

変動圧の埋立て砂層への伝搬特性に関する基礎的研究

重村 利幸*・滝口 和男**・林 建二郎***・藤間 功司****

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護岸シンポジウム (1996) が開かれて, この問題が検討された。高橋ら (1996) は二次元のケーソン式防波護岸模型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) は高橋らとほぼ同様な二次元小型模型を用いて実験を行ない, 変動圧の伝搬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。一方, 善ら (1987) は波圧の伝搬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 (垂直方向一次元) を誘導し, 同式の数値解と実験値を比べて式の妥当性を確かめている。又, 酒井ら (1993) は漂砂や洗掘現象に与える海底面付近の変動間隙水圧を調べるため, 善らの誘導した基礎式から砂層底面での境界条件を考慮しないで近似解を求め, 実験値と比較して, 変動圧の伝搬に与える諸因子の影響を関数形で示している。

本研究では先に用いた二次元模型 (1998) に代えて, より単純な構造を持つ水平一次元のケーソン式防波護岸模型を用いた実験を行い, さらに, 同模型内に誘起される変動間隙水圧の基礎方程式 (水平方向一次元) を善ら (1987) の手法に倣って誘導し, 同式の妥当性を検討する。

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, 水平一次元のケーソン式防波護岸の模型である。これは, 一端を閉じた外径 8.9 cm, 長さ 3.0 m のアクリルパイプに, 水浸状態の福島産の珪砂 5 号 ($d_{50}=0.3$ mm, $s=2.59$) を 2.0 m 流し込んで埋立て砂層とし, その上に後で述べる川砂利を長さ 1.0 m 投入して捨石マウンドとしたものである。中央部の図は同じ

アクリルパイプで作製した 2.0 m の接続部であり, その先には長さ 82 cm の可撓性の半透明強化ピニールパイプを介して, 長さ 1.0 m の同上アクリルパイプを連結した。これらパイプのうち, 護岸模型とその接続部からなる長さ 5.0 m のアクリルパイプ部分は敷板中央に水平に固定した。一方, 右方の図は造波機が創り出す水平振動をロープと滑車を介して垂直振動に変換し, 変動圧を発生させる装置である。ロープの先端は敷板上に支点を持つ長さ 2.0 m の傾斜台の上端に結び, 同台上には強化ピニールパイプの一部分とそれに繋がる長さ 1.0 m のアクリルパイプを載せて固定した。

図-1(b) は護岸模型に設置した 7 個の間隙水圧計の配置図である。間隙水圧計には外径 20 mm, 長さ 40 mm で定格負荷が 200 gf/cm² (19.6 kPa) 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。護岸模型は, マウンドに用いる川砂利の粒径を 4 通り ($d_{gm}=5.0, 10.0, 15.0, 20.0$ mm) に変えて作製した。これらの護岸模型に対して実験は, 傾斜台の初期傾斜角を 19 度に設定し, 同台上のアクリルパイプには 30 cm の初期水頭をかけた後, 表-1 に示す

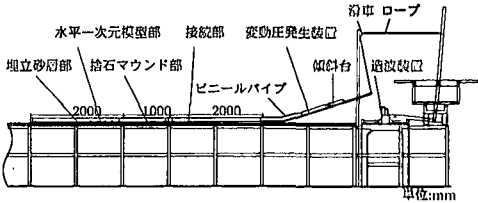


図-1(a) 実験装置図

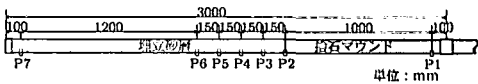


図-1(b) 間隙水圧計配置図

表-1 実験に使用した変動圧の諸元

周期 (s)	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	6 種類
変動圧 (kPa)	0.57	1.04	1.46	1.91	2.35		5 種類

* 正 会 員 Dr.E. 防衛大学校教授 建設環境工学科
** 学生会員 防衛大学校理工学研究科
*** 正 会 員 Ph.D. 防衛大学校助教授 建設環境工学科
**** 正 会 員 工博 防衛大学校助教授 建設環境工学科

30 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 100 秒間測定した。これらのデータはサンプリング間隔を 20 ms とし、5000 個のデータに変換した。

