

評価体系の現状

- 1 はじめに
指針類の扱い
- 2 従来技術(現行の評価手法)
- 3 岩塊のモデル化

セッション3 崩落岩塊の評価

電力中央研究所 原子力リスク研究センター

吉田 泰基

土木学会 原子力土木委員会 地盤安定性評価小委員会講演会
「原子力施設に関する地盤安定性評価技術の現状—どこまでできて、何が課題か—」

2020年7月28日

電力中央研究所

1 はじめに ②審査ガイド

◇ 基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に関わる審査ガイド
原子力規制委員会 平成25年6月

原子炉建屋等の耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に関連して、

2. 基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に関する安全審査の基本方針
 - (1) 原子炉建屋等の基礎地盤の安定性
(3章に記載されている)
 - (2) 周辺斜面安定性
Sクラスの施設の周辺斜面が、想定される地震動の地震力により崩壊し、当該施設の安全機能が重大な影響を受けないことを確認する。

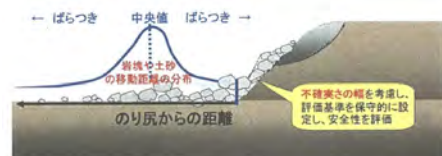
1 はじめに ①JEAG 4601-2015

◇ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-2015 日本電気協会

3.2.2.2 評価対象断面の選定

周辺斜面の評価対象断面は、斜面法尻からSクラス施設との離間距離が、約50m以内あるいは斜面高さの約1.4倍以内の斜面のうち、斜面高さ、斜面勾配、風化岩の厚さ及び滑りの方向を考慮し、適切に選定する。

【解説】 必要に応じて、地盤の大変形から破壊に至る挙動を考慮できる解析法(粒子法、個別要素法等)を用いてSクラス施設へ到達する可能性がある場合においては、安定性評価の対象とすべき斜面として選定する(参考資料3.10参照)



参図3.10-3 不確かさの幅を考慮した斜面の安定性評価

参考資料3.10 斜面崩落による土塊等の到達距離の解析評価例

1 はじめに ③日本原子力学会の実施基準 2015

◇ 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する
実施基準:2015 日本原子力学会 2015年12月

付属書L(規定) 原子炉施設周辺斜面の崩壊による炉心損傷への影響評価

L.1 原子炉施設周辺斜面の崩壊による炉心損傷への影響評価

原子炉施設周辺斜面の崩壊が炉心損傷頻度に与える影響は次の手順で確認する。

- a) 斜面の高さ及び重要施設と斜面との距離から、斜面崩壊による炉心損傷頻度への影響の有無を**工学的判断**に基づき決定する。
- b) 上記a)の結果に基づき斜面崩壊が炉心損傷頻度に影響を与えると判断した場合は、**斜面の崩壊確率を評価し**、影響を与える可能性のある建屋・機器などの損傷確率と比べることなどによって、**スクリーニングアウトが可能かどうか判断する**。
【付属書Y(参考)参照】
- c) 斜面崩壊確率の評価によるスクリーニングアウトができない場合は、斜面崩壊後の**土塊又は岩塊が炉心損傷頻度に及ぼす影響を確認する**。(付属書N(参考)参照)(付属書Z(参考)参照)

1 はじめに ④

■ 周辺斜面の崩壊の影響を考慮することが盛り込まれている。

考慮する項目

- ・**Sクラス施設へ到達する可能性の有無**
- ・**土塊又は岩塊が炉心損傷頻度に及ぼす影響**
- ・**地震力により崩壊し、当該施設の安全機能が重大な影響を受けないことを確認する。**
- ・**緊急時のアクセスルートに及ぼす影響**

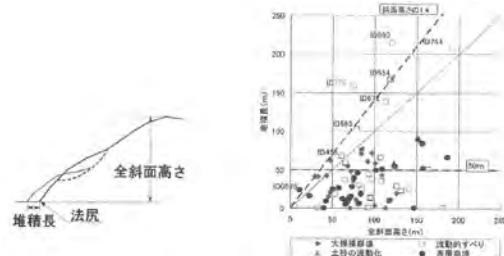
■ 斜面崩壊後の崩落解析について、現状のレベルで確率論的に評価できるモデル化方法、解析方法を整理し、解析事例を示すべきかと思われる。

2 従来技術(現行の評価手法)

①到達距離の事例分析

◇ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-2015 日本電気協会
参考資料3.9 斜面崩壊による土塊等の到達距離の事例

土木学会(2009)より、2004年新潟県中越地震の斜面崩壊の事例を基に斜面崩壊や崩壊土塊の移動距離を分析した結果、「JEAG4601-1987に定められる周辺斜面の離間距離に関する目安値は、崩壊土塊が水の影響を顕著に受ける場合を除いて、十分に保守的なものとなっていることがわかった。」としている。



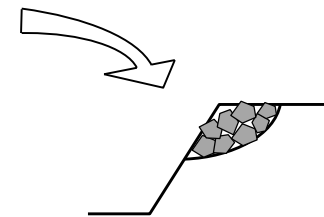
参考図3.9-3 周辺斜面の離間距離に関するJEAG4601-1987目安値との比較

◆ 離間距離により影響の有無を確認。

3 岩塊のモデル化

岩塊のモデル化

- i) 岩塊サイズ
- ii) 岩塊形状
- iii) 岩塊の粒度分布



どのようにモデル化するか？

※ 物性のばらつきを考慮した確率論的評価を行うには、計算効率を考慮する必要がある。

本セッションの発表の位置づけ

岩塊のモデル化方法	発表
①連続体解析	阿部(鉄道総合技術研究所) 「MPMを用いた斜面崩壊による 土砂流下・堆積挙動の基礎的検討」
②不連続体解析	栃木(電力中央研究所) 「斜面の地震時崩壊を想定した 岩塊衝撃力のDEM解析」
③質点系解析	津田(東京都市大学) 「3次元質点系解析の落石の 確率論的衝突速度ハザード評価」

