

鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項之研擬

內政部建築研究所自行研究報告
中華民國 106 年 12 月

PG10604-0026

鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項之研擬

研究主持人：李台光

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 106 年 12 月

目次

表次	III
圖次	V
摘要	VII
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究方法及進度說明	1
第三節 蒐集之資料、文獻分析	2
第二章 本所 RC 柱試體軸壓及撓曲試驗成果	9
第一節 RC 柱試體軸壓試驗成果	10
第二節 RC 柱試體撓曲試驗成果	12
第三節 國內工地應用實例	13
第三章 組合繫筋設計與施工注意要項	21
第一節 前言	21
第二節 國內常見 RC 柱箍繫筋細部探討	24
第三節 組合繫筋耐震性能探討	26
第四節 組合繫筋設計注意要項	28
第五節 組合繫筋施工注意要項	31
第六節 小結	32
第四章 結論與建議	45
第一節 結論	45
第二節 建議	45
附錄一 期中簡報審查會議意見與回覆	47
附錄二 期末簡報審查會議意見與回覆	51
參考資料	55

表次

表 3-1	組合繫筋最小搭接長度及柱尺寸表	33
表 3-2	塑性鉸區採傳統繫筋及組合繫筋橫向鋼筋比較表 .	33
表 3-3	柱鋼筋自主檢查表	34

圖次

圖 2-1 鋼筋混凝土耐震柱的橫向鋼筋配置示意圖	15
圖 2-2 組合繫筋組成示意圖	15
圖 2-3 RC 方形柱試體軸壓試驗照片	16
圖 2-4 RC 圓形柱試體軸壓試驗照片	16
圖 2-5 大型試驗構架示意圖	17
圖 2-6 國內使用組合繫筋案例	18
圖 3-1 鋼筋混凝土耐震柱的橫向鋼筋配置圖	35
圖 3-2 組合繫筋組成示意圖	37
圖 3-3 921 地震 RC 柱破壞照片	38
圖 3-4 0206 地震 RC 柱破壞照片	39
圖 3-5 繫筋彎鉤與縱向鋼筋之間的間隙	40
圖 3-6 繫筋同時鉤住箍筋及縱向鋼筋	40
圖 3-7 繫筋與縱向鋼筋之間的間隙	41
圖 3-8 組合外箍筋示意圖	42
圖 3-9 上下搭接組合繫筋縱向位置示意圖	42
圖 3-10 國內工地傳統繫筋施工常見缺失圖	43

摘要

關鍵詞：鋼筋混凝土柱、繫筋、設計規範

一、研究緣起

鋼筋混凝土(RC)柱斷面之橫向鋼筋，其主要作用為提供剪力強度、避免主筋受壓挫屈及圍束核心混凝土，尤其對於地震頻仍地區的建築物，後二者對於柱撓曲韌性的發展是非常重要的。傳統的橫向鋼筋通常由一根圍繞斷面的完整外箍筋，以及數根一端具 135 度彎鉤且另一端為 90 度彎鉤的繫筋所組成。繫筋一端使用 90 度彎鉤的原因，在於考量繫筋施工的方便性，但是當混凝土外圍保護層剝落時，90 度彎鉤容易向外撐開，損及繫筋圍束混凝土及主筋之效能。此外，最新 ACI 規範規定，當柱之軸壓力大於 或柱使用高強度混凝土時(不論軸力大小)，所有的主筋都要受有效彎鉤束制。此時，傳統繫筋無法使用，此一議題將造成國內工程實務界極大的衝擊。

為改善傳統繫筋施工困難、施工品質不良的情形，本所近年來積極進行組合繫筋之研發。每一支組合繫筋由兩支一端為 180 度彎鉤另一端為直線的 J 形鋼筋搭接組合而成。組合繫筋的安裝可由柱之對邊往柱內插入，只要主筋淨間距滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，且每一支 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接，不但施工相當容易且施工品質佳。

本所自 97 年起持續利用大型力學實驗室 3000 噸萬能試驗機及大型試驗構架，進行大尺寸方形(斷面：750 mm×750 mm)短柱軸壓試驗及方形(斷面：600 mm×600 mm)長柱撓曲行為之實驗研究，探討在各種繫筋配置方式下，其軸向受壓及撓曲之行為，以評估各種繫筋配置方式的可行性及實用性，嘗試解決國內工程實務的問題，並獲致多項具體結論，本年度擬彙整本所過去實驗研究成果，研擬鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項，供國內業界參考應用。

本研究之預期成果包括：(1)國內外相關文獻之回顧與蒐集，以及本所過去實驗研究成果彙整；(2)研擬鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項，提供國內工程實務界參考；(3)檢討現行 RC 構造設計規範柱繫筋之相關規定，並提供本案研究成果供相關規範研修訂時之參考，以解決國內工程實務問題。

二、研究方法及過程

本計畫之工作內容包括相關文獻之回顧與蒐集、過去研究結果之整理及分析、國內業界專家諮詢以及舉辦期中與期末簡報會議，邀請國內專家學者與相關業界人士與會，以進行意見交流。經由本案之研究，希望可將國內結構工程整體水準向上提升，使 RC 方形柱繫筋之規劃及設計更有依循的參考，以確實達到提高結構物耐震能力之預期目標，並使工程設計單位能充分瞭解正確的繫筋之設計及施工。本研究已完成相關文獻之回顧與蒐集與 RC 柱試體之規劃及設計，並完成部分過去研究結果之整理與分析，以及鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項部分內容，並彙整納入期中與期末簡報專家學者與相關業界人士意見，持續充實設計與施工注意要項內容。

三、重要發現

- (1)傳統繫筋目前普遍使用於實際工程，安裝時通常先將 135 度彎鉤勾住對面的主筋，然後再旋轉繫筋將 90 度彎鉤扣住這一面的主筋。在彎鉤及彎鉤延伸段都符合規範規定的情況下，柱主筋應有 80~100 mm 之淨間距才比較容易施作。土木 401-100 規定柱主筋的淨間距不得小於 1.5 倍主筋直徑、1.33 倍骨材最大粒徑及 40 mm。以 D32(#10)鋼筋為例，主筋之淨間距可能僅有 48 mm，繫筋之安裝將相當困難。設計者在配筋時往往僅考慮到設計規範對主筋淨間距的要求，而忽略了安裝傳統繫筋所需之施工間距，因此工地常有繫筋安裝困難、施工品質不佳的現象發生。
- (2)在工地安裝 180 度彎鉤一體繫筋時，通常需要由主筋上端往下套，不但安裝較為困難，且常需要額外的施工架，實際工程很少使用。
- (3)組合繫筋的安裝由柱之對邊往柱內插入，主筋淨間距只要滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，施工相當方便。安裝時每一 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接，J 形鋼筋直線端架在外箍筋上，不但方便 J 形鋼筋之固定，並可避免混凝土澆置時 J 形鋼筋移位。使用組合繫筋一方面可以增進韌性，另一方面施工簡便且施工品質容易控制，可以大幅提升鋼筋施工品質。
- (4)對於十字形及井字形的組合繫筋配置，可以發揮方形柱繫筋類似的圍束效應，納入橫向鋼筋等值體積比計算。對於十字形的組合繫筋配置，計算橫向鋼筋等值體積比時，可加入 1 根繫筋的圍束效應。而對於井字形的組合繫筋配置，計算

橫向鋼筋等值體積比時，可加入 2 根繫筋的圍束效應。

四、主要建議事項

以下分別從立即可行的建議及長期性建議加以列舉。

本研究案之研究成果，可供工程實務界參考應用，並可提供相關規範研修訂時之參考，以解決國內工程實務問題。－立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部建築研究所

本研究發現組合繫筋不僅施工性良好，組合繫筋的安裝可由柱之對邊往柱內插入，只要主筋淨間距滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，且每一支 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接，不但施工相當容易且施工品質佳。

研究成果已於國內外專業期刊發表，並在 101、103 及 105 年於本所建築結構創新技術研討會推廣宣導，且國內已有數個因 RC 柱斷面主筋配置過密，施工困難，而採用組合繫筋補強 RC 柱韌性之工程案例，甚獲業界好評。此外，為因應 ACI 318-14 設計規範繫筋的新規定，組合繫筋更能顯現其優越性，與更寬廣的應用空間及推廣潛力。

本研究案研擬鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項，可供國內業界參考應用。－長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部建築研究所

本研究案研擬鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項，後續可將研究成果於國內外專業期刊持續發表，並於相關建築結構技術研討會推廣宣導，供國內業界參考應用。

ABSTRACT

Keywords : Reinforced concrete columns, Crossties, Design code

A lap-spliced crosstie consists of two J-shaped steel bars (rebars) that have a straight end and an end featuring a 180° hook. A lap-spliced inner hoop is the lap splice of two U-bars. In this study, cyclic load test was conducted on four large-sized reinforced concrete (RC) columns to investigate the cyclic performance of RC columns comprising lap-spliced crossties and lap-spliced inner hoops. The research results are presented as follows: (a) The ductility of the specimens that adopted the lap-spliced crossties and lap-spliced inner hoops was significantly superior to that of the specimens using conventional crossties and crossties featuring a 180° hook on the two ends. (b) The use of the lap-spliced crossties and lap-spliced inner hoops may significantly improve the constructability of crossties over the conventional crossties, however, the amount of transverse reinforcement used is most likely to increase. (c) The lap-spliced crosstie and lap-spliced inner hoop were formed on the basis of the tension lap splice of rebars. Therefore column size has to be large enough to meet the minimum requirement for tension lap splice of rebars when lap-spliced crosstie or lap-spliced inner hoop is to be used.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

國內建築物使用鋼筋混凝土(RC)結構者約佔總樓地板面積的 8 成，鋼筋混凝土結構的使用相當普遍，又臺灣地處環太平洋地震帶上，因此確保鋼筋混凝土結構物的耐震性能至關重要。要讓 RC 結構具有良好的耐震性能，柱桿件需要能發展出足夠的韌性，而橫向鋼筋(Transverse Reinforcement)是柱是否可以發揮足夠韌性重要的一環。鋼筋混凝土柱斷面之橫向鋼筋，其主要作用為提供剪力強度、避免主筋受壓挫屈及圍束核心混凝土，尤其對於地震頻仍地區的建築物，後二者對於柱撓曲韌性的發展是非常重要的。傳統的橫向鋼筋通常由一根圍繞斷面的完整外箍筋，以及數根一端具 135 度彎鉤且另一端為 90 度彎鉤的繫筋所組成。繫筋一端使用 90 度彎鉤的原因，在於考量繫筋施工的方便性，但是當混凝土外圍保護層剝落時，90 度彎鉤容易向外撐開，損及繫筋圍束混凝土及主筋之效能。此外，美國混凝土學會 ACI 最新規範規定，當柱之軸壓力大於 $0.3A_g f'_c$ 或柱使用高強度混凝土時(不論軸力大小)，所有的主筋都要受有效彎鉤束制。此時，縱使使用方便施工之傳統繫筋且主筋淨間距也符合規範之規定，繫筋的施工空間也受到相當程度的局限，加上主筋的位置及繫筋之長度、彎鉤角度都有施工誤差，傳統繫筋之施工常遇到困難，繫筋兩端彎鉤也時常無法同時與主筋密接。

為改善傳統繫筋施工困難、施工品質不良的情形，本所近年來積極進行組合繫筋之研發。每一支組合繫筋由兩支一端為 180 度彎鉤另一端為直線的 J 形鋼筋搭接組合而成。組合繫筋的安裝可由柱之對邊往柱內插入，只要主筋淨間距滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，且每一支 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接，不但施工相當容易且施工品質佳。

本所自 97 年起持續利用大型力學實驗室 3000 噸萬能試驗機及大型試驗構架，進行大尺寸方形(斷面：750 mm×750 mm)短柱軸壓試驗[1]及方形(斷面：600 mm×600 mm)長柱撓曲行為之實驗研究[2]，探討在各種繫筋配置方式下，其軸向受壓及撓曲之行為，以評估各種繫筋配置方式的可行性及實用性，嘗試解決國內工程實務的問題，並獲致多項具體結論，本年度擬彙整本所過去實驗研究成果，研擬鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項，供國內業界參考應用。

本研究之預期成果包括：(1)國內外相關文獻之回顧與蒐集，以及本所過去實驗研究成果彙整；(2)研擬鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項，提供國內工程實務界參考；(3)檢討現行 RC 構造設計規範柱繫筋之相關規定，並提供本案研究成果供相關規範研修訂時之參考，以解決國內工程實務問題。

第二節 研究方法及進度說明

本計畫之工作內容包括相關文獻之回顧與蒐集、過去研究結果之整理及分析、國內業界專家諮詢以及舉辦期中與期末簡報會議，邀請國內專家學者與相關業界人士與會，以進行意見交流。經由本案之研究，希望可將國內結構工程整體水準向上提升，使 RC 方形柱繫筋之規劃及設計更有依循的參考，以確實達到提高結構物耐震能力之預期目標，並使工程設計單位能充分瞭解正確的繫筋之設計及施工。本研究已完成相關文獻之回顧與蒐集與 RC 柱試體之規劃及設計，並完成部分過去研究結果之整理與分析，以及鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項部分內容，未來將彙整納入期中與期末簡報專家學者與相關業界人士意見，持續充實設計與施工注意要項內容，並於 106 年底前完成結案。

第三節 蒐集之資料、文獻分析

國內混凝土設計規範主要係參考美國 ACI 318 規範研訂，此外國內學者針對混凝土工程設計及施工環境，亦有相關研究成果值得參考。本研究針對美國及國內 RC 方形柱繫、箍筋相關研究文獻，進行蒐集、整理與分析。

1.3.1 美國之相關文獻

由於國內混凝土工程設計規範一直以來，皆參考美國混凝土學會(ACI, American Concrete Institute)之 ACI 318 規範(Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary)而研訂，因此儘管國內與美國的工程環境未必

完全相同，其相關文獻實值得國內參考借鏡，相關重要文獻分述如下：

(1) ACI 318M-11 (Building code requirements for structural concrete and commentary, 2011)

ACI 318M-11[3]有關承受撓曲與軸向載重構材橫向鋼筋之耐震特別規定如下：

$$A_{sh} / sb_c \geq 0.3 \frac{f'_c}{f_{yt}} \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \leq 0.09 f'_c / f_{yt}$$

其中

A_{sh} = 在 s 間距內垂直於 b_c 方向之橫向鋼筋(包括繫筋)總斷面積。

s = 橫向鋼筋於縱向鋼筋平行方向之中心距。

b_c = 計算 A_{ch} 時之柱心尺寸，即橫向鋼筋外緣之間距。

f'_c = 混凝土之規定抗壓強度。

f_{yt} = 橫向鋼筋之規定降伏強度。

A_g = 鋼筋混凝土總斷面積。

A_{ch} = 橫向鋼筋圍束面積。

承受撓曲與軸向載重構材橫向鋼筋之間距不得超過(耐震特別規定)：

(1) 構材斷面最小尺度之 1/4。

(2) 6 倍主筋直徑。

(3) 下式定義之 s_0

$$s_0 = 100 + \left(\frac{350 - h_x}{3} \right) \leq 150 \text{ mm}$$

其中 h_x 為沿柱各邊相鄰箍筋或繫筋間最大水平距離。

有關承受撓曲與軸向載重構材橫向鋼筋耐震特別規定之接頭區域不得小於：

(1) 接頭面處之構材深度。

(2) 構材淨長之 1/6。

(3) 450 mm。

(2) Elwood, K. J., Maffei, J., Riederer, K. A., and Telleen, K. (2009) "Improving column confinement Part 2: Proposed new provisions for the ACI 318 building code," ACI Concrete International, Michigan, USA.

