

変動水圧作用下における構造物周辺地盤の動的挙動に与える境界の影響

Influence of Boundary Condition on Dynamic Behavior of Sand Bed
around the Structure under Oscillating Water Pressure

岡山大学工学部 正員 名 合 宏 之

岡山大学工学部 正員 前 野 詩 朗

岡山大学大学院 学生員 野 村 泰 弘

1. まえがき

透水性地盤上に変動水圧が作用すると、地盤内に含まれる極く微量（含有率0.3～1.0%）の空気存在により、変動水圧は地盤中を振幅の減衰および位相の遅れを伴いながら伝播する。その結果、ある時間帯では、過剰間隙水圧が発生し有効応力が減少する。筆者らは従来より、このような現象をとくに構造物との破壊問題との関連において、鉛直1次元および鉛直2次元砂層モデルを用いて理論的かつ実験的に解析してきた^{1), 2), 3)}。前報では、構造物周辺地盤における応力分布状態の解析を行ったが、ここでは、構造物および周辺地盤をとりまく境界のある条件のもとで固定していた^{2), 3)}。本報告は、この境界の影響を数値実験的に検討しようとするものである。

2. 鉛直2次元砂層モデルの理論解析法

2.1 鉛直2次元砂層モデル

鉛直2次元砂層としては、多くの砂地盤上の水理構造物周辺の形状を単純化した図-1に示されるような形状を対象としている。すなわち、厚さDの砂地盤上に斜線に示される根入れ深さdの構造物が設置されている状態である。また、構造物のない側の砂層面上に変動水圧 $\rho_w g h_s$ を作用させている。ここでは、境界幅 $(B-b)$ 、砂層厚Dおよび根入れ深さdを変化させて境界の影響を検討する。

2.2 基礎式

上述のモデルに対して、理論解析を行うための基礎式は、弾性砂層内の非定常浸透流問題と同様な手法^{4), 5)}で導かれる。

すなわち、砂層の構造骨格、水の密度および空隙率は時間的に変化するものとしている。また、空隙は水およびわずかの空気

により占められており、空隙率 λ は水および空気の含有率 λ_w および λ_a の和によって表わされるものとする。水の流動がDarcyの法則に従い、気泡の体積がBoyleの法則に従うものとすれば、砂層内の間隙水圧および応力分布を解析するための基礎式は次式のように表わされる⁶⁾。

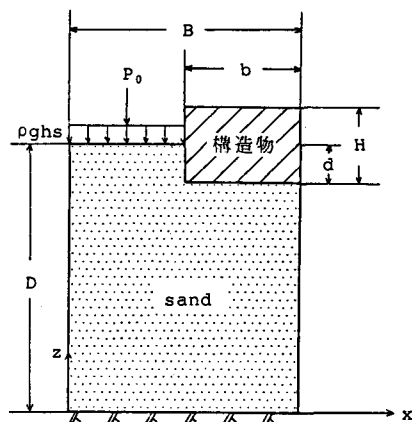


図-1 解析で用いる鉛直2次元砂層

$$G \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho_w g \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$G \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho_w g \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1)$$

$$\rho_w g \left(\beta \lambda_w + \frac{\lambda_a}{P_0 + \rho_w g h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right)$$

ここに、 β : 水の圧縮率、 ρ_w : 水の密度、 g : 重力加速度、 P_0 : 大気圧、 h : 間隙水圧水頭、 u_x, u_z : x, z 方向の変位、 k : 透水係数、 G : セン断弾性係数、 ν : ポアッソン比である。

2.3 計算方法および計算条件

具体的な計算は重みつき残差法の一つであるガラーキン法による有限要素解析を用いて行った。また、砂層内の応力状態を評価する方法として、基礎式より求められる水平および鉛直方向の変位 u_x および u_z を用いて、次式で示される応力-ひずみの関係より各応力を求め、図-2に示されるモールの応力円より砂層内の応力状態を検討した。

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 2G \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \\ \sigma_z &= 2G \left[\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \\ \tau_{zx} &= G \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)\end{aligned}\quad (2)$$

