臺北市救援道路橋梁之延壽補強

關鍵詞：橋梁耐震設計規範、耐震補強、側推分析

台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／協理／黃炳勳 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／經理／陳新之 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／經理／蔣啟恆 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／副理／吳弘明 ❹
台灣世曦工程顧問股份有限公司／第二結構部／正工程師／張廷犖 ❺

摘 要 ABSTRACT

橋梁是防救災體系中不可或缺的一環，具有跨越障礙、附掛維生管線及災損修復困難等特殊的功能與特性，而陸橋的損毀崩塌，亦將造成二次災害及橋下道路交通中斷，阻礙救災的進行。因此，橋梁可視為防救災體系及維生線的基石，在歷經921大地震之慘痛教訓，如何將基礎建設的耐震能力提昇，減低地震危害風險，是刻不容緩與艱鉅的工作。臺北市管轄之橋梁，多數設計及建造係於民國97年「公路橋梁耐震設計規範」頒布之前完成，大多未符新版耐震規範需求。隨著橋梁趨於老舊，或受環境影響，而造成材料老劣化現象，可能使部分橋梁無法承受大地震之荷載，而導致破壞。「臺北市橋梁耐震評估補強工作」乃為積極強化臺北市重要救援道路之健全度及結構安全，對於現有橋梁進行安全評估及有效之耐震補強作業，冀希於地震發生時，保持道路橋梁之暢通，達到減災、避災的目標。

❶

❷

❸

❹

❺

壹、前言

臺灣因地處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊之交界，屬環太平洋地震帶，地震發生頻仍，終年受到地震災害的威脅，如1999年9月21日發生芮氏規模7.3之集集大地震，造成生命財產重大損失，更因多處橋梁損毀、道路中斷，使得部分地區的搶救災工作無法順利展開，遭遇困難，更因此造成災情持續擴大，其所產生後續之損失，更倍數於地震發生瞬間產生的災損。另2011年日本311大地震，其地震規模倍數大於臺灣921地震，災情相當嚴重，然該次災損成因主要係因地震引發大海嘯而造成，直接由地震所造成的災害則較為輕微，其中，當地經耐震補強後之橋梁，更未見有明顯受損情形，顯見耐震補強的有效性與必要性。因此，吾人應思考如何汲取災害經驗及教訓，及早針對耐震能力不足之橋梁進行有效之耐震補強作業，期能於未來地震發生時，降低橋梁因耐震能力不足而損毀，導致交通運輸中斷，社會經濟衝擊之機率，且災後如能保持道路橋梁之暢通，將能大幅減少地震後所導致之生命、財產損失，同時亦能加速災後工商業及社經活動之恢復腳步。

臺北市政府轄管之橋梁多數設計及建造於民國84年「公路橋梁耐震設計規範」頒布之前，而國內目前現行最新耐震設計規範則為民國97年頒布，歷年來臺灣橋梁耐震設計規範之演變如圖1所示。因此，隨著橋梁老舊程度不同、採用之設計規範(設計地震力)不同、或隨橋梁營運服務後受環境影響而造成之劣化現象等，均有可能使部分橋梁無法承受未來可能發生大地震之荷載，而發生破壞之情形。有鑑於

