

以低壓灌注環氧樹脂修復高強度混凝土含開孔深 梁

*李岱融(Tai-Jung Lee)

中國科技大學室內設計研究所

本研究旨在以低壓灌注環氧樹脂(LPEI)方式修復含開孔深梁。共製作12支含開孔深梁進行兩次剪力強度試驗。第一次試驗前，12支梁在試體兩面包覆兩層寬度40 mm之CFRP，6支沿水平方向補強，另6支沿垂直方向補強。本研究於第1次試驗後，選取6支剪力破壞程度較不嚴重之含開孔深梁，以LPEI修復並再次進行試驗，比較兩次試驗結果得知，以LPEI修復之試體平均可提升18%剪力強度。

關鍵詞：深梁、梁腹開孔、剪力強度、碳纖維、低壓灌注環氧樹脂

HIGH-STRENGTH CONCRETE DEEP BEAMS WITH WEB OPENINGS REPAIRED BY LOW PRESSURE EPOXY INJECTION

Abstract

The objective of this study is to investigate the repairing effectiveness of low pressure epoxy injection (LPEI) on the deep beams with web openings. A total of 12 high-strength concrete deep beams with web openings were tested. All beams were wrapped with two layers of 40 mm wide CFRP strip on both sides of specimens, six of them strengthened in the horizontal direction and the others in the vertical direction. In the first phase of test, all beams were failed by shear. After the first phase of test, 6 deep beams with web openings were chosen to repair and then tested once more. The results in the second phase of test indicate that the shear strengths of CFRP strengthened beams can be enhanced about 18 % by LPEI.

Keywords : deep beams; web openings; shear strengths; carbon fiber reinforced plastics (CFRP) ; low pressure epoxy injection (LPEI)

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。本研究共製作12支高強度混凝土含開孔深梁試體，嘗試以低壓灌注環氧樹脂(LPEI)之方式來修復剪力破壞之含開孔深梁。

二、試驗規劃

2.1 試體詳細資料

典型之含開孔深梁之試體設計如圖1所示，其中圖1(a)於開孔上方及開孔下方沿著水平方向各包覆2層40 mm寬之CFRP。圖1(b)則分別於深梁兩個開孔之正上方及正下方，沿著垂直方向各包覆2層40 mm寬之CFRP。圖1中含開孔深梁之寬度(b)、深梁之全深度(h)及有效深度(d)分別為100 mm、300 mm及275 mm。混凝土之抗壓強度(f'_c)、開孔寬度與剪力跨度(a)之比值(m_h)、開孔深度與深梁全深度之比值(m_v)、開孔之水平位置係數(k_h)及垂直位置係數(k_v)，如表1所示。表1中試體之編號分成4部份，第1部份為混凝土之強度，H代表高強度混凝土，第2部份為開孔尺寸，S代表小開孔(尺寸為60×40 mm)，L代表大開孔(尺寸為68×68 mm)，第3部份為開孔高度，U、M及D分別代表高孔、中孔及低孔，第4部份為碳纖維配置狀況，O0、H2及V2分別代表無包覆碳纖維、水平方向包覆兩層碳纖維及垂直方向包覆兩層碳纖維。圖1中撓曲鋼筋係採用2-#5鋼筋，深梁開孔上方 $y_o=25$ mm處則配置2-#4水平鋼筋。深梁之撓曲鋼筋及開孔上方水平鋼筋之兩端皆各焊接一100×50×6之鋼板作為錨定(圖1)。

2.2 材料性質

鋼筋之性質詳如表2所示，其中鋼筋降伏應力除以鋼筋彈性模數200000 MPa，可算得#4及#5鋼筋之降伏點應變別為0.0016及0.0021。本研究高強度混凝土之抗壓強度平均值為101.4 MPa(表3)。碳纖維材料之性質詳如表4，碳纖維之抗拉強度、每層之厚度及彈性模數分別為3900 MPa、0.166 mm及230000 MPa。採用兩點加載方式進行含開孔深梁之剪力強度試驗，顧及加載時施力點及支承點可能產生混凝土局部壓碎之現象，各試體載重施力點及支承點皆預埋4塊100×50×6之鋼板(圖1)，以避免試體因混凝土局部壓碎而發生早夭型破壞。表5中，低壓灌注環氧樹脂之抗拉強度高達48.7 MPa約為其抗壓強度70.5 MPa之70%。

