

「岩盤斜面災害の軽減に向けて
～危険斜面の抽出技術と安定性評価技術」
土木学会平成29年度全国大会
2017年9月11日，九州大学伊都キャンパス

危険斜面の安定性評価技術

関西大学社会安全学部

小山 倫史

岩盤斜面の危険箇所のハザード評価(1)

- **ハザード評価**：岩盤斜面上の**ハザード**(災害となりうる潜在要因：危険因子)が実際に発した場合、斜面下方に位置する保全対象に対して、何らかの直接的な被害や影響を想定するため、**崩壊岩塊の運動軌跡や速度、移動距離や停止位置、移動岩塊量、崩壊岩塊の堆積状況**などを推定し評価すること。
- ハザード評価を行う際の入力情報として、**斜面上のハザードの特定**が必要である。すなわち、**地質構成や不連続面、地形、履歴**などに基づく**崩壊や落石の発生源や発生規模**および**崩壊形態**ができるだけ詳細に把握されていることが必要である。
- **保全対象との位置関係、斜面の性状**(露岩、崖錐、植生)、**斜面性状を反映した諸定数**などの事前評価が重要である。

岩盤斜面の危険箇所のハザード評価(2)

ハザード評価に必要とされる入力情報の例

入力情報	項目	備考
斜面ハザード情報	<ul style="list-style-type: none">✓ 発生現場所✓ 発生源高さ✓ 規模, 形状, 重心位置✓ 崩壊形態	<ul style="list-style-type: none">✓ 地質・性状, 不連続面の走行・傾斜・性状および深度方向での変化, 水理情報, 崩壊履歴などに基づく✓ 地質踏査, クライミング調査などによる
地形情報	<ul style="list-style-type: none">✓ 微地形を含む地形情報: 出尾根, 凹状頭部, 沢, オーバーハング✓ 保全対象との位置関係✓ 斜面傾斜(平均)	<ul style="list-style-type: none">✓ 細密な数値標高モデル, DEM (Digital Elevation Model) の作成
斜面性状情報	<ul style="list-style-type: none">✓ 斜面性状区分(露岩部, 崖錐部, 植生など)	<ul style="list-style-type: none">✓ 地質踏査, 近接斜め空中写真などによる
斜面定数	<ul style="list-style-type: none">✓ 法線および接線方向速度比✓ 接触バネ剛性, 減衰乗数✓ エネルギー比, 変形係数, ポアソン比, 粘性係数✓ ラメ定数など	<ul style="list-style-type: none">✓ 解析手法によって必要とされる定数は異なる.✓ 周辺に既往事例がある場合は事前(再現)解析が有用

岩盤斜面の危険箇所のハザード評価(3)

ハザード評価項目

ハザードの種別	評価項目	備考
岩盤崩壊	<ul style="list-style-type: none">✓ 崩壊堆積物長さ✓ 崩壊堆積物幅✓ 崩壊堆積物厚さ	<ul style="list-style-type: none">✓ リスク評価(土砂除去費用の算出)などに使用
落石	<ul style="list-style-type: none">✓ 軌跡,特に保全対象における最大飛跳高✓ 平面経路✓ 横断,縦断への到達域(最大到達距離)✓ 荷重またはエネルギー	<ul style="list-style-type: none">✓ 「ロックシェッドで防護できる程度のもの」✓ 剛な待ち受け工(コンクリート材,鋼材など):荷重情報が必要✓ 柔な待ち受け工(ワイヤ工,ネット工):エネルギー情報が必要

ハザード評価の方法(1)

- ハザード評価の方法は、大きく**経験・統計的手法**と**数値解析手法**に区分することができる。なお、それぞれの手法について崩壊形態から**落石**と**岩盤崩壊**に区分することができる。

■ 経験・統計的手法

- ✓ **岩盤崩壊**：崩壊事例を統計的に整理し、斜面高さや斜面端部からの斜面上端部の見通し仰角といった基本的な数値から、崩壊岩塊の到達範囲や飛散幅を推定する。
- ✓ **落石**：**落石対策便覧**に示された評価式に代表されるもので、落石実験から求められたものである。
 - 簡易な調査や地形図の読み取りなどで実施可能で、簡易な評価手法として詳細な検討を行う斜面を抽出するためのスクリーニング手段として適用できる。また、**GIS技術**を活用したシステムの構築が試みられている。

ハザード評価の方法(2)

- **数値解析手法**: 何らかの力学的な原理に基づいた解析手法であり, **質点系解析**, **連続体解析**, **不連続体解析**などがある.
- ✓ **岩盤崩壊**: 複数の岩塊の移動, 落下, 衝突などの現象を解析する必要があることから, 不連続体解析の適用が多い.
- ✓ **落石**: 岩塊の落下や跳躍といった現象を解析するため, 質点系解析が不連続体解析が用いられる.
 - 斜面形状や岩塊の形状(亀裂の分布)などの幾何データと岩塊の運動を規定するパラメータを入力することから, 岩塊の移動経路, 速度や広がりなどを予測することが可能であり, 詳細な検討に適している.

