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-

清田 亮二1*・髙橋 裕徳1・原田 雅也1

1中電技術コンサルタント株式会社 原子力本部 解析ソリューション部 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30) *E-mail: kiyota@cecnet.co.jp

本研究では、不連続性岩盤の耐震性評価の課題を抽出し、その解決策を模索するため、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加振実験を行うとともに、様々な解析手法を用いて、シミュレーションや実験結果の解釈を試みている。本論文では、金属六角棒の集合体の要素試験で得られたひずみに依存するせん断剛性および履歴減衰の非線形特性に対して、等価線形化法を適用した2次元動的FEM解析により、斜面模型の遠心力載荷加振実験(25G場、50G場)のシミュレーションを行った。解析により得られたせん断ひずみ分布、加速度応答やすべり安全率から、斜面模型の破壊形態を評価し、加振実験の再現性および当手法の適用性や課題について考察を行った。

Key Words: rock mass, discontinuity, dynamic characteristics, rock slope, equivalent-linear analysis

はじめに

岩盤構造物や斜面の耐震設計を行う場合、一般に岩盤 を等価な連続体と見なして評価しているが、不連続面を 有する硬岩については、現実的な動的挙動に関して未解 明な点が多い1). 実務においては、岩盤の応力-ひずみ 関係の非線形性は考慮せず、弾性波速度に基づく剛性を 用いて動的解析を行い、得られた応力から安全率等で照 査を行うことが多いが、これらは保守的な評価となって いる可能性が高い、今後、耐震性の評価体系が、確定論 から決定論に移行していく状況であり、重要構造物を設 置する岩盤の現実的な耐力の評価が必要と考えられる³. そこで、本研究では、不連続性岩盤の模型を対象にし た1G場での加振実験³⁾に続き、遠心力載荷装置を用いた 25G場, 50G場での加振実験⁴⁾を行い, 各種の評価手法の 比較を行っている. 本論文は、この一環として、原子力 発電所重要施設の基礎地盤および周辺斜面の評価でも用 いられている等価線形解析により、1G場での加振実験 シミュレーションのに続き、遠心力載荷加振実験のシミ ュレーションを行い、当手法の適用性や課題について考 察したものである.

なお,本研究は,土木学会 岩盤力学委員会 岩盤動力 学小委員会 (第3期) ⁹ のWG活動 (2019年6月-2022年3月) として実施するものである.

2. 等価線形解析による評価の概要

本論文で用いる等価線形解析は、地盤を等価な連続体と見なして、動的FEMにより周波数応答解析を行い、ひずみに依存するせん断剛性および減衰定数を等価な線形関係に置き換えて計算する手法である。当手法は、非線形性を有する地盤に対して比較的短時間での解析が可能であり、様々な分野で汎用されている。

原子力発電所重要施設の基礎地盤および周辺斜面の評価においても、現状では周波数応答解析法による等価線形解析により評価を行うことが基本とされている⁷. 具体的には、自重応力と等価線形解析による地震時応力を足し合わせ、予め設定したすべり面上のせん断抵抗力の和とせん断力の和の比をすべり安全率として、すべり安全率の時刻歴最小値と評価基準の比較による評価が行われている.

本論文では、等価線形解析により、不連続面がかみ合った岩盤をイメージした金属製の六角棒の集合体で構成される斜面模型の遠心力載荷加振実験⁴⁾のシミュレーションを行った。なお、解析に必要なパラメータについては、金属製の六角棒の集合体を模型材料とした各種室内試験²⁾の結果に基づいて決定した。

