

【附件三】 成果報告(系統端上傳 PDF 檔)

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：PEE1100818

學門專案分類/Division：工程

執行期間/Funding Period：2021.08.01 – 2022.07.31

建構以有限元素為基礎之電腦輔助虛擬土壤力學實驗課程
Establishing a Computer-Aided Virtual Soil Mechanics Laboratory based on
Finite Element method
土壤力學試驗

計畫主持人(Principal Investigator)：廖國偉

協同主持人(Co-Principal Investigator)：無

執行機構及系所(Institution/Department/Program)：臺灣大學生物環境系
統工程學系

成果報告公開日期：

立即公開 延後公開(統一於 2024 年 9 月 30 日公開)

繳交報告日期(Report Submission Date)：2022/09/14

建構以有限元素為基礎之電腦輔助虛擬土壤力學實驗課程

Establishing a Computer-Aided Virtual Soil Mechanics Laboratory based on Finite Element method

一. 本文 Content

1. 研究動機與目的 Research Motive and Purpose

土壤力學是一門具有悠久歷史、專門的學科。但以個人經驗而言，其學習模式多年來並沒有過多的改變，這在科技快速發展的今日，有點格格不入。雖然，傳統的教學方法並不表示存有問題，但融合新的教學方法，也是一個值得嘗試的方向。申請人因此欲藉由今日科技快速發展的相關成果，提升學生對於這門具有悠久歷史的學習意願與樂趣。土壤力學試驗課程數十年來均透過實作方式進行，近年來數值分析軟體進步幅度十分快速，多數的土壤力學試驗均可透過數值分析的方式進行，利用數值模型建立的虛擬實驗室可以重現土壤力學試驗各項條件，數值模擬在許多方面均可彌補實作之不足，例如在難度較高與儀器設備較為昂貴的試驗時，每位學生均有機會親自參與，又如透過數值分析，學生除了原本課本中傳統的方法外(如流網)，有機會學習另一個更具理論基礎的分析工具。綜合上述，本計畫的動機計有

- (1)利用現代蓬勃發展的數值模型與其卓越的分析能力，建立一套不同於以往的學習工具。
- (2)藉由電腦模擬以減低實體試驗的成本。
- (3)現代學生非常熟悉電腦的操作，藉由他們習慣的工具，提升學習成效。
- (4)同時培養學生具有現地試驗與電腦分析的能力。
- (5)數值模型可以重複試驗，提供更多機會了解在參數變異下，對試驗結果的影響。
- (6)數值分析是未來的趨勢之一，理應成為大學生在學過程中學習的一環。
- (7)數值模型可以分析比實體試驗更複雜、但貼近日常生活的問題，可以提升學生的學

習意願。

2. 文獻探討 Literature Review

以數值模擬取代實體試驗並非本計畫之創見，國內外均有相關類似的嘗試。以國內為例，先前成功大學的李輝煌教授即嘗試以 SOLIDWORKS 重新闡釋材料/工程力學的概念，然而，李教授並非想利用數模取代實體試驗，李教授的重點在於利用當代最先進的軟體來進行動力學行為分析，而非訓練學生解題技巧，透過李教授所設計的練習題，一方面可以幫助學生充分理解工程動力學的名詞、觀念、及公式，另一方面也可以教導學生使用當代 CAE 軟體來分析工程動力學行為的技巧。而在國外方面，SAM HELWANY 也曾利用 ABAUQS 試圖解釋土壤力學中的許多重要概念。該書的主旨在於希望可以提供土木工程專業的學生和從業人員如何將有限元方法應用於土壤力學問題的簡單基礎知識。因此，本質上，SAM HELWANY 嘗試撰寫的是一本土壤力學書籍，其中包括傳統的土壤力學主題和應用。這本書與傳統的土壤力學書籍的不同之處在於，它提供了一種使用更簡單，更靈活的替代方法，這些方法可以解決具有封閉形式的傳統土壤力學問題。另費康與彭劫亦曾撰書「ABAQUS 岩土工程實例詳解」系統地介紹了應用 ABAQUS 6.14 進行岩土工程數值分析的步驟及需要考慮的關鍵問題。該書分基礎篇、應用篇與進階篇等，內容包含了地基承载力、擋土結構的土壓力、飽和土的滲流固結、非飽和土滲流問題、岩土開挖和堆載問題，邊坡穩定分析問題、自定義材料、岩土動力問題、以及離散元素分析等。

以上三個案例說明，已有許多學者嘗試利用數模進行教學，然而，其重點均非在於建立一個虛擬的實驗室，並用以取代既有的試驗或與其交互運用，幫助學生了解實體試驗的內涵。如前述，若累積足夠的實驗數模案例，本計畫的目標如同先前的學者前輩們，希望也可以集結成冊，作為國內首次以有限元素建立土壤力學虛擬實驗室之教科書。

