

高速道路盛土の地震被災予測に関する一考察

村上 陽平¹・一井 康二²・丸山 喜久³・秦 吉弥⁴・福島 康宏⁵

¹広島大学大学院工学研究科
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:m111860@hiroshima-u.ac.jp

²広島大学大学院准教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp

³千葉大学大学院准教授 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

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

⁴日本工営(株) 中央研究所主任研究員 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail:hata-ys@n-koei.jp

⁵(株) エイト日本技術開発保全・耐震・防災事業部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail:fukushima-ya@ej-hds.co.jp

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。このとき、被災予測の対象となる高速道路の構成要素としては、橋梁、盛土等が挙げられるが、種々の形状を有する盛土の被災予測は難しい課題である。そこで本研究では、関越自動車道と北陸自動車道での被災事例をもとに、種々の条件下での被災予測式の検討を行った。まず、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、各構造物の周辺について、構造物の影響を考慮した被害確率の評価式を提案した。また、構造物の影響がなく、平均的な盛土断面の被災データを抽出し、ある特定の断面形状と物性値を対象とした、単位長さあたりの被災件数の評価式を提案した。

Key Words : earthquake, expressway embankment, fragility curve, PGV

1. はじめに

近年、盛土における地震時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、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、常田ら¹⁾は、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付けている。久世ら²⁾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。さらに、丸山ら³⁾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、これらの条件の違いを適切に考慮することは容易ではない。すなわち、被災事例に基づく分析では、被災事例に含まれる盛土の条件がさまざまであり、条件の違いによる被災確率の違いを適切に評価することは難しい。一方で、解析的なアプローチでは、解析手法の適用性・精度を被災事例等に基づいて評価することが不可欠であり、やはり難しい。

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、種々の条件下での被災予測式の検討を行った。まず、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、各構造物の周辺について、構造物の影響を考慮した被害確率の評価式を提案した。また、構造物の影響がなく平均的な盛土断面の被災データを抽出し、ある特定の断面形状と物性値を対象とした、単位長さあたりの被災件数の評価式を提案した。

表-1 盛土の条件の分類

(Ⅰ)	カルバート周辺の盛土
(Ⅱ)	橋梁周辺の盛土
(Ⅲ)	トンネル周辺の盛土
(Ⅳ)	標準区間の盛土

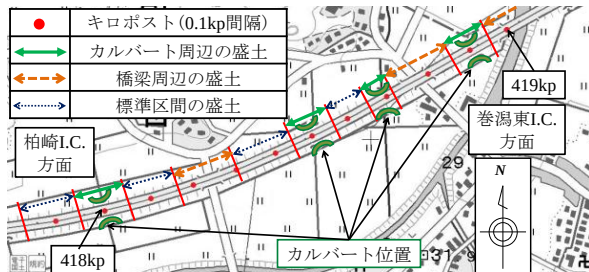


図-1 盛土の条件による分類の例) 4)に加筆

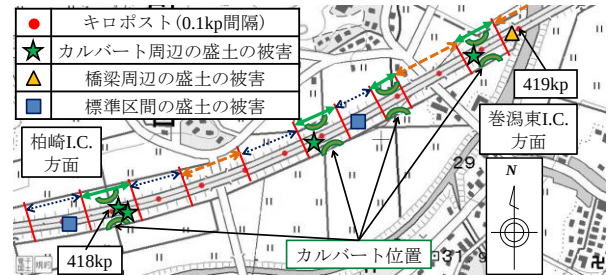


図-2 盛土の条件と被害分布 (一例) 4)に加筆

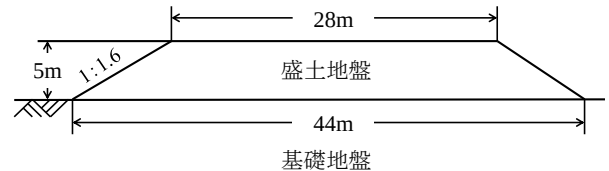


図-3 標準区間の平均断面

2. 被害事例に基づく被害率の評価

(1) 盛土の条件による被害の分類

本研究では、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）のデータを用いて研究を実施した。まず、上述の区間を対象に盛土の条件を確認し、分類した上で検討を行った。

