

混成堤における越波水の打ち込み特性と被覆材の安定性

早川 哲也* ・渡部 靖憲** ・鈴木 孝信***
木村 克俊**** ・土井 善和***** ・工藤 貴弘*****

1. ま え が き

混成堤の基礎捨石マウンドは来襲波浪による散乱や変形を生じないように十分な重量を有する石やコンクリートブロックにより被覆される。防波堤港外側のマウンド被覆材については、谷本ら (1982) や高橋ら (1990) により十分な検討が行われており、設計波浪に対して適切な重量を算定することができる。また、近年では須藤ら (1995) により変形を許容した重量算定法も提案されており、マウンド機能を損なわない程度に重量を低減することができる。これに対して、港内側のマウンド被覆材については港外側重量の 25~50% の値が経験的に使用されている。しかしながら、実際には被災事例は極めて少なく、条件によっては被覆工が省略でき工費の縮減が可能になると考えられる。

さらに、図-1 に示すように防波堤港内側の静穏域に浚渫土砂などの安価な資材を用い藻場造成を目的としたマウンド部を設け、水産生物の生息場として利用する計画がある。この場合、コンブ等が光合成を十分に行えるように、マウンド天端水深を 4~5 m 程度とするため、越波水の打ち込みに対する被覆材の安定性の検討が重要な課題となる。

そこで本研究では数値計算および水理模型実験により越波水の打ち込み特性と港内側マウンド被覆材の安定性についての検討を行った。これらの結果により被覆材の移動特性を明らかにするとともに安定重量の算定法を提案する。

2. 計算および実験方法

越波水の打ち込みに伴う複雑な流体運動を再現するため、渡部 (1996, 1997) らと同様に cubic-polynomial interpolation (CIP) 法を適用した数値計算を行った。

図-2 は計算領域を示したものであり、水深 h を 45

cm, 堤体幅 B を 50 cm, 堤体高さ D を 55 cm と一定にし、港内側マウンド天端水深 h_c を 15 および 45 cm に変化させた。また、造波境界条件は楕円関数の母数 m が 0.876 である 2 次のクノイド波理論を用いており、波高 H が 20 cm, 周期 T が 1.7 s (水深を代表長とした Reynolds 数は 945000) である。

また、長さ 27 m, 深さ 1.2 m, 幅 0.6 m の 2 次元造波水路において、モルタル水平床上に図-2 に示すような堤体模型を設置し、プロペラ式流速計を用いて堤体天端上における越波水の流速および打ち込みによる港内側の流速分布の測定を行った。堤体幅 B を 50 cm, 堤体高さ D を 55 cm と一定にし、水深 h を 40, 45, 50 cm に、港内側マウンド天端水深 h_c を 5, 10, 15 cm に変化させた。実験は規則波を用いており、波高 H を 10, 15, 20, 25 cm, 周期 T を 1.2, 1.7, 2.2 s に変化させた。

さらに、有義波高 $H_{1/3}$ が 10, 14 cm, 有義波周期 $T_{1/3}$ が 1.7 s である不規則波を用いて、港内側マウンド被覆材の安定実験を行った。構造条件としては水深 h を 45 cm と一定にし、堤体天端高 h_c を 8.0, 8.4, 11.2 cm に、港内側マウンド天端水深 h_c を 5~30 cm の範囲で変化させ



図-1 水産協調型防波堤

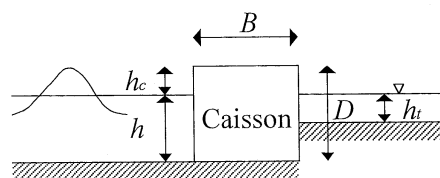


図-2 防波堤断面図

* 正会員 北海道開発局 開発土木研究所
** 正会員 工博 北海道大学大学院助手 工学研究科
*** 正会員 北海道開発局 根室港湾建設事業所 (前開発土木研究所)
**** 正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所
***** 北日本港湾コンサルタント(株)
***** (株)西村組

た。被覆材としては碎石（2層被覆）を用いており、重量は2.0, 4.0, 7.5, 11, 15, 25, 30, 45, 60 gf(0.0020, 0.0040, 0.0074, 0.011, 0.015, 0.025, 0.029, 0.044, 0.058 N)の9種類である。1波群200波の不規則波を作用させ港内側マウンド被覆材の移動個数の測定を行った。これを15回(計3000波)繰り返し、被覆材の並べ直しは行わず移動個数を累積し被害率を求めた。ここで、被害率とは堤体から岸方向に60 cm(≒1.3*h*)の範囲での被覆材総数に対する移動個数の割合を%で表したものである。

