河川堤防における地震動および津波 の複合影響に関する再現解析

秦 吉弥1・谷本 隆介2・常田 賢一3・舘川 逸朗4

¹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
²学生会員 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: rtanimoto@civil.eng.osaka-u.ac.jp
³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: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp
⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 大阪本社(〒541-0052大阪府大阪市中央区安土町2-3-13)
E-mail: itsurou.tatekawa@os.pacific.co.jp

2011年東北地方太平洋沖地震により、宮城県石巻市の新北上川の堤防は、津波で破堤したとされている が、津波前の地震動により堤防の沈下が発生し、津波により堤防被害が増長した可能性がある.本研究で は、津波遡上の影響範囲にある河川堤防における地震動および津波の複合的な影響に着目し、河川堤防の 被害に関する再現解析を実施した.まず、地震動の影響に関して、現地で実施した常時微動計測に基づい て推定した本震の地震動により動的有効応力解析を実施した.次に、津波の影響に関して、地震動による 残留変形下の津波越流解析を実施した.その結果、津波による破堤区間と未破堤区間において、地震動に よる残留変形および残留変形下の堤防での津波の越流特性(流速など)の差異が明らかになり、津波遡上域 にある河川堤防の耐震性と耐津波性の複合関係および津波対策としての耐震性の重要性が明らかになった.

Key Words: river dyke, seismic ground motion, tsunami flood, subsidence, erosion

1. はじめに

我が国の河川堤防では、既往の大規模地震において被 災がしばしば発生している。2011年東北地方太平洋沖地 震では、(新・旧)北上川堤防・鳴瀬川堤防・吉田川堤 防・江合川堤防・阿武隈川堤防・利根川堤防などにおい て、それぞれ深刻な被害が数多く報告^{1,2)}されている。

その中でも、2011年東北地方太平洋沖地震によって被 災した河川堤防の一部は、強震動の作用だけでなく巨大 津波の作用を受けていることが特徴的である.強震動の 作用に関しては、松岡ほか³⁾、渦岡ほか⁴⁾、渦岡・仙波⁵⁾、 酒井ほか⁶⁾、秦ほか⁷⁾は、2011年東北地方太平洋沖地震に よる継続時間が非常に長い地震動を入力した河川堤防の 動的解析を実施している.一方で、巨大津波の作用に関 しては、松山ほか⁸⁾、藤井ほか⁹⁾、柳沢ほか¹⁰⁾、鳩貝ほか ¹¹⁾、高橋ほか¹²⁾による盛土(河川・海岸堤防を一部含む) の津波越流実験、及び松山ほか¹³、藤井ほか⁹、谷本ほ か¹⁴⁾による盛土を越流する津波に対する数値解析がそれ ぞれ実施されている.

しかしながら、既往の研究では、強震動の作用と津波

の作用をそれぞれ外力として単独で取り扱っており,両 者を複合的に取り扱っていない.すなわち,既往の動的 解析では,強震動の作用による堤体の変状しか考慮して おらず(地震後の津波越流に伴う変状を考慮しておらず), さらに,既往の津波越流実験・解析では,津波作用前の 強震動の作用による堤体の変状を無視している(強震動 による変状は極めて小さいと仮定されている).

地震と津波を複合的に取り扱った解析としては、片岡 ほかによる一連の研究^{15,16,17)}があるが、河川堤防ではな く道路橋を対象としている.今後の河川堤防の設計・照 査などの高度化に向けて、対象地点に作用した地震動と 津波の特性をそれぞれ推定した上で、河川堤防の地震応 答解析(もしくは振動台実験など)と津波越流解析(もし くは津波越流実験など)を連続的に実施することは非常 に重要¹⁸である.

上述した背景を踏まえ、本研究では、2011年東北地方 太平洋沖地震によって深刻な被災を受けた宮城県石巻市 に築堤されている新北上川堤防(以後、北上川堤防と呼 ぶ)を対象に、地震・津波被害の再現解析を実施した. 具体的には、まず、北上川堤防右岸の破堤区間ならびに



図-1 北上川堤防右岸における検討対象地点と被災実績



写真-1 北上川河口部の上空写真(2006年撮影)

写真-2 北上川河口部の上空写真(2011年3月19日撮影)



写真-3 北上川堤防右岸での破堤状況(R4.5k付近から撮影)

非破堤区間を対象に、本震時に作用した強震波形を推定 した.次に、推定地震動を入力した河川堤防(破堤区間 ならびに非破堤区間)の有効応力解析を実施し、強震動 の作用による河川堤防の残留変形量を評価した.最後に、 上記の残留変形状態をインターフェイスとした津波越流 解析を実施し、破堤区間ならびに未破堤区間での解析結 果と被災状況について比較検討を行った.

2. 検討対象地点

写真-1および写真-2は、震災前(2006年)および震災後 (2011年3月19日)における北上川下流部の状況^{19,20)}を比較 したものであるが、堤内地が広域にわたり浸水しており、 一部区間では北上川堤防が破堤に至っていることが読み 取れる.

