

変動圧の伝播特性に及ぼす 砂層地盤の間隙率の影響

ATTENUATION AND PHASE DELAY OF DYNAMIC PRESSURE IN SAND ZONE OF VARIOUS POROSITY

重村利幸¹・滝口和男²・林建二郎³・藤間功司⁴

Toshiyuki Shigemura, Kazuo Takiguchi, Kenjiro Hayashi and Koji Fujima

¹正会員 Dr. Eng 防衛大学校教授 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

²学生会員 防衛大学校 理工学研究科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

³正会員 PhD. 防衛大学校助教授 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

⁴正会員 工博 防衛大学校助教授 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Zen et al(1987) has derived a well-known equation on the dynamic behavior of pore water pressure in the study on the mechanism of wave-induced liquefaction and densification in a permeable seabed. As a result, they reveal that pore water pressure attenuates its magnitude and delays its phase during its propagation into permeable seabed and that these phenomena are highly related to the physical properties of seabed such as permeability, porosity and volume compressibility of seabed sand.

This study intends to clarify the effects of porosity on the attenuation and phase delay. A series of model tests reveals that period of the dynamic pressure loaded on the surface of seabed is a controlling factor for both attenuation and phase delay and that a firm power functional relationship exists between the attenuation rate and porosity of seabed sand although a clear effect of the porosity is not found in the case of phase drift.

Key Words : dynamic porewater pressure, attenuation, phase delay, sand zone, porosity

1. はじめに

1970年代の後半に入り、波によって海底地盤内に誘起される間隙水圧の変化と、それが海底地盤の不安定化に及ぼす影響について盛んに研究が行われてきた。

善ら(1987)¹⁾は海底地盤の波浪による液状化および高密度化現象のメカニズムを研究し、波圧の伝播によって海底地盤内に誘起される変動間隙水圧の基礎方程式(鉛直方向一次元)として以下に示す(1-1)式を誘導した。

$$C_v \cdot \frac{\partial^2 p_m}{\partial z^2} = \alpha \cdot \frac{\partial p_m}{\partial t} - \frac{\partial p_b}{\partial t} \quad (1-1)$$

ここに C_v 及び α は、次式で表される係数

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v}, \quad \alpha = 1 + \frac{n \cdot m_w}{m_v} \quad (1-2)$$

であり、式中の各記号は、それぞれ以下の物理量を示す。

k : 地盤の透水係数, γ_w : 水の単位体積重量, m_v : 粒子骨

格の体積圧縮係数, m_w : 間隙水のみかけの圧縮率, z : 砂層表面を原点とする鉛直下向き座標, p_m : 深さ z における変動間隙水圧, p_b : 砂層表面に働く変動圧, n : 地盤の間隙率, t : 時間. 善らは、さらに砂層厚さ l や波圧の周期 T を取り入れて上式を無次元化して無次元変動間隙水圧の数値解を求め、実験値と比較した. その結果、数値解は彼らが命名した排水係数 $c (= C_v \cdot T / l^2)$ と伝達係数 α の値を適切に選ぶことにより実測値をかなりうまく再現できることを明らかにした。

又、酒井ら(1993)²⁾は漂砂や洗掘現象に与える海底面表層近傍の変動間隙水圧を調べるため、善らの誘導した無次元式を変換して砂層底面での境界条件を考慮しないで解いた近似解を与える(1-3)式を誘導した。

$$\frac{p_m}{P_b} = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \frac{z}{l}\right) \cdot \cos\left(-\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \frac{z}{l} + 2\pi \frac{t}{T}\right) + \frac{1}{\alpha} \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (1-3)$$

