

環境共生を目的とした傾斜堤背後小段 の耐波安定性

STABILITY OF ARMOR UNITS FOR LEEWARD STEP WITH SLOPING BREAKWATER

早川哲也¹・森昌也²・梅沢信敏³・土井善和⁴・遠藤強⁵

Tetsuya HAYAKAWA, Masaya MORI, Nobutoshi UMEZAWA, Yoshikazu DOI and Tsutomu ENDO

¹正会員 北海道開発局 港湾空港部 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

²北海道開発土木研究所 港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 北海道開発土木研究所 港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴北日本港湾コンサルタント(株) 環境水理課 (〒003-0029 札幌市白石区平和通2丁目北11番18号)

⁵日本データサービス(株) (〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目1-14)

In constructing ports and harbors, the Eco-friendly function has been recently added on coastal structures in Japan. As leeward step with a sloping breakwater provides the suitable condition for seaweeds, it was reported to effective construction in formation of seaweed forest. However, leeward step must be stable against wave overtopping, it needs to be covered by armor units.

In this study, hydraulic model experiments clarified fluid motion occurred by plunging of wave overtopping, and the design method of armor unit was proposed.

Key Words: *Eco-friendly, Wave overtopping, Armor units, Stability number*

1. はじめに

近年、我が国において自然環境との調和を目指した港湾・漁港施設整備が進められており、この一環として図-1に示すような背後小段付傾斜堤の建設が行われている。この構造はブロック積み傾斜堤により来襲波を制御すると同時に、堤体背後に設置された小段上において光・流れといった海藻の生育に望ましい環境条件を創造しようというものである。明田ら¹⁾の現地調査結果によると、背後小段の天端が高い条件では海藻の光合成が促進されるため、藻場創出の有効な手段となることが報告されている。しかしながら、越波水の打ち込みに対して小段部の安定性を確保することが重要な課題となっており、適切な被覆材の安定質量算定法の提案が望まれている。

傾斜堤港内側の捨石およびブロックの安定についてはいくつかの検討例があり、条件によっては越波水の打ち込みにより港外側よりも問題となることが従来から指摘されてきた(例えば, Walkerら²⁾)。また, Kudaleら³⁾は傾斜堤における越波水の運動をモ

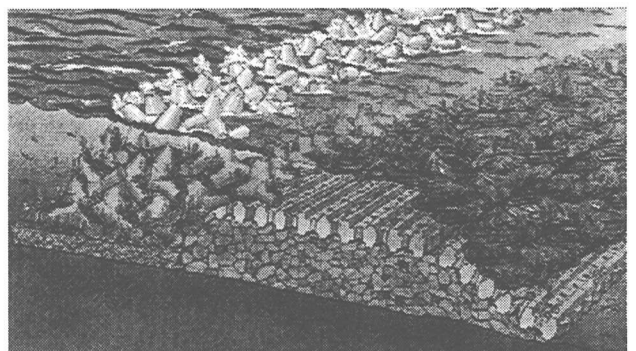


図-1 背後小段付傾斜堤

デル化し、堤体港内側の捨石の安定質量算定法を提案している。しかしながら、この算定法を傾斜堤背後小段部の被覆材に適用した場合、小段天端水深が異なっても被覆材の安定質量が変化しないという問題がある。

そこで本研究は、二次元水理模型実験により小段天端上における流速を測定し、小段水深の影響を明らかにする。また、被覆材に作用する力の釣り合いから安定質量算定法を提案するとともに、安定実験の結果からその妥当性を検証する。

2. 検討方法

(1) 流速測定実験

背後マウンド天端上における流速の測定は、長さ28m、幅0.8m、深さ1mの二次元造波水路において、縮尺は約1/25を想定して行った。1/30勾配の水路床に図-2に示すような傾斜堤を設置した。傾斜堤模型は異型ブロック積みであり、天端幅はブロック3個並び、法勾配は1:4/3であり、一般的に用いられているものと同様である。また、これは後述する被覆材の安定実験においても同じである。水深 h は35.8cm、傾斜堤天端高 h_c は9.7cm、背後小段天端水深 d_l は7.5、10.0および12.5cmである。実験は波高 $H=22$ cmおよび周期 $T=2.4$ sの規則波を用いており、波高水深比 H/h は0.61、相対水深 h/L は0.11、相対天端高 h_c/H は0.44である。

マウンド天端上の流速については、5.0cm間隔の10箇所においてプロベラ式流速計により最大値を測定した。測定は規則波が傾斜堤に作用し始めてから安定する5波目において行い、これを3回繰り返し流速の最大値の平均を求めた。

