

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

丸山喜久¹・山崎文雄²・用害比呂之³・檜作正登³・岡本拓³

¹千葉大学助手 工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

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

²千葉大学教授 工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

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

³日本道路公団 試験研究所保全研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail: hiroyuki.yougai@jhnet.go.jp, masato.hidukuri@jhnet.go.jp, taku.okamoto@jhnet.go.jp

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震における高速道路被害と地震動強さの関係について検討を行った。新潟県中越地震の地震動分布を推定し、高速道路の被害データと推定された地震動強さとの関係を検討した結果、高速道路に被害が発生している区間の平均計測震度はいずれも5.0以上であり、平均計測震度が6.0以上の堀之内インターチェンジ(IC)～越後川口IC間、越後川口IC～小千谷IC間に多くの被害が集中していることが明らかとなった。さらに、航空写真から判読される高速道路の被害程度が、実際の被害報告とどの程度一致するか検討を行い、航空写真による早期被害把握の可能性を示した。

Key Words : *Niigataken-Chuetsu earthquake, expressway damage, spatial distribution, aerial photograph*

1. はじめに

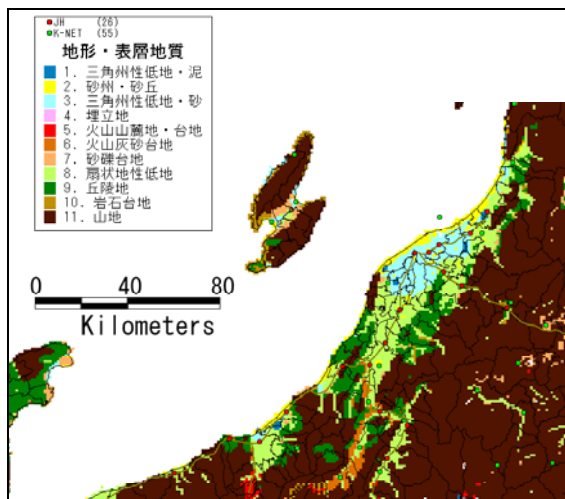
日本道路公団(JH)が管轄する高速道路では、地震発生直後に早期段階での地震情報を集めて効果的な地震時通行規制を行うことを目的とし、管理事務所などに地震計を設置している。従来は、最大加速度(PGA)を通行規制の指標値として用いてきたが、2001年10月より計測震度4.5以上が記録された場合に通行止めの処置がとられている¹⁾。

2004年10月23日17時56分に発生した新潟県中越地震($M_{JMA} = 6.8$)では、地震発生直後の17時58分から新潟県全域、長野県、群馬県の一部など広範囲にわたり通行止めが実施された。順次点検が行われ安全が確認された区間では通行止めが解除されていたが、地震発生から約1日後の10月24日16時30分の時点では、北陸自動車道の柏崎インターチェンジ(IC)～三条燕ICの上下線、関越自動車道の長岡ジャンクション(JCT)～湯沢ICの上下線、湯沢IC～月夜野ICの下り線で通行止めの処置が続いた²⁾。その後、地震によって発生した高速道路被害の応急復旧が行われた結果、11月5日に関越自動車道の長岡IC～小出IC間の片側一車線での開通をもって全線で

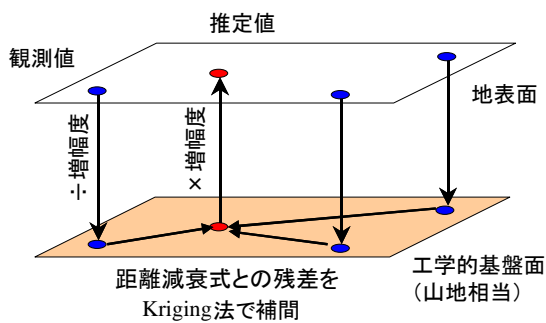
応急復旧が完了し、11月26日の16時に同区間で片側二車線での走行が可能となった²⁾。

航空機、ヘリコプター、人工衛星などにより被災地の上空から得られる画像・映像情報は、その広域性・情報量から大規模な災害時に被害状況を把握するうえで非常に有効である。新潟県中越地震に関しても、様々な機関がリモートセンシングによる広範囲の被害把握について検討を行っている³⁾⁻⁵⁾。様々なプラットフォームが与える情報は、即時性や広域性、分解能において長所と短所を兼ね備えている。最も解像度の高い人工衛星であるQuickBirdは約60 cmの分解能を有している⁶⁾。また、航空機から得られる航空写真はそれよりも高い分解能をもっている。

そこで、本研究では、面的地震動分布とリモートセンシングを組み合わせた高速道路の被害状況の早期把握を目的とした総合的なリアルタイム地震防災システムの構築に向けた基礎的検討として、日本道路公団により応急復旧や点検時に作成された高速道路の被害箇所リストをもとに被害状況をまとめ、地震動強さと被害件数の関係について検討した。地震動強さは、Simple Kriging法^{7), 8)}により推定された面的地震動分布の結果を用いた。また、国土地理院に



