不規則非建築結構物設計探討—以南科南入口意象工程為例

關鍵詞：鋼結構、風力、結構設計

台灣世曦工程顧問股份有限公司／建築部／正工程師／陳永儒 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

對於造型特殊結構體之分析、設計，因國內規範條文尚無法完全涵蓋，故在設計時必須依據規範之精神及參考國外相關規範，思考可執行之對策。本文以台灣台南科學園區之扭曲斜拱景觀結構體為例，探討其結構設計時之考量重點，包括在符合建築師外型創意下，如何選擇可行之結構系統、結構分析3D模型座標如何定義與建立、與自由曲面風力之加載方式、鋼管接頭在考量施工實務上如何設計及接頭之應力檢核等做一介紹，希望對從事相關設計者有所助益。

壹、簡介

本結構體位於台南科學園區南側入口處，迎曦湖旁的大型鋼構造藝術『舞彩迎賓』，其景觀建築係取彩帶飄揚之意象，包括三段曲折斜拱，蜿蜒於地面並高低起伏於空中，彩帶下方為人行親水步道、水池和腳踏車道交錯，穿梭於蜿蜒的斜拱下。

結構體平面投影長度約397公尺，曲線長度達450公尺，概分為三跨，每跨長約110至120公尺，高度最高達30公尺(圖1)，剖面單元由五角形斷面所構成，最寬處12公尺，主構架採鋼結構設計，彩帶頂部面材採用沖孔鋁板，上方不可行人，彩帶結構以桁架系統規劃，利用圓形鋼管剛接而成，承受結構體自重、地震力與風力，結構體因為自重輕，故引致之地震力相對於風力而言較小，屬於風控制結構物。

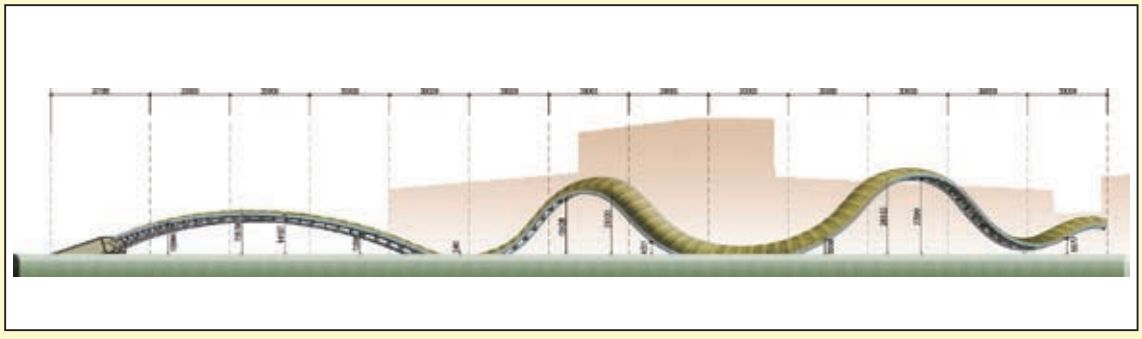

圖1『舞彩迎賓』展開圖

貳、結構系統規劃

由於構造物模擬彩帶意象，呈現不規則之扭曲，故結構體存在極大的偏心與扭曲，可行的結構系統初期嘗試採單一管狀結構，其抗扭、抗彎性皆佳，經試算尺寸約需直徑2.2公尺之圓管可符合需求(圖2)，但此系統無法滿足建築造型上，橫斷面要如彩帶般細薄之需求，若採單一橢圓管雖可以適度控制斷面深度，但是在扭曲處橢圓斷面亦須配合旋轉，在加工製造上將產生極大困難。

建築另一需求則是視覺穿透性，以展現出輕盈之感覺，上述二種管狀結構從側面皆不能貫穿通視，無法滿足建築創意。以如此複雜多變的造型，經評估結構採用空間桁架系統應是最佳選擇，除可達到建築穿透之感覺又可符合結構需求。至於桁架之接頭可採用球狀接頭或以電銲剛接，在考量桿件分布、接頭應力、變位控制以及避免採用專利空間桁架接頭，且亦能符合建築造型後，決定採用銲接之剛性接合。

