

岩盤構造物の性能評価における課題 — 不連続性岩盤斜面の動的安定性評価の現状と課題 —

亀村勝美

深田地質研究所

Some Issues on the Performance Evaluation of Rock Structures — Current Status and Issues of Seismic Stability Assessment of Discontinuous Rock Slopes —

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：地震国である我が国では建物だけではなく、社会インフラを構成する土木構造物にも高い耐震性が求められている。耐震性については1923年の関東地震、1995年の兵庫県南部地震、そして2011年の東北地方太平洋沖地震など、大きな被害をもたらした地震の度に新たに得られた膨大な被害データに基づいた研究開発が行われ、より現実に即した信頼できる耐震技術が整備されてきた。その結果、社会全体としての耐震性は確実に向上してきている。しかし近い将来、最大級の東南海地震の発生が危惧されているなか、これまで整備されてきた様々な構造物、システムを対象とした耐震技術の実効性をもう一度確認し、課題があれば確な対応を取る必要がある。ここでは土木構造物の中でも課題が多いとされる不連続性岩盤斜面の耐震性評価技術について現状を確認し、解決すべき課題について議論する。

キーワード：不連続性岩盤，斜面，動的安定性，加振実験，数値解析

Abstract: Japan is an earthquake-prone country, and many large earthquakes such as the 1923 Kanto Earthquake, the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, and the 2011 Tohoku-Pacific Ocean Earthquake had yielded extensive damage to not only buildings but also civil engineering structures. Civil engineering structures constitute the social infrastructure and are required to have high earthquake resistance. Research and development have been conducted based on the vast amount of new damage data obtained after each earthquake that caused extensive damage, and more realistic and reliable earthquake-resistant technologies have been developed. As a result, the total earthquake resistance of society has steadily improved. However, a high possibility of the largest To-Nankai earthquake in the near future has been pointed out. It is necessary to reconfirm the effectiveness of earthquake-resistant technologies developed for various structures and systems and to take immediate action if any problems are found. In this report, the status of the seismic resistance evaluation method for discontinuous rock slopes which is considered to have many problems among civil engineering structures, is reviewed, and issues that need to be resolved are discussed.

Keywords: discontinuous rock mass, slope, dynamic stability, vibration test, numerical analysis

1. はじめに

地震国である我が国では、社会インフラを構成する様々な構造物やシステムの高い耐震性が求められ、これまでに多くの地震被害を経験する中で進められてきた研究開発により社会全体としての耐震性は着実に向上してきている。

しかし近い将来、最大級の東南海地震や首都直下型地震の発生が危惧されているなか、これまで整備されてきた耐震技術の実効性をもう一度確認し、課題があれば的確な対応を取る必要がある。ここでは土木構造物の中でも課題が多いとされる不連続性岩盤斜面の耐震性評価技術について現状を確認し、解決すべき課題について議論する。

亀村（2022a）は、不連続性岩盤斜面の動的安定性評価について最も基本的な解析法である極限平衡法の適用性を議論した。そして最新の数値解析技術に依らずとも簡便な極限平衡法である程度の検討ができる可能性があることを示した。と同時に、不連続性を考慮した岩盤斜面の動的安定性評価手法が抱える多くの課題をよく理解した上で、設計手法としてどうあるべきかを理解することが重要であると指摘した。

本報文では、土木学会岩盤力学委員会「岩盤の動力学に関する研究小委員会」が岩盤斜面の動的安定性評価手法に関する研究の一環として行った金属六角棒を用いた模型斜面の動的載荷実験と、その実験結果に対する様々な解析手法の適用性検討結果（土木学会，2022）を紹介するとともに、それらを基に動力学に関する研究小委員会・斜面耐震WG「理論解析SWG」において進められている議論を紹介する。ここでは各解析手法で得られた結果を詳細に比較検討することによって課題を抽出し、得られた知見に基づき不連続性岩盤斜面の動的安定性について斜面設計の観点からどう

あるべきかが議論されている。

各解析手法における必ずしも明確にされていない点や解析条件設定における解析手法間の違いなどに関する詳細な議論により様々な疑問点が浮かび上がり、不連続性岩盤斜面の設計法を明確にすることは簡単に結論が出せる課題ではないことが次第に明白になってきた。しかし、他の構造物に対して設計体系が明確になっていない岩盤斜面の動的安定性評価について問題点を明確にし、今後の検討の方向性を示すことは新たな研究開発に寄与するものである。

2. 斜面の安定性評価の考え方

土や岩で構成される大小様々な斜面は、図1に示すように大きく3種類に分けることができる。

自然斜面：文字通り自然に存在する斜面で、すでに一部崩壊している土砂斜面からそそり立っている岩盤斜面まで様々である。

切土斜面：人の手によって必要な空間を得るために掘削されてできた斜面。

盛土斜面：人の手によって必要な空間を得るために盛り立てられてできた斜面。

自然斜面や、宅地造成、鉄道、道路、そして堤防などの建設に伴う切土斜面および盛土斜面は、常に安定を保っていることが求められるが、降雨や地震によって崩壊し、大きな被害を生じることも多い。また切取や盛土などの人工斜面では、斜面の傾斜や建設方法によっては建設中に斜面が不安定となり、最終的に崩壊に至ることもあり、建設中や建設後にもそうしたことにならないように

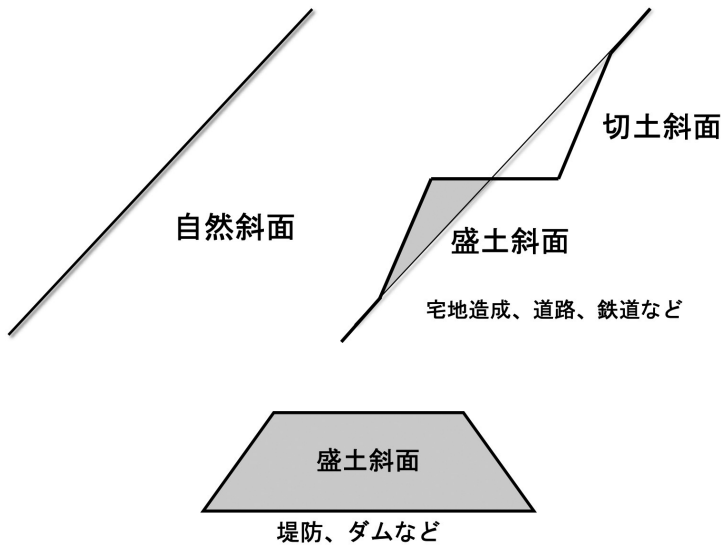


図1 斜面の種類.