3. 実験結果及び解析

図-2 はある実験条件下で計測した各測点での変動間隙水圧の時系列データの一部である。図中の番号は図-1 (b) に示す各間隙水圧計の番号に対応する。

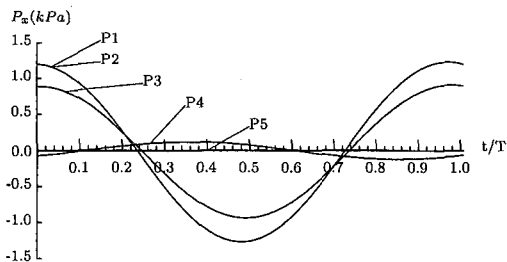


図-2 変動間隙水圧の記録例 ($T=3.0$ s, $d_{50}=15$ mm)

この図から、P1 と P2 点で検出した変動圧には、差異は認められず、捨石マウンド内では減衰も位相遅れもほとんど生じないことがわかる。一方、埋立て砂層に到着後は変動圧は伝搬距離が増大するにつれて大きく減衰し、位相遅れも明瞭に発生するが、砂層入り口より 45 cm の位置にある P5 では、約 5% にまで減衰して変動圧の検出が難しいことが判る。このような観点で全ての実験データを詳細に調べた結果、マウンド内における変動圧の減衰は今回用いた川砂利の中で粒径が最も小さい、中央粒径 (d_{50}) が 5 mm の場合でも数%以下であり、しかも、位相遅れは発生せず、ほぼ瞬時に砂層に達することが確認された。従って、本論文では砂層内を伝搬する変動圧の減衰と位相遅れに限って解析を行うことにし、各計測点で検出された変動間隙水圧が極値をとる位相とその大きさを、それぞれ検出した。

3.1 埋立て砂層内を伝搬する変動圧の減衰特性

埋立て砂層内を伝搬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、捨石マウンドと埋立て砂層の境界面 (測点 P2) を原点にとり、原点からそれぞれ所定の距離 x だけ砂層内に入った測点での変動間隙水圧の全振幅の平均値 P_{xa} を、入口断面における変動圧の平均全振幅 P_{sa} で割って無次元化し、伝搬距離に関しては、距離 x を変動圧が減衰して検出できなくなる点、すなわち変動圧の最大伝搬距離 l で割って無次元化した。ただし、 l の値は無次元変動間隙水圧 P_{xa}/P_{sa} の値が 1~2% 程度になり、変動圧の波形の検出が不可能になる位置までの距離をとることとし、実験結果から判断して 60 cm と仮定した。

図-3 はこのようにして定めた無次元変動間隙水圧

P_{xa}/P_{sa} を、変動圧の周期 T をパラメータとして、無次元伝搬距離 x/l に対して、プロットしたものである。 $x/l=0.75$ でデータにバラツキが見られるが、これらは測点 P5 におけるデータである。この点では P_x の値は P_s の 5% 以下にまで減衰して波圧計の検出能力の限界に近い値となっているデータも多く、このようなバラツキが生じたものと考えられる。図中に示す各実線は測点 P5 におけるデータを除き周期 T をパラメータとして、 P_{xa}/P_{sa} と x/l の間に求めた回帰式を示す。

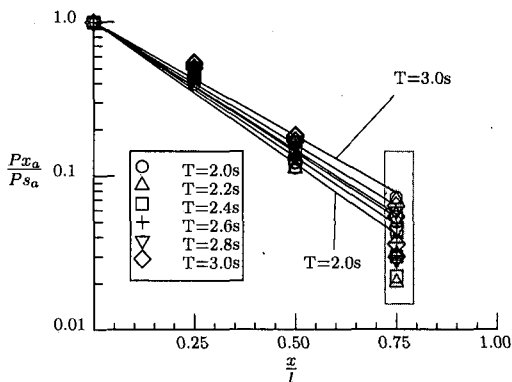


図-3 埋立て砂層を伝搬する変動圧の減衰

回帰解析の結果、両変数の間には (3-1) に示すような関数関係が存在することが判った。

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

ここに、 β は変動圧の伝搬距離に対する減衰係数である。また、表-2 は、周期別に行った回帰解析の結果と、得られた β の値をまとめたものである。

表-2 変動圧の減衰係数と周期の関係

周期 (s)	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
相関係数	0.991	0.994	0.990	0.990	0.990	0.989
サンプル数	48	48	48	48	48	48
減衰係数 β	4.24	4.04	3.83	3.90	3.66	3.41

