

## 高速道路盛土の地震時被災予測とその復旧期間の推定法に関する検討

A Study on the Seismic Damage Evaluation of Expressway Embankment  
and the Estimation Method of Recovery Period

村上陽平	Yohei MURAKAMI	(広島大学大学院工学研究科)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究院)
丸山喜久	Yoshihisa MARUYAMA	(千葉大学大学院工学研究科)
秦 吉弥	Yoshiya HATA	(日本工営(株)中央研究所)
福島康宏	Yasuhiro FUKUSHIMA	((株)エイト日本技術開発)

地震被災地域の復興支援において高速道路の果たす役割は重要であり、想定地震に対する高速道路の被災予測を事前に行う必要がある。しかし、被災予測の対象となる高速道路盛土の場合、種々の形状を有するため被災予測は難しい課題である。そこで本研究では、2004年新潟県中越地震における関越自動車道と北陸自動車道での被災事例をもとに、カルバートの有無等の構造条件に基づいて盛土部の被害の分類を行い、構造物の影響を考慮した被害率の推定式を提案した。それらの推定式を組み合わせることで高速道路盛土全体における被害率の推定式を示した。また、関越自動車道での被災事例をもとに、被害程度に応じた復旧期間の推定法を示した。

キーワード：被害予測，フラジリティ・カーブ，復旧期間，盛土 (IGC : H06)

## 1. はじめに

近年、道路盛土における地震時の被害が多数発生している。特に高速道路のような構造物では、地震被害により盛土が機能不全に陥った場合、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。高速道路は地震による被災地域の復旧・復興に重要な役割を果たすことを考慮すると、より耐震性を向上させることが必要である。そのため、その基本となる被災予測を適切に行い、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<sup>1,2)</sup>は、2003年宮城県北部の地震、2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震による高速道路盛土の被害と地震動強さとの関係性を評価し、フラジリティ・カーブの構築・提案を行っている。しかし、道路盛土の形状(高さや幅など)、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推定式を算出した。また、関越自動車道での被災事例をもとに被害程度に応じた復旧期間の推定法を示した。

## 2. 被害事例に基づく地震時被災予測法の検討

## 2.1 既往の研究での被害率の評価

丸山ら<sup>1)</sup>は、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推定式を提案している。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<sup>3)</sup>を示す。これは、丸山らの推定式<sup>1)</sup>に対し、対象区間の地震動分布の再推定結果<sup>4)</sup>を踏まえて修正したものである。しかし、被災事例における盛土の条件(盛土の形状、地盤の物性の違い)はさまざまであることを考慮すると、これら<sup>1),2),3)</sup>の推定式では、盛土条件による違いが評価できないという点に短所がある。

また、村上ら<sup>4)</sup>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、盛土部に関しても、カルバートや橋梁といった構造物の近傍の盛土区間(構造物の影響があった可能性のある盛土区間)とそれ以外の盛土区間(標準区間)に分類し、それぞれの区間における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<sup>4)</sup>を示す。図-2に示すように、車両の走行に支障が生じ始めるとされる被災ランクB以上を対象とした場合、被害率が増加し始める地表面最大速度Peak Ground Velocity(以降、PGV)に関して、カルバート周辺の盛土では約50cm/sec

表-1 被害程度の分類<sup>1),2)</sup>

被災ランク	大(A)	中(B)	小(C)	微小(D)
法面	・全体的に崩壊	・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

