

地工技術

編者的話

李崇正

主題：地工物理模型試驗及應用

人類探究自然的奧秘，通常必須經由現象觀察、累積經驗及歸納分析的過程。而利用相似模擬，利用縮尺的物理模型(Physical model)來研究各種物理現象，藉以幫助解決理論與設計問題是科學或工程上常用的方法。對應該物理模型所代表的原系統，稱之為原型(Prototype)，原型不一定與實際的工程問題完全相符。物理模型與原型各物理量間必須有強烈的關連性，物理模型試驗的成果才有意義。土木工程物理模型試驗，針對不同試驗條件的需求，試驗可以在1g重力場或高g重力場狀態下進行。常見的物理模型試驗包括：(1)水工模型試驗；(2)風洞試驗；(3)結構構件或縮尺結構的模型試驗；(4) 1 g地工物理模型試驗；(5)地工離心模型試驗(Geotechnical centrifuge model test)等。值得注意的是執行任何物理模型試驗時，針對研究問題的重要特徵（變數），需妥善考慮縮尺模型與原型的相似性(similitude)。不考慮兩者相似性的物理模型試驗，試驗成果無法有效推廣至其他不同尺度的模型或原型，也無法具備工程上的應用性。

縮尺模型與原型的相似性必須包括幾何相似性(Geometrical similarity，模型幾何形狀及邊界形狀與原型相似)、運動相似性(Kinematic similarity，模型與原型位移量相似)及動力相似性(Dynamic similarity，模型內力和外部作用力均與原型相似)。目前雖然仍有許多工程問題，模型與原型仍無法全部考量所有物理量的相似性，但是選擇重要物理變數，建立兩者之間的相似性，如此模型試驗的試驗成果才能正確代表原型重要的力學行為，也才能推廣至工程應用的層次。因此進行地工物理模型試驗的試驗設計時，必須依據縮尺律(Scaling law)，適當考量模型與原型的相似性，特別應該考慮模型所使用土壤或結構體的力學行為、荷載、環境及施工過程與原型的相似性。

地工結構通常規模大、地層複雜，也不容易利用全尺度的現場試驗來觀察破壞機制，而簡化的地工物理模型可以提供具重複性且相對低成本的試驗，讓研究者可以觀察不同試驗條件下的地工結構的破壞機制。地工物理模型(Geotechnical physical model)是具備代表某一特定邊界值問題特徵的簡化縮尺物理模型(代表某一類型的大地工程問題)，可以在1g或高g的情況下進行縮尺物理模型試驗。相較於傳統室內元素試驗(Element tests，例如三軸剪力試驗、直接剪力試驗等)僅能模擬單一土壤元素的應力路徑，且各種元素試驗所能夠模擬的應力路徑也有限；而物理模型試驗可以同時模擬符合邊界條件(Boundary conditions)下，模型內不同土壤元素的應力路徑，這是物理模型試驗的優點。日本PWRI(Public Works Research Institute)開發上部結構(Superstructures)與下部基礎(Soil-foundation)混合動態即時振動試驗系統與數值模擬技術，利用數值分析評估上部結構的動態反應(力或位移)，並即時輸入下部基礎，進行地工物理模型試驗。這種模型試驗的新技術，必須整合不同專長領域的人參與研究，如此一來也更能正確模擬包括上一下部結構與土壤互制情況下，模型內不同位置的土壤元素的應力路徑，也更能掌握原型的受振反應。

大地工程的研究者及設計者，通常將複雜的問題，利用簡化的數值模擬或理論來進行分析，並進行施工過程及完工以後之現場觀測，期望由目前簡化的模擬結果與現場直接觀測值進行比對，作為將來類似工程設計之借鏡。如果沒有經過適宜之模擬，設計趨於保守，造成不經濟，但也有可能因忽略，導致設計錯誤，而造成工程失敗的案例。地工物理模型可以觀察破壞的機制，雖然可以考慮物理模型與原型的相似性，但物理模型有尺寸效應(scale effect)、試驗箱的邊界效應(Boundary effect of container)、試驗的重複性(Repeatability)、邊界條件(Boundary condition)等與原型不盡相同；另外

