

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

FRP 補強 RC 結構之電腦輔助分析與設計

Computer-Aided Analysis and Design of FRP-Retrofitted RC Structures

計畫編號：NSC 87-2211-E-002-042

執行期限：86 年 8 月 1 日至 87 年 7 月 31 日

主持人：謝尚賢 台灣大學土木工程系

電子郵件信箱：shhsieh@ce.ntu.edu.tw

一. 中文摘要

近年來，歐美日等先進國家積極地進行應用纖維強化高分子複合材料(FRP)於鋼筋混凝土(RC)結構補強之各種相關研究，以解決 RC 結構物除了因設計、施工與使用不當及因材料老化與環境腐蝕所引發的維修問題。

目前國內外相關之研究多以試驗為多，理論探討較少，數值模擬方面之研究幾乎沒有。本研究計畫為針對 FRP 應用於 RC 結構補強之一系列相關整合研究計畫之一個子計畫。研究重點在於應用有限元素法分析預測 RC 梁與 FRP 補強 RC 梁之力學行為，期能以數值模擬方式，可靠地預測 RC 梁以 FRP 補強前後之破壞機制與承載能力，以利工程師從事 RC 結構之 FRP 補強設計。

關鍵詞：鋼筋混凝土結構物、纖維強化高分子複合材料、結構補強、有限元素分析

Abstract

In recent years, modern countries in the world have paid more attentions to the maintenance problems of Reinforced Concrete (RC) structures caused by the inadequate design, construction, and operation as well as the aging of materials and corrosion in severe environments. In order to address these problems, there have

been many research efforts made in applications of Fiber Reinforced Polymer (FRP) to the strengthening and retrofitting of RC structures.

Most of research efforts in applications of FRP to retrofitting RC structures have been on experimental studies. There are only a few on theoretical studies, and very few on numerical simulations. The present research is one of many sub-projects of an integrated project to study the applications of FRP to retrofitting of RC structures. The goal of the present research is to effectively predict behavior and failure mechanism of RC beams and FRP-retrofitted RC beams using finite element techniques

Keywords: Reinforced Concrete Structures, Fiber Reinforced Polymer, Retrofitting of Structures, Finite Element Analysis

二. 緣由與目的

結構物由於原先設計錯誤、使用情況改變、環境氣候或施工疏忽等因素對於結構物強度影響甚巨，甚至可能造成結構物強度不足。若結構物本身因強度過低而造成承載能力低於安全要求將造成結構物安全上之顧慮而威脅生命與財產安全。基於經濟因素考量，以補強方法提升結構物不足之強度，常遠比拆除加以重建具經濟效益與方便性。因此，對於強度嚴重不足影響公共安全之結構物，利用 FRP 貼附於強度不足之結構構件補強方式已逐漸廣

為世界各國使用。相較於航太工業，FRP 應用於土木結構物上屬於較新穎之應用，也由於 RC 結構與 FRP 材料兩者本身之材料性質具相當複雜與 FRP 貼於 RC 構件時交界面附著等問題，仍然尚未完全為工程界完全掌握，故 FRP 補強方法目前仍然存有一些問題，必需進行試驗以瞭解 RC 構件在以 FRP 補強後之力學行為與可能之破壞機制。然而以試驗研究 FRP 補強 RC 構件行為雖為必需，但因為 FRP 材料本身成本較高與 RC 試體準備耗時，在有限時間與經費下，常只能進行非常有限的試驗，不易廣泛研究各種行為與破壞機制，以利補強之輔助設計。

基於上述之原因，本研究之主要目的為利用非線性有限元素分析程式 ABAQUS[1]，以二維與三維有限元素模型分析與模擬 RC 梁與 FRP 補強 RC 梁之力學行為，並評估藉由有限元素分析預測 FRP 補強 RC 梁方式破壞模式之可能性與力學行為之趨勢。同時，對於有限元素分析 FRP 補強 RC 梁中許多材料參數之影響性以及不同模擬方式間之差異做一整理與評估，以供進行有限元素分析 FRP 補強 RC 梁構件時，材料參數選定與分析模型建立之依據，提供有限元素輔助工程分析之參考。

