不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層 斜面模型の遠心力載荷加振実験(3) 一遠心力載荷加振実験-

納谷 朋広1*・岡田 哲実2・関口 陽3

¹株式会社ダイヤコンサルタント 地質解析事業部(〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3) ²一般財団法人 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646) ³株式会社セレス(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646) *E-mail: t.naya@diaconsult.co.jp

原子力発電所周辺の岩盤斜面の耐震設計では、動的解析から得られた応力状態を用いてすべり安全率評価が行われているが、現実の不連続性岩盤の地震時挙動については未だ不明な点が多い.そこで、本研究では、不連続性岩盤の地震時挙動の基礎的検討のため、不連続性岩盤の模型として、金属六角棒を積み上げた斜面模型の遠心力載荷加振実験を行うとともに、様々な解析手法を用いてその解釈やシミュレーションを実施する.本論文では、その斜面模型の遠心力載荷加振実験の結果を報告する.遠心実験では、1つの斜面模型に対して遠心力25G(50Hz正弦波)、遠心力50G(100Hz正弦波)の2つの条件で加振した.斜面の挙動については画像解析による計測を行った.2つの異なった条件であるが、結果的に類似の崩壊形態を示した.

Key Words : rock mass, discontinuity, centrifugal force, vibration test, slope model, image analysis

1. はじめに

原子力発電所周辺の岩盤斜面の耐震設計では、動的解 析から得られた応力状態を用いて、すべり安全率評価が 行われている.動的解析の方法は、基本的には連続体力 学に基づいているが、不連続性岩盤の動的挙動について は未だ不明な点が多い.そこで、本研究では、不連続性 岩盤の動的挙動を明らかにするため、不連続性岩盤の模 型として、金属六角棒を積み上げた斜面模型の遠心力載 荷の加振実験を行った.

本論文では、金属六角棒を積み上げた斜面模型の遠心 力載荷加振実験を行った結果を報告する.遠心力25G (加振周波数50Hz)、遠心力50G(加振周波数100Hz) の2つの条件で実験を行った.

なお,本研究は,土木学会 岩盤力学委員会 岩盤動力 学に関する研究小委員会(第3期)のWG活動(2019年6 月-2022年3月,http://rock-jsce.org/index.php?FrontPage)とし て実施した.

2. 実験方法

(1) 斜面模型

斜面模型の材料は、1G場の斜面模型¹¹と同じで、対辺 6mm×長さ80mmのステンレス製の六角棒を積層した. 斜面模型の寸法は図-1に示す通り、高さ150mm、天端長 さ390mm、底盤長さ474mm、斜面勾配60°で作製した.

斜面模型の境界状態は、底盤の六角棒は架台とエポキ シ樹脂で固定、背面は固定していない.斜面模型の手前 の側面は画像を撮影可能なようにガラス板となっており、 摩擦を低減させるためにワセリンを塗布してからシリコ ンシートを張り、さらに、ワセリンを塗布した.斜面模 型の奥側側面は、0.5mmの隙間をとり、摩擦を無くした.



図-1 斜面模型

(2) 計測装置

a)振動台

斜面模型を加振する振動台は、1G場での加振実験⁰と同じ遠心力載荷仕様の一次元振動台である.

b)遠心力載荷装置

遠心力の載荷は、有効回転半径3.2m、動的な条件での 遠心力加速度は最大50Gの装置を使用した(図-2).

c)加速度計

加速度計については、基盤の入力加速度を土槽の中央 に、斜面模型の応答加速度を天端に設置した. 土槽中央 にはひずみゲージ式の加速度計(SSK製, A6H-200)を1 箇所に、天端には圧電型加速度計(PCB製, 353B15)を 3箇所に、それぞれ水平方向と鉛直方向に設置した. 設 置状況を図-1に示す.