2.3 試驗步驟

如圖1所示之含開孔深梁試體，其開孔上方水平鋼筋之A及B兩點及撓曲鋼筋之C點分別粘貼鋼筋應變計，以便試體在進行剪力強度試驗時，量測鋼

筋應變。各試體在測試之前先塗上白色水泥漆，以便試驗進行時觀察裂縫分佈情形。試體下方安裝一LVDT以量測變位。試驗進行時，載重經由SHIMADZU 100噸萬能試驗機往下加壓，在加載過程中約每隔15噸暫停加壓，以便繪製裂縫分佈。

三、試驗結果

3.1 第1次試驗

本研究第1次剪力試驗12支含開孔深梁試體之試驗觀察顯示，在開孔角落附近形成之初始裂縫並沒有隨著載重之增加而繼續發展，如圖2所示。但隨著作用剪力之增加，由於深梁在其自然傳力路徑上受到梁腹開孔之干擾，迫使含開孔深梁之剪力傳遞路徑必須繞過開孔，如此將導致深梁之剪力傳遞路徑需分流為上、下兩個剪力傳遞路徑Kong and Sharp (1973, 1977)，故而終止此項開孔角落附近初始裂縫之發展(圖2)。當載重值約超過極限載重之二分之一時，含開孔深梁在跨度中央附近會有撓曲裂縫形成。在沿著梁腹開孔上方及梁腹開孔下方之傳力路徑上會開始有對角裂縫形成。隨著作用剪力之繼續增加，梁腹開孔上方及梁腹開孔下方會有愈來愈多之對角裂縫形成，且原先已存在之對角裂縫會繼續延伸，裂縫之寬度也會隨著作用剪力之增加而加寬。圖2(a)水平方向包覆兩層CFRP試體之破壞裂縫圖可見，其裂縫及混凝土剝落現象皆侷限在CFRP包覆層之上側及下側。而圖2(b)垂直方向包覆CFRP試體之破壞裂縫圖顯示，其裂縫及混凝土剝落現象皆侷限在CFRP包覆層之左側及右側。

第1次剪力試驗之結果如表5所示。本研究第1次剪力試驗中，12支含開孔深梁之破壞模式皆為剪力破壞。表5顯示，小開孔深梁之剪力強度，較大開孔深梁之剪力強度高。根據表5之測試數據可算得開孔尺寸 60×40 mm之深梁較開孔尺寸 68×68 mm之深梁約高出18%之剪力強度。

3.2 第2次試驗

完成第1次剪力試驗後，本研究選取6支破壞程度較不嚴重之試體以低壓灌注環氧樹脂(LPEI)來進行修復。上述6支經修復之試體於自然養護14天後，進行第2次剪力強度試驗，以探討修復成效。表6顯示以低壓灌注環氧樹脂修復試體之試驗結果，本文定義含開孔深梁之修復指數為第2次試驗所得之剪力強度除以第1次試驗所得之剪力強度。由表6之修復指數平均值為1.18而變異係數為0.06看來，對於原先已包覆2層CFRP之試體發生剪力破壞後，可藉著低壓灌注環氧樹脂修復試體，而達到補強之效果(表6)。圖3為以低壓灌注環氧樹脂修復試體之載重與變位曲線比較圖，圖3中實線及虛線分別為第1次試驗及第2次試驗所得之載重與變位曲線。圖3顯示，試體經低壓灌注環氧樹脂修復後，其極限載重增加。

四、測試比對

由於目前設計規範(ACI, 2011)尚未有針對含開孔深梁剪力強度之計算

方法可供參考，本研究採用Kong and Sharp (1977)所提出之經驗公式來計算含開孔深梁之剪力強度：

$$V_{bv,calc} = V_c + V_s = C_1 \left(1 - \frac{0.35k_1x}{k_2h} \right) f_t b k_2 h + \sum \lambda C_2 A \frac{y_1}{h} \sin^2 \alpha_1 \quad (1)$$