M P Mを用いた斜面崩壊による土砂 流下・堆積挙動に関する基礎的検討

令和元年9月3日

中村 晋

日本大学工学部土木工学科

(発表：阿部慶太)

内容

- 背景
- 目的と検討方法
- 解析モデル
- 平坦部における平面堆積状況
- まとめ

背 景

- 地震による斜面崩壊が構造物に及ぼした被害事例(東北地方太平洋沖地震)
 - ・白河市葉ノ木平の家屋倒壊
 - ・福島第一原子力発電所の送電鉄塔の倒壊

→斜面崩壊の流下挙動や衝撃作用が社会基盤施設に及ぼす影響を定量的に評価することが必要
- 2001年国土交通省告示第322号により急傾斜地の崩壊による建築物に作用する力の大きさを簡易に算定する手法が提示
 - ⇒崩壊時の速度変化や土砂の変形を考慮した衝撃作用などの合理的な評価手法の構築が望まれている。
- 2018:模型実験に基づく土砂崩壊による流動・堆積挙動および衝突挙動へのMPM適用性を検証(中村 晋¹・阿部 慶太²・渡辺 健治³・中島 進⁴
，実験による崩壊土の流下挙動と衝撃作用の分析およびMPMによる再現解析，土木学会論文集C(地圏工学)，Vol. 74，No. 3，259-274，2018.)
- 影響評価/対策への活用：斜面崩壊後の流下・堆積挙動の特性の把握など

目的と検討方法

- 目 的：妥当性が確認された解析法MPM(Material Point Method)を用い，斜面崩壊後の流下・堆積挙動の基本的な特性を確認するため，崩壊斜面の素因とその関係を把握する。
- 検討手順：
 - 反力壁の無い大型流路模型の解析パラメータを用い，斜面の素因として斜面の傾斜角，摩擦角，土砂の土量をパラメータとした解析を実施
 - 以下の2つの堆積状況を表す特性の比較
 - ・平坦部における到達距離
 - ・平坦部における縦断方向の高さ分布

解析手法の概要

MPMは、Lagrange粒子とバックグラウンド格子で構成されている。

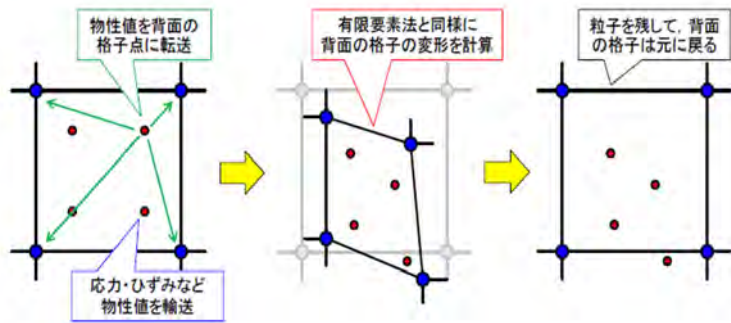
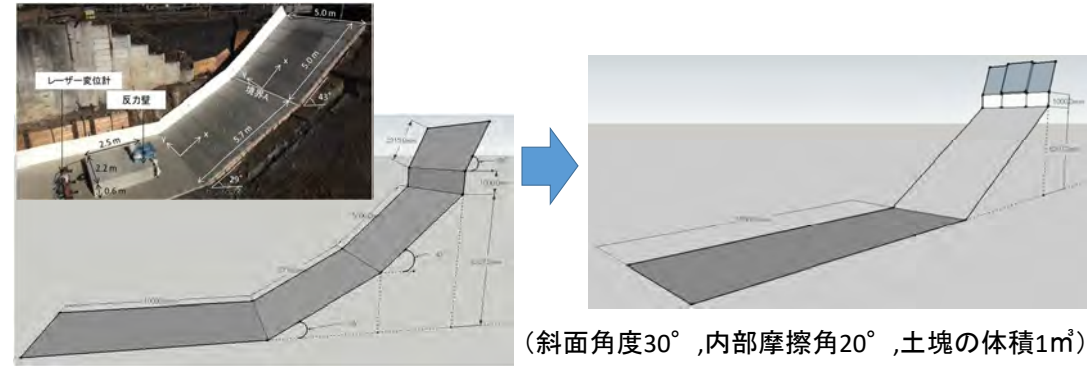


図 MPMの計算の流れ

解析モデル

既往の研究で用いられたモデルを基に、素因による影響を把握しやすい単一斜面のモデルについて検討を行った。



解析条件

解析パラメータ

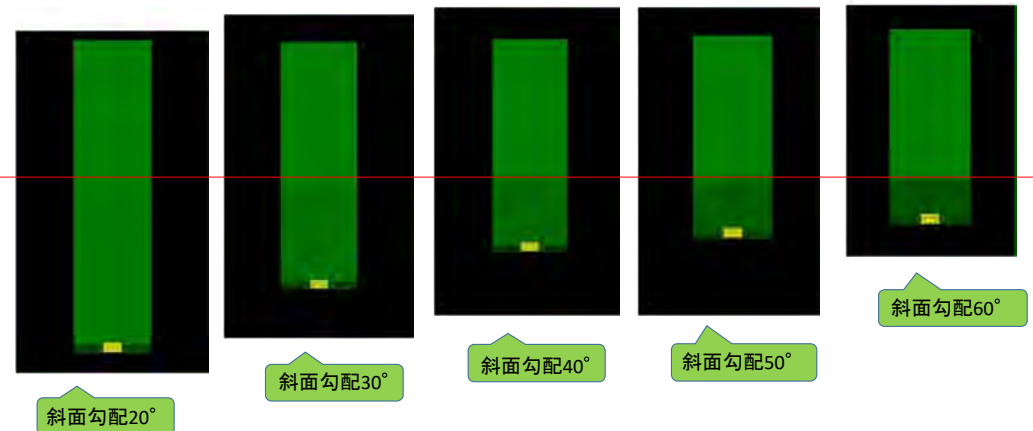
- 斜面勾配・ 20,30,40,50,60 (°)
- 摩擦角・ 20,25,30,35,40 (°)
- 土塊の体積・ 1, 2, 3 (m³)