する必要がある。

粘土や砂などの土質材料で構成される斜面の常時および地震時の安定性評価は、円弧すべり解析によって行われてきた。まずその基本的な考え方を示す。

斜面の崩壊は、斜面を構成している材料の力学的な釣合いが失われた場合に生じるが、その原因は、

- 新たな盛土や切土などによる応力の変化
- 地下水や降雨などによる斜面内の浸透水が原因で生じる浮力や浸透力
- 斜面構成材料の経年劣化による強度の低下
- 地震による動的荷重

など様々である。

一方、崩壊した斜面を観察すると、ある面（すべり面）に沿って生じていることが判る。つまり斜面の安定を検討する場合、斜面内部のどの位置にどのような形のすべり面が発生するかを知ることが重要となる。

斜面には重力が作用し、低い部分に移動しよう

として斜面内部にせん断応力が生じる。このせん断応力が斜面構成材料のせん断強さよりも大きくなると、せん断破壊が生じ、破壊面が連続することですべり面が形成されて崩壊が起きる。このすべり面の形は、斜面の地質構造や変形強度特性、斜面の形状などによって様々であるが、盛土などのように材料が均一な斜面では、円弧状となることが知られている。

そこでいくつかのすべり円弧を仮定し、それぞれの円弧のすべりに対する安全性を調べ、すべり崩壊を起こすかどうかを判定することが行

われる。図2に示すような円弧すべり面を仮定すると、その面に沿ってすべりを起こそうとするせん断応力と、それに抵抗するせん断強さが働く。すべり面に沿ったそれらの和が

$$\begin{aligned} & (\text{すべり面に沿ったせん断応力の和}) < \\ & (\text{すべり面に沿ったせん断強さの和}) \end{aligned}$$

の関係にあれば、その円弧に沿うすべりは生じないことになる。

この時、仮定したすべり面のすべりに対する安全性（安全率）は次のように表される。

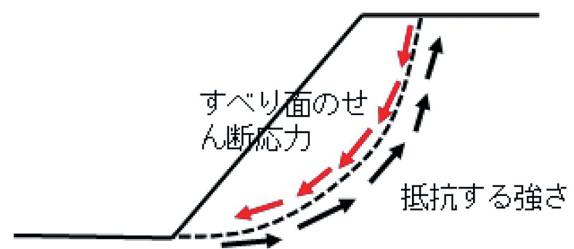


図2 円弧すべりの考え方.

- ① すべりに抵抗するせん断強さの和と、すべろうとするせん断応力との比.
- ② すべり円弧の中心に対してすべりを起こそうとする力のモーメントと、それに抵抗するモーメントとの比

実際の斜面は様々な形状，材料で構成されており，円弧すべり解析だけで対応することは難しい．そのため，それらの条件を考慮できるように多くの解析手法が提案されているが，基本はここに示したように「すべろうとする力」とそれに「抵抗する力」の評価にある．

次節では具体的な斜面の安定性評価手法について示す．

3. 原子力発電所周辺斜面の地震時安定性評価の現状と課題

ここでは耐震性の検討の中でも最も厳しい対応がとられている構造物の一つである原子力発電所周辺斜面の地震時安定性の評価手法の概要を示すとともに，検討の余地があるとして議論されている手法に関する課題を示す．

原子力発電所周辺斜面の地震時安定性については，原子力規格委員会の「原子力発電所耐震設計技術指針」（日本電気協会・原子力規格委員会，2015）に定められ，すべり面法などの慣用法による解析，静的解析，動的解析によって行うとされている．ここで静的解析や動的解析などの数値解析法は，その解析結果から直接安定性を評価するために用いられるのではなく，斜面構成材料が複数ある場合や，その力学特性の非線形性が卓越しているような場合に斜面内の応力，ひずみや局所安全率の分布を求めるために用いられる．そして，その分布状況から複数のすべり面の推定を行

い，それぞれの想定すべり面について安全率を求め，その中の最小値によって安定性を判断する．すなわち安定性評価の考え方は基本的にすべり解析にある．

指針に示された「基礎地盤および周辺斜面の安定性評価の流れ」を基に斜面安定性評価フローの概要を示すと，図3のようになる．

このように原子力発電所周辺斜面の地震時安定性は，地盤あるいは岩盤を等価線形体でモデル化し動的解析（周波数応答解析）を行い，想定したすべり面上の時々刻々の安全率を算定したうえでその最小値によって評価する．そして，不安定化が予想される場合には破壊進展の影響を把握す

