

# サイト特性を考慮した推定地震動に基づく 河川堤防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—

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

<sup>1</sup>正会員 大阪大学 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

<sup>2</sup>正会員 法政大学 デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)

E-mail: hisakai@hosei.ac.jp

<sup>3</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>4</sup>正会員 (独)港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

<sup>5</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>6</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

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)において深刻な被害が繰返し発生している。そこで本研究では、中小地震観測や常時微動計測などを行い、得られた記録に基づいて鳴瀬川堤防沿いの個別地点における経験的サイト増幅・位相特性を評価し、特性化震源モデルを用いた強震波形計算を行うことで、鳴瀬川堤防沿いでの地震動を推定した。さらに、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、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、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、SI値で15cm/s程度、気象庁計測震度で4.6~4.7程度となった。

**Key Words :** river dike, strong motion, seismic observation, microtremor measurement, fragility curve

## 1. はじめに

我が国の河川堤防では、大規模地震による被害がしばしば発生している。例えば、宮城県の鳴瀬川堤防では、既往の大規模地震(1978年宮城県沖地震, 2003年7月26日に発生した宮城県北部を震源とする地震, 2011年東北地方太平洋沖地震など)による被害<sup>1,2,3)</sup>が繰返し発生している。そして、この鳴瀬川堤防の事例では、地震の特性等の違いのために被災形態がまちまちであり、近年、様々な調査・研究<sup>4)</sup>が盛んに行われている。しかし、鳴瀬川堤防の被災・無被災地点における地震動の詳細は十分に明らかになっていない。

被災・無被災事例の分析は、動的解析の精度の検証などを通じた河川堤防の耐震性評価の高度化において重要である。つまり、鳴瀬川堤防の被災地点ならびに無被災地点における地震動を推定することは非常に重要<sup>5)</sup>であ

る。

一方で、河川堤防の要求性能には、止水性のほかに、堤体が幹線道路などとして利用(いわゆる堤防道路<sup>6)</sup>として利用)されることがあることや堤体の安定性・止水性の確認が円滑になされる必要があることから通行機能がある。ここで、止水性の観点については、洪水等の浸透問題に対するフラジリティカーブの構築のためのフレームワーク<sup>8)</sup>が近年提案されている。しかしながら、現在、大規模地震による止水性の低下に関しては、天端の沈下だけでなく、堤防湾曲部における横断方向のクラックの発生<sup>9)</sup>など、未解明な点が数多く残されており、妥当な評価手法が確立されているとは言い難い。また、一般的には、止水性の要件よりも通行機能の要件のほうが厳しいと考えられる。そこで、堤防道路が車両の通行機能を保持できるかどうかの観点から、地震被害予測に基づいた対策を講じていくことが有用であると思われる。

ここで、通行機能の観点に関し、一般的な道路盛土(堤防道路を除く)については、既往の大規模地震による道路盛土の被災データに基づく地震動強さとの関係について様々な研究が既に著者ら<sup>10-13)</sup>などによって行われている。しかしながら、河川堤防の大規模な地震被災は、道路盛土とは異なり、基礎地盤などにおける過剰間隙水圧の発生が主要因である場合が多く<sup>14)</sup>、道路盛土による既往の知見<sup>10-13)</sup>を河川堤防(堤防道路)に対して適用できるかについては更なる検討が必要である。

以上の背景を踏まえ本研究では、まず、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法<sup>15)</sup>を用いて、1978年宮城県沖地震、2003年7月26日7時13分に発生した宮城県北部を震源とする気象庁マグニチュード6.4の地震(以後、2003年宮城県北部の地震と呼ぶ)、2011年東北地方太平洋沖地震における鳴瀬川堤防沿い(左岸ならびに右岸の11k~31k)での地震動を推定した。その際、大きな地震被害に結びつきやすいと考えられるやや短周期帯域<sup>16)</sup>、鳴瀬川堤防沿いの対象区間とその周辺の強震観測点におけるサイト増幅特性(2.5)参照)のピーク周波数などを考慮して、0.2~3.0Hzの速度波形に主に着目した。

さらに、鳴瀬川堤防沿いの推定地震動の分布と、被災実績の関係について統計的な分析を行うことで、車両の通行機能に着目した河川堤防(堤防道路)の地震被災に関する脆弱性カーブを構築した。そして、脆弱性カーブの適合性の観点から、河川堤防の地震時被災予測において適用性の高い地震動指標を提案する。

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))が実施している委員会活動の一環として実施したものである。

## 2. サイト特性の評価

### (1) 強震観測記録の整理

本研究では、図-1、図-2、図-3に示すように鳴瀬川堤防沿いにおける左岸ならびに右岸の11k~31kを検討対象とする(以後、対象区間もしくは対象地域と呼ぶ)。図-1および図-2は、対象区間周辺における既存強震観測点の分布と、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おいて得られた強震観測記録(3成分合成最大加速度PGA, 気象庁計測震度)をそれぞれ示したものである。なお、1978年宮城県沖地震では、開北橋(後述する図-8参照)において観測記録が得られている。

図-1および図-2に示すように、比較的近い位置関係にある観測点間(例えば、美里町役場と松山支所(地点間距

離:3.7km・標高差:4.0m)、南郷支所と鹿島台支所(地点間距離:3.4km・標高差:0.2m)など)でも、本震観測記録の差異が比較的大きくなっており、両観測点間でのサイト特性の違いによるものであると推察される。すなわち、対象区間の被災・無被災の各地点(本震時の地震動未観測点)における地震動評価のためには、当該地点におけるサイト特性を常時微動計測や地震観測の実施により、適切に評価する必要性が示唆される。

### (2) 常時微動計測の実施

対象区間内での地盤震動特性を把握することを目的として、図-3に示すように、対象区間を概ね500mの間隔で全80地点について常時微動計測を実施した(右岸27.5k付近および左岸30.0k付近は工事中のため未実施)。また、後述する余震観測地点でも同様に常時微動計測を実施した。写真-1に左岸11.0kでの常時微動計測状況を示す。計測地点は全て堤内地側(余震観測地点での計測は堤外地側)の主に堤体法尻付近であり、計測機器は物探サービス(株)製GEO-NET1-2S3D(速度計)を採用した。計測機器の詳細については、文献17)を参照されたい。計測方向は水平2成分と鉛直成分の計3成分、計測時間は1計測点あたり11分間、サンプリング周波数は100Hzとした。計測期間は2011年10月24~31日の日中である。雑振動が大きい地点については、時間帯や実施日を変えて再度計測を行った。

図-4および図-5に左岸および右岸における常時微動計測結果(常時微動H/Vスペクトル)を示す。常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法としては、既往の方法<sup>18)</sup>を採用した。図-4および図-5に示すとおり、常時微動H/Vスペクトルの形状やピーク周波数を比較すると、計測地点ごとの差異が比較的小さい区間と大きい区間が見受けられる。例えば、上流側では0.3Hzならびに1Hz付近にピーク周波数を有するスペクトル形状を有しているのに対し、下流側では0.3Hz付近のピーク周波数は不明瞭であり、1Hz付近のピーク周波数がより顕著に表れている。



写真-1 鳴瀬川堤防沿いでの常時微動計測状況例(左岸11.0k)



図-1 2003年宮城県北部の地震による観測記録の分布



図-2 2011年東北地方太平洋沖地震による観測記録の分布

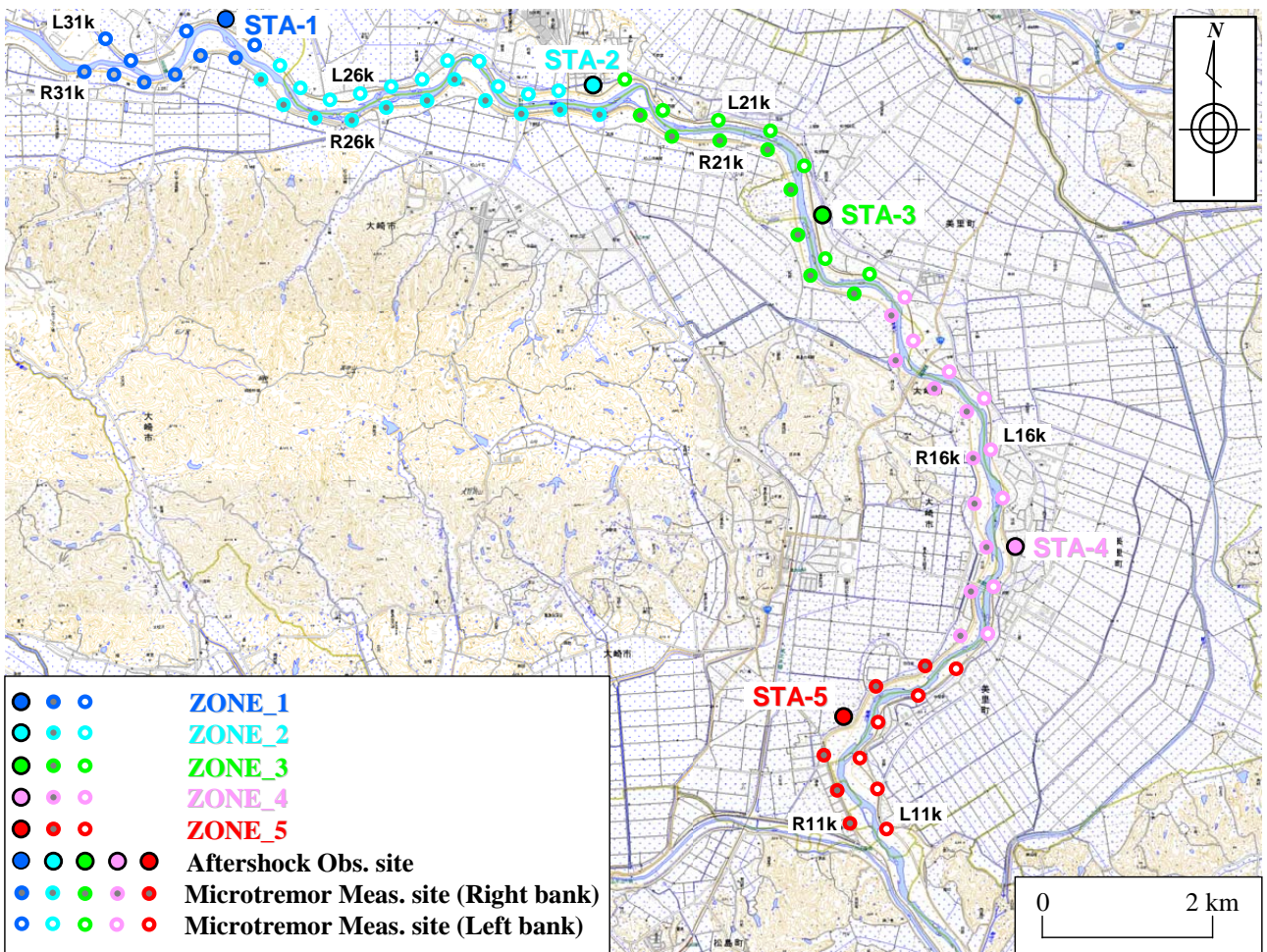


図-3 鳴瀬川堤防沿い(対象区間11k~31k)における余震観測地点・常時微動計測地点とHVスペクトルによるゾーニング

### (3) ゾーニングの実施

本検討では、図-3、図-4、図-5に示すように常時微動HVスペクトルによる地盤震動特性に基づいて対象区間のゾーニングを実施した。ゾーニングの方法としては、DGS値<sup>19)</sup>を用いた定量的方法を採用した。DGS値は常時微動HVスペクトルの2地点間(STATION\_1-5：後述する5

