

投稿類別：物理類

篇名：

高聳入雲，穩如泰山，台北101

作者：

林子源。台北市立明倫高中。高一16班

林后軒。台北市立明倫高中。高一16班

指導老師：

徐榮濱老師

## 壹●前言

自 19 世紀末世界第一棟摩天大樓－芝加哥家庭保險大樓開始，一股摩天大樓的風潮席捲全球，各國的建築越蓋越高，杜拜的哈里發塔目標一百六十層樓，台灣也有摩天大樓－台北 101 大樓。

台北的 101 大樓高達一百零一層樓，是外國觀光客必到的景點。位在環太平洋地震帶的台灣，幾乎每天都有地震，如此高聳的建築究竟是如何防風、防震？本論文主題在於探討高樓大廈之所以能抵抗強風、強震，而不倒塌的特殊結構，及背後所含的物理原理。

## 貳●正文

### 一、結構

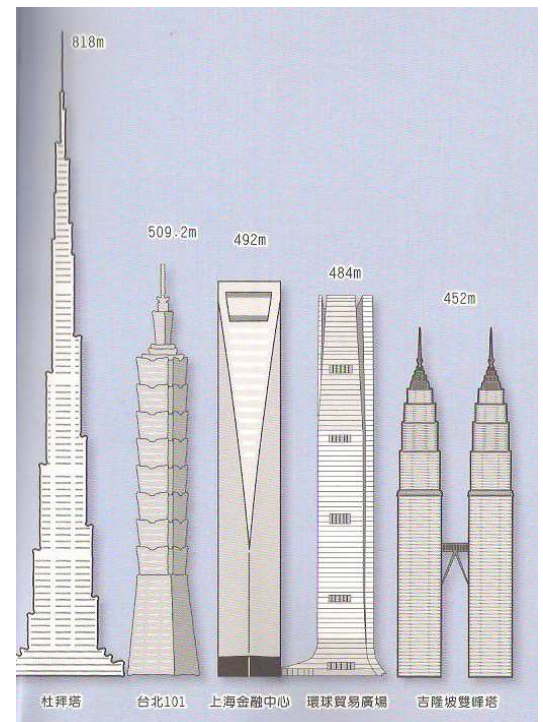
台北 101 大樓建在擁有 50 多條斷層之多的台灣，然而世界高樓中，300 尺以上都蓋在非震地區，或是弱震區(如高雄的 85 層高樓，高 347 公尺)，多僅以風力設計。台北 101 距離休眠斷層卻只有 200 公尺，抗風與防震變成了設計團隊的難題。

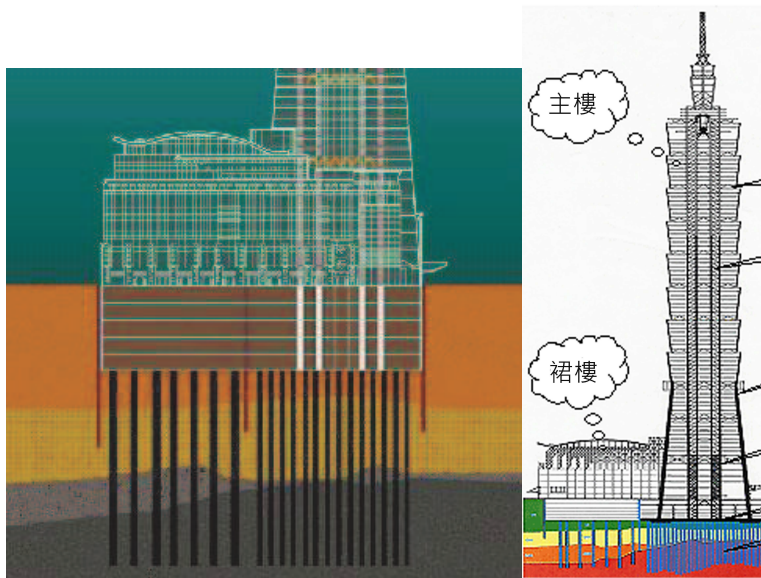
#### (一) 地基

數十萬年來，海平面的改變，使台北盆地堆積了約 30~40 公尺厚的沉泥與粘土，爲了讓 101 大樓站穩，必須使用基樁(如圖一)，使其深入岩盤達 20 公尺以上。就如同大樹的樹根，緊緊抓住地表。

