

特殊造型劇院建築之 隔震系統應用與鋼結構細部設計

郭錫卿／永峻工程顧問股份有限公司協理

洪雅惠／永峻工程顧問股份有限公司專案經理

謝紹松／永峻工程顧問股份有限公司董事長

摘要

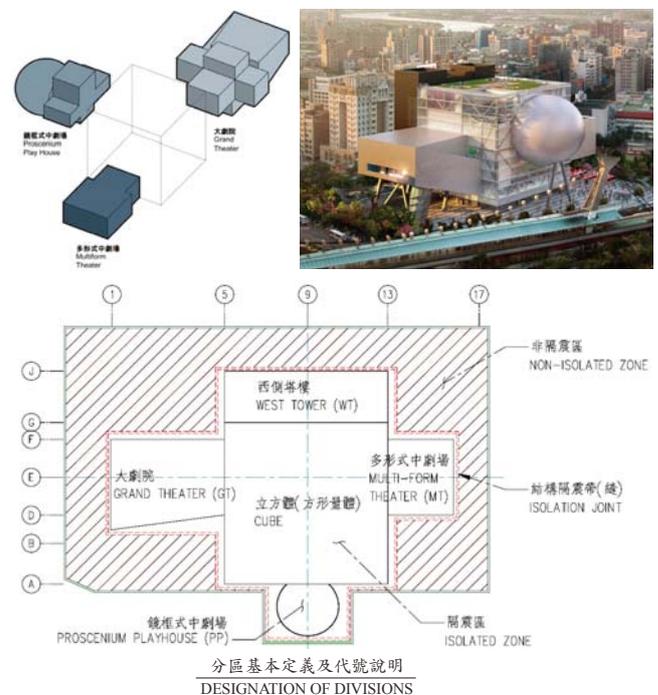
本文主要介紹台北藝術中心之工程設計案例，其基地位置位於台北市北側，鄰近士林夜市與捷運劍潭站，為一地上十二層、地下一層之劇院建築。建築量體主要包括一個大劇院、兩個中型劇院以及對應的排練室、辦公室及工作間。建築總樓地板面積約為 58,650 m²，基地面積為 20,750 m²。

本案建築結構採用基礎隔震系統，相較於傳統結構，採用隔震系統可以顯著降低結構體的地震力，適用於本案複雜而不規則之建築結構形式。隔震裝置則採用首次應用於台灣之摩擦單擺型滑動支承（Friction Pendulum Isolation System）。隔震層上方主體結構則主要由箱型之梁、柱、跨層大斜撐及多組桁架系統組成的鋼骨造結構。

台北藝術中心建築概要

本計畫為興建以各類大型表演及戲劇演出為主軸的表演藝術中心，其建築各部之主要組成分述如下：

- 方形量體：約為 55 m 高，50 m 長、50 m 寬，包括了所有舞臺、後臺等設施，大廳、辦公室及排練室。
- 三個劇院：分別為大劇院（GT：1,500 席）、多形式中劇場（MT：800 席）、鏡框式中劇場（PP：800 席）。觀眾席則自方形量體向外延伸並透過結構柱支撐其載重。建築理念上最大的要點是大劇院與多形式中劇院尚可整合為超級大劇院從而提供更多元與彈性的使用自由度。
- 停車場和建築設備室位於在單層地下室。
建築意象與分區之基本定義如圖所示。



結構設計目標

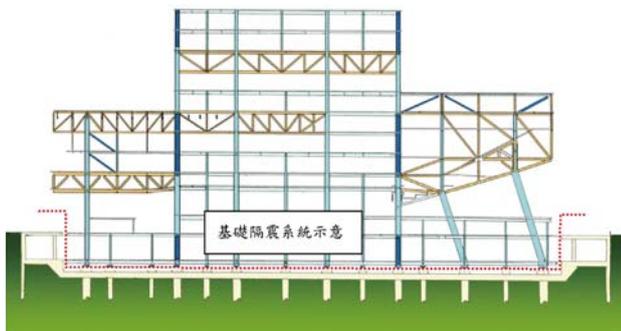
依據業主（台北市政府文化局）針對本案於技術設計準則中之要求，「結構計算之抗震係數需達醫院建築之抗震標準」，且其基本原則為「減少人員及室內財物之損傷，並確保於最短時間內恢復使用」，依此作為規劃本案結構系統之主要準則。

