

# 鋼與混凝土複合橋墩之設計與應用

洪曉慧／國家地震工程研究中心研究員

陳國隆／交通部臺灣區國道新建工程局組長

宋裕祺／國立台北科技大學土木工程系教授暨國家地震工程研究中心組長

張國鎮／國立台灣大學土木工程系教授暨國家地震工程研究中心主任

王柄雄／國家地震工程研究中心助理研究員

曾榮川／台灣世曦工程顧問股份有限公司第一結構部技術經理

## 鋼與混凝土複合橋墩・品質優

橋墩為橋梁結構系統中抵抗地震力之主要構件，橋墩之設計與施工品質影響整體橋梁耐震性能甚鉅。傳統橋墩多為鋼筋混凝土橋墩或鋼結構橋墩，對於鋼筋混凝土橋墩而言，在耐震設計中為滿足強度及韌性需求，橋墩須配置足夠之主筋與大量之橫向鋼筋，且規定許多配筋細節，如耐震彎鉤、伸展長度等。然而大量的橫向鋼筋與嚴格的配筋細節容易增加施工複雜度，造成施工品質與施工安全不易掌控，所需工期與造價亦隨之大幅增加。另一方面鋼橋墩因鋼材具高強度與韌性，可減少柱斷面尺寸與自重，但鋼材在高軸力下有局部挫屈問題，須在柱內裝設加勁板、角隅連結材並考量螺栓或電銲接頭所需作業空間等，施工複雜度亦頗高。由此可見傳統鋼筋混凝土橋墩與鋼橋墩各有其優缺點，為保有兩者之優點並避免其缺點，使結構耐震系統更有效率，採用適當配置之鋼與混凝土複合式橋墩，將能有效結合具備高強度、高韌性的鋼與具備高承载力、高耐久性的混凝土二者之優點，減少繁複的施工作業，有助於提昇施工品質與施工效能，並進而達到營建自動化與提高施工安全之目的。

近年來各項工程為減少危險之高空人工作業，降低工安問題，並提升施工效率，營建自動化逐漸受到重視。鋼與混凝土複合式橋墩之發展，也逐漸以營建

自動化為出發點，除考量橋墩柱之耐震性外，也將施工性與施工步驟納入考量。將傳統鋼及混凝土複合式橋墩柱之設計結合先進之工法，則各式省時、省工並兼具高性能之鋼及混凝土複合式橋墩柱新工法逐漸發展，其中包括日本的 3H 工法 [1] 與 REED 工法 [2]。參考 3H 工法與 REED 工法之精神，配內國內需求與施工環境，國家地震工程研究中心透過國道新建工程局研究計畫，研發符合營建自動工法之 H 鋼與混凝土複合式橋墩 [3 ~ 4]。本橋墩斷面配置如圖 1 所示，以 H 型鋼為主筋組立時之支撐並取代部分主筋，外圍以一筆箍筋 [5] 包覆提供圍束。以圖 1 為例，施工時，橋柱將分成六個 H 型鋼與一筆箍鋼筋籠。首先將六個 H 型鋼分別吊裝組立並固定，之後再將已先在地面組裝完成之一筆箍筋籠吊裝，並以已組立完成之 H 型鋼為支撐。如此作法可避免傳統配置橋墩所需之繁複箍筋與繫筋綁紮作業，也可透過 H 型鋼之支撐，降低鋼筋籠吊裝之工安問題，並提升施工效率。

## 試體設計與分析

為確認所研發工法橋墩之施工性與耐震性，本研究透過大尺寸的橋墩試體在實驗室之建造與紀錄，檢討工法細節，就如何減少繁複施工作業、有效降低工期、提升工程品質等，研議合宜的施工工法；透過橋墩試體之性能實驗，探討鋼與混凝土複合式橋墩在承受地震力

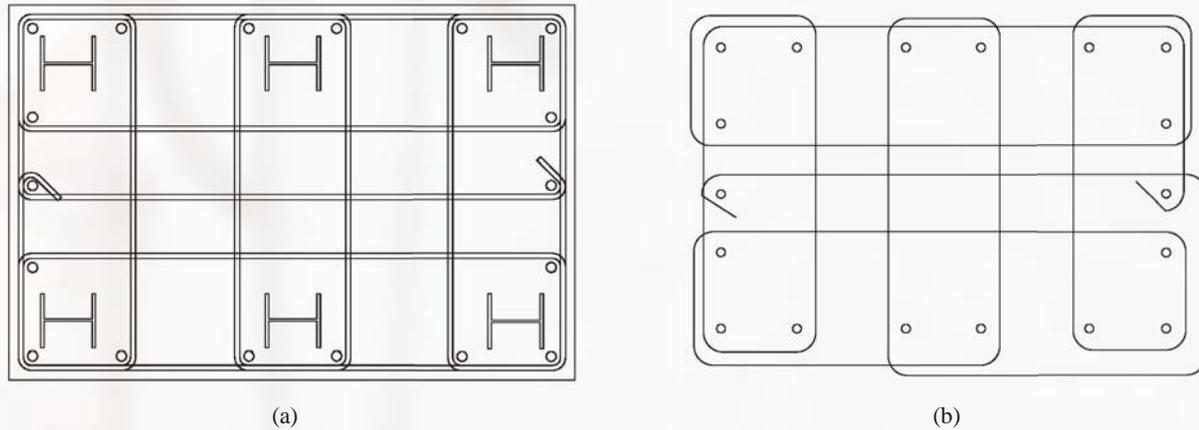


圖 1 鋼及混凝土複合式橋柱斷面配置示意圖 (a) 斷面配置；(b) 一筆箍箍筋

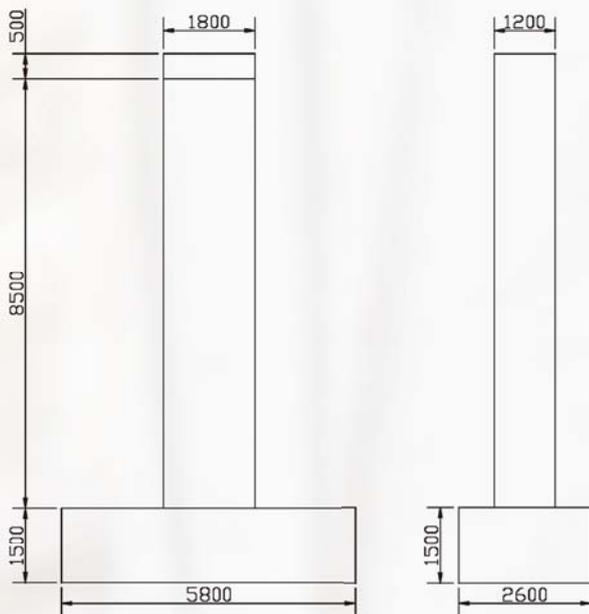


圖 2 橋柱外觀尺寸圖 (單位:mm)

作用時的強度、韌性和破壞行為。考慮實驗室之場地限制，本研究設計之試體尺寸如圖 2 所示，試體總高度為 10.5 m，其中包含基礎 1.5 m、柱身 9 m，以 18 m 高之實際橋墩而言，為 1/2 縮尺試體。矩形柱斷面為 1.8 m × 1.2 m，基礎斷面長寬為 5.8 m × 2.6 m。

