

相対加速度を考慮した有限変形液状化解析法の適用性

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 小高猛司
 東京電力（株） 正会員 森本 良
 京都大学大学院 学生会員 喜多信代

1. はじめに

u-p 法によって定式化された有限変形理論に基づく 3 次元液状化解析法 LIQCA-FD^{1) 2)} の支配方程式を固相変位、相対変位、間隙水圧を未知数にする u-w-p 法により定式化し直し、新しい解析法 LIQCA-FW を開発した。LIQCA-FW の支配方程式には相互作用を表す項が陽に現れ、u-p 法を用いた LIQCA-FD よりも精度の高い液状化解析が行えると考えられる。岡ら³⁾ の均質砂地盤を用いた解析では地盤の透水性、入力波の周波数が高い場合、LIQCA-FW と LIQCA-FD で結果の違いが生じていた。そこで、本報ではどの程度の透水性、周波数で 2 つの解析法で違いが生じ、LIQCA-FW を適用した方が有利なのか検討する。

2. u-w-p 法による支配方程式の定式化

土粒子骨格の変形と間隙水移動の連成問題の支配方程式を Biot の二相混合体理論に基づいて u-w-p 法で定式化する。二相混合体理論は土粒子骨格で表される連続体を固相、間隙水で表される連続体を液相とし、飽和土をその二つの相の重ね合わせで表現している。構成式には Oka et al.(1999)⁴⁾ による非線形移動硬化則に基づく砂の繰り返し弾塑性構成式を用いた。定式化された支配方程式を以下に示す。

$$\begin{array}{ll}
 \underline{1. 全体のつりあい式} & \rho a^S_i + \rho^F a^R_i = S_{ij,j} + \rho b_i \quad (1) \\
 \underline{2. 間隙水のつりあい式} & \rho^F a^S_i + \frac{\rho^F}{n} a^R_i - p_{,i} - \frac{\gamma_w}{k} v^R_i - \rho^F b_i = 0 \quad (2) \\
 \underline{3. 間隙水の連続式} & \rho^F \dot{D}^S_{ii} + \frac{\rho^F}{n} \dot{D}^R_{ii} = p_{,ii} + \frac{\gamma_w}{k} D^S_{ii} \quad (3) \\
 \underline{4. 構成式} & \hat{T}'_{ij} = C_{ijkl}^{EP} D_{kl} \quad (4) \\
 \underline{5. 有効応力の定義} & T_{ij} = T'_{ij} + p \delta_{ij} \quad (5)
 \end{array}$$

ここで、 ρ 、 ρ^F はそれぞれ全体及び液相の密度、 γ_w は水の単位体積重量、 n は間隙率、 k は透水係数である。 a_i は加速度ベクトル、 v_i は速度ベクトル、 b_i は物体力ベクトル、 p は間隙水圧である。 S_{ij} は公称応力テンソル、 T_{ij} は Cauchy 応力テンソルである。LIQCA-FD で用いられている u-p 法では、相対加速度が微小であると仮定し、(1) と (3) より相対加速度の項を消去していた。u-w-p 法では仮定をせずに、(1) ~ (5) の式を組み合わせる厳密に解く。これらの式に対して空間離散化には FEM、時間離散化には Newmark β 法を用いて離散化を行う。

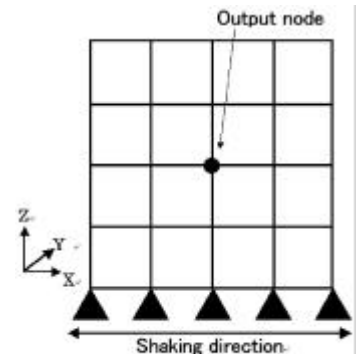


図-1 16要素砂地盤モデル

表-1 解析パラメータ

Newmark β 法の β	0.3025
Newmark β 法の γ	0.6
Rayleigh 減衰の α_0	0.0
Rayleigh 減衰の α_1	0.001
水の単位体積重量 γ_w	$9.8kN/m^3$
飽和土の単位体積重量 γ_{sat}	$18.98kN/m^3$
土圧係数 K_0	0.5
初期間隙比 e_0	0.772
圧縮指数 λ	0.02
膨潤指数	0.0052
ポアソン比 ν	0.25
重力加速度 g	$9.8m/s^2$
変相応力比 M_m^*	0.707
破壊応力比 M_f^*	0.990
塑性せん断剛性パラメータ B_0^*	3500
塑性せん断剛性パラメータ B_1^*	350
塑性せん断剛性パラメータ C_f^*	2000
ダイレイタンス係数べき指数 n	1.5
基準両振幅塑性せん断ひずみ γ_{DAr}^P	0.004
基準両振幅弾性せん断ひずみ γ_{DAr}^E	0.001

