

粒状要素法解析による粘性盛土地盤を想定した 遠心載荷逆断層模型実験の再現解析

森 貴寛^{1*}・金子 賢治²・鈴木 隼人³

¹電源開発株式会社 技術開発部（〒253-0041神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-7）

²八戸工業大学大学院 社会基盤工学専攻（〒031-8501 青森県八戸市大字妙字大開88-1）

³JPビジネスサービス株式会社 社会環境部（東京都江東区深川2-13-5）

*E-mail:takahiro_mori@jpower.co.jp

本論では、粘性盛土地盤に逆断層等の強制変位が作用する状況を想定した遠心載荷逆断層実験に対して、粒状要素法解析による再現解析を実施し、同解析手法の適用性評価を目的とする。実験では、層厚12m相当の粘性盛土地盤に強制変位が作用した場合を想定し、地盤内部のせん断変形の発生過程を評価した。再現解析では、土粒子を弾性粒状体として仮定し、粒子間の接触をバネ要素で表現する粒状要素法を採用し、実験から得られた盛土地盤内部の最大せん断ひずみを再現するバネ定数を同定した。

再現解析の結果、適切なバネ定数を設定することで、逆断層に起因した変位が盛土地盤内部に発生した後のせん断変形発生過程を定性的に推定した。

Key Words : fill embankment, deformation mechanisms, centrifugal experiment, Granular Element Method

1. はじめに

日本は世界でも有数の地震国であることや、各地で断層が確認されるため、インフラ構造物の建設や維持管理をする上で、断層による影響を検討するのは重要である。

断層変位に関する実験的な研究については、表層地盤の断層に伴う地盤内部の変形挙動を取り扱うものが中心に行われてきた。例えば、横ずれ断層を対象とした模型実験による供試体内部の観察¹⁾などがある。また、数値解析手法としては、連続体や離散体に基づく手法などがある。連続体手法は、FEM解析が代表的で実績が多いが、変形の局所化や不連続面の表現が難しい等の問題点がある²⁾。離散体手法には、個別要素法を用いた解析があり、材料を構成する個々の土粒子を解析要素として表現できるため、局所的な変形挙動や変形の不連続性を表現しやすい。しかし、連続体手法と比較して地盤工学分野への適用例が少ないことや計算時間が掛かる等の課題がある³⁾。

本研究では盛土等の土構造物を想定し、逆断層等の強制変位を受けた場合を対象とした。盛土等の土構造物の変形挙動は、粒度分布や拘束圧に依存することや、変形の局所化領域あるいは不連続面が発達・分岐する等の複雑な挙動を示すこともある。特に、拘束圧を考慮した実験をするため、遠心載荷装置を改良した逆断層実験装置を開発した。同装置により、実験規模で12m相当の盛土

地盤を想定した。同条件下において、逆断層を模した強制変位を作用させ、地盤内部の変形挙動を評価した。再現解析では、盛土地盤内部の不連続的な変形挙動を表現するため、離散体手法である粒状要素法解析(以下、GEM)⁴⁾を採用し、同解析手法の解析精度を評価する。

2. 遠心載荷逆断層実験

(1) 遠心載荷模型実験の概念

1/n縮尺模型実験を重力場で実施した場合、模型内部の鉛直土圧は実規模の1/nとなる(式(1))。遠心載荷装置を用いると、遠心力により重力加速度を α 倍した遠心加速度を作用させることができ、実験レベルで最大数十m相当の鉛直土圧を作用させることが可能である。

$$\sigma_m = \rho_t \cdot g \cdot \left(h_m \times \frac{1}{n} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_c = \rho_t \cdot (\alpha \times g) \cdot \left(h_m \times \frac{1}{n} \right) \quad (2)$$

ここで、 σ_m ：縮尺模型内部の鉛直土圧(kN/m²)、 σ_c ：遠心場における縮尺模型内部の鉛直土圧(kN/m²)、 ρ_t ：湿潤密度(t/m³)、 g ：重力加速度(m/s²)、 h_m ：模型高さ(m)。

(2) 遠心载荷逆断層実験の概略

図-1に、実験で使用した土槽（奥行：100×横幅：198×高さ：260mm）を示す。表-1と図-2に、土質材料の物性値と粒径加積曲線を示す。実験では、土質材料の違いによる変形挙動の違いを考察するため、珪砂4号（砂質土）とローム（粘性土）を用いた。供試体の締固め条件は、珪砂4号の場合は相対密度90%とし、ロームの場合は最大乾燥密度の90%とした。なお、ロームについては、供試体を土槽に締固めた後、飽和化を実施した。