(a) 地形・表層分類



(b) Kriging 法の概要

図-1 本研究で用いた新潟地方の地形・地質分類と地震動推定法

よって撮影された航空写真をもとに高速道路被害の目視判読を行い、被害箇所リストにおける記述内容と比較し、目視判読可能な被害程度について検討を行った。

2. Simple Kriging法による面的地震動推定

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求めなければならない。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。

そこで、本研究では確率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^{7), 8)}を用いた。平均値成分には距離減衰式を用いる。地震動分布推定に用いた地震記録は、新潟県中越地震の本震の地震記録でK-NET観測点の55記録、気象庁観測点の2記録（小千谷と川口町）、JHの地震計で得られた26記録の計83記録である。

空間補間の際には、地盤・地形条件の影響を取り除くため、地震動の地盤増幅率を用いる必要がある。

地盤増幅率は、国土数値情報を用いて1kmメッシュ単位で算定されているのに加えて、最近では、それより詳細なメッシュ単位での推定が行われたりもしている⁹⁾。本研究では、大西ら¹⁰⁾の国土数値情報を用いた1kmメッシュの地形・地質分類の「山地」を基準とする地盤増幅率を用いた（図-1(a)）。ただし、K-NET観測点が位置するメッシュの地盤増幅率に関しては、Shabestari and Yamazaki¹¹⁾により得られた距離減衰式の地点係数より以下のように算出した。

$$\log_{10} ARA_i = c^A_i - c^A_0 \quad (1)$$

$$\log_{10} ARV_i = c^V_i - c^V_0 \quad (2)$$

$$ARI_i = c^I_i - c^I_0 \quad (3)$$

ここで、 ARA は最大加速度（PGA）の地盤増幅率、 ARV は最大速度（PGV）の地盤増幅率、 ARI は計測震度（ I ）の地盤増幅率である。 c_0 は大西らの「山地」の平均地点係数（ $c^A_0 = -0.107$, $c^V_0 = -0.261$, $c^I_0 = 0.554$ ）である。

図-1(b)に、本研究の地震動推定法の流れを示す。まず、地表面の地震動観測値 PGA_{si} , PGV_{si} , I_{si} を地盤増幅率を用いて基盤面における PGA_{bi} , PGV_{bi} , I_{bi} に変換する。

$$PGA_{bi} = PGA_{si} / ARA_i \quad (4)$$

$$PGV_{bi} = PGV_{si} / ARV_i \quad (5)$$

$$I_{bi} = I_{si} - ARI_i \quad (6)$$

次に、基盤面における地震動指標値を用いて距離減衰式を作成する。回帰式の関数型は以下のようにある。

$$\log_{10} PGA = c_1 + c_2 r - \log_{10}(r + c_3) \quad (7)$$

$$\log_{10} PGV = c_1 + c_2 r - \log_{10}(r + c_3) \quad (8)$$

$$I = c_1 + c_2 r - 1.89 \log_{10}(r + c_3) \quad (9)$$

ここで、 r は断層面最短距離で国土地理院の作成した断層モデルより算出した。 c_1 , c_2 , c_3 は回帰係数である。 c_3 は震源近傍で地震動強度が飽和する影響を表している。本研究で得られた基盤面の距離減衰式は以下のようになり、図-2に地震動指標値の距離減衰特性を示す。

$$\log_{10} PGA = 4.026 - 0.00492r - \log_{10}(r + 5.5) \quad (10)$$

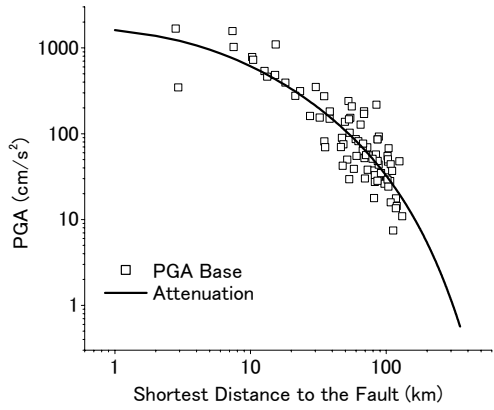
$$\log_{10} PGV = 2.610 - 0.00453r - \log_{10}(r + 0.6) \quad (11)$$

$$I = 7.532 - 0.01055r - 1.89 \log_{10}(r + 1.1) \quad (12)$$

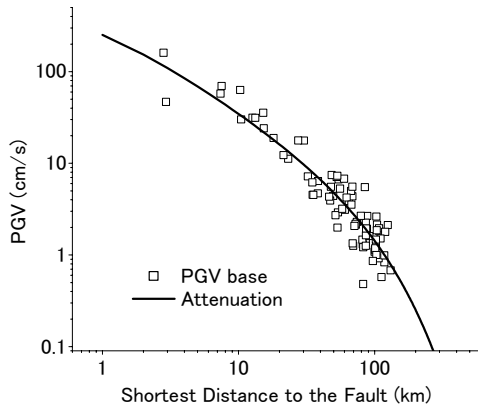
以上のように構築した距離減衰式（平均値成分）と基盤面地震動指標値の残差を平均値 0 の正規確率場と仮定して Simple Kriging 法で補間した。相関距離は 5.0km とした。このようにして得られた任意地点の残差に基盤面における平均値成分を加えた。

