

潜堤背後の底面圧力変動に関する研究

INVESTIGATION OF BOTTOM PRESSURE BEHIND THE SUBMERGED BREAKWATER

南 将人¹・羽鳥 やすこ²・上田 雄一³・竹林 剛⁴・田中 博通⁵

Masato Minami, Yasuko Hatori, Yuichi Ueda, Tsuyoshi Takebayashi, Hiromichi Tanaka

1 正会員 工修 八戸高専 建設環境工学科 (〒039-1192 八戸市田面木上野平 16-1)

2,4 学生会員 長岡技術科学大学

3 (株) ダイダン

5 正会員 工博 東海大学 教授 海洋土木工学科

The Submerged Breakwater has been used in compensation for detached Breakwater. Occasionally the bottom of Submerged Breakwater was partially scoured. In this paper, the characteristics of bottom pressure behind the Submerged Breakwater was investigated experimentally. The main conclusions were that the range of bottom pressure was 0.6 times of wave height, and at wave trough the base pressure was nearly hydrostatic pressure.

Key Words: Submerged breakwater, bottom pressure, PTV, boussinesq

1. 目的

景観性の重視や魚類の生息基地等、様々な機能を有しながら、主に海岸保全施設として離岸堤に代わって潜堤が使用されている。しかし、設置場所によっては、その直背後底面において局所洗掘現象¹⁾といった離岸堤には見られない現象が発生している。

本研究は、この潜堤背後の局所洗掘現象を生じる主要因の1つである底面圧力変動を水理模型実験で測定し特性について検討したものである。また、流速場を測定し、底面圧力結果と合わせて洗掘現象の要因について若干の考察を加えたものである。さらに、砕波した水塊が背後に飛び込む事によって生じる乱流場をモデル化した運動方程式に組み込み、その数値計算結果と実験結果とを比較してモデルの検証を行った。

2. 水理実験方法

本研究は、圧力計を用いた測定実験と中立浮子を用いた可視化実験より構成される。

(1) 底面圧力測定

長さ 10m のプランジャー型造波機付き開水路に、潜堤天端幅 $B=0.375\text{m}$ 、高さ $h=0.175\text{m}$ 、法面勾配 1:2 の不透過型の潜堤模型²⁾を設置した。実験水位を $D=0.3\text{m}$ とし、周期の異なる 2 種類の波を用い、容量式波高計と小型圧力計 ($\phi 5\text{mm}$: ST 研究社) により、潜堤岸側法先 ($X=0\text{m}$) から岸側に 5cm ピッチで水位変化と底面圧力変化を造波開始と同時に計測し、200Hz で A/D 変換してパソコンに取り込み、解析範囲を設定し極値の解析を行った。

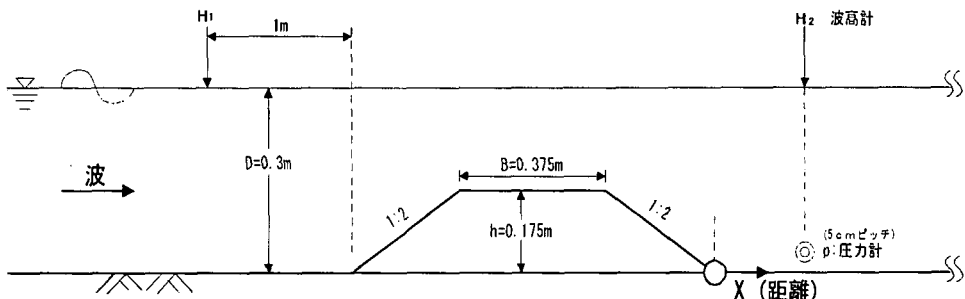


図-1 潜堤形状と測定位置図

また、小型圧力計（応答周波数 3 kHz 以上）は、実験前後の静水状態で、センサーを 1 cm ピッチで上下させて出力電圧を測定し、線形性および回帰性を確認した。図-1 に潜堤形状と底面圧力の測定位置を示す。

