

包覆碳纖維對含開口深梁剪力強度之影響

呂文堯^{1*} 游新旺² 陳俊良¹ 黃淑敏²

¹中國科技大學室內設計系

²中國科技大學土木與防災設計系

摘 要

本研究共製作 4 支鋼筋混凝土含開口深梁進行試驗，以探討包覆碳纖維對含開口深梁剪力強度之影響。試驗結果顯示，包覆碳纖維之高強度混凝土含開口深梁之剪力強度約較未包覆碳纖維者高出 10 % 剪力強度。試驗結果亦顯示，包覆碳纖維之高強度混凝土含開口深梁，其撓曲鋼筋在極限狀態時已降伏。本文也建議了一分析方法以評估包覆碳纖維含開口深梁之剪力強度。經由試驗值與分析值之比對，所建議之分析方法可保守地計算包覆碳纖維含開口深梁之剪力強度。

關鍵詞：鋼筋混凝土，深梁，梁腹開口，碳纖維，剪力強度

Effect of the Carbon Fiber Reinforced Plastics Wrappings on the Shear Strength of Deep Beam with web Openings

Wen-Yao Lu^{1*}, Hsin-Wan Yu², Chun-Liang Chen¹, and Shu-Min Huang²

¹Department of Interior Design, China University of Technology

²Department of Civil and Hazard Mitigation Design, China University of Technology

ABSTRACT

Four specimens were tested to study the effect of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) wrappings on the shear strength of reinforced concrete deep beam with web openings. Test results indicate that the shear strengths of high-strength concrete deep beam with CFRP wrappings are about 10 % more than that without CFRP wrappings. Test results also indicate that flexural bars of high-strength concrete deep beams with CFRP wrappings are yielded at the ultimate state. An analytical method for determining the shear strengths of reinforced concrete deep beams with web openings and CFRP wrappings is also proposed in this paper. The shear strengths predicted by the proposed method are compared with test results. The comparison shows that the proposed method can conservatively predict the shear strengths of reinforced concrete deep beams with web openings and CFRP wrappings.

Keywords: reinforced concrete, deep beam, web openings, carbon fiber reinforced plastics (CFRP), shear strength

一、前言

一般常見鋼筋混凝土深梁為了讓水電管道通過而在其梁腹開口，此即所謂鋼筋混凝土含開口深梁。含開口深梁為剪力強度主控的桿件[1-6]，有鑒於剪力破壞為一無預警效果之脆性破壞，其確為工程設計所最不樂見之破壞模式。故提高含開口深梁之剪力強度確為一重要之研究課題。2012年 Lu et al. [7]就藉著包覆碳纖維而有效地提高鋼筋混凝土托架之剪力強度。

對於不含開口之鋼筋混凝土深梁，外作用剪力係沿著其自然傳力路徑(也就是沿著深梁載重施力點與支承間之最短路徑)傳遞。Kong 和 Sharp[1,2]之研究顯示，若梁腹開口不在深梁載重施力點與支承間之自然傳力路徑上，則梁腹開口並不會導致含開口深梁剪力強度之降低，而可視為不含開口深梁，此不含開口深梁之剪力強度行為已為眾所周知，其並不在本研究之研討範圍。

本研究共製作 4 支鋼筋混凝土含開口深梁試體，並針對其中兩支試體包覆碳纖維，期望能藉著碳纖維補強來提高含開口深梁之剪力強度。2011 年呂等人[6]針對無包覆碳纖維之含開口深梁提出剪力強度分析方法。接續呂等人[6]之研究，本文將針對包覆碳纖維之含開口深梁提出一分析方法以預測其剪力強度。本研究首先將報告剪力強度之試驗結果，然後介紹剪力強度之分析程序及試驗值和分析值之比較結果。

二、試驗規畫

含開口深梁之試體設計如圖 1 所示，其中圖 1(a)為無包覆碳纖維之含開口深梁。圖 1(b)之含開口深梁則分別於開口上方及開口下方沿著水平方向各包覆 4 層碳纖維。圖 1(c)則分別於深梁兩個開口之正上方及正下方，沿著垂直方向各包覆 4 層碳纖維。碳纖維的使用寬度為 40 mm。本研究圖 1 之含開口深梁試體總長度皆為 500 mm，寬度 b 、深度 h 及有效深度 d 則分別為 100 mm、300 mm 及 275 mm，剪力跨度 a 為 117.5 mm。每支深梁皆含 2 個尺寸為 $m_1 a \times m_2 h = 60 \times 40$ mm 之矩形開口，其中開口之水平尺寸係數 m_1 及開口之垂直尺寸係數 m_2 分別為 0.511 及 0.133，開口之水平

位置係數 k_1 及開口之垂直位置係數 k_2 分別為 0.277 及 0.433。

圖 1 中含開口深梁試體之撓曲鋼筋係採用 2-#5 鋼筋，深梁開口上方 $y_o = 25$ mm 處則配置 2-#4 水平鋼筋。撓曲鋼筋及開口上方水平鋼筋之兩端皆各焊接一 $100 \times 50 \times 6$ mm 之鋼板作為錨定。鋼筋之性質詳如表 1 所示。

