地工技術,第 82 期（民國 89 年 12 月）第 79-90 頁
SINO-GEOTECHNICS, NO.82 DEC.,2000）PP. 79-90-

腦力激盪

土壤力學理論在大地工程上之應用發展

劉泉枝* 胡邵敏* 歐章煜**

一、前言

土壤為多相位(Multi-phase)之複雜材料，若為不飽和情況時，包含土壤顆粒、空氣及水等三相位，飽和之情況則為土壤顆粒及水之二相位材料。對於飽和土壤而言，由於多出水此一介質，使得土壤之性質較一般材料更加複雜，因此土壤力學中除了針對一般材料所需之應力應變行為及破壞準則加以研究之外，另就其透水性及水份進出引致之體積變化特性進行探討，而透水性在大地工程上之應用即涉及時間問題，因此發展出有別於其他材料之壓密理論，亦由於水之存在，土壤力學均在有效應力原理之架構下發展。綜合上述，對於大地工程應用上所需之工程參數大致即包含強度參數 $\bar{c}$、$\bar{\phi}$、體積變化參數 C_c、C_r、C_v以及透水係數k等。

傳統單純之大地工程問題，例如基礎承載力、基礎沉陷量、邊坡穩定、擋土牆側向壓力及滲流壓力等，已發展相關理論以簡單之公式、圖表或轉換為程式可供相關設計者加以解決，如承載力理論，單向度壓密及彈性壓縮理論、邊坡穩定理論、土壓力公式及Darcy 定理等，應用上述之土壤參數大致上即能解決，其中除了涉及體積變化之分析及流體力學外，大部分工程均需應用強度參數 $\bar{c}$、$\bar{\phi}$ 值，因此大地工程師長期即在將此二適當之數值提供給相關設計者，導致大地工程師竟然成為戲稱之 $\bar{c}\,\bar{\phi}$ 工程師，殊為可惜。

由於社會高度發展，大地工程亦趨於複雜，以都會區之深開挖工程為例，土壤之穩定性雖然可以極限平衡原理加以解決，擋土結構之變形亦可由土壓力理論及簡單之彈塑性理論配合結構行為加以分析預測，惟擋土結構之施工，無論係打擊貫入式施工，亦或挖掘場鑄施工，雖係單元接續施作，均可導致周邊土層應力變化及變形，而基地開挖更將引致周邊地層內應力之改變及變形，對於鄰近建物基礎、樁基礎，或地下公共設施，如捷運隧道，捷運基樁、基礎，下水道，管線等之影響，實難由古典土壤力學所能解決，亦非由案例監測所得之地表沉陷及土壓資訊經驗即能精確獲知。傳統之 $\bar{c}\,\bar{\phi}$ 工程師已逐漸不適用，起而代之則必須能提供地層內部應力及變形變化之精確預測者，才能真正解決此類大地工程之問題。大地工程師應係能精確預測地工材料行為之專業者，而非僅提供參數之 $\bar{c}\,\bar{\phi}$ 工程師。

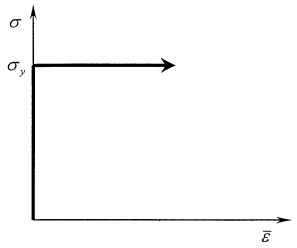
本文旨在敘述日後理論上發展之趨勢如何與工程應用上相配合，而使得大地工程師在預測土壤工程行為時能更加精準。

二、大地工程問題分析方式

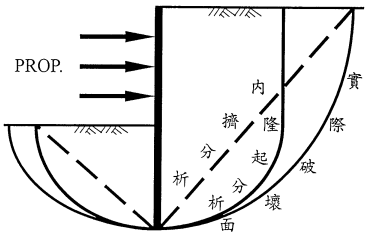
大地工程領域中，主要包含兩項重要課題，一為土壤穩定性之探討，例如坡地開發及斜坡開挖邊坡穩定性、深開挖工程

* 三力技術工程顧問股份有限公司
** 台灣科技大學營建工程系教授

土壤穩定性、堤壩滲流穩定及基礎承載等；另一項則為土層變形行為，諸如深開挖引致地表沉陷、擋土結構變形、基礎沉陷、不均勻沉陷等。前者一般採極限平衡原理，以Mohr-coulomb或其他適當之降伏準則，提供土壤或岩石相關力學參數，分析地層所能提供之抗剪強度，並假設土體內可能之破壞面，分析沿著破壞面之抵抗力(力矩)與可能產生之驅動力(力矩)，以獲取穩定性之安全係數。以深開挖工程為例，分析土壤穩定性問題，通常假設土壤為一剛性-全塑性(Rigid-perfectly plastic)材料，由提供之破壞準則，分析土壓力平衡及抗隆起之安全係數，以選取適當之擋土結構貫入深度(圖一)。因此分析之中僅涉及「力」及「強度」之問題，未包括整體地層變形行為，尚不足以構成完整之分析設計，因此需進一步針對地層及擋土結構之變形性進行瞭解。對於深開挖工程而言，通常又將土壤假設為線彈性-全塑性(Elastic-perfectly plastic)材料，將土壤之抵抗力以彈簧取代，當彈簧受力達土壤之強度後，則屬完全塑性體，由大地工程師提供之土壓力及水平地盤反力係數分析擋土結構之變形行為(圖二)。整體分析過程中隱藏之研究課題包括：(1) 計算土壓力之土壤參數或可由標準之土壤強度試驗結果獲取，惟土壓力之大小仍與土壤應變量有關，(2) 水平地盤反力係數為假設模式下之產物，土壤屬於一非線性材料，並非線彈塑性所能完全模擬，分析時所採用之數值，無法由試驗結果直接獲得，僅為經驗值，擇取時需反覆計算，依擋土結構變形行為之合理性加以調整，分析之結果過於「經驗化」，(3) 分析結果亦僅有擋土結構之變形量，雖已達成結構設計之初步要

