個別要素法による原子力発電所周辺の地震起因性斜面崩落挙動のモデル化と適用性

中瀬　仁[1]・曹　国強[2]・田部井　和人[3]・栃木　均[4]・松島　亘志[5]

[1]正会員　東電設計㈱　土木本部（〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12KDXグランスクエア9F）
E-mail: nakase@tepsco.co.jp

[2]非会員　伊藤忠テクノソリューションズ㈱　原子力・エンジニアリング部（〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5 霞が関ビル）
E-mail: cao.guo.qiang@ctc-g.co.jp

[3]正会員　鹿島建設株式会社　土木設計本部（〒107-8502東京都港区赤坂6-5-30）
E-mail: tabei@kajima.com

[4]正会員　電力中央研究所　地震工学領域（〒270-1194千葉県我孫子市我孫子1646）
E-mail: tochigi@criepi.denken.or.jp

[5]正会員　**筑波大学**　システム情報系（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1）
E-mail: tmatsu@kz.tsukuba.ac.jp

想定を超える地震動が作用し斜面が崩壊した場合の原子力施設へのリスク評価が急務となっている．具体的には，斜面崩壊による岩塊や落石がどこまで到達するか，さらに構造物等へ与える影響の大きさを評価する必要が或る．そのような予測には，個別要素法のような離散系数値解析手法を用いることが有利である．本研究では，個々の落石挙動を正確に予測することを目的とするのではなく，その平均的な到達距離およびばらつきを推定するための個別要素法によるモデル化を提案する．提案したモデルを用いて，実験の再現解析を行いその適用性を検証する．次にパラメトリックスタディを行い，重要な解析パラメータの感度を調べる．

Key Words : *earthquake-induced rock fall, hazard of collision, numerical simulation*

1.　はじめに

近年，原子力発電所関連施設のリスク評価プロセスにおいては，基準地震動に対する安全性の照査だけではなく，想定を超える地震が生じた場合，これに起因する斜面崩壊や落石が重要構造物やアクセス道路などへ与える影響も評価することが求められる方向にある[1)2)3)4)5)]．

崩壊や落石に対して有効な解析手法として，個別要素法[6)] (以下DEMと言う)が多く用いられる[例えば7)8)]．市川ら[9)]は，複数の粒子を組み合わせ忠実に岩塊形状をモデル化し，実験の再現解析を行っている．しかし，岩石の衝突問題においては，わずかな衝突角度の違いがその後の運動に及ぼす影響が大きく，いかに精度よく岩塊形状をモデル化したとしても，確定的にその経路，速度の時系列や到達距離を予測することは難しい．実際の斜面においては凹凸もあり，斜面を構成する地盤種別等も多様なので，確定的評価はさらに困難である．従って，岩塊の到達位置などは確率分布で評価することが妥当であると考えられる．さて，単一の岩塊が凹凸のある斜面を転がり落ちる問題においては，最終的な経路のばらつきは１回の衝突時の岩塊運動のばらつきの積み重ねの結果である．そして，１回の衝突挙動の確率分布は，岩塊と斜面の衝突時の接触面角度のばらつき，岩塊の形状に起因する接触力モーメントのばらつきなど，多くの要因に支配されるが，この要因自体の違いは，結果に大きな影響を及ぼさないと仮定すれば，要因の精緻なモデル化は必要ない，と言うことができる．たとえば，岩塊形状を単純化しても，斜面の凹凸によって，１回の衝突の確率挙動を模擬すれば，岩塊の平均的な到達位置とばらつきの確率論的評価に対して十分資することができると考えられる．そ

こで本研究では，岩塊を一個の球要素で表現して，斜面の凹凸パラメータを変化させたケース，および五個の球要素で表現して，斜面を平面としたケースに対して，１回の衝突挙動および斜面の落下解析を行い，複雑形状の岩石を用いた実験と比較することにより，上記のアイディアの検証を試みる．更に，岩塊群の崩落実験に対しても同様のモデル化を行い，その結果を比較する．その上で，各種パラメータの感度解析を通じて，解析結果を支配する重要なパラメータの抽出を行う．

2. 個別要素法によるモデル化

(1) モデル化の概念

岩塊の形状を忠実にモデル化せず，これを一個の球要素で表し，この球要素と同じ直径の球体を，上方から見て図-1左および図-2に示すように等間隔に斜面や床に配置することで岩塊の粗度を表現する[10]．

つまり，図-3に示すように岩塊が落下して反発する際不規則に反発する様を，球が球面に衝突して不規則にバウンドする現象でモデル化する．このモデルとの比較のため図-1右に示す球五個連結した落石モデル[11]を用いた検討も行う．以後それぞれ簡易モデル，球五個モデルと言う．球五個モデルの斜面や床は剛な平面境界である．