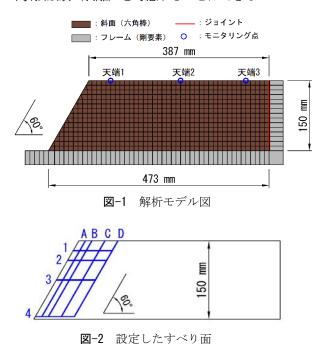
3. 評価方法

本論文では,等価線形解析による模型斜面の遠心力載 荷加振実験³⁾のシミュレーションで得られた加速度応答 やせん断ひずみ分布およびすべり安全率から,実験によ る破壊形態の再現性や当手法の適用性を評価する.ここ で,すべり安全率は,自重解析(静的解析)による応力 と等価線形解析(動的解析)による各時刻の応力を要素 毎に重ね合わせて,すべり面が通る各要素の破壊状況に 応じた強度により算定する.具体的には,要素に破壊が 生じていない場合はピーク強度とし,せん断破壊もしく は引張破壊(最小主応力が引張)する場合は残留強度と する.また,すべり面に作用する直応力が引張の場合は 強度はゼロとする.

4. 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルを図-1に示す.解析モデルは、加振実験やにおいて金属製の六角棒(SUS304)を積み重ねて作製した高さ150mmの斜面模型をモデル化した.積み重ねた六角棒は、等価な連続体として、平面ひずみ要素でモデル化し、底面および背面側には土槽のフレームを模擬した剛な要素を設定した.また、六角棒の底面と土層の境界部は固着とし、背面と土槽の境界部にはジョイント要素を設けた.ジョイント要素のバネ定数は、せん断方向ゼロ、圧縮方向については1.0×10°kPaの大きな値を設定した.なお、本解析では、ジョイント要素は線形バネとしているため、ジョイント要素のせん断破壊(すべり)や引張破壊(剥離)を考慮することはできない.



境界条件は、自重解析(静的)では底面固定、側方鉛 直ローラー、応答解析(動的)では底面固定(剛基盤)、 側方水平ローラーとした.

(2) すべり面

すべり安全率を算定するすべり面を図-2に示す.すべり面については、金属棒の積み上げパターンおよび遠心力載荷実験における崩壊形態や加振中の亀裂発生状況から、天端のA~Dの各点から角度60°で切り下がり、斜面の1~4の各点に角度0°すなわち水平で抜ける2直線の複合すべり面を斜面表層付近に設定した.

(3) 解析用物性值

解析用物性値を表-1に、動的変形特性を図-3に示す. 解析用物性値は、六角棒の仕様および六角棒により構成されるマスを等価連続体とみなした三軸圧縮試験結果²⁾に基づき設定したものであり、本研究における等価連続体解析の共通パラメータ⁸⁾である.

単位体積重量は、六角棒の仕様であるSUS304の密度 7.83-8.00 g/cm³より、六角棒を積み重ねた時の微小な隙間 を考慮して下限値の7.83 g/cm³を設定した. ポアソン比は、

項目 物性値 単位体積重量 γ (g/cm³) 7.83 初期せん断弾性係数 G₀ (MPa) 1532 σ m^{0.73} ポアソン比 ν 0.30 ピーク強度 τ p (MPa) 0.003+ σ n·tan36°

ピーク強度と同じ

表-1 解析用物性值

σ_m: 自重解析における各要素の平均拘束圧

σ_n: すべり面に対する直応力

残留強度 τr (MPa)