為比較所研發工法橋墩與傳統配置橋墩之差異，本研究亦同時建造一組依傳統配置之同尺寸鋼筋混凝土橋墩試體。試體圖 3(a) 為傳統橋柱之斷面配筋圖，箍筋採 SD420 D13@10 cm 竹節鋼筋設計，分外箍及繫筋，箍筋用量為 1.19%；主筋採 SD420 D36 竹節鋼筋設計，共配置 32 支主筋，主筋配筋量為 1.5%。為模擬現場施工狀況，試體主筋分兩段續接，第一段由基礎內延伸至基礎面上 4 m，以避開塑鉸區，第二段則由

續接處延伸至柱頂，兩段主筋以標準之螺牙續接器續接。由於主筋續接器為 SA 級續接器，按混凝土結構設計規範之規定可在任意位置續接，且續處位於非塑鉸區，無影響破壞模式之疑慮，故主筋續接位置設置在同一斷面。

圖 3(b) 為鋼與混凝土複合式橋柱試體斷面設計圖。斷面配置 18 支 SD420 D32 主筋及 6 組 A572 H175 × 175 × 7.5 × 12 鋼骨，斷面主筋比 0.68%，斷面鋼骨比 1.39%，鋼材加鋼筋換算為對應之等值主筋比為 1.83%，略大於 RC 試體，此係考量 RC 試體主筋之有效深度大於鋼與混凝土複合式橋柱之對應值，且鋼骨與周圍混凝土握裹效果尚待驗證，故設計採偏保守方式進行。箍筋部分配合鋼骨之配置，並為維持和標準試體同樣為 10 cm 之間距，採用 SD420 D16@10 cm 鋼筋，換算箍筋比為 1.40%，箍筋採一筆箍方式施作。此外，為使鋼骨與混凝土達到握裹結合之目的，鋼骨如圖 4 所示於翼板位置焊接剪力釘，剪力釘在離基礎面為 4 m 範圍內之下段柱為每 20 cm 配置 24 支，在上段柱為每 1 m 配置 24 支。試體組裝期間，為提供鋼筋籠有效側向支撐，基礎內部首先埋設一座如圖 5 所示之鋼製基礎底梁，柱身段鋼骨與基礎底梁採銲接接合。試體之箍筋籠分成三段，第一段位於基礎面下，箍筋籠長度為 112 cm，箍筋籠由基礎底部延伸至基礎上層筋下方；第二段位於柱底塑鉸區，箍筋籠長度為 384 cm，箍筋籠從基礎面上 4.5 cm 向上延伸至鋼骨續接板下緣位置；第三段位於柱上段部分，箍筋籠由鋼骨續接板下緣位置向上延伸至柱頂面下 5 cm 處。試體之柱主筋分兩段，一段自基礎頂面下 137.5 cm 處錨定後向

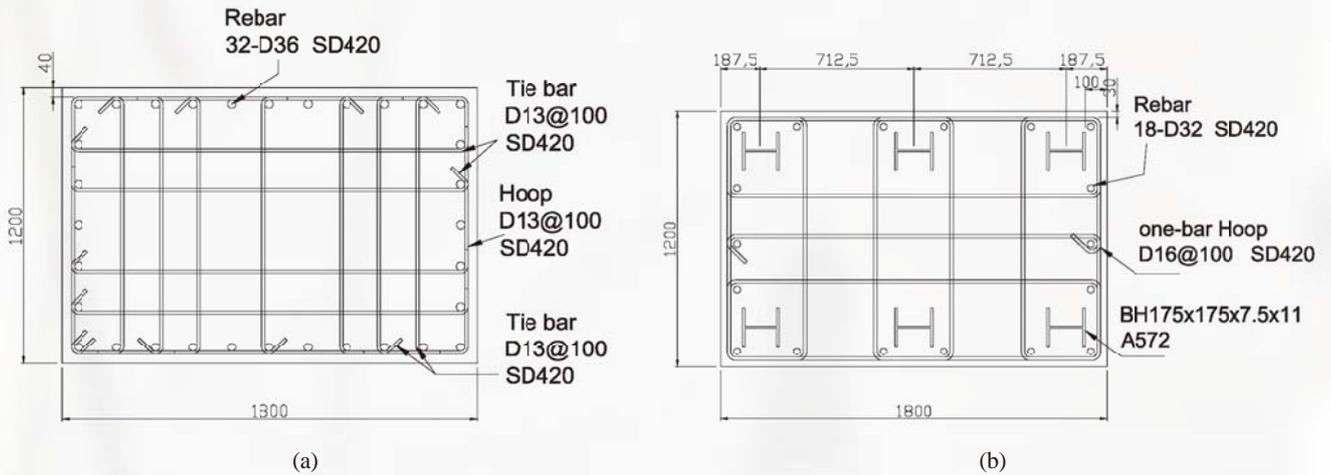


圖 3 試體斷面配筋圖：(a) 傳統橋柱；(b) 鋼與混凝土複合式橋柱（單位：mm）

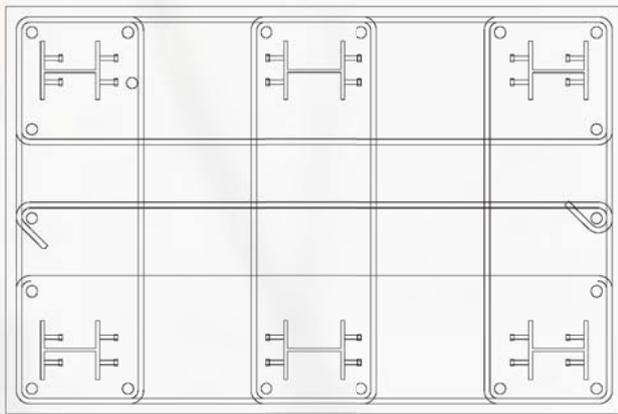


圖 4 鋼與混凝土複合式橋柱剪力釘之斷面配置

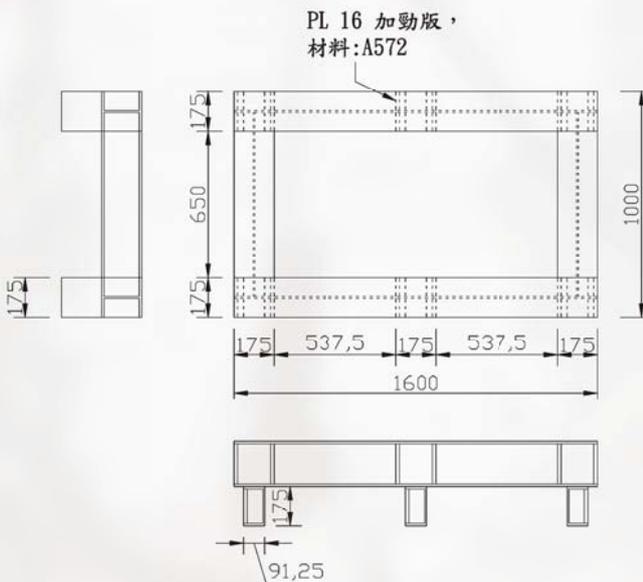


圖 5 鋼與混凝土複合式橋柱之基礎底梁設計圖

上延伸至基礎面上 4 m 處，另一段則由續接處延伸至柱頂，主筋之續接與錨定皆採用與傳統 RC 橋柱試體

相同之設計。試體之鋼骨分為 2 段，第一段長度為 514 cm，由基礎底部延伸至基礎面上 4 m 處；第二段長度為 496 cm，由第一段鋼骨續接位置向上延伸至柱頂面下 4 cm 處。鋼骨相鄰斷面採用續接板螺栓接合，接合強度以腹板及翼板個別發揮全斷面降伏為原則。

