

海域環境に配慮した背後マウンド付き防波堤の 設計法に関する研究

森 昌也* ・上久保勝美** ・梅沢信敏***
山本泰司**** ・橋詰知喜***** ・伊東雅規*****

背後マウンド付き防波堤は、堤体背後に設置した水深の浅い背後マウンドにより、防波堤の安定性を向上させるとともに自然環境と調和した生物生息場を創り出すことができる。しかしながら、背後マウンド付き防波堤に関する研究例は少なく、適切な断面の決定が難しい。そこで、水理模型実験により背後マウンド被覆ブロックの耐波安定性および伝達波特性を明らかにするとともに、越波水塊の打ち込み運動をモデル化してマウンド上における被害の発生箇所を算定し、伝達波や背後における被害発生箇所等を考慮した最適な設計法を提案する。

1. ま え が き

近年、自然環境との調和をめざした港湾・漁港施設の整備が進められており、本来荒波から背後施設を守るための防波堤や防波護岸に対しても、防災などの機能に付加して海域環境に配慮した構造物の整備が求められている。こうしたなか、図-1 に示すような背後マウンド付き防波堤が建設されている。この防波堤は、堤体背後に浚渫土などの安価な資材によって水深の浅いマウンドを設けることにより、堤体の安定性を向上させることができる。また、マウンド上においては、光環境が良好であることから、海藻などの水生生物の生息に適した環境となることが期待されている。

これまで早川ら (2000) は、背後マウンド付き防波堤について直接数値計算により、越波水の打ち込みによる背後の流体運動を明らかにするとともに、水理模型実験により背後被覆石の安定質量算定法を提案している。しかしながら、藻場の造成を目的とした場合、背後マウンド水深は、-3~-5m に設定されることが多く、第一線防波堤では大型の被覆ブロックが必要となるため、安定質量の算定ができない。また、背後マウンドは、越波による伝達波高の減衰効果も期待できるが、定量的に評価する方法がないため、合理的な天端高さを算定することができないのが現状である。

そこで本研究では、背後マウンド付き防波堤のマウンド形状を変化させた場合のマウンド被覆ブロックの耐波安定性および伝達波特性を水理模型実験により明らかにするとともに、越波水塊の打ち込み運動をモデル化してマウンド上における被害の発生箇所を算定し、背後マウンド付き防波堤の最適な設計法の提案を行うものである。

2. 実験の方法

水理模型実験は、不規則波発生装置を備えた 2 次元造波水路 (長さ 27.0 m, 幅 0.6 m, 深さ 1.2 m) に勾配が 1/100 のモルタル製の水路床を製作して行った。実験に用いた断面を図-1 に示す。構造条件としては、天端高さ h_c を 7.6, 13.4 および 19.3 cm, 背後マウンド肩幅 B_m を 45, 50, 103, 143 および 200 cm, 背後マウンド水深 d_i を 6.0, 8.7, 10.8, 12.9, 14.0, 15.0 および 26.0 cm に変化させてその影響を確認した。

実験波浪は、修正 Bretschneider・光易型の周波数スペクトルを目標とする不規則波を用いており、波浪条件は有義波高を $H_{1/3}=13.4, 15.4, 17.4$ および 19.4 cm の 4 種類、有義波周期を $T_{1/3}=1.7, 1.98$ および 2.2 s の 3 種類に変化させた。

マウンド被覆材の安定実験では、被覆材として平型の被覆ブロックを用いており、その質量を 66, 150, 240, 300 および 500 g の 5 種類に変化させて実施した。今回の実験では、波浪条件を一定として被覆材の質量を徐々に大きくしていく方法を用いており、被覆材質量 M (g) と被害率 D (%) の関係から被害率 1% に着目して背後における安定質量を求めた。ここでの作用波数は 1000 波を標準とする。被害率は、被覆ブロックの総数に対する被害個数の割合であり、被害の定義としては被覆ブロックの抜け出しおよび被覆ブロック半個長以上の移動とした。また、堤体前面を消波ブロックで被覆した場合についても実験を実施して安定性を検討した。

伝達波測定実験では、1 波群の作用波数は 200 波を標準としており、堤体後面から 250 cm および 300 cm の位置に設置した波高計により伝達波高を測定した。

