

京都大学工学部 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
京都大学大学院 正会員 木元 小百合
京都大学大学院 正会員 肥後 陽介
京都大学大学院 学生会員 衣川 哲平

1. はじめに

南海トラフを震源とするマグニチュード 9.0 クラスの巨大地震の発生が懸念されているが、海溝型の連動地震である南海トラフ巨大地震は地震動の継続時間が長くなり、液状化の被害が広がることが予想される。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-水連成の有限要素解析プログラム LIQCA2D11³⁾を用いて、継続時間や地盤物性を考慮し、南海トラフ巨大地震発生時の応答加速度や液状化の発生状況などの検討を行うため、大阪市域の多数の地点において動的解析を実施した。また、液状化危険度指数(Liquefaction Risk Index)を新たに定義し、大阪市域での液状化挙動を予測した。さらに液状化危険度指数の検討を行うために、兵庫県南部地震の際に実際に液状化が発生した地点でその時の地震動を用いて液状化危険度指数を求めた。

2. 解析モデル 本研究で用いたパラメータを表 1、表 2、表 3、液状化強度曲線を図 1 に示す。本研究では大阪市域の多数の地点のボーリングデータを元に地盤の一次元モデルを作成した。モデル図の例を図 2 に示す。一次元モデルの深さは 150m であり、境界条件に同一深度等変位境界を用いた。また、底面には粘性境界を用いている。図に示した二つのモデルは此花区では液状化層があり、阿倍野区では液状化層が存在しなかった。入力地震動には杉戸らによる南海トラフ巨大地震の想定地震動を用いた⁴⁾。図 3 にその波形を示す。この想定地震動は震源を宮崎県の日向灘とし、最大加速度は 572.6(gal)、最大速度は 52.3(cm/s)となっている。

3. 解析結果

3.1 地表面応答加速度、地表面応答速度

解析を行い、地表面応答加速度と地表面応答速度を求めた。先述の二地点での結果を表 4 に示す。表を見ると、液状化が発生した此花区では地表面最大応答加速度が大きく減衰したが、速度は減衰していない。液状化が発生しなかった

表1 パラメータ1

Parameter	As-U	As-L	Dg1	Ac	Dc
Density ρ (t/m ³)	1.8	1.8	1.9	1.66	1.8
Coefficient of permeability k_{vs} (m/s ² ·m/kN)	3.98×10^{-8}	5.6×10^{-7}	1.0×10^{-6}	5.87×10^{-11}	5.40×10^{-11}
Initial void ratio e_0	0.623	0.9	0.9	1.25	1.20
Compression index λ	0.0875	0.01	0.01	0.3410	0.217
Swelling index κ	0.0068	0.003	0.003	0.0190	0.0217
Normalized initial shear modulus G_0/σ'_{vd} (kPa)	175.5	512	541	75.2	128.25
Stress ratio at Maximum Compression M_{cs}	1.12	0.909	0.909	1.24	1.30
Stress ratio at failure M'_f	1.36	1.158	1.336	1.24	1.30
Quasi-overconsolidation ratio $OCR(=\sigma'_{vd}/\sigma'_{vd0})$	1.0	1.20	1.50	1.0	1.9
Hardening parameter B'_0, B'_1, C_1	3000, 5.15	3800, 70.0	3000, 5.0	100, 40, 10	350, 50, 5
Structure parameter $\sigma'_{vd0}/\sigma'_{vd00}\beta$	-	-	-	0.30, 3.6	0.35, 3.0
Control parameter of anisotropy C_β	2000	2000	2000	-	-
Parameter of Dilatancy $D'_{v,n}$	2.75, 4.75	1.00, 6.00	-	-	-
Reference Value of plastic Strain y_p^*	0.0033	0.0050	-	-	-
Reference Value of elastic Strain y_e^*	0.019	0.010	-	-	-
Viscoplastic parameter m'	-	-	-	24.68	20.00
Viscoplastic parameter (1/s) C_2	-	-	-	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-7}
Viscoplastic parameter (1/s) C_3	-	-	-	3.83×10^{-6}	1.16×10^{-8}
Hardening parameter A_2^*, B_2^*	-	-	-	5.9, 1.8	5.9, 1.8
Strain-dependent elastic modulus parameter α, r	-	-	-	10, 0.4	0, 0

