

潜り堰近傍における塩水層の波動下での挙動

鈴木智浩*・谷本勝利**・Phung Dang Hieu***

潜り堰近傍における塩水層の挙動を実験とともに解析解, 数値計算を用いて検討した。実験は水路に水深 (40 cm) の半分の高さの直立潜堤を設け, 潜堤の高さの 3/4 まで塩水層を形成し, 周期 1 s と 2 s の波をかけたものである。その結果, 淡水の表面波高は周期によって大きな違いは認められないのに対し, 潜堤付近の塩水層の表面波高 (内部波高) は周期が 2 s のとき周期が 1 s のときの約 3.5 倍となった。これは潜堤付近の波動の特徴によるものであるので解析解を用いて検討した。その結果, 周期が長い波では無限級数項が効いて鉛直運動が大きくなることがわかった。これより, 直立潜堤近傍の塩水層の挙動に関しては周期の長い波に対して注意が必要であると指摘できる。

1. はじめに

河川の河口部付近では下層に海水が楔状に侵入する現象がしばしば観測され, 塩水楔現象と称されている。この塩水楔現象は, 川底を上流に数 km も遡って塩害を引き起こすことがある。塩水楔の河口からの遡上距離は一般的に極めて長い。帯水層の水位が低下すると塩水楔は長くなり, 海水が内陸深くに侵入して地下水の塩水化を引き起こす等の被害が発生している。そのため, 塩水楔を阻止する目的で河口部に潜り堰を設置することがある。しかし, 潜り堰を設置した場合, 風波や航走波によって乱された塩水が上流側へ運ばれる恐れがある。そこで本研究では, 潜り堰近傍における塩水層の波動下での挙動の特性を, 実験とともに理論計算と数値計算を用いて検討した。ここで理論計算を進めるにあたっては, 井島ら (1971) による解析解を用いた。また, 数値計算は Hieu ら (2002) のモデルを用いて行った。

2. 実験概要

(1) 実験方法

実験は幅 40 cm, 高さ 75 cm, 長さ 18 m の二次元造波水路で行い, 水深を 40 cm とした。この水路に, 高さ 20 cm の半円形の塩水止めを沖側と岸側に 2 つ設置した状態で, さらにその間に幅 10 cm, 高さ 20 cm の耐水性ベニヤで製作した不透透の潜堤を設置して実験を行った。沖側の塩水止めと潜堤の間にはアリニプルーで青色に着色した塩分濃度約 2% ($\rho_s=1014 \text{ kg/m}^3$) の塩水を h_s の高さまで貯めて, その他の部分は無色の淡水 ($\rho_w=999 \text{ kg/m}^3$) とした。ここで, 水路に 2 つの半円形の塩水止めを設置するのは, 塩水層が造波機の挙動の影響を直接的に受けないようにするためと, 塩水が水路端の消波材に侵入しないようにするためである。実験水路の略図を図-1 に示した。

実験では, 沖から入射した表面波によって塩水層の表面がどのように挙動するかを計測した。計測器は容量式波高計とサーボ式内部波高計を使用し, 表面波と内部波 (塩水層のある濃度での境界面における波動を内部波と呼ぶ) の両方を同時に計測した。サーボ式内部波高計は, 同じ密度の流体を追跡していくので, 塩水層の表面の動きを計測することができる。実験では, 水底から高さ h_s での濃度を追跡し計測した。表面波と内部波の同時測点は潜堤から $L/2$ (L は波長) までの間で 12 地点である。その他, 容量式波高計は, 潜堤位置から 6.25 m 離れたところに $L/4$ 間隔で常時 2 本設置した。波は基本的な内部波の挙動の特性を検討するという観点から規則波とした。入射波高は $H_{\text{input}}=2\sim 10 \text{ cm}$ の 5 種類とし, 周期を 1.0 s と 2.0 s の 2 種類とした。

実験の塩水層は, あらかじめ塩水が入る部分の体積を算出して, 水路内に一定の淡水を入れてから, 一定量の塩水を水路底に注入して形成した。このとき, 淡水と塩水が混じり合わないように細いチューブを使いゆっくりと塩水を注入した。

