

# 複数の地震災害の統計分析による 道路盛土復旧予測モデルの構築

野本 篤史<sup>1</sup>・酒井 久和<sup>2</sup>・梶谷 義雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科 都市環境デザイン工学専攻

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

E-mail: atsushi.nomoto.4b@stu.hosei.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 法政大学教授 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

E-mail: hisakai@hosei.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 香川大学教授 創造工学部 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

E-mail: kajitani@eng.kagawa-u.ac.jp

道路盛土は長距離にわたる線状構造物であるため、ある区間内で被災した時に、復旧に時間を要し、社会基盤としての機能が損なわれる事例が多数報告されている。その事例の1つとして、2016年熊本地震であり、九州自動車道の益城 BS 付近で盛土崩壊し、13日間の交通規制が行われた。被災した盛土部で規制期間を予測することができれば、道路のネットワーク化等により機能低下を最小限に抑えることができると考えられる。

本研究では、道路盛土に甚大な被害を受けた7地震の被害状況と規制期間を調査し、規制期間に影響を及ぼす要因の盛土高さ、被害範囲、地形、被害形態、交通量の計5項目を加えて複数の統計手法で分析し、復旧予測モデル式を構築した。また、この5項目と規制期間との関係性を推測するとともに、5項目の復旧要因の重要度を示した。

**Key Words:** road embankment, quantification theory type 1, category scores, range, prediction model

## 1. はじめに

社会経済活動や生活基盤となる道路は、人や車に対する交通機能と、ライフラインや防災等のための空間機能と2つの機能を有しており、重要な社会資本の1つである。近年、日本では自然災害が多く発生し、人的被害や物的被害の誘因となっている。21世紀以降に発生した地震で人的被害に及んだ地震は132回、物的被害に及んだ地震は75回発生している<sup>1)</sup>。物的被害の内訳として道路被害があり、道路被害のうちの半数は盛土が占めている。道路盛土は長距離にわたる線状構造物であるため、ある区間内で1箇所でも被災した場合、復旧に時間を要し、社会基盤としての機能が損なわれる事例が多数報告されている<sup>2)</sup>のが現状である。

その事例の1つとして、2016年熊本地震が挙げられる。熊本地震発生により、九州自動車道の益城バスストップ付近にて盛土崩壊が発生した(写真-1)。その影響により、同自動車道植木 IC~八代 IC間で約13日間の交通規



写真-1 益城バスストップ付近における盛土崩壊<sup>4)</sup>

制が強いられ、本復旧までには1年以上かかった<sup>3)</sup>。道路の復旧が遅くなるほど、ライフラインへの影響や経済や国民生活への影響が大きくなる。地震による被害や影響を最小限にしていくことが、災害大国である日本の課題であると考えられる。高速道の盛土部の復旧性については、

上原ら<sup>8)</sup>は、地震時の高速道の復旧日数を推定することを目的に、多重ロジスティック回帰分析を用いて復旧予測のためのロジットモデルを構築した。構築した復旧予測モデルを既往地震に適用し検証した後、シナリオ地震への適用として南海トラフ巨大地震発生時の高速道の復旧日数を推定した結果、高速道路の復旧作業の実情に合わない予測結果を示すなど、より精度の高い復旧予測モデルを構築することを課題としている。中村ら<sup>7)</sup>は、盛土基本情報の評価点法による一次評価、変形量の簡易図による二次評価、復旧土量から算定する許容変形量の設定の計3つの手法を、高速道路盛土における過去の被災区間や実際のモデル路線で適用し、実際の路線においても評価対象箇所を合理的な抽出が可能であること、復旧体制の規模によって目標時間内での復旧可否が判断可能である等の手法の有効性を確認した。このことより対象盛土の選定から残留変形量の算出、許容変形量の設定などを体系化した手法を構築した。

本研究では両論文で取扱いのなかった国道を含めて、道路盛土に甚大な被害を受けた地震を対象に、数量化理論第I類に基づいた復旧に影響を与える要因の抽出と複数の統計手法による復旧予測モデル式の構築を行う。本研究の最終目的は、精度の高い規制期間の予測モデル式を算出し、そのモデル式を用いて、今後発生し得る地震による被害盛土部での規制期間を予測し、道路としての機能低下を低減させることである。

## 2. 研究方法

地震における道路盛土部の被害事例を文献調査した結果、21世紀以降で道路盛土に被害が及んだ地震は19回であった。そのうち、道路車線部まで被害がおよび甚大な被害を受けた地震、道路の規制期間が1週間続いた地震、被災データが収集できた地震、以上3つの条件を総合的に満たした地震は、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2009年岩手宮城内陸地震、2009年駿河湾地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震の計7地震である。本研究では、この7地震を検討対象とする。また、文献調査によると復旧に対して影響を与える要因は、1) 盛土高さ、2) 被害範囲、3) 地形、4) 被害形態、5) 交通量、6) 盛土構造、7) 被害延長、8) 流出土砂量、9) 土の種類、10) 作業人員数の10項目だと考えられるが、7)～10)の項目に関しては収集データの数が少ないため、本研究では1)～6)の6項目を復旧要因として採用する。

検討対象の7地震による被害盛土部の収集箇所数は、新潟県中越地震30地点、能登半島地震19地点、新潟県中越沖地震8地点、岩手宮城内陸地震6地点、駿河湾地



図-1 規制期間の再配分

震3地点、東北地方太平洋沖地震40地点、熊本地震5地点の計111地点である。そこで、被災箇所111地点における復旧要因の6項目と規制期間の計7項目のデータを整理し、数量化理論第I類および拡張型数量化理論第I類で分析する。分析によりカテゴリースコアを算出し、規制期間の予測モデル式を提案する。その予測式からサンプルスコアと実績値を用いて分析精度を確認した後、各説明変数のレンジを用いて、111地点における復旧に影響を及ぼす要因を分析する。なお、111地点において一部の取得できなかった復旧要因の補完と規制期間の再配分の要旨を以下に示す。

### a) 復旧要因の補完

1) 盛土高さ、3) 地形、6) 盛土構造の3項目について、取得できなかった被災箇所に関しては、Google Earth Proと国土地理院地図の衛星画像による目視およびに標高差を用いて推定する。

### b) 規制期間の再配分

2004年新潟県中越地震の発生により、関越自動車道堀之内IC～越後川口IC間で3箇所の盛土崩壊が生じ、規制期間は13日間であった<sup>8)</sup>。しかし、被災した3箇所はそれぞれ被災間の距離が短く、1箇所復旧してもその他の箇所で復旧しない限り交通規制は解除されないため、規制期間が長くなったと考えられる。このことを考慮して、取得した規制期間の中で、規制期間が同一でその区間に複数の被災箇所がある場合、各地点の被災範囲の比率で算出し、規制期間を再配分する(図-1)。

