

P14 可能性線形回帰分析による崩土の到達範囲予測の検討

建設省土木研究所○寺田秀樹、中村良光

はじめに

実際の崩壊事例を基に、崩土の到達範囲に影響を及ぼす要因の評価を行った。評価手法には、実際の崩土の到達範囲を出力とした可能性線形回帰モデルを用いた。これにより、影響要因の客観的な評価と出力にあいまいさを生じさせている要因の評価、さらに同定された回帰モデルを未崩壊斜面に適用することにより、崩土の到達危険度を可能性の幅として簡便に評価できる。

対象とした資料は、平成元年度と2年度に発生したがけ崩れ災害のうち、土木研究所が14道県から収集した58事例である。このうち、後述する全ての項目の計測等が可能であった事例数が28で、かつ到達範囲に家屋等の影響がない、あるいは少ないと考えられる事例が16であった。回帰モデルの同定はこの16事例を対象に行った。また、家屋の影響が大きいと考えられた残り12事例で、回帰モデルの検証を行った。

1. 影響要因の抽出

崩土の到達範囲あるいは距離に関する文献から、影響要因を抽出した。抽出された要因には、斜面傾斜角等の定量的な要因と土質等の定性的な要因が含まれる。これを基に、ブレーン・ストーミングを行い、影響要因を整理した。整理された要因は、地形条件、土質・地質条件、水分条件、環境条件、崩壊規模にグルーピングできる。地形条件には、斜面傾斜（崩壊源頭部、斜面下部、堆積区、斜面下部と堆積区の勾配差）、斜面規模（斜面高さ、斜面長さ）、集水度（斜面平面形状、集水面積、背後地形）が含まれる。土質・地質条件には、表土・風化土の厚さ、土質が含まれる。水分条件には、湧水状況が、環境条件には植生状況が含まれる。また、崩壊規模には崩壊高さ、崩壊長、崩壊深が含まれる。

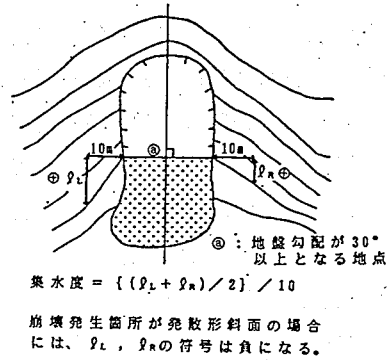
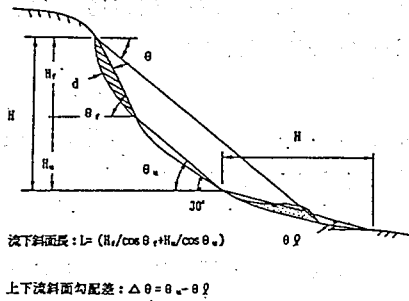
これらの要因について、前述の58資料を対象に崩土の到達範囲との単相関等により検討し、結果的には、集水面積、背後地形、湧水状況及び植生状況を除いた8要因で解析を行うことにした。これは、集水面積、背後地形については、収集した資料に斜面全域（例えば稜線まで）が必ずしも含まれないこと、湧水状況は崩壊発生前の状況判定が困難であったと思われること、植生状況については崩土の到達範囲との相関が見られないことなどから除外した。また、斜面規模、表土・風化土の厚さには崩壊規模の要因を用いた。

