

高速道路の復旧予測に向けた 既往地震データに基づく基礎的検討

上原 康平¹・丸山 喜久²

¹学生会員 千葉大学博士前期課程 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: 14tm0311@chiba-u.jp

²正会員 千葉大学准教授 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

本研究では地震時の高速道路の復旧日数の推定を目的とし、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。2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震の際の高速道路の開通までに要した日数をもとに、復旧予測モデルの構築に関する検討を行った。ROC曲線に基づきモデルの精度の検証を行い、復旧予測モデルに適している関数形を定めた。さらに、構築した復旧予測モデルを南海トラフ巨大地震の基本ケースに適用し、復旧日数の推定を行った。

Key Words : restoration of expressway after an earthquake, logistic regression analysis, receiver operating characteristics (ROC) curve

1. はじめに

2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震などの地震が発生した際に、人的被害や建物被害に加え、道路ネットワークやライフライン等にも多大な影響が生じた。また、中央防災会議では、南海トラフ巨大地震や首都直下地震も近い将来発生すると予想している¹⁾。道路ネットワークは被災地への緊急対応を司る重要なライフラインであるため、地震後の復旧状況を予想することは、災害対策の立案に貢献することができる。しかし既往の研究では、地震の被害想定や構造物などの被害調査などは行われているものの、道路ネットワークの復旧予測が行われた事例はあまり多くない。

そこで本研究では、震度曝露人口^{2,3)}の考え方を応用した震度曝露道路延長を指標として用いることで、高速道路の復旧期間を予測することを目的とする。統計手法の一つである多変量解析のロジスティック回帰分析を用いて、既往地震の際の高速道路の復旧状況に基づき、高速道路の復旧確率を予測する多重ロジスティック回帰モデルを構築する。ロジスティック回帰分析の結果を、ROC曲線 (Receiver Operating Characteristics curve) によって精度を検証し、復旧予測モデルに適した関数形を定める。

さらに、今後発生が予想されている地震に本研究で構

築した復旧予測モデルを適応させ、高速道路の復旧期間を予測する。具体的には、多重ロジスティック回帰モデルと震度曝露道路延長の指標を用いて、南海トラフ巨大地震時の高速道路ネットワークの復旧日数の推定を試みた。

2. 既往地震の際の高速道路復旧期間と震度曝露道路延長

GIS上に対象地域の道路データを反映させ、高速道路の道路延長を算出した。これに震度情報を付加させるために、対象とする地震の震度分布を重ね合わせた。本研究では、2004年新潟県中越地震⁴⁾、2007年新潟県中越沖地震⁵⁾、2008年岩手・宮城内陸地震⁶⁾、2011年東北地方太平洋沖地震⁷⁾の4地震を対象とした。4地震の高速道路の復旧期間の概要^{8,9)}を表-1に示す。新潟県中越地震、新潟県中越沖地震については最大速度 (PGV) の空間分布を式(1)を用いて計測震度 I に変換した¹⁰⁾。

$$I = 2.42 + 1.82 \log_{10} PGV \quad (1)$$

震度曝露道路延長はインターチェンジ (IC) 間ごとに、震度階別に集計した。高速道路は計測震度が震度5弱以上であると、一時通行止めとし点検を行うことになって

表-1 高速道路の復旧期間の概要

	対象路線	通行止め範囲	復旧期間(日)		M
			最短	最長	
新潟県中越地震	関越自動車道	長岡IC－水上IC	1.0	13.0	6.6
新潟県中越沖地震	北陸自動車道	能生IC－新潟中央IC	0.1	2.4	6.6
岩手・宮城内陸地震	東北自動車道	花巻IC－福島飯坂IC	0.1	0.2	6.9
東北地方太平洋沖地震	東北自動車道	青森IC－浦和IC	0.9	13.0	9.0

