

教育部教學實踐研究計畫成果報告

Project Report for MOE Teaching Practice Research Program

計畫編號/Project Number：PEE1090653

學門專案分類/Division：工程學門

執行期間/Funding Period：2020 年 8 月 1 日至 2021 年 7 月 31 日

結合實驗與自學的大地工程科技防災教育

Combination of experiments and self-learning for the education of disaster prevention by  
technology in geotechnical engineering

土壤力學/Soil mechanics

計畫主持人(Principal Investigator)：洪汶宜

執行機構及系所(Institution/Department/Program)：

國立中央大學土木工程學系

成果報告公開日期：

立即公開 延後公開(統一於 2023 年 9 月 30 日公開)

繳交報告日期(Report Submission Date)：2021 年 9 月 17 日

## 摘要

土壤力學為大地工程的專業基礎課程之一，在介紹土壤的分類、滲透性、壓縮性與剪力強度，用以評估與設計基礎工程、擋土工程、隧道工程、邊坡穩定、土壤液化等。在現今極端氣候之下，年降雨量改變不多，但是降雨集中使降雨強度變大，加上台灣地處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊聚合性邊界上，地震頻繁發生，大地工程災害發生頻繁，例如土壤液化、邊坡滑動、降雨坡面侵蝕、土工構造物的受震破壞等自然災害或複合性災害。本計畫將結合課堂授課與實作，合併土壤力學、相關基礎實驗與離心模型實驗，在教室外上課並配合相關教具，提升學生學習興趣與教學品質，達到科技防災教育之目標。

中文關鍵詞：土壤力學、複合性災害、基礎試驗、實作、離心模型試驗

## Abstract

Soil mechanics is one of the professional fundamental courses for geotechnical engineering. The soil classification, permeability, compressibility and shear strength of soil are introduced and used to assess and to design the foundations, retaining system, tunnel, slope stability and to evaluate the potential of soil liquefaction et al. Taiwan locates at the boundary of Eurasia and Philippine Sea plates and the climate changes in recent years, geotechnical and compound disasters occur frequently, such as soil liquefaction, slope failure, erosion of slope surface and damage of geo-structure under seismic loading. Teaching and implement classes will be combined including soil mechanics, fundamental experiments and centrifuge modeling test outside the classroom. Teaching properties and videos will be made for students in this project to enhance their interesting and teaching quality for the goal of disaster prevention education by technology.

英文關鍵詞：Soil mechanics, Compound Disasters, Fundamental experiments, Implementation, Centrifuge modeling test

## 目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	I
目錄.....	II
一、 報告內文.....	1
1. 研究動機與目的.....	1
2. 文獻探討.....	1
3. 研究問題.....	4
4. 研究設計與方法.....	4
5. 教學暨研究成果.....	9
6. 建議與省思.....	10
二、 參考文獻.....	10
三、 附件.....	12

## 結合實驗與自學的大地工程科技防災教育

Combination of experiments and self-learning for the education of disaster prevention by technology in geotechnical engineering

### 一、報告內文

#### 1. 研究動機與目的

##### (1) 教學實踐研究計畫動機

在現今極端氣候之下，年降雨量變化不大，但是降雨集中使降雨強度變大，加上台灣地處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊聚合性邊界上，地震頻繁發生，種種因素引致土壤液化、邊坡滑動、降雨坡面侵蝕、地工構造物的受震破壞等大地工程災害發生頻繁。然而，在學校不論是基礎課程、總整課程或遠距課程，皆不容易讓學生對土壤液化的機制、過程與結果有通盤性的瞭解，過去常說『Seeing is believing』，相信若能藉由本計畫的示範影片及現場實做之教具，配合授課時的講解、教科書上的理論與網路資源，相信能提高學生學習效率與成效，讓學生不僅只是瞭解課本上的內容，亦讓學生親眼觀察土壤液化發生的過程，有效提高科技防災教育的目標。

中央大學地工離心機為全台唯一之地工離心機，本計畫欲建構新的教學材料以提升教學品質，除了進行土壤力學基礎物理性質實驗、力學性質試驗以外，以物理模型試驗影片並於課堂中讓學生進行簡單的土壤液化實驗，眼見土壤液化的過程與引致的相關破壞行為，提升學生對土壤液化相關議題的了解程度，熟悉物理模型試驗之技巧，並學習動手解決問題的能力，提高學生學習效率與成效。

##### (2) 教學實踐研究計畫主題及研究目的

土壤液化、邊坡滑動、降雨坡面侵蝕、地工構造物的受震破壞等，都是常發生在台灣的自然災害或複合性災害，未來預計透過教學實踐研究計畫，逐年發展各類災害機制與行為的教學展示與課堂教具的發展，配合土壤基礎物性實驗、力學性質實驗、振動台實驗與離心模型實驗等，讓土木工程之學習生活化，達到科技防災的教育目標。

#### 2. 文獻探討

從 1964 年日本新瀉規模 7.2 地震和美國阿拉斯加發生規模 9.2 之地震，均發生了大規模的土壤液化災害，使在世界各國的學者們對於土壤液化的現象有高度的關注。到現在，不論是在現地的調查、理論的分析與模型試驗上均累積了許多成果，讓工程師能在設計時能對此作預防。在 1980 年後，世界各地雖都有地震引致土壤液化的現象，但皆未造成嚴重災害。一直到 1994 年美國加州 Loma Prieta 地震與 1995 年日本阪神地震，發生了嚴重地土壤液化災害危及人民生命安全。

