

### 第三章 包覆箱型鋼柱接鋼梁之梁柱接頭試驗

本研究探討鋼梁與包覆箱型鋼柱（簡稱 SRC 柱）相接之梁柱接頭於反復載重下之力學行為與耐震性能。如圖 3.1 所示，在地震力作用下建築結構發生側向位移，假設相鄰上下樓層柱中央及相鄰兩跨梁中央為反曲點，則可以三個鉸點來模擬三個反曲點的結構外部梁柱接頭作為實驗之試體。以下將針對梁柱接頭之力學行為與梁柱接頭試驗進行說明：

#### 3.1 梁柱接頭力學分析

當採用剛性接頭(Rigid Joint)設計之構架受一水平地震力作用時，若此地震力所引起的梁彎矩大於由重力荷載所產生的梁彎矩時，該構架可能產生的變形如圖 3.1 所示，此種變形狀態將使梁端產生一彎矩  $M_{Beam}$ 。圖 3.2 顯示 SRC 柱接鋼梁之外部梁柱接頭之受力情形，由圖中可知，由地震力造成之梁端彎矩  $M_{Beam}$  將使梁之上下翼板產生一對大小相等、方向相反的水平力  $T_f$ ，如下式所示：

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

其中  $d_b$  為梁深， $t_{bf}$  為梁翼板厚度。當梁端發展出塑性鉸，即梁端彎矩  $M_{Beam}$  到達塑性彎矩  $M_{pb}$  時，此時梁之上下翼板所對應之水平力  $T_f$  將極大，因此需藉由鋼柱內配置之連續板（Continuity Plate）傳遞至另一面之鋼柱翼版，連續板又稱為柱內橫隔板（Diaphragm）或水平加勁板（Horizontal Stiffener）。連續板之主要功能即在於傳遞梁柱接頭處之水平力，適當設計之連續板能使鋼梁的彎矩與剪力順利的傳遞到鋼柱上。相反的，如果鋼骨梁柱接頭處未配置連續板，如圖 3.3 所示，則該梁柱接頭可能發生以下的失敗模式：

- (1) 鋼柱翼板可能受梁翼板拉力作用而發生彎曲變形。
- (2) 鋼柱腹板可能受梁翼板壓力作用而發生腹板壓摺挫屈 (Web Crippling) 現象。
- (3) 鋼骨梁柱接頭處之銲道可能受梁翼板拉力作用而發生開裂現象。

圖3.4為外部梁柱接頭柱剪力 $V_{col}$ 之示意圖，對圖中A點取力平衡可得柱剪力 $V_{col}$ 如下式所示：

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

其中  $L_b$  為鋼梁之長度； $D$  為 SRC 柱之深度； $H_c$  為梁柱接頭處上方與下方樓層高度之平均值。當梁端彎矩  $M_{Beam}$  到達塑性彎矩  $M_{pb}$  時，梁剪力  $V_{Beam}$  如下式所示：

$$V_{Beam} = \frac{M_{pb}}{L_b} \quad (3-3)$$

將上式帶入式 (3-2)，化簡後可得柱剪力  $V_{col}$  為：

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

如圖 3.2 所示，梁上下翼板傳遞至接頭區之水平力  $T_f$  與柱剪力  $V_{col}$  方向正好相反，因此相減後即可得到梁柱接頭區之需求剪力  $(V_u)_j$ ，其計算公式如下：

$$(V_u)_j = T_f - V_{col} \quad (3-5)$$

以 SRC 柱而言，上式所得之梁柱接頭區之需求剪力  $(V_u)_j$  由接頭區鋼柱腹板 (Panel Zone)、接頭區之混凝土與圍束箍筋共同承擔，因此接頭區鋼柱腹板之力學行為主要受到剪力控制。再者，梁柱接頭設計的主要原則在於能夠平順的傳遞剪力及彎矩，因此梁與柱的結合必須能充分達到傳遞彎矩與剪力的之功能，且不得產生脆性破壞現象。

## 3.2 試驗設計

本研究共進行兩組大尺寸鋼梁與 SRC 柱相接之梁柱接頭試體之反復載重試驗。兩組試體均符合強柱弱梁之原則，且梁柱接頭區標稱剪力強度均大於該區之最大需求剪力強度，試體之斷面配置均滿足我國「SRC 構造設計規範」(2004)之要求(如：SRC 柱之主筋配置於斷面四個角落，混凝土包覆鋼管之厚度為 10 公分等)。另一方面，本研究梁柱接頭試體之鋼梁均未採取補強(如加鉸蓋板、側翼板、肋板)或減弱(如切削鋼梁翼板斷面)方式處理。

### 3.3 試驗規劃

本研究之梁柱接頭試體的編號與型式如表 3.1 所示，試體的尺寸及相關參數列於表 3.2。兩組試體之編號分別為 SRC1-BOX-N（簡稱試體 SRC1）及 SRC2-BOX-S（簡稱試體 SRC2），其中 BOX 表示箱型鋼柱；N 表示試體之鋼管表面沒有配置剪力釘，S 表示有配置剪力釘。試體之材料強度如表 3.3 所示，兩組試體的鋼梁及箱型鋼柱之材質均為 A572 Gr.50，混凝土之抗壓強度  $f'_c$  為 35 MPa（約 5,000 psi）。混凝土僅包覆箱型鋼管柱之外部，鋼管內部並未填充混凝土。本研究採取未於鋼管內部填充混凝土之理由在於這是對梁柱接頭最保守之情況，如果未填充混凝土也可以表現良好，則填充混凝土之後應該會有更佳之表現。