表-1 地盤材料模型型のモデルパラメータ

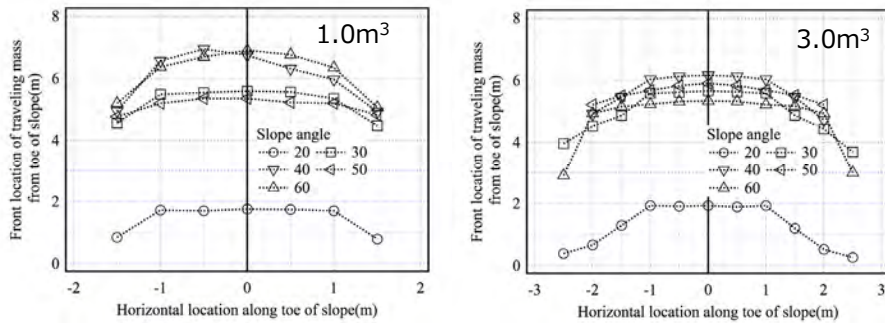
解析パラメータ		土砂
弾性係数 $E=E_0(\sigma'_m/\sigma'_{m0})^n$	E_0 (kN/m ²)	1000
	σ'_{m0} (kN/m ²)	98
	n	0
σ'_m の下限値(kN/m ²)		0.00164
密度(γ_0 , 10 ³ kg/m ³)		1.64
ポアソン比(ν)		0.3
内部摩擦角(°)		34.6
ダイレンタンシー角(°)		0
粘着力(kN/m ²)		2.1
引張強度(σ'_t , kN/m ²)		0
側圧係数($=\nu/(1-\nu)$)		0.43

- ✓ 体積2, 3m³については、底面から土砂の体積1.0 m³分の粘着力のみ実験値の0.1倍とした。
- ✓ 格子間隔は既往の研究で再現性があると示された0.05mとした。

斜面勾配に応じた流下・堆積挙動の比較 (摩擦角20°, 体積1m³)

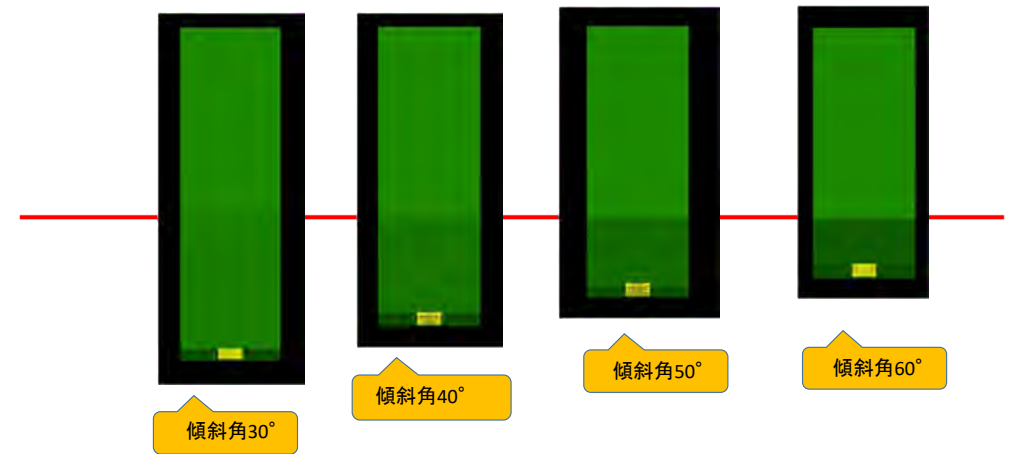


斜面勾配に応じた到達距離の比較(摩擦角 20°) (斜面勾配: $20, 30, 40, 50, 60^\circ$, 土量 1.0m^3 , 3.0m^3)

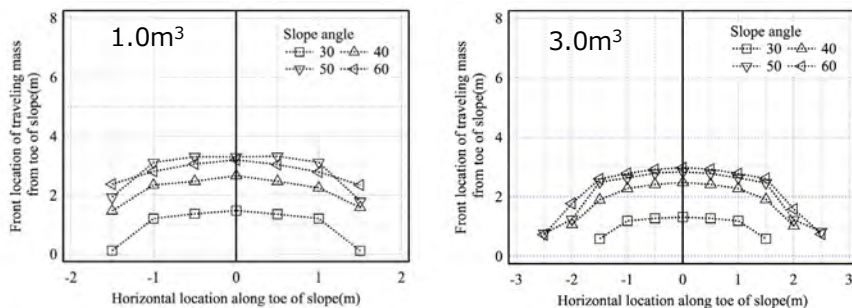


- 斜面勾配が大きくなると土砂の到達距離が勾配に応じて長くなるが、勾配が 40 度より大きくなると逆に到達距離は若干小さくなる傾向がみられた。
- 体積の増加により群として挙動し、到達距離が短くなる傾向がある。
- 群として初期の状態のまま一体として流下、堆積するのではなく、分離して流下、堆積している。

斜面勾配に応じた流下・堆積挙動の比較 (摩擦角 30° , 体積 1m^3)



