

降雨による盛土崩壊の形態と規模に関する統計的予測手法

杉山 友康* 森 泰樹*

布川 修* 太田 直之*

A Statistical Method to Predict the Shape and Scale of an Embankment Collapse under the Rainfall

Tomoyasu SUGIYAMA Taiki MORI

Osamu NUNOKAWA Naoyuki OTA

Regarding embankment collapses due to heavy rainfalls, there are various shapes and scales. Therefore, it is essential to predict the shape and scale of the embankment collapse to determine effective countermeasures. In addition, a result of a prediction of the shape and scale of an embankment collapse is applicable to a risk evaluation model, which determines priorities and methods for investments of disaster prevention for existing railroad slopes. Accordingly, we analyzed previous data of the embankment collapses, and developed a method capable of predicting the shape and scale of the embankment collapse from various embankment conditions.

キーワード：降雨，盛土，崩壊形状，崩壊土量，統計解析

1. はじめに

降雨による盛土崩壊は、その形状や規模により運転を支障する被害となる場合や軽微な被害ですむ場合など様々である。このため、有効な防護対策を決定するためには、盛土の崩壊形状や崩壊規模を予測することが必要である。

また、筆者らは斜面のリスク評価を行って、斜面災害に対する防災投資の順位や方法を意志決定する手法^{1), 2), 3)}の構築を進めている。斜面災害に対するリスクを算出するためには、切土の崩壊規模を予測^{4), 5)}した結果や盛土の崩壊形状と崩壊規模を予測した結果を用いて、車両への影響や応急・復旧費などを算出しておく必要がある。

そこで、本報告では、盛土を対象とし、過去の降雨による崩壊事例を統計的に分析して、高さや土質などの条件から崩壊形状と崩壊規模を予測する手法について述べる。

2. 崩壊形状の予測手法

2.1 盛土の条件と崩壊形状

崩壊形状の予測手法を検討するにあたっては、昭和50年から62年までに降雨により発生した鉄道盛土の崩壊データ⁶⁾(66箇所)を用いることとし、表1に示すよう

表1 崩壊形状予測のための条件

盛土の条件	
①	盛土高さ h (m)
②	のり長 L (m)
③	のり面勾配 θ (度)
④	基盤傾斜角 θ' (度)
⑤	盛土強度 Nc
⑥	土質 (砂質土, 礫質土, 粘性土)
⑦	表層地盤地質 (沖積土, 洪積土, 岩盤)
⑧	集水地形 (無し, 崩壊側, 反対側)
⑨	縦断形態 (一般, 切盛境界, 落込勾配)
⑩	横断形態 (純盛土, 片盛土, 腹付盛土)
⑪	防護工 (無し, 有り)
⑫	透水係数 (cm/s)

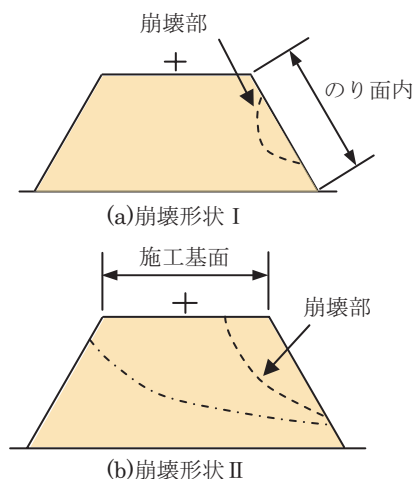


図1 盛土の崩壊形状

* 防災技術研究部 (地盤防災)

特集：防災技術

に崩壊形状に関係すると想定される条件を選定した。なお、崩壊形状は列車への影響の大きさを考慮し、図1に示すように、列車への影響が比較的小さいと考えられるのり面内で生じる規模の小さなもの（以下、崩壊形状Ⅰという）と列車への影響が著しいと考えられる施工基面に達する規模の大きなもの（以下、崩壊形状Ⅱという）との2つに分類した。なお、過去の崩壊データのうち崩壊形状Ⅰは15箇所、崩壊形状Ⅱは51箇所である。

