

法尻補強した道路盛土の振動台実験

鍋島 康之* 田中 雄太** 豊田 新悟***

Shaking Table Tests of Model Road Embankments with Improved Slope Toes

Yasuyuki NABESHIMA, Yuta TANAKA, Shingo TOYOTA

ABSTRACT

In the 2004 Mid-Niigata Prefecture and the 2007 Noto-Peninsula Earthquakes, many road infrastructures, especially road embankments, suffered severe damages. Seismic countermeasures for road embankments had not been considered up to then; however, these earthquakes emphasized the necessity of seismic countermeasures for road embankments. A series of shaking table tests was performed to confirm the dynamic performance of road embankments with partially improved slope toes. The increase in dynamic performance, such as settlement and acceleration at the top of the embankment, was confirmed in the road embankments with partially improved toes.

KEY WORDS: shaking table test, slope failure, road embankment, earthquake, improvement

1. はじめに

従来、道路や鉄道を始めとする盛土構造物は復旧が容易なため、十分な耐震設計が行われてこなかったが、2004年10月23日に起こった新潟県中越地震や2007年3月25日に起こった能登半島沖地震を契機として盛土構造物の耐震補強が重要視されてきている。特に、山間部では道路機能が麻痺することにより、村落が孤立する状況を招くことから、道路盛土の耐震補強は非常に重要な問題¹⁾となってきた。

そこで本研究では、盛土構造物を経済的に補強することを目的として、法尻を補強した盛土の耐震性について検討を行う。このため法尻を補強した盛土と無補強盛土の模型を作成して振動台実験を行い、加振時の天端応答加速度と天端変位を比較した。さらに、法尻補強範囲が盛土構造物の耐震性に及ぼす影響についても検討するため、補強領域を変化させた盛土の模型についても振動台実験を行った。そして、これらの結果をもとに法尻補強された盛土について耐震性の向上について検討する。



図1 新潟県中越地震における道路盛土被害例

2. 実験方法

2・1 振動台実験装置

まず、本研究で使用した振動台は、大阪大学振動制御試験室の振動台実験装置²⁾である。図2は振動台実験装置ならびに実際に使用した模型盛土である。振動台試験装置は、水平・垂直の同時二方向加振用の動電型振動試験装置であり、振動発生基部は動電型を使用し、1200×600mmの振動台上にはできる限り入力に忠実な波形を再現することを主眼に設計された装置であ

*都市システム工学科, **JR 貨物, ***建築・都市システム工学専攻

る。振動方向は水平・垂直の二方向であり、二軸同時またはいずれか一軸の加振が可能である。加振源に使用されている動電型の振動発生機は水平軸一軸、垂直軸一軸が装備され、各軸の信号系はそれぞれ独立しているため、各方向の加振条件は任意に設定することが可能である。テーブルの加振制御には二方向同時振動制御装置が装備されており、二軸実波形再現加振制御ソフトウェアにより、過去に記録された地震動の再現加振も行える。表 1 に振動台実験装置の仕様を示す。



(a) 振動台実験装置外観



(b) 土槽および模型盛土

図 2 振動台模型実験装置および模型盛土

2・2 模型盛土

次に、本研究で用いた模型盛土について述べる。図 3～5 に模型盛土の寸法、形状および法尻補強された範囲を示す。まず、内寸 500mm×800mm×300mm の土槽内に乾燥した豊浦標準砂を $\rho_s=1.38g/cm^3$ になるように約 30mm 敷き詰め、基礎地盤を作成する。その上に含水比 5%、 $\rho_s=1.15g/cm^3$ の豊浦標準砂で階段状の盛土作成した後、1:1 勾配の法面を形成し、天端幅 120mm、高さ 150mm の模型盛土を作成する(図 3 参照)。また、法尻補強範囲が盛土構造物の耐震性に及ぼす影響についても検討するため、模型盛土の法尻部を面積率で 6.7% (補強領域小) と 22.2% (補強領域大) 補強した 2

