

流れ盤斜面の地震時崩壊発生および崩壊範囲の 解明に関する基礎的検討

石丸 真^{1*}・河井 正¹

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

地震時の崩壊岩塊の到達距離等の斜面が崩壊した後の影響評価に寄与するため、本研究では岩盤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を最終的な目的とする。

岩盤斜面においては、不連続面を含む際の物性の設定が地震時安定性評価に大きく影響するが、不連続面の物性がわかっているときに、岩盤斜面を対象として従来のすべり安全率評価の精度を検証した事例は少ない。ここではまず、不連続面を有する流れ盤斜面を模擬した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を調べた。そして実験結果とすべり面法によるすべり安全率評価結果を比較することにより、従来の評価手法の妥当性を検討した。

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

1. はじめに

近年、大地震の際の岩盤斜面崩壊が注目されており、崩壊岩塊の到達距離等の斜面が崩壊した後の影響評価の必要性が高まっている。これに関して、岩盤斜面を不連続なブロックの集合体としてモデル化し、それに地震力を作用させて到達距離を求める方法の適用も試みられている^{例として1),2)}。

到達距離を求めるに際し、設定された地震動に対して斜面が崩壊するか否かはもちろんとして、崩壊する場合の規模・範囲の評価は到達距離の予測結果に大きく影響する。そのため、従来にも増して、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となる。

岩盤斜面に対する地震時崩壊発生および崩壊範囲の予測については、従来からすべり面法（極限平衡法）や静的・動的FEMなどの力のつり合いに基づくすべり安全率評価により検討されてきた³⁾。北爪他⁴⁾は泥岩切土斜面を想定した遠心力模型実験を行い、実験で得られた円弧状のすべり面に対してすべり安全率を算出した結果、すべり面法による安全率評価はわずかに安全側であったことを示している。

一方で、岩盤斜面において留意すべき大きな特徴として、節理、層理および片理等の岩盤不連続面の存在があげられる。これらの不連続面を含む岩盤斜面は、平面す

べり崩壊やくさびすべり崩壊等の不連続面が大きく関与した形態で崩壊する場合が多く³⁾、また不連続面を含む際の物性の設定は地震時安定性評価に大きく影響する。しかしながら、不連続面の配置およびその物性がわかっているときに、従来のすべり安全率評価が岩盤斜面の崩壊発生とその範囲の予測に関して、どの程度適用可能か検証した事例は少ない。

本研究の目的は、岩盤を模擬した斜面模型の破壊が可能な遠心力模型実験により、模型の崩壊発生および崩壊範囲に関する基礎データを取得し、これらの評価手法の検証・高精度化を行うことである。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”斜面を対象に実施した遠心力模型実験結果を報告し、実験で確認されたすべり面に対するすべり安全率評価と実験結果の比較について述べる。

2. 実験条件

実験に用いた岩盤斜面模型を図-1に示す。実験では、流れ盤斜面の平面すべり崩壊を対象とした。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、模型材料との粘着力を無視し得るテフロン

