

# ケーソン式防波護岸の背後に生ずる 吸出しに関する研究

滝口和男\*1・重村利幸\*1・林建二郎\*1・藤間功司\*1・多田毅\*1

\*1 防衛大学校システム工学群建設環境工学科

近年、ケーソン式防波護岸の背後に陥没災害が頻発し、工学上大きな問題になっている。本研究では、埋立て砂層の鉛直一次元モデルを用いて吸出し災害の発生に支配的影響を及ぼす変動間隙水圧の伝播特性を実験的に調べ併せて埋立て砂層内にボイリングを発生させ、防砂シートの損傷の大小、損傷の位置、砂層の条件が、砂の吸出し流出に及ぼす影響について実験的に検討する。

キーワード：護岸、吸出し、埋立砂層、変動間隙水圧

## 1. はじめに

近年、防波護岸の背後に生じる陥没災害に関して技術的関心が高まり、運輸省港湾技術研究所では1996年に省内の技術者を対象に護岸シンポジウム<sup>1)</sup>を催して、この問題を検討した。

図-1はケーソン式防波護岸の背後に頻発する陥没災害の模式図である。陥没災害には、波浪によって生起される流れが、防砂シートの破損部を通して、直接、埋立砂に作用し、これらが洗い出される場合と波圧の伝播によって埋立砂内に発生する変動間隙水圧が、埋立砂を液状化させ、防砂シートの破損部から一挙に吸い出される場合とがある。本研究では後者の原因による陥没災害を対象とする。

ケーソン式防波護岸の陥没災害に関しては、高橋ら(1996)<sup>2)</sup>は二次元のモデルを用いて広範な実験を行い、陥没災害の引き金となる吸出し現象に関して多くの知見を得ている。また、Shigemuraら(1998)<sup>3)</sup>は高橋らとほぼ同様な二次元小型モデルを用いて実験を行ない、変動圧の伝播によって埋立て砂層内に誘起される変動間隙水圧の分布を測定して、砂層内を伝搬する変動圧の減衰並びに位相遅れを調べている。

変動間隙水圧の伝播についての理論的研究は、海底地盤中に垂直一次元的に伝播する変動間隙水圧の挙動について検討した。山本ら(1978)<sup>4)</sup>によって始まり、名合ら(1982)<sup>5)</sup>、善ら(1987)<sup>6)</sup>、によって大きく進展した。最近では漂砂量の適正評価を目指した酒井ら(1993)<sup>7)</sup>の研究が

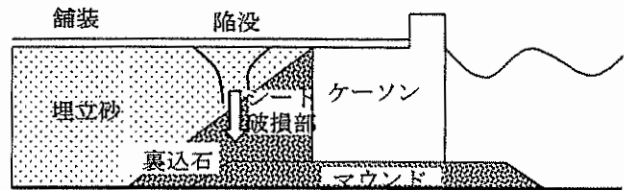


図-1 護岸背後に生ずる陥没災害の模式図

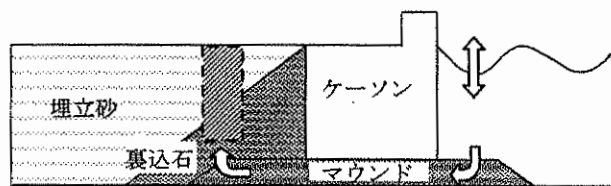


図-2 埋立砂層の鉛直一次元モデル対象域

あり、一方、重村(2000)ら<sup>8)</sup>は、水平方向の変動間隙水圧の伝播について研究している。

そこで、本研究では、護岸背後の一部分を図-2に示すように取り出した一次元モデルを用い、変動間隙水圧の鉛直上方向への伝播特性ならびに埋立砂の落下量に与える変動圧特性や防砂シートの欠損のサイズ、欠損位置との関係を実験的に調べることにした。

## 2. 変動圧の伝播特性に関する理論解

変動圧伝播についての研究は、海洋物構造物の倒壊や海底パイプラインの破損に対する原因の究明が引き金となって1970年代後半からアメリカで山本ら(1978)<sup>4)</sup>を中心に盛んに行われるようになった。従って当初研究の主流は、海底表面に誘起される波圧が海底地盤の中を鉛直下方に伝播していく現象を研究するものであった。1980年代の後半に我が国にも同様な研究が行われるようになった。善らは、波浪による海底地盤の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)式を誘導した。

