

衝撃振動実験による盛土の耐震補強技術の検討

Study on Aseismic Reinforcing Design of Embankment Using Impact Tests

戸村 豪治 GOJI TOMURA

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

技術企画部 黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

筆者らは、簡易な方法で模型地盤に一樣な慣性力を与えることにより、地震時の斜面の崩壊過程を再現する方法として、模型地盤に対する衝撃振動実験を考案した¹⁾。本報告では、本装置を用いた試験方法の特徴を示し、さらに、耐震補強対策の有無による斜面の崩壊形態や地盤の変位量の違いから、耐震補強対策の効果について検討を行った。その結果、本試験方法により地震時の盛土斜面のすべり破壊の状況を再現することが可能であり、衝撃時の加速度波形とすべり破壊までの衝撃回数や破壊性状の比較から、各種の盛土の耐震補強対策の効果について検証可能であることがわかった。

キーワード：斜面安定、地震、模型実験

The authors has proposed an impact test on model embankment as the way of simulating slope failure during earthquake. In this paper, the characteristics of the test method were shown. From the difference of collapse form of slope and the amount of displacement due to reinforcing measures, the effect of aseismic reinforcing design were examined. As a result, it was found that it is possible to simulate slip destructions of embankments slope during earthquakes and evaluate the effect of aseismic reinforcing design for embankment by the test method.

Key Words: Aseismic Reinforcing, Embankment, Earthquake, Impact Test

1. はじめに

近年、大地震や豪雨のような大規模自然災害時における緊急物資輸送路の確保、あるいはライフライン等の迅速な復旧復興の観点から、道路や鉄道などの盛土の耐震性の問題が注目されている。また、最近の地震では盛土による宅地造成地の被害が毎回のように発生しており、災害から人命・財産を守るために通常の盛土のような土構造物に対しても耐震設計の導入が開始されるようになってきている。

土構造物の耐震設計においては、レベル2地震動のような強地震動に対しても直ちに全面的な崩壊に至らないなど、土構造物の靱性を考慮した限界変形量などによる設計法の確立を図っていく必要があると考えられる。しかし、例えば鉄筋補強土工法やジオグリッドによる補強土工法などを用いて地盤を補強した場合、どの程度の被害低減効果が得られるかなど不明な点も多い。筆者らは、簡易な方法で模型地盤に一樣な慣性力を与えることにより、地震時の斜面の崩壊過程を再現する方法とし

て、模型地盤に対する衝撃振動実験を考案した¹⁾。

本報告では、本装置を用いた試験方法の特徴を示し、さらに、耐震補強対策の有無による斜面の崩壊形態や地盤の変位量の違いから、耐震補強対策の効果について検討を行った。

2. 試験方法

図-1に試験方法の概要を示す。模型土槽の下には車輪を取り付けており、傾斜のあるガイドレール上を滑らせて壁に衝突させて急停止することにより、模型地盤に水平方向に慣性力が作用する仕組みとなっている。模型土槽前面にはゴムを貼り付けており、衝突時のハネ返りを防止している。ガイドレールの傾斜角度は $\theta = 5^\circ$ で、模型土槽の底面はガイドレールの傾斜角度と同一の傾斜角度を有しており、土槽本体は移動時でも常に水平を維持するような構造としている。試験に使用した土槽は、幅700mm、高さ380mm、奥行き100mmである。