3. LIQCA-FW の適用性の検討

(1) 解析の概要

適用性を検討する方法として図 1 に示す $4m \times 4m \times 1m$ の均質な砂地盤モデル (16 要素、155 節点、奥行き 1 要素) を用い、地盤の透水係数と入力地震波の振動数を変化させ、LIQCA-FW と LIQCA-FD の 2 つの解析法で解析を行い、間隙水圧の結果を比較する。Zienkiewicz et al.⁵⁾ の検討にならひ、透水係数を横軸、入力地震波の振動数を縦軸に取った平面に、2 つの解析法で間隙水圧の結果が一致した範囲と、一致しなかった範囲を図示する。解析パラメータは表 1 に示すものを用いた。このパラメータは相対密度 60% の豊浦砂を想定して求められたもの⁴⁾ である。底面 ($z = 0m$) において固相変位、相対変位、共に全方向拘束 ($u_i = 0, w_i = 0, i = x, y, z$) し、側面及び前面、後面では非排水条件 ($x = 0, 4m$ で $w_x = 0, y = 0, 1m$ で $w_y = 0$) とした。モデル上面については排水条件 ($z = 4m$ で $p = 0$) を設定した。そして y 方向に固

キーワード: 液状化, 有限要素法, 相対加速度, 有限変形理論

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町, TEL:075-753-5086, FAX:075-753-5086

相変位，相対変位，共に拘束 ($u_y = 0, w_y = 0$) し 2 次元平面ひずみ条件を仮定した。地盤の透水係数を $10^{-7}m/s$ から $10^{-2}m/s$ まで 10 倍刻みで 6 通り，入力地震波については sin 波 (250gal) を 20 秒間入力し，振動数を 0.5Hz から 10.0Hz までの 11 通りに変化させ解析を行った。また計算時間増分は 0.01 秒に設定した。

(2) 解析結果

計 66 ケースの解析を 2 つの解析法を用いて行い，図 1 に示す出力節点での間隙水圧の結果を比較した。その結果を表 2 に示す。ここで，○ は両解析法で一致したケース，× は一致しなかったケースである。一致した代表的なケースとして透水係数が $10^{-2}m/s$ ，振動数が

表-2 間隙水圧の結果の比較

振動数 \ 透水係数	$10^{-7}m/s$	$10^{-6}m/s$	$10^{-5}m/s$	$10^{-4}m/s$	$10^{-3}m/s$	$10^{-2}m/s$
10.0Hz		×	×	×	×	×
9.0Hz		×	×	×	×	×
8.0Hz		×	×	×	×	×
7.0Hz		×	×	×	×	×
6.0Hz		×	×	×	×	×
5.0Hz			×	×	×	×
4.0Hz		×	×	×	×	×
3.0Hz	×		×	×	×	×
2.0Hz			×	×	×	×
1.0Hz				×	×	×
0.5Hz						×

が 5.0Hz の場合での LIQCA-FW の相対加速度の時刻歴を図 2 に，その条件での両解析法の間隙水圧の時刻歴の比較を図 3 に示す。一致しなかった代表的なケースとして透水係数が $10^{-7}m/s$ ，振動数が 0.5Hz の場合での LIQCA-FW の相対加速度の時刻歴を先の例と合わせて図 2 に，その条件での両解析法の間隙水圧の時刻歴の比較を図 4 に示す。間隙水圧の結果が一致しない場合の方が相対加速度の振幅が大きくなっているのがわかる。表 2 をもとに縦軸に振動数，横軸に透水係数を取った平面に図示すると図 5 のようになる。領域 I では相対加速度が大きくなり，その影響を受けて間隙水圧の結果に差が生じると考えられ，領域 II に含まれる透水係数，振動数を用いて LIQCA-FD により解析する場合は精度の良い解析が行えない可能性があり，LIQCA-FW を用いる方が有効であると考えられる。

