

地震動中の透水が過剰間隙水圧挙動に与える影響

—有効応力解析を用いた検討—

Effect of Permeability on Excess Pore Water Pressure Behavior during Seismic Motion

Discussion by effective stress analysis

○長田駿¹, 道明裕毅², 酒匂教明³

*Shun Nagata¹, Yuki Domyo², Noriaki Sako³

Abstract: One of the factors that induce great liquefaction damage is the long-time seismic motion such as the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. Therefore, it is necessary to adopt an idea of permeability to assess the risk of liquefaction damage for a long-time seismic motion. In this paper, effective stress analysis was performed using two types of earthquake motion with different durations and three different permeability factors to research the effect of permeability on the excess pore pressure behavior. It is revealed that the excess pore water pressure behavior highly depends on the durations of earthquake motion and the permeability factors.

1. はじめに

液状化予測方法については、これまでは地震動の継続時間が比較的短いことを前提に、間隙水の移動（以下、透水）は無視してきた。しかしながら、2011年東北地方太平洋沖地震では大規模な液状化被害が確認され、その要因の一つに、地震動の継続時間が非常に長かったことが挙げられる^[1]。吉田ら^[2]は、有効応力解析により、地震動の継続時間が長い場合には、排水条件の違いで解析結果が異なる可能性を報告した。そこで本報告では、吉田らの検討結果を確認する意味も含めて、有効応力解析によるケーススタディにより、過剰間隙水圧挙動に与える透水係数および継続時間の影響について調べた。

2. 解析概要

解析には、1次元有効応力解析プログラム「YUSAYUSA-2」^[3]を用いた。解析に用いた地盤モデルを Figure 1 に示す。

層厚は 20m、地下水位は GL-0m、GL-0~20m を飽和層の 5 層地盤モデルとし、全層が相対密度 $D_r=70\%$ の霞ヶ浦砂で構成される一様地盤とした。解析に用いたパラメーターを Table 1 に示す。砂層の初期せん断剛性 G_0 は、Iwasaki ら^[4]による推定式、内部摩擦角 ϕ は建築基礎構造設計指針^[5]に基づき N 値より算出、間隙水圧モデル B_p , B_u は中空ねじりによる繰返しせん断試験結果から算出し、同じく間隙水圧モデルに必要なパラメーター κ は 0.06 とした。せん断強度 τ_{max} は、内部摩擦角 ϕ と有効上載圧 σ'_v よりクーロンの破壊基準を用いて算出した。各層の応力-ひずみ関係は、H-D モデル^[6]を用いた。体積圧縮係数 m_v は、吉田らの示す実験式^[3]、透水係数 k は、JIS A 1218 に準じた定水位透水試験結果^[7]より、供試体の相対密度から求めた値を基に 3 種類の透水係数 k で検討を行った。入力地震動は El-Centro NS 波（継続時間 53.76 秒、最大加速度

を Figure 1 に示す。層厚は 20m、地下水位は GL-0m、GL-0~20m を飽和層の 5 層地盤モデルとし、全層が相対密度 $D_r=70\%$ の霞ヶ浦砂で構成される一様地盤とした。解析に用いたパラメーターを Table 1 に示す。砂層の初期せん断剛性 G_0 は、Iwasaki ら^[4]による推定式、内部摩擦角 ϕ は建築基礎構造設計指針^[5]に基づき N 値より算出、間隙水圧モデル B_p , B_u は中空ねじりによる繰返しせん断試験結果から算出し、同じく間隙水圧モデルに必要なパラメーター κ は 0.06 とした。せん断強度 τ_{max} は、内部摩擦角 ϕ と有効上載圧 σ'_v よりクーロンの破壊基準を用いて算出した。各層の応力-ひずみ関係は、H-D モデル^[6]を用いた。体積圧縮係数 m_v は、吉田らの示す実験式^[3]、透水係数 k は、JIS A 1218 に準じた定水位透水試験結果^[7]より、供試体の相対密度から求めた値を基に 3 種類の透水係数 k で検討を行った。入力地震動は El-Centro NS 波（継続時間 53.76 秒、最大加速度

