

橋柱耐震設計新工法

楊國珍¹，陳傑²

關鍵詞：複合式橋柱、鋼橋柱、預選定塑性區、強度、韌性

摘要

橋柱為橋梁結構系統中抵抗地震力之主要構件由過去橋梁震害中鋼筋混凝土橋柱及鋼橋柱之損壞案例顯現橋柱之細部設計如鋼筋混凝土橋柱之耐震彎鉤、箍筋間距與鋼橋柱加勁板與銲接細部等不僅增加施工上之困難度其更為影響橋柱破壞模式之重要因素。本文介紹兩種橋柱耐震設計新工法—複合式混凝土橋柱與預選定塑性區鋼橋柱，此二種橋柱耐震設計新工法不僅具有高強度、高韌性高消能性等優異之耐震性能，且具有施工與檢測維修之便利性。

1. 前言

由過去國內外震災調查發現地震下橋梁之損壞可歸納以下部結構如橋柱與基礎破壞之破壞為主，此乃因橋柱為橋梁抵抗地震力之主要構材。而橋柱或基礎之破壞亦可能因橋柱傾斜量過大而導致落橋破壞。早期因橋梁設計規範並無韌性設計之需求，僅以強度為主要之考量，因此在北嶺、阪神或集集等大地震作用下，橋柱往往因不僅不能提供適當的圍束效應發揮韌性，亦無法提供足夠的剪力強度而產生剪力破壞，如 921 地震下烏溪橋橋柱之破壞即為典型的橋柱剪力破壞模式。而地震下鋼筋混凝土橋柱亦可能因主筋搭接長度不足、主筋銲接處斷裂等不當續接、圍束不佳、而導致橋柱韌性無法完全發揮產生撓曲或撓剪破壞。有鑒於過去鋼筋混凝土橋柱震害破壞模式突顯鋼筋混凝土橋柱之破壞模式與其韌性好壞取決於結構耐震細部如箍筋間距、耐震彎勾等設計與施工之細節，現行耐震設計已針對此些耐震細部訂有詳細規定以確保橋柱具有適當之強度與韌性，實務上則必須以大量橫向圍束鋼筋方能滿足耐震需求，此往往導致鋼筋因排列過於密集增加施工之困難度甚或衍生灌漿搗實不易、蜂窩過多等缺陷，進而影響橋柱之強度與韌性。

¹ 國立高雄第一科技大學營建工程系副教授

² 國立臺灣科技大學營建工程系博士

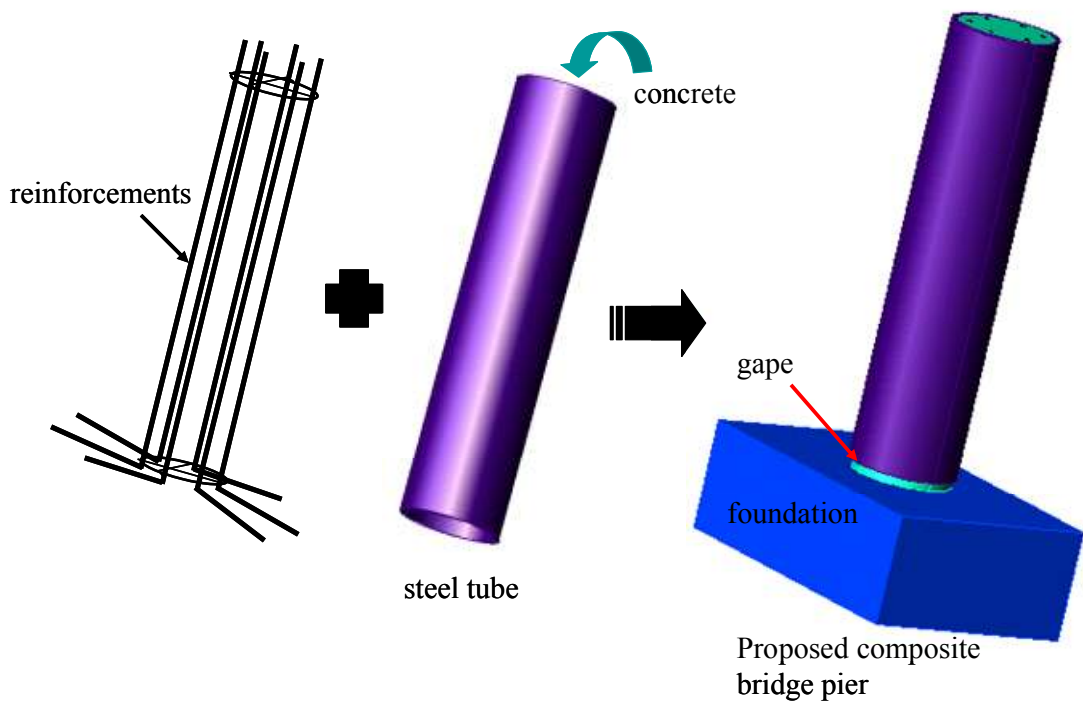
除混凝土橋柱外，鋼橋柱因採用鋼材，一般認為其相較與混凝土橋柱具有較佳的韌性，加上過去橋梁震害中鋼筋混凝土橋柱之損壞案例較多且亦較為嚴重，所以 1995 年阪神地震前鋼橋柱並無韌性設計之要求，而僅規定在最大地表加速度 150~200 gals 層級(1 級)下不會崩塌，甚至在設計年限內罕見的強震(2 級)下可喪失部分機能但也不會崩塌。1995 阪神地震中亦有不少鋼橋柱產生破壞，由震害破壞模式之調查發現橋柱的破壞模式大致可歸納為橋柱挫屈、支承破壞、橋柱傾斜、基礎傾斜、銲道龜裂等。鋼橋柱為橋梁系統中主要的承受地震的構件，為避免鋼板在降伏前即發生彈性挫屈，柱板需採用加勁板予以加勁，使得鋼橋柱之銲道非常多，尤其在帽梁等多向力量傳遞交會處，銲道更是多且複雜。依據日本之統計資料導致銲道產生裂縫之原因可歸納為母材不良、銲材不良、施工不良、設計不良、及結構上的問題點等，銲道的開裂可能導致橋柱之脆性破壞應特別注意。此外，鋼橋柱柱底固定於錨碇構架上，利用錨碇構架預埋於基礎內固定之，由於柱底承受較大之彎矩，若破壞發生在鋼橋柱和錨碇構架接合處如銲道龜裂或錨碇螺栓鬆弛等增加檢測維修之困難。