結構系統

本案建築結構採用基礎隔震系統，除了能符合上述業主設定之結構設計目標外，另一考量為因應本案在平面與立面均屬不規則性之結構，傳統耐震基本結

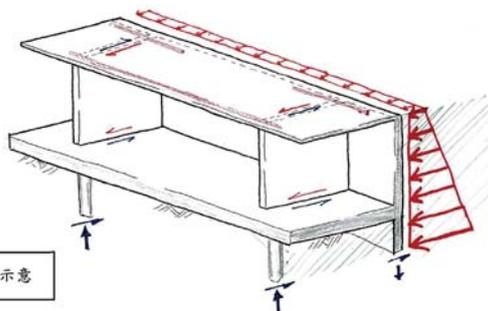
構系統所定義之韌性容量 R 不易直接認定為本案結構之所需，故採行隔震系統使上部結構在設計地震下仍能維持結構體之彈性，同時亦降低了非結構構材之損壞程度。

隔震區範圍涵蓋所有主要之上部結構柱，隔震層則設置在 B1F 下方，高度需求為 2.7 m。隔震層上方結構為地下一層及地上十二層之鋼骨造結構，系統規劃主要區分立方體區（含西側塔樓）、大劇院、多形式中劇場及鏡框式中劇場分述於後；非隔震區則為 RC 結構。



本案基礎型式採用樁基礎，配合基地承載層變化之走勢載重由基樁底部點承力及表面摩擦力共同承擔。在載重較輕之區域，抗拔樁則結合基礎平板抵抗上浮力。橫向力主要通過基樁之剪力傳導到地下。

土壓力藉由地下室周圍之連續壁抵抗，在局部開挖較深區域採用複壁加勁。另因上部隔震結構與地下室隔離而不傳遞任何土壓力，規劃地下連續壁與非隔震區一樓樓版結合，並與垂直於地下連續壁的剪力牆（作用如扶壁）作為永久抵抗土壓力之構造。在局部與隔震縫相鄰之地下連續壁，則設置外扶壁加勁。

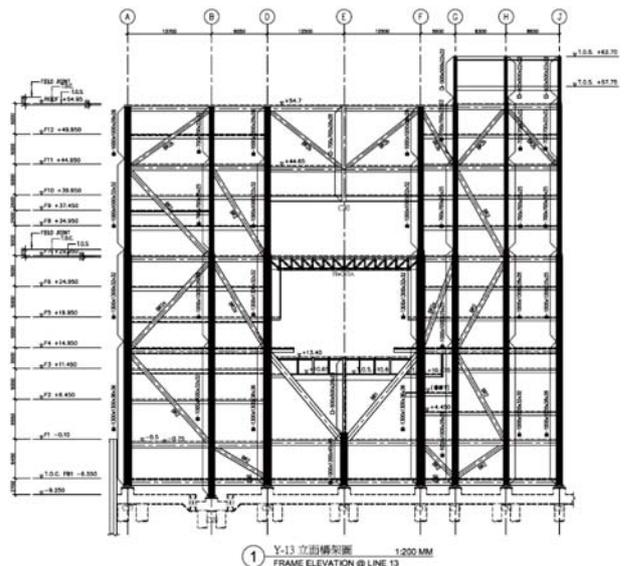


上部結構系統說明如下：

● 立方體區 (CUBE)

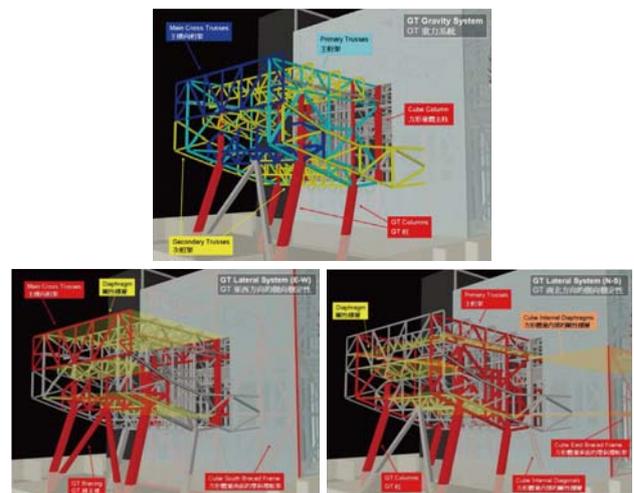
立方體區之結構配置主要係在四面軸線 X-A、X-G、Y-5、Y13 設置跨層之大斜撐，提供主體結構良好之側向及抗扭穩定性（如下圖以 Y-13 為例）；並考量在 B1F、1F、4F、7F、11F 及 RF 等樓層之大梁與柱及

