

### 第16回

# 斜面の降雨に対する 安定性評価

#### はじめに

国土の7割が山間地という我が国では、盛土や切土あるいは沢を横切って走る鉄道が多く存在しています。このような鉄道を降雨による斜面災害から守るために、鉄道沿線斜面では様々な防災対策が実施されています。防災対策はハード対策とソフト対策の二種類に大きく分けられます。ハード対策は、降雨に対して安定性が低いと評価された斜面にのり面防護工などを施工することで斜面の崩壊を防ぐ対策のことをいいます。また、ソフト対策は、降雨に対する斜面の耐力を予め評価しておき、その耐力以上の雨が降った場合には列車を徐行あるいは停止させて、斜面が崩壊しても列車が被災しないようにする対策のことをいいます。どちらの対策でも、斜面の検査を予め行い降雨に対する斜面の安定性を適切に評価することが重要となります。

本稿では、斜面の安定性を評価するための検査方法、また検査結果を用いた評価方法などについて、過去から現在までの主な変遷を俯瞰するとともに、将来を展望してみたいと思います。

#### 検査体制の整備の黎明

明治から大正期に発行された保守関係の資料には、降雨による斜面災害に対する備えや斜面を対象とした検査についての記述はみられません。降雨による斜面災害は「水害記事<sup>1)</sup>」(図1)として河川増水による橋脚の流失などとともに毎年記録され、次の災害が発生した際の事例集として役立てられていたようです。すなわち、当時の鉄道では斜面の安定性を予め評価して災害から列車を守るという行為は行われていなく、斜面災害は文字通り「天災」として甘んじて受け入れ、その代わりに復旧に力を注ぐというのが一般的な取り組みであったようです。

斜面を含む土構造物を対象とした検査については、昭和3年に発行された「保線区従事員職制及服務規程<sup>2)</sup>」(図2)にその記述を見ることができます。同規程には線路分区長は線路に付帯する土留め壁などの建造物を、また工事士は線路に直接付帯していない全ての建造物を保守することとされています。自然斜面の評価については不明ですが、記述を見る限りでは少なくとも線路に面した切土や盛土、ま

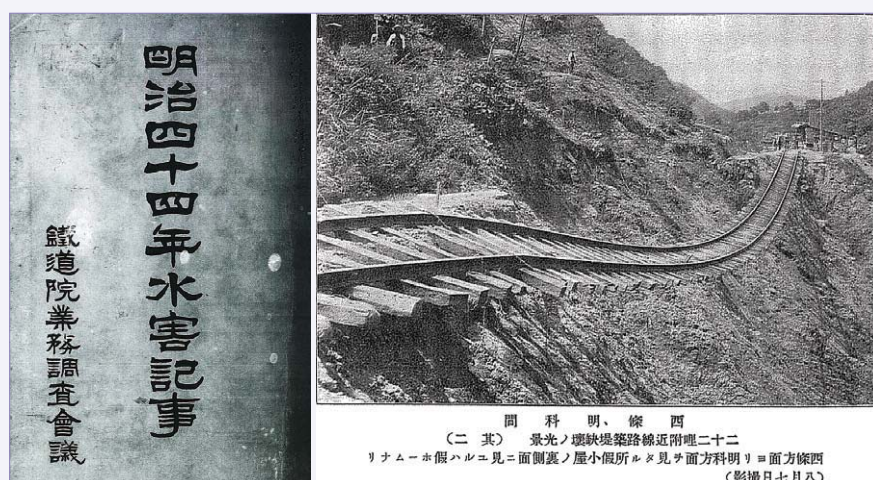


図1 「明治四十四年水害記事」<sup>1)</sup>とこれに掲載された篠ノ井線西條・明科間築堤崩壊の状況  
(所蔵：鉄道総研図書室)

