

斜面崩壊による岩塊や落石の 衝突ハザードの評価法

吉田 郁政¹・内藤 直人²・中瀬 仁³

¹正会員 東京都市大学教授 工学部都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)
E-mail: iyoshida@tcu.ac.jp

²学生会員 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: 24518057@stn.nitech.ac.jp

³正会員 東電設計㈱ (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア 9F)
E-mail: nakase@tepsco.co.jp

個別要素法などの数値解析の発展によって斜面崩壊による岩塊や落石の挙動予測がある程度可能となってきた。しかし、その挙動には非常に大きな不確定性が伴い、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については確定的に評価することは現実的ではない。そこで本研究ではなんらかの数値解析によって崩壊した岩塊や落石の到達位置の分布が得られた場合を対象に、注目する構造物に対する衝突確率の算定法について提案する。さらに、構造物等への影響を評価するには衝突確率だけではなく、衝突の激しさに関する情報も必要である。そこで、残存距離を構造物に衝突しない場合のさらなる移動量と定義して、残存距離とその超過確率に関するハザード曲線を提案する。

Key Words : *falling rock, hazard of collision, probability distribution, probability of collision*

1. はじめに

地震時には斜面崩壊が生じ周辺の施設に影響を与えることがある。その影響を適切に評価し対策を講じることは重要なテーマであり、多くの検討が行われてきた。原子力発電所のような重要な構造物の周辺にも斜面が存在することがあり、その地震時安定性は重要な評価項目の一つとなっている¹⁾²⁾。近年では基準地震動に対する安全性の照査だけではなく、地震時に斜面崩壊や落石が生じた場合に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³⁾⁴⁾⁵⁾。こうした崩壊や落石に対する解析手法としてSPH法⁶⁾、MPM法⁷⁾⁸⁾、MPS法⁹⁾などの粒子法が注目されており、特に落石に対してはDEMを用いた多くの報告¹⁰⁾¹⁴⁾がある。

斜面崩壊や落石などに対する影響評価には非常に大きなばらつきが伴う。斜面には凹凸があり、岩塊の形状は複雑である。それらの情報を全て詳細に収集してモデル化に反映させることは現実的ではない。さらに、強非線形問題特有の不確定性も存在するため¹⁵⁾、注意深く3次元地形や斜面のモデル化を行い、最新の方法で数値解析を行ったとしても確定的に斜面崩壊や落石の影響を評価

することは難しい。また、落石の実験においても、細心の注意を払って実施しても落石の経路や到達距離は大きくばらつくこととなる。構造物への衝突の可能性は一般には小さく、たまたま衝突しなければその衝撃力は0であるが衝突すれば大きな衝撃力を与えることとなる。そのため、1回の数値計算から構造物へ与える影響を確定的に評価することは難しく、ばらつきを考慮できる評価方法が好ましい。落石の到達位置などは確率分布で評価することが妥当であろう。

そこで、本研究ではDEM等の方法で斜面崩壊による落石岩塊の到達位置分布が与えられたとして、その確率分布を評価し、想定した構造物への衝突確率を評価する方法の構築を試みる。栃木による落石実験¹⁶⁾¹⁷⁾が行われており、一個ずつ個別に岩塊モデルを斜面の上から落とした場合とまとめて同時に落とした場合の落石の到達位置の情報が得られている。この実験結果による落石の到達位置の確率分布の評価を行い、仮定した構造物への衝突確率の評価を行う。さらに、単に衝突するか否かだけではなく、どの程度の強さで衝突するかの情報も重要であるため、衝突の衝撃の強さとその関係を表す衝突ハザード曲線の評価も試みる。本研究では基礎的検討として