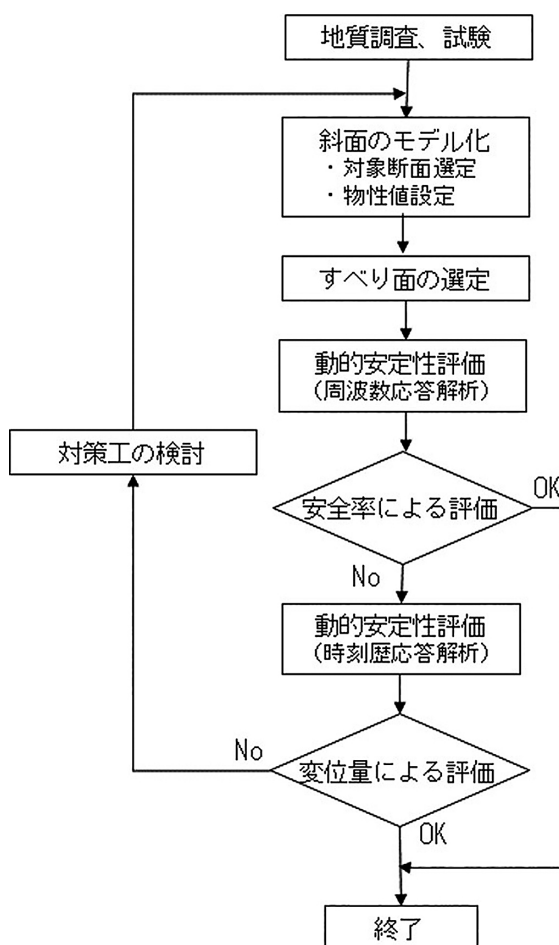


図3 斜面の安定性評価法（日本電気協会・原子力規格委員会，2015を基に作成）．

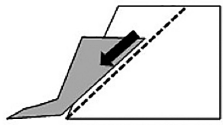
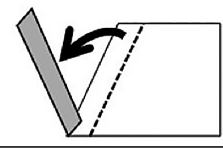
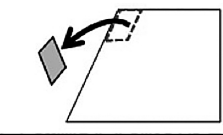
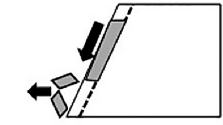
るために、非線形性を考慮した動的解析（時刻歴応答解析）を行い変位量による安定性を評価する。こうした方法による安定性評価結果は、すべり破壊が生じない範囲においては妥当な結果を与えるものと認識されている。しかし、すべり安全率が1.0を下回るような状態に至る大規模な地震動に対しては、実現象を必ずしも反映できていないとの指摘がなされている。

このような安定性評価手法の課題に対し、土木学会原子力土木委員会地盤安定解析高度化小委員会では、地盤岩盤の破壊進展性の評価、安定性を失った後の変位や移動を定量的に評価する手法に着目して研究活動を行い、2018年に報告書を取りまとめた（土木学会，2018）。

報告書では、図4に示す基礎岩盤および周辺斜面の地震時安定性評価フローを示すとともに破壊進展性の評価手法、変位量・移動量の評価に関する様々な解析手法を紹介し、残された課題を示している。そして、そこでの最大の課題は移動量とその評価結果の判定基準をいかに行うかであるとしている。

さて本報告の主題である不連続面の卓越した

表1 不連続性岩盤斜面の崩壊形態.

崩壊形態	状 況	
すべり	直線，円弧あるいは両者が複合した線に沿って滑り落ちる	
転倒	不連続面によって柱状に分離した岩盤が重心移動によって頭部から転倒する	
崩落	斜面の一部が分離し落ちる	
座屈	柱状に分離した岩盤の一部が安定を失い，柱が座屈し崩壊する	

岩盤斜面に対して、これまで紹介してきた連続体解析手法を主とする安定性評価フローを適用しようとするとさらなる課題が生じてくる。それは現行の評価手法の基本となるすべり面の設定が必ずしも適切ではないことによる。

不連続面が卓越した岩盤斜面ではすべりだけではなく、表1に示すような転倒（トップリング）、崩落、座屈など様々な崩壊形態が想定され、その安定性の評価に当たっては先ずどのような崩壊形態が生じる可能性があるかを地質情報に基づいて判断する必要がある。そしてその上で崩壊の可能性を評価し、可能性が高い崩壊形態に対する安全率を求め、さらにその変位量・移動量を算定しなければならない。

しかし、大小様々な不連続性を

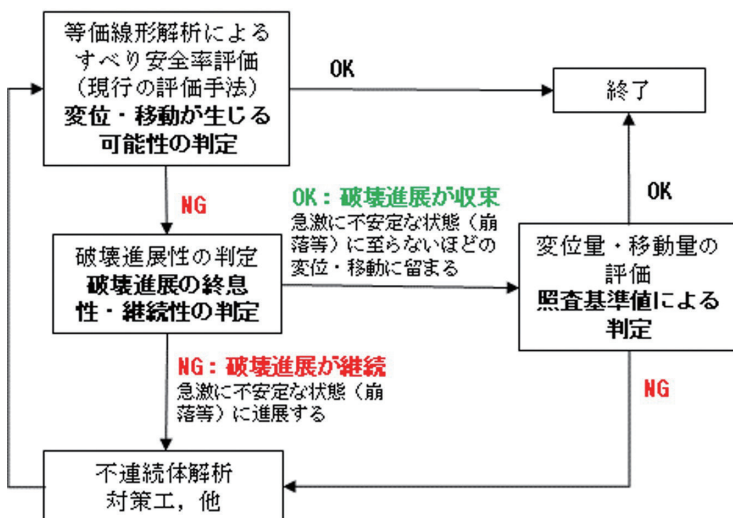


図4 基礎岩盤および周辺斜面の地震時安定性評価フロー（土木学会，2018）。

有する岩盤斜面の崩壊形態を想定することは難しく、不連続性岩盤斜面の地震時安定性評価手法を整備していくためには、不連続性岩盤の特性を念頭に置いたうえで、崩壊形態の推定から安定解析手法そして安定性（応力、ひずみ、変位、移動量）評価に至る一連の項目について検討する必要がある。

それでは現状、不連続性あるいは非線形性を考慮した岩盤挙動解析に用いられている数値解析手法は、こうした評価上の要件に対しどこまで対応できているのであろうか。

4. 不連続性岩盤斜面の崩壊形状の評価

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」の実験・シミュレーションWG1では、不連続性岩盤斜面の地震時安定性評価手法の現状と課題を明らかにすることを目的に金属製