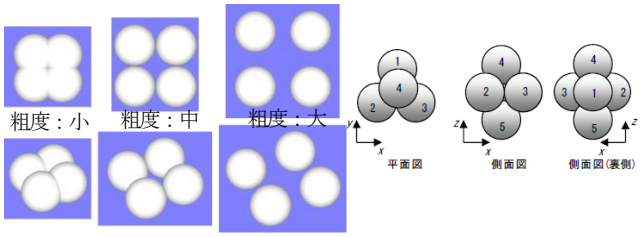


図-1　格子間隔と粗度

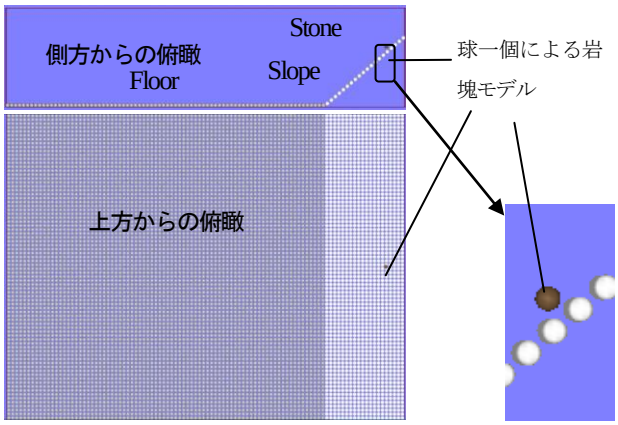


図-2　モデル化の例

(2) 反発係数

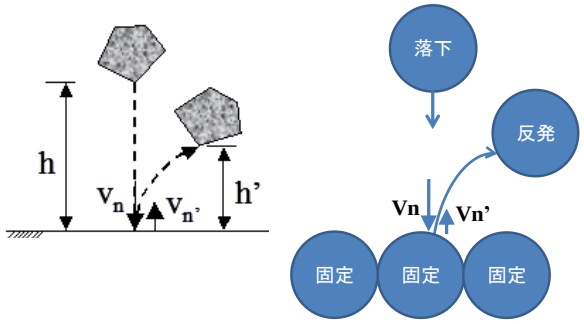
反発係数は本検討における落石シミュレーションで最も重要なパラメータである．

実際の岩塊の反発係数と，簡易モデル，球五個モデルのそれを図-4に比較する．　最大反発係数とは，岩塊の場合，岩塊を球形に削り出したものを試験体とした反発係数，簡易モデルの場合，球の真上から落下させた場合の反発係数である．見かけの反発係数とは，岩塊の場合，岩塊に対する反発係数(図-3左Vn'/Vn，鉛直速度の比)の平均値，簡易モデルは初期位置を球の真上から水平方向にさまざまにずらせた落下実験における反発係数(図-3右Vn'/Vn，鉛直速度の比)の平均値である．球五個モデルの最大反発係数は，その質量とバネ係数および粘性係数を持つ球を平面に落下させたときに発揮する反発係数，見かけの反発係数は，球五個モデルの初期姿勢を様々に変えて平面に対して落下させたときの反発係数(鉛直速度の比)の平均値である．DEMは，±σのばらつきの幅を点線および一点鎖線で示し，実験はそれを上下に延びる線分で示した．この検討はDEM簡易モデルの固定球の間隔は直径とした場合である．図-1左の粗度：中と対応する．

DEMは両者とも簡単なモデルにしては，DEMと実験結果との対応がよいと考えている．しかし簡易モデルは実験に比べて最大反発係数が大きくなるほど見かけの反発係数が大きくそのばらつきも大きくなる傾向がある．

球五個モデルはさらにその傾向が強い．実験との差は，簡易モデルにおいては球の間隔，球五個モデルにおいては，連結モデルの形状を縦長にすることで改善できる．

図-5に示すように，簡易モデルでは，球配置の間隔が大きい程，見かけの反発係数が小さくなる．この図の「粗度：中」は，図-4の黒実線と同じものである．



(a)　実際の反発　　(b)　簡易モデルの反発

図-3　実際の岩塊が反発する様子と球が球面に衝突して不規則にバウンドする現象

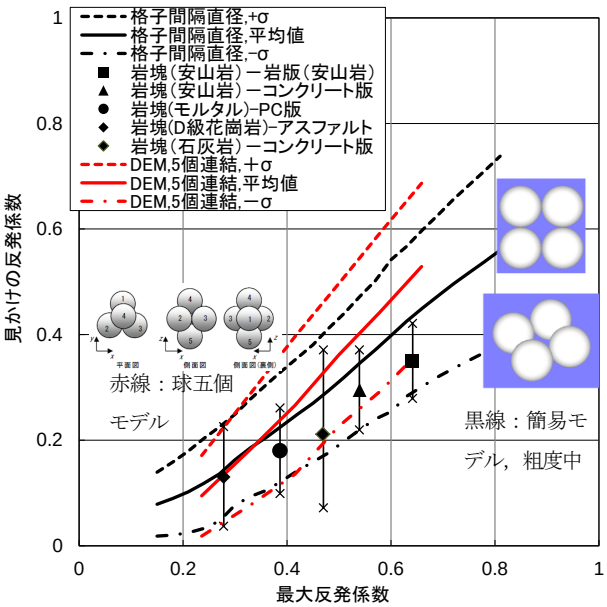


図-4　最大反発係数と見かけの反発係数の関係

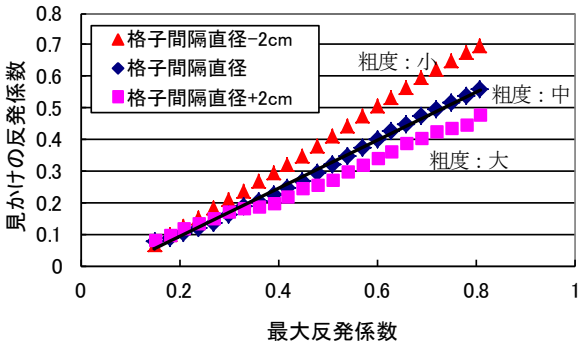


図-5　最大反発係数と見かけの反発係数の関係
(粗度大，中，小は図-1左と対応)

3.　栃木らの実験に対する落下試験の再現解析

(1)　単一岩塊の落下試験の再現解析

栃木らは20-30mm(粒径小と言う)と40-80mm(粒径大と言う)の2種類のサイズの塊状岩塊(石灰岩)について，単一岩塊の落下と岩塊群の崩落実験を行った[12),13)]．ここではまず，図-6に示す単一岩塊の落下試験について，再現解析を行った．単一岩塊の落下実験では，粒径小と粒径大の岩塊の中からそれぞれ代表300個を抽出し，ひとつずつ落下させたときの到達位置を記録している．岩塊は，ひとつ落下させた後にその岩塊を平板上から取り除いてから次の岩塊を落下させている．具体的な落下方法は，図-6の斜面中央の法肩手前に岩塊の長辺が斜面傾斜方向に向くようセットし，指で少しずつ押し出して落下させる．岩塊は，数cm滑動したところで回転し始め，法尻まで滑動するケースはほとんどなかった．