種類の模型盛土(図 4, 5)を作成し、振動台実験を行った。今回の振動台実験では、法尻補強部分を含む含水比 5% の豊浦標準砂を締固めて $\rho_s=1.37g/cm^3$ になるようにして作成した。このため、法尻補強された盛土と無補強の盛土は、外見上、差は見られない。模型盛土の作成方法に関する詳細は他の文献³⁾ を参照されたい。

表 1 振動台模型実験装置の仕様

駆動方式	動電式
振動方向	水平・垂直 2 方向同時。 ないしは、いずれか 1 方向。
最大搭載	2kN
最大加振力	正弦波:9.8kN, 地震波:11.86kN
最大加速度	2.5G (正弦波, 無負荷時) 2.5G (地震波, 0.824kN 負荷時) 2.5G (地震波, 2.0kN 負荷時)
最大速度	80cm/s (正弦波), 156cm/s (地震波)
周波数範囲	0.5~200Hz (水平方向), 0.5~100Hz (垂直方向)
振動台可動部	1200mm×600mm
土槽寸法	H500mm×L800mm×W300mm

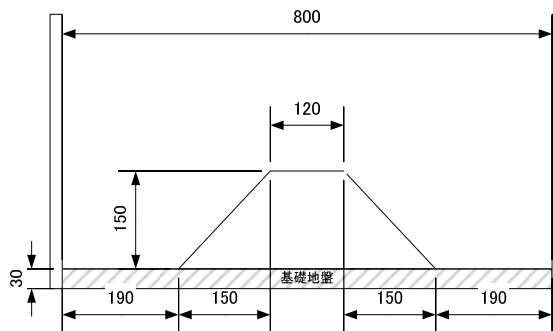


図 3 無補強盛土模型の寸法、形状および補強領域

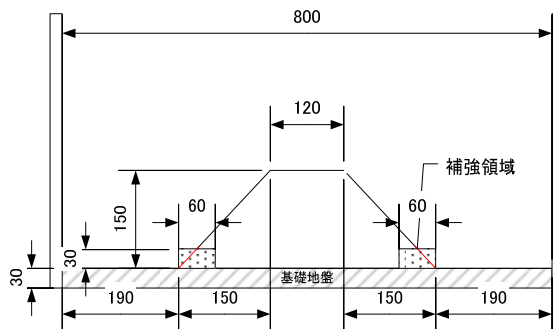


図 4 法尻補強された盛土模型(補強領域小)の寸法、形状および補強領域

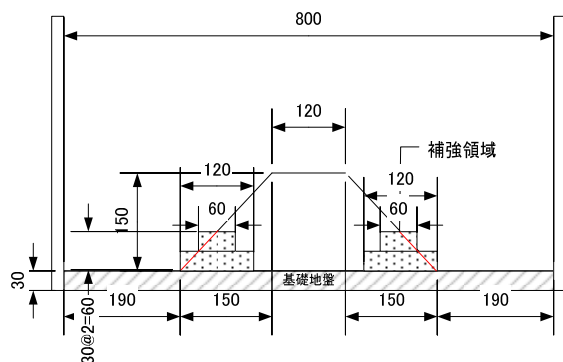


図5 法尻補強された盛土模型(補強領域小)の寸法、形状および補強領域

2・3 加振方法

振動台実験では、あらかじめ実験前に加振する波形を作成しておく必要があるため、模型盛土と同じ質量の重りを設置して、入力波形を作成した。加振方法は水平一方向(図2(a)の左右方向)のみで行い、第一段階として400ga, 500gal, 630galと加速度を10秒ごとに段階的に増加させて加振を行う。盛土が破壊しない場合には、第二段階として500gal, 630gal, 710galの加速度で加振を行った。なお、今回の振動台実験では第一段階で崩壊した盛土はなく、第二段階の加振で盛土が崩壊した。なお、入力波形は周波数8Hzのsin波形を用いた。

2・4 計測項目

計測項目および実験に使用したセンサーを以下に説明する。振動台実験中は、振動台加速度、盛土天端応答加速度および4箇所(天端両端、中央)の盛土天端変位を測定した。

2・4・1 変位計測

変位計は可視光レーザー式のものを使用し、基準距離は300mmで、測定距離が±100mmの変位計を併用している。実験前に所定の変位で正常な電圧の出力値が得られるように校正を行っている。これらのレーザー変位計は図6(a)に示すように、土槽上部に渡した梁に固定している。