の六角棒を積み上げた模型斜面の動的試験を実施し、不連続性岩盤斜面の崩壊現象に関するデータを得るとともに、様々な安定性評価手法により予測解析を行い、両者を比較することで斜面崩壊現象に対する様々な解析手法の適応性について検討してきた（土木学会，2022）。

以下ではその検討内容の概要を示す。

4.1 模型斜面の加振実験と安定性解析

加振実験は、対辺6mm、長さ80mmのステンレス製の六角棒を積み上げ、図5に示すような不連続性岩盤斜面モデルを作成し、表2に示すような条件で実施した。

シリーズ1では、実験の再現性を確認することを第一義として、斜面高さを150mmと300mmの2種、加振周波数を10Hzと50Hzの2種とし、それぞれの組合せに対して9回の実験を行った。模型底面への入力波は正弦波で、前波4波で目標

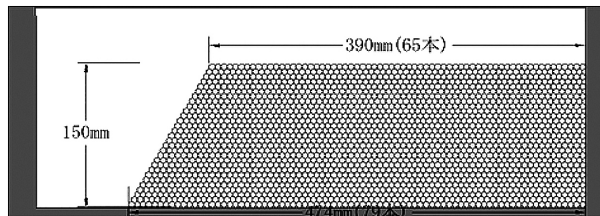


図5 六角形金属棒を積み上げた斜面モデル（土木学会，2022）。

表2 不連続性岩盤斜面モデル加振実験条件。

シリーズ	重力条件		斜面模型高さ	実験回数	加振周波数	特徴	
1	重力場	1G	150mm	9回	10Hz	加振実験の再現性確認	
			300mm		9回		50Hz
		25G	150mm	1回	50Hz		画像解析 解析パラメータの統一
					50G		

表3 シリーズ2 25G 試験における加振過程.

step	設定電圧 (V)	入力加速度 (m/sec ²)	崩壊の有無
3	0.01	0.9	-
4	0.05	1	-
5	0.1	0.9	-
6	0.5	2.6	-
7	1	13.2	-
8	2	37.7	-
9	3	99.7	-
10	4	179.2	-
11	5	225.9	-
12	6	311.5	肩部崩壊
13	7	385.8	領域拡大
14	8	428.7	領域拡大

とする設定値まで増加させ、20波加振した後4波の後波で減衰させている。

入力波の大きさは電圧による制御のため周波数10Hzでは設定電圧を1V, 3V, 5V, 7Vの4stepで、50Hzでは0.5V, 1V, 2V, 3Vの4stepでそれぞれ増加させ崩壊状況を確認した。結果はいずれのケースも3step目で崩壊が発生し、その時の入力加速度の平均は10Hzの場合34.2m/sec²、50Hzの場合71.7m/sec²であった。また崩壊形

態は、斜面の高さによらず10Hzでは法肩部から崩壊し始め徐々にその範囲を広げていき、50Hzでは法面表層部の下部が剥離し始め最終的には表層部が崩壊するパターンとなっている。

シリーズ1ではモデル斜面の加振実験の再現性を確認することができたが、ステップ間での入力加速度増分が大きいため、崩壊時の加速度を明確に把握することができなかった。そこでシリーズ2では高さ150mmの斜面について遠心力载荷試験装置で25Gと50Gの重力場を設定し、25G場では50Hz、50G場では100Hzの正弦波を、表3に示すように設定電圧を小刻みに増加させて加振した。入力波は図6に示すように前波3波で目標とする設定電圧まで増加させ、10波加振した後3波の後波で減衰させている。

シリーズ2の25G場における実験結果を表3に示す。step12の最大入力加速度311.5m/sec²で法肩の崩壊が生じ始め、以降加速度を増大させるに従い崩壊領域が拡大していく結果となった。この時の入力加速度波形は図6である。

シリーズ2 25Gの結果を基に詳細な崩壊状況を確認する。写真1は全16波の入力波の内、明確な応答が確認された5波目と肩部の崩壊が生じた8波目の状況である。写真-1(a)の5波目

