

防災技術に関する最近の研究開発と今後の課題

太田 岳洋*

Recent Research on and Prospects of the Disaster Prevention Technology

Takehiro OHTA

Various natural disasters have occurred in Japan due to geological and meteorological conditions, and we have suffered a lot of human and economical damage. The disaster prevention technology in the railway has been developed through many experiences and has contributed to the decrease of damage. After the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, however, the paradigm of disaster prevention has been shifted. The main policy of the disaster prevention of the Japanese Government has come to focus on the mitigation of and the resilience against large-scale disasters caused by larger natural force. I will introduce the results of our recent research on the disaster prevention technology, and will describe our research plan of the mitigation of and the resilience against the large-scale disasters.

キーワード：防災技術，減災，レジリエンス，降雨災害，強風災害，地震災害

1. はじめに

我が国は地質学的にはプレート境界に位置し、世界でも有数の変動帯にある。そのため、非常に急峻な地形を呈し、かつ地震や火山活動が活発な地域であり、世界的に見ても新しく、脆弱な地質から構成されているといえる。一方、我が国の大部分は温帯モンスーン気候に属し、夏季には台風が襲われ、冬季には北西の季節風と豪雪に見舞われる。これらの地象気象の特徴を有する我が国では、これまでも暴風、豪雪、豪雨や土砂崩壊、土石流、地震、津波、噴火などのあらゆる自然災害が発生し、人的、経済的被害を被ってきた。ここ数年の間にも2011年の東北地方太平洋沖地震をはじめ、2011年台風12号による紀伊半島の豪雨、2012年7月の九州北部豪雨、2013年10月台風26号による伊豆大島での豪雨、2014年8月の広島市の豪雨など数十人の死者・行方不明者が生じるような大規模土砂災害、豪雪地域ではない関東甲信地方を襲った2014年2月の豪雪、2011年の霧島山や2014年9月の御嶽山などの火山噴火災害など、強大な外力による自然災害が発生している。

このような国土においても、鉄道は安全かつ安定した輸送の提供が求められるため、被災の経験に基づき様々な防災対策の努力を続け、近年では鉄道における災害発生件数は減少してきている¹⁾。鉄道における防災対策には、災害発生の可能性のある箇所を抽出して防災設備等を設置するハード的な対策と、災害発生の原因となる現象を観測して発生の危険性が高まった時に列車を徐行させたり運行を中止したりする運転規制といったソフト的な対策がある。鉄道総研では、降雨、強風、降雪、地震等の外力や風化・劣化などの素因といった災害の主な原

* 防災技術研究部 部長

因に応じたハード対策やソフト対策の技術開発を行ってきた。本稿ではこれらの技術開発成果の一部を紹介する。

また、近年の外力の強大化にともない減災の考え方を徹底することが、国の防災施策の中心となった²⁾。そこで、鉄道総研が今後取り組むことを予定している減災技術に関する技術開発の概要について述べる。

2. 鉄道総研における最近の研究開発

鉄道総研では、降雨、強風、降雪、地震などの様々な外力に対しては、その検知や外力の大きさに対する危険度評価と耐力評価、予防・対策手法に関する研究開発を進めている。また風化・劣化など素因が主な原因となる災害については、危険箇所の把握手法や危険度評価、対策方法についての研究開発を行っている。本号ではこれらの成果の一部を掲載している。ここでは、本号に掲載されていないその他の成果について紹介する。

2.1 中小河川の氾濫評価手法

近年クローズアップされているゲリラ豪雨を対象とした中小河川氾濫評価手法に関する研究を進めている。

評価手法の作成にあたっては、斜面に降った降雨が河川等へ集まる量を精度よく算定することが重要となる。河川等へ流れ込む表面水の量は降雨量から地盤内への浸透量を差し引いた水の量となるが、短時間に非常に強い雨が降った場合の地盤内への浸透性状については明らかにされていない。そこで模型地盤を用いた降雨浸透実験を行い、短時間豪雨時の表面水の流量を求めた。実験の結果、短時間豪雨の場合には少雨の場合に比べて地盤内への浸透量が減少し、表面流出量が増加することが分かった。今後、実験結果を解析して、評価手法に反映させる予定である。