(2)可視化実験³⁾

可視化実験には、粒子表面に蛍光塗料を塗布した中立浮子（トレーサー：（株）タナックス）を使用した。この浮子の粒径は 0.4mm 以下、比重は 1.03 であり、これを静水状態時に注入した。撮影のためのスリット光源としてレーザーライトシート（アルゴンタイプ：最大出力 10W：幅 4 mm）を使用し、水路中央上方に波の進行方向に平行になるように設置し、水路側面からビデオカメラ（CCD-TRV66：SONY）で粒子の移動状況を撮影した。そして、この撮影した画像を画像解析装置（Nexus Qube：（株）ネクサス）に取り込み、1/15 秒毎に流速の算出を行った。

(3)作用波と実験ケース

本実験に用いた波浪諸元は、既往の研究⁴⁾を参考に表-1 に示す 2 種類を用いた。表に示す様に、それぞれの波形勾配は 0.045 と 0.080 と約 2 倍の大きさとなるように周期を変化させた。

表-1 実験ケース一覧表

番号	波高 (cm)	周期 (s)	波長 (cm)	波形勾配
1	8.5	1.25	187	0.045
2	9.5	0.90	117	0.080

3. 圧力測定結果

(1)時系列変化

図-2 に、Case-1 における潜堤背後 $X=10\text{cm}$ の測定結果を示す。図中の(a)は沖側の水位変化を、(b)は背後の水位変化を、そして(c)は底面圧力変動を示す。造波直前は静止状態であるため、第 3 波目の水位変動および底面圧力について検討する。

まず、沖側と潜堤背後の水位変化を比較すると、背後の波高が小さくなっており、潜堤での砕波により波高が減衰している事が分かる。潜堤上での砕波状況を写真-1 に示す。これは潜堤岸側法先部 ($X=0\text{cm}$) で水位が最高となる瞬間の砕波状況を示したものである。潜堤上で砕波した水塊の飛び込みによって水面が振動して三日月状に全水深の 3 割相当の範囲で空気を巻き込んでいる。

図-2(b)の記号 A に示す様に、背後の水位変動には高周波振動成分が生じている。これは、背後への水塊の飛び込みによるものと考えられる。

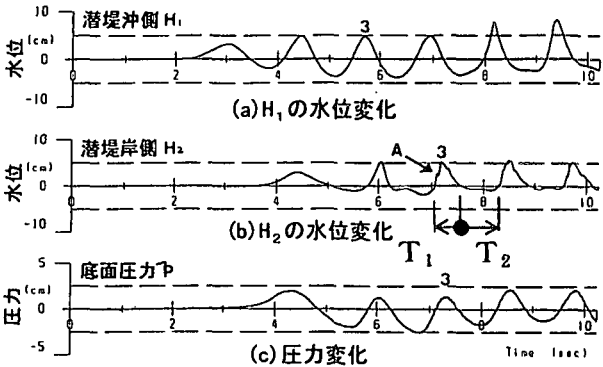


図-2 測定結果一例 (Case-1 : $X=10\text{cm}$)

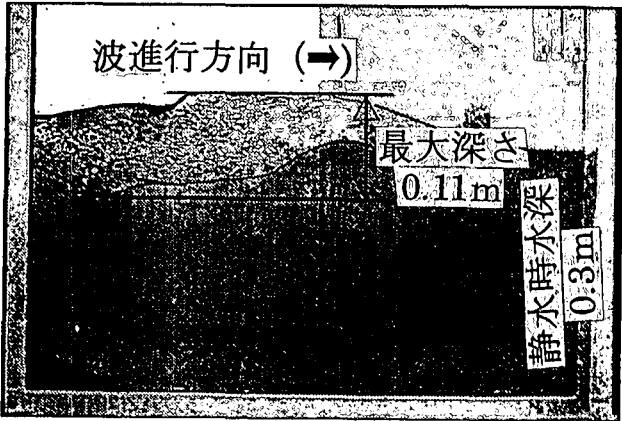


写真-1 砕波状況 (Case-1)

次に底面圧力変化について検討する。(c)の底面圧力変動には、前述のような高周波成分が見られない。写真-1 に見られるように、表面では激しく乱れているものの、底面付近では上下方向の中立浮子の移動がほとんど見られなかった。表面の乱れの影響が底面に達する前に分散（高周波成分が消されて）されてしまうものと考えられる。