3. 研究問題 Research Question

本計畫研究的架構為透過實作與電腦模擬的方式進行教學，並與期中與期末藉由歷次的試驗報告與考試進行教學成果的評量。圖 1 所示為詳細的研究架構圖。圖中顯示，本計畫將從既有的試驗項目中，挑選出最具改善潛能的試驗項目作為電腦模擬教學的對象，挑選完成之後，將進行教案的製作。教案製作完畢之後，即交由助教與課堂上施作，進行電腦模擬的過程。其中，在選擇的教案的同時，研究團隊同時備妥該數值模型的解析解，因此，電腦模擬的結果必須與解析解一致，模擬方案完成。之後，本團隊將整合維持實作的試驗項目與電腦模擬的項目，使之成完一個完整的課程。目前暫時挑選出的幾個項目分別為土壤滲透性係數測定、土壤之三軸試驗、板樁滲流分析、土壩的穩定滲流分析與邊坡降雨入滲分析等。

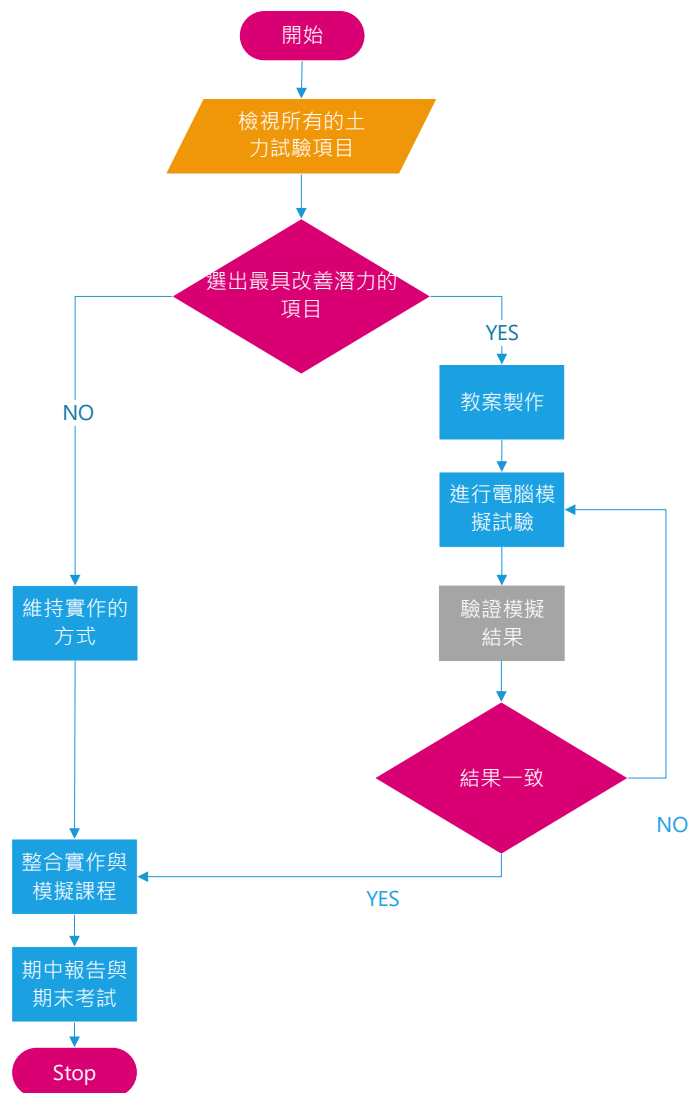


圖 1 本計畫研究的架構示意圖

本計畫研究的問題為利用電腦模擬提升學生學習的興趣與效果。為明確了解成效，

除了藉由閱讀學生報告的內容、期末評量等了解成效之外，並將針對施作的班級進行問卷調查，然後利用相關的統計分析如檢定分析等，探討所採取的方法是否具有成效。

4. 研究設計與方法 Research Methodology

研究的方法為有限元素、對應的工具為 ABAQUS 商業軟體。申請人三十年所進行的土壤力學試驗項目與繳交的作業內容，與今日申請人的學生相似度超過 90%。土壤力學是一門專業的課程，有許多基礎內容需要傳授給學生，雖然如此，傳授的方式三十年來沒有明顯改變，這樣的教學方式應該存有改善的空間。申請人因此欲藉由今日科技快速發展的相關成果，提升學生對於這門具有悠久歷史，但有一定門檻的學習意願與樂趣。土壤力學試驗課程數十年來均透過實作方式進行，實作提供學生真實接觸土壤的機會並了解土壤力學試驗實務上的操作程序。然而、近年來數值分析軟體進步幅度十分快速，多數的土壤力學試驗均可透過數值分析的方式進行，例如單向度壓密、滲流與三軸試驗。利用數值模型建立的虛擬實驗室可以重現土壤力學試驗各項條件，且若設定正確，每次試驗結果均相同，藉由與實作交互操作，學生可以更深入了解人為試驗的差異來源。數值模擬在許多方面均可彌補實作之不足。例如三軸試驗於傳統的土壤力學試驗中，由於試體準備的過程難度較高與儀器設備較為昂貴，試驗時經常僅由助教(或技士)準備試體與實作，在此狀況下，學生了解三軸試驗內涵的機會不大。又如透過滲流數值分析，學生除了可以從模型的建立過程中了解試驗的過程，並可進一步了解流體於土壤孔隙介質中的流動行為與有效應力原理，且可設定不同邊界條件反覆進行多次的試驗，多次的操作有助於深入了解各項機制的原理，且數值模擬可以提供學生除了流網之外，另一個更具理論基礎的分析工具。本計畫冀望藉由多年建構數值模型的基礎，最終可以發表教學專書，詳細說明如何利用有限元素虛擬各項土壤力學試驗。

5. 教學暨研究成果 Teaching and Research Outcomes

(1) 教學過程與成果

一般均將有限元素分為三大步驟：前處理、分析與後處理。這堂課雖然為土壤力學試驗，但學生可以同時學習到有限元素法初步而重要的概念。關於土壤力學試驗數值分析的教學過程說明如下

