

鉄道盛土の崩壊限界雨量に及ぼす 防護工の効果

杉山友康¹・岡田勝也²・秋山保行³・村石尚⁴・奈良利孝⁴

¹正会員 博(工) 鉄道総合技術研究所 環境防災技術開発推進部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²フェロー 工博 国土館大学教授 工学部土木工学科 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-28-1)

³正会員 東日本旅客鉄道(株)八王子土木技術センター (〒192-0073 東京都八王子市寺町61)

⁴正会員 鉄道総合技術研究所 環境防災技術開発推進部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

本論文は、鉄道盛土で施工頻度の高い盛土のり面防護工に着目して、過去の防護工施工盛土の崩壊事例を取り上げ、防護工の効果が期待できることを明確にする。さらに、鉄道沿線で施工された多くの防護工盛土が施工後に受けた降雨実績とこれらの盛土の防護工未施工状態での崩壊限界雨量を比較・分析することによって、盛土防護工の耐雨性の定量化を試みるものである。

Key Words : embankment, critical rainfall, slope protection work, covering effects for rainfall

1. はじめに

鉄道は、公共輸送機関として安全で安定した輸送を行うことを使命としている。しかし、我が国の自然条件は厳しく、台風や梅雨期の豪雨による鉄道沿線の盛土、切土などのり面崩壊は、年間500件以上¹⁾の発生数におよび、鉄道の安全輸送を阻害している。降雨に起因する斜面災害を防止する研究は、その発生数の多さや直接的・間接的被害の大きさから、鉄道の安全輸送を確保する上で重要な課題の一つである。鉄道の盛土は東海道新幹線の建設を契機に降雨に対して耐久性の高いものとする設計基準が整備されてきたが、全国の総延長20,000kmにも及ぶ在来線は、建設の歴史が古く、降雨に対する耐久性が十分に大きいとはいえない。毎年の災害発生の危険にさらされている。地域の生活、産業に密着した在来線の役割と安全を考えると、鉄道沿線斜面の降雨に対する危険箇所を的確に抽出するとともに、それらの箇所に対して防護対策を事前に施工するなど、災害を防止するための合理的な維持管理技術の開発が特に必要となっている。

こうした盛土崩壊防止のためには、危険と判断された箇所に対し、のり面防護工を施工し耐雨性を高めることが行われる。のり面防護工の多くは、主として表面の侵食防止を目的として施工されており、

力学的な効果を設計計算に基づいて施工されるものは少ない。しかし、これらの防護工を施工する際は、鉄道盛土の崩壊形態として最も頻度の高い表層崩壊²⁾やごく一部の円弧すべり的な小規模崩壊などを防止する効果も期待して施工される場合が多いものの、侵食や土塊の滑動に対する抵抗力効果も含めた包括的な耐雨効果は不明である。

本論文は、鉄道盛土で施工頻度の高い盛土のり面防護工に着目して、過去の防護工施工盛土の崩壊事例を取り上げ、防護工の効果が期待できることを明確にした。さらに、鉄道沿線で施工された多くの防護工盛土が施工後に受けた降雨実績とこれらの盛土の防護工未施工状態での崩壊限界雨量を比較・分析することによって、盛土防護工の耐雨性を定量化した。最後に既に提案している盛土の危険度評価基準²⁾の改良を試み、鉄道の降雨時の運転規制基準の向上指標の一つとするものである。

2. のり面防護工の効果に関する過去の研究 経過

斜面やのり面に降雨に対する崩壊防止を目的として施工される防護工は、本来想定される外力に対して最も効果的な工法が採用されるべきであるが、防

災強度を高めるために施工されるのり面防護工は、鉄道沿線で発生する多種多様の被害形態からトータル的な効果を期待すること、発生する崩壊形態を特定することが困難であることなどから、過去の施工実績に基づいて、周辺の環境条件や施工条件などを勘案して施工される。

このように、従来ののり面防護工に期待される効果は、特定の崩壊メカニズムに対するものではないが、のり表面の侵食による崩壊、表層部の肌落ち、盛土表土の滑動に対してその効果を期待しているものと考えられる。

筆者ら^{2), 3)}は、過去の鉄道盛土崩壊事例に基づき、統計的な分析を行って、連続雨量と時間雨量の積で示される崩壊限界雨量を導入した新しい降雨時の盛土危険度評価手法を開発した。この評価基準は、盛土に防護工が施工されていない状態での評価に対するもので、既にのり面防護工が施工された盛土や、今後防護工の施工が予定されている盛土耐降雨量の評価は不可能であった。したがって、沿線の降雨に対する耐久性を防護工の施工を行って向上させたにもかかわらず、防護工の定量的な評価ができないために、降雨時の列車の運転規制基準の見直しは、経験的に行われてきた。

斜面、切土のり面と盛土のり面に施工される防護工の効果に関する過去の研究は多くはない。久楽⁴⁾らは道路の切土のり面、盛土のり面に多く施工されるのり枠工について、実物大の模型盛土による散水実験と安定解析を実施して、その効果を確認した。これによると、浅い表層崩壊に対しては十分効果があるが、すべり面が深い場合は効果はあまり期待できない、としている。本研究でねらいとする表層崩壊に対してのり枠工は効果があると結論しているが、その効果を降雨量に換算できるような定量的な結論までは示されていない。

一方筆者らは、盛土に施工される張ブロック工による雨水の遮水性に着目し、小型模型盛土の散水崩壊実験^{5), 6)}、張ブロック工の遮水性確認のための室内散水実験⁷⁾、現場散水実験⁸⁾と浸透流解析⁹⁾によって、一般的な純盛土の場合、ブロック工が施工される前と比較して約1.5倍程度の耐降雨量の向上効果が見込まれることを明らかにした。

