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(5) 一剛塑性有限要素法を用いた考察一

河村 精一^{1*}·水野 和憲²·大塚 悟³

¹基礎地盤コンサルタンツ株式会社(〒136-8577 東京都江東区亀戸1-5-7)
²岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科(〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2236-2)
³長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
*E-mail: koumura.seiichi@kiso.co.jp

重要施設周辺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.しかし,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.

本論文は、上界定理に基づく剛塑性有限要素法解析を用い、1G場及び遠心場の斜面模型加振実験に対し て、地震慣性力を増大させていく極限荷重問題として静的にシミュレーションを行った。入力物性は別途 実施された金属六角棒の各種要素試験で得られた強度特性を参考に遠心力載荷時の状態を考慮して設定し た.そして、異なる重力場の模型斜面実験結果との対比を通して、対象とする不連続体の動的挙動を連続 体の静的挙動としてマクロに表現する物性を、破壊モードの変化とともに考察した。

Key Words : discontinuous rock slope, seismic design, rigid-plastic finite element method, dynamic centrifuge model test, failure mode

1. はじめに

不連続性岩盤斜面の耐震性を評価する場合,不連続面 の卓越する方向を念頭にいくつかのすべり線を設定して 静的震度法によるすべり解析を行う.原子力発電所重要 施設周辺の場合,さらにその結果に基づきいくつかのす べり線候補を抽出し,等価線形解析や時刻歴非線形解析 などの地震応答解析を行い,その発生応力に基づいて事 前に想定したすべり線に対して安全率の計算やニューマ ーク法によるすべり量評価を行う.想定するすべり線は, 地震応答解析結果に基づき,厳しい時刻のモビライズド プレーンを参考に決めるなど,動的応答を考慮して設定 することも行われている.

不連続性岩盤の想定するすべり線は、節理や層理など の地質的分離面の影響を大きくうけるため、地質構造を 調査し、直線すべりや円弧すべりと組み合わせた複合す べり、トップリングの評価を行うことも行われる¹が、 不連続面に卓越する方向性が無い場合、等方かつ一様な 材料として、すべり線を円弧として仮定し設定すること がしばしば行われる.すべり線に適用する強度定数は、 岩盤分類に応じて室内試験や弾性波探査を含む原位置試 験をもとに経験的に設定されることが多い.設定される 破壊規準は、引張強度を考慮したGriffith規準が使われる こともあるが、実務では土質材料と同じくMohr-Coulomb 規準により粘着力と内部摩擦角を用いることが多い¹⁰. しかし、一様な不連続性岩盤のすべり線が円弧であった り、強度定数を三軸圧縮試験等からそのまま粘着力と内 部摩擦角で表現してよいのか疑問であり、その設定の考 え方が実務上まず重要となる.

本論文は、このような実務上のスキームを念頭に、土 木学会 岩盤力学委員会 岩盤動力学小委員会(第3期)³ のWG活動(2019年6月-2022年3月)として実施された不 連続性岩盤を模擬した金属六角棒を積み上げてつくられ た模型斜面の1G場及び遠心場(25Gおよび50G)の振動台 実験³⁴⁴を、一様で等価な連続体として剛塑性有限要素法 を用いてシミュレーションする.すべり線形状は、設定 した強度定数から最もすべりやすい形状が算出される. また、その際の等価震度も極限荷重として求められる. そして、シミュレーション結果と実験結果を比較考察す ることで、実務で一般的に用いられているすべり線と粘 着力及び内部摩擦角との関係、等価震度の設定を議論す るとともに、不連続性岩盤の挙動としてダイレイタンシ ー特性についても検討し、不連続性岩盤斜面の耐震性評価の課題を考察する.

2. 剛塑性有限要素法解析

本論文で使用した剛塑性有限要素法解析は,以下の特 徴がある.

・すべり面を仮定することなく崩壊荷重と崩壊モードを 算出できる.本論文では、地震時慣性力がどれくらいで、 どのような崩壊モードになるかが得られる.

・地盤の材料特性は、基本的に実務設計で摩擦性材料と

して一般に用いる粘着力 c と内部摩擦角 φ だけである.

・応力履歴を考慮する必要がない.

・弾塑性有限要素法のように応力を増分型で扱わないので、大きな変形を伴うような問題の崩壊荷重だけが必要な問題に適している.

・摩擦性材料として、ダイレイタンシー特性を陽に取り 込むことができる.

