

氏名 ながお かずゆき 長尾 和之
 授与学位 博士(工学)
 学位授与年月日 令和3年3月25日
 学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項
 研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科(博士課程) 土木工学専攻
 学位論文題目 豪雨による被災データに基づく東北地方の高速道路のり面のアセットマネジメントに関する研究
 指導教員 東北大学教授 風間 基樹
 論文審査委員 主査 東北大学教授 風間 基樹 東北大学教授 久田 真
 東北大学教授 奥村 誠 東北大学准教授 河井 正

論文内容要旨

近年, 異常降雨や大規模地震に起因して高速道路の切土および盛土のり面が被災し, 物流や日常生活に影響を与える事象が顕在化している. また, 高速道路の延長の約4割が供用後30年以上を経過し, 経年劣化のリスクの高まりが懸念される. 東北地方においても, 1973年の東北自動車道(白河IC~郡山IC)の46.7kmの開通以降2020年で47年が経過するとともに供用後30年以上の延長が1,396kmのうち657kmで47%に達している.

このような背景を踏まえ, 東北地方の1993年から2017年までの25年間に降雨を誘因として発生した切土および盛土のり面の被災事例187件(切土のり面92件, 盛土のり面95件)から, 崩壊に影響を及ぼす「素因」を点数化し「素因」の潜在的な危険性を評価した. はじめに, のり面が有する自然的な崩壊素因として, 切土のり面では, 地形, 地山の土質・地質など, 盛土のり面では, 盛土個所の地形, 盛土材料などの評価を試みた. 表-1

表-1 切土のり面の崩壊性の評価に用いた配点表

項目	素因	配点	機械学習に用いた評点
地形	崖錐地形	35	0.7
	集水型傾斜	50	1
	尾根地形(頭部開発行為あり)	35	0.7
	尾根地形(頭部開発行為なし)	5	0.1
切土のり面地山の土質・地質	土砂	35	0.875
	ローム	25	0.625
	スレーキング性の岩	40	1
	花崗岩(まさ土含む)	40	1
	非スレーキング性の岩	10	0.25
崩壊性の構造	断層または褶曲軸あり	10	1
	断層または褶曲軸なし	0	0

が, 切土のり面の崩壊の潜在的な危険性の評価に用いた自然的な素因の配点である. 配点が高いほど, 降雨と崩壊の関係が大きいと評価した. 地形では, 表面水および地下水の集めやすさの観点から, 集水型傾斜, 崖錐地形および尾根地形のうち切土頭部の開発行為のある場合の配点を高くした. 切土のり面地山の土質・地質では, 長期的に脆弱化しやすいスレーキング性の岩および降雨による被災割合が高かった花崗岩の場合の配点を高くした. また, 崩壊性の構造では, 断層または褶曲軸が存在する場合, その付近では弱層が発達している可能性があることから, 配点を行った. これに加え, 土工工事で形成された構造上の崩壊素因として, のり高, のり面の勾配およびのり面対策工を評価し

た. この評価点を用い, 東北地方の降雨で崩壊していない切土のり面 (長大のり面は延長 100 m ごとに 1 のり面として区切り算出) および被災した切土のり面 (92 箇所) の素因合計評価点とのり面個所数との関係を, 図-1 の切土のり面の潜在危険性の評価図に示した. 図-1(b)から, 切土のり面の被災箇所は, 素因合計評価点が 60 点以上となっており, 今回の項目で評価すると, 東北地方の高速道路のり面では, 被災を起しやすいのり面の目安は 60 点となる. この結果から, 図-1(a)において, 降雨により崩壊していない切土のり面 6812 箇所のうち, 60 点以上に該当する未崩壊のり面は, 3,483 箇所 (約 51.1%) 存在することが分かる. また, 表-2 が, 素因合計評価点毎の切土のり面の被災箇所数の全のり面個所数に対する被災割合であり, 切土のり面は, 素因合計評価点が高いほど被災割合が大きい. 表-2 から, 被災履歴がなく崩壊の可能性の低い領域 (表-2 の青色の評価点の領域), 被災割合が 5%未満の領域および 5%以上の被災割合で崩壊が発生する可能性の高い領域 (表-2 の黄色の評価点の領域) の 3 つに区分できる. この結果から, 切土のり面および盛土のり面について, 「素因」を点数化し評価することにより, 予防保全的な対策工等を進めるのり面の優先順位付けができることを示した.

