

# 高強度鋼筋混凝土應用在超高樓層建築物之耐震性能探討

## Study on seismic performance of New RC technique on high-rise buildings

主管單位：內政部建築研究所 計畫編號：10062B001

宋裕祺

廖慧明

邱昌平

蔡江洋

Chen, Chang-Shian Liao, Hui-Ming Chiu, Chang-Pien Tsai, Chiang-Yang

### 摘要

台灣地狹人稠，所能利用之建築面積亦有所限制，建築物朝向高樓層發展為未來之趨勢，目前台灣房屋建築均以鋼筋混凝土(RC)建物居多，由於RC自重過大，其所建之樓層數約莫可達三十層樓左右。日本建設省在1988至1993年間的研擬新形式鋼筋混凝土(New RC)研究計畫，將混凝土強度與鋼筋強度分別提昇到140MPa與700MPa，以有效降低RC斷面。時至今日，日本已有超過700棟以上的超高層建築物使用New RC之建造案例，其最高樓層高達60層，已突破傳統RC建築之限制。

台灣位於環太平洋地震帶，地震發生頻仍，如何確保New RC高樓之耐震性能至為重要。本研究將依據日本相關研究機構實驗所得之高強度鋼筋與高強度混凝土之組成律與剪力強度等特性，研擬一套適用於New RC耐震性能之評估與檢核分析系統，透過側推分析(Pushover Analysis)逐一檢核不同等級需求的耐震性能；此外，續以側推分析所得之結果，將模型簡化為一串燒模式(Stick Model)進行非線性動力歷時分析(Nonlinear Time History Analysis)，並檢核各樓層反應。文中對於New RC各構件之塑鉸設定亦有詳細之描述，可供為國內超高層建築物從事耐震設計參考之用。

關鍵詞：側推分析、非線性動力歷時分析、高強度混凝土、高強度鋼筋

### Abstract

The application of high strength of concrete and reinforcement(New RC) on the building structure can significantly decrease the dimension of structural member, benefiting the use of high-rise reinforced concrete building. However, the seismic performance of the New RC building should be evaluated carefully particularly for the high-rise of seismic zone. This paper intends to study this issue concreted.

The stress-strain relationship based on some Japanese researchers were adopted to set up the plastic hinge property of the New RC structural member. Through the pushover analysis, the multiple level of seismic performance for the New RC building can be investigated based on the proposed methodology and accordingly, an equivalent stick model of the building can then be established for the purpose of nonlinear time history analysis. As a result, the seismic performance of the New RC building can be analyzed successfully. The results obtained can facilitate the fulfill of New RC building in Taiwan.

Keywords : Pushover analysis, Nonlinear time history analysis, High strength concrete, High strength reinforced

## 一、前言

超高樓建築使用高強度混凝土與高強度鋼筋為未來重要之趨勢，如何確保 New RC 之耐震性能為首要之問題。目前針對普通混凝土建物之耐震詳細評估已有 SERCB、NCREE 等程式可應用，但對於 New RC 部分則未有相關之程式及規範，本文將發展一套適用於 New RC 之耐震性能評估程式，針對梁柱構件之塑性鉸考慮其非線性行為，透過普遍使用之結構分析軟體如 ETABS 等進行側推分析求得其結構物所能承受之地表加速度，並考慮地震作用下之各樓層行為，檢核其結構物之耐震性能。

## 二、構件力學行為

### 2.1 撓曲行為

切片法(Strip Element Method)為分析柱斷面彎矩-曲率的有效方法之一，該法首先將柱斷面切割為很多纖細的條狀纖維元素，設柱斷面之撓曲曲率為  $\varphi$ ，固定軸力  $N$  並選定合宜的曲率增量  $\Delta\varphi$ ，並根據混凝土組成率即可建立柱斷面的彎矩-曲率關係；若變動軸力  $N$  並重複前述方法，則可建立柱斷面的軸力-彎矩交互關係[1]。求得彎矩-曲率後以柱構材底部之曲率作為控判值，逐次增加曲率，由前述建立完成之彎矩-曲率關係，由彎矩-曲率關係可得其對應之曲率  $\varphi_i$ ，利用力矩面積法將各斷面之曲率對長度  $x_i$  作積分，可求得柱構材頂部變位  $\delta$  與其對應的等值轉角  $\theta$ 。根據相關實驗成果顯示：當柱底產生塑性鉸時，將有塑性擴展(Plastic Penetration)現象，柱底會有一塑鉸區(Plastic Zone)，該區內曲率由柱底之極限曲率  $\varphi_u$  往上延伸到塑鉸區長度處之降伏曲率  $\varphi_y$  考量上述塑性擴展現象，柱構材頂部極限變位  $\delta_u$  其對應的等值轉角  $\theta_u$  便可計算，因此柱構材彎矩-轉角 ( $M_b - \theta$ ) 之關係便可建立[1]。

