

以串聯多門課程知識建構工程教育： 以離岸風能之大地工程導論為例

紀昭銘* 林正山**

摘要

為執行教育部「新工程教育方法實驗與建構計畫」的要求——開發新的學習教材，作者將串連多門學科的知識、由實際的工程問題來學習、與使用軟體解題作為教材開發的重點。由於真實之工程問題往往非單一學科知識能處理，作者串聯三門課教材且將其應用在離岸風能的大地工程問題上，並解決因不同學科之定義不同而導致之不同計算公式的莫爾圓問題。本研究之每門課程皆藉由專案作業與期末考來檢核學習成果，學生在助教的協助之下，編寫程式與使用數值軟體，並在期末口頭報告中呈現團隊成果。另外，問卷調查結果顯示，在執行計畫後，學生對於課程知識的應用與團隊合作有收穫，反饋結果也可作為未來教學的參考。

關鍵詞：工程教育、多門學科知識串聯、新工程教育方法實驗與建構計畫、實際工程問題、數值軟體



DOI: 10.6870/JTPRHE.202306_7(1).0004

投稿日期：2021年10月11日，2022年8月9日修改完畢，2022年8月25日通過採用

* 紀昭銘，逢甲大學土木工程學系助理教授，E-mail: cmchi@mail.fcu.edu.tw

** 林正山，逢甲大學建設規劃與工程博士學位學程博士生，E-mail: z-slin@mail.fcu.edu.tw

壹、前言

工程教育的內容和現實世界對於工程師的需求之差異逐漸擴大；為了解決這個問題，麻省理工學院（Massachusetts Institute of Technology [MIT]）提出了CDIO（conceive, design, implement, operate）工程教育模式且成立CDIO組織將此人才培育模式推動至歐洲、加拿大、亞洲等地（Massachusetts Institute of Technology [MIT], n.d.），而教育部亦提出「以真實工程問題串連必修課程」的概念推動「新工程教育方法實驗與建構計畫」（以下簡稱新工程教育計畫）（教育部，2021）。由上述可見，高等工程教育的內容必須符合現實世界的工程需求是一項值得關注的議題。另一方面，我國政府大力推動可再生能源產業的發展，並預計於2035年前達到10GW的離岸風場建設，故工程教育相關科系的畢業生進入離岸工程領域是可預見的。因此，本文之第一作者基於過往在美國離岸石油與天然氣業界工作經驗，在2019年時帶領其服務科系以離岸風能為主軸獲得新工程教育計畫B類計畫補助，更於2021年將研究議題結合該校校務發展方針獲得A類計畫補助。

為了使學生更全面性地認識離岸風力發電產業，某土木工程學系重新組織「課程地圖」（圖1）並將必、選修課程分別對應與連結海、陸域風力發電機建設項目。再者，教師授課內容是基於工程業界實際的問題反饋所設計，且針對實際工程問題提供相關背景介紹並與重點學術知識連結。作者進一步地導入專案導向學習（project based learning, PBL）做為具體貫徹CDIO人才培育模式的方法，在課堂中將實際工程專案拆解為系列課堂練習，逐步地引導學生並培養學生面對問題的思維邏輯。除此之外，「知識互相串連」、「學習環環相扣」的授課觀念與教材發展概念被應用於系列課程中，例如「離岸風能之大地工程導論」課群中連結「工程數學」、「土壤力學」與「基礎工程」三門必修科目。作者於教材發展及課堂講解中，提供全面性的規劃，由新課程地圖出發，連結對應的授課教材，並透過動手操作的學習成果以了解對應的工程問題，以落實教育從做中學的精神，進而達到「學習環環相扣」與「知識互相串連」（紀昭銘、林正山，2021）。最後，為了厚植學生使用數值模擬軟體的能力，作者在課程中引入基礎數學運算軟體：MATLAB，與

講述高階數值模擬軟體：FLAC（fast lagrangian analysis of continua），藉由講述與操作系列工程議題以及連結學科理論，而達到「科技翻轉教育」的教學目標。

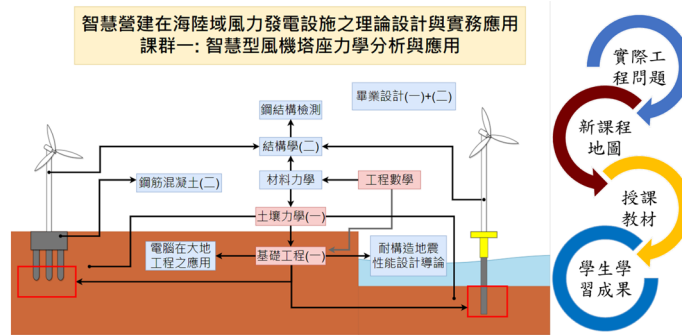


圖1 新課程地圖與課程教材發展原則

貳、教材設計理念與理論基礎

一、CDIO人才培育模式

麻省理工學院指出，於第二次世界大戰後，工程教育所產出的工程人員逐漸不能符合真實工程產業所需，為了縮小兩者間的差距，其開創一個新穎的人才培育模式——CDIO人才培育模式（MIT, n.d.）。依據CDIO國際組織（CDIO™ INITIATIVE, n.d.）指出，CDIO的執行可分為四個階段：（一）構思（conceive）：學生須基於產業需求與問題，構思最終成果的設計並兼顧相關技術的整體企劃；（二）設計（design）：依據上階段所訂立之專案計畫，學生應用相關理論知識、電腦軟體、工具進行初步規劃；（三）實施（implement）：將設計圖、設計理念等資訊具體執行與產出；（四）操作（operate）：針對產出加以改善、精進，並加入使用者的反饋資訊加以調整產出（吳如娟、黃智彥，2021；Crawley et al., 2007）。藉由執行CDIO人才培育模式，學生可更深入地了解基礎學科知識（Edström & Kolmos, 2014）並發展相關知識、技能以構思與設計複雜的系統或產品（吳如娟、黃智彥，2021）。

二、專案導向學習（PBL）

專案導向學習（PBL）模式可成為一個平臺，提供學生在解決問題的過程中將各學科知識相互連結。學生在執行專案的過程中將不斷地自我反思並將成果回饋至學習過程，而在反思過程中，學生可獲得自主學習、專案管理、團隊合作、溝通等專業能力外的技能（Edström & Kolmos, 2014）。Kao（2019）指出，專案導向學習可將不同情境所需的實踐過程轉化為學習目標，透過認識、學習、熟悉此些目標，學生可更靈活的運用課程知識。再者，專案導向學習的教學設計原則可分為3項，教學執行中可選擇任一項目目標進行相關教學：（一）設計或創作；（二）解決真實問題；（三）探討主題或議題（Kao, 2019）。在這之中，採用解決真實問題做為學習情境的教學目標，可幫助學生建構有意義的學習經驗（meaningful learning experiences）（吳如娟、黃智彥，2021；Al-Balushi & Al-Aamri, 2014; Wurdinger et al., 2007）、獲得資訊素養技能並發展思維能力（吳如娟、黃智彥，2021；Blumenfeld et al., 1991; Frank & Barzilai, 2004; Lam et al., 2009）。

三、CDIO與PBL教育模式之應用

Edström和Kolmos（2014）針對CDIO人才培育模式與專案導向學習（PBL）模式進行深入的比較與討論，而文中針對兩種教育模式之定義說明為：

The PBL principles form a broad philosophy of teaching and learning focusing exclusively on the learning process, that is, how students should learn, and not on what they should learn.

Conversely, CDIO takes its starting point in the learning outcomes of higher engineering education, and how learning should be facilitated is mainly a consequence of what students should learn.

