

ネットワークの構造を考慮した道路網の水害・土砂災害リスク評価手法

高山 芳樹¹・加藤 博和²・朴 秀日³・田島 治希⁴

- ¹ 学生会員 名古屋大学大学院環境学研究科
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町) E-mail: ytakayama@urban.env.nagoya-u.ac.jp
- ² 正会員 名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町) E-mail: kato@genv.nagoya-u.ac.jp
- ³ 正会員 名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町) E-mail: suil@urban.env.nagoya-u.ac.jp
- ⁴ 学生会員 名古屋大学大学院環境学研究科
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町) E-mail: htajima@urban.env.nagoya-u.ac.jp

極端気象に伴う災害が引き起こす交通網の途絶を防ぐために事前の防災・減災策が求められるが、多くの時間と費用を必要とするため、対象区間ごとの対策の優先順位の決定が重要である。本研究では道路網を対象に、区間ごとの災害リスク評価と、ネットワークからみた重要度を考慮した各区間の重要度を加味した災害リスク評価の手法を構築する。愛知県内の緊急輸送道路網に適用した結果、水害では大都市周辺の橋梁を含む区間、土砂災害では主要道路の山間部区間が高リスクであることが示された。

Key Words: Disaster Risk, Flood, Sediment Disaster, Risk Evaluation, Link Criticality Index, Network Analysis

1. はじめに

(1) 研究の背景

近年、日本において大きな被害をもたらす自然災害が頻発しており、これにより線路や道路といった交通インフラにも毎年のように被害が発生し交通網の途絶が起きている。したがって、交通インフラの災害対策は、発災後の不通状態の迅速な解消だけでなく、防災・減災のための事前対策が急がれる。

国土強靱化計画¹⁾によれば鉄道橋梁の災害対策完了は2032年度、道路橋梁の災害対策完了は2040年度と計画されているように、災害対策に長い時間がかかることが見込まれている。

さらに、もし気候変動により極端気象が増加するならばインフラの災害対策がさらに後手に回ってしまう。また、東日本大震災以降、災害復旧にはBuild Back Betterや予防保全の考え方が適用されるようになり、被災前以上の性能を持つインフラが求められるようになってきているため、同じ箇所の復旧においても復旧費用は以前に比べ高くなっている。

人口減少やオンライン会議の浸透などにより交通需要は減少すると予想され、災害対策が必要な区間における事前対策の優先順位決定が必要である。

(2) 研究の目的

本研究では、道路網の水害・土砂災害リスク評価手法を構築する。その際、「災害に起因する脆弱性」と「ネットワーク構造に起因する脆弱性」を考慮できるものとする。具体的には、国土数値情報の浸水想定区域及び土砂災害データなどを用いてハザードマップと道路を重ね合わせ、これを区間（交通量データが公開されている単位）ごとに集計し、被災想定区域と重なる延長の合計と交通量から各区間のリスク値を求める。さらにネットワーク分析を行い、各区間のリスク値に、ネットワーク全体からみた各区間の重要度（ネットワークの構造によって決まる）を加味して、ネットワーク構造を考慮した当該区間のリスク値を求める。

以上の結果を踏まえて、道路網の構造を考慮した、各区間の自然災害対策の優先順位を決定する手法を提供することを旨とする。

2. 既往研究と本研究の位置付け

道路網におけるリスク評価においては、グラフ理論の適用が行われてきた。評価手法は主に連結信頼性と脆弱性の2つに大別される。

連結信頼性は、2点間が連結されているために必要な

最小リンク（区間）の組み合わせ（ミニマルパス）と 2 点間が寸断されるために必要な最小リンクの組み合わせ（ミニマルカット）を考慮して、2 点間が連結されている確率を求める手法である。各区間に被害率関数を設定することで道路が不通になる確率を計算し、その値を用いて 2 点間が接続されている確率を求める手法である。若林ら(1988)²⁾などの研究例があるが、被害率関数の設定と、大規模ネットワークにおいて計算量が膨大になることが課題である。

