

地震時の堤防道路の通行機能に着目した フラジリティカーブの構築

秦 吉弥¹・常田賢一²

¹ 助成研究者 大阪大学助教 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

² 共同研究者 大阪大学教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

概要:

鳴瀬川堤防では、既往の大規模地震において深刻な被害が繰返し発生している。そこで本研究では、先行研究により得られた推定地震動の分布に基づいて、推定地震動による指標値と被災実績の関係について統計的な分析を行い、堤防道路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、河川堤防において車両走行に支障のある被害を生じ始めるのは、気象庁計測震度で4.6~4.7程度となった。

キーワード: 堤防道路, 通行機能, 被害率, フラジリティカーブ, 気象庁計測震度

1. はじめに

河川堤防の天端部分を道路として利用する堤防道路が全国各地に存在し、幹線道路の混雑緩和などの補完道路として重要な役割を果たしている。豪雨災害の際に冠水した周辺道路を補完する機能を有しているほか、津波災害時に周囲より高い堤防道路が緊急車両等の通行機能を確保する上で非常に重要な役割を果たすと想定される。今後は、大規模地震時における堤防道路の通行機能を確保するという観点からも、河川堤防の地震対策を進めていく必要がある。堤防道路の通行機能の確保を視野に対策を進めることは、止水性そのもの向上にも寄与するものと考えられる。

既往の研究¹⁾⁴⁾では、堤防道路以外の一般的な道路盛土を対象として、通行機能の観点から地震動強さと被災確率の関係(フラジリティカーブ)が評価されている。しかしながら、河川堤防は一般の盛土と異なり、地下水位が高い上に堤体やその基礎地盤に砂質土を含む場合が多く、地震時に液状化を起こす事例が多い。従って、堤防道路の通行機能に着目したフラジリティカーブについては、一般的な道路盛土とは別個に検討する必要がある。

上述した背景を踏まえ、本稿では、既往の大規模地震の被災・無被災実績に基づいて堤防道路のフラジリティカーブを評価した結果について報告する。具体的には、まず、1978年宮城県沖地震(M7.4)、2003年宮城県北部の地震(M6.4)、2011年東北地方太平洋沖地震(M_w9.0)

(以後、対象3地震と呼ぶ)による被害が繰返し発生している宮城県・鳴瀬川堤防⁵⁾⁶⁾⁷⁾を検討対象として取り上げ、鳴瀬川堤防沿いの推定地震動に基づいて気象庁計測震度の計算を実行するとともに、被災実績の有無についても整理を行った。そして、気象庁計測震度と被災実績の関係に着目したフラジリティカーブを構築し、通行機能に関する議論を行った。

2. 地震動強さと被災実績

著者ら⁸⁾は、鳴瀬川堤防沿いにおける左岸ならびに右岸の11k~31kを検討対象(以後、対象区間と呼ぶ)として、現地において臨時地震観測および常時微動計測を実施し、得られた結果に基づいて対象3地震による地震動を約500m間隔ごとに推定している。図-1は、地震動強さの指標の一つである気象庁計測震度を推定地震動に基づいて計算した結果を各対象地震について500m間隔ごとに示したものである。図-1に示すとおり、対象地震によって対象区間の気象庁計測震度の値には大きな違いがあることがわかる。さらに、同じ対象地震においても対象区間内での伝播経路特性およびサイト特性の差異に起因して、気象庁計測震度⁹⁾の値に有意な差異が確認できる。

