

高速道路における土砂流入災害の傾向分析と土砂流入を防止した落石防護工の事例報告

Trend Analysis of the Sediment Inflow of Disasters on the Expressways,
and Case Reports of Falling Rock Protection Works that Prevented the Inflow of the Sediment

村上豊和 Toyokazu MURAKAMI ((株)高速道路総合技術研究所)
久田裕史 Hirofumi HISADA ((株)高速道路総合技術研究所)
柳迫新吾 Shingo YANAGISAKO (西日本高速道路エンジニアリング中国(株))
下野宗彦 Munehiko SHITANO (西日本高速道路エンジニアリング中国(株))

近年、集中豪雨の増加に伴い、土石流等の土砂流入災害に対する高速道路の安全性の確保が課題となっている。特に、高速道路区域外の溪流からの安全性の確保は重点的に行われる必要がある。そこで、近年の土砂流入災害による高速道路への影響を明確にするため、高速道路での土砂流入災害データを活用し、近年の災害傾向について分析した。これらの分析結果をもとに、現地調査を効率的に進めるため、既往の調査資料に基づいて、高速道路への影響度を評価した溪流の机上評価と災害傾向との関係性について整理すると共に、落石防護工が土石流の流入を防止し高速道路への影響を軽減した事例について報告する。

キーワード：土砂災害，危険度評価，航空レーザ測量，地形判読，落石防護工
(IGC : B-0)

1. はじめに

近年、局所的集中豪雨が増加傾向¹⁾にある中、高速道路に対する道路区域外からの斜面崩壊や土石流災害（以下、「土砂流入災害」という）の危険性が高まっている。我が国の高速道路は、急峻な地形を縫って計画されており、このような土砂流入災害の恐れのある斜面や溪流を横断する箇所が数多く存在する。近年、甚大な被害をもたらした豪雨災害のうち、少なからず高速道路へ影響を与えた災害として、平成 28 年 8 月台風 10 号東日本豪雨災害²⁾、平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害³⁾、平成 30 年 7 月豪雨災害⁴⁾が挙げられ、近年では、毎年のように災害が発生していることが伺える。

このような背景の中、高速道路に影響を及ぼすと考えられる溪流は、高速道路沿線に膨大にあることから、筆者⁵⁾らは、現地調査を行う必要がある危険溪流を事前にある程度絞り込むため、既往の調査資料に基づいて高速道路への影響度を評価し現地調査の優先度付けを行う溪流の机上調査方法（以下、「机上評価」という）の研究を行っており、一部の高速道路では、これらの机上評価が実際に行われている。また、これらの考え方は、土石流対策の手引き⁶⁾（以下、「NEXCO 基準」と称する）にも記載されている。

令和元年度には、高速道路における安全・安心計画が、東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)（以下、「NEXCO3 社」という）より発表され、この中で、道路区域外からの土石流を含む土砂等流入に対する自衛対策について進めていく方針が掲げられた。以上

のことから、本研究では、近年の土砂流入災害による高速道路への影響を明確にすることを目的に、平成 27 年度以降、NEXCO3 社が管理する高速道路において発生した土砂流入災害のデータから、近年の高速道路の土砂流入災害の傾向分析した結果を報告すると共に、机上評価との関係性について報告する。また、高速道路の自衛対策手段として、高速道路本線を防護する具体的な対策工を検討する必要が出てきたなか、平成 30 年 7 月豪雨において、既設の落石防護工が高速道路への土砂流入を防ぐ事例が確認された。このように、高速道路の側道際に既設落石防護工のような施設があることで、高速道路の被害を軽減できる可能性があることから、既設落石防護工の耐力度照査を行い、道路区域外からの土石流により変形を生じずに土砂流入防止が可能な土石流の条件等について検討を行った結果についても報告する。

2. 土砂流入災害の分析

2.1 高速道路への被害分析

2.1.1 近年の高速道路での土砂流入災害事例の収集

NEXCO3 社が管理する高速道路で発生した土砂流入災害について、近年の被害状況を把握するため平成 27 年～平成 31 年の 5 年間の災害記録や既往の災害対応報告書等を NEXCO3 社より収集した。ここでは、道路区域外の溪流で発生した土石流災害および自然斜面崩壊を対象とし、通行止めの有無に関わらず、高速道路の路面に道路区域外からの土砂が流入したものを分析対象の災害と