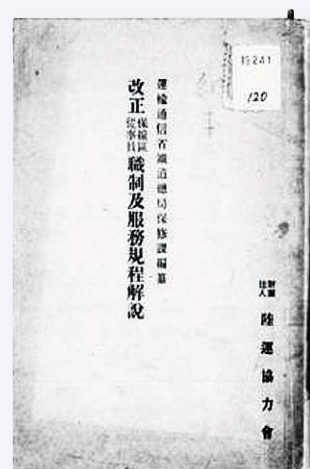


図2 保線区従事員職制及服務規程<sup>2)</sup>  
(写真は昭和19年に発行された改正版)  
(所蔵：国立国会図書館近代ライブラリー)

盛土の不安定性は次の採点基準による評価点と雨量評価点の関係で判定する。

基本点は原則として60点とする。

防 護 点	素 因 点							判断点
	土羽の状況	土羽土の性質	のり高	のり勾配	のり面への水の集中しやすさ	盛土の位置	周囲の水の影響	
新設盛土ののり面の表層厚さ0.5~1.5mが標準2以下でその下が締まっている。	砂および砂質土	6m以上	-15	標準勾配より急	平坦伸勾配	0	切盛境界横台背後	現場の実情に応じ ±20
上記以外の場合	粘性土	6~3m	-10	標準勾配それよりゆるい	落込勾配	-10	その他	
古い盛土	0	3m以下	0	0	0	0	山側にだん水のおそれあり盛土の下がうらんでいる -20 地下水流がある -10 水の影響なし	
おもな目的	防護工	点数	防 護 対 象					雨量評価点
のり面の浸食防止	十分繁茂した植生	+10	○					評価点 許容日雨量
	張コンクリート、ブロック張、石張、プレキャスト格子枠工	+10	○	○				100 450 mm
	岩座張	+20	○					90 400
のり面の浸食防止	土留壁	+20					○	80 350
	たて下水など	+5				○		70 300
排水処理	のり京砂利枠工	+10		○		○		60 250
	排水フランクット	+10		○		○		50 200
	排水パイプ工	+20	○	○		○	○	40 150
表層部強化	蛇籠工	+20	○	○				30 100
	杭打工	+10	○	○				20 50
高盛土補強	土留擁壁	-		○				
	押え盛土	-						

図3 取替標準に記載されたのり面採点表(盛土)

表1 線路防護設備設置基準規程に示された線区の目標強度

線区の等級	目標降雨の超過確率年
1級線	70年
2級線	30年
3級線	10年
4級線	2年

たこれらに付随する土留め壁なども保守の対象とされていることがわかります。

一方、同規程には「二日に一回以上担当区域を徒歩巡回し、線路、建設物用地及び保安設備の状態を視察し・・・」と、実際には不可能に近いと考えられる検査要領が定められています。検査の体制やルール作りには取り組まれていたものの、実効性のある検査の実施という面ではまだまだといったところだったようです。

入手できた資料では、現在のような検査の原型は、昭和31年の「建造物保守心得(案)」で定められたようです。当時の東京鉄道管理局の仁杉工事主管を中心に始まった同心得(案)作成の顛末は、田中<sup>3)</sup>によって詳述されていますのでここでは割愛しますが、検査を「巡回検査」、「定期検査」、「特別検査」に分けた上で、定期検査の周期を明記するなど、現在に近い検査体系がこの心得によって整備されました。また、この心得では用地外の条件の変化に対しても監視を強化することが明記され、部外用地に対しても目を向けるべきとしたところが画期的であったと思われます。

建造物保守心得の作成時には、別冊として「建造物の検査及び措置要項」が作られました。この中では検査方法について詳しく述べられていますが、検査結果から斜面の安定性をいかに評価したらよいかについては示されていませんでした。検査結果に基づく斜面の安定性評価方法の導入については、昭和49年発行の「土木建造物取替の考え方」まで待たなければなりません。

