

潜堤に斜め入射した波浪の波高低減に関する実験

Experiment on Wave Transformation around Submerged Breakwater

河合弘泰*, 工藤 巧*, 榎本達也**, 上原 功***, 平石哲也*

Hiroyasu Kawai, Takumi Kudoh, Tatsuya Masumoto, Isao Uehara and Tetsuya Hiraishi

The characteristic of waves and currents around a submerged breakwater is studied by a large scale three-dimensional experiment. The wave height decreases on the submerged breakwater by plunging breaker. The wave heights measured in laboratory simulation are compared with those estimated in numerical models. The comparison demonstrates the applicability of the Boussinesq model to estimate wave profiles on the submerged breakwater. The experimental formula for the wave height estimation is also proposed. The velocity of the steady current at the backward of the submerged breakwater is much larger than that at the forward. The large current may occur the serious scoring.

Keywords; (submerged breakwater, large scale laboratory simulation, wave height, current velocity)

1. はじめに

海浜を安定させるために潜堤を設置すると、潜堤の背後で侵食が発生する場合がある。このような侵食の原因としては、潜堤によって砂の供給が妨げられることや、潜堤背後で流れが速くなるために砂が浮遊して流出することが考えられる。そこで、本研究では、潜堤周辺の砂移動に影響を及ぼす波・流れ場の特性を模型実験によって明らかにした。現地海岸では必ずしも潜堤に対して直角に波が入射するわけではないので、今回の実験では潜堤に対する入射角を45degとした。

ところで、これまで行なわれてきた潜堤周辺の波・流れに関する模型実験の多くは、断面実験によるものか、平面実験であっても模型縮尺の小さいものであった。本研究においては、現実に即した潜堤周辺の波・流れ場を再現するために、大きな模型縮尺により平面実験を行なった。また、この実験によって得られた波高、周期、流速の値を用いて、既往の数値計算モデルの適用性も検討した。

2. 実験の方法

2.1 実験条件

図-1に潜堤模型および計測機器の配置を示す。実験に用いた水槽の大きさは37m×25mであり、この水槽には多方向不規則波造波装置(幅80cm×35枚)が設置されている。水槽の周りには消波箱が設置してあり、造波装置で発生させた波や模型によって反射した波を吸収することができる。潜堤模型は水槽の中央部に設置した。潜堤の高さは30cmであり、水深は32cmまたは34cm(天端上水深では2cmまたは4cm)とした。

実験では、造波板前面、潜堤の前面、天端上、背後の合計11点で波高を測定するとともに、潜堤からの反射波の影響を受けると予想される位置で方向スペクトルも測定した。図-1に示したH1～H15が波高の測定地点である。また、潜堤の前面、天端上、背後の合計6点にける流速を2成分電磁式流速計で測定した。図-1に示したU1～U6が流速の測定地点である。なお、潜堤の前面および背後では上層(底面から20cm)および下層(底面から5cm)とにわけて流速を測定し、天端上では一層とみなして底面から1cmの位置で流速を測定した。

入射波は、波高が0.7～6.0cm、周期が1.0sの、規則波、単一方向不規則波、多方向不規則波(方向集中度 $S_{max}=25$)であり、潜堤の軸に対して45degで入射させた。

2.2 計測開始時刻

図-2は、規則波を発生させたときに波高計および流速計で得られた波形である。この図に示した時刻 t は、造波開始時刻を基準とした経過時間である。波高は潜堤前面(H3)、天端上(H7)、背後(H11)の順に一定となり、造波開始後約40sで潜堤周りの波浪場は安定する。一方、流れの場が安定するのに必要な時間をみると、来襲する個々の波の影響が卓越する潜堤前面(U1)では造波開始後約10sで安定するのに対し、潜堤背後(U3)では少なくとも70s以上を要している。そこで、今回の実験においてはこれに20sの余裕をとり、造波開始後90sに計測を開始することにした。なお、図-1に示したように、 x は潜堤の長軸に平行な向き、 y はこれに直交する向きと定義した。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部(〒239 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

