

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：林其璋 教授

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

本人於 2013 年 1 月 27 日至 1 月 29 日協同林錦隆博士後研究員赴香港與廣州，進行塔式結構應用調諧質量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)減振之技術考察，主要項目包括：(一)、訪問廣州新電視塔，參觀該塔之阻尼器層，以進一步了解調諧質量阻尼器於塔式結構之實務應用情形，(二)、參訪香港理工大學，進行高樓建築應用多元調諧質量阻尼器之專題報告，並與倪一清教授及在場學生進行座談與交流。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，如台北 101 大樓雖由國內永峻工程顧問公司進行結構設計，但裝設 TMD 之設計分析則由國外顧問公司所承接，然而廣州塔的調諧質量阻尼器則是全部自行設計製造且具國際水準，藉由此次實際案例考察，對於利用國內技術完成 TMD 減振裝置之設計與製造，有極大助益。

目次

摘要.....	2
一、 考察目的.....	1
二、 考察過程.....	2
三、 考察心得及建議.....	4
四、 附錄.....	5

一、考察目的

由於建築與材料科技的進步，建築物的高度愈來愈高，橋樑的跨距愈來愈長，使得結構體的健康監測與減振控制成爲重要議題。其中，裝設主/被動調諧質量阻尼器(Active/Passive Tuned Mass Dampers，通稱 TMD)以降低結構受強風及地震作用下之動態反應，已獲國內外學術界與工程界之肯定。不同型式 TMD 也相繼問世，目前全世界有 20 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。對於新建結構，採用 TMD 配合傳統耐震設計將更爲經濟；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。以國內高層建築之台北國際金融中心 101 層摩天大樓即爲其例，TMD 裝置之設計與分析皆仰賴國外大型工程顧問公司全程設計及監造，國人尙無工程顧問公司針對結構裝設 TMD 進行設計之工程案件，主要原因在於業界尙無一套針對應用 TMD 於結構減振之完整最佳參數設計程序之程式或軟體供國內工程業工程師使用，且若 TMD 設計不當不但會因而高估 TMD 之減振效用，甚至對結構安全性造成影響，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，本人過去長期研究發展 TMD 技術並執行國科會計畫多年，分別於 2004、2008 年因研發多元調諧質量阻尼器(Multiple Tuned Mass Damper, MTMD)獲中華民國及美國專利，多元調諧質量阻尼器(Multiple Tuned Mass Damper, MTMD)係由多個質塊、彈簧與阻尼之系統所組成。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 MTMD，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。因此本次考察之目的在於參訪廣州塔之實際案例建築，以進一步了解超長週期結構裝設 TMD 之設計分析及工程實務上遭遇問題及解決方案，協助產業界設計減震技術能力之提升推廣國人自行研發設計並製造之 MTMD，提升國人結構設計能力與減震技術。

二、考察過程

本人於 1 月 27 日(日)上午 10:30 分協同林錦隆博士後研究員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(如圖一所示)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 米漸變到 1.2 米，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。無數網狀的空洞讓陽光和空氣穿透而過，也減少了塔身的笨重感和風荷載。廣州塔有幾個世界之最：(1)世界最高的自立式電視塔：總高度 600 米(高 450 米的主塔體、高 150 米的天線桅杆)；(2)全球最長的空中漫步雲梯：蜘蛛俠棧道位於廣州塔 168 米 - 334.4 米處，1088 級階梯圍繞塔身核心筒螺旋向上，全長約 1000 米；(3)最高的旋轉餐廳：424 米高的旋轉餐廳可容納 400 人就餐，享受中外美食；(4)最高的 4D 影院：身處百米高空看有香味的電影；(5)最高的露天觀景平台：高 450 米，面積為 54 米x40 米，有半個足球場大；(6)最高的橫向摩天輪：在 450 米露天觀景平台外圍，增設一個橫向的摩天輪，可以乘坐摩天輪一覽廣州美景。

