

平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用

中瀬 仁*・安中 正**・片平冬樹***・
興野俊也****

アクリル丸棒を用いた平面ひずみ圧縮試験に対して個別要素法によるシミュレーションを行った。アクリル丸棒の材料定数は、その物理的性質から定めた。シミュレーション結果は、応力比-ひずみ曲線に関して実験結果と一致し、せん断帯に関する特徴をうまく再現できた。またシミュレーションでは、せん断帯と粒状体の構造骨格の関係について視覚的に表示した。

Keywords : distinct element method, shear band, plane strain compression test

1. ま え が き

個別要素法は、連続体力学では取扱いが困難な不連続変形を伴う大変形問題や破壊問題などに対して適用可能な方法として注目されており、各種の問題に対して適用性が研究されている^{1)~4)}。しかし、計算結果の妥当性の評価に関しては、定性的な比較にとどまるものが多く、厳密に定量的な検討をしている例は少ない。したがって、計算に用いる材料定数の妥当な設定法は十分検証されていない。そこで、本研究では個別要素法の適用性を実証的に示すために、アクリル丸棒を材料とした平面ひずみ圧縮試験の結果に対して、アクリル丸棒の物理的性質から定めた材料定数を用い、個別要素法によるシミュレーションを行った。丸棒は断面が円であることから2次元個別要素法の円要素を用いて、ほぼ厳密にモデル化できる。また、アクリルは鉄やガラスに比べて剛性が低いため、陽解法で時間軸に沿って積分する個別要素法の時間間隔を比較的大きくとれることから、計算時間を短縮できるという利点がある。

計算結果と実験結果を、応力比-ひずみ関係や試験の際観察される写真-1に示すようなせん断帯 (shear band) に着目して比較検討した。せん断帯の形成機構を明らかにする事は土質力学の重要な課題であり、個別要素法により実験では把握が困難な供試体内部の力の分布を容易に検討することができる。

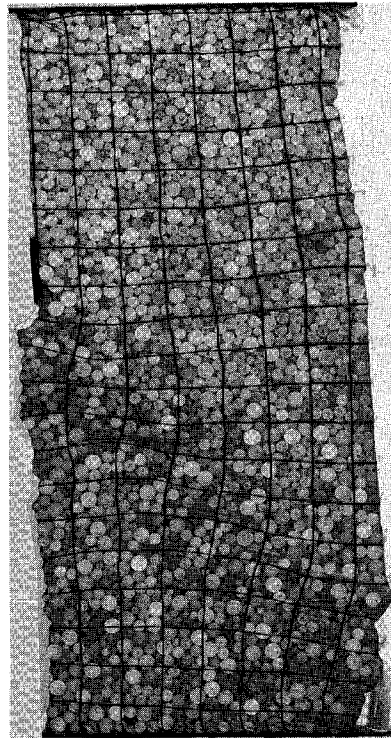


写真-1 アクリル丸棒の平面ひずみ圧縮試験

2. アクリル棒を用いた平面ひずみ圧縮試験

写真-2に実験材料として用いたアクリル製の丸棒を示す。丸棒の片端面には、位置と回転量を計測するため半円形のマークをつけた。

直径 2 mm, 3 mm および 4 mm のアクリル丸棒 1784 本を表-1に示すように配合し、型枠を用いて筒状のメンブレンに包み込み、幅 7.5 cm, 高さ 20 cm の供試体を作成した。供試体は、一定の負圧を与えることにより自立させた。供試体の上下端面は良く研磨したステンレ

* 正会員 工修 東電設計 (株) 技術開発本部耐震技術部主任

(〒100 千代田区内幸町 1-3-1)

** 正会員 理修 東電設計 (株) 技術開発本部耐震技術部長代理

*** 正会員 東京電力 (株) 技術開発本部原子力研究所 耐震研究室 主任研究員

**** 正会員 東京電力 (株) 技術開発本部原子力研究所 耐震研究室 主任

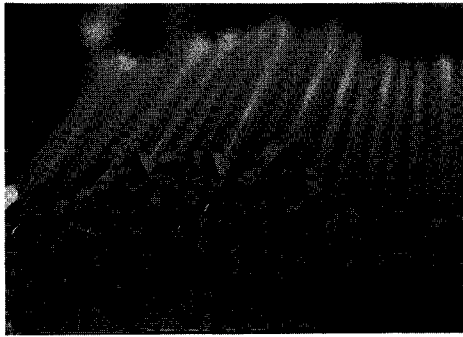


写真-2 試験材料として用いたアクリル製の丸棒

表-1 材料の配合

均等係数	最大粒径	平均粒径	粒径重量百分率		
			4mm	3mm	2mm
U 1.5	D _{max} 4mm	D ₅₀ 3.2mm	35.5%	50.0%	14.5%

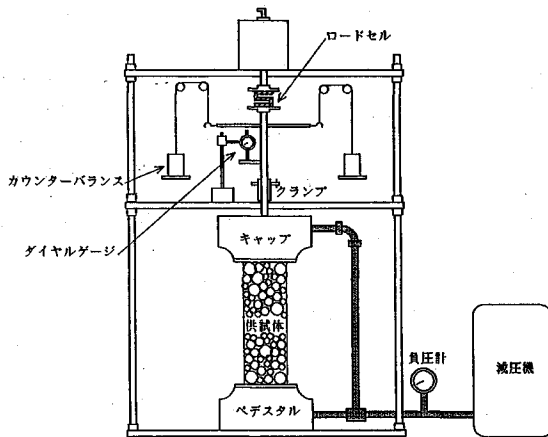


図-1 実験装置

スチール面と接しており、特別の摩擦の除去は行っていない。図-1に示すように実験装置に供試体をセットし、ジャッキでキャップを押し下げ圧縮した。

ダイヤルゲージで計測されたキャップの変位から供試体の軸方向の平均ひずみを算出した。

供試体には、大気圧と供試体内部の気圧の差（すなわち、負圧）が拘束圧として鉛直および水平に供試体中央に向かって加わっている。このうち水平方向から加わる圧力は最小主応力 σ_3 である。軸圧縮の荷重はロードセルで計測した。この力を供試体の断面積で除した圧力と σ_3 の和が、最大主応力 σ_1 である。

