

III-175 回転自由度を拘束した個別要素法による平面ひずみ圧縮試験のシミュレーション

東電設計株式会社 正会員 ○中瀬 仁 正会員 栗田 哲史 正会員 安中 正
東京電力株式会社 正会員 安田 登 正会員 藤谷 昌弘

1. まえがき アクリル棒を材料とした供試体に対する平面ひずみ圧縮試験によればその強度は内部摩擦角 25° 程度で砂(35° 程度以上)に比べてかなり小さい。この実験を通常の個別要素法でシミュレーションした結果も同様であり、要素の物理摩擦角を非現実的に大きく設定してもさほど強度はあがらない。これは要素の断面形状が円であるためであり、改良型個別要素法¹⁾を用いて円要素3つを連結し断面がお結び型の要素からなる粒状体に対する平面ひずみ圧縮試験のシミュレーションでは、内部摩擦角で 45° 程度の強度を発揮した²⁾。本研究では、お結び型の要素からなる粒状体の強度が大きい原因を、要素形状による要素の回転の起こり難さによるものと考えて、要素の回転運動を完全に拘束したシミュレーションを行いその強度を通常のシミュレーション結果と比較した。

2. アクリル棒を用いた平面ひずみ圧縮試験とシミュレーション 直径2mm、3mmおよび4mm、長さ16cmのアクリル丸棒約1800本をメンブレンに包み込み、幅7.5cm、高さ20cmの上下面の摩擦は除去していない供試体に負圧をかけて圧縮する試験を対象とした³⁾。解析の条件を表-1に示す。詳細は文献1)および2)を参照されたい。表に示した条件は通常の回転を拘束しない解析および回転を拘束した解析の両者において共通である。

解析上完全に回転を拘束するため、通常用いている個別要素法のアルゴリズムから要素の回転に係わる項をすべて削除した。これは要素の運動に関して並進運動のみの2自由度運動方程式を解くことと等価である。この場合、ある要素が他の要素や境界との接点から受ける合力はその大きさと方向を保ちながらその要素の中心に作用することになり、要素間の相対変位は「すべり」のみで生じる。

3. 解析結果 図-1に回転を拘束した解析と拘束しない解析の主応力比-ひずみ曲線について比較した結果を示す。回転を拘束した解析は軸圧縮に伴って主応力比が増加し軸ひずみ1%で内部摩擦角が 57° に達するのに対して、回転を拘束しない場合は、たかだか 19° であった。このことから、断面が円である要素からなる粒状体が外力を受け変形する際、普通は、要素間の相対変位を「要素の回転」により容易に生じるのでその強度が小さいが、回転を拘束して要素間の相対変位を「すべり」によってのみ生じさせる場合には摩擦抵抗により非常に大きな強度を発揮することが解った。

図-2にせん断ひずみの分布について回転を拘束した解析と拘束しない解析の比較した結果を示す。メッシュ内のせん断ひずみがしきい値2%を越える場合黒、1%から2%の場合×印、1%以下を白で示す。ただし、せん断ひずみ量は要素を個別に扱ったものではなく、マイクロゾーニングにより、対象とするメッシュ(正方形)の左右両隣のメッシュについてこれに含まれる要素の平均鉛直移動量の差の絶対値と上下両隣のメッシュに含まれる要素の平均水平移動量の差の絶対値の和の1/2をメッシュの大きさで除して得た。

供試体に発生するひずみ領域は回転を拘束した場合の方が回転を拘束しない場合に比べてかなり狭い範囲に局所化された。変形を要素間の「すべり」だけで吸収する粒状体においてもその破壊形態はやはり帯状のひずみの局所化であり、むしろ回転を拘束しない解析より顕著であることが解る。

図-3は回転を拘束した解析における要素の絶対水平変位分布を示す。左右に抜け出つつある要素群(黒)とじっと動かずにいる要素群(白)

表-1 材料定数および解析条件

最小要素直径	$2.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
最小要素質量	$3.77 \times 10^{-3} \text{ kg}$
法線方向バネ係数	$6.6 \times 10^7 \text{ N/m}$
法線方向減衰係数	$2.0 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{sec/m}$
接線方向バネ係数	$6.6 \times 10^7 \text{ N/m}$
接線方向減衰係数	$0.8 \text{ N} \cdot \text{sec/m}$
摩擦係数	$0.51 (\tan(27^\circ))$
拘束圧	6174 Pa
時間間隔	$2.0 \times 10^{-6} \text{ sec}$
圧縮速度	20%/sec

の間(灰)がせん断ひずみの局所化している領域と対応している。

4. あとがき れきや砂などの不規則な形状を持つ要素をモデル化するため連結要素を用いる場合、要素の配合に関して決定すべきパラメータが著しく増加する点で不便であり、連結した要素を1つの要素とした場合、計算時間の制約から解析で用い得る要素数が大幅に減少する等の不利な点がある。

