

室內音響設計與建築設計之整合

賴榮平

國立成功大學建築系 教授

一、前言

一棟完美建築的落成，除了仰賴建築師的創造力外，還須透過很多工程師的協力，最後再由建築師整合而成。本文以東吳大學音樂系音樂廳及六堆客家文化園區演藝廳為例，檢討這兩個廳整合時之協調管理經驗。

建築生產可分為企畫階段、計畫階段、基本設計階段、實施設計階段、施工階段及最後的完工、驗收、移交階段。每個階段的專業工程都包含軀體、機電、外構、內裝等部分，透過建築師的整合才能呈現出它的整體性，在音樂廳的工程上，其專案工程再增加【聲學(acoustics)】專業，倘若為劇場使用時，再增加一【劇場(theater)】專業，不可不知。

筆者參與東吳大學音樂系大樓中的音樂廳設計及屏東六堆客家文化園區演藝廳設計中，深覺室內音響設計、劇場設計必須與建築設計從一開始就須有密切的配合，否則就產生相當多的品質犧牲、不當的投資，甚至無法拯救的後悔，本文即以此兩音樂廳的設計經驗為基礎，論述室內音響設計與建築設計整合。

二、建築興建緣起及概要

東吳大學音樂系於民國六十一年成立，培育出眾多的優秀音樂家；舊有系館經多年的使用後，系方於九十三年決定將之拆除重建，重新規劃包含 502 席之中型音樂廳、大小音樂練習室、教師教學琴房、學生練習琴房等音樂性空間的教學研究大樓；音響設計工作於九十四年開始進行，九十六學年第一學期開始使用。系方極為重視上述各音樂性空間之音響效果，要求需有音響顧問參與建築師團隊中。

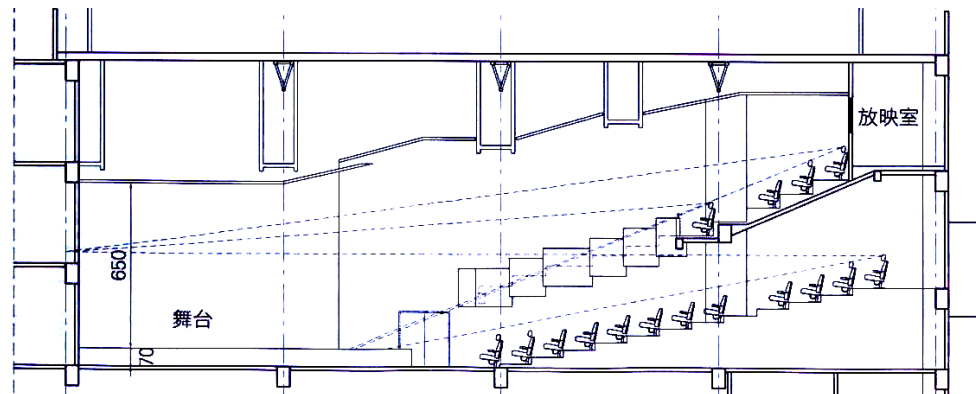
屏東縣六堆客家文化園區位於屏東縣內埔、長治、麟洛三個鄉交界，占地面積二十公頃，為保存及推展客家文化的一個重大建設案。該園區自民國八十七年開始籌劃，527 席多目的演藝廳工程分兩期設計及施工。九十四年底由屏東縣政府發包的第一期工程接近完工，第一期工程為建築軀體及空調設備。第二期則以演藝廳的室內裝修為主，交由文建會客委會主辦。筆者受邀文建會討論第二期的設計時，確實發現其中十分驚訝，為何沒有劇場專業、音響專業的協助設計，建築師、業主(屏東縣政府)就予發包施工？其中有相當多的專業需求，勢必修正第一期設計，將產生造價、工期在執行上的困擾。幾經討論，本人再組工作團隊協助第二期建築師的設計工作，九十五年才展開第二期演藝廳的內裝音響之設計，九十六年完成基礎景觀、演藝廳、多媒體館、戶外表演及休憩區，並於同年十月二十日起對外營運，頗受好評。本團隊於九十五年二月接受第二期得標建築師的委託，擔任「六堆客家文化園區多媒體展映館第二期工程」之建築音響顧問。檢討先期設計後發現有相當多的問題必須克服，(1)舞台寬度不足，主舞台表演空間太小；(2)舞台後台空間不足，包括道具出入口、化粧室等；(3)道具出入口空間不足、高度不足、出入動線未考慮；(4)主舞台與舞台周邊有高差 30 公分；(5)觀眾席坐席後排視線會被前排擋住；(6)舞台屋寬度不足；(7)觀眾席天花板高度不足；(8)無樓梯可通達舞台屋上方的鋼棚；(9)屋頂構造隔音不足；(10)外牆構造隔音不足；(11)舞台屋開窗；(12)預留空調之空調冷卻能力不足，預留風管不能用。幾經多方協調，增加道具出入口及後台化粧室，其他部分則僅能就現況做最大價值的應用了！

