

新一代橋樑建造工法 — 後拉式預鑄節塊橋柱

張國鎮／國立台灣大學土木工程學系教授

歐昱辰／美國紐約大學水牛城分校土木結構與環境工程學系博士

王柄雄／國家地震工程研究中心助理研究員

蔡木森／國立台灣大學土木工程學系博士生

George C. Lee／美國紐約大學水牛城分校土木結構與環境工程學系博士

目前大多數預鑄節塊橋柱的實際應用多在低地震威脅的地區，因此，為了解採預鑄節塊工法建造的橋梁在強震區的耐震行為，本文規劃了兩階段試驗，第一階段試驗著重在節塊橋柱的臨界接頭測試，目的在於檢驗消能鋼筋反覆拉拔至破壞所需的埋入深度，及避免鋼筋提早破壞所需的額外脫層長度，而接頭試驗結果亦將回饋至第二階段橋柱試驗之試體設計。第二階段節塊橋柱試驗的目的包括 (1) 了解橋柱試體於作業過程之工作性 (2) 測試整體橋柱的耐震特性。經由實驗證明，橋柱試驗結果符合預期的結果，對於未來新一代的橋樑工程，是個不錯的選擇。

預鑄節塊工法・普受選用

以預鑄節塊工法來縮短橋梁建造時間的方式逐漸受到重視，橋梁預鑄節塊工法是一種結合預鑄產製及機械化吊裝的施工方式，首先在施工上，預鑄節塊橋梁之節塊可在預鑄場事先鑄造，鋼筋彎紮及混凝土澆注可以自動化、機械化方式進行，再配合現場組裝，相較於傳統模版工法之鋼筋彎紮不易及混凝土澆注之費事耗時，有施工迅速及縮短工期之優點。同時也因為預鑄場優良的施工環境，使得預

鑄混凝土橋樑施工較傳統施工有更佳的施工品質。其次，在生態環境方面，由於預鑄橋柱可不經施工便道施工，對環境或交通所造成的干擾較少，因此，在保護區或都會區的效益特別明顯。以目前國內橋梁而言，預鑄節塊已大量使用於上部結構，然針對未來的中橫、南橫及東部等國道公路計畫，由於大多位處山岳地帶，且通過生態保護區，在生態保育及施工條件考量之下，預鑄節塊橋柱便成為極佳的選擇。

而早在美國，便已經有預鑄節塊橋柱的案例，但是這些使用預鑄橋柱的地區通常都是在輕微地震帶，甚至無地震區，而台灣位於環太平洋地震區，屬於高度頻繁的地震帶，所以要在國內應用預鑄節塊的概念於橋柱上，仍有待藉由相關的試驗研究，來了解此種橋柱在地震頻繁的區域上的性質、行為，進而提供一些可靠的分析及模擬。

過去幾年來國內陸續引進許多新式橋梁工法，從北二高時期頭前溪橋的節塊推進工法、桃園高架橋的支撐先進工法，到二高後續計畫高雄環線 C393Z 標的預鑄節塊懸臂吊裝工法等。除了工法的提升外，在造型景觀方面，也有碧潭橋的預力混凝土弧形拱橋設計、竹東雲南路的 π 型鋼構橋，以及

高屏溪的兩跨不對稱斜張橋。此外烏日交流道穿越橋採用高性能混凝土設計，及多座鉛心橡膠支承墊橋梁的設計施工等，都是國內橋梁工程發展的重要里程碑，這些工法除了技術提昇考量外之，也越來越重視景觀及生態的維護。

在國外，預鑄節塊橋墩的案例以 Linn Cove [1,2]，圖 1(a)(b)，高架橋的漸進式工法最為著稱，當時 Figg and Muller 公司為了保護北卡羅來那州境內國家公園的天然景觀，成功地將整座橋梁，包含上部結構與下部結構，以後拉式鋼腱組合預鑄節

塊而成。由於該座橋梁所處的地形條件極差、施工限制又多，因此橋柱不得不採用由上而下的方式建造。橋柱節塊吊裝前需先在現場澆置一直徑 6.1 公尺、厚 1.5 公尺的鋼筋混凝土基座，並預埋鋼腱套管，之後經由上部結構將節塊依序下放，節塊接合前先塗抹 epoxy，此 epoxy 僅用以防水不提供強度，相鄰節塊以高拉力螺桿施預力固定，最後在所有節塊完成後即將預力鋼腱由基座穿至柱頂，並施拉預力、灌漿密封。除了 Linn Cove 外，位於德州奧斯汀的 183 號公路 [3]，其橋墩也是由預鑄節塊組合