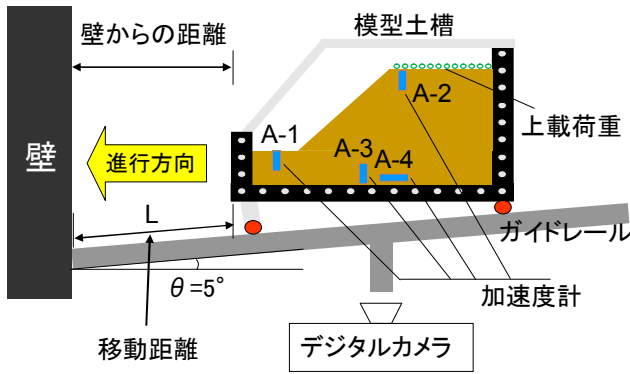


図-1 試験方法概要

表-1 試験ケース

試験ケース	使用材料	移動距離	補強材		上載荷重
			種類	設置位置	
CASE①-1	三河珪砂V6号+ カオリンT.A=95:05 w=6.7%, γt=1.626g/cm ³	10cm	無		無
CASE①-2			補強メッシュ	B=7cm	
CASE①-3			補強メッシュ	B=14cm	
CASE②-1	三河珪砂V6号 Sr=30%, Dr=60%	7cm	無		0.5kPa
CASE②-2			補強メッシュ	B=7cm	
CASE②-3			補強材+支圧板	2列@5cm	

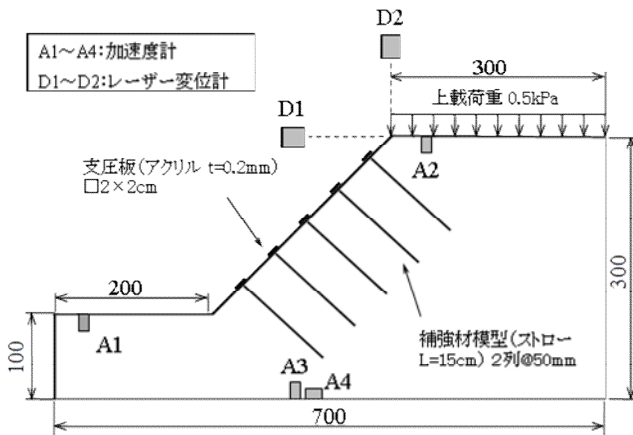


図-2 模型盛土概要図 (鉄筋補強タイプ)

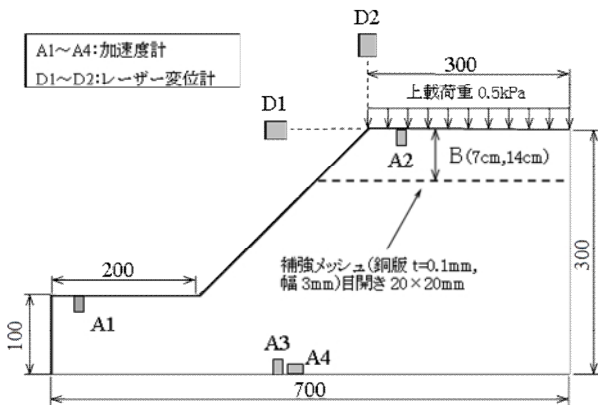


図-3 模型盛土概要図 (ジオグリッド補強タイプ)

図-2, 3に模型盛土の概要を、表-1に実施した試験ケースを示す。試料は三河珪砂 V6 号 ($\rho_{dmin}=1.299$, $\rho_{dmax}=1.595$, $e_{min}=0.665$, $e_{max}=1.044$, $G_s=2.655$) を用い、CASE ①ではカオリンを 5% 混ぜ、CASE ②では珪砂のみを使用した。模型地盤は各ケースとも表-1に示す条件で全体が均一となるように水平方向に突き固めて作

成した。

ジオグリッドを想定した補強メッシュは、幅 3mm 厚さ 0.1mm の銅板の帯を目開き 100 × 50mm の格子状にし、表面に珪砂を塗して粗にしたものを使用し、模型地盤の作成中に所定の位置に設置した。また、鉄筋を想定した補強材は、長さ 15cm のストローに 2 × 2cm のアクリル製の支圧板を接着したものを模型地盤作成後に 5cm 間隔で斜面に対して垂直に挿入した。