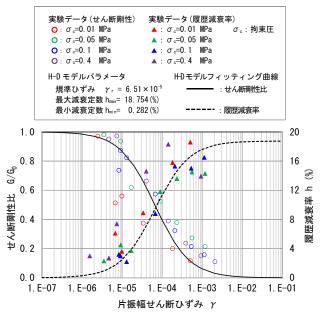


図-3 六角棒集合体の動的変形特性

繰り返し載荷の三軸圧縮試験で各振幅ステップにおける 値が得られているものの、値のばらつきが大きい. また、 単調載荷の三軸圧縮試験では、接線ポアソン比が0.5を 大きく超えており、試験結果から連続体としての物性値 を設定するのは難しい. ここでは、六角棒の仕様である SUS304のポアソン比0.29-0.3より, 六角棒を積み重ねた 時の微小な隙間や変形しやすさを考慮して上限値の0.3 を設定した. ピーク強度は、単調載荷の三軸圧縮試験に おける各拘束圧下のモールの応力円から不連続面の角度 60°におけるせん断強度を算定し、強度定数を設定した. 残留強度については、六角棒の噛み合わせの強度である ピーク強度と概ね同等と考え、ピーク強度と同じとした. 動的変形特性については、図-3に示すとおり、繰り返し 載荷の三軸圧縮試験結果に基づき、片振幅せん断ひずみ とせん断弾性係数および履歴減衰定数の関係をHardin-Dmevichモデル (H-Dモデル) によりフィッティングし た曲線を設定した. また、初期せん断弾性係数について は、繰り返し載荷の三軸圧縮試験結果より、各拘束圧に おける初期せん断弾性係数を推定し、これらの関係から 拘束圧依存式を設定したものである.

(4) 解析ケース

解析ケースを表-2に示す.遠心力載荷加振実験がは,25Gおよび50Gの遠心力場で行われており,振動台の加速度レベルを電圧制御により段階的に引き上げている.本論文では,各遠心力場における加振実験での加速度ステップのうち,破壊に至ったステップを含む5つのステップの解析結果を示す.なお,加振実験では,25G場ではstep12で,50G場ではstep11で法肩付近の数本の金属棒が崩落している。また,入力波形については,加振実験において土層底面中央位置で観測された水平波形と鉛直波形を同時入力とした.

5. 解析結果

(1) 固有値解析

解析モデルの固有値解析結果を表-3に示す.表-3は,等価線形解析における初期剛性および各加速度ステップにおける収束剛性による固有値解析の結果,最も卓越する1次モードの振動数を示している.表より,加速度のレベルが大きくなるにつれて,固有振動数が小さくなり,すなわち長周期化しており剛性が低下していることが推察される.

(2) 最大せん断ひずみ分布

25G場および50G場における各ケースの最大せん断ひずみ分布を図-4および図-5に示す。ここで、最大せん断

表-2 解析ケース

遠心力場	加速度 ステップ	入力最大 水平加速度 (m/s²)	加振実験 での崩壊有無	
	step3	0.9	_	
25G	step6	2.6	_	
	step7	13.2		
	step9	99.7	_	
	step12	311.5	斜面破壊	
50G	step3	4.5		
	step5	25.5	_	
	step7	94.0		
	step9	225.3	_	
	step11	349.4	斜面破壊	

表-3 固有值解析結果

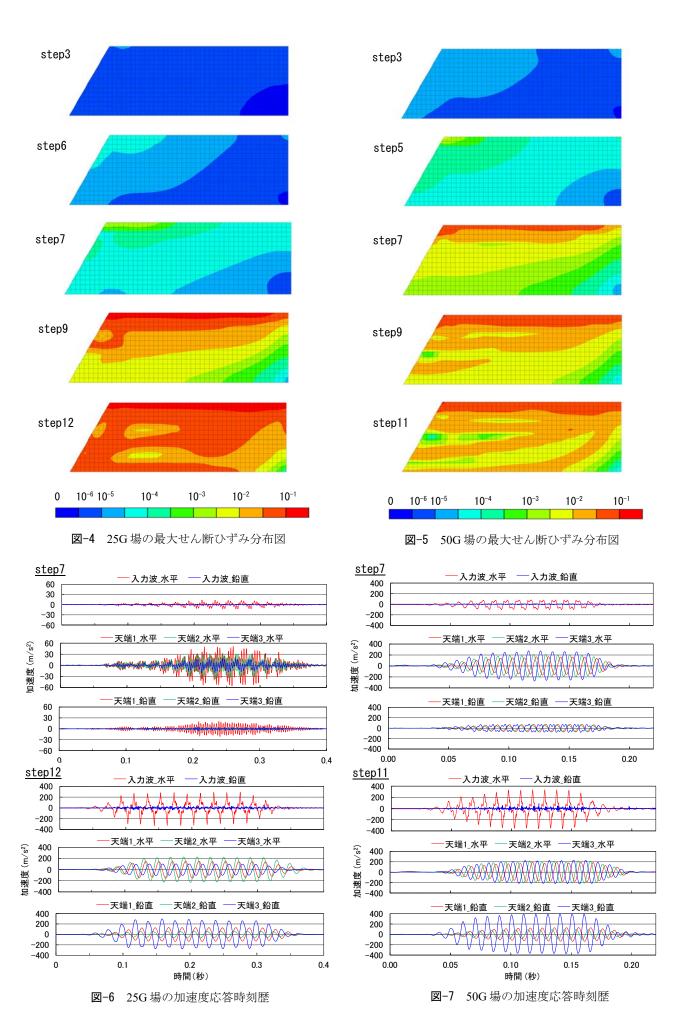
25G 場		50G 場		
ケース	卓越振動数 (Hz)	ケース	卓越振動数 (Hz)	
初期	341.0	初期	441.4	
step3	330.6	step3	404.1	
step6	295.9	step5	210.1	
step7	187.1	step7	41.4	
step9	19.6	step9	31.9	
step12	15.3	step11	31.3	