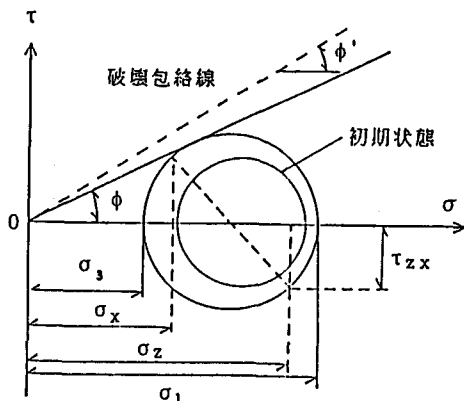


図-2 モールの応力円

すなわち、原点とモールの応力円の接線が σ 軸となす角度（以下応力角と呼ぶ）と砂の内部摩擦角 ϕ' （ここでは $\phi' = 45^\circ$ としている）との間に式（3）が成り立つ場合が破壊状態に達したものとしている。

$$\sin \phi \geq \sin \phi' \quad (\sin \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}) \quad (3)$$

ここに、 σ_1, σ_3 は主応力で次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{4} + \tau_{zx}^2} \\ \sigma_3 &= \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{4} + \tau_{zx}^2}\end{aligned}\quad (4)$$

計算は表1に示される Run 1 から Run 10 について行った。Run 1 を基本モデルとして、Run 2 から Run 4 までは変動水圧が作用する砂層面幅 (B-b) を変化させた場合であり、Run 5 から Run 8 は砂層厚 D を変化させた場合である。また、Run 9 および Run 10 は構造物の根入れ深さ d を変化させた場合である。基礎式に含まれる諸定数は従来の実験結果をも考慮し、つぎのような値を採用している。

$$\begin{aligned}\lambda_a &= 0.003, \quad \lambda_w = 0.4, \quad k = 0.015 \text{ cm/sec}, \quad \nu = 0.48, \\ \beta &= 43.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{kg} (44.6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}), \\ G &= 3.49 \times 10^7 \text{ kg/m}^2 (3.42 \times 10^8 \text{ N/m}^2)\end{aligned}$$

なお、図-1に示される構造物 ($b=0.3\text{m}, H=0.2\text{m}$) には自重があるものとしており、その自重としては比重 2.65 の構造物を想定している。

実際の数値計算においては、構造物および砂の自重による初期応力状態を求めたのち、この状態を初期状態として数値計算を開始している。

2.4 境界条件

モデルの境界は砂層表面以外はすべて不浸透境界としており、以下のような境界条件のもとで解析される。

- 1) ($0 \leq x \leq B-b, z=D$) において $h=h_s(t)=h_0+a_0 \sin 2\pi f t$
- 2) ($0 \leq x \leq B, z=0$) および ($B-b \leq x \leq B, z=D-d$) において $\partial h / \partial z = 0$

表-1 計算条件

Run	B/b	D/d	d/b
1	2	8	0.33
2	3	〃	〃
3	4	〃	〃
4	5	〃	〃
5	2	4	〃
6	〃	6	〃
7	〃	10	〃
8	〃	12	〃
9	〃	8	0.50
10	〃	〃	0.67

($0 \leq x \leq B, z=0$) において $u_z=0$

3) ($x=0, 0 \leq z \leq D$) , ($x=B, 0 \leq z \leq D-d$) および ($x=B-b, D-d \leq z \leq D$) において $\partial h / \partial x=0$

($x=0, 0 \leq z \leq D$) , ($x=B, 0 \leq z \leq D-d$) において $u_x=0$

ここに, h_0 : 変動水圧水頭の平均値, f : 周波数である。計算にあたっては, $h_0=1.0\text{m}$, $a_0=0.3\text{m}$, $f=1.0\text{Hz}$ とした(図-3参照)