3. 越波水の打ち込みに伴う流体運動

(1) 流速ベクトル分布

図-3は、港内マウンド天端水深 h_t が15 cmの条件における防波堤港内側の流速ベクトル分布であり、計算結果を $T/16s$ 間隔で①~⑥に示している。①~②のように越波水は防波堤天端から落下し港内側へと打ち込み、複

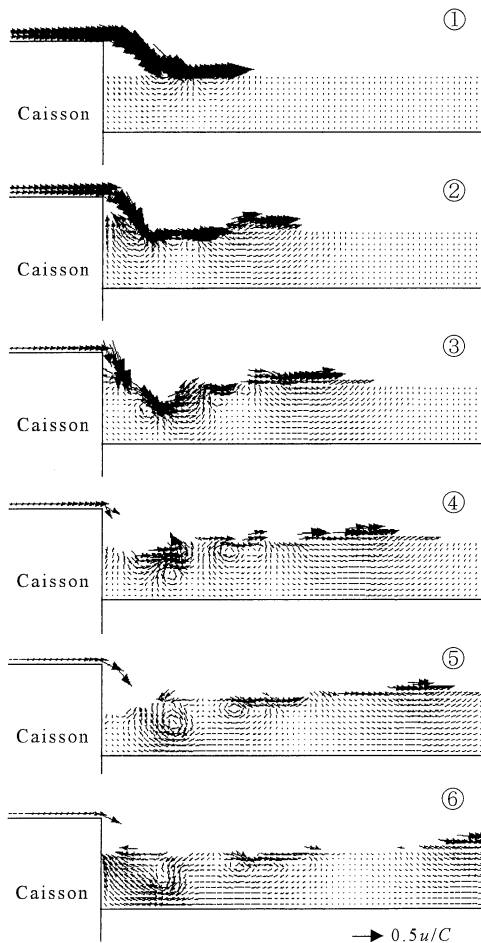


図-3 流速ベクトル分布 ($h_t=15\text{ cm}$)

数の渦の生成が見られる。その後、これらの渦は③~④のように水面を巻き込みながら干渉し合い、最終的には⑤のように二つの大規模な渦が見られるようになる。これらの渦は⑥のように堤体および岸方向に拡散しながら移流している。とくに堤体側の渦は港内側マウンド天端に影響を及ぼし、堤体側へ向かう早い流れが生じている。これに対して図-4は $h_t=45\text{ cm}$ の条件における流速ベクトル分布を示したものであり、 $h_t=15\text{ cm}$ の条件と同様に大規模な渦の生成が見られるものの港内側マウンド天端にはほとんど影響を及ぼさない。

(2) 港内側マウンド天端流速

図-5は、港内側マウンド天端近傍の流速の計算結果を $T/8s$ 間隔で示している、横軸は直立部港内端からの距離 X を水深 h で無次元化したもの、縦軸は底面近傍での流速 u_b を重力加速度 g および h で無次元化したものである。越波水は $X/h=0.5$ 付近で静水面に打ち込み、その堤体側では渦による直立部へ向かう負の流速が時間とともに大きくなる。これに対して打ち込み地点より岸側では、越波伝達波による流れが卓越する。また同図には、底面流速 U_b が最大となる時刻③における実験値を●印でプロットしており、計算値は流速分布の傾向を良く表している。また、越波水の打ち込み時には大量の気泡が混入し流速場に影響を与えるが、大規模渦の生成過程を通してこの影響は小さいと仮定し無視してい



図-4 流速ベクトル分布 ($h_t=45\text{ cm}$)