図-1は、北上川堤防右岸の3.7k~4.8k区間の破堤・未破 堤区間を表したものであるが、3.8k~4.0k付近ならびに 4.5k~4.8k付近では未破堤であるのに対し、4.0k~4.5k付 近では長距離にわたって破堤している.写真-3は、4.5k 付近から下流側を撮影したものであるが、河川堤防が連 続的に破堤に至っており、堤防道路としての機能も完全 に麻痺しているのがわかる.

上述した被災状況を踏まえ、本研究では、比較的近接 しているにも関わらず、被災状況が大きく異なる北上川 堤防右岸3.9k付近(以後、R3.9kと呼ぶ;未破堤区間内)お よび4.2k付近(以後、R4.2kと呼ぶ;破堤区間内)を検討対 象地点とし、地震動および津波の複合影響に関する再現 解析を実施した.



3. 入力地震動の評価

(1) 地震動推定手法の選定

図-2に本研究の検討対象地点(北上川堤防R3.9k付近・ R4.2k付近)に対する旧・K-NET北上²¹⁾の位置関係を示す. 図-2に示すように,旧・K-NET北上は,検討対象地点周 辺において本震観測記録が唯一得られている既存強震観 測点であり,検討対象地点から向かって北東方向に位置 している.新・K-NET北上(図-2参照)は,2013年1月16日 付けで移設されており,旧・K-NET北上において現在, 強震観測は継続されていない.

本震時における検討対象地点での地震動を推定する方法²⁰としては、断層モデルによる強震波形計算に基づく 方法²³⁾²⁴⁾²⁵⁾(方法A),本震観測記録(旧・K-NET北上)に対 して検討対象地点と旧・K-NET北上のサイト特性の差異 に基づく補正を施す方法²⁶⁾²⁷⁾(方法B),本震観測記録 (旧・K-NET北上)に対して表層地盤の非線形性を考慮し た等価線形解析を適用する方法²⁶⁾²⁹⁾(方法C),旧・K-NET 北上で得られた本震観測記録を検討対象地点に直接転用 する方法^{30,31)}(方法D),などのアプローチが挙げられる. しかしながら、上述したとおり、旧・K-NET北上にお いて強震観測が現在実施されていないこと、検討対象地 点での臨時地震観測の実施が非常に困難であること、な どを考慮すると、方法Aおよび方法Bの採用は適切では ない.一方で、後述するように、検討対象地点と旧・K-NET北上では、地盤震動特性(常時微動H/Vスペクトルの 特性)が大きく異なっていることから、方法Dの採用は 回避すべきである.よって、本稿では、本震時に検討対 象地点の工学的基盤相当に作用した地震動を方法Cを用 いて推定することとした.

(2) 常時微動計測

図-3は、(独)防災科学技術研究所による旧・K-NET北上での地盤柱状図³⁰である.図-3に示すように、深度7~14m付近の礫質土層(せん断波速度Vs=500m/s)ではN値が50を示しているものの、深度13~20m付近のシルト層(せん断波速度Vs=300m/s)ではN値が10~20程度の値を示している.さらに、旧・K-NET北上における既存のサイト増幅特性(地震基盤~地表)³³は、2Hz付近に顕著なピーク周波数を有しており、仮に、深度0~7m付近の砂層(せん断波速度Vs=120m/s)のみを考慮した場合、1/4波長則³⁰に基づく固有周波数は4.3Hzと算定され、2Hzのピー



図-5 旧・K-NET北上の推定1次元地盤モデル

ク周波数の生成に関する説明が困難となる.

そこで本研究では、旧・K-NET北上での計測に基づく 常時微動H/Vスペクトルに対して、理論H/Vスペクトル³⁵⁾ が整合するよう試行錯誤を繰り返す方法³⁰を採用するこ とで、地表~工学的基盤の1次元地盤構造を推定した. 図-4に常時微動H/Vスペクトルの比較を示す.

常時微動計測は、旧・K-NET北上および北上川堤防 R3.9k付近・R4.2k付近(ともに堤外地)の計3地点において 実施した.計測時間は11分間とし、サンプリング周波数 は100Hzとした.微動計としては、3地点ともに加速度計 (一体型微動探査兼地震計機器³⁷)を採用した.計測方向 は、水平2成分と鉛直成分の計3成分であり、常時微動 H/Vスペクトルの計算では、水平2成分の平均をとった.

常時微動HVスペクトルの計算処理方法としては,既 往の方法^{30,39}を採用した.具体的には,まず,微動の加 速度時刻歴に対して,まず0.1Hzのハイパスフィルター を施した.次に,11分間(ほぼ163.84秒×4区間)の時刻歴 の中で,雑振動が小さい163.84秒の区間を3区間抽出し,

フーリエスペクトルの計算を行った.最後に、バンド幅 0.05HzのParzenウィンドウで平滑化したのちに、H/Vスペ クトルを算出し、その平均をとった.なお、評価する周 波数範囲としては、北上川堤防R3.9k付近・R42k付近に おける常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数(図-4 (右)参照)を含む0.2~10Hzとした.

