

# 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

丸山 喜久<sup>1</sup>・山崎 文雄<sup>2</sup>・用害 比呂之<sup>3</sup>・土屋 良之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 千葉大学大学院助教 工学研究科建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail:yamaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 千葉大学大学院教授 工学研究科建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail:yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 保全研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)  
E-mail:h.yogai.aa@ri-nexco.co.jp, y.tsuchiya.aa@ri-nexco.co.jp

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でとくに盛土部に震動が原因となった被害が多数発生した。そこで、本研究では、詳細な高速道路被害データと250mメッシュ単位で細密に推定した地震動強度分布をもとに、盛土部の被害程度と地震動強さの関係について統計的な分析を行い高速道路盛土部の被害関数を構築した。その結果、車両の走行に支障のある被害は、計測震度が5.1～5.2のとき0.05～0.1件/kmの被害率を示すと推定された。走行に支障のない軽微な被害も含めると、計測震度4.5～4.6のとき0.05～0.1件/kmの被害率を示した。

**Key Words :** *The 2004 mid-Niigata earthquake, expressway embankment, fragility curve, weighted least squares method*

## 1. はじめに

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震では、活褶曲地帯で多くの土砂災害を引き起こした<sup>1)</sup>。とくに山古志村芋川流域では、10ヶ所で土砂崩壊が原因となり河道閉塞が生じた<sup>2)</sup>。さらに震源域で発生した無数の斜面崩壊が道路を寸断し、多くの集落が孤立した。また、自然斜面の被害だけでなく、土構造物とくに盛土部の被害が多く見られた。一般国道や鉄道盛土のほか、宅地造成地の一部で盛土部に著しい被害が見られた<sup>1)</sup>。

この地震の強震域を通る関越自動車道と北陸自動車道でも震動が原因となった被害が発生し、片側2車線の復旧までに約1ヶ月を要した<sup>3)</sup>。旧日本道路公団が地震直後にまとめた被害調査結果によると、高速道路被害の内訳は盛土部や切土部が全体の60%以上を占めており、橋梁部の被害は15%程度となっている<sup>3)</sup>。とくに盛土部分の被害が多く発生し、関越自動車道の堀之内インターチェンジ(IC)～越後川口IC間では、大規模な盛土の崩壊が3ヶ所発生している<sup>4)</sup>。1995年の兵庫県南部地震では、道路、鉄道、ライフライン施設などの各種構造物に大きな被害が生じた。高速道路に関しては、高架構造物の被害が目立っていたので、橋梁・高架に対する地震被害と地

震動強さの関係は評価されているが、道路盛土の被害分析例<sup>5)</sup>はそれほど多くはない。鉄道盛土に関しては、1993年の釧路沖地震及び北海道南西沖地震による盛土被害を常時微動観測結果に基づき分析された例<sup>6)</sup>がある。

常田ら<sup>7)</sup>は、新潟県中越地震の道路施設被害が道路機能へ与える影響について検討している。また、気象庁の発表する推計震度分布と道路被害の関係を評価し、震度階級と道路施設被害状況を関連づけている。久世ら<sup>8)</sup>は、高速道路の盛土被害と計測震度の関係を評価し、被害関数の提案を行っている。しかし、ここで使用しているデータには被害程度が含まれていないため被災面積を考慮して被害関数を構築している。気象庁の発表する推計震度分布<sup>9)</sup>では、約1kmメッシュ単位の震度階級が与えられる。新潟県中越地震の強震域に関しては、若松・松岡による250mメッシュの地形地質分類<sup>10)</sup>が公開されている<sup>11)</sup>ので、これを用いるとより詳細な地震動の空間分布が推定可能である。

そこで、本研究では、旧日本道路公団によって整理された詳細な高速道路被害データと、250mメッシュ単位で細密に推定した地震動強度分布をもとに、盛土部の被害程度と地震動強さの関係について統計的な分析を行う。さらに、分析結果をもとに高速道路盛土部の被害関数を

構築する。

## 2. 地震動分布の推定

高速道路における地震被害の程度と地震動の強さの関係を整理するためには、被害の発生した地点の地震動強さを評価する必要がある。被害の発生した地点において地震記録があるわけではないので、任意の地点の地震動強さをほぼ面的ないし線的に推定する手法が必要となる。

気象庁は、おおむね20 kmごとに配備した全国約600の地震計と39の都道府県震度情報ネットワークシステム（川崎市、横浜市、名古屋市など）から提供を受けている約2300の地震計で得られた記録を活用し、平成16年3月1日から震度5弱以上の強い揺れを観測した地震が発生した場合に震度を面的に表示した「推計震度分布図」を作成し、発表している<sup>9)</sup>。新潟県中越地震後に発表された推計震度分布は、約1kmメッシュ単位の震度階で表されている。一方、高速道路の料金所付近には地震計が設置されている<sup>12)</sup>ので、これらの地震記録も利用して地震動分布を推定すれば、高速道路沿線に関しては気象庁の推計震度分布よりも精度の高い推定結果が得られるものと思われる。

著者らは、確率論的空間補間手法のうち平均値（トレンド成分）と共分散を既知とするSimple Kriging法を用いて新潟県中越地震の地震動強さを1kmメッシュ単位で推定した<sup>3)</sup>。空間補間の際には、地盤・地形条件の影響を取り除くため、地震動の地盤増幅度を用いる必要があるが、大西ら<sup>13)</sup>の国土数値情報を用いた1kmメッシュの地形・地質11分類により定められた地盤増幅度を用いていた。