3. 結果および考察

図-4は, 基本モデル Run 1 について, 変動間隙水圧水頭 h' (実線) および応力角 ϕ (破線) の分布を水圧上昇時と水圧下降時とを対比させて示したものである。図中の斜線は応力角 ϕ が砂の内部摩擦角 $\phi' = 45^\circ$ を越える領域であり, ここでは破壊領域と呼ぶことにする。この図より等ポテンシャル線を見ると, 水圧上昇時には構造物周辺の流れは構造物下部へ流れこむようであり, 水圧下降時には, ほぼ逆向きの流れとなっていることがわかる。ここで, 地盤の強度の面からみて問題となるのは水圧下降時である。すなわち, 構造物下部から砂層表面に向かう流れによる浸透圧のため, 構造物周辺の砂層のせん断抵抗力が低下するということである。このことは応力角の分布をみても明らかのように, 水圧上昇時には破壊領域はみられないが, 水圧下降時において構造物周辺において破壊領域が発生していることからわかる。このように, 構造物の安定性からみて危険な状態が水圧下降時に発生することを考慮して, 以下の考察においては水圧下降時における間隙水圧および応力角分布について検討する。

3. 1 側方境界の影響

ここでは, Run 1 から Run 4 を用いて構造物前面から側方不浸透壁までの距離 ($B-b$) の変化が地盤内応力に与える影響について検討する。

図-5-(a), (b), (c) はそれぞれ Run 2 から Run 4 の場合の水圧下降時における変動間隙水圧および応力角分布を示している。これらの図と図-4-(b) を比較すると, まず, 間隙水圧に関してみると, 構造物周辺ではいずれの場合もほとんど変化しないようである。 B/b が大きくなるにつれて不浸透境界壁付近での等ポテンシャル線は若干ではあるが水平に漸近する傾向がある。つぎに, 応力角分布をみると B/b が大きくなるにつれて全体的に応力角の値が大きくなる傾向がみられる。また, Run 3 および Run 4 における不浸透境界壁付近の応力角分布をみると Run 1 および Run 2 の場合と異なりほぼ水平に分布していることがわかる。このことは, 破壊領域の面からみてもほぼ同様なことがいえる。以上の結果より, B/b の値

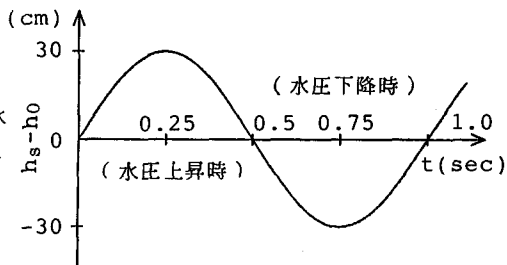
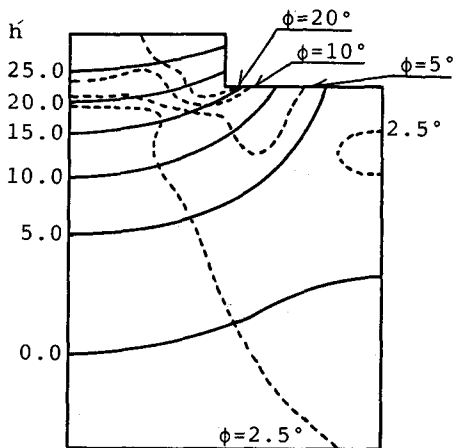
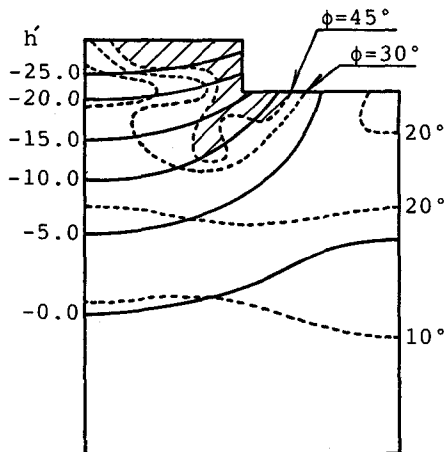


図-3 砂層面に作用する変動水圧水頭



(a) 水圧上昇時 ($t=0.25\text{sec}$)



(b) 水圧下降時 ($t=0.75\text{sec}$)

図-4 変動間隙水圧および応力角分布図
Run 1 ($B/b=2, D/d=8, d/b=0.33$)

