

第三章 預鑄五螺箍 SRC 梁柱接頭之耐震試驗

3.1 前言

本研究共進行三組實尺寸預鑄五螺箍 SRC 梁柱接頭之反復載重試驗，目的為了解此新型式 SRC 梁柱接頭之實際耐震性能，且試體製作過程皆模擬實際工地現場狀況進行製作。試體規劃係依據「強柱弱梁」之耐震設計理念，即主要藉由梁端的韌性變形能力來吸收及消散地震力所傳入之能量，並且避免柱在接頭區變形後可能導致較嚴重的構架不穩定現象，因此對於保障大地震來臨時之生命與財產安全有重要的意義。

由於在預鑄 SRC 梁柱接頭之施工簡化上仍然有很大的改善之空間，因此必須藉由改善 SRC 預鑄工法之施工方式，以減少工地現場組立時間、減少造價及運輸成本，並且增加 SRC 梁柱接頭在預鑄工法之競爭力。另一方面，為了要模擬預鑄工法之施工程序，試體製作、安裝及灌漿依照預鑄工法之程序來施作，研究重點並且思考如何將預鑄 SRC 梁柱接頭達到「SRC 鋼構化」的施工模式。圖 3.1 為三組預鑄 SRC 梁柱接頭之現場施工示意圖。

3.2 梁柱接頭力學分析

建築物在地震力作用下發生側向位移，假設相鄰上下樓層柱中央及相鄰兩跨梁中央為反曲點，則可以採用包含三個鉸接點的子結構，來模擬包含三個反曲點之建築結構外部梁柱接頭作為實驗之試體，如圖 3.2 所示。圖 3.3 及圖 3.4 為受地震力外力作用所造成外部梁柱接頭之受力情形。

當梁端發展出塑性鉸時，即梁端彎矩 M_b 達鋼梁之塑性彎矩強度 M_{pb} 及 SRC 梁端彎矩達極限彎矩強度 $(M_{ub})_{src}$ 時，此時由鋼梁上下翼板傳入梁柱接頭之水平力將極大，因此需藉由鋼柱內配置連續板(Continuity Plate)來確保鋼梁的彎矩及剪力可順利的傳遞到鋼柱上。另一方面，在剪力設計中梁柱接頭區之標稱剪力強度須大於梁柱接頭之需求剪力強度 $(V_u)_j$ 來確保接頭區在地震力作用下不致於發生剪力破壞之現象。

在 SRC 柱接鋼梁方面，由地震力所造成梁端之塑性彎矩強度 M_{bp} 將使梁之上下翼板產生一對大小相等、方向相反的水平力 T_f ，如圖 3.3 所示。此水平力將從鋼梁之上下翼板傳入梁柱接頭區中，鋼梁翼板傳入接頭區之水平力 T_f 計算公式如

下所示：

$$T_f = \frac{M_{pb}}{d_b - t_{bf}} \quad (3-1)$$

其中 T_f 為鋼梁翼板傳入梁柱接頭區之水平力； M_{pb} 為鋼梁塑性彎矩強度； d_b 為鋼梁深度； t_{bf} 為鋼梁翼板厚度。

圖 3.5 為SRC柱接鋼梁受地震力作用所造成外部梁柱接頭之柱剪力(V_{col})_s示意圖，對圖中A點取力平衡即可得柱剪力(V_{col})_s，其計算公式如下所示：

$$(V_{col})_s \times H_c = (V_b)_s \times \left(L_b + \frac{D}{2} \right) \quad (3-2)$$

其中 $(V_{col})_s$ 為SRC柱接鋼梁之柱剪力； H_c 為接頭上下樓層之平均高度； L_b 為SRC柱混凝土面至MTS油壓致動器中心點之距離； D 為SRC柱之深度。

當鋼梁之梁端彎矩 M_b 到達塑性彎矩強度 M_{bp} 時，鋼梁所對應之梁剪力(V_b)_s，其計算公式如下所示：

$$(V_b)_s = \frac{M_{pb}}{L_b} \quad (3-3)$$

將公式(3-3)帶入公式(3-2)中，經化簡後可得SRC柱接鋼梁之柱剪力(V_{col})_s，其化簡公式如下所示：

$$(V_{col})_s = \frac{M_{pb} \left(L_b + \frac{D}{2} \right)}{L_b} \times \frac{1}{H_c} \quad (3-4)$$