図-4(左)に示すように、旧・K-NET北上では、2Hzお よび5Hz付近にピーク周波数が確認できる.5Hz付近の ピーク周波数については、砂層(深度0~7m付近:図-3参 照)の影響が表れているものと推察され、2Hz付近のピ ーク周波数については、ボーリング調査が行われていな い深度20m以深の地盤構造が影響を及ぼしているものと 考えられる. そこで,常時微動計測によって得られた H/Vスペクトルに対して理論H/Vスペクトル³⁵⁾が整合する ように(図-4(左)参照),深度20m以深の地盤構造を推定 した結果を図-5に示す.

(3) 等価線形解析による地震動の評価

本検討では、旧・K-NET北上における工学的基盤〜地 表の1次元地盤モデル(図-5参照)に対して、等価線形解 析(DYNEQ)²⁸⁾²⁹⁾を適用し、地表面で得られた本震時の水 平動(本稿では、検討対象地点での堤体断面方向を概算 し、N20°W方向を採用した)を工学的基盤(深度32m: 図-5参照)まで引き戻した.その際、旧・K-NET北上の 工学的基盤以浅の表層地盤では、本震時に少なからず地 盤の非線形挙動を示していた可能性が高いことから、安 田・山口による動的変形特性⁴⁰⁾を採用することで、地盤 の非線形性を考慮した.

図-6は、本震時における旧・K-NET北上の工学的基盤 深度32m)での推定地震動の加速度時刻歴である。本検 討では、4.で述べる検討対象地点での動的有効応力の際 に、当該地震動(図-6参照)を入力地震動として採用した。 なお、本震時の強震動パルスに影響を及ぼしている震源 域(SPGA)²³⁾²⁴から旧・K-NET北上までの距離に対して、 旧・K-NET北上から検討対象地点(北上川堤防R3.9k付近 もしくはR4.2k付近)までの距離は、非常に短いことから、 距離の違いによる補正⁴¹⁾⁴²などは実施していない。

4. 動的有効応力解析

(1) 解析モデル

解析の対象とした検討対象地点(北上川堤防R3.9kおよ びR4.2k)を対象とした河川堤防の2次元FEMモデルを図-7 に示す.このモデルは,既存の地盤調査結果(ボーリン グ調査や浸透点検の結果)⁴⁹を踏まえて作成したもので, 使用要素は全て平面ひずみ要素である.なお,堤外地に おける河川およびそれに伴う水圧については,水要素や 付加質量等でモデル化していない(土層内の地下水位条 件のみ考慮).図-7に示すように,R3.9kの土層は,上か らBs層(地下水位以浅),As層,Ac層,Ag層(工学的基盤 層)となっているのに対し,R4.2kの土層は,上からBs層 (地下水位以浅),Ac1層,As層,Ac2層,Ag層(工学的基 盤層)となっており,R3.9kとR4.2kを比較すると,堤体下 の基礎地盤における土層構成が大きく異なっている.

(2) パラメターの設定

R3.9kならびに**R4.2k**ともに,**Bs**層,**As**層,**Ag**層に対し ては砂の弾塑性モデル⁴⁴,**Ac**層に対しては粘土の弾塑性



表-1 動的有効応力解析(LIQCA)に基づく設定パラメターの一覧

図-7 2次元有限要素解析モデル(左:R3.9k · 右:R4.2k)

モデル⁴⁹をそれぞれ適用した. R4.2kの擁壁については弾 性体でモデル化した. 各土層に対して設定したパラメタ ーを表-1に示す. 参考とした地盤調査は,検討対象地点 およびその付近での調査⁴⁹であり,原位置試験や各種土 質試験が実施されている. 以下では,表-1の掲載順に従 ってその設定方法を主に動的解析の部分について示す.

- 密度
 ρ: 土質試験結果,もしくは既往の浸透点検での採用値を参考に設定した.
- 透水係数k: 土質試験結果もしくは粒度分布D20から Creagerの方法⁴⁰に基づいて設定した.
- ・初期間隙比e₀:原位置試験および物理試験の結果に 基づいて推算した.
- 圧縮指数2、膨潤指数κ:等方圧密試験が実施されていないため、経験的な値^{47,48)}を採用した.
- ・ せん断波速度*Vs*:標準貫入試験およびPS検層の結果 から総合的に決定した.



- ・初期せん断係数比G₀/G_m:密度とせん断波速度から 算定される初期せん断係数G₀を各土層中心の初期平 均有効応力G_mで除して算定した.
- ・疑似過圧密比OCR*:正規圧密状態と仮定して1.0とした.
- ・破壊応力比*M**_f:三軸圧縮試験から得られた内部摩 擦角¢,もしくは既往の浸透点検での採用値に基づ いて設定した.
- ・変相応力比*M**_m:内部摩擦角 ∉と変相角 ∉の経験的 関係⁴⁹を参考に設定した.
- ・硬化関数中のパラメターB*₀ B*₀, C_f,塑性剛性・弾 性剛性のための規準ひずみ♂*, ♂*, ダイレイタン シー係数D*₀, n:砂質土層については液状化強度試 験の要素シミュレーションより試行錯誤で設定した. 目標としたのは,両振幅軸ひずみ5%における繰返 し回数と軸差応力比の関係である.図-8には一例と して,R3.9kおよびR4.2kのAs層における設定したパ ラメターによる液状化強度曲線を示す.粘性土層に ついては,粘性土の繰返し強度特性に関する一斉試 験の結果⁵⁰を参考にした要素シミュレーションを実 施することによって設定した.