上述顯示兩種教育模式可透過系列的學習活動強化學生對於專業知識的認知，然而其所關注的內容卻有差異。本文將基於新工程教育計畫的理念——「以真實工程問題串聯必修課程」，教師選擇一個適當的工程專案作業為核心，整合多學科知識內容撰寫課程教材，並在教材中導入與講述相關的數值模擬軟體，以培育學生操作進階工程軟體的能力。再者，學生於執行工程專案作業時，需要綜整過往所學的专业知識並從中挑選所需的知識單元進行複習、強化與延伸。基於選定的知識單元，學生需進一步地安排問題解決流程，並提出一個初步的解決方案。當問題的解決流程被決定後，學習者需要實際地執行這個方案並產出具體的成果報告。學生在實行的期間將會不斷地修正問題解決流程，而課程助教將和學生進行反覆的討論，最終由學生提出一個合適的工程分析報告。工程報告被要求以口頭簡報及紙本報告的方式繳交，其評分方式將包含教師、課程助教、學生自評與互評等較全面性地審視學生學習成果，如圖2。



圖2 本研究執行流程

四、真實的工程問題

臺灣政府預計於2025年前完成5.5 GW的離岸風場（offshore wind farm）建設目標。離岸風機（offshore wind turbine）係將風力發電

機建設於海床上，而常見的離岸結構物支撐構造型式可參考圖3，分別為：大口徑樁基礎（monopile foundation）、套筒式結構（jacket structure）、重力式基礎（gravity-based foundation, GBF）、與浮動式結構（floating structures），以及建造離岸風機期間被廣泛使用的工作船——自升式平臺船（jack-up barge）——的spudcan基礎。在這些基礎構造中，自升式平臺船與離岸風機的圓形重力式基礎（GBF）的彈性加載問題將是本課程與教材發展的核心議題。除此之外，由於條型基礎的彈性加載問題的分析概念與之類似，故這個議題亦將同樣被討論，如路海堤（embankment）、水壩（dam）等。

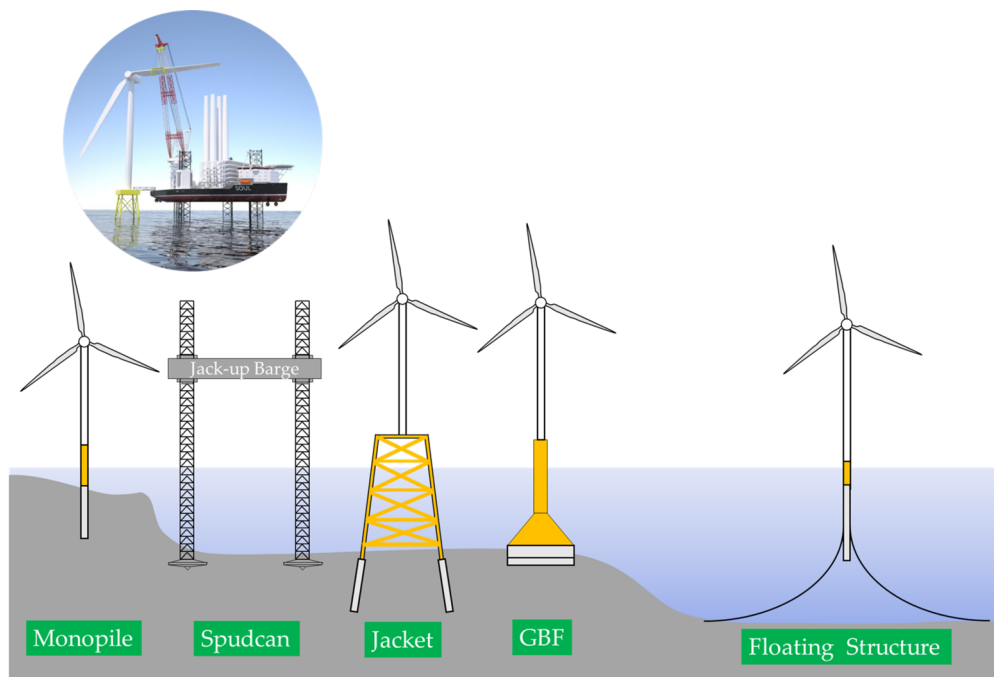


圖3 離岸結構基礎型式

註：圖形改繪自“Wind energy in the Mediterranean Spanish ARC: The application of gravity based solutions,” by J. Abanades, 2019, *Frontiers in Energy Research*, 7, 83, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00083> ; 左上施工圖取自 *New jack-up vessel concept for 10 to 12 MW turbines*, by Offshore Wind Industry, 2017, <https://www.offshorewindindustry.com>

對於大地工程（geotechnical engineering）領域而言，分析與計算基礎構造的受力學行為是重要的議題。為了分析基礎與土壤的受力行為，工程人員至少需熟悉「工程數學」、「土壤力學」與「基礎工程」三門土木系必修課程知識並具備程式編程能力，例如：MATLAB、Fortran、Excel VBA等。再者，一般而言，真實的工程條件是較複雜的，故進一步地利用高階數值模擬軟體（advanced numerical simulation software）是必須的，如：FLAC、LPILE、APILE等。由上述可見，真實的工程問題難以單純透過理論知識進行紙筆計算，尚需仰賴各種科學計算軟體進行全面性地分析，方可獲得合適的分析結果（圖4）。



圖4 學科理論逼近真實工程問題

五、跨學科工程專案教材

本課群的設計是為了讓修課生具備解決真實工程問題的能力，而學生所需的專業知識將源自各專業科目。圖5為本課群的課程知識建構示意圖，「工程數學」將作為核心知識內容、「土壤力學」主要探討土壤材料的三大工程性質、「基礎工程」則直接地與各種工程問題相關，並需將工程數學與土壤力學的知識應用至此處。對於授課教材發展的重點方向是：(a) 串聯各課程的專業理論知識；(b) 將實際的工程問題引入上課教材；(c) 數值軟體的使用，並搭配原有的教科書分別在三門課中執行。教材的內容為強化學生串聯運用3門專業課程專業知識的能力，使

學生在課後研讀時可思考在課堂上所學的知識和數值軟體在實際工程上的應用。課程執行至一定階段後，學生可以自行練習教材中的工程專案習題，其目的在於讓學生整合專業理論與應用數值軟體，有利於學生在學期末時進行書面及口頭報告的成果展現。

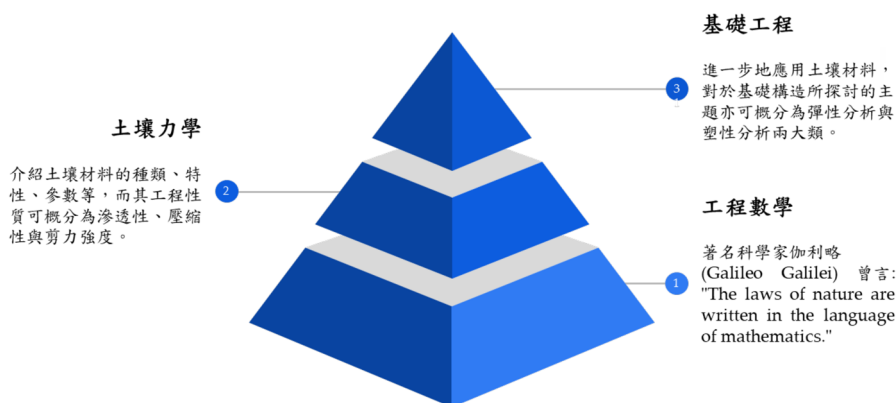


圖5 「離岸風能之大地工程導論」課群知識建構示意圖

六、學生學習困難反饋教材發展

根據作者的授課經驗，由於不同版本的力學教科書在應力分析章節中採用不同的符號系統與公式表示式，使得學生易發生學習混亂；而不同版本的教科書中所顯示的應力分析公式存在著些許差異，亦導致學生需背誦不同的公式。再者，應力分析在工程力學科目（如土壤力學或材料力學）係採用基於力平衡條件（**equilibrium condition**）所推導的莫爾圓（**Mohr's circle**）公式解析，而在工程數學的範疇裡則屬矩陣的特徵值（**eigenvalue**）問題。對於上述章節而言，力學與數學間的知識並未被良好地統整，造成學習者認為上述二法是相互獨立的觀念並難以串聯學科間的知識。此外，實際工程專案的內容是高度複雜的，故培養學生具有操作相關數值模擬軟體的能力是必須的，而修課生將理論課程知識應用至數值軟體的能力較為薄弱，因此，本研究將基於力學應力分析的觀點，應用工程數學中矩陣分析理論進行驗證，並將所得到的計算結果經由MATLAB數值運算再次進行比較。最後，本文所得之各項理論結果將