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。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，以作為結構建康診斷的依據。

為消除晃動幅度，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(如圖二所示)，可在火災時來滅火，還可在塔身晃動時向相反方向運動抵消晃動幅度。未來，阻尼層將開放參觀，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(如圖三、四、五所示)。廣州塔從建設期間就請香港理工大學進行結構檢測，塔身內部鋼結構上裝有監控電子元件，至今最大的偏移是由於日照不均勻塔身熱脹冷縮所致，為 35 厘米，10 月 5 日塔身搖晃的幅度未超過這個數據。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 米。水箱上設置有主動調諧質量系統，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震動幅度高達 50%，經模型測試，廣州塔即使遭受最猛烈的地震和颱風災害也能保持其結構的完整性。

在 400 公尺以上的高空，因為強風導致的建築搖擺位移可能達到 1 至 2 米。由於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，會令人感到不適，一般而言，長時間超過 5gal 的振動即會使人暈眩。控制加速度，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，造價較高、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，以便水箱可以滑動。當塔身晃動時，由於水箱的頻率調整與塔身一致，因此水箱會往反方向運動，以此來消滅塔身的晃動幅度，大約可以使晃動位移降低 40%。在廣州，建築物設防標準是地震烈度 7 度，7.8 度在廣州會是極為罕見的。

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) (如圖六所示)，成為「主被動混合調諧控制系統」，不同於上海國際金融中心和台北 101 大樓的 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。水箱一直在工作；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，將水箱的減振效果再加強 8%到 10%。

這個系統採用線性馬達控制的技術，響應速度很快，裝置小、壽命長、噪聲小。可有效減緩時間延遲效應，且耗能極少。此外，廣州塔在天線上面做了兩個 2 噸的金屬球，作為鍾擺式的阻尼，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 米的水平移動，這是建築的極限值，相當於建築本體高度的 1/300。

本人於 1 月 29 日上午 10:30 分於香港理工大學由倪一清教授主持(如圖七所示)，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(如圖八所示)，他們也針對自己研究所遇到的問題，與筆者與林錦隆博士進行討論。本人與林錦隆博士於當地時間 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

廣州塔所裝設的阻尼器屬於混合控制技術，其中包含被動控制的 TMD 與主動控制的 AMD，實際應用必須結合土木與機電工程之技術，而中國大陸近幾年在工程技術整合方面的進步的確亮眼。此次考察由香港理工大學倪一清教授的安排，才得以進入尚未開放的廣州塔阻尼層，進行廣州塔 TMD 的細部考察，經由此次考察的豐碩成果，可供國內自行設計與製造 TMD 的參考。

四、附錄



圖一 筆者與廣州塔合影



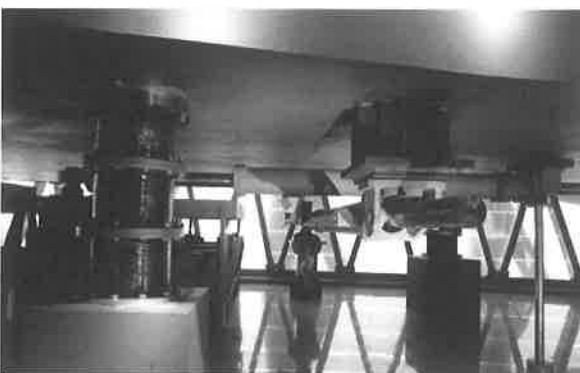
圖二 廣州塔的两个調諧質量阻尼器(香港理工大學倪一清教授提供)



圖三 筆者於廣州塔阻尼層與解說人員梁高級工程師(中)、林錦隆博士(右)合影



圖四 筆者與梁部長討論阻尼器細節



圖五 提供 TMD 側向勁度的橡膠支承與黏滯阻尼器



圖六 TMD 上方裝設的 AMD 系統



圖七 專題演講前由倪一清教授(右)介紹
主講人(筆者)



圖八 學生提問情形