為彌補傳統混凝土橋柱與鋼橋柱設計或施工上之不便，避免橋柱在地震力作用下發生脆性破壞，本文提出耐震性能優異且施工檢測便利之複合式混凝土橋柱與預選定塑性區鋼橋柱兩種橋柱耐震設計新工法，以做為工程界橋柱設計選用時之參考

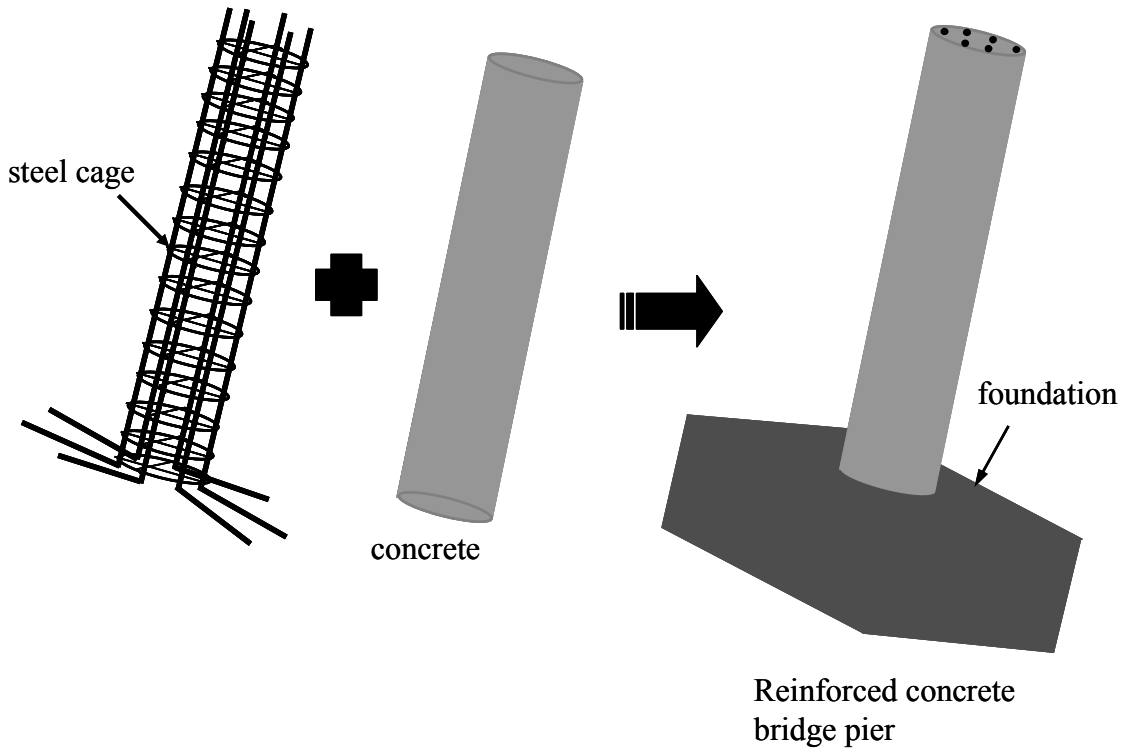
2. 複合式混凝土橋柱

2.1 設計理念

複合式混凝土橋柱主要之設計理念是利用鋼管提供混凝土橋柱所需之圍束力與橋柱之剪力，橋柱基本上仍為傳統鋼筋混凝土行為，亦即以混凝土及縱向主筋之聯合作用做為橋柱抵抗軸力及撓曲應力之構件，利用混凝土及鋼管提供橋柱所需之剪力，以取代橫向鋼筋。鋼管良好之圍束效應不僅可大幅提高混凝土橋柱之韌性亦可使混凝土受鋼管圍束後，表現出超高軸力的特性，縮小橋柱所需斷面尺寸。此外，藉由鋼管與基礎間預留之間隙，可避免鋼管承受彎矩而導致局部挫屈，並排除鋼管混凝土需與基礎錨定、銲接等後續之設計與施工，避免大量銲接工作將導致殘餘應力、鋼材變脆等問題的產生，大幅度提升鋼管設計及施工的便利性。而鋼管因內有混凝土提供鋼板板厚方向之面外勁度，亦可降低其發生局部挫屈之機率。複合式橋柱與採用鋼板補強之橋柱概念相近，皆為利用鋼板提供混凝土橋柱所需之圍束力，不同處在於複合式橋柱省卻密集的橫向箍筋及複雜繁瑣的箍筋，取而代之的是輕薄且強度及延展性高的鋼板。圖 1 為複合式混凝土橋柱設計概念圖。



(a). 複合式混凝土橋柱



(b) 傳統混凝土橋柱

圖 1 複合式混凝土橋柱與傳統混凝土橋柱之比較圖

2.2 橋柱之耐震性能

圖 2 所示為採用矩形斷面之傳統混凝土橋柱與複合式混凝土橋柱之受力-變形圖，其中 ORC1 橋柱為依現行橋梁耐震設計規範設計之傳統混凝土橋柱，CR1、CR2、及 CR3 為複合式混凝土橋柱，表 1 為橋柱之斷面尺寸與重要設計參數及試驗所得之耐震性能。