最後に、式(1)-(3)を用いて基盤面の地震動推定値から地表面の推定値を算出した。この地震動分布推定法では、地震観測点での推定結果は観測値と一致する。

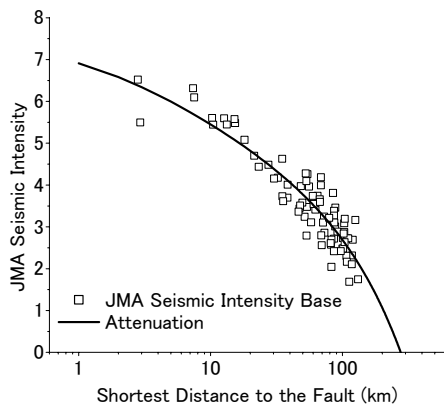
気象庁は、おおむね20 kmごとに配備した全国約600の地震計と39の都道府県震度情報ネットワークシステム（川崎市、横浜市、名古屋市など）から提供を受けている約2290の地震計で得られた記録を活



(a) PGA



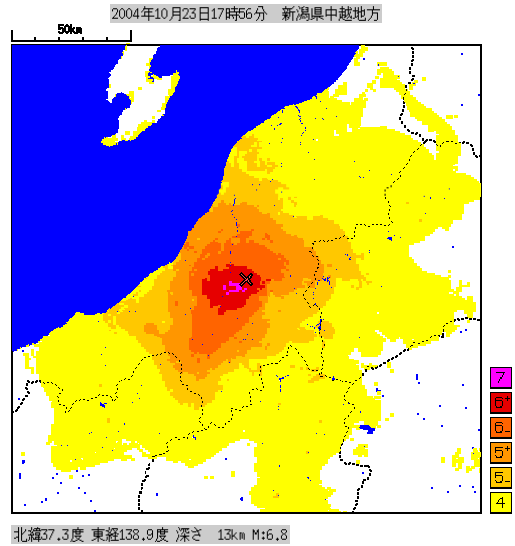
(b) PGV



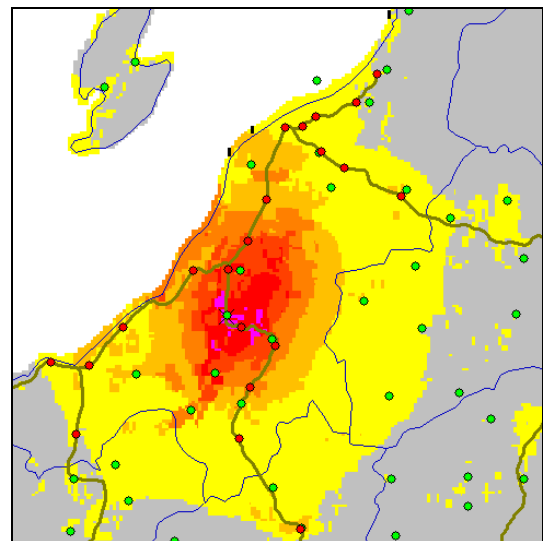
(c) 計測震度

図-2 地震動指標値の基盤面における距離減衰特性

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¹²⁾。本研究で得られた面的震度分布と気象庁発表の推計震度分布を図-3に比較する。本研究で推定された面的震度分布は、方法、使用データともに気象庁のものとは異なっている。しかし、両者の推定震度分布は北東から南西方向に震度の大きい地域が分布していることなどそれほど大きな違いは見られない。



(a) 気象庁発表の推計震度分布



(b) 本研究の推定震度分布

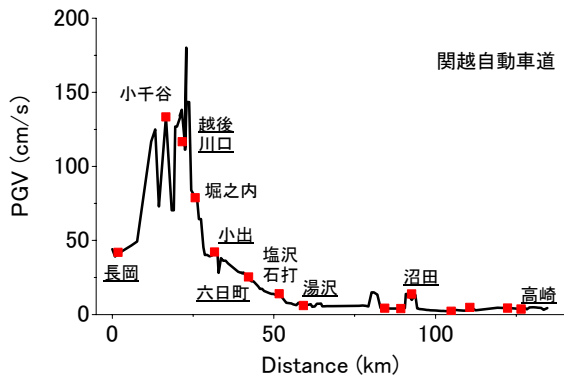
図-3 本研究の推定計測震度分布と気象庁発表の推計震度分布の比較

3. 高速道路被害と地震動強さの関係

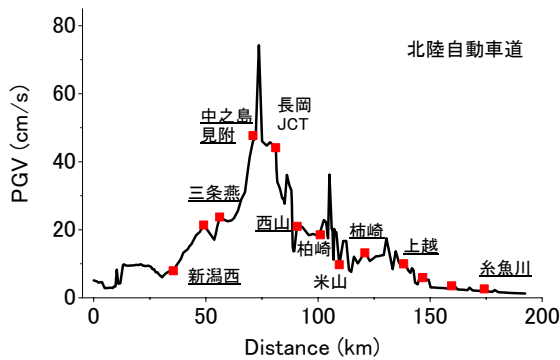
(1) 高速道路沿線の推定地震動分布

2. で推定された面的地震動分布から、高速道路線形に沿った地震動指標値を抽出し高速道路沿線の推定地震動値とした。対象としたのは、新潟県中越地震の影響で被害が生じた関越自動車道と北陸自動車道の一部区間である。