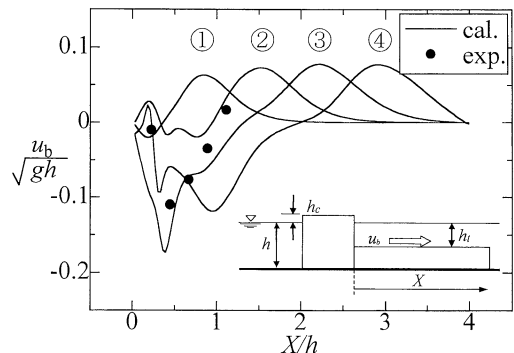


図-5 港内側マウンド天端流速

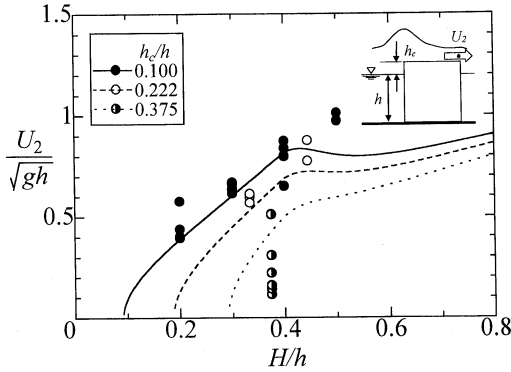


図-6 防波堤港内端天端流速

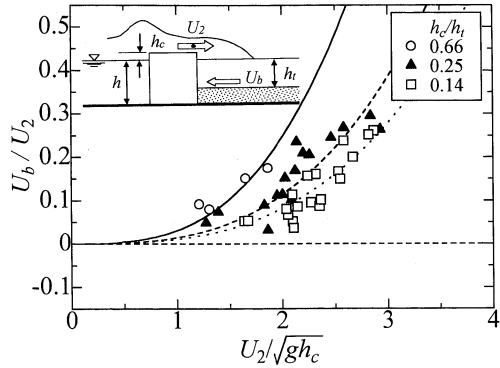


図-7 マウンド天端流速

る。このため、定量的に実験と計算の間に若干の差異が表れたと考えられる。

4. 港内側マウンド天端流速の定式化

港内側マウンド被覆材の安定性に影響する大きな要因として、前節で明らかにしたような越波水の打ち込みにより発生する港内側マウンド天端近傍の流れが考えられる。ここでは、規則波を用いた模型実験の結果により港内側マウンド天端近傍における最大流速を定式化する。越波水は堤体天端から自由落下し港内側へ打ち込むため、マウンド天端付近の最大流速を表すパラメータは、天端上港内端での流速、堤体天端高およびマウンド天端水深となる。

(1) 越波水の運動モデル

防波堤天端上の越波水の運動については高橋ら(1991)によりモデル化が行われており、越波水が天端上に打ち込み越流するという一連の運動の中での水位や流速などを算定することができる。図-6は、天端上港内端における流速のピーク値 U_2 の実験結果と高橋ら(1991)による計算結果を示したものであり、横軸は波高水深比 H/h 、縦軸は U_2 を重力加速度 g および水深 h により無次元化したものである。 U_2 は H とともに増加し、堤体天端高 h_c が大きくなると越波量が減少するため小さくなる。また、計算値と実験値は一致する傾向にある。

(2) 港内側マウンド天端流速

図-7は、港内側マウンド天端近傍の水平流速のピーク値 U_b を示したものであり、横軸は天端上港内端における最大流速 U_2 を天端高 h_c および重力加速度 g により無次元化したもの、縦軸は U_b を U_2 により無次元化したものである。 U_b は U_2 および天端高とマウンド天端水深の比 h_c/h_t とともに増加する。この傾向を次のように定式化した。

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_b}{U_2} &= a \left(\frac{U_2}{\sqrt{gh_c}} \right)^3 \\ a &= 0.0493 \left(\frac{h_c}{h_t} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

5. 港内側マウンド被覆材の安定重量

(1) 被覆材の移動特性

図-8は、堤体天端高と有義波高およびマウンド天端水深の比 $h_c/H_{1/3}$ 、 h_c/h_t がそれぞれ0.8の条件における、作用波数 N と被害率 D の関係を示したものである。被覆材の被害率は、波が作用する初期段階において大きく増加するが、その後増加率は減少し一定値に近づくようになる。本研究では、 $N=3000$ を基準として、 D が1%に対応する安定重量を求めた。

また、図-8と同条件における作用波数 N が1000, 2000, 3000における被覆材の移動状況を写真-1に示す。被害率 D はそれぞれ1.3, 2.7, 3.3%であり、数値計算で示したように越波水の打ち込みによる堤体側へ向かう流れにより被覆材が移動していることがわかる。