ORC1 橋柱試體因主筋量較高，由彎矩引致之剪力大於試體設計剪力，屬於剪力破壞。如圖 2 ORC1 橋柱試體之受力-變形曲線所示，試體達極限載重後因混凝土剪力裂縫迅速增大而發生強度與勁度迅速下降之脆性破壞。反觀採用相同斷面尺寸與配筋量之複合式橋柱，由於鋼板可提供混凝土相當之圍束力，使得試體達極限強度後雖然因混凝土開裂後強度略微下降，但仍可維持八成以上之極限強度，直到鋼管因銲道撕裂橋柱才喪失其強度。

在相同斷面及相同配筋量下，複合式混凝土橋柱之強度較傳統混凝土橋柱高約 20%，增加鋼板厚度對橋柱強度之無顯著之貢獻，但若於橋柱試體採用剪力釘則因為力量分佈較為均勻則橋柱之強度可再略為提升。雖然增加鋼管板厚對於橋柱強度之提升並無顯著之貢獻，但對於橋柱之韌性卻有相當之貢獻。採用板厚 2mm 之複合式混凝土橋柱之韌性可達 3 以上，較傳統混凝土橋柱提高 2.4 倍。若採用板厚 4mm 之複合式混凝土橋柱其韌性可達 4 以上，較板厚 2mm 之複合式混凝土橋柱之又再提高 4 成左右。

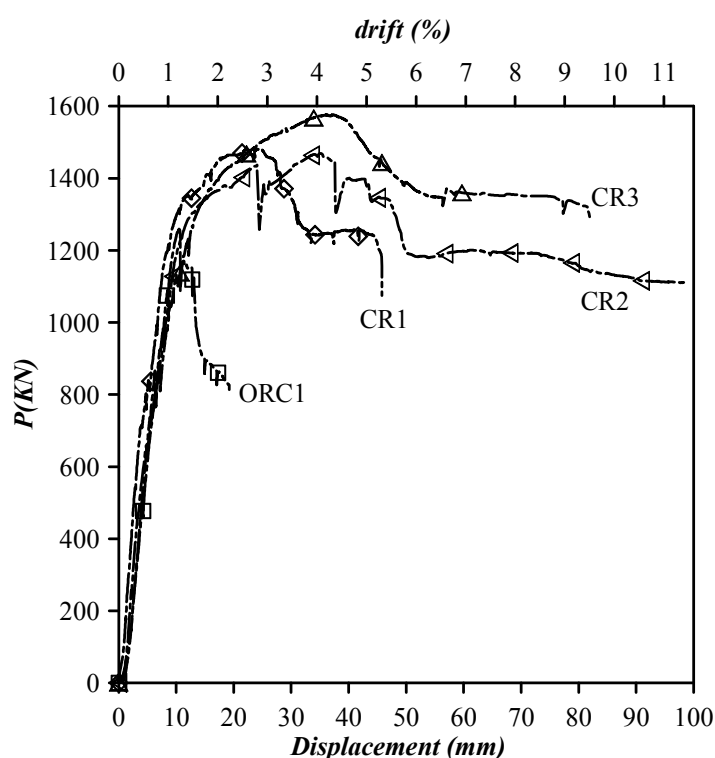


圖 2 傳統混凝土橋柱與複合式混凝土橋柱之受力行為

表1 矩形橋柱之斷面性質及耐震性能

試體 編號	斷面尺寸 寬 x 深 (mm x mm)	跨深 比	鋼管		主筋鋼 筋比	試驗剪力 (kN)	韌性	
			板厚 (mm)	長度 (cm)			μ_{max}	μ_{80}
ORC1	600 x 600	1.43	-	-	2.25%	1254	1.38	1.76
CR1	600 x 600	1.43	2	70	2.25%	1480	3.29	6.22
CR2	600 x 600	1.43	4	70	2.25%	1470	4.57	9.91
CR3	600 x 600	1.43	4	70	2.25%	1568	5.47	10.97