### 施工流程與紀錄

為探討所研發工法橋墩之施工性，本研究在橋墩試體施作時均全程記錄，照相和錄影，以利於施工工率之比較。傳統 RC 橋柱為本研究之標準對照組，其施工以現場鋼筋綁紮澆置混凝土的方式施作，為確保混凝土品質，避免灌漿時出現粒料分離的情形，試體之混凝土灌漿分成基礎、下段橋柱、中段橋柱及上段橋柱四部分，配合現場模板、鷹架之搭設，逐漸向上施工。鋼與混凝土複合式橋柱之灌漿亦依照傳統橋柱分成基礎、下段柱、中段柱及上段柱四部分。施工歷程紀錄相片列於圖 6，其施工步驟概述如下：

- (1) 基礎下層鋼筋綁紮。
- (2) 下段鋼骨及底座定位。
- (3) 基礎段一筆箍定位、主筋定位。
- (4) 基礎上層鋼筋綁紮完成後基礎灌漿。
- (5) 第一昇層一筆箍定位後，第一昇層封膜、灌漿。
- (6) 上段鋼骨續接。
- (7) 第二昇層一筆箍定位。
- (8) 上段主筋續接。
- (9) 第二昇層灌漿、接著第三昇層續接、灌漿後完工。

工率是用以衡量施工效率的直接數據，本研究依據試體實際施工之紀錄計算工率，表 1 為兩組橋柱試體之工率統計，其中工率為各工項的工人數與作業時間的乘積，表中數據顯示傳統橋柱工率為 407 人時，複合式橋柱之工率為 381 人時，以傳統橋柱所花費人時為基準，複合式橋柱之工率為傳統橋柱之 93.6%。以上數據顯示本研究所發展之複合橋柱在施工效率上確實明顯優於傳

統作法，可用於改善營造業勞工短缺及工人素質不穩定的問題。此外，本研究以成本考量，採用公母螺牙續接器續接主筋，公母螺牙續接器由於續接器與鋼筋焊為一體，鋼筋續接時需轉動主筋，故主筋需與箍筋籠分別組立，若將來改用僅需轉續接器之填漿式續接器，複合式橋柱可將主筋與箍筋籠預先綁紮固定，再於現場一起吊裝，施工效率應可更進一步提高。

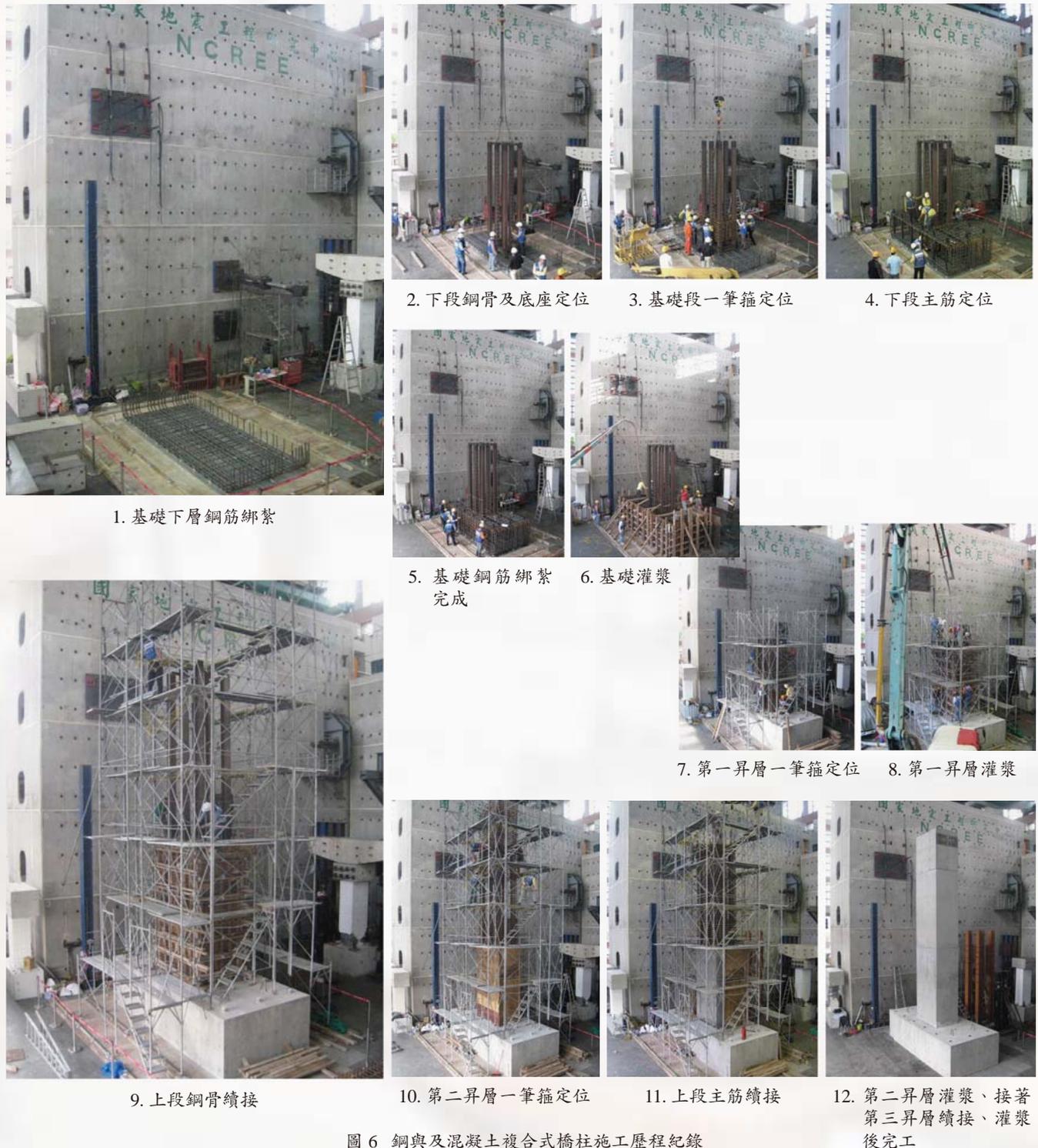


圖 6 鋼與混凝土複合式橋柱施工歷程紀錄

表 1 橋墩之工率統計表 (單位：人時)

| 工項  | 傳統橋柱  | 複合式橋柱 |
|-----|-------|-------|
| 基礎  | 152.1 | 146   |
| 下段柱 | 86    | 72    |
| 中段柱 | 106.8 | 100.5 |
| 上段柱 | 61.9  | 61.9  |
| 合計  | 406.8 | 380.4 |
| %   | 100%  | 93.5% |

## 試體之性能試驗

為驗證鋼與混凝土複合式橋柱之耐震性能，兩組試體在完工後，均在實驗室內進行性能試驗。整體試驗配置如圖 7 所示，橋柱基礎以 16 支施加 150 噸預力之  $\Phi 69$  mm 高拉力鋼棒與強力地板緊密接合，以模擬基礎端固定接合方式；垂直向軸力加載方式則透過兩側各 2 支  $\Phi 69$  mm 高拉力鋼棒所承受之預力對橋柱施加軸力，以模擬上部結構之重量；側力加載部分，配置 3 支 100 噸最大出力之油壓制動器，兩端分別固定於反力牆及柱頂轉接鋼梁以施加反覆荷載。

為量測試體受反覆荷載後之曲率變化與剪力變形，兩座試體均於東側安裝角度計與位移計。如圖 8 所示，角度計 T1-T7 共七個，分別安裝於基礎上 10 cm、50 cm、90 cm、130 cm、170 cm、250 cm 與 330 cm 處。LVDT 位移計 L1-L12 共 12 支，分別交叉設置於上述角度計中間。為量測試體受反覆荷載後之鋼筋與鋼骨之應變變化，兩座試體亦於下段柱灌漿前於適當位置埋設應變計。