1999 年臺灣集集地震亦造成相當程度的土壤液化災害(倪勝火、賴宏源，2000 [1]；翁作新等人，2000 [2]；黃俊鴻等人，2000 [3]；褚炳麟等人，2000 [4]；蘇鼎鈞、王劍虹，2000 [5]；張益銘，2001 [6]；李崇正等人，2003 [7]；蕭峻銘，2003 [8])。在 2011 年的紐西蘭基督城地震，地震規模僅 6.2，但卻造成包含市中心向外延伸的大範圍土壤液化，附近河川也因液化所引致側向滑移之破壞，導致上萬民宅的結構受損，有的甚至無法住人，只能打掉再重建。不僅地表上有影響，地表下之地下水和污水下水道系統也受到嚴重的破壞，使當地居民不僅無家可歸，也沒有乾淨的水資源可使用，使當地居民生活相當克

難；而 2011 年 3 月 11 日的東日本大地震，地震規模達 9.0，除了有高達 15 公尺之海嘯及浮島核電廠原子爐洩漏災害外，也產生了嚴重的土壤液化災害。土壤液化所影響的範圍涵蓋了東京沿岸及其北部鄰近地區，市區中的住宅受到嚴重的破壞。下水道系統也因土壤液化而斷裂、上浮或淤塞，損壞情況非常普遍，影響人民生命財產安全，可說是有史以來最大規模與嚴重的土壤液化災害，過去也有土壤液化引致地工構造物破壞的相關研究 (Brandenberg 等人, 2005 [9]; González 等人, 2008 [10]; Haskell 等人, 2011 [11]; Adalier 等人, 2004 [12]; Okamura 等人, 2011 [13]); 此外，今年 2018 年北海道與印尼大地震，亦造成大規模邊坡滑動、土壤液化的災害如圖 2.1 所示。

臺灣位於環太平洋地震帶上，歐亞板塊與菲律賓海板塊交界線，使發生地震的頻率相較於位在大陸板塊上的國家高出許多。又因臺灣西部平原區均屬地質軟弱的沖積地層，且地下水位面較高，當大地震來臨時，發生土壤液化的機率又會高上其它地區許多。近年最直接讓人聯想到的大地震即為 1999 年的集集大地震，台灣中部一帶即發生土壤液化，地表產生差異沉陷使住宅受損。而臺中港部分碼頭也因土壤液化而受損，無法正常營運(如圖 2.2 所示)；2010 年甲仙地震時，臺南新化高鐵沿線附近亦發生土壤液化現象(如圖 2.3 所示)。

據上述所說，臺灣西部沖積平原土壤具液化潛能，又因人口稠密工商發達，若遇大地震而導致土壤液化，雖然不會立即造成大規模的人命損傷，但因土壤液化引致的住宅與地中構造物的損壞，勢必嚴重影響人民生活與社會安全。鑑於 2011 年紐西蘭基督城與東日本大地震的土壤液化災害，以及臺灣過去因地震引致土壤液化的災害案例，臺灣必須要重視土壤液化防災，以利國家的永續發展。



圖 2.1 北海道大地震引致山崩與土壤液化 (擷取自李四端's 雲端世界節目)



圖 2.2 九二一地震造成土壤液化使台中港碼頭積砂(國家實驗研究院地震工程研究中心, 陳正興、陳家漢, 2014)



圖 2.3 甲仙地震造成臺南新化地區土壤液化 (國家實驗研究院地震工程研究中心, 黃富國博士)

