

出國報告（出國類別：實習）

## 研習輸電線路鐵塔結構系統之耐震技術

服務機關：台灣電力公司台北供電區營運處

姓名：賴盈如

職稱：管路設計專員

派赴國家：日本

出國期間：104年11月5日至104年11月11日

報告日期：105年1月8日



# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：研習輸電線路鐵塔結構系統之耐震技術

頁數\_29\_含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

賴盈如/台灣電力公司/台北供電區營運處/

管路設計專員/(02)2367-5969 分機 6710

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他：\_\_\_\_\_

出國期間：104/11/5~104/11/11 出國地區：日本

報告日期：105/1/8

分類號/目：

關鍵詞：耐震設計 Seismic design

輸電鐵塔基礎 Transmission tower foundation

日本鐵塔耐震設計 Tower seismic design of Japan

鹿島技術研究所 Kajima technical research institute

SUNTEC 株式會社 Sanyo engineering & construction Inc.

內容摘要：(二百至三百字)

因應近年來地球極端氣候異常，輸電線路鐵塔結構之耐震分析是相當重要的課題，重新檢視鐵塔強度及目前設計準則下仍可承受強度餘裕，以確保供電無虞。目前僅「架空輸電線路設計準則」規定基礎設計時，應作非颱風時承受水平地表加速度 0.33G、垂直地表加速度 0.22G 之耐震檢討，尚無明確鐵塔結構耐震設計規定供參，更突顯結構系統控制之重要。

本次出國主要規劃赴日本鹿島技術研究所及 SUNTEC 株式會社參訪。首先前往鹿島技術研究所西調布實驗場參觀，並與研究人員研習日本輸電設備耐震設計與地下管路深挖調查及施工技術。接著觀摩 SUNTEC 株式會社施工中之東京電力明野太陽光發電所連繫鐵塔工事，再由曾任職於東京電力公司之 SUNTEC 電力事業部部長說明目前日本輸電線路鐵塔基礎耐震設計及分析。希望藉由此次前往日本實習的報告內容，提供公司輸電設計維護之參考。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

# 目 錄

	頁次
行政院及所屬各機關出國報告提要-----	2
目錄-----	4
壹 出國目的與行程-----	5
一 實習行程-----	5
二 實習緣由及目的-----	5
貳 本公司供電系統鐵塔基礎設計概述-----	6
一 前言-----	6
二 分析程式簡介-----	6
參 鹿島技術研究所研習內容-----	8
一 鹿島技術研究所簡介-----	8
二 鹿島技術研究所西調布實驗場-----	9
三 輸電設備耐震設計與地下管路深挖調查技術-----	11
肆 SUNTEC 株式會社研習內容-----	15
一 觀摩東京電力明野太陽光發電所連繫鐵塔工事-----	15
二 輸電鐵塔基礎耐震設計-----	19
三 核能電廠輸電鐵塔基礎安全評估-----	22
伍 心得與建議-----	25
陸 參考文獻-----	28

# 壹、出國目的與行程：

## 一、實習行程(104.11.5~104.11.11)

出國行程表					
成員：賴盈如 Lai Ying-Ju 管路設計專員					
日期	交通	時間	起迄地點	拜訪單位	住宿
11月5日	班機 BR192(長榮)	起 07:30 達 11:15	台北~東京	(去程)	東京
11月 6-7日	火車、計程車			鹿島技術研究所	東京
11月8日	地鐵、火車		東京~山梨縣		山梨縣
11月9日	地鐵、火車		山梨縣~東京	SUNTEC 株式會社 施工中鐵塔工事	東京
11月10日	地鐵			SUNTEC 株式會社	東京
11月11日	班機 BR197(長榮)	起 14:00 達 17:05	東京~台北	(回程)	

## 二、實習緣由及目的:

因應近年來地球極端氣候異常，輸電線路鐵塔結構之耐震分析是相當重要的課題，重新檢視鐵塔強度及目前設計準則下仍可承受強度餘裕，以確保供電無虞。目前僅「架空輸電線路設計準則」規定基礎設計時，應作非颱風時承受水平地表加速度 0.33G、垂直地表加速度 0.22G 之耐震檢討，尚無明確鐵塔結構耐震設計規定供參，更突顯結構系統控制之重要

本次出國主要規劃赴日本鹿島技術研究所及 SUNTEC 株式會社參訪。首先前往鹿島技術研究所西調布實驗場參觀，並與研究人員研習日本輸電設備耐震設計與地下管路深挖調查及施工技術。接著觀摩 SUNTEC 株式會社施工中之東京電力明野太陽光發電所連繫鐵塔工事，再由曾任職於東京電力公司之 SUNTEC 株式會社電力事業部小宮山部長說明目前日本輸電線路鐵塔基礎耐震設計及分析；以及新能源事業部宮本工事

部長介紹鐵塔損壞案例。希望藉由此次前往日本實習的報告內容，提供公司輸電設計維護之參考。

## 貳、本公司供電系統鐵塔基礎設計概述

### 一、前言

目前本公司供電系統土木人員，可利用本公司供電處開發之 FOUND 塔基設計程式及套裝軟體 MIDAS/Gen、Set，進行鐵塔基礎與配筋的設計。因 FOUND 程式撰寫時係以颱風負載大於地震考量，故程式並無檢討地震力。然依據「架空輸電線路設計準則」4.4.5.4：基礎設計時，應作非颱風時承受水平地表加速度 0.33G、垂直地表加速度 0.22G 之耐震檢討。有鑑於此，為防止塔基加高造成地震負載超過颱風情況，供電處亦要求 FOUND 程式使用者應自行檢討地震力。另一方面，套裝軟體 MIDAS 在設計載重時，則是直接輸入地震力即可。

### 二、分析程式簡介

供電處針對供電系統常用之鐵塔基礎型式開發 FOUND 程式（選單如圖 1）。為便於同仁使用，僅需輸入設計參數及塔基尺寸（圖 2）。分析結果亦完整列出基礎各部分之配筋，尤其有大樑之基礎，分析結果會標明通過主腳材頂層主鋼筋切斷後之最少支數（分析結果如圖 3、4）。

雖然使用 MIDAS 軟體建立結構模型較耗時，除了外加载重的輸入，尚需給定邊界條件及地盤反力，但其圖形化輸出可隨時檢查輸入是否有誤，井筒之配筋結果較 FOUND 經濟，至於大樑及小柱的配筋量，則約略相等。

