

出國報告（出國類別：考察）

廣州塔應用調諧質量阻尼器減振技術 考察報告

服務機關：國立中興大學土木系
姓名職稱：林錦隆 博士後研究員
派赴國家：中國/香港、廣州
出國期間：2013/1/27-2013/1/29
報告日期：2013/4/24

摘要

筆者於 2013 年 1 月 27 日至 1 月 29 日協同林其璋教授赴大陸廣州新電視塔，進行高樓結構應用調諧質量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)減振之技術考察，主要目的為：(一)、參訪廣州塔之 TMD 設計細節，以進一步了解足尺寸 TMD 應用於高層建築之工程實務問題及解決方案，(二)、參訪香港理工大學，陪同林其璋教授進行專題演講與會後討論。筆者目前正協助執行林其璋教授之產學合作計畫，有鑒於國內高層建築裝設 TMD 裝置之設計與製造幾乎都是仰賴國外大型工程顧問公司全程設計及監造，因此若要提升本土設計與製造 TMD 的能力，就必須借鏡於其他國家成功的案例，本次考察主要參訪廣州新電視塔，並且進入到阻尼層實地參觀 TMD 機構，考察的成果十分豐碩，可作為國內自行設計製造 TMD 時的重要參考。

目次

摘要	2
目次	3
一、 考察目的	1
二、 考察過程	2
三、 考察心得及建議	4
四、 具體建議事項	4
五、 附錄	5

一、考察目的

利用調諧質量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)減振最早是由 Frahm 所提出，現已成功地應用於高樓與高塔之減振，如紐約之 Citicorp Center、波士頓之 John Hancock 大樓與台北 101 大樓、雪梨的 Sydney Tower 等。調諧質量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)係為一具有特定頻率與阻尼之單自由度質塊。利用調頻共振之原理，可將結構物所承受之部份振動能量轉移至 TMD，並由其阻尼耗散消除，藉此達到降低主結構動態反應之目的。TMD 對結構之減振的效果取決於其質量、阻尼與勁度等參數，而線性 TMD 之最佳化理論發展已臻成熟，目前全世界有數十餘棟高樓、高塔與橋塔裝設 TMD，並有上百棟正興建或規畫興建，國內則有高雄東帝士 85 超高層大樓以及台北國際金融中心 101 層摩天大樓等兩個著名的案例。對於新建結構，採用 TMD 配合傳統耐震設計將更為經濟；而對於現存耐震能力不足結構或設計完成結構，裝設 TMD 亦可達到補強減振的目標。不過國內高層建築裝設 TMD 裝置之設計與分析幾乎都是仰賴國外大型工程顧問公司全程設計及監造，本土工程顧問公司目前尚無成功案例。以台北 101 大樓為例，結構設計是國內永峻工程顧問公司所負責，但裝設 TMD 之設計分析則由加拿大公司所承接，主要原因在於業界尚無可供國內工程業工程師使用的設計程式，國內機械加工廠亦無相關機構製造經驗。且若 TMD 設計不當，將無法達成減振效用，因此國內企業均不敢輕易嘗試。然而國內學術界針對 TMD 最佳參數研究已發展多年，林其璋教授過去長期研究發展多元調諧質量阻尼器(Multiple Tuned Mass Damper, MTMD)，MTMD 係由多個質塊、彈簧與阻尼之系統所組成。筆者協助執行林其璋教授與永峻工程顧問公司、中鋼結構公司之國科會產學合作計畫，藉由此次的考察可實地參訪現有 TMD 的細部設計與工程實務考量，可作為國內實際設計與安裝 TMD 時之重要參考。

二、考察過程

本人於 1 月 27 日(日)上午 10:30 分協同林其璋教授搭乘長榮班機由台北飛往香港國際機場，並於當日下午由香港機場搭乘接駁巴士抵達富豪九龍酒店。1 月 28 日上午 7:30 分與香港理工大學研究助理蘇娟小姐在飯店大廳會合，並由蘇小姐帶領，搭火車前往廣州進行廣州塔 TMD 參訪行程。

廣州塔坐落於珠江旁(如圖一、圖二、圖三所示)，是由鋼結構外筒和鋼筋混凝土核心筒組成的筒中筒結構體系。外框筒由 24 根鋼管混凝土柱和 46 個橢圓形鋼環梁及鋼斜撐組成，塔體由下到上截面由大變小，再由小變大扭轉而成，鋼管混凝土柱截面由 2 公尺漸變到 1.2 公尺，在空間裡呈現出三維的傾斜狀態。外筒和核心筒互相支撐起包括觀景平台、餐廳、電影院等在內的觀光塔功能層，70%的結構力仍然依靠外筒承擔。廣州塔利用網狀的空洞使陽光和空氣穿透，可有效減少塔身的重量與風荷重。

