

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

酒井 久和¹・秦 吉弥²・渦岡 良介³・吉澤 睦博⁴

¹正会員 広島工業大学 工学部建築工学科 (〒731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1)

E-mail: h-sakai@cc.it-hiroshima.ac.jp

²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

³正会員 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

E-mail: uzuoka@ce.tokushima-u.ac.jp

⁴正会員 独立行政法人防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター

(〒673-0515 三木市志染町三津田字西亀屋1501-21)

E-mail: yszwmthr@bosai.go.jp

我が国の3大都市圏には海拔0m地帯が広く分布していることから、切迫する南海トラフの巨大地震など継続時間の長い地震動に対する河川、海岸堤防の耐震性評価の精度向上が重要となる。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震、2003年宮城県北部の地震、1978年宮城県沖地震において被害程度の異なる鳴瀬川河川堤防地点に対して、微動観測に基づく地震動を推定した。当該地点において1次元の全応力地震応答解析によるせん断応力の時刻歴応答と累積損傷度理論に基づいて液状化指数を算定し、地震被害と算定値との関係を検討した。その結果、巨大海溝型地震のような継続時間の長い強震動に対しても、本簡易液状化評価手法が、液状化を伴う土構造物の耐震性検討の有効な1次スクリーニング手法となる可能性を有することが分かった。

Key Words : seismic damage prediction methodology ,river dike, long time duration earthquake, liquefaction, first screening

1. はじめに

東京、名古屋、大阪の3大都市圏には海拔0m地帯が広く分布し、その地域に社会資本や住居が高密度で存在している。海岸堤防、河川堤防等の施設がその地域への海水流入を防いでいるが、南海トラフの巨大地震が切迫しており、それらの堤防施設は近い将来必ず巨大地震特有の継続時間の長い強い地震動を受けることになる。そのため、近年、継続時間の長い地震動に対する地盤の液状化や土構造物に関する研究が盛んに行われている。吉田ら¹⁾は、過去の液状化研究の地盤データをもとに1次元有効応力解析 YUSAYUSA と液状化抵抗率(F_L)との比較により海溝型地震動に対する適用性の検討を行なっている。山崎、江本²⁾は、継続時間の長い地震動を含む11種類の不規則波形を用いて、地震波形と液状化抵抗の関係をおねじりせん断試験、単純せん断試験により調べ

ている。吉澤ら³⁾は、既往の模型振動実験に対して有効応力解析に基づく変形解析手法として、有効応力解析コード LIQCA と FLIP について、想定海溝型の巨大地震である継続時間が長い地震動に対する変形解析の適用性を検討している。余川ら⁴⁾は、2004年新潟県中越地震で被害を受けた信濃川河川堤防に対して LIQCA に基づいて被害メカニズムの検討を行うとともに、異なる地震動波形、継続時間による被害の違いを検討している。八代ら⁵⁾は、繰り返し損傷度理論を用いて、想定東海・東南海地震のような継続時間の長い地震動に対する道路橋上方書の地震動の繰り返し特性の補正係数について提案を行なっている。しかし、これまで継続時間の長い強震動を受けた地盤や土構造物の実被害事例が少ないため、上記のいずれの研究も震動実験や解析的検討に留まり、RC 構造物や鋼構造物などと比較して地震応答の推定精度は十分ではない。