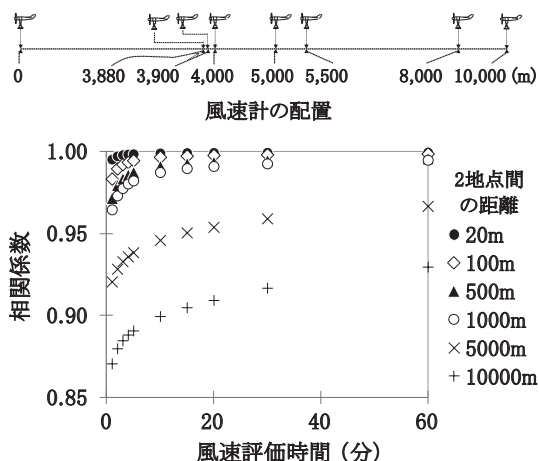


図1 風速計の配置および風速の評価時間と相関係数との関係（平均風速の例）

2.2 風観測値の時空間代表性の評価

風速計で得られる風観測値の時空間代表性の定量的な評価と風向風速の時空間相関モデルの作成を目的とした研究を進めている。強風時の運転規制区間長（概ね数km～10km程度）の空間スケールに8基の風速計を設置して風観測を行い、得られた風観測データを用いて2地点間の距離と風速の評価時間をパラメータとして風速の相関分析を行った。その結果、同時刻における2地点の風速の相関係数は風速の評価時間が長いほど、また2地点間の距離が短いほど大きく（図1）、2地点の風速相関に卓越風向の風上側の環境が影響を及ぼすことを確認した。今後、風観測を行った比較的平坦な地形を再現した気流解析結果を用いて、風観測値の時空間代表性および作成する2地点の風向風速の時空間相関モデルの妥当性を評価し、より複雑な地形を考慮できるモデルへと発展させる予定である。

2.3 降雪分布推定手法の構築

鉄道沿線の雪害リスク評価時の外力を推定するために、降雪量の面的分布推定手法の構築に取り組んでいる。本手法では、降雪現象と地上に堆積した雪が風によって再配分される現象とに分けてモデルを構築した。降雪現象については気象モデルWRF（Weather Research and Forecasting model）³⁾を用い、降雪に影響する計算領域や地形データなどの計算条件と放射や雲物理など降雪に影響する物理過程を複数設定して再現性の優劣を評価した。一方、雪の再配分については、気温と風速から地上の雪粒子のフラックスを計算するモデル⁴⁾を参考に、前述の気象モデルによる地上気象状況の推定値、またはレーダーアメダス解析値やアメダス観測値の実況値と気流モデルとを組み合わせた地上気象状況の推定値を用いて堆積した雪の再配分量を推定している。

本手法を用いて北海道の石狩平野での降雪現象の再現

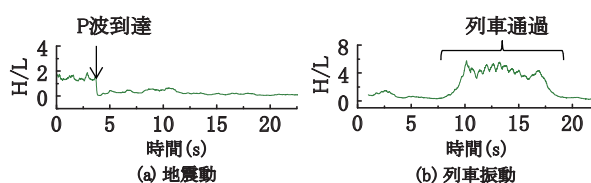


図2 地震動と列車振動の高周波振幅/低周波振幅(H/L)
ここでは20Hz以上を高周波、5Hz以下を低周波と定義

計算結果と実測値とを比較した結果、降雪分布を概ね再現できることが確認できた。今後、平坦地だけでなく起伏の激しい山間地の降雪分布についても再現できるようにモデルを改良する予定である。

2.4 早期地震防災システムの性能向上

新幹線等で活用されている現行の早期地震防災システム⁵⁾は、地震動の規定値超過に基づくS波警報、地震動の初動による地震諸元の推定に基づき警報を出力するP波警報の機能を持つ。このうちP波警報に関わる性能を向上させるための研究開発を行っている。P波警報の性能を効果的に向上させるためには、①確実にP波検知を行い、②早く精度良く地震諸元を推定することが重要である。以下に具体的な取り組みを示す。

