

# フラジリティカーブに基づく 河川堤防の地震時被災確率に関する基礎的研究

秦 吉弥<sup>1</sup>・静間俊郎<sup>2</sup>・酒井久和<sup>3</sup>・一井康二<sup>4</sup>・丸山喜久<sup>5</sup>・村上陽平<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)  
E-mail: hata-ys@n-koei.jp

<sup>2</sup>正会員 株式会社篠塚研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-5-1幸伸ビル3F)  
E-mail: shizuma@shinozokaken.co.jp

<sup>3</sup>正会員 広島工業大学 工学部建築工学科 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅2-1-1)  
E-mail: h-sakai@cc.it-hiroshima.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 広島大学大学院 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)  
E-mail: ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 千葉大学大学院 工学研究科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

<sup>6</sup>学生会員 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: m113195@hiroshima-u.ac.jp

鳴瀬川堤防では、既往の大規模地震(1978年宮城県沖地震, 2003年宮城県北部の地震, 2011年東北地方太平洋沖地震)において被害を繰り返している。そこで本研究では、著者らによって推定された鳴瀬川堤防沿いのサイト特性を考慮した推定地震動の分布に基づいて、被害実績と推定地震動の指標値との関係について統計的な分析を行うことで、河川堤防の被害関数となるフラジリティカーブを構築した。その結果、地震タイプに関係なくフラジリティカーブは利活用でき、修正計測震度およびSI値などが実被害と良い適合度を示した。また、河川堤防での車両の走行に支障のある被害を生じ始めるのは、SI値で20cm/s程度、気象庁計測震度で5.0~5.1程度となった。

**Key Words :** river dike, strong motion, seismic damage, fragility curve, robust indices

## 1. はじめに

我が国の河川堤防では、大規模地震において被害がしばしば発生している。例えば、1964年新潟地震では阿賀野川堤防・信濃川堤防<sup>1)</sup>、1978年宮城県沖地震では鳴瀬川堤防・吉田川堤防・江合川堤防<sup>2)</sup>、1983年日本海中部地震では八郎潟堤防<sup>3)</sup>、1993年釧路沖地震では釧路川堤防・十勝川堤防<sup>4)</sup>、1993年北海道南西沖地震では後志利別川堤防<sup>5)</sup>、1995年兵庫県南部地震では淀川西島堤防・武庫川堤防<sup>6)</sup>、2000年鳥取県西部地震では弓浜堤防・荒島堤防<sup>7)</sup>、2003年宮城県北部の地震では鳴瀬川堤防<sup>8)</sup>、2003年十勝沖地震では十勝川堤防<sup>9)</sup>、2004年新潟県中越地震および2007年新潟県中越沖地震では信濃川堤防<sup>10,11)</sup>、2011年東北地方太平洋沖地震では、鳴瀬川堤防・吉田川堤防・江合川堤防・阿武隈川堤防・利根川堤防<sup>12)</sup>においてそれぞれ甚大な被害が報告されている。

その中でも鳴瀬川堤防は、既往の大規模地震において被害を繰り返しているだけでなく、対象地震のタイプも、

(i)海溝型(プレート境界型)地震(1978年宮城県沖地震および2011年東北地方太平洋沖地震)と、(ii)内陸地殻内地震(2003年宮城県北部の地震)で異なっている。そのため近年、鳴瀬川堤防を対象にした様々な調査・研究<sup>13)</sup>が盛んに行われている。しかしながら、当該地点における地震動は十分に明らかになっていないことを踏まえて、著者ら<sup>14)</sup>は、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法を用いて、1978年宮城県沖地震、2003年宮城県北部の地震、2011年東北地方太平洋沖地震における鳴瀬川堤防沿い(左岸・右岸の11k~31k)での地震動を推定している。

一方で、河川堤防の堤体は、道路盛土などと同様に、道路ネットワークを構成する線状の土構造物としての機能も有しており、上述した大規模地震による被害堤防においてもその一定区間は国道・県道などとして供されている。地震被害地域の復旧・復興において、道路が重要な役割を担っていることは言うまでもなく、上述のような被害を防止するために、地震被害予測に基づいた対策

を講じていくことが必要不可欠である。

道路盛土では、既往の大規模地震による道路盛土の被害データに基づく地震動強さとの関係などについて既に様々な研究が行われている。常田ら<sup>15)</sup>は、2004年新潟県中越地震における震度階級と道路施設被害状況を関連付けている。久世ら<sup>16)</sup>は、2004年新潟県中越地震における高速道路盛土の被害と計測震度の関係性を評価し、脆弱性カーブ(被害関数)の構築・提案を行っている。丸山ら<sup>17),18)</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最大速度PGVの推定値との関係性を評価し、脆弱性カーブ(被害関数)の構築・提案を行っている。秦ら<sup>19)</sup>は、2007年能登半島地震による能登有料道路の被害・無被害地点での地震動を地震観測記録や常時微動計測結果に基づいて推定し、被害分析への応用イメージとして脆弱性カーブの検討を行っている。酒井ら<sup>20)</sup>は、2004年新潟県中越地震における被害域のサイトの地震動強さを震源断層モデルを用いた強震動評価に基づいて算定し、国道以外に市町村道、主要地方道、一般県道路の被害についても、気象庁の計測震度と強震動評価による地震動強さとの比較検討を行っている。村上ら<sup>21),22),23)</sup>は、丸山らの研究成果<sup>17),18)</sup>に対して推定地震動の高精度化や盛土の構造条件などを考慮することで、新たな脆弱性カーブの提案を行っている。

河川堤防では、洪水等の浸透問題に対する脆弱性カーブ導出のためのフレームワーク<sup>24)</sup>が近年提案されている。大規模地震に対しては、1978年宮城県沖地震などにおける震度階級に対する河川堤防の被害実績を関連付けた報告<sup>25)</sup>がなされている。しかしながら、大規模地震による河川堤防の被害に関する脆弱性カーブの構築は行われていないのが現状である。

以上の背景を踏まえ本研究では、鳴瀬川堤防(左岸ならびに右岸の11k~31k)を検討対象とし(以後、対象区間と呼ぶ)、1978年宮城県沖地震、2003年宮城県北部の地震、2011年東北地方太平洋沖地震における対象区間内での推定地震動を被害実績との関係について基礎的な検討を行うことで、河川堤防の地震被害に関する脆弱性カーブの提案を行った。なお、本研究は、(公社)土木学会地震工学委員会による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委員会(委員長:澤田純男・多々納裕一(京都大学防災研究所教授))での委員会活動の一環として実施したものである。

## 2. 統計的評価

河川構造物などの盛土構造物は、地震動特性に依存し

た固有の挙動を示し、その評価は地震動の推定誤差を含め様々な不確定性を伴う。一方で、性能においても地盤強度のばらつき、築堤履歴・基礎地盤の違いなどから、確定的に示すことはできないのが実情である。信頼性理論では、挙動および性能ともに地震動の大きさを指標とした確率変数とし、挙動が性能を超える確率として構造物の脆弱性を記述している。前章で述べた脆弱性カーブ(以後、FCと呼ぶ)は、地震動の大きさを条件とした損傷確率を与える一価関数であり、上記の考えに基づいて評価される。本章では、統計的なFCの評価方法<sup>26)</sup>について概説する。

### (1) 被害確率の評価

河川堤防の地震時挙動(応答) $R$ および性能(耐力) $C$ ともに対数正規分布を仮定し、 $R(r_m, \zeta_r)$  および  $C(c_m, \zeta_c)$  とそれぞれ定義する。ここに、 $r_m$ および $c_m$ は中央値、 $\zeta_r$ および $\zeta_c$ は対数標準偏差である。被害確率 $P$ は挙動が性能を超える確率として次式のように定義される。

$$P_f = P(C < R) = P(X < 1.0) \quad (1)$$

ここに、 $X$ は $C/R$ である。双方が互いに独立であるとすると、 $X$ についても同様に対数正規分布となる。そして、 $Z = X \cdot r_m$ による変数変換を行い、0から $r_m$ までの積分を実行すると、地震動による挙動の中央値 $r_m$ による条件付き損傷確率が次式のように求められる。

$$F_z(r_m) = \int_0^{r_m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \ln c_m}{\zeta}\right)^2\right] dz \quad (2)$$

ここに、対数標準偏差 $\zeta$ は、以下のように表わされる。

$$\zeta = \sqrt{\zeta_r^2 + \zeta_c^2} \quad (3)$$

FCは、 $r_m$ を条件とした一価関数として、(2)式から容易に求めることが可能である。挙動と性能の確率分布パラメータは計4つであるが、FCを得るためには挙動の中央値以外は既知として与えなければならない。本検討では、挙動と性能の変動係数から得られる対数標準偏差 $\zeta$ 、ならびに性能の中央値 $c_m$ を河川堤防の地震被害実績(4.参照)から統計的に推定することを目指す。

### (2) 統計解析

確率分布のパラメータ推定手法の一つである最尤法を採用する。尤度関数は次のように表現できる。

$$L(r_{mi}) = \prod_{i=1}^n F_z(r_{mi})^{q_i} \cdot (1 - F_z(r_{mi}))^{1-q_i} \quad (4)$$

ここに、 $n$ はサンプル数、 $q_i$ は地震被害が生じていた場合は1、そうでない場合は0をとる二価関数である。 $c_m$ および $\zeta$ は、尤度を最大とする値として求められる。文

