的評估方式，對計畫範圍內橋梁作初步沖刷潛勢研判。參考交通部運輸研究所提出之「跨河橋梁橋基沖刷檢測作業規範(草案)」(100年12月)，有關橋基沖刷潛勢評估方法共分為『目視檢測』及『詳細檢測』兩大項目，其中目視檢測包含 DER&U 評估、簡易沖刷潛勢評估以及現況紀錄，如表 4 所示；詳細檢測需包含詳細沖刷潛勢評估、沖刷深度及水位、流速檢測以及橋梁結構及河道斷面檢測等。本計畫為探討橋梁耐洪沖刷初步評估，故以 DER&U 評估及簡易沖刷潛勢評估為主。

表4 「跨河橋梁橋基沖刷檢測作業規範(草案)」中目視檢測之方法說明

目視檢測方法	定義或項目	主要取得參數	使用表格
DER&U 評估	一般性或定期性之橋梁巡檢	DER&U 評估分數	DER&U 評估表
簡易沖刷潛勢評估	1. 簡易快速的完成沖刷潛勢評估 2. 基礎裸露深度以及河流表面流速之概估	1. 沖刷潛勢評估分數 2. 估算之基礎裸露深度、河流表面流速等	跨河橋梁沖刷潛勢評估表
現況紀錄	1. 河流水位、表面流速 2. 橋梁結構是否有受損	概估之河流水位及表面流速或引用治理計畫之流速	跨河橋梁沖刷潛勢評估表

在 DER&U 評估所需之六個項目為：『河道』、『橋台基礎』、『橋台』、『橋墩保護設施』、『橋墩基礎』及『橋墩墩體』等項目，依其 DER&U 評分結果計算 SSI 值，並將 SSI 值紀錄於表中，其中 SSI 值愈高代表該橋梁的沖刷風險愈低，反之沖刷穩定指標 SSI 值過低的話，則可能有較大遭受沖刷損害的風險。

在簡易沖刷潛勢評估方面，主要包括二大區塊：(1)室內評估項目：包含『上游攔河堰或水庫等設施』、『基礎型式』、『橋梁是否位於河道彎曲處或束縮處』、『河床下降情形』、『河床材料』以及『主河道位置』等；(2)現地評估項目：包含『跌水效應』、『橋墩(基)方向與河川流向間之角度』、『阻水面積比 RA』、『基礎裸露程度』、『橋墩阻水情形』以及『下部構件健全度』、『護岸工現況』、『護床工現況』等項目，其中並包括 DER&U 評估所計算之 SSI 值評估成果。經前述評估項目依所屬權重評分，低於 20 分者可列為低度沖刷潛勢橋梁，介於 20~40 分者列為中度沖刷潛勢橋梁，而評估分數高於 40 分者則可列為高度沖刷潛勢橋梁。

由於簡易沖刷潛勢評估目的主要在於能有效評估橋梁現況沖刷潛勢，對於河川之長期演變較少著墨，故跨河橋梁沖刷潛勢評估表針對其評分項目中未羅列之沖刷可能，另列一欄「其他沖刷潛在因素」作為補充，而本計畫即由以下三方面作為補充評估：(1)瓣狀河川河道沖刷演變，藉由歷年航照及竣工資料作為判斷依據；(2)由過往竣工報告、研究報告及文獻收集各橋梁之已知或潛在危害；(3)河道中直接基礎之沖刷潛勢評估。此三補充評估中有任一項評估為高風險者，即認定該橋具有高沖刷潛勢，並合併前述評分為高度沖刷潛勢者，則建議考量納入優先辦理耐震評估補強。

六、耐震補強優選排序架構

本計畫整合「台灣地震損失評估系統(TELES)」、TransCAD 路網分析與經濟損失評估等跨領域技術，對震後國道路網服務效能進行分析，其成果除做為橋梁耐震補強優選排序重要指標，亦可據以合理量化耐震補強計畫之直接與間接經濟效益。本計畫目前仍進行相關分析中，具體的研究結果預計於今年 7 月提出期末報告。