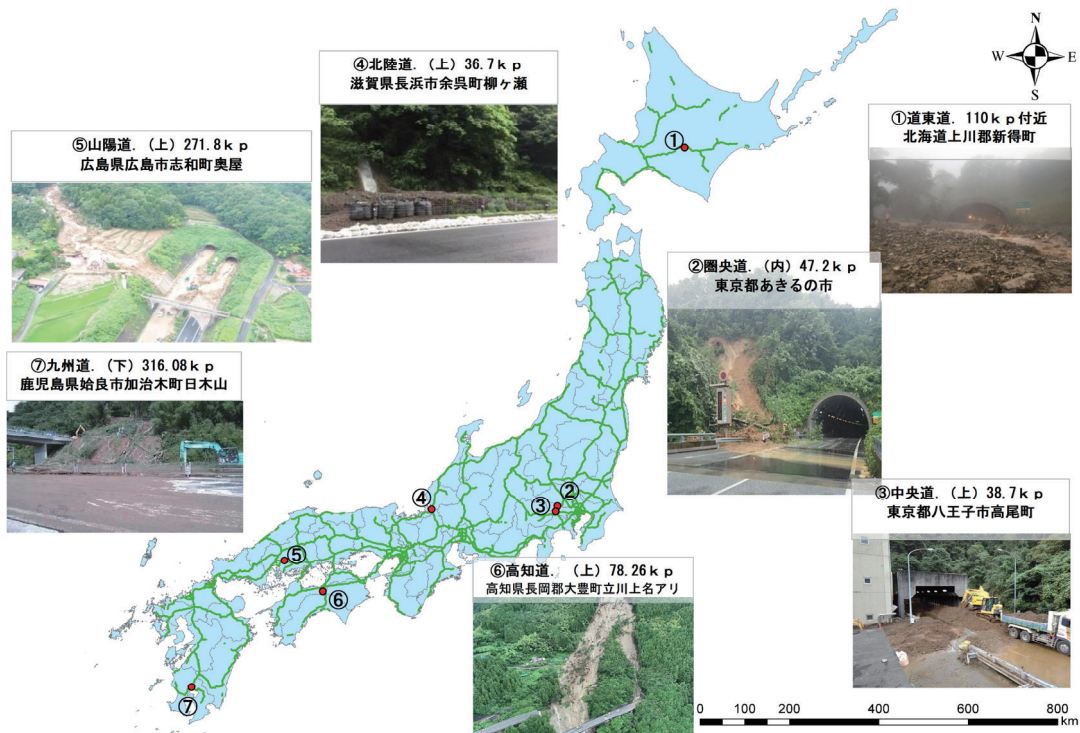


図-1 NEXCO3 社の管理する高速道路で被災した近年の主な土砂流入災害事例

して取り扱う。なお、高速道路の切土法面の崩壊は含まない。

収集・整理の結果、土砂流入災害数は、5年間で49件であった。主な災害事例について図-1に示す。

2.1.2 高速道路への流入土砂量

竹本ら⁷⁾は、昭和57年から平成24年までに発生した48件の土砂流入災害における高速道路本線への流入土砂量について、全体の約8割が3,000 m³未満であったことを報告している。本研究においても、図-2に示すとおり、平成27年～平成31年の5年間で発生した49件の土砂流入災害について高速道路本線への流入土砂量を整理した。その結果、3,000 m³未満が全体の約6割、4,000 m³未満が約7割であり、高速道路に影響を与える土砂流入災害の多くは4,000 m³未満が占めることがわかった。これらは、道路区域外の溪流に対し、発生源対策が難しい高速道路側で行う対策工の対象とすべき土砂量の参考となるものである。

次に、高速道路上流側の溪流の谷出口と高速道路が交差する箇所の横断構造を整理した。これは、高速道路と溪流の横過形式によって被災の程度が異なることから整理を行ったものである。その結果、図-3に示すとおり、切土構造が26件と約5割を占め、盛土構造が約2割、盛土+カルバートボックス構造、カルバート構造、橋梁構造がそれぞれ約1割であった。このように、盛土を含む構造は、流入土砂の堆積ポケット容量があり、カルバートボックスや橋梁は内空や高架下を流下して高速道路本線に土砂が流入しないことから、高速道路本線へ影響を与える横断構造としては、土砂等が直撃する切土構造が多くを占める結果となった。

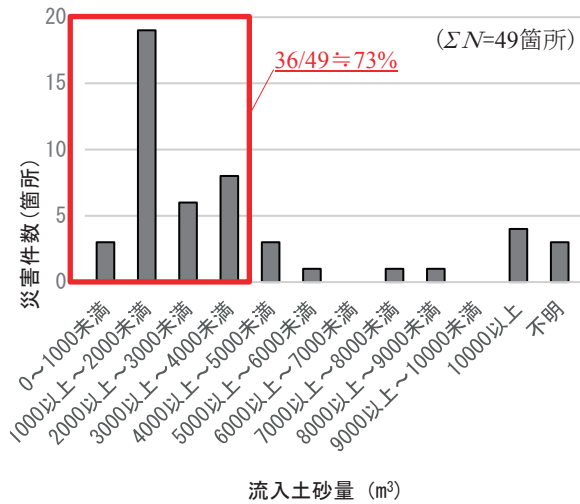


図-2 区域外からの高速道路への流入土砂量

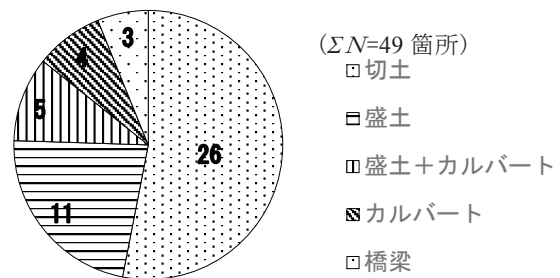






図-3 土砂流入災害の高速道路横過形式

表-1 机上評価の流れと概要⁶⁾

評価項目	評価の観点	ランク分け	現地調査優先溪流の抽出
① 高速道路横過条件	土石流発生時に、流出土砂が高速道路上に氾濫、堆積すると想定される場合、高速道路への影響度が大きい。(切土の場合、影響度がもっとも大きい)	 低 ランク 高	各評価項目でランクの高い組み合わせのほど高速道路への影響度が高い溪流とし、現地調査を優先的に実施する。
② 溪床勾配条件 (高速道路横過地点から上流200m区間の平均溪床勾配)	高速道路横過部の溪床勾配がより急なほど高速道路への影響度が大きい。	 低 ランク 高	
③ 地質特性	土石流の発生頻度の高い地質ほど高速道路への影響度が大きい。	 低 ランク 高	
④ 溪流特性 (最急溪床勾配、発生流域面積)	土石流が発生しやすい素因的溪流特徴を有するほうが高速道路への影響度が大きい。	 低 ランク 高	

2.1.3 机上評価の概要

机上評価は、土石流が発生していない溪流の現地詳細調査を効率的に進めるため、既往の調査資料に基づいて、高速道路への影響度を評価し現地調査の優先度付けを行う机上調査手法として検討されたものである。高速道路と溪流の交差形状による被災程度や地形や地質による土石流の発生し易さに着目している。机上評価の流れと概要を表-1に示す。机上評価の基本は、高速道路上に土砂が流出しやすい横過形状であるかどうか、土石流が高速道路へ到着しやすいかどうか、土石流が発生しやすい地質かどうか、土石流が発生しやすい特徴を有する溪流かどうかの観点で各項目をランク分けし、それらの組合せをもとに高速道路への影響度合いを評価するものである。

2.1.4 机上評価の項目検証

ここでは、机上評価の評価項目の検証として、平成27年～平成31年の5年間で発生した49災害のうち、31災害の諸元と評価項目との関係について整理する。ここで、31災害としたのは、机上評価は、一部の高速道路では実施しているものの、49災害全てで実施されているものではない。そのため、災害発生前に机上評価を実施していた平成30年7月豪雨で土砂流入災害が発生した31災害とした。なお、評価項目①は、より詳細な分析を行ったことから、後述(2.1.5章)する。

評価項目②は、溪流の高速道路横過地点における溪床勾配(横過地点の上流側200m区間の平均勾配)について、表-2に示すとおり、4区分で評価するものである。これは、土石流が高速道路に到達するかどうかの指標として、高速道路横過地点から上流側200m区間の平均溪床勾配を用いて、土砂移動形態による影響度区分を表-2に示すとおり行うものである。検証した31災害は、「影響が大きい」もしくは「特に影響が大きい」の区分に全てが該当しており、評価項目および区分としては、妥当であることが確認された。また、評価項目④は、表-3～4に示すとおり、溪流の「溪床勾配・発生流域面積」と「最急溪床勾配」を組み合わせることで溪流特性として3区分で評価するものである。