** 東洋建設株式会社横浜港作業所(前 港湾技術研究所研修生)

*** 正会員 若築建設株式会社土木本部設計部

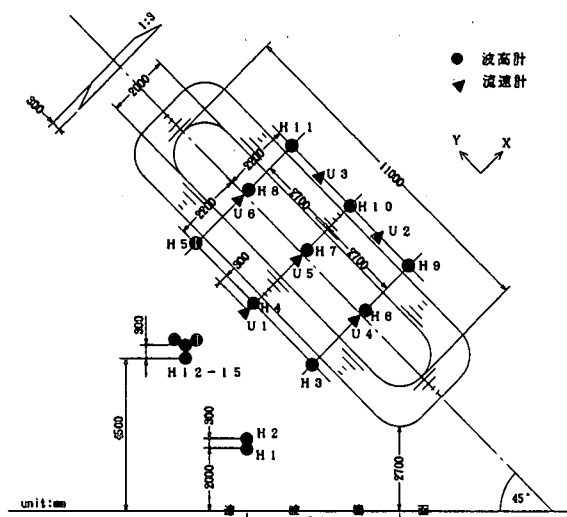


図-1 潜堤模型および計測機器の配置

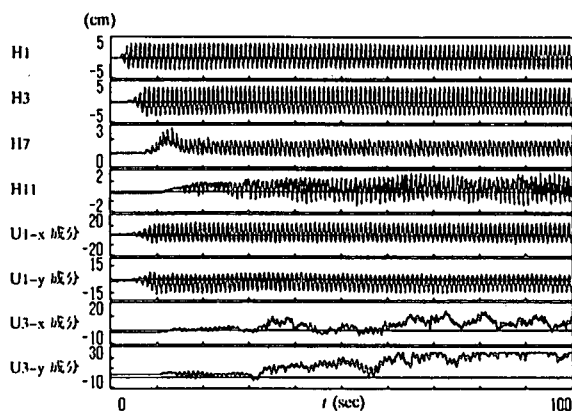


図-2 波高計および流速計で得られた波形の例

(注) 流速計の感度を高くし過ぎたため、U3-y方向は70s以降断続的に振り切れている。しかし、70s以降に平均流速が約30cm/sで安定していることは想像できる。なお、本番の実験では適切な感度に調整した。

3. 潜堤周辺の波高および周期

3.1 潜堤前面における波高増大

図-3は、潜堤周辺の波高および周期を、入射波の波高および周期で無次元化して示したものである。規則波については、潜堤前面（H3～H5）で造波板前面（H1，H2）と比較して10%以上の波高増大が起きている。潜堤前面の水深は波高の5倍以上あるので、この波高増大は浅水変形によるものではない。反射波の主波向は潜堤に対して45deg（造波板と平行）であると考えられ、図-1に示したように、波高計H3～H5は反射波の影響を受ける場所に位置している。

不規則波でも潜堤前面における波高増大が起きているが、規則波ほど顕著ではない。

3.2 潜堤端部の法肩で起きる巻き波

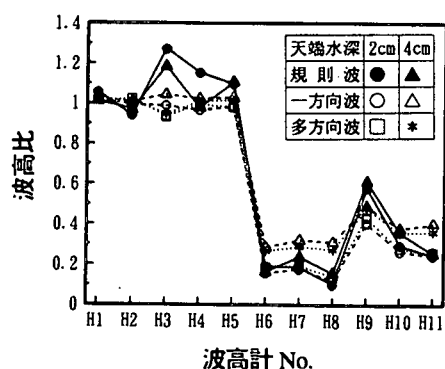
潜堤の両端部のうちで造波装置に近い側では、入射波の谷が潜堤法肩を通過するときに法肩が干上がり、そこに入射する峯は巻き波となって砕波する。潜堤上の波高（H6～H8）が潜堤前面（H3～H5）と比較して小さくなっているのはそのためである。ちなみに、入射波高が6cmのときの砕波帯相似パラメータ ξ は、

$$\xi = \tan \theta / \sqrt{H/L_0} = 1.61 \quad (1)$$

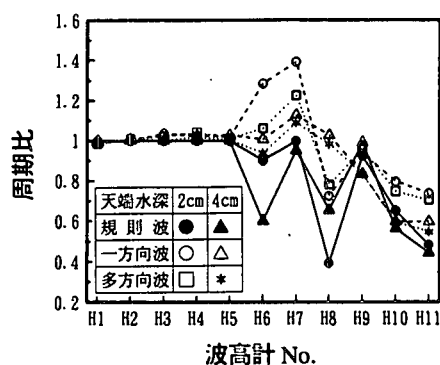
であり、巻き波の範囲（ $\xi = 0.5 \sim 3.3$ ）に含まれている。また、著者らが別途行った実験によれば、勾配が1/3の斜面上において砕波による波高減衰が始まる相対水深は0.5～1である。入射波高6cmに対する天端上の相対水深は0.33または0.67であり、ちょうど法肩付近で波高減衰が生じるような実験条件となっている。

