# 個別要素法における固結粒状材料の材料定数の決定法に関する検討

(独)労働安全衛生総合研究所 正会員 〇吉川直孝,堀智仁,伊藤和也,豊澤康男日本大学生産工学部 正会員 三田地 利之

## 1. はじめに

実務において、軟岩等の強度変形特性を個別要素法(Distinct Element Method)(以下「DEM」という。)により表 現するためには、現地の地盤調査、簡便な室内試験等により得られた物性値から材料定数を決定する必要がある。 例えば、山岳トンネルの設計に用いられる地山等級は、弾性波速度、一軸圧縮強度等により決定される<sup>1),2)</sup>。そこ で、本研究では、弾性波速度と一軸圧縮強度から軟岩等における DEM の材料定数を決定する方法を検討する。こ こでは、再現性のある供試体により固結力の異なる軟岩等を模擬するため、薬液のシリカ濃度を変化させ豊浦砂を 固結した材料(以下「固結粒状材料」という。)を用いた。各供試体に対してベンダーエレメント試験および一軸圧 縮試験を実施し、弾性波速度および一軸圧縮強度から DEM の材料定数を決定し、DEM を用いた一軸圧縮試験シミ ュレーションと実験時の応力ひずみ関係を比較することにより、決定方法の妥当性を検討した。

### 2. 実験方法および結果

# 2.1 供試体作製方法

固結粒状材料の供試体は、予め薬液をモールド内に入れ、そこに母材(豊浦砂: $\rho_s=2650 \text{ kg/m}^3$ ,  $e_{max}=0.985$ ,  $e_{min}=0.611$ )を相対密度  $D_r=80$ %(e=0.686)となるよう空中落下により堆積させ、21日(3週間)以上養生させ作製した。薬液のシリカ濃度  $S_c$ は、8、10、12、14%と変化させ、固結力の異なる供試体を作製した。供試体寸法は直径 50mm、高さ 100mm である。母材のみの供試体についても乾燥振動法により作製し、-49kN/m<sup>2</sup>の負圧を与えた状態でベンダーエレメント試験のみに供した。

## 2.2 ベンダーエレメント試験および一軸圧縮試験と結果

ベンダーエレメント試験は、P波およびS波速度の計測が可能 である<sup>3)</sup>。一軸圧縮試験は、岩石の一軸圧縮試験方法

(JGS2521-2009)に従って実施した。なお,軸ひずみ速度は1%/min とした。図1,2に各試験結果を示す。弾性波速度,一軸圧縮強 度ともにシリカ濃度の増加に伴って増加しており,固結力の増加 がうかがえる。

### 3. DEM による一軸圧縮試験シミュレーション

実験結果から DEM の材料定数を決定し一軸圧縮試験シミュレ ーションを行った。使用した材料定数の一覧を表1に示す。また, 材料定数は図3のようなフローチャートに従い決定した。

### 3.1 供試体作製方法およびシミュレーション方法

円筒状の壁要素および上下の壁要素に囲まれた領域に所定の 密度 (e=0.686 程度) となるよう球要素 (最大球要素半径  $R_{max}=2.0$ , 球要素の最大最小半径比  $R_{max}/R_{min}=2.0$ ) を発生させ、パラレルボ ンドを粒子間に付加した後、モールドを取り除き、供試体を作製 した。上の壁要素を固定した状態で下の壁要素を 0.02m/sec の速 さで上昇させ、供試体を加圧した。

#### 3.2 実験結果と解析結果の比較

図4に一軸圧縮試験の実験結果とDEMによる解析結果を示す。

キーワード 個別要素法,弾性波速度,ベンダーエレメント試験,一軸圧縮試験,固結粒状材料
 連絡先 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6 (独)労働安全衛生総合研究所 TEL. 042-494-6296







図2 一軸圧縮強度とシリカ濃度の関係

### 土木学会第67回年次学術講演会(平成24年9月)

	材料定数	記号	シリカ濃度	シリカ濃度	シリカ濃度	シリカ濃度	単位
			$S_c = 14\%$	$S_c = 12\%$	$S_c = 10\%$	$S_c = 8\%$	
球要素	密度	$ ho_{s}$	2650				kg/m <sup>3</sup>
	平均半径	R	1.5				mm
	法線方向の剛性	$k^n$	$6.8 \times 10^{5}$				N/m
	接線方向の剛性	k <sup>s</sup>	$2.7 \times 10^{5}$				N/m
	摩擦係数	μ	0.5				-
	減衰定数	$\beta_n, \beta_s$		0	.8		-
パラレルボンドと球要素の半径比		$\overline{\lambda}$	1.0				-
ドラレルボン	法線方向の剛性	$\overline{k}^{n}$	$5.8 \times 10^{11}$	$4.4 \times 10^{11}$	$3.6 \times 10^{11}$	$2.6 \times 10^{11}$	N/m <sup>3</sup>
	接線方向の剛性	$\overline{k}^{s}$	$2.6 \times 10^{10}$	$1.8  imes 10^{10}$	$1.2 \times 10^{10}$	$9.0 \times 10^{8}$	N/m <sup>3</sup>
	法線方向の強度	$\overline{\sigma}_{c}$	$3.0 \times 10^{6}$	$1.8 \times 10^{6}$	$1.8 \times 10^6$	$1.8 \times 10^{6}$	N/m <sup>2</sup>
	接線方向の強度	$\overline{\tau}_{c}$	$3.0 \times 10^{6}$	$1.8 \times 10^{6}$	$1.8 \times 10^{6}$	$1.8 \times 10^{6}$	N/m <sup>2</sup>

表1 一軸圧縮試験シミュレーションで用いた材料定数



図3 DEM の材料定数を決定するためのフローチャート

応力ひずみ関係を比較すると、 $S_c=10\%$ では、実験結果と解析 結果の初期勾配がほぼ一致している(同図(a)参照)。紙面の都 合上、本概要には示していないが、 $S_c=14\%$ および12%でも実 験結果と解析結果の初期勾配がほぼ一致している。しかしな がら、 $S_c=8\%$ では、初期勾配が大きく異なっている(同図(b) 参照)。これは、固結力が弱くなるにつれ、粒子形状や粒度の 影響が大きくなるためだと考えられる。

### 4. まとめ

実験から得られた弾性波速度に基づき,球要素およびパラ レルボンドの剛性を決定すると,固結力がある程度強い固結 粒状材料の一軸圧縮試験時の初期勾配を DEM により表現で



(b) シリカ濃度 S<sub>c</sub>= 8%の固結粒状材料
 図4 DEM と実験の一軸圧縮応力と軸ひずみの関係

Axial strain,  $\varepsilon_a$  (%)

きる。パラレルボンドの強度は、一軸圧縮強度に適合するよう、パラメトリックに決定しているため、今後、一軸 圧縮強度との相関性を検討する必要がある。

#### 参考文献

1) 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, pp. 39-40, 2008. 2) 東日本高速道路株式会社,中日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社: 設計要領 第三集 トンネル編, p. 77, 2009. 3) Lings, M. L. and Greening, P. D.: A Novel Bender/Extender Element for Soil Testing, Gèotechnique, Vol. 51, No. 8, pp. 713-717, 2001.