加速度計の番号は、図-1に記載のとおり法面側から1, 2、3番とした.天端の加速度計の設置方法は、六角棒2 本と三角柱を接着剤で一体化したものの上に接着した. 図-1の左側に示す.

d) 変位計

法肩の水平変位を測定するために、レーザー変位計 (キーエンス製:LK-H085)を土槽に固定し、法肩と土 槽の相対水平変位を測定した(図-1).

e)動画撮影

加振中の斜面模型の状況を,高速度カメラ(ナックイ メージテクノロジー社製,MEMRECAM Qlm,画素数 1280×1024,2000fps)で,斜面模型の側面から撮影した. カメラと斜面模型のの距離は435mmであるため,画素分 解能は,1画素あたり0.15mmとなる.

(3) 画像解析

a)画像解析方法

画像解析のための標点は、lmm角の標点がlmmピッチ で4箇所とし、六角棒に貼付した(図-3).高速度カメ ラで撮影した画像を用いて、六角棒の標点に対して、 PTV(Particle Tracking Velocimetry)による画像解析(ライブ ラリー社製、Move-tr/2D)を実施した.PTV法は、連続 的に撮影した画像を二値化し、マーカーを指定して、マ ーカーの面積重心を計算しながら自動追跡して変位を算



図-2 遠心力載荷装置

出する手法となる.

b) 画像解析結果の検証

PTV法では、画像濃淡のデータを数値化して波形として処理するため、サブピクセル処理の近似計算をすることにより、画素分解能以上の分解能が得られる.分解能がどの程度あるかを検証した.検証方法は、マイクロメーター(分解能1/1000mm)の先端に、1mm角の標点を貼付し、マイクロメーターのハンドルを回し、段階的に横方向に変位させた.高速度カメラとマイクロメーターの距離は一定にして実施した.画像解析の変位とマイクロメータの変位のと関係を図-4に示す.マイクロメーター変位量に対する画像解析の変位の標準偏差は0.019~0.035mmとなった.マイクロメーターと画像解析の変位関係の傾きは0.9973で、決定係数R²は0.9998の線形関係を示した.

3. 加振条件

同じ寸法の斜面模型(図-1)に対して遠心力載荷25G (加振周波数50Hz),遠心力載荷50G(加振周波数 100Hz)で加振実験を実施した.加振波形は10波の正弦 波で,最初と最後に3波のエンベローブの波を加えて全 部で16波とした.波形の一例を図-5に示す.加振ステッ プごとに,振幅を設定する電圧を増加させて,加振力を 増加させた.加振ステップを表-1に示す.



(1) 斜面模型の崩壊の加速度レベル

25G (50Hz)の実験ではstep12 (電圧6V)で,50G (100Hz)の実験ではstep11 (電圧8V)で斜面模型が崩 壊した.斜面模型の加振実験の結果を表-1に示す.天端 と入力の加速度は、(最大加速度-最小加速度)2として算 定した.天端の加速度と基盤の入力加速度の関係を、図 -6に示す.上図が水平方向で、下図が鉛直方向を示す. なお、鉛直の入力加速度は意図して入力したものではな く、水平方向加振に伴って発生したものである.緑の線 は加速度計の測定の上限 (5000m/s²以上)を示しており、 斜面崩壊付近での、加速度の値については信頼性が低い. 斜面模型の崩壊時は塗り潰しのマーカーで示した.

25Gでは、水平方向の基盤入力加速度が100m/s²から 180m/s²程度の間に天端の水平加速度は150m/s²から 5000m/s²程度に急増している.50Gでは、水平方向の基 盤入力加速度が230m/s²から340m/s²程度の間に天端の水平 加速度は5000m/s²に急増している.遠心力25G,50G,ど ちらも、斜面模型が崩壊する前兆段階として、天端の加 速度の急増が確認できる.加速度の急増は、六角棒同士 の衝突が原因の一つと考えられる.