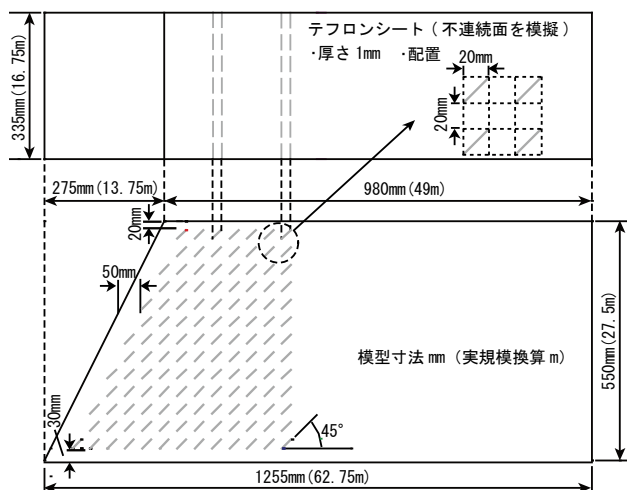


図-1 模型形状

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。

(1) 材料特性

a) 模擬岩盤材料の物性

本検討においては、数値解析手法の検証および高度化のための実験という位置づけから、実験で使用する模型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、かつ遠心载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。上記のような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を用いた。用いた材料の内訳は、早強ポルトランドセメント、珪砂7号、鉄粉、水、木節粘土、および作製時の水の分離を抑えるための混和剤である。珪砂7号および鉄粉は模擬岩盤材料の摩擦係数および密度の調整のために用いており、木節粘土は混和剤と同様に作製時の水の分離を抑える目的で使用した。模擬岩盤材料の目標強度については、既往の実験結果^{4),5)}を目安に設定した。なお、事前の一軸圧縮試験による配合検討から、水セメント比を大きくして強度を下げるほど脆性的な破壊性状を示さなくなる傾向が得られた。このため、目標強度と破壊性状の両者を勘案し、各材料の配合を1m³あたり、セメント32.5kg、砂1,100kg、鉄粉400kg、水500kg、粘土80kg、混和剤2.5kgとした。

模擬岩盤材料の強度および変形特性を把握するため、モールドで作製した材令28日の供試体を用いて、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験および圧裂引張試験を実施した。なお、供試体は打設から7日間は25～30℃の湿潤状態で養生し、8日目以降は脱枠して40℃の乾燥炉にて養生を行った。これらは遠心力模型実験で使用する斜面模型の養生条件と同様である。また、事前検討において模擬岩盤材料の含水比がその強度および変形特性に大きく影響したため、モールド供試体および斜面模型ともに重量の

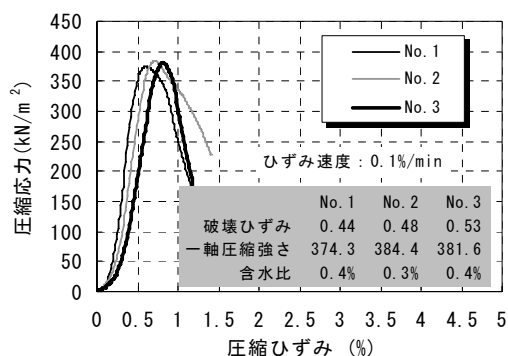


図-2 一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線

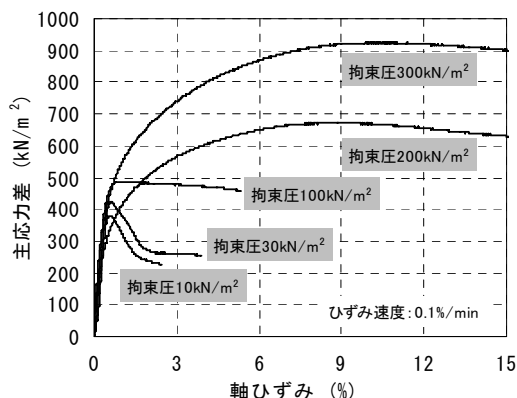


図-3 UU三軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線

変化がなくなるまで乾燥させることを条件とした。作製した供試体の基本的な物性値は、湿潤密度1.550g/cm³、含水比0.3%、S波速度423m/sec、P波速度747m/secおよび動ポアソン比0.264（以上、三軸圧縮試験に用いた供試体の平均値）である。

図-2に供試体3本の一軸圧縮試験結果を示す。一軸圧縮試験では、加圧板と供試体端面の摩擦抵抗を減じる目的で、両者の間に厚さ2mmのテフロンシートを挟んだ状態で試験を行った。模擬岩盤材料の一軸圧縮強さは約380kN/m²、原点補正後の破壊ひずみは約0.5%であり、いずれも脆性的な破壊性状を示している。また、図より個々の供試体の物性のばらつきも少ないことがわかる。