斜面勾配に応じた到達距離の比較(摩擦角 30 度) (斜面勾配: $30, 40, 50, 60^\circ$, 土量 1.0m^3 , 3.0m^3)



- 到達距離が摩擦角の小さい場合に比べて小さくなっている。
- 体積が小さい場合には、摩擦角 20 度に対するケースの斜面勾配と平面堆積状況との関係と類似の傾向が見られる
- 体積が大きい場合には到達距離が斜面勾配とともに増加する傾向が見られる。

まとめ

■摩擦角と斜面勾配

- 摩擦角 20° : 斜面勾配が 40° の場合に土砂の到達距離が最大。
- 摩擦角 30° : 到達距離は摩擦角 20° の場合より小さいものの、土砂の到達距離, 横方向の広がりには斜面勾配に依存。

■体積

- 体積の増加とともに到達距離は減少するものの、減少率は斜面勾配や摩擦角などの影響に比べて小さい。

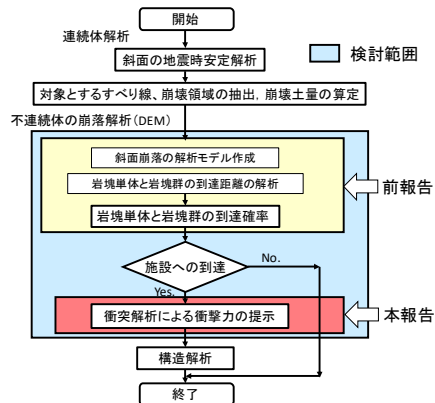
ご清聴ありがとうございました

原子力発電所周辺斜面の地震時崩壊を想定した岩塊衝撃力のDEM解析

電力中央研究所 栃木 均
中部電力(株) 中村秀樹

背景・目的

- ◆背景 原子力発電所のさらなる安全性向上のため、地震時における周辺斜面の崩壊の影響を考慮することが求められている。
- ◆目的 斜面崩壊によって崩落する岩塊の到達距離と衝撃力の評価手法の提案



◆衝撃力解析の検討内容

- (1) 弾性球の衝突理論を適用して、岩塊の衝撃力の大きさを把握する。
- (2) コンクリート外壁の損傷評価として、修正NDRC式による評価を行う。

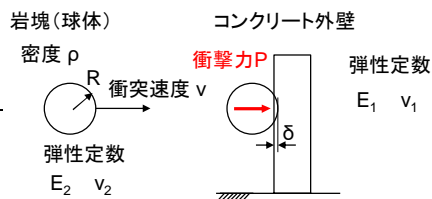
衝撃力解析 - 弾性球の衝突理論

適用例：ロックシェットの落石の衝撃力、土石流に含まれる礫の衝撃力算定

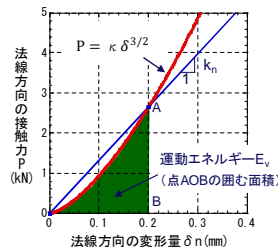
弾性球の衝撃力

$$P = \kappa \delta^{3/2} \quad (1) \quad \delta: \text{変形量}$$

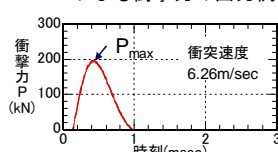
$$\kappa = \frac{4}{3} E_0 \sqrt{R} \quad E_0 = \frac{1}{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}}$$



衝撃力の荷重～変形関係(1)式

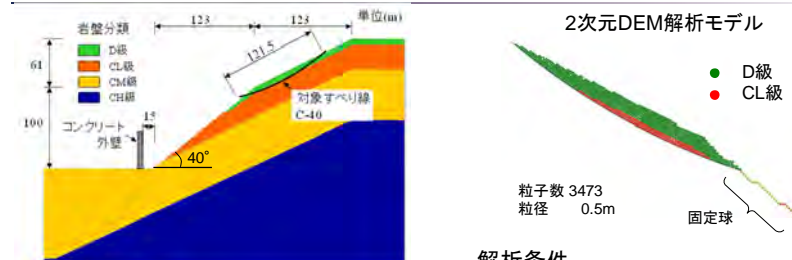


DEMによる衝撃力の出力例



弾性球の衝撃力(1)式を、岩塊と壁面の接触力の計算に組み込んでDEMで解析。

斜面崩落による衝撃力解析



対象とした斜面とすべり線

DEMの物性(中央値)

物性	接触分類	岩塊同士		法先地盤上	
		D級	CL級	D級	CL級
ばね定数(MN/m)	法線	19	540	37	740
	接線	13	410	26	600
ダッシュポット定数(MN・s/m)	法線	0.036	0.20	0.066	0.28
	接線	0	0	0	0
スライダ一定数(-)	法線	0.21	0.30	0.59	0.67
	接線	0.14	0.19	0.17	0.26

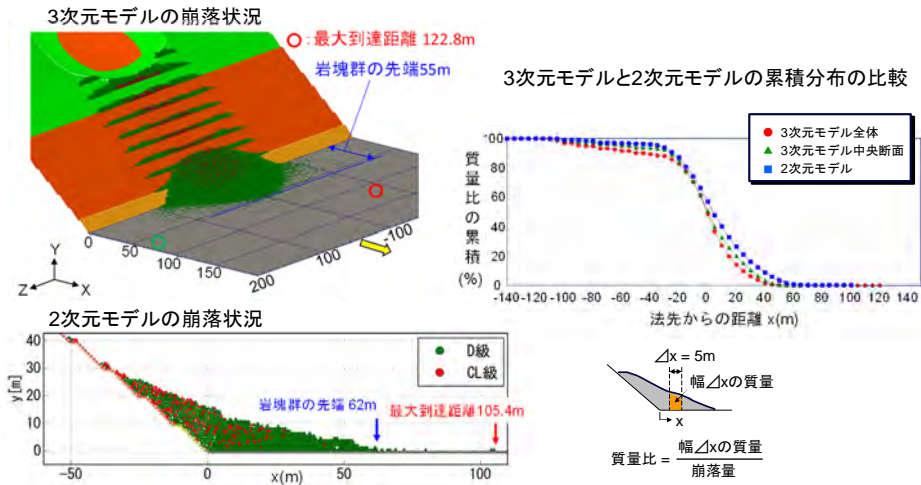
解析条件

- ・崩落岩塊 単一粒径0.5mモデル
- ・重力の崩落(地震動なし)
- ・法先地盤は、コンクリート舗装。
- ・岩級区分が同じ粒子は、同じ物性

衝撃力解析の弾性定数(中央値)

