

透水を考慮した2011年東北地方太平洋沖地震における埋立地盤の地震応答解析

植村 一瑛¹・信本 実¹・澤田 俊一¹・吉田 誠²・佐藤 成³・影地 良昭⁴・溜 幸生⁵・兵頭 順一⁵・仲摩 貴史⁶・細尾 敦⁶・一井 康二⁷

¹正会員 応用地質株式会社 エンジニアリング本部 (〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町1-66-2)

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業本部 (〒163-6018 東京都新宿区西新宿6-8-1)

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土保全事業本部 (〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)

⁵正会員 東電設計株式会社 土木本部 (〒206-8550 東京都江東区東雲1-7-12)

⁶正会員 株式会社 地震工学研究所 技術部 (〒160-0004 東京都新宿区四谷4-27-2)

⁷正会員 広島大学大学院工学研究院 社会環境空間部門 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東京湾岸の埋立地に広域かつ大規模な液状化被害をもたらした。本地震では2分以上の長い継続時間の本震と、そのおよそ30分後に発生した余震により液状化の被害が拡大したと問題視されている。

本報では、東北地方太平洋沖地震で液状化被害を受けた埋立土地盤を対象に、被災地点と無被災地点で地震時の透水を考慮できるモデルを用いて地震応答解析を実施した。その結果、被災地点および無被災地点の状況を再現でき、モデルの適用性を確認した。また、被災地点においては、地震時の水圧上昇過程を評価することで噴砂現象を再現できる可能性を見出した。

Key Words : liquefaction, effective stress analysis, permeability

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は、千葉県浦安市をはじめとする東京湾岸の埋立地に、広域かつ大規模な液状化被害をもたらした。本地震では、2分以上の長い継続時間の本震 ($M=9.0$) と、その30分後に発生した余震 ($M=7.7$) により、液状化の被害が拡大したと問題視されている。このように、本震後の余震により被害が拡大する現象を対象とする場合、地盤の透水現象を無視することはできない。

そこで本報では、地震時の透水を考慮することが可能なFLIP¹⁾のカクテルグラスモデル²⁾を使用して、浦安市の液状化による被災地点および無被災地点を対象として事例解析を実施した。

2. 被害状況

浦安市では東北地方太平洋沖地震 ($M=9.0$, 浦安市: 震度5強) およびその後の余震 ($M=7.7$, 浦安市: 震度5弱) により、市域の大半を占める埋立地で液状化現象が

発生した。これにより、戸建て住宅の沈下や傾斜、噴砂・噴水を伴う道路の変状、上下水道等の管路の寸断、貯水槽・マンホールの浮き上がりなど多くの被害が発生した。最大加速度が中規模地震程度であったにもかかわらず長時間にわたり振動が続いたことによって上記のような液状化被害が生じたこと、埋立履歴の新しい地点で激しい液状化が生じたことが特徴である。

検討地点 (図-1) は、浦安市の中でも新しい埋立地であり、東北地方太平洋沖地震による液状化被害の激しかった高洲小学校地点 (以下、地点1) と後背湿地で液状化被害が見られなかった浦安市役所地点 (以下、地点2) を対象とした。地点1の被災状況の一例を写真-1に示す。写真-1は杭基礎構造の建物であり、液状化による地盤沈下の影響で出入口の階段と地盤との間に段差が生じている。また、地盤には噴砂・噴水の跡とみられる水たまりもできている。

