行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

地錨結構破壞聲訊監測模擬和處理之再探
研究成果報告(精簡版)

計 畫 類 別 ：個別型
計 畫 編 號 ：NSC 97-2221-E-032-040-
執 行 期 間 ：97 年 08 月 01 日至 98 年 10 月 31 日
執 行 單 位 ：淡江大學土木工程學系

計畫主持人：張德文
共同主持人：李維峰
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：楊智麟
碩士班研究生-兼任助理人員：楊子逸
博士班研究生-兼任助理人員：鄭世豪

報 告 附 件 ：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處 理 方 式 ：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 98 年 11 月 01 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ■ 成 果 報 告 □期中進度報告

地錨結構破壞聲訊監測模擬和處理之再探

計畫類別：■ 個別型計畫　　□ 整合型計畫
計畫編號：NSC 97－2221－E－032－040－
執行期間：　97 年 08 月 01 日至 98 年 07 月 31 日

計畫主持人：張德文
共同主持人：李維峰
計畫參與人員：鄭世豪 楊智麟

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：■精簡報告　□完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：
□赴國外出差或研習心得報告一份
□赴大陸地區出差或研習心得報告一份
■出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
□國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
□涉及專利或其他智慧財產權，□一年■二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學土木工程學系

中　華　民　國　九　十　八　年　十　月　三　十　一　日

行政院國家科學委員會專題研究計畫精簡報告

地錨結構破壞聲訊監測模擬和處理之再探

Reassessment for Simulations and Signal Analysis of Acoustic Monitoring on Ground Anchor Failures

計畫編號：NSC 97-2212-E-032-040

執行期限：97 年 8 月 1 日至 98 年 7 月 31 日

主持人：張德文　　淡江大學土木工程學系

共同主持人：李維峰　　台灣科技大學研發處

研究助理：鄭世豪 楊智麟　　淡江大學土木工程學系

一、中文摘要

地錨損傷行為複雜且伴隨多重影響因素而發生，雖可於災害前期之結構表徵變化發現其破壞潛勢，但卻不易以單一儀器設備完整剖析所有致災原因和鑑識其損傷情況，導致災害於無預警情況下發生。有鑑於此，為防杜地錨邊坡和地錨支撐結構破壞發生於未然，其於使用階段之安全和功能的評估更顯重要，故本文除藉由現地之地錨同步揚起和聲洩監測試驗，說明聲洩技術於地錨結構之損傷識別和安全預警的應用性外，另以數值模擬和訊號處理分析，探討該項技術之可靠性和聲訊內涵，期能建立常見地錨損傷之音量釋放和頻率變化規則，以定量方式描述其損傷發展情況，供地錨功能維護和安全預警之參考。

關鍵詞：地錨、損傷行為、聲洩監測、訊號處理。

ABSTRACT

Ground anchors' disaster behaviors are complicated and influenced by multiple causes. Although at the initial stage the damage causes can be detected from looking at structural appearance changes, they, as the complete generator to disasters, are not easily diagnosed and their degrees are also hard to be recognized by single equipment. Due to the above mentioned, damages occurred without pre-warn. In view of this, to prevent the future occurrence of damages to anchor slope and anchor supported structure, the ground anchor's safety and function evaluation at its usage stage becomes more important. By simultaneously applying lift-off test and acoustic monitoring test, this study explains the application of acoustic monitoring technology in disaster diagnosis and damage pre-warning. Other than this, this study uses numerical modeling and signal processing to discuss the reliability and meanings of on-site test results in order to build the rules of acoustic volume release and frequency change for anchor disaster. Besides, in company with quantity, this study illustrates the development of anchor's damages and thus be as reference to anchor's maintenance and damage pre-warning.

Key words: ground anchor, disaster behaviors, acoustic monitoring, signal processing.

二、緣由與目的

地錨因可充分發揮錨碇地層強度和提高其穩定性等優點，常為邊坡防護工程或開挖支撐工程廣泛使用的工法之一，然因其結構體埋置於地層中，每當施工品質不良、地質特性窘變或設計未盡周詳時而發生災害。以台灣為例，絕多數地錨常打設於地下水位以下和不良地質環境中(風化泥岩或砂岩互層)，在多重因素影響下而發生錨頭銹蝕/脫落、錨碇水泥漿開裂、鋼絞線銹蝕/斷裂等破壞(如表一說明)。僅管上述各式破壞在初期，可藉結構外觀或周遭環境的變化發現其表徵，但欲作細部的健康檢查或功能安全評估，仍需仰賴較為

進階的儀器設備和妥善的數據分析處理才可完成。

傳統之地錨功能評估常以電子式荷重計或揚起試驗進行施作，雖可於短時間內瞭解地錨狀況，但因這些方法受限於先天缺陷(耐候(久)性、施作價格、地形限制、施工難易度等)無法長期追蹤其安全性和功能變化，使災害於無預警情況下發生。因此，本文除延續前期研究案(NSC 96-2212-E-032-040)說明揚起試驗配合聲洩技術同步於地錨結構之損傷行為監測和數值模擬外，將透過訊號分析，建立常見地錨損傷之音量釋放、頻率變化規則，希冀增進工程界對於地錨安全性能的瞭解，以助於地錨功能維護和災害預警之參考。

三、數值理論與分析程序

3-1 分析模型建立

錨碇地錨之構件拆解後可概分為鋼絞線外露段、錨頭、自由段、錨碇段和錨碇土層等 5 個子系統。然欲充分體現各構件行為機制，建構之分析模式須有效涵蓋各子系統特徵。因此，本研究將錨碇於土層中之地錨結構離散後(圖 1)，忽略保護套管與鋼絞線、水泥漿之結合界面影響，依各離散節塊之運動平衡推導代表錨碇地錨之質量矩陣、阻尼矩陣和勁度矩陣(矩陣之分配情形和詳細推導可參考 NSC 96-2212-E-032-040 結案報告和鄭世豪，2009 說明)。

3-2 材料組構模式

離散後之分析模式若能配合簡單的力學概念和合理的初始材料估算，即可滿足線彈性分析要求(如：應力波檢測)。然為瞭解地錨各構件受外力作用後之損傷情形和損傷時產生的即時聲訊，仍須將各構件之組構行為納入考量，以應變量或滑動量反覆迭代修正其模數值(鋼絞線和錨碇土層)或勁度值(錨碇水泥漿界面)，充分體現地錨構件受力後之非線性特徵和界定各構件之損傷發生時機。如圖 2(a)所示，為公式化之鋼絞線應力-應變曲線，以 250 *ksi* 之鋼絞線為例，當應變量達降伏應變量(0.0076)即定義為鋼絞線斷裂；圖 2(b)為工程界最常用以描述土壤非線性行為之雙曲線模式；圖 2(c)則為描述錨碇水泥漿和錨碇土層界面(最弱面假設)之剪力遲滯模式(shear lag model)，藉由界面之尖峰剪力強度(τ_1)和殘餘剪力強度(τ_2)；以及界面受剪後之最大相對位移量(s_1)和應變軟化後之相對位移量(s_2)，來定義錨碇水泥漿和土層界面的開裂情況。

3-3 地錨預力施加方式

地錨施加預力後將導致鋼絞線的伸張、錨碇土層的壓縮和承載鈑的撓度變化，為將上述各項行為變化合理表現於分析中，本文依 Ivanonic (2001)之試驗數據和建議，以立方曲線擬合(cubic spine fitting)代表特定承載鈑之受力和撓度變化方程式，並將施加預力視為初始靜態作用力，如圖 3(a)以公式(1)及公式(2)計算錨頭和錨碇土層之相對位移量，並依公式(3)求得錨頭之撓度變化後，加總其反應為地錨施加預力後錨頭之總體變位量(見公式(4))。同時，當地錨承受外部載重作用時，為簡化錨頭勁度之反覆迭代計算，如圖 3(b)可將錨頭勁度貢獻轉換為變位反應，並以公式(4)所得結果為前置解，代入公式(3)(見公式(5))，藉以修正實際作用於結構之作用力(f_{actual})而體現預力的影響，如圖 3(c)。

$$u_p = K^{-1} f_p \quad \text{.....} (1)$$

$$g_p = u_{pb(i)} - u_{ps(i)} \quad \text{.....} (2)$$

$$f = 4.216\times10^{11}\delta^3 - 9.521\times10^{7}\delta^2 + 4.665\times10^{4}\delta - 0.174 \quad \text{.....} (3)$$

$$g_0 = g_p + \delta_p \quad \text{.....} (4)$$

$$f_{actual} = 4.216\times10^{11}\left(g_0 - u_{b(i)} + u_{s(i)}\right)^3 - 9.521\times10^{7}\left(g_0 - u_{b(i)} + u_{s(i)}\right)^2 + 4.665\times10^{4}\left(g_0 - u_{b(i)} + u_{s(i)}\right) - 0.174 \quad \text{....} (5)$$