### 2.2 剪力行為

#### 2.2.1 柱剪力強度-韌性比關係之建立

有關高強度混凝土剪力行為與韌性關係本文參考日本等相關剪力計算公式：青山博之[2]教授建議之混凝土剪力行為。後續將比對日本各相關研究單位之實驗資料。

### 2.3 鋼筋混凝土柱破壞模式之判別

將柱撓曲行為之彎矩轉角 ( $M_b - \theta$ ) 圖與剪力行為之彎矩轉角 ( $M_v - \theta$ ) 圖疊合，可得圖 1。圖中顯示  $M_b - \theta$  與  $M_v - \theta$  間有三種可能的情況：

#### (1) 剪力破壞模式

如圖 1(a)所示，在彈性階段下(即  $\theta \leq \theta_y$ )，柱剪力強度對應之彎矩  $M_v$  小於撓曲強度  $M_b$ ，顯示剪力破壞會先行發生。此種破壞模式可稱為剪力破壞模式。

#### (2) 撓曲-剪力破壞模式

如圖 1(b)所示，在彈性階段及部分塑性階段下，柱剪力強度對應之彎矩  $M_v$  大於撓

曲強度  $M_b$ ；但在某一臨界韌性比時二者會相等(即  $M_v = M_b$ )；當韌性超過該臨界值時則有  $M_v < M_b$ 。顯示在該臨界韌性比之前，柱會發生撓曲破壞；在該臨界韌性比之後，柱會發生剪力破壞。此種破壞模式可稱為撓曲-剪力破壞模式。

### (3) 撓曲破壞模式

如圖 1(c)所示，柱剪力強度對應之彎矩  $M_v$  大於撓曲強度  $M_b$ ，顯示撓曲破壞會先行發生。此種破壞模式可稱為撓曲破壞模式。

## 三、構件在軸力變化下之塑鉸設定

在構架式鋼筋混凝土柱的側推分析中，隨著水平推力的增大，柱軸力與反曲點高度亦會隨之改變，本文參考宋裕祺[1]等人之研究，先以柱構材靜重軸力  $P_D$  與彎矩  $M_D$  為基準，以構材反曲點間之距離設為各構材之柱高，並依前述方法設定「靜重狀態塑性鉸」。在此，梁構材並不考慮軸力效應，並假設反曲點位於梁中央位置。找出各單柱受地震力作用後的反曲點高度。續以軸力  $P_u$  為基準，以靜重及地震力引致構材反曲點間之距離設為各構材之柱高，設定「極限狀態塑性鉸」。內插靜重狀態塑性鉸與極限狀態塑性鉸所得之二塑性鉸特性。其原則為初期係以「靜重狀態塑性鉸」特性為基準，俟構材初始降伏後即開始向「極限狀態塑性鉸」特性逼近，直到最終點完全相同為止。

## 四、高強度鋼筋混凝土單柱容量曲線之案例分析與驗證

### 4.1 側推分析與構件反覆載重實驗之比對

本文以日本京都大學小室 努(Komuro Tsutomu)等人所進行之單柱試體 150-1[3]、日本京都大學六車 熙(Muguruma Hiroshi)教授之單柱試體 CL-3[4]，日本千葉大學和泉信之(Izumi Nobuyuki) 教授研究團隊之單柱試體 UHRC04[5]以及日本清水建設(株)技術研究所熊谷仁志(Kumagai Hitoshi)等人之單柱試體 C1[6]以 SAP2000 之非線性側推分析功能配合本文開發之 SERCB for New RC 程式與梁、柱塑鉸設定方式進行高強度鋼筋混凝土柱非線性行為之分析與驗證如圖 2~圖 5 所示。

## 五、超高層鋼筋混凝土建築結構耐震性能評估案例及探討

本章將根據前述之高強度鋼筋混凝土柱塑鉸設定方式，針對某一超高層高強度鋼筋混凝土建築物，配合 SERCB for New RC(Seismic Evaluation of RC Building for New RC) 程式，設定建築物各梁柱構件的塑鉸性質，藉由分析求得的容量曲線及容量震譜，進行整體結構物非線性靜力側推分析並根據台灣現行規範及日本規範，評估整體結構物之耐震性能。此外，亦經由分析後之結果，建立一串燒模式(Stick Model)進行非線性動力歷時分析，以比較側推分析之準確性。

### 5.1 高強度鋼筋混凝土建築物諸元

本範例以一棟純構架式超高層高強度鋼筋混凝土建築物之建物為對象[2]，並假設其工址為台北市信義區，其平面配置為一正方形，跨距為 5.7m，兩邊各有 6 跨度；立面系統為六十層樓高且其屋頂為屋突形式，柱斷面為漸變形式其隨樓層增加亦隨之減小，樓

