

含高強度材料 RC 柱之軸向受力行為與強度評估

Study of axial load capacity of new RC columns with high-strength materials

主管單位：內政部建築研究所工程組

王榮進

李宏仁

Wang, Rong-Jin

Lee, Hung-Jen

內政部建築研究所

國立雲林科技大學

摘要

使用高強度材料可使構材設計斷面減小，達到材料減量結構減重，建築使用空間更大而建造成本更低，極具經濟效益，惟如何確保超高強度鋼筋混凝土結構之耐震安全性能為當前主要課題。現有的高強度混凝土柱試驗數據幾乎都是縮小尺寸之試體，實際建築應用仍有疑慮，現階段仍需新的測試研究加以確認。本計畫測試 21 支大尺寸高強度混凝土柱試體，斷面尺寸為(500×500 mm)，承受軸向單向載重，主要測試參數為混凝土抗壓強度 (42、56、70 MPa)、箍筋降伏強度(420、490 MPa)、箍筋細部及間距，評估其軸力強度並檢討現行設計方法，大尺寸測試有助於澄清尺寸效應，研究成果有助於推動超高強度鋼筋混凝土應用於超高層建築工程。

關鍵詞：柱、圍束、高強度混凝土、高強度鋼筋

Abstract

Using the high-strength materials, a new reinforced concrete building can reduce the sizes of structural members, the material amount, and the structural weight. More floor areas can be used and construction cost is significantly reduced. The major challenge is how to design a safe earthquake-resistant structure with high strength materials. Almost available test results of high-strength concrete columns are reduced-scale tests due to the limitation of testing capacity. The application of high-strength materials in real construction is still controversial. New experimental studies for high-strength reinforced concrete columns are needed. This project tested 21 large-scale (500×500 mm) units of high-strength reinforced concrete columns subjected to monotonic axial loads. The primary testing variables are the concrete strength(42, 56, 70 MPa), yield strength of reinforcement(420, 490 MPa), detailing and spacing of the lateral reinforcement. The axial load capacities and current stress-strain models of confined concrete will be evaluated using full scale test units. Full-scale tests are helpful to clarify the size effect. The test results will provide further information for the application of high strength materials in the construction of high-rise buildings.

Keyword: column, confinement, high-strength concrete, high-strength reinforcement

一、前言

鋼筋混凝土(reinforced concrete, RC)構造由於其成本低、耐久性高、易於維護且適用於建築的特性，是目前全球應用上最普遍的建築材料。在日本的 RC 構造高層建築發展史上，如圖 1 所示，於 70 年代日本已可以建造約 20 層樓高的 RC 造建築物，80 年代 RC 造建築物發展已至 30 層樓高。日本建設省有鑑於都市高層建築發展與 RC 構造高強度、輕量化之需求，在 1988 至 1992 年間推行一個 5 年期國家型計畫 New RC Project [1]，如圖 2 所示，將 1980 年代常用的普通強度 RC 材料升級為 New RC，鋼筋降伏強度從 4000 kgf/cm^2 提升到 7000 kgf/cm^2 (約為目前台灣常用鋼筋 1.7 倍強度)，混凝土抗壓強度從 280 kgf/cm^2 提升至 700 kgf/cm^2 (約為目前台灣常用混凝土 2 倍強度以上)。日本的高層建築發展經驗顯示，高層建築物同樣也可以用高強度 New RC 建造，在 1993 年 New RC Project 結束之後，日本超過 30 層以上的 New RC 構造之高層建築物數量迅速增加，目前最高至 52 層樓。

根據日本高層建築發展經驗，New RC 造高層建築物相較於鋼骨鋼筋混凝土 (SRC) 造成本更低，以一棟 30 層樓建築物為例，如圖 3 所示，以 New RC 構造取代 SRC 構造結構體成本節省 20% 至 30%，搭配預組預鑄工法 New RC 工期甚至還可以再縮短 20%，對於人口密集又缺乏鋼鐵資源的島國日本，以 New RC 構造興建高層建築物為最經濟之選擇。使用高強度材料可減小構材斷面尺寸，達到材料減量結構減重，建築使用空間更大、建造成本更低，加上配套使用預組、預鑄工法，使工期縮短極具經濟效益，邊際效益還能減少砂石開採與鋼鐵用量，節省能源並減少溫室氣體排放，此為兼顧建設品質與永續的國家發展目標。使用預鑄預組工法在擁擠的都市裡較適合施工，加上防火性、居住舒適性 New RC 造建築物亦較 SRC 佳。在 90 年代後，在日本超高層建築物 New RC 造百分比有逐年提高的趨勢 SRC 比例降低，如圖 4 所示，至目前為止，日本已有超過 500 棟以上 New RC 構造高層建築物，如圖 5 所示，其中使用減震及隔震元件的建築物數量在 2000 年後亦迅速增加，迎合市場趨勢，由此可見，發展高強度 New RC 構造配合減震及隔震元件為日本未來都市高層建築的趨勢，在台灣如何推行 New RC 之應用為當前的研究主要課題。

