

秋田港における港内長周期波対策施設による 静穏度向上効果

IMPROVEMENT OF HARBOR TRANQUILITY IN AKITA PORT BY CONSTRUCTION OF LONG-PERIOD WAVE ABSORBERS

小澤敬二¹・森屋陽一²・山本禎寿³・平山克也⁴・平石哲也⁴

Keiji KOZAWA, Yoichi MORIYA, Yoshihisa YAMAMOTO,

Katsuya HIRAYAMA, Tetsuya HIRAISHI

¹国土交通省 東北地方整備局 秋田港湾事務所 (〒011-0945 秋田県秋田市土崎港西1-1-49)

²正会員 博(工) (財)沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

³修(工) 日本海洋コンサルタント株式会社 技術本部 (〒136-0074 東京都江東区東砂7-19-31)

⁴正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

Long-period waves affect cargo handling and sometimes cause breakage of mooring ropes in many ports. The reduction of the long-period waves in the port is one of countermeasures for the smooth loading and unloading. In Akita port, rubble mound wave absorbers were constructed along the portside face of the offshore breakwater.

In order to check the performance of the wave absorbers, their reflection coefficient was estimated to be 0.91-0.97 through the observation of wave profiles in front and rear parts of the absorbers. The results of the numerical simulation by using the reflection coefficient show the well improvement of the harbor tranquility. Consequently, it is confirmed that the adequate construction of the wave absorbers is quite effective to improve the harbor tranquility.

Key Words : Long-period waves, long-period wave absorber, harbor tranquility, reflection coefficient, Boussinesq equation

1. はじめに

近年の船舶の大型化に伴い、多くの港湾において長周期波によると考えられる係留索の破断や荷役障害が問題となっている¹⁾。この問題に対応するために、長周期波の波高を予測し荷役可否判断を行うソフト的な対策²⁾が提案され実用に供し始めていると共に、ハード的な対策として、係留系の復元特性を変更して船体の動揺を低減させる対策³⁾、また、防波堤の延伸や港内に長周期波のエネルギーを低減させるような対策施設を設置することにより泊地等の長周期波の波高を低減させる対策^{4), 5)}が提案されている。

一般の公共岸壁を対象とした場合、利用する船舶が多種にわたるため、泊地の長周期波の波高を低減し静穏度を向上させることが可能な防波堤の延伸や港内への長周期波対策施設の設置が有効であると考えられる。ただし、防波堤の延伸は整備期間が長くなるため、即時的な静穏度の向上を目指すには、港内への長周期波対策施設の設置が有効であると考え

られる。以上の背景を踏まえ、秋田港では、将来的な防波堤の延伸計画も考慮した上で、港内に傾斜堤タイプの長周期波対策施設を設置し、即時的な静穏度の向上を目指している。

本研究では、防波堤の内側に沿って設置された長周期波対策施設の前で水位と流速等の現地観測を実施し、これまで明らかにされていなかった現地での傾斜堤タイプの長周期波対策施設の長周期波に対する反射率を推定した。さらに、現状および将来の施設整備の進捗に応じた、長周期波に対する静穏度の検討を行い、港内長周期波対策施設による静穏度向上効果について調べた。

2. 現地観測の概要

(1) 長周期波対策施設の整備状況

現在、秋田港では第一南防波堤波除堤区間および外港地区の護岸前面において、傾斜堤タイプの長周期波対策施設の整備が進められている。図-1に平成

19年度（2007年度）の波浪観測時点での長周期波対策施設の整備状況を示す。防波堤港内側の防波堤波除堤区間において、港口側130m、港奥側50mが整備済みの状況である。

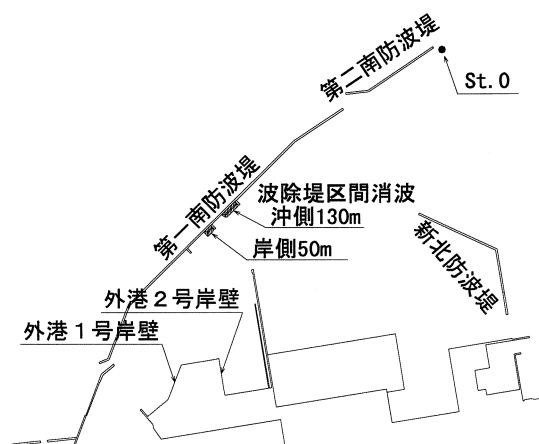


図-1 秋田港の長周期波対策施設位置図

(2) 観測期間および観測位置

2008年2月7日～3月11日（34日間）に港口（St. 0）および図-2および図-3に示す港口側の対策施設前背面（St. 1～St. 4）において水位、水圧、水平2成分流速の観測を実施した。