2.2 予測手法の構築

分類した2つの崩壊形状を目的変数とし、崩壊形状を予測する条件を説明変数として、数量化Ⅱ類解析（以下、2章では解析という）を行うことで予測手法を構築する。

まず、表1の条件をカテゴリー化して一次解析を行い、それぞれの条件と崩壊形状との関係を把握したのち、崩壊形状を支配すると考えられる条件を抽出したうえで、再度カテゴリー化して二次解析を行った。二次解析結果を表2に示す。表2には、抽出された条件、カテゴリー分類、各条件の評価点、点数の範囲を示している。ここで、各条件の評価点が正の値で、かつ値が大きいほど予測値が崩壊形状Ⅰに近づく傾向となり、評価点が負の値

表2 二次解析結果（崩壊形状）

条件	カテゴリー分類	評価点	点数の範囲
盛土高さ h (m)	$h < 10$	-0.14	0.86
	$10 \leq h$	0.72	
のり面勾配 θ (度)	$\theta < 45$	0.15	1.11
	$45 \leq \theta$	-0.96	
盛土強度 N_c	$N_c < 5$	0.21	0.86
	$5 \leq N_c < 10$	-0.23	
	$10 \leq N_c$	-0.64	
土質	砂質土	0.18	0.60
	礫質土・粘性土	-0.42	
表層地盤地質	沖積土・洪積土	-0.11	0.44
	岩盤	0.33	
集水地形	無し	0.22	2.22
	崩壊側	-2.00	
	反対側	-0.44	
縦断形態	一般	0.32	0.87
	切盛境界・落込勾配	-0.55	
横断形態	純盛土	-0.37	0.69
	片盛土・腹付盛土	0.31	
透水係数 k (cm/s)	$k < 10^{-4}$	0.30	1.53
	$10^{-4} \leq k < 10^{-2}$	0.10	
	$10^{-2} \leq k$	-1.22	

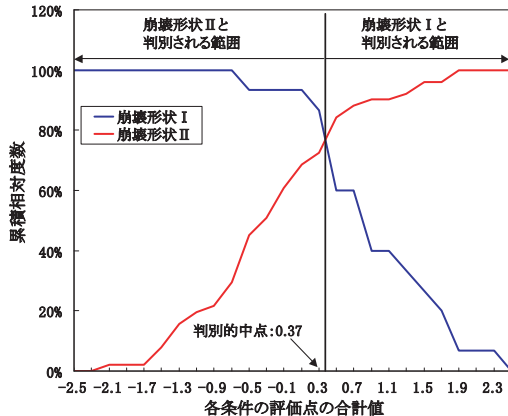


図2 判別グラフ

で、かつ値が大きいほど予測値が崩壊形状Ⅱに近づく傾向となる。また、点数の範囲は、崩壊形状を判別する上での影響度を示している。表2に示すとおり崩壊形状を予測する上で最も影響度が大きい条件は「集水地形」であった。盛土の周辺が集水地形で無い場合には評価点が正の値となり、盛土の周辺が集水地形の場合には評価点が負の値となった。すなわち、水の集まりやすい環境下にある盛土は、崩壊が施工基面に達する崩壊形状Ⅱになる傾向が強く、比較的大きな崩壊が発生しやすいという結果となった。また、「集水地形」に続いて、崩壊形状を予測する上で影響度が大きい条件は「透水係数」、「のり面勾配」であった。

解析の結果から得た判別グラフを図2に示す。図2に示すように崩壊形状Ⅰと崩壊形状Ⅱとを判別する点数（以下、判別の中心という）は、0.37であった。すなわち、予測対象盛土の各条件の評価点の合計が0.37より大きい場合には崩壊形状Ⅰに、0.37より小さい場合には崩壊形状Ⅱに判別される。