採用空間桁架之結構系統，可將結構體沿縱方向切出標準橫斷面單元，每個橫斷面間再以縱向桿及斜桿連結，由標準橫斷面之規劃再考量橫向穩定及與縱向桿件接合關係，最後決定採用五角形斷面，並於單元內設置斜桿增加穩定性(圖3)。

縱向系統上，可採用剛接之華倫式(Vierendeel truss)桁架系統或是派翠式(Pratt truss)桁架系統(圖4)，因支承間跨度大，若採用華倫式桁架將加大上下弦材之尺寸，且桿件接合處以彎矩及扭力為主，將增加圓管接頭設

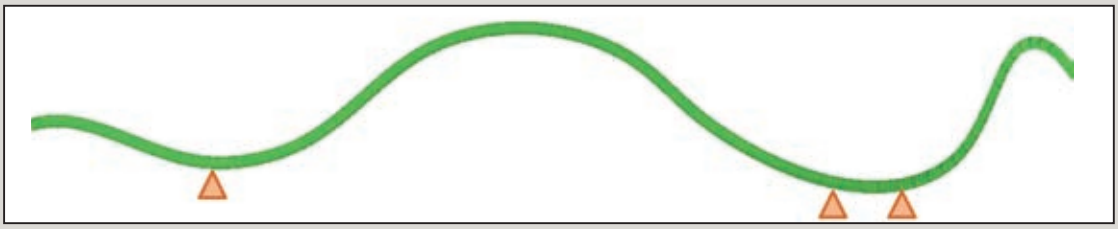

圖2 彩帶初期規劃結構分析模型

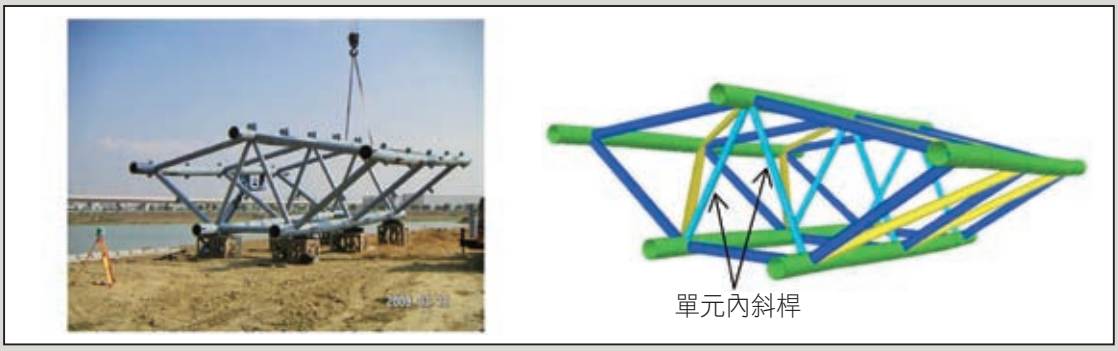

圖3 標準橫斷面施工相片與分析模型

圖4 華倫式(Vierendeel truss)桁架系統與派翠式(Pratt truss)桁架系統示意圖

計之困難，經評估後採用較有效率之派翠式桁架，雖然多了斜向桿件之存在(圖5)，但受力行為可轉變成以桿件軸力為主，應力較單純明確，有利於接頭設計。

參、分析模型建置

在建築師與業主選定外型方案後，即遭遇如何將建築模型檔案(Google SketchUp)轉換為結構分析模型之問題，因在建築規劃階段重點在整體意象之表現，建築模型中僅著重於形狀與量體，並無結構分析軟體所需要之細部節點座標資訊，故結構分析前需先將整座彩帶進行外型微調，調整到結構分析建模之節點可順利執行定位之形狀，此順利執行係指曲線表面(曲率)之順暢，將一些有不連續現象或是不順暢之曲率加以修正(圖6)，整組彩帶利用三條曲線控制，調整三條曲線之位置關係就可以控制整組結構體於空間之彎曲及扭轉，曲線定位後再節點化(本案約以1.2m為分割單元)，最後轉出至AUTOCAD檔案，結構再據此建立分析模型，每個橫斷面均為五角形，由5個節點組成，利用表面已知的3個節點座標，再配合斷面所需之深度，即可計算另外2個節點座標，如此可完成整體分析模型建置。