いる¹¹⁾ため、本研究では震度5弱以上の高速道路を対象に震度階ごとに曝露道路延長を集計した。

3. 復旧予測モデルの構築

(1) ロジットモデルの関数形

本研究の目的である高速道路の復旧確率を予測する数理モデルを構築するために、統計解析システムのR¹²⁾を用いて、ロジスティック回帰分析を行う。関数形は、式(2)、(3)の2通りを仮定した。この際に、IC毎に震度曝露道路延長と開通までに要した日数^{9,9)}をまとめ、データフレームを作成した。

$$p = \frac{1}{1 + \exp\{-(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_tx_t)\}} \quad (2)$$

$$p = \frac{1}{1 + \exp\{-(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_Mx_M + b_tx_t)\}} \quad (3)$$

説明変数である x_1 は震度5弱および震度5強の震度曝露道路延長 (km) , x_2 は震度6弱以上の震度曝露道路延長 (km) , x_t は開通までに要した日数 (復旧期間) , x_M はモーメントマグニチュードである。また、 p は復旧確率、 $b_0 \sim b_2$, b_M , b_t は回帰定数である。式(2)と式(3)のモデルの違いは、地震のモーメントマグニチュードを考慮するか否かである。モーメントマグニチュードを導入したのは、広範囲にわたる道路区間で被害が生じた場合には復旧期間が長くなると想像されるので、地震による強震域の広さの違いを表すことを意図したものである。

(2) ロジットモデルの検証

式(2)、(3)の関数形を仮定したロジスティック回帰分析の結果を、ROC (Receiver Operating Characteristics) 曲線¹³⁾を用いて検証する。ここで、復旧済みの区間を復旧済みと正しく判別する率を敏感度 TPR (sensitivity) , 未復旧の区間を未復旧と正しく判別する率を特異度 TNR (specificity) と定義する。敏感度および特異度は、表-2の混同行列に基づき式(4)、(5)のように書ける。

$$TPR = TP / (TP + FN) \quad (4)$$

$$TNR = TN / (TN + FP) \quad (5)$$

表-2 モデル検証のための混同行列

		予測	
		Positive 復旧済み	Negative 未復旧
観測	True 復旧済み	True Positive (TP) 開通済みの的中数	False Negative (FN) 未開通のはずれ数
	False 未復旧	False Positive (FP) 開通済みのはずれ数	True Negative (TN) 未開通の的中数

式(2)および(3)の p の値を適宜変化させ、 TPR および TNR をその都度算出する。そして、横軸を $1-TNR$ 、縦軸を TPR として図化したものがROC曲線である。一般的に判別モデルが有効である場合、ROC曲線は $1-TNR$ と TPR の比が1:1である直線から左上に離れる。ROC曲線下の面積はAUC (Area under the curve) と呼ばれ、最大値は1、ランダムな判別では0.5となる¹³⁾。

式(2)および式(3)のロジットモデルに対してROC曲線を描くと図-1のようになる。式(2)のモデルのAUCは0.77、式(3)のモデルのAUCは0.93となり、式(3)の方がAUCが大きく判別能力が高い。また、式(3)のAUCの値から、非常に優れたモデルと判断される^{14,15)}。

式(3)のROC曲線にもとづき、高速道路の復旧日数を評価するために最適な復旧確率 p の値を定める。判別能力の高いモデルのROC曲線はグラフの左上隅に近づく¹³⁾。そこで、グラフの左上隅からの距離が最も近くなる $1-TNR$ 、 TPR を与える p を評価したところ、本研究の式(3)のモデルでは0.51となった。なお、このときの TPR は0.83、 TNR は0.88である。表-3に式(3)のロジットモデルの回帰定数を示す。

式(3)で構築したロジットモデルの説明変数に対する感度を図-2のように評価した。説明変数 x_2 (震度6弱以上の震度曝露道路延長) を30kmで固定し、 x_1 の説明変数に任意の延長 (10km, 30km, 50km) を与え、復旧日数と復旧確率の関係を比較した。同様に、 x_1 (震度5弱および5強の震度曝露延長) を30kmで固定し、 x_2 の説明変数に任意の延長 (10km, 30km, 50km) を与えた。このとき説明変数 x_M は7.0と仮定した。図-2より、震度曝露道路延長が長くなると、同一の復旧確率が得られるまでに要する日数が長くなる傾向が得られ、合理的な予測値を示すことが確認できた。また、説明変数 x_1 に比べ x_2 の値を変化させた時の方が、同一の復旧確率に達するまでに要する日数の違いが大きくなったため、震度6弱以上の震度曝露道路延長の方が、震度5弱および震度5強の震度曝

