

海象・地理的特性を考慮した巖原港防波堤(北)の改良断面の検討について

平山 朋樹¹・春尾 和人²

¹九州地方整備局 長崎港湾・空港整備事務所 航路管理課 (〒817-0016 対馬市巖原町東里301-28)

²九州地方整備局 長崎港湾・空港整備事務所 工務課 (〒850-0961 長崎市小ヶ倉町3丁目76-72)

巖原港は国内・国際定期航路が就航しており、対馬の生活や産業を支える物流・人流拠点として重要な役割を担っている。巖原港の第一線防波堤である防波堤(北)は、港内静穏度確保の機能を果たしているが、近年、頻発・激甚化する台風や冬季風浪により消波ブロック等の飛散により、その機能が低下してきている。また、2020年度沖波の見直しの結果、波高が予想以上に増大し、改良コストが高額になったため、海象・地理的特性及び防波堤構造の特性を考慮し、沖波の再検討をはじめとしたコスト縮減断面の検討結果について報告する。

キーワード 沖波, ブシネスク, 高マウンド防波堤, 消波・被覆ブロック, 天端高, 滑動抵抗力

1. はじめに

巖原港は長崎県の北西、対馬の南東に位置する港湾で、対馬と福岡、壱岐を結ぶジェットfoilやRORO船等、定期航路が就航しており、対馬の物流・人流の拠点として離島の生活・産業を支えている。(図-1)

防波堤(北)は、巖原港の港口部に位置し(図-2)、船舶の離発着や荷役作業を安全・安定的に行えるよう静穏度確保の機能として重要な役割を担っている。

また、近年の頻発・激甚化する台風や冬季風浪の影響によって図-3や図-4に示すように消波ブロック等が飛散しており防波堤機能が低下している。消波ブロック飛散によって波圧が増大すると防波堤本体が倒壊してしまうことから、早急に機能を回復する必要がある。

一方、高潮・高波等に対する港湾施設の耐波性能等を確保し、背後地を含めた浸水被害の防止等を図るため、2020年度に九州管内の設計沖波が見直された。見直しの中で、巖原港の設計沖波は既往設計沖波に比べ+5.3m高くなり、防波堤改良にかかるコストが高額になることが確認された。過剰な沖波の増大は、消波・被覆ブロックの大型化とマウンド幅の拡大、上部工の嵩上げ、耐波安定性の確保が必要となり、高コストになっていく。

改良断面は、防波堤機能を確保するため、安全かつ最適コストとなる適切な構造諸元を検討する必要がある。

本稿は、沖波見直しの結果、波高が予想以上に増大し、防波堤の改良コストが高額になったことから、巖原港周辺の海象・地理的特性及び防波堤構造の特性を考慮し、コスト縮減断面の検討結果について報告する。

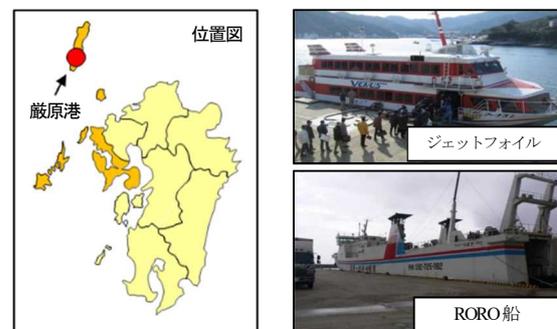


図-1 巖原港の位置と利用状況



図-2 巖原港と防波堤(北)



図-3 堤頭部の消波工飛散状況 (左: 2009年, 右: 2020年)