なお、地点1における地震前後の沈下量は20~30cmであり、地点2では地震前後でほとんど沈下が見られなかった³⁾。

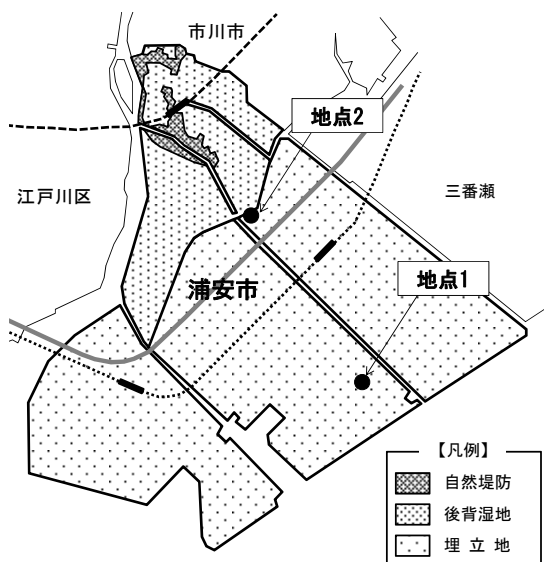


図-1 検討地点位置図



写真-1 地点1の液状化被害状況 ③に加筆

3. 解析条件

解析には、有効応力解析プログラムFLIP (ver.7.2.3.4) を使用し、一次元の柱状モデルを作成した。以下、解析条件を示す。

(1) 地盤モデル

地盤モデルを図-2に示す。本検討では液状化による地下水位上昇を考慮しうるモデルとして地下水位以浅にも間隙水要素を貼り付けた。このとき、初期自重解析時には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。

(2) 入力地震動

入力地震動は、本震は東京都港湾局「夢の島」観測点⁴⁾、余震はK-NET「浦安」地点⁵⁾の記録を用いて一次元地震応答解析DYNEQ⁶⁾を用いて工学的基盤面における波形に引き戻し計算を行ったものを用いた。入力地震動を図-3に示す。本震時の波形がゼロからスタートしていないのは、データ欠損のためである。FLIPによる解析は上記地震動を入力した後、水圧消散過程として過剰間隙水圧が十分に消散するまで計算を実施した。本震の最大加速度は103gal、余震の最大加速度は56galと小さいものの、継続時間は長く、本震は2分以上の継続時間である。

(3) 解析定数

解析定数を表-1に示す。解析定数は、土質およびN値を参考に設定した。なお、液状化パラメータは、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-4に示す。要素シミュレーションの目標値は、液状化強度に関しては文献3)による液状化試験結果を参考にし、体積収縮特性はIshihara et al.⁷⁾ (相対密度 $D_r=50$