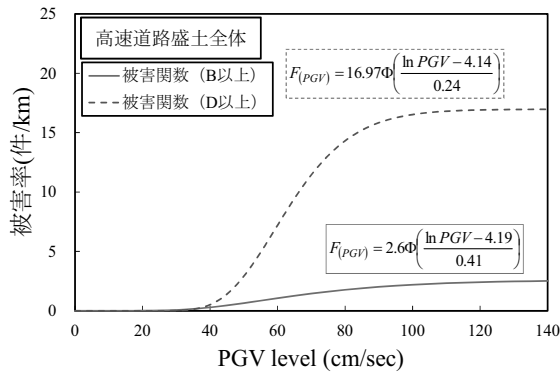
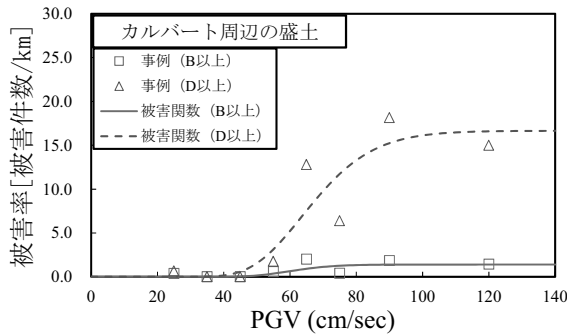
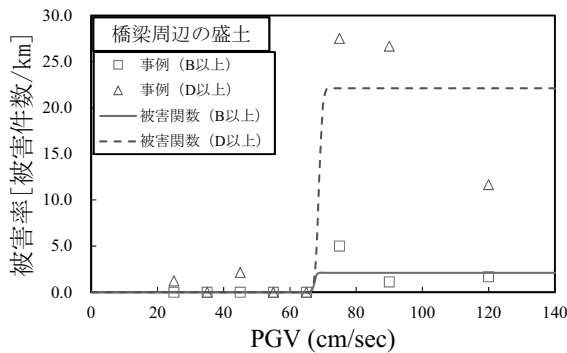


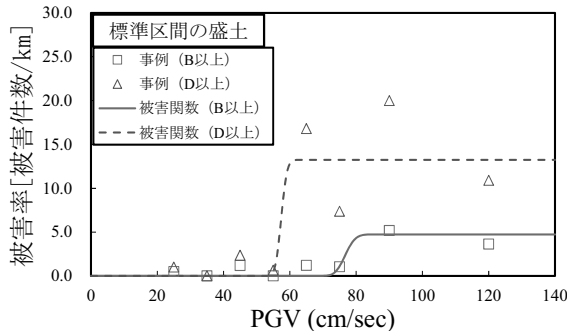
図-1 PGV と被害率の関係<sup>3)</sup>



(a)カルバート周辺の盛土



(b) 橋梁周辺の盛土



(c)標準区間の盛土

図-2 PGV と被害率の関係<sup>4)</sup>

である。また、橋梁周辺の盛土では約 65cm/sec である。そして、標準区間の盛土では約 70cm/sec である。このように、盛土部の被害の発生の有無に構造物の影響が存在し、被害の生じ易さもそれぞれで異なることを指摘している。また、これらの条件(構造物近傍)違いを考慮できる点が、丸山らの被害関数<sup>1),2),3)</sup>との違いである。

しかし、村上ら<sup>4)</sup>の各盛土区間の推定式の結果を足し合わせて高速道路盛土全体とした推定式は、丸山ら<sup>3)</sup>の盛土全体の推定式に比べ、被害率が大きくなってしまったという欠点があった。

なお、これらの研究<sup>1),2),3),4)</sup>では、地震動強さの指標として PGV が用いられている。PGV を用いた理由は、すでに当該区域での地震動分布が推定されている<sup>4)</sup>ことと、PGV が地震動の運動エネルギーと関係が深く、変形量の評価に適切であろうと推定されるためである。

## 2.2 構造物近傍の被害率の再評価

本研究では、丸山らの被害率の修正推定式<sup>3)</sup>に整合するように、村上ら<sup>4)</sup>の検討結果に対し、各種構造物周辺(近傍 50m)の被害率予測式の再構築を行った。式(1)にフラジリティ・カーブとして仮定した式を示す。式(1)は被害率曲線を構築する上で、よく用いられる式(2)<sup>例えば、5)</sup>に倍率 C (件/km) を乗じた式であり、既往の研究<sup>1),2),3),4)</sup>と同じ式および算定式である。

式(2)は、地震動強さの大きさを条件とした損傷確率を与える関数である。これは、地震時の挙動(応答)と性能(耐力)がともに対数正規分布に従うと仮定したときに、応答が耐力を超える確率として導出されるものである。

$$P_{(v)} = C\Phi((\ln v - \lambda)/\zeta) \quad (1)$$

$$P_{(v)} = \Phi((\ln v - \lambda)/\zeta) \quad (2)$$

ここで、 $P_{(v)}$ は PGV が  $v(\text{cm/sec})$ の時の被害率、 $\Phi(x)$ は標準正規分布の確率分布関数、 $C$ 、 $\lambda$ 、 $\zeta$ は式(3)の誤差関数  $\epsilon$  を最小化することにより得られる係数である。

