

二種混合体の圧縮特性に関する解析的検討 — 礫岩の強度評価へのアプローチ —

A numerical study on compression profiles of mixtures with two different materials
-An approach to evaluation of the strength of conglomerate-

中本 崇*・西村 強**・川崎 了***・木山 英郎****

Takashi NAKAMOTO, Tsuyoshi NISHIMURA, Satoru KAWASAKI, Hideo KIYAMA

A numerical modeling is presented for analysis stresses and displacements in a mixture. The mixture is modeled as a body in which distinct blocks are intermixed into a continuum. In the numerical procedure, the section of the continuum is divided into individual elements of finite size. At each interface between a rigid block and the continuum, the equilibrium of forces and the continuity of displacement are satisfied. The FLEM-DEM coupled method, which has been reported by us, can analyze stresses and displacements in the section as well as contact forces between a distinct block and the continuum.

This is an attempt to gain an understanding of mechanical behaviors of conglomerate. The results are summarized by distinct block fraction contents and patterns of intermixing.

1. まえがき

本文は、2種の材料で構成される混合体の応力-ひずみ関係に関する数値解析についてまとめたものである。著者らがすでに報告している流動要素-個別要素結合解析法¹⁾を用いて、均一な基質中に複数の円形介在物が混入したときの混合体の圧縮特性を解析した。それは、礫岩のような複合体材料の力学的性質の表現を目的としたものである。

混合体の応力-ひずみ関係に関する研究は、古くから複合体材料の分野で実施されており、基質と介在物の弾性係数に基づいて、混合体の等価弾性係数を推定する式が提案されている。推定式個々に関しては、適用限界もあるが、混合体の弾性係数の上・下限値は求め得るものと思われる^{2) 3)}。

礫岩のような材料においても、その圧縮特性を評価する際、混合体の理論が基本となる事は言うまでもない。しかしながら、礫岩の場合、基質と礫の弾性係数のみならず、礫岩と基質の付着状態や礫の配置など、様々の因子が影響することが指摘されている⁴⁾。原位置試験や室内試験で、それらの影響を把握していくことが最も有効な手段と成り得るが、礫径が大きい場合などでは、それも困難となることが想像される。そのような場合、

* 学生会員 鳥取大学大学院 工学研究科

** 正会員 鳥取大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 大阪大学助手 大学院地球総合工学専攻

**** 正会員 鳥取大学教授 工学部土木工学科

数値解析を利用することも一つの選択と考えられる。

2. 計算法の概要

個別要素法(DEM)⁵⁾、流動要素法(FLEM)⁶⁾に関しては、両手法とも運動方程式の逐次解法を基本とする手法であり、その概要はすでに報告しているのでここでは省略する。以下には、基質(FLEM要素)と介在物(DEM要素)に接触が生じたときの接触力計算法の概要を示す。

図-1に示すFLEM要素 e' の辺 kl とDEM要素 e^i (半径 r_i)の接触開始条件は次式である。

$$0 < \bar{x}_i < L, \quad \bar{y}_i \geq -r_i \quad (1)$$

ここに、 (\bar{x}, \bar{y}) は節点 k を原点とする局所座標系であり、 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) はDEM要素の重心座標、 L は辺 kl の長さである。接触力を求めるには次式によって、接触点 p における相対変位増分を算出しておく必要がある。

$$\Delta \bar{u}_c = \Delta \bar{u}_i^p - \Delta \bar{u}_j^p, \quad \Delta \bar{v}_c = \Delta \bar{v}_i^p - \Delta \bar{v}_j^p \quad (2)$$

ここに、 $(\Delta \bar{u}_i^p, \Delta \bar{v}_i^p)$ は e' の重心位置の変位増分 $(\Delta \bar{u}_i, \Delta \bar{v}_i)$ と回転角増分 Δw_i (反時計方向正)が既知であれば、

$$\Delta \bar{u}_i^p = \Delta \bar{u}_i - \eta \Delta w_i, \quad \Delta \bar{v}_i^p = \Delta \bar{v}_i \quad (3)$$

と求めることができる。一方、 $(\Delta \bar{u}_j^p, \Delta \bar{v}_j^p)$ は節点 k, l の変位増分 $(\Delta \bar{u}_l, \Delta \bar{v}_l)$ より

$$\Delta \bar{u}_j^p = \Delta \bar{u}_k N_1(\xi) + \Delta \bar{u}_l N_2(\xi), \quad \Delta \bar{v}_j^p = \Delta \bar{v}_k N_1(\xi) + \Delta \bar{v}_l N_2(\xi) \quad (4)$$

