

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 子計畫：一維與二維振動下砂土液化潛能之探討(1)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2625-Z-002-028-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：翁作新

報告類型：完整報告

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 94 年 10 月 6 日

台灣地震損失評估系統之強化應落實應用—

子計畫：一維與二維振動下砂土液化潛能之探討(1)

計畫類別： 個別型計畫            整合型計畫

計畫編號：NSC 93 - 2625 - Z - 002 - 028 -

執行期間： 93年 8月 1日至 94年 7月 31日

計畫主持人：翁作新

共同主持人：

計畫參與人員：石豐嘉、吳繼偉、鄒承府

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：國立台灣大學土木工程學系

中 華 民 國 94 年 7 月 31 日

# 一維與二維振動下砂土液化潛能之探討(I)

## 中文摘要

本計畫為整合型計畫「台灣地震損失評估系統之強化與落實應用」中之子計畫，為考慮二維地震波作用下之砂土液化行為，使用國家地震工程研究中心所研發之大型雙軸向多層剪力試驗盒，進行大尺寸物理模型之振動台試驗，以模擬實際地震力作用下砂土的受震反應行為。振動台砂土液化試驗分別進行一維及二維多向振動模式，輸入振動力則包含規則反覆載重以及實際地震紀錄。除了在不同高度之內外框架上裝有 X、Y 兩方向之位移計及加速度計外，也同時在試體中不同深度與位置上裝設水壓計與加速度計以探討孔隙水壓之變化以及砂土受震液化之現象。根據試驗結果可知在相同的加速度作用下，二維振動試驗所激發之超額孔隙水壓較一維振動試驗高，且隨著振動頻率越高所激發之超額孔隙水壓力也越高。同時，亦發現淺層砂土比深層砂土容易發生液化之現象，而且在振動過程中不論試體是否發生液化，試體內皆有一向上之水力坡降，這表示即使試體未發生液化時，孔隙水也有從較深層土壤流向淺層土壤的趨勢。本子計畫之研究成果可以作為在考量實際二維多向地震作用下所需修正之參考。

**關鍵詞：**砂、地震、振動台、多層剪力試驗盒、液化、孔隙水壓力

# **Liquefaction potential of sands under one- and two-dimensional shakings**

## **Abstract**

This project used the large biaxial laminar shear box developed by National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE) to prepare the large specimens of Vietnam sand to study the behavior of saturated sand, especially liquefaction, and soil-structure interactions under two-dimensional earthquake shaking on the shaking table at NCREE. Pore pressures and accelerations within the soil, and the displacements and accelerations of the frames at various depths were measured during tests under both one- and multi-directional shakings of sinusoidal accelerations and earthquake records with various amplitudes. It is found that the excess pore water pressures generated during a two-dimensional shaking are substantially higher than those generated under the one-dimensional shaking of the same magnitude of acceleration. The sand at a shallower depth is more susceptible to liquefaction than the sand at a greater depth. There is always an upward hydraulic gradient in the sand during shaking regardless of occurrence of liquefaction. The pore water tends to flow from the deeper soil, even without liquefaction, towards the shallower soil. The results obtained from the multidirectional shaking tests in this sub-projects can be used as the basis for corrections for the problem of soil liquefaction and ground settlement to the existing analyses and design methods which consider only the single-directional shaking.

**Key words:** earthquake, sand, shaking table, laminar shear box, liquefaction, pore water pressure.

# 目錄

中文摘要 .....	I
Abstract .....	II
目錄 .....	III
一、前言 .....	1
二、砂土試體準備 .....	2
三、量測儀器 .....	4
四、振動台試驗 .....	6
五、試驗結果 .....	8
5.1 一維與二維振動作用之水壓力變化 .....	8
5.2 不同振動頻率之水壓力變化 .....	10
5.3 水力坡降變化 .....	11
六、結論 .....	13
參考文獻 .....	14
成果自評 .....	15

# 一、前言

當砂性土壤受到振動之時，土壤顆粒會有緊密化的趨勢。若在飽和不排水的情況下，土層空隙縮小的趨勢會使顆粒和顆粒間的接觸應力傳遞到孔隙水上，而激發超額孔隙水壓，若振動強度夠大或延時夠長時，當孔隙水壓力上升到與土壤的有效應力相等的時候，土壤會失去強度有如液體般，此時即稱為液化。液化後的土壤失去承載力，致使上部結構物下沉、傾斜，且斜坡砂土層會向低處滑移與側潰。1999年集集地震使台灣中部許多砂性土層地區發生液化，例如台中港區、員林、霧峰及南投等地區，顯示出砂性土壤液化問題在台灣局部地區有進一步研究之必要性。土壤受振沉陷的問題在近幾年來一直是相當重要的課題，一般而言，土壤受振液化發生與否是影響沉陷量大小的主要因素。相對於室內小試體土壤元素試驗而言，大型振動台試驗之試體比較符合現地土壤狀況。利用大型振動台進行砂土液化方面之研究在國外發展已久，大型剪力試驗盒之振動台試驗具有以下之優點：