一方、脆弱性は、各リンクが通れなくなる確率を考慮せず、ネットワーク構造のみから脆弱な箇所を判定するものである。瀬戸ら(2008)³⁾は 2 点間でリンクを共有しない経路である「非重複経路数」を求め、当該リンクを通れなくなることによる非重複経路数の減少割合をリンク重要度指標(LCI)として定義した。倉内ら(2009)⁴⁾は Hansen のアクセシビリティ指標を用い、少数のリンクが通れなくなることでアクセシビリティが大きく低下するノードを脆弱なノードと定義し、これを評価するための指標として接続脆弱性を提案した。中山ら(2014)⁵⁾は瀬戸ら(2008)³⁾の手法を用いて首都高速道路のリンク重要度指標を計算し、推計交通量を乗じて補修の優先順位を決定した。

大澤(2020)⁶⁾は「危険箇所数」という指標を定義し、危険箇所数の多い区間が脆弱な区間であると定義したうえで、石川県の道路網についてリスク評価を行った。

以上のように、既存研究において様々な観点から評価が行われているが、実道路網への適用に関して、被災が想定される箇所、経路の距離、交通量をいずれも考慮した研究はない。それらすべてを考慮するところに本研究の意義がある。

3. 各区間の災害リスク評価手法

(1) リスク評価の指標とその定義

災害リスクの評価は一般的に「危険源：災害の発生頻度」「脆弱性：影響を受けやすくなる性質」「曝露：影響が及ぶ人数」の指標が用いられる⁷⁾。本研究においてリスクは「危険源」「脆弱性」「曝露」の積とする。

「危険源」は、対象とする災害を引き起こす事象の発生確率とする。

「脆弱性」は、災害に対する脆弱性とネットワーク構造に起因する脆弱性の積とする。災害に対する脆弱性は、被災想定区間と重なる道路の延長と、および老朽化対策が必要な橋梁の延長の合計延長とする。ネットワーク構造に起因する脆弱性は、OD ペア間の各経路の距離から有効となる経路数を求め、有効となる経路数が当該区間が不通になることによって減少する割合と定義する。

「曝露」は、小型車交通量を人の移動量に換算した値とする。

(2) 対象とする災害と発生確率

本研究では、水害と土砂災害を対象とする。

水害は、一級河川における計画規模洪水は100年に一度の洪水を想定している。そこで水害の年発生超過確率を1/100と設定する。土砂災害は、土砂災害特別警戒区域が100年間での発生確率が30%となることを想定して設定されている。そこで、確率を高めに見積もって年発生超過確率を1/250と設定する。土砂災害警戒区域についても同じ値とする。

(3) 災害に対する脆弱性評価手法

災害に対する脆弱性は、ハザードの対象となる被災想定区間の延長と復旧期間から求める。延長はハザードマップとの重ね合わせに加え、水害では橋梁を、土砂災害ではトンネルを考慮する。

橋梁は、橋脚が被害を受けた場合、鉄道橋では応急復旧までに半年から1年を要する⁸⁾。道路橋も同様であると考え、復旧期間を365日とする。浸水の復旧期間は浸水想定期間と同じとする。被災が想定される橋梁として、「道路メンテナンス年報」で「III:早期措置段階」と判断された橋梁のうち、河川をまたぐものを対象とする。

トンネル内では、土砂災害については被害は発生しない。そこで土砂災害警戒区域と道路が重なった部分のうち、完全にトンネル内にある部分については脆弱性を評価するための延長に算入しない。

復旧期間は、25~60m程度の土砂崩れについては復旧日数が概ね被災延長に比例するという先行研究⁹⁾の結果から、被災想定区間延長をそのまま災害に対する脆弱性指標とする。

(4) 曝露の評価

曝露指標は、平成 27 年度道路交通センサスにおける 24 時間交通量を使用する。人流を重視する観点から、小型車の交通量を使用し、国土交通省が一般に用いている 1 台あたりの乗車人数 1.3 人を用いて小型車台数を影響人数に換算する。

4. ネットワーク構造を考慮した各区間のリスク評価手法

ネットワーク構造を考慮した区間の脆弱性評価は、瀬戸ら(2008)³⁾のリンク重要度指標 LCI (Link Criticality Index) を一部修正の上利用する。

瀬戸ら(2008)³⁾は、リンク a の重要度指標 LCI(a)を式(1a)

