

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

鳥取大学大学院 学 伊東 浩介

大成建設 正 文村 賢一

鳥取大学大学院 フェロー 西村 強 正 河野 勝宣

1. はじめに

個別要素法 (DEM) など, 解析対象を質点あるいは剛体をばねで連結した系でモデル化する手法では, ばね係数など係数値の決定に (地盤材料に対して計測できる指標を用いた) 有効な方法が確立されていない. そこで, 仮定値を適宜変更しながら目標とする地盤材料の変形特性や強度特性を再現したうえで, 地盤挙動や構造物との相互材用の解析を行うことが多いと思われる. 本報告では, 弾性係数, ポアソン比などの供試体レベルで計測可能な指標に基づいてばね係数値を決定した上で, 単一き裂を有する石膏供試体の圧縮試験の再現解析について報告する.

2. 3次元格子ばね解析法と入力値の決定手順

第1章で述べたように解析対象は, ばねで連結された質点系としてモデル化される. 質点個々の運動は, 次の運動方程式により表現される.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f \quad (1)$$

ここに, m は質量, c は減衰係数, f は外力である. ここで取り扱う数値解析法は, 式(1)を陽形式時間差分で解くとともに, 質点の運動で物体の変形を表現する解析法である. まず, 式(1)のばね係数 k を, 対象とする材料の弾性係数や強度特性と関連付ける手順について述べる. 応力 σ_{ij} が, 0 (ゼロ) の状態から载荷されて, 物体にひずみ e_{ij} が生じているとき, 位置 x_j にある点 p の変位が次のように書けると仮定する.

$$u_i^p = e_{ij} x_j^p \quad (2)$$

ここに, $i=1, 2, 3$ であり, 全体座標成分を表している (図-1). 各格子点間には, 相対変位 Δu_i^m が生じている.

$$\Delta u_i^m = u_i^{p1} - u_i^{p2} = e_{ij} (x_j^{p1} - x_j^{p2}) = e_{ij} d_m I_j^m \quad (3)$$

ここに d_m は p_1 と p_2 間のばねの長さ, I_i^m は法線方向の単位ベクトルである. 相対変位によりばねに生じる力 f_i^m は,

$$f_i^m = k_n \Delta u_j^m I_j^m I_i^m + k_s (\Delta u_i^m - \Delta u_j^m I_j^m I_i^m) \quad (4)$$

と計算できる. 単位体積当たりのひずみエネルギー Π を次式で表すことにする.

$$\Pi = \frac{\Pi_b}{V} = \frac{1}{V} \sum_{m=1}^{N_c} \frac{1}{2} (\Delta u_i^m f_j^m + \Delta u_j^m f_i^m) = \frac{1}{V} \sum_{m=1}^{N_c} \frac{1}{2} (e_{ij} d_m I_j^m f_j^m + e_{ji} d_m I_i^m f_i^m) \quad (5)$$

応力 σ_{ij} は, このひずみエネルギーの勾配として与えられるとすれば,

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Pi}{\partial e_{ij}} = \frac{1}{2V} \sum_{m=1}^{N_c} (d_m I_i^m f_j^m + d_m I_j^m f_i^m) \quad (6)$$

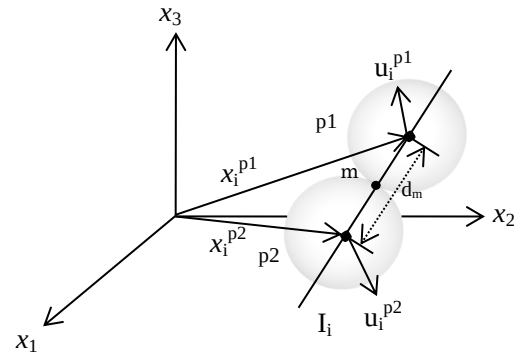


図-1 解析対象内の連結格子点

キーワード 格子ばね解析法, 弾性係数, ポアソン比, ばね係数, 破壊, 進展

連絡先 〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101 鳥取大学大学院工学研究科 TEL0857-31-5297

となる． N_c は格子系内部の総連結数であり，次のように弾性係数テンソル C_{ijkl} は与えられる．

$$C_{ijkl} = \frac{1}{V} \sum_{m=1}^{N_c} \left[\frac{k_t^m d_m^2}{4} (I_j^m I_k^m \delta_{il} + I_i^m I_k^m \delta_{jl} + I_j^m I_l^m \delta_{ik} + I_i^m I_l^m \delta_{jk}) + (k_n^m - k_t^m) d_m^2 I_i^m I_j^m I_k^m I_l^m \right] \quad (7)$$

