

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

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

亀裂性岩盤斜面の地震時変形量を精度良く予測する解析手法の高度化および検証のため、岩盤斜面模型の加振実験を行い、「要素特性－応答解析－模型応答」の関係を整理することを考えている。ここではその目的のために、岩盤斜面模型に用いる材料の調整、および模型内の亀裂の作製方法について検討した。

検討した方法により作製した亀裂なしと流れ目亀裂を有する2種類の模型について、遠心場振動破壊実験によりその破壊状況を確認したところ、亀裂なしの模型では円弧状のすべり面の形成が確認され、流れ目亀裂を有する模型では亀裂が関与するすべり面の形成が確認された。

Key Words : *dynamic centrifuge tests, rock slope, discontinuities, failure, earthquake*

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破壊現象が注目されている。

地震時の斜面の安定性は、一般に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。近年では、安定性検討に時刻歴応答解析を用いる事例もある¹⁾が、その場合には斜面の安定性を瞬間的な力のつり合いで評価せざるを得ない。しかしながら、地震時に瞬間的に力のつり合いが保たれなくなったとしても、必ずしも斜面が崩壊するわけではない。したがって、地震時の斜面の安定性評価においては、従来の力のつり合いによる評価ではなく、斜面の変形量から評価することが重要となる。

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、亀裂の存在があげられる。亀裂を含む岩盤斜面では、強度あるいは変形特性に亀裂が大きく関与²⁾し、すべり安全率の評価における抵抗力の算定においては、亀裂が存在するため引張強度はゼロか、または非常に小さな値に設定せざるを得ない。このような亀裂性岩盤斜面では、仮にすべり安全率の評価によって斜面がすべり破壊すると判定されても、実際の変形量がどの程度になるか精度良く予測することは非常に困難である。

本研究の大きな目的は、岩盤斜面の地震時変形量を精度良く予測する解析手法の高度化および検証にある。そのために、岩盤斜面模型の加振実験を行い、破壊が生じ

る入力レベル、破壊形式、および破壊時の変形量に着目して、「要素特性－応答解析－模型応答」の関係を整理する。なお、加振実験に用いる斜面模型では、亀裂性岩盤斜面模型を想定し、流れ目あるいは差し目などの角度のほか、傾度および大きさもパラメータとして考慮している。

本文では、上記目的のために実施した、岩盤斜面模型の材料の調整、および模型内の亀裂の作製方法について検討した結果を中心に述べる。さらに、これらの方法により作製した模型を用いて実施した遠心力模型実験の概況を報告する。

2. 亀裂性岩盤斜面模型の作製法の検討

(1) 模型材料の調整

岩盤斜面模型の加振実験においては、岩盤の物性に少なからず拘束圧依存性が存在すること、および破壊後の変形には重力が関与するためスケール効果の影響を把握する必要があることなどから、実証的な位置づけの模型実験とするためには遠心場での実験が必要となる。

実証的な位置づけの実験に際しては、通常、何らかの実物に対して相似則を適用する必要がある³⁾。しかし、本研究においては、あくまで斜面の破壊に関して「要素特性－応答解析－模型応答」の関係を整理することを主眼としているため、模型実験で使用する模型には実物に

対する相似性よりも、遠心力載荷試験装置で破壊が可能な強度を有することを重視した。ただし、実物の岩盤斜面の挙動に可能な限り近づけるため、岩盤の脆性的な破壊を模擬できるように模型材料を調整した。