橋柱所承受之軸力決定設計上主筋量之大小，主筋量對橋柱耐震性能之影響以圓形複合式混凝土橋柱說明(表 2)。三組圓形橋柱試體 CC1、CC2、CC3 之設計特性為跨深比小，且三組試體除主筋量之差異外其他斷面性質均相同。主筋量愈高，橋柱所受的剪力愈大，藉由設計橋柱剪力強度可控制橋柱的破壞模式。對傳統混凝土橋柱，設計剪力須大於需求剪力，以避免脆性破壞行為。若採用複合式混凝土橋柱即使設計剪力等於需求剪力，橋柱在韌性大於 2 以上，而後因混凝土產生剪力裂縫而開裂使得橋柱到達極限強度後強度隨之下降，但由於鋼管可提供相當之圍束力，在高達 10 之韌性橋柱仍可維持八成之極限強度。換言之，即使跨深比小剪力需求大之矮胖型橋柱亦可因複合式橋柱中鋼板提供之圍束力使橋柱在混凝土嚴重開裂後橋柱強度不會有顯著之下降，且保有相當之韌性。

表2 圓形複合式混凝土橋柱之斷面性質及耐震性能

試體 編號	橋柱直徑 (mm)	鋼管		主筋鋼筋 比	V_n / V_u	韌性	
		板厚 (mm)	長度 (cm)			μ_{max}	μ_{80}
CC1	450	2	54	5.10 %	1.06	2.37	10.61
CC2	450	2	54	3.83 %	1.30	2.22	9.56
CC3	450	2	54	1.91 %	2.02	12.87	12.91
CC4	500	3	212	2.27%	3.33	6.14	>11

註： μ_{max} 為極限強度所對應之韌性(Δ_u/Δ_y)； μ_{80} 為強度下降至 80%極限強度時所對應之韌性(Δ_u/Δ_y)。

除橋柱在單一載重作用下之強度與韌性外，橋柱之耐震性能可以橋柱承受反覆載重作用下之行為表現之。圖 3 所示圓形複合式混凝土橋柱承受反覆載重作用下之行為。橋柱之設計剪力與需求剪力之比值為 3.33。由橋柱在反覆載重作用下之遲滯迴圈顯示，複合式混凝土橋柱因鋼管提供之圍束效應不僅使橋柱達極限強度後強度下降緩慢，韌性 11 時橋柱仍保有九成以上之極限強度。且橋柱在反覆載重作用下並無明顯之頸縮現象，正、負位移之側傾角皆大於 4%。

