

港湾における長周期波対策の現状と課題

PRACTICAL COUNTERMEASURE TO LONG PERIOD WAVE IN HARBOR

平石哲也¹・平山克也²

Tetsuya HIRAISHI and Katsuya HIRAYAMA

¹正会員 工博 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)

²正会員 工修 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 with period of 30 to 300s causes the troubles in loading and un-loading of large cargo vessels and breaks of mooring ropes. Such damages are amplified by the resonance of mooring system composed of vessel and hawser to long period waves because the natural oscillation period of the system agrees with that of waves. The countermeasures represented by the extension of offshore breakwaters, improvement of mooring system and establishment to warning system have been proposed to prevent the long period wave turbulence.

In the paper, the practical countermeasures employing the extension of offshore breakwater and development of long period wave absorber are proposed. Numerical modeling is carried out to evaluate the effects of countermeasures to reduce long period wave heights in harbor. The simulated results demonstrate that offshore breakwaters extended appropriately may reduce the incident energy of long period waves and may increase the rate of effective handling days and that double slit caisson sea wall is applicable to reduce the energy of reflected long period waves.

Key Words : effective handling days, harbor tranquility, long period wave, numerical simulation

1. はじめに

周期数分の長周期波の侵入によって、水深が深い岸壁に係留された大型貨物船やコンテナ船が大きな水平運動を引き起こし、荷役が中断されたり、係留ロープや防舷材が破損する事故が全国で生じている。荷役の安全性を確保したり、港湾の荷役作業の定時性を向上させ、経済的な運営を行うためには、このような長周期波による荷役障害を軽減させる必要がある。また、最近では、できるだけ荷役時間を短縮させ、大型船の接岸時間を短くすることが、輸送コストを低減させる効果があるために、船体の動揺を抑えて荷役作業を迅速に行うことが必須となっている。

長周期波による荷役障害は、大型船と係船索からなる係留系の固有振動周期が1～数分程度になり、港湾に入る波の周期と一致して、共振現象を生じることが、主な原因となっている¹⁾。したがって、この対策としては、まず係留索の材質や初期張力を変更して、固有周期を変えて共振運動を抑止することが考えられる。しかし、固有周期を大きく変化させるためには、繊維やナイロン系の化学繊維で製作されている通常の係船索に変えてワイヤー等の非常に固いロープを使うことになり、附帯設備の更新も必要で、能代港²⁾以外では実用化されていない。

短期的な対策として注目されているのは、長周期波の発生時刻を予測して、船舶の寄港時刻や荷役時刻を調整して障害が発生しないようにする、いわゆる“長周期波警報システム”の構築である。港湾工事における施工計画の作成のために各港毎に行われている風波の短期予報値から、経験式で港内長周期波を予測する手法³⁾は、苫小牧港ですでに運用されており、鹿島港でも運用準備がされている。ただし、この手法は、経験式の精度に問題を残しており、長周期波高が設定した警戒値を超える時間を時刻は推定できるものの、波高の最大値や変化の傾向を正確に予測するためには、波向きに関する情報を考慮できるように改善する必要がある。

もう一つの対策は、防波堤の延伸や波除堤の新設によって侵入する長周期波のエネルギーを低減させ、結果的に共振で生じる大型船の動揺振幅を抑制するものである。苫小牧港や能代港の沖防波堤の新設による長周期波の低下に関する数値計算⁴⁾によれば、長周期波の伝播波向に対して直角に防波堤を延伸することで、港内における長周期波高を低減できることを示し、港湾計画の策定に活用されている。この対策は、通常の風波に対しても有効で、港内の静穏海域を拡大させ水産養殖施設の設置場所を増やす効果を有するので、全国の荷役障害が発生している港

湾で検討されている。ただし、港湾施設を整備して閉じられた水域を形成することは、副振動を励起して小型船の係留障害を及ぼす可能性があり、配置計画策定には詳細な検討が必要である。