三.研究方法

FRP 補強 RC 梁以有限元素分析其補強行為時，若不瞭解各個材料參數於所引用之有限元素混凝土模型中所代表意義，可能造成引用錯誤而導致分析結果錯誤。所以，於分析 FRP 補強之 RC 梁前，必需先確實掌握 RC 梁分析之正確性，故需對 RC 梁有限元素分析模型的物理意義以及相關理論加以瞭解。因此，本研究對有限元素分析 RC 結構相關非線性破壞力學[9]、模擬混凝土破裂與鋼筋之有限元素模型等相關文獻[2-8]及 FRP 補強 RC[10-11]與其力學性質做一有系統之整理與說明。

基於上述之因素，本研究先以 ABAQUS

非線性有限元素及固定正交式混凝土破裂模型分析 RC 梁，並藉以瞭解各材料參數、元素網格密度收斂性、不同形式元素與鋼筋模擬方法對於分析與模擬結果之影響，以尋找一適當的分析模型。

根據合理之 RC 分析梁模型，建立補強 RC 梁之分析模型並分析不同貼附 FRP 於 RC 梁方式之補強，以不同元素模擬 FRP，比較不同元素對於 FRP 補強 RC 梁對於分析與模擬結果之影響，再由分析所得之結果探討與歸納本研究所使用之混凝土模型適用性與預測補強後力學行為趨勢之正確性與破壞模式能性，以作為分析時，分析模型建立之建議。

四.分析結果

有限元素分析 RC 結構時，如何考慮混凝土開裂後對結構物力學反應之影響相當重要，本研究採用固定正交式均佈裂縫法，藉由調整折減元素勁度以模擬混凝土因裂縫所造成之影響。所謂固定正交均佈裂縫模型，其假設裂縫產生後，裂縫之間為正交關係，且於持續加載下，裂縫方向保持不變。其中模型中隱含有代表著不同物理意義之剪力折減與拉力加勁或軟化效應[5-8]參數。根據本研究實際分析 RC 梁之問題時，混凝土拉應力軟化與開裂之非線性行為，於分析上造成 ABAQUS 收斂之困難性，以致無法求得完整極限載重-位移反應，這可能是因為混凝土破裂造成應力釋放造成，其收斂性與混凝土開裂後軟化曲線與張力加勁之斜率相關，斜率越平滑較容易獲得收斂解。剪力折減係數對於 RC 梁之載重-位移反應並無顯著之影響，這可能因於非往復載重效應之下，裂縫開、閉效應並不影響 RC 梁整體之勁度。同時，不考慮混凝土受壓之塑性行為下，所得之載重-位移反應並無明顯之差異，所以於 RC 梁之問題中，造成 RC 梁勁度折減效應主要應為裂縫所造成之效應。

對於鋼筋有限元素模型，本研究在二維分析時分別以離散法與內嵌法加以模

擬，但離散法，與元素網格排列方式息息相關，故其使用性較受限制，故於三維分析時並不採用此一方式加以比較。三維分析時內嵌法分別以接近真實物理模型之單一鋼筋（圖 1）與等效鋼筋層（圖 2）模擬，以此兩種方法模擬所得之載重-位移反應相當接近，但以便利性而言以等效鋼筋層模擬將比以單一鋼筋模擬複雜性較低。

在 FRP 補強 RC 梁之分析模擬中，進行二維分析時，只能就 FRP 貼附於 RC 梁底部之補強方式進行分析，分別以相等於 FRP 斷面積之等量斷面桁架元素與平面應力元素模擬貼附於梁底面之 FRP，材料性質則假設為等向性材料。以平面應力元素與 FRP 貼片等斷面積之桁架元素分析，其載重-位移反應於補強 RC 梁破壞之前並無顯著不同，但以桁架元素模擬於極限載重後出現回跳與不穩定之數值現象。有限元素對於底部貼片厚度變化補強變化，其勁度隨厚度增加而增強，與試驗之趨勢大致相符（圖 3），但對於剪力等局部破壞模式，並無法由應力等高圖觀察出。

