

2011年東北地方太平洋沖地震の被災事例 を対象とした地震応答解析

吉田 誠¹・田代 聡一²・森島 直樹³・澤田 俊一⁴・大矢 陽介⁵・井合 進⁶

¹正会員 五洋建設株式会社 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: makoto.yoshida@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 東亜建設工業株式会社 (〒163-1031 東京都新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワー31F)

E-mail: s_tashiro@toa-const.co.jp

³正会員 株式会社ダイヤコンサルタント (〒331-8638 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)

E-mail: n.morishima@diaconsult.co.jp

⁴正会員 応用地質株式会社 (〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町1-66-2)

E-mail: sawada-shun@oyonet.oyo.co.jp

⁵正会員 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: ooya-y@pari.go.jp

⁶正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: iai.susumu.6x@kyoto-u.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震では、2分以上の長い継続時間の地震動が観測されており、地震動が継続している間に、過剰間隙水圧の消散や、それに伴う地盤の沈下が生じていたと推測される。長継続時間の地震動による液状化の被害を検証するためには、間隙水の移動や液状化にともなう体積変化を考慮することが重要であると考えられる。そこで、本研究では、東北地方太平洋沖地震において主に液状化で被災した構造物を対象に、解析コードFLIPにより再現解析を試みるとともに、被災原因について検討を行った。本研究で用いたFLIPは、従来のひずみ空間多重モデルに、新たにストレスダイレイタンスー関係を組込んだ構成モデルを採用したものとし、間隙水の移動やダイレイタンスーによる体積ひずみを考慮することが可能となっている。

Key Words : liquefaction, quay wall, river embankment, landfill, effective stress dynamic analysis

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、地震動、津波およびこれらの複合により、多くの土木・建築構造物が甚大な被害を受けた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。この地震は海溝型であるとともにマグニチュード(M_w)が9.0と非常に大きかったため、被害が広範囲に及んだと考えられる。さらに、地震動の継続時間が2分以上と非常に長いことや、本震の約30分後に発生した余震($M=7.6$)により、液状化などによる被害が拡大した可能性が指摘されている³⁾。

港湾構造物の被害は、津波による被害が顕著であったが、地震の揺れに起因する岸壁の被害は、宮城県以南で多数確認された。その理由として、震源破壊過程と地震放射特性の影響⁵⁾により、震央の南側で地震動の卓越周

波数が低いことや、宮城県以南には埋立地が多いことが挙げられる。岸壁の被害の主な特徴は、背後地盤の液状化などに起因する法線のはらみ出しや背後地盤の沈下である。

河川盛土の被害に着目すると、東北地方の北上川や関東地方の利根川などの各水系を中心に、液状化による大規模な沈下、すべり破壊、亀裂等が広範囲に渡って発生した。主な被災形態は、堤体の沈下や法尻の水平変位であり、その原因は、基礎地盤の液状化、堤体の液状化、基礎地盤と堤体の液状化の3パターンに分類される²⁾。

東京湾岸の埋立地は、震源から数百キロ離れており、地震動の加速度振幅が100 Gal程度と小さいにもかかわらず、液状化により、噴砂、家屋の傾斜・沈下や道路の隆起など多くの被害を受けている³⁾。東京湾岸の砂は細粒

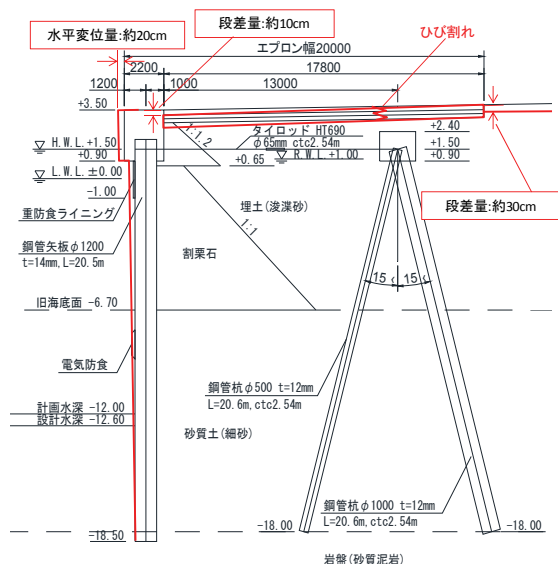


図-1 相馬港2号埠頭岸壁の被災状況

分が多く、液状化による噴砂の量が非常に多かったことも被害の特徴のひとつとして挙げられる。

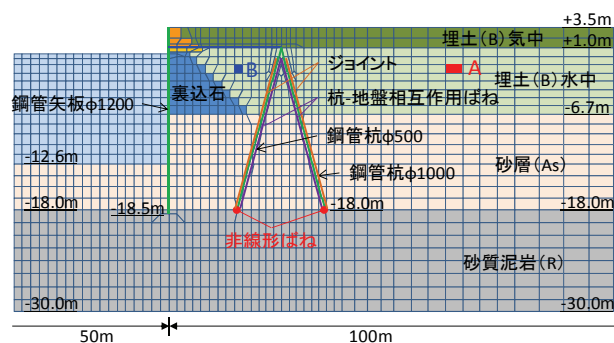


図-2 土層分割および有限要素分割図

表-1 地盤の動的変形特性パラメータ

[illegible]

表-2 地盤の液状化特性パラメータ

埋土(B) $F_{\varepsilon}=10\%$	ε_d^{cm}	$r_{\varepsilon dc}$	$r_{\varepsilon d}$	q_1	q_2	$H_{max}L$	l_k
	0.20	0.95	1.20	8.00	0.70	0.24	2.00
	r_k	r_k''	S_j	c_l	q_4	r_{γ_j}	r_{imp}
	0.500	0.500	0.005	2.560	1.0	0.1	0.5
砂層(As) $F_{\varepsilon}=10\%$	ε_d^{cm}	$r_{\varepsilon dc}$	$r_{\varepsilon d}$	q_1	q_2	$H_{max}L$	l_k
	0.15	1.40	0.60	1.00	0.80	0.24	2.00
	r_k	r_k''	S_j	c_l	q_4	r_{γ_j}	r_{imp}
	0.500	0.500	0.005	8.290	1.0	0.1	0.5

分が多く、液状化による噴砂の量が非常に多かったことも被害の特徴のひとつとして挙げられる。

長継続時間の地震動や本震と余震を考慮した液状化の被害を予測するためには、地盤中の間隙水の移動やそれともなう土骨格の体積変化を考慮することが重要であると考えられる。

液状化による被害を評価することができる解析コードの一つとして、有効法力法に基づく地震応答解析コードFLIP⁶⁾が挙げられる。FLIPは港湾分野を中心に、その精度向上に関する研究が多数行われており、実務で一般的に使用されるようになっている^{例えば7)}。ダイレイタンスーの評価法や基礎捨石の材料定数などについて検討・改善が行われており^{8) 9)}、一斉解析などによって被災事例に対する再現性が確認されている¹⁰⁾。