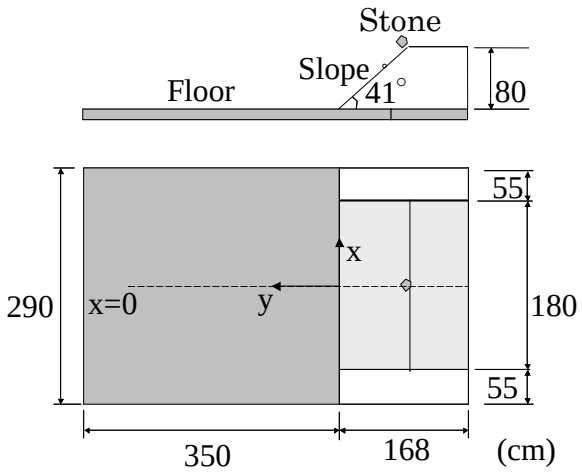


図-6　栃木らにより実施された単一岩塊の落下試験

表-1　DEMのミクロパラメータ

要素半径(m)　40-80mmの実験用	0.03
要素半径(m)　40-80mmの実験用球五個モデル	0.0125
要素半径(m)　20-30mmの実験用	0.015
密度(kg/m^3)	2,600
バネ係数(N/m)	2.0×10^6
粘性減衰係数(N･s/m)　40-80mmの実験用	3.92×10^2
粘性減衰係数(N･s/m)　20-30mmの実験用	1.23×10^2
摩擦係数(摩擦角)	0.577(30°)

表-2　解析条件

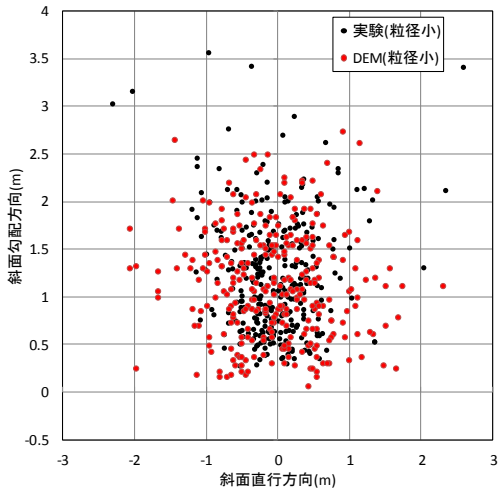
時間間隔(s)	3.80×10^2

表-1にDEMのミクロパラメータを表-2に解析条件をそれぞれ示す．密度は，実験に用いた岩塊のそれと同じとした．バネ係数と摩擦係数は文献12)を参考に定めた．別途検討で岩塊とコンクリート版との最大反発係数は0.48程度であると推定したので，粘性減衰係数はこれを実現する値とした．本検討ではバネ係数，粘性減衰係数ともに，半径方向と接線方向を同値とした．岩塊モデルの初期位置300点を一辺が岩塊モデルの直径に等しい正方形の中にランダムに発生させることにより，岩塊モデルの到達位置をばらつかせた．

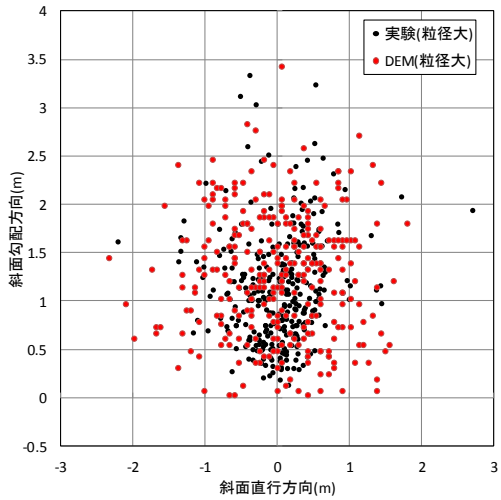
DEM簡易モデルの斜面および底面の固定球の配置間隔は，直径(図-5粗度中)とした．

実験とDEM簡易モデルの岩塊の到達位置の分布を図-7に比較する．

粒径小の比較，粒径大の比較ともに実験とDEM簡易モデルの岩塊の到達位置の分布範囲がおおむね対応している．図-8に実験とDEM簡易モデルの岩塊の到達位置の斜面直交方向（拡がり）および斜面傾斜方向（到達距離）について累積分布確率の比較をそれぞれ示す．



(a)　粒径小の比較



(b)　粒径大の比較

図-7　岩塊の到達位置の分布の比較

実験とDEM簡易モデルは，粒径の大きさによらずおおむね対応しているが，斜面直交方向については，DEM簡易モデルが若干ばらつく傾向が或る．

実験とDEM球五個モデルの岩塊の到達位置の分布を図-9に，到達位置の斜面直交方向（拡がり）および斜面傾斜方向（到達距離）についての累積分布を図-10に比較をする．

実験とDEM球五個モデルもおおむね対応しているが，斜面直交方向については，DEM球五個モデルのばらつきが小さい．DEM球五個モデルは，球一個モデルに比べて回転慣性が大きいので，法尻に達したときの傾斜直交方向を軸としたの回転エネルギーが大きく，傾斜勾配方向への指向性が強くなるものと考えられる．

