以碳纖維修復鋼筋混凝土深梁之研究

*吳霽哲(Ji-Jhe Wu)
中國科技大學室內設計研究所

本研究針對前一篇論文中，12支發生剪力破壞之深梁，採碳纖維貼布方式進行深梁之修復。隨後再針對完成修復之深梁再測試。剪力破壞之深梁，經碳纖維修復後其第二次剪力強度試驗之結果顯示，剪跨-深比愈大，深梁剪力強度愈低。含水平箍筋及垂直箍筋之深梁其剪力強度較不含箍筋深梁之剪力強度高。由於修復指數之平均值小於1，故本研究之12支深梁測試結果顯示，採用碳纖維修復剪力破壞之深梁，並無法提升深梁之剪力強度。
關鍵詞：深梁、剪力強度、碳纖維

REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS REPAIRED BY CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS

Abstract

In this study, twelve shear-failure deep beams were repaired by CFRP jacket. Retest on the strengthened deep beams was performed during the second load stage.

The test results at the second load stage after deep beams repaired by CFRP indicate that the larger the shear span-to-depth ratio the smaller the shear strength of deep beam is. The shear strengths of deep beams with horizontal and vertical stirrups are larger than those of deep beams without stirrups. Because the mean of the repair index is less than 1, using CFRP to repair the shear failure deep beams cannot raise the shear strength of deep beams.
Keywords：deep beams; shear strengths; carbon fiber reinforced plastics (CFRP)

一、前言

台灣老舊鋼筋混凝土建築物相當多，每當構件損壞就打掉重練，既勞民又傷財，且與目前節能減廢、環保再生之潮流並不符合，因此採用修復、補強方式來延長破損之梁、柱及樓板等結構構件之使用年限，確有其必要性。鋼筋混凝土深梁係指梁之剪力跨度(a)與其有效深度(d)之比值(a/d)小於2.5者[1]。根據鋼筋混凝土設計規範[2,3]，淨跨度(l_n)與有效深度之比值(l_n/d)不超過4之梁即歸類為深

梁。深梁之設計常以剪力強度為主要的考慮，其於台灣本土亦有廣泛的應用，通常見諸高樓建築的地梁。鋼筋混凝土深梁為剪力主控的構件，其最常見之破壞模式為對角方向上混凝土擠碎之剪力破壞[4-16]。

延續前一篇論文，本研究將前一篇論文第一次剪力強度試驗中，12支剪力破壞之鋼筋混凝土深梁試體，在試體之正面及背面各貼布一層碳纖維以進行修復，這12支經碳纖維修復之深梁試體再繼續進行第二次剪力強度試驗。藉由深梁試體兩次剪力強度試驗所得剪力強度值之比對，本研究擬探討貼布碳纖維對於鋼筋混凝土深梁之修復成效，以做為工程界設計與施工之參考。

二、試驗

2.1 材料性質

本研究12支鋼筋混凝土深梁試體，涵蓋不同之剪力跨度（a）及不同之鋼筋配置狀況。本研究深梁試體之鋼筋係採用SD 280竹節鋼筋，撓曲鋼筋採用2-#5鋼筋，其降伏應力為374 MPa。本研究12支鋼筋混凝土深梁試體皆採普通強度混凝土，混凝土設計強度為30 MPa，其經混凝土圓柱試體抗壓試驗所得平均強度為31.03 MPa。本研究所用之碳纖維詳細資料如表1所示。其厚度為0.165 mm。

2.2 試驗步驟

第一次剪力強度試驗後，針對各發生剪力破壞之深梁試體完成碳纖維貼佈後，再進行第二次剪力強度試驗，其試體之安裝如圖1所示。以每秒110 kg定速加壓，直到試體發生剪力破壞。

每次試體安裝前，深梁試體左、右兩支承點須預先做記號，萬能試驗機上升承座鋼板與試體之間放置兩個支承深梁試體之100×50×30 mm 承壓鋼鈑，支承深梁試體之承壓鋼鈑中心需依照各試體設計之剪力跨度（a）位置安裝設定，深梁試體上方放置一100×100×30 mm 加載承壓鋼鈑，其中心須與深梁試體中心在同一鉛垂線上。量測位移之LVDT位置須與加載承壓鋼鈑之中心在同一鉛垂線上，如圖1所示。