塩水層の形成は波の周期条件ごとに行い, 5 種の波高の実験が終わるまでそのまま用いた。波高は小さい波高から始め, それぞれの波高の波をかける前に塩分濃度を水面から水底まで 5 cm 毎に測定した。図-2 は $h_s=15 \text{ cm}$ を想定したときの全測定結果をプロットしたものである。塩分濃度が約 2% の塩水を所定の量注入した結果であるが, 測定結果は水面下 20 cm から 30 cm の間で急激に変化する分布となった。想定した塩水層の境界面では濃度のばらつきが大きい。平均濃度は 0.7% 程度である。本研究では, この想定境界面での濃度を追跡して内部波高を求めている。

(2) 潜堤がない場合

はじめに, 潜堤を設置しない状態で実験を行った。このとき, 塩水層の厚さ h_s は 20 cm とした。潜堤設置予定位置での表面波の時間波形を図-3 に, 内部波の時間波形を図-4 に示した。これらは $T=1.0 \text{ s}$, $H_{\text{input}}=6 \text{ cm}$ の場合の例である。縦軸は水位 η で横軸は時間 t を示して

* 工修 (株)エコー 沿岸デザイン本部水理実験部
** フェロー 工博 埼玉大学教授工学部建設工学科
*** 工修 埼玉大学理工学研究科生物環境科学専攻

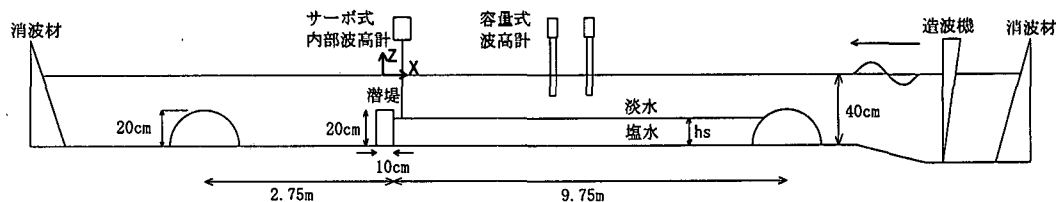
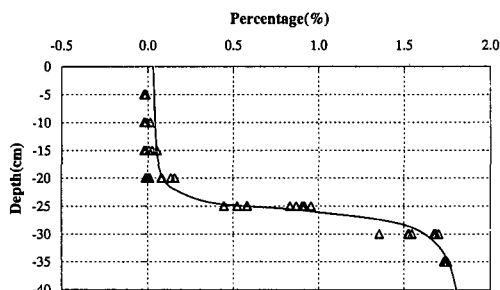
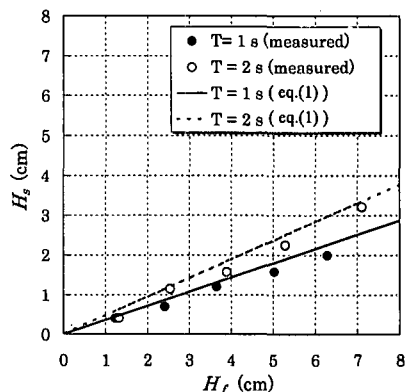
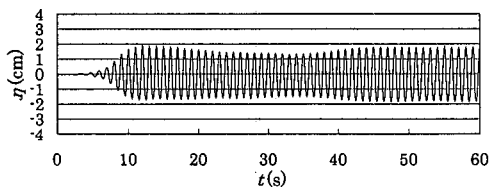
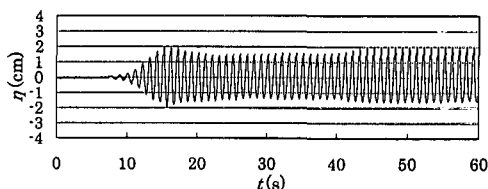
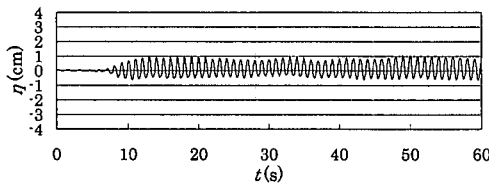
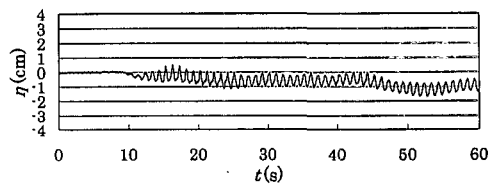