図-4に高速道路沿線のPGV分布、図-5に計測震度の分布を示す。図中に下線で示しているインターチェンジは、地震記録が得られている地点であり、本研究の推定法では地震記録のある地点の推定地震動指標値は観測値と等しくなるようになっている。推

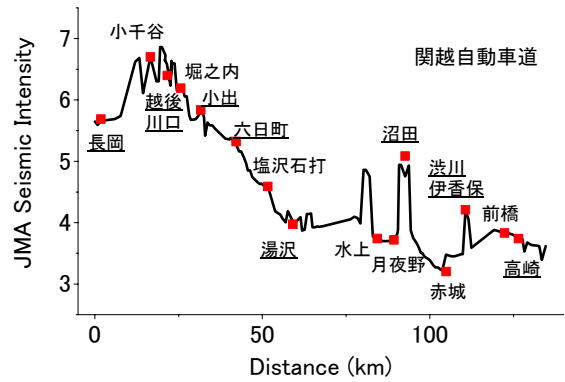


(a) 関越自動車道

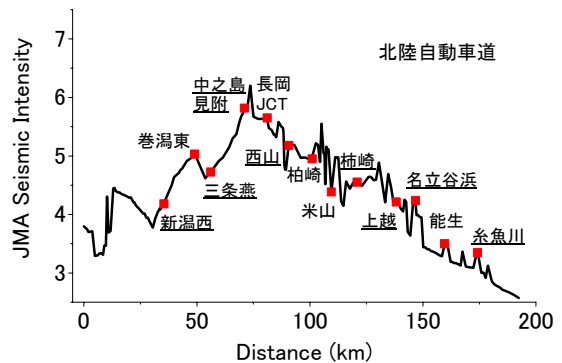


(b) 北陸自動車道

図-4 高速道路沿線の推定 PGV 分布



(a) 関越自動車道



(b) 北陸自動車道

図-5 高速道路沿線の推定計測震度分布

定された計測震度分布によると、関越自動車道の小出ICから長岡IC間、北陸自動車道の長岡JCTから中之島見附IC間で計測震度6.0以上を示している。とくに、関越自動車道の堀之内ICから長岡IC間では震度7（計測震度6.5以上）の区間も存在する。

(2) 高速道路被害数と地震動強さの関係

新潟県中越地震における高速道路被害数をまとめると図-6のようになる。盛土や切土などの平面道路の被害が最も多く60%以上を占めている。次いで、C-BOX（ボックスカルバート）が約20%、橋梁が約15%となっている。

新潟県中越地震における高速道路被害をIC区間ごとに集計し、地震動強さとの関係进行评估した。IC区間の地震動強さは、以下のような重み付き平均で以下のように算出した（図-7）。

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i r_i}{\sum r_i} \quad (13)$$

ここで、 x_i は高速道路上のある位置における地震動指標値、 r_i はその代表長さ、 \bar{X} は区間平均地震動指標値である。

図-8、図-9に、IC間の平均PGV、計測震度と高速道路被害件数の関係を示す。ただし、高速道路被害件数は区間延長距離（km）で基準化している。これによると、高速道路被害は関越自動車道の堀之内IC～越後川口IC間に集中しており1kmあたり70件以上の被害が生じたことになる。次いで越後川口IC～

