

新世代超高強度鋼筋混凝土結構系統研發

Research and Development of New-RC Structural System in Taiwan

主管單位：財團法人國家實驗研究院

黃世建¹

林克強¹

Hwang, Shyh-Jiann¹ Lin, Ker-Chun¹

¹財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心

摘要

為推動節能減碳、環境永續發展的國家基本政策與全球高度重視議題，近年來，國家實驗研究院國家地震工程研究中心推動國內新一代鋼筋混凝土材料的研發，將鋼筋與混凝土強度分別提高至 800 與 100MPa 等級，分別約為國內工程界現行常用強度的 1.8 倍或 3.6 倍，擴大我國鋼筋混凝土營建材料的應用範圍。藉由嚴謹材料規格的制訂、適當的品質管控與檢驗，以獲得更穩定材料品質，更進而可獲得安全且經濟的結構品質。本計畫之研究內容包括：材料研發、構件行為研究、及結構分析、設計與施工，研發一套超高強度鋼筋混凝土結構之分析、設計與實際施工管理的本土化準則，並協助國內產業界，達到應用此高強度鋼筋與混凝土材料於實際建築結構之總體目標，甚至應用於橋梁結構。

關鍵詞：高強度鋼筋混凝土、預鑄工法、鋼筋續接套筒、螺紋節鋼筋

Abstract

To promote the issues on saving energy, reducing carbon emission and developing sustainable environment of national policies and global concerns, in recent years, the National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE), a member of the National Applied Research Laboratories (NAR Labs) devoted to researching and developing a new type structural system. An innovative structural system using ultra high-strength reinforced-concrete material, called as “Taiwan New RC Project” was planned in and launched in 2010. Its maximum goal strengths of reinforcement and concrete are 800 MPa and 100 MPa, respectively, which are around 1.8 and 3.6 times those of materials using in the practical RC engineering in Taiwan. The Taiwan New RC Project is able to extend wider applications of traditional RC construction. This project is predicted to obtain the stable qualities of materials by specifying rigorous material specifications and proper quality control and inspection of material. It is main goal to get a safe and economical structural system with the ultra-high-strength RC materials. The principal research items of this project include research and development of high-strength materials, seismic studies of structural members, and analysis, design and construction

methodologies of this structure. It is a main objective of this project not only to develop a complete set of localized analysis and design method but also to assist Taiwan's engineering communities to build a first real New RC building in Taiwan. In addition to the building structures, the New RC materials are attempted to use in bridge structures.

Keywords : ultra-high-strength reinforced-concrete, precast construction method, reinforcement's splice sleeve, threaded steel bars

一、前言

鋼筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)構造，由於其成本低、耐久性高、易於維護且符合一般國人居住習慣，為目前應用最普遍的構造用營建材料。但因單位重量大較大，位處於地震帶的台灣，因此採用此材料做為建築結構物之地震力效應較為顯著，故依國內現行常用之28至42MPa混凝土與420MPa鋼筋之材料強度，以場鑄工法建造之建築物高度多無法超過30層。故一般30層樓以上的高層建築較少為RC構造。除此之外，國內在過去1980至1990年代期間的快速經濟建設中，許多民生使用的住宅建築，大量採用經濟的鋼筋混凝土材料建造，由於建築構造需求大，部分營造公司之耐震營建技術尚未提升，但已有建造大量傳統鋼筋混凝土建築結構實績，自恃具有成熟鋼筋混凝土造的設計、建造與品管等能力，即從事高耐震要求的高樓建築之建設；另一部分早期建設之中低樓層建築因結構系統不良、不當的加蓋或結構修改、耐震設計觀念不普遍、或結構耐震細節要求不嚴謹等，導致無論是中低樓層或高層之鋼筋混凝土造建築，在1999年的921地震事件中受到嚴重的破壞，儘管經耐震設計、考慮耐震細節、與經耐震施工及品管之高層建築，其耐震性能表現均如預期，並未有任何倒塌事件發生，但此事件已重創民眾對於鋼筋混凝土造建築的結構安全信心。近年來國內隨著耐震工程技術的精進、耐震工程教育的日益普、及過去耐震設計建築結構經地震作用後的良好耐震表現，另參考日本超高層鋼筋混凝土建築的發展與受震性能表現經驗，只要經考慮周詳的耐震設計、施工與品質管控，超高層鋼筋凝土建築結構亦具優異的耐震性能。在高強度鋼筋混凝土應用於高層建築結構時，預鑄工法為確保結構品質之營建工法之一，同時，鋼筋混凝土構造建築藉由預鑄工法之運用，可增進施工技術與品質，並有效縮短工期。