(2)　岩塊群の崩落実験の再現解析

次に，岩塊群の崩落実験について，DEM簡易モデルによる再現解析を行った．

岩塊群の崩落実験では，図-11(a)(b)のように所定の量

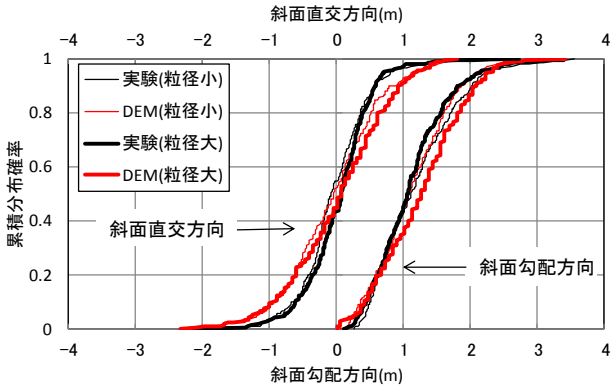


図-8　岩塊の到達位置の累積分布確率の比較

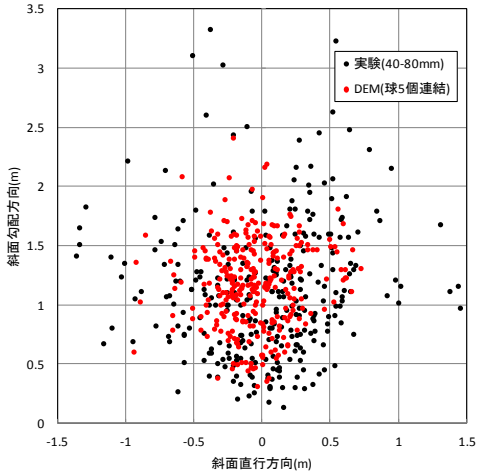


図-9　岩塊の到達位置の分布の比較（球五個モデル）

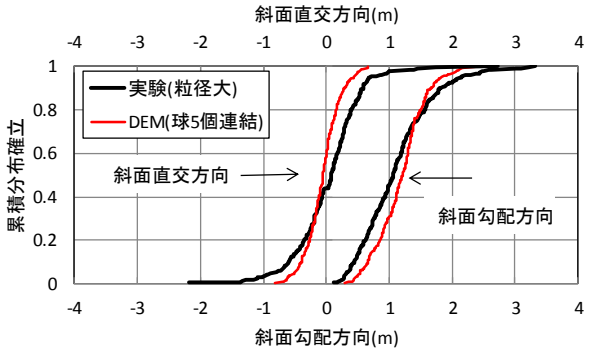


図-10　岩塊の到達位置の累積分布確率の比較（球五個モデル）

を堆積させ，図中に示す蓋を瞬時に開放することにより崩落させ，岩塊群の到達位置を記録している．対象とした実験は，粒径小50kg，粒径大50kg，粒径小10kgである．

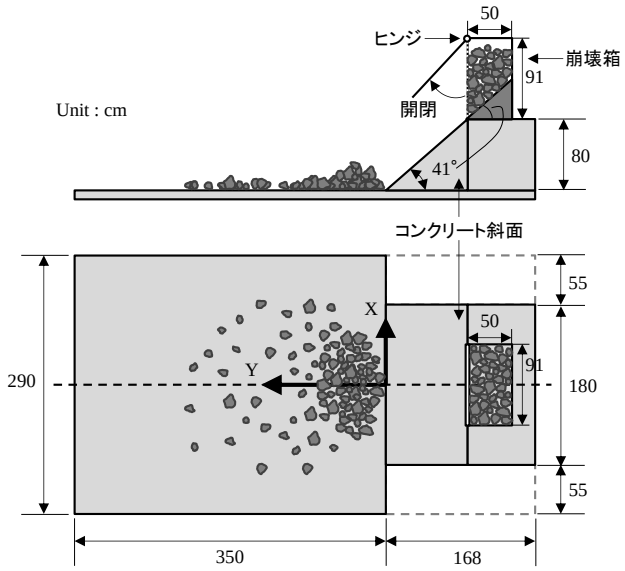
それぞれの岩塊個数は，2178個(岩塊一個当たりの質量から推定)，177個(実験写真を見て個数をカウント)，442個(実験写真を見て個数をカウント)と判定した．

粒子同士の反発係数は0.48と仮定した．図-12に再現解析の様子を示す．

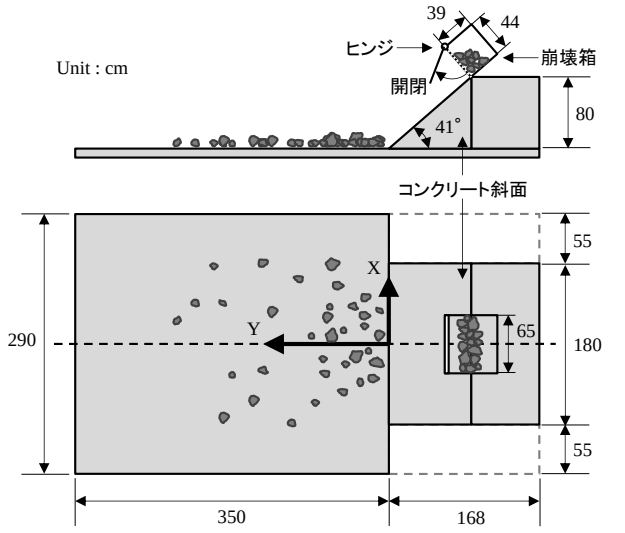
図-13，図-14および図-15に実験とDEM簡易モデルの岩塊の到達位置の分布を比較する．飛散の様子はいずれもおおむね対応しているように見えが，堆積領域に関しては，岩塊群の量が多い場合には，図-15のように法尻付近の分布状況から見て，実験の方が安息角が大きいことの影響が出てくることが分かる．

図-15の実験の堆積域は，写真では，表面の岩塊の下に多くの岩塊が隠れており，正確な個数が分からなかった．そこで図-16のように堆積域を取り除いたデータ(飛散域)に関して累積を比較することにした．飛散域のデータ数は，実験が380個，DEMが366個であった．