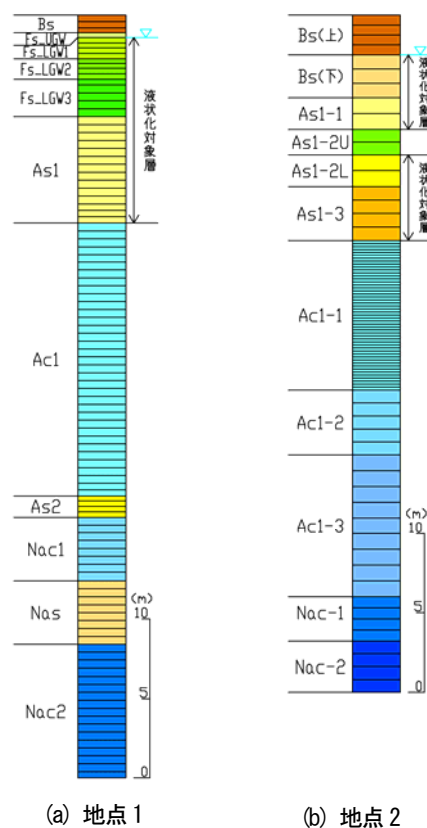


図-2 地盤モデル

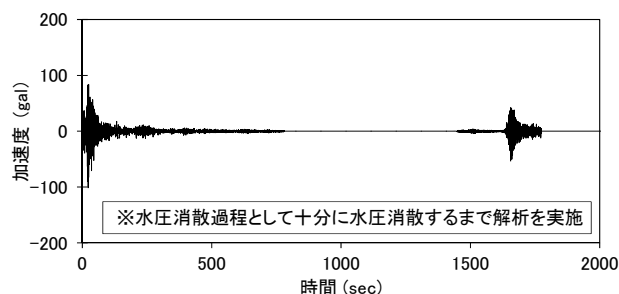


図-3 入力地震動

表-1 解析定数一覧

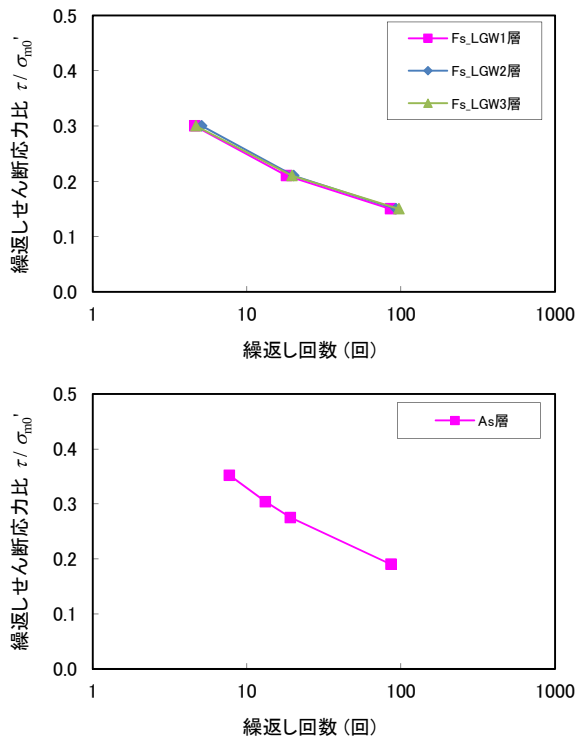
(a) 地点 1

名称	密度	基準 拘束圧	初期せん断 剛性	初期体積 剛性	粘着力	内部 摩擦角	パラメータ	ポアソン比	間隙率	最大減衰	透水係数	変相角	ダイレイタンスに関するパラメータ										体積圧縮特性に 関するパラメータ	液状化強度曲線の下限 を規定するパラメータ		
	ρ (g/cm ³)	σ_{vm} (kN/m ²)	G_{vm} (kN/m ²)	K_{vm} (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	m_c, m_k	ν	n	h_{max}	k (m/s)	ϕ_p (°)	ε_{dvm}	$r\varepsilon_{dvm}$	$r\varepsilon_{dvm}$	q_1	q_2	q_3	q_4	r_{vm}	$rmmp$	S_1	I_s	r_s	r_s'	c_1
Bs	1.7	98.0	57200	149200	0.0	41.3	0.500	0.330	0.450	0.240	5×10^{-3}															
Fs UGW	1.8	98.0	40000	104300	0.0	41.0	0.500	0.330	0.450	0.240	5×10^{-3}															
Fs LGW1	1.8	98.0	34100	88900	0.0	38.3	0.500	0.330	0.450	0.240	1×10^{-4}	28.0	0.500	0.958	0.500	1.0	0.5	1.0	0.0	0.2	0.5	0.005	2.0	0.200	0.200	1.52
Fs LGW2	1.8	98.0	32500	87800	0.0	35.6	0.500	0.330	0.450	0.240	1×10^{-4}	28.0	0.580	0.720	0.580	1.0	0.5	1.0	0.0	0.2	0.5	0.005	2.0	0.172	0.172	1.52
Fs LGW3	1.8	98.0	25300	66000	0.0	39.6	0.500	0.330	0.450	0.240	1×10^{-4}	28.0	0.400	0.958	0.400	1.0	0.5	1.0	0.0	0.2	0.5	0.005	2.0	0.250	0.250	1.52
As1	1.8	98.0	34000	88700	0.0	39.4	0.500	0.330	0.450	0.240	1×10^{-4}	28.0	1.000	0.500	1.000	6.0	2.1	1.0	0.0	0.2	0.5	0.005	2.0	0.100	0.100	1.60
Ac1	1.6	98.0	25800	66800	0.0	30.0	0.500	0.330	0.550	0.150	3×10^{-3}															
As2	1.8	98.0	34900	91000	0.0	40.0	0.500	0.330	0.450	0.240	9×10^{-3}															
Nac1	1.7	98.0	44700	116600	0.0	30.0	0.500	0.330	0.550	0.150	3×10^{-3}															
Nas	1.8	98.0	104000	271200	0.0	39.1	0.500	0.330	0.450	0.240	2×10^{-3}															
Nac2	1.7	98.0	39100	102000	0.0	30.0	0.500	0.330	0.550	0.150	3×10^{-3}															