二、新型高強度鋼筋混凝土系統之發展

2.1 日本發展經驗

1988至1992年間起日本建設省推行New RC Project，其材料強度目標詳圖1之New RC區域[1]，將RC之鋼筋與混凝土材料強度，分別提升至降伏強度685MPa(約為目前國內常用鋼筋強度之1.7倍)與抗壓強度60MPa(約為目前常用混凝土2倍強度)。圖2、圖3顯示日本從1973年至今RC構造建築之材料強度的演變過程，從1995年開始，RC造建築之使用材料強度大幅度提升，直到今日更蓬勃發展，截至2007年為止，在日本已有超過500棟以上的超高層建築物使用New RC建造(圖4) [2]，樓層高度已達47層，更於2009年日本興建完成一棟59層New RC建築(圖5)，鋼筋與混凝土材料強度最高分別採用685MPa與150MPa。此證實New RC應用於超高層建築之可行性。依日本經驗，圖6中以一棟30層建築物為例，統計說明若以New RC取代SRC結構體材料費可節省20%至30%，工期可縮短20% [2]，可見New RC極具潛力。

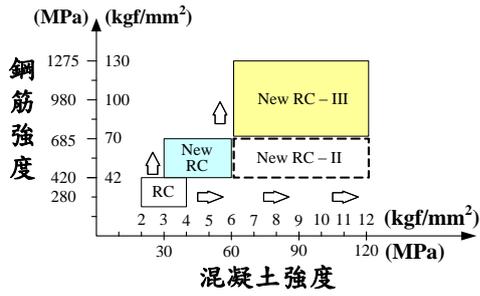


圖1 材料強度提升之New RC[2]

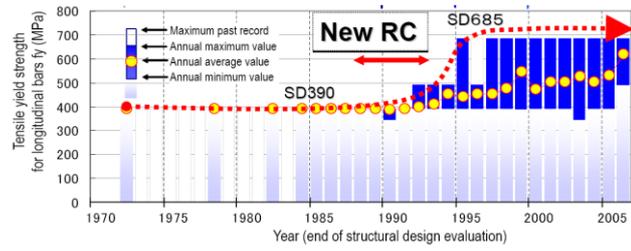


圖2 高強度鋼筋之強度演變[2]

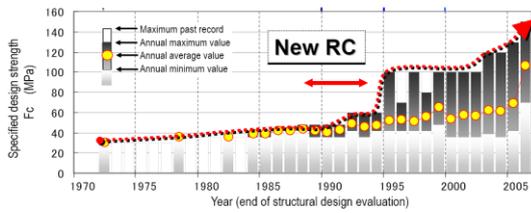


圖3 高強度混凝土之強度演變[2]

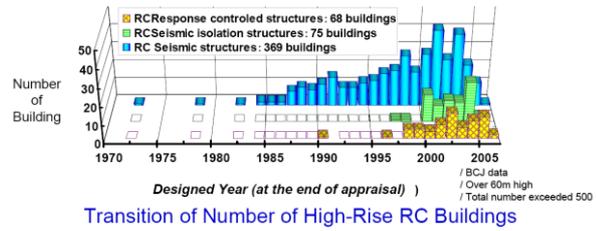


圖4 New RC建築於日本數量之統計[2]