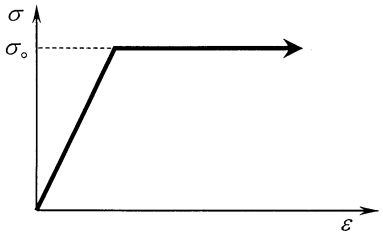


(a) 剛性-全塑性應力應變曲線

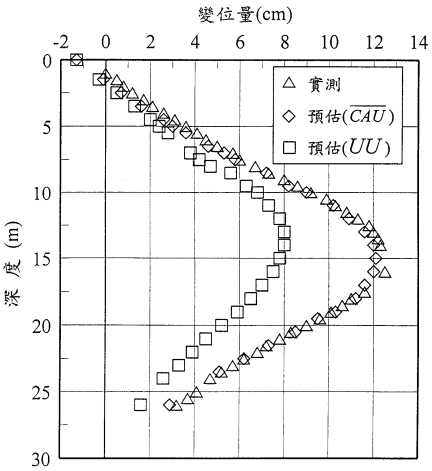


(b) 深開挖分析假設破壞面

圖一 傳統深開挖黏性土層穩定性分析



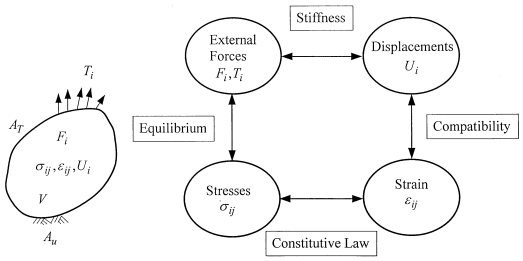
(a) 線彈性-全塑性應力應變曲線



(b) 深開挖擋土壁變形行為預估與監測結果之比較

圖二 深開挖擋土壁變形行為分析

求，惟有關土壤之變形性則無法獲知，土層內激發之超額孔隙水壓亦無法預測，導致整體地層應力應變行為難由此分析結果得知，故僅能仰賴經驗上監測結果或以往之反推分析研究成果加以判斷，以目前之施工經驗及反推分析研究而言，亦大致僅能針對地表沉陷行為較有具體量化成果，及(4)同一材料在穩定性分析及變形分析卻採用二種不同行為之假設，顯見對材料認識之不夠成熟及分析方式未能統合。



圖三 固態力學問題中各變數間相互關係

如同上述，傳統之設計及分析方法大多過於經驗化，或可達成完成結構設計之目的，對於單純工程上引致之土壤變形，亦可依大量之案例統計分析稍加掌握，然而對於較為複雜之工程則仍無法精確預測，例如深開挖引致基地外地層中之變位、鄰近建物基礎(基樁)變位及應力之改變、地下結構物(捷運隧道、下水道等)受鄰近基地開挖之影響等。藉由固態力學問題之解決程序(圖三)，配合數值分析方式(有限元素法及有限差分法等)則可達成此項目的。筆者之觀念中，大地工程中之問題仍須合理地加以分析解決，而不必靠太多之經驗及判斷即可得到合理之結果，極限平衡分析方式或可簡易地解決土壤穩定性之問題，對於土壤之變形行為，則仍需藉數值分析方法，始能達成合理分析之要求，因此數值分析在大地工程之應用應為日後二十一世紀發展之主流。而數值分析結果之合理性主要依靠正確之分析方法及材料組成律能符合材料之行為。配合此一趨勢，土壤力學領域則需朝組構完整之土壤模式，以及建立適當之分析方法發展。