図-3に非圧密非排水（UU）三軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線を示す。三軸圧縮試験においても一軸圧縮試験と同様に供試体の両端面に直径5cm×厚さ2mmのテフロンシートを挟んだ状態で試験を行った。今回実験に用いた模擬岩盤材料は、拘束圧30kN/m²までは脆性的な破壊を示すが、拘束圧100kN/m²付近ではやや延性的な曲線を示す状態となり、さらに拘束圧200kN/m²（実規模換算斜面高さ27.5mの約半分の高さに該当）以上の拘束圧では極度に延性的な曲線を示す状態となる。本試験より得られた強度定数は、粘着力101.2kN/m²およびせん断抵抗角28.7度（主応力差最大時のモール円群の包絡線より）である。

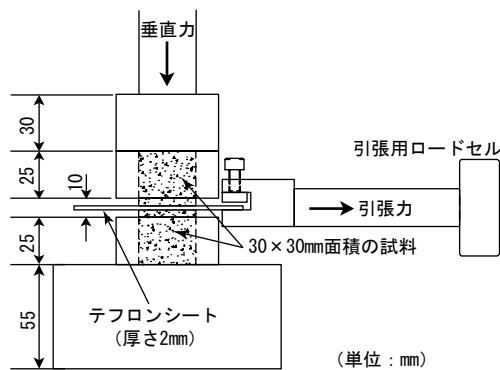


図-4 テフロンシート引抜き試験の概要

また、圧裂による引張試験により求めた引張強さは、 66.4kN/m^2 （供試体3本の平均値）である。

今回は模擬岩盤材料の基本的な物性を得ることを主目的としたが、今後、ひずみ速度や繰返し载荷が強度特性および変形特性に与える影響を把握する必要がある。また、低強度かつ高拘束圧下でもより脆性的な破壊性状を有する模擬岩盤材料について検討する予定である。

b) 模擬不連続面の物性

通常、不連続面は引張強度を持たないと考えられており、強度としては主にせん断強度特性が問題となる。不連続面のせん断強度は、作用する垂直応力の大きさ、表面の粗さ、壁面の強度、かみ合わせの程度、充てん物の厚さやその物性に影響されるとともに、寸法効果が顕著であることが指摘されている⁹⁾。実際の不連続面や不連続面モデルを用いた既往の研究により、壁面の強度や粗さ及び不連続面に作用する垂直応力から、不連続面のせん断強度を推定する関係式がいくつか提案されている^{例えは7)}。

本検討においては、厚さ1mmのテフロンシートを模擬岩盤材料の硬化が始まる前に模型内に設置することにより岩盤内の不連続面を模擬した。この方法で作製した不連続面は表面の粗さ、およびかみ合わせの程度などが一定となる。また、事前検討において、硬化後の模擬岩盤材料のテフロンシートとの粘着力は非常に小さかったため、本検討においてはこれを無視した。以上より、模擬不連続面のせん断抵抗は、当該部分の垂直応力による摩擦力から発揮されると推定した。

垂直力が载荷された状態での模擬岩盤材料とテフロンシートの間に働く摩擦力を調べる目的で、テフロンシートの引抜き試験を行った。図-4に試験の概要を示す。試験では、 $30 \times 30 \times$ 厚さ29mmの模擬岩盤材料を上下の固定箱にセットし、その間にテフロンシートを挟んで垂直力を载荷した状態で、テフロンシートの引抜き抵抗を測定した。前述のように、硬化後の模擬岩盤材料とテフロンシートの粘着力は無視している。なお、試験での引抜き速度は、0.1, 1.0, 3.7（装置最大）mm/minである。