また、振動台土槽の正面方向から、デジタルビデオカメラを用いてアクリル板を通して加振中の盛土天端ならびに法面の変形状況を撮影する。また、デジタルカメラを用いて、盛土破壊時における盛土天端の崩壊状況や法面の破壊状況を記録する。

2・4・2 加速度計測

加速度計はひずみゲージを検出部に応用した小型低

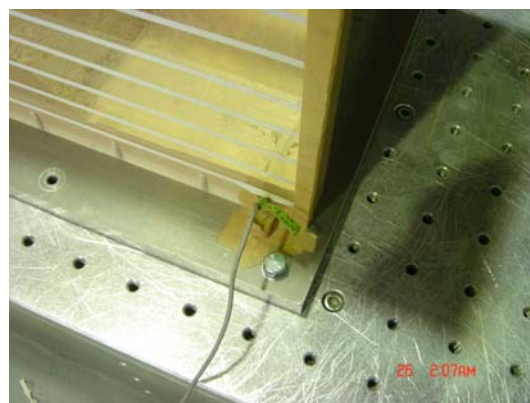
容量の加速度変換器を用いており、定格容量は2.0G(1960gal)である。使用する前にセンサーを(+)方向および(-)方向に90度傾けて重力加速度(1G=980gal)を作用させ、正常な電圧の出力値を得られるように校正を行っている。その後、図6に示すように、加速度計を盛土天端および振動台基盤に設置して加速度を計測した。なお、今回の振動台実験では水平一方向のみの加振であるため、加振方向の加速度のみを測定している。

2・4・3 データロガー

計測された変位および加速度データの記録は、それぞれ電圧に変換して、データ収集システム(商品名:NR2000)を使用し、コンパクトフラッシュに記録した。なお、データのサンプリング周波数は100Hzである。その後、波形観測ソフトウェア(商品名:Wave Shot!2000)を用いて波形データを読み出し、エクセルで整理可能なデータへの変換を行った。



(a) 盛土天端での変位および加速度の計測



(b) 振動台基盤での加速度の計測

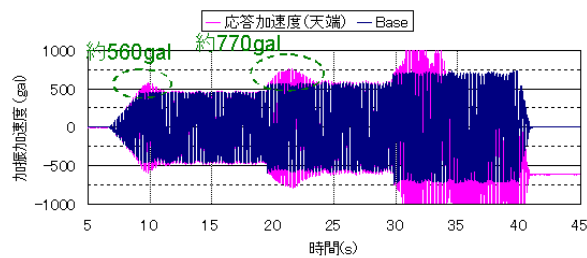
図6 変位および加速度の計測

3. 実験結果及び考察

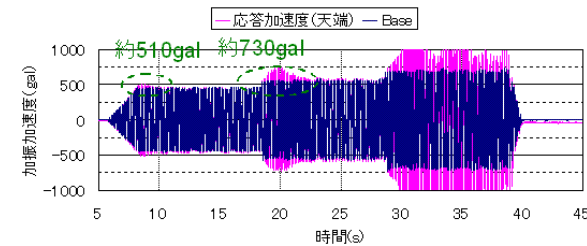
3・1 実験結果

先に述べたように、今回の振動台実験では第一段階の加振では盛土が崩壊せず、第二段階 710gal の加速度で加振した際に全ての模型盛土が破壊したため、ここでは第二段階の加振結果のみを示す。

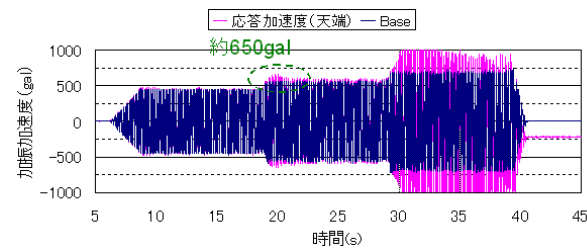
まず、無補強盛土の加振加速度一時間関係および天端変位一時間関係を図7(a)、図8(a)にそれぞれ示す。このケースでは 500gal 入力時の最大天端応答加速度は約 560gal、630gal 入力時に約 770gal を計測した。また、盛土天端変位は 500gal 入力時に約 2.5mm、630gal 入力時に約 6mm の沈下が生じた。



