

出國報告（出國類別：考察）

日本高樓結構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：日本/大阪、京都
出國期間：2012/8/6-2012/8/9
報告日期：2012/10/26

摘要

筆者於 2012 年 8 月 6 日至 8 月 9 日協同林其璋教授、永峻工程顧問股份有限公司陳奕信協理、張國瑋工程師等四人赴日本大阪與京都，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)、訪問日本鹿島建設株式會社與竹中建設株式會社，參觀該公司曾設計與建造減震裝置之實際案例建築，並進行經驗交流分享座談會，以進一步了解實際設計分析及工程實務上遭遇問題及解決方案，(二)、參訪京都大學「桂」校區，建立本校土木系及環保防災中心與京都大學土木系在防災及減災技術之學術交流合作管道。筆者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，本次考察主要參訪日本大阪的 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	I
目 次	II
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	5
五、 附錄	5

一、考察目的

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。利用 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。TMD 對結構之減震效果取決於其質量、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。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。筆者協助執行林其璋教授與永峻工程顧問公司之國科會產學合作計畫，藉由此次的考察可與日本鹿島建設株式會社、竹中建設株式會社進行交流，評估以國內技術進行 MTMD 設計與製造的可行性。

二、考察過程

筆者於 8 月 6 日(一)上午協同林其璋教授、永峻工程顧問股份有限公司陳奕信協理、張國瑋工程師搭乘長榮班機由台北飛往日本關西機場，並於當日下午由關西機場搭乘接駁巴士抵達大阪第一飯店。8 月 7 日上午，由京都大學金哲佑(Chul-Woo Kim)教授帶領，參訪鳳凰塔大樓(Phoenix Tower)，如圖一所示，參觀行程如圖二所示。

位於大阪市的鳳凰塔大樓，地下三層，樓高二十九層之鋼結構大樓，部份結構體亦採用鋼骨鋼筋混凝土材料，總樓高為 145.45 公尺，標準層樓地板面積為 1072.33 平方公尺(約 325 坪)。樓房總重約為 26,000 公噸，其基本自振週期在長軸向為 2.90 秒，在短軸向則為 3.14 秒，而在扭轉向則為 2.10 秒。該大樓在空間運用上，包含辦公室、會議大廳、音樂廳、藝術展覽館、高空餐廳等等，可作為商業與藝文活動之使用。由於鳳凰塔大樓在承受動力荷載時可能會有安全性及舒適性的問題，因此鳳凰塔大樓之所有人 Dowa 產物保險公司決定在建物頂樓加裝主動控制元件，以減少大樓在強風或中小型地震時所產生之振動，營造商業與文化活動之舒適環境。

上述之主動控制元件係由 Kabori 所屬之小堀鐸二研究所與鹿島建設公司設計、製造及安裝相關之控制設備。小堀鐸二研究所對於推動結構主動控制之實用化累積了相當多的實務經驗。鳳凰塔大樓所採用之主動控制元件係小堀鐸二研究所研發成功之第二代主動質量驅動器(Active Mass Driver, AMD)，小堀鐸二研究所將之取名為 DUOX 系統(見圖三)。本大樓共使用二座 DUOX 系統，分別安裝在最頂層的二個獨立塔形結構上。因此，除了能有效控制該樓房的二個水平方向之運動外，亦可控制因樓房平面配置不對稱所造成之扭轉運動。整個控制系統除了上述之 DUOX 驅動器外，尚包括數個用以量測樓房振動反應之加速度感應計及一組數位控制用電腦，加速度計分別安裝在頂層、中間樓層及地面層。當強風或地震來襲時，樓房結構或地表之振動量將經由感應計傳送至控

制電腦，若振動量超過預設值時，控制電腦即會自行起動 DUOX 系統，對樓房施加控制力，進而抑制樓房之振動量，達到主動控制之目的。為減少耗能量，小堀鐸二研究所之 DUOX 系統乃將傳統之主動質塊控制元件加以改良，其作法為係將一小型主動質塊驅動器裝設在傳統的被動調諧質塊阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)上。如此，則用來控制樓房振動之主要慣性力可由被動控制元件 TMD 提供，而無需外加能量。但是，由於 TMD 為被動元件，在樓房振動初期之運動量極小，故附加之主動質塊驅動器則可用以加速被動控制元件 TMD 質塊之運動；而當樓房振動減小時，則可反向操作，以減緩 TMD 質塊之運動。如此既能提高整體系統之控制效能，亦可減少 TMD 質塊之衝程(相對位移)，進而縮小裝設減振系統所需之空間。本案之 DUOX 主動控制系統所使用之 TMD 部份重量為 30 公噸，上附二個重量各為 6 公噸之主動質塊驅動器，用以控制 TMD 之二個水平方向運動，故每一 DUOX 系統總重為 42 公噸，約僅為樓房總重量的千分之 1.6，經實地運作証實在每秒 17 公尺之風速吹襲下，樓房振動量可減少至未控制時之 1/2 以下。圖四為技術人員示範 AMD 之作動，圖五為考察人員與接待人員於 DUOX 系統前之合影。