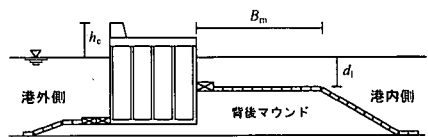


図-1 背後マウンド付き防波堤

* 正会員 (独法)北海道開発土木研究所港湾研究室
** 正会員 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所
*** 正会員 北海道開発局稚内開発建設部技術管理官
**** 正会員 工修 (独法)北海道開発土木研究所港湾研究室
***** 北海道開発局釧路港湾建設事務所長
(株)北日本港湾コンサルタント

3. 背後マウンド被覆材の安定性

3.1 背後被覆ブロックの安定質量算定法

混成堤のマウンド被覆材の安定質量を算定する場合には、次式で示されるようなハドソン式が用いられている。

$$M = \frac{\gamma_r H_{1/3}^3}{N_s (S_r - 1)^3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 γ_r は被覆材の単位体積質量、 $H_{1/3}$ は有義波高、 S_r は被覆材の海水に対する比重、 N_s は安定数を示す。

これまで、港外側のマウンド被覆材については多くの研究がなされている。例えば、谷本ら (1982) は不規則波による系統的な水理模型実験から、マウンド近傍の無次元流速に基づいて被覆材の安定数 N_s の算定法を提案している。さらに、藤池ら (1999) は谷本らの算定式から被覆ブロック固有の安定数である基準安定数 N_{s0} を分離した算定式を提案している。

また、港内側の被覆材については、早川ら (2000) が水理模型実験から背後マウンド上流速に基づいて被覆石の安定数 N_s を次式のように提案している。

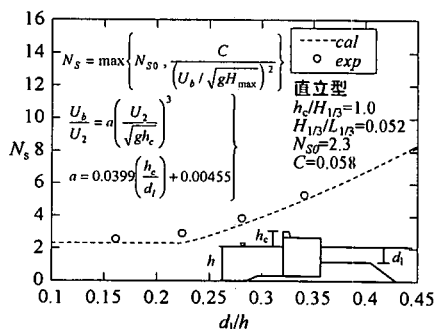
$$N_s = \frac{C}{(U_b / \sqrt{g H_{\max}})^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_b}{U_2} &= a \left(\frac{U_2}{\sqrt{g h_c}} \right)^3 \\ a &= 0.0399 \left(\frac{h_c}{d_i} \right) + 0.00455 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 C は被覆材の形状、抗力および揚力係数によって決まる係数、 g は重力加速度、 $H_{\max}$ は最高波高、 U_b は背後マウンド天端上の流速、 h_c は堤体天端高さ、 d_i は背後マウンド水深、 U_2 は堤体天端上の流速であり、Hujii ら (1994) の算定法を用いて計算する。

ここでは、藤池らと同様に背後被覆材についても基準安定数 N_{s0} を導入して早川らの算定法を (4) 式のように改良し、水理模型実験によってその妥当性を検討した。

$$N_s = \max \left\{ N_{s0}, \frac{C}{(U_b / \sqrt{g H_{\max}})^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$



図一 港内側マウンド水深と安定数

3.2 背後マウンド水深と安定数の関係

図一は、背後被覆ブロックの安定数 N_s と背後マウンド水深比 d_i/h の関係を示している。ここで、相対天端高さ $h_c/H_{1/3}$ は 1.0、背後マウンド幅と水深の比 B_m/h は 4.5 である。その結果、背後マウンド水深比 d_i/h が小さくなるにつれて越波水塊の打ち込み力が増大するため安定数 N_s は減少する。また、背後マウンド水深比 d_i/h が 0.2 程度より小さくなると安定数は一定の値に近づく傾向にある。図中の破線は、今回提案した基準安定数 N_{s0} を導入した算定法による値であり、今回実施した条件においては、 $N_{s0}=2.3$ を用いると実験値と良く一致した。