斜撐剛接，構成整體之斜撐構架系統，且上述樓層因具較為完整之樓板，可提供作為剛性樓板之作用。



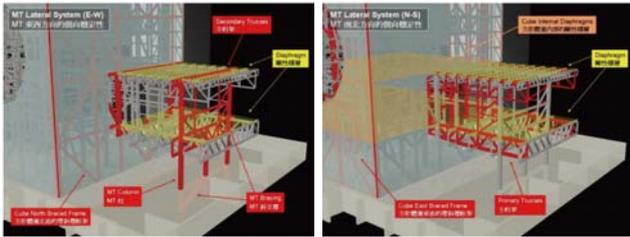
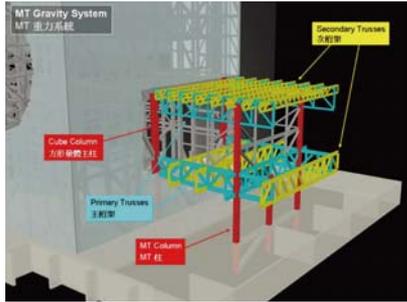
● 大劇院 (GT)

大劇院（以下簡稱 GT）長 37 m，寬 39 m。從立方體區 (CUBE) 3 樓到 8 樓南側延伸出來。主構架位於大劇院觀眾席兩側，由全高南北向的桁架和四根斜柱所組成。主桁架與 CUBE 內轉換桁架構成連續桁架。水平載重和垂直載重即藉由主桁架傳遞至斜柱與 CUBE 之主斜撐構架系統。



● 多形式中劇場 (MT)

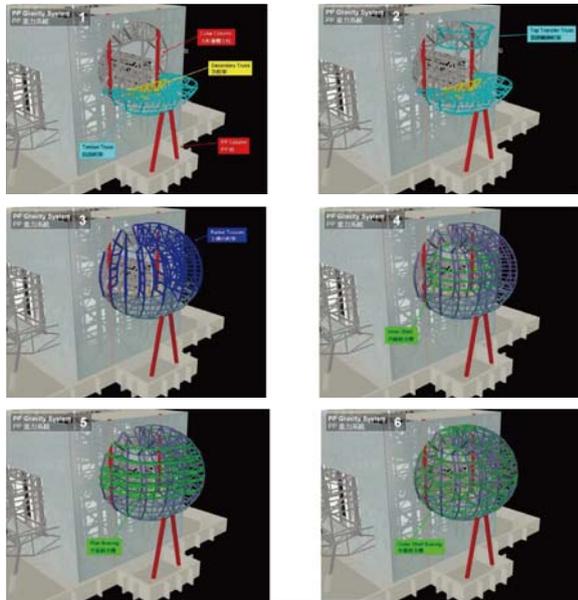
多形式中劇場（以下簡稱 MT）約 29 m 長，31 m 寬。從 CUBE 北側 3 樓到 7 樓延伸出來。整體構造與大劇院相似，透過東西向桁架支撐樓板垂直載重並傳遞至南北向主桁架與 CUBE 內轉換桁架相連接。水平載重和垂直載重即藉由主桁架傳遞至外部 3 支垂直柱與 CUBE 之主斜撐構架系統。



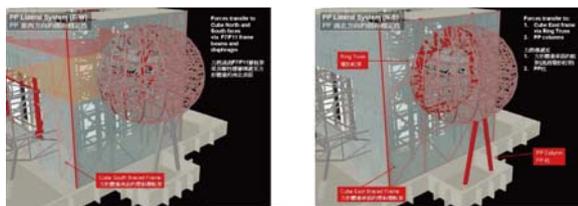
● 鏡框式中劇場 (PP)

鏡框式中劇場 (以下簡稱 PP) 觀眾席為半橢球型結構，從 CUBE 東側 5 樓到 12 樓突出約 26 m。

PP 主構造為立體鋼桁架，由 CUBE 主柱和外部倒 V 柱 (Λ) 支撐。與 CUBE 連接的環形桁架可使重力載重通過立體桁架傳遞到主柱，而鋼構件組成之薄殼體則提高了結構系統之靜不定度，移除個別構件並不致影響系統的整體性，藉此使得內外殼體間可以具備更大之彈性作為通道，動線和燈光等設備及開孔之用。