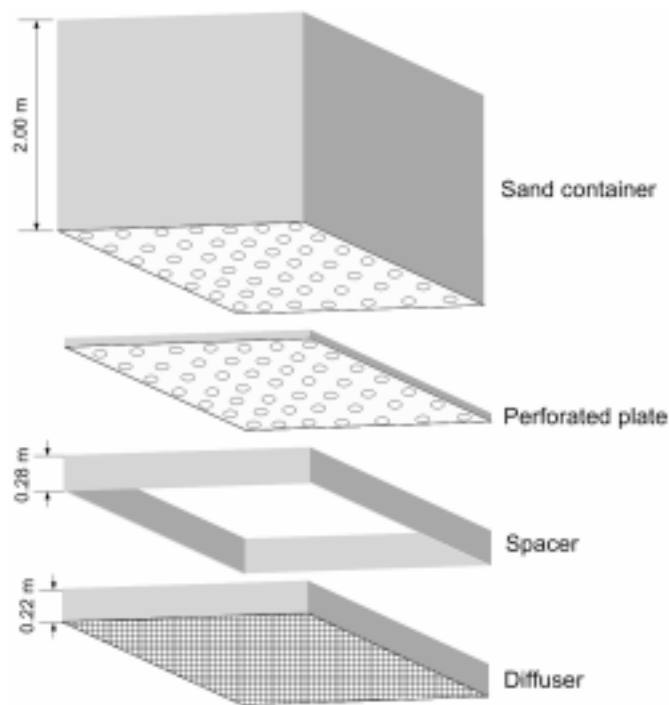
- 1、 大尺寸試體可得較合於現地之土層狀況，
- 2、 量測儀器比較容易安裝，
- 3、 量測儀器相對試體而言較小，故對土壤行為的影響也較小，
- 4、 埋置量測儀器可量得試體反應之空間分佈特性，並可記錄飽和砂土試樣於液化過程中之孔隙水壓分佈及傳遞，
- 5、 可模擬地震波傳遞之剪力波傳行為。

目前土壤動態試驗方法多將土壤之受震反應行為簡化為單向受剪振動問題，而現地土層所受之二維乃至於三維振動對於土壤動態反應行為之探討，不論是小元素試體或是大尺寸試體之試驗仍相當有限，如[1]，[2]，[3]，[4]及[5]。因此本研究使用翁作新等人所研發之大型雙軸向多層剪力試驗盒[6]，並以中心之大型振動台進行大尺寸物理模型振動試驗，以模擬二維地震力作用下土壤之受震反應與液化行為。

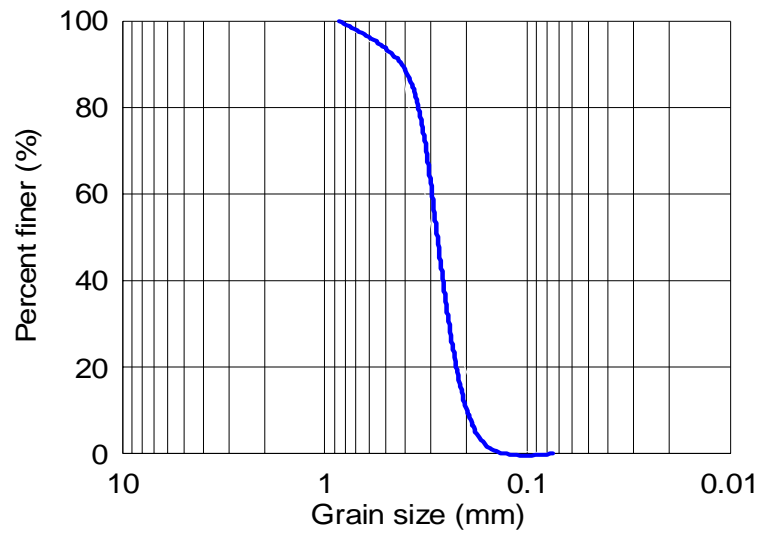
## 二、砂土試體準備

為配合本試驗盒之砂土試體準備工作，研發出一大型砂土震落箱，如圖一所示。本研究採用濕沈降法(wet sedimentation method)進行大型砂土試體準備。濕沈降法是先在剪力盒中注水至一預定高度，然後將砂土從震落箱震落至剪力盒中，在震落過程中水面一直保持在砂面上。當試體準備完成之後，則進行試體水平向之壓力波波速量測以檢驗試體之飽和度。而試體之均勻度與密度檢測則可在試體準備完成後利用短薄管採取不擾動土樣來進行試驗。有關大型砂土試體準備的詳細探討可參考翁作新等人的研究報告[7]。