従来のFLIPは、設計地震動の継続時間が比較的短かったため、非排水条件下で定式化されたひずみ空間多重モデル「東畑・石原モデル+井合モデル」¹¹⁾（以下、マルチスプリングモデルと称す）が用いられてきた。マルチスプリングモデルでは、地震時の透水を考慮できないが、過剰間隙水圧上昇に伴う地盤剛性の低下を適切に考慮できる。開発当時のFLIP（以下、マルチスプリングモデルと称す）は、間隙水の収支バランス式において土骨格と間隙水の相対速度をゼロとし、間隙水の流れを考慮しない非排水条件に基づいていた。しかし、土骨格と間隙水の相対速度を考慮した間隙水の収支バランス式と運動方程式を連成させて解く透水解析機能や、新たに提案されたストレスダイレイタンシー関係^{12) 13)}が導入され、間隙水の移動や液状化に伴う体積圧縮を考慮できるようになった（以下、カクテルグラスモデルと称す）。

本研究では、東北地方太平洋沖地震で主に液状化により被災した岸壁、河川盛土および東京湾岸の埋立地を対象に、透水を考慮することができるカクテルグラスモデ

ル要素を組み込んだFLIPによる再現解析を試みることを目的としている。長継続時間地震動や、本震と余震の影響を考慮した透水解析により、様々な構造物に対する被害状況の再現性について検証するとともに、被災原因について検討した。

2. 控え組杭式鋼矢板岸壁の事例解析

2011年東北地方太平洋沖地震で被災した相馬港2号埠頭(-12 m)岸壁を対象に、透水を考慮することができるカクテルグラスモデル要素を組み込んだFLIP(Ver.7.2.3_2)による再現解析を試みた。

(1) 被災状況

岸壁の構造形式は、図-1に示すような控え組杭式鋼矢板岸壁である。被災調査結果によると、岸壁法線が20cm程度海側に移動し、上部工直背後とエプロン部の間に10～20 cmの段差、法線から20～25 mの位置で30 cm程度の段差が認められる¹⁾。

(2) 解析内容

本解析における土層分割および有限要素分割図を図-2

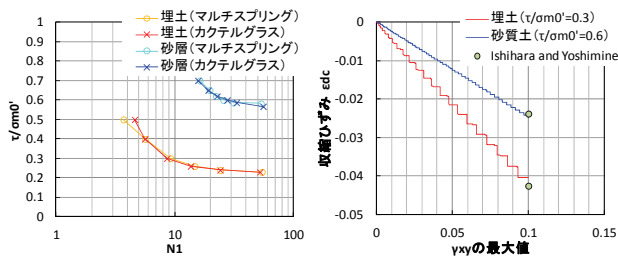


図-3 要素シミュレーション結果

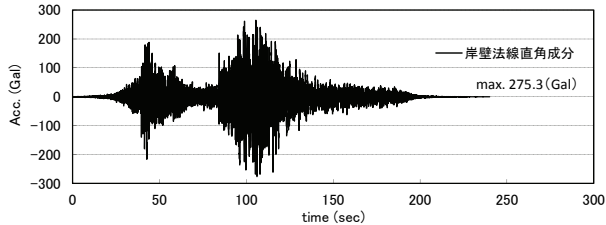


図-4 入力地震動

に示す。岩盤である砂質泥岩(R)は線形平面要素、裏込石はマルチスプリング要素でモデル化し、それ以外の地盤はカクテルグラス要素でモデル化した。矢板および控え杭は線形はり要素でモデル化した。矢板のすり抜けや地盤との剥離や滑りを表現するため、杭と地盤の間に相互作用ばねとジョイント要素を設定した。タイロッドは非線形ばね要素でモデル化し、圧縮力を伝達させないように圧縮側の剛性をゼロとし、引張側は線形ばねとした。杭下端は圧縮のみ受け持ち、引張は受け持たない非線形ばね要素を挿入した。

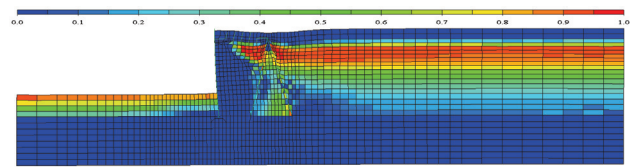
地盤の動的変形特性パラメータ(表-1)は、既存のボーリング調査結果やPS検層結果に基づき N 値やせん断波速度 V_s などの値から設定した。ただし、埋土および砂層の細粒分含有率は、マルチスプリングモデルによるパラメータスタディ結果より10%と仮定している¹⁴⁾。

液状化対象地盤である埋土および砂層について非排水繰返し三軸試験が実施されていないため、液状化特性パラメータ(表-2)は次のように設定した。 N 値と細粒分含有率による簡易設定法¹⁵⁾からマルチスプリングモデルにより実施した要素シミュレーション結果をターゲットとし、カクテルグラスモデルによる要素シミュレーションを実施して液状化特性パラメータを決定した(図-3左)。さらに、繰返しせん断による体積ひずみがIshihara and Yoshimine¹⁶⁾の要素試験結果と整合するようにパラメータを設定した(図-3右)。その他の地盤パラメータはFLIPにおける標準的な方法に基づき設定した¹⁵⁾。

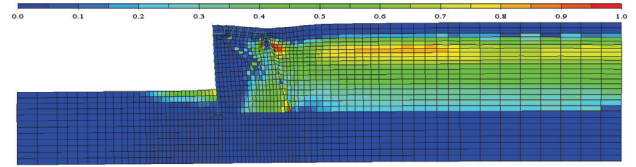
側面・底面境界は粘性境界でモデル化した。

入力地震動は、強震観測地点(相馬-G)における東北地方太平洋沖地震の事後推定波¹⁷⁾を、NS成分とEW成分から岸壁法直方向に変換したものを使用した(図-4)。

解析方法は、初期応力状態を正確に再現するため4段



(a) $t=126$ s(主要動直後)



(b) $t=240$ s

図-5 岸壁の変形形状および過剰間隙水圧比分布

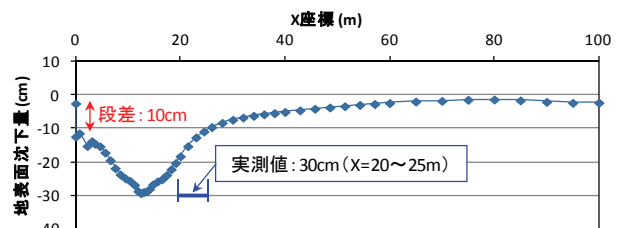


図-6 矢板背後の地表面沈下量分布

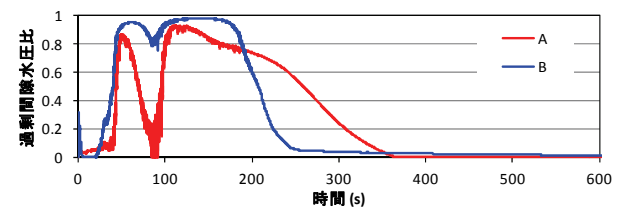


図-7 埋土の過剰間隙水圧比時刻歴

階法(初期自重解析3段階+動的解析)¹⁸⁾とした。

(3) 解析結果

岸壁の変形形状および過剰間隙水圧比分布を図-5に示す。同図によると、矢板は全体が海側に倒れるように変位しており、天端での変位が最も大きい。矢板天端の残留水平変位は26 cmであり、実測値の約20 cmと概ね整合している。埋土の過剰間隙水圧比は、主要動直後(126 s)で0.9以上に達して液状化しており、その後、時間とともに消散している。

