

SPH 法による急勾配盛土の 遠心振動台実験の再現解析

伊吹 竜一¹・井澤 淳²・土井 達也²・
小島 謙一³・酒井 久和⁴・小野 祐輔⁵

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: ibuki.ryuichi.85@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 総務部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁴正会員 法政大学教授 デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

⁵正会員 鳥取大学教授 工学部 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

盛土の耐震性能評価では、円弧滑り破壊を前提としたニューマーク法が使用されることが多いが、この手法では実際の盛土の損傷形態を必ずしも正確に再現できない。そこで、筆者らは遠心振動台実験を実施し、損傷過程の観察と性能照査手法の提案を行っている。本稿では、提案した性能照査法における応答値算定手法への適用を最終的な目的とし、SPH 法を用いた実験の再現解析を実施した。その結果、実験と比べて深い位置での滑り線であったが、法尻付近からひずみが集中して滑り線が形成される損傷過程を再現できた。また、実験とは異なり滑り破壊に至らなかったものの、天端および法尻にて変位が発生する傾向は概ね一致し、応答値算定手法としての適用性を確認した。さらに、解析の高精度化のためのいくつかの課題を抽出した。

Key Words: SPH method, centrifuge test, embankment, numerical simulation

1. はじめに

盛土の耐震性能評価では、円弧滑り破壊を前提としたニューマーク法が使用されることが多い^(例えば 1)2)。しかし、図-1 の藤原ら³⁾⁴⁾が行った 2011 年東北地方太平洋沖地震における鉄道盛土の地震時変位量の観測値とニューマーク法による滑動変位量との比較に示すように、ニューマーク法を適用した場合、過度に安全側または危険側の結果を与える傾向があることが分かる。このように、円弧滑り破壊を前提としたニューマーク法は、実際の盛土の損傷形態を必ずしも正確に再現出来ておらず、適切な耐震性能評価を実施することが困難な場合がある。これは、地震時の盛土の被害は沈下や法面のはらみだし、クラックの発生など、滑り破壊には至らない損傷が発生する場合が多いのに対して、円弧滑りによる極限釣り合い法による安全率ではこのような損傷の過程を評価することができないためであると考えられる。

一方で、地震時の盛土の損傷過程を明らかにするためには筆者らは遠心振動台実験を実施している⁵⁾⁶⁾。井澤ら⁷⁾は、この遠心振動台実験の結果に基づき、地震時の盛土の損傷レベルを法尻付近のせん断ひずみと盛土材料の応力ひずみ関係で規定することにより、盛土が破壊に至るまでの損傷の過程を評価可能な性能照査法を提案している。この性能照査法を適用することにより、より実情に即した盛土の耐震性能評価を実施できると期待される。

この性能照査法を実構造物に適用する際には、法尻付近におけるせん断ひずみの算出が必要となるため、損傷過程を精緻に再現可能な地震応答解析手法を用いることが望ましい。そのような解析手法としては、主に有限要素法 (Finite Element Method: FEM) や個別要素法 (Discrete Element Method: DEM) などが挙げられる。FEM は土構造物の数値解析手法として古くから利用されており、信頼性の高い計算手法である^(例えば 8)。しかし、解析対象をメッシュで分割するため、大変形や分離、剥離等の表現が不得意である。よっ

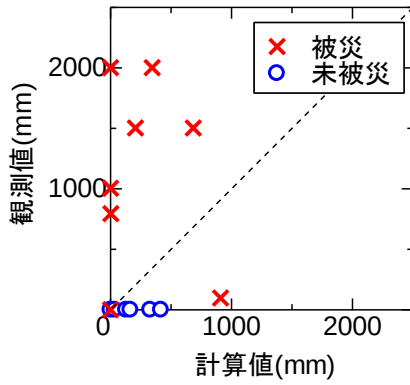


図-1 観測変位量と解析による滑動変位量の関係
(藤原ら⁹⁾を再整理)

て、FEM においてこれらの問題を扱う際には、ジョイント要素の導入やメッシュの再生成などといった工夫をする必要がある。また、DEM は離散体を扱う解析手法であるため、大きな変形を表現できる手法である⁹⁾。このとき、要素間に設置されたばねとダッシュポッドにより相互作用を表現するが、これらのパラメータは試行錯誤的に決定されており、解析対象の特性を精度良く再現することが困難である。

近年、連続体の大変形を表現可能な数値解析手法として、粒子法が注目されている。粒子法は、対象の連続体を離散的な粒子により表現して支配方程式を解くことで、それぞれの粒子の運動を計算する手法であり、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法や MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法がよく知られている。本研究で扱う SPH 法は、宇宙物理学の分野において圧縮性流体解析手法として開発されたものであり¹⁰⁾、運動方程式などの支配方程式に対してカーネル近似と呼ばれる近似を行うことで、個々の粒子の運動を計算する。つまり、FEM のようなメッシュを必要としないため、解析対象の大変形を伴う現象を扱うことが容易となる。そのため、流体力学をはじめとして様々な分野において SPH 法の適用が検討されており、さらに、FEM で用いられてきた弾塑性構成則を導入することが可能であることから、土構造物に対する適用も試みられている^{例えば11)12)13)}。

本稿では、盛土の地震時損傷過程の把握を目的とした急勾配盛土の遠心振動台実験に対して、微小変形から大変形までを追跡可能な SPH 法¹²⁾を用いて再現解析を行うことで、盛土の地震時損傷過程を考慮した応答値算定手法としての SPH 法の適用性を検討した。