軸圧縮の荷重には供試体正面から適当な時間間隔で写真撮影を行い、要素一つ一つの挙動を記録した。また、軸圧縮終了後、せん断帯の発生状況を観察するために格子状のマークを張り付けた供試体の裏面も撮影した。

正面から撮影した写真と比較しやすいように裏面から

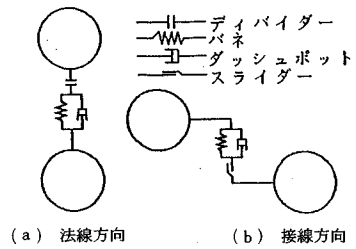


図-2 接触点のモデル化

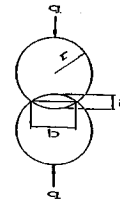


図-3 弾性接触する2円柱

撮影した写真を表裏逆にして印画紙に焼き付けたものが前章で示した写真-1であり、格子の変形具合から左端中央部から右端下部へ斜めに抜けるせん断帯が発生している様子が観察できる。また右端中上部から左下方にも小さなせん断帯が観察される。このときの供試体の平均軸ひずみは約7.5%である。

実験結果は、5章において、シミュレーション結果と詳細に比較検討する。

3. 解析のための材料定数

個別要素法は互いに不連続な自由に運動するたくさんの要素で粒状体を表す手法である⁵⁾。運動している要素は、他の要素および境界との接触により力（加速度）を受ける。各要素の運動方程式を差分化することによりある時刻の要素の状態から次の時刻の要素の状態を計算することができる。2つの要素が接触している場合について、相互に作用する力を伝達するための接触点のモデル化を図-2に示す。ディバイダーは要素間距離が2つの要素の半径の和より大きくなった際に互いに無関係となることを表わす。バネ、ダッシュポットおよびスライダの強度を表わす定数は実験に用いたアクリル丸棒の物理的性質から以下のように定めた^{6),7)}。

法線方向のバネ係数 k_n は、アクリル丸棒の半径方向の剛性に等価な値として図-3に示す軸荷重 q を受ける2つの弾性円柱（半径 r ）の変形量 δ により次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} k_n &= q/(\delta/2) \\ &= \pi E / (1-\nu^2) (2/3 + 2 \ln(4r/b)) \\ b &= \sqrt{4rq(1-\nu^2)} / \pi E \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし b は円柱の接触面積、 E はヤング率、 ν はポアソン

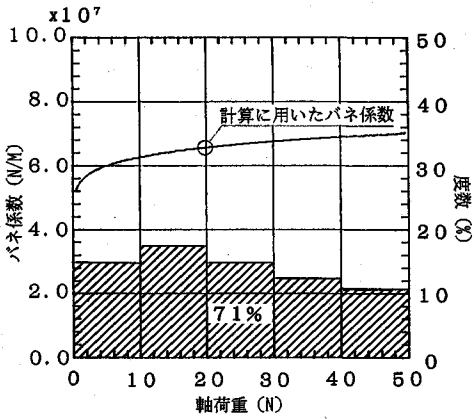


図-4 2円柱に動く軸荷重と法線方向バネ係数の関係

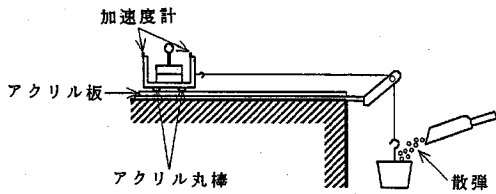


図-5 摩擦係数と接線方向粘性減衰係数を定めるための材料実験

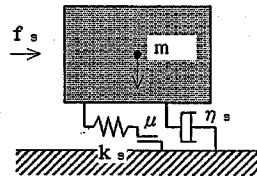


図-6 接線方向の粘性減衰係数を定めるための解析モデル

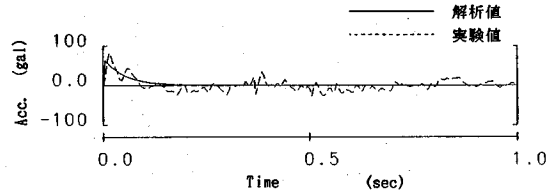


図-7 定められた粘性減衰係数を用いた時の材料試験に対するシミュレーション結果

とした。ただし、 k_s の値はある程度以上大きければ、値の多少が1つの要素の挙動に与える影響はきわめて少なく、式(3)で定める k_s の値は十分大きいと考えられる。

摩擦係数 μ と接線方向の粘性減衰係数 η_s は図-5に示す実験結果に基づいて決定した。

図-5の実験では、アクリル丸棒をアルミの台に貼付け、おもりを載せたコマに側方荷重 f_s を徐々に加え、滑り出した瞬間の側方荷重とコマの加速度記録を求めた。

μ は側方荷重とおもりの重さの比から決定した。

η_s は、コマの運動を図-6に示すようにモデル化した場合の質点 m の加速度時刻歴を、実験で得られた加速度記録とできるだけ一致するように定めた。このとき η_s のみをパラメーターとした。両者の加速度時刻歴を図-7に示す。

4. 解析モデルと解析条件

実験をシミュレーションするためにモデル化する必要のある部分として、個別要素法の要素として表すアクリル丸棒以外にキャップ、ペダスタルおよびアクリル丸棒を柔軟に包んでいるラテックススラバー製のメンブレンがある(図-8)。

キャップとペダスタルは剛な変位境界で表した。キャップは下方向に可動である。

メンブレンは従来の研究では取り扱われなかったフレキシブルな応力境界であり、新たにモデル化する必要がある。ここでは、

- メンブレンの変形が供試体に与える影響は無視する
- 拘束圧は水平方向にのみ働く
- 図-9(a)に示すようにメンブレンに接する可能性のある供試体の最も外側の要素すなわち要素7, 9以