梯間位於中央如圖 6、7、8 所示。

## 5.2 整體結構模型建立與側推分析

本節將利用前述之構件塑鉸特性設定，考慮軸力、剪力及彎矩互制效應，故結構物將以 ETABS 先進行靜力分析，待求得各構件之軸力變化情形再進行塑鉸特性設定，再執行側推分析，由此計算建築物破壞方向之耐震能力。根據前述之基本結構資料建立如圖 9 所示之 3D 模型，本分析範例不考慮結構與土壤互制作用，並假設梁柱接點為完全剛性接合，樓層樓板在樓梯間不設置樓板，除結構物梁柱自重外其餘如外牆、陽台欄杆、女兒牆自重將換算成等值重量加載於模型上。

### 5.2.1 側推分析結果與耐震性能評估

側推分析結果之基底剪力對位移關係圖(容量曲線)與各階段發展情形如圖 10 所示。求得分析結構物之容量曲線後，參考宋裕祺[1]等人提出之改良式耐震能力評估法，使用側推分析結果所得之有效週期( $T_{eff}$ )、譜加速度( $a_{pi}$ )、譜位移( $d_{pi}$ )和有效阻尼比( $\beta_{eff}$ )來計算地表加速度(PGA)，求得側推過程中每一階段的地表加速度與位移關係如圖 11 所示。

### 5.2.2 耐震性能檢核

耐震需求為中度地震(LV1)時(相當於地表加速度為  $S_{ad}I/3.5$ )，層間變位角須在 1/200 以下，構件在容許應力以內；耐震需求為設計地震(LV2)時(相當於地表加速度為  $0.4S_{ds}I$ )，層間變位角須在 1/100 以下，樓層塑性率 2.0 以下，各構材塑性率 4.0 以下(如表 1 所示)。

由圖 12 可知，當耐震需求為中度地震，其各個樓層均未超過其規範之規定；耐震需求為設計地震時，層間變位角如圖 13 所示其檢核結果未超過其規範規定；構材塑性率如圖 14、15 所示，其塑性率可先由層間變位角圖知其 LV2 所對應之耐震需求為 0.3g 時，梁已達降伏狀態而柱仍維持於彈性狀態，因此「強柱弱梁」可以確保。

除此之外根據前述之考慮構架式鋼筋混凝土柱其塑鉸之軸力變化關係的塑鉸性質，將其第一層樓柱受壓側及第一層樓柱受拉側進行軸力-彎矩關係檢核如圖 16、17 所示，其軸力尚未超過軸力-彎矩曲線之包絡線，其結果尚屬合理。

## 5.3 Stick Model 建立與非線性動力分析

### 5.3.1 建立 SAP2000 模型

本節以側推分析之結果，將側推每階段樓層剪力及樓層位移之關係，取降伏點與極限點之力與位移將其雙線性化，而各樓層勁度以降伏點之力除以位移為有效勁度，並使用 SAP2000 內建之非線性元素 Takeda Model，將每根 Nonlinear Link 的自由度設定為 V2 之力量與位移關係，建立一多自由度系統之簡化模型如圖 18 所示之 Stick Model。

本範例採用之地震力歷時為 TAP014、TAP088、TAP089，並參考上述之三筆地震記錄建立三筆與 5% 阻尼比之設計反應譜相符(Spectrum Compatible)之地震記錄，依規範規



定其 5% 阻尼比之譜加速度值在  $0.2T$  至  $1.5T$  週期範圍內不得低於設計地震水平譜加速度值之 90% ( $T$  為所考慮結構物方向之基本振動週期)，且在此週期範圍內之平均值不得低於上述規定之譜加速度平均值，此三筆於設計反應譜相符之地震記錄定義為 RTAP014、RTAP088、RTAP089，接著將以三筆原始地震紀錄與三筆人造地震紀錄進行非線性動力分析如圖 19 所示。

#### 5.4.2 非線性動力歷時分析之結果

本範例分析所採用之歷時資料為 TAP014、TAP088、TAP089、RTAP014、RTAP088、RTAP089 等六筆，依序將每筆地震記錄資料輸入 SAP2000 分析軟體中進行非線性動力歷時分析，樓層間力量與位移關係之非線性元素設定如上節所述，分析結果以表 1 之規範進行檢核，檢核結果如下：

##### 1. 三筆原始地震歷時最大反應：

將其歷時中最大反應值如圖 22 所示以 LV1 進行檢核層間變位角不得大於  $1/200(0.005)$ 。由所得三筆原始地震歷時分析結果顯示，其層間變位及層間變位角均小於規定值。