また、潜堤背後における水位変化のピーク発生時期と圧力ピークの発生時期を比較すると両者はほぼ同じであった。直背後では水面が激しく振動しているのに対し、底面圧力のピークの位相は背後への伝達波と同じである事より、砂移動の位相の検討には表面の乱れによる位相のずれは小さいものと考えられる。

(2)圧力の振幅の変化

a) Case-1 ($H/L=0.045$)

図-3 に、底面圧力の振幅 (Δp : 最大と最小の差) をその位置の全水深 ($D=h+\eta_{max}$) で無次元化した結果を示す ($\Delta p/D$)。全水深に対して底面圧力の変動幅がどの程度になるかについて整理した。ここでは、底面に作用する圧力 (= 波動成分 + 静水圧成分) の内、波動成分によるものについて整理した。

また、この図における横軸の無次元距離 ($x'=x/L$) の算定には、潜堤沖側の周期 T に対する波長 (L) を用いた。図中には、潜堤背後の波高 (H_2) を入射波高で (H_1) 無次元化した結果を併記した。

Case-1 における潜堤背後の波高の変化 (▲印) を見ると、直背後では急激な波高変化により 0.7 まで減衰し、その後波の伝播と共に再生しながら波高が増大し、 $x/L=0.5$ 以降でまた減衰する凸型となっている。

無次元圧力値 (●印) は、潜堤背後で平均約 0.11 程度となっており、底面圧力の変動幅は全水深の 1 割と見積もられる。この値は、潜堤直背後 ($x=0\text{cm}$) で 0.1 となり、潜堤から離れるに従って増加し、最大値は $x/L=0.5$ の地点で 0.13 となっていた。潜堤直背後より $1/2$ 波長離れた位置での底面圧力の変動幅が大きいという事が分かる。

b) Case-2 ($H/L=0.080$)

図-4 に Case-2 の場合の結果を示す。なお、縦軸の無次元圧力振動は 10 倍した値である。Case-1 と比較して、周期が短く波形勾配が大きい場合である。

波高比 (▲印) を見ると、潜堤直背後から波高比が 0.8~0.5 までほぼ直線的に、波の伝播と共に減衰している場合である。

無次元圧力値 (●印) は、平均 0.08 と Case-1 に比べて小さい。潜堤から離れるに従って変動幅が小さくなり、 $1/2$ 波長を超えると増加に転じる。波形勾配が大きい (周期が短い) と水塊の飛び込みによる乱流場が局所的になるためと考えられる。

(3) 水位最低時

a) Case-1

図-5 に、波の谷時における底面の圧力を全水深で無次元化した結果を示す (「 p' 」: 無次元負側圧力) と記述: 図中の記号: ●印)。即ち、水位最低時の底面圧力が、静水圧の何倍に相当するかを算定した結果である。

無次元負側圧力の分布は凹型分布となり、潜堤背後における無次元化圧力は、0.95 に相当する圧力変化を示している。しかし、 $x/L > 0.7$ の領域においてはほぼ $p'=1.0$ となりほぼ静水圧と等しい圧力となっている。潜堤直背後の領域において、静水圧より小さい事より、下向きの圧力が弱く浮き上がり安くなっているものと考えられる。

b) Case-2

図-6 に Case 2 での実験結果を示す。潜堤背後での圧力変化はほぼ 1 となっており、静水圧にほぼ一致している。周期が短い場合には水塊の飛び込みにより表面は激しく振動するものの、鉛直範囲は狭く底面への影響は急激に小さくなっているものと考えられる。

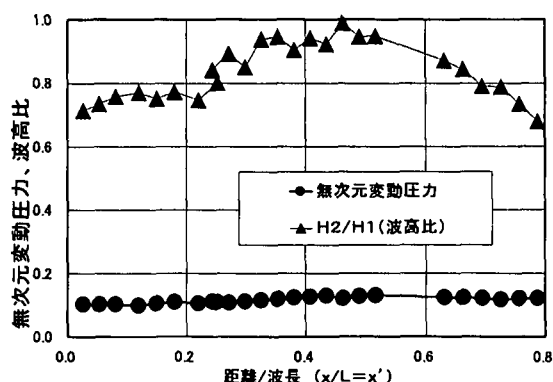


図-3 無次元変動圧力 (Case-1)

