

# 含T型鋼骨SRC邊柱之耐震行為

陳誠直／國立交通大學土木工程學系教授

李健銘／國立交通大學土木工程學系碩士

翁正強／國立交通大學土木工程學系教授

## 摘要

本研究探討含 T 型鋼骨斷面之包覆型鋼骨鋼筋混凝土 (Steel Reinforced Concrete, SRC) 邊柱之耐震行為，十組試體之參數包括主筋數量、是否配置繫筋、箍筋間距、彎矩作用方向及軸力比。試驗結果顯示因鋼骨斷面不對稱，彎矩方向影響試體之耐震行為與破壞模式；額外配置縱向主筋及繫筋與良好的箍筋間距將可增加試體之彎矩強度及韌性，並有助於改善承受正負彎矩遲滯迴圈的差異性。研究結果亦顯示，ACI 及 AIJ 規範均能合理且保守地預測含偏心 T 型鋼骨 SRC 邊柱承受軸壓力時之彎矩。

## Abstract

This study aims to investigate the structural behavior of concrete-encased composite edge columns with T-shaped steel section. The parameters of 10 specimens included the amount and distribution of longitudinal bars, the spacing of transverse reinforcement, the presence of cross ties, and the axial compressive load level. The test results indicate that the cyclic behavior and failure modes of the specimens are greatly affected by the direction of the bending moment owing to the unsymmetrical cross-section. The concrete-encased composite edge columns can develop stable hysteretic response by providing cross ties and decreasing spacing of the transverse ties. The ACI and AIJ design provisions reasonably and conservatively predict the flexural strengths of the specimens under axial compression.

## 探討非對稱鋼骨斷面 SRC 柱

台灣地處於環太平洋地震帶，因此高樓建築的耐震能力顯得十分重要。鋼骨鋼筋混凝土 (Steel Reinforced Concrete, SRC) 結構逐漸受到重視及採用。日本於 SRC 結構的使用甚多，然而日本規範的設計地震力較大，相對的對韌性之要求也較低；歐美各國於 SRC 的使用則較少，研究的成果也較少。包覆型 SRC 柱之研究著重於軸壓強度、軸壓與單軸彎矩或雙軸彎矩之行為<sup>[1-7]</sup>。

建築工程實務上，SRC 邊柱可採用單對稱的 T 型斷面，如圖 1 所示，然而不對稱的包覆型 SRC 柱研究甚少<sup>[8]</sup>。國內外的設計規範，如美國 ACI<sup>[9]</sup> 與日本的 AIJ<sup>[10]</sup>，對於非對稱鋼骨斷面並沒有使用上的限制；美國 AISC<sup>[11]</sup> 則規定必須為雙對稱鋼骨斷面。國內 SRC 規範<sup>[12]</sup> 則規定於受軸力與彎矩共同作用之構材，構材須為雙對稱或單對稱斷面。基於設計上的限制及工程實務上的使用性，非對稱鋼骨斷面之 SRC 柱實有深入研究的必要性。因此本研究規劃一系列的 T 型鋼骨斷面 SRC 邊柱，以實驗方式探討其彎矩強度與耐震行為<sup>[13]</sup>。