これらの研究結果は、いずれも防護工の施工効果を確認したものであり、防護工の施工効果を降雨量に換算し、鉄道が必要とする運転規制基準への反映にまで至っていない。

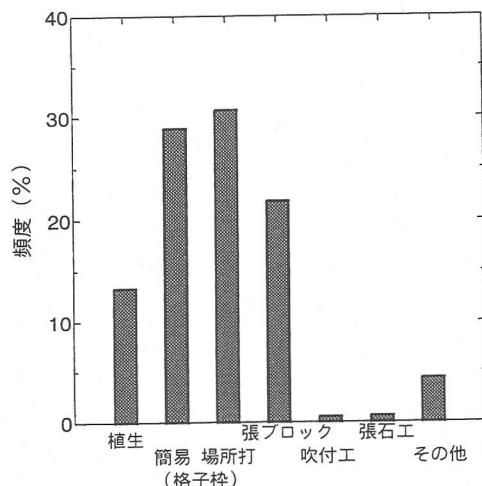


図-1 鉄道での盛土のり面防護工の施工頻度

3. 鉄道盛土の防護工種別

鉄道盛土で、耐雨強度の向上を期待して施工される防護工は多種にわたる。そこで、筆者らは崩壊箇所を含む事前の防災対策工事として施工された過去ののり面防護工のデータを収集し、施工頻度の実態を調査した。

図-1は鉄道で施工されている盛土のり面防護工の工種別の施工頻度を示したものである。鉄道では現地の条件によって多様な防護工が施工されている。図中の簡易格子枠工はコンクリート製のプレキャスト格子枠工やのり枠工に代表される格子枠工である。また、張ブロック工はコンクリートブロックなどでのり面全体を覆う工法を総称した。図によると鉄道盛土で施工されるのり面防護工は、のり面植生工による土羽改良を除けば簡易格子枠工、場所打格子枠工、張ブロック工に大別できる。ここで、場所打格子枠工は張ブロック工を施工するための枠材として施工されたものが多く、切土のり面で施工されるような場所打格子枠工とは異なる。以上を勘案すれば、鉄道で施工される防護工は、簡易格子枠工と張ブロック工で50%を占める。したがって、定量化をはかる代表的な防護工として当論文ではこの2種類の防護工に限定する。

表-1 鉄道盛土の限界雨量方式による危険度評価基準²⁾

基本点		13.14			
条件		カテゴリー(上段)と評価点(下段)			
盛土の構造・土質	盛土高さ H (m)	$H < 3$	$3 \leq H < 10$	$10 \leq H$	
		0.61	0.23	-1.53	
	土質 S_E	粘性土	砂質土	礫質土	
		-1.05	0.07	0.14	
盛土強度 N_c	$N_c < 4$	$4 \leq N_c < 6$	$6 \leq N_c < 8$	$8 \leq N_c$	
		-1.19	0.30	0.65	0.80
基盤の構造・土質	表層地盤地質 S_B	沖積層	その他		
		-0.38	0.22		
	基盤傾斜角 θ_B	$\theta_B < 10^\circ$	$10^\circ \leq \theta_B$		
透水係数 k (cm/s)		$\theta_B < 10^\circ$	$10^\circ \leq \theta_B$	$10^{-3} \leq k < 10^{-2}$	$10^{-2} \leq k$
		-0.17	0.26	-0.41	0.86
集水地形 W_G	無	対象斜面側	反対側		
		0.52	-3.23	-1.83	
縦断形態 T_L	切盛境界・落込勾配点	平坦・単勾配			
		-0.53	-0.30		
横断形態 T_H	純盛土	片切片盛・腹付け盛土			
		0.21	-0.16		
経験雨量	経験雨量 $R_E (\times 10^4 \text{mm})$	$R_E < 2$	$2 \leq R_E < 5$	$5 \leq R_E < 10$	$10 \leq R_E < 15$
		-2.83	-0.41	-0.15	2.47
					3.13

4. 鉄道盛土の限界雨量に基づく危険度評価方法

降雨に対する盛土、切土のり面の危険度を判定する代表的な手法として、これまでに国鉄時代に作成された「のり面採点表¹⁰⁾」があり、比較的容易に評価が可能なため、実務的に幅広く使用してきた。これは、全国一律の基準であり採点結果を日雨量で評価するものであった。しかし、この日雨量評価は、JR各社が運転規制に使用している時間雨量と連続雨量（降り始めからの累積雨量で12時間以内の降り止みは連続した降雨と見なす鉄道独自の考え方）の組み合わせによる雨量指標と異なり、斜面の評価結果が直接安全運行の指標となる規制雨量に関連していないといった実務上の問題点を抱えていた。

筆者らは、これらの問題の解決をはかるために統計的な手法によって新たな盛土の評価基準^{2), 3)}を提案してきた。この評価基準は実際の鉄道沿線における降雨時の盛土崩壊事例を統計的に分析することによって、盛土の崩壊危険雨量を時間雨量と連続雨量の積で与えるものである。この崩壊危険雨量は以下の式によって得られる。

$$[R^{0.3}r^{0.3}] = \sum (H, S_E, N_c, k, S_B, \theta_B, W_G, T_L, T_H, R_E) + \alpha \quad (1)$$