物性	分類	岩塊	
		コンクリート外壁	岩塊
密度(kg/m³)			
弾性係数E(GPa)			

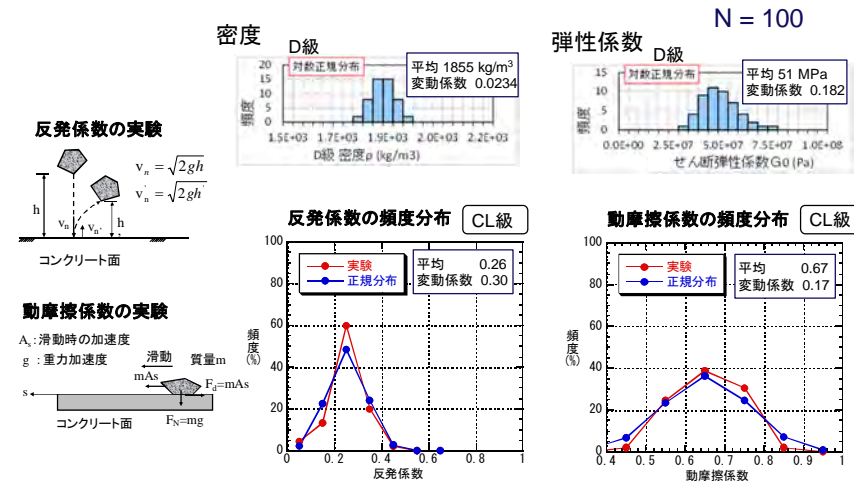
3次元モデルと2次元モデルの比較



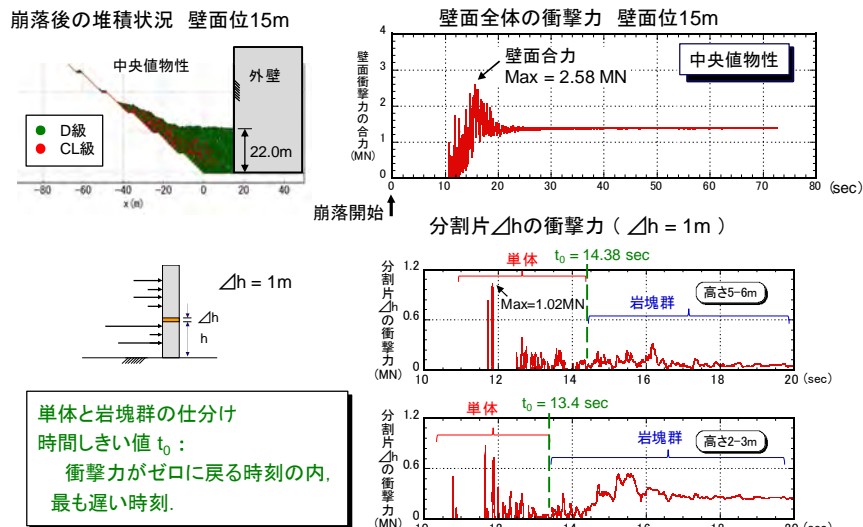
リスク評価モデルとしての2次元モデルの適用性

衝撃力解析の物性のばらつき

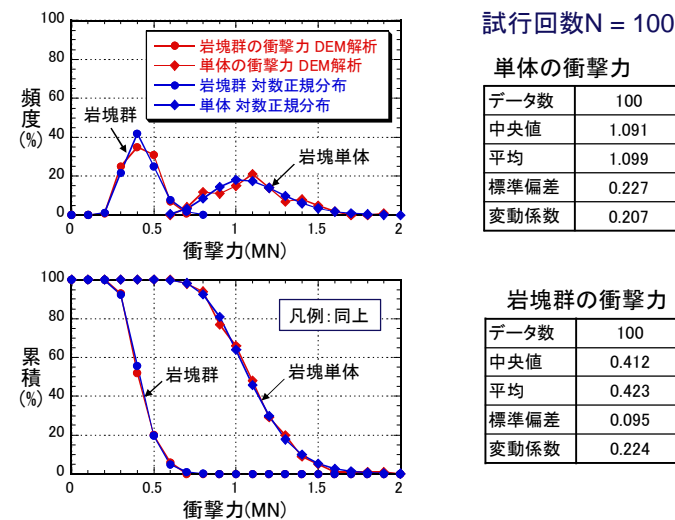
◆ LHS (Latin Hypercube Sampling) により, 試行回数N回の入力物性を設定.



