

鋼筋混凝土深梁之試驗研究

* 吳霽哲(Ji-Jhe Wu)

中國科技大學室內設計研究所

本研究共測試12支深梁。探討之變數主要有剪跨-深比、混凝土抗壓強度、水平及垂直箍筋參數。本研究也建議一預測深梁剪力強度之分析方法。試驗之結果顯示，剪跨-深比為影響深梁剪力強度之最重要參數。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剪度度高。

關鍵詞：深梁、剪力強度

TEST OF REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS

Abstract

In this study, twelve reinforced concrete deep beams were tested. The main variables studied are the shear span-to-depth ratio, compressive strength of concrete, and parameter of horizontal and vertical stirrups. An analytical method for predicting the shear strengths of deep beams is also proposed in this study.

The test results indicate that shear span-to-depth ratio is the most important parameter on the shear strength of deep beams. 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.

Keywords : deep beams; shear strengths.

一、前言

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桿件，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]，鋼筋混凝土深梁之典型剪力破壞如圖1所示。本研究共測試12支深梁。探討之變數主要有剪跨-深比、混凝土抗壓強度、水平及垂直箍筋參數。

本研究擬根據ACI規範方法[2]及Lu等人[16]之方法，計算鋼筋混凝土深梁之剪力強度。藉著試體剪力強度試驗值與ACI規範方法[2]及Lu等人[16]之方法所得剪力強度分析值進行比較、討論，並據以提出結論。

二、試驗規劃

2.1 試體詳細資料

本研究共製作12支鋼筋混凝土深梁試體，試體詳細規劃如表1所示。12支鋼筋混凝土深梁試體中，涵蓋不同之剪力跨度及不同之鋼筋配置狀況(表1)。本研究典型之深梁試體如圖2所示，其配置3-#3水平箍筋，且在其左右兩剪力跨度中央處，各配置1-#3垂直箍筋，其剪跨-深比 $a/d=0.93$ 。本研究深梁試體之鋼筋係採用SD 280竹節鋼筋，其降伏應力詳如表2所示。水平箍筋及垂直箍筋採用#3鋼筋，其降伏應力 $f_y=390$ MPa，撓曲鋼筋採用2-#5鋼筋，其降伏應力 $f_y=374$ MPa(表2)。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(表3)。撓曲鋼筋之兩端皆各焊接一 $100\times 60\times 6$ mm之鋼板作為錨定，如圖2所示。深梁試體在撓曲鋼筋中央之F點、水平箍筋之H點及垂直箍筋之V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。

2.2 試驗步驟

本研究深梁試體加載安裝方式如圖3所示。剪力強度試驗步驟如下：

1、試驗前，每一深梁試體其表面皆均勻塗刷一層白色水泥漆，以便後續每一加載階段停止時可以描繪試體裂縫分佈情形。

2、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 $100\times 50\times 30$ mm承壓鋼板，支承深梁試體之承壓鋼板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 $100\times 100\times 30$ mm加載承壓鋼板，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板之中心在同一鉛垂線上，如圖3所示。

3、本研究深梁試體試體加載時，萬能試驗機系採力量控制方式，加載約以每秒110kg定速加壓，加載過程中所有數據透過資料收集器同步傳輸至電腦自動記錄。

4、本研究預先根據ACI規範方法[2]及Lu等人[16]之方法算得鋼筋混凝土深梁試體所能承受之極限載重，此預先估計之試體極限載重，其可供設定本研究深梁試體其各載重階段之最大載重值。本研究試驗時，設定每一載重階段之最大載重值約為四分之一極限載重計算值或三分之一極限載重計算值。每當深梁試體各階段加載至其預定之最大載重值時便暫停加壓，而暫停加壓時須迅速以彩色筆描繪試體裂縫，以便觀察深梁試體之裂縫分布情

形。描繪試體裂縫時，須拍照以供試驗後觀察比對之參考。如此，依序完成深梁試體之各載重階段之加載試驗。最後當試體加載達其極限載重，作用於深梁之載重開始迅速下降後，試體即解壓。而這裡所稱之極限載重指的就是般所習知之試體載重-變位曲線之最高點所對應之載重。

三、試驗結果

3.1 剪力強度

由本研究表4深梁試體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 為影響深梁剪力強度最重要之變數。表4顯示，剪跨-深比 a/d 愈大，深梁之剪力強度愈低。表4亦顯示，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强度高。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會具有最高之剪力強度(表4)。