2.3 予測手法の適用の検討

2.2で述べたとおり判別の中心は0.37であり、予測式は、（崩壊形状を判別するための値 P ） = Σ （各条件の評価点） - 0.37で表すことができる。すなわち、 $P > 0$ なら崩壊形状Ⅰ、 $P < 0$ なら崩壊形状Ⅱと予測できることになる。しかし、崩壊形状の予測を実務に適用する場合には、図3の概略図に示すように崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱのどちらにもなり得る範囲を設定した方がよいと考える。その場合、盛土の全崩壊データに対して崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱとなる割合 T は式(1)で示される。なお、どちらにもなり得る範囲を設定する場合には、その範囲によって実際の崩壊形状と予測した崩壊形状とが

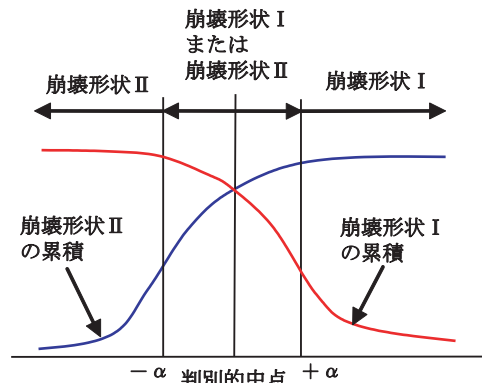


図3 崩壊形状の予測範囲

表3 崩壊形状ⅠまたはⅡとなる割合と正答率

	崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱとなる範囲 ($\pm\alpha$)					
	0	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.4	± 0.5
崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱとなる割合 T	-	15.2	18.2	22.7	27.3	38.9
崩壊形状Ⅰの正答率 S_1	73.3	86.7	86.7	93.3	93.3	93.3
崩壊形状Ⅱの正答率 S_2	80.4	84.3	88.2	88.2	90.2	90.2

単位 (%)

一致する割合（以下、正答率という）がどのように推移するかを検討する必要がある。ここで、崩壊形状Ⅰの正答率を S_I 、崩壊形状Ⅱの正答率を S_{II} とすると、 S_I 、 S_{II} は式(2)、(3)で示される。

$$T = b / (A + B) \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$$S_I = (a + b) / A \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

$$S_{II} = (b + c) / B \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

ここで、

T ：崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱとなる割合

a ：崩壊形状Ⅰと判別される個数

b ：崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱと判別される個数

c ：崩壊形状Ⅱと判別される個数

A ：崩壊データのうち実際に崩壊形状Ⅰである個数

B ：崩壊データのうち実際に崩壊形状Ⅱである個数

ここでは、崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱと判別される点数の範囲 α を0、 ± 0.1 、 ± 0.2 、 ± 0.3 、 ± 0.4 、 ± 0.5 に設定して盛土の全崩壊データに対して崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱとなる割合 T と各正答率 S_I 、 S_{II} とを求め、それらの結果を表3に示す。表3より、崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱとなる範囲が大きくなれば、当然のことながら正答率が高くなるのがわかる。しかし、それに伴い崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱとなる割合 T も大きくなる。そこで、今回は、崩壊形状Ⅰ、崩壊形状Ⅱの正答率がともに90%以上となり、崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱのいずれかになる割合が30%以下となる ± 0.4 を範囲として設定することとした。

以上の結果から、崩壊形状の判別は以下により行うことができる。

$$P = \Sigma (\text{各条件の評価点}) - 0.37 \quad (4)$$

ここで、

$0.4 < P$ のとき、崩壊形状Ⅰ

$-0.4 \leq P \leq 0.4$ のとき、崩壊形状Ⅰまたは崩壊形状Ⅱ

$P < -0.4$ のとき、崩壊形状Ⅱ

3. 崩壊規模の予測手法

3.1 崩壊規模の予測手法の概要

本章では、盛土の崩壊規模として、崩壊土量を予測することを中心に述べる。崩壊土量は、2章で示した崩壊形状Ⅰと崩壊形状Ⅱに区分し、数量化Ⅰ類解析（以下、3章では解析という）により予測することとした。

崩壊土量の予測手法としては、①過去の盛土崩壊データから得られた崩壊土量を目的変数とし、崩壊土量を予測する条件を説明変数として解析により直接的に崩壊土量を予測する手法（以下、直接的予測手法という）、②過去の盛土崩壊データから得られた崩壊長さ、崩壊厚さ、