## 實驗計畫

本研究係以實驗的方式，探討非對稱 T 型鋼骨斷面 SRC 邊柱受固定軸力於反覆彎矩載重下之耐震

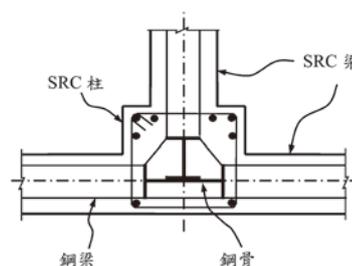


圖 1 含 T 型鋼骨 SRC 邊柱之斷面

行為。實驗規劃以主筋數量、箍筋間距、是否配置繫筋、彎矩作用方向及軸力比為試體參數，探討參數於耐震行為之影響。

### 試體設計

規劃十組 SRC 邊柱試體，試體編號與參數詳見表 1。試體之斷面尺寸、長度、鋼骨比均為固定。斷面尺寸詳見圖 2，斷面尺寸皆為 300 mm × 300 mm，長為 2350 mm。T 型鋼骨斷面鋼骨比為 5%，為 H175 × 90 × 5 × 8 及 H100 × 100 × 6 × 8 兩種熱軋型鋼斷面銲接組合而成，T 型鋼骨形心與全斷面之幾何中心在 y 方向上均有 34 mm 之偏心量。鋼骨標稱強度為 247 MPa (A36 鋼材)。

表 1 試體表

試體編號	主筋與數量	繫筋	箍筋間距 (mm)	軸力比 (% of $P_{squash}$ )
R4-S7-P4	4-#5	-	75	40
R4-S12-P4	4-#5	-	125	40
R8N-S7-P2	8-#5	-	75	20
R8N-S7-P4	8-#5	-	75	40
R8N-S12-P2	8-#5	-	125	20
R8N-S12-P4	8-#5	-	125	40
R8T-S7-P2	8-#5	#3	75	20
R8T-S7-P4	8-#5	#3	75	40
R8T-S12-P2	8-#5	#3	125	20
R8T-S12-P4	8-#5	#3	125	40

試體配置縱向鋼筋均為 5 號竹節鋼筋。因 T 型鋼骨之偏心，R8 系列試體加入額外縱向鋼筋，以降低試體在正負向彎矩強度的差異性。箍筋及繫筋均為 3 號竹節鋼筋，標稱強度為 274 MPa (Gr. 40)。以變化箍筋間距及加入繫筋的方式，探討試體於韌性上的差異。試體之箍筋間距如圖 3 所示。箍筋間距於試體長度方向的配置上分為圍束區及非圍束區，圍束區之箍筋間距 S7 系列試體為 75 mm，S12 系列試體採 125 mm；於非圍束區之箍筋間距則所有試體皆為 150 mm。

軸力比為施加之軸力大小與  $P_{squash}$  之比值，其中

$$P_{squash} = 0.85f'_c A_c + f_{yr} A_r + f_{ys} A_s \quad (1)$$

式中  $f'_c$ 、 $f_{yr}$ 、 $f_{ys}$  分別為混凝土抗壓強度及鋼筋、鋼骨材料之實際降伏強度， $A_c$ 、 $A_r$ 、 $A_s$  分別為混凝土、鋼筋、

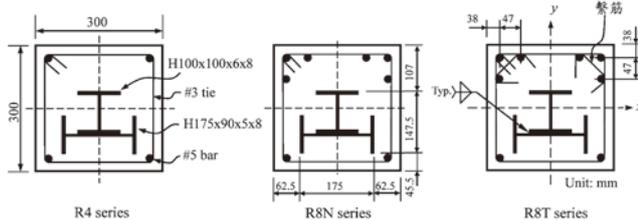
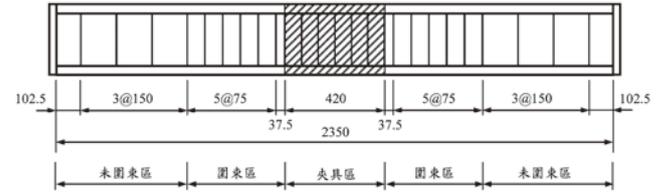


圖 2 試體斷面

S7 series



S12 series

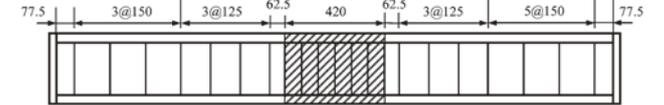


圖 3 橫向鋼筋配置

鋼骨之斷面積。實驗時將依試體規劃分別施以 0.2 與 0.4 之軸力比。

### 材料性質

混凝土採用標稱抗壓強度 24 MPa 之高流動性的高性能混凝土，28 天抗壓強度為 30 MPa，試體實驗期間混凝土抗壓強度為 34.5 MPa。鋼骨、鋼筋及繫筋標稱及實際降伏及極限強度如表 2 所示。鋼骨強度由兩種型鋼之拉力試片強度依面積大小計算，降伏強度為 358 MPa，極限強度為 455 MPa。