なお、動的解析に先だって実施した初期応力解析に用いたパラメターについては、4.(2)において後述する.

(3) 解析条件

初期応力状態は、図-7に示したFEMモデルと同じモデ ルを用いた初期応力解析により算定した.全ての土層は 弾完全塑性モデルとし、要素の有効重量を荷重(100分割 の増分解析)として与えた.弾完全塑性モデルのパラメ ターは以下のように設定した.

- ・ヤング係数E:初期せん断係数G₀とポアソン比vの関係から計算した.また、比例定数については、ヤング係数Eを各土層中心の初期平均有効応力σ_mで除することによって算定した.
- ・ポアソン比v:水平地盤部において静止土圧係数が 0.5となることを仮定して, 0.333とした.

 ・地盤強度定数c', Ø:三軸圧縮試験から得られた地盤 強度定数(粘着力c',内部摩擦角Ø),もしくは既往の 浸透点検での採用値に基づいて設定した.

土骨格に対する境界条件として,底面は弾性基盤とし てダッシュポットを配置し,そのせん断波速度V₃は300 m/sとした.側方は疑似自由地盤境界⁵¹⁾として,幅3,000m 程度の幅広要素(同一深度等変位拘束)をモデル両側に配 置した.間隙水に対する境界条件として,地下水位面を 水頭0の排水境界,その他の要素面は全て流量0の非排水 境界とした.入力地震動としては,3.で評価した地震波 形(図-6参照)をモデル底面(Ag層下面)に作用させた.

数値解析上の解析条件として,計算時間増分は0.001 秒,Newmark法の係数はβ=0.3025, p=0.6とした.Rayleigh減 衰として,初期剛性比例型を用いた.その係数ζは,水 平地盤部の1次固有周波数(1/4波長則に基づいて計算)で ある0.9Hz(R3.9k)および1.7Hz(R4.2k)に対して,ともに減 衰定数ζ=1.0%を仮定し,ζ=0.0035(R3.9k)およびζ=0.0019 (R4.2k)とした.なお,上記の1次固有周波数は,常時微 動H/Vスペクトルのピーク周波数(0.9Hz(R3.9k)および2.0 Hz(R3.9k):図-4(右)参照)と比較的良い一致を示してお り,設定パラメターの適用性を確認することができる. 動的解析時間は240s(図-6参照)であり,その後,10,020s (2.8hour)まで慣性項を無視した圧密解析を実施した.

(4) 解析結果

図-9は、堤体の天端中央における鉛直方向の変位時刻 歴を、0~240s(動的解析)および1~1,000s(動的解析+圧 密解析)についてそれぞれ示したものである。図-9に示 すように、本震時の強震動の作用に伴う沈下(図-9(上)) に加えて、主要動終了後の過剰間隙水圧の消散に伴う沈 下(図-9(下))が発生している。最終的な天端での沈下量 は、0.76m(R3.9k)および2.01m(R4.2k)となっており、工学 的基盤面(Ag層下面:図-7参照)に対して同一の入力地震 動を考慮しているにも関わらず、大きな差異が生じてい る.また、図-9(下)に示すように、津波到達時間(本震 発生から約44分後)⁵²には、R3.9kならびにR4.2kにおける



図-10 過剰間隙水圧比の分布ならびに等倍変形状況(240s時間断面)

変形の進行がともに収束していることも読み取れる. 図-10は、240sの時間断面(動的解析での最終計算ステ ップ:図-6参照)における残留変形の状況ならびに過剰 間隙水圧比の分布をR3.9kとR4.2kで比較したものである. 図-10に示すように、堤体天端が鉛直方向に変位(沈下)を示しているとともに、堤外地方向への残留変形を示しており、その度合がR3.9kよりもR4.2kのほうが大きくなっていることが読み取れる(詳細については、図-11



(a) R3.9k



(b) R4.2k図-11 津波到達時間における等倍変形状況(44min時間断面)

参照).また,過剰間隙水圧比の分布に関しては,まず, 堤体ならびに堤体直下の表層を除いたAs層では,過剰 間隙水圧比が1.0に近い値を示している.次に,中間層 であるAc層(Ac2層)では,過剰間隙水圧比が0.5程度の値 を示している.上記のAs層およびAc層における過剰間 隙水圧比の分布状況に関しては,R3.9kとR4.2kにおいて 大きな差異はない.したがって,R3.9kに対してR4.2kの ほうが残留変形が大きくなっている主要因としては, R4.2kにおける中間層であるAc2層(層厚31.3m)の存在が 示唆される.