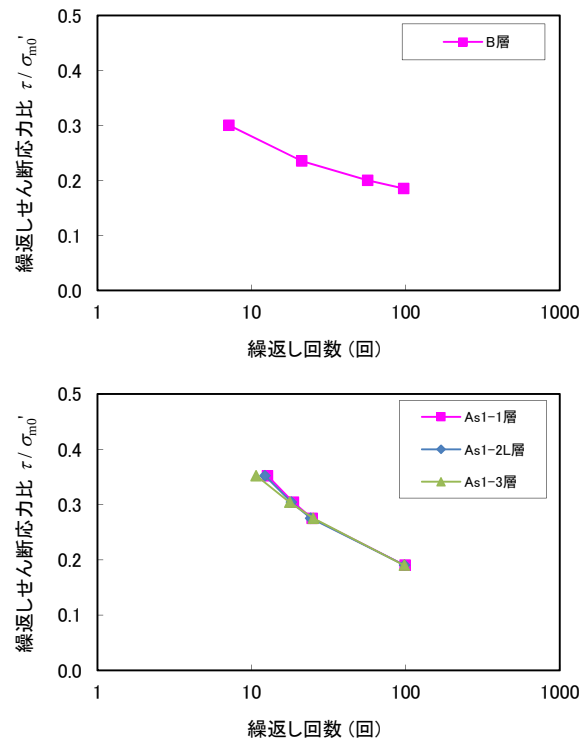
※透水係数は D_{20} より設定した。

(b) 地点 2

名称	密度	基準 拘束圧	初期せん断 剛性	初期体積 剛性	粘着力	内部 摩擦角	パラメータ	ポアソン比	間隙率	最大減衰	透水係数	変相角	ダイレイタンスに関するパラメータ										体積圧縮特性に 関するパラメータ	液状化強度曲線の下限 を規定するパラメータ		
	ρ (g/cm ³)	σ_{vm} (kN/m ²)	G_{vm} (kN/m ²)	K_{vm} (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	m_c, m_k	ν	n	h_{max}	k (m/s)	ϕ_p (°)	ε_{dvm}	$r\varepsilon_{dvm}$	$r\varepsilon_{dvm}$	q_1	q_2	q_3	q_4	r_{vm}	$rmmp$	S_1	I_s	r_s	$r_{s'}$	c_1
Bs(水面上)	1.7	15.8	44408	115810	0.0	41.3	0.500	0.330	0.450	0.240	4×10^{-3}															
Bs(水面上・液)	1.7	39.0	20990	54738	0.0	41.3	0.500	0.330	0.450	0.240	4×10^{-3}	28.0	0.250	1.0	0.500	5.0	1.1	1.0	0.0	0.2	0.5	0.005	2.0	0.20	0.20	1.95
As1-1(液)	1.8	52.1	41327	107773	0.0	39.4	0.500	0.330	0.450	0.240	9×10^{-4}	28.0	0.625	0.5	0.625	5.0	1.8	1.0	0.0	0.2	0.5	0.005	2.0	0.16	0.16	1.70
As1-2U	1.8	62.9	47020	122622	0.0	39.4	0.500	0.330	0.450	0.240	9×10^{-4}															
As1-2L(液)	1.8	73.7	47020	122622	0.0	39.4	0.500	0.330	0.450	0.240	9×10^{-4}	28.0	0.625	0.5	0.625	5.0	1.8	1.0	0.0	0.2	0.5	0.005	2.0	0.16	0.16	1.70
As1-3(液)	1.8	89.8	22224	57958	0.0	39.4	0.500	0.330	0.450	0.240	9×10^{-4}	28.0	0.588	0.5	0.588	5.0	2.8	1.0	0.0	0.2	0.5	0.005	2.0	0.17	0.17	1.40
As1-1	1.8	121.4	19755	51518	0.0	30.0	0.500	0.330	0.550	0.150	3×10^{-4}															
As1-2	1.6	152.0	47184	123048	0.0	30.0	0.500	0.330	0.550	0.150	3×10^{-4}															
As1-3	1.6	181.5	32000	83451	0.0	30.0	0.500	0.330	0.550	0.150	3×10^{-4}															
Nac-1	1.7	209.1	39031	101786	0.0	30.0	0.500	0.330	0.550	0.150	3×10^{-4}															
Nac-2	1.7	224.8	56204	146571	0.0	30.0	0.500	0.330	0.550	0.150	3×10^{-4}															