三、土壤模式之發展

研究特殊材料力學行為之程序大致如下：

透過精緻之取樣、嚴謹之試驗程序及步驟，以瞭解材料之特性及其應力應變行為。

由相關之理論(如連體力學)配合材料之特性建立材料應力應變關係式，亦即建立土壤模式。

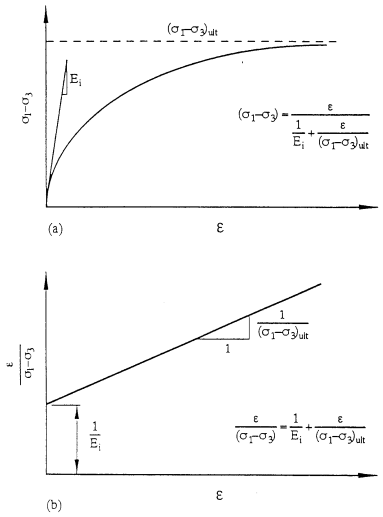
由各種不同應力狀態下之試驗資料加以驗證，並進行模式中相關參數之研究。

前三項已完成材料組成律之建立，再依實際工程案例進行數值分析，以確立模式與數值分析方法之相容性。

由此可知建立土壤模式之前即需針對土壤行為有深入之瞭解，60年代以前，由於儀器、取樣及量測技巧及試驗程序不成熟之限制，有關土壤行為之研究僅限於均向性，例如UU、$\overline{CIU}$ 試驗等，或為單向度，如壓密儀壓密試驗，或僅針對影響因素及土壤破壞準則中之參數進行探討。至美國ASCE及科羅拉多大學主辦之凝聚性土壤剪力強度研討會(1960)之後，古典土壤力學之發展大致告一段落，由此至90年代，由於儀器、取樣量測技巧及試驗程序之精進，自動控制系統、精密取樣及量測，以及再壓及SHANSEP試驗程序之發展，使得人們對土壤之特性有深入之瞭解，包含異向性之行為、不同應力系統下應力應

變之行為，以及時間、溫度效應等。至今，土壤之基本特性大致已被掌握，而可依此進行較完整之組成律探討，尚需釐清者在於土壤極小應變下之行為(Tasuoka, et al., 1997)，此一性質對於發生小應變工程如深開挖及動力行為均屬重要。

土壤材料組成律之中，線彈性-全塑性土壤模式配合簡單之降伏準則時，由於採用之土壤參數少，且容易獲得，因此常被採用做為工程上定性行為探求之工具。雙曲線模式(圖四)可模擬土壤非線性應力應變行為，因此近年來於國內廣被應用，然而雙曲線模式基本上係依據一般化之虎克定理推演而得，其基本屬性仍為彈性模式，不同者僅在於可作非線性應力應變曲線模擬，由於模式上未能完全模擬土壤實際行為，分析時仍需慎選分析之問題(Duncan, 1994)，避免運用至塑性變形控制整體變形行為之問題上(即較適用於較小應變之情況)，或局部破壞之發生影響所欲獲取之資料，並僅進行完全排水或完全不排水之情況。



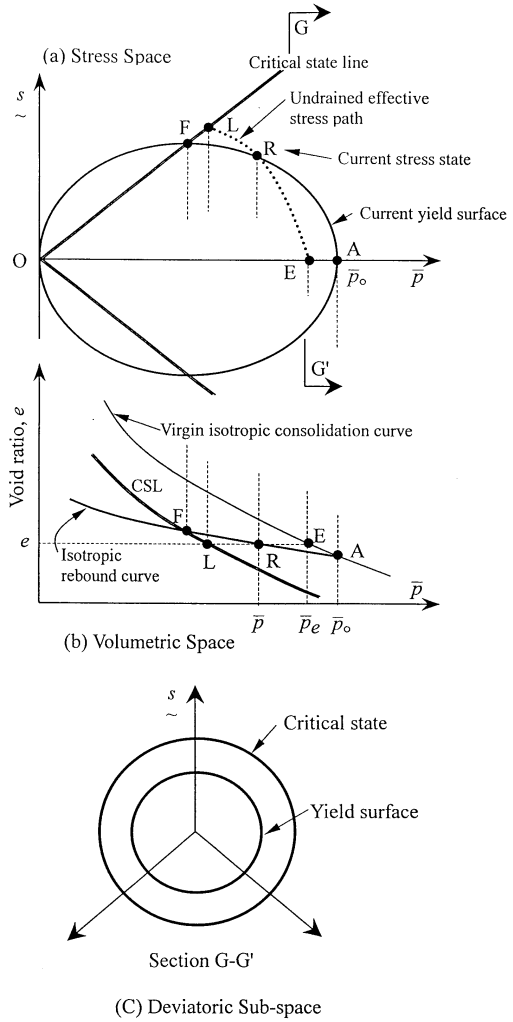
圖四　以雙曲線表示之應力應變關係

如同前述，土壤為一種極為複雜且具多相位之材料，土壤之力學行為則係由有效應力所控制(Terzaghi, 1936)，此即為構成土壤力學之有效應力原理，而有效應力代表土壤相位引致真正之應力，或可由水無法承受剪力之觀念加以解釋，一般以下式表示:

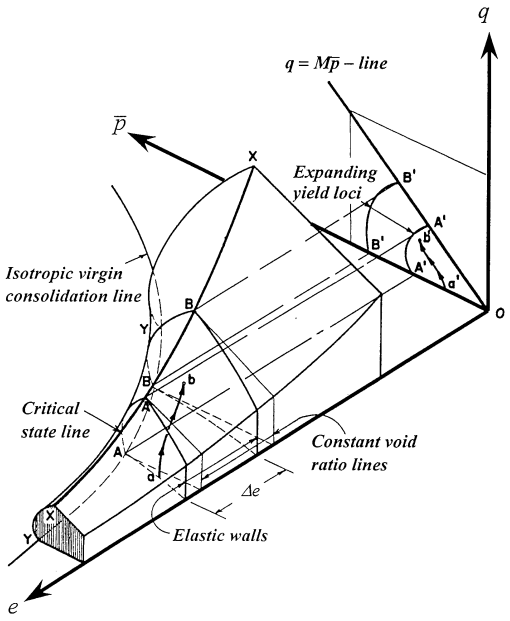
$$\bar{\underset{\sim}{\sigma}} = \underset{\sim}{\sigma} - u\underset{\sim}{I} \quad \cdots\cdots(1)$$