表2 パラメータ2

Parameter	浅土	Dg2	深層①	深層②
Density ρ (t/m ³)	2.00	1.80	1.79	1.92
Coefficient of permeability k_{vs} (m ³ /kN ² ·s)	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}
Initial void ratio e_0	0.670	0.450	0.450	0.450
Poisson ratio ν	0.333	0.410	0.410	0.410
Lame's constant λ	3.92×10^5	8.68×10^5	1.17×10^6	1.67×10^6
Lame's constant μ	3.43×10^5	1.905×10^5	2.56×10^5	3.67×10^5

表3 パラメータ3

Parameter	砂層①	砂層②	砂層③	深層①	深層②
Density ρ (t/m ³)	1.80	1.80	1.80	1.79	1.92
Coefficient of permeability k_{vs} (m ³ /kN ² ·s)	5.6×10^{-7}	5.6×10^{-7}	5.6×10^{-7}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}
Initial void ratio e_0	0.900	0.900	0.900	0.450	0.450
Poisson ratio ν	0.410	0.410	0.410	0.410	0.410
Lame's constant $\lambda(=E\nu/(1+\nu)(1-2\nu))$	7.88×10^5	8.93×10^5	1.45×10^6	1.17×10^6	1.67×10^6
Lame's constant $\mu(=E/(2(1+\nu)))$	1.73×10^5	1.96×10^5	3.175×10^5	2.56×10^5	3.67×10^5

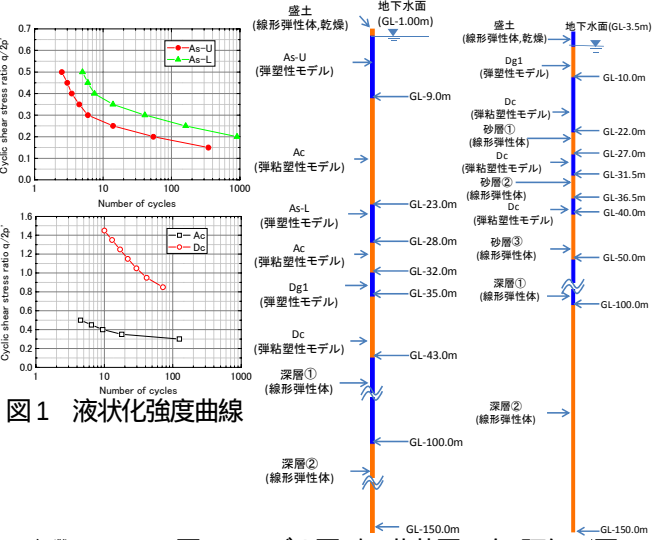


図1 液状化強度曲線

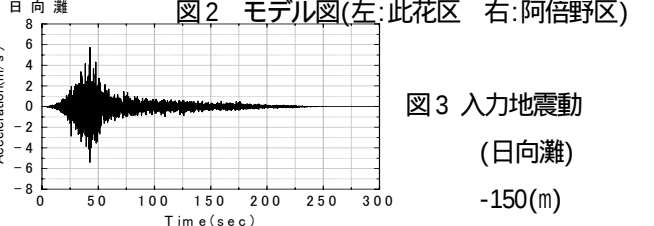


図2 モデル図(左: 此花区 右: 阿倍野区)

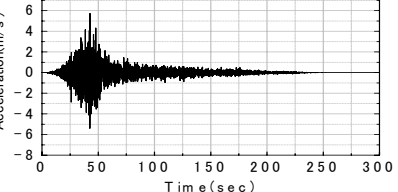


図3 入力地震動
(日向灘)
-150(m)

阿倍野区では地表面応答加速度はほとんど減衰しておらず，速度の大きな増幅が見られた．

3.2 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．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，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あわせ，その値を液状化危険度指数(Liquefaction Risk Index，LRI)とした．LRI は以下の式で新たに定義した．

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

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 まですべての層が完全に液状化した場合，LRI は 10 になる．各解析地点での地震終了時の有効応力減少比深度分布図と LRI を図 4 に示す．有効応力減少比の深度分布図の横の数字は地表面からの深さを、上の枠内の数字はその地点の LRI を表している．液状化が発生していない No.10 の阿倍野区と No.18 の東大阪市の地点では LRI は 3.0 を下回る結果となった．No.18 の東大阪で液状化が発生していないにもかかわらず LRI が大きくなったのは，液状化が発生していても有効応力減少比が上昇した層があったためだと思われる．