ン比である。 k_n は要素1個あたりのバネ係数を表す。

単位長さの直径4mmのアクリル丸棒に対して、ヤング率 $3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 、ポアソン比0.32を用いると、法線方向のバネ係数は軸荷重 q に対して図-4のようになる。軸荷重によるバネ係数の変化があまり大きくないことから、0~50Nの範囲の平均的な値として、ここでは軸荷重20Nに対するバネ係数を用いた。図中の斜線は、後述するシミュレーション1において応力比が最大を示した時間断面での、計算結果における軸荷重の頻度分布であり、全接点数の7割でその点に加わる軸荷重0~50Nの範囲にあることを示している。

法線方向の粘性減衰係数 η_n は、アクリル丸棒をアクリル板の床に落下させた際の跳ね返り高さから求めた反発係数 R を次式に適用して決定した。

$$\left. \begin{aligned} \eta_n &= 2h\sqrt{k_n m} \\ h &= -\log_e R / \sqrt{\log_e R^2 + \pi^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 h はアクリル丸棒と床の相互作用を法線方向のバネとダッシュポットでモデル化した際の1自由度振動系の減衰定数、 m はアクリル丸棒の質量である。

接線方向のバネ係数 k_s は軸方向に荷重 q で押しつけた弾性2円柱にさらにせん断力 q_s を加えた際の変形量 δ_s から定めるべきであるが、こうして得られる k_s は q および q_s の複雑な関数となるためここでは便宜上

$$k_s = k_n \dots\dots\dots (3)$$

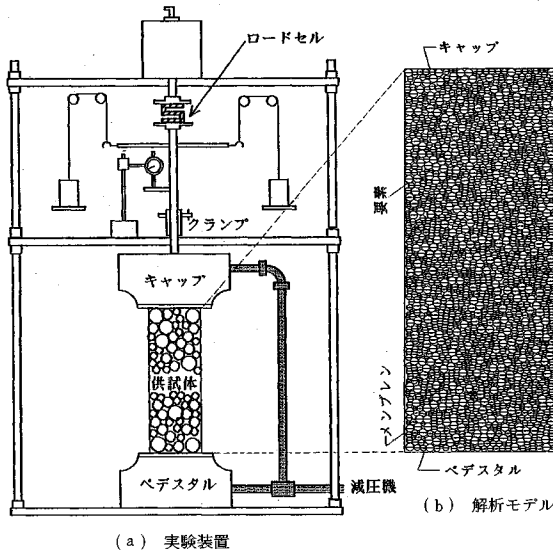


図-8 実験装置と解析モデル

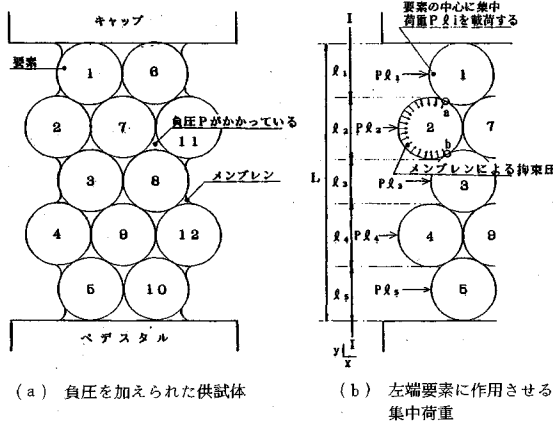


図-9 メンブレンのモデル化

外の要素にのみ拘束圧が直接働く
と仮定し、図-9 (b) に示すように、メンブレンが個々の要素に加える拘束圧を、最端部の要素の y 軸に平行な I-I 面に対する正射影の長さに負圧 P を乗じた集中荷重を要素の中心に加えることで表現した。正射影をとる際に要素の中心がより外側にあるものを優先した。

図-8 (b) を初期状態とし、上下の境界を固定し、上述のようにモデル化した供試体に拘束圧を 50 Pa 加えた際上下の境界で生じる圧力を計算したところ 48 Pa であった。モデル化はほぼ妥当であると考えられる。

表-2 に要素の材料定数と解析の条件を示す。質量、バネ係数および減衰係数は単位長さあたりの値である。

解析の時間間隔は、Cundall の示す値の 1/5 以下を用いた。これ以上大きな時間間隔は要素の回転量に大きな誤差が生じるためである。

表-2 材料定数および解析条件

最小要素直径	2.0×10^{-3} (m)
最小要素質量	3.77×10^{-9} (kg)
法線方向バネ係数 k_n	6.6×10^7 (N/m)
法線方向粘性減衰係数 η_n	2.0×10^2 (N·sec/m)
接線方向バネ係数 k_t	6.6×10^7 (N/m)
接線方向粘性減衰係数 η_t	0.8 (N·sec/m)
摩擦係数	0.51
拘束圧	6174 (Pa)
時間間隔	2.0×10^{-6} (sec)
圧縮速度	20 (%/sec)

圧縮速度は、解析時間を短縮するため実験時の 2400 倍の 20%/sec とした。圧縮速度が 20%/sec とはキャップを 4 cm/sec の速さで下方向へ強制変位させることに等しい。圧縮速度を 20%/sec とした場合の解析は 10%/sec の場合と顕著な差がない。しかし、圧縮速度を 40%/sec とした場合の解析結果は 10%/sec の場合と著しく異なる。したがって、ここで用いた圧縮速度は十分小さく、解析に与える影響は少ないと考えられる。

解析のための要素の初期状態を作成するため、実験に用いた供試体の要素初期状態を写真から読みとり、個々の要素の外周をデジタルライザで読みとり数値化した。数値化した生データは、要素の一部が重なって見える程度に誤差が大きいため、解析のための要素の初期状態として用いるには不相当であると判断した。そこで、要素を適当になじませるため、実際よりも弱いバネ係数を設定し、実際よりも低い拘束圧を加えて個別要素法によるパッキングを行い最終的な要素の初期状態を得た。

