

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 纖維貼片補強混凝土版貫穿剪力行為(二)

### Punching Shear Behavior of Reinforced Concrete Slabs Strengthened with Fiber-Reinforced-Plastic (II)

計畫編號：NSC89-2211-E-009-016

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：陳誠直 國立交通大學土木工程學系

計劃參與人員：陳順隆 李建銘 國立交通大學土木工程學系

#### 一、中英文摘要

本研究為兩年期計畫之第二年計劃，主要在探討以纖維貼片補強鋼筋混凝土版之貫穿剪力強度與破壞行為，第一年係以玻璃纖維貼片為補強材料，第二年則以碳纖維貼片為補強材料。此兩年之試驗結果顯示，纖維貼片確實能提升鋼筋混凝土版之貫穿剪力強度。第一年所提之以貼片補強斷面撓曲強度換算斷面之等值鋼筋比，套入規範之貫穿剪力分析方法，能有效預測貼片補強版之貫穿剪力強度。

關鍵詞：碳纖維貼片、鋼筋混凝土版、貫穿剪力強度

#### Abstract

An experiment was conducted to investigate the behavior and punching shear strengths of the concrete slab-column connections externally reinforced with carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. Test results show that the ultimate punching shear strength of the flat slab can be substantially increased by the application of the CFRP laminates. Moreover, a design procedure following code expressions was proposed to predict the ultimate punching shear capacity of FRP strengthening slabs. The predictions from code expressions show a conservatively consistent correlation with test results.

Keywords : CFRP sheets, punching shear strength, RC slabs.

#### 二、緒論

混凝土結構物於強度、勁度、韌性不足時，需進行修復補強，以維持設計要求之機能使不致發生破壞。補強材料之一的纖維複合材料乃因其擁有高強度質量比、耐腐蝕性佳、非磁性、比重小、造形容易、易施工等優異的材料性能，故在已往許多的研究顯示纖維複合材料的應用於混凝土結構物之修復補強有優異的功效；然而，現有的研究成果多集中於混凝土梁與柱的補強，甚少有版結構補強的研究。貫穿剪力破壞是雙向版系統重要的破壞模式之一，本文以碳纖維貼片為補強材料，探討其對混凝土版貫穿剪力強度與行為之影響；並建立合理之貼片補強版貫穿剪力強度分析方法。

#### 三、試驗規劃

本研究共製作二十四組  $1000 \times 1000 \times 100$  mm 之正方形版，版正中心位置為一個  $150 \times 150$  mm 之正方形柱頭。試體規劃如表一所示，試體之參數有混凝土抗壓強度、拉力鋼筋比、碳纖維貼片層數。混凝土抗壓強度為 18.2MPa 及 27.6MPa，拉力鋼筋比為 0.59% 及 1.18%，貼片之變數有一層與兩層。碳纖維貼片為單向碳纖維編織席含浸環氧樹脂而成，材料試驗結果為：單層貼片之平均厚度為 0.62 mm，極限抗拉強度  $f_p=587$ MPa，彈性模數  $E_p=49,470$ MPa；雙層貼片之平均厚度為 1.15mm，極限抗拉強度  $f_p=888$ MPa，彈性

模數  $E_p=60,482\text{MPa}$ 。

試驗設置如圖一所示，四周以四根簡支承鋼棒為版試體之邊界條件。試驗所需集中力以油壓致動器以位移控制來加載。版試體上方皆架設位移感應器以量測各相關點的位移變化，鋼筋和纖維貼片之應變狀況則以應變計量測。

#### 四、試驗結果與討論

圖二至圖五所示為二十四組版試體之載重-位移關係曲線，CSR1-C1-F0 及 CSR1-C2-F0 之試體為撓曲破壞，所以其曲線在達到極限載重後會緩慢下降，且版呈現降伏線之破壞；其餘試體因破壞模式為貫穿剪力破壞，在達到極限載重時，發出破裂聲響，惟此時貼片仍與混凝土充份黏結。

表二所示為試驗結果，顯示參數對試體行為之影響：混凝土強度之提升，可以提升其貫穿剪力強度。隨著拉力鋼筋比的增加，強度與勁度皆增加，在相同的混凝土強度及貼片層數下，鋼筋比提升時，貫穿剪力最高可以提升 35.8%。當貼片層數增加時，版之貫穿剪力強度增加，受載階段勁度亦增加，但並沒有呈等比例的增加關係。