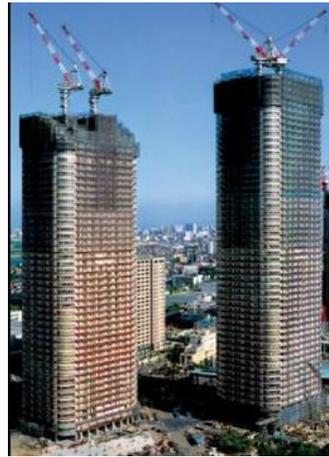


圖5 2009年神奈川縣New RC建築

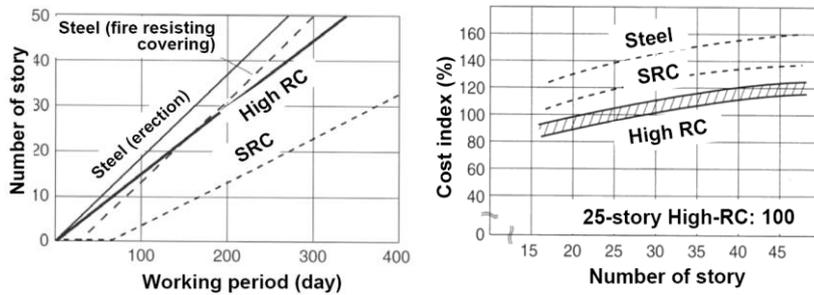


圖6 建築成本、工期與樓層數關係圖[2]

2.2 國內應用之機會

台灣地狹人稠，都市發展經驗與日本類似，同時在各大都市中屋齡超過三、四

十年之低矮樓房比例極高，因而有其都市更新的壓力，故政府大力鼓勵推動都市更新，在都市更新下，將有大面積建地產生，加上日本都市新空間規劃採用高層建築及大面積綠地公共空間方式之做法，大幅改善舊市區景觀、環境與居住品質。台灣都市建築用地有限，可效法日本經驗積極發展超高材料強度之New RC建築，朝向超高層發展。質的提升可促進量的減少，故使用高強度RC材料不僅減少材料使用量，並能節省製造材料之能源，進而減少溫室氣體排放，此可提升國內建築結構設計與施工技術，同時往環境永續的國家發展目標邁進。另外將建築物朝超高層發展可舒緩都市的土地需求，並有助於提升生活品質。

2.3 計畫目標

本研究計畫之總目標便是利用材料與技術研發成果，研發一套超高強度鋼筋混凝土結構之分析、設計與實際施工管理的本土化準則，並協助國內工程界，實際應用超高強度鋼筋混凝土材料應用於興建建築結構上，促使第一棟New RC建築的建造，甚至應用於橋梁結構。本計畫不以修改現行結構混凝土設計規範為目標，短期是以建立New RC建築之設計、施工與品管指針，依據營建署「建築新技術新工法新設備及新材料認可申請要點」，作為New RC建築的建造法令基礎。本研究所規劃之New RC結構系統有以下特點：(1)SD685鋼筋因強度太高，其含碳當量高不利銲接製作，故建議採用螺紋節鋼筋，以利鋼筋以螺紋牙套筒灌注沙漿續接，(2)此高強度鋼筋不建議採用標準彎鉤錨定，建議使用灌漿式機械錨定裝置作為端部錨定，(3)為使New RC結構之施工品質獲得確保，建議上部結構採用預鑄工法施作。

三、研究項目及執行進度

本計畫之研究內容可包括：材料研發、構件行為研究、結構系統分析與設計，唯有三方面均獲得可信且成熟之材料研發成果後(詳圖7)，再配合構件設計及施工技術，此系統才可推廣應用於實際工程中。現階段國內已完成材料研發，正進行量產調整，為使後續構件試驗研究之材料來源充分無虞，期盼國內鋼筋柱造廠商儘速進入量產外，也尋求國外鋼筋替代的可能性。現階段除了進行後續之材料研發外，也正展開各種受力構件之強度、變形與耐震性能之研究。由於本研究研發之鋼筋與混凝土材料強度較現行規範規定者大幅提高，因此過去傳統鋼筋混凝土學中構件的分析與設計公式、結構系統的設計邏輯、分析方法與流程、及施工的方法與管理已無法完全涵蓋，均應重新審視其適用性，並研發創新且適當的設計與施工細節，建立高品質、安全且經濟的新節能減碳建築結構系統。

3.1 高強度材料資料庫

高強度材料數據資料庫方面，目前進度為蒐集已進行試驗之試體，所有混凝土材料測試均須提供其配比設計(含水膠比、飛灰爐石粉取代量等詳細資料)、抗壓強

度及其對應應變、極限應變、彈性模數之實驗數據，鋼筋方面，均須提供測試分析其化學組成成份，並提供彈性模數、降伏強度、抗拉強度、伸長率及彎轉測試結果，未來將再蒐集更多數據以建構台灣高強度材料數據資料庫。