本研究分別針對兩座試體進行反覆載重試驗，側向力加載為位移控制。試驗過程中，施加固定之垂直向軸力 5186 kN ( $= 0.07f'_cA_g$ )。表 2 與圖 9 為本實驗之側向位移加載歷程，側向位移比 (Drift Ratio) 由小到大分別為 0.25%、0.375%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、3.0%、4.0%、5.0%，其中，4% 以前每個位移量施載 2 次迴圈，5% 施載 3 次迴圈。此外，考量油壓制動器的最大行程  $\pm 500$  mm 僅足以完成 5% 側向位移比，故倘橋柱試體在 5% 側向位移比下仍無顯著的強度衰減，則在完成 5% 側推位移後，於原轉接鋼梁南側加墊一座相

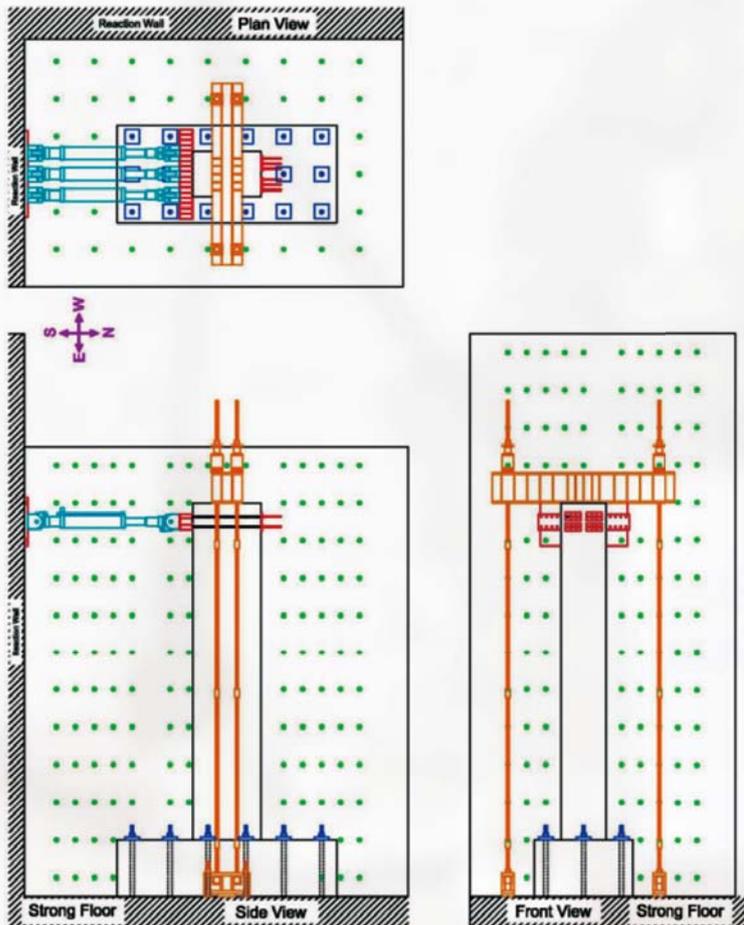


圖 7 試驗配置



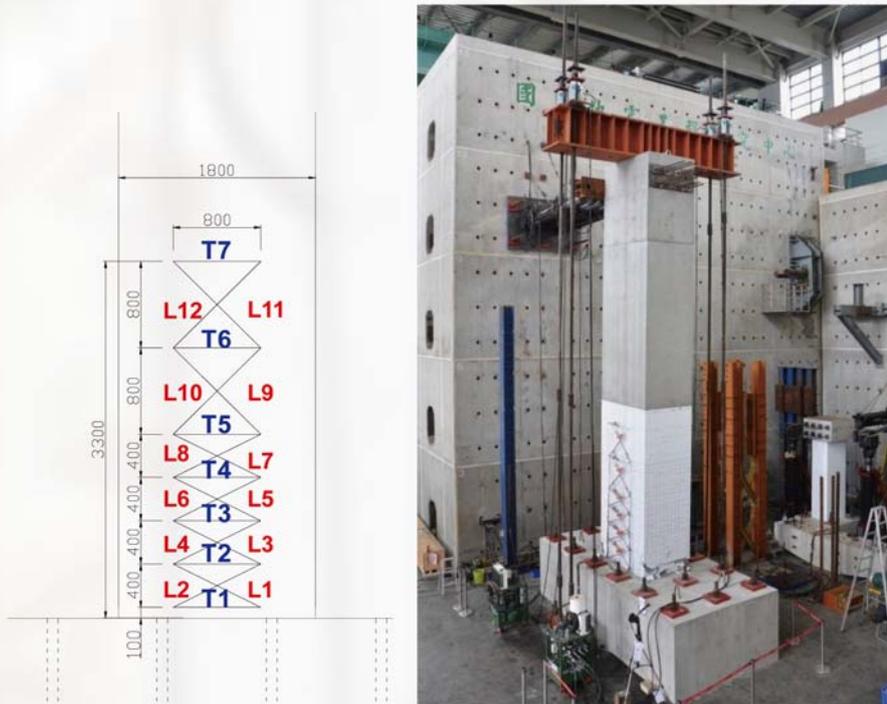


圖 8 角度計與位移計配置圖

同尺寸的鋼梁，以增加橋柱受推側之位移行程，但此配置會相對減少橋柱受拉側之之位移行程，故於 5% 側向位移比後，推向加載位移調整為 +8% 及 +9%，拉向則固定為 -1%，並以此檢核橋柱之極限承載性能。

實際進行實驗時，傳統橋柱試體強度在側向位

移比達 5% 時之第一迴圈開始有些折減，而在側向位移比為 5% 之第二迴圈時，強度明顯折減，第三迴圈時，強度則驟減至 1200 kN 左右，故試驗在側向位移比為 5% 之第三迴圈完成後即停止。複合式橋柱強度在側向位移比為 5% 完成後仍無折減，故實驗繼續進行側向位移比為 8% 之側推。試體強度在側向位移比為 8% 之第三迴圈時亦仍無明顯折減，故試驗持續進行側向位移比為 9% 之側推。試體強度在側向位移比為 9% 之第三迴圈時折減至 1800 kN 左右，低於試體強度之 80%，故實驗停止。綜

整兩組試體之反覆載重試驗結果，將遲滯迴圈同時繪於圖 10 中可發現，鋼與混凝土複合橋柱之耐震性能優於傳統橋柱。在韌性方面，傳統橋柱在側向位移比為 5% 時強度開始折減，鋼與混凝土複合式橋柱在側向位移比為 9% 時強度才開始有較大之折減。在強度

表 2 側向位移加載歷程

| 回次        |   | 2     | 4      | 6    | 8     | 10  | 12    | 14  | 16  | 18  | 21  | 24  | 27  |
|-----------|---|-------|--------|------|-------|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 側向位移比 (%) | + | 0.25  | 0.375  | 0.5  | 0.75  | 1.0 | 1.5   | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 8.0 | 9.0 |
|           | - | 0.25  | 0.375  | 0.5  | 0.75  | 1.0 | 1.5   | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 1.0 | 1.0 |
| 側向位移 (mm) | + | 21.25 | 31.875 | 42.5 | 63.75 | 85  | 127.5 | 170 | 255 | 340 | 425 | 680 | 765 |
|           | - | 21.25 | 31.875 | 42.5 | 63.75 | 85  | 127.5 | 170 | 255 | 340 | 425 | 85  | 85  |
| 迴圈數       |   | 2     | 2      | 2    | 2     | 2   | 2     | 2   | 2   | 2   | 3   | 3   | 3   |