本検討で用いた材料は、焼石膏（陶磁器型材用）、細砂（硅砂7号）および水を混練したものである。石膏については、人工岩盤材料として利用された実績がある⁴⁾。

焼石膏と水を混練する際、温度、混水量および攪拌速度・攪拌時間の変化が石膏の物理的性質に影響を与えることが知られている（吉野石膏(株) <http://www.yoshinogypsum.com/index.html>）。本検討においては、混水量（焼石膏に対する水の重量比 W/P ）以外の混練の条件を表-1のように規定し、混水量が硬化物の強度に与える影響を調べた。なお、細砂は内部摩擦角の増大および重量の増大のために混入したが、この他にも細砂の量は作業性（練り易さ、脱型に要する時間など）に大きく関係する。また、 W/P が大きくなると、硬化につれて硬化物の収縮が大きくなるが（特に、 $W/P > 3$ で顕著）、適切な量の細砂を混入することによりこれをある程度抑制することができる。したがって、本検討においては W/P を大きくした場合でもそれに応じた細砂の量を確保するため、水に対する細砂の重量比 S/W の値が2.5前後となるように細砂の量を調整した。また、図-1に示すように、硬化物の含水状態によりその強度が大きく変化することが確認されたため、硬化物は完全に乾燥させることを条件とした。

図-2に W/P と一軸圧縮強さの関係（1回の混練から得られた供試体3本の平均値）を示す。 $W/P = 5.0$ 以降のものについては、模型打設時の施工性向上のため、硬化遅延剤を焼石膏に対して0.3%混入している。検討に使用した焼石膏の標準混水量は $W/P = 0.74$ であり、この場合の一軸圧縮強さは約15,000kN/m²であるが、 W/P を増加させることにより約200kN/m²まで強度の低減が可能になることがわかる。また、図には一部の W/P について、それぞれで2回あるいは4回の混練を行い、各混練バッチから得られた供試体3本の平均値を示しているが、供試体レベルでは強度のばらつきは少なく、再現性は確保されているものと思われる。

本検討においては、加振実験に使用する遠心載荷試験装置の性能から、材料の配合を焼石膏：細砂：水 = 1：14：5.5とした。図-3にこの配合で作製した供試体の一軸圧縮試験による応力-ひずみ関係を示す。なお、この配合で作製した硬化体の密度は、約1.4g/cm³である。

(2) 亀裂の模擬

亀裂の模擬に関して、本検討では石膏との接着が極めて少なく、また摩擦係数が非常に小さなテフロンシート（摩擦係数0.10、ニチアス(株) <http://www.nichias.co.jp/>）を、

模型型枠内に別途定めた頻度・角度で配置し、これを模型内の2次元的な亀裂とみなした。

表-1 混練条件

水温	25℃
攪拌速度	1500rpm
攪拌時間	焼石膏+水：0.5min 焼石膏+水+細砂：3.5min
乾燥・養生	打設から2時間までの室温：25℃ 打設から2時間経過後：40℃乾燥炉 ※重量が一定になるまで乾燥 ※打設から2日後に脱型

