

1. はじめに

浦安市は平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により、中町、新町地区のほぼ全域において液状化現象が発生した。本研究では砂の繰返し弾塑性構成式¹⁾と粘土の繰返し弾粘塑性構成式²⁾を用いた土-水連成の有限要素プログラム LIQCA2D13³⁾を用いて、東北地方太平洋沖地震時の応答加速度や液状化の発生状況などについて検討を行うため、浦安市の 3 地点において一次元動的解析を実施した。また、実地盤での単純せん断モードでの強度の違いを考慮するため、材料定数を変更した解析も行った。その際、有効応力減少比によって定義される液状化危険度指数 (Liquefaction Risk Index, LRI) を求め、PL 値と比較した。

2. 解析モデル

本研究では浦安市域のボーリングデータを元に 3 地点の地盤の一次元モデルを作成し、各層について液状化強度曲線を再現できるように材料パラメータを決定した。液状化強度曲線を図 1 に、モデル図を図 2 に示す。一次元モデルの深さは 74m であり、境界条件に同一深度等変位境界を用いた。また、底面は剛基盤としている。入力地震動には東北地方太平洋沖地震時に東京都港湾局品川地震観測所(品川区東品川 5 丁目 2 番地)にて観測された本震の地震動の EW 成分を用いた⁴⁾。図 3 にその波形を示す。この地震動の最大加速度は 65.9gal となっている。図 4 に解析地点を示す。実際の地震時の変形挙動は単純せん断モードに近いと見られ、繰返し三軸試験結果により得られた液状化強度曲線と異なる可能性がある。そこで本研究では破壊応力比、および変相応力比を、三軸圧縮時の 0.95 倍としたものを基本パラメータ(ケース 1)とし、三軸圧縮側の値に設定したパラメータをケース 2、液状化強度曲線が 7 割程度になるように設定したパラメータをケース 3 とした。表 1 は各地点の無次元化初期せん断係数、表 2 は基盤の材料パラメータ、表 3 は基本パラメータである。ケース 2 とケース 3 のパラメータはここでは割愛する。

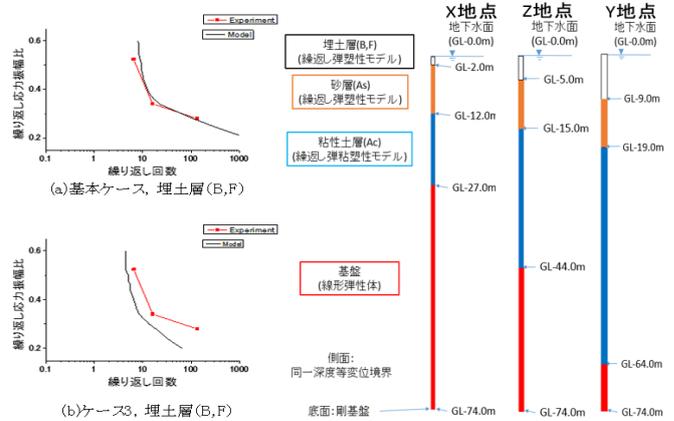


図 1 液状化強度曲線

図 2 モデル図

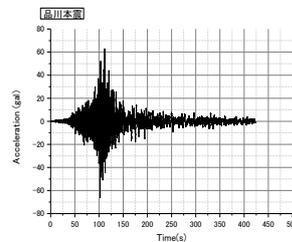


図 3 入力地震動(品川) -36m



図 4 解析地点

表 1 無次元化初期せん断係数

	埋土層(B,F)	砂層(A,s)	粘性土層(Ac)
G_0	37800.0	55777.0	35557.0
G_0/σ'_{m0} (X地点)	5642	947.0	247.7
G_0/σ'_{m0} (Z地点)	2257	706.0	178.1
G_0/σ'_{m0} (Y地点)	1254	527.2	132.2