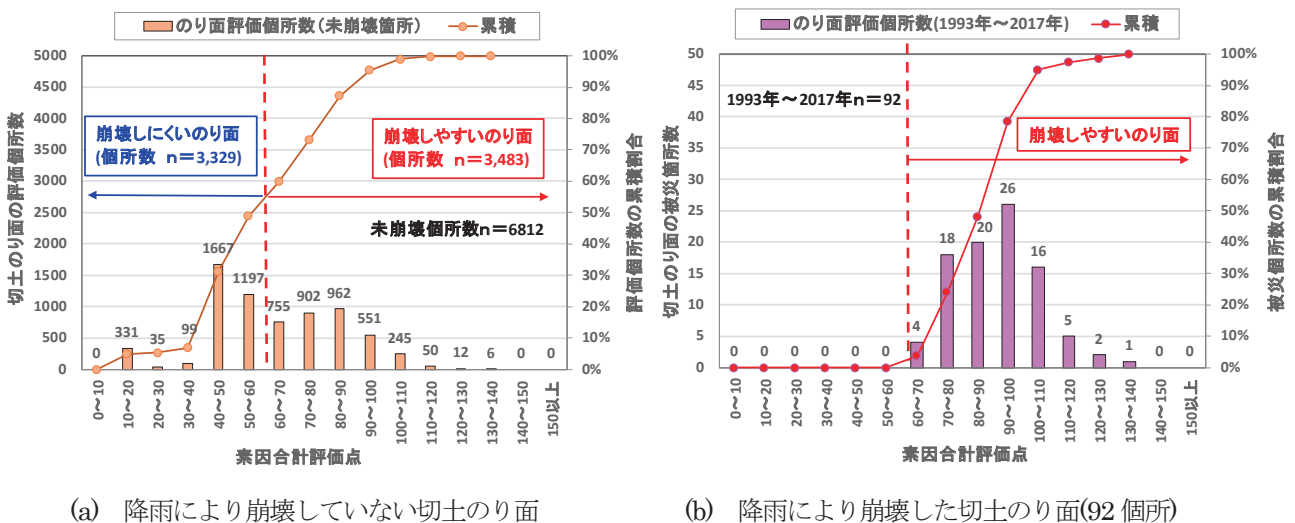


図-1 東北地方の高速道路の切土のり面の潜在危険性の評価図

表-2 切土のり面の素因合計評価点毎の被災割合

切土のり面	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100	100~110	110~120	120~130	130~140	合計	摘要
被災箇所数 1)	0	0	0	0	0	4	18	20	26	16	5	2	1	92	
全のり面個所 2)	331	35	99	1667	1197	759	920	982	577	261	55	14	7	6904	
被災割合 1)/2)	0%	0%	0%	0%	0%	0.5%	2.0%	2.0%	4.5%	6.1%	9.1%	14.3%	14.3%	1.3%	

次に, 「誘因」として降水量のり面崩壊への影響を評価するため, 切土のり面について, 解析雨量による時間最大雨量と降雨の降り方を表現するための細分化した累積雨量を「誘因」として, 点数化した「素因」の評価点と組合せたディープニューラルネットワーク (DNN) による機械学習を用いて, のり面の崩壊誘因の評価を行った. DNN に用いた「誘因」の降水量は, のり面の崩壊発見から 1 週間前までの間に記録した時間最大雨量と崩壊発見時から遡って 24 時間, 48 時間, 72 時間および 1 週間 (168 時間) の累積雨量を用いた. また, 切土のり面の素因は, 自然的な素因の評点として表-1 に示す機械学習に用いた評点, のり面の高さを表す指標としてのり

面段数および供用後の経過年数を用いた。これらを「素因」と「誘因」のデータセットとして、1993年～2017年までに崩壊した切土のり面 91 箇所と、崩壊した切土のり面が供用開始から崩壊に至るまでに経験した降雨のうち 1 週間の累積雨量が大きい連続雨量の降雨イベントの上位 10 箇所を抽出（供用開始後の早い時期に崩壊した事例は 10 箇所より少ない）した 791 箇所を非崩壊のり面とした合計 882 箇所のデータを DNN に用いた。このうち、ランダムに抽出した 8 割の 705 データ（崩壊データ 71 件、非崩壊データ 634 件）を学習に、2 割の 177 データ（崩壊データ 20 件、非崩壊データ 157 件）を学習結果の検証に用いた。この DNN による東北地方の高速道路のり面の崩壊予測の結果が図-2 である。図は、隠れ層を 20×20 に設定し、学習ステップ数が 20,000 回の時の検証データの予測結果を混同行列で示したものである。学習の結果、検証データの正解率は 95%、敏感率は 85% となり、実際の崩壊を非崩壊と予測した崩壊の見逃し割合は 15% となった。この結果から、細分化した降水量を用いて機械学習を行うことにより、崩壊発生時刻付近での降雨パターンの特徴が学習され、

		DNN予測	
		非崩壊	崩壊
実	崩壊	FN=3 (見逃し)	TP=17
	非崩壊	TN=151	FP=6 (空振り)

