

第五章 試驗結果與討論

5.1 試體行為

5.1.1 試體一 CM600

試體一 CM600 為槽型鋼置於梁腹處之協力桿件接頭，協力桿件長度為 600 mm，斷面取 454×95×25×25 mm，使梁柱接面彎矩降至約 $0.57M_p$ ，其降伏形式為彎矩降伏，預期支撐處之梁斷面產生塑性鉸。試體實驗配置如照片 5.1 所示。觀察試體於 0.375% 弧度之層間變位角時，梁下翼板外側發現全滲透銲道處少許石灰呈放射狀剝落(如照片 5.2 所示)，顯示現階段梁之應力最大值仍發生在梁柱交接面，與其理論推導不同，應為銲接所造成之應力集中，使梁柱交接處的應力值大於協力桿件支撐處之梁斷面。進入 0.5% 弧度後，於相同位置之石灰剝落些許增加。

層間變位角進入 0.75% 弧度後，除梁下翼板外側全滲透銲道處石灰剝落持續增加外，支撐處前後翼板亦發現石灰斜向剝落產生，表示支撐處之梁應力有逐漸增加的趨勢。完成 1% 弧度時，其石灰剝落之位置與 0.75% 相同，只有少許增加的情形。

層間變位角進入 1.5% 弧度後載重-位移曲線開始彎折，代表梁進入塑性階段。完成 1.5% 弧度時，梁翼全滲透銲道及支撐處之梁翼板表面石灰明顯呈現放射狀剝落，其發展方向由梁翼板中心向

外放射擴張，支撐段內之梁翼板亦出現平行於梁寬方向之石灰剝落紋(如照片 5.3 所示)。完成 2%弧度時，大範圍之石灰斜向剝落出現於支撐段內之梁翼板及支撐段外側之梁翼板(如照片 5.4 所示)，此與其有限元素分析之結果吻合。

反覆加載至 3%弧度時，支撐段外側梁腹板石灰剝落從兩側向中心延伸(如照片 5.5 所示)。梁翼板石灰剝落逐漸增加擴大至支撐段內梁翼板全區域，而支撐段外側之梁翼板石灰剝落亦逐漸向外擴張(如照片 5.6 所示)，由此顯示塑鉸機制極有可能發生於此區域內。行進至第二圈負方向時發現上翼板全滲透鐸道起弧處有輕微裂縫產生，觀察扇形開孔處之石灰皆無剝落現象，顯示較大的應力已轉移至支撐位置處。

行程進入 4%弧度第一迴圈正方向時，梁上翼板尚無明顯局部挫屈發生，此時正向之最大載重為+690 kN。行進至負方向時，梁下翼板支撐段內首先發生明顯的局部挫屈(如照片 5.7 所示)，此時負方向之最大載重為-627 kN。進入第二迴圈後，梁上翼板支撐段內亦發生明顯的局部挫屈，此時下翼板全滲透鐸道起弧處亦有輕微的裂縫產生。

行程走到 5%弧度時，梁翼局部挫屈情形更加嚴重，挫屈之翼板與其協力桿件翼板接觸，協力桿件翼板防止其挫屈繼續增加。而梁翼全滲透鐸道起弧處之裂縫並無明顯向內延伸的情況發生，扇形開孔處之石灰亦皆無剝落現象，顯示協力桿件確能將梁柱交

接面彎矩降低，使塑性鉸移出梁柱交接面，防止鐸道無預警的脆性破壞。行程結束後，觀察其協力桿件並無明顯的石灰剝落情形發生，表示其協力桿件仍維持在彈性的範圍之內，其挫屈範圍即支撐段內(如照片 5.8 所示)。

5.1.2 試體二 BS600

試體二 BS600 為協力桿件採箱型斷面包覆於梁外之梁柱接頭，箱型協力桿件於支撐處藉由支撐塊與梁接觸，支撐處距柱面為 600 mm。試體實驗配置如照片 5.9 所示。試體於 0.375%弧度之層間變位角時並無明顯的變化，還保持於彈性行為。進入 0.5%弧度時，與支撐塊接觸之梁翼處出現些微斜向斑紋狀石灰剝落。層間變位角從 0.75%弧度至 1%弧度時，支撐處斜向斑紋石灰剝落逐漸增加，降伏範圍也逐漸擴大(如照片 5.10 所示)。

