

し、実験の反復過程で砂地盤の締め固めが進行した場合には適度なボーリングを施して、各ケースにおける地盤の質の保持に努めた。

3. 地盤内間隙水圧分布の解析解

(1) 基礎式と解析解

有限層厚の砂地盤表面に圧力変動のみが作用する際の地盤内間隙水圧変動については、善ら (1987) が次式のような1次元圧密方程式と同型の基礎式を導き、数値解析を行っている。

$$\frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \left(1 + \frac{nm_w}{m_v}\right) \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial p_b}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 k : 地盤の透水係数、 γ_w : 水の単位体積重量、 m_v : 土粒子骨格の体積圧縮係数、 m_w : 間隙水の圧縮率、 z : 砂層表面を原点とする鉛直下向き座標、 p : 深さ z における過剰間隙水圧、 p_b : 砂層表面に働く水圧変動、 n : 地盤の間隙率、 t : 時間である。

酒井ら (1993) は、進行波による間隙水圧変動の解析解の誘導における Mei・Foda (1981) の方法を参考に、Stokes boundary layer の解を利用して式 (1) の解析解を導いた。なお、解析解の誘導に際しては、砂層底面での境界条件を無視し、地盤表面における水圧変動は微小振幅波を想定して正弦波型で与えている。

酒井ら (1993) の被圧海底地盤内間隙水圧分布の解析解は以下のように与えられる。

$$\frac{p}{P_0} = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \frac{z}{l}\right) \cdot \cos\left(-\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \frac{z}{l} + 2\pi \frac{t}{T}\right) + \frac{1}{\alpha} \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha = 1 + \frac{nm_w}{m_v}, \quad C = \frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{T}{l^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 P_0 : 砂層表面に働く水圧変動振幅 ($P_0 = \Delta p/2$)、 l : 砂層厚程度の長さスケール、 T : 振動周期である。

さらに、式 (2) を変形すると

$$\frac{p}{P_0} = A_R \cos\left(2\pi \frac{t}{T} + \theta_R\right) \dots\dots\dots (4)$$

$$A_R = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)^2 e^{2\theta} + \frac{2}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) e^{\theta} \cos \theta + \frac{1}{\alpha^2}}, \dots\dots\dots (5)$$

$$\theta_R = \tan^{-1} \left\{ \frac{-\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) e^{\theta} \sin \theta}{\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) e^{\theta} \cos \theta + \frac{1}{\alpha}} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

となり、振幅 A_R と位相差 θ_R が陽に現れる。

(2) パラメータの決定

解析解には2つの無次元パラメータ α と C が含まれ

[A] mutual dependent condition of α & C

$$\alpha = 1 + \frac{nm_w^{\text{const}}}{m_v} \quad C = \frac{k}{\text{const} \gamma_w m_v} \frac{T^{\text{given}}}{l^2 \text{given}}$$

$n = \frac{e}{1+e}$ $k = \text{fun}(e)$

[B] independent condition of α & C

$$\alpha = 1 + \frac{n m_{w0}}{m_v} \quad C = \frac{k}{\text{const} \gamma_w m_v} \frac{T^{\text{given}}}{l^2 \text{given}}$$

$n = \frac{e}{1+e}$ $k = \text{fun}(e)$

$m_w = m_{w0} S_r + \frac{1-S_r}{p_{mg}^{\text{const}}}$

図-2 パラメータの決定

るが、パラメータ α は水圧の伝達のし難さを表し、 α が大きくなるほど地盤深くの間隙水圧変動の減衰が大きくなる。一方、パラメータ C は排水の容易さを表し、 C が大きくなるほど間隙水圧変動の減衰は小さくなる。2つの無次元パラメータ α と C に関して諸量との関係をまとめたのが、図-2 である。

地盤の間隙率 n は、間隙比 e を介して透水係数 k と結びつけられるから、完全飽和を仮定して間隙水の圧縮率が定数であるとする、無次元パラメータ α と C は従属関係となり、パラメータ決定の自由度は1となる (図中の [A])。しかし、実際に解析解を計測結果と適合させるには、2つのパラメータを独立に設定できないと不都合である。