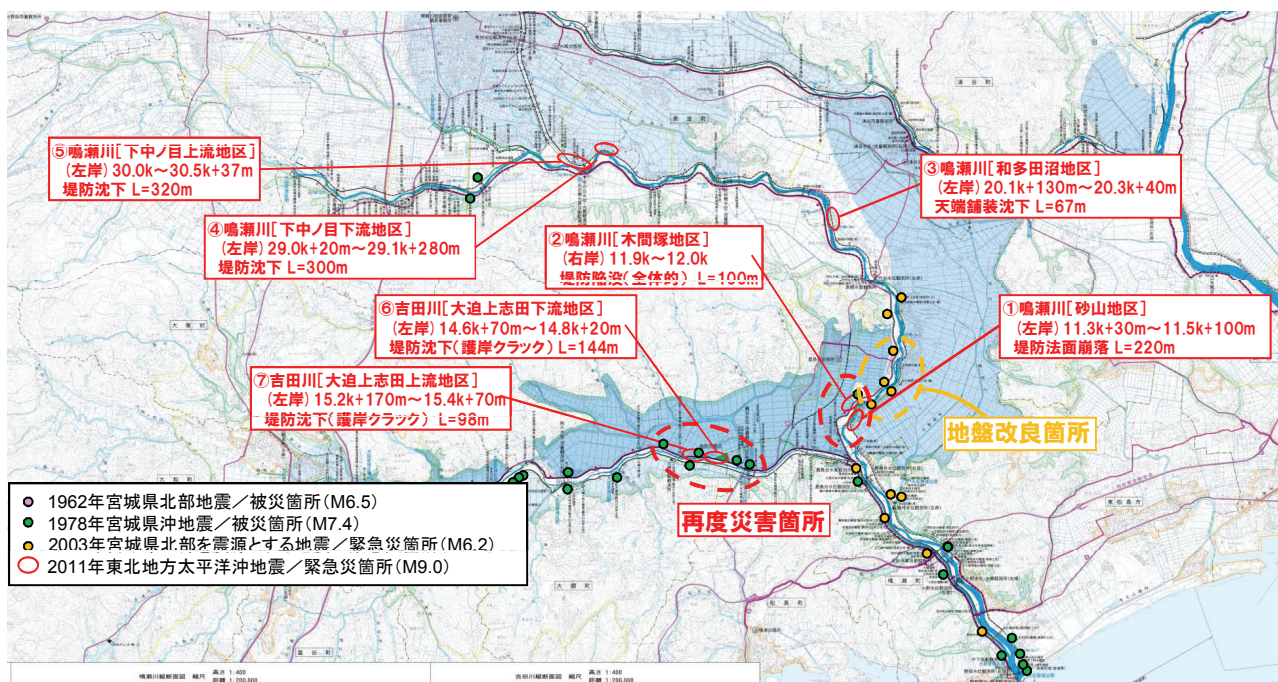


図- 1 近年の被害地震における鳴瀬川河川堤防被災箇所⁹⁾

一方、南海トラフの巨大地震に対して耐震性を検討すべき河川堤防、海岸堤防の総延長距離は非常に長い。個々の構造物に対する耐震性の精度向上が極めて重要であることは論を俟たないが、その詳細な耐震性検討を要する構造物を特定する簡易評価手法も、1次スクリーニング手法として欠くことができない。本研究では、土構造物、特に液状化に着目し、近年の地震で繰り返し被災している鳴瀬川（宮城県北部から石巻湾に注ぐ）の河川堤防に対して、地震動特性の異なる既往地震と堤防被害との関係から、継続時間の長い地震動に対する簡便法の適用性、評価方法について検討を行う。

2. 検討方法

継続時間の異なる地震動とその際の河川堤防の液状化被害の有無との関係を、鳴瀬川の河川堤防において既往地震で被害程度の異なる地点に対して、全応力一次元解析による液状化指数に基づいて検討する。

(1) 検討対象地点

鳴瀬川河川堤防は、近年の地震のたびに少なからず被害を受けている。図- 1に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による近年の4つの地震（1962年宮城県北部地震、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）によって被災した堤防の被災箇所を示す⁹⁾。本研究では、詳細な土質試験結果が公表され、地震動により被害程度

に差が生じている右岸13k付近（木間塚地区）、左岸20.3k（和多田沼地区）、左岸30.3k（下中ノ目上流地区）を対象に検討を行う。各地点での被災状況を図- 2～図- 4に示す^{9)~8)}。鳴瀬川堤防右岸13kでは、1978年宮城県沖地震では近傍の12.1k+90m～160m（図- 1②隣の緑丸）で小さな被害が発生したものの、当該地点では被害がなく、2003年宮城県北部の地震で段差3mに及ぶ被害が発生し、基礎地盤の浅層地盤改良が実施された。2011年東北地方太平洋沖地震では当該地点では無被害であったが、近隣の地震対策が施されていない地域で一部緊急復旧を要する被害（図- 1②）が生じている。一方、左岸20.3kと30.3kでは1978年、2003年の地震では被害がなかったが、2011年地震で、左岸20.3kでは1.0mの天端沈下、左岸30.3kで5.5mの段差が発生している。いずれの地点においても堤防の被害に影響度の大きいと考えられる堤内側の小段位置での検討を行う。

(2) 既往地震の推定地震動

地震被害と地震動との関係を検討するためには、当該地点で作用した地震動を精度よく推定することが不可欠である。近年、地震観測網が整備されることにより、従前観測されなかったような大振幅の地震動が記録されるようになるとともに、検討対象構造物と地震観測点との距離も短縮されている。しかし、上記3地点において被害状況記録は残されているものの、本研究で検討対象とする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当該地点の地震動は観測されていない。また、検討対象構造物の地震応