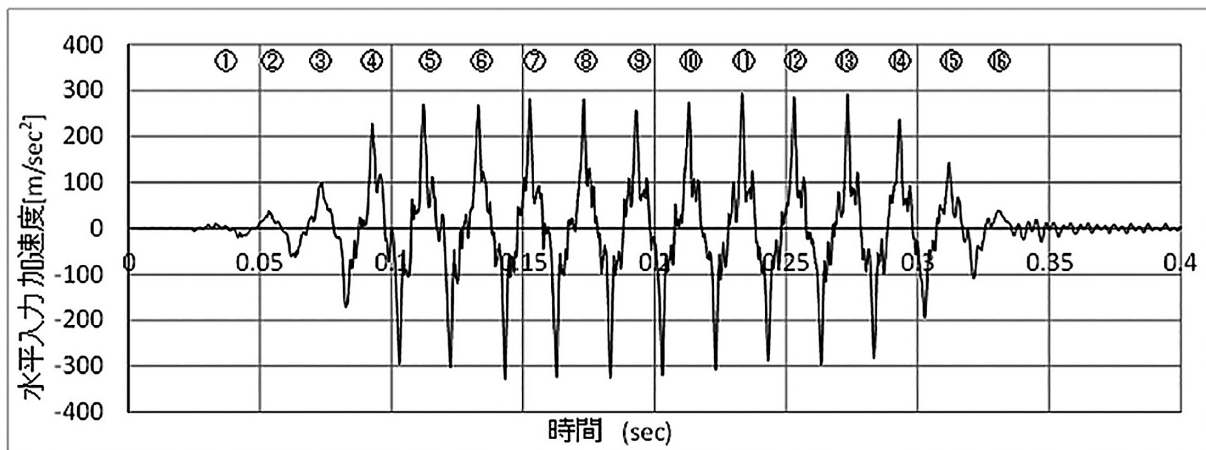
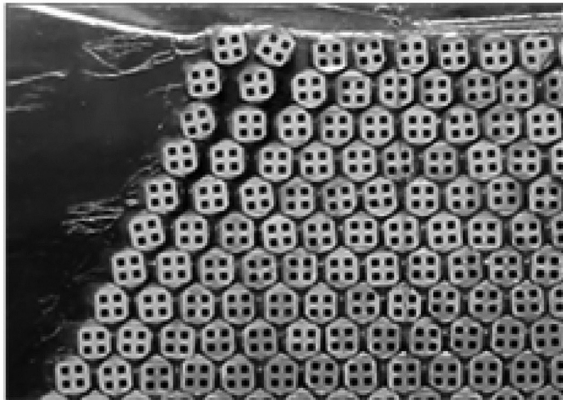
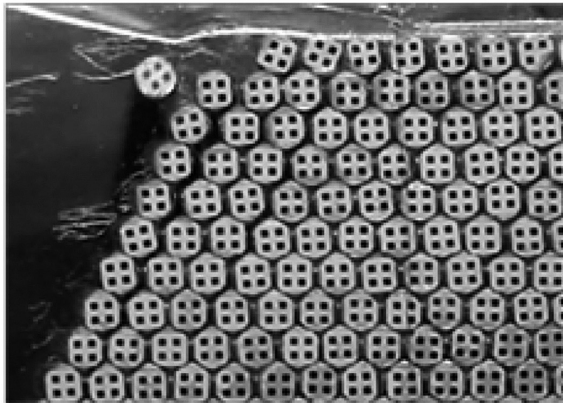


図6 シリーズ2 25G 試験における崩壊開始時 (step12) の入力波形 (亀村, 2022a).



(a) 5 波目 $\alpha \text{ max} = 270.3 \text{ m/sec}^2$



(b) 8 波目 $\alpha \text{ max} = 282.0 \text{ m/sec}^2$

写真 1 step12 の崩壊時における斜面挙動 (亀村, 2022a).

では、それまでの step でも生じていた法肩部を中心とする斜面に平行な不連続面での剥離の範囲と前方への変位が大きくなり、法肩変位は 7mm 近くになる。しかし崩壊には至らず元の位置へと戻る。

6, 7 波も同様の挙動を示すが 8 波目になると変位は 10mm 近くになり、一旦は戻り始めるもののその途中で再度前方へ変位し始め、12mm を超えたところで写真 -1 (b) にあるように肩部の 1 個が崩落する。ついで 10 波目でその下の 2 個目、12 波でさらにその下の 3 個目が崩落し、step12 は終了する。

表 4 安定性解析手法一覧.

理論解析	極限平衡法
	動的極限平衡法
連続体解析 (FEM)	剛塑性 (静的)
	等価線形
	非線形 (時刻歴非線形)
	非線形 (複合降伏モデル)
不連続体解析	個別要素法 (円形)
	個別要素法 (多角形)
	不連続変形法
	不連続変形法 (改良型)

表 5 崩壊時の step と加速度 (シリーズ 2 25G 実験結果と解析結果).

解析法		崩壊時 step	加速度 (m/sec ²)
25G場 実験結果		12	311.5
静的解析	理論解析	極限平衡法	Kh=0.58 142.1
		動的極限平衡法	
動的解析	連続体解析 (FEM)	剛塑性 (静的)	-
		等価線形	9 99.7
		非線形 (時刻歴非線形)	11 225.9
		非線形 (複合降伏モデル)	11,12 225.9-311.5
	不連続体解析	個別要素法 (円形)	8 37.7
		個別要素法 (多角形)	11 225.9
		不連続変形法	12* 311.5
	不連続変形法 (改良型)	11,12 225.9-311.5	

*) 試行錯誤の結果

このような崩壊状況に対し、表 4 に示す様々な安定性解析手法により評価を行った。解析に当たって設定する力学特性は解析法により様々であるが、加振実験に先立って実施された材料の金属棒単体、複数個による境界面、棒を組み合わせた要素に対する静的/動的室内試験結果 (岡田ら, 2021) に基づくことを基本とした。様々な解析手法で安定性を評価した結果は、表 5 に示すようになった。

実験結果に対応する崩壊時加速度は、連続体非線形 (複合降伏モデル) 解析と不連続体解析で得られている。

4.2 崩壊現象と安定性解析結果

ここでは2つのシリーズの加振実験結果とそれに対応する安定性解析結果を比較し、安定性評価における各解析手法の課題を探る。

まずシリーズ1の崩壊ケースにおける斜面挙動の記録画像を見ると、図7のようになっている。L10-3(7) (高さ15cm, 10Hz, 3step, case7)の場合、加振開始から0.53secで法肩の最上部が崩落し、その後加振ごとに崩壊範囲が増大していく。これに対しL50-3(3)では、斜面全体が応答し始めて0.17secで法面表面の下部が膨れ上がり、これを数回繰り返したのちに表層が一気に崩壊する。

一方、H10-3(7)では加振開始から0.67secで法面表層上部が大きくたわみ、その後の加振でたわんだ部分から上部が一気に崩壊する。これに対しH50-3(7)では、斜面表層の下部が0.20sec

で大きく前方にたわみ、この形態でたわむ層が次第に深くなり、0.37secで5層分が一気に崩壊する。このように崩壊挙動には加振条件による明確な差が見て取れる。

このような実験結果に対応する安定性解析結果は土木学会(2022)に詳しいが、それらと表5の内容を合わせてさらに詳しく見ていくと、表6のような結果が得られる。

この結果からすると、複合降伏モデルで不連続性による非線形性の影響の傾向を把握し、その結果に基づいて不連続体モデルを作成し、多角形不連続体解析(DEM, DDA)で解析することで、安定性の検討と残留変形の評価が可能になると思われる。