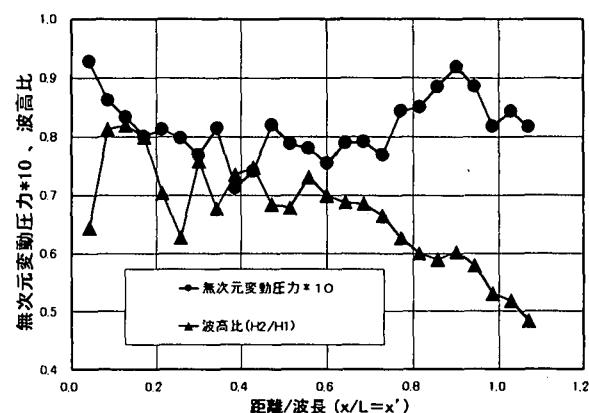


図-4 無次元変動圧力 (Case-2)

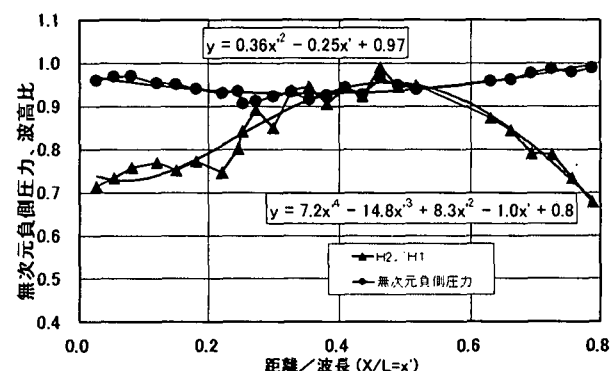


図-5 無次元負側圧力 (Case-1)

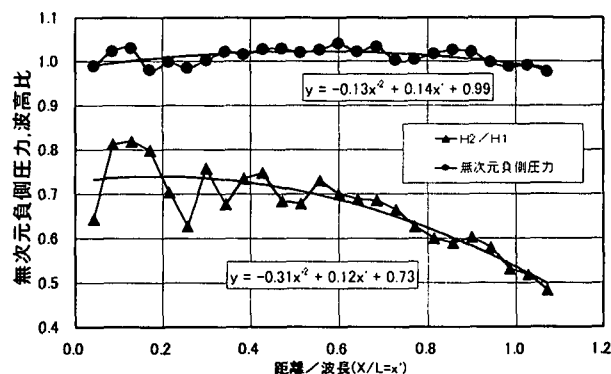


図-6 無次元負側圧力 (Case-2)

(4) 圧力変化幅と波高の比

図-7 に Case-1 における底面圧力の変化幅を波高で無次元化した結果を示す。図中の破線は多項式による近似曲線を求めたものである。

微小振幅波の底面における圧力の波動成分の振幅 (Δp) は、式 (1) で与えられる。

$$\frac{\Delta p_{max}}{w_0 H} = \frac{1}{\cosh(2\pi/L)} \quad (1)$$

図より、波高に対する圧力変動幅の比は平均 0.61 であり、波の伝播と共にその値は小さくなり $x/L=0.4$ で最小値 0.59 となり、その後増加する凹型の分布となり、前述の図-3 の波高比分布と逆の分布傾向となっている。

潜堤直背後の底面付近では、水塊の飛び込みより圧力の変動は波高の約 6 割程度であるが、圧力変動幅の大きさは背後の波高の増加と共に大きくなっている事が分かる。

4. 流速分布

Case-1 における PTV による流速ベクトルの算定結果を示す。図-8 は静水面から水位が下がる瞬間（下降時と記述）を、図-9 は水位が上がる瞬間（上昇時）の結果である。

両者を比較すると、水位最低時から静水面を上方に切る瞬間（上昇時）に底面付近の流速ベクトルが水位下降時より大きくなっている事が分かる。また、その時の流れの向きは冲向きとなっている。