3.2 剪跨-深比之影響

剪跨-深比 a/d 確為影響深梁剪力強度行為之重要變數。 a/d 對深梁第力強度試驗載重與變位曲線之影響如圖4至圖6所示。對於不含箍筋之深梁， a/d 愈大，其載重與變位曲線之斜率愈小且其所能承受之極限載重也愈低(圖4)。對於含水平箍筋之深梁， a/d 愈大，其載重與變位曲線之斜率愈小且其所能承受之極限載重也愈低(圖5)。對於含垂直箍筋之深梁， a/d 愈大，其載重與變位曲線之斜率愈小且其所能承受之極限載重也愈低(圖6)。

3.3 水平箍筋之影響

水平箍筋對深梁載重與變位曲線之影響如圖7所示。圖7(a)顯示對於 $a/d=1.11$ 之深梁，含3-#3水平箍筋之No.4試體較不含水平箍筋之No.1試體能承受較高之極限載重，且其破壞時之變位也較大。圖7(b)顯示對於 $a/d=0.56$ 之深梁，含3-#3水平箍筋之No.6試體較不含水平箍筋之No.3試體能承受較高之極限載重。

3.4 垂直箍筋之影響

垂直箍筋對深梁載重與變位曲線之影響如圖8所示。含1-#3垂直箍筋之No.8試體較不含垂直箍筋之No.2試體能承受較高之極限載重(圖8)。

四、測試比對

本研究根據ACI規範[2]及如圖9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]之方法其剪力強度可計算如下：

$$V_{bv,calc} = C_d \sin \theta \quad (1)$$

其中， $V_{bv,calc}$ ， 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5所示。

本研究在表5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($V_{bv, test} / V_{bv, calc}$)，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1.71而變異係數為0.13，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1.13而變異係數為0.08(表5)。由此可見，無論就強度比值之平均數或變異係數而言，Lu等人[16]建議之分析方法及ACI規範方法[2]對於第一次剪力強度試驗之12支鋼筋混凝土深梁皆能獲得不錯之剪力強度預測。ACI規範[2]對於深梁剪力強度之預測有較偏於保守之現象。

五、結論

本研究製作12支鋼筋混凝土深梁試體，進行剪力強度試驗，並採用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. 剪力強度試驗之結果顯示，剪跨-深比(a/d)為影響深梁剪力強度最重要之變數。 a/d 愈大，深梁之剪力強度愈低。
2. 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强度高。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最高之剪力強度。不論箍筋之配置狀況， a/d 愈大之深梁，其載重與變位曲線之斜率愈小且其所能承受之極限載重也愈低。
3. Lu等人[16]建議之分析方法及ACI規範方法[2]對於深梁剪力強度皆能獲得不錯之預測精度。

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 試體詳細資料(Specimen details)

試體編號	f'_c (MPa)	l_n (mm)	a (mm)	a/d	主鋼筋	水平箍筋	垂直箍筋
1	31.03	550	300	1.11	2-#5	-	-
2	31.03	350	200	0.74	2-#5	-	-
3	31.03	250	150	0.56	2-#5	-	-
4	31.03	550	300	1.11	2-#5	3-#3	-
5	31.03	450	250	0.93	2-#5	3-#3	-
6	31.03	250	150	0.56	2-#5	3-#3	-
7	31.03	450	250	0.93	2-#5	-	1-#3
8	31.03	350	200	0.74	2-#5	-	1-#3
9	31.03	250	150	0.56	2-#5	-	1-#3
10	31.03	550	300	1.11	2-#5	3-#3	1-#3
11	31.03	450	250	0.93	2-#5	3-#3	1-#3
12	31.03	350	200	0.74	2-#5	3-#3	1-#3

表 2 鋼筋之性質(Properties of reinforcement)

鋼筋號數	降伏應力	備註
#3	390 MPa	水平箍筋及垂直箍筋
#5	374 MPa	撓曲鋼筋

表 3 混凝土之性質(Properties of concrete)

設計強度	平均強度	水灰比	坍度	骨材最大粒徑	單位重量
30 MPa	31.03 MPa	0.41	100 mm	25 mm	2344 kgf/m ³

表 4 試驗結果(Test results)