3-4 分析程序

本分析模式係依動力概念以質量-

彈簧-消能盤之集合參數而建立，但如何同時使用於地錨揚起和聲洩試驗之模擬，將為本節說明重點。

1. 地錨揚起荷重-變位曲線模擬

由於分析模式係基於離散系統之節塊運動平衡假設而建構，直接用於靜態行為之地錨揚起試驗模擬或許會引起疑慮。但眾所皆知，靜力分析中所有的行為反應大都由彈簧力所控制，故靜力分析時可忽略系統之慣性力和阻尼力貢獻，直接以虎克定律(Hook's law)求解其變位反應。此外，因整體分析程序係以結構變形為基礎，故分析時地錨預力之修正方式、構件之非線性迭代和損傷判定原則皆以變位或應變量進行檢核，細節可參考鄭世豪(2009)說明。

2. 地錨損壞聲訊模擬

地錨受揚起荷載作用時，地錨構件損傷所產生之聲訊，以波動方式向四面八方傳遞。然為簡化分析，本研究基於聲訊沿最短和最快路徑傳播之假設，於任一地錨構件損傷瞬時，保留其對應之材料參數並施加一單位脈衝載重(unit impulse load)於損傷位置，以模擬各式損傷聲訊之能量分配情形。該分析步除需納入慣性力和阻尼力之影響外，損傷位置之脈衝作用載重的力幅大小(load magnitude)和延時長短(duration)隨損傷構件之材料特性和位置不同而有所差異，且影響分析結果甚巨，在無借鑑資料和參考標準情況下，吾人依現地試驗成果建議各構件損傷發生時之單位脈衝載重如圖 4 所示。此外，求解運動方程時(常微分方程)，除可藉中值差分公式展開並使用內隱積分法（implicit method）之 CAA 法則(Constant Averaged Acceleration)進行系統求解外，其初始條件於損傷瞬間已非靜止，尚須配合合理之初始條件假設才可進行求解($u_{signal}(0)=0$、$\dot{u}_{signal}(0)=1/M$，詳細推導請見鄭世豪，2009 說明)。

四、驗證與參數研究

4-1 案例驗證

本研究為確立聲洩技術於地錨損傷監測之可靠性和建立完整立論，茲將上述分析構想程式化後，以舊有地錨試驗為例證明其成效。然數值分析時，初始參數設定合理與否，攸關結果的正確性，本文除參照歷史設計資訊和相關技術報告之描述外(李維峰等人，2004；營建研究院，1995；于作安，1999；Benmokrane *et al*., 1995)，其餘不可考據之參數則透過合理的推估或假設以完成分析。此外，離散系統之分析程序雖依矩陣方式進行求解，但類似於有限元素或有限差分概念，分析結構之離散節塊數目仍須反覆檢核，以確保解的收斂性，由圖 5 及表二試驗和數值模擬結果之比較可知，揚起載重-變位曲線之變化趨勢和構件損傷發展順序(含損傷型態)皆相當吻合，惟損傷次數和損傷時之作用載重未能完全匹配，疑因分析程序中對於地錨構件之材料損傷定義與真實材料損傷時機不同所致。

僅管上述結果係依靜力分析配合地錨構件之組構律，迭代修正系統勁度矩陣來檢核其損傷發展，但為模擬損傷之瞬時聲訊，仍可於構件損傷時納入質量矩陣和阻尼矩陣的估算，以運動方程求解其聲訊反應。如圖 6 及圖 7 分別為舊有地錨錨碇水泥漿開裂、鋼絞線斷裂之試驗和模擬聲訊比較，得知數值模擬可合理反映試驗結果，但受限於分析模式之基本假設，僅能模擬損傷聲訊之第一反射波，無法探知其餘的反射波訊。此外，本分析模式雖依單錨假設而建立，仍可配合聲訊沿最快路徑傳播假設(混凝土材料)和衰減律的運用，模擬試驗時聲訊沿面版之傳遞和衰減情形。

4-2 參數研究

影響地錨構件損傷行為因素甚多，舉凡與地錨錨碇段長度、地錨種類、鋼絞線設計數目、鋼絞線材料特性、錨碇水泥漿材料特性、錨碇土層性質和覆土厚度等有密切關係，故本研究承續舊有地錨試驗之相關參數設定，並以此為標準案例，進階地討論錨碇土層性質、錨碇水泥漿性質、鋼絞線性質及設計數目改變時，地錨設計載重之變化

程度和趨勢以回饋於地錨施作設計和功能檢查參考。然而，地錨隨其幾何設計參數、使用材料特性和座落土層性質的改變，於使用期間因外力或自然環境變遷所衍生之劣化程度及損傷發展情況不同，不易合併討論，故本研究暫不探討因相關參數變化後，地錨構件之可能損傷發展和損傷時產生之瞬時聲訊差異，僅單純的依各項參數改變時對地錨設計載重的影響程度進行說明。

1. 當不考慮地下水位影響下，本研究就土層種類和覆土深度改變討論其對地錨設計載重之影響，如圖8(a)~(b)可知，地錨設計載重隨錨碇土層穩定性愈佳和覆土深度的增加而提高，其影響程度以錨碇土層穩定性>覆土深度。
2. 錨碇土層和錨碇水泥漿性質的改變皆為影響其界面強度發揮之重要因素，如圖8(c)~(e)可知，地錨設計載重隨錨碇土層-錨碇水泥漿界面強度和地錨錨碇段長度增加而提高，影響程度以錨碇段長度>錨碇土層-錨碇水泥漿界面強度>錨碇水泥漿強度。
3. 如圖8(f)~(h)可知，當預力鋼絞線性質和設計數目改變時，地錨設計載重隨鋼絞線強度、設計數目和施加預力增加而提高，影響程度以鋼絞線設計數目>施加預力大小>鋼絞線強度。
4. 綜合上述各項觀察可知：地錨設計載重受其鋼絞線之強度性質和設計數目影響最大，錨碇土層和錨碇水泥漿性質次之，地錨設計和使用期間之功能安全檢查可以此結論為參考要點。

五、聲訊處理與分析

地錨安全監測時，構件損傷訊號雖為判讀其行為變化的重要資訊，但隨各構件材料複雜度的不同，聲訊之時間特徵(振幅、相關性、延時)往往不能提供有效的辨識和建立相關變化規則。因此，為增添監測系統之後處理功能和提取各構件損傷聲訊之頻率特徵和聲洩音量(能量)，本研究藉由快速傅立葉變換和功率譜分析之適用性比較，探討地錨損傷時系統之主頻變化和音量(能量)釋放情形，期能提供地錨安全監測之參考。此外，因試驗聲訊受外部雜訊干擾較數值聲訊複雜許多，故如下內容將先就試驗聲訊之解析方式提出討論，再合併理論聲訊之解析結果整建相關規則，以回饋於地錨安全功能監測或設計之應用。

5-1 頻率域解析方法比較

試驗訊號分析時除須對訊號之擷取方式、種類和特性有充分的瞭解外，分析前應藉數據校正、剔點處理、中心化和消除趨勢項等方式進行前置處理，以確保分析結果的可靠性(詳見鄭世豪，2009)。再者，本試驗聲訊受異常訊號和外部雜訊干擾，雖已藉由機械濾波濾除大部分雜訊，但仍較數值聲訊複雜許多，為有效於頻率域中，探討各構件之損傷音量釋放情形和提取頻率特徵，謹依快速傅立葉變換和功率譜二種分析方法討論其差異性，俾便建議適當之詮釋方式。

5-1-1 快速傅立葉變換

快速傅立葉因其簡單性和實用性，廣泛應用於工程相關領域之頻率反應分析，其中以低作用能量和簡單結構之週期訊號最為常用。此外，僅管快速傅立葉變換於非週期性訊號分析時，可藉相關手段避免頻譜混疊失真(aliasing)、頻譜洩漏(leakage)及柵欄現象(picket fence effect)等效應的發生而進行聲訊內在訊息的詮釋，但因其係直接將有限試驗資料點採全域離散序列方式進行變換，對於複雜訊號而言，會因漣波(ripple)的干擾而影響主要頻率的判讀(圖 9)。因此，為克服上述問題，本文進階透過加窗和局部化分段的處理方式(功率譜分析)描述試驗聲訊的隨機過程和頻率的分佈情形。

