

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

以強化碳纖維高分子材料補強鋼筋混凝土構架之擬彈性法耐震評估
Aseismic Assessment on Damaged R.C. Frame Strengthened

with CFRP by Pseudo-Elastic Method

計畫編號: NSC 89-2211-E-002-125

執行期限: 89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

主持人: 陳清泉 台灣大學土木工程學系(E-mail:ccchern@ccms.ntu.edu.tw)

一、中文摘要

經 921 大地地震之後，全國對受震損或強度不足之建築結構物均有不安全的感覺，亟欲進行補強，以免受到往後之震害，以確保居住及公共之安全，更受政府及各界之關注。以 CFRP 補強有其輕便、經濟、及快速之功效倍受注目。

惟補強後之結構體到底能抵抗地震之能力為何，實難以傳統之方法，加以分析及估算。特針對以 CFRP 補強之構件及其斷面之耐震能力加以合理之分析。採用本人歷經十多年研究開發之擬彈性分析法，探討其合理之補強後耐震能力。

本計畫之重點在於探討梁、柱、版及牆之於以 CFRP 補強後力學行為及其構架之整體耐震能力。

關鍵詞：鋼筋混凝土、結構體、纖維強化高分子複合材料、補強、耐震能力、構件、擬彈性性。

Abstract:

This paper is aimed on the aseismic capacity analysis for the damaged reinforced concrete (RC) frame strengthened with the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) by using Pseudo-Elastic Method. The composite sectional property and mechanical models of structural members have been derived and established. The seismic load is applied to

CFRP strengthened RC frame, and the seismic load was increased step by step for nonlinear analysis, finally the maximum seismic resistant capacity and response of frame could be assessed by adopting the Pseudo-Elastic Approach Analysis.

Keyword: aseismic capacity, fiber reinforced polymer, pseudo-elastic method, reinforced concrete, retrofitting, strengthening,

二、緣由與目的

鋼筋混凝土結構物常因施工品質不良、設計錯誤、超載使用、偷工減料等人為疏失，以及地震、颱風、洪水等自然災害之影響，而造成結構物在設計年限即發生承载力不足及耐久性縮減等問題。另一方面由於耐震需求更趨嚴格，使現有老舊建築物無法滿足耐震要求，因此由防災的角度及經濟考量，為避免將來付出更大的社會成本，完善的修護補強以確保結構安全，實為一可行方法。

結構之補強方式，大體可分為兩類：(1)改變整體結構系統構件之受力分配方式。(2)增加構件之強度或提高韌性。

為使鋼筋混凝土結構在修補後能達成堅固耐久目的，目前常用的補強

方式有下列幾種：

(1)增加斷面及鋼筋量補強法：擴大原構件斷面尺寸及增加鋼筋量方式增強構件之承載能力，甚至於新舊混凝土介面以螺栓接合。

(2)鋼板貼片補強法：此法係採用環氧樹脂為黏接劑將鋼板黏接於構件的表面形成一複合構件，以提高原構件之承載力。

(3)強化纖維複合材料補強法：引入過去航太及造船工業使用已久之強化纖維材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)應用於土木工程之補強為目前新趨勢。一般而言強化纖維具有重量輕、強度高、耐腐蝕性、具可變化性、不導電性、良好之抗疲勞強度及易施工等優點，使得此一補強方式具有極大之發展潛力。

本研究擬使用強化纖維(CFRP)複合材料，對含牆鋼筋混凝土結構物進行補強，以瞭解結構補強後之能力與效果，作為實務設計之參考基礎。

三、強化纖維之物理性質及補強後之構件行為

推導過程係基於下列之基本假設：(1)開裂裂縫彼此平行，而且裂縫之傾斜角隨剪力大小改變。(2)裂縫間的混凝土支柱 (Concrete Struts)承受主軸壓應力。(3)鋼筋與混凝土間為完全握裹(Perfect Anchorage Bond)，即不考慮錨定不足之現象。(4)CFRP 複合材料與混凝土間為完全貼合 (Perfect Bond)，不考慮脫層之可能。推導過程茲簡述如下：

