

多層水平地盤の地震時液状化挙動に関する解析

京都大学大学院 学生会員 ○長浦佳祐
 京都大学防災研究所 正会員 井合 進
 京都大学防災研究所 正会員 飛田哲男

1. はじめに

不透水層である粘土・シルト層と透水層である砂層との互層で構成される地盤の液状化については、特に過剰間隙水圧の消散に伴う沈下挙動など未解明の点が残されている。2011年東北地方太平洋沖地震で発生した東京湾岸の埋立地における液状化では、多くの住宅や道路施設等に大きな被害が発生した。このような被害を高い精度で推定するため、現実の地盤の挙動を高い精度で推定できる手法の開発が必要である。本研究では FLIP^{1),2)}による有効応力解析を通じて、不透水層の存在が過剰間隙水圧の消散時間に与える影響を考察する。

2. 解析手法

本研究で用いたメッシュは、図1に示す3タイプである。透水層と不透水層の数に応じて(a)単層、(b)二層、(c)四層とする。解析に用いた地震波は図2に示す不規則波であり、最大加速度3.85(m/s²)、主要動継続時間は約13秒である。

FLIPでは、多孔質弾塑性体の運動方程式および間隙水の収支式(式1)を採用し、U-Pフォーミュレーションにより数値的に解を求めている。

$$k_{ij} p_{,j} - \varepsilon_{ij} - (k_{ij} \rho_f g_j)_{,j} = -(k_{ij} \rho_f u_j)_{,j} + \frac{np}{K_f} \quad (1)$$

また、体積成分の応力ひずみ関係と水頭勾配で定義される透水係数は式(2)、(3)のように表される。

$$\frac{\sigma'_{ii}}{3} = K \varepsilon_{ii} \quad (2)$$

$$k_{ij} = \delta_{ij} \frac{k}{\gamma_w} \quad (3)$$

式(2)と(3)を式(1)に代入し、入力加速度 $u_j \rightarrow 0$ とすると式(4)が得られる。ただし、本解析では体積弾性係数 K の低減係数 r_k を導入し K を $r_k K$ で置き換えている。

$$\frac{\sigma'_{ii}}{3} = \frac{k(r_k K)}{\gamma_w} \{ (\delta_{ij} p_{,j})_{,i} - (\delta_{ij} \rho_f g_j)_{,i} \} \quad (4)$$

ここで kK/γ_w は圧密係数である。FLIPでは膨張的ダイラタンシーを制御するパラメータとして r_{ed} を導入しているが、これと体積弾性係数 K の低減係数 r_k の積を一定にすると液状化強度を変化させることなく体積ひずみを制

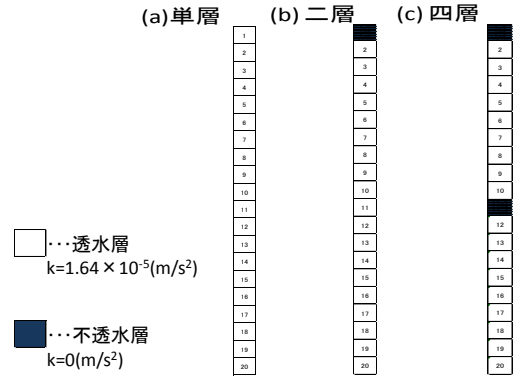


図1 解析メッシュ

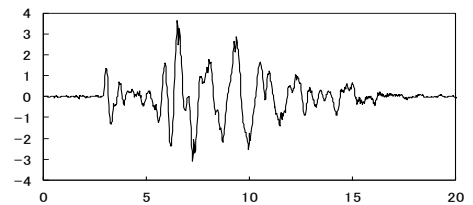


図2 入力波形

表1 解析ケース

解析ケース	透水係数	液状化特性				圧密係数
	k (m/s)	液状化パラメータ				C _v
		ε_d^{2m}	$r\varepsilon_d$	r_k	$r_k \times r\varepsilon_d$	
Case A(基本)	1.64×10^{-5}	0.2	0.15	0.3	0.045	4.32×10^{-2}
Case B	1.64×10^{-5}	0.6	0.45	0.1	0.045	1.44×10^{-2}
Case C	1.64×10^{-5}	0.04	0.03	1.5	0.045	0.216
Case D	5.47×10^{-6}	0.2	0.15	0.3	0.045	1.44×10^{-2}
Case E	8.2×10^{-5}	0.2	0.15	0.3	0.045	0.216

キーワード FLIP、液状化、多層地盤

連絡先 〒611-0011 宇治市五カ庄 京都大学防災研究所 TEL0774-38-4093

御できる。このことは例えば、透水係数を変化させても液状化強度が一定の地盤条件で解析を行うことができることを示している。そこでこの比を一定に保ったまま表 1 のように 5 ケースの解析を行なった。