二、文獻回顧

2.1 日本 New RC 柱軸力實驗成果

日本自 New RC Project 以來，已有許多高強度混凝土柱實驗成果，根據 Kato 與 Watanabe 等人[2]整理日本近 20 年高強度混凝土柱軸力實驗成果，已有橫箍方柱試體 91 支，螺箍圓柱試體 59 支，典型測試佈置如圖 6(a)及(b)所示，典型測試佈置[3]在上下兩端非量測區使用非常緊密的圍束箍筋，控制破壞在量測區域內，量測區域長度在 1 至 2 倍試體寬度範圍內不等，量測區利用螺栓轉接的方式，使位移計與試體保持一定距離，除量測軸向應變外還修正旋轉量之影響，且避免試驗過程中高強度混凝土開裂擠碎時，混凝土碎片掉落及飛出影響到量測數據。既有柱試體參數統計分佈如圖 7 所示，材料強度分佈相當廣，混凝土圓柱試體抗壓強度 f'_c 值從 27 MPa 至 132 MPa 不等 (4,000 to 19,000 psi)，橫向鋼筋之降伏強度 f_{yt} 值由 173 MPa 到 1360 MPa 不等 (25,000 to 197,000

psi)，但是絕大多數柱試體為縮尺試體，柱核心斷面寬度約 250 mm 左右，僅有的 4 支大尺寸試體（約 500×500 mm）為 Tanaka 與 Hiraishi 等人[4]所測試，這是受限於實驗室設備的加載能力，大尺寸試體測試經驗明顯不足。高強度混凝土之軸向受力行為已有大量的試驗數據，但實尺寸或接近實尺寸的柱軸向強度測試需要極大的載重，這是大部分實驗室所欠缺的，這使得絕大多數的研究單位必須退一步縮小柱試體，實尺寸柱軸向強度之測試極具挑戰性。

2.2 國內既有之鋼筋混凝土柱試體實驗

鋼筋混凝土受同心軸力實驗需要極大的力量，受限於實驗設備，往往必須製作縮尺試體模型。中興大學土木系林建宏教授等[7]曾測試 30 支普通強度混凝土柱試體，普通與高流動性混凝土各半，而柱斷面也僅僅為 300×300mm。台灣大學張國鎮教授等[8]與王炳雄[9]亦曾測試斷面 600×600mm 的大尺寸柱試體之軸力強度，總計 28 組試體設計，每組重複製作 3 支試體，總計 84 支柱試體，由於其試體設計軸力高達 3000 tonf 以上，而一般國內實驗室之試驗儀器均無法達到此軸壓強度之要求，故於連福橡膠公司楊梅實驗室借用 58.8 MN (6,000 tonf)之萬能試驗機執行試驗，唯受限試驗機空間，其柱試體高 1.2m 寬 0.6m 形成高寬比 2：1 之試體，一般軸向試驗之柱試體高寬比有 2：1 與 3：1 兩種，使用後者可使中央測試區之應力較為平均。台灣大學張國鎮教授等[8]與王炳雄[9]之柱試體設計著重於研究螺旋箍筋應用於矩形柱，其中幾種新圍束型式已有量產應用之實例。其試體混凝土設計強度從 35 至 70 MPa，箍筋降伏強度有 420 MPa 與 490 MPa 兩級，均為目前國內業界可量產之材料。本計畫案擬測試之柱試體材料強度與文獻[9]類似，實驗結果可與前人研究相比對，可供國內工程界直接參考引用。

2.3 柱軸力強度評估與圍束鋼筋之設計

國內混凝土工程設計規範[10]沿用美國混凝土學會之 ACI 318-05 規範[11]之設計方法，假設混凝土達強度時縱向主筋亦在降伏平台，則柱同心軸力強度為

$$P_0 = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_{yt} \quad (1)$$

其中 f'_c = 混凝土圓柱試體抗壓強度、 A_g = 橫斷面之全面積、 A_{st} = 縱向主筋之總截面積、 f_{yt} = 縱向鋼筋之降伏強度。

上式將混凝土圓柱試體抗壓強度乘以 0.85 折減係考慮實際柱尺寸、形狀、與澆置方式與標準圓柱試體之差異，這個公式源自 1930 年代在美國 University of Illinois 與 Lehigh University 的研究，當年混凝土強度較今日為低。經過近 80 年來許多學者研究，又新增許多高強度混凝土的柱試體，美國混凝土學會 2007 年有一份報告 ACI ITG-4.3R-07[12]，回顧既有研究成果並指出，上述係數 0.85 對高強度混凝土柱有時會不保守，例如 Ozbakkaloglu and Saatcioglu[13]即建議應按混凝土強度 f'_c 值調整係數 0.85。

