

鉄道斜面（盛土、切取り）の限界雨量による崩壊予測法とその適用

Prediction of Slope Failure by Critical Rainfall in Railway and Its Application

岡 田 勝 也 (おかだ かつや)
国土館大学教授 工学部杉 山 友 康 (すぎやま ともやす)
（財）鉄道総合技術研究所防災技術研究部 主任研究員

1. はじめに

我が国の自然条件は厳しく、台風や梅雨期の豪雨により、鉄道沿線の長い線状構造物である盛土や切取りなどの斜面崩壊は、鉄道だけでも年間300件以上に上っています。特に在来鉄道においては明治時代に建設されたものが多く、耐降雨性が必ずしも高いものとはなっていない。

鉄道の安全性と安定性を維持するために、降雨対策工の施工というハードな対策と、降雨による崩壊を予測して列車の運転規制をするというソフトな対策という、いわばハードとソフトの車の両輪が不可欠となっている。

このうち、ソフトな対策は、単に降雨による斜面崩壊を予測して列車の運転を規制するというだけではない。斜面がどの程度の耐降雨性を有しているかを定量的に判定し、降雨に弱い斜面を抽出し、その斜面にどの程度の斜面対策工を施せばよいか決定するというソフトな評価も含まれる。

そこで、本稿では、ソフトな対策と評価に着目して、(1)鉄道における降雨時の運転規制の方法、(2)斜面構造物の耐雨性評価の従来の手法、(3) R^{mrn} （限界雨量）による斜面崩壊予測手法の開発、(4)格子枠工などの簡易な法面対策工の耐降雨評価を加えた、限界雨量による斜面崩壊予測法の開発、(5)不飽和浸透解析と円弧すべり解析による解析的手法の適応と比較、について概説する。

2. 鉄道における降雨時の運転規制

鉄道の豪雨時の安全運行を維持するための運転規制の歴史は古く、戦前には線路班ごとに雨量ますを設置し、ますに貯まった水深を折尺で計測して、保線区へ伝達するシステムがその始まりである。

その後、雨量観測の計器化と自動警報化が進み、降雨災害のソフトな予防策として運転規制の基準化が進められた。そんななか、1968年8月、局地的豪雨による飛騨川バス転落事故が起きたが、これと平行する当時の国鉄高山本線では、その運転規制基準により列車の運行停止が行われ、適切な運転規制の重要性が再認識された。このような運転規制は、基本的には“連続雨量”と“時雨量”の二つのパラメーターを用いるもので、両パラメーターを横軸と縦軸とする折れ線によって、列車の徐行、列車の運転停止を行おうとするものである。しかし、これは、一つの雨量計が管轄するある駅間における盛土や

切取りを含むすべての構造物の耐雨性を、過去の降雨履歴とそれに対応する災害実績に基づいて経験的に決めたものである。

この連続雨量と時雨量の二つのパラメーターに加えて、5日間積算雨量、実効雨量などを加味した手法もJRになってから採用したところもある。

3. 鉄道における従来の斜面危険度評価法

戦後の混乱期は、鉄道構造物のメンテナンスの確保以上に旅客と貨物の輸送が第一目標であったが、1960年前後になって、斜面のメンテナンスがシステム化されました。

これは、後に、法面採点表として定着した⁸⁾。特に災害の発生件数の多かった切取りに関する採点表は、崩壊データに基づく数量化理論による解析結果に工学的の判断を加えて作成された。素因点としては、たとえば盛土の採点表では、法高さ、法勾配、土質、表層土厚さなど、また防護点として侵食防止工、排水処理工などに基づいて採点し、それぞれの盛土の雨量評価点を算出し、最終的にはそれを許容日雨量に換算した。

この日雨量は斜面の有する耐降雨性を表す指標となり、画期的なものであったが、全国一律の規準として作成されたため地域特性などを反映できず、かつ2.に述べた運転規制の雨量パラメーターとは違っていたために、運転規制には直接用いられることはなく、もっぱら構造物の取替えなどの投資順位の決定に使われるのが一般的であった。

4. 限界雨量による斜面の危険度評価法

4.1 法面補強工の無い斜面の危険度評価法

上述の2.の運転規制では降雨を時間雨量 r と連続雨量 R の二つのパラメーターで表し、3.の斜面の採点表では日雨量 D のただ一つのパラメーターで表すものであり、両者に連動性はなかった。