6.1 應用 NCREE TELES 震損評估

財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心近十多年來持續研發「台灣地震損失評估系統(TELES)」，提供各種地震災情推估、災情彙整及應變決策支援等相關的資訊服務，提升各級政府與民間企業關於震災風險評估與應變管理的能力。TELES 系統分析模組大致包含地震災害潛勢分析、工程結構物損害評估、二次災害評估和社會經濟影響評估等。

民國 91 年林同棧工程顧問公司執行高公局「國道高速公路橋梁耐震分析評估及補強工程(國道通車路段)可行性研究」，乃 TELES 系統第一次參與公路橋梁的震損評估，並初步整合震源機率模型，計算個別橋梁於耐震補強前後的年平均損失，作為推估直接經濟效益的依據。當時採用的震損評估模式，主要係參考美國所研發的地震損失評估系統 HAZUS 99；首先將典型橋梁分為 8 大類，每一大類又依耐震設計年份，區分為傳統設計或經耐震設計等兩類，並針對每一類別國道橋梁進行側推分析，藉以擬訂超越不同損害狀態的易損性曲線的中值和變異數；另依據個別橋梁的幾何特性、歪斜角、地盤種類等，調整振動與位移易損性曲線中值。該系統後續亦運用於交通部公路總局「公路橋梁耐震能力評估及補強工程可行性研究」及臺灣鐵路管理局「環島鐵路整體系統安全提昇計畫(全線橋梁總檢查及耐震補強延壽規劃)」等橋梁耐震補強計畫。本計畫所採用的震損評估模式，乃累積前述幾項大型委託計畫的研究成果，並針對其評估模式和參數校正進行研發，藉以提升各項評估結果的合理性和可靠度。

前述橋梁震損評估技術，可推估個別橋梁於模擬地震作用下可能的損害程度、修復或拆除重建所需的費用與時間等。如能有效整合橋梁震損評估、路網分析與經濟損失評估等三項跨領域的技術，可對路網震後服務效能進行分析，並可協助防災規劃、優選排序與風險管理。

為使橋梁震損評估結果的各項數據能落實應用於實務上，本計畫亦進一步利用 921 地震當時具代表性之公路橋梁損害案例，進行震損評估模式和其所使用的參數值之校正和驗證，確保震損評估結果能合理預測各種推測地震事件所造成的橋梁損害狀態、修復金額和修復時間等。

6.2 結合 TransCAD 交通路網分析

本計畫為了評估國道橋梁於地震受災後造成路段阻斷，影響國道主線通行所造成車輛因繞行而增加旅行時間及旅行距離，參考交通部運研所第四期國家永續發展之城際運輸系統需求模式研究成果，利用 TransCAD 軟體進行本計畫各橋梁受災時之情境模擬，以瞭解國道橋梁地震受損後對交通造成之損失。其基本假設及研究步驟說明如下：

1.基本假設：

- (1)公路路網：採用交通部運研所第四期國家永續發展之城際運輸系統需求模式民國 105 年公路路網。
- (2)交通分區：參考交通部運研所第四期國家永續發展之城際運輸系統需求模式所建立之 361 分區。
- (3)旅次矩陣：參考交通部運研所第四期國家永續發展之城際運輸系統需求模式民國 105 年平常日客、貨運旅次。

2. 研究流程

本計畫計算地震災後交通間接損失之研究流程如圖 10 所示，以民國 105 年公路路網為起始路網，地震災後對各評估單元進行分析，未處於震區之評估單元保持國道主線通行，位於震區之國道區間若為重度受損則需封閉並進行車輛改道，將未受影響之評估單元及受影響之評估單元結合後可以得到新的各獨立地震災後公路路網，重新計算整個路網之旅行時間及旅行距離，可得知災後國道橋梁受損情境與原本公路路網情境下之差值，透過時間價值及行車耗損等貨幣化之轉換，即為本計畫所擬定之高速公路交通間接損失。