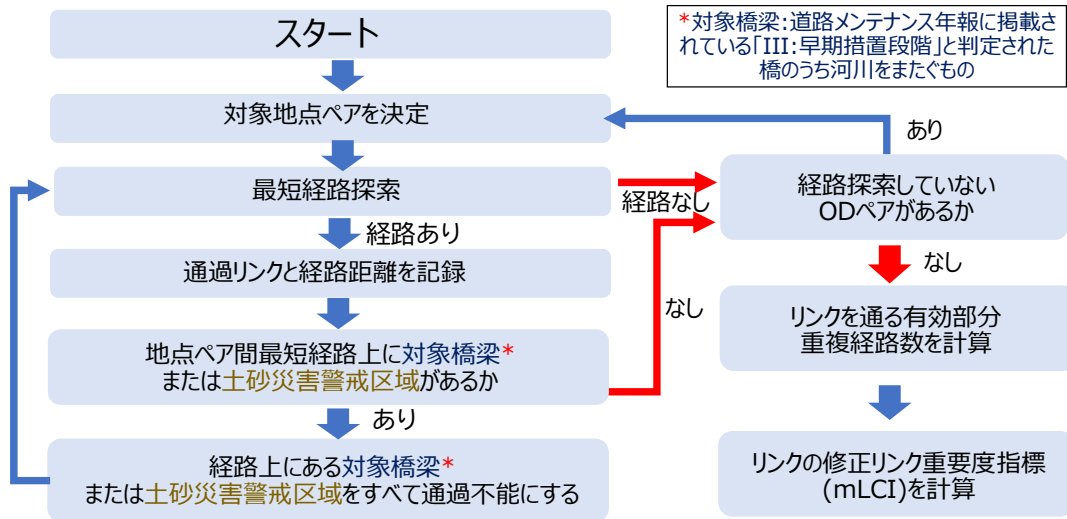


図-1 ネットワーク分析のフロー

で定義し、LCI の高いリンクを脆弱なリンクと定義した。ここで非重複経路数とは、同一 OD 間でリンクを一切共有しない経路の数である。

中山ら(2014)⁹⁾はこの指標を用い、首都高速道路における LCI を計算した上で各リンクの交通量との積から補修の優先順位を決定した。同研究においては非現実的な迂回経路を計算対象から除くためカットオフ値を設定しているが、カットオフ値を最短経路の 2 倍に設定しても非現実的な迂回経路が含まれてしまうことが課題として挙げられている。逆にカットオフ値を低く設定すると多くの経路で非重複経路数が 1 となり、LCI が必要以上に高く見積もられてしまう可能性がある。

この問題を回避するため、本研究においてはあえてカットオフ値を設定せず、経路数の数え方を経路距離に応じて変えることで、ネットワーク構造を考慮した区間重

$$LCI(a) = 1 - \frac{\text{リンク } a \text{ 寸断時に残った非重複経路数}}{\text{対象とする全 OD の非重複経路数}} \quad (1a)$$

要度を定義した。また被災が想定される箇所を含まない区間については経路の重複を認めた。このようにして求めた経路数を有効部分重複経路数と定義する。有効部分重複経路数はある OD ペアの最短経路において 1 となり、経路の距離に対して単調減少する関数を設定し、この関数の値を各経路について足し合わせた値とする。不通になったリンクがないときの OD ペア rs の有効部分重複経路数 $N_{eff-rs}(0)$ は、 rs 間の最短経路の経路長を L_{1-rs} 、 k 番目に短い経路の経路長を L_{krs} として次の式(1b)で定義する。

$$N_{eff-rs}(0) = \sum_k \left(\frac{L_{k-rs}}{L_{1-rs}} \right)^{-\gamma} \exp \left(-\gamma \frac{L_{k-rs} - L_{1-rs}}{L_{1-rs}} \right) \quad (1b)$$

ここで、 γ はパラメータである。(1b)式の形と γ の値は、平成 13 年度中京都市圏パーソントリップ調査で集計された各市町村間の自動車によるトリップ数、各市町村の平成 12 年の人口および各市町村役場間の最短経路距離を、重力モデルの指数型、べき乗型、混合型の式に代入し、重回帰分析を行い自由度調整済決定係数が高かった混合型を採用した上で $\gamma=1.083$ と決定した。