高強度混凝土較硬較脆的材料特性，對耐震設計中必須加以關注，其中最重要的莫過於反復載重下之韌性，想維持高強度混凝土保有足夠之韌性，必須有適當充分之圍束。因此圍束混凝土數值模式與實驗比對一直是個重要的研究課題，落實在工程設計規

範中，即為圍束箍筋量之設計方法與驗證。

現行 ACI 318-05 設計方法，希望柱外殼保護層剝落後柱核心能持續保有軸向承載能力，故 ACI 規範要求式(2)之最少圍束箍筋量，由於當柱斷面較大時，保護層所佔比例甚少，為確保柱具有一定之韌性，ACI 規範另規定最少圍束箍筋量亦不得少於式(3)。

$$A_{sh} = 0.3s b_c f'_c / f_{yt} (A_g / A_{ch} - 1) \quad (2)$$

$$A_{sh} = 0.09s b_c f'_c / f_{yt} \quad (3)$$

其中 A_{sh} 是在 s 間距內垂直於 b_c 方向之橫向箍筋(包括繫筋)總斷面積、 s = 橫向鋼筋於縱向鋼筋平行方向之間距、 b_c = 計算 A_{sh} 時之柱心寬度，即外緣圍束鋼筋心至心之間距、 f_{yt} = 橫向鋼筋規定之降伏強度、 A_g = 柱總斷面積、 A_{ch} = 構材閉合箍筋或螺箍外緣以內之面積。

當 A_g 大於 1.3 倍 A_{ch} 時，即較小柱斷面時，式(2)控制柱箍筋量之設計，反之，對於較大柱斷面者，式(3)控制柱箍筋量之設計。上述這些要求係基於適當的箍筋圍束柱核心混凝土以補償保護層剝落的強度損失。然而，上述規定之最少箍筋量正比於混凝土強度 f'_c ，而反比於箍筋降伏強度 f_{yt} ，若箍筋降伏強度未能隨混凝土強度一起提高，則箍筋用量勢必增加，衍生箍筋壅塞與混凝土澆置的困難。

為舒緩箍筋過密導致施工困難，使用較高強度之箍筋圍束高強度混凝土亦是近年來重要之研究課題，Saatcioglu and Razvi[14]最近曾執行 26 支使用超高強度箍筋圍束高強度混凝土之柱軸向受力試驗，但柱斷面僅 250x250mm。可見大尺寸柱試體軸向受力行為與強度評估研究仍亟待加強。

三、實驗設計

3.1 試體設計

本案規劃測試 21 支大尺寸柱試體，考量國內規範容許之箍筋配置型式與 CNS 鋼筋規格之最高等級為 SD 490，試體斷面均為 500x500mm 屬大尺寸，淨保護層 30mm，縱向主筋 12-D25，主筋比 0.0243，全部試體均使用 D13 箍筋，試體設計參數如表 3-1 所示。試體分成 Normal、Moderate、High-strength concrete 三組，三組試體之 28 天圓柱混凝土強度設計為 42、56、72 MPa，縱向主筋與橫向箍筋規定降伏強度有 420 及 490 MPa 兩級，N 組使用 SD 420 鋼筋，M 與 H 組使用高強度 SD 490 級鋼筋。

橫向箍筋三種 Types：1) 單一閉合箍筋；2) 閉合箍筋兩向各穿插二根繫筋；3) 三個閉合環箍組合。箍筋橫向配置細部不同，係為檢討穿插繫筋對高強度混凝土圍束之無效性，此種穿插繫筋對高強度混凝土柱是否適用恐有疑慮，其表現應介於另兩種配置之間。

