

地工技術

專題報導

臺中國家歌劇院的興建歷程

楊立華* 黃明晴**

歷經十一年設計和施工的時間，臺中國家歌劇院於去年(2016年)十月正式開幕營運了。回想參與本工程的點點滴滴仍彷彿如昨日，相關的人與事也歷歷在目，承蒙「地工技術雜誌」邀稿，就針對本工程做一些心得分享。

一、回首往途路漫漫~重大公共建設的漫長歷程

在作為歌劇院的用途之前，事實上，臺中市原來的胡志強市長為了爭取以大型的藝文設施為城市行銷的一個亮點，做了多次的努力。原來古根漢美術館的提案，未能獲得議會同意而胎死腹中；退而求其次，改而將舊有省府時代的音樂廳方案再次提出，希望爭取中央的經費補助。中央在考慮全國表演場館的配置及需求，再重新定位為以劇院為主的設施，並且採用國際競圖的方式，希望邀請世界級的建築大師來打造此一建築，終於在2005年底，日本的伊東豊雄建築師在歷經兩輪的競賽後獲得首獎設計監造權，到此已歷經13年了。

臺中市擁有廣大遼闊的平地，所以整個城市隨著經濟的發展，採取土地重劃的方式，由舊有的以火車站為中心，逐步向高速公路方向同心圓的方式擴展，其中尤其以臺灣大道為主要的軸線，而七期重劃區正是位於接近高速公路交流道，與原來都市中心又有相當距離，正是做為新的行政、商業、文化中心的絕佳位置。從2000年開始，民間的百貨商場開始進駐營業，大型公共建設正要開始。在重劃區中心地帶的主要開放空間十字綠軸上，新的市府和議會大樓作為兩翼，很自然的新的歌劇院就坐落在主要長軸的端點，完善整體都市核心區的功能。

雖然在2006年時，七期的新建築物還寥寥可數，可能受到劇院建設投資的刺激，就在短短的十年之間，歌劇院周邊的土地也正值施工的高峰期，在開幕前四周已經大廈林立，幾乎已無空地了。

二、凡事先從地基起~歌劇院基地的地質與開挖方式

臺中市的土地幾乎都是河道沖積的地質，堆滿了由卵礫石所構成的地層，良好的承載力及開挖時土壤的自立性，是興建建築物最佳的基地，似乎沒有甚麼懸念。

歌劇院所在的位置，是由四面計畫道路所圍的方整基地，主要基地面積約3.8公頃。從東北角向西南，地形逐步向下傾斜，高地落差約達三公尺，靠近北面市政北六路，為半開放的明渠，銜接東北角停車場下的暗渠，幾乎改向轉了九十度角，向西北角流出。說實在的，我們也就以為基地長久就是這樣的狀況。有次閒聊，有位日本朋友以其曾經有整個地區因大規模土地回填，完全改變了原有地形地貌，整個地質調查不深入，而後衍生建築物不均沉陷的親身經歷；於是囑咐我們要多加小心，甚至特別到日本國會圖書館的地圖室，影印了日治初期的地圖給我們參考，圖上似乎隱約可辨在基地上有小溪流過。後來實際開挖時，還確實在回填的土層裡，挖到了一座可能是1950年代的鋼筋混凝土小橋橋柱；這也說明了在重劃時可能整個區域回填，並且將小溪改道為自基地北側銜接地區排水箱涵前的遺跡，因而我們也確認了建築物的基礎確實落在原有的河床之下。

歌劇院主體建築下部構造其中央區域是反映地上部分曲牆結構垂直延伸，達到地下

* 大矩聯合建築師事務所 ** 麗明營造股份有限公司

二層，同時容納包含裝卸道具區、劇場舞台升降台機坑、幕塔構造、排練室和各種設備機械室，大部分是與地下一樓貫穿的挑高空間。北東西三面個增挖地下一層範圍，以容納車道、停車場、管理辦公室和有振動之虞的設備空間。