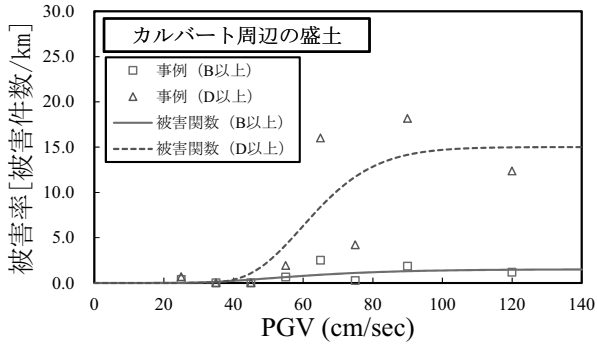
$$\epsilon = \sum (P_R - P_{(v)})^2 w \quad (3)$$

ここで  $P_R$  は実被害データ(抽出した代表値)から求められる被害率[件/km]、 $w$  は盛土延長である。式(3)は、盛土延長による重みつき最小二乗法によって係数を求めたことに相当する。これは PGV の小さな区間の被害数に対して、盛土延長が大きいことを考慮するためである。

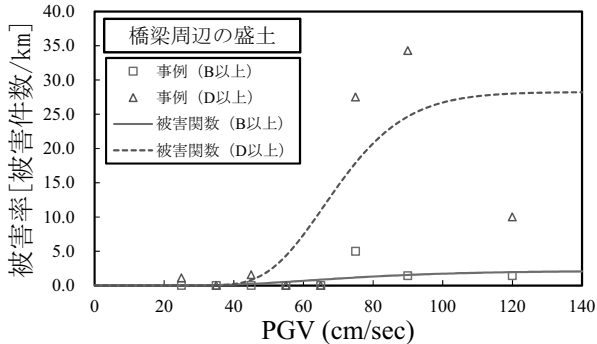
ただし、丸山らの修正推定式<sup>3)</sup>で提案されている被害関

表-2 被害関数の一覧

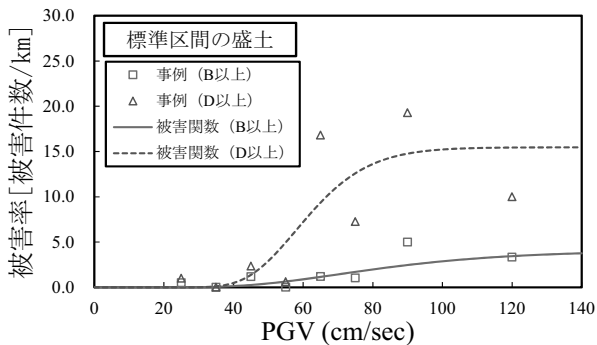
(a)カルバート周辺の盛土				(b)橋梁周辺の盛土				(c)標準区間の盛土			
係数	$c$	$\xi$	$\lambda$	係数	$c$	$\xi$	$\lambda$	係数	$c$	$\xi$	$\lambda$
被災ランク B 以上	1.51	0.39	4.08	被災ランク B 以上	2.17	0.39	4.28	被災ランク B 以上	4.10	0.39	4.40
被災ランク D 以上	15.01	0.23	4.14	被災ランク D 以上	28.25	0.23	4.24	被災ランク D 以上	15.46	0.23	4.11



(a)カルバート周辺の盛土



(b)橋梁周辺の盛土



(c)標準区間の盛土

図-3 PGV と被害率の関係

数となるべく整合するよう、 $\lambda$ ,  $\xi$ は、提案されている係数の値の $\pm 5\%$ の範囲のみを対象として局所最適となる値を求めた。ここで、範囲制限を設けた理由としては、構造条件ごとに被害データを分類したため、構造条件ごとのデータ数が少なくなり、ばらつきが大きくなることによる問題を防ぐためである。また、後述の各種構造物周辺盛土の各被害推定式を組み合わせた場合、盛土部全体での修正推定式<sup>3)</sup>と一致することを考慮したためである。

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

### 2.3 被害率の評価における構造物の影響

上記の検討対象区間において、カルバートおよび橋梁の総数は、盛土総延長 (95.4km) に対して、カルバートが 341 箇所、橋梁が 121 箇所である。よって、カルバートは盛土 1km あたり 3.6 箇所、橋梁は盛土 1km あたり 1.3 箇所存在していたことになる。一方、本研究では、これらの構造物 1 箇所あたりの影響範囲を前後 50m (計 100m) としたため、構造物の影響を受けていない区間 (以降、標準区間) は、盛土 1km あたり 0.51km ( $=1 - (3.6+1.3) \times 0.1$ [km]) 分となる。

