

台北盆地砂性土壤不排水與部分排水情況之 液化特性行為研究（五）

---部份排水情況下砂性土壤孔隙水壓激發理論模式實用性之探討
*The Study of Liquefaction for Sandy Soils under
Undrained and Partially drained Condition in Taipei Basin(5)*

計畫編號： NSC 89-2211-E-002-054

執行期間： 中華民國88年11月1日至89年12月31日

計畫主持人：吳偉特 國立台灣大學土木工程學系 教授

研究助理： 詹松儒 國立台灣大學土木工程學研究所 博士(89.12.29 審核通過)

摘 要

本研究主要內容係延續國科會第四期計畫，針對本研究發展建立之孔隙水壓激發模式與地震案例分析，進行更深入之探討，並提出相關之工程應用。根據分析結果顯示，利用本研究建立之動態孔隙水壓係數 A_d 關係式，並配合建議之基本第一類型曲線函數 $\overline{f(t)}$ 、基本第二類型曲線函數 $f(t)$ ，以及曲線形狀上升修正式，可分別合理模擬出在不排水狀態與部分排水狀態下，具有基本類型或衍生類型曲線形狀之粉土質砂土承受反覆震動作用力時之孔隙水壓發展變化情形。

在工程應用方面，本研究建立之動態孔隙水壓模式，可使用於預測粉土質砂土之孔隙水壓變化與液化強度曲線，亦可適當地預測薄管土樣之孔隙水壓變化。在案例分析方面，初步利用本模式進行現地土層之地震反應模擬分析，已可得到合理變化趨勢之相近結果，顯示本模式在土層地震反應分析應用方面，具有後續良好之發展潛力。

關鍵詞：動態孔隙水壓係數、基本第一類型曲線函數、基本第二類型曲線函數、衍生類型

Abstract

This study is to continue proceeding the

NSC fourth project and make more advanced research in pore water development model and seismic case analysis, to provide the associated applications of engineering.

According to the study results, whether in the undrained or partially drained conditions, to use cyclic pore water pressure coefficient A_d associated with the basic first curve shape function $\overline{f(t)}$ 、the basic second curve shape function $f(t)$ and the modified formula of curve shape rise dynamic, can all successfully simulate numerically pore water changes of sandy soils with the basic and derivative curve shape function respectively.

In the application of engineering, the mathematical model of cyclic pore water pressure coefficient A_d can also be used to predict change of pore water pressure and the liquefaction curve of silty sands. Furthermore, in the application of seismic case analysis, to use the mathematical model to perform seismic analysis of soil layers in situ and the preliminary results of reasonable pore water change tendency can be obtained. Hence, the established mathematical model has a much more developed potential in the application of seismic analysis.

Keyword : cyclic pore water pressure coefficient、the basic first curve shape function、the basic second curve shape function、the derivative curve shape

一. 前言

民國88年9月21日臺灣發生近世紀來地震規模達7.3之集集大地震，造成南投地區嚴重災害，以及其它縣市如台北市、台北縣、台中縣、台中市等多處屋樓倒塌，造成上千人傷亡，並且引起中北部地區限電危機，致使民生經濟活動倍增困難與不便。同年10月22日在嘉義附近發生規模6.4之大地震，同樣亦造成嘉義地區不少樓房倒塌與傷亡事件。由於集集大地震引發出不少區域產生土壤液化現象，如在台中港、大肚溪、台中烏日、霧峰、彰濱地區、草屯、貓羅溪、員林鎮、社頭、中二高名間收費站、雲林教養院等區域，皆可明顯見到不少土壤液化行為諸如噴砂孔、泥水浮出、地面下陷、土壤表面軟化等狀況出現。本研究主要內容在承續第四期國科會研究計畫，進一步探討本研究所提出孔隙水壓激發模式，並再針對具備衍生型曲線形狀之粉土質砂土進行模擬，且探討本理論模式之適用性；同時利用已知之地震資料進行案例分析，探討本研究所提出之孔隙水壓模式之工程應用性。

二. 動態孔隙水壓激發模式理論

本研究在考慮動態之反覆剪應力作用時，依據Skempton[1]所提出之靜態孔隙水壓係數模式之基本觀念，進而衍生定義出「動態孔隙水壓係數 $A_{d,t}$ 」，用以計算土壤內部之動態孔隙水壓變化值，亦即：

$$u_t = A_{d,t} \cdot B \cdot \Sigma_i |\Delta \sigma_d| = A_{d,t} \cdot \Sigma_i |\Delta \sigma_d| \quad (2-1)$$