図-1 実験水路の略図

図-2 塩分濃度の鉛直分布 ($h_s = 15$ cm)図-5 表面波高と内部波高の比 ($h_s = 20$ cm)図-3 表面波の時間波形 ($h_s = 20$ cm, $T = 1.0$ s)図-6 表面波の時間波形 ($h_s = 15$ cm, $T = 1.0$ s)図-4 内部波の時間波形 ($h_s = 20$ cm, $T = 1.0$ s)図-7 内部波の時間波形 ($h_s = 15$ cm, $T = 1.0$ s)

いる。時間波形から波高を算出する際のデータ解析においては、表面波、内部波ともに11～15波目を対象とした。

塩水層の存在による波動の変化はないものとして、微小振幅波理論により境界面に相当する位置での水粒子の軌跡から得られる内部波の波高は式(1)のようになる。

$$H_s = H_f \frac{\sinh kh_s}{\sinh kh} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_s ：内部波高、 H_f ：表面波高、 h ：全水深、 h_s ：塩水層の厚さである。図-5はこの式と実験による表面波高と内部波高の関係を示したものである。実験結果の内部波高がやや小さい傾向を示しているものの、両者の関係はほぼ同じであり、この結果は波動そのものに及ぼ

す塩水層の影響は小さいことを例証しているといえる。

(3) 潜堤がある場合

次に、潜堤を設置した状態で実験を行った。このとき、塩水層の厚さ h_s は15 cmとした。 $x/L = 0.35$ における $T = 1.0$ s, $H_{\text{input}} = 6$ cm の場合の表面波と内部波の時間波形を図-6と図-7に示した。内部波の波形を見ると、平均位置が移動していることと長周期の変動を伴っていることがわかる。平均水位の変動は、波が作用したことにより塩水が拡散・混合し、同濃度の位置が下がったことによるものと考えられる。また、長周期波の出現につ

いては今後検討が必要であるが、本研究では長周期変動を除去した短周期成分に関する部分のみを議論することとする。

3. 理論計算の概要

(1) 解析解

直立潜堤に対する井島ら (1971) の解析解を用いて、境界面に相当する位置での水粒子の軌跡を求め、実験による内部波高と比較する。この方法は、水面および水底条件を満足する Laplace の方程式の一般解として速度ポテンシャルを表示し、これに水平方向の境界条件を適用して一般解の任意定数を決定し解を確定するという方法である。

図-8 に示すように水深 h の水底に幅 $2l$ 、深さ $qh(l > q > 0)$ の矩形断面を持つ不透過潜堤があるとすると、流体域は $x = \pm l$ において区分される。不透過潜堤の沖側を領域 I、上面側を領域 II、岸側を領域 III とする。

