

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420482

研究課題名(和文) 粒状体解析におけるバネ係数の弾性定数への関連付けと地盤の静的動的変形機構の解明

研究課題名(英文) A 3D LATTICE SPRING MODEL FOR SIMULATION ON STATIC AND DYNAMIC DEFORMATION

研究代表者

西村 強 (Nishimura, Tsuyoshi)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90189308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：岩質材料の変形から破壊の発生・進展を表現する質点系解析手法の開発を目指した。この手法では、解析対象を小領域に分割した後に、各小領域を質点で代表させる。質点間に挿入したばねに生じる力の不平衡により質点が移動して対象物体の変形を表現するが、その移動量は減衰を伴う振動系の運動方程式の陽形式差分法によって計算される。本研究では、質点間を連結するばねの係数値を解析対象の弾性定数(弾性係数とポアソン比)に関連付ける式を提案した。

研究成果の概要(英文)：An alternative three-dimensional lattice spring numerical model, in which matter is discretised into a system of mass points, is developed for the study of rock-like materials. The model includes a normal spring and a shear spring for each pair of lattice points. The deformation of the shear spring is evaluated by using the local strain. In this method, to obtain the local strain, the rotation-related term in the relative displacement vector is calculated by the Euler equation for the rotation of imaginal rigid sphere. Relationships between the stiffness of the springs and the macro material elastic constants of the matter, e.g. the Young modulus and the Poisson's ration, are derived. The explicit-finite difference scheme is adopted to solve the system of equation of motion. Through numerical simulations, it is concluded that this three-dimensional numerical model is one of possible method to analyze deformation and failure not only static but also dynamic failure of rocks.

研究分野：地盤工学

キーワード：3次元格子ばね法 弾性係数 ポアソン比 ばね係数 変形 進行性破壊 剛体回転

1. 研究開始当初の背景

連続体解析は、地盤内の不連続面の存在およびその進展や崩壊後の運動を表現することには適しておらず、多くの試みが行われてきた。地盤構造物の安定性評価においても、不均質性、粒状性、破壊の進展の表現は欠かすことができない点である。

これに対して、個別要素法 (DEM, Cundall (1971)) に代表される不連続体解析法は、前記の問題点を軽減して変形から破壊に至る過程を表現する方法として地盤材料あるいは地盤構造物の解析にも用いられるものの入力条件 (ばね係数, ダッシュポット減衰係数など) は、物理モデルの要素であり、土や岩の力学的性質を直接に表す指標ではなく、実材料において要素試験などから容易に決定できるものではないという問題点があった。特に、集合体の特性の決定方法について確立された手法はなく、「キャリブレーションプロセス」(Potyondy et.al (2004)) と呼称される手順で試行錯誤的に求めて使用されていた。さらに、このプロセスでは、実験室内の供試体による要素試験を意識して、数 mm の寸法の要素が用いられることが多い。しかし、この要素寸法は実構造物の解析には不適である。膨大な要素数を必要とすることは明らかである。そのため、解析結果は、実構造物を対象とした定量的な評価に至らず、定性的なレベルに留まっているのが実情であった。

2. 研究の目的

質点の運動方程式に基づく変形解析法の開発に対して、次の3つを目的とする。

(目的 1) 弾性係数, ポアソン比と要素間ばね係数の関係式の誘導すること

(目的 2) その誘導では、質点間の相対変位に対して純粋な変形によるひずみを算出する過程を導出し、質点上の応力を算出できるようにすること

(目的 3) 岩質材料の静的変形のみならず破壊に至る解析するため、質点上の応力度に対して降伏規準を適用すること

以上3点である。

3. 研究の方法

【平成 26 年度】

<H26-1> 超弾性体理論に基づく要素間接触ばね係数—弾性定数関係式の誘導

格子連結ばね内に蓄えられるひずみエネルギーの勾配が構成則を与えるとして関係式の誘導を実施する。

<H26-2> 3次元解析プログラムの開発と模擬解析

一軸圧縮解析, 片持ち梁の静的変形解析を実施する。

<H26-3> 実験材料の選定と静的力学特性の把握

石膏供試体の物理的性質や静的弾性特性 (弾性係数, ポアソン比) を求める。

【平成 27 年度】

<H27-1> 弾性波速度伝播解析と格子連結形

式の影響

<H27-2> 強度試験の解析

・圧裂試験解析において、円盤中央部の応力度の強度評価式 ($2P/\pi dL$) に対する近似度の確認をする。

・単純引張をうける単一き裂を有する板の解析において、き裂先端部の応力度の線形弾性解解に対する近似度の確認をする。

・3点曲げ試験解析において、強度評価式 $k(3PL/2BH^2)$ の補正係数 k の評価を実施する。以上を通じて、供試体試験で求める変形特性・強度特性を入力条件とすることを可能にする。

