

十字片剪力試驗

(Vane Shear Test)

鍾毓東*

現場十字片剪儀早於1928年左右即同時於德國及瑞典發展，惟於1950年Calding及Odenstad發表了理論與實際試驗結果後，才廣受採用。此一試驗的基本程序是將十字翼片貫入欲量測之粘土層中，並於地面以機械裝置轉動銜接十字翼片之剛性連接桿，使產生之扭矩傳遞至十字翼片，因而剪動土壤，直至土壤發生剪動破壞為止。目前，CNS 尚未制定現場十字片剪試驗之標準程序，但可參考ASTM D2573之規定。

應用十字片剪試驗可推求粘土之不排水剪力強度及靈敏度，並間接推求粘土之不排水彈性模數。不排水剪力強度可根據試驗時，施加之扭矩及十字翼片之尺寸推求之，但應用時須注意十字片剪試驗係模擬土壤特定破壞模式，與實際之土壤破壞情況不盡相符。Bjerrum (1973)即曾就幾則土堤及開挖邊坡破壞例所得之現場土壤強度和十字片剪試驗所得強度比較分析後，提出下列關係式：

$$(S_u)_{\text{現場}} = \mu \times (S_u)_{\text{十字片剪}}$$

其中 μ 值與土壤之塑性指數有關，對於塑性指數大於20之粘土， μ 值小於1。因此，應用十字片剪試驗時，應予修正，以免高估粘土之不排水剪力強度。

試驗時，若將翼片快速旋轉十圈，所得之強度即為粘土之殘餘強度。但是，一般工程習慣上，均將此種強度視為重模強度，並藉以推求靈敏度，故而十字片剪試驗所得之靈敏度，較實驗室所得略高。

有關十字片剪試驗，可參考下述文獻：

(1) 陳麗秋，陳敏雄（民國78年）“現場十字片剪試驗應用之研究”，第三屆大地工程學術研究討論會，墾丁，1989。

BJERRUM, L. (1973), "Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays", *SOA Report, 8th ICSMFE, Vol. 3*, Moscow, 1973.

CADLING, L. and ODENSTAD, S. (1950), "The Vane Borer: An Apparatus for Determining the Shear Strength of Clay Soils Directly in the Ground", *SGL, Stockholes, Proc. 2*, 1950.

土壤彈性模數 (Young's Modulus Of Elasticity)

楊麗文*

土壤之應力一應變特性為分析土壤荷重一變形關係之基本條件；雖然土壤並不是完全彈性材料，但因目前有關之分析方法，主要均引用彈性力學之觀念，故實用上，仍將土壤之軸向應力與應變之比值，定義為土壤之彈性模數，如圖一所示，以供應用。最常用以瞭解土壤之應力一應變性質的試驗，為三軸壓縮試驗，其應力路徑(stress path) 如圖二所示，水平段為加圍壓壓密階段，傾斜段為加軸壓階段。

就室內試驗而言，影響土壤彈性模數的主要因素，有下列各項 (Bowles, 1982)：

(1) 求取應力一應變曲線的試驗方法 — 無圍壓或有圍壓，壓縮或伸張，排水或不排水，壓密或不壓密，三軸或非三軸試驗等。

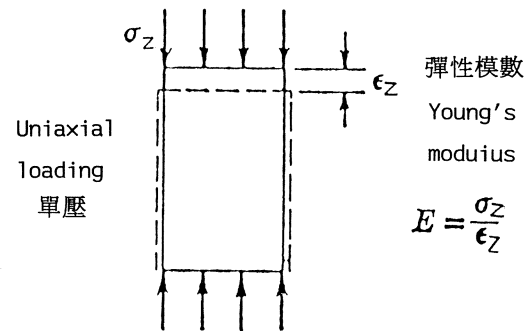
(2) 圍壓大小 — 當圍壓增加時，E 值呈非線性增加。

(3) 過壓密比 OCR。

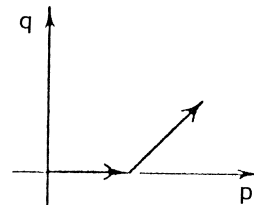
(4) 土壤密度 — 顆粒緊密則 E 值增加。

(5) 土壤含水量 — 低含水量時，得到較高 E 值。

(6) 應變速率 — 低應變速率時，



圖一 土壤彈性模數定義示意圖 (引自 Lambe & Whitman(1969))



