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(12) - 不連続変形法の適用性に関する検討-

馬貴臣^{1*}·井原拓二¹·小野寺正勝¹

¹応用地質株式会社 メンテナンス事業部(〒331-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5) *E-mail: ma-gc@oyonet.oyo.co.jp

地震時の不連続性岩盤斜面の安定性評価は従来から重要な課題であり,特に原子力発電所のような重要 構造物周辺の岩盤斜面の耐震設計では,岩盤の不連続性を考慮した評価が必要である.これまでには,不 連続変形法などの手法が適用されるケースがあるが,物性値の設定法並びに解析手法には未解決な課題が ある.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,金属六角棒を積み上げた斜面 模型を用いた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たシミュレーションを実施した. 本論文では,従来の不連続変形法に静的解析と動的解析の組み合わせ及び弾性係数の拘束圧影響を考慮し, 不連続変形法による模型実験の数値解析を実施し,その適用性の検討を考察した.

Key Words : slope stability, numerical analysis, DDA, earthquake, constrained pressure dependence

1. はじめに

地震による岩盤斜面の崩壊は甚大な被害をもたらす. 特に,原子力発電所のような重要構造物周辺の岩盤斜面 の耐震設計では,地震時の岩盤斜面挙動評価は重要な課 題である.岩盤斜面の崩壊は,一度発生すると,崩壊土 砂が急速に落下するため,避難や対策の余裕が殆どない. そのため,岩盤安定性評価または危険度評価は岩盤斜面 防災において最も重要な課題の1つである.岩盤斜面の 安定性は一般的に岩塊内の不連続面の分布状況やその強 度に大きく左右されるが,不連続面の分布や強度は不確 定的なものであるため,岩盤斜面の安定性を正確に評価 するのは困難である.近年では岩盤の振動計測,電気探 査,写真測量など多くの簡易的な測定方法が提案され, 実斜面の安定性評価への有効性が示されている¹⁾.しか

し、これらの測定方法は対象岩盤の過去・現在の挙動を 評価することはある程度可能であるが、将来地震時の挙 動を予測することは困難である.

そのため、数値解析による地震時岩盤斜面の挙動予測 は有力な手法である.これまでに、不連続変形法などの 手法が適用されたケースはあるが、解析に用いる物性値 の設定方法並びに適用方法には未解決な課題が残されて おり、殆どの場合では定性的な評価に止まっている³. 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を用いた振動台実験(昨年)、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 てそのシミュレーションを実施することにした.本論文 では、従来の不連続変形法に静的解析と動的解析を組み 合わせ及び弾性係数の設定においての拘束圧影響を考慮 し、不連続変形法による模型実験の数値解析を実施し、 その適用性の検討と共に適用方法を考察した.

2. 実験概要

金属六角棒積層斜面の振動台模型実験(昨年)³⁴⁾の 詳細は参考文献,遠心力載荷加振実験⁵⁶⁰の詳細は参考文 献を参照されたい.ここでは、本文に関連する主な実験 結果の概要を述べる.

遠心力載荷加振実験は斜面高さ150mmの斜面模型に対して,遠心力載荷模型実験装置を使用して,25Gで正弦 波50Hz,50Gで正弦波100Hzの加振を実施し,段階的に 加振力(設定電圧)を増加させ,斜面を破壊させた.そ してさらに破壊後も継続して加振力を増加させて加振し, 崩壊形状の変化を追った.

図-1と図-2にそれぞれ遠心場25Gと50Gの実験結果例 を示した.図中,(a)は崩壊前Stepの最終形,(b)は崩壊



図-2 遠心場50Gの実験結果例

Stepの崩壊直前,(c)崩壊Stepの最終形,(d)は崩壊後Stepの 最終形である.図に示すように,遠心場25Gの場合では 加振Step12で崩壊,50Gの場合ではStep11で崩壊した.崩 壊し始めた箇所は,25Gと50Gの両方ともに法肩である. 以下に,遠心場25G及び50Gのそれぞれ崩壊前,崩壊及 び崩壊後の加振Stepを対象に再現解析を実施し,崩壊 Step及び崩壊形態に着目し,数値解析手法の適用性及び 適用方法を検討する.