##### 2. 三筆與設計反應譜相符之地震歷時最大反應：

將其歷時中最大反應值如圖 25 所示以規範 LV2 進行檢核層間變位角不得大於  $1/100(0.01)$ 。由所得三筆與設計反應譜相符之地震歷時分析結果顯示，其層間變位及層間變位角均小於規定值。

## 六、 結論

本文分別以側推分析法與非線性動力歷時分析法進行超高層高強度鋼筋混凝土建築物耐震性能評估。所得結論如下：

### 1. 高強度鋼筋混凝土構件撓曲行為以 New RC Model 所定義之混凝土組成律可獲得較佳之分析結果

本研究根據由孫玉平(Sun Yuping)教授與崎野 健治(Sakino Kenji)教授所研提之 New RC Model，並就日本相關單位所執行單柱反覆載重實驗的實驗數據，進行相關比對。結果顯示採用 New RC Model 所得高強度混凝土構材之撓曲強度與實際實驗成果比對後可獲得較佳之分析結果。

### 2. SERCB for New RC 分析系統之開發有助於結構工程師從事高強度鋼筋混凝土建築物耐震性能設計與檢核

本研究所開發之高強度鋼筋混凝土建築物耐震性能分析系統 SERCB for New RC，主要功用係以自動化流程從事高強度鋼筋混凝土耐震性能分析工作。其基本功能包括：

- (1) 梁、柱斷面軸力與彎矩交互曲線之建立，
- (2) 斷面承受軸力下彎矩與曲率分析及塑鉸特性設定，
- (3) 前處理之功能：包括將建築物各構材承受載重下之內力資料從結構分析軟體中匯出。設定塑鉸特性後再匯入結構分析軟體執行側推分析。
- (4) 後處理之功能：可依據工址所屬震區之地震需求特性，進行建築物耐震性能是否合乎需求之判定。

(5) 本系統提供自動化功能：包括支援文字交換檔、支援視窗介面操作模式與支援批次化的操作功能。

(6) 本系統亦具有良好的管理功能，包括分析資料檔案專案管理、分析資料版本及狀態管理、輔助分析系統版本更新管理及協同作業資料交換等。

SERCB for New RC 分析系統之開發有助於結構工程師從事高強度鋼筋混凝土建築物耐震性能設計與檢核。

### 3. 建構高強度鋼筋混凝土超高層建築物側推分析與非線性動力歷時分析之方法與流程，有助於結構工程師了解高強度鋼筋混凝土建築物耐震性能設計與分析要項

本研究針對一棟六十層樓為分析對象，進行以下分析：

#### (1) 側推分析(Pushover Analysis)

依據本研究所建議各構材塑鉸設定之方式，分別設定個梁、柱構材。續依據側推分析所得容量曲線(Capacity Curve)，轉換為容量震譜(Capacity Spectrum)，再以改良式耐震能力評估方法得到屋頂位移與地表加速度之曲線圖，顯現結構物自彈性至塑性乃至極限狀態下對應之地表加速度，以探討多目標地震下結構耐震性能如下：

*Level 1*(中度地震)所對應之耐震能力為 0.06(g)，其各樓層之層間變位角皆低於 1/200；構件保持在彈性階段尚未超出容許應力，*Level 1* 檢核均合乎規定。

*Level 2*(設計地震)所對應之耐震能力為 0.24(g)，其各樓層之層間變位角皆低於 1/100；構件與樓層塑性率尚未超過規定值。其中，於側推過程中梁已達到降伏但柱仍維持在彈性範圍，顯示「強柱弱梁」在此案例中可獲確保。

#### (2) 非線性動力歷時分析

首先彙整側推分析中各施力階段所得之樓層剪力與樓層相對位移之關係，計算各樓層之樓層勁度，並配合 Takeda Model 設定其遲滯迴圈特性，將整體結構物簡化成 Stick Model，以探討多目標地震下結構耐震性能如下：

將三筆原始地震紀錄所分析之結果以 *Level 1* 進行檢核，各樓層之層間變位角皆低於 1/200，均合乎規定。

與設計反應譜相符之三筆地震紀錄所分析之結果以 *Level 2* 進行檢核，在 RTAP014、RTAP088 地震歷時下各樓層之層間變位角皆低於 1/100，RTAP089 地震歷時下有少數樓層層間變位角超出 0.01，但其整體仍合乎檢核標準。