また、式(1), (3)で推定したカルバート、橋梁周辺盛土の被害関数は、単位の通り 1km あたりの被害件数であることから、上記の通り影響範囲を 100m とすると、構造物 10 箇所分の被害率であるといえる。

そこで、これらの値を 2.2 節で推定した各被害率の式に掛けると、式(4)のように表せる。

$$P_f = P_{f,c} \times \frac{A}{10} + P_{f,b} \times \frac{B}{10} + C \times P_{f,s} \quad (4)$$

ここで、 $P_f$ は丸山らの被害率<sup>3)</sup> (被害件数の期待値)、 $A$ は盛土 1km 当たりのカルバートの数[箇所/km]、 $P_{f,c}$ 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)、 $B$ は盛土 1km 当たりの橋梁の数[箇所/km]、 $P_{f,b}$ 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)、 $C$ は標準区間の割合 (本研究では構造物から 50m 以上離れている区間)、 $P_{f,s}$ は標準区間の盛土 1km あたりの被害率 (被害件数の期待値) である。

式(4)が示すように、上記の推定式を組み合わせると、丸山らが求めた高速道路盛土全体の被害率の式<sup>3)</sup>に整合するはずである。それを確認した結果を図-4 に示す。被災ランク B 以上に関しては、本研究での推定式の和による高速道路盛土全体の被害関数と既往の研究での被害関数に多少の誤差が見られるが、全般的には整合している。また、被災ランク D 以上に関しては、ほぼ一致する形状となっている。つまり、ここで提案した方法により、図-1 に示された種々の条件が混在する母集団の被災率を、図-3 に示すように条件ごとの被災率に分解できたということになる。

### 2.4 構造物の影響を考慮した地震時被災予測法の提案

2.3 より、カルバート、橋梁の数に応じて、図-4 から求

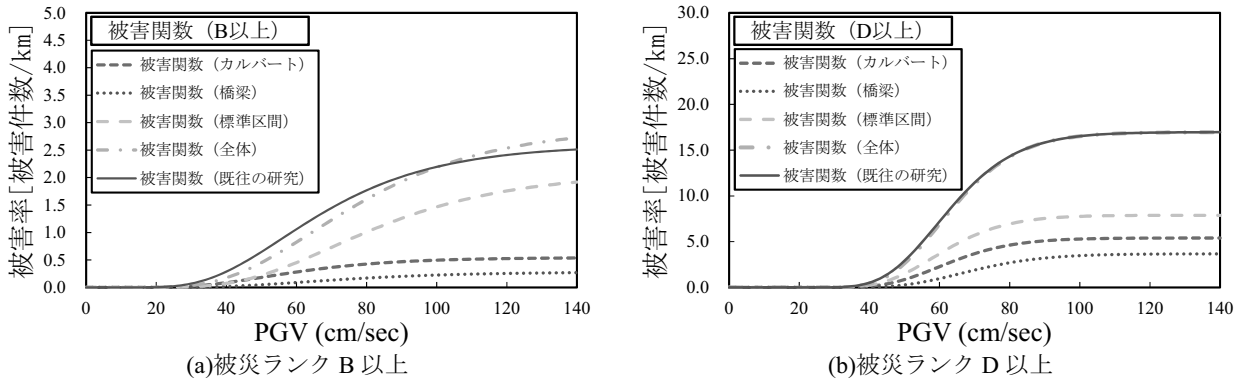


図-4 PGV と被害確率の関係

表-3 被害データ<sup>6)</sup>

I.C.区間	被災件数		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
六日町～小出	3	11	17.5	0.8	7
小出～堀之内	7	40	7.5	0.8	13
堀之内～越後川口	20	132	9	0.8	13
越後川口～小千谷	12	88	8	0.8	13
小千谷～長岡	16	168	15	0.8	13

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高速道路盛土全体の被災件数を推定することができる。

例えばカルバート、橋梁の 1km あたりの数が  $N_c$ ,  $N_b$  であった場合、 $P_{f,c}$ ,  $P_{f,b}$ ,  $P_{f,s}$  の単独の推定式を用いて高速道路盛土全体の被害率の推定式を以下に示す。

$$P_f = P_{f,c} \times \frac{N_c}{10} + P_{f,b} \times \frac{N_b}{10} + \{1 - 0.1(N_c + N_b)\} \times P_{f,s} \quad (5)$$

