

高速道路盛土の地震被災予測に関する検討

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○村上 陽平
広島大学大学院工学研究院 正会員 一井 康二
千葉大学大学院工学研究科 正会員 丸山 喜久
日本工営（株）中央研究所 正会員 秦 吉弥
（株）エイト日本技術開発 正会員 福島 康宏

1 はじめに

近年、道路盛土における地震時の被害が数多く発生している．そして、高速道路のような構造物では、盛土の地震被害による機能不全が社会・経済活動に大きな影響を与える．例えば、2004年10月23日に発生した新潟県中越地震では、関越自動車道と北陸自動車道の一部区間の盛土部に被害が多数発生した．その際、片側2車線を復旧するまでに約1ヶ月を要した．高速道路が、地震発生時の被災地域の復旧・復興において重要な役割を果たすことを考慮すると、上述のような被害を防止するためには、被害予測を適切に行って地震対策を進捗させることが必要である．

このため、例えば、丸山ら^{1),2)}は、2004年に発生した新潟県中越地震により被災した関越自動車道、および北陸自動車道の被害データをもとに、被害率と地震動強さの関係を提案している．しかし、道路盛土の形状（高さや幅）、地盤の物性は地点毎に異なり、被災事例に含まれる盛土の条件はさまざまである．そのため、被災事例に基づく分析では、条件の違いによる被災率の違いを適切に評価することは難しい．

そこで、本研究では、2004年新潟県中越地震によって被害が生じた関越自動車道と北陸自動車道での被災事例をもとに、種々の条件を考慮できる被災予測式の検討を行った．また、関越自動車道での被害をもとに被害程度に応じた復旧期間の推定法を検討した．

2 被害事例に基づく被害率の評価

2.1 既往の研究での被害率の評価

丸山らは^{1),2)}、2004年新潟県中越地震において被害が生じた関越自動車道（長岡インターチェンジ（以降、I.C.）～六日町I.C.間）、北陸自動車道（柏崎I.C.～巻潟東I.C.間）の被害データを用いて、高速道路盛土全体での被害予測式を提案している．なお被害データは、表-1に示されている被害程度の分類に基づいている．図-1に被害率と地震動強さの関係を示す．これは、既発表の推定式¹⁾に対し、対象区間の地震動分布の再推定結果を踏まえて修正したもの²⁾である．

また、村上ら³⁾は、同被害データを用いて、同様に被害事例に基づく被害率の評価を行った．具体的には、上述の区間を対象に高速道路の構造種別を、盛土、切土、トンネル、橋梁部に分類し、盛土部のみで被災事例を分析した．また、盛土部の中でも、カルバートや橋梁の近傍の盛土区間（構造物の影響があった可能性のある区間）とそれ以外の盛土区間（標準区間）

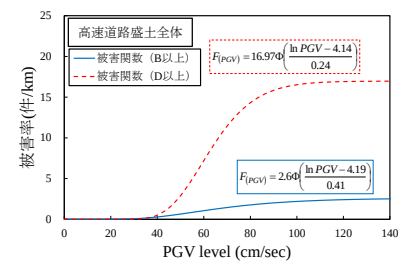


図-1 PGV と被害率の関係²⁾

表-1 被害程度の分類^{1),2)}

被災ランク	大(A)	中(B)	小(C)	微小(D)
法面	・全面的に崩壊	・部分的に崩壊	・一部の変状	
路面段差 (伸縮継手含む)		・車線部(橋梁取付部)：2cmを超えるもの ・車線部(上記以外)：3cmを超えるもの ・路肩部：20cmを超えるもの	・車線部(橋梁取付部)：1～2cm ・車線部(上記以外)：1～3cm ・路肩部：1～20cm	・1cm未満
路面クラック		・5cmを超えるもの	・3～5cm	・3cm未満