領域 I における水粒子の軌跡は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
 x - x_0 &= \delta = \int u(x_0, z_0, t) dt \\
 &= \left[-k \frac{ag}{\sigma^2} \sin(\sigma t + kx_0) \right. \\
 &\quad \left. + kb_r \frac{ag}{\sigma^2} \sin(\sigma t + 2kl - kx_0) \right] \frac{\cosh k(z_0 + h)}{\cosh kh} \\
 &\quad + kb_i \frac{ag}{\sigma^2} \cos(\sigma t + 2kl - kx_0) \\
 &\quad - \sum_{m=1}^{\infty} k_m c_r \frac{ag}{\sigma^2} \cos(kl + \sigma t) e^{-k_m(x_0 - l)} \frac{\cos k_m(z_0 + h)}{\cos k_m h} \\
 &\quad + \sum_{m=1}^{\infty} k_m c_i \frac{ag}{\sigma^2} \sin(kl + \sigma t) e^{-k_m(x_0 - l)} \frac{\cos k_m(z_0 + h)}{\cos k_m h} \\
 &\quad \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z - z_0 &= \gamma = \int w(x_0, z_0, t) dt \\
 &= \left[k \frac{ag}{\sigma^2} \cos(\sigma t + kx) \right. \\
 &\quad \left. + kb_r \frac{ag}{\sigma^2} \cos(\sigma t + 2kl - kx) \right] \frac{\sinh k(z + h)}{\cosh kh} \\
 &\quad - kb_i \frac{ag}{\sigma^2} \sin(\sigma t + 2kl - kx) \\
 &\quad - \sum_{m=1}^{\infty} k_m c_r \frac{ag}{\sigma^2} \cos(kl + \sigma t) e^{-k_m(x - l)} \frac{\sin k_m(z + h)}{\cos k_m h} \\
 &\quad + \sum_{m=1}^{\infty} k_m c_i \frac{ag}{\sigma^2} \sin(kl + \sigma t) e^{-k_m(x - l)} \frac{\sin k_m(z + h)}{\cos k_m h} \\
 &\quad \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

ここに、 a : 入射波の振幅、 g : 重力の加速度、 b_r : 反射波を表す定数の実数部分、 b_i : 反射波を表す定数の虚数部分、 c_r : 領域 I における scattering wave を表す定数の実数部分、 c_i : 領域 I における scattering wave を表す定数の虚数部分を表す。また、 $k, k_m (m=1, 2, 3, \dots)$

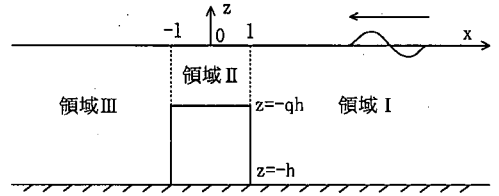


図-8 計算概念図

および $k', k'_n (n=1, 2, 3, \dots)$ は、各領域の水面条件による次式で決まる固有値である。

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma^2 h}{g} &= kh \tanh kh \\
 &= -k_m h \tan k_m h \quad (m=1, 2, 3, \dots) \dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma^2 gh}{g} &= k' gh \tanh k' gh \\
 &= -k'_n gh \tan k'_n gh \quad (n=1, 2, 3, \dots) \dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

解析解から得た水粒子運動の軌跡を図-9 に示した。また、時間により内部波の波形がどのように変化するかを図-10 に示した。ともに縦軸は鉛直方向の距離 z 、横軸は波長 L で無次元化した水平方向の距離 x である。また、周期は 1.0 s で、入射波高は 4.0 cm である。なお、解析解では塩水止めは考慮されていない。図-9 より、水粒子が直立潜堤に近づくにつれて、円運動が鉛直方向に直線的になり、波高が増大していくことがわかる。ここで、直立潜堤の壁面は $x/L = 0.034$ の位置にある。

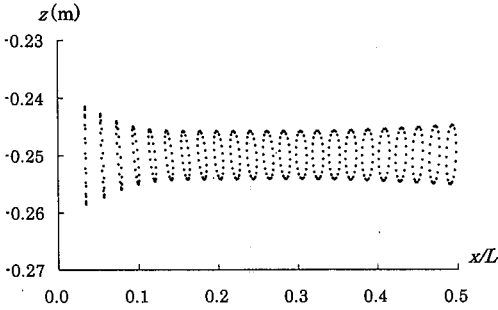
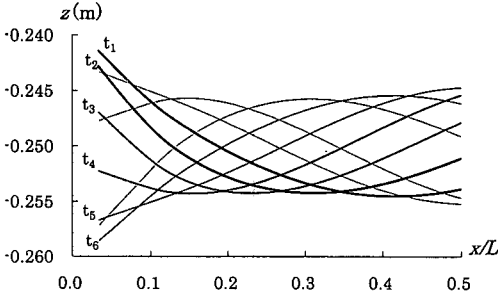
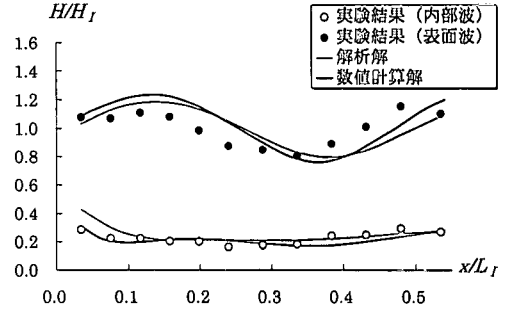
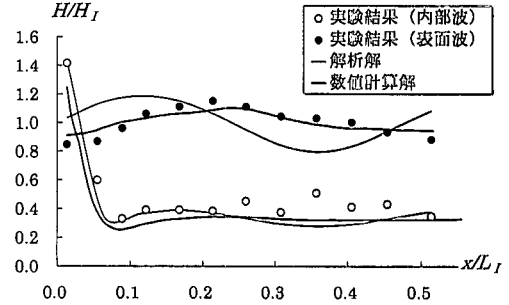
(2) VOF 法に基づく数値解析