また、防波堤の延伸は、現在の港口部より深い海域での工事を必要とするので、単位長さあたりに要する工事費が増大する。したがって、侵入エネルギーを低減させるだけでなく、港内での反射を無くし、港内に入射した長周期波が港内で増幅されることを抑止する手法も同時に推奨すべきである。本調査では、港湾構造物による長周期波対策の事例とその効果を整理するとともに、建設時の課題を示した。さらに、港内の消波機能を高める手法を示した。

2. 長周期波対策工の評価

港湾は通常、沖合に長大な防波堤を有し、風波の侵入を防ぎ、港内の静穏を保っている。ここでは最も沖側に位置し、港内静穏度の確保におもな役割を果たす防波堤を“沖合防波堤”とよぶ。沖合防波堤を延伸すると、長周期波の抑止に効果があるだけでなく、風波に対する静穏度を向上させ、港湾の安全性を高めることができる。沖合防波堤の延伸や屈曲による長周期波の低減効果を推定し、同時に岸壁に係留された船体の動揺計算を時間領域で実施するには、港内の長周期波形を算出しておく必要がある。計算には、長波の分散性と非線型性が考慮できる修正ブシネスクモデルによる波浪変形計算法を活用する手法が幅広く用いられている。本計算法のプログラム³⁾は、その任意反射境界部分を除いたものが港湾空港技術研究所NOWT-PARI Ver. 4.6βとして港湾設計者に配布されている。

図-1は、小名浜港を例として“NOWT-PARI”を用いた計算結果の中で港内波高比の分布を示したものである。入射波は、波向ESEで、有義波高 $H/3$ が0.2m、有義波周期60secの単一方向長周期波である。計算格子は、波長の1/10程度を必要とするため風波成分の計算では5m程度の詳細格子を必要とする。ここでは、長周期波成分のみを入射させたので格子間隔は50mである。入射長周期波の波形は、標準スペクトルの近似形⁴⁾においてエネルギー密度 $m_0=H/3^2/16$ として算出した。図-2に港口部M、港内のP1およびP2における計算波形を示す。港内のバースP1では、長周期波高は40%に低減されており、沖合防波堤の効果が現れている。さらに港奥側のP2では波高は80%程度にしか低下していない。これは、バース位置の水域において反射波による増幅が生じており、防波堤の軽減効果を打ち消すような現象が生じているためである。また波形を外力として係留船舶の動揺計算が可能になる。

長周期波の低減率を定量的に推定できる計算法は確立されたものの、どこまで防波堤を延伸すれば所定の目的を果たせるかどうかについては別途の指標が必要である。現在、指標として幅広く使われてい

