

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06554

研究課題名(和文) 角運動量に関する弾性定数を従属変数化した3次元質点ばね変形解析法の開発

研究課題名(英文) A 3D LATTICE SPRING MODEL FOR SIMULATION ON DEFORMATION AND FAILURE OF ROCK-LIKE MATERIALS

研究代表者

西村 強 (NISHIMURA, Tsuyoshi)

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：90189308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：地盤構造物の安定性評価には、地盤内部の破壊面の逐次進展や、それに伴う応力変化を表現できる数値解析法の利用が有効である。ばねで連結した質点系による解析法について、室内試験により求め得る定数に基づいて、解析への入力変数の値の決定法を構築した。準静的な破壊のみならず、脆性破壊に代表される急激な破壊進展を表現できる解析法を開発して斜面やトンネルの安定性評価に有効な解析手順および解析例を提供した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

斜面やトンネルの施工中および供用中の安定性評価は、構造物自体の安定性のみならず、周辺への影響評価からも重要である。地盤内で進行する逐次的な破壊が突如として大変形に通じて大災害に結び付くことも想定される。このような例について、破壊域の想定などを可能にして被害の最小化を図ることは社会生活に安全・安心をもたらす上で重要である。このようなことに対して、一つの手法とその利用法を示した。

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 ratio, are derived. The explicit-finite difference scheme is adopted to solve the system of equation of motion. Numerical examples are presented to show the abilities and properties of this method in modeling for simulation of deformation and failure of rocks and concrete.

研究分野：地盤工学

キーワード：岩質材料 大変形 破壊 質点系解析 ばね係数 剛体回転 ひずみ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

斜面やトンネルなどの地盤構造物の安定性評価には、地盤材料の変形・強度を知った上で、数値解析を利用することが有効である。さらに、そのような解析では地盤内部の破壊面の逐次進展や、それに伴う応力変化を表現することが必要となっている。地盤・岩盤では準静的な破壊のみならず、脆性破壊に代表される急激な破壊進展を表現できる解析法の開発が構造物の安定性の検討そして急激な破壊進展時の影響範囲の想定に有効とされるからである。このような背景から、有限要素法に粒状性を加味した方法や質点系解析法に基づく方法によるが提案されている。このうち、後者は、ばねで連結した質点系による解析対象のモデル化を実施しているが、弾性定数(ヤング率 E 、ポアソン比 ν)とばねの剛性(k_n, k_s)の関係式について有効な手法が確立されていない現状にある。このため、個別要素法をはじめとする離散解析法では、実材料の挙動を再現するようにばね係数を試行錯誤的に変化させる手法が採られてきており、弾性定数や強度定数の実測値を用いた(粒状体解析法における)解析定数の理論的な決定法が必要であると認識される。本研究では、まず、変位勾配から剛体回転を除いた純粋変形分に注目した入力値を求めるための定式化を示すことにした。

2. 研究の目的

1. に述べた背景の下、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 E 、ポアソン比 ν と要素間ばね係数 k_n, k_s の関係式を誘導すること

(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

さらに、質点の連結方法によっては、 $\nu > 0.25$ のとき、せん断剛性 k_s が負となることが予見されたため、数種の連結形式を試みることで、(目的2)に対して剛体回転による量を含んだままばね係数を算出すること、などを実施する。物体内の局所的な回転が変形解析結果に及ぼす影響について知見を得ることを目指した。

3. 研究の方法

本研究は、理論的研究であるので、文献調査、プログラム開発、数値解析を主として実施する。具体的な研究手法は次の通りである。

(1) 弾性理論に基づくばね係数と弾性定数の関係式を誘導と解析

・超弾性体理論に基づいて要素間接触ばね係数 弾性定数関係式の誘導する。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たとして関係式の誘導を実施する。

・3次元解析プログラムの開発し、それを用いた静的な問題の解析を実施する。その目的は弾性定数の値が再現されることを確認することである。一軸圧縮試験の解析事例を示す。

(2) 静的破壊および波動伝播の解析の実施

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。圧裂試験を解析事例に選び、弾性理論式による破壊荷重の値への接近度を示す。続いて、平板内の衝撃波伝播の解析例により格子点連結方式が伝播の速度、方向性に及ぼす影響を明らかにする。

(3) 斜面やトンネル切羽など安定問題の解析

本項目では、実務的な解析結果を示す。斜面の解析では、限界高さ $H_c = N_c c / \gamma$ (c : 粘着力, γ :

単位体積重量, N_c :安定係数) を目安として解析モデルを設定し, 重力加速度を増加させて降伏域あるいは破壊面の進展状況を表示する. トンネルの解析では, 浅所トンネルを題材として2次元解析結果を示す.