図-8 において下降時の流速ベクトルの分布は反時計回りとなっており、表面に近い程その速さが大きく、底面に近づくに従って流速が小さくなっている。有限振幅性を考慮した長波の波速式 $C = \sqrt{g(h + \eta_{max})}$ は 1.83m/s であり、表面付近の流速比は 0.16 倍、水深の中央部で 0.12 倍、そして底面付近では 0.08 倍となっており、波速の 1/5~1/10 となっている。

次に、図-9 の水面上昇時の流速分布を見ると、ほぼ鉛直方向に一樣に冲向きの流れとなっている。表面と底面の流速差は小さく、前述の波速の約 0.14 倍となっている。局所的に潜堤岸側法先付近で 0.2 倍の場所も見られるが、底面付近程大きくなる事が分かる。

第3章の底面圧力の変化と合わせて砂移動に寄与する圧力と流速の影響をまとめると次のようになる。

水面が上昇する瞬間に底面の砂は潜堤の方へ大きく移動し、そして次の波で岸方向に運ばれていく。この直前、底面の圧力は静水圧より小さく、急激な水面の上昇変化によって浮き上がりやすくなり、浮き上がった浮子は、岸向の流れによって移動する。水面変化の継続時間（波の有限振幅性）を考慮すると、図-2 に示した下降時の継続時間 (T_d) の継続時間がプラス

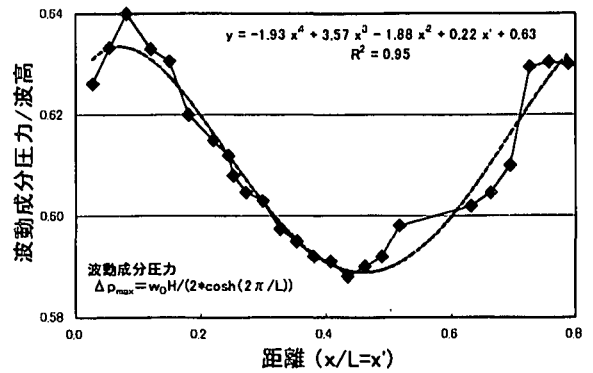


図-7 波動成分振幅の変化 (Case1)

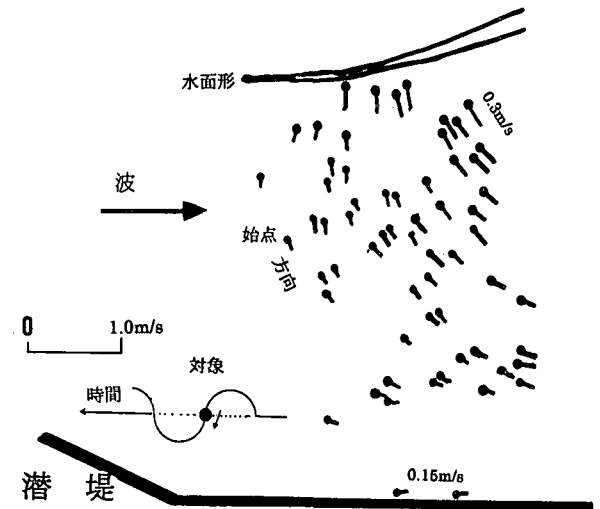


図-8 流速ベクトル図（水位下降時）

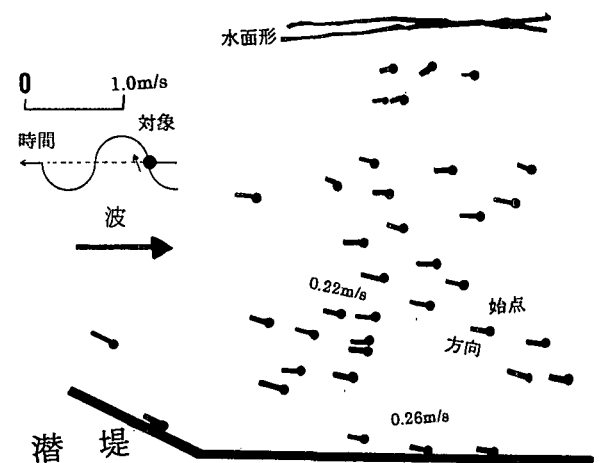


図-9 流速ベクトル図（水面上昇時）

時 (T_d) より長く、1 波当たりの移動は水面の上昇時に顕著となるものと考えられる。

5. 数値計算

(1)基礎式とレイノルズ応力のモデル化⁵⁾

砕波によって生じる表面のレイノルズ応力をモデル化して組み込んだ数値計算を実施し、潜堤背後の水位変化を測定結果と比較する事により砕波モデルの妥当性について検討した。