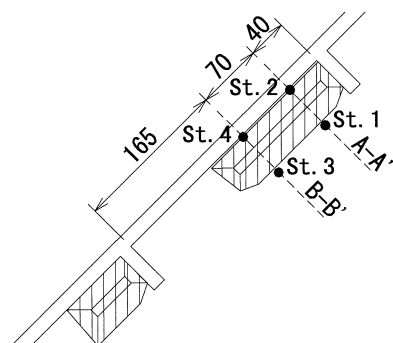


図-2 波浪観測位置（単位:m）

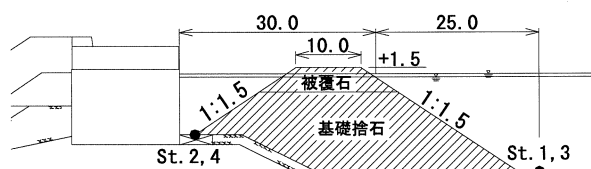


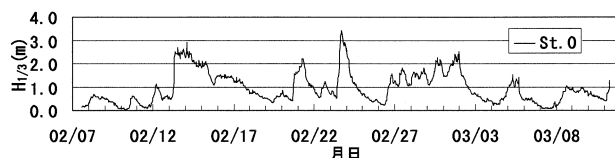
図-3 長周期波対策施設の断面および観測位置（単位:m）
（被覆石1,000kg/個、基礎捨石200～500kg/個）

(3) 解析対象期間の設定

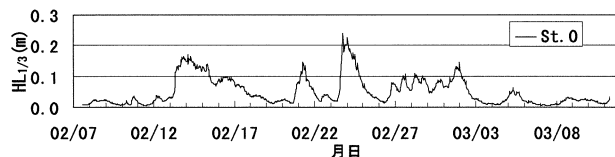
観測期間における観測データを1時間単位で、全成分および長周期波成分の統計処理を行った。St. 0における全成分、長周期波成分の有義波高の経時変化を図-4に示す。ここで、長周期波の周期帯は「港内長周期波影響評価マニュアル」⁶⁾（以下、マニュアル）に従い30s～300sとした。

観測期間中、St. 0における有義波高 ($H_{1/3}$) が2m以

上となった表-1に示す4期間を高波イベントとして抽出した。



(a) 全成分



(b) 長周期波成分 (30s～300s)

図-4 有義波高の経時変化(St. 0)

表-1 抽出した高波イベント発生時刻

イベントNo.	観測時刻
No. 1	2008/02/14 02～03時
No. 2	2008/02/21 07～08時
No. 3	2008/02/23 17～18時
No. 4	2008/03/02 00～01時

3. 長周期波対策施設の反射率の推定

長周期波対策施設の反射率について、以下の方法により推定した。

- ① ブシネスク方程式を用いた水路モデルの波浪場解析⁷⁾により、長周期波対策施設の性能を表すパラメータであるエネルギー吸収係数と反射率の関係を求める。
- ② ブシネスク方程式を用いた平面モデルによる港内長周期波浪場の再現計算結果と現地観測結果との比較により、現地観測結果を最もよく再現する吸収係数を推定する。
- ③ 水路モデルで求めた吸収係数と反射率の関係から長周期波対策施設の反射率を求める。

(1) 水路モデルによる反射率とエネルギー吸収係数の関係

ブシネスク方程式を用いた水路モデルの波浪場解析により、長周期波対策施設の消波性能を表すパラメータであるエネルギー吸収係数を変化させたときの反射率の感度分析を行った。

a) 長周期波対策施設のモデル化

水路モデルは、図-5および図-6のようにモデル化した。計算格子間隔は長周期波対策施設の幅との関係から10mとし、水深は現地の状況から14mとした。長周期波対策施設は傾斜堤タイプであるため、その断面のモデル化は、防波堤（直立壁）から30m離れ

