

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 顆粒材料組構與應力狀態之率定技術及微結構穩定分析法 **The Calibration Technique of Fabric and/or Stress State and the Microstructural-stability Analysis for granular materials**

計畫編號：NSC 88-2611-E-009-006

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：潘以文 國立交通大學土木工程系

### 一、中文摘要

顆粒材料微觀力學研究中，微結構連體分析法為重要且迅速發展之工具。微結構連體分析法界於傳統連體分析法與不連續數值分析法間，具有分析量小且能均質化考量顆粒材料微觀特性之優點。然而於實際工程應用上仍有理論及實務上之困難：(1)目前顆粒材料微結構連體分析組合律模式仍多假設材料為理想圓球狀單一尺寸顆粒集合體，對於天然沉積顆粒材料(如礫石、非均勻砂等)而言，此一簡化並不合理；(2)在實際工程應用方面，決定現地顆粒材料之組構參數與應力狀態非常不容易。本計劃首先擬利用先前之研究成果為基礎，以一個小應變微觀力學模式配合異向性波傳理論與逆推方法，用於逆推材料之微結構參數與應力狀態。在逆推方法上，將分別以(1)數值處理及(2)基因演算兩種方法推求『最小平方差之非線性最佳化問題』之最佳解為手段，以率定顆粒材料微結構參數與應力狀態，並比較此兩種逆推方法於此一類率定參數之問題之優劣。除此之外，本計劃將以小應變微觀力學模式為基礎，建立應力應變之彈性矩陣，並結合有限元素法或/與有限差分法以進行邊界值問題之彈性應力分析，再由區域範圍內任一點之應力狀態可推求區域接觸力，進而可評估微結構穩定性，此種計算程序的結果可視為一問題之下限解，但潛在卻遠較一般之非線性分析(如彈塑性有限元素分析方法)等之計算有效率並極經濟，於微觀力學在實際之工程應用極具價值。

關鍵詞：顆粒材料；微結構連體分析法；微觀力學；組構；應力狀態

### Abstract

The microstructure continuum approach requires much less computation to derive an averaged constitutive relationship for an assembly of particulate system. Nevertheless, there are still some limitation on applying this approach to engineering problems. Among others, most micromechanics models idealize granular materials as mono-size and spherical particulate assembly. This idealization, from time to time, is not even close to the conditions of a naturally deposited granular material. The initial fabric and stress state of a material are also very difficult to determine. This project will investigate the calibration of the initial fabric and stress state of a granular material by employing a micromechanics constitutive model, an anisotropic wave propagation theory, and optimization techniques. Both numerical approach and genetic algorithm will be attempted to obtain the optimized solution for the inverse problem of parameter calibration. Besides the calibration, a numerical procedure combining micromechanics will be attempted to analyze the microstructural stability of a domain made of granular material. This method is potentially useful for applying the micromechanics to geotechnical engineering practice.

**Keywords:** granular material; microstructure continuum approach; micromechanics; fabric; stress state

## 二、緣由與目的

顆粒材料(**granular materials**)其力學行為主要乃受不連續之顆粒間相對滾動、滑動、分離以及顆粒本身之彈性或非彈性變形所控制，因此顆粒材料之微結構(**microstructure**)及顆粒間互制作用對材料之力學及工程行為之影響相當值得加以探討。顆粒材料微結構連體分析法(**M.C.M.**; **Microstructural continuum method**)介於傳統連體分析法與不連續數值分析法間，具有分析量小且能均質化考量顆粒材料微觀特性之優點。目前此一分析概念近年來急速發展，並逐漸發展成為具有大地材料工程行為研究工具之一[1]，微觀組合律模式為微結構連體分析法中最重要之一環，因顆粒集合體(**granular assemblies**)之微觀特性可合理反應於微觀組合律模式中[2]，故顆粒材料微觀組合律模式能掌握顆粒材料之變形機制[3]。