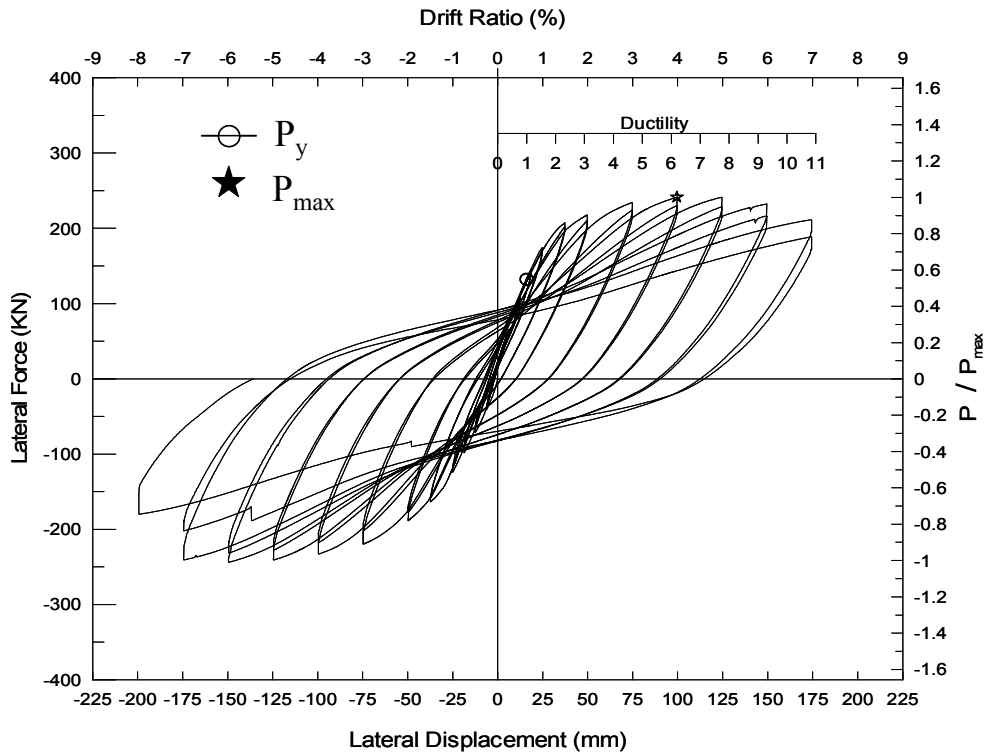


圖 3 反覆載重作用下複合式混凝土橋柱之行為

2.3 橋柱之設計

複合式混凝土橋柱之設計與傳統混凝土橋柱相同以混凝土與主筋抵抗軸力與彎矩，因此複合式混凝土橋柱之軸力與彎矩強度依據傳統鋼筋混凝土軸力與彎矩計算強度的方法即可得到準確且保守設計。為避免鋼管參與抵抗彎矩，柱底鋼管與基礎間需預留一約 5cm 之間隙。橋柱之剪力強度來自混凝土與鋼板之貢獻，因此橋柱之剪力強度可採用混凝土剪力強度和鋼管剪力強度疊加，如式(1)~(4)所示。式中， $f'c$ 為混凝土之抗壓強度 (kgf/cm^2)； b_w 為梁腹寬 (cm)； d 為受拉鋼筋重心至斷面最外受壓纖維處的距離 (cm)； A_g 為柱之總斷面積 (cm^2)， A_e 為柱之有效斷面積 (cm^2)； P 為軸向力 (kgf)。 V_j 為鋼板所提供的剪力強度； t_j 為鋼板厚度； f_{yj} 為鋼板降伏強度； D 為受力斷面之斷面深度； θ 為剪力開裂之角度。

$$\phi_s V_n \geq V_u \quad (1)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (2)$$

$$V_c = 0.53 \left(1 + \frac{P}{140 A_g} \right) \sqrt{f'c} \cdot A_e \quad (3)$$

$$V_s = t_s F_y D \cot \theta \quad (4)$$

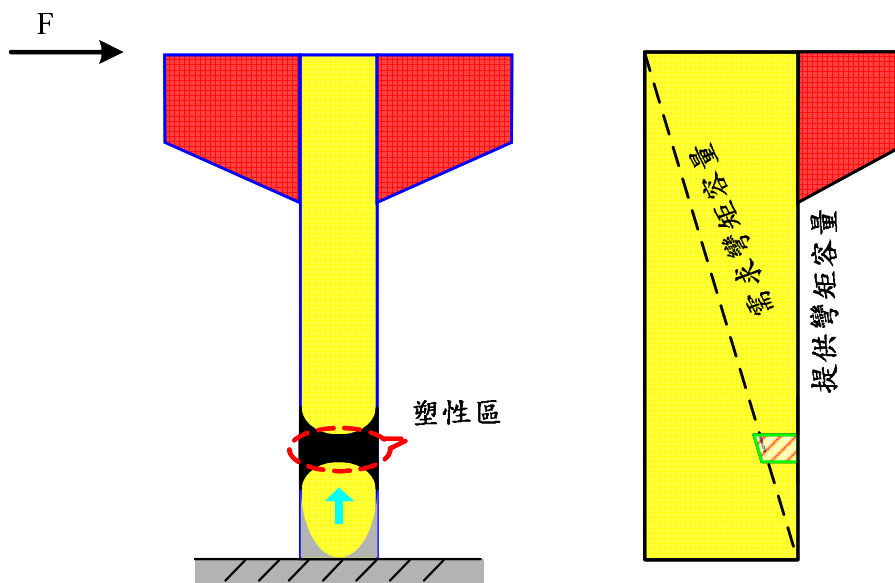
剪力釘在複合式混凝土橋柱並非必要，但可間隔約 35cm 設置剪力釘以提高鋼板與混凝土之合成作用，除使鋼板受力更為均勻外，亦可延後鋼板局部挫屈之發生，進而提高橋柱之強度與韌性。

