

大規模震災がもたらす道路破断・走行速度低下の予測モデルの構築及び強靱化対策効果の分析

小野寺 哲也¹・中尾 聡²・片山 慎太郎³・東 徹⁴・
川端 祐一郎⁵・藤井 聡⁶

¹ 学生会員 京都大学大学院 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-2-433)

² 正会員 京都大学大学院 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-2-433)

³ 正会員 一般社団法人 システム科学研究所 (〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目無番地)

⁴ 正会員 一般社団法人 システム科学研究所 (〒160-0004 東京都新宿区三矢六丁目 13-5)

⁵ 正会員 京都大学大学院 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-2-433)

⁶ 正会員 京都大学大学院 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-2-433)

我が国の国土は様々な自然災害に見舞われるリスクを抱えており、それらに対処するため、インフラの拡張や耐震化をはじめとする国土強靱化を推進することが喫緊の課題となっている。強靱化のための事業の妥当性や緊急性を判断するためには、災害によってインフラがどの程度毀損し、強靱化対策によってどの程度その被害を軽減できるのかといった定量的な予測が必要となるが、そうした知見の蓄積は不十分である。そこで本研究では、東日本大震災におけるデータに基づき、地震発生時の道路リンクの破断および車両走行速度の低下を予測するモデルを構築し、これを用いて強靱化対策効果を分析した。その結果、橋梁の耐震化や電線類の地中化等の強靱化施策が被害軽減に寄与することが明らかになった。ただし、効果量が比較的小さく推計されることや、インフラ耐震化状況等のデータが不足しており推計精度に限界がある等の課題も明らかになった。

Key Words: earthquake, vulnerability function, road, national resilience

1. 背景と目的

(1) 背景

我が国は、地震や津波、台風をはじめとする様々な自然災害に見舞われるリスクが非常に高い国である。それ故、そのような自然現象がもたらす危機に対し、国土強靱化を達成することが喫緊の課題となっている¹⁾。国土強靱化とは、国土や経済が、災害や事故などにより致命的な被害を負わない強さと、速やかに回復するしなやかさ、すなわちレジリエンスを備えることを指し、「人命の保護が最大限図られること」「国家及び社会の重要な機能が致命的な障害を受けず維持されること」「国民の財産及び公共施設に係る被害の最小化」「迅速な復旧復興」の4つをその基本目標としている²⁾。

これに対し、政府では「強くしなやかな国民生活の実現を図るための防災・減災等に資する国土強靱化基本法」が2013年に成立し、それに基づく国土強靱化基本計画や、それをより具体化した毎年次の国土強靱化アク

ションプランが策定されている³⁾。また、2013年に設置されたレジリエンス強化策検討のためのナショナル・レジリエンス(防災・減災)懇談会は2017年1月で38回目の開催を迎えるなど、国家を挙げた国土強靱化への取り組みが現在も引き続き進められているところである⁴⁾。

このような取り組みにより、日本においてこれまでどのような災害が発生し、どのような被害を受けたかという知見が改めて集積され、さらに今後どのような災害リスクが考えられるかについて検討が進んできた。また、災害リスクに対して国土強靱化が目指すべき具体的な目標を設定し、我が国が現状その目標を達成できるかどうかを評価する「脆弱性評価」も進められてきている⁵⁾。これに伴い、今後実施されるべき強靱化施策についても、産官学を横断した幅広い視点から検討が行われてきている。

一方で、これらの検討は定性的な議論に留まるものが多く、定量化されている知見は少ないため、レジリエンス強化のための各種取り組みの、政策としての妥当性や

緊急性の判断、優先順位付けを行うための客観的材料に乏しいのが現状である。今後は、レジリエンス向上の取り組みを実践的に推進していくにあたり、取り組みの効果の予測等について定量的・客観的な知見が必要となる。

定量的な知見とは典型的には、「どのような規模・内容の災害が起きた場合にどのようなインフラがどの程度毀損し、それによって経済活動がどのような影響を受けるのか」という被害の数値的な把握と、「インフラをどの程度強化しておけば被害をどの程度軽減できるのか」といった強靱化施策の効果の数値的な把握である。それらの知見がなければ、どの程度の予算が必要であるか、そしてどの程度のインフラ強化を目指せばよいかといった計画の策定ができず、強靱化の実践的な推進に移ることができないからである。

そうした定量的な知見を得るには、「災害の規模・内容やインフラの強化水準によって、インフラの毀損程度がどのように変化するか」を表現するインフラの被害関数を構築することで、「インフラをどの程度強化すれば、被害をどの程度軽減できるのか」といった強靱化施策による対策効果を推定することと、そのインフラの性能の向上や低下を変数として組み込んだ経済計量モデルを構築して、経済被害の程度を計算することが必要となる。詳しくは次章で既往研究を概観する際に言及するが、そうした研究は現在のところ、十分に進められているとは言い難い状況である。

(2) 目的

上記のような問題意識から、本研究ではインフラの被害関数の推定を試みる。具体的には、大規模地震発生時の道路リンク破断や走行速度低下の程度を、地震の規模や道路の種類、耐震化推進状況等の関数として表現するモデルを推計する。またこれを用いて、「橋梁耐震化や電線類地中化等の強靱化施策をどの程度強化すれば、道路破断をどの程度軽減できるのか」という、強靱化施策による対策効果についても分析する。なお、本研究が被害関数の中でも道路ネットワークの被害関数に注目するのは、次のような理由からである。

第一に、一口にインフラと言ってもその指す内容は様々であり、その被害関数もそれぞれ異なる。そのため、各インフラについて一つ一つ被害関数を推定していくことが必要であるが、なるべく経済的な影響力が大きいものから着目していくことが望ましいと考えられる。なかでも道路ネットワークは地域の人流・物流の根幹であり、人・物の移動時間が増大することは、生産活動にも消費活動にも大きな影響を与えると考えられ、実際に、過去の震災発生時に道路の通行が妨げられたことにより、経済活動に影響が生じたことについて様々な報告がある。

第二に、道路については、橋梁の耐震化や電線類の地

中化など強靱化の方法がある程度具体的になっており、かつ現状でそれらの施策を推進する余地が十分にある。また、鉄道や送電網など民間企業が保有していることが多いインフラに比べ、道路は中央・地方政府による公共投資で成り立っている面が大きいので、「国家や自治体に取り組むべき強靱化施策」として適当なものの一つであると言える。