被連結至真實的工程問題並結合FLAC的計算結果進行全面性地成果展現。綜合上述，以下為工程科系學生在應力分析上常見的學習困難：

（一）定義不同導致學習混亂

於力學分析領域中，「應力轉換公式」與「應力莫爾圓」的觀念是極為關鍵的；而在「土壤力學」與「材料力學」中，此些概念係基於「力平衡」的觀念進行推演。然而，不同學科間所採用的張應力、壓應力、剪應力方向之定義不完全相等，進而導致所對應的應力轉換公式不一致，可參考表1。對於初學者而言，此常導致發生混淆的現象。

表1

不同教科書作者所用之應力轉換公式系統

拉應力、逆時 針剪應力為正	拉應力、順時 針剪應力為正	壓應力、逆時針剪應力為正
J. M. Gere and S. P. Timoshenko	A. C. Ugural	I. S. Dunn, L. R. Anderson, and F. W. Kiefer
R. C. Hibbeler	E. P. Popov	B. M. Das
T. A. Philpot	S. K. Fenster	施國欽
歐陽（材料力學論衡）	I. H. Shames	歐陽（解說土壤力學）

註：整理自歐陽（2016）。**材料力學論衡**（修訂三版）。文笙。

（二）無法串聯學科間知識

為了分析微小單元體的受力情況，「應力莫爾圓」與「應力轉換公式」可分別被應用並進一步地獲得此受力單元的主應力（principal stress）與主軸方向；另一方面，此議題亦可藉由分析此受力單元的應力矩陣獲得相同的結果；而在工程數學矩陣分析章節中，特徵值（eigenvalue）與特徵向量（eigenvector）恰可用來解析此類問題。由於力學與數學間的關係未被直接地連結與建立，為了強化學習者鏈結數學與物理力學的能力，本文藉由不同的學科知識闡述微小單元的受力情況並將所得結果相互連結。

（三）缺乏與數值軟體的連結

教師在課堂間所傳授的專業知識係基於數學模型與力學理論，而學生操作數值軟體係為學習成果的展現。本研究分別採用應力莫爾圓與矩陣分析的觀點描述單元體的受力行為，並將理論分析結果與MATLAB運算結果進行交互驗證。此外，此些理論結果亦被應用至實際的工程問題並進步一地使用高階數值模擬軟體FLAC進行闡述。文中藉由河、海堤或水壩的加載問題指出，受力單元將發生主軸旋轉的現象，而此亦呼應相關力學理論的分析結果。

參、教材內容

一、PBL結合工程專案作業

「離岸風能之大地工程導論」課程與教材是基於專案導向學習（PBL）及做中學（learning by doing）的教學方式進行規劃，其教材內容皆圍繞工程專案項目提供學習者所需之相關知識並逐步地引導學生完成專案作業。其中，學生須基於臺灣西部海域土壤鑽探資訊進行初步分析進而獲得土壤相關物理參數，而後基於此項結果再進一步地假設基礎資訊進行應力分析。學習者為了完成工程專案作業需針對過往所學的課程單元進行統整並逐一使用各項專業知識，表2顯示「工程數學」、「土壤力學」及「基礎工程」三門必修課程各授課單元名稱和所需知識內容，工程專案作業的施作流程與各階段所需的知識單元可參考圖6。

表2

課程授課單元與工程專案作業所需知識總表

課 群	科目	章節	編號	工程專案作業 所需專業知識
離 岸 風 能 之 大 地 工 程 導 論	工程數學	一階常微分方程式	A1	
		高階線性常微分方程式	A2	
		拉普拉斯轉換	A3	
		向量分析基礎	A4	✓
		線性代數	A5	✓
		複變分析基礎	A6	
	土壤力學	土壤物理性質	B1	✓
		土壤分類	B2	✓
		土壤力學試驗	B3	✓
		土體應力分析	B4	✓
		土壤滲流	B5	
		土壤壓縮性	B6	
		土壤剪力強度	B7	✓
	基礎工程	淺基礎承載力	C1	✓
		樁基礎承載力	C2	
		土壤淺層改良	C3	
		邊坡破壞模式	C4	
		圓弧破壞邊坡	C5	
		主、被動土壓	C6	
		擋土牆型式與設計	C7	

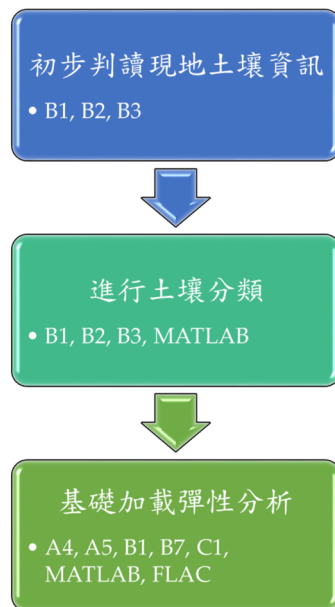


圖6 工程專案作業流程與學科知識

本課程之工程專案項目的執行流程起始於臺灣西部海域土壤資訊，教師提供常見的現地試驗CPT（cone penetration test）施測結果（圖7），而學生將以組為單位利用MATLAB進行土壤分類（soil classification）。其中，對於土層議題，各組間若採用不同學者所提的理論，其所得到的土壤分類結果可能有所差異，此可令學生彼此交互比對與討論。各小組基於第一階段所得之各項土壤物理性質進行下階段的土壤單元應力分析，而這個階段學生可分別利用工程數學特徵值問題與土壤力學應力莫爾圓的理論獲得計算結果。最後，學生將被要求應用FLAC與MATLAB再次分析這個議題，藉此驗證第二階段的結果。藉由此工程專案項目，作者將帶領學生認識離岸工程領域，並達成「知識互相串連」、「學習環環相扣」與「科技翻轉教育」的教育理念。

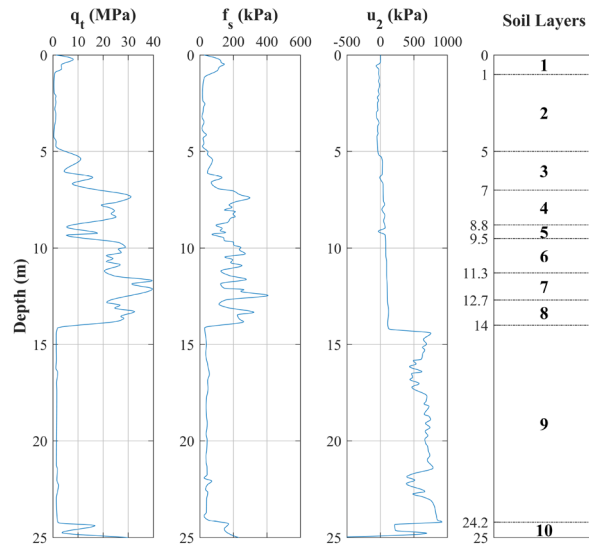


圖7 CPT profile

二、主題式專案教材內容

作者藉由安排、編撰離岸風能之大地工程導論課程與教材期望帶領修課學生認識離岸工程領域，並使學習者擁有跨學科理論應用及具體執行工程專案的能力。本系列課程中所使用的教材皆屬於電子教材，並於課程開始前數週放置於雲端學習空間供學生下載、預習。圖8顯示，作者基於工程數學、土壤力學與基礎工程三門必修課程的原有課程架構上，導入離岸風能相關議題並交互連結與配合。對於「單元一：工程數學篇」，授課教師將針對離岸風力發電產業進行初步介紹，使學生對於這個產業有基本的了解。在這之後，課堂的內容將聚焦工程數學的基本與關鍵議題：微分方程式及矩陣運算。關於「單元二：土壤力學篇」，作者將土壤單元的應力分析結合「單元一：工程數學篇」的相關議題對修課學生進行全面性地闡述。最後，作者帶領學生將此些理論實際應用至「單元三：基礎工程篇」並導入FLAC數值軟體的應用。教材中在每個章節之後均附有習題（專案作業）以供學生演練，同時引導學生使用MATLAB編寫程式與繪圖來展現計算結果，並在期末考檢核學生的學習效果。