図-11は、本震前の状況(解析モデル)とともに、津波 到達時間(2,640s)における圧密沈下を考慮した残留変形 状況を等倍スケールに基づいて示している.図-11に示 すように、津波到達時点の堤防の変形状態は、天端が沈 下し、堤外地側にはらみ出すようになっており、この変 状はR3.9kおよびR4.2kにおいて共通である.しかしなが らR3.9kに対してR4.2kの残留変形は、本震前の原形を留 めないほど非常に大きくなっている.そこで、5.の津波 越流解析では、津波到達時間における残留変形状況(図-11参照)をインターフェイスとした解析条件を設定した.

5. 津波越流解析

(1) 解析モデル

津波越流解析は、常流と射流が混在する自由表面流れ を安定的に解析可能な二次元数値波動水路(CADMAS-SURF 2D)⁵³⁾を用いて実施した.道路橋を対象とした地震



図-14 津波越流計算における断面形状

・津波複合解析^{15,16,17)}では、3次元津波解析(CADMAS-SURF 3D)⁵⁴⁾が採用されているが、図-12に示すように、 R3.9kおよびR4.2k付近では、津波の流向として堤防横断 面方向(堤防縦断直交方向)が支配的であることから、本 検討では、動的有効応力解析(4.参照)と同様に、津波越 流解析においても2次元解析を採用した。

本解析での2次元計算領域の一例を図-13に,堤防の横断面形状を図-14にそれぞれ示す.解析ケースは、図-14に示す堤防形状を有する計4ケースである.図-14に示すとおり、図-14(a),(c)は、地震動による変形前の形状(以後、変形無と呼ぶ)であり、図-14(b),(d)は、動的有効応力解析(4.参照)により求められた変状後の形状(以後、変形有と呼ぶ)である(図-11で示した津波到達時間における変形無・変形有の形状参照).なお、図-14の横軸原点は、堤外地の水際線(以後、汀線と呼ぶ)としている.

表-2には格子設定条件を示す.計算格子は堤防付近で

表-2 津波越流計算における計算格子

(a) 水平方向

	領域		格子
-1830.15 m	~	-120.15 m	5.00 m
-120.15 m	~	-116.15 m	4.00 m
-116.15 m	~	-113.15 m	3.00 m
-113.15 m	~	-111.15 m	2.00 m
-111.15 m	~	-110.15 m	1.00 m
-110.15 m	~	169.85 m	0.50 m
169.85 m	~	170.85 m	1.00 m
170.85 m	~	172.85 m	2.00 m
172.85 m	~	175.85 m	3.00 m
175.85 m	~	179.85 m	4.00 m
179.85 m	~	1119.85 m	5.00 m

(b)	鉛直方向	ī
領域		格子
-5.55m ~	10.05m	0.50m



図-17 準定常時(90s前後)における津波挙動のスナップショット

は水平方向0.5m間隔で分割し、堤防から比較的遠い位置 では5m間隔で分割した.一方で、鉛直方向は0.5mで一 様に分割した.データ出力は、堤防近傍の水位および断 面平均流速を1~5m間隔かつ1秒間隔で実施した.ただ し、越流による堤体の洗掘・侵食等の形状変化は考慮し ていない.また、津波を再現する造波手法はダム破壊法 ^{50,57)}を採用したが、これは水位差を与えて貯水したダム が破壊したとして、貯留水により発生する段波を堤防に 到達する津波流として模擬し、再現するものである.東 北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる現地調 査結果⁵⁰⁾より、新北上大橋右岸の痕跡高はTP 7.25mと推 定されているため、本解析では汀線付近における水位を TP 7.25mに近付けられるようケーススタディを実施し, ダムの水位差を7.95mと設定した.

(2) 解析結果

図-15および図-16は、R4.2k断面の変形有における図-13の汀線から堤内地方向に1m間隔で45mまでの水位およ び水平方向流速の時間変化を示している.図-15ならび に図-16ともに、解析開始時から約30s後の津波到達時点 以降において、津波の衝突によって水位・流速が急増し、 その後は概ね定常的に推移しているのが読み取れる.な お、この傾向は、全4ケースにおいて同様であることを 確認している.ここで、図-17は、R3.9kおよびR4.2kでの



図-21 流速分布 (R4.2k変形有・変形無)

変形無・変形有における準定常時(90s前後)の水面形状 と流速ベクトル分布である.まず,図-17(a)と図-17(b)を 比較すると,堤防前面における流況は概ね一致している が,堤防裏法付近においては、変形有のほうが地形の変 化の影響を受け,流速ベクトルの鉛直成分が増加してい るのが読み取れる.次に、図-17(c)と図-17(d)を比較する と、変形無のケースでは、裏法面において流速ベクトル 鉛直成分が比較的大きいが、変形有のケースでは、流速 ベクトルの水平成分が比較的大きく、堤防前面から裏法 尻にかけてなだらかな水面形を示している.ただし、 図-17だけでは明瞭な差異が確認しづらいため,詳細な 分析を行った結果を以下に示す.具体的には,全4ケー スにおいて準定常時(75~100s)の地点毎の平均値に基づ いて,各断面(R3.9kとR4.2k)における変形前後の水位お よび流速の分布形状を図-18,図-19,図-20,図-21に示 す.図-18および図-19に示すとおり,R3.9kにおいて,水 域から汀線付近にかけての区間では,水位および流速と もに概ね一致しているが,堤体付近においては,水位は 変形有の方が変形無と比較して減少しており,その減少 量は天端中央付近で約0.4mである.また,流速は変形



のほうが増加しており、天端中央付近では約0.4m/s増加 していることが読み取れる.次に、図-20および図-21に 示すとおり、R4.2kにおいて、水域から堤防裏法肩にか けての区間に着目すると、水位は変形有のほうが変形無 と比較して減少しており、その減少量は天端中央付近で 約1.6mである.一方で、流速は変形有のほうが大きく、 その増加量は天端中央付近で約1.6m/sである.