図-4 は β の値を周期 T に対してプロットしたものである。回帰解析の結果、両者の間に次のような関係式がえられた。

$$\beta = 5.95 T^{-0.48} \quad (3-2)$$

なお、図中には β と $\sqrt{T}$ とのフィッティング曲線も併せて示してある。これらの結果から、埋立て砂層を伝搬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

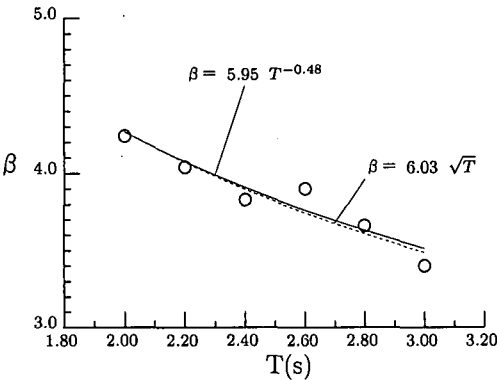


図-4 減衰率 β と変動圧の周期 T の関係

比例する関係にあることが明らかになった。

3.2 埋立て砂層内を伝搬する変動圧の位相遅れ特性

埋立て砂層の入口断面(測点 P2)で検出した変動圧が極値をとるデータ番号 ($M_{s1}-M_{sn}$) を基準とし、砂層内の P3 測点以降の各測点で検出した変動間隙水圧の対応する極値番号 ($N_{x1}-N_{xn}$) を、それぞれゼロアップクロス方で定め、各測点での無次元位相遅れ $\bar{\theta}$ を次式で定めた。

$$\bar{\theta} = \sum \{ (N_{xi} - M_{si}) / N \} \cdot 0.02 / T \quad \cdots (3-3)$$

(3-3) 式で 0.02 を掛けているのはサンプリング間隔を 20 ms にとったためである。

図-5 は T をパラメーターとし $\bar{\theta}$ を x/l に対してプロットしたものである。測点 P5 では変動圧の波形が明瞭に検出されないデータが多く含まれていた。そのため、図には測点 P5 での位相遅れ $\bar{\theta}$ のデータは示されていない。図中の各実線は T をパラメーターとして $\bar{\theta}$ と x/l の間に得られた回帰式を示す。 $\bar{\theta}$ と x/l の間には以下に示すような直線関係が導かれた。

$$\bar{\theta} = \kappa (x/l) \quad \cdots (3-4)$$

ここに、 κ は変動圧の伝搬距離に対する位相遅れの割合

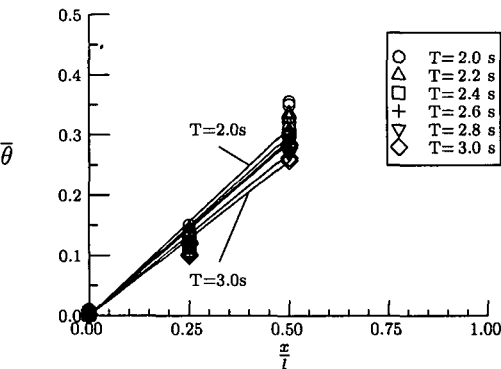


図-5 埋立て砂層を伝搬する変動圧の位相遅れ

表-3 変動圧の位相遅れ率と周期の関係

周期 (s)	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
相関係数	0.999	0.918	0.971	0.997	0.997	0.999
サンプル数	36	36	36	36	36	36
位相遅れ率 κ	0.623	0.597	0.575	0.583	0.530	0.514