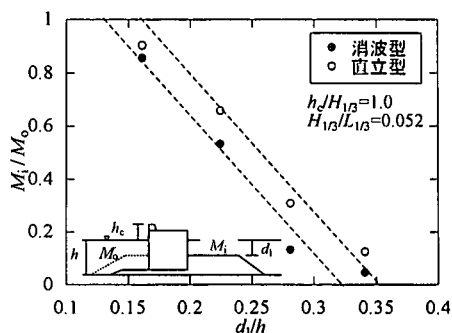
3.3 背後と港外側の安定質量の比

通常の混成堤において背後被覆材の安定質量を算定する場合には港外側の質量の 0.5 倍や 0.25 倍の質量を用いている場合もある。そこで、港内側と港外側の安定質量の比 M_i/M_o と背後マウンド水深比 d_i/h の関係を図一3のように示した。ここで、 M_o は背後マウンド水深と同じマウンド水深とした場合の港外側被覆ブロックの安定質量であり、破線は実験値の傾向を示している。図中の (○) は直立型、(●) は消波型の結果を示す。その結果、背後マウンド水深比 d_i/h が増大するにつれてほぼ直線的に背後と港外側の安定質量の比 M_i/M_o は減少している。例えば、背後マウンド水深比 d_i/h が 0.3 の条件においては直立堤では港外側被覆材の 1/5 倍程度の質量、消波堤では港外側の 1/10 倍程度の質量が必要となる。ここで、消波型における M_i/M_o の方が小さい値となっているのは堤体前面を消波ブロックで被覆することにより越波流量が低減し、被覆ブロックに作用する流体力が低減するためであると考えられる。

4. 背後における被害の発生箇所

4.1 背後マウンド上における被害の発生箇所

図一4は、背後マウンド水深比 d_i/h を 0.26 および 0.32 とした場合の堤体後壁からの無次元距離 $X/H_{1/3}$ と背後マウンド被覆ブロックの被害率の相対度数分布 p の



図一 港内と港外側の質量比

関係を示している。この図から、背後被覆ブロックの被害率は、背後マウンド上においてあるピーク値を持って分布しており、そのピーク値付近に越波水塊が打ち込んでいるものと考えられる。また、背後マウンド水深が深いほどピークの位置は岸側に移動していることから、越波水塊はある角度を持って背後に打ち込むことが分かる。

4.2 越波水の打ち込みモデル

早川ら(2001)は、背後マウンド付き傾斜堤について越波水塊の運動をモデル化して、背後マウンド上において最も被害の発生しやすい位置の算定法を提案している。ここでも同様のモデルを用いて越波水の運動を図-5のようにモデル化した。このモデルでは、堤体の天端上を流速 U_2 で水平に飛び出した越波水塊が自由落下しながら静水面にある角度をもって打ち込み、背後の被覆材に作用すると仮定している。ここで、堤体天端上流速 U_2 は Hujii ら(1994)の方法を用いて計算している。このモデルを用いると堤体後面から越波水塊が被覆材に作用する位置までの距離 X は(5)式のように表すことができる。

$$X = \left(\frac{\sqrt{2gh_c}}{g} + \frac{d_l}{\sqrt{2gh_c}} \right) \cdot U_2 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 g は重力加速度、 h_c は堤体天端高さ、 d_l は背後マウンド水深、 U_2 は堤体天端上の流速を示す。

図-6 は直立型および消波型の実験において最も被害の発生した位置 X_{exp} と今回提案したモデルを用いて計

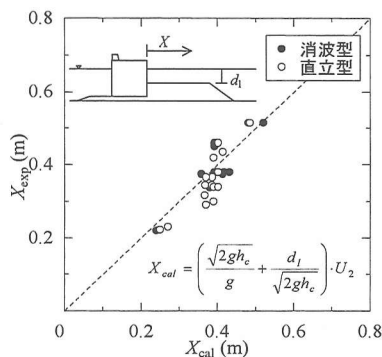


図-6 実験値と計算値

算した打ち込み位置 X_{cal} の関係を示している。実験値と計算値は比較的良く一致しており、このモデルの妥当性が確認された。混成堤の基礎マウンド部において最も被害の発生しやすい位置は、基礎マウンドの法肩部と言われているため、(5)式により計算される越波水塊の打ち込み位置にマウンド法肩部を設けることは避ける方がよい。

5. 越波伝達波特性

5.1 背後への越波水の打ち込みと波高減衰

前章では堤体の天端上を越えた越波水塊の運動をモデル化して水塊の打ち込みによる被覆ブロックの被害発生箇所の算定法を提案した。今回提案したモデルは、打ち込みによって発生する渦などの影響については考慮していないが、実際の現象では背後マウンド水深やマウンド幅などの影響により複雑な流体運動が生じているものと考えられる。写真-1 は、 $h_c=7.6$ cm、 $B_m=50.0$ cm および $d_l=14.0$ cm の条件における、直立部を越えた越波水塊の打ち込みの状況を示している。この写真から、打ち込んだ越波水は背後マウンド天端面付近にまで達しているのが確認できる。また、西受ら(1996)によると越波水が打ち込んだ時、渦を生成する前に、第1波はほぼ形成されており、越波伝達波の主要な波是水塊が割り込むことによって生じることを報告している。こうして生成された越波伝達波高はマウンド天端面と水塊との摩擦により波浪のエネルギーが減衰するため、背後マウンドの