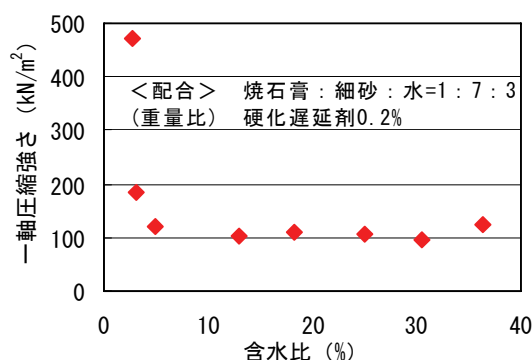


図-1 硬化物の含水状態と一軸圧縮強さの関係

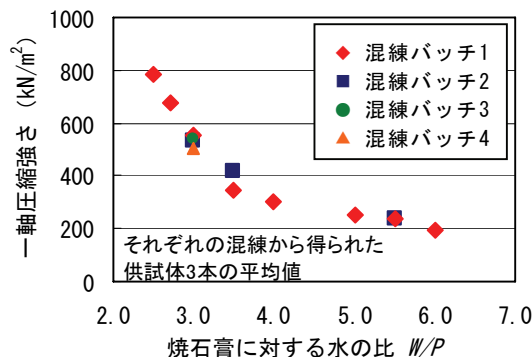


図-2 W/P と一軸圧縮強さの関係

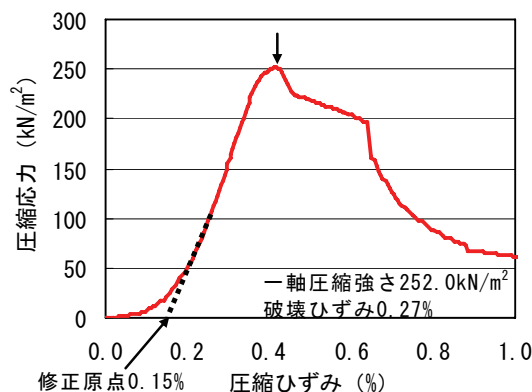


図-3 模型作製に使用した配合の応力-ひずみ関係

3. 遠心場振動破壊実験による破壊状況の確認

(1) 実験条件

前章の材料・方法により作製した岩盤斜面模型の破壊状況を確認するため、遠心加速度50G場において加振実験を行った。遠心力模型実験では、加振方向長さ2.0m×高さ0.58m×奥行き0.7mの剛土槽を仕切り板により奥行き方向に2つに分け、図-4に示す亀裂なしと流れ目亀裂を有する2種類の模型を設置した。なお、模型の両側面は土槽および仕切り板にテフロンシートを貼り付けることにより、可能な限り摩擦を低減させた。

加振実験は、振幅を順に大きくした実物換算1.2Hzの正弦波20波による段階加振（実物換算の加速度振幅30gal, 70gal, 100gal, 以降、装置限界400galまで50galずつ増大）を実施した。入力波形の一例を図-5に示す。

(2) 破壊状況の確認

亀裂なしの模型は実物換算の加速度振幅400gal入力

時に破壊に至った。図-6に実験後、土槽から取り出した模型の状態を示す。図より、亀裂なしの模型は円弧状のすべり面を形成して破壊していることがわかる。

一方、流れ目亀裂を有する模型は、実物換算の加速度振幅150gal入力時に破壊に至った。図-7および図-8には破壊に至った加振中にCCDカメラ（30フレーム/秒、実物換算でのフレーム間は約1.667秒）によって捉えた模型の状態を示す。図-7は模型に変状がない状態、一方、図-8はすべり面が形成される様子を示している（フレーム間は実物換算で約1.667秒）。図-8より流れ目亀裂を有する模型では、亀裂なしの模型と比較して明らかにすべり面の形成に亀裂が関与していることがわかる。

流れ目亀裂を有する模型では、すべり面の形成に亀裂が関与しているものの、斜面中腹に引張クラックが発生した状態で破壊に至っている。この原因については、今後、模型の上・中・下部よりサンプリングした試料により物性の確認を行うとともに、それらの物性を使った応答解析を行い、発生応力の状態等を確認する予定である。