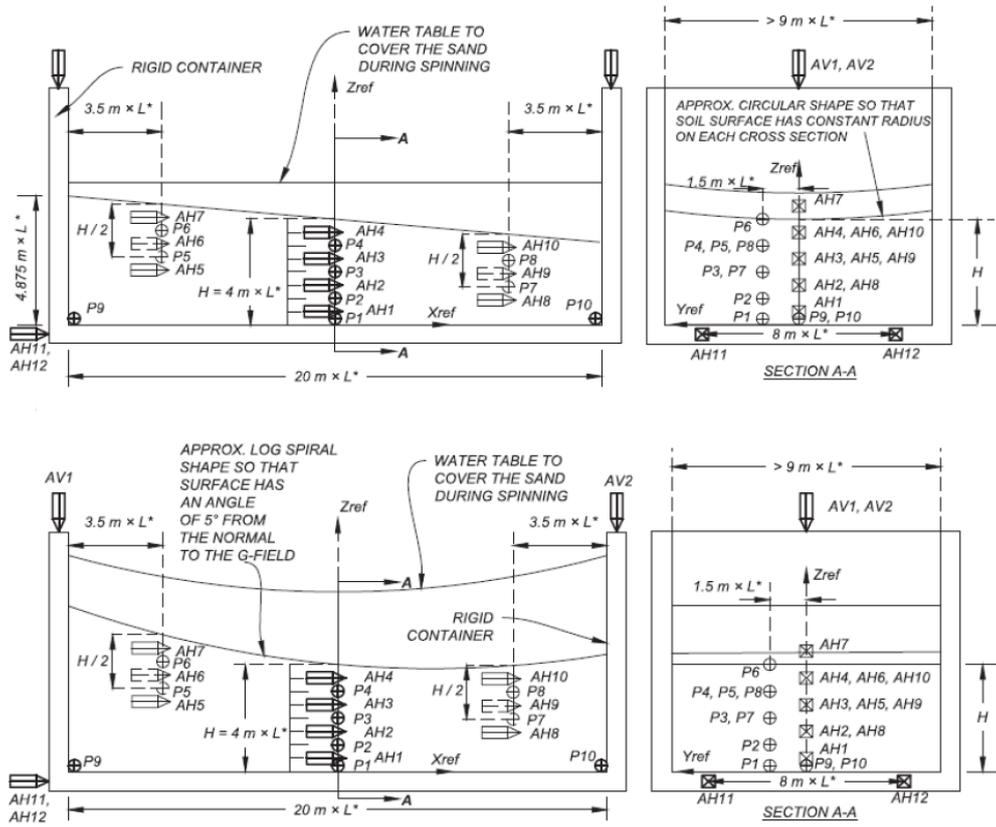


圖 2.4 LEAP-GWU-2015 離心模型配剖面置圖 (Ueda 等人, 2016)

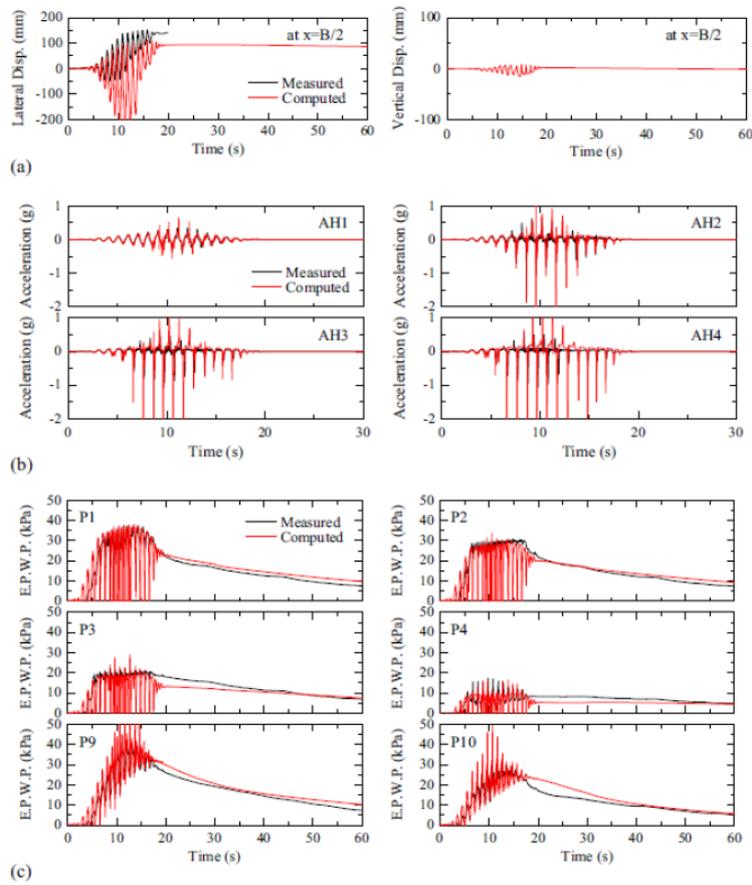


Fig. 25. Computed time history of (Class B prediction for RPI): (a) Relative displacement; (b) Horizontal acceleration; (c) Excess pore water pressure.

圖 2.5 LEAP GWU 2015 離心模型與數值模型結果之比較圖 (Ueda 等人, 2016)

大約二十年前，Verification of Liquefaction Analysis using Centrifuge Studies (VELACS) 計畫由 7 所美國與英國為首的大學藉由離心模型試驗模擬土壤液化現象和其引致的相關災害，並由世界上超過 20 個研究數值模型的團隊參加以數值模型預測離心模型試驗的結果以此相互驗證(Popescu 等人，1995 [14])。但是此計畫並不是很成功，主要是試驗設備與分析軟體無法提供足夠的需求。在 VELACS 計畫之後雖然也陸續有學者研究關於數值模型與離心模型的比較，但較無系統性的整理(Yang 等人，2013 [15]；Popescu 等人，2012 [16]；Marasini 等人，2012 [17])。因此在 2014 年京都大學 Iai 教授提出了一個國際合作的驗證計畫 Liquefaction Experiments and Analysis Projects (LEAP)，其目的首先在比較世界上不同研究單位所進行相同原型(Prototype)的離心模型試驗結果，再以探討土壤受振液化及其側潰的行為，提供數值模型做相互驗證。

LEAP 計畫中，LEAP-GWU-2015 由多個國家的離心模型研究團隊包含美國 The George Washington University (GWU)、University of California at Davis (UC-Davis) 與 Rensselaer Polytechnic Institute (RPI)、英國 Cambridge University、日本 Kyoto University、東京工業大學、大陸浙江大學、香港理工科技大學、法國 IFSTTAR、南韓 KAIST and K-Water 以及台灣中央大學，參與計畫的各國研究單位之離心模型都模擬相同的原型(如圖 2.4 所示)，並期望能藉由各個離心模型團隊模擬同一原型進行相互驗證，建立離心模型試驗的準備與試驗標準 (Kulter 等人，2014 [18]；Srikeneth 等人，2015[19]；Ueda 等人，2016[20]，如圖 2.5)。