層間變位角 1.5%弧度時，梁翼板斜向斑紋增多且範圍向外延伸(如照片 5.11 所示)，而協力桿件於梁上翼板支撐塊處有斜向石灰剝落，顯示此處有應力集中現象，其它地方並無明顯石灰剝落，協力桿件還處於彈性階段。進入 2%弧度時梁腹產生斜向斑紋，此時達到降伏的區域由梁翼擴大至梁腹。

行程進入 3%弧度，石灰剝落的範圍從支撐處向外擴展呈現區域性的石灰脫落，且梁腹板斜向石灰剝落逐漸增加，並由腹板兩側向中心延伸。在 3%弧度第一迴圈負方向，梁支撐處之下翼板兩側發生同方向之挫屈現象(照片 5.12)，反覆加載至正方向時，上翼

板也發生同方向之挫屈現象，顯示此為剪力降伏變形所造成；在 3%弧度第二迴圈時，箱型協力桿件上翼板於支撐塊處有明顯變形發生(照片 5.13)。

位移持續增至 4%弧度第一迴圈，梁翼於支撐處之石灰已完全剝落，梁腹板斜向斑紋石灰剝落雖然增加但並未擴展至整個梁腹，顯示梁並未達彎矩降伏而產生塑性鉸，此與當初設計先達到剪力降伏是相符合的；此時箱型協力桿件上翼板之變形已非常明顯。到達 4%弧度第二迴圈正方向時，力量突然劇降，於是暫停實驗，此時正向之最大載重為+570 kN。推測試體可能是因為梁上翼板銲道處撕裂導致載重突然驟降，於是更改行程卸載後反向加載直接進入 5%弧度負方向，走完 5%弧度負方向後終止實驗，試驗結束後移除箱型協力桿件觀察梁柱接頭破壞情況，梁下翼板於銲道處發生撕裂破壞(如照片 5.14 所示)，其原因為協力桿件上翼板支撐處局部變形而導致無法有效傳遞梁之作用力，而導致受拉側梁翼板全滲透銲道撕裂，並可看出梁腹板有 45 度之斜向斑紋產生，顯示剪力降伏機制已於支撐段內之梁斷面產生(如照片 5.15 所示)。

5.1.3 試體三 CM400

試體三 CM400 為槽形鋼置於梁腹處之協力桿件接頭，協力桿件長度取 400 mm，斷面取 454×95×25×25mm，使梁柱接面彎矩降至約 $0.7M_p$ ，其降伏形式為彎矩降伏，預期支撐處之梁斷面產生塑

性鉸。觀察試體於 0.375% 弧度，翼板全滲透鐸道處有少許石灰呈放射狀剝落由梁翼板中心線向外側延伸，進入 0.5% 時並無明顯增加。進入 0.75% 弧度後，翼板全滲透鐸道處之放射狀石灰剝落有較為明顯增加的趨勢，並於扇形開孔末端與梁翼接合處發現石灰呈放射狀往兩側剝落，行為與試體一相同，而協力桿件支撐段外側之梁翼板亦發現石灰開始剝落。完成 1% 弧度時，支撐段外側翼板石灰有較明顯剝落的現象，而支撐處內側石灰少許剝落(如照片 5.16 所示)，其他位置石灰剝落並無明顯增加。


層間變位角進入 1.5% 弧度後，載重-位移曲線開始彎折，即進入塑性變形階段，當位移方向使其梁翼板呈受壓行為時，其支撐段內側之翼板石灰產生大範圍剝落，其剝落範圍開始大過支撐處外側翼板之石灰剝落。行程進入 2% 弧度時，支撐處兩側之石灰剝落持續增加(如照片 5.17 所示)。