ここで、盛土の条件とは、盛土の形状の他、カルバートや橋梁との近傍の程度を意味している。すなわち、報告されている被害の中には、盛土の沈下により生じたカルバートや橋梁の踏みかけ版との段差が含まれている。さらに、盛土と橋梁やカルバートの振動特性が異なることに起因した被害も含まれている可能性がある。そこで、これらの橋梁やカルバートの影響による被害と考えられ得る被害をまず抽出した。

a) 盛土の条件および被害程度の整理

本研究で対象とした区間は、水田上に建設されたと考えられる盛土が多く、ほぼ同一形状の盛土と判断できる区間が非常に長い。そこで、まず、山間部近傍の片盛土など形状が大きく異なると判断した区間を検討範囲から除外した。当然ながら、高架・橋梁等の盛土と異なる区間も除外している。残る区間は、平地にカルバートの設置を想定して盛られるような、「高さ5m程度で左右対称のほぼ同一形状の区間」であり、当該区域において標準的な形状とみなし得る両盛土の区間である。

そして、この区間に対して、構造物（カルバートおよび橋梁）の前後50m区間を、各構造物からの影響があったと考えられる区間と設定した。なお、トンネルも検討対象となる構造物に含むが、トンネル近傍ではそもそも盛土の形状が異なることが多く、本検討で対象となる地点があまりなかったため、以

下の検討から除外した。

ここで、構造物の影響があったと考えられる区間を50mとした理由は、特にはない。盛土高さが5m程度であることを考慮すると、高さと同程度の範囲として5m程度が妥当であるとも考えられるが、報告されている被害地点の精度が0.1km毎に設定されているキロポストであることから、被災地点の精度が低いものと考えられたこと、さらには、構造物に起因する被害を標準区間の被災データには含めなかったことから、かなり大きめの値として50mを採用した。

表-1に、盛土の条件の分類を示す。構造物に応じて、「～周辺の盛土」と分類した。そして、それらの区間を抽出した後に残った区間は、ほぼ類似した断面形状の盛土で構造物近傍でもない区間であることから、「標準区間の盛土」と設定した。図-1に、盛土の条件による分類の例を示す。

次に、報告されている被害の発生箇所と盛土の条件を対応付けた。図-2に、盛土の条件と被害の対応付けの例を示す。なお、被害は既往の研究³⁾で用いられているデータであり、表-2に示すように被害程度が分類されている³⁾。ここでは盛土部の被害に着目しているため、表-2に示されている各種被害のうち、路面段差、路面クラックおよび法面の被害を対象としている。また、以下の検討では、被害程度として、車両の走行に支障がある被害（被災ランク B 以上）および軽微な被害も含めた全被害（被災ランク D 以上）の2段階を対象とした。

なお、標準区間として想定される「高さ5m程度で左右対称のほぼ同一形状」の盛土においても、厳密には地点ごとに形状は若干ながら異なっている。実際に、4地点で概略の形状を計測すると、例えば高さでは4m～6mと幅がある結果となったが、平均的には図-3に示す断面が標準断面として想定されるものである。