ひずみは、各要素の時刻歴最大せん断ひずみを0.65倍した有効せん断ひずみとしている.

図-4の25G場の結果より、加速度レベルの小さいstep3では微小なひずみしか発生していないが、step6以降、加速度ステップが進むにつれて、法肩からせん断ひずみが大きくなり、step9以降は1%を超えるせん断ひずみが広く分布している.加振実験で崩壊が発生したstep12では、モデル範囲の大半が5%を超える大きなせん断ひずみが分布している.

図-5の50G場の結果より、25G場の結果と同様に、加速度ステップが大きくなるにつれて、法肩からせん断ひずみが大きくなっている.加振実験で崩壊が発生したstep11では、天端表層に5%を超える大きなせん断ひずみが発生している.それ以外の範囲は、1%程度のせん断ひずみが分布しているが、25G場ほど大きなせん断ひずみの分布にはなっていない.

加振実験では、25G場、50G場とも法肩付近の表層が 崩壊しているが、解析でも法肩付近からせん断ひずみが 大きくなり、加速度レベルが上がるにつれて、これらの



箇所のひずみが大きくなる傾向にある. また, **図-4**および**図-5**のひずみ分布は, 加振実験の画像解析による各六角棒の変位ベクトル⁴の大小関係と概ね整合している.

(3) 加速度応答

25G場におけるstep7およびstep12の入力加速度波形および図-2に示したモニタリング点における加速度応答時刻歴を図-6に示す。step7では、入力加速度に対して、水平加速度応答および鉛直加速度応答はともに増幅している。一方step12では、入力加速度に対して、鉛直加速度応答は増幅しているものの、水平加速度応答については減衰が見られる。

50G場におけるstep7およびstep11の入力加速度波形および加速度応答時刻歴を図-7に示す。step7では、入力加速度に対して、水平加速度応答および鉛直加速度応答はともに増幅している。step11では、25G場と同様に入力加速度に対して鉛直加速度応答は大きく増幅しているものの、水平加速度応答については減衰が見られる。

斜面崩壊が発生する加速度レベルでは、せん断ひずみレベルも大きくなり、図-3のひずみ依存特性により剛性が低下し、表-3のとおり、モデルの固有周期は長周期化し、加速度応答波形もこれに伴って長周期化している。また、ひずみレベルが大きくなると減衰も大きくなるため、水平加速度応答は入力加速度に対して減衰している。

(4) すべり安全率による評価

図-2で示したすべり面のすべり安全率を表-4および表-5に示す. また, すべり安全率が1.0を下回るすべり面形状を図-8に示す. なお, すべり安全率については, 時刻歴の最小値を示している.

表より、25G場ではstep9、50G場ではstep5で表層のすべり面のすべり安全率が1.0を下回っているが、加振実験で崩壊したstep12もしくはstep11よりも早い段階ですべりが発生する結果となった.