3. 解析方法と解析条件

(1) 解析方法

これまでに数値解析分野においては、不連続面を直接 モデル化する幾つかの数値解析方法が提案されている. 本文では、数値解析法として不連続変形法を用いるが、 この方法を岩盤崩壊挙動のシミュレーション手法として 用いるには、岩盤内の応力状態を正確に再現するための 解析上の工夫が必要となることを示す.

a)初期応力解析

不連続変形法では、初期応力を入力値として考慮で きるが、岩盤斜面のように初期応力状態が位置により変 化する場合などは、解析を実行することにより初期応力 状態を再現している.従来、この解析では、動的解析を 行っている.なお、静的解析と動的解析の違いは、静的 解析では各時間ステップ計算の初速度を毎回ゼロとして 解析するのに対して、動的解析では時間ステップ計算の 初速度に一段階前の時間ステップ計算による速度を受け 継ぐ点である.動的解析では、最初の数ステップにおい て、岩盤ブロックの自重及び岩盤ブロックの変形から岩 盤ブロック内の応力及びブロック間の接触力が不安定な 状態となる場合がある.すなわち、元々安定な岩盤であ っても、不安定となる可能性があり、限界状態における 岩盤の安定評価が困難になる.

したがって、本研究においては、静的解析と動的解析 の不連続変形法を組み合わせて行っている.すなわち、 解析の最初の数ステップにおいて、静的解析を行い、そ の後動的解析を実行する.静的解析では、重力加速度を ゼロから1Gまで線形的に増加する.静的解析を実施す ることにより、自重をかける際に生じる岩盤ブロックの 変位速度を最大限に低減させながら、自重による初期応 力状態を解析する.これにより、現状では安定している 岩盤斜面はもちろん、岩盤崩壊直前の岩盤斜面の応力状 態も再現できる.その後の動的解析では、岩盤ブロック の変形や岩体間の接触時の力学関係をステップ毎に計算 し、各ブロックの動きを追跡し、崩壊時の挙動や崩壊後 の軌跡・形状を解析する.

b)振動解析

振動解析は、初期応力解析後に、初期応力と変形状態 を受け継いて、ステップ毎に地震力を作用させて解析を 実施する.振動による動的解析は一般的に物体力として の地震力の載荷をモデル全体に作用させる方法(ここで、 物体力法と呼ぶ)とモデルの枠に作用させる方法(ここ で、振動台法と呼ぶ)が挙げられるが、本研究は不連続 変形法を振動台実験による実施した模型実験に適用する ことから振動台法を用いた再現解析を実施する.なお、 実務では物体力法を一般的に使用していることから、振 動台法による再現解析の後、物体力法による確認解析を 実施した.

(2) 解析モデル

前年度に実施した解析と同様な解析モデルを採用する. 図-3 に解析モデルを示す.昨年の実験 ³⁴⁰では, 300mm 模型と 150mm 模型による実験は,崩壊しない振幅電圧 と崩壊振幅電圧と共に同じであった.また,解析に使用



図-4 入力加速度調整のための置き換えモデル

する DDA は従来のソルバーを使用しているため,解析 速度に限界があり,再現解析に多くのケースが必要であ ることから,小さいモデルによる検討が望ましい.これ らの原因により,昨年の解析と同様に,150mm 模型の 約半分をモデル化して採用した.振動実験に示すトップ リングのような崩壊に対して,モデルの高さは崩壊挙動 に影響があると考えられ,今後,高速ソルバーの導入及 びある程度解析パラメーターの設定法が確認できたら, 実験に使用した150mm 模型を用いたモデルによる検証 が期待したい.

(3)入力波形の質量調整

振動解析では、加速度波形をモデルの枠に作用させる.解析モデルが同様な応答加速度を得るため、モデル も質量による入力加速度の調整が必要である.入力波形 をモデルの枠に作用させる場合では、枠がモデル全体と 一緒に振動することから、枠の質量と入力波形(加速 度)による物体力はモデル全体の質量と入力波形による 物体力より小さく、枠の応答加速度は入力加速度より小 さくなる.実験の入力波形はモデル全体と一緒に振動す る枠の振動波形であることから、枠の入力波形の調整が 必要となる.質量調整は、前年度では予備解析による入 力加速度の調整ⁿを実施したが、本文では解析モデルの 置き換えにより実施する.

入力波形の加速度をai,モデルの枠の質量をmiとすると、枠に掛けている力Fiは、

 $F_1 = m_1 a_1$

となる. なお,実際に振動しているのはモデル全体(台 座を除き)であるため,モデルの応答加速度をa,モデ ルの質量(振動部分の合計)をmとすると,振動台実験 におけるモデルに掛けている力Fは,

$$F = ma$$
 (2)

(1)

となる.FはFiに等しいため、モデルの応答加速度は

$$a = \frac{m_1}{m} a_1 \tag{3}$$

となる. モデルの質量は枠の質量より大きいため,モデ ルの応答加速度は入力波形より小さくなる. モデルの応 答波形は実験の実際加速度と等しい振動を得るため,入 力波形を m/m の倍率で調整することが必要である.本 研究では,解析モデルの置き換えによりこの倍率を設定 した. 図-4 に入力加速度調整のための置き換えモデル を示す.