た位置が前面法肩となるように、3格子(30m)に吸収係数を設定した。

また、長周期波対策施設の中央と法面とでは波浪の減衰の度合いが異なると考えられるため、両サイドの吸収係数は中央の吸収係数の半分の値とした。入射波は非線形性の影響を受けないように波高1cmの規則波とし、6周期(10, 30, 50, 60, 80, 100s)を検討した。

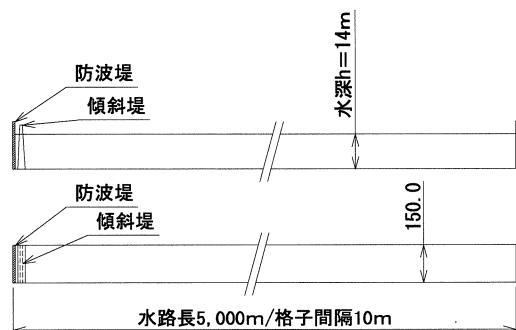


図-5 水路のモデル図（上：断面／下：平面）

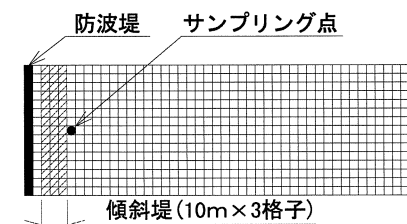


図-6 長周期波対策施設のモデル化

b) 反射率の感度分析

図-6に示したサンプリング点における水位および水路長方向の流速を用い、Guzaの方法⁸⁾により入・反射波の分離を行い、反射率を求めた。

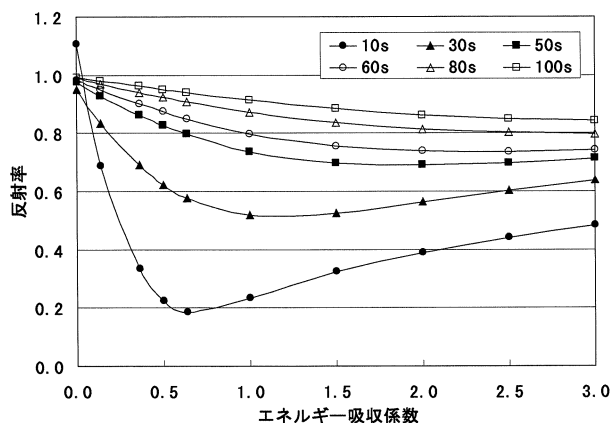


図-7 エネルギー吸収係数に対する反射率の算定結果

水路モデルによる反射率の算定結果を図-7に示す。本研究で着目している長周期波の周期は60～90s程度であり、ここで検討したエネルギー吸収係数0.0～3.0の範囲は、周期60sに対しては反射率0.74程度

以上、80sに対しては反射率0.80程度以上に対応していることを示している。

(2) 平面モデルでの検討

長周期波対策施設の設置位置にエネルギー吸収係数を設定して、ブシネスク方程式を用いた秋田港の平面波浪場解析を実施し、観測波高との整合性より反射率の推定を行った。検討条件は、観測期間中で最も高波浪であったイベントNo.3 (2008/02/23 17～18時) の条件とした。

a) 計算条件および計算ケース

計算条件を表-2に、図-8に計算領域図を示す。

計算領域は、長周期波対策施設の法線が計算領域に対し水平となるように地形を回転させて作成した。また、格子間隔は水路モデルと同様の10mとした。入射波高はSt.0における観測波高と計算波高の整合により設定することとし、沖側境界における入射波高の試行計算により調整を行った。

表-2 計算条件

項 目	係 数
計算格子間隔	10m
入射波高	0.183m (試行計算の結果)
入射波スペクトル	30s～300s (矩形スペクトル)
入射波向	N267° E/単一方向波 (イベントNo.3のSt.0の波向)
成分波数	256波
計算時間間隔 Δt	0.25s
緩造波時間	300s
サンプリング時間	3600s～7200s

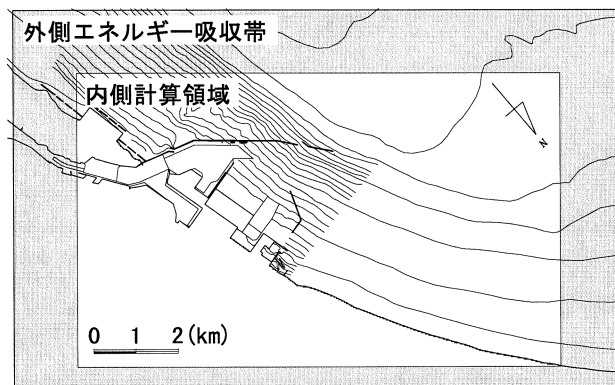


図-8 計算領域図

表-3 エネルギー吸収係数と反射率の対応[周期80s]