5-1-2 功率譜分析

功率譜分析之子程序眾多，一般可分為非參數化方法、參數化方法和子空間方

法三大類，其中，非參數化方法係以訊號本身之相關性估計功率密度函數；參數化方法係先產生訊號之系統參數再估計功率密度函數，可討論雜訊的干擾成分；而子空間方法則以特徵分析或特徵分解估計訊號頻率成分，屬高解析度之分析方法。但因上述各法之分析程序和應用性不同，欲逐項討論定將耗費多時，故吾人逕以非參數化中常用之週期圖法(Periodogram Method)、Welch 法(Welch Method)和多正交窗口法(Multitaper Method)單純討論不同功率譜估算方法之差異。由圖 10(a)~(c)可知，當選用最簡單之矩型窗口和滿足尼奎士(Nyquist)取樣規則進行分析時，三法所得之第一主要頻率皆為 6,630 *Hz* (與快速傅立葉變換相同)，但 Welch 法和多正交窗口法可消除峰值兩側的漣波，尤以 Welch 法之效果最好，至於變換後振幅大小的差異乃肇因於加窗效果和局部化分段方法的差異，故本研究建議以非參數之 Welch 法作為後續特徵判讀和研究之主要方法。

5-1-3 結果討論

聲洩監測系統於過去大都應用於預力橋梁和混凝土結構之行為監測，因為材料簡單試驗所得訊號相對清晰，採快速傅立葉變換足已解釋其特徵(現地試驗監測系統之訊號分析方法係依此經驗而建立 ；Paulson *et al.*, 2003)。但本研究將試驗監測聲訊前置處理後，經傅立葉變換和功率譜分析發現：快速傅立葉變換謹慎使用可討論訊號整體頻率的分佈，但因主要振幅兩側有漣波產生，容易影響主要頻率的識別；而功率譜分析除可討論訊號整體頻率的分佈情形外，可藉分段處理消除漣波干擾以增加受測結構系統之主頻判讀，但因窗口類型和分段方式影響結果甚巨，本文以矩形窗為例，討論 Periodogram 法、Welch 法和 Multitaper 法之差異，由結果可知解析度以：Welch 法>Multitaper 法>Periodogram 法。

5-2 地錨損傷頻率變化規則

雖然現地地錨監測成效已藉由數值分析證明可行，但因時間域之試驗和數值損傷聲訊無法確實反映兩者狀態變化的吻合性。因此，本文依上述結論以功率譜(Welch 法)進行相關數據解析，重新於頻率域探討兩者於地錨結構狀態變化的相似性，由圖 11可知試驗聲訊和數值聲訊除於時間域匹配外，其於損傷過程之狀態詮釋亦具一致性。此外，由表三不同設計載重之地錨構件損傷聲訊的系統主頻變化可知：

1. 不同地錨於相同構件發生損傷時，設計性能(設計載重)愈佳者其系統主頻愈高，且隨損傷程度的擴大，主頻逐漸下降，尤以設計載重低者變化較為明顯。
2. 地錨隨構件損傷事件的增加，系統主頻兩側之波形振盪加劇，代表隨著損傷事件的演進，結構愈形劣化其頻率特徵愈形複雜(可能含有其他事件雜訊)。
3. 地錨構件損傷之系統主頻隨設計載重和損傷型態的不同而改變，不易統建其關聯性，但仍為地錨構件損傷識別之重要依據，例如：當結構系統之主頻改變時即表示結構內部發生損傷或變化，宜注意其行為潛勢。

5-3 地錨損傷音量(能量)變化規則

地錨聲洩試驗和數值模擬之構件損傷訊息雖皆以疏密擴張之聲波進行傳遞，但欲瞭解該事件發生時之釋放能量，除可依公式(6)計算所有記錄感應器之頻譜能量再疊加其總和外，可再配合公式(7)，將原始聲訊單位換算音量單位(dB)。

$$E=\frac{1}{(N\times i)}\sum_{n=0}^{N-1}\left(x_1^2(n)+x_2^2(n)+.....+x_i^2(n)\right)\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

$$dB=\begin{cases}10\log\left(\dfrac{E}{E_{ref}}\right) & \textit{for power signal (W)}\\ 20\log\left(\dfrac{E}{E_{ref}}\right) & \textit{for energy signal (V)}\end{cases}\cdots\cdots\cdots(10)$$

其中，E 為地錨單一損傷事件發生時，面版上所有感應器之釋放能量(E_{ref} 為參考能量)；N 為頻率分析之樣本點數；i 為聲訊接收筆數；$x_i(n)$ 為第 i 筆、第 n 頻率的聲訊幅值。

同上述損傷音量之計算說明，吾人可將不同設計載重之地錨損傷聲訊變換至頻率域，將各感應器之幾何配置影響透過正規化程序消除後，建立地錨構件損傷發生時之總體釋放音量和作用載重關係(圖12)。由圖可知錨碇水泥漿開裂和鋼絞線斷裂之作用載重和音量(能量)釋放等級明顯不同，但僅限於特性的討論，無法有效落實於應用參考，故吾人嘗試依上述分析結果佐以迴歸分析(regression analysis)，期能建立各式損傷的規則和估算公式，以量化相關資訊。然而，因錨碇水泥漿開裂之事件數較少且於地錨使用期間較無立即危險，故研究暫忽略其量化之必要性，僅依鋼絞線斷裂事件迴歸整理其規則如圖13所示，而代表不同設計載重之迴歸曲線如表四所示。由圖可知當地錨設計載重高時，誘發鋼絞線斷裂所需外力相對較高，且釋放音量相對低沉；但隨設計載重尚失或不足時，其釋放音量則相對提高。此外，若以單一設計地錨而言，相同構件損傷時，隨外加荷載的上升其釋放音量依指數函數形式提高。

六、結論

國內地錨施工程序、施工材料和機具隨著施作經驗的累積和相關規範的製訂，以趨成熟。但對於使用中地錨之功能檢查和行為變化，迄今尚未能藉由有效的研究方法明確掌握，導致地錨維護管理工作進展不易。因此，本文以新進聲洩技術於地錨監測試驗之結果為基礎，藉數值模擬和訊號分析探討地錨構件損傷規則，茲將主要結論說明如下：

1. 聲洩監測系統經證明可應用於地錨損傷行為和安全預警之應用，其藉由內建之聲訊資料庫和定位式可識別大多數常見地錨破壞型態。
2. 本文建立之數值分析程序，除可配合地錨構件之材料組構行為和相關程序設定模擬其破壞特徵外，仍可搭配衰減律的應用，瞭解各式損傷波訊沿格梁面版之傳遞情形。
3. 影響地錨功能狀態之主要因素，除自然環境的變遷(豪大雨量、銹蝕)外，由參數研究可知鋼絞線的強度和設計股數之影響最為明顯、澆置混凝土品質和地層性質次之。
4. 主頻特徵在監測系統中是為反映地錨工作狀態和服務品質之重要指標，由試驗和數值模擬結果皆可見當地錨損傷愈嚴重時，其變化程度愈明顯，可以此結論應用於地錨安全預警。
5. 由量化之地錨損傷規則可知，鋼絞線斷裂的釋放音量隨設計載重降低而提升，且當單一設計載重情況下連續鋼絞線損傷發生時，釋放音量則依指數函數形式提高，可應用於地錨功能維護和安全預警之參考。

六、參考文獻

1. 鄭世豪 (2009)，“聲波監測應用於地錨結構破壞之模擬和訊號分析”，博士論文，淡江大學土木工程研究所，台灣，淡水。
2. 李維峰，陳育聖，王淳謹，林主潔，卓大鈞(2004)，「Advitam預力監測系統研發推廣計畫」，派爾國際工程股份有限公司委託案。
3. 台灣營建研究院 (1995)，“台灣基隆監獄整建工程地質調查及基地整體安全評估工作－期中地質調查報告”，台灣科技大學委託案。
4. 于作安 (1999)，“木山層砂岩高圍壓之變形行為研究”，碩士論文，台灣大學土木工程研究所，台灣，台北。
5. 張德文、李維峰 (2008)，"聲波監測應用於地錨結構破壞之模擬和訊號分析"，國科會專題研究計畫，NSC96-2211-E-032-040。
6. Benmokrane, B., Chekired, M. AND Xu, H. (1995). “Monitoring Behavior of Grouted Anchors Using Vibrating-Wire Gauges.” *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121 (6), pp. 466-475.
7. Ivanovic, A. (2001). “*The Dynamic Response of Ground Anchorage Systems*.” PhD Thesis, University of Aberdeen.
8. Liao, H.J. and Lin, C.C. (2008). “Rainfall Induced Tied-Back Slopes Failures in Taiwan.” *Proceeding*, 3rd Taiwan-Japan Joint Workshop on Geotechnical Natural Hazards, Keelung, Taiwan, pp. 305-315.
9. Paulson, P., Tozser, O. and Marcel De Wit

(2003). “The Use of Acoustic Monitoring to Manage Concrete Structures in the Nuclear Industry.” *Proceeding*, 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Prague, Czech Republic, Paper ID:001-6.

