

輸送系及び供給系ライフラインの地震後の復旧予測状況の評価

Evaluation of Recovery Processes of Expressway Network and Water Supply System after an Earthquake

17WM1347 五十嵐 翼
Tsubasa Igarashi

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

This study tries to develop a more accurate numerical model to estimate the restoration time of the expressways and water supply systems after an earthquake. As for the expressways' restoration prediction model, various types of expressway structures are considered in the newly developed model, and the accuracy could be improved comparing with the previous model. As for the recovery process of water supply system, the authors try to estimate the restoration time with respect to the water supplier. The applicability of the numerical model proposed by Nojima and Sugito (2003) is investigated using the dataset compiled after the 2011 Great East Japan earthquake, and the model was modified to simulate the recovery process after the earthquake. The obtained numerical model was applied to the scenario earthquake of the Nankai Trough, and the restoration time was estimated.

1. はじめに

我が国では 2004 年新潟県中越地震、2011 年東北地方太平洋沖地震、2016 年熊本地震など大規模な地震が発生しており、そのたびに多大な人的被害や建物被害等が生じた。同様に、これらの地震では、鉄道や高速道路などの輸送系ライフラインや、電気、ガス、水道などの供給系ライフラインにも多大な被害が生じた。内閣府の中央防災会議では、南海トラフ地震や首都直下地震の危険性が指摘されている。とくに南海トラフを震源とする巨大地震では、関東から西日本の広い範囲が大きな揺れに見舞われ、人的被害や建物被害に加えて、高速道路や上水道などへも多大な被害が見込まれる。道路は被災地の応急復旧活動に、上水道は被災者の生活に欠かせない重要な社会基盤施設であり、これらの地震発生後の復旧状況を予測することは、事業継続計画の策定¹⁾など災害対策の立案に貢献することができる。

既往研究²⁾では、高速道路の地震後の復旧状況を予測するモデルが構築されている。震度曝露道路延長を説明変数として、既往地震の際の高速道路の復旧状況にもとづき、多重ロジスティック回帰分析を用いて復旧日数の予測モデルが構築されている。また、既往研究³⁾では、1995 年兵庫県南部地震の被災事例に基づき計測震度を説明変数とした上水道供給の復旧予測を二段階で行うモデルが構築されている。

本研究では既往研究^{2), 3)}で構築された地震時の復旧予測モデルの再検討を行い、モデルを改良することで精度の向上を図る。高速道路の復旧予測モデルの構築では、高速道路の区間および対象とする地震を増やし、高速道路の道路構造を考慮した復旧予測モデルなどの検討を行い、高精度な予測モデルの構築を目指す。上水道供給の復旧予測モデルの構築では 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の水道事業体ごとの復旧過程を検証し、既往研究³⁾におけるモデルの適合性を調べた。また、停電や津波等の要因を考慮しモデルの改良を検討した。東北地方太平洋沖地震の際には、地震発生から数日の間にわたって水道供給が完全に停止している事業体も見られたため、これを考慮した復旧モデルの構築も行った。

最後に、得られた高速道路、上水道の復旧モデルを用い、今後発生が予測されている南海トラフ地震の際の復旧状況の予測を行った。

2. 既往研究による高速道路の復旧モデルの検証

既往研究²⁾では高速道路の IC 間の復旧確率 p を予測する数理モデルを構築するため、ロジスティック回帰分析を行い、予測モデル式(1)を構築している(表-1)。

$$p = \frac{1}{1 + \exp \left\{ - (b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_M x_M + b_t x_t) \right\}} \quad (1)$$

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_M はモーメントマグニチュード (Mw)、 x_t は地震後の経過時間 (日) である。 X_1, X_2 は、IC 間ごとに計算する。 $b_0 \sim b_2, b_M, b_t$ は回帰定数である。 p は IC 間の地震後の経過時間に応じた復旧確率を表す。予測式の適用としては、 p に適切な閾値を設定し未復旧の区間と復旧済みの区間の 2 つに分類することを考えた場合、復旧確率 p が閾値に達するときの x_t を当該区間の復旧日数と見なす。

まず、既往研究の後に発生した 2016 年熊本地震の際の高速道路の実際の復旧日数と、既往研究のモデルで推定された復旧日数について比較を行った。図-1 では、高速道路の実際の復旧日数と、既往研究の予測モデル式(1)を用いて推定された復旧予測日数を表している。ここで、既往研究の式(1)における最適な判別解を与える復旧確率 p の閾値は、 $p = 0.51$ である²⁾ので p が 0.51 以上のとき、その IC 間は復旧したものと仮定した。