而目前採用較容易大量取得而且均勻之進口越南石英砂作為試驗用砂，其粒徑分佈曲線及基本物理性質如下圖二與表一所示。



圖一 大型砂土震落箱示意圖



圖二 越南石英砂之粒徑分部曲線

表一 越南石英砂之基本物理性質

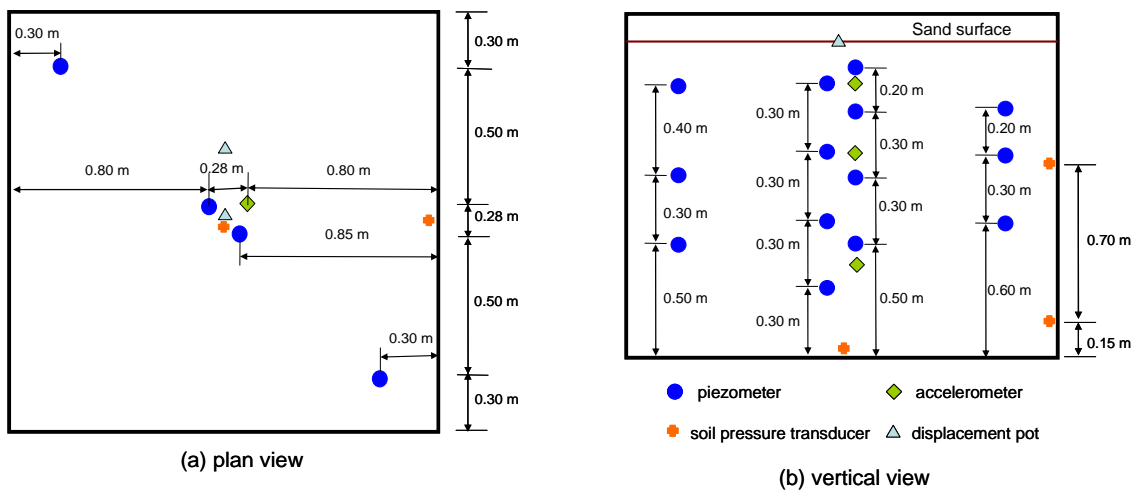
Shape	$G_s$	$D_{50}$ (mm)	$C_u$	$e_{max}$	$e_{min}$	$\rho_{max}$ ( $kg/cm^3$ )	$\rho_{min}$ ( $kg/cm^3$ )
Subangular	2.65	0.32	1.52	0.912	0.612	1644	1386



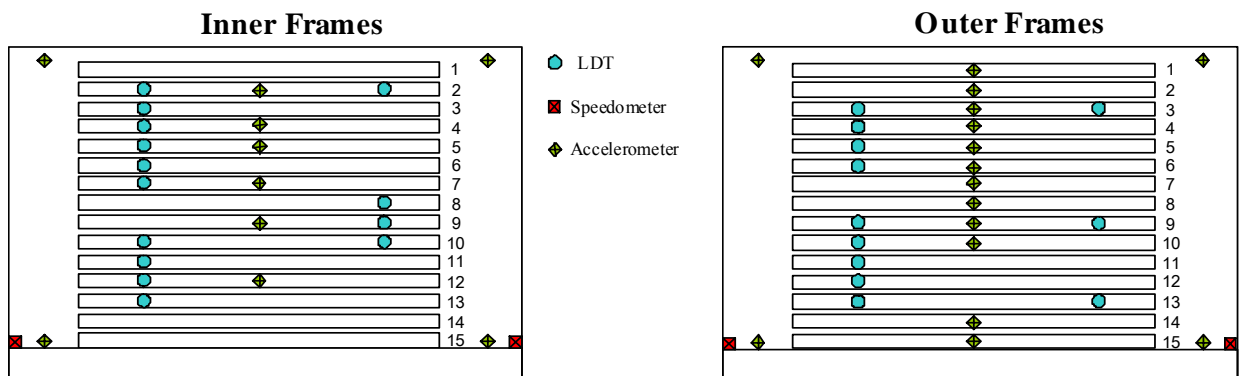
### 三、量測儀器

飽和砂土受到震動時，超額孔隙水壓激發的狀況是一個重要的課題。而土層受震之運動狀況，包括位移、速度、加速度以及土層表面沈陷量亦為觀察的重點。因此除了在土壤試體內部不同深度與位置埋設水壓計、加速度計與土壓計之外，在剪力盒的內、外框架上則裝設有 X, Y 兩方向之位移計、速度計及加速度計，同時也在試體表面上裝設沈陷盤，以觀察試驗進行時的土層表面沈陷量之變化。剪力盒內部量測儀器的配置則如圖三所示。圖四顯示剪力盒框架上之儀器配置。圖五為飽和砂土試體在振動台上之情況。

試體內部量測儀器的埋設方式是先將釣魚線固定在試驗盒上，再將水壓計和加速度計分別固定在所規劃的深度及位置上。在進行振動台試驗前，再將釣魚線剪斷，以避免其影響試體的變形行為。在每次振動試驗前，水壓計均須逐一檢測，以確定其功能與水面下位置。