表 2 鋼骨、鋼筋及繫筋強度

	規格	標稱降伏強度 (MPa)	實際降伏強度 (MPa)	實際極限強度 (MPa)
鋼骨	H175 × 90 × 5 × 8	247	356	456
	H100 × 100 × 6 × 8	247	360	455
主筋	#5	274	406	594
箍筋	#3	274	430	615

### 實驗設置

試驗設置如圖 4 所示，試體兩端為滾支承模擬柱之反曲點，間距為 2,450 mm。於試體兩端施軸向壓力，中央處施加一側向力。

### 側向位移歷程

側向位移歷程如圖 5 所示，縱座標代表側向位移韌性 (Displacement Ductility)，即  $\mu = \Delta/\Delta_y$ ，其中  $\Delta$  表示試體之加載位移， $\Delta_y$  則為斷面受純彎矩作用下鋼筋降伏時之試體側向位移，此位移為以實際材料強度計

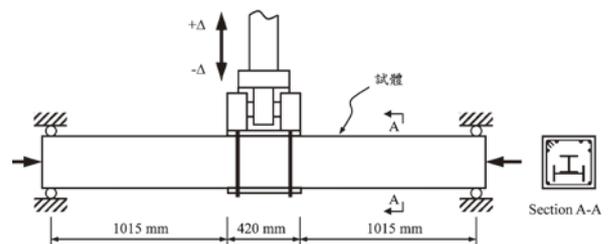


圖 4 實驗設置示意圖

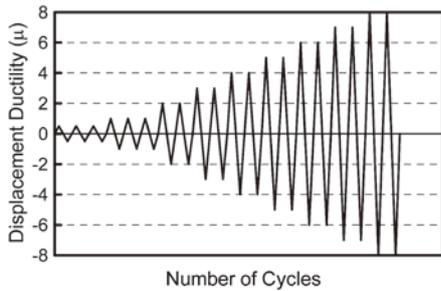


圖 5 側向位移歷程

算所得之理論值。於  $\mu = \pm 0.5$  及  $\pm 1$  時，加載迴圈數為 3 個完整的迴圈，於  $\mu = \pm 2$  後之加載迴圈數則為 2 個完整的迴圈。

## 試驗結果與討論

為描述試體之行為，定義正負彎矩方向如圖 6 所示。正彎矩作用於斷面時，試體之側向力及側向位移亦定義為正值，負彎矩方向則反之。

### 破壞行為

試驗開始之後，各試體於  $\mu = \pm 0.5$  時，混凝土已有些許微小裂縫產生，且約發生在箍筋位置的附近，P2 系列試體之裂縫較 P4 系列試體為多。R8 系列試體之兩側裂縫發展較為均勻，而 R4 系列試體則由於其中一側之鋼筋及鋼骨量不足，使其裂縫發展快速。P4 系列試體由於高軸力的影響，隨著各試體變數上的影響，分別於  $\mu = \pm 2$  至  $\pm 3$  間發生負彎矩作用下之混凝土壓力區壓碎，載重並隨之下降，且 R4 系列試體破壞情形較 R8 系列試體嚴重。P2 系列試體由於軸力造成的二次彎矩效應影響較小，並隨著各試體變數上的影響，使試體於  $\mu = \pm 3$  至  $\pm 5$  之間發生負彎矩作用下之壓力區壓碎。各試體於負彎矩方向側向載重下降後，正彎矩方向之壓力區於載重位移迴圈延遲 1 至 2 倍隨之碎裂。隨著混凝土壓力區破壞的擴大，載重亦持續下降，主筋亦開始有挫屈的情形，隨後箍筋彎鉤逐漸被撐開，鋼骨產生局部挫屈。P4 系列試體主筋及鋼骨挫屈情形較為嚴重，R8T 系列及 S7 系列之試體主筋挫屈情形較為遲緩。試體破壞情形如圖 7 所示。