※透水係数は D_{20} より設定した。

(a) 地点 1



(b) 地点 2

図-4 要素シミュレーション結果

～60%の体積収縮特性：最大せん断ひずみ $\gamma_{max}=7\%$ に対する体積収縮ひずみ $\varepsilon_{cd}=2.5\sim3.0\%$ とした。

(4) 透水係数

透水係数は、20%粒径 D_{20} からCreagerの方法により設定した。なお、本検討では、液状化層については液状化時に有効間隙率の増加、乱流の発生等により、 D_{20} から設定した透水係数よりも大きな透水係数となること、非液状化層については不飽和層であるので飽和透水係数よりも小さな透水係数となること、局所的なクラック等で透水係数が大きい場所もあることも考えられるため、表-2

表-2 解析ケース

		液状化層の透水係数 k_1 (m/s)		
		D20から推定	$\times 10$	$\times 100$
非液状化層の透水係数 k_2 (m/s)	$\times 1/100$	Case1-5	Case2-5	Case3-5
	$\times 1/10$	Case1-4	Case2-4	Case3-4
	D20から推定	Case1-1	Case2-1	Case3-1
	$\times 10$	Case1-2	Case2-2	Case3-2
	$\times 100$	Case1-3	Case2-3	Case3-3

に示すように透水係数を種々に変化させて解析を実施した。

(5) 境界条件

変位に関する境界条件は、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以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した。

4. 解析結果

(1) 地点1

過剰間隙水圧比の時刻歴の比較を図-5に示す。どのケースにおいても実現象と同様に過剰間隙水圧比が上昇し、液状化に至っていることがわかる。

図-5(a)は、液状化層の透水係数 k_1 が同一で、非液状化層の透水係数 k_2 を変化させた場合の結果である。 $k_2 > k_1$ よりも $k_2 < k_1$ の方が、液状化層上部 (Fs_LGW1 層) の過剰間隙水圧比が増加する。また k_2 が小さくなるほど水圧消散時間が長くなる傾向を示す。またこの傾向は k_2 と k_1 の比が大きいくほど顕著である。これは $k_2 < k_1$ の場合、非液状化層から消散する水圧よりも、液状化層下部 (Fs_LGW3 層や As1 層) から供給される水圧の方が大きいためと考えられる。

図-5(b)は、非液状化層の透水係数 k_2 が同一で液状化層の透水係数 k_1 を変化させた場合の結果である。 $k_2 > k_1$ の場合、 k_1 の違いによる液状化層上部 (Fs_LGW1 層) の過剰間隙水圧比の最大値の差異は小さい。また k_1 が小さくなるほど水圧消散時間が長くなる傾向を示す。これは k_2

$> k_1$ の場合、液状化層で発生する過剰間隙水圧よりも非液状化層から消散する水圧の方が大きいと、非液状化層と液状化層の過剰間隙水圧の上昇に与える影響は小さく、水圧消散は液状化層の透水係数 k_1 に依存したものと考えられる。