表-2 評価項目と評価基準【机上評価項目②】⁵⁾

影響区分	高速道路横通過地点の状況		区分	内訳(溪流)
	土砂移動形態	横過地点における溪床勾配		
特に影響が大きい	発生区間	15°以上	I	15
	流下区間	10°以上 15°未満		9
影響が大きい	堆積区間	2°以上 10°未満	II	7
ほとんどない	掃流区間	2°未満	III	0

表-3 溪流特性の机上評価区分項目⁵⁾

要因	評価区分	区分	内訳(溪流)
発生流域面積(溪床勾配と流域面積) …評価項目④-1	溪床勾配15°以上の面積(発生流域面積が5ha以上)	A1	8
	溪床勾配15°以上の面積(発生流域面積が5ha未満)	A2	22
	溪床勾配が10°以上15°未満 発生流域面積=0ha	B	1
	溪床勾配が10°未満 発生流域面積=0ha	C	0
最急溪床勾配(A1・A2を対象) …評価項目④-2	40°以上	2	11
	30°以上40°未満	1	11
	15°以上30°未満	0	9

※上記評価項目④-1, ④-2の組合せにより

表-4 評価項目と評価基準【机上評価項目④】⁵⁾

区分	影響区分	評価区分(評価項目④-1,④-2の組合せ)	内訳(溪流)
A	特に影響が大きい	非常に危険な溪流 A1-2 A1-1 A2-2	14
B	影響が大きい	危険な溪流 A1-0 A2-1 A2-0	16
C	ほとんどない	危険性の少ない溪流 B・C	1

ここで、溪床勾配は、発生流域面積を算出するために、標高データから溪流内の等高線間の勾配を取得したものであり、発生流域面積は、溪床勾配 10° 以上、15° 以上の面積である。また、最急溪床勾配は、溪床勾配のうち、対象の溪流内の最も急な溪床勾配である。

ここで、溪床勾配は、最急溪床勾配が 30° 以上の溪流では、崩壊の頻度が増加することと、発生流域面積が大きい場合は、崩壊した際の影響度も大きいことから、影響度区分を高くしている。31 災害は、机上評価の「特に影響が大きい」と「影響が大きい」に 96%が該当しており、評価項目および区分としては、妥当であることが確認された。なお、「ほとんどない」に該当した溪流は、溪床勾配 10° 以上の面積が 0.17ha であるが、溪床勾配 15° 以上の面積は 0ha の溪流であった。なお、最急溪床勾配は 28.4° である。この 1 溪流を除く溪流は、高速道路への「影響が大きい」以上の評価を行っていたことから、評価項目②および④については、その項目と区分について妥当であることが今回の整理により比較することで確認できた。

次に、評価項目③の地質特性について整理する。ここで 31 災害について整理を行った結果、机上評価を実施していたのが一部路線となるため、路線の地質特性より 30 災害が花崗岩に該当する結果となった。そのため、地質については、机上評価を実施していなかった路線においても、国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センターが編纂した 5 万分の 1 地質図、20 万分の 1 地質図を参考に災害後でも確認ができることから、49 災害での地質別の災害発生件数を整理した。その結果、49 災害の内訳は、図-4 に示すとおり、花崗岩が 39 件 (80%)、堆積岩が 7 件 (14%)、変成岩が 1 件 (2%)、火山噴出物 (未固結) が 1 件 (2%)、火山噴出物 (固結) が 1 件 (2%) であった。花崗岩が多い理由は、平成 30 年 7 月豪雨が多くを占め、広島型花崗岩での崩壊事例を多く含むことにも起因されるが、花崗岩の特徴である表層のまさ化は、土石流の発生素因としての要素が高いと一般的にも言われており、まさ化した土砂の流出のしやすさが原因として考えられることから、筆者らの机上評価においても、最も危険な区分にしており、その評価と一致する。また、花崗岩に次いで多かった堆積岩については、新旧年代に関係なく崩壊が発生しており、地質図に記載された年代に特徴的な傾向は認められなかった。ただし、現地での風化状況や地下水、微地形、植生状況など様々な要因が影響している可能性もあり、より詳細な原因把握には現地調査による地質把握が必要と考えられる。以上のことから、机上評価項目③地質特性については、高速道路への影響度評価としては、妥当であることが確認できた。

2.1.5 机上評価への反映

前述のとおり、机上評価の評価項目②～④については、災害実績の検証より妥当性が確認できた。但し、評価項目①の妥当性については確認できていない。評価項目①

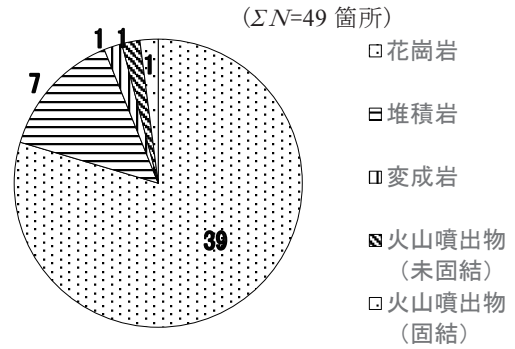


図-4 地質別による災害発生件数

表-5 評価項目と評価基準【机上評価項目①】⁵⁾

影響度	評価	区分
特に影響が大きい	ポケット容量が計画流出土砂量の 50%以下あるいはピーク流量に対して流下能力が 50%以下 ※横過形式が切土の場合を含む	I
影響が大きい	ポケット容量が計画流出土砂量の 50%～100%あるいはピーク流量に対して流下能力が 50%～100%	II
影響がある	ポケット容量が計画流出土砂量の 100%～200%あるいはピーク流量に対して流下能力が 100%～200%	III
ほとんどない	ポケット容量が計画流出土砂量の 200%以上あるいはピーク流量に対して流下能力が 200%以上	IV

表-6 カテゴリー区分と災害履歴 (21 災害)

カテゴリー	観点	災害が発生した溪流
①	溪流評価の全ての項目において最上位ランクの評価	3
②	溪流評価全ての項目において、影響区分が「影響が大きい」以上の評価項目 (カテゴリ①を除く)	14
③	溪流評価 (その 1, その 2) において、影響区分が「影響が大きい」以上で、机上評価 (その 3, その 4) で「影響がある」以下	0
④	溪流評価 (その 2) において、ランク III の評価	0
⑤	溪流評価 (その 1) において、ランク III, IV の評価	4

は、表-5 に示すとおり高速道路横過条件について 4 区分で評価するものである。これは、崩壊前の想定計画流出土砂量と想定される堆積ポケット容量及び流下能力を比較して、高速道路への影響度を評価するものである。