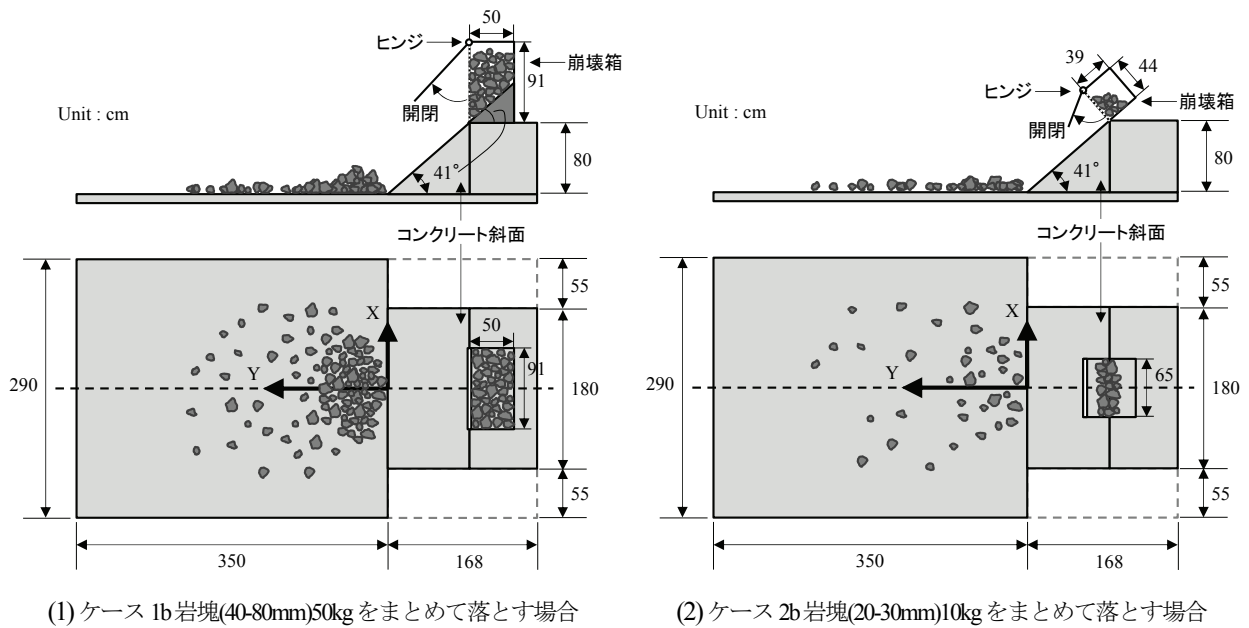


図-1 栃木らにより実施された落石実験の概要と各種寸法

衝突衝撃の強さについて残存距離に注目し、その超過確率との関係性を評価する。残存距離とはもしも構造物に衝突しなければさらにどの程度移動していたかの距離を表しており、衝突した時点でのエネルギーの大きさに関係した量となっている。

2. 落石実験による岩塊到達位置の確率分布

(1) 栃木による実験^{16), 17)}の概要

斜面崩壊後の岩塊の飛散分布特性を把握するため岩塊の崩落実験が実施された。20-30mmと40-80mmの2種類のサイズの塊状岩塊について、単一岩塊の落下と岩塊群の崩落を行った結果の概要を示す。実験に用いた20-30mmおよび40-80mmの岩塊はZinggの方法による形状分類¹⁸⁾を実施し、岩塊の長辺長 a 、中間長 b および短辺長 c ($a > b > c$ の関係) の寸法比として定められる扁平率 c/b と細長率 b/a の大小により塊状を選定した。図-1に示す実験装置を用いて、単一岩塊の落下実験と岩塊群(崩落量 10kg, 50kg)の崩落実験が実施された。

単一岩塊の落下実験では、20-30mmと40-80mm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。落下方法は、図-1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。岩塊群の崩落実験では、図

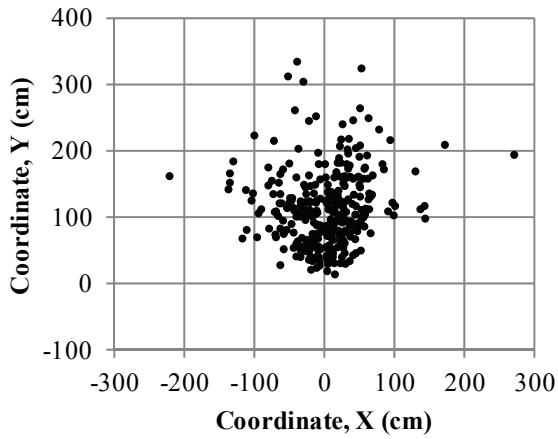
表-1 実験結果のケース

ケース	1a	1b	2a	2b
大きさ	40-80mm		20-30mm	
落とし方	個別	同時 50kg	個別	同時 10kg
個数	300	177	300	442

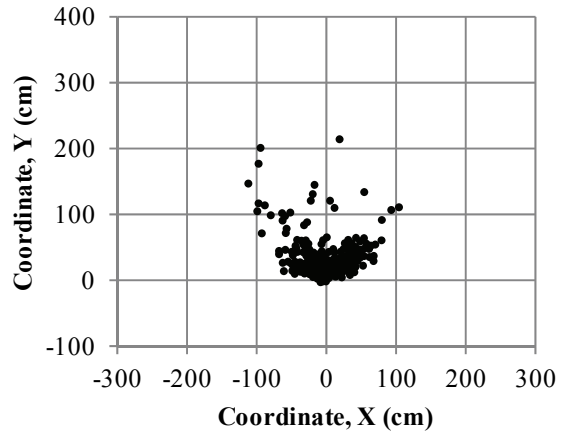
-1(1)(2)のように所定の量を箱に入れ、図中に示す蓋を瞬時に開放することにより崩落させて岩塊群の到達位置を記録している。

本研究では表-1に示す4ケースを対象とする。ケース1aと1bは40-80mmの塊状岩塊の個別と同時落下(50kg)、ケース2aと2bは20-30mmの塊状岩塊の個別と同時落下(10kg)の実験である。使用する岩塊量(重量)の記録はあるものの、崩落させた岩塊の個数のデータは残っていない。そこで、実験終了後の写真から岩塊個数を数えた結果を表-1に示している。