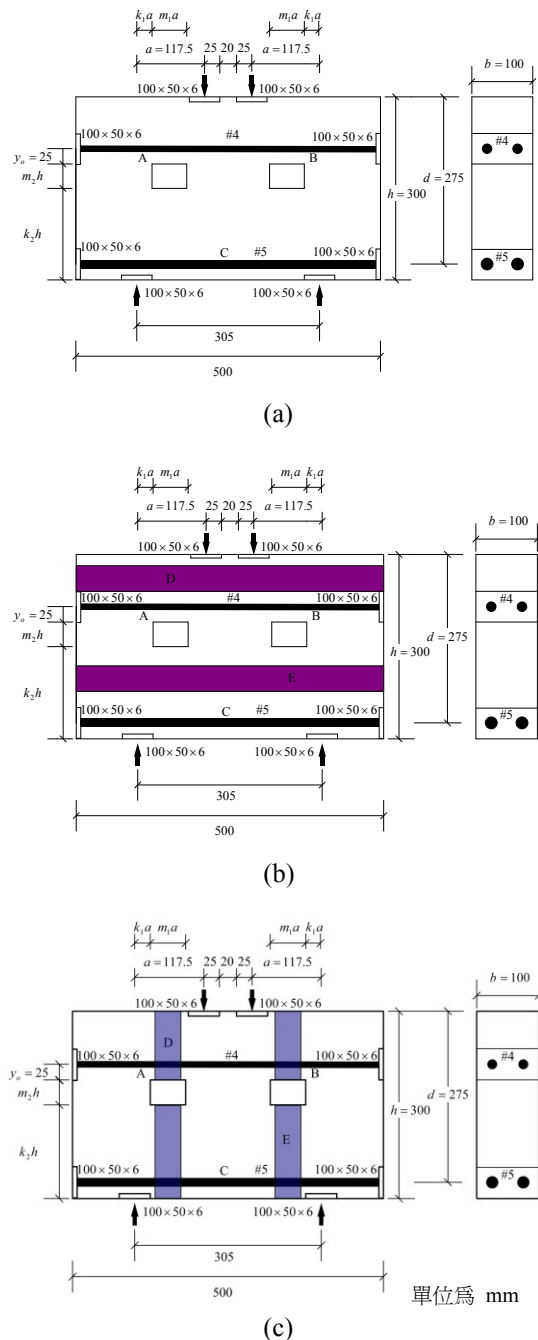


圖 1. 含開口深梁試體(a) LO 及 HO(b) HH(c) HV

表 1. 鋼筋性質

號數	降伏應力	備註
#4	328 MPa	開口上方水平鋼筋
#5	374 MPa	撓曲鋼筋

如圖 1 所示之含開口深梁試體，其開口上方水平鋼筋之 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。如表 2 所示，本研究採用兩種不同強度混凝土，普通強度混凝土只用於製作無包覆碳纖維之含開口深梁(圖 1a)，其抗壓強度為 27.0 MPa (表 2)。高強度混凝土除了用於製作無包覆碳纖維之含開口深梁(圖 1a)外，也用於製作沿水平方向閉合環繞 4 層碳纖維(圖 1b)及沿垂直方向閉合環繞 4 層碳纖維(圖 1c)之含開口深梁。高強度混凝土之抗壓強度為 101.4 MPa (表 2)。碳纖維材料之性質詳如表 3。本研究在圖 1(b)及圖 1(c)之碳纖維包覆層表面之 D 及 E 兩點粘貼應變計，以便試體在進行剪力強度試驗時量測碳纖維應變。本研究採用兩點加載方式進行含開口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 個 100×50×6 mm 之鋼鈹(圖 1)以避免試體因混凝土局部壓碎而發生早天型破壞。

表 2. 混凝土之詳細資料

抗壓強度 MPa	水膠比	坍度 mm	骨材最 大粒徑	單位重量 kgf/m ³
101.4	0.20	250	13 mm	2491
27.0	0.41	200	25 mm	2344

表 3. 碳纖維性質

抗拉強度 (MPa)	厚度 (mm)	彈性模數 (MPa)	破壞時伸長率
3900	0.166	230000	1.5 %

表 4 中試體編號第一個字母係用以區分混凝土強度，字母 L 代表試體係採用普通強度混凝土，字母 H 則代表高強度混凝土。試體編號第二個字母則用以辨識碳纖維補強方

式，O 代表無包覆碳纖維，H 代表沿水平方向包覆 4 層碳纖維如圖 1(b)所示，V 代表沿垂直方向包覆 4 層碳纖維如圖 1(c)所示。表 4 中 f'_c 為混凝土抗壓強度， A_{CFRP} 為碳纖維之截面積。

表 4. 試體之詳細資料

試體 編號	f'_c (MPa)	包覆碳纖維	A_{CFRP} mm ²
LO	27.0	無	0
HO	101.4	無	0
HH	101.4	水平閉合環繞 4 層	53.12
HV	101.4	垂直閉合環繞 4 層	53.12

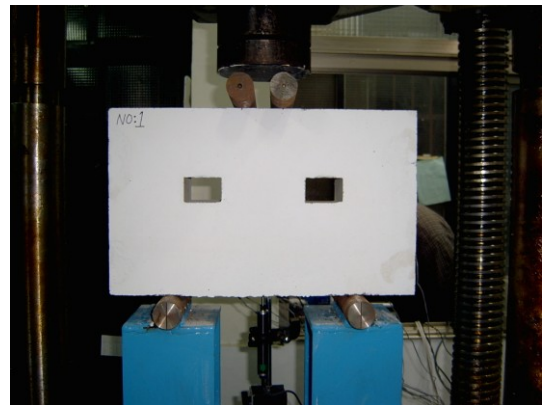


圖 2. 含開口深梁試體加載裝置

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。試體之加載裝置如圖 2 所示，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

當載重不超過試體極限載重的四分之一時，4 支含開口深梁試體皆沒有明顯之裂縫產生。載重超過四分之一極限載重以後，含開口深梁試體之初始裂縫會在沿著深梁自然傳力路徑上之開口角落附近形成(圖 3)。值得注意的是，本研究 4 支含開口深梁試體之試驗觀察亦顯示，在開口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。推測造成此現象的原因，可能是含開口深梁對於載重之傳