表一　地錨常見破壞型態和破壞原因說明

破壞位置	破壞型態	破壞原因
錨頭	銹蝕	混凝土澆置品質劣化；二次施工冷縫和雨水侵襲
	脫落	夾片和鋼絞線之咬合能力不佳；夾片銹蝕和構件不良；握線器和錨孔軸線之垂直度不佳
自由段(淺層)	鋼絞線銹蝕	混凝土澆置品質劣化；二次施工冷縫和雨水侵襲
	鋼絞線斷裂	淺層地質滑動；水壓力作用；施工品質和設計不良
錨碇段(深層)	水泥漿開裂	水泥漿品質和灌置缺陷
	鋼絞線銹蝕	錨碇水泥漿開裂；地下水侵襲
	鋼絞線斷裂	深層地質滑動；水壓力作用；施工品質和設計不良

表二 試驗和數值分析之結果比較列表

方法 / 比較項目	現地試驗	數值模擬
設計載重(tons)	48.0	48.0
損傷事件	3	4
最終破壞型式	錨碇段拉脫	鋼絞線斷裂
損傷類別	cement crack (作用載重42.79tons)	cement crack (作用載重38.88tons)
	cement crack (作用載重46.57tons)	cement crack (作用載重50.25tons)
	—	cement crack (作用載重51.91tons)
	deep wire break (作用載重57.58tons)	wire break (作用載重58.41tons)

表三 不同設計載重之地錨損傷主頻變化規則

主要頻率(kHz) / **設計載重(tons)**	cement crack	(deep or surface)　wire break
62.5 (數值模擬)	9.2~	8.7~
48　(現地試驗)	8.7~8.8	8.0~
48　(數值模擬)	8.5~8.6	8.5~
42　(數值模擬)	7.7~	6.2~7.6
38　(現地試驗)	6.7~7.6	6，7~7.2
29.5 (數值模擬)	7.0~7.1	4.2~6.4

表四 不同設計載重之地錨損傷迴歸曲線

分析地錨編號	設計載重	迴歸公式： $f(x)=ae^{bx}$		R^2
		a	b	
1	62.5 tons	0.1525	0.0834	0.8
2	48.0 tons	2.7520	0.0526	0.8
3	42.0 tons	22.9600	0.0319	0.8
4	29.5 tons	61.4000	0.0241	0.9

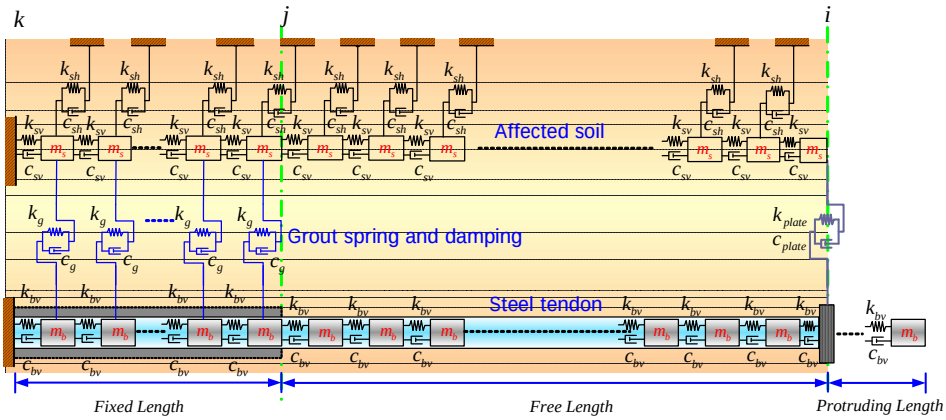
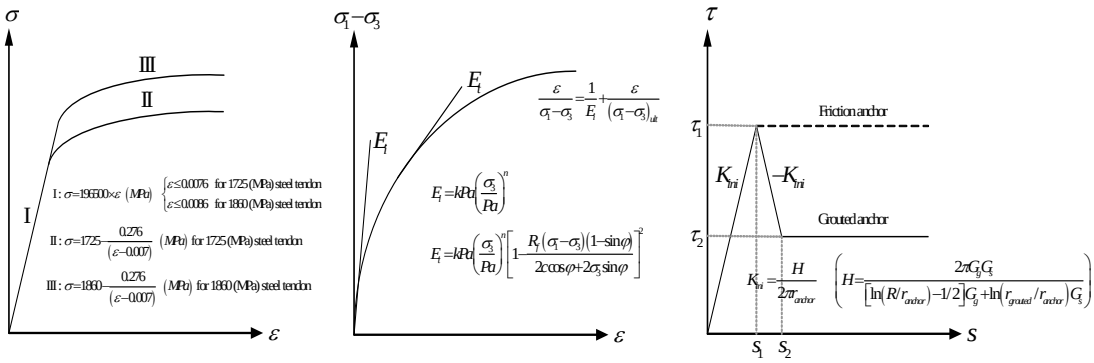
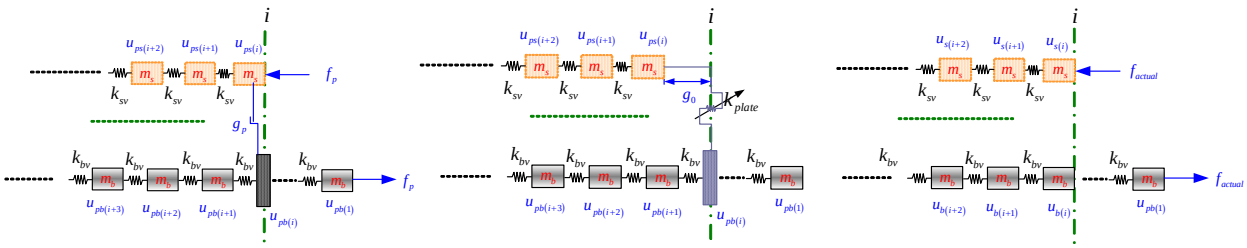


圖 1 離散化之地錨結構示意圖



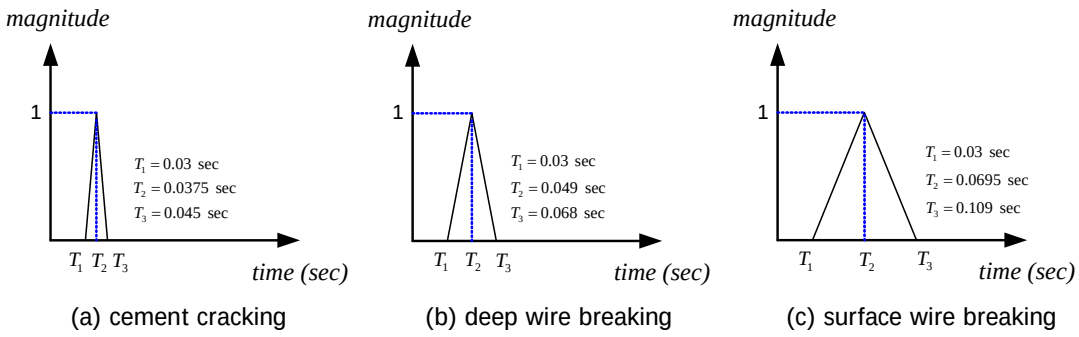
(a) steel tendon model (b) soil model (Hyperbolic model) (c) grouted-soil interface model