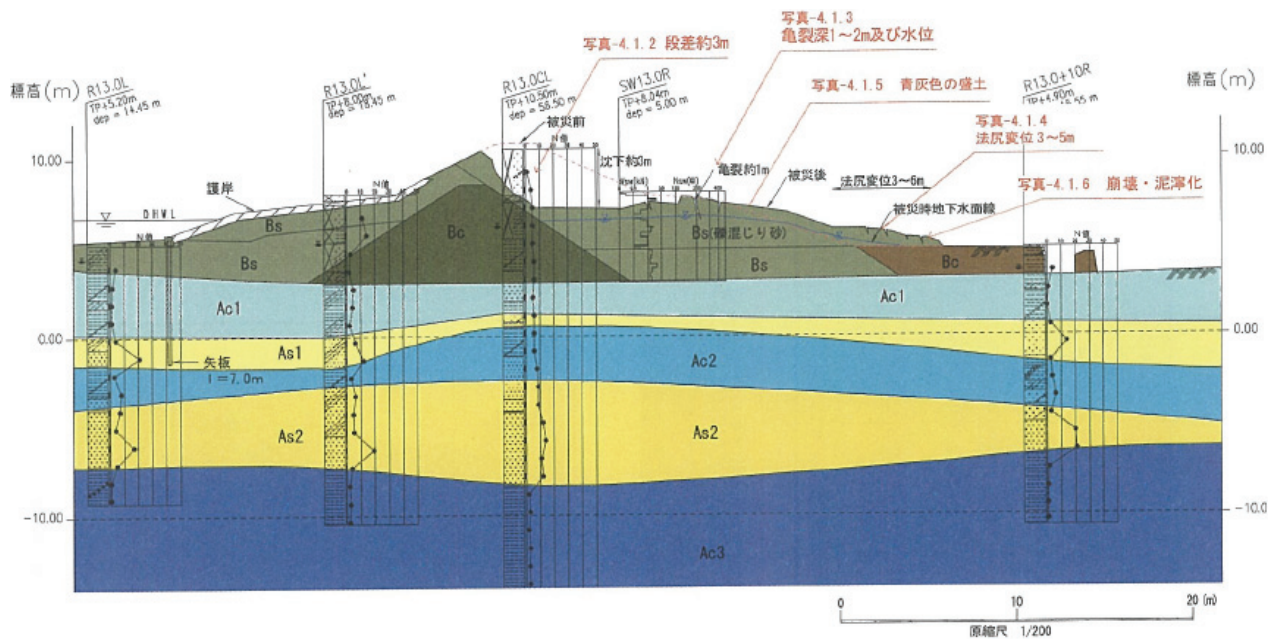


図-2 2003年宮城県北部の地震における鳴瀬川右岸13kの被災状況⁶⁾

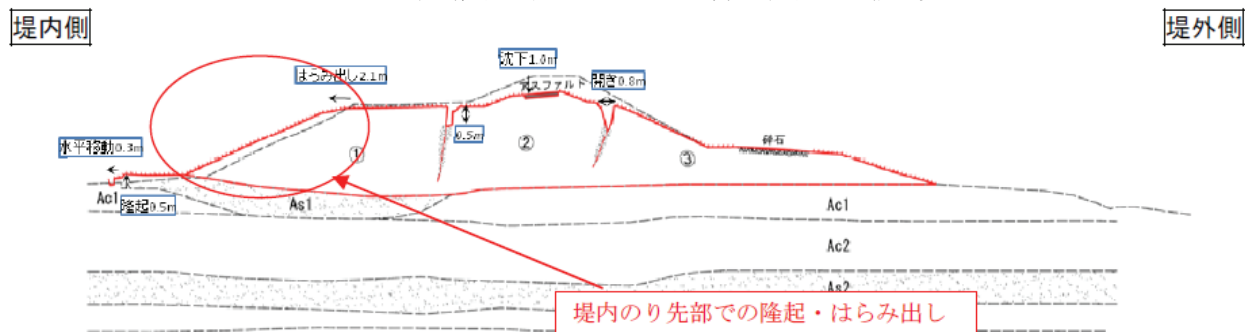


図-3 2011年東北地方太平洋沖地震における鳴瀬川左岸20.3kの被災状況⁷⁾

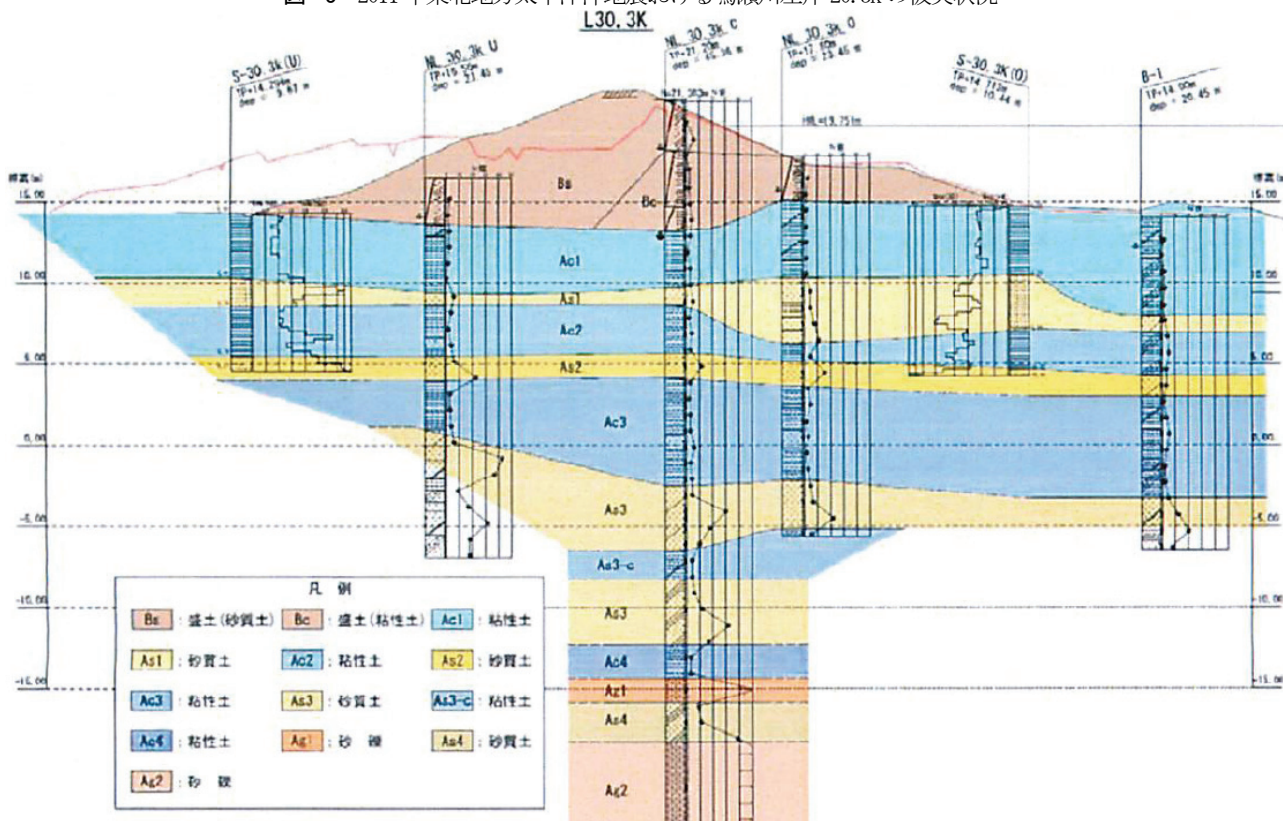


図-4 2011年東北地方太平洋沖地震における鳴瀬川左岸30.3kの被災状況⁸⁾

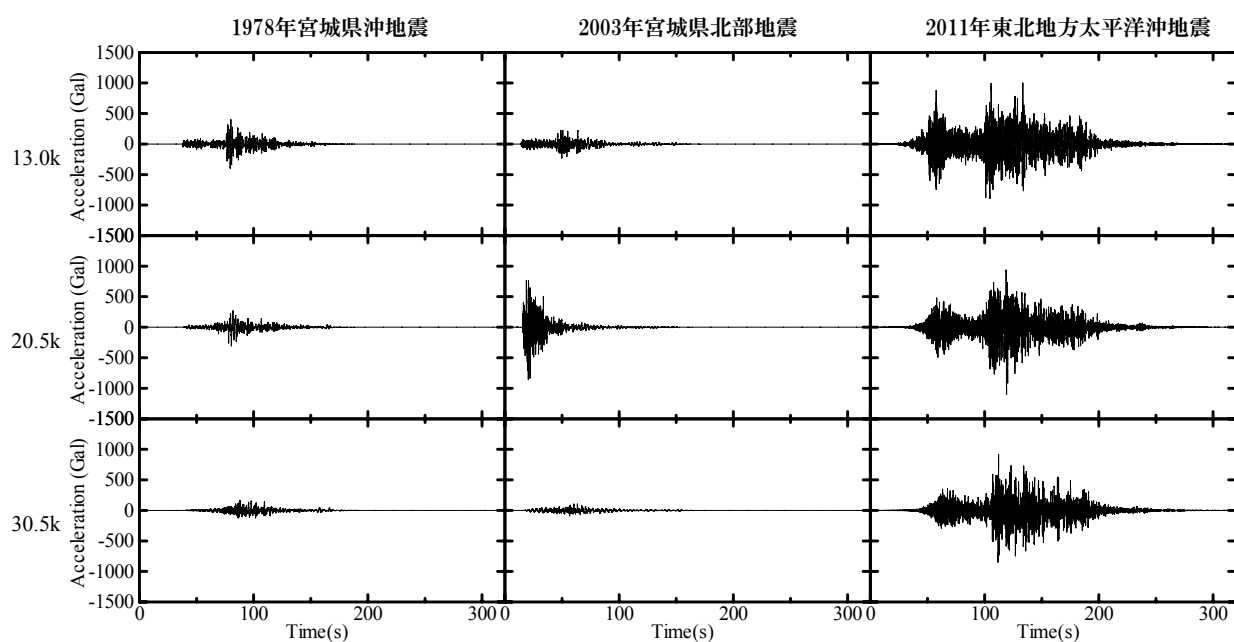


図- 5 検討対象地点における既往地震の推定地表面地震動

表- 1 鳴瀬川右岸 13.0k 地点の解析モデルの地盤パラメータ

層厚(m)	土質	ρ (kN/m ³)	V_s (m/s)	D_{50} (mm)	F_c (%)	RL_{15}
4.5	Bs	17.2	130	0.15	20	0.257
1.9	Ac1	16.8	130	0.020		
1.0	As1	17.2	130	0.004	15	0.267
3.1	Ac2	15.1	130	0.15		
5.2	As2	17.6	160	0.04	10	0.362
21.9	Ac3	15.0	120	0.15		
5.0	As3-1	19.1	200	0.004		
4.0	As3-2	19.1	360	0.35		
2.9	Dc	19.6	240	0.35		
	Ds	20.6	600	0.004		