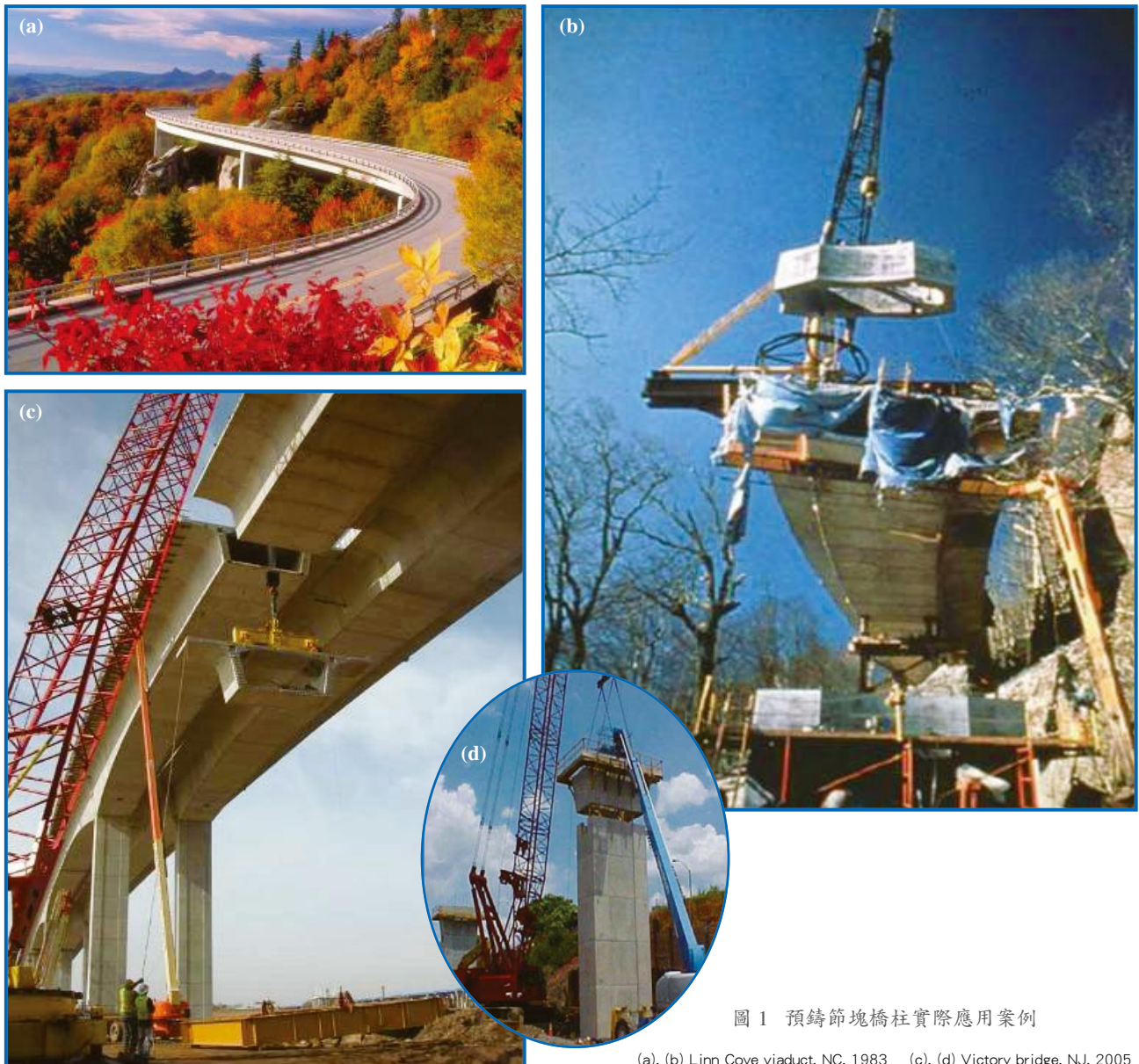


圖 1 預鑄節塊橋柱實際應用案例

(a), (b) Linn Cove viaduct, NC, 1983 (c), (d) Victory bridge, NJ, 2005

成，其八角型的中空節塊高約一米，所有節塊同樣是以後拉式鋼腱連結，這種以後拉式鋼腱結合預鑄混凝土節塊的施工構想，不僅侷限於橋柱，就連位於 Dallas 的機場 [4] 控制塔也是以類似方式建造。

國內目前對於預鑄節塊橋柱的研究還在初始階段，對於這類型橋柱的耐震能力還無法掌握，而此類型的橋柱不同於以往的傳統橋柱，它是由一塊塊節塊堆疊起來而組成一根橋柱，而每個節塊間的行為需要透過一系列的接頭試驗來做研究、評估。希望藉由掌握接頭的行為後，將其的特性應用於整體的橋柱的分析上。

過去幾年來，王瑞禎博士與張國鎮教授著手進行一系列相關研究 [5]，並就上述問題進行初步的探討，該研究主要是從分析、設計面著手，透過理論分析評估其耐震能力，建立適當的分析模型。王瑞禎博士提出的研究中，包含了四種形式的試體，其中也有純鋼腱試體 (P1) 與加入消能鋼筋的試體 (P2、P3、P4)，示於圖 2。在國外，Priestley *et al.* (2002) [6] 也提出了一系列的純鋼腱預鑄節塊橋柱，其在底部節塊包覆鋼板並進行了一些相關的研究。

為了改進之前相關研究結果的不足，本文重新提出了一系列的橋柱試驗研究，整個研究分兩個階段進行，在試體規劃設計時，依國家地震工程研究中心的場地及設備限制及相關試驗研究成果調整，