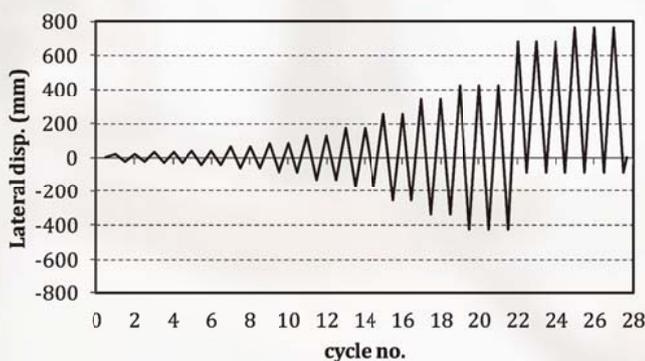


圖 9 側向位移加載歷程

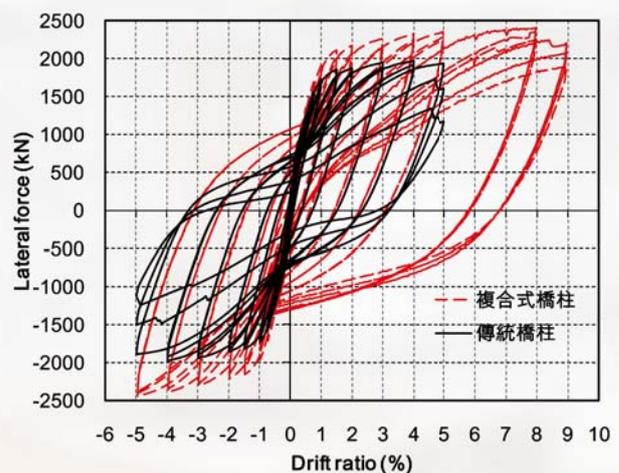


圖 10 試體遲滯迴圈比較圖

方面，傳統橋柱在為 2000 kN 左右，而鋼與混凝土複合橋柱則可達 2400 kN。另由橋柱上安裝之位移計量測結果，可推求得各橋柱於不同側向位移比時之剪力位移與總位移比，將兩組橋柱所得結果一起套疊可得圖 11 之比較圖，圖 (a) 和 (b) 分別為側向位移比為負值（拉）和正值（推）時之結果。如圖所示，複合式橋柱由於鋼骨具有較佳之抗剪能力，其剪力位移明顯低於傳統橋柱。

圖 12 為試體之破壞情況比較，其中圖 (a) 和 (b) 分別為傳統橋柱與複合橋柱於側向位移比為 5% 之第三迴圈時之破壞相片，如圖所示，複合橋柱之破壞主要集中於柱底 40 cm 處，混凝土剝落，箍筋外露，但主筋

未外露，故複合橋柱在側向位移比為 5% 時，強度並未折減，而傳統橋柱之主筋則明顯外露並嚴重挫屈，箍筋亦明顯外凸，繫筋彎勾脫離。圖 12(c) 所示為複合式柱於側向位移比為 9% 第三迴圈後之破壞相片，如圖所示，此時複合式柱部分主筋挫屈斷裂，但鋼骨並未外露。為進一步了解試體內部的實際破壞情況，兩座試體均在實驗完成後鑿除表面破壞混凝土，再次觀察其最後破壞機制，圖 13 所示為鑿除表面破壞混凝土後之試體相片，其中圖 (a) 為傳統柱在受到側向位移比為 5% 後之破壞相片，圖 (b) 為複合柱在受到側向位移比為 9% 後之破壞相片。如圖所示，傳統橋柱之箍筋發生一般矩形 RC 柱常見之破壞模式，即直線排列箍筋明顯

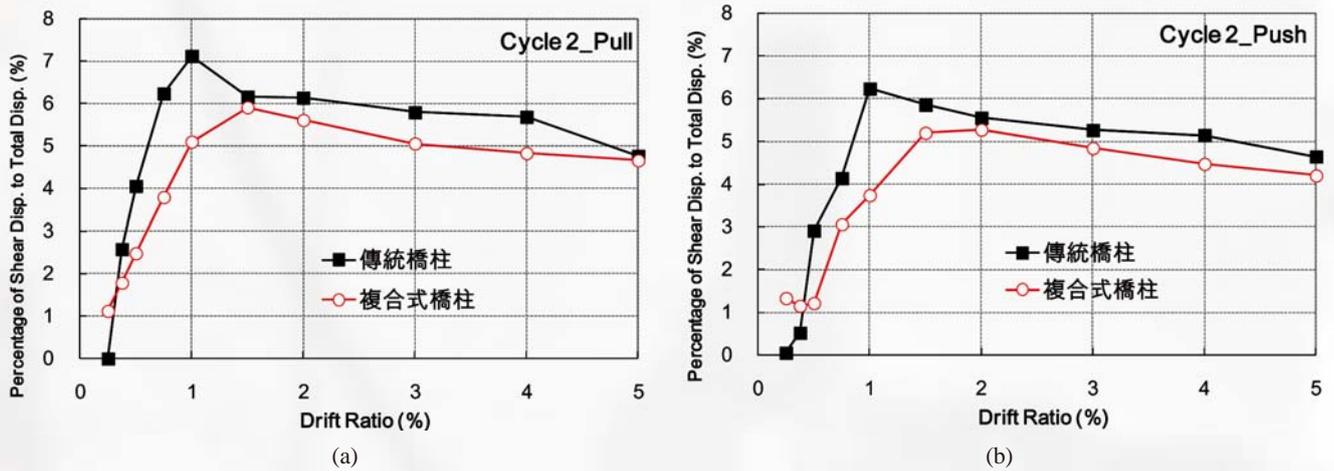


圖 11 試體於不同側向位移比之剪力變形比（第二迴圈）(a) 側向位移比為負值時（拉）；(b) 側向位移比為正值時（推）

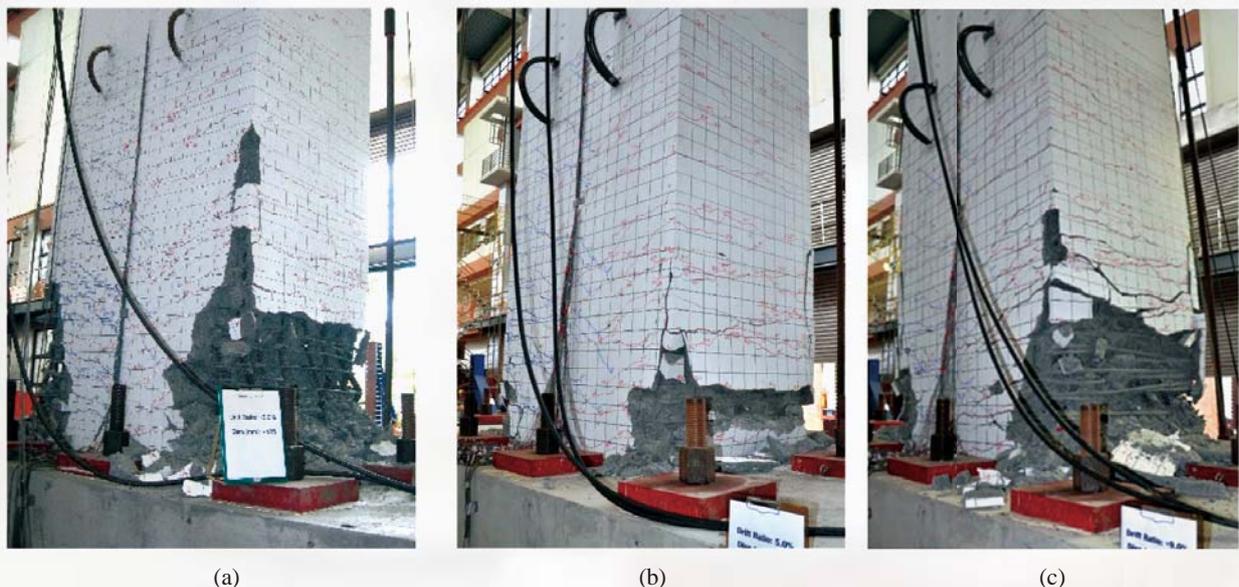


圖 12 試體之破壞情況比較 (a) 傳統橋柱於側向位移比為 5% 第三迴圈時；(b) 複合柱於側向位移比為 5% 第三迴圈時；(c) 複合柱於側向位移比為 9% 第三迴圈時