## 参考文献

1. 宋裕祺 et al., 鋼筋混凝土柱側推分析之研究與探討. 中華民國建築學會「建築學報」, 2004, p. 47~65.
2. Aoyama, H., Design of modern highrise reinforced concrete structures. 2001, Japan: Imperial College Press.
3. 小室, 努, 渡辺 英義, 是永 健好, 150MPa 超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐震性能. コンクリート工学年次論文集, 2002, p. 277-282.
4. 渡辺 史夫, 西山 峰広, 六車 熙, 超高強度コンクリートを用いた RC 柱の曲げ強度と靱性. 日本建築学会構造系論文報告集, 1993, p. 99-106.
5. 山内, 茂一 et al., 超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造の柱部材に関する実験研究: その3 実験概要. 学術講演梗概集. C-2, 構造 IV, 鉄筋コンクリート構造, プレストレストコンクリート構造, 壁構造・組積構造, 2000. 2000: p. 191-192
6. 熊谷 仁志 et al., 超高強度鉄筋コンクリート構造( $F_c=120\text{Nmm}^2$ )の開発: その2 柱の曲げせん断実験. 学術講演梗概集. C-2, 構造 IV, 鉄筋コンクリート構造, プレストレストコンクリート構造, 壁構造・組積構造, 2000, p. 609-610.

表 1 非線性靜力分析之檢核標準

LV1 ( $PGA = S_{aD}I/3.5$ )	1. 層間變位角 1/200 以下。 2. 構件在容許應力以內。
LV2 ( $PGA = 0.4S_{DS}I$ )	1. 層間變位角 1/100 以下。 2. 樓層塑性率 2.0 以下。 3. 構材塑性率 4.0 以下。

