

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

聲波監測應用於地錨結構破壞之模擬和訊號分析

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 96-2221-E-032-040-

執行期間：96年08月01日至97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

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

中華民國九十七年十月十日

行政院國家科學委員會專題研究計畫精簡報告

聲波監測應用於地錨結構破壞之模擬和訊號分析

Simulations and Signal Analysis of Ground Anchor Failure Using Acoustic Test

計畫編號：NSC 96-2212-E-032-040

執行期限：96年8月1日至97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

淡江大學土木工程學系

一、中文摘要

地錨常見於台灣各地之坡地和擋土工程中，其性能評估當為工程防災的重點項目之一，然有關國內外研究成果並不多見，相關之研發工作雖以英國和中國大陸等地學者成果為先驅，但以岩栓為主，仍有相當之空間尚賴探索。本研究構想係以 SoundPrint[®] 預力連續式聲波監測系統應用於地錨監測(全球首例)之台灣本地試驗數據為基礎，建立合理之數值分析模式以做為解讀試驗數據之用(靜力拉拔試驗預測和破壞聲訊模擬)，並經二維及三維有限元素分析，證明其可行性，以利探究地錨使用期間影響其性能表現之主要因素，盼能掌握主要影響因素以回饋於設計參考。研究發現：(1)本文建議之分析模式可合理模擬地錨拉拔試驗結果和反映破壞時產生之聲訊；(2)由參數分析結果可知鋼鍵之強度性質和設計數目影響最劇，錨碇土層和錨碇砂漿性質次之，地錨之施做設計和工作狀態之性能檢查可以本研究結論為參考要點。

關鍵詞：地錨破壞、聲波監測系統、拉拔試驗、波動理論

ABSTRACT

Ground anchors are popularly used in many slopes and retaining structures in Taiwan. The ground anchor's performance is very important to hazard assessment in engineering mitigation

issues. However the relevant studies are hardly seen. Advance of the research works can be represented by the efforts made by UK and PRC scholars. The research study has been focusing on the rock bolt applications, more explosions seem to be needed. This study intends to establish a sound base for the similar application of the SoundPrint[®] pre-stressed acoustics monitoring system to the ground anchors, and it fully utilizes the data of its first applications to the local anchors. A simple modeling is established based 1D discrete model of the anchors and the surrounding soils, nonlinear material models are used for various elements of the structure. Pull-out test data and signals triggered by the failures during the test are simulated through the modeling. Attenuation Law is used to capture the signals measured elsewhere along the concrete panel. 2D and 3D FM analyses are conducted for validation of the suggestion. It is found that the proposed model could effectively predict the signals occurred during the test. The tendon strength and the numbers of tendon are mostly important to the structural strength. The cement and soil strengths are less important to the anchor capacity. The results of this study are helpful to the design and assessment of the ground anchor.

Key words: anchor failure, acoustic monitoring system, pull-out test, wave theory

二、緣由與目的

地錨工程技術因可充分發揮錨碇地層之承载力、提高錨碇地層強度和穩定性、減輕錨碇結構或支撐結構自重等優點，而

廣泛應用於大地工程領域之相關工程實例中，諸如：交通建設和建築結構的隧道開挖支撐；水壩基礎、輸電塔基礎穩定；邊坡穩定修護等大型建設工程。然而，由於其作用機制複雜且埋置於地層中，常因施工品質不良、鋼鍵腐蝕、地層潛變或環境氣候變遷等外在因素影響造成缺陷，進而降低其服務年限(service life)和使用性能(service function)，導致破壞和發生災害，故如何評估其耐久性和使用性能遂為該項工程之重要工作。我國因多山坡地形且地狹人稠，自民國六十年代初期迄今，諸多重大工程和住宅建案依傍坡地而開發，用以支護之背拉式預力地錨，歷經多年的使用，其品質狀況和服務性能是否因施工品質不良而造成缺陷；是否因人為或自然環境變遷等因素影響，尚能滿足原始設計要求或發生破壞危機，研究與實務界至今仍未多見研討，相關問題實賴評估並尋求解決對策。鑑於此，本研究擬以(1)預力連續式聲波監測系統(SoundPrint[®])結合現地拉拔試驗藉人為方式加促地錨破壞產生，探究地錨完整破壞歷程之各項表徵和蒐集全球首例之地錨破壞聲波(acoustic wave)資料；(2)建立更為周延完整的立論和分析架構，以波動理論為基礎建立數值分析模型，並和現地拉拔試驗、二維乃至三維有限元素分析結果比較，證明其可行性；(3)比較地錨現地試驗聲訊和理論聲訊模擬成效，可依靜力拉拔分析結果納入動態訊號模擬機制，以瞭解不同破壞事件所產生之訊號差異和能量分配情形；(4)藉參數研究討論地錨使用期間影響其性能表現之主要因素，盼能掌握主要影響因素以回饋於設計參考和敦促地錨服務性能檢查及維修補強之要點掌控。

三、地錨數值分析模式

完整地錨構造可概分為鋼鍵外露段、錨頭、自由段、固定段和錨碇土層等 5 個子結構系統。欲充分體現地錨行為，建構的分析模式需有效涵蓋各子系統特徵，故本研究將整體地錨結構離散化，以質量-彈

簧-消能盤的組合方式模擬其軸向反應。其中，為考量各子系統行為及特性，可將地錨鋼鍵質量集中於多個離散點上，並將其和代表鋼鍵的彈簧及消能盤以並聯之凱文模式(Kelvin Model)結合後，以串聯方式模擬鋼鍵元件；而錨碇土層亦可仿照上述方式模擬。此外，為考慮固定段之錨碇砂漿和影響土層的剪力貢獻，可分別將代表側向力傳遞之彈簧和阻尼並聯後，再分別與鋼鍵和影響土層之軸向彈簧及阻尼連接，如圖 1 所示。然而，依牛頓第二運動定律(Newton's Second Law of Motion)和各子系統之節塊運動平衡關係可推導代表整體地錨反應之質量(M)、勁度(K)和阻尼(C)矩陣如下：

$$M = \begin{bmatrix} m_{tendon(protruding)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{tendon(free)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{tendon(fixed)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{soil(free)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{soil(fixed)} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{tendon(protruding)} & -k_{bv(i)} & 0 & 0 & 0 \\ -k_{bv(i)} & k_{tendon(free)} & -k_{bv(j)} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{bv(j)} & k_{tendon(fixed)} & 0 & k_{grout} \\ 0 & 0 & 0 & k_{soil(free)} & -k_{sv(j)} \\ 0 & 0 & k_{grout} & -k_{sv(j)} & k_{soil(fixed)} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{tendon(protruding)} & -c_{bv(i)} & 0 & 0 & 0 \\ -c_{bv(i)} & c_{tendon(free)} & -c_{bv(j)} & 0 & 0 \\ 0 & -c_{bv(j)} & c_{tendon(fixed)} & 0 & c_{grout} \\ 0 & 0 & 0 & c_{soil(free)} & -c_{sv(j)} \\ 0 & 0 & c_{grout} & -c_{sv(j)} & c_{soil(fixed)} \end{bmatrix}$$

