

地震時の盛土斜面の安定性に関する衝撃振動実験

Impact Test of Embankment on Slope Stability during Earthquake

山本 陽一 YOICHI YAMAMOTO
 黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA
 高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

地震時の盛土崩壊過程を再現する方法として、模型盛土に対する衝撃振動実験方法を考案した。考案した実験方法は、簡易な方法で模型地盤に一樣な慣性力を効果的に与えることが可能で、地震による盛土斜面のすべり破壊の状況を明確に再現できる。補強位置・範囲の違いによる対策効果の実験検証から、部分的な補強では安全率の増加は期待できないが、破壊形態には大きな違いが認められた。

キーワード：斜面安定、地震、すべり面、模型実験、盛土

An impact test on model embankment as the way of reproducing slope failure during earthquake is proposed. It is possible that the inertia force acts on the embankment model uniformly by this method, and the slope failure condition of the embankment due to earthquake can be reproduced easily. As the result of tests on countermeasure effects varying the condition of position and range of the reinforcement, it is confirmed that though increasing of safety factor can't be expected by the partial reinforcement, a serious difference is recognized in the form of slope failure.

Key Words: Slope Stability, Earthquake, Slip Surface, Model Test, Embankment

1. はじめに

2005年新潟県中越地震や2007年の能登半島地震、新潟県中越沖地震では数多くの斜面崩壊による地盤災害が発生し、あらためて人工地盤である盛土の耐震性の問題が注目されている¹⁾。盛土は社会インフラを伴って建設されることから、例えば、宅地盛土の崩壊は人命や財産へ直結する問題であり、道路盛土などでは緊急物資輸送の確保や早期の震災復興を可能にする観点からも、効果的で総合的な防災対策が求められる^{2),3)}。

本研究は、地震による盛土の破壊機構の解明と災害防止のための効果的な対策工法の提案および検証を目指すものである。地震時の盛土崩壊過程を再現する方法として、模型盛土に対する衝撃振動実験方法を考案した。本報告では、まず、考案した実験装置および試験方法を概説しその特徴を示す。また、試験方法の有効性確認と盛土破壊機構の基礎的なデータ収集を目的として、無補強の砂質盛土地盤を対象に実施した試験結果について考察する。さらに、既存盛土の耐震補強方法として、ネイリング工法をイメージした補強位置・範囲の違いによる対策効果の実験検証を行い、そ

れぞれの破壊形態の特徴について考察した。

2. 衝撃振動実験の概要

図-1に実験装置の概要を示す。本実験は図-2に示すように、盛土に対して震度法による斜面安定解析と同様の応力状態を再現することをイメージしている。したがって、実験では模型地盤に一樣な慣性力を作用させる必要がある。図-1に示した実験装置の土槽下の台座先端には車輪を取り付けており、実験では土槽を緩傾斜のガイドレール上をゆるやかに移動させて壁に衝突させる。土槽が壁に衝突して急停止することにより、模型地盤には水平方向に一樣な慣性力が作用すると考えた。土槽前面にはスポンジを貼り付けており、衝突後のリバウンドを防止している。ガイドレールの傾斜角度は、土槽の移動過程で加速度が極力発生せずに土槽の移動がスムーズに行われるよう試行の末、 $\theta=5^\circ$ とした。土槽台座はガイドレールと同一の傾斜角度としているので、土槽は移動中も水平を維持している。