## 3. 数量化理論第I類

### (1) 数量化理論第I類の目的と概要

数量化理論第I類とは、目的変数と説明変数との関係を調べて関係式を作成し、その関係式を用いて以下の3項目を明らかにする手法である<sup>9)</sup>。

1) 説明変数の各カテゴリーの目的変数に対する貢献度  
重回帰分析で得られた偏回帰係数と各説明変数に該当

する標本値を用いて、加重平均を算出する。偏回帰係数と算出した加重平均の差によってカテゴリースコアが得られる。カテゴリースコアが説明変数の各カテゴリーの目的変数に対する貢献度を示す。

2) 説明変数の重要度ランキング

得られたカテゴリースコアの最大値と最小値の格差を示すレンジと、各項目のレンジのレンジ合計に占める割合を示す寄与率の2項目を用いて、説明変数の重要度ランキングを表す。レンジや寄与率の値が大きいほど、目的変数により影響を及ぼす説明変数であることを示す。

3) 予測

得られた各カテゴリースコアと各カテゴリーの0, 1の数量データを掛け合わせて、目的変数の平均値を足した式が数量化理論第I類で得られた予測式であり、その予測式から目的変数の値を算出し、予測を行う。

また、数量化理論第I類は目的変数が数量データ、説明変数はカテゴリーデータを用いて分析する。説明変数には数量データと質的データが混在する場合があるため、カテゴリーごとに振り分け、1, 2, 3...とカテゴリーデータ化する必要がある。この時、(1)式の条件を満足しなければ適用することができない。

$$\text{個体数} > \text{カテゴリー総数} - \text{説明変数個数} + 1 \quad (1)$$

カテゴリーデータ化した説明変数を1, 0のダミー変数に置換して数量データに変換し、目的変数の数量データと説明変数のダミー変数に置換した数量データとの重回帰分析を行う。その後、1) ~3) の3項目を明らかにする。

(2) 数量化理論第I類の適用

本研究では、第2章で示した111地点における被災箇所において、目的変数を規制期間、説明変数を盛土高さ、被害範囲、地形、被害形態、盛土構造、交通量として数量化理論第I類の分析を行う。分析の手順を下記に示す。

a) カテゴリーデータ化

復旧要因の6項目の説明変数をカテゴリーデータ化したものを表-1に示し、収集した被災箇所の被災データ(表-2)を表-1にならってカテゴリーデータ化したものを表-3に示す。ここで、(1)式を満足するかを検証する。個体数は被災箇所数の111、カテゴリー総数は盛土高さ4、被害範囲および交通量は3、地形、被害形態および盛土構造は各々2の計16、説明変数個数は復旧要因の項目数6であることから、 $111 > 16 - 6 + 1 = 11$ となり、(1)式を満足することより、数量化理論第I類を適用することができる。

b) ダミー変数への置換

a) でカテゴリーデータ化した説明変数を、当てはまらないものを0、当てはまるものを1という0, 1のダミー変数に置換し数量データに変換したものを表-4に示す。

表-1 説明変数のカテゴリーデータ化

	盛土高さ	被害範囲	盛土構造	地形	被害形態	交通量(台/日)
1	~5m	路肩部	両盛土	平坦	未崩壊	20,000~
2	5m~10m	1車線	片盛土	傾斜	崩壊	4,000~20,000
3	10m~15m	2車線以上				~4000
4	15m~					

表-2 被災箇所の被災データ

路線名	被災場所	盛土高さ	被害範囲	盛土構造	地形	被害形態	交通量	規制期間
関越道	214.5kp	7.1	4	両盛	傾斜	崩壊	13,801	6.5
関越道	215.9kp	15.6	2	両盛	傾斜	崩壊	13,801	3.3
関越道	226.2kp	10.0	2	両盛	平坦	段差	15,627	5.2
北陸道	418.8kp	3.4	路肩	両盛	平坦	陥没	18,837	0.6
8号	長岡市宮本	2.0	1	片盛	傾斜	段差	15,632	1.0
17号	川口市天納	35.7	2	片盛	傾斜	崩壊	21,337	6.0
117号	小千谷市細島	9.7	2	片盛	傾斜	崩壊	12,000	8.0
117号	小千谷市塩殿	26.9	1	両盛	傾斜	崩壊	12,000	8.0
252号	堀之内町上稲倉	3.1	2	片盛	傾斜	崩壊	4,028	5.0
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
252号	十日町上野	9.5	2	片盛	傾斜	崩壊	3,873	9.0
常磐道	92.5kp	9.0	2	両盛	平坦	崩壊	31,164	7.2
九州道	益城BS	5.8	2	両盛	傾斜	崩壊	31,194	13.0
443号	益城町寺迫	4.3	2	片盛	傾斜	崩壊	11,120	7.0
212号	小国町杖立	2.7	2	両盛	平坦	陥没	11,036	2.4
266号	大津町室	2.3	1	両盛	平坦	亀裂	25,480	1.3
325号	東区画図町	2.4	1	両盛	平坦	段差	43,817	1.2

表-3 被災箇所のカテゴリーデータ化

路線名	被災場所	盛土高さ	被害範囲	盛土構造	地形	被害形態	交通量
関越道	214.5kp	2	3	1	2	2	2
関越道	215.9kp	4	3	1	2	2	2
関越道	226.2kp	3	3	1	1	1	2
北陸道	418.8kp	1	1	1	1	1	2
8号	長岡市宮本	1	2	2	2	1	2
17号	川口市天納	4	3	2	2	2	1
117号	小千谷市細島	2	3	2	2	2	2
117号	小千谷市塩殿	4	2	1	2	2	2
252号	堀之内町上稲倉	1	3	2	2	2	2
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
252号	十日町上野	2	3	2	2	2	3
常磐道	92.5kp	2	3	1	1	2	1
九州道	益城BS	2	3	1	2	2	1
443号	益城町寺迫	1	3	2	2	2	2
212号	小国町杖立	1	3	1	1	1	2
266号	大津町室	1	2	1	1	1	1
325号	東区画図町	1	2	1	1	1	1

表-4 説明変数の数量データ化

路線名	被災場所	盛土高さ				被害範囲			盛土構造		地形		被害形態		交通量		
		~5m	5m~10m	10m~15m	15m~	路肩部	1車線	2車線以上	両盛土	片盛土	平坦	傾斜	未崩壊	崩壊	20,000~	4,000~20,000	~4,000
関越道	214.5kp	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0
関越道	215.9kp	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0
関越道	226.2kp	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
北陸道	418.8kp	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
8号	長岡市宮本	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0
17号	川口市天納	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
117号	小千谷市細島	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
117号	小千谷市塩殿	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0
252号	堀之内町上稲倉	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
252号	十日町上野	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
常磐道	92.5kp	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0
九州道	益城BS	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0
443号	益城町寺迫	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
212号	小国町杖立	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
266号	大津町室	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
325号	東区画図町	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0

表-5 偏回帰係数及びカテゴリースコア

説明変数名	偏回帰係数	n	加重平均	カテゴリースコア	
盛土高さ	5m未満	-2.01	36	-1.00	-1.01
	5m-10m未満	-1.06	35		-0.06
	10m-15m未満	-0.10	16		0.90
	15m以上	0.00	24		1.00
被害範囲	路肩部	-3.30	6	-1.00	-2.30
	1車線	-2.04	45		-1.03
	2車線以上	0.00	60		1.00
盛土構造	両盛土	1.18	61	0.65	0.53
	片盛土	0.00	50		-0.65
地形	平坦	-0.92	40	-0.33	-0.59
	傾斜	0.00	71		0.33
被害形式	未崩壊	-2.27	61	-1.25	-1.02
	崩壊	0.00	50		1.25
交通量	20,000~	-1.26	30	-0.81	-0.45
	4,000~20,000	-0.92	57		-0.11
	~4,000	0.00	24		0.81