表 2 基盤の材料パラメータ

Parameter	基盤
Density ρ (t/m ³)	1.79
Coefficient of permeability k (m/s)	1.0×10^{-4}
Initial void ratio e_0	0.450
Poisson ratio ν	0.375
Lame's constant λ	2.82×10^5
Lame's constant μ	1.77×10^5

表 3 基本ケース(ケース 1)の材料パラメータ

Parameter	埋土層 (B,F)	砂層 (As)	粘性土層 (Ac)
Density ρ (t/m ³)	1.68	1.93	1.48
Coefficient of permeability k (m/s)	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-9}
Initial void ratio e_0	1.46	0.93	2.5
Compression index λ	0.013	0.0875	0.473
Swelling index κ	0.008	0.0142	0.053
Normalized initial shear modulus G_0/σ'_{m0} (表 2 参照)	-	-	-
Stress ratio at Maximum Compression M_m^*	0.8417	1.083	1.28
Stress ratio at failure M_f^*	1.083	1.319	1.28
Quasi-overconsolidation ratio OCR [*] ($=\sigma'_{ms}/\sigma'_{m0}$)	1.0	1.25	1.0
Hardening parameter B_{0v}, B_{1v}, C_1	6000,80,10	6000,150,15	200,40,100
Structure parameter $\sigma'_{ms}/\sigma'_{ms0} \beta$	-	-	0.40,5.0
fading memory C_d	2000	2000	-
Parameter of Dilatancy D_{0v}, n	0.9,6.0	3.75,10	-
Reference Value of plastic Strain v_p^{**}	0.005	0.0015	-
Reference Value of elastic Strain v_e^{**}	0.1	0.05	-
Viscoplastic parameter m^*	-	-	23.9
Viscoplastic parameter (1/s) C_1	-	-	0.7×10^{-5}
Viscoplastic parameter (1/s) C_2	-	-	5.0×10^{-6}
Hardening parameter A_2^*, B_2^*	-	-	2.0,1.0
Strain-dependent elastic modulus parameter α, r	-	-	10,0.4

3. 解析結果

3.1 地表面最大応答加速度, 最大沈下量

基本パラメータを用いて解析を行い, 先述の 3 地点での地表面最大応答加速度と地表面最大沈下量を求めた. 結果を表 4 に示す. 表を見ると, すべての地点で加速度が増幅していることがわかる. 最大応答加速度は X 地点で最大であり, 沈下量は Y 地点で最大となった.

3.2 P_L 値, 有効応力減少比, 液状化危険度指数

有効応力減少比は以下の式で表される.

$$ESDR = 1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$$

ここで, σ'_{m0} は初期状態での平均有効応力, σ'_m は現在の平均有効応力である. 完全に液状化すると平均有効応力が 0 になり, 有効応力減少比は 1 になる. 基本パラメータを用いた時の, 各地点の有効応力減少比のコンター図を図 5 に示す. すべての地点の埋土層で液状化が発生していることがわかる. 今回の解析では地点ごとの有効応力減少比の分布を数値化するため, 由井ら(2013)⁵⁾により定義された液状化危険度指数 (Liquefaction Risk Index, LRI) を求めた. LRI は各地層の有効応力減少比を深さ方向に重み付けして足し合わせ, 以下の式で定義される.

$$LRI = \int_0^{20} ESDR \cdot \left(1 - \frac{1}{20}z\right) dz$$

z は地表からの深さである. LRI は地表から深さ 20m までの有効応力減少比を元に計算している. 深さ 20m までのすべての層が液状化した場合, LRI は 10 になる. また, 各地点の N 値と解析結果による地表面最大加速度を用いて P_L 値も求めた. 3 地点それぞれの LRI, P_L 値を表 5 に示す. すべての地点で P_L 値が 0 となった. LRI はすべての地点で 5.0 を上回る値となっており, X 地点から Y 地点に向かって大きな値となっている. 実際には埋立地のほぼ全域で液状化の被害が発生しており, また, Y 地点での被害が顕著であったことから, 本解析結果によって得られた LRI は妥当であると評価できる.