為制止柱主筋挫屈及提供柱適當圍束，箍筋配置尚須符合：1) 橫向鋼筋可採用單個或重疊閉合箍筋。與閉合箍筋相同大小與間距之繫筋應可使用。繫筋兩端均須圍繞於縱向鋼筋，並間隔換端；2) 箍筋縱向間距不得超過：構材斷面最小尺度之 1/4、6 倍主筋直徑、 $s_x = 100 + ((350 - h_x) / 3)$ 及 150mm。其中 h_x 為沿柱各邊相鄰箍筋或繫筋間最大水平距離；mm。根據上述規定，Type 2 及 3 使用穿插繫筋或重疊環箍，已使 h_x 值小於 200mm，可使最大間距放寬至 150mm。

故箍筋縱向間距主要有 100 及 150mm，H 組另增 75mm 提高圍束，如表 1 所示。

總計 N 組 6 支、M 組 6 支、H 組 9 支試體設計，另考量試驗結果必須具有可重複性，N 組另加作 2 支，H 組加作 1 支，實際製作 24 支試體。

實際配置之箍筋體積比從 0.79% 至 3.17% 不等，而按式(2)及式(3)計算最少箍筋量，換算成箍筋佔圍束柱核心之體積比分別為 N 組 1.8%、M 組 2.06%、H 組 2.57%，每一組均只有 2 支試體之實際箍筋量大於規範規定之最小箍筋量，其他試體低於规范要求之箍筋量。

本計畫主要測試參數為材料強度與箍筋細部配置，藉由大尺寸柱軸力實驗釐清現行規範設計公式是否適用於中高強度之材料，並與普通強度材料之表現相對照。

若以 ACI 方法以 $P_0 = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_{yt}$ 估算柱軸力降伏強度，另假設柱外殼保護層剝落後，核心圍束混凝土以數值模式推估其極限應力 f_{cp} ，故圍束柱核心之極限強度 $P_{ult} = (A_{ch} - A_{st}) f_{cp} + A_{st} f_{yl}$ ，兩者計算之結果比較如表 2 所示。根據表 2 之估算，最大強度不超過 20 MN，考慮鋼筋混凝土可能的材料變異與應固硬化，最大實測強度應該不會超過 25 MN，約為 MTS 30 MN 萬能試驗機最大承載容量的 85%，應屬可行之設計。

3.2 柱試體軸力與應變之數值模擬

除強度考量之外，韌度才是耐震設計所更關注的構件性能，參考 Aoyama[15]所著 New RC 專書，使用 Sakino Model 估試算表 2 所列之柱核心圍束混凝土應力應變曲線。以應變一致性假設將核心圍束混凝土、外殼保護層混凝土、及縱向主筋貢獻之軸力疊加，即可得柱軸力強度。

混凝土強度愈高，其強度後劣化較迅速，尤其是 H 組試體因混凝土強度高達 70 MPa，而箍筋強度僅 490 MPa 略有不足，必須將間距縮小為 75mm 才有類似之韌度，例如試體 N3@100、M3@100 及 H3@75 之圍束混凝土應力應變數值模式分析結果如圖 8。

3.3 柱試體製作與測試佈置

本案試體製作於實驗室先預組鋼筋籠，將鋼筋籠平躺於鋼模中定位，於預鑄工廠中澆置高強度低坍度混凝土，鋼模以高周波外模震動器夯實混凝土，確保柱內無蜂窩，試體製作過程與成品照片如圖 9 所示。

工廠內吊筒可裝置 1.5m³ 混凝土一次澆置 4 支柱試體及 15 個標準圓柱試體，圓柱試體與柱試體一同養護，分別作 7-day、28-day、柱測試日期前後分別執行 CNS 1232 混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗。鋼筋進場加工前已執行 CNS 2111 鋼筋拉伸試驗，均符合 CNS 560 規格中 SD 420 或 SD 490 等級要求之機械性能。

本案柱試體使用內政部建築研究所建築材料實驗中心之 MTS 30 MN (3,000 tonf) 萬能試驗機作同心軸向壓力測試，試驗機如圖 10 所示。為量測試體之軸向與橫向應變，柱試體表面留有預埋牙條接頭孔，測試前以牙條延伸外接位移計，規劃柱一側面縱向 5 支位移計橫向 1 支，如圖 11 所示，縱向測距 1m 長為 2 倍柱寬，總計 12 支位移計，試體中間 900 mm 長度內為控制破壞區，柱頂與柱底長度 300mm 以內配置間距 50 mm 緊密圍束箍筋，避免兩端破壞。除外部變形量測，本研究亦於二根主筋與兩組箍筋上黏貼應變計監測加載過程之鋼筋之應變應力。