水位および流速の増加率についてR3.9kとR4.2kで比較 したものを図-22および図-23に示す.ここに、増加率は、 変形有の水位・流速値を、変形無の水位・流速値で除し たものである.図-22および図-23に示すとおり、R3.9kの 堤防前面における水位・流速の増加率は、概ね1.0~1.2 程度である.これに対し、R4.2kの堤防前面における水 位増加率は概ね0.9程度、及び流速増加率は1.4~2.7程度 の値をそれぞれ示している.すなわち、地震動による変 形が比較的小さいR3.9kでは、水位増加率および流速増 加率が比較的小さな値を示しているのに対し、地震動に よる変形が比較的大きいR4.2kでは、水位増加率は小さ いものの、流速増加率は増大していることが確認できる. よって、地震動による堤体の変形が大きくなるのに伴い、 流速増加率も増大していく可能性が示唆される.

6. 河川堤防の耐震性と耐津波性の複合関係

動的有効応力解析(4.参照)と津波越流解析(5.参照)に よる一連の解析結果により、地震動による堤体の変形程 度と津波越流による流速増加率の関係性が示された.ま た,この関係性は,新北上川堤防の被災実績に対して矛 盾しておらず,R3.9kが今次津波の越流後も残存した要 因は,津波来襲前の地震動による堤体の変形が小さく, 堤防の高さが保持されたために,堤防前面において津波 流が抑制され,その結果,津波による越流時の流速が抑 制されたためと推察される.一方で,R4.2kが破堤した 要因は,津波来襲前の地震動による堤体の変形が大きく, 堤防の高さが低くなったために,堤防前面において津波 流が抑制されず,その結果,堤体部の越流時の流速が抑 制されなかったためであると推察される.

ここで、津波の越流による侵食は、特に流速の大きさ に関係するので、越流前に堤防の高さが確保されている ことが越流による被害を抑制することになる.したがっ て、上記の結果は、津波の越流による堤防の被害を軽減 し、堤内地への影響を抑制するためには、地震動による 堤防の沈下を抑制することが効果的であることを示唆し、 その意味で、堤防の耐震性向上が津波の越流対策にも深 く関わっていると言える.

7. まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震によって被 災した新北上川堤防右岸を対象に、動的有効応力解析・ 津波越流解析に基づく地震動・津波による複合影響解析 を実施した.以下に、得られた知見を示す.

(1) 動的有効応力解析の結果によれば,強震動の作用に よる新北上川堤防R3.9k(未破堤区間内)およびR 4.2k(破堤区間内)の変形の進行は、津波来襲時には ともに収束していたものの、R3.9kに対してR4.2kの 残留変形量は、非常に大きかったと推定される.

- (2) 動的有効応力解析に基づく津波到達時間における残留変形状況をインターフェイスとした津波越流解析の結果によれば、R3.9kにおける堤体部の越流時の流速に対して、R4.2kにおける堤体部の越流時の流速は、1.4~2.7倍程度大きくなっており、被災・無被災(破堤・未破堤)の実績を定性的に評価できた.
- (3) 津波による破堤区間と未破堤区間において、地震動による残留変形、および残留変形下の堤防の津波越流特性について分析することで、津波遡上域にある河川堤防の耐震性と耐津波性の複合関係、および津波対策としての耐震性の重要性を明らかにできた。

今後は、2011年東北地方太平洋沖地震で被災した他の 河川堤防に対しても同様のアプローチを行うことで、本 稿で得られた知見をより深めていきたいと考えている.

謝辞:国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所の関係者の皆様には、新北上川に関する既存資料をご提供していただきました.(独)防災科学技術研究所K-NETによる地震観測記録を利用させていただきました.ここに記して深く御礼申し上げます.

参考文献

- 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.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所,(独)土木研究 所:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震土木施 設災害調査速報,第6章河川施設,国土技術政策総 合研究所資料 No.646/土木研究所資料 No.4202, pp.242-341,2012.
- 松岡一成,片岡正次郎,長屋和宏,金子正洋:東北 地方太平洋沖地震の強震記録を用いた河川堤防の地 震応答解析,土木学会論文集 A1(地震工学論文集 31b), Vol.68, No.4, pp.I_104-I_110, 2012.
- 4) 渦岡良介,島袋ホルへ,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.
- Uzuoka, R. and Semba K.: Numerical analysis of liquefaction in a river levee on soft cohesive ground, *Journal of Disaster Research*, Vol.7, No.6, pp.711-717, 2012.
- 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(地震工学論文集 32), Vol.69, No.4, pp.I_134-I_141, 2013.
- 7) 秦吉弥,常田賢一,谷本隆介,小泉圭吾:2011 年東 北地方太平洋沖地震における宮城県井土浦での強震 動および地盤沈下量の評価,地盤と建設,Vol.31, No.1,2014.(Accepted)