其中， $m_{tendon(protruding)}$ 、 $m_{tendon(free)}$ 、 $m_{tendon(fixed)}$ 、 $m_{soil(free)}$ 、 $m_{soil(fixed)}$ 皆為對角線矩陣(diagonal matrix)，分別為外露段鋼鍵、自由段鋼鍵、固定段鋼鍵、自由段錨碇土層和固定段錨碇土層之質量次矩陣(忽略錨碇砂漿之質量貢獻)； $k_{tendon(protruding)}$ 、 $k_{tendon(free)}$ 、 $k_{tendon(fixed)}$ 、 $k_{soil(free)}$ 、 $k_{soil(fixed)}$ 皆為寬帶矩陣(band matrix)，分別為外露端鋼鍵、自由段鋼鍵、固定段鋼鍵、自由段錨碇土層和固定段錨碇土層之勁度次矩陣； k_{grout} 為對角線矩陣代表錨碇砂漿之勁度次矩陣；

$C_{tendon(protruding)}$ 、 $C_{tendon(free)}$ 、 $C_{tendon(fixed)}$ 、 $C_{soil(free)}$ 、 $C_{soil(fixed)}$ 皆為寬帶矩陣，分別為外露端鋼鍵、自由段鋼鍵、固定段鋼鍵、自由段錨碇土層和固定段錨碇土層之阻尼次矩陣； c_{grout} 則為對角線矩陣代表錨碇砂漿之阻尼次矩陣，完整之矩陣配置情形、分析參數估算方式、材料組構模式選用和預力施加方式可參考 Cheng *et al.* (2008)、鄭世豪 (2009) 說明。然而，上述模式係依運動平衡概念所建構，如何應用於地錨之靜力拉拔曲線和動態破壞聲訊模擬，茲參考圖 2 和下列說明：

3-1 拉拔曲線模擬(靜力分析)

地錨拉拔試驗係以階段性荷載進行施拉，屬靜態行為，而本研究係基於離散系統之節塊運動平衡假設建構整體地錨結構之質量矩陣、勁度矩陣和阻尼矩陣，直接以靜力分析進行討論或許會引起疑慮。然而，靜力分析中，其行為反應大都由彈簧力所控制，故吾人可依上述說明忽略整體系統之慣性力 (inertia force) 和阻尼力 (damping force)，以虎克定律 (Hooke's Law) 求解其靜態反應。然而，整體分析架構係以結構變形為基礎，故結構各組合元件破壞的判定，亦以變形量的檢核為標準。其中，當鋼鍵之應變量大於降伏應變量 ($\epsilon_{ps} > 0.0076$ for 250ksi tendon; $\epsilon_{ps} > 0.0086$ for 270ksi tendon) 即斷裂；鋼鍵和錨碇土層之相對位移量大於錨碇砂漿之容許剪力滑動量即產生開裂。

3-2 破壞聲波訊號模擬(動力分析)

為瞭解地錨結構元件破壞瞬間產生之即時聲波訊號，本研究依靜力分析結果，保留破壞時之材料參數(如圖 2 所示)，於破壞發生位置施加一單位脈衝載重 (Unit Impulse Load)，以討論各式破壞發生時之訊號差異和能量分配情形。然而，該項分析中脈衝載重之力幅大小 (load magnitude) 和延時長短 (duration) 隨破壞材料元件和破壞位置的不同而有所差異，且影響分析結果甚鉅，在無借鑑資料和參考標準情況下，本研究將依現場試驗成果建議各式破

壞施加之單位脈衝載重如圖 3 所示。此外，欲以運動方程求解其訊號反應，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 Averged Acceleration) 進行系統求解外，其初始條件於破壞瞬間已非靜止 ($u_{signal} = 0$ 、 $\dot{u}_{signal} = 0$ 、 $\ddot{u}_{signal} = 0$)，尚須配合合理之初始條件假設才可進行求解，如鄭世豪 (2009) 說明。

四、理論分析與破壞聲訊演譯

4-1 地錨拉拔試驗預測

為確立本研究建議靜態分析程序(地錨拉拔曲線模擬)之可行性和應用性，吾人直接引用現地試驗中舊有地錨和新設地錨之幾何設計尺寸和地質參數為分析案例 (李維峰等人 2003; 2005)，並以不同切割節塊數目檢核分析程序之收斂性後(建議以單位公尺切割分析地錨)，討論其與現地試驗和有限元素分析結果之差異及應用成效。

(1) 現地試驗案例比較：

- A. 舊有地錨模擬成效：由現地拉拔試驗和本文建議分析程序之模擬結果(如圖 4 所示)比較可知，數值預測之拉拔曲線趨勢和破壞型態的發生順序與現地試驗結果相當吻合，惟破壞發生次數和破壞時之作用載重未能完全與現地試驗匹配，乃因分析程序中對於地錨組材料之破壞定義與材料實際破壞發生時機不同所致。表 1 及表 2 分別為現地試驗和數值模擬之結果及破壞發生件數比較；
- B. 新設地錨模擬成效：同舊有地錨之模擬成效說明，新設地錨之現地拉拔試驗和本文建議分析程序之模擬結果及破壞發生統計比較，分別如圖 5、表 1 及表 2 所示。由圖 5 可見，隨破壞發生和彈性變形完全發揮後，拉拔曲線之塑性勁度較現地試驗為高，吾人推論其乃因新設地錨係於施工養護 35 天後即進行測

試，或許因強度未能充分發揮所致。

(2) 有限元素分析比較：

- A. 二維(2D)軸對稱形式：地錨因屬對稱結構系統，為簡化分析可以二維(2D)軸對稱形式並取有效分析域之一半進行分析，如圖 6 所示，分別為舊有地錨和新設地錨之分析域和幾何網格切割示意圖。分析模型中，係依節點位置的定義沿鋼鍵中心線向右自動複製網格，故舊有地錨和新設地錨皆包含有 17,173 個節點和 5,508 個元素。然而，為減少分析之運算量，鋼鍵、錨碇砂漿和錨碇土層皆採用 8 個節點之軸對稱元素(CAX8R)模擬之，各材料特性的模擬則依本研究建議數值模式之說明：(1)以彈性非線性模式模擬鋼鍵材料；(2)以完全彈性-塑性模式模擬錨碇砂漿；(3)以雙曲線模式模擬錨碇土層。
- B. 三維(3D)形式：如二維軸對稱形式說明，本研究另以三維(3D)形式取其有效分析域之 1/4 進行分析，如圖 7 所示，分別為舊有地錨和新設地錨之分析域和幾何網格切割示意圖。分析模型中，係依節點位置的定義沿鋼鍵中心線向右及向下自動複製網格，故舊有地錨和新設地錨皆包含有 32,217 個節點和 6,930 個元素。然而，為減少分析之運算量，鋼鍵、錨碇砂漿和錨碇土層皆採用 20 個節點之磚形元素(C3D20R)模擬之，而各材料特性的模擬同二維軸對稱形式說明。
- C. 分析結果與應用差異比較：由現地拉拔試驗、本文建議靜態分析程序、二維軸對稱有限元素和三維有限元素分析結果比較，如圖 8 及圖 9 可知上述各法所得之拉拔曲線趨勢相似但仍有些微差異，究其因乃肇於各法之基本工作特性和假設的不同所致。此外，就各法之工作特性、效能和應用性之評比而言，各具優劣性，吾人將其整理說明如表 3 所示。