Elwood 等[4]提出較合理的撓曲與軸向載重構材橫向鋼筋之耐震特別規定如下：

$$A_{sh} / sb_c \geq 0.25k_p k_n (f'_c / f_{yt})(A_g / A_{ch})$$

其中

$$k_p = \frac{P_u}{A_g f'_c} \geq 0.2 ; \text{軸力係數。}$$

$$k_n = [0.6 + 0.4(n / n_{\ell s})][(h_x + 12) / 20] ; \text{圍束係數。}$$

n = 縱向鋼筋總數。

$n_{\ell s}$ = 位於箍筋角落或以超過 135 度的耐震彎鉤圍繞束制之縱向鋼筋數目。

$[(h_x + 12) / 20] \geq 1.0$; 其中 h_x 之單位為英吋。

由以上的說明得知，Elwood 等所提之橫向鋼筋設計量，因考慮軸力及圍束效應等因素故較為合理，並且反映柱構材在較高軸力下，需配置較多橫向鋼筋量，以滿足耐震的需求。

(3) Anchorage of transverse reinforcement in rectangular reinforced concrete columns in seismic design (Tanaka, H., Park, R., and McNamee, B. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 165-190)

根據 Tanaka 等人[5]的研究，對於斷面尺寸為 400 mm 的 RC 柱，不具足夠搭接長度的組合繫筋，也可以提供可接受的韌性行為；但搭接長度不足的外圍組合箍筋，則因其耐震行為不佳，不建議採用。

(4) PEER structural performance database user's manual (version 1.0) (Berry, M., Parrish, M., and Eberhard, M. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA, 2004)

本研究[6]共蒐集 274 支矩形箍筋柱及 160 支圓形螺箍筋柱試體，承受反覆側向

載重之試驗資料庫，提供包括試體的基本設計資料、側向載重與位移數位歷時資料、重要材料性質及試驗裝置等。本資料庫提供豐富的既有研究成果，供研究者參考比對，(矩形箍筋柱最大尺寸：380 mm×610 mm；方形箍筋柱最大尺寸：550 mm×550 mm；圓形螺箍筋柱最大直徑：600 mm)。

(5) Confinement effectiveness of crossties in RC (Moehle, J. P., and Cavanagh, T. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 10, pp. 2105-2120)

本研究[7]共計有 10 個試體，其中 8 個試體配置橫箍筋，總計採用 4 種箍筋配置型式。研究結果發現兩端 180 度的繫筋與箍筋綁紮及一端 90 度另一端 135 度的繫筋與主筋綁紮，此兩種施工細部皆為可接受的圍束方式，惟其柱試體的尺寸為 305 mm×305 mm，與 RC 結構物的實際柱尺寸仍存有差距。

(6) Seismic performance of full-scale reinforced concrete columns (Bae, S., and Bayrak, O. ACI Structural Journal, Vol. 105, No. 2, pp. 123-133)

本研究[8]進行 5 個實尺寸鋼筋混凝土柱試體的撓曲試驗，研究結果發現由於 P- Δ 效應，跨深比在高軸力比下，將明顯降低柱構材的耐震性能。此外，軸力比是決定塑性鉸長度的重要因素。因塑性鉸長度與軸力比有關，斷面及構材行為的關係，也受到軸力比的影響。

(7) ACI 374.1-05 (Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary)

ACI 374.1-05[9]規定強震區的抗彎矩構架，進行相關結構試驗的合格標準，其中包括建議的反復側向實驗歷程，另建議結構試驗的側向位移比應超過 3.5%。

(8) ACI 318M-14 (Building code requirements for structural concrete and commentary, 2014)

ACI 318M-14[10]有關柱構材橫向鋼筋之耐震特別規定，除依 ACI 318M-11[3]既有規定外，另外針對 $P_u > 0.3A_g f'_c$ (高軸力) 或 $f'_c \geq 70$ MPa (高強度混凝土) 的情況下，有更嚴格的規定如下：

$$A_{sh} / sb_c \geq 0.2k_f k_n \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}}$$

其中

$$k_f = \frac{f'_c}{175} + 0.6 \geq 1.0 ; \text{混凝土強度係數}(f'_c \text{ 單位為 MPa})。$$

$$k_n = \frac{n_\ell}{n_\ell - 2} ; \text{圍束係數。}$$

n_ℓ = 被外箍筋角落或耐震彎鉤(彎鉤彎角不少於 135 度)圍繞之主筋數目。

此外，在 $P_u > 0.3A_g f'_c$ (高軸力) 或 $f'_c \geq 70$ MPa (高強度混凝土) 的情況下，所有主筋須被外箍筋角落或耐震彎鉤圍繞，此一新規定將有效提升 RC 柱之耐震性能，但將因此造成 RC 柱橫向鋼筋的施工更形困難。

(9) NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 1 (Seismic design of reinforced concrete special moment frames: A guide for practicing engineers, Second Edition, GCR 16-917-40, 2016)

GCR 16-917-40[11] 依據美國最新規範如 ACI 318M-14 (Building code requirements for structural concrete and commentary, 2014)、2015 International Building Code (ICC 2015) 及 ASCE/SEI 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE 2016) 之規定，研訂鋼筋混凝土特殊抗彎矩構架耐震設計手冊，包含鋼筋混凝土特殊抗彎矩構架設計及施工注意事項等內容，供工程實務界參考。

1.3.2 國內相關文獻

(1) 現行規範「柱圍束箍筋綁紮方式」之安全性探討(中華民國結構工程學會結構工程第 21 卷第 4 期)

本文[12]主要的論點在於現行「結構混凝土設計規範」中，對於繫筋二端之彎鉤，未鉤住橫箍筋，而僅鉤住縱向柱主筋之綁紮方式所產生之安全疑慮甚多，對

柱之承載能力及韌性影響亦甚大，尤其是對大尺寸之柱會有近半數的柱主筋從柱頂至柱底全長均處於幾乎無側撐之情況。因此雖然繫筋二端之彎鉤改為鉤住橫箍筋，亦有其缺點存在，但「二害相權取其輕」，若犧牲少許施工性，可確保較大之安全性，便值得深入研究改進。

(2) 建築鋼筋工程現場實務(詹氏書局 2000 年出版；劉壽榮、范光懿合著)

本書[13]著者認為彎鉤不論是否需要同時鉤住柱主筋或柱箍筋，重要的是大於 135 度的耐震彎鉤需確實的與柱主筋或柱箍筋繫結在一起，此時耐震彎鉤靠著繫筋與混凝土之間的握裹力鉤住柱主筋或柱箍筋。另工作實務中，繫筋與主筋之間至少要留 10 mm 的轉圓空間以利安裝，意即繫筋與被鉤的柱主筋或柱箍筋之間將有至少 10 mm 的工作間隙而非完全密合。

(3) 一筆箍及年年發預製箍筋之研發(潤弘精密工程事業股份有限公司網站：<http://www.ruentex.com.tw>)

國內預鑄廠[14]有鑒於鋼筋現場綁紮常常是最費工，也是最容易因為人為的疏失導致施工結果與設計不符的情形，嘗試進行預製箍筋的研發，所謂的一筆箍，即指箍筋在鋼筋廠中將一根鋼筋，依據設計連續彎折成箍筋的形狀，箍筋已事先從工廠中彎折成設計之大小，運至工地後僅需將箍筋套入，省去工地現場許多箍筋加工的工項，加快施工之速度，而年年發則是一種採用螺旋箍筋新工法。

(4) 「混凝土結構技術規範之修正研擬」研究報告(內政部建築研究所 105 委託研究計畫)

內政部建築研究所於 105 年委託中國土木水利工程學會辦理「混凝土結構技術規範之修正研擬」研究案[15]，係以美國 ACI 318M-14 規範為主要參考依據，完成「混凝土結構技術規範」修正草案，其中有關柱構材橫向鋼筋之耐震特別規定，除完全依據 ACI 318M-14[10]既有規定外，在 $P_u > 0.3A_g f'_c$ (高軸力) 或 $f'_c \geq 70$ MPa (高強度混凝土) 的情況下，針對所有主筋須被外箍筋角落或耐震彎鉤圍繞的規定，將兩端為耐震彎鉤的繫筋放寬為一端具 135 度彎鉤且另一端為 90 度彎鉤的繫筋，但必需依 ACI 318M-14[10] 的新增公式，增加其橫向鋼筋量，當柱斷面包含有大量的縱向鋼筋時，在組裝柱鋼筋籠時，很難將繫筋準確地安裝於標準的配置位置。

第二章 本所 RC 柱試體軸壓及撓曲試驗成果

臺灣地區以鋼筋混凝土(RC)做為建築結構材料的情形相當普遍，RC 柱的箍、繫筋在圍束核心混凝土及柱撓曲韌性發展上扮演重要的角色(參見圖 2-1)。為了降低施工困難度傳統繫筋安裝時通常先將 135 度彎鉤勾住對面的主筋，然後再旋轉繫筋將 90 度彎鉤扣住這一面的主筋。但是工程實務上，尤其是高樓結構，由於柱主筋較多，傳統繫筋的施工還是時常遇到困難，降低了施工品質。此外，依據美國混凝土學會(ACI)最新版設計規範(ACI 318-14)的規定，承受高軸力的 RC 柱基本上所有的主筋均需被繫筋勾住，這讓傳統繫筋的安裝更形困難，雪上加霜。

本所積極構思研發組合繫筋(參見圖 2-2)，來降低繫筋施工的困難度。組合繫筋是由二支一端為 180 度彎鉤另一端為直線的 J 形鋼筋搭接組合而成。組合繫筋的安裝由柱之對邊往柱內插入，主筋淨間距只要滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，施工相當方便。安裝時每一 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接，同時 J 形鋼筋直線端架在外箍筋上，不但方便 J 形鋼筋之固定，並可避免混凝土澆置時 J 形鋼筋移位。

針對組合繫筋，本所利用臺北景美建置的材料實驗中心大型力學設備，完成一系列完整的實驗研究。共計以 3000 噸萬能試驗機完成 24 支大尺寸 RC 柱試體軸壓試驗，並以大型試驗構架完成 26 支 RC 柱試體撓曲試驗，完整探討高軸壓力、軸拉力以及搭接長度對組合繫筋的影響。研究成果證實使用組合繫筋可增進 RC 柱的韌性，施工簡便且施工品質容易控制，可以大幅提升鋼筋施工品質。

研究成果已於國內外專業期刊發表，並在 101、103 及 105 年於本所建築結構創新技術研討會推廣宣導，且國內已有數個因 RC 柱斷面主筋配置過密，傳統繫筋施工困難，而改採用組合繫筋之工程案例，甚獲業界好評。此外，組合繫筋能輕鬆因應 ACI 318-14 設計規範繫筋的新規定，預計組合繫筋在未來會更能顯現其優越性，及更寬廣的應用潛力。

本章將就本所過去 RC 柱試體軸壓及撓曲試驗結果，以及國內工地應用實例簡要介紹，並且做為本研究研擬鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項內容最主要的參考依據。

第一節 RC 柱試體軸壓試驗成果

本所於臺北市景美建置的材料實驗中心大型力學設備，其中以 3000 噸萬能試驗機最具特色，本所藉由 3000 噸萬能試驗機進行大尺寸 RC 柱試體軸壓試驗(方形柱：750 mm×750 mm；圓形柱：850 mm 直徑)，探討 RC 柱橫向鋼筋圍束核心混凝土的效果，參見圖 2-3 及圖 2-4。

本所過去有關 RC 柱試體軸壓實驗研究成果論文，可參見文獻如下：

- (1) Lee, T. K., Chen, C. C., Tsou, P. C., Lin, K. T., Lee, W. W., and Pan, A. D. E. (2012). “Experimental evaluation of crossties in large reinforced concrete columns under pure compression.” *Advances in Structural Engineering*, 15(10), 1717-1728. (SCI)[16]
- (2) Lee, T. K., Chen, C. C., Pan, A. D. E., Hsiue, K. Y., Tsai, W. M., and Hwa, K. (2013). “Experimental evaluation of large circular RC columns under pure compression.” *Structural Concrete*, 14(1), 60-68. (SCI)[17]
- (3) Lee, T. K., Chen, C. C., Pan, A. D. E., Hwa, K., and Ma, M. J. L. (2013). “Performance of large circular RC columns under compression.” *Magazine of Concrete Research*, 65(8), 519-527. (SCI)[18]
- (4) Lee, T. K., Chen, C. C., Hwa, K., and Pan, A. D. E. (2014). “Performance of large RC columns under axial compression loads.” *Structures and Buildings*, 167(SB5), 300-311. (SCI)[19]
- (5) 李台光、陳正誠、華根 (2012) “大型鋼筋混凝土方形柱軸壓行為之探討” 結構工程第 27 卷第 2 期第 3-20 頁，中華民國結構工程學會。[20]
- (6) 李台光、陳正誠、華根 (2012) “大型鋼筋混凝土圓形短柱軸壓行為之探討” 結構工程第 27 卷第 3 期第 3-17 頁，中華民國結構工程學會。[21]
- (7) 李台光、華根、陳正誠 (2013) “大尺寸鋼筋混凝土柱橫向鋼筋圍束效應之研究” 技師期刊第 63 期第 40-46 頁，臺北市土木技師公會。[22]

前述有關 RC 柱試體軸壓實驗研究結果，可獲得以下重要的結論：

- (1) 傳統繫筋 90 度彎鉤與縱向鋼筋間 20 mm 以內的間距，並不會對圍束效應產生顯著的影響。

- (2)傳統繫筋彎鉤同時鉤住箍筋及縱向鋼筋上的效果會優於彎鉤僅鉤住縱向鋼筋，但這種做法會增加施工時的困難度。
- (3)對於柱構材的圍束效果而言，二端均為 180 度彎鉤的繫筋較二端分別為 90 度及 135 度彎鉤的傳統繫筋為佳，但在施工組裝時會較為困難。
- (4)相較於傳統繫筋及二端均為 180 度彎鉤的繫筋，2 件式 180 度彎鉤的組合繫筋表現最佳，且其具有施工組裝簡便的好處。
- (5)若傳統繫筋與縱向鋼筋間有 10 mm 以內的間隙，繫筋彎鉤鉤住箍筋的效果會優於鉤住縱向鋼筋。
- (6)傳統繫筋沿主筋方向上不間隔換端，對於圍束混凝土效果的影響並不顯著。
- (7)以 2 根 2 端為 135 度彎鉤的 L 形肋筋交疊而成的組合箍筋，取代鋼筋混凝土柱的傳統完整箍筋，其圍束效果良好，且對於鋼筋籠的製作也不困難。
- (8)ACI 318M-11 提出的新式圓箍筋，亦即端部必須疊接至少 150 mm，同時兩端標準彎鉤需圍繞縱向鋼筋，應有足夠的耐震性能。
- (9)採用類似矩形箍筋的續接方式，90 度彎鉤直線延伸長度為 12 倍鋼筋直徑，且圍繞於縱向鋼筋的改良式 ACI 螺箍筋比傳統搭接式 ACI 螺箍筋，能提供較大圍束力。
- (10)圓箍筋端部 90 度彎鉤採用 ACI 規定之肋筋與箍筋標準彎鉤的直線延伸長度(6 倍鋼筋直徑)是恰當的。
- (11)相鄰圓箍筋疊接處的交錯距離愈大，可以提供較大圍束力。因此，ACI 318M-11 要求相鄰圓箍筋疊接處必須沿圓周相互交錯之規定應是合理的。
- (12)圓箍筋採用類似矩形箍筋的續接方式，兩端的 90 度彎鉤直接錨定於核心混凝土與圍繞於輔助鋼筋的性能相差不大，但明顯比傳統搭接式 ACI 螺箍筋優異並與改良式 ACI 螺箍筋相接近。
- (13)螺箍筋與圓箍筋同時採用類似矩形箍筋的續接方式，90 度彎鉤直線延伸長度為 12 倍鋼筋直徑，且圍繞於縱向鋼筋時，則圓箍筋的性能較為優異。
- (14)針對 ACI 318M-11 新式圓箍筋稍做改良，僅要求 1 支 90 度彎鉤圍繞縱向鋼筋，而另外 1 支彎鉤則直接錨定於核心混凝土中，主要是基於施工方便性的考量。
- (15)圓柱的繫筋可以發揮方柱繫筋類似的圍束效應。
- (16)對於十字形的繫筋配置，計算橫向鋼筋等值體積比時，可加入 1 根繫筋的圍束效應。