第三に、交通ネットワークの性能については、それをマクロ経済モデルに反映させる方法が、アクセシビリティを組み込んだマクロ経済計量モデルの既往研究においてすでに開発されている。実際の計算は今後の研究課題となるが、道路ネットワークの被害関数さえ同定できれば、マクロ経済計量モデルについての既存研究の知見を応用することで、道路ネットワークの毀損が引き起こす経済的被害の導出は比較的スムーズに行えると思われる。

上記のように本研究では、災害の規模や強靱化施策の推進状況等に応じて、道路ネットワークが毀損する程度の変化を表現する被害関数を推定し、これを用いて、強靱化施策をどの程度強化すれば、道路ネットワークの被害をどの程度軽減できるのかといった、強靱化施策による対策効果を分析する。この作業を通じて、今後実行されるべき総合的な経済被害の分析への材料を供し、ひいては、官民が今後実施すべき強靱化政策の妥当性や緊急性の判断に資するような、定量的・客観的な知見を供することを本研究の目的とする。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

(1) 既往研究

Gordon et al⁶⁾ や土屋ら⁷⁾、⁸⁾ にみられるように、災害による交通ネットワークの毀損がもたらす経済被害に着目した研究は数多くなされており、被害の推計方法も様々である。しかし、これまでの研究では、交通ネットワーク自体の物理的な被害関数については推計から除かれており、物理的な被害関数を経済被害の推計モデルに組み込んだ研究は見られない。

また、廣瀬ら⁹⁾ や塚口ら¹⁰⁾ のように、ある特定の道路構造物についてその被害関数を導出している研究はいくつか見られるが、1つ1つは分析範囲が限られており、また車両の通行が可能か否かという意味での破断の予測を目的としてはいないものもあり、地震がもたらす人流・物流の阻害を通じた経済的悪影響の予測にそのままでは用いることが難しい。また、車両の通行が可能か否かに着目した研究においても、破断を説明する要素が道路幅員や震度などごく少数に限られていたり、適応できる道路に制約があるなどの課題が残されている。

(3) 本研究の位置づけ

上記にみたように、災害による交通ネットワークの毀損がもたらす経済被害に着目した研究は数多くなされているものの、交通ネットワーク自体の物理的な被害関数については推計から除かれており、物理的な被害関数を経済被害の推計モデルに組み込んだ研究は見られない。また、震災時の道路破断推定を目的とした論文においては、「ある特定の道路構造物について被害関数を求めるもの」や「数種類の説明変数によって通行不能を表現するもの」についてはこれまでに研究が進められてきている一方で、構造種別によらない道路一般について、幅広い要素の説明変数を用いて破断確率を推定する総合的な研究は見られない。

さらに重要な点として、これらの研究で用いられている説明変数からは、実行可能な「対策」と破断の関係性が明確になるとは言えず、実務上の示唆が引き出しにくい。たとえば、道路の幅員が広ければ（瓦礫による）破断の確率が下がるというのであれば、道路を全体的に太くすべきであるというような対策が導かれるが、それは現実的ではない場合も多いだろう。

したがって、交通ネットワークの毀損による経済活動の低下を定量的に把握するうえでは、各道路リンクについて、移動の制限という意味での破断確率（や通行速度の低下）を推計することが必要であり、かつ具体的に実行可能な対策との関係性が明らかになるような説明変数を考慮に入れることが望ましいと言える。

上記の認識のもと、本研究では、災害の規模や道路リンクの基礎データに加え、強靱化施策の推進状況等も説明変数に加えたうえで、震災発生時の各道路リンクの破断確率及び通行速度低下を推計する被害関数を構築する。さらにこの被害関数を用いて、強靱化施策による対策効果を分析することで、今後実行されるべき経済被害の分析への材料を供し、ひいては、今後実行すべき強靱化施策の妥当性や緊急性の判断に資するような、定量的知見を供する。

3. 分析手法

(1) データ整理

本研究では、東日本大震災における被災状況等のデータをもとに分析を行う。具体的な対象エリアは東北地方（青森県・岩手県・宮城県・秋田県・山形県・福島県）における、推計震度分布¹¹⁾（エラー! 参照元が見つかりません。）の震度5弱以上の地域である。

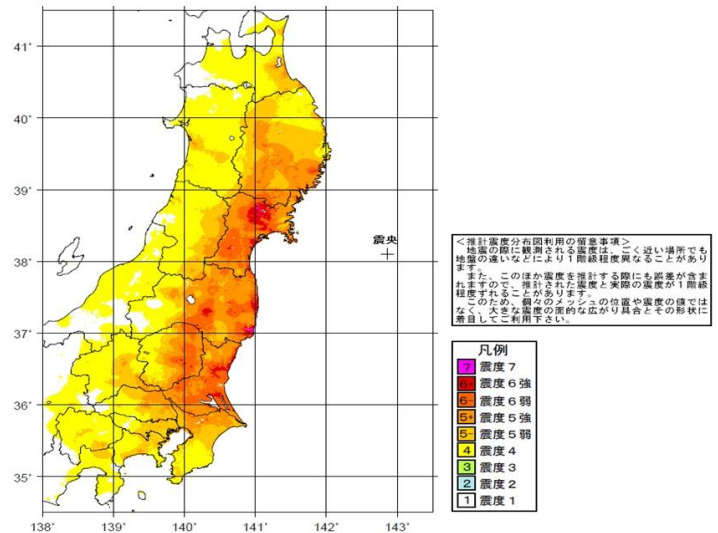


図1 推計震度分布図

この対象エリア内に存在する計 101,019 本の道路リンクを対象に、分析を行うための各種データを整理した。先に述べたように、多様な変数をモデルに組み込むために、表1のように道路リンクの特性を表現するデータを用意し、グループ分けした。次項以降で、各データの説明およびデータ取得方法について述べる。