如圖 3.3 所示，由於鋼梁上下翼板傳入梁柱接頭區之水平力 T_f 與柱剪力(V_{col})_s 的方向正好相反，因此相減後即可求得梁柱接頭區之需求剪力強度(V_u)_j，其計算公式如下所示：

$$(V_u)_j = T_f - (V_{col})_s = \frac{M_{pb}}{d_b - t_{bf}} - \frac{M_{pb} \left(L_b + \frac{D}{2} \right)}{L_b} \times \frac{1}{H_c} \quad (3-5)$$

在SRC柱接SRC梁方面，由於SRC梁中比鋼梁多出RC部分的存在，所以除了有鋼梁上下翼板傳入接頭區之水平力 T_f 外，尚有SRC梁主筋傳入梁柱接頭區之水平力 T_r （當SRC梁塑性鉸一但發生，由於其非彈性轉角頗大，且鋼筋可能進入應變硬化階段，因此在計算梁彎矩時鋼筋之降伏應力應以 $1.25f_{yr}$ 取代之，即 $T_r =$

$1.25f_{yr}A_{rt}$)，如圖 3.4 所示。將兩種力量相加即可得梁端彎矩 M_b 所造成梁柱接頭受地震力作用傳入梁柱接頭區之水平力總和， T_{src} ，其計算公式如下所示：

$$T_{src} = T_f + T_r = \frac{M_{pb}}{d_b - t_{bf}} + 1.25f_{yr}A_{rt} \quad (3-6)$$

其中 T_f 為鋼梁上下翼板傳入接頭區之水平力； T_r 為SRC梁主筋傳入梁柱接頭區之水平力，鋼筋之降伏應力以 $1.25f_{yr}$ 取代之； d_b 為鋼梁深度； t_{bf} 為鋼梁翼板厚度； M_{pb} 為SRC梁中鋼梁塑性彎矩強度； f_{yr} 為鋼筋之降伏強度； A_{rt} 為SRC梁之拉力筋面積。

圖 3.6 為SRC柱接SRC梁受地震力作用所造成之外部梁柱接頭之柱剪力 $(V_{col})_{src}$ 示意圖，對圖中A點取力平衡即可得柱剪力 $(V_{col})_{src}$ ，其計算公式如下所示：

$$(V_{col})_{src} \times H_c = (V_b)_{src} \times \left(L_b + \frac{D}{2} \right) \quad (3-7)$$

其中 $(V_{col})_{src}$ 為SRC柱接SRC梁之柱剪力。

當SRC梁端達極限彎矩強度 $(M_{ub})_{src}$ 時，SRC梁所對應之梁剪力 $(V_b)_{src}$ ，其計算公式如下所示：

$$(V_b)_{src} = \frac{(M_{ub})_{src}}{L_b} \quad (3-8)$$

將公式(3-8)帶入公式(3-7)中，經化簡後可得SRC柱接SRC梁之柱剪力 $(V_{col})_{src}$ ，其化簡公式如下所示：

$$(V_{col})_{src} = \frac{(M_{ub})_{src} \left(L_b + \frac{D}{2} \right)}{L_b} \times \frac{1}{H_c} \quad (3-9)$$

如圖 3.4 所示，由於SRC梁之上下翼板及主筋傳入梁柱接頭區之水平力總和 T_{src} 和柱剪力 $(V_{col})_{src}$ 方向正好相反，因此相減後即可求得梁柱接頭區之需求剪力強度 $(V_u)_j$ ，其計算公式如下所示：

$$(V_u)_j = T_{src} - (V_{col})_{src} = \left[\frac{M_{pb}}{d_b - t_{bf}} + 1.25f_{yr}A_{rt} \right] - \left[\frac{(M_{ub})_{src} \left(L_b + \frac{D}{2} \right)}{L_b} \times \frac{1}{H_c} \right] \quad (3-10)$$

3.3 試體設計規劃

如圖 3.1 所示，本研究三組預鑄五螺箍 SRC 梁柱接頭中，第一組採用箱型 SRC 柱接鋼梁(試體 JBC-SRC1)，另兩組則採用十字型 SRC 柱接 SRC 梁(試體 JBC-SRC2 與試體 JBC-SRC3)。本研究三組試體之編號、斷面形式及重要設計參數如表 3.1 所示；試體之材料實測強度如表 3.2 所示。三組試體之鋼梁及鋼柱的材質均為 A572 Gr.50，主筋與箍筋均採用 SD420 竹節鋼筋，混凝土則採用常重預拌混凝土 28 天之抗壓強度。

