

岩盤の地震時崩壊実験のための 遠心振動台の開発（その1）

西本 壮志^{1*}・岡田 哲実¹・石丸 真¹

¹電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

*E-mail: soshi-n@criepi.denken.or.jp

本研究では岩盤の地震時崩壊実験のための遠心振動台の開発をした。開発された遠心振動台は電中研所有の既存の遠心力载荷装置に設置され、最大50Gの遠心場において模型に対し、サイン波もしくは地震波等の振動を水平1方向に与えることができる。振動台の性能確認のために、水、セメント、粘土からなる人工泥岩斜面模型を作製し、遠心加速度50G場において、100Hzのサイン波（実現象2Hz相当）、実物換算100～1100 gal相当の加振を同模型に対し実施した。その結果、粘着力を有する人工岩においても明確なすべり面が発生し、斜面崩壊が生じることが確認され、本装置の有効性が示された。

Key Words : centrifugal model test, shaking table, earthquake, rock failure

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震の後に制定された原子力施設の新規制基準およびその適合性審査では、耐震設計上の重要度分類Sクラス施設の設計にあたり、精度の高い基準地震動の策定、サイト敷地の地下構造を三次元的に把握等することが必要となっている。また、再稼働後の安全性向上評価において実施予定の確率論的リスク評価（PRA）では、設計を超える地震に対する重要施設の基礎地盤等の健全性評価が必要である。このため、地盤の破壊箇所や変形量を評価できる時刻歴非線形解析や、破壊した後の斜面の崩落挙動を評価できる不連続体解析等の新しい解析手法の開発・実用化が急務であり、新しい解析手法の適用に際しては実験による検証が求められる¹⁾。新しい解析手法の検証には、基礎地盤および周辺斜面の縮小模型の加振実験を行う必要があるが、（1G）重力場での実験では実物の応力を作用させることができない。しかし、 $1/n$ の縮小模型に対して n Gの遠心加速度場で加振実験を行うことにより、実物に近い応力を作用させることが可能となるため、応力依存性を示す地盤材料の実験方法として、従来より遠心加速度場での縮小模型実験が重用されてきた。

電力中央研究所では有効半径3.2 m、実験試料の最大積載150 G・ton（遠心加速度100G時に最大1.5 ton）搭載可能なプラットフォームを有する遠心力载荷装置を所有しているが、これまでバックエンド研究の静的な長期挙動評

価実験に特化して使用してきたため、加振実験を行うための振動台は所有していなかった。今回、遠心力加振実験に対応するため、遠心場の相似則を適用した縮尺模型で実地盤の地震時の応力状態を再現することが可能な振動台を現有遠心装置に導入し、人工泥岩を用いた性能確認試験を実施した。本報では、遠心振動台の仕様および性能確認試験の結果について報告する。

2. 遠心力模型実験

（1）遠心力場での相似則

遠心力模型加振実験において実物と模型が同じ材料であるとした場合、変位や応力などに関連するパラメータの動的場における相似率は表-1のようになる。従って、実寸法の $1/n$ の模型を遠心力载荷装置により n 倍の遠心加速度場に置けば、入力や計測される加振加速度・周波数は実物の n 倍となる（表-1）。例えば $n = 50$ として加振周波数100 Hzのサイン波、 ± 35 Gの加振加速度を入力した場合、実物では、2 Hz、 ± 0.7 G（700 gal）の周波数・加速度に相当する模擬地震波を入力したこととなる。一方で、動的場の遠心力模型実験では、相似則上、水（間隙流体）の粘性に関するパラメーターが実物に対して n 倍となることが知られている。厳密には同パラメーターを考慮し粘性流体等を使用して実験する必要があるが、本研究の対象は性能評価実験であり、また基礎地盤や斜面の地震時崩壊現象にフォーカスしていることから、液状

表-1 動的条件下における遠心力場の相似率.