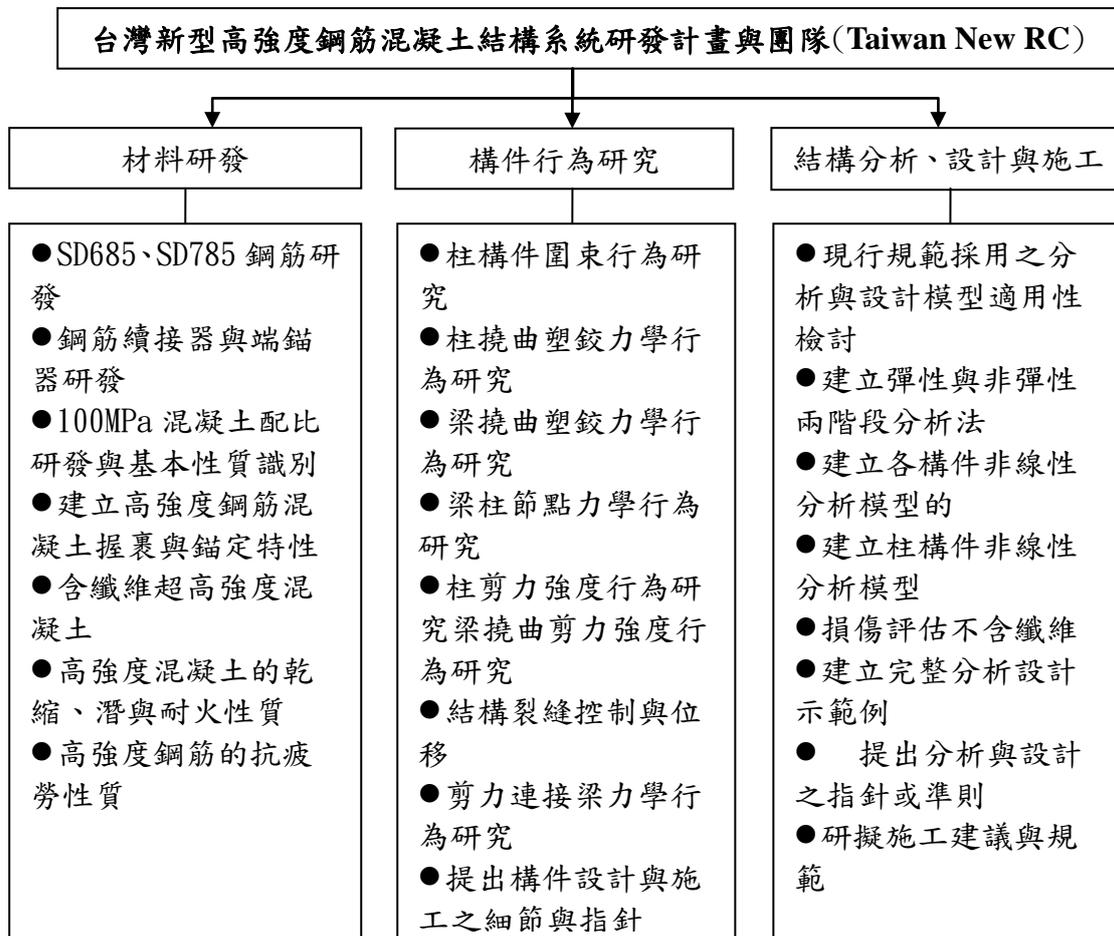


圖 7 Taiwan New RC Project/Group 研發架構圖

3.2 結構構件行為

在結構構件行為之研究中，包括九個子計畫，探討主題涵蓋高層鋼筋混凝土結構各主要構件，包括柱構件行為、梁構件行為、梁柱接頭行為、握裹行為及剪力牆行為，各子計畫間分工合作以探討RC結構中之主要構件行為，整合後將可共同規劃實驗、相互支援、分享試驗夾具及試驗成果。研究參數包含構件軸力比、圍束箍筋及鋼纖維配置量、主筋續接器形式、鋼筋表面幾何性質及地震下撓剪行為之對照等。

高強度鋼筋混凝土梁耐震行為與設計之研究

主要將現有ACI318設計規範，先引用於New RC梁構件設計，如梁塑性鉸長度、橫向筋間距、鋼筋截斷設計等，實際試作一批一般RC與New RC懸臂梁，施以靜態反覆地震力，來觀察一般RC梁與New RC梁之耐震性能差異，藉此修正現行規範規定，以供未來設計New RC結構物參考。