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

ここに $C_v$ 、及び $\alpha$ は、次式で表される係数

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

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、 $\gamma_w$ :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 $\alpha$ 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ている。

又、酒井ら(1993)<sup>7)</sup>は漂砂や洗掘現象に与える海底地盤表層近傍における変動間隙水圧を調べるため、善ら(1987)<sup>8)</sup>の誘導した無次元式を変換して(3)式で与えられる近似解を求めている。ただしこの解の誘導過程では砂層底面の境界条件は考慮されていない。

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

重村ら(2000)は水平一次元モデルにおいても変動圧の伝播は善らの誘導した(1)式と同様な支配方程式で記述できることを明らかにし、同式から(4)式で表される近似化解を誘導した。

$$\frac{p_m}{P_b} = \sqrt{A^2 + B^2} \cos\left(2\pi t - \sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} x + \delta\right) \quad (4)$$

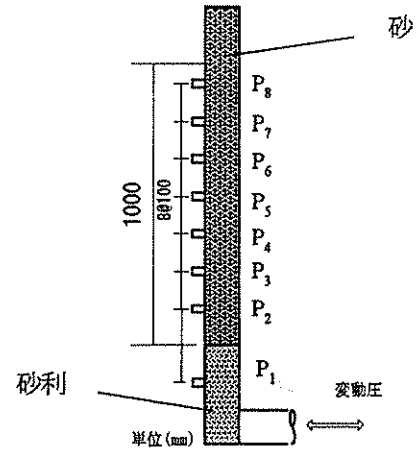


図-3 埋立て砂層の垂直一次元モデル

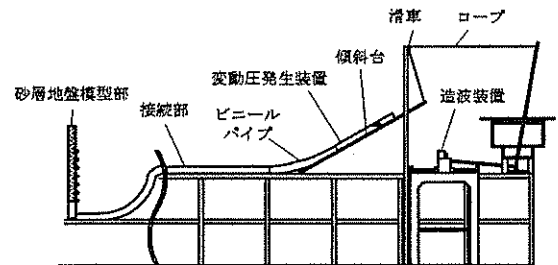


図-4 実験装置図

$$A = \frac{1}{\alpha} \cos\left(\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} x\right) + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} x\right)$$

$$B = \frac{1}{\alpha} \sin\left(\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} x\right)$$

$$A > 0 \text{ のとき } \delta = \tan^{-1}(B/A)$$

$$A < 0 \text{ のとき } \delta = \pi - \tan^{-1}(B/A)$$

## 3 実験装置および方法

実験は、ケーソン式防波護岸背後にある埋立砂層を図-2に示すように取り出して作成した鉛直一次元模型を用いて行うことにした。図-3は、このような考えの下に作成した鉛直一次元の砂層地盤の模型である。これは、内径8.2cm、長さ1.0mのアクリルパイプに、福島産の珪砂5号( $d_{50}=0.3\text{mm}$ ,  $s=2.59$ )を1.0m流し込んで流し込み砂層地盤模型としたものである。アクリルパイプの上方には、施工中及び舗装等で密閉された場合を再現するため、ふたで開閉できるようにしてありしてある。砂層地盤は、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。また、この時測定した珪砂5号の物理特性を表-1に示す。

実験装置は、ピストン型造波機を備えた二次元造波水路の上部を敷板で塞ぎ、その上に図-4に示すように配置した。図-4の右方は、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。

間隙水圧計は、図-3に示すとおり捨石マウンド中に  $P_1$  を設置し、マウンドと砂層の境界から 10cm 上に  $P_2$  を設置し、以後、鉛直方向に 10cm 間隔で 6 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<sup>2</sup> (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、砂層地盤底面に 100cm の初期水頭をかけた後、表-2 に示す 35 種類の変動圧を作用させて行った、変動間隙水圧は図-3 に示した各測点で約 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 として、4096 個のデータに変換した。

#### 4 実験結果および解析

図-5 は、閉鎖状態の砂層地盤模型に周期 4.0s、全振幅 2.64kPa の変動圧を載荷させた時、図-3 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。載荷された変動圧は、鉛直上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) 砂層内を鉛直上方に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、砂層と捨石マウンドの境界面を原点にとり、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  $P_z$  を、測点  $P_1$  における変動圧の平均全振幅  $P_0$  で割って無次元化した。また、伝播距離に関しては、原点から鉛直上方に測った距離  $z$  を砂層地盤深さ  $l$  で割って無次元化した。ただし、砂層厚さ  $l$  は 100cm とした。

