

個別要素法による土構造物の地震時残留変形量の予測

(株)大林組 土木技術本部 山本修一

1. はじめに

盛土や堤防などの土構造物は地震により変形が生じて直ちに完全な崩壊に至りにくい、いわゆる靱性を期待できる構造物である。土木学会地震工学委員会「高地震力に対する土構造物の耐震設計法に関する研究小委員会」では、この土構造物の特徴を生かし高地震力に対して変形を許容する合理的な設計法について検討してきた。本研究はその活動の一環として実施したものである。本報告では土構造物の破壊・流動までの地震時の変形挙動を個別要素法 (DEM) により定量的に予測するための方法を提示し、盛土の模型振動実験^{1),2)}のシミュレーション解析結果を示す。

2. 模型振動実験の概要

模型盛土は剛土槽内に気乾状態の豊浦標準砂を空中落下して作成している。盛土模型をゴムメンブレンで覆い内部に負圧1.73gf/cm²を作用させて擬似的なサクシオンを与えている。加振は、土槽を振動台に設置し5Hzの正弦波を入力している。入力加速度は増分50～60galで約600galまで10段階で増加させている。それぞれの段階で一定加速度を約10秒間保持している(詳細は文献1),2)。

3. 解析方法

(1)解析手法 解析には、円形要素に基づく二次元個別要素法 (GRADIA)³⁾を用いた。GRADIAでは内部摩擦角に及ぼす粒子形状の影響に関する考察に基づいて「粒子接点での転がり抵抗」⁴⁾を導入している。これにより解析対象地盤と等価な内部摩擦角の数値モデル地盤を作成することができる。また、粒子間に付着力を導入することによって見かけの粘着力を考慮することが可能である⁵⁾。

(2)解析モデル 解析モデルは、実験模型と断面形状が一致するように、直径1.25cmおよび2.25cmの円形個別要素を混合重量比3:2でランダムパッキングして作成した。図-1に重力を作用させた状態での解析モデルを示す。全要素数は5,950である。左右両端の直線は剛土槽をモデル化した剛体要素を示している。また、塗りつぶした粒子は実験計測位置と対応させて変位の時刻歴応答をサンプリングした要素である。

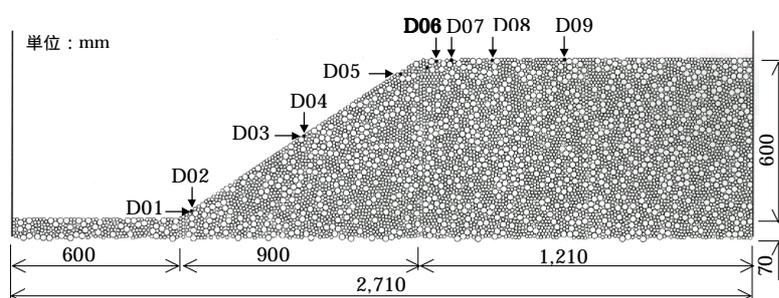


図-1 解析モデル (重力作用時)

表-1 材料定数

DEMの材料物性		関連する地盤物性		
項目	値	項目	解析モデル地盤の物性値	実験模型地盤の物性値
法線方向バネ定数 (kgf/cm)	2000	弾性波速度 (cm/s)	$V_p=3.7 \times 10^4$	$V_p=3.7 \times 10^4$
接線方向バネ定数 (kgf/cm)	720		$V_s=未確認$	$V_s=2.2 \times 10^4$
法線方向粘性定数 (kgf/cm s)	0.136	減衰定数 (%)	$h=13.8$	$h=14\%$ ($\gamma=5 \times 10^{-4}$)
接線方向粘性定数 (kgf/cm s)	0.0817	内部摩擦角 (度)	$\phi=43$	$\phi=42$
粒子間摩擦角 ϕ_μ (度)	24	転がり抵抗 B/r		
転がり抵抗 B/r	0.156	粘着力 (kgf/cm ²)	$c=0.004$	$c=0.0039$ (負圧換算分を含む)
粒子間付着力 P (kgf)	0.074	単位体積重量 (gf/cm ³)	1.55	1.55
要素の質量密度 (g/cm ³)	1.89			