表1 データ項目

グループ	データ名称 (単位)
リンク特徴	リンク長 (m) , 隣接リンク数 (本) , 橋梁 (ダミー変数)
被災状況	震度 6 以上 (ダミー変数) , 破断有無 (ダミー変数) , <u>リンク通行速度 (km/h)</u> , 直後 (ダミー変数) , 半年後 (ダミー変数) , 1 年半後 (ダミー変数) , 浸水域 (ダミー変数)
強靱化施策対応率	橋梁耐震化率, 電線類地中化率
土地利用種別	田, その他の農用地, 森林, 荒地, 建物用地, 道路, 鉄道, その他の用地, 河川地及び湖沼, 海浜, 海水域, ゴルフ場, (全てダミー変数)
都市地域種別	都市地域, 市街化区域, 市街化調整区域, その他用途地域, 市街地 (全てダミー変数)

※下線部の項目は目的変数として用いる

a) リンク特徴

「リンク長」は各道路リンクの長さ (m) , 「隣接リンク数」はあるリンクに隣接しているリンクの本数を表す。「橋梁」は、その道路リンクが橋梁であるか否かを表すダミー変数であり、橋梁の場合は 1, 橋梁でない場合は 0 の値をとる。これらの 3 種類のデータは、一般財

団法人日本デジタル道路地図協会製のデジタル道路地図データにより取得した。

b) 被災状況

「震度 6 以上」は、その道路リンクにおける震度が 6 弱以上であることを表すダミー変数である。図-1 に示す推計震度分布図をもとに、震度 6 弱以上のエリアに存在する道路リンクは「震度 6 以上」=1、震度 5 強以下のエリアに存在する道路リンクは「震度 6 以上」=0 と設定した。次に、「破断有無」は道路リンクが破断しているか否かを表すダミー変数である。本研究ではこの項目を目的変数として、道路破断率の予測モデルを構築する。ここで、道路の破断状況を直接的かつ網羅的に集計したデータは存在しないため、間接的に道路の破断状況についてのデータを取得する必要がある。既往研究においては、航空写真を用いて道路の破断を判断する方法や、政府や公共機関の発表資料から道路が通行可能であったか否かを判断する方法が用いられているが、これらの方法は、調査記録が残っている道路にしか適用できない点や、震災発生後からの経時的な道路状況の変化を捉えられない点等の課題があり、網羅的でない。そこで本研究では、国土技術政策総合研究所より提供いただいた民間プローブデータを用いて車両通行の有無を分析することにより、道路の破断有無を把握する。すなわち、震災発生直後、半年後、1 年半後のそれぞれの時点における各道路リンク上でのプローブデータの存在有無を集計し、プローブデータが存在するならば車両が通行可能であり（道路リンクは破断していない）、プローブデータが存在しないならば車両は通行不可能である（道路リンクは破断している）と判定する。プローブデータの集計対象期間は、**エラー! 参照元が見つかりません。**に整理した通りである。

表 2 プローブデータ集計期間

時系列区分		集計期間
震災発生前		2010 年 9 月 1 日 0 時～2010 年 10 月 1 日 21 時 (1 ヶ月間)
震災発生後	直後	2011 年 3 月 11 日 15 時～2011 年 3 月 12 日 15 時 (24 時間)
	半年後	2011 年 9 月 9 日 0 時～2011 年 9 月 15 日 24 時 (1 週間)
	一年半後	2012 年 9 月 7 日 0 時～2012 年 9 月 13 日 24 時 (1 週間)

なお、震災発生前から震災発生後 1 年半の間に、一度もプローブデータによる車両通行実績が存在しない道路リンクについては分析の対象外とした。また、震災発生前には車両通行実績が存在していなかったが、震災発生後に一度でも車両通行実績が得られた道路リンクについて

は、震災発生前にも車両の通行は存在していたとみなすこととした。以上の手順により、震災直後、半年後、1 年半後のそれぞれの時点におけるプローブデータの存在有無を、「破断有無」のダミー変数とした。なお、ダミー変数の値が 0 のとき破断は「無し」、ダミー変数の値が 1 のとき破断は「有り」に対応している。次に、「リンク通行速度」は各道路リンクの総リンク長を総旅行時間で除した値であり、リンクを通行する車両の平均速度を表す。これを目的変数として車両通行速度の予測モデルを構築する。このデータについても民間プローブデータより取得した。次に、「直後」「半年後」「1 年半後」はそれぞれデータの集計期間を表すダミー変数である。最後に、「浸水域」は、その道路リンクが震災に伴う津波により浸水した範囲内に存在しているかどうかを表すダミー変数である。国土地理院が取りまとめた 10 万分の 1 浸水範囲概況図¹²⁾を利用して、目視確認により道路リンクの浸水を判定した。

c) 強靱化施策対応率

「橋梁耐震化率」は、国土交通省が定める緊急輸送道路上の橋梁の耐震化¹³⁾が、平成 28 年 10 月時点で完了している割合を表す。データは国土交通省より提供いただいた (**エラー! 参照元が見つかりません。**)。

表 3 橋梁耐震化率

道路種別	高速道路 (NEXCO・都市高速)	直轄国道 (直轄高速を含む)	都道府県管理道路 (補助国道, 都道府県道)	市町村管理道路
対象橋梁数	17,082	(計) 14,766	28,033	
耐震化済橋梁数	12,528	(計) 11,718	21,444	
耐震化率	73.3%	79.4%	76%	
備考	全国合計のデータのみ	都道府県ごとにデータあり (省略)	全国合計のデータのみ	データなし

エラー! 参照元が見つかりません。をもとに、道路リンクのうち「橋梁」に該当するものに、その道路リンクの道路種別および都道府県に応じて耐震化率を対応させた。

高速道路及び都道府県管理道路に属する道路リンクについては、道路リンクの所在地によらず全国平均の値を用い、直轄国道に属する道路リンクについては、その道路リンクの所在地に応じた県別の耐震化率を用いることとした。市町村管理道路についてはデータが存在しない。次に「電線類地中化率」は、市街地における電線及び電柱等関連施設の地中への埋没が済んでいる道路リンクの割合を表す。こちらも国土交通省よりデータを提供いただいた（エラー!参照元が見つかりません。）

表4 電線類地中化率

道路種別	高速道路 (NEXCO・都市高速)	直轄国道 (直轄高速を含む)	都道府県管理道路 (補助国道, 都道府県道)	市町村管理道路
対象延長		(計) 28,033	14,740	
地中化済延長		(計) 21,444	2,833	
地中化率		37.1%	19.2%	
備考	データなし	都道府県ごとにデータあり(省略)	全国合計のデータのみ	データなし

