

包覆型鋼骨鋼筋混凝土(SRC)梁之彎矩強度理論分析研究

Analytical Study on Flexural Strength of SRC Beam

計畫編號：NSC89-2211-E-009-015

執行時間：88年8月1日至89年7月31日

主持人：翁正強 交通大學土木系所 教授

一、中文摘要

目前關於包覆型鋼骨鋼筋混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)梁斷面內鋼骨與混凝土之間合成作用(Composite Action)的考量，日本 AIJ-SRC 規範(1987)假設合成作用可以忽略，而 ACI-318 規範(1995)則假設為完全合成(Fully Composite)。為深入探討合成作用之影響，本研究考量鋼骨與混凝土間之合成作用對 SRC 梁彎矩強度之影響，進而推導出一組可以預測部分合成梁(Partially Composite Beam)極限彎矩強度的公式。本研究並應用加州大學柏克萊分校所發展之程式 BIAx 來分析 SRC 梁之非線性行為。該程式將 SRC 斷面分割為有限之元素，並採用鋼骨、鋼筋與混凝土材料之真實應力應變曲線，以模擬包覆型 SRC 梁中鋼骨、鋼筋與混凝土材料之非線性特性。最後，本研究預測之結果並與所蒐集之實驗資料進行比較與討論，以了解本研究建議方法的合理性。

關鍵詞：鋼骨鋼筋混凝土梁，彎矩強度，合成作用，部份合成梁

Abstract

The AIJ-SRC code (1987) and the ACI-318 code (1995) adopt different design philosophy to determine the flexural capacity of SRC beams. The AIJ-SRC code calculates the beam flexural capacity by superposition method which neglects the composite action

between the steel shape and the RC portion. However, the ACI-318 code treats the SRC section as fully composite. In order to understand the actual behavior of SRC beams, this research conducts an analytical study to determine the flexural capacity of a partially composite SRC beam and discusses the effect of the composite action on the beam flexural capacity. This research also uses a computer program BIAx developed by UC Berkeley to analyze the nonlinear material behavior of the steel and the concrete. Finally, the predicted values are compared with previous SRC beam test results.

Keyword: Steel Reinforced Concrete (SRC) Beam, Flexure Strength, Composite Action, and Partially Composite Beam

二、緣由與目的

對於 SRC 梁之極限彎矩強度計算，日本建築學會(Architectural Institute of Japan, AIJ)的 AIJ-SRC 規範[1]中係採用強度疊加的概念，忽略鋼骨與混凝土介面間之合成作用將 SRC 梁視為非合成梁(Non-Composite Beam)。另一方面，美國混凝土學會(American Concrete Institute, ACI)的 ACI-318 規範[2]中則假設鋼骨與混凝土為完全應變相合，即將 SRC 梁視為完全合成梁(Fully Composite Beam)。換言之，日本 AIJ-SRC 規範與美國 ACI-318 規範對於 SRC 梁中之

鋼骨與混凝土的"合成作用"均做了相當程度的簡化。本研究為深入探討鋼骨與混凝土間之合成作用對 SRC 梁彎矩強度之影響，乃推導一組可以預測部份合成梁極限彎矩強度的理論公式，並據以建議 SRC 梁之設計流程。同時本研究並應用美國加州大學柏克萊分校所發展之數值模擬分析程式 BIAx[3] 來模擬鋼骨、鋼筋與混凝土材料之非線性特性。最後，本研究所預測 SRC 梁之極限彎矩強度將與前人的實驗結果進行比較，以探討本研究建議法之合理性。

三、SRC 梁之極限彎矩強度公式之推導

當包覆型 SRC 梁受撓曲作用時，其斷面內鋼骨與 RC 部分的中性軸位置，會依桿件為非合成梁、部份合成梁或完全合成梁的不同而有所變化，如圖一所示。合成強度的存在與否及其大小，將影響梁中鋼骨部份與 RC 部份之中性軸位置，進而影響其極限彎矩強度的大小。

