

一面せん断試験の DEM シミュレーションを用いた隙間幅の設定基準の検討

岡山大学大学院 正会員 ○ 金 乗洸
 神戸大学大学院 正会員 加藤 正司
 岡山大学大学院 正会員 竹下 祐二

1. はじめに 一面せん断試験において、せん断強度と体積変化特性は、設定する隙間幅の大きさにより影響を受けると考えられる。しかし、この隙間幅の大きさの設定基準は明確に示されていない状況にある。Kim et al.¹⁾は、7つの砂質試料を用いてせん断箱の隙間幅がせん断強度に与える影響について検討し、隙間幅の設定基準に関して以下に示すようなストレスホルドライン(以下 TL と記す)の提案を行っている。まず、隙間幅を変えた一面せん断試験の結果について、図 1 に示す規準により、隙間幅～内部摩擦角関係からストレスホルドポイント(以下 T.P と記す)を求め、隙間幅 $M_{T,P}$ (急激に内部摩擦角が減少する隙間の大きさ)を定義した。そして、数種類の試料の試験結果から得られた平均粒径(以下 D_{50} と記す)～ $M_{T,P}$ 関係(図 2)から、実材料試験による TL を提案した。この TL は、ある平均粒径をもつ試料に関する、隙間から試料の流出による強度への影響を受けない最大の隙間幅を表しており、一面せん断試験における隙間幅の設定基準として利用できるものと考えられる。著者らは、TL の有効性をさらに検討するため、DEM シミュレーションを用いて検討を行った(図 2)²⁾ ³⁾。本研究では、0.8mm より小さい D_{50} を持つ試料における TL の有効性を検討した。

2. 過去の検討結果について 過去に行った DEM シミュレーション結果²⁾においては、まず、豊浦砂($D_{50}=0.16$ mm)の粒度分布を参考に、相似粒度分布で $D_{50}=1.25$ mm となる試料を作製した。なお、細粒分と粗粒分の含有率の変化が T.P に及ぼす影響を見るため、 D_{50} を固定し、粒度分布曲線の傾きを豊浦砂の粒度分布の傾きの 1.0 倍、1/1.5 倍、1/2.0 倍、1/2.5 倍と変化させた 4 種類の試料を用いて解析を行った。この解析結果では、 $M_{T,P}$ と TL との最大差は 0.13 mm となった。また、 D_{50} を固定するのではなく、 D_{50} と共に、細粒分と粗粒分の割合を変化させて試料を用いた解析³⁾も行った。この場合、粒度分布曲線の傾きを豊浦砂の粒度分布の傾き 1.0 倍、1/1.5 倍、1/2.0 倍、1/2.5 倍と変化させ、 D_{50} も異なる 4 種類の試料を用いて解析を行った。その結果、 $M_{T,P}$ と TL との最大差は 0.17 mm となった。これら結果から、TL が隙間幅を設定に有効であると報告している。

3. DEM による一面せん断試験のシミュレーション

3.1 供試体作製方法 本研究では PFC3D を用いて解析を行った。 D_{50} が 0.8mm より小さい試料の供試体を作製するためには、供試体サイズを実際の一面せん断試験の供試体(直径 60mm、高さ 20mm)より小さくす

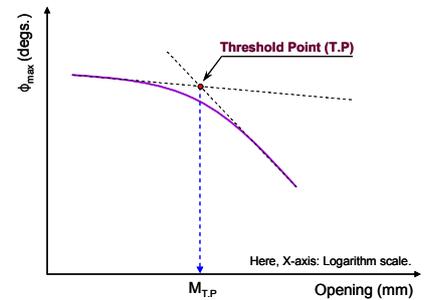


図 1 隙間幅～ ϕ_{max} の関係における T.P¹⁾

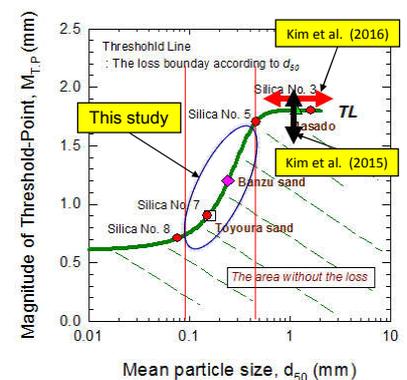


図 2 スレスホルドライン(TL)と DEM シミュレーションの検討範囲

表 1 スケールエフェクトの検討結果

Case	Shear box size (cm)	Number of Balls	Friction Angle
1	7.5 x 2.5	90561	39.5°
2	6.0 x 2.0	46370	38.4°
3	4.5 x 1.5	19564	39.1°
4	3.0 x 1.0	5800	38.3°

表 2 解析時のせん断箱サイズ、 D_{50} 、粒子数

Case	Shear box size (cm)	D_{50} (mm)	Number of Balls
1	1.8 x 0.6	0.242	129233
2	2.4 x 0.8	0.322	129233
3	3.0 x 1.0	0.483	74790

キーワード 一面せん断試験, DEM, 間隙幅, スレスホルドライン

連絡先 〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1 岡山大学大学院環境生命科学研究科 TEL 086-251-8992