然而地下水位約位於地面下 2 公尺，對主樓而言，因荷重集中有沉陷量過大的問題；對裙樓(如圖二)而言，因荷重不大，無法克服地下水上舉力，反而有上浮的問題。

因此，設計團隊在裙樓下使用了 167 支直徑 2 公尺之基樁；而主樓則是用 380 之直徑 1.5 公尺，由鋼筋混凝土構成之基樁，平均深度爲 68 公尺，合計共 547 支基樁。





圖一

圖二

## (二) 雙管巨型結構與 S.R.C.結構

### 1、雙管巨柱

一般而言，高樓總高度在 30 層以下是地震力大於風力，超過 30 層樓的高樓都是風力大於地震力，風力是風先吹結構，結構再把力量傳入地基，地表是不動的。而這種建築多會在外部周圍加上較緊密的框架和固定外牆的管狀構造(註一)。但 101 會受地震的影響，地震為地表波動，力量從地基傳給結構，而細高型建築會產生位移放大的結果(越高樓越明顯)，為此，設計團隊使用雙管結構的巨柱，共八支，每支截面長 3 公尺、寬 2.4 公尺。用鋼作為外管，鋼加混凝土為內管。而不是在外部加上框架或固定外牆的構造。

### 2、S.R.C.結構

一般早期 10 層樓以下的建築使用的鋼筋混凝土，又稱 R.C.結構(Reinforced Concrete)，是由鋼筋和混凝土所構成的結構，融合鋼筋的抗拉特性(張力高)及混凝土的抗壓能力。又有高耐火、耐久、抗蝕等優點。其應用範圍相當廣闊，除建築物外，許多橋樑、木櫃、水庫、雜項工程等都可用鋼筋混凝土(註二)。

S.R.C.結構(Steel Reinforce Concrete Construction)，是以鋼骨為主要結構，輔以鋼筋，並外包混凝土的建築。具有鋼骨的韌性及鋼筋混凝土的鋼性，因此被標榜抗震、安全性高，921 地震後，逐漸被台灣各地區廣泛使用，而 101 使用的正是此種結構。

### (三) 耐震、減震與隔震結構

上述的分類是以建材作為標準，而另一種分類是依據結構的特性分為剛性結構、柔性結構，而又依建築物的避震方式分為減震結構和隔震結構。

#### 1、剛性結構

剛性結構正如其名，結構材間彼此緊密地結合在一起，同時構件本身亦強度高、體積大，大多固定成堅硬材質。

#### 2、柔性結構

柔性結構是讓結構材的連結部分，事先設計成接受在某個程度內變形並能隨之晃動的結構。接縫處刻意保留些許鬆動，在木製骨架餘裕範圍內輕輕晃動的五重塔，就是典型的柔性結構(註三)。

#### 3、減震與隔震

建築物就像是扎入地面的大型單擺，當地板產生震動，自然會跟著左右震動，但這會對建築本身結構及內部人員有極大的影響。於是建築學就出現兩種方式：減震與隔震。一般而言，減震是在大樓結構設計上增補或放置阻尼器等來吸收地震所釋放給建築的能量。而隔震則是在建築基部加上橡皮事的隔震裝置，在地震波進入建築前，就將其吸收掉，但這不適用於一般小規模的建築，過輕的重量使橡皮呈現鬆軟狀態而失去功效。一般小建築的隔震系統，是像在盤子上放一顆球，球上在放上建築，一旦地震發生，球會變成移動中的球，建築物則因慣性定律而不受影響。

### 二、結構控制系統

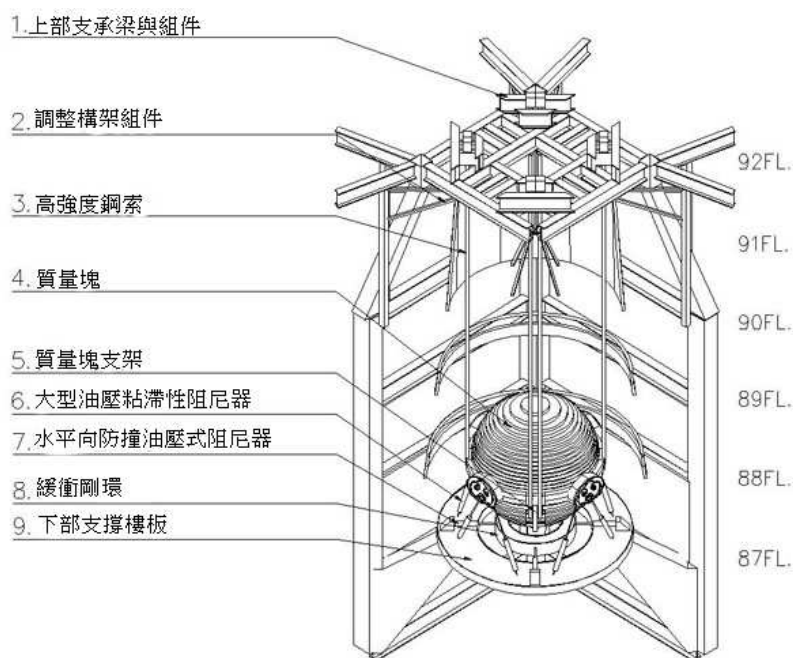
結構控制系統就是建築的避震器，吸收能量減少震動，而阻尼器就是使堅硬的建築物產生塑性的工具，101 將阻尼器設計為可見式，也成為 101 另類地標、另類吸引遊客的設施。