式中係假設土壤完全飽和時，B值等於1.0；並且在進行動力液化試驗時，圍壓係保持定值。 $A_{d,t}$ 為作用時間t時所得之動態孔隙水壓係數，其物理意義即為土壤累積承受反覆應力作用所產生之孔隙水壓比值，該比值隨反覆應力絕對累積值之增加而有衰減趨勢； $\Sigma_i |\Delta \sigma_d|$ 代表在時間t內，作用在土壤之各時間段(Δt_n)反覆軸差應力絕對差值($|\Delta \sigma_{d,n}|$)之累積值。

本研究動態孔隙水壓模式建立之假設條件，如下列所述：

- (1) 在單層或多層土壤中，各層土壤之力學性質為均質性與均向性；
- (2) 土壤顆粒為不可壓縮者；
- (3) 排水現象只限於垂直方向產生，僅考慮滲透係數 k_z 效應；
- (4) 土壤內部孔隙水壓之反應值，僅與動態孔隙水壓係數 A_d 與反覆剪應力累積絕對值有關；
- (5) 土壤試體係為飽和土體，即Skempton孔隙水壓係數B等於1.0；
- (6) 在施加反覆剪應力之前，土壤內部淨殘餘孔隙水壓初始值為零；
- (7) 在施加反覆剪應力之前，動態孔隙水壓係數 A_d 初始值為零。

根據在不排水狀態下與不同排水程度狀態之試驗資料整理結果，並依上述建議之動態孔隙水壓模式關係，即可畫出動態孔隙水壓係數 A_d 與作用時間t之關係圖形(圖1)。圖1顯示動態孔隙水壓係數(A_d)隨時間歷程呈現震盪衰減趨勢， A_d 反應值主要包含作用剪應力大小、作用力型態、應力路徑、土壤種類、土壤性質、土體勁度軟化效應等因素，故其變化值並非為唯一關係。由於 A_d 值隨時間歷程呈現震盪衰減趨勢，依據數學理論，該震盪衰減曲線可採用反覆震盪函數、衰減函數與曲線形狀函數等數學式之組成式表示，可得本研究之動態孔隙水壓係數 A_d 理論關係式，亦即：

$$A_d(t) = \frac{e^{-\alpha t}}{1+t} \cdot (a \sin 2\pi ft + c) + f(t) \quad (2-2)$$

式中之反覆震盪函數為 $\sin 2\pi ft$ ，f為頻率；衰減函數為 $e^{-\alpha t}/(1+t)$ ；曲線形狀函數為 $f(t)$ ；其中a與c分別為試驗常數值，a影響振幅大小，c影響反覆震盪函數之位置； $f(t)$ 影響 A_d 值整體位置之變化，而 α 影響到衰減速率。

本研究分析之曲線形狀 $f(t)$ ，無論在不排水狀態與部份排水狀態下，大體上可歸納為兩種基本類型：基本第一類型與基本第二類型，並且由該基本類型再各自發展出衍生第一類型與衍生第二類型。

三. 液化強度曲線預測分析法之建立

本研究動態孔隙水壓模式之建立，除期望能預測得到與試驗結果相同之數值模擬結果外，在工程應用方面亦希望能經由此動態孔隙水壓模式，發展出一套能建立液化強度曲線之分析步驟及程序，以利液化潛能分析之用。

利用相關試驗資料之比對與分析測試檢討後，本研究建立液化強度曲線預測分析程序(圖2)，用以預測粉土質砂土試體承受反覆剪應力作用時，內部所產生之孔隙水壓歷時變化，以及引致初始液化之反覆震動時間與次數，進而建立該粉土質砂土之液化強度曲線，提供液化潛能分析之用。茲將所採用之關係圖分別說明如下：

(一)土壤曲線形狀類型之判斷

當已知細料含量、臨界有效抗剪角與排水效果等條件時，則可透過曲線形狀歷時曲線變化關係圖[圖2(a)之左圖，此判斷方法為「普通法」]；或者透過臨界有效抗剪角—細料含量—曲線形狀分布關係圖[圖2(a)之右圖，此判斷方法為「嚴謹法」]，決定優先採用第一類型曲線形狀函數或第二類型曲線形狀函數進行初步分析。若已知土壤條件僅為細料含量與排水效果時，則可利用圖2(a)之左圖資料，由分析者決定採用何種類型曲線形狀進行分析；若已知土壤條件為細料含量、臨界有效抗剪角與排水效果時，則可直接應用圖2(a)之右圖資料，決定採用何種類型曲線形狀進行分析。兩種方法之選用可視土壤臨界有效抗剪角之資料而定，原則上，採用「嚴謹法」較能得到較合理之分析結果，而「普通法」所得結果可提供初步分析參考之用。