1. 使用的軟體為 ABAQUS；ABAQUS 是一種有限元素軟體。
2. 預定分析的問題為單向度壓密問題。單向度壓密在實驗室中需花 14 天完成；利用 ABAQUS 僅需 1 分鐘。
3. 透過數值模擬，預期可以學習
 - A. 複習 Terzaghi 單向度壓密理論
 - B. 初步了解有限元素法
 - C. 了解 ABAQUS 的解題過程
 - D. 使用 Terzaghi 單向度壓密理論解出壓密度與時間的關係
 - E. 使用有限元素法解出壓密度與時間的關係
 - F. 使用 Terzaghi 單向度壓密理論解出有效應力與孔隙水壓的關係
 - G. 使用有限元素法解出有效應力與孔隙水壓的關係
4. 執行的過程為
 - A. 約 30 分鐘的講課，課程內容複習為 Terzaghi 單向度壓密理論
 - B. 安裝 ABAQUS 於自己的筆電中
 - C. 約 30 分鐘的講課，課程內容為 ABAQUS 操作說明
 - D. 給訂題目，自行利用理論與電腦模擬解題
 - E. 討論(與我或與其他同學、與我的部分約 30 分鐘)
 - F. 比較計算結果、整理討論內容並撰寫心得
5. 未來應用
 - A. 首次使用 ABAQUS 軟體，有限元素法是學術研究非常廣泛使用的方法，增加未來研究時可選用工具的範圍與可能性。
 - B. 有限元素法可以分析更多(廣)更深入的問題，增加未來研究的潛力。
6. 本研究室未來與此次數值分析相關的規劃(僅供參考)
 - A. 生態工法有許多不同的定義。
 - B. 我們不嘗試定義何謂生態工法，但我們嘗試從力學的角度切入生態工法或幫助提升生態工法的內涵。

- C. 無論國內外，生態工法普遍缺乏力學分析的基礎。
- D. 自然/生態工法隱含的力學並未包含於目前在大學已發展的課程之中。
- E. 有限元素法、離散元素法、計算流體力學與其他方法的整合，提供分析自然/生態工法中隱含力學的一個可能。
- F. 本研究室嘗試進行上述的整合，並計畫未來於生工系開設相關的課程。
- G. 本次土力試驗以數值方法分析是一小步。

教學成果說明如下：

我們製作了 3 份教材，詳如附件所示。

(2) 教師教學反思

雖然對於多數學生均可接受有限元素模擬的分析過程與概念，但仍有少部分學生不甚了解；改進的方法除了利用更多的時間外，也可開發非傳統的有限元素教學方法。

(3) 學生學習回饋

在此次 abaqus 土壤力學數值試驗當中，我覺得透過影片先學習操作後再與老師討論其中原理的效果很好，因為 abaqus 是個相當複雜的軟體，有數不盡的功能與參數待調整，透過影片的學習，可以很快速的上手與壓密相關的操作，大致了解建模的流程與步驟，但同時也會帶來疑問，比方說某個參數是什麼、這兩種運算會不會對結果有影響等等，因為影片可以暫停的特性，這時就可以很快速的查詢到簡單的問題的解答，而相對困難、無法立即有解答的疑問則是留待與老師討論，在這樣子的模式當中（建立在提供好的教材如影片、書本），我的學習的自主性是很高的，從自己出發的學習效果也是優良的，也很喜歡這種 learning by doing 的方式。

