

地震時斜面崩壊による崩土の到達距離に関する 影響要因の検討- 斜面高さと加速度の影響について

栃木 均^{1*}・中島 正人¹・大鳥 靖樹¹・伊東 守²・蛭澤 勝三²

¹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）

²原子力安全基盤機構（〒105-0001 東京都港区虎ノ門4丁目3-20）

*E-mail: tochigi@criepi.denken.or.jp

崩土の到達距離はばらつきを多く含む量であるため、種々の要因を確率変量とした評価が望まれており、検討に用いる重要要因の抽出が求められている。そこで本研究では、振動台による小型の斜面崩壊実験を実施し、到達距離に及ぼす各種要因の影響について検討した。実験には碎石による斜面模型を用い、斜面高さ、地震動の加速度、上下動成分および崩土の粒子サイズを種々変えて、それらが到達距離に及ぼす影響を比較した。これらの振動台実験を対象とした個別要素法による数値シミュレーションを実施し、同手法の到達距離評価手法としての適用性を検討した。

Key Words : slope failure, runout distance, shaking table test, DEM, numerical analysis

1. はじめに

斜面災害を軽減するためには、斜面崩壊による崩土の到達範囲を予測し危険区域を把握しておくことが考えられる。地震時の斜面崩壊を考えると、重要度が高い場合には、想定される地震動に対する斜面の安定性検討を行い、斜面崩壊の発生の有無あるいは崩壊の可能性が検討される。次に崩壊の危険性が否定できない場合には、個別要素法¹⁾や不連続変形法²⁾などの手法により崩壊領域のモデル化を行い、斜面崩壊解析による到達範囲の検討を行うことが考えられる。

ここで、最初の段階で行われる斜面崩壊の発生に関する検討では、地震動の増幅による応力評価が主体となり、入力地震動や減衰特性などの影響が大きいといえる。次の段階における崩土の到達範囲の検討では、重力場での崩落による変位評価が主体となる。斜面が崩壊し、滑りや転がり、飛び跳ねなどの崩落運動が始まると地震動が伝達しにくくなるためその影響は小さくなると考えられるが、崩落挙動や到達距離に関して地震動の及ぼす影響がどの程度であるのか、未だ明らかでない。

また、崩土の到達距離は、斜面上での転がりや飛び跳ねの影響を受け、評価結果にばらつきを多く含む量であるといえる。そのため、影響度合いの大きな要因の抽出を行い、それらを確率変量とした評価が望まれるている。

このような観点から、本研究では到達距離に関する各種要因の影響を明らかにする目的で、振動台による粗粒材料斜面の崩壊実験を実施した。地震動の要因として加速度の大きさ、上下動成分を考え、地震動の加速度を大きくした場合と位置エネルギーに関係する斜面高さを大きくした場合との到達距離の比較を行った。同時に、これらの振動台実験を対象として個別要素法による数値シミュレーションを実施し、到達範囲の予測手法としての解析手法の適用性について検討した。

2. 振動台による斜面崩壊実験

(1) 実験の目的

碎石による斜面模型を振動台で加振することにより崩壊させ、崩落した碎石の到達距離に及ぼす各種要因の影響を明らかにすることを目的とする。検討した要因は、斜面高さ、地震動の加速度、上下動成分および崩土の粒子サイズであり、それらが到達距離に及ぼす影響の大きさを相互に比較した。表-1には本実験の検討要因を示す。

(2) 実験方法

(a) 実験模型

振動台に固定した鋼製の土槽内（長さ2.84m×高さ

表- 1 振動台実験による検討要因

要 因	範 囲
斜面高さ(cm) (位置エネルギー)	120, 80, 40
崩落岩塊の粒子サイズ(mm)	20~40 5~13
水平動の加速度(gal) 正弦波 5Hz	400, 700
上下動の加速度(gal) 水平動 700gal	0, 400