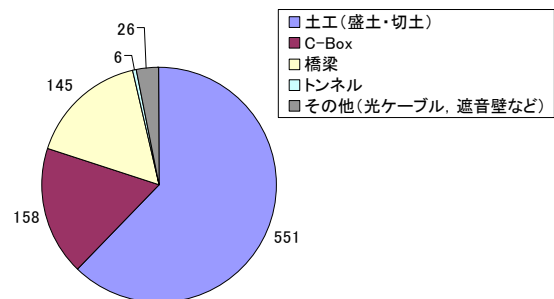


図-6 新潟県中越地震による高速道路被害の総計

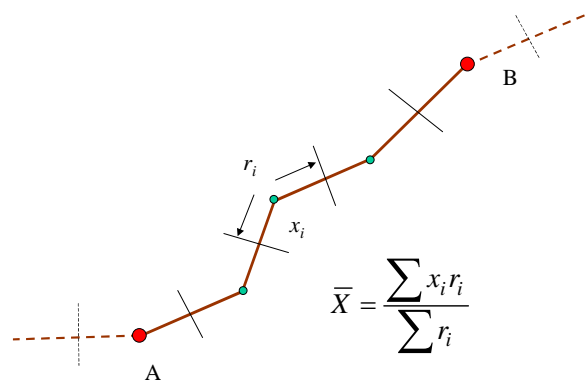


図-7 高速道路インターチェンジ区間の地震動重み付き平均値

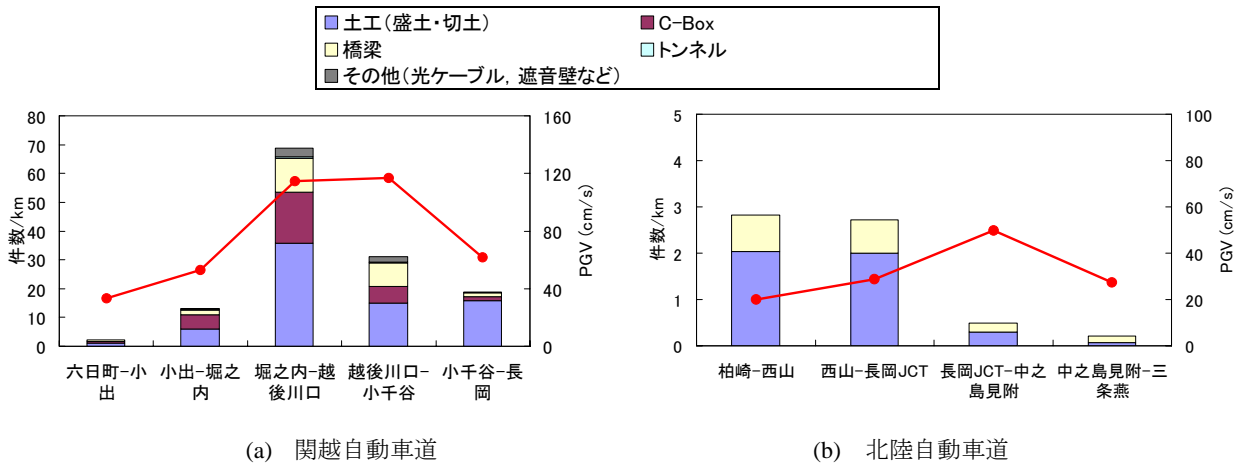


図-8 区間平均 PGV と高速道路被害の関係

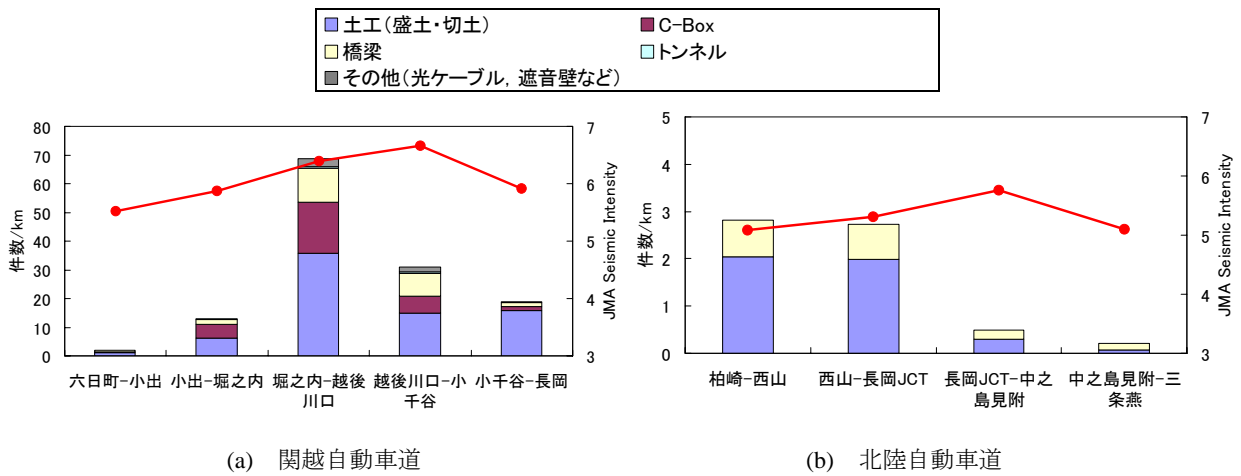


図-9 区間平均計測震度と高速道路被害の関係

小千谷IC間の約30件/kmである。また、被害発生箇所は関越自動車道に集中しており、北陸自動車道の1kmあたりの被害件数はそれほど多くない。

高速道路被害と推定された計測震度の関係（図-9）を見ると、被害が発生しているIC区間の平均計測震度はいずれも5.0以上の区間である。とくに平均計測震度が6.0以上の堀之内IC～越後川口IC間、越後川口IC～小千谷IC間では非常に多くの被害が発生していることがわかる。