つの余震観測地点、SITE：常時微動の各計測点)の比率の常用対数を取り、対象周波数 $f$ の範囲(0.2-3.0Hz)において積分した値<sup>19)</sup>であり次式で表わされる。

$$DGS = \sum \left| \log \left( \frac{R_{SITE}(f)}{R_{STATION\_1-5}(f)} \right) \right| \cdot \Delta f \quad (1)$$

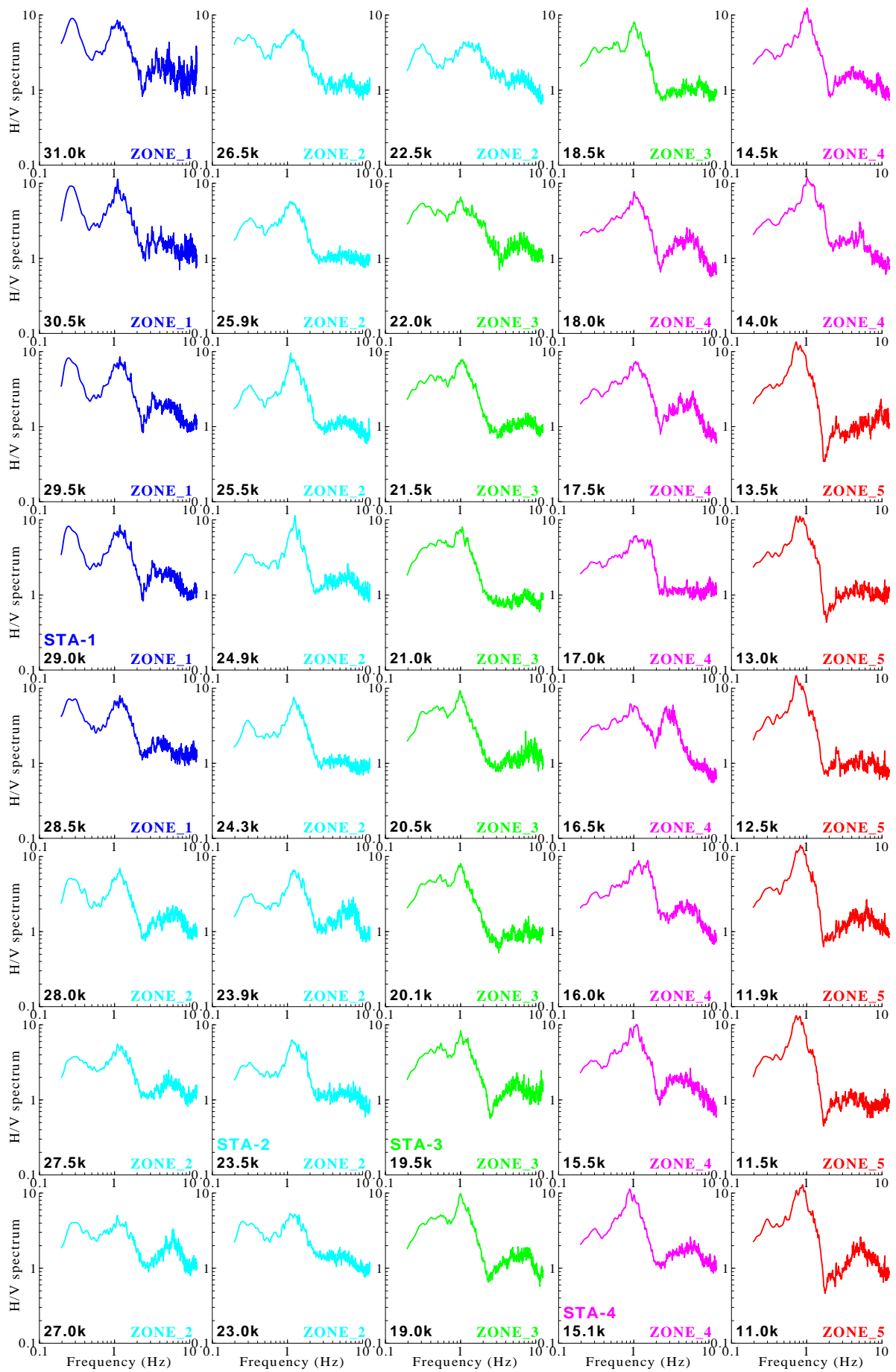


図-4 鳴瀬川堤防(11k~31k)の左岸における常時微動H/Vスペクトル【STA-1~STA-4は余震観測地点】

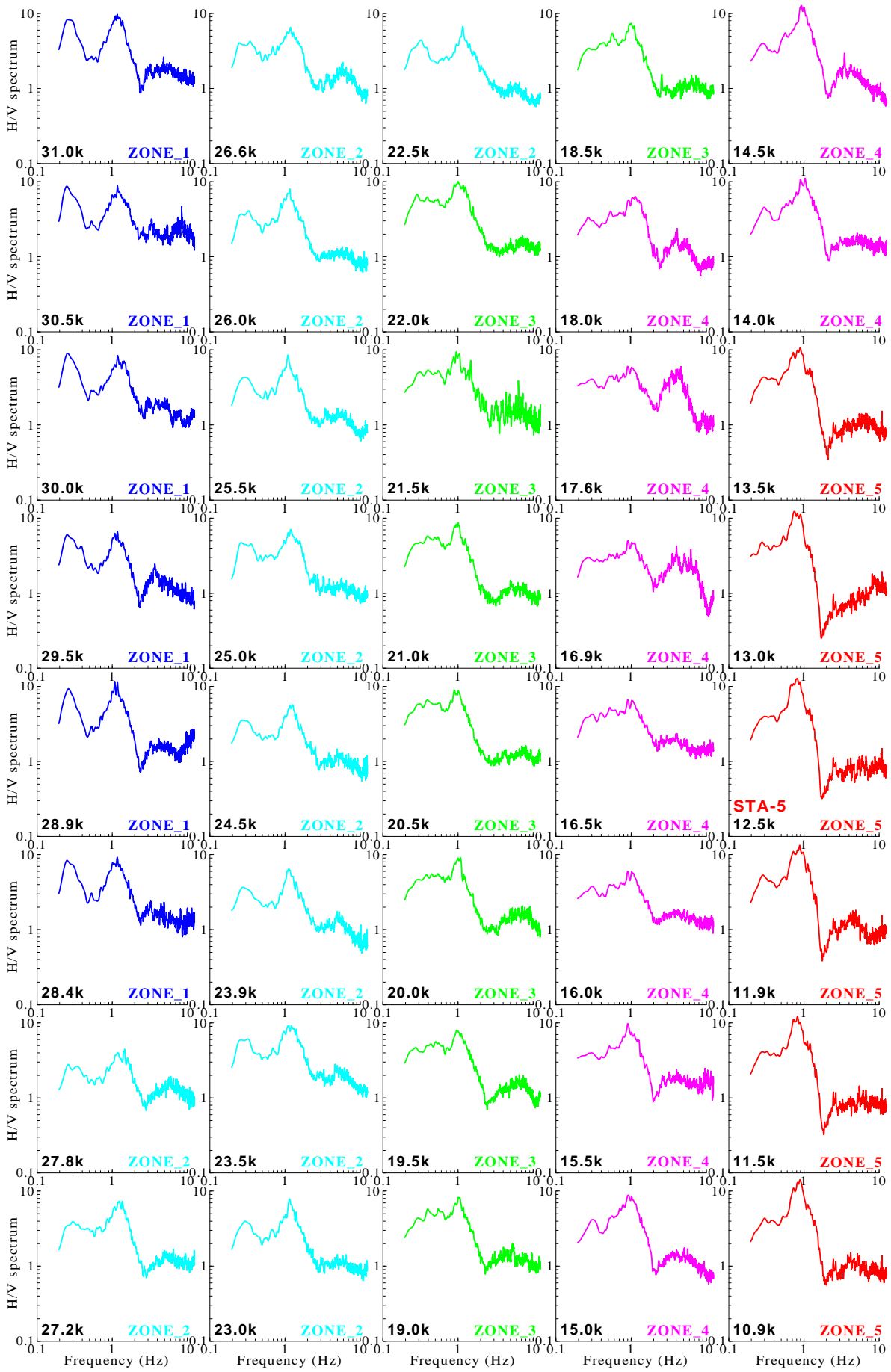


図-5 鳴瀬川堤防(11k~31k)の右岸における常時微動H/Vスペクトル 【STA-5は余震観測地点】

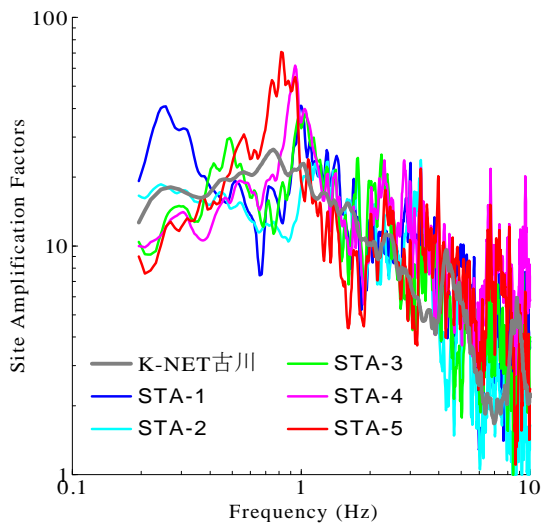


図-6 鳴瀬川堤防の余震観測地点におけるサイト増幅特性

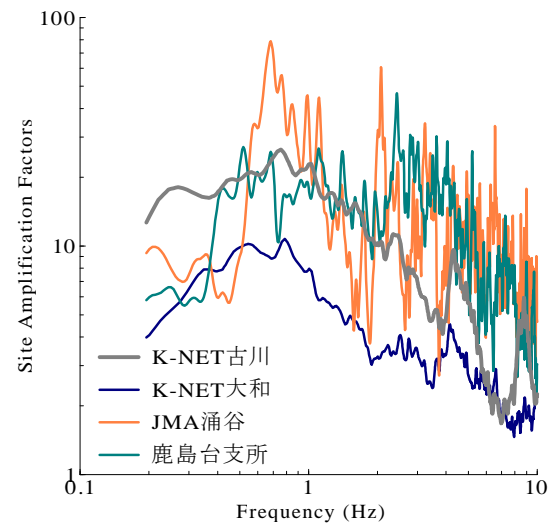


図-7 対象区間周辺の既存強震観測点でのサイト増幅特性<sup>18)21)</sup>

ここに、各余震観測地点では、 $DGS$ 値は0.0となる。常時微動の各計測点における $DGS$ 値を5つの余震観測点に対してそれぞれ計算し、 $DGS$ 値が最も0.0に近くなるゾーンを選択することで、図-3、図-4、図-5に示すように対象区間を5つのゾーンに分割した。