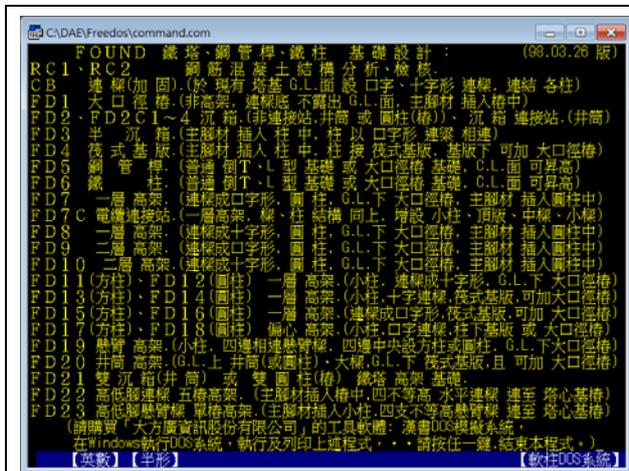


圖1、FOUND程式選單

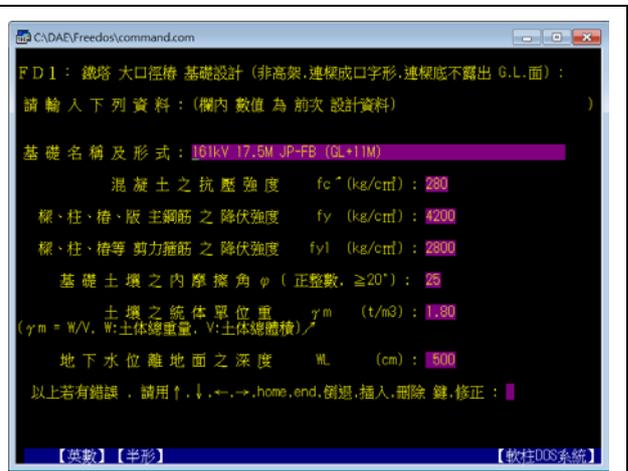


圖2、FOUND程式輸入頁面

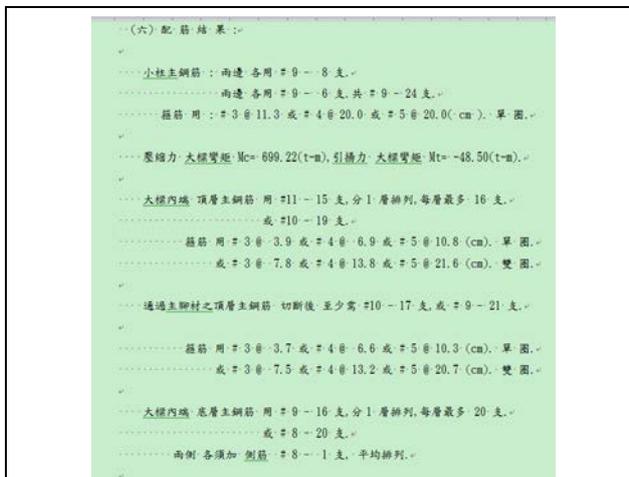


圖3、FOUND程式分析配筋結果

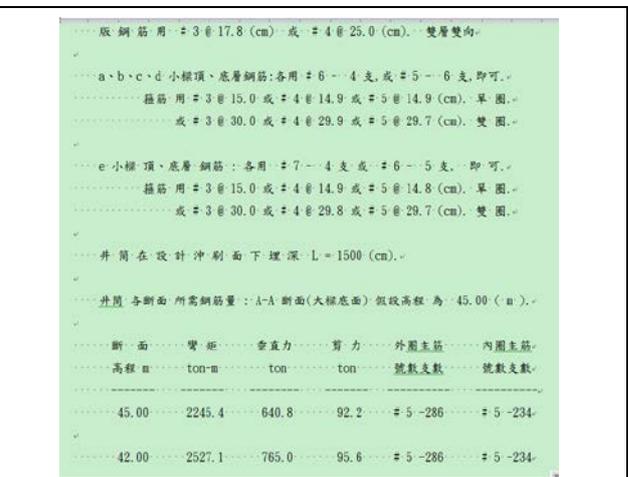


圖4、FOUND程式分析樁深

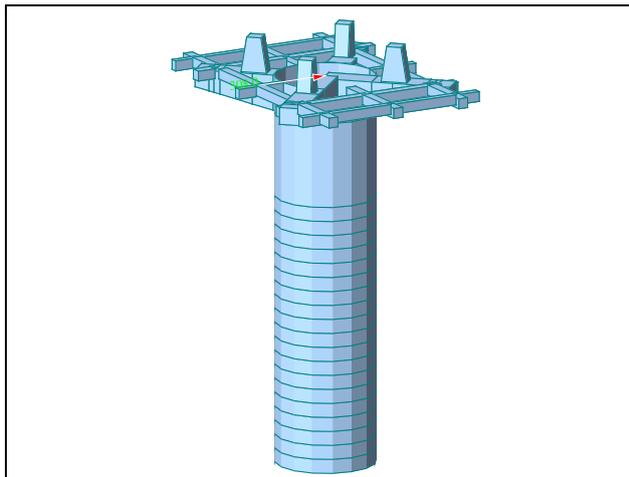


圖5、MIDAS分析模型及地震力輸入

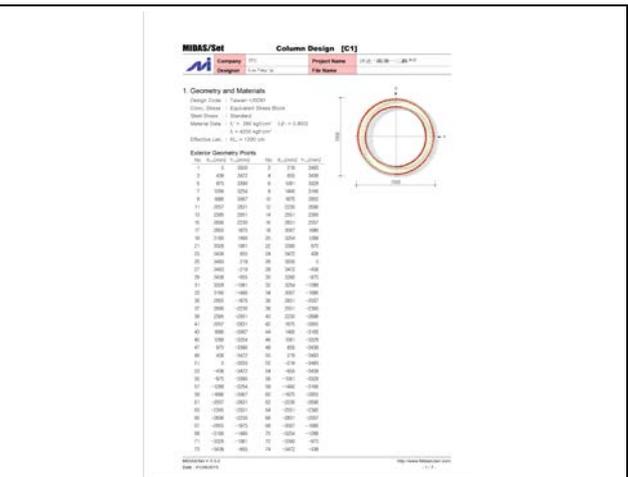


圖6、MIDAS/Set井筒配筋

# 參、鹿島技術研究所研習內容

## 一、鹿島技術研究所簡介

鹿島技術研究於1949年在東京都中央區創立，並於1956年遷移至現址東京都調布市，其主要任務為研究開發、技術協力及教育普及。相關設施有：本館、西調布實驗場、葉山水域環境實驗場、檢見川綠化實驗場與新加坡分所。目前正致力發展最具代表的4個方向：土木、建築、防災與環境。土木包含了橋樑、海岸構造物、水壩、土壩、隧道及都市土木工程。建築則著重在辦公室、商業設施、住宅、文化設施、工廠、醫院及實驗室。防災含括地震、海嘯、風災、水災、火災等之災害預防。環境涵蓋生物多樣性保存、綠化、環境保護、污染淨化、新能源及永續工程。

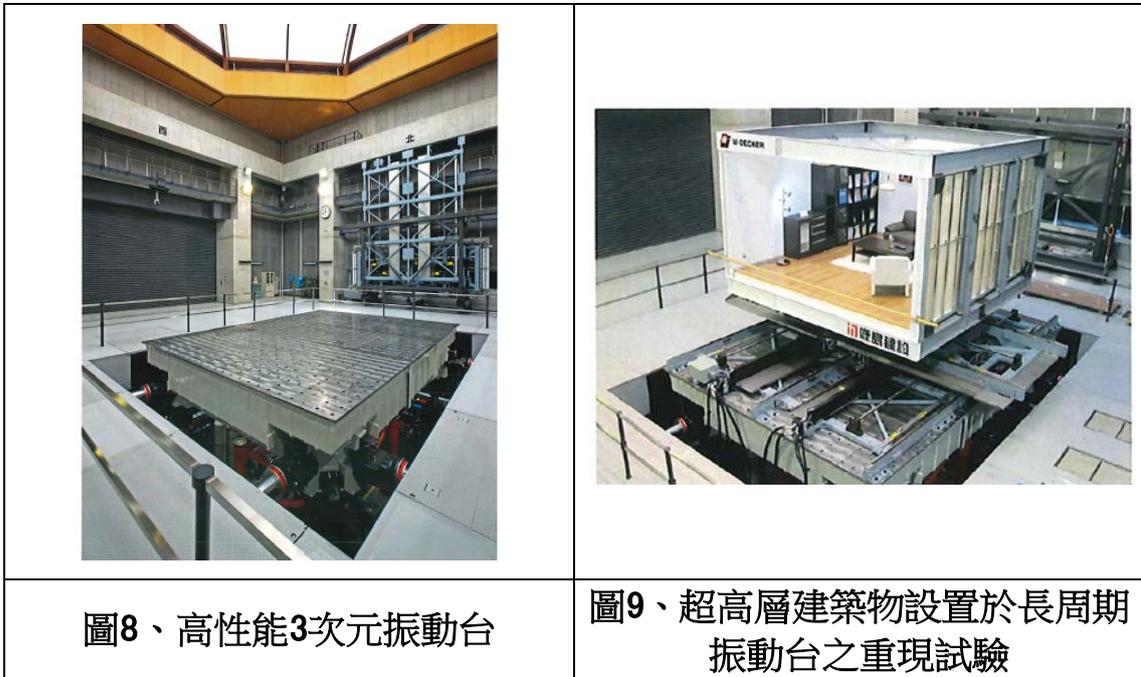
<p><b>本館 Main Complex</b> 東京都調布市飛田給 2-19-1 敷地面積 Site area 11,847㎡ ① 研究棟 Research and Administration Building ② 実験棟 Laboratories Building ③ 海洋・水理実験棟 Hydraulics Laboratory</p>		
<p><b>西調布実験場 Nishichofu Complex</b> 東京都調布市多摩川 1-36-1 敷地面積 Site area 21,871㎡ ④ 展示・実験棟 Exhibits and Laboratory ⑤ 振動実験棟 Shaking Table Laboratory ⑥ コンクリート・風洞実験棟 Concrete and Wind-Tunnel Laboratory ⑦ 大型構造実験棟 Large-size Structural Testing Laboratory ⑧ 土質・基礎実験棟 Soil Mechanics and Foundations Laboratory ⑨ 環境工学実験棟 Environmental Engineering Laboratory ⑩ 施工・防災実験棟 Construction and Fire Safety Laboratory ⑪ 機材棟 Equipment Storage Building</p>		
<p><b>葉山水域環境実験場 Hayama Marine Science Laboratory</b> 神奈川県三浦郡葉山町一色2400 敷地面積 Site area 955㎡</p> 	<p><b>検見川緑化実験場 Kemigawa Revegetation Experiment Site</b> 千葉県千葉市花見川区畑町485 敷地面積 Site area 29,940㎡</p> 	<p><b>シンガポールオフィス KaTRIS (KaTRI Singapore)</b> Marine Parade Road, Singapore</p> 

圖7、鹿島技術研究所相關設施圖

## 二、鹿島技術研究所西調布實驗場

本次研習主要參觀西調布實驗場之振動實驗館、大型構造實驗館以及土質基礎實驗館。

振動實驗館主要設備為高性能3次元振動台W-DECKER，5x7 m主振動台可重現地震的地表振動，而在主振動台上的2.1x2.1 m長周期振動台則可模擬大規模長時間的振動。2個振動台皆可承受2 g的加速度。除此之外，振動台的資料收集處理裝置達到256個頻道，並配置4台HD的錄影機（可擴充至8台），可快速且準確的記錄試體的行為。



大型構造實驗館內有高12m x寬16m及高5m x寬12m，厚度皆為2.1m之大小2座反力牆。無論是原子反應設施、長跨度大型橋樑、複合構造物、超高層建築或是大型土木構造物，皆可在本實驗館內實體重建，對於重要構造物在強度及安全性上的確認有很大的貢獻。

土質基礎實驗館主要之設備為遠心模型實驗裝置，其原理為藉由縮小N倍的模型，放置於 $Ng$ 之人造重力場中，瞭解實際結構物的受力變形與破壞因素。通常可應用在土壤-結構物互制作用、隧道開挖、大型填土/坡面切削、加勁土壤結構物、土壤-樁互制

作用。2011年在日本東北地震（台灣稱日本331地震）發生後，鹿島技術研究所利用此裝置，模擬土堤在東北地震下的情況，觀看影像紀錄時才發現，地震發生後短時間內，土堤即產生大規模滑動，顯見東北地震的威力。