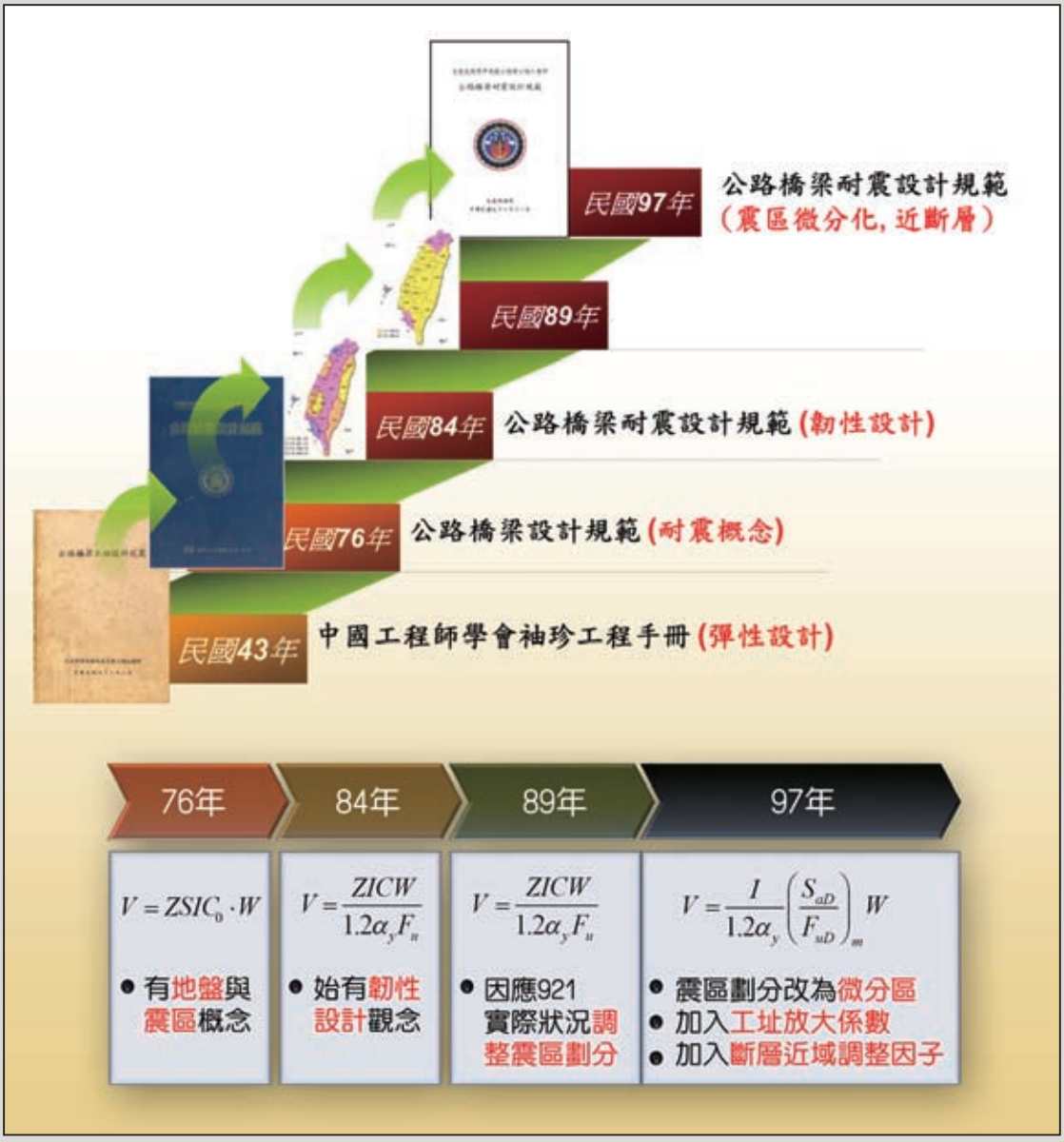

圖1 橋梁耐震設計規範演變

此，臺北市政府工務局新建工程處為確保臺北市緊急救援道路(圖2)於地震災後之可使用性，已針對轄管橋梁，依據最新耐震設計規定，全面進行耐震能力評估，並將依評估結果進行後續橋梁之耐震補強工程。冀望能藉由事先之預防及補強，有效提昇轄內橋梁之耐震能力，使能於日後大地震時可達到減少損失及避免傷亡，同時於災變時能肩負運輸及維生之功能，成為輸送救災物資、傷患與災民之交通動線。

貳、橋梁耐震補強策略

橋梁使用年限並非是無限的，隨其結構使用時間，極限水平力強度亦將會逐年下降，因此，適時的維修將可延長其耐久性年限，但無法提昇其水平力強度。如欲提昇其強度，則須作結構的耐震補強，同時也可大幅展延其結構使用年限。橋梁的耐震性能隨時間變化之曲線關係，如圖3所示。

