

3次元個別要素法のコンクリート供試体の圧縮破壊解析への応用

防衛大学校建設環境工学科 学生会員 原木大輔 学生会員 白石博文 正会員 香月 智 正会員 深和岳人

1. 緒言

コンクリート材料の弾性挙動や破壊限界が重要な場合には、有限要素法が有効であるが、衝撃問題のように破壊後の破片の挙動にまで意義を有する場合には、個別要素法による一般化が容易である^{1,2)}。本研究は、3次元個別要素法³⁾を用いて、基礎的にコンクリートの圧縮解析を行うことを試みたものである。

2. 解析手法

本解析では、コンクリートを図-1に示すような細かい球形要素の集合体と考え、要素間に図-2に示すようなコンクリートの構成則に対応する接触ばねを導入する。この時の要素の運動方程式は次式ようになる。

$$m_i \ddot{u}_x + \sum_{j=1}^n C_{ij} \dot{u}_x + \sum_{j=1}^n k_{ij} u_x = F_x \tag{1a}$$

$$m_i \ddot{u}_y + \sum_{j=1}^n C_{ij} \dot{u}_y + \sum_{j=1}^n k_{ij} u_y = F_y \tag{1b}$$

$$m_i \ddot{u}_z + \sum_{j=1}^n C_{ij} \dot{u}_z + \sum_{j=1}^n k_{ij} u_z = F_z \tag{1c}$$

$$I_i \ddot{\phi}_x + \sum_{j=1}^n C_{ij} r \dot{\phi}_x + \sum_{j=1}^n k_{ij} r \phi_x = F_{xR} \tag{1d}$$

$$I_i \ddot{\phi}_y + \sum_{j=1}^n C_{ij} r \dot{\phi}_y + \sum_{j=1}^n k_{ij} r \phi_y = F_{yR} \tag{1e}$$

$$I_i \ddot{\phi}_z + \sum_{j=1}^n C_{ij} r \dot{\phi}_z + \sum_{j=1}^n k_{ij} r \phi_z = F_{zR} \tag{1f}$$

ここで、 m ：質量、 I ：慣性モーメント、 C ：減衰定数、 k ：バネ定数、 u ：変位、 ϕ ：回転変位、 F ：要素に働く合力、 F_R ：要素に働く合モーメント、 (\cdot) ：時間に関する1次微分。

ところで、コンクリート材料は初期状態では引張限界力を有していること、個別要素法で初期状態では、要素間わずかにオーバーラップ δ_0 が生じることを考慮して、図-3のような構成則を用いた。すなわち

$$\text{(引張破壊前)} \quad P_n = k_n (\delta_n - \delta_{n0}) \quad (P_n \geq P_{nf}) \tag{2a}$$

$$\text{(引張破壊後)} \quad P_n = k_n \delta_n \quad (\delta_n \geq 0) \tag{2b}$$

$$P_n = 0 \quad (\delta_n \leq 0) \tag{2c}$$

ただし、 P_n ：要素に作用する法線方向の力、 P_{nf} ：引張限界力、 k_n ：法線方向のバネ定数、 δ_n ：法線方向の接触量、 δ_{n0} ：法線方向の初期接触量、

