

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、盛土などの人工地盤において地震時の災害が数多く発生している。そして、盛土地盤の変状は、盛土上にある道路、鉄道、住宅、施設などの社会基盤に直接的な被害を与える。特に、高速道路のような構造物では、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、高速道路の通行機能の不全に陥った。防災上の観点から、上述のような被害を防止するための被害予測が必要である。

しかし、地震時の被害予測を行う際、高速道路のように同様の構造物が長く続く場合では、解析断面の適切な設定間隔は定量的に議論されておらず、課題となる。

そこで、本研究では、実被害事例から算出される被害率[件/km]と解析により求まる被害確率の整合性の検討を行い、被害予測における解析断面の設定間隔を提案する。

2. 構造条件および被害の整理

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構造条件を確認し、分類した上で検討を行った。

構造条件による分類は、以下に示すような考察に基づいている。まず、対象区間にはカルバートが多いが、一般に、カルバートのある地点では周辺盛土との不同沈下にもなる路面段差が生じることが多い。また、橋梁も多く存在しているが、ここでも取付け部との間に段差が生じることが多い。これらのことから、盛土部の被害の中には、構造物の影響によって生じたものが含まれていると考えられる。

一方で、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、高架等の盛土以外のところに加えて、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。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(標準的な形状の両盛土の区間)である。そして、この区間に対して、カルバート、橋梁およびトンネルといった構造物の前後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、表-1に示すような構造条件で「～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り、「標準区間の盛土」と設定した。

表-1 構造条件の分類

(I)	カルバート周辺の盛土	*標準区間は、この地域において最も多い平地に、高さ5m程度の盛土が構築されていると定義する。
(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	

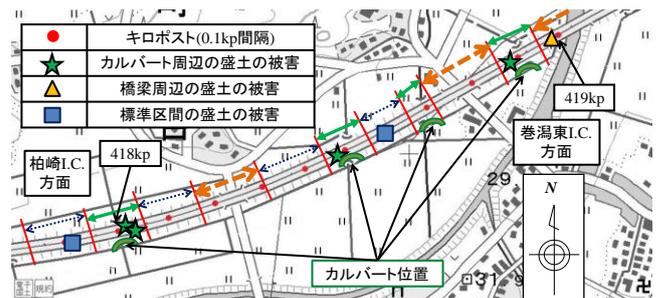


図-1 被害の分布(一例)

次に、各被害の生じた地点がどの区間に属するかを整理し、区間分類と被害分布を対応付けた。図-1に、構造条件による区間分類と被害分布の対応付けの例を示す。なお、被害は既往の研究<sup>1)</sup>に示されているデータであり、被害程度が分類されている。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。

### 3. 地震動強さと被害率[件/km]の評価

#### 3.1 構造物ごとの被害率[件/km]の評価

まず、地震動強さ PGV に関して既往の研究<sup>1)</sup>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。この際、カルバート周辺および橋梁周辺の盛土の盛土延長は、各構造物の前後 50m を影響範囲としたため、各構造物 1 箇所あたりの盛土延長が 100m として計算している。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のである。また、トンネル周辺の被害に関しては区間の延長が短いことやデータ数が少ないことから今回は除外した。

そして、被害率[件/km]は各被害件数を各 PGV レベルの盛土延長で除すことにより算出した。図-2 に PGV と被害率[件/km]の関係をそれぞれ示す。

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)<sup>例えば、2)</sup>に倍率  $C$  [件/km] を乗じた式であり、既往の研究<sup>1)</sup>と同じ式および算定方法である。

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

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

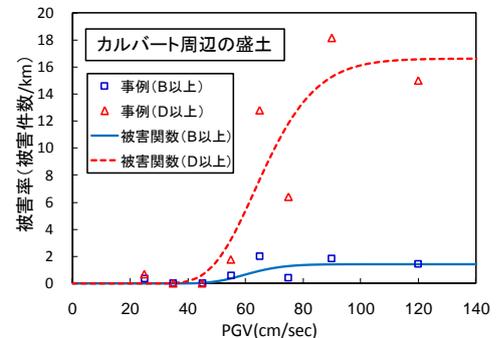
ここで、 $\Phi(x)$  は標準正規分布の確率分布関数、 $C$ 、 $\lambda$ 、 $\zeta$  は式(3)の誤差関数  $\varepsilon$  を最小化することにより得られる係数である。