遞，剛開始時仍然是沿著深梁之自然傳力路徑傳遞(也就是沿著深梁載重施力點與支承間之

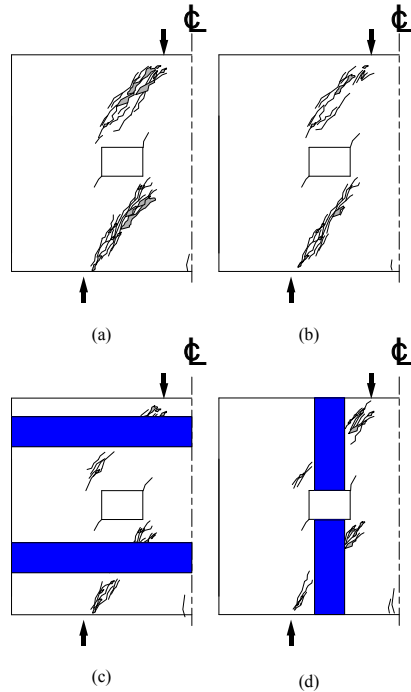


圖 3. 試體破壞時裂縫分佈圖(a) LO (b) HO (c) HH (d) HV

最短路徑傳遞)，如圖 3 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口之干擾，迫使含開口深梁之剪力傳遞路徑必須繞過開口，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[6]，故而終止此項開口角落附近初始裂縫之發展(圖 3)。試驗之觀察顯示，當載重值超過極限載重的三分之一以上，含開口深梁在跨度中央附近會有撓曲裂縫形成。且如圖 3(a)及(b)所示，無包覆碳纖維之 LO 及 HO 試體在沿著梁腹開口上方及梁腹開口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，梁腹開口上方及梁腹開口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。此時由於對角裂縫之間的混凝土仍可傳遞壓力，故含開口深梁並不會立即破壞。最後無包覆碳纖維之 LO 及 HO 試體在極限剪力作用下，因其對角裂縫之間的混凝土被擠碎而宣告破壞。包覆碳纖維之 HH 及 HV 試體，其剪力傳遞行為與無包覆碳纖維試體之剪力傳遞行為類似。但圖 3(c)及圖 3(d)包覆碳纖

維試體之破壞裂縫圖顯示，碳纖維包覆層所在位置因裂縫不易穿過，導致裂縫中斷而分布於包覆層兩側。由圖 3(c) HH 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碳纖維包覆層之上側及下側。而圖 3(d) HV 試體之裂縫及混凝土剝落現象皆侷限在碳纖維包覆層之左側及右側。

載重與鋼筋之應變曲線如圖 4 所示，圖中曲線 A,B 為左右兩側開口上方之載重-鋼筋應變圖，曲線 C 為撓曲鋼筋之載重-鋼筋應變圖。由圖示變化可以顯示試體在進行剪力強度試驗時鋼筋之受力狀況。由圖 4(a)之無包覆碳纖維之普通強度混凝土試體 LO 之載重與鋼筋應變曲線可知，極限載重作用下 LO 試體開口

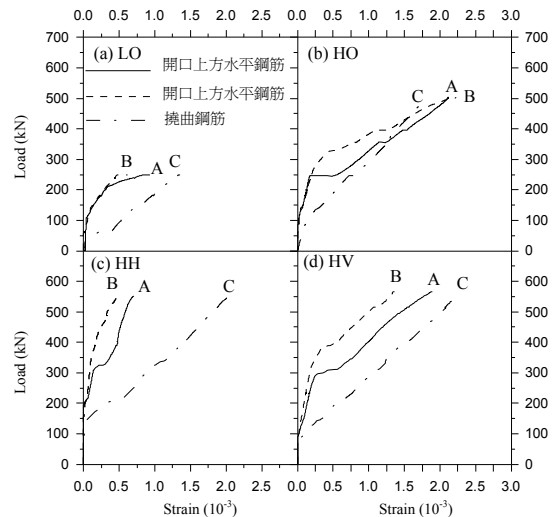


圖 4. 載重-鋼筋應變圖(a) LO (b) HO (c) HH (d) HV (開口上方水平鋼筋及撓曲鋼筋之降伏點應變分別為 0.00164 及 0.00187)

上方水平鋼筋之受拉應變尚未達鋼筋降伏點應變之半。LO 試體在極限載重作用下其撓曲鋼筋並未降伏。由圖 4(b)之無包覆碳纖維高強度混凝土試體 HO 之載重與鋼筋應變曲線可知，當載重超過 HO 試體之二分之一極限載重後，梁腹開口上方之水平鋼筋之受拉應變隨著載重之增加而明顯快速增加，HO 試體在極限載重作用下其梁腹開口上方之水平鋼筋已經降伏，但極限狀態時 HO 試體之撓曲鋼筋反而未降伏，此點充分說明了對於無包覆碳纖維之高強度混凝土深梁，其梁腹開口上方必須配置足夠之水平鋼筋以提供足夠之水平抗拉力。由圖 4(c)水平方向包覆 4 層碳纖維之高強度混凝土試體 HH 之載重與鋼筋應變曲線可

知，載重大約超過 HH 試體的三分之一極限載重後，HH 試體之撓曲鋼筋應變開始明顯增加，相較於無包覆碳纖維之 HO 試體，水平方向包覆 4 層碳纖維之 HH 試體，其開口上方對應相同載重之水平鋼筋受拉應變相對較小，HH 試體在極限載重作用下其開口上方之水平鋼筋並未降伏。如圖 4(c)所示，極限狀態時 HH 試體之撓曲鋼筋已經降伏。由圖 4(d)垂直方向包覆 4 層碳纖維之高強度混凝土試體 HV 之載重與鋼筋應變曲線可知，當載重約超過 HV 試體的四分之一極限載重以後，HV 試體之撓曲鋼筋應變逐漸增加，相較於無包覆碳纖維之 HO 試體，垂直方向包覆 4 層碳纖維之 HV 試體，其撓曲鋼筋之受拉應變較大，極限狀態時 HV 試體之撓曲鋼筋降伏而其開口上方之水平鋼筋受拉應變也很接近降伏點應變，如圖 4(d)所示。綜合上述，無包覆碳纖維之 LO 及 HO 試體破壞時其撓曲鋼筋並未降伏。反觀包覆碳纖維之 HH 及 HV 試體，由於碳纖維補強確可以提升含開口深梁之極限載重、延緩含開口深梁之剪力破壞並使其撓曲鋼筋發展出降伏應力。對於水平方向包覆碳纖維之 HH 試體而言，由於其開口上方閉合環繞之碳纖維水平包覆層(圖 1(b))有如水平箍筋一樣，其可以幫忙梁腹開口上方之水平鋼筋承擔部分之水平拉力，導致 HH 試體其梁腹開口上方之水平鋼筋受拉應變會較 HO 試體梁腹開口上方水平鋼筋之受拉應變小。