離岸風力發電簡介 (Offshore Wind Power Introduction).....1	大地工程 (Geotechnical Engineering).....3	基礎工程 (Foundation Engineering).....4
微分方程式 (Differential Equation).....13	現地土壤鑽探及試驗報告.....7	基礎均勻質土壤之承載力評估 (The Bearing Capacity Evaluations of a Shallow Foundation on Homogeneous Soils).....7
柱屈曲方程式 (Buckling Equation).....17	特徵值與特徵向量問題 (Eigen Value and Eigen Vector Problems).....16	基礎不均質黏性土壤之承載力評估 (The Bearing Capacity Evaluations of a Surface Footing on Inhomogeneous Cohesive Soils).....14
基樁側向載重 (Laterally Loaded Piles).....23	特徵值及特徵向量的應用.....19	Foundation on Single Thick Stratum.....14
附錄(一) 歐拉公式 (Euler Formula).....33	參考文獻.....32	Foundation on Two-Layered Cohesive Soils.....16
附錄(二) 德美弗定理 (De Moivre's Theorem).....34	附錄 (一) Donald Wood Taylor.....34	淺基礎承載力案例研究 (Case Studies on Ultimate Bearing Capacity).....21
附錄(三) 複數根 (Complex Roots).....36	附錄 (二) Arthur Casagrande.....35	樁基礎 (Pile Foundations).....26
參考文獻.....40	附錄(三) 附錄1) 附錄2) 附錄3).....36	FLAC 數值分析.....32
		參考文獻.....37
		附錄 (一) Mark F. Randolph.....40
		附錄 (二) Peter A. Cundall.....41

(a) 單元一：工程數學篇 (b) 單元二：土壤力學篇 (c) 單元三：基礎工程篇

圖8 離岸風能之大地工程導論系列教材目錄

三、教學現場指引教材發展

大專校院培育具備解決工程問題能力的畢業生是必須的，而現代專業的工程師為解決一個工程專案問題必須掌握多門學科知識並輔以各種數值分析軟體。然而，根據作者之前的授課經驗，學生無法良好地串連各學科的知識內容，導致學生無法挑選在不同學科中所需的知識去解決實際工程問題。再者，在作者和學生的互動過程中得知，使用數值分析軟體對於學習者是具挑戰性的。綜合上述，本研究所開發的教材將著重於串聯多門課程知識內容和指派數個工程專案作業，而數值分析軟體的操作、應用層面將是執行此些工程專案作業的要點，藉此希望學生有機會接觸工程計算軟體。

對於「土壤力學」與「材料力學」中有關應力分析理論部分，由於不同學科的需求與考量不同，在座標系統與應力正負方向上的定義也有不同。舉例來說，土壤力學探討地表下土壤的受力行為，故縱座標以向下為正。再者，又因土石材料多受壓力而無法承受張力，故定義壓應力為正；而剪應力的定義更有順時針為正或逆時針為正之區別。由表1可見，現行力學教科書所採用的應力轉換公式之定義相當繁雜；然而，此尚未能完全地表達符號系統定義之混亂程度。由於力學計算需搭配合適的座標系統方可進行，而座標系統與應力正負方向之定義更使學習者感到困惑。

由前述可見，學生在學習應力轉換公式及應力莫爾圓相關章節時，

其容易因不同的座標系統與應力定義而發生混亂的現象；再者，對於平面應變下的應力分析問題可採用二維應力矩陣進行分析，亦因力學與數學間的關係未被直接地連結與建立而無法解決。為了強化數學與力學科目間的鏈結，本課程教材將由工程數學觀點剖析土壤力學與材料力學的應力分析章節，其中包含的議題與其講授順序為：(I) 應力矩陣；(II) 旋轉矩陣；(III) 利用應力矩陣與旋轉矩陣獲得應力轉換公式；(IV) 應力分量的變化軌跡即為應力莫爾圓；(V) 應力矩陣之特徵值即為主應力大小；(VI) 相同應力莫爾圓上有著相同特徵值；(VII) 特徵方向所旋轉的角度恰為應力莫爾圓上旋轉角之半；(VIII) 具備相同特徵向量之莫爾圓性質。教材內容除點出學生因座標與受力定義不同而導致理論公式不同的學習混亂外，亦帶領學生由工程數學的角度出發，理解此不同點在數學的本質是一致的。同時學習者可藉由本文中在工程數學的一系列證明，對比土壤力學與材料力學教科書上的公式及其物理意義，強化數學與物理力學的鏈結。

四、科學與工程研究的先驅者

教材內容除含有專業學科知識外，作者尚介紹數名在科學與大地工程領域表現卓越的研究學者，而這些學者所被呈現的研究項目將直接與教材內容相互呼應，如表3所示：(I) 在「單元一：工程數學篇」部分，兩位知名的數學家Leonhard Euler與Abraham De Moivre將被介紹；(II) 在「單元二：土壤力學篇」部分，首先介紹奧地利學者Dr. Karl von Terzaghi，其傑出的貢獻被後世尊稱為「Father of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering」（Das, 2010）。再者，Prof. Donald Wood Taylor與Prof. Arthur Casagrande於大地工程領域的相關事蹟同樣被敘述；(III) 「單元三：基礎工程篇」，Prof. Geoffrey G. Meyerhof在基礎承載力理論有著巨大的貢獻、Dr. Mark F. Randolph利用土壤塑性理論分析離岸基礎工程並建置相關離心機試驗、Dr. Peter A. Cundall為本研究所使用的數值軟體FLAC程式的主要開發者。

表3

人物介紹簡述

教材單元	介紹人物	內容概述*
單元一： 工程數學篇	Leonhard Euler	提出著名的歐拉公式 ($e^{ix} = \cos x + i \sin x$)，透過此式可連接三角函數、指數與複數 (complex number)；當 $x = \pi$ 時可獲得特殊解 ($e^{i\pi} + 1 = 0$)，此式連結數學上五個基本常數。知名物理學家費曼先生 (R. P. Feynman) 評論歐拉公式為 “The most remarkable formula in mathematics.” 此外，歐拉-白努力梁方程式 (Euler-Bernoulli beam theory) 亦被廣泛地應用於土木工程領域的梁分析與柱挫屈問題，亦在教材中介紹。
	Abraham De Moivre	提出棣美弗定理 (De Moivre's theorem)，而透過此定理可獲得歐拉公式。對於複數根 (complex roots) 問題，棣美弗定理被廣泛地應用於議題。再者，於工程數學求解基樁側向承載力的章節中，棣美弗定理在教材中被用來求解複數根議題。
單元二： 土壤力學篇	Karl von Terzaghi	Dr. Terzaghi 畢業於機械工程學系，後投入大地工程領域的各種研究並取得輝煌成果。Prof. Terzaghi 所提出眾多理論中壓密理論 (theory of consolidation) 尤其出眾，並被尊稱為土壤力學之父。
	Donald Wood Taylor	Prof. Taylor 的研究結果在土壤壓密、凝聚性土壤剪力強度及邊坡穩定性議題尤其出眾，其中 Prof. Taylor 於 1937 年所發表的文章 “Stability of earth slopes”，使其獲得德斯蒙德·菲茨杰拉德獎章 (Desmond Fitzgerald medal) 的肯定。
		Prof. Casagrande 為土石壩設計先驅之一，在職業生涯中與其指導教授、同事 Prof. Terzaghi 共同發展土壤力學學科眾多理論。此外，Prof. Casagrande 與

(續下頁)

單元三： 基礎工程篇	Arthur Casagrande	Prof. Terzaghi將二人開創性的理論模式實際應用於數百項大型工程中。再者，其卓越的研究貢獻使其受邀擔任首屆Rankine Lecture講者、獲頒首屆Terzaghi Award與擔任美國國家工程院（National Academy of Engineering）院士。
	Geoffrey G. Meyerhof	Prof. Meyerhof被認為是加拿大最傑出的大地工程師之一，在其一生中發表超過200篇的會議與期刊論文並以基礎承載力分析理論模型聞名於世界。Dr. Meyerhof不凡的研究成果使其受邀至Terzaghi Lecture擔任講者、獲頒Terzaghi Award。
	Mark F. Randolph	Prof. Randolph任職於西澳洲大學並創立離岸基礎中心，其以土壤塑性分析、大地工程之離心機試驗及數值模擬等專長享譽國際。Dr. Randolph對於離岸工程的貢獻使其被提名為皇家協會（the Royal Society）、皇家工程學院（Royal Academy of Engineering）、澳洲國家科學院（the Australian Academy of Science）、澳洲國家工程學院（the Australian Academy of Technological Sciences and Engineering）的院士。
	Peter A. Cundall	Prof. Cundall為多個大地工程領域數值模擬軟體的原始作者之一，如FLAC、FLAC3D、UDEC、3DEC與PFC。1971年，Dr. Cundall提出不連續材料的數值模擬方法（Distinct Element Method），此法被廣泛地應用於岩石力學及其相關應用。Dr. Cundall在岩石力學不凡的貢獻與成就使其分別成為英國皇家工程院（UK Royal Academy of Engineering, RAE）院士與美國國家工程院院士。