材料性質假設

- (一) 混凝土部份：假設極限應變為 0.003，並以 Whitney 等值應力塊計算其強度，應力值以 $0.85f'_c$ 計，並忽略混凝土之拉力強度。
- (二) 鋼筋方面：假設在極限狀態下鋼筋可達完全降伏。
- (三) 鋼骨方面：本研究假設鋼骨部份在極限狀態下可達全斷面降伏。

SRC 梁極限彎矩強度之公式推導

部份合成之 SRC 梁受撓曲作用時，鋼骨與 RC 部份之中性軸並不重合，本研究在推導部份合成梁之極限彎矩強度主要包括以下三個步驟：

- (一) 計算鋼骨部份之中性軸 $(NA)_s$ 位置：

將鋼骨部份自 SRC 梁中分離出來，其自由體圖如圖二(a)所示，考慮作用在鋼骨自由體上之力量平衡式，如下式所示：

$$C_{sf} + C_{sw} + F_b = T_{sf} + T_{sw} \quad (1)$$

其中：

C_{sf} = 鋼骨翼板部份之合壓力， $C_{sf} = f_{ys} b_f t_f$

C_{sw} = 鋼骨腹板部份之合壓力，

$C_{sw} = f_{ys} t_w ((NA)_s - d'' - t_f)$

T_{sf} = 鋼骨翼板部份之合拉力， $T_{sf} = f_{ys} b_f t_f$

T_{sw} = 鋼骨腹板部份之合拉力，

$T_{sw} = f_{ys} t_w (d - t_f - (NA)_s + d'')$

d'' = 鋼骨翼板表面至混凝土表面之厚度

將(1)式中之各數值帶入可求得鋼骨部份之中性軸位置 $(NA)_s$ ，如下式：

$$(NA)_s = \frac{f_{ys} t_w D - F_b}{2f_{ys} t_w} \quad (2)$$

- (二) 計算 RC 部份之中性軸 $(NA)_{RC}$ 位置：

將 RC 部份自 SRC 梁中分離出來，其自由體圖如圖二(b)所示，考慮作用在 RC 部份之水平力量平衡，如下所示：

$$C_c + C_r = T + F_b \quad (3)$$

其中：

C_c = 混凝土之合壓力， $C_c = 0.85f'_c \beta (NA)_{RC} B$

C_r = 壓力筋之合壓力， $C_r = A'_r f'_{yr}$

T = 拉力筋之合拉力， $T = A_r f_{yr}$

將(3)式中之各數值帶入可求得鋼骨部份之中性軸位 $(NA)_{RC}$ ，如下式：

$$(NA)_{RC} = \frac{T - C_r + F_b}{0.85f'_c \beta B} \quad (4)$$

- (三) 計算 SRC 梁之極限彎矩強度

最後由圖二鋼骨與 RC 部份之合力圖，分別對 SRC 梁表面取力矩和再予疊加，整理後求得部份合成 SRC 梁之極限彎矩強度 M_{SRC} 如下：

$$M_{SRC} = [T(D-d') - C_r d' - \frac{C_s \beta (NA)_{RC}}{2}] + [\frac{T_{sw}(d-t_f + (NA)_s + d'')}{2} + T_{sf}(d-t_f) - \frac{C_{sw}(d''+t_f + (NA)_s)}{2}] \quad (5)$$

SRC 梁之極限彎矩強度主要是由鋼骨、RC、及兩者介面之合成作用等三部份所構成，因此將式(5)分成三部份之疊加，如式(6)所示：

$$M_{SRC} = (M_0)_S + (M_0)_{RC} + \Delta M \quad (6)$$

其中：

$(M_0)_S$ =依照 AISC-LRFD 規範計算之鋼骨部份之塑性彎矩強度

$(M_0)_{RC}$ =依照 ACI 規範計算之鋼筋混凝土部份之極限彎矩強度

ΔM =合成作用而增加之彎矩強度，依照公式(7)計算

$$\Delta M = f_{yt} \left[\frac{D^2}{4} + (NA)_s^2 \right] + \left[T(D-d') - C_r d' - \frac{C_c \beta (NA)_{RC}}{2} - C_{cn}(D-d') - \frac{\beta (NA)_{RCn}}{2} - C_m(D-2d') \right] \quad (7)$$