因為建築物配置位於正中，中央區域曲牆結構範圍，曲牆分布型態和範圍沒有既定規則，無法像一般柱樑建築物做有地梁的雙層版式筏基，也為了節省開挖土方量，所以採用厚度 1.5 公尺的單層大底版式基礎。這樣的配置使位於中心區和增挖區的深度由深變淺，而且配合整體地勢落差，將一樓地坪高程提高，增挖區位於較高位置，南側則為開放狀態，主體結構完成後，再回填土方，造成自然緩坡的景觀。如此可以降低周邊開挖的深度，利用優越的地質條件，採用大規模明挖方式，不但施工安全也節約地下工程的費用。（圖一及圖二）



圖一 現場明挖及基礎底板分區施作



圖二 地下室開挖及結構體施工

明挖方式也可解決地下室防水的問題，一般都市建築物受限於地界，地下室防水多採用複層牆及雙層筏基的方式，讓經由結構

體滲漏的地下水，經由二次收集再排出。而本工程是難得有地下全面開挖的機會，可以很確實地做完整的外防水措施，採用的方式是先打 PC，在上面施作防水層，然後再打 PC 壓制層，並作為基礎結構體的工作面；外牆則是預留防水層搭接，等外牆結構體澆灌完成，再進行表面防水補修，鋪設防水層，表面再覆蓋保護緩衝層，防止回填時卵石級配，可能對防水層的破壞；增挖區外露的結構體頂版，就像一般的屋面防水施作，最後再做表面的裝修或覆土植栽，經過完工後的追蹤，室內結構體經常都能保持乾爽狀態。

地下工程另外的一個考量是地下水的問題，根據地質調查報告，長年的地下水位高達地下 4 公尺，設計地水高程建議為地表。

但是因為適逢整個七期重劃區的工程興建高峰，所以各個工地都採用點井抽取地下水，確保地下施工安全，所以本工程也配合建築物深度，設置了抽水點井，但實際地下工程施工時的地下水位，經常保持在地下 15~16 公尺。

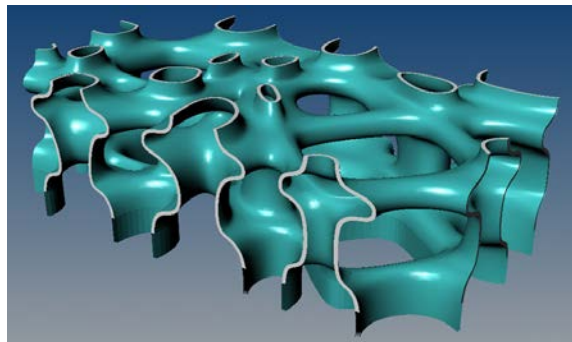
地下施工時唯一碰到了一個小狀況，當開挖到了最深的大劇院升降平台機坑時，整個大底防水及鋼筋配筋施作的很長一段時間都沒有問題，就在隔日要澆灌混凝土的前晚，突然地下水位上升，所幸即時抽水及就近增設點井，順利降水，讓工程得以順利施作。

到現在雖然周邊已接近開發完成，地下水位也並沒有回升太快，會不會因附近會展中心工程中止開挖造成大坑，而後反誤打誤撞改造成為都市內「秋紅谷」特殊的深谷景觀水池，造成周邊地下水的匯聚而降低，就不得而知了。

三、歌劇院的主體結構形式

臺中國家歌劇院最引人注目的應該就是主體結構的形式，伊東建築師提出了三次元的連續管狀曲牆結構；像是洞穴或海綿、骨骼組織的空間，成為整個建築空間的最大特色。尤其是結構整體上下並非完全貫通，可能管狀結構在這一層的位置，到了下一層就移位完全不見了，這和我們既往理解建築空

間結構，可以找到貫通上下像柱子般的垂直結構構件，完全不同，而且因為每處都不一樣，更增加了理解的困難。(圖三)