(2) 被覆材の安定実験

安定実験は長さ85m、幅1.6m、深さ3.0mの二次元造波水路において行った。水深 h を57cmとし、図-2に示した傾斜堤模型を設置した。堤体天端高 h_c は0.0、8.0および15.4cm、小段天端水深 d_l は10.0および20.0cmに変化させた。

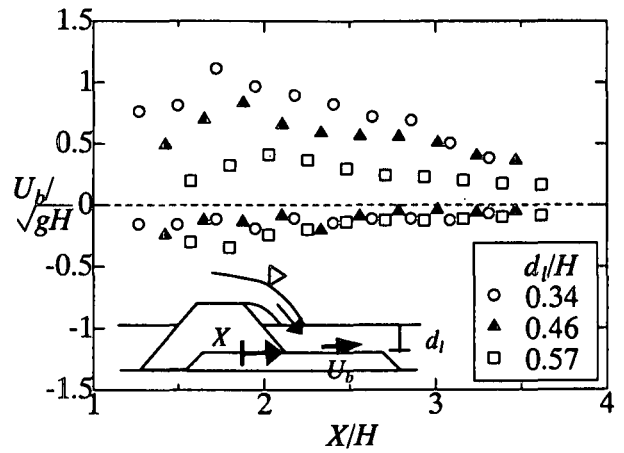


図-3 背後マウンド天端上流速

マウンド被覆材としては異型ブロックを用いており、質量は66、100、140、300gの4種類である。

実験波は修正 Bretschneider・光易型スペクトルを目標とした1波群500波の不規則波を用いた。有義波周期 $T_{1/3}$ は2.4s、有義波高 $H_{1/3}$ は17、20、23および26cmの4種類であり、相対水深 h/L は0.11および波高水深比 $H_{1/3}/h$ は0.30~0.46である。波高の小さい方から段階的に作用させ、各波群の終了後に被覆材の移動個数を測定し、被覆材の総数に対する移動した個数の割合を%で示した被害率 D を算出した。次に、有義波高 $H_{1/3}$ と D の関係から $D=1\%$ となる $H_{1/3}$ をその構造条件および被覆材質量における安定限界波高とした。このような安定性の検討は、谷本ら⁴⁾が混成堤基礎マウンドの被覆材の安定質量算定法を提案した際の方法と同じである。

3. 傾斜堤背後の流体運動

(1) マウンド天端上の流速分布

図-3は、流速測定実験により得られたマウンド天端上の最大流速分布（正：沖→岸方向）である。横軸は堤体法肩下端からの無次元距離 X/H （ H ：波高）、縦軸は波高と重力加速度 g による無次元流速であり、パラメータは d_l/H である。 d_l/H に関わらず正の U_b が大きく、ある X においてピーク値を持つ傾向にある。また、ピーク値が発生する X は d_l/H の増

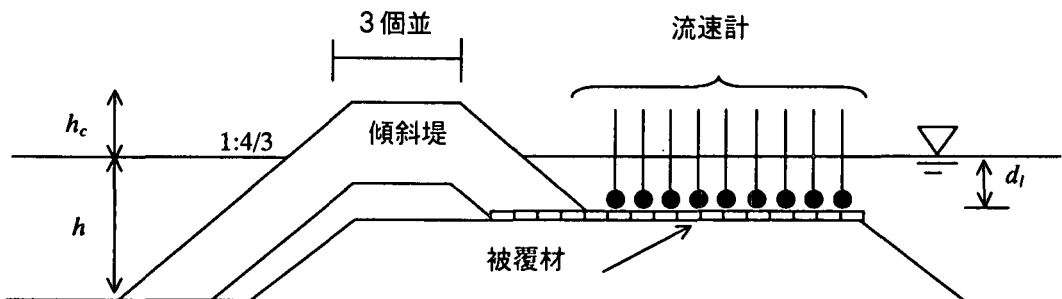
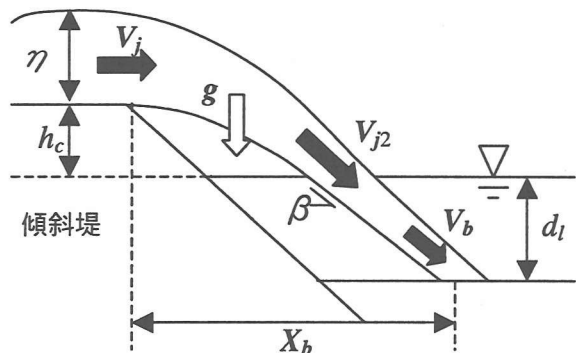