### 3. 研究問題

相較於其他自然或土木工程相關災害，土壤液化自 1964 年開始逐漸被重視，過去各地亦發生許多土壤液化的相關災害，隨著科技的發展，民眾很容易用手機拍下災害發生的瞬間畫面，實驗室內也有越來越多的設備可以進行模擬與研究，但如何與時俱進的把研究與實做帶進教室，提升學生的興趣以及對土壤液化相關議題的了解程度，熟悉物理模型試驗之技巧，並學習動手解決問題的能力，讓學生從『旁觀者』變成『操作者』，引發學生思考與興趣，是本計畫的目標。

### 4. 研究設計與方法

#### (1) 研究設計說明

本計畫之教學目標在藉由講授土壤力學(大學生)、離心模型試驗技術與資料分析(研究生)時，由本計畫的示範影片及現場實做之教具，配合授課時的講解、教科書上的理論與網路資源，相信能提高學生學習效率與成效，提升學生的興趣以及對土壤液化相關議題的了解，讓學生不僅只是瞭解課本上的內容，亦讓學生親眼觀察土壤液化發生的過程，搭配課程中之實作經驗，使學生了解及熟悉物理模型試驗準備、模擬過程、試驗後處理及結果分析等，甚至未來更可以進一步提供土壤結構互制行為、邊坡穩定、地工構造物動態反應及災害防治對策等主題之資料，以期達到科技防災教育的目標。

教學方法主要以課堂講授為主，搭配課堂實做與討論，必要時以組對學生進行指導。成績考核以作業與預習小考為主，作業則著重於實習課程時進行的操作及心得分享。小範圍之預習小考，可使學生於課前預習，在課堂中由教師直接進行檢討，一方面可讓教師了解學生在哪些觀念上的了解較薄弱，可於該堂課中強化該觀念之解說，另一方面亦使學生有更加深刻的印象。學生有課前預習，於課堂上的提出問題與教師及同班同學進行討論，訓練學生的思辨能力，因此學生之課堂參與表現亦

為本課程之成績考核方式之一。

於課程的最後，學生分組進行實作，透過課堂上習得之數據處理及分析技術，撰寫結果報告，並進行口頭報告。學生的報告能力亦為本課程的成績考核重點之一。大學部學生課堂進度如表 4.1 所示，主要在基礎理論、現象與機制說明、實做課程、土壤滲透性、壓縮性及剪力強度的評估與分析計算；研究所學生課堂進度如表 4.2 所示，課程前半部為離心模型原理及技術的教授，後半部為試驗結果之數據處理及分析的教授，並於中間穿插實習課程，強化學生對該主題的了解。學期課程結束後，除了請學生填寫中央大學教學問券評量作為回饋，並在期末舉辦心得分享，面對面了解學生之學習成效。

表 4.1 土壤力學課程進度與規劃

週次	課程主題：土壤力學（大學生）
1	大地工程之起源、土壤與岩石
2	重量與體積關係、塑性及土壤結構
3	土壤分類（AASHTO）（實習課）
4	土壤分類（USCS）
5	土壤夯實：目的及理論
6	土壤夯實：實做與應用（實習課）
7	土中水之流動：滲透與滲流（實習課）
8	土中水之流動：流網圖
9	期中考
10	有效應力觀念
11	有效應力觀念：莫爾圓
12	土中應力：液化之機制與理論說明
13	土中應力：液化行為探討、課堂教具操作（實習課）
14	土壤之壓縮性
15	土壤之壓縮性（實習課）
16	土壤之剪力強度
17	土壤之剪力強度（實習課）
18	期末考

表 4.2 離心模型試驗技術與資料分析課程進度與規劃

週次	課程主題：離心模型試驗技術與資料分析（研究生）
1	Unit 1: Concept and principle of centrifuge modeling：離心模型概論及原理
2	Unit 2: Centrifuge modeling technique and model design：離心模型規劃設計
3	Practice 1: Tool operation training: monitory and unbalance systems 實習課 1：操作監控系統以及調整不平衡呆重系統
4	Unit 3: Model preparation：準備試體
5	Practice 2: Tool operation training: Pluviation and consolidation 實習課 2：以空氣質降法製作乾砂試體
6	Unit 4: Operation of monitor and data acquisition systems：監控及訊號擷取系統操作
7	Practice 3: Tool operation training: Saturation system 實習課 3：操作試體飽和系統
8	Unit5: Operation of monitor and data acquisition systems：監控及訊號擷取系統操作

9	Practice 4: Tool operation training: DAQ system 實習 4：操作訊號截取系統
10	Unit 6: Data processing- dynamic test：動態試驗的數據處理與分析
11	Practice 5: Data analysis training: Visual Signal 實習 5：以 Visual Signal 進行數據分析
12	Unit 7: Data processing-pile behavior：土壤液化的理論與展示、數據處理與分析
13	實做：Centrifuge modeling 準備離心模型試驗：土壤液化實驗
14	實做：Centrifuge modeling 準備離心模型試驗：土壤液化實驗
15	實做：Model analysis 試驗結果分析
16	實做：Centrifuge modeling 執行離心模型試驗
17	實做：Model analysis 試驗結果分析
18	Project presentation 成果發表與心得分享