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

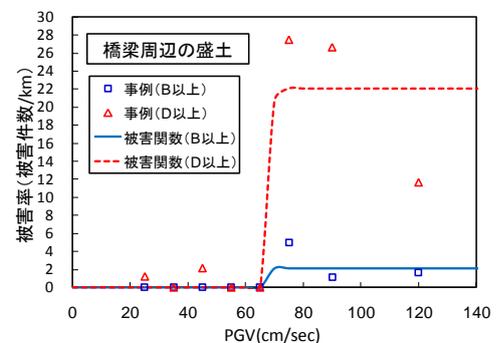
また、ここで  $P_R$  は実被害データから求められる被害率[件/km]、 $w$  は盛土延長である。式(3)は、盛土延長による重みつき最小二乗法によって係数を求めたことに相当する。これは PGV の小さな区間の被害数に対して、盛土延長が大きいことを考慮するためである。

図-2 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。

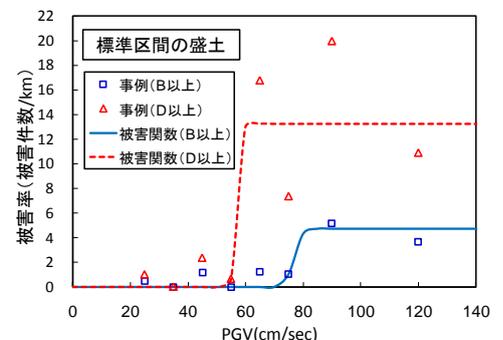
また、車両の走行に支障のある被災ランク B 以上において、被害率[件/km]が増加し始める PGV は、カルバート周辺の盛土では約 50cm/sec である。また、橋梁周辺の盛土では約 65cm/sec である。そして、標準区間の盛土で



(a) カルバート周辺の盛土



(b) 橋梁周辺の盛土



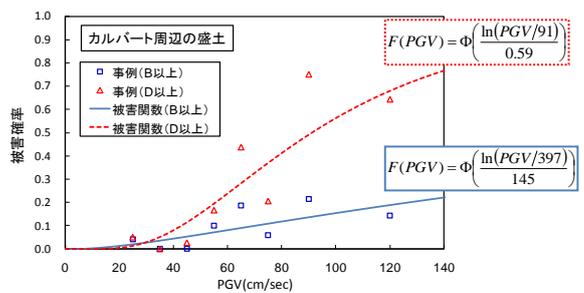
(c) 標準区間の盛土

図-2 PGV と被害率[件/km]の関係

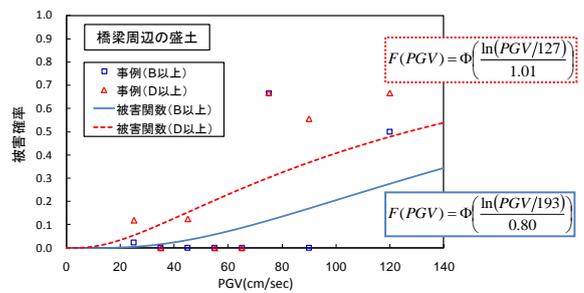
は約 70cm/sec である。これは、盛土部の被害に構造物ごとの影響があり、カルバート周辺は被害が発生しやすいことを意味していると解釈できる。

### 3.2 構造物ごとの被害確率の評価

次に、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、施設一つ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 1 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-3 に評価結果と被害関数をそれぞれ示す。実際の被害予測では、こちらの関数を用いる方が現実的である。ただし、カルバート等が存在しない区間では、解析断面の設定間隔が課題となる。



(a)カルバート周辺の盛土



(b)橋梁周辺の盛土

図-3 PGV と被害確率の関係

### 4. 数値解析による被害確率の検討

次に、標準的な断面に対して、山下ら<sup>3)</sup>の方法により変形量を求め、被害確率を求めた。以下に、解析条件を示す。

図-4 に、標準区間の盛土の断面形状を示す。しかし、左右対称であることから、片側の形状のみを取り出している。考え方次第では、被災確率を 2 倍として検討した方が適切かもしれないが、今後の課題である。



図-4 断面形状

図-5 に入力地震動を示す。図-5 に示す入力地震動は、小千谷 I.C.における推定地震動である。この地震動は、PGV が大きく（水平 2 成分合成値：116cm/sec）、図-2 に示す被害関数において、被害率が頭打ちとなるレベルに相当している。

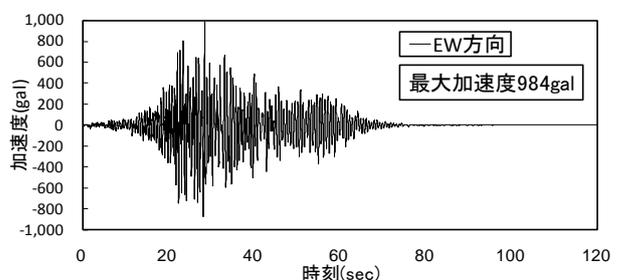


図-5 入力地震動

表-2 に材料特性の一覧を示す。表-2 に示す材料特性は、盛土部は砂質土、また基礎地盤は対象とした区間周辺に農用地などが多く存在していたことより粘性土として、盛土工指針<sup>4)</sup>に基づいて設定した。また、粘着力  $c$  および内部摩擦角の正接  $\tan \phi$  の変動係数を 0.3、その相関係数を -0.05 とした<sup>5)</sup>。この変動係数および相関係数は、空港の高盛土などの調査結果で得られている値であり、一般的な値と考えられる。