廣州塔共配置了 20 個單向式加速度計於 8 個不同的垂直高度上(如圖四所示)。其中，在第 4 與第 8 個高度上，配置 4 個單向式加速度計，其中 2 個量測主塔內筒長向加速度，其餘 2 個量測主塔內筒短向加速度。在另外 6 個高度方面，只各別安裝 2 個加速度計，用以量測主塔內筒長向與短向加速度，以作為結構健康診斷的依據。筆者曾依據香港理工大學所提供之廣州新電視塔(Guangzhou New TV Tower)微振資料，以唯輸出系統識別方法(Output-Only System Identification)，進行廣州塔模態參數之識別，得知廣州塔的自然週期高達 10 秒，屬於非常柔軟的結構體。筆者亦曾利用識別所得之廣州塔模態參數，進行廣州塔數值模型修正，使數學模型得以正確反映真實結構之動態特性，供後續健康診斷研究之用，此次得以親訪廣州塔實屬難得的機會。

廣州塔因強風所導致的建築振動位移可能達到 1 至 2 公尺，且因廣州塔屬於柔性結構，大位移是可預期的，不過來回的搖擺之下的加速度，會令人感到不舒服，一般而言，長時間超過 5gal 的振動即會使人暈眩。抑制加速度太大的

方法中，TMD 在高層建築的應用上有其優越性。在很多建築上，阻尼器是利用巨大的金屬球或混凝土塊，其造價較高且浪費空間。而廣州塔的 TMD 質量，是利用靠近頂層的中央核心筒安裝的兩個各 540 噸容量的鐵製消防水箱，水箱的下面安裝有雙向的軌道，使水箱可以滑動。當塔身振動時，由於水箱的頻率調整與塔身一致，因此水箱會與主塔運動方向相反，因此可消滅塔身的晃動幅度。此外，當塔身的振動能量傳遞至 TMD，將使 TMD 劇烈運動，此時必須利用黏滯阻尼器以消散運動能量。而廣州塔的 TMD 上方還裝設一個 50 噸的主動式質塊(Active Mass Damper, AMD)，成爲「主被動混合調諧控制系統」，不同於被動型的 TMD，廣州塔的調諧質量阻尼器是兼有「被動」與「主動」控制的混合控制系統(Hybrid Mass Damper, HMD)。在「被動」的水箱上，加了一個小的主動控制系統。大水箱一直處於工作狀態，小的主動控制系統則處於待機狀態，只有在極端天氣或災難導致建築反應特別大時才會啓動，其輔助水箱運動，將水箱的減振效果加強 10%左右。這個系統採用線性控制的技術，響應速度很快，裝置小、壽命長、噪聲小，並可有效減緩時間延遲效應。此外，廣州塔在天線上面做了兩個 2 噸的金屬球，作爲鍾擺式的阻尼，限制天線的變形和振動。如此一來，在 8 級風力作用下，廣州塔的頂部可能達到 1.5 公尺的水平移動，這是建築的極限值，相當於建築本體高度的 1/300。

同上所述，爲提高參觀者的舒適度，廣州塔頂端設置了阻尼器兩個重達 600 噸的水箱安裝在電視塔餐廳上的 84 層和 85 層(如圖五、圖六所示)，可在火災時用以滅火，還可在塔身晃動時向相反方向運動抵消晃動幅度。目前，廣州塔阻尼層尚未開放參觀，而本團隊經由香港理工大學倪一清教授的安排，得以先行進入參觀(如圖七、八所示)。廣州塔在保障結構安全前提下允許的塔身偏移範圍是 1.2 公尺。水箱上設置有主動調諧質量系統(如圖九所示)，在罕遇強風作用下，系統的阻尼值增大，同時主動調諧系統啓動，確保主塔結構的減振控制效果。這兩個超大的水箱阻尼器，其與塔頂天線處的質塊阻尼器一起，可共同減少風力和地震造成的振動達 50%。

本人陪同林其璋教授於 1 月 29 日上午 10:30 分於香港理工大學由倪一清教授主持，進行高樓建築應用多元調諧質量阻尼器之專題報告，報告內容包含多元調諧質量阻尼器的最佳化設計、實務應用的考量與半主動調諧質量阻尼器的先關研究等，會後並與在場學生進行座談與交流，會場反應熱烈，有多位博士生提問(如圖十所示)，由其是有關半主動控制的問題，是筆者的專長，因此在討論的過程中，達到了學術交流的效果。本人與林其璋教授於當地時間 1 月 29 日下午 4:30 分搭乘長榮班機返台，結束此考察行程。

三、考察心得及建議

此次是筆者第一次踏進中國的領土，雖然只有一天且只去了廣州，不過還是有一些心得。大陸這幾年的經濟突飛猛進，大城市的相關建設如雨後春筍般冒出，廣州新電視塔則是為了因應廣州亞運而建造的超高建築，其所使用的兩個 TMD 屬於複合式控制型，必須結合備動與主動控制技術，而且全由中國自己的技術製造完成，這部分已超越了台灣，而大陸敢於應用新技術的態度，也令筆者印象深刻。不過，由於經濟的快速起飛，雖然物質生活變好了，不過貧富差距也變大了，造成了許多社會問題，從每輛計程車皆需加裝鐵柵欄可窺知一二。此外，筆者參觀廣州塔的那一天剛好是大陸春運的第一天，從廣州車站看到了大批民眾準備搭乘前往內陸的火車，每個人的臉上還看不到返鄉過年的喜悅，反觀台灣要回家過年可容易多了。回到主題，此次考察得到了許多廣州塔 TMD 細部構造的資料，可供國內自行設計 TMD 時的參考。