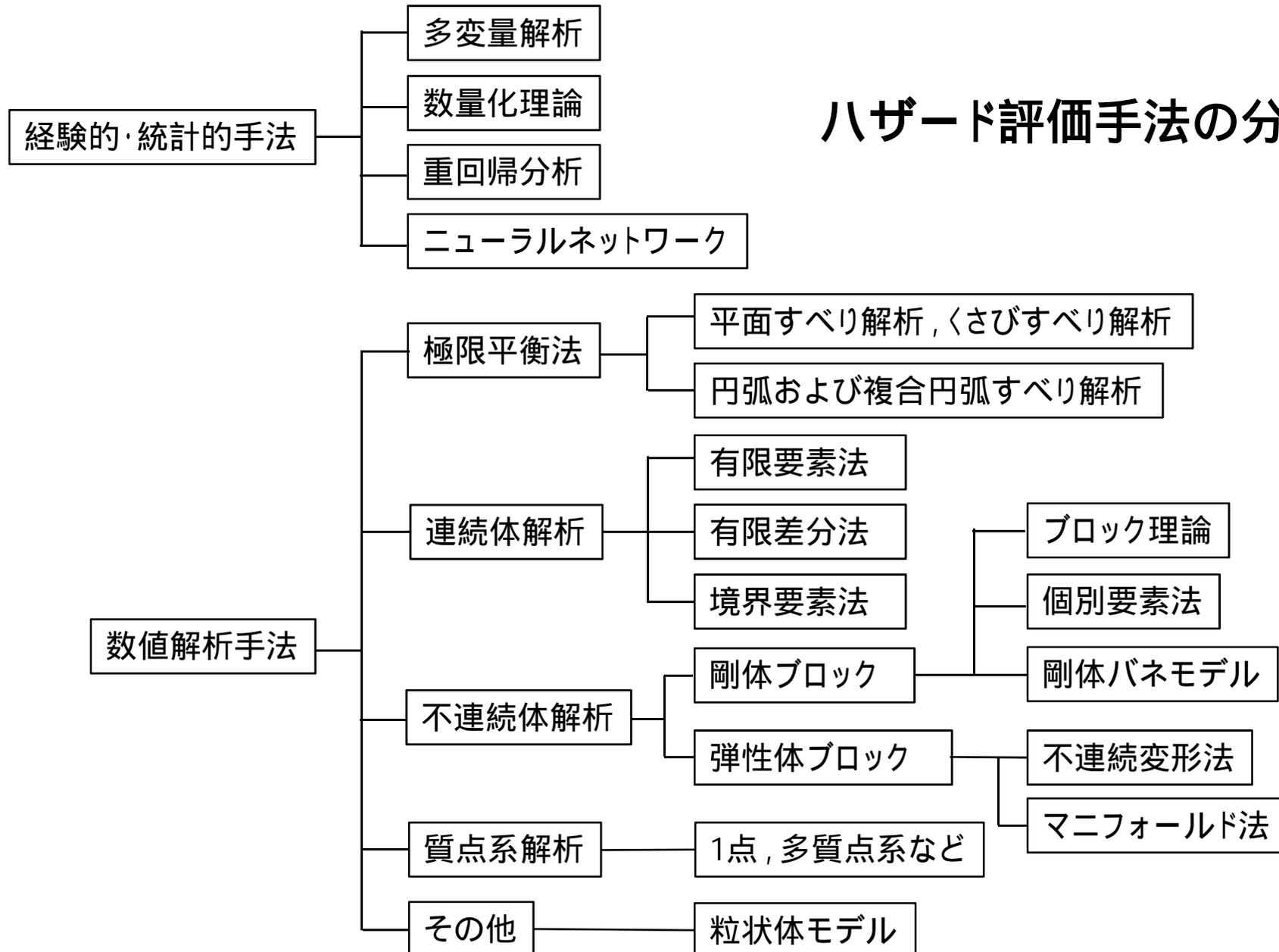
ハザード評価の方法(3)

代表的なハザード評価のための解析手法

対象	区分		解析手法	入力パラメータ	評価項目
岩盤崩壊	経験・統計的手法		桑野らの方法など	斜面高さ, 幅, 見通し角度など	到達位置, 広がり幅
	数値解析手法	不連続体解析	個別要素法	斜面形状, 亀裂分布, 接触バネ剛性, 減衰定数など	速度, 跳躍高さ, 軌跡, 到達範囲, 崩土厚
			不連続変形法	斜面形状, 亀裂分布, 接触バネ剛性, 速度エネルギー比, 変形係数, ポアソン比, 粘性係数など	
落石	経験・統計的手法		落石対策便覧式	斜面高さ, 斜面傾斜角, 伽面区分	速度, 跳躍高さ
	数値解析手法	質点系解析	ROCKFALLなど	斜面形状, 法線方向速度比, 接線方向速度比	速度, 跳躍高さ, 軌跡(3次元解析では平面軌跡)
			個別要素法	斜面形状, 落石形状, 接触バネ剛性, 減衰定数など	速度, 跳躍高さ, 停止位置, 軌跡(3次元解析では平面軌跡)
		不連続変形法		斜面形状, 落石形状, 接触バネ剛性, 速度エネルギー比, 変形係数, ポアソン比, 粘性係数など	

ハザード評価の方法(4)

ハザード評価手法の分類



ハザード評価の方法(5)

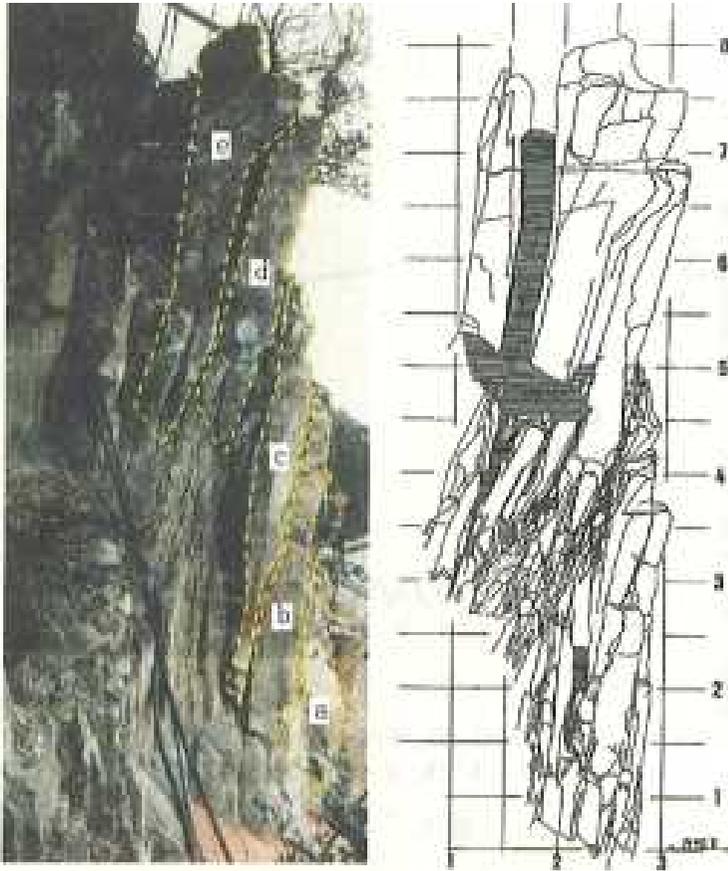
崩壊形態と解析手法の一覧表

形態		評価内容	解析手法						
			極限 平衡法	有限 要素法	有限 差分法	個別 要素法	不連続 変形法	マニフォ ールド法	質点系 解析
岩盤崩壊	崩落	安定							
		ハザード	—	—	—				
	滑動	安定							
		ハザード	—						
	転倒	安定							
		ハザード	—						
	座屈	安定							
		ハザード	—						
落石	安定		—	—					
	ハザード	—	—	—					