### 斜面の安定性評価の近代化

防災投資を適正に実施するためには、のり面の安定性を定量的に評価する必要があるという観点から、その手法として、昭和49年に発行された「土木建造物取替の考え方<sup>4)</sup>」(取替標準)で図3のようなのり面採点表が示されました。採点表は盛土用・切土用が作成され、それぞれのり面の高さや勾配、土質などの条件ごとに設定された点数(素因点)を付け、その合計点から安定性を評価し防護設備の要否を定量的に示そうとするものです。採点表には採点の合計点(評価点)に対応した許容日雨量が示されており、評価対象斜面の安定性がその斜面の許容し得る雨量として得られる仕組みとなっています。一方、当時の「線路防護設備設置基準規程」は、線区が有すべき目標耐降雨強度として線区のランク別に表1のような超過確率年数を示し、その降雨に耐えることと規定していました。この目標雨量と上述の許容日雨量とを比較して、許容雨量が目標雨量に達していない場合は何らかの対策が必要と評価しました。

のり面採点表の導入によって斜面の安定度が定量的に評価でき、防災投資のひとつの根拠として利用できるようになりました。この手法は現場で広く用いられるようになりました。のり面採点表は、災害が発生したらその都度復旧するといういわば「事後防災」から、検査によって斜面の安定度を評価し、危険箇所を抽出して対策を施工する「事前防災」へと防災の取り組みを大きく前進させることになりました。

現在の斜面の安定性評価

のり面採点表の導入は事前防災へ大きく貢献するものであり、のり面採点表を擁した取替標準は長く利用されることになりました。一方、時代は昭和から平成へと移り、これと時期を同じくして国鉄もJRへと変革しました。高度経済成長期が終わりを告げてバブル景気がはじけると、世の中のインフラも新設からメンテナンスへと大きく舵がとられました。このような中、鉄道のメンテナンスに資する標準書として「鉄道構造物等維持管理標準・同解説<sup>5)</sup>」が作成されることとなり、平成19年に発行されました。

維持管理標準では、検査の種類と各検査の位置づけが明確にされるとともに、各検査で行われる判定のための評価方法と指標も示されました。ここで同標準では、斜面の降雨に対する安定性の評価にあたって、変状と不安定要因の両者を評価すべきであるとしました。検査では、のり面工や土留めに現れた亀裂などの変状にとかく目を奪われがちですが、不安定要因の有無を検査で把握することが斜面の評価にとって重要であることが示されました。同標準は、取替標準の考え方を引き継ぎ、より明確化されたものと捉えることができます。また、同標準には図4のような代表的な変状および不安定要因の代表例とその評価の例が示されており、異なる現場でも共通した評価ができるよう配慮がなされています。

また、維持管理標準では、のり面採点表に替る新たな斜面評価方法として限界雨量による安定性評価手法が示され

ました。それまでののり面採点表には、斜面の外観的な素因に重点が置かれていること、各素因点の重みづけの妥当性、全国一律の評価基準となっていることなどの問題点から、評価結果の精度に課題がありました。そこで、これらの問題点を解決した新しい斜面評価手法として、限界雨量曲線の考え方が杉山<sup>6)</sup>によって提案されました。

提案は、180件におよぶ過去の崩壊事例を基にして判別解析や数量化I類解析といった統計解析を行い、斜面の構造条件、地盤条件、集水条件および経験雨量条件別に評価点を設定し、斜面の安定性を表す指標として $R^m \cdot r^n = \text{基本点} + \Sigma \text{評価点}$  (ここで、 $R$ は連続雨量、 $r$ は時間雨量、 $m$ および $n$ は斜面種別ごとの定数)で求められる限界雨量曲線を示しました。また、対策工による安定性向上効果も評価点として限界雨量曲線に反映することができます。

限界雨量曲線を斜面毎に求めることで各斜面が有する安定性を相対的に求めることができます。また、限界雨量曲線は、時間雨量と連続雨量を二軸とする図5のようなグラフ上に曲線として示すことができるため、従来用いられている降雨時の運転規制に対して斜面がどの程度の安定性を有しているのかを直感的に知ることができます。このため、対策工を施工することによってどの程度運転規制値を向上することが可能であるかを知ることができ、運転規制の検討などにも用いることができます。このような有用性から限界雨量曲線を用いた斜面評価手法は、JRを中心に今日広く用いられています。