確実なP波検知を目指して、地震と列車振動の識別手法の高度化を図った。一般に鉄道の警報用地震計は線路付近に設置されることが多く、列車振動の影響を強く受ける。このような環境下で列車振動による誤警報を防ぐためには、地震動と列車振動の精度の高い識別が求められる。ここでは地震波の各成分間の振幅比を用いた従来の識別手法に加えて、周波数特性の違いを用いた識別手法を提案した（図2）⁶⁾。列車振動は地震動に比べ高周波成分が卓越する性質があり、適切な周波数帯を定義した場合、低周波振幅に対する高周波振幅の比が相対的に大きな値をとる傾向を示す。この性質を利用した識別手法と従来の手法を組み合わせることにより、列車振動の識別率が10%向上することを確認した。今後は実用化を念頭に、上述の手法を組み込んだプロトタイプ地震計を作成し、実地試験を行う計画である。

2.5 石積み壁の健全度評価と補強対策

石積み擁壁はいわゆる旧式土木構造物であるが、その安定性を簡便かつ適切に評価する手法は確立されていなかった。そこで、全般検査での使用を念頭に置いた石積み壁の簡便な健全度評価方法を検討した⁷⁾。

図3のような実物大の模型石積み壁を作成して載荷実験を行い、この実験から得られた石積み壁に作用する土圧と変形量との関係を基にして「はらみ出し指数」による健全度評価指標を作成した。ここでははらみ出し指数とは、石積み壁に生じた最大水平変位量を石積み壁の高さで除した値であり、城郭の石垣の安定性評価指標として



図3 模型石積み壁を用いた载荷実験

提案されている。城郭の石垣と鉄道沿線の石積み壁とでは構造が異なるが、実験結果を基にその適用性を検討し、はらみ出し指数が4より大きくなると安定性は著しく低下することを明らかにした。また、はらみ出し指数が4以下の場合には、「軽微な変状」と捉える事ができ、その健全度に応じた軽微な対策が求められる。このような場合に適用する対策として、鋼材とロックボルトによる補強対策を考案し、その効果を模型実験により検証した。

2.6 打音測定による岩塊の安定性評価方法

落石の発生には多くの要因が関与するため、発生箇所や発生時期を予測することが難しい災害の一つである。鉄道総研ではこれまでに、落石災害の素因の一つである岩盤斜面中の岩塊の安定性を評価するために、打音を用いた評価方法の実用化に取り組んできた。実験と現地計測結果⁸⁾を踏まえ、モード解析の結果から打音測定で得られる音圧波形から岩塊の安定性にかかわる岩塊と岩盤との付着状況の情報が得られることを確認した⁹⁾。また、種々の供試体実験と現場実験から0～0.5kHzの範囲に含まれるピークのフーリエ振幅を比較することで浮き石の安定性を評価できること明らかにした¹⁰⁾。これらの結果を踏まえて、図4に示した打音測定法による岩盤斜面中の岩塊の安定性評価方法¹⁰⁾を提案している。

3. 今後取り組む減災に関する研究開発

前述したように2011年東北地方太平洋沖地震以降、強大な外力により発生する災害に対して被害をゼロにすることは困難であるため、いかに被災を小さくするかという観点から減災の考え方が国の防災施策の中心となった²⁾。そこで国が設置した総合科学技術・イノベーション会議は研究開発の予算を重点的に配布する戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の一つの課題として「レジリエントな防災・減災機能の強化」を設定した¹¹⁾。

