

地震時の斜面崩壊に係わる不確定要因の分析

小早川博亮^{*1}・中島正人²・大鳥靖樹²・伊藤洋²・中村英孝³

¹ (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域 (〒 270-1194 我孫子市我孫子 1646)

² (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域 (〒 270-1194 我孫子市我孫子 1646)

³ 原子力安全基盤機構 (〒 105-0001 東京都港区虎ノ門 4 丁目 3 番 20 号 神谷町MTビル)

*E-mail: h-koba@criepi.denken.or.jp

地震時の斜面崩壊によって発生する崩壊土塊の移動に影響する要因を、既往文献の調査によって整理した。整理した結果を、地震時の斜面崩壊による岩塊の転動の評価のための個別要素法解析 (DEM) に反映させる方法と、反映させる際に不確定となる要因の分析を行った。DEM への反映は、1) 斜面のモデル化、2) 崩壊土塊のモデル化、3) ブロック間およびブロックと斜面の間の物性値、の 3 つのグループに考慮することとして、各々の要因を分類した。

Key Words : slope failure, earthquake, uncertain factor, runout distance

1. はじめに

地震時の斜面の安定性評価は、地震力が斜面に入力された場合に、対象とするすべり面上の土塊の力の釣り合いを考え、安全率によって評価されることが通常である。この評価は、極限平衡法や有限要素法などの数値解析手法によって行われる。安定性評価の結果、基準となる安全率を下回る場合には、斜面の対策工の検討がなされることが多い。一方で、斜面が崩壊する可能性が否定できない場合には、個別要素法や不連続変形法などの不連続体の解析手法により、崩壊した際の斜面崩壊や岩塊の転動挙動を評価し、その移動範囲を検討することが考えられる。

しかしながら、斜面崩壊時の崩壊土塊や岩塊の転動挙動には斜面の勾配や地質、岩盤の性状や植生状況など、種々の要因 (素因) が影響するうえ、斜面に外力として入力される地震動 (誘因) にも尾根の形状や震源などの要因が影響することから、岩塊の転動挙動や土塊の移動範囲を定量的に評価することは必ずしも容易ではない。評価の上では、崩壊土塊の移動や岩塊の転動挙動に支配的な要因を抽出・分析することは重要であり、また評価のための数値解析的な手法においては、それらの要因を余すことなく考慮できることが重要と考える。そこで、地震時の斜面崩壊や岩塊の転動挙動の定量的な評価手法の構築に資するために、それらの要因を分析する。

要因の分析において対象とする事象は次のように考える。崩壊土塊の移動形態は① 地すべりやすべりなどのような崩壊土塊全体の移動、② 崩壊による岩塊の移動・転動に大別できる。移動土塊の先端付近では、連続

した崩壊土塊の先端に、崩壊時にエネルギーをもっていた岩塊がより遠方へ移動していることが通常と考えられることから、崩壊土塊本体の到達よりも岩塊の到達について検討しておいた方が移動範囲の評価においては安全側である。このため、ここでは、岩塊の移動を対象とする。また、岩塊の挙動を定量的に評価するための解析手法として個別要素法 (DEM) を対象とし、抽出・分析された要因を反映する方法と課題について整理する。

2. 既往文献調査による岩塊の転動に影響する要因の分析

(1) 落石の素因

岩塊の転動に関連する従来技術を概観すると、落石に対する道路や鉄道などの線形構造物の維持管理との関連が深いと考えられ、そこで検討されている落石の要因分析は岩塊の移動の分析と共通な点が多い。そこで、まず落石に関する従来知見に基づき、落石の素因を分析したうえで、岩塊の転動の要因を分析する。

野口ら¹⁾は各機関の評価法を対象として落石・岩盤崩壊に係わる素因を分析している。分析においては、既存の評価法で取り扱われている落石・岩盤崩壊の素因を、大きく① 斜面の形態、② 斜面諸元、③ 地質・地質構造、④ 水、⑤ 地被状況、⑥ 特殊地形・地質等、⑦ 気象条件の 7 つに大分類し、各分類項目を表-1 のようにそれぞれ小分類したうえで、それぞれの評価法における、各分類項目の重要度を検討している。その結果、落石の発生に対して、次の知見を得ている。