答シミュレーションに対して近傍の観測記録を代用できないことを示す研究が少なくない^{9~12)}。そのため、本研究ではまず、崩壊地点近傍での余震観測結果および常時微動計測結果などに基づいて、当該地点におけるサイト特性を評価した。そして、特性化震源モデルを用いた強震波形計算¹³⁾を実施し、本震時における被災地点での地震動を推定した。推定方法の詳細は文献14)を参照されたい。推定された堤防横断方向の地表面地震動を図- 5に示す。

(3) 液状化評価方法

上記 3 地点のうち、右岸 13k と左岸 30.3k では堤体下部の砂質地盤が粘性土の窪地内に飽和状態にあり、被害地震時に液状化したと考えられている⁷⁸⁾。一方、左岸 20.3k では明確な液状化の痕跡は見られなかった⁶⁾ものの、堤内側の小段の基礎部分とその下方の標高 4~3m に密実でない沖積砂層が存在することから強震時に液状化するものと想定される。よって、各地点での被害を液状化

程度の観点から検討を行う。

a) 一次元地震応答解析

重複反射理論による一次元地震応答解析に基づいて飽和砂層のせん断応力の時刻歴を算定する。解析は DYNEQ (ver3.25)¹⁵⁾を使用し、土の動的変形特性は土質、平均粒径をもとに安田・山口の方法¹⁶⁾に基づいて設定する。土質パラメータは、各関係機関で詳細な土質試験が実施されており、その結果を参考に決定する。