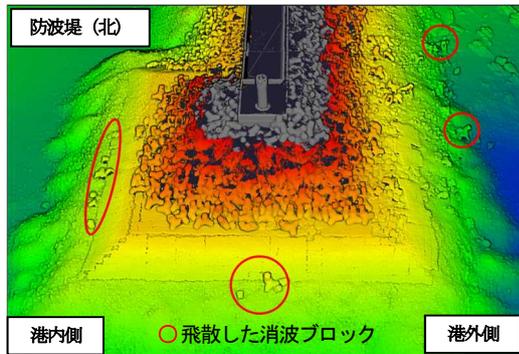


図-4 防波堤(北)の消波工等の飛散状況

表-1 沖波諸元の比較

既往	2020年度見直し			
	NE	ENE	SSE	S
E				
$H_0=6.6m$ $T_0=11.0s$	$H_0=7.68m$ $T_0=10.75s$	$H_0=7.69m$ $T_0=10.95s$	$H_0=9.58m$ $T_0=12.61s$	$H_0=11.9m$ $T_0=13.97s$

2. 高コストとなった要因分析

防波堤(北)の法線は南北方向になっており、既往設計沖波は波向Eを対象に設定されていた。表-1は既往設計沖波と2020年度に見直された主要な沖波を示している。見直しにより特に波向Sの波高が高くなったことで改良断面が高コストになった。

また、防波堤の必要天端高は $H.W.L.+0.6H_0$ となっており、一般的には堤前波高が最も高いSの波向を採用し天端の高上げをする。過剰な嵩上げは消波ブロックの被覆面積拡大やマウンド拡幅に影響し高コストになる。

防波堤の耐波安定性は、滑動抵抗力を高めるため、港内側に石材で腹付工を付加する対策が考えられる。堤頭部に関しては巻き止めの消波工があり、一般的には消波ブロックの撤去後に腹付工の施工、消波工の再設置が必要になる。

3. 設計条件の見直し

(1) 沖波諸元の見直し

2020年度の九州管内で見直された沖波は、3波向重ね

合わせの極値統計解析から確率波高を算定している。この解析は、検討すべき主波向の両隣の波向の高波を含めて統計解析を行う手法であり、台風のコースが少しずれた場合に評価ができないため、ばらつきによる影響に対して、安全側の外力を設定できる。一方で、隣接する波向の波高が極端に高いと、主波向の波高が高めに評価される。特に地理的影響(遮蔽, 屈折)によって本来は伝搬しにくい波向まで含めて統計解析を行うと過大な波高が算定されるおそれがある。

図-5は対馬島と巖原港および波向をイメージしたものである。SWやSSWにとって巖原港は対馬島の遮蔽域となっているため、地理的特性から沖波が伝搬しにくい。

次に、図-6は各波向の50年確率波について3波向重ね合わせ処理をしたもの、重ね合わせ処理をしないもの(主波向のみの処理)を示している。

重ね合わせなしの場合、ESEからSSWに向かって波高が増大し、SWで大きく低下する傾向を示している。SSWは極値的な波高となっており、その影響でSとSWの3波向重ね合わせでは、Sで2.25m、SWで4.42m高めに評価されている。

表-2は重ね合わせ処理を行っていない沖波波高SとSSWを用いてエネルギー平衡方程式により防波堤前面の堤前波高を比較整理したものである。

波は波長の1/2より深い水深では海底地形の影響を受けないため、屈折しない。1/2より浅くなると海底地形の影響を受け浅い方に屈折し、エネルギー(波高)が減衰する。



図-5 巖原港に影響を及ぼす波向

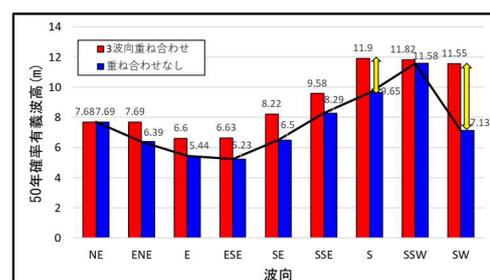


図-6 50年確率波の比較

表-2 波向S及びSSWの波浪変形計算結果

波向	沖波		堤前波	波高比
	H ₀ [m]	T ₀ [s]	H ₁₀ [m]	H ₁₀ /H ₀
S	9.65	12.6	5.55	0.58
SSW	11.58	13.83	5.14	0.44