* 內容擷取自紀昭銘（2019a，2019b，2020）

肆、教材實踐模式

一、教師端教學安排

(一) 教材呈現方式

作者藉由安排、編撰離岸風能之大地工程導論課程與教材期望帶領修課學生認識離岸工程領域，並使學習者擁有跨學科理論應用及具體執行工程專案的能力。本系列課程中所使用的教材皆屬於電子教材，並於課程開始前數週放置雲端學習空間供學生下載、預習。再者，本教材是為了帶領修課學生獨立完成工程專案作業，因此教材所呈現的內容與議題彼此相互連結並對應至最終的工程專案作業所需的背景知識。圖9顯示為引導修課生順利完成基礎加載彈性分析工程專案，作者所發展的跨學科課程教材，而教材所提供的背景知識為：(I) 應力分析議題：串聯工程數學向量分析、線性代數章節與土壤力學應力分析章節，提供數學觀點直接求解，並以莫爾圓圖解法進行問題剖析。圖10顯示本教材由工程數學的角度出發、連結到力學莫爾圓的理論，使學生串聯數學與力學的觀念、統整跨學科知識，以解決上一章第三節「教學現場指引教材發展」所闡述之學生在莫爾圓的學習困難；(II) 土壤物理性質、土壤分類等：授課教師導入臺灣西部海域土壤鑽探資訊並逐一地講解各類土壤物理性質、力學試驗等，以建構學生之全面性的知識背景。再者，學生須基於土壤力學相關理論，將現地土壤鑽探資料進行分類；(III) 基礎加載彈性分析：本議題直接對應至工程專案內容，然而學生要完成這個項目須基於(I)與(II)的知識內容並加以延伸。在這個階段，學生除採用理論分析外，尚被要求操作FLAC數值軟體以進行驗證。



圖9 PBL架構下的課程教材

另一方面，若考慮以座標旋轉矩陣 ($\bar{\mathbf{R}}$) 對應力矩陣 ($\boldsymbol{\tau}$) 所形成的相似矩陣 ($\boldsymbol{\tau}'$)，則可表示為式 14。

$$\boldsymbol{\tau}' = \begin{bmatrix} \tau'_{\theta 11} & \tau'_{\theta 12} \\ \tau'_{\theta 21} & \tau'_{\theta 22} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{R}}^{-1} \boldsymbol{\tau} \bar{\mathbf{R}} \quad \text{式 14}$$

其中，

$$\tau'_{\theta 11} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad \text{式 15}$$

$$\tau'_{\theta 12} = \tau'_{\theta 21} = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad \text{式 16}$$

$$\tau'_{\theta 22} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} - \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad \text{式 17}$$

在這之中，式 15 與式 16 之表示式則為式 2 所顯示的應力轉換公式。

(四) 應力分量的變化軌跡即為應力莫爾圓

若將式 10 與式 14 中元素表示式以極座標系統進行表示，則可進一步地將矩陣運算結果與應力莫爾圓進行連結，考量以下條件：

$$r = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{式 18}$$

及

$$\begin{cases} \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} = r \cos \alpha \\ \tau_{xy} = r \sin \alpha \end{cases} \quad \text{式 19}$$

其中， α 為一個角度。因此，式 10 及式 12 可利用式 18 與式 19 改寫為式 20 及式 21。

(a)

(五) 應力矩陣之特徵值即為主應力大小

上體單元受特定外力作用後，其所對應的正向應力與剪應力分量變化行為可藉由應力莫爾圓進行全面性地闡述。另一方面，土體單元的受力情況亦可採用應力矩陣進行表示，然而在不同的座標系統下其所對應的應力分量將會有所不同。因此，為了更進一步地連結一特定的應力莫爾圓，其所對應的應力矩陣分量變化行為，矩陣運算中的特徵值問題將被採用。為了計算式 9 所對應的特徵值 (σ)，式 24 所列條件須被滿足。

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad \text{式 24}$$

並可得：

$$\sigma = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{式 25}$$

其中，應力矩陣屬於實對稱矩陣，因此其所對應的特徵值將屬於實數。再者，式 25 可進一步地表示為：

$$\sigma = \sigma_c \pm r \quad \text{式 26}$$

因此，應力矩陣所對應的特徵值即為此受力單元的主應力大小 (式 27)。

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_c + r \\ \sigma_3 = \sigma_c - r \end{cases} \quad \text{式 27}$$

(六) 相同應力莫爾圓上有著相同特徵值

若進一步地利用極座標的分析結果表示微小單元體的應力矩陣：

$$\boldsymbol{\tau}_\theta = \begin{bmatrix} \sigma_c + r \cos(t) & r \sin(t) \\ r \sin(t) & \sigma_c - r \cos(t) \end{bmatrix} \quad \text{式 28}$$

為了計算式 28 所對應的特徵值，可利用式 29 進行求解。

(b)

$$\begin{vmatrix} \sigma_c + r \cos(t) - \sigma & r \sin(t) \\ r \sin(t) & \sigma_c - r \cos(t) - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad \text{式 29}$$

並可得

$$\sigma = \frac{2\sigma_c \pm \sqrt{4\sigma_c^2 - 4(\sigma_c^2 - r^2)}}{2} = \sigma_c \pm r \quad \text{式 30}$$

因此，對比式 26 與式 30，顯示於相同的應力莫爾圓上其所對應的應力矩陣皆有相同的特徵值。

(七) 特徵方向所旋轉的角度恰為應力莫爾圓上旋轉角之半

式 28 所對應的特徵向量可利用式 31 及式 32 進行求解。

$$\begin{bmatrix} \sigma_c + r \cos(t) - (\sigma_c + r) & r \sin(t) \\ r \sin(t) & \sigma_c - r \cos(t) - (\sigma_c + r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{21} \end{bmatrix} = 0 \quad \text{式 31}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_c + r \cos(t) - (\sigma_c - r) & r \sin(t) \\ r \sin(t) & \sigma_c - r \cos(t) - (\sigma_c - r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{12} \\ x_{22} \end{bmatrix} = 0 \quad \text{式 32}$$

並可得單位化後之特徵向量式 33、式 34，分別為最大主應力 (σ_1) 與最小主應力 (σ_2) 所對應之特徵向量。

$$\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{t}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{t}{2}\right) \end{bmatrix} \quad \text{式 33}$$

及

$$\mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\left(\frac{t}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{t}{2}\right) \end{bmatrix} \quad \text{式 34}$$

(c)

圖10 跨學科知識教材內容

(二) 教學方法與評量搭配

對於離岸風能之大地工程導論系列課程，作者採用「知識互相串連」、「學習環環相扣」及「科技翻轉教育」的教育理念，藉由真實工程的問題激發學生之學習意願；另一方面，培育學生擁有解決問題與團隊溝通的能力亦是不可或缺的。因此，課堂間除教師講授外，課堂討論與分組報告亦被導入。以工程專案流程第二階段土壤分類為例（圖 6），作者於課堂上以臺灣西部海域土壤資訊為例講授土壤的各項試驗，再由學生針對特定場址進行土壤分類。其中，對於土層議題，各組間若採用不同學者所提的理論，其所得土壤分類結果可能有所差異。然而，學生須憑藉著自身的工程判斷與小組間的大量討論，進而獲得一個相對合理的分析結果。

於執行「條型基礎彈性加載」工程專案作業期間，藉由統計回饋資料得知學生的操作困難（圖11）主要可歸納為以下三點：(I) 力學理論問題：此項目隱含著學生對於本工程專案所需力學分析理論的大觀念、大架構的問題，其中包含學習者對於土壤參數、應力、應變等概念薄弱之因素；(II) 微積分相關問題：由於力學理論的分析須藉助於各種數學

式 33 與式 34 分析結果指出，最大主應力與最小主應力所對應的特徵向量可組成旋轉矩陣。此外，特徵方向所旋轉的角度 ($t/2$) 恰為應力莫爾圓上旋轉角 (t) 之半，圖 12。