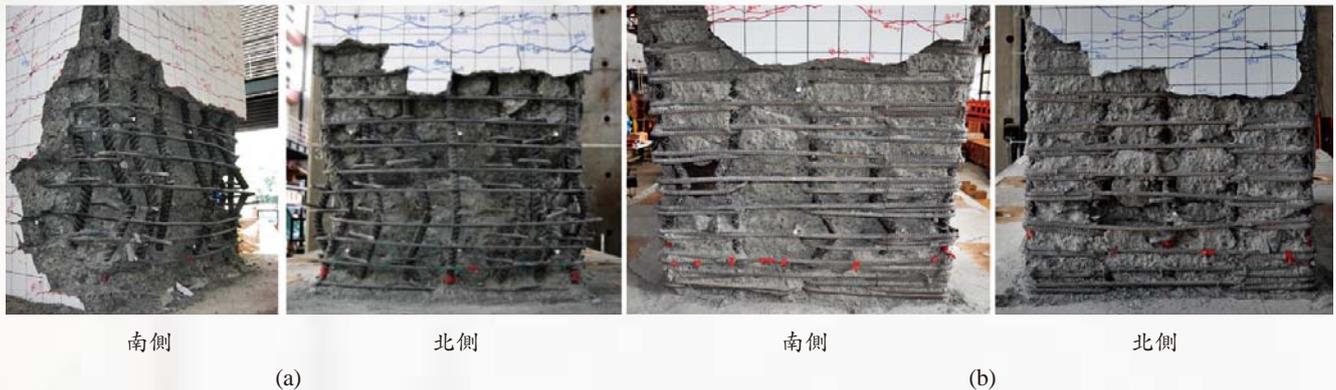


圖 13 鑿除表面破壞混凝土後之破壞情況比較 (a) 傳統柱 (drift ratio = 5%); (b) 複合式橋柱 (drift ratio = 9%)

外鼓，繫筋彎勾脫離，故其箍筋圍束效果完全喪失，主筋嚴重挫曲斷裂，反觀複合柱之圍束箍筋則沒有明顯外凸情形，仍保持在其原有位置，其破壞原因為部分主筋挫曲，南側之兩支鋼骨挫屈。

圖 14 所示為橋柱塑鉸區於不同側向位移比之曲率變化圖，如圖所示，兩組橋柱試體之最大曲率值均發生在柱底基礎交界面附近，而在離基礎底 30 cm 外之橋柱塑鉸區範圍內，傳統橋柱之曲率值大於複合式橋柱，表示傳統橋柱在該處之破壞情況較嚴重，此結果再次顯示複合柱之耐震性能優於傳統柱。

### 試體分析與比較

兩組試體於製作過程中均有進行材料試驗，依據材料試驗強度，本研究亦進行試體斷面之非線性分析，分析軟體採用 Sap 2000N，混凝土採 Mander 模型 [6] 計算其圍束及未圍束區之應力應變曲線，鋼筋與鋼骨採用考慮降伏平台及應變硬化特性之應力應變曲

線。分析假設試體在受彎矩過程中平面保持平面，鋼筋、鋼骨與混凝土完全合成，即假設鋼筋和鋼骨與周圍混凝土之握裹效果很好，其介面無相對滑動產生。斷面以纖維元素 (fiber element) 進行模擬，圖 15(a) 和 15(b) 所示分別代表傳統橋柱與複合橋柱之分析模型。將分析結果與試驗結果比較可得圖 16，圖中分析結果與試驗所得之遲滯迴圈包絡線相當吻合，此結果證實分析之可靠性，也驗證分析時所採用鋼骨 / 鋼筋與周圍混凝土完全合成之假設的適當性。

如前所述，複合橋柱試體在設計階段，考量鋼骨與周圍混凝土握裹效果未知而採偏保守方式設計，故複合橋柱試體所配置之主筋比高於傳統橋柱試體，但經實驗結果與分析結果比較後證實鋼骨與周圍混凝土握裹效果良好，且兩者完全合成之假設合理，故本研究依此假設，以混凝土應變達 0.003 為基準，重新計算兩組橋柱之標稱彎矩強度  $M_n$ 。分析結果得傳統橋柱之  $M_n$  為 14199 kN-m，複合式橋柱  $M_n$  為 16190 kN-m。最後再將圖 10 所示之試驗結果除以各試體標稱彎矩強度