崩壊幅を目的変数とし、それぞれを予測する条件を説明変数として、まず、解析により崩壊長さ、崩壊厚さ、崩壊幅を予測し、その結果を用いて崩壊土量を間接的に算出する手法（以下、間接的予測手法という）の2つの手法を検討した。

なお、崩壊規模（崩壊土量、崩壊長さ、崩壊厚さ、崩壊幅）は解析によって、式(5)から予測される。

$$\begin{aligned} (\text{崩壊規模の予測値}) = \\ \Sigma (\text{盛土の条件ごとに応じた点数}) + (\text{定数}) \quad (5) \end{aligned}$$

式(5)の（盛土の条件ごとに応じた点数）と（定数）は、後述する解析の結果である予測基準を用いる。

また、間接的予測手法における崩壊土量は式(6)より算出される。

$$V = L \times T \times 1/2 \times B \quad (6)$$

ここで、

V ：崩壊土量

L ：崩壊長さ（崩壊部ののり面方向の最大長さ）

T ：崩壊厚さ（崩壊部の最大深さ）

B ：崩壊幅（崩壊部の線路方向の最大幅）

すなわち、線路直角方向の崩壊断面の面積を（崩壊長さ×崩壊厚さ）×1/2の三角形の面積と仮定し、その面積に線路方向の崩壊幅を乗じ、得られる三角柱の体積を崩壊土量と仮定して算出する。

3.2 崩壊形状Ⅰの崩壊土量の予測

3.2.1 直接的予測手法による予測

崩壊形状Ⅰの崩壊土量を目的変数、盛土の条件を説明変数として解析を行い得られた予測基準を表4に示す。崩壊土量は、予測基準の盛土高さ、のり面勾配、基盤傾斜角、横断形態の各項目の状態を選び、それに対応する点数と定数を足し合わせることで求める。各予測

表4 解析結果（崩壊土量）

条件	カテゴリ分類	評価点	点数の範囲
盛土高さ h (m)	$h < 5$	-113.5	189.2
	$5 \leq h$	75.7	
のり面勾配 θ (度)	$\theta < 35$	312.2	669.0
	$35 \leq \theta$	-356.8	
基盤傾斜角 θ' (度)	$\theta' = 0$	-216.5	464.0
	$\theta' = 10, 20$	247.5	
横断形態	純盛土	-116.7	175.0
	片盛土、腹付盛土	58.3	
	定数項	165.0	

表5 分析精度と誤差（崩壊土量）

	崩壊土量 (m^3)
決定係数	0.71
重相関係数	0.84
平均値	165.0
誤差の標準偏差	163.1

特集：防災技術

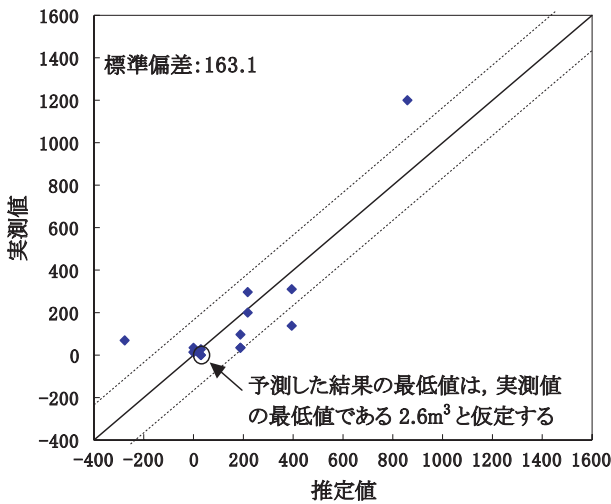


図4 予測値と実測値との比較（崩壊土量）

基準を用いた場合の分析精度と誤差を表5に、予測値と斜面崩壊データの実測値との関係を図4に示す。なお、ここで示す誤差とは、予測値と実測値の差を指す。用いるデータが少ないため良好な精度を期待することはできないが、表4の予測基準を用いて、崩壊土量を予測することができそうである。