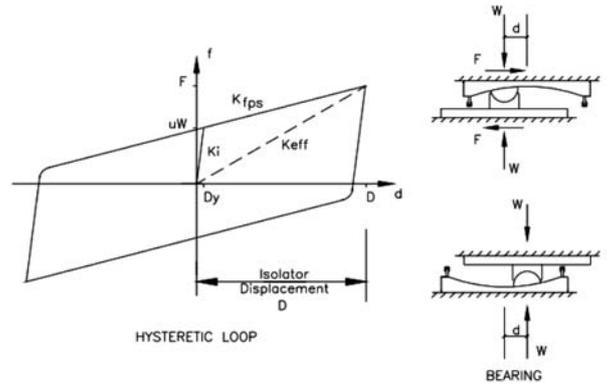
PP - 重力系統



PP - 側向系統

摩擦單擺型滑動支承之適用性

設計邏輯與主要特點



Definitions

- u = Dynamic Friction
- W = Vertical Load
- R = Radius of Curvature
- Ki = Initial Stiffness = $\frac{uW}{Dy}$
- Kfps = Stiffness of FP Bearing = $\frac{W}{R}$
- D = Design Displacement
- F = $uW + \left[\frac{W}{R}\right]D$
- T = Bearing Period = $2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$
- Keff = Effective Stiffness = $\frac{F}{D}$
- Teff = Effective Period = $2\pi\sqrt{\frac{W}{Keff \cdot g}}$
- B = Effective Damping = $\frac{2}{\pi} \left[\frac{u}{u+D/R}\right]$
- Dy = 0.10 in.

主要特點說明如下：

- 隔震周期與垂直載重無關 (independent)

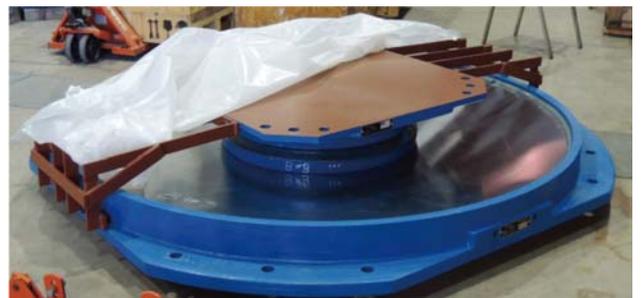
$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{eff} g}} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{D}\right) g}}$$

- 隔震器水平向勁度與垂直載重成正比，隔震層剛心與建築物質心自然重合。

$$k_e = \frac{F}{D} = \left(\frac{W}{R}\right) + \left(\frac{\mu W}{D}\right)$$

基本設計參數

- 動摩擦係數標準值 (Nominal Dynamic Friction Coefficient) $\mu_{dyn} = 0.06$
- 等值滑動面曲率半徑 (Equivalent Pendulum Length of Each Device) R = 6,200 mm



本案適用性

- 隔震周期與垂直載重無關 (independent)，有利於本案對載重之高度變動要求。
- 隔震器水平向勁度與垂直載重成正比，可使隔震層剛心與建築物質心自然重合，適用於本案複雜及不規則之建築配置。
- 高面壓之承受力，有助於本案部分主柱極大之承載需求。

結構分析說明

地震力說明

本基地位處台北盆地，屬地震台北二區，依據建築物耐震設計規範及解說，相關地震參數為：

設計反應譜 (S_{ad})

$T \leq 0.2 T_0^D$	$0.2 T_0^D \leq T \leq T_0^D$	$T \geq T_0^D$
$S_{ad} = S_{DS} (0.4 + 3T/T_0^D)$	$S_{ad} = S_{DS}$	$S_{ad} = S_{DS} T_0^D / T$

最大考量地震反應譜 (S_{aM})：

$T \leq 0.2 T_0^M$	$0.2 T_0^M \leq T \leq T_0^M$	$T \geq T_0^M$
$S_{aM} = S_{MS} (0.4 + 3T/T_0^M)$	$S_{aM} = S_{MS}$	$S_{aM} = S_{MS} T_0^M / T$