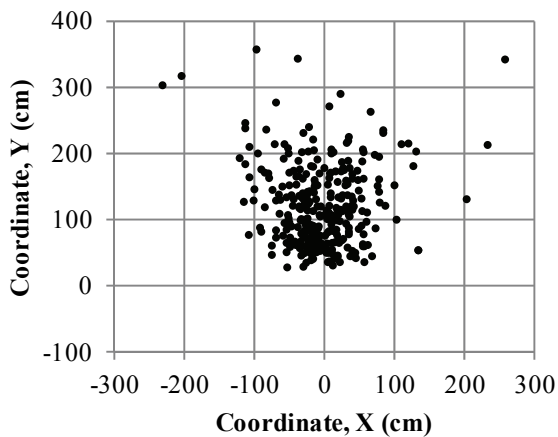
これら4ケースについての岩塊の到達位置の分布を図-2に示す。ケース1aと2aあるいは1bと2bでは到達位置の分布に大きな差は見られない。つまり、個別落下、同時落下ともに岩塊の大きさ40-80mmと20-30mmの違いの影響は小さい。一方、個別落下と同時落下の違いの影響について注目すると、40-80mm、20-30mmともに個別に落下させた方が遠くまで到達している。同時に落下させた場合は斜面の直下に集中して分布しており、一部重なっている。



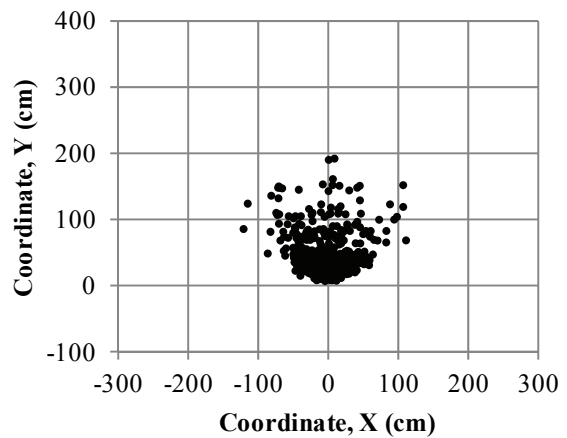
(1) ケース 1a(40-80mm, 個別落下)



(2) ケース 1b(40-80mm, 同時落下)



(3) ケース 2a (20-30mm, 個別落下)



(4) ケース 2b (20-30mm, 同時落下)

図-2 落石実験結果の岩塊の到達位置の分布

これらの傾向は岩塊同士の相互作用によって解釈できると考えている。同時に落下させる場合は、落下中の岩塊同士の衝突や既に停止している岩塊への衝突によりエネルギーが消散される。そのため、単独に落下させる場合に比べて遠くまで移動せずに斜面直下に多く堆積していると解釈できる。

実験や到達位置分布の詳細については栃木による論文^{16,17}を参照されたい。

(2) 到達位置の確率分布の評価

2つの方向、X、Y方向について到達位置の累積確率分布のモデル化を行う。個別に落下させた場合のケース1aのX方向を例にモデル化の方法について示す。各岩塊の到達位置の座標値に関して小さい順に並べて $(x_i, i=1, n)$ とする。ここで、 n はデータ個数である。到達位置の座標値に関して x_i 以下となる累積確率を次式で与える¹⁹。

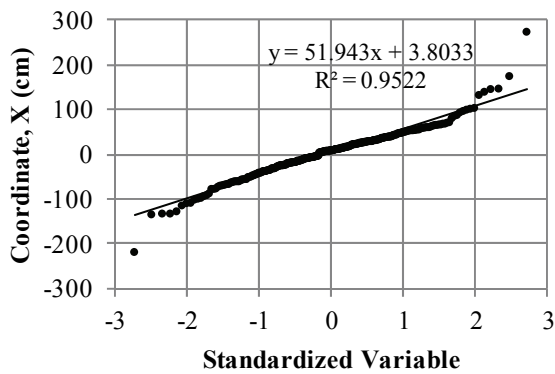
$$P(x_i) = p_i = \frac{i}{n+1} \quad (1)$$

縦軸を座標 x_i 、横軸を上記の確率から逆算した標準化変数 z_i として図-3(1)に示す。

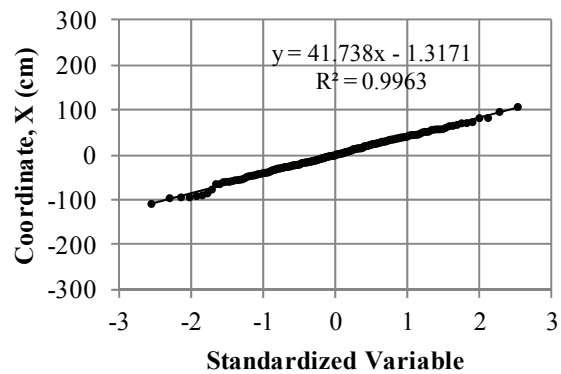
$$z_i = \Phi^{-1}(p_i) \quad (2)$$

ここで、 Φ^{-1} は累積標準正規分布の逆関数である。正規分布に従う場合は座標 x_i と標準化変数 z_i の関係は直線となり、その傾きは標準偏差、切片は平均値を表す。図に示されているように、標準化変数が2あるいは-2を超えると直線からの多少のずれが見られるが、概ね両者の関係はほぼ直線となっており、正規分布でモデル化できることがわかる。