其中， V_c 為混凝土所貢獻之剪力強度， V_s 為鋼筋所貢獻之剪力強度， C_1 為試驗常數，對於常重混凝土取 $C_1=1.4$ ，對於輕質混凝土取 $C_1=1.35$ ； k_1 及 k_2 為與深梁開孔位置有關之係數(圖4)， f_t 為混凝土圓柱劈裂抗拉強度； b 為深梁寬度； C_2 為與鋼筋表面狀況有關之試驗常數，對於竹節鋼筋取 $C_2=300$ MPa，對於光面鋼筋取 $C_2=130$ MPa； λ 為試驗常數，對於剪力鋼筋取 $\lambda=1.5$ ，對於撓曲主鋼筋取 $\lambda=1.0$ ； A 為每組穿越對角裂縫鋼筋之截面積； y_1 為鋼筋與對角裂縫相交點之深度(圖4)； α_1 為鋼筋與對角裂縫之夾角(圖4)。本文以Kong and Sharp (1977)之經驗公式做為分析工具，來預測高強度混凝土含開孔深梁之剪力強度。本文在表7及8中定義含開孔深梁剪力強度之強度比值($V_{bv,test}/V_{bv,calc}$)，其為含開孔深梁剪力強度之測試值除以含開孔深梁剪力強度之分析值，此一數值可以幫助了解Kong and Sharp (1977)經驗公式之精確度。由表7可知，Kong and Sharp (1977)之經驗公式對本研究高強度混凝土含開孔深梁試體第1次剪力試驗能得到相當不錯的預測精度，其強度比之平均數為1.33而變異係數為0.08。對於不同開孔尺寸、不同開孔高度及不同碳纖維補強方式，Kong and Sharp (1977)之經驗公式對於高強度混凝土含開孔深梁皆能得到相當一致且偏於保守地剪力強度預測(表8)。對於第2次剪力試驗而言，以Kong and Sharp (1977)之經驗公式來預測修復後含開孔深梁之剪力強度仍屬可行(表8)。

五、結論

本研究共製作12支含開孔深梁進行兩次剪力強度試驗，第1次試驗前試體兩面包覆兩層寬度40 mm之CFRP，6支沿水平方向補強，另6支沿垂直方向補強。本研究於第1次試驗後選取6支試體以低壓灌注環氧樹脂(LPEI)方式進行修復，並於養護14天後進行第2次剪力試驗。根據研究所得，茲做下列結論：

1. 試體發生剪力破壞後，可藉著低壓灌注環氧樹脂修復，此修復方式可提升18%之剪力強度而達到補強之效果。
2. Kong and Sharp (1977)之經驗公式對於高強度混凝土含開孔深梁皆能得到相當一致且偏於保守地剪力強度預測。對於第2次剪力試驗而言，以Kong and Sharp (1977)之經驗公式來預測修復後含開孔深梁之剪力強度仍屬可行。

參考文獻

American Concrete Institute (2011), “Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and Commentary (ACI 318R-11)”, Farmington Hills, Mich.

Kong, F.K. and Sharp, G.R. (1973), “Shear strength of lightweight reinforced concrete deep beams with web openings”, The Structural Engineer, 51(8), 267-275.

Kong, F.K. and Sharp, G.R. (1977), “Structural idealization for deep beams with web openings”, Magazine of Concrete Research, 29(99), 81-91.

表1 試體詳細資料(Specimen details)

試體編號	f'_c (MPa)	CFRP 之配置	m_h	m_v	k_h	k_v
HSUH2	101.4	H2	0.511	0.133	0.213	0.500
HSMH2	101.4	H2	0.511	0.133	0.213	0.433
HSDH2	101.4	H2	0.511	0.133	0.213	0.367
HSUV2	101.4	V2	0.511	0.133	0.213	0.500
HSMV2	101.4	V2	0.511	0.133	0.213	0.433
HSDV2	101.4	V2	0.511	0.133	0.213	0.367
HLUH2	101.4	H2	0.579	0.227	0.145	0.500
HLMH2	101.4	H2	0.579	0.227	0.145	0.387
HLDH2	101.4	H2	0.579	0.227	0.145	0.273
HLUV2	101.4	V2	0.579	0.227	0.145	0.500
HLMV2	101.4	V2	0.579	0.227	0.145	0.387
HLDV2	101.4	V2	0.579	0.227	0.145	0.273

H2：水平方向包覆兩層CFRP

V2：垂直方向包覆兩層CFRP

表 2 鋼筋之性質(Properties of reinforcement)

號數	f_y (MPa)	ϵ_y	f_u (MPa)	備註
#4	327 MPa	0.0016	467 MPa	開口上方之水平鋼筋
#5	414 MPa	0.0021	579 MPa	撓曲鋼筋