肆、外力系統

一、地震力

設計地震力，依據內政部民國94年修正之「建築物耐震設計規範及解說」計算，因結構體與一般房屋建築不同，又屬於不規則性結構體，無法依規範規定，以簡化倒三角形分布方式輸入地震力，故採用動力分析方法中的反應譜分析計算，反應譜分析相關參數包括動力分析調整係數$I/(1.4\alpha_y)$與韌性折減加速度反應譜係數$(S_{aD}/F_u)_m$，其中用途係數I與起始降伏地震力放大倍數α_y均為1.0，設計水平加速度反應譜係數S_{aD}與工址所在位置有關，結構系統地震力折減係數F_u與結構系統韌性容量R相關，因結構體形狀特殊，韌性容量無法從規範或試驗獲得，故保守的以R＝1求取最大地震力與桿件應力，惟經與風力比較，結構體所受地震之影響仍小於受風力之影響。

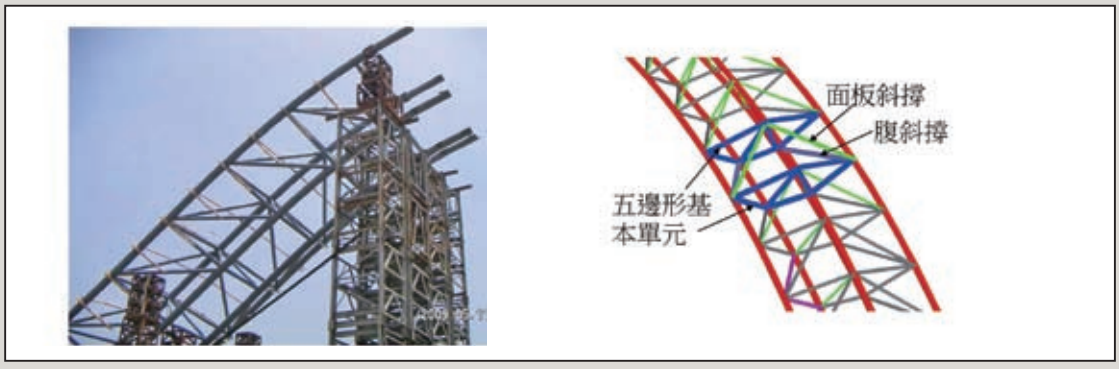

圖5 標準縱斷面施工相片與分析模型

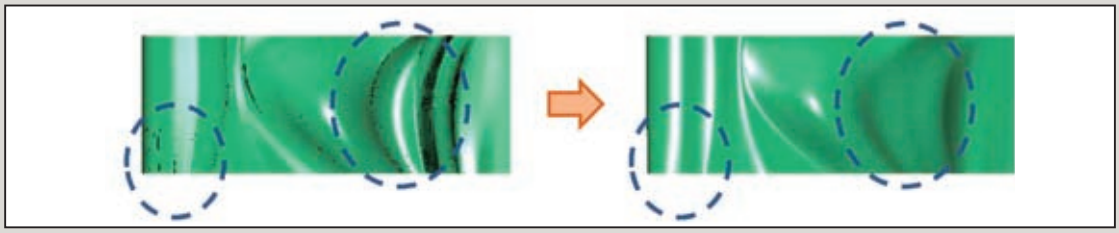

圖6 曲面表面順暢調整前、後示意圖

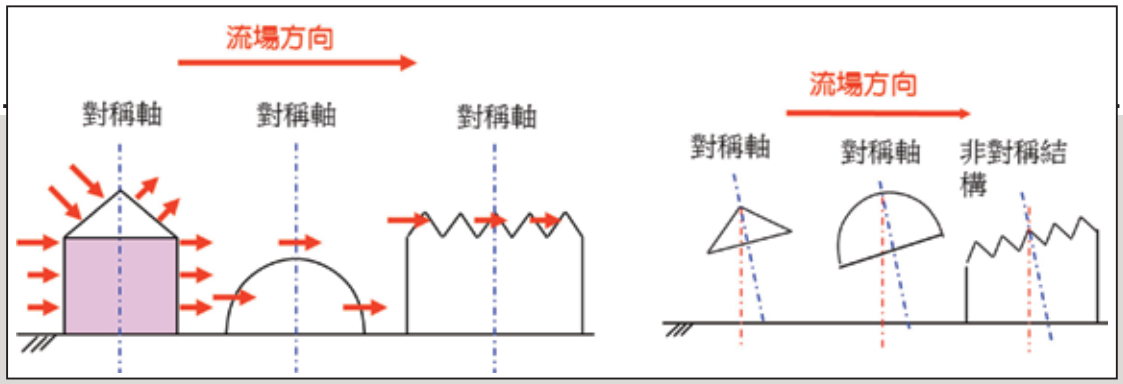

圖7 垂直對稱與非垂直對稱建築物示意圖

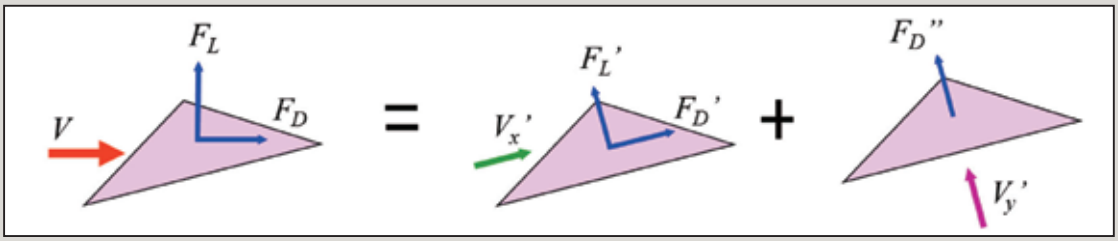

圖8 整體座標系統的流場拆解成局部座標系統的兩分量組合示意圖