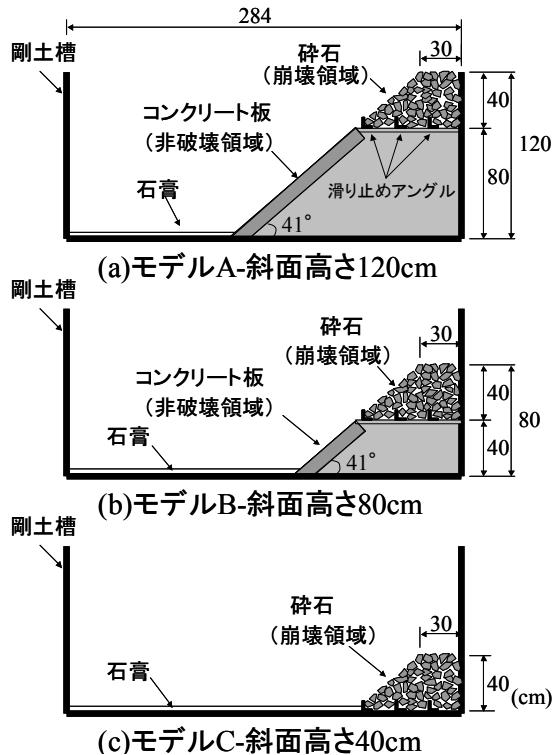


図-1 振動台実験に用いた斜面模型

1.2m×奥行き1m)に、碎石による崩壊領域とコンクリートによる非破壊領域から成る2次元の斜面模型を作成した。図-1にそれらの斜面模型を示す。崩壊領域は毎回ほぼ同量の碎石で揺る詰め状態に作成し、崩壊領域の寸法、形状は変えずに非破壊領域の高さを変化させることで位置エネルギーの異なる模型を3体作成した。斜面材料とした碎石には、粒子サイズの影響について検討するため20-40mmおよび5-13mmの2種類の碎石を用いた。2種類の碎石とも絶対比重2.64の硬質砂岩である。崩壊領域の勾配は碎石の安息角勾配(碎石20-40mm: 41°, 碎石5-13mm: 39°)とし、コンクリート部分の勾配は41°とした。図-2には斜面材料とした碎石の粒度曲線を示す。

コンクリート斜面の上部には滑り止めのアングルを固定し、碎石を少量ずつ投入して崩壊領域を作成した。斜面先の平坦部は、土槽底部の鋼材を厚さ約2cmの石膏で覆い摩擦係数が小さくならないようにした。

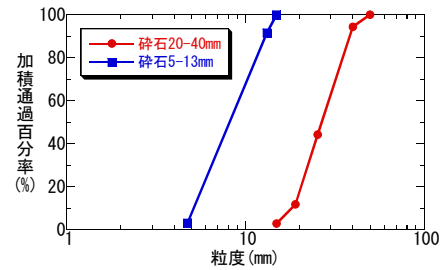


図-2 斜面材料とした碎石の粒度曲線

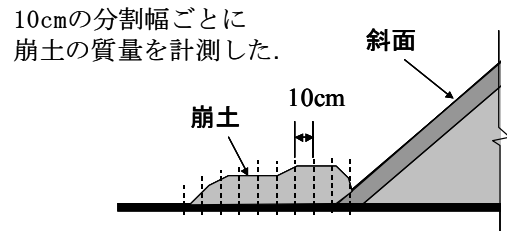


図-3 崩土の質量計測

(b) 加振方法

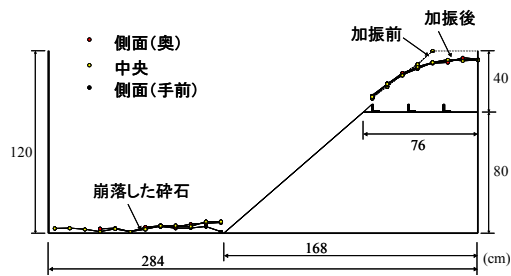
振動台による加振は加速度制御で行い、振動数5Hzの正弦波を10波入力して、水平動のみの加振と上下動を伴う加振を行った。水平動のみの加振では、加速度振幅を400galおよび700galとした。上下動を伴う加振では、加速度振幅700galの水平動と400galの上下動を同位相で入力した加振と逆位相で入力した加振を行った。