剛塑性有限要素法は、金属塑性加工の分野において大 きな塑性変形を伴う問題に適用されてきた.本論文で用 いた剛塑性有限要素法は、極限解析の上界定理に基づく 考察から誘導した田村ら⁵⁰⁰の考え方によるもので、地盤 材料のような摩擦性材料に対して適用可能なように開発 されたものである.降伏関数にはDrucker-Prager型を用い、 非関連流れ則にも拡張することでダイレイタンシー特性 を陽に表し、変化させることができる.構成式の非決定 応力については、構成式を用いて制約条件(ダイレイタ ンシー特性)と共に境界値問題を解く必要があり、保科 ら⁷⁰⁹による制約条件下の最適化問題をペナルティ法を用 いて解く方法を用いている.

3. 自重解析による強度定数検討

実務で岩盤斜面や自然斜面の安定性を検討する際, 入力する強度定数を岩盤分類や岩盤試験,室内試験結果 から設定するが,現場や室内試験結果がない場合や設定 した物性確認のため,現状の斜面形状で崩壊していない 事実に基づき,その斜面形状や地層構成から自重だけで 崩壊しない強度物性を設定することを行う⁹.本論文に おいても,1G場および遠心場(25Gおよび50G)において 自重だけで崩壊しない強度定数をせん断強度低減型剛塑 性有限要素法解析¹⁰を用いて検討した.解析モデルを図-1に,解析ケースと入力物性を表-1に示す.

表-1の解析ケース1から3の入力物性は、別途実施された三軸圧縮試験結果¹¹⁾を用いたものであり、本WG活動⁹⁾における連続体解析を行う際の共通物性である.用いた

金属六角棒はステンレス製であり,単位体積重量は 77.8kN/m³である.遠心場においては,この単位体積重 量を25Gで1945 kN/m³(=77.8×25),50Gで3890 kN/m³(=77.8 ×50)として入力した.三軸圧縮試験結果に基づき設定 した強度定数では,1G場では安定しているものの,25G および50Gの遠心場では崩壊してしまう結果となった. これは,別途実施した通常の円弧滑り簡便法でも同様の 結果であった.

解析ケース4および5は、三軸圧縮試験結果の内部摩擦 角を固定し、粘着力cがどれくらいあれば自重崩壊しな いのかを検討した結果である.なお、本解析はすべて関 連流れ則を用いており、ダイレイタンシー角ødは内部 摩擦角øと同値である.解析結果である図-1は、等価塑 性ひずみ速度分布(コンター)と変位速度分布(ベクトル) であり、破壊形態を示している.ここで、各解析におけ る等価ひずみ速度は、対象斜面の破壊時のものであるた め、相対的な値となる.したがって、解析によって得 られる分布の範囲は各解析での最小値(0)から最大値 とした.赤色など暖系色ほど等価ひずみ速度が大きく、 白い部分はほぼひずみ速度がゼロである.

遠心力載荷実験では、自重崩壊していない事実から、 安全率1.0を確保する強度定数は、三軸圧縮試験に基づ く内部摩擦角を用いるなら、25Gの場合15.0kN/m²程度以 上、50Gの場合25.0kN/m²程度以上必要であるという結果 となった.金属六角棒のかみ合い効果の発揮される度合 いが自重の大きさによって異なっていることが考えられ、 三軸圧縮試験結果よりも大きな粘着力になっているもの と推察される.重力加速度が増えるに従い、安全率が低 下する傾向にあり、内部摩擦角が同じであれば、粘着力 はより大きい値でなければ崩壊してしまうことになる. ただし、ここでの粘着力は物理的なものではなく、解析 上の擬似的な粘着力を表している.

4. 加振実験の解析検討

(1) 解析ケースと考え方

鉛直方向に対象とする模型実験の重力加速度1Gや遠 心力25G,50Gを与え、水平方向の慣性力が何Gになる と破壊するかを求める極限荷重とその時の崩壊モードを 求める解析として扱った.用いた解析は上界定理に基づ

表-1 解析ケース,入力物性,解析結果(安全率)

5-7	重力加	入力物性		解析結果		
No	速度	c kN/m ²	ϕ $^{\circ}$	安全率	備考	
1	1G	3.0	36	1.97	二曲口游学和	
2	25G	3.0	36	0.82	二甲川工和市以沢和	
3	50G	3.0	36	0.79	未(WU共通)	
4	25G	15.0	36	1.04	安全率 1.0 確保	
5	50G	25.0	36	1.00	時粘着力	



図-1 解析モデルと解析結果(等価ひずみ速度分布と変位速度分布)

くものであるので、荷重係数の最小値を求めている. 解 析モデルおよび入力する単位体積重量は3.自重解析によ る強度定数検討と同じである. 各解析ケースの入力物性 を表-2に示す. なお、遠心力載荷装置の特性上、鉛直方 向にも振動があるが、本論文の検討では、水平方向のみ の加振を想定した.