(a) 斜面を構成している地質や地質構造が重要であり、

表-1 既往の安定性評価法における落石の素因¹⁾

評 価 項 目		評 価 の 目 安		備 考
大分類	小 分 類	【不安定側】←	→【安定側】	
斜面の形態	斜面型	尾根型	谷型	両者の中間
	自然斜面・切取のり面別	人工斜面		自然斜面
	斜面縦断形	凸型 凹型 凸型	直線 凸型 凹型	凹型 直線 直線
斜面諸元	高さ	高		低
	勾配	急		緩
	斜面の方向	南向き 北向き		北向き 南向き
地質・地質構造	風化状況	顕著		新鮮
	岩質・土質・強度	固結度・圧縮強度・小 弾性波速度・小		固結度・圧縮強度・大 弾性波速度・大
	割れ目	多寡	少	無
		規模・開口状況	大 小	無
		粘土を挟む、湧水・有 開口進行 根系進入・有		密着 根系進入・無
	方向性	流れ目 規則的、連続性有	受け目 不規則、貧連続性	無 無
	間隔	大	小	無
	構造	硬軟両者	軟質のみ	硬質のみ
	流れ盤・受け盤	流れ盤	受け盤	無
	浮き石・転石	転石の浮き上がり・大 転石の根入れ・浅 転石周辺の斜面角度・急	転石の浮き上がり・小 地山に埋没 転石の根入れ・深 転石周辺の斜面角度・緩	
	岩質	硬質		軟質
	形状	丸型、球形、円筒形		角型、偏平
水	集水状況	集水範囲・大 表流水集中・有、雨裂形成		集水範囲・小 表流水集中・無
	湧水	多、パイピング進行	少、地表面の侵食・無	無
	乾燥・湿潤	湿潤		乾燥
地被状況	立木・植生	草地	裸地	樹木
		立木管理不十分 立木密度・疎	立木密度・中	立木管理十分 立木密度・密
	表層土	マトリックス軟質 表土侵食		マトリックス硬質 表土厚く安定
特殊地形・地質等	膨潤性の岩等	泥岩、凝灰岩、蛇紋岩、 変朽安山岩、片岩等		
	断層	有		無
	オーバーハング	程度・大	程度・小	無
	遷急線	明瞭		不明瞭
気象条件	崩壊性地形等	崖錐、崩壊跡地、 土石流跡地等		
	降雨	多		少
	降雪	多		少
	気温(含・凍結融解)	寒冷地		温暖地
		気温の日較差・大		気温の日較差・小

* 評価の目安が評価法により異なる項目については、備考欄に対応する評価法を示した。

割れ目の状況，風化状況，岩質・強度がとくに重要である。

- (b) 斜面高さ，勾配は，重要な評価項目である。
- (c) 水は全体の素因の中でのウェイトは高くない。
- (d) 地被状況は転落型の落石で重要である。
- (e) オーバーハングは特殊地形として重要な評価項目である。

(2) 落石の素因の整理と支配的な要因の抽出

岩塊挙動においては，その運動機構が重要と考えられてきた。この為に，落石の運動機構そのものを説明するための要因の抽出や落石運動への影響を与える要因についての分析が盛んに行われてきた^{2,3)}。また，地震時の落石事例として，日本道路協会による落石対策

便覧²⁾に2000年以前のものがまとめられている。それ以降にもいくつか大きな地震が発生しており，福岡県西方沖地震(2005.3)⁴⁾や新潟県中越地震(2004.10)⁵⁾，新潟県中越沖地震(2007.7)^{6,7)}の事例がそれぞれまとめられている。地震以外の事例についても，北海道での検討事例⁸⁾があり，実際の崩壊事例に基づき，岩塊の到達距離に及ぼす影響についても検討がなされてきている。これらの結果から，岩塊の到達距離に対する影響要因は以下のようにまとめられる。

岩塊の運動には，岩塊の形状はあまり影響がないものの，岩塊の大きさは影響することが指摘されている例が多い^{8,9)}。また，斜面の勾配は，落石の発生と落石の運動形態に関係があること^{9,10)}，また斜面の上の植生は落石の停止に影響すること^{3,11,12)}が指摘されてい