表-1 式(1)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

表-2 式(2)のロジットモデルの回帰定数

b_0	b_1	b_2	b_4	b_M	b_t
8.40	-1.51	-2.27	-1.75	-0.88	0.27

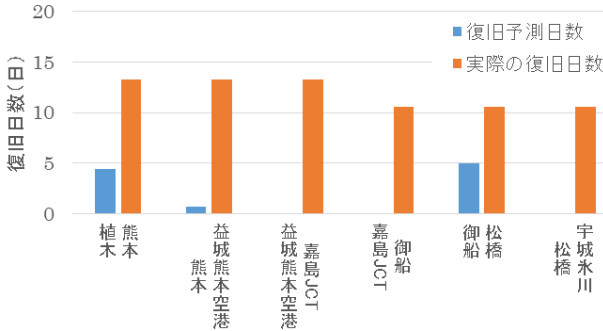


図-1 熊本地震における高速道路の実際の復旧日数と既往研究のモデル(式(1))で得られた復旧予測日数

IC間の道路延長が10 km以上である植木IC-熊本IC間や、御船IC-松橋IC間などでは4~5日程度の復旧日数が予測されているが、IC間の道路延長が短い他の区間では震度が大きくても予測日数がほぼ0日となっている。このことから既往研究で構築された予測モデル式(1)では、IC間ごとの道路延長の大小が予測される復旧確率に大きく影響を与えていることが考えられる。このような問題を解決し、さらに道路構造などを考慮するため、次章ではモデルの改良を検討する。

3. 高速道路の復旧モデルの改良

本研究では、式(2)の x_1 をインターチェンジ(IC)間の距離に対する震度5弱および震度5強の揺れに曝された距離の割合、 x_2 をIC間の距離に対する震度6弱以上の揺れに曝された距離の割合とした。また、道路構造の違いが復旧日数に与える影響を推定するため、道路構造別の復旧状況を分析した。丸山ら⁴⁾によると、高速道路の盛土区間について、走行に支障のあるとされる被災ランクBの被害は震度6弱以上の震動を受けた区間で生じている。そこで説明変数 x_4 (IC間ごとの震度6弱以上の揺れに曝された距離に占める土工道路の割合)を新たに加えた。 x_M はモーメントマグニチュード(Mw)、 x_t は地震後の経過時間とし、 $b_0 \sim b_2, b_4, b_M, b_t$ は回帰定数を表す(表-2)。分析の結果、判別能力の指標であるAUCの値は0.89となった。

$$p = \frac{1}{1 + \exp\{-(b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_4 x_4 + b_M x_M + b_t x_t)\}} \quad (2)$$

図-2では新潟県中越地震の際の式(1)、式(2)で得られた復旧予測日数と実際の復旧日数について示す。ここで、式(2)の最適な閾値は $p = 0.71$ である。式(1)の結果と比べると、式(2)ではIC間ごとの復旧予測日数のばらつきも解消され、復旧予測日数が0日となっていた小出IC~堀之内IC間でも現実に近い復旧予測日数が得られるようになった。