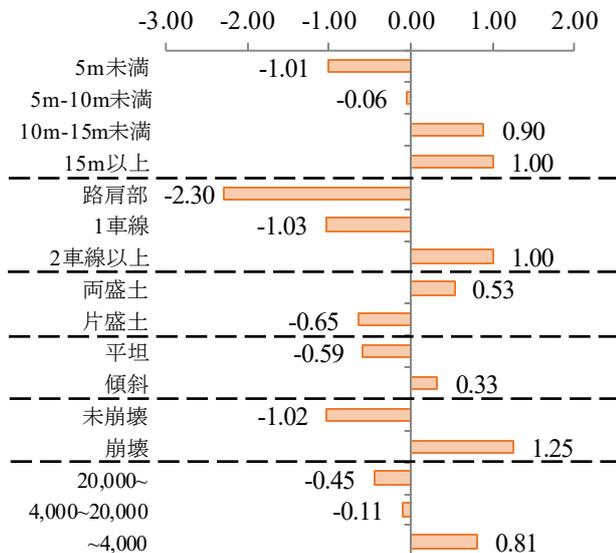


図-2 カテゴリースコア

c) 任意のカテゴリースコア削除

ダミー変数を用いた数量データ化された6項目の復旧要因と目的変数である規制期間で重回帰分析を行う。ここで、盛土高さに着目すると、どの被災箇所においても合計値が1となる。このように、任意の複数項目を選択し、個体ごとにその項目のデータの合計を計算したとき、どの個体も合計値が同じになる場合、標準偏差が0となるため、重回帰分析は適用できない。そのことを考慮して、本研究では表4中の黄色で示したカテゴリースコアを削除して重回帰分析を行うこととする。

(3) 分析結果

重回帰分析を行った結果、表5のように各説明変数の回帰係数が得られた。回帰係数と標準値を用いて加重平均を算出し、回帰係数と加重平均との差が表5に示すカテゴリースコア値となる。カテゴリースコア値をグラフ化したものが図2である。カテゴリースコア値が大きいほど、目的変数である規制期間が長引く傾向であることを示している。一般的に盛土高が高い、被害範囲や被害形態が大きい、地形が傾斜で盛土構造が片盛土、交通量が少ないほど規制期間は長引くが、今回の分析では、盛土構造のカテゴリースコア値が両盛土>片盛土となり、一般的な傾向とは異なる結果が得られたので、カテゴリースコア矛盾現象の検証を行った。

a) カテゴリースコア矛盾現象

カテゴリースコア矛盾現象の検証を行った結果が表6となる。盛土高さ、被害範囲、地形、被害形態、交通量では正の相関を示しているのに対して、盛土構造のみは負の相関を示している。これは、両盛土構造での被害に

表-6 カテゴリースコア矛盾現象の検証

項目名	カテゴリー名	n	カテゴリースコア	カテゴリー別平均値	相関	対応の有無
盛土高さ	5m未満	36	-1.01	2.41	0.9684	○
	5m以上10m未満	35	-0.06	5.05		
	10m以上15m未満	16	0.90	5.84		
	15m以上	24	1.00	6.42		
被害範囲	路肩部	6	-2.30	1.65	0.9838	○
	1車線	45	-1.03	3.75		
	2車線以上	60	1.00	5.53		
地形	平坦	40	-0.59	3.01	1.0000	○
	傾斜	71	0.33	5.49		
盛土構造	両盛土	61	0.53	4.29	-1.0000	×
	片盛土	50	-0.65	4.98		
被害形態	未崩壊	61	-1.02	2.94	1.0000	○
	崩壊	50	1.25	6.61		
交通量	20,000~	30	-0.45	3.86	0.9349	○
	4,000~20,000	57	-0.11	4.70		
	~4,000	24	0.81	5.28		

あった時の規制期間は平均 429 日、片盛土構造での被害にあった時の規制期間は平均 498 日で、実際の規制期間は片盛土構造の方が長くなる傾向であるにもかかわらず、数量化理論第 I 類での分析によるカテゴリースコアでは矛盾した結果が得られたためである。このような現象をカテゴリースコア矛盾現象といい、一般的に分析精度が低下するので、盛土構造を削除して復旧要因 5 項目として再度分析を行うこととする。

b) 分析による予測式算定

復旧要因 5 項目として再分析をした結果、新たな偏回帰係数およびカテゴリースコア値が算出され (表-7) , さらにスコア値をグラフ化したものが図-3 である。どの復旧要因も一般的な傾向と同じ結果が得られた。よって、数量化理論第 I 類の分析による予測モデル式は次式のよう

$$Y = \{-1.13X_{11} + 0.06X_{12} + 1.05X_{13} + 1.08X_{14}\} + \{-2.27X_{21} - 1.05X_{22} + 1.02X_{23}\} + \{-0.02X_{31} + 0.01X_{32}\} + \{-1.08X_{41} + 1.31X_{42}\} + \{-0.34X_{51} - 0.09X_{52} + 0.64X_{53}\} + 4.59 \quad (2)$$

ただし、 $X_{11}$ : 盛土高さ 5m 未満,  $X_{12}$ : 5m 以上 10m 未満,  $X_{13}$ : 10m 以上 15m 未満,  $X_{14}$ : 15m 以上,  $X_{21}$ : 被害範囲路肩部,  $X_{22}$ : 1車線,  $X_{23}$ : 2車線以上,  $X_{31}$ : 地形平坦,  $X_{32}$ : 傾斜,  $X_{41}$ : 被害形式段差・陥没・亀裂 (未崩壊),  $X_{42}$ : 崩壊,  $X_{51}$ : 交通量 4,000 台/日未満,  $X_{52}$ : 4,000 台/日以上 20,000 台/日未満,  $X_{53}$ : 20,000 台/日以上

c) 規制期間に最も影響を及ぼす復旧要因の決定

各説明変数における最大カテゴリースコア値と最小カテゴリースコア値の差を取ったものをレンジといい、各項目のレンジのレンジ合計に占める割合を示す寄与率があり、レンジおよび寄与率が大きいほど規制期間に影響を及ぼす要因であることを示す。2値を求めた結果が表-8 である。分析結果より、規制期間に最も影響を及ぼす

表-7 修正後の偏回帰係数及びカテゴリースコア

説明変数名	偏回帰係数	n	加重平均	カテゴリースコア
盛土高さ	5m未満	36	-1.08	-1.13
	5m-10m	35		-0.06
	10m-15m	16		1.05
	15m以上	24		1.08
被害範囲	路肩部	6	-1.02	-2.27
	1車線	45		-1.05
	2車線以上	60		1.02
地形	平坦	40	0.01	-0.02
	傾斜	71		0.01
被害形式	未崩壊	61	-1.31	-1.08
	崩壊	50		1.31
交通量	20,000~	30	-0.64	-0.34
	4,000~20,000	57		-0.09
	~4,000	24		0.64