また、接線方向バネについては

$$P_s = k_s \delta_s \tag{3a}$$

ただし、

$$|P_s| \leq c + \mu P_n \tag{3b}$$

ただし、 P_s ：要素に作用するせん断方向の力、 k_s ：せん断方向のバネ定数、 δ_s ：せん断方向のバネの変形量、 c ：粘着力、 μ ：摩擦係数。

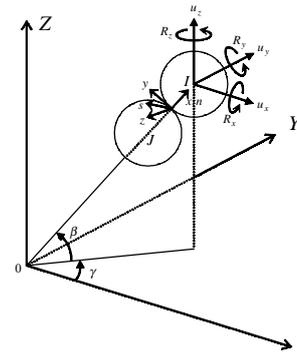


図-1 一般座標系における要素の変位

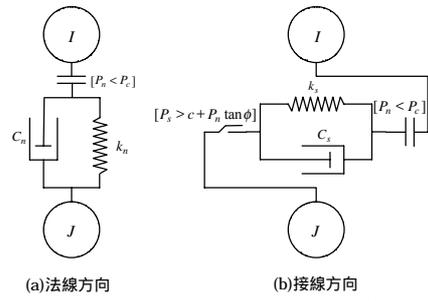


図-2 局所座標系の接触力モデル

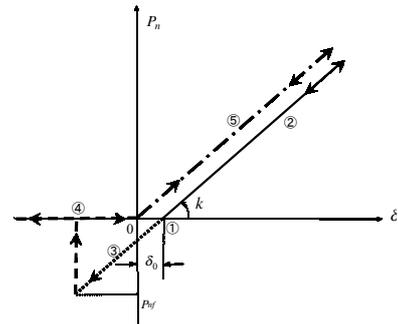


図-3 法線方向バネの構成則

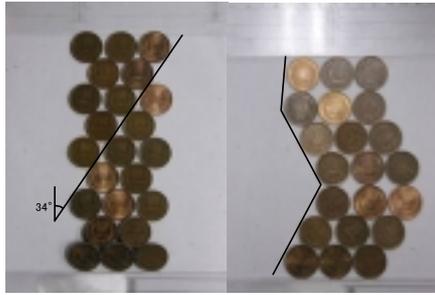
3. 二次元鋼円板要素実験と解析

3次元解析に先立って、写真-1に示すような金属円形板要素を長方形に並べて、圧縮実験を行い、その挙動と解析を比較検討した。

写真-1(a)の場合は、円形要素を千鳥状に配列したものであり、(b)の場合は、格子状に規則配列したものである。圧縮力を加えると、モデル1では、斜め36°の傾きで破壊線が形成されるが、モデル2では、上から3段目の円形要素が右方向に飛び出したように動いて、座屈破壊性状を形成する。この条件を、図-4(c)に示すように、前後面に拘束板で挟んだ解析条件下で(a)、(b)に示すような配列モデルを用いて解析した。図-5にモデル1に対する解析結果を示す。解析は実験とほぼ同様に34°線上に破壊線が現れ、良好なシミュレーションが得られている。図-6にモデル2の解析結果を示す。この場合においても、やはり同様な破壊特性がシミュレートできている。

キーワード：3次元個別要素法、圧縮破壊、数値シミュレーション

連絡先：〒239-8686 神奈川県横浜須賀町走水1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL 046-841-3810 FAX 046-844-5913