2. 数値解析手法

(1) Smoothed Particle Hydrodynamics 法

SPH 法の計算では、図-2 に示すように連続体を多数の粒子へと離散化してその運動を表現する。そして、ある粒子 i の関数 $f(\mathbf{x}_i)$ の近似 $\langle f(\mathbf{x}_i) \rangle$ は、近傍粒子 j の関数

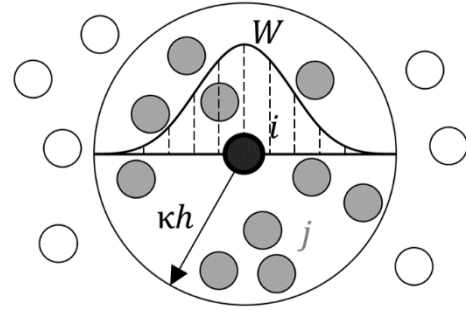


図-2 SPH 法概念図

$f(\mathbf{x}_j)$ に対してカーネル関数 $W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h)$ を用いた重み付け平均することで、次式のように得られる¹¹⁾。

$$\langle f(\mathbf{x}_i) \rangle = \int f(\mathbf{x}_j) \cdot W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) d\mathbf{x}_j \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_i$ は評価を行う粒子 i の評価中心及び座標値、 $\mathbf{x}_j$ は粒子 i 周辺の粒子 j の評価中心及び座標値、 h は影響半径、 κ は平滑化距離を規定するパラメータ、 $d\mathbf{x}_j$ は粒子 j の体積である。カーネル関数は原点に頂点があり、原点から離れるにつれて減少し、平滑化距離よりも離れたときに 0 となる性質を持つ。本稿では、カーネル関数として 3 次スプライン関数を採用した。

そして、偏微分方程式に現れる関数 $f(\mathbf{x}_i)$ の空間勾配 $\nabla \cdot f(\mathbf{x}_i)$ は、カーネル関数の空間勾配を用いることで式(2)のように近似される。

$$\langle \nabla \cdot f(\mathbf{x}_i) \rangle = - \int f(\mathbf{x}_j) \cdot \nabla W_{ij} d\mathbf{x}_j \quad (2)$$

ここで、 W_{ij} は $W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h)$ である。さらに、関数 $f(\mathbf{x})$ は密度 ρ を持つ媒質上で定義されていると考え、式(2)を有限な粒子によって離散化することで、次式を得る。

$$\langle \nabla \cdot f(\mathbf{x}_i) \rangle = - \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(\mathbf{x}_j) \cdot \nabla W_{ij} \quad (3)$$

ここで、 ρ_j 、 m_j 、 $\mathbf{x}_j$ は粒子 j の密度、質量、座標、 N は影響半径内にある粒子の総数である。また、これらの粒子は近似を行うための評価位置を示す仮想的な存在である。なお、式(3)は微分操作によって次式へと変形が可能である。

$$\langle \nabla \cdot f(\mathbf{x}_i) \rangle = \frac{1}{\rho_i} \sum_{j=1}^N m_j \{ f(\mathbf{x}_i) - f(\mathbf{x}_j) \} \cdot \nabla W_{ij} \quad (4)$$

$$\langle \nabla \cdot f(\mathbf{x}_i) \rangle = -\rho_i \sum_{j=1}^N m_j \left\{ \frac{f(\mathbf{x}_i)}{(\rho_i)^2} + \frac{f(\mathbf{x}_j)}{(\rho_j)^2} \right\} \cdot \nabla W_{ij} \quad (5)$$

(2) 運動方程式の離散化

密度 ρ を持つ弾性体の運動方程式は次式で表される¹¹⁾。

表-1 江戸崎砂物性値⁵⁾

乾燥密度: ρ_d	1.422 g/cm ³
圧縮指数: C_c	8.75
膨潤指数: C_s	1.21
先行圧縮圧力: P_c	91.8 kPa
粘着力: c	5.0 kPa
内部摩擦角: ϕ	30.2 deg.

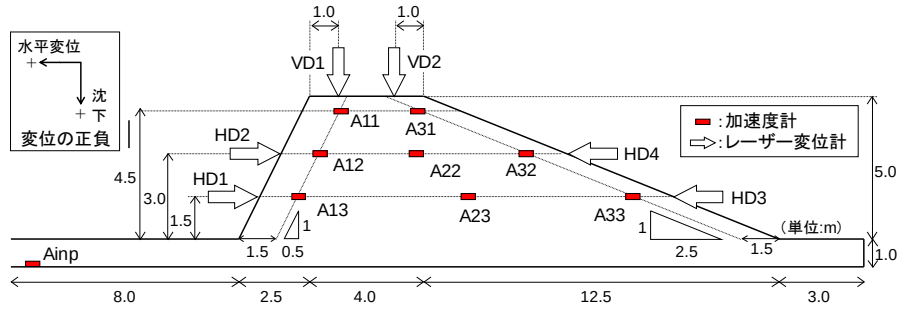


図-3 模型盛土とセンサー配置図 (実物大換算)⁵⁾

$$a^I = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{IJ}}{\partial x^J} + b^I \quad (6)$$

ここで、 a^I は I 方向の加速度、 σ^{IJ} は応力テンソル、 b は物体力である。さらに、式(6)に式(5)を適用すると、

$$a_i^I = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{IJ}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{IJ}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_j^J} + b_i^I \quad (7)$$

