

3次元個別要素法によるコンクリート供試体の弾塑性解析

防衛大学校 学生会員 原木 大輔
 防衛大学校 学生会員 白石 博文
 防衛大学校 正会員 香月 智

1. 緒言

離散体の解析を基礎とした個別要素法は、亀裂の発生・進展に起因する崩壊メカニズムの再現が可能であるとされている¹⁾。本研究は3次元個別要素法を用いて、静的圧縮試験におけるコンクリート供試体の破壊現象を再現することを試みたものである。

2. 解析手法

2.1. 基本式

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²⁾。

時々刻々運動方程式は中心差分法を用いて解く。すなわち、

$$\text{(速度)} \quad \dot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t + \Delta t) - \mathbf{u}(t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (1a)$$

$$\text{(加速度)} \quad \ddot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t + \Delta t) - 2\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}(t - \Delta t)}{\Delta t^2} \quad (1b)$$

ここで、 \mathbf{u} :変位ベクトル、 $(\dot{\quad})$:時間に関する1次微分。

これを運動方程式と連立して解くと、変位を求める基本式は次式となる。

$$\mathbf{u}(t + \Delta t) = \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} + \frac{\mathbf{C}}{2\Delta t} \right)^{-1} \left\{ \mathbf{F}(t) + \frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} (2\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t - \Delta t)) - \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \frac{\mathbf{C}}{2\Delta t} \mathbf{u}(t - \Delta t) \right\} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{M} :質量マトリクス、 \mathbf{C} :減衰マトリクス、 \mathbf{K} :集成要素剛性マトリクス、 \mathbf{F} :外力ベクトル。

ところで、コンクリート材料の応力～ひずみ曲線のモデル化については、図-3に示すポポビクス式³⁾を採用した。

$$\text{(ポポビクス式)} \quad P = P_{\max} \left(\frac{\delta}{\delta_{\max}} \right) \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{\delta}{\delta_{\max}} \right)^n} \quad (3)$$

ここで、 P :法線方向のばね力、 δ :法線方向ばねの任意の変形量、 P_{\max} :法線方向ばねの強度、 δ_{\max} :強度に対応するばねの変形量、 n :非線形パラメータ

接線方向ばねについては

$$P_s = k_s \delta_s \quad (4a)$$

ただし、モール・クーロンのすべり限界条件を与える。

$$|P_s| \leq c + \mu P_n \quad (4b)$$

ここで、 P_s :要素に作用するせん断方向の力、 k_s :せん断方向のばね定数、 δ_s :せん断方向のばねの変形量、 c :粘着力、 μ :摩擦係数。

2.2. 解析モデル

図-4(a)に示すように球形要素を配置したモデルを用いて解析を行った。図-(b)に示すようにモデルの前後面を平面要素で挟むことにより、2次元の解析を可能とした。静的圧縮破壊試験をシミュレートするためモデルの上下を平面要素で挟み、上側の平面を一定の速度で下げることで載荷を表現した。

キーワード：3次元個別要素法、ポポビクス式、モール・クーロンの破壊基準

連絡先：神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL 046-841-3810 FAX 046-844-5913