粒径大50kg，粒径小10kg，粒径小50kgの飛散域に関する岩塊の到達位置の累積分布確率の比較を図-17に示す．



(a)　岩塊50kgをまとめて落とす場合



(b)　粒径小岩塊(20-30mm)10kgをまとめて落とす場合

図-11　栃木らにより実施された落石実験の概要と各種寸法

粒径大50kgおよび粒径小10kgは，斜面直行，斜面勾配いずれの方向とも，粒径による差がなく，また，実験と

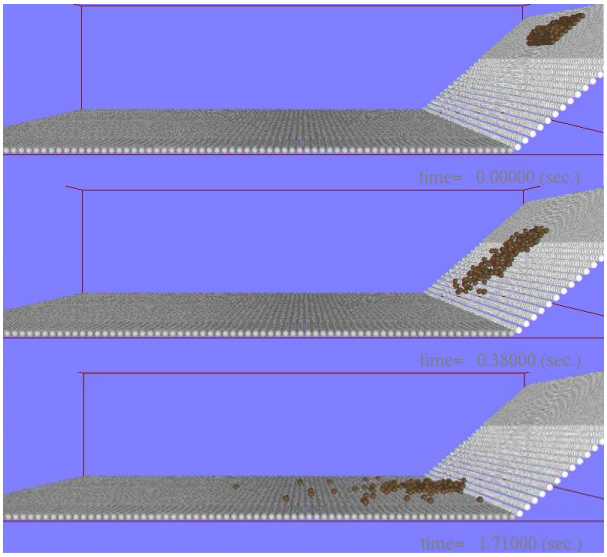


図-12　岩塊群の崩落実験の再現解析の様子

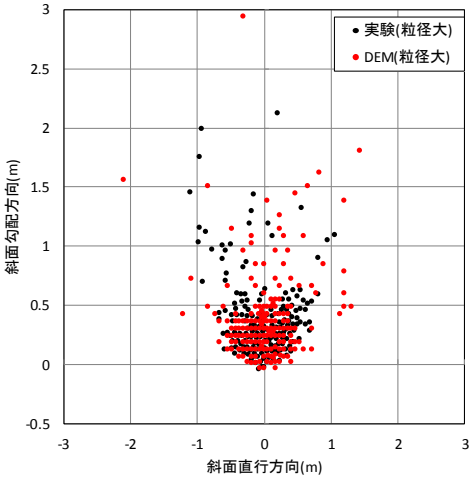


図-13　岩塊の到達位置の分布の比較, 粒径大

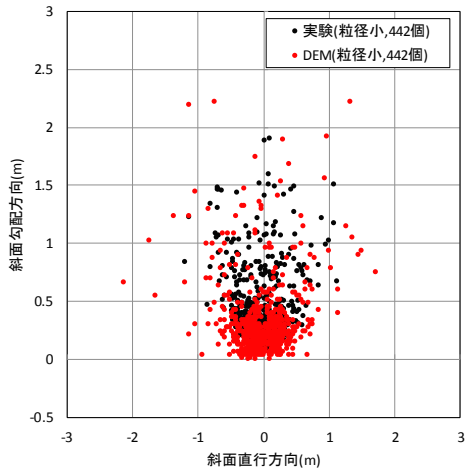


図-14　岩塊の到達位置の分布の比較, 粒径小

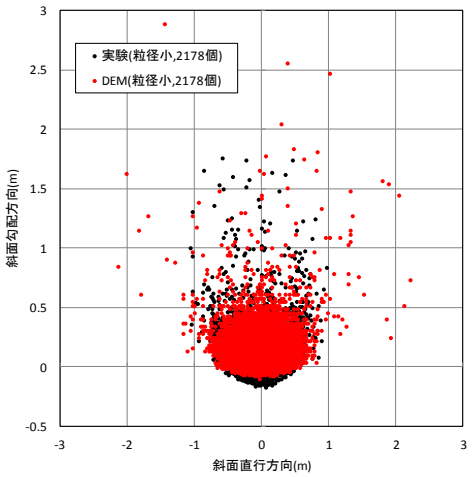


図-15　岩塊の到達位置の分布の比較, 粒径小，50kg

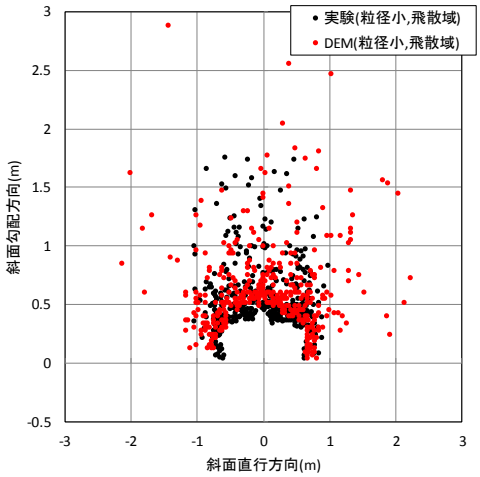


図-16　岩塊の到達位置の分布の比較, 粒径小, 50kg, 飛散域

DEM簡易モデルの対応が良い．これに対して，粒径小50kgの飛散域の斜面直行方向は，実験とDEM簡易モデルともに，粒径大50kgおよび粒径小10kgに比べてばらつきが大きく，斜面勾配方向は，実験とDEM簡易モデルともに，粒径大50kgおよび粒径小10kgに比べて若干平均値が小さい結果となった．

堆積ＤＥＭ解析によれば，表-3に示すように，粒径小10kg (岩塊数442個)や粒径大50kg (岩塊数177個)に比べて，粒子小50kg (岩塊数2178個)の方が，粒子一個当たりの衝突回数が倍近く多くなっている．等体積空間を占める岩塊の数が多いほど，斜面を落下する際に互いに衝突する確率が高いと言える．この事実をもとに，斜面落下，堆積，飛散のメカニズムを考えると，粒子小50kg (岩塊数2178個)の飛散の傾向が他と異なることについて「衝突の回数が多いほど，エネルギー損失が大きいので法尻に到着したときの反発が小さくなり，反発が小さいと，後から来る岩塊が前の岩塊に衝突し易いので堆積し易く，

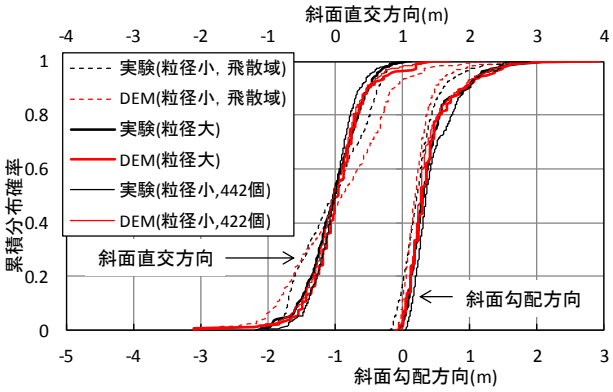


図-17　岩塊の到達位置の累積分布確率の比較

表-3　ＤＥＭ解析における粒子一個当りの平均衝突回数

	粒子小, 442個	粒子小, 2178個	粒子大, 177個
粒子一個当りの平均衝突回数	7.22	13.87	5.78

堆積し易ければ，そこに落下する岩塊の反発は非常に小さいので，飛散しにくくなる．」と説明できる．

4.　重要なパラメータに関する感度解析

ここでは，DEM簡易モデルについて，重要なパラメータに関する感度解析を行う．項目(1)の「斜面底面の粒子間隔」については，岩塊を一個づつ落下させる実験，その他は岩塊群を一気に落下させる実験の内，粒径大50kgを対象として検討を行った．