<H27-3> : 関連流れ則に基づいた弾塑性構成式の導入を行う。

【平成 28 年度】

<H28-1> : 石膏供試体の押抜きせん断試験の実施と解析

せん断破壊の表現を実施する。岩質材料を対象とするとき、面内せん断変形 (モード II) の表現が興味深い。これに取り組む。

<H28-2> トンネルや斜面の解析例の提示
実構造物を意識して、2次元斜面解析, 2次元トンネル断面解析, 切羽部の3次元解析を行う。

<H28-3> 研究成果のまとめと成果の公表
関連学会に成果の投稿・公表を実施する。

4. 研究成果

<H26-1> 超弾性体理論に基づく要素間接触ばね係数—弾性定数関係式の誘導

質点連結系内のばねに蓄えられるエネルギーが対象とする弾性体内のひずみエネルギーに等しく、その勾配が材料の構成則を与えるとして、ばね係数 k_n, k_s と弾性定数の関係式を次のように記述した。

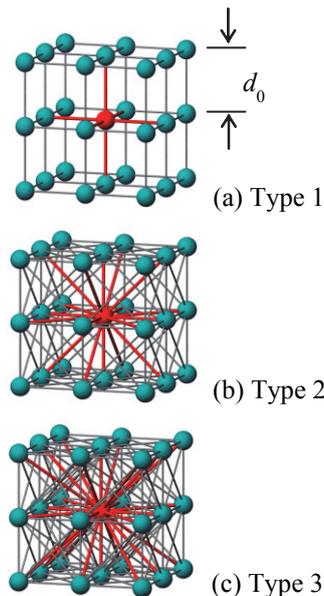


図-1 質点連結格子モデル

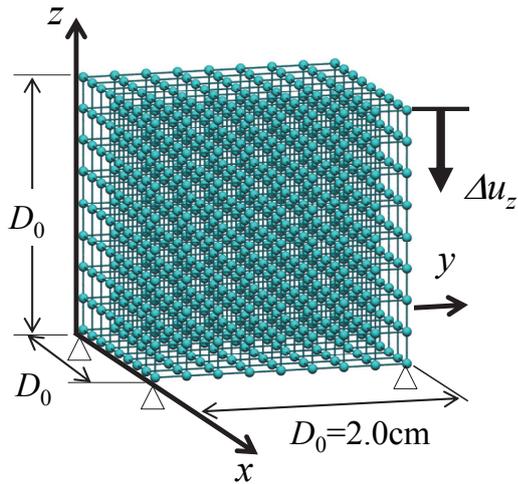


図-2 一軸圧縮解析

$$C_{ijkl} = \frac{1}{V} \sum_{m=1}^{N_s} \left[\frac{k_s d_b^{m2}}{4} (I_j^m I_k^m \delta_{il} + I_i^m I_k^m \delta_{jl} + I_j^m I_l^m \delta_{ik} + I_i^m I_l^m \delta_{jk}) + (k_n - k_s) d_b^{m2} I_i^m I_j^m I_k^m I_l^m \right] \quad (1)$$

ここに、 C_{ijkl} :弾性係数テンソル、 I_i^m は法線方向の単位ベクトル、 d_b^m :ばねの長さ、 δ_{ij} :クロネッカーのデルタである。上の図-1の右の格子モデルの例では、 k_n 、 k_s と E_0 、 ν_0 の関係を決めるように求めた。

$$k_n = \frac{E_0 d_0}{5(1-2\nu_0)} \quad (2)$$

$$k_s = \frac{(1-4\nu_0)E_0 d_0}{5(1+\nu_0)(1-2\nu_0)} \quad (3)$$

その誘導では、研究目的2に対する成果として、次式を誘導した。

$$\begin{pmatrix} \Delta u_1^m \\ \Delta u_2^m \\ \Delta u_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_x^{p2} - u_x^{p1} \\ u_y^{p2} - u_y^{p1} \\ u_z^{p2} - u_z^{p1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & z^{p2} - z^{p1} & -(y^{p2} - y^{p1}) \\ -(z^{p2} - z^{p1}) & 0 & x^{p2} - x^{p1} \\ y^{p2} - y^{p1} & -(x^{p2} - x^{p1}) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