(c) 計測方法

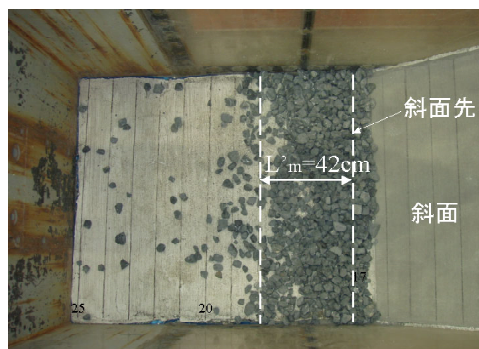
計測項目は、振動台の加速度、斜面模型の崩壊形状、崩落した碎石の堆積状況および到達距離である。振動台の加速度は、土槽底面の中央に固定した加速度計により計測した。斜面模型の崩壊形状は、土槽上端から模型表面までの距離を10cm毎に計測し形状を記録した。崩落した碎石の堆積状況は、図-3に示すように10cm間隔で分割した質量を計測して分布状況を求めた。

(3) 斜面模型の崩壊形状

碎石20-40mmによるモデルA(斜面高さ120cm)について水平700galの加振を行った場合の斜面模型の崩壊状況を図-4に示し、崩落した碎石の質量分布を図-5に示す。図-4に示すように、振動台の加振によって斜面表層付近の碎石が崩落し斜面先に堆積した。崩壊後の形状は、側面(手前側、奥)および中央においてほぼ同じ形状であり、2次元的な崩壊形状が示されている。崩落した碎石の堆積状況は、斜面先付近に隙間なく集散的に堆積しており、ある距離を過ぎると次第にまばらになっている。この崩落した碎石が形成する集合体の先端までの距離をL'mとして整理するものとした。図-4(b)において示したL'mの位置は、図-5において崩落量が2.0kg以下となる位



(a) 崩壊形状



(b) 崩落した碎石の堆積状況の写真

図-4 斜面模型の崩壊状況（モデル A-碎石 20-40mm，水平動 5Hz 700gal 10波，上下動なし）

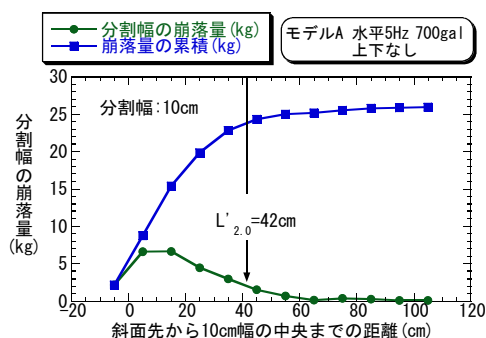


図-5 斜面先からの距離と崩落量の関係

置に対応している。他のケースにおいても、同様に崩落した碎石の質量分布を整理しその結果から L'_m を求めた。

(4) 到達距離に及ぼす各種要因の影響

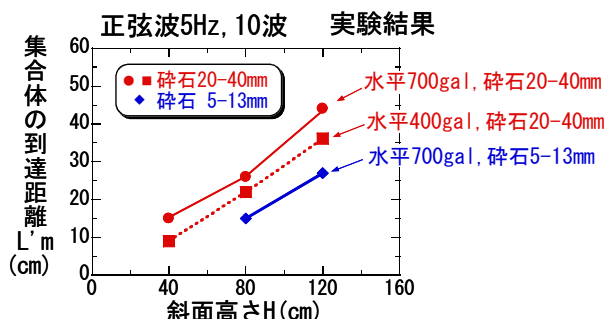
集合体としての到達距離 L'_m の各種要因による変化を図-6に示し、加速度による崩落量の変化を図-7に示す。

(a) 斜面高さ・加速度の影響

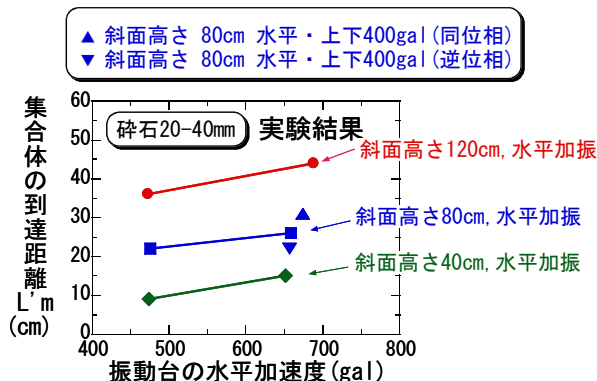
斜面高さによる到達距離の変化状況をみると（図-6(a）），400galおよび700gal加振の場合とも斜面高さと共に到達距離が大きくなる傾向が示され，斜面高さに応じて位置エネルギーが増加したことによる到達距離の増加傾向が明瞭に表れている。一方，振動台の加速度による変化状況は，加速度と共に崩落量は増加するが（図-7），加速度による到達距離の増加の割合はどのケースもあり大きくない。これは，地震動の加速度の大きさは崩落量や崩壊領域などに関係し，崩壊後の到達距離に関する影響はあまり大きくないことを示している。これらの結果から，地震時の斜面崩壊に関して，崩落前の崩壊領域や崩落量については地震動の加速度の影響が認められ，崩壊後の到達距離については重力による位置エネルギーの影響が大きいことが明らかになったといえる。