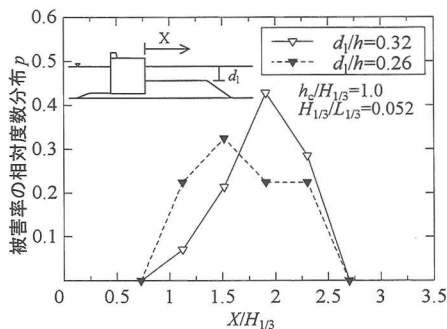


図-4 被害の相対度数分布

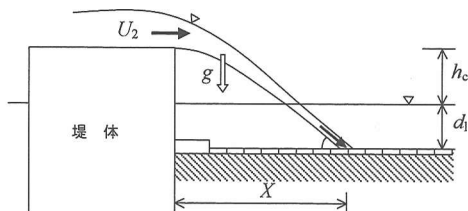


図-5 越波水の打ち込みモデル



写真-1 越波水塊の打ち込み状況

形状が越波伝達率に影響を与えているものと考えられる。

5.2 直立部の天端高さの影響

図-7 は、伝達率 K_t と相対天端高さ $h_c/H_{1/3}$ の関係を、背後マウンドのない通常の混成堤と背後マウンドを設置した場合 ($d_i/h=0.19$, $B_m/h=6.37$) について示したものである。パラメータとしては、水深波長比 $h/L_{1/3}$ を用いている。通常の混成堤の場合には、近藤ら (1976) による結果と同様に、相対天端高さ $h_c/H_{1/3}$ が増加するにつれて伝達率 K_t はほぼ直線的に減少している。背後マウンドを設置した場合には、いずれの天端高さにおいても通常の混成堤と比較して伝達率 K_t が $0.03 \sim 0.09$ 程度減少している。これは、マウンドの存在により越波水塊の打ち込み時の乱れが大きくなることと、マウンド上を伝達する波が底面摩擦によって減衰するためと考えられる。また、いずれのケースにおいても入射波の周期が伝達波に与える影響は小さいことが分かった。

5.3 背後マウンド形状の影響

伝達波は背後マウンド水深 d_i およびマウンド幅 B_m の双方の影響によって変化するものと考えられる。図-8 は、背後マウンド水深比 d_i/h をパラメータとして、マウンド天端幅 B_m の影響を直立部の天端高さが $h_c/H_{1/3}=0.40$ の場合について示したものである。マウンド水深の小さい $d_i/h=0.19$ の場合をみると B_m が大きくなるにつれて K_t は直線的に小さくなる。しかし、マウンド水深の大きい $d_i/h=0.83$ の場合はマウンドの影響はみられず K_t はほぼ一定となっている。これは背後マウンド水深 d_i が伝達波高に比較して相対的に大きいと、底面との摩擦の影響をほとんど受けなくなるためである。また、前述の結果と同様に周期の影響は小さい。

5.4 直立部天端高さや背後マウンド形状の影響

図-9 は、背後マウンド天端幅 B_m が伝達率 K_t に及ぼす影響を直立部の相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ をパラメータとして示したものである。図はマウンド水深が小さい $d_i/h=0.19$ の条件であり、周期の影響が小さいことから各周期