加振実験では、法肩付近の数本の金属棒が崩落しているが、この形態はすべり面A-1もしくはA-2のすべりに近い、解析の結果、A-2のすべり面は、加振実験よりも早いステップではあるが、すべり安全率は1.0を下回っている。また、先述のとおり、法肩付近のせん断ひずみが大きくなってることなどから、本解析では、加振実験の現象を概ね再現できていると考える。

なお、解析では、A-3、A-4やB-3、B-4のように、天端から深部まで切り下がっているすべり面で安全率が1.0を下回っている. 加振実験では、このような崩壊は発生していないが、加振中の動画を確認すると、天端の法肩付近から深部まで、斜面と同勾配(60°)の亀裂(剥離)が数回に渡り発生するケースがある. 解析では、せん断弱面角度 60° を想定した強度特性を一律に設定している

が、水平に抜ける部分の強度は弱面ではないため、実際 は設定値よりも大きいと考えられる.このような強度の 異方性を考慮すればより実験に近い結果となることが推 察される.

以上の加振実験と解析結果の相違の要因には、解析や物性値設定の精度の問題も十分含まれるが、解析で安全率が1.0を下回ることが、実際の斜面崩壊と等価ではないこと、すなわち保守的な評価となっていることも示唆している.

表-4 25G 場のすべり安全率一覧

すべり面			25G場		
	step3	step6	step7	step9	step12
A-1	1.56	1.44	1.43	1.11	1.11
A-2	1.18	1.12	1.09	0.91	0.93
A-3	1.33	1.28	1.25	1.01	0.92
A-4	1.07	1.04	1.01	0.96	0.94
B-1	2.79	2.45	2.35	1.54	1.66
B-2	1.61	1.51	1.43	1.23	1.28
B-3	1.17	1.12	1.07	0.86	0.79
B-4	1.08	1.05	1.01	0.99	0.95
C-1	5.18	3.99	3.82	2.40	2.82
C-2	3.17	2.84	2.60	1.99	2.16
C-3	1.84	1.77	1.71	1.24	1.20
C-4	1.23	1.20	1.16	1.12	1.02
D-1	8.52	5.70	5.57	3.35	4.05
D-2	4.66	3.90	3.45	2.41	2.75
D-3	2.45	2.34	2.22	1.54	1.55
D-4	1.49	1.47	1.43	1.28	1.19

※すべり安全率1.0以下は赤字で表示

表-5 50G場のすべり安全率一覧

	20 30	0 //// /	751	70	
すべり面	50G場				
	step3	step5	step7	step9	step11
A-1	1.44	1.30	1.14	1.15	1.21
A-2	1.09	1.05	0.90	0.82	0.83
A-3	1.24	1.20	1.04	1.21	1.13
A-4	1.01	0.96	0.89	0.92	0.94
B-1	2.45	2.12	1.74	1.68	1.75
B-2	1.48	1.36	1.17	1.09	1.07
B-3	1.09	1.01	0.85	1.00	0.96
B-4	1.03	0.97	0.93	0.92	0.96
C-1	4.55	3.20	2.69	2.50	2.44
C-2	2.92	2.39	2.12	1.94	1.92
C-3	1.75	1.63	1.34	1.49	1.53
C-4	1.19	1.12	1.10	1.01	1.06
D-1	7.14	4.01	3.38	3.45	3.10
D-2	4.20	3.07	2.70	2.51	2.42
D-3	2.33	2.08	1.65	1.87	1.91
D-4	1.45	1.39	1.30	1.20	1.25

※すべり安全率1.0以下は赤字で表示

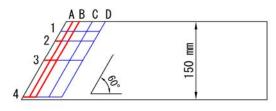


図-8 すべり安全率が 1.0 を下回るすべり面 (赤線で表示)

6. 本解析の課題

以上のとおり、今回の解析では、加振実験の現象を大 局的に捉えることができたものの、崩壊ステップの相違 など実験と若干異なる結果となった. 現時点で考えられ る本解析における課題を以下に挙げる.