なお、崩壊土量の予測値の最低値は、図4に示すように実測値の最低値である2.6m³と仮定する。

3.2.2 間接的予測手法による予測

解析により得られた崩壊長さ、崩壊厚さ、崩壊幅の各予測基準を表6～8に示す。また、各予測基準を用いた場合の分析精度と誤差を表9に、予測値と斜面崩壊データの実測値との関係を図5～7に示す。

崩壊長さ、崩壊厚さの予測の場合、分析精度は比較的高く、誤差の標準偏差も崩壊長さが1.8m、崩壊厚さが0.9mであり許容できる範囲内であるといえる。また、崩壊幅の予測の場合、分析精度は崩壊長さ、崩壊厚さと比較すると低く、誤差の標準偏差も若干大きいものの予測可能な範囲であるといえる。つまり、崩壊形状Iの場合、崩壊長さ、崩壊厚さ、崩壊幅は、解析で得た予測基準を用いて予測できるため、それらの予測値から式(6)により崩壊土量を算出できる。

表6 解析結果（崩壊長さ）

条件	カテゴリ分類	評価点	点数の範囲
盛土高さ h (m)	$h < 5$	-5.10	8.51
	$5 \leq h$	3.41	
のり面勾配 θ (度)	$\theta < 35$	1.40	3.00
	$35 \leq \theta$	-1.60	
基盤傾斜角 θ' (度)	$\theta' = 0$	-1.64	3.50
	$\theta' = 10, 20$	1.87	
盛土強度 Nc	$Nc < 5$	-0.23	0.69
	$5 \leq Nc$	0.46	
表層地盤地質	沖積土	-0.10	0.19
	洪積土・岩盤	0.09	
横断形態	純盛土	-1.56	2.34
	片盛土、腹付盛土	0.78	
	定数項	9.65	

表7 解析結果（崩壊厚さ）

条件	カテゴリ分類	評価点	点数の範囲
盛土高さ h (m)	$h < 5$	-0.41	0.68
	$5 \leq h$	0.27	
のり面勾配 θ (度)	$\theta < 35$	2.32	4.97
	$35 \leq \theta$	-2.65	
基盤傾斜角 θ' (度)	$\theta' = 0$	-1.09	2.33
	$\theta' = 10, 20$	1.24	
盛土強度 Nc	$Nc < 5$	0.04	0.12
	$5 \leq Nc$	-0.08	
表層地盤地質	沖積土	0.01	0.03
	洪積土・岩盤	-0.01	
横断形態	純盛土	-2.08	3.12
	片盛土、腹付盛土	1.04	
	定数項	1.80	

表8 解析結果（崩壊幅）

条件	カテゴリ分類	評価点	点数の範囲
盛土高さ h (m)	$h < 5$	-2.83	4.72
	$5 \leq h$	1.89	
のり面勾配 θ (度)	$\theta < 35$	4.03	8.64
	$35 \leq \theta$	-4.61	
基盤傾斜角 θ' (度)	$\theta' = 0$	1.23	2.64
	$\theta' = 10, 20$	-1.41	
盛土強度 Nc	$Nc < 5$	-0.87	2.61
	$5 \leq Nc$	1.74	
表層地盤地質	沖積土	-3.13	5.87
	洪積土・岩盤	2.74	
横断形態	純盛土	1.04	1.56
	片盛土、腹付盛土	-0.52	
	定数項	14.63	

表9 分析精度と誤差（崩壊長さ、厚さ、幅）

	崩壊長さ (m)	崩壊厚さ (m)	崩壊幅 (m)
決定係数	0.88	0.81	0.51
重相関係数	0.94	0.90	0.71
平均値	9.70	1.80	14.60
誤差の標準偏差	1.80	0.90	5.30