表-2 被害程度の分類³⁾

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

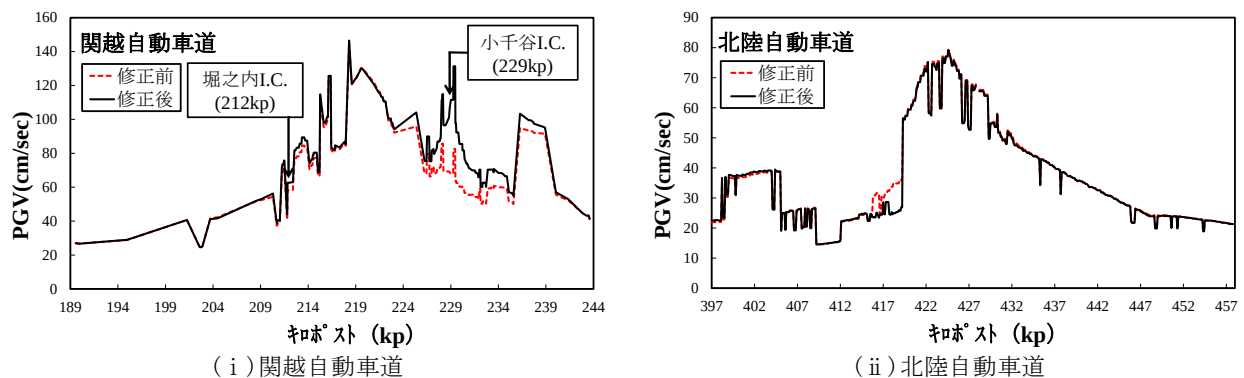
図-4 推定した地震動レベルの分布^{3), 5), 6)}

表-3 各 PGV レベルごとの被害件数

(I) カルバート周辺の盛土						(II) 橋梁周辺の盛土						(III) 標準区間の盛土					
PGV [cm/sec]	A	B	C	D	盛土延長 [km]	PGV [cm/sec]	A	B	C	D	盛土延長 [km]	PGV [cm/sec]	A	B	C	D	盛土延長 [km]
~30	0	4	2	1	10.3	~30	0	0	3	2	4.1	~30	0	1	1	0	2.0
30~40	0	0	0	0	6.5	30~40	0	0	0	0	1.8	30~40	0	0	0	0	5.2
40~50	0	0	0	0	3.8	40~50	0	0	3	0	1.4	40~50	0	2	2	0	1.7
50~60	0	2	4	0	3.4	50~60	0	0	0	0	1.4	50~60	0	0	0	1	1.6
60~70	0	5	23	4	2.5	60~70	0	0	0	0	0.6	60~70	0	3	33	6	2.5
70~80	0	1	15	0	2.5	70~80	0	2	9	0	0.4	70~80	1	2	18	0	2.9
80~100	0	5	42	2	2.7	80~100	0	1	23	0	0.9	80~100	0	7	19	1	1.4
100~140	0	2	19	0	1.4	100~140	0	1	6	0	0.6	100~140	0	2	4	0	0.6

b) 地震動強さと被害率[件/km]の評価

本研究では、地震動強さの指標として地表面における最大速度 (PGV[cm/sec]) を用いた。PGV を用いた理由は、すでに当該区域での PGV 分布が推定されている³⁾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したためである。ただし、適切な地震動指標の選定は今後の課題の一つである。

地震動の強さの分布は、既往の研究³⁾で評価されている PGV の分布を用いた。ただし、地震動が観測されていなかった小千谷 I.C. と堀之内 I.C. の地震動を、サイト位相特性を考慮したサイト特性置換手法を用いて推定^{5), 6)}し、図-4 に示すように PGV の分布を

修正したものを用いた。

表-3 に各 PGV レベルの区間ごとの被害件数を示す。地震動強さ PGV に関しては既往の研究³⁾を参考に、30cm/sec 未満、30cm/sec 以上 40cm/sec 未満、以降 10cm/sec 刻みで、80cm/sec 以降はデータ数自体が少ないことを考慮して、80cm/sec 以上 100cm/sec 未満、100cm/sec 以上 140cm/sec 未満の計 8 段階に分類した。

なお、カルバート周辺および橋梁周辺では、各構造物の前後 50m を影響範囲としたため、各構造物一箇所あたりの盛土延長が 100m である。また、標準区間の盛土延長は、抽出した盛土から上記のカルバート周辺および橋梁周辺の盛土延長を差し引いたも