となる。ここで、 i は評価を行う粒子、 j は平滑化領域内に含まれる他の粒子である。また、 Π_{ij} は人工粘性項と呼ばれ、解の振動を防ぐために導入されており、次のように定義される¹⁵⁾。

$$\Pi_{ij} = \frac{-\alpha \bar{c}_{ij} \bar{\mu}_{ij} + \beta \bar{\mu}_{ij}^2}{\bar{\rho}_{ij}} \quad (8)$$

$$\bar{\mu}_{ij} = \frac{h(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2 + \varepsilon h^2} \quad (9)$$

$$\bar{\rho}_{ij} = \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \quad (10)$$

$$\bar{c}_{ij} = \frac{c_i + c_j}{2} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{v}$ は粒子速度、 c はP波速度である。また、 α 、 β は減衰の大きさを表す定数であり、 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 1$ とされることが多く¹⁶⁾、本稿でもこの値を採用した。一方、 ε は過度な減衰が発生し、解析が不安定になることを防ぐパラメータであり、0.01 から 0.1 の間の値が用いられることが多い。本稿における解析では野々山ら¹⁷⁾と同様に 0.01 とした。

3. 対象実験⁶⁾

対象実験は、破壊に至るまでの盛土の損傷過程を把握するために実施した1:0.5勾配盛土の遠心振動台実験⁶⁾とした。実験では、盛土材として江戸崎砂を締固め度Dc=85%で使用した。江戸崎砂のDc=85%での各種地盤材料試験結果を表-1に示す。なお、遠心载荷装置内に設置した振動台に搭載可能な容器の関係で、盛土高さは

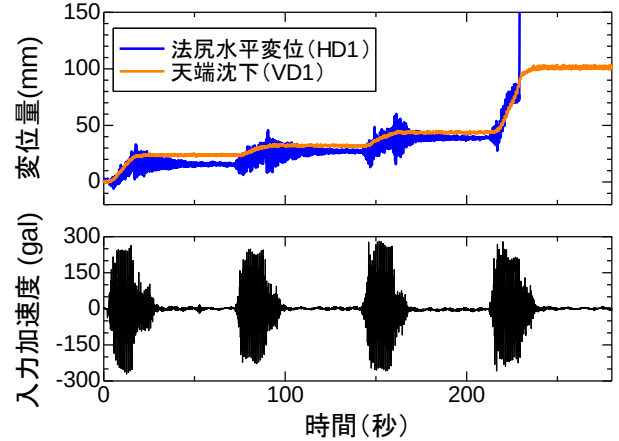


図-4 変位量の時刻歴と入力加速度⁶⁾

5m (50G換算)とした。以降の数値は全て実物大換算とする。盛土模型の形状およびセンサー配置を図-3に示す。また、盛土内部に生じるひずみを精緻に計測するために、PIV法¹⁸⁾を用いた。遠心加速度50G到達後、本加振前に微小なホワイトノイズ加振を行った結果、盛土の固有周期は0.192秒(固有振動数:5.22Hz)であった。

加振は、徐々に盛土の変形を生じさせて破壊に至るまでを詳細に観察できるよう、比較的小さな地震動を何度も入力することとし、目標最大加速度250gal、1Hz、20波の正弦波で数回加振した。入力波を図-4に示す。盛土の固有周期が0.192秒であることから、周期1秒の正弦波は長周期の入力波である。

HD1における法尻水平変位量とVD1における天端沈下量の時刻歴を図-4に示す。3回目の加振までは、滑り破壊には至らず、地震動により天端の沈下とそれに伴う水平変位が発生した。これらの変形は、実際の盛土の地震時被害と同様である。その後、4回目の加振中に滑り線が発生し、図-5に示すような滑り破壊が生じた。各加振後の画像を用いたPIV解析から得られた最大せん断ひずみ分布図(図-6)より、法尻付近にひずみが集中し始め、徐々にひずみが内部へ進行して滑り線が形成され、滑り破壊に至る様子を確認した。

4. 解析条件

解析に使用したモデルを図-7 に示す．総粒子数 15, 125 個，初期粒子間隔 0.1m，平滑化距離 0.26m とした．なお，粒子は格子状に配置し，側方と底面における 2 列の粒子（赤色）を固定している．弾塑性モデルは Drucker-Prager モデル，塑性ポテンシャル g は Bui ら¹⁴⁾を参考に式(12)として，解析パラメータは要素試験結果より表-2 のように設定した．

$$g = \sqrt{J_2} + 3I_1 \sin\psi \quad (12)$$

ここで， J_2 は偏差応力の第 2 不変量， I_1 は応力の第 1 不変量， ψ はダイレイタンシー角である．実験では 4 回目の加振中に盛土が滑り破壊に至ったこと，各加振時にお