表-3 見直した沖波諸元

NE	ENE	SSE	S
H ₀ =7.68m T ₀ =10.75s	H ₀ =7.69m T ₀ =10.95s	H ₀ =9.58m T ₀ =12.61s	H ₀ =9.61m T ₀ =12.66s

巖原港の海象・地理的特性から、SSWは沖波地点で波高は高いが対馬島と巖原港の地理的關係で遮蔽域になっていることや防波堤前面に伝搬するころには海底地形の影響を受けて波高が大きく減衰する。

表-2のとおりSSWの堤前波は沖波が2mも小さいSより小さくなっており、防波堤に対する影響は小さいことを現している。

まとめると、Sの3波向の処理で極値のSSW波高を適用すると実際には伝搬しにくい過大な沖波を設定する可能性がある。

以上を踏まえ、有識者による検討会で波向Sの処理方法を議論いただき、Sの沖波はSSWを除きSと隣接のSSEの2波向の波高を用いて確率波高を見直すことにした。

Sの沖波を2波向処理とすることで安全かつ過大な波高にならない整理ができた。(表-3)

(2) 高マウンド式構造を考慮した堤前波の評価

防波堤の設計に用いられる堤前波は、沖波をもとに海底地形等による屈折、浅水変形、砕波変形を踏まえ設定する。実務では平面的な波浪変形(屈折)をエネルギー平衡方程式で計算し、換算沖波(H₀')求め、換算沖波から浅水変形や砕波による波高減衰を算定図等を用いて設定する。ここで算定図はモデル断面による実験結果を取りまとめたものであり、平均的な海底勾配は1/10~1/100を対象に整理されている。

防波堤(北)は、図-7に示すように法面勾配1:2の高マウンド構造となっており、水深約30m程度に設置されている。防波堤前面は1/100程度の緩勾配であるが、マウンドにより水深30m~10mまでは急勾配の斜面が出現することになる。よって、算定図の海底勾配条件と大きく異なるため、適用が難しい。

一方、一般的な防波堤の波長とマウンド法面幅の比は0.05程度であるが、防波堤(北)のマウンド法面幅は約40mあり、波長とマウンド法面幅の比は0.3~0.15程度になる。防波堤(北)では、高マウンドでマウンド法面幅が広いいため一般的には起こらない波浪変形(屈折、回折、浅水変形)が起こる。

上述のように算定図表が適用できないこと、マウンド法面幅が広いため、局所的に波浪変形が起きることから、高マウンド地形を海底地形としてモデル化し、マウンド法面上の波浪変形を考慮した堤前波を算定することにした。なお、波浪変形計算には、屈折、回折、浅水変形、砕波といった波浪変形を高精度で算定できるブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.5.2)を適用した。

堤前波の検討波向は防波堤(北)へ影響が大きいと推察されるNE, ENE, SSE, Sの4波向を対象とした。

波浪変形計算の一例として、波向SSEの有義波高分布図を図-8に示す。図-8から明らかなようにマウンドを地形化することで波浪変形が起こり、マウンド上で波高が増大している様子を確認できる。

表-4及び表-5は、H.W.L.時とL.W.L.時の波向別の堤前波高を示している。いずれもSSEの波高が高くなることが確認された。

以降に記す改良断面の検討及び耐波安定性の評価は、表-4及び表-5に示す堤前波を用いて検討を行った。

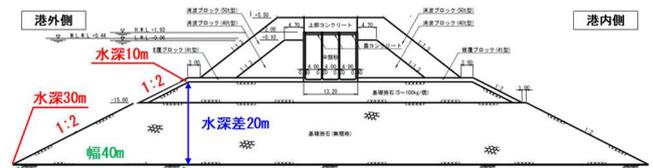


図-7 防波堤(北)の堤頭部断面図

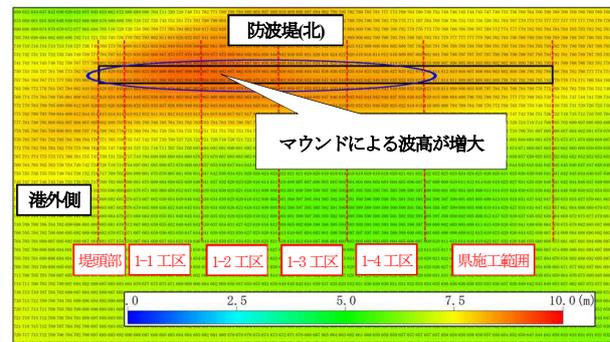


図-8 有義波高分布図(波向SSE, 防波堤周辺拡大)

表-4 算定した堤前波一覧(H.W.L.)