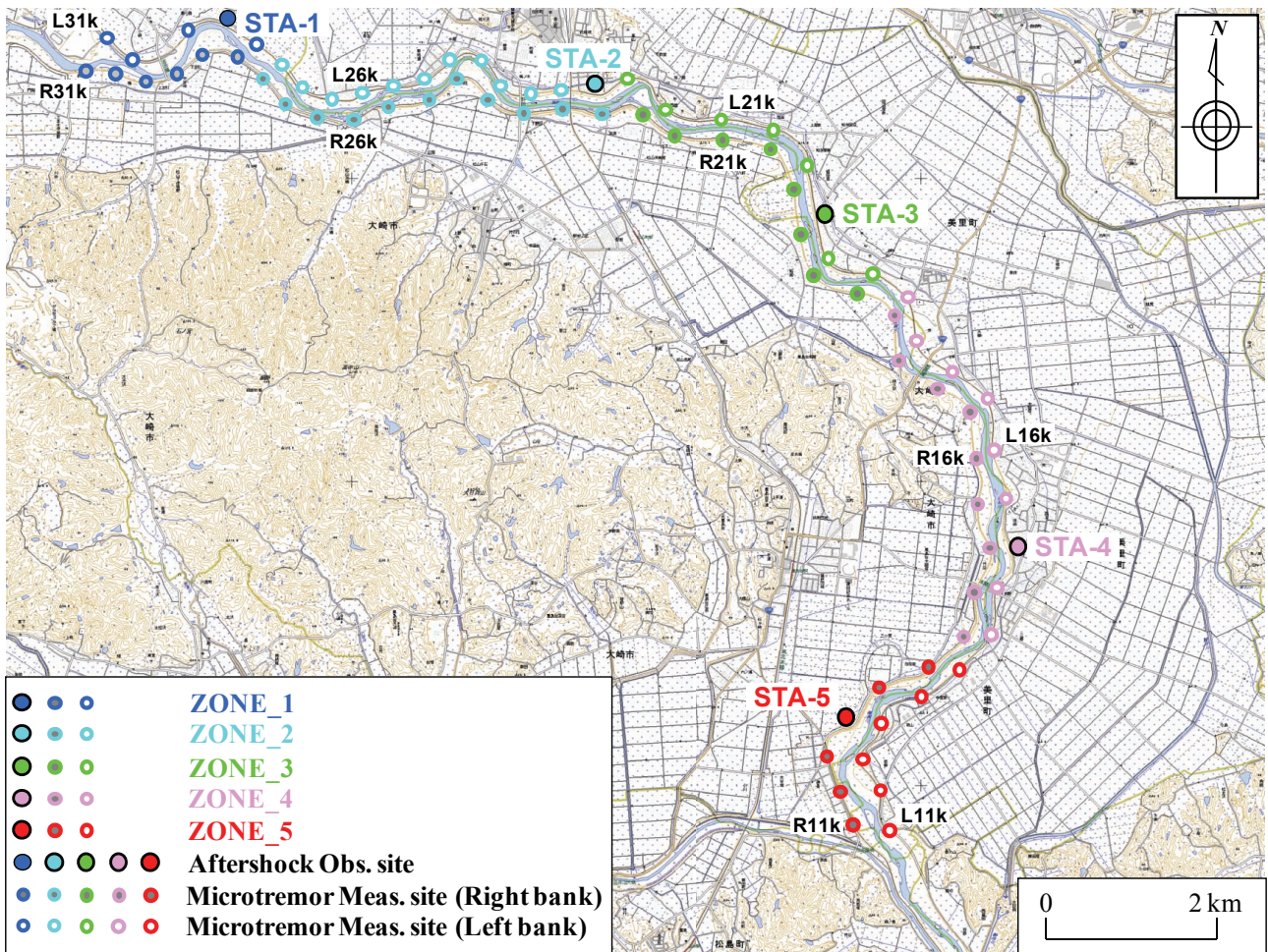


図-1 区間内における地震動推定地点（中小地震観測地点もしくは常時微動計測地点）の分布

献26)では、損傷に関与する様々な不確定性をすべてに  
取り込んだかたちで定式化を行っている。

### 3. 推定地震動とその評価指標

FCを構築・評価する上では、地震動と被害の関係を  
捉えることが重要である。そのため、対象3地震(1978年  
宮城県沖地震、2003年宮城県北部の地震、2011年東北地  
方太平洋沖地震)による対象地域内での詳細な地震動分  
布を予め推定しておく必要がある。

著者ら<sup>14)</sup>は、図-1に示す鳴瀬川堤防の対象区間(左岸・  
右岸の11k～31k)において、経験的サイト増幅・位相特  
性を考慮した地震動の推定手法を適用し、既往の大規模  
地震(1978年宮城県沖地震、2003年宮城県北部の地震、  
2011年東北地方太平洋沖地震)において被災した鳴瀬川  
堤防に適用している。具体的には、図-1に示すように対  
象区間内において中小地震観測や常時微動計測などを実  
施し、得られた記録に基づいて鳴瀬川堤防の個別地点  
(左岸・右岸で計80地点)におけるサイト特性をそれぞれ

評価し、特性化震源モデルを用いた強震波形計算を行う  
ことで地震動を推定している。本検討では、この地震動  
推定結果<sup>14)</sup>を利用する。

一方で、FCの構築においては、地震動指標として何  
が適切かが議論となる。本検討では上述したとおり、著  
者らによる地震動推定結果<sup>14)</sup>を利用することで、対象区  
間内の個別地点におけるサイト特性を考慮した推定地震  
波形が既に推定できている。よって、種々の指標を採用  
した場合のFCの構築に関する検討が実施可能である点  
が本検討の最大の強みである。そこで本検討では、以下  
に示す7つの地震動指標値を採用した。

- ・ 最大加速度PGA (堤体横断・縦断方向合成)
- ・ 最大速度PGV (堤体横断・縦断方向合成)
- ・ 気象庁計測震度<sup>27)</sup> (堤体横断・縦断方向合成)
- ・ 境ら<sup>28)</sup>の修正計測震度(堤体横断・縦断方向合成)
- ・ Housner<sup>29)</sup>によるSI値 (堤体横断面方向)
- ・ 野津・井合<sup>30)</sup>による速度PSI値 (堤体横断面方向)
- ・ 加速度パワー値<sup>31)</sup> (堤体横断面方向)

図-2～図-8には、上記の7指標値による対象区間内  
での推定地震動の分布を示す。図-2～図-8に示すように、

表-1 車両走行実験結果に基づく耐震性能の評価基準<sup>43)</sup>

ランク	被災直後における 常時の交通機能の確保の容易	被害の評価項目 (車道路面の段差高)
1	交通機能は確保される	段差規模が2~3cm以下
2	交通は低下するが、その確保は容易であり、比較的短時間で実施できる	段差規模が2~3cmを超えて、25cm以下
3	交通は低下し、その確保はやや困難であり、やや期間を要する	段差規模が25cmを超えて、50cm以下
4	通行機能が喪失し、その確保は困難であり、長期間を要する	段差規模が50cmを超える

1978年宮城県沖地震のケースでは主に12k付近、2003年宮城県北部の地震のケースでは主に20k付近、および2011年東北地方太平洋沖地震のケースでは主に16k付近において地震動指標の値が大きくなっており、さらに地震動指標値の大きい区間は対象3地震ごとにまちまちとなっていることが読み取れる。

#### 4. 被害実績の整理

本検討では、対象区間内での対象3地震(1978年宮城県沖地震、2003年宮城県北部の地震、2011年東北地方太平洋沖地震)における河川堤防の被害実績に関する既存資料<sup>2)8),12),32)42)</sup>(一般公開資料、国土交通省東北地方整備局からの提供資料など)に基づいて被害実績の有無について整理を行った。なお、対象区間内(左岸・右岸の11k~31k)は、図-2~図-8で示したとおり、推定地震動による指標値のレンジが比較的幅広く散布しており、FC構築のための統計情報(ここでは被害実績の有無)の整理に適した区間であるといえる。

被害実績の有無の整理(判断)は、道路ネットワークに主眼をおいた河川堤防のFCの構築を目指していることを考慮し、鳴瀬川堤防の縦断測量の結果に基づく対象3地震の発生前後の標高差(沈下量)と、常田・小田<sup>43)</sup>による車両走行実験結果に基づく耐震性能の評価基準例(表-1参照)を比較することによって実施した。具体的には、耐震性能ランク3(応急復旧はやや時間を要し、また規制速度下の通行機能の確保も困難であるため通行止めが必要となるランク<sup>43)</sup>)の中間値である37.5cm(表-1参照)を判断基準値として、堤体天端の沈下量が37.5cm以上であれば被害有、37.5cm未満であれば被害無と地震動評価地点(左岸・右岸で計80地点：図-1参照)ごとにそれぞれ判断した。ここに、1978年宮城県沖地震による被害実績では、対象区間内の全てにおいて縦断測量に基づく沈下量が得られていないため、既存資料<sup>2)32)35)</sup>等で報告されている被害区間を追加した。また、2003年宮城県北

部の地震および2011年東北地方太平洋沖地震による被害実績では、著者らによる地震直後の現地調査結果と上記の判断基準による結果に矛盾がないことを確認した。

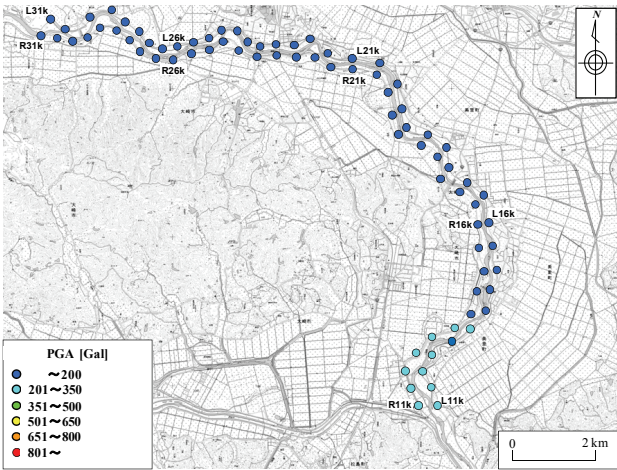
図-9には、2.(2)で述べた二価関数を用いて整理した対象3地震による対象区間内での地震被害実績の分布を示す。ここに、堤体天端の沈下量が37.5cm以上の場合は1、沈下量が37.5cm未満の場合は0となる。図-9に示すとおり、2011年東北地方太平洋沖地震では対象区間のほぼ全域にわたって1.0(被害有)と判断されているのに対し、1978年宮城県沖地震および2003年宮城県北部の地震では1.0(被害有)の範囲が局所的である。すなわち、3.で述べた地震動指標値の分布(図-2~図-8参照)と同様に、被害実績の分布(図-9参照)についても、対象3地震ごとに大きく異なっていることが読み取れる。

#### 5. フラジリティカーブの評価ならびに考察

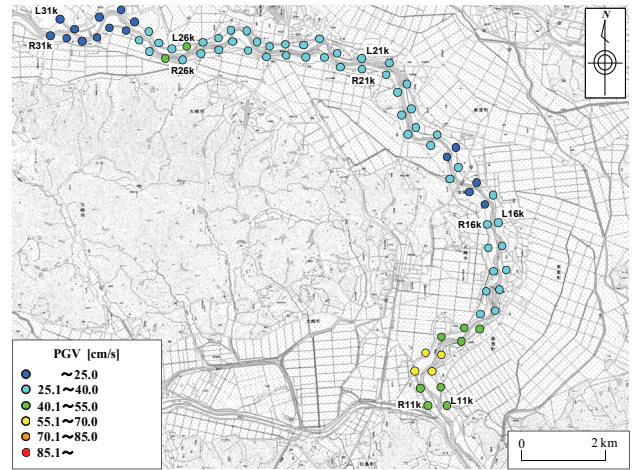
本章では、7種類の地震動指標値(3.参照)と、二価関数を用いた被害実績(4.参照)の関係についてFCを構築した結果について述べ、その結果に対して考察を行う。