5. シミュレーション結果

応力比-ひずみ曲線について、実験結果とシミュレーション結果 (以下、シミュレーション 1 と称する) の比較を図-10 に示す。シミュレーションでは応力比の立ち上がり部でジャンプしており実験との対応が悪い。しかしながら、軸ひずみが 0.5% 以上の供試体の強度においては両者は非常に一致している。供試体の最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ は約 2.5、内部摩擦角 ϕ は約 25° である。

図-11 はパッキングにより得られた供試体の初期状態である。供試体上端の要素が 1 つだけ飛び抜けてキャップと接触している。この要素が供試体中に完全に押し込まれた瞬間が図-10 の応力比-ひずみ曲線のジャンプしている箇所に対応していることから、再度パッキングを行い上端の飛び出している要素を取り除いた供試体を初期状態としてシミュレーションを行った

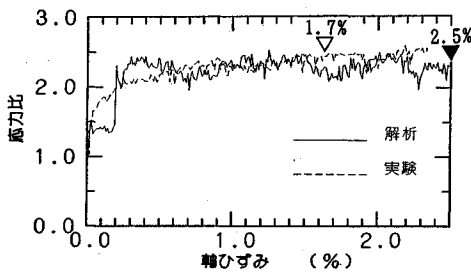


図-10 応力比—ひずみ曲線の比較 (シミュレーション1)

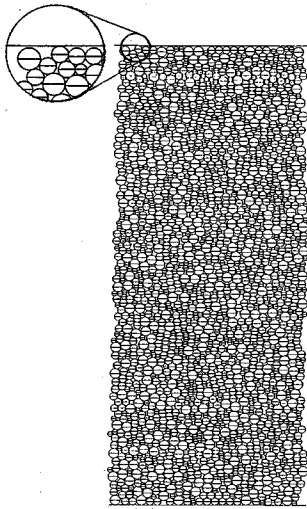


図-11 シミュレーションにおける供試体の初期状態

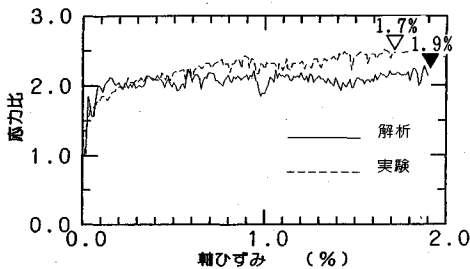


図-12 応力比—ひずみ曲線の比較 (シミュレーション2)

(シミュレーション2と称する)。その結果、図-12のように応力比—ひずみ曲線の対応が立ち上がり部でも良くなった。

要素の変位、供試体のひずみ分布および要素の回転量について、実験結果とシミュレーション結果の比較を図-13、図-14、および図-15に示す。

図-13は実験結果であり、供試体の軸ひずみが約1.7%に達したときの要素の絶対水平変位量、縦に20、横に10分割した小領域の水平直ひずみおよび要素の絶対回転量の大小を色の濃淡で示したものである。ここでは凡例に示すしきい値を定め、これをこえる要素を最も濃く表示し、しきい値以下の量を段階的に示す。

なお、水平直ひずみは、対象とするメッシュの左右隣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1/2をメッシュの幅で除して得た。また、対象とするメッシュが供試体の両端にある場合は、自分と内側のメッシュに含まれる要素の平均水平移動量の差をメッシュの幅で除したものを水平直ひずみとした。

水平変位量の図では、濃淡のコントラストが強い部分を境界として、“く”の字型ブロックが供試体の両側へ抜け出そうとしている様子が観察される。

この境界と水平直ひずみの大きい領域はほぼ対応している。帯状のひずみ領域が供試体をジグザグに切り刻むように局所的に発達しており、これらの内の1つ(供試体左中部から右下にぬけるひずみ領域)が写真-1で観察されたせん断帯に成長したと考えられる。

水平直ひずみの大きい領域では要素の回転量も大きくせん断破壊と要素の回転には密接な関係があることを示している。

図-14はシミュレーション2である(軸ひずみ1.9%)。実験結果とは、せん断帯の形成される場所は異なるものの、ブロック状になって移動する要素の挙動や供試体を切り刻むようなせん断帯の発生状況および水平直ひずみの大きい領域に回転量の大きな要素が集中している点が共通している。

図-15はシミュレーション1である(軸ひずみ2.5%)。図-13や図-14に比べてひずみの集中の度合いが激しく、右上から左中部にかけてのせん断帯が顕著である。

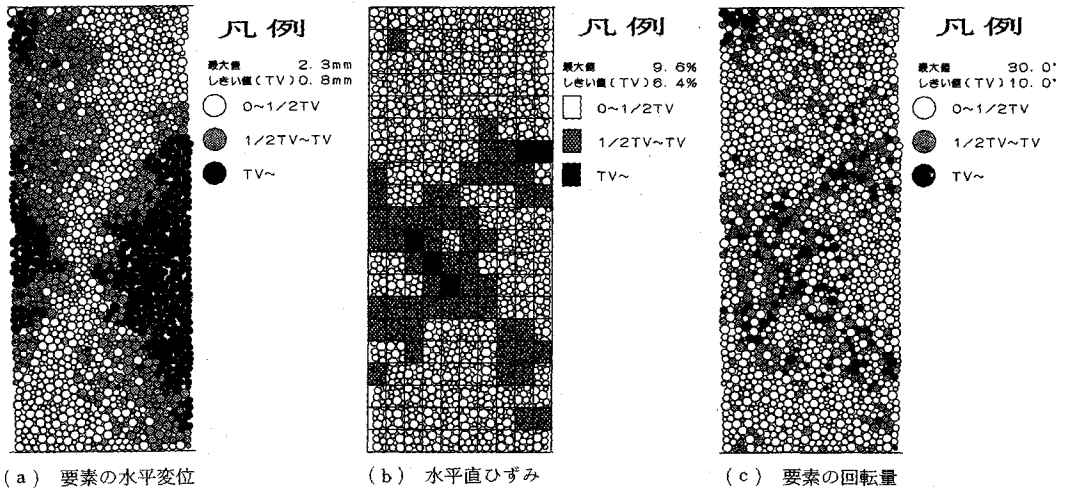
水平直ひずみの大きい領域に回転量の大きな要素が集中している点は図-13や図-14と共通している。

