

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

京都大学工学部 学生会員 由井 洋和, 衣川 哲平
 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, 肥後 陽介

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いため、液状化の被害が広がると予想される。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、継続時間などを考慮し、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, LRI)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液状化被害が大きかっ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ほか、 P_L 値を様々な方法で導出した。

2. 解析モデル 本研究で用いたパラメータを表 1~3、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。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 2 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。入力地震動には図 3 に示す杉戸による南海トラフ巨大地震の想定地震動を用いた⁴⁾。想定地震動は震源を日向灘とし、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

先述の二地点の地表面最大応答加速度と地表面最大応答速度を表 4 に示す。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(ESDR)は右の式で表される。

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

キーワード 液状化, 地震応答解析, 地盤震害

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学 4 C クラスター C1 棟 TEL 075-383-3193

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/v_w (m/s ² /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'_{vm} (kPa)	175.5	512	541	75.2	128.25
Stress ratio at Maximum Compression M'_{vm}	1.12	0.909	0.909	1.24	1.30
Stress ratio at failure M'_r	1.36	1.158	1.336	1.24	1.30
Quasi-overconsolidation ratio OCR($\sigma'_{vm}/\sigma'_{vm0}$)	1.0	1.20	1.50	1.0	1.9
Hardening parameter B'_p, B'_s, C_s	3000, 5.15	3800, 7.0	3000, 5.0	100, 40, 10	350, 50, 5
Structure parameter $\sigma'_{vm}/\sigma'_{vm0} \beta$	-	-	-	0.30, 3.6	0.35, 3.0
Control parameter of anisotropy C_d	2000	2000	2000	-	-
Parameter of Dilatancy $D'_{p,n}$	2.75, 4.75	1.00, 6.00	-	-	-
Reference Value of plastic Strain γ^p	0.0033	0.0050	-	-	-
Reference Value of elastic Strain γ^e	0.019	0.010	-	-	-
Viscoplastic parameter m'	-	-	-	24.68	20.00
Viscoplastic parameter (1/s) C_v	-	-	-	1.00×10^5	1.00×10^7
Viscoplastic parameter (1/s) C_s	-	-	-	3.83×10^6	1.16×10^8
Hardening parameter A'_s, B'_s	-	-	-	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	粘土	Dg2	深層①	深層②
Density ρ (t/m ³)	2.00	1.80	1.79	1.92
Coefficient of permeability k/v_w (m ² /kN ² s)	1.0×10^{-5}	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	3.93×10^7	8.68×10^7	1.17×10^8	1.67×10^8
Lame's constant μ	3.43×10^7	1.905×10^7	2.56×10^7	3.67×10^7

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/v_w (m ² /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 $\lambda = E\nu/(1+\nu)(1-2\nu)$	7.88×10^7	8.93×10^7	1.45×10^8	1.17×10^8	1.67×10^8
Lame's constant $\mu = E/(2(1+\nu))$	1.73×10^7	1.96×10^7	3.175×10^7	2.56×10^7	3.67×10^7

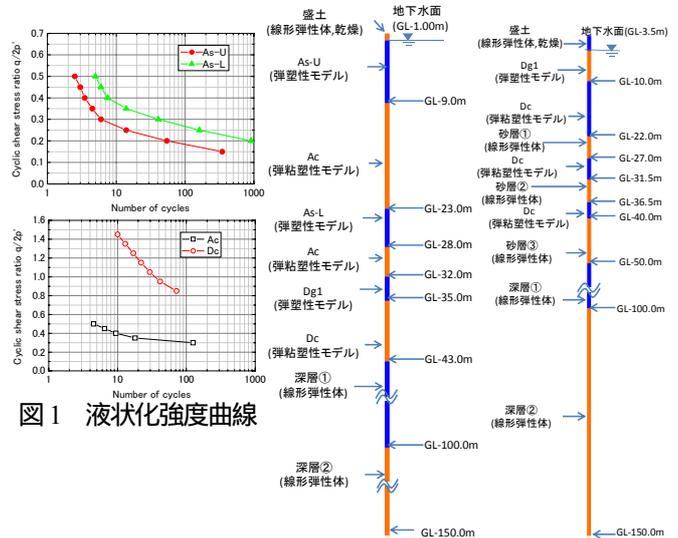


図1 液状化強度曲線

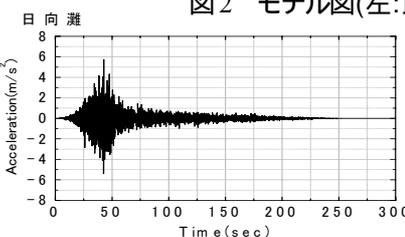


図3 入力地震動 (日向灘) GL-150(m)