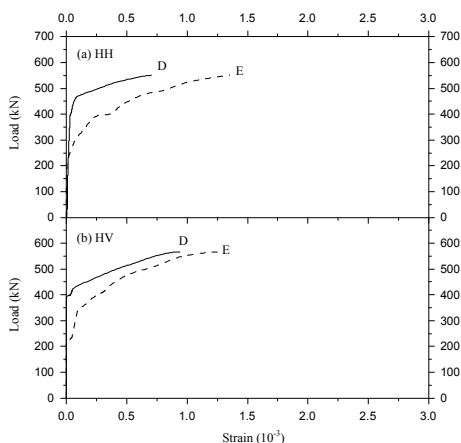


圖 5. 載重-碳纖維應變圖(a) HH (b) HV

含開口深梁試體載重與碳纖維之應變曲線如圖 5 所示，其可以顯示試體在進行剪力強度試驗時碳纖維之受力狀況。由圖 5 可見，當

載重不大時碳纖維之受拉應變甚小，直到含開口深梁受到之載重約超過 80%極限載重後，碳纖維之受拉應變才開始明顯增加。

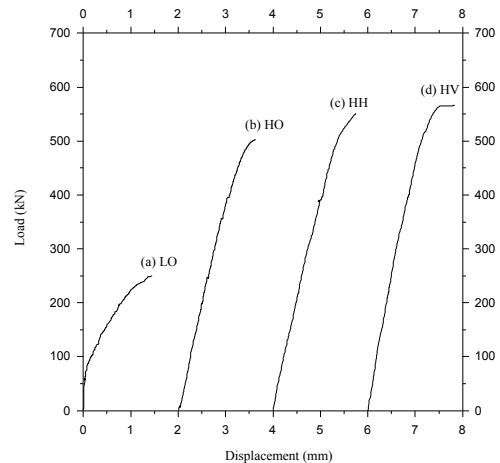


圖 6. 載重-變位曲線圖(a) LO (b) HO (c) HH (d) HV

圖 6 顯示含開口深梁試體之載重與變位曲線。相較於普通強度混凝土含開口深梁，高強度混凝土含開口深梁之載重與變位曲線斜率較高(圖 6)。圖 4(a)及圖 4(b)之載重與鋼筋應變曲線顯示，兩支無包覆碳纖維之深梁試體 LO 及 HO 其破壞時撓曲鋼筋皆未降伏，LO 試體及 HO 試體之破壞模式定義為剪力破壞無疑慮。雖然圖 4(c)及圖 4(d)顯示包覆碳纖維之含開口深梁試體 HH 及 HV，其破壞時撓曲鋼筋之受拉應變僅略高於鋼筋降伏點應變，但圖 6 之載重與變位曲線顯示，極限狀態時 HH 試體及 HV 試體之變位不大，故而本研究建議將 HH 及 HV 試體之破壞模式註記為剪力破壞(表 5)。表 5 之試驗結果顯示，混凝土強度愈高，含開口深梁剪力強度也愈高。相較於無包覆碳纖維之高強度混凝土含開口深梁，碳纖維補強大約可增加深梁 10%之剪力強度。且包覆碳纖維之含開口深梁其撓曲鋼筋在極限狀態時之受拉應變略高於鋼筋之降伏點應變(表 5)，顯示包覆碳纖維確可以延緩含開口深梁之剪力破壞並使撓曲鋼筋發展出降伏應力。

表 5. 試驗結果

試體編號	f'_c (MPa)	補強方向	A_{CFRP}	ε_{hu}	ε_{su}	$V_{bv, test}$	破壞模式
LO	27.0	-	0	0.00078	0.00136	125 kN	剪力破壞
HO	101.4	-	0	0.00217	0.00176	252 kN	剪力破壞
HH	101.4	水平	53.12 mm ²	0.00060	0.00205	275 kN	剪力破壞
HV	101.4	垂直	53.12 mm ²	0.00163	0.00230	283 kN	剪力破壞

ε_{hu} 為極限狀態時開口上方水平鋼筋之平均量測應變， ε_{su} 為極限狀態時撓曲鋼筋之量測應變， $V_{bv, test}$ 為剪力強度之測試值

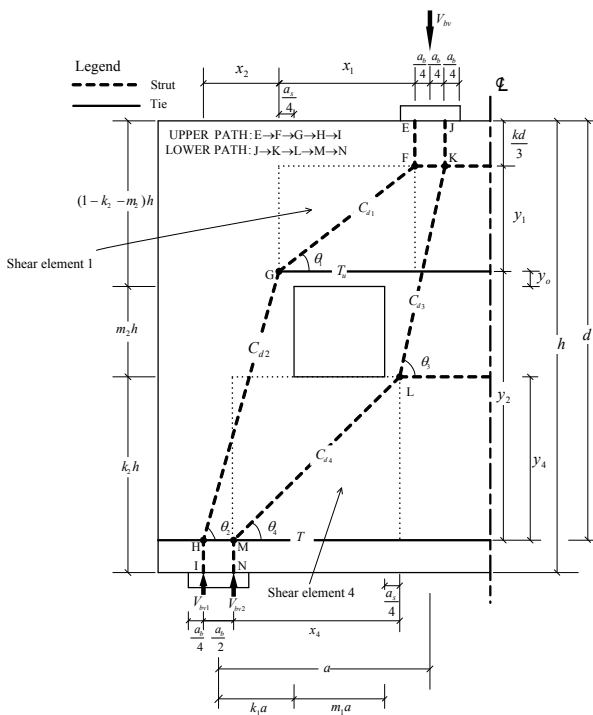


圖 7. 含開口深梁之剪力傳遞路徑

四、分析方法

本研究建議含開口深梁，其剪力傳遞路徑如圖 7 所示。圖 7 中，深梁原對角壓桿方向上因為梁腹開口之干擾，導致其外載重作用力必須經由上部及下部兩個不同路徑傳遞到支承。其中上部剪力傳遞路徑為沿著 EFGHI，下部剪力傳遞路徑則為沿著 JKLMN。圖 7 中，實線代表拉桿，虛線為壓桿。含開口深梁由上部剪力傳遞路徑所承擔之剪力為 V_{bv1} ，其可詳如圖 8。