Case.	Case. 1	Case. 2	Case. 3	Case. 4	Case. 5	Case. 6
吸収係数	1.60	1.00	0.64	0.36	0.14	0.00
反射率	0.83	0.87	0.91	0.94	0.97	1.00

入射波の周波数スペクトルは、30s～300sで矩形のエネルギー分布となる不規則波とし、波向は観測期間におけるSt.0の風波の波向と同一の単一方向として与えた⁶⁾。

計算ケースは表-3に示す6ケースとし、周期80sに対する長周期波対策施設の反射率は0.83~1.0である。表-3の吸収係数の値は、長周期波対策施設の中央での設定値である。

b) 多方向性の影響について

長周期波の波向や方向分布特性については、現在のところ十分に解明されていないため、マニュアルにおいては近似的に風波の波向で代表させた単方向波とする手法を実用的な手法として提案されている。本検討においても、ブシネスク方程式を用いた波浪場計算の計算時間も考慮の上、マニュアルに従った解析を行っている。

ただし、実際の海域においては短周期成分よりも方向集中度が小さい多方向不規則波になっていることが指摘されている⁹⁾。そこで、多方向性の影響を調べるため、周期60sおよび80sの規則波について、波向を変化させた場合の港内波浪場の予備計算を行った。その結果、入射波の周期および波向により各St.の波高がばらつくことを確認した。

c) 現地反射率の推定

上述したばらつきの存在等を考慮し、St.1~4における観測波高と計算波高のそれぞれの平均値が等しくなるように計算値の補正を行った。観測値から計算値(補正後)を差し引き、観測値で無次元化し、誤差最小になる吸収係数から、表-3の関数を用いて長周期波対策施設の反射率を推定した。ここで、反射率としては、周期80sの波に対する値としている。図-9にイベントNo.3の場合の設定反射率に対する波高の誤差を示す。St.1とSt.2では反射率0.94で、St.3とSt.4では0.87で極小値となる。またSt.1~4の誤差の相加平均では0.94が極小値となった。

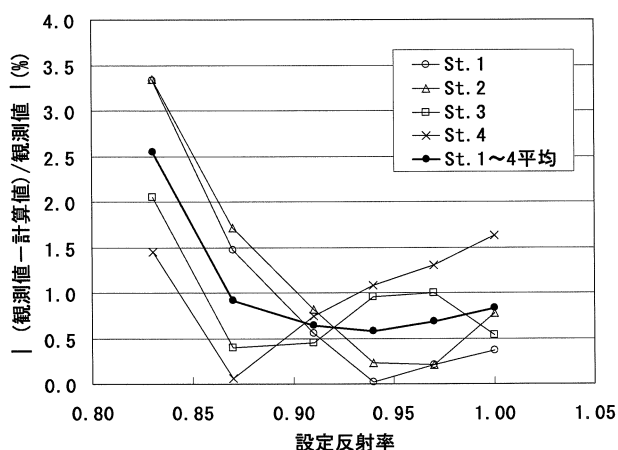


図-9 観測値と計算値の誤差 (イベントNo.3)

他のイベントにおいても同様に整理した結果を図-10に示す。ただし、平面波浪場の計算はイベントNo.3を対象に行っているため、各St.と港口との波高比は、イベントNo.3を対象にした計算結果を用いている。各設定反射率に対するイベントNo.1~4

の誤差およびその相加平均値、標準偏差について整理した。この結果より、対象としたイベントによりばらつきはあるものの誤差が最小となる範囲から、長周期波対策施設の反射率は周期80sに対して0.91~0.97の間であるといえる。