圖三 結構曲牆系統

事實上從伊東建築的作品發展，可以了解他對於弧面及管狀空間發展的痕跡，進一步追求流動、輕盈的空間感覺，來打破現代建築以正交格子功能明確區分的建築形式。從早期的 U 型住宅、銀色小屋、風之塔，一直到仙台媒體館都可以看到管的要素，他又大膽導入電腦三次元數位模擬技術，將形成管的連續牆面，做不同形式的表現，如表參道的 TOD's 像樹枝結構，銀座的 MIKIMOTO 像細胞的擠壓，倫敦蛇行展覽館像瓦楞鋼板，每件作品都有獨特的表情，好像各種材料和形式都能信手捻來，輕鬆裕如。但是實際上，就在新世紀之初，他醞釀著更進一步發展，將管狀的組織能夠垂直水平自然流動完全無縫的接合，徹底打破正交天花、地坪和牆面的固有觀念。在臺中歌劇院是將格子狀薄膜正交接點上下錯位，相互拉伸所形成的空間組織，這樣的空間組織並不僵化，用於劇場建築，有三大特徵：

1. 形態可操作性：透過操作曲面有限的控制點，可以將曲面的曲度，長度、高度、跨度，隨著空間功能的需要調整大小。
2. 結構行為連續性：整體是一個完整連續的表面，沒有大的轉折變化，力量很容易傳遞流動，比較沒有應力集中的現象，管狀結構又是對抗變形，最有效的形狀。
3. 空間適宜性：靠著曲牆實際區分為兩個隔絕的空間，比較適合類似劇場、音樂廳、美術館等需要密閉區隔的空間，臺中國家歌劇院正是利用了此一特徵，將劇場所需

要的隔音、室內建築音效的反射曲面，利用曲牆結構兼具多種功能達成，節省了不少隔音及室內裝修的材料費用。

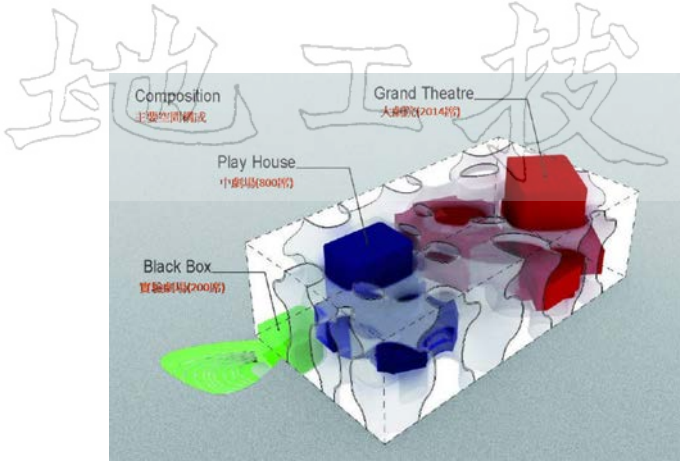
在這樣的前提條件下，才可以將歌劇院三座不同大小的劇場(大劇院 2014 席、中劇場 800 席、小劇場 200 席)妥適的容納於曲牆空間組織之中。而且運用此一結構將劇場空間上抬，空留出一樓的出入大廳，讓一般民眾於開館的時間，可以隨時進出，並成為可即興展演的場所，避免了多數劇場僅限於購票方可進入的封閉性，成為市民樂於親近的公共設施。

四、上窮碧落下黃泉~不斷嘗試尋求最佳化的設計過程

臺中國家歌劇院從前所未見的曲牆空間型態出發，有機地融合劇場所需要的舞台、幕塔、觀眾席、前台及後台的空間。建構了包含以曲牆為主，加上鑲嵌牆、鑲嵌樓板、貫穿垂直核等結構元件來加固並承載一般用途的活載重，而將較重的舞台吊具幕塔及升降平台利用鋼骨桁架，穿過曲牆的空洞，直接落於地下基礎。三次元自由曲牆的結構分析，並非一般的套裝分析軟體所能夠解決，所以由倫敦 ARUP 公司發展了有線元素分析的軟體，將曲牆表面以每平方公尺作為一個解析單元，按其位置及邊界條件，分析其出所受各種應力的大小，並加以回饋，作為各個曲牆曲率調整參考，以找出適合空間美學、結構、建築音效及相關設備的最佳型態。因為各個條件都相互牽扯，每當修正一個內容，其他的部分都要配合重新模擬及調整，這個尋求最適化的過程，需要相當的耐心及反覆的嘗試，才能體會出曲牆系統的優勢。(圖四)