表-3 式(3)のロジットモデルの回帰定数

b_0	b_1	b_2	b_M	b_t
13.65	-0.02	-0.11	-1.82	0.35

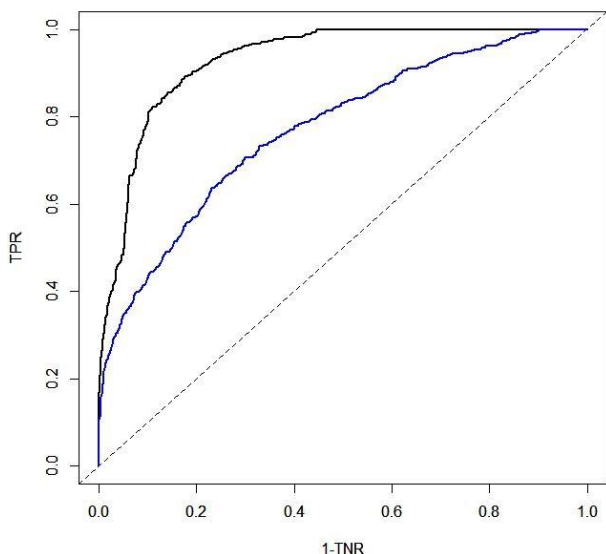


図-1 式(2)で表されるロジットモデルのROC曲線（青色）と式(3)で表されるロジットモデル（黒色）の比較

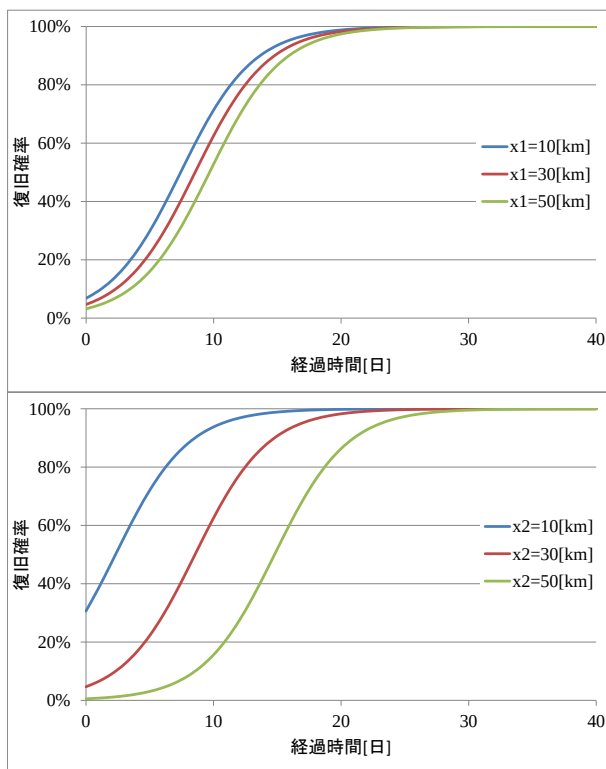


図-2 ロジットモデルの説明変数に対する感度の評価
(上図： $x_2=30[\text{km}]$ で固定，下図： $x_1=30[\text{km}]$ で固定)

露道路延長よりも、復旧日数に大きな影響を与えるものと考えられる。

4. 高速道路の復旧日数と震度曝露道路延長の関係

(1) 既往地震への適用

前章で構築した復旧予測モデル（式(3)）を用いて、新潟県中越地震、新潟県中越沖地震、岩手・宮城内陸地震および東北地方太平洋沖地震を対象に、地震後の高速道路の復旧に要した実際の日数と、モデルで推定した復旧日数を比較した（図-3～図-6）。ここで、高速道路の復旧日数は、ROC曲線を用いた検証結果を踏まえて、 $p=0.5$ となるときの x_t とした。また、 x_1 、 x_2 がどちらも0kmのときには、高速道路の通行規制が行われないものと仮定した。モデルで算出した復旧日数が負になった場合は、復旧日数は0日とした。