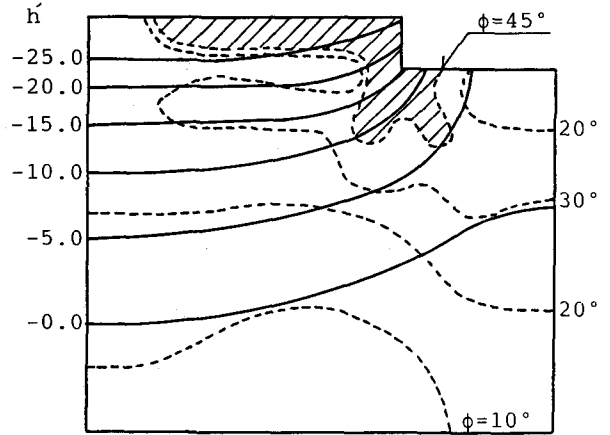
4ないし5以上とすれば不浸透境界壁の影響がほとんどなくなることがわかる。すなわち、無限遠に境界があるものとして解析する場合と同様な結果が得られるものと考えてよい。

3. 2 砂層厚の影響

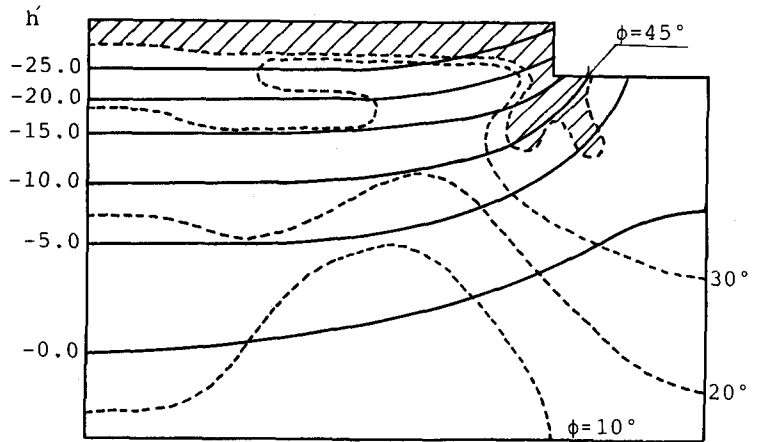
ここでは、Run 1およびRun 5からRun 8を比較することにより砂層厚さが地盤内応力に与える影響について検討を行う。

図-6-(a)から(d)はそれぞれRun 5からRun 8における変動間隙水圧および応力角を示したものである。これらの図と図-4-(b)を比較すれば以下のことがわかる。間隙水圧分布に関してみると、Run 1, Run 7

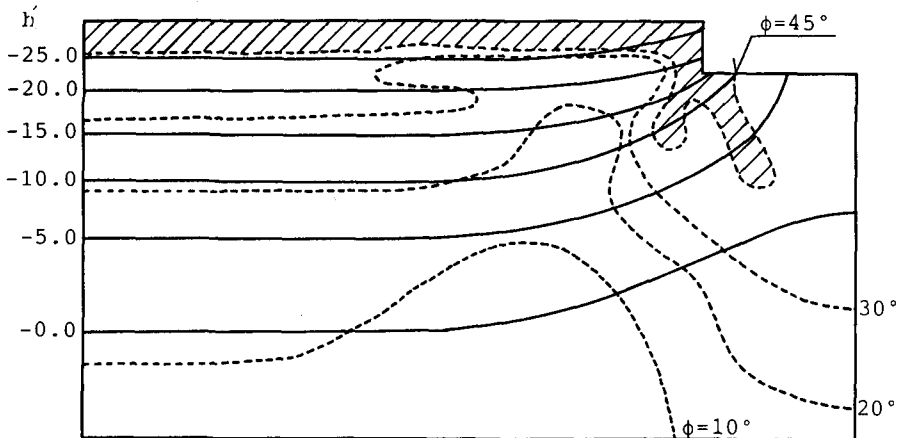
およびRun 8はほぼ一致しているが、Run 5およびRun 6ではかなり異なった分布を呈する。とくに、Run 5の場合構造物下部における等ポテンシャル線はほぼ鉛直に近く砂層内の流れは水平方向に近づくことがわかる。つぎに、応力角分布についてみると、Run 7およびRun 8の場合は D/d の値が変化してもほぼ同様な分布を示すが、Run 1, Run 5およびRun 6では D/d が変化すると応力角の