(二)基本土壤資料關係圖之建立

採用試驗編號Ed系列為比對基準，並以壓密後孔隙率(n)為0.385作為正規化基準值，將其它試驗結果皆進行孔隙率正規化處理，亦即進行 $n/0.385$ 之計算；同時，以試驗編號Ed系列在相同試驗條件下之引

致初始液化反覆震動次數($N_{n=0.385}$)為基準值，將其它在相同控制條件下之試驗結果所得之引致初始液化反覆震動次數(N_i)，進行正規化處理，亦即進行 $N_i/N_{n=0.385}$ 之計算[圖2(b)之左圖]。

(三)震動次數修正係數關係圖之建立

理論上，輸入之預測震動次數(N_p)與引致初始液化所需之反覆震動次數(N_i)應該相同，但依據分析比較結果，顯示實際輸入之預測震動次數(N_p)與引致初始液化所需之反覆震動次數(N_i)，有一修正比值存在，利用修正之震動次數輸入至圖2(c)中關係式計算，方能得到較真正之參數值。本研究定義該修正比值為「震動次數修正係數(m_N)」，其值係等於 N_p/N_i 。由於該震動次數修正係數並非定值，本研究將分析所得之一系列震動次數修正係數資料進行64次開方計算後，將所得數值與引致初始液化反覆震動次數繪成關係圖，並加入五條迴歸曲線[圖2(b)之右圖]。

(四)動態孔隙水壓係數關係式之參數關係圖建立

本研究將分析所得之參數值與相對應之引致初始液化震動次數繪成不同排水情況之關係圖，分別得到 $\text{slope} \sim N_i$ 、 $S_2 \sim N_i$ 、 $c_1 \sim N_i$ 、 $a_2(c_2) \sim N_i$ 、 $a_1(c_1) \sim N_i$ 等五種獨立關係圖[圖2(c)]，而圖中關係線之迴歸變化趨勢，係假設為直線關係，所得之確定係數(R^2)亦皆標記於圖中。

四. 數值分析結果之檢討

(一)孔隙水壓模式之檢驗

利用本研究建立之動態孔隙水壓係數理論模式，配合建立之曲線形狀函數，以及41組動力三軸液化試驗資料，進行參數求取，並進行數值模擬分析。由分析結果顯示(圖3與圖4)，利用本孔隙水壓模式所得數值分析結果，與試驗結果之符合度極佳，無論在不排水狀態或部份排水狀態下，曲線反覆震盪變化與數值歷時變化，均顯示有相當良好之吻合度。

(二)液化強度曲線預測分析之結果

利用本研究建立之液化強度曲線預測分析程序與相關關係圖表，用以預測粉土質砂土試體承受反覆剪應力作用時，內部所產生之孔隙水壓歷時變化，進而建立該粉土質砂土之液化強度曲線，提供液化潛能分析之用；由分析結果與實際試驗結果比較(圖5)，顯示預測之液化資料點與試驗所得液化資料點分布在同一液化曲線上，表示預測效果良好，吻合程度極佳。

(三)孔隙水壓模式之適用性

為探討本模式分析方法是否適用於預測薄管土樣(不擾動土樣)，承受反覆剪應力作用時所產生之孔隙水壓歷時變化。本研究利用松山菸廠中薄管土樣試體進行分析比較(圖6)，由分析結果顯示，利用本孔隙水壓模式與建議之分析方法和程序，亦能適宜地預測薄管土樣試體，承受反覆剪應力作用時之孔隙水壓歷時變化。

(四)孔隙水壓模式之應用性

進行地震孔隙水壓變化分析時，係假設分析之現地土層具有相對應於室內動力三軸試驗狀態下特定之 A_d 歷時變化曲線，並可利用本研究所提之 A_d 曲線求取方法進行估算，同時透過應力轉換關係式，將現地地震加速度轉化成動力三軸狀態下提供之等效軸差應力值，進行孔隙水壓估算，並採用本研究建議之「水壓震盪分量」與「水壓曲線變化分量」之修正，將室內分析所得之孔隙水壓值轉換成現地之孔隙水壓變化。在分析中，本研究將現地可能產生之排水效果納入考慮，根據分析土層之滲透性質，可依本研究所提供之方法估算排水效果。

由於現地土層之地震加速度記錄時間間隔與孔隙水壓記錄時間間格，在量測系統設計上會產生不可避免之延遲現象，故本研究模擬之孔隙水壓歷時變化與實際記錄資料亦會有時間延遲問題；本研究在初步分析階段亦暫將該問題不予考慮，同時亦暫不考慮「地盤放大效應」，由所得分析結果(圖7與圖8)，顯示利用本模式進行地震模擬分析之初步所得孔隙水壓歷時變化與實際記錄資料比較，有相當良好之

