

第七章 受軸力與彎矩共同作用之構材

7.1 適用範圍

本章適用於受軸力與彎矩共同作用之鋼骨鋼筋混凝土構材，此構材應具雙對稱或單對稱斷面，且符合本規範第 5.2 節與第 6.2 節之規定。

解說：本章適用於具雙對稱或單對稱斷面之 SRC 構材受軸力與彎矩共同作用之情形。倘設計者採用非對稱斷面 SRC 構材或當構材受到扭矩之作用時，則應適當考慮扭力造成之影響。有關 RC 部分受扭矩作用之設計可參考內政部所定之「混凝土結構設計規範」[2]之相關規定。

7.2 設計強度

受軸壓力與彎矩共同作用之鋼骨鋼筋混凝土構材，其設計強度得採用以下三種方式之一決定之：

1. 採用「強度疊加法」，依本章第 7.3 節與第 7.4 節之相關規定。
2. 依內政部所定之「混凝土結構設計規範」之相關規定。
3. 依內政部所定之「鋼結構極限設計法規範及解說」之相關規定。

解說：本節允許採用三種不同之方法來決定 SRC 梁-柱 (Beam-Column) 構材之設計強度。

第一種方法為本章建議之設計法，該法採用「強度疊加」(Strength Superposition) 與「相對剛度」(Relative Rigidity) 的概念來進行設計 [20,21,32,33]。該法之設計步驟是先依據 SRC 構材內部的鋼骨及 RC 之「相對剛度」來分擔外力，然後再採用「強度疊加」法來檢核 SRC 梁-柱之強度。該法依據鋼骨及 RC 相對剛度之大小，可以適當的考慮鋼骨及 RC 分擔外力之比例。在進行 SRC 構材之設計時，設計者可以

先決定鋼骨之尺寸，由鋼骨先行分擔一部分外力，剩餘之外力再由 RC 部分來承擔；設計者亦可先決定混凝土之尺寸與配筋，剩餘之部分便與設計一般純鋼骨構材相同，有助於使設計更為簡便。

第二種方法為存在於內政部所定之「混凝土結構設計規範」中的設計法[2]。該法主要是將 SRC 構材中之鋼骨視為等量的鋼筋來設計(依 ACI-318 規範訂定)，並假設鋼骨與 RC 之介面無相對滑動發生，亦即屬於完全合成作用 (Fully Composite) 之狀況。

第三種方法為存在於內政部所定之「鋼結構極限設計法規範及解說」中的設計法[1]。該法主要是透過幾個轉換係數(依 AISC-LRFD 規範訂定)，將 SRC 構材中之鋼筋與混凝土轉換為等量的鋼骨，然後再依照純鋼結構的方法來進行設計。

7.3 受軸壓力與彎矩共同作用之構材

7.3.1 軸力與彎矩之分配

鋼骨鋼筋混凝土構材中之鋼骨部分與鋼筋混凝土部分，應共同分擔由組合載重所引致之需要軸力 P_u 與需要彎矩 M_u ，即

$$P_u = P_{us} + P_{urc} \quad (7.3-1)$$

$$M_u = M_{us} + M_{urc} \quad (7.3-2)$$

其中：

P_u = 由組合載重引致作用於鋼骨鋼筋混凝土構材之需要受壓強度

M_u = 由組合載重引致作用於鋼骨鋼筋混凝土構材之需要彎矩強度
(含 $P-\Delta$ 效應)，依 7.4 節之規定分別對 x 軸或 y 軸計算

P_{us} = 鋼骨部分之需要受壓強度，可依鋼骨與鋼筋混凝土之相對剛度以下式決定之

$$P_{us} = P_u \cdot \left[\frac{E_s A_s}{E_s A_s + 0.55 E_c A_c} \right] \quad (7.3-3)$$

M_{us} = 鋼骨部分之需要彎矩強度，可依鋼骨與鋼筋混凝土之相對剛度以下式分別對 x 軸或 y 軸決定之

$$M_{us} = M_u \cdot \left[\frac{E_s I_s}{E_s I_s + 0.35 E_c I_g} \right] \quad (7.3-4)$$

P_{urc} = 鋼筋混凝土部分之需要受壓強度，可依鋼骨與鋼筋混凝土之相對剛度以下式決定之

$$P_{urc} = P_u \cdot \left[\frac{0.55 E_c A_c}{E_s A_s + 0.55 E_c A_c} \right] \quad (7.3-5)$$