図-5 滑り破壊の様子⁹⁾

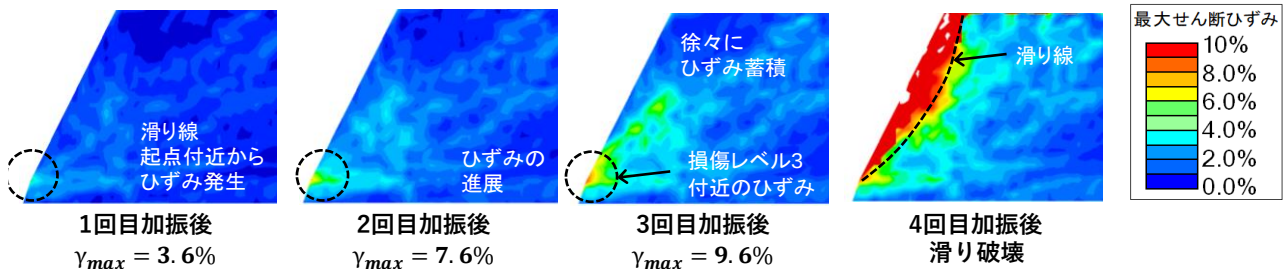


図-6 盛土内部の損傷状態（最大せん断ひずみ分布図）⁹⁾

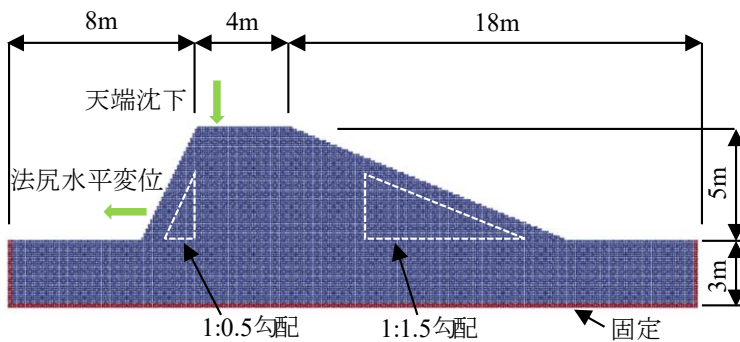


図-7 解析モデル

表-2 解析パラメータ

単位体積重量	16.6 kN/m ³
変形係数($\sigma_c = 40\text{kPa}$)	98.6 MN/m ²
ポアソン比	0.45
粘着力	5.0 kPa
内部摩擦角	30 deg.
ダイレイタンシー角	0 deg.

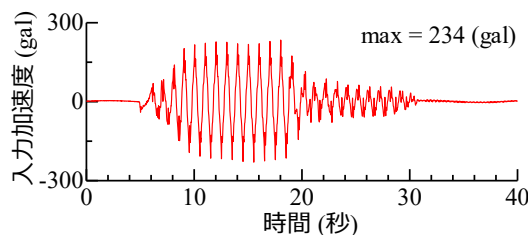


図-8 入力加速度

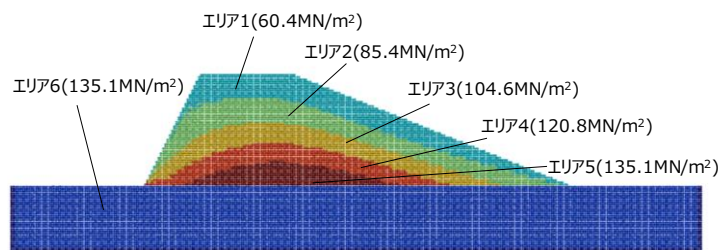


図-9 解析モデルの分割と変形係数の補正

ける入力波の差異が小さかったことから，1 回目加振時に得られた支持地盤の加速度波形（図-8）を 4 回入力した．このとき，入力加速度は解析モデル全体に対して一様に与え，積分時間間隔は 5.0×10^{-6} 秒とした．

振動台実験の解析は，変形係数を一様とした Case-A と拘束圧依存性を考慮して変形係数を階級分けした Case-B の 2 ケース実施した．初めに，各ケースに対して初期応力状態を得るために自重解析を行った．Case-A では，要素試験で得られたせん断剛性と盛土中央の鉛直土圧 40kPa から算出された変形係数を用いた．Case-B では，Case-A の自重解析にて得られた応力状態から垂直応力の平均値を平均応力として，その値に基づき解析モデルを図-9 のように分割し，各エリアの平均応力の代表値より式(13)によって変形係数を補正した．

$$E_1 = E \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_m} \right)^{0.5} \quad (13)$$

ここで， E_1 は補正後の変形係数， E は Case-A で採用した基準変形係数， σ_c は各層の平均応力の代表値， σ_m は材料試験における平均有効応力であり，ここでは実験結果より 50kPa とした⁹⁾．Case-B についても補正した変形

係数を用いてCase-Aと同様に自重解析を行った。自重解析では、図-10に示すように鉛直下方向への加速度を漸増させていき、20秒後に重力加速度へ達した後に、その状態を10秒間維持して初期応力状態を算定した。

Case-Aの自重解析結果を図-11に示す。体積ひずみ分布および鉛直応力分布が地表面から底面にかけて滑らかに変化していることがわかる。また、常時においても法尻にせん断ひずみが発生していることから、盛土が急な勾配を持つ場合は、その法尻にせん断ひずみが集中しやすいと考えられる。さらに、盛土中央における鉛直応力については、水平成層地盤を仮定したときに得られる鉛