波向	堤頭部	1-1工区	1-2工区	1-3工区	1-4工区
NE	6.60m	6.20m	6.60m	7.00m	6.50m
ENE	7.50m	7.10m	7.10m	7.10m	7.30m
SSE	8.15m	8.13m	8.14m	8.15m	8.13m
S	6.56m	6.93m	6.98m	7.07m	6.98m

表-5 算定した堤前波一覧(L.W.L.)

波向	堤頭部	1-1工区	1-2工区	1-3工区	1-4工区
NE	6.60m	6.20m	6.50m	6.60m	6.70m
ENE	7.70m	7.40m	6.80m	6.80m	7.10m
SSE	8.20m	8.14m	7.96m	7.79m	7.63m
S	6.68m	6.95m	7.07m	7.19m	7.01m

4. 新たな改良断面の検討

(1) 消波ブロックの見直し

見直した堤前波を元に新たな改良断面を検討した。消波ブロックの所要質量 M は、港湾の技術上の基準・同解説（以降、技術基準と記す）に示されている安定数 N_s によるハドソン式（1）を適用して算定するものとした。現行の技術基準には全断面乱積みの消波ブロックの安定数 N_s の評価式として高橋ら¹⁾の式（2a）が紹介されているものの、砕波の効果を表す係数 C_H は式（2b）と別途 $H_{1/20}/H_{1/3}$ の推定図を用いる必要がある。 $H_{1/20}/H_{1/3}$ の推定図は1/100～1/20の海底勾配までしか適用できないことから、法面勾配が1/2の高マウンドの影響を十分に考慮できないため、本検討では式（3）により安定数を評価するものとした。

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

$$N_s = C_H \left\{ a \left(N_0 / N^{0.5} \right)^{0.2} + b \right\} \quad (2a)$$

$$C_H = 1.4 / (H_{1/20} / H_{1/3}) \quad (2b)$$

$$N_s = K_D \cot \alpha \quad (3)$$

式（3）は、ブロック固有の K_D 値と斜面勾配 α の関係から安定数 N_s を評価できる関係式であるが、現地への適用性を確認する必要がある。

本検討では、実験条件は異なるが別途ブロックの安定性確認のために行った平面模型実験結果を参考にすることで算定手法の妥当性を確認した。

参考とする平面模型実験は、防波堤（北）を将来延伸した場合、延伸部から既設防波堤に反射波など影響がないかを確認したもので結果として、大きな影響はなかった。（図-9）

消波ブロック算定の妥当性検討は、延伸防波堤の影響が少ない1-3工区、1-4工区を対象とした。再現条件が異なるため、そのままブロックの妥当性を確認できないことから、平面模型実験をブシネスクモデルで再現し、ブロック質量を算定したものと実験結果を比較し評価した。



図-9 参考とした平面模型実験

表-6 質量算定結果と実験結果の比較

項目	単位	1-3工区	1-4工区
有義波高	m	8.2	8.4
KD		8.3	8.3
所要質量	t	61.56	66.18
適用規格（計算）		80t型	80t型
実験結果		64t型移動	64t型移動

質量算定結果と実験結果を表-6に示す。実験では64t型の消波ブロックが移動し、再現計算による所要質量は80tであるため一致している。模型条件は異なるが、高マウンド式防波堤の消波ブロックの所要質量算定方法の妥当性を確認できた。