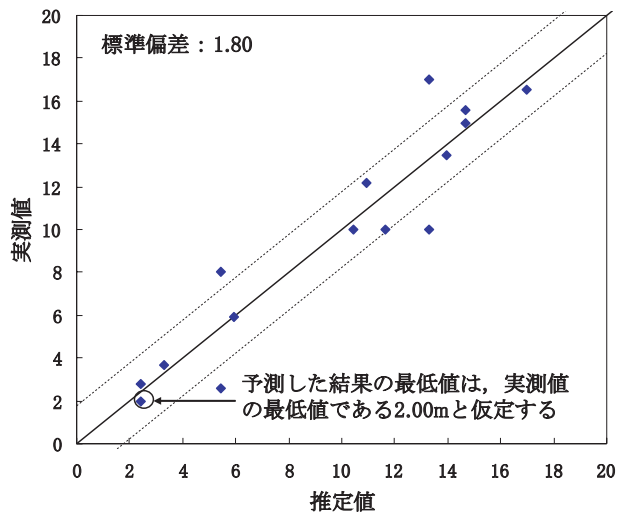


図5 予測値と実測値との比較（崩壊長さ）

なお、崩壊長さの予測値の最低値は、図5に示すように実測値の最低値である2.0mと仮定した。同様に図6、図7のとおり崩壊厚さ、崩壊幅の予測値の最低値も実測値の最低値と仮定することとし、崩壊厚さの最低値は0.2m、崩壊幅の最低値は4.5mとした。

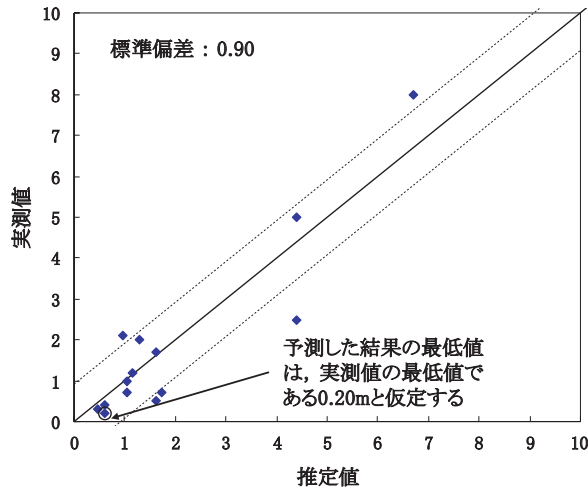


図6 予測値と実測値との比較（崩壊厚さ）

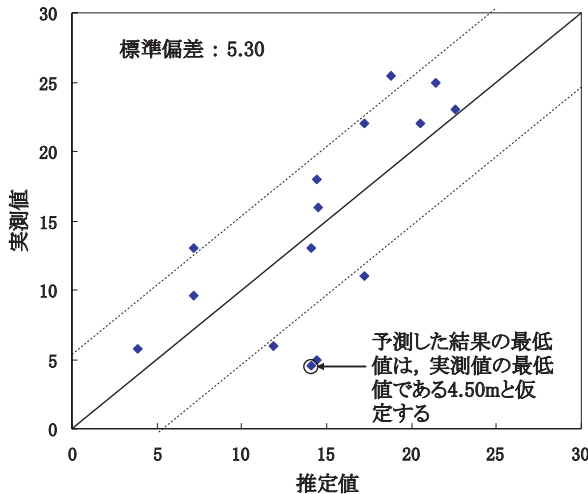


図7 予測値と実測値との比較（崩壊幅）

3.3 崩壊形状Ⅱの崩壊土量の予測

3.3.1 直接的予測手法による予測

崩壊形状Ⅱの崩壊土量を目的変数、盛土の条件を説明変数として解析を行い得られた予測基準を表10に示す。崩壊土量は、予測基準の盛土高さ、のり面勾配、基盤傾斜角などの各項目の状態を選び、それに対応する点数と定数を足し合わせることによって求める。各予測基準を用いた場合の分析精度と誤差を表11に、予測値と斜面崩壊データの実測値との関係を図8に示す。分析精度はそれほど高くないものの予測は可能であるといえる。なお、崩壊土量の予測値の最低値は、図8に示すように実測値の最低値である8.4m³と仮定した。