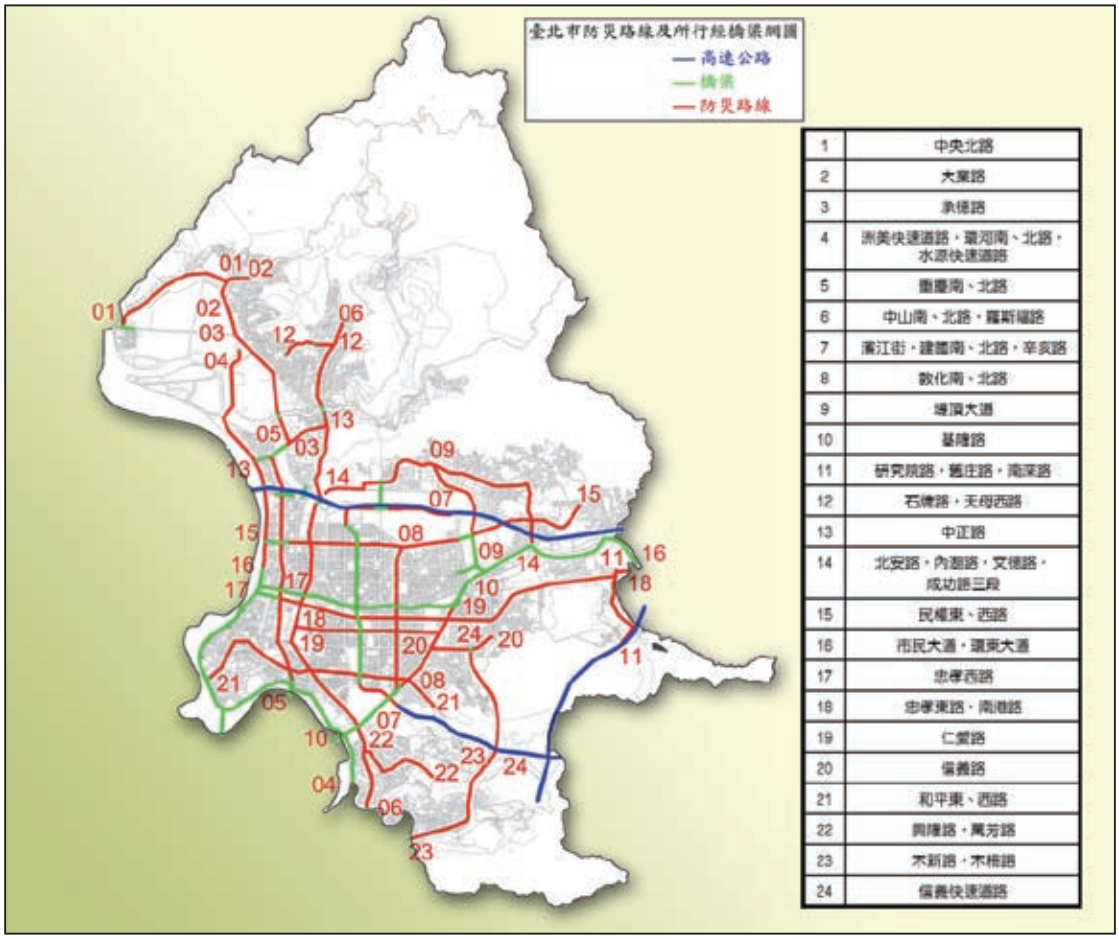

圖2 臺北市緊急救援道路路網圖

依據橋梁容量曲線圖，可以判斷結構物狀態屬於強度不足、韌性不足或者強度韌性皆不足狀況，並擬定對應之補強策略，如圖4所示。國內、外橋梁補強策略因各國橋梁特性與震害之情況不同而異，美國之橋梁構造多為固接式橋墩，其耐震補強基本理念為發揮結構韌性為主，而日本早期耐震設計原則是採震度設計法，亦與臺灣採用之工作應力法相似，且臺灣橋梁結構型式多為簡支鉸接，與日本橋梁之構造型式相近，又曾同樣發生過淺層地震。因此，在研擬國內耐震補強之策略時，因地緣關係及橋梁型式與設計理念均與日本較為相近，可參酌日本之耐震補強方案，擷取其工法與施工上優點，作為臺灣本土之橋梁耐震補強之規劃與設計的借鏡。