埋土が液状化したにもかかわらず、矢板水平変位が抑えられたのは、控え工が堅固な地盤に根入れされているため支持力を失わなかったことによると考えられる。このことは、矢板が海側に凸となる形状を示していることから支持される。

矢板背後の地表面沈下量分布を図-6に示す。矢板直背後の段差は10 cmであり、実測値(約10 cm)と良い対応を示している。調査結果によると岸壁法線から20~25 m付

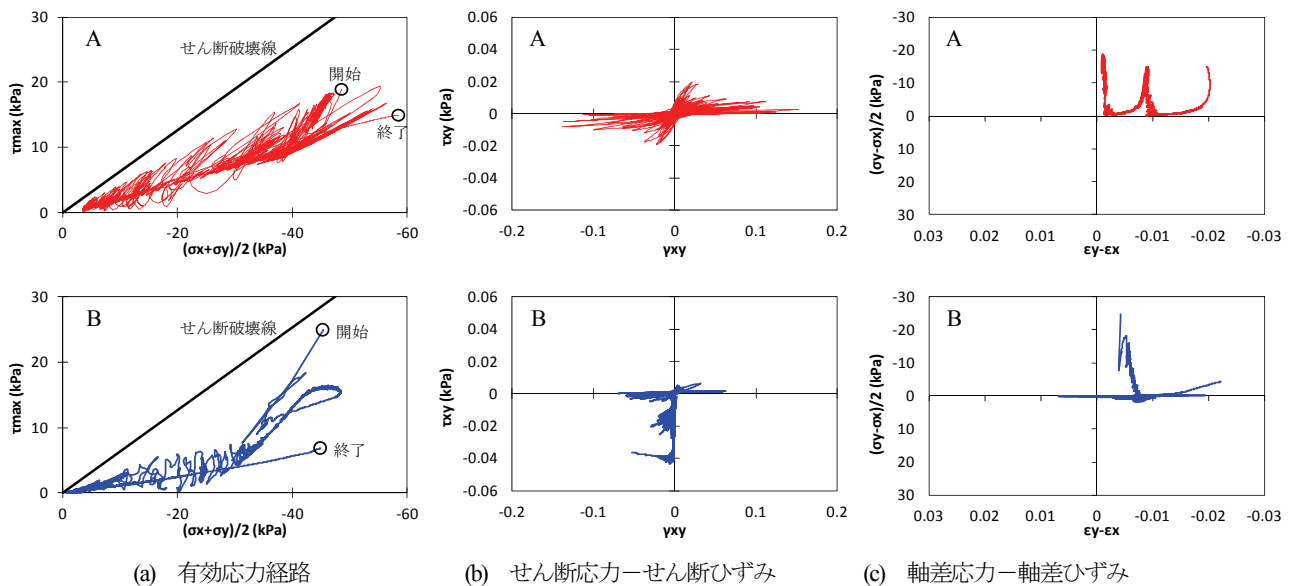


図-8 埋土の有効応力経路および応力-ひずみ関係

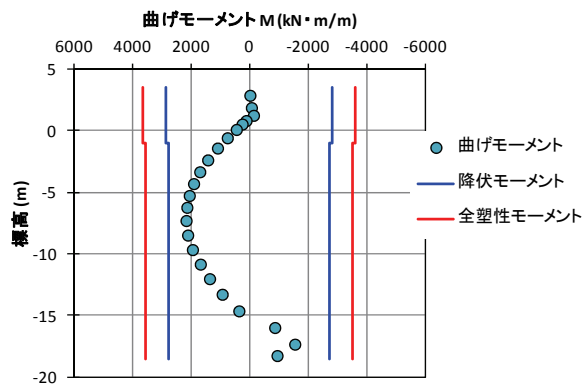


図-9 矢板の曲げモーメント分布

近に30cm程度の段差が生じていたと報告されており、沈下が生じる位置は異なるものの、解析による沈下量は最大で30cmであり実測値と整合している。

埋土の過剰間隙水圧比時刻歴を図-7に示す。矢板直背後(B地点)の過剰間隙水圧比は、陸側(A地点)よりやや小さいが、両者とも最大値は0.9以上であり概ね液状化したと判断される。200 s以降における水圧の消散は、B地点の方が早い。これは、B地点の近くに透水係数の大きい裏込石があるためである。

埋土の有効応力経路および応力-ひずみ関係を図-8に示す。同図によると、陸側(図-8のA地点)では液状化時の典型的な挙動が再現されている。すなわち、有効応力と軸差応力が加振とともに0に近づき、せん断応力-せん断ひずみ関係では加振の進行とともに剛性が低下している。過剰間隙水圧の消散後は有効応力が回復している。

一方、矢板直背後(図-8のB地点)では、地震動の作用直後に最大せん断応力が大幅に低下している。これは、矢板直背後の過剰間隙水圧の上昇が早かったため(図-7)、軸差応力が著しく減少したことによると考えられる。せん断応力は、矢板変位にともない負の値が増加している。

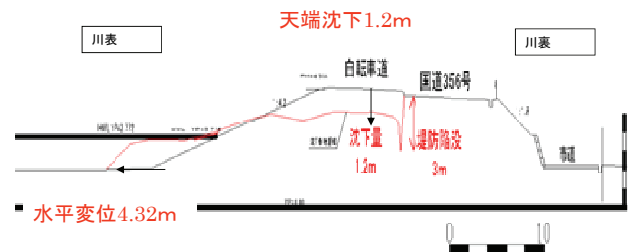


図-10 利根川右岸26kにおける河川盛土の被災状況

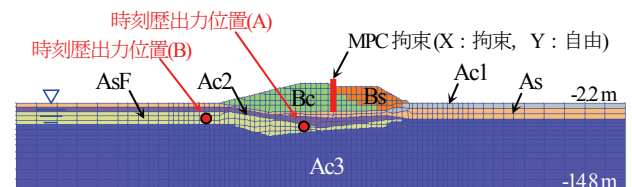


図-11 土層分割および有限要素分割図

せん断応力は、矢板変位にともない負の値が増加している。

矢板の曲げモーメント分布は、図-9に示すように中央付近で最大となっている。これは、矢板上部の水平変位がタイロッドで抑えられた状態で背後から土圧が作用したためと考えられる。矢板は降伏しておらず、被災状況と整合的である。