在經過土壤力學數值模擬後，也更理解數值模擬與實體實驗切入角度的不同，透過比較這些不同，也更清楚哪一些參數是從何而來的，並且有哪一些參數，我可以推求出什麼物理量，而此物理量又代表什麼意義，而且數值試驗當中，可以透過些微調整某一參數，來觀察對此過程有何影響。

6. 建議與省思 Recommendations and Reflections

經過一個學期的教學，有以下幾點建議與省思：

1. 傳統試驗學生容易依樣畫葫蘆
2. 數值分析亦有類似問題
3. 兩者並行、確實提供學生思考問題的機會

4. 經由操作了解一(二)維與彈(塑)性土壤壓密問題
5. 沒有充分說明有限元素、學生可能一知半解
6. 學習成效沒有比較對照組
7. 學習成效未能量化
8. 結合 journal file、程式撰寫與最佳化可創造更接近試驗的流程

9. 參考文獻 References

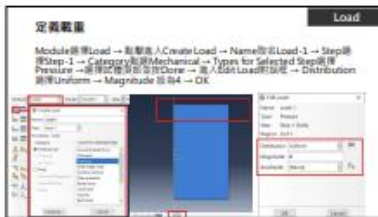
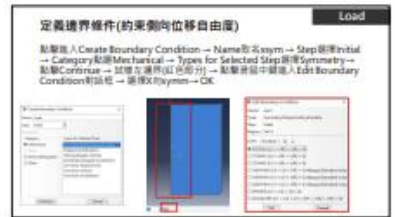
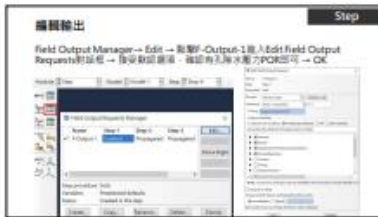
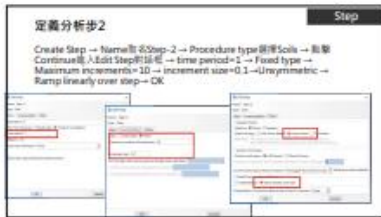
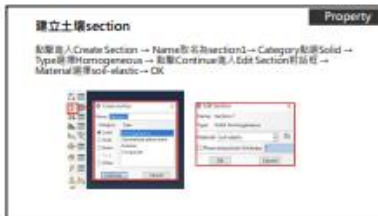
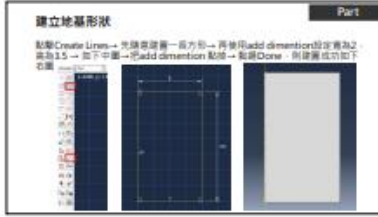
1. Helwany, S. (2007). Applied soil mechanics with ABAQUS applications. John Wiley & Sons.
2. Lee, H. H. (2015). Engineering Dynamics Labs with SOLIDWORKS Motion 2015. SDC publications.
3. 費康與彭劼，ABAQUS 岩土工程實例詳解，人民郵電出版社。
4. 熊希蕊，資料不全下之可靠度分析-以海嘯牆為例，國立臺灣科技大學營建工程系碩士學位論文，2015。

10. 附件 Appendix (請勿超過 10 頁)

附件一 一維壓密土壤數值試驗

一維壓密軸對稱之圓柱黏土，其直徑 4cm ，高 3.5cm ，並且土壤無法往側向移動，在其上突然施加一載重 $4\text{kg}/[\text{cm}]^2$ ，在上方可通過且透水。此黏土滲透性固定 $k=6\times[10]^{-6}\text{cm}/\text{min}$ ，a coefficient of consolidation $c_v = 0.16135 [\text{cm}]^2/\text{min}$ ，初始孔隙率 $e_0=1.0$ ，並設定土壤行為 *Linear Elastic*，Poisson's ratio $\nu=0.33$

一維壓密土壤數值試驗



設置初始孔隙比 Load

點擊進入 Create Predefined Field → Name 設為 V → Step 選擇 Initial → Category 點選 Other → Type for Selected Step 選擇 Void ratio → 點擊 Continue → 全部模型皆用相同值(目前部分) → 點擊彈窗中 進入 Edit Boundary Condition 對話框 → Point 1 distribution 選擇 Uniform → Elevation distribution 點擊 Constant → Void ratio 1.51 輸入 → OK

設置網格單元尺寸 Mesh

再選擇上下兩邊界 → 在右方的方向 → Done → 輸入 Local Seeds 彈窗 → 選擇 By number(以 Number=1) → OK

提交工作 Job

Module 選擇 Job → 點擊進入 Create Job → Name 設為 Job-1 → Source 選擇 Model 選擇 Model-1 → 點擊 Continue 輸入 Edit job 對話框 → 接受所有設置 選擇 Full Analysis → OK

