

個別要素法による急速载荷を受けるコンクリート供試体の破壊挙動解析

防衛大学校 学生会員 原木 大輔
防衛大学校 正会員 ○香月 智

1. 緒言

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の破壊は、表面破壊、裏面剥離、衝突物の貫入・貫通など、コンクリート片の飛散現象をとともなう。また、このような飛散片による2次被害が問題となることが少なからず存在する。このような観点から、個別要素法¹⁾が有する飛散問題への適用性を検討し、工学的な応用性を高めることは重要である。そこで本研究は、三次元個別要素法の解析プログラムを作成し²⁾、急速载荷を受けるコンクリート供試体の破壊挙動に対する適用を試みたものである。

2. 解析手法

本解析では、図-1に示すような要素モデルについて、3次元における運動方程式を中心差分法を用いて解く。ただし、速度項は後進差分とした。運動方程式を解くと、変位を求める基本式は次式となる。

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

ここで、 $\mathbf{u}$: 変位ベクトル、 $\mathbf{M}$: 質量マトリクス、 $\mathbf{D}$: 減衰マトリクス、 $\mathbf{K}$: 剛性マトリクス、 $\mathbf{F}$: 外力ベクトル、 $\Delta \mathbf{u}$: Δt 秒間の $\mathbf{u}$ の増分。

法線方向のばね力については、図-2(a)に示す Popovics 式を用いる。すなわち、

$$P_N = P_{\max} (\delta_N / \delta_{\max}) \frac{n}{(n-1) + (\delta_N / \delta_{\max})^n} \quad (2)$$

ここで、 P_N : 法線方向のばね力、 δ_N : 法線方向バネの任意の変形量、 $P_{\max}$: 法線方向バネの強度(コンクリートの圧縮強度に相当するばね力)、 $\delta_{\max}$: 強度に対応するばねの変形量(最大荷重時の変形量に相当するばねの変形量)、 n : 非線形パラメータ。

この際、引張力は引張強度に達するまでは線形弾性とし、その後は引張破壊エネルギーによって軟化勾配を変化させるモデルに従ってばね力を低減させた。

接線方向ばねは図-2(b)に示すように、線形モデルとし、モール・クーロンのすべり限界条件を与える。すなわち、

$$P_s = k_s \delta_s \quad (3a)$$

$$\delta_s = \sqrt{\delta_K^2 + \delta_L^2} \quad (3b)$$

$$|P_s| \leq C + P_N \tan \phi = C + P_N \cdot \mu \quad (4)$$

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合成変形量、 δ_K, δ_L : せん断方向のそれぞれK軸、L軸方向のばねの変形量、 C : 粘着力、 ϕ : 摩擦角、 μ : 摩擦係数。

なお、本解析においては、一端すべり限界に達した後にせん断塑性変形量に応じて粘着力と摩擦係数を低減させることで、モール・クーロンのすべり限界条件に達した後の軟化を表現した。

よって、法線方向ばね力とせん断ばね力は一連の限界状態を有する。その法線方向、接線方向の限界条件の関係を図-3に示す。

3. 実験の概要

普通強度コンクリートの円柱供試体に対する静的および急速圧縮载荷の実験結果を図-4に示す³⁾。コンクリート円柱供試体は、直径5cm、高さ10cmである。側方拘束圧が大きくなると、強度が大きくなり軟化勾配

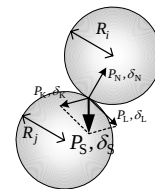
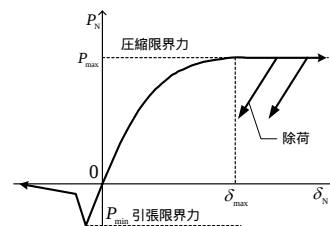


図-1 3次元球体要素



(a) 法線方向ばね

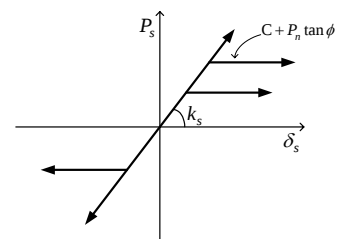
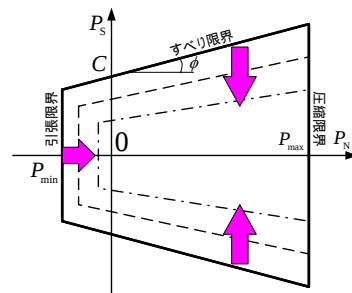
(b) 接線方向ばね
図-2 ばねの構成則

図-3 限界条件

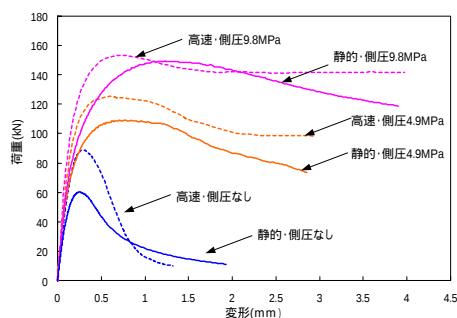


図-4 実験結果

キーワード：三次元個別要素法、急速载荷

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

表-1 解析パラメータ

	ばね係数		減衰係数 h	粘着力 C (N)	摩擦角 ϕ (°)
	法線方向 k_N (N/mm)	接線方向 k_S (N/mm)			
静的載荷	1.402×10^8	3.584×10^7	0.05	4.000×10^2	20
高速載荷	1.718×10^8	7.094×10^7	0.05	7.280×10^2	20

が小さくなることがわかる．また，急速載荷実験はひずみ速度 $v_\epsilon = 0.2(1/s)$ で載荷し，側圧なしの場合で静的に比べると初期勾配が約1.5倍，強度が約1.8倍と大きくなっており，いわゆるひずみ速度効果が見られる．