- 松山昌史,内野大介,橋和正,田中良仁,榊山勉, 仲村治朗,稲葉大介:盛土を越流する津波に対する 防波壁の効果に関する実験,土木学会論文集 B2(海 岸工学論文集), Vol.68, No.2, pp.I 236-I 240, 2012.
- 9) 藤井裕之, 首藤伸夫, 堀田新太郎, 高木利光: 津波 越流による沿岸道路の破壊に関する研究, 土木学会 論文集 B2(海岸工学論文集), Vol.66, No.1, pp.I_246-I_250, 2010.
- 10) 栁沢舞美,二瓶泰雄,山口晋平,川邉翔平,龍岡文 夫:海岸砂丘と補強盛土技術を組み合わせた新形式 防潮堤の提案,土木学会論文集 B2(海岸工学論文集), Vol.68, No.2, pp.I_886-I_890, 2012.
- 11) 鳩貝聡, 諏訪義雄, 加藤史訓:津波の越流による海 岸堤防の裏法尻の洗掘に関する水理模型実験, 土木 学会論文集 B2(海岸工学論文集), Vol.68, No.2, pp.I_406-I_410, 2012.
- 12) 高橋悠人,常田賢一,谷本隆介,鈴木啓祐,秦吉 弥:津波に対する盛土の侵食特性および浸透特性に 関する模型実験,Kansai Geo-Symposium 2013 講演論 文集,地盤工学会,2013. (Accepted)
- 13) 松山昌史,橋和正,榊山勉,田中良仁,仲村治朗, 須賀康雄:盛土を越流する津波に対する防波壁の効 果に関する数値解析,土木学会論文集 B2(海岸工学 論文集), Vol.67, No.2, pp.I_201-I_205, 2011.
- 14) 谷本隆介,常田賢一,鈴木啓祐,秋田剛:盛土の侵 食に関わる越流特性のシミュレーション解析,第48 回地盤工学研究発表会講演概要集,No.611, pp.1221-1222, 2013.
- 15) 片岡正次郎,金子正洋,松岡一成,長屋和宏:道路橋の地震・津波複合応答解析,第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.9-16, 2012.
- 16) 片岡正次郎,金子正洋,松岡一成,長屋和宏,運上 茂樹:上部構造と橋脚が流出した道路橋の地震・津 波被害再現解析,土木学会論文集 A1(地震工学論文 集 32), Vol.69, No.4, pp.I 932-I 941, 2013.
- 17) 片岡正次郎,金子正洋,長屋和宏:津波が越流した 被害が軽微な道路橋の地震・津波応答再現解析,第 16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポ ジウム講演論文集,土木学会,pp.7-12,2013.
- 18) たとえば、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.
- 19) 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震,鳴瀬川・ 北上川被害状況<速報第 23 報>,北上川下流河川事 務所 HP, 2011. (last accessed: 2013/09/10)
- 20) 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所: 津波による被災状況~鳴瀬川から旧北上川の河口部, 北上川河口部の被災前後写真~,北上川下流河川事 務所 HP, 2011. (last accessed: 2013/09/10)
- 21) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiKnet, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 22) 一井康二, 秦吉弥, 村田晶:道路盛土の耐震性評価 のための地震動設定手法に関するアンケート調査, 土木学会論文集 A1(地震工学論文集 31-b), Vol.68,

No.4, pp.I_40-I_53, 2012.

- 23) 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.
- 24) 野津厚,山田雅行,長尾毅,入倉孝次郎:海溝型巨 大地震における強震動パルスの生成とその生成域の スケーリング,日本地震工学会論文集,Vol.12, No.4, pp.209-228, 2012.
- 25) 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.
- 26) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake, based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011.
- 27) Hata, Y., Nozu, A., Nakamura, S., Takahashi, Y. and Goto, H.: Strong motion estimation at the elevated bridges of the Tohoku Shinkansen damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake based on extended site effects substitution method, *Proc. of the International Symposium* on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, pp.418-429, Tokyo, Japan, 2012.
- 28) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependant characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.22, No.3, pp.205-222, 2002.
- 29) 吉田望,末富岩雄: DYNEQ: 等価線形法に基づく水 平成層地盤の地震応答解析プログラム,佐藤工業 (株)技術研究所報, pp.61-70, 1996.
- 30) 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.
- 31) 秦吉弥, 釜井俊孝, 王功輝: 茨城県東海村南台団地 における地盤震動特性の評価, 第 10 回地盤工学会関 東支部発表会(Geo-Kanto 2013)発表講演集, No. A0018, 2013.
- 32) 大井昌弘,藤原広行:地盤情報の統合化と提供―ジ オ・ステーション―,地盤工学会誌, Vol.61, No.6, pp.8-11, 2013.
- 33) 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.
- 34) たとえば、(社)土木学会:地震動・動的特性、動的 解析と耐震設計第1巻、170p., 1989.
- 35) Haskel, N. A.: The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bulletin of the Seismological Society* of America, Vol.43, No.1, pp.17-34, 1953.
- 36) 秦吉弥,野津厚,一井康二,丸山喜久,酒井久和: 我孫子市布佐地区における地盤震動特性の評価,第9 回地盤工学会関東支部発表会(Geo-Kanto 2012)発表講 演集, Vol.9, No.A0023, 2012.
- 37) 先名重樹,安達繁樹,安藤浩,荒木恒彦,藤原広行:微動探査観測システムの開発,地球惑星連合大会2006予稿集(CD-ROM), S111-P002,2006.