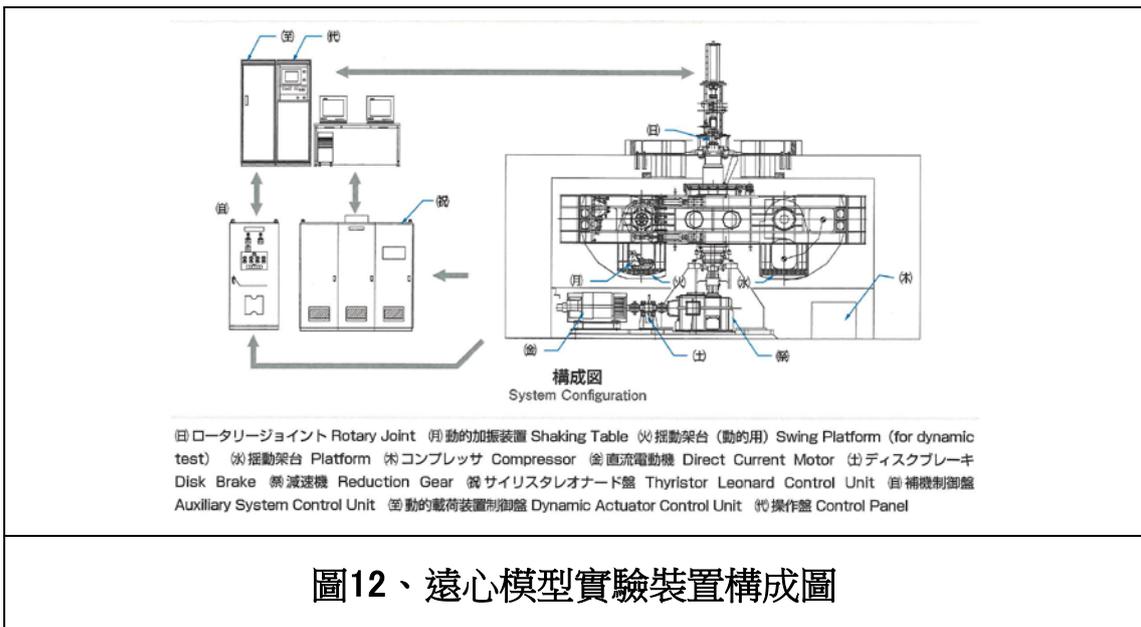
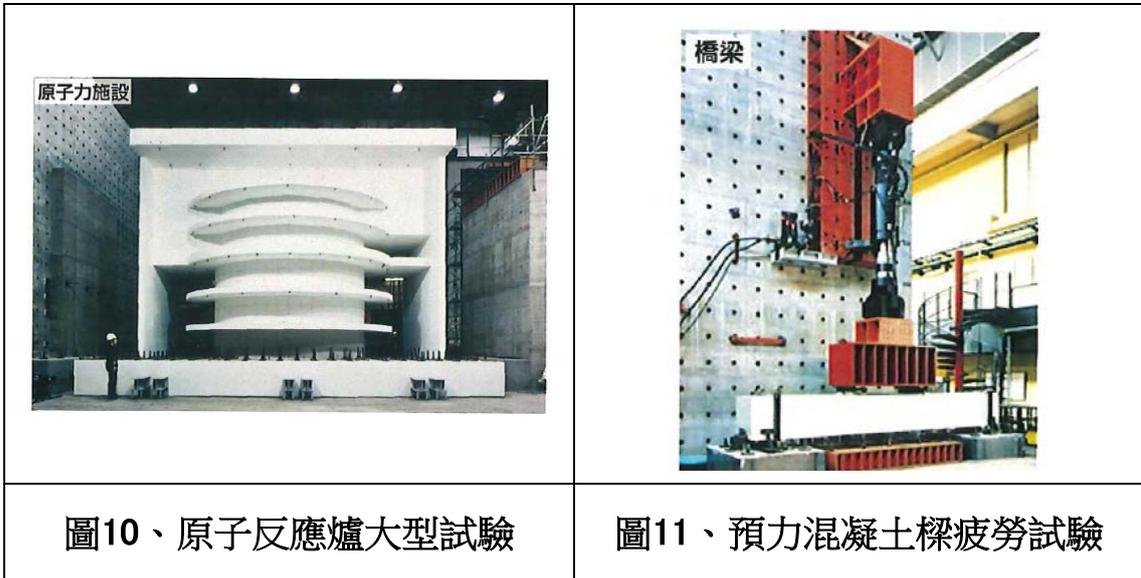
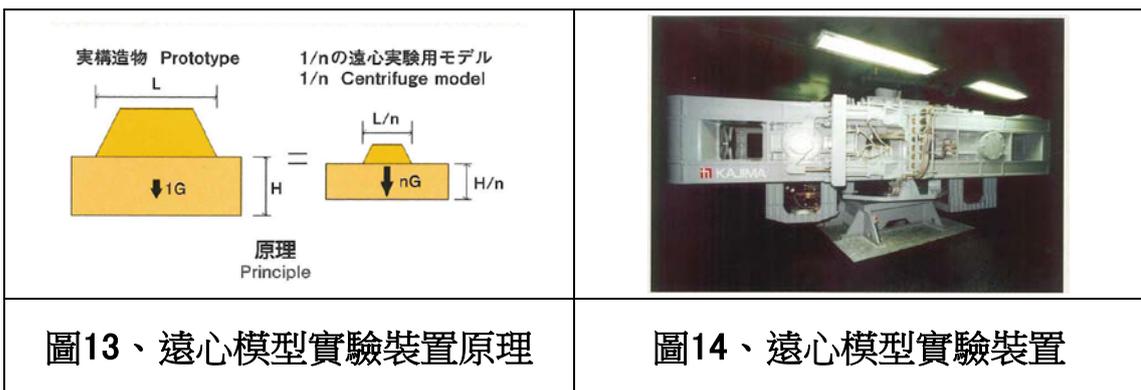
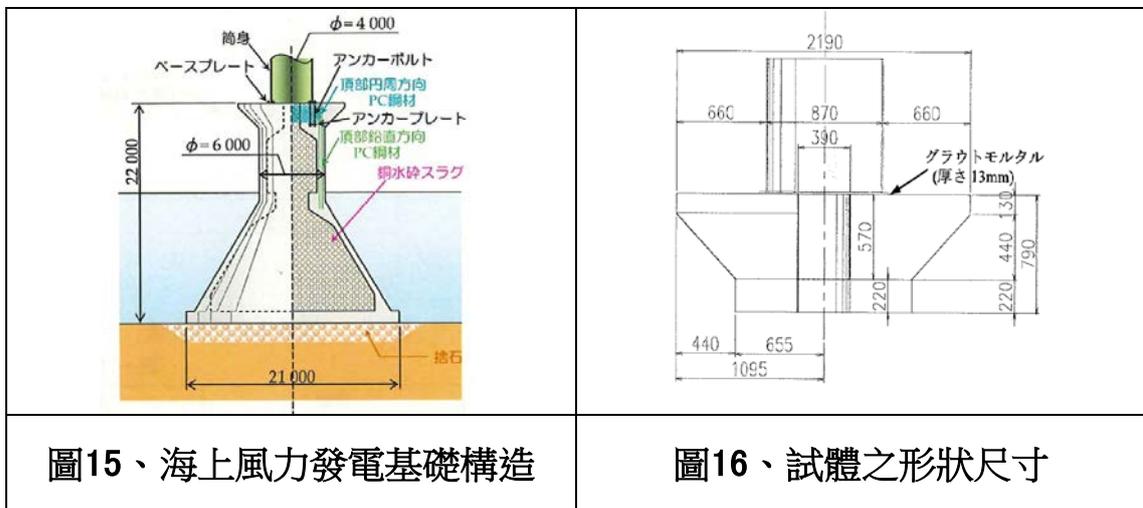


圖12、遠心模型實驗裝置構成圖

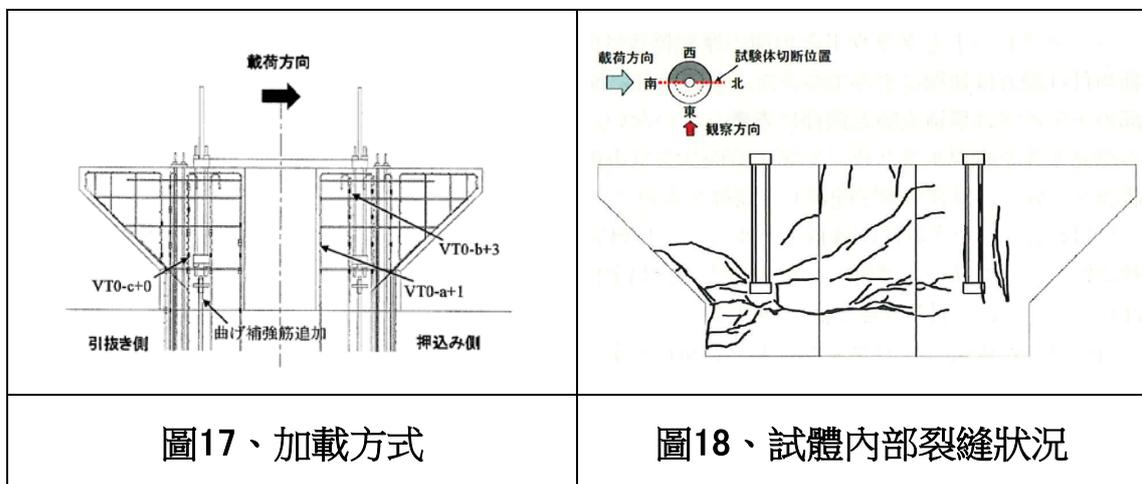


### 三、輸電設備耐震設計與地下管路深挖調查技術

在2013年1月底，第1座海上風力發電和風況觀測塔建造於千葉縣銚子近海，採重力式沉箱基礎，基礎內部為中空。由圖15所示，（風力發電）筒身和基礎接合處有錨定螺栓，基礎之橫斷面由錨定螺栓下方之錨定板附近變窄。因風力發電基礎與陸上風力發電基礎構造不同，為了確保風力發電基礎在L2地震（一般而言，Level 2地震指的是較少發生的強烈地震或是歷史上的重大地震）時之安全性，所以進行1/4.6的縮小尺寸加載實驗，再由3D非線性FEM（有限元素法）加以分析。



