

繰返し弾塑性構成式を用いた浦安市域の地盤の液状化解析

京都大学大学院 学生会員 ○松岡 浩志  
 京都大学大学院 正会員 木元 小百合  
 京都大学大学院 学生会員 由井 洋和  
 京都大学大学院 フェロー会員 岡 二三生

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、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、砂の繰返し弾塑性構成式<sup>1)</sup>と粘土の繰返し弾粘塑性構成式<sup>2)</sup>を用いた水-土連成の有限要素プログラム LIQCA2D13<sup>3)</sup>を用いて、液状化解析を行った。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を行った。また、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、 $P_L$  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新町地区(図 4, Y 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<sup>4)</sup>。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。実際の地震時の変形挙動は単純せん断モードに近いので、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(図 1(a)実線, 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 (図 1(b)実線)とした。表 1 は各地点の無次元化初期せん断弾性係数, 表 2 は基盤の材料パラメータ, 表 3 はケース 1 の材料パラメータである。ケース 2 とケース 3 のパラメータはここでは省略する。

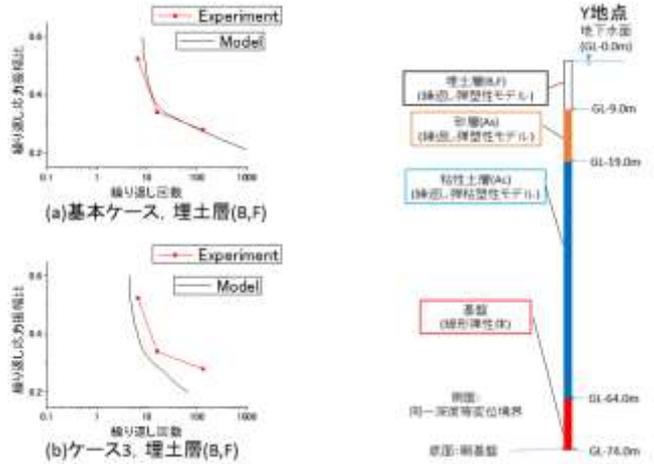


図 1 液状化強度曲線

図 2 モデル図

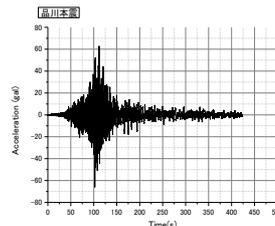


図 3 入力地震動(品川)-36m 図 4 解析地点

表 1 初期せん断弾性係数

	埋土層(B,F)	砂層(As)	粘性土層(Ac)
$G_0$	37800.0	55777.0	35557.0
$G_0/\sigma'_{vm}$ (X地点)	5642	947.0	247.7
$G_0/\sigma'_{vm}$ (Z地点)	2257	706.0	178.1
$G_0/\sigma'_{vm}$ (Y地点)	1254	527.2	132.2

表 2 基盤の材料パラメータ

Parameter	基礎
Density $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.74
Coefficient of permeability $k$ (m/s)	$1.0 \times 10^{-6}$
Initial void ratio $e_0$	0.450
Poisson ratio $\nu$	0.375
Lame's constant $\lambda$	$2.82 \times 10^7$
Lame's constant $\mu$	$1.77 \times 10^7$

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 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.68	1.93	1.48
Coefficient of permeability $k$ (m/s)	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-9}$
Initial void ratio $e_0$	1.46	0.93	2.5
Compression index $\lambda$	0.013	0.0875	0.473
Swelling index $\kappa$	0.008	0.0142	0.053
Normalized initial shear modulus $G_0/\sigma'_{vm}$ (表 2 参照)	-	-	-
Stress ratio at Maximum Compression $M^*_{vm}$	0.8417	1.083	1.28
Stress ratio at failure $M^*_f$	1.083	1.319	1.28
Quasi-overconsolidation ratio $OCR^* (= \sigma'_{vm}/\sigma'_{vm0})$	1.0	1.25	1.0
Hardening parameter $B^*, \alpha, B^*, \beta, C_1$	6000,80,10	6000,150,15	200,40,100
Structure parameter $\sigma'_{vm0}/\sigma'_{vm0}\beta$	-	-	0.40,5.0
fading memory $C_0$	2000	2000	-
Parameter of Dilatancy $D^*, n$	0.9,6.0	3.75,10	-
Reference Value of plastic Strain $v_p^{**}$	0.005	0.0015	-
Reference Value of elastic Strain $v_p^{*E}$	0.1	0.05	-
Viscoplastic parameter $m^*$	-	-	23.9
Viscoplastic parameter (1/s) $C_1$	-	-	$0.7 \times 10^{-5}$
Viscoplastic parameter (1/s) $C_2$	-	-	$5.0 \times 10^{-6}$
Hardening parameter $A_1^*, B_2^*$	-	-	2.0,1.0
Strain-dependent elastic modulus parameter $\alpha, r$	-	-	10,0.4