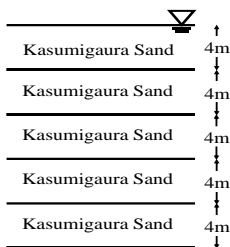


Figure 1. Ground Model

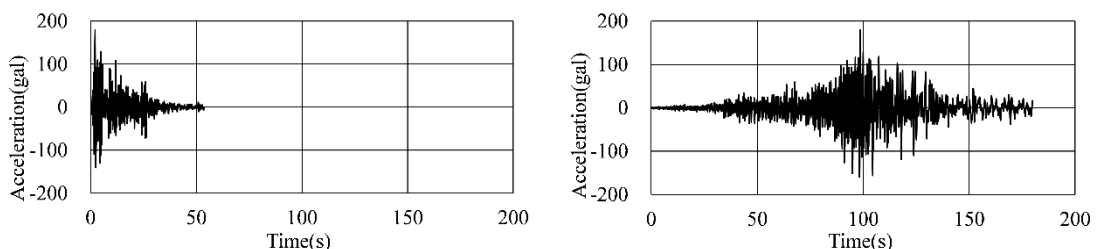


Figure 2. Acceleration Waveforms of Input Earthquake Motion (Left : El-Centro NS Wave, Right : Urayasu Wave)

Table 1. Analytical Constants of Ground Model

Soil	H(m)	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$G_0(\text{kN/m}^2)$	K_0	$\phi(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$\tau_{max}(\text{kN/m}^2)$	h_{max}	R_{15}	B_p	B_u	κ	$m_v(\text{m}^2/\text{kN})$	$k(\text{m/s})$
Kasumigaura Sand	4	19.9	49514	0.5	40	36.29	23	0.3	0.21	2.762	0.06	0.06	4.95E-05	0.00103 0.000103 0.0103
Kasumigaura Sand	4	19.9	74101	0.5	40	36.29	56	0.3	0.21	2.762	0.06	0.06	3.50E-05	
Kasumigaura Sand	4	19.9	91124	0.5	40	36.29	90	0.3	0.21	2.712	0.06	0.06	2.92E-05	
Kasumigaura Sand	4	19.9	104830	0.5	40	36.29	124	0.3	0.21	2.712	0.06	0.06	2.59E-05	
Kasumigaura Sand	4	19.9	116566	0.5	40	36.29	158	0.3	0.21	2.712	0.06	0.06	2.36E-05	

Table 2. Analysis conditions

Case No.	入力地震動	$k(\text{m/s})$
Case1	El-Centro波	0.00103
Case2	浦安波	0.00103
Case3	浦安波	0.000103
Case4	浦安波	0.0103

1 : 日大短大・教員・建築 2 : 株式会社テノックス 3 : 日大理工・院 (前)・建築

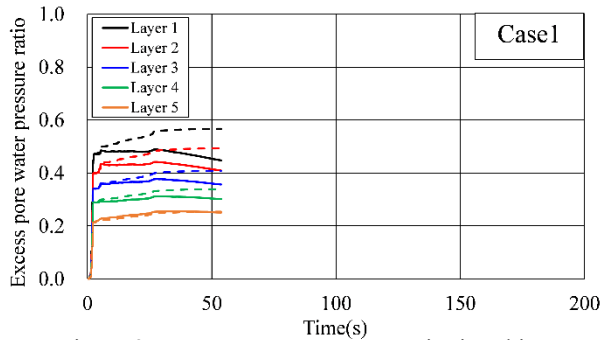


Figure 3. Excess pore pressure ratio time history (El-Centro NS Wave, $k=0.00103\text{m/s}$)

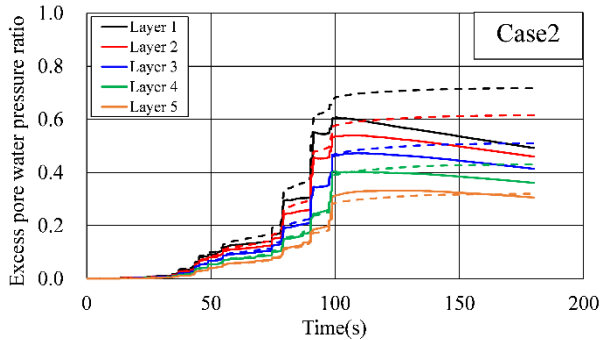


Figure 4. Excess pore pressure ratio time history (Urayasu Wave, $k=0.00103\text{m/s}$)

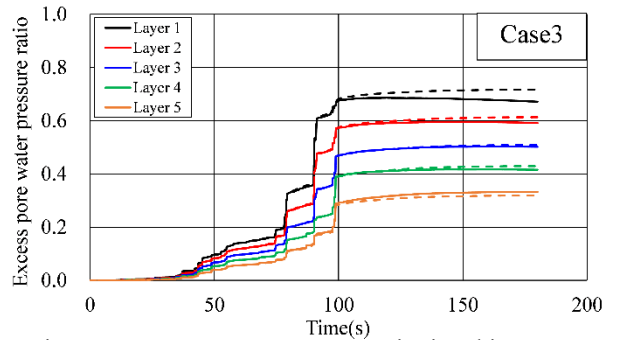


Figure 5. Excess pore pressure ratio time history (Urayasu Wave, $k=0.000103\text{m/s}$)