鉛直2次元断面で、静水面を基準に波の進行方向にX軸を、鉛直向きにY軸を設定する。

X軸方向のレイノルズ方程式を、分子粘性を無視して底面($y=-h$)から水面($y=\eta$)まで積分し、ある時刻の流速値 u を平均値と乱れ成分(u')の合成とし、表面摩擦力をゼロ、底面摩擦力は断面平均流速の2乗に比例すると仮定する。圧力項は摂動展開して第2次近似まで考え、さらにレイノルズ方程式から生じる $\overline{u'u'}$ を混合距離理論と渦動拡散係数を用いて変形した。渦動拡散係数の代表長さとして波高(η)、速度として孤立波の波速 $C=\sqrt{g(h+\eta)}$ を用いて変形する。

以下、数値計算に用いた3種類の基礎式を示す。

連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \{u(h+\eta)\}}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{R}{D} \\ = \frac{h^2}{3} \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial x^2} + h \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} - f \frac{u^2}{D} \end{aligned} \quad (3)$$

レイノルズ応力(R/D)のモデル化⁶⁾

$$R = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \overline{u'u'} dy = N \sqrt{g} \frac{\partial}{\partial x} \left[h(h+\eta)^{3/2} \frac{\partial u}{\partial x} \right] \quad (4)$$

ここで、 u ：鉛直断面平均流速

$\overline{u'u'}$ ：レイノルズ応力

D ：全水深($=h+\eta$)

η ：水位

h ：静水深

N ：常数($=0.1$)

f ：摩擦係数

数値計算には、予測子-修正子法を用い、 $\Delta x=1\text{cm}$ 、 $\Delta t=1/200$ 秒とし、実験で測定した水位の時間変化を入射境界条件として与えた。また、計算領域に反射波が生じない様にする為に計算領域を長く設定し、反対側に波が到達する前に計算を終了させた。

作用させた波は潜堤上で写真-1に示す様に砕波するが、その判定には、佐藤らに習って水表面における水粒子と速度と波速比を用いた。平石ら⁷⁾に習って Boussinesq 方程式(式3と同等)における水表面の水粒子速度⁸⁾(u_s)を計算点毎に各時刻毎に求めた。既往の研究例を参考に、その比が1.0倍以上になった場合を砕波として判定し、前述のレイノルズ応力をモデル化した項を加え、水位変化の計算を行った。

(2)水位の比較

図-10に、水位変化の式(2)～(4)を用いた数値計算結果と測定結果の比較例を示す。

この図は、実験ケース1で潜堤背後の距離 $X=20\text{cm}$ 地点の結果である。図中の太線は実験値を、細線は計算結果を示している。

第2波から3波の範囲を見ると、ほぼ水位の最高と最低値、および小さな振動(図中A地点)は再現できているものの、第3波の下降期以後の再現性が弱い。また、第3波以降のピーク位相は実験値に比べやや発生時期が遅れている。潜堤背後において静水面下の移動量が小さい事の再現が不十分であるもの、最初の数波の大きさについては、ある程度、数値計算によって再現出来る。