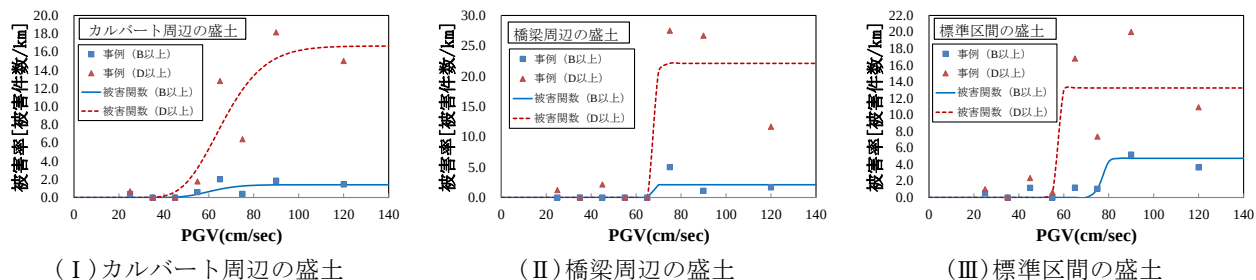


図-5 PGV と被害率[件/km]の関係

表-4 被害関数の係数の一覧

(I)カルバート周辺の盛土				(II)橋梁周辺の盛土				(III)標準区間の盛土			
被害関数の係数	ζ	λ	C	被害関数の係数	ζ	λ	C	被害関数の係数	ζ	λ	C
被災ランク B 以上	0.16	4.11	1.40	被災ランク B 以上	0.01	4.21	2.11	被災ランク B 以上	0.03	4.34	1.40
被災ランク D 以上	0.22	4.20	16.65	被災ランク D 以上	0.01	4.23	22.11	被災ランク D 以上	0.02	4.05	14.24

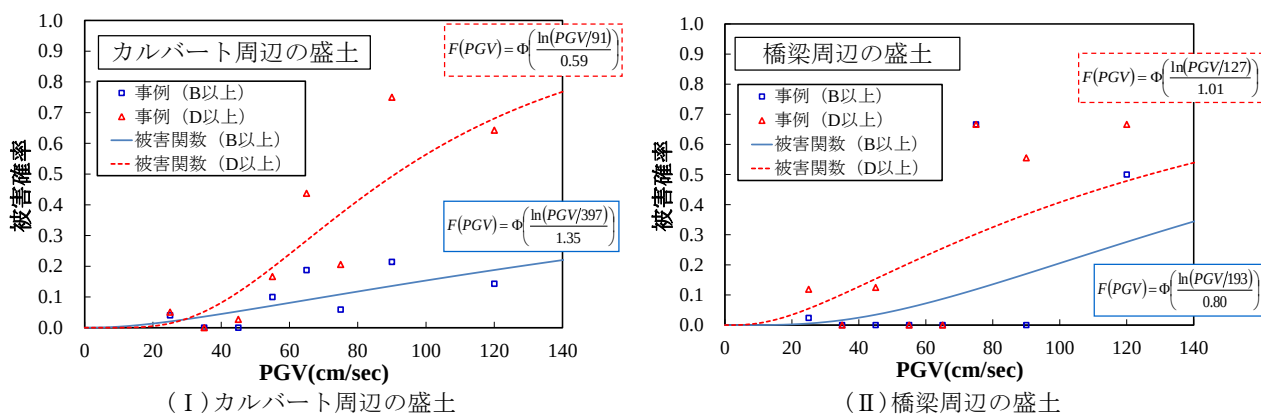


図-6 PGV と被害確率の関係

のである。

次に、表-3のデータをもとに被害率[件/km]を、各被害件数を各PGVレベルの盛土延長で除すことにより算出した。図-5にPGVと被害率[件/km]の関係をそれぞれ示す。