6. 粒状体の構造骨格とせん断帯の形成

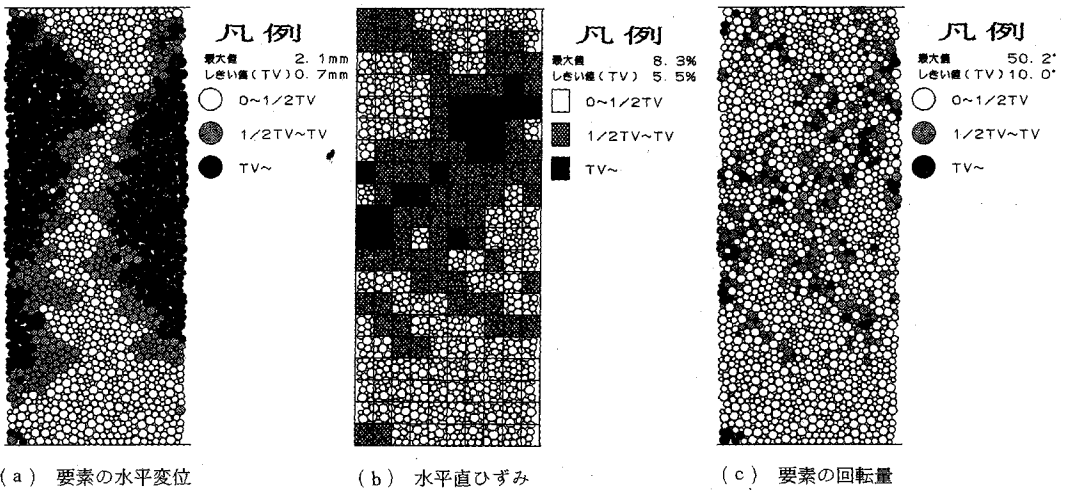
ここでは、5章で行ったシミュレーション1の結果についてさらに詳細な検討を行う。

写真-3に、応力比が急激に上昇し始める瞬間から後の、要素間に働く法線方向の力の分布を時系列で示す。法線方向力の大小は黄色の明暗で示す。ここではしきい値として60Nを定め、これをこえる法線方向力を最も明るく表示する。しきい値以下の法線方向に対する明度を左下の凡例に示す。写真-4、写真-5、写真-6および写真-7における各量も同様に表示する。各コマの上のグラフは供試体の軸ひずみ0%から0.5%までの応力比—ひずみ曲線で、対応する時間断面までの応力比を白色に発色して示す。各コマにはその時間断面での供試体の軸ひずみを記す。

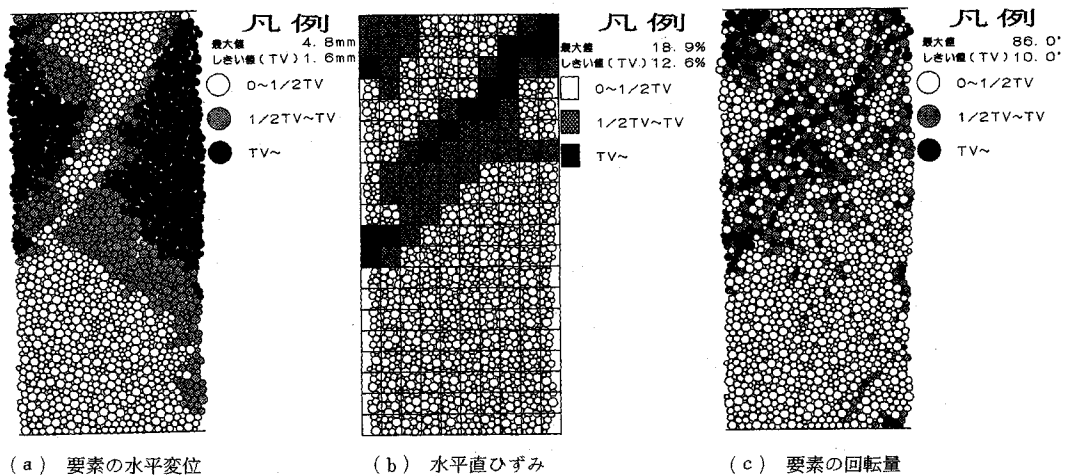
圧縮に伴い、法線方向の力が圧縮方向(紙面縦方向)に卓越して連なり、編み目状の骨格が徐々に形成される。これは土質力学における‘土の構造骨格’と呼ばれるものの本質であると考えられ、岸野によって示された解析



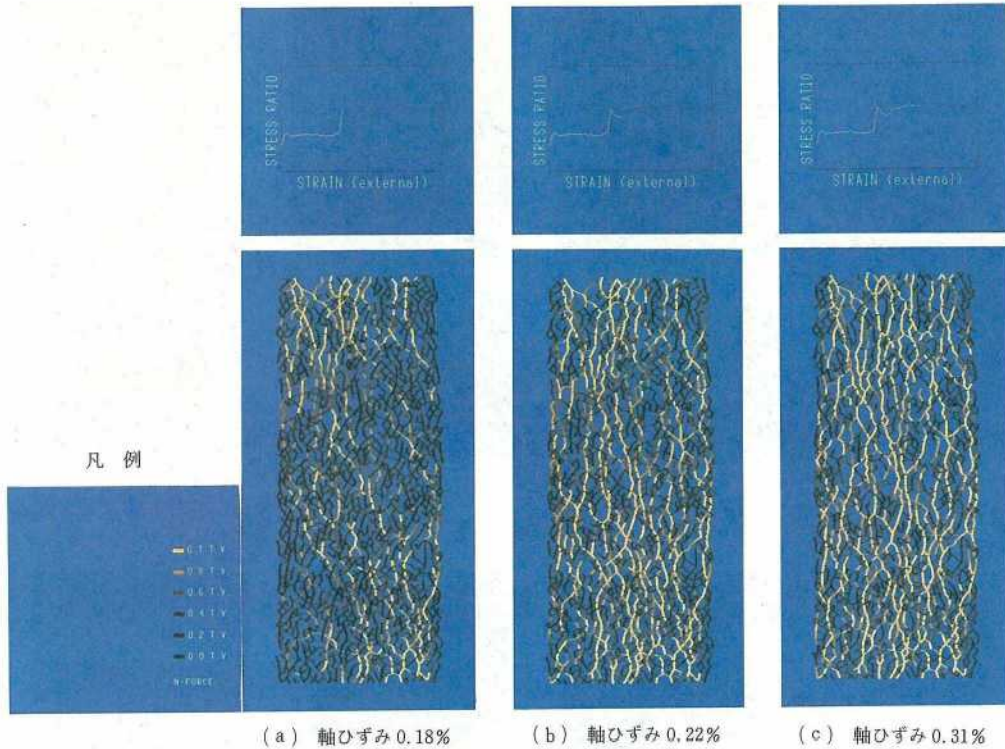
図一13 要素の変位およびひずみの分布 (実験 (軸ひずみ 1.7%))