得られた8要因について、5段階の階級区分を行い、入力要因表を作成した（表-1）。階級区分は単相関等を参考に入

力値が大きくなるほど、到達範囲が大きくなる（見通し角が小さくなる）ように設定してある。また、各要因の計測方法を図-1、2に示す。

表-1 入力要因一覧表

要 因	1	2	3	4	5
1 崩壊源の斜面勾配 (θ_f :度)	65以上	55~65	45~55	35~45	35未満
2 上流側斜面勾配 (θ_u :度)	65以上	55~65	45~55	35~45	35未満
3 下流側斜面勾配 (θ_d :度)	5未満	5~10	10~15	15~20	20以上
4 上下流斜面の傾斜角の差 ($\Delta\theta$:度)	40以上	30~40	20~30	10~20	10未満
5 流下斜面長 (L:m)	10未満	10~30	30~50	50~70	70以上
6 平均崩壊深 (d:m)	4以上	3~4	2~3	1~2	1未満
7 斜面形状 (水平断面形) ((L/R)/2)/10	発散型	平行型	集水度小	集水度中	集水度強
8 表層土質	軟岩・硬岩	砂礫又は玉石混じり粘性土	粘性土	砂利又は岩塊混じり砂質土	砂質土・火山灰質土



2. 可能性線形回帰モデル

本解析では、回帰モデルを到達危険度評価にも適用することを考慮し、出力値を雪崩の到達範囲の評価指標によく用いられる見通し角 (θ) の計測値とした。ここで、 $\tan \theta (=H/L)$ は、いわゆる等価摩擦係数に相当する。また、対象とした16事例の見通し角の範囲は $19.0 \sim 47.5^\circ$ 、斜面下端からの到達距離の崩壊高さに対する比で見ると $0.4 \sim 7.5$ の範囲にある。

可能性線形システムは式(1)で表される。

$$Y_i = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_n X_n \quad \dots \text{式(1)}$$

ここに、 A_0 ; ファジイ定数項

A_j ($j=1, \dots, n; n$ は評価要因の個数) ; 影響要因のファジイ係数

X_j ($j=1, \dots, n; n$ は評価要因の個数) ; 影響要因の評価値 ($1 \sim 5$)

Y_i ($i=1, \dots, m; m$ はデータセット数) ; 出力ファジイ値

ただし、ファジイ係数 A_j は、可能性分布関数(対称な三角形ファジイ数)で、 β_j は中心、 C_j は可能性の幅で与えられる。

$$A_j = (\beta_j, C_j) \quad \dots \text{式(2)}$$

出力 Y_i の可能性分布関数は式(3)で計算できる。

$$Y_i = \left(\sum_{j=1}^n \beta_j^t X_{ij}, \sum_{j=1}^n C_j^t |X_{ij}| \right) \quad \dots \text{式(3)}$$

ファジイ回帰モデルでは、与えられたデータ(y_i, x_i)を出力ファジイ値 Y_i が度合い h ($0 \leq h \leq 1$)以上で含むようファジイ係数 A_j を決める。したがって、可能性の度合い h での出力ファジイ値 Y_i のメンバシップ関数は式(4)で表される。

$$1 - \left| (Y_i - X_i^t \beta) / (C^t |X_i|) \right| \geq h \quad \dots \text{式(4)}$$

ファジイ係数 A_i は、式(4)の条件下で出力ファジイ値 Y_i の幅の合計を最小にすることによって求められる。可能性の度合い h は、最もあいまいさが小さくなることを条件に $h=0$ とした。

3. モデル式の同定と影響要因の評価

表-1の8要因により同定された可能性線形回帰モデルは、次式のようなものである。

$$Y = (56.230, 0.000) + (-3.006, 0.000) X_1 + (-1.788, 0.000) X_2 + (1.710, 0.000) X_3 \\ + (-1.817, 0.000) X_4 + (-0.431, 0.000) X_5 + (-0.604, 0.777) X_6 \\ + (-1.628, 0.000) X_7 + (-0.401, 0.000) X_8 \quad \dots \text{式 (5)}$$

ここに、 X_1 ；崩壊源頭部勾配 (θf)、 X_2 ；上流側斜面勾配 (θu)、 X_3 ；下流側斜面勾配 (θl)、 X_4 ；上下流勾配差 ($\Delta \theta$)、 X_5 ；流下斜面長 (L)、 X_6 ；崩壊深 (d)、 X_7 ；集水度、 X_8 ；土質