これらを連動させる手法の一つとして開発したものが限界雨量による危険度評価法であり、図-1のように示される。これは、個々の斜面（盛土、切取り）構造物の耐雨性を、外的変数としての時間雨量 r と連続雨量 R のそれぞれのべき乗を m と n で表したとき、 R^{mrn} （限界雨量）によって、評価する手法である。斜面の説明変数の抽出には、地盤工学的な斜面安定理論のパラメーターを考慮すると同時に、鉄道における災害実態や保守担

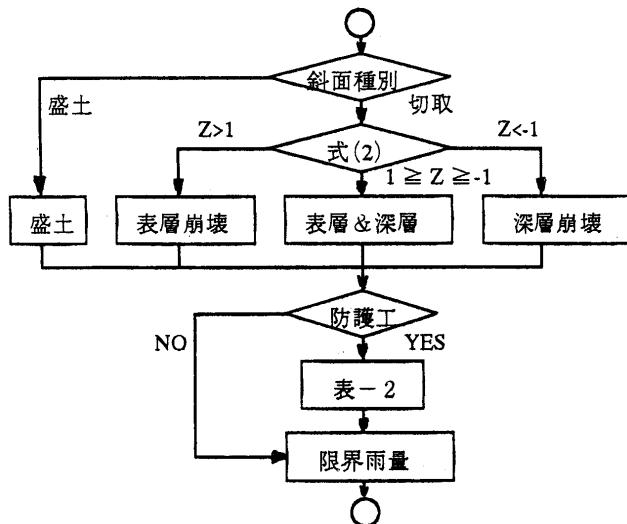


図-1 限界雨量による危険度評価手法のフロー

当者の簡易な調査・試験ができるることにも配慮した。それらの要因を用いて数量化 I 類による多変量解析を実施し、説明変数の抽出とべき乗 m と n の最適化を行った。

その結果、たとえば盛土¹⁾については、外的変数のべき乗の定数は $m=n=0.3$ が最適値となり、説明変数としては、盛土の構造条件として、盛土高さ H 、土質 S_E 、貫入強度 N_C 、基盤条件として、表層地盤の地質 S_R 、地盤の傾斜角 θ_B 、集水・浸透条件として、透水係数 k 、集水地形 W_G 、縦断形態 T_L 、横断形態 T_H 、経験雨量条件としての経験雨量 R_E の 10 要因で表されることになった。これから限界雨量は、表-1 に示す基本点 $\alpha (=13.14)$ を加えて、

$$R^{m+n} = \Sigma(H, S_E, N_C, S_R, \theta_B, k, W_G, T_L, T_H, R_E) + \alpha \quad \dots \dots \dots (1)$$

によって決定されることになった。

同様に切取りについても解析を実行した^{2),3)}が、切取りにおいては連続雨量 R と時雨量 r の寄与度が、表層崩壊と深層崩壊では相違すること、および両者の崩壊メカニズムが異なることを考慮し、それぞれの崩壊パターンについて危険度評価基準を設けた。なお、切取り斜面において表層崩壊と深層崩壊の発生する可能性は、 D_S を表層厚さとするとき、判別解析の結果、

$$Z = -0.115H - 2.992D_S + 0.666W_G + 4.001 \quad \dots \dots \dots (2)$$

によって判別できることになった²⁾。 $Z > 1$ ならば表層崩壊、 $Z < -1$ ならば深層崩壊、 Z がその間なら両崩壊について検討することにした。表-1 は危険度評価基準におけるべき乗 m と n 、基本点 α をまとめたものであるが、切取りの表層崩壊では時雨量が、切取りの深層崩壊では連続雨量が卓越することを示している。

4.2 法面補強工のある斜面の危険度評価法

上述の限界雨量による斜面の危険度評価法では、法面工などの補強のない斜面に対するものであった。

法面工の持つ耐雨性が十分にあれば、後述の図-2 のように限界雨量曲線は右上に移動するはずである。すなわち、たとえば法面防護工を施工した盛土では、式(1)にその防護効果定数 β を考慮し、