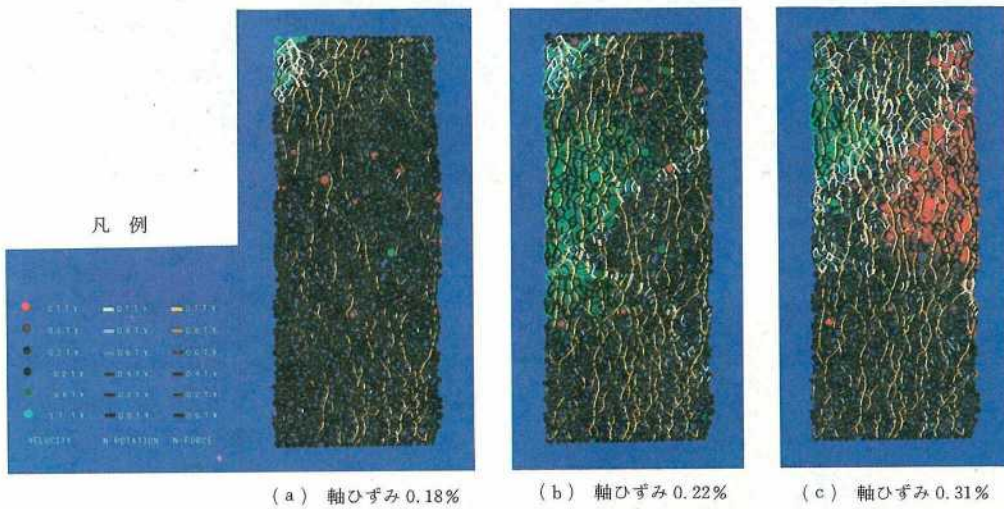
図一14 要素の変位およびひずみの分布 (シミュレーション2 (軸ひずみ 1.9%))



図一15 要素の変位およびひずみの分布 (シミュレーション1 (軸ひずみ 2.5%))



写真—3 圧縮に伴う構造骨格の成長



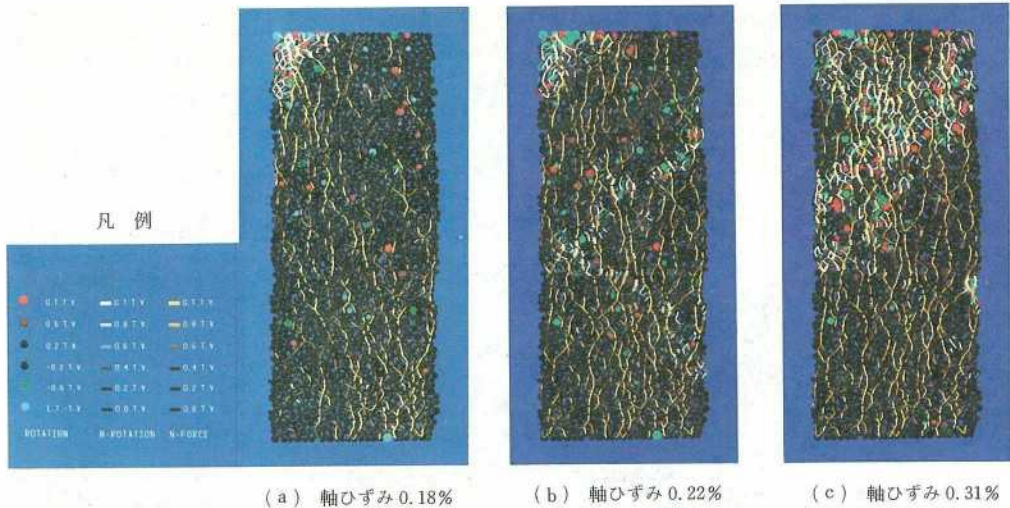
写真—4 セン断帯と法線方向力の回転

例⁹⁾と対応する。黄色い編み目の粗密はしきい値の取り方によって変化するが、ここでは、以下の議論を進めるため上で定めたしきい値による黄色い編み目を構造骨格と称する。これは粒状体の強度を発揮するために相対的に重要な役割を果たしており、この骨格の破壊がすなわち粒状体の破壊そのものであると考えられる。