式中$\bar{\underset{\sim}{\sigma}}$為有效應力張量，$\underset{\sim}{\sigma}$為總應力張量，$u$為孔隙水壓力，$\underset{\sim}{I}$則為單位張量。而有效應力原理意指描述土壤力學行為之組成模式必須對應於有效應力及其應變。Cam Clay 模式(Roscoe, et al., 1963)及Modified Cam Clay(MCC)模式(Roscoe and Burland, 1968)即為一有效應力模式，如圖五所示，其特點為可模擬非線性彈塑性材料，係依據臨界狀態土壤力學(Critical State Soil Mechanics, CSSM)，配合應變硬化塑性原理加以量化而得；而CSSM係由觀察重模土樣試驗室$\overline{CIUC}$及壓密儀壓密試驗之應力應變行為，綜合其特性提出主要包含臨界狀態線、常化及邊界面狀態(圖六)等觀念。由此模式來源之說明即可瞭解，MCC模式可適切模擬土壤之應力應變行為，且運用上除須建立土壤彈性參數之外，亦僅需三項土壤參數，具備簡易之功能，因此亦較能為工程師所接受而可廣泛應用。Duncan(1994)將其歸類為所謂「高級組成關係式」(Advanced constitutive relationship)，惟MCC可模擬土壤一般之基本力學行為，土壤其他之複雜性卻未完全描述，例如土壤異向性、應變軟化、遲滯性及時間因素等，因此MCC模式模擬之結果仍不夠完整，使得模擬之效果未必真

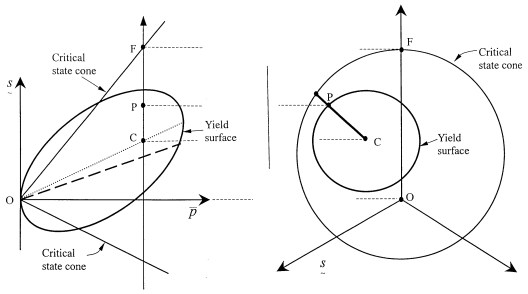
實，「高級」之說已未必高級。其後則陸續有進一步之土壤模式發表，包含異向性之描述（Mroz, et al., 1979; Kavvadas, 1982; Newson and Davies, 1995等），如圖七所示，及小應變下非線性之行為、應變軟化以及遲滯性之模擬(Whittle and Kavvadas, 1994; Pestana and Whittle, 1994等)，而使得有效應力模式之發展更加具體而實在。



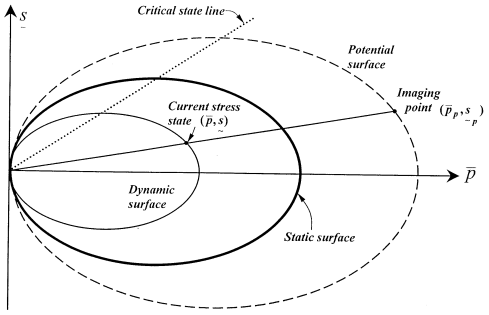
圖五 Modified Cam Clay 模式圖示



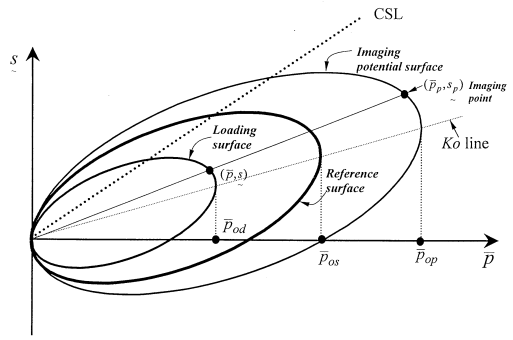
圖六 狀態邊界面



圖七 異向土壤模式降伏面與破壞面



圖八 推導速率相關均向土壤模式之黏塑性觀念



圖九 推導速率相關異向土壤模式之黏塑性觀念

上述各種土壤模式之發展大多為與時間無關之關係式，對於黏性土壤而言，時間亦為影響其應力應變之重要因素。針對軟弱黏土層深開挖案例之研究(O'Rourke, 1980等)亦指出，黏性土壤之不排水潛變效應會導致壁體變形及地表沉陷之增加。Ou et al.(1998)更針對台北深開挖逆打工法進行實地監測研究，於靜置時間內，擋土壁體之變形速度可達0.1~0.6mm/day之間，其他相關之研究亦均指出，台北黏土之潛變潛能頗高，潛變對開挖行為有顯著之影響(Lin and Wang, 1995)，對於透水係數較低、排水路徑較長之深厚軟弱黏土層，潛變行為之影響尤應加以考慮。因此對於應用於深開挖工程之有效應力模式，時間因素成為一探討之重要方向。