表-1 限界雨量による評価基準のべき乗と基本点

	盛 土	切 取	
		表層崩壊	深層崩壊
α	13.14	45.16	15.56
m	0.3	0.2	0.4
n	0.3	0.9	0.2

表-2 盛土と切取り（表層崩壊・深層崩壊）における法面防護工の防護効果 β

		防護効果 β	β の標準偏差
盛土	プレキャスト格子棒工	4.26	3.02
	張りブロック工	3.36	2.70
切取	表層	28.75	12.15
	場所打ち格子棒工	36.16	19.10
	張りコンクリート工	37.68	17.59
深層	プレキャスト格子棒工	3.53	2.50
	場所打ち格子棒工	4.39	2.92
	張りコンクリート工	5.41	4.56

$$R^{m+n} = \Sigma(H, S_E, N_C, S_R, \theta_B, k, W_G, T_L, T_H, R_E) + \alpha + \beta \quad \dots \dots \dots (3)$$

で表されるものとした⁴⁾。

鉄道沿線では法面防護工が施工された盛土・切取りが豪雨によって崩壊した事例は非常に少ない。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を限界雨量として近似し、それと未施工時の限界雨量との差 β を防護工効果として統計的に求めた。

その結果、盛土と切取りの簡易な法面防護工について、その工種別の β は表-2 のようになつた^{4),5)}。

5. 限界雨量による危険度評価法の盛土斜面への適用例

5.1 崩壊盛土の概要

梅雨末期の前線性豪雨（最大時雨量 $r=41.5 \text{ mm/h}$ 、連続雨量 $R=389.7 \text{ mm}$ ）のなか、複線鉄道盛土が延長 50 m にわたって円弧すべり破壊した事例を述べる。

盛土高さは $H=6.6 \text{ m}$ で、法面勾配は 1 割 5 分、複線盛土ではあるが、単線しか敷設されておらず線路に近接する右側法面だけが崩壊した。盛土の土質は粒度試験の結果 (SM) と判定され、透水係数は 10^{-3} cm/s のオーダーであり、簡易動的貫入試験による法面の深さ 3 m までの平均 N_c 値は 5.0 であった。盛土基盤である軟弱層の厚さは 4 m 程度であった。法面下部には高さ 1 m 程度の腰土留めがあるが、根入れはなく厚さ 30 cm の栗石の上にあり、盛土崩壊時の水平抵抗としてはほとんど寄与できない。法面下部には平板ブロックがあったが、盛土施工後の圧密沈下などによってかなり傷んでおり、表面侵食防止程度の効果しかなかった。

一方、崩壊を免れた線路左側の法面は開業後間もない変状の発生により格子棒工が施工されていたために崩壊を免れた。

論 文

5.2 防護工のない盛土の限界雨量

崩壊を起こした線路右側の法面の限界雨量を式(1)によって求めると、 $R^{0.3}r^{0.3}=14.75$ が得られた。この限界雨量曲線は、連続雨量 R と時雨量 r に対して双曲線で表され、図-2 のようになる。この崩壊は連続雨量 R が約350 mm の時に発生しているが、予測値はこの災害時の雨量観測値と良く一致している¹⁾。

図には過去の降雨履歴も示しているが、そのうち2例はこの盛土と同じような条件の近接した盛土が崩壊したときのものである。他の降雨履歴では盛土崩壊を起こさなかった。したがって、予測値は実測値を十分満足するといえそうである。

5.3 防護工を施工した盛土の限界雨量

未崩壊の線路左側の法面には格子枠工が施工されていた。その場合の限界雨量の算定には式(3)を、防護工効果 β は表-2 の値を用いる。そのとき、限界雨量は $R^{0.3}r^{0.3}=19.01$ となり、その曲線もやはり双曲線で示され、図-2 のようになる。右側法面が崩壊したときの実測雨量はこの限界雨量曲線の下にあり、防護工を施工した法面は崩壊雨量に達していないことが判る。

5.4 斜面安定解析の適用

限界雨量による危険度評価法は統計的処理によって求められたものであるが、この盛土については防護工の有無にかかわらず、崩壊雨量の実態を一応説明できる結果が得られた。

しかし、地盤工学的な解析法の検証も必要である。まず、この盛土の定常地下水位を推定⁶⁾を行い、それを初期値として災害当時の降雨記録を時系列的に入力して飽和・不飽和浸透流解析を行った。法面直下における地下水位の経時変化を図-3 に示した。

この水位変動のシミュレーション結果を受けて、修正フェレニウス法の全応力法による斜面安定解析を行い、安全率 F_s の変化を、図-3 の上図のように、求めた⁷⁾。 F_s 1.0 を下回る時のすべり面は斜面先崩壊の形態を示し、実際のすべり面形状とほぼ同じであった。