M_{urc} = 鋼筋混凝土部分之需要彎矩強度，可依鋼骨與鋼筋混凝土之相對剛度以下式分別對 x 軸或 y 軸決定之

$$M_{urc} = M_u \cdot \left[\frac{0.35 E_c I_g}{E_s I_s + 0.35 E_c I_g} \right] \quad (7.3-6)$$

其中：

E_s, E_c = 分別為鋼骨與混凝土之彈性模數

A_s, A_c = 分別為鋼骨部分與混凝土部分之斷面積

I_s, I_g = 分別為鋼骨部分之慣性矩與鋼骨鋼筋混凝土全斷面積之慣性矩

7.3.2 構材強度之檢核

受軸壓力與彎矩共同作用之鋼骨鋼筋混凝土構材，其設計強度應依以下之步驟檢核之：

(一) 鋼骨部分之強度檢核

鋼骨鋼筋混凝土構材中之鋼骨部分在受到軸力 P_{us} 與彎矩 M_{us} 共同作用下，應符合以下之強度檢核規定：

(1) 當 $P_{us} < 0.2 \phi_{cs} P_{ns}$ 時：

$$\frac{P_{us}}{2\phi_{cs}P_{ns}} + \left(\frac{M_{uxs}}{\phi_{bs}M_{nxs}} + \frac{M_{uys}}{\phi_{bs}M_{nys}} \right) \leq 1.0 \quad (7.3-7)$$

(2) 當 $P_{us} \geq 0.2\phi_{cs}P_{ns}$ 時：

$$\frac{P_{us}}{\phi_{cs}P_{ns}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{uxs}}{\phi_{bs}M_{nxs}} + \frac{M_{uys}}{\phi_{bs}M_{nys}} \right) \leq 1.0 \quad (7.3-8)$$

其中：

ϕ_{cs} = 鋼骨部分之軸力強度折減係數，依第六章決定之

ϕ_{bs} = 鋼骨部分之彎矩強度折減係數，依第五章決定之

P_{us} = 鋼骨部分之需要受壓強度，依(7.3-3)式決定之

P_{ns} = 鋼骨部分僅受軸力時之標稱受壓強度，依第六章之規定計算

M_{uxs}, M_{uys} = 對 x 軸或 y 軸彎曲時鋼骨部分之需要彎矩強度，依(7.3-4)式分別對 x 軸或 y 軸決定之

M_{nxs}, M_{nys} = 對 x 軸或 y 軸彎曲時鋼骨部分之標稱彎矩強度，依第五章之規定計算

(二) 鋼筋混凝土部分之強度檢核

鋼骨鋼筋混凝土構材中之鋼筋混凝土部分受到軸力 P_{urc} 與彎矩 M_{urc} 共同作用下，其設計強度應符合內政部所定之「混凝土結構設計規範」之相關規定，其中鋼筋混凝土部分所受到之軸力 P_{urc} 與彎矩 M_{urc} 應分別依(7.3-5)與(7.3-6)式決定之。

(三) 軸力與彎矩之重新分配

當上述步驟(一)與(二)之強度檢核均能滿足，表示鋼骨鋼筋混凝土構材之強度符合設計要求。若上述步驟(一)與(二)之強度檢核均不能滿足時，則表示構材強度不足，應予重新設計。

若鋼骨鋼筋混凝土構材中之鋼骨部分或鋼筋混凝土部分，其中之一不能滿足強度檢核之要求時，則可依以下方式重新分配鋼骨與

鋼筋混凝土所需分擔之軸力與彎矩，然後再重覆上述步驟(一)與(二)之強度檢核。軸力與彎矩重新分配之方式如下：

$$\bar{P}_{us} = P_{us} / \beta \quad \text{且} \quad \bar{P}_{urc} = P_u - \bar{P}_{us} \quad (7.3-9)$$

$$\bar{M}_{us} = M_{us} / \beta \quad \text{且} \quad \bar{M}_{urc} = M_u - \bar{M}_{us} \quad (7.3-10)$$

其中：

β = 軸力與彎矩重新分配係數，其值為依公式(7.3-7) 前三項或(7.3-8) 式前三項相加之和

\bar{P}_{us} , \bar{P}_{urc} = 重新分配後，鋼骨部分與鋼筋混凝土部分所分擔之需要受壓強度，用以取代 P_{us} 與 P_{urc}

\bar{M}_{us} , \bar{M}_{urc} = 重新分配後，鋼骨部分與鋼筋混凝土部分所分擔之需要彎矩強度，用以取代 M_{us} 與 M_{urc} (分別對 x 軸或 y 軸計算)

