

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

Pore Water Pressure and Effective Stress in 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 阿 久 根 徹

1. まえがき

洪水時や波浪時においては、水理構造物周辺には強度の水面変動が発生しており、構造物の周辺地盤には絶えず変動水圧が作用している。この変動水圧は構造物周辺地盤の洗掘、土砂の吸い出しあるいは構造物の沈下などといった水理構造物の損壊現象と密接な関係があると考えられる。このような観点から、著者らは従来より、変動水圧が砂地盤の力学特性に及ぼす影響について、鉛直1次元砂層モデルを用いて変動水圧作用下における砂層内の間隙水圧・有効応力の解析を行い、変動水圧の影響により地盤内の間隙水圧が時間的に変化し、砂地盤が脆弱化するのみならず、ある条件のもとでは液状化することなどを明らかにしてきた¹⁾。また、砂層の透水係数が大きくなると液状化は起り難くなるという解析結果を利用して、液状化を防止するための一つの方法として、透水係数が小さく液状化が発生しやすい砂層の上部を透水係数の大きな砂層に置換する方法を提案し、その液状化防止効果について検討し、その方法が液状化防止に効果があることを示している²⁾。以上のような成果を踏まえ、より実際的な問題へのアプローチとして、砂地盤上に構造物を設置した場合の構造物周辺部における動的挙動を2次元的に解明することを目的として、構造物周辺地盤内の間隙水圧分布および有効応力特性について検討したものである。

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する。すなわち、厚さ D の砂地盤内に、斜線で示される厚さ d の構造物が設置されている状態およびその構造物の先端部に長さ l の矢板を取り付けた状態を対象とする。変動水圧 ρgh_s は構造物前面の砂層面上に作用するものとする。砂層内の水および砂の運動は弾性砂層内の非定常浸透流問題と同様な手法^{3), 4)}で解析される。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する。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。水の流動は Darcy の法則に従い、気泡の体積は Boyle の法則に従うものとする。なお、砂層上面以外の境界はすべて固定境界面とする。

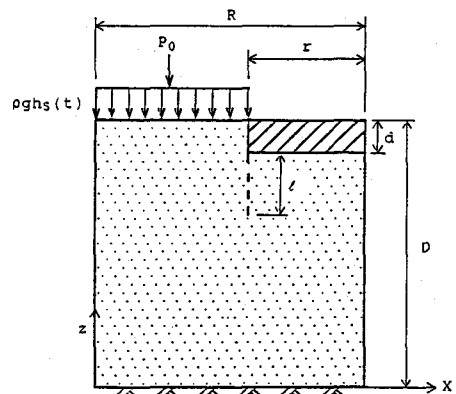


図-1 解析で用いる鉛直2次元砂層

2. 2 基礎式

上述のモデルに対して、砂層内水圧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⁵⁾。

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

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

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

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 方向の砂層の変位、 k ：透水係数、 G ：せん断弾性係数、 ν ：ポアソン比である。

2.3 境界条件

上述の基礎式は以下の境界条件のもとで解析される。

矢板がない場合

$$(0 \leq x \leq R-r, z=D) \text{ において } h=h_s(t),$$

$$(0 \leq x \leq R, z=0) \text{ および } (R-r \leq x \leq R, z=D-d) \text{ において } \partial h / \partial z = 0, u_z = 0,$$

$$(x=0, 0 \leq z \leq D), (x=R, 0 \leq z \leq D-d) \text{ および } (x=R-r, D-d \leq z \leq D) \text{ において}$$

$$\partial h / \partial x = 0, u_x = 0$$

矢板がある場合

上述の条件のほかに

$$(x=R-r, D-d \leq z \leq D-d) \text{ において } \partial h / \partial x = 0, u_x = 0$$

が付け加わる。

2.4 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

$$\sigma_x = 2G \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right]$$

$$\sigma_z = 2G \left[\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \quad (2)$$

$$\tau_{zx} = G \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)$$

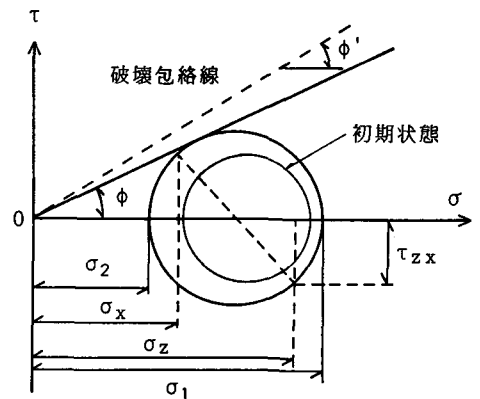


図-2 モールの応力円

してあるモールの応力円より砂層内の応力状態を検討した。

すなわち、破壊時における状態として次式が成り立つ時としている。

$$\sin \phi' - \sin \phi \leq 0 \quad (\sin \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}) \quad (3)$$