CASE ①では模型土槽の移動距離 $L=10\text{cm}$ として試験を行い、CASE ②では 0.5kPa の上載荷重を与えたうえで $L=7\text{cm}$ で試験を実施した。試験はそれぞれのケースで斜面崩壊するまで土槽を繰り返し衝突させ、衝突ごとにそれぞれ、A1 (盛土のり先水平方向)、A2 (盛土のり肩水平方向)、A3 (土槽水平方向)、A4 (土槽鉛直方向) に設置した加速度計および、D-1 (のり肩水平方向)、D-2 (のり肩鉛直方向) に設置した変位計により計測を行うとともに、衝突後に模型地盤のデジタル画像を撮影した。

3. 実験手法の検証

図-4~7に、それぞれ移動距離 $L=5, 10, 15, 20\text{cm}$ で実施した無補強実験での各部の加速度波形を比較して示す。

どのケースでも、A1 (盛土のり先水平方向) と A3 (土槽水平方向) はほぼ同様に、正弦半波のような片振幅の衝撃加速度波形を示しており、A2 (盛土のり肩水平方向) の応答加速度は A1, A3 と比べて加速度波形のピークに 0.01 秒程度の位相差が生じていることがわかる。また、図-4~7を比較すると、移動距離が長くなり、最大加速度が大きくなるほど水平加速度パルスの振動数が大きくなる傾向がみられる。

A4 の土槽鉛直加速度は衝突後にすべてのケースでほぼ同様の振動成分が見られることから、土槽衝突時の衝

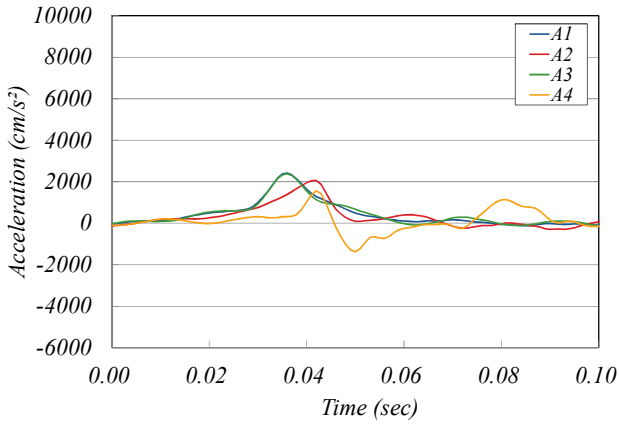


図-4 加速度波形の比較 (L=5cm)

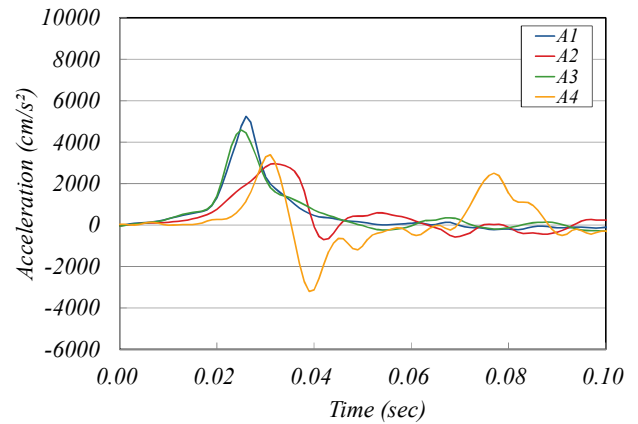


図-5 加速度波形の比較 (L=10cm)

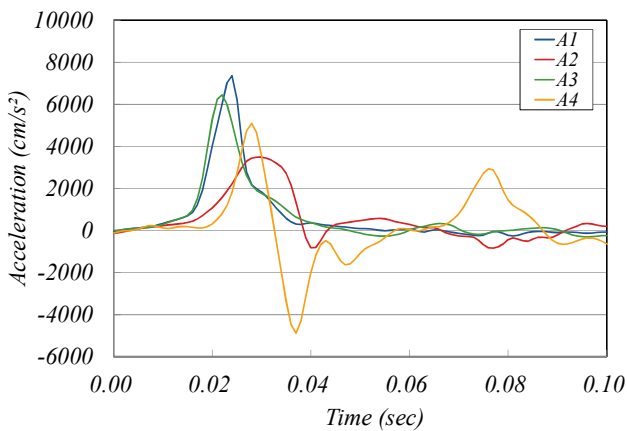


図-6 加速度波形の比較 (L=15cm)