図-2 実験断面



図－4 越波水の打ち込みモデル

加に比例して岸方向に移動する傾向にある。これは図のように越波水の運動量が水面に対してある角度を持って堤体背後へ供給されるためである。ピークにおける流速の最大値についても、 d_l/H の増加にともない減少する傾向にある。

また、著者ら⁵⁾は混成堤背後マウンド部における流体運動の検討を行っている。混成堤背後においては、越波水の打ち込みにより渦が発生し、堤体側へ向う早い流れが観測された。しかしながら、傾斜堤においては渦の発生は見られず岸方向への流れが卓越する。これは、堤体形状の違いや傾斜堤の透過性によるものと考えられる。

(2) 越波水の運動モデル

越波水が水面に打ち込み、小段天端に到達するという一連の運動を Kudale ら³⁾と同様な方法で図－4に示すようにモデル化する。ただし、越波水の打ち込み後の運動については、Kudale らのモデルでは等速度運動としているが、小段天端水深が大きくなった場合に相対的に被覆材の所要質量が小さくできることを再現するため、速度が減少する効果を取り込めるように改良を加えた。

傾斜堤天端上の越波水を堰上の流れと考えると、速度 V_j は流量係数 C 、水位 η および重力加速度 g により次のように表すことができる。

$$V_j = C\sqrt{g\eta} \quad (1)$$

また、水位 η は天端高 h_c 、入射波高 H および波頂高比 $K (=R$ (静水面からの打ち上げ高) $/H)$ を用いると式 (2) のようになる。

$$\eta = KH - h_c \quad (2)$$

次に、速度 V_j で飛び出した越波水は、自由落下し

ながら角度 β で傾斜堤背後の水面へ打ち込むと考えると、その時の速度 V_{j2} は波高 H および重力加速度 g で無次元化した V_{j2*} で考えると次のようになる。

$$V_{j2*} (=V_{j2}/gH)^2 = C^2(K - h_{c*}) + K + h_{c*} \quad (3)$$

ここに、 h_{c*} : 無次元天端高 h_c/H である。

また、打ち込み角 β は次のように表される。

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{C} \sqrt{\frac{K + h_{c*}}{K - h_{c*}}} \right) \quad (4)$$

ここで、規則波による最大流速の測定結果において小段天端水深の増加とともにマウンド天端上の流速が減少したことから、打ち込み速度 V_{j2} が越波水の静水面下で進む距離に応じて減衰すると仮定し、小段天端上の流速 V_b を波高 H および重力加速度 g による無次元量 V_{b*} で次のように考える。

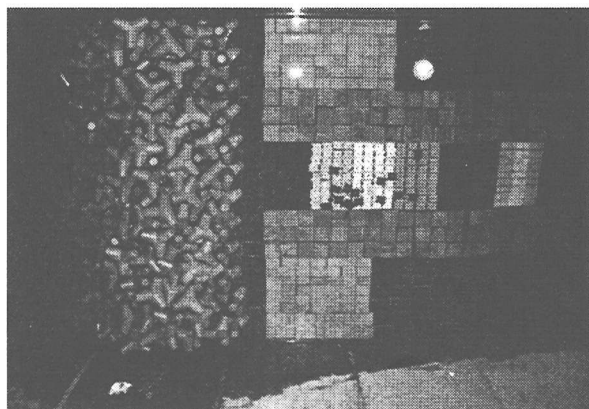
$$V_{b*}^2 (=V_b/gH)^2 = V_{j2*}^2 \exp \left(-a \frac{d_{l*}}{\sin \beta} \right) \quad (5)$$

ここに、 a : 減衰率の大きさを表すパラメータ、

d_{l*} : 無次元小段天端水深 d_l/H である。

また、小段天端における打ち込み点 X_b は波高 H による無次元量 X_{b*} で次式のようになる。

$$X_{b*} (=X_b/H) = C \left(\sqrt{K^2 - h_{c*}^2} + \frac{d_{l*}}{\tan \beta} \right) \quad (6)$$



写真－1 被覆材の移動状況

4. 被覆材の安定性

(1) 被覆材の移動状況

写真-1は、 $H_{1/3}=17\sim 26\text{cm}$ の段階波を作用させた後の被覆材の移動状況であり、被覆材の質量 M が66g、相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ が0.60、無次元小段天端水深 $d_l/H_{1/3}$ が0.38の条件である。被害率 D は16%であり、被覆材が岸方向へ移動しているのが確認できる。このように、安定質量を満たしていない被覆材は岸方向へ移動する傾向があり、流速の測定結果と矛盾しない。