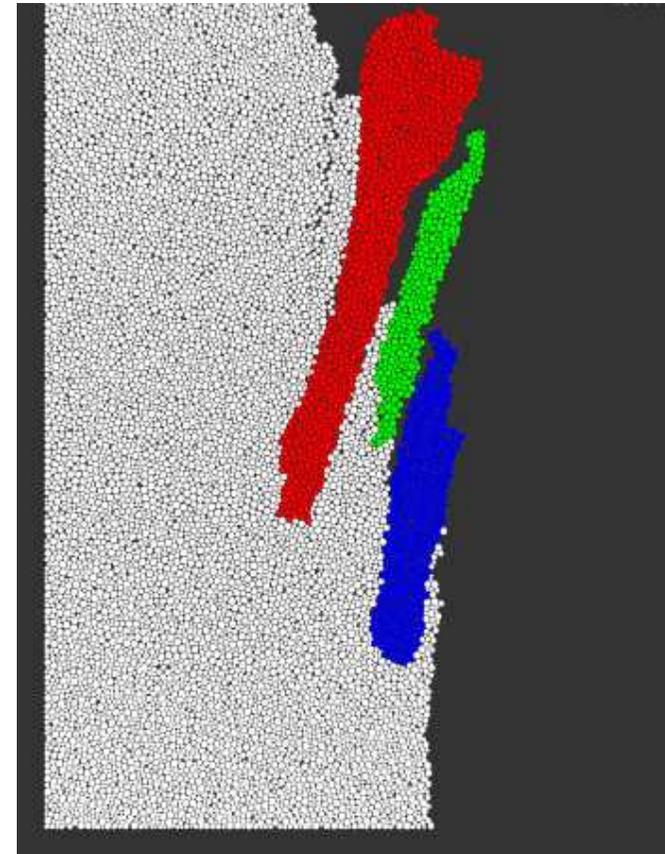
凡例 :適用例多数, :適用例あり, :適用例少数, - :資料なし

岩盤斜面のハザード評価の事例(1)

■ (粒状体)個別要素法を用いた解析事例1



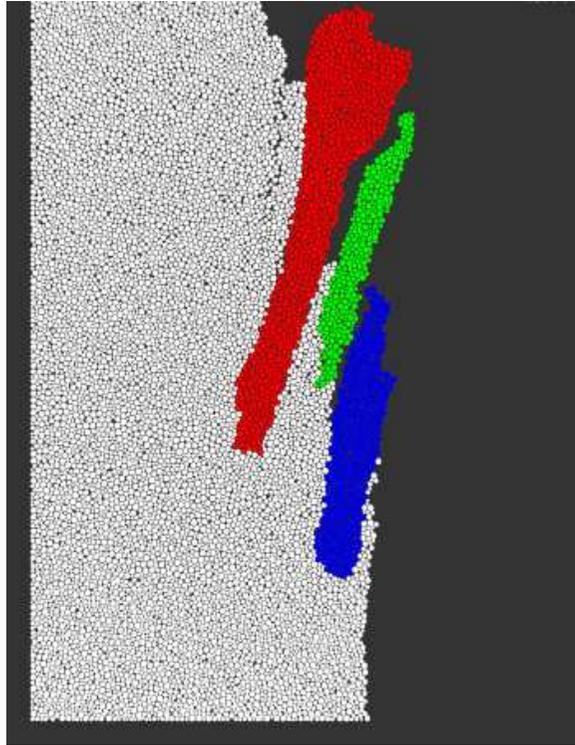
1999年3月, 天鳥橋西地区(和歌山県)
で発生した岩盤崩壊



2D-DEM モデル

大槻敏ほか. 粒子間ボンディング力を適用した個別要素法による2次元岩盤斜面の崩壊シミュレーション解析. 材料, 2007; 56(9): 846-850.

岩盤斜面のハザード評価の事例(2)



< 解析モデルの作成プロセス >

ランダム径の粒子を六角形格子状に発生させ、重力落下によりパッキングする (12000個, 平均粒径: 5.7cm) .

粒子間結合力を与える .

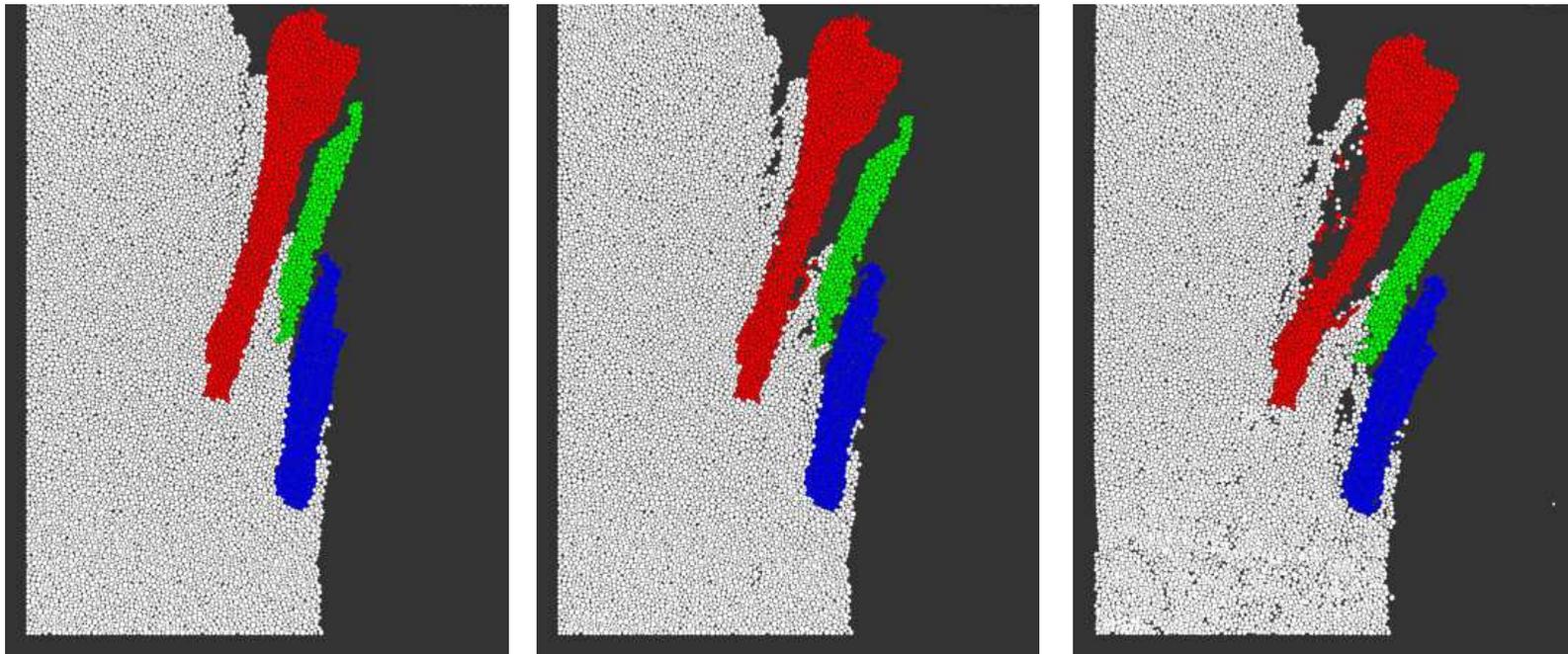
斜面形状に切り取る .

既存の亀裂の位置に相当する粒子の結合力を強制的に解除 (粒子間の引張力を無効化) する .

< 微視的パラメータの決定方法 >

- ✓ 二軸圧縮試験のシミュレーションを実施し、粒子間結合力、接触バネ剛性をキャリブレーションにより求める .