図-6 は、上端を開放した場合の砂層内を伝播する変動圧の減衰をプロットしたものである。この図から、上端を開放した場合は、上端の変動圧を 0 とする一本の線にそって直線的に減衰して、しかも作用させる変動圧の周期および振幅は影響しないことがわかる。すなわち、上端が開放されている場合には、変動圧の伝播は先に求めた支配方程式(1)に従わないことが判る。

一方、図-7 は、上端を閉鎖した場合の砂層内を伝播する変動圧の減衰をプロットしたものである。図中の実線は各  $T$  毎に求めた  $P_z/P_0$  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

表-1 実験に使用した硅砂 5 号の諸元

$s$	2.59
$k$ (cm/s)	$3.93 \times 10^{-2}$
$n$ (%)	38.6

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 0.5s 刻み 7 種類				
変動圧 (kPa)	0.79	1.41	2.64	3.63	4.42
	5 種類				

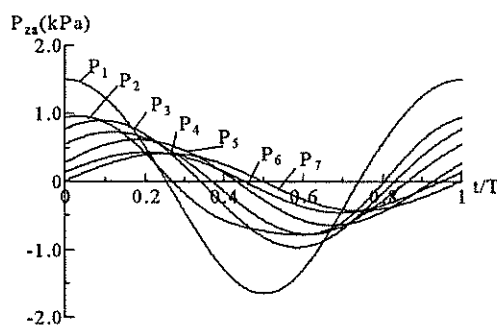


図-5 変動間隙水圧の記録例(T=4.0s)

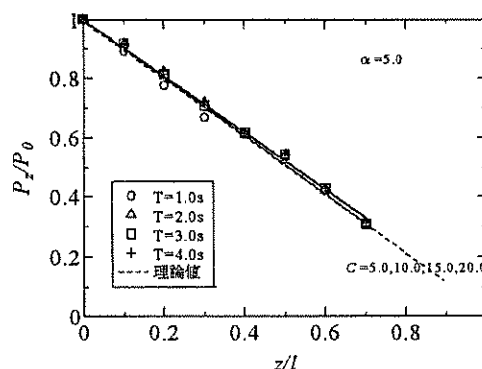


図-6 砂層を伝播する変動圧の位相遅れ(開放)

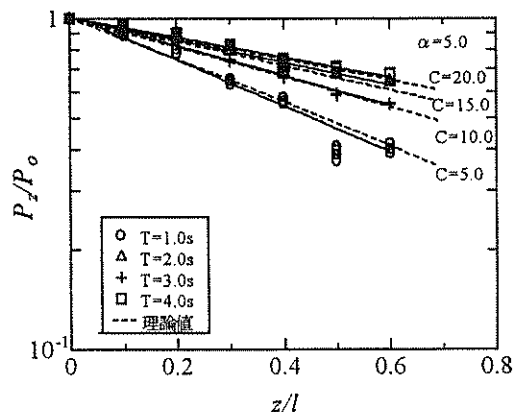


図-7 砂層内を伝播する変動圧の減衰(閉鎖)

$$P_z/P_0 = \exp\{-\beta(z/l)\} \quad (5)$$

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 $\beta$ は $T$ が小さくなる程大きくなることがかがえた。そこで全てのデータに関し、 $T$ 毎に、 $\log(P_z/P_0)$ と $z/l$ の間に回帰解析を行い、減衰係数 $\beta$ を算定した。表-3はこのようにして周期 $T$ 毎に得られた $\beta$ の値をまとめたものである。図-8は $\beta$ の値を周期 $T$ に対してプロットしたものである。 $\beta$ と周期 $T$ の間に回帰解析を行うと下式の関係式を得る。

$$\beta = 1.52T^{-0.64} \quad (6)$$

さらに、 $\beta$ と $\sqrt{T}$ とのベストフィット式も算定した。その結果

$$\beta = 1.40/\sqrt{T} \quad (7)$$

なる関係式を仮定しうることがわかった。これらの解析から埋立て砂層を鉛直上方に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 $\beta$ 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、酒井らや重村らの求めた式において、減衰係数が $\sqrt{\pi\alpha l C}$ であり、しかも $\sqrt{\pi\alpha l C}$ 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、 $\beta$ 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。また図-6, 7上に善ら(1987)の求めた数値解に $\alpha, c$ を与えたものをプロットしてある。この図から実験値は、よく理論値に一致することがわかる。