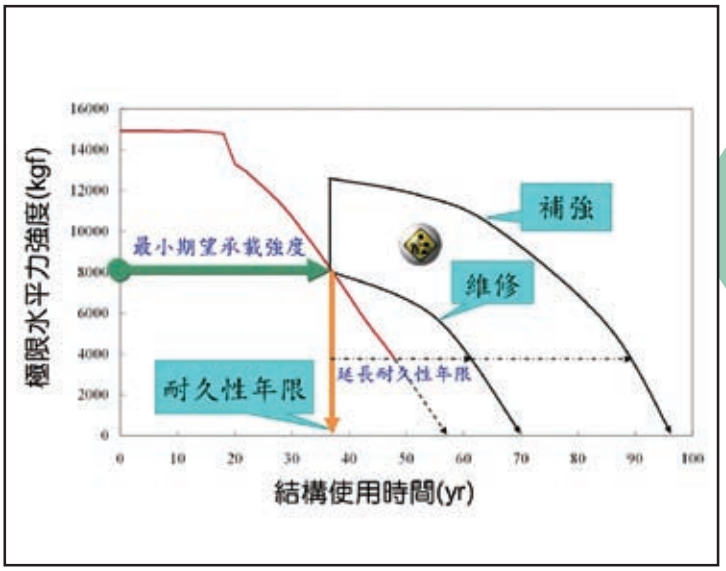

圖3 橋梁耐震性能曲線

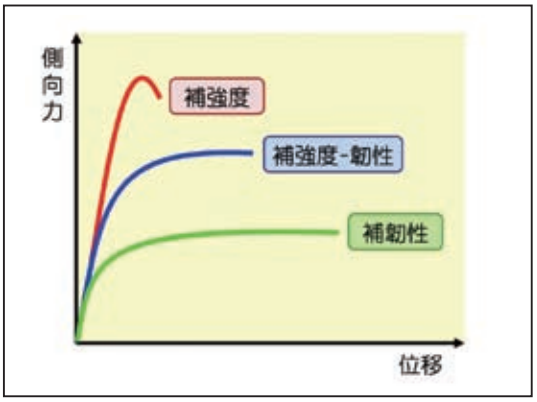

圖4 容量曲線及其對應之補強策略

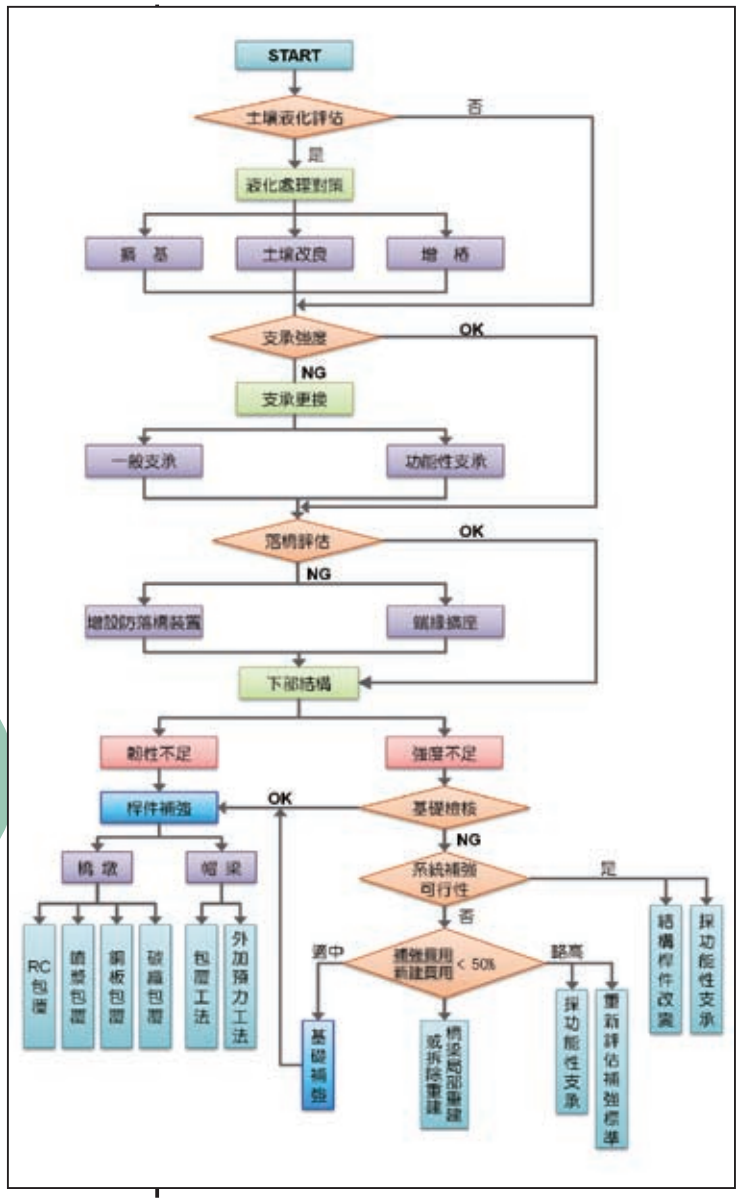

圖5 補強設計流程與對策

補強方案之選定，須依個案考慮，將各種可行工法之施工性、經濟性、補強效果、施工工期、未來維護管理等作比較，選擇最佳之方案後方進行細部設計，惟其中經濟性應作為優先之考量。換言之，儘量不要採用費用昂貴之基礎補強，在特殊情況下如補強費用過高時，應尋求其他經濟方案來替代，此時可考慮採用功能性支承將橋梁破壞機制轉移至其他較易修復之元件，或重新檢討補強標準，並配合後續配套之檢測、監測，以達到合理之補強設計。另若有沖刷問題時，須將橋梁之耐震耐洪補強一併考量。有關補強策略整理如下：