具体的に実験結果と解析結果を比較してみる。図8, 9にシリーズ1における斜面崩壊時(図7参照)に対応する数値解析結果として、複合降伏



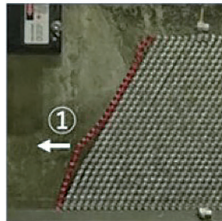
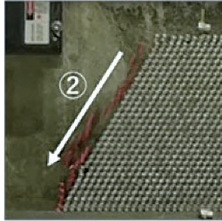
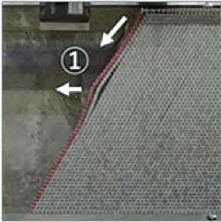
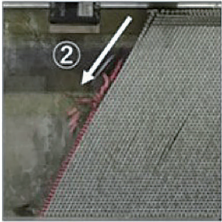
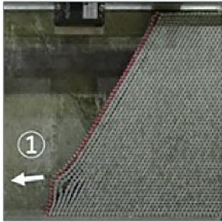

斜面 高さ	加振周波数			
	10Hz		50Hz	
15cm	①法肩が崩落  (L10-3(7) 0.53sec)	②斜面、天端方向に拡大  (L10-3(7) 1.42sec)	①法面下部が膨らむ  (L50-3(3) 0.17sec)	②その上部が一気に崩落  (L50-3(3) 0.27sec)
30cm	①法肩が崩落、斜面中腹が膨らむ  (H10-3(7) 0.67sec)	②中腹上部が一気に崩落  (H10-3(7) 0.93sec)	①法面下部が膨らむ  (H50-3(7) 0.20sec)	②その上部が一気に崩落  (H50-3(7) 0.37sec)

図7 動的試験における斜面崩壊の状況。
 (記号の凡例 L10-3(7): 模型高さ150mm, 加振周波数10Hz, 3段階目の加振電圧, 7回目の試験)

モデルによる残留せん断ひずみと変位の分布図と改良型 DDA による変位図を示す。

これらの図をみると斜面崩壊時の法面の変位分布はそれぞれ図 7 の実験結果とよく対応している。また複合降伏モデルにおける残留せん断ひず

みの分布は、改良型 DDA における変位状況に対応しており、複合降伏モデルによる解析結果から不連続体モデルで解析すべき崩壊範囲、形態を精度よく推定できると思われる。

表 6 各解析手法による解析結果と実験結果との対応。

解析手法	シリーズ1における崩壊モードの推定	シリーズ2における崩壊時加速度	崩壊範囲	課題・考察
1 理論解析	—	一致しない	最初に想定する必要がある	簡易ではあるが適用は限られる
2 等価線形	LとHで差がなく推定は難しい	一致しない	最初に想定する必要がある LではOKだがHでは決まらない	破壊を考慮していないため変形やひずみでの判断が困難
3 非線形	推定は可能	一致しない	想定は困難	減衰定数やポアソン比の設定に課題
4 複合降伏	推定は可能	一致	おおむね一致	崩壊形態の推定も可能
5 個別要素法 (円形)	10Hzと50Hzで推定結果に差	一致	小さめ	粘性減衰係数の設定に課題
6 個別要素法 (多角形)	おおよそ対応	おおむね一致 崩壊開始が早い	大きめ	減衰定数やポアソン比の設定に課題 減衰効果が不十分
7 不連続変形法 (改良型)	おおよそ対応	おおむね一致 1step崩壊早い	大きめ	せん断剛性の拘束圧依存性に課題