3. 河川盛土の事例解析

2011年東北地方太平洋沖地震で被災した利根川右岸27k+80m～27k+150mにおける河川盛土²⁾を対象に、透水を考慮することができるカクテルグラスモデル要素を組み込んだFLIP(Ver.7.2.3_2)による再現解析を試みた。

表-3 地盤の解析パラメータ

(a) 動的変形特性

土層	区分	密度 ρ	基準 拘束圧 σ_{ma} (Pa)	せん断 弾性係数 G_{ma} (kPa)	m_G	体積 弾性係数 K_{ma} (kPa)	m_K	粘着 力 c (kPa)	内部 摩擦角 ϕ_f	最大 減衰 定数 h_{max}	間隙 率 n
Bs	水位上;非液化層	1.90	27.8	46,204	0.5	120,492	0.5	0.0	36.67	0.24	0.475
	水位下;液化層	1.90	57.8	46,204	0.5	120,492	0.5	0.0	35.10	0.24	0.490
Bc	水位上;非液化層	1.80	30.0	23,800	0.5	62,067	0.5	0.0	30.00	0.24	0.550
	水位下;液化層	1.80	63.0	23,800	0.5	62,067	0.5	0.0	30.00	0.24	0.550
As	液化層	1.80	69.0	31,816	0.5	82,972	0.5	0.0	33.02	0.24	0.510
AsF	液化層	1.80	84.8	31,816	0.5	82,972	0.5	0.0	32.77	0.24	0.512
Ac1	非液化層	1.70	3.0	3,400	0.5	8,867	0.5	0.0	30.00	0.24	0.550
Ac2	非液化層	1.70	75.8	3,400	0.5	8,867	0.5	0.0	30.00	0.24	0.550
Ac3	非液化層	1.70	119.3	6,800	0.5	17,733	0.5	0.0	30.00	0.24	0.550

(b) 液化化特性

Bs	e_d^{cm}	r_{dc}	r_{ed}	q_1	q_2
	0.10	3.5	0.15	5.5	1.00
	l_k	r_k	r_k''	S_L	cl
	2.00	0.5	0.5	0.005	2.60
As	e_d^{cm}	r_{dc}	r_{ed}	q_1	q_2
	0.20	4.0	0.20	7.0	1.50
	l_k	r_k	r_k''	S_L	cl
	2.00	0.7	0.7	0.005	1.98
AsF	e_d^{cm}	r_{dc}	r_{ed}	q_1	q_2
	0.20	5.0	0.20	7.0	1.50
	l_k	r_k	r_k''	S_L	cl
	2.00	0.5	0.5	0.005	1.98

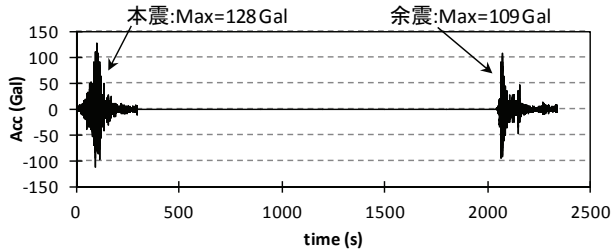


図-12 入力地震動

表-4 解析ケース

ケース	Case1	Case2
入力地震動	本震 + 余震	本震のみ

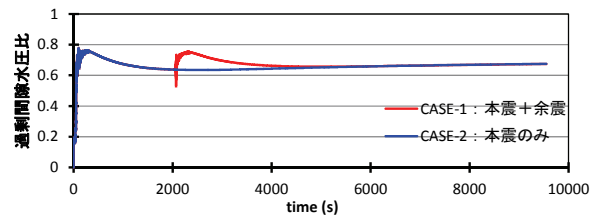
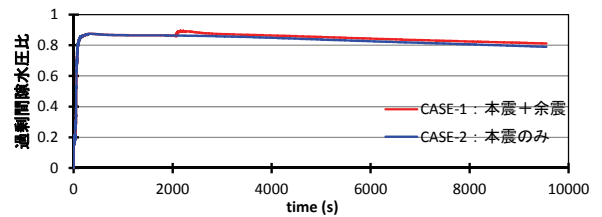


図-13 AsF層の過剰間隙水圧比時刻歴

(上: 堤防直下, 下: 法尻)

(1) 被災状況

被災要因は基礎地盤の液化化によるものと考えられ、図-10に示すように堤防天端で1.2 m沈下した。堤防中央付近を境として変状の不連続性が見られ、3 m程度の陥没が確認された²⁾。

(2) 解析内容

本解析における土層分割および有限要素分割図を図-11に示す。地盤はカクテルグラス要素でモデル化した。堤防中央付近を境とした変状の不連続面は、水位面より上部の堤体内に二重節点を設け、重複する節点の水平方向自由度のみ同一と設定した。

地盤の解析パラメータを表-3に示す。動的変形特性パラメータは、公開されている N 値などの地盤情報²⁾に基づき簡易設定法¹⁵⁾により設定した。

液化化対象地盤であるBs層、As層およびAsF層については、液化化強度 R_{L20} ²⁾にフィッティングするように要素シミュレーションを実施して液化化特性パラメータを決定した。さらに、繰返しせん断による体積ひずみがIshihara and Yoshimine¹⁶⁾の要素試験結果と整合するようにパラメータを設定した。その他の地盤パラメータはFLIPにおける標準的な方法に基づき設定した¹⁵⁾。

側面・底面境界は粘性境界でモデル化した。

入力地震動は、検討対象地点の近傍にある国土交通省国土技術政策総合研究所小見川振動観測所の強振観測記録から、NS成分とEW成分を用いて堤防横断方向に合成した水平方向の地震波形とした(図-12)。本震(3/11 14:47:00、東北地方太平洋沖地震)とその約29分後に発生した余震(3/11 15:15:53、茨城県沖地震)を用いた。

解析ケースは、表-4に示すように入力地震動が本震と余震のCASE-1、本震のみのCASE-2の2ケースとした。

(3) 解析結果

AsF層の過剰間隙水圧比時刻歴を図-13に、堤防天端の沈下量時刻歴を図-14に示す。なお、出力位置を図-11に示す。本震では、過剰間隙水圧比が0.8程度まで上昇し、堤防天端が約1 m沈下した。本震後、水圧がゆっくりと

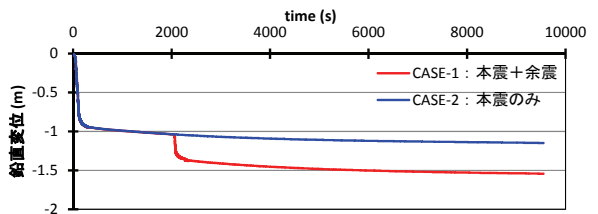


図-14 堤防天端の沈下量時刻歴

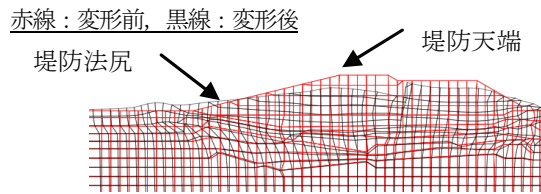


図-15 堤防の変形図(CASE-1, 余震終了時)