(b) 粒子サイズの影響

碎石5-13mmを用いて粒子サイズを小さくした場合の斜面模型の崩壊状況を図-8に示す。碎石20-40mmを用いた場合（図-4）と比較すると，碎石20-40mmの場合には崩落した碎石は全て斜面先の平坦部に達しているのに対し，碎石5-13mmを用いた場合には斜面先の平坦部の他に斜面上にも多く堆積している。到達距離 L'_m の変化状況（図-6(a））は，碎石5-13mmを用いた場合には碎石20-40mmを用いた場合よりも到達距離が小さくなっていることがわかる。崩落量の変化状況（図-7）は，碎石5-13mmを用いた場合は，碎石20-40mmを用いた場合より



(a) 斜面高さ、粒子サイズの影響



(b) 水平加速度、上下動成分の影響

図-6 到達距離に及ぼす各種要因の影響

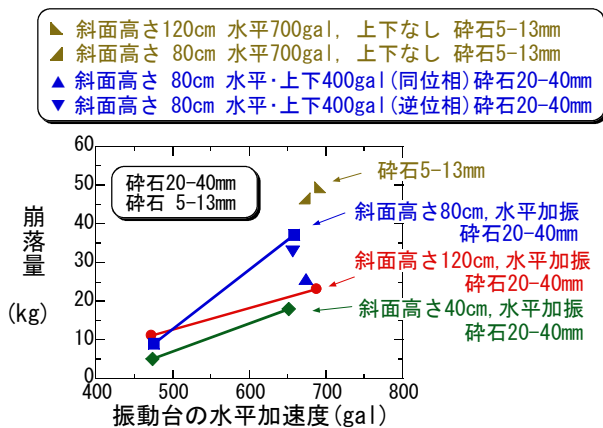
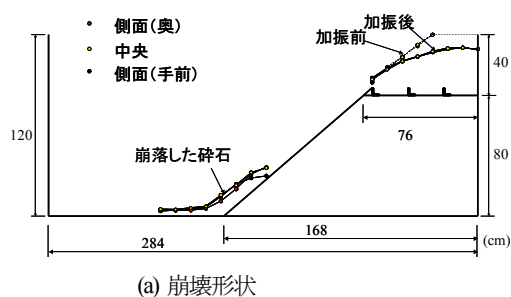
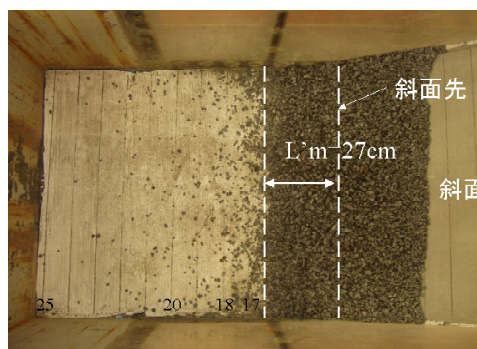


図-7 加速度と崩落量の関係



(a) 崩壊形状



(b) 崩落した碎石の堆積状況の写真

図-8 斜面模型の崩壊状況 (モデルA-碎石 5-13mm, 水平動 5Hz 700gal 10波, 上下動なし)

も大きくなっている。粒子サイズが小さくなると、粒子を乗り越える際の抵抗が小さくなるため崩落量が増すが、粒子数の増加により粒子同士の接触によるエネルギー損失の合計が大きくなること、および粒子1個当りの位置エネルギーが小さくなるため斜面先から平坦部に移る際の角度変化に追従しにくくなり後続の粒子を抑制することなどにより、到達距離が小さくなると考えられる。