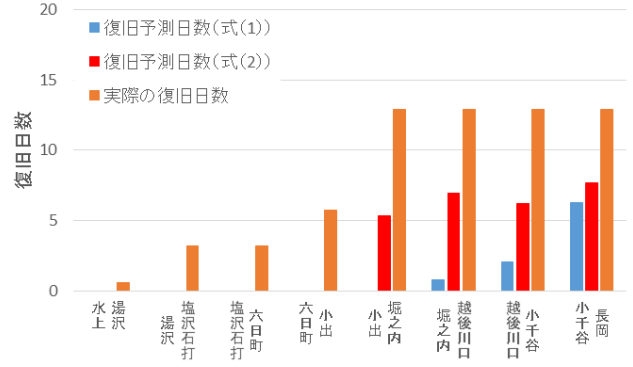


図-2 新潟県中越地震における高速道路の実際の復旧日数と式(1)、式(2)で得られた復旧予測日数の比較

4. 既往研究による上水道の復旧モデルの検証

既往研究³⁾では1995年兵庫県南部地震の被災事例に基づき、上水道供給の地震時機能の二段階評価モデルが構築されている。第一段階の供給停止確率の予測モデルでは、地震直後の上水道供給機能停止の有無を計測震度 I に対する二項反応と捉え、式(3)により評価される(表-3)。第二段階の供給停止期間の予測モデルでは計測震度 I で機能停止という条件下での停止期間 t を予測するモデルを上水道供給停止期間 t と計測震度 I との関係を統計的に処理し、ガンマ分布でモデル化しモーメント法を適用して2つのパラメーターを求め、次式のガンマ分布の確立密度関数に代入して時間積分することで上水道供給停止期間の非超過確率 $F(t|I)$ が求められる(式(4)から式(7))。2段階の式(3)と式(7)を組み合わせると、計測震度 I と地震後経過期間 t の供給率曲線 $P(I, t)$ が得られる(式(8))。文献⁵⁾では、兵庫県南部地震の被災地域における水道事業者の配水管の脆弱性($V_{pd}^* = 0.446$)と、対象地域の脆弱性との違いを考慮して従来モデルを改良している。文献⁶⁾では平成22年度版の水道統計を用いて、配水管の脆弱性指数 V_{pd} (管径別脆弱性指数 V_p と管種別脆弱性指数 V_d の積)を評価している。これに基づいて式(3)、式(4)に用いる計測震度 I_0 を式(9)により等価震度 I_{eq} に変換して予測モデルに適用している。

$$p(I) = \frac{\exp(b_0 + b_1 \cdot I)}{1 + \exp(b_0 + b_1 \cdot I)} \quad (3)$$

$$\mu(I) = a_0 + a_1 I + a_2 I^2, \sigma(I) = c_0 + c_1 I + c_2 I^2 \quad (4)$$

$$\alpha(I) = \left(\frac{\mu(I)}{\sigma(I)} \right)^2, \beta(I) = \frac{\sigma^2(I)}{\mu(I)} \quad (5)$$

$$f(t|I) = \frac{t^{\alpha(I)-1} \exp\left(-\frac{t}{\beta(I)}\right)}{\beta(I)^{\alpha(I)} \Gamma(\alpha(I))} \quad (6)$$

$$F(t|I) = \int_0^t f(\tau|I) d\tau \quad (7)$$

$$P(I, t) = \{1 - p(I)\} + P(I) \cdot F(t|I) \quad (8)$$

表-3 式(3)のロジットモデルの回帰定数

b_0	b_1
-26.98	4.72

表-4 式(4)のモデルのパラメーター

a_0	a_1	a_2
228.93	-89.82	9.04
c_0	c_1	c_2
5.12	-6.94	1.36

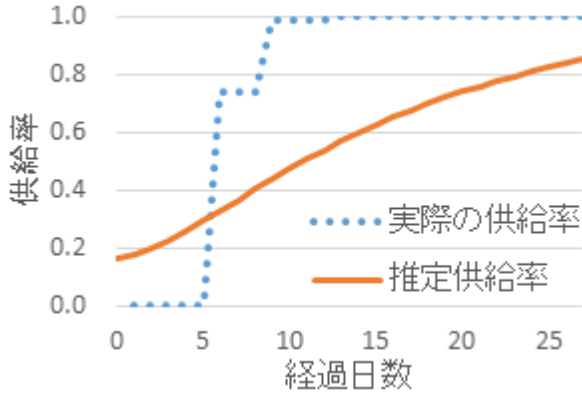


図-3 岩手県一関市の上水道の実際の供給率と既往研究による推定供給率の比較

$$I_{eq} = I_0 + 0.647 \cdot \log_{10} \frac{V_{pd}}{V_{pd}^*} \quad (9)$$

本研究では、東北地方太平洋沖地震の際の岩手県、宮城県、福島県の被災三県における水道事業体（全 97 団体）の被災状況の分析を行った。厚生労働省健康局水道課による東日本大震災水道施設被害状況調査報告書のデータ及び、各市町村が発表している水道統計等を参考にし、東北地方太平洋沖地震発生後の復旧状況を集計した。既往研究³⁾によって得られる推定供給率を用いて、東北地方太平洋沖地震の際の被災三県における上水道供給の実際の復旧状況との比較を行った。岩手県一関市では地震発生直後の被害が過少に評価されており、推定供給率の復旧速度が実際の供給率に比べて遅い(図-3)。

5. 上水道供給の復旧モデルの改良

既往研究³⁾と東日本大震災水道施設被害状況調査報告書をもとに被害状況別に復旧予測モデルの改良を行った。水道事業体への被害が停電や漏水、濁水などの軽微な被害のみであった場合は、式(3)、式(4)に用いる計測震度を供給区域内の最小震度とすることで実際の供給率を再現することができた。津波被害が予測される事業体については、式(3)、式(4)に用いる計測震度を供給区域内の最大震度とすることで実際の供給率を再現することができた。

その他の地震動による被害が予測される事業体では既往研究³⁾の第一段階の再分析を行った(式(10))。本研究では計測震度に対する機能停止確率が既往研究よりも高くなった。これにより図-3の岩手県一関市のように地震発生直後から一定日数の間、供給が完全に停止していた場合の供給率を再現することができた。しかしそのような被害が発生しなかった場合、本研究式(11)によって得られる供給率は過少