圖二 土壤三軸試驗之應力路徑

模數值可能低 2 倍以上。

(7) 應力路徑 — 同一應力狀態但不同之應力路徑求得之 E 值不同。

(8) 應力或應變狀態 — 低應力或應變狀態之 E 值較高，反覆載重狀態之 E 值則比主載重階段高。

(9) 土樣擾動。

求取土壤彈性模數的方法，除上述第(1)項提到之室內試驗外，尚有一些

現場試驗結果可用以推求 E 值，如平鉞膨脹儀試驗、孔內側向載重試驗及平鉞載重試驗等。此外，亦可應用現場標準貫入試驗或圓錐貫入試驗，以經驗公式間接推求。但各種方法皆有其適用範圍，如應運用於砂性土或粘性土？排水或不排水狀況？應力和應變範圍大小？是切線模數或正割模數？等等。在進行土壤之荷重—變形分析時，應配合分析狀況，慎加選用。表一提供—些土壤的彈性模數範圍，供做一般性的參考。

表一 土壤彈性模數代表值之範圍（現場值隨應力歷史，含水量、密度等改變），引自 Bowles (1982)

土 壤	彈性模數 E, kg/cm ²
粘土	
非常軟弱	20— 150
軟弱	50— 250
中等堅實	150— 500
堅硬	500—1,000
砂質	250—2,500
黃土	140— 570
砂土	
粉質	70— 210
疏鬆	100— 240
緊密	480— 810
砂和礫石	
疏鬆	480—1,440
緊密	960—1,920
頁岩	1,440—144,400
粉土	20— 200

參考文獻

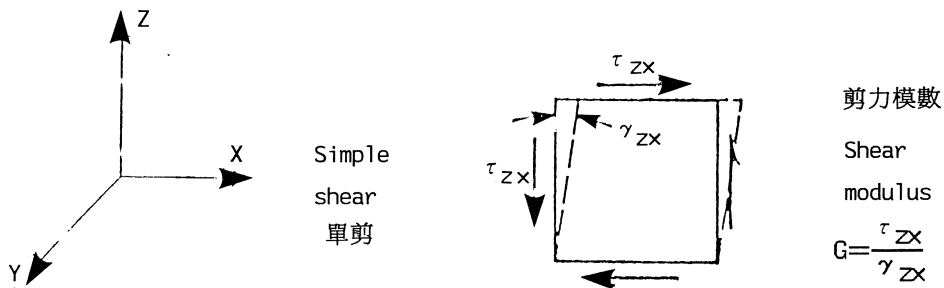
- BOWLES, J.E. (1982), "Foundation Analysis and Design", Ch. 2, McGraw-Hill Inc.
- LAMBE, T.W., and WHITMAN, R.V. (1979), "Soil Mechanics", 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.

土壤剪力模數 (Shear Modulus), G

楊麗文*

土壤剪力模數定義為剪應力和剪應變之比值，如圖一所示。土壤剪力模數 G ，和其彈性模數 E 及柏松比 μ 相關，可由已知的 E 和 μ 值計算而得，即 $G = E/2(1 + \mu)$ 。故其影響因素類似於土壤彈性模數。

至於動態分析所需之 G 值，則請參考土壤動態剪力模數之名詞解釋。



圖一 土壤剪力模數定義示意圖 (引自Lambe & Whitman(1969))

土壤動態剪力模數 (Dynamic Shear Modulus), G

楊麗文*

動態剪力模數是當土壤承受動態荷重時之剪力模數（見土壤剪力模數名詞解釋），圖一為土壤承受反覆動力荷重之剪應力—應變曲線，由圖中可知動態剪力模數隨著剪應變增大而減小。

工程設計上常遭遇的振動問題包括地震時的結構反應，振動機器基礎之自體振動，以及精密儀器，生產線受外來振動影響等，均須應用土壤的動態剪力模數，分析結構—土體之互制行為。

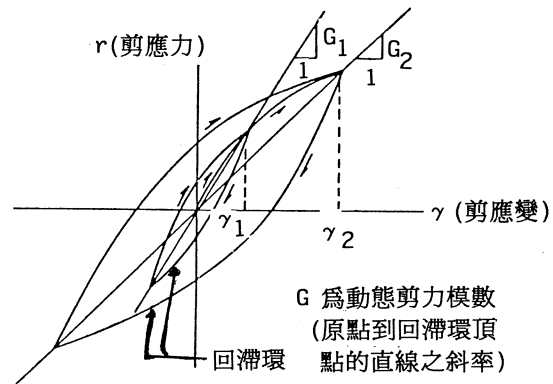
影響土壤動態剪力模數之因素計有：

：

- (1) 動態剪應變的振幅——剪應變振幅大時，動態 G 值低。
- (2) 平均有效應力和應力作用時間的長短
- (3) 空隙比
- (4) 土壤顆粒特性和結構
- (5) 應力歷史
- (6) 振動頻率
- (7) 飽和度
- (8) 溫度