有關土壤依時效應組成模式之研究方式，大致可區分為三種，一是由試驗之結果加以分析，以調合(Fitting)之方式建立量化模式，例如Singh & Mitchell (1968)、Semple(1973)及Mesri (1981)之潛變模式，以及Lin and Wang(1998)之率相關模式等；另一種方式則依彈塑性理論加以推演，取一降伏面(例如MCC中之降伏面)，對於時間效應之考慮時，則取此降伏面之形狀做為視降伏面 (Apparent yield surface)，而降伏面硬化定則中則另以準預壓密(Quasi-preconsolidation)觀念考慮時間因素之影響。此種考慮依時性之組成律，例如Borja and Kavazanjian (1985)之依時組成模式及Hsieh et al.(1990)之雙面模式等。第三種方式則係以黏彈塑性(Visco elasto-plastic) 或彈黏塑性 (Elastic visco-plastic)理論加以推導，即考慮彈性及塑性之中均含有時間之影響，或僅於塑性一項包含有時間效應。例如Perzyna(1966)、Adachi & Oka(1982)、Desai & Zhang(1987)、Kutter & Sathialingam(1992) 及 Adachi et al.(1998)等以彈黏塑性推導之組成模式，Pestana & Whittle(1998)以狀態(State)之觀念推導砂性土壤壓縮之時間效應，亦做類似之假設。然而上述考慮時間因素下之土壤模式僅考慮均向載重面，如圖八所示，土壤基本之異向性行為則未列入。近頃，劉泉枝(1999)由黏塑性理論及狀態邊界面之觀念，配合Taylor(1942)之次壓密模式及Bjerrum(1967)之延時模式，並考慮土壤異向性行為推導一異向性速率相關有效應力模式(圖九)，並可模擬土壤應變軟化行為及三期潛變，且對台北黏土行為之模擬獲致甚佳之結果。值得一提的是，上述之土壤模式均在理想化土壤行為之假設下推演而得。

四、日後發展之建議

大地工程領域上之發展大致可區分為四個方向，分別說明如下：

(一)、試驗室試驗

1.速率相關土壤特性更深入之瞭解。

2.極小應變下土壤受力行為，包含速率相關因素，做為預測破壞前行為之依循。

3.發展量化土壤組構之試驗及方法。

4.未飽和情況下土壤行為之深入瞭解。

(二)、現場試驗

主要在於大尺寸案例監測之結果，尤其地下結構物或地層內部應力之變化及變位受鄰近工程之影響。

(三)、土壤模式之精進

為利於數值分析之正確性，必須建立更嚴謹合理之土壤模式。前述土壤模式之發展已考慮異向性、時間因素、應變硬化軟化、滲流等之統合，未來仍需以更適當之理論加以調整，並繼續參入其他土壤特性，例如較高過壓密比之行為、遲滯性、極小應變下之行為，甚致於構造化之考慮及溫度效應等，以及未飽和狀態下之統合。

(四)、建立數值分析工具

選擇或編寫適當之有限元素數值分析軟體，或發展適當之分析方法，並考慮三向度問題及大變位之情況(如打擊樁、大變位滑動之問題)等，納入已完成之土壤模式，評估其間之相容性，並對於實際工程進行分析，評估其合理性，建立工程運用之工具。

數值分析工具建立之後，對於大地工程中地層之應力變化及變位情形即可合理預測，包括基礎荷重、土堤、邊坡、開挖、滲流等未破壞前之行為，以及可能之破壞型態，此時大地工程師不僅是 $\bar{c}\ \bar{\phi}$ 工程師而已，而是必須完全透徹瞭解土壤之工程行為，亦不僅能提供土壤行為下之相關參數，而是具有數值分析之能力，且對分析之結果能合理解釋，並以相關工程技術克服地工上之問題。

參考文獻

劉泉枝，*台北黏土有效應力模式之研究*，國立臺灣科技大學營建工程系博士論文 (1999)。

TASUOKA, F., JARDINE, R.J., PRESTI, D.LO, BENEDETTO, H.DI, AND KODAKA, T., (1997) Theme Lecture:"Characterising the Pre-Failure Deformation Properties of Geomaterials," Proceedings, *14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Vol. 4, pp. 2129~2164.

DUNCAN, J.M. (1994),"The Role of Advanced Constitutive Relations in Practical Applications," *Proceedings, 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi India, Vol. 5, pp. 31~48.

TERZAGHI, K. (1936),"The Shearing Resistance of Saturated Soil and the Angle Between the Planes of Shear,"Proceedings, *1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Harvard, Mass, Vol. 1, pp. 54~56.

ROSCOE, K. H. Schofield, A.N., and Thurairajah, A., (1963), "Yielding of Clays in State Wetter Than Critical," *Geotechnique*, Vol. 13, pp. 211~240.

ROSCOE, K. H., AND BURLAND, J.B., (1968),"On the Generalized Stress-strain Behavior of Wet Clays," *in Engineering Plasticity*, J. Heyman and F.A. Leckie, eds., Cambridge University Press, pp. 535~609.

MROZ, Z., NORRIE, V.A., AND ZIENKIEWICZ, O.C., (1979),"An Anisotropic, Critical State Model for Soils Subject to Cyclic Loading," *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 1~34.

KAVVADAS, M., (1982), *Non-linear Consolidation around Driven Piles in Clays*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge,MA..

NEWSON, T.A., AND DAVIES, M.C.R., (1996), "A Rotational Hardening Constitutive Model for Anisotropically Consolidated

Clay," *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 3, pp. 13~20.