其中：

C_{cn} =純彎矩作用之 RC 梁中混凝土之合壓力

C_{rn} =純彎矩作用之 RC 梁中壓力筋之合壓力

$(NA)_{RCn}$ =純彎矩作用之 RC 梁中之中性軸位置

根據上述所推導之公式，SRC 梁極限彎矩強度計算如流程圖三所示。

四、SRC 梁彎矩強度之數值模擬分析

BIAX 程式之分析方法，為將所要計算強度之斷面切割成許多微小之矩形元素，如圖四所示。BIAX 程式定義斷面之極限彎矩強度為混凝土壓力側最外緣之元素達極限應變，在基於平面維持平面與應變相合的假設下，依據各元素形心到 SRC 斷面形心之距離求出各元素之應變。再由各材料之真實應力應變曲線上求得各元素之應力值，然後將此應力值對面積積分以計算各元素所能提供之軸力。最後將各元素所能提供之軸力相疊加即為 SRC 斷面之極限軸壓強度，如公式(8)，而各元素所能提供之軸力與其到形心距離之乘積相疊加後即可得 SRC 斷面之極限彎矩強度，如公式(9)。

$$P = \sum_{i=1}^{nc} f_i A_i + \sum_{j=1}^{ns} f_j A_j + \sum_{k=1}^{nr} f_k A_k \quad (9)$$

$$M = \sum_{i=1}^{nc} f_i A_i y_i + \sum_{j=1}^{ns} f_j A_j y_j + \sum_{k=1}^{nr} f_k A_k y_k \quad (9)$$

其中：

f_i, f_j, f_k = 分別為混凝土、鋼骨及鋼筋中各元素之應力值

A_i, A_j, A_k = 分別為混凝土、鋼骨及鋼筋中各元素之面積

y_i, y_j, y_k = 分別為混凝土、鋼骨及鋼筋中各元素形心至 SRC 全斷面形心之距離

本研究在應用 BIAX 程式計算梁之極限彎矩強度，採用混凝土極限應變為 0.003，其應力應變曲線採用 Kent 和 Park[4]建議之模型，而混凝土拉力強度則採用 Vecchio 與 Collins[5]所建議之模型，如圖四(b)所示。鋼骨部份之應力應變曲線，乃根據 Saenz[6]所建議之曲線，如圖四(c)所示。

五、比較與討論

(一) 當 SRC 梁受撓曲時，合成強度的存在與否及其大小，將影響梁中鋼骨與 RC 部份之中性軸位置，進而影響其極限彎矩強度的大小。根據本文之分析，SRC 梁之極限彎矩強度主要是由鋼骨、RC、及兩者介面之合成作用等三部份所構成的。而合成作用對極限彎矩強度的貢獻主要受鋼骨與混凝土介面所能提供之合成強度大小的影響。

(二) 本研究共蒐集了六篇 SRC 梁實驗資料，包括 Wakabayashi(1971)[7]、Naka(1977)[8]、陳昭榮(1992)[9]、朱俊星(1993)[10]、蔡克銓等(1995)[11]、陳勤傑(1996)[12]之實驗結果。本法預測值與以 BIAX 數值模擬分析程式所得結果之比值，平均值(Mean Value)為 0.94；標準偏差(Standard Deviation)為 5.4 %；變異係數(Coefficient of Variation)為 5.7 %，結果顯示本法之預測值與數值模擬分析程式所得結果相近。

(三) 本研究蒐集的六篇實驗資料，與本文建議法所設計的結果比較，實驗值與本建議法的預測值比之平均值为 0.98；

標準偏差為 8.7 %；變異係數為 8.9 %，顯示本法可合理預估梁之極限彎矩強度。

- (四) 本文建議法與實驗值之比較其平均誤差在 2 % 之內，此結果初步顯示本法可準確預估 SRC 梁之極限彎矩強度。前述結果主要在於本法考慮鋼骨與混凝土間之合成作用，且能區別 SRC 梁為部份合成或完全合成梁，較能適切地反映 SRC 梁受撓曲時之真實力學行為，因此所預測之 SRC 梁極限彎矩強度與實驗值的比較結果相近。
- (五) 在變異係數方面，本研究建議法與實驗值比較結果之變異係數為 8.9 %，以上之結果顯示本研究建議法可準確預估 SRC 梁之極限彎矩強度，並可得到較為穩定之預測值。