三、現況問題及解決方法

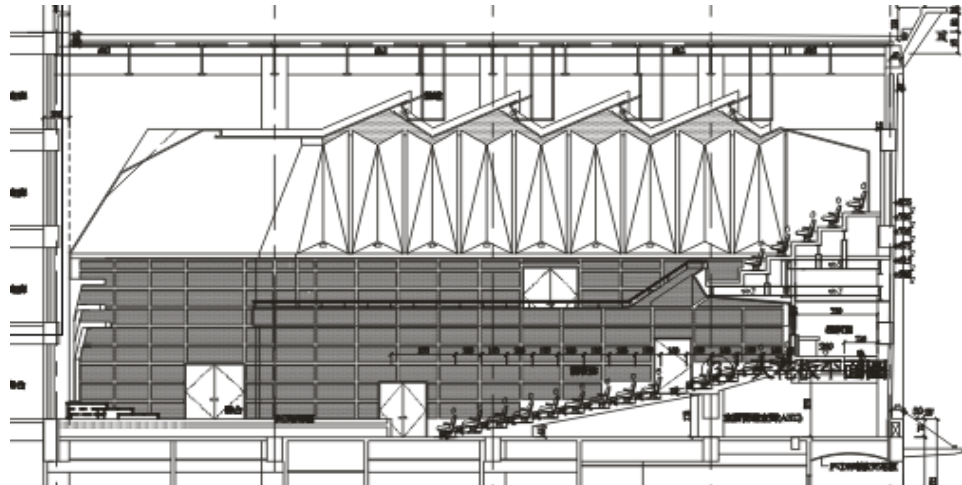
(一) 東吳大學音樂系音樂廳

1. 室形設計

建築師於設計階段初期提出中型音樂廳設計案，高度僅三層樓高，剖面示意圖如圖一所示。未考慮結構空間、空調設備空間以及音響空間，以音響空間之需求，音樂廳的室容積須達 8~12m³/1 席的水準，因此建議建築師將設計案變更爲四層樓高之鞋盒型音樂廳，也立即獲得校方同意，如圖二所示。



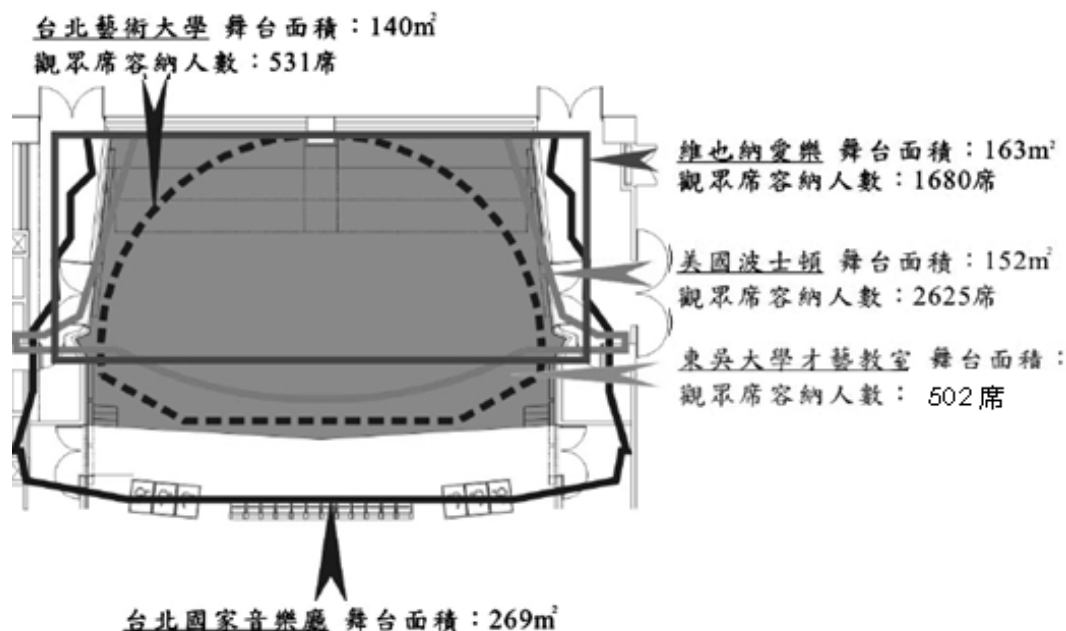
圖一、建築師初期提出之鏡框式音樂廳剖面圖



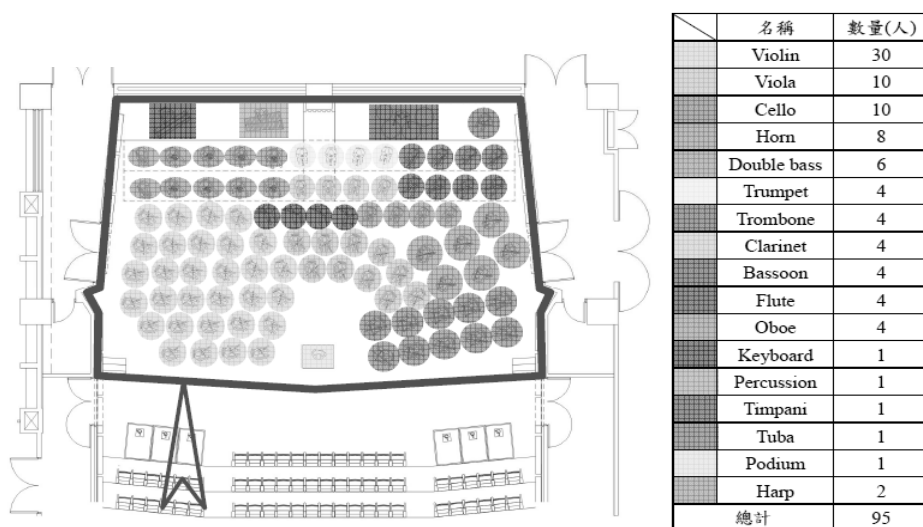
圖二、音響顧問與建築師意見整合後設計案-剖面圖

2. 舞台設計

音樂廳平時做爲音樂性演出場地，也規劃做爲系上交響樂團平時團練之用；初期系方要求要比照國家音樂廳，但我們不贊成，經過綜合考量世界上各著名音樂廳舞台面積、形狀(如圖三所示)，以及針對四管制交響樂團各樂器演出人數、位置及演出時人體工學上涵蓋面積(如圖四所示)等因素之後，建議本廳舞台之大小及形狀，面積爲 175m²。



