

潜堤周辺の波・流れ場と砂移動に関する平面実験

河合弘泰* ・ 工藤 巧** ・ 梶本達也***
上原 功**** ・ 平石哲也*****

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ことがある。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、潜堤背後に速い流れが生じて砂が流出することが考えられる。そこで、本研究では模型実験によって潜堤周辺の波・流れ場の特性を明らかにするとともに、天端上に置いた砂の移動についても調べた。

ところで、これまでに行なわれて来た潜堤周辺の波・流れ場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。これに対し、本研究では現実に即した波・流れ場を再現するために大きな模型縮尺で平面実験を行なった。また、実験によって得られた波高や流速の値を用いて、既往の数値計算モデルの適用性も検討した。

2. 実験方法

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)が設置してある。潜堤の高さは30cmであり、天端上水深は2cmまたは4cmとした。

入射波は、波高が0.7~6.0cm、周期が1.0sの、規則波、一方向不規則波、多方向不規則波(方向集中度 $S_{max}=25$)である。現地海岸では波が潜堤に対して必ずしも直角に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。

波高計は図-1に示す15点(H1~H15)に設置し、潜堤からの反射波の影響を受けると予想される位置(H12~H15)では方向スペクトルも測定した。流速は、二成分電磁式流速計を用いて6点(U1~U6)で測定した。なお、潜堤の前面および背後(U1~U3)では上層(底面から20cm)と下層(底面から5cm)とを別々に測定し、

天端上(U4~U6)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。

砂移動については、着色砂を図-1に示す8点(P1~P8)に置き、波浪を約60s間作用させた後の移動状況を写真で撮影した。

3. 潜堤周辺の波と流れ

3.1 潜堤前面の波と流れ(H3~H5, U1)

図-2は、入射波高が2.5cm、天端上水深が4cmのときの、水面および流速の変化を示したものである(この条件のときに潜堤の天端上では砂の移動限界状態となる)。潜堤前面では浅水変形をほとんど受けていない。また、流れは変動流成分が卓越する。流速計U1で得られた変動流速の片振幅は7.2cm/sであり、線形の微小振幅波理論による片振幅4.5cm/sと大きな違いはない。一方、平均流の流速は2.2cm/sであり、流向は潜堤の周りを反時計回りに回る向きである。

3.2 天端上の波と流れ(H6~H8, U4~U6)

天端上では崩れ波による碎波が起きる。図-2に示したH8の波形は峯が立ち上がって碎波しつつある状況をよく表している。H6やH7の波形で峯が分裂している原因の一つとして、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した波との重ね

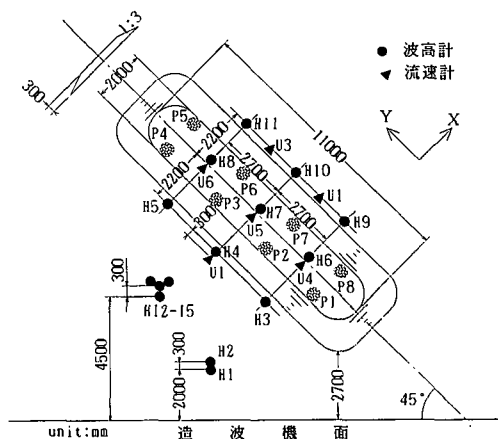
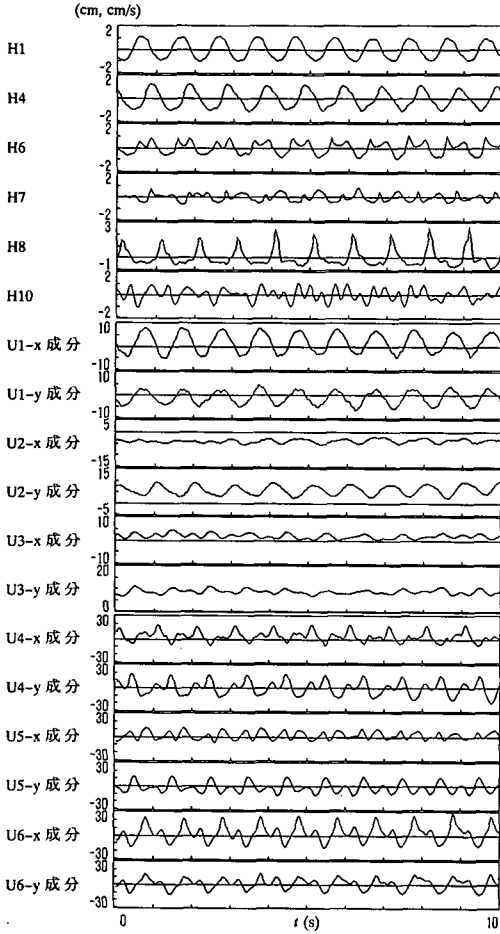