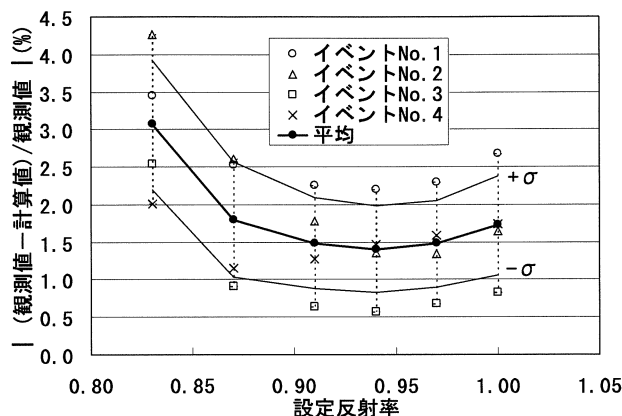


図-10 観測値と計算値の誤差平均

(3) 断面実験結果との比較

現在、秋田港において整備されている長周期波対策施設の断面は、断面実験結果¹⁰⁾を参考に決定されている。ここでは、この実験結果と推定した反射率の結果との比較を行った。

図-11に実験模型断面を示す。上段が現在整備されている「切欠あり」の断面、下段が切欠部をケーソン背後まで埋めてしまう「切欠なし」の断面である。この2断面についての実験による反射率の算定結果が図-12である。堤体幅 B と波長 L の比 B/L に対して反射率を整理している。秋田港において長周期波対策施設の堤体幅 B は30mであり実験時の想定と同じ、また、対象周期 T は80s程度であることから、水深 h を14mとすると、波長 L は ≈ 937 mとなる。よって、 B/L の値は0.032となり、図-12より反射率を読み取ると0.85~0.9程度となる。

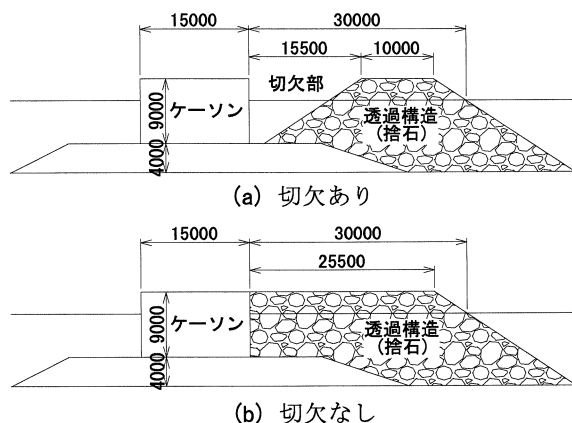


図-11 長周期波対策施設の実験模型断面¹⁰⁾ (現地スケール換算, 単位mm)

推定された秋田港の長周期波対策施設の周期80sに対する反射率0.91～0.97, その区間中間値0.94は, 実験結果よりもやや大きいものの, 本研究における反射率の推定精度や実験結果のばらつき等を考慮すると, ほぼ対応する結果となっているといえる。また, 実験結果を参照すると, この周期帯において「切欠あり」と「切欠なし」とでは反射率は大きく変わらない可能性が高く, 今後, 長周期波対策施設の性能を向上させるためには, 切欠を埋めるのではなく, 港内側への拡幅や対策施設の延長が有効であるといえる。

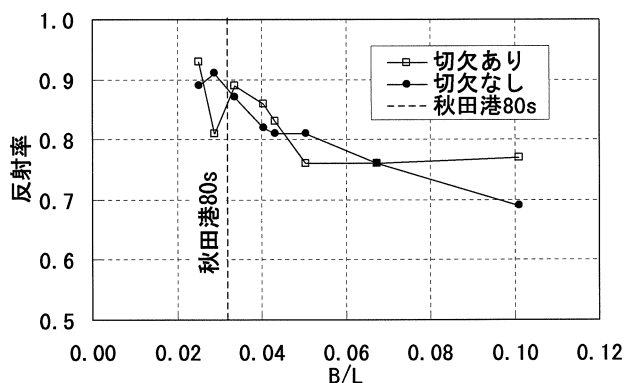


図-12 実験による長周期波対策施設の反射率特性

4. 長周期波対策施設の整備による静穏度向上効果

現状および将来の施設整備の進捗に応じた, 長周期波に対する静穏度の検討を行い, 港内長周期波対策施設による静穏度向上効果について検討した。静穏度算定の対象としたのは, 図-1に示した外港1号および2号岸壁である。静穏度は, マニュアルの標準解析法に従い, 長周期波の波高の頻度とブシネスク方程式を用いた波浪場計算結果を用いて, 対象位置の波高が基準波高を下回る確率として算定した。