一、蒐集設計圖、竣工圖資料，如有闕漏，則混凝土強度、配筋等細節可參照竣工年代之標準圖說所採用之數據，配合現場目視檢測結果及量測之結構尺寸，進行分析設計。

二、有設計圖、竣工圖資料者，將依耐震評估結果，參照圖5補強設計流程與對策辦理。

三、對於埋於土中的基礎，除非研判可能發生土壤液化的狀況，否則不建議進行基礎補強。

四、目視檢測結果顯示橋梁外觀尚可者，則建議採下述補強策略：防落設施補強、結構系統補強、包覆工法韌性補強及地盤改良等處理之。

五、 對於因橋梁老舊，補強費用太高或補強至規範規定值有困難者，考量其經濟效益及生命週期成本，若其補強工程費超過同型式橋梁新建工程費之某個比率時（初步建議為50%），應研擬橋梁局部重建方案或直接拆除重建方案。

參、補強目標

臺北市救援道路橋梁補強係參考交通部

98年委託公路總局研擬「公路橋梁耐震能力評估及補強準則」(草案)，以耐震性能為基準，即為補強後橋梁於不同等級地震作用下有其各別期望之性能水準，並依橋梁安全性、服務性與可修復性共定義有四種性能水準，如表1所示。安全性係考慮結構體耐震能力，在地震力作用下必須能保持不產生落橋與橋柱崩塌；使用性係期望地震後橋梁能繼續保有交通運輸與救災服務的功能；修復性則強調在不需大規模拆除重建的原則下，選用經濟合適的修復補強工法恢復橋梁原有功能。至於耐震補強設計需要達到的性能水準，必須依據地震力大小及橋梁重要程度劃分。對於強度不同的地震，其超越機率、迴歸期、地表加速度及預期之性能水準亦不同，一般而言，耐震設計規範基本理念如表2所示。將其與補強準則(草案)進行整合，可依橋梁重要性、橋齡與橋梁現況等因素，考量訂定不同之耐震性能目標，如表3所示。臺北市救援道路之橋梁耐震補強方針，即可依表2和表3所示耐震性能目標進行補強設計，補強後之橋梁耐震能力需大於規範規定設計地震力0.24g($0.4S_{DS}$)。

表1 耐震補強後橋梁之性能水準

性能水準	安全性	使用性	修復性	
			短期*(服務性)	長期**(安全性)
PL3	結構保持彈性防止落橋	與震前交通機能相同	簡易維修	經常維修
PL2	防止落橋與允許橋柱產生可修復之塑性變形	短期搶修可恢復震前交通機能	依既有緊急搶修工法，完成短期搶修	依既有修復工法，完成長期修復
PL1	防止落橋與避免橋柱過大殘留變形	短期搶修可限重限速恢復通行	更換受損構件或進行結構補強	封閉橋梁，進行局部重建
PL0	防止落橋與避免橋柱崩塌	得禁止通行，以替代道路或臨時便橋取代	得全橋或局部拆除重建	得全橋或局部拆除重建

*短期搶修：使橋梁恢復服務性；**長期修復：使橋梁恢復至震前之結構安全性

表2 耐震基本理念

地震大小	預期之性能水準	使用年限50年超越機率	地震迴歸期	工址地表加速度
中度地震	結構保持彈性	80%	30年	$0.4S_{DS}/3.25$
設計地震	構件產生塑鉸，發揮容許韌性容量	10%	475年	$0.4S_{DS}$
最大考量地震	結構韌性容量完全發揮，但橋梁不會落橋、崩塌	2%	2500年	$0.4S_{MS}$

表3 橋梁之耐震性能目標

橋梁分類及地震等級	採用之設計規範版本					
	84及89年版		49及76年版		49年版以前	
	一般I=1.0	重要I=1.2	一般I=1.0	重要I=1.2	一般I=1.0	重要I=1.2
中度地震	PL3	PL3	PL3	PL3	PL3	PL3
設計地震	PL2	PL2	PL1	PL1	PL0	PL1

肆、耐震補強工法

一般耐震補強設計可採用：桿件補強、基礎補強、防落設施補強及結構系統補強四種方案，補強時應依據補強策略選擇合適之方案，茲就各補強方案及工法分述如下：

一、桿件補強

可分為橋柱補強及橋墩帽梁補強兩類：

(一) 橋柱補強

對於RC橋柱耐震能力不足之的補強方式，大致採用下列五種方法：(1)RC包覆工法；(2)鋼板包覆工法；(3)碳纖維貼片工法；(4)噴漿包覆工法；(5)預鑄RC版包覆工法。橋柱補強工法之選定如圖6所示，各補強工法比較如表4。