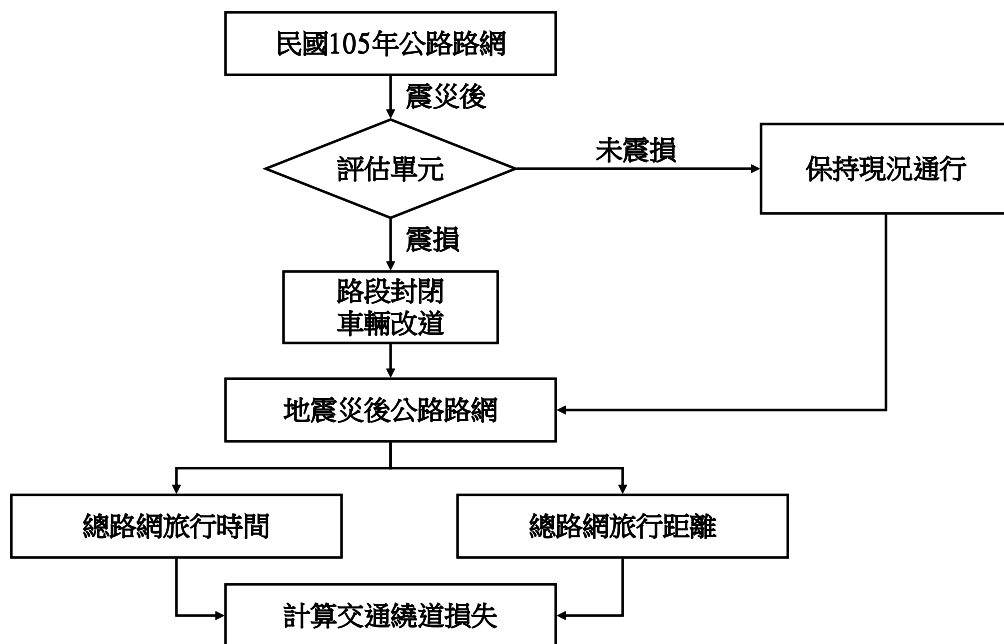


圖 10 交通繞道損失計算研究流程圖

6.3 本計畫採用的優選排序指標

本計畫之橋梁耐震評估補強優選排序指標，初步研擬分為橋梁耐震性能指標與交通經濟衝擊指標等兩類，後續將再進一步研析調整：

1. 橋梁耐震性能指標 (Structural Vulnerability)

- (1) 橋梁損失風險值：

經由 TELES 的震災風險評估可以求得地震損失風險值，地震損失風險值越大的橋梁，應優先進行後續之耐震評估，因此可以下列式(1)來表示區間 i 之橋梁損失風險值 $I_{L,i}$ ，考慮此參數的用處在於橋梁補強排序的一個因素，所以皆需正規化，使其值為介於 0 到 1 之間的數字，以增加其鑑別率。

$$0 \leq I_{L,i} = \frac{(L_{c,i}/A_i) - (L_{c,i}/A_i)_{\min}}{(L_{c,i}/A_i)_{\max} - (L_{c,i}/A_i)_{\min}} \leq 1 \quad (1)$$

其中評估區間 i 之補強前地震損失風險值為 $L_{c,i}$ ， $(L_{c,i}/A_i)_{\max}$ 為所有區間橋梁損失風險值之最大值， $(L_{c,i}/A_i)_{\min}$ 為所有區間橋梁損失風險值之最小值， A_i 為評估區間 i 之橋梁面積。

(2) 橋梁耐震初評分數：

本計畫針對既有橋梁進行現況普查，並依據計畫初期擬訂之初步評估表，針對落橋及強度韌性進行初步評估，兩項均可獲得一個從 0 至 100 的評估分數。為提高鑑別率，因此以初評分數最大值為上限及初評分數最小值為下限，以進行正規化，使其值為介於 0 到 1 之間的數字值。公式如下式(2)、(3)：

$$0 \leq I_{pc,i} = \frac{S_{pc,i} - (S_{pc,i})_{\min}}{(S_{pc,i})_{\max} - (S_{pc,i})_{\min}} \leq 1 \quad (2)$$

$$0 \leq I_{pd,i} = \frac{S_{pd,i} - (S_{pd,i})_{\min}}{(S_{pd,i})_{\max} - (S_{pd,i})_{\min}} \leq 1 \quad (3)$$