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	-	-	266.56	133.28	剪力破壞
2	31.03	0.74	2-#5	-	-	350.84	175.42	剪力破壞
3	31.03	0.56	2-#5	-	-	401.80	200.90	剪力破壞
4	31.03	1.11	2-#5	3-#3	-	284.20	142.10	剪力破壞
5	31.03	0.93	2-#5	3-#3	-	342.02	171.01	剪力破壞
6	31.03	0.56	2-#5	3-#3	-	454.72	227.36	剪力破壞
7	31.03	0.93	2-#5	-	1-#3	323.40	161.70	剪力破壞
8	31.03	0.74	2-#5	-	1-#3	354.76	177.38	剪力破壞
9	31.03	0.56	2-#5	-	1-#3	363.58	181.79	剪力破壞
10	31.03	1.11	2-#5	3-#3	1-#3	301.84	150.92	剪力破壞
11	31.03	0.93	2-#5	3-#3	1-#3	330.26	165.13	剪力破壞
12	31.03	0.74	2-#5	3-#3	1-#3	410.62	205.31	剪力破壞

表 5 測試比對(Experimental verification)

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 方法[2]	Lu 等 人[16]	ACI 規範 方法[2]	Lu 等 人[16]
1	1.11	-	-	133.28	81.25	118.49	1.64	1.12
2	0.74	-	-	175.42	96.86	146.11	1.81	1.20
3	0.56	-	-	200.90	101.14	160.71	1.99	1.25
4	1.11	3-#3	-	142.10	101.56	125.97	1.40	1.13
5	0.93	3-#3	-	171.01	105.50	146.34	1.62	1.17
6	0.56	3-#3	-	227.36	105.50	250.03	2.16	0.91
7	0.93	-	1-#3	161.70	105.50	142.88	1.53	1.13
8	0.74	-	1-#3	177.38	105.50	151.75	1.68	1.17
9	0.56	-	1-#3	181.79	105.50	161.35	1.72	1.13
10	1.11	3-#3	1-#3	150.92	101.56	130.24	1.49	1.16
11	0.93	3-#3	1-#3	165.13	105.50	157.55	1.56	1.05
12	0.74	3-#3	1-#3	205.31	105.50	183.31	1.95	1.12
						AVG	1.71	1.13
						COV	0.13	0.08

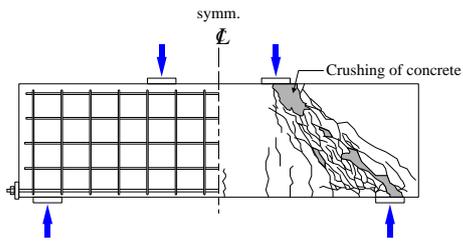


圖 1 深梁典型之剪力破壞[16]

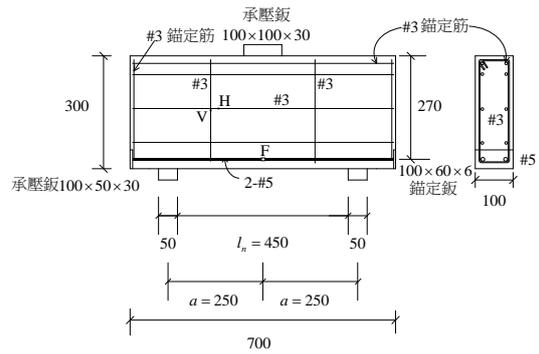


圖 2 典型試體設計圖



圖 3 試體加載安裝圖

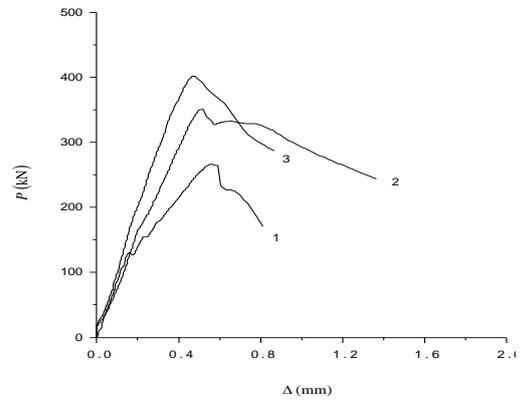


圖 4 a/d 對載重與變位曲線之影響(不含箍筋)

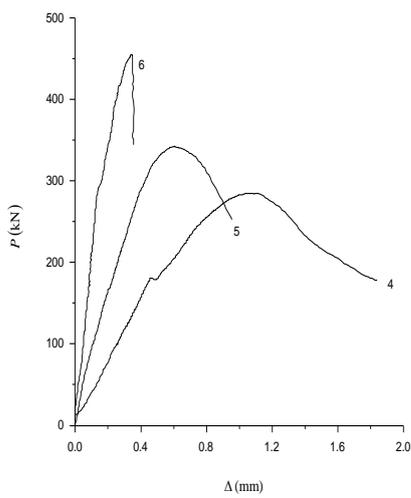


圖 5 a/d 對載重與變位曲線之影響(含水平箍筋)