液状化, 地震応答解析, 構成式

〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4 C クラスター C1 棟 587 号室 TEL080-5340-4038 [matsuoka.hiroshi.85s@st.kyoto-u.ac.jp](mailto:matsuoka.hiroshi.85s@st.kyoto-u.ac.jp)

3. 解析結果

3.1 地表面最大応答加速度, 最大沈下量

ケース1~3の地表面最大応答加速度と地表面最大沈下量を表4に示す。すべてのケースで加速度が増幅し、最大応答加速度はケース2で最大であった。沈下量はケース3で最小となったが、各ケースでそれほど大きな違いは見られなかった。

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、 $\sigma'_{m0}$ は初期状態での平均有効応力、 $\sigma'_m$ 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、各ケース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。液状化した範囲は単純せん断モードを想定したケース3で最小となっている。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)<sup>9)</sup>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。各ケースの $P_L$ 値、LRIを表5に示す。 $P_L$ 値はすべてのケースで0となった。LRIについては、ケース3で最大、ケース2で最小となり、ケースにより違いが見られた。ケース1と3ではLRIが6を超えている。これは兵庫県南部地震による西島での解析による液状化被害にも対応しており興味深い。

4. 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、解析を行ったすべてのケースにおいて地表面応答加速度が増幅した。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値が大きく、また細粒分を多く含むためと考えられる。液状化危険度指数については、ケースによりLRIが異なったことから、液状化強度を評価する際の試験方法に留意する必要があると考える。

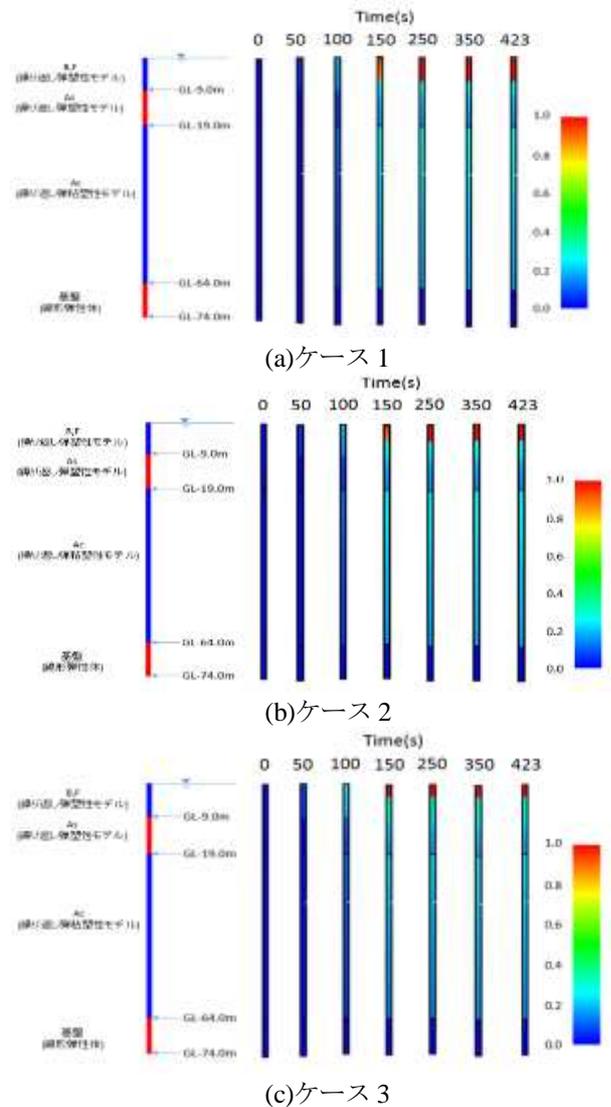


図5 Y地点の有効応力減少比のコンター図(ケース1~3)

表4 ケース1~3の解析結果

	地表面最大応答加速度	地表面最大沈下量
ケース1	146(gal)	$1.09 \times 10^{-3}$ (m)
ケース2	150(gal)	$1.09 \times 10^{-3}$ (m)
ケース3	146(gal)	$9.95 \times 10^{-4}$ (m)

表5 ケース1~3の $P_L$ 値, LRI

	ケース1	ケース2	ケース3
$P_L$ 値	0	0	0
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, *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/jishindoudata/shinagawa.cs>, 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.