

流れ盤斜面の地震時崩壊挙動に関する 遠心力模型実験

石丸 真¹・河井 正²

¹(財) 電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域 (〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
E-mail: ishimaru@criepi.denken.or.jp

²(財) 電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域 (〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
E-mail: t-kawai@criepi.denken.or.jp

岩塊の到達距離のような斜面が崩壊した後の影響評価を行うためには、まず斜面崩壊が発生する地震動レベルとその崩壊範囲を精度良く予測することが重要である。本研究では、これに関する数値解析手法の検証あるいは高度化のため、遠心力模型実験により岩盤斜面模型の崩壊発生および崩壊範囲の把握・解明を行っている。

ここではその一環として、不連続面を有する流れ盤と、明確な構造的弱面がない岩盤の 2 パターンの斜面模型を用いて遠心力模型実験を行い、斜面模型が崩壊する加速度レベルとその崩壊範囲・形態を調べた。その結果、明確な構造的弱面がない岩盤斜面模型は崩壊に至らなかったが、流れ盤斜面模型は 400gal 入力時に不連続面が関与する平面すべりで比較的浅いすべりで崩壊した。

Key Words : centrifuge model test, earthquake, slope failure, discontinuity structures in rock mass

1. はじめに

近年、新潟県中越地震をはじめとして、大地震の際の岩盤斜面の崩壊挙動が注目されている。これに関して、地震時の岩盤斜面崩壊およびそれに起因する岩塊の到達距離の評価に関する研究が進められている (例えば¹)。

岩塊の到達距離のような斜面が崩壊した後の影響評価を行うためには、まず斜面崩壊が発生する地震動レベルとその崩壊範囲を精度良く予測することが重要である。

一般に、地震時の斜面の安定性は、滑り面に沿う滑動力と抵抗力のつり合いから判断される。盛土等の土質系斜面と比較して、岩盤斜面の地震時安定性評価において留意すべき大きな特徴として、節理、層理、片理などの岩盤不連続面の存在があげられる。不連続面を含む岩盤斜面では、強度あるいは変形特性に不連続面が大きく関与するため、前述の抵抗力の算定においては引張強度をゼロかまたは非常に小さな値に設定せざるを得ない。また、従来の力のつり合いによる評価方法では、実際に斜面が崩壊する地震動レベルとその崩壊範囲を精度良く予測することは非常に困難である。

本研究の目的は、遠心力模型実験により岩盤斜面模型の崩壊発生および崩壊範囲の把握・解明を行い、これに関する数値解析手法の検証・高度化に寄与するデータを取得することである。ここでは、不連続面の傾斜が斜面の傾斜と同じ方向にある“流れ盤”斜面に着目して実施した遠心力模型実験結果について報告する。

2. 実験条件

(1) 斜面模型の形状と材料特性

実験に用いた岩盤斜面模型を図-1 に示す。実験での遠心加速度は 50G であり、模型は図に示すように法面勾配 1 : 0.5、斜面高さ 550mm (50G 遠心力場における実規模換算では 27.5m) である。

流れ盤斜面模型内の不連続面については、模型材料との摩擦が少ないテフロンシートを加振直角方向に模型全長にわたって設置することにより模擬した。また、流れ盤斜面模型の比較として、テフロンシートを設置しない斜面模型 (以後、均質斜面模型) についても同様に加振実験を実施した。

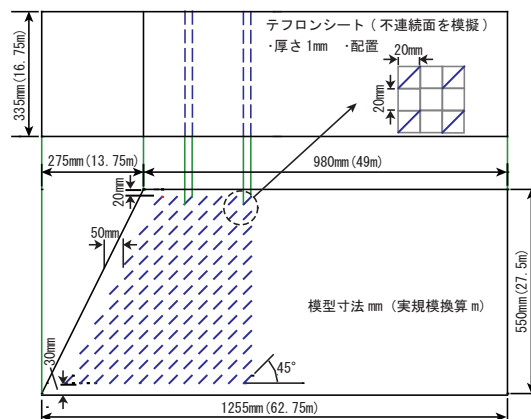


図-1 模型形状

岩盤を模擬する材料として、本検討ではセメントを主体とする材料（重量比で、早強ポルトランドセメント：13，珪砂7号：440，鉄粉：160，水：200，木節粘土：32，および作製時の水の分離を抑えるための混和剤：1）を用いた．事前に行った配合に関する調査から，材料の乾燥状態が強度に大きく影響するということがわかっていたため，模型の作製から加振実験まで約3ヶ月の期間を要して模型全体を完全に乾燥させた．なお，ここでは数値解析手法の検証・高度化のための実験という位置づけから，実験で用いた模型については，実物に対する相似性よりもできるだけ岩盤の脆性的な破壊を模擬し，かつ遠心載荷試験装置の振動加振能力で破壊が可能な強度を有することを重視した．

