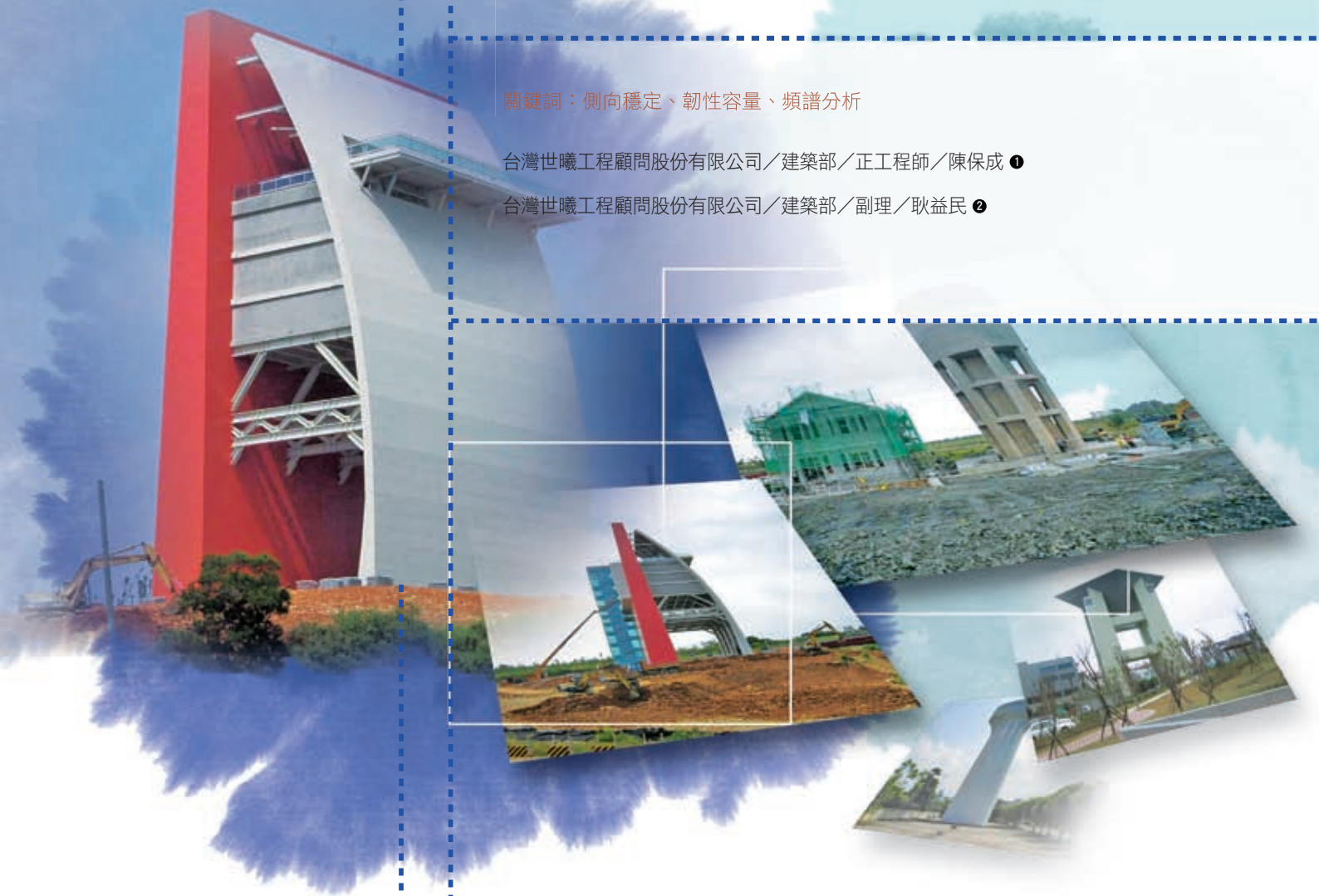
高架水塔結構規劃設計技術探討

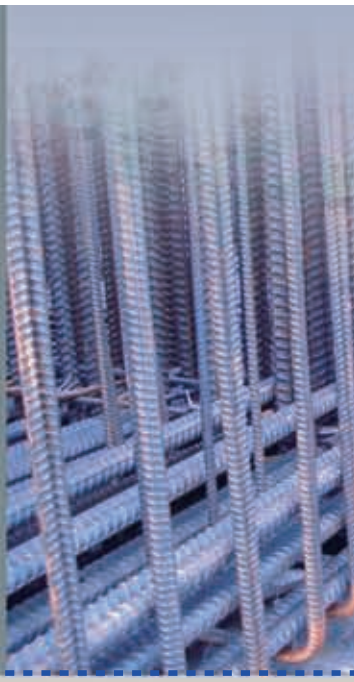
關鍵詞：側向穩定、韌性容量、頻譜分析

台灣世曦工程顧問股份有限公司／建築部／正工程師／陳保成 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／建築部／副理／耿益民 ❷



摘 要 ABSTRACT

科學工業園區內因用水需求不斷增加，導致高架水塔的儲水量亦不斷成長，由早期儲水量約500噸的圓柱蘑菇形狀水塔，增加至目前儲水量動輒2000噸甚至3000噸的大型高架水塔，因水塔高度高且量體大，成為建築師構築地標的最佳方式，故水塔造型也不再一成不變。本文就歷年來由本公司負責設計、監造且施工完成並啟用的高架水塔，綜整各不同水塔造型所採用之結構系統配置方式，探討其結構應力及變形等行為，研析結構規劃考量的重點，並依據耐震規範與參考相關文獻及結構審查者的意見，得到合理的結構分析結果，另從設計規範結合現場施工實務，綜整結構設計時應注意的要點等，由結構系統規劃起至完成設計，各個面向提出經驗分享。



壹、前言

近年來科技業的蓬勃發展，隨著科學工業園區的開發，用水及儲水需求不斷增加，大型高架水塔也因應而生，由於高架水塔的功能需求，不可避免的成為頭重腳輕的構造，與一般建築構造型式大不相同，近年來高架水塔蓄水量動輒達2000噸以上，高度也都超過30公尺，量體相當龐大，因此園區業主都將高架水塔視為地標工程，建築師對於造型創意也就越來越多樣化，本文嘗試就本公司設計且已完工啟用之案例，就其結構規劃、分析及設計之經驗與各界分享。

