

防災技術に関する研究開発の現状と展望

木谷 日出男*

Recent State of Research and Development Concerning Disaster Prevention Technology

Hideo KIYA

A natural condition of Japan is characterized by varied geographical features, active geological features, and a changeable meteorology. Some natural external forces generated in these peculiar environmental conditions cause natural disasters in various forms. Therefore, it is necessary to forecast the expected change of conditions of each place caused by these external forces, and take appropriate measures against them, for safe operation of the railway. In addition, it is requested that the overall system for the prevention of disasters should be established by integrating the technology of each external force.

This paper explains the recent state and the issues of the research and development in a disaster prevention technological field.

キーワード：防災技術，自然災害，自然外力，降雨災害，地震災害，強風災害，雪氷害，風化

1. はじめに

日本は周囲を海で囲まれた南北に長い島国であり、梅雨や台風に伴う降雨、冬季間の豪雪、さらには季節性を持った強風の発生など、地域ごとに異なる変化に富んだ気象条件を持つ。また、急峻な地形や急勾配河川等の地形条件により、浸食・運搬・堆積などが活発であり、この一連の地形変化の過程において様々な斜面災害を伴う。さらに、地震の多発域であることや火山活動の活発性から世界有数の活動性の高い地質環境にあることが知られているなど、多様な自然環境条件で特徴づけられる。

これらの自然条件は、様々な外力として自然災害の直接的な原因や誘因となって多様な形態の被害をもたらす。このため、防災技術には種々の外力に対する個別の対策を図る必要があるとともに、これらの技術を総合的に活用した防災体制の構築が求められる。

本解説では、鉄道総研における防災技術に関する最近の研究開発の概要を、主に対象とする外力ごとに整理して紹介する。

2. 自然外力と災害発生箇所

自然外力とは、我々の生活圏である地球表層あるいは大気中での地象的、気象的な自然現象の結果として生じる作用力である。これらの自然現象は人間の活動に関わりを持たないところで生じれば、直接災害とはならない。同様に、鉄道防災で対象とするのは、直接的、間接的にその外力による現象が鉄道運行に支障を及ぼす、あ

表1 各種条件の組み合わせと防災技術の対応

主な自然外力 発生箇所の条件		降雨・ 地下水	地震	風	雪	風化 等
		自然斜面	△	○	△	○
斜面	切取斜面	◎	△		○	○
	盛土	◎	△	○		
河川	橋りょう	◎	△	○		
	溪流斜面	◎				△
その他構造物		△	◎	○	○	○

◎：対応の必要性大，○：対応の必要性有，△：対応の必要性やや有

るいはその可能性がある場合であり、それぞれの外力ごとに発生する場の条件との組み合わせで、災害としての形態や規模などが異なることとなる。

表1に自然外力と災害発生箇所（主な地形や鉄道施設等の条件）の組み合わせと、それぞれについての防災技術分野における対応の必要性の程度を整理した結果を示す。ここで、防災技術の分野で対象とする主な外力としては、降雨（地下水）、地震、風、雪氷のほか、自然条件下で進行する風化（暴露による経年劣化を含む）を、また、発生箇所の条件については、従来から防災技術で対応してきた地形条件や主な鉄道施設を挙げた。なお、表中の未記入の組み合わせ条件においても災害発生の確率は0ではないが、現状で対応すべき具体的な技術課題が明確でないと判断したものである。

表に示すように、防災技術は多様な外力と場の条件の組み合わせに対し、個別の課題として適切な対策を図ることが必要となる。同時に、鉄道システムの安全・安定輸送に資するためには、それぞれの課題に対する研究開発成果に基づいた総合的な防災体制の構築が求められる点に防災技術分野の一つの特徴がある。