(2) 被覆材の安定数

谷本ら⁴⁾は、水底に単体で置かれた被覆材に流速 U_b が作用している状態を考え、モリソン式で算定される抗力、揚力および底面との摩擦力の釣り合いから、式(7)のような安定限界質量 M が U_b の6乗に比例することを導いている。

$$M = \frac{\rho_r U_b^6}{\{C_s g(S_r - 1)\}^3} \quad (7)$$

ここに、 ρ_r :被覆材の密度、 g :重力の加速度、 S_r :被覆材と流体の密度比、 C_s :被覆材の形状により決まるパラメータである。

一方、傾斜堤や混成堤基礎マウンド部における被覆材の安定質量を求めるのに一般的に用いられている安定数 N_s を用いたHudsonら⁶⁾による算定式を以下に示す。

$$M = \frac{\rho_r}{N_s^3 (S_r - 1)^3} H^3 \quad (8)$$

ここで、式(7)および式(8)から $U_b = V_b \cos \beta$ と

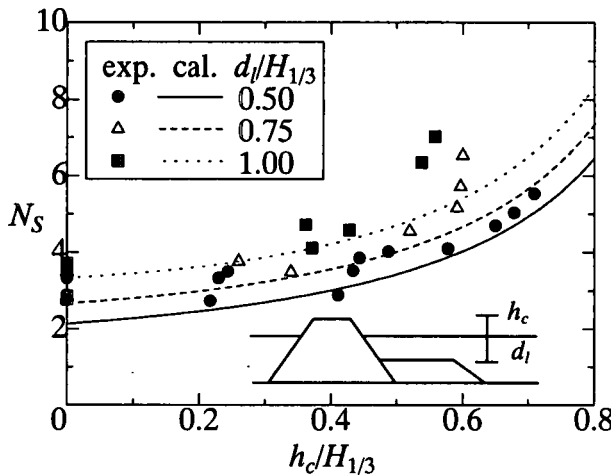


図-5 安定数の実験値および計算値

考えると安定数 N_s は次式のようになる。

$$N_s = \frac{C_s}{(V_b \cos \beta)^2} \quad (9)$$

図-5は、無次元小段天端水深 $d_l/H_{1/3}$ をパラメータとし、安定数 N_s と相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ の関係を示したものである。ここで、図に示されている実験により得られた安定数 N_s は、安定限界波高と被覆材の質量を式(8)に代入し求めたものである。 $h_c/H_{1/3}$ が増加すると越波量が減少するためマウンド被覆材に作用する流体力が小さくなり安定数は大きくなる。また、 $d_l/H_{1/3}$ が増加すると、 $h_c/H_{1/3}$ が同じであっても背後マウンド天端上での流速が減少し被覆材に作用する抗力および揚力が小さくなり、安定数は大きくなる。

図中の曲線は式(3)における係数 K 、 C および a をそれぞれ1.1、2.0および0.50、式(7)における C_s を7.0、入射波 H を $H_{1/3}$ と考えた場合の計算値であり、 N_s の実験結果のほぼ下限値を示している。ただし、式中のパラメータ K 、 C 、 a および C_s は、安定実験により得られた N_s に計算値を一致させるように調整した値である。今回の検討においては周期を一定とし、 N_s の算定法の提案を試みた。しかしながら、実際には周期の違いにより傾斜堤背後の流体運動が変化するため、各パラメータは波長 L による無次元量の関数になると考えられ、今後さらなる検討が必要である。

(3) 被害発生箇所

図-6は、被覆材の被害が卓越しやすい箇所 X_{bexp} と式(6)より算定される X_{bcal} の関係を示したものである。実験値は、ほぼ $X_{bexp} = X_{bcal}$ の直線上にプロ