貳、高架水塔結構系統規劃及其分析方式探討

一、高架水塔結構系統規劃

水塔是生活不可或缺的設備，一般建築物常見於屋頂設置的預鑄白鐵球形水塔(圖1)或是在樓電梯間上方附建的混凝土造水箱(圖2)，因其重量相對於主體建築物極小，故屬於建築物上的附屬設施；然而科學工業園區的高架水塔由於量體大，已從附屬於建物的設施，成為獨立的構造，結構系統必須因應高高在上且具各不同造型的水塔而擬定。早期電腦運算能力較不足，水塔型式大多採具規則性、對稱性的蘑菇狀(圖3)或是矩形，近年來，結構分析設計軟體功能及運算速度進步，可配合建築師創意發展出多樣具變化如帆船型、菱形、鑽石型、橢圓形、圓柱形等(圖4~圖6)，依據不同建築造型所採用的結構系統概述如表1。

圖1 預鑄白鐵球形水塔

圖2 附屬混凝土水箱

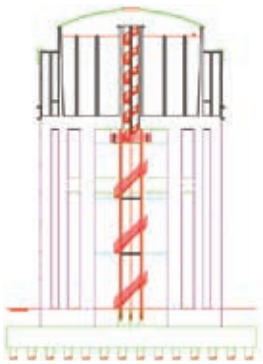
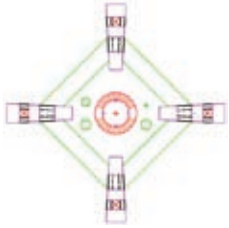
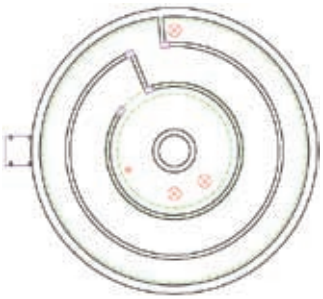
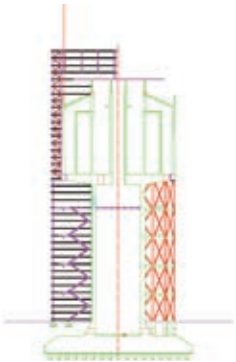
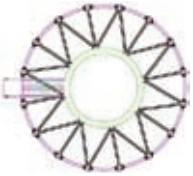
圖3 蘑菇狀水塔(網路資料)

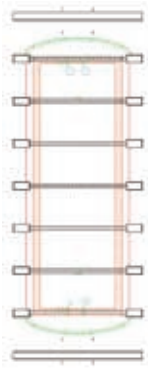
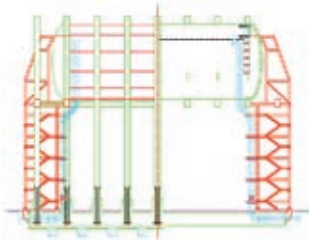
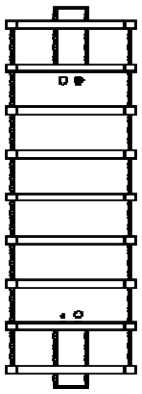
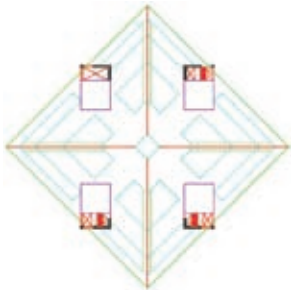
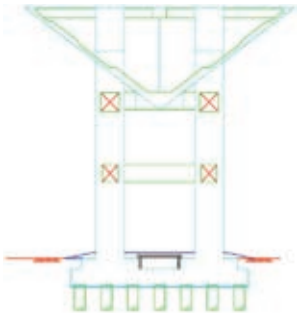
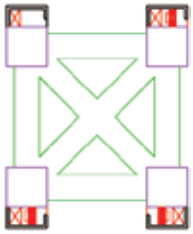
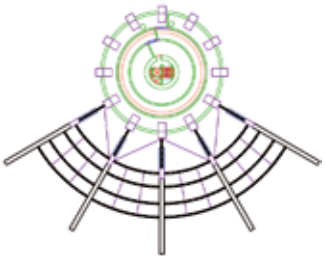
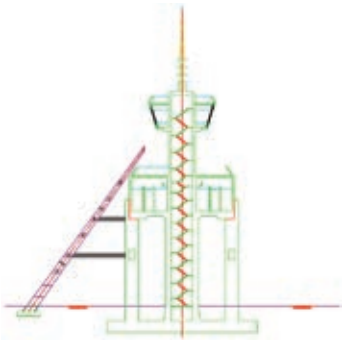
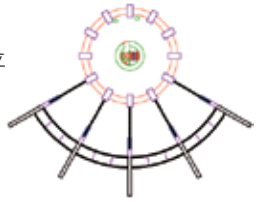
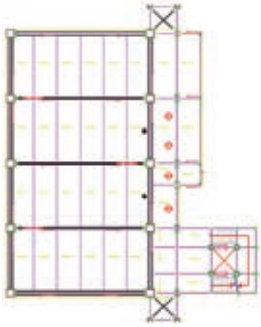
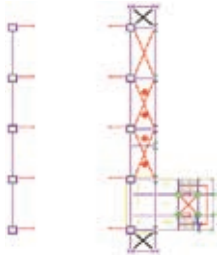
圖4 帆船型高架水塔