二、風力

風力則依據內政部民國95年頒布之「建築物耐風設計規範及解說」進行計算，規範提供開放式建築物的設計風力F公式為：

$$F = q(z)\, GC_f\, A_f$$

其中，F：開放式建築物所受的設計風力

q(z)：離地面z公尺高的風速壓

G：普通建築物的陣風反應因子

C_f：計算開放式建築物所受風力所用的風力係數

A_f：開放式建築物構件投影在與風向垂直之平面上之面積

上式中，風速壓q(z)需依不同地況與高度而訂，可由結構物所在之地理位置、地況種類、用途係數與高度等因子決定。規範中將風力係數C_f依據不同外形將其簡化為單一值，可依據不同形狀與角度查表得知。由上述公式，再計算節點受風體的分攤投影面積，即可獲得節點風力值和其方向。

耐風設計規範探討的風力或風力係數，乃在假設流場為水平方向情況下，及以垂直對稱的建物為主，對於非垂直對稱建物，或建築物對稱軸與垂直方向間具旋轉角度時，則耐風設計規範並無參考數據(圖7)。因此，對於規範中定義之形狀，但其受風角度無法直接應用者，例如本案，則需透過向量分解的方法，將整體座標系統下的流場分解成局部系統中平行和垂直座標系統(符合規範的座標系統)，在局部座標中平行建物流場的分量可套用規範公式獲得風昇力(垂直流場)和拖曳力(平行流場)，局部座標中，垂直流場的分量則視為風昇力或風壓力(圖8)。