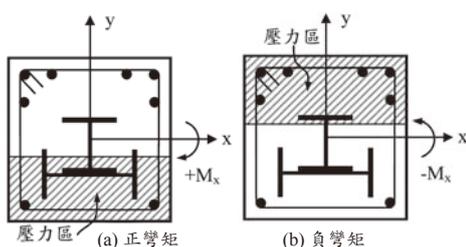


圖 6 彎矩方向

### 遲滯迴圈

試體彎矩-側向位移遲滯迴圈圖如圖 8~10 所示。P2 系列試體受正彎矩作用時，遲滯迴圈較為飽滿，整體行為接近於純鋼骨結構梁柱的行為，主要是由於壓力區有足夠的鋼骨承受壓力，並且於壓力區內的鋼骨幾何型式能有效提供混凝土圍束作用；拉力區的鋼筋及鋼骨亦能維持足夠的拉力強度，使得全斷面材料均能有效發揮。然而當試體受負彎矩作用時，遲滯迴圈均有束縮現象，整體行為與鋼筋混凝土梁柱的行為相近，主要因主筋挫屈後，於箍筋圍束區內的混凝土隨即不斷剝落，且鋼骨未能有效提供壓力區混凝土圍束作用，使得側向力明顯下降，且側向勁度不斷地衰減。

### 彎矩強度

表 3 為試體之斷面彎矩極限強度，斷面彎矩極限強度的計算為側向力所造成的彎矩，再加上固定軸力與側向位移所造成的二次彎矩效應。

#### ● R4 系列與 R8N(T) 系列

比較 R4 系列與 R8N(T) 系列同樣承受 0.4 軸力比的試體，由於 R4 系列只有 4 根主筋，因此其正負彎矩之極限強度均較 R8N(T) 系列為低。於 R4 及 R8N(T) 系列中，負彎矩方向的行為表現較接近於脆性的壓力破壞的情況，而正彎矩方向的行為表現較接近於韌性的拉力破壞的情況，當試體達到破壞臨界點時，由於承受高軸力的狀態下，使得負彎矩強度下降迅速，因此極限正彎矩強度均要比極限負彎矩強度大。

#### ● R8N 系列與 R8T 系列

8 根主筋試體的極限強度並未受到繫筋的影響。

#### ● S7 系列與 S12 系列

箍筋的功能大多在提供 RC 或 SRC 構件良好的圍束作用，增加其韌性行為，但由於 T 型鋼骨斷面的不對稱性，使得緊密的箍筋亦能圍束混凝土提高其強度，試體 S7 系列的極限正負彎矩強度平均可比試體 S12 系列高出 4%~8%。



(a) Specimen R8N-S12-P2



(b) Specimen R8N-S12-P4



(c) Specimen R8T-S7-P2

圖 7 試體破壞情況

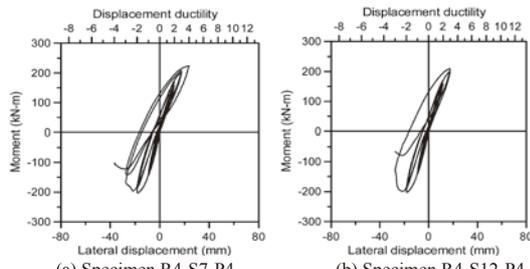
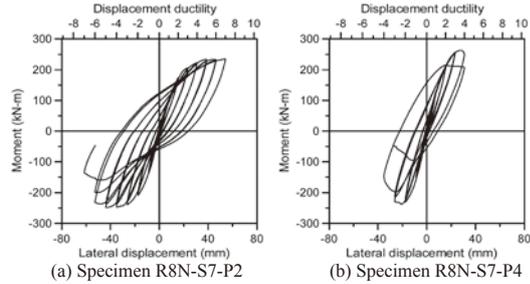
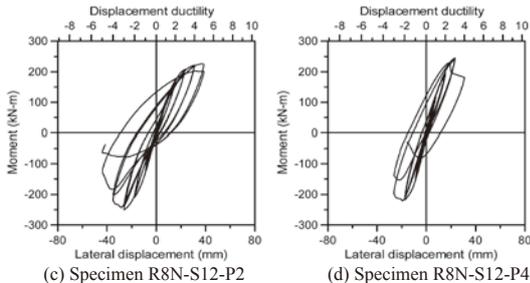