図-1 潜堤模型および計測機器の配置

* 正会員 工務 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室
** 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室
*** 東洋建設株式会社横浜港作業所
**** 正会員 若築建設株式会社土木本部設計部
***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長



図一 潜堤周辺の水面・流速の変化 (入射波高 2.5 cm)
(注) H1~U3 と U4~U6 とは別々に測定された。

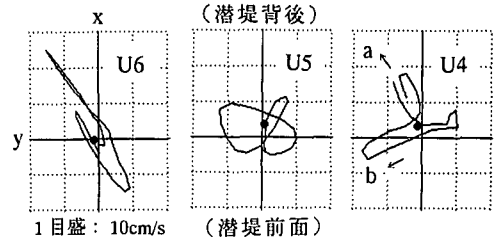
合せが考えられる。波の峯が格子のように重なり合うことも目視によって確認した。

図一は天端上の各地点における流速変化を示したものである。平均流成分は計測時間全体の平均値を●印で示し、変動流成分は計測時間中のある 1 周期分を実線で示した。この図から天端上の流れは変動流成分が卓越することが判る。また、U4 および U5 では、沖波の 1 波に対して異なる 2 方向の往復流が生じていることがわかる。例えば U4 において、潜堤の前面から入射した波の進行方向は図に示した a の方向であり、平均流の方向も a の方向である。b の方向の往復流は潜堤の背後に回り込んで入射する波によるものであると考えられる。

3.3 潜堤背後の波と流れ (H9~H11, U2~U3)

図一に示すように、潜堤背後では天端上で碎波した伝達波と、潜堤端部を回り込んだ回折波とが重なり合うために、水面波形は複雑である。

潜堤背後の流れは平均流成分が卓越する。U2 では 7.0



図一 天端上の流速変化 (入射波高 2.5 cm)

cm/s, U3 では 8.8 cm/s の平均流速が得られており、潜堤前面 (U1) の 3~4 倍に達している。流向は両地点とも潜堤の周りを反時計回りに回る向きである。この速い流れが潜堤背後における侵食の一因になっていると考えられる。なお、変動流速の片振幅は U2 で 2.8 cm/s, U3 で 2.3 cm/s であり、平均流速と比べれば小さい。

3.4 潜堤周辺の波高算定式

鈴木ら (1995) は、平面実験によって潜堤背後の波高 H_t と入射波高 H_i との比 K_t の算定式を提案した。

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = 1 - f_1 \cdot \tanh \frac{B}{L_i} \cdot \tanh \frac{H_i}{d} \cdot \frac{H_i}{L_s} \dots (1)$$

ここに、 B は波向線に沿った天端幅、 L_i は入射波の波長、 L_s は天端上の波長、 d は天端上水深、 f_1 は潜堤の形状によって定まる定数である。この式は回折波の影響をあまり受けない場所に対して適用できる。

式 (1) の B に天端半幅を代入することによって、回折波の影響の比較的小さい天端中央部の波高比を求め、今回の実験で得られた波高比と比較したところ、あまり一致しなかった。鈴木ら (1995) よりも相対天端上水深 d/H_i が小さい条件で実験を行なったことがその原因であると考えられる。そこで、天端上水深 d を含む項などを修正した以下の式について適用性を検討した。

$$K_t = \left\{ 1 - f_2 \cdot \tanh \frac{2.3B}{L_i} \right\} \cdot \tanh \frac{0.61d}{H_i} \dots (2)$$

$$K_t = \left\{ 1 - f_3 \cdot \tanh \frac{2.3B}{L_i} \right\} \cdot \tanh \frac{0.61H_i}{d} \dots (3)$$

ここに、 f_2 , f_3 は潜堤の形状によって決まる係数である。今回の実験では $f_2 = 0.34$, $f_3 = 1.15$ が得られ、これらの式によって精度よく計算できることが確かめられた。

潜堤背後では、天端上を通過した伝達波と、潜堤の端部を回り込む回折波とが重なり合っている。したがって、潜堤背後の波高と入射波高との比 K_o は、回折係数を K_d とすると、

$$K_o = \sqrt{K_t^2 + K_d^2} \dots (4)$$

で表される。伝達率 K_t には式 (2) または式 (3) による値、回折係数 K_d には潜堤を直立壁とみなしたときの値を用いることができる。また、 B は波向線に沿った天