本考察團於下午 2:00 同樣由金教授帶領，參訪竹中建設株式會社所設計建造的鑽石塔大樓(DT Tower)與水晶塔大樓(Crystal Tower)。鑽石塔大樓(見圖六)是一座非常特殊的大樓，因為此大樓除在頂層裝設單擺型 TMD 外，其一樓挑高的上方樓板亦裝設隔震系統，形成隔震與 TMD 同時存在之混合控制系統。圖七為鑽石塔大樓隔震層之隔震墊(提供回復力)與阻尼系統，該阻尼系統在大地震後有另一個功能，就是可當作千斤頂將結構推回原始的位置而不會有殘餘位移。另外，鑽石塔大樓是採用雙向滑軌作為隔震系統之滑動面(見圖八)，屬於非常先進與可靠的隔震系統，但造價亦高。另一方面，鑽石塔大樓利用頂樓之冰儲熱槽作為 TMD 的質量，形成單擺式 TMD(見圖九)，由於水的比重較鋼低很多，因此其所需的體積較大。

當日下午所參觀之第二棟大樓為水晶塔大樓(見圖十)，其為日本第一座設

有減震裝置的大樓，1990 年興建。其亦採用冰儲熱槽作為 TMD 質量，共有 9 台各重達 90 噸的冰儲熱槽，其中 6 台被使用在減震用的單擺質量塊中。[圖十一](#)為考察人員與竹中株式會社設計部部長前野敏原與總工程師長瀨正於水晶塔大樓內之合影，結束 8 月 7 日之參觀行程。

隔日(8 月 8 日)搭乘阪急電車與計程車至京都大學「桂(Katsura)」校區(見[圖十二](#))，透過京都大學杉浦邦征(Kunitomo Sugiura)教授，參訪於此校區之結構與風洞實驗室，建立本校土木系及環保防災中心與京都大學土木系在防災及減災技術之學術交流合作管道。本考察團於當地時間 8 月 9 日中午 1:15 分搭乘長榮班機返台，結束此考察行程。

三、考察心得及建議

在此次參訪過程中，日本鹿島建設與竹中建設的接待人員都是主管級的工程師與經理，顯示其對於本考察團的重視。這三棟建築物最久的有二十多年歷史，TMD 仍能維持正常的運作且允許參觀，相關保養維護工作皆有標準作業程序參考施行，有效延長儀器使用壽命及維持儀器工作效能。本團參訪時提出許多問題，對方的資深工程師皆能詳實回答，顯示日本大型建設公司的工程師養成教育與經驗傳承工作，皆值得台灣借鏡。

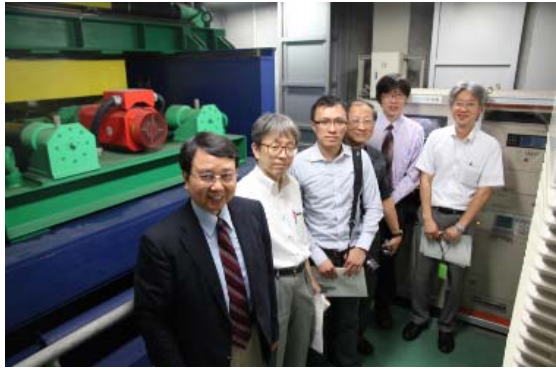
此次考察觀察到日本減振裝置所採用之彈簧機構，其運作行程與國內單擺式減振裝置比較，約只有 25 公分至 30 公分的距離，有效利用空間及可達到減振效果，對於台灣生活空間與日本相似的情況，如果能降低減振裝置所佔用的空間，就可以提高空間的使用效率與價值，且日本安全防護裝置屬於強迫停止系統，當遭遇極大災害時，減振裝置將停止運作，避免造成災害的二次傷害，但此安全防護裝置將造成減振系統之損壞，提高企業與使用者之成本壓力，是否為唯一選擇將列入往後研究內容；未來減振裝置將利用類似之彈簧元件與國內廠商合作，創造國內品牌自有廠牌，提高國家及學校之國際知名度與能見度。