於三維分析時，本研究以薄殼元素模擬 FRP，所以於三維分析時可以對於 RC 梁進行梁側面 FRP 貼附補強，側面貼附方式可以分為兩側側面全部包覆與包覆一半，就試驗研究而言，側面全部包覆與一半包覆之補強效果，全部包覆與一半包覆之方式，對於原梁之提升效果約相同（圖 3）。

五. 結論與未來研究方向

本研究利用非線性有限元素法，對於 FRP 補強 RC 構件中之梁構件先進行力學行為分析之初步研究，本研究所使用之固定正交式混凝土破裂模型，似乎對於 FRP 補強 RC 梁之載重-位移反應比試驗之勁度與極限載重高估，顯現出較大之勁度。未來可考慮根據旋轉裂縫法模型[12]或多向正交裂縫法模型[5]加以分析，進一步比較對於梁問題而言此三種模型之適用

性。同時，由於混凝土破裂造成應力釋放與混凝土之軟化行為，造成有限元素收斂之困難，使得需假設其軟化或張力加勁曲線為一平緩之直線，此一為求得極限載重而於分析上需做此一調整，造成忽略混凝土於受拉應力軟化後真實非線性破壞力學與張力加勁行為之理論基礎。所以，發展一能有效解決因混凝土受拉應力軟化而造成數值上收斂困難之有效解決方法，才能於符合軟化行為之物理意義之下，獲得一收斂解，是一項未來重要研究方向。此外，於本研究中剪力折減、張力加勁與張力軟化等參數對於 RC 梁與 FRP 補強 RC 梁之載重-位移反應之影響並不顯著，其中剪力折減於本研究所使用 ABAQUS 分析程式中所採用為隨裂縫增長呈線性折減模式。對於分析眾多參數，如何更明確訂定不同問題下應如何選取，也需要更進一步加以研究，以增加有限元素分析上之正確性。而對於鋼筋之模擬方法而言，二維與三維之分析以等效鋼筋層模擬方法，可以簡化分析模型建立之複雜度。故以有限元素預測 FRP 補強 RC 梁之力學行為趨勢，雖大致與試驗趨勢相符，但並無法直接明白觀察出其局部破壞模式。

由於試驗資料對於 FRP 材料性質並無精確測定，故無法應用複合材料力學理論對於研究以不同纖維角度貼附於 RC 梁時多層 FRP 底部、側面補強加以分析，亦無法研究由於纖維角度偏離受力方向主軸，引致非等向材料行為對於補強效果之影響，未來之研究方向應整合試驗研究以獲得精確複合材料性質並引入複合材料力學之破壞準則，研究其評估局部破壞之可能性。

六. 計畫成果自評

本研究大致上已完成以有限元素法分析 FRP 補強 RC 梁之力學行為與預測破壞模式原計畫預期工作項目。研究中對於有限元素法、混凝土模型、FRP 模擬方式與材料參數選定做一探討與評估。 本研

究並指出有限元素分析時，為獲得一收斂解而對於混凝土軟化行為所做之忽略，可能為造成對於極限強度與勁度高估之因素。

美中不足的是，研究之過程中遭遇 FRP 材料試驗數據不全，經多方請教亦試驗研究之學者專家及中山科學院航空所，能無法獲得，故於研究中假設 FRP 材料為均質等向性。若能將試驗研究與數值研究相互結合，對於數值分析模型之正確性與複合材料力學及破壞準則適用性，可獲得更進一步之驗證。