実験に使用した土槽は、幅 530mm、高さ 400mm、奥行き 100mm の小型土槽である。今回実施した実験では、

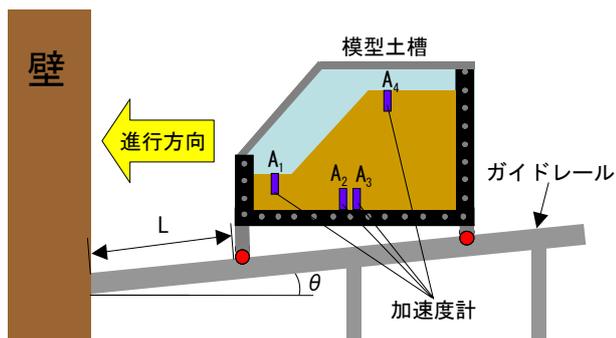


図-1 衝撃振動実験の概要

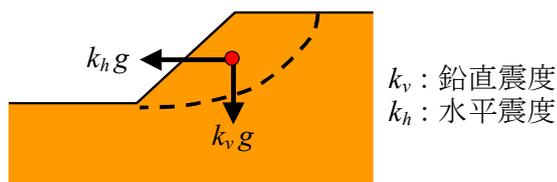


図-2 地震時安定解析における震度

試料に三河珪砂 ($D_{50}=0.333\text{mm}$, $U_c=1.972$, $G_s=2.660$, $e_{\max}=1.022$, $e_{\min}=0.630$) を用い、模型地盤全体を飽和度 $S_r=50\%$ に相当する含水比 14.8% に調整した潤滑砂で、相対密度 $D_r=60\%$ となるように均一に突き固めて作製した。また、斜面勾配は 1 : 1 (200mm : 200mm)、天端幅 200 mm とした。実験は、所定の移動距離 L で斜面崩壊するまで土槽を繰り返し衝突させ (最大 30 回)、それぞれ、 A_1 (法先地盤水平)、 A_2 (土槽上下)、 A_3 (土槽水平)、 A_4 (法肩天端水平) に設置した加速度計で実験中の加速度を計測するとともに、ビデオ撮影を行った。

3. 実験手法の検証

ここでは、実験手法の検証を目的に実施した無補強盛土模型に対する衝撃振動実験結果を示す。

図-3 に、土槽移動距離 $L=15\text{cm}$ で実施した実験の各測定位置の加速度波形を比較して示した。土槽の衝突により、水平加速度は測定位置にかかわらず同一とみなせる値を示しており、模型地盤全体に様な慣性力が作用していることを表している。鉛直加速度は水平加速度に対して大きくはないが、衝突後に振動成分が見られることから、土槽衝突時の衝撃によりガイドレールが振動したと考えられる。図-4 に、移動距離 $L=15\text{cm}$, 25cm , 40cm で実施した実験の A_3 位置の加速度波形を示す。波形は 3 波とも 0.19 秒で水平加速度が立ち上がり、さらに 0.21 秒で大きく上昇していることから、最初に土槽前面に貼り付けたスポンジが壁に接触し、その後で土槽本体が衝突したことによる影響が

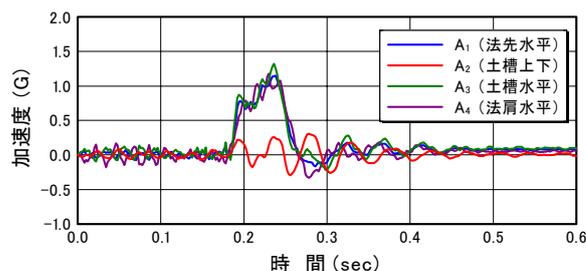


図-3 加速度波形の比較 ($L=15\text{cm}$)