項目	立地条件・周辺環境	
主な不安定要因と予想される崩壊や変状	<p>●背後に集水地形等が存在(土砂斜面)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>切土上部に水の集まりやすい地形があると大雨時に切土の一部に水が集中する。</li> <li>水田、畑などの耕作地は水を保水する機能があるので、耕作地の下にある切土は湿潤状態になりやすい環境にある。</li> <li>大雨時には水田等の用水路が溢れ、のり面に表流水が直接集中流下する恐れがある。</li> <li>切土上部の湿地は、過去にすべりが生じた際の陥没地である場合もある。このような箇所は、元々不安定な地形の一部となっていることもある。</li> </ul>	
	<p>【予想される崩壊や変状】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>土砂崩壊</li> <li>落石</li> </ul>	
	健全度判定の考え方	健全度の判定例
	のり面に水が集中して流下したような跡が見られる。	A
	のり面あるいはのり面からの湧水があり、その湧水に濁り、または、湧水量に変化が見られる。	A
	湿潤状態ではなかったのり面あるいはのり面がいつも湿潤状態となる。	A
	上記3点の現象が見られない。	B
	防護工(のり面工、排水工等)が施工されている。	C

図4 維持管理標準に示された不安定要因とその評価の例

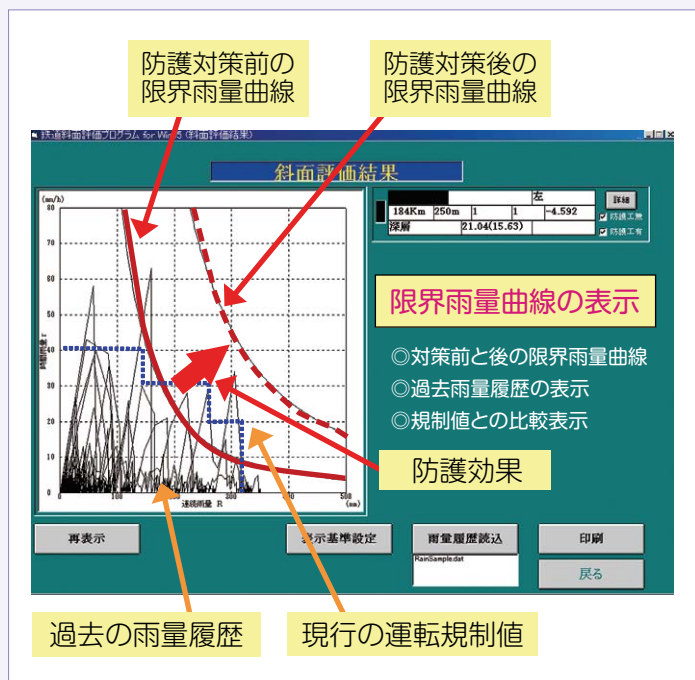


図5 限界雨量による評価結果の例

## 斜面の安定性評価の将来展望

降雨に対する斜面の安定性を評価する場合、外力としての降雨と、耐力としての斜面の強度の両者を適正に評価することが必要になります。そのためにはこれらをいかに精度よく求められるかが今後の課題と考えられます。

外力については、各研究機関で現在進められているような気象の数値シミュレーションモデルの研究が進展し、将来、詳細な気象状況を数値解析によって再現することが可能になると考えられます。このような技術が実現することによって、細かな地形情報に基づく局地的な気象現象を再現することができ、より細密な降雨分布とその経時的な変化を把握することができるようになると考えられます。

耐力については、医療分野で実践されているいわゆるCT (Computed Tomography) 技術の地盤工学分野への活用が期待されます。ボーリング調査を実施することなく地中の状況を把握することが可能となれば、斜面の強度評価に飛躍的な進化をもたらすと考えられます。技術的な課題はあるものの一部では研究が進みつつあり<sup>7)</sup>、将来的な実用化に向かってさらに研究が進められることと思います。

