

## 摩天大樓的制震「護身符」－調諧質量阻尼器

文・圖 / 王哲夫

### 摘要

臺灣最著名的地標，非「臺北 101 大樓」莫屬。在 2004~2010 年間，它是地球上最接近天空的高樓，相較於其他頂尖的摩天大樓，要把臺北 101 大樓安穩放在板塊邊緣與颱風必經之路的臺灣土地上，工程難度更高。在這座大樓高處懸掛了一個臺灣獨一無二的高樓「護身符」－風阻尼器，學術界與工業界稱為「調諧質量阻尼器」（原文為 Tuned Mass Damper，簡稱為 TMD），這個裝置的重量連大樓重量的 1% 都不到，卻對降低臺北 101 大樓的搖晃起了很大的作用，為何它這麼神奇？原理是什麼？本文將帶讀者一探究竟。

關鍵詞：臺北 101 大樓、風阻尼器、調諧質量阻尼器

## 前言

臺灣最著名的地標，非「臺北 101 大樓」莫屬。在 2004~2010 年間，它是地球上最接近天空的高樓，有將近半公里的高度。相較於其它頂尖的摩天大樓，臺北 101 大樓所在的大環境，地震頻繁不用說，年年颱風經過也屬稀鬆平常，所以要把它安穩放在臺灣的土地上，有更高的工程難度。為此，這座大樓在第 91 層樓之處懸掛了一個臺灣獨一無二的高樓「護身符」—風阻尼器（圖 1、2）（維基百科）。「風阻尼器」這個詞是大樓自行取的名字，這種裝置在學術與工業界通常以「調諧質量阻尼器」稱之，原文是 Tuned Mass Damper，簡稱為 TMD。臺北 101 的這個 TMD 重達 660 噸，目前仍是全球最大最重的 TMD 紀錄保持者（王秋文等，2009），但其實這個重量連 101 大樓的百分之一都不到，卻對降低大樓的搖晃起了很大的作用，為何它這麼神奇？原理是什麼？本文將帶讀者一探究竟。

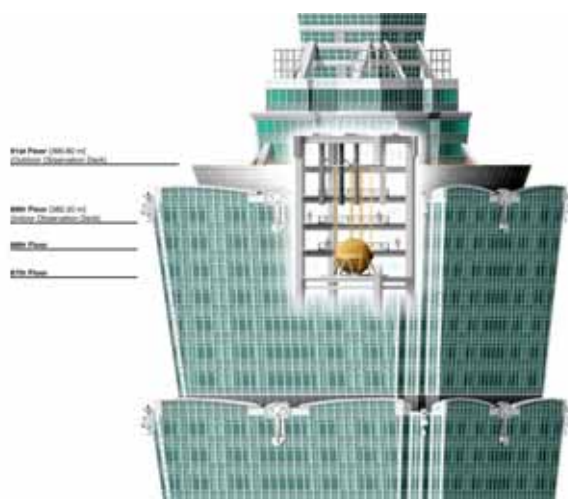


圖 1. 臺北 101 大樓風阻尼器(TMD)安裝位置略圖  
(資料來源：維基共享資源 Someformofhuman 的作品)



圖 2. 臺北 101 大樓風阻尼器(TMD)特寫近照  
(資料來源：維基共享資源 BreakdownDiode 的作品)

## 談談摩天大樓的「暈眩症」

建築物瘦瘦高高的像根筷子插在土裡，儼然是現代都市建築發展的趨勢，因為在寸土寸金的都會區裡，向上發展比橫向發展要便宜許多。問題便出在當房屋愈來愈高之後，對風與地震這類側力的作用也愈來愈敏感，就像是扳手鬆螺絲的原理一樣，整個構造很容易在側向力之中變形。

房屋與自然界其他材料一樣，一旦變形了，如果沒有崩壞，在力量消失後便會回彈，這是材料抵抗能量作用的一種方式。也就是藉由變形吸收能量、轉「動」為「靜」，等到外力暫歇後再釋放出去、由「靜」轉「動」，如此在動與靜之間反覆轉換。一般大樓在地震中或颱風中搖搖晃晃，甚至當這些外來力量消失後，搖晃仍會持續，就是因為大樓的構造材料正在作這種能量的轉換。

如果上述的這種動與靜的能量轉換沒有一個「煞車機制」，能量就會在建築材料內不斷遊走，永遠不會消失，房屋的搖晃也將永不停止。幸好，自然界的材料除了可作能量的轉換，也會「踩煞車」，讓房屋的搖晃最終能停下來。這種「煞車」機制，在學術上稱為「阻尼」，這個名詞很有趣，讓人有種「在泥巴阻礙中寸步難行」的畫面。

只是傳統建築材料的阻尼並不大，尤其摩天大樓常以鋼構建成，它的阻尼比鋼筋混凝土來得更小，所以一般摩天大樓在被激起搖晃後，需要更長一段時間才能靜下來，這也是摩天大樓所遭遇到容易產生暈眩的原因。