四、 具體建議事項

期盼校內可放寬個人結餘款使用方式及申請期限，由於國外考察或參訪行程往往須配合計畫安排與國外接洽單位行程及可行性，無法準確預期何時能確定出訪行程與日期，對於申請校內個人結餘款使用於國外差旅費之申請時程常常造成延誤，致使校內行政人員額外的負擔與不便，且容易降低研究者國外考察及參訪之意願，喪失吸取國外成功經驗機會，不符合最初設置個人結餘款之原意，應多資助國內研究人員及研究生參加國際會議、學術交流活動、實務考察及現地參訪等，增進國際視野及交流學習的機會。

五、 附錄

	■Schedule スケジュール <table><tr><th>Time 時間</th><th>Place 場所</th><th>Outline 概要</th></tr><tr><td>10:00</td><td>Lobby [1FL]</td><td>1. Assemble 集合</td></tr><tr><td>5 min</td><td>(ELV.)</td><td>Move 移動</td></tr><tr><td>10:05~10:20</td><td>Meeting Room [9FL]</td><td>2. Greeting 挨拶 3. Handout materials 資料配布 4. Technical explanation of DUOX 制震装置説明</td></tr><tr><td>5 min</td><td>(ELV. and Stairs)</td><td>Move 移動</td></tr><tr><td>10:25~11:15</td><td>DUOX Machine Room [P1FL] Roof Floor ~Office Floor ~Phoenix Hall [3FL]</td><td>5. Technical guided tour 制震装置見学 6. Building guided tour (*optional) 建物内施設見学 (屋上~基準階~ホール)</td></tr><tr><td>11:15~11:25</td><td>Meeting Room [9FL]</td><td>7. Q/A 質疑応答</td></tr><tr><td>5 min</td><td>(ELV. and Stairs)</td><td>Move 移動</td></tr><tr><td>11:30</td><td>Lobby [1FL]</td><td>8. Adjourn 解散</td></tr></table> *建物内施設見学は、天候や当日のホールの催物によっては中止するかもしれません。	Time 時間	Place 場所	Outline 概要	10:00	Lobby [1FL]	1. Assemble 集合	5 min	(ELV.)	Move 移動	10:05~10:20	Meeting Room [9FL]	2. Greeting 挨拶 3. Handout materials 資料配布 4. Technical explanation of DUOX 制震装置説明	5 min	(ELV. and Stairs)	Move 移動	10:25~11:15	DUOX Machine Room [P1FL] Roof Floor ~Office Floor ~Phoenix Hall [3FL]	5. Technical guided tour 制震装置見学 6. Building guided tour (*optional) 建物内施設見学 (屋上~基準階~ホール)	11:15~11:25	Meeting Room [9FL]	7. Q/A 質疑応答	5 min	(ELV. and Stairs)	Move 移動	11:30	Lobby [1FL]	8. Adjourn 解散
Time 時間	Place 場所	Outline 概要																										
10:00	Lobby [1FL]	1. Assemble 集合																										
5 min	(ELV.)	Move 移動																										
10:05~10:20	Meeting Room [9FL]	2. Greeting 挨拶 3. Handout materials 資料配布 4. Technical explanation of DUOX 制震装置説明																										
5 min	(ELV. and Stairs)	Move 移動																										
10:25~11:15	DUOX Machine Room [P1FL] Roof Floor ~Office Floor ~Phoenix Hall [3FL]	5. Technical guided tour 制震装置見学 6. Building guided tour (*optional) 建物内施設見学 (屋上~基準階~ホール)																										
11:15~11:25	Meeting Room [9FL]	7. Q/A 質疑応答																										
5 min	(ELV. and Stairs)	Move 移動																										
11:30	Lobby [1FL]	8. Adjourn 解散																										
圖一 日本大阪市鳳凰塔大樓	圖二 日本大阪市鳳凰塔大樓考察行程表																											
																												
圖三 鳳凰塔大樓之 DUOX 系統	圖四 DUOX 系統現場操作示範																											



圖五 本次考察人員與鹿島建設建築設計部辻泰一副部長(左二)與京都大學金哲佑教授(右一)之合照



圖六 鑽石塔大樓



圖七 鑽石塔大樓之阻尼系統與隔震墊



圖八 鑽石塔大樓之滑軌隔震系統



圖九 鑽石塔大樓之單擺式 TMD



圖十 水晶塔大樓



圖十一 與竹中株式會社設計部部長前野敏原(左二)與總工程師長瀨正(左三)於水晶塔大樓內之合影。



圖十二 與林其璋教授於京都大學桂校區合影