##### (1) フラジリティカーブの適用性確認

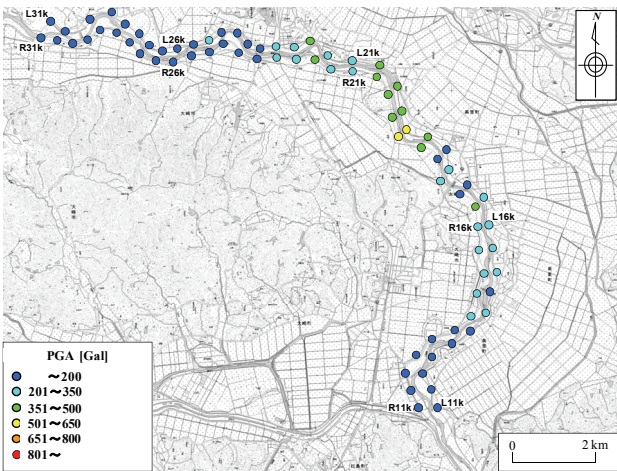
図-10は、FCの構築に先立ち計算した被害率<sup>44)</sup>の分布を各地震動指標値についてプロットしたものである。ここに、被害率は、以下に示す手順で計算した。まず、被害実績の有無(0または1)と各地震動指標のデータ(データ数は80(各対象地震)もしくは240(全3地震)となる)を地震動指標の小さい順に並び替え、次に、並び替えたデータを小さい順に順次20データずつ取っていき、20データごとに被害率(被害堤防数/全堤防数(=20))ならびに対応する地震動指標の平均値を算出した。すなわち、被害率のデータは、4つ(各対象地震)もしくは12つ(全3地震)作成されることになり、1つあたりの被害率に20つ(各対象地震と全3地震のケースで共通)の堤防データが含まれていることになる。



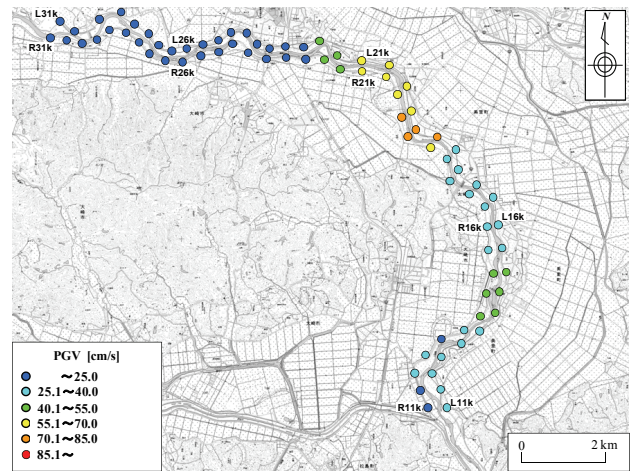
(a) 1978年宮城県沖地震



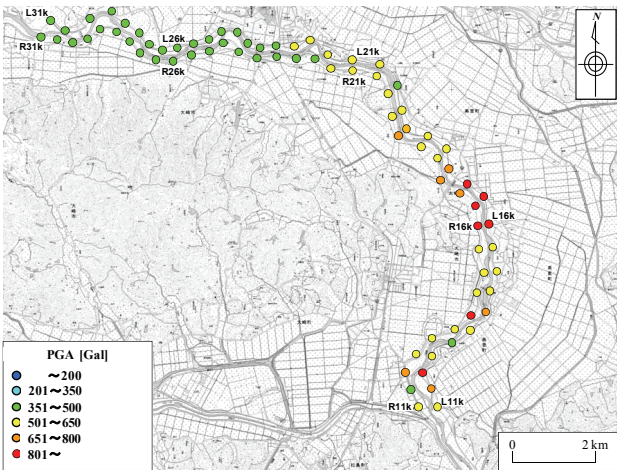
(a) 1978年宮城県沖地震



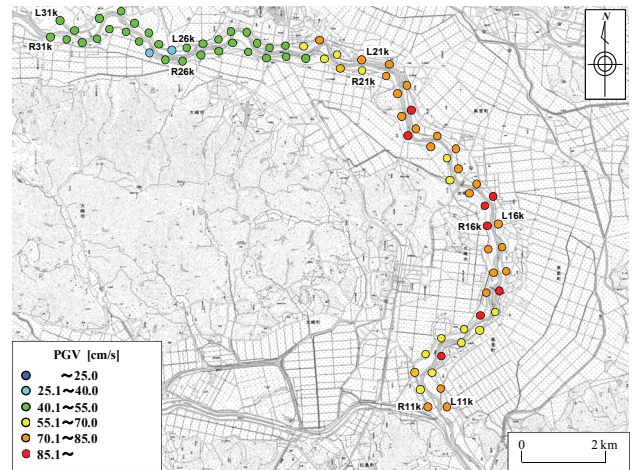
(b) 2003年宮城県北部の地震



(b) 2003年宮城県北部の地震



(c) 2011年東北地方太平洋沖地震



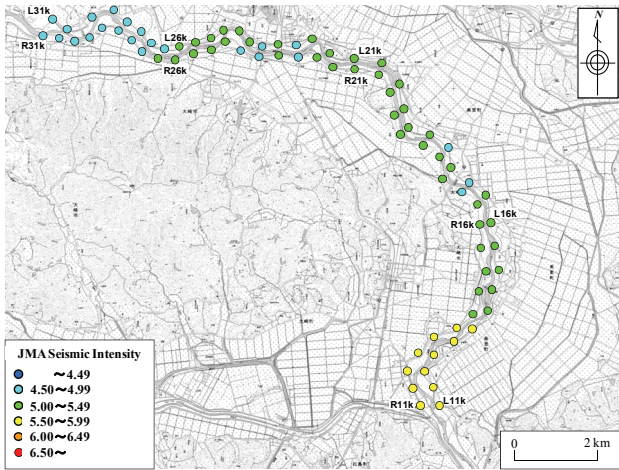
(c) 2011年東北地方太平洋沖地震

図-2 PGA(水平2成分合成)の分布

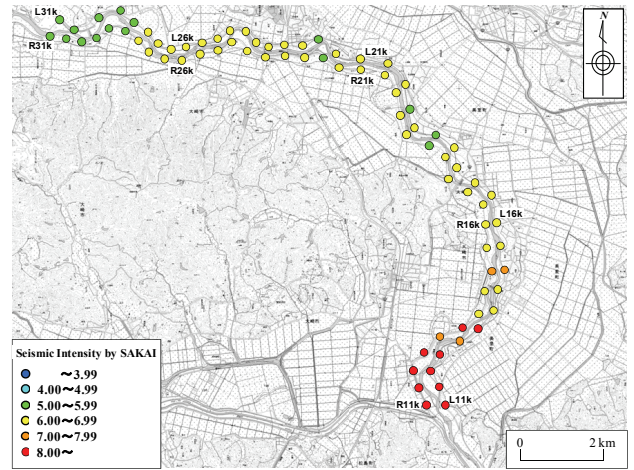
図-3 PGV(水平2成分合成)の分布

- ~200 [Gal]
- 201~350 [Gal]
- 351~500 [Gal]
- 501~650 [Gal]
- 651~800 [Gal]
- 801~ [Gal]

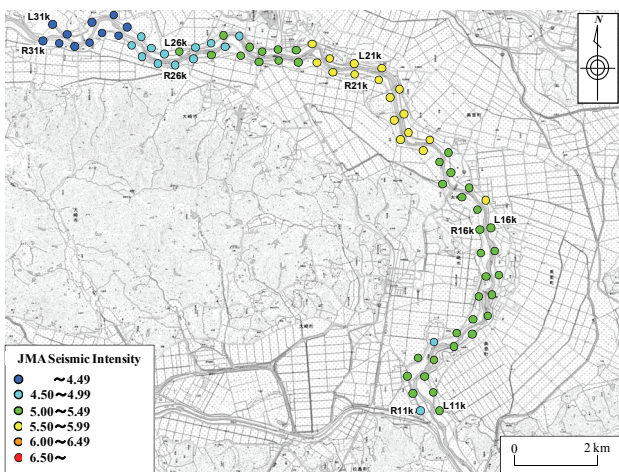
- ~25.0 [cm/s]
- 25.1~40.0 [cm/s]
- 40.1~55.0 [cm/s]
- 55.1~70.0 [cm/s]
- 70.1~85.0 [cm/s]
- 85.1~ [cm/s]