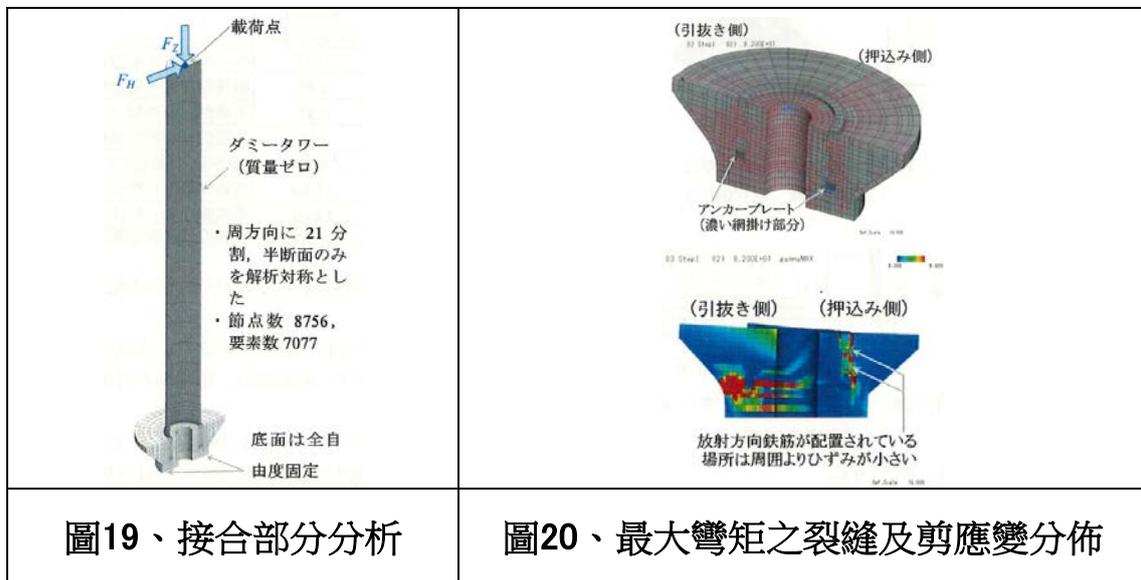
考量試體縮小尺寸，換算出L2地震作用於塔基之彎矩為1,027kN-m、剪力為128kN。試體內之鋼筋、PC鋼棒及鋼管皆埋設應變計。加載實驗結果顯示，在L2地震設計彎矩附近，確認基板的上浮現象，剛性有若干下降，另外垂直外壁也有裂縫產生。



依日本土木學會「風力發電設備支持構造設計指針・同解説(2007年版)」，安全係數為1.0時，抗拉強度為2,336kN-m，此時受拉側的抗剪鋼筋已達到降伏應變。另外，受拉側PC鋼棒也達到降伏應變，受壓側垂直外壁基礎混凝土應變達 $2,000 \times 10^{-6}$ 後，隨即有最大彎矩4,163kN-m。

由圖18試體內部裂縫狀況得知，錨定板斜向裂縫發生時，因抗剪鋼筋及垂直的PC鋼材補強，而未產生錐形破壞。在實驗中確認接合結構最大彎曲強度約為4倍L2地震作用於塔基之彎矩，也約2倍依前述風力發電設備支持構造設計指針計算錐狀斷裂的抗拉強度，因此可推斷該接合結構具有足夠的強度。

針對接合部分的結構分析是採用COM3d version 2008，以L2地震設計垂直力 $F_z$ 作用於頂部的虛擬加載點，水平力 $F_H=2700\text{kN}$ ，彎矩 $F_M=100\text{MN-m}$ ，載重依比例增加，扭矩則不考慮。

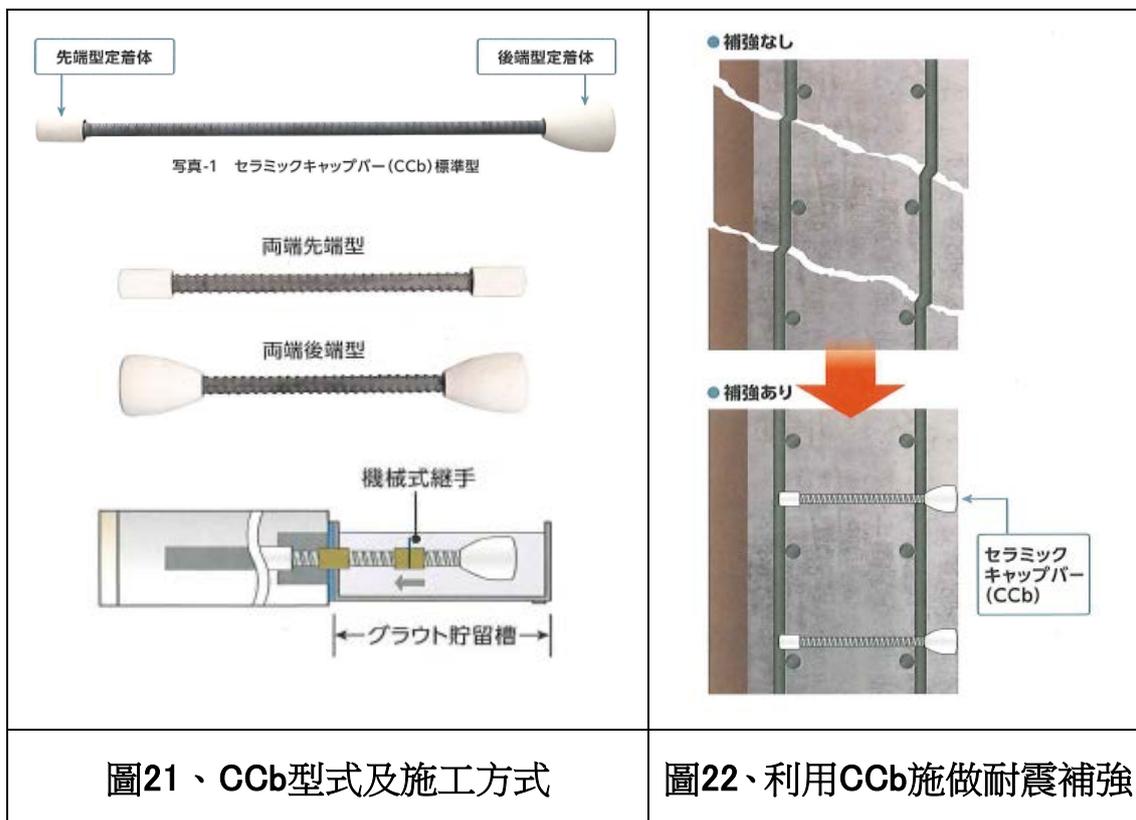


實驗值得到之最大彎矩強度為4,163kN-m，而使用分析軟體之數值為4,270kN-m。由分析結果之裂縫分佈圖，受拉側於錨定板附近為橫向裂縫，受壓側在錨定板外側產生垂直裂縫，與試驗結果一致。剪應變於受拉側從錨定板水平向內，以及朝45°方向；此外外側水平方向也有大面積的大剪應變。當彎矩增加時，中性軸移動使得受拉側最

大剪應變往井筒外圍擴散，直到受壓側的內壁。雖然配置縱向鋼筋的地方應變小，但是縱向鋼筋間的應變卻很大，顯示縱向鋼筋可承受底板下壓力裂縫。

日本於1980年以前的耐震設計基準無法滿足現在的耐震性能要求，且許多地下結構物的壁體需要補強，因此開發了Ceramic-Cap-bar（簡稱CCb）工法。CCb工法配合兩端陶瓷錨定配置，可提高斷面剪切強度，因其使用耐腐蝕性良好的陶瓷元件，所以耐久性佳。CCb施工使用灌漿貯留槽，無需另外安裝灌漿軟管，使得工作人員可在短時間達到非常好的施工品質，長度的延伸亦可在現場依情況調整，不需要大型機械設備，所以在狹小的空間中亦可施做。配合不同結構物型式，可選擇不同的錨定端，因此適用範圍也相關廣泛，但主要仍舊運用於地下結構物的耐震補強。

CCb施工順序如圖24所示，於佈設位置鑽孔，於鑽孔壁體外設置灌漿用貯留槽，再將CCb放入灌漿用貯留槽並推入鑽孔內，養護填充水泥漿後，回收多餘水泥漿，最後將貯留槽脫模、壁面養生。