(2) 研究步驟說明

A. 研究架構

如圖 4.1 之研究架構，本計畫之研究架構在土壤液化物理模型模擬技術，進行示範影片及現場實做之教具，配合授課時的講解、教科書上的理論與網路資源，提高學生學習效率與成效，提升學生的興趣以及對土壤液化相關議題的了解，課程中包括實做與課前預習，強化觀念與加深印象，最後藉由學生評量與期末報告及心得分享來評估學習成語教學程校，以期能達到科技防災教育之目標。

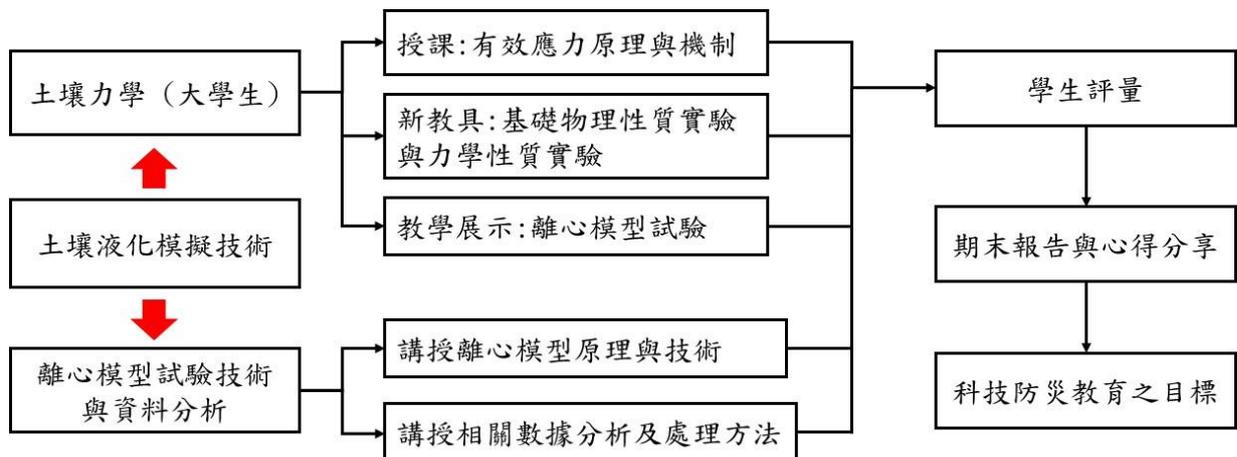


圖 4.1 研究架構圖

B. 研究假設

說明：此計畫為實做型教學實踐研究計畫，無研究假設。

C. 研究範圍

土壤力學課程使用 Das 所著 Principles of Geotechnical Engineering (大地工程原理) 為教科書，配合 Taylor 所著 Geotechnical centrifuge technology，作為離心模型試驗之原理的背景知識來源，並以本人的課堂講義當作教材，包括實際案例、示範影片、實做教具、網路資源作為共同之教材。評量方式則為中央大學期末課程評量，以及面對面的期末簡報與心得分享最為課程回饋。

D. 研究對象

土壤力學修課學生以大學部學生為主，離心模型試驗技術與資料分析則為碩博

同修，參與離心模型試驗相關之專題研究的大學生亦可選修本課程。選修本課程的學生不需特殊背景，或者對大地工程有興趣者為佳，或專題研究與離心模型試驗或是物理模型試驗有關。透過選修本課程的教學與訓練，學習模型試驗的知識與技術，提高同學們對科技防災之概念，或對未來就讀碩、博士學位時，能夠更順利地進行。

#### E. 研究方法

針對土壤基礎性質與力學性質實驗，將依據 ASTM 進行篩分析、比重計分析、最大最小乾單位重、定水頭實驗、直接剪力實驗，以得到土壤材料的基本性質，包含離心模型振動台試驗等各試驗簡單敘述如下。

##### 1. 粒徑分析試驗

(1)試驗目的：求土壤粒徑分佈曲線，以供土壤分類及其他工程上之運用，並計算均勻係數、曲率係數。

(2)試驗原理

###### A. 篩分析 (Sieve Analysis)

適用於粗粒土壤 (#200 以上)，利用一系列之篩組，求土壤通過時，各篩上的停留重量百分比及累積通過重量百分比。依各篩號尺寸大小及累積通過重量百分比之結果，繪製於半對數座標圖上，即為粒徑分佈曲線。

###### B. 比重計分析 (Hydrometer Analysis)

比重計分析法，亦稱沉澱分析法，根據流體力學中之斯篤克定律 (Stoke's Law)，利用細顆粒土粒在水中沉澱之終端速度與粒徑之關係推求土粒粒徑尺寸。

##### 2. 比重試驗

試驗原理：比重為土壤顆粒單位重與 4°C 純水單位重之比值。

##### 3. 最大最小乾單位重試驗

(1)試驗目的

求土壤最大最小乾單位重  $\gamma_d$  參數，以配合試驗二土粒比重  $G_s$  試驗計算孔隙比  $e$ 、孔隙率  $n$  及飽和度  $S$ 。提供土壤一般參數，作為工程應用參考之依據。

(2)試驗原理

土壤之天然性質包括含水量  $w$ 、孔隙比  $e$ 、孔隙率  $n$ 、飽和度  $S$ 、土粒比重  $G_s$  與單位重  $\gamma$ 。可由土壤柱狀圖中之重量 ( $W$ ) 與體積 ( $V$ ) 間之關係而定義以上之幾個土壤天然性質。