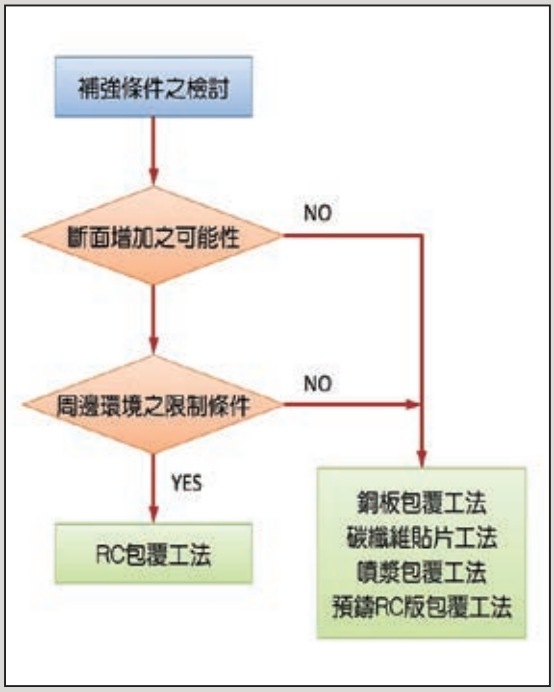

圖6 橋柱補強工法之選定

表4 橋柱補強工法說明

橋柱補強工法	工法比較說明
RC包覆工法	將原有RC柱先作表面處理(如噴砂)，再配置軸向鋼筋及橫束箍筋後，澆注外圈混凝土而成。它可增加橋柱之水平耐力，也有利於主筋截斷部位之剪力補強。除了傳統採用鋼筋外，目前國外亦有採用鋼絞線圍束替代鋼筋之新工法來增加橋墩之耐荷力之研究。
鋼板包覆工法	將原有RC柱作噴砂表面處理，其外包覆鋼板，其間注入環氧樹脂接著劑或無收縮水泥砂漿。本工法佔有空間小、施工快速，適合都市高架橋及河道阻水斷面嚴格限制情形之耐震補強。鋼板包覆工法對於矩形柱，可採用圓形或橢圓形方式，增加原斷面面積。
碳纖維貼片工法	使用環氧樹脂浸潤後之碳纖維片黏著於現有混凝土的表面，作為複合材的CFRP或AFRP形成，讓斷面增加抵抗力，使耐荷力的恢復或增加的工法。本工法碳纖維具有方向性，施工須特別注意，包覆構材形狀若有彎角，應予圓弧化。貼片工法具有材料輕、柔性、搬運容易及施工迅速等優點。惟河川橋因橋墩常有受漂流物撞擊之情況，所以較不適用。
噴漿包覆工法	本工法為日本最近所實驗研發之補強工法，其係在原有的橋墩加設高拉力之圍束鋼筋、並灌注砂漿S96C來固定保護。依據研究報告指出，本工法具有與鋼板補強工法相同的補強效果，其主要之優點為施工簡單，不受施工場所之限制。

(二) 橋墩帽梁補強

橋墩帽梁補強的方法有兩種：(1)降低帽梁內力需求之補強；(2)增加強度之補強。為降低帽梁在垂直行車方向地震之內力需求，可在柱中央偏上位置設置連接梁，以降低帽梁下柱頂之彎矩，達到降低帽梁內力需求之目的。另外RC橋墩帽梁之強度補強，一般均以補強帽梁之彎矩及剪力強度，以使塑鉸發生於橋墩柱而非帽梁處。因此，帽梁補強之方式包括前述各種包覆工法及外加預力工法。至於構架式橋墩亦可考量於墩柱間增設繫梁以減少帽梁之受力，繫梁之位置應較靠近帽梁，俾使塑鉸發生於下段橋墩柱之頂部或底部。各種RC補強工法之混凝土澆置，常因現場之施工空間限制，而無法確實搗實，造成補強之混凝土品質較難掌握，建議可採用自充填混凝土(SCC)予以克服。自充填混凝土具有高流動性及施工性，可克服鋼筋密集及封閉性空間不易澆置之缺點，且可解決因施工不良所造成結構耐久性問題。

二、基礎補強

以往橋梁基礎之設計並未考量橋墩柱產生塑鉸，因此其基礎強度可能不足而需要予以補強；或部分跨河橋梁常因水害沖刷導致基礎裸露造成穩定性不足，影響其耐震能力，而須進行橋基補強。基礎補強方案因受到橋梁下方施工空間限制，多應用於施工動線良好之跨河橋梁，應用於施工空間狹隘之市區道路橋梁案例則較少。目前國內針對河川橋基礎補強之方法包括：(1)包墩或混凝土圍繞工法；(2)排樁工法；(3)連續壁工法(圖7)；(4)基礎擴大並增補基樁工法(圖8)；(5)托底工法；(6)換底工法(圖9)