然而微結構連體分析法於實際工程應用上仍有理論及實務上之限制[4]，諸如顆粒材料微觀組構之過度簡化以及微觀狀態參數之率定困難。目前顆粒材料微觀組合律模式仍多假設材料為理想圓球狀單一尺寸顆粒集合體，對於天然沉積顆粒材料(如礫石與非均勻砂)而言，此一簡化並不合理。先前研究[5]即試圖克服此一困難，基於既存之微觀力學理論，以統計觀點加以擴充成為隱性考慮顆粒材料形狀與級配效應之小應變組合律模式，同時透過接觸力估計(利用 **generalized static hypothesis**)以及為接觸力函數之接觸勁度(利用 **Hertz-Mindlin contact theory**)，得以將顆粒材料之先天異向性以及應力狀態引致異向性分離考慮，因而推導而得之彈性勁度張量即為微觀狀態參數之函數。

除此之外，顆粒材料微觀狀態參數之評估與率定方法之建立為實際工程應用之要務。先前之研究[6]曾發展一套顆粒材料現地微觀初始狀態之分析程序，應用(1)顆粒材料微觀模式；(2)彈性波傳理論；以及(3)最佳化參數率定法為工具，配合發展完備且已廣汎應用之彈性波量測技術，以間

接評估顆粒材料微觀參數。因此一顆粒材料現地微觀初始狀態分析法之提出，將可望大幅提昇顆粒材料微觀力學之工程應用價值。另外若顆粒材料室內力學試驗能配合進行彈性波速量測，則藉由此一微觀參數率定技術，即可應用於研究顆粒材料微結構更新法則，以進一步對於顆粒材料之巨觀力學行為機制有所解讀。過去國外有部份學者曾利用大型標度槽進行於不同應力狀態下之波傳速度研究[7]，然對於材料微觀狀態之探討卻付之闕如。本研究利用國立交通大學土木系之大型標度槽(**calibration chamber**)，進行精密控制邊界條件之大型三軸試驗，並利用預先佈置於標度槽內之波源產生探頭及接受探頭量測不同方向上之壓力及剪力波[8]，並利用先前研究所建立之微觀參數率定法[6]以探討砂土材料之受力變形微觀狀態之變化。然而先前研究之微觀參數率定，以非線性最佳化數值計算(**IMSL 程式庫**)為逆解手段，若同時率定幾何組構參數及應力狀態，有時並無法確保參數率定結果之唯一性，本研究分別嘗試利用數值方法(本計畫採 **Levenberg-Marquardt 法**)與基因演算方法(**Genetic Algorithm**, 以下簡寫 **GA**)於解決「最小平方差之非線性最佳化」(**nonlinear optimization of least square**)問題，比較兩種方法所得之率定結果，尋求改進率定參數之道。

本計劃除了進行上述之基礎研究外，亦利用先前研究所建立之小應變組合律模式，結合有限元素法或/與有限差分法，以進行邊界值問題之彈性應力分析，再由分析區內某一點之應力狀態推求其接觸力，最後基於微觀屈服準則評估工程穩定性，並與傳統彈塑性有限元素分析結果比較，藉以彰顯微結構連體分析法於工程穩定分析之應用價值。

## 三、結果與討論

本研究計畫由已建立之非圓球形、非均勻(單一粒徑)顆粒集合體之微觀小變形組合律為基礎，配合已研發之顆粒材料微觀組構率定分析法，進行大型標度槽中砂土

試體初始微觀組構率定以及試體受力變形後之微觀狀態參數改變特性研究，研究目的在於瞭解砂土顆粒震落後之微觀幾何組構及應力系統變化造成微觀狀態(包括幾何與應力組構)之異向性。以下分三部分討論本研究計畫結果。

#### (A) 組構與應力狀態之率定：

本研究利用大型標度槽進行控制邊界條件( $K_0$  狀態)之大型三軸試驗，並利用預先佈置於標度槽內之波源產生器及接受器(波源產生器與接受器均為 geophone)量測不同方向上之壓力及剪力波。垂直方向之應力路徑如圖一所示，不同應力狀態下之 P 波波速分佈如圖二所示，不同應力狀態下之波速分佈如表一所示，不同應力狀態下之  $K_0$  值如表二所示。茲將試驗結果敘述如下：