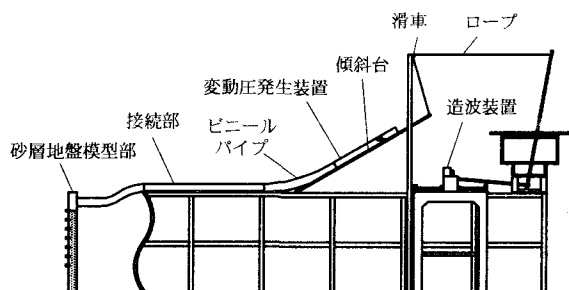


図-1(a) 実験装置図

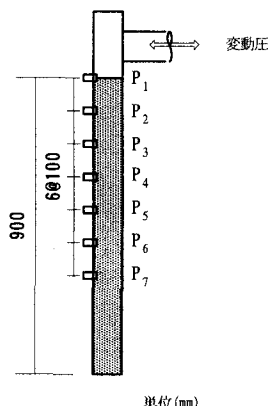


図-1(b) 間隙水圧計配置図

表-1 実験に使用した砂の密度、透水係数及び間隙率

s	2.59
k (cm/s)	3.93×10^{-2}
n (%)	38.6 36.1 33.6 31.0

表-2 実験に使用した変動圧の諸元

周期(s)	1.0s から 4.0s まで 0.2s 刻み	16 種類
変動圧(kPa)	0.79 1.41 2.64	3 種類

路の上部を敷板で塞ぎ、その上に図-1(a)に示すように配置した。左方の図は、鉛直一次元の砂層地盤の模型である。これは、下端を閉じた外径 8.9cm、長さ 1.0m のアクリルパイプに、気乾状態の福島産の珪砂 5 号 ($d_{50}=0.3\text{mm}$, $s=2.59$) を 0.9m 流し込んで砂層地盤模型としたものである。一方、右方の図は、ピストン型造波機が創り出す水平振動をロープと滑車を介して鉛直振動に変換し、変動圧を発生させる装置である。すなわち、水平振動する造波板と振り子状に振動するバーの下端をヒンジ結合させ、バーの先端にロープを結び、滑車を介して敷板上に支点を持つ長さ 2.0m の傾斜台の上端に結んである。同台上には強化ビニールパイプの一部分とそれに繋がる長さ 1.0m のアクリルパイプを載せて固定した。中央部の図は同じアクリルパイプで作製した長さ 2.0m の接続部であり、その先には長さ 1.0m の可撓性の半透明強化ビニールパイプを介して、図のように砂層模型の頂部に連結してある。

砂層地盤模型に関しては、気泡の残留を防ぐため水を張ったアクリルパイプの中に気乾状態の砂を約 1cm づつ流し込み、パイプに振動を与えながら深さ 90cm のものを作成した。初期の状態は比較的ゆるい状態である。このときの間隙率、すなわち、初期状態の間隙率は、砂の乾燥重量、砂の密度、地盤模型の容積を計測することにより定めた。次いで砂層地盤模型全体に振動を与えることによって砂層地盤を締め固め、これによって減少した砂層地盤模型の容積を測定することによって、各締め固め状態での間隙率 n の値を定めた。この実験で用いた砂層地盤模型の間隙率は表-1 に示す 4 種類であり、表中の 38.6% が初期間隙率の値である。

間隙水圧計の配置は、図-1(b) に示すとおり砂層地盤表面に P_1 を設置し、以後、鉛直方向に 10cm 間隔で 7 個設置した。間隙水圧計は、外径 20mm、長さ 40mm で定格負荷が 200gf/cm^2 (19,800Pa) の低容量型圧力変換器を用い、それぞれダイナミックアンプを介してコンピュータに接続した。実験は、傾斜台の初期傾斜角を 40 度に設定して砂層地盤表面に 110cm の初期水頭をかけた後、表-2 に示す 48 種類の変動圧を作用させて行い、各測点で変動間隙水圧を 40 秒間測定した。これらのデータはサンプリング間隔を 10ms とし、4000 個のデータに変換した。

(1-3) 式には変動圧の伝播に与える諸因子の影響を関数形で示されており、変動間隙水圧の減衰や位相遅れに与える c 及び α の影響を明瞭に理解することが可能となった。酒井らは k/m_v の値が相対密度が変わっても、ほぼ一定値を取るという善ら (1987) の成果を参考にして c の値を定め、近似解が実測値に最もよく符合する α の値を定めている。その結果 α については善らより大きな値を定めている。同様の事実、山下ら (1997) の研究でも確認されている。しかしながら、善ら (1987) も指摘しているとおり、 c や α には砂層地盤や間隙水の物理特性、変動圧を誘起する波浪特性、ならびに地盤の幾何学的特性が複雑に取り込まれており、これらの物理量が変動間隙水圧の減衰や位相遅れにどのように寄与しているのか見えにくい。そこで本研究では変動圧の伝播特性に影響を与える諸因子のうち、比較的把握が容易な砂層地盤の間隙率 n と変動圧の周期 T に限定して、これらの因子が変動間隙水圧の鉛直一次元方向の伝播特性、すなわち (1) 減衰、(2) 位相遅れにどのように寄与するかを実験的に調べることにした。