(a) 無補強盛土



(b) 法尻補強された盛土 (補強領域小)

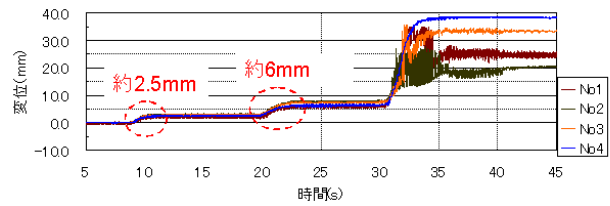


(c) 法尻補強された盛土 (補強領域小)

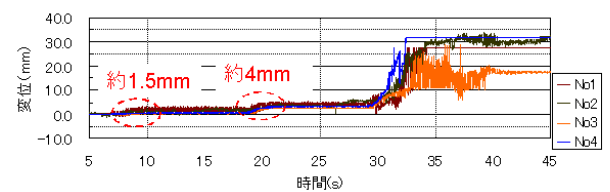
図7 加振加速度一時間関係

次に、法尻補強盛土 (領域小) における加振加速度一時間関係および天端変位一時間関係を図7(b)、図8(b)にそれぞれ示す。500gal 入力時の最大天端応答加速度は約 510gal、630gal 入力時に約 730gal を計測した。無補強盛土の場合と比較すると天端応答加速度が減少しており、法尻補強の効果がみられる。また、天端変位は 500gal 入力時に約 1.5mm、630gal 入力時に約 4mm の沈下が生じているが、無補強盛土の場合より沈下量が減少している。

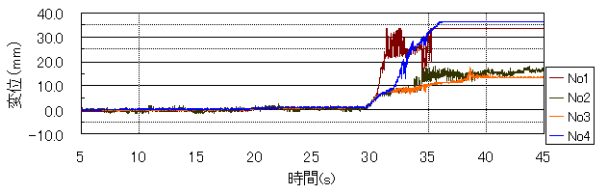
そして、法尻補強盛土 (領域大) における加振加速度一時間関係および天端変位一時間関係を図7(c)、図8(c)に示す。500gal 入力時の天端応答加速度はほぼ振動台加速度に等しく、630gal 入力時においても天端応答加速度は約 650gal に増加しただけである。このことから、法尻補強盛土 (領域大) のケースでは他のケースよりもはるかに天端応答加速度が減少しており、耐震性の向上がみられた。また、天端変位についても 500gal、630gal の加振時にほとんど沈下が生じていない。このことから、法尻補強範囲を拡大した場合、耐震性がかなり向上することが考えられる



(a) 無補強盛土



(b) 法尻補強された盛土 (補強領域小)



(c) 法尻補強された盛土 (補強領域小)

図8 天端変位一時間関係

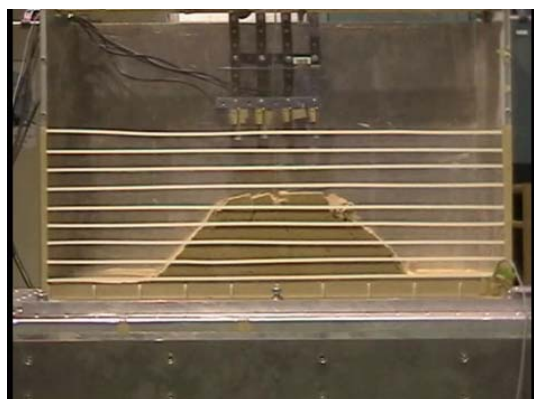
また、図9は加振中に撮影したデジタルビデオカメラの映像から模型盛土の崩壊が始まった時点の破壊状況である。土槽側面のアクリル板に配置された白線を基準として盛土天端の沈下挙動を観測することができる。無補強盛土の場合、図9(a)から盛土天端に沈下や亀裂が生じていることが確認できる。次に、法尻補強盛土 (領域小) では図9(b)から無補強盛土と同じく、盛土天端に沈下や亀裂が生じている。一方、法尻補強盛土 (領域大) では、盛土崩壊時において法面の崩壊が確認できるが、盛土天端の沈下や亀裂は確認できない。このことから、法尻補強の範囲がある程度以上で

