

ブシネスク方程式モデルを用いた防波堤隅角部の波高増大の検討

NURMERICAL SIMULATIONS OF WAVE INCREASE AT CONCAVE SECTIONS OF BREAKWATERS

辻尾大樹¹・熊谷健蔵²

Daiki TSUJIO and Kenzou KUMAGAI

¹正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13 大阪国際ビル)

²正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13 大阪国際ビル)

At concave sections of breakwaters, waves increase induced by reflected waves from wing sections. Kofune and Oosato (1976) presented the procedures to calculate the wave heights at concave sections. But, the procedures don't compute severely wave heights because topographical and wave conditions around breakwaters are assumed to be constant. This paper describes the comparison of the results calculated by Kofune's model and Boussinesq model (Hiyayama, 2002). In same conditions, the wave heights of both procedures are similar. It is found that considering with change of water depth and wave direction, the wave height by Boussinesq model are calculated smaller than those of Kofune's.

Key Words : Concave Sections, Boussinesq Model, Wave Increase, Numerical Simulations

1. はじめに

港湾の主要施設である防波堤の平面形状について、機能性、経済性の理由から通常、防波堤は直線形状をとることが多い。しかし、航路や泊地の確保などの利用上の制約や漂砂、海象条件などの理由によって、直線形状から羽堤の形状をとることがある。その際、隅角部においては、羽堤からの反射波の影響で、羽堤のない場合に比べて、波高が増大することが知られている。

隅角部における波高増大の影響については、小舟・大里(1976)が、凹形状の隅角部を有する防波堤前面の波高分布の解析方法を示している。

また、「港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会, 2007」では、隅角部の波高増大を検討する際には、小舟・大里のような計算機による手法の他、波高分布の算定図や近似解法も示している。さらに、不規則性を考慮することが必要であると記載されている。

しかし、これらの方法は、防波堤の周辺で入射波高、周期、波向、 S_{max} 、水深等の海象、地形条件を一定と仮定している。また、反射波を低減するために消波ブロックを設置した際、羽堤部に対する入射角に関わらず、直入射と同じ反射率として扱っていることから、必ずしも実現象を反映していない可能性があると考えられる。

本検討は、隅角部を有する防波堤に関して、平山(2002)のブシネスク方程式モデルと既往の小舟・大里の手法を用いて、来襲波浪の隅角部での波高増大率を算出し、両者の特性を把握することによって、今後の港湾構造物設計に資するものである。

2. 計算条件

(1) 計算モデル

本検討で用いた計算モデルは、小舟・大里の手法と平山のブシネスク方程式モデルである。

小舟らは防波堤を $N-1$ 個の要素に分割してそれぞれの反射率を設定して、防波堤前面波高を算出している。また、平山は水深を場所の関数とした修正ブシネスク方程式にエネルギー吸収帯内のエネルギー減衰を与える高次エネルギー減衰項、底面摩擦項ならびに砕波減衰項を加えたモデルである。

(2) 対象港形、地形

本検討では、図-1 に示すような直線防波堤と約 110° の開角をなす羽堤によって隅角部を有する A 港の防波堤を検討対象としている。通常、防波堤の隅角部は $120 \sim 165^\circ$ 程度の開角であることが多いが、本防波堤はそれらよりも開角が小さい。

また、図-1 の等深線から防波堤の前面海域は凸形状であることがわかる。防波堤に来襲した波浪は

水深の影響を受けて、波高や波向などが変化していると推定される。

(3) 対象波浪

A港の対象防波堤に來襲する主な波浪を表-1に示し、入射波浪と隅角部の関係を図-2に示す。検討対象波浪に対して、最も波高の大きい波浪1（波高7.4m）は羽堤から約9°の角度で來襲し、羽堤部に対してほぼ沿い波となることがわかる。波浪2および波浪3については、波浪1よりも波高は小さくなるが、羽堤に対する入射角が大きくなるため、波浪1よりも波高が増大する可能性がある。

以下では、便宜的に、図中の600m区間を直線部、屈曲後の300m区間を羽堤部と呼ぶことにする。

3. 隅角部における波高増大率の算定

通常、防波堤設計については、進行波を用いて設計する。隅角部における波浪増大を設計に取り入れるには、進行波に隅角部からの波高増大率を乗じるという方法によって、隅角部の影響を考慮することができる。

以下では、既往の手法とブシネスク方程式モデルによって、隅角部による波高増大率を算出する。

(1) 既往の手法による波高増大率の算定

対象防波堤の隅角部による波高増大を検討するために、小舟・大里の方法によって、入射波浪に対する防波堤前面波浪の増大率を算出した。

上述したように、本手法では、水深は隅角点付近の14.4mで一定とし、Smaxについても全区間を通して14で一定として取り扱っている。また、羽堤部や直線部からの反射率は、1.0と設定した。本手法の出力解は入射波高に対する防波堤前面波高の比という形で算出されるため、入射波高の絶対値を評価している訳ではない。また、解析結果は重複波高となっているため、全て完全反射と設定している本ケースでは、前面波高を1/2倍したものを隅角部による増大率としている。