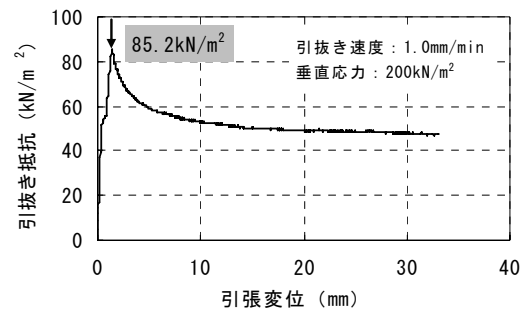


図-5 引抜き試験結果の一例

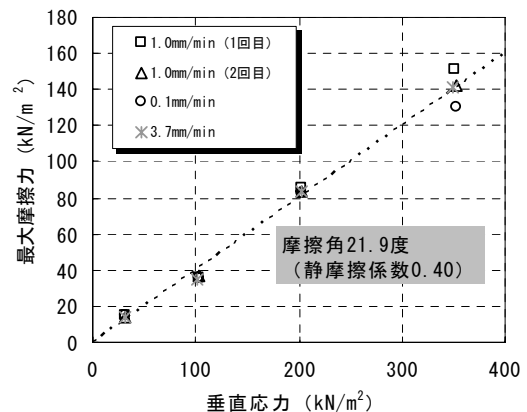


図-6 模擬岩盤材料とテフロンシートの間に働く摩擦力

試験結果の一例を図-5に示す。本検討においては、静止状態のテフロンシートが定常的に動きだす直前の引抜き抵抗（最大摩擦力）を引抜き抵抗-引張変位曲線から読み取った。図-6に最大摩擦力と垂直応力の関係を示す。図より、最大摩擦力が垂直応力に比例して大きくなっており、また今回実施した範囲では引抜き速度の影響はあまり認められないことがわかる。全てのデータを用いてその近似直線の傾き（摩擦角）を求めると、21.9度である（静摩擦係数0.40）。

(2) 斜面模型の物性分布

前述のように、本検討で用いた模擬岩盤材料は乾燥状態が強度・変形特性に大きく影響するため、斜面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を乾燥させた。実験後の模型からサンプリングした試料の含水比は模型全体でほぼ0.3%であった。この値は十分に乾燥させたモールド供試体と同じ値であることから、模型は十分に乾燥していたと思われる。

模型の実際の強度およびそのばらつきを把握する目的で、実験後模型の比較的損傷を受けていない背面部分から試料をサンプリングした。サンプリング試料の密度、超音波速度および一軸圧縮強さを表-1に示す。密度についてはモールド供試体の平均値 1.550g/cm^3 よりも若干大きい、模型全体でほぼ同じ値を示しており、ばらつきなく作製できているものと思われる。一方、超音波速度

表-1 サンプルングした試料の物性

サンプリング位置	密度 g/cm ³	V _s m/sec	V _p m/sec	一軸圧縮強さ kN/m ²
模型上部				
中央付近	1.606	416	649	342.9
↓	1.563	392	609	261.5
最背面	1.591	272	473	268.7
模型中部				
中央付近	1.609	301	448	261.9
↓	1.629	309	517	276.4
最背面	1.592	229	414	275.3
模型下部				
中央付近	1.578	241	358	238.4
↓	1.585	287	485	290.2
最背面	1.596	233	402	169.2

および一軸圧縮強さについてはばらつきが大きい。これらのばらつきは模型作製時の不均質性を反映している可能性も考えられるが、加振実験時やサンプリング時の損傷の影響のほうがより大きいと思われる。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、その他の箇所と比べて物性値が平均的に小さい。今後は、何らかの方法を用いて加振実験前の模型全体の物性を把握する必要がある。

(3) 計測項目と加振ステップ

計測器配置を図-7に示す。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、加振中に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実施した。各加振ステップの振幅は、模型底面（ac-4）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-8(a)に入力加速度波形の例を示す。一方、実験での入力水平動のみであるが、実際には図-8(b)に示すように鉛直方向にも水平動と同程度かそれ以上の加速度応答が確認された。鉛直動が発生した要因は、土槽内の模型の重量バランスに起因する振動台のロッキングが想定される。模型底面（ac-7v）における鉛直加速度波形の最大振幅は、各加振ステップにおける水平動の最大振幅に対して1.0～1.2倍程度である。