(3)材料物性の設定方法 DEM解析で用いた材料定数を関連する地盤物性と対応させて表-1に示す。

要素の質量密度は、数値モデル地盤の単位体積重量が実験と一致するよう設定した。バネ定数は、数値モデル地盤の弾性波速度試験を行って実験模型地盤の弾性波速度と等価となるバネ定数を設定した⁶⁾。

内部摩擦角 ϕ と粒子接点での転がり抵抗 $R=(B/r)/\tan\phi_\mu$ の間には、経験的に図-2に示すように密接な関係がある⁴⁾。ここに、 B は転がり摩擦係数、 r は粒子半径、 ϕ_μ は粒子間摩擦角である。図-2において、 ϕ_{min} は粒子接点に転がり抵抗が無いとき($R=0.0$)の内部摩擦角で、 ϕ_{max} は転がり抵抗が最大($R=1.0$)のときの内部摩擦角である。図-2の関係を用いて図-3に示す手順により実験模型地盤と等価な内部摩擦角および粘着力を有する数値モデル地盤を作成した(粘着力は粒子間付着力の大きさに比例する^{3),7)})。なお、模型実験で作用させている負圧は見かけの粘着力の増加として考慮した。

(4)入力加速度 実験では、加速度振幅を段階的に増加させ全部で約150秒間加振しているが、全時間の解析を行うのは計算時間が膨大となり困難である。そこで本解析では、実験で残留変形が大きくなり始めた入力加速度(360gal)

キーワード：個別要素法、盛土、残留変位、地震応答、振動台実験

連絡先：〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 (株)大林組土木技術本部 TEL.03-5769-1309 FAX.03-5769-1972

をスタートとして360galを4秒間、410galを1秒間、475galを8秒間入力した。

4. 解析結果

(1) 盛土上面の鉛直変位 図-4は、法肩に最も近いサンプリング粒子の鉛直変位(D06)について、入力加速度レベルごとに実験結果と比較したものである。入力加速度履歴が実験と解析では異なるので鉛直変位量を直接実験と比較することはできないが、沈下速度(勾配)に着目すると、解析結果は実験結果とよく対応するのが見られる。

(2) 盛土の変形・破壊形態 図-5は入力加速度475gal入力後の変形・破壊の様子を実験と比較して示したものである。中段の図は、加速度入力前に等間隔に引かれたグリッド線がどのように変化したかを示したもので、変形あるいは滑りの形態がよくわかる。また、上段の図は粒子の回転量の大きさを色分けして示したものである。砂のせん断試験やDEMによる粒状体のせん断試験から、せん断帯内では周囲の粒子に比べ大きな粒子回転が起こることが報告されている^{8),9)}。したがって、上段の図はせん断帯の発達状況を示していると理解することができる。これら解析結果は変形形態やすべり面の位置など実験結果(下段の図)をよくシミュレートしていると思われる。

5. おわりに

粒子間に転がり抵抗と付着力を導入した個別要素法により、従来のDEMや弾塑性FEMでは再現困難な盛土の振動破壊実験をよく再現できることが確認された。今後は、様々な条件の模型振動実験や実際の土構造物に対する解析事例を蓄積することによって、個別要素解析の実用化を図っていく必要がある。

謝辞：振動実験結果をご提供頂いた鉄道総合技術研究所の館山勝氏に記して感謝の意を表します。

参考文献： 1) (財) 鉄道総合技術研究所：土木学会地震工学委員会高地震力に対する土構造物の耐震設計法に関する研究小委員会資料(1998.10.21)。 2) 小島ほか：第33回地盤工学研究発表会, pp.1033-1034。 3) 山本：名古屋工業大学博士論文, 1996。 4) 山本：第32回地盤工学研究発表会, pp.497-498。 5) 山本ほか：土木学会第50回年次学術講演会, pp.326-327。 6) 伯野：森北出版, 1997。 7) 加藤ほか：土木学会応用力学論文集Vol.2, 1999。 8) 神谷ほか：第33回地盤工学研究発表会, pp.559-560。 9) K. Iwashita et al., Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.124(3), pp. 285-292, 1998。