#### (4) 中小地震観測の実施

本検討では、既設の商用電源が利用可能であることなどを考慮して、左岸29.0k、左岸23.5k、左岸19.5k、左岸15.1k、右岸12.5k(いずれも各ゾーン内の堤外地側)の計5地点においてボアホール型地震計を埋設し、地震観測を実施した。地震計のサンプリング周波数は100Hzとした。トリガー加速度レベルは設定せず、常時観測を継続するシステムを採用した。地震計は東京測振(株)製AS-3250A(加速度計)、データロガーは白山工業(株)製LS-7000XTを使用した。観測機器の詳細については、文献17)を参照されたい。観測期間は、2011年11月1日～2012年2月20日までの約3か月間であり、全5観測点(STATION\_1～STATION\_5)において共通である。ここに、得られた主要な中小地震観測記録<sup>20)</sup>の大半は、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域で発生した余震による観測記録であることなどを勘案して、本稿内では以後、余震観測および余震観測地点などと呼ぶこととする。

#### (5) サイト増幅特性の評価

図-6に対象区間内での余震観測地点(左岸29.0k、左岸23.5k、左岸19.5k、左岸15.1k、右岸12.5k)におけるサイト増幅特性の推定結果を示す。同図には、比較対象としてK-NET古川におけるサイト増幅特性<sup>21)</sup>についても示す。なお、本稿でのサイト増幅特性は、全て地震基盤～地表の地震動の増幅特性である。サイト増幅特性は、対象区

間内での余震観測地点とK-NET古川で同時に観測された記録を対象に、2地点間の距離の違いによる補正<sup>22)23)</sup>を考慮したフーリエスペクトルの比率を計算し、この比率をK-NET古川におけるサイト増幅特性<sup>21)</sup>に掛け合わせることで設定<sup>19)</sup>した。なお、距離の違いによる補正としては、幾何減衰に関する補正と非弾性減衰<sup>23)</sup>に関する補正を行い、非弾性減衰を表す $Q$ 値は、佐藤・巽<sup>22)</sup>による $Q$ 値( $Q=114f^{0.92}$ )を適用した。

図-7には、比較対象として、対象区間周辺の既存強震観測点におけるサイト増幅特性<sup>18)21)</sup>を示す。図-6と図-7を比較すると、対象区間内での余震観測地点におけるサイト増幅特性は、周辺のK-NET古川やJMA涌谷などのものと特徴が大きく異なっている。さらに、図-6に示すように、対象区間内においてもサイト増幅特性の特徴が異なっている。すなわち、2.(2)で述べた対象区間内での常時微動HVスペクトルの差異からも推論されるとおり、対象区間内においても本震時の地震動は、1つで代表することが極めて困難であることが改めて確認できる。

### 3. 断層モデルに基づく強震動評価

#### (1) 特性化震源モデル

##### a) 1978年宮城県沖地震

1978年宮城県沖地震による地震動の推定には、野津・菅野<sup>24)</sup>による特性化震源モデル(SPGAモデル)を採用した。図-8にSPGAモデル(SPGA\_1およびSPGA\_2)と対象地域の位置関係、表-1に震源モデルパラメーターの一覧を示す。このモデルは、開北橋(図-8参照)での本震観測記録の速度波形およびフーリエ振幅スペクトルを一定の精度で評価可能なモデル<sup>24)</sup>である。また、震源付近の密度、S波速度、走向、傾斜、破壊開始点、破壊伝播速度は、

表-1 1978年宮城県沖地震の特性化震源モデルのパラメーター

断層パラメーター	SPGA_1	SPGA_2
破壊開始時刻(h:m:s)	17:14:25	17:14:30.8
地震モーメント(Nm)	$1.2 \times 10^{19}$	$4.8 \times 10^{18}$
長さ (km)	4.0	3.0
幅 (km)	3.0	3.0
面積 (km <sup>2</sup> )	12.0	9.0
ライズタイム (s)	0.25	0.25

表-2 2003年宮城県北部の地震の特性化震源モデルのパラメーター

断層パラメーター	AP_1	AP_2	AP_3
破壊開始時刻(h:m:s)	07:13:31.5	07:13:32.4	07:13:34.1
地震モーメント(Nm)	$2.0 \times 10^{17}$	$4.0 \times 10^{16}$	$7.0 \times 10^{17}$
長さ (km)	2.0	1.5	4.0
幅 (km)	2.0	1.0	3.5
面積 (km <sup>2</sup> )	4.0	1.5	14.0
ライズタイム (s)	0.21	0.13	0.39

表-3 2011年東北地方太平洋沖地震の特性化震源モデルのパラメーター

断層パラメーター	SPGA_1	SPGA_2	SPGA_3	SPGA_4	SPGA_5	SPGA_6	SPGA_7
破壊開始時刻(h:m:s)	14:46:43.5	14:46:46.9	14:47:33.4	14:47:26.3	14:47:57.1	14:48:04.4	14:48:15.0
地震モーメント(Nm)	$8.0 \times 10^{18}$	$8.0 \times 10^{18}$	$4.0 \times 10^{18}$	$2.1 \times 10^{19}$	$3.0 \times 10^{18}$	$3.0 \times 10^{18}$	$5.0 \times 10^{18}$
長さ (km)	3.0	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	6.0
幅 (km)	2.0	3.0	2.0	3.0	4.0	4.0	2.0
面積 (km <sup>2</sup> )	6.0	12.0	8.0	10.5	12.0	12.0	12.0
ライズタイム (sec)	0.17	0.25	0.17	0.25	0.33	0.33	0.17

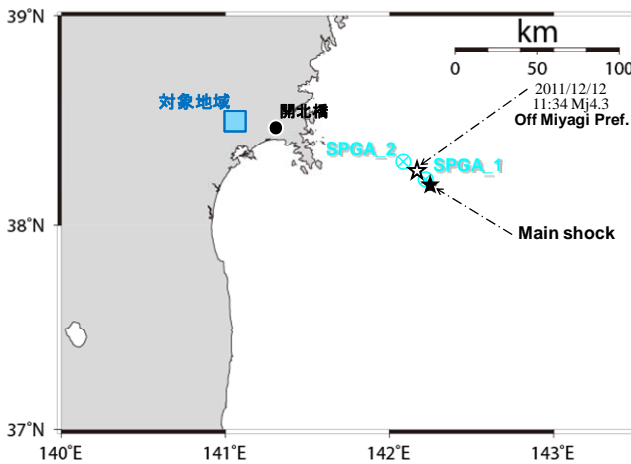


図-8 1978年宮城県沖地震の特性化震源モデル

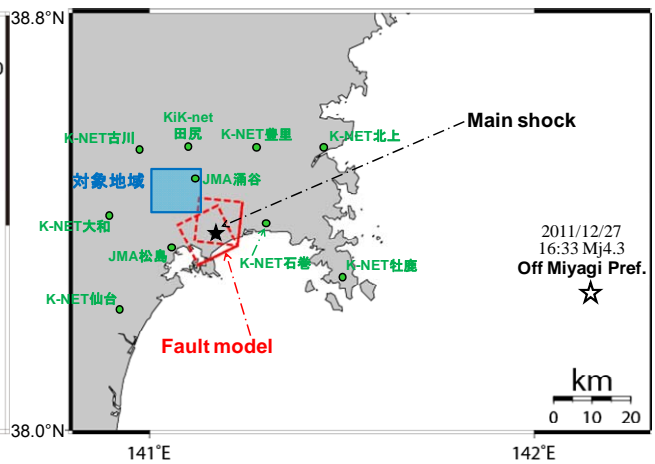


図-9 2003年宮城県北部の地震による矩形断層モデルと周辺観測点

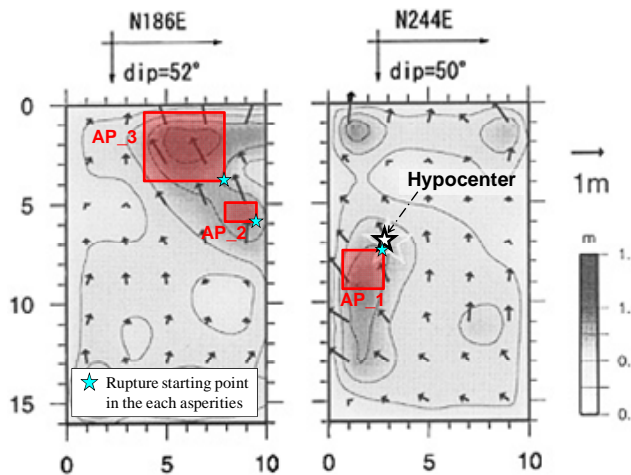


図-10 2003年宮城県北部の地震の特性化震源モデル[文献26)に加筆]

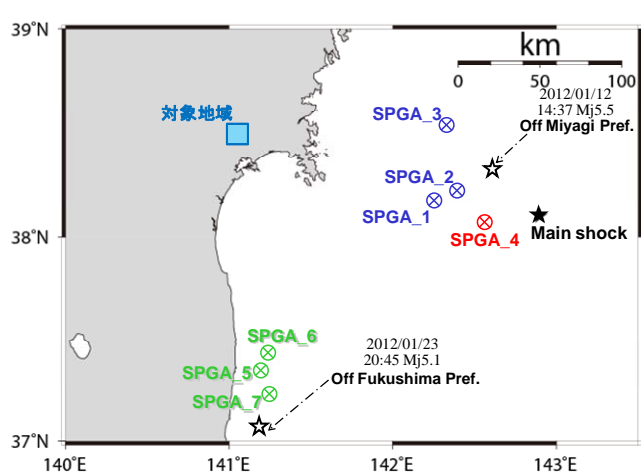


図-11 2011年東北地方太平洋沖地震の特性化震源モデル

いずれも地震調査研究推進本部の提案値<sup>25)</sup>を採用した。一方で、 $Q$ 値については、佐藤・巽<sup>22)</sup>による東日本の海溝型地震での推定値を採用した。

b) 2003年宮城県北部の地震

2003年宮城県北部の地震による地震動の推定には、著者ら<sup>20)</sup>によるアスペリティモデルを採用した。図-9)に2枚の断層面<sup>26)</sup>を地表面に垂直に投影したものと対象地域の

位置関係、および表-2にモデルパラメータの一覧を示す。この震源モデルは、図-10に示すように波形インバージョンによる最終すべり量分布<sup>20)</sup>において、比較的すべり量の大きい領域に3つの矩形アスペリティ (AP\_1, AP\_2, AP\_3)を配した特性化震源モデルであり、対象地域周辺の観測点(図-9参照)で得られた本震記録(速度波形、フーリエ振幅スペクトル、相対速度応答スペクトル、絶対加速度応答スペクトル(ともに減衰定数5%))を一定の精度で評価可能なモデル<sup>20)</sup>である。なお、破壊伝播は、震源(Hypocenter: 図-10参照)から放射状に広がると仮定<sup>27)</sup>し、その伝播速度は2.6km/s、震源付近の密度は2.7t/m<sup>3</sup>、S波速度は3.5km/sをそれぞれ採用<sup>20)</sup>した。一方で、Q値については、佐藤・巽<sup>22)</sup>による東日本の内陸部での推定値を採用した。

### c) 2011年東北地方太平洋沖地震

2011年東北地方太平洋沖地震による地震動の推定には野津<sup>28)</sup>による特性化震源モデル(SPGAモデル)を採用した。図-11に宮城県沖ならびに福島県沖におけるSPGAモデルと対象地域の位置関係、表-3にモデルパラメータの一覧を示す。この震源モデルは、太平洋沿岸および東日本内陸部における既存強震観測点で得られた本震観測記録の速度波形やフーリエ振幅スペクトルを一定の精度で評価可能なモデル<sup>28)29)</sup>である。また、この震源モデルでは、気象庁による破壊開始点を含む走向203deg.および傾斜10deg.の断層面を仮定している。一方で、破壊伝播速度、S波速度、密度、Q値については、地震調査研究推進本部の提案値<sup>25)</sup>を採用している(すなわち上述した1978年宮城県沖地震の震源モデルのパラメータと同様である)。