- (17)對於井字形的繫筋配置，計算橫向鋼筋等值體積比時，可加入 2 根繫筋的圍束效應。

第二節 RC 柱試體撓曲試驗成果

本所藉由材料實驗中心大型試驗構架進行大尺寸 RC 柱試體撓曲試驗(方形柱：600 mm×600 mm 及 470 mm×470 mm；圓形柱：700 mm 直徑)，探討 RC 柱橫向鋼筋對於撓曲韌性發展的影響，參見圖 2-5。

本所過去有關 RC 柱試體撓曲實驗研究成果，可參考文獻如下：

- (1) Lee, T. K., Chen, C. C., and Zhan, K. S. (2017). “The cyclic performance of reinforced concrete columns using the lap-spliced crosstie and lap-spliced inner hoop.” *Structural Concrete* (Accepted for Publication). (SCI)[23]
- (2) 李台光、陳正誠、何明錦 (2017) “含水平搭接組合繫筋 RC 柱考慮搭接長度效應之耐震性能” *結構工程* 第 32 卷第 3 期第 27-47 頁，中華民國結構工程學會。[24]
- (3) 李台光、陳正誠 (2015) “含組合繫筋及組合內箍筋 RC 柱之耐震性能” *結構工程* 第 30 卷第 1 期第 34-52 頁，中華民國結構工程學會。[25]
- (4) 李台光、陳正誠 (2016) “不同軸力作用下組合繫筋之一體性及 RC 柱之耐震性能” *結構工程* 第 31 卷第 2 期第 5-24 頁，中華民國結構工程學會。[26]

前述有關 RC 柱試體撓曲實驗研究結果，可獲得以下重要的結論：

- (1) 組合繫筋圍束混凝土之效應明顯比傳統繫筋優異。以組合繫筋取代傳統繫筋，可以顯著提升柱桿件之耐震性能。
- (2) 傳統繫筋容易受到施工空間的不足，而產生施工困難的問題，進而影響到施工品質。採用組合繫筋，可以大幅降低施工空間之需求，不但施工簡便、施工誤差可降到很低，且彎鉤可以和主筋密接，可有效提升 RC 柱之施工品質。
- (3) 組合內箍筋圍束混凝土之效應明顯比傳統繫筋優異。傳統內箍筋之安裝需由主筋頂部往下套，施工性差，國內甚少使用。組合內箍筋可以由柱兩對邊往內插入進行安裝，可以大幅改善內箍筋之施工性，有效提升 RC 柱鋼筋之施工品質及耐震性能。

- (4)過去的研究結果顯示，僅有外箍筋之角落、內箍筋之角落、繫筋之 135 度彎鉤及繫筋之 180 度彎鉤，才被認定為有效彎鉤。依此觀之，一個組合繫筋具有兩個有效彎鉤，而一個傳統箍筋僅有一個有效彎鉤，組合繫筋的有效性是傳統繫筋的兩倍。而本所的試驗結果也支持有效彎鉤的論點。
- (5)組合繫筋及組合內箍筋採用鋼筋拉力搭接組合而成，在常用的鋼筋強度與混凝土強度之組合以及混凝土保護層厚度的情況下，當柱寬等於或大於 470 mm，即可使用 D10(#3)鋼筋做成之組合繫筋及組合內箍筋，而當柱寬等於或大於 570 mm，即可使用 D13(#4)鋼筋做成之組合繫筋及組合內箍筋。
- (6)使用組合繫筋之柱試體在不同軸力比作用下，其層間位移角容量及塑性轉角容量，與含兩端皆為 180 度彎鉤一體繫筋之試體不相上下。以組合繫筋取代傳統繫筋，可以顯著提升柱桿件之耐震性能。
- (7)含組合繫筋之柱試體在無軸力作用下，J 形鋼筋直線端未發現有向柱內滑動的現象，顯示兩個 J 形鋼筋有效組合成一個兩端為 180 度彎鉤之繫筋，維持良好的一體性。
- (8)使用組合繫筋及 180 度彎鉤一體繫筋之試體，其韌性表現皆隨著軸力比的增加，而大幅衰減。目前「混凝土結構設計規範」之橫向鋼筋量公式，並未依學理納入軸力比因子，建議可參考國際相關規範修正。
- (9)水平搭接且搭接長度為 1 倍之規範規定甲級搭接長度之組合繫筋，其圍束效果不亞於兩端為 180 度彎鉤之一體繫筋。組合繫筋採用上下搭接或水平搭接都可以發揮良好的圍束功能。
- (10)根據本所研究應變的量測結果，組合繫筋所發揮的強度高於單根繫筋之降伏強度，顯示水平搭接且搭接長度為 1 倍規範規定甲級搭接長度之組合繫筋，可以發展出所需之強度。
- (11)組合繫筋可以大幅改善繫筋之施工性及施工品質，但是也會增加鋼筋使用量。本所研究探討的個案顯示，使用組合繫筋會使每個塑性鉸區增加 11.5 公斤之鋼筋量。

第三節 國內工地應用實例

組合繫筋於國內工地因傳統繫筋施工困難，已有數個工程應用實例，甚獲業界

好評。此外，組合繫筋能輕鬆因應 ACI 318-14 設計規範繫筋的新規定，預計組合繫筋在未來會更能顯現其優越性，及更寬廣的應用潛力，如圖 2-6 所示：

- (1) 圖 2-6(a)所示，為組合繫筋中部工地應用實例，針對異形 RC 柱，組合繫筋展現其優越的施工性，且每一 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接。
- (2) 圖 2-6(b)所示，為組合繫筋南部工地應用實例，針對補強 RC 梁柱接頭橫向鋼筋量，外箍筋及傳統繫筋皆難以施工下，組合繫筋施工便利，且每一 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接。

目前國內鋼筋混凝土建築大多採鋼筋現場綁紮後，再經組模及澆置混凝土的傳統施工方式，施工精度不如預鑄工法準確。組合繫筋適用於國內 RC 柱鋼筋綁紮工程實務現況，並能有效提升 RC 柱的耐震能力。

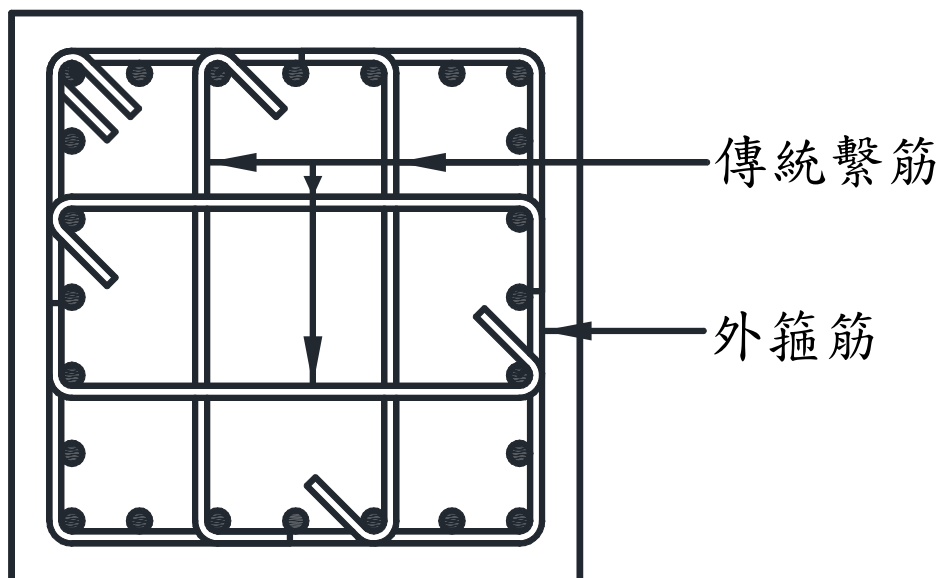


圖 2-1 鋼筋混凝土耐震柱的橫向鋼筋配置示意圖

(資料來源：本研究)

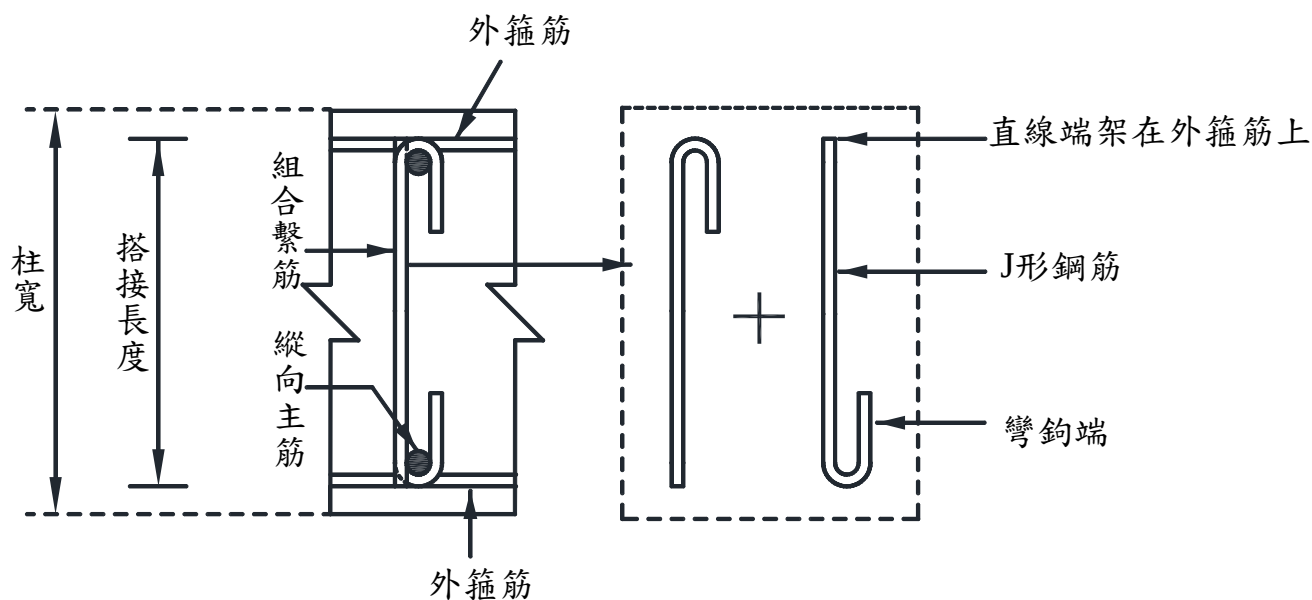


圖 2-2 組合繫筋組成示意圖

(資料來源：本研究)

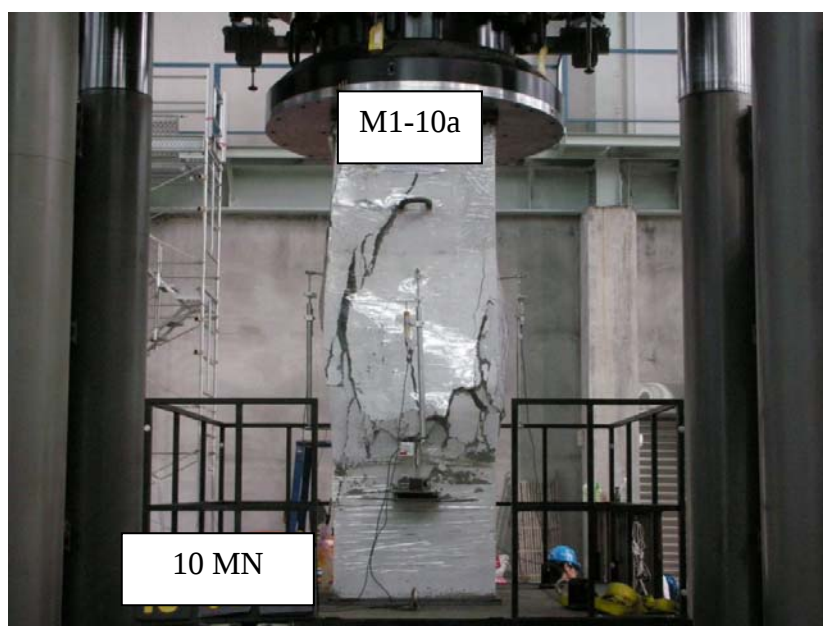


圖 2-3 RC 方形柱試體軸壓試驗照片

(資料來源：本研究)



圖 2-4 RC 圓形柱試體軸壓試驗照片

(資料來源：本研究)