#### (2) 砂層内を鉛直上方に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 $\theta$ は約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するデータ番号( $M_{x1} \sim M_{xN}$ )を基準として定めることにし、 $\theta$ を次式で算出した。

$$\theta = \Sigma\{(N_{xi} - M_{si})/N\} \times 0.01/T \quad (8)$$

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

図-9は上端を開放した場合、図-10は上端を閉鎖した場合に得られた無次元位相遅れ $\theta$ と無次元伝播距離 $z/l$ の関係図である。図中の実線は、 $\theta$ と $z/l$ の間の回帰式である。点線は、善ら(1987)の求めた数値解に $\alpha, c$ を与えたものをプロットしてある。

上端を開放した場合の位相遅れは、非常に小さな値でほぼ瞬時といえる。

表-3 減衰率 $\beta$ と変動圧の周期 $T$

$T$ (s)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\beta$	1.52	1.16	0.99	0.87	0.77	0.68	0.60

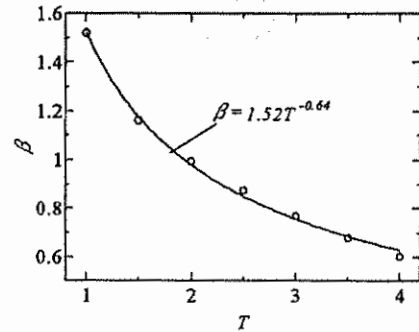


図-8 減衰率 $\beta$ と変動圧の周期 $T$

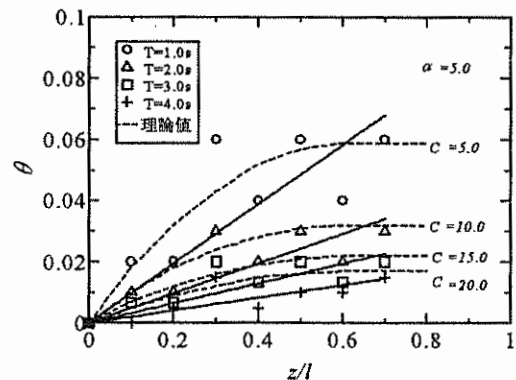


図-9 砂層内を伝播する変動圧の位相遅れ (開放)

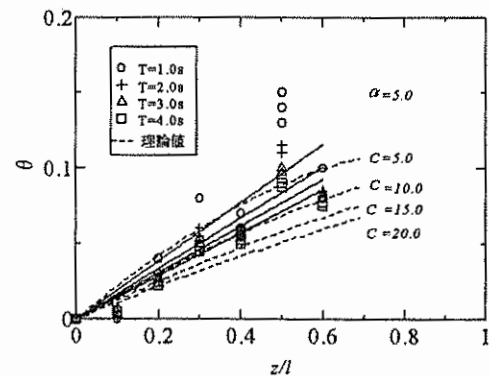


図-10 砂層内を伝播する変動圧の位相遅れ (閉鎖)

表-4 位相遅れ率 $\kappa$ と変動圧の周期T

T(s)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\kappa$	0.19	0.17	0.17	0.16	0.15	0.15	0.14

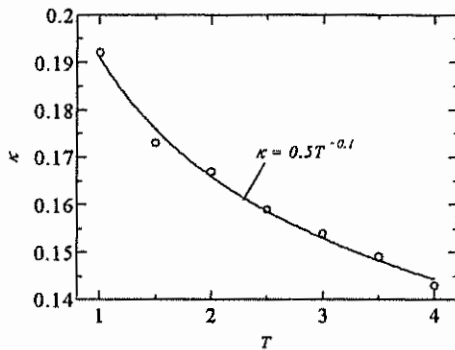


図-11 変動圧の周期Tと位相遅れ率 $\kappa$

一方、上端を閉鎖した場合には、両変量、 $\theta$ と $z/l$ の間には(9)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。

$$\theta = \kappa(z/l) \quad (9)$$

ここに、 $\kappa$ 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。表-4は、全データに対して、T毎に $\theta$ と $z/l$ の間に回帰解析を行った。表-4は回帰解析から得られた $\kappa$ とTの値をまとめたものである。図-11は得られた位相遅れ率 $\kappa$ の値を周期Tに対してプロットしたものである。その結果、 $\kappa$ とTの間には