WHITTLE, A. J., AND KAVVADAS, M. J., (1994),"Formulation of the MIT-E3 Constitutive Model for Overconsolidated Clay," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 1, pp. 173~198.

PESTANA, J. M., AND WHITTLE A. J., (1994),"Model Prediction of Anisotropic Clay Behavior due to Consolidation Stress History," *Proceedings of 8th International Conference on Analytical and Numerical Methods in Geomechanics* (IACMAG'94), pp. 1~6.

O'Rourke, T.D., (1981),"Ground Movements Caused by Braced Excavation," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 107, No. 6, pp. 1159~1178.

Ou, C. Y., Liao, J. T., and Lin, H. D., (1998),"Performance of Diaphragm Wall Constructed Using Top-Down Method," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 798~808.

LIN, H.D., AND WANG, C.C., (1995),"Creep Effect on Deformation of Deep Excavation," *Proceeding 10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Beijing, Vol. 1, pp. 321~324.

SINGH, A., AND MITCHELL, J. K., (1968),"General Stress-Strain-Time Function for Soils," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 94, No. SM1, pp. 21~46.

SEMPLE, R.M., (1973), *The Effect of Time-Dependent Properties of Altered Rock on the Tunnel Support Requirement*, Ph.D. Dissertation, University of Illinois.

MESRI, G., FEBRES-COVDERO, E., SHIELDS, D.R., AND CASTRO, A., (1981), "Shear Stress-Strain-Time Behavior of Clays," *Geotechnique*, Vol. 31, No. 4, pp. 537~552.

LIN, H. D., AND WANG, C. C., (1998), "Stress-Strain-Time Function of Clay," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 4, pp. 289~296.

BORJA, R.I. AND KAVAZANJIAN, E., JR., (1985), "A Constitutive Model for the Stress-strain-time Behavior of 'Wet' Clays," *Geotechnique* , Vol. 35, No. 3, pp. 283~298.

HSIEH, H.S., KAVAZANJIAN, E., AND BORJA, R.I., (1990),"Double-Yield-Surface Cam Clay Plasticity Model. I: Theory," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 9, pp. 1381~1401.

PERZYNA, P., (1966), "Fundamental Problems in Viscoplasticity," In: *Recent Advances in Applied Mechanics*, Academic Press, N.Y., pp. 243~377.

ADACHI, T., AND OKA, F., (1982), "Constitutive Equations for Normally Consolidated Clay Based on Elasto-Viscoplasticity," *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 4, pp. 57~70.

DESAI, C. S., AND ZHANG, D., (1987), "Viscoplastic Model for Geologic Materials with Generalized Flow Rule," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 11, pp. 603~620.

KUTTER, B. L. AND SATHIALINGAM, N. , (1992), "Elastic-viscoplastic Modeling of the Rate–dependent Behavior of Clays," *Geotechnique*, Vol. 42, No. 3, pp. 427~441.

ADACHI, T., OKA, F., AND ZHANG, F., (1998), "An Elasto-Viscoplastic Constitutive Model with Strain Softening," *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 2, pp. 27~35.

PESTANA, J.M., AND WHITTLE, A.J., (1998), "Time Effects in the Compression of Sands," *Geotechnique*, Vol. 48, No. 5, pp. 695~701.

大地工程科技的永續發展

潘國樑

一、引言

廣義而言，凡是在地殼內淺處與地表面從事有關土壤、岩石或水的調查研究、規劃設計、施工維護等相關的工程都可稱為大地工程。其所牽涉的專業領域包括工程地質、環境地質、水文地質、土壤力學、岩石力學、基礎工程、邊坡工程、地震工程、環境地工、防災工程、地質改良、地工材料等等，不一而足。

人類社會總是要不斷地發展，這就要保證資源、能源與環境的持續利用；而大地工程科技係服務於土地資源、水資源、甚至海洋資源的永續利用，以及環境的維護。因此，要達成資源永續利用的目標及維護生存環境的承續，就要有永續發展的大地工程科技。

為了適應21世紀國家社會永續發展的需要，我們既不能走上工業化國家“高消耗資源、高消費水平”的老路，也不應重蹈工業化國家“先污染後整治”的覆轍，祇能選擇「節省資源、適度消費、注重內涵開發、實施總量管制，資源再利用、大力保護環境、實施生態建設」的方針，這是國家是否能夠走向永續發展的關鍵。在這種永續發展的前提下，大地工程科技的研發勢必會寬廣許多，思潮也會自由湧現。

二、永續發展的意涵

從1960年代末期開始，人類對於地球環境問題給予普遍的關注，但多數人認為環境與經濟發展是互相對立的，即認為如果想要發展就必須降低環境的品質。直至1972年6月聯合國在瑞典首都斯德哥爾摩舉行第一次人類環境大會，通過了「人類環境宣言」等文件，確定6月5日為「世界環境日」。從此世界才開始對環境與經濟發展相協調的模式進行深入的探索。1984年以挪威首相布倫德蘭夫人為首的世界環境與發展委員會開始系統地研究人類面臨的重大經濟、社會和環境問題，並於1987年提出了一系列政策目標及行動建議，後經聯合國大會辯論通過，成為關於人類未來發展的重要文獻—我們共同的未來。它係以永續發展為基本綱領，且以保護及發展環境資源，滿足當代及後代的需要為出發點。因此，永續發展的思想與總原則才被世界各國及社會各界所廣泛接受。