ところで、地盤中には微細な気泡が混入しているのが通常であるから、完全飽和を前提とした議論は必ずしも適切ではない。そこで、善ら (1987) による間隙水の圧縮率と飽和度の関係

$$m_w = m_{w0} S_r + \frac{1-S_r}{p_{mg}} \dots\dots\dots (7)$$

を導入して、2つのパラメータを独立に設定できるようにすることとした (図中の [B])。ここに、 m_{w0} : 飽和水の圧縮率、 S_r : 地盤の飽和度、 p_{mg} : 絶対圧力で表した間隙水圧である。

また、 k/m_v が採りうる値が通常 20.0~50.0 kgf/s/cm 程度であることが、善ら (1987) によって指摘されている点を考慮に入れ、この範囲を逸脱しない範囲で k/m_v

と S_r を変化させて、全実験ケースの間隙水圧分布に対して最もよく適合するパラメータの組み合わせとして、 $k/m_v = 20.0 \text{ kgf/s/cm}$ 、 $S_r = 99.7\%$ を見出した。

4. 解析解と実験結果の比較

(1) 水圧変動全振幅が比較的小さい場合

図-3 は、間隙比 $e=0.8$ 、地盤表面の水圧変動全振幅 $\Delta p=0.5 \text{ m}$ に設定し、水圧変動周期 T を変化させた際、地盤内間隙水圧の振幅 $A_R (= p_{\max}/P_0)$ と地盤内間隙水圧変動の地盤表面の水圧変動に対する位相差 θ_R を示している。図中には、解析解の振幅 (式 (5)) と位相差 (式 (6)) を併示しているが、振幅に関しては、いずれの変動周期についても実験結果と解析解との一致は良好である。位相差に関しては、解析解は短周期変動に対して過大評価を与え、長周期変動に対して過小評価を与える傾向が認められるが、変動周期が増大するほど位相差が減少するという実験結果の特性は解析解でも明瞭に再現されている。

図-4 は、変動周期 $T=3.0 \text{ s}$ 、地盤表面の水圧変動全振幅 $\Delta p=0.5 \text{ m}$ の場合について、間隙比 e の相違による地盤内間隙水圧の振幅 $A_R (= p_{\max}/P_0)$ と地盤内間隙水圧変動の地盤表面の水圧変動に対する位相差 θ_R の相違を示している。なお、図中には、解析解の振幅 (式 (5))

と位相差 (式 (6)) を併示している。振幅、位相差ともに、いずれの間隙比についても実験結果と解析解との一致は良好である。

さらに、図-5 は、間隙比 $e=0.8$ 、地盤表面の水圧変動全振幅 $\Delta p=0.5 \text{ m}$ 、変動周期 $T=3.0 \text{ s}$ の場合について、地盤内間隙水圧の変動時系列を示したものである。図中の実線は、解析解による計算結果 (式 (2)) を示しているが、いずれの測点においても、実験結果と解析解の対応は、全位相を通じて良好である。

以上のように、水圧変動振幅が比較的小さい場合に相当する $\Delta p=0.5 \text{ m}$ においては、変動周期の変化や地盤の間隙比の変化に対しても解析解は少なくとも今回の実験