吻合程度；雖然在數據結果方面並不完全吻合，但在趨勢變化方面則有相當良好之模擬效果，故利用本模式進行地震模擬分析之初步探討時，可得到合理孔隙水壓歷時變化趨勢，但在分析所得數值數據結果方面則較為不理想。

本研究所定義之動態孔隙水壓係數歷時曲線變化，係為土壤真正於外在作用力作用下所反應出之孔隙水壓值與外在作用力之比值函數關係。由於外力作用形態為已知，因此所測量得之孔隙水壓變化直接為土壤試體本身之行為表現所反應之結果。因此，土壤試體在承受反覆作用應力時，土壤行為包含著彈塑性變形行為，相對地孔隙水壓值已反應出該行為特性，故本研究所定義之動態孔隙水壓係數，其適用範圍係已包含彈性與塑性兩階段之土壤變形行為。

綜合言之，初步利用本模式進行現地土層地震模擬分析，已可得到合理變化趨勢之結果，顯示本模式在土層地震反應分析應用方面，具有後續良好之發展潛力；建議可更進一步建立完整參數之關係圖表，並進行更多之地震模擬分析與比較，以便針對本模式作必要之修改，使分析結果更為合理與完善。

五. 結論

本研究根據動力三軸試驗資料衍生推導出孔隙水壓理論模式，並利用該數學模式進行不排水狀態與不同排水效果下之孔隙水壓數值模擬分析，探討數值分析結果與實際試驗結果之符合性與適用性問題，並且建立液化強度曲線預測分析程序與土層之地震反應分析方法，提供工程分析與應用。茲將重要結論與建議列述如下：

(一)利用本研究發展建立之動態孔隙水壓係數(A_d)關係式，並配合基本第一類型曲線形狀函數 $f_1(t)$ 、基本第二類型曲線形狀函數 $f_2(t)$ 與曲線形狀上升修正關係式，可分別合理地模擬在不排水狀態與部份排水狀態下粉土質砂土在承受反覆震動作用剪應力時之動態

孔隙水壓歷時變化；亦即本研究建立之動態孔隙水壓模式可適用於分析粉土質砂土在不同排水效果下之動態孔隙水壓變化。同時，比較Seed等[2]之孔隙水壓模式與本研究建立之模式所得分析結果，顯示本模式之模擬效果優於Seed等之孔隙水壓模式所得結果。

- (二)利用本研究發展之動態孔隙水壓理論模式，與本研究建議之液化強度曲線預測分析方法，可合理地建立並預測不排水或部份排水狀態下之粉土質砂土液化強度曲線。同時，利用本研究之孔隙水壓模式進行現地土層地震反應模擬分析之初步探討結果，亦可得到相近之變化趨勢結果，顯示本模式在土層地震反應分析應用方面，具有後續良好之發展潛力。
- (三)由於土壤具有地域性特質，本研究建議可針對其它地區性之砂性土壤先進進行相關試驗(如不同排水效果下之動力

三軸液化試驗與靜態剪力試驗)，並利用4.1節之方法彙整試驗分析資料，建立如圖2等資料關係圖，然後再採用本研究發展建立之孔隙水壓理論模式與分析程序方法，進行孔隙水壓數值模擬分析與該深度土層土壤液化曲線之建立。為提高孔隙水壓數值分析之精確度，若能採用更佳之曲線形狀函數，應將有效助於提高數值分析精度，此有待進一步之研究。

參考文獻

- [1] Skempton, A.W., "The Pore-Pressure Coefficients A and B," *Geotechnique*, Vol.4, pp.143-147,1954
- [2] Seed, H. B., Martin, P. P. and Lysmer, J., "Porewater Pressure Changes During Soil Liquefaction," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.102, No.GT4, pp.323-346,1976

