

防波堤整備コストの更なる縮減について

港湾空港部 港湾建設課 ○水島 良
林 誉命
早川 哲也

防波堤のコスト縮減のため、これまで様々な新構造の防波堤を開発してきたが、施工性等の観点から、防波堤構造形式の主流は混成堤となっている。本報告では、混成堤の設計における更なるコスト縮減を図るため、①港内側マウンド被覆材の必要性、②低天端波力算定式による暫定断面縮小の可能性、③越波水の利用による堤体質量増加の可能性の3項目について分析を行い、コスト削減の可能性がある波浪条件や今後の課題について整理するものである。

キーワード：防波堤、コスト縮減、マウンド被覆材、暫定断面、越波

1. はじめに

防波堤は比較的水深の深い水域に整備され、構造が大断面となることから、港湾施設の中でも整備費用が高いものとなっている。このため、従来から、防波堤のコスト縮減を目的とした研究開発が積極的に行われ、例えば、谷本¹⁾ら（1987）による半円形ケーソンや関口²⁾ら（2000）による斜面スリットケーソン等、様々な新構造の防波堤の開発が行われてきたが、ある条件においては波浪制御効果やコスト縮減効果に優れているものの、施工性等の観点から、防波堤構造形式の主流はケーソンによる混成堤となっている。

そこで本研究では、混成堤における更なるコスト縮減に主眼を置き、①港内側マウンド被覆材の必要性、②低天端波力算定式による暫定断面縮小の可能性、③越波水の利用による堤体質量増加の可能性の3項目について分析を行い、コスト削減の可能性がある波浪条件や今後の課題について整理するものである。

2. 港内側マウンド被覆材の必要性

(1) 研究内容

混成堤は基礎捨石の上にコンクリートケーソンを据え付ける構造であり、波浪の作用により、基礎捨石の洗堀による被災が発生しないよう、所要の質量を有したコンクリートブロック等のマウンド被覆材により被覆される。港外側のマウンド被覆材については、高橋³⁾ら（1990）の方法により、波浪や構造条件から安定数 N_s を算出し、 N_s を考慮したハドソン式から適切な所要質量の算定が可能である。しかしながら、港内側のマウンド被覆材については、港外側の質量の1/2や1/4といった値を経験的に用いているのが現状である。

防波堤港内側のマウンド被覆材の安定性に影響を及ぼ

す外力としては、①越波水の打ち込み、②回折波を主体とした港内波、③マウンド透過波が考えられる。②については高橋³⁾ら（1990）の方法、③については例えばCADMAS-SURFに代表されるような波浪による基礎マウンドの圧力伝播を再現できる数値シミュレーションにより検討が可能である。ここでは、①の防波堤の越波に対するマウンド被覆材の安定性を検討し、マウンド被覆材を必要としない、即ち30kg～300kgの中割石でも安定する条件について整理するものである。

(2) 研究方法

早川⁴⁾ら（2000）は、環境共生を目的とした背後小段付防波堤の設計法の確立のため、数値計算や水理模型実験により、式（1）に示すとおり、波浪条件や構造条件から背後マウンド上の流速 U_b を算定し、その流速から安定数 N_s を算定する方法を提案している。

$$N_s = C / (U_b / \sqrt{gH})^2 \quad (1)$$

ここに、 g は重力加速度、 H は波高、 C は係数で0.06である。安定数 N_s は、流速の2乗に反比例する式となっており、流速の増加により急激に N_s が小さくなり、港内側マウンド被覆材の所要質量が大きくなるものである。

本研究では、この方法を用いて、港内側マウンド被覆材の所要質量が30kg未満となる条件を検討する。検討に用いる防波堤のモデルは図-1であり、水深 h 、天

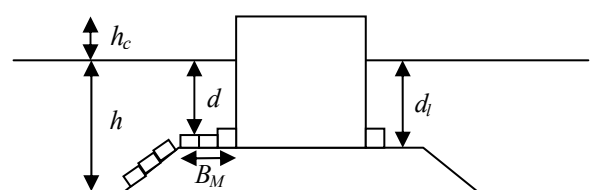


図-1 防波堤モデル (各パラメータ)