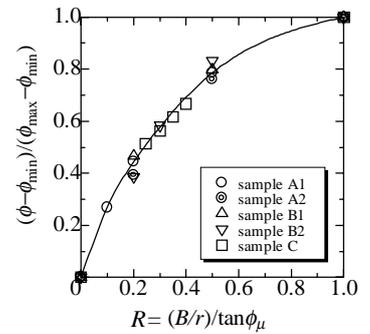


図-2 内部摩擦角 ϕ と転がり抵抗 R の関係

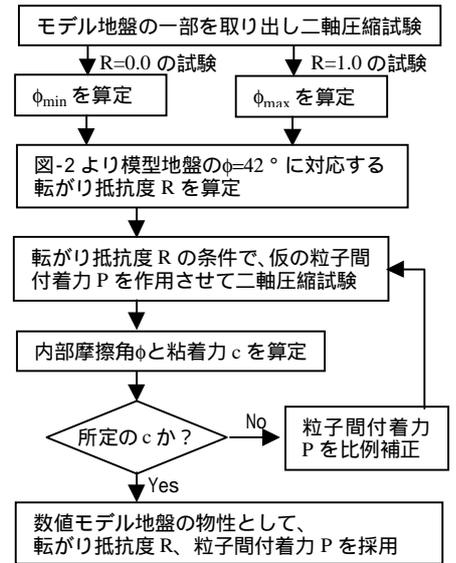


図-3 所定のせん断強度 (c, ϕ) を有する数値モデル地盤の作成法

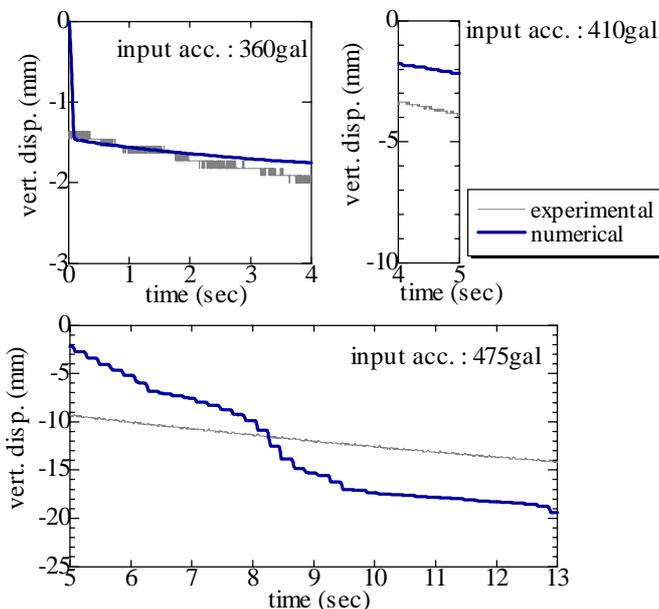
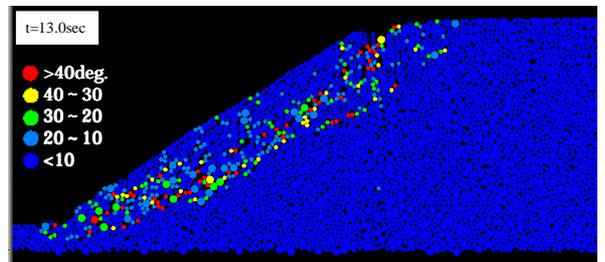
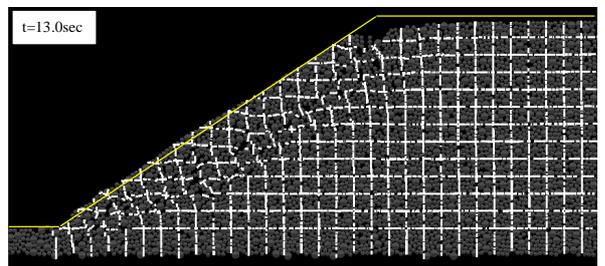


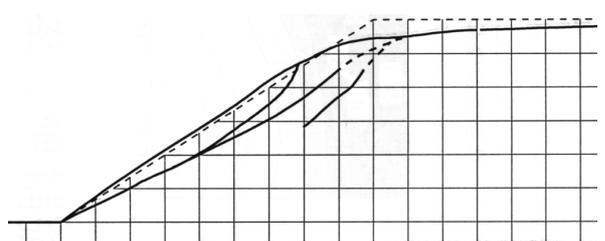
図-4 法肩部 (D06) の鉛直変位量



解析結果 (粒子回転量の分布)



解析結果 (メッシュの変形) グリッド幅: 50mm



実験結果 (加振終了時) グリッド幅: 100mm

図-5 盛土の破壊状況の実験結果との比較