在 SRC 柱的尺寸方面，三組 SRC 柱之長度均為 3.5 m，全斷面尺寸皆為 600×600 mm，SRC 柱之斷面配置如照片 1.1、圖 3.7 及圖 3.8 所示。柱主筋採用 16 根#8 竹節鋼筋(每個角落配置 4 根)，柱之箍筋則採用#3 與#4 竹節鋼筋所組合之五螺箍(大螺箍筋採用#4 鋼筋，小螺箍筋則採用#3 鋼筋)。試體 JBC-SRC1 之 SRC 柱內鋼骨為 $\square 275 \times 275 \times 14 \times 14$ 之鍛接組合箱型斷面，試體 JBC-SRC2 及 JBC-SRC3 之 SRC 柱內鋼骨為 $2H350 \times 175 \times 10 \times 16$ 之鍛接組合十字型斷面。

在梁的尺寸方面，三組梁之長度(由 SRC 柱混凝土面至 MTS 油壓致動器 (Actuator) 中心點之距離)均為 2.875 m。試體 JBC-SRC1 採用鋼梁，其斷面為 $H550 \times 225 \times 10 \times 16$ 之 H 型鋼，如圖 3.9 所示。試體 JBC-SRC2 及 JBC-SRC3 均採用 SRC 梁，其全斷面尺寸為 350×600 mm，鋼梁為 $H400 \times 150 \times 10 \times 16$ 之 H 型鋼。SRC 梁之主筋採用 4 根#8 竹節鋼筋，斷面每個角落各配置一支主筋，如圖 3.10 所示。

表 3.3 及表 3.4 分別顯示本研究三組 SRC 梁柱接頭試體中 SRC 柱、SRC 梁及鋼梁的標稱抗彎強度與剪力強度。表中詳細列出 SRC 柱中鋼柱彎矩強度(M_{ns})_c 與鋼梁彎矩強度(M_{ns})_b 之比值， $(M_{ns})_c / (M_{ns})_b$ ；亦列出 SRC 梁柱交會區鋼骨部分之標稱剪力強度(V_n)_s 與交會區需求剪力強度(V_u)_j 之比值， $(V_n)_s / (V_u)_j$ 。表 3.3 及表 3.4 中之值係採用表 3.2 所示之材料實測強度來計算。

本研究三組 SRC 梁柱接頭之鋼骨鍛接細部設計如圖 3.11 至圖 3.13 所示；三組 SRC 梁柱接頭之整體示意圖如圖 3.14 至圖 3.16 所示；三組 SRC 梁柱接頭之側向細部配置示意圖如圖 3.17 至圖 3.18 所示。試體 JBC-SRC1 採用托梁接合設計，托梁長度由 SRC 柱面至托梁續接處為 0.8 倍鋼梁深度。在托梁續接處，鋼梁上下翼板以全滲透開槽鍛接合，腹板則以高強度螺栓接合。試體 JBC-SRC2 亦

採用托梁接合設計，托梁長度為 0.8 倍 SRC 梁深度；試體 JBC-SRC3 則採用傳統接合設計(無托梁)，鋼梁直接以全滲透開槽鉗與 SRC 柱內之鋼骨接合。另一方面，在梁柱接頭區，三組 SRC 梁柱接頭試體之鋼梁翼板均未採用切削斷面 (Reduced Beam Section, RBS)，亦未採用蓋板或肋板補強。

3.4 預鑄 SRC 梁柱接頭之施工組裝步驟

為了要模擬預鑄工法之施工程序，本研究在 SRC 梁柱接頭試體之製作、安裝與灌漿等方面均依照預鑄工法之程序施作。照片 3.1 至 3.3 顯示三組預鑄五螺箍 SRC 梁柱接頭試體之製作情形。本研究三組預鑄 SRC 梁柱接頭試體之施工與組裝步驟分別如下所示。

試體 JBC-SRC1：托梁式接合

- (1) 全預鑄 SRC 柱在預鑄廠中進行鋼骨鉗接、主筋組立與箍筋綁紮，並在鋼骨、主筋及箍筋黏貼應變計。待組立完成後，分別在預鑄廠中進行混凝土澆置，如圖 3.19(a)所示。
- (2) 鋼梁在鋼構廠中進行切割以及鉗接完成，如圖 3.19(b)所示。
- (3) 鋼梁與全預鑄 SRC 柱托梁之鋼梁腹板用高強度螺栓接合，然後進行托梁續接處之鋼梁上下翼板鉗接，如圖 3.19(c)所示。