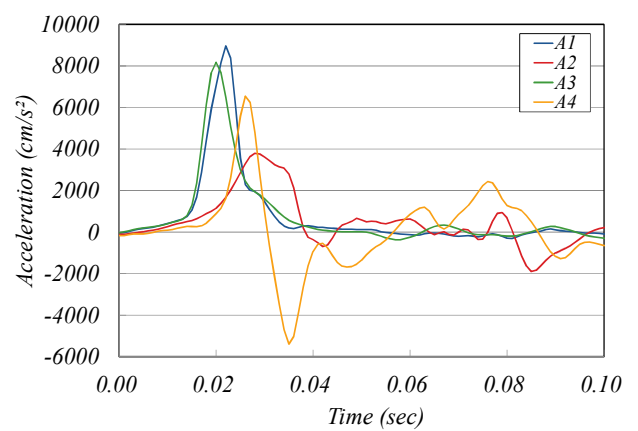


図-7 加速度波形の比較 (L=20cm)

撃により土槽が上下に振動した影響が出ているものと考えられる。

図-8は、移動距離と水平加速度の最大値の関係を示している。A1(盛土のり先水平方向)とA3(土槽水平方向)の最大加速度と移動距離にはほぼ線形の相関関係が認められるが、A2(盛土のり肩水平方向)の最大加速度はA1,A3と比較した場合、移動距離の増加とともに加速度の増加割合が小さくなっていることがわかる。移動距離が長くなると1回当たりの衝撃が盛土の強度に比較して大きくなり、土槽内部の盛土に作用する水平慣性力が一様ではなくなるものと考えられ、したがって衝撃振動実験における移動距離は5～10cmを基準とすることとした。

4. 試験結果

(1) 破壊性状

写真-1～6にCASE①-1～3およびCASE②-1～3のそれぞれの盛土の破壊性状を示す。写真-1～3のCASE①を比較すると、無補強のCASE①-1では10回目の衝撃

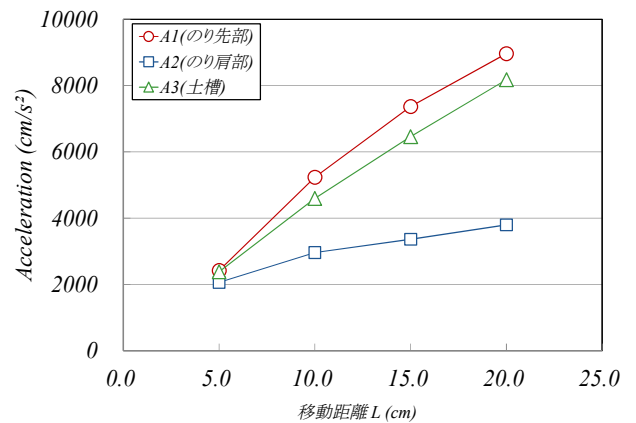


図-8 移動距離と最大加速度の関係

で明瞭な円弧状のすべり面を伴って破壊に至っているのに対して、CASE①-2およびCASE①-3ではすべり面が確認できるのは15回目以降であり、破壊性状についても、補強メッシュを通過する大きなすべり面の発生を防ぐことにより破壊領域が小さくなっていることがわかる。