$$\kappa = 0.5T^{-0.1} \quad (10)$$

なる関係式が得られた。

## 5 吸出しと変動圧

前章までは、変動圧の伝播特性に関して取り扱った。ここでは、吸い出し量に与える変動圧や防砂シートの破損特性の関係を調べるために図-12に示す装置を用いて実験を行った。実験諸元は、表-5に示すとおりである。すなわち、裏込め石層を代表させるため粒径1.5~2.0cmの砂利をマウンド上に40cmの高さに積み上げ、その上に珪砂5号を所要の高さに投入して、埋立砂層を作成した。なお、砂利と砂の間に置いた防砂シート用の不織布には、中心に直径1及び2cmの2通りの穴をあけてある。図-12のP1~P6は、間隙水圧計を示す。実験は埋立砂層の厚さは5, 10, 15cmの三種類とし、各砂層圧に対して変動圧の周期を2, 3, 4sのいずれかにセットして、変動圧の振幅はボイリングが発生するまで徐々に大きくしていった。変動圧を40秒、作用させたときに得られた結果

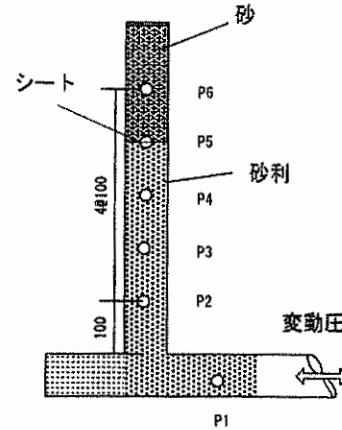


図-12 実験装置図

表-5 実験諸元

砂利	粒径 1.5~2.0cm
砂	珪砂5号
砂層	5 10 15cm
防砂シートの穴	$\phi$ 1, 2 cm

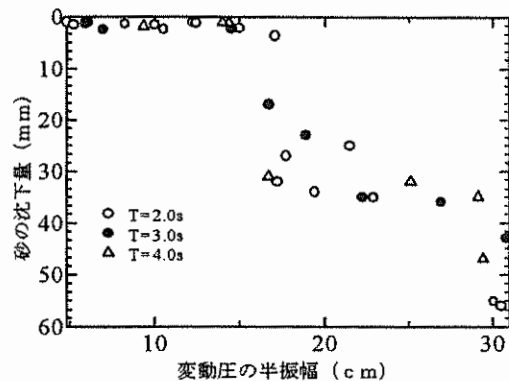


図-13 変動圧と沈下量(砂層厚10cm)

を図-13, 14, 15に示す。沈下が発生した際には、埋立砂層の表面は一般的に中心部が最も低くなり、図13~15に示してある各沈下量は砂層表面で観測された最も沈下した部分の深さである。図-13は、砂層厚10cm、防砂シートの欠損穴 $\phi$ 1cmのときの変動圧の振幅と砂の沈下量を示したものである。この図から変動圧の半振幅が15cm以上になると砂の沈下量は急激に大きくなっていることがわかる。このとき砂層中にボイリングの発生が認められた。

図-14は、砂層の厚さを変化させた場合の、防砂シートの欠損穴 $\phi$ 1cmとし周期2秒の変動圧に対する沈下量を示している。この図から砂層厚さとボイリングの発生との関係が明瞭に現れることが明らかになる。ただし、ボイリング発生後の最終の沈下量にははっきりした差異

は認められない。

図-15 はシートの穴による違いを示したもので、穴が大きくなると砂の沈下量が大きくなることを明瞭に示している。

また、変動圧を継続的に作用させていくと砂が砂利の間隙中に落下して目詰まりを起こし、砂の落下がにぶる傾向が見られた。そのときの変動圧と沈下量を図-16 に示してある。目詰まりによって変動圧が小さくなり、砂の落下が止まったと考えられる。このときの条件は、砂利の径、砂の粒径、シートの穴、砂層厚によってことなり、今後の検討課題とする。

#### 4. 結論

以下に結論を示す。

##### (1) 上端開放の場合

- 無次元変動間隙水圧  $P_{za}/P_{sa}$  と無次元伝播距離  $z/l$  の間には、上端の変動圧を 0 とする一本の線にそって直線的に減衰する。
- 埋立砂層を伝播する変動圧の位相遅れは、ほとんどない。