る。落石の広がりには、地形、植生、斜面勾配、岩塊の大きさ、形状が影響すること^{3,11-13)}が指摘されている。また、落石の到達距離に影響する岩塊の線速度や角速度は、斜面の高さとの相関がある^{3,11-16)}。

3. DEM 解析における岩塊挙動の不確定要因

野口ら¹⁾の素因の分析結果に基づき、これらの素因が崩壊土塊や岩塊の到達距離に及ぼす影響の有無について、既往の文献調査の結果を勘案して整理し、その上で、影響があると考えられる要因に関して、DEM 解析にどのように考慮する必要があるかを整理した。その結果を表-2 に示す。なお、ここでは DEM 解析はあくまでも崩壊土塊の到達距離の評価のみに用いるという前提のもとで整理をしている。つまり、すべりの範囲やその安定性については DEM 解析の前段階で評価がなされているものと考えている。

到達距離に及ぼす影響は、考えられている落石の素因のうち、斜面の方向、集水状況、湧水については影響がないものとした。浮き石や転石は斜面のすべり安全率の評価の際には影響しないが、当該斜面に浮き石や転石が存在する場合には到達距離に影響を及ぼすと考えられることから、浮き石、転石に関する評価項目は影響があるとした。特殊地形や地質については、DEM 解析による到達距離の評価の前の段階、つまり斜面のすべりに対する安定性評価の段階で考慮されるべき項目と考えられるが、ここでは影響があるとしている。ただし、オーバーハングに関しては特殊な地形であるとしてここでは影響はないとした。さらに、気象条件は基本的には影響はないとしているが、積雪した斜面は岩塊の運動に影響すると考え、影響があるとしている。

影響があるとした項目の DEM 解析への反映に関しては、大きく①斜面のモデル化、②崩壊土塊のモデル化、③ブロック間およびブロックと斜面間の物性値（ばね、ダッシュポット、動摩擦係数）の3つグループに考慮することとなる。①斜面のモデル化に関しては、斜面の高さ、勾配が支配的と考えられており、それらは DEM 解析において斜面形状として反映することができる。しかしながら、斜面型（尾根型、谷型）は落石の素因として考えられているが、2次元 DEM 解析ではその要因を反映することは難しく、今後の課題の一つである。また、斜面の高さは、高くなるに従って表-2 に示した地被状況や風化状況などの項目の内容の多様性が増す不確定要因を含みやすくなることから、斜面高さは評価結果に及ぼす影響が大きい要因の一つである。次に②崩壊土塊モデル化に関しては、岩盤に含まれる割れ目の多寡、方向性、間隔に加えて、浮き石や転石の岩質、形状、大きさ、量などが要因として考えられており、こ

れらは DEM 解析においては具体的なブロックの大きさや形状といった形で反映できるようになっている。崩壊土塊のモデル化に対する解析上の課題としては、調査によるブロックの大きさや形状などの解析モデルへの反映方法が挙げられ、これは評価上の不確定要因の一つとして考えられる。また、運動中の岩塊の衝突による分離現象は、解析上考慮できるものとなっているが、分離に関するパラメータの設定方法は容易でなく、これも不確定要因の一つである。さらに③物性値に影響する要因としては、地盤の風化状況、岩質・土質、強度、さらには岩相（硬軟）の組合せ、地被状況（立木・植生、表層土の厚さ）などが挙げられている。DEM 解析においてはこれらの要因を含めてブロック同士・ブロックと斜面のばねやダッシュポット、動摩擦係数の値に反映できるようになっている。それらのパラメータを具体的に試験などによって把握可能なものもあるものの、植生の影響を反映する方法は必ずしも明確ではないために現状では考慮されていない。植生の影響は、岩塊の到達距離が縮む方向へ作用することから、これを考慮しないことは安全性の上では問題ないが、不確定要因の一つと考えられる。