(a) Run 2, $B/b=3$



(b) Run 3, $B/b=4$



(c) Run 4, $B/b=5$

図-5 変動間隙水圧および応力角分布図(水圧下降時)

分布形状が変化することがわかる。このことより、砂層厚の変化に関しては、 D/d の値を10以上とすれば下方境界の影響は無視できると考えてよい。

3.3 根入れ深さ d の影響

ここでは、Run 1、Run 9およびRun 10の結果を用いて構造物の根入れ深さ d の変化が砂地盤内応力に与える影響について検討を行う。

図-7-(a)、(b)はRun 9およびRun 10における変動間隙水圧および応力角を示したものである。これらの図と図-4-(b)より以下のことがわかる。変動間隙水圧に関しては、根入れ深さを増すことにより構造物下部に達するまでの振幅の減衰が大きくなることわかる。つぎに、応力角に関してみると、根入れ深さが増加するほど構造物下部における破壊領域は減少してくるが、構造物前面における破壊領域は増加することがわかる。以上のことより、根入れ深さを増加させることにより、構造物直下部における地盤を安定させることができるが、構造物前面部分ではむしろ逆の傾向が現われてくるといえる。

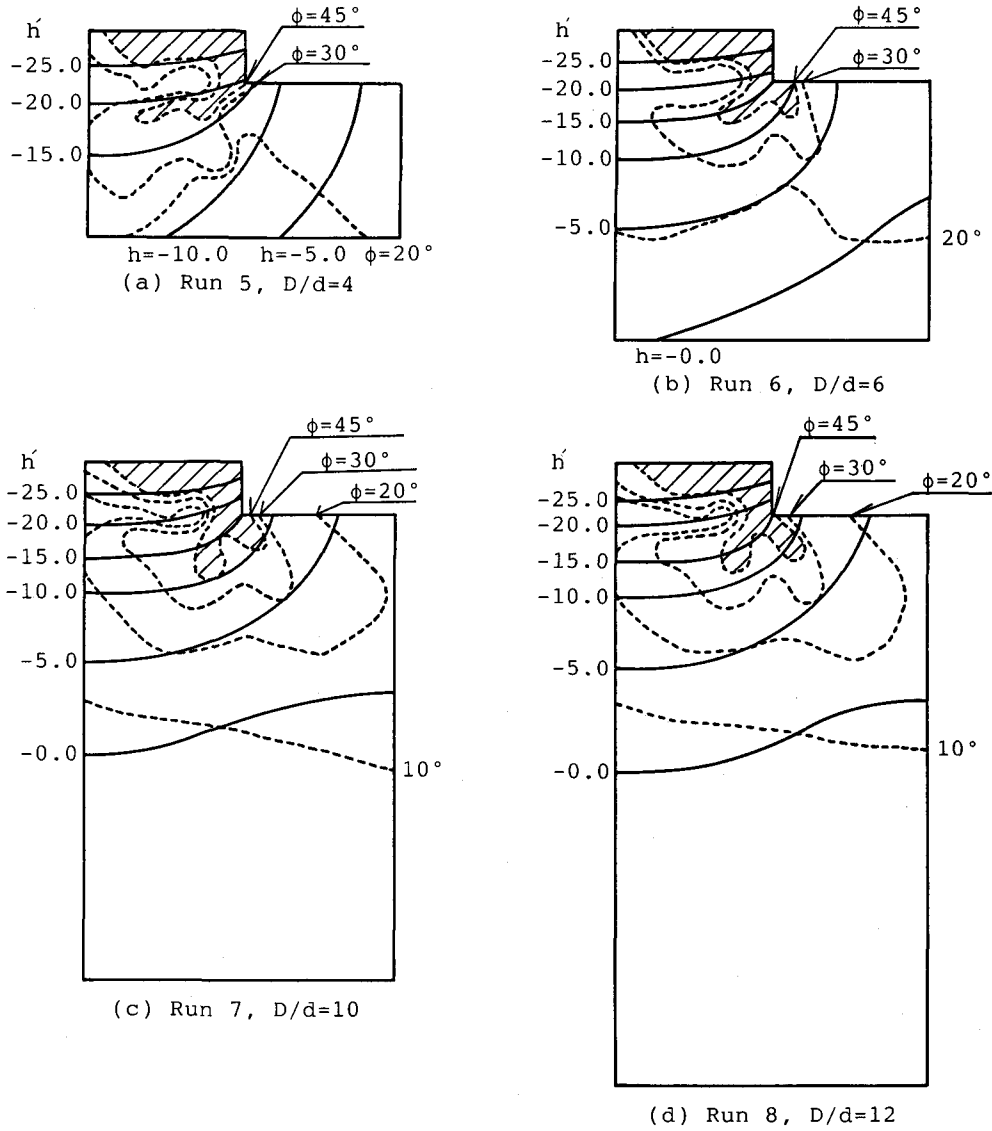
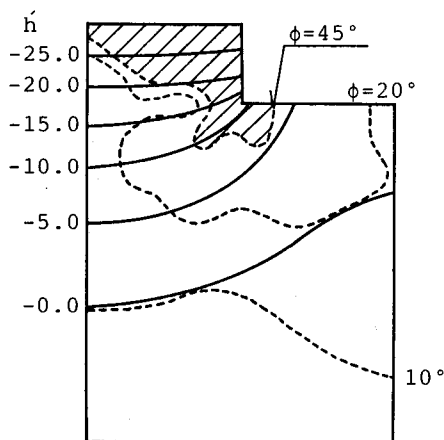
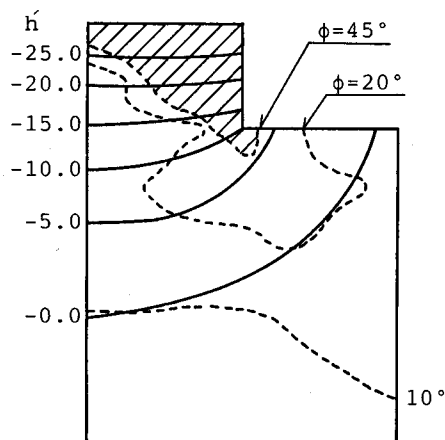