並透過此研究探討節塊之製作生產限制、工法施作障礙以及及構件之基本行為特性等，同時透過專家的意見諮詢，使試驗內容與成果能兼顧學理及工程需求。

預鑄節塊橋柱系統

本文所提出的預鑄節塊橋柱系統乃由一個基礎、數個預鑄節塊及一個預鑄帽梁所組成 (如圖 3 所示)，預鑄節塊採中空斷面的型式以減輕節塊重量並便於吊裝，節塊間除了有預力鋼腱穿過並施與預力讓個別節塊結為一體以抵抗側向力的作用外，為了增加橋柱的側向強度及耐震消能能力，於節塊內預留套管並採後插式的消能鋼筋貫穿節塊，並加以灌漿填實。其中，為了確保柱底塑鉸區的消能鋼筋能夠確實發揮出預期的握裹及消能行為，柱底節塊的消能鋼筋採用預埋的方式跟節塊一起澆鑄。

節塊橋柱受地震力的作用下，柱底節塊面會呈現反覆打開及閉合的特性，而柱體的變形也主要由此開合所貢獻，利用柱底節塊面開合的特性，此處的消能鋼筋提供了穩定且飽滿的消能行為以提高橋柱的耐震能力。另外，為了避免大地震下，柱底消能鋼筋因集中大量的塑性變形與低週期疲勞的影響而提早斷裂，於柱底消能鋼筋處做了脫層處理。在預力系統的部分，因鋼腱握裹後會提高鋼腱降伏及

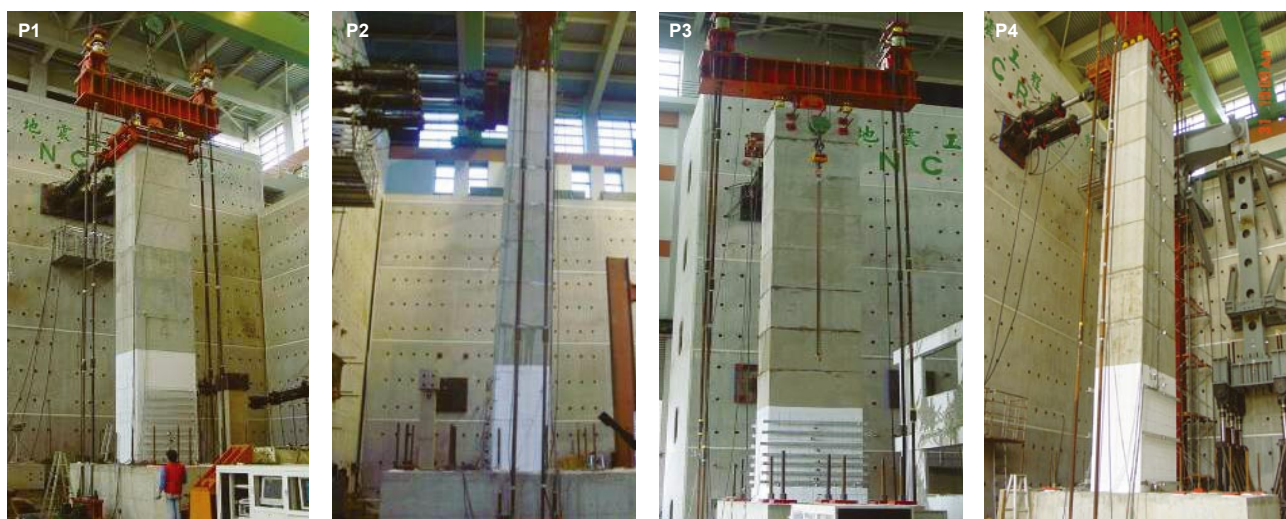


圖 2 王瑞禎博士 (2002) [5] 所提出的預鑄節塊橋柱

預力損失的可能，進而影響橋柱的安全。此系統中採用無握裹預力鋼腱並以外置預力的方式將預力鋼腱配置於節塊中空斷面內，且外置預力的方式方便鋼腱的檢修及抽換。

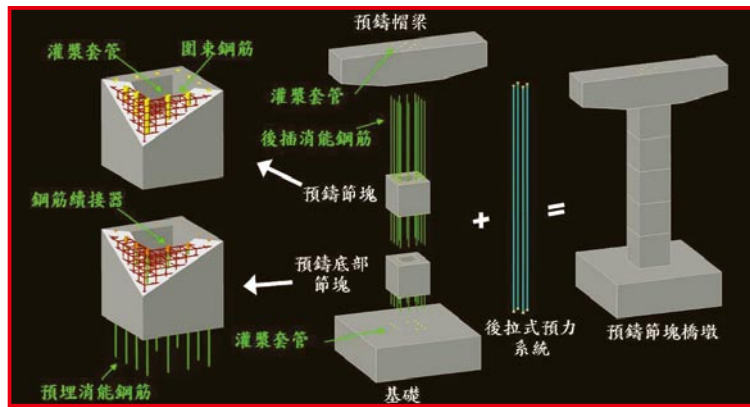


圖 3 預鑄節塊橋柱系統

節塊接頭試驗的目的在於求取柱底消能鋼筋所需的埋入深度 (L_d) 及避免鋼筋提早斷裂所需之額外脫層長度 (L_{au})，以做為橋柱的設計依據。柱底節塊的消能鋼筋採預埋的方式與節塊一起澆鑄