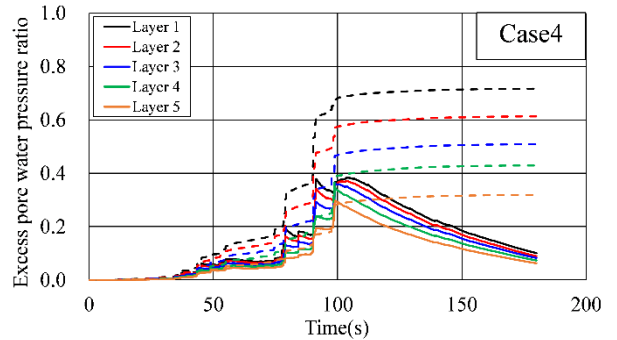


Figure 6. Excess pore pressure ratio time history (Urayasu Wave, $k=0.0103\text{m/s}$)

$\alpha_{\text{max}}=180\text{gal}$ に調整), 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に, 千葉県浦安市近傍で観測された地震波 (継続時間 180 秒, 最大加速度 $\alpha_{\text{max}}=180\text{gal}$ に調整) (以下, 浦安波) を用いた. 入力地震動の加速度波形を Figure 2 に示す. 各解析条件を Table 2 に示す.

3. 解析結果

Figure 3~Figure6 に各解析 Case の過剰間隙水圧比時刻歴を示す. 実線は透水有りの設定, 破線は透水無しの設定による結果である.

Case1 および Case2 では, 透水係数を同じとして継続地震動の異なる入力地震波とした. Case1 では, 透水の有無による過剰間隙水圧の上昇および消散過程に大きな差が見られなかった. 一方の Case2 では, 透水有りの場合 1, 2 層目の過剰間隙水圧の上昇が抑えられている. Case1 と Case2 の差は地震動の継続時間のみであるため, 地震動の継続時間が長いと透水による過剰間隙水圧への影響が無視できないことが分かる.

Case2, Case3 および Case4 では, 入力地震動をすべて浦安波とし, 透水係数の設定を変えた. Case2 は実験に使用した霞ヶ浦砂の値, Case3 は細粒分を多く含む砂質土地盤, Case4 は砂礫地盤として設定した. Case3 では, 地震動の継続時間が長いにも関わらず, 透水の有無による過剰間隙水圧挙動の差はあまり見られなかった. これに比べ, Case4 では, 透水有りの場合は全層に

渡って過剰間隙水圧の消散傾向が大きくなり, 水圧の上昇が抑えられている. Case2 については, Case4 ほど水圧の消散は抑えられていないことが判明した.

4. まとめ

本研究では, 地震時の透水が過剰間隙水圧挙動に与える影響を検討することを目的とし, 地震動の継続時間が異なる 2 種の地震波, および異なる 3 種の透水係数を用いて有効応力解析を行った. その結果, 透水性が一定以上であれば, 地震動の継続時間の影響が表れることが判明した. また, 透水性が高い地盤ほど過剰間隙水圧挙動に及ぼす影響は顕著であることが示された.

参考文献

- [1] 上田恭平 他:余震の発生が地盤の液状化挙動に及ぼす影響に関する解析的検討, 土木学会論文集, A1,Vol.70, No.4,pp.578-585,2014.
- [2] 吉田望, 辻本修一:液状化解析における非排水条件仮定の有効性, 土木学会第 44 回年次学術講演会, III-285,pp. 644-645,1989.
- [3] 吉田望 他:YUSAYUSA-2, SIMMDL-2 理論と使用法 (改訂版 Version 2.10), 2005.
- [4] Iwasaki, T., et al.: Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, Soils and Foundations, Vol.17, No.3, pp.19-35,1977.9.
- [5] 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針,2019.
- [6] Hardin B.O, Drnevich V.P: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, Proc. ASCE, Jour. SMFD, Vol.98 (SM7), pp. 667-692, 1972.
- [7] 井上健太 他: 透水係数の違いが砂地盤の液状化挙動に与える影響-その 1 定水位透水試験結果-, 第 54 回地盤工学研究発表会, pp.373-374, 2019.