SRC 柱之斷面如圖 3.5 所示，試體 SRC2 的剪力釘配置如圖 3.6 所示。兩組 SRC 柱之全斷面尺寸均為 550×550mm，長度為 3m；主筋採用 12 根#6 竹節鋼筋(每個角落配置 3 根)，箍筋則採用#3 竹節鋼筋。兩組試體的鋼梁斷面均為 H488×300×11×18 之 H 型鋼，長度為 2.03 m；SRC 柱中之鋼管均為  $\square$ 350×350×22×22 之銲接組合箱型斷面，長度為 3m。

在箍筋配置方面，兩組 SRC 柱試體之箍筋間距均為 150 mm。對於梁柱接頭區的箍筋配置，本研究參考日本建築學會之「SRC 構造配筋指針」[37]，採用四支 L 型箍筋組成圍束箍筋，L 型箍筋在搭接處之銲接長度為 10 倍箍筋直徑。SRC 柱之非接頭區採用閉合箍筋，試體之箍筋配置圖與箍筋型式如圖 3.7 及圖 3.8 所示。

本研究之試體的鋼梁與箱型鋼柱之接合方式係模擬日本常用的托梁式接頭之銲接方式。鋼梁之翼板以全滲透開槽銲與鋼柱接合，鋼梁之腹板則以填角銲與鋼柱接合（未採用剪力板及螺栓），如圖 3.9 所示。試體於梁柱接頭處之銲道均進行超音波檢測以確保銲接品質。由於托梁式螺栓接合之主要原則為接合處需能完整傳遞鋼梁的彎矩與剪力，因此在接合設計及施工品質控制良好情況下，實則與一般未續接之鋼梁無異，因此本實驗係直接採用一支連續的鋼梁與 SRC 柱中鋼骨相接合，以模擬托梁式之接頭，並可節省鋼梁續接時之費用。

在試體之彎矩強度方面，本研究兩組試體均滿足強柱弱梁之耐震設計原則。表 3.4 顯示兩組試體之箱型鋼柱與鋼梁的彎矩強度比值， $\Sigma (M_{ns})_c / (M_{ns})_b$ ，以及 SRC 柱與鋼梁之彎矩強度比值， $\Sigma (M_{nSRC})_c / (M_{ns})_b$ 。試體 SRC1 之  $\Sigma (M_{ns})_c / (M_{ns})_b$  比值為 2.23， $\Sigma (M_{nSRC})_c / (M_{ns})_b$  之比值為 2.84。試體 SRC2 之  $\Sigma (M_{ns})_c / (M_{ns})_b$  之比值為 2.26， $\Sigma (M_{nSRC})_c / (M_{ns})_b$  之比值為 2.86。上述彎矩強度比值之計算詳如表 4 之附註所示。

在試體之剪力強度方面，表 3.5 顯示試體接頭區之箱型鋼柱腹板的標稱剪力強度與接頭區需求剪力之比值， $(V_n)_s / (V_u)_j$ ，以及接頭區整體標稱剪力強度與接頭區需求剪力之比值， $(V_n)_{SRC} / (V_u)_j$ 。值得注意的是，表中所列兩組試體之  $(V_n)_s / (V_u)_j$  比值分別為 1.72 與 1.74，均遠大於 1.0，顯示本研究之試體只需靠箱型鋼柱之腹板即可提供梁柱接頭區足夠的抗剪能力，這是由於箱型鋼柱斷面之 X 向與 Y 向各有兩片腹板，故可提供充裕的剪力強度。上述剪力強度比值之計算詳如表 3.5 之附註所示。

### 3.4 試驗設置

本研究之試驗工作在交通大學土木系的大型結構實驗室進行，整體試驗之配置方式如圖 3.10 所示。試體灌漿前之情形如照片 3.1、3.2、3.2 所示。照片 3.4 顯示試體架設於反力牆之情形，固定於反力牆上的 1000 kN 之 MTS 油壓致動器 (Actuator) 用以對鋼梁施加水平反復作用力。此外，為了避免鋼梁在承受大載重時發生平面外變形，本研究於鋼梁中點裝置一組側向支撐鋼架。本研究並在 SRC 柱下方設置線性變形位移感應計 (LVDT) 以量測 SRC 柱之轉角變形狀況，如圖 3.11 所示。

### 3.5 試驗程序

本試驗以 MTS 動力系統控制連接於梁端之油壓致動器，以位移控制方式對試體施加反復載重。致動器的施力大小是由預先規劃的位移歷程來控制。本研究在試驗過程中採用每個迴圈均加載一次，位移控制的步驟如圖 3.12 所示，依序為  $0.25\Delta_y$ 、 $0.5\Delta_y$ 、 $0.75\Delta_y$ 、 $1\Delta_y$ 、 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$  等，往後每一階段增加一個  $\Delta_y$ ，如此直到試體破壞或強度

折減過大時方停止試驗。 $\Delta_y$  係指鋼梁之固定端開始降伏時所對應的鋼梁自由端之位移量。假設鋼梁為一懸臂梁， $\Delta_y$  值可計算如下：

$$\Delta_y = \frac{P_y L_b^3}{3E_s I_s} \quad (3-6)$$

其中  $P_y$  為懸臂鋼梁之固定端達到起始降伏彎矩時所對應之自由端載重； $L_b$  為鋼梁長度； $E_s$  為鋼梁之彈性模數； $I_s$  為鋼梁之強軸慣性矩。依上式計算，本研究試體鋼梁之  $\Delta_y$  為 11.0 mm。