4-2 理論破壞聲訊模擬

為證明理論聲訊之模擬成效，吾人於

地錨拉拔和破壞模擬過程中，以非線性材料組構模式修正系統勁度參數，並配合質量和阻尼參數的計算，依 3-2 節地錨破壞聲訊的模擬說明和各式破壞對應之單位脈衝載重進行分析，以瞭解地錨元件破壞發生時之表徵和能量分配情形。但礙於試驗破壞聲訊，係由加速計之壓電晶片所記錄，擷取電壓限制為 10 伏特(volts)，僅能接收該幅值內的訊號。為方便比較，本研究將理論分析所得之破壞聲訊除以一常數值(舊有地錨： 1.5×10^7 ；新設地錨： 4.0×10^6)，並將幅值大於 10 之訊號剔除。如圖 10、圖 11 以舊有地錨和新設地錨第 1 破壞事件為例，由擋土面版之完整歷時和局部放大訊號比較可知，數值模擬聲訊和試驗聲訊趨勢相似，可合理反映試驗所得結果，但受限於分析模式之邊界條件假設，僅能模擬各式破壞發生時之第一反射聲波，無法探知其餘反射波訊。

4-3 影響參數研究

影響地錨力學行為之因素甚多，舉凡地錨固定段長度、地錨種類、鋼鍵使用數目、鋼鍵材料特性、錨碇砂漿材料特性、錨碇土層性質和覆土厚度等有密切關係，故本研究以舊有試驗地錨之相關參數設定說明為標準案例(詳見鄭世豪, 2009)，討論(1)錨碇土層性質；(2)錨碇砂漿性質和(3)鋼鍵性質及設計數目改變時，地錨設計載重之變化程度以回饋於地錨設計和性能檢查要點掌控參考。然而，隨地錨設計參數和錨碇土層性質的改變，使用期間因外力或自然環境變遷所衍生之劣化程度及破壞發生型態不同，不易併入討論，故本研究暫不探討因相關參數變化後，地錨可能發生破壞事件數目、破壞類型和產生之聲訊差異。茲將分析結果，以各項參數對地錨之絕對最大設計載重的影響程度說明如下：

- (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 12(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，並以錨碇土

層穩定性>覆土深度；

- (2) 錨碇土層和錨碇砂漿性質的改變皆為影響其界面強度發揮之重要因素，如圖 12(c)~(e)可知，地錨設計載重隨錨碇土層-錨碇砂漿界面強度和地錨固定段長度增加而提高，並以固定段長度>錨碇土層-錨碇砂漿界面強度>錨碇砂漿強度；
- (3) 如圖 12(f)~(h)可知，當預力鋼鍵性質和設計數目改變時，地錨設計載重隨鋼鍵強度、設計鍵數和施加預力增加而提高，並以鋼鍵設計數目>施加預力大小>鋼鍵強度；
- (4) 綜合上述各項觀察可知：地錨設計載重之影響程度，受鋼鍵之強度性質和設計數目影響最驟，錨碇土層和錨碇砂漿性質次之，地錨之施做設計和工作狀態之性能檢查可以此結論為參考要點。

五、結論

現地足尺試驗雖為探知工程狀況和瞭解問題最為直接且有效的方法之一，但常受限於試驗場址和經費的限制，不易獲得大量參考數據，故本研究藉數值理論的分析並配合試驗成果佐證，以擴展研究之參考價值和應用性，茲將主要結論說明如下：

1. 本研究建議之地錨拉拔曲線預測方法，經收斂檢核後(建議以單位公尺切割分析地錨)與現地試驗結果比較證明可行；
2. 數值模擬之地錨破壞同試驗結果，以錨碇砂漿開裂為先、次而鋼鍵斷裂，惟破壞發生次數和破壞時之作用載重未能完全與現地試驗匹配，乃因分析程序中對於地錨組材料之破壞定義與材料實際破壞發生時機不同所致；
3. 由現地試驗、本文建議分析方法和有限元素 ABAQUS 之分析結果可知三者皆有其應用價值，但就工作效能、工作限制和應用性的評比，該項研究以現地試驗和本文建議分析方法較有限元素分析具備發展性，詳如表 3 所述；

4. 本文建議地錨破壞之聲訊模擬方式，雖僅獲得各式破壞發生時之第一反射聲波，無法探知其餘反射波訊，但由舊有地錨和新設地錨各式試驗訊號比較得知，整體趨勢相似可合理反映試驗所得結果；
5. 本研究依錨碇土層性質、錨碇砂漿性質、鋼鍵性質和鋼鍵設計數目等參數，討論其對地錨設計載重之影響程度，由分析結果可知鋼鍵強度性質和設計數目對破壞的影響最劇，錨碇土層和錨碇砂漿性質次之，地錨施做設計和工作狀態之性能檢查可以本研究結論為參考要點。

六、參考文獻

1. Cheng, S.H., Chang, D.W. and Lee, Wei-F. (2008), "Preliminary Study on Modeling and Interpretation for Acoustic Monitoring System Applied to Ground Anchor", *Procds., 3rd International Conference on Site Characterization, Taipei, Taiwan, April.*
2. 李維峰等人 (2003), "Advitam 預力監測系統研發推廣計畫", 財團法人台灣營建研究院。
3. 陳育聖、李維峰、王淳謹 (2005), "SoundPrint 監測系統於預力地錨之應用", 第十一屆大地工程學術研究討論會論文摘要集, 第 104 頁。
4. 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", 淡江大學博士論文。
5. Cheng, S.H., Chang, D.W. and Lee, Wei-F. (2009), "Failure Interpretation on Energy-Load Relation for Acoustic Monitoring System Applied to Ground Anchor", *Procds., 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt, October (abstract accepted).*
6. 張德文、李維峰、鄭世豪 (2009), "地錨破壞聲訊之現地試驗與數值模擬", 海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會, 台中, 台灣, 四月(摘要已繳交)。
7. Chang, D.W., Cheng, S.H. and Lee, Wei-F. (2008), "Numerical Simulation and data interpretation on ground anchor failure using acoustic monitoring test", *The 3rd Taiwan-Japan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall, Keelung, Taiwan, October.*