節塊接頭試驗

接頭設計理念

對於傳統橋柱而言，整體橋柱的特性主要取決於塑角區的行為。對於預鑄節塊的行為，由於節塊與節塊之間會有打開的情形，所以想要了解整體的行為反應，必須先了解底部節塊接頭的基本行為。

本文所提出的節塊橋柱接頭的設計概念，底部節塊與基礎相接的接頭被設計成韌性接頭 (ductile joint) 或稱為 (critical joint)，當橋柱受到設計地震時，韌性接頭會進入非線性的行為，這對於設計來說比較經濟，而其他的接頭則設計成強接頭，意指只允許稍微進入非線性或者根本不會發生非線性行為。而此接頭試驗的焦點放在韌性接頭的部分，因為此種接頭用在具有消能鋼筋的節塊橋柱上，而消能鋼筋在節塊之間是連續的，所以其消能行為與韌性的發揮是本文的焦點。

並於底部突出一段長度，在組裝橋柱時將此突出段鋼筋插入基礎的預留孔內，並加以灌漿填實讓鋼筋握裹於基礎內。以往對於接頭試驗已經有相當多的研究，Raynor *et al.* (2002) [7] 提到由於鋼筋與混凝土的握裹行為並不是理想中的完全握裹，一般鋼筋受握裹後的應力為一漸變分佈 (如圖 4a 所示)，隨著埋入段的深度增加，鋼筋受力會因握裹力的作用而逐漸減小直至周圍的漿體完全抓住鋼筋為止，而此段長度即為鋼筋所需的最小埋入深度，且會受地震作用的反覆拉拔下而影響。設計時為方便計算，常會將握裹鋼筋的漸變受力行為等效成一段完全無握裹長度 (L_{eu})，此等效無握裹長度及埋入深度皆需透過接頭試驗來求得及驗證。圖 4 中也顯示一段長為 L_{au} 的無握裹段，此作用是為了將鋼筋受拉產生的變形量可以散佈到 L_{au} 及 L_{eu} 中，延遲鋼筋達破壞的時間。

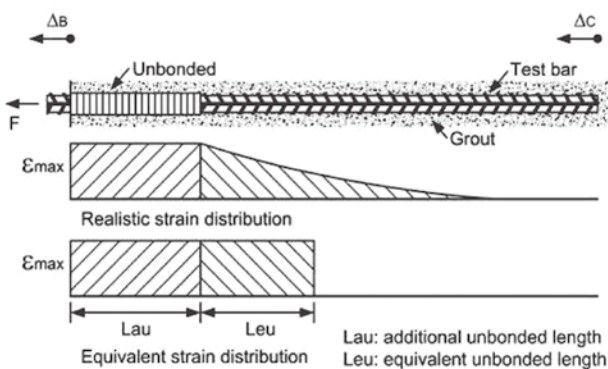


圖 4a 握裹鋼筋受力分佈

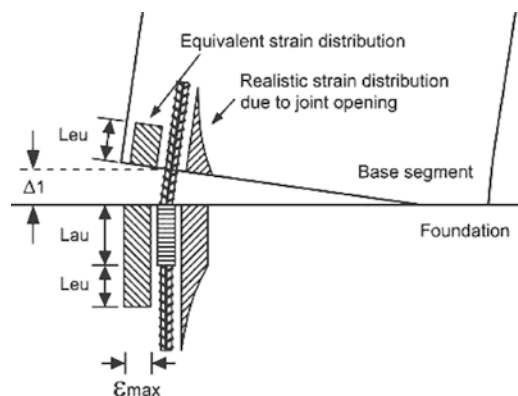


圖 4b 節塊橋柱柱底變形

對於鋼筋埋入的深度，則是參考 AASHTO LRFDA5.11.2.1 [8]，為了使消能鋼筋能夠在發揮抗拉的特性之前而不被拔出混凝土，需要埋入一定的深度，對於 N0.36 以下的小號數鋼筋所需的埋入深度規範建議為：

$$\max \left(\frac{0.02 A_b f_y}{\sqrt{f'_c}} \times 0.8 \times 0.75, 0.06 d_b f_y \right) \text{ Unit: S.I.} \quad (1)$$

0.8：修正因子，鋼筋之間有足夠間距，鋼筋握裹行為彼此不會有太大的影響，可以予以折減。

0.75：修正因子，對於鋼筋可以受到良好的圍束行為，可以折減。

A_b ：鋼筋斷面積 (mm^2)。

f_y ：鋼筋的降服強度 (MPa)。

f'_c ：28 天混凝土抗壓強度 (MPa)。

d_b ：鋼筋直徑 (mm)。

對於埋入深度 L_d ，Matsumoto (2003) [9] 也提出此段的長度為 $24 d_b$ ，而在 AASHTO (2004) 對於傳統鋼筋混凝土柱的埋入深度的公式中，經過計算後也是大約 $24 d_b$ 。經由接頭試驗的結果發現此建議值對於本文是適用的。