図-2および図-3に，実験後の模型からサンプリングした試料の一軸圧縮強さと密度の分布を示す．また，表-1には三軸圧縮試験および弾性波速度測定による試料の物性を示す（試料は流れ盤斜面模型からサンプリング）．これらは模型作製時の不均質性のほか，加振実験時やサンプリング時の損傷を含んでいる可能性も十分考えられる．特に模型底面に近い部分は加振時に損傷を受けたと推測され，その点を考慮すると模型は概ね均質に作製されているものと思われる．物性試験に関しては，今後，不連続面を模擬するテフロンシートと模型材料の摩擦係数の確認など，数値解析を行うに際して必要なデータを取得していく予定である．

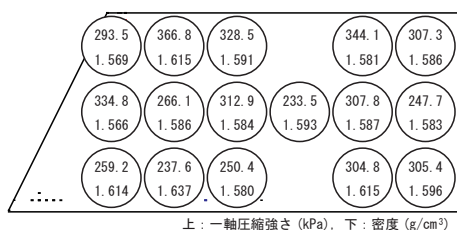


図-2 均質斜面模型の物性の分布

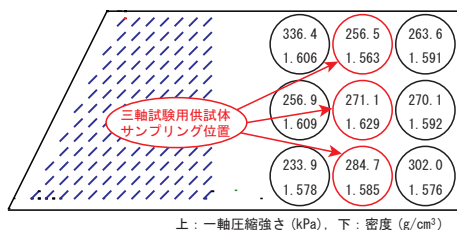


図-3 流れ盤斜面模型の物性の分布

表-1 流れ盤斜面模型からサンプリングした試料の物性

	模型からのサンプリング位置			
	上部	上部	中部	下部
湿潤密度 (g/cm³)	1.574	1.606	1.583	1.593
S波速度 (m/sec)	439	389	317	281
P波速度 (m/sec)	732	646	601	444
動的ポアソン比	0.219	0.215	0.306	0.168
動的弾性係数 ($\times 10^6 \text{ kN/m}^2$)	0.74	0.59	0.41	0.29
せん断抵抗	$c_d = 25.2 \text{ kN/m}^2$, $\phi_d = 38.5^\circ$			

(2) 計測項目と加振波

計測器配置を図-4に示す．実験では，図のように土槽内を中敷により半分に仕切り，流れ盤斜面と均質斜面の2体の斜面模型を設置した．計測項目は斜面模型表面のレーザー変位計による変位と斜面模型内の加速度であり，加速度計の配置については加振時に斜面模型の崩壊に影響しないように配慮した．このほか，斜面模型のすべり面形成の進展を把握する目的で，CCDカメラを用いて土槽側面より斜面模型を撮影した．

斜面模型底面は底面治具上のリブ（直径10mmの異形棒鋼を斜面法先から150mmピッチで設置）により，加振方向に対して固定した．また，斜面模型側面と土槽・中敷の間はテフロンシートにより加振時のせん断抵抗を低減した．

加振実験は，振幅を順に大きくした167Hz（実規模換算3.34Hz，以降のデータは全て実規模換算後の値で示す）の正弦波20波による水平加振を，流れ盤斜面模型が崩壊するまで実施した．各加振ステップの振幅は，流れ盤斜面模型の底面で得られた加速度波形の最大振幅より，40，70，100，135，160，240，280，360，400galである．図-5に入力加速度波形の例（240galの場合）を示す．