3.3 潜堤上における周期の変化

図-3(b)の周期変化を見ると、規則波では、潜堤端部（H6，H8）の周期が潜堤前面（H3～H5）と比べて短い。潜堤端部では、潜堤の前面から入射した波と、回折や屈折によって潜堤背後に回り込んで入射する波とが重なり合い、波の峯が格子のように重なり合うことが目視によって確認された。図-4の波形記録で波の峯が分裂している原因としては、波の非線形現象の他に異なった方向に進む波の重ね合わせも考えられる。また、波形が滑

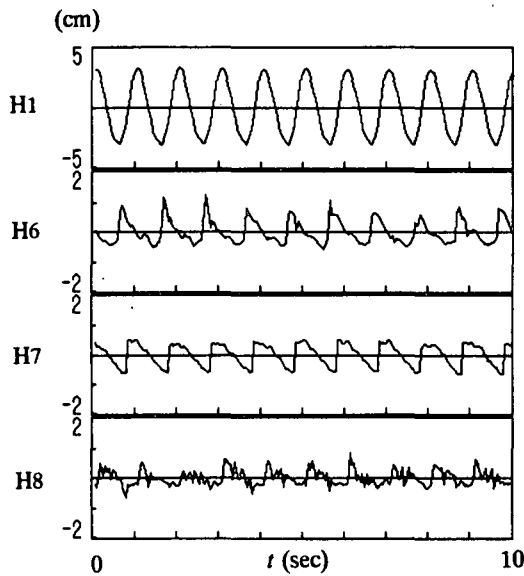


(a) 波高

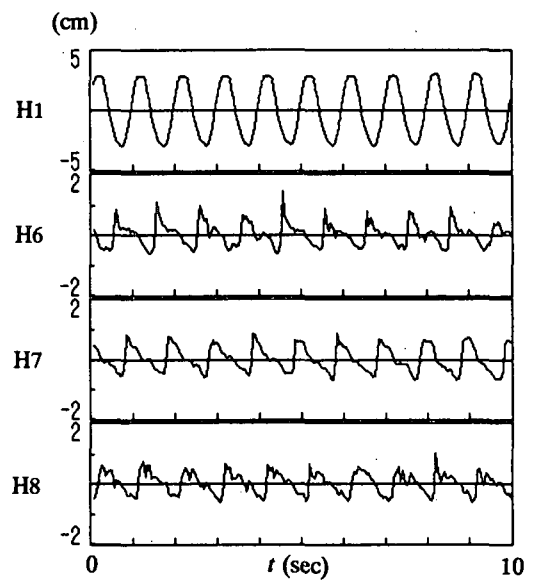


(b) 周期

図-3 潜堤周辺における波高・周期の変化



(a) 天端上水深2cm



(b) 天端上水深4cm

図-4 波形記録の例（規則波，入射波高 6cm）

らかでないのは，天端上で砕波が起きているためである．これに対して，潜堤の中央部（H7）の周期は潜堤前面とほとんど同じであり，計測された波形にも波の定義に影響を及ぼすほど顕著な波の分裂は見られない．なお，天端上水深が 4cm のときと比べて 2cm のときには峯が平らになっている．

一方，不規則波で天端上水深が 4cm のときには，潜堤上のどの位置であっても有義波周期に大きな変化は見られない．天端上水深が 2cm のときには有義波周期の増加や減少が見られるものの，規則波でみられたほど著しい変化ではない．

3.4 天端上の波高の算定式

潜堤背後の波高の算定式は，中村ら（1966），高山ら（1985），鈴木ら（1995）によって検討されている．これらのうちで，鈴木らは平面実験によって潜堤背後の波高を測定し，以下のような算定式を提案した．

$$\frac{H_t}{H_i} = 1 - f_1 \cdot \tanh \frac{B}{L_i} \cdot \tanh \frac{H_i}{d} \cdot \frac{H_i}{L_i} \quad (2)$$