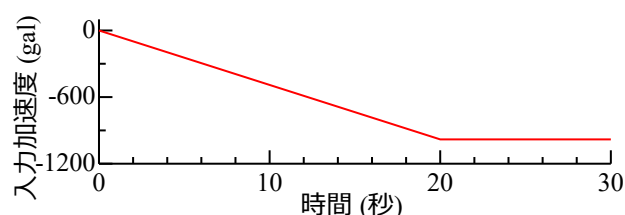


図-10 自重解析時の入力加速度

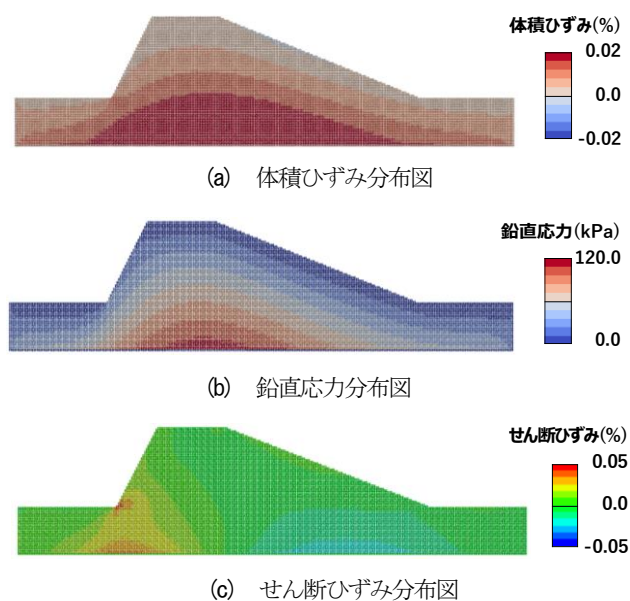


図-11 自重解析結果 (Case-A)

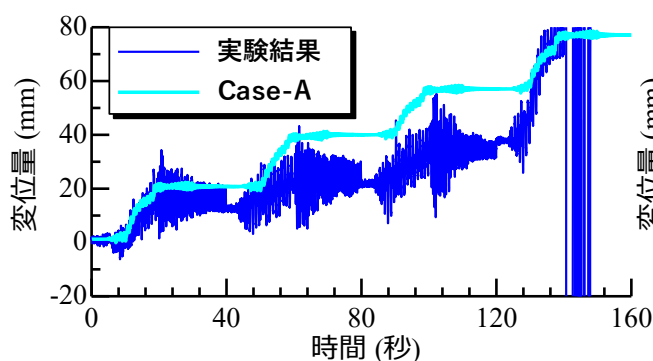


図-12 法尻水平変位量の時刻歴 (Case-A)

直応力と概ね一致していることから、自重解析が正しく行われたと考えられる。また、Case-Bにおいてもほぼ同様の結果が得られた。以上より、これらの応力状態のみを引継いで振動台実験の再現解析を行った。

5. 解析結果

(1) Case-A

図-12、図-13に実験とCase-Aにおける法尻水平変位量と天端沈下量の時刻歴、図-14に各加振終了後の最大せん断ひずみ分布図を示す。加振によって、段階的な天端の沈下と法尻の水平変位の発生と、法尻付近からひずみが集中し始め、その領域を起点とした滑り線の形成がみられる。この挙動は図-6に示すような実験結果を概ね再現できていることがわかる。しかしながら、滑り線は実験と比べて深く位置し、最大せん断ひずみが卓越する領域は、実験では法面表面付近であったのに対して解析ではより盛土内部であった。また、図-15に3回目加振終了後の実験とCase-Aの比較を示すが、赤枠で囲まれた箇所のように実験においても解析と同様に深い位置で最大せん断ひずみが発生している様子が見られる。しかし、その大きさは法面表面や法尻付近で発生するものより小さく、この領域における滑り破壊は見られなかった。この差異の原因の一つとして、解析では外力条件として基盤加振ではなく全ての粒子に対して一様な加速度を与えたことで、浅部の応答の増幅が表現できていないことが挙げられる。つまり、盛土浅部の応答を適切に評価できなかったことで、盛土深部における変形が卓越し、深い位置の滑り線が発達したと考えられる。

また、図-13より天端沈下量は実験と概ね一致しているものの、図-12より法尻水平変位量は実験の2倍程度、図-14より最大せん断ひずみは実験の2倍以上の大きさであることがわかる。さらに、1回目加振後において、法尻付近で最も大きな最大せん断ひずみが得られた粒子のせん断応力-せん断ひずみ関係を図-16に示す。対象の

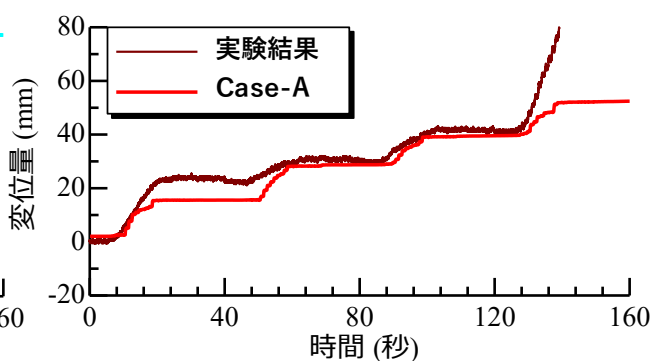


図-13 天端沈下量の時刻歴 (Case-A)