この定式化により、質点系解析と剛体系解析における剛体回転の取り扱いを考察した。つまり、剛体要素を用いる解析法では、上式右辺第2項が同辺第1項に加算されており、力の評価位置は剛体要素同士の接触点になる。このことを、独創的な点として、研究成果の公表論文に記載している。

<H26-2>3次元解析プログラムの開発と模

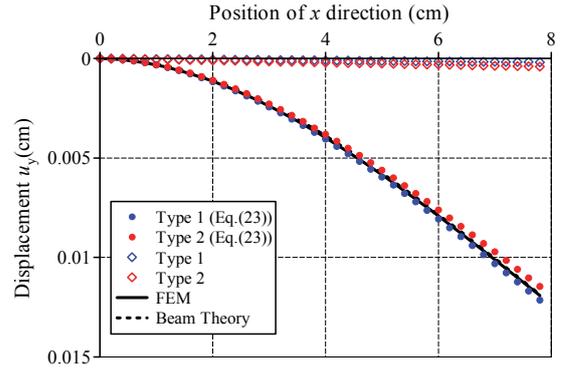
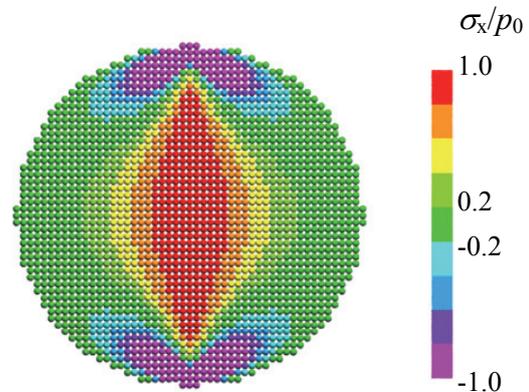
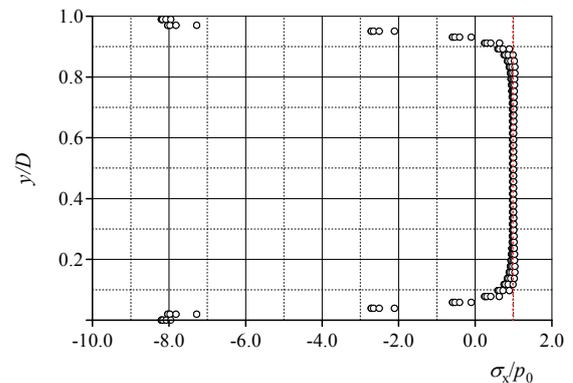


図-3 片持ちばり解析における本解析法と他解析法の比較



(a)中央断面における σ_x の分布 (引張応力:正)



(b)荷重軸上における σ_x の分布

図-4 圧裂試験解析における応力分布

擬解析

<H26-1>の成果に基づき、3次元プログラムを作成した。図-2に示す一軸圧縮解析を実施した。ここに記載の例からは、 $d_0/D_0=1/20$ あるいは $1/10$ とすれば、圧縮荷重 P_z 、側方変形量 ΔD_x とも目標値 P_{z0} 、 ΔD_{x0} に対して $\pm 3\%$ 以内に収まっていることが導かれた。連結方式と質点間距離 d_0 に注意して解析モデルを作成する必要があることを指摘した。片持ちばり

表-1 応力拡大係数に関する解析結果の評価

| $2a/W$ | $K_I / \left(\sqrt{\frac{P_0 \sqrt{\pi W}}{WT}} \right)$ | P_y/P_0 |
|--------|---|--------------------|
| 0.1 | 0.238 (0.239, 0.4) | 0.989 (0.992, 0.3) |
| 0.3 | 0.390 (0.393, 0.7) | 0.923 (0.930, 0.8) |
| 0.5 | 0.477 (0.480, 0.6) | 0.802 (0.807, 0.6) |
| 0.7 | 0.571 (0.578, 1.0) | 0.630 (0.639, 1.5) |

()内は、式(29), (30)の算出値とそれに対する誤差(%)

りの解析では、はり理論による自由端におけるたわみ量 δ_0 に対して、2種の連結方式に対して $u_y/\delta_0=1.016, 0.966$ と良好な接近度を示した。たわみ曲線の比較を図-3に示す。このことから、開発した解析手法は、せん断変形の伝達に対して良好な機能を有していると判断した。