四、結語

本研究試體設計三群，28 天圓柱混凝土抗壓強度設計分為 42、56、72 MPa 三級，實際圓柱試體 28 天抗壓強度依序平均為 54、60、80 MPa，此次使用混凝土抗壓強度平均超額約 17%，與實際業界量產之預拌混凝土超額比例接近，建議後續實驗設計應列入 10%-15% 超額考量。注縱向主筋與橫向箍筋規定降伏強度有 420 及 490 MPa 兩級，N 組使用 SD 420 鋼筋，M 與 H 組使用高強度 SD 490 級鋼筋。材料檢驗均符合國家標準，其中 SD 420 鋼筋實測降伏強度 432 MPa，SD 490 鋼筋測降伏強度 508 MPa，實測降伏點只高出規定值 3~4%，且不同試片之檢測值變異性甚小，本次實驗所使用之高強度 SD 420 及 SD 490 鋼筋均為低合金熱軋鋼筋，未經線上熱處理，品質相當穩定。

本研究探討含高強度材料 RC 柱之軸向受力行為及其強度，為應用新材料之基礎研究，短期內完成 21 組實尺寸柱軸向載重試驗及其相關材料試驗，試驗結果可提昇業界對高強度 RC 結構行為之認識，有助於推動高強度 RC 材料應用於建築工程。

中長期而言，建立使用高強度 RC 結構設計準則，有助於超高層建築之發展，使用高強度材料興建高層建築時，可以降低斷面尺寸，大幅減少材料用量，並增加建築物可使用面積，此外，當這些結構物需要拆除時，由於混凝土強度高，回收再利用的彈性高，具有環保優越性。

建築結構體使用高強度材料可使建築減重、材料減量、空間增加、且成本降低，在建築業可直接創造經濟效益，邊際效益還包括減少砂石開採與鋼鐵用量，節省能源並減少溫室氣體排放，此為兼顧建設品質與環境永續的研究方向。

展望未來可預見的能源短缺與溫室氣體排放量限制，在資源不足且地狹人稠的台灣，我們尤需重視節能與環境永續的研究，高強度材料應用於建築工程為極具前瞻性之工作，本研究對國內後續工作推動極具參考價值。

五、參考文獻

- [1] 建設省総合技術開発プロジェクト：鉄筋コンクリート造建築物之超軽量化・超高層化技術の開発(New RC)，平成四年度構造性能分科会報告書，(財)国土開発技術研究センター，1993。
- [2] Kato, D., Watanabe, F., Nishiyama, M., and Sato, H., “Confined Concrete with High Strength Concrete,” ACI Special Publication, SP-176, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1998, pp. 85-104.
- [3] Sun, Y. P., and Sakino, K., “Axial Behaviors of Confined High-Strength Concrete,” Transactions of the Japan Concrete Institute, 1993, pp. 455-462.
- [4] Tanaka K., and Hiraishi, H, et al., “Experimental Study on the Behavior of the Actual Scale High-Strength Reinforced Concrete Columns under Compressive Axial Load,” Summaries of Technical Papers of AIJ Annual Meetings, 1993, pp. 761-762. (in Japanese)
- [5] Kamuro, T., Imai, K., Muramatsu, A., Korenaga, T., and Watanabe, F., “Compressive

- Properties of Reinforced Concrete Columns using High Strength Concrete with Compressive Strength of 100-180 N/mm²,” Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, March 2004.
- [6] Watanabe, F., “Research Activities on Confined Concrete in Japan,” ACI Special Publication, SP-238, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2006, pp.63-79.
- [7] Lin, C.H., Lin, S. P., and Tseng, C. H., “High-Workability Concrete Columns Under Concentric Compression,” ACI Structural Journal, V. 101, No. 1, January-February 2004, pp. 85-93.
- [8] 張國鎮、尹衍樑、王瑞禎、王炳雄，「螺旋箍筋於矩形柱應用之試驗研究」，工程，中國工程師學會，第七十八卷，第三期，2005，pp. 101-124。
- [9] 王炳雄，「新矩形混凝土柱圍束型式之研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程研究所，2004。
- [10] 混凝土工程委員會，「混凝土工程設計與解說（土木 401-96）」，中國土木水利工程學會，台北，2007。
- [11] ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05),” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2005, 430 pp.
- [12] ACI Innovation Task Group 4, “Report on Structural Design and Detailing for High-Strength Concrete in Moderate to High Seismic Applications,” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2007, 62 pp.
- [13] Ozbakkaloglu, T., and Saatcioglu, M., “Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete,” ACI Structural Journal, V. 101, No. 4, July-Aug. 2004, pp. 475-483.
- [14] Saatcioglu, M., and Razvi, S., “High-Strength Concrete Columns with Square Sections under Concentric Compression,” Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 124, No. 12, 1998, pp. 1438-1447.
- [15] Aoyama, H., *Design of Modern High-rise Reinforced Concrete Structures*, Imperial College Press, London, 2002.