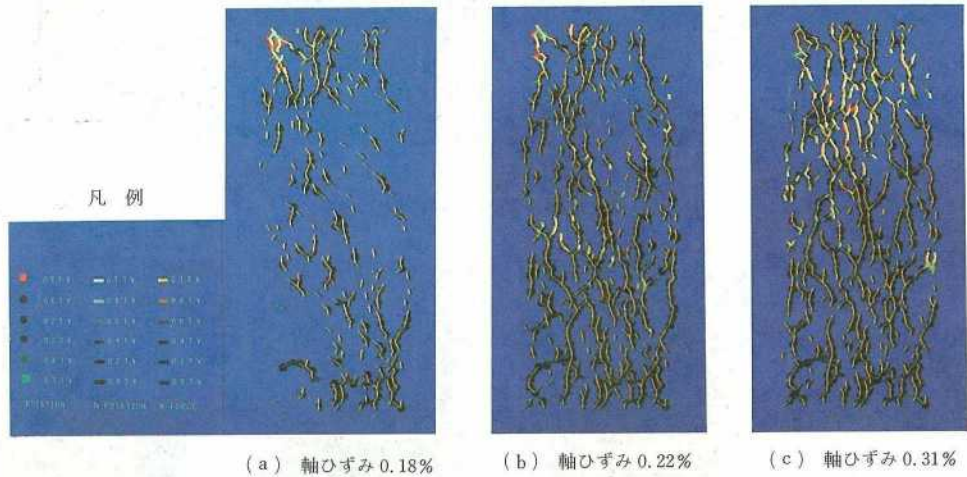
構造骨格の構成要素は、すでに接触していた要素間、あるいは粒状体の変形により新たに接触した要素間接点

のうち、要素間接点に働く法線方向力の方向と軸圧縮の方向の近いものが選択的により接触の程度が強まり、骨格の新たな編み目として惹起され形成される。構造骨格が圧縮方向に卓越して柱状に達することは、小田ら⁹⁾が示した要素の接点における法線の方向が粒状体に加わる主応力方向に片寄ることと対応している。

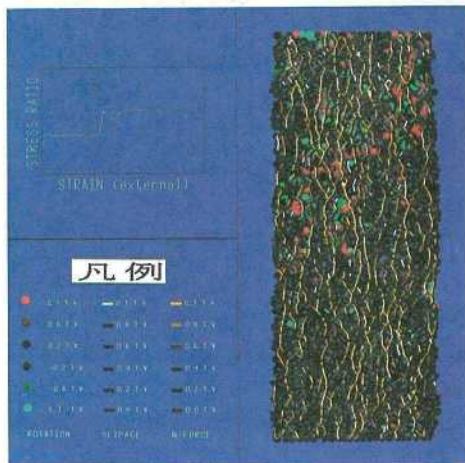
圧縮が進行するにつれて構造骨格の編み目がより密に発達するとともに応力比が増加する。応力比が一定にな



写真—5 構造骨格の破壊に伴う要素の回転



写真—6 構造骨格を形成する要素の接点数と回転量



写真—7 構造骨格の破壊と要素間の滑り

る状態に転じた後(軸ひずみ 0.31% 以降)は、構造骨格の目の粗密に顕著な変化はない。

要素間に働く法線方向の力と、要素の水平速度および法線の回転速度の分布を時系列にしたがって写真—4に示す。各コマの時間は写真—3と一致する。紙面右方向に移動する要素は赤、紙面左方向に移動する要素は緑である。法線方向の力は黄色で、その法線の回転速度を法線方向力の右側に平行して白の明暗で示す。表示のためのしきい値は、法線方向力が 60 N、要素の水平速度が 1.0 m/sec、法線の回転速度が 2.0 rad/sec である。

法線方向力の回転速度が大きい箇所は、構造骨格中変形の著しい箇所であり、局所的な破壊を示す。法線方向の力が大きく、その回転速度が大きい箇所(白と黄が同時に発色している箇所)では、構造骨格全体に力の再配分が行われるような重大な破壊が生じており、構造骨格の再構成に与える影響が大きいと考えられる。

圧縮の初期(写真—4(a))において, 供試体の左上で変形が著しいのは, 図—11に示した一つだけ上に飛び出した要素が供試体に強制的に押し込まれているためである。

軸圧縮に伴って, 部分的な破壊(写真—4(b))が繰り返され応力の再配分が行われながら, しだいに破壊が供試体上部に集中する。

軸ひずみが0.3%に達した段階で水平速度の大きい要素のシルエットが, 図—15(a)に示した形(軸ひずみ2.5%)に近づき破壊現象が定常的になったことが解る。法線方向力の回転速度が大きい接点は, 水平速度の大きい要素のシルエットの境界を包含するように分布しており, 組織的な構造骨格の破壊が生じている場所とひずみ領域(せん断帯)が一致していることを示す。

図—16に構造骨格を模式的に示し, 構造骨格の破壊形態と法線方向力の回転力が生じるしくみを考える。モデルの上下端は剛な境界で骨格が縮む方向に圧縮される。側方については, 最も外側の要素がメンブレンから拘束圧を受けている。

黒色で示した編み目の“目”にあたる要素は, 他の要素や境界に3点で接しているため, 回転を生じにくい。一方, 白色の要素の接点数は2点で回転し易い。

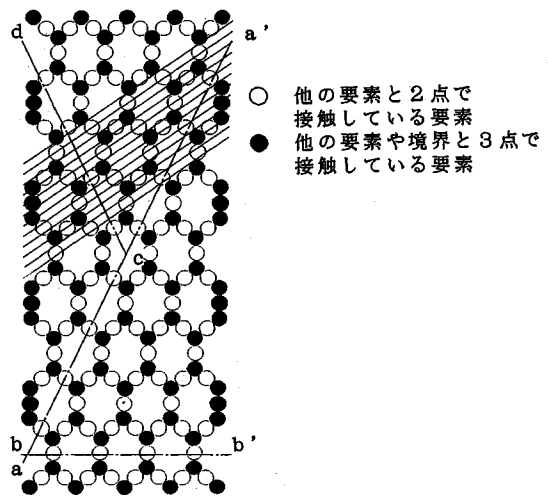
このような構造は回転し易い要素が多いため, 破壊のパターンが無数にある。そのなかで, 回転し易い要素の連なり, 例えば, 面a-a'や面b-b'などに沿うせん断破壊や, あるいは面a-c-dなどで隔てられたブロックが側方へ抜け出すという破壊形態は, 代表的なものの一つであろう。このような破壊形態は, 破壊面を形成する要素が回転することにより生じる。このとき, 回転している要素を介して伝達される法線方向力もまた回転する。写真—4の初期(写真(b))の破壊には, 上記のような破壊形態によるものと思われる。