其中 $I_{pc,i}$ 為評估區間 i 之落橋指標、 $S_{pc,i}$ 為評估區間 i 之初評落橋得分、 $(S_{pc,i})_{\max}$ 為所有區間初評落橋得分之最大值、 $(S_{pc,i})_{\min}$ 為所有區間初評落橋得分之最小值、 $I_{pd,i}$ 為評估區間 i 之強度韌性指標及 $S_{pd,i}$ 為評估區間 i 之初評強度韌性得分、 $(S_{pd,i})_{\max}$ 為所有區間初評強度韌性得分之最大值、 $(S_{pd,i})_{\min}$ 為所有區間初評強度韌性得分之最小值。

(3) 橋梁補強績效比：

TELES 系統除了推估補強前的地震損失風險值之外，更進一步依據所訂定的補強目標，求出橋梁在補強後的狀態下之地震損失風險值後，依據下列式(4)來表示評估區間 i 之橋梁補強後橋梁補強績效 $I_{e,i}$ ，同樣將其值正規化，使其值為介於 0 到 1 之間的數字，以增加其鑑別率。

$$0 \leq I_{e,i} = \frac{[(L_{c,i} - L_{r,i})/A_i] - [(L_{c,i} - L_{r,i})/A_i]_{\min}}{[(L_{c,i} - L_{r,i})/A_i]_{\max} - [(L_{c,i} - L_{r,i})/A_i]_{\min}} \leq 1 \quad (4)$$

其中評估區間 i 之後地震損失風險值為 $L_{r,i}$ ， $(L_{c,i} - L_{r,i})/A_i$ 為評估區間 i 之補強績效比， $[(L_{c,i} - L_{r,i})/A_i]_{\min}$ 為所有區間之補強績效比最小值， $[(L_{c,i} - L_{r,i})/A_i]_{\max}$ 為所有區間之補強績效比最大值。

2. 交通經濟衝擊指標(Social & Economic Impact)

在交通經濟衝擊指標部分，主要從交通繞道風險值、跨越重要設施指標及產業經濟衝擊指標等三層面進行評分，茲說明如下。

(1) 交通繞道風險值(I_{detour})：

交通繞道風險值納入生命線交通路網之概念，由於高速公路為封閉性道路，故評分時納入高快速道路之路網架構之概念，以交流道至交流道間為分析區段，且視為獨立事件。操作時將先利用運輸規劃軟體 TransCAD 分析每一分析區間(交流道至交流道間)封閉時，每日交通改道所額外增加之總旅行時間及總旅行距離，其後將前述兩者分別乘以時間價值及單位行駛成本將兩者予以貨幣化後，得到交通繞道所導致之衍生成本。配合 TELES 計算每一橋梁發生災損之機率值，兩者相乘即為交通繞道風險值。

此一風險值受到分析區間交通量大、改道動線距離、改道動線服務水準及橋梁發生災損之機率值所影響，其數值越高表示風險值越高，其重要性越高。

$$0 \leq I_{\text{detour},i} = \frac{L_{\text{detour},i}}{(L_{\text{detour},i})_{\text{max}}} \leq 1 \quad (5)$$

其中， $L_{\text{detour},i}$ 表示評估區間 i 之交通繞道風險值， $(L_{\text{detour},i})_{\text{max}}$ 表示所有區間交通繞道風險值中之最大值。

(2) 跨越重要設施指標：

國道橋梁如有跨越重要設施如高鐵、臺鐵、快速道路或市區高架道路等，發生橋梁災損時亦將對各跨越之重要設施造成影響。故本評估將藉由「跨越重要設施指標」反應各橋梁路段對其跨越設施之影響。

本指標係由電子地圖依各國道評估區段所在位置判別是否跨越高鐵、臺鐵、快速道路或市區高架道路等重要設施，其指標設定為 0 或 1。

$$I_{\text{infrastructure},i} = 0 \text{ or } 1 \quad (6)$$

其中， $I_{\text{infrastructure},i}$ 表示評估區段 i 之跨越重要設施指標值，為 1 或 0。1 表示有跨越高鐵等重要設施，0 則表示沒有跨越重要設施。