若松ら<sup>14)</sup>は、日本全国の地形地盤を統一的に分類するための地形分類基準を提案し、1kmメッシュ単位で19微地形に分類している。さらに、新潟県中越地方に関しては、より詳細な250mメッシュの分類結果を公開している<sup>11)</sup>。松岡ら<sup>15)</sup>は、深さ30mまでの地盤の平均S波速度（AVS<sub>30</sub>）と微地形区分の関係を評価し、広域のAVS<sub>30</sub>分布マップを作成している。藤本・翠川<sup>16)</sup>は、S波速度600m/sの基準地盤に対する最大速度（PGV）の増幅度とAVS<sub>30</sub>の関係式を提案している。これらの成果を組み合わせることで、新潟県中越地方の250mメッシュ単位のS波速度600m/sの基準地盤に対するPGVの増幅度が推定される（図-1）。今回の検討では、1kmメッシュの地震動分布よりも詳細な地盤条件を考慮できると思われる250mメッシュ単位の推定結果を用いることとする。

Shabestari and Yamazaki<sup>17)</sup>は、K-NET95型地震計によって1996年5月から1998年12月の間に観測された地震記録を

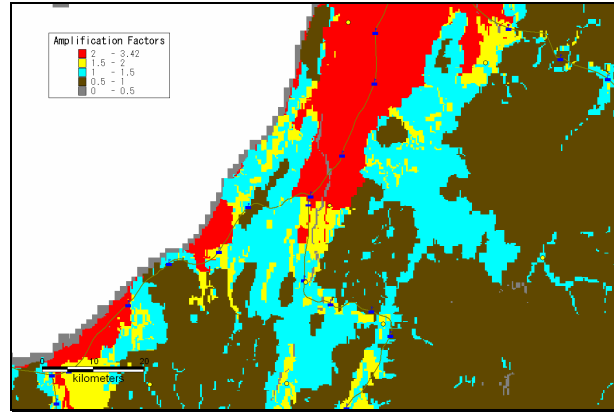


図-1 新潟県中越地方のPGVの地盤増幅度

用いてPGV（2方向最大値）の距離減衰式を構築した。回帰に用いた関数形は式(1)の通りである。

$$\log_{10} PGV = b_0 + b_1 M + b_2 r - \log_{10} r + b_4 h + c \quad (1)$$

ここで、 $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_4$ は回帰係数、 $M$ は気象庁マグニチュード、 $r$ は断層最短距離、 $h$ は震源深さである。 $c$ は地点係数であり、その観測点における地盤条件、地形効果、地震計の設置状況などの影響が重なり合ったものと考えることができる。また全観測点の平均値は0となり、K-NET観測点の平均地盤に対するPGVの増幅度は $10^c$ で表される。田村ら<sup>18)</sup>は、K-NETの地盤データを用いて平均S波速度を算出し、平均地盤に対する増幅度 $AR_{PGV}$  ( $=10^c$ )と以下のような関係があることを示している。

$$\log_{10} AR_{PGV} = -0.734 \log_{10} AVS_{20} + 1.81 \quad (2)$$

式(2)の $AVS_{20}$ は、深さ20mまでの地盤の平均S波速度である。新潟県中越地方の250mメッシュPGV増幅度マップはS波速度600m/sが基準地盤（増幅度1.0）と定められている。そこで、地表面にS波速度600m/sの岩盤が露出しているような地点を基準地盤として考える。すなわち、式(2)の $AVS_{20}$ に600m/sを代入し、増幅度が1.0になるようにすると式(3)が得られる。

$$\log_{10} AR_{PGV/600} = -0.734 \log_{10} AVS_{20} + 2.04 \quad (3)$$

ここで、 $AR_{PGV/600}$ はS波速度600m/sの基準地盤に対するK-NET観測点のPGV増幅度である。式(2)と(3)の定数項の差より、Shabestari and Yamazaki<sup>17)</sup>の地点係数 $c$ に0.23を加え、 $10^{c+0.23}$ とすることで、K-NET観測点のS波速度600m/sの基準地盤に対する増幅度が得られることが分かる。

本研究の地震動分布推定法の流れを図-2に示す。平均値と共分散を既知とするSimple Kriging法を用いた著者らの先行研究<sup>3)</sup>とほぼ同様の手法で行う。既存の研究では大西ら<sup>13)</sup>による地形・地質11分類のうち「山地」を基準