四、具體建議事項

阻尼器材質選用應以高密度為主要考量，如鋼鐵等，降低使用空間浪費所造成的成本過高，以達到普及的目的，或是由多功能角度考量，採用消防水箱裝水，雖然佔用空間體積很大，但可協助解決高樓、高塔火災滅火不易的問題。

五、附錄



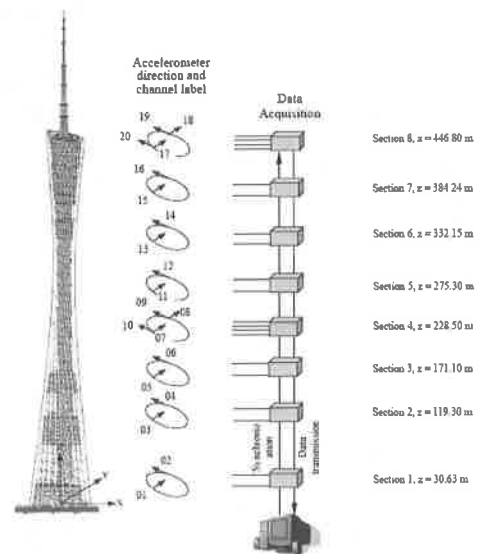
圖一 筆者與廣州塔之合影



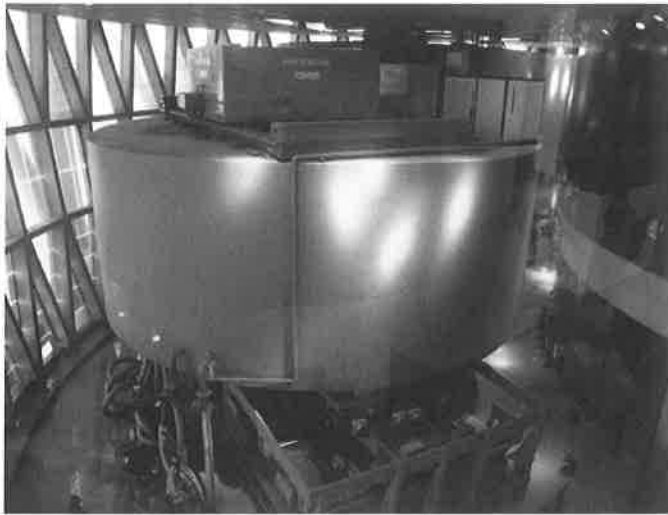
圖二 由廣州塔之透明玻璃往下看



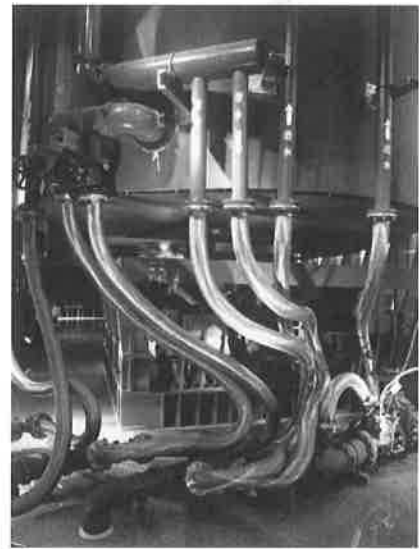
圖三 由廣州塔向外可看見珠江



圖四 廣州新電視塔量測系統配置圖



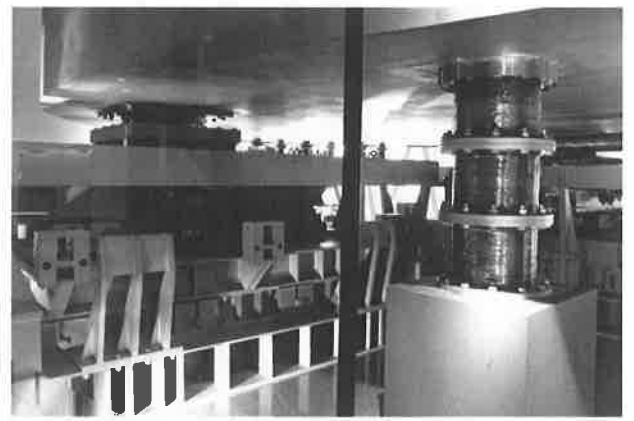
圖五 廣州塔 TMD 一隅



圖六 廣州塔 TMD 之水路管線



圖七 參訪廣州塔阻尼層(林其璋教授(左)、廣州塔梁高級工程師(中)、筆者(右))



圖八 雙向滑軌支承(左)與橡膠支承墊(提供側向回復力)



圖九 廣州塔 TMD 上方之 AMD 系統



圖十 林其璋教授於香港理工大學之專題演講