

透水を考慮したオンライン地震応答実験  
 —その2 過剰間隙水圧と損失エネルギーの関係—  
 A Pseudo-Dynamic Test Considering Permeability

—Part 2 the Relationship between Excess Pore Water Pressure and Dissipated Energy—

○堀田寅男<sup>1</sup>, 山田雅一<sup>2</sup>, 道明裕毅<sup>2</sup>, 井上健太<sup>3</sup>

\* Torao Hotta<sup>1</sup>, Masaichi Yamada<sup>2</sup>, Yuki Domyo<sup>2</sup>, Kenta Inoue<sup>3</sup>

Abstract: It is known that the dissipated energy has a good correlation with the increasing tendency of pore water pressure regardless of various stress paths. In this paper, we conducted pseudo-dynamic test that considering permeability, and examined the effect of permeability on the relationship between excess pore water pressure and dissipated energy. It was confirmed that the increasing tendency of the relationship between excess pore water pressure ratio and dissipated energy is different in considering permeability.

1. はじめに

前報その1<sup>1)</sup>では、透水を考慮したオンライン地震応答実験を行い、継続時間が長い地震動を対象に、透水を考慮した際に、地震動の最大加速度が地盤の液状化発生の有無に与える影響について検討した。

本報その2では、損失エネルギーに着目する。損失エネルギーは、種々の応力経路に依らず、間隙水圧の上昇傾向と良い相関があることが知られている<sup>2)</sup>。そのような関係を利用した、損失エネルギーに基づく間隙水圧モデルが国内外で多く提案されている(例えば3),4)。そのため液状化に寄与する間隙水圧の上昇傾向と損失エネルギーの関係を捉えることの有意性は明らかである。

そこで、本報その2では、前報その1<sup>1)</sup>で実施した実験結果を用いて、透水の考慮の有無が過剰間隙水圧比と損失エネルギーの関係に与える影響について検討する。

2. 実験概要

Table 1 に実験条件を示す。Figure 1 に入力地震動の加速度波形を示す。実験概要の詳細については、前報その1<sup>1)</sup>を参照されたい。本報その2では、前報その1<sup>1)</sup>で行われた実験結果を用いて考察を行う。前報その1<sup>1)</sup>で行ったオンライン地震応答実験は、最大入力加速度が157gal と 350gal の2つの入力地震動に対して、それぞれ透水を考慮した場合(Case1, Case3)と透水を考慮していない場合(Case2, Case4)について実施している。

3. 実験結果

Figure 2 に Case1, Case2 の実験結果より得られた過剰間隙水圧比  $\Delta u/\sigma'_{m0}$  の時刻歴を、Figure 3 に Case3, Case4 の実験結果より得られた  $\Delta u/\sigma'_{m0}$  の時刻歴をそれぞれ示す。また、Figure 4, Figure 5 に  $\Delta u/\sigma'_{m0}$  と損失エネルギー  $W_s$  の関係をそれぞれ示す。なお、同図における  $W_s$  は次式<sup>5)</sup>で算出した。

$$W_s = \frac{1}{2\sigma'_{m0}} \sum (\tau_{i+1} + \tau_i)(\gamma_{i+1} - \gamma_i) \quad (1)$$

ここに、 $\tau_i$  と  $\tau_{i+1}$  はそれぞれ荷重増分  $i$  ステップと  $i+1$  ステップにおけるせん断応力、 $\gamma_i$  と  $\gamma_{i+1}$  はそれぞれ荷重増分  $i$  ステップと  $i+1$  ステップにおけるせん断ひずみであり、 $\sigma'_{m0}$  は初期平均有効応力である。

最初に、透水を考慮していない条件下の実験結果に着目する。Figure 2 の Case2 では、140 秒付近で  $\Delta u/\sigma'_{m0}$  が 0.9 程度となっていることに対し、Figure 3 の Case4 では、120 秒付近で液状化していることが見て取れる。次に透水を考慮した条件下の実験結果に着目する。Figure 2 の透水を考慮した Case1 では、 $\Delta u/\sigma'_{m0}$  が 0.3 程度まで上昇した後、消散し、液状化に至らなかった事