五、柳暗花明又一村~克服結構分析及施工工法的難題

當國際競圖一公布，建築界除了讚賞大膽而又創新的曲牆空間美學外，對於能否蓋



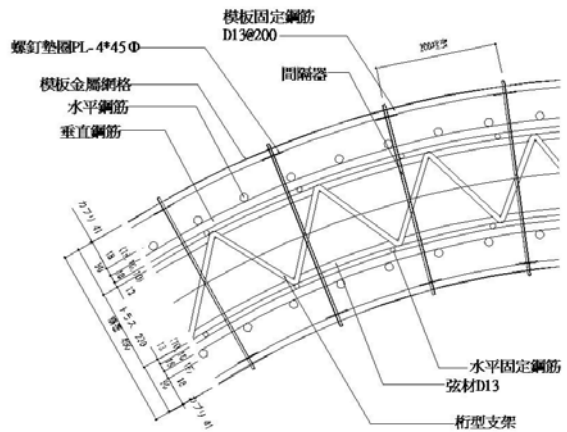
圖四 曲牆與劇場關係

得出來一直是最大的疑問。雖然在競圖時，曾經提出以二次元的曲線鋼樑連結，建構整體的曲面位置定義，然後再在兩側用噴凝土材料，直接順應曲面噴附形成混凝土曲面牆體，以滿足空間隔音及反射的需要，就像是紮燈籠，先做骨架，再糊面紙。但是表面積達 21,350M² 這麼大量體的自由曲線鋼構加工與組裝談何容易，而且要分到多細，才能使表面順暢，另外噴凝土的技術大規模運用到建築也備受考驗，其材料的特殊性，施工品質的控管和在結構設計規範強度如何有效認定，甚至施工人員的資格及認證等軟體制度面的配合，而昂貴的造價，使設計單位在初期記不得不放棄此一構思，重回到原點思考。

因為鋼構僅是作為曲面型態的定義骨架，並連結內外兩混凝土牆面，並未承擔其他結構作用；就建築音響要求而言，混凝土的質量及其可塑性、價格便宜，具有無可取代功能，只要在曲面定義及模板固定改善，說不定有新的方法。而一般混凝土構造，多採用定形模板和從外固定的方式，這種方法用於曲牆，最大的困難在於模板曲面加工材料和方法，途中也曾思考過用像保麗龍的材料，以電腦三次元切削成形再加以固定的方式，但這樣的方式無論是加工費，臨時固定材料和廢材的環保性，都是大問題。幸而當時日本有一家做立體造型的公司，是採用平面的鋼筋桁架相互連結做為立體骨架，再配主筋，利用這個桁架的剛性從裡面抓住表面多層的金屬網模版，在澆灌時利用混凝土的黏性不致漏漿，這倒是與在地鋼板屋內的立體桁架加工頗為類似，很有發展的空間。於

是，設計單位趕緊請他們作為工法的顧問。但當時受限於原有鋼構的結構曲牆尺寸設定為 90 公分厚，也以為非此厚度不可行，但屢經分析因自重太大，而需要填充中空材料，試了各種形式也無法達成所需的填充率。正進退兩難時，擔任曲牆結構分析的 ARUP 公司其他部門看到曲面完整而連續，建議何不減少厚度直接用實牆分析試一試，結果一下就減少到 40 公分，雖然當時各單位分頭進行幾乎已經基本設計完成，要送建照申請了。但是衡諸節省充填的施作費用及填充材浮力固定問題，為讓工程易於執行，即便所有作業重新進行也是完全值得的。現在想起如果錯過了這一時機，後續實際執行不知要吃多少苦頭，似乎老天也給我們額外的加持。(圖五)