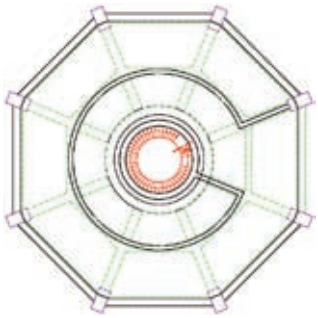
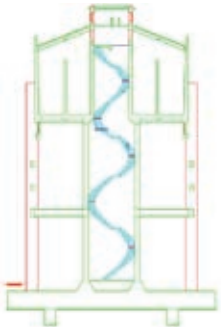
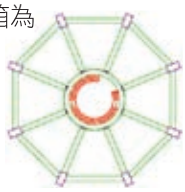
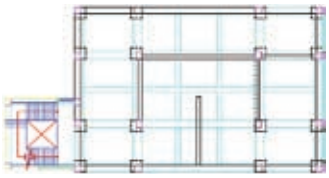
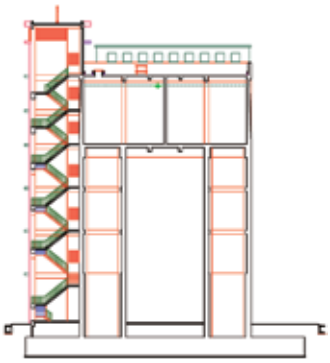
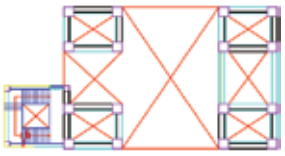
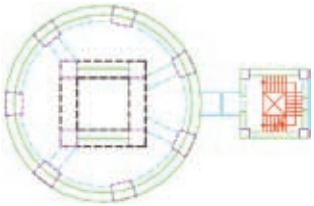
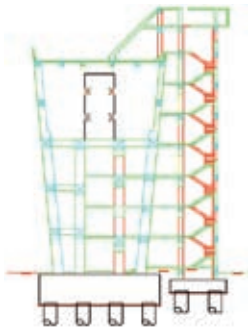
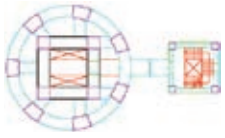
圖5 橢圓形高架水塔

圖6 鑽石型高架水塔

表1 各類高架水塔結構平、立面圖及系統概述

結構平面圖	結構立面圖	結構系統概述
地點：台南科學工業園區		3000T高架水塔，結構採鋼筋混凝土梁柱系統，由四支組合柱(每柱由三支小柱組成)支撐頂部水箱，水箱為圓柱形RC牆版系統，基礎採樁基礎。 
 地點：台南科學工業園區		3000T高架水塔，結構採鋼筋混凝土核心及鋼結構外核系統，混凝土圓核直徑9m，外周輔以16支鋼柱及斜撐共同支撐頂部水箱，水箱為圓柱形RC牆版系統，基礎採樁基礎。 

結構平面圖	結構立面圖	結構系統概述
 地點：台南科學工程園區		3000T高架水塔，結構採鋼構造梁柱系統，由14支箱型鋼柱支撐頂部水箱，水箱呈圓桶型，由7組鋼環梁及鋼板組成，基礎採樁基礎。 
 地點：新竹科學工業園區		2000T高架水塔，結構採鋼筋混凝土梁柱系統，由四支巨型柱支撐頂部水箱，水箱結構為鑽石型RC牆版系統，基礎採樁基礎。 
 地點：中部科學工業園區		3000T高架水塔，結構採鋼筋混凝土核心及混凝土環柱系統，混凝土核心直徑8.5m，四周輔以12支混凝土柱採環狀配置，共同支撐頂部水箱，水箱為圓柱形RC牆版系統，基礎採平版基礎。 
 地點：中部科學工業園區		2000T高架水塔，結構採鋼構造系統，由10支箱型鋼柱加斜撐支撐頂部水箱，水箱由矩形RC牆版結構組成，基礎採樁基礎。 

結構平面圖	結構立面圖	結構系統概述
 地點：台南液晶科學園區		2000T高架水塔，結構採鋼筋混凝土核心及混凝土環柱系統，混凝土核心直徑7m，四周輔以8支環狀配置之混凝土柱，共同支撐頂部水箱，水箱為八邊形RC牆版系統，基礎採樁基礎。 
 地點：台南大新營工業園區		2000T高架水塔，結構主要以RC剛構架承受垂直載重並於外圍配置承重牆以抗扭及抑制柱之細長比，基礎採平版基礎。
 地點：台南永康工業園區		1500T高架水塔，結構採鋼筋混凝土梁柱系統，由四支組合柱(每柱由四支小柱組成)支撐頂部水箱，水箱為矩形RC梁柱系統，基礎採樁基礎。 
 地點：宜蘭科學工業園區		1000T高架水塔，結構採正方形鋼筋混凝土核心及混凝土環柱系統，方形混凝土核心邊長5.6m，四周輔以7支環狀配置之混凝柱共同支撐頂部水箱，水箱為圓柱形RC牆版系統，基礎採樁基礎。 

由上述結構型式，可以將高架水塔結構規劃方向歸納為下列幾點：

(一)結構對稱性

對稱性結構系統不僅具有簡潔、流暢的造型，結構力流也比較明確，在地震

發生時也較不會有額外應力產生，或應力集中現象，規劃階段以靜力分析即可對結構系統的優劣與結構桿件尺寸的合理性做判斷，細設時再佐以動力分析針對整體及局部桿件應力檢核，可降低後續結構尺寸修正的幅度及時間；反之，若為非對稱結構，規劃之初即需以動力分析檢核所擬定之結構系統與結構桿件尺寸的合理性，常需要反複的測試與修正，需花費極多之時間與心力，細設時對於應力集中區域，常需在不影響功能需求及建築外觀下予以克服及補強。

(二)水塔支撐系統側向穩定

園區範圍廣擴，常需要較大之水壓輸送較有效率，為減少加壓站設置，故一般高架水塔高度都在30公尺以上，水塔下方的結構支撐系統若無適當規劃，將導致受壓桿件無側撐長度相當大，會降低整體支撐系統勁度及穩定性，地震時亦會讓上方水塔產生較大的水平變位，並且使塔體產生較大的應力；因此一般需以加設斜撐、利用樓梯服務核設置剪力牆或是加設夾層及水平梁系統，以減少受壓桿件無側撐長度，增加支撐系統的側向勁度。由圖7、圖8之比較可以明顯看出，增設夾層可以有效的降低水塔週期，減少塔頂部位移以及柱應力，然而所降低之柱應力會轉嫁到夾層梁上，因此其尺寸、配筋需配合支撐系統調整，以得到最佳配置。