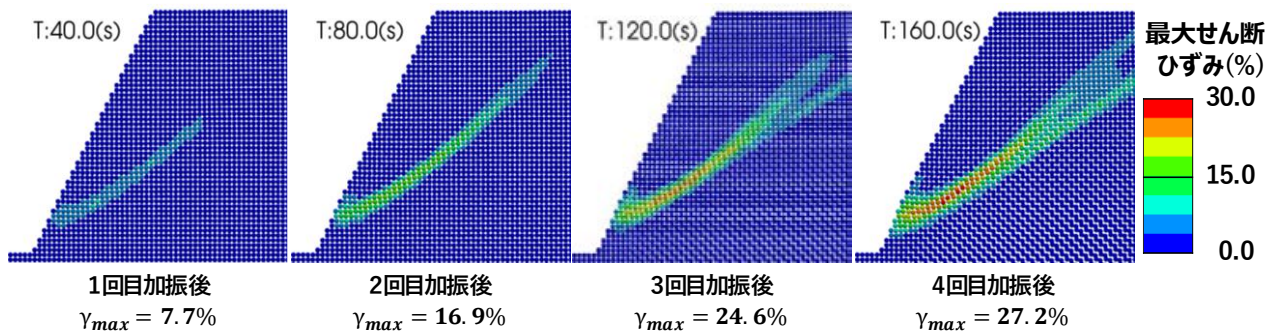


図-14 各加振終了後の最大せん断ひずみ分布図 (Case-A)

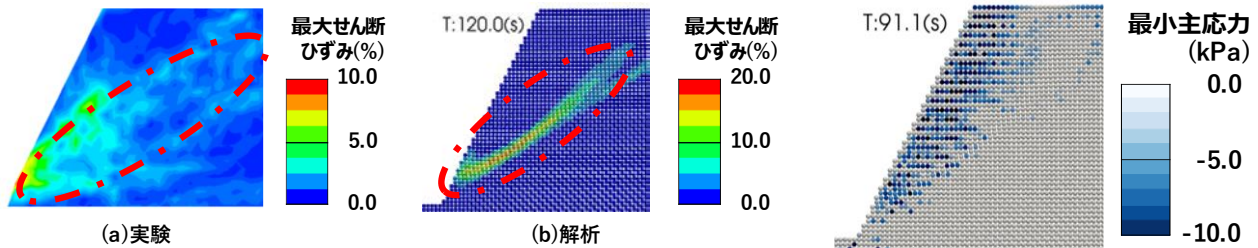


図-15 3回目加振終了後の最大せん断ひずみ分布図

図-17 2回目加振中の最小主応力分布図

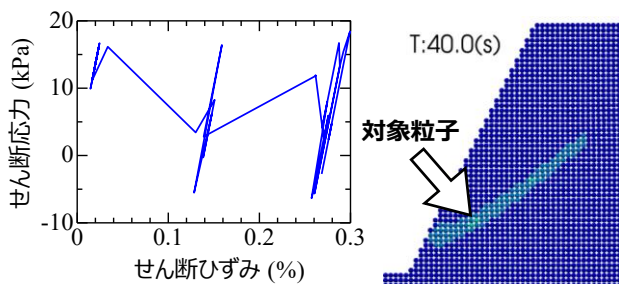


図-16 せん断応力-せん断ひずみ関係
(解析開始から 10 秒間)

粒子は加振直後に塑性化したことで、大きな塑性ひずみを伴いながら変形している。つまり、解析にて最大せん断ひずみが大きく発生したのは、弾完全塑性モデルを採用したことで塑性流れ量が增大しやすかったためであると考えられる。さらに、1:1.5の標準的な勾配の盛土に対する遠心振動台実験⁹⁾では、揺すり込み沈下が主な損傷形態となり、加振とともに剛性が向上する傾向が見られた。したがって、より精度の高い解析結果を得るためには、塑性流れに伴う剛性の向上が表現可能なひずみ硬化モデルの導入が求められる。また、深い位置に滑り線が形成され、滑り土塊が大きくなることで水平方向への滑動力が増大したことも、最大せん断ひずみが大きくなった要因の一つであると考えられる。

実験では、4回目加振中である140秒付近において、水平変位量、天端沈下量ともに急激に増加しており、滑り破壊の発生を確認できる。一方、解析では、実験にて滑り破壊に至ったときと同程度の法尻水平変位量が発生した4回目加振終了後においても、滑り破壊が生じてお

らず、実験で確認された現象を再現しきれていない。さらに、図-17の最小主応力分布図より、法肩や法面表面の付近で大きな引張応力が発生していることを確認したが、今回の解析では引張応力のカットオフといった処理を行っていないため、引張破壊を表現できなかった。既往の実験^{例えば19)}では、地震時に天端にクラックが発生する事例が多く確認されており、今回の実験においても天端にクラックが発生し、盛土の破壊形態に影響を与えていると考えられる。つまり、引張破壊を考慮していないことが、解析において滑り線が深く位置した要因の一つとして挙げられる。したがって、より実験結果に近い破壊形態を得るためには、滑り破壊や引張破壊に起因する脆性的な挙動を再現可能な構成則を導入することが必要である。

(2) Case-B

図-18、図-19に実験とCase-Bにおける法尻水平変位量と天端沈下量の時刻歴変化、図-20に各加振終了後の最大せん断ひずみ分布図を示す。Case-Bでは拘束圧依存性を考慮して変形係数を補正したものの、法尻および天端の変位量、最大せん断ひずみがCase-Aよりも大きくなり、実験結果からの差異がさらに大きくなった。実験では模型作製時に先行圧縮圧力91.8kPaで締固めが行われたのに対して、盛土内に生じる鉛直応力は盛土下端でも75.0kPa程度であり、実験での盛土は過圧密状態で変形係数はほぼ一様であったと考えられる。しかし、Case-Bでは拘束圧に応じて変形係数を変動させたため、変形を過大に評価したと考えられる。一方、Case-Aでは変形係数を一様としたことによって、締固められた盛土模型に