隨著隧道開挖機械 (Tunnel Boring Machine, TBM) 大量使用，為了準確瞭解隧道前端地質狀況及降低調查費用，鹿島技術研究所研究人員發展3D地震反射追蹤系統 Three-dimensional Seismic Reflector Tracing System (簡稱TRT)，利用此系統可繪出隧道前100-150m地質結構的3-D等度量映射圖，但是TRT僅適用於岩石地質。對於已知位置的發射源或接收器，所有可能的反射面位置可以定出橢球體。藉由槌子在隧道壁體上發射源的敲擊能量，反射波由安裝於隧道壁體上之接收器接收後，相關資料經由無線傳輸，記錄於地震儀內，再透過後處理，即可獲得如圖26之成果。

TRT已在日本測試約100次、美國約50次，以及其他國家皆有實際測試案例，準確度及適用已獲驗證，鹿島研究人員仍致力發展，希望提高準確度與實用性。

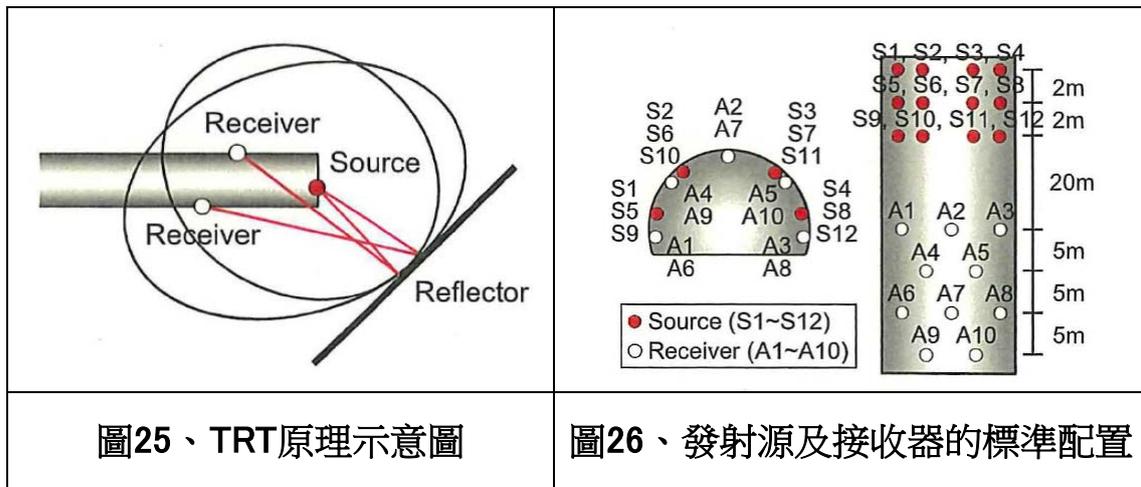


圖25、TRT原理示意圖

圖26、發射源及接收器的標準配置

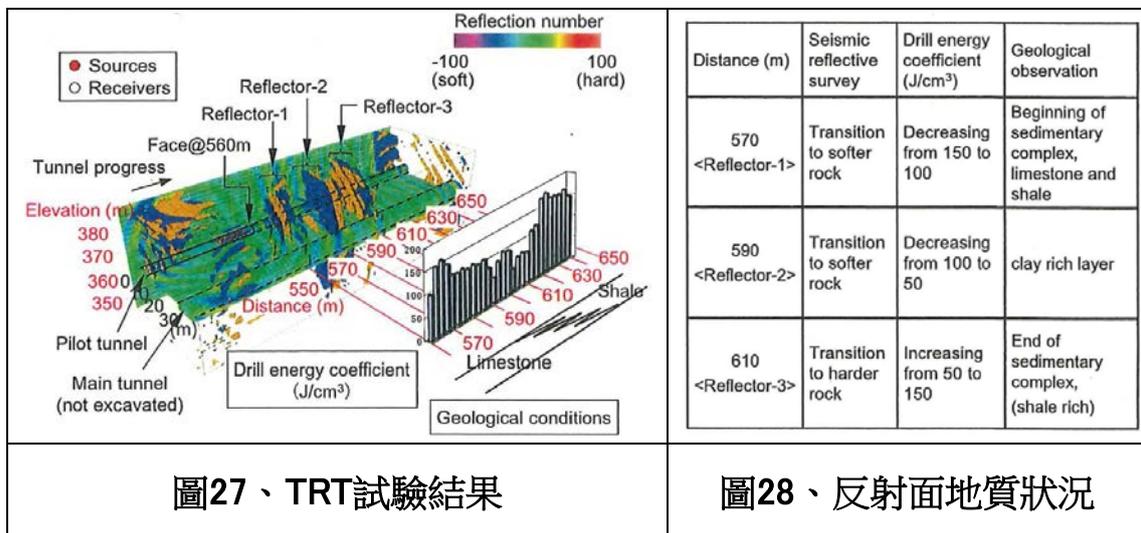


圖27、TRT試驗結果

圖28、反射面地質狀況

## 肆、SUNTEC 株式會社研習內容

### 一、觀摩東京電力明野太陽光發電所連繫鐵塔工事

本次研習現場觀摩SUNTEC株式會社於山梨縣施工中之東京電力明野太陽光發電所連繫鐵塔工程。日本政府目前也大力推動乾淨再生能源，東京電力利用政府林地，將樹木砍伐後，用以新建太陽能發電廠。雖然太陽能發電廠仍在整地中，周邊的地下管路及門型鐵構基礎皆已進行施工。本條輸電線路為22kV，地下管路採直埋式，僅配

置1條電纜、1條通訊光纜與1條接地線（如圖30）。管溝寬度約50cm、深度約1m，埋設管材為波付硬質合成樹脂（FEP），具有重量輕、強度高、可彎曲、長度可延伸、適用



圖29、整地中之明野太陽能發電廠



圖30、直埋22kV管路

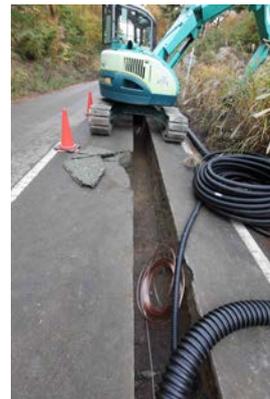


圖31、管溝施工情形

於差異沉陷處以及佈纜性佳等優點，但其每米單價約為公司目前使用PVC管的6倍。FEP管直接放置於管溝土壤上，回填砂並使用小型振動機搗實，再回填碎石級配及鋪設AC。現場觀摩時，發現並未埋設預備管，原以為是因為這條線路僅有一條電纜，故未設預備管；但據SUNTEC人員表示，即使是3條電纜的地下管路，配置幾乎一樣，不會佈設預備管，此為經濟考量，待有需要時再配管即可，現場施工也非常快速。

此次觀摩之明野太陽光發電所連繫鐵塔，將既有鐵塔改造為塔上型連接站，並新

建一門型鐵構由架空線路連接至附近變電所。經設計前地質調查，設計人員研判門型鐵構基礎所在邊坡地質條件不需進行耐震分析，基礎依一般設計即可，重點在於施做有效的邊坡保護工。



圖32、邊坡上門型鐵構基礎施工



圖33、邊坡保護工



圖34、門型鐵構與既設鐵塔（日後改造為塔上型連接站）架線工作  
-返國後SUNTEC提供

因既設鐵塔將改造為塔上型連接站，經檢討後承載力不足，因此將鐵塔基礎開挖，使用基礎板加固。一抵達現場，看到開挖出來的基礎尺寸非常小，開挖現場也沒有任何加固措施。據SUNTEC人員表示，鐵塔基礎設計依現場地質狀況決定，只要符合法規規定，並不會作多餘安全設計，至於加固措施也是視現場形況而定。此類形的施工方式相當常見，依以往經驗都是安全的。現場人員表示，工安是非常重要的，因此每天都要檢查鋼索的狀況，依據月份的不同，必須在檢查合核的鋼索上別上不同顏色的帶子，所以在日本很少發生因鋼索斷裂的工安事故。



圖35、開挖中之鐵塔淺基礎



圖36、施工環境



圖37、安全告示牌



圖38、完工之既設鐵塔加固  
-返國後SUNTEC提供



圖39、其他已完工之塔上型連接  
站-返國後SUNTEC提供

## 二、輸電鐵塔基礎耐震設計

因本次實習計畫主要目標為研習國外相關機構之鐵塔結構耐震設計，SUNTEC株式會社由曾任職於東京電力公司建設技術士小宮山茂樹部長，說明日本法規及現行相關設計。

目前日本鐵塔基礎耐震設計主要參考，2002年由社團法人電氣協同研究會所出之電氣協同研究第58卷第3號「送電用鉄塔基礎の設計」第13章「耐震設計」。基於電協同第30卷第2號與JEC-127（1979年），輸電鐵塔一般為風載重設計，對於抵抗地震力仍是十分安全，因此經檢討可以省略耐震設計。在日本到目前為止，雖然鐵塔因許多大地震造成地盤的液化、隆起、陷落、地裂而損壞，但是沒有因地震振動而導致鐵塔構件損壞的證據。然而，特殊的地質、地形，或是地震載重大於風載重設計的特殊鐵塔（例如大角度鐵塔、窄瘦型鐵塔）則需要進行耐震設計。兵庫縣南部地震（阪神大地震）和鳥取縣西部地震亦可驗證上述的結果。