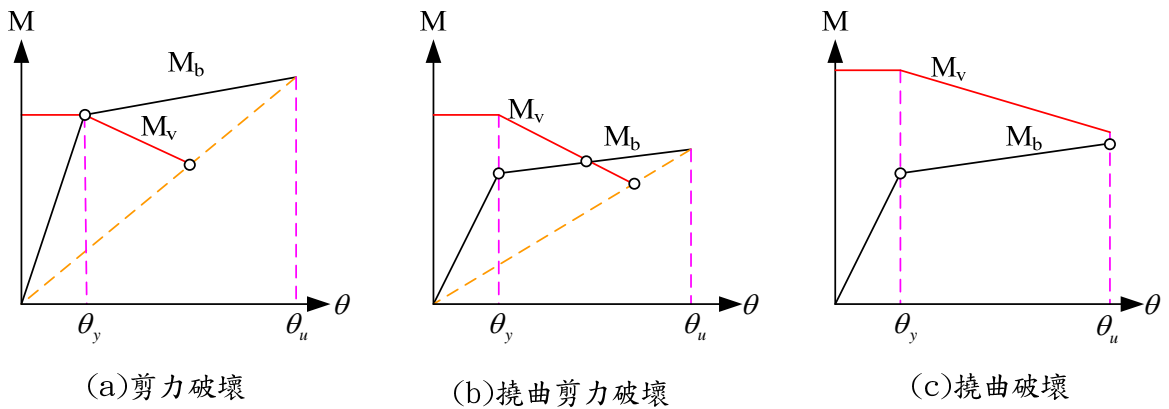


圖 1 鋼筋混凝土柱破壞模式之判別

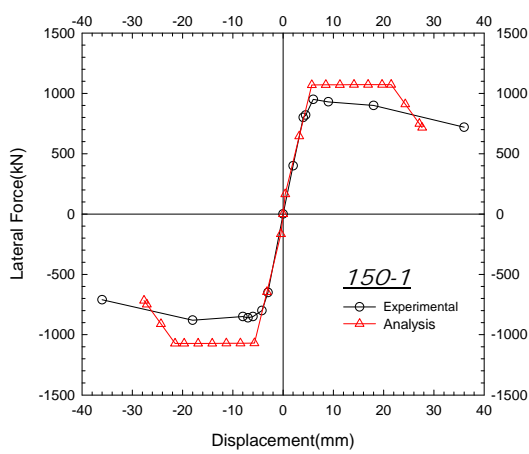


圖 2 實驗試體 150-1 分析所得結果與實驗資料之比較

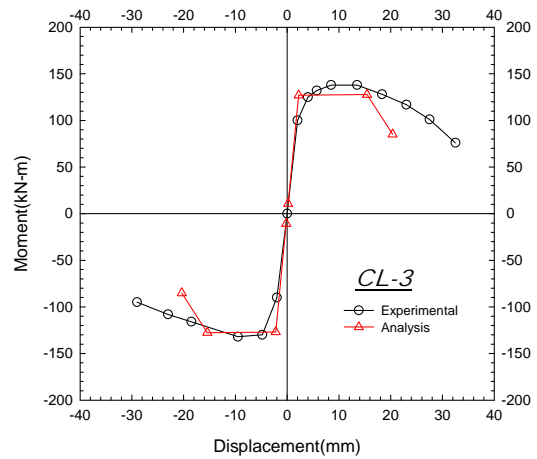


圖 3 實驗試體 CL-3 分析所得結果與實驗資料之比較



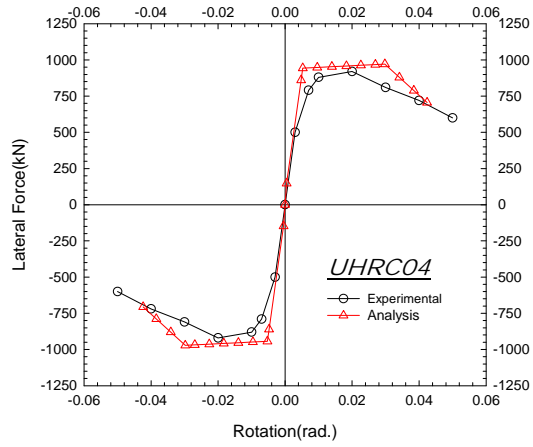


圖 4 實驗試體 UHRC04 分析所得結果與實驗資料之比較

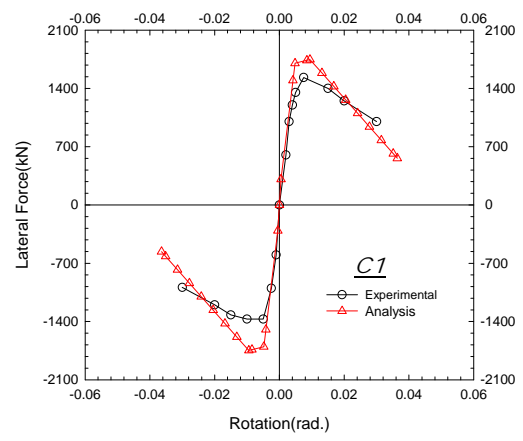


圖 5 實驗試體 C1 分析所得結果與實驗資料之比較

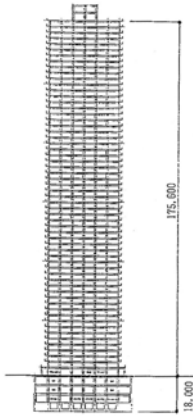


圖 6 建物立面圖[2]

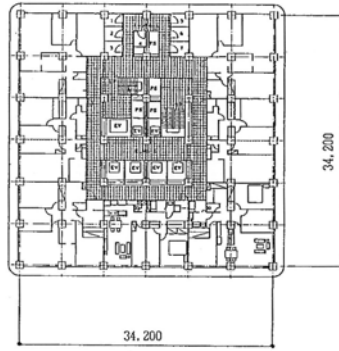


圖 7 建物平面圖[2]

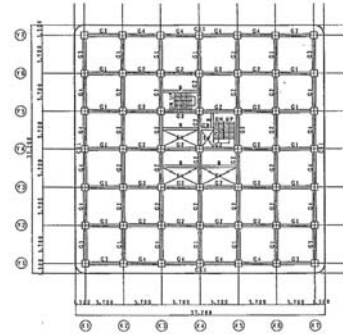


圖 8 結構平面圖[2]