表-2 材料特性の一覧<sup>4),5)</sup>

材料特性	盛土地盤	基礎地盤	変動係数	相関係数 (C と $\tan \phi$ )
C [kPa]	30	30	0.3	-0.05
$\phi$ [deg.]	25	20	0.3	
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	19	19		

各被災ランクに対応するすべり変位量の指標を、被災ランク B 以上（車両の走行に支障のある被害）では 20cm 以上、被災ランク D 以上（軽微な被害も含めた全被害）では 1cm 以上と設定した。これらの変位量の指標の設定は難しく、議論がある点であるが、鉄道盛土の耐震設計<sup>6)</sup>においては応急処置で復旧が可能な場合における沈下量の目安が 20cm 以上に設定されていることを参考とした。

図-6 にモンテカルロシミュレーションの試行回数 5000 回におけるすべり変位量の分布を示す。5000 回の試行回数で解析は十分に収束しており、被害確率は、被災ランク B 以上が約 0.155、被災ランク D 以上が約 0.715 であ

るといえる。

図-2(c)に示した被害関数において、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。そして、解析で用いた小千谷 IC の地震動 (図-5) は、この頭打ちとなっているレベルに相当する。

そして、解析による検討では、盛土の被災が被災ランク B 以上である被害率は 15.5%、また被災ランク D 以上である被害率は 71.5%という結果であった。すなわち、同様の条件で 100 断面がある場合、被災ランク B 以上の被災には 15.5 断面が該当、被災ランク D 以上の被災では 71.5 断面が該当していることになる。

ここで、1 断面に対する被災の判定が、1 件の実被害に相当すると仮定する。また、それぞれの解析断面における被災が他の断面に対して独立であると仮定する。このとき、被災ランク B 以上については、 $4.7/0.155=30.3\approx 30$  断面/km、被災ランク D 以上では、 $13.2/0.715=18.4\approx 18$  断面/km の検討を、各断面について独立に検討していたとき、両者が整合することになる。誤差を考えると、1km の区間を概ね 20~30 断面に分割して検討するとき両者が整合しているといえる。

つまり、被災予測を実施する際に、それぞれの解析断面の被災の有無を独立に判定するとして、1km の区間をおよそ 20~30 断面に分割して検討すると、全体での予測被害件数が実態に近くなると推定される。

## 5. まとめ

本研究では、まず、既存の高速道路の被害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。また、実被害事例から算出される被害率[件/km]と解析により求まる被害確率の整合性を検討した。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。また、構造物の影響を受けない平均的な断面についても、被害関数 (被害率[件/km]と PGV の関係式) を提案した。
- 2) 実被害事例から算出された被害率[件/km]と、解析的に求めた被害確率の整合性を検討したところ、対象とした新潟県中越地震における小千谷 I.C.の推定地震動が、全域に作用したと仮定した場合であるが、1km あたり 20~30 断面を独立に検討することが妥当である結果となった。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 山下典彦・竹内健造・秦吉弥：地盤強度の不均質性が地震時における盛土のすべり変位量に与える影響，第 49 回地盤工学シンポジウム論文集，地盤工学会，pp.415-422, 2004.
- 4) (社)日本道路協会：道路土工—盛土工指針，pp.92-127, 2010.
- 5) 秦吉弥・一井康二・加納誠二・土田孝：現場データに基づく空港盛土の地盤強度の不均質性に関する一考察，地盤と建設，地盤工学会，Vol.26, No.1, pp.15-22, 2008.
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，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.213-214, 2007.

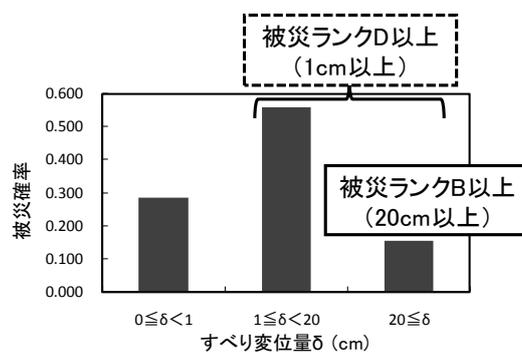


図-6 すべり変位量の分布 (試行回数 5000 回)