

大変形 粒子法 遠心载荷試験

早稲田大学 学生会員 ○今田 耕太郎
早稲田大学 国際会員 赤木 寛一
清水建設 (株) 国際会員 桐山 貴俊

1. はじめに

近年の地震による大規模な地盤の崩壊や豪雨による土砂災害は深刻な社会問題である。これらの被害を最小限に抑えるためにも、数値解析法による地盤の大変形挙動の予測に期待がかかっている。本研究では、数値解析法として連続体解析に基づく GIMP 法を採用し、地盤の大変形問題への適用性を確認する。その適用性を確認する目的で、遠心場における擁壁の平行移動に伴う背後地盤の大変形試験を実施した。この実験結果に対して、GIMP 法により地盤変形に影響する入力値の解析的な検討を行った。両者の結果について、地盤内部の変形形状に着目し、さらに、地表面の形状を座標化することで定性・定量的にその再現性を確認した。図-1 に研究フローを示す。

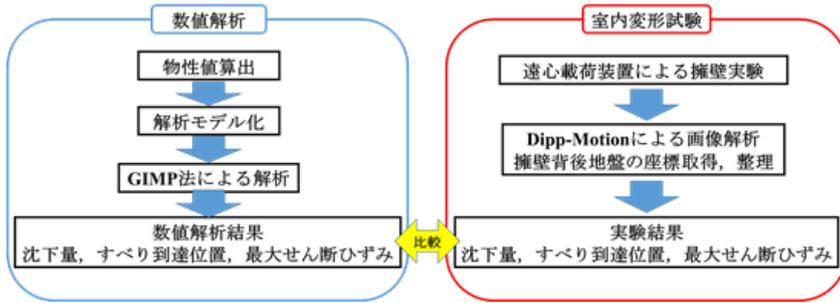


図-1 研究フロー

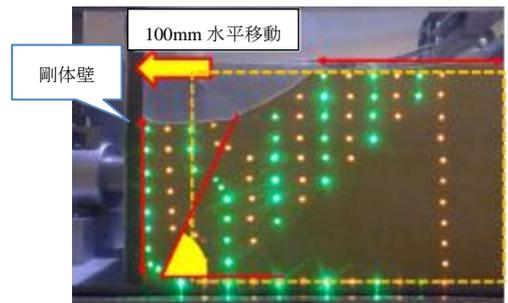


図-2 遠心载荷実験

2. 遠心载荷装置および試験手順

遠心载荷装置は、模型地盤に遠心力を作用させることで、実地盤規模の応力状態を再現することができる。本実験では、高さ 20(cm)の模型地盤に加速度 50(G)をかけることで、高さ 10m 相当の地盤を再現している。静止土圧状態にある地盤を、擁壁の水平移動により、強制的に主働崩壊させる(図-2 参照)。試験手順は次の通りである。はじめに、模型地盤の作製を行う。高さ 300(mm)、幅 900(mm)、奥行き 280(mm)の土槽内部にて、可動式擁壁を初期位置に配置し、擁壁背後に地盤材料として豊浦砂を空中落下法により充填する(図-3(a)参照)。地盤寸法を幅 400(mm)、高さ 200(mm)。相対密度を 90%として充填し、計測用 LED 標点を 2cm 格子状に配置する(図-3(b),(c)参照)。次に、遠心場 50G のもとで、この模型地盤を主働崩壊させる。遠心载荷装置により土槽を 50G の遠心場として、可動式擁壁を速度 2(mm/min)で稼働、主働方向 100(mm)まで水平移動させる。以上の実験手順で擁壁背後地盤の大変形挙動を再現した。この実験の様子を動画撮影にて標点を追跡し、撮影した動画を画像解析により、模型地盤の地中変位、せん断位置、地表面の幅、およびひずみを算出する。ひずみは矩形に配置した標点変位から形状関数を用いて最大せん断ひずみを算出した。