解說：SRC 構材受軸力與彎矩共同作用時，其設計步驟可以歸納如下[21]：

- (1) 經由結構分析，計算 SRC 構材之需要軸力 P_u 與需要彎矩 M_u 。
- (2) 依據相對剛度之大小，將軸力 P_u 與彎矩 M_u 分配給 SRC 構材中的鋼骨與 RC。
- (3) 依據步驟(一)與(二)，分別檢核鋼骨與 RC 之強度是否滿足需求。
- (4) 若鋼骨與 RC 之檢核均滿足需求，表示 SRC 構材之強度符合要求。反之，若均不能滿足，則表示不符合要求。
- (5) 若步驟(一)與(二)之檢核其中之一不能滿足要求時，則可依步驟(三)重新調整鋼骨與 RC 分擔之軸力與彎矩，然後再重複鋼骨與 RC 之強度檢核。

上述方法之主要特色在於以合理的方式讓鋼骨與 RC 共同分擔外力。從力學觀點而言，SRC 構材中之鋼骨與 RC 是依照其「相對剛度之比例」(Relative Rigidity Ratio, RRR) 來分擔軸力與彎矩，此法稱為「剛度分配法」[32,33]，此一概念也是材料力學中廣為熟知的方法。

此法的另一特點在於能使 SRC 梁-柱的設計得以簡化，當設計者將 SRC 構材受到的軸力與彎矩分配給鋼骨與 RC 之後，接下來的設計過程便與設計一般純鋼骨與純 RC 構材相同。有關此設計法的合理性，文獻[20,21,32,33,34]中有較詳細之背景說明，其中並比較此法與美國 ACI-318、AISC-LRFD 及日本 AIJ-SRC 規範所計得之 SRC 梁-柱強度，研究顯示此法可以獲得合理的結果。文獻[34]並廣泛收集國內外 SRC 梁-柱之實驗資料[35- 46]以作為比較之基準。

有關 SRC 構材中 RC 部分之強度計算，本規範主要依照國內「混凝土結構設計規範」[2]之規定辦理。此外，由於 RC 構材受軸力與彎矩共同作用時的強度計算過程較為複雜，文獻[20]提出一個經過簡化且略為保守的強度檢核方法提供設計者參考。該法將 RC 構材受軸力與單向彎矩共同作用時的 P-M 交互作用曲線保守的簡化為兩條直線公式，並採用 Bresler 的 Reciprocal Load Method 來考慮 RC 構材受軸力與雙向彎矩共同作用之情況，有助於簡化 RC 部分之強度計算。茲將此簡化的強度檢核方法敘述於后：

(1) 當 RC 部分受軸力與單向彎矩共同作用時：

(a) 當 $P_{urc} \leq \phi_{crc}(P_{nb})_{rc}$ 時

$$\frac{\phi_{crc}(P_{nb})_{rc} - P_{urc}}{\phi_{crc}(P_{nb})_{rc}} + \frac{M_{urc} - \phi_{brc}M_{nrc}}{\phi_{brc}(M_{nb})_{rc} - \phi_{brc}M_{nrc}} \leq 1.0 \quad (C7-1)$$

(b) 當 $P_{urc} > \phi_{crc}(P_{nb})_{rc}$ 時

$$\frac{P_{urc} - \phi_{crc}(P_{nb})_{rc}}{\phi_{crc}P_{nrc} - \phi_{crc}(P_{nb})_{rc}} + \frac{M_{urc}}{\phi_{brc}(M_{nb})_{rc}} \leq 1.0 \quad (C7-2)$$

其中：

P_{urc} = SRC 構材中 RC 部分之需要受壓強度，依(7.3-5)式決定

P_{nrc} = RC 部分僅受軸壓力作用時之標稱受壓強度，依第 6.4.3 節之規定計算

M_{urc} = SRC 構材中 RC 部分之需要彎矩強度，依(7.3-6)式決定

M_{nrc} = RC 部分之標稱彎矩強度，依第 5.4.1 節之規定計算

$(P_{nb})_{rc}$ = RC 部分於平衡破壞狀態下之標稱受壓強度

$(M_{nb})_{rc}$ = RC 部分於平衡破壞狀態下之標稱彎矩強度

ϕ_{crc} = RC 部分僅受軸壓力作用時之強度折減係數，依第 6.4.1 節之規定計算

ϕ_{brc} = RC 部分受彎矩作用時之強度折減係數：

(i) 當 $P_{urc} \geq 0.1(A_g f'_c)$ 時， $\phi_{brc} = \phi_{crc}$

(ii) 當 $P_{urc} < 0.1(A_g f'_c)$ 時， $\phi_{brc} = 0.9 - \left[\frac{0.9 - \phi_{crc}}{0.1 A_g f'_c} \right]$