表 1 舊有地錨和新設地錨之試驗及數值模擬結果比較

| 比較項目 | | 方法 | 現地試驗 | 數值模擬 |
|-------------|------|----|-------|------|
| 設計載重 (tons) | 舊有地錨 | | 48.0 | 48.0 |
| | 新設地錨 | | 38.0 | 42.0 |
| 破壞件數 | 舊有地錨 | | 3 | 4 |
| | 新設地錨 | | 7 | 8 |
| 最終破壞型式 | 舊有地錨 | | 固定段拉脫 | 鋼腱斷裂 |
| | 新設地錨 | | 鋼腱斷裂 | 鋼腱斷裂 |

表 2 舊有地錨和新設地錨之試驗及數值模擬破壞事件比較

| 方法 | 現地試驗 | | 數值模擬 | |
|------|-------------|--------------------|-------------|---------------------|
| 地錨 | 作用載重 (tons) | 破壞類型 | 作用載重 (tons) | 破壞類型 |
| 舊有地錨 | 42.79 | cement crack | 38.88 | cement crack |
| | 46.57 | cement crack | 50.25 | cement crack |
| | — | — | 51.91 | cement crack |
| | 57.58 | deep wire break | 58.41 | wire break (4~5m) |
| 新設地錨 | 31.51 | cement crack | 31.29 | cement crack |
| | 33.62 | cement crack | 39.34 | cement crack |
| | 41.58 | deep wire break | 42.89 | wire break (11~12m) |
| | 36.64 | surface wire break | 46.53 | wire break (0~1m) |
| | 37.2 | surface wire break | 47.20 | wire break (1~3m) |
| | 36.0 | deep wire break | 48.47 | wire break (3~4m) |
| | 36.0 | surface wire break | 50.47 | wire break (12~13m) |
| | — | — | 50.89 | wire break (4~5m) |

表 3 地錨拉拔曲線預測方法之工作特性、效能和應用性評比

| 評比項目 | 工作特性 | 工作效能與限制 | 應用性 |
|---|---|---|--|
| 預測方法 現地拉拔試驗 | 可藉現地拉拔試驗真實探知地錨之服務性能，且為工程實務普遍使用方法 | 1. 工作耗時且所需經費高； 2. 屬破壞性試驗且無法進行全面性(受地形限制)檢驗； 3. 大都應用於新建地錨之抽驗；舊有地錨之性能檢查應用較少。 | 配合 SoundPrint [®] 預力連續式聲波監測系統，可瞭解地錨在未知地層中的劣化位置，以利局部維護補強，並期應用於臨時支撐或開挖工程。 |
| 本文建議數值模式 | 配合波動理論和地錨各組合元件之材料組構律，可預測地錨之設計載重、劣化可能發生位置和衍生破壞類態 | 1. 分析效能佳(約需 25 秒)； 2. 分析參數和材料組構參數，需借助試驗取得較準確之參考值。 | 配合動態訊號分析程序可真實模擬地錨破壞瞬間產生的聲訊，以克服足尺試驗的困難和經費的耗廢。 |
| 二維(三維)有限元素 | 配合 ABAQUS 內建之元素庫和豐富材料模式，可預測地錨之設計載重 | 1. 分析效能差(二維約需 5 分鐘；三維約需 2 小時)； 2. 分析參數和材料組構參數，需借助試驗取得較準確之參考值。 | 可藉材料破壞的假設，進行動態聲訊分析，但無法同前法真實反映破壞瞬間之材料特性。 |
| 註：分析工具(電腦)規格 (1)中央處理器：P4-3.0G；(2)記憶體：1G DDR2 RAM；(3)主機板：GIGABYTE PT80-8237 (4)硬碟：WD1200/120G/7200 RPM；(6)作業系統：Win XP SP2。 | | | |

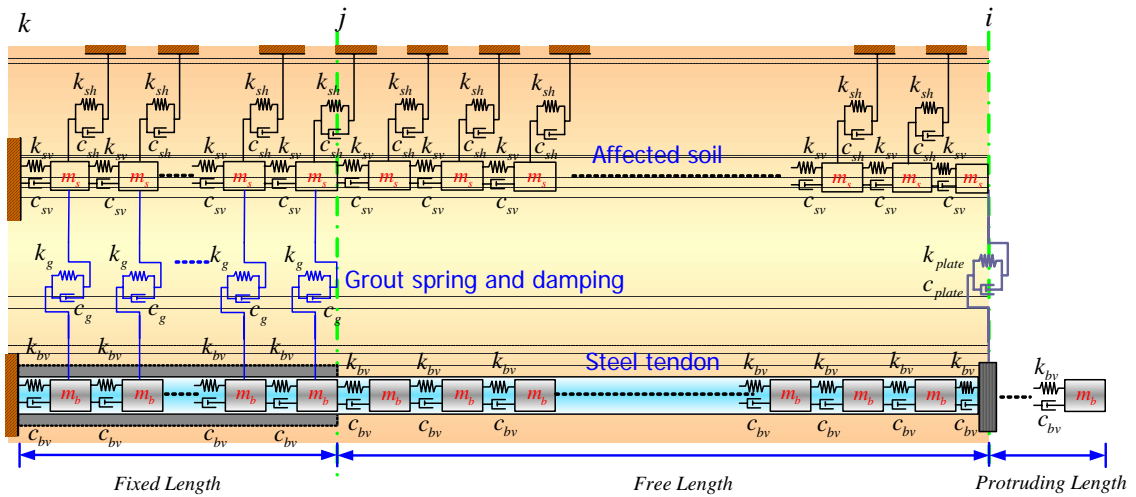


圖 1 離散化之地錨結構示意圖 (摘自 Cheng et al., 2008)