六、結論與建議

本文根據鋼骨與混凝土介面之間所能提供合成強度的大小，推導出一組公式用來區別 SRC 梁為部份合成梁或完全合成梁，較能適切地反映 SRC 梁受撓曲時之真實力學行為。同時本研究並採用合成強度之概念，進一步推導可預測部份合成梁極限彎矩強度的公式，本法在與 BIAX 數值模擬分析程式比較之後，初步顯示本法在未來應用之可能性。且本研究建議法之預測值與 SRC 梁實驗所得之極限彎矩強度頗為相近，且變異係數小於 10%。簡言之，本研究推導一組符合力學行為之彎矩強度公式，有助於區別部份合成梁或完全合成梁，並能合理地預估 SRC 梁之極限抗彎強度。

六、參考文獻

1. AIJ, "Standards for Structural Calculation of Steel Reinforced Concrete Structures," Architectural Institute of Japan (AIJ), Tokyo, 1987.
2. ACI, "Buildings Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95),"

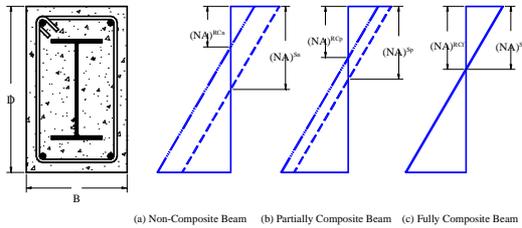
American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1995.

3. Wallace, J.W. and Moehle, J.P., "BIAX : A Computer Program for the Analysis of Reinforced Concrete Section," Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, 1989.
4. Park, R., Priestley, M.J.N., Gill, W.D., "Ductility of Square Confined Concrete Columns," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. 4, pp. 929-950, 1982.
5. Vecchio, F.J. and Collins, M.P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," ACI Structural Journal, American Concrete Institute, Vol. 83, No. 2, pp. 219-231, 1986.
6. Saenz, L.P., "Equations for the Stress-Strain Curve of Concrete," ACI Structural Journal, American Concrete Institute, Vol. 61, No. 22, pp. 1229-1235, 1964.
7. Wakabayashi, M., Minami, K., and Komura, K., "An Experimental Study on Elastic-Plastic Characteristics of Composite Members Using an Encased H-Section Subjected to Combined Bending and Axial Force," Bull. of Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto University, No. 14A, pp. 417-437, 1971.
8. Naka, T., Morita, K. and Tachibana, M., "Strength and Hysteretic Characteristics of Steel-Reinforced Concrete Columns (Part 2)," Transaction of AIJ, No. 250, pp. 47-58, 1977.
9. 陳昭榮，「鋼骨鋼筋混凝土梁柱接頭行為研究」，碩士論文，陳生金教授指導，國立臺灣工業技術學院營建工程技術研究所，台北，1992。
10. 朱俊星，「鋼骨鋼筋混凝土梁柱接頭之

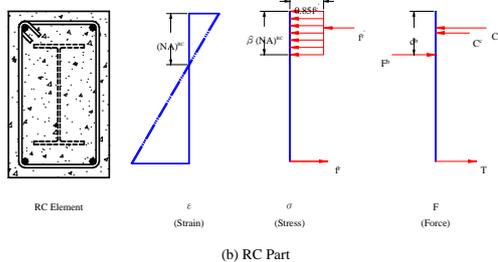
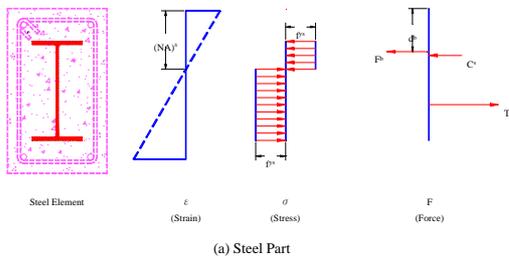
新工法」，碩士論文，陳生金教授指導，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，台北，1993。