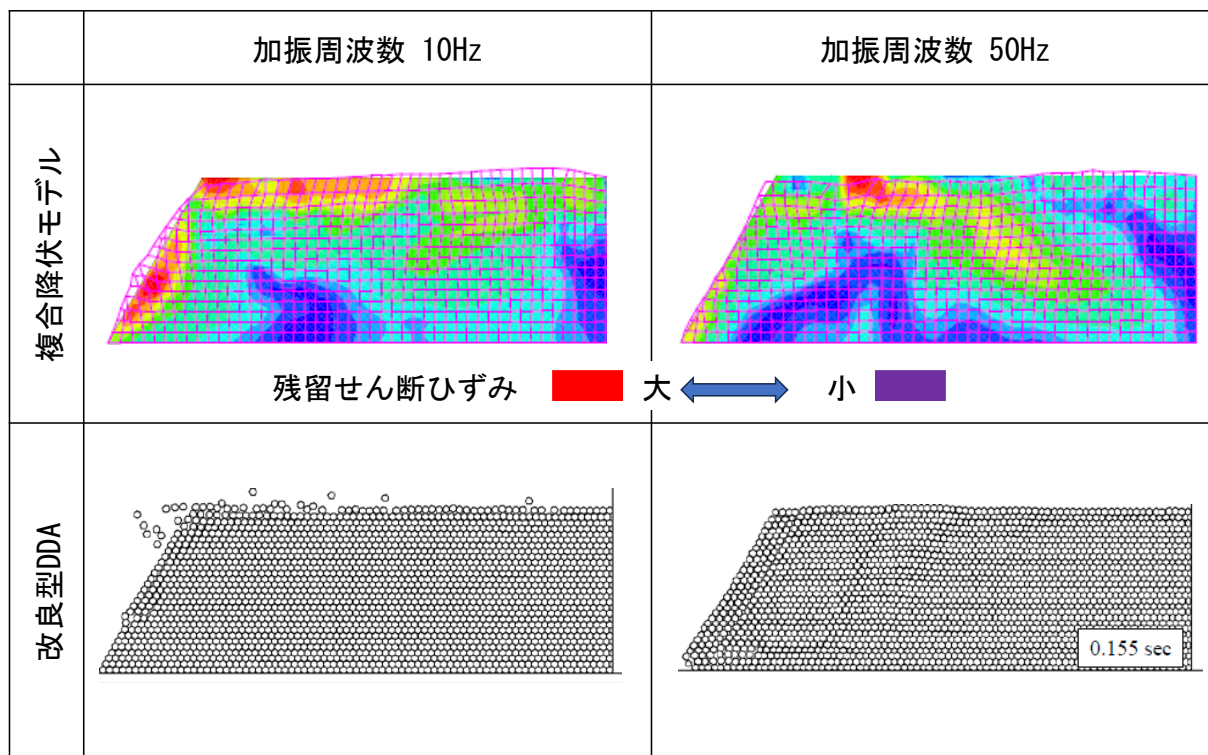


図 8 シリーズ 1 15 cm モデルに対する複合降伏モデルと改良型 DDA による解析結果 (土木学会, 2022).

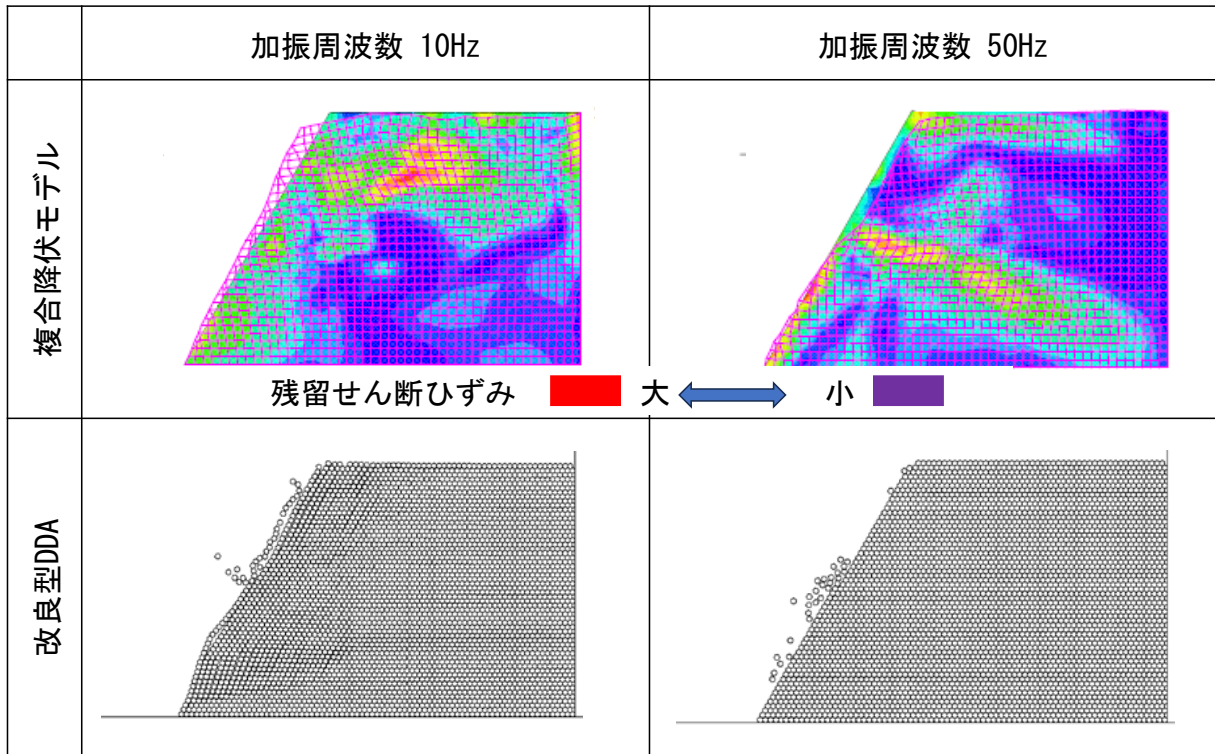


図9 シリーズ1 30cmモデルに対する複合降伏モデルと改良型DDAによる解析結果（土木学会，2022）.

5. 不連続性岩盤斜面の動的安定性評価フロー

4. で得られた知見に基づいて現時点で考えられる不連続性岩盤斜面の安定性評価フローの概要を示すと、図10のようになる。

安定性評価は、まず不連続面に関する地質情報に基づく崩壊形態の評価から始まる。この段階で十分な根拠をもって崩壊形態が推定できる場合は、極限平衡法などの理論解析や不連続体解析によってその安定性を検討することができる。この場合、静的震度で評価することができれば計算も容易であり結果も理解しやすい。ただし静的震度と地震動との関係は、まだ明らかにされておらず別途検討を要する（亀村，2022b）。また崩壊形態の推定で、単一の単純な形状の崩壊ブロックではなく複雑な形状や複数のブロックでモデル化せざるを得ない場合、それぞれのブロックに対し震

度をどう与えるのか。一様とするのか、応答を加味して分布させるのかなどについても検討を要する。

一方、地質情報が不十分な場合、あるいは十分な地質情報をもってしても崩壊形態の推定が困難な場合（情報が多すぎて統一的な見解が得られないこともある）、図10の①以下のフローによる検討を行う。このフローでは、まず不連続性に起因する非線形性を考慮できる連続体解析を用いてできるだけ簡単な斜面モデルに対して解析を行い、得られた結果（変形、応力、ひずみ、局所安全率など）から崩壊形態の推定を行う。そしてその結果に基づいて不連続体モデルで斜面をモデル化し、動的解析を行う。この場合、安定性と変位量（崩壊ブロックの移動量）の評価を同時に行うことができる。