##### 4. 定水頭試驗

(1)試驗目的

應用達西定律，決定土壤之滲透係數。

(2)試驗原理

一般土壤之滲透係數除礫石外，水流經土壤孔隙皆視為層流。故可利用達西定律求取土壤之滲透係數。

##### 5. 直接剪力試驗

(1)實驗目的

利用土壤的直剪試驗求出土壤之剪力強度參數凝聚力及內摩擦角，作為土壤承载力、強度及穩定分析之重要依據。

(2)試驗原理

根據莫耳庫倫破壞準則，由直剪試驗可繪出剪力-位移圖，並由三組以上之

試體破壞時之剪應力與正向應力決定出土壤摩擦角與凝聚力等剪力強度參數。

## 6. 標準夯實試驗

### (1) 試驗目的

求取土壤在一定夯實能量下，夯實後的最大乾單位重  $\gamma_{(d,max)}$  與最佳含水量 (Optimum Moisture Content) 之間關係，確保現場夯實可達到土壤剪力強度提高，減少沉陷量及滲透性之成效，以作為設計及施工品質控制之參考。

### (2) 試驗原理

關於夯實作用 (Compaction) 的原理，是藉由施加外力使填土材料或表層土壤達到緊密狀態的一種工法。已知水分對土壤密度大小扮演著重要角色，而土壤加水的作用猶如潤滑劑，可使顆粒易於滑動到緊密固實的位置。然而加水量有一界限，當增加含水量未達此一界限進行夯實，土粒較易滑動，造成乾單位重增加，若含水量增加超過此一界限時，因水分過多，水反而佔據原土粒的空間，反而使乾單位重減少，而以此一界限對應  $\gamma_d-\omega$  圖中之縱、橫軸，可得最大乾單位重與最佳含水量。

## 7. 離心模型實驗與振動台試驗

### (1) 實驗目的

在面對較複雜的大地工程問題時，通常大地工程師們會將問題簡化並以數值模型或物理模型分析進行設計，並在施工過程與完工後觀察成效，或檢討過往失敗之案例借鏡以解決工程難題。但若模擬之設定過於簡化會使得設計趨於保守，不符合經濟性，甚至忽略了其他因素導致工程失敗或在日後遭遇災害而使得工程損壞。物理模型與數值模型各有其優點，物理模型可模擬並觀察破壞機制 (failure mechanism)，但尺寸效應 (scale effect) 是其缺點。而數值模型雖然可以直接模擬工程原型，並有完整理論分析為基礎，但由於土壤之組成律 (constitutive law) 複雜，模擬仍有其限制。若數值模型與物理模型透過相互驗證補足雙方之缺點，對未來大地工程之模擬與設計將有很大的助益。

### (2) 實驗原理

本研究方法係採用離心模型試驗，於高離心力場中進行離心模型振動台試驗，瞭解可液化地盤在受震土壤液化，甚至引致側潰之物理行為。由過去的研究結果可以知道，以離心模型試驗進行動態研究探討土壤液化之問題，必須要考慮超額孔隙水壓消散的問題，根據離心模型之尺度因子 (scaling factor) 可以知道，線性尺度及時間之尺度因子均為  $1:N$ ，因此若要模擬原型的地震加速度歷時，在離心模型試驗時須將振幅及頻率放大  $N$  倍，則可以滿足現實基本運動方程式的因次律，由於水力坡降在模型與原型的因次比為  $1$ ，所以滲流速度只與滲透係數有關，若在試驗中使用與現實相同之黏滯液體，會加快孔隙水壓的消散速度，以水與黏滯液體飽和之模型，孔隙水壓激發的所需的間幾乎是相同的，然而以水飽和之試體在受震歷時結束時，孔隙水壓亦差不多消散完畢，以黏滯液體飽和之試體其孔隙水壓校散行為則較為緩慢，比較符合實際土壤液化後孔隙水壓消散行為，所以在研究孔隙水壓消散問題時，往往會使用高黏滯性的液體來取代水溶液。於離心模型使用的黏滯液體是以添加食物添加劑 (Methocel cellulose ether, MCE) 加水製作不同黏滯度 (viscosity) 的溶液，取代純水作為模型的飽和溶液。MCE 溶液之密度和浮力效應與純水近乎相同。當使用 MCE 溶液進行振動試驗時，並不會改變砂土的剪力模數，而當剪應變超過  $1 \times 10^{-4}$ ，則黏滯阻尼的影響也可以忽略，因此不會影響其動態反應。

離心模型試驗預計離心機在 26g 離心加速度場中進行模擬。使用的材料為渥太華砂(Ottawa F-65 sand)，其砂質穩定、顆粒粒徑較為均勻，土樣之物理性質如最大乾單位重為 1736 kg/m<sup>3</sup>、最小乾單位重為 1519 kg/m<sup>3</sup> 及比重為 2.673，統一土壤分類為不良級配砂 (SP)。藉由離心振動台試驗進行之研究，將在 26g 離心力場中，瞭解飽和傾斜地盤在不同的地盤相對密度與不同的基盤最大加速度(peak base acceleration, PBA)下，受振後土壤液化情況下引致側潰之變形行為，並做成教學展示影片，結合土壤力學中土壤分類、滲透性、有效應力及土中應力的概念。此外，製作向上滲流之教具，使同學在教室內可以動手實做瞭解向上滲流、靜水壓、向下滲流對土壤有效應力的影響。