為了證明工法的可行性，設計單位還出資在日本竹中工務店製作了實體大的試作體，將施工流程都作了演練和檢討，並將相關注意事項編成了技術資料，辦了兩場說明會，這珍貴的資料也列入發包書圖做為參考文件。(圖六)



圖五 結構曲牆剖面構成



圖六 投標前設計單位在日本進行的實體模型試作

地工技術

六、鐵杵磨成繡花針~現場的工法深化與施工實踐

雖然本工程在投標前深受國內營造業的矚目，但天不從人願，連續發包五次，連一家營造廠都沒有來投標；到了第六次，也許是命中註定要由臺中地方的營造廠來完成！當時麗明營造，剛完成臺中市政中心，而公司又即將屆滿二十周年，吳春山董事長希望有一地標性的代表作，經過市府長官的誠摯相邀和神明的保佑，毅然接下了重任。

麗明營造現場所長和各個工程師，從 3D 模型的電腦繪圖開始摸索，進而曲牆的單元

分割，到更細的各個加工步驟，施工中的假設及臨時支撐，鋼骨預埋件的結合等，進行更深入的檢討與試作。尤其對於金屬網模板的固定，將原來用鐵線鎖固，混凝土澆灌後無法拆除的方式，改為將鋼筋間隔器上加焊墊片螺母鋪設金屬網後，使用蝴蝶夾和四分鋼筋外箍的方式，改善了固定的強度，也使表面金屬網拆模後形成粗糙面，利於後續粉刷的黏著，免除了金屬網留在粉刷內層的最後一個心頭大患。其他像是使用 CNC 切割機作為平面桁架的放樣，各種支撐架方式的運用等，在在發揮本地營造廠的施工智慧，找到了最合適的施工工法。(施工狀況如圖七~圖十四)



圖七 工廠曲牆單元組立



圖八 現場曲牆鋼筋綁紮



圖九 施工中鋪設金屬網外模



圖十 高流動混凝土澆置及隔離



圖十一 曲牆施工全區鳥瞰



圖十二 施工中二樓前廳支撐架拆除



圖十三 大劇院舞台升降平台及地板施工



圖十四 水幕防火設備放水測試

而這一個工法的特色是採用最普通的鋼筋、混凝土及金屬網的材料，運用在地常用的工法和機具設備，可以說是工法開發的異數。實際執行靠著點點滴滴的各個細節的改善及落實施工節點的品質管理，光是一個曲牆單元就有八個查驗點，而全部共 1272 片單元，加上數千個鋼構的結合點，可以說整個過程靠的是每個參與成員和現場工人不厭其煩，以鐵杵磨針的精神才得以完成，更難得的是曲牆施工時現場沒有一處是平的，但整個施工過程幸運的居然沒有勞安重傷事故，可說是得到上蒼的庇佑。

因為是設計與施工分開發包，一旦與原發包材料及工項有所改變，就要辦理工法替代與變更。而公共工程的程序涉及到許多單位，準備變更文件及審查，往往是現場工程技術以外最大的負擔。在這史無前例工程面

臨了更多考驗，但市府及專管要求一定要做到完備，因此透過建立即時的處理流程和機制(尖峰時每周多達兩次的技術工作會議)，使溝通及報核更為順暢。

七、繁華過去見平實~歌劇院的空間美

當歌劇院完成開放以後，經常到內部逛逛，也曾帶許多國內外的朋友入內導覽，仔細觀察整體人們的活動行為，和一般的建築物確有所不同。因為前所未有的空間型態而讓大家感官大開，人們顯得歡愉而自在，許多人都在建築物中發掘了原來設計者未曾預料的角落與空間美感。或許可以跟大家分享一些特殊的景點：