## (2) 計算手法

本研究では、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法<sup>15)</sup>を採用した。この方法では、まず式(2)により統計的グリーン関数を生成する。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (2)$$

ここに、 $A(f)$ は地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数、 $S(f)$ は中小地震の震源特性<sup>23)</sup>で実数、 $P(f)$ は伝播経路特性<sup>23)</sup>で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(2.5)参照)で実数、 $O(f)$ は対象地点での観測記録のフーリエ変換で複素数、 $|O(f)|_p$ はその絶対値に対してバンド幅0.05 HzのParzen Window(添字 $p$ で表現)を適用したものである。

式(2)からわかるように、本手法では、統計的グリーン関数のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め、統計的グリーン関数のフーリエ

位相としては現地で得られた地震記録のフーリエ位相を用いる。式(2)をフーリエ逆変換し、経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせ<sup>30)</sup>を行うことで、大地震による波形が求まる。なお、Parzen Windowは因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている<sup>15)</sup>。

### (3) サイト位相特性の評価

サイト位相特性(対象地点での余震観測記録のフーリエ変換 $O(f)$ )の取り扱いについては、観測波と置換波による比較検討<sup>31)</sup>を行い、対象地震ごとにそれぞれ適切な地震を選定した。具体的には、1978年宮城県沖地震では、図-8に示すように、当該地震のSPGAの近傍で発生した地震(2011/12/12 11:34 39km Mj4.3)を採用した。ただし、この地震は、1978年宮城県沖地震の本震が観測されている開北橋では記録されていない。2003年宮城県北部の地震では、対象地域周辺の盆地構造への入射角の影響<sup>20)</sup>を考慮して、宮城県沖の地震(2011/12/27 16:33 36km Mj4.3)を採用した(図-9参照)。この採用地震は次節で述べる検証にも利用する。2011年東北地方太平洋沖地震では、図-11に示すように、宮城県沖および福島県沖にあるSPGAの近傍で発生した余震(2012/01/12 14:37 28km Mj5.5と2012/01/23 20:45 52km Mj5.1)をサブイベントごとにそれぞれ使い分けた。これらの地震は3.(4)で述べる検証にも利用する。

## (4) 適用性の確認

### a) 1978年宮城県沖地震

図-12は、開北橋(図-8参照)で得られた1978年宮城県沖地震による速度波形(観測波)と地震動推定結果(推定波)を比較<sup>24)</sup>したものである。なお、両波形は、ともに0.2-3.0Hzのバンド・パス・フィルタを施した速度波形となっている。図-12に示すとおり、主要動の時間帯(8-12s)における速度パルスの振幅や周期の再現性を確認することができ、観測波と推定波は良い一致を示していることから、野津・菅野<sup>24)</sup>による既往の特性化震源モデルの妥当性が改めて確認できる。さらに、図-8に示すとおり、開北橋は、対象地域とSPGAモデルの間に位置していることから、対象地域における1978年宮城県沖地震での地震動の推定に対して、野津・菅野<sup>24)</sup>による特性化震源モデルの適用が有効であると考えられる。

### b) 2003年宮城県北部の地震

図-13は、対象地域を取り囲むように存在するJMA涌谷、K-NET古川、K-NET大和(図-9参照)での2003年宮城県北部の地震による速度波形(0.2-3.0Hz)を観測波と推定波で比較したものである。なお、ここでは、表層地盤の非線形応答の効果を考慮してグリーン関数を補正する方法<sup>24)32)</sup>を採用している。具体的には、堆積層における



平均的なS波速度の低下率を表すパラメータとして $v_1=0.90$ 、堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメータとして $v_2=0.005$ をそれぞれ採用し、非線形性の影響を考慮した波形合成を行った。ここに、 $v_1$ については、既存強震観測点におけるサイト増幅特性のピーク周波数(図-7参照)と、本震観測記録のフーリエ振幅スペクトルのピーク周波数との比率を参考に設定した。また、 $v_2$ については、観測波と推定波の速度振幅の一致度を考慮して設定した。

図-13に示すとおり、主要動の時間帯における速度パルスの再現性、およびK-NET古川での後続位相が卓越する時間帯における波形の再現性など、観測波と推定波が良い一致を示していることから、鳴瀬川堤防における地震動の推定も同様の条件で実施することとした。

#### c) 2011年東北地方太平洋沖地震

図-14は、対象地域に比較的近いJMA涌谷およびK-NET古川での2011年東北地方太平洋沖地震による速度波形(0.2–3.0Hz)を観測波と推定波で比較したものである。なお、K-NET大和では、3.(3)で選定した余震(2012/01/12 14:37 28km Mj5.5と2012/01/23 20:45 52km Mj5.1)による観測記録が得られていない。また、本項でも前項と同様に、表層地盤の非線形応答の効果を考えてグリーン関数を補正する方法<sup>24,32)</sup>を採用しており、非線形パラメータとして $v_1=0.80$ および $v_2=0.030$ をそれぞれ採用し、非線形性の影響を考慮した波形合成を行った。なお、 $v_1$ および $v_2$ の設定方法については、前項と同様である。

図-14に示すとおり、観測波は前半部分と後半部分の2つの主要動で構成されているが、比較的大きな地震動を示す後半部分に主に着目すると、主要動の時間帯(90–100s)における速度パルスの振幅や周期の再現性を確認することができ、観測波と推定波は良い一致を示している。すなわち、野津<sup>29)</sup>によるSPGAモデルと強震波形計算手法を対象地域へ適用しても問題ないことが確認できた。

### 4. 鳴瀬川堤防沿いの強震動の評価

#### (1) 推定方法

本検討では、前章で述べた方法により、対象区間内における鳴瀬川堤防沿いの地震動を概ね500m間隔で推定した。その際、地震動評価の際に必要な位置情報(緯度・経度)は、常時微動計測地点および余震観測地点のもの(図-3参照)を採用した。すなわち、鳴瀬川堤防沿いにおける地震動の評価地点の総数は、80地点となる。

サイト増幅特性に関しては、基本的には各ゾーンにお

ける余震観測記録に基づいて設定されたもの(図-6参照)を用いたが、2.(2)および2.(3)で述べたとおり、同一ゾーン内においても常時微動H/Vスペクトルの特性に差異が見受けられる。そこで、既往の研究<sup>11,33)</sup>で行ったように、同一ゾーン内における余震観測地点と微動計測地点での常時微動H/Vスペクトル(図-4および図-5参照)の比較に基づき、各ゾーンでの余震観測地点におけるサイト増幅特性(図-6参照)に対して補正(微修正)を加えることによって、鳴瀬川堤防沿いの常時微動計測地点(図-3参照)におけるサイト増幅特性を評価した。このとき、既往の研究<sup>10,33)</sup>では、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の違いに着目した文献<sup>34)</sup>の方法を用いたが、本検討ではピーク周波数およびピーク振幅の違いに着目した文献<sup>35)</sup>の方法を用いた。

一方で、サイト位相特性に関しては、各余震観測地点における4.(3)および4.(4)で選定した地震記録の特性を採用した。ただし、各ゾーンでの余震観測記録(水平動)に対して、地震動評価地点(常時微動計測地点)ごとに堤体横断・縦断方向への座標変換を行った。このとき、既往の研究<sup>11,33)</sup>では、各常時微動計測地点において設定されたサイト位相特性に対して、上述したサイト増幅特性のピーク周波数の補正量に応じてサイト位相地震波の時間軸を伸縮補正していたが、本検討では時間軸の補正を実施していない<sup>36)</sup>。

#### (2) 推定結果

図-15および図-16に鳴瀬川堤防の代表地点<sup>4)</sup>である右岸13.0k、左岸20.5k、左岸30.5kにおける堤体横断方向における速度波形(0.2–3.0Hz)および加速度波形(フィルタ処理なし)を示す。図-15および図-16に示すように、同じ対象地震でも代表地点によって振幅特性や波形形状に違いがあることが確認でき、2003年宮城県北部の地震のケースでは、その違いが非常に大きくなっている。

図-17は、鳴瀬川堤防の代表地点<sup>4)</sup>での推定加速度波形(図-16参照)に対する相対速度応答スペクトルおよび絶対加速度応答スペクトル(ともに減衰定数5%)である。

図-17に示すように、2011年東北地方太平洋沖地震のケースでは、代表3地点における応答スペクトルの差異が比較的小さいのに対し、1978年宮城県沖地震および2003年宮城県北部の地震のケースではその差異が比較的大きくなっている。特に、2003年宮城県北部の地震のケースでは、左岸20.5k地点での推定地震動の応答スペクトルが、右岸13.0kおよび左岸30.5k地点での応答スペクトルを対象周期帯(0.1–10s)において上回っている。

図-18には、対象全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)による鳴瀬川堤防沿いの推定地震動の分布の一例として、気