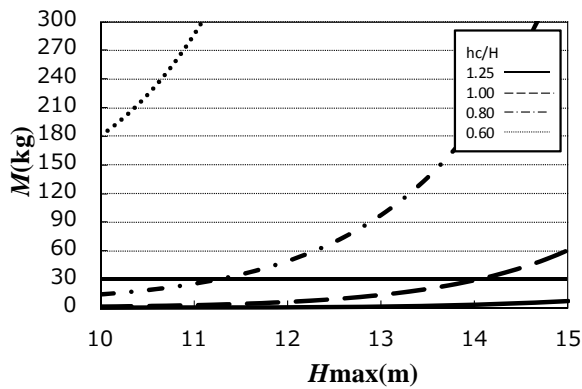


図-2 港内側被覆材必要質量 ($h=10\text{m}$)

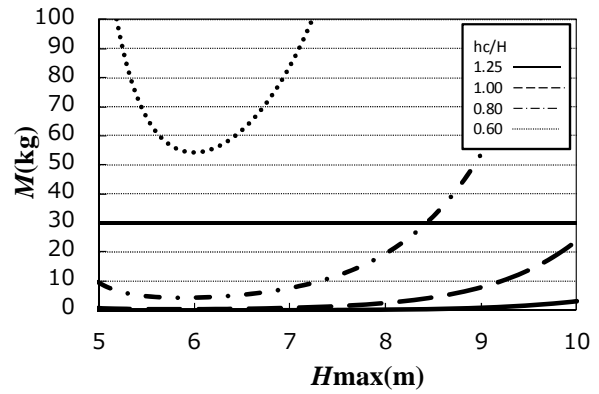


図-3 港内側被覆材必要質量 ($h=15\text{m}$)

端高 h_c の全断面構造であり、また、港内側基礎捨石上の水深を d_f としている。

水深 h は 10m と 15m の 2 種類とし、作用させる波浪の最大波高 H_{\max} については実際の設計で用いる値を考慮して、 $h=10\text{m}$ では $H_{\max}=5\sim 10\text{m}$ 、 $h=15\text{m}$ では $H_{\max}=10\sim 15\text{m}$ に変化させた。天端高 h_c は、相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ を 0.60、0.80、1.00、1.25 とし、作用させる波高 H_{\max} に応じて変化させた。ここで、有義波高 $H_{1/3}$ と最大波高 H_{\max} の関係は、一般的に用いられている $H_{\max}/H_{1/3}=1.8$ の関係を使用している。また、基礎捨石の厚さは最低厚の 1.5m とし、港内側基礎マウンド上の水深 d_f については、 $h=10\text{m}$ で $d_f=8.5\text{m}$ 、 $h=15\text{m}$ で $d_f=13.5\text{m}$ となる。なお、早川⁴⁾ら (2000) の方法における波浪の周期については、港外側マウンド肩幅 B_M と波長 L の比 B_M/L に応じて、水深を h またはマウンド上水深 d とするかに影響するパラメータとなっている。本検討では、港外マウンドの影響を受けない領域 $B_M/L \leq 0.11$ とし、 $B_M=9.0\text{m}$ と考えると、 $h=10\text{m}$ では $T \geq \text{約}9\text{s}$ 、 $h=15\text{m}$ では $T \geq \text{約}8\text{s}$ の条件を対象としていることとなる。

(3) 港内マウンド被覆材が不必要となる条件

図-2 は、水深 $h=10\text{m}$ における各波高 H_{\max} における港内側マウンド被覆材の所要質量 M の算定結果について相対天端ごとに示したものである。 $h_c/H_{1/3}=1.25$ 、1.00 の条件では、防波堤天端が高く、越波がほとんど発生しないことから、全ての波高において 30kg を下回っており、港内側マウンド被覆材が必要ない結果となった。また、 $h_c/H_{1/3}=0.80$ の条件では、波高 H_{\max} が 8.4m より小さい条件で被覆材が必要ない結果となった。一方、 $h_c/H_{1/3}=0.60$ の条件では、越波量が大きく、港内側の基礎マウンド付近で大きな流速が発生することから、全ての波高条件でマウンド被覆材が必要となる結果となった。

図-3 は、 $h=15\text{m}$ の条件において、図-2 と同様に、港内側マウンド被覆材の所要質量を示したものである。水深が深く波高が高い条件としたことから、全体的に必要な質量 M は増加するが、 $h_c/H_{1/3}=1.25$ の条件では被覆材が不必要という結果となり、 $h_c/H_{1/3}=1.00$ 、0.8 の条件でも波

高が小さい領域では、被覆材を設置しなくても良い結果となった。ただし、 $h_c/H_{1/3}=0.60$ の条件では水深 $h=10\text{m}$ と同様に全ての波高条件でマウンド被覆材が必要という結果となった。