枠の面積を S_1 , 模型の面積を S_2 とすると, モデル及 び模型の質量は

$$u = \rho \left(S_1 + S_2 \right) \tag{4}$$

$$m_1 = \rho S_1 \tag{5}$$

となる.入力波形の調整倍率は

n

$$k = m/m1 = (S_1 + S_2)/S_1$$
 (6)

となる. モデル作成により, S₁は 2807mm², S₂は 11507mm²であると分かり,式(6)に代入し, k = 5.1 が 分かる. これは,昨年度の予備解析で得られた 5.3 とほ ぼ同じである.

(4) 弾性係数の拘束圧依存性

平面ひずみ繰返し三軸圧縮試験(E-2)の試験結果に よると、等価ヤング率はひずみ及び拘束圧に依存してい ると分かった. 図-5 と表-1 に試験結果から整理した等 価ヤング率と拘束圧及び片振幅軸ひずみとの関係を示す. 図に示すように、一定の片振幅軸ひずみに対して、等価 ヤングは拘束圧と線形関係となり、拘束圧が大きいほど 等価ヤング率は大きくなる.また、一定の拘束圧に対し て、片振幅軸ひずみが小さいほど、等価ヤング率は大き くなる.この試験結果を考慮し、再現解析では弾性係数 を変化させた解析を実施し、弾性係数に関しては以下の ような仮定に基づいて設定する.

①模型の弾性係数は積層ごとに設定し、模型一番上 部の積層の弾性係数を E₀とする.

②各層の弾性係数Eは層数に比例して増加する.

$$E = \mathbf{N} E_0 \tag{7}$$

ここに, N:1~15

図-6に弾性係数によるモデルの物性区分を示す.





(図-5を参照)							
片振幅軸ひ ずみ	等価弾性係数[Mpa]						
	拘束圧0.01	拘束圧0.05	拘束圧0.1	拘束圧0.4			
5.0E-04	23	74	132	551			
1.3E-04	38	107	210	868			
3 1E-05	63	153	332	1368			

220

317

527

837

2156

3398

表-1 平面ひずみ繰返し三軸圧縮試験(E-2)の試験結果



105

175



図-6 弾性係数によるモデルの物性区分

4. 再現解析

7.8E-06

2.0E-06

再現解析は、実験結果に対して、崩壊しない振幅電圧 による実験結果及び崩壊した振幅電圧による実験結果の 両方を再現する.解析は、弾性係数を変化させた解析を 実施した.ブロックの分離が起こるまでは斜面は一体 (連続体)として変形するので、等価連続体としての剛 性を使う.室内試験(図-5,表-1)の結果から片振幅軸 ひずみを 20E-6以上、拘束圧を 0.1MP以下と仮定すると、 表-1 における塗りつぶす部分の等価弾性係数は 200MPa 以下となる.これに相当する弾性係数 Eoは約 13MPa 以 下(式(7), N=15)となる.表-2 に再現解析に用いた物 性値及び解析パラメーターを示す.図に示すように、弾 性係数は 1, 3, 5, 10MPa の4種類を選定して,試し解 析を実施した.ポアソン比は 0.3 と一定な値とした.単 位体積重量は,金属の単体に遠心場を掛けた値を使用し た.摩擦角は,六角棒間は 7.4°とし,繰返し一面せん 断試験の結果 (D-2)を使用した.ただし,模型底面棒 間及び枠との摩擦角は,実験で固定境界とされているた め,単調載荷の一面せん断試験 (D-3)の結果を採用し た.粘着力(せん断強度)と引張強度はゼロとしたが, 模型底層六角棒間及び枠との間はそれぞれ 1200kN/m², は 2000kN/m²,を採用し,接着剤のパンフレット値を使 用した.入力波形は枠の重心に掛け,遠心場及び実験 Stepに応じた波形を使用した.ただし,水平入力波形は, それぞれの平均値を用いて補正した波形を使用した.補 正後の水平入力波形及び垂直波形を 5.1 倍を掛けたもの を使用した.他の解析パラメーターは表-1を参照する.