具体的には、右岸 13k の湿潤密度 ρ_t 、せん断波速度 V_s 、繰返し三軸軸強度比 R_L (15 回) は資料8)の値を、左岸 20.3k および左岸 30.3k の湿潤密度 ρ_t 、平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c 、繰返し三軸軸強度比 R_L は資料7)に基づき、せん断波速度 V_s は、N 値から道路橋示方書の砂質土、粘性土別の算定式によって設定した。各地盤モデルを表- 1~表- 3に示す。また、地盤条件は盛土先端部の鉛直方向の地層構造が水平に無限に分布するものと仮定し、1 次元の地盤モデルを設定した。

表- 2 鳴瀬川左岸 20. 3k 地点の解析モデルの地盤パラメータ

層厚(m)	土質	$\rho_f(\text{kN/m}^3)$	$V_s(\text{m/s})$	$D_{30}(\text{mm})$	RL_{20}
4.0	Bc	15.9	140	0.03	
1.6	As1	15.9	140	0.09	0.198
3.4	Ac2	15.4	130	0.006	
1.5	As2	21.5	220	0.47	0.295
1.0	Ac3	13.5	180	0.05	
1.0	Asc	18.7	180	0.08	0.23
1.5	Asc	18.7	120	0.002	
2.1	Asc	18.7	120	0.14	0.226
10.1	Ac4	16.7	120	0.03	
4.3	As3	19.1	210	0.15	
3.8	Acs	16.8	16.8	0.04	
1.9	As4	19.1	290	0.35	
1.0	As4c	17.2	200	0.07	
	As4	19.1	400		