3. 預選定塑性區鋼橋柱

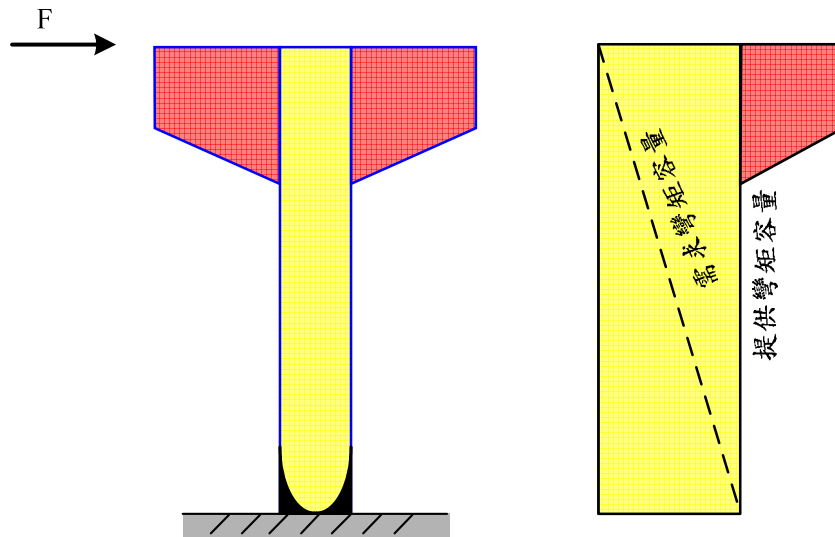
3.1 設計理念

預選定塑性區橋柱主要之設計理念是利用限制鋼橋柱塑性變形發生位置及大小，以達到控制破壞區域提升橋柱耐震韌性及消能能力並提高橋柱檢測、維修工作性之目的。預選定塑性區之設計理念已廣泛應用於國內外鋼骨抗彎矩構架系統，亦即依據地震下的彎矩需求在選定區域對鋼梁翼板進行切削，透過此種方式，不僅可控制塑鉸發生在預選定區域且可控制塑鉸範圍，同時可避免梁柱接頭區由於幾何不連續、銲接扇型孔、螺栓孔和銲接瑕疵等因素引致之應力集中現象而導致接頭區產生之脆性斷裂。

地震下，鋼橋柱所受之彎矩類似懸臂梁在自由端承受集中載重之三角形分佈，此與地震下鋼骨構架中鋼梁彎矩分佈圖非常相似，因此控制塑性變形發生在預選定區域並依據彎矩梯度進行斷面設計之觀念亦可適用於鋼橋柱之設計。惟鋼骨抗彎矩結構系統中鋼梁之上、下翼板主要用以抵抗彎矩，故採用鋼梁翼板切削或擴大翼板等方式以控制塑性區之位置與塑性區範圍。鋼橋柱除柱翼板外，尚有許多加勁板或填充混凝土砂漿，故可利用設計加勁板、柱板、橋柱斷面尺寸或灌漿深度方式以達到預選定塑性區斷面均勻降伏之目的，圖 4 即為預選定塑性區橋柱設計概念圖。



(a). 預選定塑性區鋼橋柱



(b). 傳統鋼橋柱

圖 4 預選定塑性區鋼橋柱與傳統鋼橋柱之比較圖

3.2 橋柱之耐震性能

橋柱受地震力作用時，最大彎矩會發生在柱底，因此由地震所造成之非彈性變形通常會集中在柱底，而此處一般位於地表下橋柱與基礎的交界處，如果損壞，檢測人員很難進行檢測，即使檢測出問題亦很難進行維修與補強工作。利用預選定塑性區之設計理念可使橋柱之損壞控制在預先選定遠離柱底的區域，簡化震後檢測與維修作業。在反覆載重作用下，採用預選定塑性區設計之鋼橋柱，如縱向加勁板或柱板切削皆能限制非彈性變形產生位置並使其較其他區域早發生，且可觀察到預選區均勻降伏的現象(圖 5)。相較於一般鋼橋柱(試體編號 ORS1)，依塑性彎矩梯度進行加勁板切削之鋼橋柱(試體編號 PPS1)對橋柱強度、勁度影響不到 1%，而依 95% 塑性彎矩梯度對柱板進行切削(試體編號 PPS2)，則因斷面減少量較大致使橋柱強度、勁度下降幅度較大，其下降幅度分別為 8.4% 及 7.1%，惟此二者雖對橋柱強度有所影響，但皆可提供滿足設計強度需求之橋柱。就消能能力而言，採用預選定塑性區鋼橋柱設計之橋柱均表現優異之消能能力(圖 6)，其中採用加勁板切削其消能能力更較傳統橋柱提高 54.8%，且加勁板切削較柱板切削有較好的消能能力(表 3)。

鋼橋柱中充填混凝土可提高橋柱強度，且強度隨充填高度增加而增加，惟充填混凝土會影響橋柱破壞模式，且因無充填混凝土之鋼橋段的降伏及塑性彎矩係固定，當充填混凝土愈高其彎矩梯度變化愈大，致使橋柱塑性區域減少而影響其塑性行為。採用預選定塑性區鋼橋柱因能提供適當之塑性區及控制橋柱破壞於預選區域，故能使橋柱具有足夠韌性並允許較高的充填混凝土高度，因此有助於提

高橋柱消能能力及強度。就加勁板切削橋柱而言，當橋柱充填混凝土佔柱高比例由 7%(試體編號 PPS3)提高至 21%(試體編號 PPS1)時，其強度及消能能力分別提高 17%(試體編號 PPS3)及 34%(試體編號 PPS1)。

表3 鋼橋柱斷面性質及耐震性能

試體編號	加勁板勁度比	充填混凝土佔柱高之比例	極限強度(kN)	韌性	消能(kN-m)	破壞模式
ORS1	3.4	21 %	603	7.0	493.4	錨碇處銲道開裂
PPS1	加勁板切削	21 %	604	8.0	763.9	柱板挫屈
PPS2	柱板切削	21 %	553	7.0	521.4	柱板挫屈
PPS3	加勁板切削	7 %	515	8.0	570.3	柱板挫屈