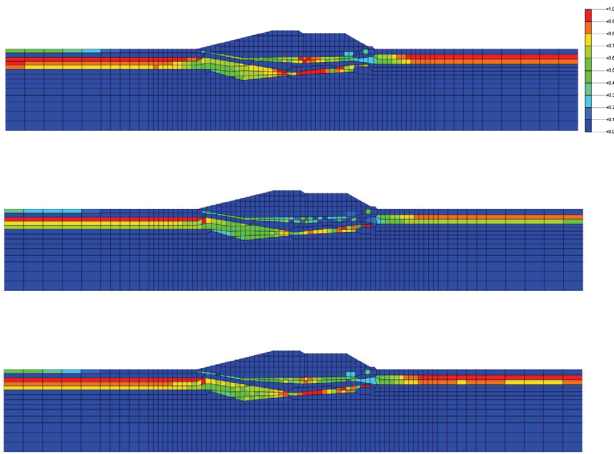


図-16 最大過剰間隙水圧比分布(CASE-1)

(上：本震終了時, 中：余震開始時, 下：余震終了時)

消散し、特に排水距離が短い法尻では水圧比が0.6程度まで低下している。その後、余震により過剰間隙水圧比が本震のときと同程度(約0.8)まで上昇し、堤防天端がさらに0.4 m程度沈下した。本震+余震の場合(CASE-1)、本震のみの場合(CASE-2)における堤防天端の残留沈下量は、それぞれ1.5 m、1.1 mであり、実測値(1.2 m)と概ね整合している。本震後の余震による影響で残留沈下量は0.4 m(約35%)増加した。

余震終了時における堤防の変形図(CASE-1)を図-15に示す。同図によると、堤体が沈下するとともに法尻付近は隆起する傾向を示す。堤防天端は左側で大きく沈下しており、これらの傾向は被災状況と整合している。堤体下部地盤は堤外側に向かって変形しており、特に液状化層(As層およびAsF層)の変形が著しい。

最大過剰間隙水圧比分布図(CASE-1)を図-16に示す。過剰間隙水圧は本震終了時に液状化層(As層およびAsF層)の広い範囲で上昇し、余震開始までに水圧の消散が認められるものの、余震時に再び上昇している。

以上の結果から、液状化層で発生した過剰間隙水圧が残留した状態で余震が発生した場合、堤防の沈下被害が拡大するおそれがあることが示唆される。

4. 東京湾岸における埋立地の事例解析

2011年東北地方太平洋沖地震で被災した東京湾岸の埋

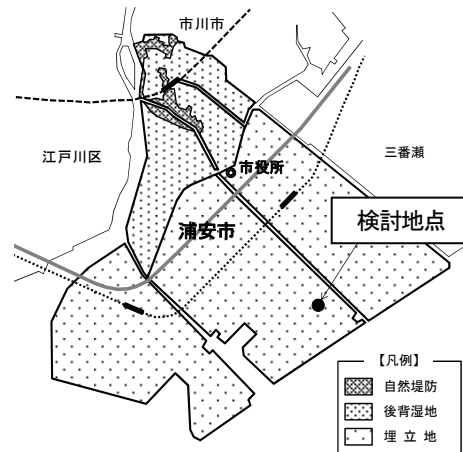


図-17 検討地点位置図

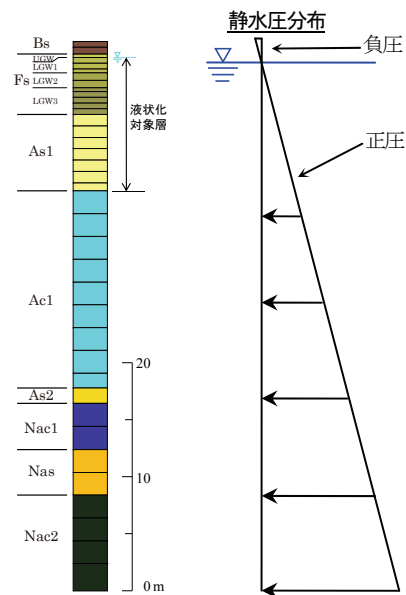


図-18 土層分割・有限要素分割図および静水圧分布

立地³⁾を対象に、透水を考慮することができるカクテルグラスモデル要素を組み込んだFLIP(Ver.7.2.3_4)による再現解析を試みた。

(1) 被災状況

検討地点を図-17に示す。当該地点では東北地方太平洋沖地震の本震(浦安市：震度5強)およびその後の余震(浦安市：震度5弱)により、埋立地で液状化が発生した。防犯カメラの記録によると、検討地点付近では本震後～余震にかけて噴砂が発生しており、地盤の沈下量は20～30cmであった³⁾。

(2) 解析内容

本解析における土層分割および有限要素分割図を図-18に示す。同図には、静水圧分布を併せて示している。地盤はカクテルグラス要素でモデル化した。本検討では液状化による地下水位上昇を考慮するため、地下水位以

表-5 地盤の解析パラメータ

(a) 動的変形特性

土層	区分	密度 ρ	基準 拘束圧 σ_{ma}' (Pa)	せん断 弾性係数 G_{ma} (kPa)	m_G	体積 弾性係数 K_{ma} (kPa)	m_K	粘着 力 c (kPa)	内部 摩擦角 ϕ_f	最大 減衰定数 h_{max}	間隙 率 n	透水 係数 k (m/s)
Bs	非液化化層	1.70	98.0	57,200	0.5	149,200	0.5	0.0	41.3	0.24	0.450	5×10^{-5}
Fs_UGW	非液化化層	1.80	98.0	40,000	0.5	104,300	0.5	0.0	41.0	0.24	0.450	5×10^{-5}
Fs_LGW1	液化化層	1.80	98.0	34,100	0.5	88,900	0.5	0.0	38.3	0.24	0.450	1×10^{-6}
Fs_LGW2	液化化層	1.80	98.0	32,500	0.5	87,800	0.5	0.0	35.6	0.24	0.450	1×10^{-6}
Fs_LGW3	液化化層	1.80	98.0	25,300	0.5	66,000	0.5	0.0	39.6	0.24	0.450	1×10^{-6}
As1	液化化層	1.80	98.0	34,000	0.5	88,700	0.5	0.0	39.4	0.24	0.450	1×10^{-5}
Ac1	非液化化層	1.80	98.0	25,600	0.5	66,800	0.5	0.0	30.0	0.24	0.550	3×10^{-8}
As2	非液化化層	1.80	98.0	34,900	0.5	91,000	0.5	0.0	40.0	0.24	0.450	9×10^{-6}
Nac1	非液化化層	1.70	98.0	44,700	0.5	116,600	0.5	0.0	30.0	0.24	0.550	3×10^{-8}
Nas	非液化化層	1.80	98.0	104,000	0.5	271,200	0.5	0.0	39.1	0.24	0.450	2×10^{-5}
Nac2	非液化化層	1.70	98.0	39,100	0.5	102,000	0.5	0.0	30.0	0.24	0.550	3×10^{-8}