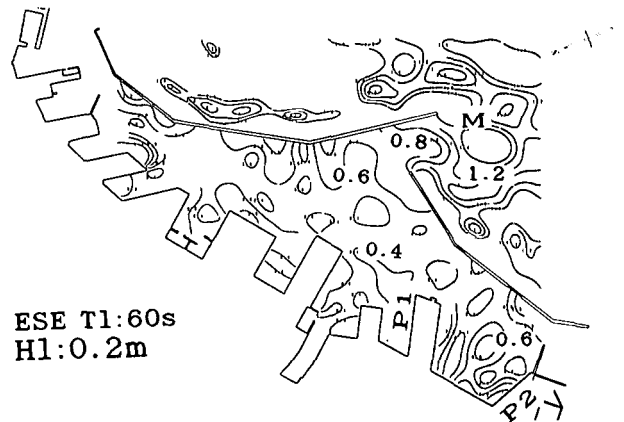


図-1 小名浜港における港内長周期波高比

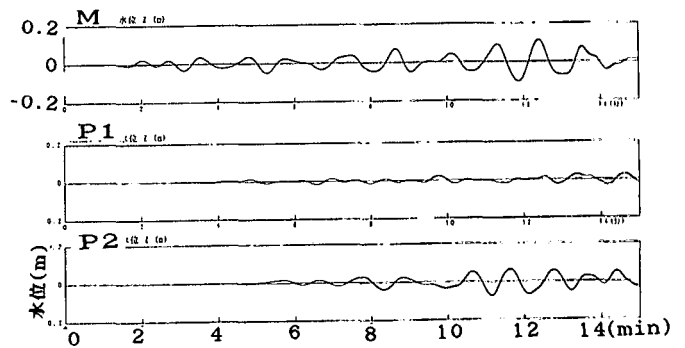
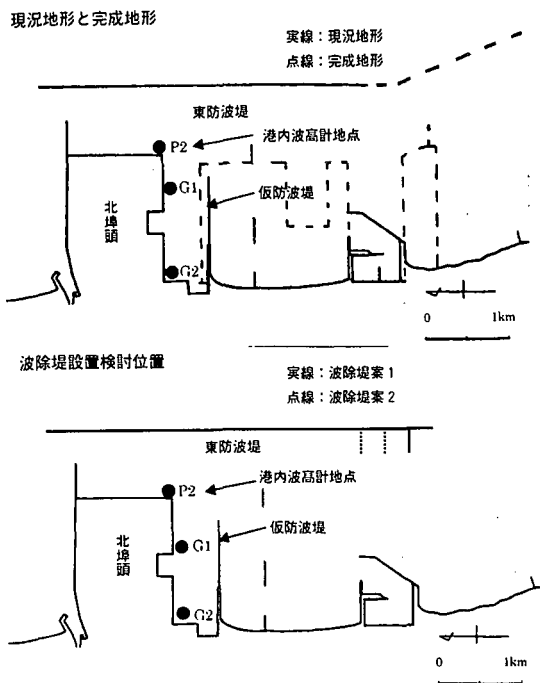


図-2 港内の計算長周期波形

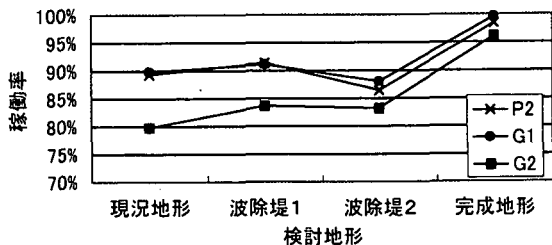
るものは荷役稼働率である。荷役稼働率は、対象岸壁前面の長周期波高が荷役限界波高以下のなる日数の年間出現率で、風波成分に対する目標率97.5%が長周期波に対しても目標値となる。荷役限界波高は、苫小牧港の船体動揺観測から標準値として有義値で10cmが提案されている¹⁾が、港湾の荷役施設の機械化が進むと、荷役効率を上げるためより小さい値が必要とされると思われる。また、荷役に従事する労働者の高齢化も考慮して、各港毎のヒアリング調査に基づいた設定が重要である。宮城県石巻港⁵⁾等では、船体運動と港内波高の同時観測を実施して、サージング運動の応答関数を求め、提案されている⁶⁾サージング両振幅の許容値2.0mを満足する荷役限界波高として有義波高8.0cmを提案している。港外の長周期波の頻度分布は、風波の頻度分布から長周期波標準スペクトル形で計算した⁴⁾。

図-3は、荷役稼働率の計算例として第2期の拡張計画が検討されている茨城県常陸那珂港における計算例を示したものである。図中の岸壁P2、G1、G2では、長周期波に対する荷役障害の発生が懸念されているため図に示す波除堤案が提案されている。また、将来の完成港形における荷役稼働率の算出が必要とされている。図-4に、現在、波除堤案1の場合、波除堤案2の場合および将来港形の場合における対象岸壁の荷役稼働率を示す。防波堤の屈曲に相当する波除堤案1の場合は、現状の稼働率を向上させることが可能で対策工として有効である。将来港形の場合には、現状の港形では開放されている図

一3の左側海域からの入射エネルギーが抑止されるので、荷役稼働率を100%まで上昇させることができ、安全な港湾を形成できる。複数基を有する波除堤案2の場合には、単基波除堤の案1より荷役稼働率が低下する。これは、波除堤間で反射波が発生し、港内の合成波高を上昇させたためで、対策工の配置案検討には反射波による増幅も考慮する必要がある。



