

固結粒状材料における2次元個別要素法のパラメータ決定方法の検討

東京都市大学 学生会員○佐藤英美

東京都市大学 正会員 伊藤和也 正会員 末政直晃

(独)労働安全衛生総合研究所 正会員 吉川直孝

1. はじめに

破壊現象のような完全に離散化する不連続体の挙動を再現するためには、解析対象を個別要素の集合で表現できる個別要素法 (Discrete Element Method : 以下「DEM」という。) が適している。ただし、DEM によって破壊現象を忠実に再現するためには、パラメータの決定方法が重要となる。そのため、3次元DEMで用いる主なパラメータを弾性波速度および一軸圧縮強度から決定する方法を検討した研究等が行われている¹⁾。一般的に、3次元DEMは2次元DEMに比べ、より定量的な評価は可能であるが、計算コストが過大である。そこで、2次元DEMと3次元DEMの関係性が明らかとすれば、各種条件を変化させた感度解析を2次元DEMで実施し、主要な解析のみを3次元DEMで実施することで定量的な把握が可能となる。本報告では、既往の研究¹⁾を基に、ベンダー/エクステンダーエレメント試験と一軸圧縮試験の実験値から2次元DEMのパラメータを取得した。それらのパラメータを用いて一軸圧縮試験をシミュレートし、実験結果と比較した。

3. 固結粒状材料のDEMのパラメータを求める方法

DEMはCundall^{2,3)}によって提案され、発展してきた不連続体の運動を解く解析手法である。DEMの基本的原理やパラレルボンド (parallel bond : 以下「ボンド」) の詳細なアルゴリズムについては既往の研究に譲る^{3,4)}。接触モデルには線形モデルを適用した。本報告では、弾性波速度および一軸圧縮強度の実験値を用いた既往の3次元DEMパラメータの決定方法¹⁾を2次元DEMに一部適用した。弾性波速度や一軸圧縮強度は、岩種を特定するだけでなく、山岳トンネルの地山等級及び支保パターン^{5,6)}、岩盤斜面の安定を評価⁷⁾するために計測されることが多く、各種の計測方法も基準化されている。そのため、弾性波速度や一軸圧縮強度からDEMパラメータを決定した方がより汎用性が高い。ここでは、球要素の剛性に関して3次元DEMの決定式と相違がみられたため、その決定方法について述べる。なお、3次元の場合¹⁾と同様にボンドの引張強度は一軸圧縮強度の実験値に適合するようパラメトリックに決定した。また、ボンドのせん断強度と引張強度は等しいと仮定した。

3.1 球要素の剛性

Chang&Misra^{8,9,10)}によると、ヤング率 E_d とポアソン比 ν_d は、接線方向の剛性 k_n 、法線方向の剛性 k_s により、以下の式で示される。

$$E_d = \frac{4R^2N}{3V_R} (2k_n + 3k_s) \left(\frac{k_n}{4k_n + k_s} \right), \quad \nu_d = \frac{k_n - k_s}{4k_n + k_s} \quad (1,2)$$

ここで、 N/V_R は空隙比 $e=V_R/V_s-1$ (V_s は粒子部分の面積 $\pi R^2 N_p$, N_p は V_R 中の粒子数, R は半径) 及び配位数 $n=N/N_p$ を用いて、

$$\frac{N}{V_R} = \frac{n}{\pi R^2 (1+e)} \quad (3)$$

表1 等球径規則充填体の物理特性^{11), 14)}

充填方法	3次元		2次元	
	配位数	空隙率	配位数	空隙率
Simple Cubic	6	0.4764	4	0.2104
Cubical Tetrahedral	8	0.3954	6	0.1608
Tetragonal Sphenoidal	10	0.3019	6	0.1124
Pyramidal Packing	12	0.2595	6	0.0931
Tetrahedral Packing	12	0.2595	6	0.0931

表2 用いたパラメータ
(球要素の最大最小半径比 $R_{max}/R_{min}=2.0$)

density of the ball	ρ_s	2650	kg/m ³
ball radius	R	1.5	mm
friction coefficient of the ball	μ	0.5	-
critical damping ratios	β_n, β_s	0.8	-
normal stiffness	$\bar{k}^n$	2.9×10^8	N/m ³
shear stiffness	$\bar{k}^s$	7.8×10^7	N/m ³
friction angle of the parallel-bond	ϕ	0	rad
cohesion of the parallel-bond	c	parametric decision	N/m ²
Porosity of the specimen	-	0.167 ¹²⁾	-
silica concentration	normal stiffness of the parallel-bond		shear stiffness of the parallel-bond
	%	$\bar{k}^n$ N/m ³	$\bar{k}^s$ N/m ³
10		3.6×10^{11}	8.1×10^9
12		4.4×10^{11}	1.2×10^{10}
14		5.8×10^{11}	1.7×10^{10}