(三)大型基礎版

高架水塔大部分的重量集中在頂部，而且韌性容量低，計算所得的設計地震力

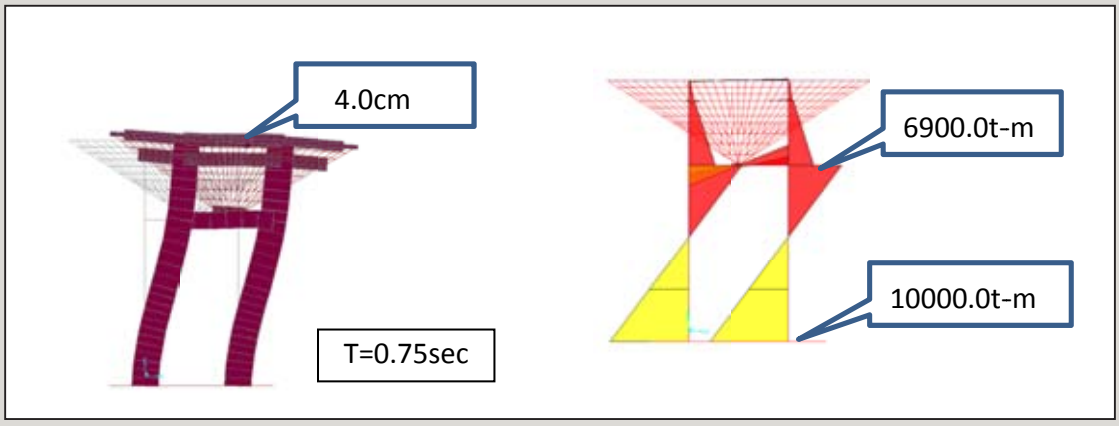


圖7 無側向支撐系統之基本振動週期、位移與彎矩

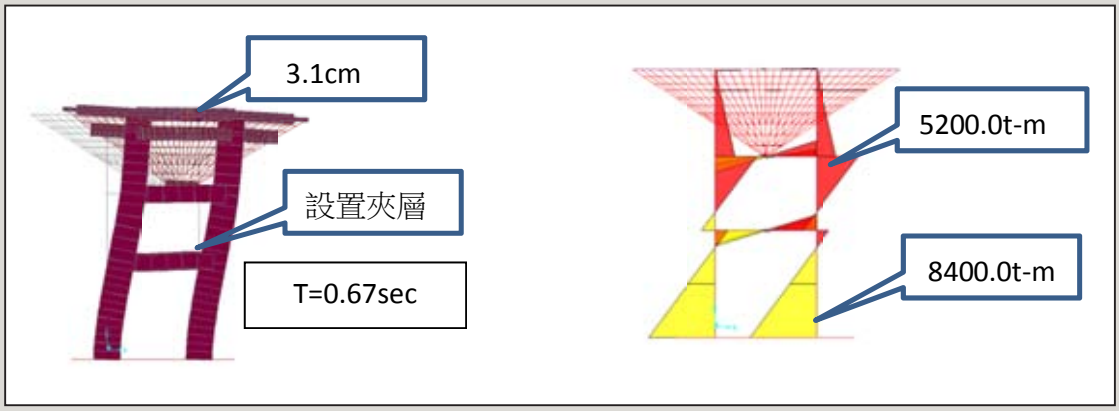


圖8 具側向支撐系統之基本振動週期、位移與彎矩

比一般房屋結構來得大，地震時底部會承受更大的傾倒彎矩，故需要大型基礎來克服因傾倒問題所引致的非均佈地反力，對於地質較差的地區，為克服地耐力不足或差異沉陷，最常採用樁基礎作為承載使用，由於樁與樁的間距在規範上有其限制，為避免太小的樁間距引致羣樁效應而降低單樁承載力，並有效的將上方應力均勻的傳遞到樁基礎上，因此常需設置大型基礎版(如圖9)。

(四)水箱箱體剛性

高架水塔主要功能為蓄水，水箱箱體之材質不論是以鋼材或混凝土材料施作，在需求上，不允許其漏水，故實務上必須儘量設計為剛體，以避免相對變形產生額外應力而造成裂縫，導致蓄水功能降低。

(五)施工性－鋼筋綁紮及混凝土澆置

近來由於水塔造型常具多樣及變化性，梁、柱桿件不像一般建築結構採正交配置，將產生有各種不同角度的接頭形式，依分析結果梁、柱、牆本來就具有極大應力外，再加上水塔外牆如菱形、八角形、鑽石形等，於角隅處會產生額外的應力集中現象，上述種種，將使每種桿件的配筋量皆非常高，若再考量鋼筋搭接與錨錠，常常在接頭處造成大量鋼筋匯集，使得混凝土澆置變得困難，如圖10、11、12，因此在規劃設計時，配筋即需考量鋼筋適當的間距、排列的方向以及鋼筋錨錠