今後は、被害種別や程度と地震動強さの関係について個々の被害ごとにより詳細な検討を行い、過去の被害地震時の事例と比較・検討することが必要である。

4. 航空写真を用いた早期被害把握の基礎的検討

被災地の上空から観測された画像や映像を利用した被害把握は、発災直後の被害情報を得るのに有効な一つの方法である。

航空写真は、地図の作製に用いられるなどリモー

トセンシングにおいて最も古くから利用されてきた。また、風水害、土砂災害、火山災害などの大規模な災害が発生した場合、当日あるいは翌日から写真が撮影され被害状況把握のための調査・解析に利用されてきた。兵庫県南部地震では、建物倒壊、火災、道路・鉄道の破損、斜面崩壊・地すべり、地盤の液状化、海岸堤防の破損の航空写真からの判読がとりまとめられたり¹³⁾、建物被害の目視により判読された被害程度が実際の被害ランクとどの程度対応するか検討されたりしている¹⁴⁾。最近では、高解像度衛星によるリモートセンシング画像も利用可能となっており、衛星画像を用いた建物被害の目視判読が行われたりもしている¹⁵⁾。

国土地理院では、新潟県中越地震発生の翌日に長岡、小千谷、十日町地区の空中写真を、10月28日に見附市、栃尾市、守門岳地区の空中写真を撮影している¹⁶⁾。一部の空中写真には高速道路も撮影されているので、JHが点検時に作成した被害リストと目視判読結果の対応について評価することができる。そこで本研究では、図-10に示す航空写真を用いて高速道路被害の目視判読を行い、判読可能な被害箇所と実際の被害程度の対応について検討した。