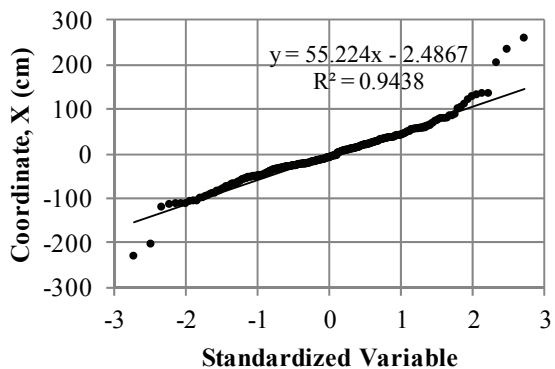
同様にして、ケース1b、2a、2bのX方向について図-3に示す。個別に落下させている1aや2aでは多少のずれが見られるものの、同時に落下させている1b、2bではほぼ直線状の図となっている。その平均値は各ケースともにはほぼ0であり、標準偏差については同時に落としたケ



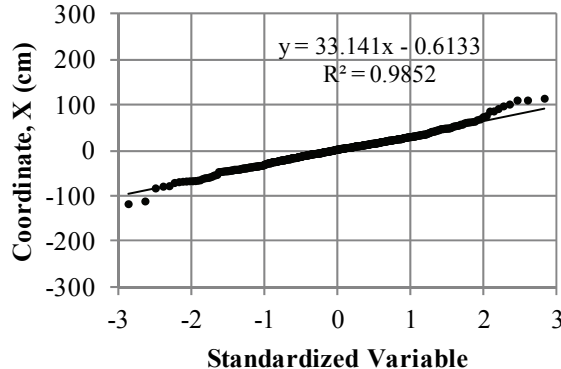
(1) ケース 1a(40-80mm, 個別落下)



(2) ケース 1b(40-80mm, 同時落下)



(3) ケース 2a (20-30mm, 個別落下)



(4) ケース 2b (20-30mm, 同時落下)

図-3 落石実験結果の岩塊の到達位置 X (斜面直交方向) の正規分布によるモデル化

表-2 各ケースの到達位置座標の平均と標準偏差

ケース		1a	1b	2a	2b
X 方向	平均 (cm)	3.8	-1.3	-2.5	-0.6
	標準偏差	51.9	41.7	55.2	33.1
Y 方向	平均 (cm)	111.6	41.1	120.7	47.6
	標準偏差	56.4	33.9	60.9	32.4

表-3 各ケースの $\ln(Y-Y_0)$ の平均と標準偏差 ($Y_0=10\text{cm}$)

ケース	1a	1b	2a	2b
平均値	4.69	3.72	4.76	3.90
標準偏差	0.499	0.669	0.486	0.548

ース 1b,2bの方が小さくなっている。

次に Y 方向について同様の整理をして図-4 に示す。Y 方向についてはいずれのケースも直線になっているとは言い難い。斜面法尻に岩塊が集中して水平面の方向に大きく分布しており、斜面の傾斜がある部分には当然のことながらほとんど分布していない。対数正規分布的に見えるが、Y 座標の原点を斜面法尻としているがケース 1b では多少の岩塊の Y 座標値が負、すなわち、斜面の上側となっている。そのままでは対数正規分布として扱うことができないので $Y-Y_0$ としてその対数正規分布を考える。 $Y_0=10\text{cm}$ とした場合の $\ln(Y-Y_0)$ について、同様

に整理した結果を図-5 に示す。各ケースともにほぼ直線状となっており、対数正規分布によるモデル化が良好であることがわかる。 Y_0 について数値を変えていくつか試してみたが得られる結果に大きな違いはない。

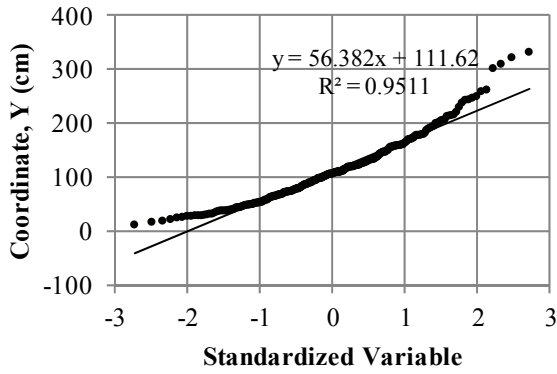
以上、得られた平均値、標準偏差をまとめて表-2 に示す。また、 $Y_0=10\text{cm}$ 、 $\ln(Y-Y_0)$ として算定した平均値や標準偏差を表-3 に示す。これらについては後述の衝突確率の算定で用いる。