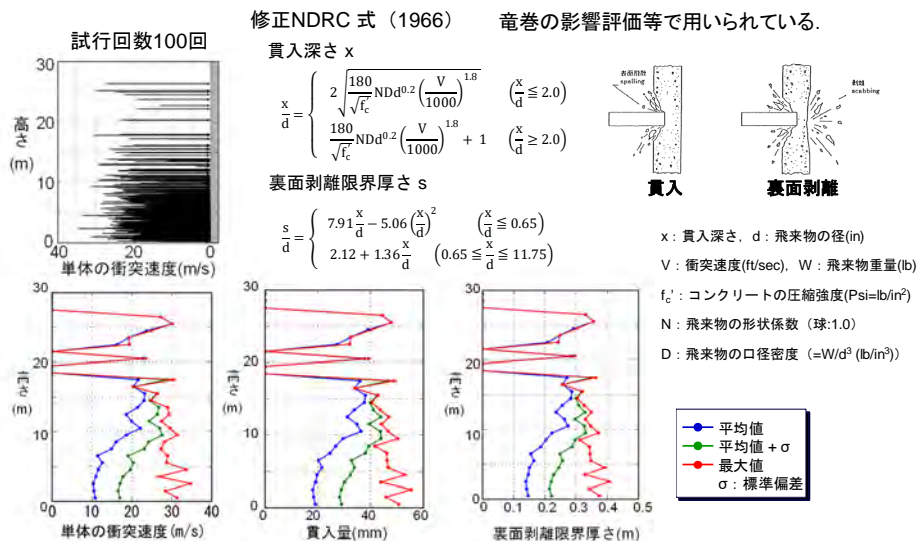
衝撃力の解析結果 中央値物性



衝撃力の確率分布



コンクリート外壁の損傷評価

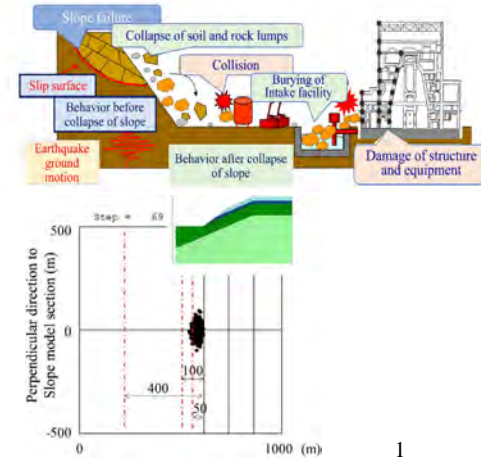


まとめ

- (1) 弾性球の衝突理論を適用して、2次元DEMにより斜面崩落による岩塊衝撃力の評価事例を示した。
- (2) 岩塊単体の衝突について、修正NDRC式による貫入量および裏面剥離限界厚さの評価を行い、対処の見通しを得た。

原子力施設周辺斜面の地震時のリスク評価

斜面崩壊が及ぼす重要施設やアクセス道路への影響



- 多段階の評価 (Nakamura et.al 2018)
 - ✓ シームレスな解析は困難 (SPH, MPS, MPM, DEM などによる地震時の弾性応答から崩壊解析まで)
 - ✓ 3ステップでの評価
 - 1) 斜面の崩壊確率 (FEM)
 - 2) 岩塊の到達のハザード (質点解析)
 - 3) 施設の損傷解析
- 崩壊した岩塊の影響度評価
 - ✓ 岩塊 (石) の落下実験の実施
 - ✓ DEM解析
 - ✓ 質点解析による簡易的評価 (吉田ら, 2015)

3次元質点解析の落石の確率論的衝突速度ハザード評価

～岩塊の大きさを考慮したエネルギーに基づく確率論的危険度評価～

原子力土木委員会 地盤安定性評価小委員会講演会
「原子力施設に関する地盤安定性評価技術の現状-どこまでできて、何が課題か-」
7/28(火) 16:05-17:05

東京都市大学 ○津田 悠人
東京都市大学 吉田 郁政

<http://traffincident.seesaa.net/article/426122868.html>
福井県国道305号線(1989)

0

報告内容

本研究の目的

3次元質点解析によるエネルギーに基づく落石の確率論的危険度評価

去年度, 土木学会全国大会

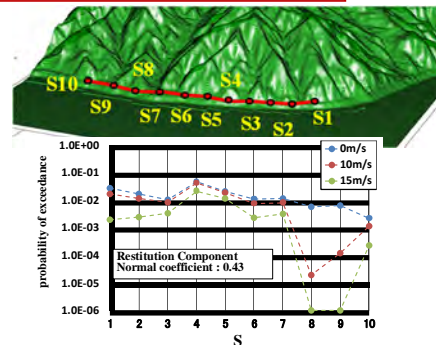
道路に対する落石の確率論的危険度評価

- 3次元質点解析
- 道路到達時の速度

⇒速度では不十分, エネルギーによる評価が必要

<追加検討項目>

- 岩塊の大きさ分布のモデル化
 - 落石の大きさに関する文献の比較
- 崩壊体積と最大径とモデル化による検証
 - 実測値とモデル化の比較
- 道路到達時のエネルギー



速度に基づく確率論的危険度評価

2

乱数を用いた質点解析の概要 反発係数

ニュートンの運動方程式

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t v_t + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 g$$

$$\vec{g} = (0 \quad 0 \quad -9.8)$$

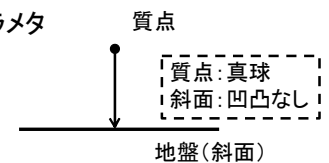
u : 位置ベクトル
 v : 速度ベクトル
 g : 重力加速度 (=9.8m/s²)

<反発係数 r >

質点が反発する時のエネルギー損失に関係したパラメタ

- 質点が衝突した際, 衝突前の速度に r 倍した速度で跳ね上がる

→ r を反発係数



3

乱数を用いた質点解析の概要 反発係数

ニュートンの運動方程式

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \Delta t \mathbf{v}_t + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \mathbf{g}$$

u : 位置ベクトル
 v : 速度ベクトル
 g : 重力加速度 (=9.8m/s²)