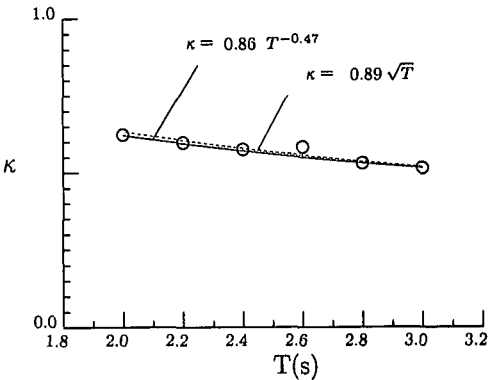


図-6 位相遅れ率と変動圧の周期 T の関係

(位相遅れ率) を表す。表-3 は周期毎に行った回帰解析の結果と得られた位相遅れ率をまとめたものである。

図-6 は位相遅れ率 κ の値を周期 T に対してプロットしたものである。回帰解析の結果、両者の間に以下のような関係式が得られた。

$$\kappa = 0.86 T^{-0.47} \quad \cdots (3-4)$$

なお、図中には κ と $\sqrt{T}$ とのフィッティング曲線も併せて示してある。これらの成果から、埋立て砂層を伝搬中に生じる変動圧の位相遅れは周期 T が支配因子であり、 κ は周期の平方根 $\sqrt{T}$ また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。

4. 考 察

4.1 水平一次元砂層における変動間隙水圧の基本式

水平一次元埋立て砂層の場合にも、砂層入口断面に作用する変動圧 P_s により砂層内に誘起される変動間隙水圧 P_x について、善ら (1987) の方法に倣って基礎方程式を誘導すると次式が導かれる。

$$\frac{k}{m_v \gamma_w} \frac{\partial^2 P_x}{\partial x^2} = \left(1 + \frac{nm_w}{m_v} \right) \frac{\partial P_x}{\partial t} - \frac{\partial P_s}{\partial t} \quad \cdots (4-1)$$

ここに、 k は埋立て砂層を構成する砂の透水係数、 m_v は体積圧縮係数、 n は間隙率を示し、 γ_w は間隙水の単位体積重量、 m_w は圧縮率を示す。また、 x は砂層入口断面に原点をとり、砂層の内部方向に測った水平距離を示し、 t は時間を示す。

いま、砂層入口断面には次式で与えられる変動圧 P_s

$$P_s(t) = P_0 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \dots\dots\dots (4-2)$$

が作用すると仮定し、(4-1) 式中の変数 P_x 、並びに x 、 t を以下に示す無次元変数

$$\bar{P} = \frac{P_x}{P_0}, \quad \bar{x} = \frac{x}{l}, \quad \bar{t} = \frac{t}{T} \dots\dots\dots (4-3)$$

で置換すると、(4-1) 式は次式のような無次元微分方程式

$$C \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{x}^2} = \alpha \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{t}} + 2\pi \sin(2\pi \bar{t}) \dots\dots\dots (4-4)$$

に変形される。ただし、(4-4) 式にある C 及び α は、それぞれ次式で与えられる無次元係数を表す。

$$C = \frac{kT}{m_v r_w l^2}, \quad \alpha = 1 + \frac{nm_w}{m_v} \dots\dots\dots (4-5)$$

(4-4) 式が水平一次元埋立て砂層における変動間隙水圧の基礎方程式である。

4.2 水平一次元砂層における変動間隙水圧の理論解

前節で誘導した(4-4)式の解を次式のように仮定する。

$$\bar{P}(\bar{x}, \bar{t}) = \bar{P}_1(\bar{t}) + \bar{P}_2(\bar{x}, \bar{t}) \dots\dots\dots (4-6)$$

(4-6) 式を(4-4)式に代入すると、次の2式が得られる。

$$\frac{d\bar{P}_1(\bar{t})}{d\bar{t}} = -\frac{2\pi}{\alpha} \sin(2\pi \bar{t}) \dots\dots\dots (4-7)$$

$$\frac{\partial \bar{P}_2(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{t}} = \frac{C}{\alpha} \frac{\partial^2 \bar{P}_2(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{x}^2} \dots\dots\dots (4-8)$$

(4-7) 式より

$$\bar{P}_1(\bar{t}) = \frac{1}{\alpha} \cos(2\pi \bar{t}) \dots\dots\dots (4-9)$$

また、 $\bar{P}_2(\bar{x}, \bar{t})$ は $\bar{x}$ が増大するにつれて減衰する関数であるから、この条件を満たす(4-8)の解は

$$\begin{aligned} \bar{P}_2(\bar{x}, \bar{t}) = & A \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right) \\ & \cdot \cos\left(2\pi \bar{t} - \sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right) \dots\dots\dots (4-10) \end{aligned}$$