(4) 今後の課題

本研究では、波浪条件によっては、マウンド被覆材を設置しなくても良い結果となり、コスト削減の可能性を示した。早川⁴⁾ら (2000) の方法は、実験ケースに限られた条件での検討であり、また、パラペット構造での検討を行っていないことから、更なる水理模型実験による検討が必要である。

さらに、港内側被覆材の安定性には、越波水の打ち込み、港内波、マウンド透過波が複合的に作用することから、この場合の安定性についての検討が必要となる。

3. 低天端波力算定式による暫定断面縮小の可能性

(1) 研究内容

混成堤は、ケーソン据付け後の上部工の打設により所要の天端高や質量を確保する構造であり、効果の早期発現等の観点から、上部工を打たない暫定断面での延伸や越年を行う場合がある。通常、防波堤の断面は 50 年確率波により完成断面での設計を行うが、暫定断面での延伸・越年が想定される条件では、10 年確率波等でも安定照査を行い、危険側で堤体幅を決定することとなる。よって、防波堤断面が 10 年確率波で決定される場合は、50 年確率波に対しては過大な断面となっている。

酒井⁵⁾ら (2014) は、没水状態を含む防波堤天端の低い条件での堤体に作用する波力特性を水理模型実験及び数値波動水路の CADMAS-SURF により検討しており、防波堤直立部に作用する波力は合田の波圧算定式より小さくなることを明らかにし、天端が低い条件での波圧低減係数を提案している。

そこで、本研究では、酒井⁵⁾ら (2014) の方法により、暫定時で決定する断面の解消や暫定時の堤体幅の縮小可能な波浪条件について整理するものである。

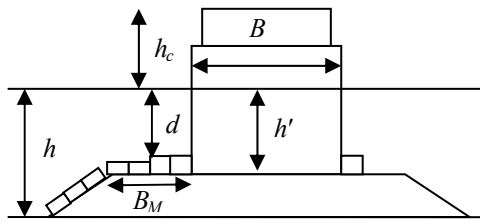


図-4 防波堤モデル(各パラメータ)

(2)研究方法

酒井⁵⁾ら(2014)は、没水状態や低天端状態での波力算定式について、合田の波圧算定式に波圧低減係数 κ を乗じる下記の式(2)を提案している。

$$\begin{aligned}
 p'_1 &= \kappa p_1 \\
 p'_u &= \kappa p_u \\
 \kappa &= 0.8 \quad (-1.5 \leq h_d/H_{1/3} < 0.0) \\
 &= 0.4 h_d/H_{1/3} + 0.8 \quad (0.0 \leq h_d/H_{1/3} < 0.5) \\
 &= 1.0 \quad (0.5 \leq h_d/H_{1/3})
 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 p'_1 及び p'_u は低天端状態の水平力と揚圧力の波圧強度であり、 p_1 及び p_u は合田の波圧算定式の波圧強度、 $h_d/H_{1/3}$ は相対天端高である。つまり、相対天端高 $h_d/H_{1/3}$ が0.5以上の場合は従来の合田の波圧算定式を用いて問題ないが、それより小さくなると $h_d/H_{1/3}$ とともに合田式より波圧が小さくなり、没水状態になると合田算定式の8割程度となることを表現している。

図-4は、検討に用いる防波堤の断面を模式的に示したものである。水深 h は10mと15mの2種類とし、50年確率波に対応した堤体に作用する最大波高 H_{50} については、概ね設計水深で最大の値を示す $H_{50}/h=0.9$ を想定し、それぞれ $H_{50}=9.0\text{m}$ 及び $H_{50}=13.5\text{m}$ とした。なお、来襲周期については、道内各港の設計波高を参考に、それぞれ $T_{50}=9.0\text{s}$ 及び $T_{50}=12.0\text{s}$ とした。また、天端高 h_c は、 $H_{50}/H_{1/3}=1.8$ 、 $h_d/H_{1/3}=0.6$ の関係と太平洋側の潮位H.W.L.=

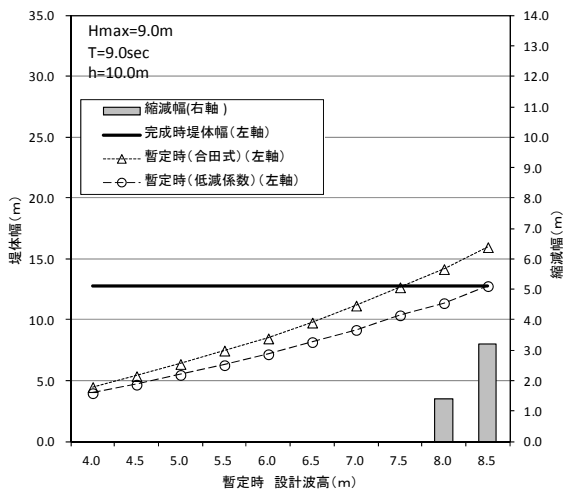


図-6 完成及び暫定時の堤体幅 ($h=10.0\text{m}$)