3. 解析結果

Case B と C は Case A の透水係数をそれぞれ 1/3 倍、5 倍にしたものである。この時、図 3 に示すように、単層 (図 1(a)) の過剰間隙水圧の消散時間は、Case A が約 3,000 秒、Case B と C がそれぞれ約 9,000 秒と 600 秒となった。このことより、間隙水圧の消散過程は圧密方程式に支配されることがわかる。そこで、時間係数 $T_v = C_v t / H^2$ を計算すると、圧密係数と時間は反比例するので T_v は一定となり、横軸を T_v で表示すれば図 3 は図 4 のように正規化される。

次に、不透水層の影響を考察するため、Case A のパラメータを用い解析メッシュ(a)、(b)、(c) (図 1) について解析を行った。図 5 は $t=5,000$ 秒時点での応力分布であるが、特に四層地盤 (図 1(c)) の下側の不透水層の直下で水圧が高い状態が維持されていることがわかる。図 6 は、この時の変形図と過剰間隙水圧比を表示したものである。同図より四層地盤は不透水層直下で水圧が大きくなっている。

4. 結論

本研究では、砂のみで構成される単層水平地盤と砂と不透水層で構成される多層水平地盤における過剰間隙水圧の消散挙動について検討をおこなった。単層水平地盤の解析結果から、圧密係数と消散時間が反比例することがわかった。粘性土の圧密現象は、地盤のあらゆる深さで上載圧分だけ、過剰間隙水圧が発生するが、地震時の液状化現象では、深さによって発生する過剰間隙水圧の大きさが異なる。このような、複雑で圧密とは異なる液状化現象でも、時間係数を用いて過剰間隙水圧の消散過程を正規化することができることを示した。また、多層水平地盤の解析結果から、不透水層の真下では過剰間隙水圧の残留が大きくなり、液状化状態が持続するため、側方流動などの危険性が高まるものと推定される。

5.参考文献

1) Iai, S. Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992). Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 32, No. 2, 1-15. 2) Towhata, I. and Ishihara, K. (1985). Shear work and pore water pressure in undrained shear, Soils and Foundations, 25, No. 3, 73-8.

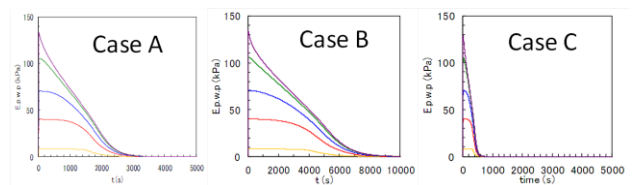


図 3 過剰間隙水圧時刻歴 Case A,B,C

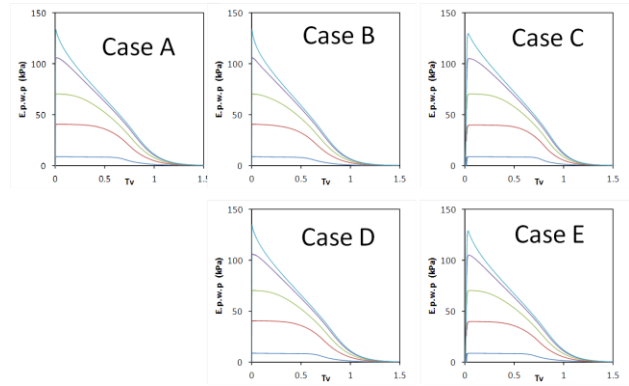


図 4 過剰間隙水圧-時間係数 CaseA-E

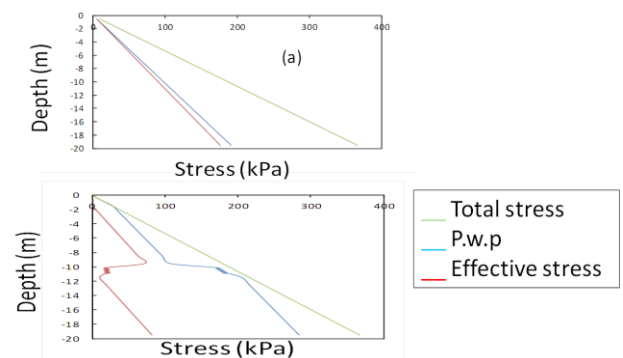


図 5 応力分布図(t=5000sec)

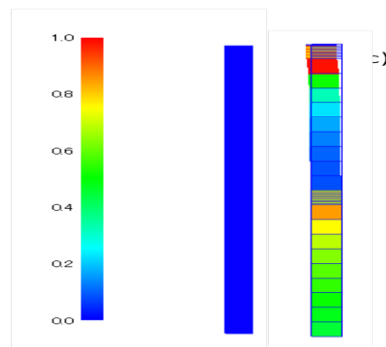


図 6 過剰間隙水圧比分布図(t=5000sec)