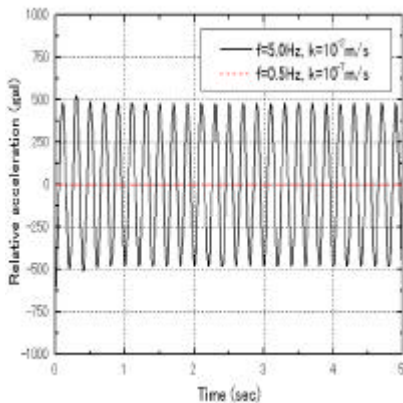


図-2 相対加速度の時刻歴

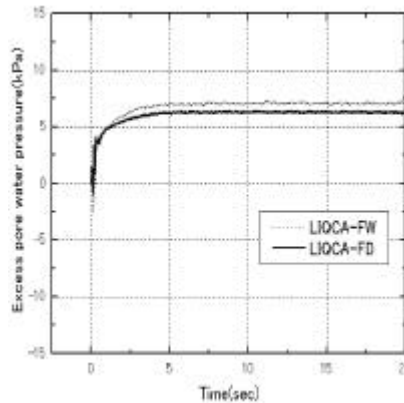


図-3 間隙水圧の比較（一致しない例）

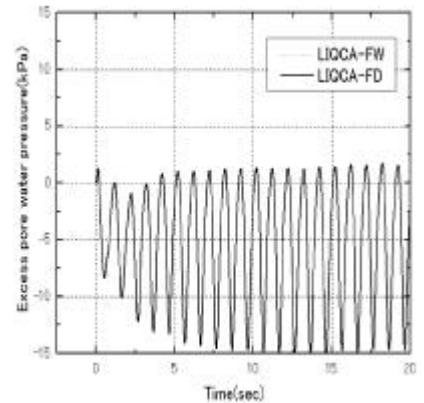


図-4 間隙水圧の比較（一致する例）

4. まとめ

地盤の透水係数及び入力地震波の振動数が大きい場合は，2 つの解析法の結果に差異が生じ，LIQCA-FW を用いる方が合理的であることがわかった。今回の解析では間隙水圧の結果を比較し，適用性の範囲を検討したが，今後は固相の応答加速度，平均有効応力の結果についても検討する必要がある。参考文献 1) 岡二三生・小高猛司・大島貴充:有限変形理論に基づく砂地盤の 3 次元液状化解析法, 第 34 回地盤工学研究発表会概要集, pp.2107-2108, 1999. 2) 岡二三生・小高猛司・角南進・小泉智之:有限変形理論による護岸構造物の 3 次元液状化解析, 第 35 回地盤工学研究発表会概要集, pp.2047-2048, 2000. 3) 岡二三生・小高猛司・森本良・喜多信代:固液の相対加速度を考慮した有限変形液状化解析, 第 37 回地盤工学研究発表会概要集, 投稿中,2000 4)Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, 49(5), pp661-680, 1999. 5)Zienkiewicz, O.C., Chang, C.T., and Bettess, P.:Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils. Limits of validity, *Geotechnique*, Vol.30, pp385-395, 1980.

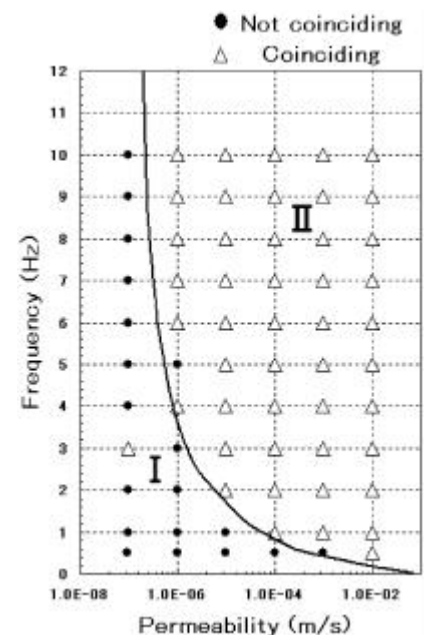


図-5 LIQCA-FW の適用性