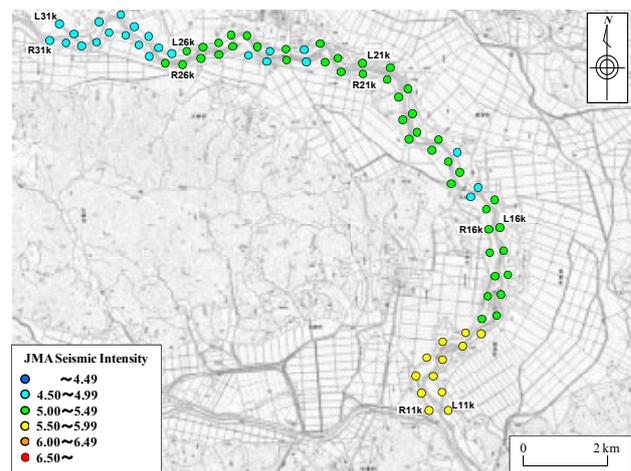
本検討では、対象区間内での対象3地震における河川堤防の被災実績に関する既存資料⁵⁾⁶⁾⁷⁾等に基づいて被災実績の有無について整理を行った。被災実績の有無の整

理(判断)は、車両の通行機能に主眼をおいた河川堤防の
 フラジリティカーブ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等の結果(約100~200m間隔)に基
 づく対象3地震の発生前後での標高差(以後、沈下量と呼
 ぶ)と、人工段差道路での車両走行実験結果¹⁰⁾に基づく
 耐震性能の評価基準例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^{10,11)})の中間値である段差
 37.5cmを判断基準値として、堤体天端の沈下量が37.5cm
 以上であれば被災有、37.5cm未満であれば被災無と地震
 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、沈下と段差は異なる概念であ
 るが、堤体において沈下が生じた部分と生じなかった部
 分が互いに近接していれば、沈下量と段差が互いに近い
 値となることを勘案している。

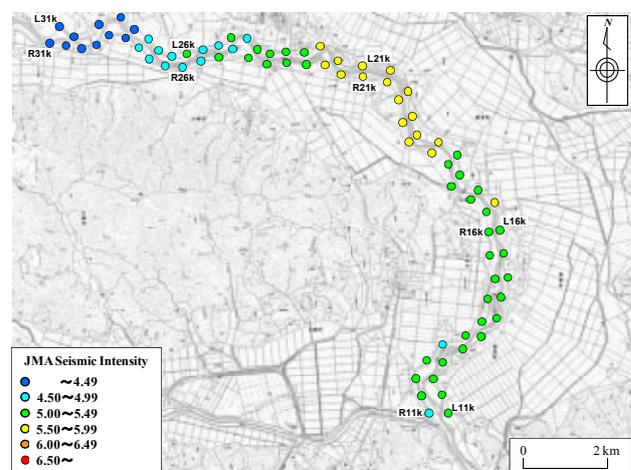
図-2には、0もしくは1の二価関数を用いて整理した対
 象3地震による対象区間内での被災実績の分布を示す。
 ここに、堤体天端の沈下量が37.5cm以上の場合は1、沈
 下量が37.5cm未満の場合は0となる。すなわち、地震動
 評価地点(図-1参照)を中間点とし、その前後の約250mの
 範囲内における沈下量の最大値に基づいて二価関数によ
 り整理した。なお、1978年宮城県沖地震による被災実績
 では、対象区間内の一部において縦断測量に基づく沈下
 量が得られていないため、既存資料等で被災が報告され
 ている区間を被災有と判断した。図-2に示すとおり、
 2011年東北地方太平洋沖地震では対象区間のほぼ全域に
 わたって1.0(被災有)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
 災有)の範囲が局所的である。すなわち、上述した気象
 庁計測震度の分布(図-1参照)と同様に、被災実績の分布
 (図-2参照)についても、対象3地震ごとに大きく異なっ
 ているのが読み取れる。