表-3にそれぞれのケースにおける残留沈下量を示す。どのケースにおいても20cm程度の沈下という結果となり、ほぼ実沈下量を再現する結果となった。

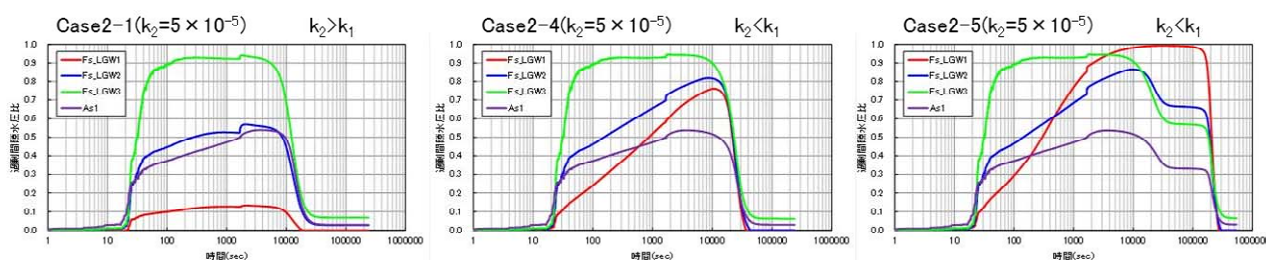
表-3 地点1の残留沈下量

残留沈下量		液状化層の透水係数 k_1 (m/s)		
		D20から推定	× 10	× 100
非液状化層の透水係数 k_2 (m/s)	× 1/100	(Case1-5) 18.4cm	(Case2-5) 19.8cm	(Case3-5) 22.4cm
	× 1/10	(Case1-4) 18.0cm	(Case2-4) 19.1cm	(Case3-4) 22.4cm
	D20から推定	(Case1-1) 18.0cm	(Case2-1) 18.7cm	(Case3-1) 21.8cm
	× 10	(Case1-2) 18.0cm	(Case2-2) 18.7cm	(Case3-2) 21.5cm
	× 100	(Case1-3) 18.0cm	(Case2-3) 18.7cm	(Case3-3) 21.3cm

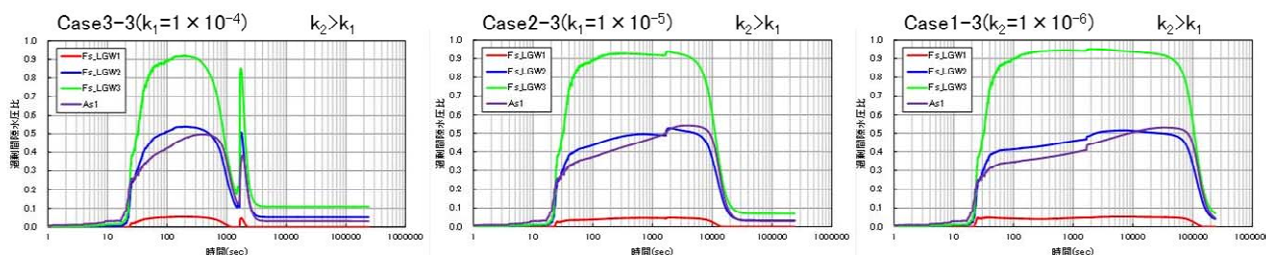
(2) 地点2

過剰間隙水圧比の時刻歴の比較を図-6に示す。最大でも過剰間隙水圧比で 0.2 程度までしか上昇せず、液状化には至らない結果となった。

表-4にそれぞれのケースにおける残留沈下量を示す。どのケースにおいても 2cm 以下の沈下量にとどまり無被災であった地点2の状況を再現する結果となった。

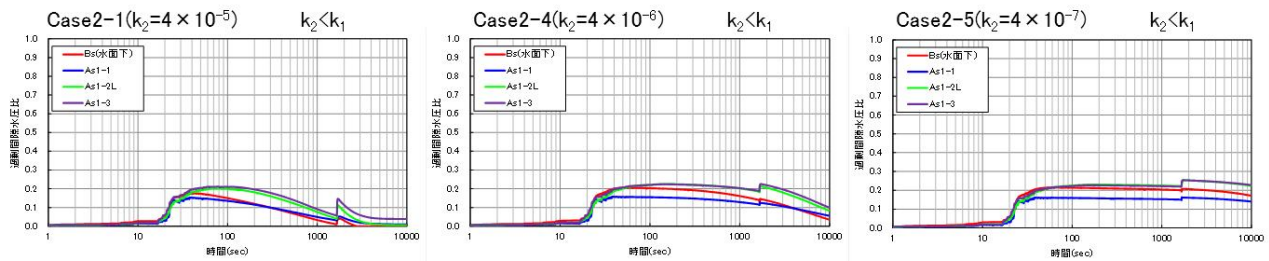


(a) 非液状化層の透水係数の違いによる比較 (液状化層の透水係数 $k_1 = 1 \times 10^{-5}$ m/s)