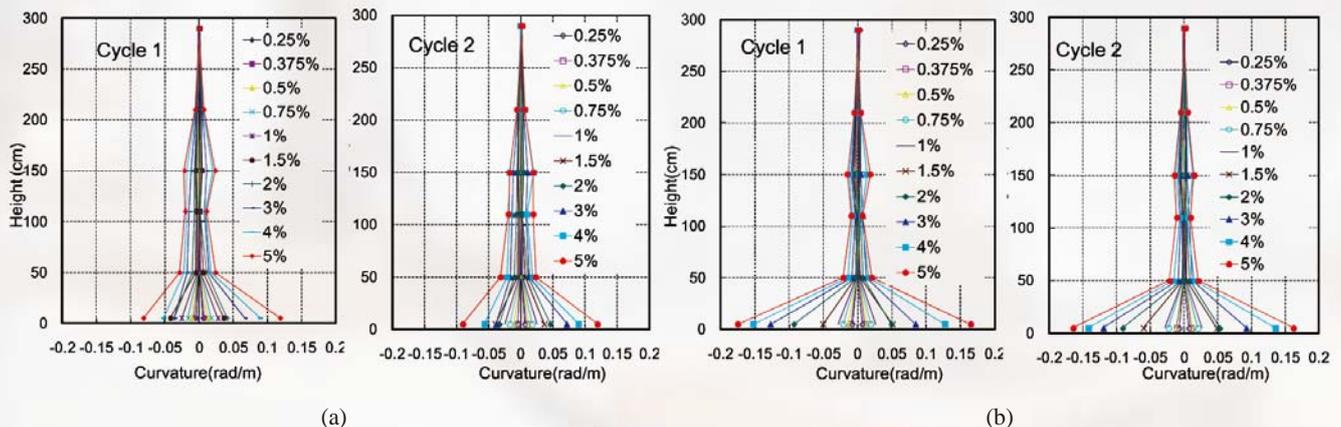


圖 14 橋柱於不同側向位移比之曲率變化圖 (a) 傳統柱 (b) 複合柱

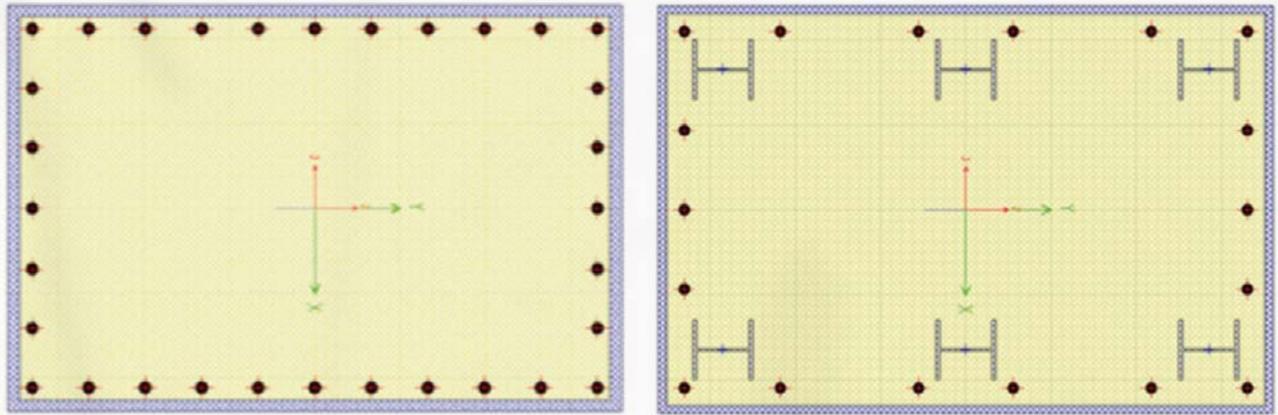


圖 15 試體分析之斷面模型 (a) 傳統橋柱 (b) 鋼與混凝土複合式橋柱

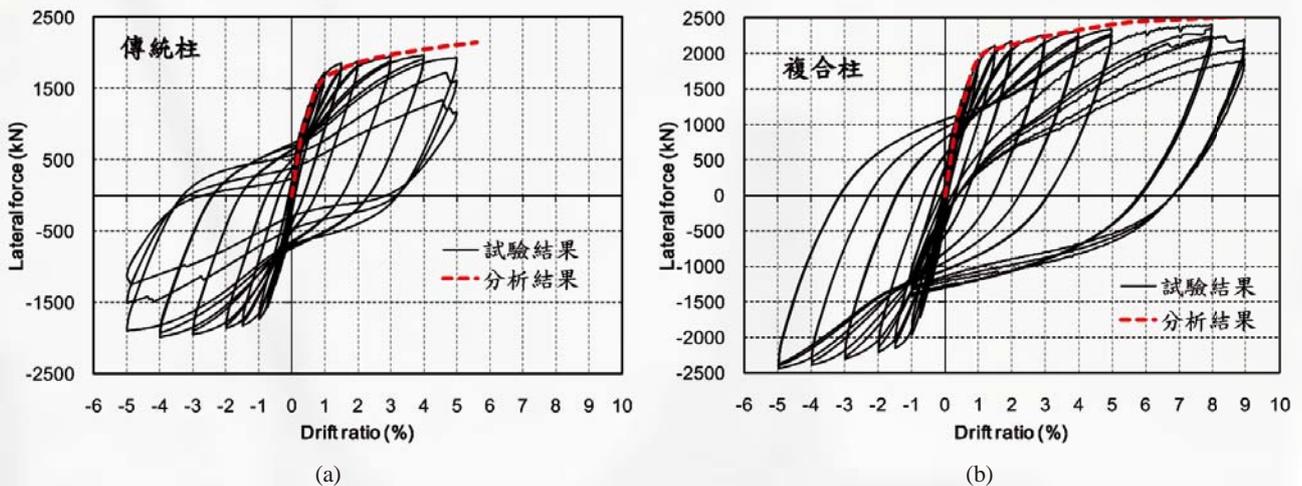


圖 16 試體分析結果與實驗結果之比較 (a) 傳統橋柱 (b) 複合橋柱

$M_n$  對應之剪力  $V_n$  進行正規化，正規化後所得之遲滯迴圈比較圖繪於圖 17 中。如圖所示，正規化後之兩組橋柱強度相當。此結果顯示若兩組試體採用相同之設計彎矩強度，其實際反應之強度將也相當，但複合橋柱之韌性優於傳統橋柱。

由實際試體施工工率之計算，已證實鋼與混凝土複合橋柱工法之施工性優於傳統橋柱，另依性能試驗結果也已證實鋼與混凝土複合橋柱之耐震性能優於傳統橋柱，但橋柱工法的選擇除了考量施工性與耐震性外，經濟性也是決定性因素，故本研究亦針對複合橋柱試體與傳統試體之造價進行比較。為使兩組橋柱具有相同之比較基準，本研究另設計一組強度與傳統橋柱相當之複合柱，新設計橋柱之主筋配置和原複合橋柱試體相同，配置 18 支 SD420 D32 鋼筋，但鋼骨改為 6 組 A572 H150 × 150 × 7 × 10 型鋼，此配置之橋柱斷

面鋼筋比為 0.68%，斷面鋼骨比為 1.09%，鋼材加鋼筋換算為對應之主筋比為 1.59%。新設計橋柱之箍筋比也改為和傳統柱相同（1.19%），即將箍筋間距由原複合式柱之 10 cm 改為 11.7 cm。經由試驗結果與分析結果之比較已驗證本研究所採用分析方法之正確性，故茲以驗證過之分析方法針對新設計橋柱進行試體分析，並將其分析結果與傳統橋柱進行比較可得如圖 18 所示之結果。如圖所示，修正後之複合柱分析所得強度和傳統柱相當，故橋柱之造價比較將依此修正後試體之配置為基準。表 3 所示為試體造價比較表，其費用包含橋柱試體加工費、施工費與材料費，材料費包括工作筋之成本，但不含試驗配合鐵件，表中數據顯示複合式橋柱之總成本為傳統柱之 129%，主要因為鋼骨之費用高於鋼筋混凝土。