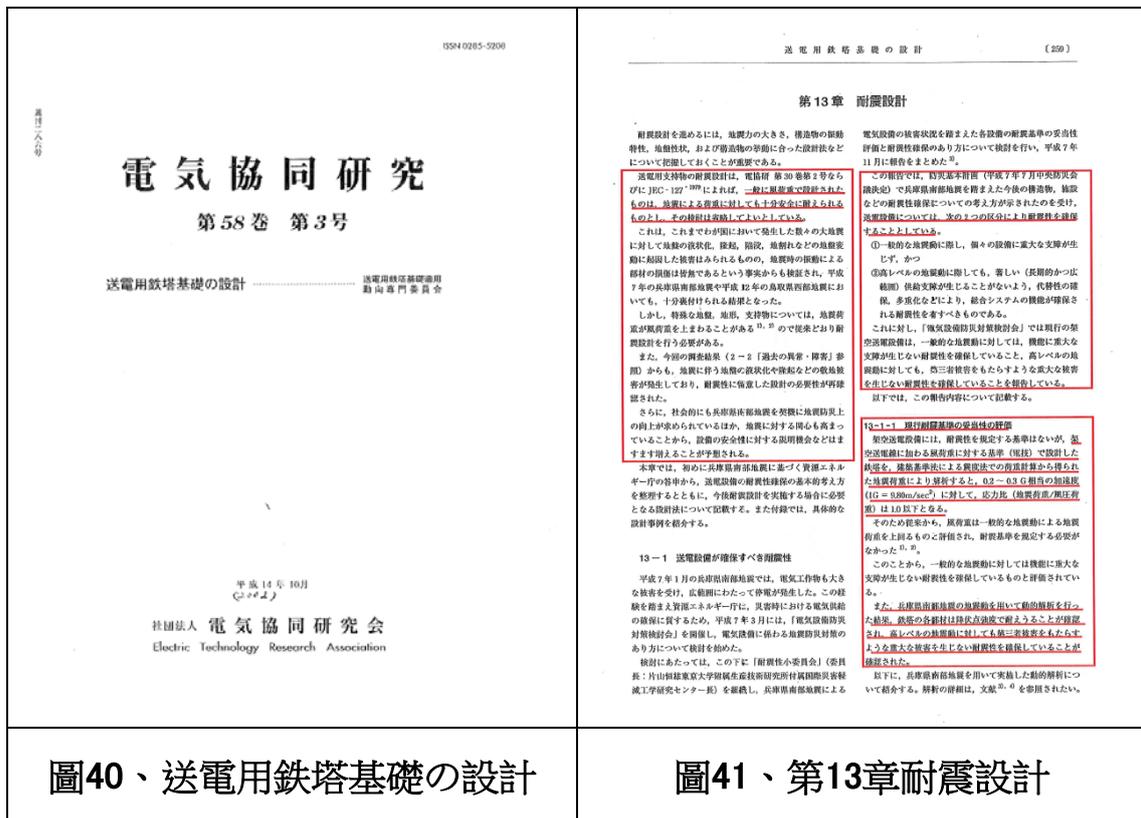


圖40、送電用鉄塔基礎の設計

圖41、第13章耐震設計

有關輸電設備，由2種程度來確保其耐震性：①一般地震時，每個設備不會產生重大的故障，或是②高水平力地震時，長期且廣泛的供給障礙，要有綜合、多重、替代性的系統功能，確保其耐震性。對於使用風載重設計的架空輸電鐵塔，根據建築基準法中震度法所得到的地震載重分析結果，對於相當於0.2~0.3G的加速度，地震載重/風壓載重的應力比小於1.0。利用阪神大地震進行動態反應分析的結果，鐵塔各構件的降伏強度可抵抗地震力，同時也確認高水平力地震對第三者不會產生重大的損壞。

對於鐵塔基礎，東京電力等會實施地震載重和風載重的比較設計結果排列鐵塔基礎的振動實驗，由動態分析有以下特性：①在地震時引起地面的側向變形，基礎、樁基礎的樁部、深基礎的樁身部分會發生大的應力，在極少數情況下，地震所產生的應力可能會超過風荷載。②鐵塔的剛性比基礎小，有其自然周期和震動形式，當固定基礎的邊界條件時，則鐵塔系統、地盤~基礎~鐵塔系統就沒有差異。③鐵塔和基礎單獨的對應關係，和地盤~基礎~鐵塔系統間的對應關係是沒有差異的。由以上的鐵塔基礎耐震設計原則，可以單獨計算基礎，依基礎的特性，選擇水平震度法或是容許變位法分析。樁基礎、深基礎等垂直方向細長的地中構造物，地盤的剪應變通過樁部，造成樁身發生大的應力，因此應同時檢討水平震度法及容許變位法。

在耐震設計手續中（如圖43），地盤種類不同會影響設計時之地震力： $k_h = v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 \cdot k_{h0}$ ，其中 $k_h$ 為耐震設計地盤面（即忽略地表面不穩定邊坡）上基礎的設計水平地震強度， $v_1$ 為重要性係數， $v_2$ 為區域補正係數， $v_3$ 為地形補正係數， $k_{h0}$ 為設計水平地震的標準值。依據社團法人日本道路協會於平成14年3月之「道路橋示方書·同解說」V耐震設計編，由鐵塔的固定周期及地盤種類，可由圖44之表格對應水平震度法用的設計水平地震強度標準值 $k_{h0}$ 。重要性係數 $v_1$ 依鐵塔電壓、所在位置與系統重要度的考量，由

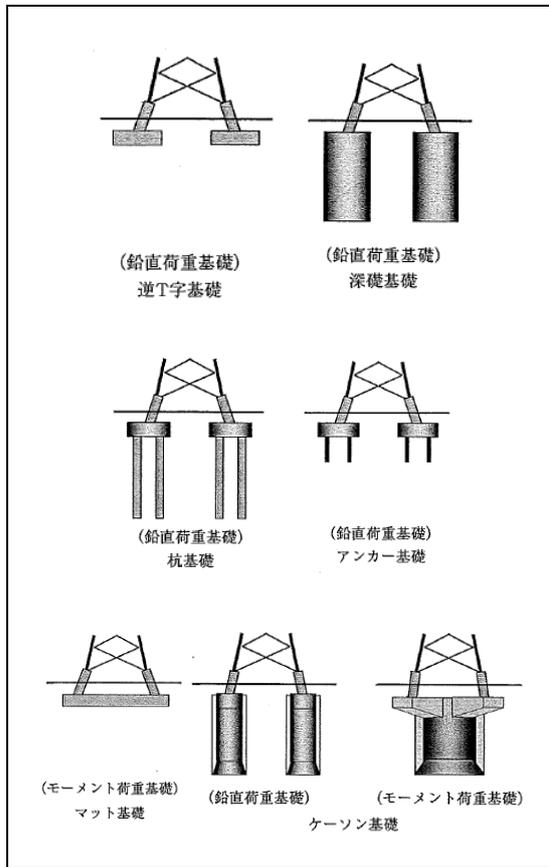


圖42、鐵塔基礎型式

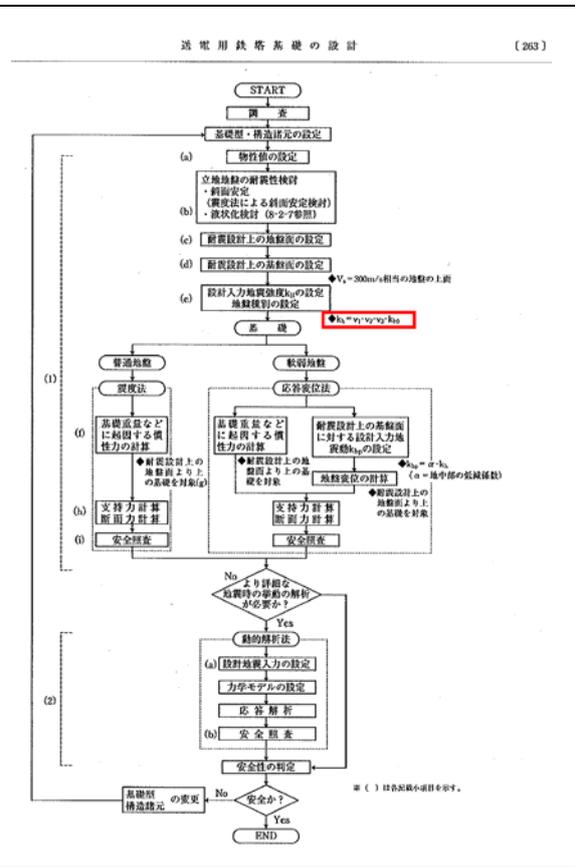


圖43、耐震設計手續

地盤種別	固有周期T (s) に対する $k_{h0}$ の値		
I種	$T < 0.1$ $k_{h0} = 0.431T^{1/3}$ ただし、 $k_{h0} \geq 0.16$	$0.1 \leq T \leq 1.1$ $k_{h0} = 0.2$	$1.1 < T$ $k_{h0} = 0.213T^{-2/3}$
II種	$T < 0.2$ $k_{h0} = 0.427T^{1/3}$ ただし、 $k_{h0} \geq 0.20$	$0.2 \leq T \leq 1.3$ $k_{h0} = 0.25$	$1.3 < T$ $k_{h0} = 0.298T^{-2/3}$
III種	$T < 0.34$ $k_{h0} = 0.430T^{1/3}$ ただし、 $k_{h0} \geq 0.24$	$0.34 \leq T \leq 1.5$ $k_{h0} = 0.3$	$1.5 < T$ $k_{h0} = 0.393T^{-2/3}$