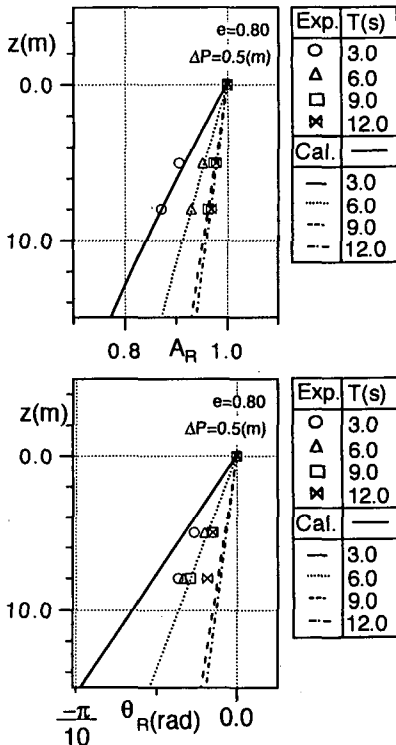


図-3 水圧変動周期の影響

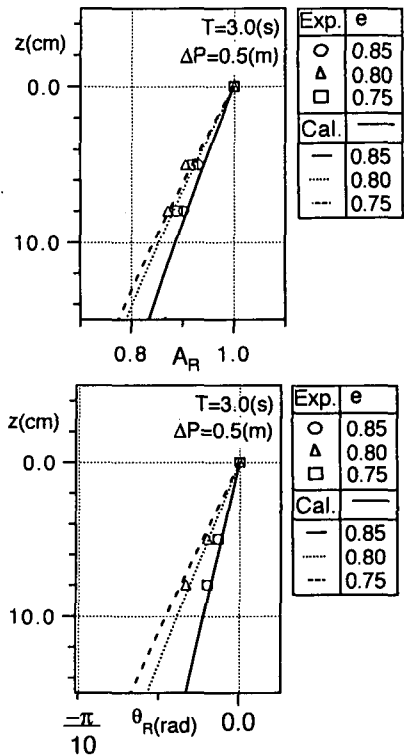


図-4 間隙比の影響

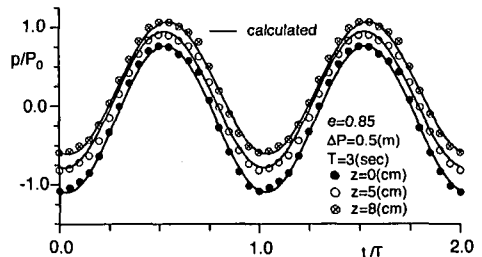


図-5 間隙水圧変動の時系列

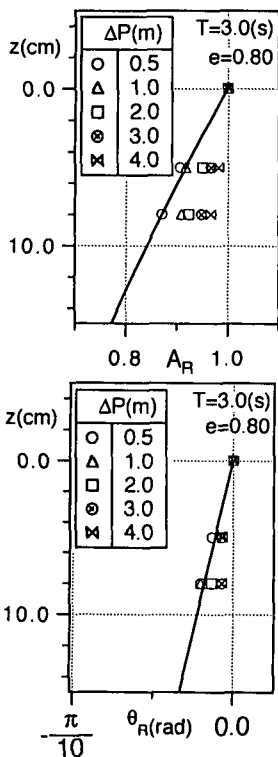


図-6 解析解からの乖離

条件の全範囲で実験結果と良好な対応を示すことが明らかとなった。このことは、水圧変動振幅が小さい領域では地盤骨格の変形はそれほど大きくないので、解析解の導出の前提条件の一つである連続体としての地盤の挙動が満足されているためと考えられる。

(2) 水圧変動全振幅が大きい場合

図-6は、間隙比 $e=0.8$ 、地盤表面の水圧変動周期 $T=3.0$ s に設定し、地盤表面の変動水圧全振幅 Δp を変化させた場合の地盤内間隙水圧分布の実験結果を解析解と比較したものである。解析解は地盤表面の作用水圧に関して線形であるので、間隙水圧振幅 A_R の分布は地盤表面の変動水圧全振幅 Δp に依存せず、全ての変動水圧全振幅に対して同一の曲線となる。先にも述べたように、変動水圧全振幅が小さい $\Delta p=0.5$ m の場合には、実験と解析解の一致は良好であるが、 $\Delta p=1.0$ m になると $z=8.0$ cm での乖離が出現し、さらに水圧変動振幅が増加して $\Delta p=2.0$ m になると、 $z=8.0$ cm でだけでなく $z=5.0$ cm でも乖離が顕在化する。乖離の程度は、水圧変動全振幅 Δp の増加とともに増大し、 $\Delta p=4.0$ m になると測点の範囲内での水圧変動振幅の分布はきわめて急峻となり、一様化が顕著となっている。