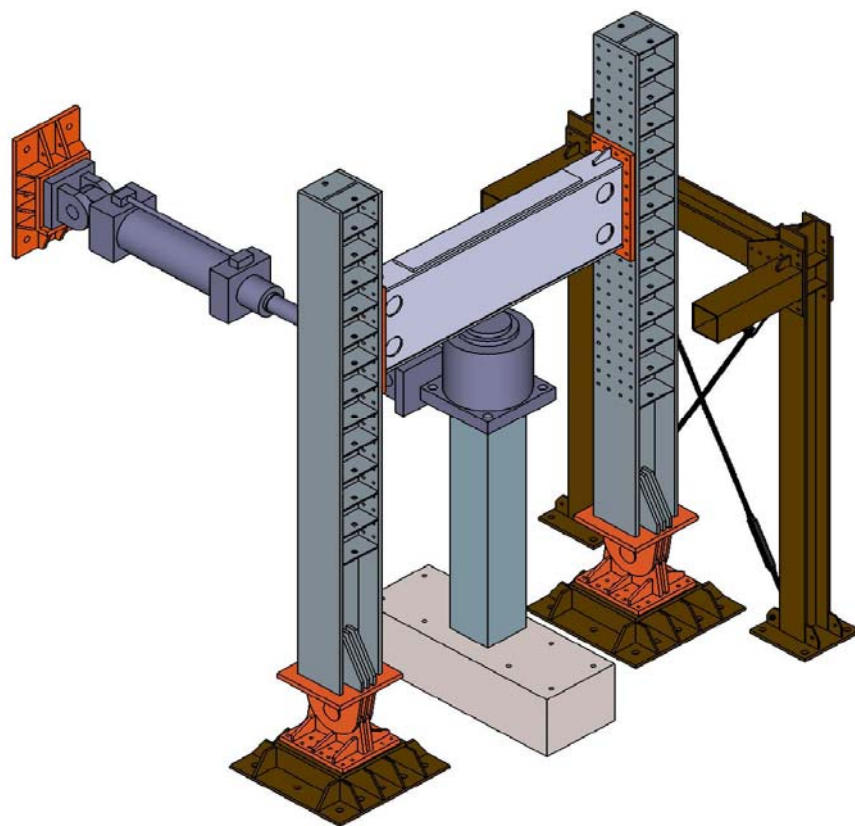
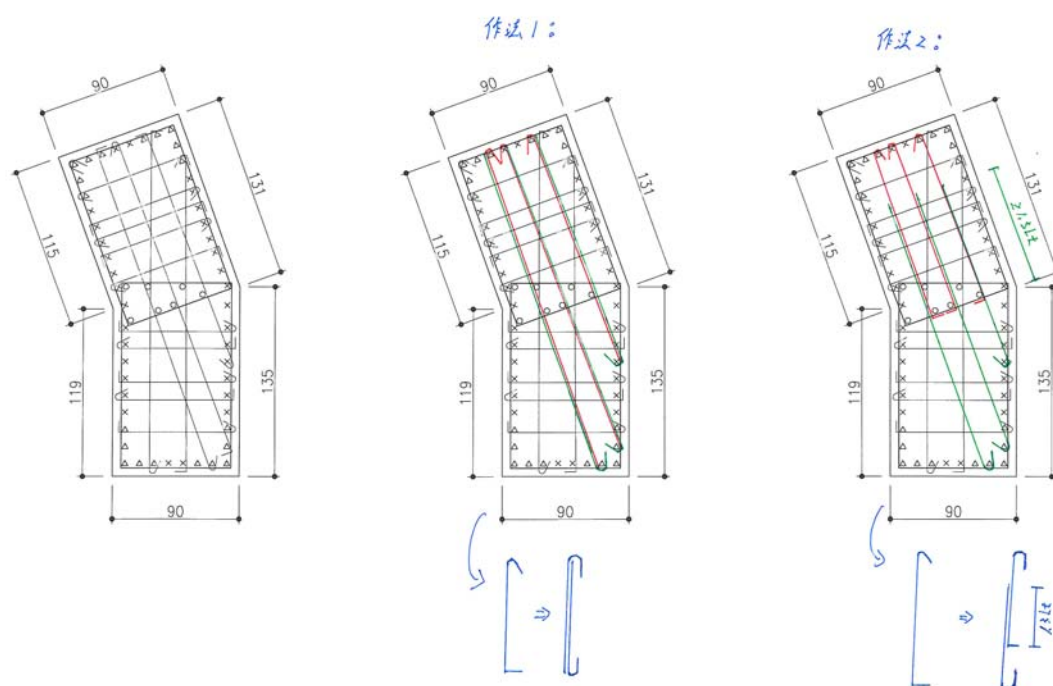
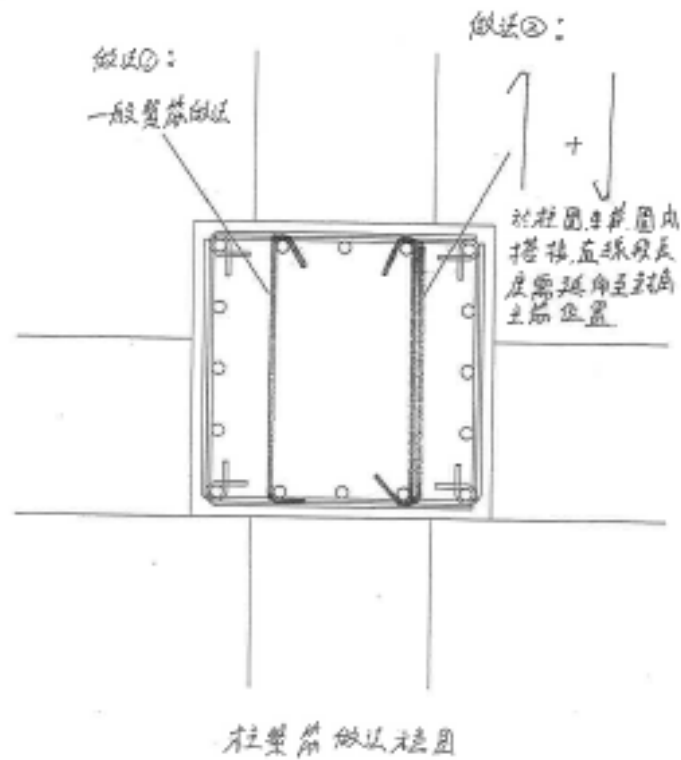


圖 2-5 大型試驗構架示意圖

(資料來源：本研究)



(a) 國內使用組合繫筋案例 1



(b) 國內使用組合繫筋案例 2

圖 2-6 國內使用組合繫筋案例

(資料來源：本研究)

第三章 組合繫筋設計與施工注意要項

國內建築物使用鋼筋混凝土(RC)結構者約佔總樓地板面積的 8 成，鋼筋混凝土結構的使用相當普遍，又臺灣地處環太平洋地震帶上，因此確保鋼筋混凝土結構物的耐震性能至關重要。要讓 RC 結構具有良好的耐震性能，柱桿件需要能發展出足夠的韌性，而橫向鋼筋(Transverse Reinforcement)是柱是否可以發揮足夠韌性重要的一環。圖 3-1(a)所示為一耐震鋼筋混凝土柱的橫向鋼筋配置示意圖，橫向鋼筋通常由一個外箍筋及數支繫筋組成，而為了施工的方便，傳統上繫筋是一端具有 90 度彎鉤而另一端具有 135 度彎鉤的鋼筋。圖 3-1(a)是常見於設計圖的橫向鋼筋配置「示意圖」，如果根據實際的柱斷面尺寸、鋼筋尺寸及彎鉤彎轉半徑繪製施工圖，以 600 × 600 mm 的斷面、D25 主筋及 D13 橫向鋼筋為例，施工圖會如圖 3-1(b)所示。由圖可看出柱主筋與橫向鋼筋已經產生衝突，且縱使使用方便施工之傳統繫筋且主筋淨間距也符合規範之規定，繫筋的施工空間也受到相當程度的侷限，加上主筋的位置及繫筋之長度、彎鉤角度都有施工誤差，傳統繫筋之施工常遇到困難，繫筋兩端彎鉤也時常無法同時與主筋密接。

根據 ACI 2014 年版規範之規定，當柱軸力高於 $0.3f'_cA_g$ (其中 f'_c 為混凝土標稱抗壓強度， A_g 為柱總斷面積)或所使用之混凝土強度超過 70 MPa，所有外圍縱向鋼筋均需被箍筋之角落或繫筋彎鉤束制。如果根據這項規定且繫筋都使用 135 度彎鉤，則上述柱斷面的施工圖會如圖 3-1(c)所示，此時繫筋的彎鉤糾結在一起，繫筋的安裝更加困難。

第一節 前言

為改善傳統繫筋施工困難、施工品質不良的情形，本所近年來積極進行組合繫筋之研發。如圖 3-2 所示，每一支組合繫筋由兩支一端為 180 度彎鉤另一端為直線的 J 形鋼筋搭接組合而成。組合繫筋的安裝可由柱之對邊往柱內插入，只要主筋淨間距滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，且每一支 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接，不但施工相當容易且施工品質佳。此外，組合繫筋 2 支 J 形鋼筋，其直線端架皆在外箍筋上，如此可以避免混凝土澆置時 J 形鋼筋移位。

針對組合繫筋，本所利用臺北景美建置的材料實驗中心大型力學設備，完成一系列完整的實驗研究。共計以 3000 噸萬能試驗機完成 24 支大尺寸 RC 柱試體軸壓試驗，並以大型試驗構架完成 26 支 RC 柱試體撓曲試驗，完整探討高軸壓力、軸拉力以及搭接長度對組合繫筋的影響。研究成果證實使用組合繫筋可增進 RC 柱的韌性，施工簡便且施工品質容易控制，可以大幅提升鋼筋施工品質。本章將依據本所過去 RC 柱試體軸壓及撓曲試驗結果，研擬鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項之內容。

3.1.1 921 及 0206 地震鋼筋混凝土建築倒塌原因探討

921 地震中建築物倒塌的主要原因可歸納為 3 類，第 1 類為地震的強度、第 2 類為建築物的基地特性、第 3 類為建築物本身的體質。大體而言，上述第 1 及第 2 類因素屬於自然原因，第 3 類原因則涉及人為因素。

(1)地震的強度

921 地震在南投日月潭及名間鄉新街國小所測得之最大水平加速度分別高達 989 gal 及 983 gal，最大地表加速度顯已大於過去假設之最大值，因此附近建築物遭受破壞誠屬難以避免。

(2)建築物的基地特性

921 地震中有重大災情的南投縣竹山、名間、南投、草屯，臺中縣霧峰、太平、潭子、豐原及臺中市大坑等地均位於車籠埔斷層帶附近，而南投縣集集、鹿谷、中寮及臺中縣東勢、新社等地則位於雙冬斷層附近。此外，地層劇烈搖晃常導致基地土壤液化，承载力隨之消減，而使建築物陷落坍塌。921 地震中員林百果山麓、大里市區域內即有大批建築物因土壤液化而破壞。另因為盆地效應，在臺北地區並因地盤軟弱，雖遠離震央 150 公里，震度達 5 級，且仍然有 300 餘棟建築物損壞。

(3)建築物的體質

建築物之耐震能力與其本身體質關係密切。影響建築物體質之人為因素包括：政府部門訂定的建築法與建築技術規則等相關耐震設計規範，專業技師的職責與管理制度，施工營造廠商對建築物材料、工法與營建管理制度的選擇，以及使用者對

建築物內部結構、隔間增改建之程度與維護管理等。

經由現場勘災顯示，對於鋼筋混凝土梁柱端部彎矩較大，當年規範並無規定箍筋彎鉤需達 135 度，故實際上施工上仍多常採用 90 度，無法達到耐震的要求。許多破壞顯示柱之箍筋間距太大，平均約在 20~30cm 左右，未依規定紮緊，易造成主筋向外挫屈。另外箍筋多未採用 135 度彎鉤，易造成箍筋暴開脫落，圍束力不足，柱體缺乏韌性易破裂，參見圖 3-3。

0206 美濃地震發生於 105 年 2 月 6 日凌晨，震央於高雄市美濃區，地震規模為 6.4。地震除在草嶺測得之最大水平加速度達 6 級(344 gal)外，其餘皆為 5 級或 5 級以下，建築物應不致發生嚴重的破壞，而維冠金龍大樓等建築物的倒塌與毀損，可能包含結構系統不良、未做韌性鋼筋細部、混凝土強度不足及施工監造不當等因素所致，參見圖 3-4。

3.1.2 各種繫筋施工性討論(傳統繫筋、組合繫筋、組合內箍筋)

(1) 傳統繫筋(90/135)

傳統繫筋目前普遍使用於實際工程，安裝時通常先將 135 度彎鉤勾住對面的主筋，然後再旋轉繫筋將 90 度彎鉤扣住這一面的主筋。在彎鉤及彎鉤延伸段都符合規範規定的情況下，柱主筋應有 80~100 mm 之淨間距才比較容易施作。規範規定柱主筋的淨間距不得小於 1.5 倍主筋直徑、1.33 倍骨材最大粒徑及 40 mm。以 D32(#10) 鋼筋為例，主筋之淨間距可能僅有 48 mm，繫筋之安裝將相當困難。設計者在配筋時往往僅考慮到設計規範對主筋淨間距的要求，而忽略了安裝傳統繫筋所需之施工間距，因此工地常有繫筋安裝困難、施工品質不佳的現象發生。

(2) 180 度彎鉤一體繫筋(180/180)

在工地安裝 180 度彎鉤一體繫筋時，通常需要由主筋上端往下套，不但安裝較為困難，且常需要額外的施工架，實際工程很少使用。本文進行此種型式繫筋的試驗，主要在和 LS/180 組合繫筋及 LS/cn 組合內箍筋做比較，並檢驗如後所述有效彎鉤的論點。

(3) 組合繫筋(LS/180)

組合繫筋的安裝由柱之對邊往柱內插入，主筋淨間距只要滿足設計規範的要

求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，施工相當方便。安裝時每一 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接，J 形鋼筋直線端架在外箍筋上，不但方便 J 形鋼筋之固定，並可避免混凝土澆置時 J 形鋼筋移位。使用組合繫筋一方面可以增進韌性，另一方面施工簡便且施工品質容易控制，可以大幅提升鋼筋施工品質。

(4) 組合內箍筋(LS/cn)

傳統內箍筋之安裝與 180 度彎鉤一體繫筋類似，需由主筋頂部往下套，安裝相當困難，國內甚少使用，然而組合內箍筋的安裝可以由柱兩對邊往內插入，比傳統內箍筋的施工簡易。U 形鋼筋角落的主筋應該位於鋼筋彎轉處，U 形鋼筋直線端亦應架在外箍筋上。

第二節 國內常見 RC 柱箍繫筋細部探討

本所以 3000 噸萬能試驗機進行大尺寸 RC 方形(斷面：750 mm×750 mm)短柱試體軸壓試驗，探討在各種繫筋配置方式下，其軸向受壓之行為，以評估各類繫筋配置方式的可行性及實用性，嘗試解決國內工程實務的問題，獲致之研究成果分述於後。

3.2.1 傳統繫筋施工誤差探討

傳統繫筋的彎鉤鉤住縱向鋼筋，然而如圖 3-5 所示，施工時彎鉤與縱向鋼筋之間經常產生間隙，該間隙對於繫筋圍束效應的影響，也時常造成現場工程師的困擾。施工間隙可能發生於繫筋的一端或二端，一般而言，最糟的狀況是間隙集中發生於 90 度的彎鉤端，如圖 3-5(b)所示。依據本所之研究成果顯示，傳統繫筋 90 度彎鉤與縱向鋼筋間 20 mm 以內的間距，並不會對圍束效應產生顯著的影響。

3.2.2 傳統繫筋彎鉤同時勾住主筋及箍筋的綁紮方式

依據本所之研究成果顯示，傳統繫筋彎鉤同時鉤住箍筋及縱向鋼筋上的效果會優於彎鉤僅鉤住縱向鋼筋，但這種做法會增加施工時的困難度，同時會減少柱斷面

的保護層，而影響柱構材的耐久性，參見圖 3-6。

3.2.3 傳統繫筋彎鉤勾住箍筋的綁紮方式

若傳統繫筋與縱向鋼筋間有 10 mm 以內的間隙且彎鉤勾住箍筋，依據本所之研究成果顯示，傳統繫筋彎鉤勾住箍筋的效果會優於彎鉤勾住縱向鋼筋，但這種做法會增加施工時的困難度，同時會減少柱斷面的保護層，而影響柱構材的耐久性，參見圖 3-7。

3.2.4 組合外箍筋性能(2L)

由於傳統完整環繞式的外箍筋不易施工，新型式的組合外箍筋具有較佳的施工性，每一組合箍筋包含 2 根 2 端均為 135 度彎鉤之 L 型肋筋，如圖 3-8 所示。依據本所之研究成果顯示，以 2 根 2 端為 135 度彎鉤的 L 形肋筋交疊而成的組合箍筋，且 135 度彎鉤交疊的位置沿縱向鋼筋方向維持不變，取代鋼筋混凝土柱的傳統完整箍筋，其圍束效果良好，且對於鋼筋籠的製作也不困難，亦可應用於 RC 柱擴柱補強工法及填充型 SRC 柱外箍筋、地下室連續壁共構柱等外，亦可改善 RC 柱及梁柱接頭鋼筋施工之缺失，參見圖 3-8。