##### 1. 組構之率定

將加壓階段垂直應力為 25kPa 及 50kPa 波速量測值作最佳化分析，以求得初始微觀組構  $D_{33}$  及剪力模數  $G_s$ 。其中假設剪力模數  $G_s$  為應力狀態之函數

$$G_s = a_1 \cdot \sigma_m^{a_2}$$

$\sigma_m$  為平均應力。率定的結果為  $D_{33} = 0.07839$ ， $a_1 = 65937.5$ ， $a_2 = -0.00031$ 。將率定的結果視為常數代入下一個階段(即應力狀態)之率定。

##### 2. 應力狀態之率定

加壓階段  $\sigma_v = 100\text{kPa}$  的狀態下，率定出的  $K_0 = 0.465$ ，實際量測值為 0.438；而解壓階段  $\sigma_v = 50\text{kPa}$  的狀態下，率定出的  $K_0 = 0.52$ ，實際量測值為 0.476。顯示在這兩種  $K_0$  情形下，率定出之應力狀態大略接近量測值。為利用此一原理來率定應力狀態之可能性提出正面之佐證。唯其廣泛適用與否仍需要更多之後續實驗數據來驗證。

#### (B) 最佳化分析法

關於微觀狀態參數率定之逆分析問題，本研究分別利用 Levenberg-Marquardt 數值方法與 GA 法做為解決「最小平方差之非線性最佳化」問題之手段，茲將此二種方法之優缺點略述如下：

##### 1. 非線性最佳化的數值方法

非線性最佳化數值方法配合 IMSL 程式庫中之程式，可求得目標函數的最佳解。其優點為可解得較精確的最佳解；但若所佈設的起始猜測值網格不夠密，則可能會遺漏全域的最佳解，而只求得局部的最佳解，此為其缺點。

##### 2. 基因演算

基因演算為人工智慧之一種[9]。過去已有人嘗試將基因演算用於大地工程相關問題之逆問題求解[10-11]。最佳解的精確度由基因演化的代數及待解參數在其猜測範圍所分割的密緻度來決定。當待解參數在其猜測範圍分割的不夠緻密，則基因演化的代數再多也不能夠提高其精確度，但卻能以較少的演化代數得到接近全域的最佳解。當最佳化的待解參數越多時，則越能顯現基因演算在最佳化上的威力。

比較數值方法與 GA 兩種方法所得之率定結果(如圖三所示)。由圖可看出數值方法有時會遺漏全域的最佳解，而基因演算所求得之最佳解精確度較差；若能以基因演算法逼近全域之最佳解，以此近似之最佳解當起始猜測值帶入數值方法中求得全域之最佳解，則可能同時兼顧效率與精確度。

#### (C) 微結構穩定之數值分析法

基於廣義靜力假說可計算得異向性顆粒材料微觀接觸力張量，若透過合理之微觀屈服準則，即可利用微結構連體分析法之概念進行顆粒材料之工程穩定性微觀評估。本計畫利用已建立之小應變組合律模式，結合有限元素法或/與有限差分法之套裝軟體，進行邊界值問題之彈性應力分析，再由分析區內某一點之應力狀態推求其接觸力，基於微觀屈服準則評估工程穩