3. 衝突確率及び残存距離ハザード曲線の評価方法

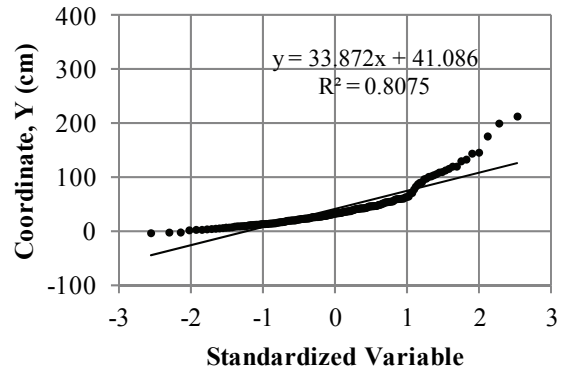
(1) 衝突確率の算定法

2章で述べた確率分布のモデル化の結果に基づき衝突確率やハザード曲線の評価を行う。ただし、ここでの衝突確率は斜面崩壊が生じた、あるいは落石が生じた場合の条件付き確率であることに注意されたい。全確率とするには斜面崩壊や落石が生じる確率をモデル化し、ここで算定する条件付き確率と合わせて評価する必要がある。

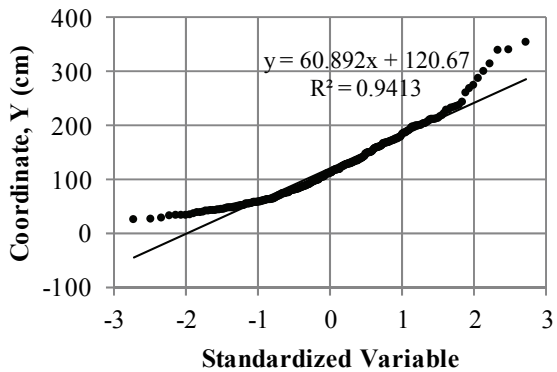
注目する施設への落石一つ当たりの衝突確率については次式で算定する。



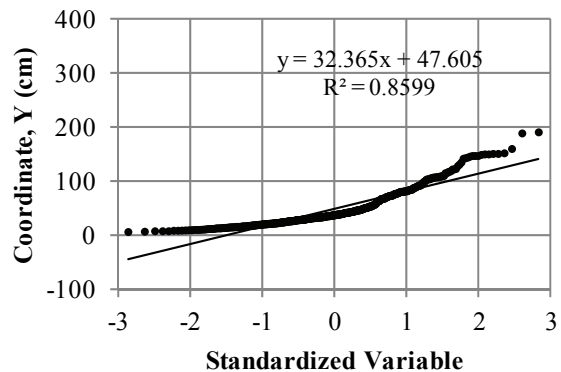
(1) ケース 1a(40-80mm, 個別落下)



(2) ケース 1b(40-80mm, 同時落下)



(3) ケース 2a (20-30mm, 個別落下)



(4) ケース 2b (20-30mm, 同時落下)

図4 落石実験結果の岩塊の到達位置 Y (斜面再急勾配方向) の正規分布によるモデル化

$$P_1 = \int_{\Omega} p(x, y) dx dy \quad (3)$$

ここで、 $p(x, y)$ は落石の到達位置座標に関する確率密度分布である。積分領域 Ω については図-6(1)に示すように落石の崩壊領域の中心から直線で対象構造物への衝突経路を仮定して、その背後の領域とした。背後の領域は全て積分の対象領域となるが、ある程度大きな領域を積分しておけば実質上は十分である。図のように左右それぞれ d_a の線分を設けて4角形の積分領域とし、 d_a は十分に大きな長さとする。

式(3)は2次元の積分問題でありどのような方法で積分してもよいが、後述する残存距離ハザードの計算に適しているため有限要素の4角形要素の内挿関数^{例えば20)}を用いて次のように積分を行った。

$$P_1 = \int_{\Omega} p(x, y) dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 p(r, s) |J| dr ds \quad (4)$$

全体座標系の座標 x, y に対して局所座標系の座標 r, s を考えると両者には以下の関係がある。

$$x(r, s) = \frac{1}{4}(1-r)(1-s)x_1 + \frac{1}{4}(1-r)(1+s)x_2 + \frac{1}{4}(1+r)(1-s)x_3 + \frac{1}{4}(1+r)(1+s)x_4 \quad (5)$$

$$y(r, s) = \frac{1}{4}(1-r)(1-s)y_1 + \frac{1}{4}(1-r)(1+s)y_2 + \frac{1}{4}(1+r)(1-s)y_3 + \frac{1}{4}(1+r)(1+s)y_4 \quad (6)$$

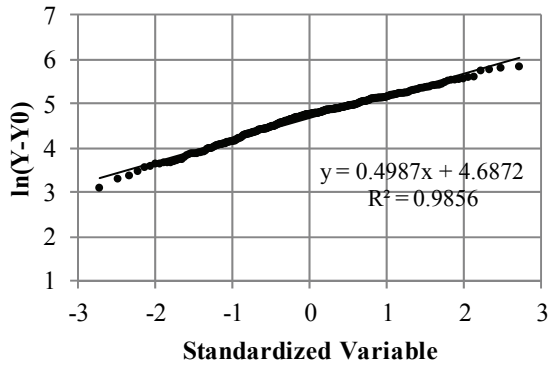
ここで、 x_i, y_i は4角形要素の節点 i の全体座標であり、図-6(1)に示すように崩壊中心に近い方から反時計回りに1, 2, 3, 4とした。ヤコビアン J は以下のように求められる。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \quad (7)$$

