

盛土の遠心振動台実験によるせん断ひずみの局所化位置に関する検討

鉄道総合技術研究所 正会員 ○伊吹 竜一、土井 達也、井澤 淳
日本工営 正会員 上村 健太郎、スレン ソッキアン

1. はじめに

鉄道盛土の耐震性能照査では、円弧滑り破壊による土塊の沈下量を算定する Newmark 法が広く用いられている^{1),2)}。しかしながら、滑り破壊に至らないような変状に留まる場合、実際の盛土の地震時損傷形態を必ずしも再現できない問題が顕在化している^{例えは 3)}。そこで、筆者らは盛土の遠心振動台実験を実施し、高速度カメラで撮影した画像を用いた PIV 解析を行うことで、地震時損傷過程を詳細に把握するとともに、その損傷過程を考慮した新しい耐震性能照査手法を提案している^{例えは 4)}。本稿では、加振中に滑り線の起点となる、せん断ひずみの局所化位置に関する検討について報告する。

2. 加振中のせん断ひずみの局所化位置

筆者らは、これまでに盛土が地震時に滑り破壊に至るまでの損傷過程として、法面のある箇所にはせん断ひずみが集中し、その箇所を起点にひずみが進展して滑り線が生じることを明らかにしている⁴⁾。既往の実験⁴⁾における、加振前と滑り破壊直前の最大せん断ひずみ γ_{max} 分布を図 1 に示す。図 1(a) のように加振前にひずみが集中する位置付近が弱点箇所となり、加振中にその箇所から滑り線が生じていることが分かる(図 1(b))。一方、図 1(c)より、滑り線は常時の円弧滑り安定解析結果よりも法面中腹に位置しているが、均質な盛土内の強度や応力分布等を踏まえると、弱点箇所はより法尻付近に存在すると考えられる。この要因として、模型作製時に盛土高さの 1/5 の厚さを 1 層として下層から盛土を作製したことで、不均質な締固めになったこと、締固め境界に弱層が形成されたことなどが挙げられる。そこで、加振中のひずみの局所化位置について検討するため、均質な締固めとなるように撮影断面の奥行き方向から作製した模型盛土に対して同様の条件で実験を行った。

3. 均質な締固め模型盛土に対する遠心振動台実験

模型形状およびセンサー配置を図 2 に示す。ここで、既往の遠心実験⁴⁾と同条件となるように、法面勾配 1:1、盛土高さ 5m とし、江戸崎砂を $D_c=95\%$ となるように締固めて作製した。また、一連の加振前に実施した微小なホワイトノイズ加振により求めた盛土の固有振動数は実物換算で 9.8Hz と、既往の模型 (9.6Hz) と同等であった。

天端沈下 VD1 と法尻水平変位 HD1 の時刻歴を入力波とともに図 3 に示す。図 3(b)に示すように計 7 回の加振を行い、600gal 加振を実施した試番 7 にて模型盛土が急激に変形して、滑り破壊に至った。ここで、図 4 には入力地震動の振幅と繰返し特性を合わせて考慮できる累積損失エネルギー $W^5)$ を盛土中央部付近の上載圧 ($\sigma'_v = 43.7\text{kPa}$) で正規化した W/σ'_v と、天端沈下 VD1 関係を示す。なお、盛土体のせん断応力～せん断ひずみ関係は測定した加速度波形を用いて推定した⁶⁾。試番 1～6 では天端沈下が徐々に発生し、試番 7 加振中に W/σ'_v が急増し、それに伴い水平変位も急増している。また、既往の実験⁴⁾ (水色) とほぼ同様の傾向を