圖 9 整體建物 3D 立體圖

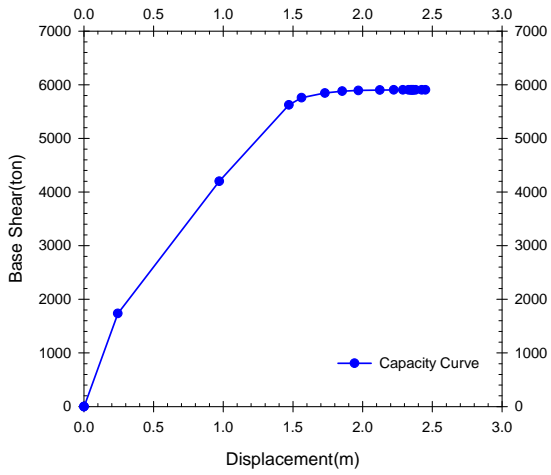


圖 10 側推分析容量曲線圖

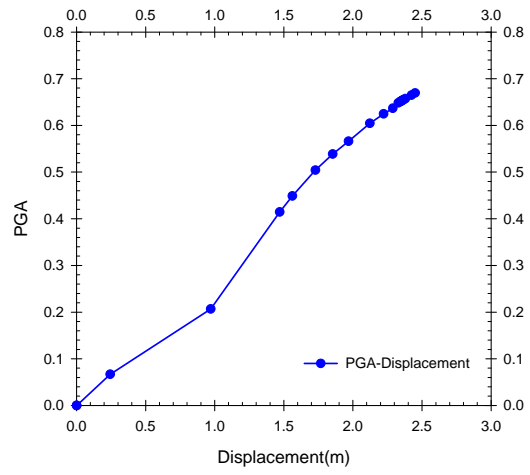


圖 11 地表加速度對位移關係圖

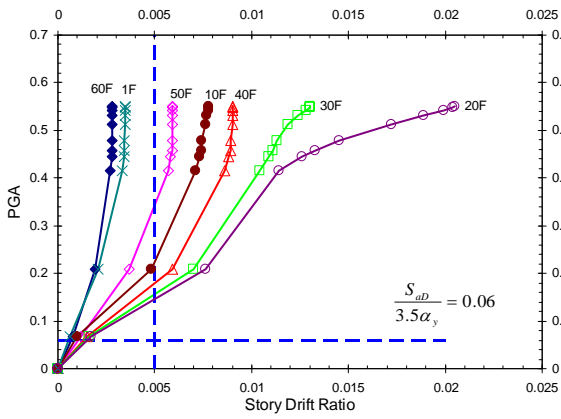


圖 12 LV1 層間變位角檢核圖

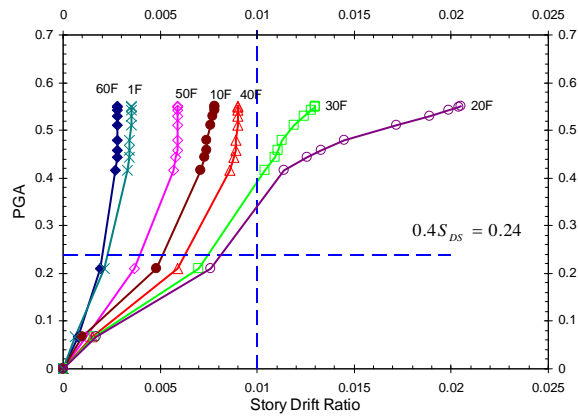


圖 13 LV2 層間變位角檢核圖

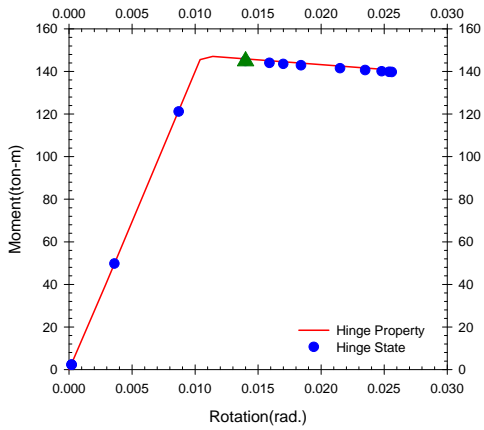


圖 14 梁構件塑性率檢核圖

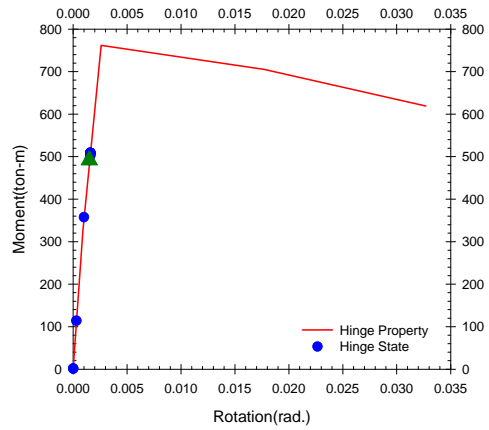


圖 15 柱構件塑性率檢核圖

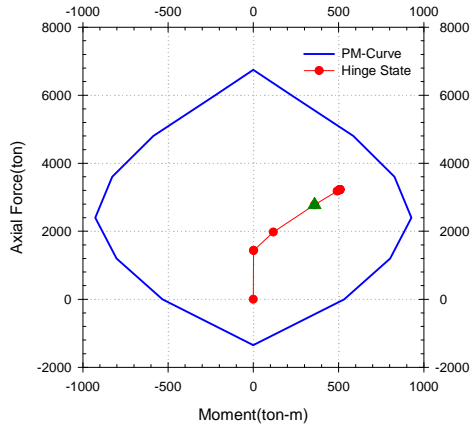


圖 16 第一層樓柱受壓側軸力-彎矩檢核圖

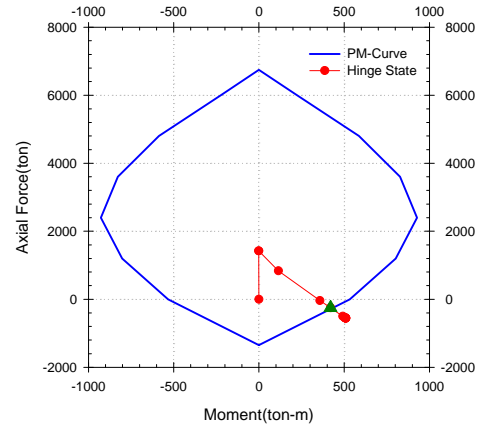