2. 実験装置及び方法

実験装置は、ピストン型造波機を備えた二次元造波水

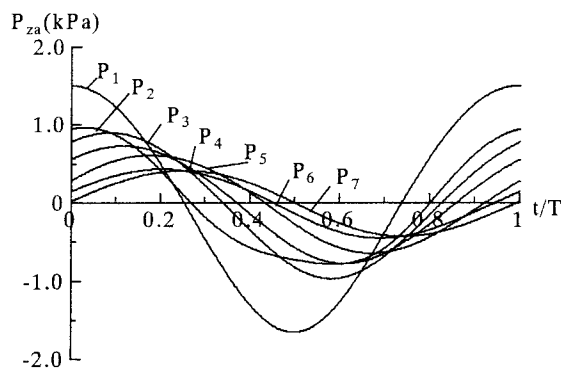


図-2 変動間隙水圧の記録例 (T=4.0s)

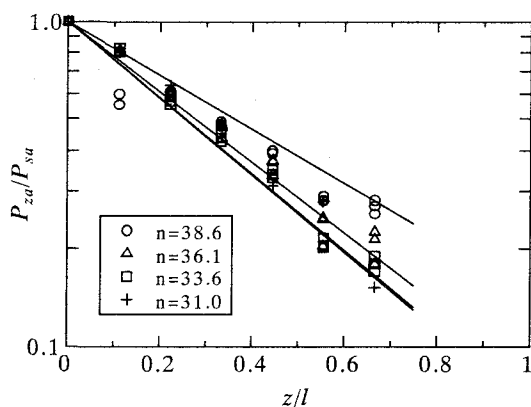


図-4 砂層内を伝播する変動圧の減衰(T=4.0s)

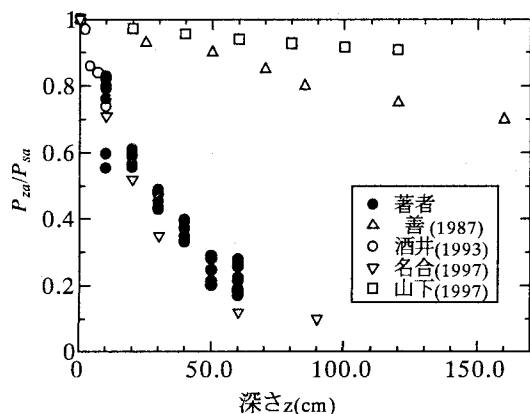


図-3 既往のデータとの比較

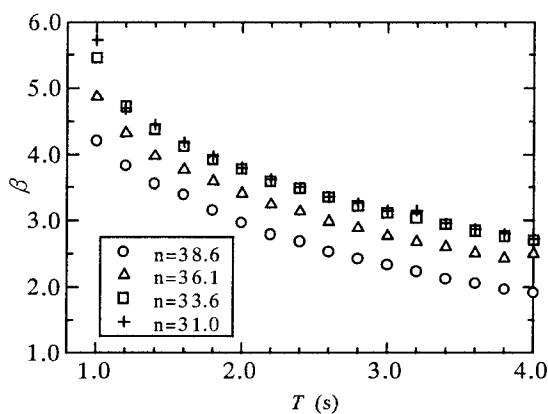


図-5 減衰率 β と変動圧の周期T

3. 実験結果及び解析

図-2 は, $n=38.1\%$ の砂層地盤模型に周期 4.0s, 全振幅 2.64kPa の変動圧を载荷させた時, 図-1(b) に示す各測点で検出された変動間隙水圧の周期内変動を示したものである。砂層地盤の表面に载荷された変動圧は, 鉛直下方に伝播してゆくにつれて, 減衰と位相遅れが生じていることが明白に読み取れる。そこで, 各実験条件下, 各測点で得られた変動間隙水圧の時系列データにゼロアップクロス法を適用し, 変動間隙水圧の全振幅と, 測点 P_1 での変動圧を基準とする位相遅れの各平均値を算定した。