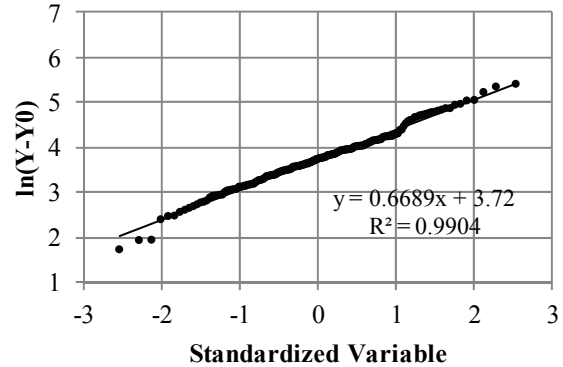
ここで、

$$\frac{\partial x}{\partial r} = \frac{1}{4}(- (1-s)x_1 - (1+s)x_2 + (1-s)x_3 + (1+s)x_4)$$

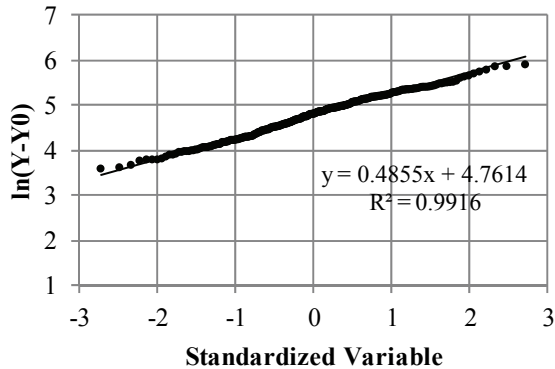
$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{1}{4}(- (1-r)x_1 + (1-r)x_2 - (1+r)x_3 + (1+r)x_4)$$



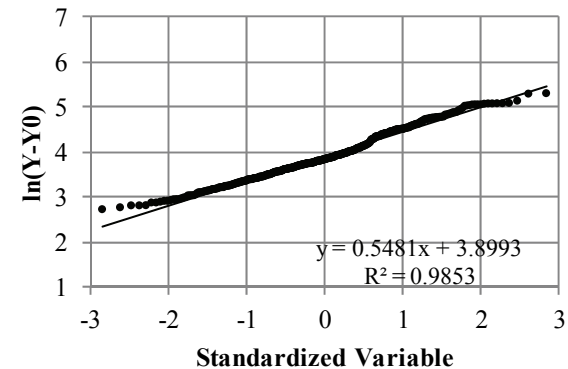
(1) ケース 1a(40-80mm, 個別落下)



(2) ケース 1b(40-80mm, 同時落下)



(3) ケース 2a (20-30mm, 個別落下)



(4) ケース 2b (20-30mm, 同時落下)

図5 落石実験結果の岩塊の到達位置 Y (斜面呼勾配方向) の対数正規分布によるモデル化, (Y-Y₀)のモデル化, Y₀=10mm

$$\frac{\partial y}{\partial r} = \frac{1}{4}(- (1-s)y_1 - (1+s)y_2 + (1-s)y_3 + (1+s)y_4)$$

$$\frac{\partial y}{\partial s} = \frac{1}{4}(- (1-r)y_1 + (1-r)y_2 - (1+r)y_3 + (1+r)y_4)$$

岩塊が n 個落ちてくる場合は、互いに独立と仮定すると少なくとも一つ以上の岩塊が衝突する確率を次式で算定することができる。

$$P_n = 1 - (1 - P_1)^n \quad (8)$$

(2) 残存距離ハザードの算定方法

本研究では、残存距離に対応して求められる確率の曲線を残存距離ハザードと定義する。残存距離とは、もしも岩塊が構造物に衝突しなければさらにどの程度移動していたかを表しており、衝突した際の衝撃力の大きさに関与した量となっている。図-6(2)に示す領域の積分を行うことで残存距離 d に対応する超過確率を算定することができる。崩壊領域の中心から伸ばした直線の方法が局所座標 s であるため、残存距離 d に対する衝突確率は局所座標 s に関して $[-1+2d/d_a, 1]$ の領域を積分した値となり、残存距離 d に対応した確率 $P(d)$ 、すなわち残存距離ハザ

ード曲線を簡単に求めることができる。

$$P_1(d) = \int_{-1+2d/d_a}^1 \int_{-1}^1 p(r, s) |J| dr ds \quad (9)$$

残存距離は必ずしも衝突の際の衝撃力やエネルギーとの関係が明確ではないため、将来的には衝突速度と残存距離の関係を実験などによりモデル化し、衝突速度に関するハザード曲線に変換することを予定している。

4. 衝突確率及び残存距離ハザード曲線の評価例

2章に示した実験結果に対して適当な構造物を想定して残存距離ハザード曲線の算定例を示す。式(9)で必要となる落石の到達位置座標に関する確率密度分布 $p(x, y)$ については2章の結果から x 方向については正規分布、 y 方向については対数正規分布として、互いに独立と仮定する。その場合の確率密度分布 $p(x, y)$ は次式で与えられる。