4. まとめ

落石に関する文献調査を行って、岩塊の到達距離に及ぼす影響要因に関する従来の知見を整理した。調査に基づく落石の素因のうち、到達距離に及ぼす影響があると考えられる項目に関し、2次元個別要素法による解析への反映について整理し、不確定な要因を抽出した。岩塊の運動には、岩塊の形状はあまり影響がないが、岩塊の大きさは影響することが指摘されている例が多い。また、斜面の勾配は、落石の発生と落石の運動形態に関係があること、斜面の上の植生は落石の停止に影響することが指摘されている。落石の広がりには、地形、植生、斜面勾配、岩塊の大きさ、形状が影響することが指摘されている。また、落石の到達距離に影響する岩塊の線速度や角速度は、斜面の高さとの相関がある。岩塊の到達距離に影響をおよぼす落石の素因の DEM 解析への反映は、①斜面のモデル化、②崩壊土塊のモデル化、③ブロック間、およびブロックと斜面間の物性値の3つのグループに考慮することとなる。斜面のモデル化に関しては、斜面の高さ、勾配が支配的な要因である。崩壊土塊のモデル化では、ブロックの大きさや形状、ブロックの分離に関するパラメータは不確定要因として挙げられる。物性値には種々の要因が影響し、特に斜面の地被状況は安全性の上では問題ないが不確定要因の一つとして考えられる。今後は、これらの不確定要因を具体的に DEM 解析で定量的に

表-2 崩壊土塊の到達距離に影響する落石の素因とDEMによる数値解析への反映(野口ら¹⁾に加筆)

評価項目		評価の目安		崩壊土塊の到達距離に及ぼす影響※1(有:○、無:×)	DEM解析での考慮の必要性(○:有、--:無)		備考
大分類	小分類	【不安定側】	<->		斜面のモジュール化	崩壊土塊のモジュール化	物性値※2
斜面の形態	斜面型	尾根型	谷型	両者の中間	○	○	--
	自然斜面・切取のり面別	人工斜面			○	○	--
	斜面横断形	凸型	直線	凹型	○	○	--
		凹型	直線	直線	○	--	--
		凸型	凹型	直線	○	--	--
斜面諸元	高さ	高	低	低	○	--	--
	勾配	急	緩	緩	○	--	--
	斜面の方向	南向き	北向き	南向き	×		
		北向き	南向き	南向き			
	風化状況	顕著	新鮮	新鮮	○	○	○
地質・地質構造	岩質・土質、強度	固結度・圧縮強度・小	固結度・圧縮強度・大	固結度・圧縮強度・大	○	○	○
		弾性波速度・小	弾性波速度・大	弾性波速度・大	○	○	○
	多寡	多	少	無	○	○	--
		大	小	無	○	--	○
	割れ目	粘土を挟む、湧水・有	根系進入・有	密着	○	--	○
		開口進行		根系進入・無			
	方向性	流れ目	受け目	無	○	○	--
		規則的、連続性有	不規則、食通断性	無	--	○	--
	間隔	大	小	無	○	○	--
		硬軟両者	軟質のみ	硬質のみ	○	○	○
水	構造	岩相の組合せ	流れ壁	受け壁	○	○	--
		流れ壁・受け壁					
	安定状態	転石の浮き上がり・大	転石の浮き上がり・小	地山に埋没	○	○	--
		転石の粗入れ・浅	転石の粗入れ・深	転石周辺の斜面角度・緩	--	--	プロットの形状に反映
	岩質	硬質	軟質	軟質	○	--	○
		丸型、球形、円筒形	角型、扁平	角型、扁平	○	○	--
	形状	大	小	小	○	○	--
		多	少	無	○	○	--
	大きさ	多	少	無	○	○	--
		量					プロットの形状・量に反映
地盤状況	集水状況	集水範囲・大	集水範囲・小	集水範囲・小	×		
		表流水集中・有、雨型形成	表流水集中・無	表流水集中・無	×		
	乾燥・湿潤	湿潤	少、地表面の侵食・無	乾燥	○	--	○
	立木・植生	草地	裸地	樹木	○	--	○
地盤状況	表層土	立木管理不十分	立木密度・中	立木管理十分	○	--	○
		立木密度・疎		立木密度・密			
	膨潤性の岩等	マトリックス軟質	マトリックス硬質	マトリックス硬質	○	--	○
		表土侵食	表土侵食	表土厚く安定		--	
	泥岩、凝灰岩、蛇紋岩、安山岩、片岩等				○	○※3	--
特殊地形・地質等	断層	有	無	無	○	○※3	--
		程度・大	程度・小	不明瞭	×		
	オーバーハング	明瞭	不明瞭	不明瞭	○	○※3	--
					○	○※3	--
	崖縁、崩壊後地、土石流跡地など				×		プロットの規模に反映
気象条件	降雪	多	少	少	○	--	○
	降雪	多	少	少	○	--	○
	気温(含・凍結融解)	寒冷地	温暖地	温暖地	×		