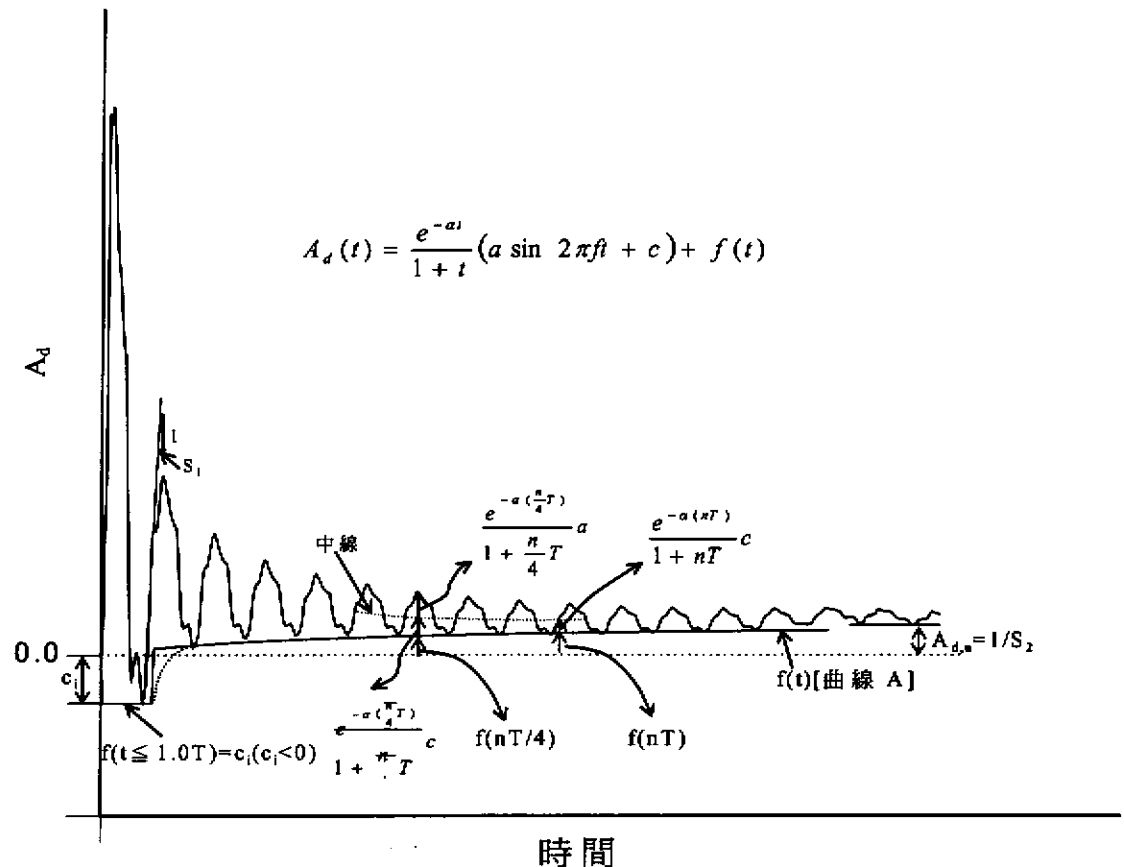


圖1 動態孔隙水壓係數(A_d)歷時變化與參數求取示意圖

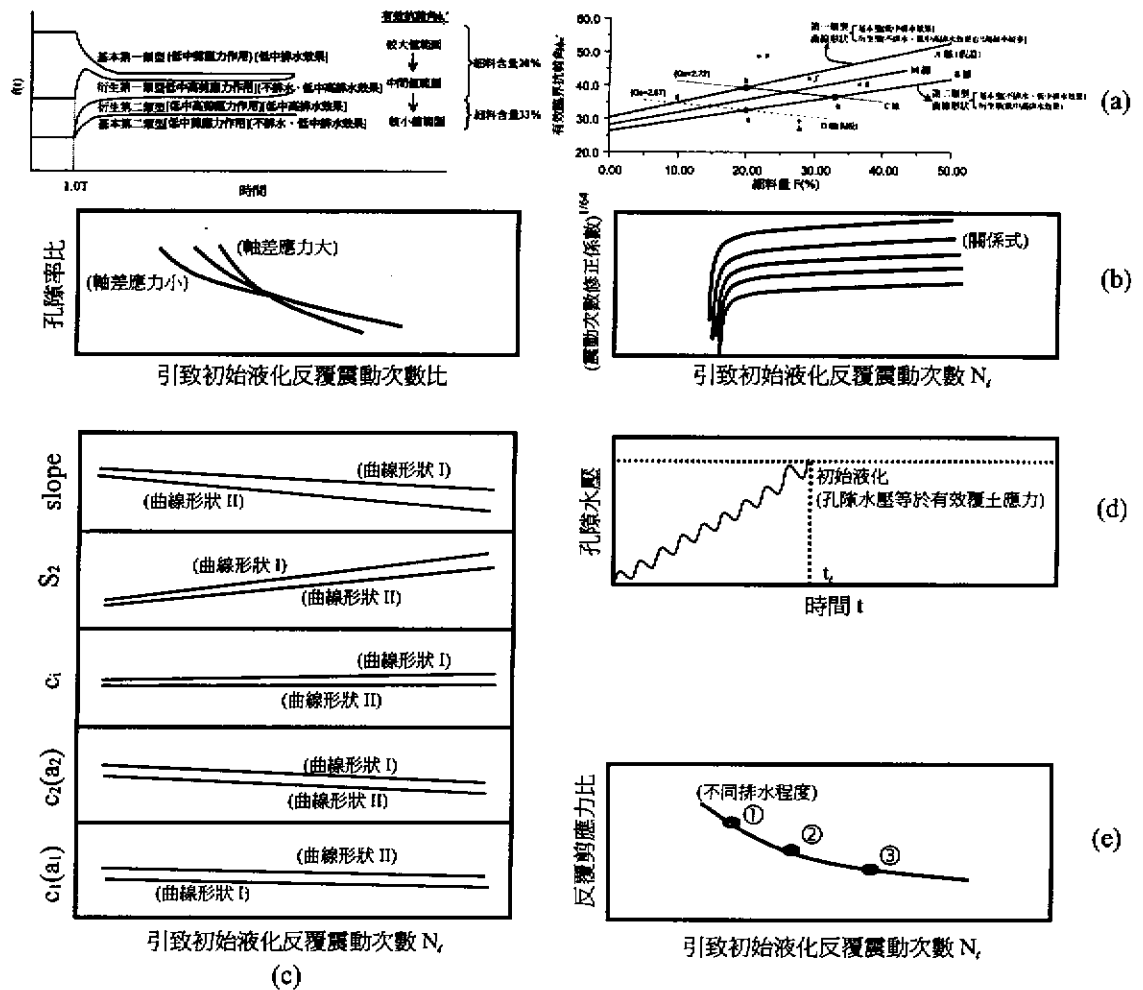