(2) 被害関数の構築

次に、高速道路盛土の被害関数の構築を行った。式(1)に被害関数として仮定した式を示す。よく用いられる被害確率の式(2)^{例え、7)}に倍率 C [件/km]を乗じた式であり、既往の研究³⁾と同じ式および算定方法である。

$$P = C\Phi((\ln PGV - \lambda)/\zeta) \quad (1)$$

$$P = \Phi((\ln PGV - \lambda)/\zeta) \quad (2)$$

ここで、 $\Phi(x)$ は標準正規分布の確率分布関数、 C 、 λ 、 ζ は式(3)の誤差関数 ε を最小化することにより得られる係数である。

$$\varepsilon = \sum (P_R - P)^2 w \quad (3)$$

また、ここで P_R は実被害データ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。

図-5 には、構築した被害関数もあわせて示しており、表-4 にそのパラメーターの一覧を示す。図-5 に示すように、カルバート周辺の被害率[件/km]は、被災ランク B 以上で 1.4 件/km、被災ランク D 以上で 16.6 件/km で頭打ちとなっている。また、

橋梁周辺の被害率[件/km]は、被災ランク B 以上で 2.1 件/km、被災ランク D 以上で 22.1 件/km で頭打ちとなっている。そして、標準区間の被害率[件/km]は、被災ランク B 以上で 4.7 件/km、被災ランク D 以上で 14.2 件/km で頭打ちとなっている。しかし、これらの km あたりの被害件数の上限値に意味があるかどうかは定かではない。この点は今後の議論の対象であるが、表-2 に示した被害分類において、道路延長方向の被害の範囲（被害延長）に関する情報が無い場合、明確な議論は困難である。復旧作業量との関係が深いと思われる被害面積等を考慮した被害分類データが今後の議論には必要である。

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[件/km]が増加し始める PGV は、カルバート周辺の盛土では約 50cm/sec 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。これは、盛土部の被害の発生の有無に構造物ごとに異なる影響が存在し、カルバート周辺は被害が発生しやすいことを意味していると解釈できる。

(3) 構造物ごとの被害確率の評価

対象区間におけるカルバートと橋梁の数がわかっていることから、カルバートと橋梁のそれぞれについて、施設一箇所当たりの被害確率を評価した。具体的には、カルバートおよび橋梁一箇所ごとに対して前後 50m 区間において、被災、無被災の判別を行った。そして、各 PGV レベルにおける被災数をカルバートおよび橋梁の総数で除した。

図-6 に評価結果と被害関数をそれぞれ示す。カルバートや橋梁を個別に考慮できるため、実際の被害予測においても、こちらの関数を用いる方が現実的であると考えられる。

3. 標準区間の盛土の被害関数の応用

本研究の大きな特長は、実際に観測された被害率においてカルバートや橋梁等の構造物の影響を明らかにしたほか、「高さ 5m 程度で左右対称のほぼ同一形状」の盛土（標準区間の盛土）に対して、被害関数を設定した点である。すなわち、道路盛土の形状（高さや幅）、地盤の物性は地点毎に異なり、これらの条件の違いを適切に考慮することは容易ではない、という既往の研究の課題が、標準区間の盛土の条件との差異を適切に評価することにより、解決できる可能性がある点である。具体的には次のような方法が考えられる。

- 1) FEM やニューマーク法、円弧すべり法などの各種の方法によって、標準断面の被災確率（あるいは安全率）を評価する。一方で、盛土形状や物性値が異なる種々の盛土に対しても同様の手法で被災確率（あるいは安全率）を評価する。そして、評価された被災確率（あるいは安全率）の比を、本研究で算定した被災確率に乗じることで、各種構造物の被災