(2) 被覆ブロックの見直し

波浪に対するマウンドの被覆材の所要質量は、消波ブロックと同様に安定数 N_s によるハドソン式（1）を適用して算定する。

一方、消波ブロック被覆堤のマウンド被覆材の安定数 N_s に関しては技術基準に藤池ら²⁾の提案式が紹介されているが、前面水深とマウンド天端水深の関係が考慮されておらず、高マウンド式の消波ブロック被覆堤構造に適用できるか不明である。そこで、安全側を考慮して、混成堤構造の安定数 N_s の評価手法を援用し、平面模型実験の結果を用いて防波堤（北）専用の安定数評価手法を検討した。

一般的な混成堤構造の被覆ブロックの安定数 N_s の評価は、図-10に示すようなブロックタイプ毎に整理された N_s 推定図を用いる。これらの図は、前面水深 h とマウンド天端水深 d の関係 d/h に加え、マウンド肩幅 B が広がるほど安定数が低下することを示しており、直立面からの重複波の影響が大きくなることを表現している。

消波ブロック被覆堤は、消波ブロックにより重複波の影響が軽減されるため、図-10をそのまま適用すると過小な N_s を推定してしまう。そこで、本検討では、図-11に示すように高マウンド構造と消波ブロックによる効果を簡易的に考慮するものとした。

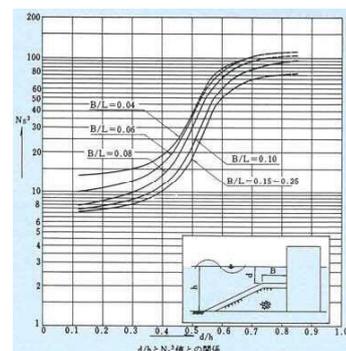


図-10 N_s 算定図の一例

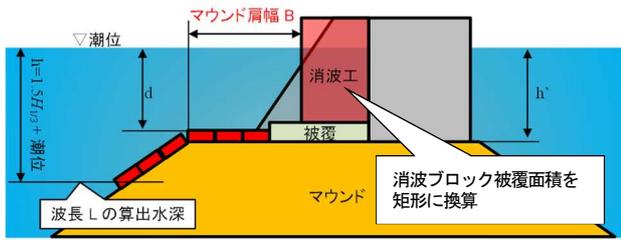


図-11 被覆ブロックの安定数 N_s 算定時の仮定

ここに、前面水深を $h = 1.5H$ と仮定したのは、技術基準p.242の「静水面下 $1.5H_{1/3}$ より深い部分は質量の小さな捨石及びブロックを使うことができる」を準用したものである。また、消波ブロックの影響を考慮し、消波ブロック被覆部を矩形に換算し、換算した矩形表面からマウンド法肩までをマウンド肩幅とした。

算定手法の妥当性を検証するために、1-3工区、1-4工区で水理模型実験の再現検討を行った。表-7は再現結果を示しており、1-3工区に関しては、特にブロックの移動が顕著な区間で算定した質量より大きい質量で安定した。

一方、沿波状に波浪が作用する延伸部に関しては、大きな被害が生じなかったことから、防波堤法線に対して直角方向に襲撃する波浪に対しては、算定式の補正が必要と判断された。補正については、1-3工区は12t型で安定していることから、実験結果より安定数 N_s を逆算し、前述の提案手法で得られた N_s との比率を補正係数 λ としてハドソン式に導入し、式(4)を設定した。

$$M = \frac{\rho_r H^3}{\lambda N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (4)$$

1-3工区は12t型(実質量11.997t)で安定していることから、式(1)の所要質量に11.997tを代入し、 N_s^3 を逆算すると56.8となる。提案手法により算定した安定数は $N_s^3 = 72.7$ であることから、 $\lambda = 56.8/72.7 \cong 0.8$ となる。

よって、式(4)の λ は、沿波状に作用する波向に対しては1.0を、法線直角方向から作用する波向に対しては0.8を適用し安定数 N_s を補正するものとした。

表-7 実験条件に対する被覆ブロックの所要質量検討

項目	単位	1-3工区	1-4工区
有義波高	m	8.2	8.4
所要質量	t	9.37	10.2
適用規格(計算)		10t型	12t型
実験結果		12t型安定	12t型安定