式(5)より、カルバートや橋梁の数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

#### 3.1 緊急車両が走行可能となるまでの復旧期間の推定法

本章では、被災件数に応じた復旧期間の推定法を考える。対象区間としては、2004 年新潟県中越地震で被災した関越自動車道における六日町 I.C.～長岡 I.C.とし、その区間の被災件数と復旧過程<sup>6)</sup>に着目する。なお、被災件数は、表-1 に基づいて分類されている被災程度に応じてまとめたものである。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(約 19 時間)がなされた。その後、一次応急復旧で一般車両の走行が可能な程度の復旧が(13 日間)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。一般的に、復旧期間は被災数に応じて延びることが考えられるが、被災事例としては、いずれの区間においても 0.8 日後(約 19 時間後)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。

依藤ら<sup>7)</sup>は、地震時における段差被害に対して、模擬段差を用いた段差走行実験により、車両の走行に支障をきたす上限値を想定している。図-5 に段差被害による交通止めに對して、段差の補修水準の変化に応じた緊急車両の交通解放の概念<sup>7)</sup>を示す。図-5 に示すように、段差 25cm ないし 20cm が修復されることで、大型ないし小型の緊急車両が通行可能となる。つまり、表-1 の被害程度分類における被災ランク B 以上の被害は、路肩部で段差が 20cm 以上に対応していることから緊急車両が走行可能になるために修復が必要なレベルであると考えられる。

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、対象とする 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)と区間長さの関係を図-6 に示す。このプロットが存在する範囲であれば、当該地震と同程度の対応が可能ならば、最大でも約 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(もしくは区間長さが長く)この範囲を超えた場合、例えば、図中の曲線を 2 倍した範囲までであれば、最大でも 2 倍の約 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、図中の曲線は限られたデータに対し、フリーハンドで引いたものである。今後より多くのデータを集めて議論を進めていく必要がある。

#### 3.2 一般車両が走行可能となるまでの復旧期間の推定法

次に、一般車両が走行可能となるまでの期間を推定する。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)の関係を図-7 に示す。こちらでは、一般