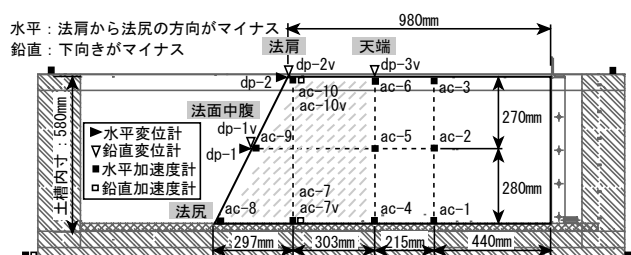
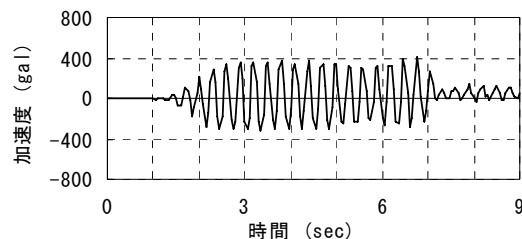
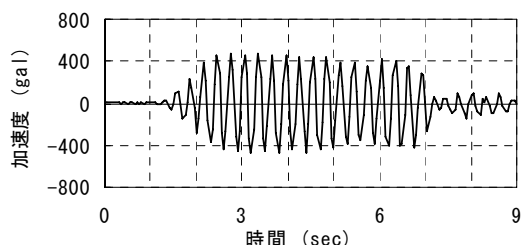


図-7 計測器配置



(a) 水平加速度波形 (ac-4)



(b) 鉛直加速度波形 (ac-7v)

図-8 入力加速度波形の例（水平動400gal入力の場合）

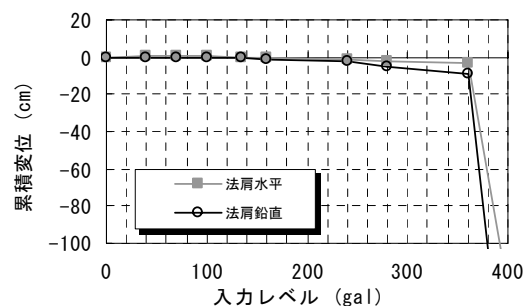


図-9 加振ステップごとの累積変位

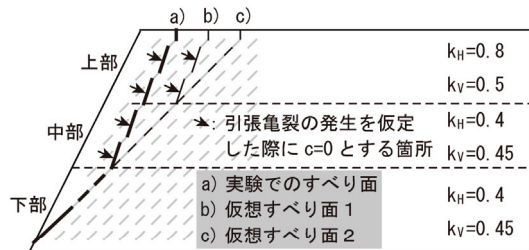
3. 実験結果と考察

(1) 実験結果

斜面模型は水平動400gal入力時に崩壊に至った。図-9に加振ステップごとの累積変位を示す。なお、ここでは遠心加速度50Gを載荷する際に生じた変位（法肩水平：-2.9cm、法肩鉛直：-11.9cm）は除いている。240gal入力時からごくわずかずつ変位が累積されているが、最終的に崩壊に至った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した。



図-10 崩壊の様子（左：加振直後一側面から，中：加振直後一上から，右：崩壊岩塊の除去後一前方から）



すべり安全率 F の算出式

$$F = \frac{\sum [c \cdot \ell + (W \cdot \cos \alpha - k_H \cdot W \cdot \sin \alpha + k_V \cdot W \cdot \cos \alpha) \tan \phi]}{\sum (W \cdot \sin \alpha + k_H \cdot W \cdot \cos \alpha + k_V \cdot W \cdot \sin \alpha)}$$