となる。したがって、被災直後に供給が完全に停止する場合は式(11)、停止しない場合は既往研究の式(8)を用いるように場合分けを行うことで両者に対応させることとした。

$$p(I_2) = \frac{\exp(b_0 + b_1 \cdot I_{eq2})}{1 + \exp(b_0 + b_1 \cdot I_{eq2})} \quad (10)$$

$$P(I_2, t) = \{1 - p(I_2)\} + P(I_2) \cdot F(t | I_2) \quad (11)$$

式(12)は場合分けのために、被災三県の水道事業体の平均震度 I_2 と被災直後の供給完全停止発生の有無をもとにした供給完全停止確率 $p_2(I_2)$ のロジットモデルである。最適な判別解を与える閾値はROC曲線より $p_2 = 0.20$ であった。その時の平均震度 I_2 は $I_2 = 5.34$ であるため平均震度が5.34以上の事業体では供給完全停止が発生する可能性があるの、式(12)を用いて供給率を算出することとする。

$$p_2(I_2) = \frac{\exp(b_0 + b_1 \cdot I_2)}{1 + \exp(b_0 + b_1 \cdot I_2)} \quad (12)$$

また、供給完全停止解消後の復旧速度を考慮した復旧予測モデルの検討も行った。該当する市町村の水道事業体における実際の供給率の平均値を求めた。水道供給が完全停止している事業体は、供給完全停止が解消した日を0日目として、以降の経過日数をもとにしている。また、直線近似($y = 0.02t$)と $y = (0.02t)^{(1/t)}$ の曲線近似を行った。 t は経過日数である。その結果、実際の供給率の推移は概ね曲線近似の形状に近いので、この曲線近似結果を用いて復旧速度を再現することを試みる。

さらに、被災三県の水道事業体において被災直後に供給完全停止が続いた日数を用いたロジットモデル式(13)も構築した。最適な判別解を与える閾値はROC曲線より $p_3 = 0.09$ であった。供給停止期間中は式(11)で得られた初期の推定供給率を採用し式(13)で得られた供給完全停止解消日以降は、式(11)で得られる供給率 $P(I_2, t)$ に $(1/t)$ を累乗し供給率 $P_2(I_2, t)$ を得る(式(14))。

$$p_3(I_2) = \frac{\exp(b_0 + b_1 \cdot I_2 + b_t \cdot t)}{1 + \exp(b_0 + b_1 \cdot I_2 + b_t \cdot t)} \quad (13)$$

$$P_2(I_2, t) = P(I_2, t)^{\frac{1}{t}} \quad (14)$$

表-5 式(10)のロジットモデルの回帰定数

b_0	b_1
-11.90	2.59

表-6 式(12)のロジットモデルの回帰定数

b_0	b_1
-16.88	2.82

表-7 式(13)のロジットモデルの回帰定数

b_0	b_1	b_t
-20.74	3.57	-0.21

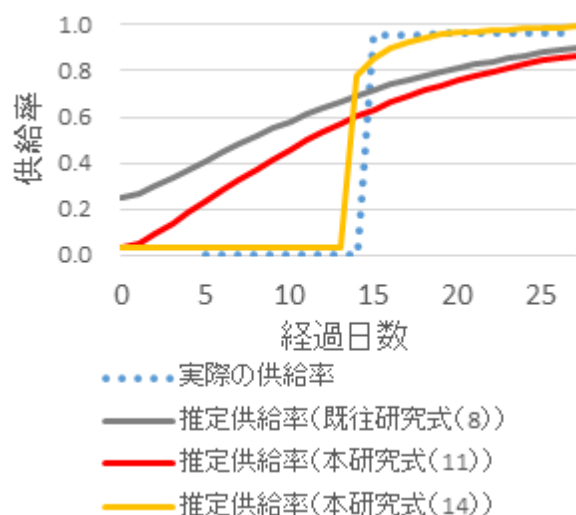


図-4 宮城県岩沼市の上水道の実際の供給率と既往研究(8)による推定供給率、本研究式(11)、式(14)を用いて算出した供給率の比較

図-4 は既往研究式(8)及び本研究式(11)、式(14)により得られた宮城県岩沼市の供給率である。平均震度が 5.34 以上であり、供給が完全に停止する可能性があるため、本研究式(14)を採用することとなる。このように供給が完全に停止した場合、被災初期の供給率、供給率が 50%に達するまでの日数、供給率が 90%に達するまでの日数はそれぞれ実際の供給率に近い値となる。