3. 被害率の評価

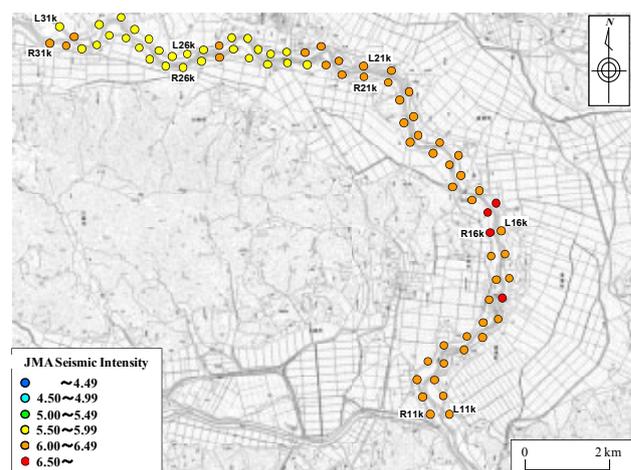
図-3は、フラジリティカーブの構築に先立ち計算した
 被害率^{11),12)}の分布を気象庁計測震度についてプロットし
 たものである。ここに、被害率¹²⁾は、以下に示す手順で
 計算した。まず、被災実績の有無(0または1)と、それ
 に対応する気象庁計測震度のデータ(データ数は、[i]各対
 象地震のケースでは80(=地震動評価地点の総数80×対象
 地震の数1)、[ii]全対象3地震のケースでは240(=地震動
 評価地点の総数80×対象地震の数3)となる)を気象庁計測
 震度の値の小さい順に並び替えた。次に、並び替えたデ
 ータを気象庁計測震度の値が小さい順に順次20データず



(a) 1978年宮城県沖地震



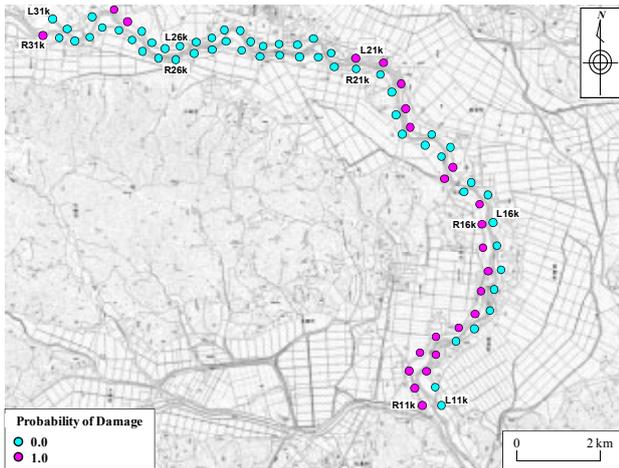
(b) 2003年宮城県北部の地震



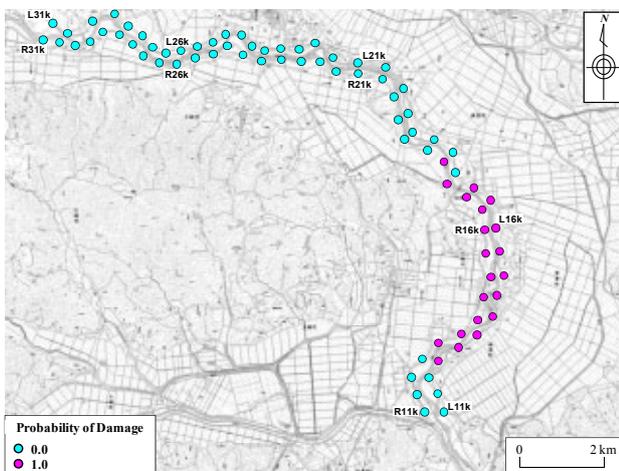
(c) 2011年東北地方太平洋沖地震

図-1 気象庁計測震度の分布

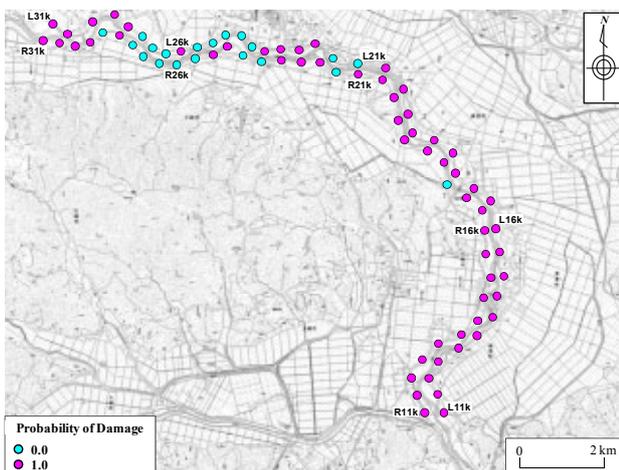
つ取っていった。最後に、20データごとに被害率(被災
 有と判断した数/地点数(=20))、ならびに対応する気象
 庁計測震度の平均値を算出した。よって本検討では、被
 害率のデータは計12個作成されることになり、1つの被