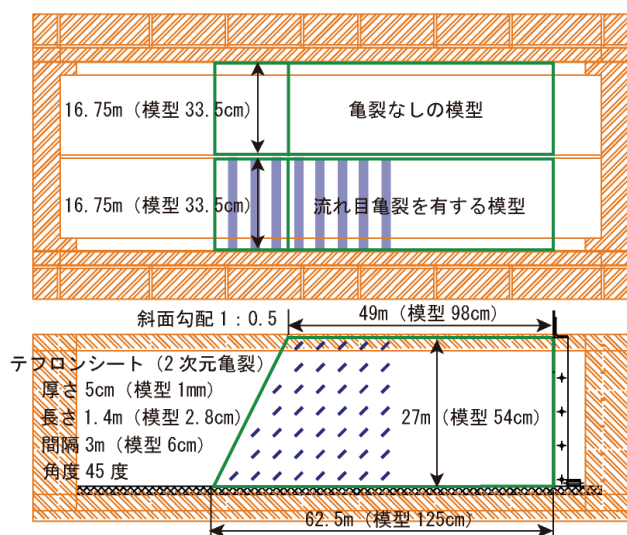


図-4 模型図

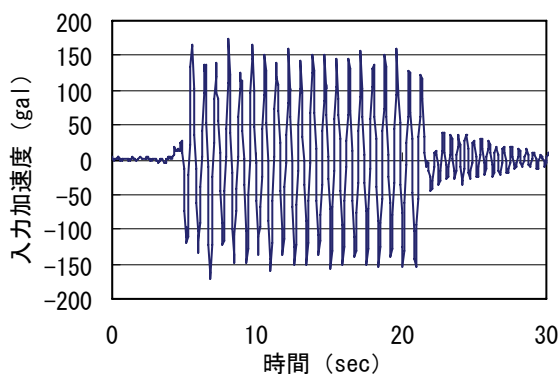


図-5 正弦波時刻歴の例

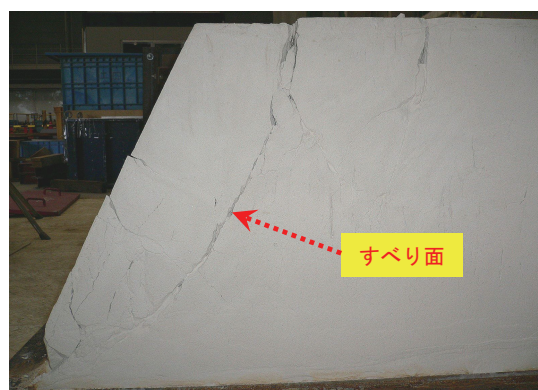


図-6 亀裂なしの模型のすべり面形状

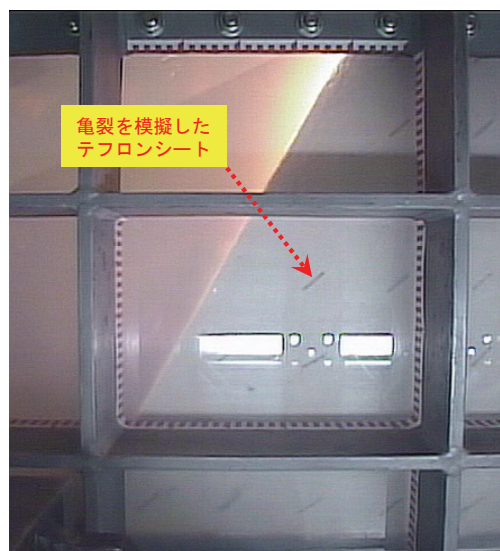


図-7 流れ目亀裂を有する模型の変状がない状態

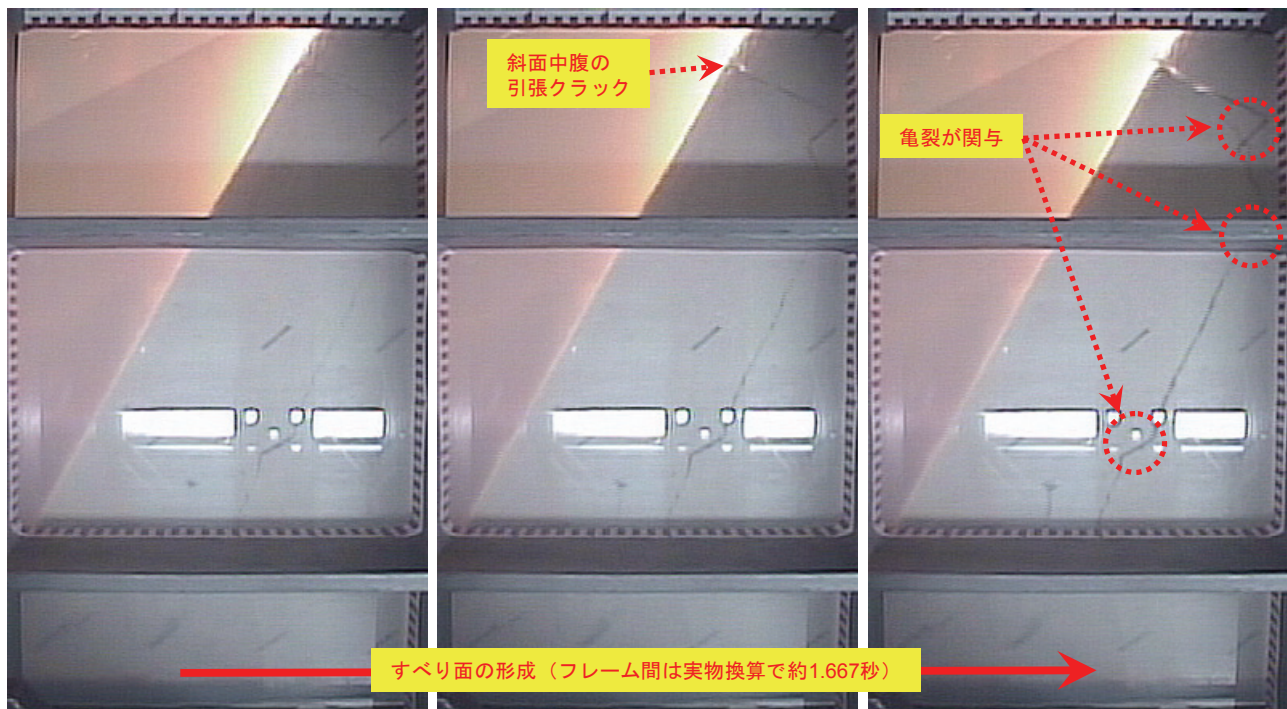


図-8 流れ目亀裂を有する模型のすべり面形状

4. まとめ

岩盤斜面の地震時破壊現象を追うため、遠心载荷試験装置の加振能力で破壊が可能な強度を有し、かつ岩盤の脆性的な破壊を模擬できるよう模型材料の検討を行った。焼石膏、細砂および水を混練した材料により、岩盤斜面模型を作製したところ、遠心場の加振実験において円弧すべり破壊が生じることが確認された。

また、テフロンシートを模型内に配置することによって亀裂を模擬し、流れ目亀裂を有する岩盤斜面模型を作製した。同様に加振実験を実施したところ、亀裂なしの模型よりも小さな入力レベルで破壊に至り、すべり面には亀裂が関与していることが確認された。

今後は、岩盤の物性により近づけるため、模型材料の密度を増大させること、および亀裂の数を増やすこと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) 岡田博和, 久野春彦, 小早川博亮, 河井正, 芝良昭：大井川中流域の地すべり斜面の安定性評価（その 2）—地震時安定性評価—, 電力土木, No.319, pp.40-44, 2005.
- 2) 吉中龍之進, 吉田淳, 佐々木猛, 佐々木勝司：寸法効果を考慮した岩盤不連続面の設計用物性値の設定, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.2, pp.457-470, 2006.
- 3) 地盤工学会編：地盤工学ハンドブック, pp.427-428, 報光社, 1999.
- 4) 米村享紘, 井上純哉：人工軟岩の平面ひずみ圧縮試験と変形特性の解明, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.867-868, 2004.

PROTOTYPE OF ROCK SLOPE MODEL WITH DISCONTINUITIES FOR DYNAMIC CENTRIFUGE TESTS

Makoto ISHIMARU and Tadashi KAWAI

The purpose of this study is to examine dynamic failure characteristics of rock slope models with discontinuities for improvement and verification of analytical methods. For this purpose, we investigated materials of the rock slope model and how to simulate two-dimensional discontinuities in the model.

In order to confirm the examined method, a dynamic centrifuge test was conducted 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.