6. シナリオ地震への適用

本研究で得られた地震発生時の高速道路復旧予測モデルと、上水道の復旧予測モデルを用いて今後発生が予測されている南海トラフ地震の際の復旧状況の推定を行った。ここでは、推定される高速道路の復旧状況について示す。復旧予測日数の推定を行う箇所は震度 5 弱以上の揺れを観測している高速道路とし、内閣府の中央防災会議における南海トラフ地震の 5 つのケースのうち、基本ケースを用いて検討を行った。

図-5 では式(2)を用いて、地震発生 10 日後の復旧確率を地図表示している。震源域に近い太平洋沿岸の東名高速道路などでは、復旧確率が 20-40%と低い区間が多くみられており、全線開通していない。一方内陸側の中央自動車道では多くの区間で復旧確率は 80-100%であり、早期に復旧できることが見込まれ、中央自動車道を利用した迂回輸送が可能である。

7. まとめ

本研究では、本研究では既往研究で構築された地震時の復旧予測モデルの再検討を行い、モデルを改良することで精度の向上を図り、新たな復旧予測モデルの構築を行った。高速道路の復旧予測では、震度曝露道路延長を説明変数としていた既往研究のモデルと比べて、ある震度に曝される延長の割合を説明変数とすることによって、復旧日数の予測精度が改善された。また、連続する IC 間の復旧日数の予測結果が、大きく変動することもなくなった。さらに、対象とする既往地震や高速道路の区間を既往研究よりも増やした結果、新潟県中越地震や東北地方太平洋沖地震の際の

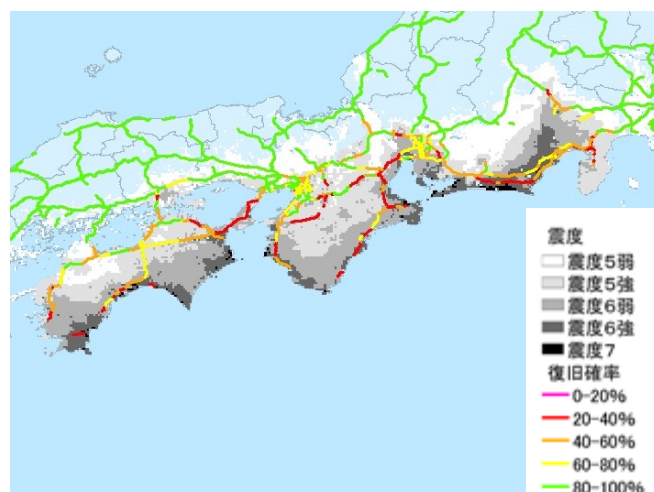


図-5 南海トラフ地震における震度分布と式(2)による地震発生 10 日 (240 時間) 後の高速道路の復旧確率

予測結果が改善された。隣接する IC 間でも区間延長の差に影響されない復旧予測日数が得られた。また、本研究で構築した復旧予測モデルを用いて今後発生が予測されている南海トラフ地震の際の高速道路の復旧予測日数の算出を行った。その結果、地震発生 10 日後の東名高速道路などでは、復旧確率が 20-40%と低い区間が多くみられた。

上水道の復旧予測では、既往研究における復旧予測モデルの検証を行い、モデルの改善を行った。実際の被害状況を考慮し、停電のみ等の軽微被害の場合は既往研究による推定供給率の算出に最小震度を用い、津波被害が発生する場合には最大震度を用いることで、推定供給率の精度が向上した。それ以外の場合については機能停止確率を再検討し、新たなモデルを構築した。また、水道供給が完全に停止する場合や、復旧速度を再現したモデルを構築し既往研究よりも高い推定精度を得た。特に供給率が 90%に達するまでの日数の精度が大幅に向上した。

参考文献

- 1) 永田政司, 大窪克己, 渋谷正則: 高速道路における事業継続計画策定について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 877-878, 2010.
- 2) 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, pp. I_110-116, 2016.
- 3) 能島暢呂, 杉戸真太, 鈴木康夫, 石川裕, 奥村俊彦: 震度情報に基づく供給系ライフラインの地震時機能リスクの二段階評価モデル, 土木学会論文集, No.724/I-62, pp.225-238, 2003.
- 4) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之: 新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp. 208-216, 2008.
- 5) 能島暢呂: 事業者と利用者の対策効果を考慮した供給系ライフラインの地震時機能停止の影響評価モデル, 地域安全学会論文集, No.15, pp.153-162, 2011.11
- 6) 能島暢呂, 加藤宏紀: 水道統計に基づく全国水道事業者の配水管路網の脆弱性評価, 第 33 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, 論文番号 4-410, 2013.11.