これに対して、要素の噛み合わせによる強度を、回転を拘束することで表す本手法は解析上のテクニックとしてかなり有効であると思われる。今後の検討により、回転を拘束する程度をコントロールすることが可能となれば、砂やれきなどの粒状体のせん断破壊において、要素の「回転」と要素間の「すべり」が混在する実現象に近いシミュレーションを行うことができると考えられる。

なお、要素の回転を拘束する手法は東北学院大学の佐竹正雄氏の指摘による。本研究で用いた個別要素法のプログラムは、大阪土質試験所の澤田純夫氏の開発した「DEMS」を改良したものである。

参考文献 1) 目黒公郎(1988) 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 地震研究所集報 2) 中瀬仁(1991): 改良個別要素法による平面ひずみ圧縮試験のシミュレーション, 土木学会第46回年次学術講演会, Vol13 3) 中瀬仁(1991): 平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用, 第26回土質工学研究発表会

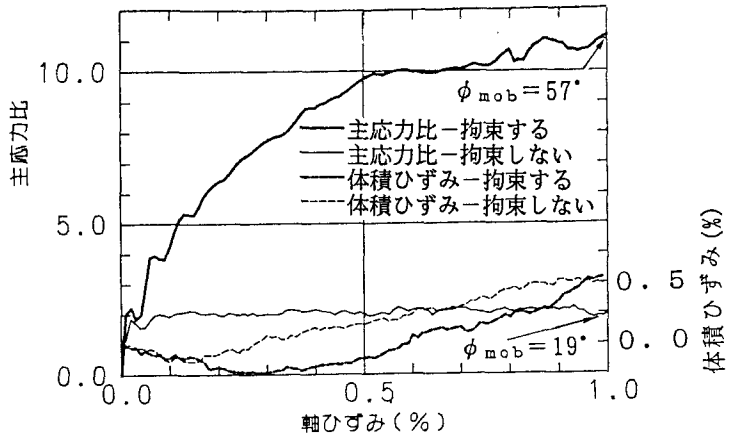


図-1 主応力比-ひずみ曲線の比較

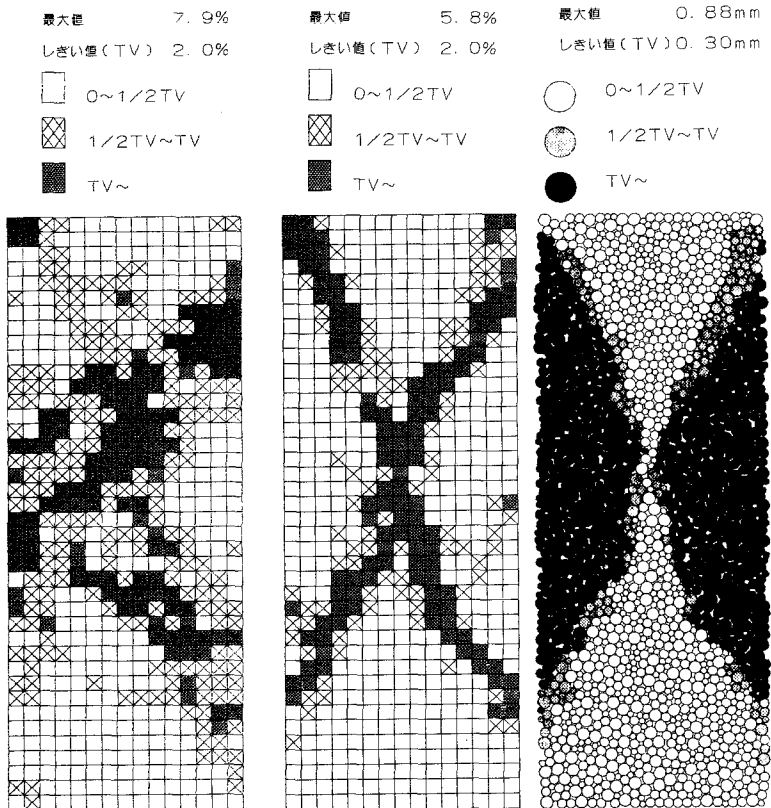


図-2 せん断ひずみの分布

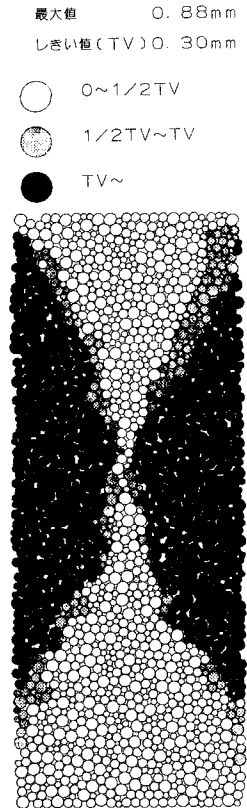


図-3 回転拘束状態の要素の絶対水平変位量