* 防災技術研究部 部長

特集：防災技術

3. 自然外力別の研究開発の現状

以下に、最近の防災技術に対する取組みを、主な外力別の災害ごとに解説する。

3.1 降雨（地下水）災害への対応

3.1.1 降雨による斜面の崩壊危険度評価手法

降雨や地下水を原因とする斜面災害は、鉄道で最も発生頻度の高い災害の一つであり、従来から切取りのり面や盛土等における崩壊発生メカニズムの解明や危険度評価方法の開発を進めてきた。これらの成果を踏まえ、より合理的な運転規制の検証および設定方法の開発を目的として、地形を考慮した斜面表層部の地下水変動モデルの研究開発を行った（詳細は文献1）参照）。

3.1.2 斜面災害に関するリスク評価方法

前項に述べたように、降雨による斜面災害については、個別斜面の危険度評価方法の精度向上を重要な目標として研究開発を進めてきた。一方、鉄道事業者が必要な対策を講じる場合には、線区の輸送密度等の特性も重要な判断資料となる。しかしながら、実際には線区の特性和降雨に対する斜面の耐久性の両面を考慮して経験的に崩壊防止工などのハード対策や運転規制の閾値が決定されているのが実情である。

そこで、実際に運転支障や被害発生に至る災害リスクを定量的に分析、評価したうえで、実際の防災計画のための判断資料とすることを目的とした方法の基礎的な検討を進めている²⁾。例えば、図1に示すような特性の異なる複数の線区を対象として防災計画を立てるためには、斜面強度と運転規制値の両面を考慮した定量的な指標による防災投資が必要となる。具体的には、斜面ごとの限界雨量による評価手法で斜面崩壊危険度³⁾を求めた上で、その斜面の過去の降雨履歴から崩壊危険度と実際の運転規制値を踏まえて設定した斜面崩壊による被害の発生確率を算出し、これと被害が発生したときの損失額からその斜面の持つ年間損失額（リスク）を求めようとするものである（図2）。現在は、この方法の検証を進めており、さらに降雨による土砂斜面の崩壊のみならず、

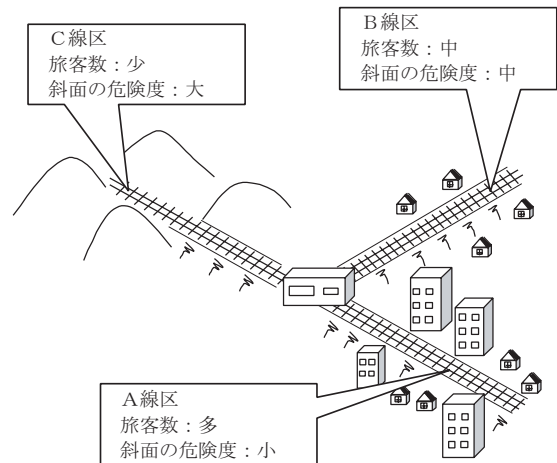


図1 斜面危険度と線区の特性的概念図

落石などの災害を含めた斜面災害全体のリスク評価方法に発展させていく予定である。

3.1.3 河川増水時の橋脚安定度評価方法

降雨による河川防災技術として、個別橋梁の洗掘発生に関する不安定橋梁の評価方法、抽出方法および河川増水時の橋脚モニタリングシステムの開発を進めている。抽出方法については、事例調査の分析や全般検査のための調査表を提案し、さらに詳細な検査段階で活用できる方法の開発に取り組んでいる。一方、河川増水時における橋脚基礎の安定・不安定の判断方法として、増水時における橋脚の振動に着目した安定度の評価手法を開発した⁴⁾。さらに、モニタリング技術としては、前述の橋脚基礎の健全性評価技術の精度向上と河川橋脚の保守管理の効率化を目指したシステムの試作や現地試験による検討を進めている。

3.2 地震災害への対応

3.2.1 早期地震検知・警報システムの実用化

気象庁との共同開発により、早期地震検知手法と最近の地震データによる被害推定手法を採用した新たな早期警報用地震計を開発した。このシステムについては、既設新幹線でシステムの実用化に供している⁵⁾、⁶⁾。現在、さらなるP波検知手法の精度向上や警報判断の迅速化・