<H26-3>実験材料の選定と静的力学特性の把握

石膏供試体の物理的性質や静的弾性特性（弾性係数，ポアソン比）を求めた。これらは、次年度以降の供試体解析の重要な資料となった。

【平成 27 年度】

<H27-1>弾性波速度伝播解析と格子連結形式の影響

図-1 (a) (b)に示した2種の連結形式について弾性波速度伝播解析を実施したところ、弾性波の伝播に対する格子連結形式の影響は大きいことが判明した。時間差分間隔と質点間距離に注意すること（すなわち、クーラン条件）の重要性が明確となった。また、減衰に関する定数の値も重要であることは示せたが、その数値の材料特性に応じた決定方法については明示することが困難であった。

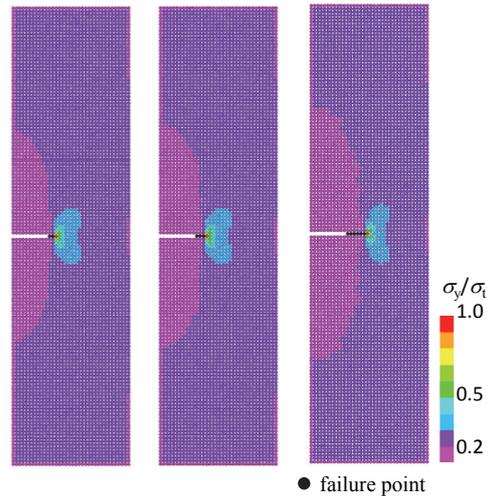
<H27-2>強度試験の解析

・圧裂試験解析において、強度評価式(2P/πdL)に近似する応力度の再現性の確認をした。図-4に結果を示す。

・単純引張をうける単一き裂を有する板の解析において、近似する応力度の再現性の確認をした。図-5に結果を示す。

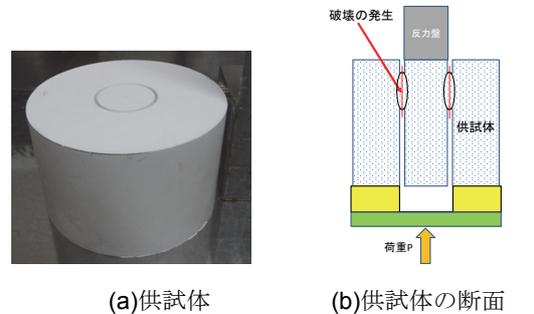
・3点曲げ試験解析において、強度評価式 $k(3PL/2BH^2)$ の補正係数 k の評価を実施した。その結果、 k は、0.85程度になる。つまり、はり下縁の応力について、载荷重から計算される数値は、はり下縁で発生している応力の(かなり)下回る結果となる。これは、载荷点付近で生じる応力集中の影響でないかと考察した。

以上を総合して、圧裂試験の結果より引張強度の導入が可能であり、また、単一き裂の先端付近の単純引張状態下の応力状態は表現可能なことを結論した。また、引張強度を設定すれば、き裂伸長も解析できること、その進展速度は、減衰定数の値に影響される



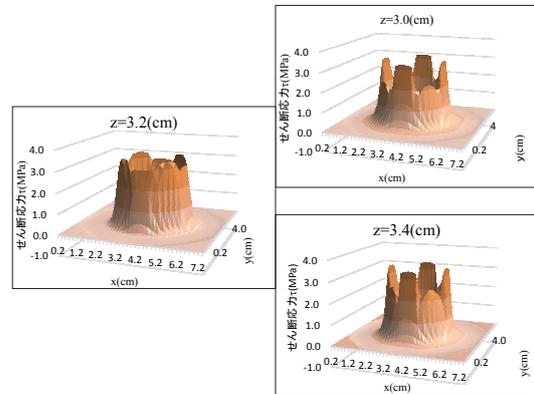
(a) $\alpha=0.8$ (b) $\alpha=0.6$ (c) $\alpha=0.4$