圖7 排樁工法

圖8 基礎擴大及增補基樁工法

圖9 換底工法

三、防落設施補強

落橋為非常嚴重之橋梁震害，故如何防止強震時橋梁上部結構自橋墩頂部掉落，係為橋梁震害復舊或耐震補強對策中非常重要的課題。既有橋梁防止落橋措施設計主要規定如下：

- 防止落橋構造基本上應先具有足夠之梁端防落長度，再加上兩處以上之防止落橋裝置。若已設有耐震連結裝置者，可視同一處。
- 梁端防落長度須符合現行規範規定，對於斜橋、曲線橋、長週期橋梁、基礎可能液化之橋梁，防落長度應考慮加大。

國內早期橋梁興建時尚無防落設施之相關規範，即使有設置相關防落設施，大多無法符合現行耐震相關規定，故對於有落橋之虞的橋梁應檢核其防落設施是否足夠，並採取適當的補強措施，以使地震發生時不致發生災情較為慘重的落橋事件。防落設施補強方案包括：

(一) 增設防落拉桿

為防止落橋的發生，於相鄰的橋梁上部結構間增設防落拉桿，利用兩側上部結構的牽制力量用以限制主梁之大變位，或將防落拉桿固定在質量較重的橋墩上。

- 預力梁橋可於端隔梁處增設防落拉桿，拉桿可與鄰跨隔梁或止震塊相連結。設計時需考慮隔版強度，必要時可予適度補強。
- 鋼橋之防落拉桿則可設於腹鈑外側(圖10)，並增設加勁鈑補強腹鈑。

(二) 增設止震塊

止震塊可設於帽梁上方或側面，對於RC橋墩可以植筋方式施作RC止震塊或是以化學錨栓將鋼製止震塊固定於帽梁(圖11)。鋼橋墩通常採用鋼製止震塊，並以現場銲接方式或是高拉力螺栓固定於帽梁。

圖11 防落補強－增設止震塊

圖10 防落補強－增設防落拉桿

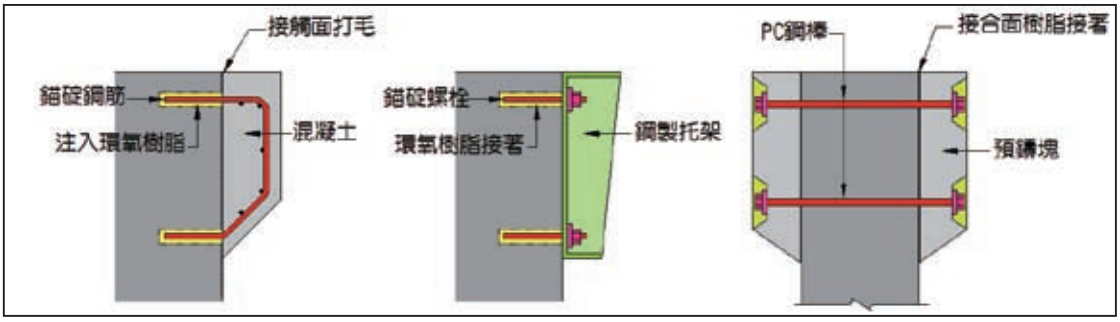

圖12 防落補強－加長防落長度

(三) 加長防落長度

對於防落長度不足的RC橋墩可於帽梁側面加設托架增長防落長度，托架型式可以植筋方式施作RC托架、以錨碇螺栓固定鋼製托架或是以PC鋼棒固定預鑄混凝土塊。鋼橋墩則可以現場銲接方式或是以高拉力螺栓將鋼製托架固定於帽梁，增長防落長度，施工方式如圖12所示。

四、結構系統補強

橋梁結構系統補強包含慣性力分散、隔減震補強等，其目的為提昇整體橋梁系統之耐震性能或降低地震力需求。

為提昇整體橋梁系統之耐震性能或降低地震力需求，橋梁耐震補強工程可依下列設計原則進行結構系統補強：(1)上部結構連續化、輕量化；(2)延長結構物週期、並提高橋梁系統整體阻尼比；(3)改善支承系統性能，減少下部結構補強需求；(4)設置兩道以上防止落橋裝置。