式 (5) を見ると下流側勾配は急な方が流下速度が大きくなることから、符号が負になることが期待されるのに対し、勾配が緩くなるほど到達範囲が遠くなる結果となった。これは、図-1 に示すように3種類の勾配が関数関係にあるためと考えられる。そこで、上下流勾配差は2次的に求められる値であること、また上流側勾配は崩壊源勾配と下流側勾配の中間的値となっていることが予想されることから、この両者を除いて解析を行った。

$$Y = (54.008, 0.000) + (-3.178, 0.000) X_1 + (-1.514, 0.000) X_3 + (-0.069, 0.000) X_5 \\ + (-0.865, 1.399) X_6 + (-1.505, 0.000) X_7 + (-0.806, 0.000) X_8 \quad \dots (6)$$

崩壊源頭部勾配については次のように考えられる。森脇 (1987) は、崩壊源の斜面勾配が見かけの静摩擦係数を表し、流下高／到達距離 ($= \tan \theta$ ； θ ：見通し角) は動摩擦係数に相当し、なおかつ崩壊源の斜面勾配と流下高／到達距離は直線関係にあり、源頭部の勾配だけから到達距離を予測できることを示した。同時に、源頭部斜面勾配と崩壊土量の関係を示し、大規模崩壊では斜面勾配は緩く、小規模崩壊は急斜面で発生しており、これは山体を形成する岩質または土質の強度を反映しているもので、急勾配では大規模土量としての安定地塊を維持することは困難であるためとしている。森脇の研究は、 $10^0 \sim 10^9 \text{ m}^3$ の広い崩壊規模を対象としているが、今回はせいぜい 10^3 m^3 規模の崩壊を対象としている。したがって、この程度の規模の崩壊に対しては、崩土の到達範囲は崩壊の規模だけでは表現できないことを示していると考えられる。

また、下流側斜面勾配は、前述のとおり流下する崩土が減速しない急な勾配の方が到達範囲は遠くなるため、さらに崩土が下流側斜面へ流出する時に地盤からの衝力が受けにくいと考えられる。

集水度については、集水度が強いほど流水が集中し発生時の崩土の含水状態を高くするとともに、流下時の含水状態をも保持しやすくすることなどが考えられる。

崩壊深については、今回の対象とした範囲 ($0.5 \sim 4 \text{ m}$ 程度) では深さが小さいほど到達範囲は大きくなる結果となっている。これは、一定の給水条件の元では崩壊深が小さいほど全層が飽和しやすく、流下時に土塊の内部構造を破壊するためのエネルギー消費が少ないため、土石流化しやすいため到達範囲が遠くなるためと考えられる。一方、可能性に幅を持ったのは、全層が飽和した場合には、層厚が厚いほど相対流動深は大きくなり流速は大きくなること、また実態として規模が小さくなると障害物の影響が大きくなること、計測の面からは崩壊深の正確な計測自体が困難であることから、可能性に幅が現れたと考えられる。

土質については、粘土分がある程度少なく、細粒ほど、土塊粒子が水中に分散しやすく、相対流動深が大きくなるため、崩土の到達範囲は遠くなると考えられる。

流下斜面長は、一定の長さになれば土塊は定常速度に達することや、今回の解析では出力を流下距

離ではなく見通し角としたため、影響が小さくなったと考えられる。

要因の寄与割合を考えると、崩壊土砂の規模と質（崩壊源頭部勾配、崩壊深及び土質）が約6割、斜面条件（下流側斜面勾配、集水度及び流下長）が約4割をしめており、せいぜい 10^3m^3 規模の崩壊に対しては流下する斜面の条件も重要であると言える。また、崩壊深が小さくなるほど、障害物の影響を大きく受けることになることなどから、実際の到達範囲の可能性の幅は広がると考えることができる。