由鋼筋與纖維貼片的應變計讀數顯示，因貼片拉力材之作用，貼片補強之混凝土版之鋼筋應變大為減少；且單層纖維貼片之應變大於雙層貼片之應變。

#### 五、貫穿剪力強度分析

本文之貼片補強版之分析方法，係依據第一年所提之分析方法，針對現有鋼筋混凝土版之研究成果及設計規範，加入貼片補強機制。由試驗結果顯示，貼片補強對貫穿剪力提升的效果與補強版之撓曲強度有相當關係，故以 ACI 強度設計法為基礎，分析貼片補強版的撓曲強度，並以此換算貼片補強版之等值鋼筋比，代入規範之設計公式中，或計算撓曲破壞時的剪力強度，並代入 Moe 的分析模式中，以分析

補強版的貫穿剪力強度。

計算貼片補強版之貫穿剪力強度之前，需對補強版斷面之等值有效深度加以定義，等值有效深度係將貼片面積依彈性模數比換算成等值鋼筋面積，再求出斷面鋼筋與貼片的形心位置，如式(1)所示：

$$d_{eqv} = \frac{A_s d + n_f A_f h}{A_s + n_f A_f} \quad (1)$$

式中  $n_f$  為貼片與鋼筋之彈性模數比； $A_s$ ， $A_f$  為鋼筋及貼片斷面積， $h$  為版厚。

由於碳纖維貼片的貢獻提升版之撓曲強度，利用 ACI 強度設計法的基本原理，再加入貼片材料的機制，由力平衡條件求得補強斷面的撓曲強度，再經由降伏線理論分析可計算版撓曲破壞時對應之剪力強度  $V_{flex}$ ：

$$V_{flex} = 8 \left( \frac{b}{s-c} - 0.172 \right) M_n \quad (2)$$

式中， $s$  為版跨度中心距， $b$  為版寬， $c$  為方柱邊長，而後代入 Moe 公式中求得貫穿剪力強度。至於規範中之拉力鋼筋比，可由貼片補強斷面之撓曲強度換算成等值鋼筋比代入計算公式中，等值鋼筋比可依式(3)加以計算。

$$\rho_{eqv} = \frac{1}{m} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right]$$
$$m = \frac{f_y}{0.85 f'_c} \quad (3)$$
$$R_n = \frac{M_n}{bd_{equ}^2}$$

圖六及圖七所示為依此分析方法計算各規範公式所得之貫穿剪力強度與等值鋼筋比的關係，由於 ACI 318 規範對貫穿剪力強度的計算並沒有考慮版內鋼筋比的影響，無法看出貼片補強的效用，故無法用以評估貼片補強的成效。其餘規範計算結果比試驗值高出的比例都相當接近，尤其是 Moe 與 BS8110 公式更為接近。

#### 六、結論

綜合二年之實驗研究，顯示纖維貼片

對鋼筋混凝土版的貫穿剪力補強確有明顯的功效，纖維貼片的層數與版內鋼筋比大小對補強版的貫穿剪力強度有重要的影響；補強之效果隨著貼片層數的增加而增加，惟其強度提升非成比例增加。

建議之貫穿剪力強度分析方法，將貼片補強版撓曲強度換算等值鋼筋比再用以分析貫穿剪力強度，分析結果與試驗值比較顯示，分析值與試驗值變化的趨勢一致，表示本研究建議之等值鋼筋比分析貼片補強版貫穿剪力強度的觀念可行。

### 七、參考文獻

- [1] Ahmad, S. H., Zia, P., Yu, T. J., and Xie, Y. Punching Shear Tests of Slabs Reinforced with 3-D Carbon Fiber Fabric. *Concrete International*, V. 16, No. 6, 1994, pp. 36-41.
- [2] Marzouk, H., and Hussein, A., "Experimental Investigation on the Behavior of High Strength Concrete Slabs," *ACI Structural Journal*, V. 88, No.6, Nov.-Dec., 1991, pp.701-713.
- [3] Moe, J., "Shearing Strength of Reinforced Slabs and Footings under Concentrated Loads," Bulletin D47, Portland Cement Assoc., 1961.