※1 土石流を除く
※2 プロット間およびプロットと斜面の間の、ばね、ダンジュボット、動摩擦係数
※3 FEMによる崩壊領域の設定の段階で反映

扱う方法についての検討が必要であると考えられる。

謝辞： 本調査は原子力安全基盤機構の公募研究「地震時の斜面崩壊に関する不確実さの検討」の一部として実施した。不確定要因の分析において、電力中央研究所栃木均上席研究員、河井正主任研究員、石丸真主任研究員にご議論いただいた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 野口達夫, 杉山友康: 落石・岩盤崩壊にかかわる素因の分析 (その 1) —既存の安定性評価法で用いられる素因の分析—, 応用地質, vol. 42, No. 1, pp. 42–51, 2001.
- 2) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.
- 3) 日本道路協会: 落石対策便覧に関する参考資料—落石シミュレーション手法の調査研究資料—, 2002.
- 4) 社団法人地盤工学会 福岡県西方沖地震地盤工学会調査団: 福岡県西方沖地震における被害調査報告, 2005.
- 5) 社団法人地盤工学会 新潟県中越地震災害調査委員会: 新潟県中越地震被害調査委員会報告書, 2007.
- 6) 社団法人地盤工学会 2007 年新潟県中越沖地震災害調査委員会: 2007 年新潟県中越沖地震被害調査委員会報告書, 2008.
- 7) 日本応用地質学会新潟県中越沖地震現地調査団: 2007 年 7 月新潟県中越沖地震の災害緊急調査報告, 応用地質, vol. 48, No. 4, pp. 192–202, 2007.
- 8) 北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会: 北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会報告書, 2000.
- 9) Huger, O. and Evans, S. G. : Engineering aspects of rockfall hazards in Canada, *Report to the geological survey of Canada and transport Canada*, pp. 20–26, 1989.
- 10) Ritchi, A. M. : Evaluation of rockfall and its control, *Highway reserch record*, No. 17, pp. 13–28, 1963.
- 11) 右城猛, 筒井秀樹: 実斜面での落石実験 1 (落石運動のメカニズム), 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.2513–2514, 2001.
- 12) 右城猛, 筒井秀樹: 実斜面での落石実験 2 (落石の運動特性), 第 36 回地盤工学研究発表会, pp. 2515–2516, 2001.
- 13) 吉田博, 右城猛, 榎谷浩, 藤井智弘: 斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃特性の評価, 構造工学論文集, vol. 37A, pp. 1603–1616, 1991.
- 14) 右城猛, 村上哲彦: 落石の跳躍高の推定, 第 1 回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計法に関するシンポジウム論文集, pp. 48–54, 1983.
- 15) 氏平増之, 細谷昭吾, 小川健太, 高貝暢浩: フィールドにおける落石の落下挙動—岩盤斜面の落石に関する研究 (第 1 報)—, 資源と素材, vol. 112, pp. 843–850, 1996.
- 16) 氏平増之, 細谷昭吾, 小川健太, 高貝暢浩: 落石の運動エネルギーと到達距離の関係—岩盤斜面の落石に関する研究 (第 2 報)—, 資源と素材, vol. 113, pp. 309–315, 1996.

ANALYSIS OF FACTORS CAUSING SEISMIC SLOPE FAILURE

Hiroaki KOBAYAKAWA, Masato NAKAJIMA, Yasuki OTORI, Hiroshi ITO and Hidetaka NAKAMURA

In this paper, we describe the factors causing seismic slope failure and report the runout distance of slope failure debris during earthquakes, estimated from the result of a bibliographic survey. We analyzed the factors influencing the estimation of runout distance of debris during earthquakes when we use numerical distinct element method (DEM). The reflection of each factor in DEM was as follows. 1) modeling the slope, 2) modeling the debris, 3) mechanical properties between blocks and between block and slope.