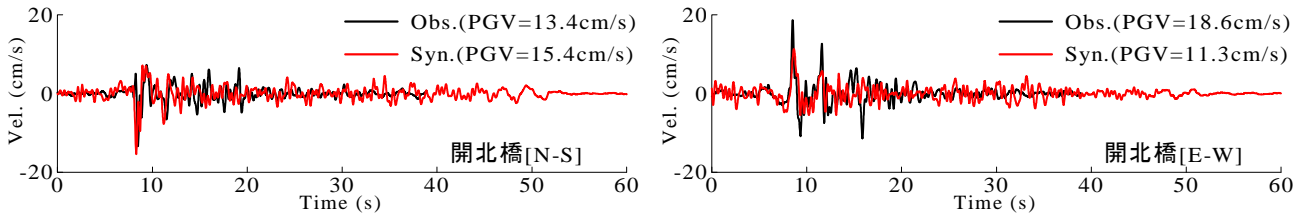


図-12 1978年宮城県沖地震による開北橋での強震観測記録の再現（速度波形：0.2-3.0Hz）〔文献24〕に加筆

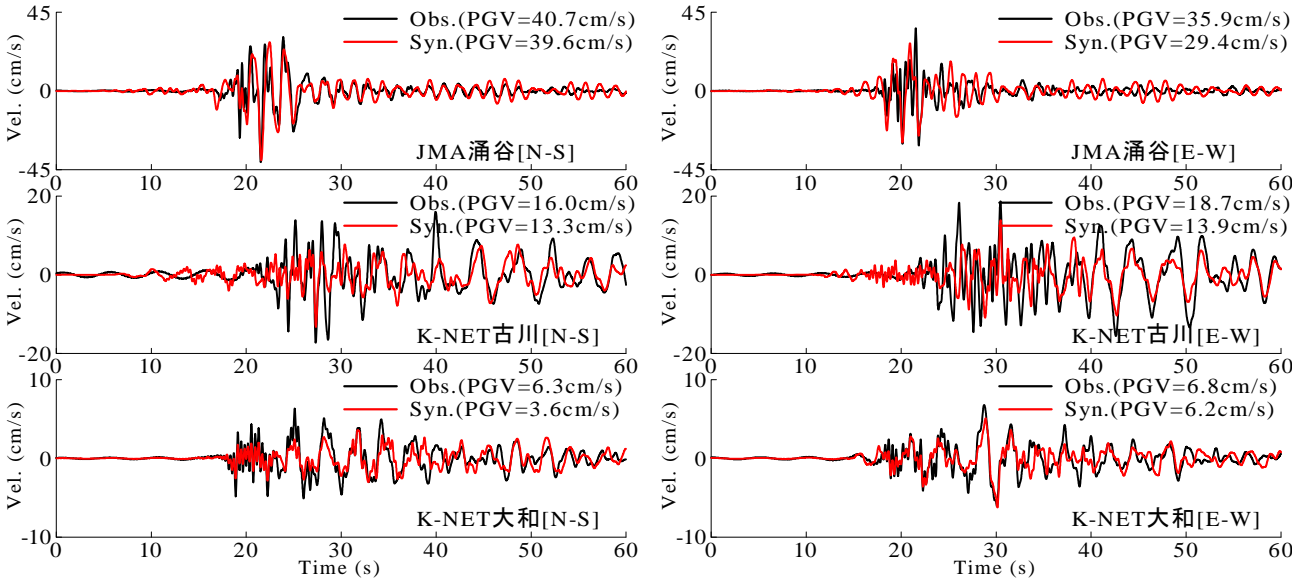


図-13 2003年宮城県北部の地震による鳴瀬川堤防周辺の観測点での強震観測記録の再現（速度波形：0.2-3.0Hz）

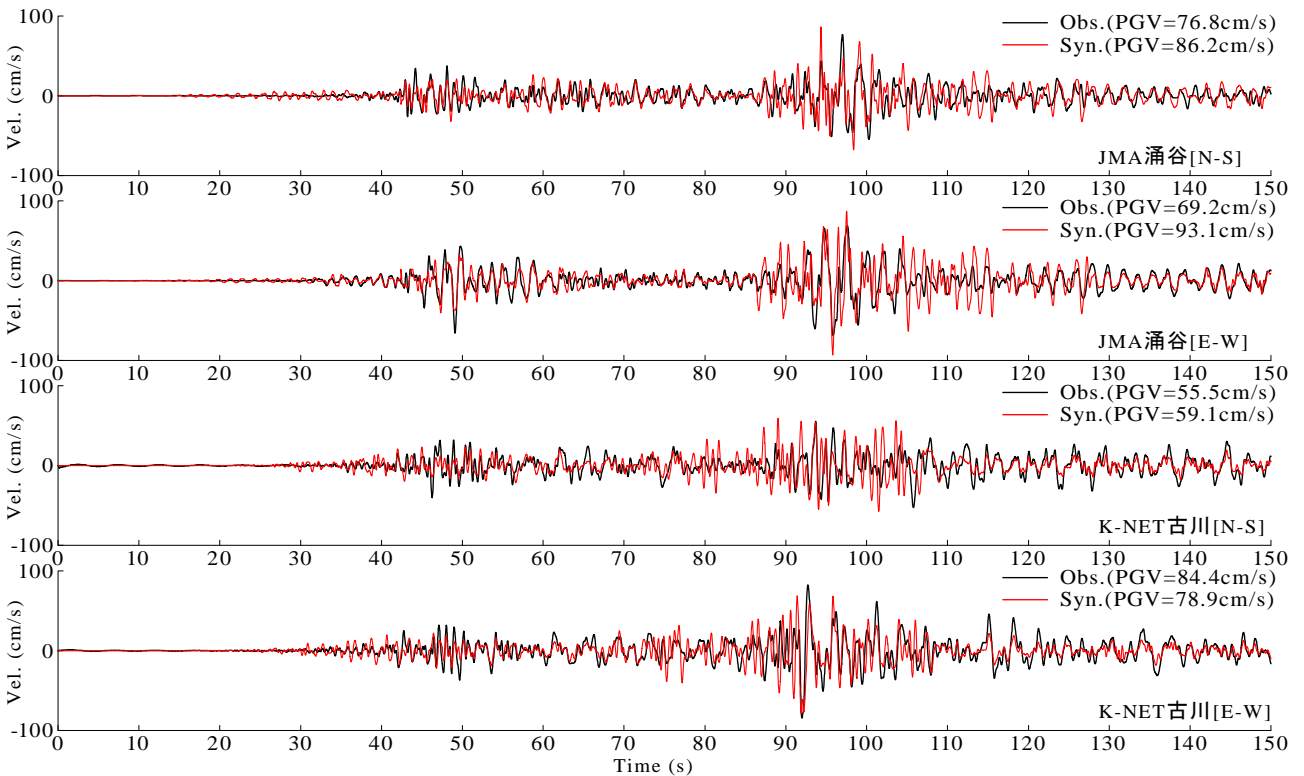


図-14 2011年東北地方太平洋沖地震によるJMA涌谷およびK-NET古川での強震観測記録の再現（速度波形：0.2-3.0Hz）

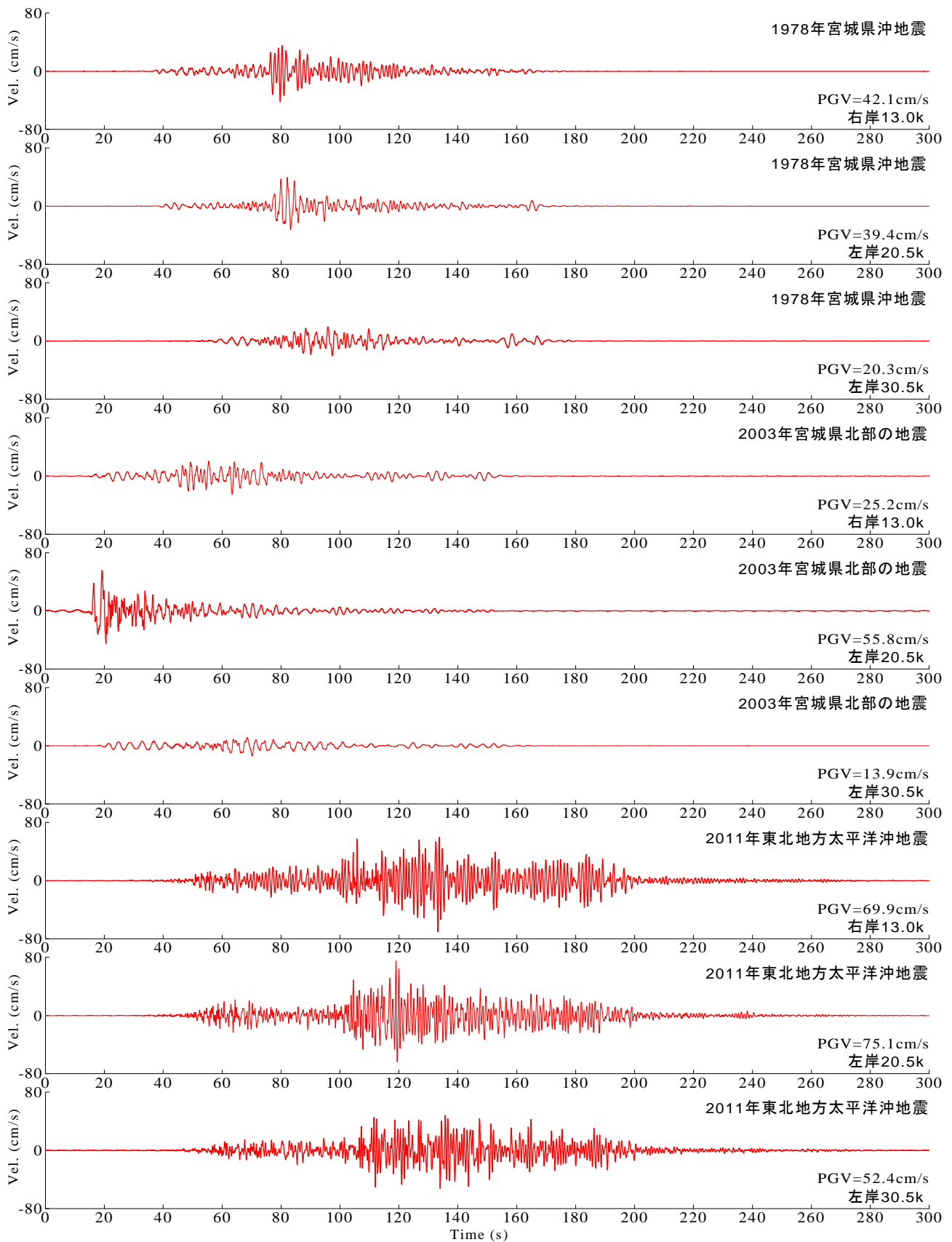


図-15 鳴瀬川堤防の代表地点<sup>4)</sup>での推定地震動 (速度波形: 0.2-3.0Hz)