使用不同土壤進行試驗，也導致材料性質不同。數值模擬或其他理論分析，雖然沒有尺寸效應，但由於地工材料的組成律及數值邊界的處理相當複雜，目前的知識尚無法全盤掌握，因此也有其限制。而利用全尺寸的現場試驗來觀察，雖然沒有尺寸效應，也沒有簡化分析法所造成的問題，但是由於工程浩大，成本太高，土層複雜並且無法全盤掌握，一般也無法觀察大變形，甚至破壞時或破壞以後的行為及機制。上述各種分析模型的比較，每一種都各有其優缺點。利用上述三種方法一齊來研究工程問題是有其必要，基本上數值或理論模擬與地工物理模型模擬，乃是相輔相成不可偏廢。圖1說明此三種研究手法相輔相成，經過互相檢核、印證及評估，才可以驗證新理論及新觀念的正確性，最後也才可以進行安全又合理的地工構造物的設計。

地工物理模型除了上述的功用外，對工程教育也有舉足輕重的貢獻。土木地工結構物的特徵通常是客製化、大型、具獨特及唯一性，且構築完成後不容許有破壞的機率，不像其他領域的產品體積小，且具有量產的特性，量產前可以進行產品的破壞試驗來驗證產品的可靠性。因此土木工程教育無法進行實體的破壞或耐久試驗來觀察破壞行為、驗證設計理論與成品的可靠性，特別是破壞機制的了解。利用地工物理模型試驗，並錄製教學錄影資訊或製作動畫，是一個相當有效展示破壞機制的教學方法，不但可以加深修習學生對該主題的了解，對可能破壞的情況有一較全盤性的概念。地工物理模型試驗配合相關原理的介紹，可提供學習者各種大地構造物的破壞現象與書本知識的結合，對土木科系大地工程領域的學習將有極大的直接效益。

1 g 地工物理模型試驗和離心模型試驗各有其優缺點。離心模型試驗在高g情況下進行試驗，可以確保模型與原型對應點有相同的應力及應變，相似性高。但是由於試驗機具容量的限制，通常試體體積較小，感測器(Transducer)的體積相對於試體體積顯得較大，對試驗成果有較大的影響。另外探討土壤與結構互制問題時，結構模型與土壤顆粒大小有尺寸效應，必須仔細評估。相反的1g物理模型試驗，無法模擬與原型相同的應力條件下進行試驗，也就無法考慮土壤強度及勁度對試驗結果的影響；但相對於離心模型

而言，試體體積較大，顆粒尺寸效應的影響較小，感測器的存在，對試驗成果的影響也較小。近年來，拜科技進步之賜，迷你感測器的開發及試驗機具硬體容量的提升（例如日本E-Defense大型1g振動台及大型地工離心機的建置），不論是1g模型試體或離心模型試體的尺寸規模均大幅提高，上述的1g物理模型及離心模型的限制也逐漸減少中。而電腦自動控制設備（機械手臂）也大幅引入模型試驗中，增加施工過程模擬的能力，也更能貼近工程實際受力狀況。大容量電腦和即時資料擷取系統的軟硬體開發，允許使用數百頻道的感測器同時擷取不同的物理量，更能掌握地工物理模型的受力行為。

地工物理模型試驗機具容量的提昇、其他輔助試驗的軟硬體設備建置及管理維護成本相當高昂，因此世界各國都成立重點試驗室，全力加強既有設備更新及全力支援重點創新設備的建置。基本試驗設備配合建置無遠弗屆的網路軟硬體系統以及可以進行遠距分散式混合動態試驗(Distributed hybrid dynamic testing)的軟硬體設備，整合不同專長（包括結構、大地、物理模型試驗及數值分析）的研究者共同參與研究，提供方便友善的試驗支援，達到增加試驗設備的利用率及鼓勵更多研究者參與合作研究的目的（例如美國的NEES, Network for Earthquake Engineering Simulation是最典型的成功例子，同樣英國的UK-NEES及歐盟也有類似的合作研究計畫）。甚至藉由試驗設備本身的獨特及唯一性，進行跨國的合作研究來分擔大型試驗設備高昂的建置及維護成本（例如日本E-Defense大型1g振動台的建置）。