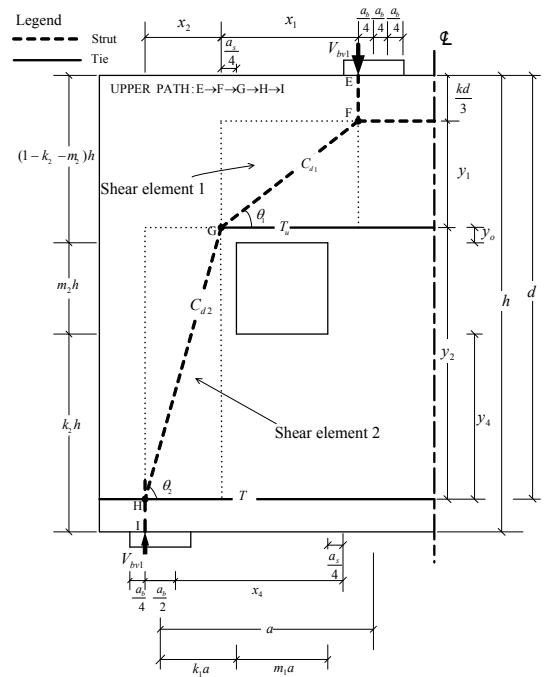


圖 8. 含開口深梁之上部剪力傳遞路徑

含開口深梁由下部剪力傳遞路徑所承擔之剪力為 V_{bv2} ，其可詳如圖 9。在圖 8 含開口深梁之上部剪力傳遞路徑中，剪力 V_{bv1} 經由混凝土垂直壓桿 EF 傳至結點 F，在結點 F 上除了垂直壓桿 EF 之外還有源自於撓曲壓力之水平壓桿，此兩者恰好可以和對角壓力 C_{d1} 平衡。前人[1-3]及本研究之試驗觀察顯示，含開口深梁在剪力作用下其開口上方(即圖 8 之剪力元素 1)及開口下方(即圖 9 之剪力元素 4)會有相當多之對角裂縫形成，而試驗之觀察顯示，在剪力元素 1 及剪力元素 4 對角開裂後，含開口深梁並沒有立刻破壞，其對角裂縫之間的混凝土可構成混凝土壓桿以傳遞壓力。由於混凝土裂縫並不平整，故而造成裂縫間之混凝土壓桿截面積有大小不齊之情況，在固定之壓

力作用下，較小的壓桿截面積會提前終止其抗壓強度的發展，此即開裂後混凝土之軟化現象。圖 8 中， C_{d1} 之傾斜角 θ_1 可計算如下：

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y_1}{x_1}\right) \quad (1)$$

其中，

$$x_1 = a - k_1 a - \frac{a_b}{4} + \frac{a_s}{4} \quad (2)$$

$$y_1 = (1 - k_2 - m_2)h - \frac{kd}{3} - y_o \quad (3)$$

$$a_s = \sqrt{(kd)^2 + (a_b)^2} \quad (4)$$

$$k = \sqrt{(n\rho)^2 + 2n\rho} - n\rho \quad (5)$$

式中， x_1 及 y_1 分別為剪力元素 1 之水平方向及垂直方向之尺寸。 a_b 為承載板之寬度， kd 為混凝土撓曲壓力區之深度， k 為撓曲壓力區深度係數， n 為模數比，其等於鋼筋的彈性模數除以混凝土的彈性模數， ρ 為撓曲鋼筋比。深梁對角壓桿之深度源自於其端部之支承效應，對於不含開口之深梁，其混凝土對角壓桿之深度應取為 a_s [8]。但圖 7 中，由於梁腹開口之干擾，導致含開口深梁之傳力路徑必須繞過開口，而分流為上部及下部兩個剪力傳遞路徑，故圖 7 中兩個傳力路徑之對角壓桿深度，其皆應折半而各取為 $a_s/2$ 。混凝土對角壓桿之有效截面積 A_{str} 可取為 $A_{str} = a_s/2 \times b$ 。

前人[1-3]及本研究之試驗觀察顯示，圖 8 之剪力元素 2 及圖 9 之剪力元素 3 在剪力作用下幾乎沒有對角裂縫形成，故其混凝土可視為未軟化，而其對角壓力強度即可簡單地取為：

$$C_{d2} = f'_c A_{str} \quad (6)$$

$$C_{d3} = f'_c A_{str} \quad (7)$$

圖 8 中， C_{d2} 之傾斜角 θ_2 可計算如下

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y_2}{x_2}\right) \quad (8)$$