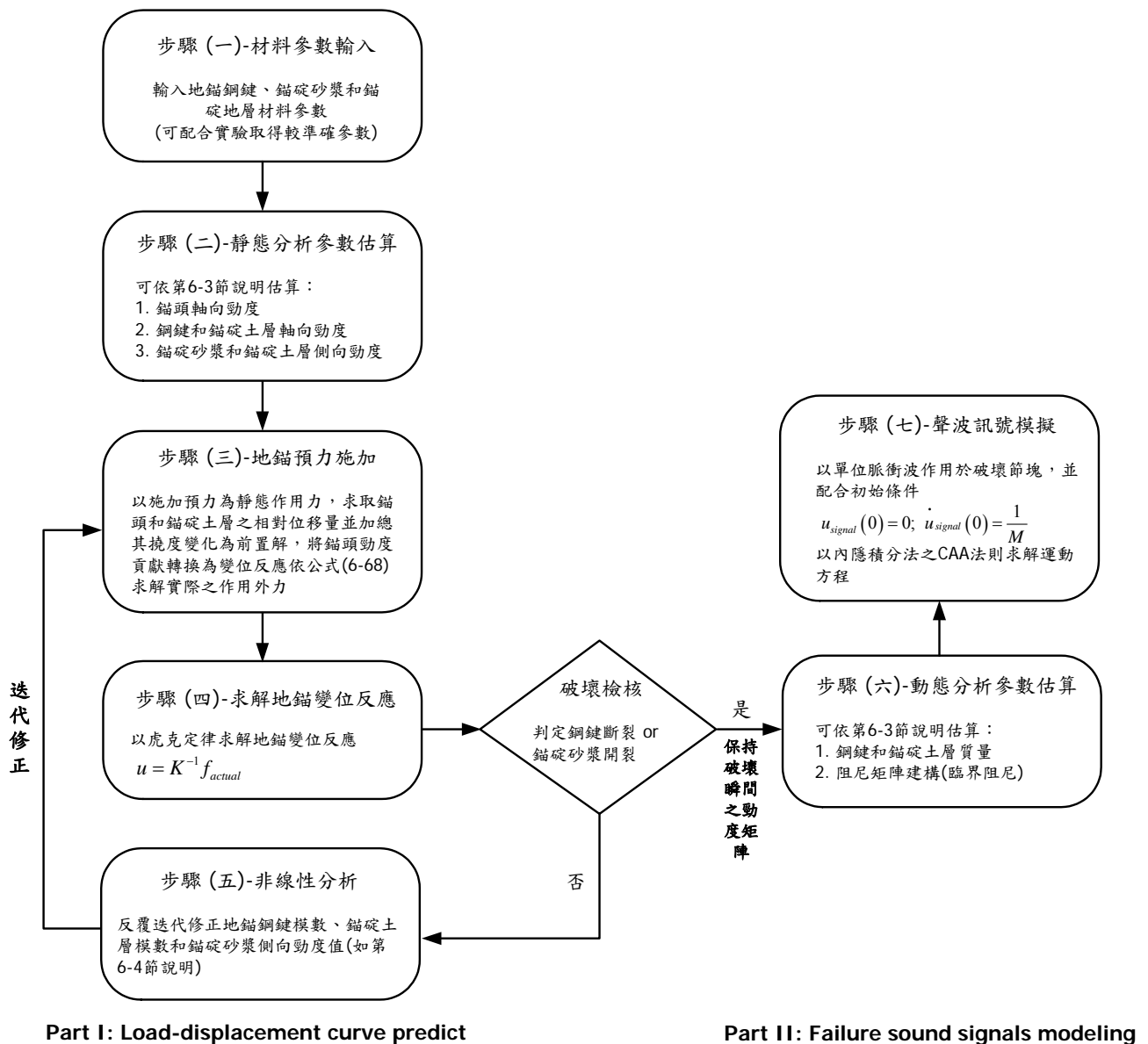


圖 2 本研究之地錨數值分析流程示意圖

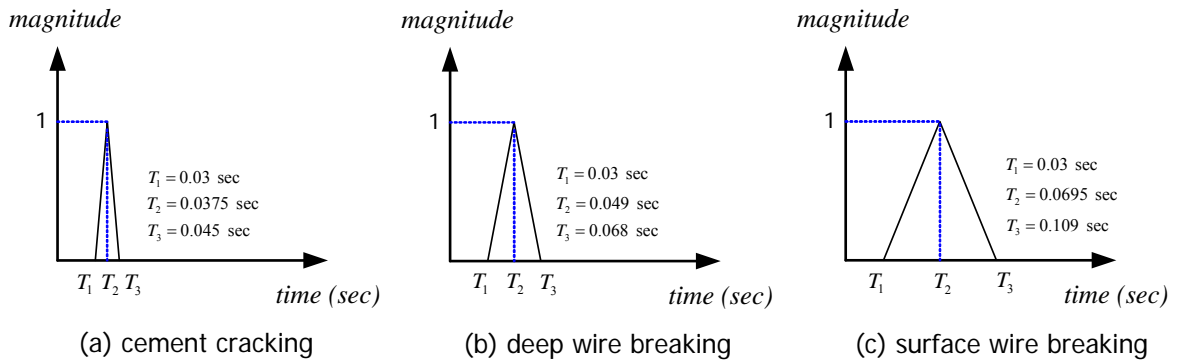
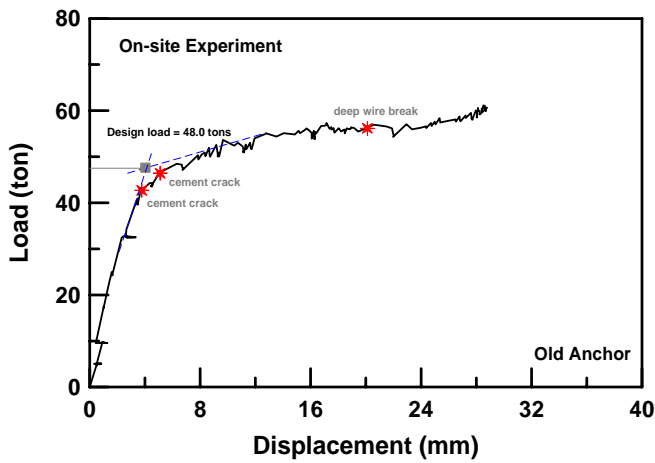
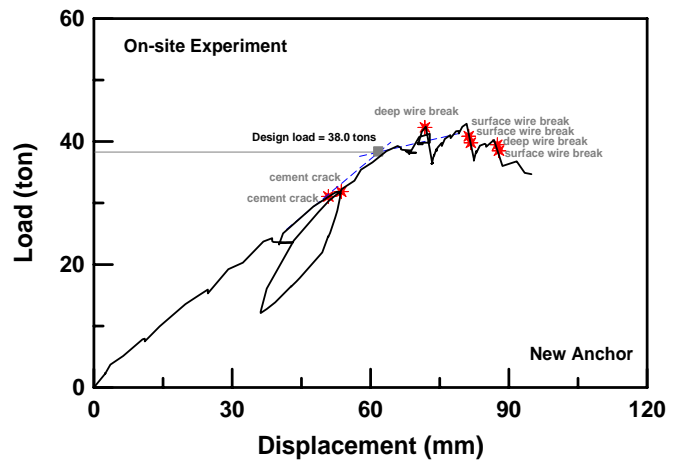