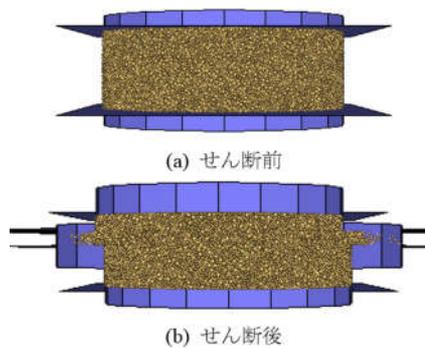
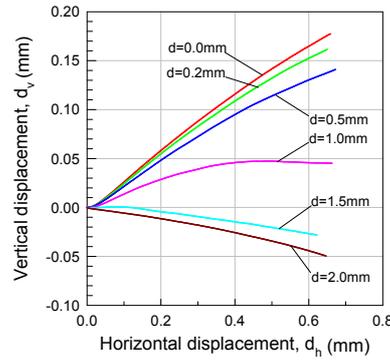
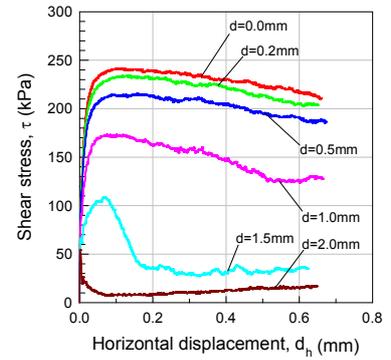


図3 ケース1のDEMシミュレーションの様子(d=1.0mm)



(a) d_h vs τ



(b) d_h vs d_v

図4 せん断強度，鉛直変位と水平変位関係(傾き 1.0 倍)

る必要がある。これは、粒子数が 30 万個を超えると PC の解析速度が遅くなるためである。このため、せん断箱のサイズを変化させた場合のスケールエフェクトについて検討を行った(表 1)。サイズを変化させた各ケースにおいて内部摩擦角は 38°~39°とほぼ等しい結果が得られ、スケールエフェクトがほとんど影響しないことを確認した。この結果に基づきせん断箱のサイズを表 2 のように縮小して、豊浦砂の粒度分布と相似粒度で D_{50} を変化させた 3 種類のケースについて解析を行った(図 3 はケース 1 の例)。粒子数は、ケース 1 と 2 が 129,233 個、ケース 3 が 74,790 個である。供試体の初期間隙比は 0.81 とし、解析に用いたバネ剛性等のパラメータは、過去の研究^{2), 3)}と同じものを用いた。

3.2 DEM シミュレーションについて 一面せん断試験シミュレーションは、3 段階に分けて行った。第 1 段階では、せん断箱となる壁要素を作製し、各粒度分布に調整した球粒子をせん断箱の中に挿入する過程を行った。第 2 段階では、上部の載荷板の速度を供試体の圧縮方向に制御し、300 kPa の鉛直応力を目標に圧縮過程を行った。圧縮過程の終了点の基準は、目標とする鉛直応力の 0.5% の誤差以内に上部載荷板が与える応力が達した時点とした。第 3 段階のせん断過程では、上部の載荷板のみを供試体に対して所定の鉛直応力を与えるように制御しながら、下部のせん断箱のみを水平方向へ 0.1 m/sec の一定速度で移動させた。

3.3 DEM シミュレーション結果 図 4 はケース 1 について、隙間幅ごとのせん断強度，鉛直変位と水平変位関係を示している。隙間幅が大きくなるほど、せん断強度やダイレイタンスが減少している。得られた結果から、隙間幅(d)~内部摩擦角(ϕ)関係を求め、さらに、図 5 に示す方法により各ケース M_{TP} がそれぞれ 1.13 mm, 1.38mm, 1.69mm と求められた。実材料による TL (実線) と今回の試料の D_{50} ~ M_{TP} 関係を比較した結果を図 6 に示す。今回の D_{50} が 0.8mm より小さい領域でも、得られた結果は、ほぼ TL 上に位置していることが分かる。過去の研究結果 (D_{50} が 0.8mm より大きい領域) でも同じ傾向が得られており、TL はせん断箱の隙間幅の設定基準として有効であることが DEM シミュレーションにより確認されたものと考えられる。

4. まとめ 今回の DEM シミュレーションにより、 D_{50} が 0.8mm より小さい領域での M_{TP} が、過去の研究結果と同様に実材料実験による TL¹⁾上に位置することが分かった。よって、TL は、試料の粒度分布の影響を受けない、一面せん断試験の隙間幅を設定するための有効な基準になるものと考えられる。

参考文献 1) Kim et al. (2012), KSCE J. of Civil Eng., Vol. 16, No. 7, pp. 1132-1142. 2) 金ら (2015), 第 50 回地盤工学研究発表会, 北海道, pp. 721-722. 3) 金ら (2016), 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.1, pp. 21-31.

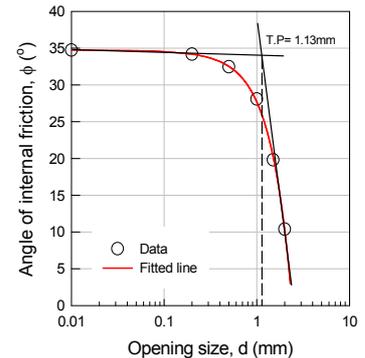


図5 ケース1での M_{TP} の決め方

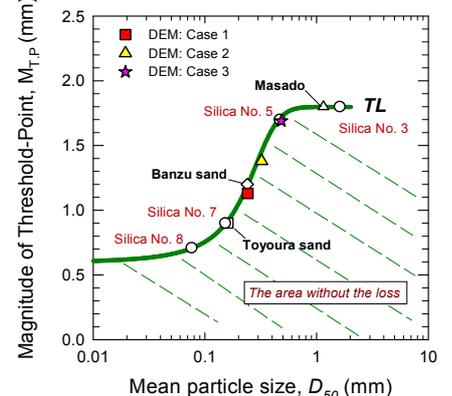


図6 D_{50} と M_{TP} の関係の比較