(b) 液化化特性

	ε_d^{cm}	$r\bar{\varepsilon}_{dc}$	$r\bar{\varepsilon}_d$	q_1	q_2
Fs_LGW1	0.50	0.958	0.50	1.0	0.5
	$\bar{l}_k$	r_k	r_k''	S_l	c_l
	2.00	0.200	0.200	0.005	1.52
Fs_LGW2	ε_d^{cm}	$r\bar{\varepsilon}_{dc}$	$r\bar{\varepsilon}_d$	q_1	q_2
	0.58	0.720	0.58	1.0	0.5
	$\bar{l}_k$	r_k	r_k''	S_l	c_l
	2.00	0.172	0.172	0.005	1.52
Fs_LGW3	ε_d^{cm}	$r\bar{\varepsilon}_{dc}$	$r\bar{\varepsilon}_d$	q_1	q_2
	0.40	0.958	0.40	1.0	0.5
	$\bar{l}_k$	r_k	r_k''	S_l	c_l
	2.00	0.250	0.250	0.005	1.52
As1	ε_d^{cm}	$r\bar{\varepsilon}_{dc}$	$r\bar{\varepsilon}_d$	q_1	q_2
	1.00	0.500	1.00	6.0	2.1
	$\bar{l}_k$	r_k	r_k''	S_l	c_l
	2.00	0.100	0.172	0.005	1.60

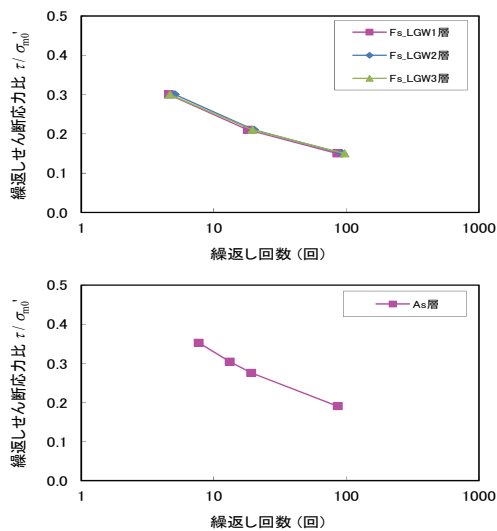


図-19 要素シミュレーション結果

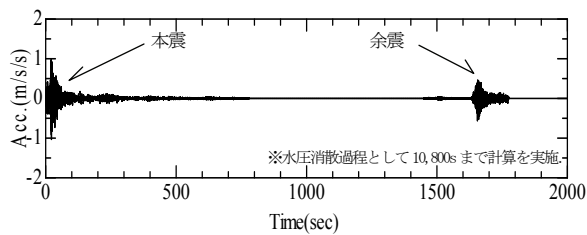


図-20 入力地震動

浅の不飽和層にも間隙水要素を適用した。このとき、初期自重解析時に発生する水圧が静水圧に一致するように地表面で負圧を考慮した。

地盤の解析パラメータを表-5に示す。動的変形特性パラメータは、公開されている N 値などの地盤情報³⁾に基づき設定した。

液化化対象地盤であるFs層およびAs1層の液化化パラメータは、要素シミュレーションを行い設定した。要素シミュレーションの結果を図-19に示す。要素シミュレーションの目標値は、液化化強度に関しては文献³⁾による液化化試験結果を参考にし、繰返しせん断による体積

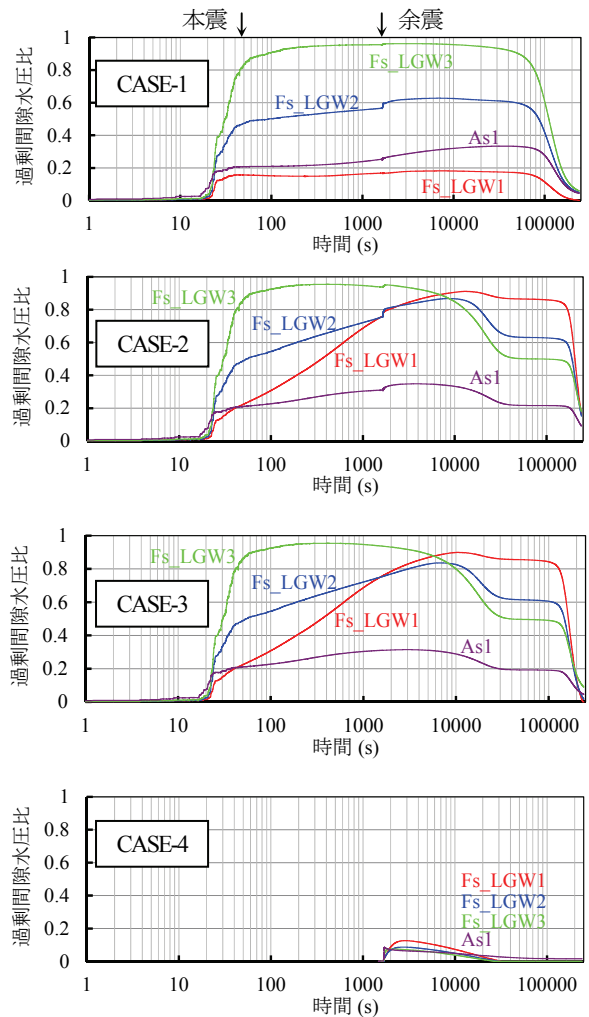


図-21 液化化層の過剰間隙水圧比時刻歴

ひずみがIshihara and Yoshimine¹⁶⁾の要素試験結果と整合するようにパラメータを設定した。その他の地盤パラメータはFLIPにおける標準的な方法に基づき設定した¹⁵⁾。

境界条件は、初期自重解析時は底面固定、側方鉛直ローラーとし、動的解析時は底面粘性境界とした。また、水圧に関する境界条件は初期自重解析時は地下水位で深に発生する水圧が静水圧と一致するように地表面で負圧を与え、動的解析時は地表面を過剰間隙水圧ゼロ境界と

表-6 解析ケース

ケース	透水係数 (m/s)			入力地震動
	不飽和層	液状化層		
		Bs, Fs_UGW	Fs_LGW	
Case1	5×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-5}	本震＋余震
Case2	5×10^{-7}	1×10^{-5}	1×10^{-4}	本震＋余震
Case3	5×10^{-7}	1×10^{-5}	1×10^{-4}	本震のみ
Case4	5×10^{-7}	1×10^{-5}	1×10^{-4}	余震のみ