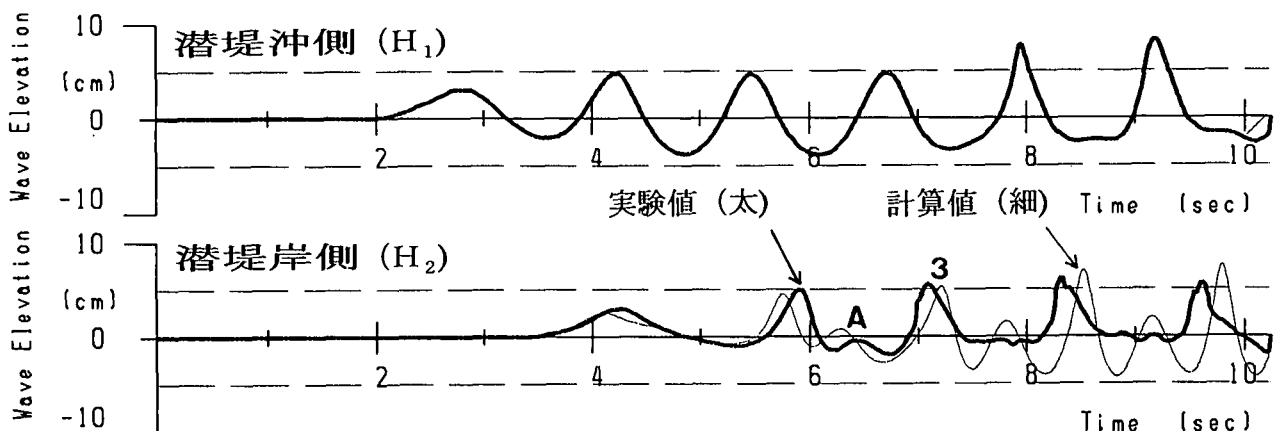


図-10 水位の比較(計算結果と実験結果 Case-1 $X=20\text{cm}$)

6. まとめ

小型圧力計を用いて潜堤背後底面の圧力ならびに水位と流速を測定した。本研究により得られた結論を列記する。

- (1) 潜堤背後の水位および圧力変化を比較すると圧力変動には高周波成分が見られず、底面に達する前に分散されてしまうものと考えられる。
- (2) 波動成分の圧力変動幅と全水深との比は 0.08～0.13 の約 1 割程度であった。また、波形勾配が大きい程、その値は小さくなる。
- (3) 水位最低時の底面の圧力を全水深（＝静水圧）で無次元化した結果、波形勾配が 0.08 の場合はほぼ全水深と同じであるが、波形勾配が 0.04 ではその値が 0.9 程度と、静水圧より小さくなる。
- (4) 水面上昇時の底面付近の流速は、波速の約 14% であり、鉛直方向はほぼ一様となり、下降時のそれより大きい。
- (5) 水塊の飛び込みによる乱れ場を混合距離でモデル化した項を組み込んだブシネスク方程式を用いる事で、潜堤背後の水位変化を求められる可能性が示された。

謝辞：本研究の遂行に当たり、東北大学真野明教授より御指導を賜りました。また、本研究の一部は、文部省科学研究費（奨励研究 A（番号：11750463））により行われました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤正一：「海岸制御工法の実例」、1996 年度水工学に関する夏期研修会論文集・B、pp. B-8-1～B-8-20, 土木学会海岸工学委員会・水理学委員会, 1996. 7.
- 2) 海岸波動【波・構造物・地盤の相互作用の解析法】：土木学会海岸工学委員会.
- 3) 南将人、梅村豪、大向達也、鎌田剛、種市賀有、田中博通：潜堤の波高減衰と背後の空気巻き込み領域に関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 76-80, 1997.
- 4) 上田雄一、羽鳥やすこ、南将人：潜堤背後の底面圧力に関する実験、東北支部技術研究発表会講演概要、pp. 152-153, 2000. 3.
- 5) 南将人：潜堤天端幅と波高減衰に関する研究、東北地域災害科学研究、第 36 巻、pp. 247-252, 平成 12 年 3 月.
- 6) 南将人、真野明：ソリトン波列の砕波後の変形過程, 第 34 回海岸工学講演会論文集、pp. 56-60, 1987.
- 7) 平石哲也、上原功、鈴木康正：ブシネスク方程式を用いた波浪変形計算法の適用性、港湾技術資料、No. 814, 20p., Dec. 1995.
- 8) 片山裕之、佐藤慎司：Boussinesq 方程式を用いた不規則波の浅水・砕波変形の計算法、海岸工学論文集、Vol. 40, pp. 16-20, 1993.