ここに、 ϕ ：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）、 ϕ' ：内部摩擦角、 σ_1 、 σ_2 ：主応力で次式で与えられる。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{4} + \tau_{zx}^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{4} + \tau_{zx}^2} \quad (4)$$

計算条件として、砂層面上に作用する変動水圧は実験によって得られる水中変動水圧を用いている。また、基礎式に含まれる諸定数は以下に述べる実験条件をも考慮し、つぎのような値を採用している。

$$\lambda_a=0.003, \quad \lambda_w=0.4, \quad k=0.015\text{cm/sec}$$

$$\beta=43.8 \times 10^{-10}\text{m}^2/\text{kg} (44.6 \times 10^{-11}\text{m}^2/\text{N})$$

$$G=1.69 \times 10^6\text{kg/m} (1.65 \times 10^7\text{N/m}^2)$$

$$\nu=0.48$$

なお、図-3には、有限要素解析で用いる要素分割の一例を示している。

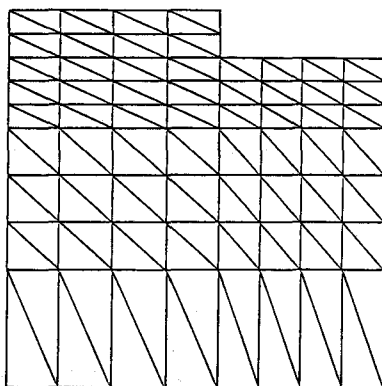


図-3 要素分割の例 (case 1)

3. 実験および実験方法

実験には、図-4に示されるような鉛直2次元砂層模型を用いた。模型の奥行は40cmである。砂層構成材料としては、高飽和状態の砂試料(豊浦標準砂 $d_{50} \approx 0.25\text{mm}$)を用いている。構造物前面の砂層面上に約110cmの水を張り、水面上に周期的変動空気圧を作用させることにより砂層面上に変動水圧を作用させている。その変動圧振幅は水頭にして約40cmであり、周波数は約0.9Hzである。実験は、表-1に示されるcase1からcase3の条件のもとで行った。

case1およびcase2は、矢板を設置しない構造物について構造物の根入れ深さ d を10cmおよび20cmと変化させた場合であり、case3はcase1の状態に、図に示されるような長さ10cmの矢板を取り付けた場合である。なお、水中および砂層中の圧力は図中の○印の位置において拡散型半導体圧力変換器により側方から検出している。また、図中の○印の点の横に示されている数字は、後で図示してある間隙水圧の時間変化の図等に表わしている測点番号と対応させている。

4. 結果および考察

図-5および図-6は、case1における間隙水圧の時間変化の鉛直方向分布について実験値と理論値を比較したものであり、図-7はcase2における水平方向分布について示したものである。これらの図における h_0 は変動水圧水頭 h_s の平均値である。これらの図より、理論解析結果は実験結果より得られる間隙水圧の変化特性をよく説明していることがわかる。すなわち、砂層中に置かれた構造物の周辺においては、変動水圧は鉛直方向だけでなく水平方向にも振幅の

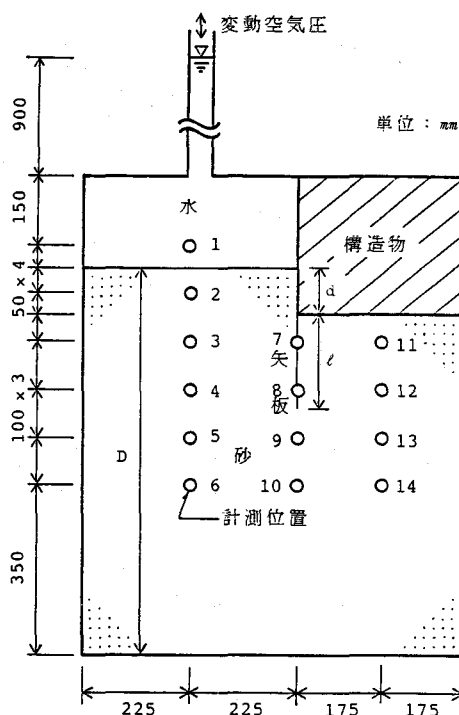


図-4 実験に用いた砂層模型

表-1 実験条件

case	構造物の根入れ深さ $d(\text{cm})$	矢板の長さ $l(\text{cm})$
1	10.0	0.0
2	20.0	0.0
3	10.0	10.0