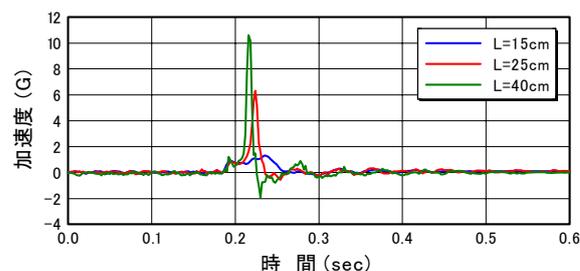


図-4 A_3 位置の水平加速度波形の比較

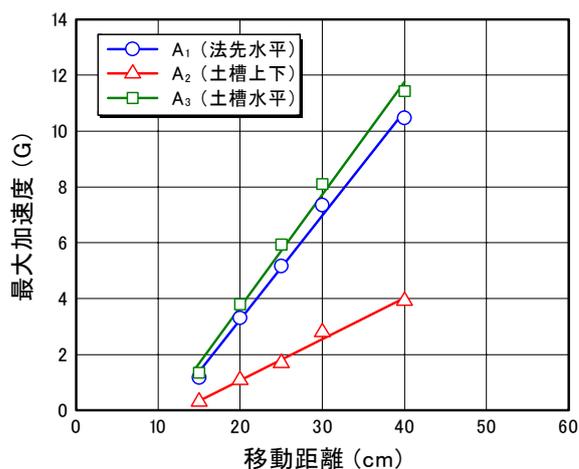
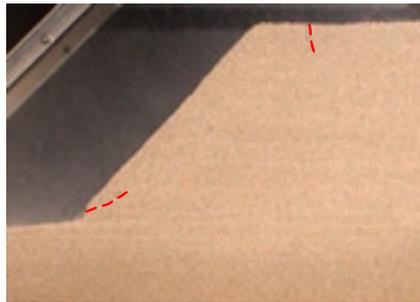


図-5 最大加速度と移動距離の関係

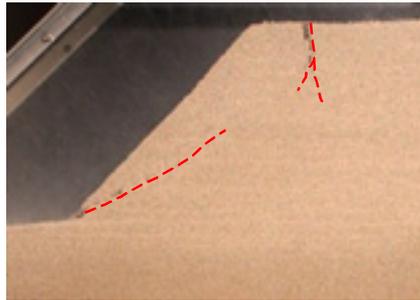
現れていると考えることができる。

図-5 には A_1 , A_2 , A_3 位置の水平方向または鉛直方向加速度の最大値と移動距離の関係を示した。水平加速度パルスの振動数を求めると $L=15\text{cm}$ で 12Hz であったものが $L=40\text{cm}$ では 28Hz と移動距離の増加により振動数は高くなっている。また、最大加速度は土槽の移動距離と比例増加の関係を示しており、移動距離を調整することで任意の加速度を与えることが可能となる。

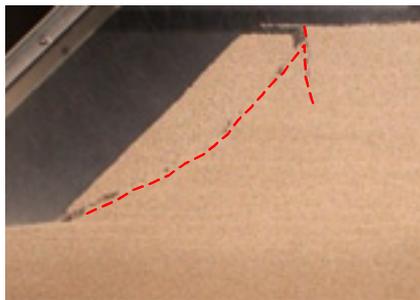
写真-1 には、 $L=20\text{cm}$ で実施した実験について斜面のすべり破壊に至る過程を示した。写真中にはクラック図を実際のクラック位置から少しずらした位置に破壊で示した。このケースでは、6 回目で天端位置にクラック



(a) クラック発生 (6回目)



(b) すべり面発生 (7回目)



(c) すべり破壊 (8回目)

写真-1 破壊に至る状況 (無補強, $L=20\text{cm}$)

クが発生, 7回目で明瞭な円弧状のすべり面が発現し, 8回目ですべり破壊に至っている。

図-6 に $L=15\text{cm}\sim 40\text{cm}$ でそれぞれ実施した実験結果について, クラック発生→すべり面発生→すべり破壊に至る回数と最大加速度との関係を整理して示した。 $L=15\text{cm}$ のケースでは 30 回の衝撃回数の中ですべり面は発生せず破壊に至らなかったことから, 本試験条件においては, 斜面崩壊に約 2G 以上の衝撃加速度を要することになる。また, いずれのケースについてもクラック発生から 1 回後にすべり面が発生し, その直後の衝撃ですべり破壊に至っている。破壊に要する水平加速度としては通常の地震動に比較して大きい, これは本実験で作用する衝撃加速度が地盤の固有周期 (1 秒程度) に対して 10~20 倍近く高い振動数で半周期のパル