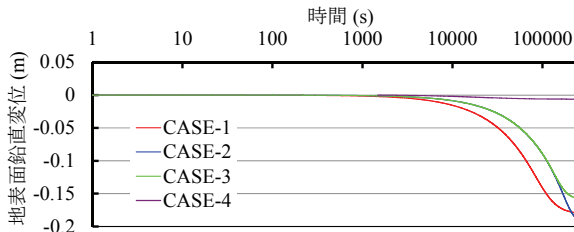


図-22 地表面の沈下量時刻歴

した。

入力地震動は、本震は東京都港湾局「夢の島」観測点¹⁹⁾、余震はK-NET「浦安」地点²⁰⁾の記録を用いて、一次元地震応答解析により工学的基盤面における波形に引き上げ、引き戻し計算を行ったものを用いた。

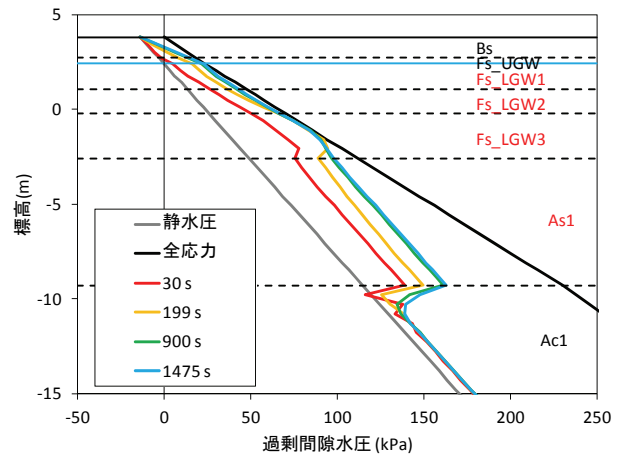
解析は、表-6に示すように、地盤の透水係数を20%粒径 D_{20} からCreagerの方法により設定した場合(CASE-1)と、さらに液状化層上部の過剰間隙水圧が上昇しやすい条件として、不飽和層(Bs層, Fs_UGW層)の透水係数を1/100倍、液状化層(Fs_LGW層, As1層)の透水係数を10倍にした場合(CASE-2)について実施した。さらに入力地震動として、本震と余震の場合(CASE-1, 2)に加え、本震のみの場合(CASE-3)、余震のみの場合(CASE-4)について解析を行った。

(3) 解析結果

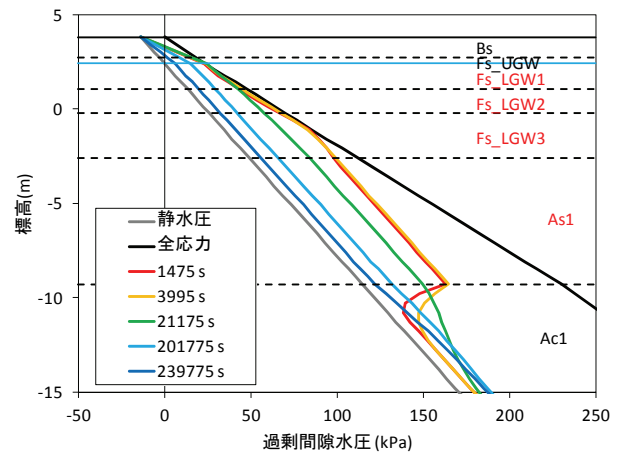
液状化層の過剰間隙水圧比時刻歴を図-21に示す。同図のCASE-1によると、本震時に過剰間隙水圧比が著しく上昇しており、Fs_LGW3層で最大値が0.9程度に達しており、ほぼ液状化したと判断される。その後、水圧はほとんど消散しない状態で余震が発生し、水圧がわずかに増加している。液状化層上部(Fs_LGW1層)の過剰間隙水圧比は、最大で0.2程度である。

同図のCASE-2によると、本震後に水圧が上昇し続ける傾向を示しており、特に液状化層上部(Fs_LGW1, 2層)で顕著である。これは、不飽和層の透水係数が小さく、液状化層の透水係数が大きいことから、不飽和層直下に水圧がたまりやすくなったためと考えられる。液状化層上部(Fs_LGW1層)の過剰間隙水圧比は余震後に0.9程度まで上昇しており、この結果は、本震後～余震にかけて噴砂が生じたという実際の現象と整合する傾向を示している。

本震のみの場合のCASE-3の過剰間隙水圧比は、本震



(a) 本震～余震直前まで



(b) 余震～水圧消散まで

図-23 間隙水圧分布の経時変化(CASE-2)

+余震の場合のCASE-2とほぼ同じ結果となっており、過剰間隙水圧に関して、今回は本震後の余震の影響は小さかったと考えられる。余震のみの場合のCASE-4の過剰間隙水圧比は、最大値が0.2以下であることから、余震のみでは液状化被害が生じなかった可能性が高い。

地表面の沈下量時刻歴を図-22に示す。同図によると、CASE-1で沈下速度が最も速いことがわかる。これは、不飽和層および液状化層の透水係数が大きいこと、過剰間隙水圧の消散が速くなったことに起因すると考えられる。

本震と余震を考慮した場合の地表面残留沈下量は、CASE-1で0.18 m、CASE-2で0.19 mであり、実際の沈下量20～30 cmと概ね整合している。これに対し、本震のみを考慮したCASE-3の残留沈下量は0.16 mである。このことから、本震と余震を考慮した場合の沈下量は、本震のみを考慮した場合より大きくなる傾向を示している。余震のみを考慮したCASE-4の残留沈下量は0.01 mであり、液状化が生じなかった場合には沈下量が非常に小さくなる結果が示された。

CASE-2における間隙水圧分布の経時変化を図-23に示

す。同図(a)によると、本震のピーク付近(30 s)で液状化層全体の過剰間隙水圧が増加しており、199秒でFs_LGW3層が最初に液状化に至っている。その後、余震直前(1475 s)までに液状化層上部(Fs_LGW1, 2層)が下層からの水圧の供給を受けて概ね液状化に至っている。

同図(b)によると、余震時およびその後3995秒までは間隙水圧分布に大きな変化は認められない。21175秒で過剰間隙水圧が下層から消散しはじめ、239775秒(本震開始から約66時間後)に概ね消散している。

以上の結果は、本震後、数十時間は液状化層の過剰間隙水圧が残留する可能性があり、このときに余震が発生した場合には液状化被害が拡大するおそれがあることを示唆するものである。

5. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震で主に液状化により被災した岸壁、河川盛土および東京湾岸の埋立地を対象に、透水を考慮することができるカクテルグラスモデル要素を組み込んだFLIPによる再現解析を試みた。長継続時間地震動や、本震と余震の影響を考慮した透水解析により、様々な構造物に対する被害状況の再現性について検証するとともに、被災原因について検討した。

相馬港2号埠頭における控え組杭式鋼矢板岸壁(-12 m)の事例解析により得られた知見を以下に示す。

- ・長継続時間地震動を考慮した透水解析を実施し、矢板天端の水平変位、上部工直背後の段差および背後地盤の地表面沈下について、解析値と実測値が概ね整合する結果が得られた。
- ・解析結果によると、矢板背後の埋土が液状化したにもかかわらず、矢板の水平変位が20 cm程度に抑えられたのは、矢板が海側に凸となる形状を示していたことから、控え工が堅固な地盤に根入れされているため支持力を失わなかったことによると考えられる。