そのため、災害前に実施していた机上評価と災害との関連性について整理することで、評価項目①を含めた机上評価全体 (現地調査優先溪流を抽出するためのカテゴリー区分) の評価を行う。ここで、検証の対象とする災害は、カテゴリー区分を行っていた 21 災害とした。

カテゴリー区分を行っていた 21 災害の机上評価区分について、表-6 に示す。西日本高速道路㈱中国支社では、

5段階の危険度評価のうち、カテゴリ区分①②に該当する溪流を高速道路への影響度が高い溪流と評価している。21災害のうち、カテゴリ①②に該当する溪流は、17溪流であり全体の約8割であった。このことは、高速道路沿線で災害発生前に机上評価を行うことにより、高速道路へ影響を与える可能性の高い溪流を抽出できることを示しており、机上評価の目的とした現地詳細調査を行う必要性のある溪流の抽出に活用できるものであると考えられる。

但し、残りの4災害については、カテゴリ⑤に該当しており、高速道路への影響を与える可能性が低いと判断していた溪流である。今後、危険度評価の精度を高めるためには、今回の結果を踏まえた見直し検討を行う必要がある。そのため、カテゴリ⑤に該当していた要因について整理することとした。

机上評価の評価項目②～④の妥当性は確認されており、この4溪流は、評価項目①が机上評価での想定と実際の災害での相違点があったと考えられる。実際に、カテゴリ区分⑤は、評価項目①において、区分ⅢもしくはⅣに該当する溪流が分類される区分である。机上評価①は、高速道路の横過条件として、溪流からの計画流出土砂量と盛土ポケット容量や計画規模から算出される土石流のピーク流量と流下能力を比較して、高速道路への影響度を評価する項目である。ここで、机上評価で算出した盛土ポケット容量や谷出口形状の確認は、1/5,000 森林基本図や 1/25,000 地形図、1/1,000 平面図や横断図を活用して算出したものであり、特に比高差を算出する横断図は、高速道路では、縦断方向に 20m ピッチでしか作成されていない。そのため、机上評価では、高速道路への影響が低かったにも関わらず、実際には影響を及ぼす災害となった原因は、これらの既存図面の精度によるものと考えられる。これらのことに着目しながら、カテゴリ⑤に該当した溪流について被災状況を確認した。ここでは、災害後の詳細な被災状況との比較が必要なため、航空レーザ測量による高精度な三次元データ（以下、「LP データ」という）を取得し、表-7 に示す3溪流の高速道路横過部における高速道路路面と溪床の比高について整理した。なお、高速道路横過部における高速道路路面と溪床の比高は、図-5 に示すとおり、高速道路に土石流が衝突する際の、溪床（側道等がある場合はその路面）と高速道路の路面との高さを比高差とした。

まず、A 溪流は、机上評価では、2.6m の比高差がありこれをもとに盛土ポケット容量を見込んでいたが、実際には比高差は 0m であった。これは、図面の精度や比高差の考え方が原因ではなく、机上評価時点では、横過形式が盛土であった箇所が、被災時には、ジャンクション化事業により、横過形式が切土法面に変更されていた箇所である。このように、ジャンクション化事業や四車線化事業などによる土地改変状況も把握し、机上評価の見直しを行っておくことが重要であることがいえる。

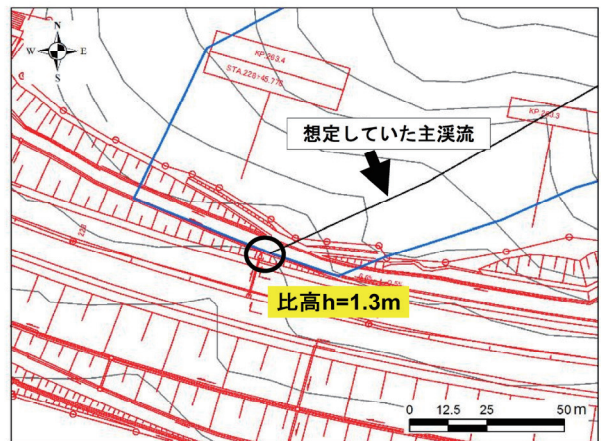
次に、B 溪流は、図-6 に示すとおり土石流の氾濫範囲

表-7 高速道路の路面と溪床の高さ

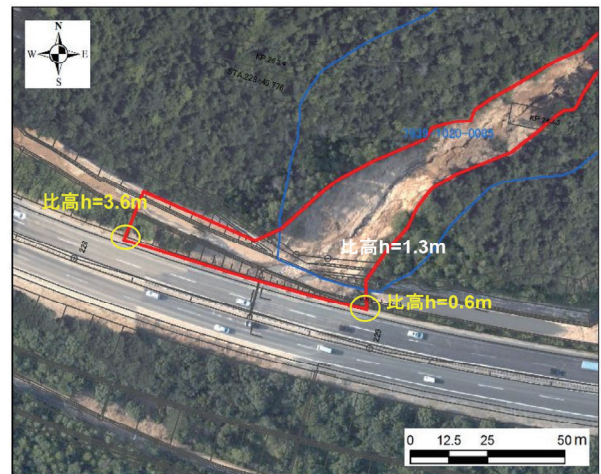
溪流名 () は管理番号	横過形式	机上評価での比高差 (m)	実際の土砂が流れ込んだ箇所 の比高差 (m)	机上評価と実際の差 (m)
		(A)	(B)	(B)-(A)
A 溪流 (0038)	盛土	2.6	0	-2.6
B 溪流 (0085)	盛土	1.3	0.6	-0.7
C 溪流 (0051)	盛土 +c-box	4.4	0.1	-4.3



図-5 高速道路横過部における高速道路路面と溪床の比高差



(a) 机上評価（災害前に想定していた比高差）



(b) 災害後に土砂が流入した箇所の比高差

図-6 B 溪流の比高値の計測結果

内において高速道路盛土の比高が地形や側道の縦断勾配により変化するため、流路と高速道路の交差点においてある程度の比高があっても端部において比高が小さくなり、土石流が本線に及んだことが確認された。