物理量	model/prototype	相似率
遠心加速度	g_m/g_p	$n/1$
長さ	l_m/l_p	$1/n$
応力	σ_m/σ_p	1
ひずみ	$\varepsilon_m/\varepsilon_p$	1
時間（動的現象）	t_m/t_p	$1/n$
加振加速度	a_m/a_p	$n/1$
加振周波数	λ_m/λ_p	$n/1$

化実験等のようにその挙動に大きく影響しないものとして、人工岩模型作製時において水を用い、完成した模型をそのまま使用する。

(2) 遠心力载荷装置および遠心振動台

振動台を増設した遠心力载荷装置は、最長6ヶ月の静的条件で連続運転可能な「超長期遠心载荷岩盤実験装置」（CENTURY5000-THM）である（図-1上）²⁾。同装置は、回転アームが4柱ビーム式、最大有効回転半径3.2mの装置であり、直径約10 mのコンクリートピット内に格納されている。付与できる最大遠心加速度は静的条件で100 G（167.2 rpm）、動的条件下で50 G（121.8 rpm）である。模型を搭載するプラットフォーム面積は2.64 m²（幅1.60 m×奥行1.65 m）、最大積載可能量は150 G・tonである。プラットフォームは油圧着座方式であり、回転軸には動力・制御用スリップリング、通信用無線LAN、油圧・水

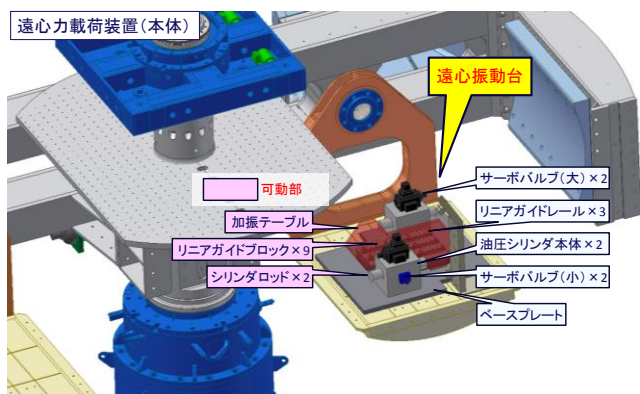


図-1 本実験で用いた遠心力载荷装置の写真（上）、および遠心振動台を含む鳥瞰図（下）。

圧・空圧用ロータリージョイントが設置されており、機外から回転体内部へ電力や油圧等が供給される。

遠心振動台は、遠心力载荷装置のプラットフォーム上に設置し、最大50Gの遠心場において実験模型に対し、サイン波もしくは地震波等の振動を水平1方向（遠心力によりプラットフォームが振り上がった後、天地の方向）に与えることにより模型の動的挙動評価を行う（図-1下）。振動台本体は、ベースプレート、油圧シリンダ、リニアガイド、加振テーブル、サーボバルブ、振動制御盤等で構成され、回転体外の油圧装置からロータリージョイントおよび遠心装置（回転体内）に増設されたアキュムレータを介して振動台へ油圧を供給し、加振力を発生させる。加振テーブルの変位量は入力する電圧の大きさで制御される。模型の動的挙動の計測は、遠心装置上に設置した動的ロガー（最大100kサンプリング/秒）および高速度カメラ（最大解像度：1280×1024、最大2000フレーム/秒）を用いる。また、地上操作室内に設置された制御・計測PCを用い、無線LANを通じて随時制御・計測を実施する。遠心振動台、土槽の主な仕様については、表-2を参照されたい。

(3) 模型

遠心振動台の性能確認試験において使用した模型は、幅700×高350×奥行300 mm、質量約110 kgの人工泥岩の斜面模型である（図-2）。人工泥岩の材料は、水、普通セメント、微粉末粘土であり、およそ4：1：5の割合で、所定の分量をミキサーで攪拌、土槽に打設、整形し（斜面角度：約40°）、模型を作製した。人工泥岩はほぼ密封状態で7日間養生した。養生7日後における物性値は、一軸圧縮強さ：約200～250kPa、密度：約1.0（乾燥）～1.6（湿潤）g/cm³、初期含水比：約64～66%である。