※1-3工区は水理模型実験では1ランク上位で安定

表-8 改良断面に必要な被覆ブロック

波向	堤頭部	1-1工区	1-2工区	1-3工区	1-4工区
ENE (H.W.L.)	13.2t (16t型)	7.21t (8t型)	7.21t (8t型)	7.21t (8t型)	7.21t (8t型)
ENE (L.W.L.)	14.7t (16t型)	8.52t (10t型)	6.34t (8t型)	6.34t (8t型)	7.3t (8t型)
SSE (H.W.L.)	14.21t (16t型)	9.37t (10t型)	9.37t (10t型)	9.37t (10t型)	9.37t (10t型)
SSE (L.W.L.)	15.11t (16t型)	9.72t (10t型)	8.84t (10t型)	8.09t (10t型)	7.73t (8t型)

※黄色ハッチング: 所要質量が最も大きい条件

式(4)を用いて改良断面に必要な被覆ブロックの規格を表-8に示す。波向 ENE は法線直角方向からの作用、SSE は沿い波状に波浪が作用する。結果として、沿波状に入射する SSE の所要質量が大きくなる結果となった。

(3) 防波堤の必要天端高の検討

防波堤の天端高は、検討波向の最も高い有義波高を対象に設定する。一方、厳原港の防波堤(北)に関しては、防波堤法線に対して沿波状に入射する SSE の堤前波高が最も高い。SSE の波高を対象に改良断面の天端高を設定すると、消波工やマウンドの幅が大きくなることから整備コストが高くなる。

ここで、防波堤の天端高は、越波伝達波を低減し、港内静穏度を確保するために必要な構造であることを鑑みると、沿波状の波浪は越波流量が小さいため、コスト低減の余地がある。机上検討で波向を考慮した越波伝達波の評価手法は確立されていないことから、本検討では、ENE(法線直角方向)と SSE(沿波状)に対して入射角を考慮した越波流量を算定し、間接的に越波伝達波への影響が大きな波浪(高上げ検討の対象波浪)を選定した。

越波流量の評価手法は、堤前波($H_{1/3}$)をブシネスクモデルを用いて算定していることを鑑み、 $H_{1/3}$ から直接越波流量を評価できる田中ら³⁾の手法を用いた。なお、入射波向の影響については、換算天端高係数として考慮した。図-12にH.W.L.時の各波向きの越波流量を示す。いずれの潮位条件も法線直角方向から入射する ENE の越波流量が大きくなることが確認されたことから、改良断面の必要天端高は ENE を対象に設定を行うものとした。

表-9には、SSE と ENE の波浪を対象とした場合の必要天端高を示している。港内静穏度へ与える影響の大きな波向に対して必要天端高を設定することにより、天端高を0.4m低下させることができた。

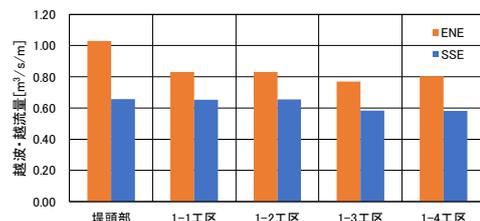


図-12 各工区の越波流量 (H.W.L.)

表-9 改良断面の必要天端高

波向	ENE	SSE
必要天端高	+6.5m	+6.9m

(4) 耐波安定性の確保

堤前波の増大に伴い、防波堤（北）の耐波安定性は不足する。要因は天端高の嵩上げによる波浪の受圧面積の増加に加え、波高増大による波力増大が挙げられる。

堤幹部については、港内側に石材で腹付工を設け、滑動抵抗力を付加する対策を行うことで耐波安定性を満足することを確認した。一方、堤頭部に関しては、既設消波工が港内側まで整備されていることから、巻き止め消波工の全撤去、腹付工の整備、消波工の再設置といった手戻り工事となり、整備コストが高くなる。