節塊橋柱受地震力作用之行為如同搖擺柱 (Rocking Column)，柱底節塊界面會有打開與閉合的情況產生，而橋柱的側向變形大部份源自於此開裂所引致的柱體轉動。為避免節塊橋柱在大地震下，柱底界面的消能鋼筋因過大的塑性變形及低週期疲勞 (Low cycle fatigue) 的影響而提早斷裂，可藉由於消能鋼筋增加一段脫層長度來減緩鋼筋斷裂的時機。針對額外脫層長度的設計方式，首先可由接頭試驗求得不同鋼筋號數的等效無握裹長度 (L_{eu}) 如下式 [10,11]：

$$L_{eu}(d_b) = 0.59 \varepsilon_{\max}(\%) + 1.5 \quad (\#5 \text{ bar}) \quad (2)$$

$$L_{eu}(d_b) = 0.82 \varepsilon_{\max}(\%) + 2.6 \quad (\#8 \text{ bar}) \quad (3)$$

由理論分析計算節塊橋柱在反覆載重的加載歷程下 (5% draft)，柱底節塊界面的開裂位移歷程 (Δ_1)。求

得柱底開裂位移歷程後，由式 (4) 及式 (5) 並給定某一額外脫層長度，可計算不同鋼筋號數之最大應變歷程。

$$\frac{\Delta_1}{d_b(2(0.59 \varepsilon_{\max}(\%) + 1.5) + Lau / d_b)} = \frac{\varepsilon_{\max}(\%)}{100} \quad (\#5 \text{ bar}) \quad (4)$$

$$\frac{\Delta_1}{d_b(2(0.82 \varepsilon_{\max}(\%) + 2.6) + Lau / d_b)} = \frac{\varepsilon_{\max}(\%)}{100} \quad (\#8 \text{ bar}) \quad (5)$$

使用 Manson -Coffin equation (式 6) 及線性損壞疊加法 (式 7)，[12]，計算鋼筋於低週期疲勞下的損傷指數 (damage index)。而由接頭試驗結果所求得鋼筋斷裂時的疲勞損傷指數 D 約為 0.4 ~ 0.9，為求保守設計採用最大容許損傷指數 $D = 0.2$ 。藉由調整額外脫層長度至鋼筋損傷指數達最大容許值時，即可求得橋柱達 5% 側位移比時鋼筋恰達斷裂所需之額外脫層長度 (Lau)。依此設計方式可求得 #5 及 #8 鋼筋所需的額外脫層長度分別為 400mm 及 100mm。

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = 0.103 (2N_f)^{-0.384} \quad (6)$$

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (7)$$

接頭試驗結果

經由接頭試驗的結果可以發現鋼筋經過額外脫層長度設計 (debonding)，可以延後鋼筋斷裂的時機，增加整體橋柱的韌性容量。圖 5 可以比較出 5(b) 因為增加了一段額外脫層長度，所以達到斷裂的時機，比起 5(a) 多拉伸 15% 的鋼筋伸長量。在使用八號鋼筋的試體結果中，(圖 7) 也是同樣的結果，整體拉伸行為增加了 25% 的拉伸量。

橋柱試驗

試體設計概念

目前一般實際應用案子最常見的型態為純鋼建預鑄節塊橋柱，只利用鋼鍵搭配上預力的施拉，將每個節塊緊密的結合在一起，而在台灣常見到上部結構使用此種方式，將一塊塊橋面版利用後拉預力



圖 5 接頭試驗照片

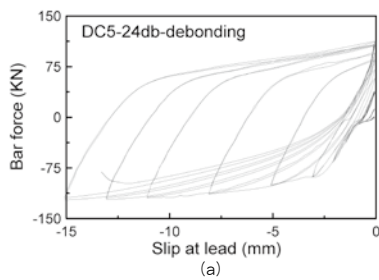
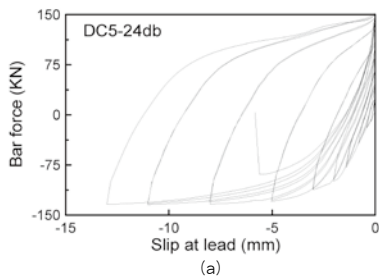


圖 6 五號鋼筋接頭試驗結果

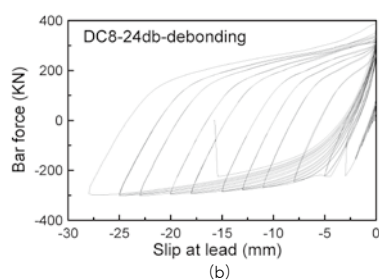
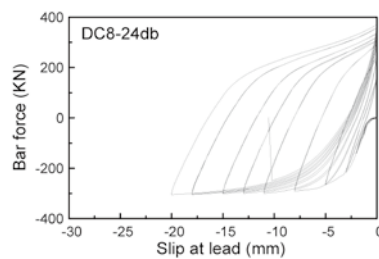