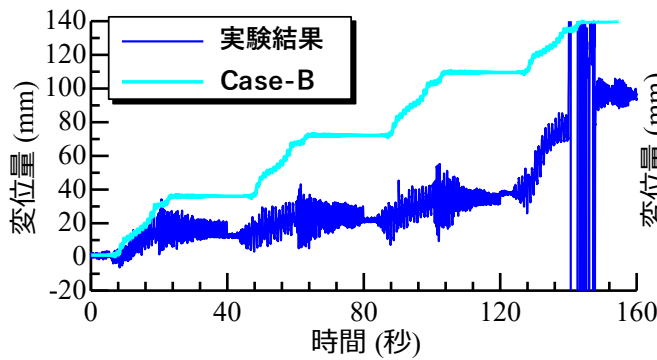


図-18 法尻水平変位量の時刻歴 (Case-B)

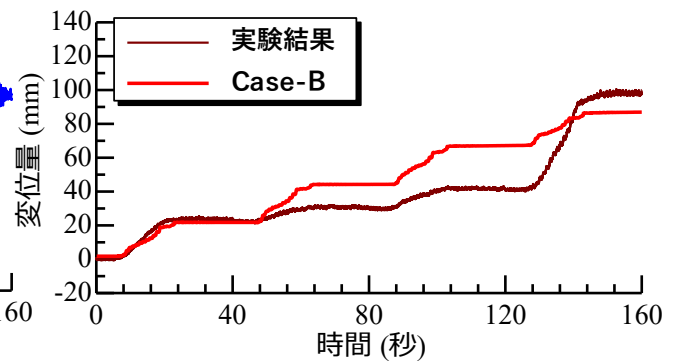


図-19 天端沈下量の時刻歴 (Case-B)

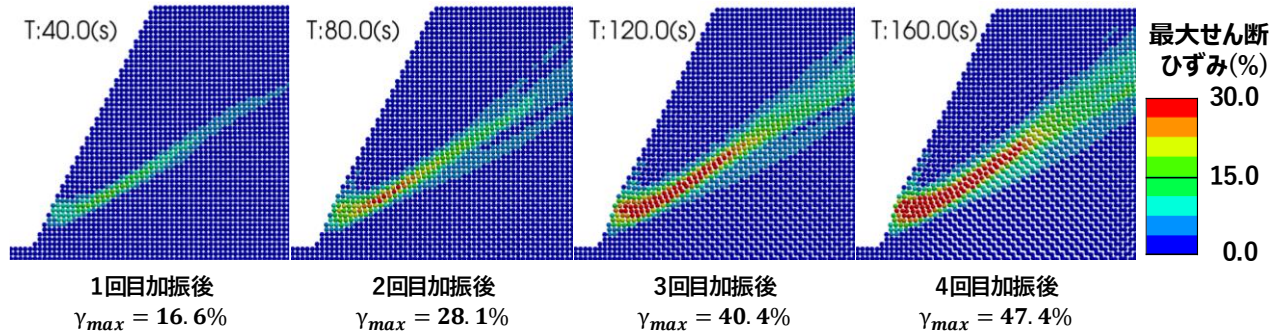


図-20 各加振終了後の最大せん断ひずみ分布図 (Case-B)

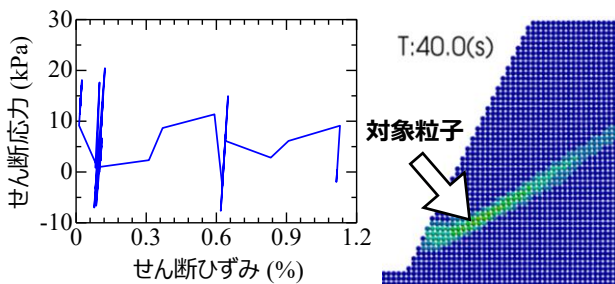


図-21 せん断応力-せん断ひずみ関係
(解析開始から10秒間)

近い条件であったと言える。したがって、今後は模型の作製過程を考慮した自重解析およびパラメータ設定を行う必要がある。

また、図-21に1回目加振後において法尻付近で最も大きなせん断ひずみが発生した粒子におけるせん断応力-せん断ひずみ関係を示すが、加振直後に粒子が塑性化し、Case-Aよりも大きなひずみを伴いながら変形していることがわかる。これは、盛土内部の変形係数を大きくしたことで発生する応力も大きくなり、塑性状態に至ったときの塑性流れが増加したためであると考えられる。よって、前節でも述べたように、塑性流れに伴う剛性の向上を表現可能な塑性モデルの導入が必要である。また、粘着力や内部摩擦角の拘束圧依存性の考慮や減衰の設定についても、損傷形態に影響を与えると考えられるため、それらの検討も今後の課題である。

6. まとめ

本稿では、井澤ら⁷が提案する法尻のせん断ひずみを用いた盛土の性能照査法への適用を最終的な目的として、SPH法¹²を用いた盛土の遠心振動台実験⁹の再現解析を行った。検討においては、急勾配盛土の遠心振動台実験の再現解析を、盛土材の変形係数を一様とした場合と拘束圧に応じて変化させた場合の2ケース実施した。

その結果、どちらのケースともに、実験と比べて滑り線の位置が盛土の深い位置であったものの、法尻付近からひずみが集中して滑り線が形成される損傷過程を再現できた。また、実験とは異なり加振によって滑り破壊には至らなかったものの、天端沈下量、法尻水平変位量が発生する傾向は実験と概ね一致した。なお、変形係数を一様としたケースのほうが模型作製時の締固めによる過圧密状態に近い条件であったため、より実験に近い解析結果が得られた。