図一3 茨城県常陸那珂港の対策工の配置案



図一4 対策工による荷役稼働率の変化

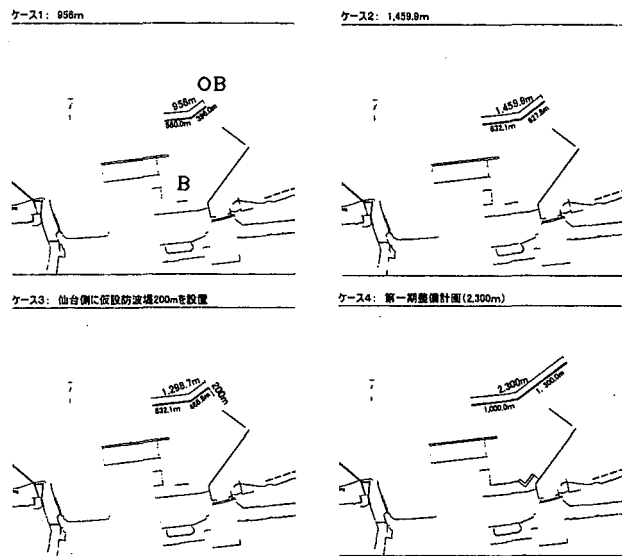
3. 長周期波対策工の事例と課題

(1) 宮城県石巻港の場合

ここでは、長周期波対策用の防波堤が計画され、配置案と施工性が議論されている宮城県石巻港と宮城県細島港を例にして、対策工の効果の算定例と建設にあたっての課題を示す。

図一5は、石巻港における防波堤延長計画の一例である。港内の大水深バースBの整備にあたっては、現在の暫定供用中でも係船索の切断が報告されており、将来、入港船舶数が増加すれば事故例も増える危険性がある。そこで、風波に対する静穏度も向上させる目的で図中の沖合防波堤OBを東側および西側へ延伸する計画である。同時に延伸することはできないので、効率の良い施工手順と将来の必要延伸長を算定するために長周期波に対する稼働率計算を

行った。なお、防波堤の延伸形状は、航路の通航性等にも配慮して決定されるので、ここに示した配置案は計算のための例題で、現地の計画部局で実際に議論されている将来港形とは異なる。



図一5 石巻港における防波堤延伸計画の例

図のケース1は、現況で、防波堤延長は956mである。ケース2では、風波の最頻出現波向SEに対するために、東側へ約300m、西側へ約200m延伸されている。ケース3は、長周期波の最頻出現波向Sに配慮するとともに、完成までの暫定港形として、将来沖側へ設置するケーソンを港口部に仮置きして波除堤に利用したもので、西側港口部の南に200mの波除堤が設置されている。ケース4は、波除堤を取り外し、沖合防波堤を延伸したケースで、現状よりも東および西側へ、それぞれ450および900m延伸されている。

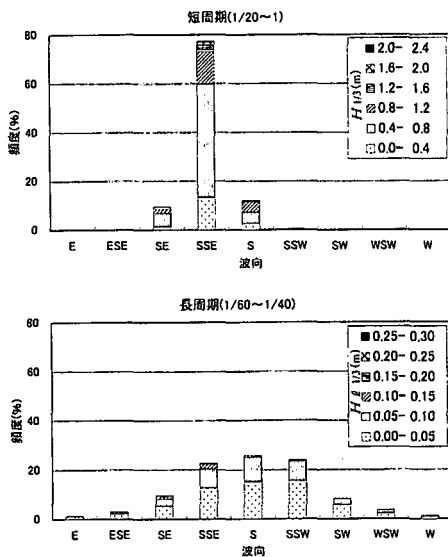
図一4で示した常陸那珂港の例では、長周期波の波向は、風波の波向と同一と仮定されている。沖側から入射する長周期波のエネルギーの大部分は自由進行長波として伝播すると考えると、洋上の低気圧によって生成される長周期波の伝播方向は、比較的陸岸に近いところで発生する風波成分の波向とは一致しない可能性が高い。そこで、石巻港では、2000年の代表期間に現地観測を行って、長周期波の波高および波向の頻度を求めている。観測点は水深25mの地点で、超音波式波高計および水平2成分電磁流速計を設置し、長周期波の波向は、2成分流速の平均流向として定義した⁵⁾。