また、CASE①-2とCASE①-3を比較すると補強メッ

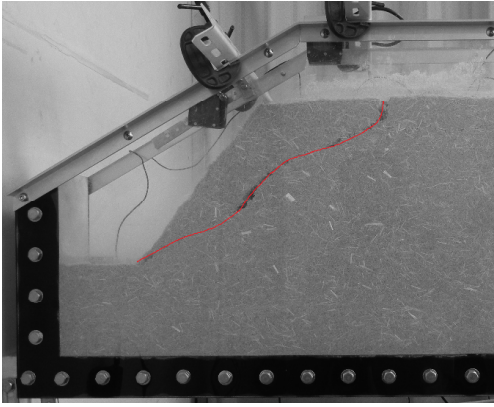


写真-1 破壊状況 (CASE① -1, 10回目)

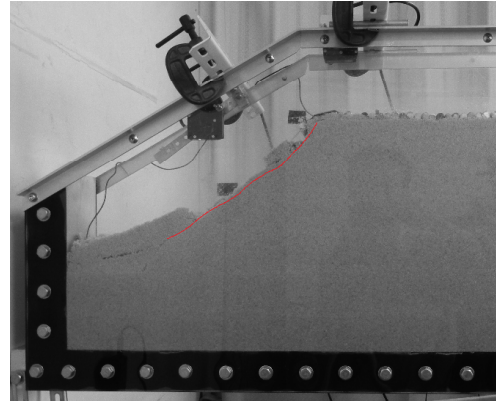


写真-4 破壊状況 (CASE② -1, 5回目)

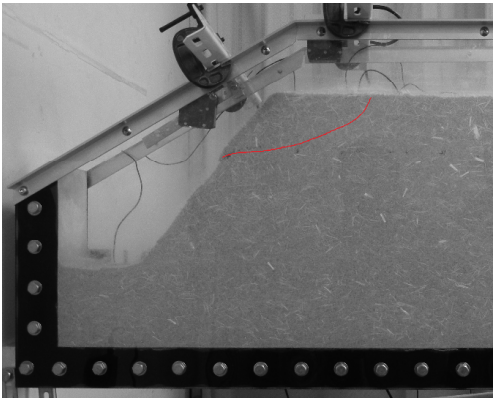


写真-2 破壊状況 (CASE① -2, 15回目)

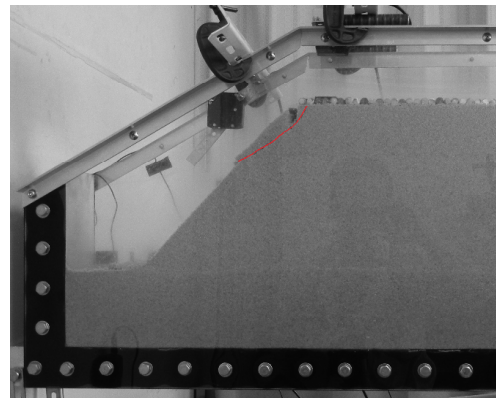


写真-5 破壊状況 (CASE② -2, 7回目)

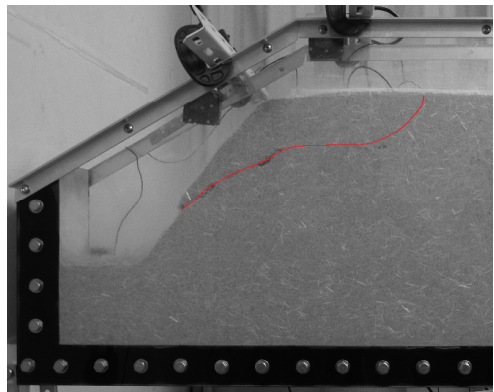


写真-3 破壊状況 (CASE① -3, 15回目)

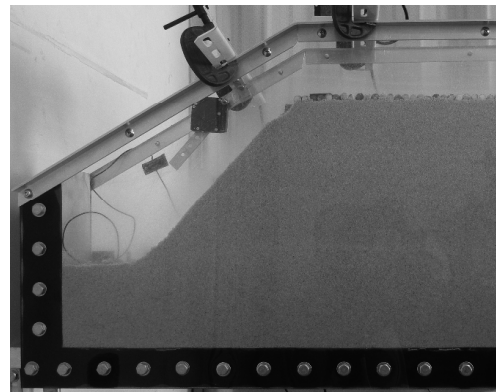


写真-6 破壊状況 (CASE② -3, 20回目)