式中：

S_{DS} = 工址短週期設計水準譜加速度係數，

S_{D1} = 工址 1 秒週期設計水準譜加速度係數

S_{MS} = 工址短週期最大水準譜加速度係數

S_{M1} = 工址 1 秒週期最大水準譜加速度係數

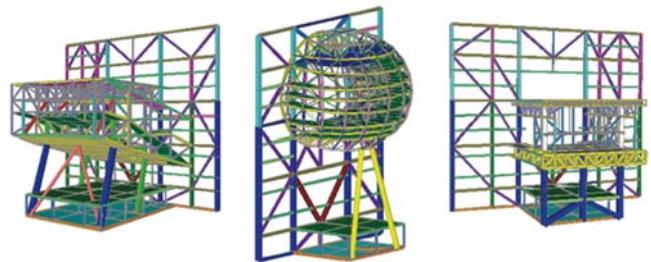
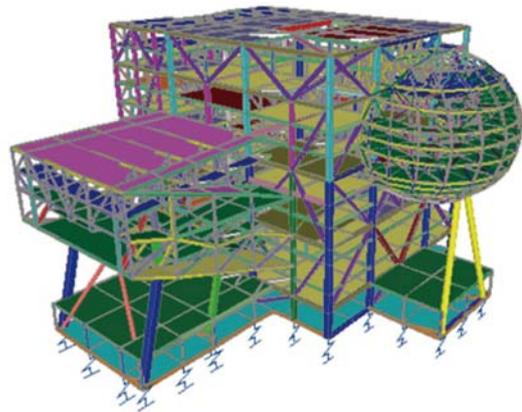
T = 建築物基本震動週期 (秒)

微分區	S_{DS}	S_{MS}	T_0^D 與 T_0^M (秒)
臺北一區	0.6	0.8	1.60
臺北二區	0.6	0.8	1.30
臺北三區	0.6	0.8	1.05

另本案除參考我國最新耐震設計規範之規定，為更周延檢討設計地震，特別委託「財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心」對本案工址之地震危害度進行相關分析，研擬設計地震歷時，包含篩選實測地震紀錄與分析人造地震歷時。

3D 分析模式建立

本案主體之結構分析主要採用 SAP2000 程式，建立之 3D 分析模式如下圖所示。



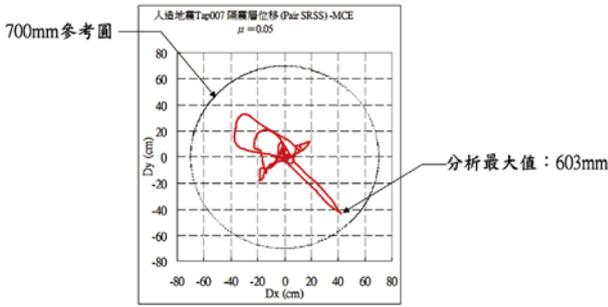
結構分析成果

本案之設計除了以 $\mu = 0.06$ 作為標準值外，另考慮 $\mu = 0.07$ 及 $\mu = 0.05$ 分別為其上下限進行參數敏感度之檢討，確認設計力及設計位移之需求。針對在設計地震 (DBE) 及最大考量地震 (MCE) 下摩擦單擺隔震器不同摩擦係數 μ 之靜力設計結果比較整理如下表所示。

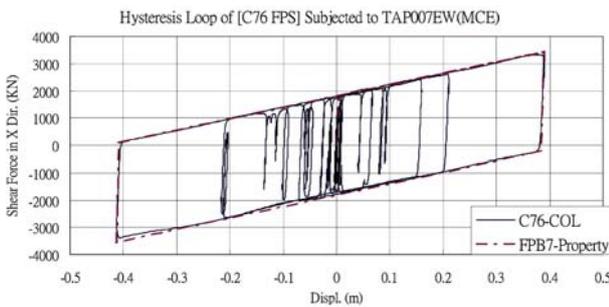
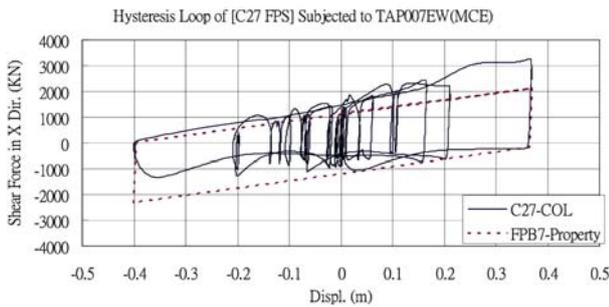
		$\mu = 0.05$	$\mu = 0.06$	$\mu = 0.07$
DBE	等效週期 (sec)	3.900	3.682	3.470
	等效阻尼比	24.9%	29.2%	32.8%
	設計位移 (m)	0.483	0.440	0.407
	設計橫力 (ton)	0.128W	0.131W	0.135W
MCE	等效週期 (sec)	4.183	4.013	3.837
	等效阻尼比	19.1%	22.6%	26.0%
	設計位移 (m)	0.726	0.675	0.629