解析ケース4から7の内部摩擦角の影響検討は,前章自 重解析による強度定数検討結果から得られた安全率1.0 を上回る最低限の粘着力で計算した.解析ケース8以降 の粘着力は,各遠心場において行った実験結果で得られ た等価震度を説明できる程度を想定して設定している. 解析ケース10,11,13,14,15の内部摩擦角45°は,金属六角棒 の積み方および六角柱間の摩擦試験結果¹⁰に基づく考察 から設定したもの(摩擦試験結果15°+ダイレイタンシー 角30°¢,)⁹で,本WGの不連続体解析を実施する際の内部 摩擦角の値46°とほぼ同じ値である.解析ケース14,15は, その内部摩擦角を用いて非関連流れ則を導入した剛塑性 有限要素法で解析しており,ダイレイタンシー角¢,4を, 六角柱の幾何形状から30°に設定している.

(2) 解析結果

解析結果を表-2および図-2に示す.図-2は、図-1と同様のものであり解析ケースのうち代表的なもの(ケースNo赤字)を示した.解析ケース2と3は、自重解析で崩壊する結果となった物性であり、等価震度が負になっている

のは安全率1.0となるためには、斜面崩壊方向と逆向き (図で右向き)の慣性力を必要としていることを意味し ている.

まず、解析ケース4から7の内部摩擦角の影響を検討し た結果では、内部摩擦角を上げると斜面崩壊形態はあま り変化が無いが、斜面崩壊時の等価震度は増えている. しかし、内部摩擦角を50°とかなり大きくしても、等価 震度は0.28程度であり、実験結果を考えると粘着力は 15kN/m²よりかなり大きいと想定される. そこで、粘着 力の影響について、通常実務で行うことが多い三軸圧縮 試験の結果から設定した内部摩擦角36°と不連続性の特 徴を念頭に設定した内部摩擦角45°で影響検討したのが ケース8から11である.粘着力を倍にすれば内部摩擦角 の設定に関わらず等価震度もほぼ倍になっており、粘着 力の設定が対象としている模型実験斜面の崩壊する等価 震度に大きく影響していることがわかる.また、粘着力 を大きくすると、模型斜面全体がやや上向きに膨らみな がら崩壊しようとする傾向が顕著になる. 重力加速度の 影響は、粘着力、内部摩擦角ともに比例関係にあるが、 粘着力の方が感度が高い.

重力加速度の影響は、内部摩擦角が同じケース8と12 を比較すると、重力加速度を倍(25G→50G)にすることと 粘着力を倍(50kN/m²→100 kN/m²)にすることは斜面崩壊時 等価震度および破壊モードともに同じ結果になっている ことが興味深い.これは、解析結果図を示していないが、

表-2 解析ケースと結果

ケース	香力加油座	入力物性		解析結果	供老		
No	里刀加速度	c kN/m ²	ϕ °	ϕ_{d}°	斜面崩壞時等価震度	加方	
1	1G	3.0	3	6	0.790		
2	25G	3.0	36		-0.260	三軸圧縮試験結果(WG 共通)	
3	50G	3.0	3	6	-0.322		
4	25G	15.0	3	6	0.052		
5	25G	15.0	40		0.118	内辺麻焼みの影響	
6	25G	15.0	4	5	0.199	「内部学院月の影響」	
7	25G	15.0	5	50	0.278]	
8	25G	50	3	6	0.549	北美力の影響	
9	25G	100	3	6	1.104	和有力の影響	
10	25G	50	4	5	0.663	北美力の影響	
11	25G	100	45		1.257	和有力の影響	
12	50G	100	36		0.549	金力加速度の影響	
13	50G	100	4	5	0.663	里川加速度の影響	
14	25G	50	45	30	0.614	ガイレイロンスケームの影響	
15	50G	50	45	30	0.324	クイレイクシン一円の影響	



図-2 解析結果(等価ひずみ速度分布と変位速度分布)

別の内部摩擦角のケースである10と13でも同様である. ダイレイタンシーの影響は、ケース10と14を比較すると ダイレイタンシー角を小さくすると斜面崩壊時等価震度 もやや小さくなり、崩壊する斜面の変位方向もやや上向 きの傾向が減る.また、関連流れ則のケースも内部摩擦 角と同じダイレイタンシー角を有していることから、全 ケースを通じて変位速度ベクトルを見ると、ダイレイタ ンシー角が小さくなると下向き(重力方向)の崩壊にな るが、内部摩擦角の大きい関連流れ則に代表されるダイ レイタンシー角が大きい場合、のり肩から法尻までやや 上向きの崩壊になる傾向である.