図-7は、水圧変動周期が異なる場合も含めて、間隙比 $e=0.8$ の場合の間隙水圧振幅 A_R の実験結果と解析解

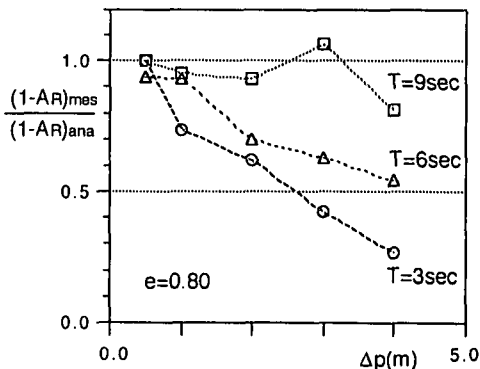


図-7 水圧変動振幅と乖離度

の乖離の程度をまとめたものである。この図では、縦軸が1.0に近づくほど実験結果と解析解の乖離が小さく、両者の一致が良好であることとなる。何れの周期においても右下がりの傾向が見られ、図-6からも明らかなように水圧変動振幅の増加が実験結果と解析解の乖離を増大させることが理解できる。解析解からの乖離度は、水圧変動振幅の増加とともに増加するが、その増加率は、本実験で最も短周期の条件である $T=3.0$ s の場合に最大で、周期の増加に伴って乖離度の増加率は小さくなる。

5. 考 察

地盤内間隙水圧の応答特性は、地盤材料や構造骨格の構成に依存するが、本実験では砂粒径は一定であり、乖離度の検討では間隙比一定の下に実験を進めているため、地盤内に形成される間隙水圧分布による有効応力の変化により構造骨格が自体が劇的に変化しない範囲では、地盤内間隙水圧の応答特性には余り変化がないものと期待される。この場合、水圧変動振幅が大きいくほど、また、非定常性が強い（すなわち、変動周期が短い）ほど形成される間隙水圧分布の勾配が大きくなり、その結果として砂粒子に大きな揚力が作用して砂粒子間の有効応力が減少し、地盤の液状化は生じやすくなる。この液状化により、土粒子間の結合が切断されると、地盤の構造骨格に劇的な変化が生じて、解析解の導出の前提である連続体近似が成立しなくなる。実験結果と解析解の乖離はこのことと関係すると考えられる。

なお、このことは水圧減少時に生じ、土粒子間の結合が切断されると水圧減少が容易に下方に伝達されて減少量が増加する。一方、水圧増加時は、土粒子が再結合するかまたは一度切断されると水圧増加時も切断されたままなのかは、現時点では不明である。いずれにしても、振幅の減衰と位相遅れは緩和されることになる。

6. おわりに

本研究では、高波圧を受ける地盤内の間隙水圧分布の特性を明らかにするため、高い水圧変動の下での地盤内間隙水圧の応答時系列についての実験を実施し、波圧の増加に伴う地盤内間隙水圧の分布特性の変化に関して系統的に検討した。

地盤表面に作用する水圧変動の振幅が比較的小さい場合には、解析解は実験と良好な一致を示すが、水圧変動振幅の増加にともなって実験値は解析解から乖離し、高い水圧変動の作用下では、地盤表面付近の比較的浅い領域における間隙水圧分布の一樣化が生じていることが確認された。これは、間隙水圧分布に起因する付加的な揚力の作用による地盤構造骨格の有効応力の減少とそれに付随する液状化の発生を裏付ける結果である。今後は、さらに実験を継続して詳細な分布を広い範囲にわたって調

べるとともに、解析解の適用不可能な範囲での解析方法についても検討したい。

参 考 文 献

- 酒井哲郎・間瀬 肇・山本哲也 (1993): 水圧変動による地盤表面付近の間隙水圧変動, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 586-590.
- 酒井哲郎・後藤仁志・森川 淳・柏村真直 (1994): 海底面の水圧変動に対する地盤内間隙水圧の応答特性に関する基礎的実験, 水工学論文集, 第 38 巻, pp. 511-516.
- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 運輸省港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 3 号, pp. 125-180.
- 名合宏之 (1982): 変動水圧による砂層の液状化に関する研究, 第 26 回水理講演会論文集, pp. 589-594.
- Mei, C. C. and Foda, M. A. (1981): Wave-induced responses in a fluid-filled pore-elastic solid with a free surface—a boundary layer theory, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol. 66, pp. 597-631.