定性，最後並與傳統彈塑性有限元素分析結果相比較。

上述之觀念以一隧道微觀穩定性評估為例說明之。具有一圓孔(半徑為  $a$ ) 之無限等向彈性空間受邊界力作用(如圖四)，其應力場可透過彈性解(Kirsch's solution)計算，亦即於此彈性介質中任一位置之應力可輕易計算而得。透過式(6)之局部化計算，即可得假設為彈性介質之隧道中任一位置其任一方向上材料顆粒間(可為卵礫石或岩塊)接觸界面之正向及切向力，由以上分析計算結果，若能進一步配合局部屈伏準則之建立，則顆粒支持卵礫石層之微觀穩定性分析即可完成。然若穩定性評估之對象難以由解析解計算得其應力場，則數值分析軟體亦可搭配應用。應用如FLAC之數值分析軟體可輕易計算複雜邊界條件或異向性大地材料之應力場，透過FLAC中FISH之副程式功能，即可連結微觀分析法進行工程穩定性評估。故本分析法深具工程應用價值。

#### 四、計畫成果自評

本研究分別利用數值方法與基因演算法進行天然沉積顆粒材料狀態參數率定逆分析。研究成果之潛在工程應用可能為於決定現地顆粒材料之組構參數與應力狀態。本研究亦利用微結構連體分析概念，配合微觀彈性常數張量與連體力學數值分析工具進行工程微觀穩定性評估，此建議方法將具有實際工程力學行為分析之應用價值，且工程分析效率將遠較一般之非線性工程分析法為高，又可能較合理反映顆粒材料之微觀特性。

參與研究人員由瞭解顆粒材料力學行為之微觀機制，對於國內外繼續蓬勃發展之顆粒材料微結構分析法理論有深入認識。另一方面，經由研究計畫之室內彈性波速量測試驗設計、執行過程，亦培養研究人員解決問題之能力，配合試驗資料分析時所需之數值程式撰寫過程，本研究並大幅提昇研究人員於試驗、理論、程式設計方面之研究能力。

#### 五、參考文獻

- [1] Chang, C.S. (1995). "Recent advances in granular mechanics," *Proc. ICADD-1*, Li, J.C. et al., eds., Chungli, Taiwan, R.O.C., pp.298-310.
- [2] Chang, C.S., Chang, Y. and Kabir, M.G. (1992). "Micromechanics modeling for stress-strain behavior of granular soils I: theory," *Journal of Geotechnical Engineering*, **118**, 1992, pp.1959-1974.
- [3] Chang, C.S., Kabir, M.G. and Chang, Y. (1992). "Micromechanics modeling for stress-strain behavior of granular soils II: evaluation," *Journal of Geotechnical Engineering*, **118**, 1992, pp.1975-1992.
- [4] 董家鈞，接觸性大地材料之微觀力學模式及其應用，國立交通大學土木工程系博士論文，民國八十七年一月。
- [5] Dong J. J. and Pan Y. W. (1997) "Fabric and micromechanics model for a non-spherical granular assembly under small strain," *Int. J. Numer. Anal. Methods in Geomech.*, under review.
- [6] Pan, Y.W. and Dong, J.J. (1997) "A Novel Methodology for Evaluating the Fabric of Granular Material", *J. Geotech. Geoenviron. Engng.*, tentatively accepted.
- [7] Stokoe, K.H., II, Lee, S.H.H and Knox, D.P. (1985). "Shear moduli measurements under true triaxial stresses," *Advances in the Art of Testing Soil under Cyclic Conditions*, ASCE Convention, Detroit, Michigan, pp.166-185.
- [8] Agarwal, T.K. (1992). *Micromechanics of granular materials and its relation to wave velocity*, PhD Dissertation, Old Dominion University.
- [9] Goldberg, D.E. (1989) *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA.
- [10] Pal, S., Wathugala, G.W., & Kundu, S. (1996) "Calibration of a Constitutive Model Using Genetic Algorithms" *Computers and Geotechnics*, Vol.19, pp.325-348.
- [11] Simpson, A.R. and Priest, S.D. (1993) "The Application of Genetic Algorithms to Optimization Problems in Geotechnics" *Computers and Geotechnics*, Vol.15, pp.1-19.