其中 A_g 為 SRC 構材之全斷面積

當採用填充型鋼管混凝土柱 (CFT 柱) 時，鋼管內部混凝土之彎矩強度計算，可參考日本 AIJ-SRC 規範之建議[13]。AIJ-SRC 規範認為鋼管內部未受軸壓力作用之混凝土應不計其彎矩強度，但是混凝土若受軸壓力作用則可發揮一部分抗彎矩能力。因此依據 AIJ-SRC 規範，鋼管內部混凝土於平衡破壞狀態下之標稱受壓強度， $(P_{nb})_{rc}$ ，其值可取為 $(P_{nb})_{rc} = 0.5P_{nrc}$ ， P_{nrc} 為混凝土部分僅受軸壓力作用時之標稱受壓強度。此外，對於鋼管內部之混凝土於平衡破壞狀態下之標稱彎矩強度， $(M_{nb})_{rc}$ ，其值可依以下方式計算[13,20]：

(i) 對矩形鋼管斷面而言， $(M_{nb})_{rc} = \frac{1}{8} P_{nrc} H_c$

(ii) 對圓形鋼管斷面而言， $(M_{nb})_{rc} = \frac{1}{3\pi} P_{nrc} D_c$

其中 H_c 為矩形鋼管內之混凝土斷面寬度(平行於撓曲平面)， D_c 為圓形鋼管內混凝土之斷面直徑。

(2) 當 RC 部分受軸力與雙向彎矩共同作用時：

RC 部分受軸力與雙向彎矩共同作用時，應滿足以下規定：

$$\phi_{rc} (P_{nxy})_{rc} \geq P_{urc} \quad (C7-3)$$

其中：

P_{urc} = RC 部分之需要受壓強度，依(7.3-5)式決定之

$(P_{nxy})_{rc}$ = RC 部分在 x 軸向之偏心為 e_x 且 y 軸向之偏心為 e_y 時的標稱受壓強度。當 RC 部分受壓軸力大於 10% 之標稱受壓強度時，可依 Bresler 公式計算 $(P_{nxy})_{rc}$ ：

$$\frac{1}{(P_{nxy})_{rc}} = \frac{1}{(P_{nx})_{rc}} + \frac{1}{(P_{ny})_{rc}} - \frac{1}{P_{nrc}} \quad (C7-4)$$

$(P_{nx})_{rc}$ = RC 部分在 y 軸方向偏心為 e_y 時之標稱軸向受壓強度

$(P_{ny})_{rc}$ = RC 部分在 x 軸方向偏心為 e_x 時之標稱軸向受壓強度

P_{nrc} = RC 部分僅受軸向壓力作用時之標稱受壓強度，依第

6.4.3 節之規定計算

在進行軸力分配時，公式(7.3-3)採用 $0.55E_cA_c$ 係考量混凝土材料的非線性行為，針對不同強度之混凝土，考慮受力超過線性階段後之行為而求得近似割線模數 (Secant Modulus) 平均值[20,33]。由於一般 SRC 柱之主筋量不高(每個角落三支)，且考量在極限狀態下，混凝土開裂後鋼筋可能發生挫屈，故忽略鋼筋對構材勁度之貢獻。此外，在進行彎矩分配時，公式(7.3-4)採用 $0.35E_cI_g$ 係參照 ACI-318 規範 [2]之建議，考慮混凝土開裂對構材勁度折減之影響。

關於軸力與彎矩重新分配之規定，主要是考量在極限狀態下，當 SRC 構材中的鋼骨或 RC 其中之一超過負荷時，可以藉由應力重新分配 (Stress Redistribution) 之機制由另一方繼續承擔外力，此一方式可達到較為經濟之設計結果。本規範所採用的在極限狀態下軸力與彎矩重新分配之規定，與日本 AIJ-SRC 規範[10]所採用的「一般化疊加法」 (Generalized Superposition Method, GSM) 在概念上相近，但是在計算過程上則予有效簡化。