地域区分	A	B	C
補正係数 $v_2$	1.0	0.85	0.7

圖44、水平震度法用設計水平地震標準値  $k_{h0}$  與區域補正係數

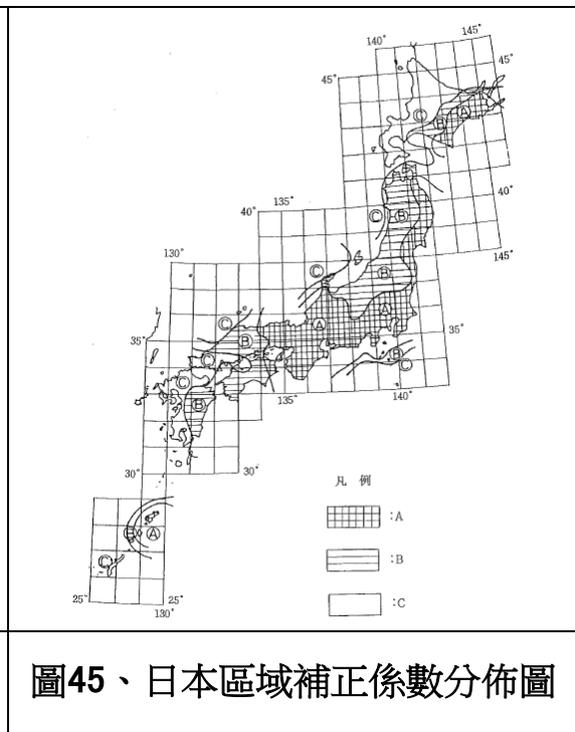


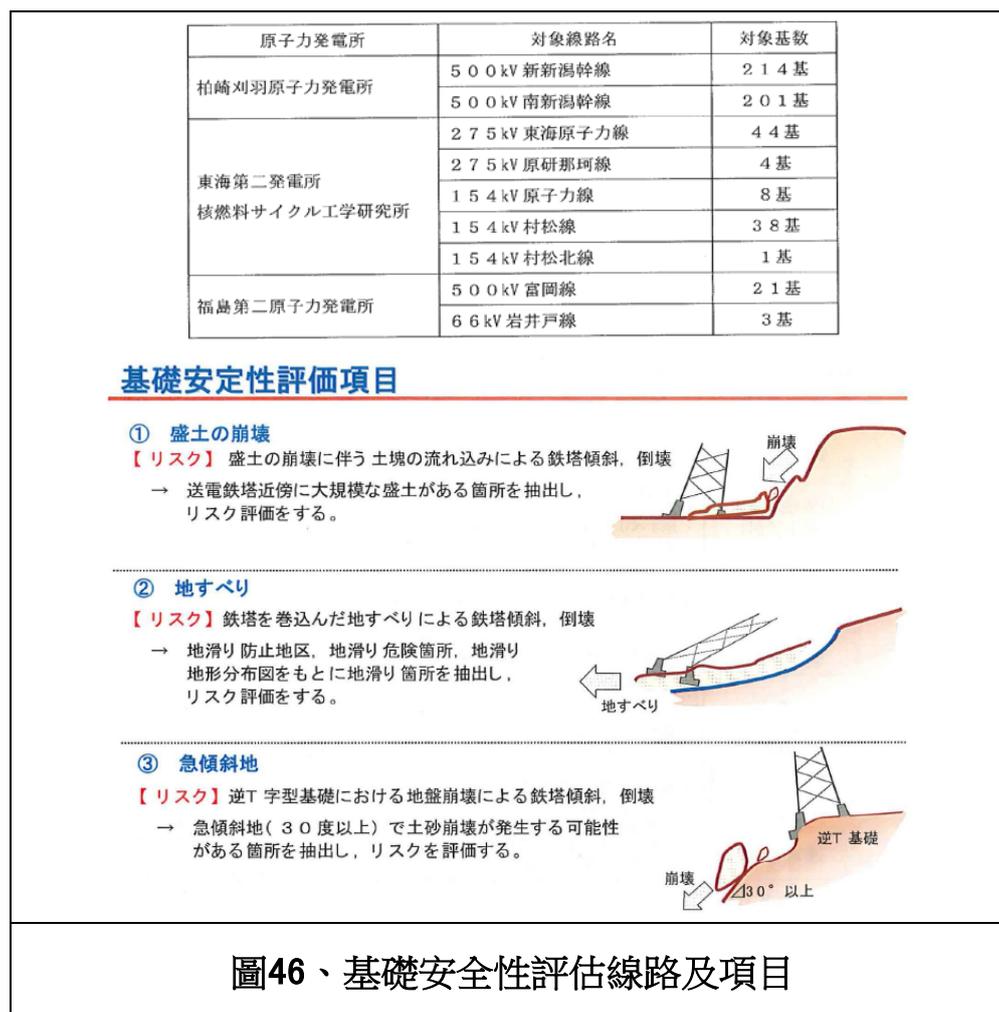
圖45、日本區域補正係數分佈圖

0.8~1.1範圍內。區域補正係數  $v_2$  依道路橋示方書規定，如圖42之表格及圖43分佈圖，可選擇適當的區域補正係數。 $v_3$  地形補正係數則依山坡地等需特別考量的地形設定，

藉由以往的地震觀測判斷地震波增幅，再設定地形補正係數。

### 三、核能電廠輸電鐵塔基礎安全評估

一般的輸電線路選址要盡力避免地滑區域，選擇地震影響最小的鐵塔用地範圍四周。若是不可避免需通過地滑區域，則需特別詳細調查地質情況、基礎安全性檢討，以及基礎型式選擇等相關對策。因為受到日本東北地震（台灣稱日本331地震）影響，許多鐵塔因周邊環境二次災害導致損壞，為了確保輸電設備安全，以及研究鐵塔周邊的影響，東京電力特別針對3座核能發電廠線路進行基礎安全性評估。評估項目包含上邊坡的崩落、地滑，以及超過30°陡坡的崩落。



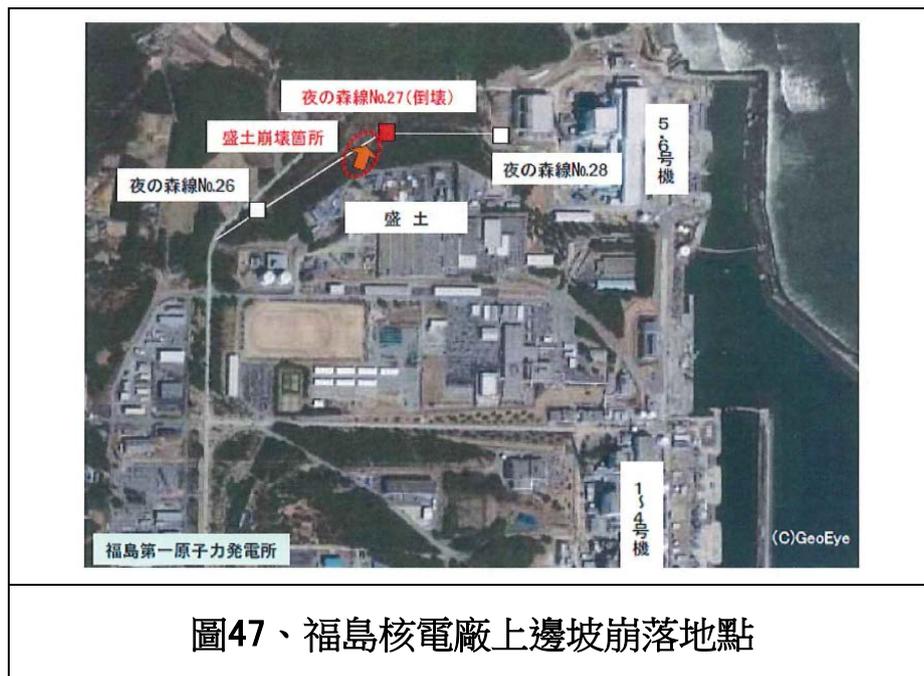
上邊坡的崩落評估對象選取方法為，過去施工時附近有上邊坡與經巡視有上邊坡處，先進行現場勘查，確認填土規模、形狀，與鐵塔的距離，有無滑動痕跡，之後判斷是否需要詳細評估，詳細評估項目有邊坡區施工時的資料收集、邊坡的土質、土壤強度，必要時加做邊坡穩定性分析，其餘則可依一般鐵塔管理方式即可。地滑評估鐵塔選取則是依照日本相關單位的地滑分佈圖面以及空中攝影判讀，藉由現場勘查確認地滑地離鐵塔距離，以及現場地滑活動徵兆。若是現場地滑狀態有改變，需進行對策檢討；現場地滑狀態沒有改變時，則針對位於地滑區內及附近之鐵塔進行重點管理。陡坡的評估對象選取，則是依1/2000平面圖鐵塔周圍25m內有30°陡坡者。利用現場勘查確定是否為30°陡坡，若需詳細評估，則要確認坡面狀態、周邊的地盤狀況，以及過去地震是否有造成災害。如果陡坡有崩壞的可能，對策檢討是必要的；若沒有陡坡崩壞的可能性，巡視時要加以確認陡坡的狀況。

經評估後，有上邊坡崩落影響需要進行詳細調查的鐵塔有2座，評估後無基礎安全性影響；地滑區內的鐵塔有2座，地滑區附近的鐵塔有11座，地盤狀態皆無變化；有陡坡土壤崩落疑慮需要詳細調查的鐵塔基礎有7座，皆沒有基礎安全性影響。

上述的鐵塔基礎安全性評估起因於福島核電廠內夜の森線#27鐵塔因東北地震倒塌事故，崩落的上邊坡高約30m、坡度18°，鐵塔以被電線拉扯方式，向上邊坡方向倒塌。考量夜の森線停止送電時間和地震波觀測資料，推斷地震最大加速度發生時，上邊坡尚未崩落，20秒後邊坡才崩落。