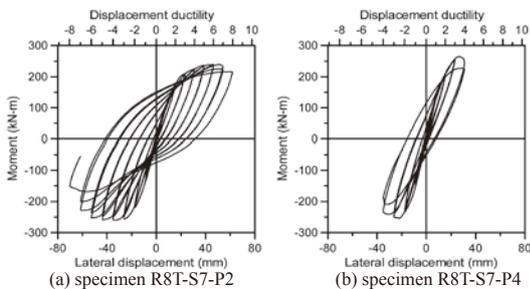
圖 8 R4 系列試體彎矩—側向位移遲滯迴圈圖



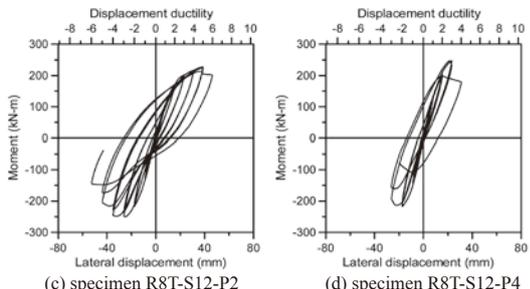
(a) Specimen R8N-S7-P2 (b) Specimen R8N-S7-P4



(c) Specimen R8N-S12-P2 (d) Specimen R8N-S12-P4  
圖 9 R8N 系列試體彎矩—側向位移遲滯迴圈圖



(a) specimen R8T-S7-P2 (b) specimen R8T-S7-P4



(c) specimen R8T-S12-P2 (d) specimen R8T-S12-P4  
圖 10 R8T 系列試體彎矩—側向位移遲滯迴圈圖

● P2 系列與 P4 系列

P2 系列試體之極限負彎矩強度均比極限正彎矩強度為高；而 P4 系列試體之極限正彎矩強度則均比極限負彎矩強度為高。承受 0.4 軸力比的試體由於正負方向破壞行為的不同，高軸力造成試體於負方向的壓力

表 3 試體極限彎矩強度

Specimen	Axial force (kN)	Maximum positive moment (kN-m)	Maximum negative moment (kN-m)
R4-S7-P4	1656	223.8	-202.9
R4-S12-P4	1656	209.2	-202.2
R8N-S7-P2	882	234.9	-248.5
R8N-S7-P4	1764	263.3	-237.5
R8N-S12-P2	882	225.5	-250.8
R8N-S12-P4	1764	245.2	-220.8
R8T-S7-P2	882	238.8	-260.1
R8T-S7-P4	1764	264.6	-254.9
R8T-S12-P2	882	227.6	-250.8
R8T-S12-P4	1764	247.8	-217.1

破壞更為嚴重，且高軸力亦將導致較大的二次彎矩效應，因此 P4 系列試體的極限正彎矩強度均要比極限負彎矩強度為高。而承受 0.2 軸力比的試體受到軸力及二次彎矩效應的影響較小，使得脆性壓力破壞側的強度將仍比韌性拉力破壞側的強度為高，因此其極限負彎矩強度較極限正彎矩強度為高。

試驗結果分別與美國 ACI 規範及日本 AIJ 規範中的一般疊加法比較，表 4 為試體試驗值與規範預測值的比較結果。可發現 ACI 及 AIJ 規範均能合理且保守地預測出含 T 型鋼骨之 SRC 柱的軸力-彎矩值。ACI 規範的預測值較 AIJ 規範的為低。