しかしながら、2ケースともに実験よりも大きな最大せん断ひずみが発生した。この原因の一つとして、弾塑性構成則として弾完全塑性モデルを用いたことで、塑性流れが大きくなったことが挙げられる。したがって、実験結果をより定量的に再現するためには、塑性流れに伴う剛性の向上を表現可能な塑性モデルの導入が求められる。さらに、解析では法尻付近、法面表面にて大きな引張応力が発生したことから、引張破壊を考慮することでより実験に近い損傷過程が得られると考えられる。

以上より、急勾配盛土の地震時損傷過程を考慮した応答値算定手法としてのSPH法の適用性を確認したが、解析によって得られた法尻付近の最大せん断ひずみは実験の2倍以上であったことから、提案する性能照査法⁷⁾への適用には課題が残った。したがって、今後は、抽出した課題を解決し、解析のさらなる精度の向上および性能照査手法への適用を目指していく。

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 2007.
- 2) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012.
- 3) 藤原寅士良, 中村貴志, 谷口善則, 高橋英明, 金田淳：東北地方太平洋沖地震における鉄道盛土の被害要因に関する考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, pp. I_79-86, 2015.
- 4) 藤原寅士良, 中村貴志, 谷口善則, 高崎秀明, 金田淳：東北地方太平洋沖地震鉄道盛土円弧すべり解析による被害要因の考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, pp. I_87-94, 2015.
- 5) 鈴木聡, 太田剛弘, 井澤淳, 土井達也, 小島謙一, 大村直哉, 高橋章浩：地震時の滑り破壊前の盛土の損傷レベル評価に関する遠心振動台実験 その 1, 第 55 回地盤工学研究発表会, 2020. (投稿中)
- 6) 小島謙一, 井澤淳, 土井達也, 鈴木聡, 太田剛弘, 高橋章浩, 大村直哉：地震時の滑り破壊前の盛土の損傷レベル評価に関する遠心振動台実験 その 2, 第 55 回地盤工学研究発表会, 2020. (投稿中)
- 7) 井澤淳, 土井達也, 小島謙一：滑り破壊前の損傷過程を考慮した盛土の地震時性能照査手法の検討, 第 55 回地盤工学研究発表会, 2020. (投稿中)
- 8) 酒井久和：構造物の動的弾性応答解析における非反復時間積分法と地震工学への応用に関する研究, 京都大学博士論文, 1998.
- 9) 山本修一：個別要素法による土構造物の地震時残留変形量の予測, 土木学会第 55 回年次学術講演会, pp. 204-205, 2000.
- 10) Smoothed Particle Hydrodynamics : A Meshfree Particle Method : G.R. Liu, M.B. Liu, WORLD SCIENTIFIC PUB CO INC, 2003.
- 11) 酒井謙, 山下彰彦：SPH 理論に基づく粒子法による構造解析の基礎的検討, 日本機械学会論文集, 69 巻 659 号, pp. 1093-1102, 2001.
- 12) 小野祐輔, 西村真悟, 清野純史：SPH 法による土構造物の弾塑性解析, 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 717-723, 2006.
- 13) 小野祐輔：SPH 法による斜面の地震応答と崩壊挙動の解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, pp. I650-I660, 2013.
- 14) Ha H. Bui, Fukagawa Ryoichi, Kazunari Sako, Shintaro Ohno : Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 32, pp. 1537-157, 2008.
- 15) 後藤仁志：粒子法, 森北出版, 2018.
- 16) 小野祐輔, 岡本遼太, 河野勝宣, 酒井久和, 秦吉弥, 池田勇司：SPH 法を用いた荒砥沢地すべりの三次元解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No. 4, pp. I_346-I356, 2017.
- 17) 野々山栄人, 沢田和秀, 森口周二, 八嶋厚, 伊藤和也：SPH 法による実規模斜面掘削実験の二次元解析, 地盤工学ジャーナル, Vol. 7, No. 4, pp. 543-555, 2012.
- 18) D. J. White, W. A. Take, M. D. Bolton : Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, Geotechnique, Vol. 53, No. 7, pp. 619-631, 2003.
- 19) 伊藤洋, 渡辺啓行：強地震動下の大規模斜面の安定性評価に関する実験的・解析的検討, 土木学会論文集, 第 406 号, III-1, pp. 233-242, 1989.

?

?

NUMERICAL SIMULATIONS ON THE CENTRIFUGE SHAKING TESTS OF EMBANKMENTS WITH THE SPH METHOD

Ryuichi IBUKI, Jun IZAWA, Tatsuya DOI, Kenichi KOJIMA,
Hisakazu SAKAI, Yusuke ONO

This paper presents trial numerical simulations with the SPH method of the centrifuge shaking table tests focusing on damage process of embankments during earthquakes. The results showed that the SPH method could adequately simulate deformation of the embankment observed in the tests to some extent if proper properties of embankment material were given. On the other hand, shear strain accumulated at the toe of the embankment was overestimated, probably due to use of the elasto-perfectly plastic model as the constitutive model of backfill. In addition, the simulation could not show sliding failure as observed in the test

because the tension cut-off was not considered in the analyses. The trial analyses indicated that more advanced soil model should be used, in order to apply the SPH method to a seismic design of an embankment considering damage process from small strain level to sliding failure.