7.4 構材之 P-Δ 效應

受軸壓力與彎矩共同作用之鋼骨鋼筋混凝土構材，設計時應考慮 P-Δ 效應對彎矩放大之影響，此效應可採用一階分析法或二階分析法決定之。若採用一階分析法時，應依以下之公式計算構材之需要彎矩強度 M_u ：

$$M_u = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (7.4-1)$$

其中：

M_{nt} = 假設構架無側位移時，構材之需要彎矩強度

M_{lt} = 構架受側位移時，構材之需要彎矩強度

B_1, B_2 = 彎矩放大係數，應依以下規定計算：

(1) B_1 之計算：

$$B_1 = \frac{C_m}{(1 - P_u / P_{e1})} \geq 1.0 \quad (7.4-2)$$

其中：

P_u = 鋼骨鋼筋混凝土構材之需要受壓強度

$$P_{e1} = \frac{\pi^2 (EI)_{SRC}}{(KL)^2} \quad (7.4-3)$$

$$(EI)_{SRC} = E_s I_s + (E_c I_g / 5)$$

KL = 鋼骨鋼筋混凝土構材之有效長度， $K \leq 1.0$

C_m = 修正係數，假設構架無側位移， C_m 值如下：

a. 構材兩端之支承點間無橫向載重時：

$$C_m = 0.6 - 0.4(M_1/M_2) \quad (7.4-4)$$

M_1/M_2 為所考慮彎曲平面上無支撐段兩端較小與較大彎矩之比值；當構材呈雙曲率彎曲時， M_1/M_2 為正值，若為單曲率彎曲，則為負值。

b. 構材兩端之支承點間有橫向載重時：

當構材兩端受束制時， $C_m = 0.85$

當構材兩端未受束制時， $C_m = 1.0$

(2) B_2 之計算：

$$B_2 = \frac{1}{1 - \left(\sum P_u / \sum P_{e2} \right)} \quad (7.4-5)$$

或

$$B_2 = \frac{1}{1 - \sum P_u \left[\Delta_{oh} / (\sum HL) \right]} \quad (7.4-6)$$

其中：

$\sum P_u$ = 同一樓層中所有柱子之需要軸力之和

$$P_{e2} = \frac{\pi^2 (EI)_{SRC}}{(KL)^2} \quad (7.4-7)$$

$$(EI)_{SRC} = E_s I_s + (E_c I_g / 5)$$

KL = 鋼骨鋼筋混凝土構材之有效長度， $K \geq 1.0$

Δ_{oh} = 樓層之側向相對位移

$\sum H$ = 造成 Δ_{oh} 之樓層側向水平力之和

L = 樓層高度

解說：SRC 構造設計必須考慮 P- Δ 效應，該效應可經由二階 (Second Order) 非線性分析法考慮之。至於一階 (First Order) 構架分析法，係指在結構分析時並未考慮因側位移引起構材內力變化之傳統彈性分析法。由於 P- Δ 效應，受軸力與彎矩共同作用之構材將因側位移的發生而受到額外彎矩的作用，此額外的彎矩稱為二次彎矩 (Secondary Moment)。倘若設計者僅採用一階分析法，則應以公式 (7.4-1) 來計算 P- Δ 效應所引起的放大彎矩[1,2]。該式中的 B_1 與 B_2 均為彎矩放大係數，而 M_{nt} 及 M_{lt} 則分別表示無側移構架及有側移構架以一階彈性構架分析法所求得之需要彎矩強度。

公式 (7.4-2) 中的 C_m 係數為一等效彎矩修正係數。由於彎矩放大係數 B_1 之推導過程中假設最大彎矩發生在構材中央附近，倘若最大彎矩發生於構材端部，則設計時即須以 C_m 係數加以修正以求得等效的放大彎矩[14]。公式 (7.4-5) 中 ΣP_u 為作用於同一樓層之總垂直力， ΣP_{e2} 為同一樓層中抵抗側移之所有柱構材之 P_{e2} 總和。

7.5 受軸拉力與彎矩共同作用之構材

具雙對稱或單對稱斷面之鋼骨鋼筋混凝土構材承受軸拉力與彎矩共同作用時，須滿足 7.2 節與 7.3 節之相關規定。惟其中：

P_u = 需要軸拉力強度

P_n = 標稱軸拉力強度，構材受拉時不計混凝土之拉力強度

M_u = 需要彎矩強度，構材受拉時不考慮 $P-\Delta$ 效應

鋼骨部分受軸拉力作用下之強度折減係數 $\phi_{ts} = 0.9$

鋼筋混凝土部分受軸拉力作用下之強度折減係數 $\phi_{trc} = 0.9$

解說：當 SRC 構材受拉力作用時，不需考慮 $P-\Delta$ 效應，且由於混凝土抗拉能力甚弱，設計時不計其拉力強度。

在強度折減係數方面，本節使用 RC 部分受軸拉力作用之折減係數 $\phi_{trc} = 0.9$ 係依據 ACI-318-05 規範第九章而訂定[50]。