圖 7 八號鋼筋接頭試驗結果

的方式串連起來。至於下部結構目前由於還沒有相關研究，可以確認此種方式在地震下的行為是可靠且可以預測的，所以實際應用的例子目前較少見到。在美國已經有不少的實際例子應用預鑄節塊橋柱，但是這些地方通常都屬於無地震帶或是輕微的地震帶，所以在這方面的研究上，仍須進一步的研究調查，才能廣泛安心地應用。

為了研究此類型橋柱在地震作用下的行為，本文於提出了三類型的橋柱型式，且依據理論分析結果與接頭試驗結果可知，預鑄節塊橋柱在反覆載重下的遲滯行為會受貫穿於節塊間的消能鋼筋用量而影響，所以依據鋼筋量的不同，將基本型式區分為三種：

第一種橋柱型式為類似一般傳統橋柱的遲滯行

為，具有高能量消散及高殘餘變形特性。具備優異的能量消散能力意味著橋柱的受震反應會較相同設計強度但低能量消散的橋柱，更有效的降低，橋柱的斷面尺寸也可因而減小以達到更經濟的設計。

第二種橋柱型式為具有低能量消散能力與最低殘餘變形的遲滯行為，此種型式為節塊界面間沒有貫穿且連續的消能鋼筋通過，而僅有預力鋼腱加以束制。因節塊間沒有消能鋼筋通過的影響，柱體的拉力變形轉由預力鋼腱承擔而橋柱只單純承受壓力，僅由混凝土壓碎破壞

提供些許能量消散。另一方面，節塊間因沒有消能鋼筋所引致的塑性變形，橋柱受震所引致的大側向變位可藉由橋梁靜載重及預力的作用拉回至原本未變形的位。而這也是近年來地震工程研究所感興趣的結構特性，因為震後重點橋梁為緊急救災及糧食物資等運輸要道，若在大震後橋梁能在進行簡易修復後即可通車，則可大幅的提升搶救效率。

第三種橋柱型式為具有適度的能量消散及低殘餘變形的遲滯行為，此型式擁有前述兩種型式的優點，橋柱的消能能力因混凝土的開裂及壓碎與消能鋼筋的塑性變形而明顯提升，且在適量的消能鋼筋配置下，柱體的塑性變形仍可藉由橋梁的靜載重及預力拉回至接近原本的位置，進而達到自動覆位的特性。

上述三種節塊橋柱行為可藉由調整貫穿節塊間

之消能鋼筋用量來達成，節塊橋柱試驗依據理論分析及節塊接頭試驗結果設計三種不同消能鋼筋用量及相應額外脫層長度之橋柱，標註為 C8C、C0C 及 C5C 三組試體，其相應之消能鋼筋比（額外脫層長度）分別為 1%(100mm)、0%(0mm) 及 5%(400mm)。試驗目的除了驗證此三種型式橋柱之耐震行為（強度、韌性、消能）外，藉由實際製作與組裝的施作過程（如圖 8 所示），了解本文所提出之節塊橋柱系統在施工時的可行性與工作性。

工法說明

現有的預鑄節塊橋墩工法多以後拉式預力節塊工法施做，根據現有案例與相關文獻資料內容可將其做法以（圖 8）的步驟說明，首先所有的部分，包含節塊及帽梁都在預鑄場先製作及養護，然後等待基礎打設完成後，將柱底節塊吊放置定位，其下放置鋪上無收縮水泥砂漿，以便填補基礎與底部節塊，使其密合接觸（步驟一），其後在第一節塊擺放至定位後，便

可以依照同樣的步驟放置其他節塊及鋼筋續接，而節塊間以一般常用的環氧樹脂進行接縫處理（步驟二）。在完成節塊組立後，即可開始進行上方帽梁的組裝工作以及鋼鍵設置（步驟三）。然後便可以進行預力拉設（步驟四），以及對消能鋼筋的部分進行壓力灌漿（步驟五），橋柱完工的照片（步驟六）。

環氧樹脂 (epoxy) 用於節塊界面黏接除了可提供介面黏結力外，另提供耐久性保護，塗抹環氧樹脂之介面可防止水氣經由節塊交接面滲入腐蝕鋼鍵，同時若預力套管需灌漿時，環氧樹脂也可避免漿料藉由節塊介面滲漏，確保壓力灌漿時漿體不會從縫細中溢出。

試驗結果

節塊橋柱試驗結果顯示，三組橋柱試體均具有良好的韌性行為，依據接頭試驗所設計之鋼筋脫層長度，確保橋柱在設計變位前沒有發生斷裂的情況，也沒有節塊間的剪力滑移及剪力破壞等脆性破