圖三、世界上各著名音樂廳舞台面積、形狀示意圖



圖四、舞台形狀面積考量各樂器演出人數、位置及人體工學上涵蓋面積示意圖

3. 練習室的高度

本案初期設計之音樂練習室僅 400cm 高，音樂練習室往往因樓層高度不足，致使室容積不足，造成練習時音量太大，倘若僅以提高吸音率的做法，會對音樂產生扭曲，並不是很好的練習室。

(二) 屏東六堆客家文化園區演藝廳

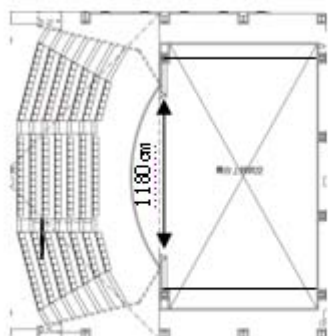
本團隊檢討先期設計，得出下列缺點：(1)舞台寬度不足，主舞台表演空間太小；(2)舞台後台空間不足，包括道具出入口、化粧室等；(3)道具出入口空間不足、高度不足、出入動線未考慮；(4)主舞台與舞台周邊有高差 30 公分；(5)觀眾席坐席後排視線會被前排擋住；(6)舞台屋寬度不足；(7)觀眾席天花板高度不足；(8)無樓梯可通達舞台屋上方

的鋼棚；(9)屋頂構造隔音不足；(10)外牆構造隔音不足；(11)舞台屋開窗；(12)預留空調之空調冷卻能力不足，預留風管不能用。與業主溝通後將道具出入口及後台化妝室列為一期工程的追加工程，其他部分則列為二期工程。

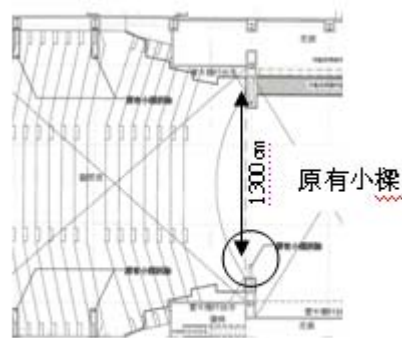
1. 舞台及後台設計

(1) 舞台寬度不足，主舞台表演空間太小

本案舞台採鏡框式舞台，原有鏡框寬度僅有 1180cm(圖五)，需在現有的結構系統下將舞台開口寬度放寬到最大，故將鏡框上原有的小樑拆除，增加寬度至 1300cm(圖六)。



圖五、原有鏡框寬度

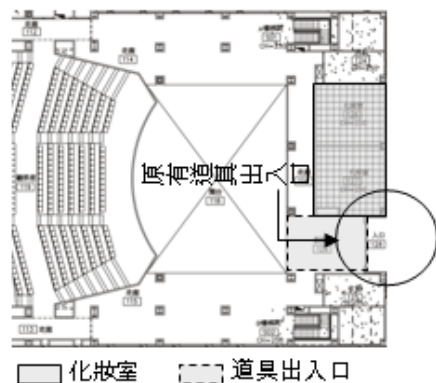


圖六、拆除原有小樑

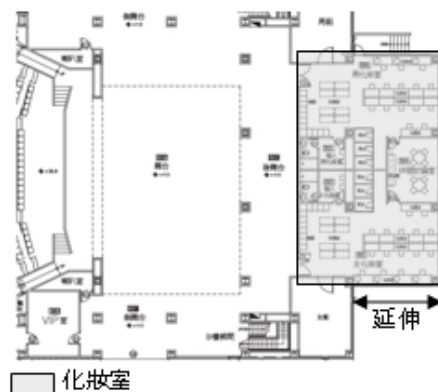
(2) 舞台後台空間不足

原有化妝室空間不足(約 76m²) (圖七)，故第二期工程考慮後台化妝區加蓋的可能性，延伸後台區增加可使用的面積(約 228m²) (圖八)。

道具出入口高度須大於 350cm，寬度須大於 600cm，卸貨平台寬度須大於 600cm，深度須大於 300cm，平台高度須方便貨車卸貨，並有雨遮等設施方便雨天使用。原設計案之道具出入口高度為 310cm，寬度僅 400cm，且無卸貨平台之設計，亦無雨遮設施供雨天使用，故幾經討論後改變需道具出入口位置，增加卸貨平台，唯礙於原有結構系統之限制，道具出入口寬度僅能就柱間距離最大寬度 550cm 設計。(圖九)