圖 5 塑性預選區斷面均勻降伏

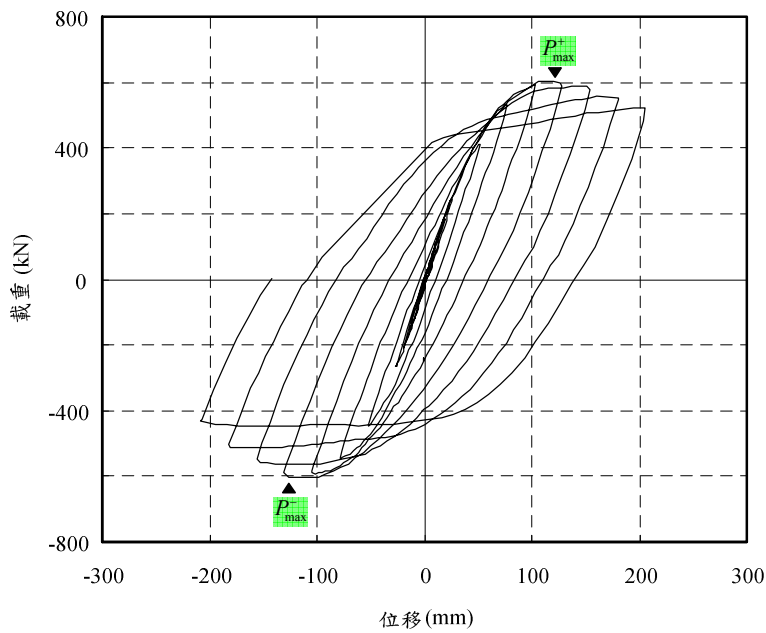


圖 6 預選塑性區鋼橋柱之遲滯迴圈

此外，亦可利用變化柱板尺寸改變斷面所提供之彎矩容量並使其等於橋柱彎矩梯度需求來達到預選定塑性區之目的，如圖 7 所示，惟其提供之斷面彎矩容量分為依據塑性彎矩容量(圖 7b)或是介於降伏與塑性彎矩容量間(圖 7c)兩種方式，此二種變化方式中，前者因塑性區應變分布較為均勻致使該區柱板挫屈較晚發生，故有較高的強度、韌性及消能能力，而此二者因斷面減少造成之勁度衰減差距約在 5%以內，在工程實務上可忽略，故建議採用前者進行柱板尺寸變化。值得注意的是，當根據塑性彎矩梯度來變化柱板尺寸且塑性區範圍分別為一倍及半倍柱寬時，塑性區範圍對於強度影響不大，勁度則隨塑性區範圍增加而減少，惟變化區域在一倍柱寬以內時，因其勁度衰減小於 10%故可忽略。對於消能而言，橋柱能量的消耗隨塑性區範圍增加而增加，當塑性區由半倍柱寬增加到一倍柱寬時，消能能力增加 76%。此外，在根據塑性彎矩梯度來變化柱板尺寸之橋柱中(試體編號 PPS4~PPS7)，當加勁材加勁量需求等於 2.5($\gamma_l/\gamma_l^* = 2.5$)時，雖可以提供滿足設計強度之橋柱，但是當橋柱柱板具有較高加勁量($\gamma_l/\gamma_l^* = 134.3$)時，因柱板挫屈延緩，故可提高橋柱強度(約 10%)及消能能力(約 152%)。