(1)　斜面底面の粒子間隔

岩塊モデルの飛散パターンに最も大きな影響を与えるのが，斜面や底面を表す固定球の配置間隔である．図-7では，この間隔を落下する岩塊の直径と同じ寸法としたが(間隔大)，半径と同じ寸法としたシミュレーション結果(間隔小)について，岩塊の到達位置の分布を実験と比較すると，図-18のようになる．「間隔小」の到達位置が5mより手前に制限されているのは，解析モデルにおいて5mの地点に壁を設けたためである．「間隔小」は実験に比べてはるかに到達距離が長くなる．図-19に岩塊の到達位置の累積分布について「間隔小」，「間隔大」および実験を図-19に比較する．「間隔小」の斜面勾配方向の平均値が他と比べて4倍程度大きくなっている．斜面直交方向については「間隔大」と差が出なかった．しかし斜面底面の粒子間隔の感度は非常に大きいと言える．斜面や底面を表す固定球の大きさを小さくしても同様の効果があると考えられる．

(2)　バネ係数

バネ係数に関する感度解析結果を図-20に示す．反

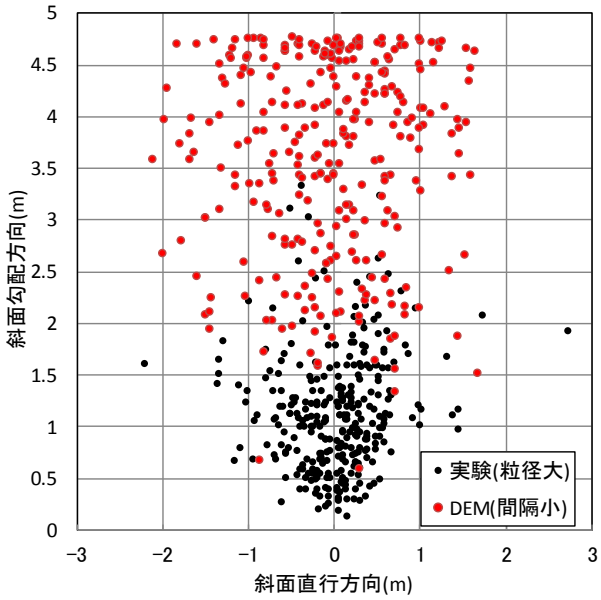


図-18　岩塊の到達位置の分布の比較

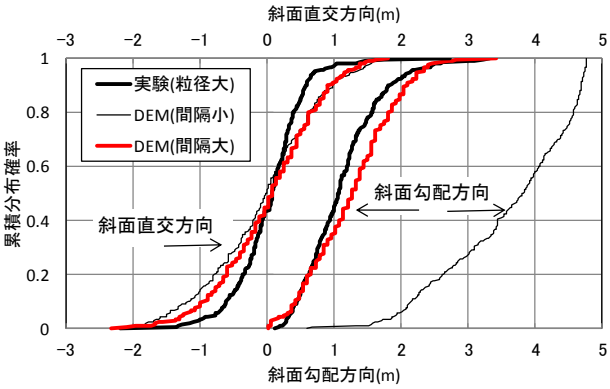


図-19　岩塊の到達位置の累積分布確率の比較

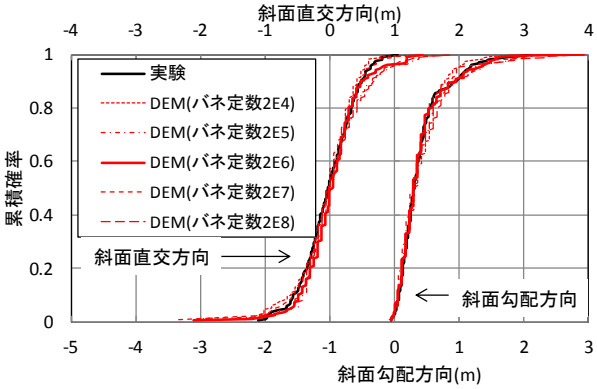


図-20　岩塊の到達位置の累積分布確率の比較

発係数は0.48となるように粘性減衰係数は調整した．反発係数が同じであれば，バネ係数を1/100倍～100倍の範囲でばらつかせても，結果に差が出ないと言える．バネ係数に関する感度は小さい．

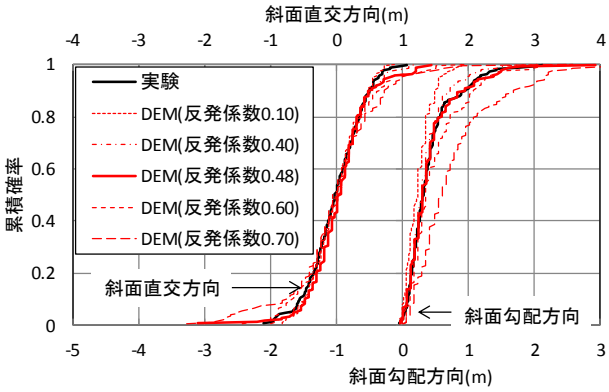


図-21　岩塊の到達位置の累積分布確率の比較(反発係数)

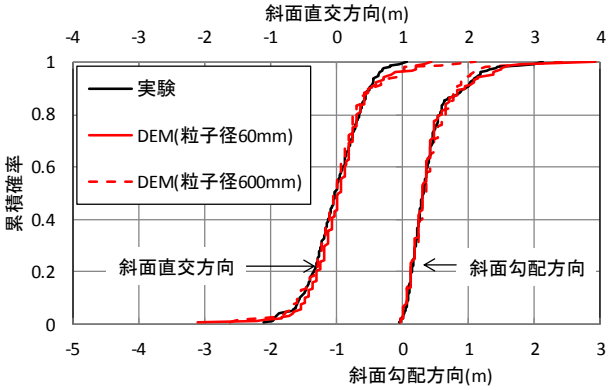


図-22　岩塊の到達位置の累積分布確率の比較(粒子径)