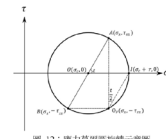


圖 12：應力莫爾圓旋轉示意圖

(八) 具備相同特徵向量之莫爾圓性質

若有兩受力單元分別為 A 與 B，則其所對應的應力矩陣可依序被表示為式 35 與式 36。

$$\mathbf{\sigma}_A = \begin{bmatrix} \sigma_{AA} + r_A \cos(t_A) & r_A \sin(t_A) \\ r_A \sin(t_A) & \sigma_{AA} - r_A \cos(t_A) \end{bmatrix} \quad \text{式 35}$$

$$\mathbf{\sigma}_B = \begin{bmatrix} \sigma_{BB} + r_B \cos(t_B) & r_B \sin(t_B) \\ r_B \sin(t_B) & \sigma_{BB} - r_B \cos(t_B) \end{bmatrix} \quad \text{式 36}$$

並進一步的考量兩受力單元之特徵向量相同，即

$$\hat{\mathbf{t}} = \hat{\mathbf{t}}_A = \hat{\mathbf{t}}_B \quad \text{式 37}$$

因此，此二受力單元所對應的單位化特徵向量可以式 38 進行表示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{1A} & \mathbf{u}_{2A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\hat{\mathbf{t}}}{2}\right) & -\sin\left(\frac{\hat{\mathbf{t}}}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\hat{\mathbf{t}}}{2}\right) & \cos\left(\frac{\hat{\mathbf{t}}}{2}\right) \end{bmatrix} \quad \text{式 38}$$

由於 A 與 B 受力單元之應力矩陣具有相同的特徵方向，故兩者可進行同步對角化

(d)

理論，而學生在執行理論分析階段缺乏更基礎的微積分觀念導致在工程數學學科應用時產生相關問題；(III) 數值軟體編程問題：學生將各種理論觀念彙整後，具體操作MATLAB、FLAC編寫程式語言與除錯階段等數值軟體時所產生的各種問題。基於上述各點，作者在課程間導入密集的課程助教輔導，包含課堂間與課後輔導，並鼓勵各組彼此交換意見尋求進一步的對策。除此之外，「條型基礎彈性加載」工程專案係以團隊方式進行，各組於學期末將被要求繳交書面報告與上臺進行口頭簡報，且修課學生必須對於書面報告與口頭簡報分別進行「自評」與「小組互評」。本課程之學期成績配當可參考表4。

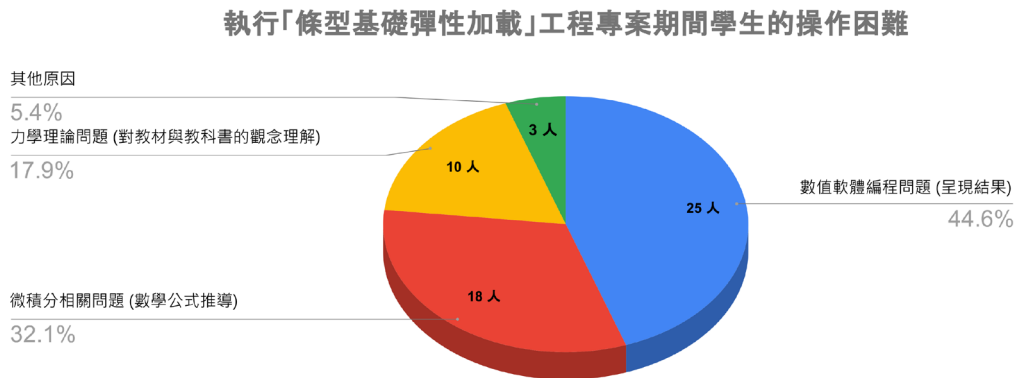


圖11 執行工程專案作業常見的學生困難

表4

成績評比比重

項目	權重
期中考	20%
期末考	20%
出席率與課堂表現	15%
習題作業	15%
工程專案作業期末報告（除教師評分外，課程助教、小組自評與互評結果亦被採計）	30%

二、學生執行內容

在系列課程初期，授課教師先對修課學生講述工程專案作業的相關內容，而學生將以組為單位進行後續操作，以本研究為例，參與執行工程專案作業之學生為56人，分成10組。學生之各階段執行內容說明如下：(I)學生在初步了解工程專案之內容後，先從學科知識總表（表2）挑選其認為執行此工程專案作業所需的知識工具；(II) 基於各小組所選定的知識議題以及知識工具，學生須將這些學科章節進行統整與連貫並提出解決問題的流程和步驟；(III) 於確立解決問題的流程後，學生須將其設計流程與概念具體化，獲得一個初步的結果；(IV) 小組將概念具體化後所得到的初步成果僅屬於樣品階段，接下來仍須經過大量的測試、小組討論、課程助教協助等方式，不斷地修正設計概念。最終，學生獲得、產出具驗證的結果。在此過程中，各小組基於執行步驟，其成員將從學科知識總表（表2）挑選合適的知識單元作為各步驟的背景知識，並於完成專案內容後重新施作一次，其結果可見表5。表5為基於表2之內容並新增一個欄位以顯示學生執行工程專案作業之成果，由本表可得知：(I) 在尚未具體執行工程專案之前，學習者有可能會挑選非必要的知識單元，如：A1、A2，此現象在工程數學的部分較其他兩科明顯；然而在實際演練過後，學生可更清楚地了解這些知識單元的應用條件與背景；(II) 對於A4、A5、B1單元，學習者在尚未執行前無法有效辨識出其必要性；然而在執行過程中，修課生有能力適時地進行修正；(III) 在作者充分地與某小組討論後，認為B5與B6的結果是特別的，對於此二單元，該組學生提出其工程考量點，並指出在特定的工程條件下B5與B6單元是必須被考慮的因素之一，值得注意的是，這些回饋的內容與施測結果是作者未預料到的結果，顯示藉由執行本工程專案作業可培養學生獨立解決問題與思辯的能力。對於學生的反饋意見，作者也將作為未來教材與專案內容的調整方向。

表5

工程專案作業所需知識總表

課 群	科目	章節	編號	工程專案作業	施測結果	
				所需專業知識	執行前	執行後
離 岸 風 能 之 大 地 工 程 導 論	工程數學	一階常微分 方程式	A1		3	0
		高階線性常微 分方程式	A2		4	0
		拉普拉斯轉換	A3		0	0
		向量分析基礎	A4	✓	8	10
		線性代數	A5	✓	6	10
		複變分析基礎	A6		0	0
	土壤力學	土壤物理性質	B1	✓	8	10
		土壤分類	B2	✓	10	10
		土壤力學試驗	B3	✓	10	10
		土體應力分析	B4	✓	10	10
		土壤滲流	B5		1	1
		土壤壓縮性	B6		0	1
		土壤剪力強度	B7	✓	10	10
	基礎工程	淺基礎承載力	C1	✓	10	10
		樁基礎承載力	C2		0	0
		土壤淺層改良	C3		0	0
		邊坡破壞模式	C4		0	0
		圓弧破壞邊坡	C5		0	0
		主、被動土壓	C6		0	0
		擋土牆型式與設計	C7		0	0

三、學習成果的反饋

本文旨在強化數學與力學科目間的鏈結、理論在實際工程問題的應用、以及數值軟體工具的使用。作者盼藉由系列課程帶領學生認識離

岸工程領域，並達成「知識互相串連」、「學習環環相扣」與「科技翻轉教育」的教育理念。正如執行後學生認為最有收穫的反饋資料所顯示（圖12），藉由此專案對工程數學理論與土木工程領域間的連結，對於學生的團隊合作中之溝通能力培養、以及對其他課程的學習動機的觸發甚有幫助，而這項結果有助於學生追求更進一步的專業知識與其應用。有關實際的工程問題發展課程內容的方向，圖13指出學生認為此類教材十分「實務」，需要思考才能解題，並在解題後得到成就感，而這也是支持作者持續推動教學研究的主要動力。