(一) 慣性力分散

慣性力分散工法係考量上部結構連續化後，變更支承系統或配置適當裝置，使地震力均勻分散至所有橋墩柱，降低橋柱地震力需求與損壞情形。採用多點固定式支承之設計，或於可動支承端裝設可消能之變位限制裝置，亦為慣性力分散工法(圖13)可行方案之一。

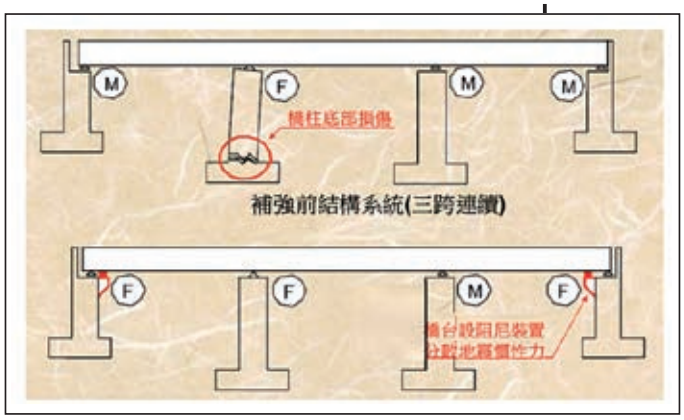

圖13 慣性力分散工法示意圖

(二) 隔減震補強

橋梁使用隔震元件進行隔震補強(圖14)，應依據「公路橋梁耐震設計規範」相關規定進行隔震支承墊之設計與檢核。當橋梁之基本振動週期短且上部結構為多跨連續或多跨鉸接板連續時，可將原支承更換為隔震支承墊，以延長基本振動週期，降低傳遞至下部結構之地震力。如有下列情形則應避免使用隔震支承墊：(1)工址依公路橋梁耐震設計規範判定為極軟弱之土層或可能液化之砂土層者；(2)下部結構剛性較小或基本震動週期長者；(3)支承可能產生拉力者；(4)工址鄰近土壤軟弱，可能發生橋梁與地盤共振情形者。如橋梁橫向

存在耐震能力不足之疑慮，宜考慮使用雙向隔震設計，一般而言以橋軸向之單向隔震為主。

減震補強應依據「公路橋梁耐震設計規範」相關規定，進行消能系統之設計與檢核。消能元件之分析應包括消能元件之特性及其平面與立面之配置，且應能反映振動頻率、環境及溫度等因素之影響。

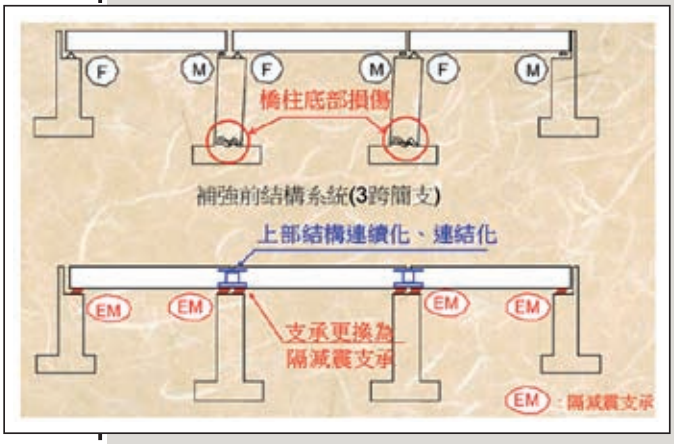

圖14 隔震補強工法示意圖

伍、結語

臺北都會區歷經數十年來之蓬勃建設，已建構完整與便捷的交通路網系統，然而隨著環境變遷與科技進步，在面臨各種天然災害的威脅，以及對於災害本質的認知，硬體設施的維護管理更趨重要。伴隨著耐震設計規範多次修改，工址地表加速度及震區劃分改變，新規範設計地震力增加，致使老舊梁耐震能力不足。橋梁是防救災體系中不可或缺的一環，為確保救援道路於發生震災時仍保有其功能，加速救災的進行，臺北市政府乃進行救援道路上橋梁結構耐震評估分析及後續補強設計工作。經由橋梁耐震評估補強工作，不僅可使臺北市既有重要橋梁與市區高架系統達到安全耐震的標準，具體成效也可讓在首善之區共同生活的市民了解耐震補強之重要，並藉以持續推動市區內其他橋梁結構之耐震評估與補強工作，以建造一個更安全的市民家園。

參考文獻

1. 交通部，「公路橋梁耐震設計規範」，民國97年。
2. 交通部公路總局，「公路橋梁耐震能力評估及補強準則(草案)」，民國98年。

施工前
施工中
施工後