試體 JBC-SRC2：托梁式接合

- (1) 全預鑄 SRC 柱及半預鑄 SRC 梁分別在預鑄廠中進行鋼骨鉗接、主筋組立與箍筋綁紮，並在鋼骨、主筋及箍筋黏貼應變計。待組立完成後，分別在預鑄廠中進行混凝土澆置，如圖 3.20(a)、(b)所示。
- (2) 預鑄 SRC 柱與半預鑄 SRC 梁之底層主筋用鋼筋續接器續接，如圖 3.20(c)所示。
- (3) 全預鑄 SRC 柱托梁與半預鑄 SRC 梁之鋼梁腹板用高強度螺栓接合，然後進行托梁續接處之鋼梁上下翼板鉗接，如圖 3.20(d)所示。
- (4) 半預鑄 SRC 梁之頂層主筋用鋼筋續接器續接，如圖 3.21(a)所示。
- (5) 配置托梁續接處 SRC 梁之 U 型耐震箍筋，如圖 3.21(b)所示。
- (6) 配置半預鑄 SRC 梁之頂層繫筋，相鄰各繫筋之 90° 與 135° 彎鈎應交替排置

且鉤住同一主筋，如圖 3.21(c)所示。

- (7) 最後，在半預鑄 SRC 梁頂部及托梁續接處進行混凝土第二次灌漿，如圖 3.21(d)所示。

試體 JBC-SRC3：傳統式接合，無托梁

- (1) 半預鑄 SRC 柱及半預鑄 SRC 梁分別在預鑄廠中進行鋼骨鋸接、主筋組立與箍筋綁紮，並在鋼骨、主筋及箍筋黏貼應變計。待組立完成後，分別在預鑄廠中進行混凝土澆置，如圖 3.22(a)、(b)所示。
- (2) 半預鑄 SRC 梁之鋼梁腹板與鋼柱剪力板用高強度螺栓接合，並將半預鑄 SRC 梁中鋼梁之上、下翼板與鋼柱翼板鋸接接合，如圖 3.22(c)所示。
- (3) 半預鑄 SRC 梁之 SRC 梁之底層主筋用鋼筋續接器續接，如圖 3.22(d)所示。
- (4) 半預鑄 SRC 梁之頂層主筋採直接貫穿接頭區之鋼柱腹板工廠預留之主筋穿插孔，如圖 3.23(a)所示。
- (5) 半預鑄 SRC 柱之柱主筋用續接器續接，如圖 3.23(b)所示。
- (6) 半預鑄 SRC 梁頂端配置 U 型耐震箍筋之頂層繫筋，相鄰各繫筋之 90° 與 135° 彎鉤應交替配置且鉤住梁主筋，如圖 3.23(c)所示。
- (7) 將工廠預留在接頭區中之 SRC 柱螺箍筋依序旋轉進入 SRC 梁中鋼梁腹板之工廠預留箍筋孔中，以方便完成預鑄 SRC 梁柱接頭中接頭區螺箍筋之配置，如圖 3.23(d)所示。
- (8) 最後，在半預鑄 SRC 柱接頭區與半預鑄 SRC 梁頂部進行混凝土第二次灌漿，如圖 3.24 所示。

3.5 試體製作與設置

如圖 3.1 的模擬示意圖所示，建築物在地震力作用下發生側向位移，假設相鄰上下樓層柱中央及相鄰兩跨梁中央為反曲點，則可以採用包含三個鉸接點的子結構，來模擬包含三個反曲點之建築結構外部梁柱接頭作為實驗之試體。

本研究之反復載重試驗在國立交通大學土木系大型結構實驗室進行，整體試驗之配置情形如圖 3.25 所示。試體之 SRC 柱以預力鋼棒施加 $0.1(P_n)_{src}$ 之軸壓力，其中 $(P_n)_{src}$ 為 SRC 柱之標稱軸壓強度。反力牆上方 100 噸之 MTS 油壓致動器用來施加梁柱接頭之往復水平作用力。本研究並在 SRC 柱之梁柱接頭區下方設置兩組

線性位移感應計(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)以量測接頭可能之變形。此外，為避免SRC梁柱接頭試體之鋼梁在承受大載重時發生平面外變形(翼板局部挫屈)，因此在鋼梁翼板側向裝置了一組支撐鋼架以充分提供鋼梁之有效側向勁度，並防止鋼梁產生側向扭轉挫屈(Lateral Torsional Buckling, LTB)。

3.6 試驗程序

本梁柱接頭試驗之反復加載程序採用美國 AISC 耐震設計規範(Seismic Provisions)[9]所建議的加載步驟，並且以位移控制(Displacement Control)之方式進行反復載重試驗，直到 SRC 梁柱接頭試體達到預期的變位角(Drift Angle)或是梁之強度下降至 80% 極限彎矩強度以下為止。本試驗之反復載重加載程序如圖 3.26 所示。