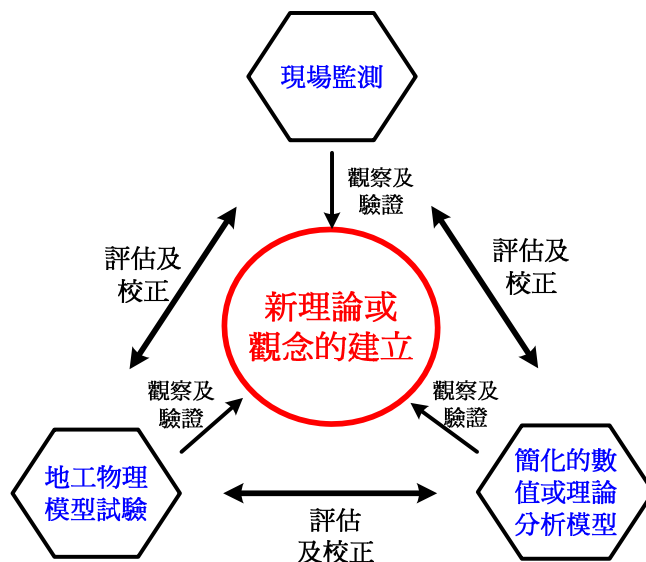
本期「地工物理模型試驗與應用」專輯共收錄十篇內容豐富的文章。依據試驗時重力場的不同來區分，1 g 物理模型試驗共六篇，其中一篇則在現地土壤進行物理模型試驗；離心模型試驗則有四篇。就論文內容來區分，以邊坡穩定及擋土牆相關研究佔六篇，與目前工程界所關心的熱門議題一致，三篇液化相關研究及一篇樁載重行為的研究論文。由陳榮河及紀伯全（模型邊坡試驗之因次分析）、王國隆及林美聆（1-g條件下之大型邊坡模型受震行為）、黃景川（地工合成物加勁邊坡模型試驗－動態與擬靜態行為之比較）、李崇正等人（以離心模型振動台試驗模擬

砂土層液化行為)所撰寫的文章，都對各自所進行的物理模型與原型的相似性，針對不同的考量重點，做相當詳盡的介紹。讀者可經由這些內容，推導自己所擬進行不同種類物理模型試驗的因次律。

無論是現場或實驗室進行土壓力的量測，通常由於土壓計周圍土壤發生拱化現象 (Soil arching)，不容易準確量測，陳滄江及方永壽（以大型擋土牆模型量測靜止土壓力）利用大型擋土牆模型系統量測靜止土壓力，對靜止土壓力的估計提出具體建議。陳家漢及翁作新（可能液化地盤中模型樁振動台試驗）詳細介紹近年來國內外所進行之液化土壤中樁基礎動態物理模型試驗，也介紹了國震中心利用獨特的大型雙軸向剪力盒，所進行之模型樁振動台試驗的最新成果。張文忠（現地土壤液化模型試驗之發展與應用）利用以大型震盪車作為地表震源，進行現地土壤的液化試驗，經由預先裝置於地層中的加速度計及孔隙水壓計進行砂土液化觀測。這種試驗手法，由於較試驗室內物理模型試驗的規模大，最近也逐漸的被應用於大地地震工程相關的研究。吳明淙及Hoe-I Ling（地工離心機於邊坡穩定研究之模擬與應用）發展可以在離心飛行產生降雨的環境控制試驗箱，進行不同降雨強度下的邊坡

穩定試驗。洪汶宜等人（柔性包覆式雙階加勁擋土牆斷裂破壞行為之離心模型模擬）探討不同退階距離及加勁材料配置方式，對柔性包覆式雙階加勁擋土牆破壞行為的影響，試驗成果可作為設計的參考。黃俊鴻等人（以離心模型試驗模擬基樁抗壓及抗拔行為）利用計測模型樁在80g情況下，進行極限承載及極限拉拔試驗，探討承載樁及拉拔樁荷重傳遞機制的異同。

本期「地工物理模型試驗與應用」專輯的十篇文章，依據論文產出的單位來區分，九篇由學術及研究機構發表，只有一篇由學界及業界合作產出。這與以往地工技術其他專輯文章的產出分布，產、官界在論文質與量均佔有過半的貢獻有很大的不同，這顯現在台灣地工物理模型試驗仍然停留在學界的象牙塔，工程界對於物理模型試驗成果的應用著力較少。學界與業界合作進行物理模型試驗研究的過程中，學界可以了解業界關心的問題點，增加可以回饋工程設計的研究主題；而工程界可以將學界的學術研究成果，反映於工程設計或施工過程中，增加工程的安全性及減少工程成本。學界與工程界的合作研究具有互補的功能，編者希望由本專輯的出刊，能有效促進學界與產、官界的合作研究，這對台灣大地工程技術的提升將有極大的助益。



圖一 地工物理模型試驗、數值或理論分析及現場試驗的相互關係