表 1、試體設計參數

Specimen	f'_c	f_{yt}	s	$\rho_{s,provided}$	$\rho_{s,required}$	$\frac{\rho_{s,provided}}{\rho_{s,required}}$
	MPa	MPa	mm	%	%	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
N1@100	42	420	100	1.19	1.80	0.66
N2@100*				2.38		1.32
N3@100*				2.38		1.32
N1@150			150	0.79		0.44
N2@150				1.59		0.88
N3@150				1.59		0.88
M1@100	56	490	100	1.19	2.06	0.58
M2@100				2.38		1.16
M3@100				2.38		1.16
M1@150			150	0.79		0.39
M2@150				1.59		0.77
M3@150				1.59		0.77
H1@75	70	490	75	1.59	2.57	0.62
H2@75				3.17		1.23
H3@75				3.17		1.23
H1@100			100	1.19		0.46
H2@100*				2.38		0.93
H3@100				2.38		0.93
H1@150			150	0.79		0.31
H2@150				1.59		0.62
H3@150				1.59		0.62

註：*相同試體製作 2 支




橫向箍筋配置：Type 1  Type 2  Type 3 

表 2、試體設計強度

Specimen	A_{sr}	f_{yt}	P_o	f_{cp}	P_{ult}	$\frac{P_{ult}}{P_o}$
	mm ²	MPa	kN	MPa	kN	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
N1@100	6084	420	11,263	43.5	10,712	0.95
N2@100*				--	--	--
N3@100*				51.9	12,287	1.09
N1@150				43.0	10,613	0.94
N2@150				--	--	--
N3@150				48.2	11,594	1.03
M1@100		490	14,592	57.8	13,820	0.95
M2@100				--	--	--
M3@100				67.6	15,653	1.07
M1@150				57.2	13,698	0.94
M2@150				--	--	--
M3@150				63.2	14,834	1.02
H1@75		490	17,494	78.8	17,765	1.02
H2@75				--	--	--
H3@75				88.0	19,475	1.11
H1@100				77.0	17,414	1.00
H2@100*				--	--	--
H3@100				83.6	18,656	1.07
H1@150	75.1			17,062	0.98	
H2@150	--			--	--	
H3@150	79.2			17,834	1.02	