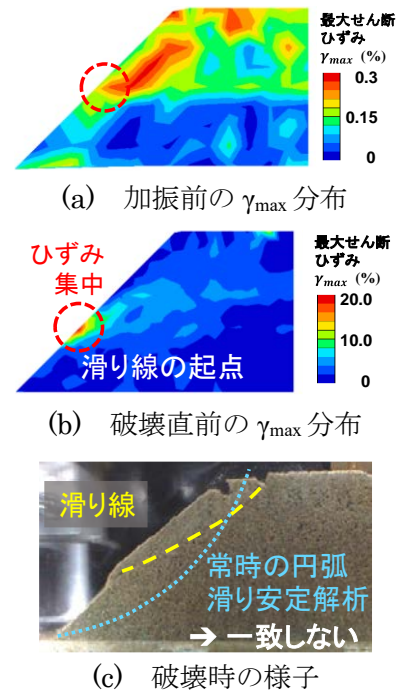


図 1 下層から締固めて作製した模型盛土の γ_{max} 分布図および破壊時の写真⁴⁾に追記

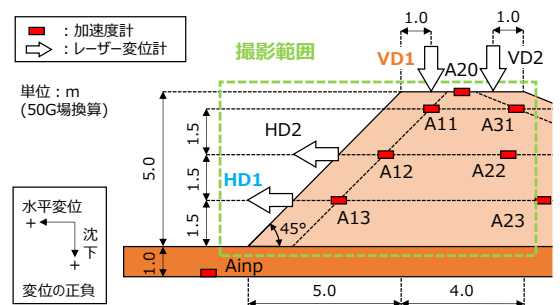


図 2 模型形状とセンサー配置

キーワード 盛土, 遠心振動台実験, PIV 解析, 損傷過程, 耐震性能照査手法

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7394

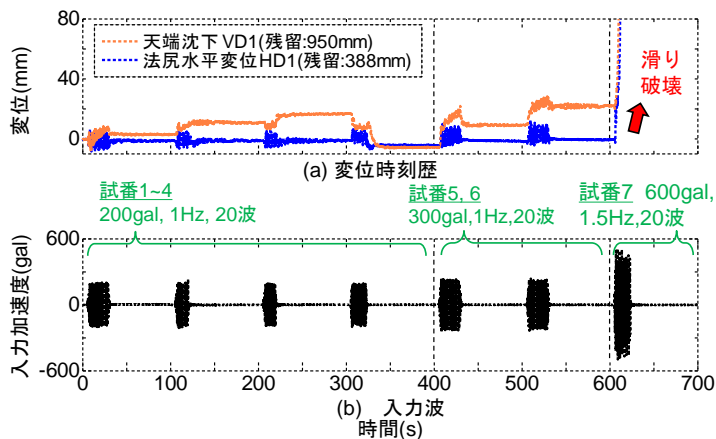


図3 入力波および時刻歴変位波形

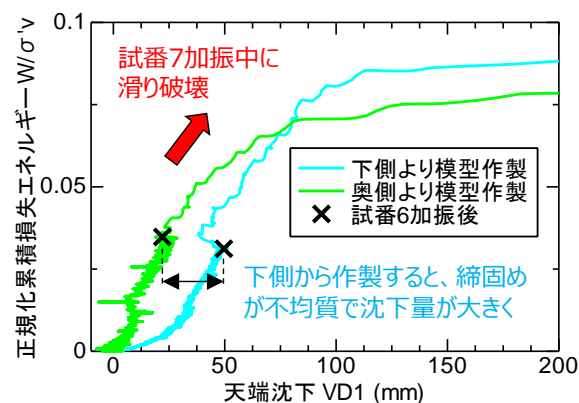
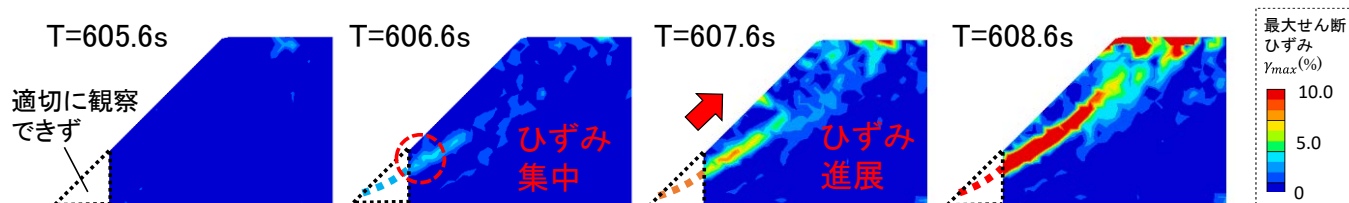


図4 正規化累積損失エネルギー～天端沈下関係

図5 試験7加振中の γ_{max} 分布図（奥行き方向の変形が落ち着いた試験6加振後からの増分）

示しているが、既往の実験⁴⁾では締固めが不均質であったため、より大きな天端沈下が生じていると考えられる。

加振中に撮影した画像を用いたPIV解析より得られた最大せん断ひずみ (γ_{max}) 分布図を図5に示す。撮影断面より奥側から模型を作製したことで、模型とガラス面にわずかな隙間が生じ、序盤の加振によって盛土がガラス面に押し付けられるように変形した。そのため、奥行き方向の変形が落ち着いたと考えられる試験6加振後を基準とした γ_{max} の増分を示している。また、法尻部分は拘束圧が小さいためガラス面と模型の隙間が特に大きく、適切に撮影ができなかったため、切り取って示す。図5より、加振によってひずみが集中する箇所が生じ、その箇所を起点として滑り線が形成されていることが分かる。今回は、法尻部分を適切に観察できなかったものの、全体的な傾向より、法尻を起点にひずみが集中・進展していると考えられる。さらに、図6には滑り破壊時の模型盛土と、常時の円弧滑り安定解析による滑り線を示す。均質な締固めを行ったことで法面中腹に弱層が生じず、安定解析結果に近い滑り線が得られた。また、平面ひずみ状態を満足した破壊性状を示しており、PIV解析で得られた表面のひずみ分布が奥行き方向にも発生していると考えられる。

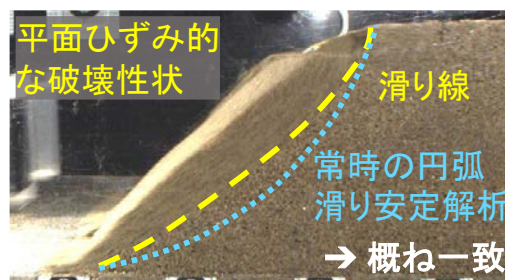


図6 撮影断面奥側から締固めて作製した模型盛土の破壊時の様子

4. まとめ

本稿では、模型の作製方法がひずみの局所化位置に与える影響を確認するため、均質な締固め状態の模型を作製して過去の実験と同条件で実験を実施した。その結果、法尻付近にひずみが局所化してその箇所を起点として滑り破壊が生じ、滑り線の位置は常時の円弧滑り安定解析結果と概ね一致することを確認した。実際の鉄道盛土では下端から締固め施工を行っているが、締固め時の標準的な仕上がり厚さは盛土高さに対して比較的薄い30cm程度であり¹⁾、既往の実験⁴⁾で見られたような極端な締固め境界の影響は生じないと考えられる。

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) 藤原ら：東北地方太平洋沖地震における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), 2015. 4) 土井ら：遠心場における盛土の地震時損傷過程の撮影手法構築とPIV解析, 土木学会第76回年次学術講演会, 2021. 5) 風間ら：地盤に入力された累加損失エネルギーの評価法と液化化予測への適用, 土木学会論文集, No. 631/III-48, pp. 161-177, 1999. 6) Koga, Y. and Matsuo, O.: Shaking table tests of embankments resting on liquefiable sandy ground, Soils and Foundations, Vol.30, No.4, pp.162-174, 1990.