點擊進入 Job Manager → 選擇 Job-1 → 點擊 Submit → 等待分析完成 → 點擊 Results 進入後查看後(可在 Module 選擇 Visualization)

設置網格單元形狀及劃分方法 Mesh

Module 選擇 Mesh → 點擊進入 Add Mesh Controls → Element Shape 點選 Quad → Technique 點選 Structured → OK

劃分網格 Mesh

選擇 Assign element type → 選擇 黏土模型 → Done → 輸入 element type 彈窗 → 在 Family 選擇 Pore Fluid, Stress → OK

繪孔隙水壓(POR)大小分佈 Visualization

Field Output 選擇 Primary/POR → 點擊 Plot Contours On Undeformed Shape

設置網格單元尺寸 Mesh

點擊進入 Seed edges → 選擇左右兩邊界 → 設置的方向 → Done → 輸入 Local Seeds 彈窗 → 選擇 By number(以 Number=5) → OK

劃分網格 Mesh

選擇 Mesh part instance → Yes → OK

建立孔隙水壓輸出 Visualization

選擇 Create XY data → 選擇 ODB field output → 在 Variables(P) Position 選擇 Unique Node → 選擇 POR → 到 Element Nodes 中選擇 Edit Selection → 選擇試體上下內(圓柱體軸對稱) → Plot → Save

建立孔隙水壓輸出 Visualization

將圖

計算有效應力 Visualization

Tools → XY Data → 點擊 Create 進入 Create XY Data 對話框 → Source 點選 Operator on XY data → 點擊 Continue 輸入 Operate on XY Data 對話框 → 點擊 Operator 下的 (sum) 函數(輸入公式(或手動輸入)) 或輸入先前設置的兩個有效應力 S33 → 選擇 Add to expression → 並將第二加上負號 → 點擊 Save As 輸入 Save XY Data As 對話框 → Name 設為 Effective Stress → OK

建立有效應力輸出 Visualization

選擇 Create XY data → 選擇 ODB field output → 在 Variables(P) Position 選擇 Unique Node → 選擇 Effective Stress → 到 Element Nodes 中選擇 Edit Selection → 選擇試體上下內(圓柱體軸對稱) → Plot → Save

繪製圖表 Visualization

Tools → XY Data → 點擊 Manager → 選擇 Effective Stress → edit → 導到空欄 → 輸入 excel → 針對孔隙水壓有效應力 → 在 excel 中將兩資料對時間繪在圖一圖上

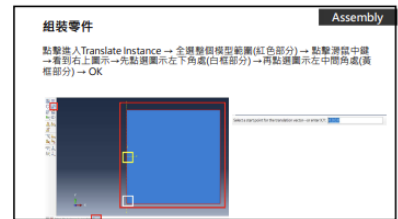
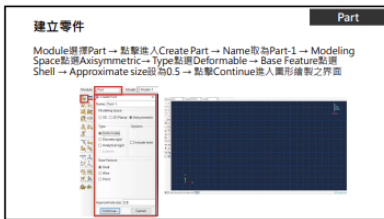
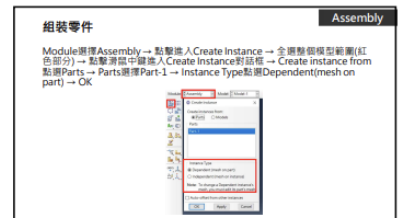
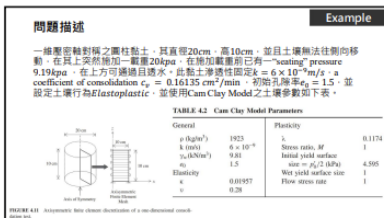
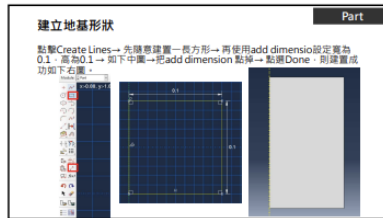
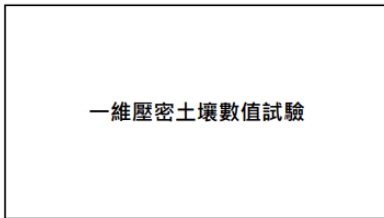
建立有效應力輸出 Visualization