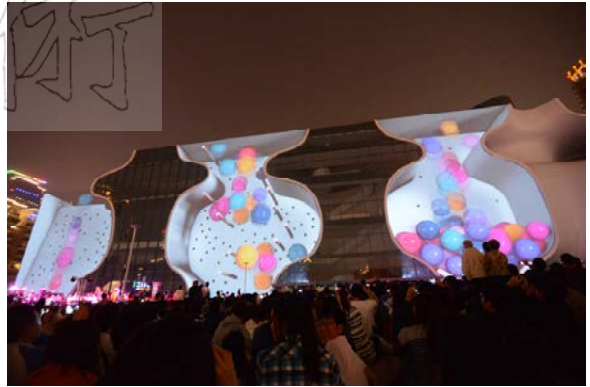
1. 清晨與黃昏到入夜，最合適在四周景觀和屋頂漫遊，從正面的十字綠軸大草坪上公共藝術的大耳朵與立面內凹的倒雙鼻孔同氣出聲，在早上可與周邊晨跑和廣場上晨操的居民相遇，沿著外部的河道，欣賞曲牆的倒影與凜凜的水波細紋，一直到南邊小劇場戶外看台與斜坡步道，期待將來樹木長大成林，鳥叫蟬鳴。如果對建築有興趣，在基地正面一隅，保留了曲牆實體模型及當初粉刷材料試作摸索的痕跡。黃昏時入口的噴水池成為小朋友遊樂的天堂，建築物內部華燈初上，曲牆空間更清楚的展現了穿透魅力，實牆的小圓窗像是香檳酒的氣泡，引誘大家進入欣賞表演藝術夢幻的演出。(圖十五~圖二十)

2. 進入一樓大廳，進口上方台可見方若游龍般的螺旋樓梯從二樓連通到五樓，將空間上下聯貫接通。在詢問櫃檯、售票櫃台及旁邊的電視牆可以自然地獲得藝文演出的資訊，輕鬆地坐在鋁板大型的蛋形座椅上，欣賞洞穴空間的層次和挑高曲牆美，偶爾看到小朋友正好奇地蹲在河道邊摸著流水嬉戲。水道的內側是藝文商場，展示著許多文創和臺中市的特色商品，沿著曲面而行，寬敞的開放空間也經常舉辦展出或藝文導聆活動，周末的即興演出，似乎回到了看與被看的表演原始型態。

地工技術



圖十五 歌劇院鳥瞰



圖十八 利用戶外實牆光雕演出



圖十六 正面噴泉水池戶外演出



圖十九 華燈初上歌劇院演出正要開始



圖十七 外觀曲牆凹入孔洞



圖二十 五樓內凹曲牆孔洞陽台對望

拾級而下可到達黑盒子的小劇院，這是供作小型演出或實驗性創作的表演場所，舞台與觀眾席的形式可以隨演出的安排而變化，更有特色的是，利用自然地形的落差，利用自然地形，設置戶外看台，某些表演可內外連通，讓表演更多樣化。(圖二十一~圖二十三)

3. 由大型鋪著紅地毯的螺旋階梯引入到二樓的劇場前廳，空間氣氛一瞬間轉換，曲牆向上延伸，高聳而驚奇，層層疊疊的弧形白色的牆面，使人突然沉靜下來。開著圓窗的實牆與外界隔絕，白天外光從孔洞漫射，空間顯得抽象而迷離，到了晚上燈光華麗的效果，則醞釀著進場前欣賞演出前期待與興奮的心情。中劇院前曲牆面類似白瓷彩繪花鳥的公共藝術，暗藏著伊東建築師和參與本案人員的臉部側面剪影，增加了華麗感與故事性。這個空間並非作為劇場的收費空間，開館後隨時可自由進出，僅有在演出時再作臨時的區隔，甚至開幕典禮的會場也藉此舉行，充分展現了劇場的公共性。(圖二十四及二十五)