圖三 剪力試驗盒砂試體內部量測儀器配置圖



圖四 剪力試驗盒框架上儀器配置圖



圖五 振動台大型剪力盒試體試驗

## 四、振動台試驗

二維大型剪力試驗盒是利用國家地震工程研究中心之振動台為地震力來源，進行大尺寸物理模型試驗來模擬水平向地震力作用下土壤之受震反應行為。

翁作新等人自 2002 年 8 月起至目前共進行了八次的振動台試驗，試驗的項目及振動模式列於吳繼偉[8]。表二為其中 2004 年 10 月所進行的振動試驗。一般試驗輸入振動模式為先進行一維振動後，再是二維振動；先施加 8~10 秒之正弦波，並變化其頻率（1Hz、2Hz 以及 4Hz）和加速度（0.03g~0.15g），然後施加不同之實地震記錄；先以小振幅振動，再加大振幅振動。每次振動試驗中皆量測不同深度內外框 x、y 向的加速度、速度與位移、土體中之水壓力與加速度以及土層表面之沈陷量。振動停止後，仍繼續水壓計之記錄，以觀測孔隙水壓之傳播與消散情形。而且也在每次振動前後量測水面與砂面高度，以得到砂土沈陷量與試體密度的變化。

表二 2004 年 10 月第六次振動台試驗振動模式

振動模式	X 向 (N-S)		Y 向(E-W)		延時(sec)
	頻率(Hz)	加速度	頻率(Hz)	加速度	
F01			2	0.03	10
F02	2	0.03			10
F03	2	0.03	2	0.03	10
F04			2	0.05	5
F05			2	0.05	10
F06			2	0.05	20
F07			2	0.05	30
F08			1	0.05	5
F09			1	0.05	10
F10			1	0.05	20
F11			1	0.05	30
F12			4	0.05	5
F13			4	0.05	10
F14			4	0.05	20
F15			4	0.05	30
F16	2	0.05	2	0.05	10
F17	1	0.05	1	0.05	10
F18	4	0.05	4	0.05	10
F18a	4	0.05	4	0.05	10
F19	集集地震社頭強震測站之歷時紀錄(Y,PGA scale down to 12.5%)				
F20	集集地震社頭強震測站之歷時紀錄(X & Y, scale down to 12.5%)				
F21			2	0.075	5
F22			2	0.075	10
F23			2	0.075	20
F24			2	0.075	30
F25			1	0.075	5
F25a			1	0.075	5
F26			1	0.075	10
F27			1	0.075	20
F28			1	0.075	30

表二 2004 年 10 月第六次振動台試驗振動模式 ( 續 )

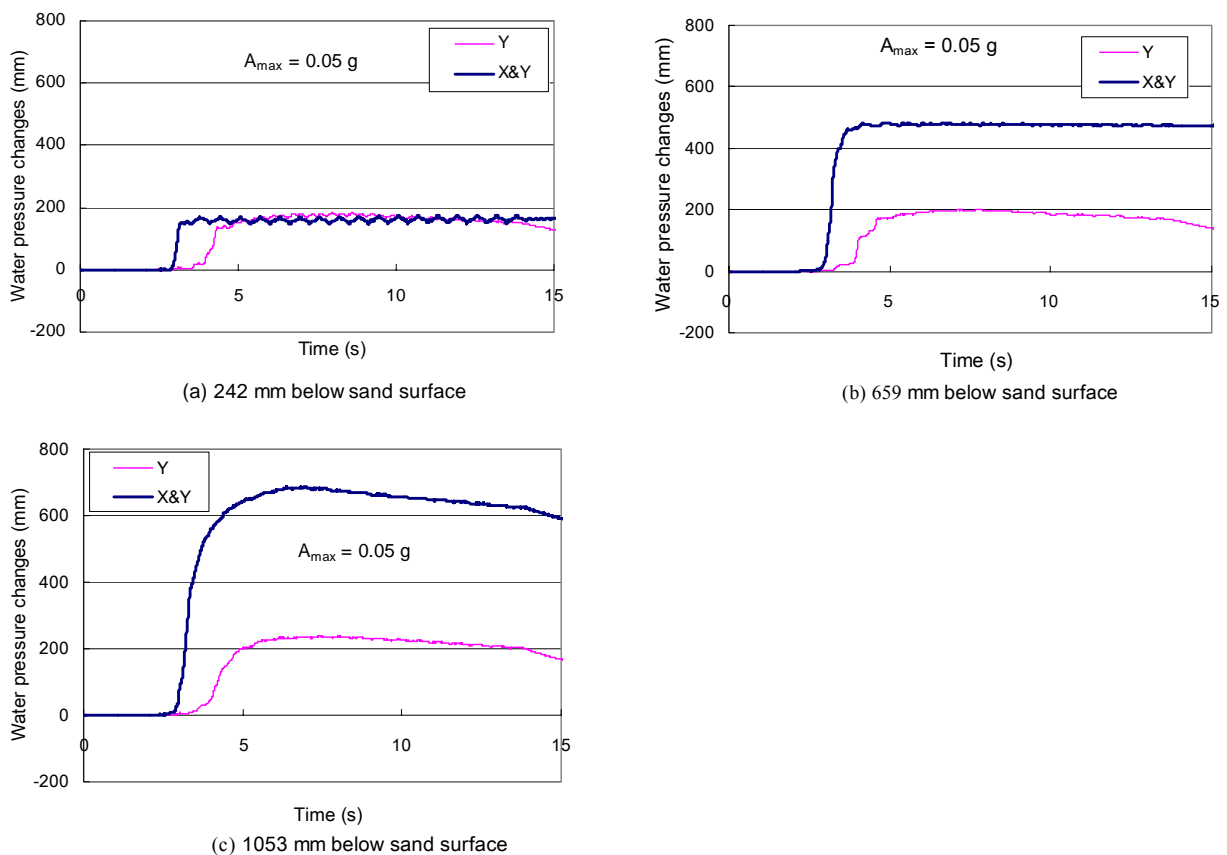
振動模式	X 向 (N-S)		Y 向(E-W)		延時(sec)
	頻率(Hz)	加速度	頻率(Hz)	加速度	
F29			4	0.075	5
F30			4	0.075	10
F31			4	0.075	20
F32			4	0.075	30
F33	2	0.075	2	0.075	10
F34	1	0.075	1	0.075	10
F35	4	0.075	4	0.075	10
F36	集集地震社頭強震測站之歷時紀錄(Y ,PGA scale down to 18.75%)				
F36a	集集地震社頭強震測站之歷時紀錄(Y ,PGA scale down to 18.75%)				
F37	集集地震社頭強震測站之歷時紀錄(X & Y , scale down to 18.75%)				
F38			2	0.1	5
F39			2	0.1	10
F40			2	0.1	20
F41			2	0.1	30
F42			1	0.1	5
F43			1	0.1	10
F44			1	0.1	20
F45			4	0.1	5
F46			4	0.1	10
F47			4	0.1	20
F48			8	0.1	5
F49			8	0.1	10
F50	2	0.1	2	0.1	10
F51	2	0.1	2	0.1	20
F52	1	0.1	1	0.1	10
F53	4	0.1	4	0.1	10
F54	集集地震社頭強震測站之歷時紀錄(Y ,PGA scale down to 25%)				
F55	集集地震社頭強震測站之歷時紀錄(X & Y , scale down to 25%)				
F56			2	0.15	5
F57			2	0.15	10
F58	集集地震社頭強震測站之歷時紀錄(Y ,PGA scale down to 50%)				
F59	集集地震社頭強震測站之歷時紀錄(X & Y , scale down to 50%)				