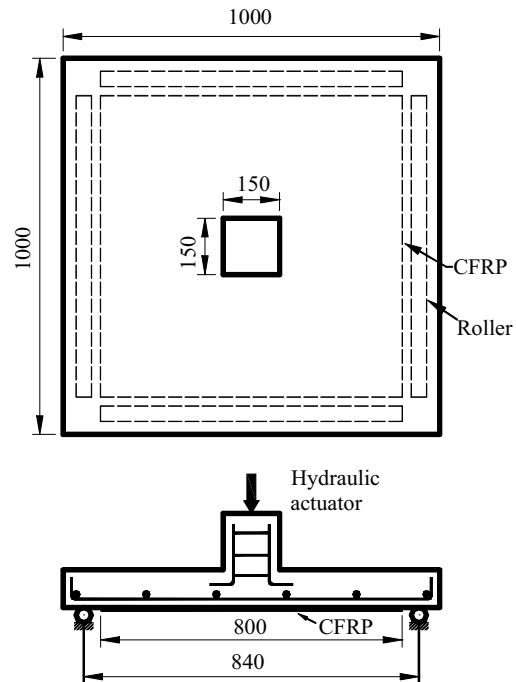
表一 試體規劃表

| 試體編號        | 鋼筋比 (%) | $f'_c$ (MPa) | 玻纖貼片層數 |
|-------------|---------|--------------|--------|
| CSR1-C1-F0a | 0.59    | 18.2         | -      |
| CSR1-C1-F0b | 0.59    | 18.2         | -      |
| CSR1-C1-F1a | 0.59    | 18.2         | 1      |
| CSR1-C1-F1b | 0.59    | 18.2         | 1      |
| CSR1-C1-F2a | 0.59    | 18.2         | 2      |
| CSR1-C1-F2b | 0.59    | 18.2         | 2      |
| CSR1-C2-F0a | 0.59    | 27.6         | -      |
| CSR1-C2-F0b | 0.59    | 27.6         | -      |
| CSR1-C2-F1a | 0.59    | 27.6         | 1      |
| CSR1-C2-F1b | 0.59    | 27.6         | 1      |
| CSR1-C2-F2a | 0.59    | 27.6         | 2      |
| CSR1-C2-F2b | 0.59    | 27.6         | 2      |
| CSR2-C1-F0a | 1.18    | 18.2         | -      |
| CSR2-C1-F0b | 1.18    | 18.2         | -      |

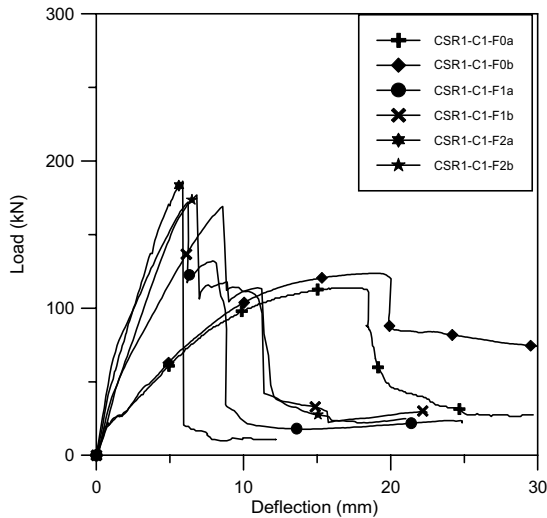
|             |      |      |   |
|-------------|------|------|---|
| CSR2-C1-F1a | 1.18 | 18.2 | 1 |
| CSR2-C1-F1b | 1.18 | 18.2 | 1 |
| CSR2-C1-F2a | 1.18 | 18.2 | 2 |
| CSR2-C1-F2b | 1.18 | 18.2 | 2 |
| CSR2-C2-F0a | 1.18 | 27.6 | - |
| CSR2-C2-F0b | 1.18 | 27.6 | - |
| CSR2-C2-F1a | 1.18 | 27.6 | 1 |
| CSR2-C2-F1b | 1.18 | 27.6 | 1 |
| CSR2-C2-F2a | 1.18 | 27.6 | 2 |
| CSR2-C2-F2b | 1.18 | 27.6 | 2 |

表二 試驗結果

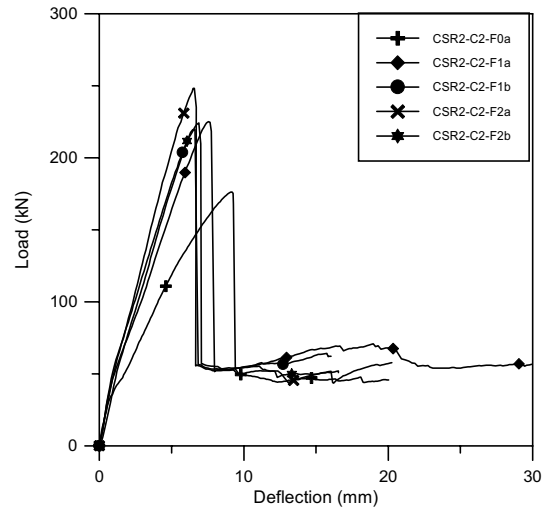
| 試體編號       | 貫穿剪力強度(kN) | 強度提昇比率% |
|------------|------------|---------|
| CSR1-C1-F0 | 118.7      | -       |
| CSR1-C1-F1 | 170.6      | 43.7    |
| CSR1-C1-F2 | 181.5      | 53.0    |
| CSR1-C2-F0 | 129.7      | -       |
| CSR1-C2-F1 | 198.2      | 52.9    |
| CSR1-C2-F2 | 222.1      | 71.3    |
| CSR2-C1-F0 | 152.5      | -       |
| CSR2-C1-F1 | 170.6      | 11.8    |
| CSR2-C1-F2 | 196.8      | 29.0    |
| CSR2-C2-F0 | 176.1      | -       |
| CSR2-C2-F1 | 224.6      | 27.5    |
| CSR2-C2-F2 | 233.9      | 32.8    |