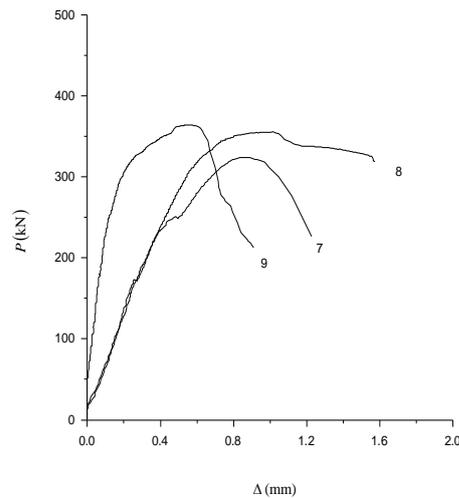
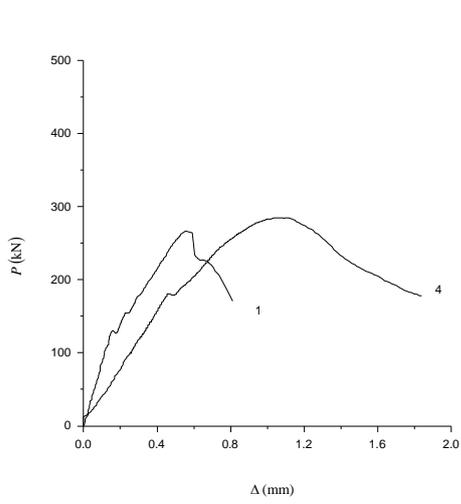
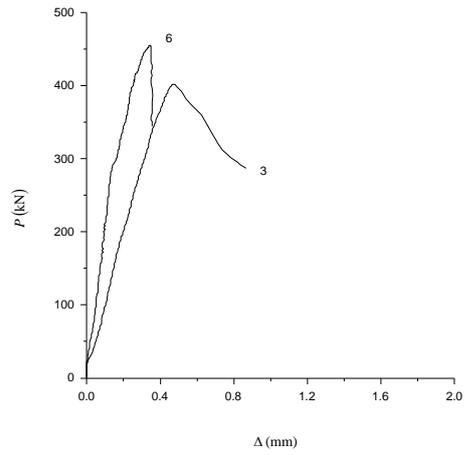


圖 6 a/d 對載重與變位曲線之影響(含垂直箍筋)



(a) $a/d=1.11$



(b) $a/d=0.56$

圖 7 水平箍筋對載重與變位曲線之影響

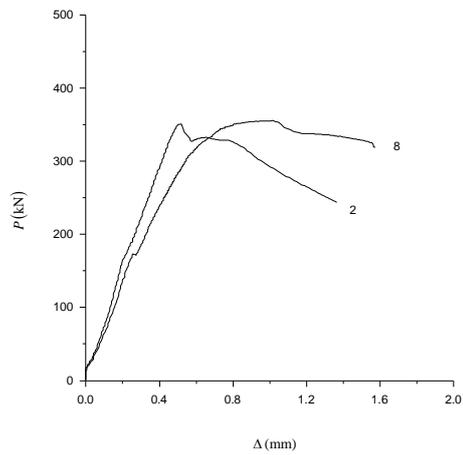


圖 8 垂直箍筋對載重與變位曲線之影響 ($a/d=0.74$)

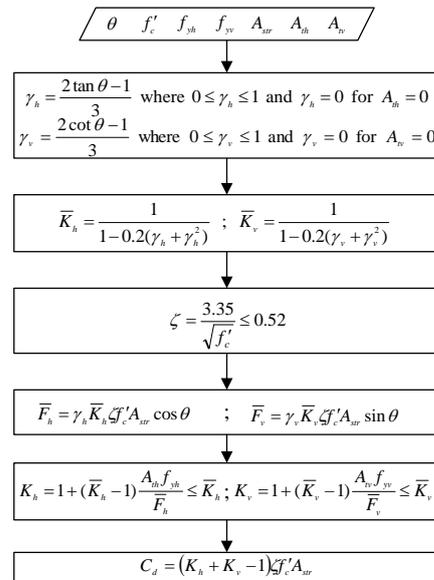


圖 9 深梁對角壓力強度之分析流程圖