ここに， H_i は入射波高， H_t は潜堤背後の波高， B は波向線に沿った天端幅， L_i は入射波の波長， d は天端上の水深である．係数 f_1 は潜堤の形状によって定まり，三角形や扇形の潜堤の場合には 13.5 である．なお，天端上の波高を求めるときには，港外側の法肩からその地点に至る波向線に沿った長さを B に代入すればよい．

ところが，今回得られた天端上の波高を用いると，相対天端上水深 d/H_i によって係数 f_1 の値が変化し，式 (2) を修正する必要がある．これは，式 (2) が相対天端上水深が 1 以上となる条件で実験した結果を用いて提案されたのに対し，今回の実験では主として相対天端上水深が 1 未満となる条件で実験を行なったためである．

そこで，中村らの実験結果も参考として天端上水深 d を含む項などを修正した次式について適用性を検討した．

$$\frac{H_t}{H_i} = \left[1 - f_2 \cdot \tanh \frac{2.3B}{L_i} \right] \cdot \tanh \frac{0.61d}{H_i} \quad (3)$$

$$\frac{H_t}{H_i} = 1 - f_3 \cdot \tanh \frac{2.3B}{L_i} \cdot \tanh \frac{0.61H_i}{d} \quad (4)$$

今回の模型実験によれば，係数 f_2 の値は 0.34 である．図-5 は式 (3) によって計算した波高比を示したものであり，規則波であっても不規則波であっても，この式によって天端上の波高が精度よく推定できることがわかる．なお，式 (4) でも式 (3) と同程度の精度が得られ， $f_3=1.15$ である．

4. 潜堤周辺の流れ

4.1 平均的な流れ成分と変動成分

潜堤周辺の流れは，平均的な流れ成分 $\bar{U}$ と，波などによ

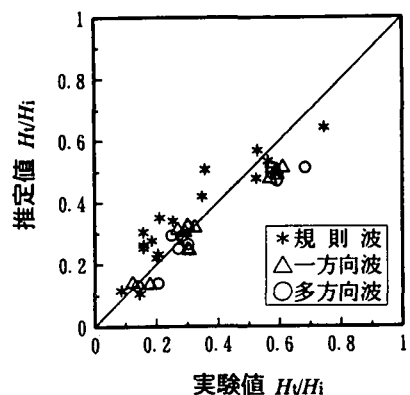


図-5 天端上の波高比の算定精度

って生じる変動成分 U_w とが合わさったものである。すなわち、

$$U = \bar{U} + U_w \quad (4)$$

と表すことができる。本研究では、流速計で得られたデジタル・データの平均値を平均流速 $\bar{U}$ 、平均流速を差し引いて残った流速を変動流速 U_w と定義した。

変動流速 U_w が線形の微小振幅波理論で近似できると仮定すれば、

$$U_w = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (6)$$

で与えられる。ここに、 π は円周率、 T は周期、 k は波数、 h は水深、 z は静水面からの深さ、 t は時刻である。

4.2 規則波が入射したときの流れ

図-6は、天端上水深を 4cm（潜堤周辺の水深を 34cm）とし、波高 6cm の規則波を入射させたときに得られた流速の時系列である。U1～U3 については下層における流速を示す。

(1) 潜堤前面の流れ

潜堤前面（U1）では変動流が卓越する。実験で得られた変動流速の片振幅は上層で 14.7cm/s、下層で 11.5cm/s である。微小振幅波理論による片振幅は上層で 12.4cm/s、下層で 9.0cm/s であり、実験で得られた値とよく一致している。一方、平均流速は上層（底面から 20cm）で 4.3cm/s、下層（底面から 5cm）で 2.7cm/s であり、上層、下層共に潜堤の周りを反時計回りに回る向きに流れている。

(2) 潜堤上の流れ

天端上（U4～U6）では平均的な流れ成分が卓越し、平均流速は 23.8～30.8cm/s である。また、天端上では碎波によって波高が 0.9～1.4cm に低下し、変動流速の片振幅は 11.0～11.7cm となる。微小振幅波理論による変動流速の片振幅は 7.3～11.1cm/s であり、実験で得られた値とよく一致している。