(4)誘導式の検証

予備研究段階では, $\nu > 0.25$ のとき, せん断剛性 k_s が負となることが検討されている. このことの原因について, 解析対象の質点間の連結方法の選択あるいは剛体回転の除去法などを検討項目として探求する.

4. 研究成果

(1)弾性理論に基づくばね係数と弾性定数の関係式を誘導と解析

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.

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

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. 次式で示すように, 質点の相対変位(右辺第一項)から回転による項を除去することにより, 純粋な変形による質点間相対変位を求めている.

$$\begin{pmatrix} \Delta u_1^m \\ \Delta u_2^m \\ \Delta u_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_x^{p2} - u_x^{p1} \\ u_y^{p2} - u_y^{p1} \\ u_z^{p2} - u_z^{p1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & z^{p2} - z^{p1} & -(y^{p2} - y^{p1}) \\ -(z^{p2} - z^{p1}) & 0 & x^{p2} - x^{p1} \\ y^{p2} - y^{p1} & -(x^{p2} - x^{p1}) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

図-1の格子モデルの例において, Type 2では, k_n, k_s と E_0, ν_0 の関係を次のように求めた.

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

式(4)より格子の連結方式によっては $k_s < 0$ が生じることが判明した. そこで, 図-1の Type 3などの連結方法を試みている. この例では, 垂直ひずみに対する弾性定数とせん断ひずみに対する弾性定数に, 均質立方体の誘導で見られるような従属の関係が得られないことが判明している. なお, Type 2を用いた一軸圧縮の解析により, 軸荷重, 変形とも(基準とする線形弾性体に対して)3%程度の誤差の範囲にあった.

(2)静的破壊および波動伝播の解析の実施

圧裂試験の解析結果について, 弾性理論式による破壊荷重に十分な接近度を示すことを確認している. 波動の伝播解析について, 解析例を図-2に示す. 伝播速度については, 図中の実線(理論値)とプロット点(解析値)の比較から一定程度の精度で解析が実施できることが示されている. また, 伝播方向について, 格子形式の影響があることがわかる.

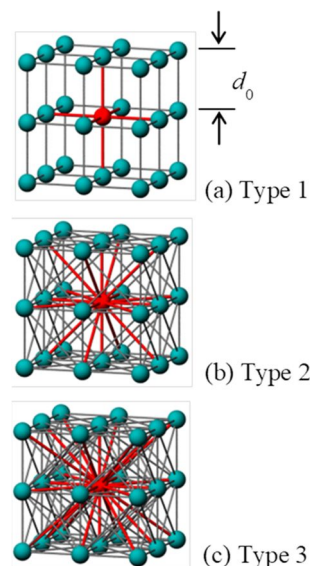
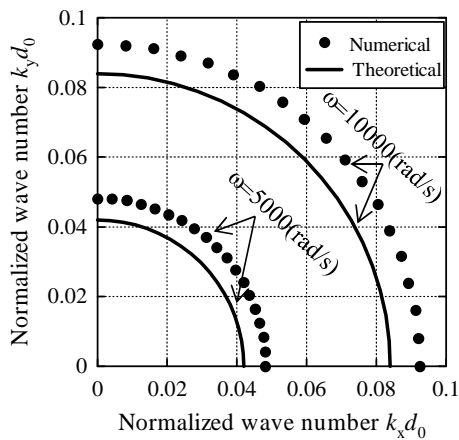
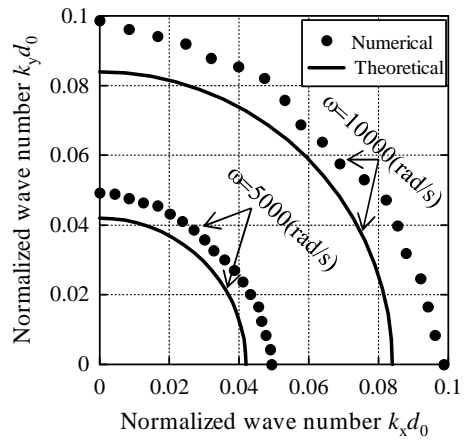