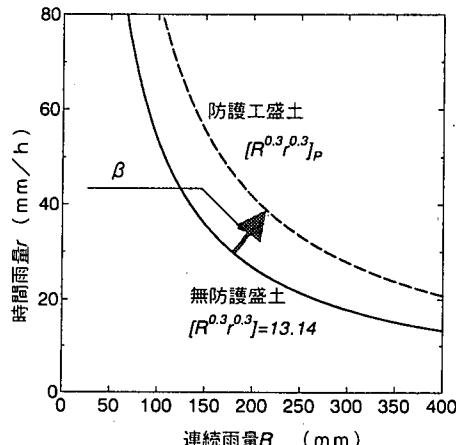


図-2 盛土の限界雨量曲線

ここに、 $[R^{0.3}r^{0.3}]$ ：無防護盛土の限界雨量

R ：連続雨量（降り始めからの累積降雨量で12時間以内の降雨中断は連続した降雨と見なす）

r ：時間雨量

H ：盛土高さ

S_E ：盛土の土質

N_c ：貫入強度

k ：盛土の透水係数

S_B ：基盤の土質

θ_B ：基盤の傾斜角

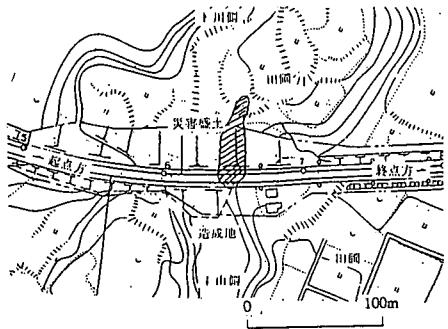


図-3 崩壊事例 1 の周辺地形

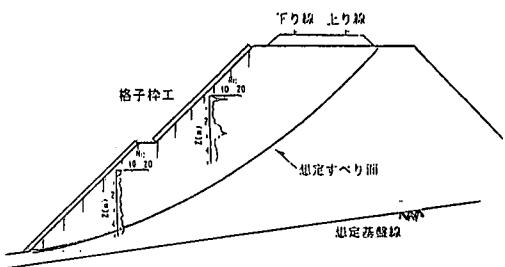


図-4 崩壊事例 1 の盛土断面

W_a : 集水条件

T_L : 盛土の縦断形態

T_H : 盛土の横断形態

R_E : 経験雨量

α : 基本点 ($=13.14$)

また、式(1)に示す盛土のアイテムと評価点は表-1に示すとおりである。ここで、式(1)で得られる限界雨量を基本点のみの $[R^{0.3}r^{0.3}] = 13.14$ として、連続雨量 R 、時間雨量 r の平面上に示すと図-2の実線のような曲線で示すことができる。

ここで、式(1)は盛土に対して防護工が施工されていない場合のものであり、防護工が施工されている場合には、耐降雨性が向上し図-2の破線で示すようになると考えられる。これが降雨に対して β という耐降雨性を有するとすれば式(1)は以下のようになる。

$$[R^{0.3}r^{0.3}]_p = \sum (H, S_E, N_c, k, S_B, \theta_B, W_a, T_L, T_H, R_E) + \alpha + \beta \quad (2)$$

ここに、 $[R^{0.3}r^{0.3}]_p$: 防護工施工盛土の限界雨量

すなわち、防護工の効果 β は、

$$\beta = [R^{0.3}r^{0.3}]_p - [R^{0.3}r^{0.3}] \quad (3)$$

で示されることになる。

したがって、防護工効果 β を求めることができれば、防護工が施工された盛土の限界雨量が求められる。すなわち、施工済みの盛土に対しては現在の耐降雨性評価が可能となり、今後施工される盛土に対しては、施工前と施工後の耐降雨性が比較できる。結果として、現在の路線の限界雨量が求まり、今後の防護工の施工によって考慮すべき運転規制基準値の判断も可能となるものである。

5. 防護工施工盛土の崩壊事例と降雨分析

本章では、のり面に崩壊防止を目的として防護工が施工された盛土が、降雨によって崩壊した事例を取り上げ^{11), 12), 13)}、無防護状態での盛土限界雨量と崩壊時の雨量を比較することによって、防護工の効果を確認する。

(1) 崩壊事例 1

a) 災害の概要

当該盛土は河岸段丘の形成に伴ってできた谷地形を横断するように構築された、いわゆる谷渡り盛土となっている。大正 10 年単線で開業後、昭和 42 年複線化が行われた。盛土は、高さ約 15m、延長約 200m であり、傾斜地盤上に構築されており、線路川側には田圃があり、線路山側には造成地・田圃等が存在する。のり面には、コンクリート製プレキャスト格子枠工が施工されていた。当該盛土の周辺地形平面図を図-3 に、盛土断面図を図-4 に調査によって得られた簡易貫入試験結果とあわせて示す。

b) 降雨による崩壊の状況

線路川側の盛土が円弧すべり的に崩壊したもので、崩壊時の降雨状況は図-5 に示すようである。2 日前から断続的に降り続いた雨が最大時雨量 29mm、連続雨量 184mm の時点で崩壊に至っている。崩壊原因は、盛土内に段丘疊層を流れる浅層地下水が浸透し、間隙水圧が異常に高まったためと推定されている。

c) 限界雨量の算定

当該盛土の防護工が施工されていない状態での限界雨量は式(1)と表-1 によって算定できる。表-2 には当該盛土の各評価点を示すが、当該盛土の無防護状態での崩壊限界雨量は $[R^{0.3}r^{0.3}] = 10.94$ である。一方、当該盛土が崩壊したのは、耐雨強度の向上の

表-2 崩壊事例の評価点（無防護状態）

条件	崩壊事例1	崩壊事例2	崩壊事例3	
基本点	13.14	13.14	13.14	
盛土高さ H (m)	15.0	-1.53	9.5	0.23
土質 S_E	粘性土	-1.05	砂質土	0.07
盛土強度 N_c	3.0	-1.19	2.0	-1.19
表層地盤 S_B	洪積層	0.22	沖積層	-0.38
基盤傾斜 θ_B	6°	1.34	0°	1.34
透水係数 K	3.4×10^{-3}	-0.17	5.0×10^{-3}	-0.41
集水地形 W_G	反対側	-1.83	無	0.52
縦断形態 T_L	単勾配	-0.30	単勾配	-0.30
横断形態 T_H	腹付盛土	-0.16	純盛土	0.21
経験雨量 R_E	10.4×10^4	2.47	4.3×10^4	-0.41
評価点		10.94		12.82
				13.69