其中，在 MCE 地震條件下， $\mu = 0.05$ 之設計位移 0.726 m 較預計留設之 0.7 m 隔震縫稍大，此部分輔以非線性動力歷時分析之成果進行更精確之分析。歷時資料採用了前述國家地震中心所製作提供之地震歷時，包括實測地震歷時資料 3 組及人造地震歷時資料 4 組，確認位移結果在 MCE 地震下均小於留設之 0.7 m 隔震縫。茲以測站 TAP007 (大龍國小站) 在 921 地震之紀錄為內涵所製作與設計反應譜相符之人造地震為例，圖示其分析位移如下。

另取 C27 及 C76 柱下之隔震器編號 FPB7 在 TAP007EW 的 MCE 地震歷時下的 X 向剪力-位移遲滯曲線圖與 FPB7 本身之隔震器性能模擬曲線（降伏剪力以 $1.0LL + 0.25LL$ 計算，忽略地震軸力影響）比較如下，以驗證摩擦單擺隔震器的非線性特性。



C27 柱為最外跨柱，故其軸向力受地震力影響大，相對其摩擦剪力亦受影響。C76 柱為內跨柱其軸力受地震影響較小，其摩擦剪力較不受影響。



鋼結構細部設計檢討

柱底垂直承載力傳遞檢討

本案採用摩擦單擺隔震器（FPS）系統，由於 FPS 承載核心尺寸通常小於上方柱尺寸，尤其針對本案部分柱尺寸為 BOX-1,500 mm × 1,500 mm（無內灌混凝土），故採用 ANSYS 分析程式對此形式之軸力傳遞執行進一步之檢討。

分析模型：以 GC1 為例，柱尺寸 $\square 1,500 \times 1,500 \times 60$ ($A_s = 0.3456 \text{ m}^2$)

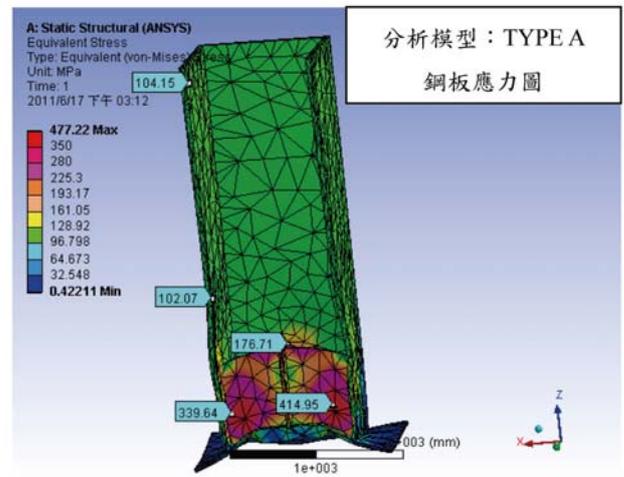
TYPE A：柱底增加十字形加勁板（PL40）高度 1 M（梁柱接頭區）

TYPE B：柱底增加十字形加勁板（PL40）高度 1 M 且增加柱內灌漿（ $f'_c = 56 \text{ Mpa}$ ）高度 1.0 M（梁柱接頭區）+ 1.8 M（B1F）