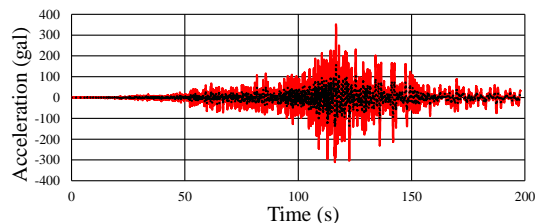


Figure 1. Input waves

Table 1. Test conditions

Case No.	Considering permeability	Peak acceleration (gal)	Layer thickness H (m)	Mean effective principle stress $\sigma'_m$ (kN/m <sup>2</sup> )	Density $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Initial shear modulus $C_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	Coefficient of volume compressibility $m_v$ (m <sup>2</sup> /kN)	Coefficient of permeability $k$ (m/s)
1	○	157	10	43.9	2.010	4.87×10 <sup>4</sup>	3.53×10 <sup>-3</sup>	1.03×10 <sup>-3</sup>
2	×				2.016	4.98×10 <sup>4</sup>		—
3	○	350			2.010	5.28×10 <sup>4</sup>		1.03×10 <sup>-3</sup>
4	×				2.001	4.26×10 <sup>4</sup>		—

1 : 日大理工・学生・建築 2 : 日大理工・教員・建築 3 : 日大理工・院(前)・建築

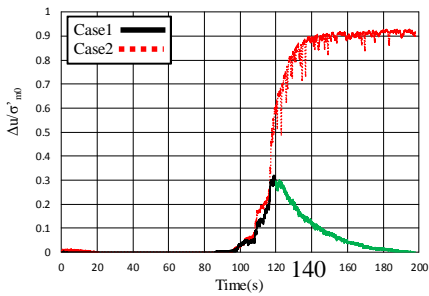


Figure 2. Excess pore water pressure ratio time history ( $\alpha_{max}=157gal$ )

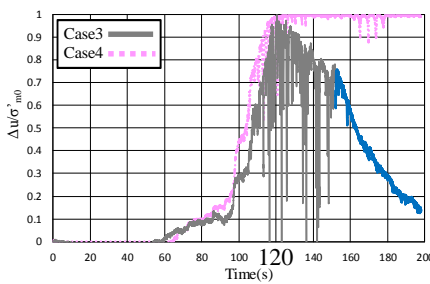


Figure 3. Excess pore water pressure ratio time history ( $\alpha_{max}=350gal$ )

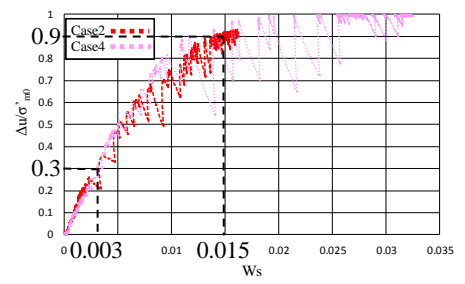


Figure 4. Relationship between water pressure ratio and strain energy (Case2,4)

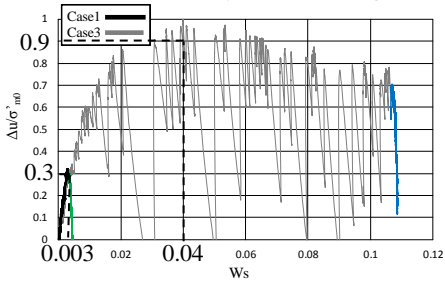


Figure 5. Relationship between water pressure ratio and strain energy (Case1,3)

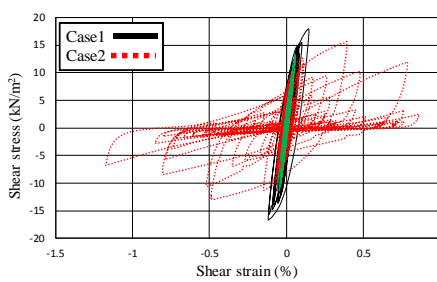


Figure 6. Relationship between shear stress and shear strain ( $\alpha_{max}=157gal$ )