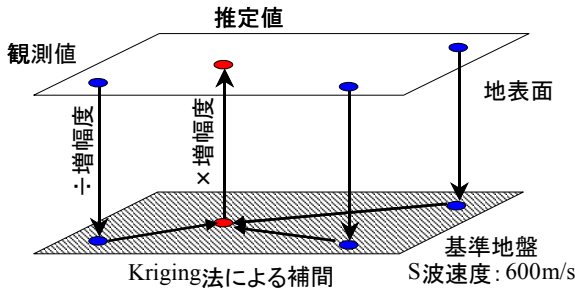


図-2 Kriging法による地震動推定法の流れ

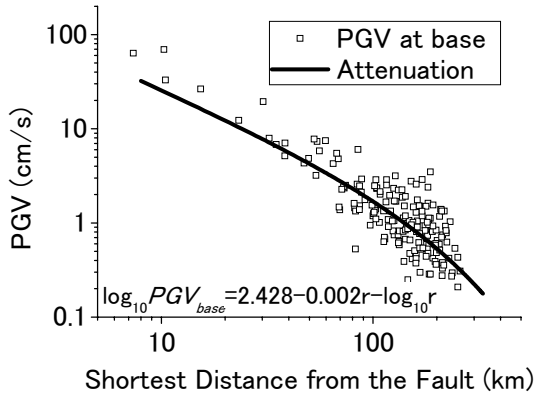


図-3 K-NET 地震記録のみを用いた基準地盤における PGV の距離減衰特性

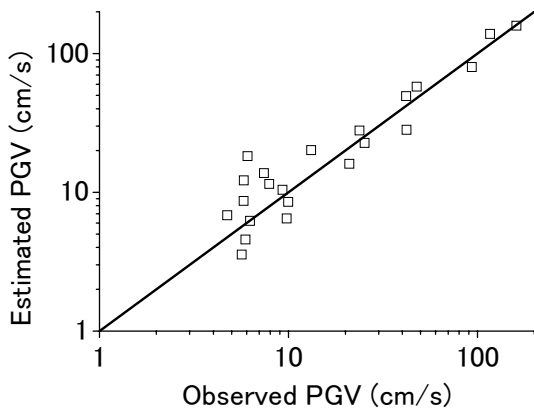


図-4 実測 PGV と推定された PGV の比較

地盤として用いていたが、ここではS波速度600m/sの地盤を基準としている。まず、地表面PGVを基準地盤におけるPGVに増幅度で割り戻すことで換算する。次に、基準地盤におけるPGVの距離減衰式を構築する。得られた距離減衰式をトレンド成分として用い、残差を平均値0の正規確率場と仮定してSimple Kriging法により補間した。なお、相関距離は既往の研究<sup>19)</sup>を参考に5.0kmとしている。最後に、補間された基準地盤におけるPGVに250mメッシュごとの増幅度を乗じて地表面PGV推定値とした。ここで、K-NET観測点が含まれるメッシュの増幅度については、前述の地点係数から得られる増幅度を用いてい

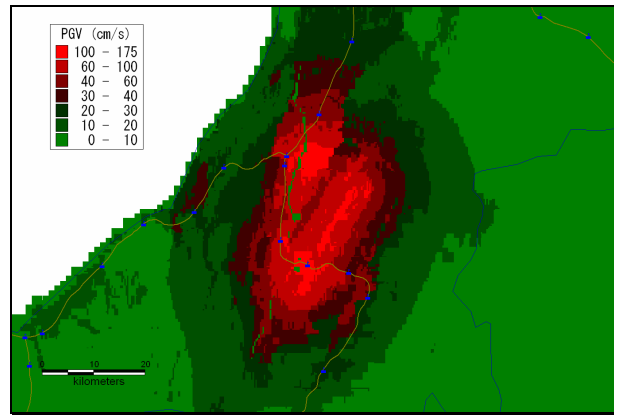


図-5 本研究で推定された新潟県中越地震の PGV 分布

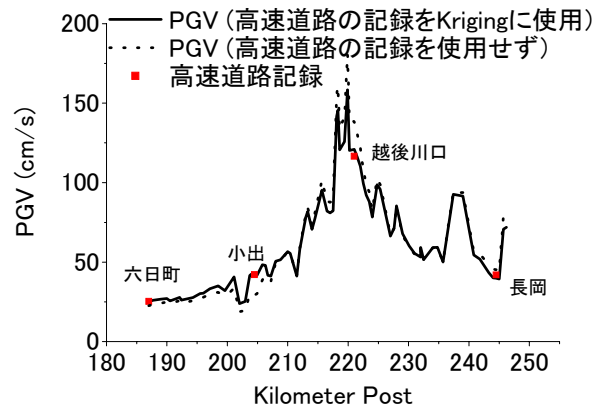


図-6 高速道路沿線（関越自動車道）の推定 PGV 分布

る。

本推定手法の精度を検証するために、まず、地表面観測値にはK-NET観測点によるもののみを用いて、高速道路に設置されている地震計の観測値がどの程度再現されるのかについて評価した。推定に用いたK-NET観測点は断層最短距離が300km以下の177観測点である。図-3に、使用したK-NET地震記録の基準地盤におけるPGV ( $PGV_{base}$ ) の距離減衰特性を示す。構築された距離減衰式は式(4)の通りである。

$$\log_{10} PGV_{base} = 2.428 - 0.002r - \log_{10} r \quad (4)$$

断層最短距離 $r$ は、国土地理院の作成した新潟県中越地震の断層モデルを用いて算出した<sup>3)</sup>。

図-2に示す方法でK-NET地震記録のみから推定された地震動強さから高速道路の地震計設置位置のPGVと大きな地震動が観測された気象庁 (JMA) 小千谷とJMA川口町のPGVを抽出し、観測値と推定値を比較した (図-4)。観測PGVが10cm/s程度以下の地震観測点に関しては、推定精度があまり良くない地点も存在するが、20cm/s以上のPGVが観測されている地点は精度良く推定できていることが確認できる。