其中，

$$x_2 = k_1 a - \frac{a_s}{4} + \frac{a_b}{4} \quad (9)$$

$$y_2 = (k_2 + m_2)h + y_o + d - h \quad (10)$$

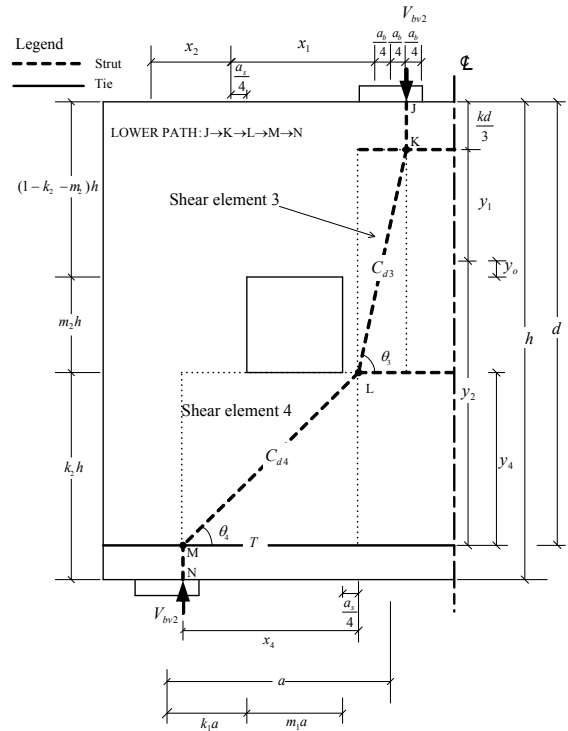


圖 9. 含開口深梁之下部剪力傳遞路徑

圖 8 中，結點 G 在水平方向之力平衡要求下， C_{d1} 須受到式(11)之限制

$$C_{d1} \leq \frac{C_{d2} \cos \theta_2 + T_u}{\cos \theta_1} \quad (11)$$

其中，水平拉力 T_u 由開口上方水平鋼筋提供，其可估算如下

$$T_u = A_{suh} f_{ysuh} \quad (12)$$

式中， A_{suh} 為開口上方水平鋼筋之截面積， f_{ysuh} 為開口上方水平鋼筋之降伏強度。

圖 8 之上部剪力傳遞路徑在極限剪力作用下，由於剪力元素 1 之混凝土有開裂軟化之現象，但剪力元素 2 之混凝土沒有開裂軟化之問題，故當剪力元素 1 之混凝土承受之對角壓

力達到其對角壓力強度而擠碎時，剪力元素 2 之混凝土實際承受之對角壓力尚未達其對角壓力強度。故含開口深梁上部剪力傳遞路徑之垂直剪力 V_{bv1} 應取為

$$V_{bv1} = C_{d1} \sin \theta_1 \quad (13)$$

圖 9 之下部剪力傳遞路徑在極限剪力作用下，由於剪力元素 4 之混凝土有開裂軟化之現象，但剪力元素 3 之混凝土沒有開裂軟化之問題，故當剪力元素 4 之混凝土承受之對角壓力達到其對角壓力強度而擠碎時，剪力元素 3 實際承受之對角壓力尚未達其對角壓力強度。故含開口深梁下部剪力傳遞路徑之垂直剪力 V_{bv2} 應取為

$$V_{bv2} = C_{d4} \sin \theta_4 \quad (14)$$

其中，

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{y_4}{x_4} \right) \quad (15)$$

$$x_4 = k_1 a + m_1 a + \frac{a_s}{4} - \frac{a_b}{4} \quad (16)$$

$$y_4 = y_2 - y_o - m_2 h \quad (17)$$

式中， θ_4 為 C_{d4} 之傾斜角， x_4 及 y_4 分別為剪力元素 4 之水平方向及垂直方向之尺寸(圖 9)。

綜合上述，本文含開口深梁之剪力強度 $V_{bv,calc}$ 可計算如下：

$$V_{bv,calc} = V_{bv1} + V_{bv2} = C_{d1} \sin \theta_1 + C_{d4} \sin \theta_4 \quad (18)$$

惟值得注意的是，圖 7 中含開口深梁發生剪力破壞時，由於剪力破壞屬脆性破壞，圖 8 中之上部剪力傳遞路徑中之 C_{d1} 及圖 9 中下部剪力傳遞路徑中之 C_{d4} ，兩者不可能同時發展出其對角壓力強度。由剪力模數 (shear modulus) 的定義和剪力虎克定律 (Hooke's law in shear) 的假設，剪力勁度比可表示如下[6]

$$\frac{V_{bv1}}{\Delta_1} : \frac{V_{bv2}}{\Delta_4} = \frac{\tau_1 b_1 y_1}{\gamma_1 x_1} : \frac{\tau_4 b_4 y_4}{\gamma_4 x_4} = \frac{G y_1}{x_1} : \frac{G y_4}{x_4} = \tan \theta_1 : \tan \theta_4 \quad (19)$$

其中 V_{bv1}/Δ_1 及 V_{bv2}/Δ_4 分別為剪力元素 1 及 4 的

剪力勁度； τ_1 及 γ_1 分別為剪力元素 1 之剪應力及剪應變， τ_4 及 γ_4 分別為剪力元素 4 之剪應力及剪應變， $b_1 y_1$ 為剪力元素 1 之受剪面積； $b_4 y_4$ 為剪力元素 4 之受剪面積，而 G 為剪力模數。

基於變位諧和，假設剪力元素 1 之垂直變位 Δ_1 與剪力元素 4 之垂直變位 Δ_4 相等，則式 (19) 可簡化為[6]：

$$V_{bv1} : V_{bv2} = C_{d1} \sin \theta_1 : C_{d4} \sin \theta_4 = \tan \theta_1 : \tan \theta_4 \quad (20)$$

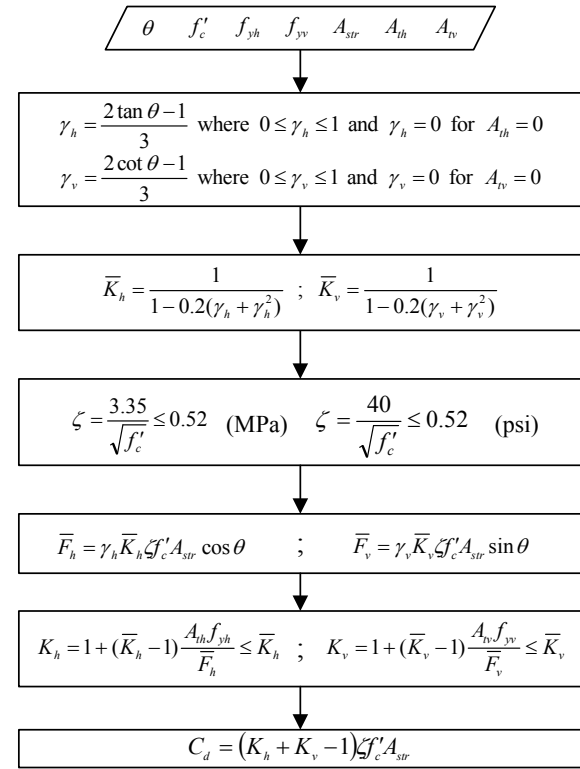


圖 10. 軟化對角壓力強度之求解程序[8]