シュをより上部に設置した CASE ①-2のほうが、すべり破壊に至った際の破壊領域も小さく、また、衝撃一回あたりの地盤変状も小さくなる傾向がみられた。

次に写真-4～6に示した CASE ②を比較すると、無補強の CASE ②-1では5回目の衝撃でり面全体がすべり面を伴って破壊に至っているのに対して、CASE ②-2では7回目の衝撃ですべり面が発生しているものの、CASE ①-2と同様にその範囲は補強メッシュより上部の

のり肩付近のみに限られている。また、補強材を設置した CASE ②-3では20回目の衝撃でも明瞭なすべり面の発生は確認できなかった。

(2) 累積変位量

レベル2地震動に対する盛土の耐震性評価においては、変形量の照査が重要な項目としてあげられるが、盛土の残留変形解析手法の一つとしてニューマーク法があ

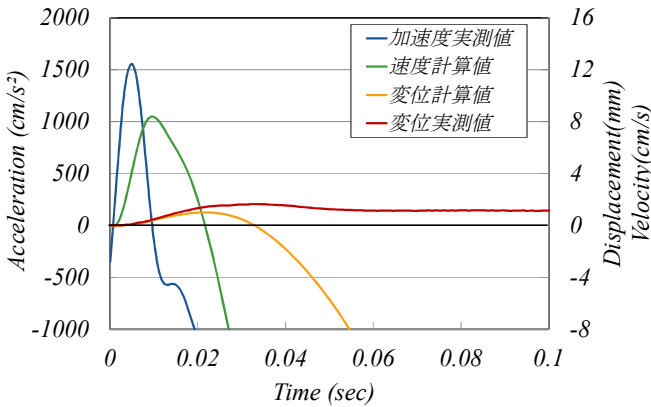


図-9 線形加速度法による計算値と変位実測値との比較 (CASE② -1, 降伏加速度 1730gal の場合)

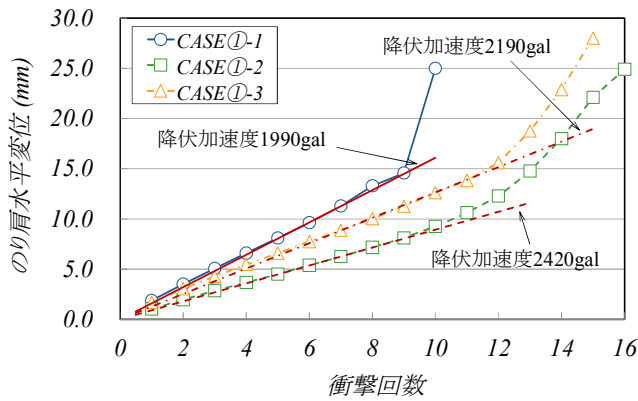


図-10 衝撃回数とのり肩水平変位累積値 (CASE ①)

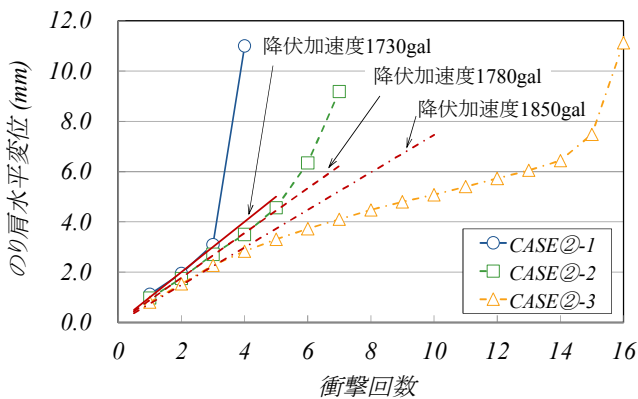


図-11 衝撃回数とのり肩水平変位累積値 (CASE ②)