このように、高速道路の盛土ポケット容量が確保できる場合においても、土石流の氾濫範囲が盛土と側道との比高差が小さい範囲に及ぶ場合、流出土砂が高速道路に流れ込む事象が発生することが確認された。次に、C 溪流は、図-7 に示すとおりカルバートボックスが閉塞したのちに、盛土部の比高差が小さい箇所から高速道路へ土砂が流れ込んだ事象である。このように、土石流が直撃する箇所が最も比高差がある場合は、その高さを採用していたが、実際には、土砂が溜まった段階で比高差の低い所から高速道路へ氾濫する事象が確認された。このことから、路面と河床の比高差については、土石流の氾濫区域は従来通り NEXCO 基準に従い設定するものの、比高差については、図-8 に示すとおり氾濫範囲内で最も低い位置を比高差とするよう見直す必要があると考えられる。また、想定していた計画流出土砂量と実際の崩壊土砂量を比較すると、A 溪流で計画流出土砂量の 2.7 倍、B 溪流で 2.4 倍、C 溪流は 3.9 倍という結果であった。これらの課題を解決する方法として、近年、取得が進んでいる LP データを活用することにより、発生流域面積、溪流長、溪床勾配、横断形状や盛土ポケット容量等の溪流諸元の精度向上が図れると考えている。ここで検証した机上評価は、平成 24 年以前に行われており、LP データを保有していない状況で行われたものである。

3. 航空レーザ測量結果からみる災害関連地形の特徴整理

今回の検証により、評価項目②～④の妥当性は確認できたと考えている。本項では、カテゴリー区分①②に該当する溪流が高速道路沿線に複数ある場合、対策工を行う溪流の優先度付けとなる指標として、平成 30 年 7 月豪雨で被災した状況より評価できる項目がないか検討を行ったものである。検討にあたっては、前述のとおり、今後は、高速道路横過条件の整理や溪流諸元の抽出に関して、LP データを活用することを提案したことから、LP データからみる災害箇所における地形の特徴について、整理を行うものである。そのため、本研究では、平成 30 年 7 月豪雨により土石流が発生した山陽自動車道沿線の溪流に対し、NEXCO 西日本中国支社が取得した LP データより、地形の特徴について分析を行った。LP データ等を基に地形判読を行ったところ、崩壊源頭部付近に図-9 に示す遷急線および遷急点が確認される溪流が複数確認された。松下ら⁸⁾は、平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨で発生した土石流災害は、遷急線と崩壊頭部の水平距離が 20m 以内の発生箇所が多発していることを指摘している。そのため、本研究においても、図-10 に示す

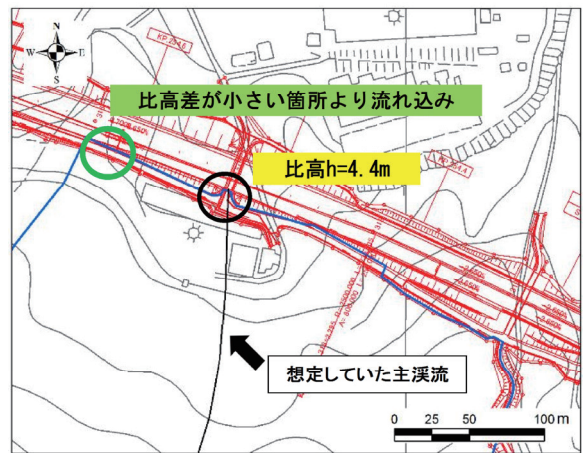


図-7 C 溪流の比高値の計測結果

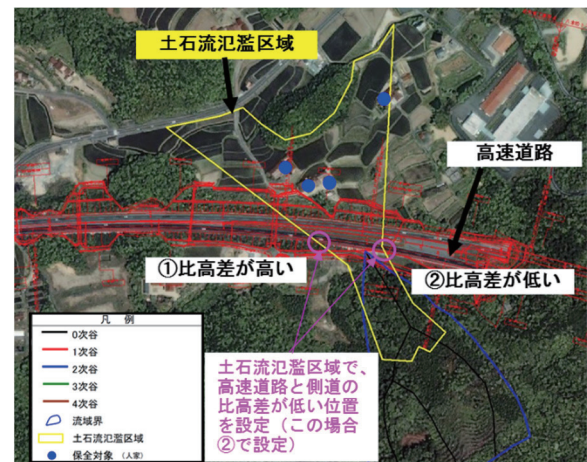


図-8 土石流氾濫区域と比高差の設定方法

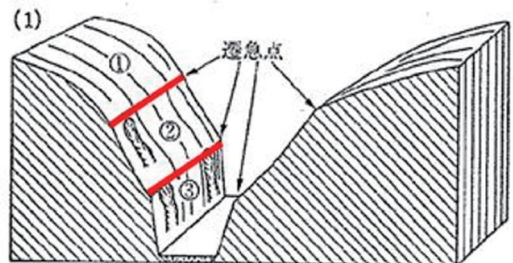


図-9 遷急線および遷急点⁸⁾に加筆

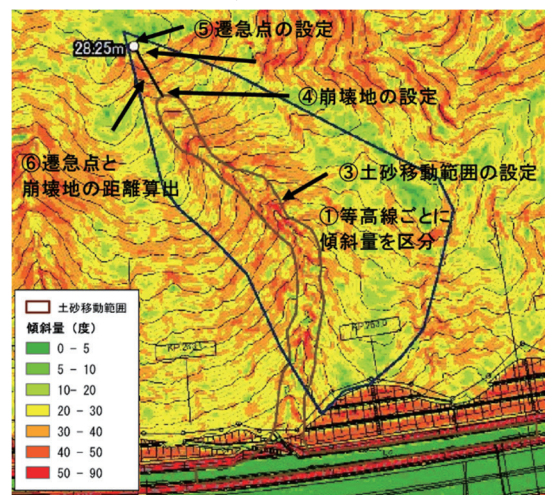


図-10 遷急点から崩壊地までの距離算出例

とおり、遷急点から土砂移動範囲までの距離として、傾斜量図より傾斜 30°以上を目安として遷急点を抽出し、そこから土砂移動範囲までの最短距離を計測した。具体的には、下記の手順によるものとし、取得状況を図-10 および図-11 に示す。

(手順 1) 図のコンターは、LP データによる等高線を示しており、計曲線を 5m、主曲線を 1m で表している。これらのコンターごとに、溪流内の傾斜量を 5°もしくは 10°毎に区分する。

(手順 2) 土砂移動範囲について、災害前後の LP データの差分解析を行い、災害後の高さの値がマイナスとなる範囲を、土砂が流出した範囲と判断し、土砂移動範囲として設定する。なお、土砂移動範囲の設定にあたっては、災害後の航空写真も参考とする。

(手順 3) 土砂移動範囲の最上流部を土石流発生源（以下、「崩壊地」という）として設定する。

(手順 4) 溪流の最上流部である源頭部から下流に向けて溪流を下った際、区分した傾斜量が 20°～30°の範囲から 30°～40°の範囲に変化する最初の地点を地形変化点として遷急点を設定する。