(a) 1978年宮城県沖地震



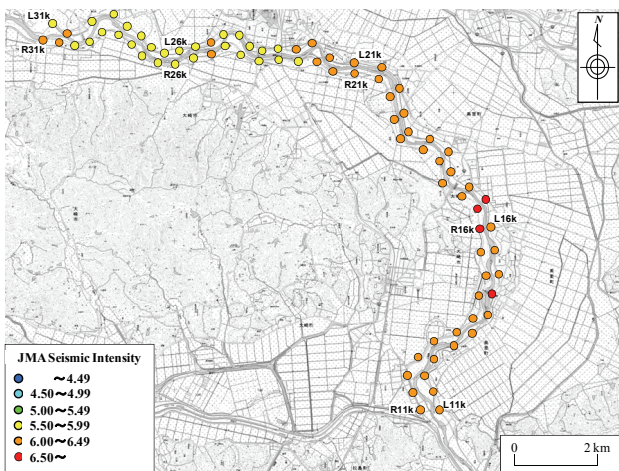
(a) 1978年宮城県沖地震



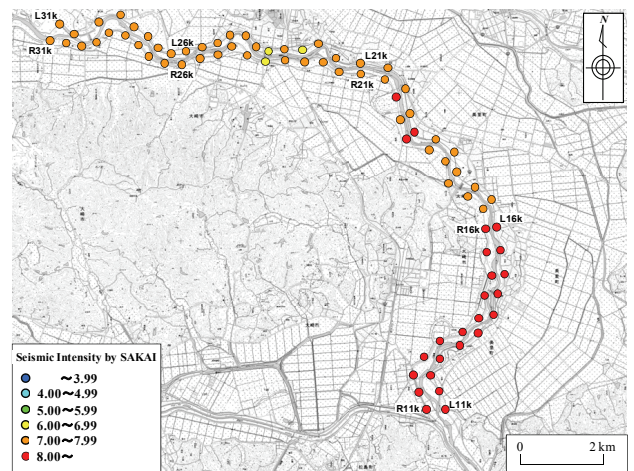
(b) 2003年宮城県北部の地震



(b) 2003年宮城県北部の地震



(c) 2011年東北地方太平洋沖地震



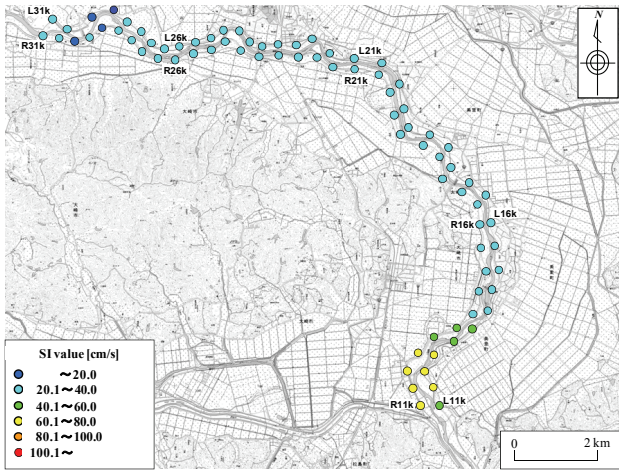
(c) 2011年東北地方太平洋沖地震

図4 気象庁計測震度の分布

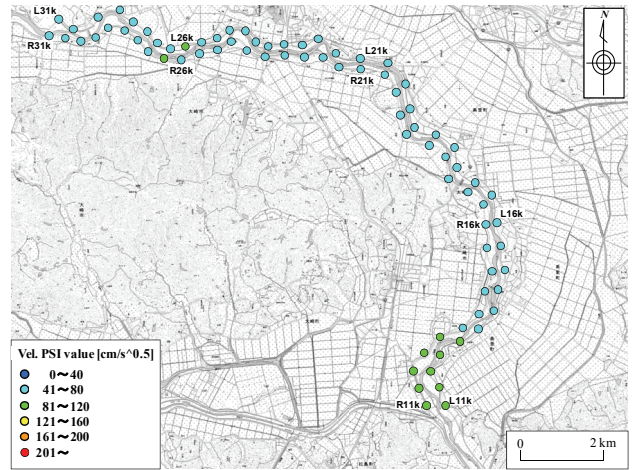
図5 境らによる修正計測震度の分布

- ~4.49
- 4.50~4.99
- 5.00~5.49
- 5.50~5.99
- 6.00~6.49
- 6.50~

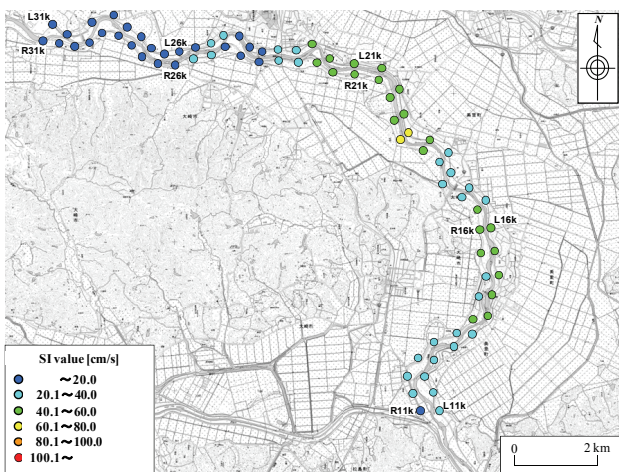
- ~3.99
- 4.00~4.99
- 5.00~5.99
- 6.00~6.99
- 7.00~7.99
- 8.00~



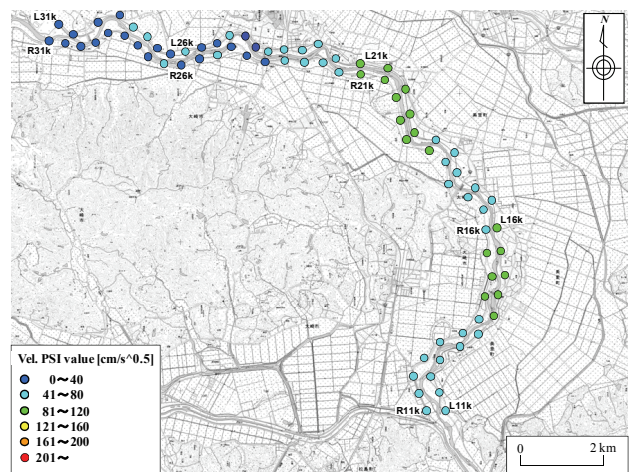
(a) 1978年宮城県沖地震



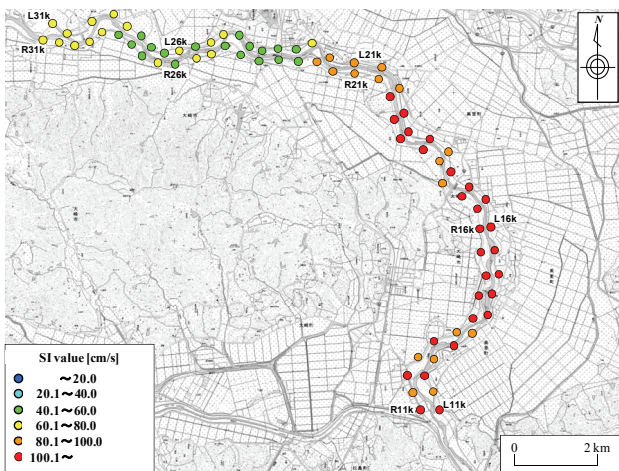
(a) 1978年宮城県沖地震



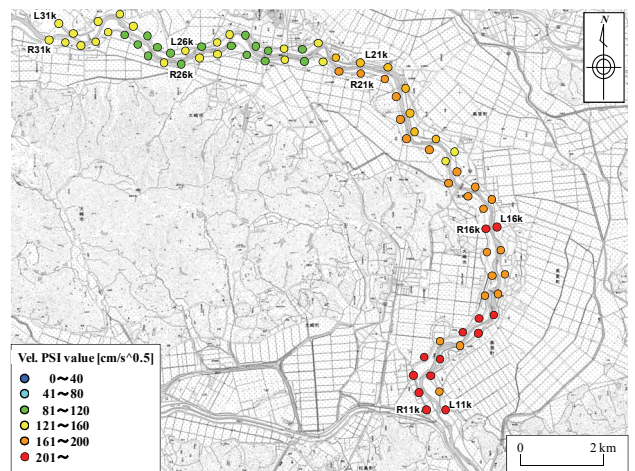
(b) 2003年宮城県北部の地震



(b) 2003年宮城県北部の地震



(c) 2011年東北地方太平洋沖地震



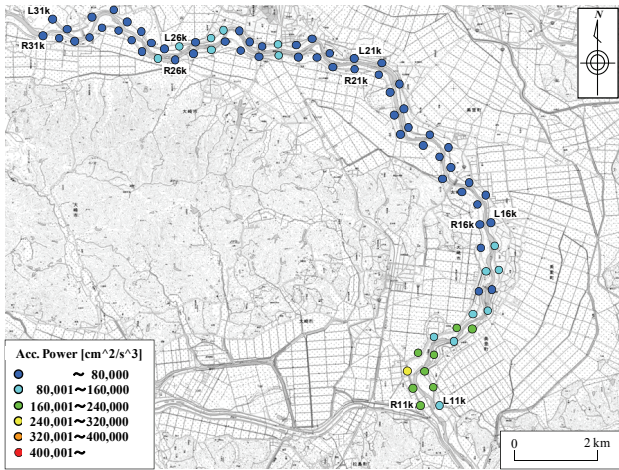
(c) 2011年東北地方太平洋沖地震

図-6 SI値の分布

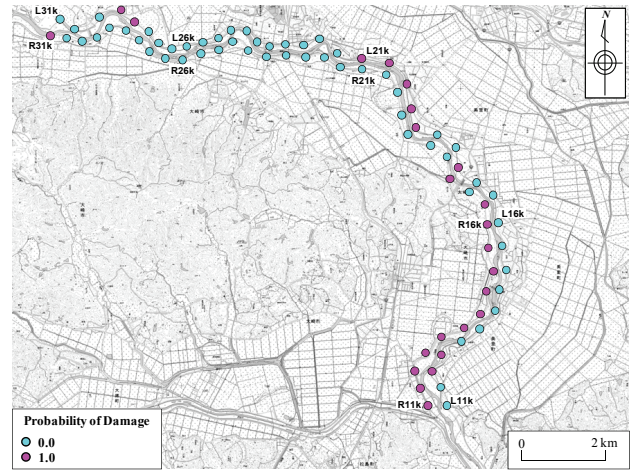
図-7 速度PSI値の分布

- ~20.0 [cm/s]
- 20.1~40.0 [cm/s]
- 40.1~60.0 [cm/s]
- 60.1~80.0 [cm/s]
- 80.1~100.0 [cm/s]
- 100.1~ [cm/s]

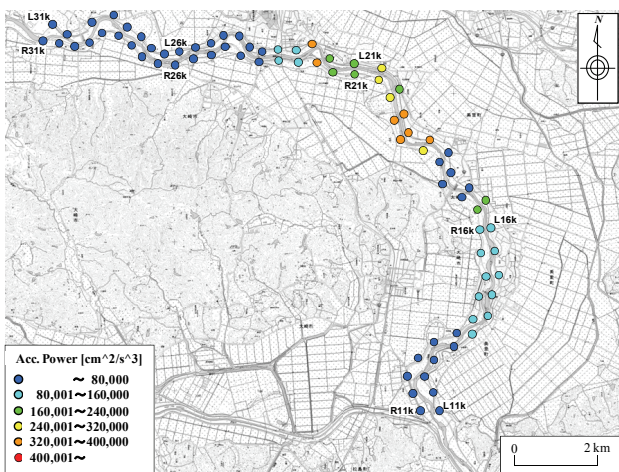
- 0~40 [cm/s<sup>0.5</sup>]
- 41~80 [cm/s<sup>0.5</sup>]
- 81~120 [cm/s<sup>0.5</sup>]
- 121~160 [cm/s<sup>0.5</sup>]
- 161~200 [cm/s<sup>0.5</sup>]
- 201~ [cm/s<sup>0.5</sup>]