分析時，風向以水平每30度輸入一次，計12組，垂直向自-30度至+30度每30度輸入一次，計3組，組合後風力共計36組；彩帶彎曲之表面簡化為2個平面，風力再依入射方向與此2平面之夾角將風力分解成側向力與上升力輸入計算。

伍、設計結果

一、結構材料

本案結構採用SAP2000有限元素分析軟體進行分析計算，材料選擇如下：

混凝土fc'≧280 kg/cm²；

鋼筋採竹節鋼筋，

D≦16ψ，fy≧2800 kg/cm²

D≧19ψ，fy≧4200 kg/cm²

主結構鋼管和連接鋼板的鋼材，最小降伏強度fy≧3500 kg/cm²

二、桿件斷面

桿件尺寸採用直徑為16、20、26、30、40、50、60和65公分圓管，管厚由6mm至22mm 不等，其中40公分(含)以上圓管設置於軸向主桿件，標準五角形橫桿則由26 及30 公分圓管組成，其他小尺寸桿件則為斜桿(圖9)。

三、接頭設計

一般管徑小於80公分之圓管在接合處無法像H型鋼接頭般可設置加勁板以傳遞力量，需藉由圓管表面鋼材之面外彎矩及剪力行為來傳遞及轉換力量，應力行為複雜，因國內目前尚無圓管接合設計之規範，蒐集國外資料得知日本、美國及歐洲等皆有針對圓管設計提出相關之規範，規範主要依實體試驗結果與有限元素法模擬後訂出計算與檢核規定，故本案依據美國規範進行設計檢討(表1至表3)。本案結構體圓管接合型式及角度複雜，包括K型、T型與X型接頭均有(圖10)，因圓管接頭可承受應力較低，所以桿件之主要應力常無法如一般箱形或H型桿件，應力比可以達上限1.0，故需進行雙重檢核，以使桿件本身及接合部位皆符合規範規定。

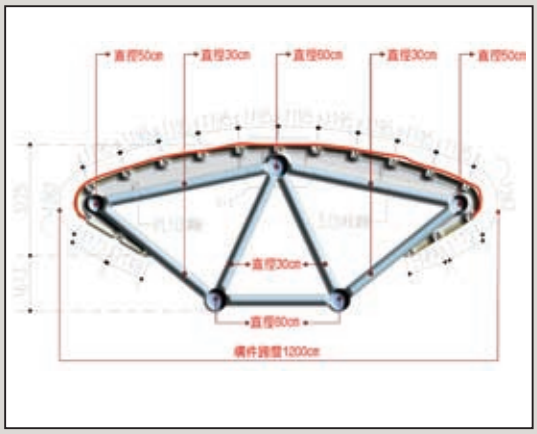

圖9 桿件設計斷面

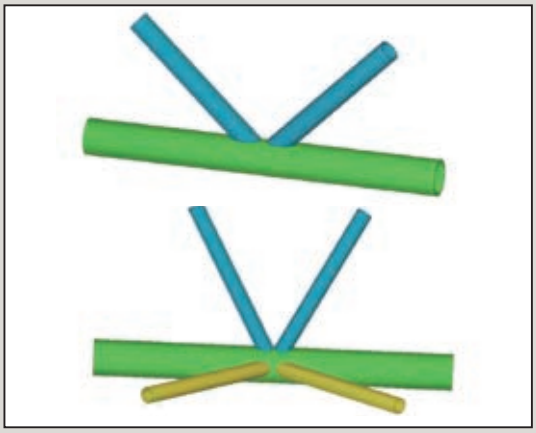

圖10 K型與X型接頭示意圖

表1 支管標稱軸力計算公式

計算項目	計算公式
Chord wall plastification	$P_n \sin\theta = t^2 F_y [6\pi\beta Q_q] Q_f$
Punching shear rupture	$P_n \sin\theta = \pi D_b t (0.6F_y)$
General collapse	$P_n \sin\theta = t^2 F_y (1.9+7.2\beta) Q_b Q_f$