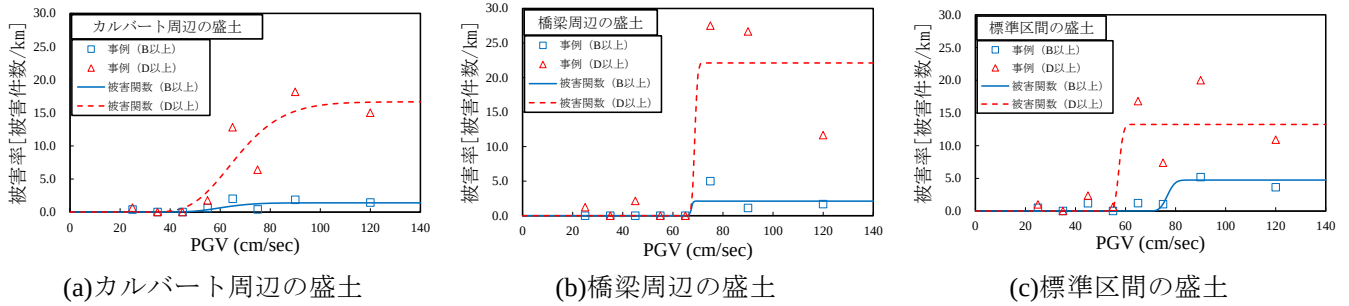


図-2 PGV と被害率の関係³⁾

に分類し、被害率の評価を行った。図-2 に各区間周辺の盛土の被害率と地震動の関係を示す。

2.2 構造物近傍の被害確率の評価

本研究では、丸山ら^{1),2)}の被害率の推定式に整合するように各種構造物周辺（近傍 50m）被害確率の fragility curve の再構築を行った。式(1)に fragility curve として仮定した式を示す。

$$F(v) = \kappa \Phi(\ln(v/c)/\xi) \quad (1)$$

ここで、 $F(v)$ は PGV が v [cm/sec]の時の被災確率、 $\Phi(x)$ は正規分布の累積分布関数、 c 、 ξ 、 κ は fragility curve のパラメータであり、被災 ($x_i=1$)、および無被災 ($x_i=0$) に対し、式(2)の尤度関数 L を最大化することにより得られる係数である。ただし、丸山らの推定式^{1),2)}で提案されている被害関数となるべく整合するよう、 c 、 ξ 、 κ は、丸山らの推定式^{1),2)}で提案されている係数の値の $\pm 5\%$ の範囲のみを対象とし、その範囲内で尤度関数 L が局所最大値となるように設定した。

$$L = \prod_{i=1}^N [F(v_i)]^{x_i} [1 - F(v_i)]^{1-x_i} \quad (2)$$

表-2 に得られたパラメータの一覧、図-3 に PGV と被害確率の関係を示す。

表-2 フラグリティ・カーブのパラメータの一覧

(a)カルバート周辺の盛土				(b)橋梁周辺の盛土			
係数	c	ξ	κ	係数	c	ξ	κ
被災ランク B 以上	62.72	0.43	0.20	被災ランク B 以上	62.72	0.43	0.20
被災ランク D 以上	59.66	0.25	0.65	被災ランク D 以上	59.66	0.25	0.8

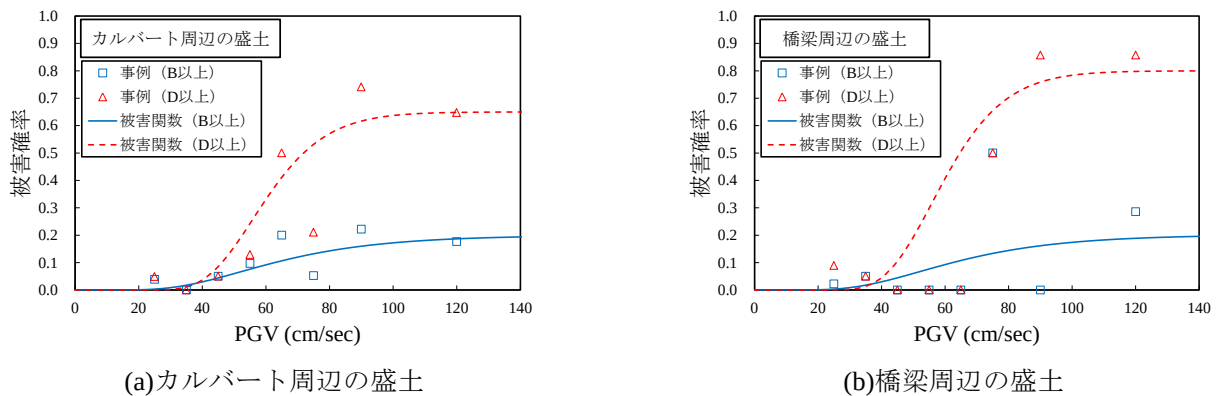


図-3 PGV と被害確率の関係

2.3 被害率の評価における構造物の影響

ここで、今回の検討対象区間において、カルバートおよび橋梁がどの程度存在していたかを算出した。すると、盛土総延長（95.4km）に対して、カルバートが341件、橋梁が121件であった。よって、カルバートは盛土1kmあたり3.6件、橋梁は盛土1kmあたり1.3件存在していたことになる。これらの値を先に求めた被害確率の式に掛けると、各構造物の影響があったと考えられる盛土区間1kmあたりの被害率（被害件数の期待値）が算出できる。一方で、本研究では、これらの構造物1件あたりの影響範囲を前後50mとしたため、構造物の影響を受けていない区間は盛土1kmあたり0.51km（ $=1-(3.6+1.3) \times 0.1[\text{km}]$ ）分となる。