圖2 液化強度曲線預測分析程序與相關關係圖

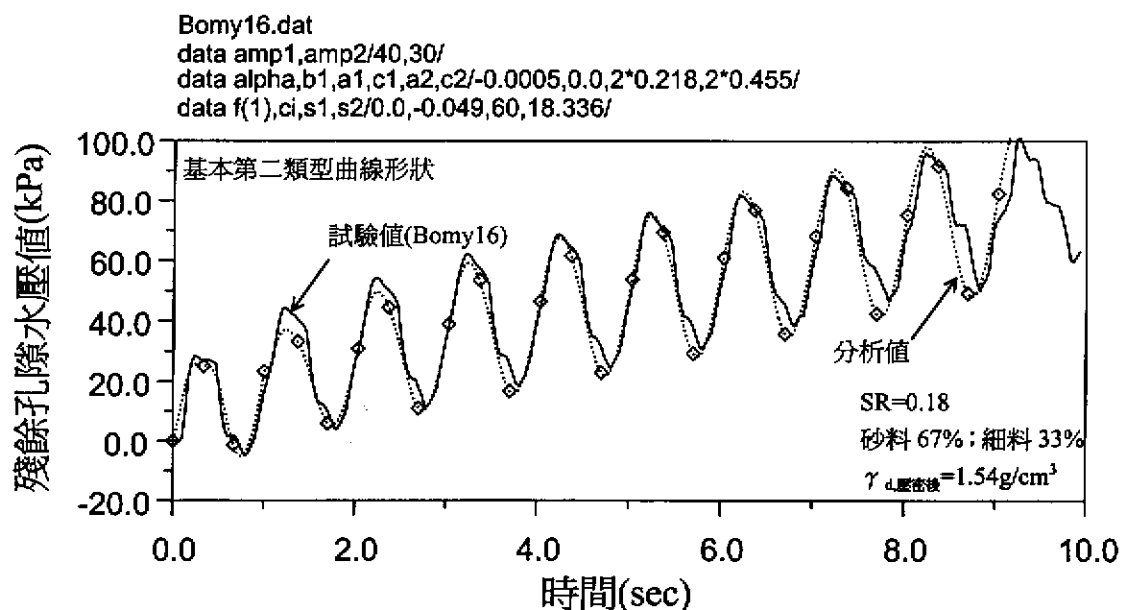


圖3 動態孔壓水壓數值分析結果與試驗資料之比較[不排水狀態]
(試驗編號: Bomy16)