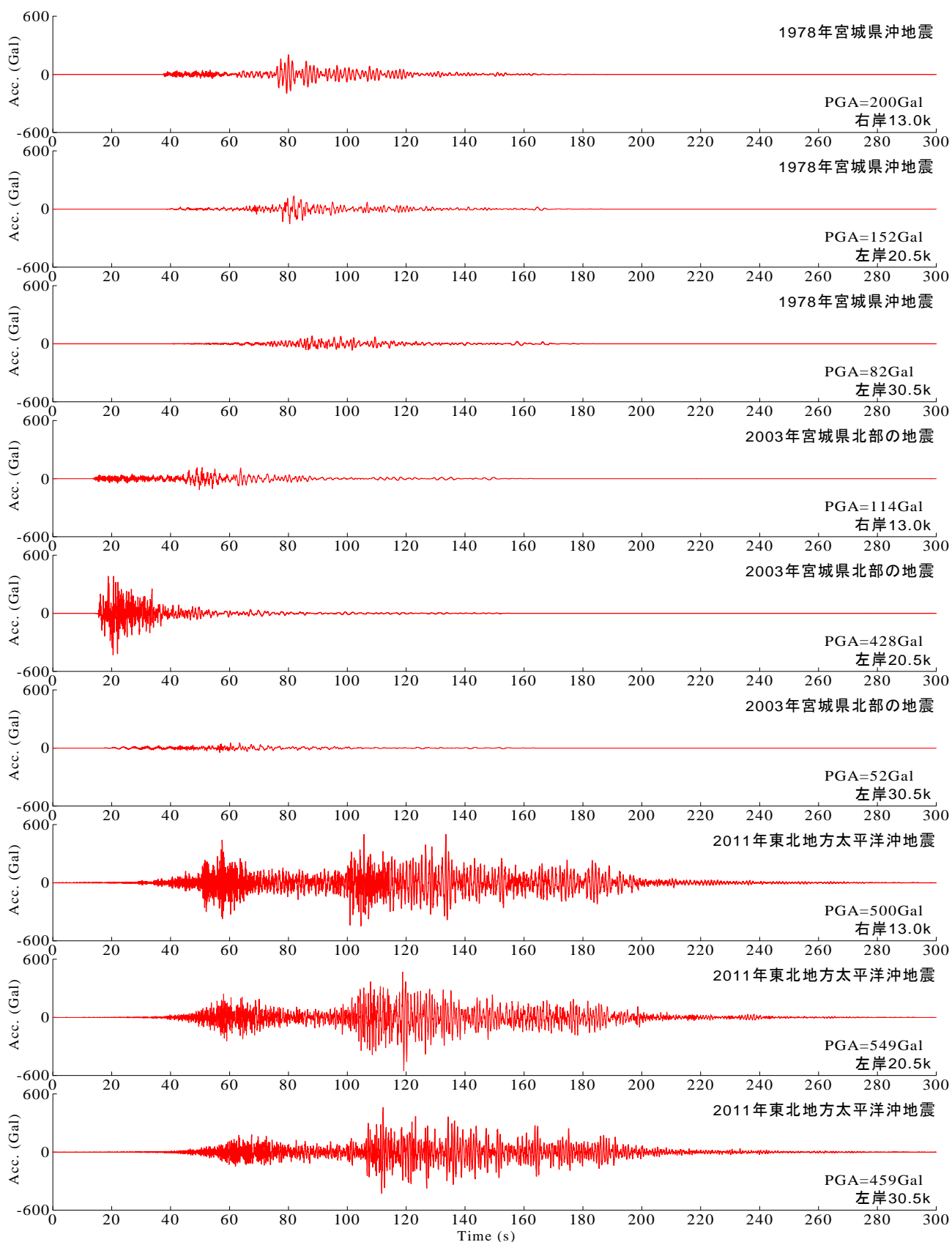


図-16 鳴瀬川堤防の代表地点<sup>9)</sup>での推定地震動（加速度波形：フィルタ処理なし）

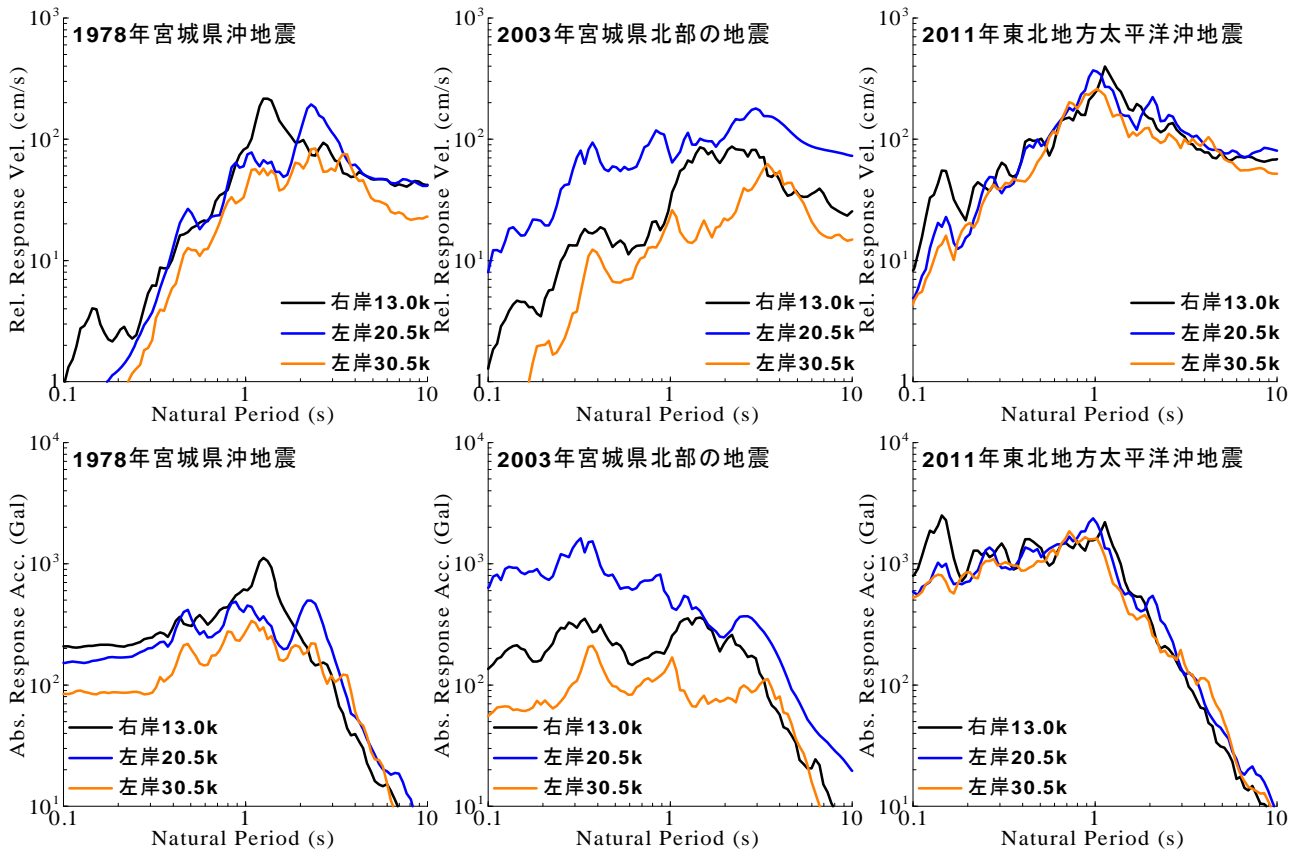


図-17 鳴瀬川堤防の代表地点<sup>4)</sup>での推定地震動による相対速度・絶対加速度応答スペクトル (ともに減衰定数: 5%)

象庁計測震度(堤体横断・縦断方向の水平2成分で計算)の分布を示す。図-18に示すように、1978年宮城県沖地震のケースでは11k~13k付近、2003年宮城県北部の地震のケースでは19k~22k付近、および2011年東北地方太平洋沖地震のケースでは16k付近においてそれぞれ気象庁計測震度の値が比較的大きくなっており、気象庁計測震度が相対的に大きい区間は対象3地震ごとにそれぞれ異なっていることが読み取れる。

## 5. 被災実績と地震動強さの関係

### (1) 被災確率と統計解析

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(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実性を伴う。一方で、河川堤防が有している耐震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、上述した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。フラジリティカーブ(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。すなわち、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。

$$P_f = P(C < R) = P(X < 1.0) \quad (3)$$

ここに、 $X$ は $CR$ 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。

$$F_z(r_m) = \int_0^{r_m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \ln c_m}{\zeta}\right)^2\right] dz \quad (4)$$

ここに、対数標準偏差 $\zeta$ は、挙動と性能の対数標準偏差 $\zeta_r$ 、 $\zeta_c$ の合成値であり、次式を用いて表わされる。

$$\zeta = \sqrt{\zeta_r^2 + \zeta_c^2} \quad (5)$$

FCは、 $r_m$ を条件とした一価関数として、(4)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、対数標準偏差 $\sigma$ および性能の中央値 $c_m$ を河川堤防の地震被災実績(後述)から統計的に推定することを目指す。統計解析には、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 $\sigma$ は、それぞれ尤度を最大とする値として求められる。

## (2) 推定地震動とその評価指標

FCの構築においては、地震動指標として何が適切かがしばしば議論となるが、本稿では、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個別地点(常時微動計測地点)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(4.(2)参照)。すなわち、種々の地震動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研究の強みである。そこで本研究では、以下に示す6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>37)</sup> (堤体横断・縦断方向合成)
- ・ 境ら<sup>38)</sup>の修正計測震度(堤体横断・縦断方向合成)
- ・ Housner<sup>39)</sup>によるSI値 (堤体横断面方向)
- ・ 野津・井合<sup>40)</sup>による速度PSI値 (堤体横断面方向)

ここに、最大速度PGVは、フィルタ処理(0.2-3.0Hz)を施していない速度波形に対する絶対最大値である。上記の全6指標値による対象区間内での推定地震動の分布については文献(41)を参照されたい。

## (3) 被災実績の整理

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災実績に関する既存資料<sup>(1)(2)(3)(42)(52)</sup>に基づいて被災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)の推定地震動の指標値のレンジは幅広いことを確認しており、FC構築のための統計情報(ここでは被災実績の有無)の整理に適した区間であるといえる。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(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、常田・小田<sup>53)</sup>による人工段差道路での車両走行実験結果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<sup>53)</sup>)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-3および図-18参照)ごとにそれぞれ判断した。ここに、著者が実施した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被災調査の結果では、報告されている沈下量とほぼ同じ程度の段差が発生しており、沈下量を段差と読み替えて被災の有無の判断を行ったとしても問題がないと考えている。

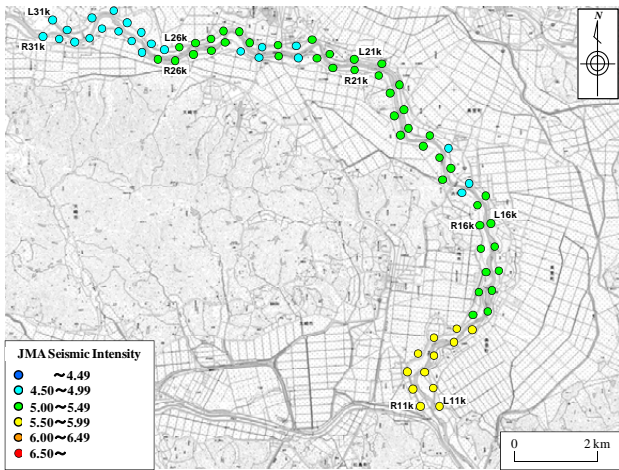
図-19には、5.(1)で述べた二価関数を用いて整理した対象3地震による対象区間内での被災実績の分布を示す。ここに、堤体天端の沈下量が37.5cm以上の場合は1、沈下量が37.5cm未満の場合は0となる。すなわち、地震動評価地点(図-3および図-18参照)を中間点とし、その前後の約250mの範囲内における沈下量の最大値に基づいて二価関数により整理した。なお、1978年宮城県沖地震による被災実績では、対象区間内の一部において縦断測量に基づく沈下量が得られていないため、既存資料<sup>(1)(39)(40)</sup>等で被災が報告されている区間を被災有と判断した。

図-19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、4.(2)で述べた地震動指標値の分布(図-18参照)と同様に、被災実績の分布(図-19参照)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。

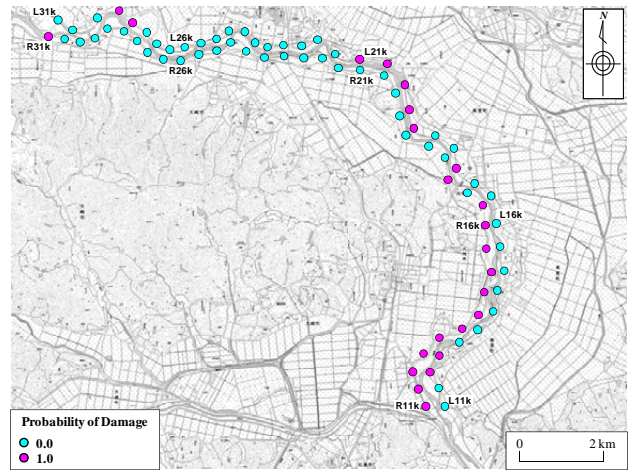
## 6. フラジリティカーブの構築ならびに考察

### (1) フラジリティカーブの統計評価結果

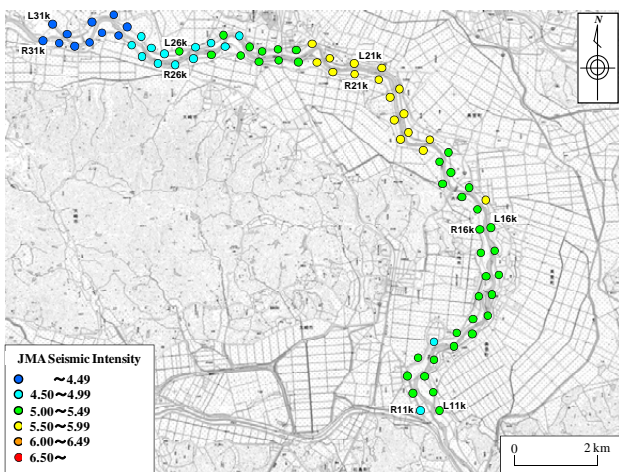
図-20は、FCの構築に先立ち計算した被害率<sup>54)</sup>の分布を各地震動指標値についてプロットしたものである。ここに、被害率<sup>54)</sup>は、以下に示す手順で計算した。まず、被災実績の有無(0または1)と、それに対応する推定地震動の評価指標のデータ(データ数は、[i]各地震のケースでは80(=地震動評価地点の総数80×対象地震の数1)、[ii]全対象3地震のケースでは240(=地震動評価地点の総数80×対象地震の数3)となる)を地震動指標の小さい順に並び替えた。次に、並び替えたデータを地震動指標値が小さい順に順次20データずつ取っていった。最後に、20データごとに被害率(被災有と判断した数/地点数(=20))、ならびに対応する推定地震動の評価指標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