(1) 砂層地盤内を伝播する変動圧の減衰特性

砂層地盤内を伝播する変動圧の減衰を調べるため, 変動間隙水圧に関しては, 砂層地盤の表面 (測点 P_1) を原点にとり, 原点からそれぞれ距離 z だけ砂層地盤内に入った測点で検出された変動間隙水圧の全振幅の平均値 P_{za} を, 測点 P_1 における変動圧の平均全振幅 P_{sa} で割って無次元化した。また, 伝播距離に関しては, 原点から鉛直下方に測った距離 z を砂層地盤深さ l で割って無次元化した。ただし, 本論文では砂層地盤深さ 90cm とした。

図-3 は得られた減衰データを既往のデータとの比較を示したものである。変動間隙水圧の伝播特性は間隙中の空気の含有量に大きく影響されることがわかっており, 善(1987), 山下(1997) はほぼ完全に空気を含んでいない状態におけるデータ, 酒井(1993), 名合(1997)⁴⁾ は, 空気を含んでる状態のデータである。よって, 著者らの実験は, 不飽和の領域にあるものと考えられる。

図-4 は $T=4.0s$ で $P_{sa}=0.79, 1.41, 2.64kPa$ の変動圧を 4 種類の値をもつ砂層模型にそれぞれ载荷して得られた無次元変動間隙水圧 P_{za}/P_{sa} と無次元伝播距離 z/l の関係図である。図中の実線は各 n 毎に求めた P_{za}/P_{sa} と z/l の間に回帰解析をして得られた関係式である。この図から両変数の間には

$$P_{za}/P_{sa} = \exp\{-\beta(z/l)\} \quad (3-1)$$

のような指数関数の関係が存在し, 変動圧の伝播距離に対する減衰係数 β は n が小さくなる程大きくなること がうかがえた。他の周期をもつ変動圧を载荷した場合の実験結果についても同様な分析を行った。その結果, 両変数の間には上述の関係式を裏付ける指数関係が存在することが明らかになった。そこで全てのデータに関し, n をパラメーターとして T 毎に, $\log(P_{za}/P_{sa})$ と z/l の間

表-3 減衰係数 β と周期 T

n (%)	回帰式	ベストフィット式
38.6	$\beta = 4.34T^{-0.57}$	$\beta = 3.90T^{-0.50}$
36.1	$\beta = 4.78T^{-0.49}$	$\beta = 4.64T^{-0.50}$
33.6	$\beta = 5.24T^{-0.48}$	$\beta = 5.21T^{-0.50}$
31.0	$\beta = 5.35T^{-0.48}$	$\beta = 5.33T^{-0.50}$

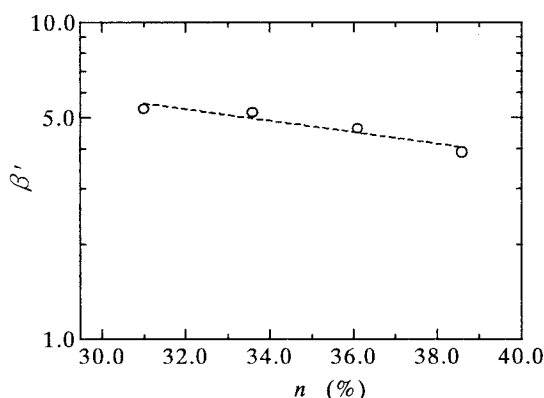


図-6 間隙率 n と β' の関係

に回帰解析を行った。図-5は回帰解析の結果得られた β の値を n をパラメーターにして周期 T に対してプロットしたものである。

図-5から、 β の値は、砂層の間隙率 n によって異なるが、周期 T に関しては T^{-m} (m を正の実数)に比例して減少することが明らかになった。そこで、 β と T の間に回帰解析を行った。表-3はその結果を示す。 $n=38.6\%$ の場合を除き、べき数 m は0.5に極めて近い値となっている。そこで、 β と $\sqrt{T}$ とのベストフィット式も算定した。表-3の右欄にはそれらの結果も示してある。これらの結果から