新潟県中越地震の際の開越自動車道（図-3）では、復旧期間が最長の13日要した区間の予測結果が最大で7日程度となるなど、全体的に過小評価である。新潟県中越沖地震の際の北陸自動車道（図-4）では、実際の開通までに要した日数は短く、モデルで算出した復旧日数は現実には則した結果となった。

岩手・宮城内陸地震の際の東北自動車道（図-5）では、実際の開通までに要した日数が0.1日もしくは0.2日である。本研究で算出した予測結果では、復旧日数0日と判断できる区間が多数を占めている。東北地方太平洋沖地震の際の東北自動車道（図-6）では、実際の開通までに要した日数は11日と13日の区間が隣接して存在する。本研究ではICの空間的な連続性を考慮していないため、隣り合うICでも推定された復旧日数に差が生じている。しかし実際の開通に13日要した区間については、予測された復旧日数が長くなる傾向がある。このように、本研究で構築した復旧日数予測モデルは、新潟県中越地震の一部道路区間を除けば、推定精度は良好である。

図-6をもとに、東北地方太平洋沖地震の際の東北自動車道について、地図上に震度分布と実際の開通までに要した日数を図-7に示す。また、モデルで算出した復旧日数を図-8に示す。図-7と図-8を比較すると、震度6弱以上の区間ではやや長めの復旧日数が予測されたが、概ね良好な予測結果となっている。

(2) シナリオ地震への適用

本研究で構築した復旧予測モデルを南海トラフ巨大地震に適用し、高速道路の復旧日数を推定した。南海トラフ巨大地震の震度分布に関しては、中央防災会議で定義されている南海トラフ地震の5つのパターンのうち、基本ケースを用いて検討を行った¹⁶⁾。なお、モデルの適用