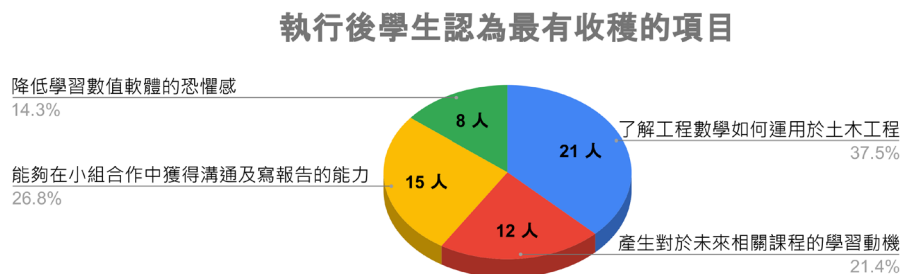


圖12 課程執行後學生認為最有收穫的項目

陳○維：我認為這些題目都是些非常需要動腦思考的類型，如果只有一人單獨解題會很累人，是需要結合大家的思考和想法後一步步完成這個新工程教育計劃。一開始雖然會遇到沒有想法的狀況但經過大家討論後卻有了新的思路，讓解題步驟逐漸成型，最後解完題目時的成就感真的很爽。

張○綸：雖然在這門課堂已經學了很多，但做後要將它全都發揮到題目上時，還是有點難思考出解答方式，新工程教育計畫裡面寫的東西其實是比较偏“實務”的東西，所以導致剛開始看得時候，會有點看不懂，不知道裡面在寫什麼，著實令我大開眼見，除了從課本學到的基礎知識外，也讓我對這部分學得更深、更透徹。

圖13 學生意見回饋

四、教材執行對應CDIO工程教育模式

CDIO工程教育模式係透過課程安排使學生以真實世界的工程專案內容為主軸，並於課程中經歷構思、設計、實施、運作四大過程。藉由這個人才培育模式，學生可獲得扎實的理論知識以及滿足真實世界所需

的專業技能。「離岸風能之大地工程導論」課群包含「工程數學」、「土壤力學」與「基礎工程」三門必修科目，各科目所教授的知識內容為表5，顯示了學生修習完上述三門必修課程後，其所擁有的技能與知識工具。

本研究將CDIO工程教育模式應用於授課教師與課堂學生（圖14），就教師端來說，教師首先須掌握臺灣工程業界所需的人才項目及相關工程議題，而本文聚焦於離岸風力發電產業。授課教師先審視離岸風能產業中的工程議題，並構思專業工程問題和必修課程間的連結，進而串聯多門課程知識解決真實工程問題。為了引導修課學生認識相關議題，教師須設計、開發課程教材及對應真實工程問題的專案作業。因課程進行中，學生將被要求執行各項工程分析作業，故授課教師導入多名課程助教以協助修課學生實施相關專案作業並產出相關樣品、設計方案。學生初始產出的樣品必定存在著部分缺陷，課程助教將協助學生不斷地完善設計方案，而在這個過程中學生面對的各項問題將被回饋給授課教師，課程教師亦將依據此些反饋內容調整、優化授課內容以完善整個人才培育模式。另一方面，對於學習者而言，因在課程中將面臨數個工程專案習題的考驗，故學習者須回顧過往修課內容，並構思、挑選適當的知識工具以面對問題。在確認所需的知識內容後，學生應可基於此些技能設計與發展出一套流程、系統以逼近特定的工程問題；再經過縝密的評估後，即可實施其設計流程，製出初步產品。然而，基於初步概念所得的成果尚須受到多方驗證，因此，藉由不斷地測試以及將資料反饋至設計階段，學生所產出的成果方可順利的運作並被稱為產出。以「條型基礎彈性加載」工程專案為例（圖14），學生於認識此工程專案的內容之後，便開始由表5構思所需的知識工具項目。基於各小組所選定的知識內容，其各自設計適當的問題解析流程。對於數值分析而言，學習者須掌握數值建模中的相關技巧，包含網格邊界條件、基礎加載方式與速度、土壤參數等。學習者最初的數值模型普遍存在缺失，而這個階段各小組組內、間與課程助教的大量討論是有助於提升數值模型的建立。最終，學生的分析成果可順利的運作，並獲得豐碩的學習成果。本課程係透過一個真實的工程問題導引學生逐步學習、編撰相關課程教材以及提供背景知識，此教育模式亦屬於專案導向學習（PBL）的展現。

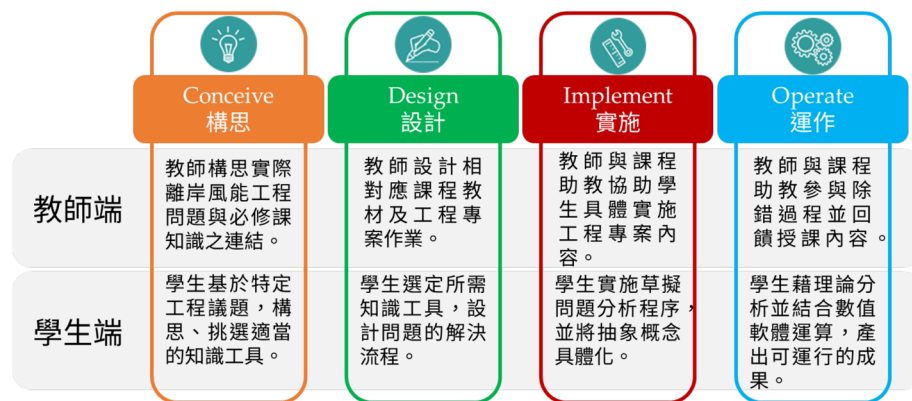


圖14 教材執行對應CDIO教育理念各階段架構

伍、結果與建議

一、結論

本研究藉由執行教育部「新工程教育方法實驗與建構計畫」，串聯計畫中的三門土木工程學系必修學科：「土壤力學」、「工程數學」、與「基礎工程」，探討議題包含：(I) 作者以一個工程專案問題將三門學科知識交互串聯，並利用此專案內容帶領修課生認識離岸工程領域及熟悉數值軟體的使用；(II) 教師觀察到學習者於應力分析階段，容易因學科定義之差異，導致學習困難與混亂，而此問題應可分別透過數學直接求解，以及力學觀點圖解法獲得分析結果，學生卻因認為此二方法是彼此獨立的，無法有效整合跨學科知識。因此，本研究所編制的教材係針對學科定義、力學理論與數學計算、及連結數值軟體三大議題進行彙編，藉此降低學生的學習困難以提升學習慾望；(III) 在工程執行的階段，工程師須全面性地了解工程特性後選擇適當的工具進行問題的分析。由不同科目教材的內容，讓學生理解到條型基礎彈性加載問題可由工程數學的直接求解法、土壤力學中的摩爾圓圖解法、或是基礎工程中的數值軟體分析加以解決，進而建構出數學證明所對應的力學物理意義（圖15）。



圖15 數學與力學的關聯性及應用

本研究在工程專案作業執行前提供表5讓學生挑選適當的知識工具。學習者為了選擇出合適的知識單元，必須對工程專案內容有所了解並建構出屬於自己的問題分析流程圖，而後基於此流程圖再回頭選擇所需的知識單元。於此階段，學生所構思的問題解決步驟與所對應的知識單元，可直接具體地應用至接下來的操作階段，並驗證最初的想法。學生透過執行工程專案內容，可具體地整合理論知識，將其應用於實際的工程問題，且不斷地驗證及調整設計流程，最終具備解決問題的能力。本研究經由以上的操作過程，所得之結果與重點如下：

1. 在施行工程專案作業之前，學生尚無法全面性地了解學科理論知識（如：工程數學），如何應用於土木工程領域，藉由工程專案作業之執行，可自我建構出學科理論與工程應用之間的橋梁，並使用數值軟體以驗證相關理論知識。

2. 教師挑選適當的工程專案議題以編撰PBL之系列課程教材，其所提供學生所需的背景知識是有助於學習的。再者，作者針對學生易混淆、不熟悉的單元進行全面性的教材開發，其內容除可解決學習困難外，亦整合了多學科知識單元以及導入了數值軟體，使學生獲得完整性

的學科理論知識並具備應用知識的能力。

3. 工程師須具備良好的問題解決能力，選擇適當的工具進行分析亦是不可或缺的。本研究將學科知識單元視為各種工具，學生須在這些知識庫中選擇所需的工具，並經由執行過程中不斷地修正流程圖與所需的知識單元，建構出屬於自己的問題解決流程。