(a) 1978年宮城県沖地震



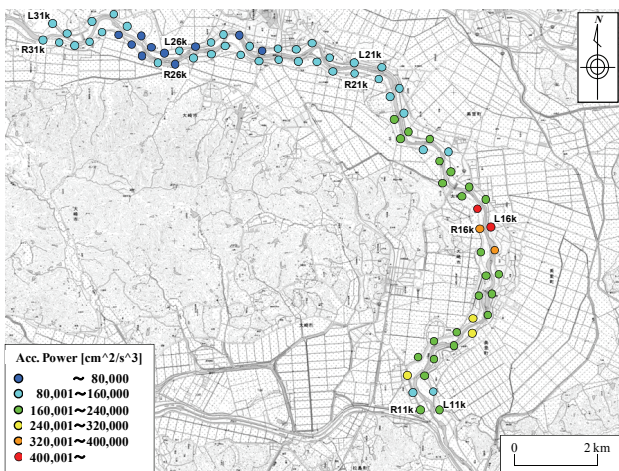
(a) 1978年宮城県沖地震



(b) 2003年宮城県北部の地震



(b) 2003年宮城県北部の地震



(c) 2011年東北地方太平洋沖地震



(c) 2011年東北地方太平洋沖地震

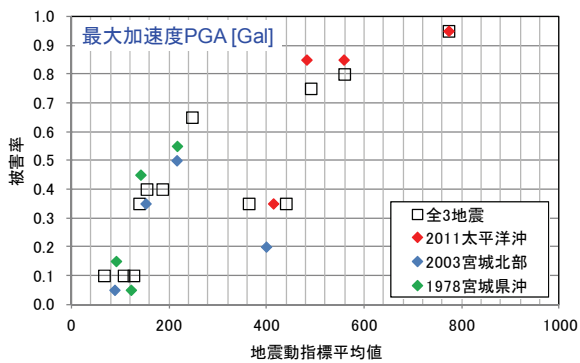
図-8 加速度パワーの分布

図-9 二価関数による被害確率の分布

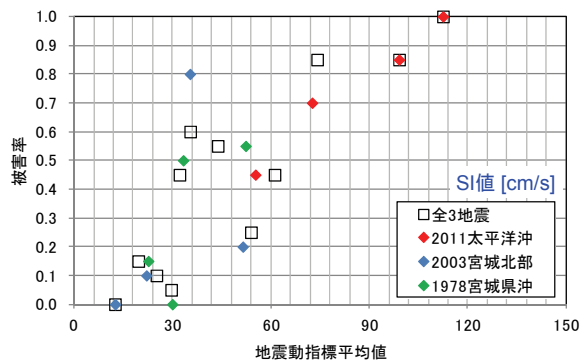
- ~80,000 [cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]
- 80,001~160,000 [cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]
- 160,001~240,000 [cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]
- 240,001~320,000 [cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]
- 320,001~400,000 [cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]
- 400,001~ [cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]

- 0.0 (被害なし)
- 1.0 (被害あり)

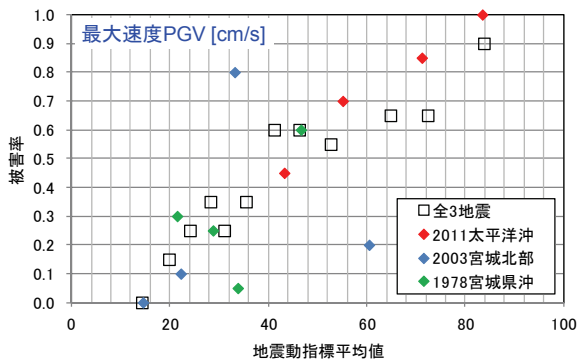




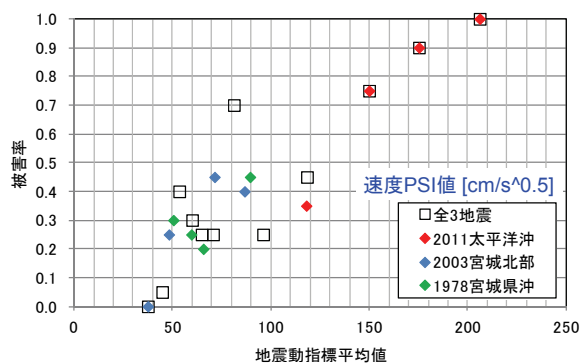
(a) 最大加速度  $PGA$



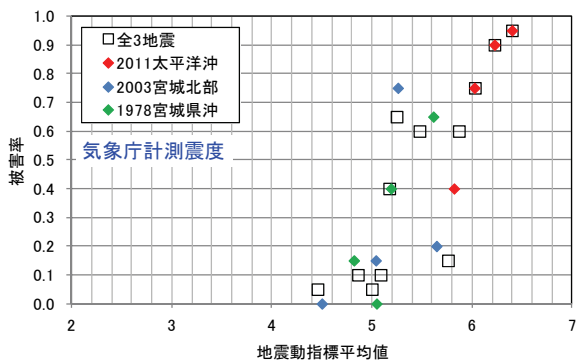
(e) Housner ほかによる SI 値<sup>29)</sup>



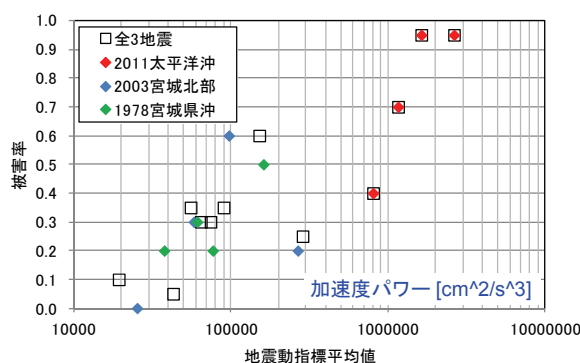
(b) 最大速度  $PGV$



(f) 速度 PSI 値

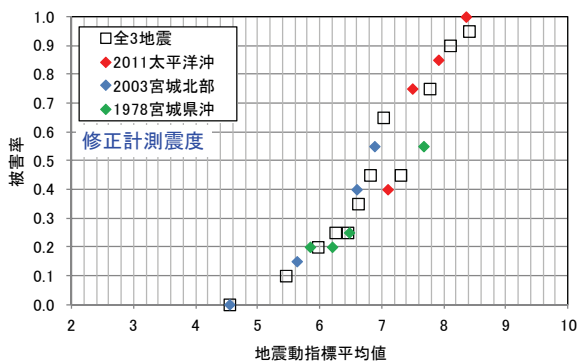


(c) 気象庁(JMA)計測震度



(g) 加速度パワー

図-10 各地震動指標に対する被害率の分布 [続き]



(d) 境ほかによる修正計測震度<sup>28)</sup>

図-10 各地震動指標に対する被害率の分布

表-2 中央値(上)および対数標準偏差(下)の一覧(1)

地震動指標	1978年 宮城県沖	2003年 宮城県北部	2011年 東北地方 太平洋沖	全3地震
最大加速度 [Gal]	192 0.624	1,086 2.940	426 0.232	283 1.042
最大速度 [cm/s]	51 0.907	75 1.535	46 0.327	43 0.705
JMA計測震度	5.48 0.103	5.80 0.193	5.87 0.043	5.57 0.121
修正計測震度	7.47 0.248	6.73 0.106	7.18 0.075	6.93 0.147
SI値 [cm/s]	46.4 0.619	49.9 0.855	59.5 0.348	47.5 0.661
速度PSI値 [cm/s <sup>0.5</sup> ]	92.6 0.662	83.6 0.486	127.5 0.232	93.0 0.603
加速度パワー [cm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	16,108 1.498	866,166 3.995	901,909 0.440	274,609 2.161

図-10 に示すように、全3地震のケースに対して正の相関が確認でき、地震動指標値が小～中程度のレンジは1978年宮城県沖地震と2003年宮城県北部の地震、大きいレンジは2011年東北地方太平洋沖地震のデータに被害率が大きく依存していることがわかる。

## (2) フラジリティカーブの統計評価結果

図-11, 図-12, 図-13 は、1978年宮城県沖地震, 2003年宮城県北部の地震, 2011年東北地方太平洋沖地震についてそれぞれ最尤法によりFCを統計評価した結果である。また、表-2には、統計解析により推定されたパラメータ(中央値および対数標準偏差)の一覧を示す。なお、図-11, 図-12, 図-13には、図-10で示した各対象地震の被害率についても併記している。図-11, 図-12, 図-13に示すように、FCと被害率分布が概ね調和的であることから、構築したFCは被害実績を概ね説明していることがわかる。しかしながら、表-2に示すとおり、中央値や対数標準偏差が同種の地震動指標値にも関わらず差異が大きく、FCの様相が異なっている。これは、被害率に関する考察(図-10参照)で述べたとおり、FCの評価の際に、データのないレンジ(1978年宮城県沖地震および2003年宮城県北部の地震：大きいレンジ, 2011年東北地方太平洋沖地震：小～中程度のレンジ)は外挿となっているためである。さらに、図-14に示す全3地震によるデータに基づいて構築したFCと、各地震によるFC(図-11, 図-12, 図-13参照)の比較においても、上記と同様にFCの様相が異なっているのが読み取れる。一般的に、FCは様々な不確定性が対数正規分布に近似できるとの知見を踏まえた上で、異なる地震動を受けた場合の構造物被害を一元的に取扱ったものであるため、最終的に評価したFC(図-14参照)には、地震動の推定誤差<sup>14)</sup>が取り込まれていることに留意する必要がある。

## (3) 地震動指標の評価

ところで地震動指標としては、実被害をよく説明できること、すなわち実被害との適合度が相対的に高いことが必要不可欠である。最終評価したFC(図-14参照)による対数尤度を各地震動指標について比較したものを図-15に示すが、最も対数尤度が高い(適合度が高い)指標は修正計測震度、次いでSI値となっている。

境らによる修正計測震度は0.67～0.83Hzの周波数帯域における速度応答に着目した指標値<sup>28)</sup>である。河川堤防を除く土構造物に影響を及ぼす周波数帯域として様々な報告<sup>45)51)</sup>がなされているが、図-15から得られた知見は、河川堤防の地震被害に比較的影響を及ぼす周波数帯域が0.67～0.83Hz付近にある可能性を示唆している。

図-16は、地震タイプがFCの評価に及ぼす影響につ

いて確認するために、全3地震によるFC(図-14参照)と海溝型地震(1978年宮城県沖地震および2011年東北地方太平洋沖地震)によるFCを比較したものである。図-16に示すとおり、両FCの違いが比較的大きくなる小～中程度の地震動指標レンジに着目して図示しているものの、統計解析による推定パラメータ(中央値および対数標準偏差)の一覧(表-3参照)にも示すように両者の差異は非常に軽微であることがわかる。なお、2003年宮城県北部の地震による土構造物の被害には、前震・最大余震の影響<sup>52)</sup>や本震前の先行降雨の影響<sup>53)</sup>が指摘されているため、両FCの直接比較には再考の余地が残されていることを付記しておく。