(a)モデル1 (b)モデル2
写真-1 円板要素実験

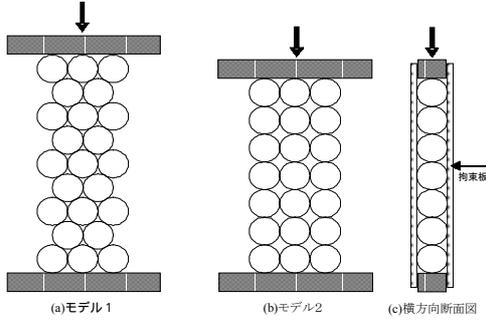


図-4 解析モデル

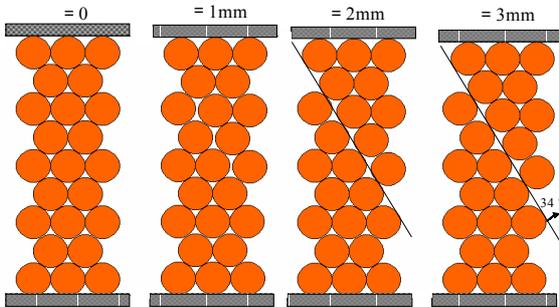


図-5 モデル1の解析結果

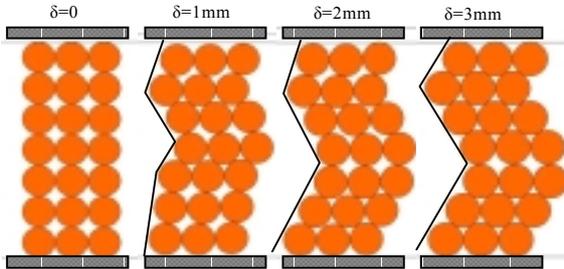
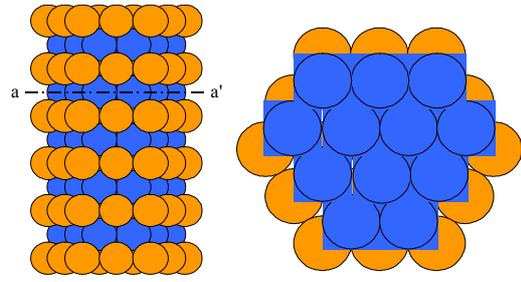


図-6 モデル2の解析結果

4. 三次元解析

続いて、図-7に示すような3次元供試体の圧縮解析を行った。要素配列は6方最密充填であり、1個要素が12点の接触点を有するものである。この場合、図-7(b)に見るように、灰色で示した段の要素は、上下左右に対称な六角形であるが、中間の黒色要素は相互に接触状態を保つために、上下非対称となっている。この状態で、二次元解析と同様に上下の板を圧縮するように近づけると、図-8に示すように $\delta = 5mm$ で 38° の斜め線に沿ったズレが現れる。その後、その破壊線に沿ったズレが増すと同時に水平方向に膨張するような変形を伴って、破壊が進行していることがわかる。

本解析で得られた応力～ひずみ曲線を図-9に示す。ひずみに比例して応力も増大し、約 $30(N/mm^2)$ で破壊に至って急激に効力を失う。コンクリート材料の非線形的な抵抗則を表すことはできないが、概ね抵抗の増大と破壊を



(a)側面図 (b) a-a' 断面図

図-7 3次元解析モデル

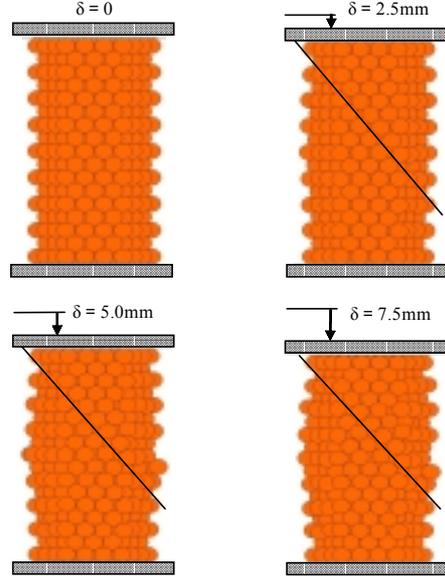


図-8 3次元モデルの解析結果

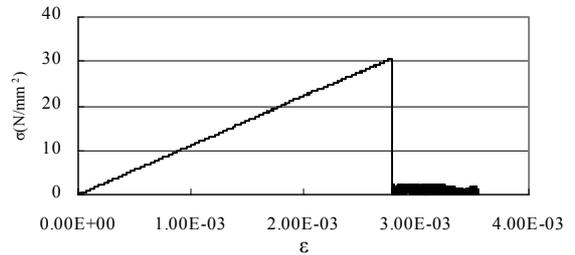


図-9 応力～ひずみ曲線

表現できる。

5. 結 言

本研究では、三次元個別要素法を用いてコンクリートの圧縮破壊解析を試みた。粒状体の集合によって、一軸圧縮破壊の概要を表現できることが認められる。

しかし、定量的な整合性を得るためには、さらに検討が必要である。

参考文献

- 1) 伯野元彦：破壊のシミュレーション，森北出版，pp25～38，1997。
- 2) 中田吉彦：個別要素法による落石覆工の衝撃問題に解析に関する研究，金沢大学博士論文，pp.21～32，2002。
- 3) 宮川千尋，深和岳人，香月智：3次元個別要素法によるオープン型砂防ダムの土石流捕捉効果解析，第29回関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.32～33，2002。