本研究では、とくに高速道路沿線について推定精度の

表-1 被害の判定区分（グレーの部分は判定せず）

被災ランク	甚大(As)	大(A)	中(B)	小(C)	軽微(D)
橋梁上部工	・落橋	・上部工の横移動 ・鋼桁の破断	・鋼桁の座屈, 変形 ・被りコンクリートの大きな剥離・ひび割れ	・桁かかり部の変形 ・被りコンクリートの小さな剥離・ひび割れ	
橋梁下部工	・橋脚の破壊	・鉄筋の破断	・鉄筋のはらみ出し ・被りコンクリートの大きな剥離・ひび割れ	・被りコンクリートの小さな剥離・ひび割れ	
支承		・支承本体の破断 ・アンカーボルトの破断	・ローラーの逸脱 ・支承コンクリート・モルタルの破壊	・支承本体の一部損傷 ・ストッパーの亀裂 ・セットボルト, ストッパーの破断 ・沓座コンクリートの亀裂 ・沓座モルタルの剥離 ・アンカーボルトの抜け出し	・アンカーボルトのゆるみ ・セットボルトのゆるみ ・沓座モルタルのひび割れ
トンネル		・覆工の破壊	・覆工の大きな剥離・ひび割れ	・覆工の小さな剥離・ひび割れ	
のり面		・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）：2 cm を超えるもの ・車線部（上記以外）：3 cm を超えるもの ・路肩部：20 cm を超えるもの	・車線部（橋梁取付部）：1~2 cm ・車線部（上記以外）：1~3 cm ・路肩部：1~20 cm	・1 cm 未満
路面クラック			・5 cm を超えるもの	・3 cm~5 cm	・3 cm 未満

高い地震動分布が必要である。そこで、図-2に示す地震動推定手法の観測値に高速道路で観測された地震記録もK-NET観測値と併せて利用した。高速道路地震観測点の地点係数は得られていないので、250mメッシュの微地形分類から推定された地震計位置が含まれるメッシュのPGVの増幅度を用いて基準地盤におけるPGVを算出した。推定されたPGV分布を図-5に示す。

この結果から高速道路沿線の地震動強さを抽出すると図-6のようになる。図中では、高速道路の地震記録を用いなかったときの推定結果も併せて示している。高速道路の地震記録を推定に用いた場合、各ICのPGVは観測値と等しくなる。高速道路の地震記録を推定に用いた場合と用いなかった場合の推定PGV分布を比較すると、とくに小出IC、越後川口IC周辺で両者の差がやや大きく見られる。IC周辺の地震動分布の推定精度は、ICで得られた地震記録を用いた方が高いものと推測されるので、以後の検討では図-5に示す地震動分布を用いることとする。

### 3. 盛土の被害と地震動強さの関係

#### (1) 新潟県中越地震における高速道路被害データ

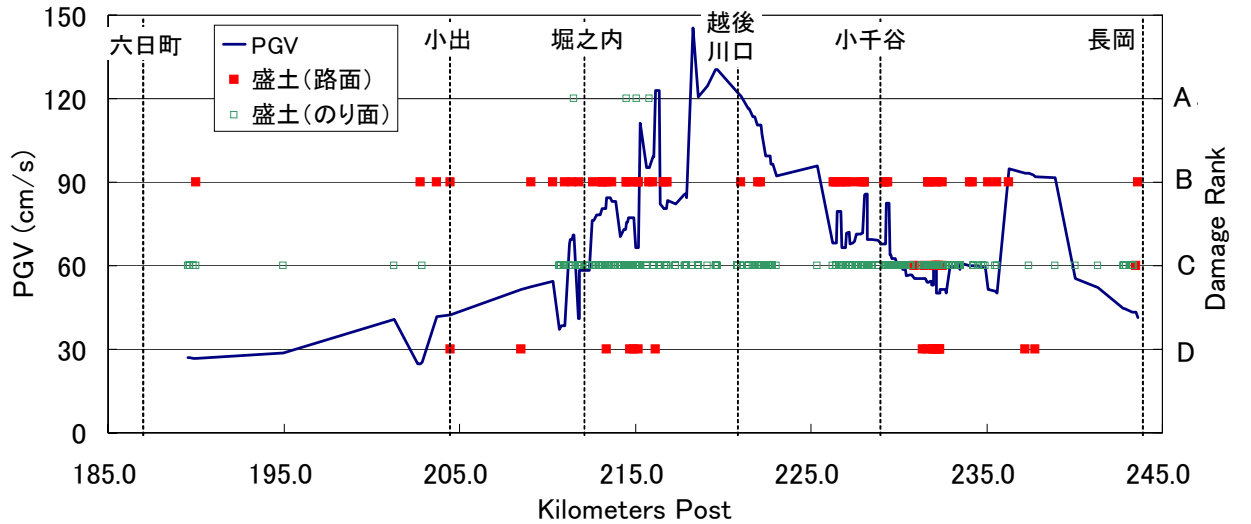
新潟県中越地震の影響で、高速道路には大小様々な

被害が生じた。被害件数の多かったのは土工部（盛土、切土）であり、とくに盛土部の被害数が多かった。著者らは、地震後早期にまとめた高速道路の被害データをもとに被害件数と地震動強さの関係を評価した<sup>3)</sup>。その結果、地震動の大きな堀之内IC~越後川口IC間で被害件数が多いことが明らかとなったが、ほぼ同程度の地震動に見舞われた越後川口IC~小千谷IC間の被害数は半分以下となっていた。そもそも越後川口IC~小千谷IC間は土工部の延長が短い、先行研究<sup>3)</sup>では被害のレベルや道路構造に関して考慮していなかったため、より詳細な検討を行う必要があると考えた。