將圖

繪製圖表 Visualization

附件二 一維壓密土壤數值試驗

一維壓密軸對稱之圓柱黏土，其直徑20cm，高10cm，並且土壤無法往側向移動，在其上突然施加一載重20kpa，在施加载重前已有一“seating” pressure 9.19kpa，在上方可通過且透水。此黏土滲透性固定 $k = 6 \times 10^{-9} m/s$ ，a coefficient of consolidation $c_v = 0.16135 cm^2/min$ ，初始孔隙率 $e_0 = 1.5$ ，並設定土壤行為Elastoplastic，並使用 Cam Clay Model 之土壤參數如下表。



定義Geostatic step Step

Module選擇Step → 點擊進入Create Step → Name取名geostatic(seating pressure) → Procedure type選擇Geostatic → 點擊Continue進入Edit Step對話框 → Basic中Nigeom點開On → Incrementation中Type點選Automatic → OK

定義預加載重 Load

Module選擇Load → 點擊進入Create Load → Name取名Load-1 → Step選擇Geostatic(seating pressure) → Category點選Mechanical → Types for Selected Step選擇Pressure → 選擇試體頂部並按Done → 進入Edit Load對話框 → Distribution選擇Uniform → Magnitude 設為 9.19×10^6 → OK

定義邊界條件(約束底部位移自由度) Load

點擊進入Create Boundary Condition → Step選擇Initial → Category點選Mechanical → Types for Selected Step選擇Displacement/Rotation → 點擊Continue → 選擇試體底部邊界(紅色部分) → 點擊滑鼠中鍵進入Edit Boundary Condition對話框 → 選擇U1、U2 → OK

定義Pressure step Step

Module選擇Step → 點擊進入Create Step → Name取名pressure loading → Procedure type選擇Soils → 點擊Continue進入Edit Step對話框 → Basic中Time period=10 → Incrementation中Type點選Automatic → 並改變Initial increment size=1 → 設定Max pore pressure change per increment=21000 → 並取消勾選Creep/Swelling/Viscoelastic strain error tolerance → 在Other中, 將Matrix storage設為Unsymmetric → OK

定義施加載重 Load

Module選擇Load → 點擊進入Create Load → Name取名Load-1 → Step選擇pressure loading → Category點選Mechanical → Types for Selected Step選擇Pressure → 選擇試體頂部並按Done → 進入Edit Load對話框 → Distribution選擇Uniform → Magnitude 設為 20×10^6 → OK

定義邊界條件(約束側向位移自由度) Load

點擊進入Create Boundary Condition → Step選擇Initial → Category點選Mechanical → Types for Selected Step選擇Symmetry → 點擊Continue → 選擇在邊界(紅色部分) → 點擊滑鼠中鍵進入Edit Boundary Condition對話框 → 選擇Xsymm → OK

定義consolidation step Step

Module選擇Step → 點擊進入Create Step → Name取名consolidation → Procedure type選擇Soils → 點擊Continue進入Edit Step對話框 → Pore fluid response點選Transient state → Basic中Time period=100000 → Incrementation中Type點選Automatic → 設定Maximum number of increments=1000 → 並改變Initial increment size=100 → 設定Max pore pressure change per increments=17000 → 並取消勾選Creep/Swelling/Viscoelastic strain error tolerance → 在Other中, 將Matrix storage設為Unsymmetric → OK

定義邊界條件(約束側向位移自由度) Load

點擊進入Create Boundary Condition → Step選擇Initial → Category點選Mechanical → Types for Selected Step選擇Displacement/Rotation → 點擊Continue → 選擇在邊界(紅色部分) → 點擊滑鼠中鍵進入Edit Boundary Condition對話框 → Distribution選擇Uniform → 勾選U1 → OK

定義邊界條件(上游孔隙水壓邊界) Load

點擊進入Create Boundary Condition → Step選擇consolidation → Category點選Other → Types for Selected Step選擇Pore pressure → 點擊Continue → 選擇上游試體表面 → 以及試體表面(紅色部分) → 點擊滑鼠中鍵進入Edit Boundary Condition對話框 → Distribution選擇Uniform → Magnitude 設為0 → OK

設置初始孔隙比 Load

點擊進入Create Predefined Field → Step選擇Initial → Category點選Other → Types for Selected Step選擇Void ratio → 點擊Continue → 全選整個模型(紅色部分) → 點擊滑鼠中鍵進入Edit Boundary Condition對話框 → Point 1 distribution選擇Uniform → Elevation distribution點選constant → Void ratio 1設為1.5 → OK

設置網格單元尺寸 Mesh

獲取試體x方向 → 在Local Seeds中, Method改成By number → Number of elements=1 → OK

提交工作 Job

Module選擇Job → 點擊進入Create Job → Name取名one-consolidation → Source選擇Model並選擇Moel-1 → 點擊Continue進入Edit job對話框 → 接受所有默認選項(Full Analysis) → OK

點擊滑鼠Job Manager → 選擇one-consolidation → 點擊Submit → 等待分析完成 → 點擊Results進入後處理模組(視Module選擇Visualization)