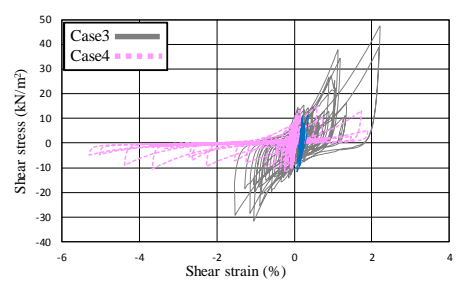


Figure 7. Relationship between shear stress and shear strain ( $\alpha_{max}=350gal$ )

に対し、Figure 3の透水を考慮したCase3では、透水を考慮していないCase4と同様の120秒付近で液状化に至り、その後はCase1と同様に $\Delta u/\sigma'_{m0}$ が消散した。一方で、Figure 4に示したように、最大入力加速度が異なり、透水を考慮していないCase2, Case4を比較すると、 $\Delta u/\sigma'_{m0}-W_s$ 関係は、ほとんど同様の傾向を示していることが確認できる。ここで、Figure 5に示した透水を考慮したCase1とCase3より得られた $\Delta u/\sigma'_{m0}-W_s$ 関係に着目すると、 $\Delta u/\sigma'_{m0}$ が0.3程度までの水圧比の上昇は入力加速度の大きさの違いによらず様な傾向を示した。また、この $\Delta u/\sigma'_{m0}$ が0.3までの上昇傾向は、Figure 4に示した透水を考慮していないCase2, Case4共に、 $W_s$ が0.003程度に達していることから、同様の傾向となっていることがわかる。一方で、 $\Delta u/\sigma'_{m0}$ が0.3を超えた後のCase2~4の挙動に着目すると、Case2とCase4では $\Delta u/\sigma'_{m0}$ が0.9の時点で $W_s$ が0.015程度を示したことに対して、Case3では $\Delta u/\sigma'_{m0}$ が0.9の時点で $W_s$ が0.04を示した。これより、透水考慮の有無により $\Delta u/\sigma'_{m0}-W_s$ 関係の上昇傾向が異なる結果となることを確認した。

Figure 6にCase1, Case2の実験結果より得られたせん断応力-せん断ひずみ関係を、Figure 7にCase3, Case4の実験結果より得られたせん断応力-せん断ひずみ関係をそれぞれ示す。また、Figure 2, Figure 3には透水を考慮した実験結果において $\Delta u/\sigma'_{m0}$ の消散傾向が顕著にみられた点を緑と青の実線で併せ示した。加えてFigure 5, Figure 6, Figure 7における同時点の結果を

同様の緑と青の実線で示している。同図より、透水による $\Delta u/\sigma'_{m0}$ の消散過程に着目すると、一度非線形となったせん断応力-せん断ひずみ関係が線形な挙動になり、剛性の回復が見取れる。また、Figure 5に示しているように、 $W_s$ がほとんど発生していないことから、透水による $\Delta u/\sigma'_{m0}$ の消散過程ではほとんど $W_s$ が生じないことを確認した。

#### 4. まとめ

本報では、前報その1<sup>1)</sup>で実施した実験結果を用いて過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_{m0}$ -損失エネルギー $W_s$ 関係について検討を行った。実験結果より、透水の考慮の有無により $\Delta u/\sigma'_{m0}-W_s$ 関係の上昇傾向が異なる結果となる事を確認した。加えて、透水による $\Delta u/\sigma'_{m0}$ の消散過程では、ほとんど $W_s$ が生じないことを確認した。

#### 【参考文献】

- 1) 井上健太 他：透水を考慮したオンライン地震応答実験-その1 地震動の最大加速度が地盤の液状化挙動に与える影響-, 令和元年度日本大学理工学部学術講演会予稿集, 2019.
- 2) Towhata, I. et al. : Shear Work and Pore Water Pressure in Undrained Shear, Soils and Foundations, Vol.25, No.3, pp.73-84, 1985.
- 3) Jafarian, Y. et al. : Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.35, pp. 13-28, 2012.
- 4) Green, R. A. et al. : An energy-based excess pore pressure generation model for cohesionless soils, Proc. John Booker Memorial Symp. -Developments in Theoretical Geomechanics, D. W. Simith and J. P. Carter, eds. , pp. 383-390, 2000.
- 5) 道明裕毅 他：擬似エネルギー容量に基づく過剰間隙水圧モデルの検討, エネルギーに基づく液状化予測手法に関するシンポジウム論文集, pp. 366-378, 2019.