端全幅とする。図-4は、式(2)および式(4)によって計算した潜堤背後の波高比を実験値と比較したものである。規則波、一方向不規則波、多方向不規則波の何れに対しても十分な精度がある。

3.5 規則波と不規則波とによる平均流の違い

図-5は、入射波高が2.5 cm、天端上水深が4 cmのときの、潜堤周辺の平均流をベクトルで示したものである。規則波でも不規則波でも、流向や流速に大きな差はない。また、潜堤前面と天端上では流速が小さく、潜堤背後では流速が大きい。

3.6 入射波高が大きいときの天端上の流れ

図-6は、入射波高が6 cm、天端上水深が4 cmのときの、天端上の水面および流速の変化を示したものである。図-2に示した入射波高2.5 cmのときと比較して、波の峯の分裂は顕著でない。図-7は図-3と同じ方法で流速変化を示したものである。平均流速が変動流速の片振幅よりも大きいため、流速の x 成分も y 成分も常に同じ符

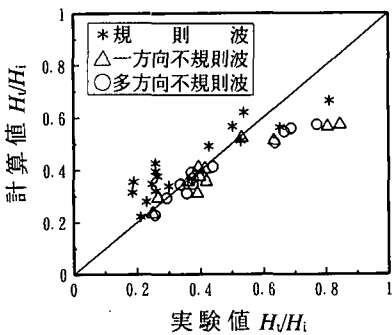


図-4 潜堤背後の波高の算定式

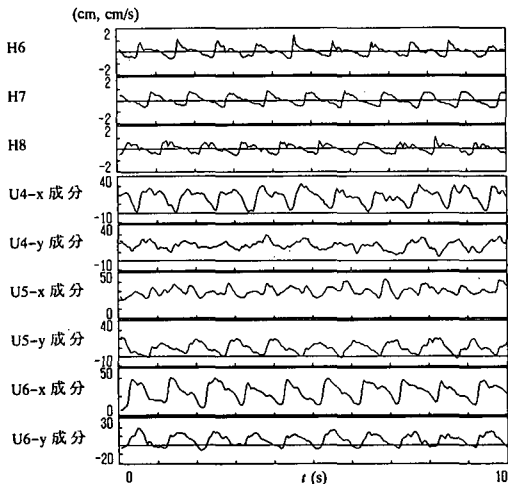
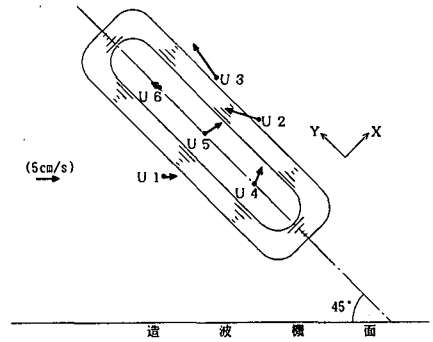
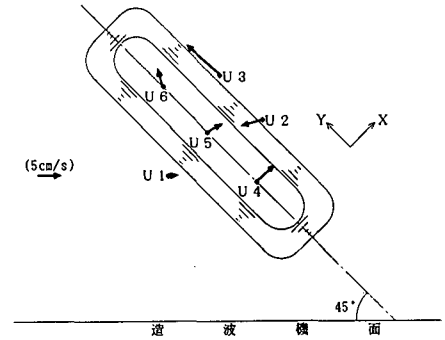


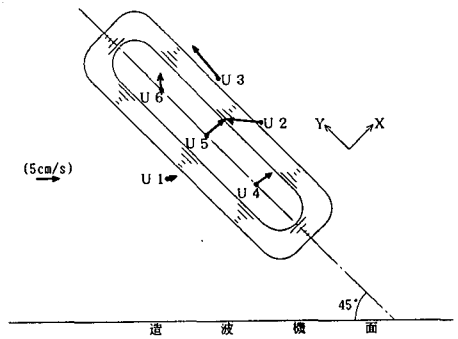
図-6 潜堤上における波高・流速(入射波高6 cm)
(注) H6~H8とU4~U6とは別々に測定されたものである。



(a) 規則波



(b) 一方向不規則波



(c) 多方向不規則波

図-5 潜堤周辺の平均流(入射波高2.5 cm)

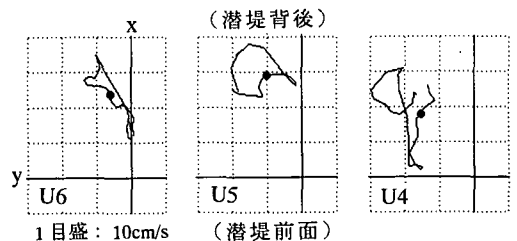


図-7 天端上の流速変化(入射波高6 cm)