表- 3 鳴瀬川左岸 30. 3k 地点の解析モデルの地盤パラメータ

層厚(m)	土質	$\rho_f(\text{kN/m}^3)$	$V_s(\text{m/s})$	$D_{30}(\text{mm})$	RL_{20}
1.8	B1-c	17.0	120	0.06	
2.3	B1-s	16.9	120	0.04	0.256
4.4	Ac1	16.4	140	0.06	
0.8	As1	17.2	140	0.07	0.291
2.1	Ac2	14.1	140	0.015	
0.5	As1	17.2	140	0.10	0.238
0.5	Ac2	14.1	140	0.015	
1.5	As2	18.2	180	0.15	0.345
1.9	Ac3	15.4	150	0.006	
2.0	As3	18.9	200	0.50	
1.1	As3	18.9	200	0.70	
1.2	As3	18.9	200	0.09	
0.7	As3	18.9	200	0.30	
3.5	As3-c	17.6	130	0.07	
2.1	As3	18.9	210	0.30	
4.2	Ac4	15.0	140	0.004	
2.1	Ag1	20.6	290	2.00	
1.6	As4	19.1	170	0.35	
	Ag2	20.6	400		

b) 工学基盤波

検討対象地点の 3 地震における工学基盤波は、(2)節の推定地震波（右岸 13k、左岸 20.5k、左岸 30.5k）を工学基盤まで重複反射理論（線形地盤層、減衰 5%）で引き戻して求める。各地点での工学基盤波を図- 6 に示す。

c) 液状化評価

液状化の程度は、岩崎らの液状化指数 $PL^{17)}$ に基づいて評価する。

$$PL = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x) dx \quad (1)$$

ここに、 F_L は液状化に対する抵抗率、 x は深度を表す。

ただし、 F_L は地震動の繰返し効果を陽に考慮できる大川らの累積損傷度理論¹⁸⁾に基づき算定し、その際の液状化強度曲線は参考資料の繰返し三軸強度比 R_L を次の Tatsuoka and Silver の式¹⁹⁾に基づいて設定した。

$$R_{Li} = R_L \left(\frac{N_{ci}}{20} \right)^{-0.1-0.11 \log_{10} DA} \quad (2)$$

ここに、 R_{Li} は繰返し回数 N_{ci} で両ひずみ振幅 DA （5%）に至るせん断応力比を表す。ただし、右岸 13k については、資料に記載された一般部の R_{Li5} になるよう F_c を調整したのち、断面ごとに図中の N 値で液状化強度曲線を再設定した。

