

摩天大樓的制震 「護身符」—— 調諧質量阻尼器

文·圖—王哲夫

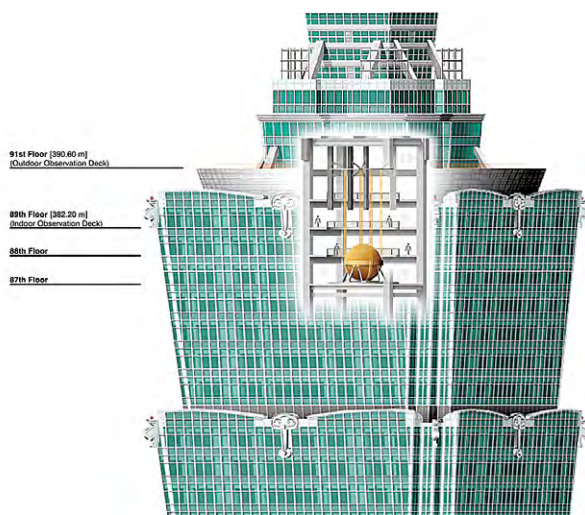


圖1 臺北101大樓風阻尼器(TMD)安裝位置略圖
(資料來源:維基共享資源Someformofhuman的作品)

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。相較於其他頂尖的摩天大樓，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)。「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，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。

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。

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

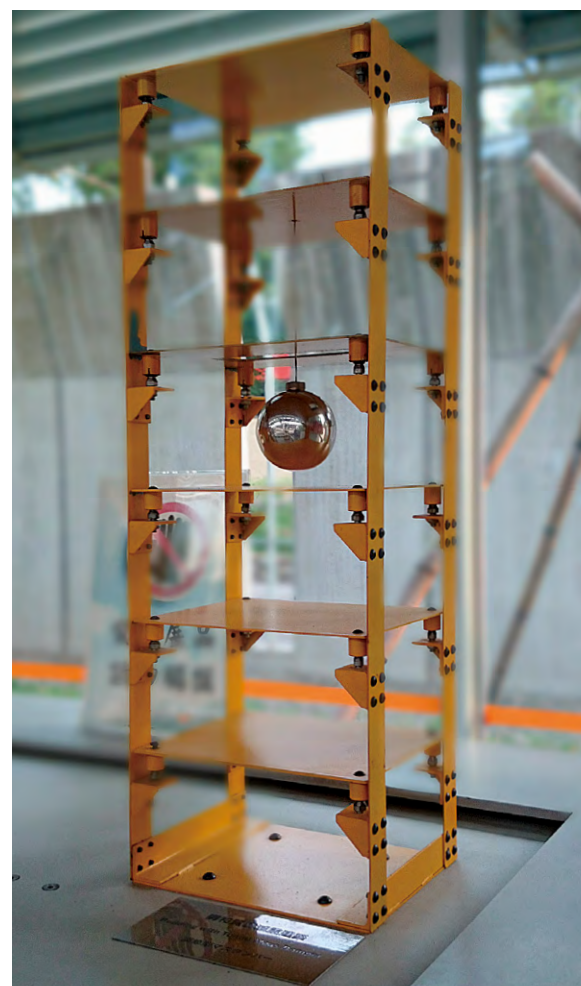


圖3 位於國立自然科學博物館921地震教育園區地震工程教育館的TMD動態演示模型(王哲夫拍攝)

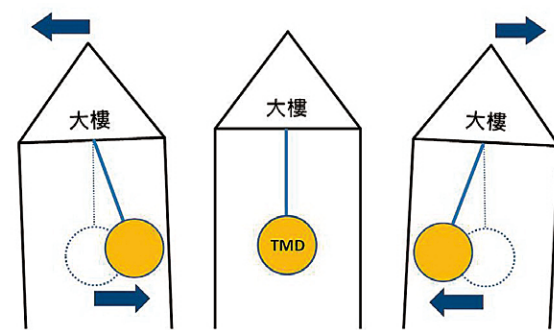


圖4 調諧質量阻尼器(TMD)建築制震略圖(王哲夫繪製)

公諸於世，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，開啟了第一波高樓與高塔裝設TMD的熱潮，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「擺長=重力加速度×週期的平方÷圓周率 π 的平方÷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。



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)