若 $C_{d4} \sin \theta_4 \tan \theta_1 \geq C_{d1} \sin \theta_1 \tan \theta_4$ ，則含開口深梁在極限載重作用下發生剪力破壞時， C_{d1} 會充分發展出其軟化對角壓力強度，而此時 C_{d1} 之分析可詳 Lu 等人[8]之研究，其計算流程如圖 10 所示，圖 10 中計算 C_{d1} 時，可取 $\theta = \theta_1$ 。至於 C_{d4} 之對角壓力強度值之計算，則必須更改如下[6]：

$$C_{d4} = C_{d1} \frac{\sin \theta_1 \tan \theta_4}{\sin \theta_4 \tan \theta_1} \quad (21)$$

反之，若 $C_{d1} \sin \theta_1 \tan \theta_4 \geq C_{d4} \sin \theta_4 \tan \theta_1$ ，則含開口深梁在極限載重作用下發生剪力破壞時， C_{d4} 會充分發展出其軟化對角壓力強度，而此時 C_{d4} 之分析可詳 Lu 等人[8]之研究，其計算流程如圖 10 所示，圖 10 中計算 C_{d4} 時，可取 $\theta = \theta_4$ 至於 C_{d1} 之對角壓力強度值之計算，則必須更改如下[6]：

$$C_{d1} = C_{d4} \frac{\sin \theta_4 \tan \theta_1}{\sin \theta_1 \tan \theta_4} \quad (22)$$

雖然圖 1 中本研究 4 支含開口深梁皆未配置水平箍筋及垂直箍筋，但由圖 5 之載重與碳纖維應變圖可知，極限狀態時 HH 試體閉合環繞之水平方向碳纖維包覆層，其平均受拉應變約為 0.001，故而本研究 HH 試體水平方向碳纖維包覆層，其在含開口深梁之力傳遞機制中所扮演之角色有如水平拉桿一樣，其可以構成軟化壓拉桿[8]力傳遞機制中之水平拉桿，一方面直接傳遞拉力，另一方面又可束制混凝土，控制其裂縫寬度以避免混凝土軟化的現象太過劇烈[8]。同理，由圖 5 之載重與碳纖維應變圖可知，極限狀態時 HV 試體閉合環繞之垂直方向碳纖維包覆層，其平均受拉應變也大約為 0.001，HV 試體之垂直方向碳纖維包覆層，其在含開口深梁之力傳遞機制中所扮演之角色亦有如垂直拉桿一樣，其可以構成力傳遞機制中之垂直拉桿[8]。綜合上述，由圖 10 軟化對角壓力強度[8]之求解程序中，水平拉桿與垂直拉桿之截面積 A_{th} 與 A_{tv} 即可取為碳纖維截面積 $A_{CFRP} = 53.12 \text{ mm}^2$ ，而於極限狀態下水平拉桿與垂直拉桿之等效強度可簡單地取為碳纖維之平均受拉應變乘以碳纖維之彈性模數($\approx 0.001 \times 230000 = 230 \text{ MPa}$)。

五、分析結果

以 HH 試體為例，說明如何以本研究所建議之方法，來分析包覆碳纖維含開口深梁之剪力強度，其詳細分析法之計算流程如圖 10 所示。此處只有展示重點計算結果，例行運算過程將省略不寫。

—材料性質

#5 鋼筋 $f_y = 374 \text{ MPa}$; #4 鋼筋

$f_y = 328 \text{ MPa}$; $f'_c = 101.4 \text{ MPa}$

$A_{th} = 53.12 \text{ mm}^2$; $f_{yh} = 230 \text{ MPa}$

—斷面分析 $kd = 80.6 \text{ mm}$

—混凝土對角壓桿

$\zeta = 0.33$; $a_s = 95 \text{ mm}$

$A_{str} = 4750 \text{ mm}^2$

—剪力元素 1

$x_1 = 92.6 \text{ mm}$; $y_1 = 78.3 \text{ mm}$

$\theta_1 = 40.2^\circ$; $\gamma_h = 0.230$

$\bar{K}_h = 1.06$; $\bar{F}_h = 29598 \text{ N}$

$K_h = 1.02$; $C_{d1} = 162 \text{ kN}$

—剪力元素 2

$C_{d2} = 482 \text{ kN}$

$x_2 = 24.9 \text{ mm}$; $y_2 = 169.8 \text{ mm}$

$\theta_2 = 81.7^\circ$

—檢查

$T_u = 83.1 \text{ kN}$

$C_{d1} \leq \frac{C_{d2} \cos \theta_2 + T_u}{\cos \theta_1} \quad \text{OK}$

—剪力元素 3

$C_{d3} = 482 \text{ kN}$

—剪力元素 4

$x_4 = 99.9 \text{ mm}$; $y_4 = 104.9 \text{ mm}$

$\theta_4 = 46.4^\circ$

$\gamma_h = 0.367$; $\bar{K}_h = 1.06$

$$\bar{F}_h = 44652 \text{ N}; K_h = 1.03$$

$$C_{d4} = 164 \text{ kN}$$

$$C_{d1} \sin \theta_1 \tan \theta_4 > C_{d4} \sin \theta_4 \tan \theta_1$$

$$C_{d1} = 148 \text{ kN}$$

— 剪力強度之分析值

$$V_{bv,calc} = 214 \text{ kN}$$

表 6. 測試比對

編號	$V_{bv,test}$	$V_{bv,calc}$	$V_{bv,test}/V_{bv,calc}$
LO	125 kN	99 kN	1.26
HO	252 kN	209 kN	1.20
HH	275 kN	214 kN	1.29
HV	283 kN	214 kN	1.32