3.2.5 傳統繫筋沿主筋方向不間隔換端

現行規範要求，繫筋沿主筋方向上應間隔換端。惟依據本所之研究成果顯示，繫筋沿主筋方向上不間隔換端，對於圍束混凝土效果的影響並不顯著，推測其主因應在於 RC 柱有將近半數的柱主筋從柱頂至柱底全長均處於幾乎無側撐之情況，這些無側撐柱主筋在混凝土保護層剝落後產生的挫屈行為，控制 RC 柱之強度及韌性。

3.2.6 組合繫筋之性能

依據本所針對組合繫筋進行短柱軸向載重試驗研究成果發現，組合繫筋的圍束效果比傳統繫筋佳，且不亞於 180 度彎鉤一體繫筋。經由觀察試體破壞情形顯

示，組合繫筋彎鉤內側的混凝土都與彎鉤緊密接觸，J 形鋼筋直線端也沒有向柱內滑動的現象，顯示兩個 J 形鋼筋有效組合成一個兩端為 180 度彎鉤之繫筋。

第三節 組合繫筋耐震性能探討

本所自 97 年度起進行大尺寸方形短柱軸壓試驗，探討在各種繫筋配置方式下，其軸向受壓之行為，以評估各類繫筋配置方式的可行性及實用性，嘗試解決國內工程實務的問題，並獲致初步具體結論，惟未進行柱撓曲韌性之探討。故另於 102 年度進行大尺寸方形柱撓曲行為之實驗研究，獲得以下的研究成果。

3.3.1 上下及水平搭接組合繫筋討論

本所先進行採用上下搭接組合繫筋之短柱軸壓試驗，以橫向鋼筋間距 100 mm 並採用 D13 鋼筋為例，第二層組合繫筋的中心與外箍筋的中心有 46 mm 的高差，如圖 3-9 所示，高差偏大。如果組合繫筋使用水平搭接，則第二層組合繫筋與外箍筋中心的高差會與使用傳統繫筋或 180/180 繫筋相同，較適合於橫向鋼筋間距較小且主筋間距較寬裕的施工條件。依據本所之研究成果顯示，組合繫筋採用上下搭接或水平搭接都可以發揮良好的圍束功能。

3.3.2 組合繫筋搭接長度之探討

依據本所之研究成果顯示，水平搭接且搭接長度為 1 倍伸展長度之組合繫筋(即規範規定之甲級搭接長度)，其圍束效果不亞於兩端為 180 度彎鉤之一體繫筋，惟需考量柱主筋應有 80~100 mm 之淨間距才比較容易施作。工程實務上，組合繫筋由一對長短不一的 J 形鋼筋組合而成時，較長之 J 形鋼筋，其彎鉤端固定於主筋及外箍筋，而直線端架在外箍筋上並固定於主筋及外箍筋；較短之 J 形鋼筋(搭接長度為 1 倍伸展長度)，其彎鉤端固定於主筋及外箍筋，而直線端則固定在較長之 J 形鋼筋上。

3.3.3 組合繫筋及組合內箍筋耐震性能

組合繫筋為由兩支一端為 180 度彎鉤另一端為直線的 J 形鋼筋搭接組合而成；

組合內箍筋為由兩支 U 形鋼筋搭接組合而成。綜合本所研究之結果，可以得到結論如下：

- (1)使用組合繫筋之柱試體，其層間位移角容量及塑性轉角容量，分別比使用傳統繫筋者高出 18%及 23%，顯示組合繫筋圍束混凝土之效應明顯比傳統繫筋優異。以組合繫筋取代傳統繫筋，可以顯著提升柱桿件之耐震性能。
- (2)傳統繫筋容易受到施工空間的不足，而產生施工困難的問題，進而影響到施工品質。採用組合繫筋，可以大幅降低施工空間之需求，不但施工簡便、施工誤差可降到很低，且彎鉤可以和主筋密接，可有效提升 RC 柱之施工品質。
- (3)使用組合內箍筋之柱試體，其層間位移角容量及塑性轉角容量，分別比使用傳統繫筋者高出 23%及 29%，顯示組合內箍筋圍束混凝土之效應明顯比傳統繫筋優異。傳統內箍筋之安裝需由主筋頂部往下套，施工性差，國內甚少使用。組合內箍筋可以由柱兩對邊往內插入進行安裝，可以大幅改善內箍筋之施工性，有效提升 RC 柱鋼筋之施工品質及耐震性能。
- (4)過去的研究結果顯示，僅有外箍筋之角落、內箍筋之角落、繫筋之 135 度彎鉤及繫筋之 180 度彎鉤，才被認定為有效彎鉤。依此觀之，一個組合繫筋具有兩個有效彎鉤，而一個傳統箍筋僅有一個有效彎鉤，組合繫筋的有效性是傳統繫筋的兩倍。而本所的試驗結果也支持有效彎鉤的論點。
- (5)組合繫筋及組合內箍筋採用鋼筋拉力搭接組合而成，在常用的鋼筋強度與混凝土強度之組合以及混凝土保護層厚度的情況下，當柱寬等於或大於 470 mm，即可使用 D10(#3)鋼筋做成之組合繫筋及組合內箍筋，而當柱寬等於或大於 570 mm，即可使用 D13(#4)鋼筋做成之組合繫筋及組合內箍筋，參見表 3-1。

3.3.4 高低軸力下組合繫筋耐震性能

組合繫筋乃依賴鋼筋搭接將 2 支 J 形鋼筋組合而成，當柱承受的軸壓力越小，J 形鋼筋搭接的效果可能越差，因此在柱的軸壓力偏小時，組合繫筋的一體性應該被檢驗。另一方面，超高層房屋底層之內柱往往承受很高的軸力，而底層柱在強烈地震作用下，又容易產生塑性鉸，因此組合繫筋在超高軸力作用下之耐震性能，也應該被檢驗。依據本所研究之結果，可得到結論如下：

- (1)使用組合繫筋之柱試體在不同軸力比作用下，其層間位移角容量及塑性轉角容

量，與含兩端皆為 180 度彎鉤一體繫筋之試體不相上下。以組合繫筋取代傳統繫筋，可以顯著提升柱桿件之耐震性能。

- (2)含組合繫筋之柱試體在無軸力作用下，J 形鋼筋直線端未發現有向柱內滑動的現象，顯示兩個 J 形鋼筋有效組合成一個兩端為 180 度彎鉤之繫筋，維持良好的一體性。
- (3)使用組合繫筋及 180 度彎鉤一體繫筋之試體，其韌性表現皆隨著軸力比的增加，而大幅衰減。

第四節 組合繫筋設計注意要項

組合繫筋採用鋼筋拉力搭接組合而成，在常用的鋼筋強度與混凝土強度之組合以及混凝土保護層厚度的情況下，當柱寬等於或大於 470 mm，即可使用 D10(#3)鋼筋做成之組合繫筋及組合內箍筋，而當柱寬等於或大於 570 mm，即可使用 D13(#4)鋼筋做成之組合繫筋及組合內箍筋，參見表 3-1。

3.4.1 ACI 318M-14 規範最新規定

ACI 318M-14[10]有關承受撓曲與軸向載重構材橫向鋼筋之耐震特別規定，除依 ACI 318M-11[3]既有規定外，另外針對 $P_u > 0.3A_g f'_c$ (高軸力) 或 $f'_c \geq 70$ MPa (高強度混凝土) 的情況下，有更嚴格的規定如下：

$$A_{sh} / sb_c \geq 0.2k_f k_n \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}}$$

其中

$$k_f = \frac{f'_c}{175} + 0.6 \geq 1.0 ; \text{混凝土強度係數}(f'_c \text{ 單位為 MPa})。$$

$$k_n = \frac{n_\ell}{n_\ell - 2} ; \text{圍束係數。}$$

n_ℓ = 被外箍筋角落或耐震彎鉤(彎鉤彎角不少於 135 度)圍繞之主筋數目。

此外，在 $P_u > 0.3A_g f'_c$ (高軸力) 或 $f'_c \geq 70$ MPa (高強度混凝土) 的情況下，所有

主筋須被外箍筋角落或耐震彎鉤圍繞，此一新規定將有效提升 RC 柱之耐震性能，但將因此造成 RC 柱橫向鋼筋的施工更形困難。

3.4.2 國內規範草案柱橫向鋼筋之規定

內政部建築研究所於 105 年委託中國土木水利工程學會辦理「混凝土結構技術規範之修正研擬」研究案[15]，係以美國 ACI 318M-14 規範為主要參考依據，完成「混凝土結構技術規範」修正草案，其中有關柱構材橫向鋼筋之耐震特別規定，除完全依據 ACI 318M-14[10]既有規定外，在 $P_u > 0.3A_g f'_c$ (高軸力) 或 $f'_c \geq 70$ MPa (高強度混凝土) 的情況下，針對所有主筋須被外箍筋角落或耐震彎鉤圍繞的規定，將兩端為耐震彎鉤的繫筋放寬為一端具 135 度彎鉤且另一端為 90 度彎鉤的傳統繫筋，但必需依 ACI 318M-14[10] 的新增公式，增加其橫向鋼筋量，當柱斷面包含有大量的縱向鋼筋時，在組裝柱鋼筋籠時，很難將繫筋準確地安裝於標準的配置位置。依據估算採用傳統繫筋的橫向鋼筋量約增加 10%，也就是說橫向鋼筋的間距需縮減至原間距的九成。相關規範草案規定，雖無強制約束力，但可做為參考依據。

3.4.3 組合繫筋彎鉤有效性討論及設計準則

過去的研究以及本所研究皆顯示，傳統繫筋之 90 度彎鉤在桿件載重試驗過程中會被撐開，其有效性一直受到質疑。最新 ACI 規範以有效圍束彎鉤個數來決定橫向鋼筋量，有效圍束彎鉤個數越多，所需橫向鋼筋量就越小，而僅有外箍筋之角落、內箍筋之角落、繫筋之 135 度彎鉤及繫筋之 180 度彎鉤，才被認為有效彎鉤。依此定義，一支傳統繫筋(即 90/135 繫筋)僅具有 1 個有效彎鉤，而一支兩端為 180 度彎鉤的繫筋(如 180 度彎鉤一體繫筋及組合繫筋)則具有 2 個有效彎鉤，其有效性為傳統繫筋的兩倍。傳統內箍筋及組合內箍筋都具有 4 個有效彎鉤，兩者之有效性相同。不過由於組合內箍筋的施工性佳，可以考慮以一個組合內箍筋取代 2 支傳統繫筋，此時組合內箍筋有 4 個有效彎鉤，是 2 支傳統繫筋的兩倍。以有效彎鉤的觀點觀之，組合繫筋及組合內箍筋，其有效性皆為傳統繫筋的 2 倍。

本所研究含 180 度一體彎鉤試體及含組合繫筋試體的層間位移角容量分別高出使用傳統繫筋者 15% 及 18%，而塑性轉角容量則分別高出 13% 及 23%。本所研究之試驗結果明顯支持有效彎鉤的觀點。

最新 ACI 規範以有效圍束彎鉤個數來決定橫向鋼筋量，有效圍束彎鉤個數越多，所需橫向鋼筋量就越小。而僅有外箍筋之角落、內箍筋之角落、繫筋之 135 度彎鉤及繫筋之 180 度彎鉤，才被認定為有效彎鉤。依有效彎鉤的觀點而言，一支傳統繫筋(即 90/135 繫筋)僅具有 1 個有效彎鉤，而一支 180/180 繫筋以及一支 LS/180 繫筋都具有 2 個有效彎鉤，其有效性為傳統繫筋的兩倍。

3.4.4 施工可行性檢核(主筋、橫向鋼筋間距及梁柱接頭等)

組合繫筋在工程實務應用上最大的優點在於施工容易及施工品質容易控制，尤其是繫筋彎鉤可以緊貼主筋。當柱軸力小於 $0.3f'_cA_g$ 且所使用之混凝土強度不超過 70 MPa，又柱寬度為 600 mm 時，圖 3-1(b)之鋼筋配置方式基本上合乎規範之規定，但是主筋的淨間距不到 60 mm，傳統之 90/135 繫筋基本上已經無法安裝(除非設置施工架由上往下套)。規範規定柱主筋的淨間距不得小於 1.5 倍主筋直徑、1.33 倍骨材最大粒徑及 40 mm。以 D32(#10)鋼筋為例，主筋之淨間距可能僅有 48 mm，繫筋之安裝將相當困難。在彎鉤及彎鉤延伸段都符合規範規定的情況下，柱主筋應有 80~100 mm 之淨間距才比較容易施作。組合繫筋若採用上下搭接，以橫向鋼筋間距 100 mm 並採用 D13 鋼筋為例，每層橫向鋼筋外箍筋與組合繫筋的淨間距，僅為 34.5 mm(參見圖 3-9)，故設計者需審慎評估橫向鋼筋間距施作組合繫筋的可行性。此外，RC 內部梁柱接頭處因有兩向梁主筋及柱主筋穿越，RC 外部梁柱接頭處又有梁主筋錨定的需求，施工空間有限，組合繫筋應可解決傳統繫筋難以施工的窘境。

3.4.5 採用組合繫筋成本增加之檢核

以下以圖 3-1(c)柱斷面(混凝土強度：28 MPa；鋼筋：SD420W)主筋及橫向鋼筋的配置為例，探討柱寬為 600 mm(主筋：D22；橫向鋼筋：D13)、750 mm(主筋：D25；橫向鋼筋：D13)及 900 mm(主筋：D32；橫向鋼筋：D13)等 3 種方形底層柱塑性鉸區使用組合繫筋(1 支 J 形鋼筋直線端架在外箍筋上；另 1 支 J 形鋼筋直線長度為 $1.3\ell_d$)時，增加橫向鋼筋成本的案例。假設底層高為 3200 mm，梁深為 500 mm，因此。取 ℓ_0 為柱寬，且假設橫向鋼筋(含外箍筋及兩向繫筋)以 100 mm 間距均勻配置於柱淨高範圍，但對於塑性鉸區採用傳統繫筋，依據 ACI 318M-14[10] k_n 的影響，調整為 90 mm。3 種方形底層柱塑性鉸區採用傳統繫筋及組合繫筋的橫向鋼筋用量

之比較，整理如表 3-2 所示。表 3-2 所有斷面單層橫向鋼筋採用組合繫筋與傳統繫筋鋼筋用量比值介於 136%至 153%之間，柱淨高範圍塑性鉸區採用組合繫筋與傳統繫筋之橫向鋼筋用量比值則介於 115%至 118%之間，驗證影響營建成本有限。

第五節 組合繫筋施工注意要項

3.5.1 組合繫筋適用時機

國內工地會遷就傳統繫筋的施工性，對傳統繫筋形狀做一些調整以利施工，增加繫筋長度為可能的作法之一，如圖 3-10(a)所示，但是增加繫筋長度會減少保護層厚度，且彎鉤處與主筋間會有較大的間隙，影響施工品質。另一個常見的情況是減少 90 度彎鉤的彎轉角度，如圖 3-10(b)所示，這樣一方面不利於繫筋強度之發展，另一方面彎鉤尾端混凝土保護層不足。還有一個常見的情況是，繫筋製作長度不足或是主筋位置有偏差造成繫筋長度不夠，如圖 3-10(c)所示，這會造成繫筋與主筋水平向之間隙過大，也是不利於繫筋強度之發展。上述情況都可以使用組合繫筋改善之。