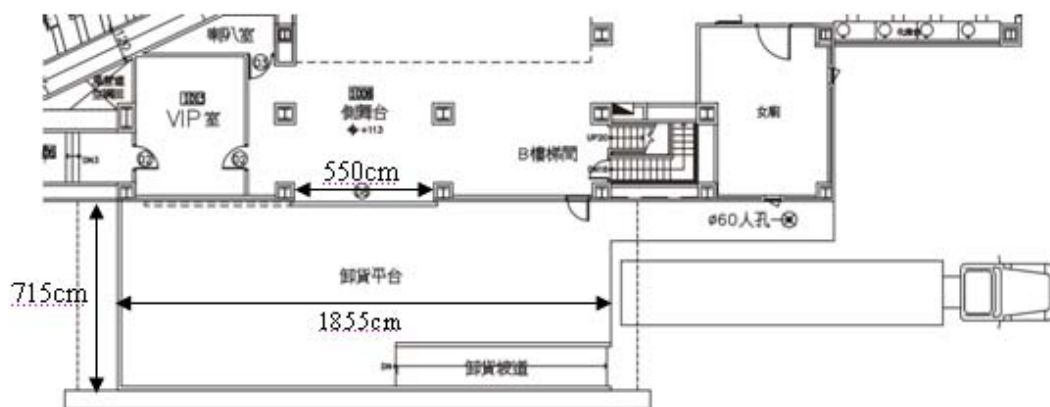
圖七、原有化妝室及道具出入口位置



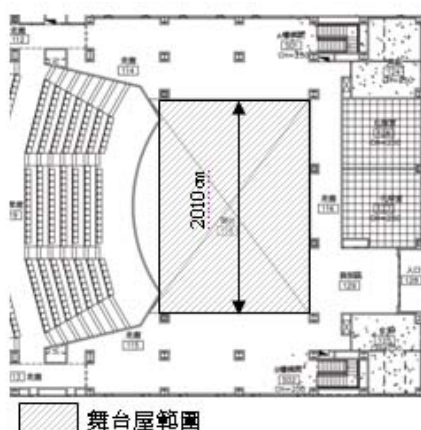
圖八、增加化妝室面積

(3) 舞台屋寬度不足

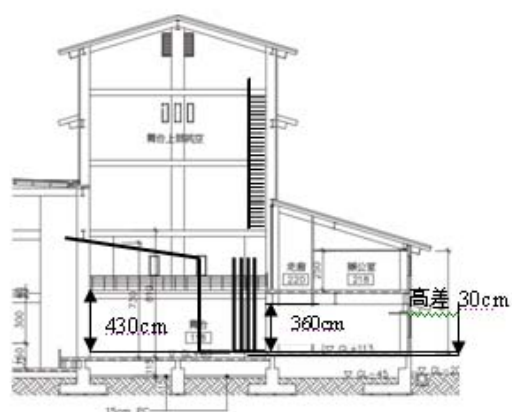
原設計案之舞台屋寬度為 2010cm(圖十)，且側舞台樓層高度只有 430cm(圖十一)，不僅在使用上因高度不足而受到限制，亦導致本廳之吊桿操作位置留設不易。一般而言，吊桿的配重裝置設置之空間，以主舞台上之舞台屋的側壁面最為適宜，經多次討論後，決議將吊桿操作位置設置於側舞台二樓，並增建格柵樓板以確保有足夠的操作空間(圖十二)，如此減少了主舞台的寬度。



圖九、變更道具出入口位置



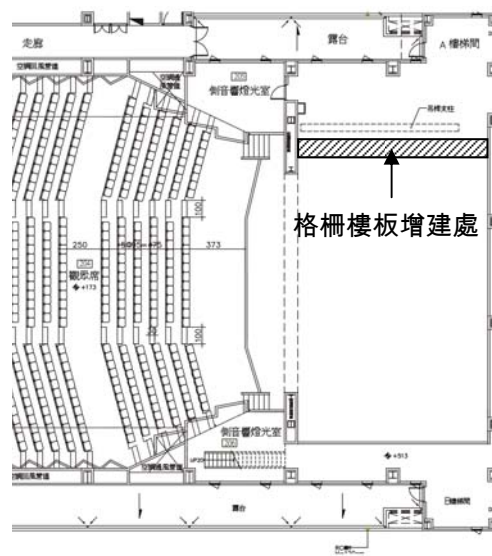
圖十、舞台屋範圍



圖十一、側舞台高度及樓層差

主舞台與舞台周邊有高差 30 公分 (圖十一)，這是很難理解為何如此設計，使用上是絕對不容許主舞台與側舞台不同地面高度的！因此必須將此凹陷的 30 公分填平。

- (4) 側舞台沒有音響反射板的收藏空間，本廳原案設計側舞台空間極低，樓層高度只有430cm，扣除結構樑、空調、消防管路只剩360cm無法做為音響反射板的收藏空間，因此只好規劃設在主舞台背牆前，如此就減少主舞台的深度。(圖十一)



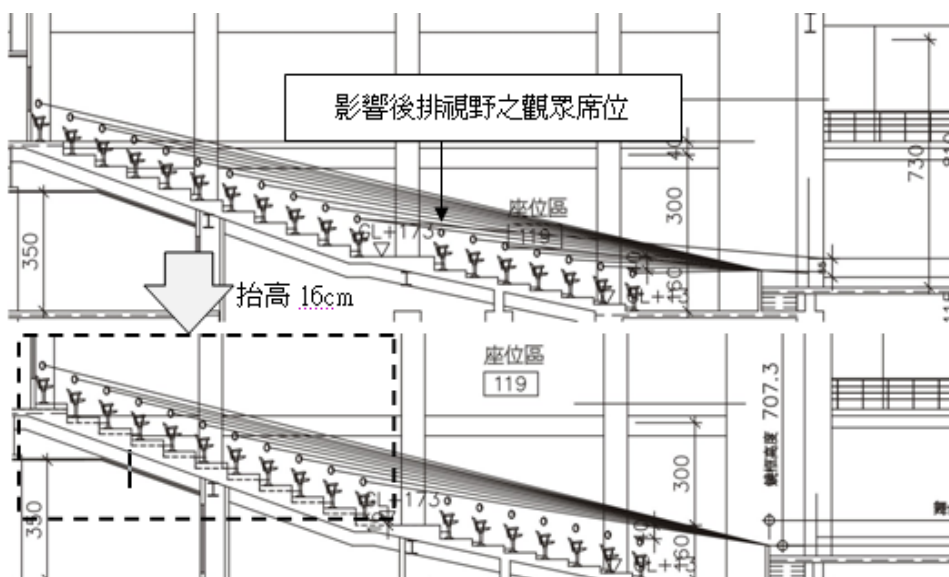
圖十二、增建隔柵樓板

- (5) 沒有樓梯可以通達舞台屋上之鋼棚，鋼棚是機械維修的必要到達之處考慮到維修的工作需求，斜式樓梯是必須留設的，不可以鐵爬梯替代，因此本案在舞台背上從三樓增加通往鋼棚的樓梯，配合主舞台上背牆的音響反射板收藏空間。