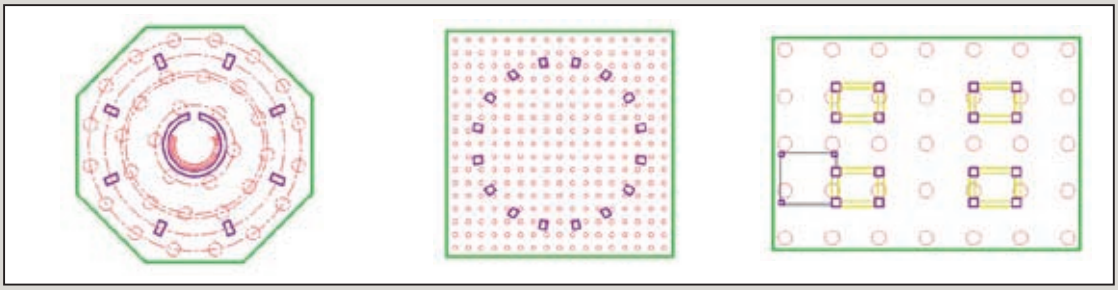


圖9 高架水塔大型基礎版

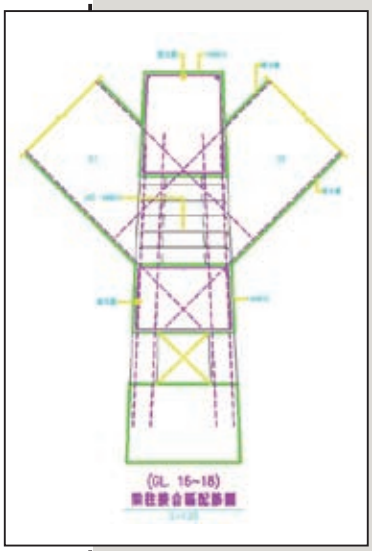


圖10 非正交梁柱接頭

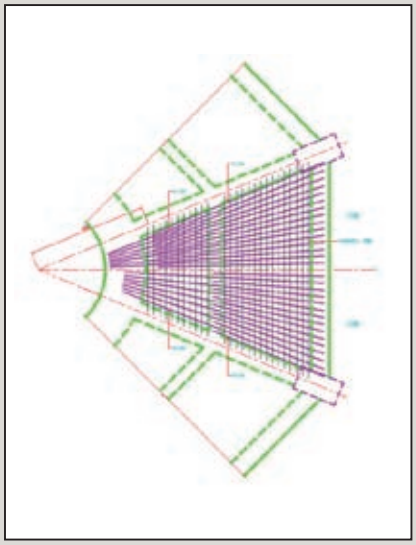


圖11 寬度漸變牆平面配筋

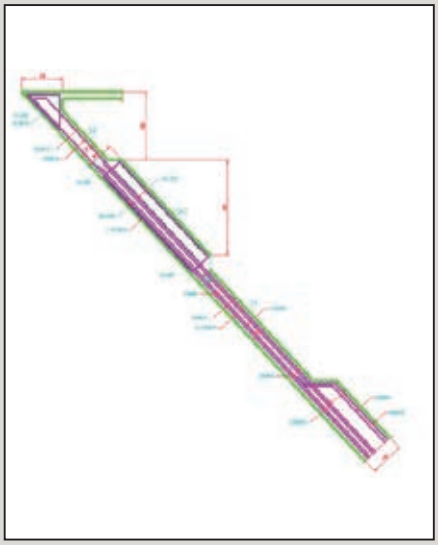


圖12 不同厚度牆剖面配筋

於混凝土內相互交錯情況、梁柱或牆主筋與箍筋排列及搭接的相對位置，以避免施工時出現鋼筋糾結一起而難以灌漿。

二、高架水塔結構分析方式

雖然高架水塔的高度大多低於50公尺且多為對稱性結構，但考量其重要性及結構特殊性，一般採靜力分析與動力分析併行，契約中常要求需另委由第三公正單位進行特殊結構審查。

由於上千噸的蓄水量，使得高架水塔不論是採混凝土構造或是鋼構造，設計水平力都是由地震力控制，而非風力控制。設計地震力計算，於靜力分析則依耐震規範最小水平設計總橫力公式求得，動力分析一般則採頻譜分析，若造型特殊再輔以歷時分析檢核。

早期水塔設計時所採用之設計地震力計算規定於【最新建築計術規則】內，最小地震總橫力以 V=ZKCIW 表示，其中震力係數C與結構振動週期有關，K為組構係數與結構系統的韌性有關，另規範規定「不支架於建築物上，單獨以四個以上具交叉斜撐架之水塔及水箱，K=2.5」，依上述規定則可計算水塔所受之地震力，而一般韌性立體剛構架K=0.67，可見規範將水塔視為低韌性結構。

隨著規範的演進，自民國86年起，就將構造物之設計地震力改在【建築耐震設計規範及解說】中規定，並依不同的結構系統訂定相對應的R(韌性容量)值，依目前規範規定，「水塔、儲槽或壓力容器，其支承架具斜撐或不具斜撐者，R=1.2」，而韌性抗彎矩構架R=4.8，若依早期K=0.67對應R=4.8來換算，K=2.5時對應的R約等於1.28，由此可見規範對水塔的韌性條件規定並無太大改變。結構外審時亦有部分委員認為高架水塔相當類似於單自由度的運動方式，其結構靜不定數低，因此主張R應採用1.0，以彈性設計地震力設計。

動力分析所需之設計水平加速度反應譜，與構造物所在的工址、地質種類、結構物韌性容量及用途係數I都有相關，如圖13是以第一類地盤、I=1.5製作之週期與加速度反應譜圖，由圖中可發現對於R值越小之結構物，其對應之加速度值越大，以高架水塔採用R=1.2的最大加速度約為一般具非結構牆(R=4.0)之房屋建築最大加速度的1.5倍。

圖14為高架水塔分析時所採用的地震歷時資料，取樣地點為新竹科學園區實驗中學測站在921地震時之資料，包括東西向及南北向兩條歷時曲線，若將歷時曲線轉換為頻譜曲線與規