(a) 1978年宮城県沖地震



(b) 2003年宮城県北部の地震



(c) 2011年東北地方太平洋沖地震

図-2 二価関数による堤防被災の有無の分布

害率に20地点分(約10kmの堤防延長に相当)の堤防データが含まれていることになる。

図-3に示すように、全対象3地震のケースに対して正の相関が確認できる。さらに、気象庁計測震度の値が小

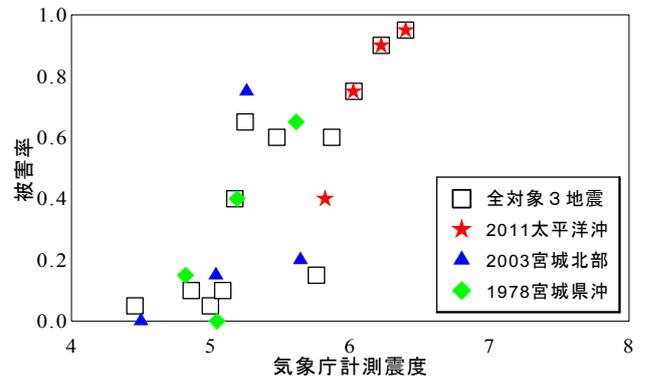


図-3 気象庁計測震度に対する被害率の分布

～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依存しているのが読み取れる。

4. フラジリティカーブの評価

河川堤防などの盛土構造物は、地震動特性に依存した固有の挙動(地震応答)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、河川堤防が有している耐震性能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。信頼性理論では、上述した挙動および性能を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。フラジリティカーブは、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。ここでは、河川堤防の地震時挙動 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, ζ_r) および C (c_m, ζ_c) とそれぞれ定義する。ここに、 r_m および c_m は中央値、 ζ_r および ζ_c は対数標準偏差である。被災確率 P_f は挙動が性能を超える確率として次式で定義される。

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

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 まで積分をすると、地震動による挙動の中央値 r_m による条件付き被災確率 $F_z(r_m)$ 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 ζ は、挙動と性能の対数標準偏差 ζ_r 、 ζ_c の合成値であり、次式を用いて表わされる。

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

助成受付番号 第 14009 号 研究課題番号 (6)
防での値(気象庁計測震度:4.6~4.7)と高速道路盛土での値(気象庁計測震度:5.1~5.2)を比較すると、高速道路盛土よりも河川堤防(堤防道路)のほうが小さな地震動の作用により、車両の走行に支障のある被害が生じ始めるという結果が得られた。

フラジリティカーブは、 r_m を条件とした一価関数として、(2)式から求められる。ここで、挙動と性能の確率分布のパラメータは計4つであるが、フラジリティカーブ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、最尤法により、対数標準偏差 σ および性能の中央値 c_m を河川堤防の地震被災実績から統計的に推定する。尤度関数は下式で示される。

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

ここに、 n はサンプル数、 q_i は被災していた場合は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 σ は、それぞれ(4)式より求められる尤度を最大とする値として求められる。

図4は、全対象3地震の被災実績(同図中の○で示されている0もしくは1で表される二価関数)を用い、最尤法によりフラジリティカーブを統計評価した結果である。なお、図4には、全対象3地震のケースにおける被害率(図3参照)についても併記している。図4に示すように、フラジリティカーブと被害率の分布が概ね調和的であることから、評価したフラジリティカーブは被災実績を概ね説明できていると判断する。