(3) 產業經濟衝擊指標：

高速公路係屬國道，依公路法第二條定義：「二、國道：指聯絡二省(市)以上，及重要港口、機場、邊防重鎮、國際交通與重要政治、經濟中心之主要道路。」

因此若分析區段具有服務重要交通節點(如直轄市、機場、港口、科學園區(國科會主管)及工業區(經濟部主管))而位於其半徑 30 公里內，其產業經濟衝擊指標將予以反應其重要性。

$$I_{\text{economy},i} = 0, 0.5 \text{ or } 1 \quad (7)$$

其中， $I_{\text{economy},i}$ 表示評估區段 i 之產業經濟衝擊指標值，為 0, 0.5 或 1。1 表示有服務重要交通節點包含直轄市、機場、港口及科學園區等；0.5 表示有服務工業區，惟其重要性不如前者，故給予略低之 0.5 評分；0 則表示沒有跨越重要設施。

6.4 橋梁補強排序初步建議

本計畫橋梁補強排序，初步建議依據前節探討之各項補強排序指標及評比因子，經過不同權重的計算，可以獲得每座橋梁在補強排序上由 0 到 1 的分數，分數越高代表耐震補強的急迫程度相對越高。

除前述指標外，本計畫進行優先排序時將同時考量下列因素：

1. 考量國道高速公路「封閉性道路」特性，若非交流道與交流道間所有橋梁單元一併評估補強，其中只要一個單元發生震損交通中斷，則無法發揮該路段震後通行效益。故進行優選排序時，將以路段為單位，而非以橋梁為單位。
2. 考量後續路段距離第一類活動斷層較近之橋梁地震風險較高，以及部分沖刷潛勢較高的河川橋，將建議優先納入後續路段第一期工程辦理耐震評估與補強。

七、結語

國道高速公路是台灣最重要的公路系統，每日負擔著六大核心都會商業區、科學園區、機場、港口及醫療中心等繁忙的交通量，當台灣面臨災難性地震侵襲時，即使橋梁結構有所損傷，仍必須能維持救災交通的順暢，讓國家緊急救災系統之人員、物資，能在最短的黃金時間內抵達災區；所以，國道高速公路為台灣最重要的生命線救災道路，高速公路局持續推動「國道高速公路橋梁耐震補強工程計畫」，重新檢核及評估國道高速公路之新舊橋梁，對於不符合最新耐震設計規範之橋梁進行耐震補強，期能於日後大地震發生時將損害減少至最低程度，並成功擔負起大地震後緊急救災之生命線道路重任。

本計畫現階段將檢討橋梁耐震設計規範年代、震區調整幅度、TELES 地震直接損失、補強效益與鄰近斷層影響因子等「橋梁耐震指標(Vulnerability)」，以及橋梁所在國道路網之交通量大小與震損改道距離，影響港口、科學園區與區域產業等「交通經濟衝擊指標(Impact)」，據以研擬後續路段之分期防災策略。另考量後續路段距離第一類活動斷層較近之橋梁地震風險較高，以及部分沖刷潛勢較高的河川橋，建議優先納入後續路段第一期辦理。

八、參考文獻

1. 林同棧工程顧問股份有限公司，「高速公路橋梁耐震補強後續路段工程」可行性研究期中報告書，民國 103 年 2 月。
2. 交通部運輸研究所「跨河橋梁橋基沖刷檢測作業規範(草案)」，民國 100 年 12 月。
3. Veletz, M.J., and Restrepo, J.I. (2011a) "Modeling of Jointed Connections in Segmental Bridges", ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 139-147, January/February 2011.
4. Veletz, M.J., and Restrepo, J.I. (2011b) "Development of Seismic Design Guidelines for Segmental Construction", Structural Systems Research Report, SSRP-2010/02, University of California, San Diego, La Jolla, CA, December 2011.
5. Veletz, M.J., and Restrepo, J.I. (2013) "Equivalent Unbonded Length for Modeling of Multi-strand Tendons in Precast Segmental Construction", ASCE Journal of Bridge Engineering. Under review.
6. MCEER-11-0002 "Seismic Design and Analysis of a Precast Segmental Concrete Bridge Model," by M. Anagnostopoulou, A.