2.3 第2次試驗之承載行為

No.1試體於極限載重27.5 t (269.5 kN) 作用下，試體因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞。由於No.1試體在貼佈碳纖維前，需先用砂輪機將混凝土表面磨平，原粘結於撓曲鋼筋之應變計連接線不慎被破壞。導致第二次剪力強度試驗時無法讀得撓曲鋼筋應變，也因此無法判定No.1試體之破壞模式。No.2試體於極限載重23.9 t (234.2 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞。極限破壞時，No.2試體之撓曲鋼筋並未降伏，由此可判定No.2試體之破壞模式為剪力破壞。No.3試體第於極限載重42.3 t (414.5 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞，原粘結於撓曲鋼筋之應變計連接線不慎被破壞。導致第二次剪力強度試驗時無法讀得撓曲鋼筋應變，也因此無法判定No.3試體之破壞模式。No.4試體於

極限載重23.8 t (233.2 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞。極限破壞時，No.4試體之撓曲鋼筋並未降伏，由此可判定No.4試體之破壞模式為剪力破壞。No.5試體於極限載重33.7 t (330.3 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞。極限破壞時，No.5試體之撓曲鋼筋並未降伏，由此可判定No.5試體之破壞模式為剪力破壞。No.6試體於極限載重46.5 t (455.7 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞。極限破壞時，No.6試體之撓曲鋼筋並未降伏，由此可判定No.6試體之破壞模式為剪力破壞。No.7試體於極限載重33.6 t (329.3 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞。極限破壞時，No.7試體之撓曲鋼筋並未降伏，由此可判定No.7試體之破壞模式為剪力破壞。No.8試體於極限載重39.5 t (387.1 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞。極限破壞時，No.8試體之撓曲鋼筋並未降伏，由此可判定No.8試體之破壞模式為剪力破壞。No.9試體於極限載重21.5 t (210.7 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞。No.9試體破壞時撓曲鋼筋仍未降伏，故可判定No.9試體之破壞模式為剪力破壞。No.10於極限載重32.3 t (316.5 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起並拉斷而試體宣告破壞。由於No.10試體在貼佈碳纖維前，在以砂輪機將混凝土表面磨平時，不慎破壞了原粘結於撓曲鋼筋之應變計連接線。導致第二次剪力強度試驗時無法讀得撓曲鋼筋應變，故無法判定No.10試體之破壞模式。No.11試體於極限載重28.2 t (276.4 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞。破壞時撓曲鋼筋並未降伏，故可判定No.11試體之破壞模式為剪力破壞。No.12試體於極限載重44.9 t (440.0 kN) 作用下，因對角方向上混凝土壓碎碳纖維鼓起而宣告破壞。由於No.12試體在貼佈碳纖維前，需先用砂輪機將混凝土表面磨平，原粘結於撓曲鋼筋之應變計連接線不慎被破壞。導致第二次剪力強度試驗時無法讀得撓曲鋼筋應變，因此無法判定No.12試體之破壞模式。

2.4 第2次試驗結果

由本研究表2，深梁試體以碳纖維修復後第二次剪力強度試驗結果可知，影響深梁試體剪力強度之因素包括剪跨-深比 a/d 、水平箍筋、垂直箍筋。其中又以剪跨-深比 a/d 為影響經碳纖維修復後深梁剪力強度最重要之變數。表2顯示，除了No.2、No.9及No.11等3支深梁試體外，基本上剪跨-深比 a/d 愈大之深梁其剪力強度愈低，而這3支例外之深梁很有可能是因為試體貼佈碳纖維未盡完善所造成。表2亦顯示，除了No.4試體外含水平箍筋之深梁其剪力強度會較不含水平箍筋深梁之剪力強度高。對於各種不同剪跨-深比之深梁而言，含水平箍筋及垂直箍筋之深梁，除了No.11試體外，一般都會具有最高之剪力強度(表2)。

2.5 碳纖維修復成效

為了探討碳纖維修復成效，本研究表3中詳列各深梁試體第一次剪力強度試驗所得之修復前剪力強度及第二次剪力強度試驗所得深梁經碳纖維修

復後之剪力強度，並定義試體修復後剪力強度除以試體修復前之剪力強度所得之比值為修復成效。表3中，修復成效之平均數為0.93而變異係數為0.18，由此看來本研究於第一次試驗剪壞試體之正面及背面各貼佈一層碳纖維來進行修復，其並無法完全回復深梁之剪力強度。本研究共有No.2、No.4、No.5、No.9及No.11等5支試體之修復成效低於1，其中No.2、No.4及No.9等3支試體之修復成效更是明顯偏低，當然這也有可能是施工時碳纖維貼佈不良所造成，期望將來後續研究能精進碳纖維修復方面之施工技術。