あるいはまた, 斜線で示すような領域全体で, 回転し易い要素が組織だって少しずつ回転し, 全体としてせん断変形を起こす可能性もある。写真—4では, 構造骨格が密になるにつれ, このような破壊形態による法線方向の回転が卓越すると考えられる(写真(c))。

要素間に働く法線方向力が要素の回転に伴って回転する様子を写真—5に示す。各コマの時間は写真—3と一致する。反時計回りに回転する要素を赤, 時計回りに回転する要素は緑である。法線方向の力は黄色で, その法線の回転速度を法線方向力の右側に平行して白の明暗で示す。しきい値は, 法線方向力が60N, 要素の回転速度が4.0 rad/sec, 法線の回転速度が2.0 rad/secである。

法線方向力の回転速度が大きい箇所と要素が回転している箇所(白と赤もしくは緑)はよく対応している。

写真—6は構造骨格を形成する要素の(50N以上の



図—16 粒状体の構造骨格と破壊モード

法線方向力を伝達するもの), 他の要素との接点数と回転量の関係を示したものである。各コマの時間は写真—3と一致する。他の要素と2点で接し, かつ回転速度の大きい要素を赤, 3点以上で接し, かつ回転速度の大きい要素を緑で示す。色の明暗は絶対回転速度の大きさを表す。法線方向の力は黄色でしきい値を越えるもののみを示した。その法線の回転速度を法線方向力の右側に平行して白の明暗で示す。しきい値は, 法線方向力が50N, 要素の回転速度が4.0 rad/sec, 法線の回転速度が2.0 rad/secである。

構造骨格が破壊している箇所(白)と, 他と2点で接触している要素で回転速度が大きいものの位置が対応しており上述の考察が妥当であることを示している。

写真—7に軸ひずみ0.31%の時の要素間に働く法線方向の力と, 要素の回転速度および要素間で滑りが生じている箇所を示す。ここで, “滑りが生じている箇所”とは, 法線方向力に摩擦係数を乗じた値より, 接線方向力の絶対値が大きい箇所を指す。反時計回りに回転する要素を赤, 時計回りに回転する要素は緑である。法線方向の力は黄色で, 要素間で滑りが生じている箇所を法線方向力の右側に平行して白の明暗で示す。しきい値は, 法線方向力が60N, 要素の回転速度が4.0 rad/secである。滑りは, 生じている(白)か, いない(黒)かで表示する。

滑りの生じている箇所は, 要素の回転速度の大きい領域にも分布しているが, 構造骨格中の滑り(横と平行している白)は非常に少なく, 滑りは破壊に伴う副次的な現象であるという小田らの研究結果⁹⁾に対応している。

7. 結 語

要素の物理的性質から定めた材料定数を用い, 十分小

さい時間間隔でシミュレーションを行った結果、アクリル丸棒を用いた平面ひずみ圧縮試験を定量的にも定性的にもかなりよく再現でき、材料定数の設定や拘束圧のモデル化がほぼ妥当であることが示された。せん断帯の形成については、構造骨格の破壊と要素の回転の関係が示された。

計算には、この例では1ステップあたり FACOM-M 380 R で 1.4 秒の cpu 時間を必要とするので 2% の圧縮試験をシミュレーションするために約 40 時間の cpu 時間を要した。個別要素法をより実用的な手法とするためには、計算時間を大幅に短縮することが不可欠である。

本研究で用いた平面ひずみ圧縮試験は東京大学生産研究所の龍岡研究室で行った。龍岡文夫教授には実験に関して貴重な御助言を頂き、御指導頂いた。佐藤剛司氏や渋谷啓氏にはなにかと助力を頂いた。朴春植氏には直接実験を手伝って頂いた。ここに感謝の意を表す。また論文作成にあたって東電設計株式会社の栗田哲史氏に御助力頂いた。謝意を表するなお、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) Uemura, D. and Hakuno, M. : Granular assembly simulation for ground collapse, Bull. Earthq. Res. Inst.

Univ. Tokyo. 62, pp.19~59, 1987.

- 2) 目黒公郎・伯野元彦：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，地震研究所彙報，Vol. 63, pp. 409~468, 1988.
- 3) 岩崎好規・澤田純男・香川敬生：個別要素法による砂の支特力問題におけるせん断帯発生時の解析，第 43 回土質工学研究発表会，1988.
- 4) 岩下和義：粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析—その 1—，地震研究所彙報，Vol. 63, pp. 201~235, 1988.
- 5) Cundall, P.A., Dhescher, A. and Strack, O.D.L. Numerical Experiments on Granular Assemblies, IUTAM-Conf. on Deformation and Failure of Granular Materials, Delft, pp.355~370, 1982.
- 6) 木山英郎・藤村尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集第 333 号，pp.137~146, 1983 年 5 月.
- 7) 木山英郎・藤村尚・西村勉：せん断モデルを用いた離散剛要素法の材料定数の検討，土木学会論文報告集第 382 号/III-7, pp.167~174, 1987 年 6 月.
- 8) 岸野佑次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析，土木学会論文集，406 号/III-11, pp.97~106, 1989 年 6 月.
- 9) Oda, M. and Konishi, J. : Microscopic Deformation Mechanism of Granular Material in Simple Shear, Soils and Foundations, Vol.14, No.4, pp.25~38, 1974.

(1991.6.21 受付)

AN APPLICATION STUDY OF THE DISTINCT ELEMENT METHOD TO PLANE STRAIN COMPRESSION TEST

Hitoshi NAKASE, Tadashi ANNAKA, Fuyuki KATAHIRA and Toshiya KYONO

A plane strain compression test on a specimen made of acrylic sticks was simulated by the distinct element method (DEM). The element parameters for acrylic sticks were determined from the known elastic constants and the experimental results obtained by using them.

The stress-strain curves between experiment and numerical analysis by DEM agree well. The characteristic features of a shear band observed in the experiment are well simulated by DEM. The shear band formation and mechanical internal structure of granular assemblies are graphically displayed from the analysis.