設計軸向載重：3,600 ton $\approx 3.6E7 \text{ N}$

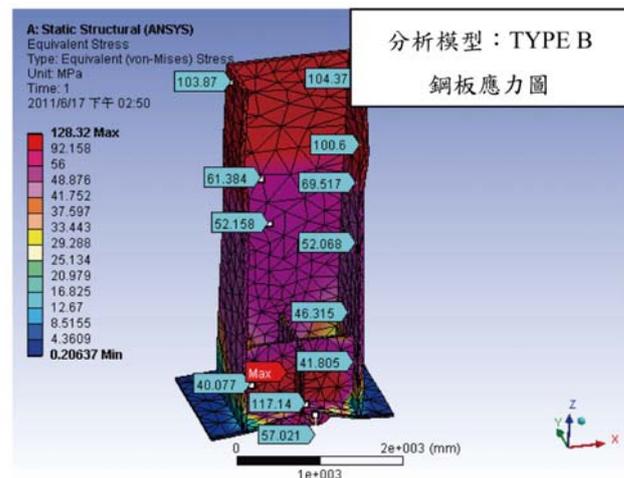
● TYPE A 分析結果：

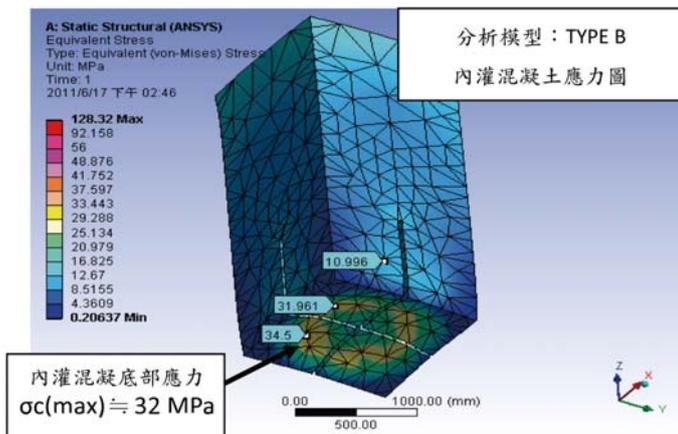
由 ANSYS 分析結果可知，TYPE A 鋼板應力已超過降伏強度（ $f_y = 330 \text{ MPa}$ ），故 GC1 柱底僅以十字鋼板加勁，對軸力無法滿足強度需求。



● TYPE B 分析結果：

TYPE B 分析結果如下列二圖，上圖為將鋼板應力單獨繪製，下圖為將內灌混凝土之應力單獨繪製。由下列二圖可知增加柱內灌漿後鋼板應力明顯低於 TYPE A 之鋼板應力，且小於降伏強度（ $f_y = 330 \text{ MPa}$ ）。另混凝土抗壓強度亦低於 $0.85 f'_c$ ，故 TYPE B 軸力傳遞安全無虞，本案採用此方式施做。



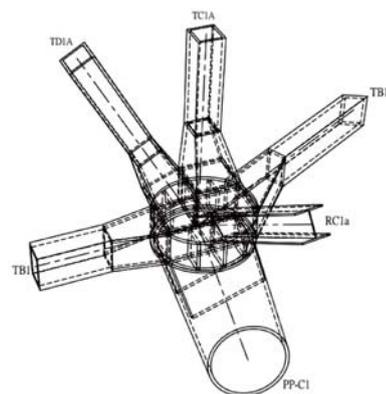


構件接合細部檢討

由於本案有為數甚多之不同角度多桿件接合於一處，故需輔以 3D 之繪圖軟體進行設計與施工可行性之檢討，配合建築師之共用平台整合檢討，本案選用 Rhino 軟體進行整體 3D 結構之繪製，如下為鏡框式中劇場（PP）倒 V 柱（ \wedge ）與上方底部抗扭桁架之接合細部示意。

結論

1. 本工程結合劇院功能及建築造型之特殊需求，配置合理之結構系統，力求在複雜不規則的建物中，理出清晰明確的結構邏輯與力系傳遞路徑予以因應。
2. 藉由立方體區周邊的四面主軸線箱型梁、柱及跨多層大斜撐所建構的箱體結構，提供了整體抗扭穩定之所需，從而解放了內部無柱的舞台空間。
3. 基礎隔震系統的選擇，引進了最新性能式設計的概念，不只對結構體提昇了其性能指標，同時也對劇院設備、機電管線、帷幕外牆等非結構構材提供了進一步的防護。
4. 首度引用於台灣大型建案的摩擦單擺型滑動支承，充分發揮其周期與垂直載重無關之特點，對於載重高度變異之劇院建築，實為最佳之隔震型式選擇。
5. 透過建構 3D 分析與繪圖模型進行細部檢討，除整合設計端之建築／機電／劇場界面，也控管了施工端之鋼構製造精度與品質。



誌謝

本案設計執行階段與 OVE ARUP & PARTNERS 國際團隊充分合作，特此致謝。

參考文獻

1. 財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心，臺北藝術中心興建工程工址設計地震參數分析，民國九十九年四月。