1992年6月聯合國在巴西里約熱內盧又召開了一次有各國首腦參與的環境與發展大會，在會上通過了「里約環境與發展宣言」及「21世紀議程」等重要文件，充份體現了當代人類社會永續發展的新思想。大地工程科技的發展必須遵循世界的潮流，方有可能立足於21世紀，並且發揚光大。

布氏提出的永續發展定義是「滿足當代人的需求，又不損害子孫後代滿足其需求能力的發展」。此一概念就其社會觀而言係主張公平分配，以滿足當代和後代全體人類的基本需求；就其經濟觀而

言，主張建立在保護地球環境的基礎上使經濟持續增長；而就其自然觀而言，則是主張人類要與自然和諧相處。這些新觀念是對傳統發展模式的挑戰，是為謀求新的發展模式與消費模式而建立的新的發展觀，正好給大地工程科技提供一個新的思維空間。

三、永續發展的策略

為了達成永續發展的目標，人類需採取四個基本策略，稱為四R策略，係取四個英文字母的首字，分別是Reduce Demand、Replace、Reuse及Recycle。

3.1 採取適度的消費水準並減少需求

人的慾望是無止境的，貪圖享受是人類的通性。但對於資源貧乏的國家，享受只能達到適度的水平即可，超過了則國家必窮。例如日本是一個資源非常貧乏的國家，所以他們的鐵、公路之寬度比美國的要窄，他們的房子及旅館房間也普遍的比美國的房間小很多；又東京市的高樓目前最高的也只蓋到60層而已。因此，一個國家為了能夠永續發展，不但要控制人口成長，而且最重要的是要提倡與本國資源條件相適應的消費水準與工程規範標準。

再舉一個與大地工程相關的居住與活動空間來說，政府為了國家的永續發展，應調查居民住宅平衡值。該值能反應居民住宅的面積(包括基地面積與住宅面積)與價值(包括原價值與淨值)總量、城鄉分佈、山坡地與平地分佈及發展變化關係的平衡。居民住宅平衡值是國家制訂住宅政策必不可少的消費資料。它的面積大小、造價高低、環境優劣、大地工程安危、交通與公共設施的方便性、廢棄物處置的良劣等都直接影響到居民物質及精神生活的水準，也影響到人們的身心健康。

減少需求的策略尚可引申到減少工期、減少能源、減少材料、減少人力、減少廢物量及提高生產力等。例如設立經驗銀行(experience bank)將可達到某種程度的省力及省工(請見表一)。

3.2 利用替代法

自然資源的空間分佈極不均勻，並有顯著的區域特性。不同區域的資源組合與匹配都不一樣。因此，因地制宜是自然資源利用的一個基本原則。為了節約能源及提高資源利用率，採用替代資源是一種很有效的方法。例如在先進國家，山坡地住宅是高收入家庭居住的地方；在台灣的情況則正好相反。一般而言，我們的山坡地住宅反而價格較低。而在先進國家，山坡地的開發密度很低，取其幽靜隱密的優點，然而我們不但是集群建築，而且越建越高，無視於山坡地的地工特性及安全顧慮，所以山坡地資源被濫用、濫墾、環境品質日見惡化，生態體系被破壞，災害頻頻發生。由於觀念上的差異，使得我們對山坡地的開發面臨了很大的壓力。因此，為了避免山坡地的過度開發及減少山坡地的災害，並朝向山坡地永續利用的目的，可考慮一些替代空間，以減緩山坡地的開發需求。這些替代土地包括：低價值農地、地盤下陷區、海埔新生地、人工島、地下空間等。

替代方法尚包括工址或路線的替代方案、規劃設計建造的替代方法、施工的替代程序、省能省材省工的替代零組

件等等。也就是採用耗能少、耗料少、耗工少、安全夠的替代方法或新技術。我們應該由過去的資源型發展模式轉變為技術型發展模式。

3.3 推行資源或廢棄物的再利用

資源或廢棄物的循環利用是資源節約及資源永續利用的最佳方法之一。例如一張白紙影印之後加以回收，並利用其反面作第二次利用，這樣稱為再利用(Reuse)；待兩面都用完之後加以回收，並變回紙漿再造成紙張，這樣稱為再生利用(Recycle)。

因此，從廣義來看，一棟房子可以換過很多主人，或者老舊之後，可以再修及再利用，這樣歷經幾十年，甚至上百年，一直到不值得再修為止，那麼這棟房子的生命週期(Life Cycle)就是一百年。房子拆掉後在原地再蓋新房子，那麼這塊基地就是再利用。大地工程體的生命週期一般而言是永久的，例如一條公路的邊坡穩定工程，其生命週期不能祇有幾十年，因為牽涉到整條公路的永續利用問題；它的生命週期一定要與這條公路一樣長，甚至更久。