經過地質調查發現，崩落地點的地盤強度並非特別弱，但是地下水位比舊的地面高，約在上邊坡內的高度。利用平均數據估算舊表土層的物理性質參數，針對崩落的邊坡進行靜態及動態的邊坡穩定性分析，分析結果最小安全係數皆大於1（圖49）。本

次的地震持續時間非常長，且地下水位很高，因地下水位對而降低地盤強度也是有可能的。由崩落滑動面舊表土層發現有物理性質較差的沉泥層，使用沉泥層的物理性質參數進行邊坡穩定分析，則安全係數皆小於1（圖50）。由檢討結果研判上邊坡崩落原因，在上邊坡有高地下水位的存在，加上強烈地震力反覆作用，使得邊坡強度降低，而發生邊坡崩落的情況。



解析手法	地震動	最小すべり安全率※2	解析手法	地震動	最小すべり安全率※2
静的解析	道路土工基準	1.103	静的解析	道路土工基準	0.681
動的解析	構内北地点の地震波形	1.051	動的解析	構内北地点の地震波形	0.665

※2: 最小すべり安全率 = 斜面抵抗力の和 / 斜面滑動力の和 が最小となるすべり面での値

<b>圖49、邊坡穩定分析結果(使用平均物理性質參數)</b>	<b>圖50、邊坡穩定分析結果(使用粉土層物理性質參數)</b>
---------------------------------	----------------------------------

## 伍、心得與建議

一、鹿島建設西調布實驗場園區共有 8 棟獨立的建築，除了一棟作為設備儲藏，其餘皆是實驗室。一間私人建設公司竟有如此規模的實驗室，著實讓我非常吃驚。據鹿島人員表示，日本政府主辦的公共工程，若有較複雜的工程或使用新的工法，競標者需提供數值分析結果，以及物理模型試驗的成果來驗證其可行性。因此在日本，大型顧問公司及工程建設公司皆有良好的實驗設備。因為做實驗花費相當大，鹿島人員表示大部分的試驗業主都會買單，但若遇到他們覺得設計不妥，希望採用實驗驗證，相關費用就由他們自行吸收；這樣的精神令人相當佩服。這也難怪有許多土木新技術需要向日本取經，甚或許多台灣公共工程常可見日商的參與。

不同於東京市區的繁忙和擁擠，調布市顯得寬廣且清幽，鹿島選擇此處做為實驗室大本營，研究人員也都很開心。負責接待我的海外土木支店土木部營業部長吉澤哲哉，因曾在鹿島台灣分公司工作 9 年，對台電的工程也有相當程度的了解，他認為台電穩定持續推動工程，對台電和台灣都是好事，我們人員的技術也有提升，只是在地質調查方面還需多花心力。

二、本次日本實習，SUNTEC 株式會社安排離東京約 3 小時車程的山梨縣，觀摩東京電力的太陽能發電廠以及相關鐵塔、管路工程。山梨縣以農業為主，到處可

見蘿蔔、蘋果等，山坡地也相當多。太陽能發電廠目前仍在整地，廠址的兩旁皆為茂盛的樹林，大概是地廣人稀的原因，砍伐整片樹林並未受到抗爭。管路工程原本不在觀摩的行程中，SUNTEC 的宮本賢一部長知道我是管路設計員，特別帶我繞到施工現場。看到規模這麼小的管路埋設工程，真的讓我心生羨慕。現場施工的明挖管路直埋 FEP 管再回填砂，佈設 1 條電纜只做 1 管 FEP 管，對於我們管路標準設計使用隔板、每回線設置 1 管預備管，感覺現場管路的施工方法很簡單，可惜的是宮本賢一部長的專長是架空線路，我想再請教其他管路的埋設問題，他只能就他的經驗回答我，無論是 3 條電纜或是 1 條電纜，埋設的方式都一樣；但若在地狹人稠處，就不可能採用前述的明挖工法。施工難度、經費相對高很多的 TBM 是較常採用的方法。

為了連接新設地下管路及既設架空線路，東京電力選擇在既設線路旁的邊坡新設門型鐵構，由門型鐵構利用架空線路連接至變電所。據宮本部長的說法，這是最經濟的做法，且經由地質調查，邊坡上的門型鐵構基礎無須進行耐震設計，但是因為坡度高，邊坡保護極為重要。現場觀摩時，宮本部長常提起，一般來說即使基礎在邊坡，也不見得需要耐震分析，事前的地質調查非常重要，施工中也應驗證事前的地質調查，確認設計強度是否足夠。無論邊坡的地質情況，邊坡保護工都應確實設計、施工。但在台灣常遇到邊坡和塔基是不同地主，就算我們想施做邊坡保護工，地主也不同意。宮本部長曾應台灣廠商要求，來過台灣 8 次協助處理架空線路案例，他了解我們常遭過的問題，但是仍舊建議依邊坡情況選擇適合的邊坡保護工，遠比增加鐵塔基礎強度來的重要。

三、目前公司僅「架空輸電線路設計準則」規定基礎設計時，應作非颱風時承受水

平地表加速度 **0.33G**、垂直地表加速度 **0.22G** 之耐震檢討；而日本則是在「送電用鐵塔基礎の設計」明確規定基礎之耐震設計手續。在台灣有建築物耐震設計規範與公路橋梁耐震設計規範，和「送電用鐵塔基礎の設計」相同，皆考量用途係數、工址地盤放大係數，由振動單元的基本振動期計算設計地震水平譜加速度係數以及設計地震結構系統地震力折減係數，以獲得設計地震下之水平設計地震力。當鐵塔設計為最大陣風控制時，SUNTEC 小宮山部長表示，只需針對基礎進行 **0.2~0.3G** 的耐震設計，這和我們目前僅針對非颱風時承受水平地表加速度 **0.33G**、垂直地表加速度 **0.22G** 之耐震檢討是吻合的。當鐵塔基礎座落在軟弱地盤或是有液化可能時，則需將其影響納入耐震評估。目前我們的作法則是在設計時施做鑽探，由鑽探資料判斷預計施工地點的液化潛能，藉此避開液化潛勢區。若是無其他適合地點，則利用深基礎穿越液化層。然而一般而言，選擇鐵塔基礎位置時，仍應儘量避免不穩定地盤。

目前我們在山上的鐵塔基礎大部分使用深基礎，SUNTEC 的宮本部長和小宮山部長一致認為這是較為保守的作法。在日本，無論是業主或廠商都很看重工程的安全和造價，只要設計符合法規，不會做保守的設計；因此日本山區鐵塔有很多倒 T 型淺基礎，但是邊坡保護工一定要確實做好，他們認為這樣才能確保鐵塔基礎安全。

至於目前我們的鐵塔基礎耐震設計方式，在鐵塔使用最大陣風設計、山區鐵塔基礎為深基礎的情況，僅針對非颱風時承受水平地表加速度 **0.33G**、垂直地表加速度 **0.22G** 之耐震檢討是足夠的。只是我們在施做邊坡保護工上，遭遇很多問題，因此山區鐵塔基礎大量採用深基礎雖然較為保守，然而換個方向想，在沒

有足夠的邊坡保護之下，深基礎可增加輸電設備的安全，並且在災害發生時，為我們爭取多一些災害處理的時間。

四、出國實習前，因仍在哺育小孩母乳，加上腹中還有一個小寶寶，懷孕初期的不適，讓我很想打退堂鼓放棄這次機會；但是先生和父母不斷地鼓勵，希望我能把握這個難得的機會出國學習，連婦產科醫師也評估安全無虞。在家人出錢出力的幫忙之下，由父母陪同我和小孩前往日本，他們負責在我工作期間照顧小孩，讓我在日本實習能安心工作、受益匪淺。

## 陸、參考文獻

- 一、輸變電工程處(2013.9.17)，架空輸電線路設計準則。
- 二、供電處(2004.12.9)，鐵塔 C.L 面總合成力及設定值一覽表(修訂版)、FOUND 塔基設計程式應檢討地震力說明。
- 三、黃建民(2007)，套裝軟體應用於連接站設計介紹，96 年度供電單位土木類技術發表彙編。
- 四、謝宗穎(2009)，套裝軟體於井筒沉箱構造物之分析應用，98 年度供電單位土木類技術發表彙編。
- 五、李崇正(2003)，地工離心模型試驗的應用與研南現況，中華民國大地工程學會第 7 卷第 4 期會訊。
- 六、平陽兵、一宮利通、山澤哲也、福本幸成(2013)，洋上風車タワー一定着部の破壊耐力に関する実験および解析的検討，プレストレストコンクリート工学会第 22 回シンポジウム論文集。

七、Takuji Yamamoto、Yasuhiro Yokota、Jozef M. Descour, Imaging geological conditions ahead of a tunnel face using Three-dimensional Seismic Reflector Tracing System (TRT).

八、社団法人電気協同研究会(2002.10)、送電用鉄塔基礎の設計、電気協同研究第58巻第3号。

九、社団法人日本道路協会(2002.3)、V耐震設計編、道路橋示方書・同解説。

十、東京電力株式会社(2012.2.17)、原子力発電所及び再処理施設の外部電源における送電鉄塔基礎の安定性評価について。

十一、原子力安全保安院(2012.2.17)、東京電力(福島第一原子力発電所構内の夜の森線 No.27 鉄塔近傍の盛土の崩壊原因に関する報告及び原子力発電所等の外部電源信頼性確保に係る追加報告