6. あとがき

鉄道における斜面の崩壊予測について述べた。

鉄道は長い線状構造物の連続であり、たとえ盛土や切取りといえどもすべての区間に5.4で述べたような解析的な手法で崩壊雨量を求ることは實際には不可能である。

鉄道の保守担当者が、長い連続した斜面の崩壊雨量を事前にかつ容易に判断できる手法の一つとして限界雨量による危険度評価法を開発した。その一助になれば幸いである。

参考文献

- 岡田・杉山・村石・野口：統計的手法による鉄道盛土の危険度評価手法、土木学会論文集、448、1992。

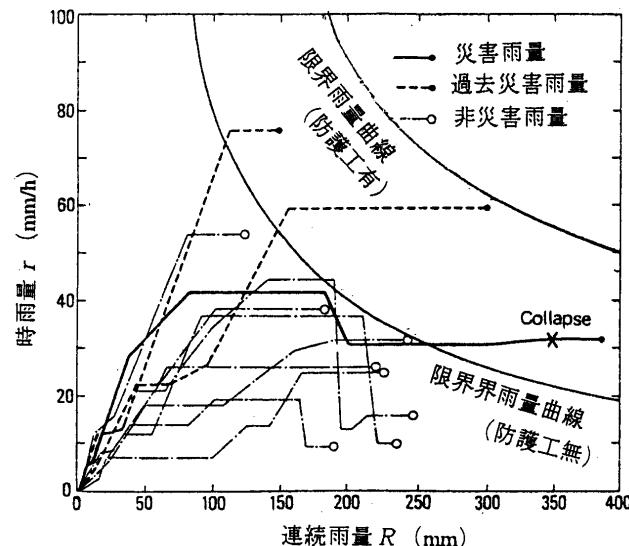


図-2 盛土の限界雨量曲線の例

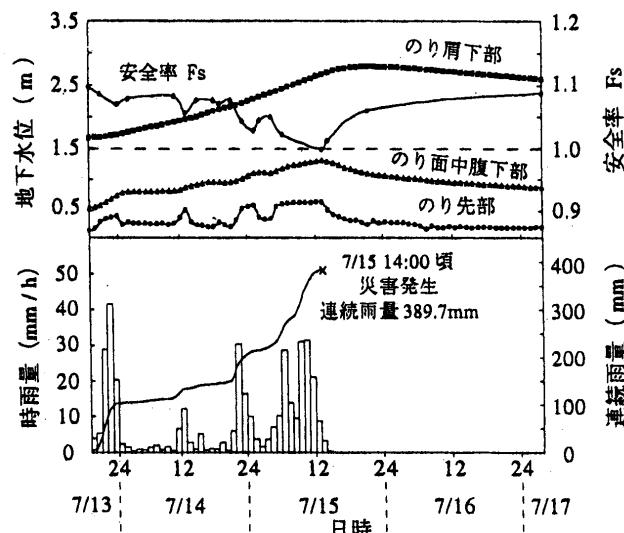


図-3 解析的手法による降雨に対する盛土の地下水位と安全率の変化

- 2) Sugiyama, Okada, Muraishi and Noguchi: Statistical risk estimating method for rainfall on surface collapse of a cut slope, Soils and Foundations, Vol. 34, No. 3, 1994.
- 3) Sugiyama, Okada, Muraishi, Noguchi and Samizo: Statistical rainfall risk estimating method for a deep collapse of a cut slope, Soils and Foundations, Vol. 35, No. 4, 1995.
- 4) 杉山・岡田・秋山・村石・奈良：鉄道盛土の崩壊限界雨量に及ぼす防護工の効果、土木学会論文集、644、2000。
- 5) 杉山・村石・斎藤・奈良：のり面防護工の耐雨性を考慮した新しい斜面評価基準の提案、鉄道総研報告、Vol. 15, No. 2, 2001。
- 6) 岡田・岩崎・杉山・村石：豪雨時の盛土の安定解析のための定常地下水位の推定、第34回地盤工学研究発表会、1999。
- 7) 岡田・岩崎・杉山・村石：鉄道盛土の降雨によるシミュレーション、第35回地盤工学研究発表会、2000。
- 8) 日本国有鉄道施設局：土木建造物の考え方、日本施設協会、1974。

(原稿受理 2001.2.13)