

III-362 個別要素法による一面せん断試験のシミュレーション

東京電力株式会社 正会員 片平 冬樹 正会員 興野 俊也
東電設計株式会社 正会員 〇中瀬 仁 正会員 安中 正

1. はじめに 本研究では、カンドルの個別要素法の数値的な検証を兼ねて、アクリル棒を供試体とした一面せん断試験を行い、結果に対するシミュレーションを行った。比較のために、要素位置、せん断抵抗力、ダイラタンシーを計測した。また、相似則を用いて計算時間を短縮し、平均半径1mmの2000個のアクリル棒を供試体としたせん断試験のシミュレーションを行った。

2. アクリル棒の一面せん断試験 計算時間の関係から、実際よりかなり弱い剛性を要素に与えることが多いが、ここでは、アクリルの剛性に等価なバネ係数 $k(10^8\text{N/m程度})$ を用いた。図-1はせん断に伴う要素の挙動について実験とシミュレーションとを比較したものである。図の左が実験結果で、右がシミュレーションであり、図(a)から(c)へと、せん断箱の下部が紙面左方向に秒速1.27mmで強制変位されて、せん断が進行している。円形は半径2mmのアクリル棒の側面で、円の中心を通る線分の傾きが要素の回転を表す。せん断箱の上部左端は力計と接続され、ここでせん断抵抗力を計測する。せん断箱の上蓋には一定の荷重がかけられており、この蓋の鉛直変位を計測してダイラタンシーを示す量とした。図-2の左はせん断抵抗力、右はダイラタンシーの比較で、実線が実験、破線がシミュレーションである。図の横軸は経過時間であり、せん断変位に対応する。これらの比較は両者が対応していることを示す。

3. 相似則による計算時間の短縮 上述のシミュレーションにおいては、従来行われているように時間刻みを $\sqrt{m/k}$ (m は要素質量)の整数倍とした場合には、計算が安定しないため(特に要素の回転)、これより1~2オーダー小さい値(10^{-6} 程度)を用いた。しかしながら、あまりにも細かい時間刻みは計算が膨大となるため実用的でない。そこで、要素の歪を保存する相似則を用いて、時間刻みを大きくする方法を考えた。これは、モデルサイズを元の a 倍とし、見かけ上の要素の歪を一定に保つためにバネ係数 k を a 倍とするものである。

m/k の比は a となるので、計算の安定のための時間刻みが $\sqrt{m/k}$ に比例するとすれば、モデルサイズの平方根に比例して時間刻みを大きくとれる。

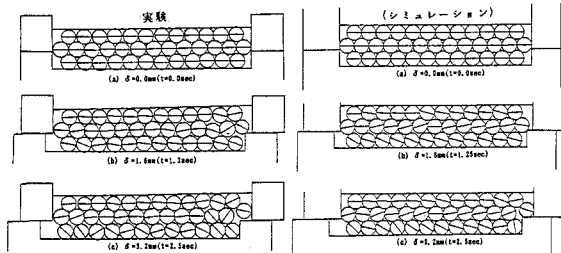


図-1試験結果とシミュレーションの要素挙動の比較

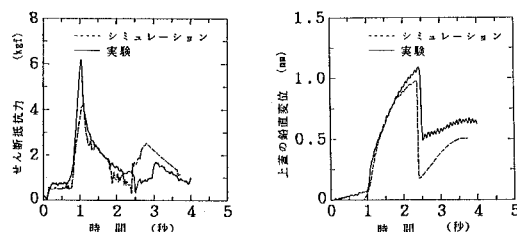


図-2試験結果とシミュレーションの計測諸量の比較

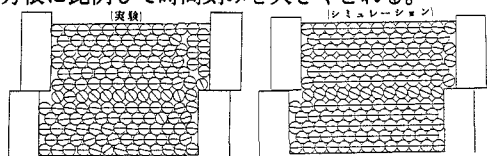


図-3相似則を用いた手法による要素挙動の比較

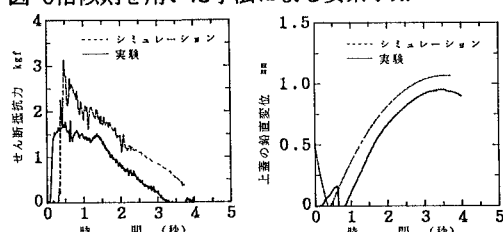


図-4相似則を用いた手法による計測諸量の比較

ただし系の慣性は相対的に大きくなる。半径2mmの要素を20mとして実験をシミュレーションした際の、せん断終了後の要素位置の比較(図-3)、および、諸測定値の比較(図-4)は両者が対応していることを示す。