エラー!参照元が見つかりません。をもとに、道路リンクのうち「市街地」に該当するものに、その道路リンクの道路種別および都道府県に応じて地中化率を対応させた。都道府県管理道路に属する道路リンクについては、道路リンクの所在地によらず全国平均の値を用い、直轄国道に属する道路リンクについては、その道路リンクの所在地に応じた県別の地中化率を用いることとした。高速道路及び市町村管理道路についてはデータが存在しない。

d) 土地利用種別及び都市地域種別

「土地利用種別」は、土地利用の状況について各利用区分(田, その他の農用地, 森林, 荒地, 建物用地, 道路, 鉄道, その他の用地, 河川地及び湖沼, 海浜, 海水域, ゴルフ場)を表すダミー変数である。「都市地域種別」は、土地利用基本計画に基づき指定された「都市地域」について、当該地域の細区分である「市街化区域」「市街化調整区域」「その他用途地域」を表すダミー変数である。これら2つのグループは共に、「国土数値情

報」と呼ばれる、国土の基礎的な情報をGISデータとして整備したデータベースから、データを取得している。ただし、「土地利用種別」グループのうち「市街地」については、3.1.3節で述べた「電線類地中化率」の対象地域を明確にするために、筆者が独自に設定した項目である。「市街地」は、「土地利用種別」が「建物用地」と「道路」の両方に該当するものと定義した。

(2) 道路リンクについてのデータ整理

これまでに述べたデータ整理手順を踏まえ、改めて道路リンクに関する基本量を整理しエラー!参照元が見つかりません。に示す。なお、エラー!参照元が見つかりません。中の破断率は破断延長を総道路延長で除した値である。

表5 道路リンク基本量

年度	道路種別	対象リンク数	対象リンク延長(m)	震災前			震災後		
				破断延長(m)	破断率	速度(km/h)	破断延長(m)	破断率	速度(km/h)
年度5	高速道路	1,086	1,054,101	0	0.0%	87.3	961,391	91.2%	61.8
	直轄国道	5,926	3,509,973	0	0.0%	47.1	1,337,843	38.1%	37.9
	都道府県管理道路	10,211	5,232,775	0	0.0%	38.4	3,517,007	67.2%	32.2
	市町村管理道路	15,860	5,258,607	0	0.0%	26.9	3,973,674	75.6%	24.6
年度6	高速道路	1,514	1,414,496	0	0.0%	94.0	1,330,092	94.0%	58.0
	直轄国道	7,485	3,425,313	0	0.0%	41.1	985,390	28.8%	24.3
	都道府県管理道路	12,626	6,092,754	0	0.0%	37.9	3,375,937	55.4%	27.2
	市町村管理道路	26,971	8,217,638	0	0.0%	25.4	5,662,690	68.9%	21.2
年度7	高速道路	131	124,060	0	0.0%	98.5	118,180	95.3%	56.9
	直轄国道	375	180,575	0	0.0%	45.0	49,441	27.4%	37.2
	都道府県管理道路	661	359,910	0	0.0%	42.3	224,053	62.3%	31.7
	市町村管理道路	1,384	540,424	0	0.0%	24.8	389,297	72.0%	20.4

年度	道路種別	対象リンク数	対象リンク延長(m)	半年後			1年半後		
				破断延長(m)	破断率	速度(km/h)	破断延長(m)	破断率	速度(km/h)
年度5	高速道路	1,086	1,054,101	15,161	1.4%	86.2	11,398	1.1%	88.9
	直轄国道	5,926	3,509,973	225,176	6.4%	45.8	102,620	2.9%	45.6
	都道府県管理道路	10,211	5,232,775	1,326,319	25.3%	38.2	522,284	10.0%	38.5
	市町村管理道路	15,860	5,258,607	1,755,107	33.4%	28.9	667,338	12.7%	29.4
年度6	高速道路	1,514	1,414,496	80,843	5.7%	83.1	16,030	1.1%	89.4
	直轄国道	7,485	3,425,313	266,972	7.8%	39.8	126,861	3.7%	39.8
	都道府県管理道路	12,626	6,092,754	1,499,155	24.6%	36.7	499,759	8.2%	37.1
	市町村管理道路	26,971	8,217,638	2,767,975	33.7%	26.4	793,034	9.7%	27.3
年度7	高速道路	131	124,060	1,083	0.9%	86.7	579	0.5%	94.0
	直轄国道	375	180,575	13,561	7.5%	43.8	4,781	2.6%	43.7
	都道府県管理道路	661	359,910	55,402	15.4%	41.0	9,807	2.7%	40.3
	市町村管理道路	1,384	540,424	172,379	31.9%	27.7	45,249	8.4%	28.3

(3) 道路破断率予測モデルの構築

本研究では、道路が破断する確率を0から1までの連続量で予測するために、モデル型として2項ロジットモデルを採用する。道路の破断確率 p を次式の形で表し、ロジスティック回帰分析を行う。

$$\ln \frac{p}{1-p} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$$

a_0, a_1, \dots, a_n : パラメータ, x_1, x_2, \dots, x_n : 説明変数
先に述べたように、分析は4種類の道路種別ごとに行うため、投入する説明変数は道路種別ごとに異なるが、共通する点を先に述べる。まず、本モデルでは破断確率を推計することが目的であるため、「破断有無」を目的変数とする。また、ここでいう「破断確率」とは、その道路リンクにおいて車両が通行不能となることと定義する。説明変数には、エラー!参照元が見つかりません。

に示した各データを用いるが、このうち「リンク通行速度」は後に述べる速度低下分析用のデータであるため、破断率の予測には用いない。また、「橋梁」及び「市街地」は、それぞれ「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」の適用リンクを判定するために用意したデータであるため、説明変数には用いない。なお、「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」は、道路種別によってデータが存在しているかどうか異なるため、説明変数として用いるか否かは道路種別に応じる。また、データの集計期間を表す「直後」「半年後」「1年半後」については、「1年半後」を基準時点として分析することとして説明変数には投入しない。したがって、表-3に示す「リンク特徴」、「被災状況」、「土地利用種別」、「都市地域種別」グループに属する変数のうち、「破断有無」、「リンク通行速度」、「橋梁」、「市街地」、「1年半後」の5項目を除いた計22項目を全道路種別共通の説明変数とする。これに加えて、道路種別に応じて「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」を説明変数に用いる。こうして構築したモデルを用いて、強靱化施策がより充実した場合に、道路破断率がどのように変化するかを分析する。強靱化施策には、橋梁の耐震化や電線類の地中化が該当するため、説明変数のうち「強靱化施策対応率」のグループに属する「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」の値を変化させることで強靱化施策の対策効果を分析する。具体的には、構築したモデルに上記で整理した道路リンクの基本量をモデル式に代入し、道路破断率を計算する。その後、道路リンクの基本量である「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」をそれぞれ一定値上昇させ、改めてモデル式に代入することで、同様に道路破断率を計算する。2度にわたって計算した道路破断率の差分が、強靱化施策によって変化したものであると考えられる。