4. 二到四樓是大劇院和中劇場的樓層，大劇院式傳統鏡框式舞台，紅色調為主的四根巨型曲牆一直延伸到天花形成大型穹頂，中央鑲嵌一個金色反射圓環，其下包覆主層觀眾席和看台觀眾席。除了曲牆實體本身是主要的音響反射面外，所有內部的裝修包含曲牆表面的圓點、鑲嵌牆的茶色立體鑄鋁板、看台前短牆的粗細木格柵裝修，都是為了有效將聲音擴散，充滿到觀眾席的每一個角落，這樣的作法省掉了二次裝修的反射板。除節約空間可使聲音更扎實的反射，使曲面除了美學體驗外，具有更深一層的意義，堪稱劇場建築音學突破性嚐試。(圖二十六及圖二十七)

中劇院沒有抬高的舞台面，讓觀眾席與舞台面同一高度，加上兩側可以移動的反射側框，及前方觀眾席的升降平台，增加舞台表演變化的形式，圍閉的觀眾席配置，拉近了表演者與觀眾間的距離，使演出更為親密。在開幕首演時，將音樂演奏、現代舞者和觀眾一起融入舞台布景中，讓表演藝術家有更多創作發揮的空間。(圖二十八)

5. 到了五樓及六樓，曲牆空間又有大的反轉，連地坪也呈現高低起伏，與牆面和天花連成一氣，在這裡有展示廳，作為公共展覽的空間，可以運用曲牆面和地形的變化搭配多媒體的技術，甚至觀賞者也可自由坐臥躺仰，優游於夢幻的空間中。另外也附設時尚而正式的餐廳和可展望綠園道的啤酒小館，讓遊人可內外交融體會曲牆空間的魅力。(圖二十九)

6. 屋頂綠化花園，企圖將原有公園用地菜用立體的方式在回補給都市，讓四周建築也有美麗的屋頂眺望，最合適在黃昏時漫步，涼風吹拂下從角落眺望四周都市璀璨的夜景，偶爾也可觀看有將劇場幕塔作為背景的夏日戶外電影院。(圖三十)