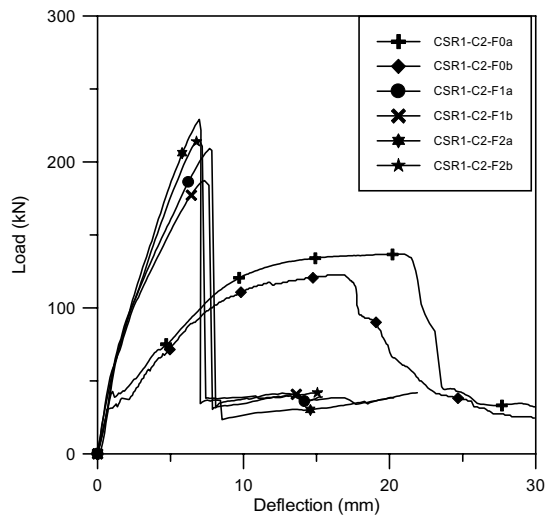
圖一 試驗設置示意圖



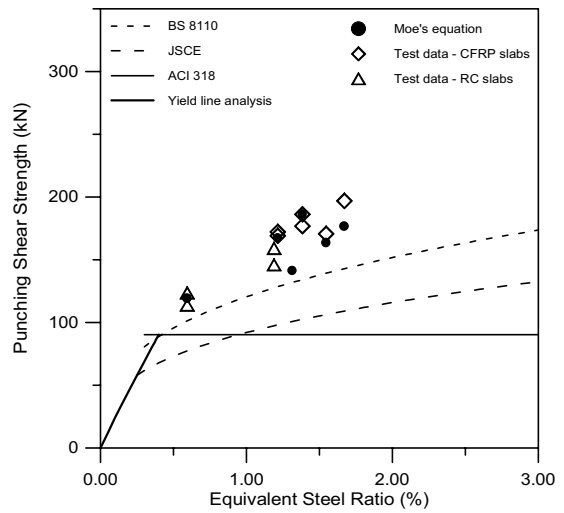
圖二 CSR1-C1 群組之載重-位移曲線



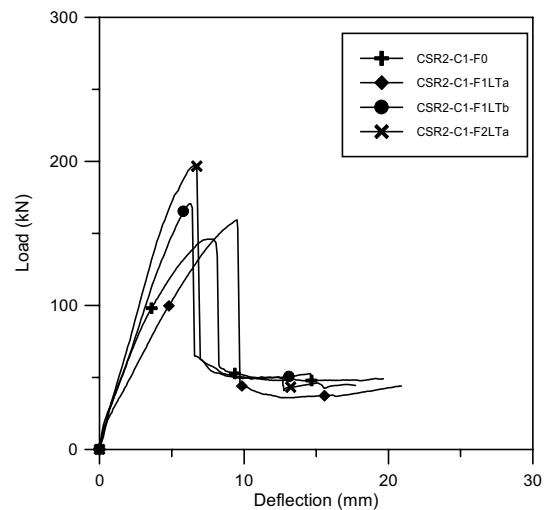
圖五 CSR2-C2 群組之載重-位移曲線



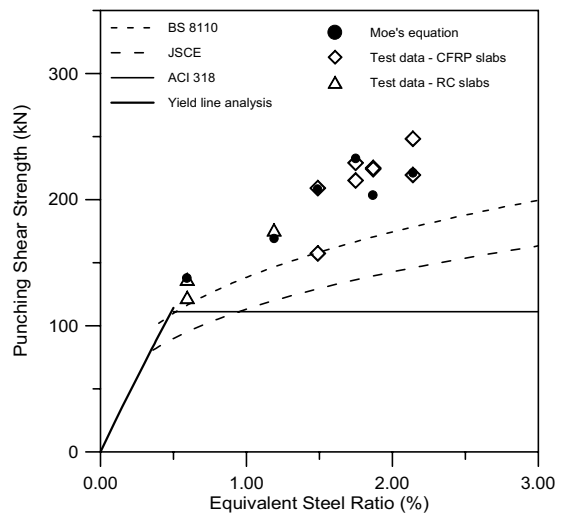
圖三 CSR1-C2 群組之載重-位移曲線



圖六 貫穿剪力強度與等值鋼筋比之關係  
(混凝土強度 16.9MPa)



圖四 CSR2-C1 群組之載重-位移曲線



圖七 貫穿剪力強度與等值鋼筋比之關係  
(混凝土強度 27.6MPa)