次に、この手法を用いて、平均粒径1mmの亚克力棒を充填して作成した架空の供試体をせん断した際のシミュレーション結果を、豊浦砂に対するせん断試験結果とともに示す。図-5は豊浦砂のせん断抵抗力とダイラタンシー、図-6はシミュレーションのせん断抵抗力とダイラタンシーを示す。豊浦砂とシミュレーションの比較では、供試体のせん断に対する応答速度が異なるが、応答の形態は似かよっている。図-7は要素接点における要素間の相対変位、図-8は要素に働く直応力の総和、図-9は要素の水平変位量を示す。図は、濃淡でその量の大小を表わし、図下の数字は試験開始後の経過時間を示す。これらの図は次の事実を示す。1)局所的な破壊が生じていると考えられる、要素間の相対速度が大きい接点は、せん断面に沿った帯状の領域に分布する。2)せん断抵抗力が最大となる時点(0.45秒後)では、直応力の大きい粒子の連なりがせん断面付近でエシェロン状に発達する。3)最大せん断抵抗力が発揮される時には、要素の水平変位を相等しくするレンズ状の領域が発生している。

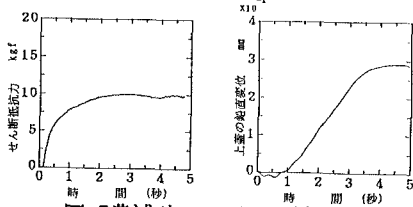


図-5豊浦砂の一面せん断試験

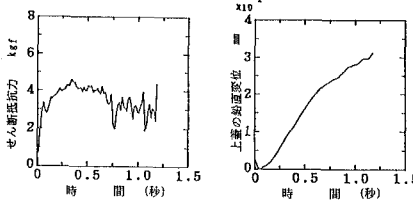


図-6シミュレーション結果

4. まとめ

亚克力棒の一面せん断試験は、要素の剛性と等価なバネ係数を与えることにより、せん断抵抗力等の数値上の比較においても、かなりの程度うまくシミュレーションできる。ゆっくりとした現象に対しては、相似則を用いて計算時間を短縮できる。この手法を、より半径の小さい亚克力棒に対する一面せん断試験について適用した結果、2次元粒状体のせん断破壊についていくつかの知見を得た。これらは砂などの土質材料のせん断破壊に共通する可能性があると考えられる。本研究において、東京電気大学の山口伯樹教授には、せん断試験の治具を提供して頂いた。東京大学伯野元彦教授に、研究内容に係わる助言を頂いた。この他、各方面の学識経験者に貴重な指摘を受けている。ここに謝意を表する。なお、シミュレーションには、大阪土質試験所の沢田純男氏の開発したプログラムを改変して使用した。

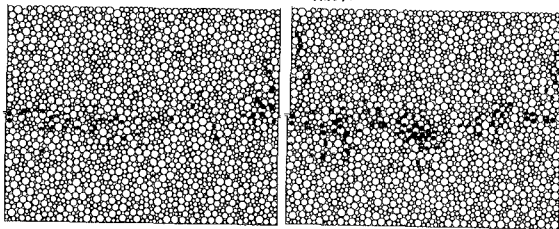


図-7要素間相対速度

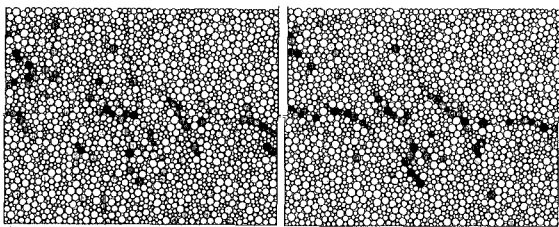


図-8要素に働く直応力の和

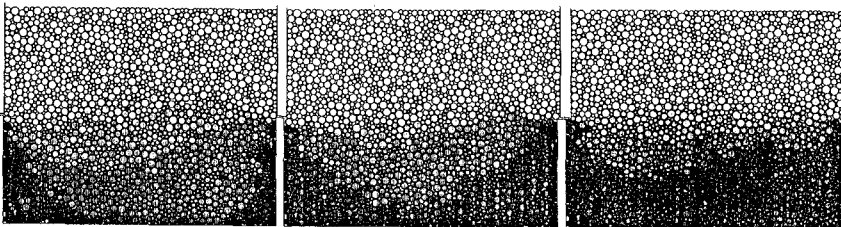


図-9要素の水平変位量

参考文献 (1)岩下和義(1988):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—、地震研究所集報、Vol163, pp201-235