数値解析には Hieu ら (2002) による空気層を取り入れたモデルにさらに塩水層を加えたモデルを用いた。その他、今回の計算では造波モデルを造波ソース方式に改良しており、再反射の影響をなくしている。波はストークス波第 3 次近似解を用いた。また、移流項の計算に対し高次スキームを採用している。解析解では塩水止めの影響を考慮していないが、数値解析では前掲図-1 に示した実験水路の条件をそのまま適用した。また、実際には時間が経過したり波を入射させたりすると塩水層の表面に拡散・混合が進展するが、数値解析ではそれらを考慮せずに境界面は大気と接する水面境界面と同様な扱いで計算を行った。

4. 結果と考察

表面波高および内部波高の実験結果と理論計算の結果を図-11、図-12 にそれぞれプロットした。ここでは表面波および内部波の波高 H を入射波高 H_i で割ったものを縦軸に、潜堤の中央からの距離 x を入射波長 L で割ったものを横軸にとった。

周期 1.0 s の場合、表面波については解析解、数値計算解ともに実験値と比較すると若干の位相差が認められ

図-9 水粒子の軌跡 ($T=1.0$ s)図-10 内部波形の時間変化 ($T=1.0$ s)図-11 理論計算との比較 ($T=1.0$ s)図-12 理論計算との比較 ($T=2.0$ s)

る。内部波に関しては理論値と実験値を比較するとほぼ傾向が一致していることが分かる。潜堤付近の値では解析解よりも数値計算解のほうが実験値に近く、波高比は0.3程度である。周期2.0sの場合、解析解の表面波高分布は数値計算解、実験値と比べて位相がずれている。このずれは、解析解の計算において潜堤前後の塩水止めを考慮していないため生じたものと考えられる。内部波高についての理論計算と実験値は周期1.0sの場合と同様、ほぼ傾向が一致することがわかる。ここで、表面波高は周期によってそれほどの違いは認められなかったのに対し、内部波高は周期が2.0sのとき潜堤付近の波高比が1.4程度となり、周期1.0sの場合と比べて3.5倍近くになっていることがわかる。

解析解における計算結果は、数値計算結果よりも表面波においては精度が低い、内部波については傾向をよく表しているといえるので、以下、解析解を用いて周期による内部波の波高の変化を調べる。図-13は周期を1.0sから2.0sまで変化させたときの内部波高の分布を示したものである。ここに示されているように、周期が長くなるにつれて潜堤付近で波高が増大する傾向が確認できる。これは、周期が長くなるにつれて、深いところでの水粒子の運動が大きくなるという浅水波の性質によってもいるが、たとえば、直立壁が水面上まで伸びた完全重複波の場合について同様に壁面での内部波高を求めると、周期1.0sのときの波高比は0.51であるのに対し、

周期2.0sのときの波高比は0.70である。よって、周期2.0sの内部波高は周期1.0sの内部波高の1.37倍ではない。したがって、周期が長くなると内部波高が急激に3.5倍にも大きくなるというのは潜堤の特色であり、それが式の上では無限級数項で表されている。完全重複波の場合、式に無限級数項を含んでいないため、その影響はない。ここで、無限級数項は減衰定常波を表す項である。そのため、無限級数項の影響を検討するために無限級数項を省略した計算を行ってみた。