(3)　反発係数

反発係数に関する感度解析結果を図-21に示す．バネ係数を2.0×10^{6}(N/m)として，反発係数が0.1，0.4，0.48，0.6，0.7となるように粘性減衰係数を調整した．反発係数が大きくなるほど，斜面直行方向のばらつきが大きく，斜面勾配方向の平均とばらつきが大きくなる．しかし，反発係数0.4～0.6の範囲であれば，さほど大きな差は出なかった．この範囲であれば反発係数に関する感度は小さい．

(4)　粒子径

粒子径に関する感度解析結果を図-22に示す．落下させる岩塊の寸法および斜面や底面を表す固定球の大きさを10倍とするシミュレーション(粒子径600mm)を実施した．バネ係数を(粒子径60mm)の10倍とし，反発係数は0.48となるように粘性減衰係数を調整した．模型の寸法を10倍にしても，反発係数が同じであれば，結果に差が出ないと言える．

(5)　二次元解析

側方の境界の幅を，斜面天端付近に設置した岩塊を収納した箱の幅と同じ幅にせばめることによる影響を見る，三次元DEMによる二次元的解析(3D-2D)と，二次元DEMによる解析を行い，実験と比較した．二次元DEMは単

位奥行あたりの体積が，実験と同じになるように，岩塊モデル個数を定めた．この結果，要素数が五個となった．一回のシミュレーションでは，データが少なくなってしまうので，5種類の初期状態を作成し，5回分のシミュレーション結果を合わせて，データ整理した．

図-23に岩塊の到達位置の分布を，図-24に累積分布確率を比較する．三次元DEMによる二次元的解析では，側面の拘束により斜面直交方向への拡散が抑制されて，到達距離が延びると予想していたが，三次元DEMによる三次元解析（図-17の赤の太線）に比べて，平均が小さくなった．表-4に示すように粒子一個当たりの平均衝突回数が1.16回増加したためであろう．二次元解析は，実験に比べて到達距離が大きくなっている．データを取得していないが粒子一個当たりの平均衝突回数が少ないためであろう．

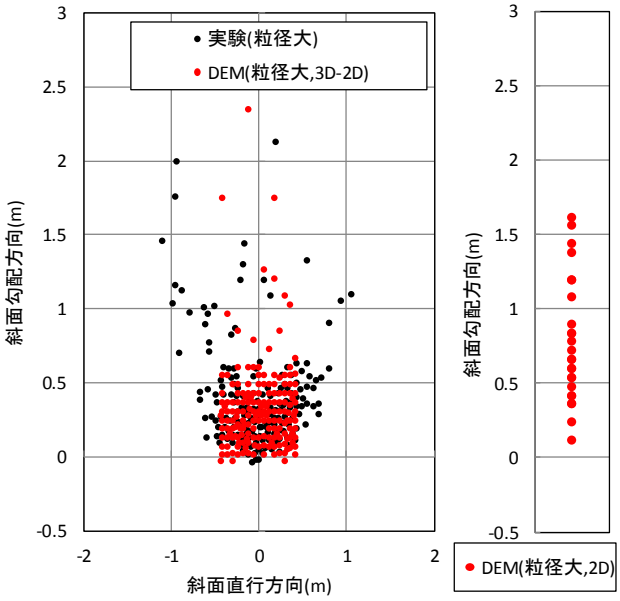


図-23　三次元DEMによる二次元的解析と二次元DEM解析

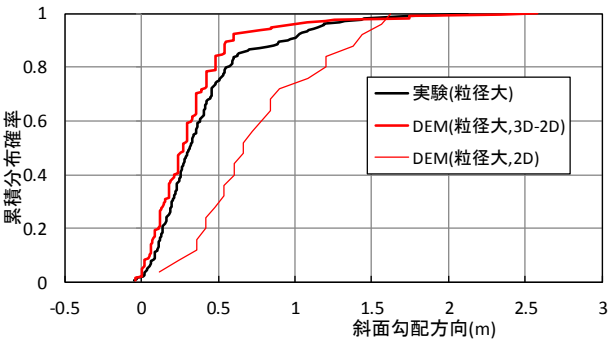


図-24　岩塊の到達位置の累積分布確率の比較（二次元と三次元）

表-4　ＤＥＭ解析における粒子一個当りの平均衝突回数

	3d-2d
粒子一個当りの平均衝突回数	6.94

5.　まとめ

想定を超える地震が発生した時，それに起因する斜面崩壊や落石の挙動を数値シュミレーションできる簡易モデルを提案した．モデル化に当たっては，検討結果が解析コードやオペレータに依存しないことを念頭においた．そして提案するモデルについて栃木らの行った実験を対象に検証のための到達位置の分布に関する再現解析を行った．次に，この手法における重要なパラメータについて到達位置の分布に関する感度解析を行った．結果をまとめると以下のようになる．

○単一岩塊の落下試験の再現解析

・まず，粒径の異なる実験同士の比較において両者は対応している．

・斜面及び底面に球一個で表した岩塊モデルと同じ大きさの固定球をXY平面上に直径の間隔で配置した解析モデルにおいて，粒径の違いによらずDEM簡易モデルは実験とおおむね対応している．斜面と粒径の比は粒径の60mmの場合13，30mmの場合17である．実機に対して岩塊を1mの球要素でモデル化した場合，高さ13m～27mの斜面に対応する．

・斜面及び底面に球一個で表した岩塊モデルと同じ大きさの固定球をXY平面上に半径の間隔で配置した解析モデルは，実験に比べて4倍程度以上到達距離が長くなる．

○岩塊群の崩落実験の再現解析

・粒径の異なる実験同士の比較においては，重量が同量の場合，粒径の大きい方が到達距離が長くなり，斜面直交方向のばらつき（以下拡がりと言う）が小さくなる．

・粒子の数が異なる実験同士の比較においては，粒子の数が少ない方が到達距離は長くなるが，拡がりが小さくなる．

・DEMはこの傾向をとらえており，実験とも対応が良い．DEM解析によれば，粒子数が多いと粒子一個当たりの衝突回数が大きくなり，エネルギーが減衰するためであることが分かる．