## 五、試驗結果

以下討論飽和砂土試體在一維與二維正弦波作用下，孔隙水壓力變化情形。而在下列的討論當中，水壓計的高程是以該次試驗前量測所得的深度為基準，而水壓計的深度可能會因為振動而改變它的位置。根據試驗結果顯示水壓計的深度相差不大，因此可以同一深度水壓計量測結果來作為比較的參考依據。由於試驗之輸入振動模式是先進行一維振動後，再進行二維振動，因此，二維振動時之試體相對密度會比一維振動時大。

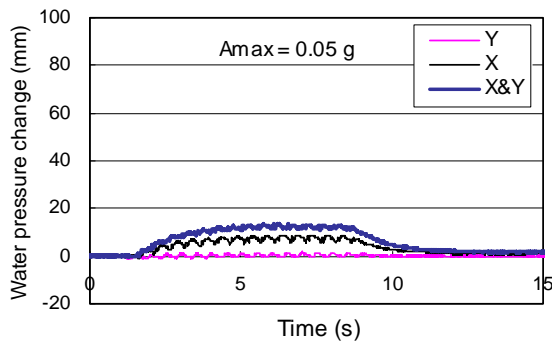
### 5.1 一維與二維振動作用之水壓力變化

圖六為分別在一維與二維振動作用下 ( $A_{max} = 0.05g$ )，砂試體表面下 242mm、659mm 和 1053mm 深處之孔隙水壓力變化情形之比較。圖六顯示在相同的加速度作用下，二維振動試驗所激發之超額孔隙水壓較一維振動試驗高，即使二維振動時( $D_r \approx 38\%$ )之試體相對密度比一維振動時( $D_r \approx 11\%$ )大。