このプログラムでは、自然災害の激化とそれを受ける

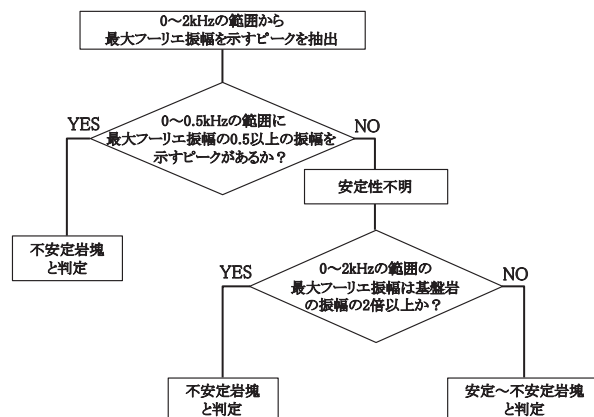


図4 打音測定法による岩塊安定性評価フロー

社会の脆弱化、東日本大震災を経て芽生えたレジリエンス(被害を最小限に留め、被害からいち早く立ち直り元の生活に戻らせる)の考え方を踏まえ、我が国が自然災害を克服するためには、最新科学技術の最大限活用、災害関連情報の官民あがての共有、国民個々の防災リテラシー(災害対応力)の向上、の必要があるとし、特に最新科学技術の活用による災害情報の共有を基軸に「早い察知(予測)」、「予防力限界の事前把握(予防)」、「先手必勝(対応)」を実現するとしている¹¹⁾(図5)。

鉄道総研では、今年度からこのSIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」に参画し、局部的短時間強雨等に対する鉄道のレジリエントな減災技術を開発することを目的として、線形構造物からなる鉄道システムに適した局地的な気象現象の検知、局地的な気象現象による自然災害のハザード評価および局地的短時間強雨時の最適な運転規制と旅客の避難誘導に向けた技術開発を行う。

これまで鉄道では、降雨や強風など気象現象による災害については、事前のハード対策とともに事業者が沿線に展開する雨量計や風速計などによる観測に基づいた運転規制により安全を担保してきた。しかしながら、いわゆる「ゲリラ豪雨」等の局地的かつ極端な気象現象は、沿線の観測システムだけでは検知できない場合がある。また、沿線から離れた箇所での局地的強雨により発生した土石流等により鉄道が被災する事例も生じている。そ

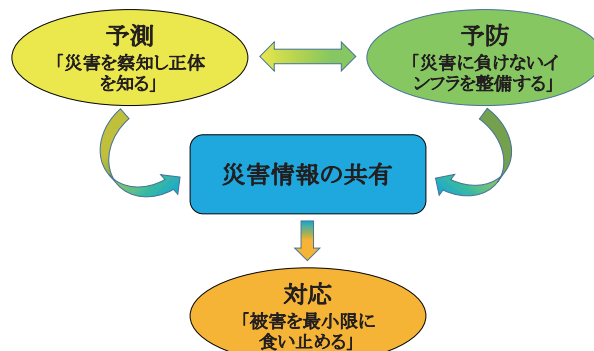


図5 SIP課題における自然災害克服の概念

特集：防災技術

ここで、局地的な気象現象による災害を防止するためには面的、かつ高密度に気象状況を把握する必要がある。これには、例えば気象庁が配信する高解像度降水ナウキャスト¹²⁾等の気象レーダデータの活用等が有効と考えられる。このようなレーダ観測情報の活用は一部の鉄道事業者でも検討が進められている¹³⁾。現状のレーダ観測は主に上空を対象としているため、観測値と地上部の降雨状況が異なる場合がある。これに対して、局地気象シミュレーションを併用することにより地上の降水量をより精度良く求めることができると考えられる。

また、降雨災害に対する運転規制は、これまで観測された雨量値に基づいて行なわれている。雨量の規制値は、これまでの災害発生時の雨量の実績や災害に至らなかった大雨の記録等に基づいて設定されているので、雨量計が受け持つ区間の降雨災害の発生リスクを包含していると考えられる。しかし、過去の災害発生箇所と雨量計の設置位置が一致していることは稀であるため、規制値は災害発生に至る絶対的な値ではなく、相対的に可能性が高くなる雨量を示していることになる。気象レーダでは面的に降雨量を観測することができるので、個別斜面での降雨量に対する災害発生リスクが明らかになれば、レーダ観測値を用いることにより個別の災害発生危険度による評価が期待できる。そこで、沿線での浸水や土砂災害の発生を降雨量に応じた危険度で評価し、沿線の影響範囲とハード対策の適用限界を考慮した逐次更新型のハザードマップを作成する手法を検討する。さらに、このハザードマップに基づいた運転規制判断、旅客の最適避難経路決定を支援するアルゴリズムを構築する。これらをシステム化することにより、顕著気象の検知から災害発生の評価・予測、列車の運転制御と旅客の避難誘導までを通して行える手法として提案することを目標として研究開発を進める予定である(図6)。