#### (一)台北 101 的調和質塊阻尼器

調諧質量阻尼器(tuned-mass-damper, TMD)，屬於被動式。運用物理慣性，當大樓搖晃時，大鋼球會跟著擺動，當大樓向右擺時，大鋼球會向左擺動，因為移動方向剛好相反，可以減少結構的位移。

總高度達 508 公尺的台北 101，易受到風力影響而產生擺動，而風力太強、震動太大，會使建物內的人感到不適，因此其所使用的調諧質量阻尼器是世界上最大的，也是位於最高樓層的。整個球體由 8 組直徑 9 公分的高強度鋼索，透過支架托住球體質量塊的下半部，將 660 公噸的載重懸吊於 92 層結構。此外，調質阻尼器支架周圍也另設置了 8 支斜向的大型油壓粘滯性阻尼器(Primary Hydraulic Viscous Damper)，其功能在於吸收球體質量塊擺動時之衝擊能量。而為了避免強風及地震作用時質量塊擺幅過大，調質阻尼器下方則放置了一可限制球體質量塊擺動的緩衝鋼環（Bumper Ring），以及 8 組水平向防撞油壓式阻尼器（Snubber Damper），一旦質量塊擺動振幅超過 1m 時，質量塊支架下方的筒狀鋼棒

（Bumper Pin）就會撞擊緩衝鋼環以減緩質量塊的運動(如圖三)。



圖三

被動式與主動式阻尼器的不同在於，主動式調質阻尼器會根據主結構受力後即時量測到的結構反應，並利用電腦程式計算出最佳的控制力大小，再藉由伺服馬達將此力作用在阻尼器的質量塊上，使其能有效的降低結構反應。而被動式阻尼器僅是根據初始的設計，也就是慣性定律。然而，主動式調質阻尼器需要電力來啟動，萬一停電時，則會失去其功能。

## （二）調質阻尼器的力學原理

簡單的調質阻尼器是由質量塊、彈簧與阻尼所組成，是一種單擺周期的運用，利用質量塊的慣性力、彈簧的彈性恢復力、阻尼的能量消散。將阻尼器的頻率調整至接近建築物，當外力使建築物震動時，阻尼器會產生反向共振，藉此消除建築物上的能量，減少損害。但建築結構物所設計之單擺 TMD 須有特定的擺長，才能產生減振效用，單擺的擺長和擺動頻率有關，所以增長擺長不但不會增加阻尼，反而只會降低 TMD 頻率，使原有減振功能喪失。但在外力離開結構體之後，因為 TMD 停不下來，反而成為結構體的外力，使結構慢慢也跟著振動起來，要重覆一段時間後，整個結構和 TMD 系統才完全靜止，101 大樓為防止此種狀況發生，在阻尼器旁增加了緩衝的油壓系統。

### 三、外型

台北 101 是全球首創多節式摩天大樓，從第 27 層至第 90 層，每 8 層為一節，一共 8 節，每層外牆均外斜  $7^\circ$ ，每一段都能將大樓的重量從外部轉移到中間，且在玻璃帷幕牆使用特殊設計的框架，為了應付地震與強風，框架具有彈性。

風吹大樓時，大樓的迎風面會被一隻無形的大手推擠，有時則會在背風面產生漩渦，會對建築物造成持續而小的推力。倒梯形的節狀結構，在經設計團隊風洞測試後，證實能較一般直立式四方型建築少 30%~40% 的風力影響。

### 四、其他高樓的防震防風

#### (一) 滑動式阻尼器

滑動式阻尼器是利用質量塊的平行移動來平衡建築物的晃動。當地震或風力造成建築物的震動時，質量塊會因為慣性定律停留在原地，而當大樓擺回來時，質量塊又是依慣性往返方向移動，再配合微電腦控制的油壓緩衝系統，達到減少震動的最佳效能。