圖 2 本研究選用之鋼絞線、錨碇土層和錨碇水泥漿-錨碇土層界面組構模式



(a) 地錨施加預力之節塊力平衡示意圖 (b) 錨頭勁度轉換為變位反應示意圖 (c) 實際作用於地錨之外力示意圖

圖 3 地錨預力施加和錨頭簡化示意圖



(a) cement cracking (b) deep wire breaking (c) surface wire breaking

圖 4 各式地錨損傷發生時對應之脈衝作用載重示意圖

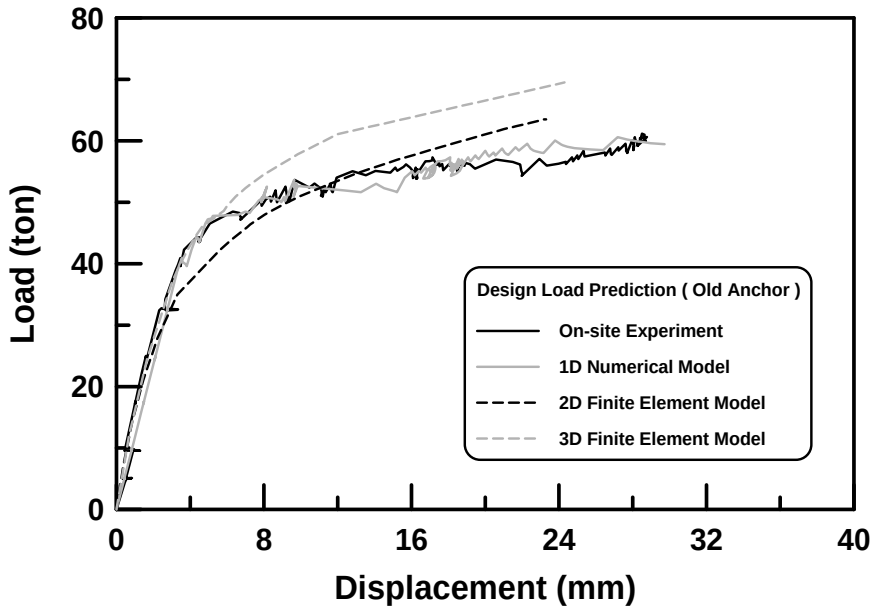


圖 5 現地試驗和數值模擬(1D Analysis Model 和 2D、3D Finite Element Model)之地錨揚起變位曲線比較

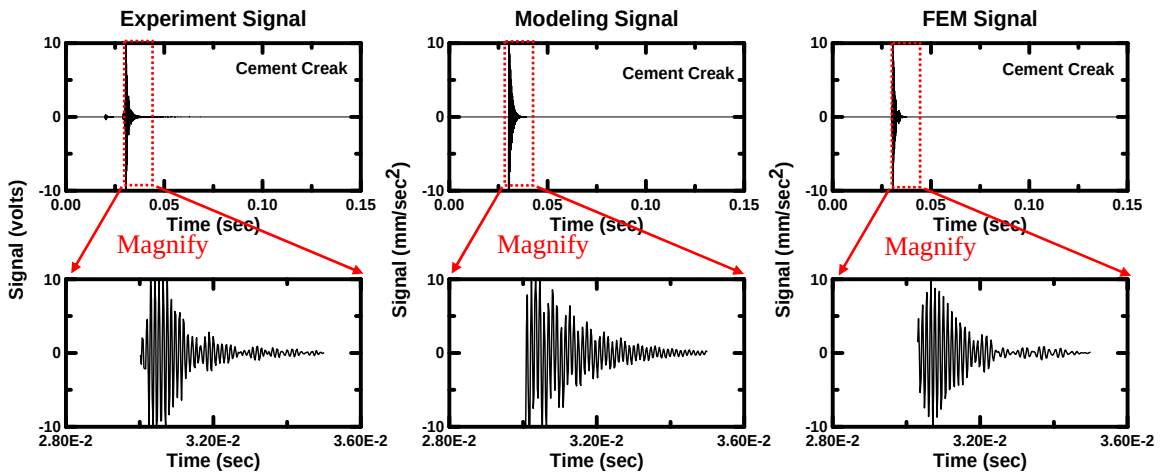


圖 6 舊有地錨試驗和數值聲訊比較(錨碇水泥漿開裂事件)

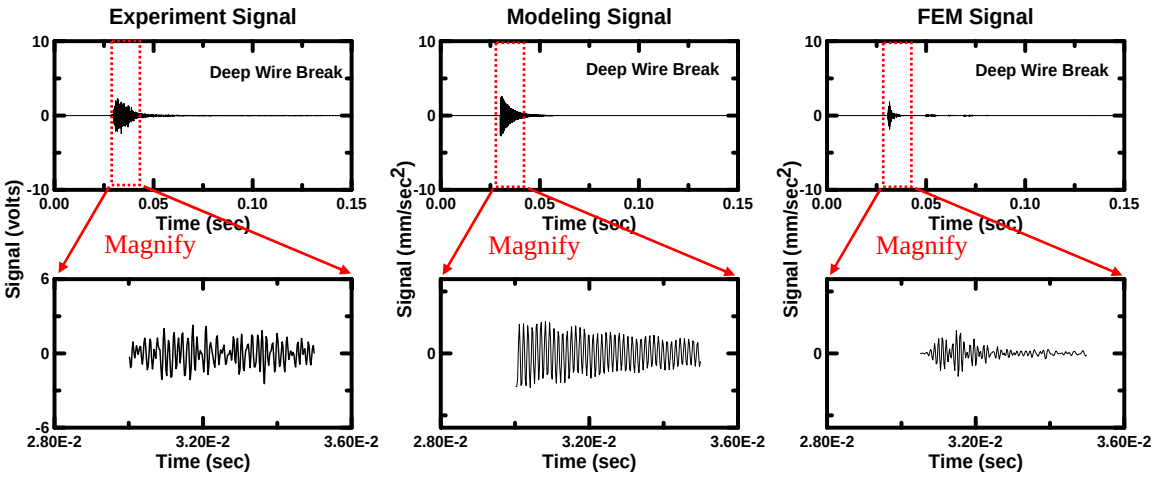


圖 7 舊有地錨試驗和數值聲訊比較(鋼絞線斷裂事件)