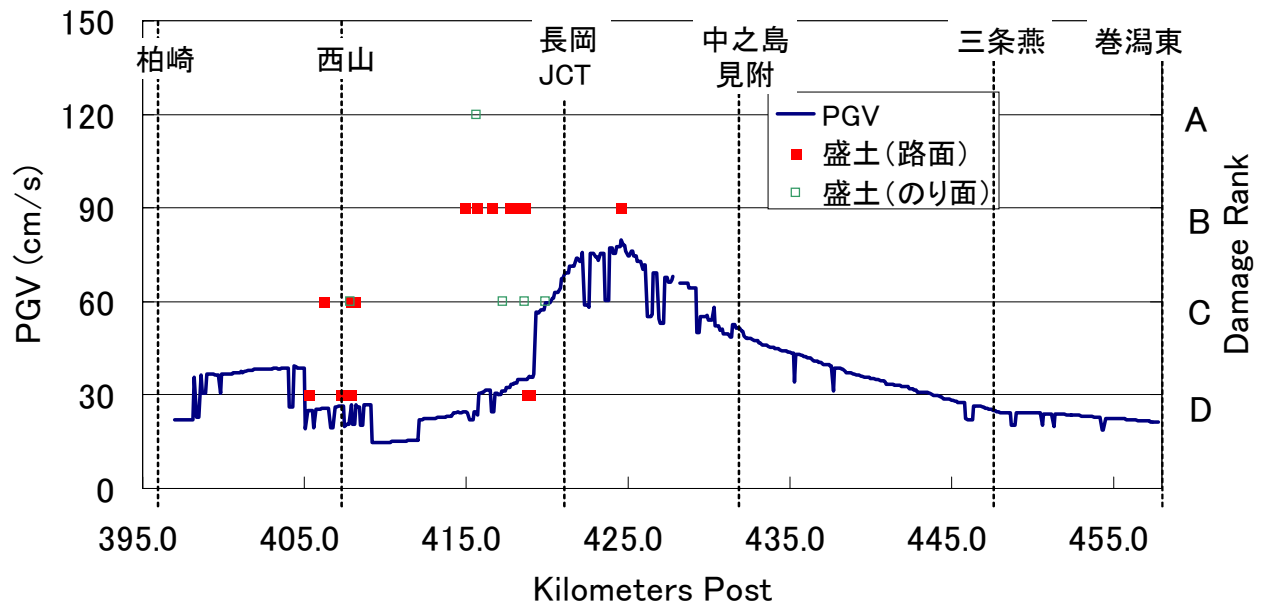
そこで、地震後早期よりも詳細にまとめられた高速道路の実被害データを用いて、盛土部の被害と地震動強さの関係を検討する。地震動強さ指標には、前章で250mメッシュ単位で詳細に推定されたPGVを利用する。また本検討では、被災ランクや道路構造に関しても考慮して検討を行う。旧日本道路公団がまとめた被害データは、キロポスト(kp)にてまとめられている。被害データは0.01kpごと(10mごと)に被害の発生した部位(盛土、切土、橋梁、支承など)、被害発生構造物(路面段差、のり面、横断構造物など)、損傷区分(クラック、陥没、破損、崩壊など)、段差やクラックなどの幅、被災ランクなどが記載されている。また、同一kpにおいて



図-7 高速道路キロポストと緯度経度を対応させるために用いた航空写真



(a) 関越自動車道



(b) 北陸自動車道

図-8 高速道路盛土部の被害発生箇所

異なる構造物に被害が生じたときは、その構造物すべてについて被災ランクが示されている。

高速道路に生じた被害の判定区分<sup>20)</sup>を表-1に示す。対象となる道路構造ごとに甚大 (As) (橋梁部のみ) ~

軽微 (D) までの5段階に判定される。また、被災ランクが中 (B) 以上の被害は車両の走行に支障 (高速走行時における) をきたす被害である。本研究の分析の対象とした盛土部の被害は、表-1の路面段差、路面クラック

(盛土路面に生じた被害)，およびのり面（盛土のり面に生じた被害）に対応する。

高速道路の被害箇所はkp単位でまとめられているが、本研究で算出した地震動分布は緯度経度で得られている。そこで、道路管理などに用いられているkpが記入されている航空写真（図-7）とゼンリン電子地図帳Z Professional 4を用いてkpと緯度経度を対応させた。

**(2) 盛土部被害箇所と地震動強さ**

図-8に、高速道路盛土部の被害発生箇所とPGVの関係を示す。関越自動車道では、六日町IC～長岡IC間に土工部の被害が発生している。とくに堀之内IC～越後川口IC間と小千谷IC付近の一部区間に、被災ランクBの被害が多く発生している。また、堀之内IC～越後川口IC間の214.5kp, 215.1kp, 215.8kpでは、盛土の大崩壊が発生している<sup>4)</sup>ことが報告されており、これらは被災ランクAに分類されている。北陸自動車道では、主に西山IC～長岡ジャンクション（JCT）間で走行に支障のある被害が発生している。なお、盛土のり面の被害は被災ランクAまたはCに分類される。新潟県中越地震の盛土のり面被害のうち車両の走行に支障をきたす被害は、盛土の大崩壊が発生している地点でありすべて被災ランクAに分類されている。

盛土部の被害のうち被災ランクB以上の走行に支障のある被害は、一部を除きPGVが30cm/s以上の地点で発生している。関越自動車道の六日町IC付近の190.0kpでは、路面の不陸（被災ランクB）が報告されておりPGVは26.8cm/sと推定されている。北陸自動車道の西山IC～長岡JCT間の415.63kpでは盛土のり面の崩壊、路面（車線部）の陥没が発生し、24.5cm/sのPGVが推定されている。