五.參考文獻

- [1] Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., ABAQUS User and Theory Manuals, Version 5.6, Providence, RI, 1996
- [2] Hillerborg, M. M. and Petersson, P. E. (1976). "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Element," *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, 773-781.
- [3] Elwi, A. E. and Hrudey, T. M. (1989). "Finite Element Model for Curved Embedded Reinforcement," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 115, No. 4, 740-754.
- [4] Barzegar, F. and Maddipati, M. (1994). "Generating Reinforcement in FE Modeling of Concrete Structures," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 5, 1656-1661.
- [5] Rots, J. G. and Borst, R. (1987). "Analysis of Mixed-Mode Fracture in Concrete," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 113, No. 11, 1739-1758.
- [6] Gupta, A. K. and Maestri, S. R. (1990). "Tension-Stiffening Model for Reinforced Concrete Bars," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 3, 769-789.
- [7] Dahlblom, D. and Ottosen, N. S. (1990). "Smeared Crack Analysis Using Generalized Fictitious Crack Model," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 116, No. 1, 55-76.
- [8] Bazant, Z. P. and Cedolin, L. (1979). "Blunt Crack Band Propagation in Finite Element Analysis," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 105, No. EM2, 297-315.
- [9] Karihaloo, B. L. (1995). *Fracture Mechanics and Structural Concrete*, Addison Wesley, New York, USA.
- [10] Sharif, A., Al-Sulaimani, G. J., Basunbul, M. H., Ghaleb, B. N. (1994). "Strengthening of

Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 2, 160-168.

- [11] Arduini, M., Tommaso, A. D., and Nanni, A. (1997). "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 4, 363-371.
- [12] Gupta, A. K., and Akbar, H. (1984). "Cracking in Reinforced Concrete Analysis," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 8, 1753-1746.

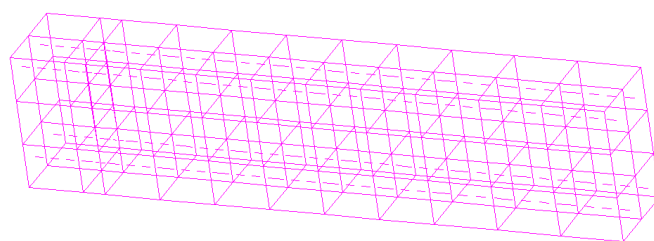


圖 1 單一鋼筋嵌入式模型

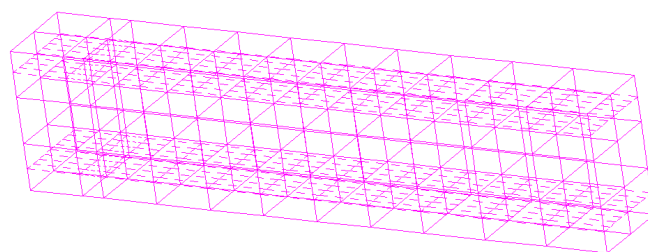


圖 2 等效鋼筋層模型

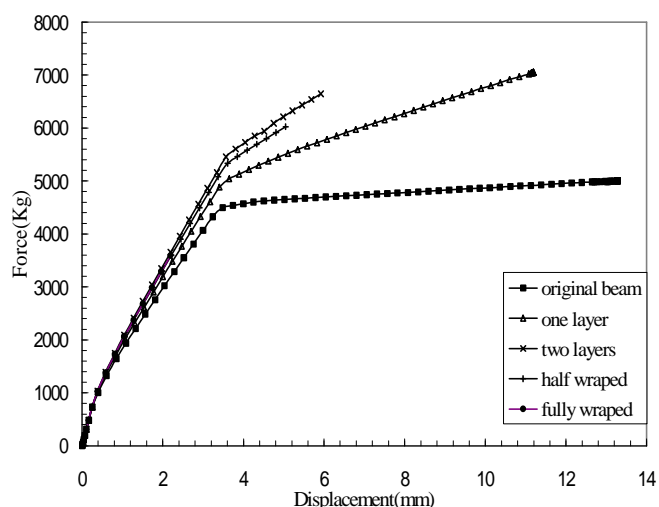


圖 3 RC 梁與 FRP 補強梁載重-位移圖