梁柱接頭耐震性能研究及資料庫建構

建構新型梁柱接頭測試資料庫，包含過去20年來具有SD 490或更高等級鋼筋之測試數據，試體數約150組，執行參數分析及破壞行為比較，檢討延伸現有設計方法之妥適性。並根據資料庫分析結果，提出梁柱接頭剪力強度之衰減模型，藉由設計四組梁柱接頭實驗，精密量測各性能點之應力與變形，驗證衰減模式之解析假設。

高強度鋼筋與混凝土柱縱向鋼筋降服後剪力行爲之試驗研究

探討高、低軸力比下，混凝土強度與箍筋間距組合對柱縱向鋼筋降服後剪力行爲之影響，並發展能考慮上述參數之剪力評估與設計模型。

高強度鋼筋混凝土構件之損傷評估與生命週期修復性能研究

除收集國內外相關文獻及參考前述「台灣新型高強度鋼筋混凝土結構系統研發計畫」之既有與未來將進行之試驗資料，以了解高強度鋼筋混凝土構件(混凝土強度為70及100MPa，鋼筋為685及785MPa)之可能損傷模式，尚包含反覆載重下之裂縫發展、裂縫寬度與構件變形等關係，並依據構件受力後幾何變形條件建立撓曲裂縫與剪力裂縫之寬度與長度計算模型。然而，依文獻可知構件之裂縫發展與其塑角區範圍及受力大小有密切關係，因此上述模型須再依其力學行為進行修正。最後，參考Taiwan New RC Project/Group之足尺寸實驗資料進行模型驗證與參數統計特性確立。

超高強度纖維混凝土力學性質與圍束效應

高強度纖維混凝土的機械行為和體積穩定性是此研究計劃的主要核心，新拌混凝土漿體的坍流度採用ASTM C1611標準試驗，硬固混凝土的抗壓、劈裂、抗彎、自體收縮和乾燥收縮試驗等標準測試，則分別依ASTM C39、ASTM C496、ASTM C1609、ASTM C157、ASTM C426-10等標準量化試驗進行。透過材料試驗建立不同參數配比（纖維添加量、纖維細長比、纖維分布排列情形、漿體水膠比、配比永續綠色礦物摻料比例等）之基本機械行為及相關材料參數（ $f'_c, E_c, \epsilon_o, \epsilon_u$ ）。亦將比較高強度纖維混凝土及一般高強度混凝土力學性質差異，並探討不同纖維添加量之自體收縮、塑性收縮及乾燥收縮，同時亦將探討不同纖維添加量之潛變量。

高強度鋼筋在鋼筋混凝土耦合剪力梁之應用

設計八個全尺寸耦合剪力梁的構件測試，試體的測試參數包含主筋降服強度、圍束箍筋降服強度，以及耦合剪力梁長深比，SD 420 與 SD 685 鋼筋分別代表一般強度與高強度鋼筋是主要研究對象，耦合剪力梁在一定的軸向束制條件下施以往復側向位移，使其產生雙曲率變形。

高強度鋼筋混凝土柱圍束作用之研究

針對高強度鋼筋混凝土橫箍柱圍束作用進行研究，作為實際超高強度混凝土柱

設計上之參考，繼而發展出一套有效的高強度混凝土橫箍柱耐震圍束公式。

螺紋節鋼筋之表面幾何特性研究

SD685鋼筋因強度高，不利鋼筋冷彎加工或加熱電鍍，因此傳統採用90度或180度彎鉤做為鋼筋端部錨定，或以電鍍鋼筋續接器進行鋼筋續接，均不適用於降伏強度為685 MPa等級之鋼筋錨定與續接，故在本“台灣新型高強度鋼筋混凝土結構研發”之整合型計畫中，建議SD685鋼筋的表面幾何形狀為螺紋節型式，配合開發螺紋式套筒端錨與續接裝置，方便鋼筋製作螺紋鎖固灌漿式端部錨定套筒與續接套筒，以取代竹節鋼筋所採用之傳統彎鉤端部錨定與電鍍鋼筋續接器續接。鋼筋埋置於混凝土中之握裹力學性質主要受鋼筋表面幾何形狀的影響，相關研究顯示，鋼筋表面節理之節高與節距比為影響鋼筋與混凝土握裹力學行為之重要參數，ACI 408.3-01建議竹節鋼筋之此比值介於0.1至0.14之間。本研究以螺紋節鋼筋表面節理之節高與節距比值為主要參數，在與竹節鋼筋於混凝土中具有等效的握裹性質下，建立螺紋節鋼筋適當之鋼筋表面幾何形狀，作為生產螺紋節鋼筋之依據。