表-3に再現解析の結果,図-7に解析結果例を示す.表 -3に示すように,解析結果は弾性係数Eoにより大きく変 わる.

- 弾性係数Eoが1MPaの場合では、実験で崩壊しない Stepでも25Gと50Gの遠心場共に崩壊した.
- ②弾性係数Eが3MPaの場合では、25Gと50Gの遠心場 共に、実験で崩壊しないStepと崩壊Stepの両方、解 析は実験と一致した。
- ③弾性係数Eが5MPaの場合では、25G遠心場は実験で 崩壊しないStepと崩壊Stepの両方ともに解析は実験 と一致したが、50G遠心場は解析は実験と一致しな い.
- ④ 弾性係数Eoが10MPaの場合では、25G及び50Gの遠心場ともに、解析は実験と一致しない。

表-2 再現解析に用いた物性値及び解析パラメーター

項目	値
弹性係数 Eo[MPa]	1, 3, 5, 10
ポアソン比[-]	0.3
単位体積重量 [kN/m³]	1956(遠心場 25G),3915(遠 心場 50G)
摩擦角[°]	7.4 (六角棒間) , 40.1 (模型底 面と枠の間) , 0 (枠と台座の 間)
粘着力 [MPa]	0(六角棒間),ただし,1.2 (模型底層六角棒間及び枠との 間),0(枠と台座の間)
引張強度[MPa]	0(六角棒間),ただし,2.0 (模型底層六角棒間及び枠との 間),0(枠と台座の間)
入力波形	遠心場及び Step に応じて,実験 毎の水平入力加速度波形と垂直 入力波形,ただし,5.1 倍を掛 ける.
境界条件条件	台座を固定,枠と台座の間はス ライド
許容最大変位率	0.1
ステップ毎の時間刻み[s]	0.00001
バネ剛性	弾性係数 Eo と同じ値
ステップ数	80000(遠心場 25G),40000 (遠心場 50G),ただし,初期 応力解析のステップ数は 300





図-7 解析結果例 (遠心場25G, Step11, E=3MPa)

上記の解析結果により,弾性係数 Eoが 1MPaの場合は 弾性係数を過小評価,10MPa は弾性係数を過大評価して いる,3MPa は実験結果を再現できたと考えられる.

図-7に解析結果例(遠心場 25G, Step11, E0=3MPa) を示す.図に示すように,崩壊し始めた箇所は法肩であ り,実験と整合した.また最終形も解析は実験とほぼ一 致している.

5. 物体力法による確認解析

岩盤斜面の数値解析では物体力法は一般的に採用され ていることから,再現解析の確認及び物体力法の適用性 を検討するため,物体力法による確認解析を実施した.

解析条件は,波形入力方法及び境界条件以外は再現解 析と同じである.物体力法の波形入力は,波形を遠心場 25Gの場合1/250,遠心場50Gの場合1/500を掛け,震度波 形に置き換えて,全ブロックの重心に掛けた.境界条件 は枠と台座の両方を固定した.

表-4に物体力法による確認解析の結果,図-8に解析 結果例を示す.物体力法による解析結果は振動台法(再 現解析)とほぼ同様な結果を得た.

6. 共通の解析パラメータによる解析

共通の解析パラメータは文献 ⁵を参照する.以下に DDA (振動台法) による検討を示す. 表-5 に共通の解析 パラメーターによる解析に用いた物性値及び解析パラメ

表-4 物体力法による確認解析の結果

遠心場	Step	E_0 [MPa]			
		1	3	5	10
25G	11	—	0*	×	×
	12	—	0	0	×
	13	—	0	—	—
50G	10	—	*	×	
	11	—	0	×	—

注):○崩壊,×崩壊しない,「-」実施していない;赤○の 解析結果は図-8に出力,「*」は表-2と一致しないケース



図で 初本力伝による脾材結果例 (遠心場25G/Step11, E₀=3MPa,)

ーターを示す. 25G/Step12に対して,バネ剛性を変化さ せた7ケースの解析, 25G/step13と14に対してバネ剛性 3MPaの解析,計9ケースを実施した.その結果,9ケー ス共に崩壊するものはなかった.

バネ剛性の影響を検討するため、25G/Step12 に対して、 法肩ブロックの累積変位とバネ剛性との関係を整理して みた(図-9).累積変位はバネ剛性により大きな差異が 見られない.これにより、崩壊するか否かはバネ剛性の 大きさに依存しないことが分かった.