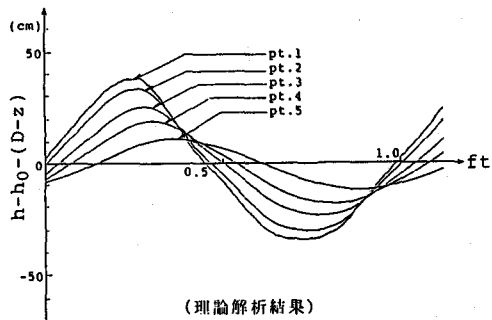
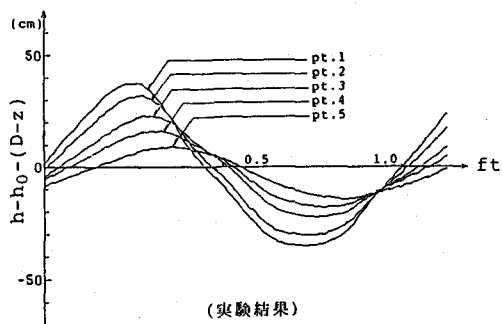


図-5 間隙水圧の時間変化 (case 1, 鉛直方向分布)

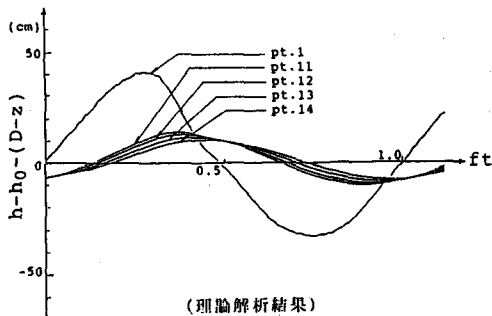
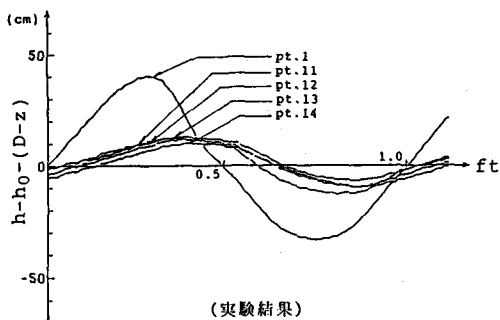


図-6 間隙水圧の時間変化 (case 1, 鉛直方向分布, 構造物下部)

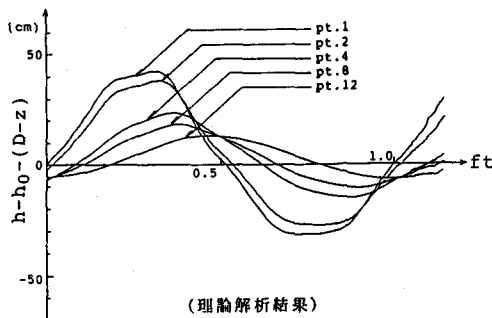
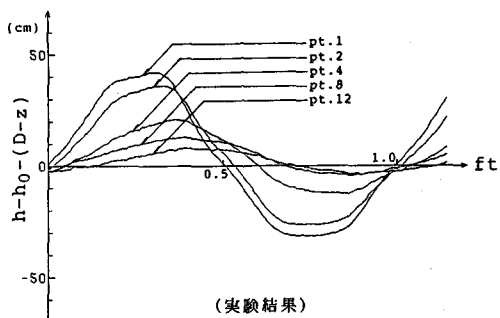


図-7 間隙水圧の時間変化 (case 2, 水平方向分布)

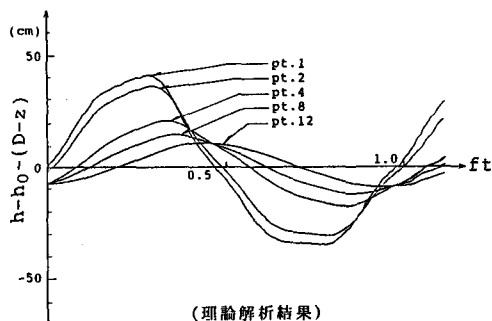
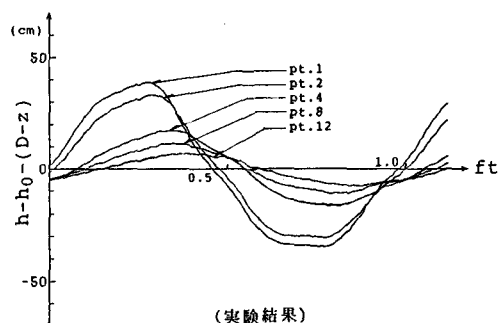