ここに， δ_{ij} はクロネッカーのデルタである． β は d_m ， I_i^m により求められる係数として，ばね係数と弾性定数が次式で関連付けられる．

$$k_n = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{3E}{(1-2\nu)} \quad (8) \quad k_s = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{(1-4\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (9)$$

なお，剛体回転を除去した純粋な変形量の算出等の詳細な記述は，別報¹⁾を参照されたい．

3. 単一き裂を有する石膏供試体の圧縮試験とその解析

格子点間に発生している力 f_j^m が既知であれば，式(6)により格子点上の応力を求めることができる．そして，その応力状態が強度に達した時点で，その格子点と連結格子点間のばねの力を解放してやれば破壊を表現できる．

図-2 に単一亀裂を有する圧縮解析モデルの概寸法を，図-3 に格子点の連結モデルを示す．この解析では，Type-II のみを採用した．

別途実施した石膏供試体の圧縮試験より求めた $E_0=680\text{MPa}$ ， $\nu_0=0.20$ を入力値として式(8)(9)に用いて k_n ， k_s の値を算出した．このばね係数値に対して格子系モデルが示す E_0' ， ν_0' の入力値 E_0 ， ν_0 に対する近似度については，別報²⁾を参照されたい．格子点における引張強度として $\sigma_t=3.49\text{MPa}$ を与えた解析における破壊の開始状況を図-4 に示す．同図には，図-2 のモデルと同寸法の供試体の圧縮試験結果も示している．

謝辞：本研究は，科学研究費補助金（基盤研究(c)，No.26420482）の補助を受けて実施している．記して，謝意を表する．

参考文献

- 1) 西村 強他：格子バネモデルによる弾性体の変形解析とバネ係数の決定法，土木学会第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.68-73, 2014. 2) 三橋大地他，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，土木学会第70回年次講演会（投稿中），2015.

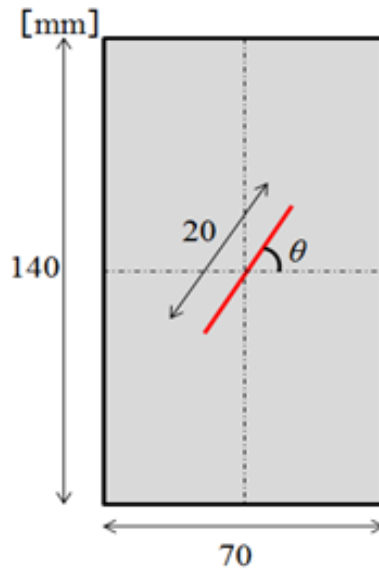


図-2 解析モデルの寸法

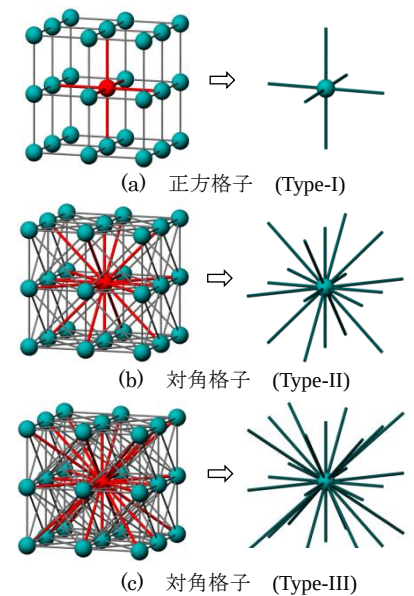


図-3 質点連結格子モデル

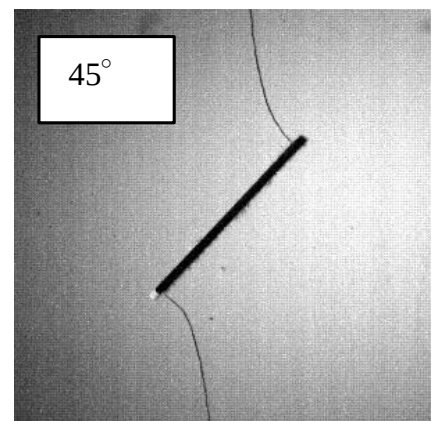
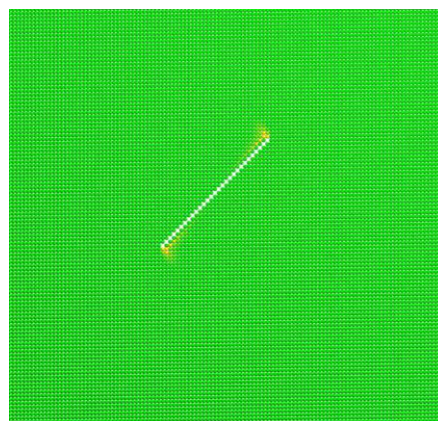


図-4 解析結果と実験結果の比較($\theta=45^\circ$)