しかしながら現時点で得られた知見に基づけば、本研究において最終評価した河川堤防の耐震に関するFC(図-14(d)および図-14(e)など)は、地震のタイプには大きく依存せずに利活用できると考えられる。一方で、国土交通省の河川・道路等施設の地震計(もしくは震度計)ネットワーク<sup>54)</sup>では、即時公開される地震動指標値として、気象庁計測震度、最大加速度PGA、SI値などがあり、FCの対数尤度(図-15参照)も合わせて考慮すれば、SI値に関するFC(図-14(e)参照)が最も実用的である可能性が高い。図-14(e)によれば、SI値が20cm/s程度に達すると被害確率は約10%である。一方で、道路の通行規制の判断にしばしば用いられる気象庁計測震度に着目すると、その値(被害確率10%の値)は計測震度5.0～5.1となり(図-14(c)参照)、丸山ら<sup>17)</sup>による道路盛土において車両の走行に支障のある被害が生じ始める地震動の大きさ(計測震度5.1～5.2)と概ね調和的な結果となった。

## 6. まとめ

本研究では、1978年宮城県沖地震, 2003年宮城県北部の地震, 2011年東北地方太平洋沖地震における鳴瀬川堤防の被害データに基づいて、地震動強さと被害の有無の関係について基礎的な検討を行い、河川堤防の被害関数(フラジリティカーブ)を統計解析によって構築した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 全3地震(1978年宮城県沖地震, 2003年宮城県北部の地震, 2011年東北地方太平洋沖地震)による鳴瀬川堤防のフラジリティカーブは、地震タイプに関係なく利活用できる可能性が高く、実被害との適合度が比較的良好な地震動指標値は、修正計測震度およびSI値などである。
- (2) 地震観測ネットワークとの関係を考慮すると、車両の走行に支障のある被害を生じ始めるのは、SI値で20cm/s程度、気象庁計測震度で5.0～5.1程度である。

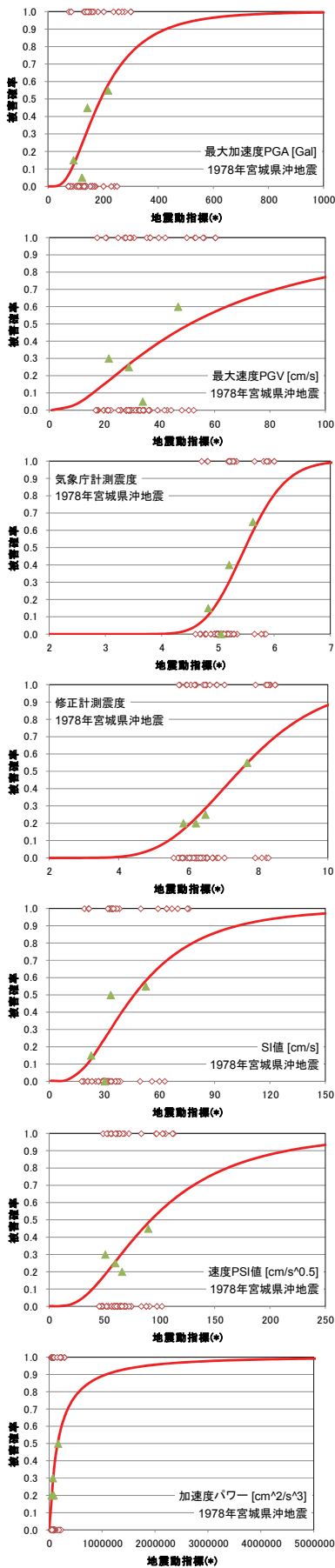


図-11 各地震動指標に対する fragility カーブ (1978年宮城県沖地震)

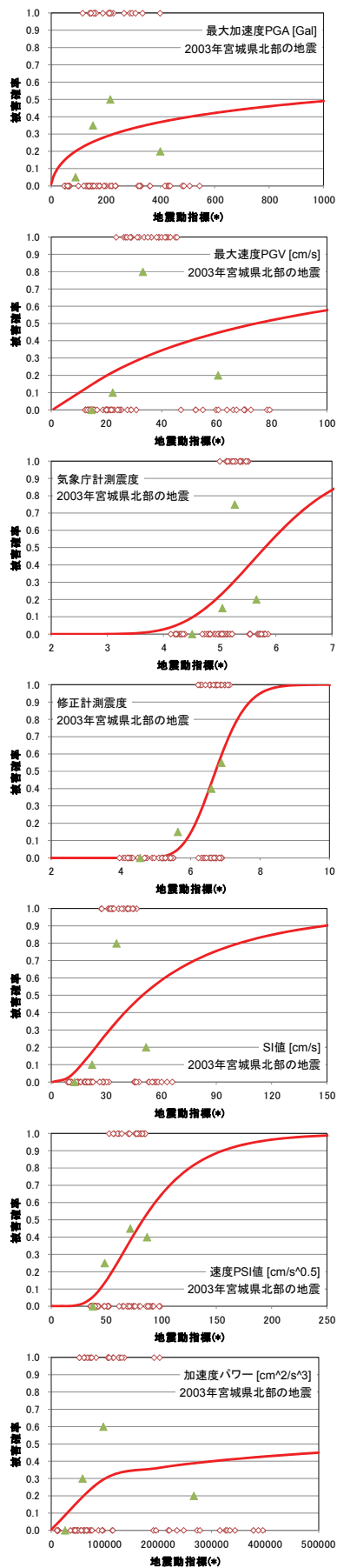


図-12 各地震動指標に対する fragility カーブ (2003年宮城県北部の地震)

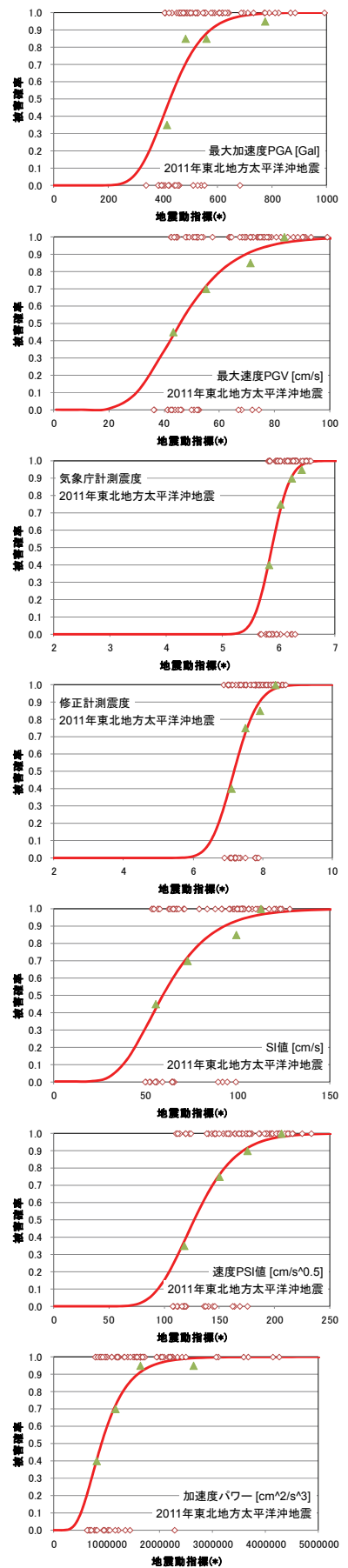
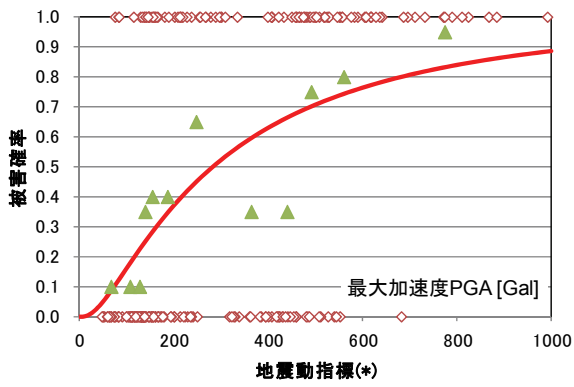
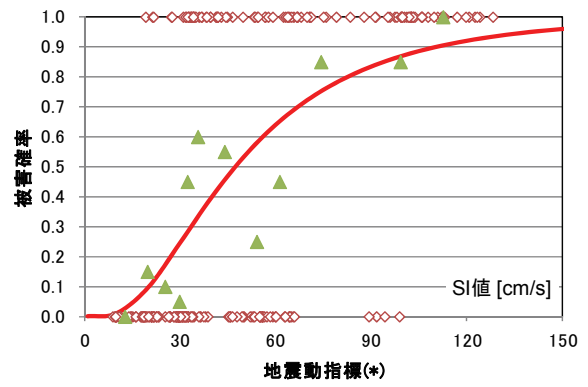


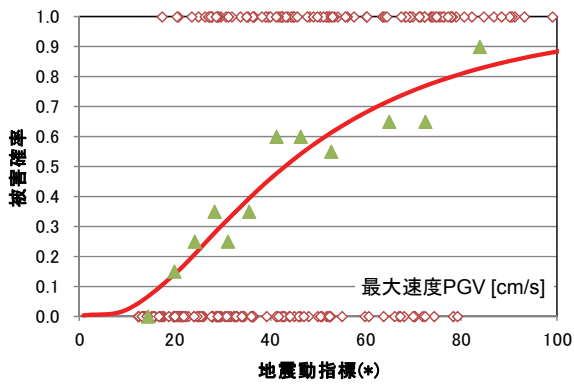
図-13 各地震動指標に対する fragility カーブ (2011年東北地方太平洋沖地震)