(c) 上下動成分の影響

加速度振幅700galおよび400galの水平動と上下動による同時加振を行い、水平動のみの場合との比較を行った。上下動による到達距離の変化状況は図-6(b)に示されている。水平動を上下動と同位相で加振した場合には、同じ斜面高さ80cmで水平動のみの場合よりも到達距離が多少増加し、逆位相で加振した場合には多少減少する傾向にあるが、その変化量はあまり大きくない。今回検討した400gal程度の上下動の範囲では、到達距離に及ぼす上下動成分の影響はあまり大きくないと考えられる。

(d) 最大到達距離

崩落した碎石の集合体から飛び抜けた最大の到達距離 $L'max$ の変化状況を図-9に示す。ここで、モデルAで斜

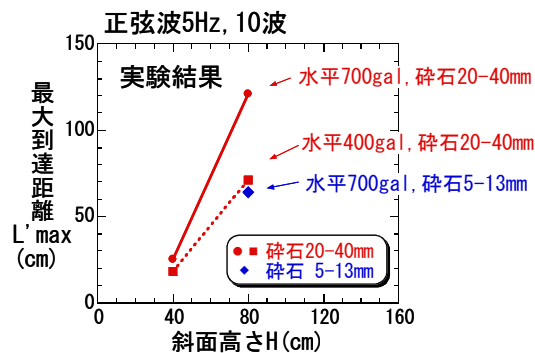


図-9 斜面高さと最大到達距離 $L'max$ の関係

面高さを120cmとしたケースでは、崩落した碎石が土槽壁面に衝突したため、モデルB (斜面高さ80cm) およびモデルC (同40cm) の結果を示している。最大到達距離についても、斜面高さを高くしたことによる増加量が大きく、斜面高さは重要な要因であるといえる。最大到達距離はばらつきの幅が大きいため、それらを把握するための検討を行っていく必要がある。

3. 個別要素法による斜面崩壊実験の数値シミュレーション

(1) 解析モデルと解析パラメーターの設定

碎石20-40mmを用いた実験を対象として個別要素法による2次元円形断面の粒状体を用いたモデル化を行った。粒状体の粒子サイズは、碎石20-40mmの粒度曲線に基づき直径43mm, 32mm, 27mm, 23mmおよび18mmの5種類とし、それぞれ質量百分率20%の比率で混合した。

碎石粒子のかみ合いによる強度特性を表現するため、土槽内に詰めた碎石を仕切り板を倒すことにより崩壊さ

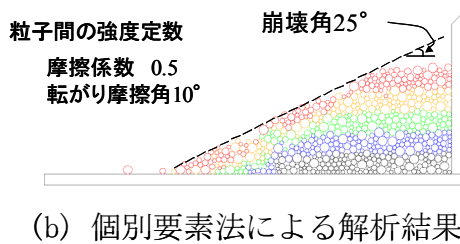
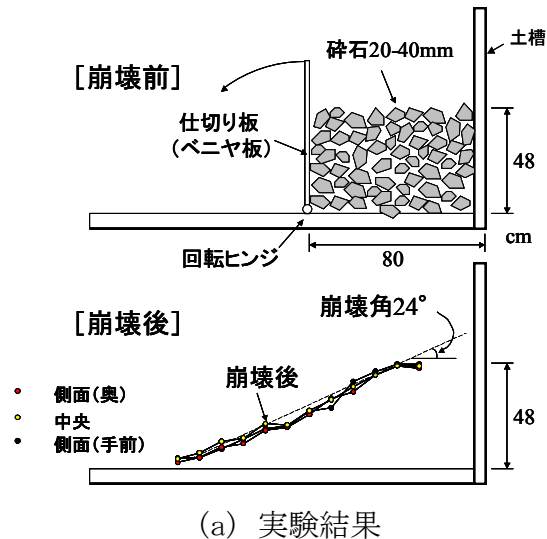