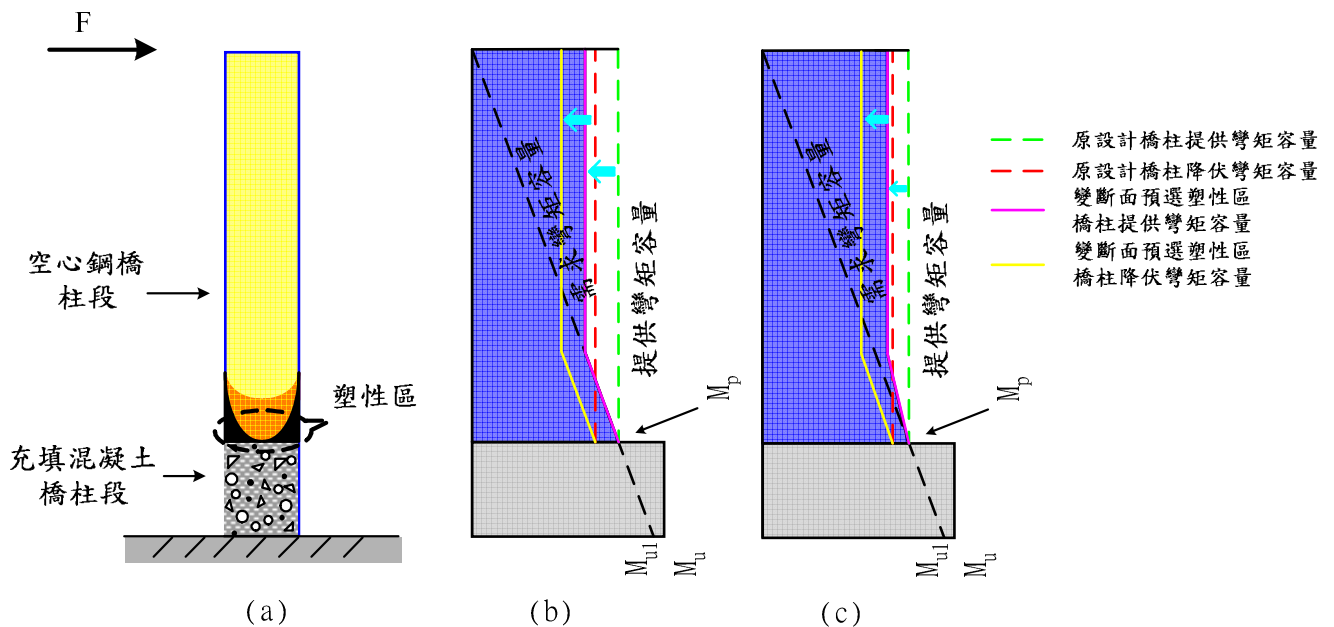


圖 7 變斷面式預選定塑性區鋼橋柱

表4 變斷面式鋼橋柱斷面性質及耐震性能

試體編號	加勁板勁度比	柱板尺寸變化	極限強度(kN)	韌性	消能(kN-m)	破壞模式
PPS4	36.6	394~460	565	8.0	681.8	柱板挫屈
PPS5	134.3	327~460	599	9.0	1078.6	柱板挫屈
PPS6	11.6	394~460	623	7.0	614.1	柱板挫屈
PPS7	2.5	327~460	545	6.0	427.6	柱板挫屈

3.3 橋柱之設計

目前設計規範有關加勁材加勁量需求($\gamma_i/\gamma_i^* \geq 1.0$)之規定，可以提供滿足設計強度之橋柱，而提高加勁板加勁量時亦會提高橋柱強度，然當加勁材加勁量高於 $\gamma_i/\gamma_i^* \geq 3.4$ 後，對橋柱強度之增加雖無明顯影響，但若將橋柱加勁材加勁量 γ_i/γ_i^* 由1提高至3.4，可使橋柱消能能力可大幅提升45.6%，然加勁量超過此值後($\gamma_i/\gamma_i^* \geq 3.4$)，雖仍可提高橋柱之消能能力，但增加幅度有限，故基於強度及消能能力之考量，建議可將 γ_i/γ_i^* 由目前規範之1.0提高至3.4。

充填混凝土可增加橋柱之強度及消能能力，且增加比例隨充填混凝土高度提高而增加。然充填混凝土過高將導致基礎銲道開裂，使其消能能力無法充分發揮，因此須控制充填混凝土之高度，設計時可採全斷面降伏方法設計充填混凝土橋柱強度，並令其基礎交界面之強度大於1.1倍中空橋柱段相對於柱底之需求強度，以避免橋柱底部發生銲道斷裂。

4. 結論

本文介紹兩種施工維修檢測便利之橋柱耐震設計新工法-複合式混凝土橋柱與預選定塑性區鋼橋柱。利用鋼板提供的高圍束力取代密集繁瑣的橫向鋼筋及箍筋，複合式混凝土橋柱不僅有優異之耐震性能，且因鋼筋量的大量縮減，大幅簡化設計與施工程序。而透過預選定塑性區之觀念以控制鋼橋柱降伏區發生之位置與範圍，使鋼橋柱具有相當的消能能力，不僅可避免脆性破壞且可使鋼橋柱之破壞遠離基礎，亦明顯提高檢測維修之便利性。

5. 參考文獻

- [1] 林科銘，「複合式混凝土橋柱之耐震行為」，國立台灣科技大學營建工程系，碩士論文，民國93年6月。
- [2] 王智德，「矩形複合式橋柱之結構行為」，國立台灣科技大學營建工程系，碩士論文，民國94年6月。
- [3] 王修駿，「圓形複合式橋柱之結構行為」，國立台灣科技大學營建工程系，碩士論文，民國95年6月。
- [4] 莊俊賢，「鋼筋混凝土橋柱之耐震評估與補強」，台灣科技大學營建工程系，碩士論文，民國93年6月。
- [5] 謝有明，「RC橋柱之鋼板包覆耐震補強」，台灣科技大學營建工程系，碩士論文，民國88年六月。
- [6] Priestley, M.J. Niguel Verma, Ravindra; Xiao, Yan, 「Seismic shear strength of reinforced concrete columns」, Journal of Structural Engineering, v 120, n 8, Aug, 1994, p 2310-2328.
- [1] 陳傑，「預選塑性區鋼橋柱耐震行為之研究」，國立台灣科技大學營建工程系，博士論文，民國97年10月。