設置Geostatic stress Load

點擊進入Create Predefined Field → Step選擇Initial → Category點選Mechanical → Types for Selected Step選擇Geostatic stress → 點擊Continue → 全選整個模型(紅色部分) → 點擊滑鼠中鍵進入Edit Predefined Condition對話框 → Stress magnitude 1=-9.19e3 → Vertical coordinate 1=0.1 → Stress magnitude 2=-9.19e3 → Vertical coordinate 2=0 → Lateral coefficient=1 → OK

設置網格單元形狀及劃分方法 Mesh

點擊進入Mesh Controls → 全選整個模型(紅色部分) → 點擊滑鼠中鍵進入Mesh Controls對話框 → Element Shape點選Quad → Technique點選Structured → 點選Mesh parts → Yes → OK → 得右下方

總孔隙水壓(POR)大小分佈 Visualization

Field Output選擇Primary/POR → 點選Plot Contours On Undeformed Shape

設置網格單元尺寸 Mesh

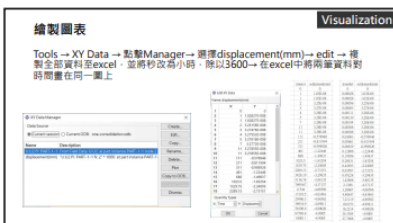
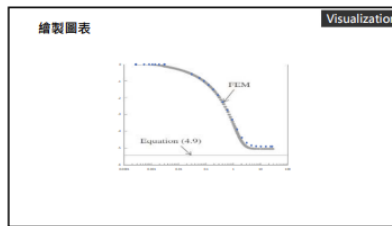
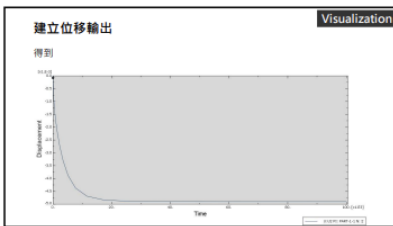
Module選擇Mesh → 在上方Object改成Part → 點擊進入Seed edges → 選擇試體方向 → 在Local Seeds中, Method改成By number → Number of elements=12 → OK

劃分網格 Mesh

選擇Assign element type → 選擇整個試體 → Done → 進入element type視窗 → 在Family選擇Pore Fluid/Stress → Geometric Order選擇Quadratic → OK

建立位移輸出 Visualization

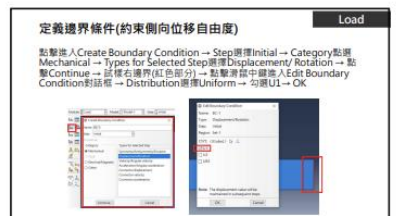
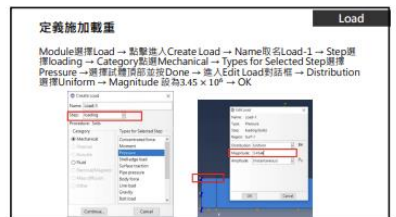
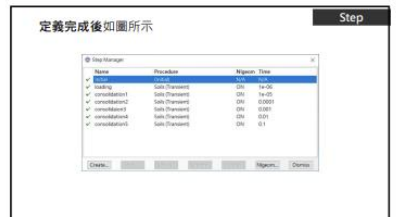
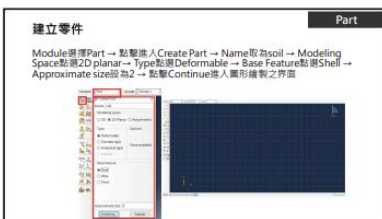
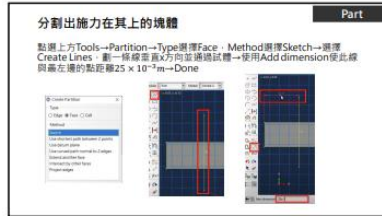
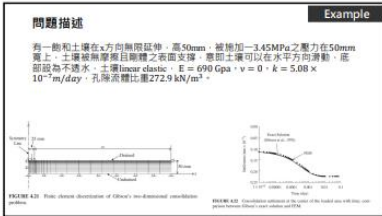
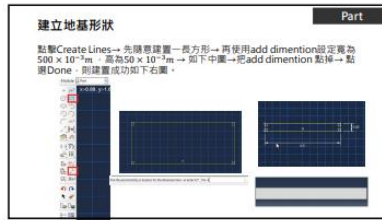
選擇Create XY data → 選擇ODB field output → 在Variables的Position選擇Unique Nodal → 選擇U1 → 到Element/Nodes中選擇Edit Selection → 選擇試體在上角 → Plot → Save