なお、入射波高を 2.5cm にしても、天端上の波高に大きな変化がないため、変動流速の片振幅は 9.8～18.4cm/s とあまり変化しない。しかし、平均流速は 1.5～3.9cm/s と非常に小さくなる。

(3) 潜堤背後の流れ

潜堤背後（U2、U3）では平均的な流れ成分が卓越する。U2 の上層では 10.9cm/s、下層では 11.8cm/s、U3 の上層では 23.1cm/s、下層では 30.3cm/s の平均流速が得られた。これらの平均流速は潜堤前面と比べて 1 オーダー大きい。流れの向きは、両地点とも潜堤の周りを反時計回りに回る方向である。一方、変動流速の片振幅は、U2 の上層で 7.3cm/s、下層で 5.1cm/s、U3 の上層で 7.6cm/s、下層で 4.7cm/s であり、平均的な流れ成分と比べれば小さい。

4.3 不規則波が入射したときの平均流れ

図-7は潜堤周辺の平均的な流れ成分をベクトルで示したものである。潜堤に一方向不規則波や多方向不規則波が入射しても、規則波が入射したのと同じように、潜堤の前面では流速が小さく、天端上や潜堤背後では流速が大きい。なお、平均流速は、規則波が入射したときよりも一方向不規則波や多方向不規則波が入射したときの方が、全体的に小さい。