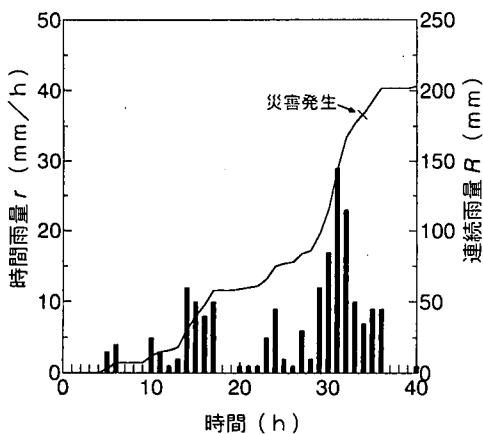


図-5 崩壊事例 1 の降雨状況

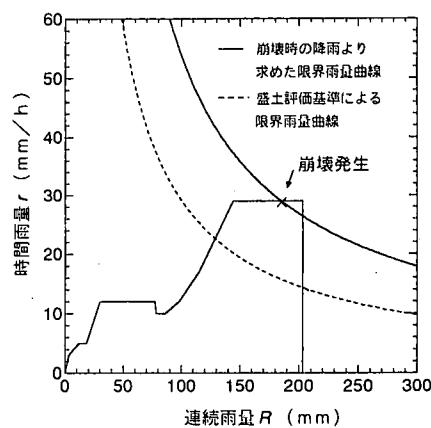


図-6 崩壊事例 1 の限界雨量曲線

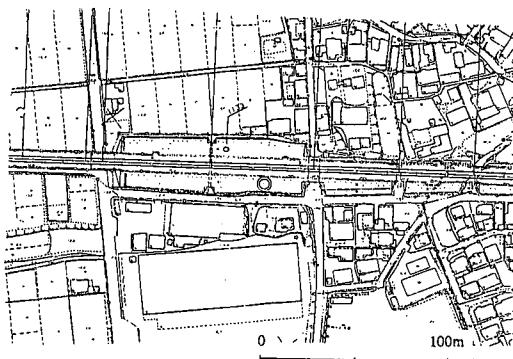


図-7 崩壊事例 2 の周辺地形

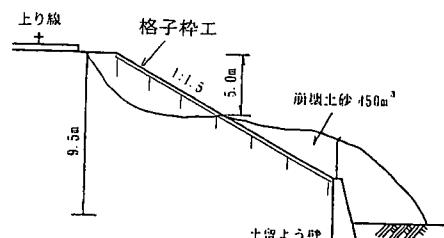


図-8 崩壊事例 2 の盛土断面

ため既に防護工が施工されている状態であり、防護工が施工された状態での崩壊限界雨量は崩壊発生時の降雨量にほかならない。崩壊発生時の降雨量を連続雨量と時間雨量の平面上にプロットし、この点を通る限界雨量を逆算して求まる限界雨量は $[R^{0.3}r^{0.3}] = 13.15$ である。無防護状態、防護工施工状態での限界雨量曲線をそれぞれ図-6に示す。

(2)崩壊事例 2

a)災害の概要

停滞中の秋雨前線が、台風の北上に伴う外側の雨雲に刺激され、東海地方に短時間に多量の降雨をもたらした。この雨により、平坦な地盤上に構築されていた純盛土がマクラギ端から高さ 5 m、延長 29 m にわたって円弧状に崩壊した。当該盛土は、線路

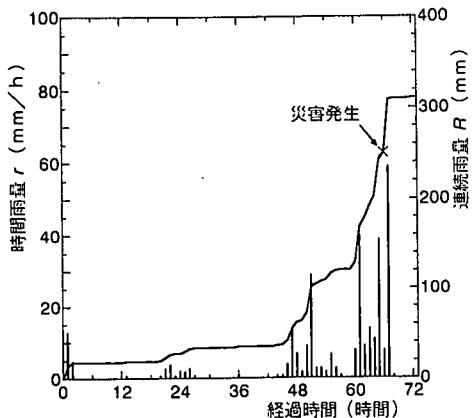


図-9 崩壊事例 2 の降雨状況

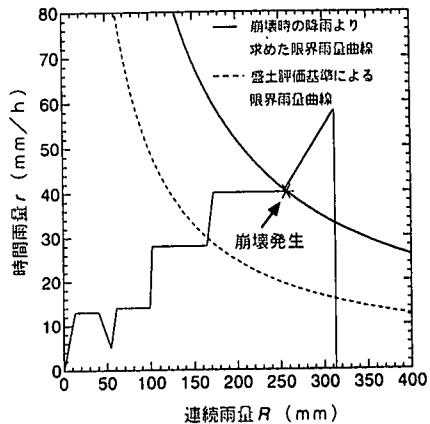


図-10 崩壊事例 2 の限界雨量曲線

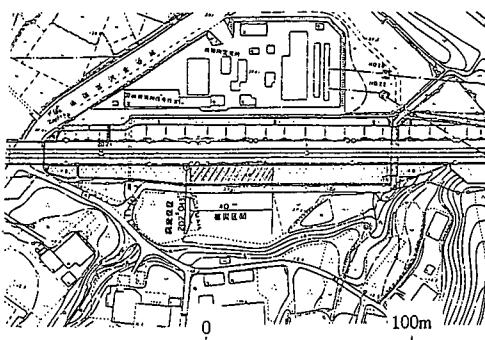


図-11 崩壊事例 3 の周辺地形

が河川を渡り台地にかかる 20 %の上り勾配区間の端部にあたる。崩壊盛土は田面上に構築されており、盛土高さは約 9.5m である。また、当該盛土にはコンクリート製プレキャスト格子枠工による防災対策がなされていた。図-7に周辺地形図を、図-8に盛土断面図を示す。

b) 降雨による崩壊の状況

崩壊当時の降雨状況を図-9に示す。降雨は 3 日前から断続的に降り続いているが、崩壊前日から当日にかけて時間雨量 40mm、同 39mm を記録している。崩壊時の連続雨量は 258mm である。断続的に降り続いた降雨が浸透水となり、さらに終点方が切取区間となっており、この部分の水が勾配に沿って当該盛土側に流入したことにより、盛土内の間隙水圧が上昇したことが崩壊の原因とされている。

c) 限界雨量の算定

式(1)と表-1により、当該盛土の無防護状態での評価点と限界雨量を求める結果は表-2のようになる。一方、事例 1 と同様に崩壊時の降雨とこれによって得られる当該盛土の限界雨量を求める結果は図-10のようになり、 $[R^{0.3}r^{0.1}]_p = 16.00$ が得られる。