表2 支管標稱彎矩計算公式

計算項目	計算公式
Chord wall plastification	$M_n \sin\theta = t^2 F_y [D_b/4][6\pi\beta Q_q] Q_f$
Punching shear rupture	$M_n \sin\theta = D_b^2 t (0.6F_y)$

表3 支管包含軸力與彎矩交互影響之檢核公式

檢核項目	檢核公式
Combined axial and flexure loads	$\left(\frac{P_u}{\varphi P_n}\right)^{1.75}+\frac{M_u}{\varphi M_n}\le 1.0$

彩帶結構採用類似樹枝分岔狀之V型桿件支撐(圖11)，V型桿件的上端接至縱向主桿件，以增加與主結構連結之固定度，V型桿件的下端連結至同一基座，可減少總基座之數量。

前述V型桿件上端與縱向桿件連接處屬於X型節點，因為該處連接桿件多，應力行為複雜且需要較大之接頭勁度，故規劃該處採鑄造方式製造以符合設計需求，此連接段管壁厚度為30mm(圖12)，前後端再以厚度漸變段與縱向圓管銲接接合，因為採鑄造之緣故，可於管內部設置一道15mm厚之加勁板以增強管壁勁度避免挫曲，故相連支管可直接與連接段之管壁銲接連結，也使得該處外型尺寸可與鄰近桿件保持一致。

圖11 V型桿件與基座施工相片

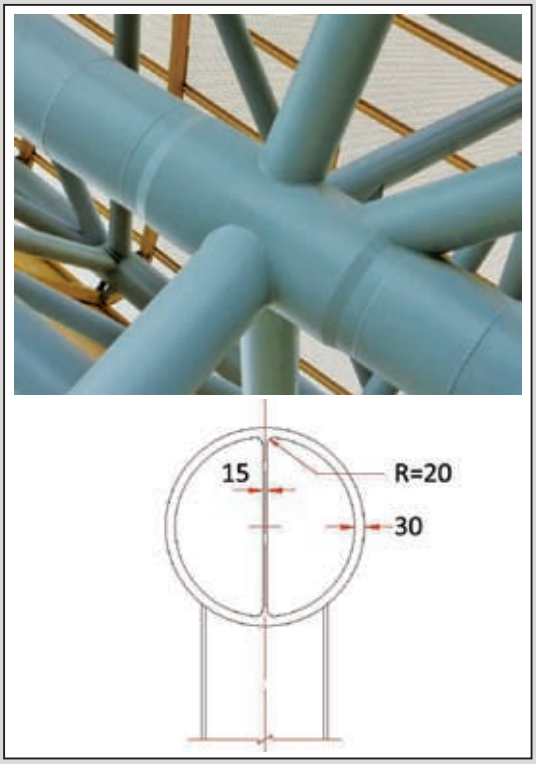

圖12 鑄造段鋼管現況相片與剖面設計圖

四、基座設計

V型桿件下端先連結至鋼底座，再以預埋之基礎螺栓與鋼筋混凝土基座連結，除V型桿件以鋼基座方式連結至基礎外，部分直接落地之縱向主構架圓鋼管亦以類似方式連結(圖13)，此處接頭均藉由連接板方式傳遞力量，連接板先穿過圓鋼管銲接固定，再銲接至鋼基座上，對於承受軸壓力或軸拉力之圓管與連接板交接處，連接板採漸縮方式與管壁接合以避免產生應力集中現象。