(3) 模型実験との比較と考察

模型実験結果の分析¹³から、ある入力加速度までは模型全体の応答加速度に一定の傾向がみられ、それより入力加速度が大きくなると、応答の傾向が変化する.この応答の相関変化を超えると、明らかに不連続体としての挙動(金属六角棒の一部が別々の動きをはじめる)が卓越するようになる.そして、斜面崩壊は、写真-1に示すような六角柱が隣接する六角柱と衝突して飛び出すような状態であった.したがって、この応答の相関変化時までが連続体モデルで表現できる限界と考え、この時点に着目して解析結果と比較した(表-3).また、別途検討された六角棒の転倒モードに着目した極限解析法の結果ゆも併せて示した.なお、1G場の実験結果は25Gおよび50Gの遠心場が1G場換算で1Hzだったことから低周波数のケースである10Hzの結果で比較している.

その結果,三軸圧縮試験の結果による内部摩擦角,不 連続性の特徴を念頭に設定した内部摩擦角どちらの設定 でも,模型実験結果とほぼ同等の等価震度を得るために



写真-1 崩壊時の金属六角棒積層斜面の挙動

表3	実験お	よび転	倒時の;	水平常	家度13
	~~~~~~			J - 1 / J	$\sim \sim$

重力場(G)	1	25	50
実験:応答相関変化時	0.90	0.93	0.52
実験:崩壊時	1.28	1.15	0.67
極限平衡法:転倒時		0.58	

は、三軸圧縮試験から得られた粘着力3kN/m²に対して50 から100kN/m²程度の粘着力が必要であることがわかった. また,既に述べたように,通常岩盤斜面の安定性評価を 行う場合、岩盤分類に基づき、現状斜面や付近の同様の 斜面が崩壊していないという事実に基づき強度定数を設 定することがよく行われる. その方法で設定した強度定 数(ケース4から7)では、今回実施した一連の模型斜面の 耐震性評価を非常に安全側に評価することになる. 既往 の研究で石膏を用いた六角棒のいろいろな積み方の供試 体による三軸圧縮試験結果¹⁴によれば、本論文でとりあ げた三軸圧縮試験の金属六角棒の積み方は、拘束圧 0kN/m²において最も低いせん断強度を示していることか ら,破壊モードによってかなり過小評価している可能性 がある.また、表-3の25Gと50Gで比較すると、水平震度 が約半分になっていることは、解析において粘着力を同 じとすれば同様の傾向を示しており、1Gのみ傾向が異 なるようにみられる.

写真-2に示す入力水平加速度と模型斜面天端の加速度 の相関関係が変化する際の挙動に着目すると、斜面と平 行な分離面が複数顕著になり、転倒モードが卓越してい ることがわかる.また、この斜面と平行な分離面が入る 範囲において、この転倒モードに伴うと思われる天端が 膨らむような挙動(連続体としてみると体積膨張挙動) が特に顕著に現れている.これは、連続体としてマクロ にみれば、粘着力を一定程度以上の大きさにした解析結 果にみられる変位速度分布の挙動に似ており、内部摩擦 角やダイレイタンシー角が大きいほど顕著である. 亀裂 性岩盤を模擬した場合、三軸圧縮試験結果に基づく内部 摩擦角よりも、不連続性を考慮した内部摩擦角設定で見 かけの粘着力を設定する方が良さそうである.

ただし、同じ金属六角棒を用いた斜面高さが2倍の1G 場模型振動台実験の剛塑性有限要素法解析結果¹⁵からは、 三軸圧縮試験結果に基づく粘着力より小さく、内部摩擦 角はより大きい傾向にあった.しかし、本論文で取り上 げた応答相関変化時の考察を行っていないことから、今 後1Gの場合を含め十分な考察が必要である.



写真-2 応答相関変化時の金属六角棒積層斜面の挙動

## 5. まとめ

ダイレイタンシー効果を陽に考慮でき、崩壊荷重と崩 壊モードを同時に得ることができる上界定理に基づく剛 塑性有限要素法解析を用いて、通常実務で用いられる方 法を参考に内部摩擦角と粘着力を設定、強度定数をパラ メータにした数値実験を行った.そして対象とする模型 斜面の遠心力載荷加振実験と対比した.

その結果,対象とする不連続体の動的挙動を連続体の 静的挙動としてマクロに表現する物性は,特に遠心力載 荷加振時において,三軸圧縮試験結果に基づく粘着力を より大きく設定しないと,実験結果で得られた等価震度 を説明できなかった.実務で用いる三軸圧縮試験結果 や現状斜面が安定していることから設定した強度定数で は,地震時安定性を過度な安全側評価することになるこ とがわかった.内部摩擦角は,三軸圧縮試験の結果によ るものよりも,不連続体としてみた摩擦係数とダイレイ タンシー角から設定した大きな内部摩擦角の方が傾向と して整合した.また,ダイレイタンシー角も関連流れ 則で設定した大きい方が実験挙動と整合した.

今回の遠心力載荷加振実験に対する検討では、粘着力 をより大きくしないと実験結果を説明できない状況であ ったが、この物理的メカニズムの解明は、連続体モデル の範疇で不連続体岩盤の物性評価をする上で課題である.

#### 参考文献

- 川本眺万,吉中龍之進,日比野敏:岩盤力学,土木学 会編新体系土木工学 20, 1985.
- 2) http://committees.jsce.or.jp/rm03/
- 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,2021.1.