図一6に観測結果から得られた風波および長周期波の波向出現頻度を示す。風波の最頻出現波向はSEおよびSSEで、SからEまでほぼ均一に波向が現れている。長周期波の最頻出現波向はSで、Sが卓越した出現率を示している。したがって、風波と同一の波向として長周期波を入力すると、最頻出現波向を考慮しない場合があり、現状と異なる結果を出力してしまう危険性がある。図の波向頻度分布は1年間の観測結果から導かれており代表値として採用するた

めには観測期間が不足している。今後は、長周期波の観測例を増やして波向に関する情報をより多く蓄積していく必要がある。また、長周期波は風波よりも多方向性が強い場合があり⁷⁾、入射波として多方向不規則波を設定する必要が生じている。

表一は、石巻港のモデル港形に対する長周期波荷役稼働率の計算結果である。荷役限界波高は8cmとした。現況では、稼働率が66%で低いが、防波堤を延伸することで、稼働率を上昇させ80%以上にすることができる。ケース3の仮設堤による稼働率は、完成形とほぼ同じで、短期間で稼働率を向上させる手段として、仮設堤の活用が有効になる場合がある。

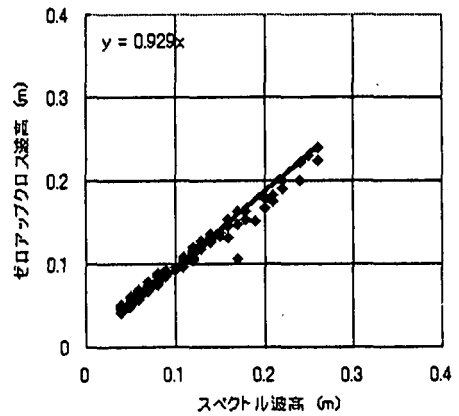
なお、エネルギーレベルから長周期波高を表す場合には、周波数スペクトルの長周期波成分の0次モーメントから、 $H/1/3=4(m)^{0.5}$ で算出されるが、船体動揺などで使う波形からゼロアップクロス法で定義される有義波高とは相違する。図一7は、2000年の観測波形から、スペクトル0次モーメントとして算出された波高を横軸に、ゼロアップクロス法で算出された波高を縦軸に示したものである。ゼロアップクロス法で求めた波高は、スペクトルによって計算した波高の0.9倍程度になり、算出法の違いによる波高統計量が相違することに注意する必要がある。



図一6 石巻港における波向出現頻度

表一 長周期波対策工による荷役稼働率の変化

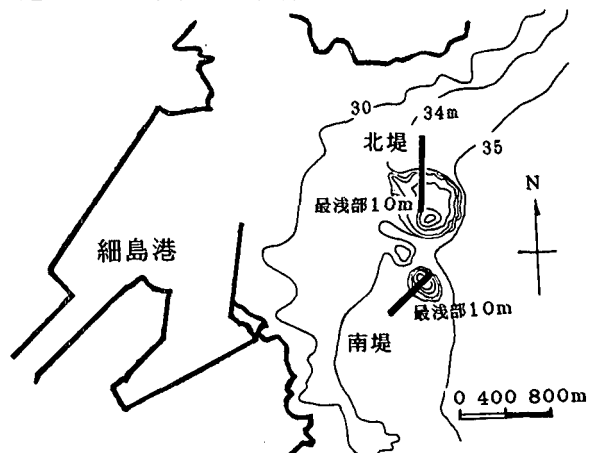
港形	防波堤延長	港内平均荷役稼働率
現状	956m	66%
東西延長	1459m	80%
西側改良	1299m+波除堤	80.9%
完成港形	2300m	81.6%



図一7 ゼロアップクロス法とスペクトル形から算出された有義波高の比較

においても沖合での長周期波の発生頻度が高い港湾の一つになっている。現在、港口部に沖合防波堤を設置して港内の長周期波を低減させる計画が進んでいる。図一8に細島港の長周期波対策防波堤の位置を示す。防波堤は北堤および南堤からなり、それぞれ総延長が750および600mである。長周期波対策の沖合防波堤は、設置場所の水深が大きいことと、設計波高が高いことから大規模なマウンドとケーソンを必要とし、建設費が膨大になる。細島港では、建設コストの軽減を図るため、防波堤の一部を沖合の浅瀬上に建設し、ケーソン堤体下部のマウンドの捨て石量を縮減する施工案が採用された。また、海中の浅瀬を利用することで、防波堤マウンドからの長周期波エネルギーの浸透を防いでいる。