(2) 被覆材の安定重量

谷本ら(1982)は、水底に単独に置かれた被覆材に流

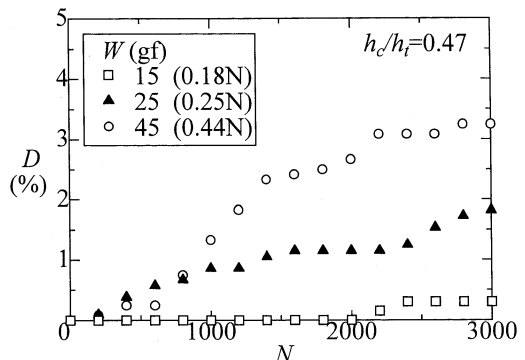


図-8 作用波数と被害率

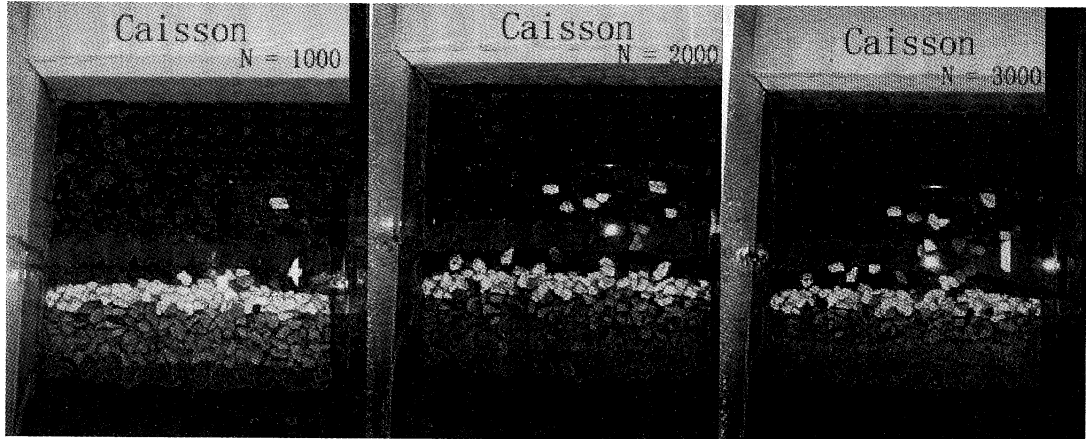


写真-1 被覆材の移動状況

速 U の流れが作用している状態を考え、式(2)のような安定重量 W の算定式を導いている。

$$W = \left\{ \frac{1}{2g} \frac{k_A}{k_V^{2/3}} \left(\frac{C_D}{\mu} + C_L \right) \right\}^3 \frac{\gamma_r}{(S_r - 1)^3} U^6 \dots\dots (2)$$

ここに、 g ：重力加速度、 k_A, k_V ：投影面積 S および体積 V を代表長さで a で表したときの無次元量 ($S = k_A a^2, V = k_V a^3$)、 C_D, C_L ：抗力および揚力係数、 μ ：被覆材と底面の静止摩擦係数、 γ_r, S_r ：被覆材の単位体積重量および比重である。ここで、式(2)における流速 U を防波堤港内側マウンド天端近傍の流速 U_b とし、Brebner・Donnelly (1962)がマウンド被覆材の安定重量の算定に用いた式に準じて次のように整理した。

$$W = \frac{\gamma_r}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \left(U_b \sqrt{\frac{h_t}{g}} \right)^3 \dots\dots (3)$$

ここに、 h_t ：港内側マウンド天端水深、 N_s ：安定数である。

N_s は実験の結果から算定された安定重量 W と港内側マウンド底面近傍の流速 U_b を式(3)に代入し求めた。ただし、 U_b の算定には防波堤構造条件から高橋ら(1991)

の方法に最高波諸元を適用し式(1)を用いた。

図-9は、安定数 N_s および港内側マウンド天端水深と堤体天端高の比 h_t/h_c の関係を示している。 $h_c/H_{1/3}$ が0.8の場合は0.6に比べて N_s が若干大きく、 h_t/h_c とともに増加する傾向にある。これは、底面流速の最大値 U_b が同じ場合であっても、 h_c および h_t の条件によって背後の流体運動が異なり、その影響が被覆材の移動特性にあらわれているためと考えられる。ここで、 N_s を h_t/h_c により定式化すると次のようになる。

$$N_s = \max \left\{ 0.30, 0.30 \frac{h_t}{h_c} + 0.30 \exp \left[-1.5 \frac{h_t}{h_c} \right] \right\} \dots (4)$$