岩盤斜面のハザード評価の事例(3)



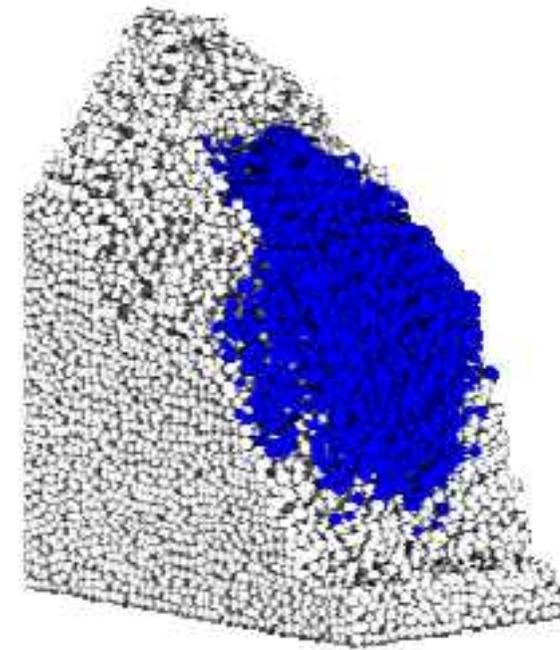
亀裂の進展に伴う、トップリング崩壊の再現

岩盤斜面のハザード評価の事例(4)

■ (粒状体)個別要素法を用いた解析事例2



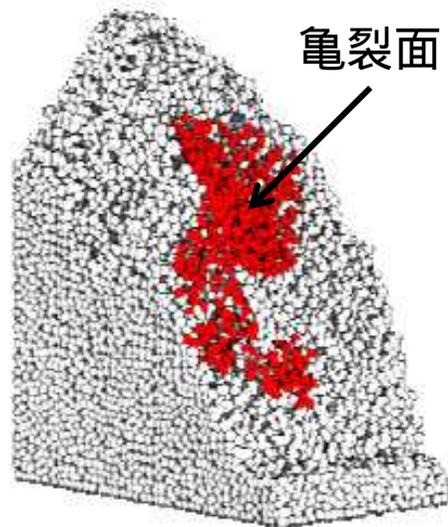
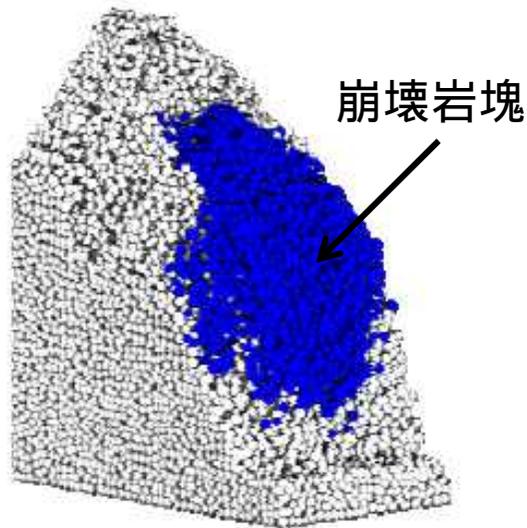
2004年1月13日, 北海道幌泉郡えりも町字
庶野(国道336号線)で発生した岩盤崩壊



3D-DEM モデル

大槻敏ほか, 3次元個別要素法による岩盤斜面の崩壊挙動及び亀裂進展シミュレーション,
土木学会論文集C, 2008; 64(3): 607-615

岩盤斜面のハザード評価の事例(5)



< 解析モデルの作成プロセス >

ランダム径の粒子を六角形格子状に発生させ、重力落下によりパッキングする

(65194個, 粒径: 1.25 ~ 1.65m)

粒子間結合力を与える。

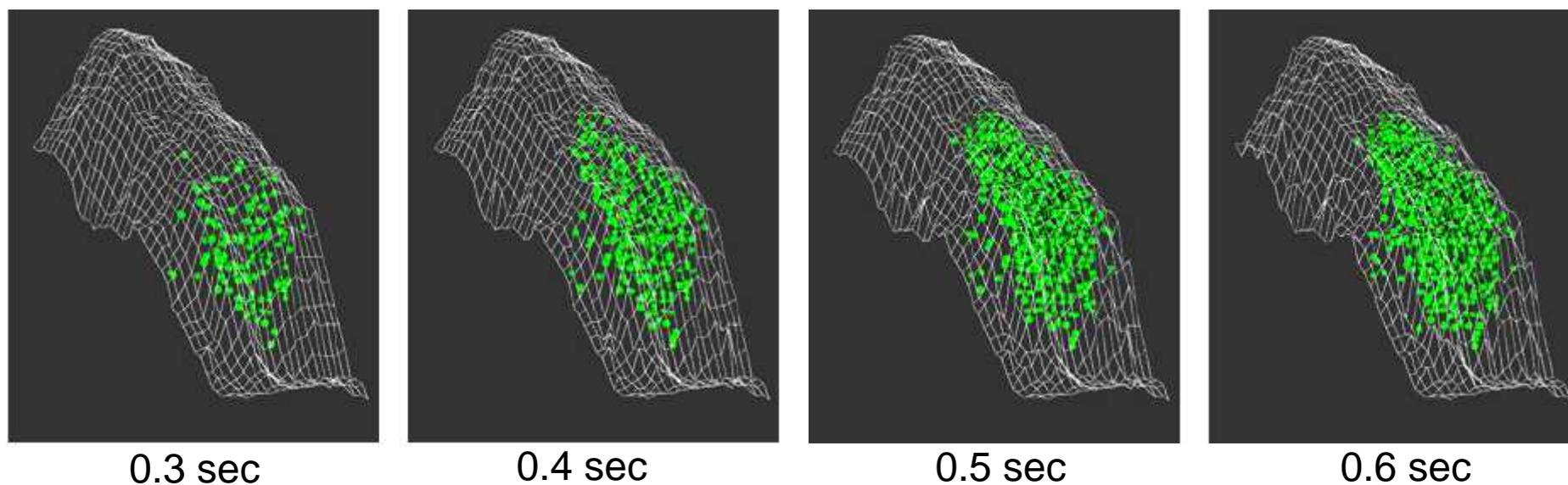
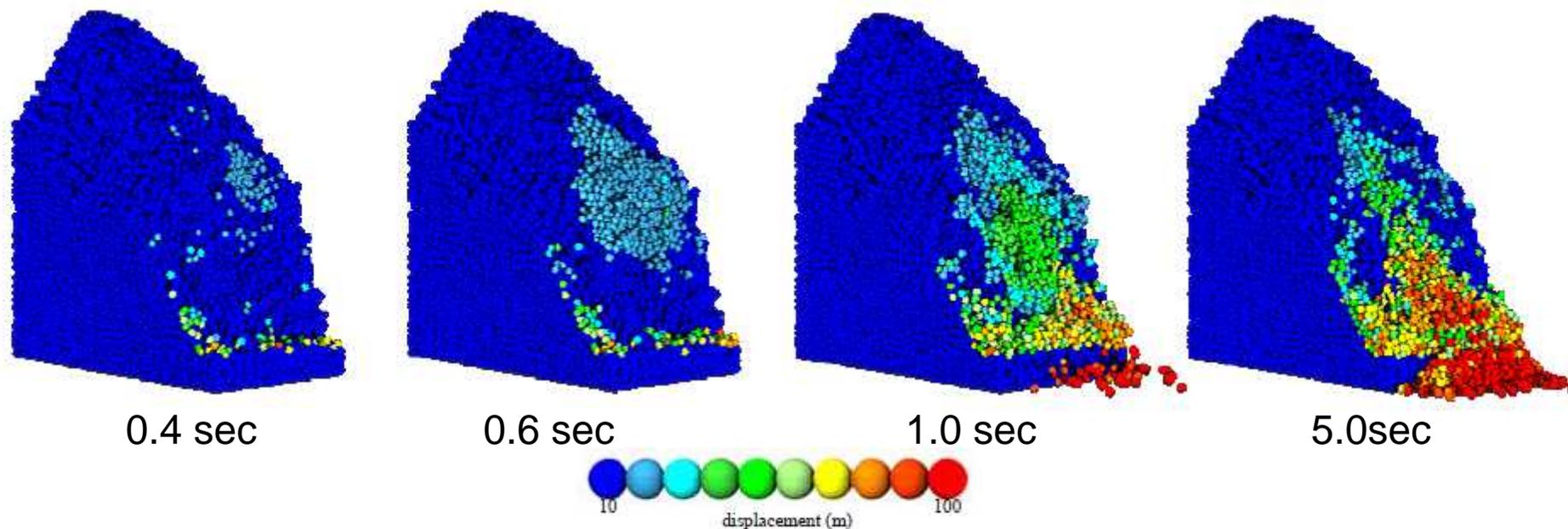
斜面形状に切り取る(粒子数: 37755個)。