11. 蔡克銓、于瑞佐、連陽、項維邦，「半預鑄鋼骨鋼筋混凝土梁柱接頭耐震行為」，結構工程，第十卷，第二期，第35-51頁，1995。
12. 陳勤傑，「鋼骨鋼筋混凝土梁柱接頭之耐震行為」，碩士論文，陳生金教授指導，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，台北，1996。

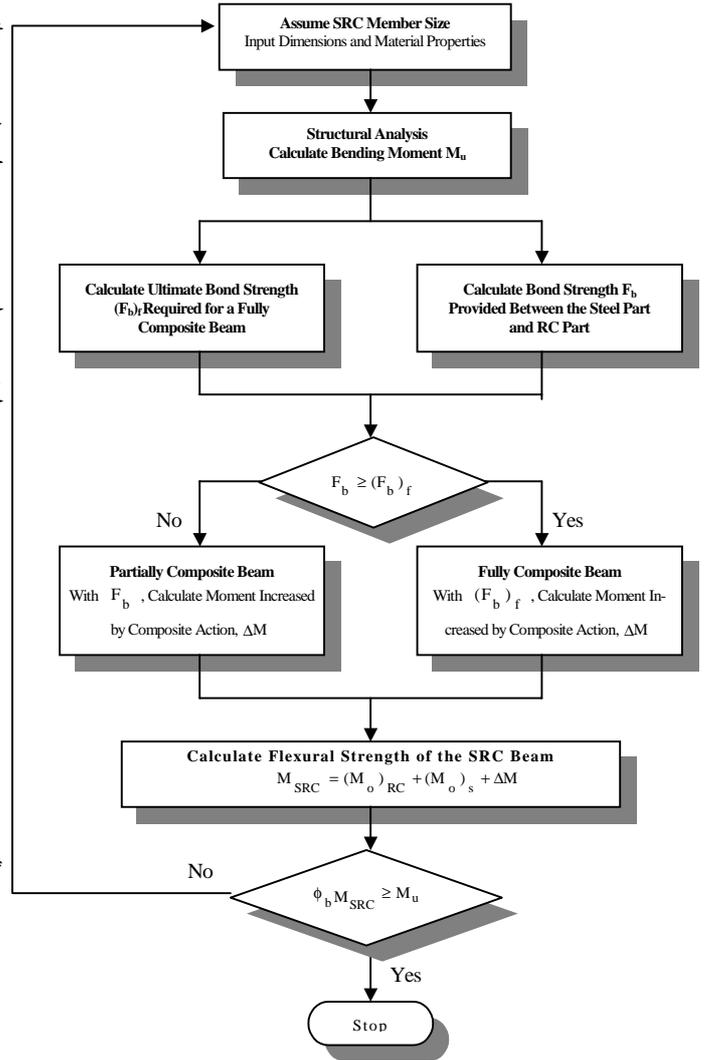
七、圖表



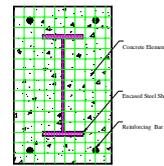
圖一 非合成與部份合成及完全合成SRC梁斷面之應變分佈與中性軸位置變化情形之比較



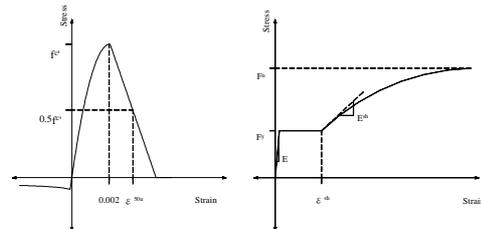
圖二 考慮部份合成作用之SRC梁中鋼骨與RC之受力情形



圖三 包覆型SRC梁之設計流程圖



(a) SRC Beam Cross Section Modeling



(b) Concrete Stress-Strain Relations (c) Steel Stress-Strain Relations

圖四 BIAx 程式之分析模型與應力-應變曲線