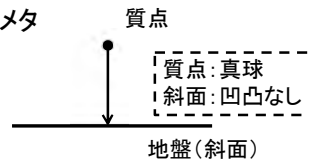
$$\mathbf{g} = (0 \quad 0 \quad -9.8)$$

<反発係数 r >

質点が反発する時のエネルギー損失に関係したパラメタ

- 質点が衝突した際、衝突前の速度に r 倍した速度で跳ね上がる

→ r を反発係数



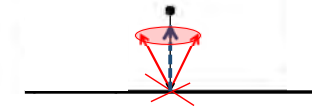
3

乱数を用いた質点解析の概要 凹凸度

ニュートンの運動方程式

- 斜面が微小な凹凸がなく、岩塊が真球 (現実的ではない)
→ 斜面の詳細な凹凸、岩塊の形状により予測困難
- 任意位置の法線ベクトルにランダムなベクトルを加える
→ 跳ね返り方向のベクトル
- ばらつきの程度を凹凸度で表現

反発係数
 法線方向: 0.8
 接線方向: 0.8



ランダムなベクトル r_r
 $r_n = r_{n0} + r_r$
 ・方向: 各成分について独立な一様乱数から算定
 ・大きさ: 平均0, 標準偏差 σ のガウス分布に従う乱数

4

乱数を用いた質点解析の概要 凹凸度

ニュートンの運動方程式

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \Delta t \mathbf{v}_t + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \mathbf{g}$$

u : 位置ベクトル
 v : 速度ベクトル
 g : 重力加速度 (=9.8m/s²)

$$\mathbf{g} = (0 \quad 0 \quad -9.8)$$

反発係数
 法線方向: 0.8
 接線方向: 0.8

質点個数: 3
 凹凸度: 0.3

ランダムなベクトル r_r
 $r_n = r_{n0} + r_r$
 ・方向: 各成分について独立な一様乱数から算定
 ・大きさ: 平均0, 標準偏差 σ のガウス分布に従う乱数

5

対象道路周辺斜面及び評価位置

<取得データ>

- 国土地理院 基盤地図情報ダウンロードサービス
 - 全国各地5mメッシュの標高データ

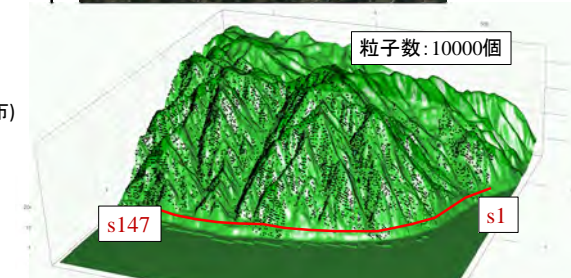


<解析手法・条件>

- 質点解析 (吉田ら, 2015)
 - 解析パラメタ (吉田ら, 2016)
 - 反発係数: 法線方向0.43
接線方向[0.85, 1.05] (一様分布)
 - 凹凸度: 0.3

<落石ハザードの評価位置>

- 斜面直下に存在する道路を147個に分割
 - 1つのセグメントの長さ: 10m



セグメントごとの危険度を評価

6

落石のエネルギーによる確率論的危険度評価

7つの文献もとに落石の大きさのモデル化

<落石の大きさに関する指標>

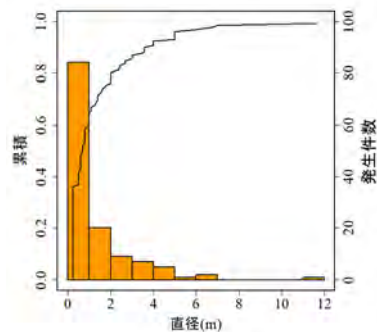
- 直径
⇒ 落石を球体と仮定し直径に変換
- 体積
⇒ 土粒子の密度 2.7g/cm^3 の球体と仮定し直径に変換
- 重量
⇒ 土粒子の密度 2.7g/cm^3 の球体と仮定し直径に変換

⇒各文献に対して累積確率分布で比較

落石の大きさを指数分布でモデル化
指数分布の確率密度式

$$p(x|\lambda) = \lambda \exp(-\lambda x)$$

λ : 落石の大きさに関するパラメータ, x : 直径



累積確率分布に変換した例

7

落石のエネルギーによる確率論的危険度評価

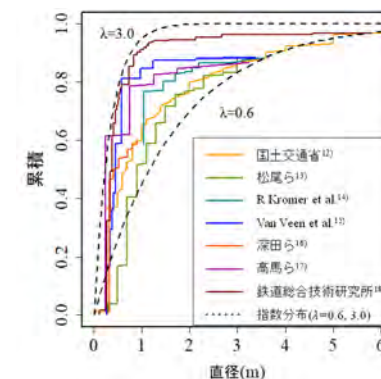
指数分布の確率密度式

$$p(x|\lambda) = \lambda \exp(-\lambda x)$$

λ : 落石の大きさに関するパラメータ, x : 直径

落石の累積分布は文献ごとに違いが大きい

- $\lambda=0.6$ から 3.0 に分布(上下限に相当)
 - $\lambda=3.0$ では小さい落石が多く分布
 - $\lambda=0.6$ では大きい落石が多く分布



各文献の落石の直径の累積分布と指数分布によるモデル化

8

崩壊体積と最大径とモデル化の検証

実測値の概要

崩壊体積: 崩壊箇所の体積

最大径: 崩壊した中の最大の径

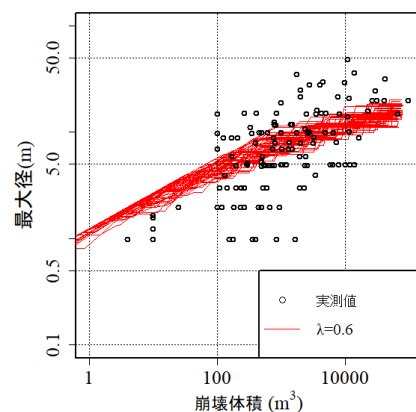
地盤安定解析高度化小委員会 2018 Corominas, J et al 2005