図-1 質点連結格子モデル



(a) Type 1

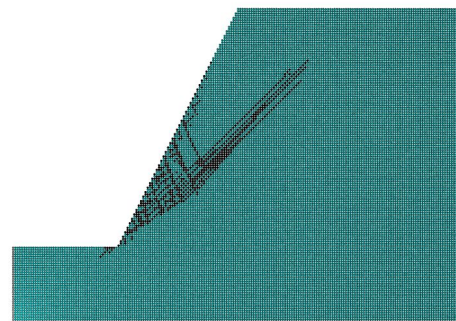


(b) Type 2

図-2 平板内を伝播する圧縮波の解析結果

(3) 斜面やトンネル切羽など安定問題の解析

本項目では、実務的解析結果を示している。斜面の解析では、限界高さ $H_c = N_c c / \gamma$ (N_c : 安定係数) を設定する斜面高さの目安として斜面の安定性を降伏域あるいは破壊面の進展状況に注目して表示した。図-3 に結果を示す。ここでは、重力加速度 G を大きくすることによって、斜面への負荷を実施している。格子点上の応力にはモールクーロンの破壊規準を適用しており、黒く塗りつぶした点は破壊が生じたものである。また、図-4 に結果



(a) 2.2G

図-3 斜面内に進行する破壊面の解析

を示すトンネルの解析では、トンネル掘削部を示す円孔部の応力解放とともに塑性域が進展し、一気に大変形そして破壊に至る状況を解析的に表現した。本解析では、有限要素解析 (FEM 解析) との比較も実施しており、円孔表面の変位量、破壊域の進展状況とも、本解析法は有限要素解析結果に近似する結果を与えることが示されている。図-4 は応力解放率 $R=94\%$ とした場合の解析例である。黒く塗りつぶした点が破壊点であり、空洞周辺から地表面に一気に (解析では 0.3sec 程度) で拡大する様子が示されている。このことから、本研究で提案した解析法では静的変形のみならず破壊そして急激は変形を表現できていると結論でき、また、有限要素解析結果とも整合的な結果を供給しているといえる。以上の解析例は、国際シンポジウム、国内シンポジウムで公表している。

(4) 誘導式の検証

予備研究段階では、 $\nu > 0.25$ のとき、せん断剛性 k_s が負となることが予見されていた。このことは、本研究の進行段階で検証された。そこで、格子形式の影響を検討した (図-1)。これに続いて、式(2)における回転項の影響を考察した。次式のように回転に関する剛性係数 κ の評価ができることが分かった。