ここで、フラジリティカーブに採用する地震動指標としては、実被害をよく説明できるだけでなく実用的であることが求められる。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¹³⁾¹⁴⁾などでは、即時公開される地震動指標値として、気象庁計測震度⁹⁾などがあることから本研究が活用できる可能性が高い。図4について更に考察すると、気象庁計測震度の値が4.6~4.7の時に被災確率が5%となる(気象庁計測震度の値が4.6~4.7の時にフラジリティカーブの立ち上がりを確認できる)。一方で、高速道路盛土のフラジリティカーブ¹⁵⁾において車両の走行に支障のある被害が生じ始める気象庁計測震度の値(フラジリティカーブが立ち上がり始める際の気象庁計測震度の値)は、被害率が0.05~0.1件/kmの時に5.1~5.2と報告されている。両者(河川堤

5. まとめ

本稿では、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)において繰り返し被害を受けている鳴瀬川堤防を対象に、気象庁計測震度と被災実績との関係について基礎的な統計解析を行うことで、河川堤防(堤防道路)の通行機能に着目したフラジリティカーブを構築した。

その結果、河川堤防(堤防道路)において車両の走行に支障のある被害を生じ始める気象庁計測震度は4.6~4.7程度となり、既往研究による高速道路盛土における計測震度の値(5.1~5.2)よりも小さな値となった。本検討で構築されたフラジリティカーブは、河川堤防(堤防道路)の地震被災の早期把握や通行規制基準の検討などの一助になることが期待できる。

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災実績に関する資料の提供を受けました。気象庁JMA、(国研)防災科学技術研究所K-NET/KiK-net、国土交通省MLIT、宮城県による地震観測データを利用させていただきました。

現地調査(2003年宮城県北部の地震後ならびに2011年東北地方太平洋沖地震後における堤防被災調査、常時微動計測、臨時余震観測など)の実施に際して、宮城県大崎市民、美里町民、涌谷町民の皆様にご大変お世話になりました。

鳴瀬川堤防沿いでの常時微動計測の実施にあたっては、角田光法氏、角礼雄氏、村上陽平氏(ともに広島大学大学院工学研究科)および藤木昂氏、湊文博氏、吉川登代子氏(ともに大阪大学大学院工学研究科)にご協力いただきました。

(公社)土木学会地震工学委員会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:澤田純男教授・多々納裕一教授(ともに京都大学防災研究所)の委員の皆様(特に、酒井久和教授(法政大学)、静間俊郎主任研究員((株)篠塚研究所)、野津厚領域長((国研)港湾空港技術研究所)、一井康二准教授(広島大学)、丸山喜久准教授(千葉大学))には、本研究の成果に関して有意義な議論をさせていただきました。