検証方法

全崩壊体積と岩塊の最大径について比較

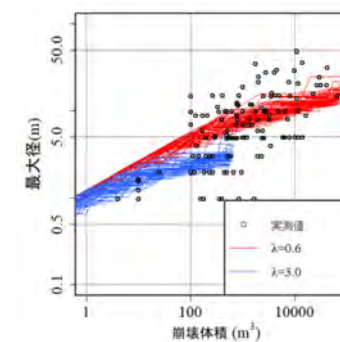
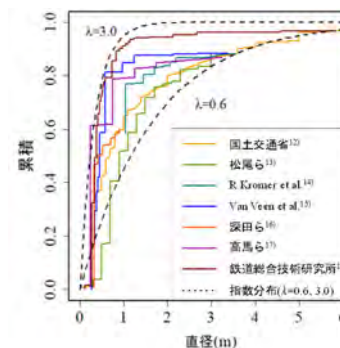
- 指数分布に従う乱数発生($\lambda=0.6$)
 - 落石の直径として体積を算定
 - 次々と発生させた体積の和を崩壊体積とする
- 崩壊体積ごとの発生させた直径のうち最大値を記録
- この試行を50回実施

- 崩壊体積が小さい領域ではばらつきが小さい
- 実測値の特徴を説明しきれない



9

崩壊体積と最大径とモデル化の検証



- 1つの λ の値では実測値全体の分布を捉えることが出来ない
 - 多数の地域の落石のデータを1つにまとめている

岩種や地域性によって指数分布のパラメータ λ を決める必要がある

10

落石のエネルギーによる確率論的危険度評価

<エネルギーによる危険度評価の手順>

1. 質点解析に基づいてセグメントを通過した際の速度の抽出
2. 指数分布($\lambda=3.0$)により乱数を発生させて落石の大きさを仮定
3. 速度と落石の大きさからエネルギーの算出

$$E = mv^2 / 2 \quad m = \rho V \quad V = 4\pi(d/2)^3 / 3$$

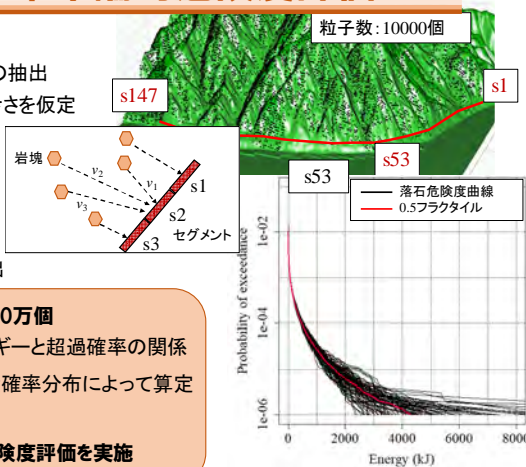
E :エネルギー(kJ), m :質量(kg), v :速度(m/s),

ρ :土粒子の密度(kg/m³), V :体積(m³), d :直径(m)

4. 到達した質点のエネルギー分布から超過確率の算出

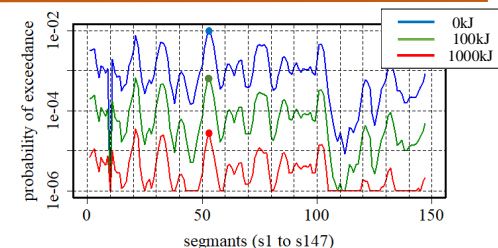
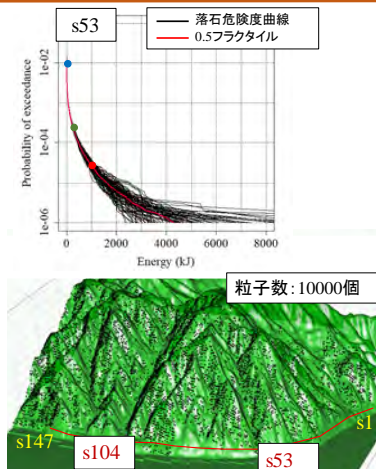
<エネルギーによる確率論的危険度評価> 粒子数:100万個

- 1個の落石が生じた場合の領域を通過する際のエネルギーと超過確率の関係
- 領域を通過する際の落石のエネルギーについての累積確率分布によって算定乱数の種を変化させ、100回試行
⇒0.5フラクタルで危険度を評価
0.5フラクタルハザード曲線より落石の確率論的危険度評価を実施



11

落石のエネルギーによる確率論的危険度評価



- 急斜面近傍のS53,70では各エネルギーの超過確率が比較的高い
➢ 落石による危険度が高い
- 緩勾配近傍のS104では各エネルギーの超過確率が低い
➢ 落石による危険度が低い

落石の危険度は3次元地形に大きく影響を受ける

12

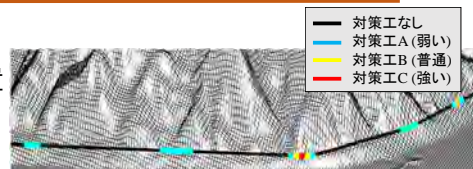
まとめ

3次元質点解析によるエネルギーに基づく落石の確率論的危険度評価

- ✓ 文献より落石の大きさ分布のモデル化
- ✓ 崩壊体積と最大径による落石の大きさ分布のモデル化の検証
- ✓ 実斜面を対象に試算

確率危険度評価に基づく最適配置への発展

- ✓ 対策工の最適配置
➢ 落石の危険度評価に基づいた最適配置
(土木学会論文集A2(応用力学)・投稿中)



13