人工泥岩斜面模型は、高速度カメラで撮影した画像が解析しやすいように、全体をラッカースプレー（白）で塗装し、乾燥させた後、表面にさらにラッカースプレー（黒）で変位計測用のターゲットを塗装した（図-2下）。

表-2 遠心振動台および土槽の主な仕様。

振動台 諸元			
振動台 重量	1972 kg		
加振テーブル寸法	幅420×長900 mm		
最大搭載重量	500 kg	模型+土槽	
加振シリンダ推力	500 KN	2本合計	
最大変位	±3 mm		
最大速度	±80 kine, cm/s		
最大加速度	±35 G	100Hz加振時	
加振周波数範囲	DC～200 Hz		
標準土槽 諸元			
内 寸	幅300×高400×長700 mm		片面強化ガラス
単体重量	約215 kg		ジュラルミン製

(4) 実験条件

実験は、遠心加速度50 G場において、始めに振動台の動作等を確認するためのホワイトノイズ加振（実物換算100 gal相当以下）を実施した。その後、100 Hzのサイン波（実物換算周波数2 Hz、エンベロープ波形4波+サイン波形20波+エンベロープ波形4波の合成波）を、指令電圧値2.0V、4.0V、6.0V、8.0V、10.0V、11.0Vの順に入力し、加速度計および高速度カメラで模型を計測した。

3. 性能確認テストの結果

(1) 指令値に対する模型への入力加速度

性能確認テストにおいて2.0～11.0 Vの入力電圧 E に対し

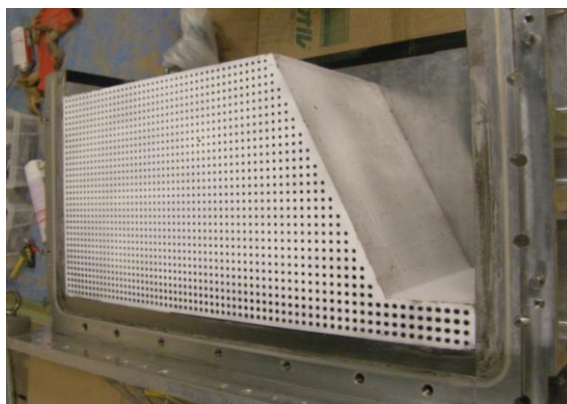
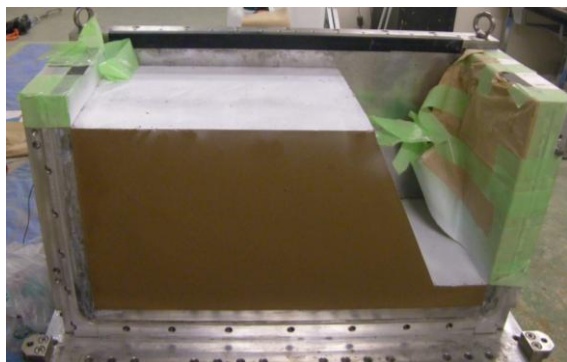
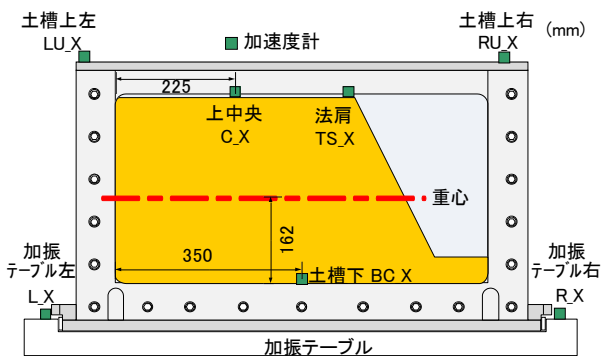