反覆加載至 3% 弧度時，支撐處兩側之梁腹板石灰剝落由兩側開始向中心延伸，進入 3% 第二圈正方向時，其支撐處兩側翼板開始有些微挫屈，但不甚明顯。行程進入 4% 第一迴圈正方向時，梁上翼板尚無明顯局部挫屈發生，此時最大正向載重為 +596 kN，觀察梁翼全滲透鐸道起弧處出現些微裂縫，行進至負方向時，梁下翼板於支撐段內側首先發生明顯之局部挫屈，此時負方向之最大載重為 -532 kN，其梁上翼板之全滲透鐸道起弧處之裂縫約向內延伸 1 cm(如照片 5.18 所示)。隨後進入第二迴圈正方向，梁上翼

板亦發生局部挫屈(如照片 5.19 所示)。

行程進入 5%弧度時，支撐段內之梁翼板挫屈更為嚴重，而挫屈之翼板頂至協力桿件之翼板，使得挫屈後之強度有些許之提升，因試體協力桿件翼板厚度較薄，故協力桿件翼板因梁翼板挫屈而產生變形(如照片 5.20 所示)，但協力桿件未因此變形而發生局部破壞。試驗結束後觀察梁全滲透鐸道起弧處之裂縫並未持續向內延伸，扇形開孔根部亦無裂縫產生，協力桿件之石灰也無明顯剝落之現象，表示仍維持於彈性之範圍內。移除協力桿件後，其塑性鉸發生位置即支撐段內側(如照片 5.21 所示)。

5.2 破壞模式



試體一 CM600 及試體三 CM400 之行為極為相似，初始降伏位置發生於協力桿件支撐點兩側之梁斷面；至層間變位角 3%時，支撐處附近梁翼板大範圍的石灰剝落及支撐段外側梁腹板石灰斜向剝落，顯示塑性鉸即將在此區域形成，並於梁上翼板全滲透鐸道起弧處發現一小裂縫；於 4%弧度時，支撐段內之梁翼板發生明顯局部挫屈，於梁下翼板全滲透鐸道起弧處亦發現裂縫產生；試體一 CM600 至 5%弧度局部挫屈更為嚴重，但挫屈之翼板與協力桿件翼板接觸，使梁挫屈後強度並無降低；試體三 CM400 於 5%弧度時則因協力桿件翼板因梁翼板挫屈而變形，使梁挫屈後強度略有下降。因實驗設備之限制，兩組試體梁最終呈嚴重的局部挫屈，並無全滲透鐸道或扇形開孔處突然性之撕裂現象。

試體二 BS600 的初始降伏位置發生在協力桿件支撐處之梁斷面，隨著迴圈增加降伏範圍也逐漸擴大。3%弧度第二迴圈時，箱型協力桿件之上翼板於支撐處發生明顯的剪力變形，進入4%弧度後變形加大，導致支撐塊與梁上翼板產生了間隙，造成協力桿件無法提供反向作用力來降低柱面彎矩，此時梁柱接頭與傳統接頭型式無異，致使正方向時最大彎矩發生於柱面而產生梁下翼板於全滲透銲道處發生脆性撕裂破壞。

5.3 韌性能力

國內規範(內政部營建署 1999)規定韌性抗彎矩構架之梁柱接頭塑性轉角 θ_p 應以下述三規定之一決定之：

θ_p 為 3% 弧度；

非線性動力分析所得最大之 θ_p 加上 0.5% 弧度；

$$\theta_p = 1.1(R-1.0)\theta_E$$

其中： R =結構系統韌性容量

θ_E =設計地震力 E 作用下之最大層間變位角

AISC(2002)對韌性抗彎矩構架之梁柱接頭要求為：實驗試體需達層間變位角 4% 弧度，並於柱面之彎矩強度必須大於標稱彎矩強度的 80%。

試體一 CM600 之遲滯迴圈圖為圖 5.1 所示。圖(a)為試體之載重與位移關係圖，試體於 4%弧度時上下翼板相繼發生局部挫屈，挫屈後強度稍有衰減的情形，待梁翼板局部挫屈後與協力桿件翼板接觸後，強度隨即繼續向上提升。達 5%弧度時，每個迴圈的強度並無遞減的趨勢，但已呈一穩定的消能狀態。其最大層間變位角為 5%，已滿足 AISC(2002)對韌性抗彎矩梁柱接頭之要求。