と求めることができる。ここに、 ξ は正規化された局所座標、 $N_1(\xi), N_2(\xi)$ はその辺上に制限された補間関数であり、2節点線要素に対する次式である。

$$N_1(\xi) = \frac{1}{2}(1-\xi), \quad N_2(\xi) = \frac{1}{2}(1+\xi) \quad -1 < \xi < 1 \quad (5)$$

次に、接触点 p にばね-ダッシュポット系を仮定し、次式より接触力を算出する。

$$\begin{aligned} e_n &:= e_n + k_n \Delta \bar{v}_c & d_n &:= \eta_n \Delta \bar{v}_c / \Delta t \\ e_s &:= e_s + k_s \Delta \bar{u}_c & d_s &:= \eta_s \Delta \bar{u}_c / \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、下添字 n, s は接触法線および接線方向の各成分を示し、 (e_s, d_s) は次の2条件を満足しておく必要がある。

$$e_n \leq 0 \text{ のとき, } e_s = d_s = 0 \quad (7)$$

$$|e_s| \geq \mu e_n \text{ のとき, } e_s = \mu e_n \cdot \text{SIGN}(e_s), \quad d_s = 0 \quad (8)$$

μ は摩擦係数、 $\text{SIGN}(\cdot)$ は変数の符号を採用する関数である。以上は、DEMの接触力計算そのものであり、FLEM-DEM要素間接触も点接触として取り扱う。算出された接触力を、FLEM要素に対しては、次式より節点への外力として作用させておく。

$$\begin{aligned} \bar{f}_{xk} &= (e_s + d_s) N_1(\xi) & \bar{f}_{xl} &= (e_s + d_s) N_2(\xi) \\ \bar{f}_{yk} &= (e_n + d_n) N_1(\xi) & \bar{f}_{yl} &= (e_n + d_n) N_2(\xi) \end{aligned} \quad (9)$$

運動方程式は全体座標系 (x, y) で記述されているのに対し、式(1)～(9)は、局所座標系 (\bar{x}, \bar{y}) 内の誘導であるため、変位増分、接触力等に座標変換が必要である。

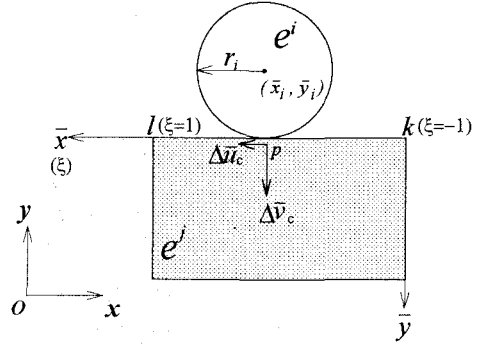


図-1 DEM要素とFLEM要素との接触

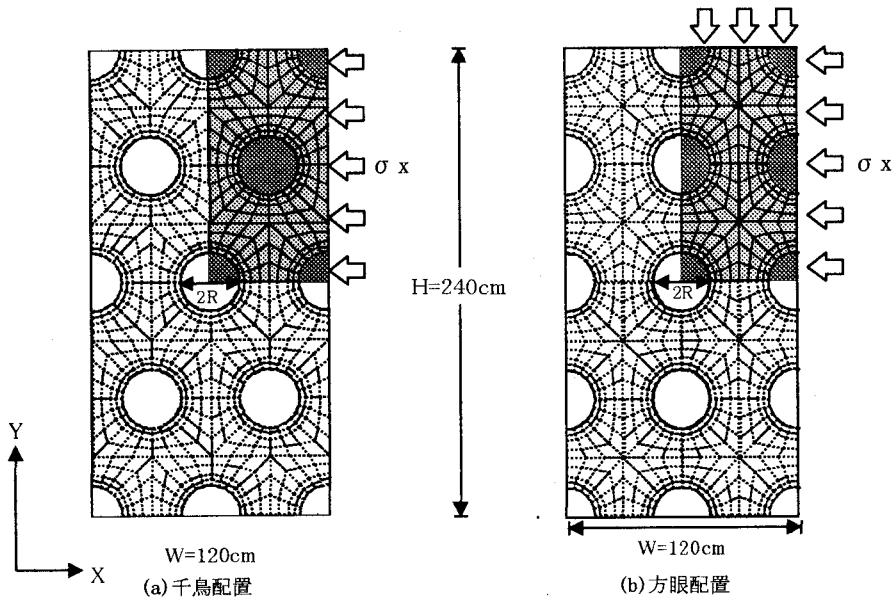


図-2 解析モデル

3. 解析方法の概要

3-1 解析モデルの設定

図-2 に連続体中に円形 DEM 要素を千鳥状及び、方眼状に混入させた 2 例を示している。これは、基質と礫の弾性係数のみならず、配置等の影響も表現しようとしたものである。本解析は平面ひずみ状態で実施するので、礫要素の含有率は解析断面積 A_0