一方、海中に位置する浅瀬は屈折によって波のエネルギーを集中させる効果を有しており、多方向波を作用させたときの波高増大が模型実験でも明らかになっている⁸⁾。浅瀬上に防波堤の堤頭部が位置する場合には、増大した波高と波の回折効果により、消波を目的とした被覆ブロックの安定性が水深の深い堤幹部より著しく低下する。そこで、断面実験での安定性評価をもとに設定した被覆ブロックが堤頭部でどのような挙動をするかを、多方向不規則波造波水槽で調べた。図一9は、堤幹部において被害率3%、堤頭部において被害率5%を満足するように重量を定めたブロックの配置案である。堤幹部では50ト



図一8 細島港の沖合防波堤の設置位置

(2) 宮崎県細島港の場合

宮崎県細島港は、商業港および工業港地区を有し、国際貿易港としても発展しているが、以前から長周期波による荷役障害が報告されており、現地観測に

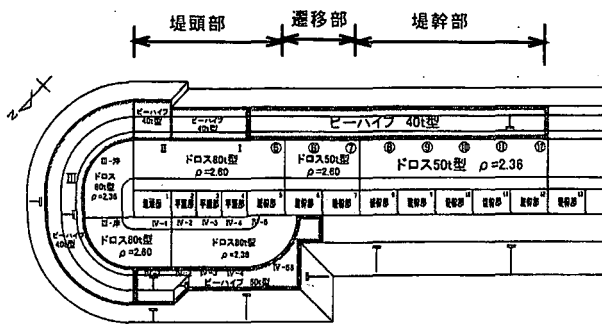


図-9 模型実験によって設定した堤頭部の被覆ブロックの配置

ン型ドロスの消波ブロックで安定性を得られるが、堤頭部や堤頭函の裏側においては、屈折による波の集中と背後への回折波の影響が大きく、ブロックの重量を大きくしないと安定しない。図に示すように、ブロックは、60%程度重量を増した80トン型のドロスを採用し、被害率が局所的に高くなるケーソン角部においては高比重のブロックを使用している。このように、長周期波対策として沖合の大水深海域へ防波堤を延伸する場合には、海底地形の条件によっては、従来の断面実験結果から得られる消波ブロックよりも、60%以上重量を増加させたものを被覆層として使用しなければならず、多方向不規則波中での被覆ブロックの安定性の検討が課題として現れる。

4. 港内における長周期波の消波

周期30s以上の長周期波を港内の岸壁やスリットケーソンや異形ブロックからなる消波護岸で吸収することは困難である。そのため、港奥では長周期波が反射のために波高増大を引き起こし、沖合防波堤のために入射エネルギーを減少させても、港内では長周期波高が減少しないことが生じる。逆に、多重反射系の構成により、岸壁の整備が進むと港奥の波高が増大するという逆説的な結果を生む要因となる。

長周期波の反射特性については、波崎海岸での解析例⁹⁾があり、砂浜海岸では反射率が0.7以下になることが示されている。そこで、港内でも自然や人工の砂浜や干潟が存在しておれば、港奥での多重反射が防止できると考えられる。港内の自然海浜の残存率と長周期波の波高分布の定量的な関係は調査例が無いので、明確な推定はできないが、全国的にも、整備が進んでおらず自然の砂浜や干潟が港内で多く残っている港湾では、近傍の港湾で長周期波の荷役障害が報告されていても、対象港湾での被害例は無く、静穏な水域が確保されているようである。このような港湾の例として、沖縄県那覇港、宮崎県宮崎港、新潟県新潟東港があげられる。

船舶が大型化して大水深岸壁が必要になると港内の航路掘削が実施されるので、現在、長周期波が問題となっているような産業重点港において岸壁の近

傍に砂浜や人工干潟を建設することは難しい。そこで、消波護岸として幅広く使われているスリットケーソン護岸を改良して、長周期波に対しても消波性を有する護岸形状を提案した。