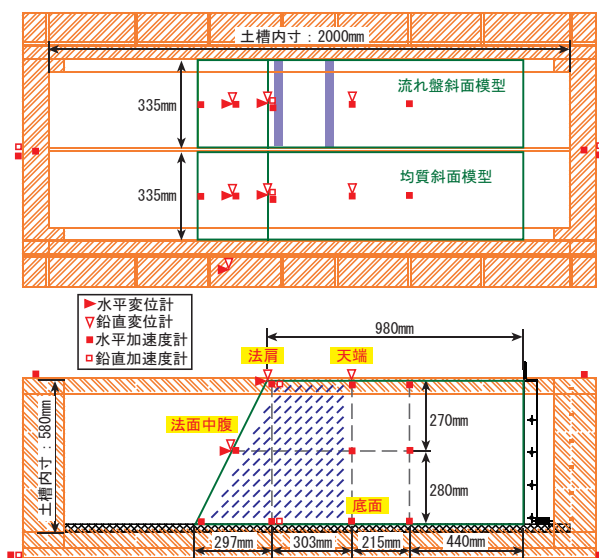


図-4 計測器配置

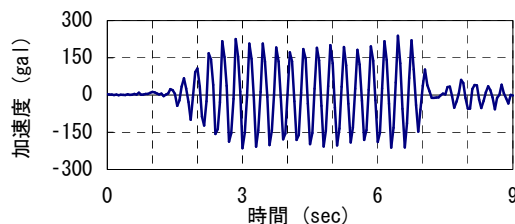


図-5 入力加速度波形の例（240galの場合）

3. 実験結果

均質斜面模型および流れ盤斜面模型の加振ステップごとの累積変位（水平：法肩から法尻の方向がマイナス，鉛直：下向きがマイナス）を，図-6 および図-7 にそれぞれ示す．なお，ここでは，遠心加速度 50G を載荷する際に生じた変位（均質斜面模型：法肩水平-5.7cm，法肩鉛直-8.7cm，流れ盤斜面模型：法肩水平-2.9cm，法肩鉛直-11.9cm）は除いている．均質斜面模型は，360 および 400gal 入力時にわずかに変位が累積しているものの，崩壊には至らなかった．一方，流れ盤斜面模型は 240gal 入力時からごくわずかに変位が累積され，400gal 入力時に崩壊に至った．400gal 入力時の発生変位はそれまでの累積変位と大きな差があり，本実験においては脆性的な破壊が生じたと判断できる．

流れ盤斜面模型が崩壊した 400gal 入力時の模型底面および法肩の水平加速度と，法肩の水平変位の時刻歴を図-8～図-10 に示す（いずれも法肩から法尻の方向がマイナス）．模型底面の入力水平加速度は，どちらの斜面模型も 3 秒付近で 400gal に到達している．流れ盤斜面模型の法肩の応答水平加速度は 3 秒付近から波形が乱れており，同様に法肩の応答水平変位も 3 秒付近から波形の基線がずれ始めていることから，入力が 400gal に達した時点で流れ盤斜面模型は崩壊が始まったことがわかる．一方で，均質斜面模型にはこのような波形の乱れは認められない．

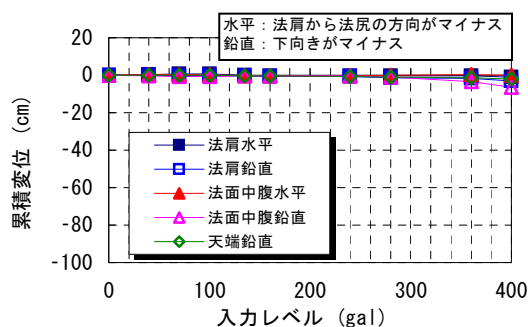


図-6 加振時の累積変位（均質斜面模型）

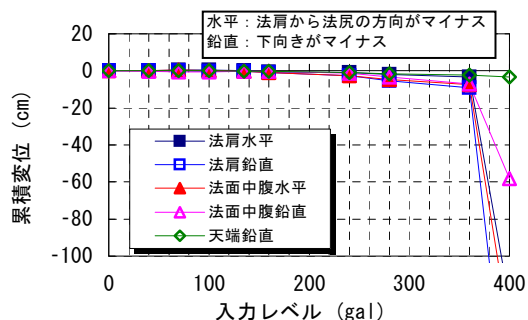


図-7 加振時の累積変位（流れ盤斜面模型）

流れ盤斜面模型について，実験直後の崩壊状態と崩土を取り除いた後の模型の様子を図-11 に，崩土を取り除いた後に計測したすべり面形状を図-12 にそれぞれ示す．両図より，すべり面はほぼ 2 次的に形成されており，また不連続面が大きく関与した“平面すべり”で崩壊していることがわかる．なお，今回の実験ではすべり面は比較的浅いものであった．