##### (2) 上端閉鎖の場合

- 下方から変動圧がかかる場合にも、変動間隙水圧の基本式は善らの誘導した基本式と同じになる。
- 無次元変動間隙水圧  $P_{za}/P_{sa}$  と無次元伝播距離  $z/l$  の間には、鉛直上方から変動圧をかけた場合と同様に  $P_{za}/P_{sa} = \exp\{-\beta(z/l)\}$  で表せるような指数関数の関係が存在する。さらに、
- 埋立砂層を伝播する変動圧の減衰率  $\beta$  には周期  $T$  が支配因子となる。 ( $\beta = AT^r$ )
- 無次元位相遅れ  $\theta$  と無次元伝播距離  $z/l$  の間には  $\theta = \kappa(z/l)$  なる直線関数の関係が存在する。
- 埋立砂層を伝播する変動圧の位相遅れ率  $\kappa$  には周期  $T$  が支配因子となる。 ( $\kappa = BT^q$ )

- 砂の落下はシートの穴が大きいほど多く、ボイリングが発生したとき極端に大きくなる。
- 砂の落下は、目詰まりによって変動圧が小さくなり止まると考えられる。

#### 参考文献

- 港湾技術研究所(1996)：護岸シンポジウム講演集, 394p.
- 高橋重雄ら(1996)：護岸の吸い出しに関する水理模型実験：港研報告, 35 巻, 2 号, pp. 3-58.
- Shigemura et al(1998)：Propagation property of dynamic pressure through reclaimed sand behind caisson-type seawalls, Ports' 98, ASCE, pp. 571-580.
- Yamamoto, T. H. S. L. Koning and E. Van Hijum(1978)：On the

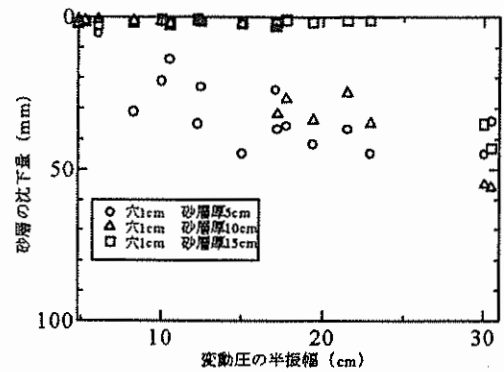


図-14 砂層厚による違い (T=2.0 s)

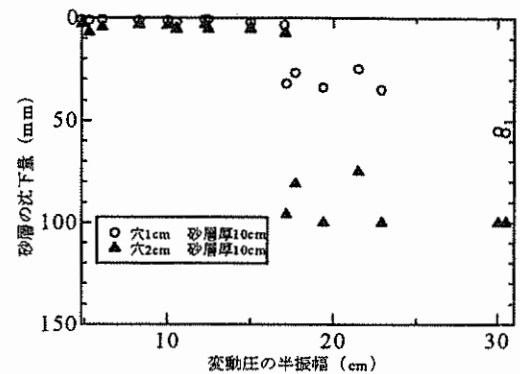


図-15 シートの穴による違い

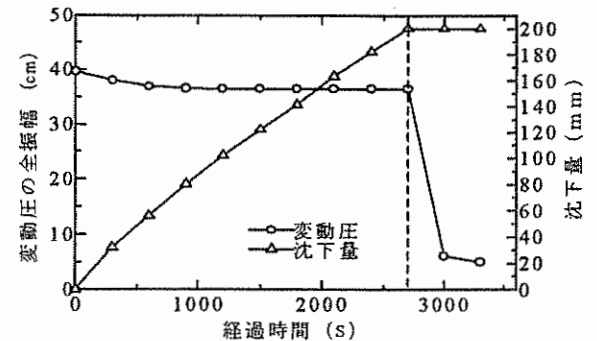


図-16 変動圧と沈下量

response of a poro-elastic bed to water waves, J. Fluid Mech., Vol. 87, part 1, pp. 193-206

- 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
- 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.
- 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, 40 巻 pp. 586-590.
- 重村利幸・滝口和男・林建二郎・藤間功司(2000)：変動圧の埋立て砂層への伝播特性に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第47巻 pp. 916-920.