実験中は、重力加速度の100倍の遠心加速度を各土質材料で作成した供試体に作用させた。

強制変位による変形挙動を追跡するために、図-1のように土槽アクリル面にマーカーを設置した。マーカーによる変位追跡は、ビデオカメラを用いて連続撮影した。変位速度は装置仕様を勘案し、3mm/minに設定した。

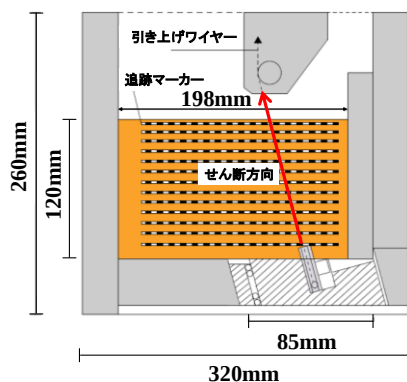


図-1 逆断層実験用土槽の概略図

表-1 実験で使用した土質材料の物性値

土質材料	珪砂4号	ローム
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65	2.66
湿潤密度 ρ (g/cm ³)	1.53	1.8
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.53	1.26
含水比 w (%)	-	42.3
間隙比 e	0.732	1.11
飽和度 S_r (%)	-	102
粘着力 c (kN/m ²)	0	4
内部摩擦角 ϕ (°)	46.1	37.1
液性限界 W_L (%)	-	98.3
塑性限界 W_P (%)	-	69.5
遠心加速度 G (m/s ²)	980	
せん断変位量 s (mm)	16	
せん断角度 α (°)	75	

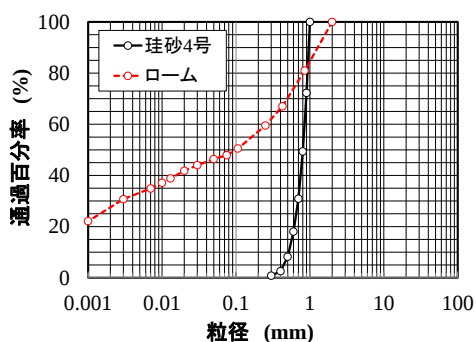


図-2 実験で使用した土質材料の粒径加積曲線

3. 粒状要素法解析

(1) 概要

GEMは、同じ離散体手法である個別要素法とは異なり、個々の粒状体の離散的な静的つり合い式を剛性マトリックスに基づいて解く陰解法である。したがって、準静的な挙動を解析する場合には、各解析ステップで静的なつり合い条件が満足されており、微視的挙動についても精度の高い解析が可能である。

図-3に、GEMの概念図を示す。各粒状体はそれぞれバネ要素と摩擦機構で構成される。

GEMでは、各粒状体を弾性体と仮定しており、各粒状体が接触した際に発生する接触力をフックの法則で表示する。そのため、各粒状体間には接線と法線方向にバネ要素が組み込まれている。一方、粒状体同士のすべりなどの非線形的な運動を再現するために、摩擦機構が組み込まれており、構成則にモール・クーロンの破壊基準を採用している。しかし、解析コードが開発途上であるため、粘着力は考慮できない。

以上のように、各粒状体の性質は弾性と想定しているが、粒状体間接触点における接触・摩擦により粒状体の運動が制約されることで非線形な材料応答となる。

(2) 数値解析領域

図-4に、GEMで再現する逆断層実験装置の解析領域を示す。左右および下面に境界粒子を配置し、同装置の壁面を再現した。数値解析上でも実験と同様に、せん断角度75度の方向にせん断変位量16mmを作用するような境界条件を与えた。