## 5. 教學暨研究成果

### (1) 教學過程與成果

因應疫情嚴峻改採線上授課，未能使學生動手實作，改採觀看實驗教學影片之方式。每週課程開始前，學生提出對預習影片中疑難的部分互相討論，老師採互動式教學，在反覆問答的過程中，增加學生思辨的能力。課程以投影片授課為主，先講解土壤力學及土壤液化的理論與機制，學習理論有助於學生推敲實務現象中的前因後果。建立基礎理論後，配合實驗教學影片讓學生實際瞭解試驗方法及試驗步驟，藉由影片輔助學習可提升學生專注程度。且課程內容與生活可能會面對到的天災息息相關，提升學生學習動機。學期課程結束後，請同學填寫中央大學教學問券評量作為回饋，以了解學生學習之成效。

本研究計畫共產出八支基礎物理性質試驗影片(粒徑分析試驗、比重試驗、阿太保試驗、最大最小乾單位重試驗、定水頭試驗、直接剪力試驗、標準夯實試驗、單向度壓密試驗)及四支模型模擬試驗影片(離心模型液化試驗、邊坡穩定模型試驗、1g 振動台土壤液化試驗、離岸風機樁基礎側推試驗)。教學影片可作為大學生及研究生預習及複習良好的工具，亦能提供給其他老師授課之參考。

### (2) 教師教學反思

教學前審慎思考課程安排是否過於緊湊，考量學生是否有足夠時間消化，思考修習這門課後學生須具備的能力，自我反思調整教學內容及方式，如何讓學生從課堂中的旁觀者變為操作者。在課堂中多關注學生的學習過程，與學生保持良好的互動關係，以了解學生的需求及疑問，給予及時的回饋，教學相長，使學生能夠更有效率地學習，運用所學知識，達到理論與實務結合之目標。

### (3) 學生學習回饋

可善用實驗教學影片進行預習及複習，若有不懂的地方可進行回放，反覆觀看加深印象。預習可以增加學生的思考能力，透過同儕互相討論激發出不同的觀點。若還有不懂的地方，於課堂上提出與老師討論，同時反饋於老師，可藉由學生意見改進教學品質。教學影片可在傳統授課方式中吸引學生的注意力，講授完理論後利用影片及實習課結合能使學生學以致用，可強化學生對該主題的瞭解。透過理論及應用的結合，活用所學，對土壤室內試驗及土壤液化實驗有基本的了解，建立正確的認知，使未來可與工程實務銜接。

## 6. 建議與省思

大部份的學校將實驗課規劃在主課程上完之後一個學期，因為上完主課程後才有相對應的知識進行實驗操作。然而主課程與實驗課的分開，有可能會導致學生對理論（課程）及應用（實驗）的連結性不佳，但放在同一學期亦有學生學習時間不足的考量。近年來網路社群蓬勃發達，許多知識從網路即可取得。將實驗課的內容與步驟，以預錄影片的方式提供給上課學生觀看，不僅可解決時間上的問題，亦可加深學生對理論的印象。

相較於其他土木工程相關災害，土壤液化自 1964 年開始逐漸被重視，過去各地亦發生許多土壤液化的相關災害，隨著科技的發展，民眾很容易用手機拍下災害發生的瞬間畫面，實驗室內也有越來越多的設備可以進行模擬與研究學習。如何與時俱進的把研究及實驗帶進教室，提升學生對大地工程的興趣，增加對土壤液化等大地工程災害議題的瞭解，熟悉物理模型試驗之技巧，並試著學習設計與動手解決問題，讓學生從『旁觀者』變成『操作者』，引發學生思考與討論。

## 二、參考文獻

- [1] 倪勝火、賴宏源，「九二一集集大地震後續短期研究-921 地震引致中部縣市土壤液化地區之調查」，國家地震工程研究中心，台北（2000）。
- [2] 翁作新、李怡穎、林家賢，「九二一集集大地震後續短期研究-員林地區液化土壤動態特性初步探討」，國家地震工程研究中心，台北（2000）。
- [3] 黃俊鴻、陳正興、楊志文、譚志豪，「集集地震土壤液化之調查與分析」，土工技術，第 77 期，第 51-46 頁（2000）。
- [4] 褚炳麟、張益銘、陳冠閔、徐松圻、張錦銘，「921 地震霧峰、太平地區液化及下陷調查分析」，土工技術，第 77 期，第 19-28 頁（2000）。
- [5] 蘇鼎鈞、王劍虹，「員林地區集集大地震土壤液化評估案例探討」，土工技術，第 81 期，第 57-68 頁（2000）。
- [6] 張益銘，「霧峰地區土壤液化特性研究」，碩士論文，國立中興大學土木工程學系，台中（2001）。
- [7] 李崇正、溫惠鈺、熊大綱，「集集員林地區液化災損及復舊調查之研究」，中國土木水利工程學刊，第十五卷，第四期，第 851-858 頁（2003）
- [8] 蕭峻銘，「921 地震霧峰、員林、大村、社頭地區液化災損及復舊調查之研究」，碩士論文，國立中央大學土木工程學系，中壢（2004）。
- [9] Brandenberg, S.J., Boulanger, R.W., Kutter, B.L. and Chang D., "Behavior of Pile Foundations in Laterally Spreading Ground during Centrifuge Tests," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 11, pp. 1378-1391 (2005).
- [10] González, L., Lucas, D. and Abdoun, T., "Centrifuge modeling of pile foundations subjected to liquefaction-induced lateral spreading in silty sand," Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan (2008).
- [11] Haskell, J., Madabhushi, G. and Cubrinovski, M., "Effect of plie spacing on the behaviour of a pile group in lateral spreading soil," Proceedings of the 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Taipei, Taiwan (2011).
- [12] Adalier, K., Pamuk, A. and Zimmie, T.F., "Earthquake retrofit of highway/railway embankments by sheet-pile walls," Geotechnical & Geological Engineering, Vol. 22, Issue 1, pp. 73-88 (2004).
- [13] Okamura, M., Takebayashi, M., Nishida, K., Fujii, N., Jinguji, M., Imasato, T., Yasuhara, H. and