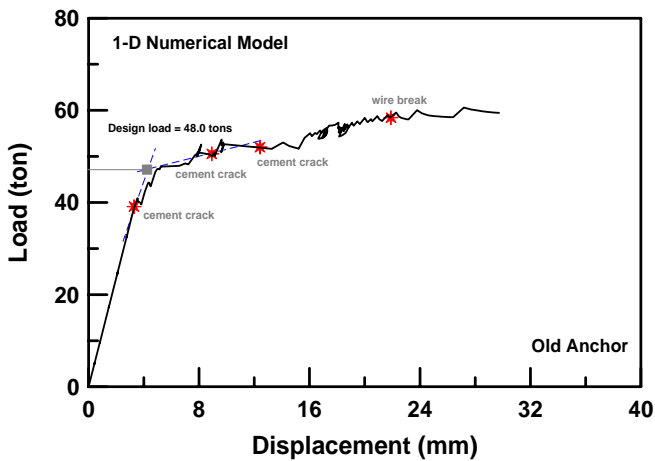
圖 3 分析模式中施加之脈衝載重示意圖



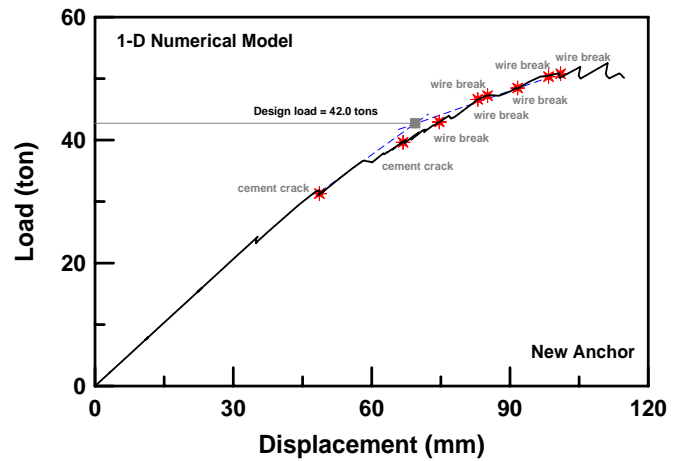
(a) 現地拉拔試驗曲線



(a) 現地拉拔試驗曲線



(b) 數值模擬拉拔曲線



(b) 數值模擬拉拔曲線

圖 4 舊有地錨現地拉拔試驗與數值模擬結果比較

圖 5 新設地錨現地拉拔試驗與數值模擬結果比較

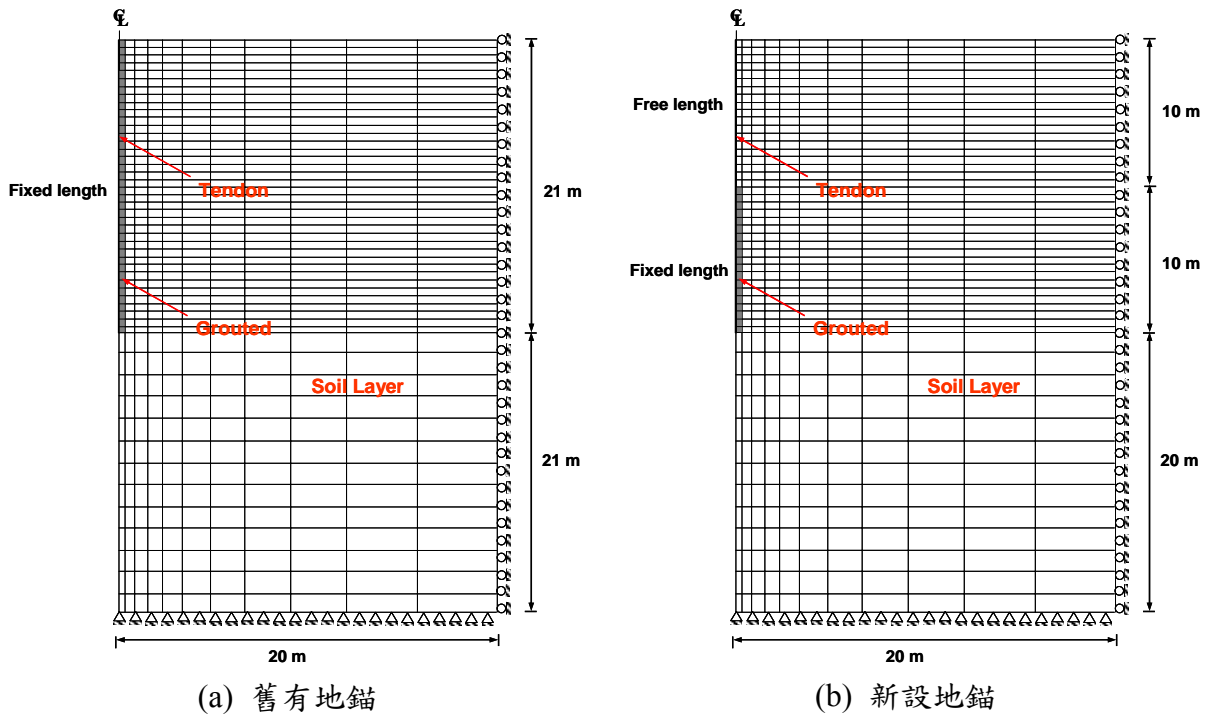


圖 6 地錨有限元素分析之分析域、幾何網格切割和邊界條件設定示意圖
(二維軸對稱形式)