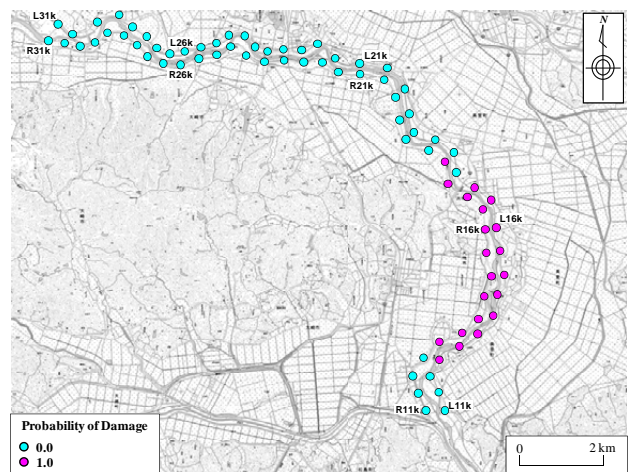
(a) 1978年宮城県沖地震



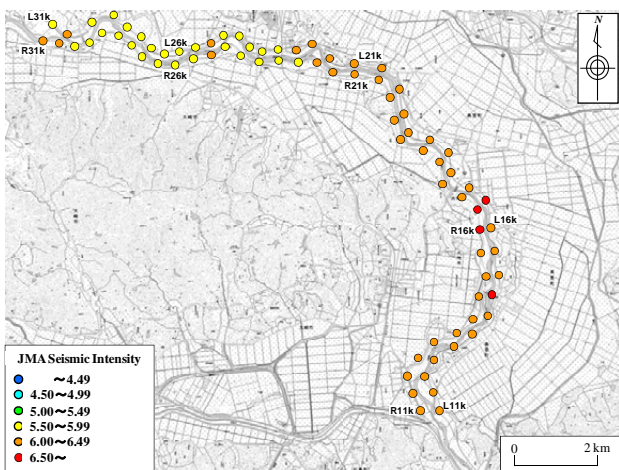
(a) 1978年宮城県沖地震



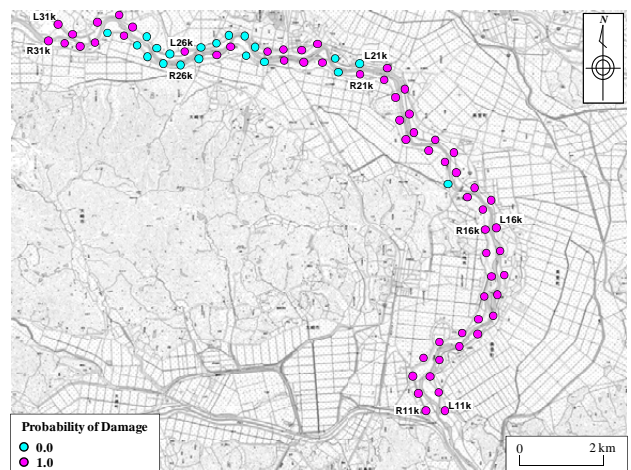
(b) 2003年宮城県北部の地震



(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

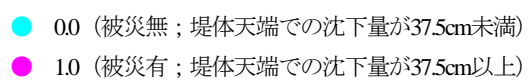
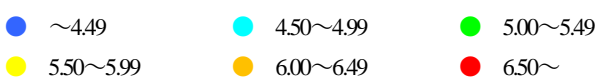


図-18 気象庁計測震度(堤体横断・縦断方向合成)の分布

図-19 二価関数による堤防被災の有無の分布

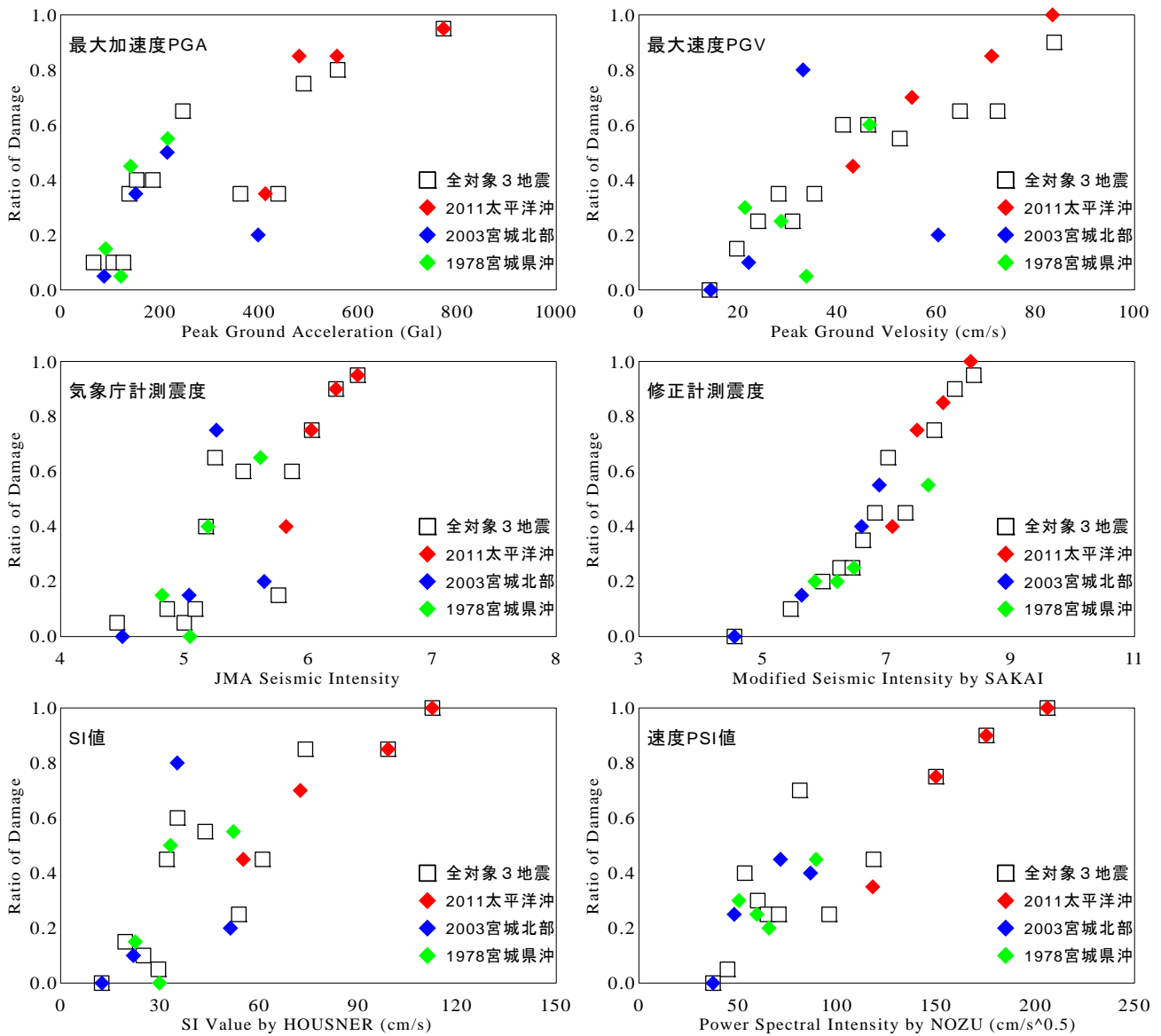


図-20 各地震動指標に対する被害率の分布

12 個作成されることになり、1 つの被害率に 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-20 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、地震動指標の種類に関わらず、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それぞれ大きく依存しているのが読み取れる。

図-21 は、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) を対象に最尤法により FC を統計評価した結果である。また、表-4 (左側・中央) 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-21 には、全対象 3 地震のケースにおける被害率 (図-20 参照) についても併記している。図-21 に示すように、FC

と被害率の分布が概ね調和的であることから、構築した FC は被災実績を概ね説明できていることが読み取れる。なお、一般的に、FC は様々な不確実性が対数正規分布で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の被災を一元的に取扱ったものであり、評価した FC (図-21 参照) には、地震動の推定誤差なども考慮されていることに留意する必要がある。

## (2) 地震動指標の評価

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。評価した FC (図-21 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表-4 (右側) 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