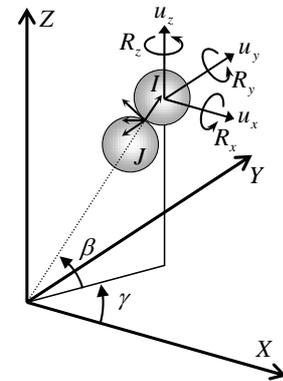


図-1 一般座標系における要素の変位

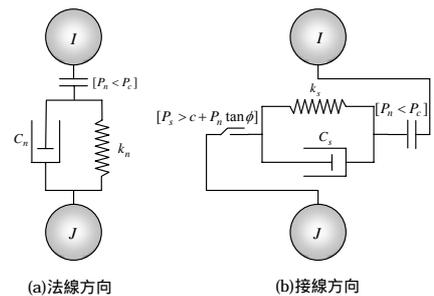


図-2 局所座標系の接触力モデル

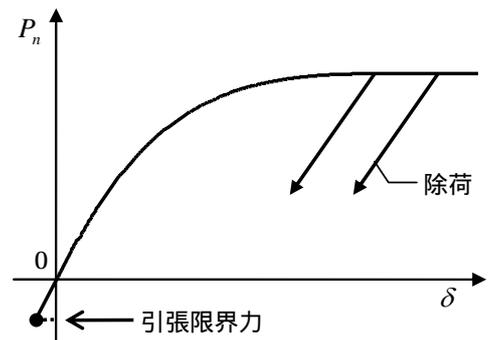


図-3 降伏条件

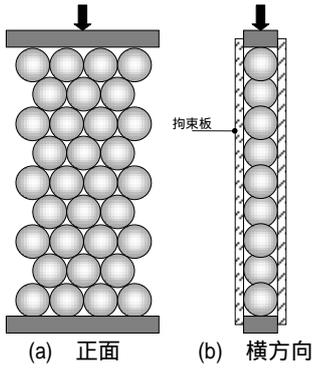


図-4 解析モデル

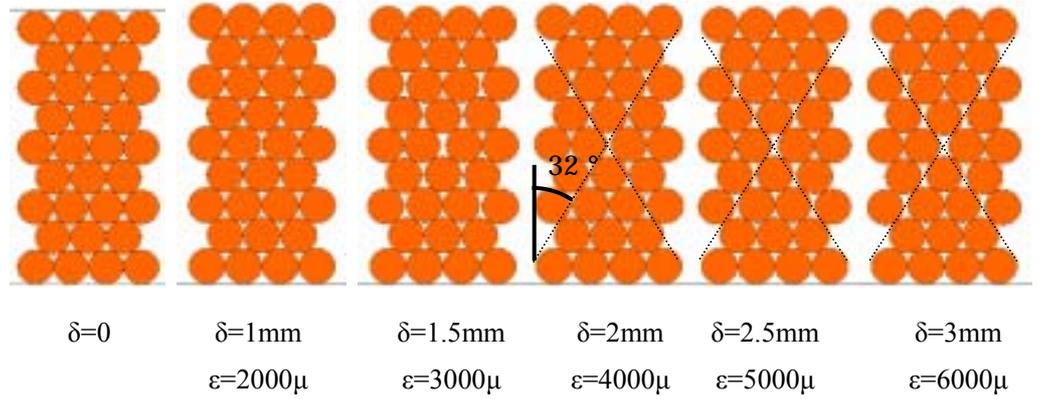


図-5 解析結果

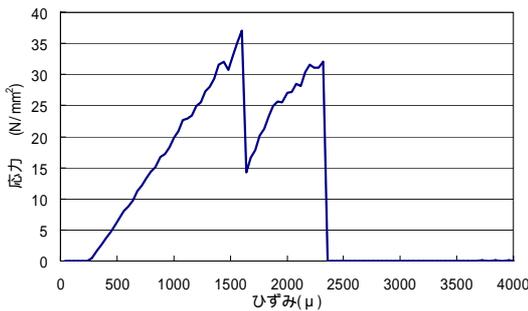


図-6 応力～ひずみ関係

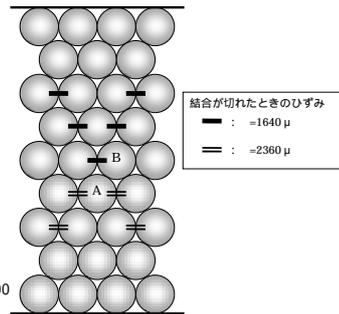
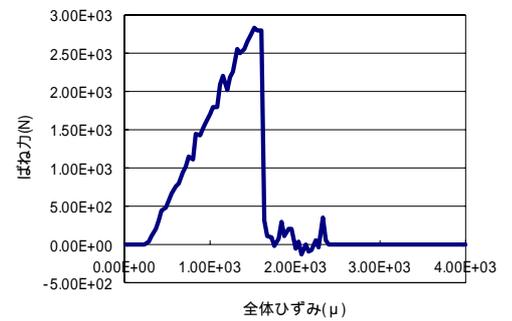
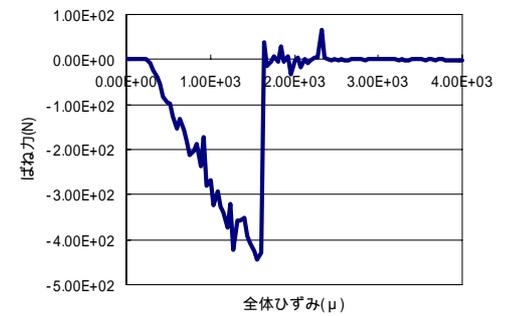


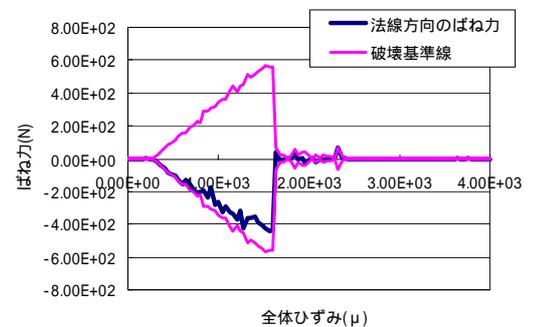
図-7 引張限界分布



(a) 法線方向



(b) 接線方向



(c) 破壊基準線

図-8 要素 A-B 間のばね力

3. 解析結果

図-5に解析結果を示す.変形量が2mmになると斜め32°に明確な破壊線が形成されている.この解析に対する応力～ひずみ関係を図-6に示す.ひずみが1500 μ ($\delta=0.75$ mm)を超えた付近で応力が最大の37N/mm²となり,その後耐力が失われている.これは図-7に示す箇所要素間ばねが引張限界に達し,亀裂が生じたためである.図-7に示す要素A-B間に生ずる法線方向と接線方向のばね力をそれぞれ図-8(a),(b)に示す.図-8(c)は法線方向ばねとモール・クーロンの破壊基準から求められる基準線と接線方向ばね力を示しているが,接線方向ばね力が基準線に達していることから,全体ひずみ2000 μ 前において要素A-B間で塑性的なすべりが生じていることがわかる.

4. 結言

本研究では,3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.ばねの構成則や破壊基準など局所の接触力モデルが,亀裂の発生,進展に起因する要素であることが認められる.

参考文献

- 1) 中川光雄, 蔣宇静, 江崎哲郎: 個別要素法を用いた不連続性岩盤における亀裂発生・進展のモデル化, 土木学会論文集, No.543/-36, 83-90, 1995.10
- 2) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, pp25-38, 1997
- 3) Popovics, S.: Factors affecting the elastic deformations of concrete, Proc. of the Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, pp.172-183, Aug., 1971.