既存の亀裂の位置に相当する粒子の結合力を強制的に解除(粒子間の引張力を無効化)する。

< 微視的パラメータの決定方法 >

- ✓ 三軸圧縮試験, 圧裂試験のシミュレーションを実施し, 粒子間結合力, 接触バネ剛性をキャリブレーションにより求める。

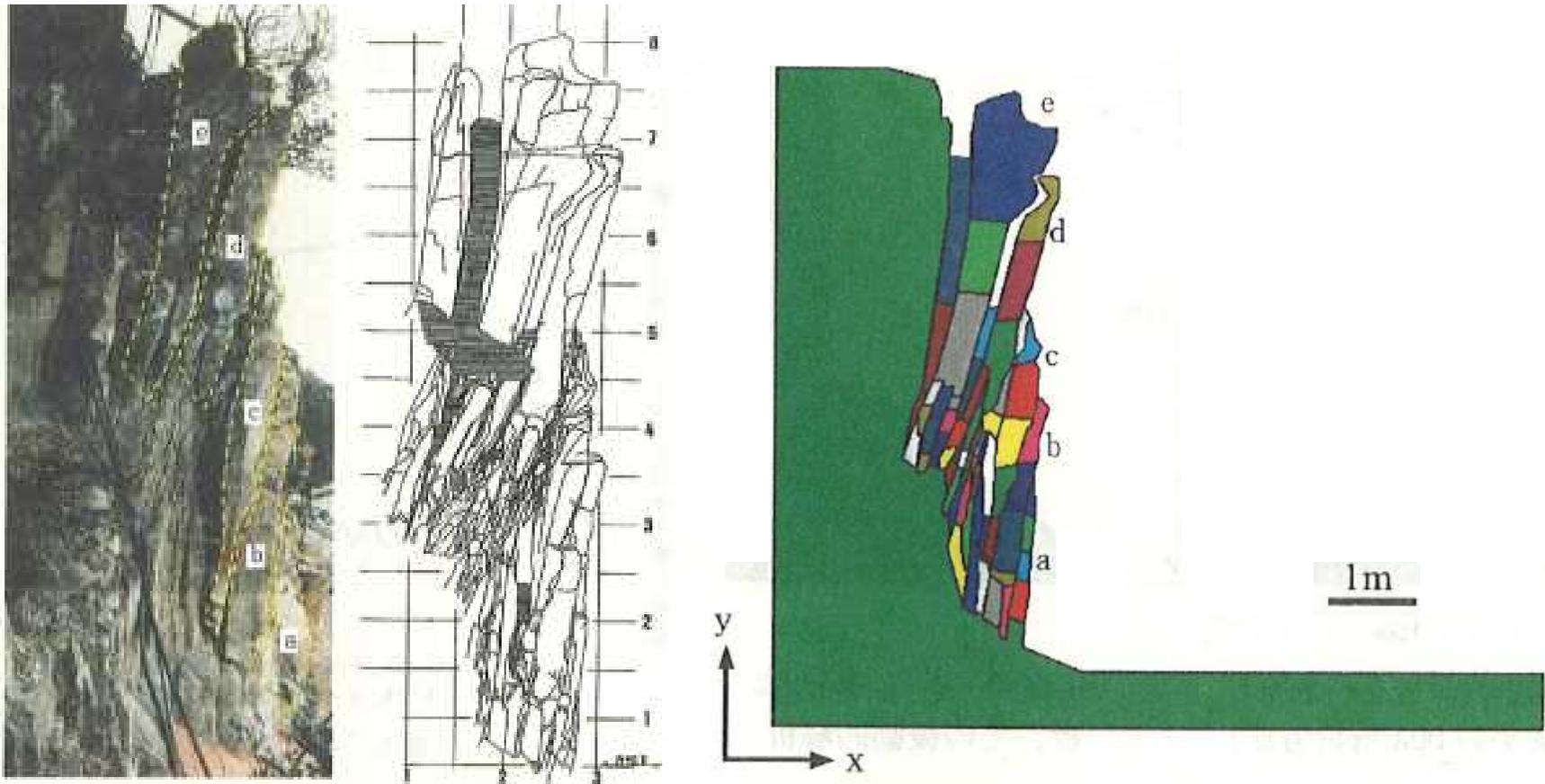
岩盤斜面のハザード評価の事例(6)



(上) 岩塊の移動距離の分布, (下) 崩壊岩盤内の亀裂進展の様子

岩盤斜面のハザード評価の事例(7)