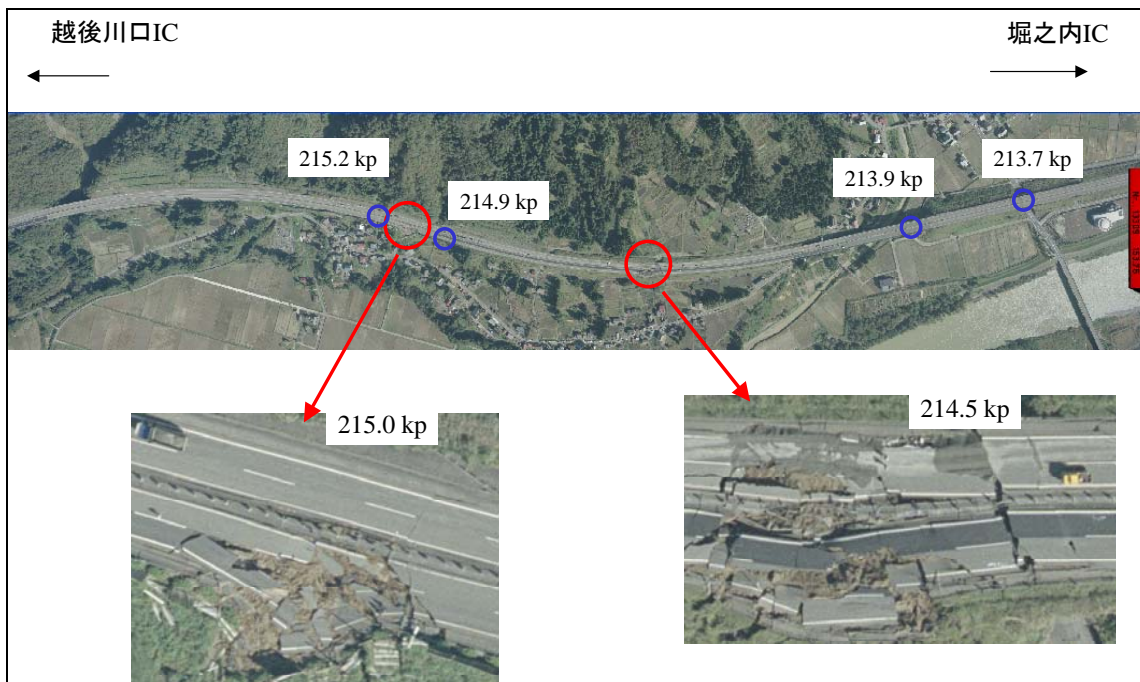


図-10 関越自動車道の越後川口IC～堀之内IC間の航空写真

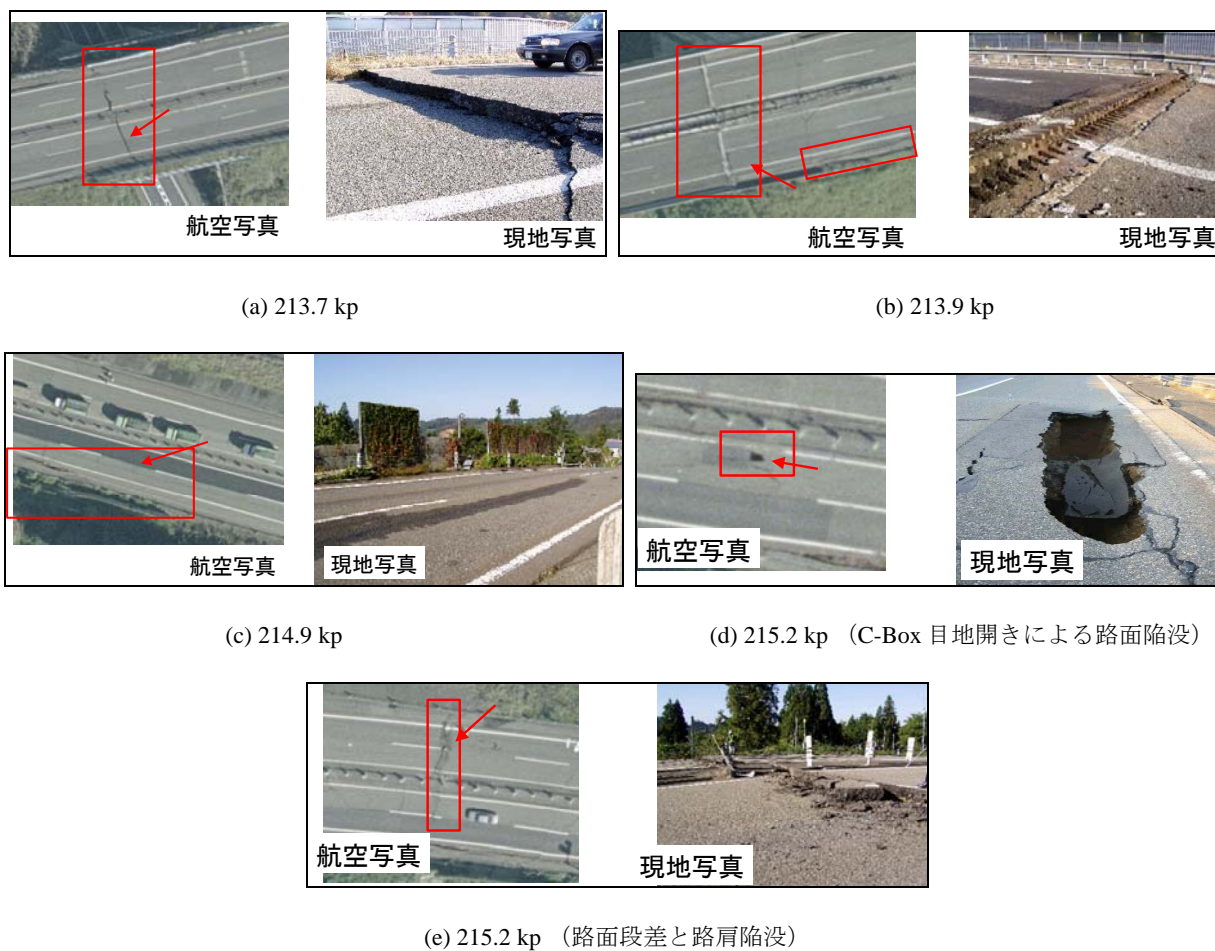


図-11 航空写真によって判読された被害と現地の被害状況の比較

図-10は関越自動車道の堀之内IC～越後川口IC間の航空写真である。図中には、215.0キロポスト

(kp)、214.5 kpにおける大規模な盛土の崩壊が見られた地点が含まれており、これらが航空写真で容



航空写真



疑似QuickBird(60cm)



疑似IKONOS(100cm)



疑似SPOT5(250cm)

(a) 214.5 kp



航空写真



疑似QuickBird(60cm)



疑似IKONOS(100cm)



疑似SPOT5(250cm)

(b) 215.2 kp

図-12 高速道路被害箇所空撮画像の解像度による変化

易に判読できることが分かる。図-10の青丸で示した箇所について、JHの調査による現場写真と航空写真による判読結果を比較する(図-11)。213.7 kp地点では、現地調査の結果20 cm程度の段差が生じたことが報告されており航空写真から確認される。213.9 kp地点では、上下線で芋川橋ジョイント部の段差が報告されている。また、下り線では路肩で約1 mの段差が発生しているが航空写真で判読可能である。214.9 kp地点では、長さ10 mにわたる路肩の陥没と遮音壁が落下したことが現地調査から分かっている。航空写真では、路肩の陥没については確認できる。また、路肩が陥没した影響で遮音壁がゆがんで見えている。215.2 kp地点では、C-Boxの目地開きのため、盛土がC-Box内に流れ込み路面の陥没が生じた。航空写真からは本線上にある路面の陥没

が確認される。また、その付近では約30 cmの路面の段差と路肩の陥没が発生し、航空写真からの被害判読が可能であった。

リモートセンシングを行うプラットフォームには様々あり、即時性、広域性、分解能は多様であるが、1999年末から画像の提供を始めた人工衛星IKONOS、2001年10月に打ち上げられたQuickBird衛星などは航空写真に迫る解像度を有している(IKONOSは約100cm、QuickBirdは約60cm)¹⁷⁾。また、2002年に打ち上げられたSPOT5は2.5 mの解像度を有している¹⁸⁾。そこで、航空写真の解像度を低下させ、疑似QuickBird画像、疑似IKONOS画像、疑似SPOT5画像を作成し、図-11に示した高速道路被害の判読の様子がどのように変化するかを検討した。214.5 kpと215.2 kpにおける空撮画像の解像度による変化の様

子を図-12に示す。214.5 kp地点で発生した大規模な盛土崩壊については、QuickBird, IKONOSやSPOT5などの高解像度人工衛星で充分判読可能である。215.2 kp地点での本線上の路面の段差に関しては、QuickBird, IKONOSでは判読可能と考えられるが、SPOT5での判読は難しいものと思われる。また、上り線に見られる路肩の陥没についてもQuickBird衛星相当の解像度をもつ画像では、判読可能であるものと考えられる。