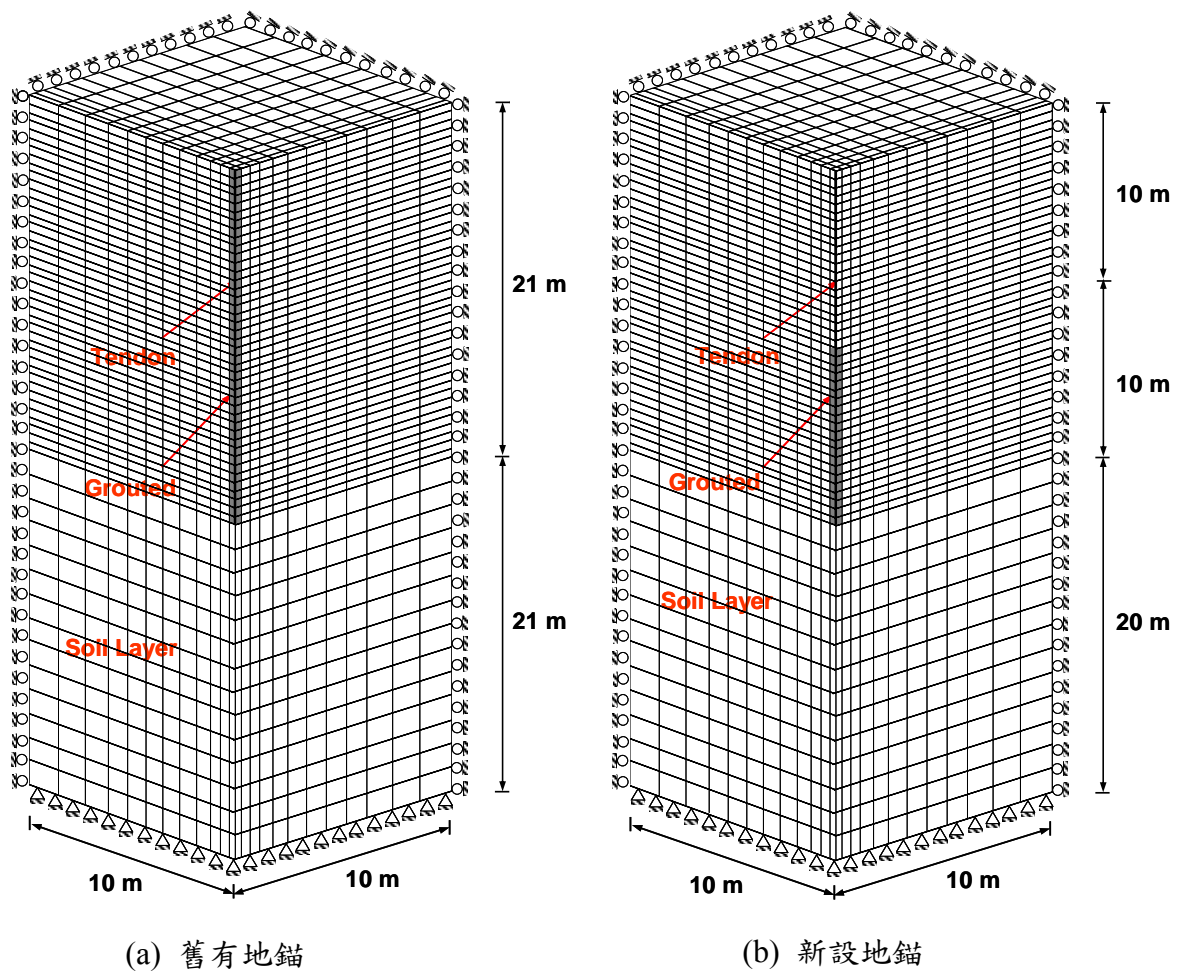


圖 7 地錨有限元素分析之分析域、幾何網格切割和邊界條件設定示意圖(三維形式)

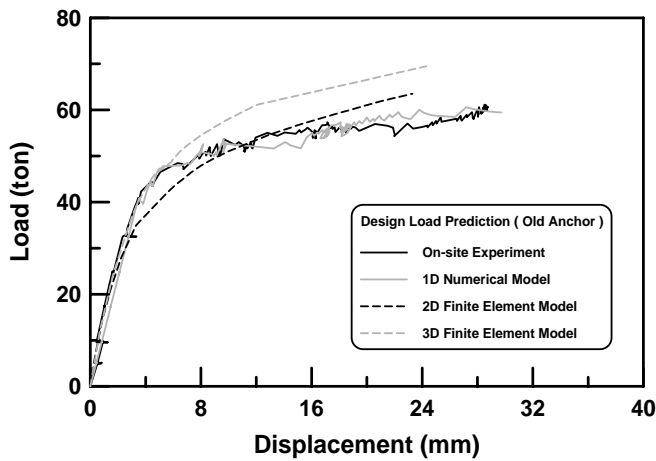


圖 8 不同方法之舊有地錨拉拔曲線
預測結果比較

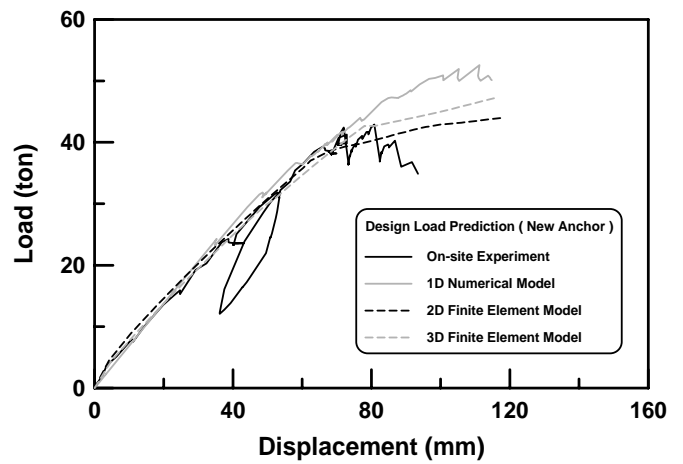


圖 9 不同方法之新設地錨拉拔曲線
預測結果比較

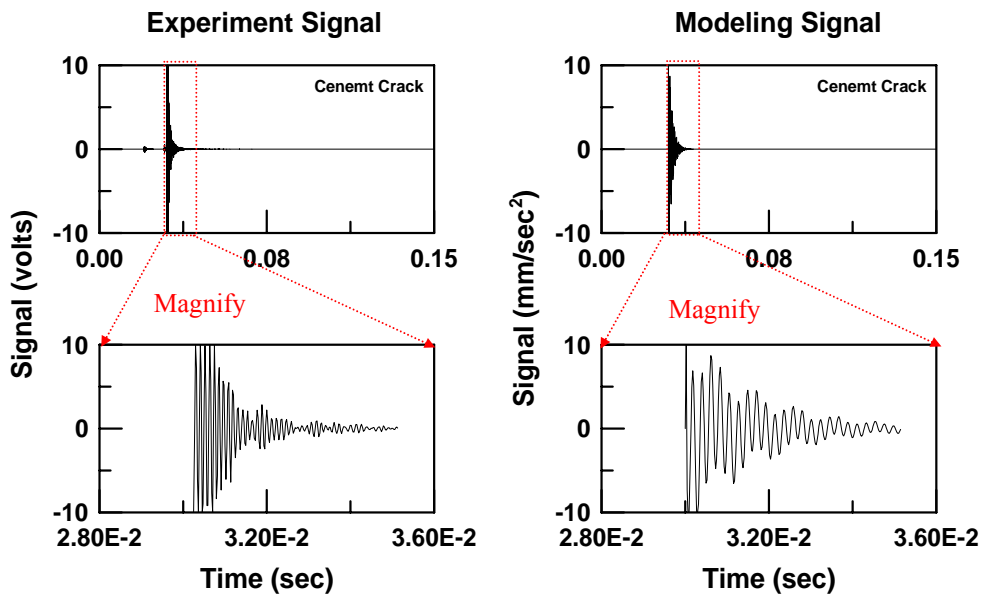


圖 10 舊有地錨現地試驗與數值模擬聲訊比較 (cement crack at 38.88 tons)

