個別要素法によるコンクリート圧縮破壊解析における粘着力が破壊に及ぼす影響

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¹⁾.そこで本研究では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し,モール・ク ーロンの破壊基準の粘着力を変化させることが破壊現象に及ぼす影響につい て検討したものである.

2. 解析手法

2.1 基本式

本解析では、コンクリートを細かい球形要素の集合体と考え、要素間にコン クリートの構成則に対応する接触ばねを導入し²⁾、時々刻々運動方程式はオイ ラー法に比べて計算結果が安定して得られる中心差分法を用いて解く、ただ し、速度項は後近差分とした.

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

ここで,**u**:変位ベクトル,(^{*}):時間に関する1次微分.

 Λt

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.

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

ここで, **M**:質量マトリクス, **D**:減衰マトリクス, **K**:剛性マトリクス, **F**:外 カベクトル.

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-1 に 示すポポビクス式 ³⁾を採用した.

$$P = P_{\max} \left(\delta / \delta_{\max} \right) \frac{n}{(n-1) + (\delta / \delta_{\max})^n}$$
(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,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,

$$P_s = k_s \delta_s \tag{4a}$$

$$|P| \le c + \mu P \tag{4b}$$

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-2(a),(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次元モデルの条件で解析した.載荷状態は 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表現した.解析に用いた条件を表-1 に示 す.粘着力*C* = 15N と*C* = 45N の2種類である.





図-2 解析モデル

表-1 解析条件

バネ	法線方向 Kn	7.9×10 ⁷ N/m	
係数	接線方向 Ks	1.6×10 ⁷ N/m	
減衰率 H		0.05	
粘着力 C		15 N	
		45 N	
摩擦角 φ		20°	

3. 解析結果

図-3に解析で得られた荷重~変形関係を示す.粘着力が大きくなると 明瞭に最大荷重が大きくなることがわかる.図-4 にC = 45Nとした場 合の変形の推移を示す.図中の 印は法線方向バネの引張力が限界に達 したことを、印はせん断方向バネがモール・クーロンの破壊基準に達 したことを示している. $\delta = 0.125mm$ では水平方向に隣り合う要素間 において法線方向バネが引張限界に達し,結合が切れている. $\delta = 0.250mm$ ではクロス線状にせん断限界に達した点が存在してお り.破壊線が形成されている.変形が $\delta = 0.250mm$ より大きくなると、

形成された破壊線に沿って ずれて変形して大きくなり, いわゆる実験で観察される せん断破壊となっているこ とがわかる.

図-5 には、図-4(e)に示し た 3 つの要素間の接触で水 平方向の接触と,斜め方向の 接触バネに生ずる力の推移 を図-3 の図中に示した

の段階に対応して示
 す.これより、C=15Nの
 場合には、で水平方向に
 隣り合う要素間において
 法線方向バネが引張限界
 に達し,結合が切れている,

で法線方向バネに生 ずる力は増加し,せん断方 向バネに生ずる力は減少 していると同時にモー



平均ひずみ

3000

4000

5000

2000

1000

6000

5000

6000 35

30

25

図-5 接線方向ばね力~法線方向バネ力関係

ル・クーロンの破壊基準に達し、 でせん断滑りが生じ法線方向せん断方向ともに減少している. *C* = 45Nの場合 には、 で水平方向に隣り合う要素間において結合が切れている、 で法線方向バネに生ずる力は増加しせん断方向 バネに生ずる力は減少している、 でモール・クーロンの破壊基準に抵触し、この時点でモデル全体は最大荷重を受 けている、 で塑性滑りが生じ法線方向せん断方向バネ力ともに減少しており、軟化傾向の体力低下と対応している. 4. 結 言

本研究では個別要素法を用いてコンクリート圧縮破壊解析を試みた.荷重変形関係において降伏点と軟化を表現 できるとともに,破壊に起因する要素として粘着力がコンクリートの耐力に与える影響を明らかにした.

参考文献

- 中川光雄,蒋 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,pp.83-90,1995.10
- 2) 伯野元彦:破壊のシミュレーション,森北出版,pp.25-38,1997
- 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.