2. 觀眾席設計

- (1) 觀眾席坐席後排視線會被前排擋住

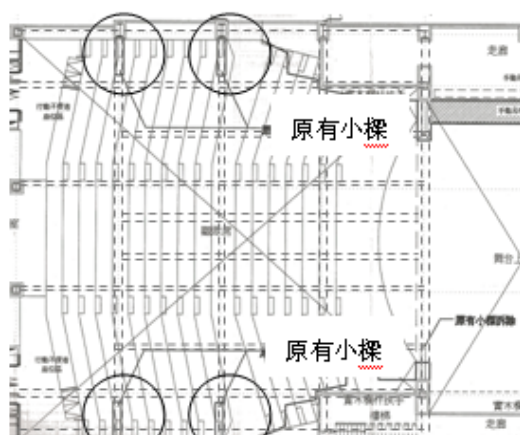
觀眾席視線檢討的結果，第八排以後之觀眾席位高度必須全部加一階 (16cm)(圖十三)。



圖十三、觀眾席視線檢討

(2) 觀眾席天花板高度不足

雖然觀眾席的中央造型上向上延伸一樓高的空間，可是在高913cm處均有結構樑通過(圖十四)，形成這種因造型需求(煙樓的意味)加空的空間很難以使用，倘若觀眾席的天花板，均在樑底下施作，則呈現天花板太矮，音樂廳的平均座席空間嚴重不足，所以本團隊與建築師一起檢討成爲目前所呈現的獨特室內空間的形式。



圖十四、拆除觀眾席上方原有小樑

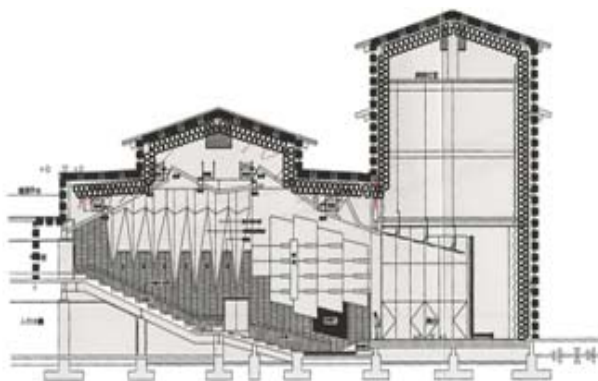
3. 室內背景噪音控制

(1) 屋頂構造、外牆構造隔音不足

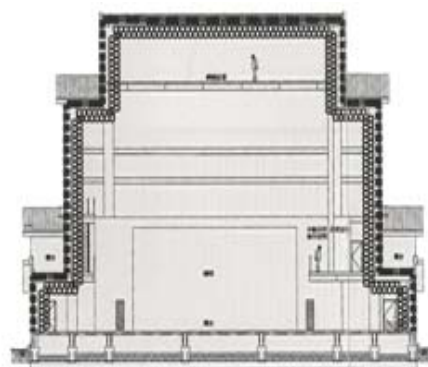
演藝廳對室內的容許背景噪音標準要求非常高，爲了提供聽眾能夠具有國家級的聽覺饗宴，本團隊訂定室內背景噪音之驗收標準值爲空調開啓及關閉狀態時均 $\leq 30\text{dB(A)}$ ，因此屬於第一期工程之屋頂及外牆構造隔音量部分，須檢討是否有 50dB 以上的隔音性能。經實驗室量測，建築師所設計的外牆構造經成大建築系音響實驗室量測，其隔音值爲 STC-49 ，屋頂板爲 STC-41 ，其隔音量明顯不足，需進行補強。故本案於室內之牆面及屋頂面設置隔音以提升隔音能力。(圖十五、圖十六)

(2) 舞台屋開窗

舞台屋開窗會讓外部噪音直接傳入室內，容易影響廳內的表演，故亦須以隔音構造進行補強(圖十六)。



..... 隔音構造補強範圍
圖十五、隔音加強施作位置圖(剖面)



..... 隔音構造補強範圍
圖十六、隔音加強施作位置圖(舞台剖面)