4. 室内試験の違いによる液状化強度の検証

ケース 1~3 の材料パラメータを用いて Y 地点での LRI を求めたところ, 表 6 のようになった. これを見ると, 単純せん断モードを想定したケース 3 での LRI が最も大きくなっており, 一方, 三軸圧縮側の応力比に設定したケース 2 では小さな値となった.

5. 結論

本研究では動的解析によって浦安市域における液状化挙動の検討を行った. その結果, 解析を行った3地点すべてにおいて地表面応答加速度が増幅したが, 液状化の被害の大きかった地点では応答加速度の減衰が見られた. また P_L 値, および液状化危険度指数を算出して比較を行ったところ, すべての地点で P_L 値が 0 となったが, これは N 値が大きいためと考えられる. 液状化危険度指数については, 実際の被害の程度と比較すると妥当な結果が得られたと考えられた. また室内試験の違いによる液状化強度について検証したところ, ケースにより LRI が大きく異なったことから, 試験方法の違いにより, 液状化強度を過大評価する可能性が示された.

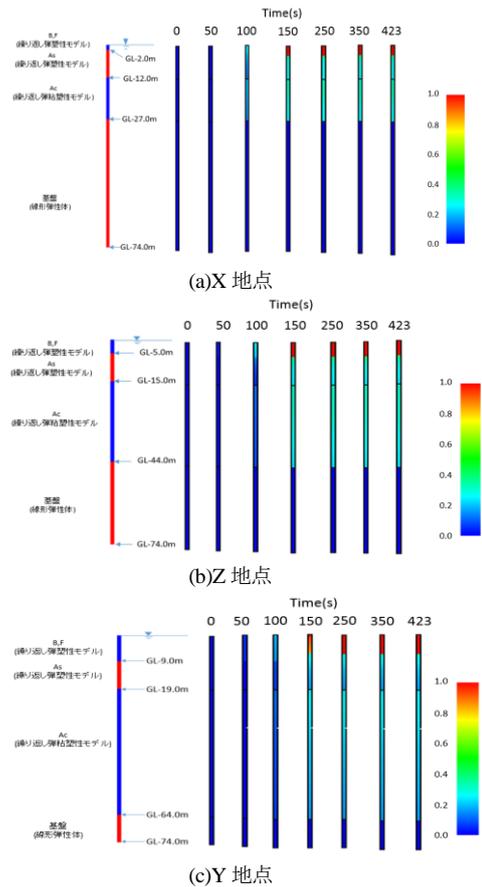


図 5 3 地点の有効応力減少比のコンター図(基本ケース)

表 4 3 地点での解析結果

	地表面最大応答加速度	地表面最大沈下量
X地点	160(gal)	3.62×10^{-6} (m)
Z地点	165(gal)	7.78×10^{-6} (m)
Y地点	146(gal)	1.09×10^{-5} (m)

表 5 3 地点での P_L 値, LRI

	X地点	Z地点	Y地点
P_L 値	0	0	0
LRI	5.19	5.99	6.40

表 6 ケース 1~3 の LRI

	ケース1	ケース2	ケース3
LRI	6.40	5.27	6.85

参考文献 1)Oka et al, A cyclic elastoplastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, 49(5), pp.661-680, 1999. 2)Oka, F. and Kimoto, S., Constitutive modeling of geomaterials, Qing Yang, Jian-Min Zhang, Hong Zheng and Yanping Yao eds., *Advances and New applications*, Springer Series in Geomechanics & Application, Springer, pp.215-221, 2012. 3)液状化解析手法LIQCA開発グループ, LIQCA2D13・LIQCA3D13(2013年公開版)資料, 2013. 4)東京都港湾局, 港湾局地震観測所で観測した地震動について, 品川地震観測所, http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/kisojoho/users/jish_indoudata/shinagawa.csv, 2011. 5) 由井洋和, 南海トラフ巨大地震を想定した大阪市域における液状化発生の予測, 土木学会第68回年次学術講演会, I-259, pp.517-518, 2013.