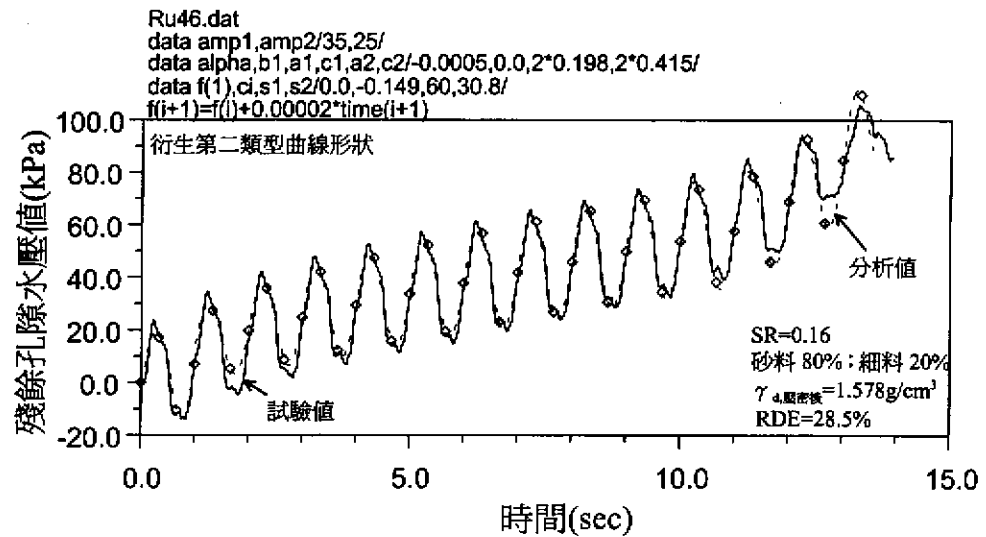


圖4 動態孔隙水壓數值分析結果與試驗資料之比較[部份排水狀態]
(試驗編號: Ru46)

細料 33%、臨界有效抗剪角 $\phi_c'=36.5^\circ$ 、比重 $G_s=2.72$ 、壓密後乾密度為 1.54g/cm^3 、
壓密後孔隙率(n)為 0.434、排水效果為 0.0%、臨界液化線選用 $p'=1.485\sigma_v'+6.561$ 。