あれば、耐震性能が向上することが確認できる。

図10は第二段階加振後における盛土天端の崩壊状況を撮影した写真である。全ての試験ケースにおいて盛土の崩壊が確認できるが、無補強盛土や法尻補強盛土（領域小）と比較して、法尻補強盛土（領域大）の盛土天端が残存していることから、補強領域を更に増加させることによって、盛土天端まで崩壊に至らない盛土を作成できる可能性が示唆された。



(a) 無補強盛土



(b) 法尻補強された盛土（補強領域小）



(c) 法尻補強された盛土（補強領域小）

図9 加振中の盛土崩壊の状況



(a) 無補強盛土



(b) 法尻補強された盛土（補強領域小）



(c) 法尻補強された盛土（補強領域小）

図10 加振後における盛土天端の崩壊状況

3・2 法尻補強による耐震補強効果の評価

法尻補強による盛土の耐震補強効果を評価するために、盛土天端における応答加速度と振動台加速度の増幅率と法尻補強範囲の面積割合の関係を用いる。

図11は天端応答加速度増幅率—法尻補強面積関係である。法尻補強面積が増加するほど、天端応答加速度の増幅率が低下していることから、無補強盛土と比較して法尻補強された盛土の天端応答加速度は減少することがわかる。また、法尻補強範囲を拡大することにより、耐震性が向上することがわかる。今回、法尻補強範囲を6.7%から22.2%に拡大した場合、500galお

よび630gal加振時において天端応答加速度が約15%減少する。

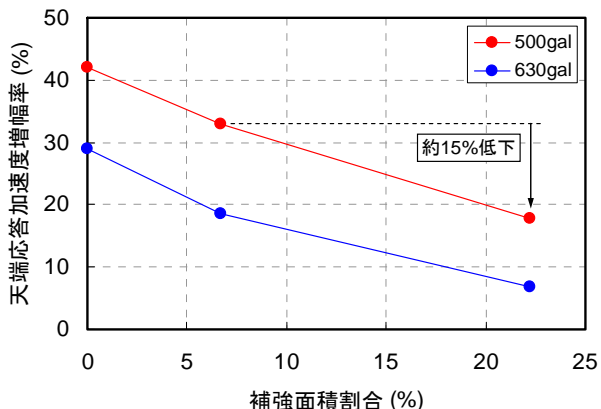


図1.1 天端応答加速度増幅率—補強面積割合関係

4. おわりに

本研究では、法尻補強による盛土の耐震性向上について、模型盛土を用いた振動台実験をもとに検討を行った。本研究の主な結論を以下に示す。

1) 法尻部を補強することにより盛土の天端応答加速度および沈下量が減少し、耐震性は向上する。

2) 法尻補強範囲を拡大することにより耐震性は向上する。法尻補強範囲を6.7%から22.2%に拡大した場合、天端応答加速度が約15%減少した。

【謝辞】本研究は(財)日工記念事業団の研究助成を受けて実施したものである。また、振動台実験の実施にあたって、大阪大学大学院工学研究科 吉野智紀君、大阪大学工学部 石澤佑介君の協力を得た。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 常田, 小田, 鍋島, 江川: 新潟県中越地震における道路施設の被害水準と道路機能の特性, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, pp.1~9, 2005.
- 2) Y. Nabeshima: Shaking table tests of reinforced earth walls, Proceedings of the 15th International Society of Ocean and Polar Engineering Conference, Seoul, pp.143~144, 2005.
- 3) Y. Nabeshima: Shaking table tests on slope failure of road embankments with partially improved toes, Proceedings of International Geotechnical Symposium on Geotechnical Engineering for Disaster Prevention and Reduction, Ysuzhno-Sakhalinsk, 2007. (in press)