4. モデル式の検証

式(6)を被害の程度が大きかった12事例に適用した結果を図-3に示す。図には式(6)とともに式(5)による結果も合わせて示してある。モデル式は、家屋の影響のあまりないものを対象としたので、家屋の影響が大きい事例に対しては安全側の結果を示すことが期待される。図-4を見ると計測値の多くが式(5)、(6)の中心値よりも見通し角が大きいか可能性の範囲内にある。また、小さい方へずれているサンプルNo.10,12はともに崩壊地直上部に道路があり、さらにNo.10の場合は道路の上部が台地上の集落となっており、集水条件が人工的に変更されていることが一因と考えられる。

また、平均的ながけ崩れに対して適用した図-4を見ると、実測値は可能性の範囲内にある。

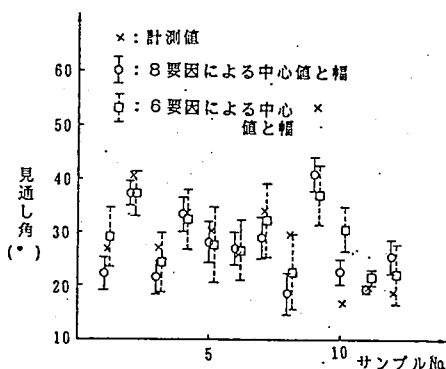


図-3 被害程度大の事例での検証

崩壊源勾配 45°
上流側勾配 45°
下流側勾配 0°
上下勾配差 45°
流下斜面長 21.5m (31.1m)
崩壊深 1.4m
集水度 直線型斜面
表層土質 (粘性土)

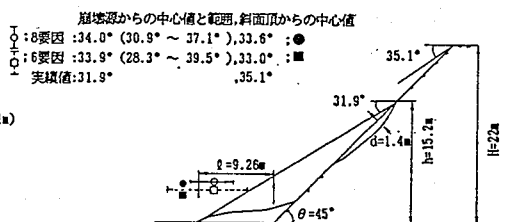


図-4 日本の平均的な崩壊像と推定値

表-2 計測データ一覧表 (被害程度小)

No	所 名	崩壊源勾配 θf	上流側勾配 θu	下流側勾配 θl	上下勾配差 $\Delta\theta$	流下斜面長 L	平均崩壊深 d	斜面形状	表層土質	崩土流下長 l (m)	崩土到達比 l/H1	見通し角 (度)
5	滋賀県 甲根	3	4	1	2	2	3	2	4	8.2	0.6	29.8
6	和歌山県 磯間	1	1	1	1	2	4	2	1	6.5	0.5	47.5
7	岡山県 石木道	2	2	1	1	2	4	2	5	8.0	0.6	41.1
9	鳥取県 みどり町	3	3	1	1	2	2	4	3	9.8	0.8	30.4
10	鳥取県 清谷	2	2	1	1	1	3	2	3	5.0	0.8	37.5
12	大分県 下久部	4	4	1	2	2	5	2	3	12.2	1.1	22.9
20	太分県 今村	2	5	2	3	2	4	2	4	11.0	0.9	29.2
28	長崎県 真浦	1	4	2	2	2	5	2	1	5.0	0.4	42.2
30	長崎県 阿蘇	3	2	3	1	2	4	2	4	9.5	0.8	35.7
33	長崎県 金家崎1	4	3	1	1	2	4	2	4	7.0	0.5	33.7
48	青森県 半賀3号	5	5	5	5	2	5	5	4	75.0	7.5	19.7
49	青森県 半賀4号	5	5	5	5	3	3	5	4	84.0	4.9	21.2
51	熊本県 尾瀬	4	5	5	4	5	3	5	5	363.0	4.9	20.1
56	鹿児島県 上之園	4	5	5	4	3	5	4	4	57.5	2.7	21.3
57	鹿児島県 脇谷E	5	4	3	2	5	3	3	4	50.0	0.9	27.1
58	鹿児島県 阿	5	5	5	5	5	5	2	4	232.4	2.9	19.0

おわりに

今後は、シミュレーション手法のパラメータ設定に本手法の適用を考えて行く予定である。

参考文献 森脇寛：(1987)：崩土の到達距離予測。地すべり24(2), pp.10~16