初期イベント	被害発生確率頻度 P_i (回/年)				被害発生時の損失(円)							各事象のリスク	リスク
	崩壊発生確率頻度 P_a	運転時間帯確率 P_b	車両被害発生確率 P_c	被害発生確率頻度	人的被害額	車両被害額	応急費用	復旧費用	代行輸送費	営業損失	損失合計		
降雨	崩壊なし・規制値未満			P_1	-	-	-	-	-	-	C_1	$P_1 \times C_1$	$R = \sum (P_i \times C_i)$
	崩壊なし・規制値以上	運転時間帯外		P_2	-	-	-	-	-	-	C_2	$P_2 \times C_2$	
		運転時間帯内		P_3	-	-	-	-	-	○	C_3	$P_3 \times C_3$	
	崩壊あり・規制値未満	運転時間帯外		P_4	-	-	○	○	△	○	C_4	$P_4 \times C_4$	
		運転時間帯内	被害なし	P_5	-	-	○	○	△	○	C_5	$P_5 \times C_5$	
		被害有り	P_6	○	○	○	○	△	○	C_6	$P_6 \times C_6$		
	崩壊あり・規制値以上	運転時間帯外		P_7	-	-	○	○	△	○	C_7	$P_7 \times C_7$	
		運転時間帯内		P_8	-	-	○	○	△	○	C_8	$P_8 \times C_8$	

※被害発生時の損失を設定する必要がある場合に○印を付けている

図2 被害発生確率とリスク

的確化のための研究開発を進めている。

3.2.2 公的地震情報の活用方法

気象庁が本格的に配信を開始した緊急地震速報を活用した地震警報システムを開発し、JR在来線等で実用に供した⁷⁾。そのほか、衛星放送での受信とGPSにより移動体(走行列車)自らが地震の影響を判断するシステムや、気象庁等からの実測地震動の詳細情報の活用方法について研究開発を進めている。今後、面的推計震度情報等を活用した地震後の安全確認や運転再開支援システムの開発、実用化を進める。

3.2.3 地震災害のリスク評価手法

鉄道では地震災害に対し、事前に施設の耐震性を向上させて被害発生を防止するとともに、あわせて地震発生時には迅速かつ適切に列車運行を制御し、被害の軽減を図ることが重要となる。こうした地震災害に対するリスクの分析や評価方法の基礎的検討として、鉄道沿線の地震危険度、施設の被害発生確率および被災による損失(リスク)等を定量的に評価する手法を検討している⁸⁾。

また、効果的な防災投資や運転規制のあり方を検討する支援技術の開発として、現在までに地震ハザード評価に利用可能な各種面的情報のデータベース化、鉄道沿線の危険度の評価方法、等の検討を行っている。その1例として、早期地震警報による列車制御の余裕時間増大が地震時運転規制の安全性向上に及ぼす効果を試算した結果を図3に示す。