号 (+) の値をとっている。

4. 砂移動の実験

4.1 砂の移動限界

今回の実験では、図-1 に示した 8 地点 (P1~P8) に着色砂 (平均粒径 0.8 mm, 比重 1.20) を置き、造波 60 s 後の移動状況を写真で撮影した。各地点における砂の移動状況は、表-1 に示す 4 段階のレベルで評価した。

天端上の 3 点 (H6~H8) における波高の平均値と、8 地点に置かれた砂の移動レベルの平均値を求め、両者の関係を示したのが図-8 である。天端上水深によって砂が移動する波高は異なる。また、天端上の波高が大きくなるほど砂の移動レベルは大きくなる。なお、この図には示していないが、港外側 (P1~P4) は港内側 (P5~P8) よりも波高が高いために移動レベルも 1 ランク程度大きかった。

佐藤ら (1964) が模型実験によって求めた全面移動限界によると、天端上水深が 4 cm となる波高は約 0.7 cm であり、今回の実験結果はこの値とよく一致している。したがって、式 (2) または (3) によって天端上の波高を求めれば、佐藤らの移動限界によって砂が移動するかどうかを判断できる。

4.2 砂移動の方向

図-9 は、流速計で測定した流れと砂移動の方向とを比較したものである。砂移動の方向は、潜堤の中央部 (P2, P3, P6, P7) に置いたものを対象として写真から読みとった。

図-3 に示したように天端上では変動流が卓越しており、平均流の向きと砂移動の方向とは必ずしも一致していない。U4 では平均流の方向と砂移動の方向が一致しているが、U6 では最大流速のときの流向が砂移動の方向とよく一致している。また、U5 では流速の卓越する方向が 2 つあり、それらを合成した方向が砂移動の方向と一致している。したがって、変動流の卓越する場における砂移動の方向は、概ね最大流速の方向であり、流速の卓越する方向が 2 つあるときには合成した方向であると考えることができる。

ところで、砂は流速がある程度以上のときに移動する。そこで、合成流速 U から砂の移動限界に対応する流速 U_b

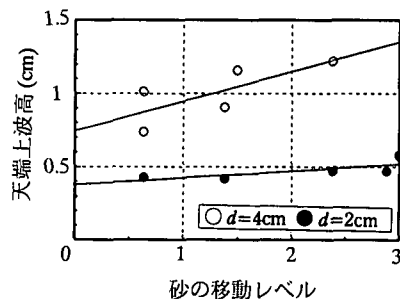


図-8 天端上の波高と砂の移動レベル

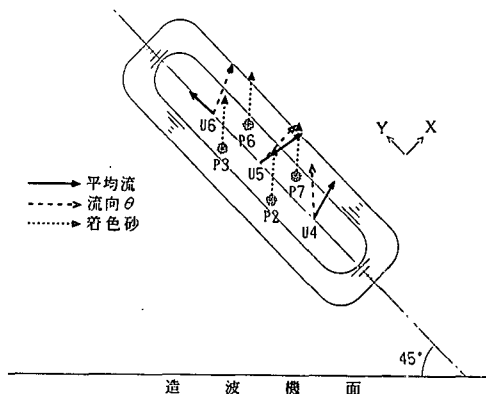


図-9 天端上の流れと砂移動 (入射波高 2.5 cm)

を減じた流速の平均値を考える。この平均値の x 成分 $\overline{U_{b,x}}$, y 成分 $\overline{U_{b,y}}$ はそれぞれ次式によって与えられる。

$$\overline{U_{b,x}} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} \langle U - U_b \rangle \frac{U_x}{U} dt \quad (4a)$$

$$\overline{U_{b,y}} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} \langle U - U_b \rangle \frac{U_y}{U} dt \quad (4b)$$