表 3 混凝土之性質(Properties of concrete)

設計強度	平均強度	水膠比	坍度	粗骨材最大粒徑	單位重
100 MPa	101.4 MPa	0.20	250 mm	13 mm	2491 kg/m ³

表 4 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 5 第1次剪力試驗之結果(Results in the first phase test)

試體 編號	$m_h a \times m_v h$	$k_v h^+$ mm	CFRP 之 配置 ⁺⁺	$V_{bv, test}$ (kN)	破壞模式
HSUH2	60×40 mm	150	H2	265.1	剪力破壞
HSMH2	60×40 mm	130	H2	276.4	剪力破壞
HSDH2	60×40 mm	110	H2	282.7	剪力破壞
HSUV2	60×40 mm	150	V2	286.2	剪力破壞
HSMV2	60×40 mm	130	V2	278.3	剪力破壞
HSDV2	60×40 mm	110	V2	270.0	剪力破壞
HLUH2	68×68 mm	150	H2	241.1	剪力破壞
HLMH2	68×68 mm	116	H2	238.1	剪力破壞
HLDH2	68×68 mm	82	H2	217.1	剪力破壞
HLUV2	68×68 mm	150	V2	234.7	剪力破壞
HLMV2	68×68 mm	116	V2	238.1	剪力破壞
HLDV2	68×68 mm	82	V2	233.7	剪力破壞

H2：水平方向包覆兩層CFRP

V2：垂直方向包覆兩層CFRP

表6 低壓灌注環氧樹脂之修復成效(Repairing effectiveness)

試體編號	$V_{bv, test}$ kN	$V_{bv, test}$ kN	修復指數
	第1次試驗	第2次試驗	
HSUH2	265.09	292.53	1.10
HSUV2	286.16	328.3	1.15
HSMV2	278.32	340.06	1.22
HLUV2	234.71	266.56	1.14
HLMV2	238.14	297.43	1.25
HLDV2	233.73	284.2	1.22
		AVG	1.18
		COV	0.06

表 7 第1次試驗之測試比對(Experimental verification: First phase test)

試體編號	開孔尺寸 $m_h a \times m_v h$	開孔高度 $k_v h$	CFRP	$V_{bv, test}$ kN	$V_{bv, calc}$ kN	$\frac{V_{bv, test}}{V_{bv, calc}}$
HSUH2	60×40 mm	150 mm	H2	265.1	217.6	1.22
HSMH2	60×40 mm	130 mm	H2	276.4	207.9	1.33
HSDH2	60×40 mm	110 mm	H2	282.7	196.3	1.44
HSUV2	60×40 mm	150 mm	V2	286.2	210.1	1.36
HSMV2	60×40 mm	130 mm	V2	278.3	200.3	1.39
HSDV2	60×40 mm	110 mm	V2	270.0	189.0	1.43
HLUH2	68×68 mm	150 mm	H2	241.1	205.2	1.18
HLMH2	68×68 mm	116 mm	H2	238.1	186.5	1.28
HLDH2	68×68 mm	82 mm	H2	217.1	161.0	1.35
HLUV2	68×68 mm	150 mm	V2	234.7	198.5	1.18
HLMV2	68×68 mm	116 mm	V2	238.1	180.0	1.32
HLDV2	68×68 mm	82 mm	V2	233.7	156.1	1.50
Total					AVG	1.33
12					COV	0.08

表 8 第2次試驗之測試比對(Experimental verification: Second phase test)

試體	$m_h a \times m_v h$ mm	$k_v h$ mm	修復方法	$V_{bv, test}$ kN	$V_{bv, calc}$ kN	$\frac{V_{bv, test}}{V_{bv, calc}}$
HSUH2	60×40	150	LPEI	292.5	217.6	1.34
HSUV2	60×40	150	LPEI	328.3	210.1	1.56
HSMV2	60×40	130	LPEI	340.1	200.3	1.70
HLUV2	68×68	150	LPEI	266.6	198.5	1.34
HLMV2	68×68	116	LPEI	297.4	180.0	1.65
HLDV2	68×68	82	LPEI	284.2	156.1	1.82
Total					AVG	1.57
6					COV	0.12