(手順 5) 遷急点と崩壊地間の最短距離を算出する。

ここでは、平成 27 年～平成 31 年の 5 年間で発生した 49 災害のうち、LP データの災害前後のデータが入手できた 37 溪流から 97 箇所を崩壊地を対象として抽出した。なお、同一溪流内で複数箇所の土砂移動現象が確認できた場合は、図-12 に示すとおり、それぞれの崩壊地に対して、遷急点からの最短距離を算出している。その結果、図-13 に示すとおり遷急点から土砂移動範囲までの距離が 20m 以内で約 5 割、0m～40m の範囲内で約 8 割を占める結果となった。このように LP データ検証より、土石流が発生しそうな地形的素因として遷急線という特徴が確認され、遷急点と土砂移動範囲との距離に関連性がある可能性を示した。

なお、被災箇所における被災前地形データと被災後地形データの差分解析結果から見た特徴把握については、今後の課題と捉えており、現在研究を進めている。

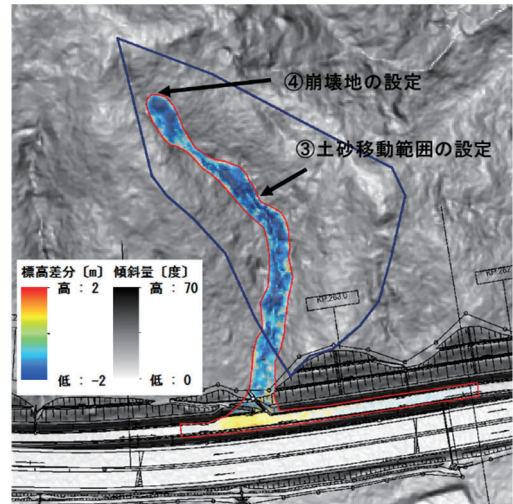


図-11 土砂移動範囲と崩壊地の設定例

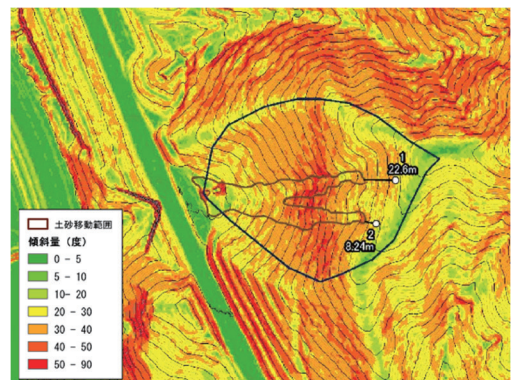


図-12 遷急点から崩壊地までの距離算出例
(崩壊箇所が同一溪流内に複数ある場合)

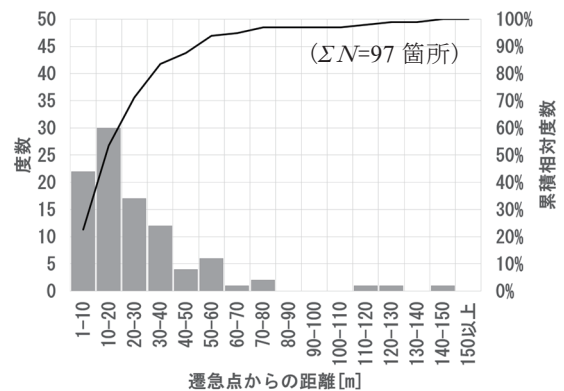


図-13 遷急点から崩壊地までの距離

4. 土石流の流入を防止した落石防護工の応力度照査

4.1 土石流の流入を防止した落石防護工の概要

平成 30 年 7 月豪雨では、図-14 および写真-1 に示す既設落石防護工が区域外から高速道路本線への土砂流入を防止する事例（以下、「本事例」という）が確認された。図-14 に示すとおり、既設落石防護工が設置されていた箇所 (KP263.05) と設置されていない箇所 (KP263.10) での高速道路の被災状況の違いは明白である。このように、既設落石防護工が土砂流入を防止した事例は高速道路では少なく、まずは、この既設落石防護工の耐力度照査を行い、本事例が土砂流入を防止した理由を明らかに

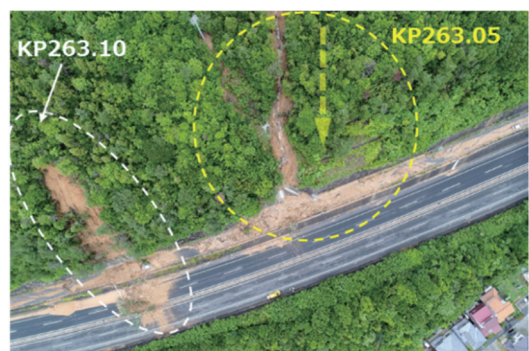


図-14 既設落石防護工の有無による被災状況の違い

することにした。この既設落石防護工は、杭基礎を巻込んだコンクリート壁上の防護柵が高速道路の側道際に施工されたもので、**図-15** に示すとおり自立式の構造である。区域外からの土石流対策の一つとして、砂防えん堤が考えられるが、維持管理段階では、対策工の施工に加えて用地取得の手続きが必要となり、多大な時間を要するという課題がある。また、対策工の一つとして、高エネルギー吸収型落石防護柵も近年普及しているが、種別によっては、ワイヤーロープアンカーの設置位置が高速道路用地外となる場合、用地取得の手続きが必要となり、施工までに時間を要するという課題が生じる。そのため、本事例のように自立式の構造で高速道路の区域内に設置できる対策工であれば、前述した砂防えん堤や高エネルギー吸収型落石防護柵での課題に対応できる可能性がある。なお、耐力度照査は杭基礎工とコンクリート壁工の構造検証であり、構造検証は許容応力度法にて行った。

4.2 土石流災害の概要

本事例の土石流発生状況を確認するため、溪流内の現地調査を行った。本溪流の地形は、谷型斜面であり、地質は、後期白亜紀の広島花崗岩類で、源頭部に黒雲母花崗閃緑岩が分布する¹⁰⁾。**写真-2** に示すとおり、現地では、源頭部において、パイピング跡が複数確認された。このことから、上部斜面から流入した伏流水が関与し、土層内の間隙水圧を上昇もしくはパイピングによって崩壊が生じた可能性が考えられる。また、LP データおよび現地調査より遷急線付近で崩壊が発生していることが確認された。これらから考えられる崩壊メカニズムとしては、長時間に渡る大量の雨水の浸透により、遷急線上部の緩やかな斜面付近において土壌が飽和し、この飽和した水が尾根部直下から吹き出したことなどにより遷急線より下方は急な斜面となるため斜面が不安定化し山復崩壊が発生したものと推測される。なお、**図-16** に示す土石流発生後の LP データより算出した溪流からの発生土砂量は $2,541\text{m}^3$ であり、落石防護工と谷出口の間の側道上に堆積した土量は 237m^3 であった。但し、側道上を下流側に流れた土砂量は不明である。また、災害実績より推定する土石流諸元として、溪床勾配は 14.4° であり、土石流ピーク流量は、 $29.1\text{m}^3/\text{s}$ である。なお、土石流発生前に実施していた机上評価は、**表-6** に示すカテゴリー①に該当する溪流であり、最も危険と評価される溪流であった。机上評価では、落石防護工の効果は見込んでおらず、横過構造を、切土としていた溪流である。災害発生前の現地調査による最大礫径は 0.3m であり、計画流出土砂量は $1,434\text{m}^3$ 、計画流出流木量に関しては 0m^3 としている。