キーワード 個別要素法 パラメータ 剛性

連絡先〒158-0087 東京都世田谷区玉堤 1-28-7 TEL03-5707-0104 E-mail:g1218035@tcu.ac.jp

とする。また、母材の弾性波速度 V_p , V_s から、動ポアソン比 ν_d 、動せん断係数 G_d 及び動ヤング率 E_d は以下の式で算出される⁵⁾。

$$\nu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2\{(V_p/V_s)^2 - 1\}}, \quad G_d = \rho \cdot V_s^2, \quad E_d = 2(1 + \nu_d) \cdot G_d \quad (4,5,6)$$

したがって、(1)～(6)式より、円要素の剛性 k_n , k_s は、

$$k_s = \frac{1}{2n} \cdot 3\pi(1 + \nu_d) \cdot G_d \frac{1 - 4\nu_d}{1 - 2\nu_d}, \quad k_n = \frac{1 + \nu_d}{1 - 4\nu_d} k_s \quad (7,8)$$

と表すことができる。最上ら¹¹⁾によると、2次元における等球径規則充填では、整列配置 (Simple Cubic) よりも密な配列の配位数は6となる (表1参照) ため、本報告では、配位数は $n=6$ を適用した。

4. 個別要素法による一軸圧縮試験シミュレーション

4.1 一軸圧縮試験シミュレーション方法

表2に、一軸圧縮試験シミュレーションで用いた各パラメータの値を示す。供試体の物性値及び球要素の間隙率、ボンドの剛性の決定方法は、既往の研究^{11,12)}と同様である。一軸圧縮シミュレーションは、下部加圧板を鉛直上方に一定速度 2mm/sec (ひずみ速度 1%/min)¹³⁾にて移動させることにより载荷した。加圧板に作用する応力、変位を出力し、圧力とひずみを求めた。なお、0.2 mm/sec でも载荷を実施し、応力ひずみ関係に差異がないことを確認している。

4.2 一軸圧縮試験シミュレーションと実験結果の比較

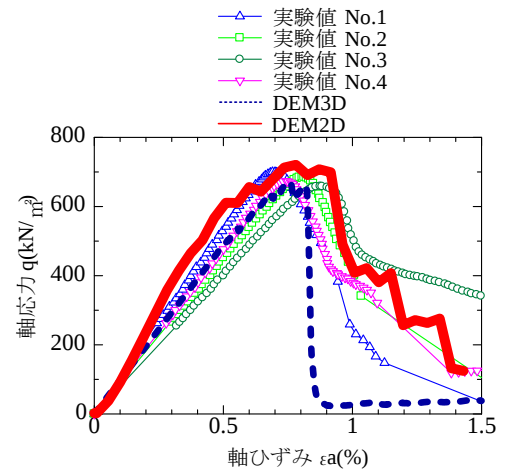
図1(a)～(c)にシリカ濃度のみを変化させた場合の2次元DEMによる一軸圧縮試験時の応力ひずみ関係と既往の実験及び3次元DEMによるシミュレーション結果¹⁾を合わせて示す。シリカ濃度 $Sc=12\%$ のとき、2次元DEMと実験値に大きく差が発現した。これは、弾性波速度を測定1日後に一軸圧縮試験を行ったため、薬液の固結箇所が乾燥により劣化し、供試体の一軸圧縮強度とその剛性が低下したため、実験と解析に相違が生じたと推察される。