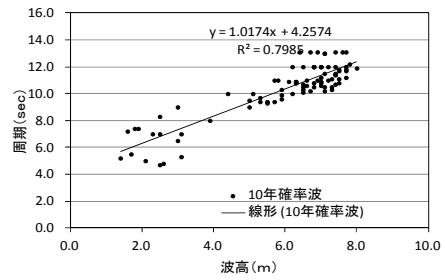


図-5 10年確率波の波高と周期の関係

1.6mから、 $h=10\text{m}$ では $h_c=5.0\text{m}$ 、 $h=15\text{m}$ では $h_c=6.6\text{m}$ とした。なお、基礎捨石の厚さは最低厚の1.5mとし、港外側基礎マウンド上の水深 h' については $h=10\text{m}$ で $h'=8.5\text{m}$ 、 $h=15\text{m}$ で $h'=13.5\text{m}$ 、マウンド被覆水深は簡便のため h' と同値とした。

一方、暫定時の10年確率波に対応した設計波高 H_{10} については、各港の現地観測結果に基づく極値統計分析により、最適な極値統計関数から沖波としての10年確率波を求め、屈折・回折・浅水変形から算出するのが本来の方法であるが、本研究では暫定断面に作用する H_{10} を変化させ、縮減幅の変化についての分析を行う。ここでは、 $h=10.0\text{m}$ では $H_{10}=4.0\sim 8.5\text{m}$ 、 $h=15\text{m}$ では $H_{10}=8.5\sim 13.0\text{m}$ に変化させた。また、暫定時のケーソン天端高は、H.W.L.+0.5mより太平洋側の潮位を考慮して2.1mに設定した。なお、10年確率波の周期については、図-5に示す道内各港の10年確率波に関する有義波の波高と周期の関係から、 H_{10} に応じて式(3)から算出している。

$$T_{10}(\text{s}) = 1.02(\text{s/m}) \cdot H_{10}(\text{m}) / 1.8 + 4.23(\text{s}) \quad (3)$$

(3) 暫定断面縮小を可能とする条件の検討

図-6は、 $h=10.0\text{m}$ 及び $H_{50}=9.0\text{m}$ の条件における堤体幅であり、横軸が暫定時の波高 H_{10} 、 Δ の点線で H_{10} に応じて算出した堤体幅を示している。また、実線が完成時の H_{50} で決定される堤体幅であり、本条件では12.8mと算定される。 H_{10} が約7.5mより大きくなると、完成時

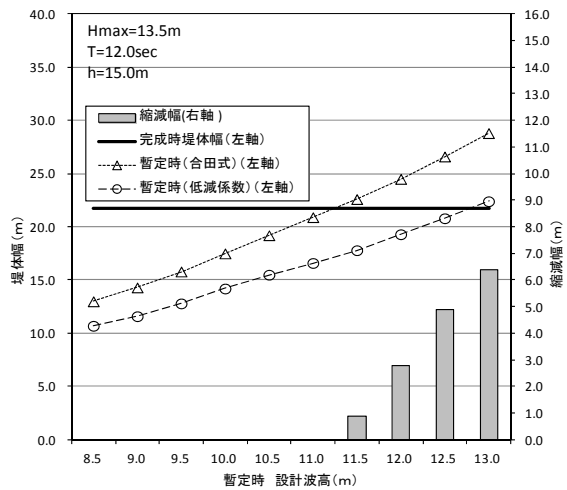


図-7 完成及び暫定時の堤体幅 ($h=15.0\text{m}$)

ではなく暫定時で必要堤体幅が決定され、 $H_{10}=8.5\text{m}$ では完成時よりも幅が約 3.2m 大きい断面となる。一方、酒井⁹⁾ら (2014) の式 (2) を用いた堤体幅を○の破線で示しており、全体的に暫定時の必要堤体幅を削減することが可能となり、 H_{10} が大きいほど削減幅が増加し、また、暫定時で決まる断面も H_{10} が約 8.5m より大きい範囲に限定されるようになり、本条件では全て完成断面で決まることとなる。本方法による堤体幅の削減量を棒グラフで合わせて示しているが、 $H_{10}=8.5\text{m}$ では 3.2m の堤体幅の削減が可能となり、工事費ベースでは約 20% のコスト削減が可能となる。