式(3)、式(4)および高橋ら(1991)の方法により港内側マウンド被覆材の安定重量の算定が可能となった。さらに、港内側マウンドの被覆範囲については、CIP法を用いた数値計算により検討が可能となる。ただし、安定実験を行ったのは堤体天端高と港内マウンド天端水深の比 h_c/h_t が0.3~1.6の範囲であり、これを超える条件に対しては別途検討する必要がある。

図-10は、波高水深比 $H_{1/3}/h, H_{max}/h$ が0.311, 0.457

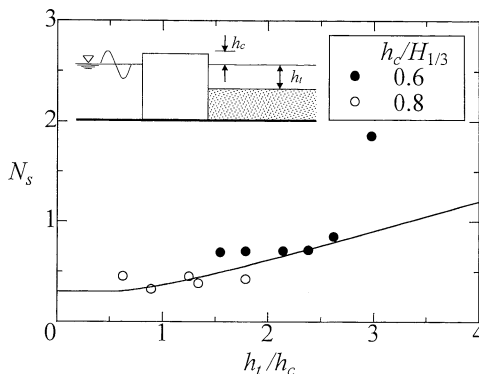


図-9 N_s と h_t/h_c

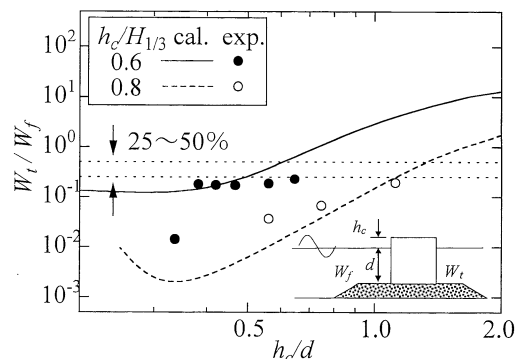


図-10 港内および港外被覆材安定重量

および相対水深 $h/L_{1/3}$ が 0.141 の条件において、谷本ら (1982) の方法により算定された港外側マウンド被覆材の安定重量と港内側安定重量の比 W_f/W_i を示したものである。横軸はマウンド天端水深と堤体天端高の比 h_c/d であり、 W_f/W_i は h_c/d とともに増加する傾向にある。天端高と有義波高の比 $h_c/H_{1/3}$ が 0.8 の場合、 h_c/d が 1.0 程度以下となると W_f/W_i が 0.25 以下となり、現在用いられている設計法よりも港内側マウンド被覆材の重量を低減することができる。

6. ま と め

本報告の主要な結論をまとめると以下のようになる。

- ① 数値シミュレーションにより越波水の打ち込みによる複雑な流体運動を再現した。越波水の打ち込みにより大規模な渦が生成し、港内側マウンド天端水深が小さい場合、天端近傍において堤体側へ向かう早い流れが生じる。
- ② 港内側のマウンド天端流速に及ぼす波浪および構造条件の影響を明らかにした。
- ③ 港内側マウンド被覆材の安定重量算定法を提案した。この算定法を適用することにより、条件によっては防波堤港内側の被覆工が省略でき工費の縮減が期待でき

る。

本報告では、数値計算および水理模型実験により越波水の打ち込みに対するマウンド被覆材の安定性について検討した。マウンド被覆材に働く外力としては、越波水の打ち込みの他にも回折波、港内発生波によるものが考えられる。今回は断面的な検討を行ったが、今後は平面的な効果を考慮するとともに、さらに広範囲の条件に対して検討する予定である。

参 考 文 献

- 高橋重雄・木村克俊・谷本勝利 (1990): 斜め入射波による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 29 巻, 第 2 号, pp. 3-36.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一郎 (1991): 親水性防波堤上の越波水の運動に関する研究, 海岸工学論文集第 38 巻, pp. 536-540.
- 谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田綱三・合田良実 (1982): 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 21 巻, 第 3 号, pp. 3-41.
- 渡部靖憲・佐伯 浩 (1996): 砕波帯内の流速場のダイレクトシミュレーション, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 71-75.
- 渡部靖憲・佐伯 浩 (1997): 砕波帯内の平均流速場と流体運動スケールについて, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 121-125.
- Brebner, A and P. Donnelly (1962): Laboratory study of rubble foundations for vertical breakwaters, Proc. 8th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 408-429.