港湾で多用されているスリットケーソンタイプの直立消波岸壁では遊水部の奥行きが数m程度であり、周期数秒の風波しか消波できない。ここでは陸側にもスリットを有する両面スリットタイプのケーソンを活用し、裏込め材に大型の雑石層を採用して、ケーソン背後にも幅の広い消波層を設けた消波護岸を示す。護岸の裏込め材が雑石であり、荷役物揚場として使用するためには、上面の舗装手法などに課題は残るが、スリット間隔を最小雑石径より小さくしておけば、吸い出し等の被害は生じない。図-10に対象とした両面スリットケーソンのイメージを示す。図におけるケーソンの設置水深は10mで、スリットの開口率は50%とし、遊水部の幅は10mとした。スリット開口部の高さは水面上1.0mで、ケーソン背後の消波層の幅は40mとした。図には、従来から港湾で多く用いられている片面にのみスリット孔を有するスリットケーソン護岸も同一スケールで示した。従来のものを、片面スリットケーソンと呼ぶ。両面スリットケーソンの裏込め雑石としては粒径20cmの固形粒子を想定した。

片面および両面スリットケーソン護岸における長周期波の反射特性を推定するために、3次元の水粒子の運動を流体直接解析法を用いて解析し、入射波形と反射波形を比較することを試みた。両面スリットケーソン壁に対してスリット有する多孔体からなる透水層として解析を行った。流体直接解析法(MARS (Multi Art Resolve Solver) 法)は、これまで栈橋の揚圧力の解析や遡上津波力の推定に応用したモデル¹⁰⁾を用い、図に示した長さ1200mの数値波動水路を幅1.0mの3次元格子で表した。図の奥行き方向の領域幅はスリットの形状が再現できるように20mとした。計算では、周期30~60sで波高1.0mの長周期波を、2波だけ入射境界から造波し、代表点での波形を解析することによって反射率を求めた。

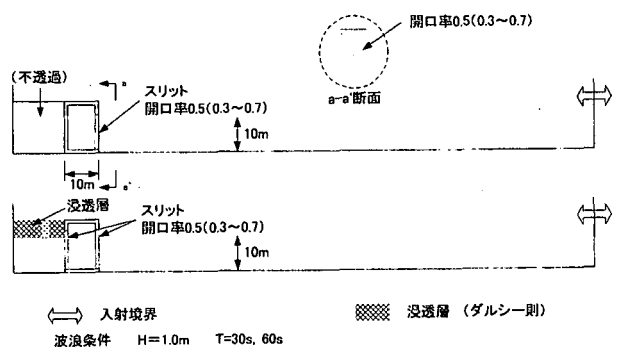


図-10 計算で用いた片面および両面スリットケーソン護岸のイメージ

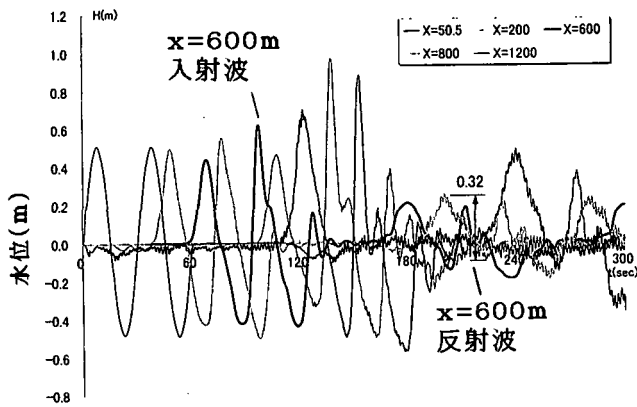


図-11 両面スリットケーソン護岸前面の波形

消波層内の圧力損失は粒径、空隙率、流体密度を考慮して評価した。計算では透過層以外のすべての構造物は不透過体としている。

図-11は、長周期波対応消波護岸前面の代表測点における観測波形を示し、位置 x は消波層背面から沖方向への距離を表す。 $x=600\sim 800\text{m}$ の長周期波対策岸壁前面の測点では、2波の入射波が観測された後に、反射波が観測されている。片面スリットケーソン護岸では、周期 30s で波高 1.0m の規則長周期波の反射波高は、入射波と同様に約 1.0m となり、スリット内での消波は見られなかったが、両面スリットケーソン護岸の場合には、図に示すように反射波高は 0.32m になる。したがって、提案した消波岸壁は周期 30s の長周期波に対して 0.3 程度の低い反射率を確保でき、港内における反射波吸収岸壁として活用することが可能である。