このように、他の被害箇所と比べて比較的小さなPGVが推定された地点でも車両走行に支障がある土工部の被害が発生している場合も幾つか見られる。周辺のボーリングデータや路線図、横断図などを確認すると、例えばとくに大きな被害が発生した415.63kpの地盤は切土と盛土の境界部分であるが、盛土部が軟弱地盤上にあり切土部との挙動に顕著な差が生じたことが原因と推測される。このような地点に関しては、現地の地盤データのさらなる収集や詳細な分析を今後行う必要がある。

**(3) 回帰分析に基づく盛土被害関数の構築**

前節で示した通り、高速道路の盛土部では新潟県中越地震の影響で大小様々な被害が発生している。そこで、今後の高速道路の地震防災対策や地震直後の被害予測に役立てるために、本節では回帰分析によって盛土部の被害関数を構築する。

まず、高速道路路線図と縦断図をもとに、高速道路の

表-2 高速道路盛土部の被害件数

(a) 盛土路面の被害

PGV	平均 PGV	A	B	C	D	延長 (km)
~30	24.1		5	3	4	28.5
30~40	35.3		5	0	2	21.8
40~50	44		4	1	1	10
50~60	54.9		12	7	11	13.7
60~70	66		9	0	1	6
70~80	74.6		10	0	2	6.8
80~100	91.1		15	0	3	6.7
100~140	122.1		3	0	1	1.9
Total	-		63	11	25	95.4

(b) 盛土路面と盛土のり面の被害

PGV	平均 PGV	A	B	C	D	延長 (km)
~30	24.1	1	5	11	4	28.5
30~40	35.3	0	5	18	2	21.8
40~50	44	0	4	14	1	10
50~60	54.9	0	12	110	11	13.7
60~70	66	1	9	52	1	6
70~80	74.6	2	10	43	2	6.8
80~100	91.1	1	15	71	3	6.7
100~140	122.1	0	3	40	1	1.9
Total	-	5	63	359	25	95.4

構造種別を盛土、切土、トンネル、橋梁部に分類した。その分類結果をもとに、0.1kpごとに盛土区間かどうかを判定した。0.1kpごとの区間分けが適切かは議論の余地があると思われるが、本研究の地震動分布が250mメッシュ単位で得られていることをふまえるとある程度は妥当であると思われる。

次に、図-8から盛土の被害と地震動強さの関係を表-2のようにまとめ、被害率（件/km）を算出した。回帰分析の対象となる被害発生箇所は路面とのり面に分類されるので、被害率も「盛土路面のみ」と「盛土路面と盛土のり面」の2種類を算出した。表-2の平均PGVは、盛土区間の沿線地震動強さの平均値である。図-8からも分かるように、のり面の被害は被災ランクCのものが多数生じている。なお、被害率を求める際の分母は盛土区間延長とした。

回帰分析には、式(5)に示す関数形を用いた。標準正規分布の確率分布関数Φ(x)を用いて対数正規分布を仮定し、それに倍率Cを乗じることとした。

$$P = C\Phi((\ln PGV - \lambda)/\zeta) \quad (5)$$

ここで、C, λ, ζは回帰で得られる定数であり、次の目的関数εを最小化することで求めた。関数形として対数

表-3 盛土被害関数の回帰定数

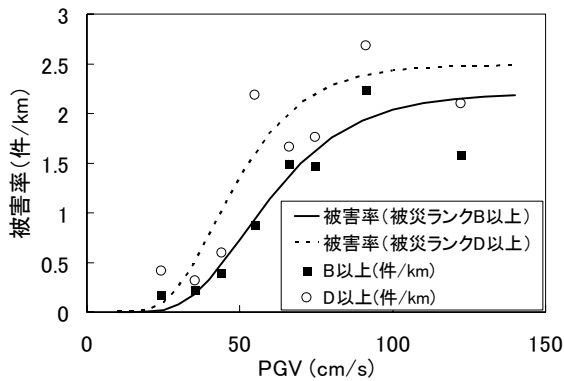
(a) 盛土路面の被害

回帰定数	$\zeta$	$\lambda$	$C$
被災ランクB以上	0.37	4.08	2.21
被災ランクD以上	(0.37)*	(3.87)	(2.49)

\* ( )は $\zeta$ を仮定して各パラメータ値を定めた

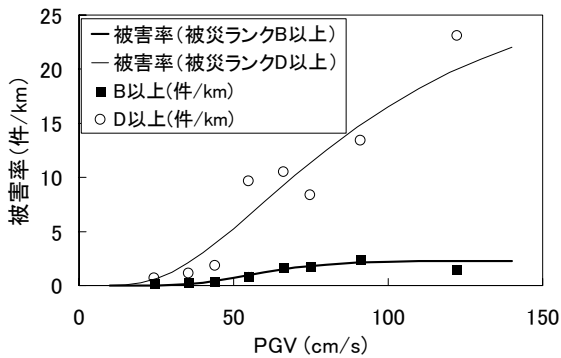
(b) 盛土路面と盛土のり面の被害

回帰定数	$\zeta$	$\lambda$	$C$
被災ランクB以上	0.31	4.06	2.29
被災ランクD以上	0.64	4.49	28.99



(a) 盛土路面の被害率\*

\*被災ランクD以上の被害関数は $\zeta$ の値を仮定



(b) 盛土路面と盛土のり面の被害率

図-9 新潟県中越地震における高速道路盛土の被害関数

正規分布を仮定したのは、パラメータの数が少なく被害関数の立ち上がり点を予め与える必要がないなど、分布形も被害発生を表すのにふさわしいためである。

$$\varepsilon = \sum (P_R - P)^2 w \quad (6)$$

$P_R$ は実被害データから求められる被害率であり、 $w$ は道路延長である。すなわち、道路延長による重み付き最小二乗法によって回帰定数を決定した。解法には、準ニュートン法による非線形回帰を用いた。重み付き最小二乗