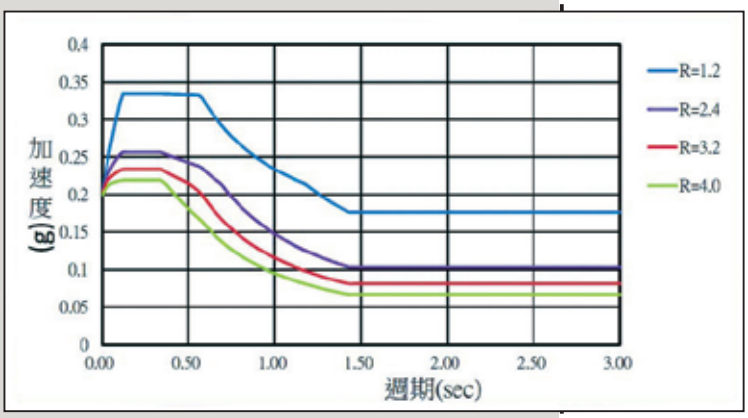


圖13 不同R值對應之規範反應譜

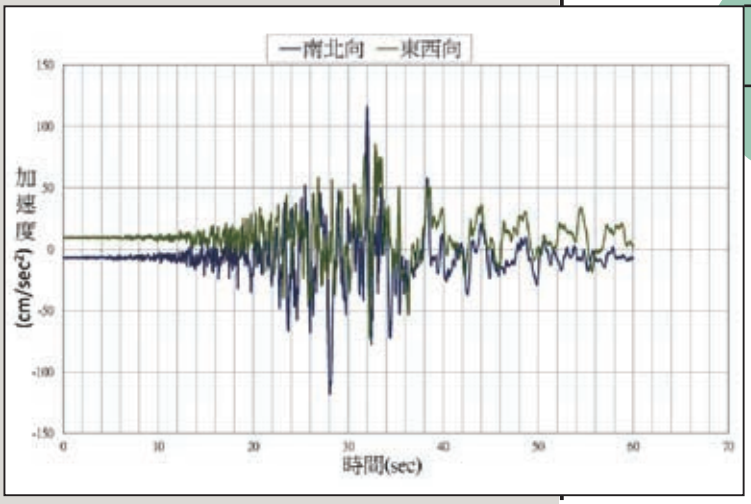


圖14 地震歷時曲線

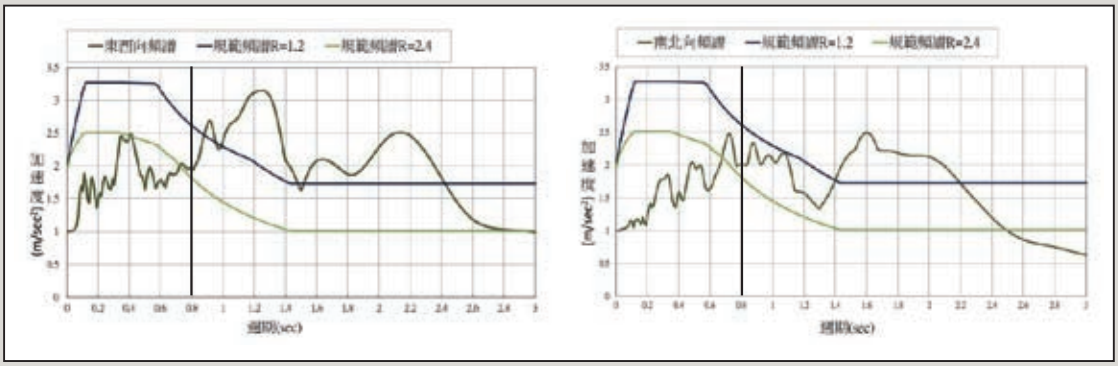


圖15 實驗中學東西向、南北向頻譜曲線與規範頻譜曲線

範採用R=1.2、I=1.5之頻譜比對，如圖15所示，依所彙集之高架水塔資料顯示，一般混凝土構造之高架水塔動力週期約在0.8秒以內，規範之最小設計地震力是可有效涵蓋實際地震力。

依規範計算水平地震力時，除了將水重納入結構總重量內計算外，在結構分析時亦須將水質量納入結構分析模型內(非一般靜載重)，動力分析時才能正確的模擬在儲水階段的水塔結構行為，由於高架水塔儲水水箱本身高度都在10公尺以上，塔底距離地面也在20公尺以上，分析時應避免僅將水質量置於水箱底部，仍應考量水箱高度效應，將水的質量均佈於水箱牆體上，以期結構模擬時之質量分佈能儘量反應實際情形，如圖16所示。

高架水塔水箱內的儲水，在地震時因結構體的晃動會產生潑濺(sloshing)現象，使在水箱壁體產生額外動態水壓，水的週期也會影響整體結構週期。依據文獻Housner[11]、[12]將水箱內晃動水分為兩類，下層水是與箱體結構一起運動的慣性水質量(impulsive mass)，上層水則是產生潑濺後的流動質量(convective mass)。另外文獻[8]以數值模擬方型水箱的潑濺行為如圖17所示，依該文獻後續對各類造型水塔的研究顯示，高架水塔於地震時屬於中、短週期運動，而水為低頻高週期物質，故不會與結構體產生共振現象但會增大整體結構之週期。

另於某一高架水塔結構審查案上，委員亦對如何模擬水的動力行為深感興趣，筆者曾以Housner的模式以二力桿模型，模擬動態水的彈簧勁度以及質量，如圖18，可以由圖19看出動態水在不同振態時對支撐桿件造成的應力，然而此分析模式，包括二力桿的配置方式、水質量計算基準等都需再進一步研究及探討。