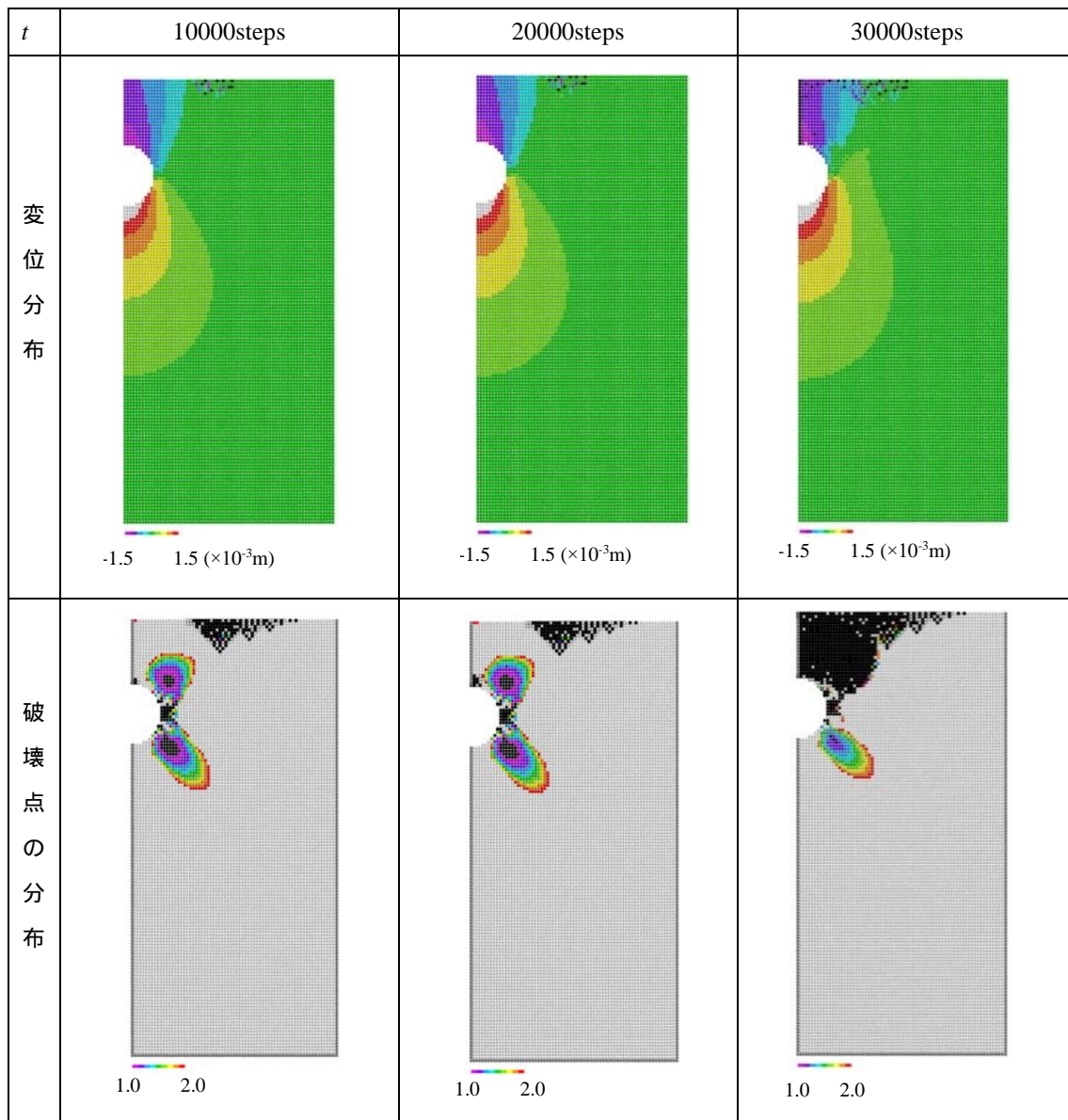


図-4 破壊域の急激な進展（応力解放率 $R=94\%$ とした場合）

$$\kappa = \frac{1}{V} \sum_{m=1}^{N_c} \left[\frac{k_s d_b^{m2}}{2} (I_1^m I_1^m + I_2^m I_2^m) \right] \quad (5)$$

しかしながら、この式を用いるとき、応力是对称性を持たないこと、剛体の回転を拘束する / しないなどについて、さらなる研究を進める必要があることも成果として得ている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 岩本 大祐・文村 賢一・西村 強・河野 勝宣	4. 巻 28
2. 論文標題 数値解析に基づくトンネル切羽周辺地盤の変形や不安定化に関する検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 トンネル工学報告集	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuyoshi Nishimura and Masanori Kohno	4. 巻 4
2. 論文標題 Numerical simulation on progressive failure in rock slope using a 3D lattice spring model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Rock Dynamics Summit in Okinawa	6. 最初と最後の頁 454-459
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuyoshi Nishimura, Masanori Kohno and Kenichi Fumimura	4. 巻 3
2. 論文標題 Numerical simulations on failure and stress wave propagation in solid materials using a 3D lattice spring model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of RocDyn3	6. 最初と最後の頁 213-218
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩本大祐，文村賢一，西村強，河野勝宣
2. 発表標題 トンネル掘削に伴う地盤の変形と破壊に関する格子ばね解析
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会（公益社団法人地盤工学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	河野 勝宣 (KOHNO Masanori) (60640901)	鳥取大学・工学研究科・准教授 (15101)	