4. 分析結果と考察

本章では、これまでに整理したデータ及び構築した道路破断率予測モデルを用いて分析を行い、その結果について示すとともに考察する。

(1) 高速道路（NEXCO・都市高速を含む）の分析結果
 高速道路においては、「電線類地中化率」のデータが存在しないため、「耐震化施策対応率」のグループからは「橋梁耐震化率」のみを用いる。以下のエラー! 参照元が見つかりません。にロジスティック回帰分析の結果を示す。

表6 破断確率を目的変数とするロジスティック回帰

分析の結果（高速道路）

方程式中の変数							
説明変数	係数	標準誤差	有意確率	説明変数	係数	標準誤差	有意確率
直後	6.456	.166	.000	道路	-0.637	.188	.001
半年後	.943	.175	0.000	市街化調整区域	-.509	.110	0.000
橋梁耐震化率	-.359	.180	0.045	その他用途地域	-.921	.265	0.001
森林	.470	.126	0.000	定数	-3.767	.252	0.000
荒地	0.250	.108	.021				

※サンプルリンク数:2731本

モデル適合度（擬似決定係数）			
Cox-Snell R2乗値	.584	Nagelkerke R2乗値	.817

(2) 直轄国道（直轄拘束を含む）の分析結果
 直轄国道においては、「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」の両方のデータが存在しているため、これら2つの変数両方を用いる。以下のエラー! 参照元が見つかりません。にロジスティック回帰分析の結果を示す。

表7 破断確率を目的変数とするロジスティック回帰分析の結果（直轄国道）

方程式中の変数							
説明変数	係数	標準誤差	有意確率	説明変数	係数	標準誤差	有意確率
隣接リンク数	-.115	.017	.000	その他の用地	-.377	.044	.000
リンク長	.000	.000	0.000	海浜	-.805	.156	.000
直後	3.243	.072	0.000	海水域	.816	.099	0.000
半年後	1.242	.078	0.000	ゴルフ場	-.593	.161	.000
田	-.141	.056	.012	都市地域	-.742	.050	.000
その他の農用地	.122	.052	0.019	市街化区域	-.800	.074	.000
森林	.603	.062	0.000	市街化調整区域	-.490	.072	.000
荒地	.160	.040	0.000	その他用途地域	-.190	.078	.015
建物用地	-.707	.065	.000	浸水域	1.885	.076	0.000
道路	.305	.051	0.000	定数	-3.268	.109	.000
鉄道	-0.394	.077	.000				

※サンプルリンク数:13786本

モデル適合度（擬似決定係数）			
Cox-Snell R2乗値	.170	Nagelkerke R2乗値	.349

(3) 都道府県権利道路の分析結果
 都道府県管理道路においては、「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」の両方のデータが存在しているため、これら2つの変数両方を用いる。以下のエラー! 参照元が見つかりません。にロジスティック回帰分析の結果を示す。

表 8 破断確率を目的変数とするロジスティック回帰分析の結果 (都道府県管理道路)

方程式中の変数						
説明変数	係数	標準誤差	有意確率	説明変数	係数	標準誤差
隣接リンク数	-.294	.010	.000	その他の用地	-.356	.024
リンク長	.000	.000	0.000	河川及び湖沼	-.055	.023
直後	3.299	.034	0.000	海浜	.220	.093
半年後	1.353	.035	0.000	海水域	-.600	.070
橋梁耐震化率	-.267	.085	.002	都市地域	-.556	.028
電線類地中化率	-2.018	.203	.000	市街化区域	-1.183	.044
その他の農用地	.152	.029	0.000	市街化調整区域	-.715	.038
森林	.471	.031	0.000	その他用途地域	-.335	.045
荒地	.127	.024	0.000	浸水域	1.284	.052
建物用地	-.477	.038	.000	定数	-1.719	.054
鉄道	-0.214	.053	.000			

※サンプルリンク数: 23498本

モデル適合度 (擬似決定係数)			
Cox-Snell R2乗値	.292	Nagelkerke R2乗値	.437

(4) 市町村管理道路の分析結果

市町村管理道路においては、「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」の両方のデータが存在しないため、「強靱化施策対応率」のグループに属する変数は用いない。以下のエラー!参照元が見つかりません。にロジスティック回帰分析の結果を示す。

表 9 破断確率を目的変数とするロジスティック回帰分析の結果 (市町村管理道路)

方程式中の変数						
説明変数	係数	標準誤差	有意確率	説明変数	係数	標準誤差
隣接リンク数	-.240	.006	.000	鉄道	-.252	.026
リンク長	.000	.000	0.000	その他の用地	-.254	.020
直後	3.299	.021	0.000	海水域	-.649	.040
半年後	1.501	.021	0.000	ゴルフ場	-.208	.041
田	.181	.020	0.000	都市地域	-.288	.023
その他の農用地	.156	.018	0.000	市街化区域	-.545	.022
森林	.289	.017	0.000	市街化調整区域	-.361	.023
荒地	.143	.017	0.000	その他用途地域	-.237	.026
建物用地	-.311	.046	.000	浸水域	-.850	.029
道路	-0.091	.020	.000	定数	-1.315	.051

※サンプルリンク数: 44211本

モデル適合度 (擬似決定係数)			
Cox-Snell R2乗値	.290	Nagelkerke R2乗値	.403

(4) 破断率予測モデルの分析結果考察

本節では、これまで示した破断率予測モデルの分析結果をもとに、エラー!参照元が見つかりません。に示した変数の項目について、その影響の正負や大きさを確認して考察を加える。以降、破断へ「正の影響がある」ことは「破断率を上昇させる」こと、「負の影響がある」ことは「破断率を低下させる」ことをそれぞれ意味するものとする。はじめにエラー!参照元が見つかりません。に示す変数項目のうち、特徴的な結果が得られたものについて考察する。