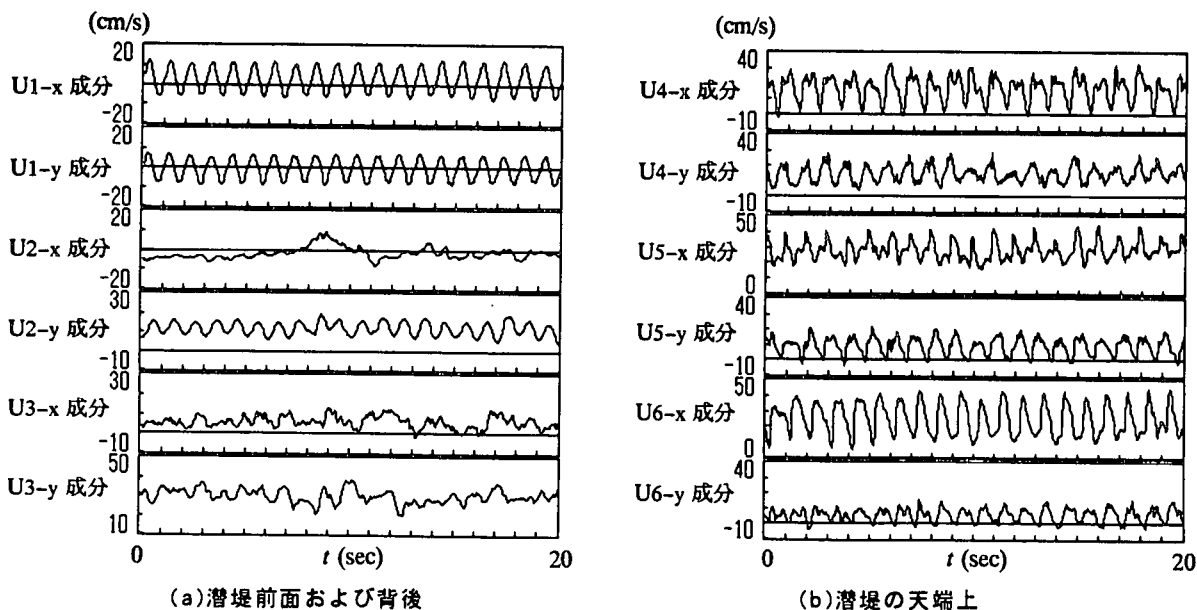


図-6 流速の時系列（入射波高 6cm，天端上水深 4cm）

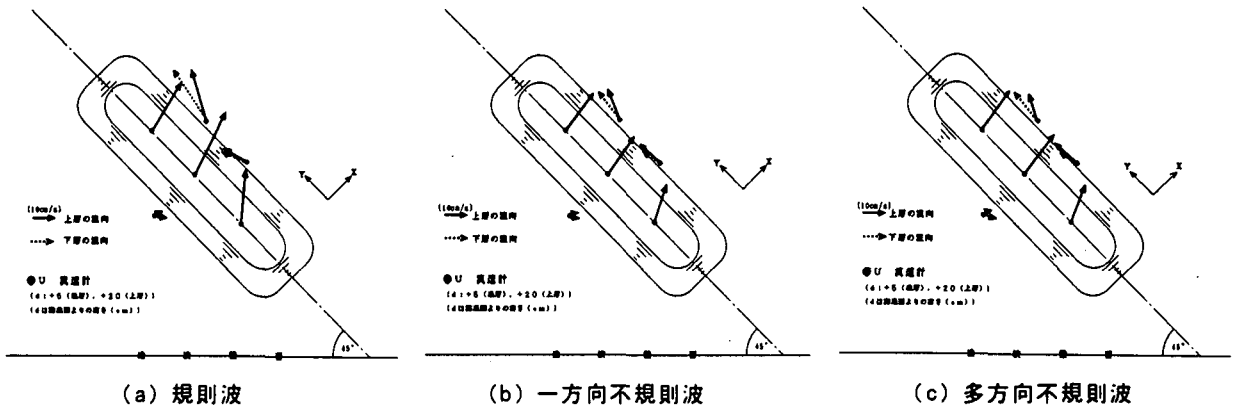


図-7 潜堤周りの平均流（入射波高 6cm，天端上水深 4cm）

4.4 潜堤背後の流れと砂移動

浮遊砂および掃流砂の移動は、平均流の大きさによって支配されると考えられる。今回の模型実験によって、潜堤前面では平均流速が小さいが、背後では非常に大きくなることが明らかになった。この流速の大きな平均流が潜堤の背後の洗掘を誘発しているのではないかと考えられる。

5. 数値計算モデルの適用性

5.1 エネルギー平衡方程式による波高の計算

図-8は、エネルギー平衡方程式（鈴木ら，1994）によって計算した潜堤周辺の波高分布である。模型実験では潜堤法肩で砕波して天端上の波高が小さくなるのに対し、数値計算では天端上でほとんど波高減衰が起きていない。このような計算結果が得られた理由の一つとして、砕波波高の計算精度が十分でないことが考えられる。

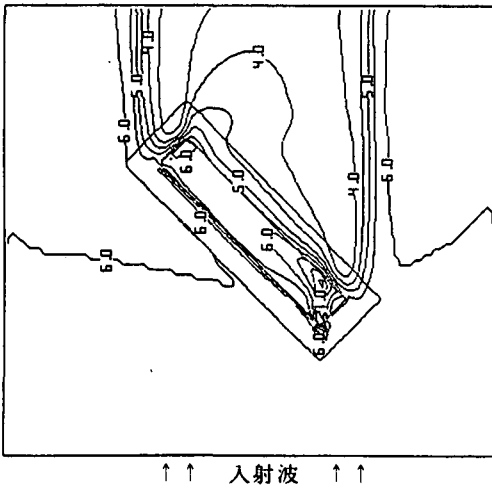


図-8 エネルギー平衡方程式による有義波高の分布

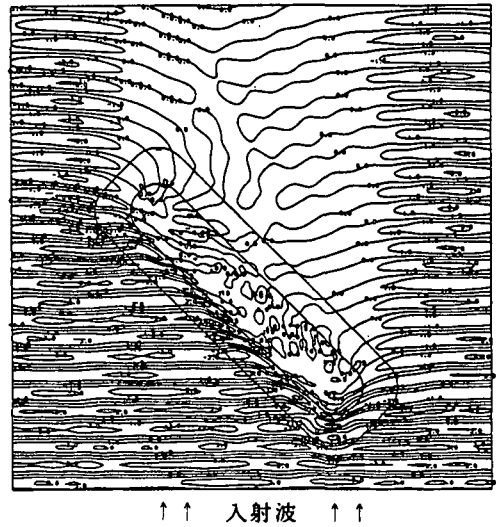


図-9 ある瞬間における潜堤周辺の水位分布

5.2 ブシネスク方程式による水面波形の計算

図-9は、ブシネスク方程式（平石ら，1995）によって計算した潜堤周辺の水面波形である。模型実験によって、潜堤上では前面から入射する波と背後に回り込んで入射する波とが重なり合うことが確認されている。このような現象もブシネスク方程式によって定性的に再現されている。