とは言え、様々な構成式に基づき提案されて

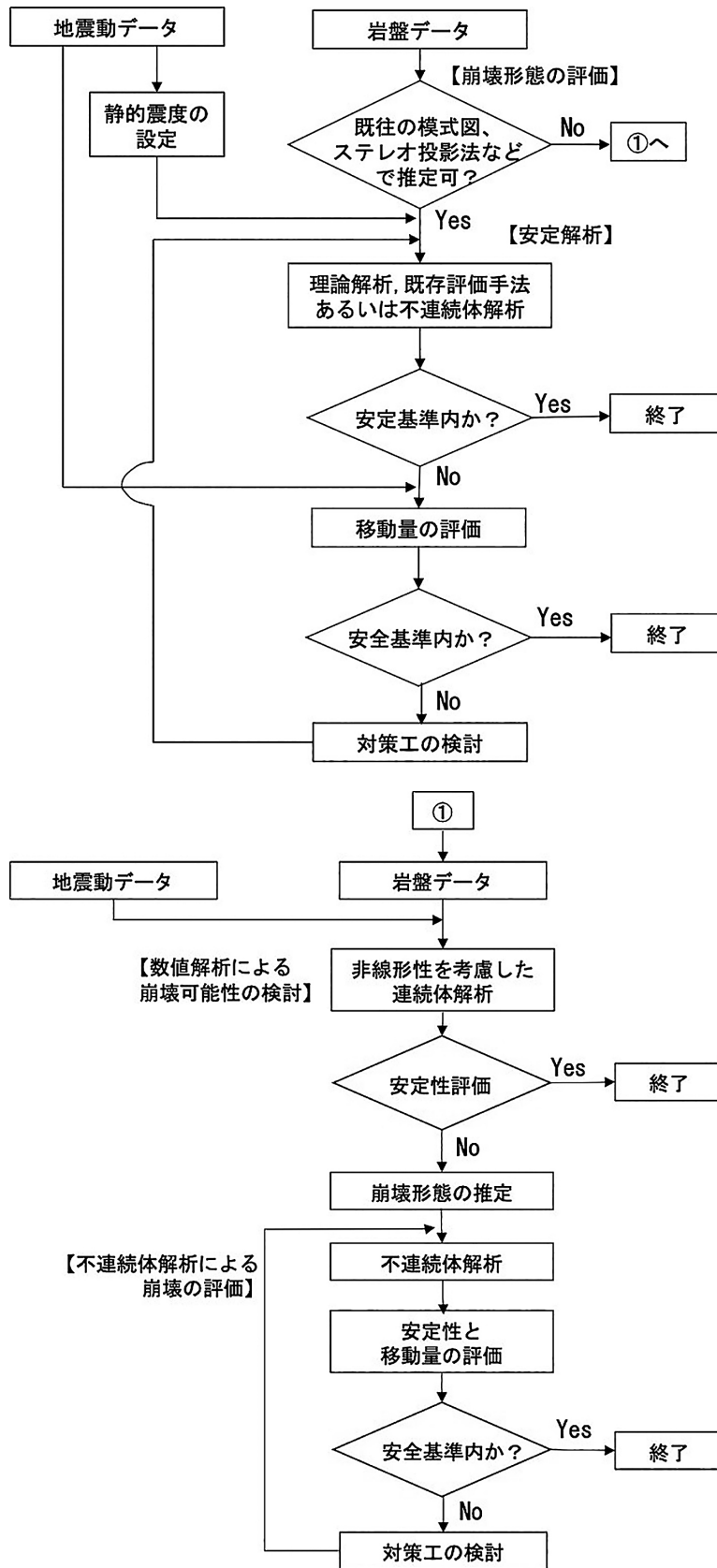


図 10 不連続性岩盤斜面の安定性評価フロー.

いる解析手法でどこまで不連続性に関する情報を考慮してモデル化する必要があるのか？ また各解析手法はどこまで不連続性に起因する非線形性を評価できているのか？ については、まだ様々な検討が必要である。一方、こうした非線形解析や不連続体解析を適用する場合、どのような地盤・岩盤情報が必要なのかについても明確にしておく必要がある。またここでは言及していないが、自重解析による動的解析の初期条件となる応力状態と動的解析における解析条件の整合性は取れているのか？ など検討すべき課題は多い。

6. おわりに

以上述べてきたように不連続性岩盤斜面の動的安定性を評価するに当たっては、安定か崩壊するかの検討だけではなく、崩壊が発生した場合にどのくらいのブロックがどのくらい移動するかも検討する必要がある。しかし、不連続性の卓越した岩盤斜面に対する様々な動的挙動解析手法の適用に当たって解決すべき課題は多く、問題点がどこにあるかを把握した上で詳細かつ網羅的な研究を行う必要がある。

こうした課題が解決され耐震性の評価が可能になれば、単純に「崩壊しないように補強を行う」ではなく、崩壊の形状と移動距離の評価結果に基づく「崩壊が発生しても大きな被害を受けない」という対策も可能となる。さらに崩壊の不確実性を考慮した地震リスク評価を行うことができれば、より現実的な対策を講じることができると考えられる。

文献

土木学会 (2018) : 原子力土木シリーズ 2 地盤

安定解析高度化小委員会研究報告書, 原子力土木委員会 地盤安定解析高度化小委員会編, 193p.

土木学会 (2022) : 第 3 フェーズ 研究成果報告書, <https://www.rock-jsce.org/archives/1150> → 委員会 HP → 岩盤動力学小委員会第 3 フェーズ報告書.

亀村勝美 (2022a) : 岩盤構造物の性能評価における課題 —地震被害に基づく山岳トンネルの耐震性評価—. 深田地質研究所年報, **23**, 55–77.

亀村勝美 (2022b) : 不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層斜面モデルの遠心力載荷加振実験 (4) —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講演集, 91–96.

日本電気協会・原子力規格委員会 (2015) : 原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG 4601-2015).

岡田哲実, 納谷朋広, 和仁雅明, 大塚康範 (2021) : 不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層の斜面モデルの動的挙動評価 (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論文集, 387–392.