建築物拆除後，其地基及連續壁能否再利用，或能否在原基礎上將建築物再加高等等，都是大地工程體能否再利用的例子。

3.4 實施廢棄物的再生利用

例如前述，一棟房子老舊後再在舊房地上將地基改進後另起更高的房子，這就是土地資源的再生利用。都市更新即是一種典型的土地再生利用之例子。這樣就可減少對新土地的無限需求，不至於把好的土地在當代就用完，祇留下壞的土地給後代子孫。舊房子被拆除後，產生了許多舊鋼筋混凝土，這些廢料也應該加以回收，其中鋼筋的部份可以重熔再生鋼筋，而混凝土的部份則可以充做骨材使用，反而變成很有價值的再生資源。

營建廢棄土常苦於無處可棄，如果從永續發展的觀點來看，應將廢棄土視為一種再生資源，有些可回收加工作為骨材利用，有些則可用於造地(如填海造陸、海埔地或廢棄魚塭、低窪地、地層下陷區)之重整、造景或造堤(如路堤)等，以減少對棄土場的需求，充分利用再生土方資源。

四、大地工程科技與永續發展

永續發展的概念給大地工程科技增添另外一個思維的主軸，可以讓我們跳出舊有的思考框架。

大地工程與太空科技或電子、通訊等高科技有很大的不同。大地工程或整個營建工程的技術演化比較靜態，新技術的生命週期非常長，它的材料、方量、設備等都是大體積的，或者標準化或模組化的，不但可以減少設計時間，而且可以適應各種不同的環境。其設計與規格都是基於降低成本的考量；其組裝及樹立要求簡易迅速，而且不需要太高級的或訓練有素的工人。更有進者，大地工程的設計方法與使用材料，非常具有地方色彩，其原因不但是受到地質條件的制約，而且還與地方的氣候、風俗習慣及資源的種類等條件有關。因此大地工程科技永續發展的研發必須認清上述特質，同時必須承認新技術的產生對該行業一定要有相當的附加價值才有可能被採用的事實。

現以永續發展的4R策略為骨架，分成地工設計、地工施工及地工材料等三大項目而試擬地工科技在21世紀的前瞻性課題如下。

表一　21世紀大地工程科技的發展新課題

地工項目	4R　策　略			
	減少需求	替代方法	資源再利用	資源再生
地工設計	•設立經驗銀行 •國際間資料共享格式之標準化 •更聰明的電腦專家系統 •開發三維空間模擬及展示軟體 •引進遙測技術	•曲孔與水平孔之鑽探技術 •地球物理探勘新技術 •地下水探測技術 •隧道前探技術 •水下探測技術 •地下空間技術(含儲油窖、地下電廠、核廢料處置庫等)	•採取因地制宜、因土制宜、因時制宜及因需制宜的土地永續利用策略 •基礎再利用技術 •土壤污染防治 •地下水污染防治(地下水圍封技術)	•開發地質改良新技術 •發展防災技術 •擋土設施維護技術 •擋土牆更新技術 •岩錨／地錨更新技術
地工施工	•營建自動化 •營建程序的電腦模擬 •減少廢料的產生	•鼓勵施工技術與施工機具的創新 •採用高性能材料 •發展降低風險的技術 •地下空間技術 •從其他產業轉移技術 •研發減少環境衝擊的工法 •研發減少廢料的工法	•基礎再利用之施工技術 •土壤污染防治 •地下水污染防治(地下水圍封技術)	•骨材再生 •廢土再生 •擋土設施維護更新之施工技術 •污染物在原地清除、破解或封閉的工法
地工材料	•開發容易施工的材料 •減少初級材料的使用量 •儘可能利用當地材料	•開發耐用、耐酸鹼、耐凍漲的材料 •開發高強度材料 •開發災害預警期較長的材料 •開發環保及景觀相容的材料 •開發輕質路堤材料 •開採陸上砂石 •開採海下砂石	•用過材料再利用	•骨材再生 •廢土再生 •發展防災技術

五、結語

大地工程科技除了本身要永續發展之外，它也是促進地球資源永續發展的重要助手之一。大地工程科技對推動土地資源的永續利用尤為重要。土地資源的特點為提供人類生產及生活的必需品，但在一定的生產及利用條件下，其總量是有限的。由於每種土地資源具有各自不同的自然與社會經濟屬性，亦即具有較強的空間地域差異，所以分別適宜於不同的利用方式，且適宜程度亦不同。又土地資源的自然、社會、經濟屬性隨著自然環境的變遷及社會經濟的發展而變化。因此，土地利用的基本原則是因地制宜、供需平衡及因時而異，故土地資源的永續利用在地球資源永續利用的系統中顯得特別重要；連帶的也使得大地工程科技的永續發展居於關鍵性的地位。

永續發展研究是一項全球性的課題，也是人類無法迴避的永恆主題。在本世紀祇見資源日顯短缺、環境污染日趨嚴重、生態環境日見惡化，再加上人口爆炸性的增長等，這些尖銳的問題已經擺在世人的面前；故如何協調好人與地的關係，處理好人與自然的關係已是刻不容緩的事了。21世紀的來臨已進入倒數計時的階段，世人已警覺到唯有資源開發與環境保護維持著平衡的關係，人類才有可能永續發展；而大地工程科技在維護這種平衡的關係上是扮演著舉足輕重的角色的，我們的核心問題是在不侵佔掠奪後代子孫需要的前題下，尋求能夠滿足我們當代人需要的發展途徑，這也就是大地工程科技與人類永續發展密切關聯之所在。