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} - \frac{(\ln(y-y_0)-\lambda)^2}{2\zeta^2}\right\} \quad (10)$$

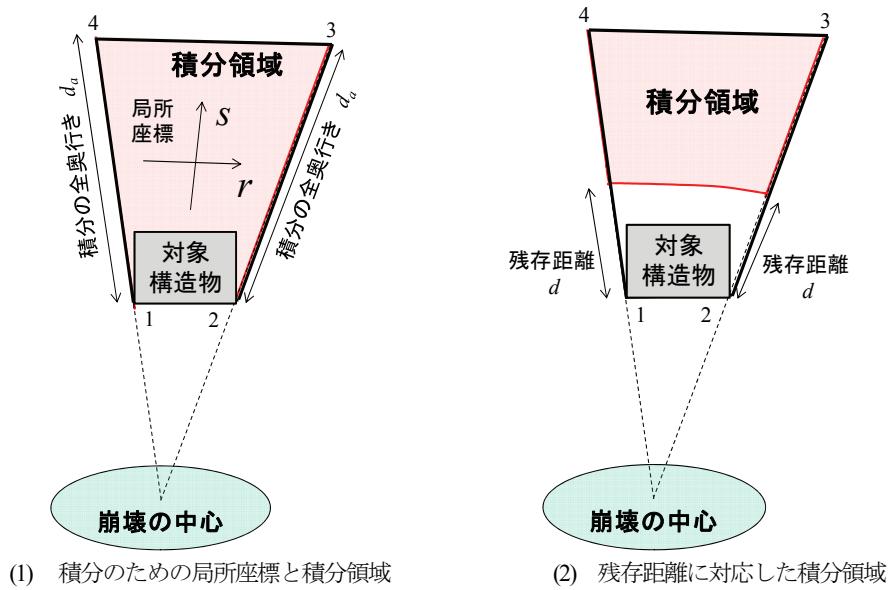


図-6 衝突確率算定のための到達位置座標に関する積分領域

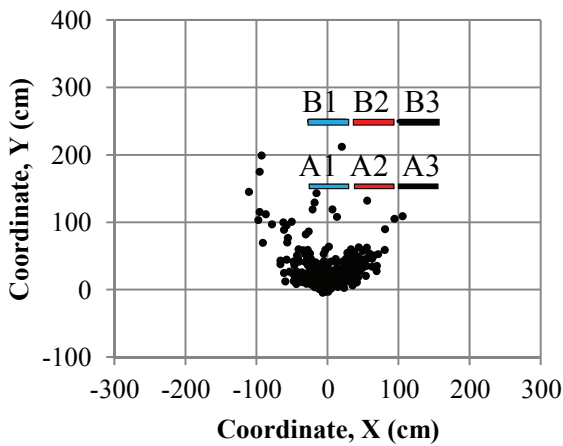


図-7 衝突確率算定のために仮定した構造物の位置

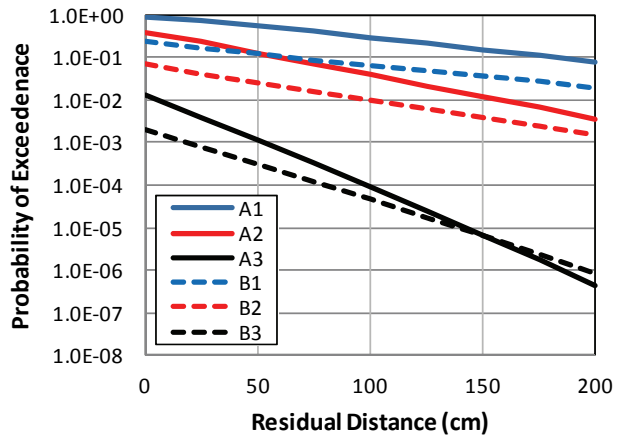


図-8 構造物の位置に応じた残存距離ハザード曲線

ここで、 μ 、 σ はX方向の平均、標準偏差で、 λ 、 ζ は $\ln(Y-Y_0)$ の平均と標準偏差である。これら平均や標準偏差は表-2や表-3にまとめて示した。衝突確率算定のための積分領域を定めるために必要となる崩落中心の座標は(0, -92cm)とした。想定した構造物A1, A2, A3, B1, B2, B3を図-7に示す。構造物は形状は考えずに一つの線分(辺)として表し、その線分の背後の領域を積分して衝突確率を算定する。

実験ケース1b (40-80mm, 50kg, まとめて落下) を対象に残存距離ハザードの算定例を図-8に示す。縦軸は超過確率を表しており、残存距離0の場合の超過確率が衝突確率を表している。個数は $n=177$ 個であり、図ではこのうちの1個以上が衝突する確率に関する残存距離ハザード