図-3(a) 空中落下法による地盤作製

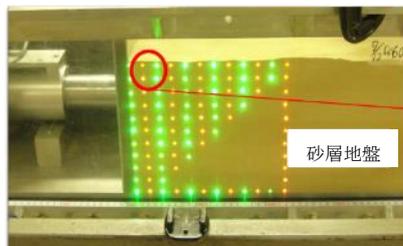


図-3(b) 模型地盤

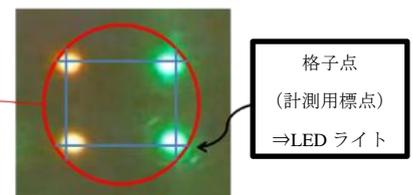


図-3(c) LED 標点

3. GIMP 法を用いた数値解析

表-1 に解析で用いた物性値、図-4 に解析モデルを示す。豊浦砂の物性値を三軸圧縮試験により算出した。せん断剛性は国生ら³⁾の式より算出した。目標間隙比 $e=0.7$ 、遠心载荷時における最大拘束圧 $\sigma'_m = 160(\text{kPa})$ をせん断剛性決定に用いた。図-4 の赤色の要素は擁壁、青色は擁壁背後地盤をモデル化したものである。本研究では、遠心場における実地盤規模を再現しているため、解析モデルについても同様の寸法を想定する。擁壁背後地盤の計算格子は幅 20(m)、高さ 10(m)であり、格子 1 つは 0.25(m)の正方形である。同様に擁壁は幅 1(m)、高さ 10(m)でモデル化したものである。擁壁、背後地盤共に 1 格子辺り 4 粒子配置した。

表-1. 解析に用いた物性値

物性値	値
ヤング率 $E(\text{kPa})$	3.9×10^5
ポアソン比 ν	0.33
せん断剛性 $G_0(\text{kPa})$	1.5×10^5
単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	15.7
粘着力 $c(\text{kPa})$	0
内部摩擦角 $\phi(\text{°})$	35.4
残留粘着力 $c_r(\text{kPa})$	0
残留内部摩擦角 $\phi_r(\text{°})$	25.8
ダイレイタンス角 $\psi(\text{°})$	0

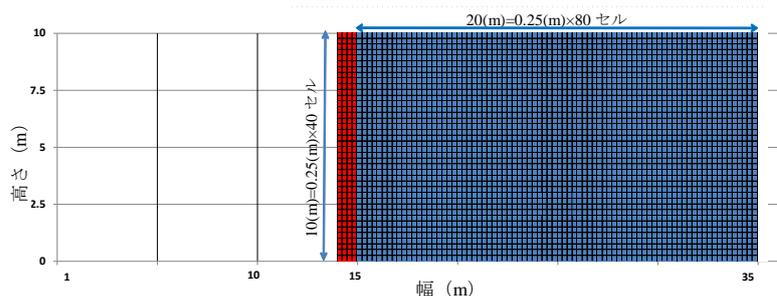


図-4 GIMP 法の解析モデル

4. 実験結果と解析結果

実験結果と解析結果の比較・検討を行い、以下に整理した。図-5より大変形後の実験結果(図-5 (a))、数値解析結果(図-5 (b))を比較すると、地盤形状のすべりの到達位置や擁壁近傍の沈み込み高さが異なることがわかる。図-6では、これらの結果を同一座標上で定量的に比較を行った。すべりの到達位置で2.6(m)、擁壁近傍の沈み込み高さで1.4(m)の差がある。

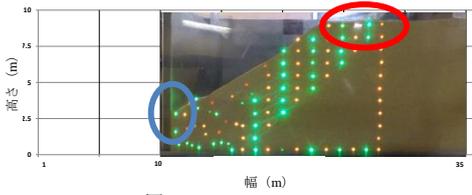


図-5 (a) 実験結果 (大変形後)

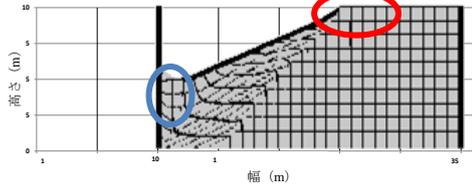


図-5 (b) 解析結果 (大変形後)

図-5 解析結果と実験結果の形状比較

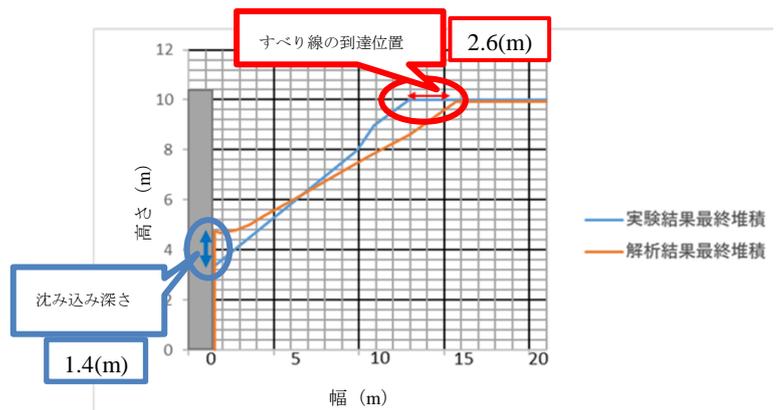


図-6 解析結果と実験結果の定量評価 (粘着力なし)