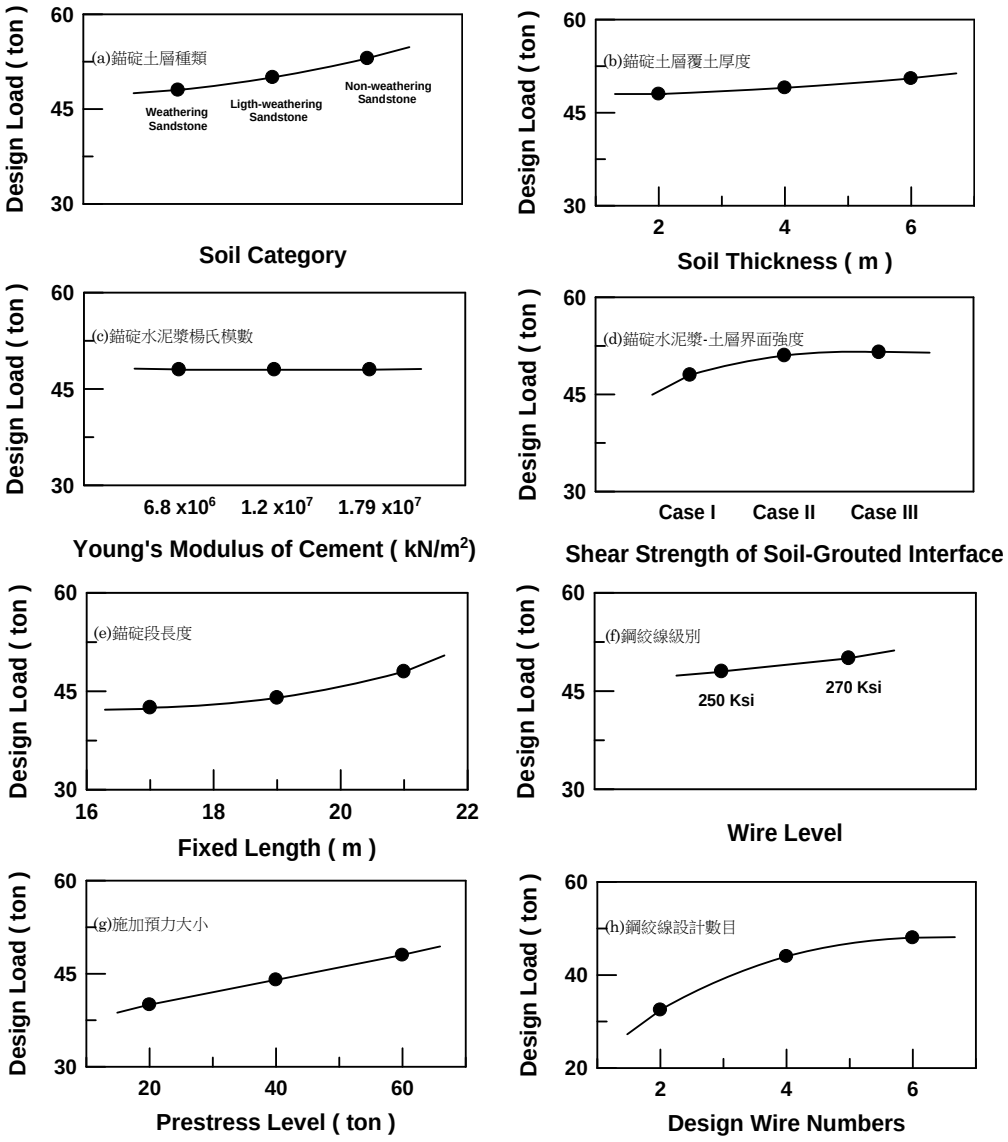


圖 8 地錨設計載重之影響參數比較

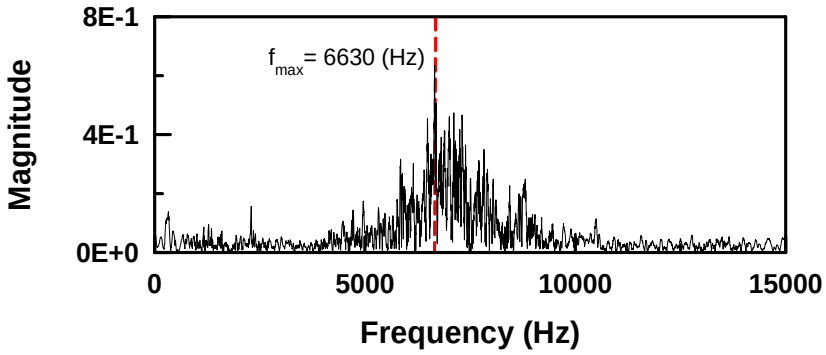


圖 9 快速傅立葉分析之頻譜圖 (0~15,000 Hz)

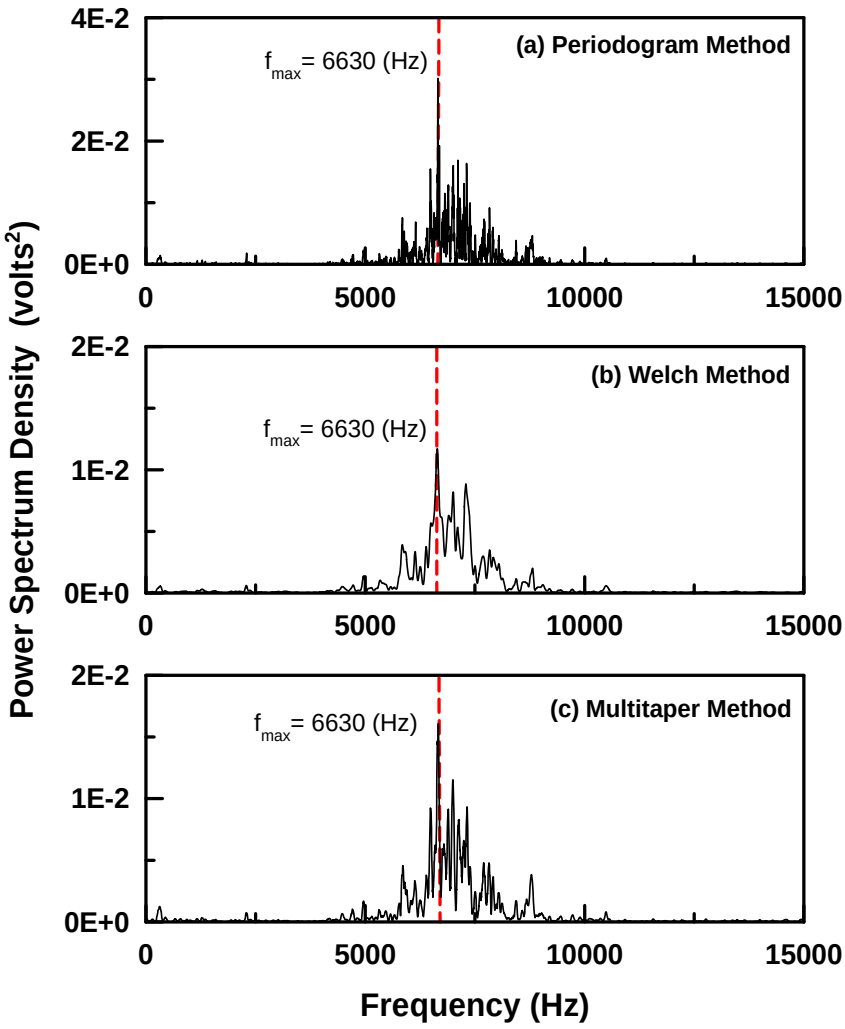


圖 10 非參數功率譜分析比較 (0~15,000 Hz)

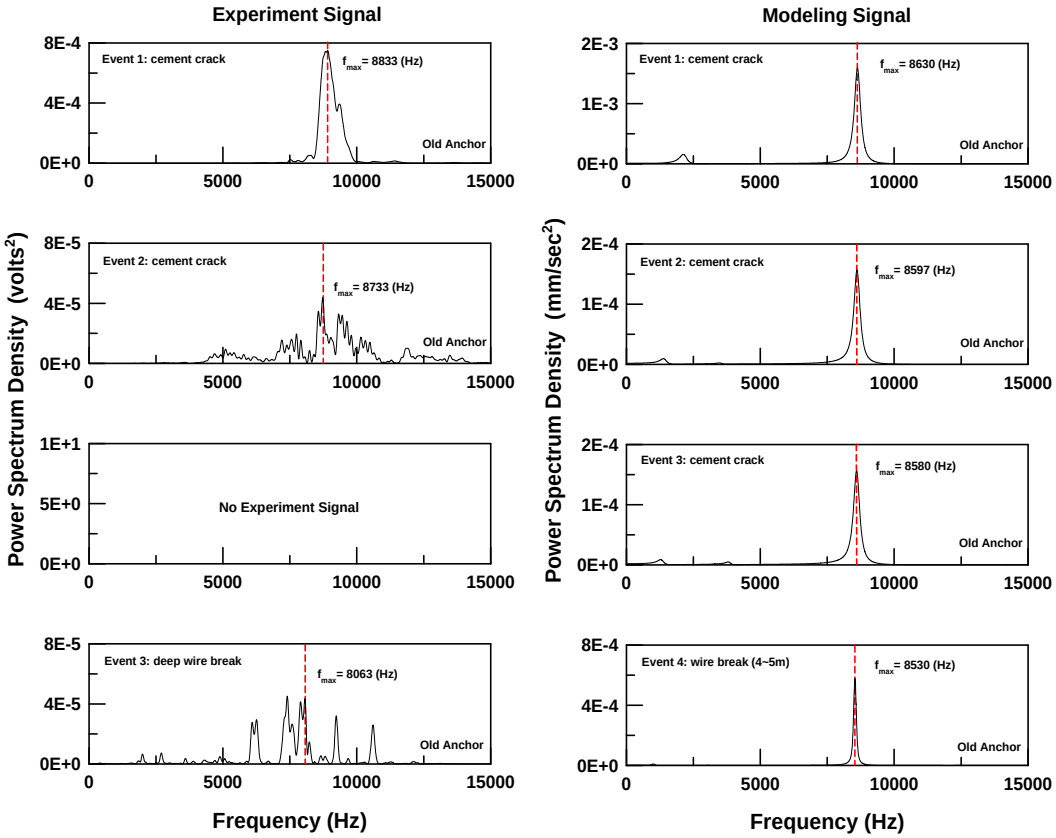


圖 11 試驗和數值聲訊之頻率特性比較 (舊有地錨)