図-7 は、 $h=15.0\text{m}$ 及び $H_{50}=13.5\text{m}$ の条件について図-6 と同様に示したものである。傾向は $H_{50}=9.0\text{m}$ の条件と同様であり、 H_{10} が約 11m を越えると暫定断面で決まっていたが、式 (2) の適用によりほぼ完成時で決まることとなった。また、 $H_{10}=13\text{m}$ では 6.4m の堤体幅の削減が可能となり、工事費ベースでは約 20% のコスト削減が可能となる。

以上の検討結果より、式 (2) を用いることにより、10 年確率波による設計波が 50 年確率波によるものの 8 割以上であれば、本研究の方法によりコスト縮減が可能になると考えられる。

(4) 今後の課題

本研究においては、酒井⁹⁾ら (2014) の方法によりコスト縮減の可能性を示した。今後、ケーススタディー等により、実用化に向けた検討を進める必要がある。

4. 越波水の利用による堤体質量増加の可能性

(1) 研究内容

防波堤の安定照査においては滑動抵抗が最も危険となる断面が多いことから、これまでもケーソン中詰材としての高比重材料や摩擦増大マットが使用されてきた。本研究では、コストのかからない越波水を堤体質量として活用し、コストを低減する方策を検討するものである。

通常の防波堤は港外側に胸壁コンクリートを設置することで、経済的に越波を抑制させるが、図-8 に示すとおり、港内側にも胸壁コンクリートを設置し、高波浪の来襲時に越波水を天端上に貯水させ、滑動抵抗を増大させる新たな構造 (貯水タイプ) を提案し、標準タイプと比較してどの程度堤体幅の縮小が期待できるか検討するものである。

(2) 研究方法

本研究では、構造決定要因が滑動の耐力作用比で決定している構造断面であることを前提に、水深 h を 10m と 15m の条件とし、ケーソンの天端高は $0.5\text{m}+\text{H.W.L.}$ 、

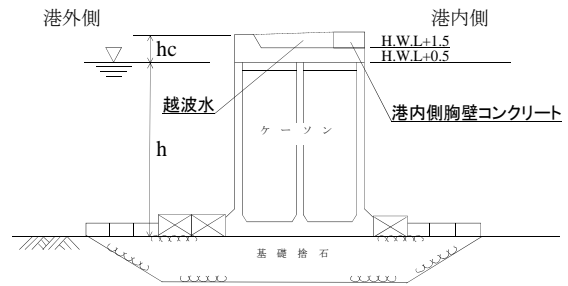


図-8 越波貯水型防波堤

上部工厚を 1.0m とすると上部工の天端高は $1.5\text{m}+\text{H.W.L.}$ となる。

作用させる波浪の最大波高 H_{max} については実際の設計で用いる値を考慮して、 $h=10\text{m}$ では $H_{\text{max}}=5\sim 10\text{m}$ 、 $h=15\text{m}$ では $H_{\text{max}}=10\sim 15\text{m}$ に変化させた。天端高は、相対天端高 $h_c/H_{1/3}=0.60$ を用いることにより、来襲波高 H_{max} に応じて変化させた。なお、有義波高 $H_{1/3}$ と最大波高 H_{max} の関係は、一般的に用いられている $H_{\text{max}}/H_{1/3}=1.8$ の関係を使用している。例えば、最大波高 $H_{\text{max}}=9\text{m}$ の場合は、 $H_{1/3}=5.0\text{m}$ で $h_c=3.0\text{m}+\text{H.W.L.}$ となることから、胸壁の高さは 1.5m となり、貯水可能水深は 1.5m となる。また、港外側の胸壁幅は有義波高に応じて 1.8m~2.6m に変化させ、港内側の胸壁幅は 1.0m と一定とし、貯水可能な海水量を考慮しながら合田波圧式から堤体幅を算定した。

(3) 貯水による堤体幅の縮減

図-9 は、水深 $h=10\text{m}$ の条件における最大波高 H_{max} と標準タイプ及び貯水タイプの堤体幅、貯水タイプの適用による堤体幅の縮減幅を示したものであり、最大波高 H_{max} の増加とともに縮減幅が大きくなる。これは、波高の増大により必要天端高 h_c が高くなることから、貯水可能な海水量が増加するためである。 $H_{\text{max}}=10\text{m}$ の条件では、標準タイプの約 14% に相当する 3.0m の天端幅を縮減することが可能となり、工事費ベースでは約 11% のコスト削減となる。なお、 $H_{\text{max}}=5\text{m}$ の条件では、必要天端高が低く、胸壁が不要となる条件であることから、標準タイプと貯水タイプの堤体幅が同じ条件となっている。