図-14は周期2.0sの条件に対し、無限級数項あり、なしの場合の軌跡を示したものである。これにより、無限級数項を無視した水粒子運動の潜堤付近での軌跡による波高は、無限級数項を含む軌跡による波高よりも著しく小さいことがわかる。また、無限級数項の影響は潜堤か

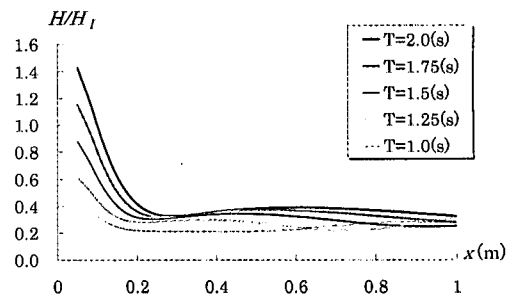
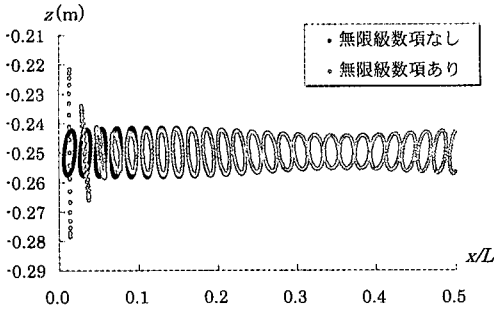


図-13 周期と内部波高


 図-14 水粒子の軌跡の比較 ($T=2.0$ s)

ら遠ざかるにつれて小さくなり、次第に無限級数項を含む解と一致するようになることも確認される。これから、周期が長くなるにつれて潜堤付近の内部波高が大きくなるのは減衰定常波の影響であり、潜堤特有の現象といえることができる。

以上の結果から直立潜堤前の塩水層の問題を考えたとき、周期の長い波に対しては、内部波高が著しく増大することに留意する必要があると指摘できる。周期が長い波としては、河口付近では外海からの侵入波が考えられる。また、谷本ら (2003) は船の航行によって造られる航走波にも周期の長い成分が含まれることを指摘しており、航走波による塩水層への影響を考慮していく必要があるといえる。

5. おわりに

以上、直立潜堤付近での波作用下での塩水層の挙動を実験および計算によって検討した。主要な結論は次のとおりである。

- 1) 塩水面の波周期による運動は、塩水層を無視した波の理論によるその高さでの水粒子の軌跡で概略推定

できる。

- 2) 直立潜堤前面での内部波高は、表面波の周期が長くなるにつれて急激に大きくなる。これは潜堤特有の現象であり、式の上では減衰定常波の影響として評価できる。

なお、本研究では塩水面の波作用下での挙動に対し、長周期変動を除いた波周期による変動のみを対象としたが、実験では長周期変動が認められており、この点については今後の検討課題である。また、実験や数値計算においては、引き波時に渦が発生して塩水面を巻き上げたり、条件によっては塩水層の越流現象が現れており、これらの点についても今後検討していくことが必要である。

謝辞：本研究の実験は、2001 年度に当時埼玉大学理工学研究科博士前期過程の Wita Purwasih によって行われたものである。また、国土交通省国土総合技術研究所の古川恵太室長には実験測定技術等について教示を得た。ここに、感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 井島武士・佐々木富雄 (1971): 潜堤の効果に関する理論的研究—1. 不透過潜堤—, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 141-147.
- 谷本勝利・Eldina Fatimah・Dam Khanh Toan・田中規夫 (2003): 直立護岸における航走波の現地観測, 日本沿岸域学会論文集, No. 15, pp. 101-112.
- 土木学会編 (2000): 水理公式集例題プログラム集, p. 27.
- 堀川清司 (1991): [新編] 海岸工学, 東大出版会, p. 16.
- Phung, D. H. and K. Tanimoto (2002): A two-phase flow model for simulation of wave transformation in shallow water, Proc. 4 th Int. Summer Symp. JSCE, pp. 179-182.