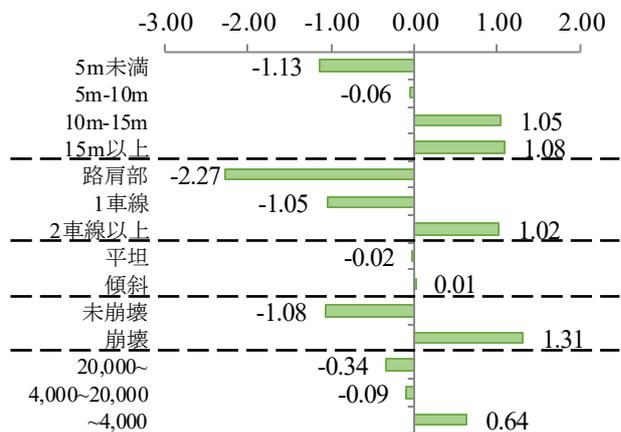


図-3 修正後のカテゴリースコア

表-8 各項目のレンジと寄与率

項目名	レンジ	寄与率(%)	順位
被害範囲	3.29	37.0	1位
被害形態	2.39	26.9	2位
盛土高さ	2.21	24.8	3位
交通量	0.98	11.0	4位
地形	0.03	0.3	5位

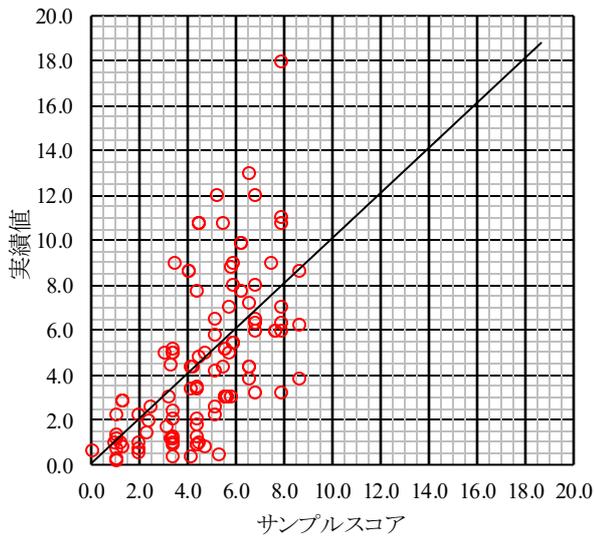


図-4 サンプルスコアと実績値の相関図

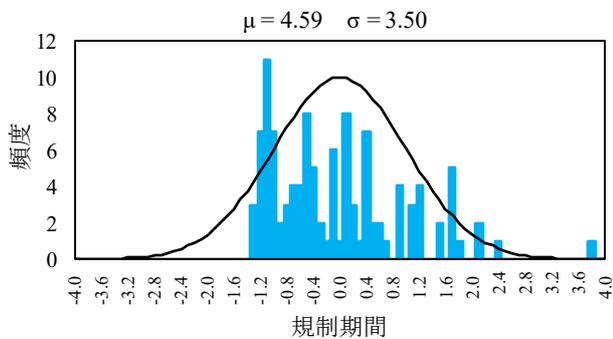


図-5 本研究の目的変数のデータ分布図（標準化）

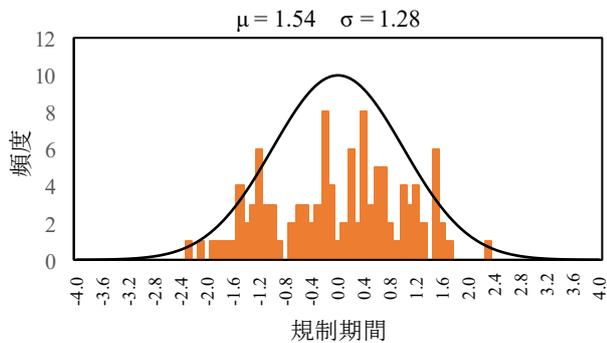


図-6 べき正規変換後の目的変数のデータ分布図（標準化）

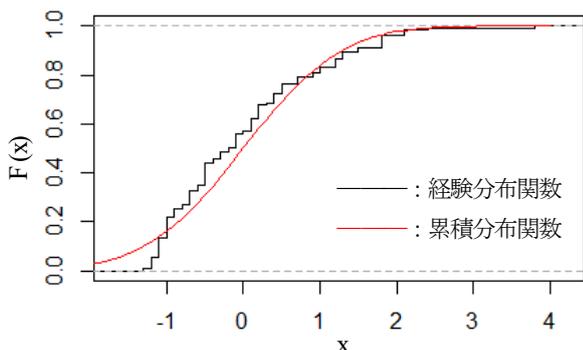


図-7 べき正規変換前の経験的累積分布関数

要因はレンジ値が最も高い被害範囲であり、寄与率は37%であった。次いで影響を与える要因は、被害形態、盛土高さ、交通量、地形の順であることが分かった。

#### d) 予測モデル式の妥当性

b) で算出済の予測モデル式を用いた被災箇所の規制期間のことをサンプルスコアといい、実際の規制期間とサンプルスコアの一致度を検証し、予測式の精度を算出する。一致度を検証した結果、図4のような相関図が得られた。赤丸が黒線に近いほど精度の良い予測値であることを示す。数量化理論第I類で得られた予測モデル式(2)式の精度を相対誤差を用いて求めた結果、52.2%となり、やや精度の低い結果であることが分かった。

#### (4) べき正規変換の適用

図4より、Xの値が増えるにつれて、Yの値の分散が大きくなる問題が生じている。この問題を分散不均一性といい、精度低下に繋がる。分散不均一性の問題が発生する原因として、目的変数のデータ分布に正規性が見られないことが考えられる。本研究の目的変数のデータ分布を検証すると、分布が左寄りになっており、正規性があまりない(図-5)。そこで、データ分布を正規分布に近づける変換法であるべき正規変換(ボックス=コックス変換)を適用し、変換した目的変数のデータを用いて、再度数量化理論第I類で分析を行う。べき正規変換の手順および分析結果を下記に示す。

##### a) 最尤値λの算出

べき正規変換では、以下の定義式を用いて目的変数のデータ変換を行う。

$$f(x) = \frac{x^{\lambda}-1}{\lambda} \quad (\lambda \neq 0) \quad (3)$$

$$f(x) = \log_e(x) \quad (\lambda = 0) \quad (4)$$

ただし、 $f(x)$ : 変換後の目的変数の値、 $x$ : 変換前の目的変数の値、 $\lambda$ : べき係数を示す。

べき係数 $\lambda$ の最尤推定は、青木<sup>10)</sup>が提示している統計解析ソフトRのboxcoxパッケージを用いて算出する。算出した結果、 $\lambda=0.29$ となり、その値を(3)式に代入し、データ変換を行う。べき正規変換後の目的変数のデータ