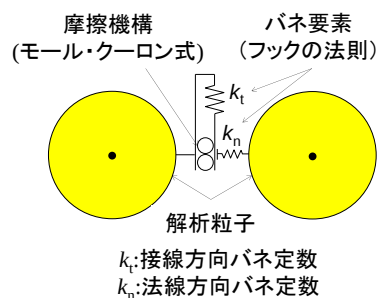


図-3 GEMの概略図

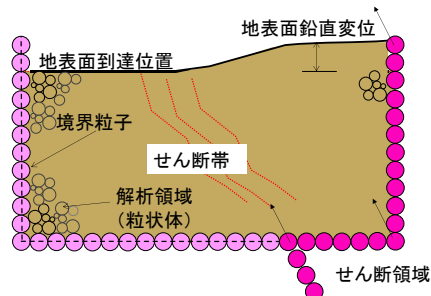


図-4 GEMで再現する逆断層実験装置の概略図

(3) バネ定数の同定手法

本解析では、土粒子の重なり率（以下、 R 値）および実験と解析結果の平均誤差（以下、 D 値）という指標を導入し、バネ定数の同定をした。 R 値と D 値の考え方は、以下の通りである。

GEM では、粒子間の接触力をフックの法則により表現するため、任意のバネ定数を与えた場合の接触力は、図-5(a)のように表現される。しかし、実現現象において、土粒子が凹む状況を除けば、土粒子同士は重なり合わないため、 R 値を極力小さくするバネ定数を設定する必要がある。式(3)に、 R 値の算定式を示す。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} r_i}{N_c} / d_{\min} \quad (3)$$

ここで、 R ：土粒子の重なり率(%), r_i ：各粒状体間の重なり量(mm), N_c ：解析領域内の重なり箇所数(個), $d_{\min}$ ：数値解析上における各土質材料の最小粒径(mm)。

D 値の概念図を、図-5(b)に示す。強制変位作用後の供試体と数値解析で再現したマーカー位置の平均誤差である。 D 値を極力小さくするようなバネ定数を設定した。式(4)に、 D 値の算定式を示す。

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} x_i}{N_c} \quad (4)$$

ここで、 D ：実験と解析におけるマーカー位置の平均誤差(mm), x_i ：実験と解析におけるマーカー位置の誤差(mm), N_c ：総粒子数(個)

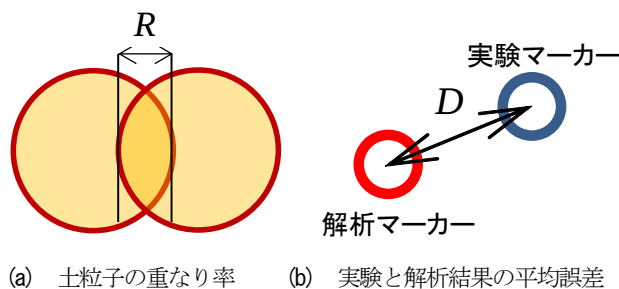


図-5 バネ定数の同定指標

4. 結果および考察

(1) 実験結果

a) 地表面の変位

図-6に、各土質材料の供試体が強制変位を受けた後の表面変位を示す。両者を比較すると、珪砂4号はロームと比較して表面変位が4mm程度大きい。この結果の要因として、材料のせん断応力が影響していると考えられる。モール・クーロンの破壊基準を勘案すれば、地表面では拘束圧は発生しないため、地表面におけるせん断応力は粘着力のみに起因する。そのため、粘着力を有さない珪砂4号は、ロームと比較して変位量が相対的に大きくなったと考えられる。

b) 盛土地盤内部の最大せん断ひずみ

図-7と図-8に、珪砂4号とロームにおける強制変位後のマーカー位置と最大せん断ひずみ $\epsilon_{\max}$ 分布を示す。ここで、 $\epsilon_{\max}$ はマーカーの中心点を節点としたメッシュのひずみから算出している。そのため、メッシュごとで $\epsilon_{\max}$ が算出される。

両材料の結果を比較すると、それぞれ特徴的な傾向がある。珪砂4号の場合、局所的に $\epsilon_{\max}$ が発達した。ロームの場合、珪砂4号と比較して $\epsilon_{\max}$ が幅広く分布した。