圖二十一 一樓曲水與角落咖啡廳



圖二十二 一樓大廳臨時的即興演出

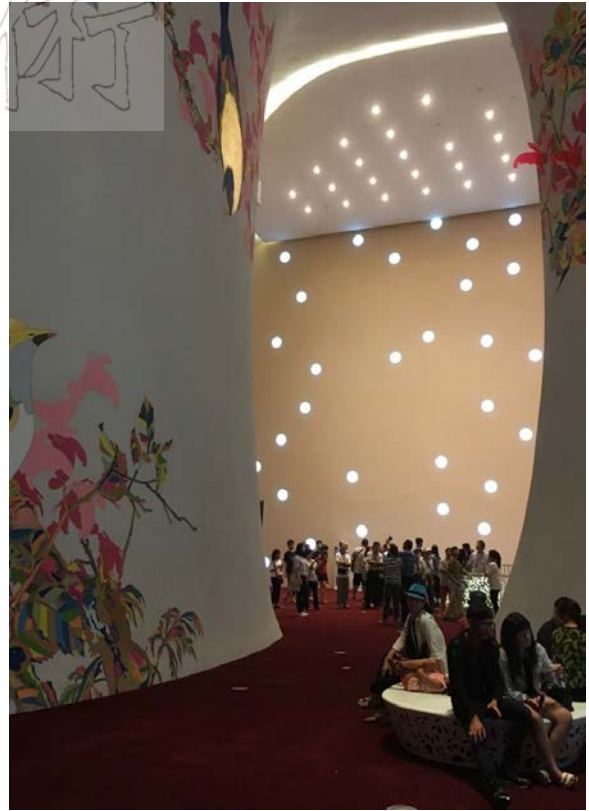


圖二十三 一樓大廳到地下實驗劇場大樓梯

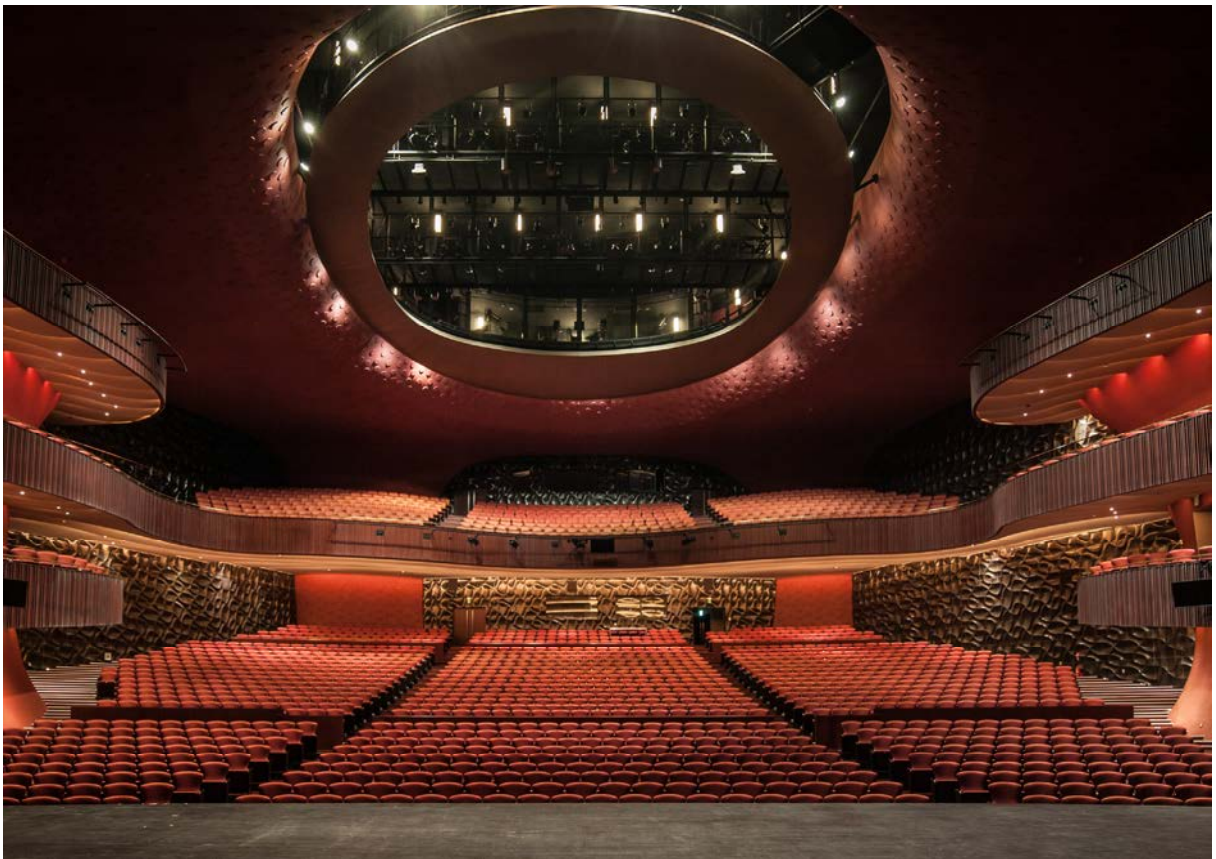
地工技術



圖二十四 入口挑空迴旋梯



圖二十五 中劇場前廳公共藝術與洞洞窗



圖二十六 大劇院觀眾席與曲牆



圖二十七 臺科大建築音響模擬模型測試



圖三十 屋頂綠化園路與表演廣場



圖二十八 中劇場舞台與觀眾席連成一氣



圖二十九 五樓展演空間利用曲牆做投影演出

八、結語

臺中國家歌劇院雖然以其獨特的結構及空間形式呈現，然並沒有採用昂貴的裝修材料；而是以平實的素顏，重新詮釋新的建築美學，其目的乃是為了讓每位進入其間的人，感受到表演藝術的熱度與魅力，讓進入劇院成為自由自在、快樂歡愉的心情，在不期而遇中，將表演、空間、生活融合為文化的一部分，這才是所參與本工程的所有成員最大的慰藉。