(1) 検討港形

検討した港形は表-4に示す5ケースとした。このうち, ②および④, ⑤を図-13に示す。①の長周期波対策施設なし(平成16年度)は, 図-8に示す防波堤延長で港内の長周期波対策施設が設置されていない状態, ③の防波堤の整備も含めた港湾計画完成時は, 図-13に示した②の状態に加えて主として第二南防波堤が872mから1500mに延伸されている状態である。④および⑤は, ②平成23年度予定の長周期波対策施設完成港形に対して, 港内の長周期波対策施設による静穏度向上対策として位置付けて設定したケースである。

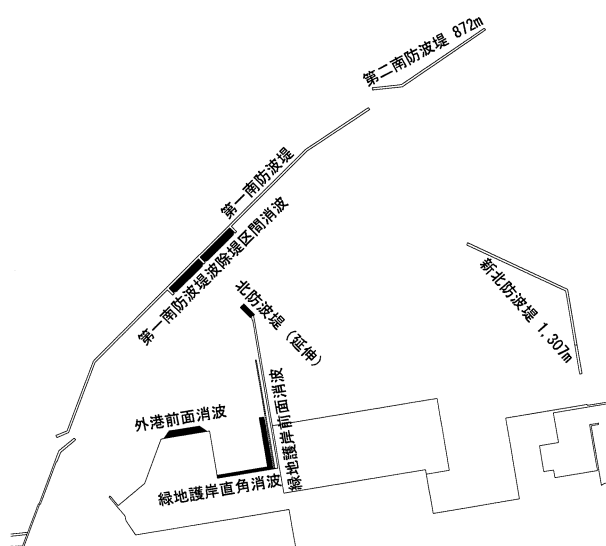
(2) 静穏度算定条件

港口での長周期波高の出現頻度は1994年～2003年

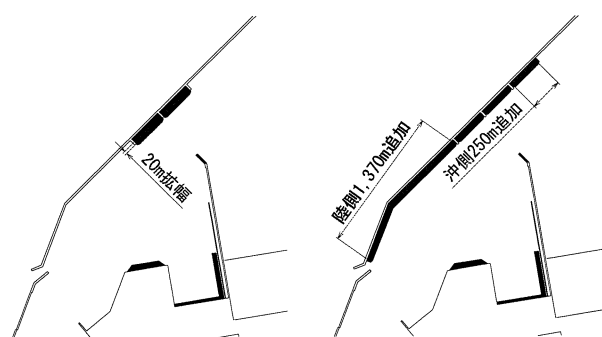
の10年間のデータを用い, 静穏度算定時の荷役限界波高は対象船舶を考慮して10cmとした。計算におけるエネルギー吸収係数は, 対策施設の設置水深の違いにより反射率が変化するを考慮し, 推定した長周期波対策施設の反射率を図-12に示した実験結果により補正して設定した。

表-4 検討ケース

①	長周期波対策施設なし(平成16年度)
②	長周期波対策施設完成(平成23年度予定)
③	防波堤の整備も含めた港湾計画完成時
④	②平成23年度予定港形の静穏度向上対策 長周期波対策施設の20m拡幅
⑤	②平成23年度予定港形の静穏度向上対策 長周期波対策施設の1620m延長



(a) ②長周期波対策施設完成(平成23年度予定)



(b) ④20m拡幅

(c) ⑤1620m延長

図-13 検討港形

(3) 静穏度算定結果

静穏度の算定結果を図-14に示す。なお, ここで静穏度の目標値としては, 港湾の技術基準¹¹⁾に従い97.5%とした。

②平成23年度予定港形の静穏度は外港1号で96.5%,

外港2号で96.4%と、①平成16年度港形の静穏度に対して、それぞれ5.0%および9.3%向上する。また、③港湾計画完成予定港形の静穏度は外港1号で98.4%、外港2号で98.4%と、何れも目標値である97.5%以上を満足する結果が得られた。

平成23年度予定港形に着目し、④長周期波対策施設を20m拡幅した場合の静穏度は、外港1号で96.7%（0.2%向上）、外港2号で96.9%（0.5%向上）と僅かではあるが静穏度が向上する結果となった。同様に⑤1620m延長では外港1号に対する効果が大きく98.3%（1.7%向上）と目標値としている97.5%以上となったが、外港2号に対しては97.2%（0.8%向上）と0.3%ほど目標値を満足できなかった。