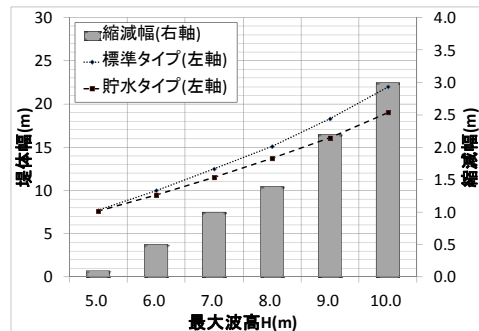


図-9 最大波高と縮減幅の関係 ($h=10\text{m}$)

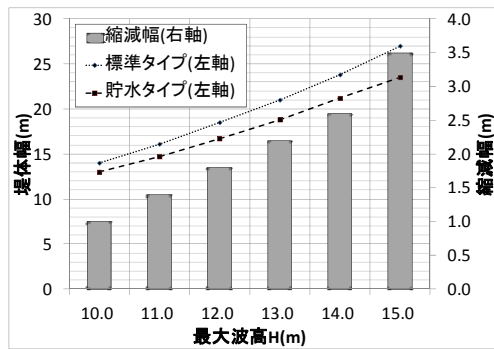


図-10 最大波高と縮減幅の関係 (h=15m)

図-10は、水深 $h=15\text{m}$ の条件での縮減幅を図-9と同様に示したものである。 $h=10\text{m}$ と比較して削減幅は大きくなり、 $H_{\text{max}}=15\text{m}$ の条件では、標準タイプの約13%に相当する 3.5m の天端幅を縮減することが可能となるが、工事費ベースでは約9%のコスト削減に留まる結果となった。

(4) 今後の課題

本研究では、最大波高 H の値が大きいほど堤体幅が縮減可能となる結果となり、コスト削減の可能性を示した。森⁶⁾ら (1999) は、後部パラペット堤の胸壁に作用する波力についての水理模型実験を実施しており、胸壁を港内側に移動させるほど、衝撃的な波形を示すようになり、波力が増大することを指摘している。今後、港内側胸壁コンクリートに作用する波圧特性を検討し、設計法を確立する必要がある。

5. まとめ

本研究では、限られた港湾整備予算により防波堤整備の推進を図るため、新構造形式の検討ではなく、最も用いられているケーソン式混成堤に着目し、更なるコスト削減方策の検討を行った。主要な結論は下記のとおりである。

- ① 相対天端高 $h_e/H_{1/3}$ が 0.8 より大きな断面では、防波堤の越波に対しても港内側の基礎捨石が安定する条件があり、港内側マウンド被覆材の設置が不要となる可能性がある。
- ② 10年確率波により堤体幅が決定される断面においても、上部工が未整備である低天端の波圧を適切に評価すれば、ほぼ完成時で決まる断面となる可能性がある。
- ③ 越波水を防波堤天端上に貯水する構造にすることにより、設計波が大きい程、コストを縮減できる可能性がある。

本報告では、今後の課題についても整理したところであり、各研究機関とも連携しながら、防波堤の更なるコスト削減の実現に向け検討して行きたい。

参考文献

- 1) 谷本勝利・奥村樹郎・滑川伸孝・橋詰文伯・石丸敬純：半円形防波堤の開発について、海洋開発本文集、Vol. 3、1987、pp. 7-17
- 2) 関口信一郎・渥美洋一・中内勲・宮部秀一・福士昌也・三輪俊彦：斜面スリットケーソンの開発、海洋開発本文集、2007
- 3) 高橋重雄・木村克俊・谷本勝利：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、1990、pp. 3-36
- 4) 早川哲也・木村克俊・林忠志：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、北海道開発局技術研究発表会、2000
- 5) 酒井和彦・上久保勝美・山本泰司・早川哲也・林誉命・掛水則秀・時沢武史・木村克俊：新たな防波堤整備工法の開発ー連結セルラーブロック工法についてー、寒地土木研究所月報、2014
- 6) 森昌也・木村克俊・早川哲也：後部パラペット堤の水理特性、北海道開発局技術研究発表会、1999