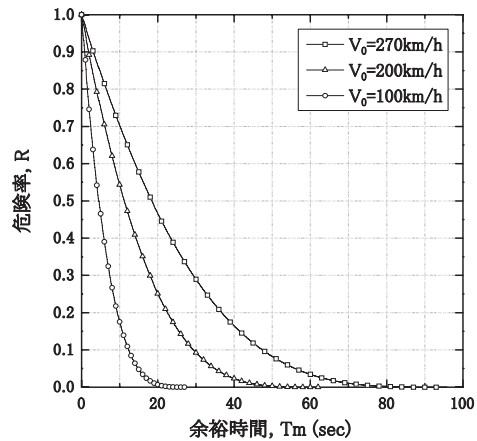


図3 新幹線の早期地震警報による余裕時間増に伴う走行危険率低下の試算例

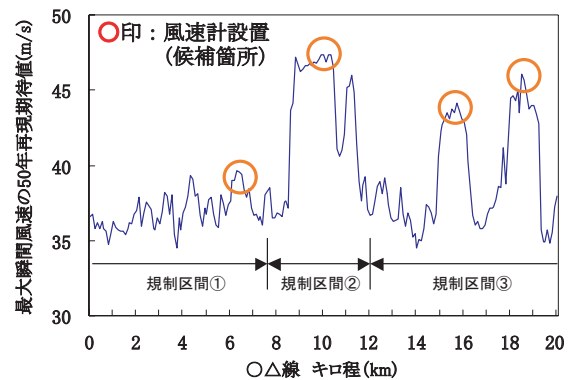


図4 強風箇所の実現と活用例

3.2.4 石積壁の耐震補強工法

地震対策については構造物の耐震・免震技術や車両、軌道側での技術開発が現在進められており、今後とも推進する必要がある。このうち、最近、防災技術研究部で取り組んだ成果として、石積壁の耐震補強工法の開発がある(詳細は文献9)参照)。

3.3 強風災害への対応

3.3.1 自然風中における車両に働く空気力評価法

車両の転覆限界風速や運転規制風速に関する検討を進めている。このうち、自然風中での車両に働く空気力を精度良く評価することを目的のひとつとして、実物大の車両模型を用いた研究を進めてきた¹⁰⁾。現在、風洞試験による検証や計測データの解析等、変動を含む自然風中での風速と空気力の関係を調べている。

3.3.2 強風特性による運転規制方法

長期間にわたる自然風の観測データを解析し、その特性を抽出した。特に、小さな風速値から短時間に大きな風速値になるときの風速増加特性に着目して、この特性を運転規制に反映する場合の考え方を整理した¹¹⁾。また、強風に対する列車の安全性評価、周辺地形が変化する長大区間での風向別運転規制方法の適用性、運転規制区間や風速計配置の最適化、等について研究を進めている。

3.3.3 強風箇所の抽出方法

鉄道沿線の風速再現期待値を求める手法の研究開発を進めている。その手順は、①過去の強風事例を数値シミュレーションモデルで再現し、②算出結果の風速データから対象地域内の平均風速の再現期待値を3kmメッシュで求めたうえで、③気流の数値シミュレーションを行い、鉄道沿線を対象とした200mメッシュの風速分布を作成する。また、④数値計算で得た風速の分布と地形要素から、風向別の突風率(最大瞬間風速と平均風速の比)を求め、沿線の最大瞬間風速の再現期待値を算出する。

図4に本手法による架空の線区における最大瞬間風速の算出結果例を示す。図より、この沿線には強風箇所(○で示す箇所)が4箇所あり、これらの箇所を風速計設置位置とすることにより、強風の見逃しを防止するとともに、適切な規制線区の設定が可能となる等、運転規制用風速計の設置箇所や運転規制区間の検討の際の客観的な根拠となることが期待される。

3.4 雪氷害への対応

3.4.1 雪崩警備方法の検討

鉄道における雪崩危険斜面の抽出方法や警備時期の決定について客観的な判定基準を提案することを目的として研究開発している。判定基準の検討として、特定線区にお

特集：防災技術

ける多数斜面の傾斜や植生などの空中写真判読を行い、雪崩の発生／非発生を目的変数とする統計的手法による発生危険度算定式等を求めた。現在は、一般的な気象情報を利用した雪崩警備時期の設定方法について検討している。

3.4.2 濡れ雪の雪質と舞い上がり現象の解明

濡れ雪区間における運転規制の適正化のため、濡れ雪の物理的性状と列車走行に伴う濡れ雪の舞い上がり現象の発生との関係を明らかにする研究を進めている（詳細は文献11）参照）。

3.4.3 台車着氷雪量の低減方法

平滑化が困難な台車およびその周辺部に対する着氷雪量の低減を目指して、空気の流れを考慮に入れた、台車近傍の局所的な形状変更の研究を進めている¹²⁾。

数値計算および風洞実験の結果から、空気の流れを台車の外側に向けることで台車周辺部の流速低減に有効であるとの見通しを得た。また、実物車両を用いた確認試験により、考案した対策工の台車側面での流速低減効果が確認された。現在は、対策方法による着氷雪量の低減効果について定量的な評価を行うとともに、実用的な対策工の研究開発を進めている。