最後に、モデル港の将来拡張案を対象に、両面スリットケーソン護岸や人工海浜を港奥に建設した場合の港内長周期波高の変化を調べた。図-12は、港内の壁面Bを直立壁とした場合と反射波吸収岸壁と等価な人工海浜にした場合の長周期波成分の波高分布をNOWT-PARI Ver. 4.6βに任意反射境界を付加したモデル³⁾で求めた一例で、人工海浜にはスポンジ層を配置し、吸収係数を調整して所定の反射率が得られるようにしている。図に示すように、港奥の岸壁前面だけでなく、港内の広い範囲にわたって波高比は変化しており、港奥部分を消波タイプとすることによって、港内の長周期波高をより小さくできることがわかる。

5. あとがき

本報告では、港湾の長周期波対策としては、沖合防波堤の延伸や波除堤の新設で港湾に入射する長周期波エネルギーを抑止する手法の効果を定量的に示す

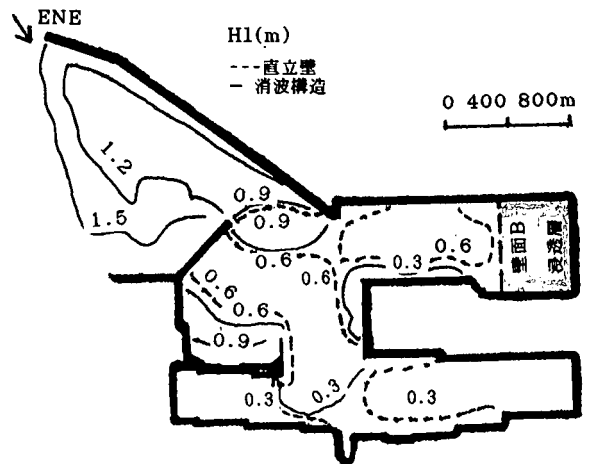


図-12 消波岸壁を有する港湾の長周期波高分布

とともに、港内に長期波吸収岸壁を効果的に設置して、反射波による長周期波の増大を防ぐことが重要であることを示した。なお、本調査報告で用いた図面および数値は、実際の現場設計に用いられているものではなく、限定された観測データからの試算であることに留意されたい。

参考文献

- 1) 平石哲也 他6名：長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査、港湾技研資料、No. 873、39p、1997。
- 2) 白石悟 他3名：係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策、海工論文集、Vol.42、pp.941-945、1995。
- 3) 平山克也：ブシネスクモデルにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射境界処理法の開発、海岸工学論文集、Vol.48、pp.26-30、2001。
- 4) 平石哲也：長周期波のエネルギーレベルとそれによる荷役稼働率の推定、港湾技研資料、No. 934、17p、1999。
- 5) 平石哲也 他7名：発生頻度を考慮した長周期波対策工法の選定法、海工論文集、Vol.48、pp.1356-1360、2001a。
- 6) Ueda S. and S. Shiraishi : The allowable ship motions for cargo handling at wharves, *Report of Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.27, No.4, pp.3-61, 1988
- 7) 阿部光信 他2名：現地観測データに基づく長周期波の方向関数特性と静穏度解析への適用、海工論文集、Vol.48、pp.266-270、2001。
- 8) Vincent, C. L. and M. J. Briggs : Refraction-diffraction of irregular waves over a mound, *ASCE, J. Waterways, Coastal and Ocean Eng.*, Vol.115, No.2, pp.269-284, 1989,
- 9) 岡安章夫 他2名：砕波帯内長周期波の現地観測と数値計算、海工論文集、Vol.45、pp.286-290、1998。
- 10) 平石哲也 他2名：南太平洋地域における植林による津波対策法の適用性、海工論文集、Vol.48、pp.1411-1415、2001b。