外力としての降雨と耐力としての地盤状況が明らかになれば、斜面に降った雨が斜面表面を流れ、あるいは斜面中に浸透して斜面を不安定化させていく状況をシミュレートすることが可能となります。鉄道総研では、斜面に降った雨による水の移動を解析し、これを基にして斜面の安定性を逐次評価する図6のような手法を開発中であり<sup>8)</sup>、実務への適用に向けて整備を進めています。コンピューター技術の進歩と合わせてリアルタイムに降雨ハザードを検知するシステムとして将来的に発展させ、列車の安全運行に役立てることを目標としています。

## 斜面災害のこの先を見据えて

近年、雨の降り方が確実に変化しており、これに伴って被災形態も変化する傾向があります。また、いわゆる深層崩壊といわれるような大規模な斜面崩壊が目撃されるなど、災害に対する社会の意識が非常に高くなっています。このような斜面災害をとりまく環境の変化を捉えて技術開発を進める必要がありますが、災害の発生は技術の進歩を待つてはくれません。そこで重要となるのが斜面的安定性評価へのリスクアセスメントの導入だと考えられますが、欧米での普及に比べて我が国では限定された分野に留まっています。しかし、斜面防災分野にもリスクアセスメントの導

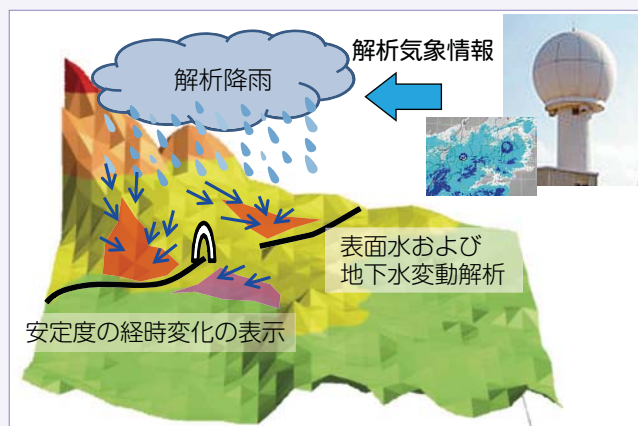


図6 斜面的安定性の逐次解析のイメージ

入が求められる局面が早晚訪れるものと考えられます。鉄道総研では、これまでに降雨による土砂災害や落石災害に関するリスクアセスメント手法を開発しており<sup>9)</sup>、今後さらなる改良と普及に努めなければならないと考えています。

防災に対する世の中のニーズは今後ますます高まるものと考えられます。より安全な鉄道を実現するために、斜面的安定性評価に関わる研究・技術開発を確実に前へ進めることが必要と考えています。

(太田直之／防災技術研究部 地盤防災研究室)

## 文献

- 1) 鉄道院業務調査会議：明治四十四年水害記事，1913他
- 2) 運輸通信省鉄道総局施設局保修課：改正保線区従事員職制及服務規程，1954 (国立国会図書館近代デジタルライブラリー <http://kindai.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/1091582/1>)
- 3) 田中武夫：建造物保守基準ことばはじめ(上)，鉄道土木，Vol.17, No.2, pp.45-49, 1975
- 4) 日本鉄道施設協会：土木建造物取替の考え方，1974
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説，丸善，2007
- 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
- 7) 例えば，大谷順：地盤材料を対象としたX線CTの利用の高度化，地盤工学会誌，Vol.57, No.11, pp.16-19, 2009
- 8) 布川修，他：地形を考慮した斜面表層部の地下水変動予測モデル，鉄道総研報告，Vol.22, No.1, pp.23-28, 2008
- 9) 布川修，他：鉄道の降雨時運転規制を考慮した斜面崩壊の発生頻度期待値算出方法，土木学会論文集C，Vol.66, pp.78-88, 2010