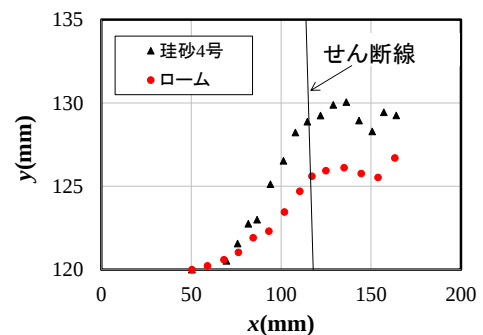


図-6 強制変位後における土質材料ごとの地表面変位

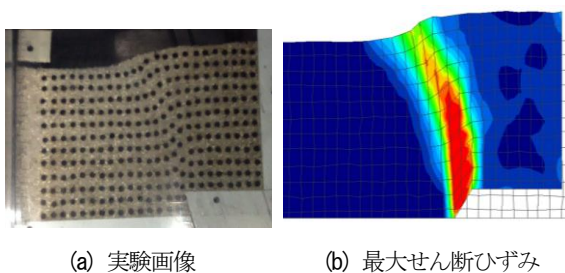


図-7 珪砂4号の実験結果

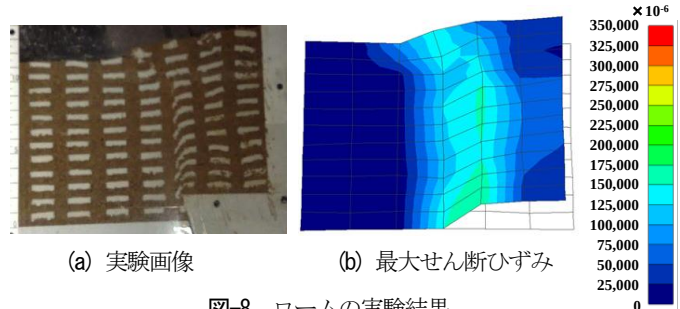


図-8 ロームの実験結果

(2) 解析結果

a) 解析条件

表-2と図-9に、解析条件と解析で使用する各土質材料の粒径加積曲線を示す。物性値や実験条件は、実験と解析において同様としたが、図-9に示すロームの解析粒度は、パソコンの計算処理能力を勘案して、実粒度の一部のみ再現した。

b) バネ定数の同定結果

図-10に、法線方向のバネ定数 k_n と土粒子の重なり率 R および実験と解析の平均誤差 D の関係を示す。 k_n と各指標の傾向は、以下の通りである。

k_n と R は、 k_n が増加するに従い R が低下する傾向があった。 k_n と D には、 k_n に拘らず D は概ね一定値を示した。これらを勘案し、実験結果を再現する最適な k_n を80kN/mとした。接線方向のバネ定数 k_t は、既往文献の感度解析⁴⁾により、 $k_t/k_n=0.4$ の関係があるため、 $k_t=32$ kN/mとした。

c) 再現解析結果

図-11と図-12に、珪砂4号とロームについて実験と解析から求めた最大せん断ひずみ $\epsilon_{\max}$ を示す。解析で算出した $\epsilon_{\max}$ は、解析上で再現したマーカーから設定したメッシュの変形量より求めた。

各土質材料の実験と解析結果を比較すると、せん断線の角度や $\epsilon_{\max}$ の絶対値について表現できなかった。一方で、珪砂4号の $\epsilon_{\max}$ がせん断線に沿って局所的に表れるといったように、各土質材料が有する定性的なせん断特性

を解析により再現できたと考えられる。

上記の結果から、GEMにより逆断層に起因した変位が盛土地盤内部に発生した後における、せん断変形発生過程を定性的に推定した。

5. 結論

本研究では、粘性盛土地盤に逆断層等の強制変位が作用する状況を想定した遠心载荷逆断層実験と、粒状要素法解析による同実験の再現解析を実施し、同解析手法の適用性評価を行い、以下の知見が得られた。

- ① 実験では、珪砂 4 号（砂質土）とローム（粘性土）で作成した供試体が強制変位を受けた後の最大せん断ひずみ分布 $\epsilon_{\max}$ を比較した。その結果、珪砂 4 号の方がロームと比較して、 $\epsilon_{\max}$ が局所的かつ大きくなるのが分かった。
- ② 粒状要素法の解析パラメータである、バネ定数 k を同定するにあたり、 R 値および D 値を提案した。その結果、実験結果を定性的に再現する上で、一定の効果を持つ指標であることが分かった。
- ③ GEM に関する適用範囲は、各土質材料の定性的なせん断特性の把握にとどまる。