3.4.4 架線着霜現象の解明と対策方法

架線着霜による被害軽減に向けた対策方法の開発を目的として、そのための基礎的な検討である架線の着霜発生条件や架線に付着した霜の物理的性状の解明を行い、発生予測手法の提案等を行った（詳細は文献13）参照）。

3.5 風化（経年劣化）に伴う災害等への対応

3.5.1 岩盤斜面の崩壊危険度評価

岩盤斜面で発生する落石の危険度評価法の開発を目的に、危険箇所を数値標高データや衛星画像を用いて抽出する研究開発を進めてきた。現在、不安定な状態で斜面内に見られる岩盤中の割れ目等の不連続面の引張強度について、その測定方法、風化状況や弾性波速度との関係等を明らかにした。さらに、風化の進行と岩石の化学組成の変化の対応を検討したうえで、これらの成果に基づく危険度評価法の開発を進めている¹⁴⁾。

3.5.2 切土のり面工の健全度評価方法

切土のり面に古い時代に施工された張コンクリートや吹付工は、のり面工自体の老朽化や背面地山の風化の進行による健全性の低下が見られるものがある。この切土のり面工の健全性を評価する手法の研究開発を進めている。現在は変状実態の調査等を実施しており、さらにモデル実験と現場状況の比較等により調査、評価方法を整理して、健全度評価マニュアルを提示する予定である。

4. おわりに

以上、防災技術の研究開発の現状を紹介した。防災技

術の展開については、多岐にわたる技術課題の解決とともに、課題ごとの技術レベルの差を埋める努力も必要である。このため、現状の技術に基づく課題の解決と、総合的な防災体制に至る段階的な検討を図り、鉄道の安全・安定輸送に資する研究開発を推進する計画である。

文献

- 1) 布川修, 杉山友康, 太田直之: 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
- 2) 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年度秋季日本信頼性学会シンポジウム発表論文集, 2006
- 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
- 4) 渡邊諭, 佐溝昌彦, 淵脇晃, 杉山友康: 微動から得られる固有振動数を用いた増水時の橋脚健全度評価, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.31-36, 2007
- 5) 岩橋寛臣, 岩田直泰, 佐藤新二, 芦谷公稔: 早期地震警報システムの実用化, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.23-28, 2004
- 6) 佐藤新二: 地震防災システムにおける新たな情報通信方法の提案, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.43-48, 2007
- 7) 芦谷公稔, 大竹和生, 佐藤新二, 中村洋光: 緊急地震速報を活用した地震警報システムの実用化, 鉄道総研報告, Vol.19, No.10, pp.5-10, 2005
- 8) 中村洋光, 岩田直泰, 芦谷公稔: 地震時運転規制に用いる指標と鉄道被害の統計的な関係, 鉄道総研報告, Vol.19, No.10, pp.11-16, 2005
- 9) 太田直之, 杉山友康, 布川修: 石積壁の地震時安定度評価と耐震補強工の設計, Vol.22, No.1, pp.29-34, 2008
- 10) 福原隆彰, 島村泰介, 今井俊昭: 風速の時間変動を考慮した強風時運転規制の評価法, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.13-18, 2007
- 11) 飯倉茂弘, 鎌田慈, 宍戸真也, 遠藤徹, 斉藤実俊, 井門敦志, 梶山博司, 藤井俊茂: 散水時の積雪密度及び含水率と舞い上がり発生速度の推定, 鉄道総研報告, Vol.22, No.1, pp.11-16, 2008
- 12) 飯倉茂弘, 河島克久, 遠藤徹, 鎌田慈, 宍戸真也, 藤井俊茂: 台車側面の着氷雪量計測システムの開発, 鉄道総研報告 Vol.21, No.1, pp.19-24, 2007
- 13) 鎌田慈, 宍戸真也, 遠藤徹, 飯倉茂弘: 架線着霜現象の解明と発生予測手法の検討, 鉄道総研報告, Vol.22, No.1, pp.5-10, 2008
- 14) 川越健, 浦越拓野, 太田岳洋, 榎本秀明: 岩盤斜面の安定性に係わる不連続面の引張強度に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.49-54, 2007