- Nakagawa, E., "In-Situ Desaturation Test by Air Injection and Its Evaluation through Field Monitoring and Multiphase Flow Simulation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137, No. 7, pp.643-652 (2011).
- [14] Popescu, R. and Prevost, J., "Comparison between VELACS numerical 'class A' predictions and centrifuge experimental soil test results," *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 14, pp. 79-92 (1995).
- [15] Yang, W., Hussein, M.F.M. and Marshall, A.M., "Centrifuge and numerical modelling of ground-borne vibration from an underground tunnel," *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 51, pp. 23-34 (2013).
- [16] Popescu, R. and Chakraborty, P., "Numerical simulation of centrifuge tests on homogeneous and heterogeneous," *Journal of Computers and Geotechnics*, Vol. 41, pp. 95-105 (2012).
- [17] Marasini, N.P. and Okamura, M., "Numerical simulation of centrifuge tests to evaluate the performance of desaturation by air injection on liquefiable foundation soil of light structures," *Journal of Soils and Foundations*, No.6, Vol. 55, pp. 1388-1399(2012).
- [18] Kulter, B.L., Manzari, M.T., Zeghal, M., Zhou, Y.G. and Armstrong, R.J., "Proposed outline for LEAP verification and validation process," *Proceeding of the Fourth International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation(4thGEDMAR)*, Kyoto, Japan, pp. 99-116 (2014).
- [19] Madabhushi, S.S.C., Haigh, S.K. and Madabhushi, G.S.P., "LEAP-GWU-2015: Centrifuge and numerical modeling of slope liquefaction at the University of Cambridge," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 113, pp. 671-681 (2016).
- [20] Ueda, K. and Iai, S., "Numerical Predictions for Centrifuge Model Tests of a Liquefiable Sloping Ground Using a Strain Space Multiple Mechanism Model Based on the Finite Strain Theory," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 113, pp. 771-792 (2016).

### 三、附件

計畫成果：創新教具影片



圖 1 粒徑分析試驗影片

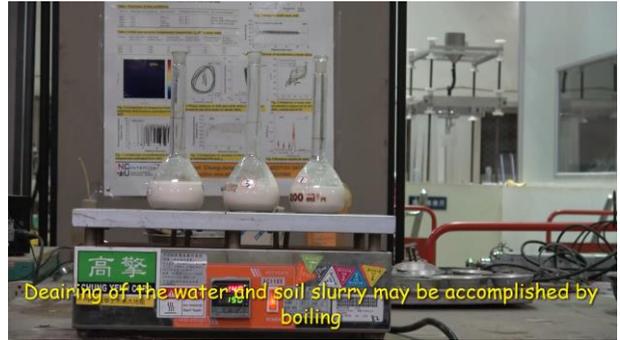


圖 2 比重試驗影片



圖 3 阿太保試驗影片



圖 4 最大最小乾單位重試驗



圖 5 定水頭試驗



圖 6 直接剪力試驗影片



圖 7 標準夯實試驗影片



圖 8 單向度壓密試驗影片



圖 9 離心模型液化試驗影片



圖 10 邊坡穩定模型試驗影片

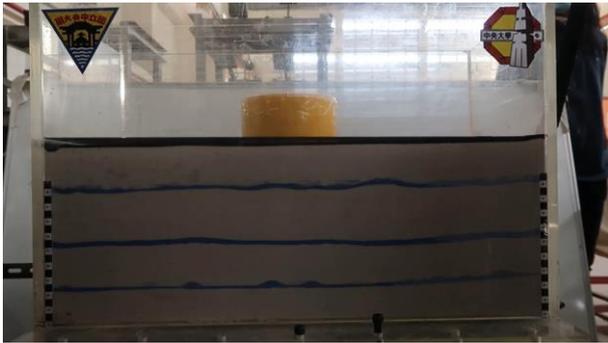


圖 11 1g 振動台土壤液化試驗影片

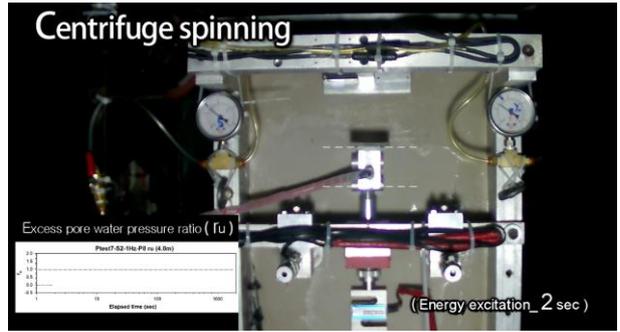


圖 12 離岸風機樁基礎側推試驗影片