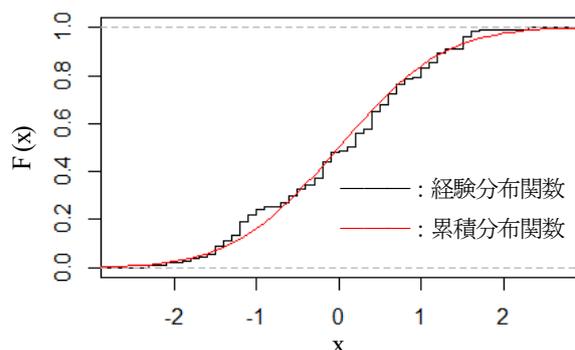


図-8 べき正規変換後の経験的累積分布関数

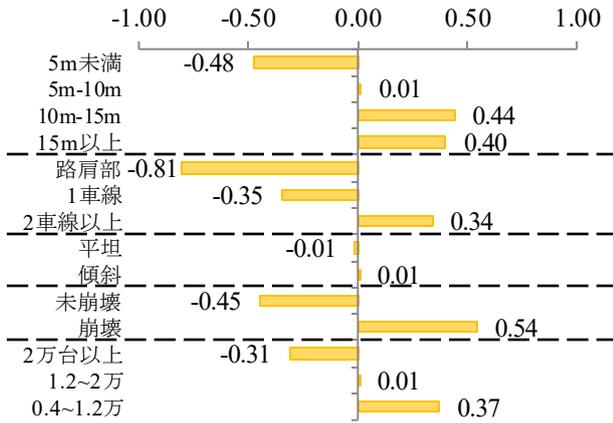


図-9 変換後のカテゴリースコア

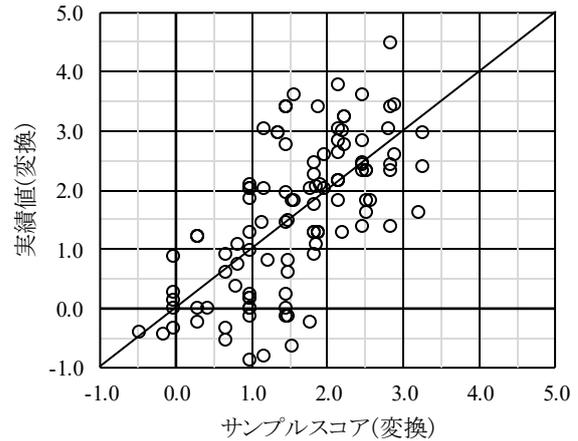


図-10 変換後のサンプルスコアと実績値の相関図

分布は図-6のようになった。

### b) 正規性の検定

有意水準 5%で目的変数のデータ分布が正規分布に従うという帰無仮説を立ててコルモゴロフ・スミノルフ検定を実行した結果、変換前の p 値が 0.10、変換後の p 値が 0.55 となり、ともに帰無仮説は棄却されなかった。つまり、変換前 (図-5) と変換後 (図-6) の 2 つのデータ分布は正規分布に従っているが、p 値が大きい変換後が正規分布により近いことを示している。また、経験的累積分布関数を求めた結果を図-7および図-8に示す。経験分布関数に着目すると、変換後は正規分布の累積分布関数である赤曲線に沿っているため、前述のように変換後のデータ分布の方が正規性があることが確認できる。

### c) 分析結果

a) で求めた変換後の目的変数を用いて、数量化理論第 I 類で分析を行った結果、得られたカテゴリースコアは図-9である。よって、サンプルスコアは次式のように表される。

$$X = \{-0.48X_{11} + 0.01X_{12} + 0.44X_{13} + 0.40X_{14}\} + \{-0.81X_{21} - 0.35X_{22} + 0.34X_{23}\} + \{-0.01X_{31} + 0.01X_{32}\} + \{-0.45X_{41} + 0.54X_{42}\} + \{-0.31X_{51} + 0.01X_{52} + 0.37X_{53}\} + 1.54 \quad (5)$$

ただし、 $X_{11}$ : 盛土高さ 5m 未満,  $X_{12}$ : 5m 以上 10m 未満,  $X_{13}$ : 10m 以上 15m 未満,  $X_{14}$ : 15m 以上,  $X_{21}$ : 被害範囲路肩部,  $X_{22}$ : 1車線,  $X_{23}$ : 2車線以上,  $X_{31}$ : 地形平坦,  $X_{32}$ : 傾斜,  $X_{41}$ : 被害形式段差・陥没・亀裂 (未崩壊),  $X_{42}$ : 崩壊,  $X_{51}$ : 交通量 4,000 台/日未満,  $X_{52}$ : 4,000 台/日以上 20,000 台/日未満,  $X_{53}$ : 20,000 台/日以上 の数量データを示しており、各々あてはまるときは  $X_{ij}=1$ , あてはまらないときは  $X_{ij}=0$  である。

変換後のサンプルスコアと実績値の相関図は図-10のようになった。ここで、得られたサンプルスコアを逆変換する必要がある。逆変換は以下の式を用いる。

$$Y = (\lambda X + 1)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (6)$$

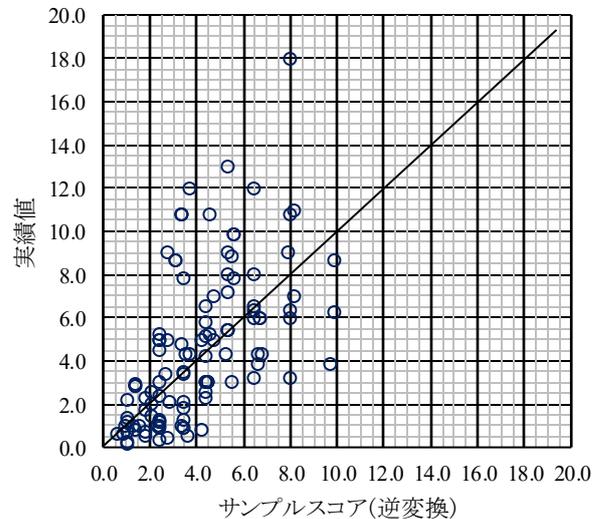


図-11 逆変換後のサンプルスコアと実績値の相関図

べき係数  $\lambda$  は a) で算出済である。よって、べき正規変換を考慮した数量化理論第 I 類の分析による予測モデル式は下記のように表される。

$$Y = (0.29X + 1)^{\frac{1}{0.29}} \quad (7)$$

ただし、 $X$ : (5)式である。

(7)式を用いて(5)式で得られたサンプルスコアを逆変換した値と実績値の一致度を検証した結果、図-11のような相関図が得られた。予測モデル式(7)式の精度を求めた結果、53.4%となり、べき正規変換を考慮する前の予測モデル式(2)式と比較すると、12%上昇した。しかし、精度は向上したものの、べき正規変換を行う前の相関図 (図-4) とほぼ変化のない相関図 (図-11) であるため、分散不均一性の問題は解消されていないと考えられる。