次に各 OD ペアの有効部分重複経路数を各 OD に対して合計し、ネットワーク全体の欠損リンクがない場合の有効部分重複経路数 $N_{eff-all}(0)$ を求める。なお W は対象とする OD ペアの集合である。

$$N_{eff-all}(0) = \sum_{rs \in W} N_{eff-rs}(0) \quad (1c)$$

次に全経路のうちリンク a を通る有効部分重複経路数 $N_{eff-all}(a)$ を同様の手法で求め、式(1d)によって修正リンク重要度指標 mLCI(modified Link Criticality Index)を求める。

$$mLCI(a) = \frac{N_{eff-all}(a)}{N_{eff-all}(0)} \quad (1d)$$

ネットワーク分析のフローは図-1 に示す。

リスク値は(1)で設定した「危険源」, 「脆弱性」, 「曝露」の積とする。算出フローを図-2・図-3 に示す。

5. 実際の道路網への評価手法の適用

(1) 適用するネットワークと OD ペア

対象とするネットワークは愛知県内の緊急輸送道路網とする(図-4)。対象とする OD ペアは愛知県庁と平成

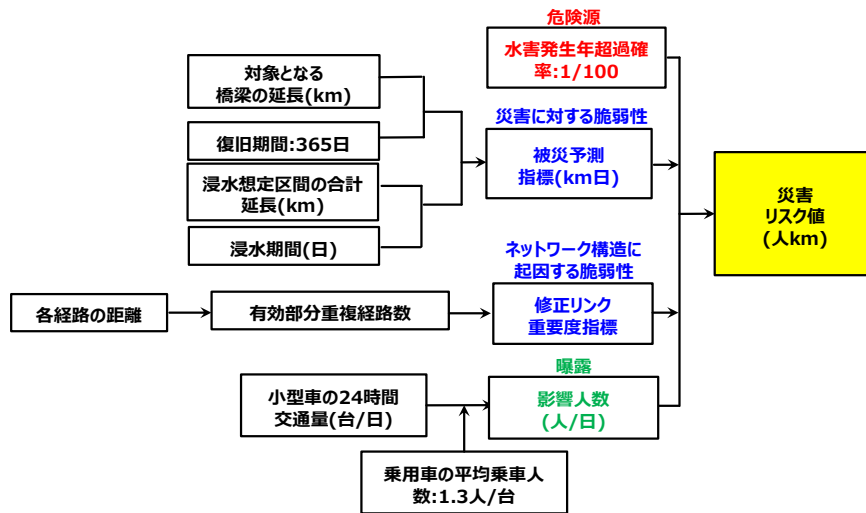


図-2 各区間の水害リスク値の算出フロー

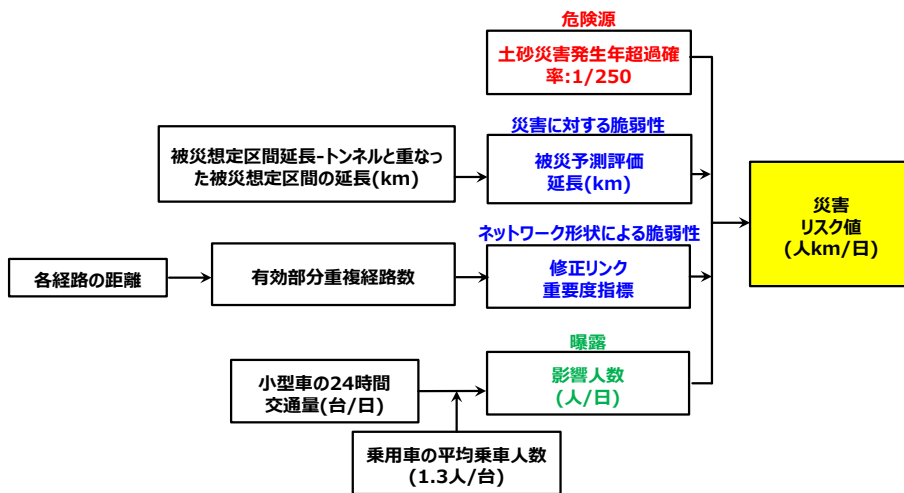


図-3 各区間の土砂災害リスク値の算出フロー

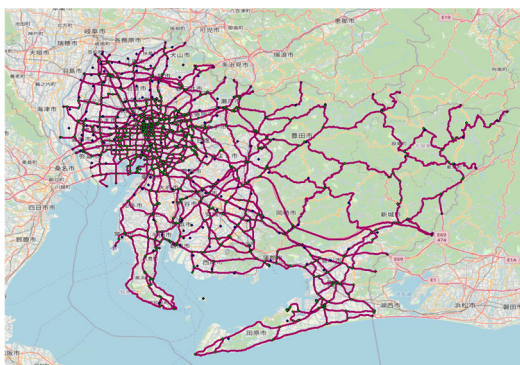


図-4 愛知県緊急輸送道路網