表 4 試體實驗值與規範值之比較

Specimen	$M_{ACI}/+M_x$	$M_{ACI}/-M_x$	$M_{AIJ}/+M_x$	$M_{AIJ}/-M_x$
R4-S7-P4	0.82	0.72	0.99	0.77
R4-S12-P4	0.87	0.72	1.06	0.78
R8N-S7-P2	0.86	0.84	0.96	0.98
R8N-S7-P4	0.79	0.76	0.90	0.85
R8N-S12-P2	0.90	0.83	1.00	0.97
R8N-S12-P4	0.85	0.81	0.97	0.91
R8T-S7-P2	0.85	0.80	0.94	0.94
R8T-S7-P4	0.79	0.70	0.89	0.79
R8T-S12-P2	0.89	0.83	0.99	0.97
R8T-S12-P4	0.84	0.83	0.96	0.93
Mean	0.85	0.78	0.97	0.89

位移韌性

表 5 為試體之位移韌性值，其中  $\mu$  值取決於當每一次的側向位移到達極限時，正負兩方向的斷面彎矩值均必須至少大於 0.8 倍的極限斷面彎矩強度。

試體於正彎矩的  $\mu$  值將會大於負彎矩的  $\mu$  值大約 0 ~ 1，主要原因在於 T 型鋼骨斷面及其偏心的影響，造成試體於負彎矩方向上傾向脆性壓力破壞。以下將簡述各參數對位移韌性值的影響。

● R4 系列與 R8N(T) 系列

比較 R4 系列與 R8N(T) 系列皆為承受 0.4 軸力比之試體，由於 T 型鋼骨偏心，使得 R4 系列試體於負彎矩方向為明顯的脆性壓力破壞，再加上高軸力的影響，使得 R4 系列試體的  $\mu$  值為 2 ~ 3。而 R8N(T) 系列試體

表 5 試體位移韌性

Specimen designation	Positive displacement ductility	Negative displacement ductility	Displacement ductility capacity
R4-S7-P4	4	3	3
R4-S12-P4	3	2	2
R8N-S7-P2	7	6	6
R8N-S7-P4	4	3	3
R8N-S12-P2	5	4	4
R8N-S12-P4	3	3	3
R8T-S7-P2	8	7	7
R8T-S7-P4	4	4	4
R8T-S12-P2	6	5	5
R8T-S12-P4	3	3	3

由於額外增加主筋以彌補鋼骨偏心於行為上的缺陷，使其於正負彎矩方向行為表現上的差異性較能均衡，故於高軸力的作用下，其  $\mu$  值可達 3 至 4 之間。

#### ● R8N 系列與 R8T 系列

繫筋將能適當增加試體之側向位移韌性行為。承受軸力比為 0.2 的有繫筋 R8T 系列試體而言，正負彎矩方向的  $\mu$  值將可較無繫筋的 R8N 系列試體增加 1 至 2；而承受軸力比為 0.4 的 R8T 系列試體而言，正負彎矩方向的  $\mu$  值增加則較不明顯，但彎矩-側向位移遲滯迴圈的消能面積已有明顯提昇。

#### ● S7 系列與 S12 系列

箍筋間距為影響試體側向位移韌性行為的主要因素，箍筋間距較小者，將可有效提供及維持試體核心混凝土的強度，且將可更增加箍筋與鋼骨間對混凝土的圍束能力。承受軸力比為 0.2 的試體而言，S7 系列試體正負彎矩方向的  $\mu$  值將可較 S12 系列試體增加 2；而承受軸力比為 0.4 的試體而言，R8N-S7 系列與 R8N-S12 系列之  $\mu$  值增加較不明顯，但若為 R8T-S7 系列試體，則將可較 R8T-S12 系列試體提高 1 個  $\mu$  值。S7 系列試體的遲滯迴圈的消能面積均比 S12 系列試體為優，顯示箍筋間距將有效的影響韌性能力。