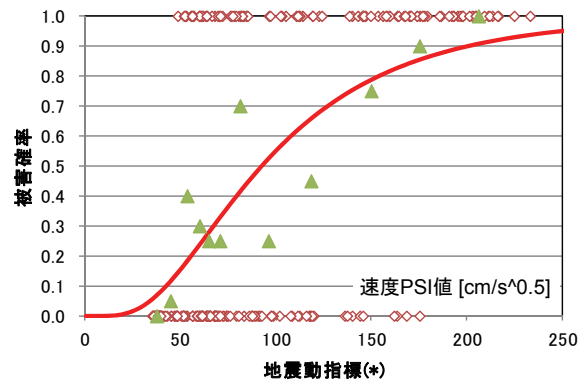
(a) 最大加速度 *PGA*



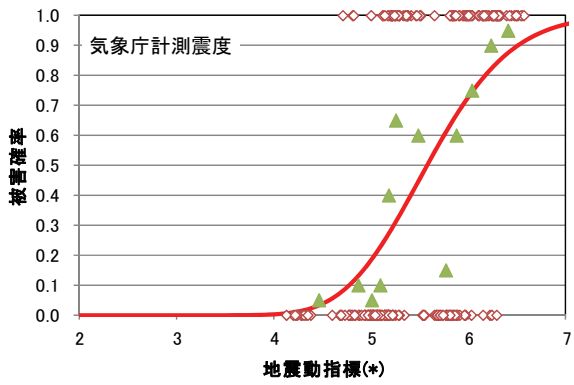
(e) Housnerによる *SI* 値<sup>29)</sup>



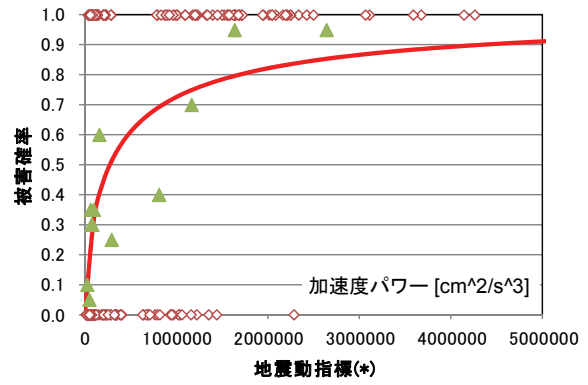
(b) 最大速度 *PGV*



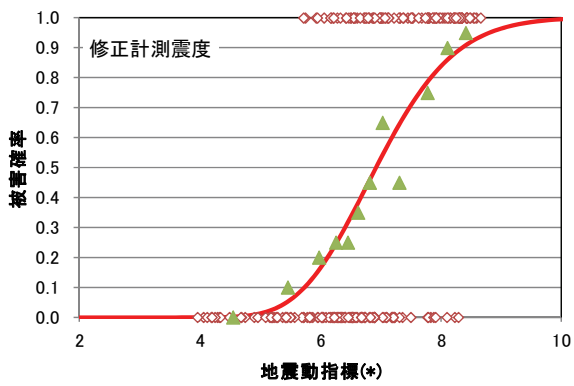
(f) 速度 *PSI* 値



(c) 気象庁(JMA)計測震度



(g) 加速度パワー



(d) 境ほかによる修正計測震度<sup>28)</sup>

図-14 各地震動指標に対するフラジリティカーブ (全3地震)

図-14 各地震動指標に対するフラジリティカーブ (全3地震) [続き]

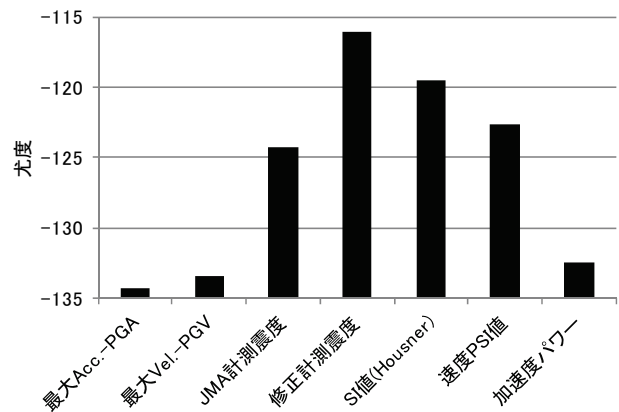
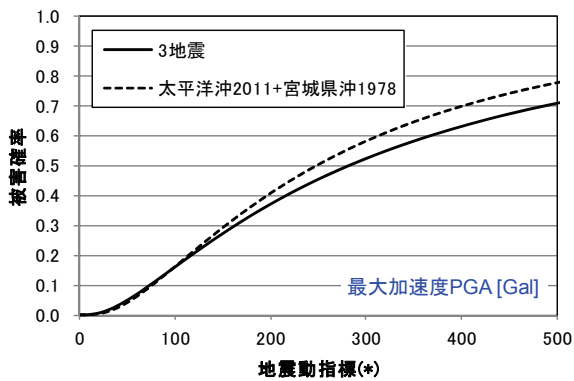


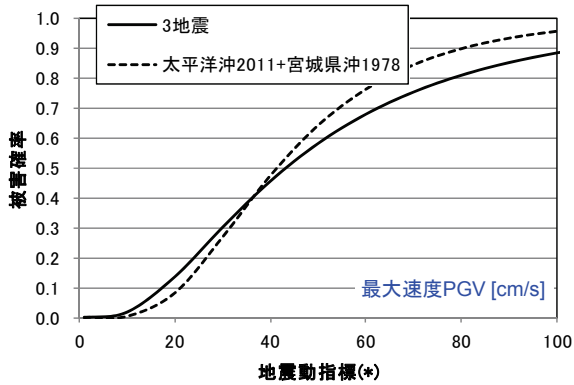
図-15 河川堤防のFCの検討に最適な地震動指標

表-3 中央値(上)および対数標準偏差(下)の一覧(2)

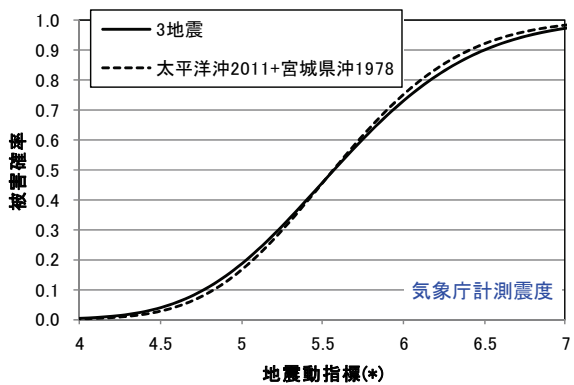
地震動指標	2003年 宮城県北部	1978年宮城県沖 + 2011年太平洋沖	全3地震
最大加速度 [Gal]	1,086 2,940	249 0.918	283 1.042
最大速度 [cm/s]	75 1,535	41 0.522	43 0.705
JMA計測震度	5.80 0.193	5.57 0.111	5.57 0.121
修正計測震度	6.73 0.106	6.98 0.149	6.93 0.147
SI値 [cm/s]	49.9 0.855	48.0 0.598	47.5 0.661
速度PSI値 [cm/s <sup>0.5</sup> ]	83.6 0.486	95.0 0.606	93.0 0.603
加速度パワー [cm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	866,166 3,995	274,609 2,048	274,609 2,161



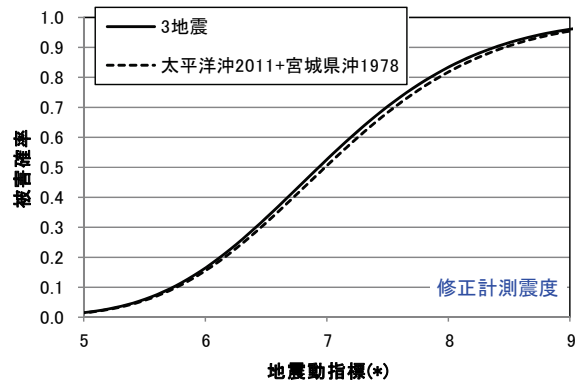
(a) 最大加速度 *PGA*



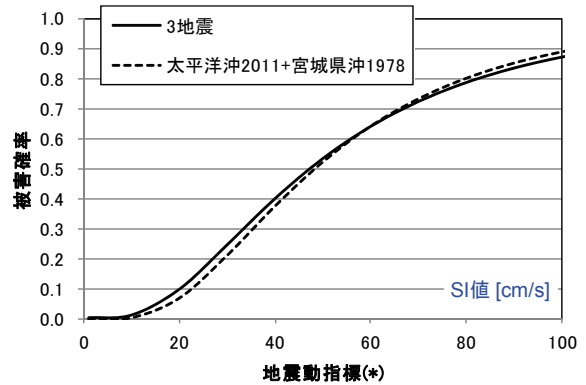
(b) 最大速度 *PGV*



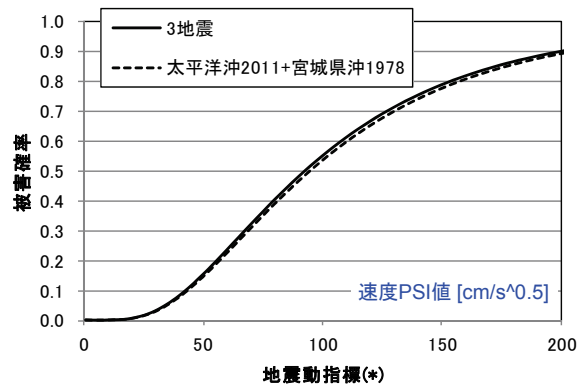
(c) 気象庁(JMA)計測震度



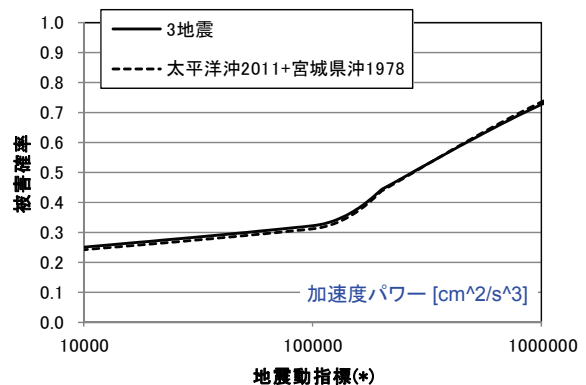
(d) 境ほかによる修正計測震度<sup>28)</sup>



(e) HousnerによるSI値<sup>29)</sup>



(f) 速度 PSI 値



(g) 加速度パワー

図-16 地震タイプが河川堤防のFCに及ぼす影響[続き]

図-16 地震タイプが河川堤防のFCに及ぼす影響

本研究で構築されたフラジリティカーブは、河川堤防の地震被害の早期把握や通行規制基準の検討などの一助になるものと期待できる。一方で、1978年宮城県沖地震、2003年宮城県北部の地震、2011年東北地方太平洋沖地震における鳴瀬川での被害実績に基づくフラジリティカーブであるため、他の地震・地域への適用性については今後検討していく必要があると思われる。