遠心力 加速度	step	設定 電圧 [V]	入力 加速度 [m/s ²]	崩壊の 有無	加振後の 累積 法肩水平 変位[mm]
25G	step3	0.01	0.9	-	0.000
	step4	0.05	1.0	-	0.000
	step5	0.1	0.9	-	0.000
	step6	0.5	2.6	-	0.000
	step7	1	13.2	-	0.000
	step8	2	37.7	-	0.000
	step9	3	99.7	-	0.000
	step10	4	179.2	-	-0.065
	step11	5	225.9	-	-0.143
	step12	6	311.5	斜面崩壊	-6.157
	step13	7	385.8	-	-
	step14	8	428.7	-	-
50G	step3	0.5	4.5	-	0.000
	step4	1	13.1	-	0.000
	step5	2	25.5	-	0.000
	step6	3	69.1	-	-0.018
	step7	4	94.0	-	0.015
	step8	5	159.9	-	0.024
	step9	6	225.3	-	0.052
	step10	7	335.9	-	0.102
	step11	8	349.4	斜面崩壞	-10.426
	step12	9	367.5	-	-
	step13	10	428.6	-	-
	step14	11	519.7	-	-

表-1 加振実験の結果

(2) 斜面模型の崩壊形態

斜面模型の崩壊形態を図-7に示す. 左が遠心力25G, 右が遠心力50Gの加振ステップ後の状況を示した. 上から1段目が斜面崩壊の1つ前, 2段目が斜面の崩壊したス テップで,その下に,さらに加振力を増加させた斜面模 型の崩壊形態を示す. どちらの斜面模型も法肩付近で斜 面模型の崩壊が開始するが,加振力の増加に伴い,天端 から法面にかけて崩壊の範囲が増加している. 斜面模型 の崩壊形態は, 25Gでも50Gでも類似の形態を示し,遠 心力の大小の影響は小さい結果となった.

(3) 画像解析の結果

a) 画像解析変位の検証

画像解析の変位の値は、六角棒1本につき標点4箇所の 平均値とした.画像解析の変位とマイクロメーターの関 係から得られた標準偏差の平均値は0.028mmであるが、 画像解析の時刻歴の変位が0.028mm以上の振幅となるの は、遠心力25Gではstep8から、遠心力50Gではstep7から であった.変位の時刻歴を図-8に示す.

さらに、画像解析から得られた変位を検証するために、 画像解析から得られた変位を2回微分(中心差分法)し て加速度に換算して、加速度計の値と比較した.比較に 使用した画像の位置は斜面模型の底盤の平均値(25G:10 箇所、50G:9箇所)を使用した.基盤入力の水平方向の 加速度計と比較すると、25G step8ではパルス状の加速度 が確認できるが、両者は調和的であった(図-9).





図-7 斜面模型の崩壊状況(左: 25G,右: 50G)

b)レーザー変位計との比較

画像解析の変位とレーザー変位計で測定した法肩の六 角棒の時刻歴を比較した(図-10).遠心力25G step10で は、レーザー変位計の変位は、正弦波の前半で周波数の 高い波となり、後半の波と異なる挙動であった.遠心力 50Gのときのレーザー変位計の変位は、画像解析より大 きな振幅となっている.これより、レーザー変位計は信 頼性に問題があることが示唆された.変位計の固定方法 は、土槽の梁からステンレス製の冶具に設置しているが、 測定方法については、今後の課題となった.

c) 天端の加速度の比較

図-11の青色の六角棒の変位の時刻歴を2回微分して加速度を算定した.斜面模型が崩壊する2つ前のステップからの時刻歴を図-12に示す.崩壊するステップに近づくにつれて、プラス側(斜面側)に加速度が大きくなる.マイナス側(背面側)は土槽の壁であり、壁側には変位する余地が少ない影響と考えられる.図-11の青色の六角棒の加速度と隣接する天端X1加速度計を、ステップ



図-10 画像解析とレーザー変位計の比較(上: 25G,下: 50G)

ごとに比較した(図-13). 画像解析の加速度はプラス 側の最大値で,基盤入力と天端X1の加速度計は(最大値-最小値)2とした. 斜面模型が崩壊に近づくにつれて,加 速度計は,変位から算出される加速度との乖離が増大し ている. 画像解析のサンプリングレート以上の高周波成 分の影響を受けていると考えられる.