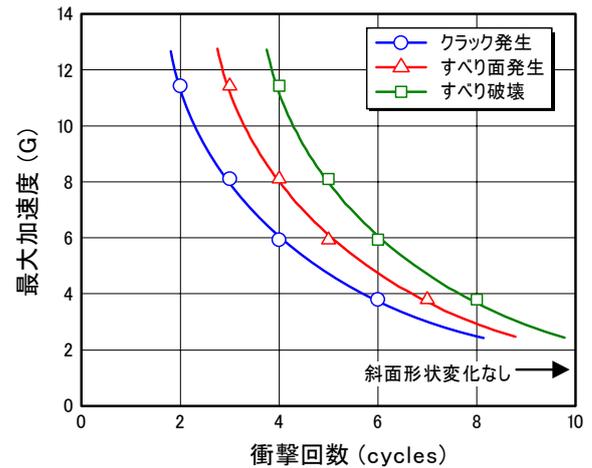
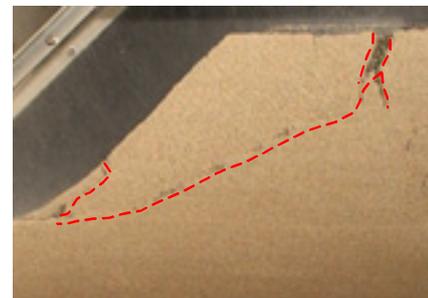


図-6 すべり破壊に至るに必要な最大加速度と衝撃回数との関係 (無補強盛土)

写真-2 破壊状況 (無補強, $L=30\text{cm}$, 5回目)

ス波形であること, 締固めた不飽和地盤で片振り状態と砂地盤の動的強度が高い状態での試験になっていることに起因していると考えられる。

写真-2 は $L=30\text{cm}$ で実施した実験のすべり破壊の状況を示している。写真-1 の $L=20\text{cm}$ の結果と比較すると, いずれも斜面法先を通る円弧すべりを生じているが, $L=30\text{cm}$ で実施したケースのほうが, より大きな円弧すべり面形状を示しており, 斜面安定計算において安全率を同一とした場合に震度を大きくすると円弧半径も大きくなることと整合する結果となっている。

これらの結果から, 本実験は震度法による斜面安定解析と同様の応力状態で, 斜面のすべり破壊を効率的に再現できると考える。

4. 対策工法の効果

既存盛土の耐震補強方法として, ネイリング工法をイメージして補強位置・範囲の違いによる対策効果の実験検証を行った。模型盛土の補強材には長さ 13cm のストローを使用し, 斜面に対して垂直に挿入した。

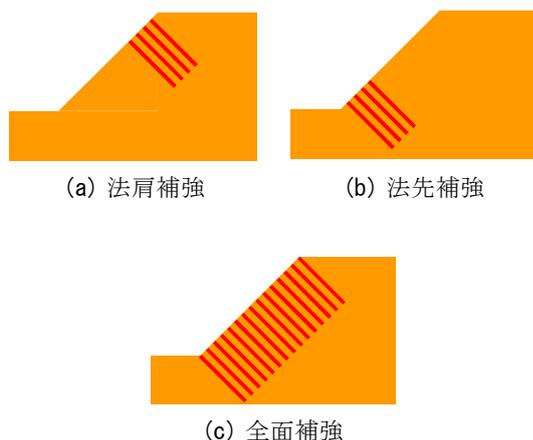


図-7 補強位置

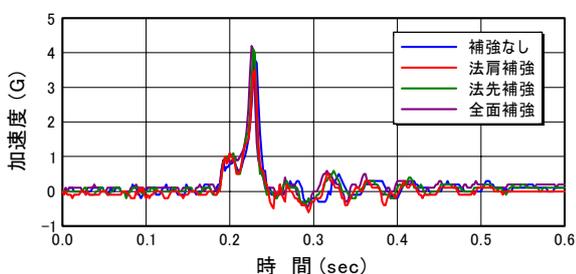


図-8 各ケースの水平加速度波形の比較 (L=20cm)

表-1 破壊に至る過程の衝撃回数

ケース	破壊に至る衝撃回数 (cycles)		
	クラック発生	すべり面発生	すべり破壊
無補強	6	7	8
法肩補強	7	8	9
法先補強	6	7	8
全面補強	7	-	-

実験は、図-7 に示すように法肩補強、法先補強、全面補強と補強位置・範囲の異なるケースについて実施した。土槽移動距離は $L=20\text{cm}$ とした。なお、補強材は奥行き方向に等間隔 (2cm) で4列挿入している。