本文藉著 4 支含開口深梁試驗數據和分析值之比對，探討所建議分析方法之適用性。本研究在表 6 中定義強度比值，其為剪力強度之測試值除以剪力強度之分析值 ($V_{bv,test}/V_{bv,calc}$)，此一強度比值可以幫助了解分析方法之適用性。由表 6 中各試體之強度比值皆高於 1 看來，採用本研究所建議之分析方法可保守地計算包覆碳纖維含開口深梁之剪力強度。

六、結 論

本研究共製作 4 支鋼筋混凝土含開口深梁進行試驗，以探討包覆碳纖維對含開口深梁剪力強度之影響。針對包覆碳纖維之含開口深梁，也建議了一分析方法以評估其剪力強度。基於研究所得茲作下列結論：

- (1) 包覆碳纖維之高強度混凝土含開口深梁其剪力強度大約較無包覆碳纖維者高出 10% 剪力強度。
- (2) 未包覆碳纖維之含開口深梁試體，其撓曲鋼筋在極限狀態時並未降伏。試驗之觀察顯示，包覆碳纖維可以使含開口深梁之撓曲鋼筋發展出降伏應力。
- (3) 經由試驗值與分析值之比對，採用本文所建議之分析方法可以保守地預測包覆碳纖維含開口深梁之剪力強度。
- (4) 混凝土強度愈高，含開口深梁剪力強度也

愈高。

符號說明

a	=	剪力跨度
a_b	=	承載板之寬度
A_{CFRP}	=	碳纖維截面積
a_s	=	對角壓桿之深度
A_{str}	=	對角壓桿之有效截面積
A_{suh}	=	開口上方水平鋼筋之截面積
A_{th}	=	水平拉桿之截面積
A_{tv}	=	垂直拉桿之截面積
b	=	寬度
b_s	=	對角壓桿之寬度
$b_s y_1$	=	剪力元素 1 之受剪面積
$b_s y_4$	=	剪力元素 4 之受剪面積
C_d	=	對角壓力強度
d	=	有效深度
f'_c	=	混凝土之抗壓強度
\bar{F}_h	=	水平拉桿之平衡拉力值
f_{yh}	=	水平拉桿之降伏強度
f_{ysuh}	=	開口上方水平鋼筋之降伏強度
f_{yv}	=	垂直拉桿之降伏強度
G	=	剪力模數
h	=	深度
k	=	撓曲壓力區深度係數
k_1	=	開口之水平位置係數
k_2	=	開口之垂直位置係數
K_h	=	水平拉桿指標
\bar{K}_h	=	彈性水平拉桿指標
K_v	=	垂直拉桿指標
\bar{K}_v	=	彈性垂直拉桿指標
kd	=	撓曲壓力區深度
m_1	=	開口之水平尺寸係數
m_2	=	開口之垂直尺寸係數
n	=	模數比，等於鋼筋的彈性模數除以混凝土的彈性模數
T_u	=	水平拉力
$V_{bv,calc}$	=	剪力強度之分析值
$V_{bv,test}$	=	剪力強度之測試值
Δ_1	=	剪力元素 1 之垂直變位
Δ_4	=	剪力元素 4 之垂直變位

ρ	=	撓曲鋼筋比
γ_1	=	剪力元素 1 之剪應變
γ_4	=	剪力元素 4 之剪應變
γ_h	=	當垂直機制不參與作用時，水平拉桿所承擔之水平剪力比例
γ_v	=	當水平機制不參與作用時，垂直拉桿所承擔之水平剪力比例
ε_{hu}	=	極限狀態時開口上方水平鋼筋之平均量測應變
ε_{su}	=	極限狀態時撓曲鋼筋之量測應變
θ	=	對角壓桿之傾斜角
ζ	=	軟化係數
τ_1	=	剪力元素 1 之剪應力
τ_4	=	剪力元素 4 之剪應力

- [7] Lu, W. Y., Yu, H. W., Chen, C. L., Yang, T. H., and Lin, Y. S., "Reinforced concrete corbels strengthened with carbon fiber reinforced plastics," *Computers and Concrete*, Vol. 10, No. 3, pp. 259-276, 2012.
- [8] Lu, W. Y., Hwang, S. J., and Lin, I. J., "Deflection prediction for reinforced concrete deep beams," *Computers and Concrete*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-16, 2010.

參考文獻

- [1] Kong, F. K. and Sharp, G. R., "Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Deep beams with Web Openings," *The Structural Engineer*, Vol. 51, No. 8, pp. 267-275, 1973.
- [2] Kong, F. K. and Sharp, G. R., "Structural Idealization for Deep Beams with Web Openings," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 29, No. 99, pp. 81-91, 1977.
- [3] Kong, F. K., Sharp, G. R., Appleton, S. C., Beaumont, C. J., and Kubik, L. A., "Structural Idealization for Deep Beams with Web Openings: Further Evidence," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 30, No. 103, pp. 89-95, 1978.
- [4] Yang, K. Y., Eun, H. C., and Chung, H. S., "The Influence of Web Openings on The Structural Behavior of Reinforced High-strength Concrete Deep Beams," *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 10, pp. 1825-1834, 2006.
- [5] Yang, K. Y., Chung, H. S., and Ashour, A. F., "Influence of Inclined Web Reinforcement on Reinforced Concrete Deep Beams with Openings," *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 5, pp. 580-589, 2007.
- [6] 呂文堯、游新旺、黃世建、曾建創、陳俊良、李宜勳，"含開口鋼筋混凝土深梁之剪力強度評估"，*建築學報*，第 78 期，第 1-17 頁，2011。

呂文堯等
包覆碳纖維對含開口深梁剪力強度之影響