図-10 粒子間の強度定数設定のための崩壊実験と解析

せる崩壊実験の解析を実施した。図-10に碎石の崩壊実験の状況を示す。同図(a)に示すように、仕切り板で区切った土槽内に碎石を緩詰めにし、瞬時に仕切り板を倒すことで碎石を崩壊させた。崩壊後の形状から平均的な勾配を求め、これを崩壊角として粒状体モデルの強度定数設定の指標とした。解析においても実験と同じ様に鉛直に立てた仕切り板内に粒状体を緩詰めにし、仕切り板を取り除いて自重により崩壊させた。粒子間の摩擦係数と転がり摩擦角を種々変えて解析を行い、実験結果に近い崩壊角が得られた値を強度定数として設定した。

粒子間の接触点におけるばね定数は、碎石を対象として過去に実施した粒状体解析³⁾に基づいて、法線方向および接線方向のばね定数を定めた。回転のばね定数は、図-11に示すように抵抗モーメントとして法線方向の力によるモーメント $M_r = F_n r \theta$ を考え、法線方向のばね定数と平均的な粒子半径およびオーバーラップ量を考慮して設定した。減衰定数は粒子間の反発係数を0.3として、衝突速度と跳ね返り速度の関係⁴⁾を考慮して設定した。

以上の粒子間の解析パラメーターをまとめて表-2に示す。粒子と斜面および斜面先の平坦部についても同様の値を用いて解析した。

(2) 数値シミュレーションの結果

上で検討した粒状体モデルを用いて斜面モデルの解析モ

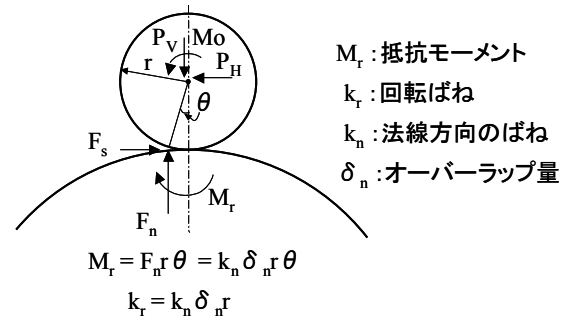


図-11 回転に対する抵抗モーメントとばね定数

表-2 粒状体モデルの解析パラメーター

解析パラメーター		設定値
粒子密度(g/m ³)		1.80
ばね定数	法線方向 k_n (kN/m)	9.81×10^4
	接線方向 k_s (kN/m)	4.91×10^4
	回転 k_r (Nm/rad)	1.47×10^4
強度定数	摩擦係数	0.5
	転がり摩擦角 (°)	10
減衰定数 (%) (反発係数 0.3)		35.8

デルを作成し、実験と同じ400galおよび700galの水平加速度を入力した崩壊解析を実施した。解析による斜面の崩壊状況を図-12に示し、到達距離に関する実験結果と解析結果の比較を図-13に示す。斜面の崩壊状況は図-4の実験結果に対応しており、解析においても実験と同じ様に表層付近の粒子が崩落する崩壊となった。崩落した粒子の軌跡からは、粒子の飛び跳ねなどの挙動はあまり認められないが、粒子形状を考慮したモデルを用いることで、改善できるものと考えられる。

図-13は、集散的に堆積している粒子の先端までの距離 $L'm$ に関して、斜面高さを変えた場合および加速度を変えた場合の実験結果と解析結果の比較を示している。解析で示された $L'm$ は、実験結果と同じ様に斜面高さと共に大きくなり、加速度を大きくした場合に比べて斜面高さを大きくしたことによる位置エネルギーの影響が著しいことが解析結果にも表れている。これらの検討から、斜面崩壊による到達距離の評価手法として個別要素法の適用性が示されたといえる。

4. まとめ

以上の検討結果は、次のように要約される。

- 地震動の加速度は、崩土の崩落量に影響を及ぼし、到達距離に関しては、地震動の加速度の影響よりも斜面高さによる位置エネルギーの影響が大きい。
- 崩土の粒子サイズが小さくなると、到達距離も小さ