に対する礫要素面積 A の比 A/A_0 で表わされる。本文では、礫要素中心座標及び混入個数を両配置ごとに一定としているので、この含有率は礫径 $2R$ によってのみ変化する量となる。また、上述しているように、礫要素は剛体 DEM 要素であるので変形しないが、便宜的に、ヤング率 E_R 、ポアソン比 ν_R を与えて、接触剛性係数 (k_m, k_s) 等を算出した。解析に用いた定数を表-1 にまとめた。解析結果は、 E_R/E_M に注目して整理されるが、このような接触剛性係数の決定法、あるいは式(8)に示した摩擦の条件など数値計算上の仮定を含んだものである。

解析では図-1 より、陰影部を解析領域とし、陰影部の左辺・下辺に法線方向固定、平行方向可動の条件を与える。さらに、右上に拘束圧 $\sigma_x (=0.1\text{kgf/cm}^2)$ を与えた後、上辺に $\dot{y}\Delta t=0.00001\text{ cm}$ となる一定変位増分を与え、 $\varepsilon_y=3\%$ となるまで平面ひずみ条件下の圧縮解析を行う。

表-1 解析定数

礫部 (DEM要素)				
半径R=10,15,20cm		面積含有率 A/A ₀ (%)=9, 20, 35		$\nu_R=0.333$
$E_R(\text{kgf/cm}^2)$	$k_n/\rho g(\text{cm}^2)$	$k_s/\rho g(\text{cm}^2)$	$\eta_n/\rho g(\text{cm}^2\cdot\text{s})$	$\eta_s/\rho g(\text{cm}^2\cdot\text{s})$
610	50300	12500	33	16.5
2440	201200	50000	132	66
4880	402400	100000	264	133
9760	804800	200000	528	266
19520	1609600	400000	1056	532
39040	3219200	800000	2112	1064
78080	6438400	1600000	4224	2128
基質部 (FLEM要素)				
$E_M=610(\text{kgf/cm}^2)$		$\Delta t=1.0 \times 10^{-6}(\text{sec})$		$\nu_M=0.333$

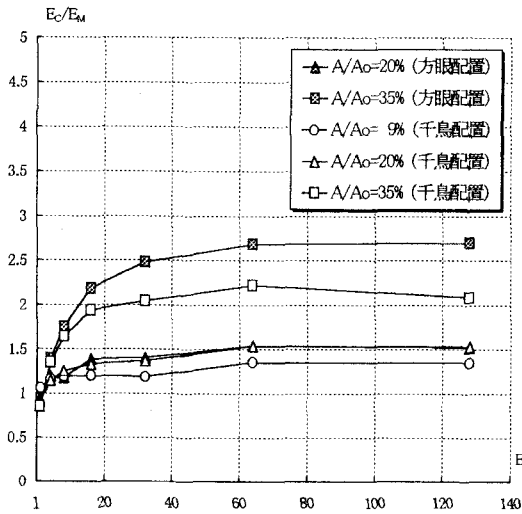


図-3 等価弾性係数比と弾性係数比との関係 (摩擦条件式(8)考慮)

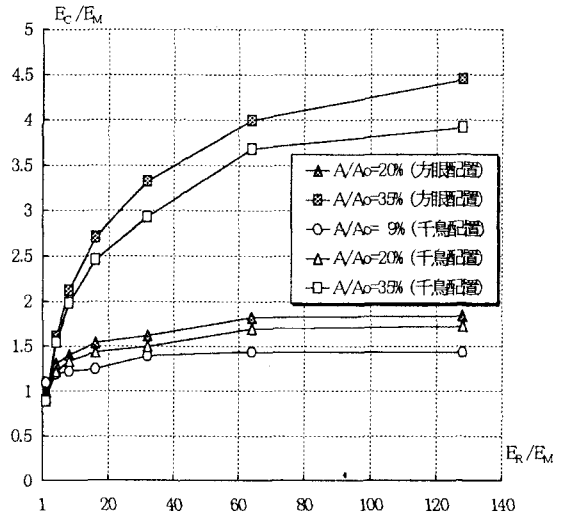


図-4 等価弾性係数比と弾性係数比との関係 (摩擦条件式(8)無視)