基本方程式

(1)力平衡條件

由縱向鋼筋、橫向鋼筋、CFRP 及

混凝土斜條柱所組成之牆元素，可由其力平衡圖得到以下三平衡方式：

$$A_l f_l + A_p f_p = t b d \cot \alpha \quad A_l f_l = t b s$$

$$\sigma_d b \cos \alpha = \frac{t b}{\sin \alpha}$$

其中, A_l = 於有效面積(ABCD)下縱向鋼筋之總面積 A_l = 單一橫向鋼筋面積

A_p = 縱向 CFRP 之總斷面積。

(2)契合條件

以下為三個基本契合條件之方程式：

代入，此與實際情況出入頗大，因此本研究將原式修正，考慮實際軸向筋及箍筋之實際強度，可得以下三個圖及回歸方程式：

$$\frac{\gamma}{2} = (\varepsilon_l + \varepsilon_p + \varepsilon_d) \cot \alpha$$

$$\frac{\gamma}{2} = (\varepsilon_l + \varepsilon_d) \tan \alpha$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_d \cos \alpha$$

FRP 之應力-應變關係：

應力上升段，即 $\varepsilon_d \leq \varepsilon_0 / \lambda$

$$\sigma_d = f'_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \right) - \lambda \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]$$

應力下降段，即 $\varepsilon_d > \varepsilon_0 / \lambda$

$$\sigma_d = \frac{f'_c}{\lambda} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_d / \varepsilon_0 - 1 / \lambda}{2 - 1 / \lambda} \right)^2 \right]$$

FRP 複合材料為一脆性材料，因此採用脆性破壞模式。

四、構架分析時之基本假設

- (1)樓層質量聚積(lump)於各樓版相同高度之質心處。樓層質量為該層樓版質量、梁質量及上與下柱及牆質量一半等之總和。
- (2)樓版為面內(in plane)刚性，且構架之主梁與樓版澆注為一體，忽略主梁之軸向變形。
- (3)梁與柱之結點為刚性接合
- (4)水平方向地震力作用於各樓板上，再經由樓版傳遞至梁、柱及剪力牆。
- (5)梁、柱及剪力牆等構件之力矩-曲率關係模擬為雙線性關係，且桿件不計扭轉勁度。

五、擬彈性法之應用

崩塌加速度可依本法及下式：

$$Z_c = \left(\frac{V_y Z}{\alpha_y V_d}, \frac{V_u Z}{\alpha_p \alpha_y V_d}, \frac{V_u Z}{\alpha_p V_y} \right)_{\min}$$

其中， V_d, V_y, V_u 分別為設計地震總橫力，第一個塑鉸產生時地震總橫力，及崩塌之地震總橫力。

擬彈性法在分析應時其步驟如下：

- (1)以線性結構進行動力或靜力分析；
- (2)求線性結構物地震作用下之桿件力；
- (3)依能量守恆原則應用擬彈性原理；
- (4)超過彈性之能量轉換成塑性能量；
- (5)推演結構物之非線性行為。
- (6)求取結構基底剪力及頂層側移以及韌性比，以作為評估結構物耐震能力之指

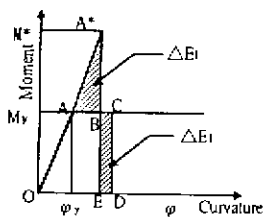


Figure 1 Beam Moment-Curvature Curve

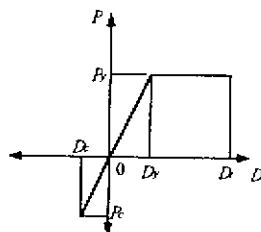


Figure 2 Bracing Force vs Deformation

標。

六、結果與討論

經由剪力牆剪力與變位關係之理論推導與梁柱補強之模式分析結果，可獲得以下幾點結論：

- (1)剪力牆以 FRP 貼布方式補強後，其相關之力學參數，如剪力模數(G)值、降伏剪應力(τ_y)值、極限剪應力(τ_u)值，均隨補強層數增加而有遞增趨勢。
- (2)由實例分析結果，單就剪力牆而言，以貼布 FRP 補強之方式，其所增加之耐震能力具有明顯之效果，尤以剪力牆為主體之構架中，其補強效果較佳；而於以剛構架為主之含牆構架中，其補強效果則相對較低。
- (3)建築物為高度靜不定之結構，構架之整體力學行為複雜，若單就補強剪力牆之方式，難以明顯增加構架之耐震能力，即無法達到良好的補強效果，應從梁、柱、牆等構件作全盤考量，方能得到最佳之補強方式。