綜上，在實務結構分析設計上，高架水塔中水對結構的影響，建議採用下列方式考量：

(一)將水重量併入整體結構重量中，依規範進行地震力靜力計算，並將水質量分佈於箱體上進行動力分析。

(二)在箱體壁上加載靜水壓及動水壓，動水壓可採用Westergaard公式計算。

(三)以Housner公式計算儲水週期，以檢核其與塔體結構週期共振之相關性。

(四)採用動力分析(頻譜分析或歷時分析)以反應整體實際應力行為。

三、高架水塔結構設計考量要點

結構分析應考量各種載重型式，並以載重組合後最大之應力進行桿件設計，即使規範以低韌性容量R=1.2做為水塔分析依據，但設計上

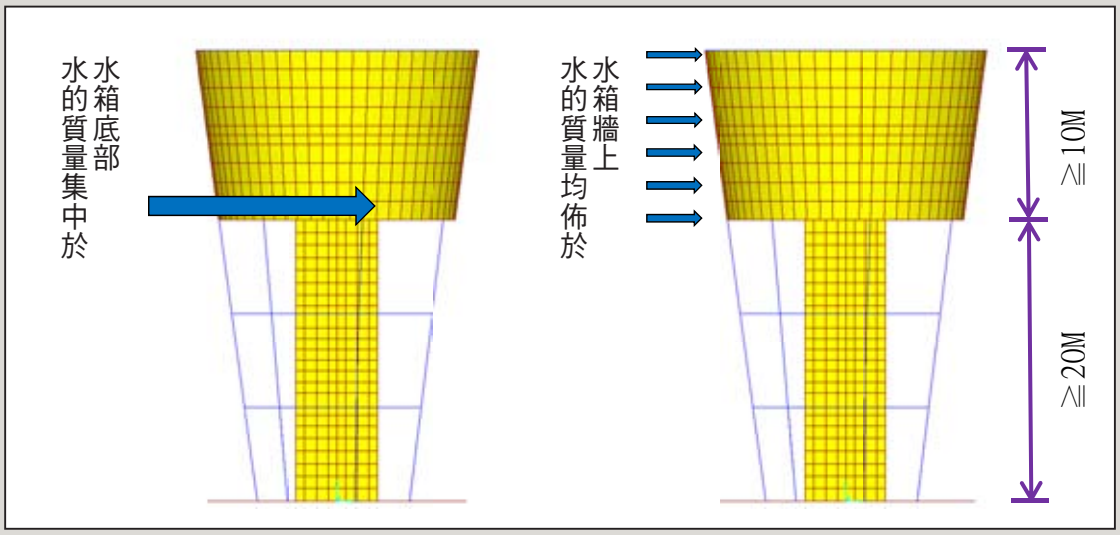


圖16 動力分析時儲水質量佈設方式

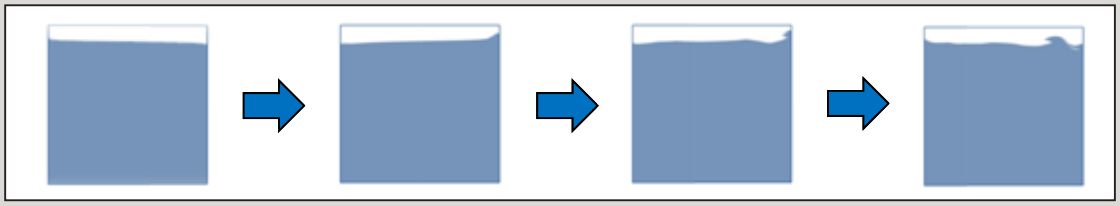


圖17 數值模擬水塔受地震時之水潑濺行為

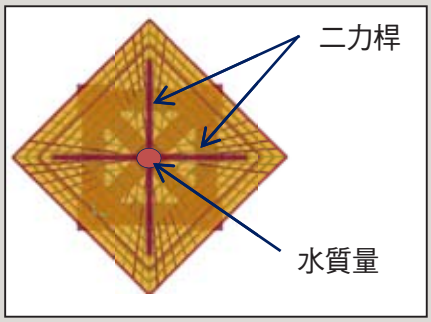


圖18 模擬分析模型

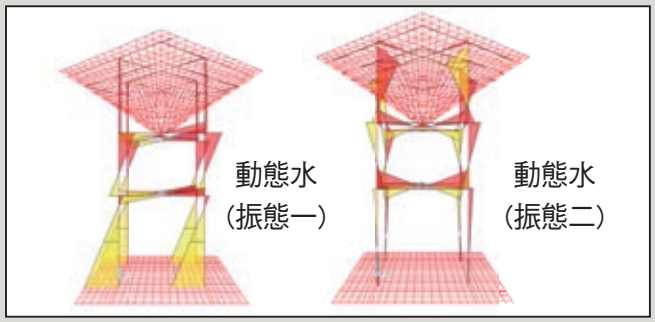


圖19 動態水壓對支撐桿件產生的力矩

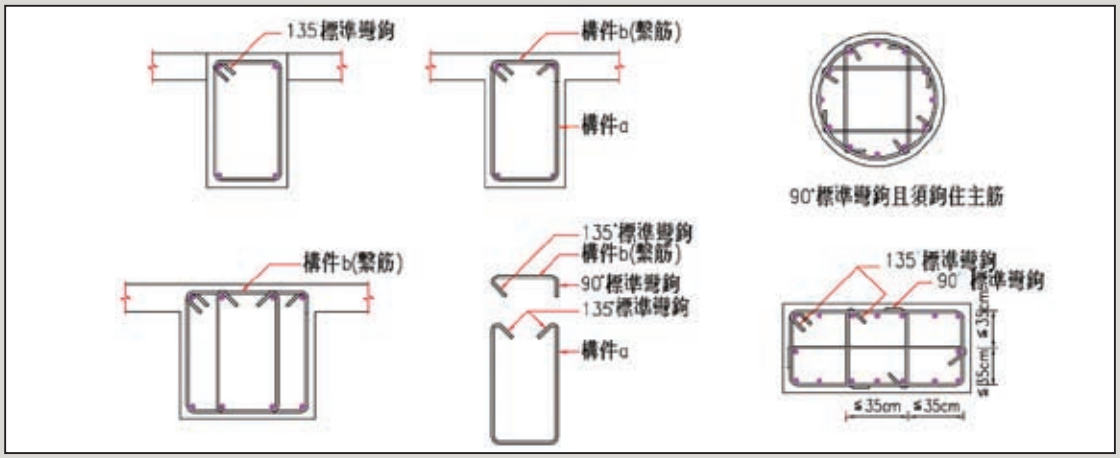


圖20 混凝土結構規範規定之梁柱韌性箍筋

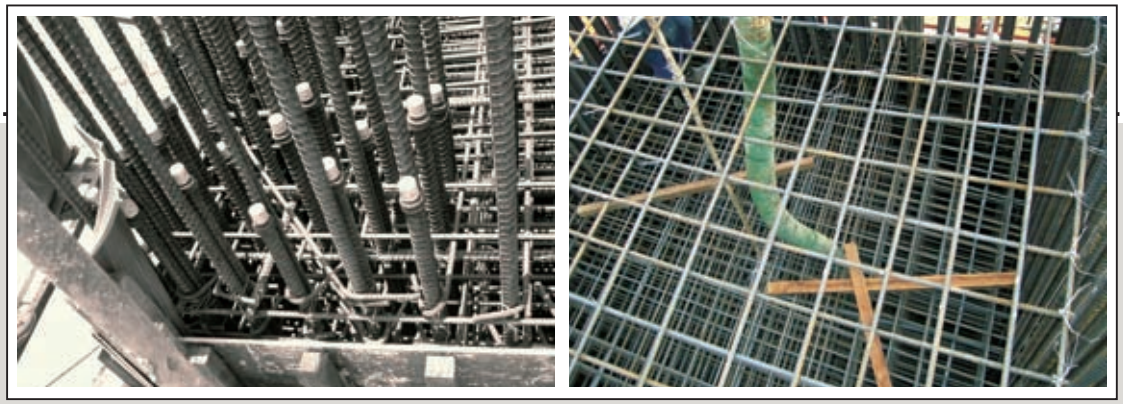


圖21 柱主筋續接及箍筋繫筋綁紮

圖22 梁柱接頭配筋及箍筋繫筋綁紮

仍須符合規範對桿件韌性設計的要求。例如混凝土柱、梁主筋量的限制與韌性箍筋的配置、間距等，詳圖20、圖21、圖22。

由於高架水塔結構的特性加上韌性配筋要求，常使得梁、柱配筋量相當多，因此在設計上需特別注意鋼筋間距，除了在CAD配筋圖做檢核外，當下則可藉由如REVIT、TEKLA等軟體協助，此類軟體可於混凝土桿件內加繪鋼筋，依所設定之保護層、鋼筋號數、長度、彎勾型式等資料，繪製3D配筋圖供接頭配筋檢核，如圖23所示，以避免施工時因鋼筋過密導致難以灌漿而延誤工期。