■ 不連続変形法を用いた解析事例1

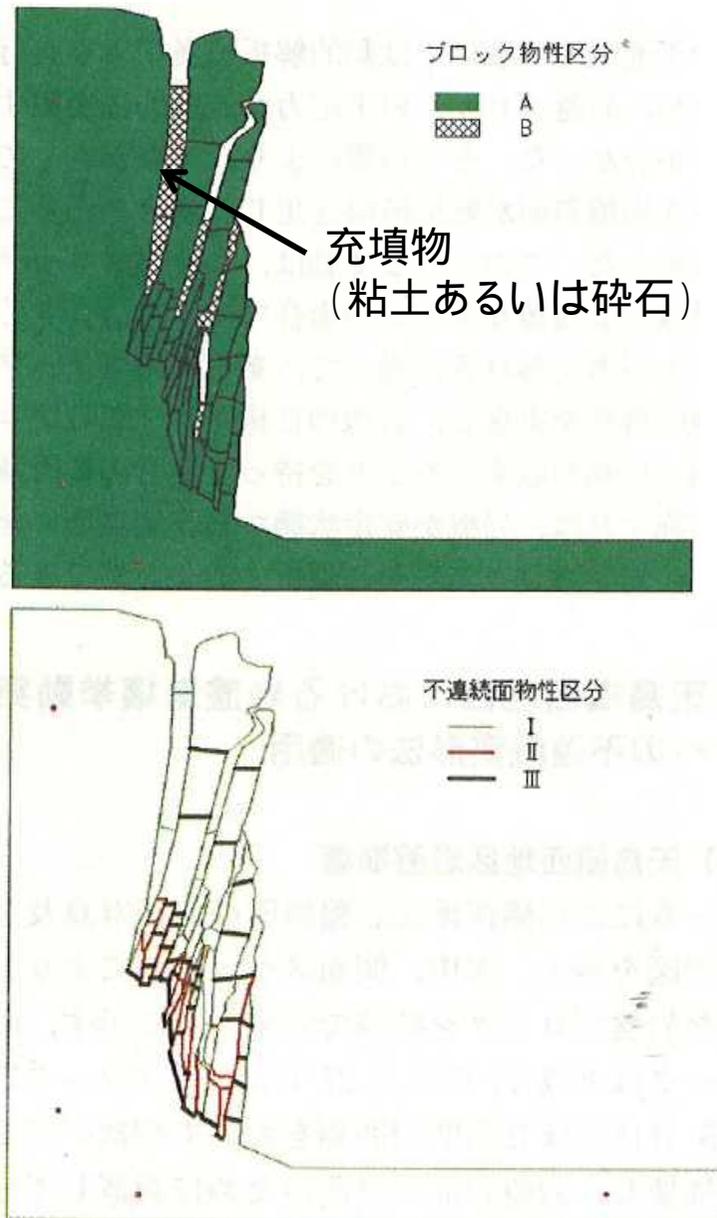


1999年3月, 天鳥橋西地区(和歌山県)
で発生した岩盤崩壊

2D-DDA モデル

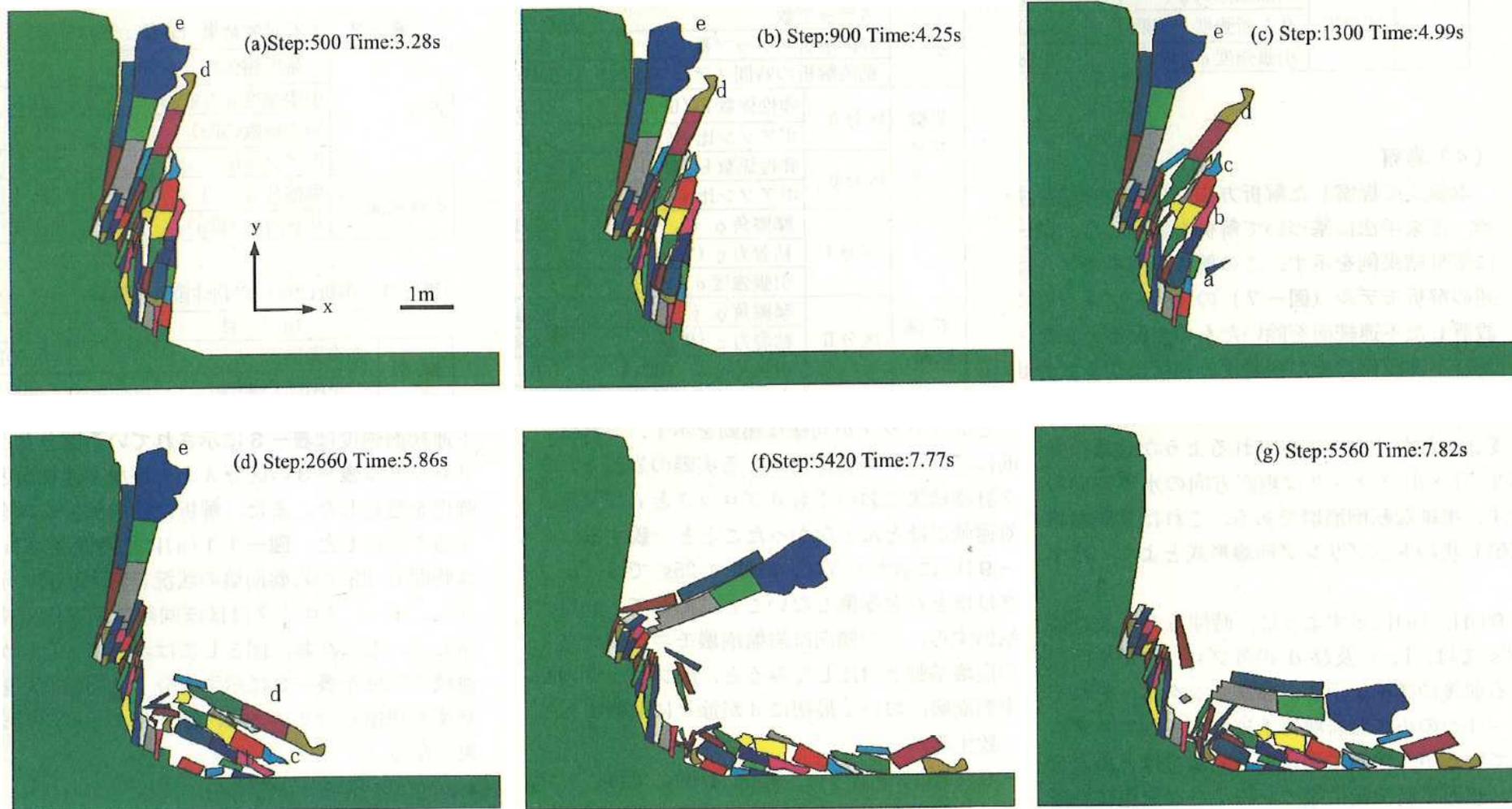
門間敬一ほか, 岩盤崩壊メカニズムを評価するための不連続変形法の適用に関する研究, 土木学会論文集No.757/III-66,45-55.