- 38) Hata, Y., Nakamura, S., Nozu, A., Shibao, S., Murakami, Y. and Ichii, K.: Microtremor H/V spectrum ratio and site amplification factor in the seismic observation stations for 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, *Bulletin of the Graduate School of Engineering, Hiroshima University*, Vol.59, No.1, 2010.
- 39) 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.
- 40) 安田進,山口勇:種々の不撹乱土における動的変形 特性,第 20 回土質工学研究発表会講演概要集, pp.539-542,1985.
- 41) 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*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 42) 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.
- 43) 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所と の私信
- 44) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-668, 1999.
- 45) Oka, F.: A cyclic elasto-viscoplastic constitutive model for clay based on the non-linear hardening rule, *Proc. of 4th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, Swansea, U.K., 1992.
- 46) (公社)地盤工学会:土の透水特性と設計用土質定数, 設計用地盤定数の決め方一土質編一, pp.145-184, 2007.
- 47) 田中智太郎,岡二三生,小高猛司,浅井良太:浸透 を考慮した河川堤防の地震応答解析,第40回地盤工 学研究発表会概要集,No.1137, pp.2269-2270, 2005.
- 48)田辺晶規,余川弘至,八嶋厚,沢田和秀,星加泰央, 中山修,藤井紀之,久保嘉章,阿部知之,関沢元 治:東海・東南海地震を想定した木曽川下流域堤防 に対する液状化解析,第 62 回年次学術講演会講演概 要集, No.3-063, pp.125-126, 2007.
- 49) 中島進,杉田秀樹,谷本俊輔:不撹乱凍結試料の液 状化試験から得られた破壊角・変相角,第6回日本 地震工学会・大会-2008 梗概集, pp.158-159,2008.
- 50) 粘性土の動的性質に関する研究委員会:粘性土の繰 返し強度特性に関する全国一斉試験の実施および試 験結果,土と基礎, Vol.43, No.5, pp.79-82, 1995.
- 51) 渦岡良介: 地盤・構造物系の有効応力解析における 境界条件, 日本地震工学会誌, No.3, pp.24-27, 2006.
- 52) 大川小学校事故検証委員会:大川小学校事故検証 中 間とりまとめ<平成 25 年 7 月 18 日>,(株)社会安 全研究所 HP, pp.39-42, 2013. (last accessed: 2013/09/14)
- 53) (財)沿岸開発技術研究センター:数値波動水路 (CADMAS-SURF)の研究・開発~数値波動水路の耐 波設計への適用に関する研究会報告書~,沿岸開発 技術ライブラリーNo.12, 78p., 2001.
- 54) (財)沿岸開発技術研究センター: CADMAS-SURF /3D 数値波動水路の研究・開発,沿岸開発技術ライブ

ラリーNo.39, 235p., 2010.

- 55) 石巻市,(株)パスコ:東日本大震災災害検証報告書 (平成 24 年 3 月 29 日), 2012.
- 56) 松冨英夫,飯塚秀則:津波の陸上流速とその簡易推 定法,海岸工学論文集,土木学会,Vol.45, pp.361-365, 1998.
- 57) 高橋俊彦, 藤間功司, 朝倉良介, 池谷毅: 数值波動

水路の段波実験への適用,海洋開発論文集,土木学 会,Vol.17, pp.281-286, 2001.

58) 2011 年東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (http://www.coastal.jp/ttjt/)によるデータ利用方針に基 づく速報値, 土木学会海岸工学委員会 HP, 2011. (last accessed: 2013/09/10)

(2013.9.19受付)

CONTINUOUS GROUND MOTION-TSUNAMI DAMAGE SIMULATION OF A RIVER DYKE DUE TO THE 2011 TOHOKU EARTHQUAKE

Yoshiya HATA, Ryusuke TANIMOTO, Ken-ichi TOKIDA and Itsuro TATEKAWA

A continuous earthquake-tsunami response analysis was conducted in order to simulate process of damage to Shin Kitakami River Dyke, Ishinomaki City, Miyagi Prefecture, during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. First, earthquake response analyses were carried out using the main shock ground motion at the site estimated from microtremor H/V spectra. Based on the residual deformation condition, tsunami response analyses were then conducted assuming the seismic damage remained. The result of the continuous analysis coincides with the actual damage to the river dyke. The importance of seismic assessment of river dyke as a procedure against tsunami disaster was specified.