註：Type 2 穿插繫筋表現應介於 Type1 與 Type3 之間。

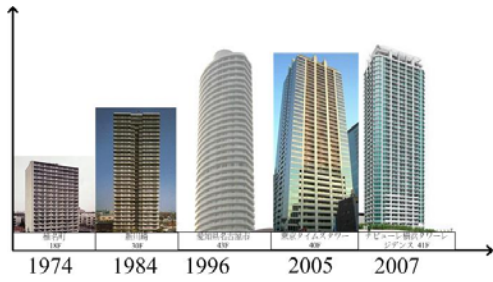


圖 1、日本 RC 構造高層建築物發展

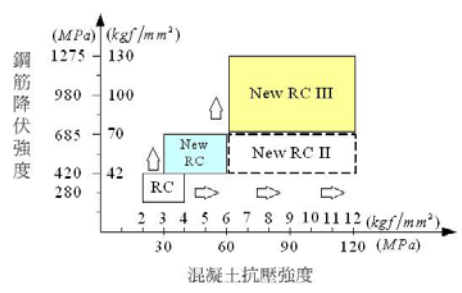


圖 2、New RC 材料強度之提升

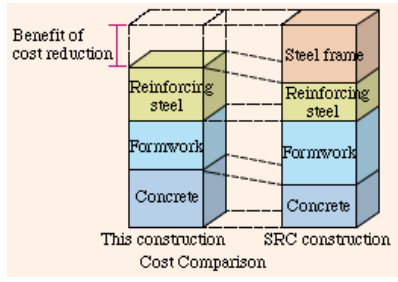


圖 3 New RC 相對於 SRC 構造節省之成本

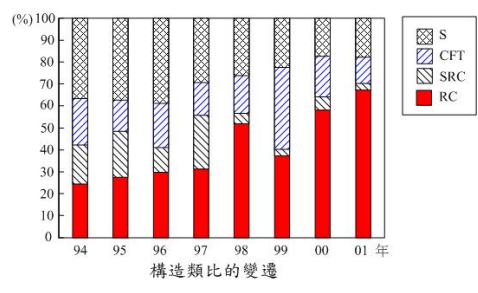


圖 4 日本超高層建築建造數量變遷

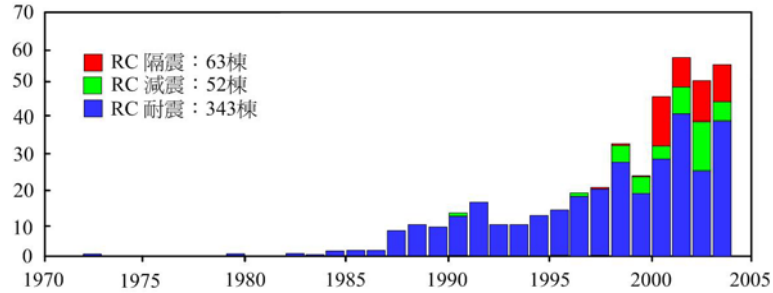
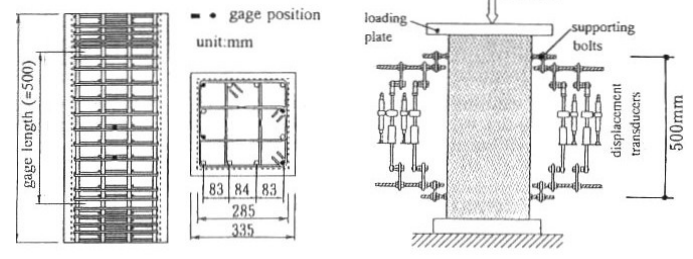
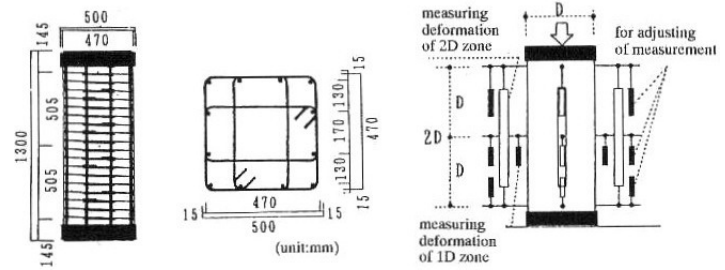


圖 5 日本超高層 RC 建築統計

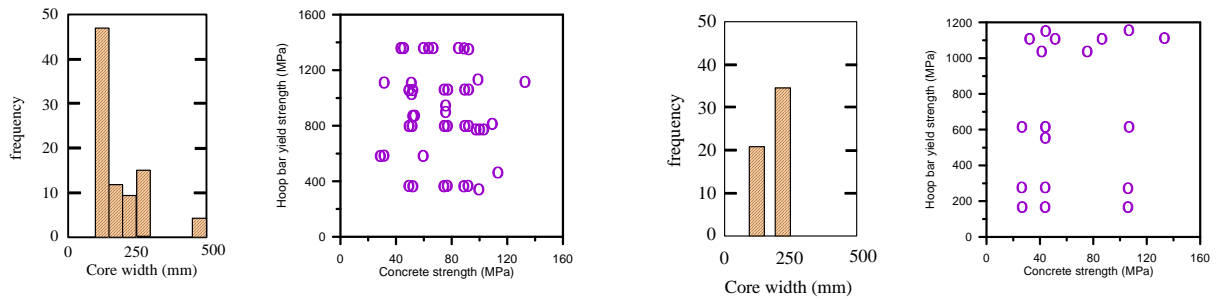


(a) Sun and Sakino 1993 之測試佈置[3]



(b) Tanaka and Hiraishi et al. 1993 之測試佈置[4]