4.3 耐力度照査の概要

耐力度照査は、土石流発生後の第1波の土石流 (V_{dq}) により流出すると想定される土砂量 (以下、「土砂量」という) と流体力を求めるための溪床勾配を変化させて検討した。



写真-1 土石流の流入を防止した既設落石防護工事事例

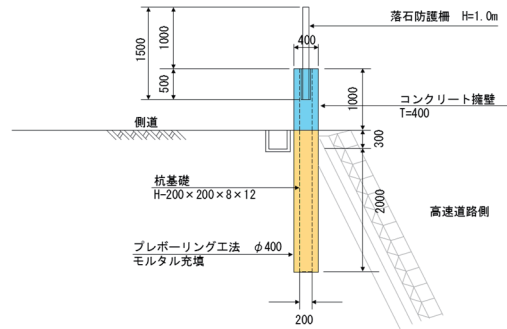


図-15 土石流の流入を防止した既設落石防護工の構造図



写真-2 源頭部のパイピング跡

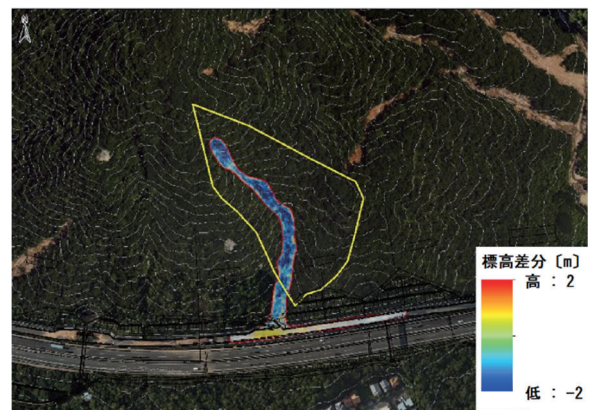


図-16 LP データを用いた侵食量の算出

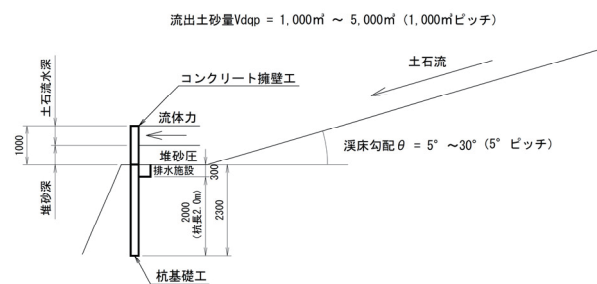


図-17 検討ケース概略図

本研究では、図-17 に示すとおり、落石防護工に土砂量を 1,000m³ から 5,000 m³ まで 1,000 m³ ずつ変化させた 5 ケースと、溪床勾配 θ を 5° から 30° まで 5° ずつ変化させた 6 ケースを組み合わせ合わせた全 30 ケースで算出した土石流外力を作用させることで耐力度照査を行った。耐力度照査に用いる土石流外力は、砂防基本計画策定指針¹¹⁾ より式(1)により算出される流体力とした。

$$F = K_h \cdot \frac{\gamma_d}{g} \cdot D_d \cdot U^2 \quad \dots(1)$$

ここに、 F ：単位幅当りの土石流流体力 (kN/m)， K_h ：係数 (1.0 とする)， g ：重力加速度 (9.81m/s²)， γ_d ：土石流の単位体積重量 (kN/m³)， D_d ：土石流の水深 (m)， U ：土石流の流速 (m/s)

図-18 に全 30 ケースの溪床勾配ごとの土砂量と流体力の関係を示す。図-18 より、土砂量が同じ場合、溪床勾配が大きくなると流体力が大きくなる。また、溪床勾配が同じ場合、土砂量が多いほど流体力が大きくなることもわかる。これは、溪床勾配が大きくなるほど、土石流の流速が上がるため流体力が大きくなり、また、土砂量が多くなるほど、土石流のピーク流量が多くなり流体力が大きくなるためである。

既設落石防護工は、高さ 1.0m のコンクリート壁と深さ 2.3m の杭基礎からなるが、ここで杭長は、コンクリート壁工の側道側に深さ 0.3m の排水施設が設置されていることから 0.3m 控除し、2.0m として検討した。地盤条件は、平成 30 年 7 月豪雨後に本事例箇所で行ったボーリング調査の結果より、CM 級花崗岩 (C=500KN/m²、φ40°) とし、耐力度照査はコンクリート壁工と杭基礎工について許容応力度法にて確認した。

4.4 耐力度照査の結果

表-8 に全 30 ケースを対象に耐力度照査を行った結果を示す。溪床勾配でみると、溪床勾配 5° ではすべての土砂量で「OK」の結果となり、溪床勾配 10° 以上になると土砂量によっては「NG」が見られる結果となった。また、土砂量でみると 2,000m³ 以下はすべての溪床勾配で「OK」の結果となり、3,000m³ 以上になると、溪床勾配によっては「NG」が見られる結果となった。このことから、今回検討を行った既設落石防護工と同じ構造且つ地盤条件であれば、溪床勾配 25° 以下かつ土砂量 3,000m³ 以下の場合であれば、区域外からの土石流の流入を防止できるといった結果となった。本論文 2.1 に示したとおり、高速道路の土砂流入災害のうち約 6 割が流入土砂量 3,000 m³ 以下であり、今回検討を行った構造であれば、落石対策に加えて、土石流対策としても対策効果を得ることができると考えられる。溪床勾配 20° のケースの耐力度照査結果を表-9 に示す。コンクリート壁の照査は土砂量の違いにより全て許容値を満足するが、杭基礎の照査については、4,000m³ 以上では許容値を上回る結果となった。コ