4. 其他

預留空調之空調冷卻能力不足，重新計算及設計預留風管太小無法對應於

真正的空調需求，拆除重做。

三、現場量測與結果分析

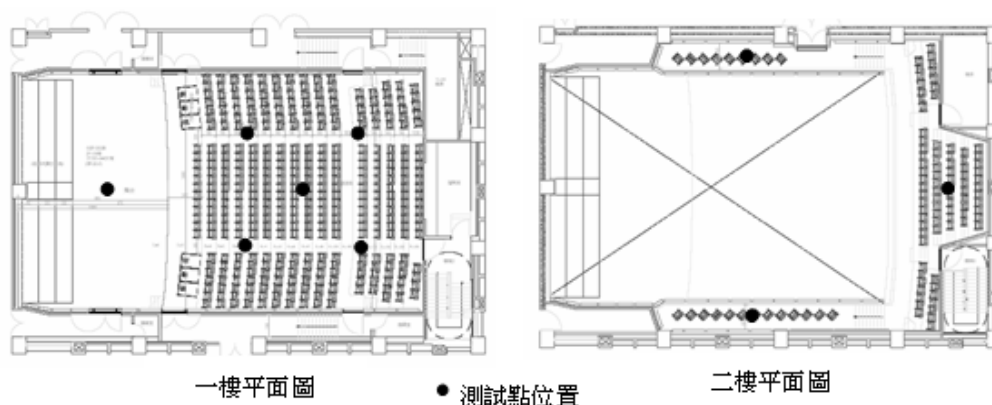
東吳大學音樂系音樂廳及屏東六堆客家文化園區演藝廳完工後之建築音響性能說明如下：

(一) 背景噪音

廳內噪音級測定目的在檢討建築外殼之隔音設計及空調設備之消音設計；依使用廳內空調設備關閉及開啓之狀態分別測定，室內均為空席狀態。

1. 東吳大學音樂系音樂廳

音樂廳內部背景噪音之目標值為空調開啓及關閉狀態時均 $\leq 30\text{dB(A)}$ ，量測點如圖十七所示。當空調關閉時一樓與二樓之背景噪音分別為 24.9dB(A) 及 23.4dB(A) ；空調開啓時一樓與二樓之背景噪音分別為 33.8dB(A) 及 33.2dB(A) ，顯示空調噪音為影響本案背景噪音之關鍵。

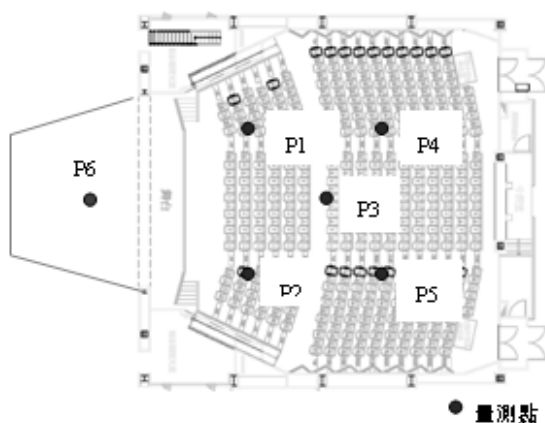


圖十七、音樂廳背景噪音量測點位置圖

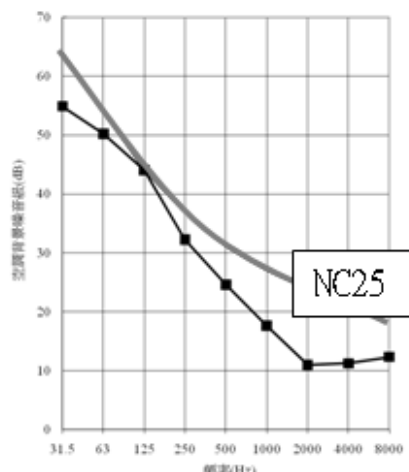
2. 屏東六堆客家文化園區演藝廳

背景噪音之目標值為空調開啓及關閉狀態時均 $\leq 30\text{dB(A)}$ 。另於空調規範中規範空調噪音需為NC25。量測時，由實時分析儀直接測定各測定點1/3八度音程之噪音級，讀取等價音壓值(L_{eq})。廳內背景噪音級之測定位置如圖十八所示，觀眾席取5個測定點，舞台取1個測定點，並按觀眾席區及舞台區平均其量測值，即得廳內觀眾席區及舞台區之噪音級。

空調關閉狀態時背景噪音測定結果為 24.5dB(A) ；空調開啓狀態時背景噪音測定結果為 30.6dB(A) 。依據CNS 7183 噪音級測定法，當含及不含對象噪音時所測得之噪音值相差6~9分貝時，對於環境噪音影響之修正值為1分貝。本次背景噪音量測結果，空調關閉狀態(24.5dB(A))與空調開啓狀態(30.6dB(A))相差6.1分貝，因此空調開啓狀態之背景噪音經修正後判定為 29.6dB(A) ，符合設計要求。在空調噪音評估方面亦能符合NC25以下之要求(圖十九)。



圖十八、演藝廳背景噪音量測點位置圖



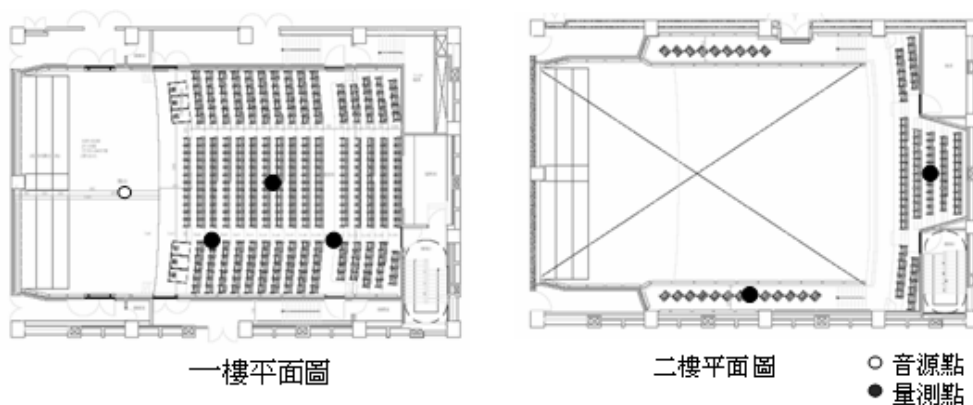
圖十九、演藝廳背景噪音量測結果

(二) 餘響時間

「餘響時間」為最常被用來描述廳堂音響性能的物理量，餘響時間的基本定義為音源停止後，室內音能衰減60dB所需的時間，此時間與室容積成正比，與空間的吸音力成反比，適當的餘響時間有助於提升空間的聲音品質。