$$\beta = \beta' / \sqrt{T} \quad (3-2)$$

なる関係式を仮定しうることがわかった。埋立て砂層を伝播する変動圧の減衰には周期 T が支配因子であり、しかも減衰係数 β は周期 T の平方根又はそれに近い関数形に逆比例する関係にあることが明らかになった。このとは、酒井らの求めた(1-3)式において、減衰係数が $\sqrt{\pi\alpha/C}$ の関数であり、しかも $\sqrt{\pi\alpha/C}$ は、善ら(1987)も指摘している通り k, n, l, m_v, m_w が一定と仮定した場合、 β には $1/\sqrt{T}$ が支配因子になることから考えて、妥当な結果と思われる。

次に β に与える n の影響について調べてみる。図-6は表-3に示したベストフィット式が(3-2)式のように置けると仮定して定めた β' と n の関係をプロットしたものである。(1-3)式からも明らかな通り、 β には、 k, n, l, m_v, m_w 等の多くの因子が絡んでおり、しかも、それらの因子は、互いに独立ではないものも含まれている。しかし今回の

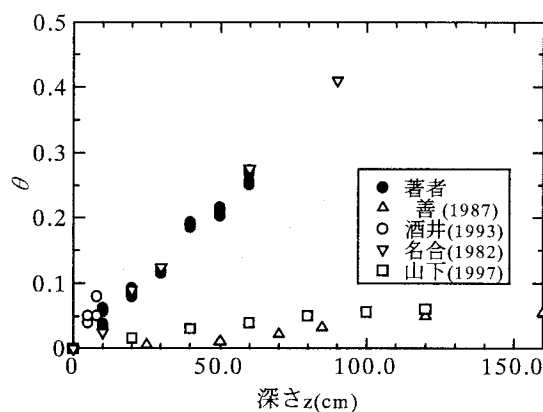


図-7 既往のデータとの比較

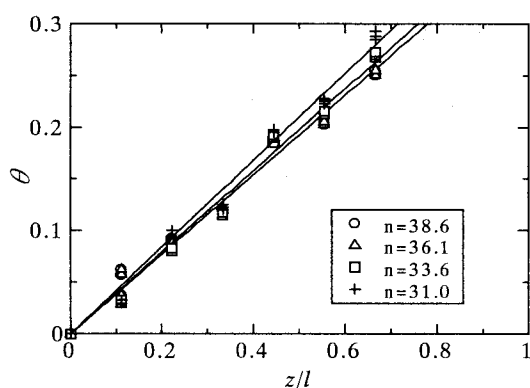


図-8 砂層を伝播する変動圧の位相遅れ($T=4.0s$)

実験範囲に限れば、 β' と n の間に

$$\beta' = A \exp(-\gamma \cdot n) \quad (3-3)$$

なる関係式が得られることがわかった。式中の A および γ の値の物理的な意味については、不明の点が残っているが、締め固めが進むにつれて、減衰係数は、大きくなっていく様子が明瞭に示されている。

(2) 砂層内を伝播する変動圧の位相遅れ特性

変動圧の無次元位相遅れは40秒の測定時間内で検出された各測点における変動圧の極値番号($N_{x1} \sim N_{xN}$)を砂層地盤模型の表面(測点 P_1)で検出した変動圧が極値とるデータ番号($M_{x1} \sim M_{xN}$)を基準として定めることにし、 θ を次式で算出した。