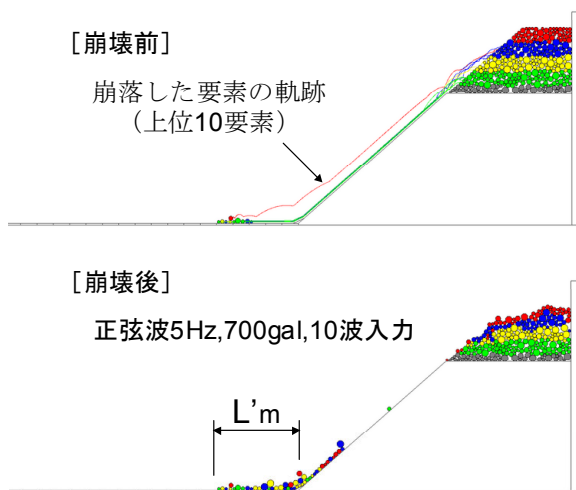


図-12 個別要素法に斜面の崩壊状況 (モデル A)
(解析時間：加振時間 1.2 秒+崩落時間 1.5 秒)

くなる。これは、粒子数の増加により粒子間のエネルギー損失の合計が増すことや、粒子の持つ位置エネルギーが小さくなり斜面先で平坦部に移る際の角度変化に追従しにくくなるためと考えられる。

- iii) 加速度振幅400galの上下動と700galの水平動による加振を行ったが、到達距離に及ぼす上下動の影響はあまり認められなかった。
- iv) 円形の粒子を用いた2次元個別要素法により実験で示された崩土の集合体としての到達距離を再現できた。今後は、斜面勾配などさらに多くの要因についての検討を進めると共に、崩落時の転がりに伴う飛び跳ねなどの挙動を表すため崩土の粒子形状などを考慮した解析を行う予定である。

謝辞：本研究は原子力安全基盤機構による受託研究として実施した。ご協力戴いた関係各位に感謝の意を表する。

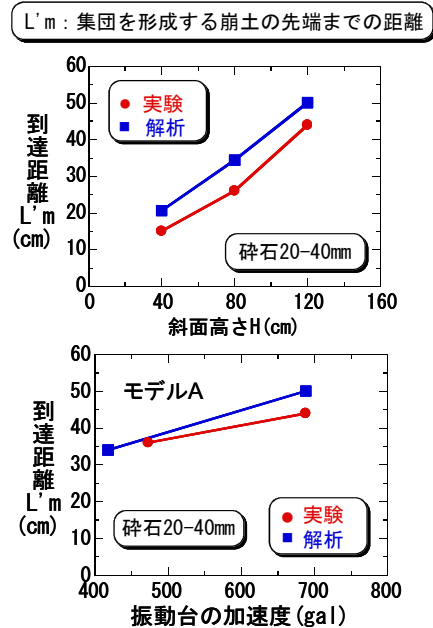


図-13 実験と解析の到達距離の比較

参考文献

- 1) 若井明彦, 鶴飼恵三, 清水義彦, 長田健吾：がけ崩れによる土砂到達範囲の DEM シミュレーションと簡易予測法の提案, 日本地すべり学会誌, 第 40 巻, 第 5 号, pp.366-376,2004.
- 2) 佐々木猛, 萩原育夫, 佐々木勝司, 堀川滋雄, 吉中龍之進, 大西有三：不連続変形法による斜面崩落モデルの地震応答解析, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.87-92,2006.
- 3) 栃木 均, 岡本敏郎：個別要素法によるアスファルト表面遮水式ロックフィルダムの地震時変形予測手法の開発, 電力中央研究所報告 研究報告 U03046, 2004.
- 4) 大町達夫, 荒井靖博：個別要素法で用いる要素定数の決め方について, 構造工学論文集, Vol.32A, pp.715-723, 1986.

A STUDY OF INFLUENCE FACTORS ON RUNOUT DISTANCE OF SLOPE FAILURE DEBRIS DURING EARTHQUAKE - INFLUENCE OF SLOPE HEIGHT AND EARTHQUAKE ACCELERATION

Hitoshi TOCHIGI, Masato NAKAJIMA, Yasuki OHTORI, Mamoru ITO
and Katsumi EBISAWA

As runout distance of slope failure debris is not uniform in evaluated value, probabilistic evaluation considering random variation of various factors is expected. In this study, slope failure experiment by shaking table is carried out and the influence of various factors on runout distance is researched. In this experiment slope height, horizontal and vertical earthquake acceleration and grain size of debris are changed as an experimental parameter and the influence of these parameters on runout distance are compared. Numerical simulation of shaking table tests by distinct element method is performed. By this simulation applicability of analysis method as runout distance evaluation method is examined.