3.3.2 間接的予測手法による予測

崩壊形状Ⅰと同様に、解析により崩壊長さ、崩壊厚さ、

表10 解析結果（崩壊土量）

条件	カテゴリ分類	評価点	点数の範囲
盛土高さ h (m)	$h < 5$	-190.2	706.1
	$5 \leq h < 10$	51.0	
	$10 \leq h$	515.9	
のり面勾配 θ (度)	$\theta < 35$	61.2	150.1
	$35 \leq \theta$	-88.8	
基盤傾斜角 θ' (度)	$\theta' = 0, 10$	-134.8	300.2
	$\theta' = 20$	165.4	
盛土強度 Nc	$Nc < 5$	28.6	66.7
	$5 \leq Nc$	-38.1	
土質	砂質土・礫質土	-22.6	221.2
	粘性土	198.6	
集水地形	無し	-3.4	15.3
	崩壊側・反対側	11.8	
縦断形態	一般	3.9	10.0
	切盛境界・落込勾配	-6.2	
横断形態	純盛土	146.2	275.6
	片盛土・腹付盛土	-129.3	
定数項		285.9	

表11 分析精度と誤差（崩壊土量）

	崩壊土量 (m ³)
決定係数	0.57
重相関係数	0.75
平均値	285.9
誤差の標準偏差	270.7

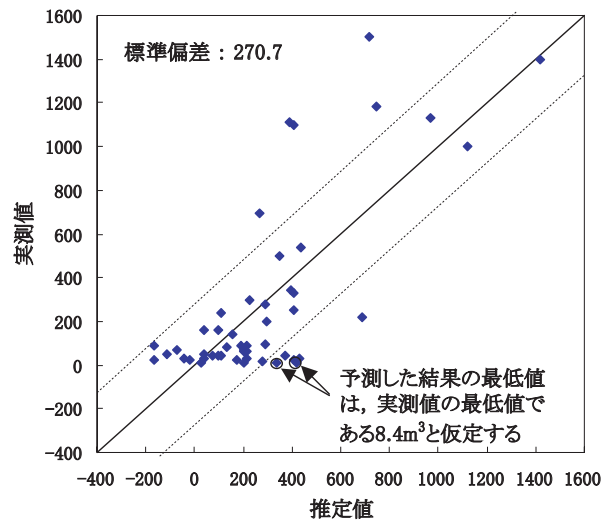


図8 予測値と実測値との比較（崩壊土量）

表12 分析精度と誤差（崩壊長さ、厚さ、幅）

	崩壊長さ (m)	崩壊厚さ (m)	崩壊幅 (m)
決定係数	0.67	0.43	0.12
重相関係数	0.82	0.65	0.42
平均値	9.90	2.20	21.00
誤差の標準偏差	5.00	1.10	13.90

崩壊幅の予測について検討した。各予測基準を用いた場合の分析精度と誤差を表12に示す。表12からわかるように、崩壊長さ、崩壊厚さは、予測が可能であるといえるが、崩壊幅は、分析精度が低く、解析で得た予測基準を用いて予測することは困難である。すなわち、崩壊形状Ⅱの