(4-9) と (4-10) を (4-6) 式に代入すれば次式が得られる。

$$\begin{aligned} \bar{P}(\bar{x}, \bar{t}) = & \frac{1}{\alpha} \cos(2\pi \bar{t}) \\ & + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right) \\ & \cdot \cos\left(2\pi \bar{t} - \sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right) \dots\dots\dots (4-11) \end{aligned}$$

ただし、上式の右辺第2項の係数 $(1-1/\alpha)$ は埋立て砂層入口の断面における境界条件、すなわち(4-12)式から決めたものである。

$$\bar{P}(0, \bar{t}) = \frac{P_s(\bar{t})}{P_0} = \cos(2\pi \bar{t}) \dots\dots\dots (4-12)$$

この式は、酒井ら(1993)が求めた解と同じ形の解であ

る。ここで(4-11)式を次式のように変形する。

$$\begin{aligned} \bar{P}(\bar{x}, \bar{t}) = & \frac{1}{\alpha} \cos\left\{\left(2\pi \bar{t} - \sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right) + \sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right\} \\ & + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right) \\ & \cdot \cos\left(2\pi \bar{t} - \sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right) \dots\dots\dots (4-13) \end{aligned}$$

上式を整理すると、最終的には次式が得られる。

$$\bar{P}(\bar{x}, \bar{t}) = \sqrt{A^2 + B^2} \cos\left(2\pi \bar{t} - \sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x} + \delta\right) \dots\dots\dots (4-14)$$

ただし、 A 、 B 及び δ はそれぞれ次式で与えられる $\bar{x}$ の変数である。

$$\begin{aligned} A = & \frac{1}{\alpha} \cos\left(\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right) + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right), \\ B = & \frac{1}{\alpha} \sin\left(\sqrt{\frac{\pi\alpha}{C}} \bar{x}\right) \dots\dots\dots (4-15) \end{aligned}$$

$A > 0$ の時 $\delta = \tan^{-1}(B/A)$ 、 $A < 0$ の時 $\delta = \pi - \tan^{-1}(B/A)$ 。式(4-14)及び(4-15)から、埋立て砂層の入口断面に作用する変動圧は砂層内を伝搬する過程で、水平距離 $\bar{x}$ と共に $\sqrt{A^2 + B^2}$ の割合で減衰し、位相は $(\sqrt{\pi\alpha/C} \bar{x} - \delta)$ の割合で遅れることが判る。さらに、減衰率や位相遅れ率は間隙水や砂層の物理特性、砂層の厚さ並びに変動圧の周期等を取り込んだ無次元パラメーター $\sqrt{\pi\alpha/C}$ の複雑な関数形となることが判る。ただし、(4-5)式から明らかなように間隙水や砂層の物理特性や厚さなどの値が決まれば、 $\sqrt{\pi\alpha/C}$ は実質的には $1/\sqrt{T}$ に比例する変数となる。このことは図-4 および図-6 の結果をよく裏付けている。

4.3 減衰率及び位相遅れ率の算定

表-4 は計算に使用するために選定した間隙水及び砂層を構成する砂の物理特性の各値を示す。表中は実測値であり、 m_v 、 m_w は善ら(1987)や酒井ら(1993)の用いた値等を参考にして決めたものである。図-7 はこれらの値を参考にして、 $C=4$ 、 $\alpha=8$ として算定した $\bar{P}(\bar{x}, \bar{t})$ の計算例である。この図には、無次元位置 $\bar{x}$ に対応して発生する変動圧の減衰および位相遅れの様子が良く表現されているように見受けられる。しかしながら、 m_w 、 m_v 、 l 等の値については明確でない点もあり、図-7 に示す計算結果から直ちに(4-14)式の妥当性を云々することは出来ない。そこで、善ら(1987)や酒井ら(1993)の用いた値を参考にして C の値を2から15まで1.0刻で増やしながら α の値を1から50まで1.0刻みで増加させて(4-14)式を計算し、減衰率 $\sqrt{A^2 + B^2}$ 、および位相遅れを周期 T で無次元化した $(\sqrt{\pi\alpha/C} \bar{x} - \delta)/T$ と $\bar{x}$ との回帰式を求めた。次いでこれらの回帰式が実験から

表-4 間隙水および砂層を構成する砂の物理特性

間隙水の圧縮率 m_w	$4.32 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$
砂の堆積弾性係数 m_v	$9.95 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$
透水係数 k	$3.93 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