岩盤斜面のハザード評価の事例(8)



項目		値	
解析 パラ メー タ	許容変位比	0.001	
	バネ剛性 P(MN/m)	200	
	ステップ数	8000	
	静的解析ステップ数	300	
	動的解析の時間ステップ幅(s)	0.001	
岩盤 ブロ ック	区分 A	弾性係数 E (GPa)	24.5
		ポアソン比 ν (-)	0.2
	区分 B	弾性係数 E (GPa)	2.45
		ポアソン比 ν (-)	0.3
不 連 続 面	区分 I	摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)	32.4
		粘着力 c (MPa)	0
		引張強度 σ_t (MPa)	0
	区分 II	摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)	32.4
		粘着力 c (MPa)	0.056
		引張強度 σ_t (MPa)	0
	区分 III	内部摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)	45.7
		せん断強度 τ_t (MPa)	3.90
		引張強度 σ_t (MPa)	3.18

岩盤斜面のハザード評価の事例(9)

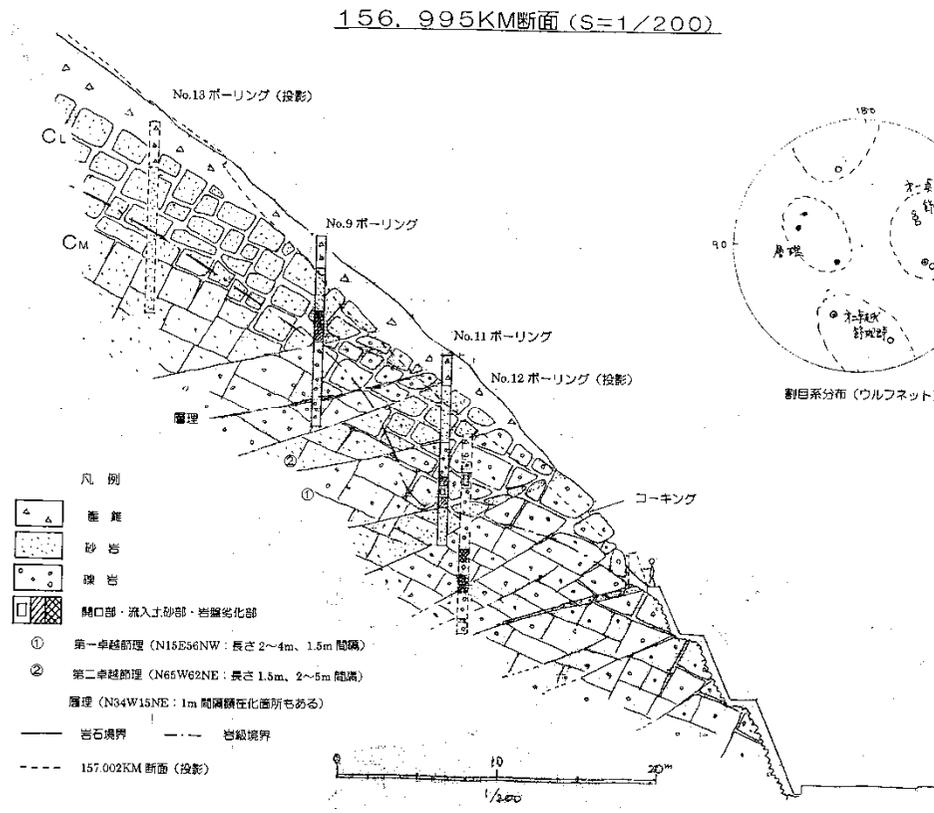


トッピング崩壊の再現

岩盤斜面のハザード評価の事例(10)

■ 不連続変形法を用いた解析事例2

岩盤不連続面の空間分布の不確実性を考慮した解析



岩盤不連続面の空間分布特性

	不連続面方向		円盤半径		空間分布
	Fisher分布		対数正規分布		一様分布
	平均方向	Fisher係数	平均長さ	変動係数	1次元亀裂密度
第一卓越節理	N15E 56NW	100	1.91m	0.75	2/3本/m
第二卓越節理	N65W 62NE	100	1.00m	0.75	2/7本/m
層理	N34W 15NE	200	20.0m	0.1	1.0本/m