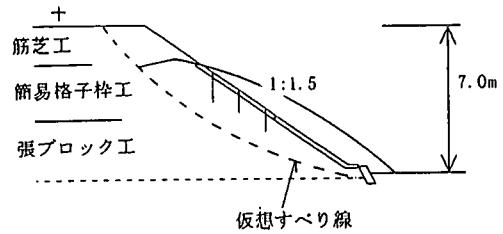


図-12 崩壊事例 3 の盛土断面

(3) 崩壊事例 3

a) 災害の概要

崩壊盛土は沖積低地にあり、線路北側の自然斜面との間は凹地状の地形を呈している。豪雨時にはこの部分が冠水する条件といえるが、崩壊部の終点方には線路下横断道路があり排水は十分確保されている。当時も冠水した状況は確認されていない。図-11に周辺地形図を示す。盛土は図-12に示すように、高さ 7 m、勾配は 1:1.5 の標準的な盛土である。のり先部分には張ブロック、のり中腹にはコンクリート製プレキャスト格子枠工が施工されていた。

b) 降雨による崩壊の状況

災害当時の降雨状況を図-13に示すが、崩壊発生 5 日前から降り始めた降雨は、台風の接近に伴い 3 日前から断続的に降り続け、崩壊発見時刻の 3 時間前から 50mm/h を超える時間雨量が観測されている。この崩壊の発生時刻は明確ではなく、崩壊時の降雨量を断定することはできないが、災害警備のため、現場付近を巡回者が通過してから発見時刻までに崩壊したことは明らかであり、この間の時間雨量と連続雨量の幅はそれぞれ、26mm/h ~ 73mm/h、443mm

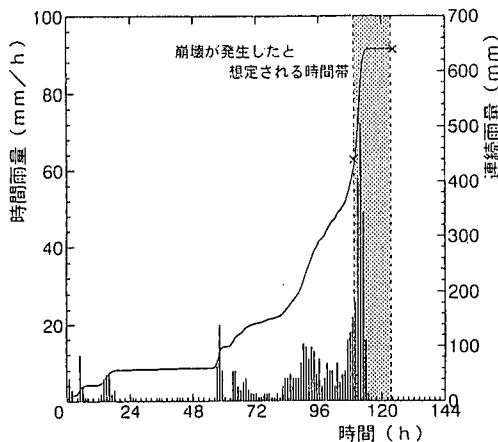


図-13 崩壊事例 3 の降雨状況

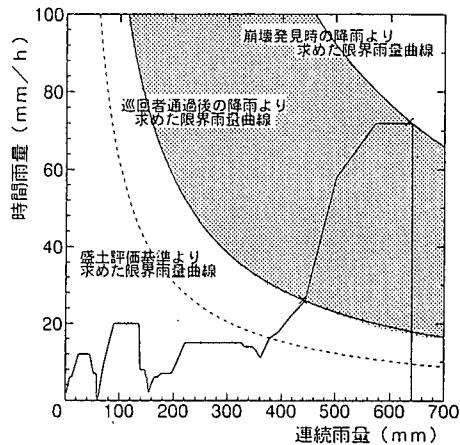


図-14 崩壊事例 3 の限界雨量曲線

~ 640mm である。

c) 限界雨量の算定

式(1)により、当該盛土の無防護状態での評価点と限界雨量を求める表-2のようになる。一方、事例1と同様に崩壊時の降雨とこれによって得られる当該盛土の限界雨量を求める図-14のようになる。ただし、当該盛土の崩壊時の雨量には前述のように幅があり、その値は $[R^{0.3}r^{0.3}]_p = 16.54 \sim 25.06$ である。

6. 降雨履歴分析による盛土防護工の耐雨効果解析

(1) 盛土防護工の耐雨効果の解析手法

盛土防護工の耐雨性検討方法には、

①防護工が施工された盛土が崩壊した事例に対して、崩壊時の降雨量から限界雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]_p$ を直接求め、式(3)から効果を求める方法

②防護工が施工された以降の降雨に耐え得た降雨量から間接的に式(3)から効果を求める方法がある。

上記の手法のうち、①については、直接的な手法ではあるが、防護工が施工された盛土の崩壊事例が非常に少なく、多くのデータを期待できない点から信頼性に問題を残す。なお、この手法は5.の崩壊事例で得た3例がこれに当たる。この3例に対して、式(3)に示すように無防護状態での限界雨量と崩壊時の降雨量との差として得られる防護工の効果は $\beta = 2.19 \sim 11.37$ である。

一方、②の手法は、防護工が施工されてから現在

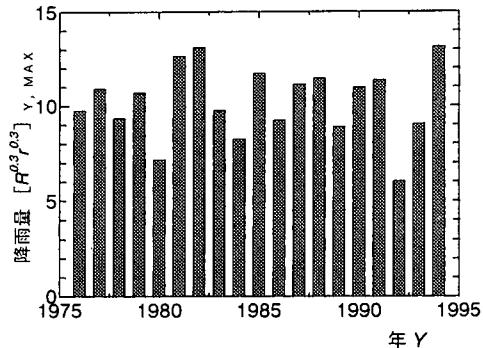


図-15 崩壊事例 1 の既往年最大雨量

までに経験した降雨量の最大値を限界雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]_p$ として近似し、式(1)によって得られる無防護状態での限界雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]$ との差を防護工の効果 β として求めるものである。すなわち、②の方法は実際に防護工が施工された盛土が崩壊しているものではないため、これによって得られる効果は保証される最小値を得ることになる。

防護工が施工された崩壊事例が極端に少なく、①の手法が適用できないため、本解析では②の手法によるが、解析の前提条件として、盛土が崩壊するであろう限界雨量は、それまでに経験した雨量の最大値であることが必要となる。そこで、以下の解析ではこの点を明確にする。

(2) 防護工施工盛土の崩壊雨量と既往雨量との関係

前述の5.の崩壊事例で示したうち、事例1の崩壊時の雨量とそれ以前に盛土が経験した雨量の一例を図-15に示す。過去の雨量については、崩壊箇所近傍のアメダスデータを利用し、図-15の縦軸は、