表-9 データセットの分割

データセット[箇所数]	A	B	C	D	E	計
新潟県中越地震	6	6	6	6	6	30
能登半島地震	4	4	3	4	4	19
新潟県中越沖地震	1	1	2	2	2	8
岩手宮城内陸地震	2	1	1	1	1	6
駿河湾地震	1	1	1	0	0	3
東北地方太平洋沖地震	8	8	8	8	8	40
熊本地震	1	1	1	1	1	5
計	23	22	22	22	22	111

表-10 テストデータ及び学習データの平均規制期間

テストデータ	規制期間	学習データ	規制期間
A	4.92	B/C/D/E	4.51
B	4.51	A/C/D/E	4.62
C	4.86	A/B/D/E	4.53
D	4.35	A/B/C/E	4.65
E	4.32	A/B/C/D	4.66

(5) 交差検証の適用

(1)から(4)までは、全 111 データで分析して予測モデル式を作成し、全データをテストデータとして予測モデル式に組み込み、精度を算出した。今回は、全データを n 分割し、n 分割分の予測モデル式を作成して精度を求める交差検証を用いて分析を行う。本研究では、n=5 とする。111 データの分割方法および分析結果を下記に示す。

a) データセットの分割

本研究は、2章に示すように、7地震の 111 地点を対象に統計分析を行っている。5 分割をするために、1 データセットあたり 22 地点となる。分割したものが表-9 である。分割方法として、各地震の収集データ数を 5 等分にした他、データセット A から E 間で規制期間にばらつきがでないよう、全てのデータセットの規制期間の平均が 4 日台となるように振り分けた (表-10)。

b) 分析結果

学習データを用いて数量化理論第 I 類で分析して得られた予測モデル式およびそのモデル式にテストデータを組み込んで算出した精度を下記に示す。

学習データ : B・C・D・E, テストデータ : A  

$$Y = \{-0.95X_{11} + 0.21X_{12} + 0.31X_{13} + 0.97X_{14}\} + \{-2.16X_{21} - 0.99X_{22} + 1.03X_{23}\} + \{0.02X_{31} - 0.01X_{32}\} + \{-1.13X_{41} + 1.42X_{42}\} + \{-0.52X_{51} - 0.58X_{52} + 0.20X_{53}\} + 4.51$$
 (8)

精度 : 58.6%

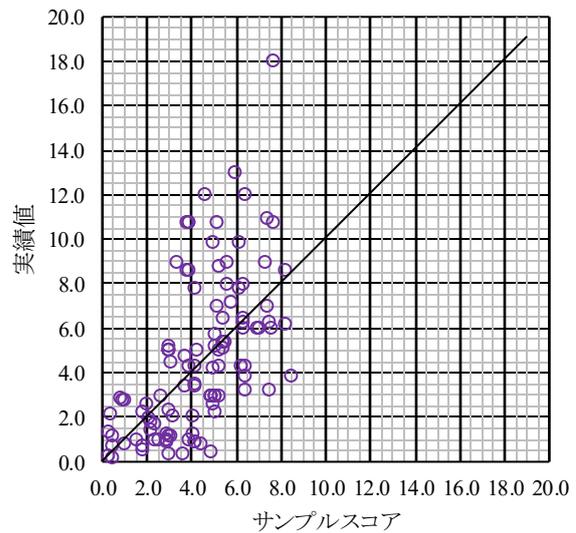


図-12 交差検証後のサンプルスコアと実績値の相関図

学習データ : A・C・D・E, テストデータ : B  

$$Y = \{-1.55X_{11} + 0.03X_{12} + 1.12X_{13} + 1.45X_{14}\} + \{-1.96X_{21} - 1.14X_{22} + 1.27X_{23}\} + \{-0.23X_{31} + 0.11X_{32}\} + \{-0.86X_{41} + 0.96X_{42}\} + \{-1.19X_{51} - 1.17X_{52} + 0.41X_{53}\} + 4.62$$
 (9)

精度 : 45.9%

学習データ : A・B・D・E, テストデータ : C  

$$Y = \{-1.22X_{11} + 0.11X_{12} + 0.40X_{13} + 1.38X_{14}\} + \{-2.52X_{21} - 0.87X_{22} + 1.00X_{23}\} + \{0.34X_{31} - 0.18X_{32}\} + \{-1.25X_{41} + 1.60X_{42}\} + \{-1.55X_{51} - 0.89X_{52} + 0.61X_{53}\} + 4.53$$
 (10)

精度 : 48.1%

学習データ : A・B・C・E, テストデータ : D  

$$Y = \{-1.25X_{11} - 0.01X_{12} + 1.54X_{13} + 0.53X_{14}\} + \{-2.51X_{21} - 0.90X_{22} + 0.73X_{23}\} + \{-0.05X_{31} + 0.03X_{32}\} + \{-0.94X_{41} + 1.10X_{42}\} + \{-0.44X_{51} - 0.13X_{52} + 0.17X_{53}\} + 4.65$$
 (11)

精度 : 42.0%

学習データ : A・B・C・D, テストデータ : E  

$$Y = \{-1.13X_{11} - 0.46X_{12} + 1.67X_{13} + 1.43X_{14}\} + \{-1.53X_{21} - 1.35X_{22} + 0.98X_{23}\} + \{-0.15X_{31} + 0.09X_{32}\} + \{-0.79X_{41} + 1.02X_{42}\} + \{-1.29X_{51} + 0.45X_{52} + 0.45X_{53}\} + 4.66$$
 (12)

精度 : 48.4%

(8)式から(12)式までの 5 式が得られた。この 5 式の係数 (カテゴリースコア) を加重平均して最終的な予測式を算定する。よって、交差検証を用いた数量化理論第 I 類の分析による予測モデル式は下記のように表される。

$$Y = \{-1.22X_{11} - 0.02X_{12} + 1.00X_{13} + 1.15X_{14}\} + \{-2.13X_{21} - 1.05X_{22} + 1.00X_{23}\} + \{-0.01X_{31} + 0.01X_{32}\} + \{-0.99X_{41} + 1.22X_{42}\} + \{-0.99X_{51} - 0.46X_{52} + 0.37X_{53}\} + 4.59$$
 (13)

(13)式で得られたサンプルスコアと実績値の一致度を検証した結果、図-12 のような相関図が得られた。予測モデル式(13)式の精度を求めた結果、50.4%となり、数量化理論第 I 類を用いた分析の中で一番精度の低い結果となった。

#### 4. 拡張型数量化理論第I類

##### (1) 拡張型数量化理論第I類の概要

拡張型数量化理論第I類は、数量化理論第I類と同様、予測モデル式を導き、目的変数の予測、その予測に重要な影響を及ぼす要因の抽出を行う手法である。数量化理論第I類との相違点は、説明変数内の数量データをカテゴリーデータ化せずに元の値を用いて分析できることである。また、分析を行う前に、説明変数内の数量データと目的変数間で回帰分析を行い、直線関数、分数関数、対数関数、ルート関数など、最も当てはまりの良い関数式を定める。定めた関数式で変換したデータを説明変数として、拡張型数量化理論第I類を行う<sup>1)</sup>。