附件三 二維壓密土壤數值試驗

有一飽和土壤在 x 方向無限延伸，高 50mm ，被施加 -3.45MPa 之壓力在 50mm 寬上，土壤被無摩擦且剛體之表面支撐，意即土壤可以在水平方向滑動，底部設為不透水，土壤 linear elastic， $E = 690\text{Gpa}$ ， $\nu = 0$ ， $k = 5.08 \times 10^{-7}\text{m/day}$ ，孔隙流體比重 272.9 kN/m^3 。

二維壓密土壤數值試驗



定義邊界條件(約束底部位移自由度) Load

點擊進入Create Boundary Condition → Step選擇Initial → Category點選Mechanical → Types for Selected Step選擇Displacement/Rotation → 點擊Continue → 選擇試樣左邊界(紅色部分) → 點擊選擇中鍵進入Edit Boundary Condition對話框 → 選擇以 → OK

設置初始孔隙比 Load

點擊進入Create Predefined Field → Step選擇Initial → Category點選Other → Types for Selected Step選擇Void ratio → 點擊Continue → 全選整個模型範圍(紅色部分) → 點擊選擇中鍵進入Edit Boundary Condition對話框 → Point 1 distribution選擇Uniform → Elevation distribution點選Constant → Void ratio 1設為1 → OK

設置網格單元尺寸 Mesh

選取試樣Y方向 → 在Local Seeds中 → Method改成By number → Bias選擇Single → Number of elements=15 → Bias Ratio=5並且Flip bias → 點選select → 並再次選取試樣Y方向的所有線條 → 使紅色箭頭向上 → OK

定義邊界條件(約束側向位移自由度) Load

點擊進入Create Boundary Condition → Step選擇Initial → Category點選Mechanical → Types for Selected Step選擇Symmetry → 點擊Continue → 選擇左邊界(紅色部分) → 點擊選擇中鍵進入Edit Boundary Condition對話框 → 選擇X/Symm → OK

設置網格單元尺寸 Mesh

Module選擇Mesh → 先將上方Object改成Part → 點擊進入Seed edges → 選取非直接受力的部分試樣(如下紅框所示) → 在Local Seeds中 → Method改成By number → Number of elements=48 → OK

設置網格單元形狀及劃分方法 Mesh

點擊進入Mesh Controls → 全選整個模型範圍(紅色部分) → 點擊選擇中鍵進入Mesh Controls對話框 → Element Shape點選Quad → Technique點選Structured → 點選Mesh parts → Yes → OK → 待右下方

定義邊界條件(上游孔隙水壓邊界) Load

點擊進入Create Boundary Condition → Step選擇consolidation → Category點選Other → Types for Selected Step選擇pressure → 點擊Continue → 選取上游試樣表面(紅色部分, 可以使用Alt鍵) → 點擊選擇中鍵進入Edit Boundary Condition對話框 → Distribution選擇Uniform → Magnitude設為0 → OK

設置網格單元尺寸 Mesh

再選擇直接受力的部分試樣的x方向 → 在Local Seeds中 → Method改成By number → Number of elements=20 → OK

劃分網格 Mesh

選擇Assign element type → 選擇整個試樣 → Done → 進入element type選擇 → 在Family選擇Pore Fluid/Stress → Geometric Order選擇Linear → OK

提交工作 Job

Module選擇Job → 點擊進入Create Job → Name取為2dconsolidation → Source選擇Model並選擇Model-1 → 點擊Continue進入Edit job對話框 → 檢查所有數據庫項(Full Analysis) → OK
 點擊進入Job Manager → 選擇one-consolidation → 點擊Submit → 等待分析完成 → 點擊Results進入後處理模組(或Module選擇Visualization)

建立位移輸出 Visualization

得到

繪製圖表 Visualization

總孔隙水壓(POR)大小分佈 Visualization

Field Output選擇Primary/POR → 點選Plot Contours On Undeformed Shape

計算位移in mm Visualization

Tools → XY Data → 點擊Create進入Create XY Data對話框 → Source點選Operate on XY data → 點擊Continue進入Operate on XY Data對話框 → 輸入先前提取的U2位移 → 並點選Operator下的'個人公式(或手動輸入)' → 乘上1000 → 點擊Save As進入Save XY Data As對話框 → Name取為displacement(mm) → OK

建立位移輸出 Visualization

選擇Create XY data → 選擇ODB field output → 在Variables的Position選擇Unique Nodal → 選擇以 → 到Element/Nodes中選擇Edit Selection → 選擇試樣左上角 → Plot → Save

繪製圖表 Visualization

Tools → XY Data → 點擊Manager → 選擇displacement(mm) → edit → 複製全部資料到excel → 並將秒改為小時 → 將以3600 → 在excel中將兩資料對時間畫在同一圖上