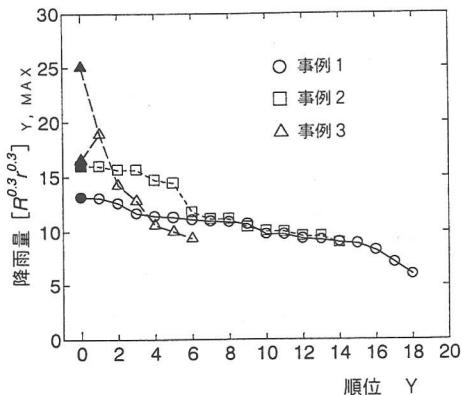


図-16 崩壊事例の既往年最大雨量の順位

1976年から崩壊するまでの降雨量の年最大値 $[R^{0.3}r^{0.3}]_{Y,MAX}$ を示している。このようにして求めた年最大値を他の2例の崩壊事例とともに大きい順に描くと図-16のようになる。図中のマークのうち塗りつぶしについては崩壊時の $[R^{0.3}r^{0.3}]_P$ を示している。なお、事例3については崩壊時の雨量に幅があるため、最低と最高の両者について示している。この図より、防護工が施工された盛土の崩壊雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]_P$ は既往の最大雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]_{Y=0,MAX}$ にほかならないこととなり、以下の式が成り立つ。

$$[R^{0.3}r^{0.3}]_P = [R^{0.3}r^{0.3}]_{0,MAX} \geq [R^{0.3}r^{0.3}]_{Y \geq 1,MAX} \quad (4)$$

さらに、 $[R^{0.3}r^{0.3}]_{Y,MAX}$ のうち $Y=0, Y=1$ を比較すると、その差はほとんどない。すなわち、防護工施工盛土の限界雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]_P$ の近似値として、経過年数が大きい場合には未崩壊時の最大雨量値を採用してもそれほどの差はない、しかも期待される効果よりも少なく見積もられることから、効果を判定する際には安全側の数値となり、以下の式が成り立つとして考えてもよいこととなる。

$$[R^{0.3}r^{0.3}]_P = [R^{0.3}r^{0.3}]_{Y=1,MAX} \quad (5)$$

(3)無防護盛土の崩壊雨量と過去の既往雨量との関係

前項では、防護工が施工された盛土の崩壊時の雨量は、施工後の最大値として近似できることを明らかにした。

一方、ここでは無防護盛土の崩壊データによって、崩壊時の雨量と崩壊前に受けた雨量との比較を行う。このデータとしては、既報の限界雨量方式による危険度評価手法^{2), 3)}を求めた際に使用した67例の崩壊事例を用いる。盛土が崩壊した際の雨量を

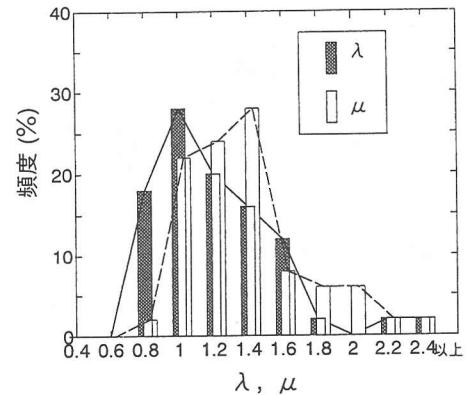


図-17 最大雨量比入と平均最大雨量比μの頻度分布

$[R^{0.3}r^{0.3}]$ 、これ以前の既往最大雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]_{MAX}$ を67事例について求めた。さらに、これらの値に対して、既往最大雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]_{MAX}$ に対する崩壊雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]$ の比入を以下の式によって求めた。

$$\lambda = [R^{0.3}r^{0.3}] / [R^{0.3}r^{0.3}]_{MAX} \quad (6)$$

ここで、両者の値が1より大きければ、崩壊時の雨量は過去の雨量値よりも大きいことを意味する。

これらの頻度分布は図-17のようになる。また、入の平均値と標準偏差はそれぞれ1.11, 0.30である。ここで、 $1.0 \leq \lambda$ となるデータ数は全体の82%であり、防護工が施工されていない盛土の崩壊雨量は既往最大雨量とほぼ等しいか、それ以上であることが分かる。

ちなみに、崩壊までの年毎の最大雨量の平均値(ただし、アメダスデータを使用したため、1976年から崩壊年までの平均値としている) $[R^{0.3}r^{0.3}]_{AVE}$ を用いた式(7)でμを求めてみると、μの平均値と標準偏差はそれぞれ1.26, 0.35となった。その頻度分布は図-17のようになる。

$$\mu = [R^{0.3}r^{0.3}] / [R^{0.3}r^{0.3}]_{AVE} \quad (7)$$

ここで、 $1 \leq \mu$ となるデータ数は全体の98%となる。したがって、盛土の崩壊時の雨量は、降雨のパターンによる影響も否定できないが、既往最大雨量値として扱って良いものと判断できる。

(4)盛土の崩壊雨量と既往雨量との関係

上述の(2)から、防護工が施工された盛土の崩壊雨量については、データがわずか3例と少ないものの、既往の最大雨量で崩壊していることが明らかに

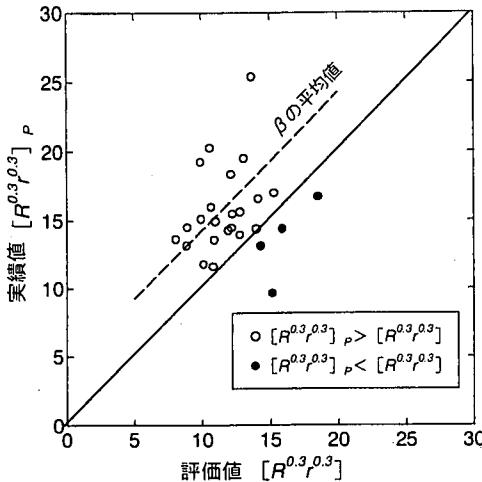


図-18 限界雨量の評価値と実績値の関係(簡易格子枠)