3.5.2 組合繫筋施工檢查要項

在 921 集集地震侵襲下，國內有不少建築結構損傷甚或倒塌，造成此現象的原因很多，其中施工不良是重要的原因之一。建築結構施工品質不良與建築結構之監造有密切的關係，過去數十年，國內建築結構之監造品質良莠不齊，不同建築結構之間，監造者甚或業主對施工品質要求的嚴謹度，常有很大的差異。這種現象不但讓社會大眾住的安全沒有足夠的保障，也讓品質要求不嚴謹的營造公司有機可乘，讓營建業者間之競爭環境變差，擠壓優質營造業者的生存空間。由於近年來社會快速發展，社會對生命安全的的要求不斷提升，另一方面，人們由都會區強烈地震的震害中不斷學習，建築結構的監造的內容與制度也不斷修正改進。參考先進國家的作法，美國 IBC 的「特別監造」(Special Inspection)中，對建築結構重要的施工階段做嚴謹的監造，對可能產生並不可逆或隱藏性缺失的施工項目，由合格技師進行連續性監造。至於日本則有「中間監督」，也是類似的作法。

國內在 921 地震後，開始重視相關的問題，且為確保結構之耐震品質與安全，國內「建築物耐震規範」之附錄中，規定有結構「特別監督」條款，經由特別監督中連續性及週期性的結構施工監督，即時發現隱藏性及不可逆性的施工缺點，並適時改正這些缺點，以提升工程品質。如何將結構特別監督制度落實到工程實務，可以說是現階段提昇國內建築耐震結構品質最關鍵的課題之一。

若特別監督人在封模及澆灌混凝土前，會檢視組合繫筋是否有依設計圖說排置，則在排置鋼筋時不必連續在現場監督，僅需進行週期性特別監督。依新北市政府採購處公共工程檢查表單範例建築類表單建 026(柱鋼筋自主檢查表)，如表 3-3 所列一般檢查事項外，針對 RC 柱配置組合繫筋進行特別監督時，建議增加以下檢查事項：

- (1)組合繫筋每一支 J 形鋼筋之 180 度彎鉤皆固定於主筋及外箍筋且與主筋密接。
- (2)組合繫筋採用 2 支等長 J 形鋼筋時，其直線端架在外箍筋上並固定於主筋及外箍筋。
- (3)組合繫筋若由一對長短不一的 J 形鋼筋組合而成時，較長之 J 形鋼筋，其直線端架在外箍筋上並固定於主筋及外箍筋；較短之 J 形鋼筋，其直線端則固定在較長之 J 形鋼筋上。

第六節 小結

為改善傳統繫筋施工困難、施工品質不良的情形，本所近年來積極進行組合繫筋之研發。每一支組合繫筋由兩支一端為 180 度彎鉤另一端為直線的 J 形鋼筋搭接組合而成。組合繫筋的安裝可由柱之對邊往柱內插入，只要主筋淨間距滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，且每一支 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接，不但施工相當容易且施工品質佳。

研究成果已於國內外專業期刊發表，並在 101、103 及 105 年於本所建築結構創新技術研討會推廣宣導，且國內已有數個因 RC 柱斷面主筋配置過密，施工困難，而採用組合繫筋補強 RC 柱韌性之工程案例，甚獲業界好評。此外，為因應 ACI 318-14 設計規範繫筋的新規定，組合繫筋更能顯現其優越性，與更寬廣的應用空間及推廣潛力。

表 3-1 組合繫筋最小搭接長度及柱尺寸表

橫向鋼筋 強度 (MPa)	混凝土 強度 (MPa)	D10(#3)鋼筋		D13(#4)鋼筋	
		所需搭接長度 (mm)	所需柱寬 (mm)	所需搭接長度 (mm)	所需柱寬 (mm)
280	28~70	390	470	390	470
420	28	390	470	483	570
	35	390	470	432	520
	42	390	470	394	480
	49~70	390	470	390	470

(資料來源：本研究)

表 3-2 塑性鉸區採傳統繫筋及組合繫筋橫向鋼筋用量比較表(圖 3-1(c) 柱斷面)

柱寬 (mm)	主筋號數	橫向鋼筋號數	底層柱上下塑性鉸區範圍繫筋型式	單層橫向鋼筋用量		柱淨高範圍橫向鋼筋用量
				L_T (mm)	$\frac{L_T}{(L_T)_{90/135}}$	$\frac{L_T}{(L_T)_{90/135}}$
600	D22	D13	90/135	9040	1	1
			LS/180u	13870	1.53	1.18
750	D25	D13	90/135	11140	1	1
			LS/180u	15970	1.43	1.17
900	D32	D13	90/135	13240	1	1
			LS/180u	18070	1.36	1.15

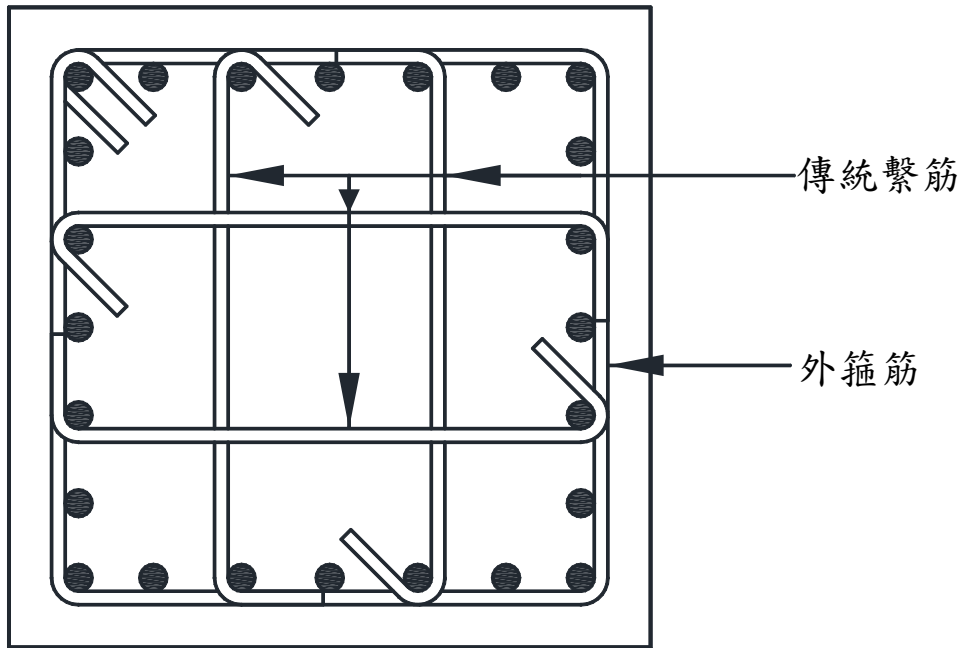
註： L_T ：橫向鋼筋之近似長度(僅計算直線長度，忽略彎鉤彎曲長度)；鋼筋混凝土底層柱上下塑性鉸區範圍，配置傳統繫筋或組合繫筋，中間部分配置傳統繫筋；保護層厚度為 40 mm；彎鉤直線延伸長度為 80 mm。

(資料來源：本研究)

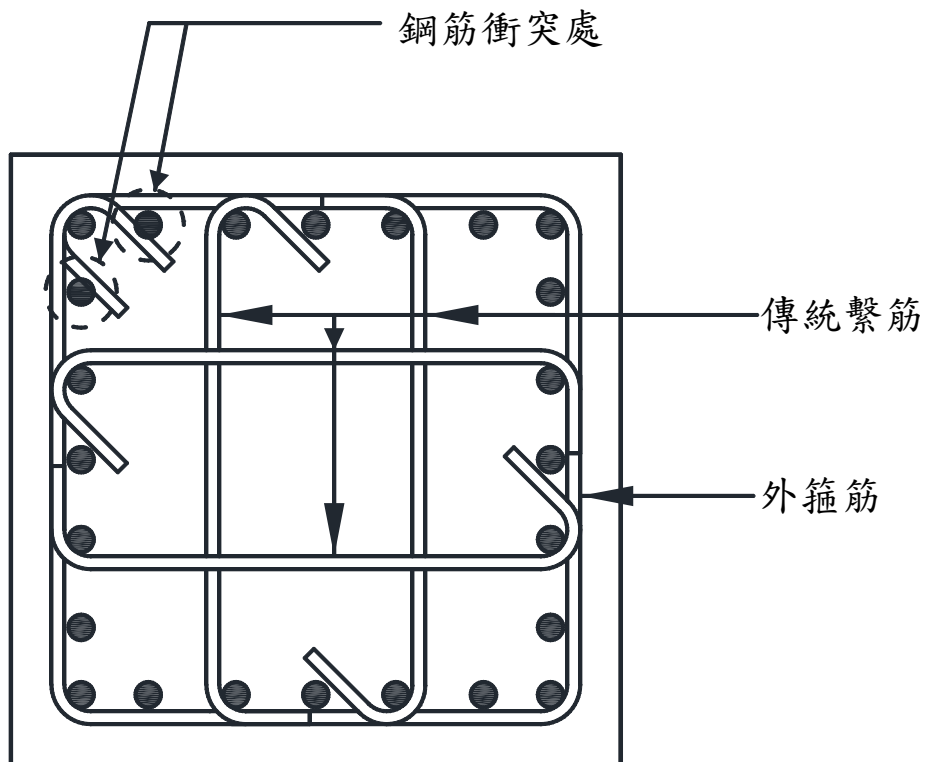
表 3-3 柱鋼筋自主檢查表

工程名稱			
承攬廠商		協力廠商	
檢查位置		檢查日期	
檢查時機	☐ 查驗停留點 ☐ 施工中檢查 ☐ 施工完成檢查		
檢查結果	☐ 檢查合格 ☒ 有缺失需改正 ☐ 無此檢查項目		
檢查項目		檢查標準 (定量定性)	實際檢查情形 (量化檢查數據)
柱尺寸 (XxY)		○x○cm	
主鋼筋	號數與支數 X、Y 向	#○x○支、#○y○支	
	間距，X 向、Y 向	X○cm、Y○cm	
	保護層	○cm	
搭接	長度、位置	○cm、○cm	
錨定	總長度	○cm	
	標準彎鉤長度	○cm	
	錨定位置	例如：地樑內	
箍筋	號數、	兩端	#○-@○
	間距	中間	#○-@○
	彎鉤角度長度		○'x○cm
	繫筋		○x○
預留水管與鋼筋距離		○cm 以上	
鋼筋潔淨度		例如：清潔	
鋼筋有無龜裂		例如：無龜裂	
鋼筋拉力試驗		Fy=○kg/c m ²	
繫筋號數與支數		#○-○支	
樑柱接頭箍筋預先放置		個	
主筋箍筋繫筋固定		#○鐵絲綁紮無鬆動	
預埋物固定		固定妥當	
組合繫筋		J 形鋼筋 180 度彎鉤固定於主筋及外箍筋且與主筋密接	
		J 形鋼筋直線端架在外箍筋上並固定於主筋及外箍筋。	
		較短之 J 形鋼筋直線端固定在較長之 J 形鋼筋上	
備註： 1. 檢查結果合格者註明「○」，不合格者註明「✕」，如無需檢查之項目則打「/」。檢查標準及實際檢查情形應明確敘述或量化尺寸。 2. 嚴重缺失、缺失複查未完成改善，應填具「缺失改善追蹤表」進行追蹤改善。 3. 檢查項目及檢查標準，請依契約書圖量化數據予以詳列。			

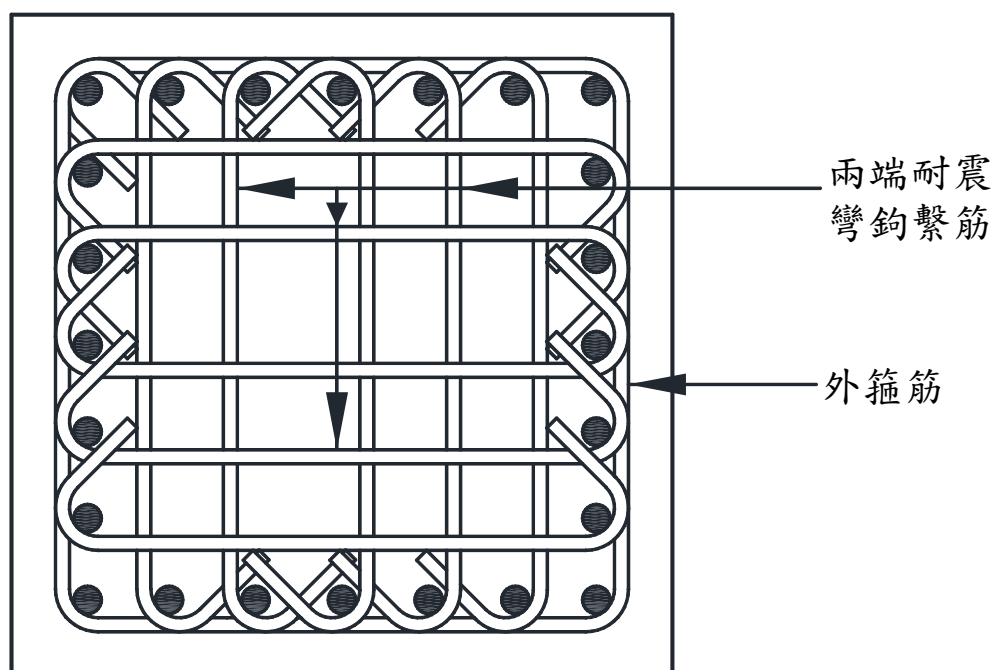
(資料來源：新北市政府採購處)



(a) 橫向鋼筋配置示意圖(設計圖)



(b) 考量實際鋼筋細部之橫向鋼筋配置圖(施工圖)



(c) 合乎 ACI 318M-14 要求之橫向鋼筋配置圖

圖 3-1 鋼筋混凝土耐震柱的橫向鋼筋配置圖

(資料來源：本研究)

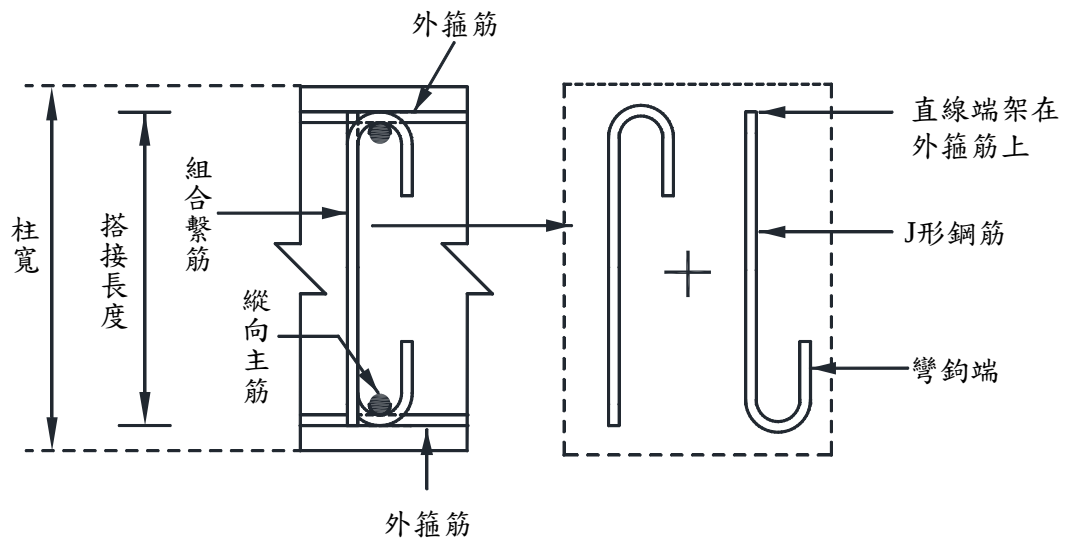


圖 3-2 組合繫筋組成示意圖

(資料來源：本研究)