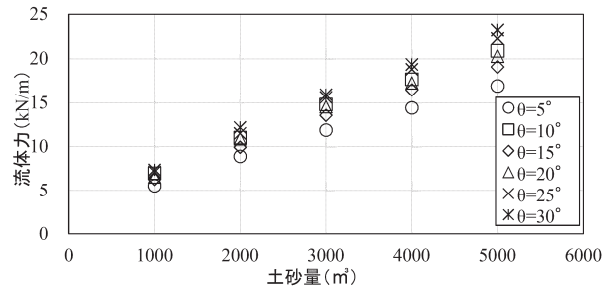


図-18 土砂量と流体力の関係図

表-8 全 30 ケースにおける耐力度照査結果

計算結果		土砂量 V _{dap} (m ³)				
		1,000	2,000	3,000	4,000	5,000
溪床勾配 (°)	5	OK	OK	OK	OK	OK
	10	OK	OK	OK	OK	NG
	15	OK	OK	OK	OK	NG
	20	OK	OK	OK	NG	NG
	25	OK	OK	OK	NG	NG
	30	OK	OK	NG	NG	NG

表-9 溪床勾配 20° における耐力度照査結果

土砂量 V _{dap} (m ³)	溪床勾配 θ (°)	コンクリート擁壁工の照査			杭基礎工の照査		
		コンクリート		鉄筋	転倒に対する安全率	曲げ圧縮応力度	局部座屈に対する圧縮応力度
		圧縮応力度	せん断応力度	引張り応力度			
1000	20	0.82	0.06	43	13.16	121	124
2000	20	1.19	0.08	71	9.92	160	163
3000	20	1.48	0.09	95	8.23	192	195
4000	20	1.69	0.10	112	7.30	216	219
5000	20	1.90	0.11	132	6.49	242	246
許容値		12.00	0.39	270	1.00	210	210

：許容値を上回る箇所 単位：N/mm² (安全率以外)

ンクリート壁と杭基礎において耐力度照査を行ったが、コンクリート壁は「OK」のケースでは、許容値に対して余裕のある照査結果となり、安全性に対して問題がないことが確認されたが、「NG」のケースにおいても、コンクリート壁の照査では「OK」ケースと同様に許容値に対して余裕のある照査結果となったものの、杭基礎において圧縮応力度が許容応力度を超える結果となった。これは、溪床勾配 20° のケースに限らず、表-8 で「NG」となった全てのケースで同じ結果となり、本事例における落石防護工の安全性は杭基礎により決まることがわかった。

4.5 耐力度照査の結果を踏まえた今後の方針

本研究における耐力度照査から得られた結果を示す。
 ・コンクリート壁工は、土砂量 5,000m³、溪床勾配 30° でも、コンクリートに発生する圧縮応力度、せん断応力度及び鉄筋に発生する引張り応力度は、各々許容値を満足することが確認された。
 ・杭基礎工は、土砂量 5,000m³、溪床勾配 30° でも、転倒に対する安全性と杭体に発生する軸圧縮応力は、各々許容値を満足することが確認された。但し、局部座屈に対する圧縮応力は許容値を満足しない。これらは、9 つのケースで確認された。構造体としての安全性は、2,000m³ 以下の場合、溪床勾配 5°～30° の範囲の全てで各々許容値を満足することが確認された。なお、今回照

査を行った事例は、地盤条件が CM 級花崗岩と条件が良かったことから、今後は、地盤条件を変更して照査を行う計画としている。

5. まとめ

対策工を計画する際、維持管理段階では用地の制約を大きく受ける。そのため、対策施設の規模を決める際、対象とする計画流出土砂量と対象施設による流入防止量の適切な設定が必要となる。今回の分析では、高速道路に影響を与える土砂流入災害の多くは 4,000 m³ 未満が占めることがわかった。また、机上評価の項目と区分については、近年の災害状況と関連性が高く、妥当性が確認された。今後は、本検討で把握した高速道路で対象とする計画流出土砂量や机上評価の考え方について更なる検討を進め効率的かつ効果的な対策工に繋げていく。

また、土石流の流入を防止した落石防護工の構造をもとに、溪床勾配と土砂量の条件を変えた照査を行ったところ、CM 級岩盤で溪床勾配 25°以下かつ土砂量 3000m³ 以下であれば、構造上の安全性に土石流の流入を防止できるといった結果となった。但し、この溪流は、最大粒径 0.3m と大きくなく流木による影響も少なかった事例である。また、照査結果が NG となるケースは全て、杭基礎において許容値を上回る結果となった。本事案の土石流は谷出口から落石防護工に達するまでに高低差および勾配差があり、この間に流体力が減勢することが考えられる。この減勢を加味することで土砂の流入防止が可能な土石流のケースが増える可能性があることから、今後は、谷出口から対象構造物までの形状に着目した検討を行いたいと考えている。

謝辞

本研究を行うにあたり、災害記録の資料提供や現地調査に際しては、東日本高速道路㈱、中日本高速道路㈱、西日本高速道路㈱の担当社員の皆様にご協力を頂いた。

記して、感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 内閣府：令和 2 年度版防災白書，
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r2.html>，
(参照 2021.9.15)。
- 2) 地盤工学会平成 28 年 8 月北海道豪雨による地盤災害調査団：平成 28 年 8 月北海道豪雨による地盤災害調査報告書，p.66，2017。
- 3) 西日本高速道路㈱：九州地方の高速道路の通行止めについて（第 1 報），
<https://corp.w-nexco.co.jp/corporate/release/kyushu/h29/0710/>，(参照 2021.4.9)。
- 4) 国土交通省：平成 30 年 7 月豪雨について，
<https://www.mlit.go.jp/common/001248491.pdf>，(参照 2021.4.9)。
- 5) 村上豊和，下野宗彦，中田幸男：高速道路に影響を与える土石流危険溪流の資料調査に基づく評価手法，地盤と建設，Vol.34, No.1, pp.19-27，2016。
- 6) 西日本高速道路㈱：土石流対策の手引き，p.2 章-7，2017。
- 7) 竹本将：地盤工学会誌，Vol.168, No.5, pp.1-4，2020。
- 8) 画でみる地形・地質の基礎知識，p.33，1983。
- 9) 松下純子，石本裕己，北村晴夫：平成 21 年 7 月 21 日防府・山口土石流災害について（その 2）-土石流の要因となった斜面崩壊と地形の関係-，全地連「技術フォーラム 2010 那覇」，研究発表会講演論文集，pp.121-122，2010。
- 10) 国立研究開発法人産業技術総合研究所，地質調査総合センター，地質図表示システム，地質図 Navi.，
<https://gbank.gsj.jp/geonavi/>，(参照 2021.4.9)。
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害部砂防研究室：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，p.34，2016。

(2021 年 6 月 11 日 受付)