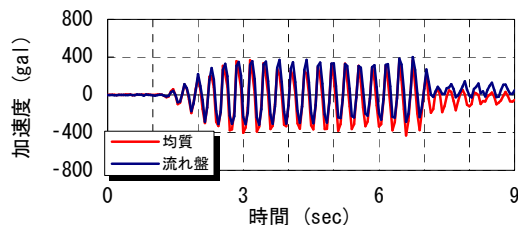


図-8 模型底面の入力水平加速度（400gal 入力時）

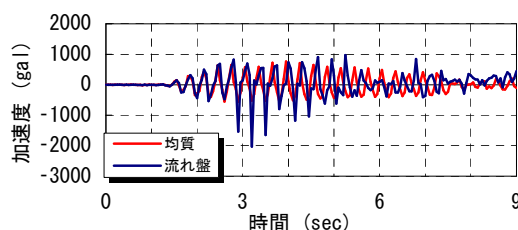


図-9 法肩の応答水平加速度（400gal 入力時）

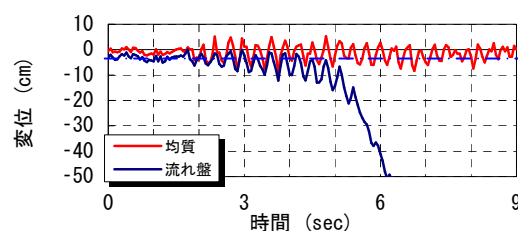


図-10 法肩の応答水平変位（400gal 入力時）



図-11 流れ盤斜面模型の崩壊状況（左：実験直後の崩壊の様子，右：崩土除去後）

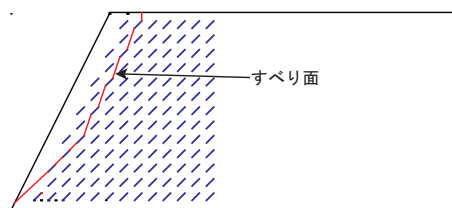


図-12 流れ盤斜面模型のすべり面形状

4. まとめ

不連続面を有する流れ盤と、明確な構造的弱面がない岩盤の2パターンの斜面模型を用いて遠心力模型実験を行い、斜面模型が崩壊する加速度レベルとその崩壊範囲・形態を調べた。その結果、明確な構造的弱面がない岩盤斜面模型は崩壊に至らなかったが、流れ盤斜面模型は400gal入力時に不連続面が関与する平面すべりで比較的浅いすべりで崩壊した。

今後はより詳細に実験結果を分析するとともに、数値解析を行うにあたって必要となる物性を取得していく予定である。また、斜面模型については密度を大き

くすることで破壊可能な強度を上げ、より実際の岩盤物性に近づけるよう検討する予定である。

謝辞： 本検討を進めるに際して、株式会社大林組の稲川雄宣氏および市川英治氏をはじめ関係者に多大なるご協力を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐々木猛, 萩原育夫, 佐々木勝司, 堀川滋雄, 吉中龍之進, 大西有三. 不連続変形法による斜面崩落モデルの地震応答解析. 第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 87-92, 2006.

(2007.06.29 受付)

DYNAMIC CENTRIFUGE TEST TO INVESTIGATE CHARACTERISTICS OF DIP SLOPE FAILURE CAUSED BY SEISMIC EXCITATION

Makoto ISHIMARU and Tadashi KAWAI

To evaluate influences after rock slope failure such as attainment distance of rock, it is important to estimate the earthquake ground motion, which causes rock slope failure, and the area of slope failure. The purpose of this study is to investigate dynamic failure characteristics of rock slope models by centrifuge tests for verification and improvement of analytical methods.

We conducted a dynamic centrifuge test using the rock slope model with discontinuities that were an angle of 45 degrees for the horizon. As it turned out, it was observed that the failure line of the model that was concerned with the discontinuities was formed.