#### 1、花旗集團中心大樓(Citigroup Center)

1977 年完工、位於紐約、總高度 279 公尺、59 層的花旗大樓，是世界第一個使用減震裝置來降低風力的超高層建築。在大樓最上層用混凝土製成寬 9.5 公尺、高 1.9 公尺的質量塊，400 噸的重量在大樓頂部作用，配合微電腦控制的油壓活塞，可將風力影響降低至 50%。

#### 2、約翰漢考克塔大樓(John Hancock Tower)

位於波士頓、高 241 公尺、60 層的辦公大樓，完工於 1976 年。最初，這棟大樓並未裝設減震裝置，但上端樓層因風力影響，使內部的人彷彿暈車一般。於是參考花旗集團中心大樓，裝設滑動式阻尼器。

#### 3、千葉港塔大樓

1986 年完工、125 公尺的千葉港塔大樓，是日本第一座設置了減震裝置的展望塔。

## (二) 鐘擺式阻尼器

將質量塊吊起，使用類似單擺運動的模式為鐘擺式阻尼器。當地震或風力影響大樓時，質量塊會依慣性定律停在原地，而當大樓再度擺回來，質量塊則做反向運動，用以吸收大樓震動。

### 水晶塔大樓(Crystal Tower)

此為日本第一座設有減震裝置的大樓，1990 年興建。它採用「冰儲熱槽」的空調系統，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鐘擺質量塊中，也就是拿冰儲熱槽當作阻尼器。

## (三) 水槽式阻尼器

利用水的反作用力作為減震的方式，稱為「液體沖激式調諧質量阻尼器」(Tuned Sloshing Damper，簡稱 TSD)。

### 新橫濱王子飯店(Prince Hotel)

1992 年興建，42 層的高樓建築。設計團隊沿著屋頂外牆頻均設置 30 座直徑 2 公尺高 20 公分纖維強化塑料所製成的容器。水槽式的好處就是裝設及維修方便，可藉由調整容器大小與水量來配合周期。

## 參●結論

101 之所以堅定不搖的主因：

一、因應堆積了 30-40 公尺厚沉泥與粘土的台北盆地，使用深入岩盤 20 公尺以上的基樁，以固定大樓。

二、為了同時抗拒來自地表的地震力與空中的風力，使用了雙管結構，用鋼作為外管，鋼加混凝土為內管。融合鋼筋的抗拉特性(張力高)及混凝土的抗壓能力。

三、如竹子狀的外型結構，可有效減少風力影響 30%~40%

經過這些特殊設計，台北 101 可以承受風速 60 公尺/秒(約 197 英尺/秒，時速 216 公里，134 英里)，並且可以抵禦 2500 年一週期的地震。但我們也發現，一般認為是抗震用途的阻尼器，事實上的功用並非抗震，而是減少大樓晃動的幅度，

讓大樓內的人不會有暈眩等不舒服的情況。一旦發生大型地震，阻尼器並不能減少及吸收能量，這時，還是得靠 101 的雙管巨柱及穩定的基樁來支撐大樓。

至於鐘擺式阻尼器與滑動式阻尼器的力學原理，是利用單擺週期、慣性力、共振、流體力學及帕斯卡定理。將阻尼器的頻率調整至接近建築物，當外力使建築物震動時，利用質量塊的慣性力，產生反向擺動，用以吸收建築物震動的能量。再配合油壓系統(流體力學與帕斯卡定理)，控制質量塊的擺動幅度、力道等等。

#### 肆●引註資料

註一、川口衛(2007)。**建築構造的設計：流體力學&造型**，44-45。楓書坊文化。

註二、梁坤明(2002)。**來蓋自己的房子**，16-17。常民文化事業股份有限公司。

註三、高橋俊介(2009)。**摩天大樓建築之謎－從台北 101 發現建築科技的奧秘**，70-74。晨星出版有限公司。

註四、玉樹臨風穩如山，行政院科委會。

<http://web1.nsc.gov.tw/ct.aspx?xItem=8014&ctNode=40&mp=1>

註五、摩天漢世界

[http://www.skyscrapers.cn/data/skymark/tw\\_ti\\_ti101.htm](http://www.skyscrapers.cn/data/skymark/tw_ti_ti101.htm)

註六、如何幫大樓抗風防震？淺談台北 101 大樓阻尼器

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

註七、建築奇觀：台北 101 大樓 - Discovery