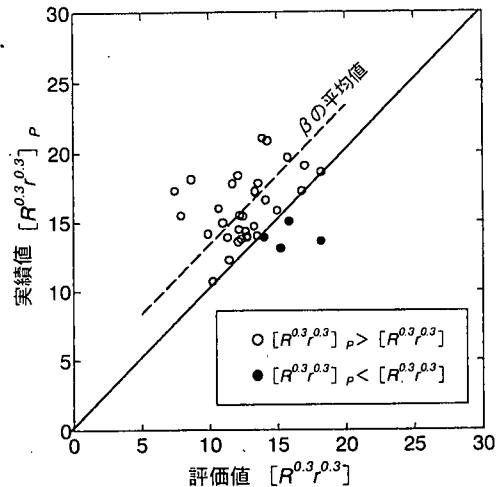


図-19 限界雨量の評価値と実績値の関係(張ブロック)

なった。

一方、上述の(3)から防護工が施工されていない盛土については、67事例の分析によって崩壊までに経験した最大雨量にほぼ等しいか、それ以上であることが明らかになった。

したがって、防護工が施工された盛土の効果を過去に経験した降雨量を基に推測しても、誤差は小さいと推論でき、次項では、この前提の基に防護工の効果を定量化する。

(5)降雨履歴分析による盛土防護工の定量化

前節では、防護工が施工されていない67の崩壊事例について雨量解析した結果、防護工が施工された盛土の耐降雨量を近似する方法として、防護工が経験した最大の降雨量を限界雨量とすることが可能であることがわかった。そこで、次に防護工を施工した盛土の雨量データに基づいて、無防護状態の盛土の限界雨量と施工後に盛土が経験した降雨量を比較することで防護工の効果を定量化する。

ここで用いるデータは、限界雨量による盛土の危険度評価基準を開発した²¹際のデータ(式(1)を解析したデータ)で崩壊後に防護工が施工されたデータ30例、および耐雨性が低いと判断され、事前に防護工が施工された盛土29例の計59例である。無防護状態での限界雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]$ は式(1)によって直ちに計算できる。

一方、今までこれらの防護工盛土は崩壊していないので、防護工施工後の限界雨量は、求めることができない。そこで、防護工が施工されてから現在までに経験した降雨量の最大値 $[R^{0.3}r^{0.3}]_{\max}$ を求め、式(5)で示したように、これ以上の降雨量で防護工盛土は崩壊するものと仮定して、この値を防護

表-3 防護工の効果βの平均値と標準偏差

	平均値	標準偏差
簡易格子枠	4.26	3.02
張ブロック	3.35	2.70

工が施工された盛土の限界雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]_P$ とする。

ここで、無防護での盛土の限界雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]$ (以下ではこれを評価値という)と防護工施工後の限界雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}]_P$ (以下ではこれを実績値という)を求めれば式(3)によって防護工の効果βが求められる。

分析事例は簡易格子枠が施工された事例が25例、張ブロックが施工された事例が34例の計59例である。図-18、図-19はそれぞれ簡易格子枠工と張ブロック工での評価値 $[R^{0.3}r^{0.3}]$ と実績値 $[R^{0.3}r^{0.3}]_P$ との関係を示したものである。

図中の実線より上の領域にあれば、防護工の効果が見込まれるデータとなり、下の領域では見込まれないデータとなる。防護工の効果が見込まれないデータとは、施工後に評価値 $[R^{0.3}r^{0.3}]$ を上回る雨量値が観測されなかったものであり、防護工の効果が見込めないものではない。

そこで、 $[R^{0.3}r^{0.3}]_P > [R^{0.3}r^{0.3}]$ となるデータのみによって式(3)によって防護工の効果を求め、すべてのデータの平均値と標準偏差を示すと、表-3のようになる。すなわち、簡易格子枠と張ブロックの防護工効果は、平均値でそれぞれ $\beta=4.26$ と3.35となる。

ここで、評価値 $[R^{0.3}r^{0.3}]$ と実績値 $[R^{0.3}r^{0.3}]_P$ の母平均の差の検定を有意水準 $\alpha=0.05$ のもとで行うと、簡易格子枠に対する検定統計量t値は6.60で

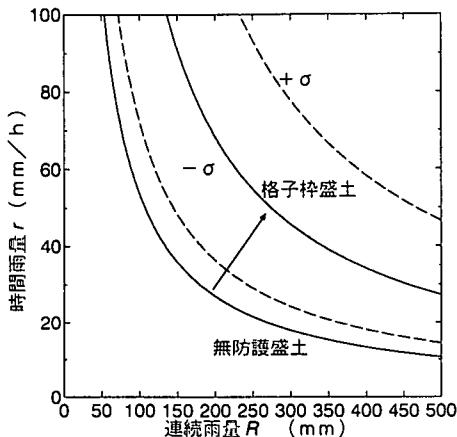


図-20 簡易格子枠盛土の限界雨量の向上効果

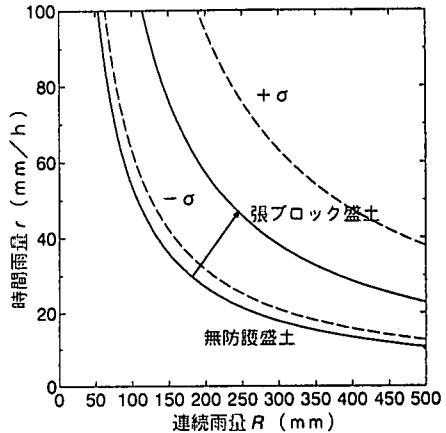


図-21 張ブロック盛土の限界雨量の向上効果

あり、有意水準と比較する確率 p 値は自由度 $\phi = n-1=21$ の t 分布において p 値 $=1.5 \times 10^{-6}$ となる。一方、張ブロック同様にして p 値を求めるとき、検定統計量 t 値は 6.93 であり、自由度 $\phi=n-1=30$ の t 分布において p 値 $=1.1 \times 10^{-7}$ となる。両者ともに p 値 $<\alpha=0.05$ となる。したがって、実績値は、評価値よりも大きいことになり、両者の差である両防護工の β は統計的に有意であることがわかる。