d) 変位の応答特性

画像解析から得られた水平変位の時刻歴から FFT 振 幅を算定して応答特性を比較した. 比較した底盤と天端 の水平変位は、図-11 に示す位置の六角棒の変位の時刻 歴から FFT 振幅を算定した. FFT 振幅と周波数の関係の 一例を図-14 に示す. 遠心力 25G の底盤変位では,加振 周波数と同じ周波数 50Hz に FFT 振幅の山があり、遠心 力 50G でも加振周波数と同じ周波数 100Hz に底盤変位 の山が確認できる. 天端の変位の FFT 振幅を底盤の変 位の FFT 振幅で除して, FFT 振幅比とした. FFT 振幅比 と周波数の関係を図-15 に示す.遠心力 25G では、加振 力の増大に伴って 10Hz, 70~100Hz, 200Hz 付近で, FFT 振幅比が増大している. 遠心力 50G では,加振力の 増大に伴って 30~80Hz, 130Hz 付近で FFT 振幅比が増大 している. 等価線形解析 2の固有値解析の1次モードの 卓越振動数は, 25G step12 で 15Hz 程度, 50G step11 で 30Hz程度であるため、低周波部分で整合している.

e) ベクトル図

斜面が崩壊するステップで、画像解析の変位からベクトル図を描画した. 図-16は遠心力25Gで、図-17は遠心力50Gの斜面崩壊前の法面が膨らんだ時を示した. コンターは、ベクトルの変位を示す. ベクトルの矢印の長さは、コンターの長さの5倍で描画した. 1mm以上の変位に注目すると、遠心力50Gでは、天端付近でのみ発生しているが、遠心力25Gでは、法面の中央付近にまで、拡大している. 遠心力の大小による違いと考えられる. 両者の最終的な斜面模型の崩壊形態は同等であるが、斜面内部では、若干異なる変位の挙動を確認できた.









図-16 ベクトル図 (遠心力25G)

5. おわりに

遠心力25G(50Hz正弦波),遠心力50G(100Hz正弦 波)の2つの条件で斜面模型の加振実験を行った.その 結果,以下のことが分かった.

- ・遠心力の違いによる斜面模型の崩壊形態については, 25G,50Gともに類似の崩壊形態であることが分かった.
- ・画像解析から得られた斜面模型の内部の変位では, 25Gでは斜面の中腹まで1mm以上の変位が確認できた.
- ・斜面模型が崩壊するときには、急激な天端の加速度の 上昇が伴うことが分かった.



図-17 ベクトル図(遠心力50G)

参考文献

- 納谷朋広,岡田哲実:不連続性岩盤を模擬した金属六 角棒積層の斜面模型の動的挙動評価(2)-斜面模型の加 振実験-,第15回岩の力学国内シンポジウム講演集, p394,2021.
- 2)清田亮二,髙橋裕徳,原田雅也:不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層斜面模型の遠心力載荷加振実験(7) -等価線形解析による評価-,第48回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,2022(投稿中).

CENTRIFUGE TESTING TO DYNAMIC BEHAVIOR OF SLOPE MODEL PILED UP STEELHEXAGONAL BAR SIMULATING DISCONTINUOUS ROCK MASS (PART 3)-CENTRIFUGAL FORCE VIBRATION TEST OF SLOPE MODEL-

Tomohiro NAYA, Tetsuji OKADA and Akira SEKIGUCHI

In this study, in order to clarify the dynamic behavior of the discontinuous rock mass, we conducted a centrifugal load excitation experiment of a slope model in which steel hexagonal bar were piled as a model of the discontinuous rock mass, and various analyzes. In this paper, we report the results of a centrifugal load excitation experiment of a slope model in which steel hexagonal bar are piled. In the centrifugal experiment, the experiment was conducted under two conditions: centrifugal force 25G and centrifugal force 50G. Image analysis was performed on the behavior of the slope. Although they showed two different conditions, they showed similar decay morphology.