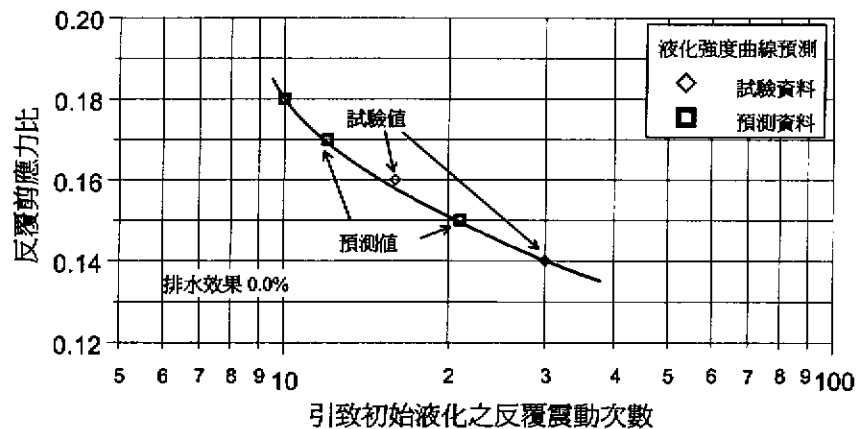


圖5 第一類粉土質砂土液化強度曲線預測分析結果

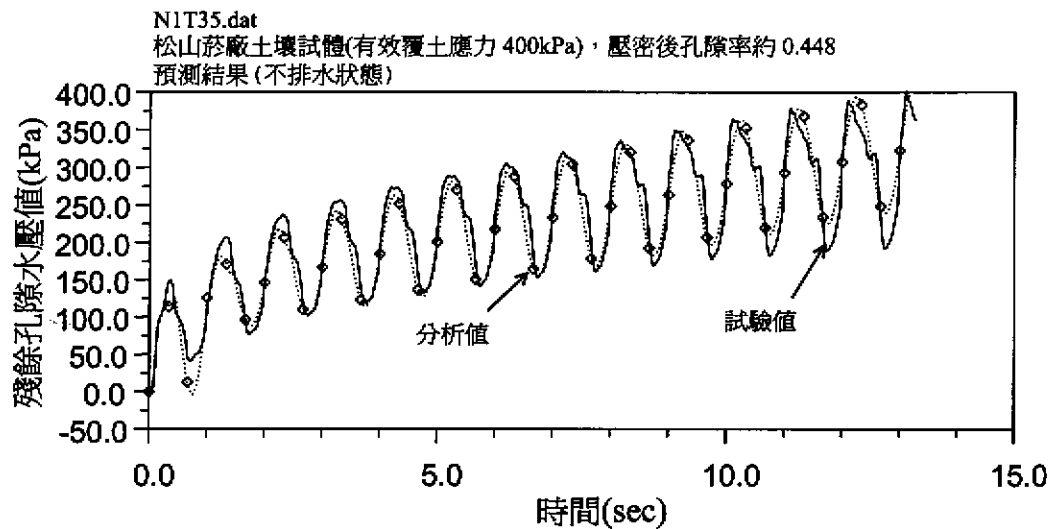


圖6 薄管不擾動土壤試體承受反覆震動剪應力時之孔隙水壓
歷時變化模擬結果

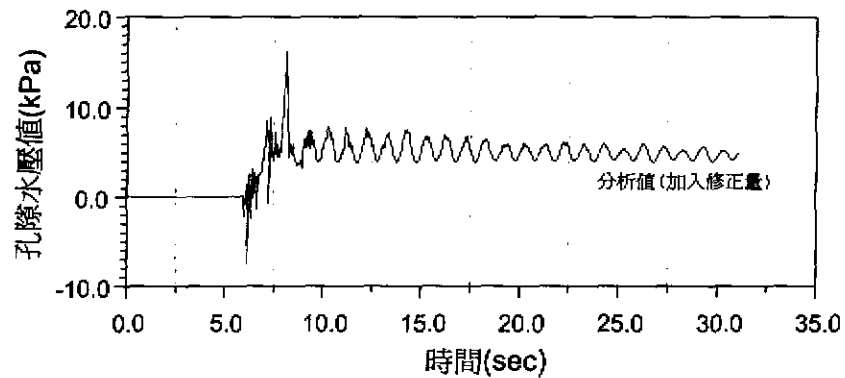
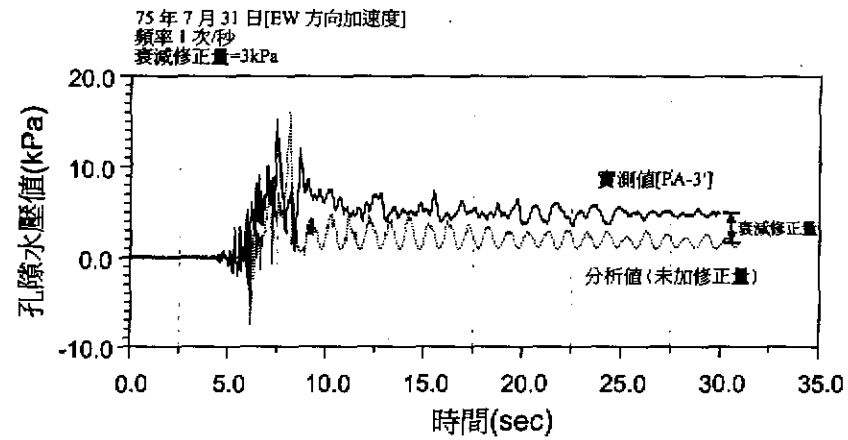


圖7 利用EW方向地震加速度進行模擬分析
 所得之孔隙水壓變化(75年7月31日)

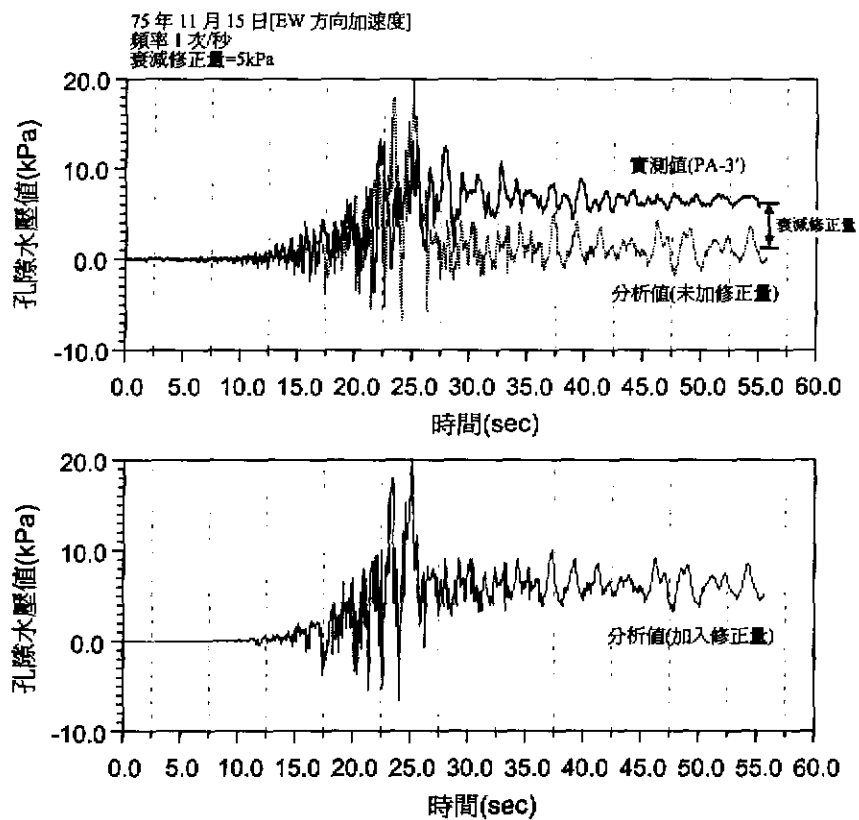


圖8 利用EW方向地震加速度進行模擬分析
 所得之孔隙水壓變化(75年11月15日)