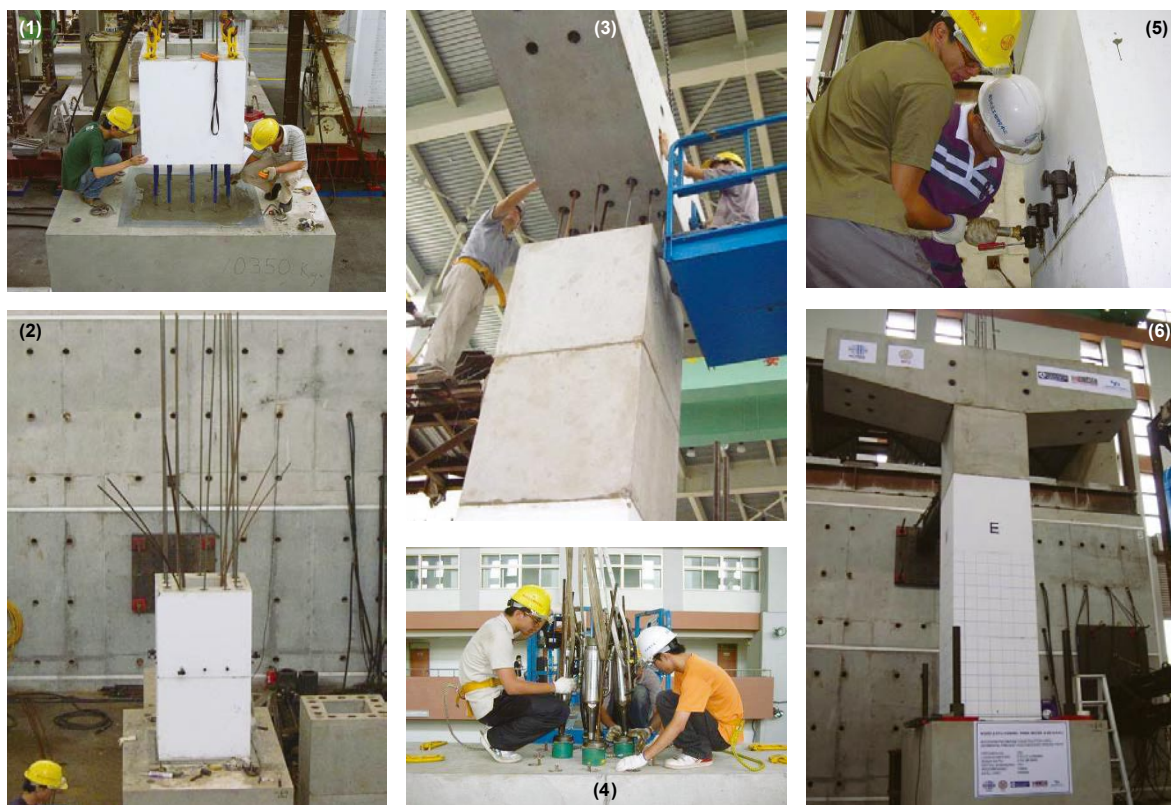


圖 8 節塊組裝流程

壞模式產生。圖 9 為三組橋柱試體之柱頂側向載重與位移遲滯迴圈圖，隨著節塊間消能鋼筋用量的不同，三組試體如預期發展出三種不同遲滯行為。試體 C8C 的消能鋼筋比為 1%，具有最大的消能面積與側向強度，但殘餘變形也隨之增加。試體 C0C 不含任何消能鋼筋，具有最佳的韌性及最低的殘餘變形，但消能能力及側向強度則不盡理想。試體 C5C 的消能鋼筋比為 0.5%，側向強度比試體 C0C 稍微提升了一點，但是整體的消能能力確有明顯的改善，而殘餘變形也控制在側位移比 0.4% 以內。

圖 10 則分別展示出這三種型態的試體試驗破壞情形，對於高消能的 C8C 試體，由於鋼筋用量的比較多，所以可以明顯的看出在柱身有許多的撓曲

裂縫，而且因為其可達的側向強度較大的，所以相對的需要更多的混凝土來承擔壓力，導致無圍束混凝土壓碎較為嚴重。對於純鋼鍵試體 C0C，則因為沒有使用任何消能鋼筋，所以柱身沒有撓曲裂縫的產生，僅在柱底稍微有壓碎的現象。而介於 C8C 與 C0C 中間的試體 C5C，因為使用了 0.5% 鋼筋比的關係，所以柱身也出現了稍微的撓取裂縫及柱底壓碎，其餘則沒有太大的破壞。