図-8 に各ケースの水平加速度波形を比較して示した。いずれのケースについても同様の加速度が作用していることが確認できる。表-1 に各ケースについてすべり破壊に至る過程の衝撃回数をまとめた。全面補強では天端付近にクラックの発生は観察されたが、すべり面の発生や破壊に至ることはなかった。それ以外のケースではいずれもクラック発生直後の衝撃回数ですべり面が発生し、すべり破壊へと至っていることが分かる。また、部分的な補強では破壊に至るまでの衝撃回数に

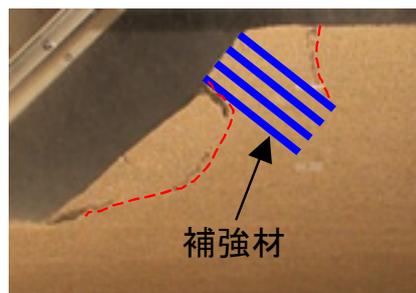


写真-3 破壊状況 (法肩補強, $L=20\text{cm}$, 10回目)

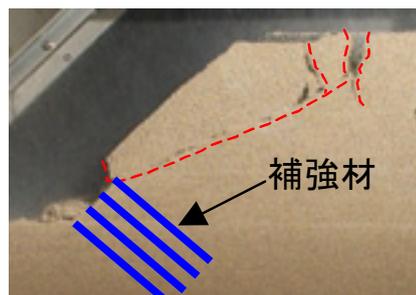


写真-4 破壊状況 (法先補強, $L=20\text{cm}$, 10回目)

無補強との違いが認められないことから、実験結果は部分的な補強ではすべり安全率の増加がほとんど期待できないことを表している。

一方、破壊形態からは補強位置による効果の違いを考察することができる。写真-3、写真-4 は法肩補強と法先補強したケースのすべり破壊状況をそれぞれ示している。法肩補強のケースでは補強位置直下から法先部にかけてすべり破壊を生じている。盛土天端位置にもクラックの発生が認められるが、補強した法肩部は崩壊を免れている。法先補強のケースでは補強位置の直上から天端中央部を通るすべり面が発生して破壊に至っている。このケースの盛土天端に現れたすべり面は、写真-1 に示した無補強のケースよりも背後に生じており、盛土天端の破壊領域の範囲はむしろ広がっている。

盛土地盤では、天端部分に家屋や道路などのインフラが存在していることが通常なので、法先のみを補強した場合には、補強を実施しない場合よりも地震時の被害を拡大させる可能性が実験結果から示唆される。法肩部のみ補強した場合には、斜面内のすべりは発生するが盛土天端の崩壊を抑止していることから、ある程度の被害が生じる可能性は否定できないものの、人命確保が可能な性能レベルに達していると考えられる。

5. まとめ

震度法による斜面安定解析と同様の応力状態を再現可能な盛土模型の衝撃振動実験を考案し実施した。無補強の盛土地盤に対する実験結果から、地盤全体に一樣な慣性力を作用させることが可能で、地震による盛土斜面の被害事例に見られるのと同様のすべり破壊の状況を効率的に再現できることが明らかとなった。

補強位置・範囲の違いによる対策効果の実験検証から、部分的な補強ではすべり安全率の増加は期待できない一方で、破壊形態に大きな違いが認められた。法先のみを補強した場合には、補強を実施しない場合よりも地震時の被害を拡大させる可能性が実験結果から示唆された。法肩部を補強したケースでは、斜面のすべりは否定できないものの、盛土上構造物の倒壊に繋がる地盤変状を抑止可能であることが認められた。全面補強したケースでは破壊に至らなかった。

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 准教授，同大学院 沖元翼氏のほか、関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 地盤工学会関東支部：造成宅地における耐震調査・検討・対策の手引き，2007.
- 2) 渋谷和久：宅地造成等規制法の改正一宅地造成地の耐震化対策一，地学雑誌，Vol.116, No.3/4, pp.511-515, 2007.
- 3) 宮島昌克：平成19年度能登半島地震報告会，土と基礎，Vol.55, No.12, pp.12-13, 2007.