- 1) すべり面の強度特性については、せん断面角度を想定した強度を一律に設定している。今回の実験および解析では確認できていないが、試験のばらつき、異方性、動的挙動下での不連続面の接触や噛み合わせの状態などが強度特性に影響すると考えられ、これらを踏まえた物性設定が必要である。
- 2) 加振実験の動画を確認すると、崩壊前に天端の法肩付近から深部まで、斜面と同勾配の亀裂(剥離)が数回に渡り発生するケースがある。このような場合、本検討のような連続体解析では、剛性や応答の再現性が低くなる要因の一つと考えられる。
- 3) 一般に等価線形解析におけるせん断ひずみの適用範囲は、概ね1%以下^{例えば9}とされている。本解析の加速度レベルが大きいケースでは、せん断ひずみレベルが大きくなり、加振実験とは異なり加速度応答の減衰が見られ、等価線形解析の適用範囲を超えた結果となっている。

7. おわりに

等価線形解析では、要素が破壊に至っても剛性低下を 考慮しないため、大きな外力に対しては応力を過度に受 け持つことになる。このため、本解析結果のように、加 速度レベルが小さい段階でもすべり安全率が小さくなり やすい。これらのことから、等価線形解析は、破壊過程 や破壊開始後の剛性低下の評価、変形量による精緻な照 査には適さないが、すべり破壊による斜面変形が生じる 可能性の有無の判定には適すると考えられ、保守的な評 価として実務でも汎用されている。本解析結果からは、 実現象との乖離の要因およびその影響度合が明確にはなっていないが、これらを明確にしていくことは、合理的な設計を行う上でも重要である。今後は、追加の加振実験や先述の課題を踏まえて更なる検討を行っていきたい。

参考文献

- 1) 吉中龍之進,岩田直樹,佐々木猛:岩盤の不連続性を 考慮した大型構造物基礎の地震応答解析-東北地方太 平洋沖地震を基本事例として-,土木学会論文集 C, 70巻,1号,pp.16-32,2014.
- 2) 岡田哲実,納谷朋広,和仁雅明,大塚康範: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(1)-研究の取り組み方法と材料の室内試験-,第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集,pp.387-392, 2021.
- 3) 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, pp.393-398, 2021.
- 4) 納谷朋広,岡田哲実,関口陽: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)ー遠心力載荷加振実験ー,第48回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,2022(投稿中).
- 5) 清田亮二,原田雅也,東圭太: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(5)-等価線形解析による評価-,第15回岩の力学国内シンポジウム講演集,pp.411-416,2021.
- 6) 土木学会 岩盤力学委員会:岩盤動力学小委員会 (第 3 期), http://rock-jsce.org/index.php?FrontPage
- 7) 日本電気協会・原子力規格委員会:原子力発電所耐震 設計技術指針JEAG4601-2015,日本電気協会,2015.
- 8) 岡田哲実,納谷朋広: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(2)-模型材料の力学試験-,第48回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,2022(投稿中).
- Ishihara, K.: Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis, *Proc.*, 9th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Zurich, pp. 237-259, 1982.

CENTRIFUGE TESTING TO DYNAMIC BEHAVIOR OF SLOPE MODEL PILED UP STEEL HEXAGONAL BAR SIMULATING DISCONTINOUS ROCK MASS (PART 7) - EVALUATION USING EQUIVALENT LINEAR ANALYSIS -

Ryoji KIYOTA, Yasunori TAKAHASHI and Masaya HARADA

The purposes of this research are to clarify problems of seismic assessment of discontinuous rock mass and to search the solution to the problems. Therefore, the vibration tests of slope model piled steel hexagonal bar simulating discontinuous rock mass were carried out, and using various analytical methods, the simulation of experimental results attempts made. In this paper, a simulation of the centrifuge vibration experiments of slope model was carried out by 2D dynamic FEM analysis based on equivalent linearization method. From results of the analysis, the fracture morphology of the slope model was evaluated, and the reproducibility of the experiment and the applicability and problems of this method were considered.