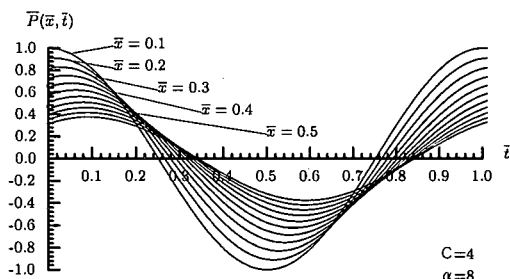


図-7 水平一次元埋立て砂層を伝搬する変動圧の計算例

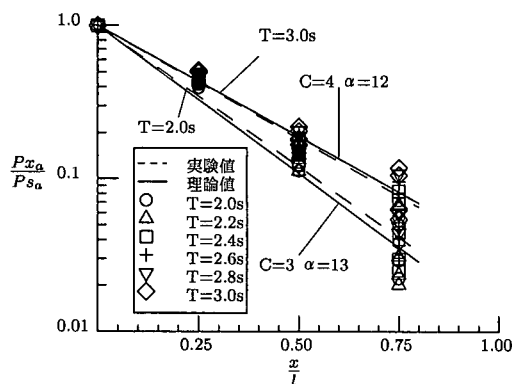


図-8 伝搬距離に対する変動圧の減衰

得られた各関係式に最も良く符合する C および α 値の存在を探した。

図-8 は $\bar{x}$ に対する減衰率の分布図であり、図中に示す 2 本の破線は実験から得られた周期 2 s および 3 s の時の回帰線である。また、2 本の実線は計算から得られた減衰率と $\bar{x}$ との回帰線のうち、破線に最もよく符合する回帰線を示したものである。この図から、 $T=2.0 \text{ s}$ の破線にベストフィットする回帰線は $C=3, \alpha=13$ とした時に、また、 $T=3.0 \text{ s}$ の破線に対する回帰線は $C=4, \alpha=12$ とした時に、それぞれ得られることがわかった。

図-9 は $\bar{x}$ に対する位相遅れの分布図であり、図中に示す 2 本の破線は実験から得られた周期 2.0 s および 3.0 s の時の回帰線である。

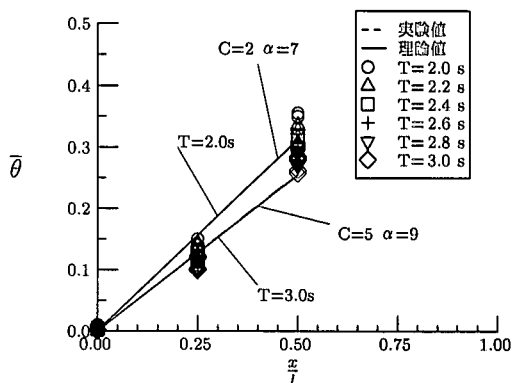


図-9 伝搬距離に対する変動圧の位相遅れ

また、2 本の実線は計算から得られた位相遅れと $\bar{x}$ との回帰線のうち、破線に最もよく符合する回帰線を示したものである。 $T=2.0 \text{ s}$ の破線にベストフィットする回帰線は $C=2, \alpha=7$ とした時に、また、 $T=3.0 \text{ s}$ の破線にベストフィットする回帰線は $C=5, \alpha=9$ とした時に、それぞれ得られることがわかった。これらの事実から C および α に適切な範囲内の値を与えれば、(4-14) 式は埋立て砂層中を伝搬する変動圧の減衰及び位相遅れの双方をほぼ適正に推定することができるものと思われる。

5. 結 論

水平一次元のケーソン式防波護岸模型を用いて実験を行い、埋立て砂層を伝搬する変動圧の減衰と位相遅れが $1/\sqrt{T}$ に支配的影響を受けることを明らかにした。また、砂層内に誘起される変動間隙水圧の基礎方程式を求め、同式の妥当性を確かめた。今後は実験条件等をさらに拡大し、検討を進めて行きたい。

参 考 文 献

- 港湾技術研究所 (1996): 護岸シンポジウム講演集, 394 p.
- 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.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰 (1989): 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.
- 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 sea-walls, Ports '98, ASCE, pp. 571-580.