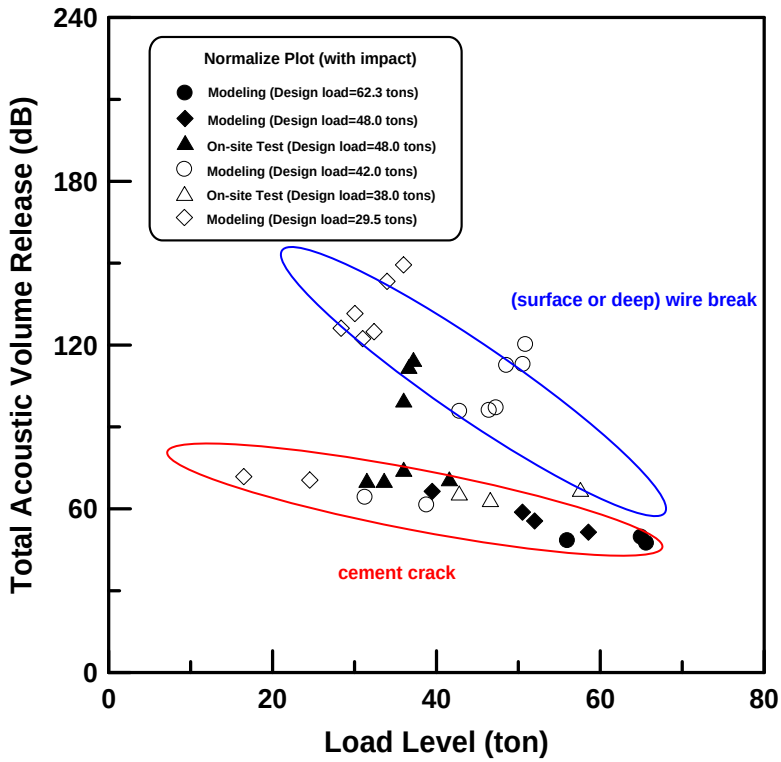


圖 12 地錨構件損傷之釋放音量-揚起載重關係曲線

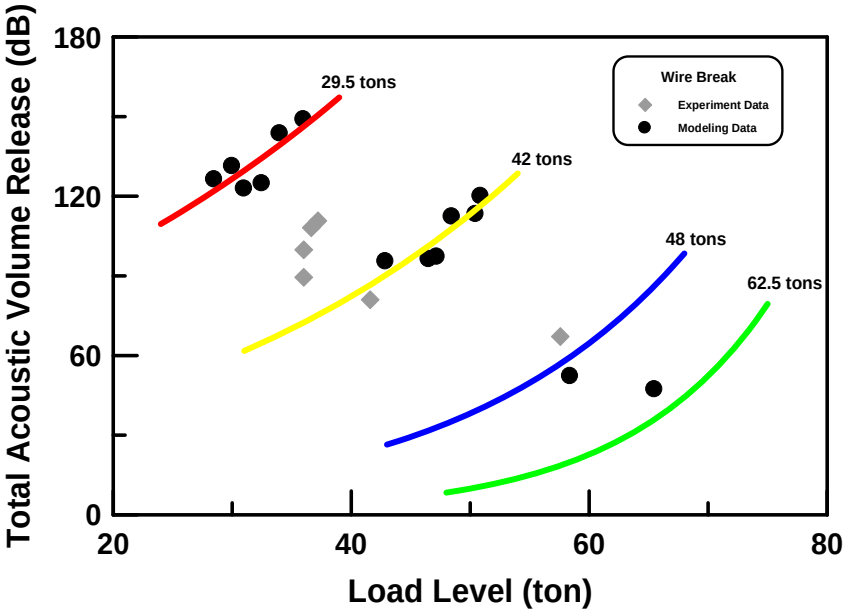


圖 13 不同設計載重之鋼絞線損傷音量釋放規則

行政院國家科學委員會補助國內專家學者出席
國際學術會議報告(I)

會議中文名稱：汶川地震週年國際地震工程學術研討會

會議英文名稱：International Conf. on Earthquake Engineering ~ The 1st Anniversary of Wenchuan Earthquake

會議時間：2009 年 5 月 10~12 日

會議地點：中國大陸四川省成都市

RDT08

行政院國家科學委員會補助國內專家學者出席國際學術會議報告

98 年 5 月 17 日

報告人姓名	張德文	服務機關及職稱	淡江大學土木系
會議時間 會議地點	2009/5/10~12 中國四川省成都市	本會核定補助文號	NSC97-2221-E-032-040
會議名稱	（中文） 汶川地震週年國際地震工程學術研討會 （英文） International Conf. on Earthquake Engineering ~ The 1st Anniversary of Wenchuan Earthquake		
發表論文題目	（中文）基於 EQWEAP 的單樁抗震性能分析 （英文）Analysis of Seismic Performance of Single Piles from EQWEAP		

會議經過

汶川地震週年國際地震工程學術研討會(International Conf. on Earthquake Engineering ~ The 1st Anniversary of Wenchuan Earthquake)係由中國西南交通大學聯合日本八學會汶川地震災後重建技術支援聯絡會、中國地震學會和其他有關組織所主辦，時間為 2009 年 5 月 10 日~12 日，地點為四川省成都市。本次大會係由西南交大土木工程學院承辦，由於西南交大和淡江大學素有交流，遂邀請淡江大學為協辦單位，中國地震局工程力學研究亦為另一協辦單位。由於聯繫時間稍嫌緊迫，淡江大學出席此項會議教師共計四人，包括土木系教授鄭啟明、王人牧、廖國偉等老師和筆者。我們一行人於 5/9 搭承國泰航空班機由香港轉港龍航空班機飛抵成都，由交大接機並下榻於校園內之鏡湖賓館，晚間由土木工程學院招待晚宴後，即由鄭啟明教授和筆者分別針對土木工程學院之研究生和本科生(大學部學生)進行土木科技月講座演說，筆者就「台灣土木工程高等教育概況暨淡江大學土木工程學系現況和發展」向該校師生進行一小時的報告，與會師生反應熱烈，報告後提問和回答時間近半小時。十日上午大會正式於成都市四川科技館召開，首日議程主要為特邀報告，主辦單位共安排了十三場特邀報告(包括日本學者 Hamada、Towhata、Chigira、Maeda、Yashima，美國學者 Bardet、Kavazanjian、紐西蘭學者 King 等人的演講)，晚間則由主辦單位設宴歡迎與會人士。第二日則為分三組進行報告(見附件)，筆者的論文 Analysis of Seismic Performance of Single Piles from EQWEAP 被安排為第二日大地工程組議程的 Theme Lecturer，發表時間較長，為 30 分鐘，主持人為西南交大土木學院的姚令侃教授，出席該場次的人數近百人，報告後並與美國亞利桑那州大土木系教授 Kavazanjian 和加州洛城水電局顏利平博士交換研究意見。稍後則由筆者主持大地工程組第二場議程，廖國偉教授的論文即在該議程發表。11 日下午一行人到該校新校區和結構風洞實驗室（全世界最大之結構風洞實驗室）參訪，晚間則參加了該院在悟園會所所準備的特別晚宴，出席者尚包括工程院士和清華大學、同濟大學的幾位教授。12 日大會準備了幾條路線供與會人士前往災區考察，個人因另有要務，遂先行返台，鄭啟明教授等三人則於 13 日返台。相關參訪照片如附件資料。

會議心得、成果和建議

1. 淡江大學長期所經營的學術交流關係再次發揮影響力，本次學術會議不僅為兩校學術交流增添佳話，更為台灣相關學術工作的成果做見證。與會人士均甚肯定筆者和廖教授所提出的報告內容，咸認為可在規範制訂和設計實務上做為學習參考。筆者現有工作成果除過去所發展者實和 2008 年在西雅圖華大訪問三個月所學習的最新技術有關，非常慶幸能有此機會進修，充實自我。
2. 和西南交大土木工程學院領導階層晤談甚歡，咸認為兩校可循既有模式進行學術交流和合作，除本科生(或研究生)的交換學生工作推行外，亦可利用暑假推動教師短期講座課程，供學術研究交流之用，再由此為基礎，擴大研究之合作關係，唯以上構想尚須由兩校行政主管商議協訂以推動並落實。
3. 兩校學術的持續交流工作將於今年下半年十一月再創高峰，屆時淡江大學風工程研究中心將舉辦亞太風工程學術會議，大陸地區的所有參與人士將由西南交通大學土木工程學院副院長廖海黎教授率團參訪，兩岸交流可再增進一步。
4. 筆者目前擔任第十七屆東南亞大地工程學術會議秘書長，該會議為國際性學術會議，將於 2010 年五月假台北國際會議中心召開，主辦單位為東南亞大地工程學會和中華民國地工學會，筆者亦在會中向許多同好表示歡迎參加出席是項會議，希望能擴大參與，共襄盛舉。
5. 此行巧遇原熟識的日本東大教授 Towhata，亦有幸認識日本、美國和紐西蘭等地知名學者，也由筆者報告讓所有與會者了解個人研究成果，此行對於筆者未來的學術工作交流和提昇將更有助益。
6. 西南交大教學研究資源充沛豐富，其校地、校舍、硬體和學生人力等資源令人羨慕，唯其師資國際化程度尚賴加強，該校現每年送三十多名教師赴國外一流學府進修；該校高層人士對筆者所報告的台灣土木和淡大土木系師資人力甚為稱讚，認為素質優於該校。不過筆者認為此狀況短期內成立，長遠來看，台灣高教師資人力將有衰退危機，若彼岸不斷精進，未來兩岸高校師資彼長我消之態勢是極有可能存在的。由此觀察，高校新聘人員的考量除其學術表現和潛能外，國際化的訓練背景或外語流利程度亦甚為重要，此亦或可做為台灣高校新聘師資參考，個人建議應要求以外語簡報其研究成果以做為聘審評量之重要依據。