三、測試比對

本研究根據ACI規範[2]及如圖2所示Lu等人[16]之方法來計算鋼筋混凝土深梁之剪力強度。其中，Lu等人[16]之方法其剪力強度$V_{bv,calc}$可計算如下：

$$V_{bv,calc} = C_d \sin\theta \tag{1}$$

其中，C_d為深梁之對角壓力強度，θ為對角壓桿之傾斜角。

藉著試體剪力強度試驗值與ACI規範方法[2]及Lu等人[16]建議之方法計算12支鋼筋混凝土深梁試體之剪力強度，其結果如表4所示。

本研究在表4中定義剪力強度比值，其為深梁剪力強度測試值除以深梁剪力強度之分析值　，此一數值可以幫助了解分析方法之精確度。由本研究深梁剪力強度試驗之測試比對可見，以ACI規範方法[2]預測12支深梁之剪力強度，其所得剪力強度比值之平均數為1.59而變異係數為0.24，而以Lu等人[16]建議之分析方法，其分析所得強度比值之平均數為1.05而變異係數為0.24(表4)。由此可見，ACI規範方法[2]對於經貼布碳纖維修復之深梁皆能獲得保守之剪力強度預測。反之，Lu等人[16]所建議之分析方法對於其中有5支貼布碳纖維修復之深梁會得到不保守之剪力強度預測(表4)。

四、結論

本研究製作12支鋼筋混凝土深梁試體，並先後進行兩次剪力強度試驗，其中第二次剪力強度試驗為針對前篇論文中第一次試驗剪壞之深梁，在試體之正面及背面各貼佈一層碳纖維修復後再進行之試驗。根據本研究碳纖維修復前及碳纖維修復後深梁兩次剪力強度試驗之結果，可以歸納出碳纖維修復對鋼筋混凝土深梁剪力強度行為之影響。本研究採用ACI規範[2]方法及Lu等人[16]建議之方法計算深梁之剪力強度，根據研究所得茲做下列結論：

1. 深梁貼佈一層碳纖維修復後再進行第二次剪力強度試驗，其試驗結果顯示除了No.2、No.9及No.11等3支深梁試體外，基本上a/d愈大之深梁其剪力強度愈低。第二次剪力強度試驗之試驗結果顯示，除了No.4試體外，含水

平箍筋之深梁其剪力強度會較不含水平箍筋深梁之剪力強度高。除了No.11試體外，對於各種不同a/d之深梁而言，同時配置水平箍筋及垂直箍筋之深梁會具有較高之剪力強度。

2. 本研究定義修復成效為修復後試體剪力強度除以修復前試體剪力強度所得之比值。本研究12支試體修復成效之平均數為0.93而變異係數為0.18，由此看來本研究於試體之正面及背面各貼佈一層碳纖維來進行修復，其並無法完全回復深梁之剪力強度。

3. 對於經貼佈碳纖維修復之深梁而言，ACI規範方法[2]皆能獲得保守之剪力強度預測。而Lu等人[16]所建議之分析方法對於經貼佈碳纖維修復之深梁，則有些試體會得到不保守之剪力強度預測。

參考文獻

1. ASCE-ACI Committee 426, “The shear strength of reinforced concrete members,” Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 99, No. ST6, pp. 1091-1187 (1973).

2. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 465 pp. (2008).

3. 中國土木水利工程學會，混凝土工程設計規範解說(土木401-96)，科技圖書股份有限公司，台北(2007).

4. Aguilar G., Matamoros, A. B., Parra-Montesinos, G. J., Ramirez, J. A. and Wight, J. K., “Experimental evaluation of design procedures for shear strength of deep reinforced concrete beams”, ACI Structural Journal, Vol. 99(4), 539-548. (2002)

5. Smith, K. N. and Vantsiotis, A. S., “Shear strength of deep beams”, ACI Journal, Vol. 79, No. 3, 201-213. (1982)

6. Tan, K. H., Kong, F. K., Teng, S. and Guan, L., “High-strength concrete deep beams with effective span and shear span variations”, ACI Structural Journal, Vol. 92, No. 4, 395-405. (1995)

7. Tan, K. H., Kong, F. K., Teng, S. and Weng, L. W., “Effect of web reinforcement on high-strength concrete deep beams”, ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 5, 572-582. (1997)

8. Tan, K. H., Teng, S., Kong, F. K. and Lu, H.Y., “Main tension steel in high-strength concrete deep and short beams”, ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 6, 752-768. (1997)