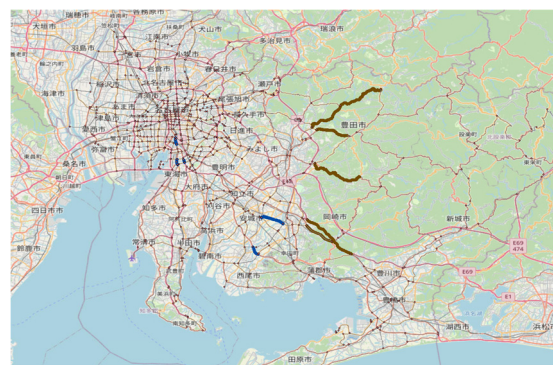


図-5 ネットワーク構造による脆弱性を考慮しない場合の高リスク区間 (青線:水害、茶色線:土砂災害)

の大合併前の各市町村役場に相当する市町村役場および支所の間と、平成の大合併前に単独自治体であった自治体の役場機能を引き継ぐ支所と現在の当該支所が所在する自治体の本庁舎の間、および新城市役所と設楽町・東栄町・豊根村の各町村の役場・支所との間とする。

(2) 水害リスク

ネットワーク構造による脆弱性を計算する前に、各区

間における危険源・曝露および災害に対する脆弱性を掛け合わせて区間別リスク評価を行った結果、リスク値が高い上位5区間は図-5の青線で太く示した区間のようになった。水害の修正リンク重要度指標が高い区間は図-6のようになった。赤がmLCI0.050以上、青が0.025~0.050の区間である。

以上の2指標を掛け合わせ、水害リスクの高い上位5区間を計算すると図-7のようになった。ただし水色の点



図-6 水害についての修正リンク重要度指標が高い区間(太線)
(赤:mLCI0.050以上, 青:mLCI0.025以上0.050未満)

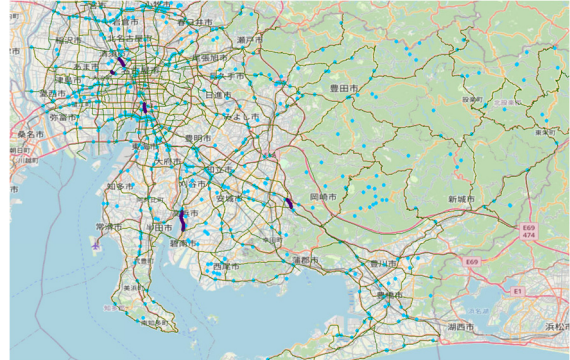


図-7 青線:水害リスクが高い上位5区間
水色の点:道路メンテナンス年報で「III:早期措置段階」と判定された橋

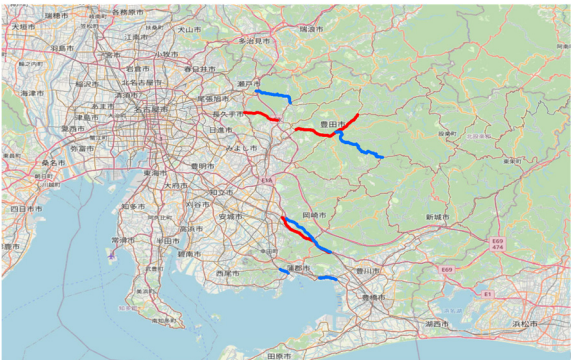


図-8 土砂災害についての修正リンク重要度指標が高い区間
(赤:mLCI0.10以上, 青:mLCI0.05以上0.10未満)