丸山らの推定式^{1),2)}で提案されている被害関数は構造物の影響などを考慮せずに盛土全体で算出されたものである。そこで、本検討の被害関数式を用いると、構造物の影響のない盛土の被害関数を算出できる。以上を式で表すと式(3)のようになる。

$$\begin{aligned} P_f &= A \times P_{f,c,1} + B \times P_{f,b,1} + C \times P_{f,s} \\ \Leftrightarrow P_f &= P_{f,c} + P_{f,b} + C \times P_{f,s} \\ \Leftrightarrow P_{f,s} &= (P_f - P_{f,c} - P_{f,b}) / C \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 P_f は既往の研究²⁾で提案されている被害率（被害件数の期待値）、 A は盛土1km当たりのカルバートの数、 $P_{f,c,1}$ はカルバート1箇所あたりの被害確率、 $P_{f,c}$ はカルバートの影響を受けた盛土区間1kmあたりの被害率（被害件数の期待値）（ $P_{f,c} = A \times P_{f,c,1}$ ）、 B は盛土1km当たりの橋梁の数、 $P_{f,b,1}$ は橋梁1箇所あたりの被害確率、 $P_{f,b}$ は橋梁の影響を受けた盛土区間1kmあたりの被害率（被害件数の期待値）（ $P_{f,b} = B \times P_{f,b,1}$ ）、 C は橋梁やカルバートの影響を受けていない区間（本研究では構造物から50m以上離れている区間） $P_{f,s}$ は橋梁やカルバートの影響を受けていない盛土1kmあたりの被害率（被害件数の期待値）である。

上記から求めた、PGVと種々の条件下での盛土1kmあたりの被害率[件/km]の関係を図-4に示す。この図に示すように、構造物の影響を受けていない区間の盛土の被災率が最も高いことが分かる。これは対象とした高速道路の周辺地域が水田などの農地であったことに関係しているのではないかと考えられる。

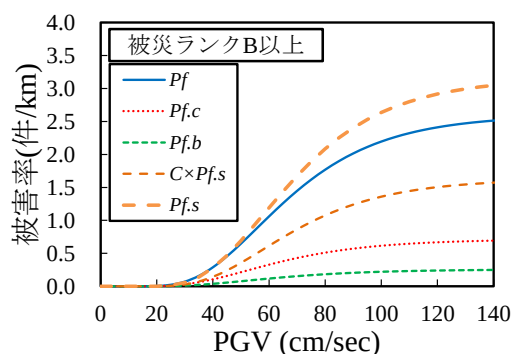


図-4 PGVと被害率[件/km]の関係²⁾

また、カルバート、橋梁の数に応じて、図-4から求まる $P_{f,c}$ 、 $P_{f,b}$ 、 $P_{f,s}$ を組み合わせることで、橋梁やカルバートの数に応じたフラジリティの補正が実施でき、実際の道路の条件に応じた被災件数を推定することができる。

3 被害件数に応じた復旧期間の推定法

まず、既往の研究^{1),2),3)}および本研究による被災の推定が1kmごとの被災件数の推定であることを踏まえて、被災件数に応じた復旧期間の推定法を考える。被災事例としては2004年新潟県中越地震で被災した関越自動車道における復旧過程⁴⁾に着目する。対象とした区間は六日町I.C.～長岡I.C.である。なお、被害は既往の研究^{1),2),3)}で用いられているデータである。復旧過程⁴⁾は、まず緊急車両の走行路面の確保を目的として、土のうによる段差修正などの緊急措置（19時間）がなされた。その後、一時応急復旧で一般車両の走行が可能な程度の復旧（13日間）、