本研究で使用した高速道路の被害データは、キロポストごとにまとめられているので被害箇所と航空写真上のマッチングが非常に困難であった。今後、高速道路被害箇所を緯度経度などでデータを整理することにより航空写真による判読結果とのより詳細な検討が可能になるものと考えられる。また、被害の自動判読に向けた検討も行うことができるであろう。さらに、面的に推定された地震動分布と広域のリモートセンシング画像を組み合わせることで地震発生直後の被害把握に役立つことが期待される。

5. 結論

本研究では、面的地震動分布と広域のリモートセンシング画像を組み合わせたリアルタイム地震防災システムの構築に向けた基礎的検討として、新潟県中越地震によって高速道路で発生した被害の状況をまとめ地震動強さとの関係性を評価した。さらに、航空写真を用いて高速道路被害の早期把握に向けた基礎的検討を行った。

新潟県中越地震における高速道路被害の60%以上が盛土、切土などの平面道路に集中していることが分かった。次いでボックスカルバート、橋梁の被害が多かった。被害が発生しているIC区間の平均計測震度はいずれも5.0以上であった。とくに平均計測震度が6.0以上の堀之内IC～越後川口IC間、越後川口IC～小千谷IC間では非常に多くの被害が発生していることが明らかとなった。

航空写真による高速道路被害の判読結果と日本道路公団による現地写真を比較し、空撮画像から判読可能な被害程度について検討を行った。それによると、大規模な盛土崩壊などが判読されるだけでなく、本線上の路面の段差、路肩の陥没なども判読可能であった。さらに、高解像度人工衛星による画像を想定した解像度60cm, 100cm, 250cmの画像を航空写真の解像度を低下させて作成し、被害判読の様子がどのように変化するかを検討した。その結果、盛土の大規模崩壊などの壊滅的な高速道路被害は解像度60cm, 100cm, 250cmの画像からも判読可能であった。QuickBird衛星による画像を想定した解像度60cmの画像やIKONOS画像相当の解像度100cmの画

像からは、路面の段差なども確認できた。

本研究で用いた高速道路被害データには、被災リンクなどの被害程度に関する内容が得られていない。また、被害箇所もキロポストごとに整理されている。今後、高速道路被害箇所に被害程度や緯度経度を与えることができれば、本研究で行った内容についてより詳細な検討を行うことが可能であり、今後の課題である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 日本道路公団：<http://www.jhnet.go.jp/index.html>
- 3) 国際航業株式会社：<http://www.kkc.co.jp/index.html>
- 4) 株式会社パスコ：<http://www.pasco.co.jp/>
- 5) アジア航測株式会社：<http://www.ajiko.co.jp/bousai/tyuetsu/tyuetsu.htm>
- 6) DigitalGlobe, Inc.: <http://www.digitalglobe.com/>
- 7) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press, 1992.
- 8) 野田茂, 星谷勝：条件付き確率場の補間法に関する一提案, 鳥取大学工学部研究報告, Vol. 28, pp. 175-197, 1997.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 気象庁：http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/press/0402/26a/sindo040226.pdf
- 13) 国土地理院：平成7年度兵庫県南部地震災害現況図（第I版）, 1995.
- 14) 小川直樹, 山崎文雄：航空写真を用いた兵庫県南部地震における建物被害の目視判読, 地域安全学会論文集, No. 2, pp. 119-128, 2000.
- 15) 矢野嘉久, 山崎文雄, 松岡昌志：高解像度衛星によるイラン・バム地震の被害把握, 日本地震工学会大会－2004梗概集, pp. 454-455, 2005.
- 16) 国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/>
- 17) 三富創, 松岡昌志, 山崎文雄：最近の地震災害の空撮画像を用いた建物被害地域の自動抽出の試み, 土木学会論文集, No. 703/I-59, pp. 267-278, 2002.
- 18) 株式会社イメージワン：<http://www.imageone.co.jp>

(2005. 3. 14 受付)

DAMAGE INVESTIGATION OF EXPRESSWAYS IN THE 2004 NIIGATAKEN-
CHUETSU EARTHQUAKE AND DAMAGE DETECTION
USING AERIAL PHOTOGRAPH

Yoshihisa MARUYAMA, Fumio YAMAZAKI, Hiroyuki YOGAI, Masato HIDUKURI
and Taku OKAMOTO

The relationship between the damage of expressways caused in the 2004 Niigataken-Chuetsu earthquake and the seismic intensity was evaluated. The areas where the expressway suffered from many damages were subjected to severe ground motion whose JMA (Japan Meteorological Agency) seismic intensity was larger than 6.0. The major and minor damages of expressways can be detected using aerial photographs. It is also possible to detect some minor damages using high resolution satellite images, e.g., QuickBird and IKONOS. The remote sensing technology is expected to contribute to early damage detection just after the occurrence of a large earthquake.