ここに記して感謝の意を表します。

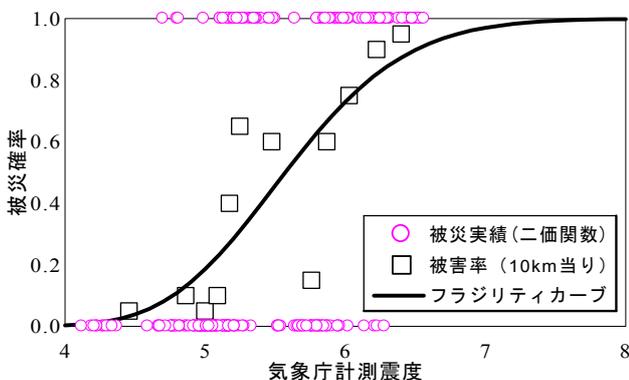


図4 堤防道路の通行機能に着目したフラジリティカーブ

参考文献

- 1) 酒井久和, 長谷川浩一, ネルソン・ブリード, 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.
- 2) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiya, Y. and Yogai, Y.: Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30, No.11, pp.1158-1167, 2010.
- 3) 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一, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
- 4) 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.
- 5) 例えば, 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.
- 6) 例えば, 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.
- 7) 例えば, 東日本大震災合同調査報告書編集委員会: 東日本大震災合同調査報告, 共通編3地盤災害(DVD-ROM), 地盤工学会, 2014.
- 8) 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, Paper No.2-240, 2012.
- 9) 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.
- 10) 依藤光代, 常田賢一: 地震時の段差被害に対する補修と交通開放の管理・運用方法について, 平成19年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 防災・保全部門 No.16, 2007.
- 11) (一財)土木研究センター: 盛土の性能評価と強化・補強の実務, 盛土の性能向上技術普及研究会編, 228p., 2014.
- 12) 例えば, 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.
- 13) 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.
- 14) 運上茂樹, 高宮進, 片岡正次郎, 長屋和宏: 地震発

助成受付番号 第14009号 研究課題番号(6)

生直後の概略被害状況の推測, 国総研レポート 2011, No.10, pp.47, 2011.

- 15) 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.

発表実績一覧

- (1) 秦吉弥, 常田賢一: 鳴瀬川流域の土構造物を対象とした耐震性評価における想定地震に関する一考察, 平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, No.0304, 2015.
- (2) 秦吉弥, 常田賢一, 湊文博, 吉川登代子, 藤木昂: 鳴瀬川堤防沿いにおける常時微動計測および臨時地震観測, 第54回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.202-203, 2015.
- (3) 秦吉弥, 酒井久和, 一井康二: 宮城県北部を震源とする歴史地震による鳴瀬川流域での強震動の評価, 第50回地盤工学研究発表会講演概要集, No.1008, pp.2015-2016, 2015.
- (4) 秦吉弥, 酒井久和, 静間俊郎, 常田賢一, 湊文博, 吉川登代子: 既往の大規模地震における鳴瀬川堤防沿いでの推定地震動と被害率の関係, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集, I-224, pp.447-448, 2015.
- (5) 秦吉弥, 酒井久和, 静間俊郎, 野津厚, 一井康二, 丸山喜久: サイト特性を考慮した推定地震動に基づく堤防道路の通行機能に着目した被害関数の評価—大規模地震による鳴瀬川堤防の被災を例に一, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, pp.I_894-914, 2015.
- (6) 秦吉弥, 常田賢一, 酒井久和, 一井康二, 静間俊郎, 丸山喜久: 鳴瀬川堤防の耐震性評価における想定地震の選定に関する基礎的検討, 第35回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, Paper No.738, 2015.
- (7) 秦吉弥, 常田賢一: 地震時の堤防道路の通行機能に着目したフラジリティカーブの構築, 構造物の安全性および信頼性(JCOSSAR 2015)論文集, Vol.8, pp.45-48, 2015.
- (8) 秦吉弥, 酒井久和, 常田賢一, 一井康二, 湊文博, 丸山喜久: 大規模地震における堤防道路のフラジリティカーブの評価, 第31回日本道路会議論文集, Paper No.2048, 2015.
- (9) 秦吉弥, 湊文博, 藤木昂, 常田賢一, 酒井久和, 一井康二, 静間俊郎, 丸山喜久: 堤防道路のフラジリティカーブの構築に向けた想定地震の選定, 地域安全学会梗概集, No.37, pp.23-26, 2015.
- (10) 秦吉弥, 酒井久和, 静間俊郎, 丸山喜久, 常田賢一, 湊文博: 堤防道路のフラジリティカーブの評価—大規模地震による鳴瀬川堤防の被災・無被災実績を例として一, 日本地震工学会第11回年次大会梗概集, Paper No.P1-8, 2015.
- (11) 秦吉弥, 常田賢一, 酒井久和, 一井康二, 静間俊郎, 丸山喜久: 疑似点震源モデルに基づく1900年宮城県北部の地震における鳴瀬川堤防サイトでの地震動の評価, 地盤と建設, 地盤工学会, Vol.32, No.1, pp.187-192, 2015.