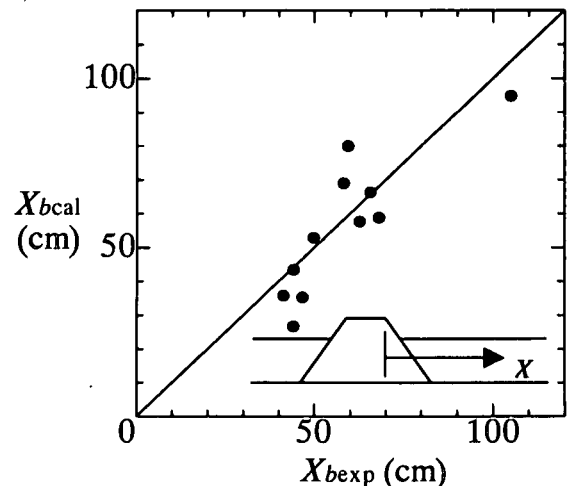


図-6 被覆材の移動箇所

ットされており、式(6)により被覆材の最も移動しやすい箇所が算定可能である。マウンド法肩部の被覆材は天端上のものと比較して不安定となりやすいことが従来から指摘されており、設計の際には X_{cal} の地点において背後小段法肩部を避ける必要がある。

5. 安定質量の計算例

設計有義波高 $H_{1/3}=7.3\text{m}$ 、傾斜堤天端高 $h_c=4.4\text{m}$ および背後マウンド天端水深 $d_l=5.9\text{m}$ の条件において傾斜堤背後小段被覆材の安定質量を算定する。

まず、相対天端高 h_{c*} および無次元小段天端水深 d_{l*} を求める。

$$h_{c*} = h_c / H_{1/3} = 0.603$$

$$d_{l*} = d_l / H_{1/3} = 0.808$$

これらを式(3)に代入し、越波水が傾斜堤背後の静水面に打ち込む際の無次元速度 V_{j2*} を求めると次のようになる。

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1.1+0.603}{1.1-0.603}} \right) = 0.747$$

$$V_{j2*}^2 = 2.0^2(1.1-0.603)+1.1+0.603-2 \cdot 0.5 \cdot \frac{0.808}{\sin(0.747)} = 2.50$$

次に式(9)より算定される安定数 N_s は

$$N_s = \frac{7.0}{2.50 \cos^2(0.747)} = 5.20$$

となる。

最後に式(8)のハドソン式により次のように被覆材質量を算定できる。

$$M = \frac{2.3}{5.20^3(2.3/1.03-1)^3} 7.3^3 = 3.4 \text{ t}$$

また、背後小段 d_l を 4.0m とした条件では、被覆材の安定質量 M が 5.2t となり、 $d_l=5.9\text{m}$ の場合の約1.5倍となる。

6. まとめ

本報告の主要な結論をまとめると次のようになる。

- ① 小段上においては岸方向へ向う早い流れが発生する。また、その最大値は小段天端水深の増加に比例して減少する。
- ② 越波水の運動をモデル化することにより安定質量算定法を提案し、実験結果により検証した。また、越波水の打ち込み後の速度減衰を考慮することにより、これまでの設計では考慮されていなかった小段天端水深の増加による被覆材安定質量の低減を評価した。
- ③ 被覆材の移動しやすい箇所は越波水の運動モデルにより推定可能である。

傾斜堤背後小段の安定性に対しては、越波および透過波による影響がある。今回の報告では、実用的な算定法を提案するため、透過波を考慮せず式中のパラメータを調整することにより実験結果と一致させ、算定式が複雑化すること avoided。被覆材安定質量の推定の精度を上げるためには、被覆材が不安定となるメカニズム、波の不規則性および周期、透過波の影響を考慮する必要がある。今後、回折波といった平面的な波浪場の影響とともに検討する予定である。

参考文献

- 1) 明田定満, 山本泰司, 小野寺利治, 鳴海日出人, 斉藤二郎, 谷野賢二: 複断面構造を有する港湾構造物への海藻群落形成について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1131-1135, 1997.
- 2) Walker, J. R., Palmer, R. Q. and Dunham, J. W.: *Breakwater Backslope Stability*, Proc. Civil Engineering in Oceans pp.879-898, 1975.
- 3) Kudale, M.D. and N. Kobayashi: *Hydraulic Stability Analysis of Leeward Slopes of Overtopped Breakwaters*, Proc. 25th ICCE, pp. 1721-1734, 1996.
- 4) 谷本勝利, 柳生忠彦, 村永努, 柴田鋼三, 合田良実: 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, 1982.
- 5) 早川哲也, 渡部靖憲, 鈴木孝信, 木村克俊, 土井善和, 工藤貴弘: 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, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 691-695, 1998.
- 6) Hudson, R.Y.: *Laboratory Investigation of Rubble-mound Breakwaters*, Proc. A.S.C.E., Waterways and Harbors Division, Vol. 85, 1959.
- 7) 高橋重雄, 遠藤仁彦, 室善一郎: 親水性防波堤上の越波水の運動に関する研究, 海岸工学講演会論文集 第38巻, pp.536-540, 1991.