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & (x > 0) \\ 0 & (x \leq 0) \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 U_x , U_y は流速の x , y 成分であり、 T_n は計測時間である。そして、流向 θ を次式により定義する。

$$\theta = \tan^{-1}(\overline{U_{b,y}} / \overline{U_{b,x}}) \quad (6)$$

移動限界に相当する波高を 1.4 cm とし、微小振幅波理論に従うと仮定すれば $U_b = 10.8$ cm/s となる。

以上のような仮定によって計算した流向 θ を図-9 に示す。流向 θ は平均流の向きよりも砂移動の方向を正しく与えている。

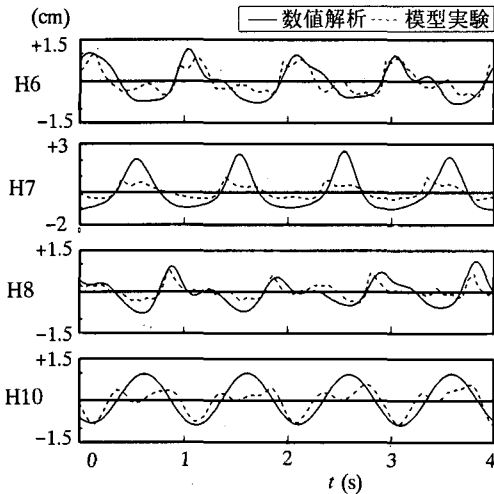
なお、潜堤上から移動した砂は、潜堤の背後側の法尻近くの海底面に堆積する。

5. 数値計算モデルの適用性

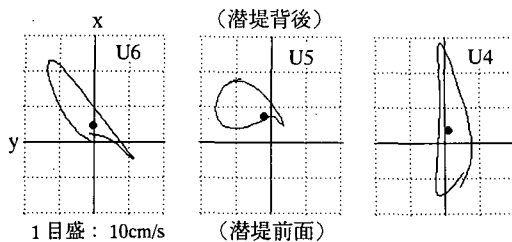
ブシネスク方程式 (Madsen et. al, 1992) を用いた数値計算モデルによって、潜堤周辺の波・流れ場を計算し

表-1 砂の移動レベル

レベル	砂の移動状況
0	全く流れなかった
1	少し (目視で半分未満) 流された
2	かなり (目視で半分以上) 流された
3	全て流れ去った



(a) 天端上および潜堤背後の水面波形



(b) 天端上の流速変化

図-10 ブシネスク方程式による計算結果 (入射波高 2.5 cm)

た。

図-10(a)は、図-2と同じ条件(入射波高 2.5 cm)で計算した天端上(H6~H8)および潜堤背後(H10)の水面波形を示したものである。数値計算によって得られた波高は模型実験とよく一致している。模型実験で得られた天端上の波形は、潜堤前面から入射した波と潜堤背後に回り込んで入射した波とが重なり合い、波が分裂したように見える波形となっている。数値計算においてもこのような波形はある程度再現されている。ただし、模型実験で得られた潜堤背後の波形は伝達波と回折波とが重なり合って複雑になっているが、数値解析による再現性は十分とは言えない。

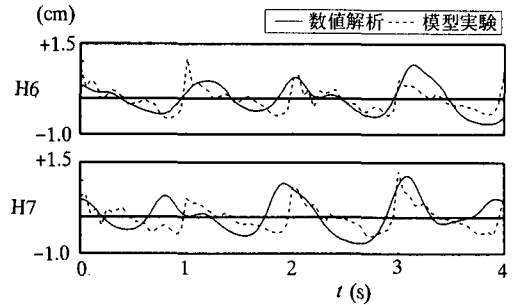


図-11 ブシネスク方程式による計算結果 (入射波高 6 cm)

図-10(b)は天端上の流速の変化を図-3と同じ方法で示したものである。模型実験と同程度の流速が得られていることがわかる。ただし、図-3の流速計U4でb方向の顕著な流れが模型実験によって測定されていることから、数値計算モデルでは潜堤端部における屈折や回折が必ずしも十分に再現されていないと考えられる。

図-11は、入射波高が 6 cm のときの計算結果を示したものである。図-10(a)と同様、模型実験によって得られた波形とよく一致していることがわかる。

6. まとめ

潜堤周辺における波・流れ場と砂移動の特性を模型実験によって調べ、潜堤背後に速い流れが発生することが確認された。この流れが潜堤背後の侵食の一因になっているものと考えられる。また、ブシネスク方程式を用いた数値計算モデルによって、模型実験とよく一致する波高や水面波形が得られることがわかった。

参考文献

- 河合弘泰・工藤 巧・榎本達也・上原 功・平石哲也 (1996): 潜堤に斜め入射した波浪の波高低減に関する実験, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp. 121-126.
- 佐藤昭二・田中則男 (1964): 沖浜帯における波による砂移動について, 港研報告, Vol. 1, No. 1, pp. 23-33.
- 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.
- Madsen, P. E. and O. R. Sorensen (1992): A new form of Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Part 2, A slowly-varying bathymetry, Coastal Eng., Vol. 18, pp. 183-204.