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積分し、その値を液状化危険度指数(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おり、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．

4. 液状化危険度指数の評価と P_L 値 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、その値は6.002となった．日向灘の地震動に対してNo.19ではLRIは5.713であり、値はやや下回るがかなり激しい液状化が発生すると考えられる．また、同様の地点で P_L 値を様々な方法で導出した結果、表5のようになった．表5の日向灘と高見はそれぞれの地震動の地表面最大応答加速度から求めた P_L 値である．日向灘と高見の P_L 値の大小関係はLRIと一致していたがLRIよりも P_L 値のほうが液状化の評価は小さめとなった．設計水平震度とは道路橋示方書で地盤特性や地震動の種類などによって決定されており、今回は392galとした．表の値はその震度を用いて求めた P_L 値である．日向灘と高見の P_L 値が設計水平震度のものに対して小さいのは、液状化が発生して減衰した加速度を用いている為である．

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

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(cm/s)
阿倍野区	562.9(gal)	90.93(cm/s)

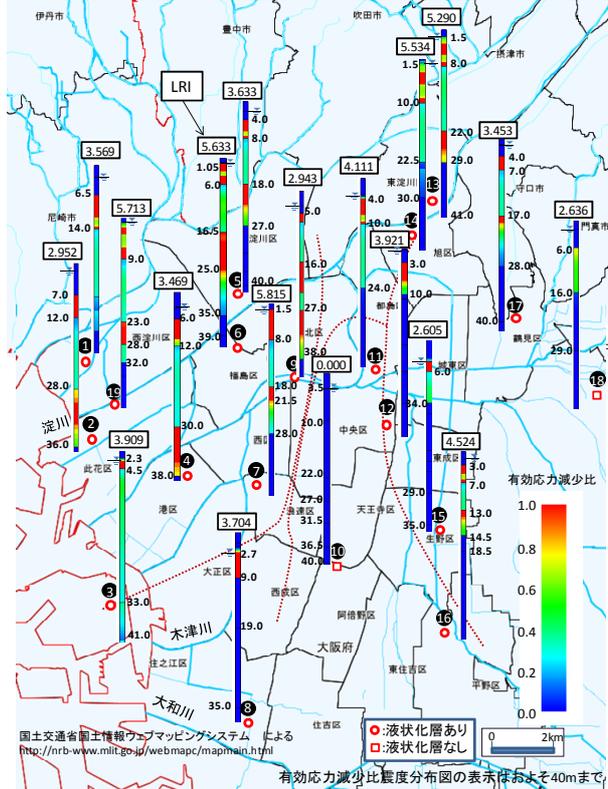


図4 地震終了時の有効応力減少比の深度分布図とLRI

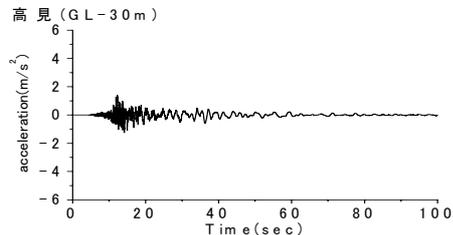


図5 地震動(高見) $a_{max}=139.27$ (gal)

表5 様々な方法で導出した P_L 値(No.19 此花区 西島)

	日向灘	兵庫県南部地震時の高見での地震動	設計水平震度(392gal)
P_L 値	5.676	8.019	34.632

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 LRI を定義し各地点で求めた結果、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** 本研究では岐阜大学の杉戸真太先生による南海トラフ巨大地震の想定地震動を使用させて頂いた．また、関西圏地盤情報データベースのボーリングデータを使用させて頂いた．本研究は平成24年度科学研究費基盤研究(S)「国難」となる最悪の被災シナリオと減災対策 代表河田恵昭氏の補助を受けた．記して謝意を表します．

参考文献 1) Oka et al, *Geotechnique*, 49(5), pp.661-680, 1999. 2) Oka, F. and Kimoto, S., Constitutive modeling of geomaterials, Qing Yang et al. eds., *Advances and New applications*, 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, 南海トラフ沿いで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.