例えば「リンク長」は、説明変数として選択されなかった高速道路を除く3種類の道路種別に共通して、そのパラメータはほぼ0に近い値となっている。すなわち、道路リンクの長さは道路の破断にほぼ影響を与えないものと解釈できる。

「震度6以上」はその道路リンクにおける震度が6以上であったことを意味しており、一般に震度が高ければ高いほど、破断は生じやすいと考えられるため、パラメータは正の値となることが予想される。しかし、分析の結果、高速道路及び直轄国道においては「震度6以上」の説明変数が有意とならず、また、都道府県管理道路及び市町村管理道路においては説明変数の係数が正の値とならなかった。このため、符号条件の一致と統計的優位性を考慮し、「震度6以上」については説明変数に投入していない。このような結果となった原因として、本研究にて収集したデータにおいては、必ずしも震度が高ければ破断率も高くなるという傾向に無かったということが挙げられる。エラー!参照元が見つかりません。の震度別通行不能区間率を表すグラフが示すように、震度5の方が、震度6や震度7に比べて通行不能区間率が高いといったデータが散見される。本研究では道路リンクにおける震度を推計震度分布図によって判定しているが、地表最大加速度や地表面最大速度を用いた震度分析など精度の高い手法を用いることで、道路リンクの震度が破断率に与える影響をより明確にできる可能性が考えられる。

4種類の道路種別の全てに共通して、「直後」の項目は有意な説明変数であり、かつ係数のパラメータは正の値となっている。これは、震災発生からの経過時間は道路の破断に大きく関わっており、発災から間もない時点では、発災からの時間が経過した後に比べて道路の破断が生じる可能性が高くなることを示している。また、「半年後」の項目に着目すると、説明変数として選択されなかった直轄国道を除き、他の3種類の道路種別においては、こちらも全てパラメータが正の値となっている。「直後」と「半年後」のパラメータの大きさを比較すると、いずれも「直後」が「半年後」の数倍大きな値となっていることから、発災後の経過時間が道路の破断に与える影響は発災直後で最も大きく、時間の経過と共に小さくなっていくことが予想できる。

「隣接リンク数」は、高速道路では有意とならなかったものの、他の3種類の道路においては全て負の値のパラメータをもった説明変数となっている。これは、ある道路リンクに接続している道路リンクの本数が多いほど破断率が低く、逆に接続している道路リンクの本数が少ないほど破断率が高くなることを意味する。例えば、接続リンクが1本しか存在していない道路リンクは、接続している道路リンクが破断してしまえば、その道路リンク自体の破断有無に関わらず通行が不可能となってしまう。このような理由から、隣接リンクが多いほど、該当道路リンクの破断確率を低減する効果が示唆されるものと考えられる。

また、「浸水域」は高速道路を除く3種類の道路種別に共通して有意な説明変数であり、かつ係数のパラメータ

タは正の値となっている。震災だけでなく、それに伴う津波の被害を受けた道路リンクは、破断の確率が高くなるということが示唆されている。

「土地利用種別」及び「都市地域種別」のグループに属する各項目については、道路種別によって、説明変数として選択するか否かが大きく異なり、4種類に共通して選択されたものは「市街化調整区域」のみであった。また、複数の道路種別において説明変数に選択された項目においても、各道路種別においてパラメータが共通の符号を持つものは「荒地」（正）、「市街化調整区域」（負）、「その他用途地域」（負）の4種類であった。「市街化調整区域」については、全道路種別で説明変数に選択され、かつ全てパラメータが負の値であったことから、道路リンクがこの区域に存在することは破断へ負の影響を与えることが示唆されている。「市街化調整区域」の特徴として、開発行為や都市施設の整備が原則行われないことや、田園地帯となっている地域が多いことが挙げられるため、沿道構造物の倒壊などによる道路閉塞被害を受けにくいことが、破断へ負の影響を与える一因として考察できる。

変数項目についての考察として最後に、「強靱化施策対応率」のグループに属する「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」について述べる。まず、道路種別のうち直轄国道においては、「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」の両方が説明変数として選択されなかった。また、市町村管理道路においては「強靱化施策対応率」の変数項目データが存在していない。そのため、高速道路及び都道府県管理道路の2種を対象として、これらの項目について考察を加える。「橋梁耐震化率」については、高速道路と都道府県管理道路の両方においてそのパラメータが負の値となっており、破断へ負の影響があることが示唆されている。「電線類地中化率」については、対象となる道路種別が都道府県管理道路に限られるものの、そのパラメータは負の値であり、破断に負の影響を与えることが示唆されている。また、都道府県管理道路においては、「橋梁耐震化率」のパラメータが-0.267、「電線類地中化率」のパラメータが-2.018であり、「電線類地中化率」のパラメータ絶対値は「橋梁耐震化率」のパラメータ絶対値の7倍以上大きな値となっている。このことから、都道府県管理道路では、同じ強靱化施策でも「電線類地中化率」の方が「橋梁耐震化率」よりも強い影響を与える施策であることが示唆されている。これらの「強靱化施策対応率」は、説明変数として選択されたどの道路種別においてもパラメータが負の値となっており、強靱化施策が道路破断率の低減に資するものであることが示唆されている。なお、強靱化施策の対策効果については次章で詳しく述べる。

5. 強靱化対策効果の分析

本章では、強靱化対策効果の分析結果と考察について述べる。なお、「強靱化施策対応率」が道路破断率予測モデルの説明変数となるのは、道路種別が高速道路及び都道府県管理道路の2種類である。したがって、これら2つの道路種別それぞれについて、強靱化対策効果を分析した。

(1) 高速道路における強靱化対策効果

高速道路においては、強靱化施策のうち「橋梁耐震化率」がモデルの説明変数となっている。そこで、構築した破断率予測モデルを用いて、橋梁リンクにおける「橋梁耐震化率」を10%及び20%上昇させた場合の破断率をそれぞれ2通り求め、それらと元の「橋梁耐震化率」の場合に推定される破断率との差分を取ることで、橋梁の耐震化による対策効果を分析した。以下のエラー!参照元が見つかりません。およびエラー!参照元が見つかりません。にその結果を示す。