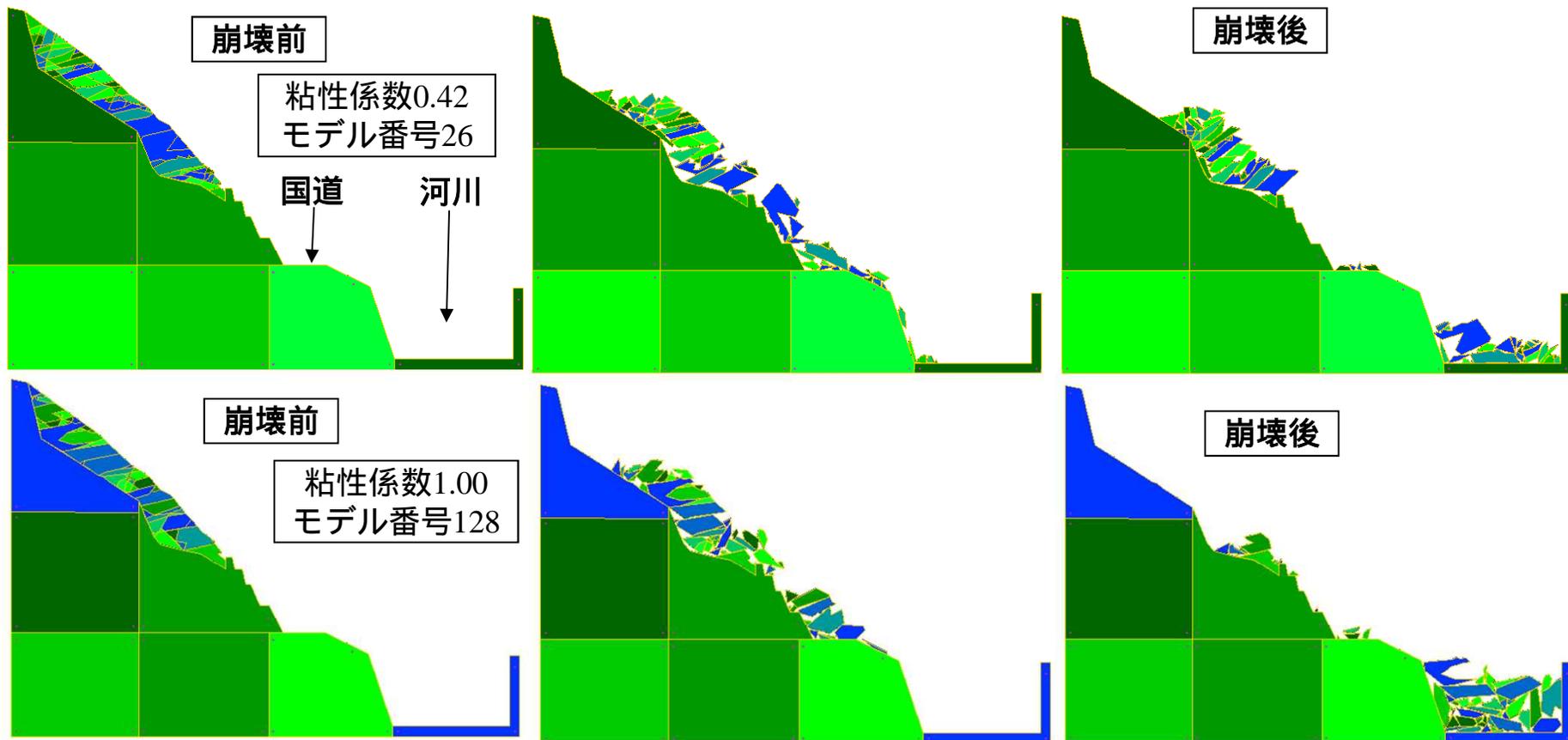
太字の部分は、仮定したものである

兵庫県美方郡村岡町入江地区の国道9号線に隣接する斜面

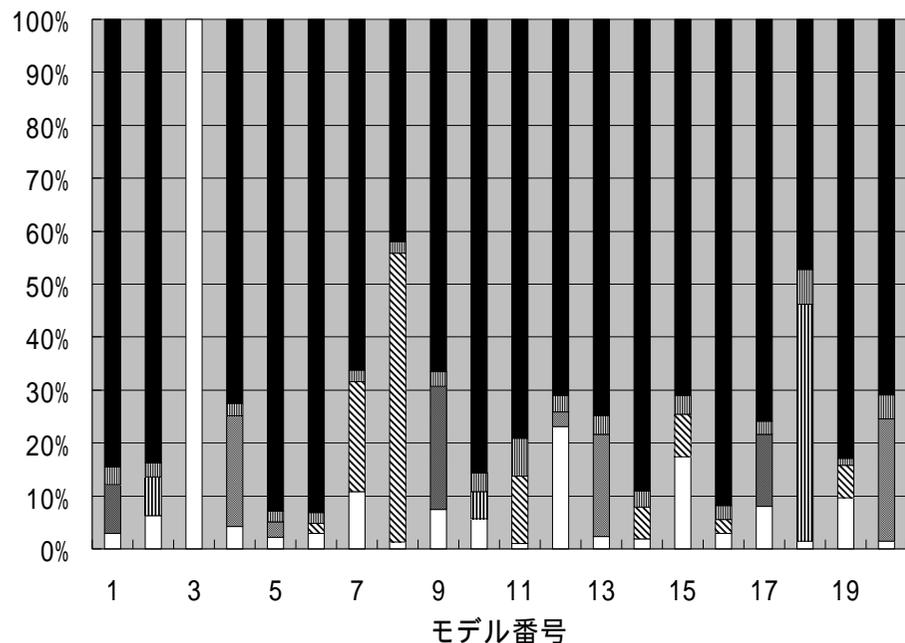
大津宏康ほか, 不連続面の空間分布特性に着目した斜面崩壊に伴う社会的損失推定, 土木学会論文集, No. 736/III-63, 231-248, 2003.

岩盤斜面のハザード評価の事例(11)

モンテカルロ・シミュレーション(200パターン)



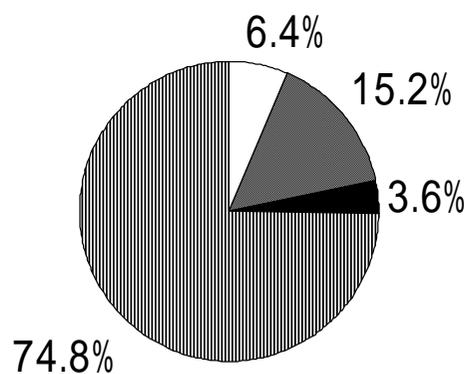
岩盤斜面のハザード評価の事例(12)



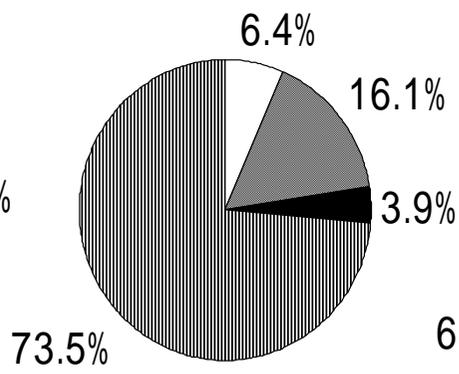
DDAによる解析結果(モデル1~20, 粘性係数0.42)

岩塊の停止位置別の崩壊ブロック体積の平均値および標準偏差

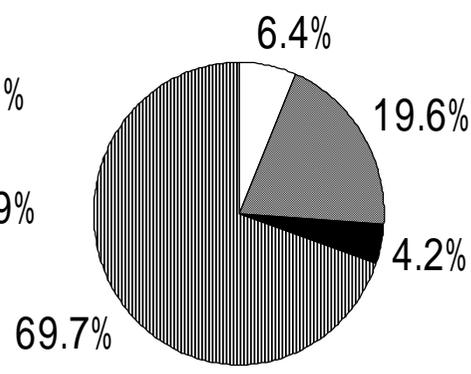
粘性係数		安定	斜面内	道路上	河川内
0.42	平均値 (m ³)	236.2	556.4	132.0	2747.0
	標準偏差	307.9	528.0	82.9	597.5
1.00	平均値 (m ³)	236.2	590.9	144.6	2697.4
	標準偏差	308.1	573.8	101.5	635.4
2.20	平均値 (m ³)	235.8	719.4	154.5	2556.2
	標準偏差	307.9	657.2	70.7	708.8



粘性係数0.42



粘性係数1.00



粘性係数2.20



崩壊ブロック体積の停止位置別割合

岩盤斜面のハザード評価の課題(1)

岩盤崩落におけるハザード評価における課題を以下に挙げる。

- ✓ 経験的手法では、分析に用いることのできる崩壊事例が少なく、地形、地質および地域性を加味したものとなっていない。
- ✓ 数値解析手法では、多くのパラメータを設定しなければならず、その設定方法が課題である。パラメータの中には、現場試験(例えば、粘性係数など)や室内試験で決定するのが困難なものもある。また、亀裂面の強度などは、室内試験で求めることは可能であるが、特殊な試験となること、試験結果から**スケール効果**を考慮して解析に用いなければならないなどの課題もある。また、経験的に設定されているパラメータもある。

岩盤斜面のハザード評価の課題(2)

- ✓ 不連続体解析では、崩壊すると想定される岩塊に対して、どのようなきっかけで崩壊を発生させるかについても決まった方法はない。 岩盤崩落では、**不連続面の強度を低下させる**ことで崩壊を開始させるケースが多い。地震による岩盤崩壊については、地震外力をモデル基盤に入力することで崩落を開始させている。 **降雨**や**雨水浸透**についてはほとんど考慮されていない。
- ✓ 落石では、落石実験や落石事例の再現解析を行うことで解析手法の適用性やパラメータ設定の方法などが検討されている。 岩盤崩落では、崩落事例の再現を行うことで解析手法の適用性やパラメータ設定の方法などが検討されている。 崩壊岩塊の到達範囲や堆積状況などについても、現地状況と比較されているが、ハザード評価事例は少ない。岩盤崩落ではモンテカルロ・シミュレーションが行われることは稀で、崩壊岩塊数は少ない場合に限られている。