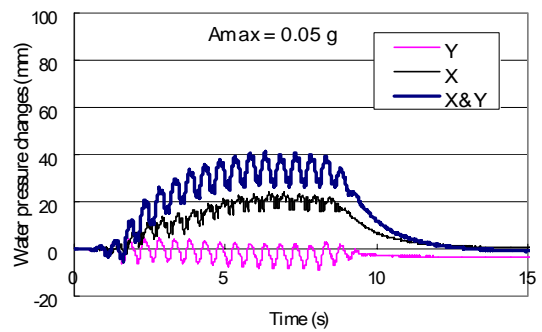


圖六 孔隙水壓變化歷時， $D_r \approx 11\% - 38\%$

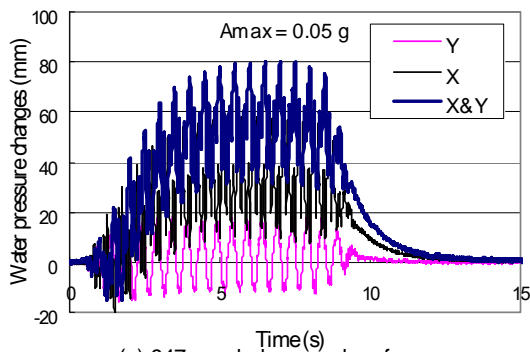
根據試驗結果發現在較緊密的砂土中( $Dr \approx 83\%$ )，若試驗之最大加速度僅為  $0.05g$ ，則如圖七所示，在一維與二維振動作用下皆不會引起顯著的孔隙水壓力激發。而當試驗之最大加速度增為  $0.075g$  時，圖八顯示在相同的加速度作用下，二維振動試驗所激發之超額水壓比一維振動試驗高，而且在二維振動時，砂面下  $954mm$  以上土層皆達到液化。