圖 6、日本 New RC 柱軸力測試之典型佈置



(a) 橫箍方柱 91 支試體

(b) 螺箍圓柱 59 支試體

圖 7、日本既有柱軸力試驗數據統計

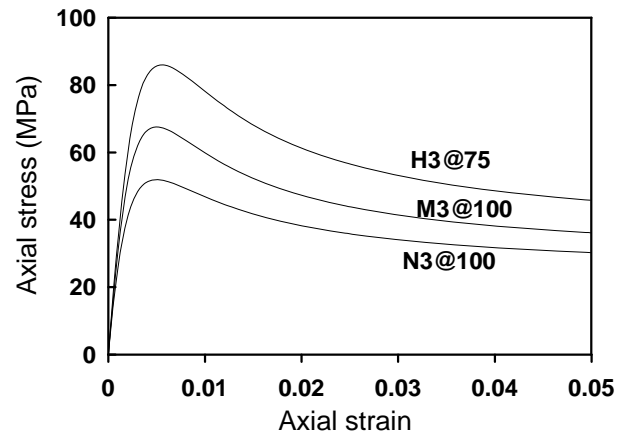


圖 8、圍束混凝土應力應變數值模式



圖 9 柱試體之製作

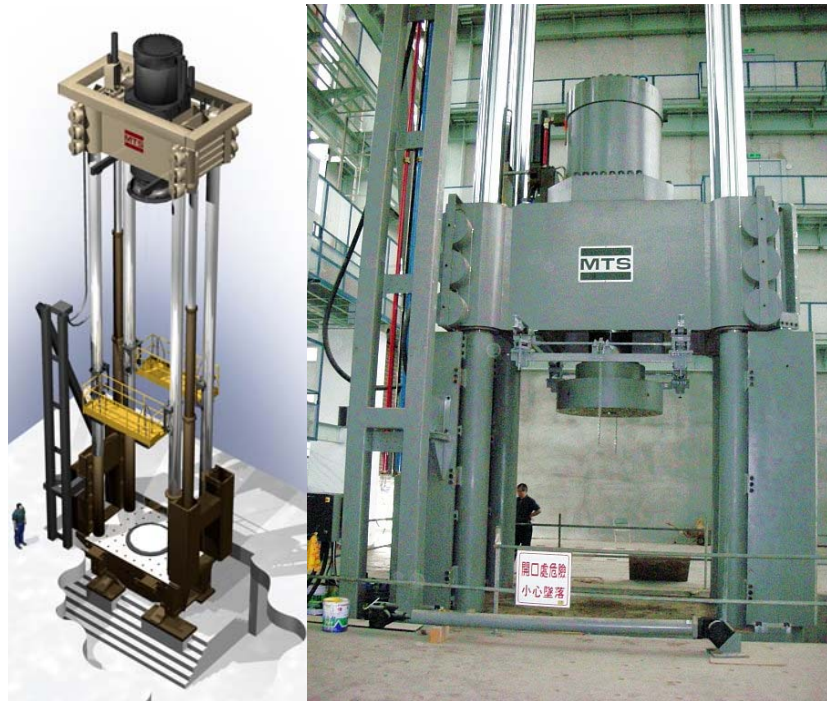


圖 10、 MTS 30 MN (3000 tonf) 萬能試驗機

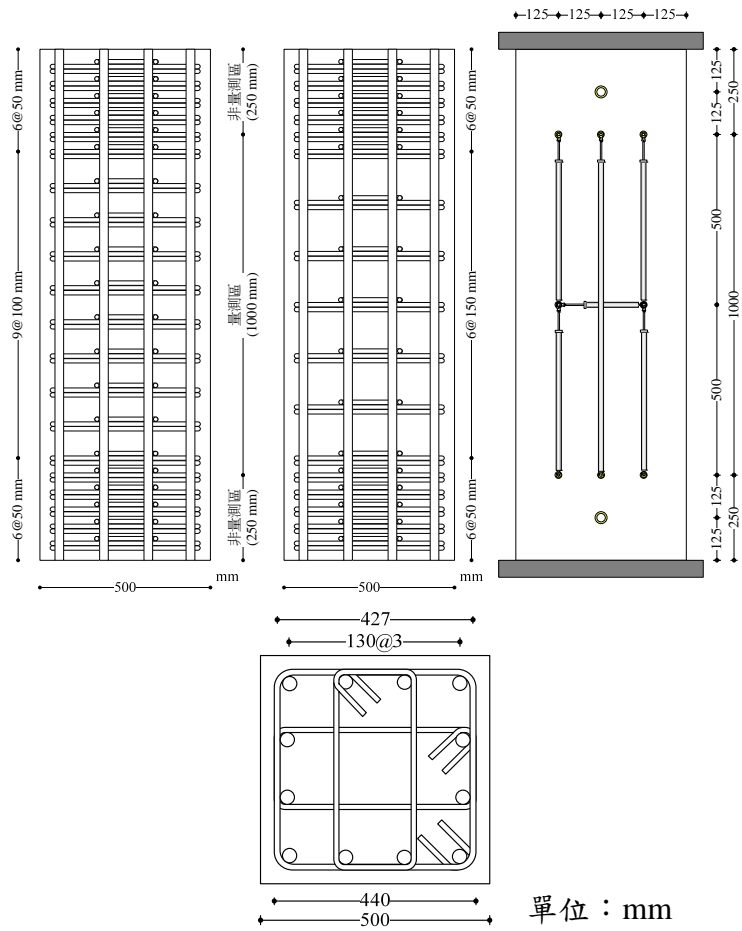


圖 11、試體剖面與立面配置