図-6 変動間隙水圧および応力角分布図（水圧下降時）



(a) Run 9, $d/b=0.50$



(b) Run 10, $d/b=0.67$

図-7 変動間隙水圧および応力角分布図(水圧下降時)

5. 結語

本研究では、鉛直2次元砂層モデルを用いて、変動水圧が作用した場合の構造物周辺砂地盤内の応力状態に及ぼす周辺境界の影響について数値実験的な検討を行った。その結果以下のようなことが明らかになった。

- (1) 側方境界までの距離が構造物幅の4～5倍以上になるとその影響はほとんど無視できるようである。
- (2) 砂層厚が根入れ深さの約10倍程度以上になるとその影響は無視できるほど小さくなる。
- (3) 構造物の根入れ深さを大きくすると構造物直下部における危険領域は減少するが構造物前面の地盤はむしろ不安定になる傾向を示す。

最後に、本研究は昭和60年度文部省科学研究費自然災害特別研究(1)「変動水圧による砂地盤の強度低下と構造物の破壊に関する研究」の補助を受けて行われたことを付記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 名合宏之: 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, 1982.
- 2) 名合宏之・前野詩朗・阿久根徹: 変動水圧作用下における構造物周辺地盤内の水圧および有効応力分布特性, 第29回水理講演会論文集, 1985.
- 3) 名合宏之・前野詩朗: 変動水圧作用下における構造物周辺地盤内の応力分布特性, 第32回海岸工学講演会論文集, 1985.
- 4) Biot, M. A.: General Theory of Three-Dimensional Consolidation, J. Appl. Phys. 12, pp. 155-164, 1941.
- 5) De Wiest, R. J. M.: Flow Through Porous Media, Acad. Press, New York and London, pp. 337-344, 1969.
- 6) H. Nagō and S. Maeno: Pore Water Pressure in Sand Bed under Oscillating Water Pressure, Memoirs School of Eng., Okayama Univ. Vol. 17, No. 1, 1984.