經本研究之後，值得討論者為：

- (1)CFRP 貼布補強工法應用於土木及建築工程之補強實務，目前處於初步階段，尚待進一步之研究分析與實驗探討。如本文中牆面以 CFRP 貼布補強之錨定問題甚為重要，CFRP 能否發揮其材料強度等特性，端賴 CFRP 貼布在邊界之錨定的效果錨定的效果。因此進行錨定技術之開發及其相關之試驗，以求取相關之參數乃甚為重要。
- (2)本文採用之軟化型桁架模式理論，以推導對於受剪行為控制之含 FRP 低型剪力牆之剪力與變位關係，目前並無相關之實驗資料以茲佐證，尚須進一步的研究探討。

(3)本文之實例分析，僅探討剪力牆構件以貼布 CFRP 補強方式增加構架之耐震能力影響，若能從整體構架去作考量，應能獲致更真實之補強效果。

(4)擬彈性法之學理完整，且其實例分析結果，其準確性高，尚稱合理，應可以推廣應用於工程之實務上。

參考文獻

- [1] Strengthened with GFRP Plates I: Experimental Study," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 11, November 1991, pp. 3417-3433。
- [2] Saadatmanesh, H., and Ehasani, M. R., "RC Beams Strengthened with GFRP Plates II: Analysis and Parametric Study," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 11, November 1991, pp. 3434-3455。
- [3] Ritchie, P. A., Thomas, D.A., Lu, L-W. and Connelly, G. M. "External Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics," *Structural Journal*, ACI, Vol. 88, No. 4, 1991, pp. 490-500。
- [4] Triantafillou, T.C., "Strengthening of RC Beams with Epoxy-Bonded Fiber Composite Materials," *Materials and Structures*, 1992, pp. 201-211。
- [5] Al-Sulaimani, G. J., Sharif, A. S., Basunbul, I. A., Baluch, M. H. and Ghaleb, B. N., "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plate," *Structural Journal*, ACI, Vol. 91, No. 2, 1994, pp. 160-168。
- [6] 彭添富, 李有豐, 施邦築, 朱國棟, 邱宗佑, 鄭育祥, "碳纖維強化高分子複合材料(CFRP)應用於簡支鋼筋混凝土梁之補強最佳化設計與驗證", *結構工程*, 第十二卷第四期, 民國 86 年 12 月, pp. 87-99。
- [7] 李秉乾, 吳岱祐, 李宗澤, 廖為忠, "鋼筋混凝土樑以玻璃纖維強化高分子貼片補強之研究", 橋樑結構修補技術研討會, 行政院公共工程委員會, 民國 87 年 3 月, pp. c1-c20。
- [8] 朱國棟, 盧廷鉅, 林英民, "複合材料(FRP)貼片補強材料之發展與應用-高層建築物地下室結構柱", *工業材料*, 135 期, 民國 87 年 3 月, pp. 148-156。
- [9] 楊富勝, "高層鋼構架非線性之歷時動力分析", 台大土木工程學研究所碩士論文, 陳清泉教授指導, 民國 76 年 6 月。
- [10] 廖源輔, "考慮接頭非線性之多層鋼構架歷時動力分析之研究", 台大土木工程學研究所碩士論文, 陳清泉教授指導, 民國 77 年 6 月。
- [11] 陳清泉, "建築結構之韌性與設計", 結構耐震分析與設計講習會, 台北市, 民國 75 年。
- [12] 內政部頒, "最新建築技術規則", 詹氏書局, 民國 89 年。
- [13] 陳清泉, "建築結構設計原理" 台灣營建研究院出版, 第三版, 民國 90 年 9 月。