二、反思與建議

本研究係以串聯三門土木工程學系必修學科：「土壤力學」、「工程數學」、與「基礎工程」知識建構工程教育，培育滿足真實工程界所需之專業人才，所得之反思與建議如下：

1. 本文所討論的三門課程「工程數學」、「土壤力學」與「基礎工程」為大多數土木工程學系之必修課程，以往這三門課程大多是以介紹大量的理論內容進行，對於較為抽象的學科知識，學生不易理解與應用。透過執行工程專案作業，學生可利用電腦數值軟體進行各種「實驗」，而所得到的成果亦可透過繪圖軟體的輔助進行視覺化的展現。值得注意的是，學生在完成數值分析後可將產出系列的成果進行彙整，最終完成一份工程專案作業期末報告。在此過程中，作者認為，課程之安排若可引導學生具體產出一項成果，如實驗、產品、海報、分析報告等，將可提升學生的自信與成就感。

2. 為執行教育部推行之「新工程教育方法實驗與建構計畫」以培育下一個世代的工程師，作者根據各領域主題規劃適當的工程問題，以真實工程問題串聯必修課程，藉此營造一個學以致用、付諸實踐的學習環境，使畢業生滿足業界所需之各項技能，包含：專業知識、數值分析、溝通技巧、團隊合作等。

3. 本研究所執行的內容及實施對象是工學院中土木工程領域學生，故本文中所採用的串聯多門課知識概念、新開發教材引入實際工程案例與資訊、數值模擬軟體等概念與方法應可推衍至其他工程或是應用科學等系。另一方面，類似的想法或可適當調整，使其更廣泛地應用至人才培育機構。

4. 本文所串聯的三門必修課程係存在著知識的相關性與建構的次

序性（圖5）：從學理的工程數學出發、連結至微觀的土壤力學理論、最終應用到宏觀的基礎工程。由同一位教師在不同學期擔任同一班級多門課的授課任務，在教學設計、教材內容、與研究設計方面可以做有系統的統籌規劃。對於學生在前面課程的狀況，單一教師可以觀察到並反應到下一門課的教學調整，而同一群授課對象則可保證課程串連的延續性。相反的，不同教師也可完成多門課串聯的研究，但參與教師群的討論與合作將是執行成效的關鍵。雖然執行的挑戰度較單一教師為高，但在充足的討論下，其教學設計或研究設計上可能較為完備，故仍可作為教學實務的研究領域。

誌謝

本論文係教育部「新工程教育方法實驗與建構計畫」之「智慧營建在海陸域風力發電設施之理論設計與實務應用」（MOE-NEEMEC-B-108-02）與「智慧營建 深耕土木 永續防災」（MOE-NEEMEC-A-110-11），及科技部專題研究計畫之「臺灣離岸浮動式風機平臺與自升式平臺船之錨錠基礎極限承載力分析」（MOST 110-2221-E-035-029-）和「海洋大型基礎在均質土或互層土受複合載重的極限承載力及相對應之土壤塑性流研究」（MOST 111-2221-E-035-030-）的研究成果，承蒙教育部及科技部補助相關經費與研究人力使本研究得以順利完成，僅致謝忱。

參考文獻

- 吳如娟、黃智彥（2021）。設計思考與CDIO融入的數位人文創新教學模式。**大學教學實務與研究學刊**，5 (2)，33-65。
- 紀昭銘（2019a）。離岸風能之大地工程導論 單元一：工程數學篇。逢甲大學土木工程學系工程數學課堂教材。
- 紀昭銘（2019b）。離岸風能之大地工程導論 單元二：土壤力學篇。逢甲大學土木工程學系土壤力學課堂教材。
- 紀昭銘（2020）。離岸風能之大地工程導論 單元三：基礎工程篇。逢甲

- 大學土木工程學系基礎工程課堂教材。
- 紀昭銘、林正山（2021年4月）。利用新工程教育方法實驗與建構計畫貫徹CDIO人才培育架構。「**創新時代的教育：2021創新教育與教學實踐研究論壇**」發表之論文，逢甲大學。
- 教育部（2021）。計畫目標。**新工程教育方法實驗與建構計畫**。2021年7月6日取自<https://www.neemec.org.tw/m2/m2-m2-3/>
- 歐陽（2016）。**材料力學論衡**（修訂三版）。文笙。
- Kao, Freeman（2019）。**如何掌握PBL教學關鍵**。<https://cavesconnect.cavesbooks.com.tw/cet-perspective-clinic-trend-%E6%95%99%E5%AD%B8%E8%A8%BA%E7%99%82%E5%AE%A4%E5%A6%82%E4%BD%95%E6%8E%8C%E6%8F%A1-pbl-%E6%95%99%E5%AD%B8%E9%97%9C%E9%8D%B5/>
- Abanades, J. (2019). Wind energy in the Mediterranean Spanish ARC: The application of gravity based solutions. *Frontiers in Energy Research*, 7, 83. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00083>
- Al-Balushi, S. M., & Al-Aamri, S. S. (2014). The effect of environmental science projects on students' environmental knowledge and science attitudes. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 23(3), 213-227.
- Blumenfeld, P. C., Soloway, E., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Guzdial, M., & Palincsar, A. (1991). Motivating project-based learning: Sustaining the doing, supporting the learning. *Educational psychologist*, 26(3-4), 369-398.
- CDIO™ INITIATIVE. (n. d.). *The CDIO™ INITIATIVE is an innovative educational framework for producing the next generation of engineers*. Retrieved June 20, 2022, from <http://www.cdio.org/>
- Crawley, E., Malmqvist, J., Ostlund, S., Brodeur, D., & Edstrom, K. (2007). Rethinking engineering education. *The CDIO Approach*, 302, 60-62.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th Edition). Cengage Learning.
- Edström, K., & Kolmos, A. (2014). PBL and CDIO: Complementary

- models for engineering education development. *European Journal of Engineering Education*, 39(5), 539-555.
- Frank, M., & Barzilai, A. (2004). Integrating alternative assessment in a project-based learning course for pre-service science and technology teachers. *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 29(1), 41-61.
- Lam, S.-f., Cheng, R. W.-y., & Ma, W. Y. (2009). Teacher and student intrinsic motivation in project-based learning. *Instructional Science*, 37(6), 565-578.
- Massachusetts Institute of Technology. (n. d.). *CDIO: Conceive-design-implement-operate*. <https://web.mit.edu/edtech/casestudies/cdio.html>
- Offshore Wind Industry. (2017). *New jack-up vessel concept for 10 to 12 MW turbines*. <https://www.offshorewindindustry.com>
- Wurdinger, S., Haar, J., Hugg, R., & Bezon, J. (2007). A qualitative study using project-based learning in a mainstream middle school. *Improving Schools*, 10(2), 150-161.

Construct Engineering Education by Connecting Knowledge of Multiple Curriculums: A Case Study on Geotechnical Engineering of Offshore Wind Power Courses

Chao-Ming Chi* Zheng-Shan Lin**

Abstract

Developing new learning handouts of courses is the requirement of executing the Ministry of Education's project "New Engineering Education Method Experiment and Construction" (NEEMEC). Therefore, connecting knowledge of multiple curriculums, practical engineering problems-based learning, and using software to solve problems are the key elements of the authors' newly developed course handouts. As real engineering problems are often not covered by the knowledge of a single course, the authors connect the knowledge of three course handouts and apply it to the geotechnical problems of offshore wind energy, and solve the Mohr circle problem with different calculation formulas using different definitions from different courses. Learning outcomes were evaluated through homework and final examinations. Teaching assistants helped students edit computer programs, use numerical software, and present their team's results in final oral reports. The questionnaires indicated that the students benefited from the application of course knowledge and teamwork after implementing the project, and the feedback results were used as references for future teaching.

Keywords: engineering education, connection of multiple curriculums knowledge, new engineering education method experiment and construction, practical engineering problems, numerical software



DOI : 10.6870/JTPRHE.202306_7(1).0004

Received: October 11, 2021; Modified: August 9, 2022; Accepted: August 25, 2022

* Chao-Ming Chi, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Feng Chia University, E-mail: cmchi@mail.fcu.edu.tw

** Zheng-Shan Lin, Ph. D. Student, Program for Infrastructure Planning and Engineering, Feng Chia University, E-mail: z-slin@mail.fcu.edu.tw