高性能鋼筋混凝土剪力連接梁受震行為研究

於剪力連接梁中採用高強度鋼筋、高強度混凝土及高強度鋼纖維之可行性、必要性、經濟性各方面探討，並研擬鋼筋混凝土剪力連接梁簡化配筋、提升施工性之可行方案。藉由測試比較採用傳統材料及高強度材料對於剪力連接梁受震行為反應上之差異，以驗證高強度材料應用於剪力連接梁之效益。

3.3 設計指針研擬

主要工作為完成初步構件分析、設計與施工指針，並建立設計範例與施工要求準則，透過設定目標案例，進行實際的應用，檢討施工與技術落實生根，提升營建品質。

四、預期成果與效應影響

此台灣新型高強度鋼筋混凝土結構系統(Taiwan New RC Project/Group)完成，預期可獲得以下之綜合效益：

1、應用於超高層建築結構：在高度都市化城市中，因都市土地日趨昂貴，且人口逐漸往都市集中，使土地不敷使用。因此超高強度鋼筋混凝土結構系統之研發，可將適合住宅使用之鋼筋混凝土構造，在不增加結構構件斷面的條件下，可更合理且有效率地高層化，適當降低都市建築用地需求。

2、有助於都市更新計畫推動：特別在高度都市化的台北市，隨著快速的都市化發展，過去許多高密度的中低樓層建築，已超過或逐漸已屆設計年限，且部分建築已老舊或安全已漸堪虞，亟需推動都市更新計畫，為都市注入活水，展現更安全且適合居住的都市風貌，本計畫發展高強度且高品質之混凝土與鋼筋材料，可有效提升建築

物高度，增加可用的公共空間，提高都市生活品質，並可配合先進工法的應用，以提高施工效率，降低成本，進一步提升傳統營建產業的經濟效益。

3、提升都市環境永續發展：使用新的高強度鋼筋混凝土材料，可減少結構物構件尺寸，增加建築的使用空間，可直接減少砂石開採與鋼鐵用量，節省能源消耗並減少溫室氣體排放量等，使營建業降低成本創造利潤，也減少對環境的污染與危害，此不僅兼顧營建品質，同時顧及環境永續發展。

4、提升國內產業界之品質：新材料與新技術的研發，往往會帶動傳統產業的進步。例如本計劃高強度鋼筋的螺紋節，即可應用到傳統的鋼筋(SD420)上。其續接器方便鋼筋籠預先組立，或構件可使用預鑄產製。這些預組與預鑄之產製程序，可以提升國內的施工品質。而本計劃使用的鋼筋端部錨定板，亦可應用到傳統鋼筋工程上，其可以降低90度變鉤引致的鋼筋壅塞問題。最重要的是高強度材料的施工，需要更精緻與嚴格的施工技術與品質，這些提昇品質技術將可使傳統產業一併提升。

5、提昇我國在此研究領域的學術地位：超高強度鋼筋混凝土結構行為的相關研究，受到先進國家從事營建工程實務與研究領域的單位與研究人員的重視。由於國內產業界對此結構系統有其應用潛力，故藉由此研究計畫的開始，並結合相關研究單位與學者，及產業界的共同推動，因此超高強度鋼筋混凝土結構系統的研發，除可促進國內產業升級外，亦可提昇我國在此相關研究領域的學術地位。

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. Japan Concrete Institute, “Technical Committee Report on Structural Performance of High--Strength Concrete Structures, 2006.7.
3. Aoyama, H., (2002). *Design of Modern High-rise Reinforced Concrete Structures*, Imperial College Press, London.
4. 新世代高強度鋼筋混凝土研究<第二年度研究報告>，TCI財團法人台灣混凝土學會，2010。