1. 東吳大學音樂系音樂廳

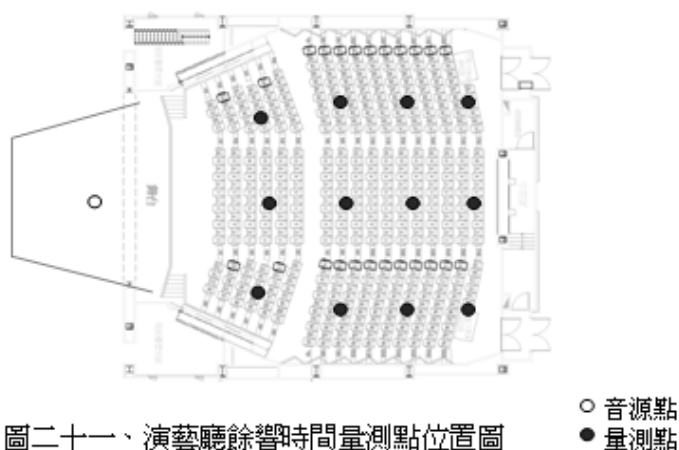
音樂廳容積約5600m²，依據Kundsen & Harris對音樂廳餘響時間之建議值，將滿席餘響時間訂在 1.6 ± 0.2 秒(500Hz)。並且推估空席狀態之餘響時間為 $1.93 \pm 15\%$ 秒(500Hz)，作為餘響時間設計目標。完工後測試單位分別以空席及音樂廳2/5滿席狀態量測各測點餘響時間，空席時狀態時餘響時間為1.71秒(500Hz)、2/5滿席狀態為1.61秒(500Hz)，均符合設計目標值，廳內各量測點如圖二十所示。



圖二十、音樂廳餘響時間量測點位置圖

2. 屏東六堆客家文化園區演藝廳

依據「六堆客家文化園區多媒體展映館演藝廳音響性能驗收建議書」，餘響時間之目標值為 $1.45 \text{秒} \pm 10\%$ (空席,500Hz)，量測位置如圖二十一所示。計算各量測點量測結果平均值，餘響時間為1.34秒(空席,500Hz)，符合設計要求。



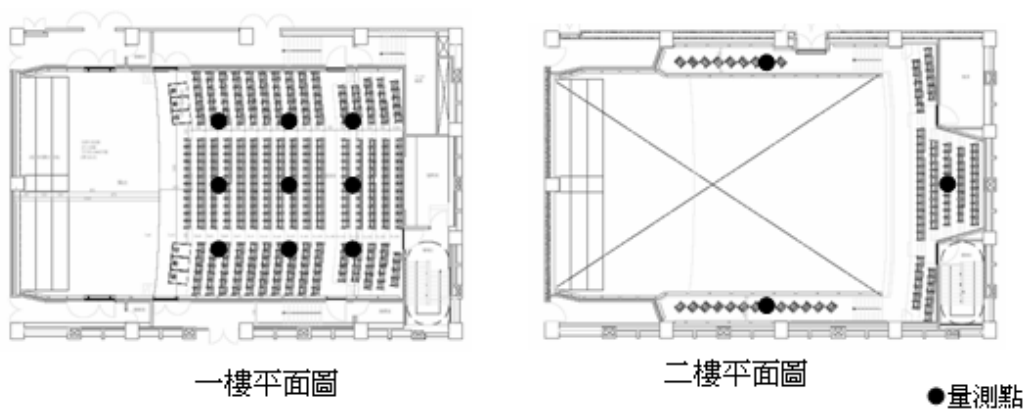
圖二十一、演藝廳餘響時間量測點位置圖

(三) 電氣音響音壓分布

聲音在室內傳播會因室內裝修材料、座椅、聽眾甚至空氣的吸音而逐漸衰減其音能，同時也受到地板坡度及室型的影響而減弱或加強其音能。藉此測定，可了解實際廳內「電氣音響音壓分布」狀況，一般期待在 $\pm 5\text{dB}$ ，如此可確保各席位間之音響品質不致差異太大。

1. 東吳大學音樂系音樂廳

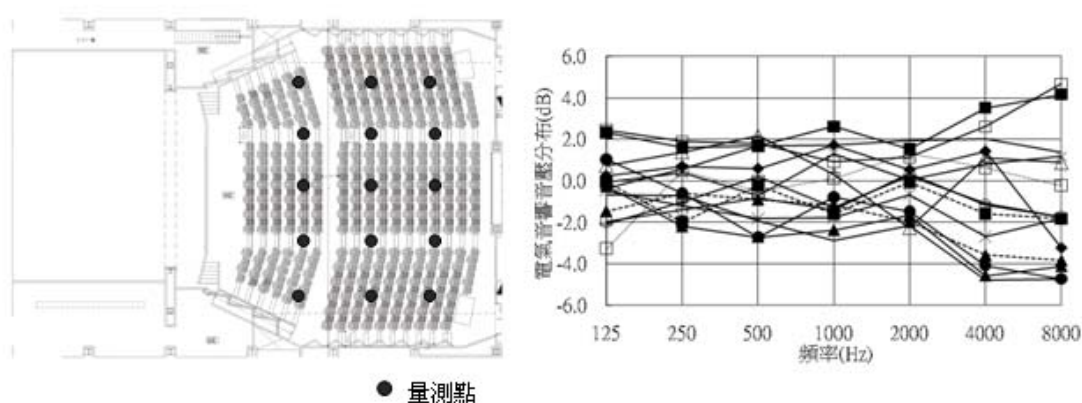
電氣音響音壓分布之量測取廳內12點為量測點，量測點位置如圖二十二所示。電氣音響音壓分布各頻率音壓級差均在 $\pm 5\text{dB}$ 以內。



圖二十二、音樂廳電氣音響音壓分布量測點位置圖

2. 屏東六堆客家文化園區演藝廳

電氣音響音壓分布之量測取廳內15點為量測點，量測點位置如圖二十三所示。量測結果如圖二十四所示，各頻率音壓分布量測結果均在 $\pm 5\text{dB}$ 以內，符合設計要求。