ここに、 W : すべりブロックの重量 c : すべり面の粘着力
 ℓ : すべり面の長さ ϕ : すべり面の摩擦角
 α : すべり面の角度 k_H : 水平震度
 k_V : 鉛直震度

図-11 すべり面形状と安全率の算出条件

実験直後の崩壊状態と崩壊岩塊を取り除いた後の模型の様子を図-10に、崩壊岩塊を取り除いた後に計測したすべり面形状を図-11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。

図-12～図-15に、斜面模型が崩壊した400gal入力時の主要な計測位置の時刻歴を示す。法肩の水平加速度は、3秒付近から波形が乱れており、同位置の水平変位も3秒付近から波形の基線がずれ始めている。また、法面中腹および法尻においては、それぞれ4秒と5秒付近から波形が乱れている。以上のことから、底面の入力が400galに達した時点で模型の上部から破壊が進行し、崩壊に至ったことがわかる。加振時において、模型表面付近の被りが浅く垂直応力の小さなところでせん断力が作用した場合、その部分で引張亀裂の発生が想定される。このことから、まず模型上部において引張亀裂が発生し、それによるせん断強度の低下が崩壊のきっかけとなった可能性がある。

(2) すべり面法によるすべり安全率

すべり面の近傍には、法尻、法面中腹および法肩の加速度計が位置する。これらの加速度計の計測値から、模型が崩壊する直前のすべり崩壊部分の応答震度（=応答加速度／重力加速度）を求め、すべり面法（極限平衡解

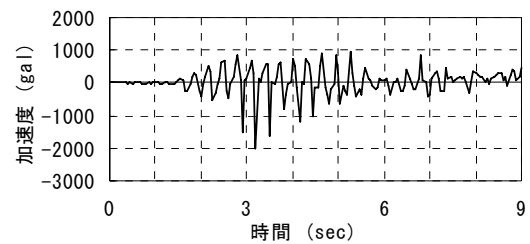


図-12 法肩の水平加速度 (ac-10)

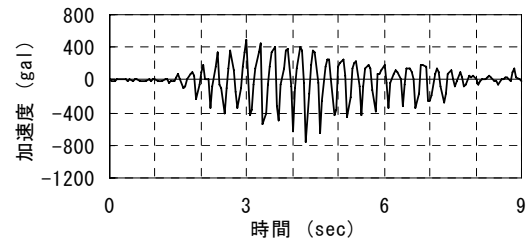


図-13 法面中腹の水平加速度 (ac-9)

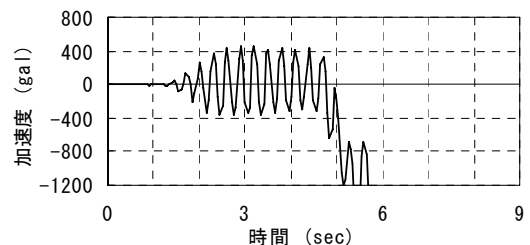


図-14 法尻の水平加速度 (ac-8)

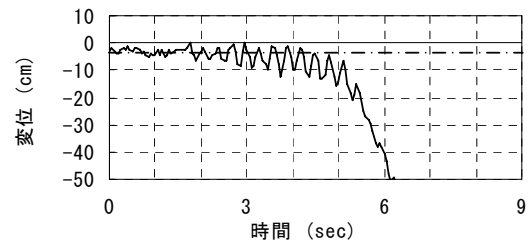


図-15 法肩の水平変位 (dp-2)

析法) によるすべり安全率を算出した。地震力は修正震度法により考慮し、水平震度（法肩から法尻の向きを正）と鉛直震度（下向きを正）は、加速度計の配置を考慮して模型の上・中・下部に分けて設定した。