- 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) -遠心力載荷加振実験-,第48回岩盤力学に関するシ ンポジウム,2022.1.(投稿中)

- Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T.: Limit analysis of soil structure by rigid plastic finite element method, Soils and Foundations, Vol.24, No.1, pp.34-42, 1984.3.
- Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T.: Rigid-plastic finite element method for frictional materials, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.1-12, 1987.9.
- 7)保科隆,瀧本英朗,田中達也,磯部公一,大塚悟:剛 塑性有限要素解析による地山補強土工法の補強効果の 評価,応用力学論文集,土木学会,Vol.13, pp.379-390, 2010.8.
- 保科隆,大塚悟,磯部公一:低強度シーム層を内在する自然斜面の斜面安定解析,地盤工学ジャーナル,地 盤工学会,Vol.6,N0.2, pp.191-200, 2011.6.
- 9) 道路土工委員会:道路土工-切土工・斜面安定工指針 (平成 21 年度版),日本道路協会,pp.397-403, 2009.6.
- 10)大塚悟,宮田善郁,池本宏文,岩部司:剛塑性有限要 素法による斜面安定解析,地すべり,Vol.38,N0.3, pp.75-83,2001
- 11) 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,2021.1.
- 12) 亀村勝美: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(3) – 極限平衡法による安定性 評価-,第15回岩の力学国内シンポジウム,2021.1.
- 13)亀村勝美: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(4)ー極限平衡法による安 定性評価-,第48回岩盤力学に関するシンポジウム, 2022.1.(投稿中)
- Brown, E.T.: Strength of models of rock with intermittent joints, ASCE, Vol.96, SM6, pp.1935-1949, 1970
- 15)河村精一,水野和憲,大塚悟: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(4)ー剛塑性有限要素法による検討-,第15回岩の力学国内シンポジウム,2021.1.

## CENTRIFUGE TESTING TO DYNAMIC BEHAVIOR OF SLOPE MODEL PILED UP STEEL HEXAGONAL BAR SIMULATING DISCONTINOUS ROCK MASS (5) - CONSIDERATIN BY RIGID PLASTIC FINITE ELEMENT METHOD ANALYSIS-

### Seiichi KOMURA, Kazunori MIZUNO and Satoru OHTSUKA

Since the seismic stability of model slope which was piled up with hexagonal steel bars was surveyed by centrifuge tests in the collaborative study, it was simulated with the rigid-plastic finite element analysis based on the upper bound theorem in this study. Although the strength parameters of model slope were determined based on the triaxial compression tests of testing specimen, it was found difficult to simulate the seismic stability properly. Through the inverse analysis of strength parameters for model tests, the evaluation method of strength parameters for discontinuous rock mass was intensively discussed by comparing the collapse patterns between model tests and simulation results.