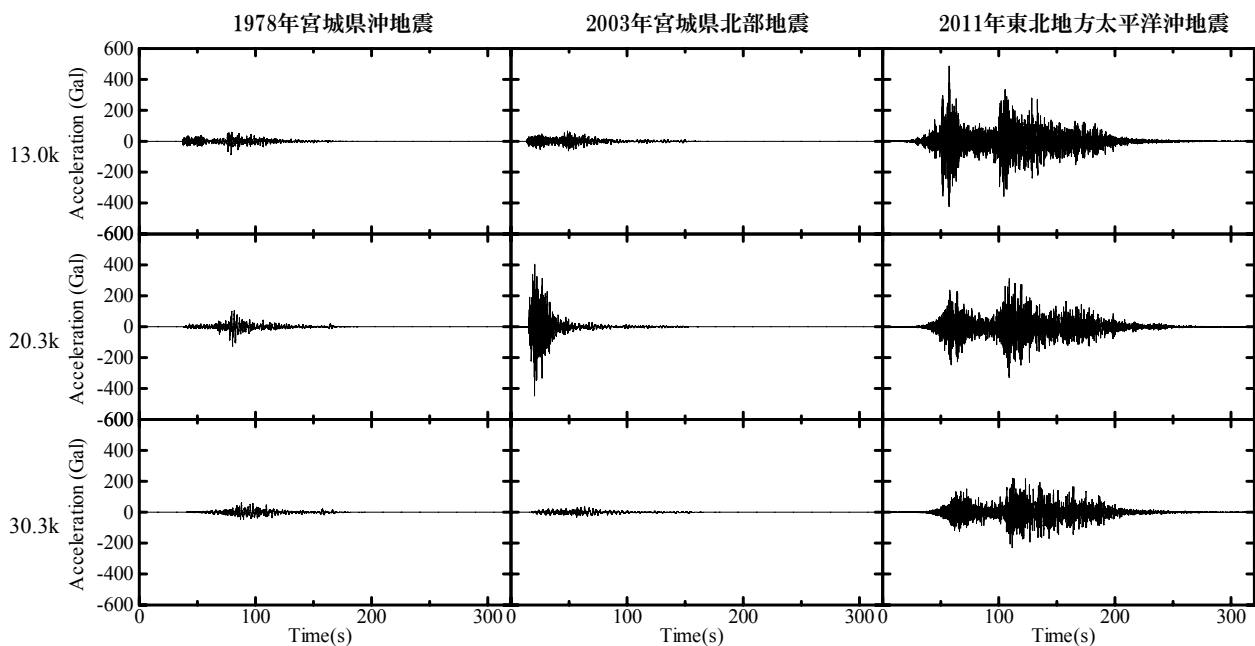


図- 6 解析対象地点の工学基盤波 (2E)

表- 4 液状化指数 PL

	鳴瀬川右岸13.0k	鳴瀬川左岸20.3k	鳴瀬川左岸30.3k
1978年宮城県沖地震	11.5	0.3	0.4
2003年宮城県北部の地震	14.1	0.9	0.0
2011年東北地方太平洋沖地震	19.9	11.3	11.9

*赤のハッチングは実際に緊急復旧を要する被害が発生したものを表す。

3. 簡易液状化評価結果と堤防被害の関係

2章で示した手法に基づいて3地点における異なる3つの地震動に対する液状化指数を算定し、結果を表-4に示す。ちなみに一般には、PLは15より大きいと液状化危険度が高く、液状化に関するより詳細な調査と液状化対策が不可避な領域であると判断されている。

2003年宮城県北部の地震の鳴瀬川右岸13.0k、2011年東北地方太平洋沖地震の左岸20.3kおよび左岸30.3kでは、表-4よりいずれもPLが11以上の値を示しており、1978年と2003年の地震で無被害であった左岸20.3kおよび30.3kのPLは1以下と非常に小さい。それに対して右岸13.0kにおいては、1978年の地震でPL=11.5と左岸20.3k、30.3kと同等のPL値を示しているにも関わらず、無被害であった。ただし、1978年の地震では、近傍の12.1k+90m～12.1k+160mの地点で小被害が生じている²⁰⁾。また、当該地点は2011年の地震に対してもPL=19.9と大きな値を示しているものの無被害であったが、これは前述のように2003年の地震で被害を大きな受けたために基礎地盤の浅層地盤改良が施されたためである。ただし、本検討では2011年の地震に対しても無対策の地盤で計算を行なっている。また、近傍の未対策地点の堤防右岸

11.9k～12.0kでは天端が陥没する大きな被害が発生しており、得られたPLと被害状況に大きな不整合はないと考える。

上記の結果より、3つの地震による堤防の被害とPL値との相関は強く、PLが11以上の値を示す場合に緊急対策を要する大きな被害が生じる可能性が高いことが示された。一般にPLは15より大きいと液状化危険度が高いとされているが、これは水平成層地盤における評価結果に対応しているものである。本検討では、盛土形状を有する構造物を水平成層地盤に簡略化してモデル化しているために、FL算定時の有効拘束圧が実際よりも大きく算定され、そのためにPL値が過小評価されている。そのため、PL値が一般の閾値である15より小さい11以上で被害の大きい結果が得られているものと考え。

4. 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いて、被害程度の異なる鳴瀬川河川堤防に対して、各検討地点の推定地震動を用いて、一次元等価線形化手法に基づく地

震応答解析，累積損傷度理論に基づく液状化抵抗率 FL 値の算定により，液状化指数 PL を求めた．得られた PL 値と堤防の被害との関係から， PL が 11 以上で緊急対策を要する大きな堤防被害が発生する可能性が大きい結果となった．本研究における無被害堤防の PL が 1 以下であることから，無被害と大被害の閾値を 11 と確定することができず，閾値を求めるためには，より多くの被害程度の異なる断面に対して検討を追加する必要がある．しかしながら，本研究における簡易耐震性評価手法が，液状化を伴う堤防の耐震性評価の 1 次スクリーニング法となる可能性を有することが分かった．

謝辞

本研究を進めるにあたり，既往地震における鳴瀬川河川堤防の地震被害状況，地盤調査結果等を国土交通省北陸地方整備局に提供頂いた．また，本研究は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（杉戸委員長）の活動の一環として行った．ここに記して感謝の意を表す．