(a) RC 柱剪力破壞(箍筋間距過大及採用 90 度彎鉤)



(b) RC 柱撓曲破壞(箍筋間距過大及內部埋置管線)

圖 3-3 921 地震 RC 柱破壞照片

(資料來源：本研究)



(a) RC 柱剪力破壞(箍筋間距過大及內部埋置管線)



(b) RC 柱撓曲破壞

圖 3-4 0206 地震 RC 柱破壞照片

(資料來源：本研究)

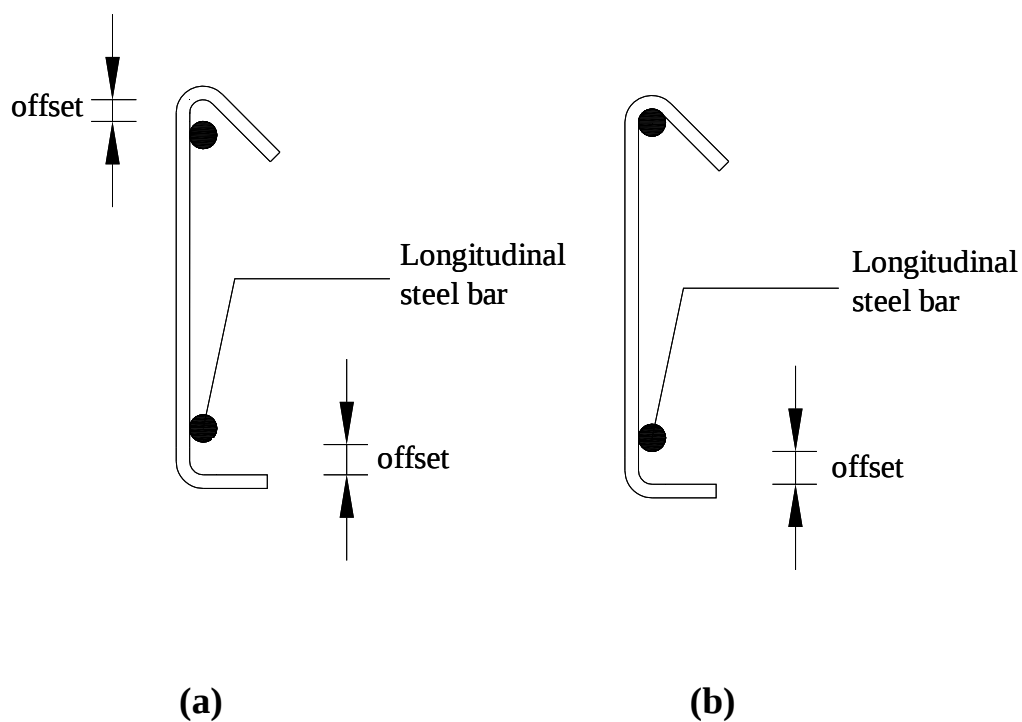


圖 3-5 繫筋彎鉤與縱向鋼筋之間的間隙

(資料來源：本研究)

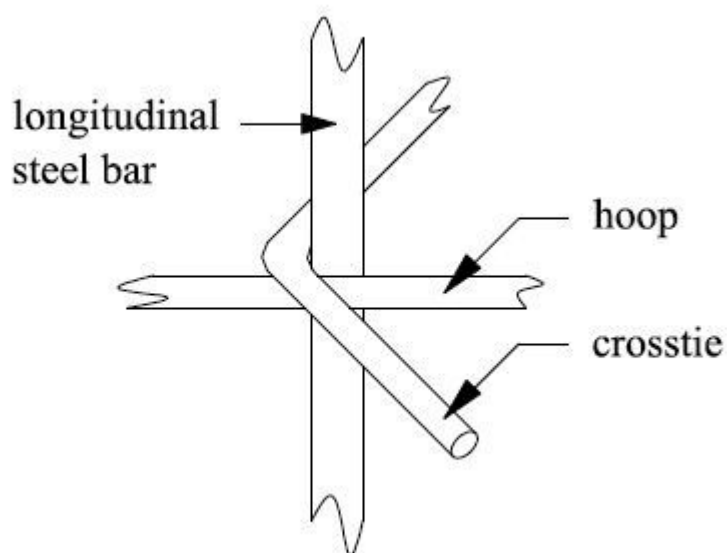
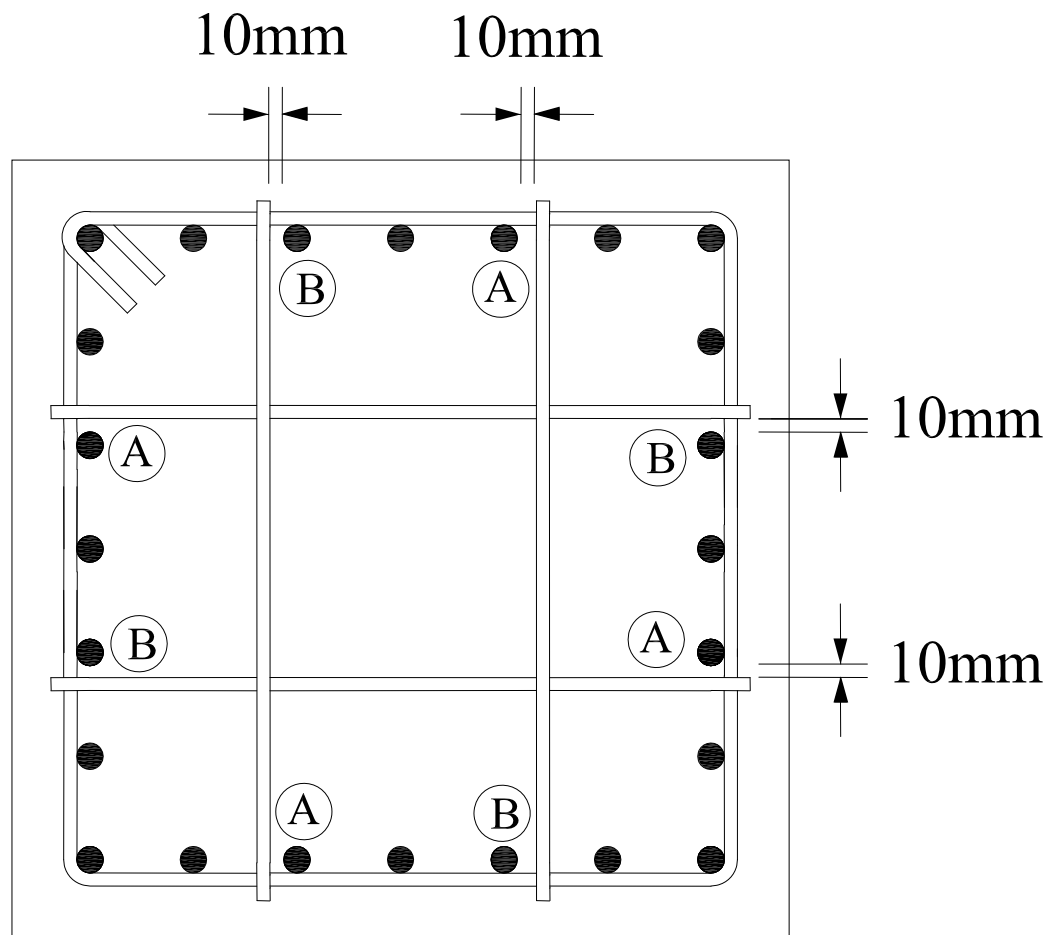
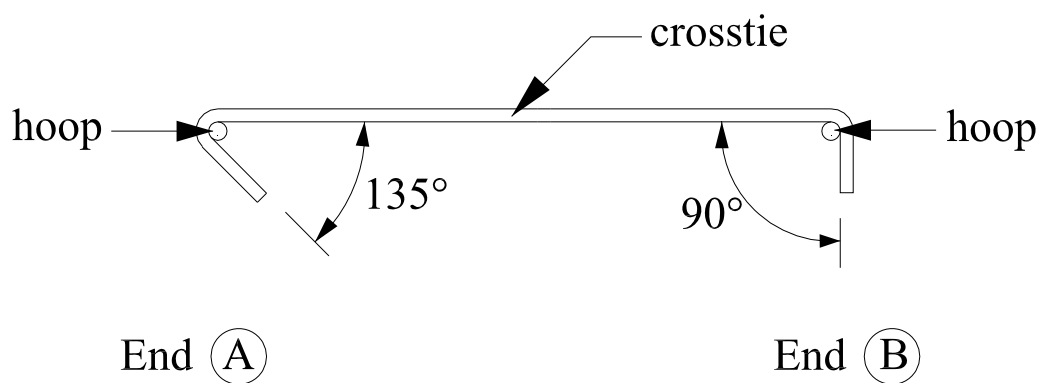


圖 3-6 繫筋同時鉤住箍筋及縱向鋼筋

(資料來源：本研究)



(a) 10 mm 的間隙模式



(b) 繫筋鉤住箍筋

圖 3-7 繫筋與縱向鋼筋之間的間隙

(資料來源：本研究)

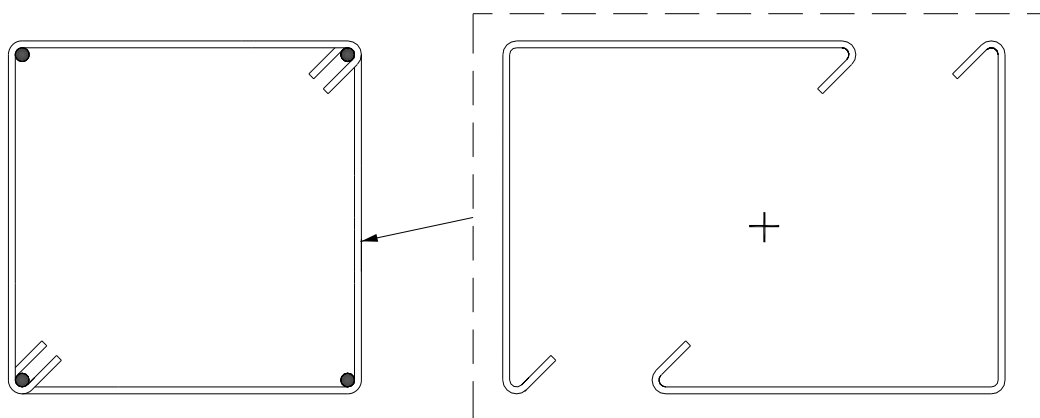


圖 3-8 組合外箍筋示意圖

(資料來源：本研究)

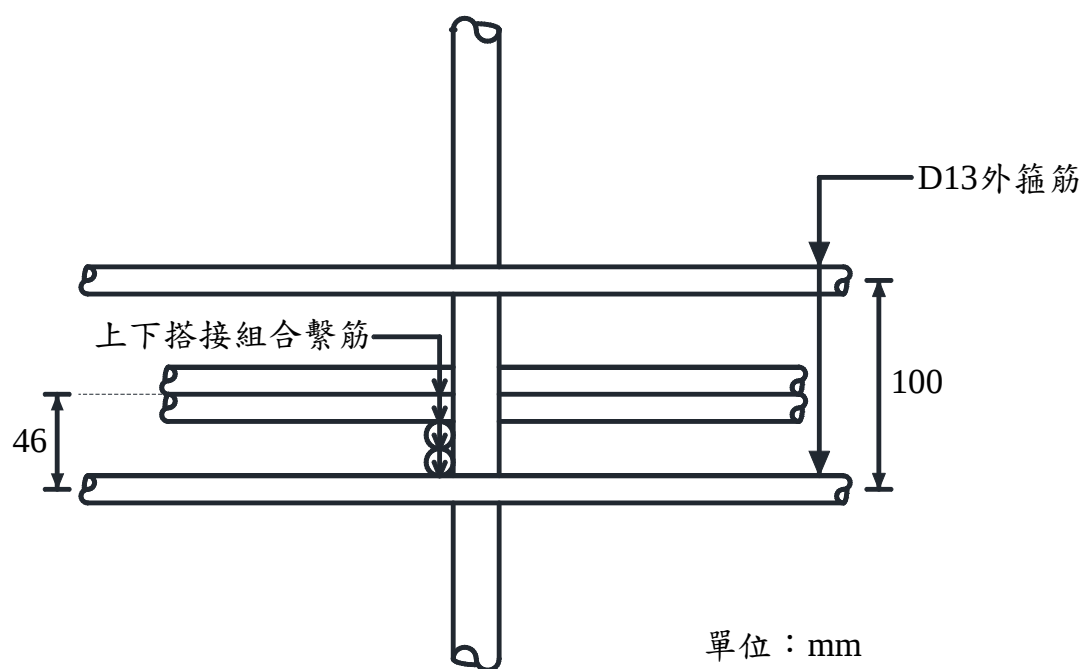
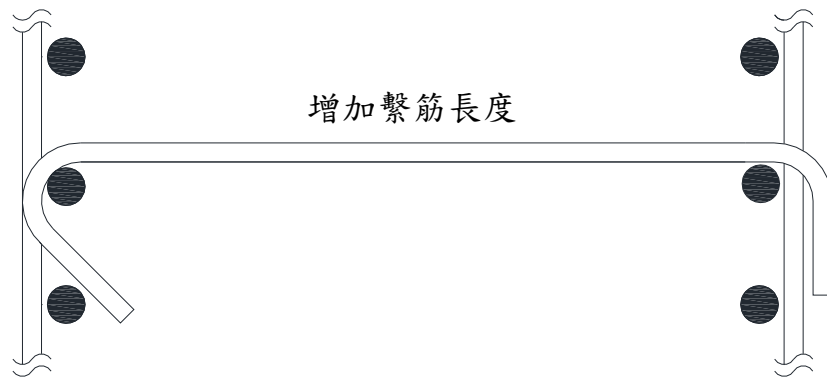


圖 3-9 上下搭接組合繫筋縱向位置示意圖

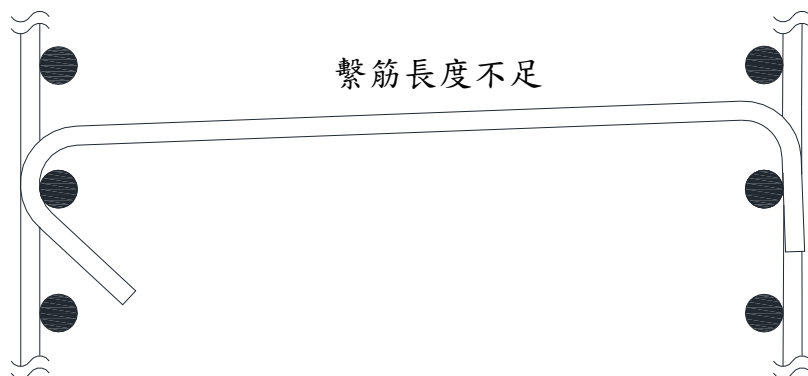
(資料來源：本研究)