預鑄節塊橋梁柱系統・新開發成功

本文成功的開發出三種具韌性的預鑄節塊橋柱系統，經試驗驗證其遲滯行為、破壞模式及施工性均可達預期的設計目標。第一種橋柱型式（試體

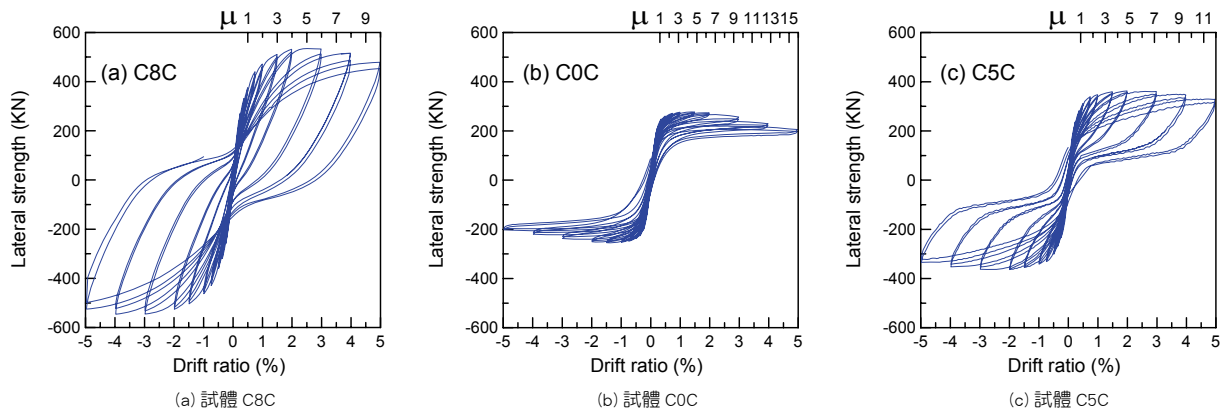


圖 9 試體遲滯迴圈圖



圖 10 試體試驗後情形

C8C) 具備優異的消能能力與高殘餘變位等特性，耐震行為接近目前傳統橋柱，適用於高耐震需求的地區；第二種橋柱型式 (試體 C0C) 具備低消能能力與最低殘餘變位等特性，建造上免除了消能鋼筋的壓力灌漿等作業，適用需快速建造與震後服務性高的橋梁，但若應用於具地震威脅地區則需搭配其他隔震消能裝置以提高耐震能力。第三種橋柱型式 (試體 C5C) 具備中度消能能力與低殘餘變位等特性，此型式兼具了前二種橋柱的優點，適用於中度耐震需求及震後服務性高的橋梁。

現行橋梁柱體的建造多採用現場鋼筋綁紮及混凝土澆置之方式，施工上需耗費許多人力及工時，且施工過程因機具物料的運送所開闢的施工道更會對周圍的環境與交通造成極大的影響。本文開發之預鑄節塊橋柱系統改進了傳統橋柱建造的缺點，具備了快速建造、高建造品質、低環境衝擊與低交通干擾等特性。對於未來老舊橋梁改建、都會區與跨越生態保護區等橋梁的新建，提供了另一種選擇方案。

參考文獻

1. Jean M. Muller, Barker, James M., "Design and Construction of Linn Cove Viaduct," PCI Journal, Vol. 30, No. 5, Sep-Oct. 1985.
2. Jean M. Muller, Barker, James M., "Joint Heating Allows Winter Construction on Linn Cove Viaduct," PCI Journal, Vol. 27, No. 5, Sep-Oct. 1982, pp. 120-130.
3. Sarah L. Billington, Robert W. Barnes, and John E. Breen, "A Precast Segmental Substructure System for Standard Bridges," PCI Journal, Vol. 44, No. 4, July-August 1999, pp. 56-73.
4. PCI Committee on Segmental Construction, "Recommended Practice for Precast Post-Tensioned Segmental Construction," PCI Journal, Vol. 27, No. 1, Jan.-Feb. 1982, pp. 7-9.
5. Chang, K. C., Loh, C. H., Chiu, H.S., Hwang, J. S., Cheng, C. B., Wang, R. J, The seismic behavior of the precast segmental bridge column and the design methodology for applications in Taiwan, Taiwan Area National Expressway Engineering Bureau, Taipei, Taiwan, 2002 (In Chinese).
6. Joshua T. Hewes and M. J. Nigel Priestly, "Seismic Design and Performance of Precast Concrete Segmental Bridge Columns," Report No. SSRP 2001/25, University of California at San Diego, La Jolla, California, May 2002.
7. Raynor, D. J., Lehman, D. E., and Stanton, J. F. (2002). "Bond-slip response of reinforcing bars grouted in ducts." ACI Struct. J., 99(5), pp. 568-576.
8. AASHTO. (2004). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 3rd Edition, Washington, D.C.
9. Matsumoto, E. E. (2003). "Development of a Precast Bent Cap System for Seismic Regions," Lake Belton Bridge-Precast Concrete Bent Cap Demonstration Workshop, Temple, T.X.
10. Ou, Y-C., Chiewanichakorn, M., Ahn, I-S., Aref, A.J., Chen, S.S., Filiatrault, A., Lee, G.C., Liang, Z., and O'Connor, J. (2005). "Modeling of the Precast Unbonded Post-Tensioned Segmental Bridge Column under Lateral Load," The PCI National Bridge Conference, Palm Springs, CA, October 16-19 (2005).
11. Ou, Y-C., Chiewanichakorn, M., Ahn, I-S., Aref, A.J., Chen, S.S., Filiatrault, A., Lee, G.C. (2006). "Cyclic Performance of Precast Concrete Segmental Bridge Column," Transportation Research Board 85th Annual Meeting, Washington D.C., January 22-26, 2006. (In Review)
12. Wehner, T. and Fatemi, A. (1991). "Effect of mean stress on fatigue behavior of a hardened carbon steel." Int. J. Fatigue, Vol. 13, No. 3.

歡迎投稿

土木水利雙月刊

中國土木水利工程學會 (02)2392-6325
e-mail:ciche@ciche.org.tw