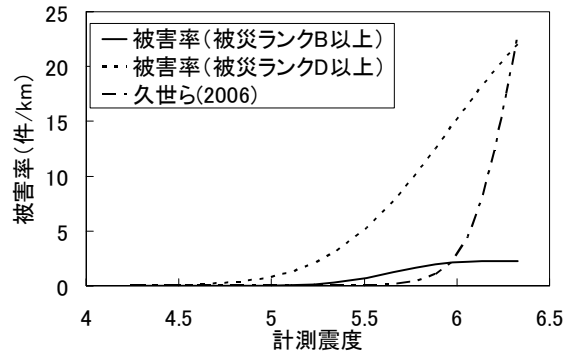


図-10 計測震度と盛土被害率の関係 (盛土路面と盛土のり面)

法を用いた理由は、PGVの小さい区間で発生した被害は、主に軟弱地盤が原因となっているものと想像され、さらにPGVの小さな区間の道路延長が大きいことから、道路延長による重みを考慮することで通常の最小二乗法よりも軟弱地盤の影響がより反映された被害関数が構築できると考えたからである。

表-1のように、路面段差や路面クラックという被害形態に関しては被災ランクが「中」までしか定義されていない。そこで、車両走行に支障のある被害(被災ランク大または中)と発生した全被害に関して回帰分析を行った。本研究で便宜的に用いている被災ランクではB以上の被害と全被害(D以上)に対応する。

表-3に重み付き最小二乗法で得られた回帰定数を、図-9に推定された盛土被害関数を示す。本線路面に発生する車両の走行に支障のある被害(被災ランクB以上)は、倍率 $C$ の値によると約2.2件/kmで頭打ちになるという結果が得られた。のり面の被害を合わせた場合に関してもほぼ同じ値が推定された。のり面には被災ランクCの被害が多数発生しており、全被害数は約29件/kmが最大値と推定される。ここで、本線路面被害の全被害(被災ランクD以上)に関しては、重み付き最小二乗法では適切な回帰定数が得られなかったが、 $\zeta$ が被災ランクB以上の被害関数と等しいものと仮定すると、図-9(a)に示す全被害に関する被害関数が構築される。また、図-9(b)の全被害に関する被害関数は、走行に支障にある被害に関する被害関数と比較して、やや当てはまりが悪いように見える。これらの理由としては、仮定した関数形の影響も考えられるが、軽微な被害まで含めた全被害の発生率はPGVなどの地震動強さのみで説明されるものではなく、路面舗装の劣化や疲労などの平常時の路面状況が影響していることを示唆していると思われる。

高速道路は地震時に通行規制を実施する<sup>12)</sup>が、これには沿線に配備された地震計で観測された計測震度が判断基準に用いられている。本研究で構築された被害関数はPGVに対するものであるため、Karim and Yamazaki<sup>21)</sup>の以

下の関係式を用いて計測震度 ( $I$ ) と盛土被害率の関係を評価した.

$$I = 2.42 + 1.82 \log_{10} PGV \quad (7)$$

図-10に、本線路面とのり面に生じた盛土被害の被害率と計測震度の関係を示す. 計測震度が5.1~5.2に達すると、車両の走行に支障のある被害(被災ランクB以上)の被害率は0.05~0.1件/kmを示す. 同様に、走行に支障のない軽微な被害も含めると、計測震度4.5~4.6で被害率が0.05~0.1件/kmと推定される.

久世ら<sup>8)</sup>は、関越自動車道の小出~長岡間の被害データをもとに計測震度に対する盛土の被害関数を構築している(図-10). 被害関数のモデル化には二項ロジットモデルを用いており、被害数の上限を40件/kmと仮定している. 久世らの被害関数は地震動の比較的大きかった区間での被害データに基づいており、計測震度5.5以下では被害が生じないと仮定して構築されている. 本研究では、地震動の比較的小きかった北陸自動車道などで発生した被害についても考慮していることから、計測震度が5.5以下でも被害が生じると推定されている.

常田ら<sup>7)</sup>のまとめた震度階級と道路施設被害状況の関連表によると、震度5弱では「通行が不能になるような被害はほとんど発生しない」、震度5強では「被害が大きいつきには、段差により通行が不能になるときがある」とされている. 本研究の被害関数では走行に支障のある被害が生じ始めるのは計測震度5.2程度であるので、常田らの記述と調和的である.

#### 4. 結論

本研究では、新潟県中越地震における高速道路の被害データをもとに地震動強さと被害数、被害程度の関係を検討し、被害数がとくに多かった盛土の被害関数を回帰分析によって構築した.

最大速度(PGV)の空間分布を推定し盛土部被害箇所のPGVを調べると、走行に支障のある被害は一部を除きPGVが30cm/s以上の地点で発生している. しかし、他の被害箇所と比べて比較的小きなPGVが推定された地点でも車両走行に支障がある盛土部の被害が発生している場合も見られるため、これらの被害箇所に関しては現地での地盤データの収集やそれらに基づく詳細な分析を今後行う必要がある.