水塔最重要為蓄水功能，應避免混凝土造之水箱壁體產生龜裂而滲水，以增加水塔的耐久性及美觀，依混凝土設計規範對於控制混凝土裂紋及透水性有相當多規定及說明，例如配置最小鋼筋量與乾縮及溫度鋼筋量、鋼筋間距限制、鋼筋最小保護層規定、低透水性混凝土要求、配置多支鋼筋較同面積之一、二支大號鋼筋有較佳的裂紋控制等，另外也提及裂紋的寬度與鋼筋的應力成正比，因此採低鋼筋應力設計可達限制受撓裂紋之目的。由於設計規範對於混凝土裂縫寬度並無規定，設計時可參考文獻[13]、文獻[14]中各國對混凝土裂縫容許要求做為設計依據。

參、結語

國內大型高架水塔之設計例，不論數量或是特殊造型都以本公司為最多，本文就歷年來設計完成之工程案例，提出高架水塔結構規劃設計經驗供先進們參考，以避免水塔規劃之初採一般建築物設計方式進行，導致細設時的大幅修正；另於設計階段就耐震規範及歷次委託審查經驗，歸納其注意重點，做為後續設計者參考，以降低作業人力與時間並增加工作效能；最後就設計規範需求及施工性考量亦加以綜整，以期避免施工階段過多的變更設計。由於水塔內儲水與結構體之間互制行為，使得其

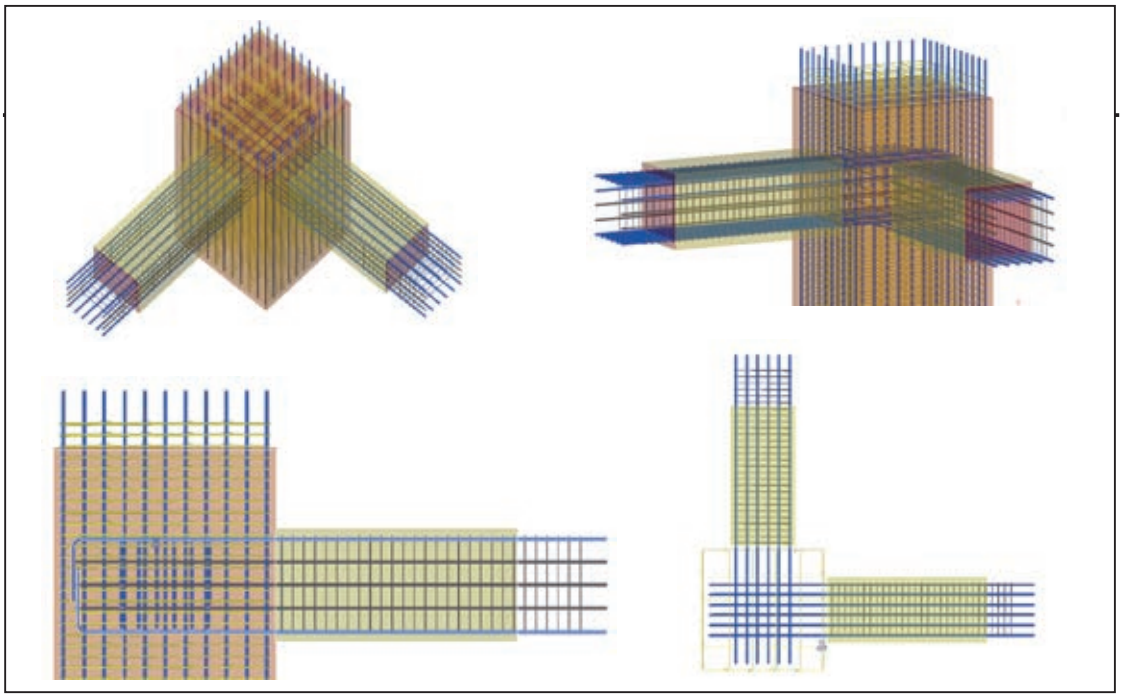


圖23 TEKLA軟體梁柱接頭鋼筋配置

應力行為相當複雜，在分析設計上仍有相當多研究的空間，後續則有待先進們進一步的研究與探討。

參考文獻

1. 最新建築技術規則 (最新版)
2. 建築物耐震設計規範及解說，民國100年。
3. 建築物耐風設計規範及解說，民國96年。
4. 混凝土結構設計規範，民國100年。
5. 鋼構造建築物鋼結構設計技術規範，民國99年。
6. 建築物基礎構造設計規範，民國90年。
7. 結構混凝土施工規範，民國92年。
8. 高架水塔受地震影響時水之震動行為， 財團法人中華顧問工程司， 民國93年。
9. 建築結構系統，鄭茂川編著，科技圖書股份有限公司，2006年9月。
10. 特殊造型構造物之數位化處理，中華技術第74期，2007年4月。
11. Housner, G., “The Dynamic Behavior of Water Tanks”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53, 1963, pp. 381-387.
12. Housner, G., “The Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 47, 1957, pp. 15-35.
13. 混凝土裂縫修補材料之研究－環氧樹脂及聚甲基丙烯酸系樹脂，朝陽科技大學，碩士論文，中華民國91年7月。
14. 鋼筋混凝土構造物防蝕技術與應用研討會論文集，交通部運輸研究所，民國91年8月。