謝辞：本稿の投稿にあたり、八戸工業大学の山口氏、JPビジネスサービス(株)の依田氏の協力を頂いた。ここに感謝の意を示す。

表-2 解析条件

土質材料	珪砂4号	ローム
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65	2.66
内部摩擦角 ϕ (°)	46.1	37.1
せん断変位量 s (mm)	16	
せん断角度 α (°)	75	
総粒子数(個)	22,126	15,048
解析粒子数(個)	20,026	12,948
境界粒子数(個)	2,100	
遠心加速度 G (m/s ²)	980	
バネ定数 k (kN/m)	$k_n=80, k_t=32$	

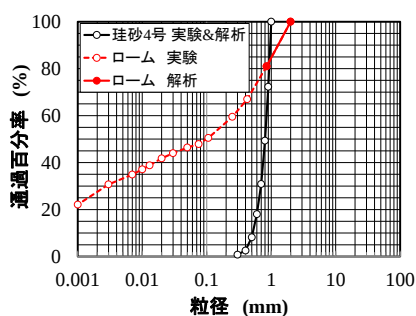


図-9 解析で再現した粒径加積曲線

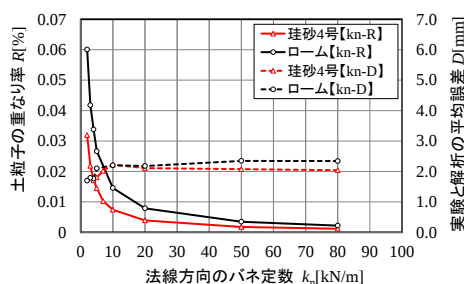


図-10 バネ定数の同定結果

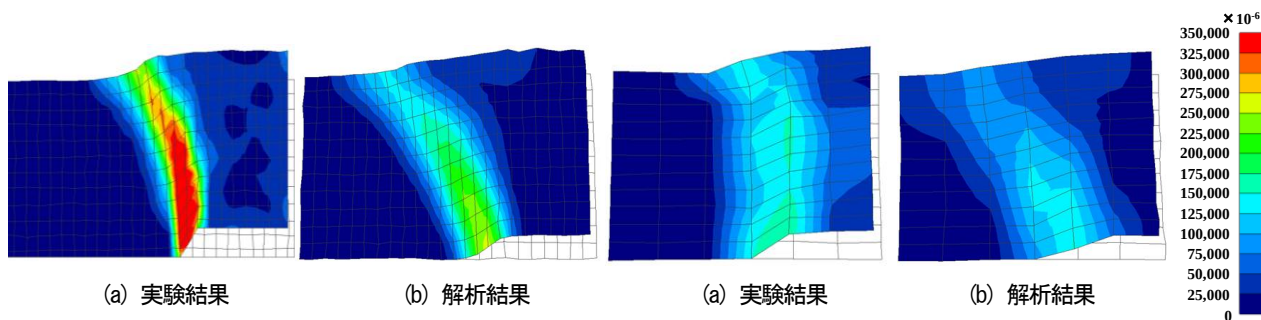


図-11 珪砂4号の最大せん断ひずみ

図-12 ロームの最大せん断ひずみ

参考文献

- 1) 谷 和夫・小山 良浩：横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の内部に発達するせん断帯の構造分析，土木学会論文集，No.757/III-66，pp.235-246，2004.
- 2) Anders, M.S., and Hori, M.: Three-dimensional stochastic finite element method for elasto-plastic bodies, *int. J. Num. Meth. Eng.*, 51, pp449-478, 2001.
- 3) 堀 宗朗：断層変位シミュレーション，活断層研究，Vol. 28, pp. 65-70, 2008.
- 4) 金子 賢治，寺田 賢二郎，京谷 孝史，岸野 佑次：非線形均質化理論に基づく粒状体マルチスケール解析法の杯初とその応用，土木学会論文集，No.680/III-55，pp.183-199，2001.

Centrifugal experiments and GEM simulation on deformation of cohesive soil embankment on ground by dip-slip fault rapture

Takahiro MORI, Kenji KANEKO, Hayato SUZUKI

The purpose of the study is to assess the applicability of Granular Element Method (GEM) for cohesive soil embankment on ground after displacement. We developed a centrifugal experiment device and simulation method based on GEM. The GEM assumes soil materials of embankment as particles with a grading. Each particle is connected to next particles with springs following the Hook's law.

We compared experimental results with numerical ones to identify spring coefficients from experimental results. As a result, GEM can simulate experimental results qualitatively by setting appropriate spring coefficients.