DNN による判定の有効性が確認できた。

図-2 機械学習による切土のり面の混同行列による崩壊予測の結果

さらに、2019年10月の台風19号および台風21号による被災箇所と非被災箇所のデータを用いて学習および判定したところ、台風19号等のデータを従来のデータに加えて学習させることにより、高速道路のり面において安全性を損なう問題である崩壊のり面における崩壊・非崩壊の判定の精度に改善効果が見られた。このことから、崩壊・非崩壊の事例に関するデータを蓄積し、学習データの多様性を確保することで、DNNモデルの「誘因」に対する汎用性が高まることが分かった。

最後に、これまでに示したのり面の崩壊素因および崩壊誘因の高速道路のり面のアセットマネジメントへの活用を検討した。崩壊規模、崩壊の発生頻度および復旧金額等をアセットマネジメントの指標として、のり面崩壊の最も大きなリスクである崩壊土量との関係から、「予防保全」として計画的に事前対応すべき領域と変状等の発生後補修等を行う事後対応の領域の境界は、崩壊土量 200 m³程度が目安になることを示した。また、崩壊素因の評価における表-2の被災割合の高い領域にある崩壊の可能性が高い非崩壊のり面を抽出し、切土および盛土のり面の事前対応すべきのり面の目安を組合せることにより、短期的視点では、降雨時に危険度の高いのり面の降雨時ののり面対策の流れを、長期的な視点では、のり面の予防保全対策の流れを示した。さらに、崩壊素因と時系列を考慮した降水量を誘因とした DNN によるのり面の崩壊危険度の予測結果を、切土および盛土のり面の管理に用いる可能性を示した。

論文審査結果の要旨

高速道路は社会生活、経済活動などに不可欠な社会基盤である。近年、豪雨や大地震に起因して高速道路の切土および盛土が被災する事象が増えている。一方、高速道路延長の約4割が供用後30年以上を経過し、施設の経年劣化のリスクの高まりも懸念されている。このような状況下で、豪雨に対する高速道路のり面を維持管理するためには、のり面の災害事例を分析し、有効な予防保全的対策を講ずる必要がある。本論文は災害事例データに基づき、災害の素因・誘因の分析を行い、アセットマネジメントに活かす方策を検討している。

第1章は、研究の背景を述べ、高速道路のり面の崩壊要因・崩壊予測、アセットマネジメントに関する既往の研究を整理し、本研究の目的と位置づけを示している。

第2章は、最近の高速道路のり面の災害事例4つを紹介し、崩壊の主因として、凝灰岩の経年風化作用による脆弱化、集水地形にある流れ盤、供用時からの土地利用の変化、スレーキング性地盤材料の細粒化などの素因と、誘因である降雨パターンが問題になっていることを示している。

第3章は、東北地方において1993年から2017年までの25年間に発生した213件の切土盛土のり面の被災事例から、「素因」の分析を行っている。切土の「地形」および「地山種別」、盛土の「地形」と「盛土材料」のそれぞれの素因と崩壊規模の関係について分析した。その結果、切土盛土ともに集水地形下のものが突出して被災比率が高いこと、崩壊規模は切土盛土両者ともに深さ2m未満が85%以上を占めること、被災は供用開始から3年までのものが52%、供用10年で85%となることなどを明らかにしている。これらは、災害事例分析からの貴重な知見である。

第4章は、崩壊を起こす「素因」である地形・構成土質などのそれぞれの影響度を分析し、素因に基づく危険度を評点化した。その結果、のり面の崩壊をもたらす素因の危険度カテゴリーを、「過去に災害事例がない」「同5%以下」「同5%以上」の3つに区分することに成功している。この成果は、危険度の高いのり面を素因のみから評価し、予防保全上要注意のり面を抽出することを可能にしている点で、実務での有用性が高い成果である。

第5章は、崩壊を起こす「誘因」である降雨パターンについて分析している。まず、崩壊が生じた時の時間最大雨量および累積雨量データのみでは、崩壊を引き起こす降雨とそうでないものを区別できないことを示している。また、4章で見出した素因の影響度合いと降雨パターンを深層ニューラルネットワーク(DNN)で解析し、その有効性を示した。のり面の持つ素因に加えて誘因である時々刻々の降雨データからリアルタイムの危険度を評価する道筋を示した点は、重要な研究成果である。

第6章は、前章までの分析結果に基づいて、高速道路のり面のアセットマネジメントへの活用方策について検討している。検討では、崩壊土量、通行止め時間、復旧費用などを整理し、これらの分析から、短期的および長期的な視点からのり面の予防保全への活用手順を提案している。提案されたフローは高速道路のり面のアセットマネジメント手法として発展性が大きい。

第7章では、本文の結論を取りまとめ、今後の課題について述べている。

以上、本論文は東北地方の高速道路のり面の被災データに基づく分析から新知見を見出し、予防保全に資する評価・検討手順を提案している。この結果は高速道路のり面の豪雨災害に対する安全性・信頼性の向上に資するものとして有用であり、地盤工学分野の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。