試體二 BS600 之載重與位移關係圖如圖 5.2(a)所示。層間變位角進入 1.5%弧度時，開始有非線性行為產生。進入 3%弧度後，梁翼板於支撐處雖發生變形，但力量卻無衰減的趨勢，當梁上翼板銲道破壞後，負方向行程走到 5%仍有穩定的消能狀態。

試體三 CM400 之載重與位移關係圖如圖 5.3(a)所示，於 3%弧度之前的韌性消能行為與試體一相似，惟進入 4%以後梁上下翼板發生局部挫屈，雖挫屈後梁翼板與協力桿件翼板接觸，但因協力桿件翼板較薄，故與其接觸的地方也同時產生變形，無提供相對之作用力，故 5%弧度的力量較 4%降低。

各試體之(b)圖為彎矩與總塑性轉角關係圖，其中 M 為計算至協力桿件支撐處即塑性鉸發生位置之彎矩強度，圖中顯示試體挫屈後仍能繼續提供強度並穩定的消散能量，遲滯迴圈皆相當飽滿。

各試體之(c)圖及(d)圖分別為彎矩與接頭腹板轉角關係圖、彎矩與柱轉角關係圖，顯示其接頭腹板區及柱尚在彈性階段，故試體之塑性變形皆由梁所提供。

5.4 試體局部行為討論

本試驗的三組試體，分別為支撐點距柱面 600 mm(試體一 CM600)與 400 mm(試體三 CM400)之槽型協力桿件梁柱接頭；支撐點距柱面 600 mm(試體二 BS600)之箱型協力桿件梁柱接頭。槽型協力桿件試體中，應變計 F-40、F-320 與 F-500 黏貼於梁翼距柱面 40 mm、320 mm 與 500 mm 位置，應變計 SW-40、SW-200 與 SW-300 黏貼於協力桿件腹板距柱面 40 mm、200 mm 與 300 mm 位置(如圖 5.4、圖 5.6)，分別為瞭解梁翼銲道處、支撐位置處與協力桿件之應變分佈與趨勢。梁翼縱向於支撐點兩側亦貼有應變計 F，用以瞭解梁翼於支撐段內外之應變趨勢。箱型協力桿件試體中，應變計 F-690 與 W-690 黏貼於梁翼板與腹板距柱面 690 mm 位置，箱型協力桿件翼板與腹板距柱面 40 mm、300 mm 處貼有應變計 SW-40、SW-300(如圖 5.5)。

5.4.1 梁應變分佈

圖 5.7(a)顯示試體 CM600 梁翼銲道處應變分佈為邊緣較高中心較低，0.375%弧度至 0.75%弧度彈性階段，梁內應變並無太大差異。進入塑性段後，梁翼兩側應變高於中央處，由 1%弧度至 4%弧度的過程中更為明顯，梁翼邊緣有高應變量，顯示在協力桿件作用下，梁翼兩側仍有應力集中現象，最後造成梁翼於銲道處兩端產生開裂。

圖 5.9(a)顯示試體 CM400 在彈性段與試體 CM600 相似，應變

在梁寬內均勻分佈。進入 1%弧度後，應變也呈現梁翼外側高於中心。隨著層間變位的增加應變值也隨之提高，整體應變增加趨勢，梁翼外側高於中央，但梁翼中心也出現高應變值。此顯示支撐位置愈靠近柱面，對於梁翼處產生應力集中現象愈明顯，在 4%弧度第一圈初始時，也於梁翼銲道處兩端產生開裂。

由於此兩組試體在 4%弧度時皆於支撐段內發生挫屈，挫屈產生的大變形影響了應變計的準確性，故應變值只取到 4%弧度。因為挫屈變形，梁翼銲道兩端之裂縫並沒有繼續向內延伸而造成梁翼撕裂破壞，故協力桿件有降低了柱面彎矩的效果。