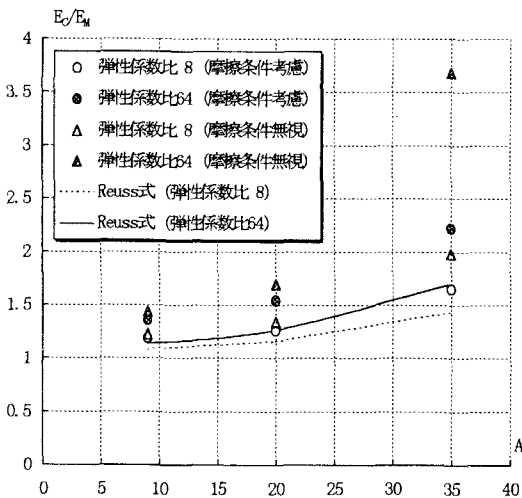


図-5 等価弾性係数と面積含有率との関係

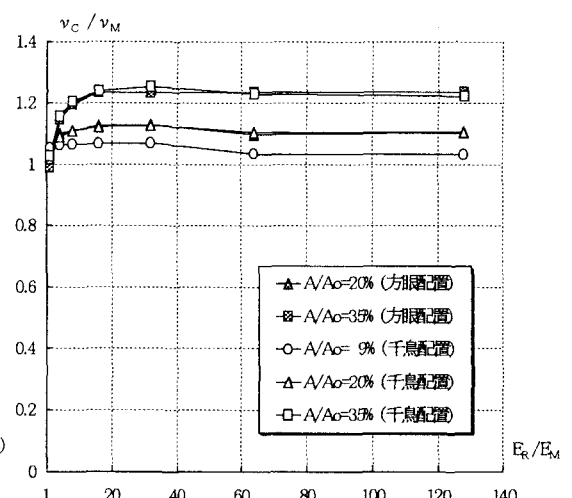


図-6 等価ポアソン比と弾性係数比との関係

3-3 解析結果と考察

図-3は、礫と基質の弾性係数比 E_R/E_M が等価弾性係数比 E_C に与える影響をまとめたものである。これによると、 E_C/E_M の値は、

- ① E_R/E_M の値が 40 程度までは、増加傾向にあるが、その後は大きな変化は見られない、
 - ② 含有率 A/A_0 が大きくなれば、大きくなる、
 - ③ 千鳥配置に比べ、方眼配置の方がやや大きくなる、
- 以上の3点が言えそうである。

図-4は、前述した本解析の仮定のうち、摩擦条件すなわち式(8)を無視した場合、つまり礫表面が粗な場合の結果である。図-3と比較すると、同一の E_R/E_M 値に対して、等価弾性係数が大きくなっており、実験等において

礫要素表面の付着強度の差異が供試体の圧縮特性に影響を与える様子が想像される。

図-5は、礫要素含有率が等価弾性係数に与える影響をまとめたものである。ここでは、図-3、図-4より千鳥配置の $E_R/E_M=8.64$ の結果と以下の示す Reuss 式を比較している。

$$\bar{G} = \frac{G_1 + G_2}{G_1 \cdot V_2 + G_2 \cdot V_1} \quad (10)$$

(G_1 : 基質のせん断弾性係数 G_2 : 礫のせん断弾性係数 V_1 : 基質含有率 V_2 : 礫含有率)

最後に、図-6は、図-3の解析より得られたもので、 E_R/E_M 値が等価ポアソン比 ν_c/ν_M に与える影響をまとめたものである。 ν_c/ν_M は E_R/E_M の増大とともに 1.2 程度まで増加していること、又、 A/A_0 の影響を受けていることなどがわかる。

4. まとめ

本文は礫岩などの地盤材料を対象として、2種の材料で構成される混合体の圧縮特性に関する解析的な検討を試みたものである。混入要素と基質の弾性係数比・配置・含有率などの変化に注目しながらその結果をまとめた。しかし、ここに示した結果は、極めて限られた条件下のものであるので、今後さらなる検討が必要と思われる。

5. 参考文献

- 1) 木山英郎・西村 強・長谷川 誠・淵本正樹：材料, 第 47 巻, 第 5 号, pp495~500, 1998.
- 2) 大嶺 聖・落合英俊：土木学会論文集, No448/Ⅲ-19, pp121-130, 1992.
- 3) 小林隆志・吉中龍之進：土木学会論文集；No487/Ⅲ-26, pp.31-40, 1994.
- 4) 川崎了：学位請求論文（鳥取大学）, 1999.
- 5) P. A. Cundull: Symposium ISRM, Nancy, Proceedings. Vol.2, pp129-136, 1971.
- 6) 木山英郎・藤村 尚・西村 強；土木学会論文集, No439/Ⅲ-17, pp63-68, 1991.