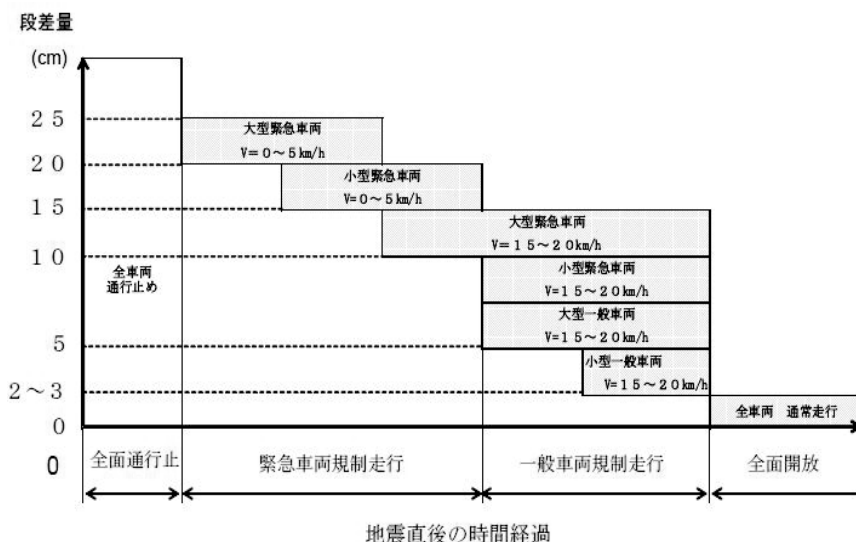


図-5 道路機能を考慮した地震直後の道路管理・運用方法の概念<sup>7)</sup>

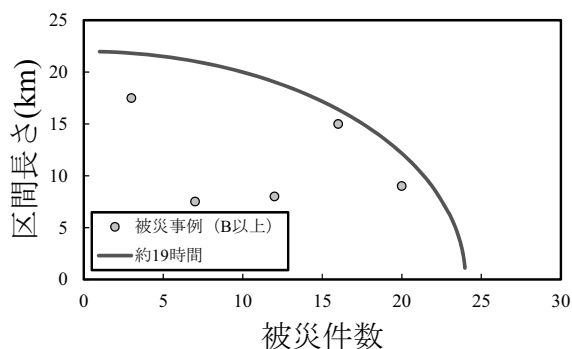


図-6 19時間以内に緊急車両が走行できる条件

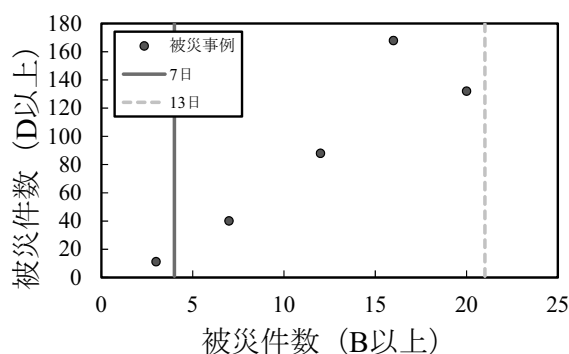


図-7 一般車両が走行できるまでの期間

車両が走行可能になるまでの期間が7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。しかし、明瞭な関係は存在しない。被災ランクDにはクラック程度の被害も含まれるので、図-5によると車両の走行可否において考慮するのは適切ではない。そこで、緊急車両の走行と同様に、被災ランクB以上の被害のみに着目すると、図-7に示す2本の直線が判断基準として推定できる。

なお、被災件数は実際には数え方が難しい。また、同一の地点で起きた複数の被害は同時に復旧されることから、被災件数だけでなく、作業の量、つまり被災延長や作業の土量も実際には復旧期間に影響するものとも考えられる。とはいえ、2.5で提案した被災予測式に図-6、図-7の推定判断基準を併用することで、種々の高速道路の復旧期間を(安全側に)概略推定することができる。

なお、残念ながらデータが5区間分しかなく信頼性が乏しい。復旧期間の推定の精度向上のためにも、もっとデータを集める必要がある。また、一般車両の走行再開においては、工事車両への支障や舗装工事の日程など、種々の要素があり、部分開通しなかった可能性もある。したがって、本研究で示した目安は種々の要素の影響が含まれた、大き

めの数字であると思われる。

#### 4. 結論

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<sup>3)</sup>での修正推定式をもとに構造物近傍での被害率を再推定した。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。得られた結論を下記に示す。

- 1) 既往の研究で得られている被害率の修正推定式をもとに構造物近傍の盛土、および構造物の影響がない区間(標準区間)の盛土における推定式を算出した。
- 2) 構造物近傍および標準区間の盛土での被害率の推定式を組み合わせることで、高速道路盛土全体の被害率の推定式を提案した。この検討結果により、構造物の数に応じて、被害率の補正を行うことができ、道路条件に応じた被災件数の推定をすることが可能となる。
- 3) 被害程度の大きな被災件数と区間長さの関係から、緊急車両が走行可能となるまでの復旧期間の概略推定法を示した。また、一般車両が走行可能となるまでの復旧期間についても、概略推定法を示した。

## 謝辞

本研究は、(公社)土木学会「リスク評価に基づく道路構造物・ネットワークの耐震設計に関する合同研究小委員会」構造側フラジリティWGの活動の一環として実施した。委員の皆様よりご意見・ご協力をいただいたことを、ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 村上陽平, 一井康二, 丸山喜久, 秦吉弥, 福島康宏: 高速道路盛土の地震被災予測に関する検討, 第 64 回土木学会中国支部研究発表会概要集(CD-ROM), No.3048, 土木学会, 2012.
- 4) 村上陽平, 一井康二, 丸山喜久, 秦吉弥, 福島康宏: 高速道路盛土の地震被災予測に関する一考察, 土木学会論文集 A1 (地震工学論文集第 31-b), Vol.68, No.4, pp.I\_1074-I\_1080, 2012.
- 5) 林康裕・宮腰淳一: 兵庫県南部地震による被害率曲線, 災害部門 PD, 地震動の特性と建築物の被害一経験と予測一, pp.15-20, 1998.
- 6) 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, 地盤工学会, pp.19-78, 2007.
- 7) 依藤光代, 常田賢一: 地震時の段差被害に対する補修と交通解放の管理・運用方法について, 平成 19 年度近畿地方整備局研究発表会, 防災・保全部門, No.16, 2007.

(2012 年 6 月 25 日 受付)