手戻り工事によるコスト増大を低減するために、巻き止め消波工を滑動抵抗力として考慮するものとした。

消波工による滑動抵抗力の評価手法については、有識者ヒアリングを行い、三井ら⁴⁾の手法を適用した。三井らの手法は、式(5)及び図-13に示すように滑動抵抗力 R を、消波ブロックの水中重量 W_B にブロックと捨石マウンドの摩擦係数 μ を乗じることで評価するものである。

なお、本検討での消波ブロックの一部は空中となるが、安全側を考慮して全て水中重量として滑動抵抗力の評価を行った。堤頭部の安定性照査結果を表-10に示す。消波工を滑動抵抗力として考慮することにより、新たに腹付工を実施せず耐波安定性を満足することを確認した。

$$R = \mu W_B \quad (5)$$

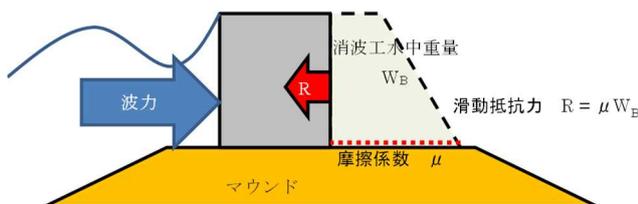


図-13 消波ブロックを腹付工とした滑動抵抗力評価

表-10 堤頭部の安定性照査結果

検討対象	堤頭部 No.1		
断面図			
性能照査結果	潮位	H.W.L.	L.W.L.
	滑動*	0.543 ≦ 1.00	0.388 ≦ 1.00
	転倒	0.928 ≦ 1.00	0.700 ≦ 1.00
	Bishop法	0.505 ≦ 1.00	0.491 ≦ 1.00
	端趾圧	1156.426 kN/m ²	683.351 kN/m ²
	円弧すべり (港外)	0.465 ≦ 1.00	
円弧すべり (港内)	0.587 ≦ 1.00		

*滑動については、腹付工による滑動抵抗力を考慮した結果

5. おわりに

本検討は、早期に機能強化が望まれる防波堤（北）に関して、厳原港特有の海象・地理的特性を考慮した沖波の再検討や高マウンド構造を地形として考慮した波浪変形計算、入射波向と越波流量の評価をした天端高の設定など、コスト縮減断面の検討を行った。

最終的な改良断面の工事費は、当初の波向Sを対象とした場合に比べ約25%のコスト縮減を図ることができた。

消波ブロックや被覆ブロックの構造諸元に関しては、水理模型実験の再現検討を行い、現地への適用性を確認してブロック規格を設定した。特に、被覆ブロックの所要質量の算定手法に関しては、高マウンド式である点や消波ブロックによる低減効果を簡易的に考慮した算定手法を提案したことが特徴的である。今後、高マウンド式の消波ブロック被覆堤に対して今回の知見を援用することが期待されることである。

謝辞：本検討にあたっては、高山知司名誉教授（京都大学）をはじめ、橋本典明教授（九州大学大学院工学研究院附属アジア防災研究センター）、鈴木高二郎領域長（港湾空港技術研究所 沿岸水工研究領域）、平山克也グループ長（港湾空港技術研究所 沿岸水工研究領域 波浪研究グループ）から貴重なご助言を頂いたものである。ここに記して厚く謝意を表する。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 半沢稔, 佐藤弘和, 五明美智男, 下迫健一郎, 寺内潔, 高山知司, 谷本勝利: 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量-消波ブロック被覆堤の設計法の再検討, 第1報, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第1号, pp. 3~28, 1998.
- 2) 藤池貴史, 木村克俊, 林忠志, 土井善和: 消波ブロック被覆堤の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, 1999.
- 3) 田中陽二, 鈴木勝之, 樋口直人, 柴木秀之: 堤前波高を用いた越流モデルの改良と越波越流結合モデルの作成, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 74, No. 1, pp. I_1015~I_1020, 2018.
- 4) 三井順, 久保田真一, 松本朗, 半沢稔: 津波に対する防波堤背後の腹付工の滑動抵抗力の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I_1039~I_1044, 2016.