##### (2) 拡張型数量化理論第I類の適用

本研究では、第2章で示した111地点における被災箇所において、目的変数を規制期間、説明変数を盛土高さ、被害範囲、地形、被害形態、交通量として拡張型数量化理論第I類の分析を行う。なお、被害範囲、地形および被害形態は質的データのため、表1にならってカテゴリーデータとして扱う。また、盛土高さや交通量は数量データのため、目的変数と回帰分析を行い、当てはまりの良い関数式を定める必要があるため、それらの手順を下記に示す。

##### a) 盛土高さのデータ変換

目的変数と元の値で回帰分析を行った結果を、図-13に示す。元の値は直線関数であり、相関係数は0.36である。同様に元の値を分数変換、対数変換、ルート変換させて回帰分析した結果、それぞれ相関係数は0.39、0.43、0.40となった。一番相関が高いのは対数変換であり、元の値を対数変換して拡張型での分析を行うと精度が高くなることを意味している。そのため、本研究では盛土高さを対数変換したデータを用いる。なお、対数関数での

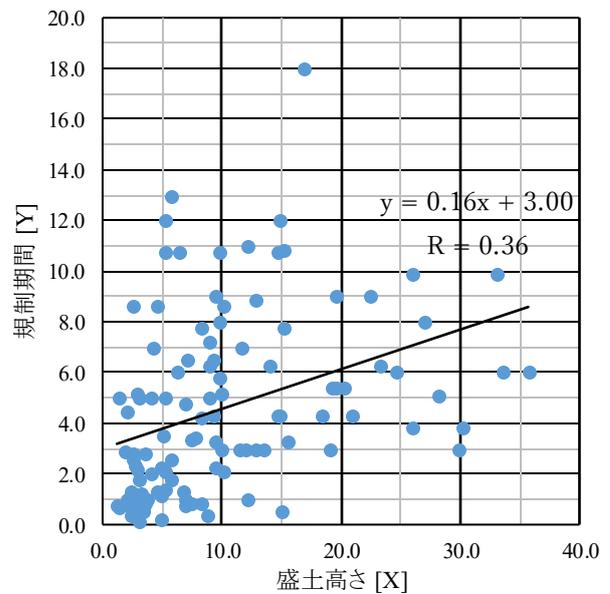


図-13 盛土高さや規制期間の相関図

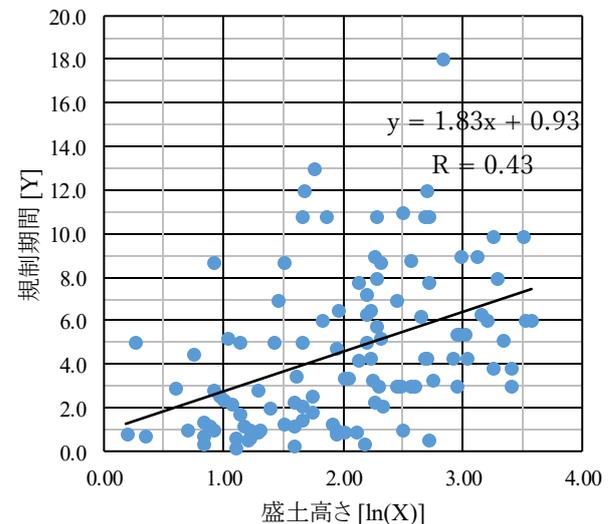


図-14 対数変換後の盛土高さや規制期間の相関図

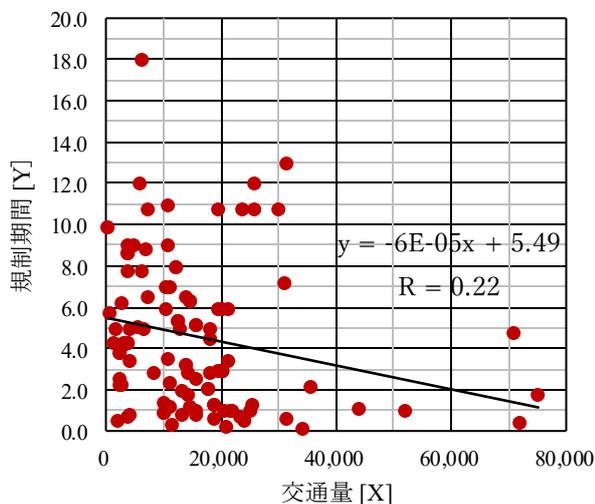


図-15 交通量や規制期間の相関図

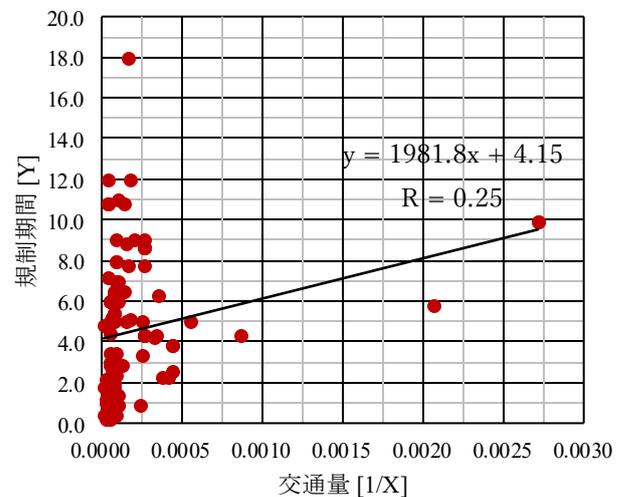


図-16 分数変換後の交通量や規制期間の相関図

表-11 該当する説明変数を用いた予測モデル式の精度 [盛土高さ：対数変換]

盛土高さ	被害範囲	地形	被害形態	交通量	盛土高さ:対数変換			
					交通量			
					元の値	分数変換	ルート変換	対数変換
○	○	○	○	○	52.1%	53.8%	52.4%	53.5%
○	○	○	○					
○	○	○		○	53.1%	52.9%	53.1%	53.1%
○	○		○	○	52.0%	53.9%	52.4%	53.2%
○		○	○	○	49.9%	50.5%	50.9%	50.9%
	○	○	○	○	50.5%	51.5%	51.5%	52.0%

表-12 該当する説明変数を用いた予測モデル式の精度 [交通量：分数変換]

盛土高さ	被害範囲	地形	被害形態	交通量	交通量:分数変換			
					盛土高さ			
					元の値	分数変換	ルート変換	対数変換
○	○	○	○	○	52.1%	51.9%	52.8%	53.8%
○	○	○	○		51.1%	49.8%	51.6%	51.8%
○	○	○		○	51.6%	51.6%	52.3%	52.9%
○	○		○	○	52.6%	52.3%	53.2%	53.9%
○		○	○	○	49.9%	50.4%	50.2%	50.5%
	○	○	○	○				

回帰分析結果を図-14 に示す。図-14 は縦軸を対数で取っているため、近似式は直線で表している。

b) 交通量のデータ変換

a) と同様に回帰分析を行う。元の値での回帰分析の結果を図-15 に示す。また、分数変換、対数変換、ルート変換での回帰分析での相関は、それぞれ 0.25、0.24、0.24 となった。よって本研究では、一番相関の高い分数変換した交通量をデータとして取り扱う。なお、分数変換での相関図を図-16 に示す。縦軸を分数で取っているため、近似式は直線で表している。