・バネ係数の感度は非常に小さい

・反発係数の感度も意外に小さい．

・粒子径の感度は小さい．このことはバネ係数の感度が小さいこととほぼ等価である．

・三次元DEMによる二次元的解析においては，到達距離が若干小さくなる．三次元的解析に比べて衝突回数が若干多いためである．一方二次元DEM解析は，到達距離が二倍以上大きくなる．恐らく衝突回数が小さいことが主因である．

課題をまとめると以下のようになる．

○摩擦係数

本検討では，摩擦係数に関して感度解析を実施しなかった．近い将来実施する予定である．

摩擦の大きさは，斜面においては，岩塊が転がり始めるか，滑り続けるかを左右する．落石対策便覧で扱われる等価摩擦係数は，岩塊が転がるとその回転エネルギーが消費されるものとして，それが算定されるが，実際には回転運動が再び並進に転換される現象が少なからず生じているはずである．提案する簡易モデルは，球なので凹凸のある実際の岩塊に比べて回転慣性が小さくなってしまうものの回転運動を考慮した検討であると言える．球が斜面に沿って落下する場合，球と斜面の摩擦角が20°以上であれば，勾配51°以下の斜面においては，すべて滑らずに転がることになる．実際の落石は凹凸があって，挙動が複雑になるが，おおむね滑らずに転がる挙動になる[14]．栃木等の実験では，数cm滑動したところで回転し始め，法尻まで滑動するケースはほとんどなかった．しかし，転がらずに滑る場合も考えられるのでその場合の本モデルの適用性を確かめておく必要が或る．

〇手法の検証，単独岩塊

本検討では，岩塊の到達位置のみの比較を行ったが，斜面落下中および底面転動中の並進速度，回転速度について，実験と比較して行く必要が或る．実験のパラメータとしては，斜面高さ，斜面形状，斜面の物性が考えられる．

〇手法の検証，群としての挙動

本検討では，Cundallの提案したDEM要素間の接触モデルを用いている．しかし，このモデルでは，実際の岩塊群の内部摩擦角を小さく見積もってしまうことになる．その影響がどの程度か把握し，必要に応じて接触モデルの改良を進めることが肝要である．

〇実際の崩壊土砂

実際の崩壊土砂には，細粒分や水分が含まれている．これらの影響を取り入れたモデルを構築することが喫緊の課題である．

〇岩塊崩落のメカニズム

簡易モデルとは言え，岩塊(岩塊群)が斜面で，衝突を繰り返しながら落下し，法尻付近に堆積し，射出された落石が平面で停止するメカニズムの本質を失わないようにすることが肝要である．この観点からすれば，それぞれの局面で，実現象のメカニズムが必ずしも明確になっているとは言えない．今後実験やその分析を積み重ね，現象のエッセンスをしっかりと取り込む努力を継続する必要が或る．

この研究は，土木学会原子力土木委員会地盤安定性評価小委員会斜面崩落ワーキングの活動の一貫として実施したものである．

参考文献

1) 原子力規制委員会，基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド，2013.
2) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987，社団法人日本電気協会，電気技術基準調査委員会，1987.
3) 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準，日本原子力学会，2007.
4) 原子力安全基盤機構：基礎地盤及び斜面の安定性に係わる設計・リスク評価手引き，JNES-RE-2013-2037, 2014.
5) 土木学会原子力安全土木技術特定テーマ委員会：原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言（土木工学からの視点），2013.
6) Cundall, P. A., and O. D. L. Strack: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Géotechnique*, 29, 1979.
7) Maeda.K. and Yuasa,T.: Performance estimation of countermeasures for falling rock using DEM, Prediction and Sumilation Methods for Geohazard Mitigation, IS-KYOTO, pp.193-199, 2009.
8) 湯浅知英，前田健一，刈田圭一，牛渡裕二：落石挙動のばらつきを評価した堆積層の衝撃吸収効果, 第 21 回中部地盤工学シンポジウム, pp.135-142, 2009
9) 市川卓也，日下部祐基，伊東佳彦，中瀬仁，足立正信：3 次元個別要素法による落石シミュレーション，第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.165-168, 2007.
10) 中瀬仁，阿部慶太，中島進，渡辺健治，中村英孝，村田雅明，中村晋，内藤直人，前田健一；岩塊転動が構造物に及ぼす影響の評価（3）―岩隗転動実験に対する個別要素法による再現シミュレーション―, 第 49 回地盤工学研究発表会概要集, pp.1875-1876, 2014.
11) 吉田郁政，大庭啓輔，石丸 真：MPS 法あるいは DEM を用いた破壊挙動の不確定性に関する基礎的考察，土木学会論文集 A2（応用力学）, Vol. 67, No. 2（応用力学論文集 Vol. 14）, I_365-I_374, 2011
12) 栃木均：地震時崩落岩塊の到達距離に関する影響要因の検討-斜面崩壊を想定した振動台実験と二次元個別要素法解析による影響予測手法の開発，電力中央研究所報告, N08084, 2009.
13) 栃木均：地震時崩落岩塊の到達距離に及ぼす岩塊の大きさと形状の影響，電力中央研究所報告, N09021, 2010.
14) 右城猛，楠本雅博，篠原昌二，木下賢司：落石の運動機構に関する実験的研究，土木学会論文集 F, Vol.62,No.2,377-386,2006

A METHOD TO ASSESS COLLISION HAZARD OF FALLING ROCK DUE TO SLOPE COLLAPSE APPLICATION OF DEM ON MODELING OF EARTHQUAKE TRIGGERERED SLOPE FAILUARE FOR NUCLEAR POWER PLANTS.

Hitoshi NAKASE Guoqiang CAO Hitoshi TOCHIGI Kazuto TABEI Koji SHIMADA and Takashi MATSUSHIMA

Risk evaluations on nuclear power plants from the slope ailure induced by unexpected large-scale earthquake have become urgent issues.In detail, the traveling distance and the collision hazard of the falling/sliding rocks are requested in risk evaluations. Discrete numerical analysis method, such as Particle simulation method contributes important role on prediction of slope failure. Therefore, the authors has proposed a DEM model to evaluate the average and deviation of the rock traveling distance statistically, instead of predicting the complicated behavior of each rock. In this study, firstly, we have applied the proposed DEM model to represent the laboratory test for verification. Then, we have conducted the parametric studies to examine the sensitivities of the important parameters.