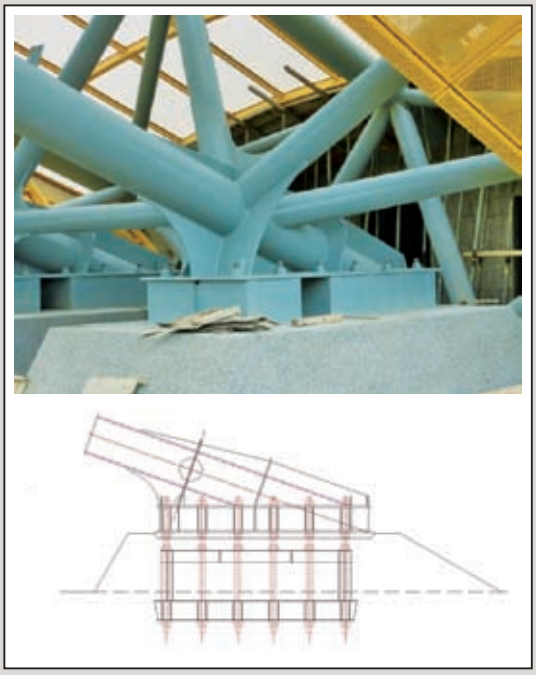

圖13 鋼基座施工相片與剖面設計圖

五、基礎設計

彩帶結構因為形狀特殊且具偏心扭轉現象，部分基座有拉拔力出現，對策為將附近承壓之基座以1.6公尺厚之樁帽連結，並擴大樁帽面積以增加自重，使減少樁帽下方基樁之拉拔力；其餘承壓型基座，樁帽中心與基座中心重疊，並設置基樁提供承載力。

工址土層主要以黏土層為主，設計時依據鑽探資料與鄰近高架水塔之樁載重試驗資料，採用直徑100公分之全套管基樁，樁長30公尺(圖14)，基樁主要承載力係由樁身側面摩擦力來提供，基樁底部僅提供局部承載力，施工時之樁載重試驗亦獲得近似結果。

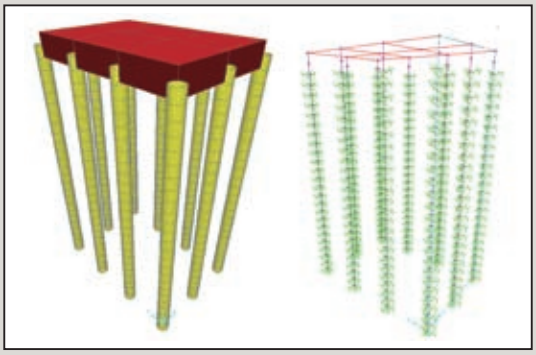

圖14 樁帽與基樁分析模型與土壤側向彈簧示意圖

陸、結語

台南科學園區之大型鋼構公共藝術『舞彩迎賓』，施工完成後配合周遭之景觀設施，如環湖步道、自行車道與夜間照明等，已成為熱門之休閒景點，除在高鐵上能清楚看見其美妙的舞姿，沿快速道路交流道入科學園區時亦能見其飄逸景象。本文詳述結構體設計時所考量因素，包括系統規劃與選擇、分析模型之節點座標訂定、設計地震力與風力之計算考量及輸入方式、桿件設計與接頭檢核細節及基礎分析等，希望能對其他從事類似不規則構造物設計人員有所助益。

參考文獻

1. 內政部營建署(2006)，「建築物耐震設計規範及解說」，民國九十五年，台北。
2. 內政部營建署(2007)，「建築物耐風設計規範及解說」，民國九十六年，台北。
3. 內政部營建署（1998)，「鋼結構極限設計法規範及解說」，民國八十七年，台北。
4. 內政部營建署（2011)，「混凝土結構設計規範」，民國一百年，台北。
5. 內政部營建署（2001)，「建築物基礎構造設計規範」，民國九十年，台北。
6. 日本建築學會，「鋼管構造設計施工指針・同解說」，(2002)。
7. AISC, “Hollow Structural Sections: Connections Manual”, American Institute of steel Construction, Chicago, Illinois, USA (1997).
8. AISC, “Load and Resistance Factor Design Specification for Steel Hollow Structural Sections”, American Institute of steel Construction, Chicago, Illinois, USA (2000).
9. ANSI/AWS “D1.1/D1.1M-96 1996 STRUCTURAL WELDING CODE-STEEL”, American Welding Society, Miami, Florida, USA (1996).
10. Zhao, Xiao-Ling, Wilkinson, Tim, & Hancock, Gregory “Cold-formed tubular members and connections: Structural behavior and design”, Oxford: Elsevier, (2005).