図-8 間隙水圧の時間変化 (case 3, 矢板周辺)

減衰，位相の遅れを伴いながら砂層中に伝播しているのがわかる。とくに，構造物の下部においては，水中変動水圧に比べて変動圧振幅は大きく減衰し，また，位相の遅れも大きくなっている。図-8は，10cmの矢板を構造物前面に設置した場合（case3）について矢板周辺部における間隙水圧の時間変化を示したものである。この図より，矢板を設置した場合も理論解析結果は実験結果をよく説明していることがわかる。ここで，図-7（構造物の根入れ深さ20cm）と図-8（構造物の根入れ深さ10cmで矢板の長さ10cm）は同一測点での間隙水圧の時間変化を示したものであるが，この両図を比較してみると，ほぼ同様な変化特性を示していることがわかる。このことは，case3の場合のように構造物の先端部に矢板を取り付けることは，間隙水圧の変化特性という面からみれば，case2の場合のように構造物全体の根入れ深さを深くすると同様な効果が得られるということがわかる。

図-9から図-14は，case1の場合の水平方向の有効応力 σ_x および鉛直方向の有効応力 σ_z の時間変化を示したものである。それぞれ，初期有効応力 σ_{x0} および σ_{z0} で無次元化している。図-9および図-10の構造物前面での鉛直方向分布より，砂層内深くなるにつれて時間的な変化が小さくなっていることがわかる。また，砂層内深くなるにつれて水平方向の有効応力の時間変化は鉛直方向の有効応力のそれと比較して，変化量が減少しているのがわかる。ところが，図-11および図-12の構造物下部におけるそれぞれの有効応力の時間変化をみると，逆の傾向がみられる。このことは，構造物の下部における有効応力の変化量として，水平方向成分が卓越していることがわかる。つぎに，図-13および図-14は構造物周辺部におけるそれぞれの有効応力の時間変化を示しているが，この場合は両者ともほぼ同様に変化していることがわかる。このことは，構造物周辺部における砂地盤内は，有効応力の面からみると時間的な変化量も大きくて危険な状態に置かれているといえる。

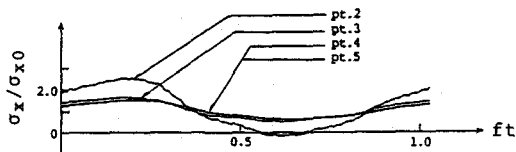


図-9 水平有効応力の時間変化
(case1, 鉛直方向分布)

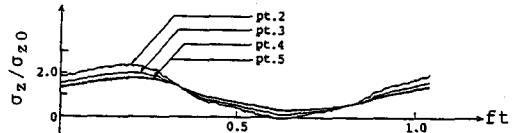


図-10 鉛直有効応力の時間変化
(case1, 鉛直方向分布)

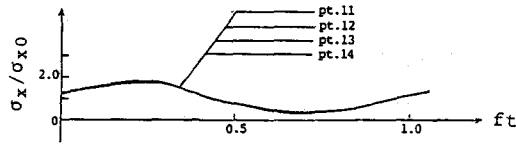


図-11 水平有効応力の時間変化
(case1, 鉛直方向分布, 構造物下部)

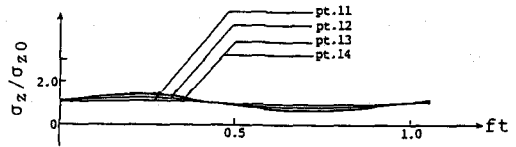


図-12 鉛直有効応力の時間変化
(case1, 鉛直方向分布, 構造物下部)

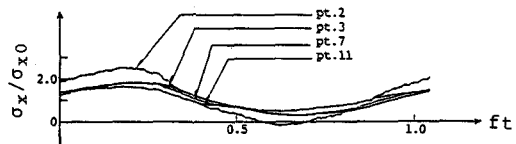


図-13 水平有効応力の時間変化
(case1, 構造物周辺)