共通パラメーター解析により、模型斜面の挙動はブロ ック母体の弾性係数より、不連続面を含んだブロック集 合体としての弾性係数に依存することが分かった.DDA による不連続体解析は対象斜面を連続体から不連続隊へ の変化を解析している.すなわち、破壊・崩壊する前の 斜面は連続体または等価連続体として考慮すべきではな いかと推察できる.

表5	共通の解析パラメーターによる解析に用いた
	物性値及び解析パラメーター

項目	値
弹性係数*[MPa]	200000
ポアソン比*[-]	0.3
単位体積重量* [kN/m³]	1960(遠心場 25G)
摩擦角* [°]	16.0(六角棒間)
粘着力 * [MPa]	0.02(六角棒間)
対象遠心場と Step	25G, Step12, 13, 14
バマ岡山北 MDo/mml	Step12: 200000, 20000, 2000, 100,
/小阿引王[[viFallill]	10, 3, 1; Step13: 3; Step14: 3
他の項目	表−1 を参照

*: 共通の解析パラメーター



図-9 共通パラメーター解析で得られた法肩累積変位の時刻歴 (遠心場25G, Step12)

7. まとめ

本文は金属六角棒積層斜面遠心力載荷加振実験の再現 解析を実施し、地震時岩盤斜面の挙動評価への不連続変 形法の適用性を検討した.

振動台法による再現解析は、崩壊及び崩壊しなかった 実験結果を再現したことにより、不連続変形法の適用性 を確認した.また、弾性係数の設定には金属棒母体の値 ではなく、不連続面を含むブロック集合体として拘束圧 などを考慮することが必要であることが分かった.これ に関して、DDAの構成式によると、ブロック集合体が破 壊するまでは連続体または等価連続体として扱っている ことから、ブロックの弾性係数はブロック集合体(すな わち、不連続面を含む岩盤マス)の弾性係数または等価 弾性係数を用いることが妥当であると考えられる.

物体力法による確認解析は振動台法(再現解析)とほぼ同様な結果を得た.再現解析結果の妥当性を検証する とともに、物体力法の適用性を確認した.

共通パラメーターによる解析は、金属棒母体ヤング率 を利用した解析では、バネ剛性を大きく変化したても、 実験結果を再現することができなかった.また,模型斜 面が崩壊するか否かはバネ剛性とほぼ関係しないことが 分かった.

等価連続体のように拘束圧やひずみレベルを考慮した 弾性係数設定法の検討と、また、今回の解析結果に関し て、高速ソルバーの導入により、模型実験に使用した 150mm 模型の検証が今後の課題としたい.

参考文献

- 1) 緒方健治,松山裕幸,天野淨行:振動特性を利用した 落石危険度の判定,土木学会論文集,No.749/VI-61, pp.123-135,2003.
- G.C. Ma, M. Nakashima, K. Arai: Study on the stability of stone wall in earthquake by discontinuous deformation analysis, 2019 Rock Dynamics Summit in OKINAWA, Okinawa, JAPAN, 531-536, 7-11 May, 2019
- 3) 岡田ほか: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,一般社団法人岩の力学連合会,387-392,2021.1
- 4) 納谷ほか: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,一般社団 法人岩の力学連合会, 393-398, 2021.1
- 5) 岡田ほか: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 回岩盤力学シンポジウム講演集,土木学会, 2022.1 (投稿中)
- 6) 納谷ほか: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回岩盤力学シンポジウム講演集,土木学会, 2022.1(投稿中)
- 7) 馬ほか: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(10) - 不連続変形法の適用性に 関する検討-,第15回岩の力学国内シンポジウム講 演集,一般社団法人岩の力学連合会,441-446,2021.1

CENTRIFUGE MODEL TEST OF SLOPE MODEL PILED STEEL HEXAGONAL BAR SIMULATING DISCONTINOUS ROCK MASS (PART12) - EXAMINATON OF APPLICABILITY OF DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS -

Guichen MA, Takuji IHARA and Masakatu ONODERA

Evaluation of the stability of discontinuous rock slopes during an earthquake has traditionally been an important issue. Especially in seismic design of rock slopes around important structures such as nuclear power plants, it is necessary to consider the discontinuity of rock. We conducted a centrifuge model test of slope model piled steel hexagonal bar, and used various analysis methods to carry out the simulation. In this paper, numerical analysis of model experiments by Discontinuous Deformation Analysis(DDA) is performed by combining static analysis and dynamic analysis with conventional method, and the experimental results are roughly reproduced. It is expected to contribute to apply to future practice.