表一 不同應力階段的波速 ( $K_0$ 狀態下)

	加壓階段				解壓階段		
	垂直應力 $\sigma_v$ (MPa)				垂直應力 $\sigma_v$ (MPa)		
	0	25	50	100	50	25	0
$P_v$ (m/s)	223	262	284	299	267	251	201
$P_{4.5}$ (m/s)	188	230	268	290	280	260	165
$P_h$ (m/s)	184	227	252	246	272	202	181
$S_{v,h}$ (m/s)	136	172	188	197	197	168	121
$S_{4.5,h}$ (m/s)	127	161	188	213	193	166	112
$S_{h,h}$ (m/s)	118	149	167	209	174	156	108
$S_{h,v}$ (m/s)	131	168	184	214	186	169	120

※  $S_{v,h}$  第一個下標代表波傳方向，第二個下標代表粒子運動方向

表二 不同應力階段的  $K_0$  值

	加壓階段			解壓階段	
	垂直應力 $\sigma_v$ (MPa)			垂直應力 $\sigma_v$ (MPa)	
	25	50	100	50	25
$K_0$	0.44	0.424	0.438	0.476	0.768

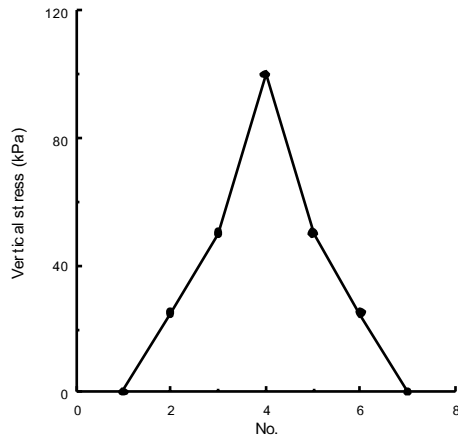
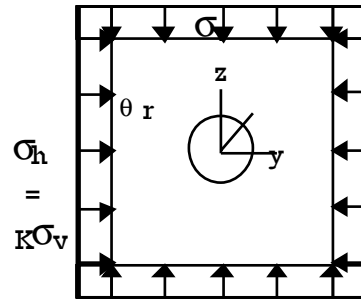
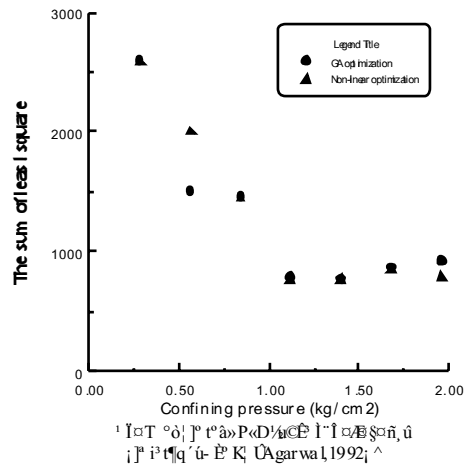


Figure 3 description: A line graph showing vertical stress in kPa on the y-axis (0 to 120) and 'No.' on the x-axis (0 to 8). The data points are connected by a line, showing a triangular distribution peaking at No. 4.



圖四 圓柱形孔洞於軸向彈性空間中，承受邊界作用力

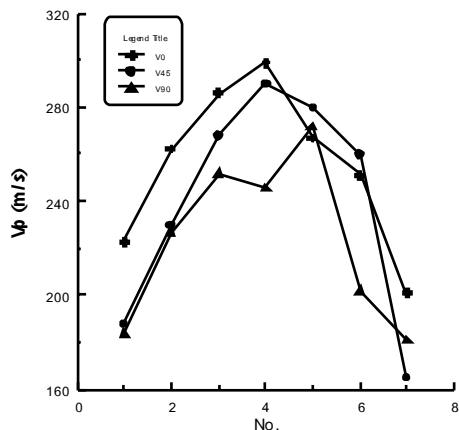


Figure 5 description: A line graph showing Vp in m/s on the y-axis (160 to 320) and 'No.' on the x-axis (0 to 8). Three data series are plotted: V0 (circles), V45 (squares), and V90 (triangles). All series show a peak around No. 4.