$$\theta = \Sigma \{ (M_{xi} - M_{si}) / N \} \times 0.01 / T \quad (3-4)$$

(3-4)式で0.01を掛けているのはサンプリング間隔を10msにとったためであり、 N は、測定時間内に検出された極値の個数である。

図-7は得られた位相遅れのデータを既往のデータと比較したものである。この図からも著者らのデータは不飽和領域のデータであると考えられる。位相遅れについ

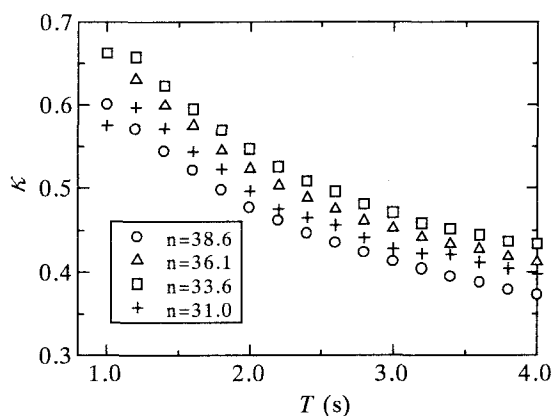


図-9 位相遅れ率と変動圧の周期Tの関係

表-4 位相遅れ率 κ と周期T間の回帰

n (%)	回帰式
38.6	$\kappa = 0.610T^{-0.36}$
36.1	$\kappa = 0.722T^{-0.36}$
33.6	$\kappa = 0.688T^{-0.34}$
31.0	$\kappa = 0.615T^{-0.31}$

ても減衰と同じく砂層地盤に空気が混入していることを示している。

図-8は $T=4.0$ sで、 $P_{sa}=0.79, 1.41, 2.64$ kPaの変動圧を4種類の n の値をもつ砂層模型にそれぞれ载荷して得られた無次元位相遅れ θ と無次元伝播距離 z/l の関係図である。図中の実線は n 毎に求めた θ と z/l の間の回帰式である。この図から両変量の間には(3-5)式に示すような直線関数の関係が存在することがうかがえる。

$$\theta = \kappa(z/l) \quad (3-5)$$

ここに、 κ は変動圧の伝播距離に対する位相遅れの割合(位相遅れ率)を表す。 κ の値は n の値が変わっても $\beta \sim T$ の関係ほど大きくは変化せず θ と z/l の関係に与える n の影響は、減衰率の場合ほど明瞭に現れないことも明らかになった。他の周期をもつ変動圧を载荷した場合の実験データに関しても同様な分析を行った。その結果、 θ と z/l の間には(3-5)式で与えられるような直線関係式が成立し、 κ に与える n の影響は、それほど大きくないことも明らかになった。そこで全てのデータに関し、 n をパラメータとし、 T 毎に θ と z/l の間に回帰解析を行った。図-9は得られた位相遅れ率 κ の値を周期 T に対してプロットしたものである。

表-4は、 n をパラメータにとり、 κ と T の間に求め

た回帰式を示す。これらの結果は、上記事実をさらに定量的に裏付けている。また、変動圧の周期は位相遅れに対しても支配的であることは確かであるが、位相遅れ率 κ は、(1-3)式で予想されるように $1/\sqrt{T}$ に比例する関係とはならず、 $T^{-0.35}$ 程度に比例することがわかった。この理由は、現時点では明瞭ではない。

4. 結 論

鉛直一次元の砂層模型を用いて実験を行い、砂層内を伝播する変動圧の伝播特性に与える砂層の間隙率 n と変動圧の周期 T の影響について検討した。その結果以下の事項が明らかになった。

- (1) 無次元変動間隙水圧は無次元伝播距離と共に指数関数的に減衰する。減衰率 β は、作用する変動圧の周期の平方根に逆比例して減少し、しかもその比例定数 β' は砂層の間隙率 n の増大と共に、指数関数的に減少する。
- (2) 無次元位相遅れは無次元伝播距離と共に直線的に増大する。位相遅れ率 κ は、作用する変動圧の周期 T に関して $T^{-0.35}$ に比例して減少するが、比例定数に対する砂層の間隙率 n の影響は、ほとんど見られない。

今後は n の範囲をさらに拡大し、検討を進めて行きたい。

参考文献

- 1) 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰(1987)：海底地盤の波浪による液状化および高密度化，港研報告，28巻，3号，pp. 125-180。
- 2) 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，海岸論文集，40巻，pp. 586-590。
- 3) 山下俊彦・南村尚昭・阿久津孝夫・谷野賢二(1997)：波浪による砂地盤の沈下・硬化化と液状化，海岸論文集，44巻，pp. 911-916。
- 4) 名合宏之・前野詩朗・平井康隆・西平福宏(1997)：変動間隙水圧計測による地盤定数の推定，海岸論文集，44巻，pp. 931-935。

(2000. 10. 2 受付)