7. 防護工の効果を考慮した危険度評価法の修正

前章までに示したように、過去の降雨履歴を分析することにより、式(2)における β を定量化し、防護工の効果を明確にした。防護工の効果 β を種別毎に表-3で示した平均値で代表させることにすれば、式(2)は以下で示すことができ、筆者らが提案した限界雨量方式による盛土の危険度評価方法²⁾が修正できる。

簡易格子枠の場合

$$[R^{0.3}r^{0.3}]_p = \Sigma (H, S_E, N_c, k, S_B, \theta_B, W_a, T_L, T_H, R_E) + 17.40 \quad (8)$$

張ブロックの場合

$$[R^{0.3}r^{0.3}]_p = \Sigma (H, S_E, N_c, k, S_B, \theta_B, W_a, T_L, T_H, R_E) + 16.49 \quad (9)$$

これらの式で得られる防護工施工盛土の限界雨量を施工前のそれと比較すると図-20、図-21のようになる。図では、仮想の盛土として式(1)の評価点を 0

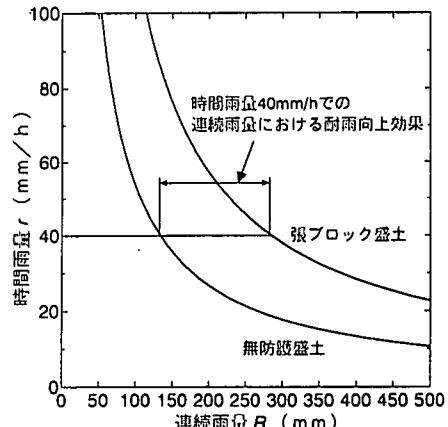


図-22 張ブロックによる限界雨量の一例

すなわち限界雨量 $[R^{0.3}r^{0.3}] = 13.14$ として示したものである。また、図中の破線は、それぞれの防護工の効果のばらつきの範囲 ($\pm \sigma$) を考慮した限界雨量曲線を示している。図から分かるように簡易格子枠、張ブロックの両者にはその効果の差は小さい。

したがって、無防護盛土の限界雨量に対し、防護工を施工することにより、図-20、図-21の限界雨量曲線は図の右上方に移動し、盛土の耐雨効果が向上することになる。

例えば、無防護盛土の限界雨量が $[R^{0.3}r^{0.3}] = 13.14$ であった場合、図-22に示すように、時間雨量 $r=40\text{mm/h}$ のとき連続雨量では $R=130\text{mm}$ の時点で限界値となるが、張ブロックを施工すれば、式(9)から $[R^{0.3}r^{0.3}]_p = 17.17$ となり、時間雨量 $r=40\text{mm/h}$ のとき連続雨量が $R=280\text{mm}$ まで耐雨強度が向上することになる。

8. おわりに

筆者らが既に提案した限界雨量方式による盛土の崩壊危険度評価方法²⁾に対し、これに防護工の効果を定量化することによって、簡易格子枠と張ブロックの防護工を有する盛土の新しい評価式を提案した。この方法によって、防護工施工後の耐降雨量が明確になり、施工後の運転規制基準値の修正が可能となつた。これは、今後の鉄道の安全輸送に加え、安定輸送の一助となるものと確信する。

最後に、本研究にあたり貴重なデータを提供いただいた、JR各社の防災担当者の各位には深甚なる謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 地盤工学会：降雨による地盤災害に関する研究報告書、1997年3月。
- 2) 岡田勝也、杉山友康、村石尚、野口達雄：統計的手法による鉄道盛土の降雨災害危険度の評価手法、土木学会論文集、No.448 / III-19, 1992.6.
- 3) 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、特別第19号、1997.5.
- 4) 久楽勝行、斎藤義幸、真下陽一：のり枠工の効果に関する大型実験、第13回日本道路会議論文集。
- 5) 岡田勝也、野口達雄、村石尚、池内久満、垣尾徹：盛土斜面の被覆効果に関する盛土模型実験、第25回土質工学研究発表会講演集、1990.6.
- 6) 村石尚、佐溝昌彦、杉山友康、野口達雄：盛土の被覆条件に着目した耐降雨性に関する模型実験、鉄道総研報告、Vol.5, No.7, 1991.7.
- 7) 杉山友康、村石尚：のり面張ブロックの雨水遮断効果に関する基礎実験、土木学会第48回年次学術講演会概要集IV、1993.9.
- 8) 杉山友康、藤井昌隆、村石尚、大南正克：コンクリート張ブロックの雨水遮断効果に関する現地散水実験、土木学会第49回年次学術講演会概要集IV、1994.9.
- 9) 杉山友康、村石尚：のり面工の遮水性に着目した盛土の耐雨性効果、鉄道総研報告、Vol.8, No.7, 1994.7.
- 10) 日本国鉄道施設局土木課：土木建造物取替の考え方、日本鉄道施設協会、1974.
- 11) 秋山保行、杉山友康、村石尚、岡田勝也、山崎慎介：簡易格子枠工を施工した盛土の降雨時の安定性に関するケーススタディ、第31回地盤工学研究発表会、1996.7.
- 12) 秋山保行、杉山友康、村石尚、岡田勝也：プレキャスト格子枠工を施工した鉄道盛土の耐降雨性に関する一考察、第51回土木学会年次学術講演会講演集IV、1996.9.
- 13) 秋山保行、杉山友康、岡田勝也：崩壊時の降雨からみた盛土のり面防護工の耐雨性効果に関する一考察、第32回地盤工学研究発表会講演集、1997.7.

(1999.7.29 受付)

EFFECTS OF SLOPE PROTECTION WORKS ON CRITICAL RAINFALL OF RAILWAY EMBANKMENT

Tomoyasu SUGIYAMA, Katsuya OKADA, Yasuyuki AKIYAMA,
Hisashi MURAISHI and Toshitaka NARA

Embankment slope surfaces are frequently covered with protection works to prevent collapse by rainfall. In this paper, in the first we confirm effects of slope protection works on railway embankments through analyzing some past collapse cases in which the embankments were covered with protection works. Furthermore, we compare estimating critical rainfall of non-covering protection embankments with the actual rainfall after covering protection works, and shall try to quantitative evaluation for the protection works.