(3) 分析結果

対数変換した盛土高さのデータを用いて分析して予測モデル式を作成し、そのモデル式の精度を求めた結果を表-11 に示す。盛土高さのデータを対数変換に固定して、交通量は4つの関数式を変換値として分析している。同様な方法で、交通量のデータを分数変換に固定して、盛土高さを様々な変換値として分析して、予測モデル式の精度を求めた結果が表-12 である。表-11 より、盛土高さのデータを対数変換に固定した場合、交通量データを分数変換させて分析したものが最も精度が高い。表-12 よ

り、交通量のデータを分数変換に固定した場合、盛土高さデータを対数変換させて分析したものが最も精度が高い。つまり、盛土高さを対数変換、交通量を分数変換したデータを用いたものかつ地形を除く4つの説明変数での分析が最も精度の高い予測モデル式が構築できることが分かった。その予測モデル式は以下の式のように表される。

$$Y=0.70\{\ln(X)-2.01\}+1586\left(\frac{1}{Z}-0.000195\right)+\{-2.56X_{21}-0.97X_{22}+0.99X_{23}\}+\{-1.26X_{41}+1.54X_{42}\}+4.59 \quad (14)$$

ただし、X は変換前の盛土高さ、Z は変換前の交通量である。

精度は 53.9%であり、本研究での分析の中で最も精度の高い予測モデル式となった。

5. 結論

本研究では、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2009年岩手宮城内陸地震、2009年駿河湾地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震の計7地

震における道路盛土被災 111箇所を対象に、復旧に影響を与える要因の抽出と被災からの復旧期間の予測について数量化理論第 I 類と拡張型数量化理論第 I 類を用いて分析した。その分析結果を下記に示す。

- ・数量化理論第 I 類の分析により、精度 52.2%の予測モデル式(2)が得られた。
- ・盛土高さが高くなるほど、規制期間が長くなる傾向であった。
- ・被害範囲が広がるほど、規制期間が長くなる傾向であった。
- ・平坦地形での被災より傾斜地形での被災の方が規制期間が長くなる傾向であった。
- ・道路崩壊の方が段差・亀裂・陥没といった崩壊に至らなかった被害よりも規制期間が長くなる傾向であった。
- ・規制期間に最も影響を及ぼす要因は被害範囲であった。
- ・分散不均一性の問題解消のために用いたべき正規変換を考慮した分析では、精度 53.4%の予測モデル式(7)式が得られ、考慮する前よりも 1.2%上昇した。
- ・べき正規変換を用いても分散不均一性の問題が解消されなかった。
- ・交差検証を考慮した分析では、精度 50.4%の予測モデル式(13)式が得られたが、最も精度の低い結果となった。
- ・拡張型数量化理論第 I 類の分析により、精度 53.9%の予測モデル式(14)式が得られ、最も精度の高い結果となった。

本研究では求めた予測式の精度が 50～54%といまひとつであった。考えられる原因として、優先的に復旧が行われる高速道路と、国道の両方を対象とした予測式を立てたことが 1つとして挙げられる。また、本研究で取り上げた 6項目の復旧要因の他にも、規制期間と密な要因があると考えられる。以上のことより、国道と高速道路の規制期間の予測式を別々に算定すること、復旧要因の再検討が課題である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 17K01343 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 日本付近で発生した主な被害地震(平成 8 年以降)－気象庁, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai1996-new.html> (最終閲覧日 2019.9.9)
- 2) 災害・防災情報 昨年以前の災害(地震)－国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/saigai/saigaibetu1.html> (最終閲覧日 2019.9.9)
- 3) 片岡正次郎, 長屋和宏, 松本幸司: 新潟県中越地震時の道路盛土被害の分析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.71, No.4(地震工学論文集第 34 巻), pp.568-576, 2015.
- 4) 地震工学委員会 地震被害調査小委員会: 2016 年 4 月 14 日熊本で発生した地震 (16 日未明の地震も含む), <http://committees.jsce.or.jp/ecc205/node/26> (最終閲覧日 2018.9.4)

- 5) 国土交通省 九州地方整備局 道路部高速道路課: 平成 29 年九州自動車道の 4 車線についてのお知らせ, [http://www.qsr.mlit.go.jp/press\\_release/h29/170416.html](http://www.qsr.mlit.go.jp/press_release/h29/170416.html) (最終閲覧日 2018.9.4)
- 6) 上原康平, 丸山喜久: 既往地震データに基づく高速道路の復旧予測に関する統計分析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4(地震工学論文集第 35 巻), pp.110-116, 2016.
- 7) 中村洋丈, 横田聖哉, 吉村雅弘: 高速道路盛土の地震災害マネジメントにおける耐震性評価手法の構築, 土木学会論文集 F4, Vol.69, No.2, pp.156-175, 2013.
- 8) 安田進: 土構造物の被害盛土構造物, [http://www.jsce.or.jp/library/eq\\_repo/Vol2/08/report/6\\_1.pdf](http://www.jsce.or.jp/library/eq_repo/Vol2/08/report/6_1.pdf) (最終閲覧日 2018.9.4)
- 9) 統計分析研究所: 多変量解析の手法別解説, [https://istat.co.jp/ta\\_commentary/method1](https://istat.co.jp/ta_commentary/method1) (最終閲覧日 2019.9.9)
- 10) 青木繁伸: Box-Cox 変換の最適の  $\lambda$ , <http://aok.i2.si.gunma-u.ac.jp/R/Box-Cox-transformation2.html> (最終閲覧日 2019.9.7)
- 11) 統計分析研究所: 多変量解析の手法別解説 拡張型数量化 I 類, [https://istat.co.jp/ta\\_commentary/advanced1](https://istat.co.jp/ta_commentary/advanced1) (最終閲覧日 2019.9.9)

(?)

# CONSTRUCTION OF RESTORATION PREDICTION MODEL FOR ROAD EMBANKMENT BY STATISTICAL ANALYSIS OF MULTIPLE EARTHQUAKE DISASTERS

Atsushi NOMOTO, Hisakazu SAKAI and Yoshio KAJITANI

A large number of earthquake-induced damage to road embankments have been reported in Japan. Since a road embankment is a linear structure over long distance, even if just one severe damage were suffered in a section, the traffic function would be lost. An embankment around the Masiki bus stop in the Kyusyu expressway had collapsed during the 2016 Kumamoto earthquake and the traffic regulation had been applied for as long as 13 days. An accurate prediction for repair period of damaged road would inform us where to reinforce road embankment, and make a functional degradation of road networks minimize, therefore it should mitigate a secondary disaster for human living.

In this study, we investigated the regulation period of roads as well as the damages to road embankment caused by seven earthquakes which induced severe damages to road. We analyzed with multiple statistical methods using five items: embankment height, damage range, topography, damage form, and traffic volume, which are factors affecting the regulation period. We constructed recovery prediction models using the analysis results. We denoted the importance of the five items and deduced the relationship among regulation period and the five items.