法ではないものの、円弧すべり法と同じ入力パラメータで計算が可能であることや、簡明な理論で妥当な結果が得られ、結果の解釈も容易であることから、特にレベル2地震動に対する盛土の耐震性を評価する指標として多くの基準で用いられている。

本来、ニューマーク法によるすべり土塊の滑動変位量の計算では、降伏震度を越えた場合の臨界すべり面の回転変位量から算出するが、ここでは、試験結果から得られた加速度波形を用いて、ニューマーク法における水平方向の降伏加速度を仮定し、これを越える等価加速度に対して簡易的に線形加速度法により2回積分して求めた変位を実測値と比較することを試みた。比較結果の一例を図-9に示す。

実測値との比較においても、変位の進行時間は0.05sec程度でほぼ同等となっており、等価加速度と変位の発生状況は実測値と計算値でほぼ同様の傾向を示しており、試験結果のシミュレーションとしては妥当であるといえる。従って、このように適切な降伏加速度を設定することによって、試験ケースごとの変位量のシミュレーションが可能になるものと考えられる。

図-10、11に衝撃回数と累積水平変位量の関係を示す。図中には図-9に示した方法で降伏加速度を仮定して求めた変位量の計算値も併せて示した。変位量の計算に用いた設定降伏加速度は各ケースによって異なり、補強効果が高いケースほど設定降伏加速度が大きくなっている。これは補強対策の効果を定量的に示せることを示唆している。

CASE ①、CASE ②ともに各ケースとも最初は衝撃ごとの変位量がほぼ一定の割合で推移しており、破壊状態に至る直前に急激に衝撃1回当たりの変位量が増大している。これは、すべりの発生とともにすべり面付近がひずみ軟化を起し、盛土地盤のせん断強度がピーク強度から残留強度に低下していることを表すものと考えられる。

また、支圧板と補強材を設置したCASE ②-3のみ、当初、変位の進行とともに衝撃1回あたりの変位量が小さくなる傾向を示している。これは、地盤変形初期の微小範囲内では、変位の進行とともに変形の拘束効果がより発揮されるという地盤補強材の特性を示した結果であるといえる。

5. まとめ

本研究では、衝撃振動実験装置を用いて盛土の耐震補強の効果について検討を行った。その結果、本試験方法により地震時の盛土斜面のすべり破壊の状況を再現する

げられる。

ニューマーク法ではすべり面上で発揮されるせん断抵抗力を上回る地震慣性力が作用した瞬間に、すべり変位が生ずると考える。この方法は変形量を求める厳密な方

ことが可能であり、衝撃時の加速度波形とすべり破壊までの衝撃回数や破壊性状の比較から、各種の盛土の耐震補強対策の効果について検証可能であることがわかった。

さらに、衝撃時の加速度波形から得られる変位量を実測値と比較することにより、ニューマーク法における降伏加速度を仮定して試験結果のシミュレーションを行うことが可能であり、補強対策の効果について破壊性状だけでなく累積変位量によって定量的に比較することが可能であることも示唆された。

今後は、PIV手法による画像解析により、盛土地盤内部の動きをより詳細に把握して、補強対策の効果について更に検討を進める予定である。

謝辞：本研究は山口大学との共同研究として実施したものである。山口大学 中田幸男教授，同大学院 小林敬尚氏のほか、関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 沖元翼，中田幸男，兵動正幸，山本陽一：地震時の盛土斜面の安定性に関する衝撃振動実験，第43回地盤工学研究発表会，2008.9
- 2) 戸村豪治，中田幸男，兵動正幸，小林敬尚：衝撃振動実験による盛土の耐震補強技術の検討，第50回地盤工学研究発表会，2015（投稿中）
- 3) 小林敬尚，中田幸男，兵動正幸，戸村豪治：地層構造の違いによる水平慣性力載荷時の斜面崩壊機構，第50回地盤工学研究発表会，2015（投稿中）