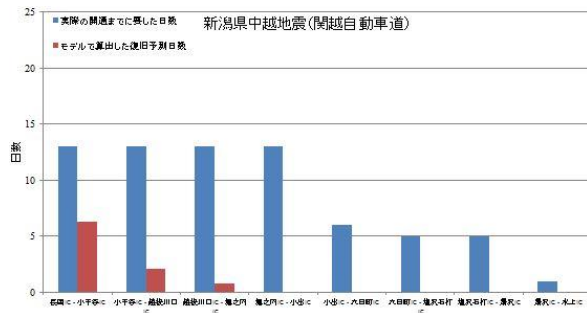


図-3 新潟県中越地震における実際の開通までに要した日数とモデルで算出した復旧日数の関係

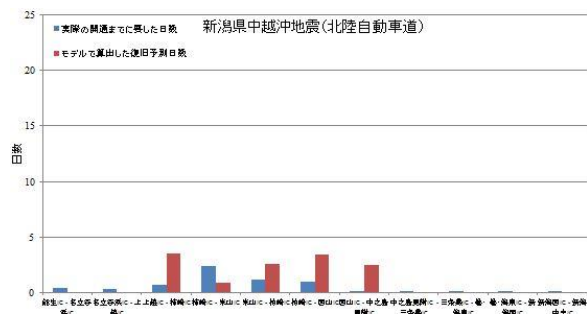


図-4 新潟県中越沖地震における実際の開通までに要した日数とモデルで算出した復旧日数の関係

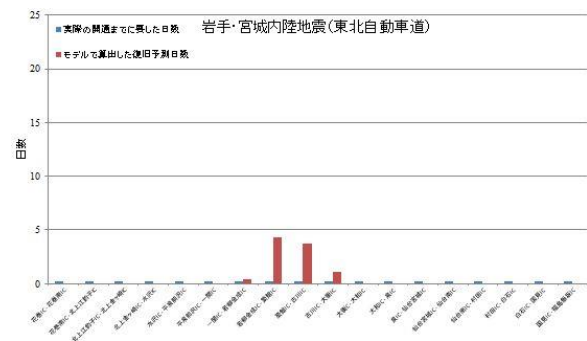


図-5 岩手・宮城内陸地震における実際の開通までに要した日数とモデルで算出した復旧日数の関係

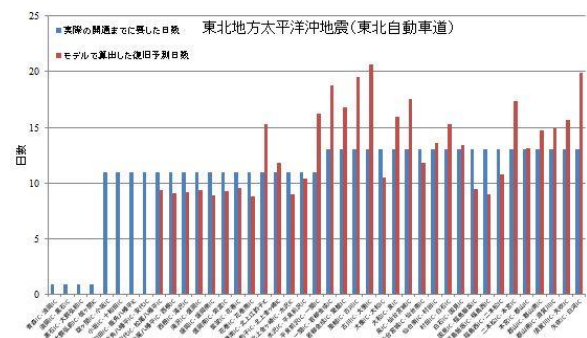


図-6 東北地方太平洋沖地震における実際の開通までに要した日数とモデルで算出した復旧日数の関係

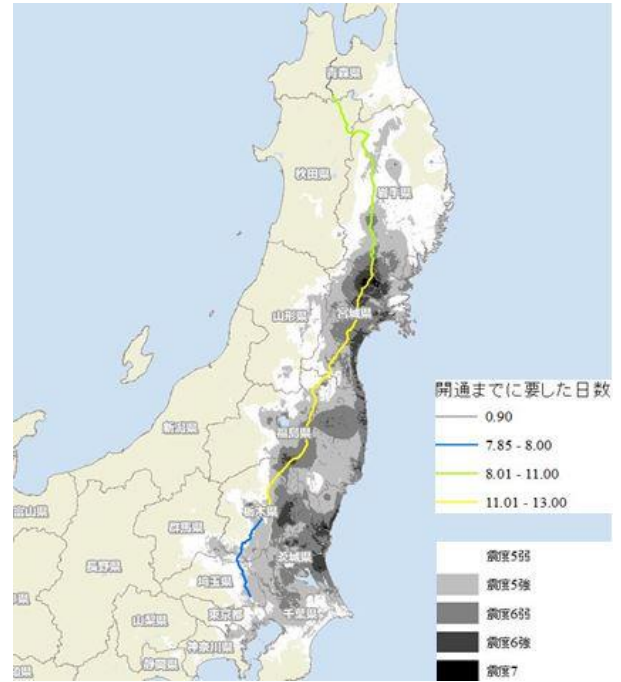


図-7 東北地方太平洋沖地震における震度分布と実際の開通までに要した日数

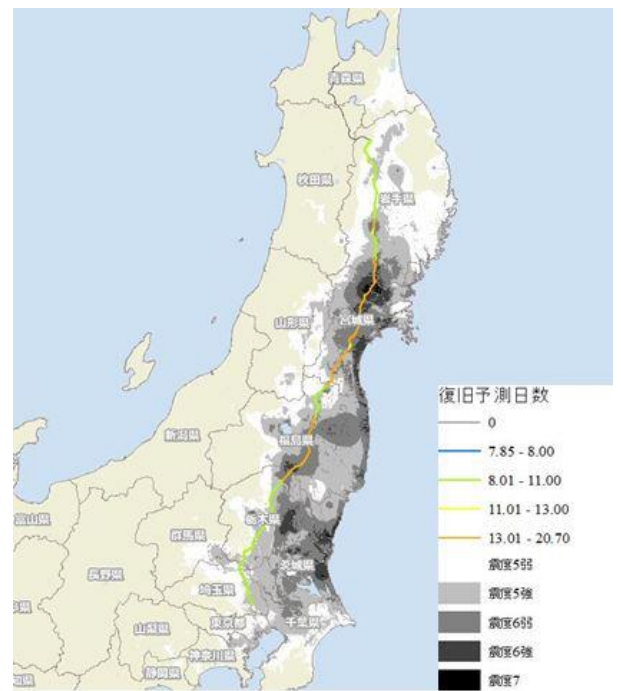


図-8 東北地方太平洋沖地震における震度分布とモデルで算出した復旧日数

範囲は、本研究で用いた既往地震のデータが震度 5 弱以上の IC 区間のみを対象としているため、震度 5 弱以上の地震動に晒される高速道路を復旧予測の対象とした。