圖二十三、演藝廳電氣音響音壓分布量測點位置圖 圖二十四、演藝廳電氣音響音壓分布量測結果

(四) 電氣音響安全擴聲利得

設置電氣音響設備時，如室內有回音、顫動回音、隆隆音之音響缺陷時很容易產生噪鳴現象，使得無法得到充分之音量，為確保不產生噪鳴所必要的擴聲量

1. 東吳大學音樂系音樂廳

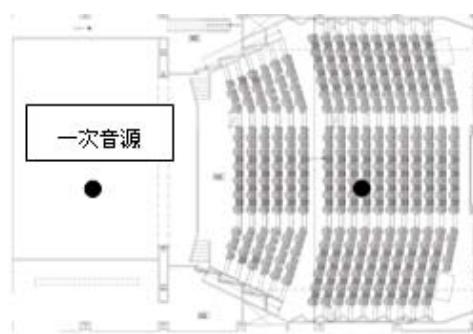
電氣音響安全擴聲利得為-3.2dB，大於目標值-8dB，量測點如圖二十五所示。

2. 屏東六堆客家文化園區演藝廳

本案需量測「安全擴聲利得」，並設定驗收標準為 ≥ -8 dB。量測點位置如圖二十二所示。一次音源前麥克風處之音壓級為 84.5 dB，觀眾席中央量測點音壓級為 78.9 dB，因此安全擴聲利得為-5.6 dB(≥ -8 dB)，符合設計之要求。



● 量測點



● 量測點

圖二十五、音樂廳電氣安全擴聲利得量測位置 圖二十六、演藝廳電氣安全擴聲利得量測位置

四、結論與建議

(一) 東吳大學音樂系音樂廳

本案例音樂廳及其他音樂性空間之設計過程，充分整合音樂系師生、建築師設計團隊以及音響顧問、空調顧問之意見；各項音響性能完工驗收量測結果，均能符合驗收規範要求，大致上能滿足音樂系師生之使用後滿意度。本案例的整合

經驗，值得讓建築師及業主作為建設之初必須留意之處，歸納重點如下。

1. 音樂廳的樓層高，包括修復燈光用的貓道空間、空調設備空間、結構梁深必要的空間、屋頂隔熱必要的空間，以及室內每座席必要的空間，均須在建築師基本設計階段共同討論，才能有上述必要空間的確保。
2. 密閉式的無外窗音樂練習室、琴房等空間必須具備高隔音度、空調新鮮空氣供應，以及學生安全防備等措施；如何慎選低噪音的空調系統，以及如何防止室與室的串音，是十分必要的介面整合工作。
3. 教學琴房既要求高隔音，又要確保女生的安全防護，因此隔音門上必須要有視窗，它確是一個隔音上的衝突點。
4. 國內廠商所提供的觀眾席座椅吸音力太高，若欲國外進口則造價偏高，這也是整合上的困難點。
5. 施工階段材料構造細部大樣的確保，也是音響設計與建築設計整合上一項困難點。它完全受制於標到工程營造廠商的專業認知！校方、建築師、營造廠、音響顧問之整合性十分重要。

(二) 屏東縣六堆客家文化園區

1. 音樂廳類的建築音響、舞台、布幕、燈光、道具、反射板與建築空間、建築造型、建築空調設備點之界面非常多，設計上必須有很好的界面整合(interface integration)，不應類似此案將建築軀體、建築結構委託一位對演出藝術(performing art)不了解的建築師設計，完全沒有經過界面整合的程序就予發包興建，這也呈現縣府行政人員的外行，將建築的生產程序如此切割，造成後續作業的困難與無奈，今後應該讓我們政府機關的建設行政人員不要犯此種錯誤。一般因為工程的年度預算不是一次到位，可是無論如何「設計」是不可切割的，必須一體完成，工程施工是可以依年度經費而予切割的。
2. 由於沒有設計界面的整合，使得本案在劇場型式上產生很大的矛盾，那就是主舞台面積太小，而且沒有足夠高度與主舞台同高的側舞台或後舞台，它就限制了大型劇團或大型劇碼的演出，可是它又留有足夠高的舞台屋，後續作業又不能把它切掉成為小型劇場即可！如此造成設計上的矛盾點！
3. 空調設備的切分點也不正確，二期工程均未設計，就在一期工程中把空調主風管留設出來，這完全是工程的浪費。
4. 本團隊曾經提議要大量修改舞台部分設計，可是涉及工期延長及工程經費的大增而作罷，只能在現有的條件下做最大的運用，最後也經二期建築師的努力，在室內的風格上也創造出了奇特的個性，同時也保留了一期建築師的建築風格，目前經使用考驗，風評甚佳，值得欣慰。

五、參考文獻

- (一) Concert Halls and Opera House : Music, Acoustics, and Architecture 2nd Ed, Leo Beranek.
- (二) L. Beranek and V. Istvan, “Noise and Vibration Control Engineering” , principles and application johnwiley & sons,inc., (1992).
- (三) Harry F. Olson., “Functional Sound Absorbers” , RCA REVIEW., America, 1946, Vol.7, No.4, pp. 503-521.
- (四) 長友宗重著，《建築設計講座 建築の音響技術》，理工圖書株式會社，日本，1969。
- (五) 永田穗，《建築の音響設計》，株式會社オーム出版局，日本，1991。
- (六) 日本音響材料協會編，吸音材料，技報堂出版株式會社，日本，1981。
- (七) 木村 翔，建築音響之噪音防止計畫，彰國社，日本，1982。
- (八) 板本守正，「空調設備的消音設計」，2003。