この結果より、長周期波対策施設を港内に適切に配置することで、一般に整備に長期間を要する防波堤の延伸と同様の効果を得られるといえる。

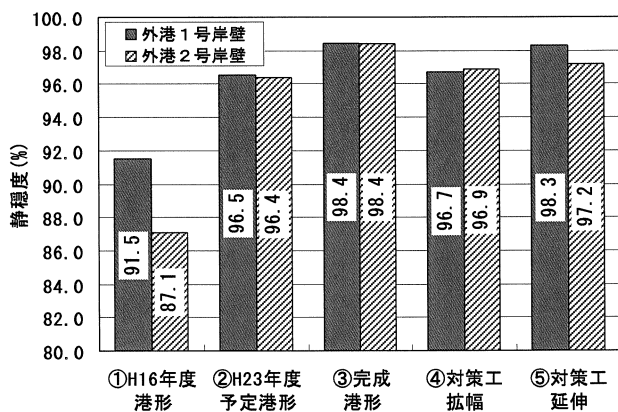


図-14 静穏度算定結果

5. おわりに

本検討における結果を以下に示す。

- ① 現地観測を実施し、秋田港の第一南防波堤の港内側の波除堤区間に設置された長周期波対策施設の反射率を推定した。その結果、長周期波対策施設の反射率は周期80sに対して0.91～0.97の間であるという結論を得た。過去に行われた実験結果と比較すると、推定された反射率は実験結果よりもやや大きいもののほぼ対応する結果となった。
- ② 計画している長周期波対策施設の設置が完了する平成23年度予定港形では、長周期波対策施設がない平成16年度港形に比べて荷役稼働率が5%以上向上する。さらに、長周期波対策施設を拡幅または延伸させることで、静穏度を向上させることができることも確認できた。以上より、長周期波対策施設を港内に適切に配置する

ことによって、整備に長期間を要する防波堤の延伸と同様の効果を得られるといえる。

また、本検討で取り扱った波浪観測時点での対策施設の整備状況は図-2に示したとおり、波除堤間を完全に覆っておらず、波除堤の存在が各St.の観測データに影響を与えていると考えられる。今後、波除堤間を覆う様に整備が進んだ段階での現地観測を行うことにより、長周期波対策施設としての水理特性（反射率、静穏度等）の推定精度の向上が期待できる。

謝辞：本論文は秋田港長周期波対策に関する検討委員会の成果を踏まえたものであり、検討委員会のメンバーである秋田大学工学資源学部の高橋智幸准教授および（財）沿岸技術研究センターの高山知司理事には有益な助言、指導を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 平石哲也，田所篤博，藤咲秀可：港湾で観測された長周期波の特性，港湾技術研究所報告，第35巻3号，pp.1-36，1996。
- 2) 渥美洋一，若山義樹，國田淳，関口信一郎，川口勉，平石哲也，青木伸一，上田茂：長周期波の港内進入過程の現地観測と長周期波高予測式の検討，海岸工学論文集，第44巻，pp.221-225，1997。
- 3) 米山治男，佐藤平和，白石悟：係留索による長周期波低減システムの開発－模型実験および試設計－，（独）港湾空港技術研究所資料，No.1056，29P. 2003。
- 4) 平石哲也，永瀬恭一：長周期波対策護岸の最適構造に関する実験，海岸工学論文集，第51巻，pp.721-725，2004。
- 5) 大島香織，森屋陽一，水流正人，杉田繁樹，平石哲也：渦による消波効果を活用した長周期波対策施設の特性，海洋開発論文集，第22巻，pp.145-150，2006。
- 6) 港内長周期波影響評価マニュアル：（財）沿岸技術研究センター，86p，平成16年8月。
- 7) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾技術研究所資料，No.1360，162p，2002。
- 8) Guza R. T., E. B. Thornton and R. A. Holman: Swash on steep and shallow beaches, Proc. 19th ICCE, Houston, pp.708-723, 1984.
- 9) 関本恒浩：港湾内外の長周期波の特性とその評価に関する研究，中央大学理工学部博士論文，130P.，1990。
- 10) 山田晶子，国栖広志，爲廣哲也，小平田浩司，平石哲也：石巻港における長周期波の消波対策に関する検討，海洋開発論文集，第21巻，pp.785-790，2005。
- 11) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，pp.181，2007。