4. 解析モデル

解析モデルは，図-5に示すように直径5cm，高さ10cmのコンクリート円柱供試体を球形要素約2000個を用いて最密配列し，モデル化したものである．この解析モデルの上下を平面要素ではさみ，下の平面は固定，上の平面を載荷条件に合わせた速度で強制的に下げることにより載荷を表現した．解析モデルに作用する荷重は平面要素が球形要素から受ける力の合計から求め，載荷する平面の変位量をもって解析モデルの全体変形とした．なお，実験における供試体端面と載荷板の摩擦を考慮するために解析モデルの最上下段水平方向の動きを拘束した．表-1に，解析パラメータを示す．

5. 解析結果

図-6に静的載荷の荷重～変形関係を実験結果と比較して示す．側圧なしの場合，最大耐力までの荷重増加域から最大耐力後の荷重軟化域まで，ほぼシミュレートできている．側圧4.9MPaの場合は，側圧なしと比べて軟化勾配を小さくすることにより軟化域まで良好なシミュレーション結果が得られた．また，側圧9.8MPaの場合は，最大耐力が実験結果に比べて小さいが，軟化勾配はほぼ実験結果をシミュレートできている．図-7に急速載荷の荷重～変形関係を実験結果と比較して示す．急速載荷の場合は，側圧なし，4.9MPa，9.8MPaともに良好なシミュレーション結果が得られた．

図-8には，急速載荷・側圧なしの場合の解析モデル全体の挙動と実験における供試体の挙動を比較して示す．図中の解析結果の直線は要素の速度ベクトルを示している．実験結果で破壊後に破砕片が飛散しているのと同様に，解析結果でも破壊後にモデルの外周の球形要素が外側に向かって飛散している様子を表現できている．

6. 結 言

急速載荷を受けるコンクリート供試体の破壊挙動に個別要素法を適用し，破砕片の飛散挙動を表現できることを示した．

参考文献

- 1) 伯野元彦：破壊のシミュレーション-拡張個別要素法で破壊を追う-，森北出版，pp.25-38，1997.
- 2) 原木ら：個別要素法によるコンクリート圧縮破壊解析におけるモデル・ケーン条件の及ぼす影響，応用力学論文集，Vol7，No2，pp.757-766，2004.4.
- 3) 上林ら：高ひずみ速度・三軸圧縮応力下におけるコンクリートの動的軟化特性とそのモデル化，土木学会論文集，No.669/ -50，pp.135-148，2001.2.

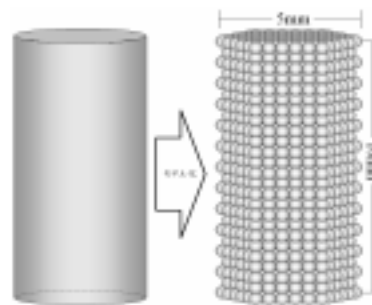


図-5 解析モデル

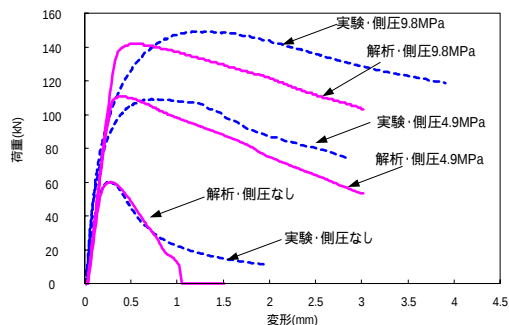


図-6 静的載荷の荷重～変形関係

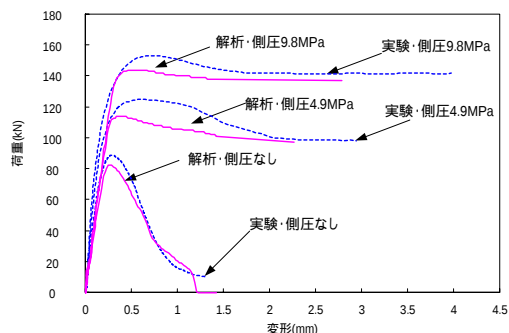
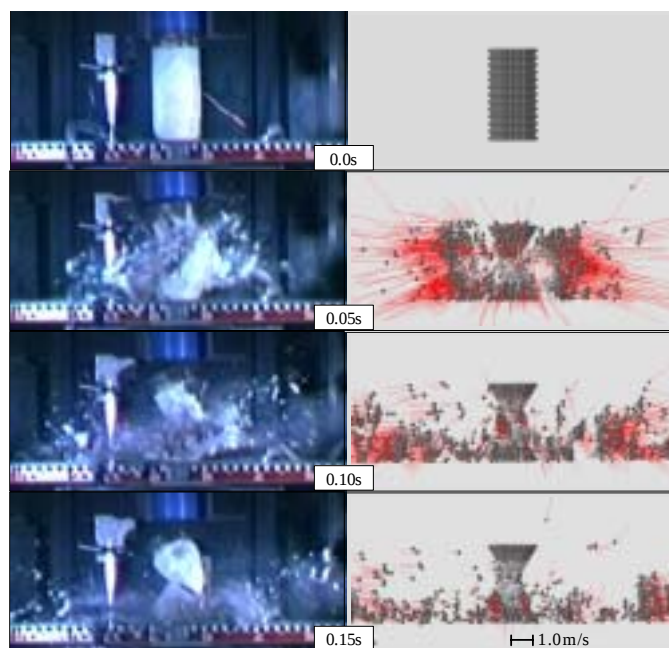


図-7 高速載荷の荷重～変形関係



(a) 解析結果 (b) 実験結果

図-8 破砕片の飛散