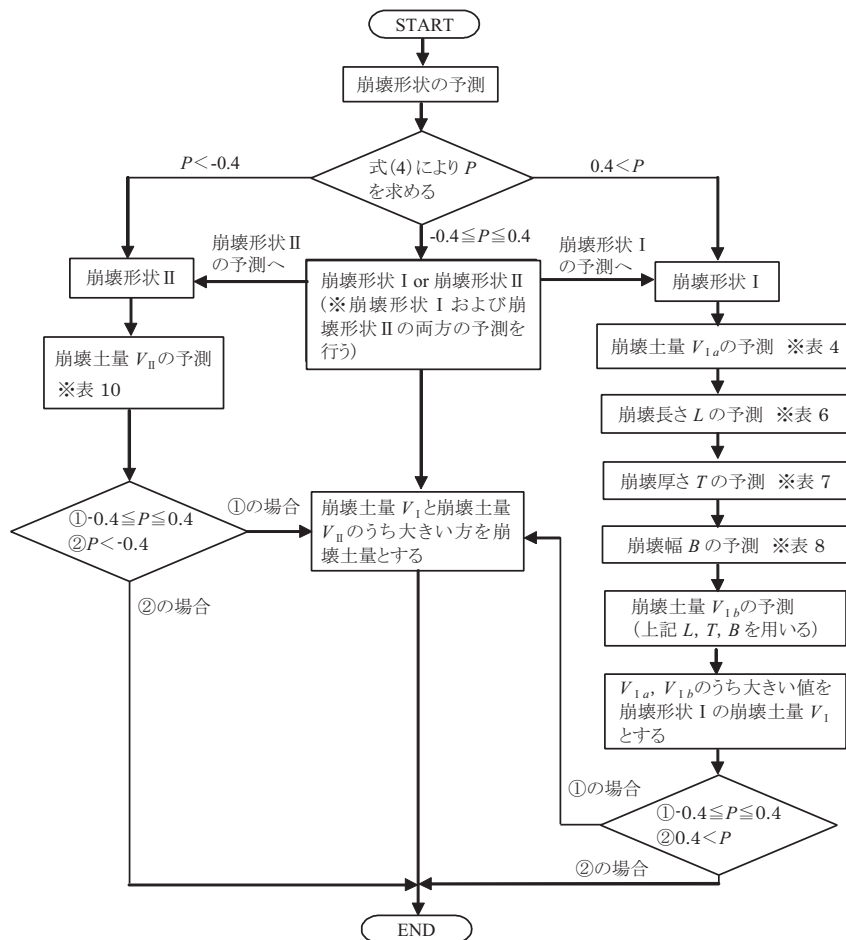


図9 盛土における崩壊形状と規模の予測フロー

場合、崩壊幅の予測に対する誤差が大きいことから、式(5)により崩壊土量を算出することは無理といえる。

3.4 崩壊土量の予測のまとめ

上述の結果を踏まえ、崩壊形状を区分し、崩壊土量を予測するまでの流れを図9のフローに示す。図9に示すとおり、まず、式(4)により崩壊形状を崩壊形状I ($0.4 < P$)、崩壊形状II ($P < -0.4$)、崩壊形状Iまたは崩壊形状II ($-0.4 \leq P \leq 0.4$)に区分する。

崩壊形状Iの場合は、直接的予測手法により予測した崩壊土量 V_{Ia} と間接的予測手法により予測した崩壊土量 V_{Ib} を比較して大きい値を採用する。崩壊形状IIの場合は、直接的予測手法により崩壊土量 V_{II} を予測する。

5. おわりに

本報告では、過去に降雨により発生した鉄道盛土の崩壊データを整理および解析することで、盛土の崩壊形状と崩壊土量を予測する手法を構築した。今後は、これらの結果を踏まえて、車両への影響や応急・復旧費などを算出する方法について検討し、リスク評価を用いて防災

投資の順序や方法を決定する手法の構築を進める予定である。

文献

- 1) 淵脇晃, 森泰樹, 布川修, 杉山友康: リスク評価手法を利用した鉄道における斜面災害対策の意志決定手法, 2006年度秋期信頼性シンポジウム, 日本信頼性学会, 2006
- 2) 淵脇晃, 森泰樹, 布川修, 杉山友康: リスク評価における鉄道斜面災害の被害確率頻度算出の考え方, 第62回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 2007
- 3) 森泰樹, 淵脇晃, 布川修, 杉山友康: 鉄道斜面災害を対象としたリスク評価における被害確率頻度の試算, 第62回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 2007
- 4) 布川修, 杉山友康, 小林徹: 斜面崩壊規模の予測手法と崩土の衝撃力特性, 鉄道総研報告, Vol.19, No.10, 2005
- 5) 布川修, 小林徹, 杉山友康, 太田直之, 岡田勝也: 切取斜面において発生する表層崩壊の崩壊規模予測に関する検討, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, 2004.9
- 6) 杉山友康: 降雨時の鉄道斜面災害防止のための危険度評価手法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.19, No.5, 1997