表 10 橋梁耐震化率を 10%上昇させた場合の対策効果 (高速道路)

対策前	全リンク平均破断率(%)	橋梁リンク平均破断率(%)
直後	90.459	89.241
半年後	4.349	3.914
1年半後	1.749	1.570

10%対策後	全リンク平均破断率(%)	橋梁リンク平均破断率(%)
直後	90.397	88.900
半年後	4.325	3.782
1年半後	1.739	1.516

差分	全リンク平均破断率(%)	橋梁リンク平均破断率(%)
直後	0.062	0.341
半年後	0.024	0.132
1年半後	0.010	0.054

※総リンク数2731本、橋梁リンク数498本

表 11 橋梁耐震化率を 20%上昇させた場合の対策効果 (高速道路)

対策前	全リンク平均破断率(%)	橋梁リンク平均破断率(%)
直後	90.459	89.241
半年後	4.349	3.914
1年半後	1.749	1.570

20%対策後	全リンク平均破断率(%)	橋梁リンク平均破断率(%)
直後	90.333	88.549
半年後	4.301	3.655
1年半後	1.729	1.464

差分	全リンク平均破断率(%)	橋梁リンク平均破断率(%)
直後	0.127	0.692
半年後	0.047	0.259
1年半後	0.020	0.107

※総リンク数2731本、橋梁リンク数498本

橋梁リンクの平均破断率に注目すると、「橋梁耐震化率」を10%上昇させた場合、元の橋梁リンク平均破断率に比べ、破断率が約0.05%から0.34%低下している。また、20%上昇させた場合は、破断率が約0.11%から

0.69%低下している。この結果から、橋梁の耐震化を推進すると、道路の破断率は低下することが示唆されている。一方で、破断率の低下割合は高々0.69%と大きい値ではない。これは、高速道路における橋梁の強靱化率が、全国平均で73.3%と高い水準にあり、強靱化の程度も十分であることから、さらなる強靱化対策の推進に対する破断率の低減効果が小さくなっているものと解釈できる。

(2) 都道府県管理道路における強靱化対策効果

都道府県管理道路においては、強靱化施策のうち「橋梁耐震化率」及び「電線類地中化率」の両方がモデルの説明変数となっている。そこで「橋梁耐震化率」に加え「電線類地中化率」についても、10%及び20%上昇させた場合の破断率をそれぞれ2通り求め、それらと元の「強靱化施策対応率」の場合に推定される破断率との差分を取ることで、強靱化施策による対策効果を分析した。以下のエラー!参照元が見つかりません。及びエラー!参照元が見つかりません。にその結果を示す。

表 12 橋梁耐震化率を10%及び20%上昇させた場合の対策効果 (都道府県管理道路)

対策前	全リンク平均(%)	全橋梁リンク平均(%)
直後	45.666	38.970
半年後	14.489	10.916
1年半後	4.715	3.383

橋梁10%	全リンク平均(%)	全橋梁リンク平均(%)
直後	45.648	38.469
半年後	14.481	10.691
1年半後	4.712	3.303

10%差分	全リンク平均(%)	全橋梁リンク平均(%)
直後	0.017	0.501
半年後	0.008	0.225
1年半後	0.003	0.080

※総リンク数23498本、橋梁リンク数800本

表 13 電線類地中化率を10%及び20%上昇させた場合の対策効果 (都道府県管理道路)

対策前	全リンク平均(%)	全市街地リンク平均(%)
直後	45.666	41.738
半年後	14.489	11.853
1年半後	4.715	3.671

電線10%	全リンク平均(%)	全市街地リンク平均(%)
直後	42.130	37.778
半年後	12.893	10.065
1年半後	4.156	3.045

10%差分	全リンク平均(%)	全市街地リンク平均(%)
直後	3.536	3.961
半年後	1.596	1.788
1年半後	0.559	0.626

※総リンク数23498本、市街地リンク数2976本

「橋梁耐震化率」については、都道府県管理道路においても高速道路と同様に、橋梁の耐震化を推進すると、道路の破断率は低下することが示唆される結果となった。また、「電線類地中化率」についても、電線類の地中化を推進すると、道路の破断率は低下することが示唆される結果となった。ここで、「電線類地中化率」の上昇による破断率の低減効果は、全項目において「橋梁耐震化率」の上昇による破断率の低減効果よりも大きい値を示している。特に、「電線類地中化率」を20%上昇させた場合の、発災直後の道路破断率低減効果は約7.8%にも及び、橋梁の耐震化に比べて、電線類の地中化が大きな影響を与えることが示唆されている。これは、都道府県

管理道路における「橋梁耐震化率」が65%~91%と高水準にあるのに対して、電線類の地中化率は全国平均で約19%と、橋梁耐震化の水準を大きく下回っているためであると考えられる。電線類地中化は現状での対応率が低いため、対策効果によって大きな破断率低減効果を示すことが考えられる。

6. 結論

(1) 本研究のまとめ

自然災害に見舞われるリスクの高い我が国においては、国土が災害や事故などにより致命的な被害を受けず、また速やかに回復するしなやかさを持ったくにつくり、すなわち国土強靱化が喫緊の課題となっている。これまでも、国家を挙げた国土強靱化への取り組みは進められてきているものの、今後実施されるべき強靱化施策を検討するにあたっては、なおも課題が残されているのが現状である。例えば、強靱化施策の政策としての妥当性や緊急性の判断、優先順位付けを行うためには、「どのような規模・内容の災害が起きた場合に、どのようなインフラがどの程度毀損し、インフラをどの程度強化しておけば、被害をどの程度軽減できるのか」といった強靱化施策の効果を定量的に把握することが必要不可欠となる。そうした定量的な知見を得るためには、「災害の規模・内容やインフラの強化水準によって、インフラの毀損程度がどのように変化するか」を表現するインフラの被害関数を構築することで、「インフラをどの程度強化すれば、被害をどの程度軽減できるのか」といった強靱化施策による対策効果を推定することが必要となる。

上記の問題意識から、本研究では、インフラの被害関数の構築を試みることにした。具体的には、東日本大震災における被災状況等のデータを用いて、大規模震災発生時の道路リンク破断や走行速度低下の程度を、地震の規模や道路の種類、強靱化施策の推進状況等の関数として表現するモデルを推計した。また、このモデルを用いて、「強靱化施策をどの程度強化すれば、道路の破断をどの程度軽減できるのか」という対策効果についても分析した。