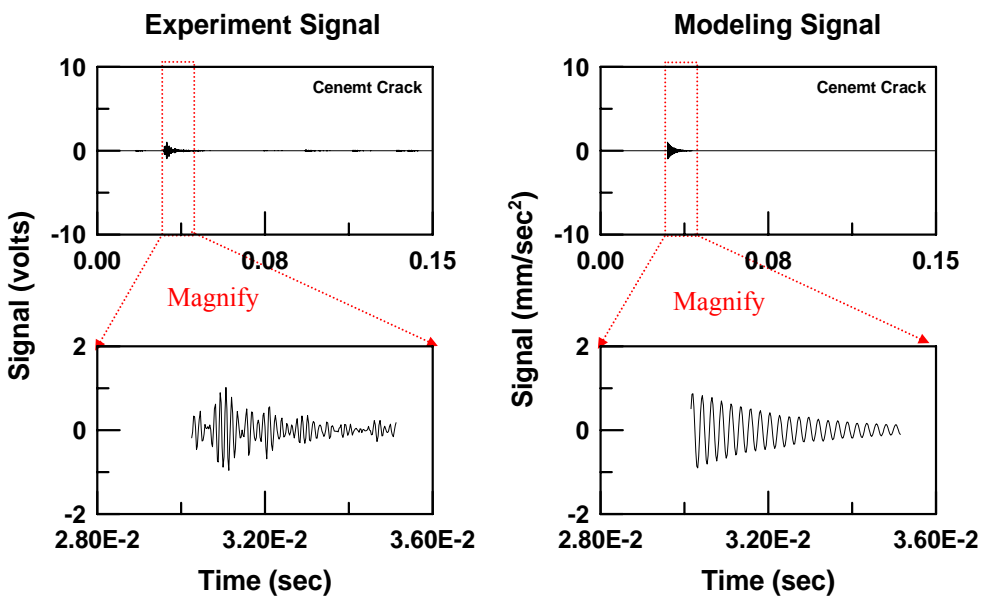


圖 11 新設地錨現地試驗與數值模擬聲訊比較 (cement crack at 31.29 tons)

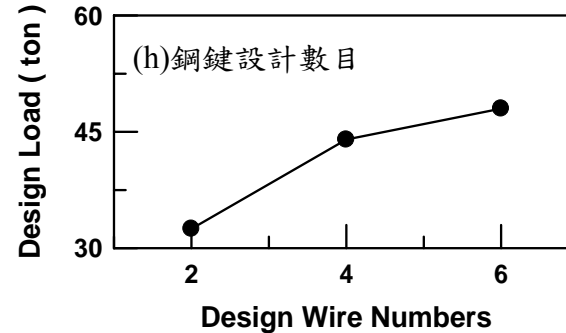
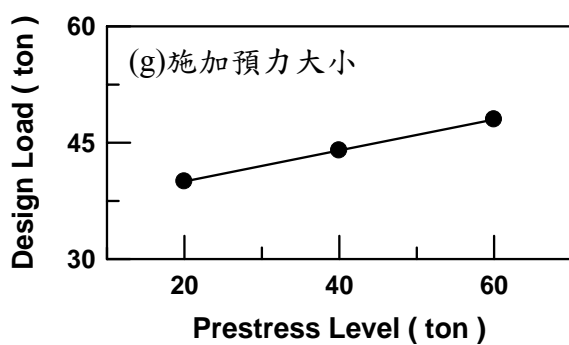
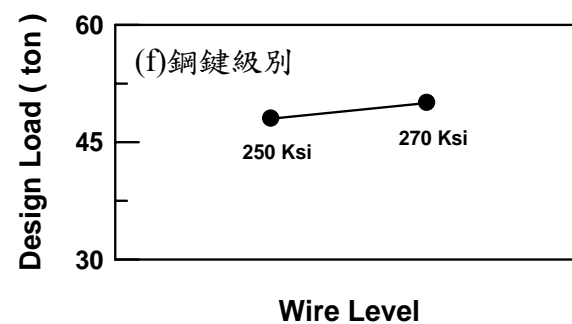
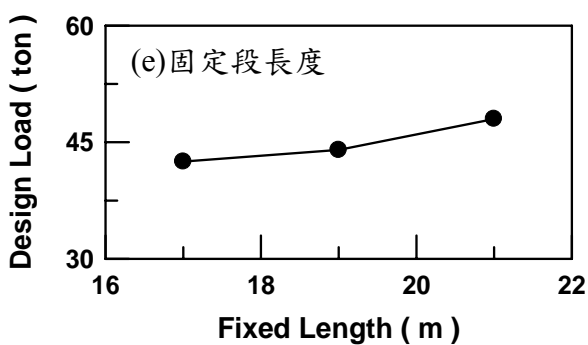
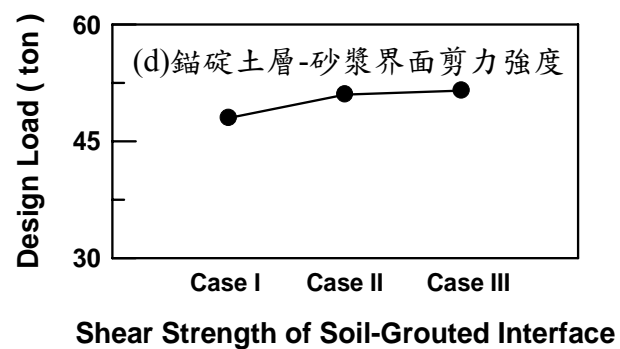
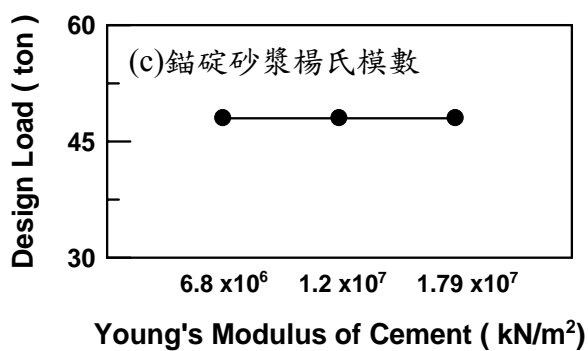
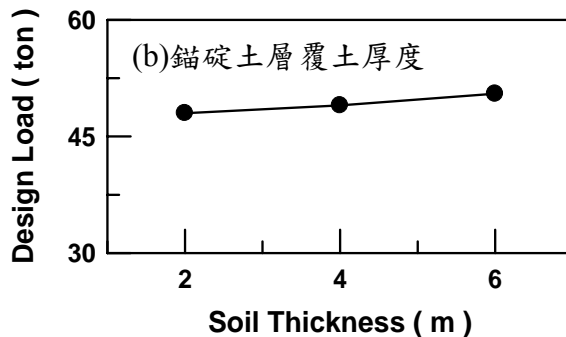
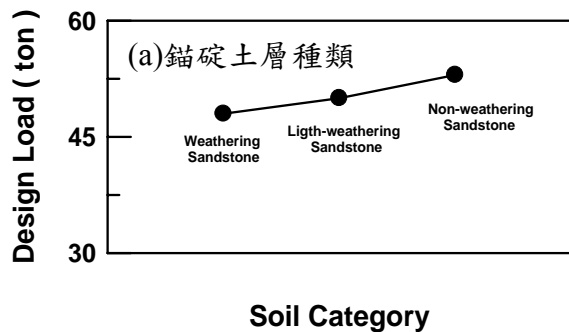


圖 12 地錨設計載重影響參數研究