攜回資料

1. 汶川地震震災調查紀實報告書乙冊
2. 會議手冊乙份
3. 會議論文集乙份

照片一 開幕式

照片二 筆者報告

照片三 會場全景

行政院國家科學委員會補助國內專家學者出席
國際學術會議報告(II)

會議中文名稱：第十七屆國際土力暨大地工程學術研討會
會議英文名稱：The 17th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

會議時間：2009 年 10 月 5~9 日

會議地點：埃及亞歷山卓市

RDT08

行政院國家科學委員會補助國內專家學者出席國際學術會議報告

98 年　10 月　21　日

報告人姓名	張德文	服務機關及職稱	淡江大學土木系
會議時間 會議地點	2009/10/5~9 埃及 亞歷山卓市	本會核定補助文號	NSC97-2221-E-032-040
會議名稱	（中文） 第十七屆國際土力暨大地工程學術研討會 （英文） The 17th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering		
發表論文題目	（中文）地錨拉拔試驗破壞聲訊的模擬和演繹 （英文）Modeling and interpretation for ground anchor failure signals under pullout loads		

會議經過

第十七屆國際土力暨大地工程會議於 2009 年 10 月 5~9 日假埃及亞歷山卓市會議中心召開，我國係透過東南亞大地工程學會的論文額度而參與發表，共計有七篇論文發表於大會。由於與會人士超過十人以上，中華民國大地工程學會遂組團前往，團員包括台科大教授廖洪鈞理事長夫婦、李維峰教授，台大陳正興教授、林美聆教授，交大方永壽教授、黃安斌教授和其博班生李瑞麟先生，中原大學馮道偉教授、中興顧問江政恩主任、地震中心陳家漢先生夫婦和筆者共十三人；此外，自身前往參加者尚包括亞新顧問莫若楫董事長和秦中天博士、三位參加 Satellite 會議 4iYGEC 的青年工程師王景平、張博翔和張志勇先生，故共計 18 人與會。代表團一行人於 10 月 3 日下午一時半搭新航出發，途經新加坡和杜拜，於四日清晨五時半抵達開羅機場，隨後即在旅行社安排下參觀埃及考古博物館和古夫等三大金字塔，參觀活動直至當日下午四時半方結束。一行人遂驅車前往位於埃及地中海岸的海港城亞歷山卓市，車行時間約為三個半小時，抵達亞市時約為晚上八點左右。筆者和林美聆教授尚匆忙出席東南亞大地工程學會的 General Committee Meeting，筆者非 GC member，列席該會議係因 SEAGS 理事長秦博士邀請，以便備詢有關承辦 17SEAGC 會議的事宜。在會議結束後，方返抵旅館休息。

大會開幕式始於 10 月 5 日上午九時，會場寬敞諾大，保守估計與人士約有七八百人，大會主席為埃及開羅大學教授 Hamaza。在開幕頒獎給國際總會前任理事長 Van Impe 和來賓致辭後，隨即由埃及弦樂團表演組曲揭開大會序幕。大會的議程安排如表一，10/5 和 10/6 前兩日以單場演說和討論為主，共計安排九場演講(Terzaghi Oration、Heritage Lecture、Project Lecture(2)、State of Art Lecture (5))、一場論壇和一場 iYGEC 的總結報告。照片一、二為大會之一二景。大會並於 10/5 日晚在亞歷山卓市凱特貝堡舉行歡迎晚宴。

10/7~10/8 日為各議程論文發表時間，會議論文每篇限制為四頁，但論文集頁數仍高達 2000 餘頁，共印製成四大冊。筆者論文被大會收錄於論文集第三冊中，屬 Tech Session 3B 課題 Monitoring and Performance，該課題論文共計 52 篇，除三篇論文被大會選擇為 Panelist 報

告(每篇報告時間八分鐘)，十二篇論文被安排口頭發表(每篇五分鐘)，餘所有論文均採壁報方式發表，惟大會對於壁報論文的安排甚為草率，不僅場地和壁報板不足以容納相關文章，事前聯繫作業亦完全忽視，故實際攜帶壁報至會場發表者寥寥可數，照片三為筆者和壁報論文之合影。

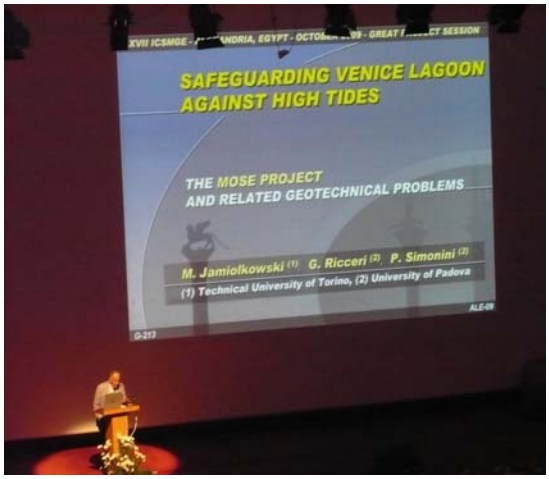
筆者於 10/8 日下午參加完會議後即隨代表團搭車前往開羅，10/9 日個人先行搭機返台並於 10/10 抵達桃園機場；由於學校課程和飛機航班等安排問題，筆者未參加 10/8 晚間所舉辦的民俗晚宴和 10/9 的工程參觀活動。

會議心得、成果和建議

1. 本屆會議安排和以往比較，除稍顯不週外，單場和平行會議演講的內容和品質也似乎明顯不如前。個人感覺主辦者安排過份傾於個人好惡和政治考量，許多演講者的演說內容過於空泛粗淺，且演說者自身學術成就不高，很難引起聽眾共鳴。其實國際土力暨大地工程會議係為大地工程界最大型最具代表性的國際盛會，對於大會的安排，筆者甚感遺憾。因為這樣的做法除無法彰顯相關研究領域的重要學術成果外，也無法使與會者對自身專業領域的佼佼者表現感到驕傲和認同，進而再次凝聚專業的共識。
2. 我國論文共計七篇，除林美聆教授論文為 panelist 報告，黃安斌教授和秦中天博士論文採口頭發表外，餘均為壁報論文。筆者論文係與台科大李維峰教授所合著，該論文內容相當新穎，亦有創見，惟仍未獲大會青睞安排口頭發表，殊為可惜。
3. 此行所遇國際人士頗多，除以前即認識的朋友外，亦結識少數新朋友。由於筆者擔任明春 (2010/5/10~13)將於台北舉行的 17SEAGC 會議委員會秘書長，遂利用機會邀請有關人士參與，希望屆時能一盡地主之誼。
4. 我國秦中天博士為現任東南亞大地工程學會理事長，在其刻意提攜帶領下，有許多重要的會議和委員會組織均邀請我國人士擔任，除提昇並維護我國參與國際社會事務的機會和權益，並可展現我國的學術能力。此外，代表團一行人也商討今後應該利用適當時機向國際總會申請我國加入成為獨立的會員國，名稱和申請須視兩岸關係而審慎作業。
5. 埃及是文明古國，筆者除驚嘆其古蹟完整性和其先人的智慧和工藝水平外，也對埃及現況的沒落和環境髒亂、市容老邁、房舍破舊、雜亂無序的社會感到嘆息。其在 20 世紀上半世紀曾經在西方世界的垂愛下而發達、古城再現風華，並在 60 年代修築舉世聞名的亞斯文水壩工程，然現在所呈現的景像卻是如此落沒不堪，這種變化實在值得吾人引為警惕。

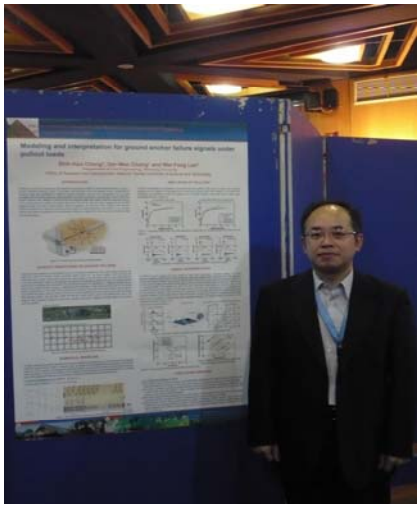
攜回資料

1. 會議手冊乙份；2.會議論文集四冊；3. 會議論文光碟乙份；4. 出席證書乙枚。



照片一　大會 Large Project 演講一景 (Prof. M. Jamiolkowski)

照片二　大會追念 Prof. R. B. Peck 一景 (Prof. G. Mesri)



照片三　筆者和壁報論文合影留念