(a) 317 mm below sand surface

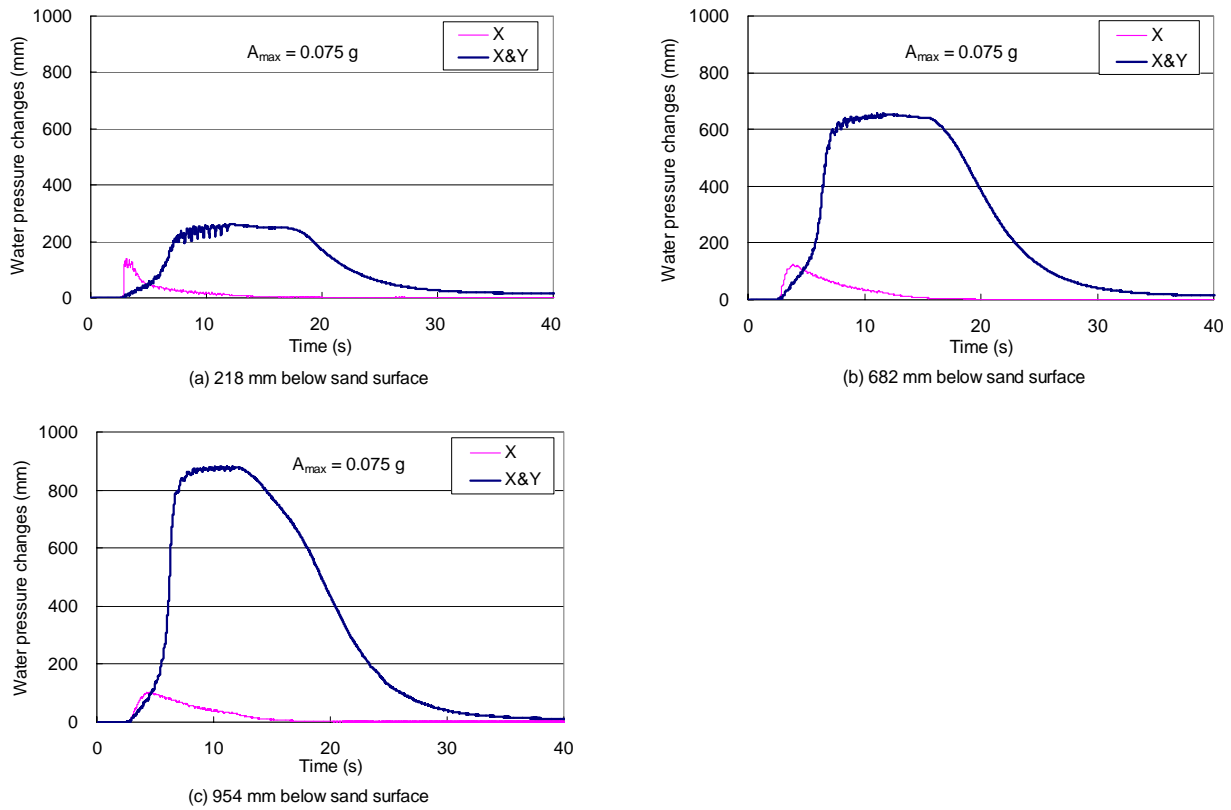


(b) 700 mm below sand surface



(c) 947 mm below sand surface

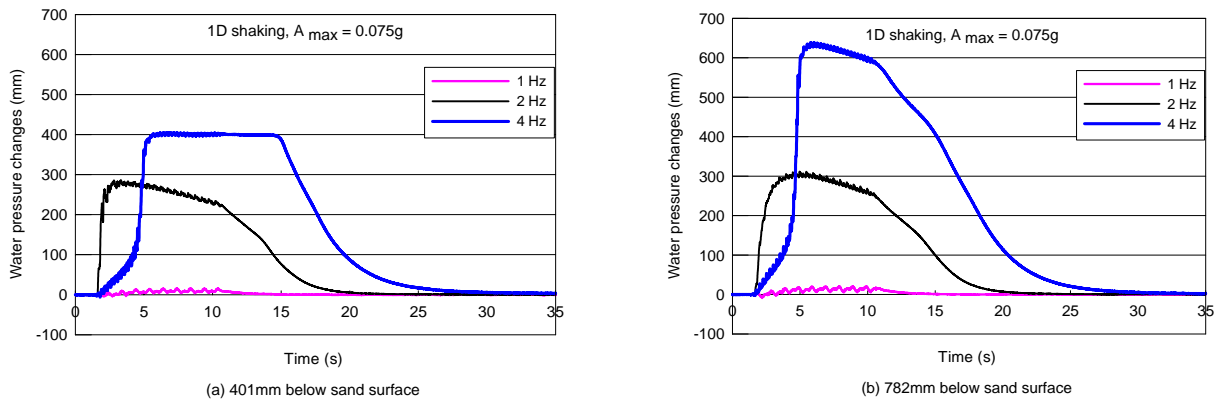
圖七 孔隙水壓變化歷時， $Dr \approx 83\%$ ， $A_{max} = 0.05 g$



圖八 孔隙水壓變化歷時， $D_r \approx 83\%$ ， $A_{max} = 0.075 g$

## 5.2 不同振動頻率之水壓力變化

圖九是在一維正弦波振動作用下 ( $A_{max} = 0.075 g$ )，變化不同的振動頻率 (1 Hz、2 Hz 和 4 Hz)，所得到砂試體表面下 401 mm 和 782 mm 兩處所量得之孔隙水壓力變化情形。試驗之順序為先進行 2 Hz 的振動，再是 1 Hz 振動，最後是 4 Hz 的振動。結果顯示振動頻率愈高所激發之超額孔隙水壓也愈高，而且愈深的砂土層，所激發的超額孔隙水壓也愈高。