圖 5.7 與圖 5.9 之(b)為試體一 CM600、試體三 CM400 在梁翼支撐處量測之應變分佈。由 0.375%弧度至 1%弧度，兩試體之應變量皆很小且分佈均勻，顯示此時還處於彈性階段。於 1.5%弧度後梁翼兩側比中心處有較大的應變量，顯示梁翼支撐處兩端若無多銲加勁板束制，將有可能因支撐塊所施的作用力而撓曲變形，使得協力桿件無法發揮其功能。

圖 5.8(a)與(b)為試體二 BS600 梁翼支撐處量測之應變分佈，在 1%弧度內之應變情況與另兩組試體相似，均勻分佈無太大變化。1%弧度至 4%弧度的應變情況是兩側翼板較中心處高，顯示梁翼兩側仍是高應力狀態，需於梁腹兩側支撐位置處加銲加勁板，防止因集中力造成之局部變形，使支撐塊與梁翼產生間隙而無法傳遞其作用力，造成協力桿件無法發揮其功用。

圖 5.7 與圖 5.9 之(c)為試體一 CM600、試體三 CM400 在梁翼縱向所量測之應變分佈，應變計黏貼位置對稱於支撐處中心，圖中橫軸表示應變計黏貼位置與柱面之距離。兩試體於 0.375%弧度至 1%弧度範圍內，應變值尚小且無太大差異。1.5%弧度後，銲道處與支稱處附近有較大的應變，顯示此處承受較大的應力，也造成試體最終於梁翼銲道兩端產生開裂及支撐段內發生局部挫屈。

5.4.2 協力桿件應變分佈

圖 5.7、圖 5.9 之(d)與圖 5.8(c)與(d)為協力桿件於柱面銲道處之應變分佈，槽型協力桿件在上下梁翼處應變大，對稱於腹板中心，圖中顯示還處於彈性階段。箱形協力桿件上翼板於支撐處兩端發生局部撓曲變形，造成中性軸偏移。隨著變形量增大，協力桿件無法發揮降低柱面彎矩的功能，導致 4%弧度時梁下翼板撕裂破壞。圖中高應變量之處在翼板和腹板兩端，顯示此處有應力集中現象，但相較於試體一 CM600 與試體三 CM400 在梁翼銲道處之應變量，該處應變值並不大，所以不會在該處發生銲道開裂的脆性破壞。

圖 5.7 至圖 5.9(e)表示試體協力桿件腹板應變分佈，應變計黏貼位置乃對稱於腹板中心。圖中顯示槽形、箱形協力桿件，其腹板應變對稱於腹板中心且呈現線性分佈，由 0.375%弧度至 4%弧度皆是以此趨勢成長。4%弧度時腹板應變量仍不大，顯示整個實驗過程協力桿件都維持在彈性範圍內，都能持續降低柱面彎矩。

5.4.3 結論

協力桿件之設計方法與施工細部已明確說明於三組試體。

由三組試體應變計顯示可得，梁翼在柱面銲道處雖然如同傳統接頭，在兩端有高應變量。由於協力桿件發揮降低柱面彎矩的功能，雖然最終仍於兩端處有發生裂縫破壞，但梁在遠離柱面處發生挫屈行為消散能量，所以裂縫並未向梁中央處延伸導致梁翼板銲道處撕裂，故協力桿件確實能改善傳統梁柱接頭塑性轉角不足之缺點。

試體中梁翼於支撐位置，受支撐塊所傳遞的集中力作用，有應力集中情況。應變計也顯示此處有高應變量發生，所以必須於支撐位置做適當的補強，以確保協力桿件能發揮其作用。

應變圖中顯示，三組試體於試驗達 5% 弧度結束後，協力桿件仍能維持在彈性，協力桿件無明顯變形。柱面銲道處並無發現破壞產生，在梁柱接頭提供足夠塑性轉角前，協力桿件均能發揮其功用，降低柱面彎矩使最大彎矩處遠離柱面，或是使支撐段達剪力降伏來消散能量。