を示している。残存距離が大きくなる、すなわち激しい衝突になるに従い超過確率が小さくなっている様子がわかる。当然のことながら斜面に近いAの方が、また、中心位置に近い1の方が全体的に衝突確率が大きくなっている。また、中心からの距離が大きくなるに従い、すなわち、1, 2, 3の順に残存距離に対する勾配が大きくなっている。つまり、中心から離れた地点では衝突してもその衝撃は比較的小さいことを意味している。例えば、A2とB1を比較すると、A2の方が斜面に近く衝突確率はややB1よりも大きいものの、60cm以上の残存距離の衝突確率は逆転している。このように斜面と注目する構造物の位置関係に応じて残存距離ハザード曲線を評価することができ、残存距離に対応した衝突確率を評価するこ

とができる。

5. まとめ

本報告では斜面崩壊が構造物へ与える危険性を残存距離ハザードとして評価する方法の提案を行った。実験結果のモデル化と評価例を通して、斜面と構造物の位置関係から定量的にその危険性を残存距離ハザードとして評価する方法を提案した。

今後の主な課題として次の3つを考えている。一つ目は衝突ハザードの指標である。残存距離は衝突の際の衝撃の大きさとの関係はあるものの必ずしも使いやすい指標ではない。衝突の際の速度の方が扱いやすいが、そのためには衝突速度と残存距離の関係をモデル化する必要がある。現在、落石実験を行いその画像処理から残存距離と速度の関係をモデル化することを予定しており、その結果に基づき衝突速度ハザードの算定を行う予定である。

二つ目の課題はより一般的な確率分布のモデル化である。本論文では直交座標系を用いそれぞれ独立としてモデル化しているが、独立の仮定が必ずしも妥当とは限らない。極座標を用いてモデル化することも一つの方法であるが、一般的な3次元形状の地形に対してはやはり限界がある。より一般性のあるモデル化の方法については現在検討中であり、追って報告する。

三つ目の課題は全確率の評価方法である。ここで示した方法は落石が生じた場合の条件付き確率の評価法であり、条件付きハザードである。全確率として地震時の斜面崩壊に伴う崩壊岩塊の構造物への衝突ハザードを評価するには、地震発生に関するハザード、斜面崩壊の評価、落石の評価、本研究で示した条件付きハザードを組み合わせ総的に評価する必要がある。こうした全体フレームの構築を現在進めているところであり、その中の一部として今回報告した。

なお、本研究は原子力規制庁の平成26年度原子力施設等防災対策等委託費（斜面の安定性に係る設計・リスク評価手法の整備）事業における「地震PRA手法に用いる斜面崩壊後のリスク評価手法の検討」の一部として実施したものである。土木学会の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部ともなっている。

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) 社団法人日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987，電気技術基準調査委員会，1987。
- 3) 日本原子力学会：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，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) 小野 祐輔：SPH 法による斜面の地震応答と崩壊挙動の解析，土木学会論文集 A1，Vol. 69，No. 4，p. I_650-I_660，2013。
- 7) Abe, K., Shinoda, M., Watanabe, K., Sanagawa, T., Nakajima, S., Nakamura, S., Kawai, T., Murata, M. & Nakamura, H., Numerical simulation of landslides after slope failure using MPM with SYS Cam-clay model in shaking table tests, Proceedings of 15th world conference on earthquake engineering, Lisbon, No.1999., 2012。
- 8) Abe, K., Nakamura, S. and Nakamura, H.: Large deformation analysis of slope models together with weak layers on shaking table by using Material Point Method, The 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (14thIACMAG), Kyoto, 2014。
- 9) 吉田郁政：MPS 法を用いた地盤構造物の地震時破壊挙動解析のための基礎検討，土木学会論文集 A2，Vol.67，No.1，pp.93-104，2011.8
- 10) 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。
- 11) 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）—岩塊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。
- 12) Maeda, K. and Yuasa, T.: Performance estimation of countermeasures for falling rock using DEM, Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, IS-KYOTO, pp.193-199, 2009。
- 13) 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
- 14) 表真也，西弘明，今野久志，伊東佳彦，日下部祐基，前田健一：実測値を用いた2次元個別要素法の落石解析パラメータに関する検討，第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.346-351，2010。
- 15) 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
- 16) 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。
- 17) 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。
- 18) 地盤工学会：ロックフィル材料の試験と設計強度，pp.88-90，1982。
- 19) A.H-S. Ang, W.H. Tang 著，伊藤学，亀田弘行 訳：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善，p.260，1977。

A METHOD TO ASSESS COLLISION HAZARD OF FALLING ROCK BY SLOPE COLLAPSE

Ikumasa YOSHIDA, Naoto NAITO and Hitoshi NAKASE

Progress of numerical simulation technique such as DEM (Discrete Element Method) permits prediction of down-slope movement of rock debris to some extent. It is, however, not reasonable to predict how far the falling rocks reach and how seriously they affect structures in concern deterministically because large uncertainties are involved in the prediction. This study proposes a method to assess the probability of collision to the structures when a distribution of falling rocks are obtained by some numerical simulation methods. Severity of collision in addition to the probability is needed in order to assess the influence on the structures. Hazard curve with respect to residual distance, which is defined as the moving distance from the structure when the falling rock does not collide with it, is proposed and estimated.