## 調諧質量阻尼器(TMD)的原理



要解決像臺北 101 大樓這類結構阻尼不足的問題，就需要在傳統建材構造之外，額外增加阻尼機制，其中 TMD 就是一種以來回擺盪方式來吸收 101 大樓振動能量的一種裝置，事實上，它就是一個有如鐘擺的單擺（圖 3）。當大樓往西擺時，TMD 往東擺；當大樓往東擺，TMD 往西擺。如此以「來回不同調」，來牽制大樓的擺動，如圖 4。我們也可以說，是將大樓部分的振動能量轉移到 TMD 的擺動上，再由 TMD 裝置來消耗掉這些能量，讓大樓本身的來回振動幅度快速降下來。

圖 3. 位於國立自然科學博物館 921 地震教育園區地震工程教育館的 TMD 動態演示模型（王哲夫拍攝）

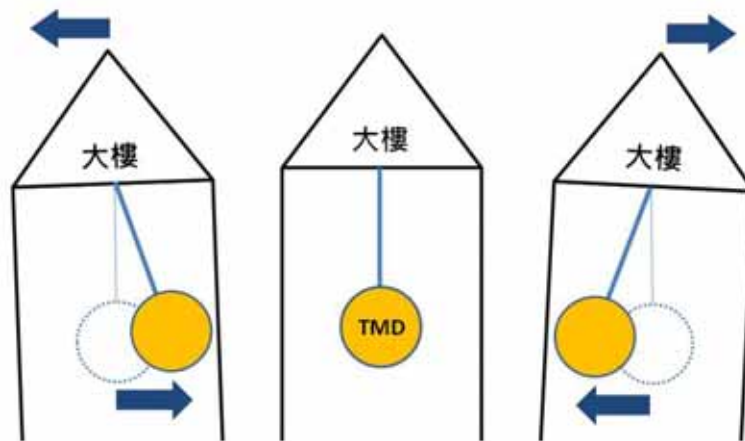


圖 4. 調諧質量阻尼器(TMD)建築制震略圖 (王哲夫繪製)

TMD 之父，是德國漢堡人赫爾曼弗拉姆。他在西元 1909 年申請了一項美國新發明專利「抑制物體振動的裝置」(Device for damping vibrations of bodies)，也就是 TMD 的雛型。這項專利在 1911 年公諸於世(Frahm, 1911)，後來也成功的用在減輕船體因海浪翻滾而產生的搖擺運動。從此，TMD 的相關研究開始崛起，被廣泛應用在減輕機械振動，直到 1970 年代，美國紐約的花旗集團大樓、波士頓的 John Hancock 高塔、加拿大的 CN 塔與澳洲的雪梨塔，開啓了第一波高樓與高塔裝設 TMD 的熱潮 (張民豈，2005)，一直到今天，除了臺北 101 大樓之外，杜拜的帆船酒店、東京的晴空塔、以及許多興建中的摩天大樓，都安裝了 TMD。

TMD 之所以能夠達到上述的功能，並不是隨便掛上一顆重球即可，這個單擺的擺長必須經過計算，讓單擺的自然擺動週期與大樓的自然擺動週期相當。所謂的「自然擺動週期」，是在力量釋放後，物體完成一次來回擺動所需時間。像 101 大樓的自然擺動週期，約長達 7 秒。故 TMD 的擺長可用「 $\text{擺長} = \text{重力加速度} \times \text{週期的平方} \div \text{圓周率}\pi\text{的平方} \div 4$ 」的公式來計算，得到約為 12 公尺。以一層樓約 3 公尺來看，約為 4 層樓高，這也是為什麼臺北 101 須要將 87~91 層打通來懸掛 TMD 的原因。

TMD 的能效來自於將它的週期調至建築物的週期附近，也可以說是調到頻率相近，這個概念類似調頻 FM 收音機，因此從「調諧」質量阻尼器這個名稱上可反映出這樣的意涵。換句話說，TMD 的頻率調得好，就是制震利器，調得不對，就會淪為一個昂貴的吊飾而已。

## 參考文獻

王秋文、謝紹松、張國儀，2009。如何幫大樓抗風防震？淺談台北 101 大樓阻尼器。台灣大學土木工程學系電子報，第 21 期。(網址：

<http://epaper.ce.ntu.edu.tw/vol.21/101damper-1.html>)

張民豈，2005。淺談調諧質量阻尼器。中華技術季刊，第 67 期。(網址：

<http://www.ceci.org.tw/book/67/67bk11a.htm>)

維基百科Wikipedia “Tuned mass damper”專頁，網址：

[http://en.wikipedia.org/wiki/Tuned\\_mass\\_damper](http://en.wikipedia.org/wiki/Tuned_mass_damper) (英文版)

Hermann Frahm, 1911. Device for damping vibrations of bodies. 美國專利，公開

號：US989958A (網址：<http://www.google.com/patents/US989958>)