実験結果と数値解析結果の差に原因について検討した。図-7に示すように、遠心実験では、土槽前後の透明板と豊浦砂間の摩擦により、砂粒子の移動が妨げられていることが考えられる。本研究では、GIMP法解析を二次元解析としているために、この摩擦の影響を解析で再現することができない。そこでGIMP法解析において、この壁面摩擦の影響を考慮するために、見かけの粘着力($c=10(\text{kN/m}^2)$)を入力すると、図-8に示すように大変形後の実験結果に対応する解析結果が得られた。この解析結果について定量比較を行うと、すべりの到達位置で2.1(m)、擁壁近傍の沈み込み高さで0.2(m)の差となり、実験結果に近づいた(図-9参照)。また、実験結果の方が解析結果より地盤の堆積高さが大きい理由としては、遠心実験においてはダイレイタンシー効果が発揮され、模型地盤が体積膨張したと考えられる。

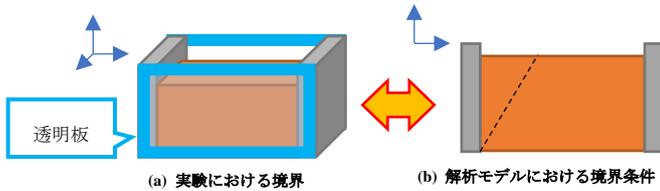


図-7 境界条件

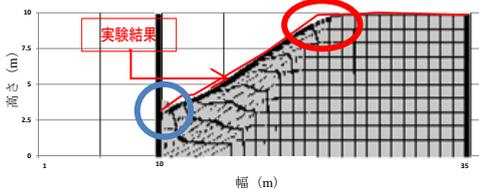


図-8 数値解析結果(粘着力付加)

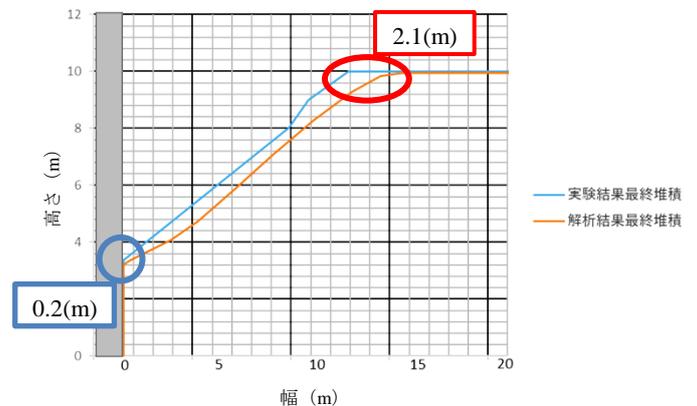


図-9 解析結果と実験結果の定量評価 (粘着力付加)

土槽と砂との間に発生する摩擦については、一面せん断試験における周面摩擦特性と似ている。周面摩擦特性というのは、供試体とせん断箱内面の間に摩擦が働き、せん断面上の垂直応力の測定値に影響を及ぼす特性である。遠心実験においても地盤が壁面および土槽と接しながら、垂直応力を受けている状態にあるため、一面せん断試験と似た境界条件になり、周面摩擦が発生したと考えられる。既往の研究²⁾においては、一面せん断試験装置において供試体に発生した周面摩擦の影響が、せん断時に見かけの粘着力を生じさせていることが示されている。

5. まとめ

- 1)実験、数値解析結果ともに、擁壁の主働変形に伴う背後地盤の大変形は連続する主働崩壊によって生じることが観測できた。
- 2)遠心载荷装置による室内変形試験、数値解析結果を比較すると、大変形後の擁壁背後地盤内のすべり到達位置や、擁壁近傍の沈み込み深さの差異が見受けられた。そこで実験における壁面摩擦に起因する境界条件の違いを考慮し、見かけの粘着力を持たせた上で数値解析を実施すると、実験に対応する解析結果が得られた。

(参考文献)

- 1)國生剛治ら(1979)「三軸試験装置を用いた微小ひずみから大ひずみまでの土質動的試験法の開発と砂の物性試験への適用」、『電力中央研究所報告』, 研究報告, No379002
- 2) 清水正喜ら: 砂の「簡易」定圧一面せん断試験に基づく強度の特性, 土木学会第60回学術講演会, Vol60, No3, 163-164, 2005.