#### ● P2 系列與 P4 系列

軸力的大小除了影響二次彎矩效應外，試體受到高軸力作用將會加速混凝土的壓碎，因此 P4 系列試體的  $\mu$  值將低於 P2 系列試體的  $\mu$  值。P2 系列試體於正彎矩方向上的  $\mu$  值與 P4 系列試體可相差到 2 到 4。而由於負彎矩方向上的脆性壓力破壞行為，P2 系列試體的  $\mu$  值與 P4 系列試體的  $\mu$  值相差 1 至 3，較正彎矩方向的為低。

## 結論

含偏心 T 型鋼骨 SRC 邊柱耐震行為之實驗結果，結論如下。

1. 因 T 型鋼骨之偏心，適當的配置縱向主筋，將可有

效降低試體於正負極限彎矩強度及韌性上的差異；適當配置箍筋間距及繫筋，將能有效增加試體的位移韌性。

2. 試體於受正彎矩作用時，遲滯迴圈較為飽滿，整體行為接近於純鋼骨結構梁柱的行為；而當試體於受負彎矩作用時，遲滯迴圈均有束縮現象，整體行為與鋼筋混凝土梁柱的行為相近。
3. 低軸力作用的試體，由於軸力所造成的二次彎矩效應影響較受高軸力者低，故韌性上的表現亦能較受高軸力試體者為優；且於正彎矩作用的韌性行為較負彎矩作用的為佳。
4. ACI 及 AIJ 規範均能合理且保守地預測試體的軸力-彎矩值。

## 誌謝

本研究承蒙內政部建築研究所經費補助，在此敬表謝忱。

## 參考文獻

1. El-Tawil, S., and Deierlein, G.G., "Strength and ductility of concrete encased composite columns," *Journal of Structural Engineering*, 125(9), pp. 1009-1019 (1999).
2. Mirza, S.A., Hyttinen, V., and Hyttinen, E., "Physical tests and analyses of composite steel-concrete beam-columns," *Journal of Structural Engineering*, 122(11), pp. 1317-1326 (1996).
3. Ricles, J.M., and Paboojian, S.D., "Seismic performance of steel-encased composite columns," *Journal of Structural Engineering*, 120(8), pp. 2474-2494 (1994).
4. Wang, Y.C., "Tests on slender composite columns," *Journal of Constructional Steel Research*, 49, pp. 25-41 (1999).
5. Li, L., and Matsui, C., "Effects of axial force on deformation capacity of steel encased reinforced concrete beam-columns," *Proceedings of 12th World conference on earthquake engineering*, Paper no. 1075 (2000).
6. Morino, S., Matsui, C., and Watanabe, H., "Strength of biaxially loaded SRC columns," *Composite and mixed construction*, *Proceedings of the U.S./Japan joint seminar*, pp. 185-194 (1984).
7. Munoz, P.R., and Hsu, C.T.T., "Behavior of biaxially loaded concrete-encased composite columns," *Journal of Structural Engineering*, 123(9), pp. 1163-1171 (1997).
8. Roik, K., and Bergmann, R., "Design method for composite columns with unsymmetrical cross-sections," *Journal of Constructional Steel Research*, 15, pp. 153-168 (1990).
9. American Concrete Institute. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)*. Detroit (2002).
10. AIJ, "AIJ Standards for Structural Calculation of Steel Reinforced Concrete Structures," *Architectural Institute of Japan*, Tokyo (1991).
11. American Institute of Steel Construction. *Manual of steel construction: Load and resistance factor design*. 3rd ed. Chicago (IL) (2001).
12. 「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」，營建署 (2011)。
13. Chen, C.C., Li, J.M., and Weng, C.C., "Experimental behaviour and strength of concrete-encased composite beam-columns with T-shaped steel section under cyclic loading," *Journal of Constructional Steel Research*, 61(7), pp. 863-881 (2005).