参考文献

- 1) 吉田望，大矢陽介，澤田純男，中村晋：海溝型長継続時間地震動に対する簡易液状化判定法の適用性，日本地震工学会論文集，Vol.9，No.3，pp.28-47，2009．
- 2) 山崎浩之，江本翔一：地震動波形の影響を考慮した液状化の予測・判定に関する提案，港湾空港技術研究所報告，Vol.49，No.3，pp.79-109，2010．
- 3) 吉澤睦博，酒井久和，渦岡良介：河川堤防の耐震性評価における継続時間の長い地震動に対する有効応力解析の適用性の検討，構造工学論文集，55A，pp.415-420，2009．
- 4) 余川弘至，田辺晶規，八嶋厚，杉戸真太，沢田和秀，久世益充，中山修，星加泰央：地震動の加速度振幅と継続時間が河川堤防の変形に及ぼす影響，日本地震工学会論文集，Vol.9，No.5，pp.1-20，2009．
- 5) 八代和幸，杉戸真太，八嶋厚，古本吉倫，渦岡良介：震動継続時間の影響を考慮した液状化危険度判定法について，土木学会地震工学論文集，Vol.27，論文番号 111，2003．
- 6) 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：効果的，効率的な耐震対策手法（工法）と耐震照査及び対策の促進，第 2 回委員会資料-6，2011．
- 7) 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一本編一，2011.12．
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所，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，国土技術政策総合研究所資料 No.636，土木研究所資料 No.4202，2011．
- 9) 秦吉弥，野津厚，一井康二，酒井久和：サイト特性置換手法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震における横浜・柴町集合住宅での地震動の評価，土木学会論文集 A1，Vol.68，No.1，pp.167-172，2012．
- 10) 秦吉弥，酒井久和，一井康二，野津厚，丸山喜久：サイト特性置換手法に基づく 2007 年新潟県中越沖地震における青海川地すべり地での地震動の評価，土木学会論文集 A1，Vol.68，No.2，pp.265-270，2012．
- 11) 秦吉弥，一井康二，野津厚，丸山喜久，酒井久和：地盤構造物の性能評価のための余震観測の重要性—2011 年東北地方太平洋沖地震における最遠方液状化地点での地震動の推定—，防災・減災のための地盤構造物の設計・施工法に関するシンポジウム論文集，地盤工学会，pp.149-154，2012．
- 12) 秦吉弥，一井康二，常田賢一，野津厚，横田聖哉，金田和男：サイト特性置換手法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震とその最大余震における盛土被災地点での地震動の推定，土木学会論文集 A1，Vol.68，No.4，pp.315-330，2012．
- 13) 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．
- 14) 秦吉弥，酒井久和，野津厚，一井康二，静間俊郎，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. (in press)
- 15) 吉田望，末富岩雄：DYNEQ—等価線形化手法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム，佐藤工業株式会社技術研究所報，pp.61-70，1996．
- 16) 安田進，山口勇：種々の不攪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集，pp.539-542，1985．
- 17) 岩崎敏男，龍岡文夫，常田賢一，安田進：地震時地盤液状化の程度の予測について，土と基礎，Vol.28，No.4，pp.23-29，1980．
- 18) 大川征治，前田良刀，真鍋進，龍岡文夫：累積損傷度理論を用いた簡易液状化判定手法の提案，第 19 回日本地震工学研究発表会，1987．
- 19) Tatsuo, F. and Silver, M.L.: Undrained Stress-Strain Behavior of Sand under Irregular Loading, Soils and Foundations, 21(1), 51-66, 1981.
- 20) 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，1980．

(2012. 9. 25 受付)

A STUDY ON A SIMPLIFIED SEISMIC RESISTANT METHODOLOGY OF RIVER DIKES BASED ON ANALYZING DAMAGE CASES DURING THREE DIFFERENT TYPES OF EARTHQUAKES

Hisakazu SAKAI, Yoshiya HATA, Ryosuke UZUOKA and Mutsuhiro YOSHIKAWA

A huge number of people living in areas below sea level in Tokyo, Nagoya and Osaka etc. are shielded from inflow sea water by river and sea dikes. The dikes face the Nankai Trough earthquake which occurs in high probability in a few dozens years future, therefore it is necessary to estimate the seismic resistance of the embankments during a long time duration earthquake with satisficate accuracy. As the detail seismic assessments of the exceedingly-long dikes are impossible in practice, we need a facile method to estimate the seismic resistance of the embankment for the first screening. In this study, we evaluated the ground motions during the past three earthquakes, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, the 2003 Northern Miyagi Earthquake and the 1978 off Miyagi Earthquake, and conducted one dimensional earthquake response analyses with equivalent linear model. We calculated the liquefaction indexes for the dikes of the Naruse river in Miyagi prefecture during the three earthquakes based on the cumulative damage concept. The index values are good agreement with the damage of the embankments of each three earthquake. The results show that the simplified methodology has a possibility for the first screening of seismic resistant of an embankment with liquefaction.