図-5 引張強度の導入とクラックの進展



(a)供試体

(b)供試体の断面



(c)せん断面上の応力分布

図-6 せん断強度測定試験と解析による応力分布の再現

ことを示した。研究成果の公表論文に記載している。

<H27-3>関連流れ則に基づいた弾塑性構成式の導入を行った。

【平成 28 年度】

<H28-1>石膏供試体の押抜きせん断試験の実施と解析

この項目ではせん断破壊の表現を実施する。岩質材料を対象とするとき、モード II の表現が興味深い。これに取り組んだ(図-6)。

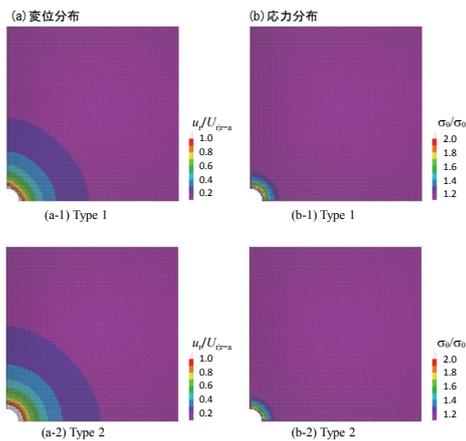


図-7 円孔周辺の変位と応力の分布

その結果は、破壊時の载荷重から求める破壊面上の想定せん断応力度が、解析モデル内でも表現されていることを示した。よって、押抜きせん断試験（図-6 (a) (b)）等でせん断強度を求めることができれば、そのせん断破壊応力度として、せん断破壊の解析が可能であると示した。

<H28-2>トンネルや斜面の解析例の提示
実構造物を意識して、2次元斜面解析、2次元トンネル断面解析、切羽部の3次元解析を行った。その結果、図-6に示すように、円孔周りの応力状態について、弾性解に近似する数値解析結果を得た。

<H28-3>研究成果のまとめと成果の公表
関連学会に成果の投稿・公表を実施した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- 1) 文村賢一, 西村 強, 河野勝宣: 岩質材料の変形と破壊の解析を目指した3次元格子ばねモデル, 土木学会論文集C (地圏工学), 査読有, 73巻, 1号, pp. 11-22, 2017. 1.
- 2) Tsuyoshi Nishimura, Ken-ichi Fumimura, Masanori Kohno and Daichi Mitsuhashi : A 3D Distinct Element-Based Model for Deformation and Failure of Rock. Harmonizing Rock Mechanics with Sustainable Economic Development, Proceedings of 9th Asian Rock Mechanics Symposium, Bali, Indonesia, Proceedings No. P04-P74, pp. 1-9, 2016. 10.
- 3) Ken-ichi Fumimura, Tsuyoshi Nishimura, and Masanori Kohno : A distinct element modeling with spring parameters-elastic constants relation and its numerical application, Innovations in Applied and Theoretical

Rock Mechanics, Proceedings of the 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics (ISRM Congress 2015, 査読無 (Abstract 審査有), Minneapolis, U.S.A., Proceedings No. 331, 2015. 5.

- 4) 文村賢一, 西村 強, 河野勝宣: 三次元格子ばね解析法による円孔周りの応力・変形解析, 第43回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 査読無 (Abstract 審査有), pp. 13-18, 2015. 1.
- 5) 三橋大地, 文村賢一, 河野勝宣, 西村 強: 個別要素法などの離散化モデルにおけるばね剛性に関する考察, 地盤と建設, 査読有, 第32巻, 第1号, pp. 143-147, 2014. 12.
- 6) Tsuyoshi Nishimura, Ken-ichi Fumimura, and Masanori Kohno, Hiroshi Ueda : Relating distinct lattice spring method parameters to elastic properties of rocks, Rock Mechanics for Global Issues -Natural Disasters, Environment and Energy- (Shimizu, N., Kaneko, K. and Kodama, J., editors), Proceedings of 2014 ISRM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 査読無 (Abstract 審査有), Sapporo, Japan, pp. 954-962, 2014. 10.

[学会発表] (計3件)

- 1) 三橋 大地, 文村賢一, 西村 強, 河野勝宣: 格子ばね解析法による弾性体解析におけるばね係数値の設定と検討, 土木学会, 平成27年度年次学術講演会概要集, 岡山市, 2015. 9.
- 2) 伊東 浩介, 文村賢一, 西村 強, 河野勝宣: 単一不連続面を含む石膏供試体の圧縮破壊挙動と3次元格子ばね解析, 土木学会, 平成27年度年次学術講演会概要集, 岡山市, 2015. 9.
- 3) 西村 強, 文村賢一, 奈良禎太, 河野勝宣: 岩石の変形・破壊の解析を目指した3次元格子ばね係数値の設定と検討, 材料学会, 材料学会第65期総会・学術講演会講演集, 富山市, 2016. 5.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

該当なし

○取得状況 (計0件)

該当なし

[その他]

ホームページ等

<http://www.cv.tottori-u.ac.jp/rock/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 強 (NISHIMURA TSUYOSHI)

鳥取大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90189308

(2)研究分担者

河野 勝宣 (KOHNO MASANORI)

鳥取大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：60640901

中村 公一 (NAKAMURA KOHICHI)

鳥取大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90530642

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

該当なし