(a) 增加繫筋長度示意圖



(b) 減少繫筋 90 度彎鉤角度示意圖



(c) 繫筋長度不足示意圖

圖 3-10 國內工地傳統繫筋施工常見缺失圖

(資料來源：本研究)

第五章 結論與建議

第一節 結論

- (1)傳統繫筋目前普遍使用於實際工程，安裝時通常先將 135 度彎鉤勾住對面的主筋，然後再旋轉繫筋將 90 度彎鉤扣住這一面的主筋。在彎鉤及彎鉤延伸段都符合規範規定的情況下，柱主筋應有 80~100 mm 之淨間距才比較容易施作。土木 401-100 規定柱主筋的淨間距不得小於 1.5 倍主筋直徑、1.33 倍骨材最大粒徑及 40 mm。以 D32(#10)鋼筋為例，主筋之淨間距可能僅有 48 mm，繫筋之安裝將相當困難。設計者在配筋時往往僅考慮到設計規範對主筋淨間距的要求，而忽略了安裝傳統繫筋所需之施工間距，因此工地常有繫筋安裝困難、施工品質不佳的現象發生。
- (2)在工地安裝 180 度彎鉤一體繫筋時，通常需要由主筋上端往下套，不但安裝較為困難，且常需要額外的施工架，實際工程很少使用。
- (3)組合繫筋的安裝由柱之對邊往柱內插入，主筋淨間距只要滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，施工相當方便。安裝時每一 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接，J 形鋼筋直線端架在外箍筋上，不但方便 J 形鋼筋之固定，並可避免混凝土澆置時 J 形鋼筋移位。使用組合繫筋一方面可以增進韌性，另一方面施工簡便且施工品質容易控制，可以大幅提升鋼筋施工品質。
- (4)對於十字形及井字形的組合繫筋配置，可以發揮方形柱繫筋類似的圍束效應，納入橫向鋼筋等值體積比計算。對於十字形的組合繫筋配置，計算橫向鋼筋等值體積比時，可加入 1 根繫筋的圍束效應。而對於井字形的組合繫筋配置，計算橫向鋼筋等值體積比時，可加入 2 根繫筋的圍束效應。

第二節 建議

以下分別從立即可行的建議及長期性建議加以列舉。

本研究案之研究成果，可供工程實務界參考應用，並可提供相關規範研修訂時之參考，以解決國內工程實務問題。—立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部建築研究所

本研究發現組合繫筋不僅施工性良好，組合繫筋的安裝可由柱之對邊往柱內插入，只要主筋淨間距滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋，且每一支 J 形鋼筋之 180 度彎鉤都可以和主筋密接，不但施工相當容易且施工品質佳。

研究成果已於國內外專業期刊發表，並在 101、103 及 105 年於本所建築結構創新技術研討會推廣宣導，且國內已有數個因 RC 柱斷面主筋配置過密，施工困難，而採用組合繫筋補強 RC 柱韌性之工程案例，甚獲業界好評。此外，為因應 ACI 318-14 設計規範繫筋的新規定，組合繫筋更能顯現其優越性，與更寬廣的應用空間及推廣潛力。

本研究案研擬鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項，可供國內業界參考應用。—長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部建築研究所

本研究案研擬鋼筋混凝土柱採用組合繫筋設計與施工注意要項，後續可將研究成果於國內外專業期刊持續發表，並於相關建築結構技術研討會推廣宣導，供國內業界參考應用。

附錄一 期中簡報審查會議意見與回覆

開會時間：106 年 8 月 9 日(星期三)上午 9 時 30 分

開會地點：內政部建築研究所 13 樓簡報室(新北市新店區北新路三段 200 號)

主持人：陳建忠 組長

審查委員	審查意見	意見回覆
一、中華民國結構工程技師公會全國聯合會陳正平技師	1. 建議對於較小柱斷面，組合繫筋直線端可增加彎鉤，將可有效提升圍束效果。	感謝委員建議，將納入未來研究參考。
二、李英傑技師	1. 依 ACI 規範之規定，180 度彎鉤彎曲內直徑是否會造成繫筋最外側開裂，而影響繫筋的強度。	感謝委員建議，將納入未來研究參考。
	2. 以搭接的方式製作組合繫筋，其搭接長度應適用於圍束區搭接之規定。	感謝委員建議，將納入未來研究參考。
	3. 組合繫筋搭接法如何施工及固定？	組合繫筋的安裝可由柱之對邊往柱內插入，只要主筋淨間距滿足設計規範的要求，即有足夠的空間來安裝組合繫筋。
三、馬一龍技師	1. 組合繫筋施工性較佳，力學圍束功能良好，可與主筋及箍筋密接，施工品質容易控制，可顯示其優越性及應用潛力，惟施工人力成本恐會增加。	感謝委員肯定，已於第 3.4.5 探討組合繫筋增加之成本。
四、張敬昌協理	1. 本研究整合既有組合繫筋研究成果，研擬設計及施工準則，對實務助益甚大。	感謝委員肯定。
	2. 組合繫筋效果較傳統繫筋佳，針對高軸壓比構件之主筋，如可減少繫筋數，有助於組合繫筋之推廣。	感謝委員肯定。
五、廖文義教授	1. 本研究內容豐碩，組合繫筋之推廣有助營建技術之提昇，符合預期成果。	感謝委員肯定。
	2. 研究文獻之收集很多，但宜適當於報告中(未來之施工要項研擬)呈現。	感謝委員建議，已參酌納入。
	3. 未來報告之撰寫，設計方面之讀者為工程技師，施工方面為工地監造人員，故整體內容之編排應多加注意使用	感謝委員建議，已參酌納入。

審查委員	審查意見	意見回覆
	本手冊之對象，以及經濟性與工期節省之討論。	
六、陳建忠組長	1. 本研究應詳細規劃設計及施工注意要項內容。	感謝委員指正，已參酌修正。
	2. 業界採用組合繫筋的回饋意見可整合分析，汰選擇優納為注意事項。	感謝委員指正，已於第2.3節討論。
	3. 工程三級品管的相關查核與表達方式，可做注意要項的研擬參考。	感謝委員指正，已蒐集相關資料參酌納入。

附錄二 期末簡報審查會議意見與回覆

開會時間：106 年 11 月 30 日(星期四)上午 10 時

開會地點：大坪林聯合開發大樓 15 樓第 4 會議室(新北市新店區北新路三段 200 號)

審查委員	審查意見	意見回覆
一、中華民國全國建築師公會江星仁建築師	1. 期末報告書第 23 頁，描述「規範規定箍筋彎鉤需達 135 度，但實際上施工上仍需常採用 90 度」，建議修正為「當年規範並無規定箍筋彎鉤需達 135 度，故實際上施工上仍多常採用 90 度」。	感謝委員指正，已參酌修正。
二、中華民國結構工程技師公會全國聯合會陳正平技師	1. 建議本研究鋼筋搭接之長度，是否可縮短。	因組合繫筋於核心混凝土內搭接，理論上鋼筋搭接長度應較短，惟為保守起見，建議採用 B 級搭接長度。
三、財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心林克強研究員	1. 建議提出傳統繫筋 90 度彎鉤與縱向鋼筋間隙容許值，以及適用組合繫筋之橫向鋼筋合理間距。	本研究建議主筋之適當淨間距為 8 至 10 cm。
四、李英傑技師	1. 組合繫筋的使用研究，確實有改善現實施工環境的效果。	感謝委員肯定。
	2. 是否能發展成施工規範。	感謝委員建議，將納入未來研究參考。
五、馬一龍技師	1. 建議在報告書之結論，明確註明採用組合繫筋時，其主筋間距必須滿足土木 401 規定外，考慮施工特性，可列表明確建議當主筋為 #7、#8、#10 時之適當間距。	本研究建議主筋之適當淨間距為 8 至 10 cm，將再檢討考量針對 #7、#8、#10 等主筋，列表明確建議適當淨間距之必要性。
六、楊勝德建築師	1. 組合外箍筋架設時，未見柱形為正方或長方穩定之討論，甚為可惜。實務上柱箍柱主筋之形狀，常有變形、扭曲或尺寸不正確，往往需要做「後修正」，尤其鋼結構轉換 RC 之轉換層。	成果報告書將說明組合外箍筋除應用於 SRC 柱、地下室連續壁共構柱，耐震補強擴柱等外，亦可改善 RC 柱及梁柱接頭鋼筋施工之缺失。
	2. 組合外箍筋除非在 SRC	感謝委員指正。

審查委員	審查意見	意見回覆
	柱、地下室連續壁共構柱，耐震補強擴柱等，實務上都不鼓勵使用。	
七、蕭輔沛研究員	1. 本研究旨在提出 2 支一端 180 度彎鉤、另一端為直線的 J 型鋼筋搭接組合而成，係依靠足夠的搭接長度固定此二支彎鉤，建議可再考慮直線端改為 T 頭或彎鉤方式強化握裹力，以增強組合繫筋之效果。	感謝委員建議，將納入未來研究參考。
	2. 本研究所提出組合繫筋之作法在彈性狀態（混凝土未開裂時）應有效果，但可能在非彈性狀態（混凝土開裂後）易有失效的可能，後續應以實驗結果做確認。	感謝委員建議，將納入未來研究參考。
八、羅遠智副總經理	1. 組合繫筋之搭接長度僅需滿足規範有關頂層搭接之需求即可，亦或需延伸至對面之外箍筋？	感謝委員建議，將納入未來研究參考。
	2. 組合繫筋採用水平搭接時，是否會有繫筋距主筋較遠之情況，其是否可行，或需搭配其他細節？	感謝委員建議，將納入未來研究參考。
	3. 是否將此做法納入設計規範，以利實務上採用。	將持續與中國土木水利工程學會溝通，於國內規範修正草案納入本研究結果，以利實務界參考應用。
九、陳建忠組長	1. 報告書之格式，請依規定書寫，誌謝等則可免除，各審查意見對照表未呈現於附錄，請補上。	成果報告書已刪除誌謝，並補充審查意見對照表。
	2. 第三章設計與施工注意要項，大綱標題宜重整，在此置放研究成果，似乎不妥，宜將各成果就有必要的資料資訊，另立標題納入。而且案名與研究一樣，業以形成衝突。	成果報告書已依委員意見修正大綱標題。
	3. 報告書第 3.4.2 節，引用國內	成果報告書已依委員建議修

審查委員	審查意見	意見回覆
	規範草案規定，似無約束力，宜以其他情況表達。	正。

參 考 資 料

- [1] 李台光、鄒本駒 繫筋細部對大尺寸鋼筋混凝土柱行為影響之研究 內政部建築研究所自行研究報告 2008 年。
- [2] 李台光 大尺寸鋼筋混凝土方形柱撓曲行為之實驗研究(1/2) 內政部建築研究所自行研究報告 2013 年。
- [3] ACI Committee 318, 2011, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-11) and commentary," Michigan, USA.
- [4] Elwood, K. J., Maffei, J., Riederer, K. A., and Telleen, K. (2009) "Improving column confinement Part 2: Proposed new provisions for the ACI 318 building code," ACI Concrete International, 31(12), 41-48, Michigan, USA.
- [5] Tanaka, H., Park, R., and McNamee, B. (1985). "Anchorage of transverse reinforcement in rectangular reinforced concrete columns in seismic design", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 18(2), 165-190, New Zealand.
- [6] Berry, M., Parrish, M., and Eberhard, M. (2004) "PEER structural performance database user's manual (version 1.0)," Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA.
- [7] Moehle, J. P., and Cavanagh, T. (1985) "Confinement effectiveness of crossties in RC," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 10, pp. 2105-2120.
- [8] Bae, S., and Bayrak, O. (2008) "Seismic performance of full-scale reinforced concrete columns," ACI Structural Journal, Vol. 105, No. 2, pp. 123-133.
- [9] ACI Committee 374 (2005). "Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary (ACI 374.1-05)", Michigan, USA.
- [10] ACI Committee 318, 2014, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-14) and commentary," Michigan, USA.
- [11] GCR 16-917-40, 2016, "Seismic design of reinforced concrete special moment frames: A guide for practicing engineers," Maryland, USA.
- [12] 現行規範「柱圍束箍筋綁紮方式」之安全性探討 結構工程第 21 卷第 4 期(陳正平) 中華民國結構工程學會。
- [13] 建築鋼筋工程現場實務 詹氏書局 2000 年出版(劉壽榮、范光懿合著)。
- [14] 潤弘精密工程事業股份有限公司網站: <http://www.ruentex.com.tw>。
- [15] 王炤烈等 混凝土結構技術規範之修正研擬 內政部建築研究所委託研究報告 2016 年。
- [16] Lee, T. K., Chen, C. C., Tsou, P. C., Lin, K. T., Lee, W. W., and Pan, A. D. E. (2012). "Experimental evaluation of crossties in large reinforced concrete columns under pure compression." Advances in Structural Engineering, 15(10), 1717-1728.
- [17] Lee, T. K., Chen, C. C., Pan, A. D. E., Hsiue, K. Y., Tsai, W. M., and Hwa, K.

- (2013). “Experimental evaluation of large circular RC columns under pure compression.” *Structural Concrete*, 14(1), 60-68.
- [18] Lee, T. K., Chen, C. C., Pan, A. D. E., Hwa, K., and Ma, M. J. L. (2013). “Performance of large circular RC columns under compression.” *Magazine of Concrete Research*, 65(8), 519-527.
- [19] Lee, T. K., Chen, C. C., Hwa, K., and Pan, A. D. E. (2014). “Performance of large RC columns under axial compression loads.” *Structures and Buildings*, 167(SB5), 300-311.
- [20] 李台光、陳正誠、華根 (2012) “大型鋼筋混凝土方形柱軸壓行為之探討” 結構工程第 27 卷第 2 期第 3-20 頁，中華民國結構工程學會。
- [21] 李台光、陳正誠、華根 (2012) “大型鋼筋混凝土圓形短柱軸壓行為之探討” 結構工程第 27 卷第 3 期第 3-17 頁，中華民國結構工程學會。
- [22] 李台光、華根、陳正誠 (2013) “大尺寸鋼筋混凝土柱橫向鋼筋圍束效應之研究” 技師期刊第 63 期第 40-46 頁，臺北市土木技師公會。
- [23] Lee, T. K., Chen, C. C., and Zhan, K. S. (2017). “The cyclic performance of reinforced concrete columns using the lap-spliced crosstie and lap-spliced inner hoop.” *Structural Concrete* (Accepted for Publication).
- [24] 李台光、陳正誠、何明錦 (2017) “含水平搭接組合繫筋 RC 柱考慮搭接長度效應之耐震性能” 結構工程第 32 卷第 3 期第 27-47 頁，中華民國結構工程學會。
- [25] 李台光、陳正誠 (2015) “含組合繫筋及組合內箍筋 RC 柱之耐震性能” 結構工程第 30 卷第 1 期第 34-52 頁，中華民國結構工程學會。
- [26] 李台光、陳正誠 (2016) “不同軸力作用下組合繫筋之一體性及 RC 柱之耐震性能” 結構工程第 31 卷第 2 期第 5-24 頁，中華民國結構工程學會。