高速道路盛土(路面およびのり面)の被害関数を、道路延長を重みとした重み付き最小二乗法に基づき構築した. 車両の走行に支障のある被害(被災ランクA, B)は、計測震度が5.1~5.2に達すると0.05~0.1件/kmの被害

率と推定される. 走行に支障のない被害(被災ランクC, D)も含めると、計測震度4.5~4.6のとき0.05~0.1件/kmの被害率を示す.

本研究で構築された被害関数は、地震被害の早期把握や通行規制基準値の再検討などの一助になるものと期待できる. 一方、新潟県中越地震の被害実績に基づく被害関数であるので、他の地震時の適用性については数値解析などによって検討する必要があると思われる. また、個々の被害メカニズムを明らかにするにはより詳細な検討を要する.

**謝辞:** 本研究で使用したPGV増幅度マップは(独)防災科学技術研究所の松岡昌志博士よりご提供頂いた. 記して、謝意を表す.

#### 参考文献

- 1) 新潟県中越地震被害調査特別調査委員会編:平成16年新潟県中越地震被害調査報告書 CD-ROM, 土木学会, 2006.
- 2) 日本地すべり学会・応用地質学会合同調査団:2004年新潟県中越地震による斜面災害緊急報告, 2004.
- 3) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 檜作正登, 岡本拓:新潟県中越地震における高速道路被害状況と航空写真を用いた被害早期把握に向けた基礎的検討, 土木学会地震工学論文集, Vol. 28, CD-ROM, 9p, 2005.
- 4) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之:航空写真の画像解析による高速道路被害把握に向けた基礎的検討, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 1262-1265, 2006.
- 5) 国富和真, 小林育夫, 松井保, 山崎聡一, 安川郁夫:阪神・淡路大震災による道路盛土被害の構造的要因分析, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 437-442, 1998.
- 6) 中村豊, 日高和利, 西永雅行:常時微動を用いた盛土の地震被害分析, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 85-90, 1994.
- 7) 常田賢一, 小田和広, 鍋島康之, 江川祐輔:新潟県中越地震における道路施設の被害水準と道路機能の特性, 土木学会地震工学論文集, Vol. 28, CD-ROM, 9p, 2005.
- 8) 久世益充, 杉戸真太, 八嶋厚, 三山敬, 櫛田末治, 近藤功規:2004年新潟県中越地震の被害事例に基づいた高速道路盛土の被害関数の検討, 土木学会第61回年次学術講演会, pp. 735-736, 2006.
- 9) 気象庁: [http://www.jma.go.jp/JMA\\_HP/jma/press/0402/26a/sindo040226.pdf](http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/press/0402/26a/sindo040226.pdf)
- 10) 若松加寿江, 松岡昌志:大都市圏を対象とした地形・地盤分類 250mメッシュマップの構築, 第27回地震工学研究発表会講演論文集, CD-ROM, 4p, 2003.
- 11) (独)防災科学技術研究所 防災システム研究センター 川崎ラボラトリー: [http://www.kedn.bosai.go.jp/japanese/daidaitoku/Niigata\\_GISdata/deta.Niigata\\_GISdata.html](http://www.kedn.bosai.go.jp/japanese/daidaitoku/Niigata_GISdata/deta.Niigata_GISdata.html)
- 12) 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.
- 13) 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江:気象庁記録の距離減衰式に基づく地盤増幅特性と地形分類との関係, 土木学



- 会論文集, No. 626/I-48, pp. 79-91, 1999.
- 14) 若松加寿江, 松岡昌志, 久保純子, 長谷川浩一, 杉浦正美: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.213-232, 2004.
- 15) 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.239-251, 2005.
- 16) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol. 6, No. 1, pp. 11-22, 2006.
- 17) Shabestari, K.T. and Yamazaki, F.: Attenuation relation of strong ground motion indices using K-NET records, 第 25 回地震工学研究発表会, pp. 137-140, 1999.
- 18) 田村勇, 山崎文雄, Shabestari, K.T.: K-NET 地震記録を用いた平均 S 波速度による地盤増幅度の推定, 土木学会第 55 回年次学術講演会, I-B357, 2000.
- 19) Shabestari, K.T., Yamazaki, F., Saita, J. and Matsuoka, M.: Estimation of the spatial distribution of ground motion parameters for two recent earthquakes in Japan, *Tectonophysics*, Vol. 390, pp. 193-204, 2004.
- 20) 垂水祐二, 佐藤亜樹男: 地震時通行止め基準値の見直し—NEXCO 東日本—, EXTEC, No. 79, pp. 8-11, 2006.
- 21) 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.

(2007. 2. 22 受付)

## RELATIONSHIP BETWEEN DAMAGE RATIO OF EXPRESSWAY EMBANKMENT AND SEISMIC INTENSITY BASED ON THE ACTUAL DAMAGE DATA IN THE MID-NIIGATA EARTHQUAKE

Yoshihisa MARUYAMA, Fumio YAMAZAKI, Hiroyuki YOGAI  
and Yoshiyuki TSUCHIYA

Many major and minor damages were found in the 2004 mid-Niigata earthquake, especially for the embankments of the Kan'etsu expressway and the Hokuriku expressway. Using both the actual damage data and detailed spatial distribution of seismic intensity, this study conducts the statistical analysis on the relationship between the damage ratio of expressway embankment and seismic intensity to construct fragility curves. Based on the obtained results, major damages that affect the serviceability for traffic are found in the area where the JMA seismic intensity is larger than about 5.1.