高速道路の GIS ファイル¹⁷⁾をもとに、IC ごとの道路リンクを作成した。GIS 上で、震度分布と重ね合わせ、震度曝露延長を IC 間ごとに算出した。さらに、式(3)のモデルを適用し、復旧日数 ($p=0.5$ となるときの x_i) を

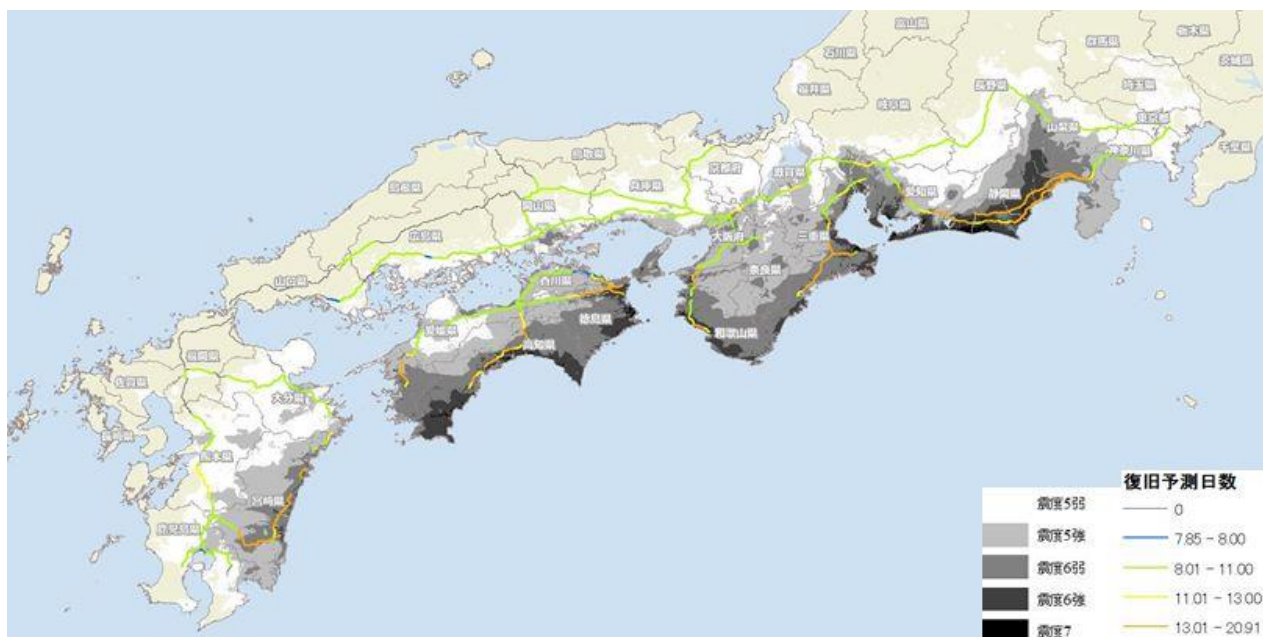


図-9 南海トラフ巨大地震における高速道路の復旧予測日数と震度分布の関係

予測した。結果を図-9に示す。図-9より、震度が大きく、震度曝露道路延長も大きくなる沿岸部で復旧日数が長く算出されていることが分かる。とくに、東名高速道路および新東名高速道路では、他の高速道路と比べて復旧日数が長い区間が多く、復旧期間として2〜3週間が見込まれるため、並行する中央自動車道の役割は大きいものと思われる。

5. まとめ

本研究は、既往地震における高速道路の開通までに要した日数をもとに、多重ロジスティック回帰分析を用いた復旧予測モデルを構築した。構築した復旧予測モデルを、既往地震に適用し検証を行った後、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路の復旧日数を推定した。

モデルの検証として、復旧予測モデルを構築する際のロジスティック回帰分析で、地震の強震域を示すモーメントマグニチュードを説明変数として考慮するか否か、および説明変数の感度の評価を行った。検証の結果、モーメントマグニチュードを考慮すると、考慮しない場合よりもモデルの診断能力が高く、AUCの値から判別能力の高い非常に優れたモデルを構築することができた。説明変数の感度の評価より、震度6弱以上の震度曝露道路延長の方が、震度5弱および5強の震度曝露道路延長よりも、復旧日数に大きな影響を与えていることが分かった。