其中前五項直接或間接和獲得動態剪力模數的程序有關，而後三項則為較次要的因素 (Richart, 1975)。

常用以求取動態剪力模數的室內試驗和現地試驗種類，及其適用之剪應變



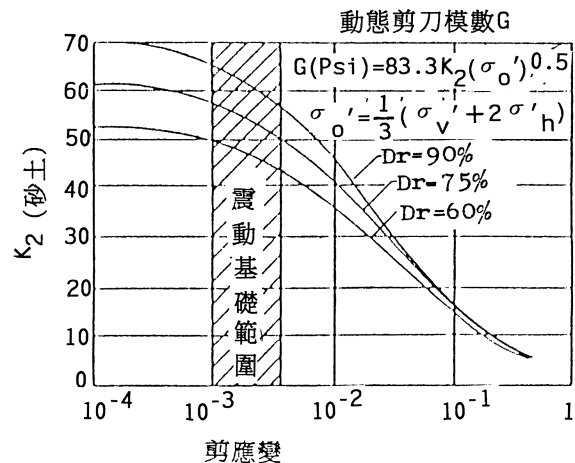
圖一 土壤承受反覆動力荷重之剪應力—應變曲線

範圍如圖二所示。除了由圖二列出之試驗方法直接求取 G 值外，亦有一些半經驗式可供求 G 值，如 Hardin 和 Richart (1963) 建立之砂性土之 G 值和空隙比 e 及平均有效應力 σ'_0 的相關式，Seed 和 Idriss (1970) 建立之砂性土 G 值和剪應變及相對密度 D_r 的相關式，及粘性土中動態剪力模數和不排水剪力強度比值 (G/S_u) 隨應變之變化等；目前有些現場試驗結果也和最大剪應變模數 G_{max} (剪應變極小時，剪力模數極大) 建立了相關式，如圓錐貫入試驗和平鈸膨脹儀試驗等 [Lunne et al. (1989), Hryciw (1990)]。

剪應變振幅(%)		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	
室內試驗測定	共振柱試驗(實心試體)	-----						
	共振柱試驗(中空試體)	-----						
	扭轉剪力試驗(中空試體)	-----						
	反覆動力三軸試驗				-----			
	反覆單剪力試驗				-----			
	震動台剪力試驗				-----			
現地震測測定	折射震測	-----						
	跨孔震測	-----						
	單孔(上孔)震測	-----						
	單孔(下孔)震測	-----						
震動動力形態		機械基礎震動		地震弱震震動	地震強震震動	核爆震動		
力學特性		彈性		彈塑性	失敗			

圖二 現地與試驗室測定土壤動力性質之剪應變振幅範圍。
(引用自吳偉特(1984))

圖三是Seed和Idriss(1970)建立的相關式，圖中可知動態剪力模數 G值隨應變增加而減小，在剪應變10⁻³% 和10⁻¹%時，G 值可相差三倍以上，因此在進行動力分析時，應依據動力形態推估可能之土壤剪應變，而選擇適當的動態剪力模數值，必要時得作反覆計算，使預估剪應變和計算所得一致為止。表一是Arya et al.(1979) 提供的一些土壤動態剪力模數代表範圍，此表僅可以做為觀念上的認知，現地動態剪力模數仍應藉試驗測定。



* 如果是礫石，乘以1.5-20
Dr = 相對密度

圖三 砂性土k₂值和剪應變與相對密度之關係 (引自Seed & Idriss (1970))

表一 動態剪力模數代表值

〔引自(Arya et al.(1979))〕

土壤種類	動態剪力模數(kg/cm ²)
軟弱粘土	210— 350
堅實粘土	700—1,400
非常堅實至堅硬粘土	≥1,400
中等緊密砂*	350—1,000
緊密砂*	700—1,400
中等緊密礫石*	1,000—1,750
緊密礫石*	1,400—2,800
* 適用於淺基礎	

參考文獻

吳偉特 (民國73年), “目前台灣地區土壤動力性質之探勘與應用”, 1984年近代工程技術討論會, 台北。

ARYA, S.C., O'NEIL, M.W. & PINCUS, G. (1979)
“Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines”, *Gulf Publishing Company, Houston, Texas.*

HARDIN, B.O., & RICHART, F.E. Jr. (1963), “Elastic Wave Velocities in Granular Soils”, *ASCE, JSMFD*, Vol. 89, SM 1.

HRYCIW, R.D. (1990), “Small Strain Shear Modulus of Soil by Marchetti Dilatometer”, to be published.

LUNNE, T. et al. (1989), “SPT, CPT, Pressure Testing and Recent Development on In Situ Testing”, *12th ICSMFE, Session 2, General Report.*

RICHART, F.E. Jr. (1975), “Some Effects of Dynamic Soil Properties on Soil-Structure Interaction”, *ASCE, JGED, Vol. 101, GT12.*

SEED, H.B. & IDRISS, I.M. (1970), “Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis”, *Report No. 70-1, E.E.R.C. Berkeley, California.*