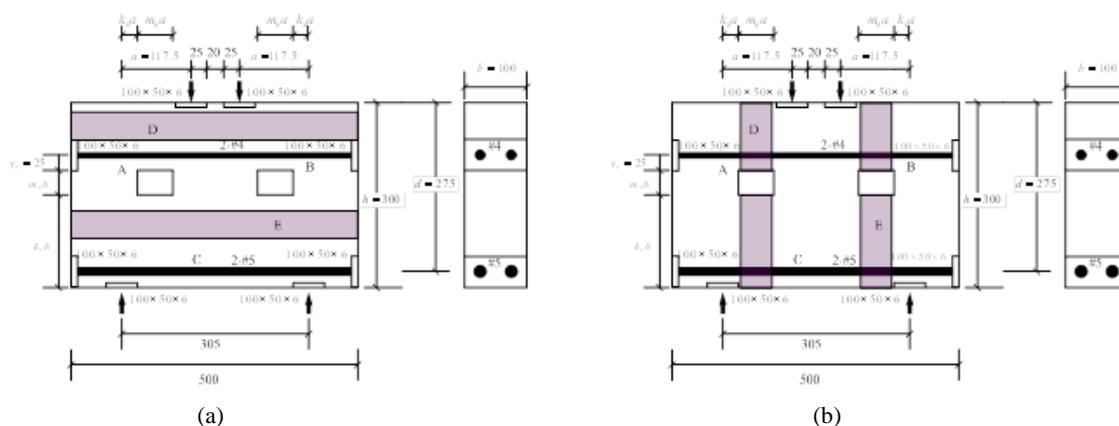


圖 1 第1次試驗之含開孔深梁試體 (a) 水平方向包覆兩層寬度40 mm之CFRP (b) 垂直方向包覆兩層寬度40 mm之CFRP

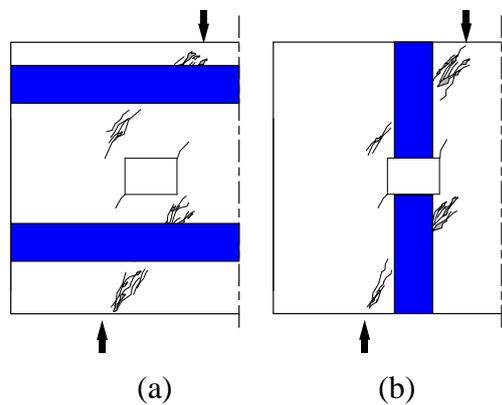


圖 2 第1次試驗之典型破壞裂縫圖

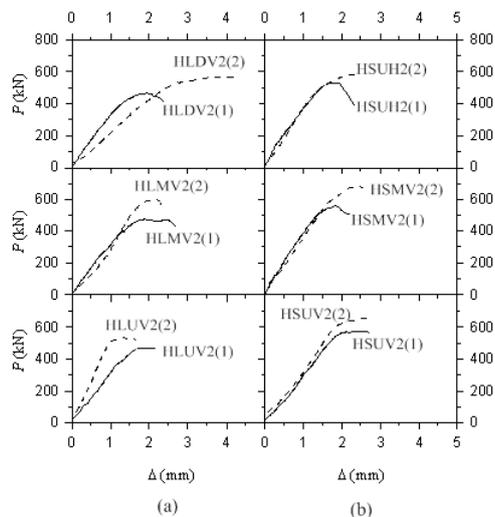


圖 3 載重與變位曲線比較圖

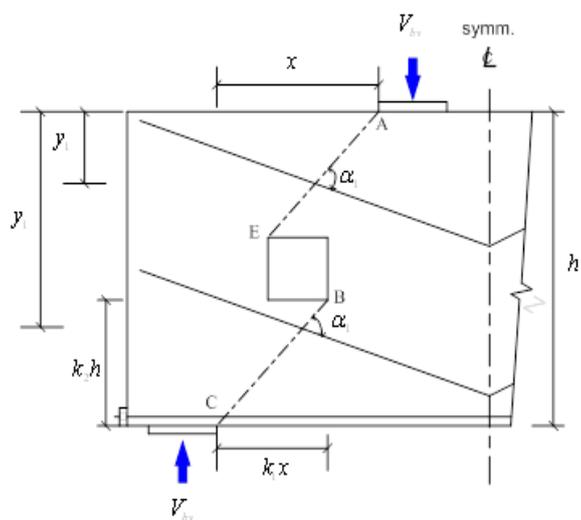


圖 4 Kong and Sharp (1977)公式示意圖