図-2 本実験で用いた人工泥岩斜面模型の模式図およびセンサー配置図（上）、整形された模型の写真（中）、塗装された模型の写真（下）。

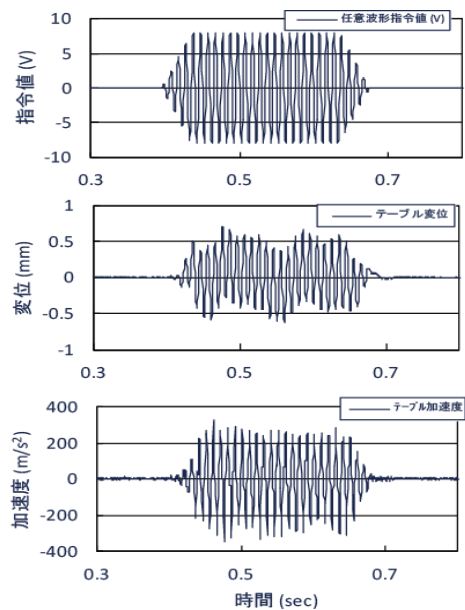


図-3 入力時（8.0V）の指令波形（上）、変位（中）、加速度波形（下）。

得られる加速度 a は、概ね線形関係を持つ。本実験では

$$a = 53.5E - 41.9 \quad (1)$$

であった。

波形のうち、例として8.0 Vにおける指令波形、振動台の変位、指令波形で得られた加速度波形（振動台備付けの加速度計）を示す（図-3）。8.0 Vの入力サイン波形（図-3上）に対し、全体としてやや波打っているものの0.3秒間に約±0.5 mmの振動台の変位（図-3中）、振動台の変位に対し得られた加速度（図-3下）は最大±372 m/s²となり、大きさの変動はあるが概ね模型試料に良好なサイン波の振動が加わっていると考えられる。

(2) 模型で計測された加速度および高速度カメラの画像

図-4に8.0 V入力における天端中央（C_X）および法肩（TS_X）（図-2上）の計測された加速度を示す。図中の経過時間および加速度は実物に換算した場合の相当値である。

入力加速度が実物換算最大±7.4 m/s²相当（740 gal、遠心加速度50 G場の実験であるため計測された±372 m/s²の1/50の値）（図-3下）に対し、天端中央で約±12～15 m/s²（1200～1500 gal）相当、法肩で約±9～11 m/s²相当（900～1100 gal）の加速度が計測された。サイン波入力前に実施したホワイトノイズ加振においてホワイトノイズ加振の結果をもとにフーリエ変換によるパワースペクトルを算出したところ固有振動数が130 Hz程度であり、入力周波数と近い入力振動が増幅されて模型に大きな振動が与えられたと考えられる。