図-10は、数値解析によって得られた天端上および潜堤背後の水面変化を模型実験と比較したものである。天端上（H6～H8）では、模型実験の波形で見られる峯の前傾化や波の分裂状況の再現性はやや悪いが、波高そのものは模型実験の結果とよく一致している。潜堤背後（H9～H11）では、数値解析は模型実験よりも小さな波高を与えており、波形も一致していない。

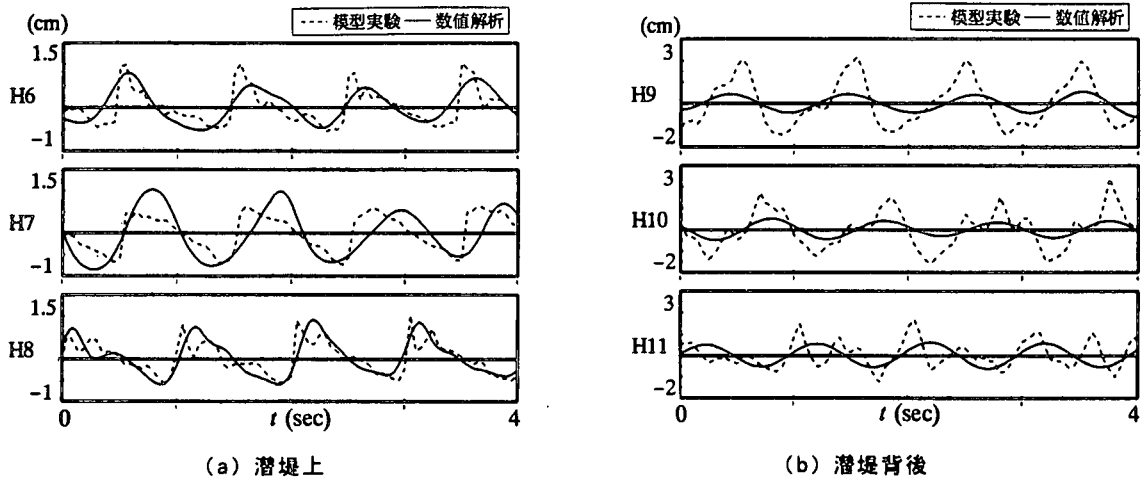


図-10 ブシネスク方程式による水面波形

6. まとめ

今回の模型実験によって潜堤周辺の波・流れ場の特徴が明らかになった。得られた結論は以下の通りである。

- ① 潜堤の法肩で巻き波による砕波が起き、天端上および潜堤背後の波高は低くなる。潜堤端部の天端上では、潜堤に直接入射する波と、潜堤背後に回り込んで入射する波とが重なり合う。
- ② 天端上の波高を求める式を改良した。
- ③ 潜堤前面では変動流が卓越するが、天端上や潜堤背後では平均流が卓越する。平均流速は潜堤前面よりも潜堤背後で大きく、この流速の大きな平均流が潜堤背後の侵食を誘発していると考えられる。
- ④ ブシネスク方程式を用いた数値計算モデルによって潜堤周辺の波浪場を計算し、天端上については実験結果とよく一致する計算結果が得られた。しかし、潜堤背後については十分な計算精度が得られておらず、計算方法の改良が必要とされる。

参考文献

- 鈴木康正・上原 功・富田康大・望月徳雄・平石哲也 (1995) : フレネル潜堤による波向・波高変更効果に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.701-705.
- 鈴木康正・平石哲也・富樫宏次・高羽泰久・南 将人・岩垣雄一 (1995) : 潜堤を用いた海浜安定工法に関する現地観測と模型実験, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.696-700.
- 鈴木康正・森川高德・平石哲也・望月徳雄 (1994) : 浅海域における波浪変形計算法の拡張, 港湾技研資料, No.767, 35p.
- 高山知司・永井紀彦・関口忠志 (1985) : 広天端幅潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp.545-549.
- 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄 (1966) : 潜堤による消波について, 第 13 回海岸工学講演会論文集, pp.76-79.
- 平石哲也・上原 功・鈴木康正 (1995) : ブシネスク方程式を用いた波浪変形計算法の適用性, 港湾技研資料, No.814, 22p.