表-3 被害データ

	IC区間	被災ランク		区間長さ(km)	復旧時間(day)	
		B以上	D以上		緊急車両走行可能	一般車両走行可能
a	六日町～小出	3	11	17.5	0.8	6.75
b	小出～堀之内	7	40	7.5	0.8	13
c	堀之内～越後川口	20	132	9	0.8	13
d	越後川口～小千谷	12	88	8	0.8	13
e	小千谷～長岡	16	168	15	0.8	13

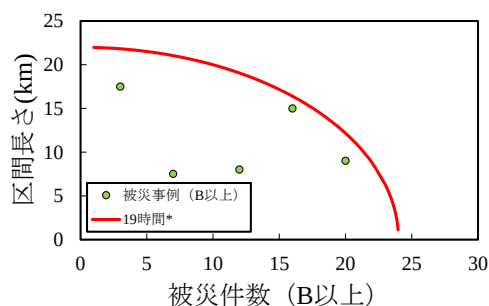


図-5 19 時間以内に緊急車両が走行できる条件

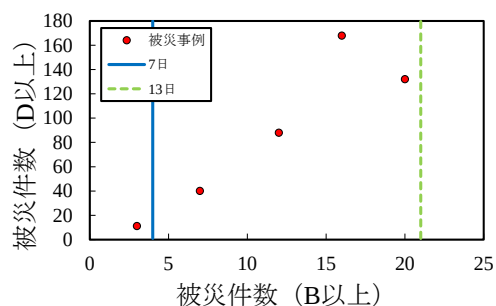


図-6 一般車両が走行できるまでの期間

そして二度の応急を経て約 34 日後に 4 車線が一般開放されている．表-3 に各被災ランクの被災数と各 I.C.間の復旧所要日数を整理したものを示す．

ここで、まず、緊急車両が走行可能になるまでの期間を考える．しかし、被災事例としては、いずれの区間においても 0.8 日後（19 時間）に緊急車両の走行が可能となっており、被災数との関係をそのまま議論することはできない．そこで、次のように考察する．被災ランク B 以上は比較的被害の程度が大きいものであり、この被害が復旧されることで、緊急車両が走行可能になると考えられる．そこで、被災ランク B 以上の件数と緊急車両走行可能までの期間には関係があるものと考えられる．また、通行可能であるとの判断を行うためには、全線にわたっての被害状況の把握が必要である．このため、I.C.区間の長さも影響するものと考えられる．

以上の考察から、表-3 に示した各区間の被災件数（被災ランク B 以上）と区間長さをプロットしたものを図-5 に示す．このプロットが存在する範囲であれば、19 時間（0.8 日）での緊急車両の走行が可能と判断できる．また、被災数が多く（もしくは区間長が長く）この範囲を超えた場合、図中の曲線を 2 倍した範囲までであれば、2 倍の 38 時間（1.6 日）で緊急車両の走行が可能になると推定できる．ここで、曲線（19 時間*）の式は特に根拠はないが、 $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ ($a=24, b=22$)、とした．

次に、一般車両が走行可能となるまでの期間を推定する．ここで、表-3 に示した各区間の被災数（被災ランク B 以上と被災ランク D 以上）をプロットしたものを図-6 に示す．こちらでは、一般車両が走行可能になるまでの期間が 6.8 日であった区間（六日町 I.C.～小出 I.C.）と 13 日であった区間の 2 種類のデータが存在するため、2 本の線を描くことができ、被災件数に応じた復旧期間を推定することができる．被災ランク D にはクラック等の軽微な被害も含むため、被災ランク B 以上の被害のみに着目すると、図-6 に示す 2 本の直線が判断基準となる．

4 まとめ

本研究では、まず、既存の高速道路盛土部の被害事例を構造条件によって分類し、既往の研究²⁾での推定式をもとに構造物近傍での被害確率を算出した．また、既往の推定式²⁾との比較を行うことで、構造物の影響を考慮した被害率の推定法を示した．

また、事例をもとに、被災程度に応じた復旧期間の推定法を示した．

参考文献

- 1) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiya, Y. and Yogai, H. : Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, pp. 1158-1167, 2010.
- 2) 丸山喜久：personal communication,（未発表データ）
- 3) 村上陽平，一井康二，丸山喜久，秦吉弥，福島康宏：高速道路盛土の被害予測における検討間隔の評価，第 63 回土木学会中国支部研究発表会概要集，土木学会，2011.
- 4) 渦岡良介・加納誠二・佐々木哲也・藤岡一頼・山本一敏・南大輔：土構造物の地震時変形事例に基づく性能規定方法の調査検討，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，pp.19-78，2007.