ロジスティック回帰分析を行った結果、高速道路、直轄国道、都道府県管理道路、市町村管理道路の4つの道路種別それぞれについて、8~19種類の説明変数を用いて道路破断率を推計するロジットモデルを得た。これらの説明変数のパラメータから、「発災直後が最も破断率が高く、時間経過とともに破断率は低下していく」「橋梁の耐震化や電線類の地中化といった強靱化施策は、破断確率を低減させる」等の重要な示唆が得られた。また、構築したロジットモデルを用いて、橋梁の耐震化や電線類の地中化といった強靱化施策をより推進した場合、破

断率は低減することを示唆する結果が得られた。また、ロジットモデルを用いた強靱化施策の対策効果分析の結果から、橋梁の耐震化よりも電線類の地中化の方が、より顕著な破断率低減効果を示すことが明らかになった。

(2) 今後の課題

本研究の総合的な考察及び課題として、以下のよう
な点が考えられる。

第一に、本研究で行った分析結果を、強靱化施策の
推進に向けて実践的に活用していくことが必要である。
具体的には、**エラー! 参照元が見つかりません。**で行った
強靱化施策の対策効果に関する分析結果を根拠として、
更なる橋梁の耐震化や電線類の地中化を進めていく必要
がある。また、**エラー! 参照元が見つかりません。**で推
計した道路破断率の被害関数を用いて、「インフラがど
の程度毀損した場合に、それによってどの程度経済活動
が影響を受けるのか」といった、定量的な経済被害の推
計についても進めて行く必要がある。定量的な知見が得
られたならば、今後実施されるべき強靱化施策の妥当性
や緊急性を判断し、優先順位付けを行うことも可能とな
るため、「どのインフラをどの程度強化する必要があるか
、そのためにはどの程度予算が必要であるか」といった
計画の策定へと繋がり、ひいては政策としての国土強靱
化の実践的な推進に寄与することが期待される。

第二に、強靱化施策の推進状況、及び災害時の被災状
況をより正確に把握する必要があると考えられる。本研
究において分析した強靱化施策の推進による対策効果は、
道路の破断率を低減させる結果が示唆されたものの、そ
の低減効果は決して大きくなかった。これは、橋梁の耐
震化率や電線類の地中化率が、道路種別によっては把握
されていないものも多く、また、把握されていたとして
も、県単位の平均値や全国平均値といった粗笨なオーダ
ーでしか得られていなかったことが原因であると考えら
れる。また、被災状況のデータについても、欠損値や外
れ値が多く、正確な分析ができなかった可能性がある。
インフラの耐震化施策推進状況をより精緻に把握してい
くことや、プローブデータ等の技術を活用して災害発生
時の被災状況をより正確に捉えることが今後期待される
が、そのためには、国土強靱化という目標に向けて、産
官学が密に連携していく必要がある。

AN ESTIMATION OF VULNERABILITY FUNCTIONS FOR ROAD NETWORKS AND AN ASSESSMENT OF THE EFFECT OF RESILIENCE REINFORCEMENT AGAINST LARGE-SCALE EARTHQUAKES

Tetsuya ONODERA, Satoshi NAKAO, Sintaro KATAYAMA, Toru HIGASHI,
Yuichiro KAWABATA and Satoshi Fujii

Japan has the risk of being hit by various natural disasters and to deal with them, it is an urgent task to

謝辞: 本稿を投稿するにあたり、多くの皆様のお力添え
をいただきましたことに心をより感謝申し上げます。ま
た、多大なるご迷惑をお掛けいたしましたことにつきま
してもまた心よりお詫び申し上げます。

参考文献

- 1) 藤井聡：レジリエンス・ジャパン 日本強靱化思
想，飛鳥新社，2013
- 2) 内閣官房国土強靱化推進室：国土強靱化とは？，2
018/1/23アクセス，https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_o_kyoujinka/pdf/kokudo_pamphlet.pdf
- 3) 内閣官房：国土強靱化基本計画，2018/1/23アク
セス，https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/kihon.html
- 4) 内閣官房：ナショナル・レジリエンス(防災・減災)
懇談会，2018/1/23アクセス，<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/resilience/>
- 5) 内閣官房：脆弱性評価，2018/1/23アクセス，https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/hyouka.html
- 6) Gordon,P. and Davis,B. : Transport-Related Impacts of the N
orthridge Earthquake, Journal of Transportation and Statistic
s, pp.21-36, 1998
- 7) 土屋哲，多々納裕一，岡田憲夫：巨大地震災害時
の交通施設の機能低下に起因する社会経済損失の
軽量化に関する研究，京都大学防災研究所年報，
第47号B, pp.57-67, 2004
- 8) 土屋哲，多々納裕一：SCGEモデルを用いた基幹交
通網に関する自身リスクのパブリックマネジメン
ト，社会技術研究論文集，vol.2, pp.228-237, 2004
- 9) 廣瀬義伸：地震防災のための道路網および緊急施
設整備計画に関する研究，土木計画学研究・論文
集，第15巻，pp.329-336, 1998
- 10) 塚口博司：大震災時における道路の通行可能確率
の推定，歴史都市防災論文集，Vol.2, pp.43-48, 20
08
- 11) 気象庁：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地
震 推計震度分布，2018/2/2アクセス，http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2011_03_11_tohoku/
- 12) 国土地理院：10万分1浸水範囲概況図，2018/2/2アク
セス，<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html>
- 13) 国土交通省：道路における震災対策，2018/2/2アク
セス，<http://www.mlit.go.jp/road/bosai/measures/index1.html>

promote national resilience. In order to judge the relevance and urgency of the project for resilience, it is necessary to quantitatively predict how much the infrastructure will be damaged by disaster and how much damage can be mitigated by resilience measures. Therefore, in this research, based on the data of the Great East Japan Earthquake, we developed a model to predict the breakage of the road link at the occurrence of the earthquake and the decrease of the vehicle running speed, and analyzed the effect of the resilience countermeasure using this model. As a result, it became clear that strengthening measures such as earthquake resistance of bridges and ground wires of electric wires contribute to mitigation of damage. However, problems such as estimating the effect quantity relatively small, limitation of estimation accuracy due to lack of data such as infrastructure earthquake resistance status, etc. were also clarified.