確率を推定することができる。

- 2) FEM やニューマーク法、円弧すべり法などの各種の方法によって、標準断面の被災確率（あるいは安全率）を評価する。被災予測において単位長さ（1km）あたりに想定すべき（仮想的な）断面数に被災確率を乗じたものが、（被災確率が正しく、各被災が独立であるとするならば）観測された単位長さ（1km）あたりの被害数に相当する。したがって、観測された単位長さ（1km）あたりの被害数を被災確率で除せば、単位長さ（1km）あたりに想定すべき（仮想的な）断面数がわかる。つまり、仮想的な断面を設定すべき間隔がわかるので、一定間隔ごとの盛土の条件の変化に応じて、考慮すべき断面を設定し、それぞれの断面の被災確率が独立であると仮定して、被災予測を行うことができる。

上記のうち、1) は比較的わかりやすい。ただし、各手法の妥当性の評価に課題がある。また、それぞれの手法で評価した被災確率や安全率を、そのまま被災事例から推定した被災確率に乗じてよいのかは、検討が必要である。一方、2) はわかりにくい。また、被災数と実際の被災の大きさとの関係が不明瞭なため、やや怪しさが残る。ちなみに筆者らは、既に 2) の手法に関して試算結果を論文投稿したが、査読者らにより種々の指摘をいただき、現在再検討中である。

しかし、種々の断面形状に対する被災確率の評価は、いずれ確立しなければならない課題である。議論はあるものの、上記のように、本研究で設定した標準区間の盛土の被害関数は、今後の検討の土台になり得るものであると思われる。

4. 結論

本研究では、まず、既存の高速道路の被災事例を構造条件によって分類した。そして、構造条件ごとの被害率[件/km]および被害確率の算出を行った。得られた結論を下記に示す。

- 1) カルバートや橋梁近傍について、構造物の影響を考慮した被害確率の評価式（被害確率と PGV の関係）を提案した。検討結果により、被害確率に対する構造物の影響を明らかにした。
- 2) 構造物の影響を受けない平均的な盛土断面についても、被害関数（被害率[件/km]と PGV の関数式）を提案した。この検討結果は、今後の検討等の対象となる、形状や物性値が異なる各種の条件下の盛土の被害予測法の検討の土台になることが期待できる。

なお、今後の課題として、本研究で提案した被害関数は、新潟県中越地震における実被害に基づく被害関数であるため、他の地震被害事例等につい

てもデータを蓄積し、検討を行っていく必要性があると考えられる。

謝辞：本研究は、土木学会・地震工学委員会・道路盛土のリスク評価に関する委員会・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) 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, No.9, CD-ROM, 9p, 2005.
- 2) 久世益充，杉田真太，谷嶋厚，三山敬，櫛田末治，近藤功規：2004年新潟県中越地震の被災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，III-370, pp.735-736, 2006.
- 3) 丸山喜久，山崎文雄，用害比呂之，土屋良久：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.
- 4) 国土地理院ホームページ：地図閲覧サービス（ウォッチず），<http://watchizu.gsi.go.jp/>（参照日2010年10月1日）。
- 5) 福島康宏ら：personal communication，（未発表データ）。
- 6) 秦吉弥，一井康二，丸山喜久，福島康宏，酒井久和，中村晋：位相を考慮したサイト特性置換手法の震源近傍地点での適用－2004年新潟県中越地震における検討－，構造工学論文集，土木学会，Vol.57A, pp.340-353, 2011.
- 7) 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－経験と予測－，pp.15-20, 1998.

A study on the damage evaluation of expressway embankment

Yohei MURAKAMI, Koji ICHII, Yoshihisa MARUYAMA, Yoshiya HATA
and Yasuhiro FUKUSHIMA

It is necessary to have an adequate fragilities curves for highway embankments, with which we can consider the differences in the conditions of embankments. In this study, the case damage histories in the Kan-estu and Hokuriku Expressway in the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake were classified based on the conditions of embankments. Based on the classified data, the relationships between the level of seismic ground motion and damage ratio were investigated with the considerations in the difference of the conditions. And, the fragility curve for a standard section of expressway embankments was proposed.