利根川右岸27 k+80 m～27 k+150 mにおける河川盛土の事例解析により得られた知見を以下に示す。

- ・長継続時間地震動や、本震と余震を考慮した透水解析を実施し、堤防天端の残留沈下量について、解析値と実測値が概ね整合する結果が得られた。
- ・解析結果によると、堤防の沈下は、主に堤体直下の液状化による液状化層の堤外側へのせん断変形および体積圧縮に起因すると考えられる。
- ・本震と余震の両者を考慮した場合と、本震のみを考慮した場合の、解析による堤防天端沈下量や過剰間隙水圧について比較・検討した結果、液状化層で発生した過剰間隙水圧が残留した状態で余震が発生した場合、堤防の沈下被害が拡大するおそれ

があることが示された。

東京湾岸の埋立地の事例解析により得られた知見を以下に示す。

- ・長継続時間地震動や、本震と余震を考慮した透水解析によると、地盤の透水係数をCreagerの方法により設定した場合に対し、不飽和層の透水係数を1/100倍、液状化層の透水係数を10倍にした場合、液状化層上部の過剰間隙水圧比は余震後に0.9程度まで上昇した。この結果は、本震後～余震にかけて噴砂が生じたという実際の現象と整合するものである。
- ・液状化層上部の過剰間隙水圧比が上昇したのは、不飽和層の透水係数が小さく、液状化層の透水係数が大きくなり、不飽和層直下に水圧がたまりやすくなったためと考えられる。
- ・解析結果によると、本震後、数十時間は液状化層の過剰間隙水圧が残留する可能性があり、このときに余震が発生した場合には液状化被害が拡大するおそれがあることが示唆される。

本研究では、長継続時間地震動、本震と余震の影響を受ける様々な構造物に対して、透水を考慮することができるカクテルグラスモデル要素を組み込んだFLIPにより、主に液状化に起因する被害を再現することができる可能性が示された。今後は、検討事例を増やすとともに、透水係数の決定法などについて検討を行い、解析精度の向上を図っていく必要がある。

謝辞：本検討を実施するにあたり、国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所より港湾構造物に係わる被災調査結果等のデータをご提供いただきました。国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室より強震記録数値データをご提供いただきました。東京都港湾局より公開されている地震観測記録数値データおよびボーリング柱状図を使用させていただきました。防災科学技術研究所より公開されている強震観測網(K-NET)の強震記録数値データを使用させていただきました。また、本検討はFLIPの改良・機能拡張と高度な利用技術に関する研究開発の推進を目的に設立された一般社団法人FLIPコンソーシアムの活動の一環として実施されたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 戸田和彦, 菊池喜昭, 菅野高弘, 栗山喜昭, 山崎浩之, 長尾毅, 下迫健一郎, 根木貴史, 菅野甚活, 富田孝史, 河合弘泰, 中川康之, 野津厚, 岡本修, 鈴木高二朗, 森川嘉之, 有川太郎, 岩波光保, 水谷崇亮, 小濱英司, 山路徹, 熊谷兼太郎, 辰巳大介, 鷺崎誠, 泉山拓也, 関克己, 廉慶善, 竹信正寛, 加島寛章, 伴野雅之, 福永勇介, 作中淳一郎,

- 渡邊祐二：2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究資料，No.1231，2011.4.
- 2) 国土技術センター：河川堤防耐震対策緊急検討委員会資料(<http://www.jice.or.jp/sonota/t1/201108250.html>)
 - 3) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会：浦安市液状化対策技術検討調査報告書，2012.
 - 4) 土木学会東日本大震災被害調査団（地震工学委員会）緊急地震被害調査報告書(<http://committees.jsce.or.jp/report/node/43>)
 - 5) 鈴木亘，青井真，関口春子，功刀卓：2011 年東北地方太平洋沖地震の震源破壊過程，防災科学技術研究所主要災害調査，第 48 号，pp.53-62，2012.
 - 6) IAI, S., Matsunaga, Y. and Tomohiro Kameoka, T.: Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.16-20, 1992.
 - 7) (財)沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集，2007.
 - 8) 小堤治，塩崎禎郎，一井康二，井合進，森玄：二次元有効応力解析法の解析精度向上に関する検討，海洋開発論文集，第 20 巻，pp.443-448，2004.
 - 9) 佐藤成，亀山和弘，大塚夏彦，森浩章，小堤治，井合進，安田進：非排水有効応力地震応答解析における捨石材のモデル化に関する検討，第 46 回地盤工学シンポジウム，pp.25-30，2001.
 - 10) 沢田俊一，小堤治，井合進：護岸構造物の残留変形解析－FLIP による解析－，地盤工学会地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム，pp.247-256，1998.
 - 11) Iai S, Matsunaga Y, Kameoka T :Strain Space Prasticity Model for Cyclic Mobility, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
 - 12) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.35, pp.360-392, 2010.
 - 13) 井合進，飛田哲男，小堤治：砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンスー関係，京都大学防災研究所年報，第 51 号，pp.291-303，2008.
 - 14) 榊原務，曲伝軍，田代聡一，大矢陽介，飛田哲男：東北地方太平洋沖地震における相馬港 2 号埠頭岸壁の液状化による被災程度の再現解析，第 68 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp.503-504，2013.
 - 15) 森田年一，井合進，Hanlong Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料，No.869，1997.
 - 16) Ishihara, K., Yoshimine, M. : Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquakes, *SOILS AND FOUNDATIONS*, Vol.32, No.1, pp173-188, 1992.
 - 17) 野津厚，若井淳：2011 年東日本大震災で被災した港湾における地震動特性，港湾空港技術研究所資料，No.1244,pp.48-52, 2011.
 - 18) 井合進，三輪滋，小堤治，溜幸生，山本裕司，森浩章：地盤の初期応力条件が矢板式岸壁の地震時挙動に与える影響の解析的検討，第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.809-812，2001.
 - 19) 東京都港湾局ホームページ：<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/kisojoho/jishindou.html>.
 - 20) 防災科学技術研究所 強震観測網 K-NET ホームページ：<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>.

AN EFFECTIVE STRESS DYNAMIC ANALYSIS ON A QUAY WALL, AN EMBANKMENT AND LANDFILL DAMAGED DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Makoto YOSHIDA, Soichi TASHIRO, Naoki MORISHIMA, Shunichi SAWADA,
Yousuke OHYA and Susumu IAI

This paper describes the results of an effective stress dynamic analysis on a quay wall, an embankment and landfill damaged during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The results of the analyses were compared with the various types of structures damaged due to liquefaction during the earthquakes which were long duration more than 2 minutes and mainshock and the aftershock about 30 minutes later. As a result, by the analysis considering of seepage of pore water and dilatancy of soil, the deformation of the various types of structures damaged due to liquefaction was fairly simulated. Moreover the cause of the damage of them was clarified by the analysis. The analytical results show that the damage of them is greater because of mainshock and the aftershock about 30 minutes later.