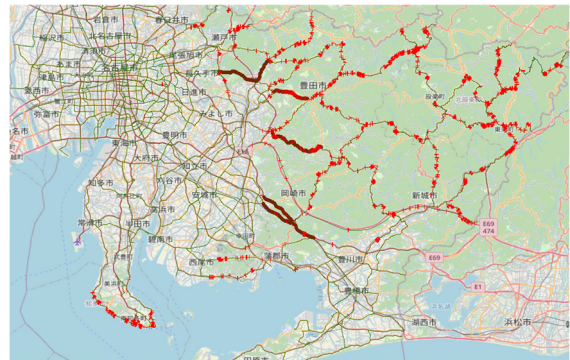


図-9 土砂災害リスク値が高い上位5区間
赤:対象道路の土砂災害被災想定箇所

は、道路メンテナンス年報で「III:早期措置段階」と判定された橋梁である。

(3) 土砂災害リスク

区間別評価を行った結果、上位5区間は図-5に示す茶色の区間のようになった。

ネットワーク分析の結果、mLCIが高い区間は図-8のようになった。赤はmLCI0.10以上、青が0.05~0.10の区間である。

以上で求めた区間別リスク値とmLCIの積からリスクの高い上位5区間を求めると、図-9の茶色の線のようになった。ただし、赤が土砂災害の被災想定箇所である。

6. おわりに

(1) 得られた成果

本研究では最短経路探索を繰り返し行い、ODペア間の経路のうち被災が想定される箇所において重複しないものの数を数えた。その際、ネットワーク分析を行った先行研究において課題となっていたカットオフ値設定についての問題を、経路距離についての単調減少関数を用いることで解決した。

愛知県緊急輸送道路網を対象に手法を適用し、災害に

対して脆弱な区間とクリティカルな区間を特定し、リスク評価を行った。その結果、水害では名古屋市周辺の橋梁を含む区間、土砂災害では岡崎市から豊川市にかけてと豊田市東部に高リスクな区間が存在することが示された。

(2) 課題

- 橋梁の復旧期間を365(日)として一律で設定した。しかし実際は同じ流量の水が流れてもそれぞれの橋梁や橋脚の構造によって影響が異なる。これらの考慮が必要となる。
- 災害の年発生確率は水害が1/100(一級河川を想定)、土砂災害が1/250と一律で設定した。しかし土砂災害警戒区域も場所によって災害発生確率が異なる。また二級河川では浸水想定は25年に一度となっている。このようにハザードの発生確率の違いを考慮した分析が必要となる。
- ハザードの発生が想定されない区間について経路の重複を認め、近くの区間が不通になった際に迂回交通が流入できると考えた。しかし平常時においても混雑している区間は、他区間の通行規制による迂回交通を受け入れる余裕がないと考えられる。このように、ハザードの発生以外にも混雑度などを制約条件とした経路探索が必要となる。

謝辞：本研究は（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20S11818）「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究 サブテーマ 44:交通・輸送システムへの気候変動影響予測と新しいサービスの検討と評価」の一環として実施した。

参考文献

- 1) 内閣官房：防災・減災、国土強靱化のための 5 か年加速化対策に関する中長期目標一覧，
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/5kanenkasokuka/pdf/chuuchouki_mokuhyou.pdf, p.34
(最終閲覧日 2022.3.1)
- 2) 若林拓史，飯田恭孝，吉木務：ミニマルパス・カットを用いた道路網信頼度の近似計算法，交通工学， Vol.23, No.4, pp.3-13, 1988.
- 3) 瀬戸裕美子，倉内文孝，宇野伸宏：脆弱性の概念を用いた道路網接続性評価に関する研究，土木計画学研究・講演集, Vol.37, 2008.
- 4) Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A. and Seto Y. : Network Evaluation Based on Connectivity Vulnerability, Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee, 2009.
- 5) 中山晶一郎・朝倉康夫：道路交通の信頼性評価，コロナ社，pp.170-196, 2014.
- 6) 大澤脩司：災害危険箇所に着目した道路の災害リスク評価に関する研究，金沢大学リポジトリ，
https://kanazawa-u.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=53479&item_no=1&page_id=13&block_id=21, 2020
- 7) 菊本統，下野勘智，伊藤和也，大里重人，稲垣秀輝，日下部治：我が国の自然災害に対する統合的リスク指標，土木学会論文集F6（安全問題），73巻1号，pp.43-57, 2017.
- 8) 小湊祐輝，阿部慶太，篠田昌弘：洪水により被災した鉄道橋梁橋脚の応急復旧事例，土木学会論文集A1（構造・地震工学），72巻2号，pp.332-337, pp.A_22-A_28, 2016
- 9) 宮川智史，久保哲也，森芳徳，宮武裕昭：大規模な土砂災害に対応した効率的な復旧方法の検討，ジオシンセティックス論文集，28巻，pp.45-52, 2013.

(2022.3.6受付)

A RISK EVALUATION OF FLOOD AND SEDIMENT DISASTER TO HIGHWAY NETWORK CONSIDERING NETWORK STRUCTURE

Yoshiki TAKAYAMA, Hirokazu KATO, Suil PARK and Haruki TAJIMA