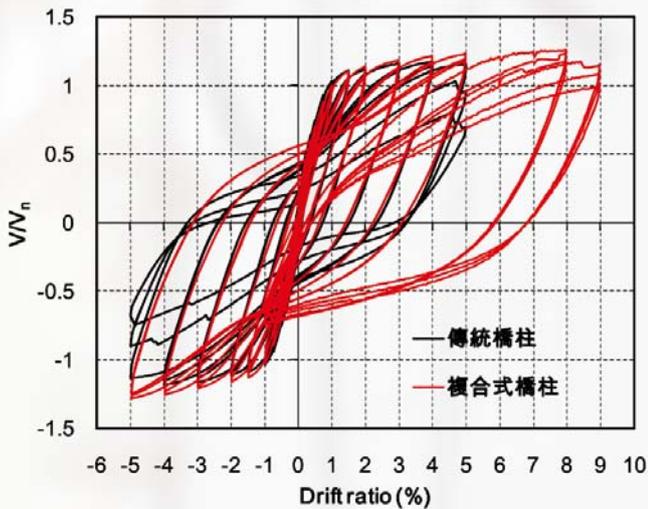


圖 17 試體正規化後之遲滯迴圈比較圖

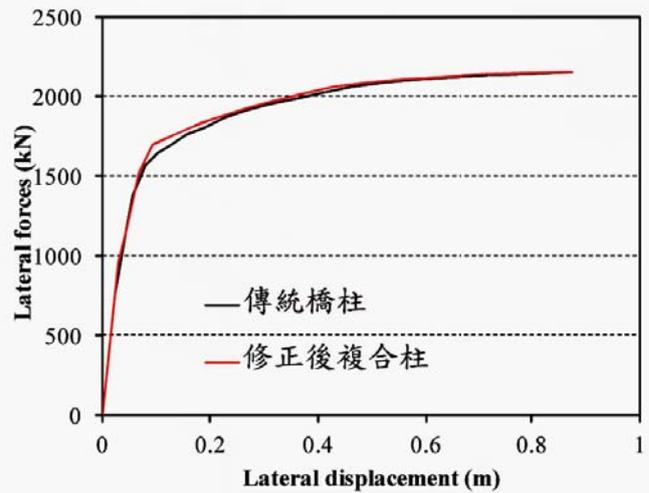


圖 18 修正後試體分析結果

表 3 試體造價比較表

| 項目  | 傳統柱        |            |            |           | 複合柱        |            |            |           |
|-----|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|
|     | 加工費<br>(元) | 施工費<br>(元) | 材料費<br>(元) | 合計<br>(元) | 加工費<br>(元) | 施工費<br>(元) | 材料費<br>(元) | 合計<br>(元) |
| 基礎  | 5,795      | 57,398     | 204,021    | 267,214   | 5,795      | 57,398     | ,          | 267,214   |
| 柱體  | 4,079      | 119,727    | 263,691    | 387,498   | 146,997    | 102,825    | 327,134    | 576,956   |
| 總計  |            |            |            | 654,711   |            |            |            | 844,170   |
| 百分比 |            |            |            | 100%      |            |            |            | 129%      |

## 工法應用與檢討

箍筋綁紮是橋柱施工最為繁雜的工項之一，本研究開發之改良式鋼與混凝土複合式橋柱工法主要藉由箍筋加工組立之自動化，達到營建自動化目的，並透過以鋼骨取代部分主筋，作為主筋與箍筋籠組立時之支撐，降低鋼筋組立時之施工風險與主筋過度緊密排列時綁紮之困難。經實際施工證實本工法在施工效率上確實明顯優於傳統作法，可用於改善營造業勞工短缺及工人素質不穩定的問題。此外，經性能試驗也證實本研究開發之複合橋柱耐震性能不僅可達傳統橋柱之標準，其韌性更明顯高於傳統橋柱，但在經濟性上由於鋼骨之材料費用高於鋼筋混凝土，故鋼與混凝土複合橋柱試體之造價仍高於傳統橋柱。

上述結論之主要依據為本研究所採用之斷面為

1.8 m × 1.2 m，柱身高為 9 m 之低橋墩試體的施工經驗、性能試驗結果與實際造價數據，其中也並未將施工安全等難以量化之影響因素納入。就耐震性而言，鋼與混凝土複合橋墩之耐震性能並不易因尺寸與規模之差異而有所不同，根據實驗成果，複合橋墩試體之耐震性優於傳統橋柱，故其他尺寸與規模之橋墩也應有相同效果。但就施工性與經濟性而言，對於其他尺寸與規模之橋墩，其比較結果應會略有不同。就施工性而言，低橋墩之主筋通常不需要續接，其現場綁紮及輔助固定措施之施工較為容易，除另有近接施工等特殊因素外，使用鋼與混凝土複合橋墩較不具有工進或工安上之優勢，而中高橋墩則因主筋需要續接，鋼骨可作為鋼筋綁紮之輔助固定措施並減少鋼筋倒塌之

風險，且若搭配局部或全數鋼筋以預組鋼筋籠方式施工，更可進一步減少現場作業時間、有效縮短工期，故當橋墩越高，主筋需要之續接次數越多時，施工效益之提高越為明顯。就經濟性而言，以型鋼作為鋼筋之輔助固定措施之複合橋墩也是橋墩高度越高，越具有經濟優勢，因為高橋墩之斷面尺寸較大，型鋼距離斷面中性軸之距離增加，替代主筋之比例可以提升，此外，在橋墩昇層高度相同之前提下，高橋墩採型鋼複合構造時，其所需之型鋼尺寸僅略大於低橋墩，而高橋墩主筋需求總量較大，故採用型鋼構造而增加的工程費用比例亦可下降。為證實此一觀點，本研究亦設定三組不同尺寸與規模之橋柱，柱高分別為 10 公尺、20 公尺及 35 公尺，分別代表低橋墩、中橋墩與高橋墩情況，其對應之斷面尺寸分別為 2 m × 3 m、2.5 m × 3.75 m 及 3 m × 4.5 m，主筋比為 1.1%、1.6% 和 1.8%，三組橋柱分別各以傳統鋼筋混凝土橋柱與鋼與混凝土複合橋柱配置方式進行設計，再依實際訪價結果與工程實務經驗推估不同配置橋墩之造價，藉以比較傳統橋柱與複合式橋柱在不同規模下之經濟性。比較結果可得鋼與混凝土複合式橋墩之造價在低橋墩時為傳統柱之 109% 倍，在高橋墩時則可降至傳統柱之 103% 倍 [4]，證實隨著橋柱規模之提升，鋼與混凝土複合式橋柱與傳統橋墩之工程費用差異性可降低。

綜上說明可知鋼與混凝土複合橋墩特別適用於中高橋墩。複合橋柱在低橋墩與低鋼筋比條件下，雖然其施工性和耐震性皆優於傳統柱，但其造價成本高於傳統橋柱，故在一般性橋梁之應用推廣上較為不易，但若應用於高橋墩或高鋼筋比之橋墩，其與傳統橋柱之成本應可拉近，其效益亦將顯現。此外，在高鋼筋比需求下，傳統配置之鋼筋混凝土橋柱因鋼筋需緊密排列，在鋼筋綁紮與混凝土澆置容易發生困難，此時以鋼骨取代部分主筋之複合橋柱正可解決此問題，在高橋墩狀態下利用型鋼固定鋼筋，減少模板設置與鋼筋組立之施工風險，也可使鋼筋綁紮施工達到安全及

效率提升之雙重效益。

根據研究成果，並參考相關規範與手冊，本研究亦完成 H 型鋼與混凝土複合式橋柱之設計及施工手冊 [4]。本手冊主要涵蓋設計與施工兩大部分。在設計部分，主要參考國內外相關規範，配合性能試驗之結果進行撰寫，內容包括工法概要、適用範圍、材料、橋墩之設計、構造細則等。在施工部分，以本研究之施工經驗為基礎，配合國內實際工程環境與工程經驗，詳述施工步驟與施工注意事項，內容涵蓋施工計畫與構件施工細部計畫。此外配合手冊之內容，手冊附錄亦提供一示範例。本設計與施工手冊可為後續鋼與混凝土複合橋相關工程應用之參考。

## 參考文獻

1. 日本獨立行政法人土木研究所等 (2009), 3H 工法設計・施工マニュアル(案)一改訂 2 版, プレハブ・複合部材を用いた山岳部橋梁の下部工の設計・施工技術の開発に関する共同研究報告書。
2. 日本前田建設工業株式會社 (2002), REED 工法設計施工マニュアル(案)一平成 14 年道示對應版。
3. 洪曉慧、張國鎮、宋裕祺、王瑞禎、劉光晏、王柄雄 (2012), 營建自動化橋梁墩柱工法之研究 (第 1 期), 交通部國工局委託研究報告: 172
4. 張國鎮、宋裕祺、洪曉慧、王瑞禎、劉光晏、曾榮川、彭知行、劉醇宇 (2013), 營建自動化橋梁墩柱工法之研究 (第 2 期), 交通部國工局委託研究報告: 175
5. Chang, K.C., Wang, J.C. and Wang, P.H. (2003). A study of test on confining behavior from one-bar hoop and wire mesh hoop, Research report from Taiwan Construction Research Institute.
6. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1988a), "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", J. Struct. Div., ASCE, 114(8), pp.1804.