圖 17 第一層樓柱受拉側軸力-彎矩檢核圖



圖 18 模擬之 Stick Model

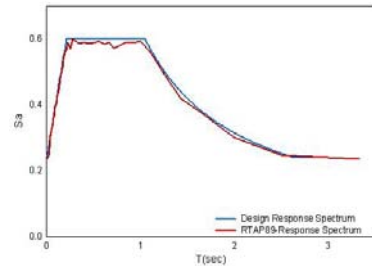


圖 19 Spectrum Compatible 人造地震波

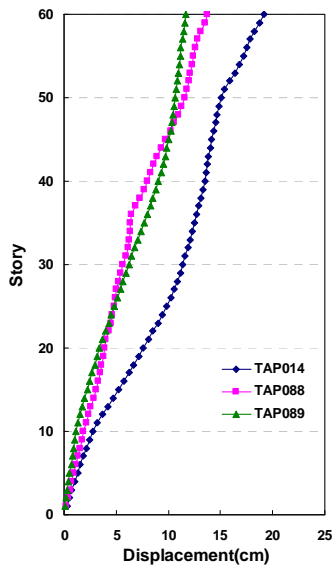


圖 20 樓層變位

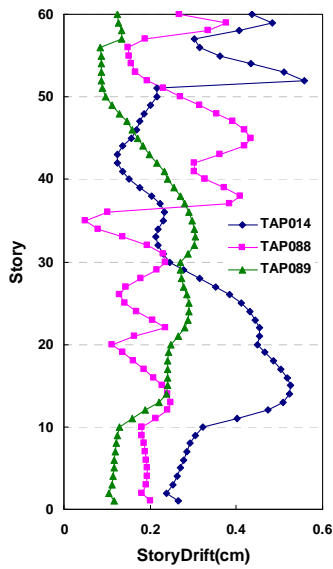


圖 21 層間變位

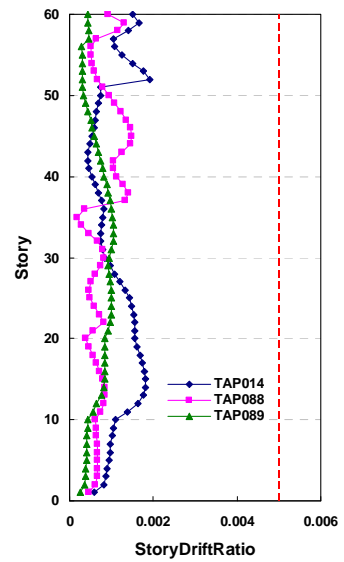


圖 22 層間變位角

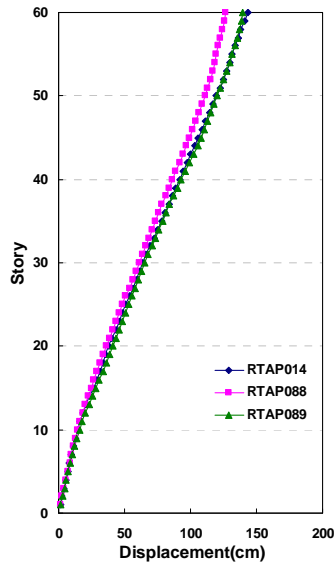


圖 23 樓層變位

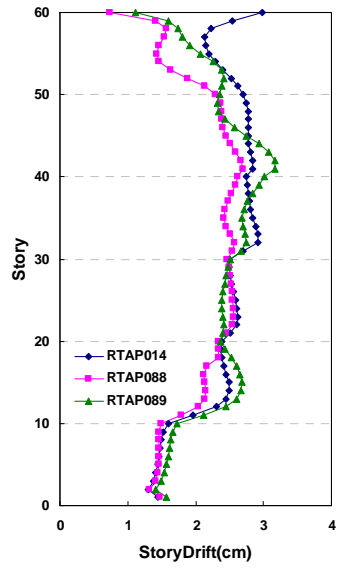


圖 24 層間變位

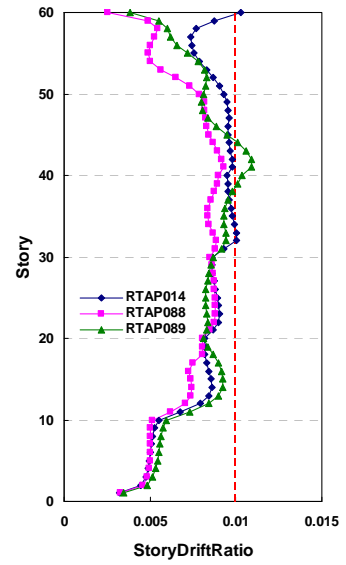


圖 25 層間變位角