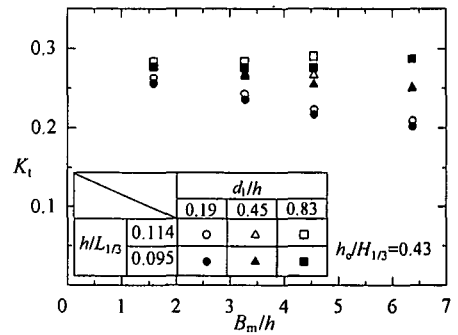


図-8 背後マウンド形状の影響

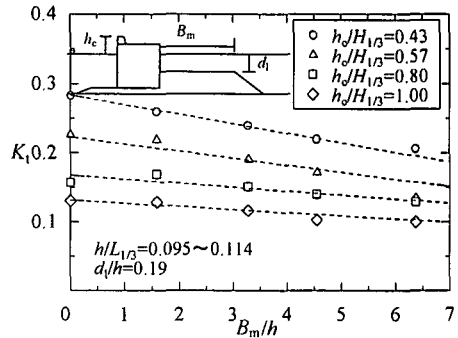


図-9 伝達波波特性

の平均値をプロットしてある。破線は実験値の傾向を表している。

この図を用いて背後マウンドによる伝達率低減効果を考慮して天端高を決定することができる。例えば、天端高を通常より低天端の $h_c/H_{1/3}=0.4$ としても、 B_m/h を 4.5 程度とすれば $h_c/H_{1/3}=0.6$ の場合と同程度の伝達率が得られる。図には示していないが、マウンド水深がより深い $d_i/h=0.45$, 0.83 の場合は、マウンドによる伝達率低減効果は順次小さくなる。

6. 背後マウンド付き防波堤の合理的設計法

今回の研究結果を用いることによって背後マウンド付き防波堤の合理的な断面の設計が可能となった。例えば、背後マウンド天端水深については、背後被覆ブロック質量、背後マウンド上に期待する藻場等の環境共生機能および本体工の断面幅縮減を意図した抑え盛土効果を総合的に判断して決める。背後マウンド天端幅については、必要な環境共生機能を加味しつつ、トータルコストを基本に決定する。その際には、背後水域に所要の静穏度が得られるような面的防護の設計思想を準用する。すなわち、本体工天端高と背後マウンド天端幅をパラメータとして越波の打ち込み位置等を加味した断面を設計すれば良い。

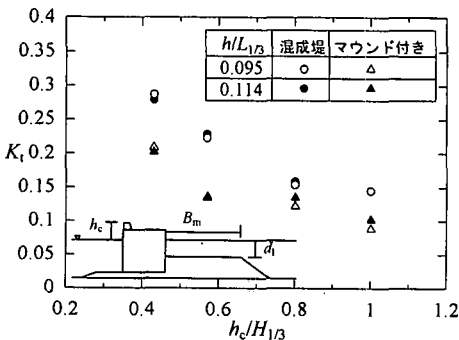


図-7 直立部の天端高さの影響

7. 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背後被覆ブロックの安定数算定法に港外側被覆材と同様に基準安定数を導入した算定法を提案し、実験値と良く一致することを明らかにした。
- ②港内側と港外側の安定質量の比は、背後マウンド水深比が増大するにつれてほぼ直線的に減少する。また、堤体前面を消波ブロックで被覆することによって背後被覆ブロックの安定性は向上する。
- ③越波水塊の運動をモデル化することによって背後被覆ブロックの被害の発生しやすい箇所の算定法を提案した。また、提案モデルが実験値と良く一致していることを確認した。
- ④背後マウンド水深およびマウンド幅が越波伝達波に与える影響を明らかにした。これにより、マウンド形状を考慮した適切な天端高さを決めることができ、面的防護の設計思想を準用した背後マウンド付き防波堤の合理的設計が可能になる。

参 考 文 献

- 合田良実・竹田英章 (1966): 越波による防波堤背後への波高伝達率, 第 13 回海岸工学講演会論文集, pp. 87-92.
- 近藤俊郎・佐藤 功 (1963): 防波堤天端高に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報, 第 117 号, pp. 1-15.
- 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, 港研報告, 第 21 巻, 第 3 号, pp. 3-42.
- 西受由裕・水口 優 (1996): 越波による伝達波について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 726-730.
- 早川哲也・山本泰司・梅沢信敏 (2000): 越波による混成堤背後の流体運動とマウンド被覆材の安定性, 北海道開発土木研究所月報, No. 570, pp. 12-18.
- 早川哲也・森 昌也・梅沢信敏・土井善和・遠藤 強 (2001): 環境共生を目的とした傾斜堤背後小段の耐波安定性, 海洋開発論文集, 第 17 巻, pp. 417-421.
- 藤池貴史・木村克俊・林 忠志・土井善和 (1999): 消波ブロック被覆堤前面マウンド被覆材の耐波安定性, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 881-885.
- Hujii, A, Takahashi, S. and Endoh, K. (1994): An Investigation of the Wave Forces Acting on Breakwater Handrails, 24th International Conference on Coastal Engineering, pp. 1046-1060.