5. まとめ

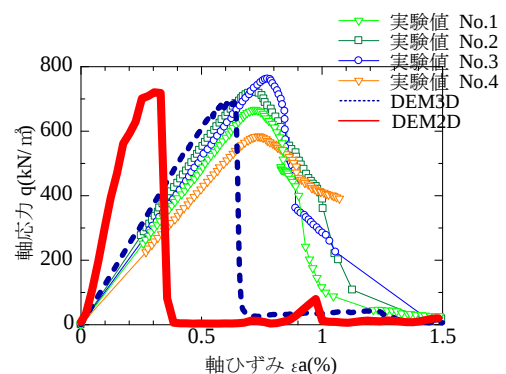
弾性波速度から球要素及びボンドの剛性を算出し、2次元DEMによる一軸圧縮試験シミュレーションを行った。その結果、一軸圧縮試験の応力ひずみ曲線は、実験値に近いものとなった。しかしながら、既往の研究¹¹⁾では3次元における等粒径ランダム充填における配位数と間隙率は密接な関係があり、その配位数は確率的に変化することが示唆されている。また、中尾ら¹⁴⁾は、構成する3次元の粒子が近似的に等粒径から成り立つ場合、地盤内の充填構造を局部的にみるならば、その充填構造は表1に示す等粒径構造体の間隙率に最も近い2つの規則充填構造体から成り立つことを示唆した。従って、2次元の地盤においても2つの規則充填構造体の混合体であると推察されるが、2次元DEMにおける異粒径ランダム充填 (図2参照) との整合性は明確ではなく、今後検討する必要がある。

【参考文献】

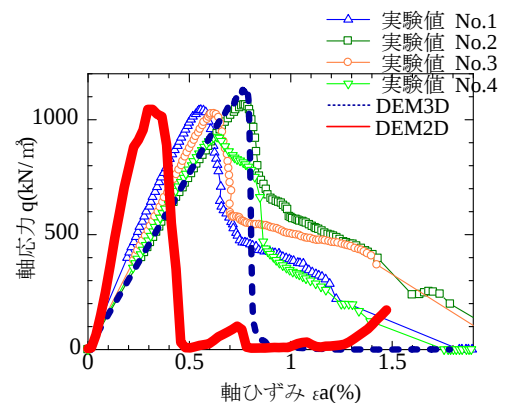
- 吉川直孝, 堀智仁, 伊藤和也, 三田地利之: 固結状態材料における個別要素法パラメータの決定方法の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.8 (2013), No.2, pp. 221-237.
- Cundall, P.A.: A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock system, Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics (Nancy, France), Vol. 1 (1971), No. II-8.
- Cundall, P.A. and Strack, O.D.L.: A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique, Vol. 29 (1979), No. 1, pp. 47-65.
- PPC2D ver5.0, Help (Users guide).
- 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社, 設計要領 第三集, トンネル編.
- 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 山岳トンネル設計施工標準・同解説 (2008).
- 土木学会岩盤力学委員会編, 岩盤斜面の安定解析と計測 (1994), 社団法人土木学会, pp. 36-37.
- Chang, C. and Misra, A., Packing structure and mechanical properties of Lons, Journal of Engineering Mechanics, vol. 116 (5) (1990), pp. 1077-1093.
- Chang, C. and Misra, A., Application of Uniform Strain Theory to Heterogeneous Granular Solids, Journal of Engineering Mechanics, vol. 116 (10) (1990), pp. 2310-2328.
- 地盤工学会土の弾塑性構成モデル編集委員会編, 土の弾塑性構成モデル (2009), 第4章土の弾塑性モデルに関する最新の研究, 公益社団法人 地盤工学会, pp. 1-15, CD-ROM.
- 最上武雄: 土質力学 (1969), 技報堂出版株式会社, pp. 904-914.
- 佐藤美穂, 伊藤和也, 吉川直孝, 2次元個別要素法のパラメータ決定方法の検討, 第12回地盤工学会関東支部発表会要集, CD-ROM, pp. 144-145.
- 地盤工学会 地盤調査方法訂編委員会編, 地盤材料試験の方法と解説 (2009), 第9章 岩石の一軸圧縮試験方法, pp. 817-828.
- 中尾 隆志, 藤田 啓寿, 球形粒子モデルを用いた土質内保水機構に関する微視的解析, 水文・水資源学会誌 Vol.16 (2003) No.1, pp. 56-68.



(a) シリカ濃度 $Sc=10\%$



(b) シリカ濃度 $Sc=12\%$



(c) シリカ濃度 $Sc=14\%$

図1 応力ひずみ関係

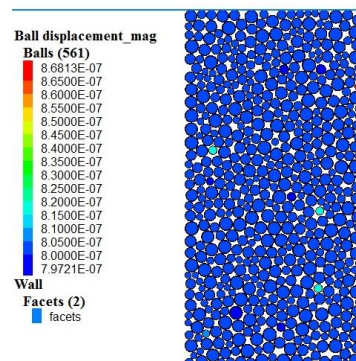


図2 異粒径ランダム充填