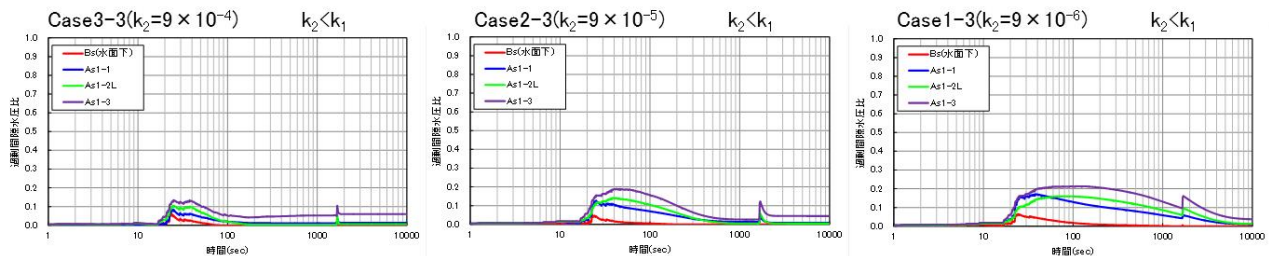


(b) 液状化層の透水係数の違いによる比較 (非液状化層の透水係数 $k_2 = 5 \times 10^{-3}$ m/s)

図-5 過剰間隙水圧比の時刻歴の比較 (地点1)



(a) 非液状化層の透水係数の違いによる比較（液状化層の透水係数 $k_1=9 \times 10^{-5}$ m/s）



(b) 液状化層の透水係数の違いによる比較（非液状化層の透水係数 $k_2=4 \times 10^{-3}$ m/s）

図-6 過剰間隙水圧比の時刻歴の比較（地点2）

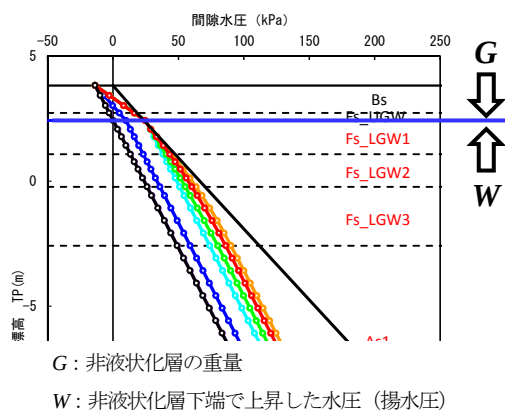


図-7 噴砂検討の概要図

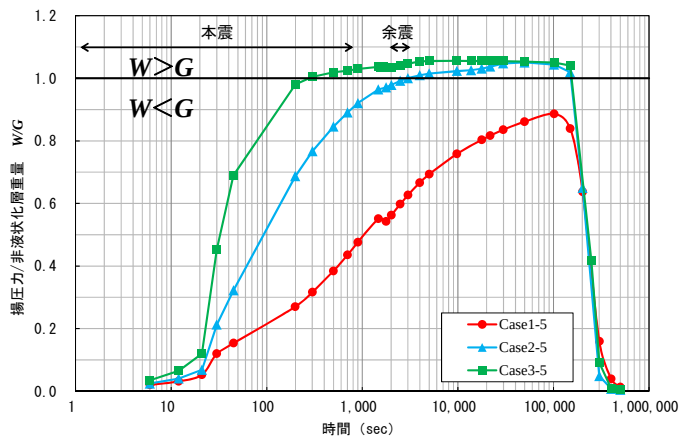


図-8 揚圧力/非液状化層重量 (W/G) の時刻歴図

表-4 地点2の残留沈下量

残留沈下量		液状化層の透水係数 k_1 (m/s)		
		D20から推定	$\times 10$	$\times 100$
非液状化層の透水係数 k_2 (m/s)	$\times 1/100$	(Case1-5) 0.8cm	(Case2-5) 0.9cm	(Case3-5) 0.9cm
	$\times 1/10$	(Case1-4) 0.2cm	(Case2-4) 0.2cm	(Case3-4) 0.2cm
	D20から推定	(Case1-1) 1.3cm	(Case2-1) 1.5cm	(Case3-1) 1.5cm
	$\times 10$	(Case1-2) 1.3cm	(Case2-2) 1.6cm	(Case3-2) 1.7cm
	$\times 100$	(Case1-3) 1.4cm	(Case2-3) 1.6cm	(Case3-3) 2.1cm