4．液状化危険度指数の評価 図 4 に示した No.19 の此花区西島では兵庫県南部地震の際に淀川沿いの堤防が最大で 3m 沈下するなどの激しい液状化被害が生じている．そこで，この地点で兵庫県南部地震の時の地震動を用いて LRI を求め，南海トラフ想定地震動を用いて求めた LRI と比較を行った．今回用いた兵庫県南部地震の地震動は此花区高見の GL-30m における観測波に方向補正を行ったものである．地震動を図 5 に示す．この地震動を用いて No.19 で LRI を求めた結果，6.002 となった．実際に激しい液状化が生じた地点で大きな数値が得られたため，LRI は液状化の被害状況を示す指標として評価できると考えられる．

5．結論 本研究では動的解析によって大阪市域における液状化挙動の検討を行った．その結果液状化が発生した地点では地表面加速度が減衰し，液状化が発生しなかった地点では地表面加速度は増幅もしくは大きく変化しないことがわかった．また液状化危険度指数を新たに定義し評価を

表 4 二地点での解析結果

	地表面最大応答加速度	地表面最大応答速度
此花区	164.4(gal)	53.32(m/s)
阿倍野区	562.9(gal)	90.93(m/s)

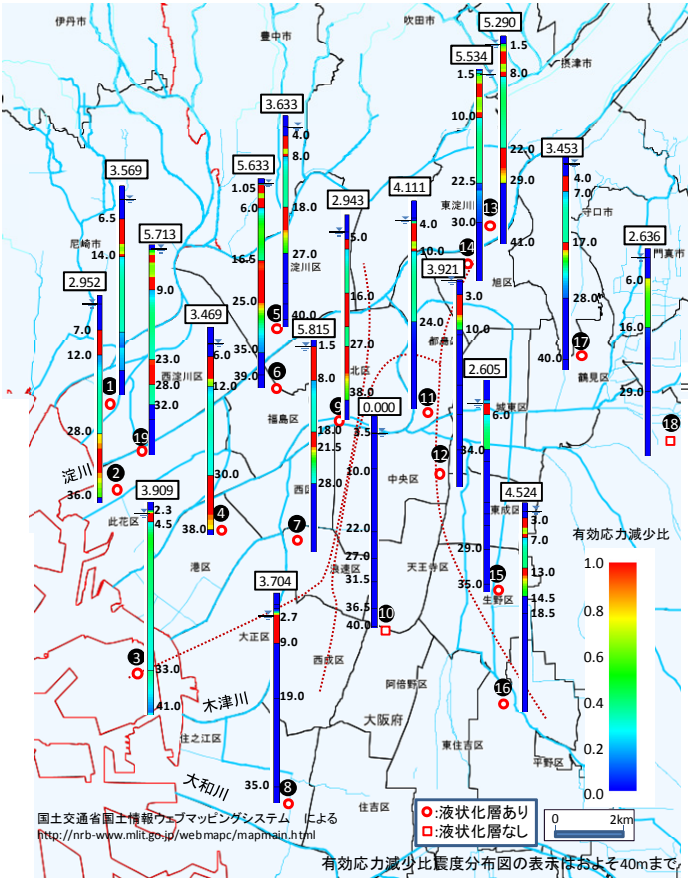


図 4 地震終了時の有効応力減少比と液状化危険度指数

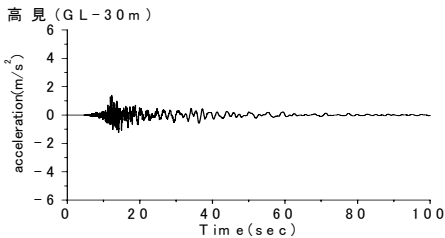


図 5 地震動(高見) $a_{max}=139.27(gal)$

行った結果，液状化の被害状況を示す指標として有効であると考えられた．

謝辞 本研究を行う上で重要な想定地震動を岐阜大学の杉戸真太先生に頂きました．貴重な資料を頂いたことに記して謝意を表します．

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, LIQCA2D11・LIQCA3D11 (2011年公開版)資料, 2011. 4) 杉戸真太ほか, 南海トラフ沿いの巨大地震による強震動予測, 岐阜大学平成23年度 年次報告 流域圏科学研究センター報告, 第10号, pp.45-48, 2012.