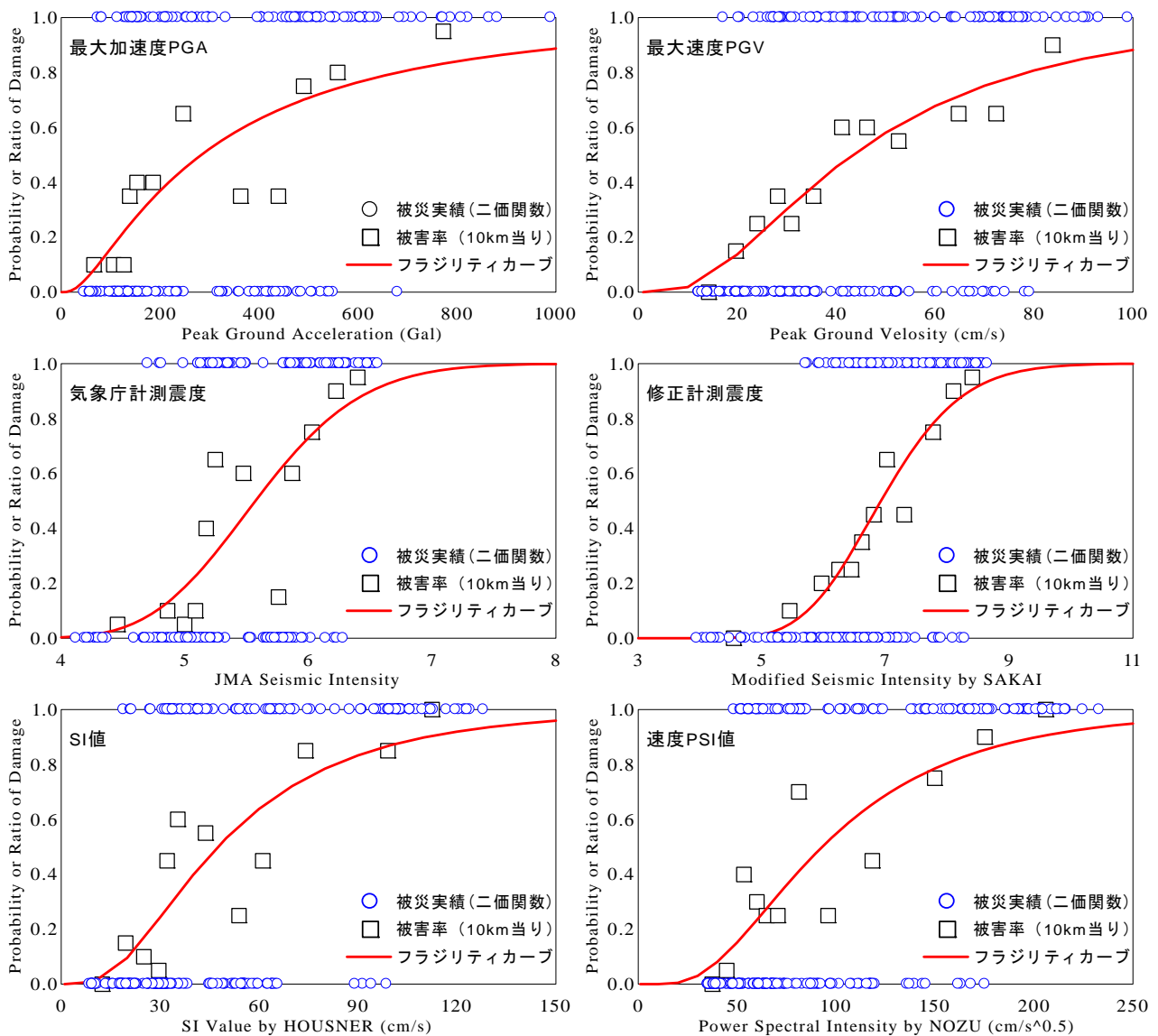


図-21 鳴瀬川堤防での推定地震動と被災実績に基づくフラジリティカーブ

表-4 FC構築に伴う中央値, 対数標準偏差, 対数尤度の一覧

地震動指標	中央値	対数標準偏差	対数尤度
最大加速度 [Gal]	283	1.042	-134.3
最大速度 [cm/s]	43.0	0.705	-133.4
JMA計測震度	5.57	0.121	-124.3
修正計測震度	6.93	0.147	<b>-116.1</b>
SI値 [cm/s]	47.5	0.661	<b>-119.5</b>
速度PSI値 [cm/s <sup>0.5</sup> ]	93.0	0.603	-122.7

した指標値<sup>39)</sup>である。図-21 および表-4 から得られた知見は、河川堤防の地震被災に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おり、これま

での著者ら<sup>55)59)</sup>による土構造物に影響を及ぼす周波数帯域に関する一連の検討結果(ただし河川堤防は含まれていない)と概ね調和的である。

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>60)</sup>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、最大加速度PGA、SI値などがある。評価したFCの対数尤度(表-4参照)を考慮すれば、SI値を用いたFC(図-21参照)が最も実用的である可能性が高い。図-21によれば、SI値がおおよそ15cm/sに達すると被災確率が5%となる。このあたりが、被災発生を考慮すべき地震動レベルであると思われる。また、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、4.6~4.7の時に被災確率が5%となる。一方で、丸山ら<sup>11)</sup>によれば、高速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は、被害率が0.05~0.1件/km(確率に読み替え

ると2.5~4.9%)の時に、気象庁計測震度で5.1~5.2と報告されている。両者(河川堤防での値(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。

## 7. まとめ

本研究では、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、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での地震動を推定した。さらに、推定地震動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、河川堤防のフラジリティカーブを構築した。本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 鳴瀬川堤防の対象区間(11k~31k)では、サイト特性が対象区間内で大きく変化しており、1つのサイト特性で代表させることができない。また、周辺の既存強震観測点におけるサイト特性との差異も大きく、既存強震観測点で得られた本震記録を鳴瀬川堤防の対象区間(11k~31k)に直接転用することはできない。
- (2) 全対象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)におけるサイト特性を考慮した推定地震動(たとえば気象庁計測震度などの指標値)が比較的大きい区間は、対象地震ごとにそれぞれ異なっている。
- (3) 鳴瀬川堤防の被災事例よりフラジリティカーブを構築した。このとき、実被害との適合度が比較的良好地震動指標値は、修正計測震度およびSI値である。
- (4) 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のは、SI値で15cm/s程度および気象庁計測震度で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る。

また、本研究で推定した既往の大規模地震による鳴瀬川堤防沿いの推定地震動は、動的解析などによる河川堤防の耐震検討への利活用<sup>6)</sup>が期待できる。さらに、本研究で構築されたフラジリティカーブは、河川堤防の地震被災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、今回の鳴瀬川堤防における事例以外の他の地震・地域に対するフラジリティカーブの適用性については、今後の検討課題である。

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。また、気象庁JMA、(独)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。さらに、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、涌谷町民の皆様は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(広島大学大学院工学研究科)にご協力いただきました。本研究を遂行する上で、佐々木康(広島大学名誉教授)には非常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。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 例えば，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.
- 5) 野津厚，一井康二：性能設計の発展型としてのEvidence-Based Designの提案とその実現に向けた課題，第13回日本地震工学シンポジウム論文集，日本地震工学会，pp.3073-3080, 2010.
- 6) 平野智，中山修：堤防と道路の一体整備に関する調査研究，財団法人国土技術研究センター第25回技術研究発表会概要集，No.3, 2011.
- 7) 庄内川堤防道路検討会：提言書，国土交通省中部地方整備局庄内川河川事務所，平成20年3月，2008.
- 8) 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.
- 9) 例えば，加納誠二，佐々木康，秦吉弥，榎野光：堤防湾曲部の地震時応答に関する実験的検討，土木学会地震工学論文集，Vol.27, pdfNo.249, 2003.
- 10) 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.
- 11) 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の関係，土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.208-216, 2008.

- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 例えば, 佐々木康: 堤防の地震災害と災害軽減工学, *JICE REPORT*, Vol.9, pp.85-96, 2006.
- 15) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
- 16) 川瀬博: 震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能—1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ—, 第10回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集, pp.29-34, 1998.
- 17) 秦吉弥, 一井康二, 常田賢一, 柴尾享, 山田雅行, 満下淳二, 小泉圭吾: アレー計測を利用した道路盛土の地震応答特性の評価, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2010 論文集, 地盤工学会, pp.21-26, 2010.
- 18) 秦吉弥, 一井康二, 酒井久和, 野津厚: 宮城県・鳴瀬川流域周辺の強震観測点における常時微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性, 広島大学大学院工学研究科研究報告, Vol.60, No.1, 2011.
- 19) Hata, Y., Ichii, K. and Nozu, A.: Preliminary study on the difference of indexes of seismic motions observed at adjacent sites, *Proc. of 2nd International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.42-50, Taormina, Italy, 2012.
- 20) 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, pdfNo.2-240, 2012.
- 21) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
- 22) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
- 23) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 24) 野津厚, 菅野高弘: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—, 港湾空港技術研究所資料, No.1173, 2008.
- 25) 地震調査研究推進本部: 宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版)について, 文部科学省研究開発局地震・防災研究課, 2005.
- 26) 関口春子, 青井真, 本多亮, 功刀卓, 先名重樹, 藤原広行: K-NET, KiK-netによる2003年7月26日宮城県沖の地震の地震動・地震過程, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, A084, 2003.
- 27) 池田隆明, 釜江克宏, 三輪滋, 入倉孝次郎: 強震動予測のレンピを用いた2003年7月26日宮城県北部の地震(Mj6.2)の強震動シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.517-518, 2004.
- 28) 野津厚: 2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.2, pp.21-40, 2012.
- 29) 野津厚, 若井淳: 東北地方太平洋沖地震を対象とした震源モデルの検証—震源モデル作成時に対象としていなかった地点での地震動の計算結果—, 第9回日本地震工学会・大会—2012梗概集, pp.76-77, 2012.
- 30) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
- 31) 例えば, 秦吉弥, 野津厚, 中村晋, 一井康二, 酒井久和, 丸山喜久: 2011年東北地方太平洋沖地震で被災した橋梁での余震観測と地震動の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.3, pp.49-52, 2012.
- 32) 野津厚, 盛川仁: 表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法, 地震, 第2輯, Vol.55, pp.361-374, 2003.
- 33) 秦吉弥, 一井康二, 野津厚: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した八戸市簗子渡における強震動の推定, 地盤と建設, 地盤工学会, Vol.27, No.1, pp.23-31, 2010.
- 34) 長尾毅, 平松和也, 平井俊之, 野津厚: 高松港における被害地震の震度再現に関する研究, 海洋開発論文集, 土木学会, Vol.22, pp.505-510, 2006.
- 35) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.56A, pp.324-333, 2010.
- 36) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚: 設計用入力地震動評価における位相特性の補正方法に関する研究, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.4, pp.13-19, 2012.
- 37) 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.
- 38) 境有紀, 瀧澤一起, 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.
- 39) 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.
- 40) 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.
- 41) 秦吉弥, 静間俊郎, 酒井久和, 一井康二, 丸山喜久, 村上陽平: 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, 第32回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, pdfNo.2-241, 2012.
- 42) 土木学会東北支部: 1978年宮城県沖地震調査報告書, pp.37-98, 1980.
- 43) 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.
- 44) 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.
- 45) 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.
- 46) 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.
- 47) 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.
- 48) 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.
- 49) 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.
- 50) 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.
- 51) (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.
- 52) 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.
- 53) 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.
- 54) 例えば, 中村孝明, 長沼敏彦, 静岡俊郎, 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.
- 55) 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.
- 56) 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.
- 57) 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, pp.1033-1038, 2002.
- 58) 秦吉弥, 一井康二, 野津厚, 酒井久和: 大規模地震による盛土の残留変形に影響を及ぼす入力地震動の周波数帯域に関する一考察, 第 58 回地盤工学シンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.225-232, 2013.
- 59) Hata, Y., Wang, G. and Kamai, T.: Preliminary study on contribution of predominant frequency components of strong motion for earthquake-induced landslide, *Proc. of XII International IAEG Congress*, Paper No.059, Torino, Italy, 2014.
- 60) 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.
- 61) 例えば, 酒井久和, 秦吉弥, 渦岡良介, 吉澤睦博: 既往地震の鳴瀬川河川堤防の被害に基づく簡易耐震性評価手法の検討, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.4, pp.I\_134-141, 2013.

## EVALUATION OF FRAGILITY CURVE ON TRAFFIC FUNCTION OF RIVER DIKE BASED ON STRONG MOTION ESTIMATION CONSIDERING EMPIRICAL SITE AMPLIFICATION AND PHASE EFFECTS — THE CASE OF THE NARUSE RIVER DIKE FOR THE PAST LARGE SCALE EARTHQUAKES —

Yoshiya HATA, Hisakazu SAKAI, Toshiro SHIZUMA,  
Atsushi NOZU, Koji ICHII and Yoshihisa MARUYAMA

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 Naruse River dike. In this study, seismic waveform evaluation was conducted at numerous sites along the dike based on empirical site amplification and phase effects. Using both the actual damage data and detailed distribution of the estimated ground motion, this study conducts the statistical analysis on the relationship between the damage ratio and several indices of the 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 15 cm/s.