4. おわりに

今後は鉄道分野においても、強大な外力に対しては減災あるいはレジリエンスの考え方を進める必要があると思われる。鉄道総研でも前述のSIP課題への参画により、減災技術の高度化およびレジリエンスの考え方を見据えた研究開発を推進する予定である。

文献

1) 太田直之, 杉山友康: 災害の推移と今後の防災, 日本鉄道施設協会誌, Vol.47, No.6, pp.17-19, 2009
 2) 内閣府: 平成25年度版防災白書, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/>, 2013
 3) W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M.

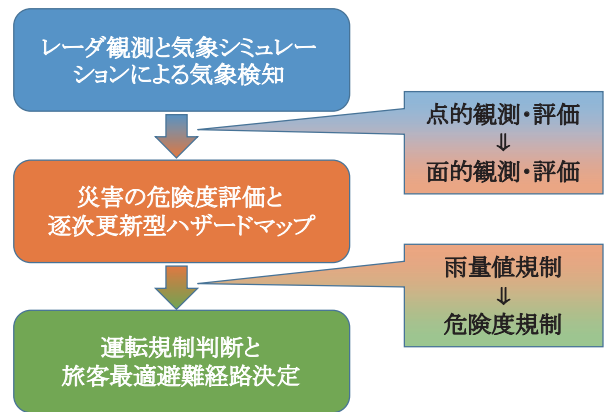


図6 局地的短時間強雨災害への今後の取り組み

Barker, M. G. Duda, Xiang-Yu Huang, Wei Wang, J. G. Powers : A Description of the Advanced Research WRF Version 3 , Near Technical Note NCAR/TN475 +STR, 125pp, June 2008.

4) 前野紀一, 福田正巳: 基礎雪氷学講座第三巻雪崩と吹雪, 古今書院, pp.121-181, 2000
 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.18, No.9, pp.23-28, 2004
 6) 岩田直泰, 山本俊六, 是永将宏: 早期地震警報に向けた地震動とノイズの識別手法の開発, 日本地震工学シンポジウム(投稿中)
 7) 高柳剛・西田 幹嗣・浅野 嘉文・太田 直之: はらみ出し指数に着目した石積み擁壁の安定度評価, 第49回地盤工学研究発表会, 2014
 8) 川越健・石原朋和・浦越拓野・太田岳洋: 岩塊斜面における岩塊の安定性に関する評価方法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.7, pp.31-36, 2011
 9) 蒲原章裕・川越健・太田岳洋・石原朋和・浦越拓野・横山秀史: 打音測定法の岩塊の安定性評価への適用性に関する解析的検討, 鉄道総研報告, Vol.27, No.11, pp.47-52, 2013
 10) 石原朋和・太田岳洋・蒲原章裕・横山秀史・上半文昭・斎藤秀樹: 打音測定による岩塊の定量的な安定性評価, 応用地質, Vol.55, No.1, pp.2-16, 2014
 11) 内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当): SIP(戦略的イノベーション創造プログラム) レジリエントな防災・減災機能の強化(リアルタイムな災害情報の共有と利活用) 研究開発計画, http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/8_bousai.pdf, 2014
 12) 気象庁: 高解像度降水ナウキャスト, http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kurashi/highres_nowcast.html, 2014
 13) 例えば, 外狩麻子: レーダー雨量の防災分野への活用に関する一考察, 第10回地盤工学学会関東支部発表会 Geo Kanto 2013, 2013