図-5に高速度カメラで撮影された加振終了後の画像（上：10.0 V、最大±10.4 m/s²相当加振；下：11.0 V、最

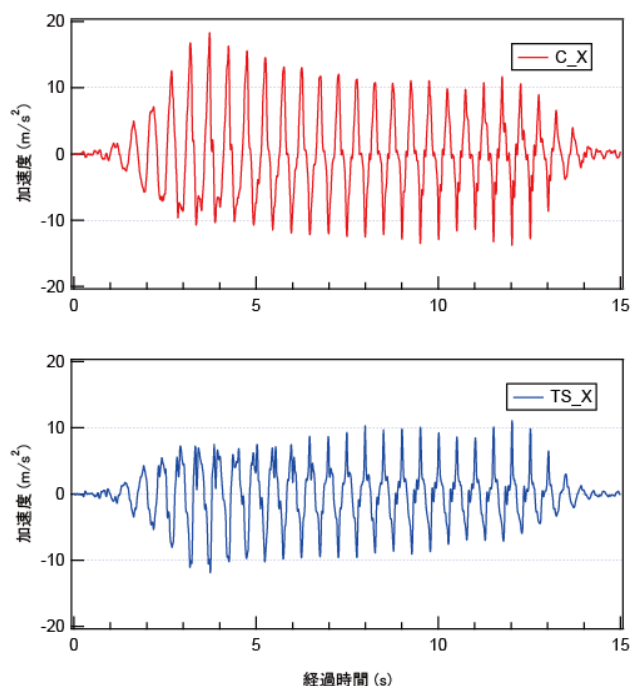


図-4 8.0V 入力時における天端中央（上）および法肩（下）の加速度。

大士 11.4 m/s^2 相当加振）を示す。その結果、粘着力を有する人工岩においても明確なすべり面が発生し、斜面崩壊が生じることが確認され、本装置の有効性が示された。

4. まとめ、および今後の課題

本研究では岩盤の地震時崩壊実験のための一軸水平遠心振動台の開発をした。性能確認のために、人工泥岩斜面模型に対し所定の大きさの加振を実施した結果、粘着力を有する人工岩においても明確なすべり面が発生し、斜面崩壊が生じることが確認された。今後、高速度カメラの画像を用いた変位やひずみ解析を行い、新しい数値解析手法の検証に資する予定である。

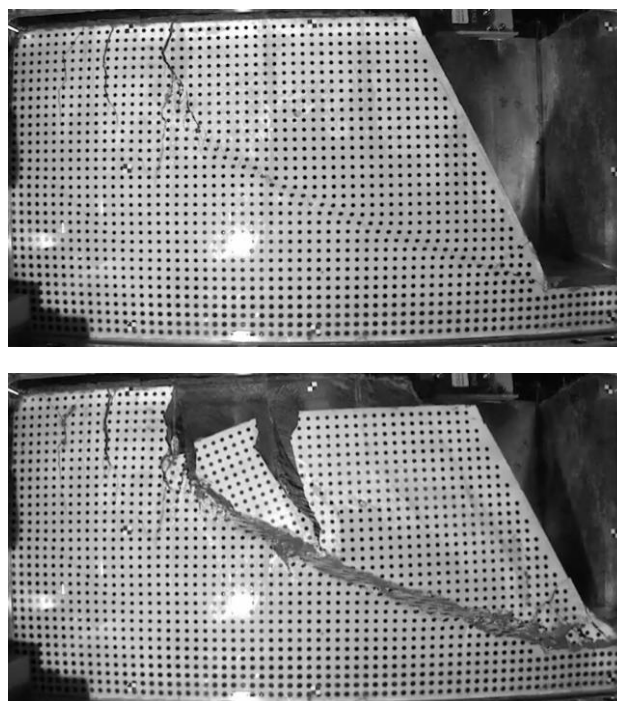


図-5 高速度カメラで撮影された画像，（上）10.0V および（下）11.0V 入力時。

謝辞：本実験を行うに当たり、（株）ジオデザイン・荒井郁岳氏には実験業務に協力して頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石丸ほか：重要構造物周辺斜面の地震時崩壊後の影響評価手法の構築，電中研報告，N11051，2015.
- 2) 西本ほか：遠心力载荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価（その1），電中研報告，N10018，2011.

DEVELOPMENT OF CENTRIFUGE SHAKING TABLE FOR MODEL TEST OF ROCK FAILURE CAUSED BY SEISMIC EXCITATION

Soshi NISHIMOTO, Tetsuji OKADA and Makoto ISHIMARU

The objective of this paper is to develop the centrifuge shaking table for the model test of rock failure caused by seismic excitation. The shaking table was installed in the geotechnical centrifuge of CRIEPI. In the centrifugal field up to 50G, the shaking table can give a sine wave and seismic wave in one horizontal direction for a model. In order to check the performance of the shaking table, we prepared the slope model of an artificial mudstone, and conducted the excitation test of the model, which is excited with the excitation frequency of 100 Hz sin wave and equivalent excitation force from 100 to 1100 gal. As the result, a clear sliding surface occurs in the rock having an adhesive strength, and then the availability of the shaking table was confirmed.