**謝辞：**本研究では、国土交通省東北地方整備局より鳴瀬川堤防の被害実績に関する資料の提供を受けました。現地調査の実施では、宮城県大崎市民、美里町民、涌谷町民の皆様にお世話になりました。現地調査に際して、角田光法氏および角礼雄氏(広島大学大学院工学研究科)にご協力いただきました。鳴瀬川堤防沿いの強震動評価では、野津厚チームリーダー((独)港湾空港技術研究所)に貴重なご意見をいただきました。(公社)土木学会地震工学委員会による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委員会の委員の皆様には、本研究の遂行に際して有意義なコメントをいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) たとえば、吉川秀夫, 山村和也, 豊島修, 土屋昭彦, 大久保忠良: 河川関係の被害, 新潟地震調査報告, 土木研究所報告, 第125号, pp.83-139, 1965.
- 2) たとえば, 建設省土木研究所地震防災部・振動研究室: 1978年6月宮城県沖地震被害調査概報, 土木研究所資料, 第1422号, pp.43-76, 1978.
- 3) たとえば, 佐々木康, 谷口栄一, 松尾修, 伊藤良弘: 日本海中部地震による土構造物の沈下, 土と基礎, Vol.32, No.9, pp.7-13, 1984.
- 4) たとえば, 金子正之, 田村圭司, 佐々木康, 勝山明雄, 佐藤謙司: 平成5年釧路沖地震による河川堤防被害について, 第29回土質工学研究発表会講演概要集, pp.973-974, 1994.
- 5) たとえば, 金子正之, 田村圭司, 佐々木康, 勝山明雄, 佐藤謙司: 平成5年北海道南西沖地震による河川堤防被害について, 第29回土質工学研究発表会講演概要集, pp.971-972, 1994.
- 6) たとえば, Sasaki, Y. and Shimada, K.: Yodogawa dike damage by the Hyogoken-nambu earthquake, *Seismic Behaviour Ground and Geotechnic by E. Pinto Seco*, Taylor & Francis, pp.307-216, 1997.
- 7) たとえば, 佐々木康, 福渡隆: ジオテキスタイルを敷設した堤防の鳥取県西部地震時の沈下, ジオシンセティックス技術情報, Vol.13, No.3, pp.15-20, 2001.
- 8) たとえば, 2003年三陸南地震・宮城県北部地震災害調査委員会: 2003年三陸南地震・宮城県北部地震災害調査報告書(CD-ROM), 地盤工学会, 2003.
- 9) たとえば, 2003年十勝沖地震地盤災害調査委員会: 2003年十勝沖地震地盤災害調査報告書, 地盤工学会, 131p., 2004.
- 10) たとえば, 新潟県中越地震災害調査委員会: 新潟県中越地震災害調査委員会報告書, 地盤工学会, 518p,

- 2007.
- 11) たとえば, 2007年新潟県中越沖地震災害調査委員会: 2007年新潟県中越沖地震災害調査報告書, 地盤工学会, 5.7節, 2009.
- 12) たとえば, 安田進, 東畑郁生: 河川堤防の被害, 土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書, 第7章, 2011.
- 13) たとえば, 渦岡良介, 島袋ホルヘ, 酒井久和, 谷本俊輔: 河川堤防に対する強震継続時間が長い地震動の影響について, 土木学会地震工学委員会強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性検討小委員会, 地盤WG報告書, pp.11-138, 2012.
- 14) 秦吉弥, 酒井久和, 野津厚, 一井康二, 丸山喜久, 角田光法: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動推定手法に基づく既往の大規模地震における鳴瀬川堤防沿いでの強震動の評価, 第32回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, 2012. (this issue)
- 15) 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(CD-ROM), Vol.28, pdfNo.9, 2005.
- 16) 久世益充, 杉戸真太, 八嶋厚, 三山敬, 櫛田未治, 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回年次学術講演会講演概要集, III-370, pp.735-736, 2006.
- 17) 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を地震動強さとの関係, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.208-216, 2008.
- 18) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., tsuchiya, Y., 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.
- 19) 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した線状構造物における地震動の推定とその応用—2007年能登半島地震での道路被災を例に—, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
- 20) 酒井久和, 長谷川浩一, ネルソン・プリード, 佐藤忠信: 新潟県中越地震における強震動と道路被害の関係, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.52A, No.1, pp.301-308, 2006.
- 21) Murakami, Y., Ichii, K., Maruyama, Y., Hata, Y. and Fukushima, Y.: Interval of Analysis in the Damage Evaluation of Expressway Embankments, *Proc. of 10th International Conference on Civil and Environmental Engineering*, pp.272-278, Jhongli, Taiwan, 2011.
- 22) Ichii, K., Murakami, Y., Maruyama, Y., Hata, Y. and Fukushima, Y.: An attempt on the fragility curves for expressway embankments considering the difference in various conditions, *Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering*, No.1761, Lisbon, Portugal, 2012.
- 23) 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 31-b), Vol.68, No.4, pp.I\_1074-I\_1080, 2012.
- 24) 桑島偉倫, 佐古俊介, 井上悟士: 堤防の信頼性評価

- について, *JICE REPORT*, Vol.21, pp.19-24, 2012.
- 25) 殿内啓司, 金子史夫: 過去の震害事例からみた構造物の被害と地盤・地震動強さとの関係について, 応用地質調査事務所年報, No.5, pp.1-22, 1983.
  - 26) たとえば, 中村孝明, 宇賀田健: 地震リスクマネジメント, 技報堂出版, 290p., 2009.
  - 27) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
  - 28) 境有紀, 瀬藤一起, 神野達夫: 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.85-91, 2002.
  - 29) Housner, G. W.: Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault. *Proc. of 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, pp.94-115, 1965.
  - 30) 野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第 28 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.18-19, 2001.
  - 31) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田孝, 柴尾享, 今村孝志: 常時微動計測に基づく高速道路盛土の入力地震動設定法の検討, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.4, pp.529-541, 2009.
  - 32) 土木学会東北支部 1978 年宮城県沖地震調査委員会: 1978 年宮城県沖地震調査報告書, 土木学会東北支部, pp.37-98, 1980.
  - 33) 建設省東北地方建設局北上川下流工事事務所: 1978 年 6 月 12 日宮城県沖地震による河川構造物等被害状況写真集, 108p., 1978.
  - 34) 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所: S53 宮城県沖地震鳴瀬川吉田川被害状況, 堤防の地震に対する点検結果, 1/37-9/37, 1978.
  - 35) 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所: 河川管理施設地震災害資料集(鳴瀬川水系鳴瀬川), 地震災害資料総括表, 1979.
  - 36) 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許容変形と性能設計に関する研究委員会報告書, 地盤工学会, pp.19-78, 2007.
  - 37) 鳴瀬川堤防検討会, 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所: 緊急復旧工事 4 箇所毎の被災メカニズムの推定, 宮城県北部地震に伴う鳴瀬川堤防被災メカニズムの検討報告書, 第 4 章, 2005.
  - 38) 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所: 2003 年宮城県北部の地震による被災箇所一覧表, 鳴瀬川左岸・右岸, 2003.
  - 39) 国土交通省東北地方整備局北上川等堤防復旧技術検討会: 北上川等堤防復旧技術検討会 報告書 本編, 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所, 193p., 2011.
  - 40) 国土交通省東北地方整備局北上川等堤防復旧技術検討会: 北上川等堤防復旧技術検討会 委員会資料(第 1~5 回), 公開資料, 2011.
  - 41) (財)国土技術研究センター: 河川堤防耐震対策緊急検討委員会(第 1~4 回), 公開資料, 2011.
  - 42) 応用地質株式会社: 平成 22 年度北上川水系堤防被災状況把握業務報告書, 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所, 2011.
  - 43) 常田賢一, 小田和広: 段差走行実験による地震時の道路の段差被害レベルと車両走行性の評価, 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.317-322, 2007.
  - 44) たとえば, 中村孝明, 長沼敏彦, 静間俊郎, 篠塚正宣: 統計解析による道路橋脚の地震時損傷確率に関する研究, 第 10 回地震工学シンポジウム論文集, 第 3 分冊, pp.3165-3170, 1998.
  - 45) 野津厚, 井合進, 一井康二: 岸壁の変形量と入力地震動タイプに関する一考察, 土構造物の耐震設計に用いるレベル 2 地震動を考えるシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.73-80, 1998.
  - 46) 野津厚, 井合進, 一井康二, 沼田淳紀: ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の振動数成分, レベル 2 地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト, 地盤工学会, pp.311-318, 2000.
  - 47) 嶋村貞夫, 河西寛, 笹川基史, 福田尚晃: 抗土圧構造物の地震時変形に影響を及ぼす入力地震動の特性に関する一考察, 土構造物の耐震設計に用いるレベル 2 地震動を考えるシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.89-94, 1998.
  - 48) 嶋村貞夫: 抗土圧構造物の応答, レベル 2 地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト, 地盤工学会, pp.193-206, 2000.
  - 49) 立石章, 佐藤忠信: LIQCA による護岸の被災変形量の有効応力解析, ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の振動数成分, レベル 2 地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト, 地盤工学会, pp.223-245, 2000.
  - 50) 酒井久和, 野津厚: 地中構造物の損傷に影響する地震動の周波数成分, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, No.194, pp.1033-1038, 2002.
  - 51) 秦吉弥, 野津厚, 一井康二, 酒井久和: 盛土構造物の残留変形に影響を及ぼす地震動の周波数帯域に関する基礎的検討, 第 32 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, 2012. (this issue)
  - 52) たとえば, Uzuoka, R., Sento, N., Kazama, M. and Unno, T.: Landslides during the earthquake on May 26 and July 26, 2003 in Miyagi, Japan, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.4, pp.149-163, 2005.
  - 53) たとえば, 国土交通省国土技術政策総合研究所: 道路の被害状況, 国土技術政策総合研究所資料, No.133, 平成 15 年 7 月 26 日宮城県北部地震被害に係わる現地調査報告書, pp.35-44, 2003.
  - 54) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earthquake motion by National Institute for Land and Infrastructure Management, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.

(2012.9.21 受付)

PRELIMINARY STUDY ON DAMAGE PROBABILITY OF RIVER DIKE  
DUE TO THE PAST LARGE SCALE EARTHQUAKES  
BASED ON FRAGILITY CURVE ANALYSIS

Yoshiya HATA, Toshiro SHIZUMA, Hisakazu SAKAI,  
Koji ICHII, Yoshihisa MARUYAMA and Yohei MURAKAMI

Serious damages were occurred by the 1978 off Miyagi Prefecture Earthquake, the 2003 northern Miyagi Prefecture Earthquake and the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, especially for the the Naruse River dike. Using both the actual damage data and detailed distribution of ground motion considering site effects along the Naruse River dike, this study conducts the statistical analysis on the relationship between the damage ratio of river dike and several indices of ground motion to construct fragility curves. Based on the obtained results, serious damages that affect the serviceability for traffic are found in the area where the SI value by Housner is larger than about 20 cm/s.