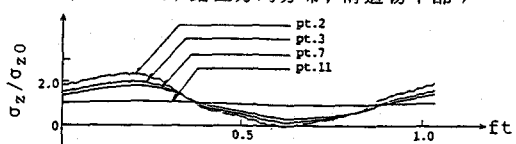


図-14 鉛直有効応力の時間変化
(case1, 構造物周辺)

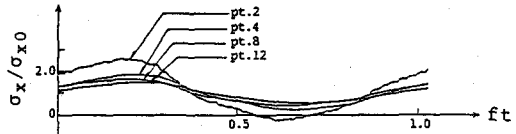


図-15 水平有効応力の時間変化
(case2, 構造物周辺)

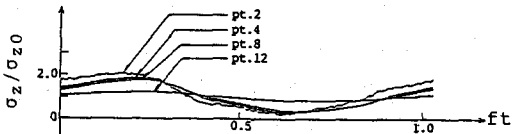


図-16 鉛直有効応力の時間変化
(case2, 構造物周辺)

図-15および図-16はcase2の場合の構造物周辺部における有効応力の時間変化を示したものである。この図中の測点2以外の点の時間変化を図-13および図-14と比較すると、case2の場合の方が変化量が小さくなっているのがわかる。これは構造物の根入れ深さを10cmから20cmにした結果生じたものと考えられる。

図-17から図-19は応力角の時間変化を示したものである。砂の内部摩擦角としては、 $\phi' = 45^\circ$ を用いている。図-17はcase1の場合であり、測点2、7では内部摩擦角を越える状態も発生しており、測点3、11においても応力角の時間的な変化量はかなり大きい。図-18および図-19はcase2およびcase3の場合である。これらの場合は、いずれも測点2における応力角は内部摩擦角を越えている。また、case1の場合よりも時間的にも多くなっている。しかし、構造物周辺の他の測点においては、応力角の時間変化はcase1の場合よりもかなり小さな変化量にとどまっている。

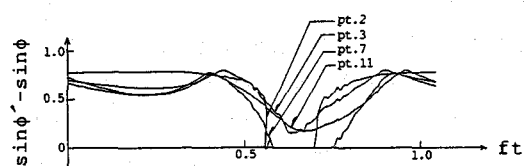


図-17 応力角の時間変化 (case1)

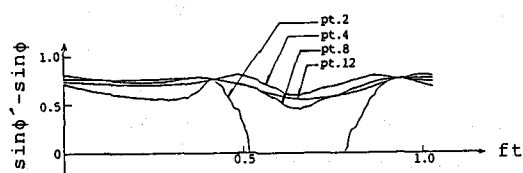


図-18 応力角の時間変化 (case2)

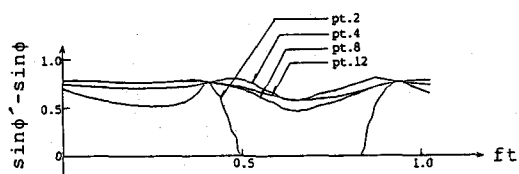


図-19 応力角の時間変化 (case3)

5. 結論

以上述べてきたように、本研究で示した鉛直2次元モデルを用いた理論解析結果は、変動水圧作用下における砂地盤上の構造物周辺の水圧分布特性をよく説明しており、本解析法がほぼ妥当な解を与えることが明らかにされた。また、砂層内の応力分布と間隙水圧分布との関連性はかなり大きいことが示され、砂層内において間隙水圧が時間的に変化することにより、地盤の強度が低下することが明らかにされた。構造物周辺の間隙水圧分布と地盤の動的挙動との関連については本報告では定性的な説明にとどまったが、今後はその定量的評価法の確立に努めるとともに、水理構造物周辺地盤の洗掘、土砂の吸い出しあるいは構造物の沈下などの現象に対する構造物の合理的設計法への応用について検討を進めることが必要である。

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: 安倉俊雄: 変動水圧作用下における砂層液状化に及ぼす置換法の効果, 第27回水理講演会論文集, 1983.
- 3) Biot, M. A.: General Theory of Three-Dimensional Consolidation, J. Appl. Phys. 12, pp. 155-164, 1941.
- 4) De Wiest, R. J. M.: Flow Through Porous Media, Acad. Press, New York and London, pp. 337-344, 1969.
- 5) H. Nagō and S. Maeno: Pore Water Pressure in Sand Bed under Oscillating Water Pressure, Memoirs School Eng., Okayama Univ., Vol. 17, No. 1, 1984.