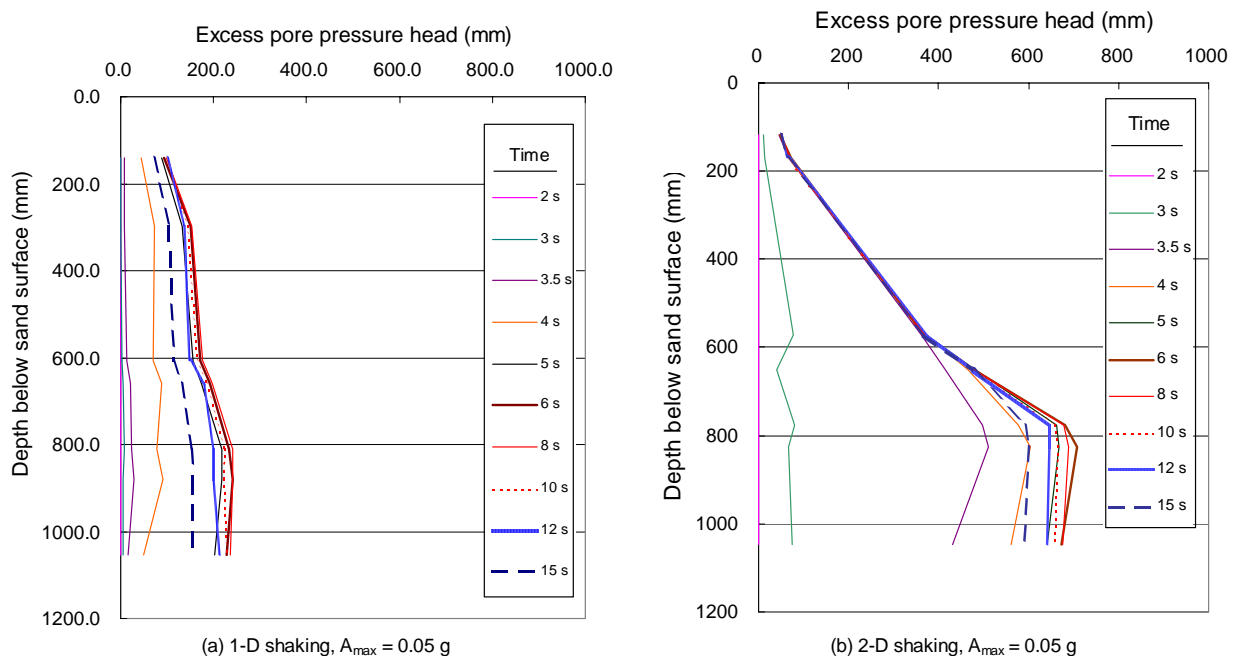


圖九 不同振動頻率下之孔隙水壓變化， $D_r \approx 52\%-66\%$

### 5.3 水力坡降變化

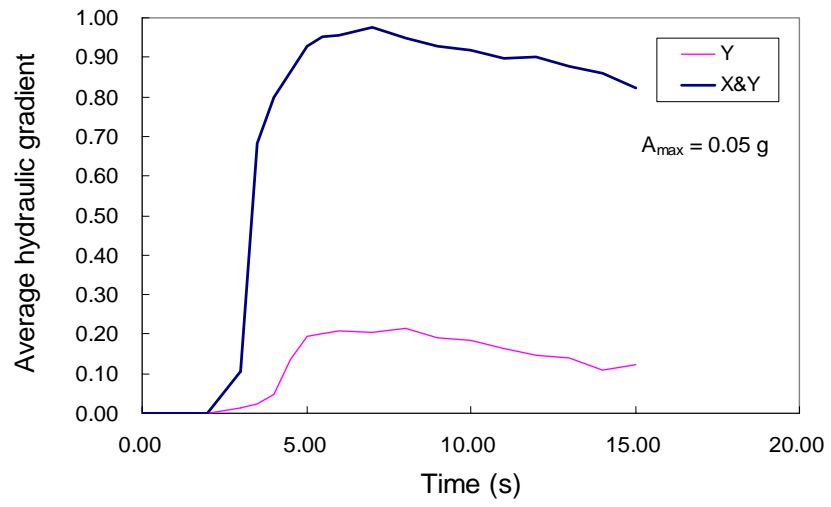
根據試體內部不同深度之水壓量測的結果發現淺層砂土比深層砂土容易發生液化。從許多的試驗結果顯示（如圖十）通常淺層的砂土層已經液化，但是較深層的土層卻尚未到液化的狀態。在一維二維振動作用下，大型砂土試體中之孔隙水壓力激發和消散狀況相當複雜。圖十是分別在一維與二維振動作用下（ $A_{max} = 0.05g$ ），試驗過程中沿著試體深度之超額孔隙壓力水頭分布情形。由試驗結果可知，在振動過程中不論試體是否發生液化，試體內皆有向上之水力坡降，這表示即使試體未發生液化時，孔隙水也有從較深層土壤流向淺層土壤的趨勢。一般而言，試驗開始前，靠近砂土試體表面的水力坡降是最高的；在試驗過過程中，試體內之水力坡降會增加到一個最大值而在試驗後才開始減少。因此，在試驗結束後，淺層砂土的超額孔隙水壓會持續一段較長的時間才開始消散。圖十表示在砂面下 600mm 以上土層之水力坡降變化，在二維振動試驗時比一維振動試驗快，且在二維振動時，砂面下 600mm 以上土層亦達到液化。

圖十一為在一維與二維振動作用下( $A_{max} = 0.05g$ )，砂土表面下 100mm 與 800mm 間之平均水力坡降歷時圖。由圖十一顯示在二維振動試驗過程中，最高的水力坡降相當接近 1.0 而此水力坡降則會造成淺層砂土液化，且會在試驗結束後延長其超額孔隙水壓消散時間。



圖十 試驗過程中試體內部超額孔隙壓力水頭分布情形





圖十一 試驗過程中之平均水力坡降變化

## 六、結論

根據目前之分析結果可歸納以下幾點結論：

1. 在相同的加速度作用下，二維振動時所引致之超額孔隙水壓較一維振動時高。
2. 淺層砂土較深層砂土容易液化而且其超額孔隙水壓消散時間也較深層的砂土長。
3. 隨著振動頻率越高所激發之超額孔隙水壓力也越高。
4. 在振動過程中不論試體是否發生液化，試體內皆有一向上之水力坡降，表示即使試體未發生液化時，孔隙水也有從較深層土壤流向淺層土壤的趨勢。

## 參考文獻

- [1] Pyke, R.M., Seed, H.B. and Chan, C.K., "Settlement of sands under multi-directional loading", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. 4, pp. 379-398 (1975).
- [2] Ishihara, K. and Yamazaki, F., "Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading," Soils and Foundations, vol. 20, no. 1, pp. 45-59 (1980) .
- [3] Ishihara, K. and Nagase, H., "Multi-directional irregular loading tests on sand", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 201-212 (1988).
- [4] Endo, O. and Komanobe, K., "Single- and multi-directional shaking table tests of sand liquefaction," in Proc. IS-Tokyo'95, 1st International Conference Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, pp. 675-680 (1995).
- [5] Kammerer, A.M., Pestana, J.M., and Seed, R.B., "Undrained response of Monterey 0/30 sand under multidirectional cyclic simple shear loading conditions," Geotechnical Engineering Report No. UCB/GT/02-01, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley. (2002).
- [6] 翁作新、王明輝、陳銘鴻、何文欽,「大型振動台剪力盒土壤液化試驗(I)--大型二維剪力盒之研發」, 國家地震工程研究中心, No. ncee-01-011, 台北 (2001)。
- [7] 翁作新、陳家漢、彭立先、李偉誠,「大型振動台剪力盒土壤液化試驗(ii)--大型砂試體之準備與振動台初期試驗」, 國家地震工程研究中心, No. ncee-03-042, 台北 (2003)。
- [8] 吳繼偉,「振動台大型試體受震體積應變之探討」, 國立台灣大學土木工程學研究所, 碩士論文, 民國 94 年 6 月。

## 成果自評

本計畫研究內容與成果與原計畫本年度預期目標相符，所得之研究成果可以作為在考量實際二維多向地震作用下所需修正之參考。本計畫部份成果與資料，已於 94 年 9 月舉行之第十一屆大地工程研討會中發表。