図-11にすべり安全率の算出式と算出条件を示す。図に示すように、ここでは実験でのすべり面のほか、2つの仮定のすべり面を設定してすべり安全率を算出した。図中の仮定すべり面2は、法尻から天端まで模擬不連続面（傾き45度）に沿ったすべり面であり、仮定すべり面1は実験でのすべり面と仮定すべり面2の中間的なすべり面である。なお、すべり安全率の計算に用いた物性値は、湿潤単位体積重量については実験後の模型からサンプリングした試料の平均値とし、その他の強度に関する物性値は加振による損傷を受けていない値として、モールド供試体による要素試験値を用いた。

表-2 すべり安全率一覧

すべり面	常時	地震時
a) 実験でのすべり面	2.14	1.08
a-1) 地震時に模型上部で 引張亀裂の発生を仮定	—	0.81
a-2) 地震時に模型上・中部で 引張亀裂の発生を仮定	—	0.55
b) 仮想すべり面1	1.68	0.79
b-1) 地震時に模型上部で 引張亀裂の発生を仮定	—	0.61
c) 仮想すべり面2	1.55	0.71

表-2にすべり安全率の算出結果を示す。実験でのすべり面の安全率は、常時で2.14、地震時で1.08であり、1.0を下回ると崩壊の可能性が高いと判断する場合には、すべり安全率評価と実験結果はほぼ対応する。しかし、すべり安全率の値の比較では、仮想すべり面1および2のほうが実験でのすべり面よりも小さな値であるため、より危険なすべり面となるはずであり実験結果と対応しない。

実験では、模型上部において引張亀裂が発生した可能性がある。そこで本検討においては、すべり面上の模擬不連続面の端部から端部の間で引張亀裂が発生したと仮定し、引張亀裂の部分では模擬岩盤材料の粘着力をゼロとしてすべり安全率を算出しておいた。引張亀裂の発生を仮定した箇所を、図-11中に矢印で示す。

算出結果を表-2にあわせて示す。実験でのすべり面において、模型上部で引張亀裂の発生を仮定した場合は0.81、上・中部では0.55であり、模型の上・中部で引張亀裂の発生を仮定した場合は最も小さな値となった。ここで示した例は極端な場合であるが、岩盤斜面の崩壊発生および崩壊範囲を評価するためには、破壊の進行性を考慮することが重要と思われる。

なお、実験においては多少なりとも模型の両側面で摩擦による抵抗が想定される等、今回のすべり安全率の計算で考慮していない点がある。これらは今後、より高度な評価手法の妥当性を検討するとともに、何らかの方法により考慮する予定である。

4. まとめと今後の課題

不連続面を有する流れ盤斜面を模擬した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を調べた。すべり面法によるすべり安全率評価と実験結果を比較したところ、模型上部付近の引張亀裂を考慮することにより、すべり安全率評価と実験結果の対応が向上することが確認された。

今後、FEMを用いた静的・動的解析による評価手法の妥当性を検討するとともに、不連続体解析等の新たな解析手法を用いて破壊のメカニズムを詳細に分析し、評価手法の高精度化を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) 片山吉史，岩田直樹，佐々木猛，黒岡浩平，家島大輔：不連続変形法による長大斜面の地震時安定性における解析的検討，第40回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.2307-2308，2005。
- 2) 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。
- 3) 土木学会岩盤力学委員会編：岩盤斜面の安定解析と計測，丸善，1994。
- 4) 北爪貴史，佐藤正行，大津仁史，曾良岡宏：遠心場振動実験による斜面の耐震裕度に関する一考察，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集，pp.373-374，2006。
- 5) 石丸 真，河井 正：遠心場振動破壊実験に用いる亀裂性岩盤斜面模型の試作，第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.231-234，2007。
- 6) 土木学会岩盤力学委員会編：岩盤斜面の調査と対策，丸善，1999。
- 7) Barton, N. R.: A model study of rock joint deformation, *Int. J. Rock Mech. Mini. Sci.*, Vol. 9, pp. 579-602, 1972。

A BASIC STUDY ON 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 a rock slope model with discontinuities that were an angle of 45 degrees for the horizon. And the test result was compared with safety factors of stability analysis.