9. 林英俊，林總仁，「不含剪力筋時高強度混凝土短梁之剪力強度」，中國土木水利工程學刊，第三卷，第二期，第167-174頁(1991)。

10. 洪克倫，「高強度混凝土深樑之剪力行為研究」，碩士論文，國立成功大

學土木工程研究所，台南(1993)。
11. 陳俊綺,「薄腹版型高強度混凝土簡支深梁之剪力行為研究」,碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，台南(1994)。
12. 吳賢杰,「兩跨連續之深樑承力行為研究」,碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，台南(1995)。
13. 林喻峰,「兩跨連續高強度混凝土深梁之承力行為研究」,碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，台南(1995)。
14. 謝明杰,「剪跨與深度比不同時深梁之剪力強度」,碩士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，台北(2004)。
15. 蔡耀賢,「高強度鋼筋混凝土深梁之剪力強度」,碩士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，台北(2004)。
16. Lu, W. Y., Lin, I. J. and Yu, H. W., "Shear Strength of Reinforced Concrete Deep Beams," ACI Structural Journal, Vol. 110, No. 4, pp. 371-380. (2013)

表 1 CFRP之性質(Properties of CFRP)

抗拉強度	每層厚度	彈性模數	單位重	極限應變
3900 MPa	0.166 mm	230000 MPa	300 g/m^2	0.015

表 2 第2次剪力試驗之結果(Results in the second phase test)

試體編號	f_c' (MPa)	a/d	主鋼筋	水平箍筋	垂直箍筋	P_u (kN)	$V_{bv,test}$ (kN)	破壞模式
1	31.03	1.11	2-#5	-	-	269.50	134.75	無法判定
2	31.03	0.74	2-#5	-	-	234.22	117.11	剪力破壞
3	31.03	0.56	2-#5	-	-	414.54	207.27	無法判定
4	31.03	1.11	2-#5	3-#3	-	233.24	116.62	剪力破壞
5	31.03	0.93	2-#5	3-#3	-	330.26	165.13	剪力破壞
6	31.03	0.56	2-#5	3-#3	-	455.70	227.85	剪力破壞
7	31.03	0.93	2-#5	-	1-#3	329.28	164.64	剪力破壞
8	31.03	0.74	2-#5	-	1-#3	387.10	193.55	剪力破壞
9	31.03	0.56	2-#5	-	1-#3	210.70	105.35	剪力破壞
10	31.03	1.11	2-#5	3-#3	1-#3	316.54	158.27	無法判定
11	31.03	0.93	2-#5	3-#3	1-#3	276.36	138.18	剪力破壞
12	31.03	0.74	2-#5	3-#3	1-#3	440.02	220.01	無法判定

表3　貼CFRP之修復成效(Repairing effectiveness)

試體編號	f_c' (MPa)	a/d	主鋼筋	水平箍筋	垂直箍筋	$V_{bv,test}$ (kN)		修復成效[+]
						修復前	修復後	
1	31.03	1.11	2-#5	-	-	133.3	134.8	1.01
2	31.03	0.74	2-#5	-	-	175.4	117.1	0.67
3	31.03	0.56	2-#5	-	-	200.9	207.3	1.03
4	31.03	1.11	2-#5	3-#3	-	142.1	116.6	0.82
5	31.03	0.93	2-#5	3-#3	-	171.0	165.1	0.97
6	31.03	0.56	2-#5	3-#3	-	227.4	227.9	1.00
7	31.03	0.93	2-#5	-	1-#3	161.7	164.6	1.02
8	31.03	0.74	2-#5	-	1-#3	177.4	193.6	1.09
9	31.03	0.56	2-#5	-	1-#3	181.8	105.4	0.58
10	31.03	1.11	2-#5	3-#3	1-#3	150.9	158.3	1.05
11	31.03	0.93	2-#5	3-#3	1-#3	165.1	138.2	0.84
12	31.03	0.74	2-#5	3-#3	1-#3	205.3	220.0	1.07
							AVG	**0.93**
							COV	**0.18**

表 4 第2次試驗之測試比對(Experimental verification: Second phase)