本研究の結果としては、新潟県中越地震、新潟県中越

沖地震、岩手・宮城内陸地震、東北地方太平洋沖地震の4地震を対象とし、ICごとの震度曝露道路延長の変数に加え、モーメントマグニチュードを変数として構築した復旧予測モデルが最適であると考えられた。しかし復旧日数が短い区間や震度曝露道路延長が短い区間については、教師データが少ないため、実際の開通までに要した日数と、モデルで算出した復旧日数の差が生じた区間がある。また本研究では、IC間の空間的な連続性を考慮していないため、隣り合うIC同士の復旧日数にも差が生じている。

今後は、IC間の連続性を考慮しつつ、より最適な復旧予測モデルの構築をしていく次第である。またIC間の道路構成要素に関する検討を行い、より精度の高い復旧予測モデルを構築することを目指す。

参考文献

- 1) 内閣府：防災情報のページ、
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/index.html>
- 2) 能島暢呂, 杉戸真太, 久世益充, 石川裕, 奥村俊彦, 宮腰淳一：地震動予測マップの活用—その2：震度曝露人口の試算—, 土木学会地震工学論文集, 4p, 2003.
- 3) 能島暢呂, 杉戸真太, 久世益充, 濱本剛紀：震度情報ネットワークによる震度曝露人口のリアルタイム推計, 地域安全学会論文集, No.6, pp. 181-190, 2004.
- 4) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiya, Y., and Yagai, H.: Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.30, No.11, pp. 1158-1167, 2010.
- 5) 地震動マップ即時推定システム,
<http://qq.ghz.geogrid.org/QuakeMap/index.html>
- 6) 社団法人地盤工学会：土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム発表論文集, 2007.

- 7) NEXCO東日本：平成19年新潟県中越沖地震～高速道路の被災及び復旧状況～，<http://www.e-nexco.co.jp/>
- 8) NEXCO 東日本：プレスリリース，東北支社，平成 20 年岩手・宮城内陸地震で発生した高速道路の被害状況等について，
http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/press_release/tohoku/h20/0614/
- 9) NEXCO 東日本：東日本大震災関連記者発表資料等，
http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/tohoku_eq/
- 10) Karim, K. R. and Yamazaki, F.: Correlation of the JMA Instrumental Seismic Intensity with Strong Motion Parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 5, pp. 1191-1212, 2002.
- 11) 後藤順治：地震時における道路通行規制基準の変更－安全性・信頼性の高い道路を目指して－，EXTEC, No. 59, pp. 21-23, 2001.
- 12) 青木繁信：Rによる統計解析，オーム社，2009.
- 13) Hanley, J.A. and McNeil, B.C.: The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve, *Radiology*, Vol. 143, No. 1, pp. 29-36, 1982.
- 14) 丸山喜久，永田茂，若松加寿江：東北地方太平洋沖地震における上水道管路被害の広域評価，第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 247-256, 2014.
- 15) ハスバートル，丸山清輝，野呂智之，中村明：ロジスティック回帰分析を用いた既存地すべり地形の地震時の危険度評価，*日本地すべり学会誌*, Vol. 49, No. 1, pp. 12-21, 2012.
- 16) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について（第一次報告），2012.
- 17) 国土交通省国土政策局国土情報課：国土数値情報ダウンロードサービス，<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>

?

ESTIMATION OF RESTORATION PERIOD OF EXPRESSWAY BASED ON THE DATASET AFTER THE RECENT EARTHQUAKES

Kohei UEHARA and Yoshihisa MARUYAMA

This study developed a numerical model to estimate the period for restoration work of expressway after an earthquake. A series of logistic regression analyses was performed based on the dataset after the recent earthquakes: the 2004 Mid-Niigata earthquake, the 2007 Chuetsu offshore earthquake, the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, and the 2011 Great East Japan earthquake. The model constructed by this study had an excellent discriminating ability based on the assessment of ROC curve. The model was applied to estimate the restoration period of expressway after a scenario earthquake which may occur in the Nankai Trough.