5. 地点1の噴砂の検討

東北地方太平洋沖地震により地点1では液状化に伴い噴砂が発生した。ここでは、地下水面上（不飽和層と飽和層の境界）での土塊の重量と揚水圧の関係に着目して噴砂の検討を行った。

検討の概要図を図-7に示す。検討は非液状化層下端で上昇した水圧を揚水圧 W と見なし、非液状化層の重量 G との比較を行い、 $W/G \geq 1.0$ を示した時点で噴砂が発生するものとした。

非液状化層の透水係数 k_2 に D_{20} からの推定値の1/100倍（ $k_2=5 \times 10^{-7}$ m/sec）を設定したCase1-5、Case2-5、Case3-5の揚水圧/非液状化層重量（ W/G ）の時刻歴を図-8に示す。文献3)の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いる。このことを勘案すると、揚水圧/非液状化層重量（ W/G ）が現実に近

い挙動を示したのは、液状化層の透水係数 k_f を粒度試験からの推定値の10倍に設定したCase2-5の場合であり、本震後～余震にかけて W/G が1.0付近に達する結果を示した。このことから、液状化した地層は D_{20} から推定した透水係数よりも透水性が高くなっていると想定される。また、不飽和層については不飽和透水係数を想定して飽和透水係数よりも小さい透水係数を設定すると液状化による噴砂を表現できる可能性があることが分かった。

6. まとめ

本検討では、東北地方太平洋沖地震により被害を受けた浦安市の中でも、液状化被害を受けた地点と無被害であった地点を対象として事例解析を実施することにより、FLIPのカクテルグラスモデルの適用性に関する検討を行った。以下に得られた主な知見を示す。

- ・無被災地点および被災地点の双方で被災状況をほぼ再現することができ、カクテルグラスモデルの適用性を確認した。
 - ・不飽和層にも間隙水要素を貼り付けることにより、液状化時の噴砂現象について表現できる可能性が示唆された。
 - ・当該地点においては、 D_{20} からCreagerの方法により推定した透水係数に対して、液状化層は10倍、非液状化層は不飽和であることを考慮して1/100倍の透水係数を設定することで、噴砂現象のタイミングもほぼ一致するモデルを作成することができた。
- 今後の課題として、以下のことが挙げられる。
- ・より多くの事例に対して再現解析を実施することでモデルの信頼性向上を図る。
 - ・噴砂現象の検討に関しては、液状化層、不飽和層の透水係数の設定についてより一般的な設定方法を検討す

る。

- ・本検討では、一次元モデルを用いて検討を行ったが、実務では二次元解析を行うことが多いことから、二次元モデルでも同様の検討を実施し、モデルの適用性を継続して確認していく必要がある。

謝辞：本報告は、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した成果を取りまとめたものである。本検討を実施するにあたり、東京都港湾局および防災科学技術研究所 強震観測網（K-NET）の観測記録を利用した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Iai, Matsunaga, Kameoka : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 2) 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、京大防災科研年報、2008.
- 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) 東京都港湾局ホームページ：<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/kisojoho/jishindou.html>.
- 5) 防災科学研究所 強震観測網K-NETホームページ：<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>.
- 6) 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.
- 7) Ishihara, Yoshimine : Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquakes, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.1 pp.173-188, 1992.

An Effective Stress Dynamic Analysis considering Permeability on Ground Motion at Landfill during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

Kazuaki UEMURA, Minoru NOBUMOTO, Shun-ichi SAWADA, Makoto YOSHIDA, Shigeru SATO, Yoshiaki KAGEJI, Yukio TAMARI, Jyun-ichi HYODO, Takashi NAKAMA, Atsushi HOSOO and Koji ICHII

The widespread liquefaction damage was occurred in Tokyo bay area by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake on March 11, 2011. At this case, the liquefaction damage was amplified by the fact that the duration of the ground motion is quite long (more than 2 minutes on the mainshock) and the aftershock occurred about 30 minute later.

In this study, a series of effective stress dynamic analyses considering permeability is done for the areas with and without liquefaction damage in Urayasu city. As a result, the applicability of the numerical model is confirmed. Especially, the observation of the sand boiling can be explained by the calculated results on the process of the pore water pressure increase.