試體編號	a/d	水平箍筋	垂直箍筋	$V_{bv,test}$ (kN)	$V_{bv,calc}$ (kN)		$V_{bv,test}/V_{bv,calc}$	
					ACI 規範[2]	Lu 等人[16]	ACI 規範[2]	Lu 等人[16]
1	1.11	-	-	134.8	81.25	118.49	1.66	1.14
2	0.74	-	-	117.1	96.86	146.11	1.21	0.80
3	0.56	-	-	207.3	101.14	160.71	2.05	1.29
4	1.11	3-#3	-	116.6	101.56	125.97	1.15	0.93
5	0.93	3-#3	-	165.1	105.50	146.34	1.56	1.13
6	0.56	3-#3	-	227.9	105.50	250.03	2.16	0.91
7	0.93	-	1-#3	164.6	105.50	142.88	1.56	1.15
8	0.74	-	1-#3	193.6	105.50	151.75	1.84	1.28
9	0.56	-	1-#3	105.4	105.50	161.35	1.00	0.65
10	1.11	3-#3	1-#3	158.3	101.56	130.24	1.56	1.22
11	0.93	3-#3	1-#3	138.2	105.50	157.55	1.31	0.88
12	0.74	3-#3	1-#3	220.0	105.50	183.31	2.09	1.20
						AVG	**1.59**	**1.05**
						COV	**0.24**	**0.20**

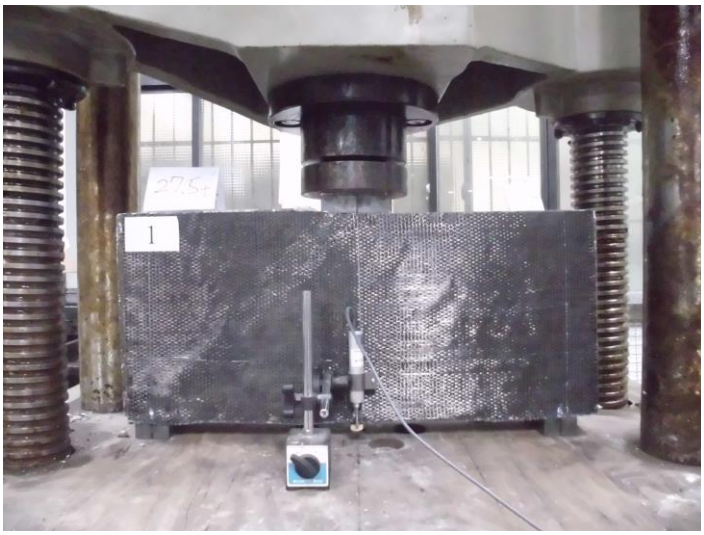

圖 1 試體加載安裝圖

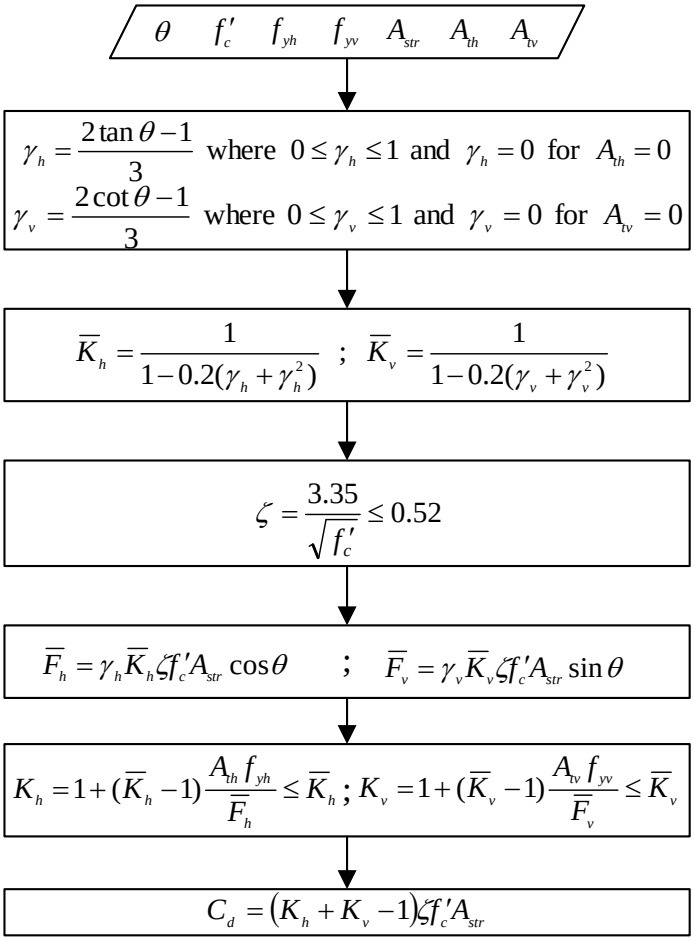

圖 2 深梁對角壓力強度之分析流程圖