対象防波堤の隅角部周辺における波高増大率の算出結果を図-3に示す。図の横軸は、隅角点を基準にして、直線部方向に隅角点からの距離である。

図から、隅角部付近の増大率について、波浪1では増大率1.47、波浪2では増大率1.57、波浪3では1.58となった。

増大率の算出結果から隅角部による波高増大を考慮した波高を算出し、表-2に示す。羽堤に対する入射角の関係で、増大率は波浪1、波浪2、波浪3の順に大きくなるが、入射波浪に乗じると増大率の最も小さい波浪1が波高としては最も大きくなることがわかる。

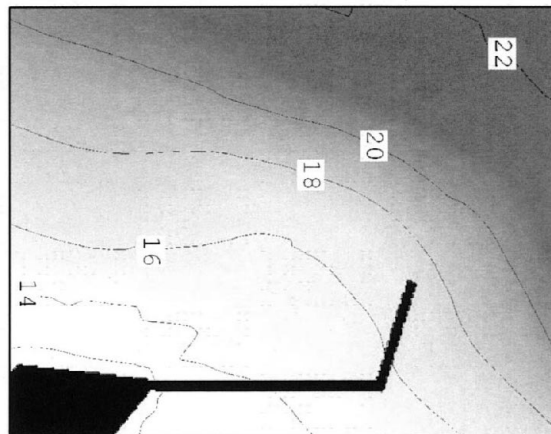


図-1 検討防波堤周辺地形

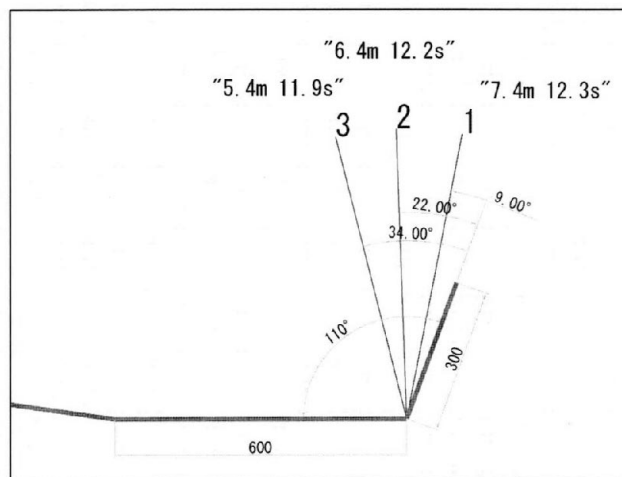


図-2 検討防波堤と入射波浪の関係

表-1 計算対象波浪

波浪	波高 (m)	周期 (s)	羽堤からの角度 (°)
1	7.4	12.3	9
2	6.4	12.2	22
3	5.4	11.9	34

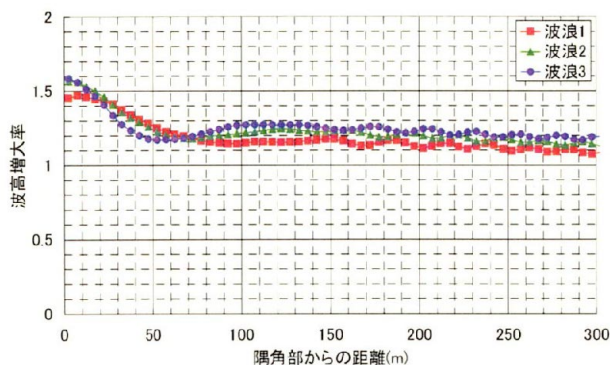


図-3 既往の手法による波高増大率の計算結果

(2) ブシネスクモデルによる波高増大率の算定

次に、ブシネスク方程式モデルを用いて隅角部の波高増大を検討する。検討に用いたブシネスク方程

表-2 既往手法での増大波高の算出結果(隅角点周辺)

波浪	波高(m)	増大率	波高 (m, 増大率考慮)
1	7.4	1.47	10.88
2	6.4	1.57	10.05
3	5.4	1.58	8.53

表-3 計算条件

項目	設定値
有義波高	7.4m/6.4m/5.4m
周期	12.3s/12.2s/11.9s
波向 (羽堤からの角度)	9°/22°/34°
Smax	14
成分波数	512
入射水深	25m
入射波スペクトル	合田修正BSスペクトル
計算領域 (無反射領域含む)	1250m×2035m (1870m×2655m)
格子間隔	5m
造波時間	安定後100波

式モデルはNOWT-PARI (4. 6c) である。

計算条件は表-3に示すとおりである。計算領域については、無反射境界を含めて1870m×2655mであり、解析対象範囲は1250m×2035m、格子間隔は5mである。

本検討では、既往の手法と比較するために、以下の3つのケースを検討している。

- 水深一定で砕波の影響が入らないような波高を入射させたケース
- 水深を一定として、対象波浪を入射させたケース
- 水深変化を考慮して、対象波浪を入射させたケース

計算結果のサンプルとして、ケースc)、波浪1での計算結果を図-4に示す。図から隅角点周辺で波高が集中し、増大していることがわかる。また、隅角点から直線部方向には、概ね半波長(75m)毎に腹と節が交互に現れていることが分かる。

ブシネスクモデルの波浪変形計算においては、完全反射としても重複波高が必ずしも入射波の2倍とならないため、波高増大率は、以下のように算定している。

- 隅角部を有する防波堤に対してブシネスク方程式モデルによって防波堤前面波高を算出する。
- 図-5に示すように隅角部や堤頭部の影響が計算されない程度まで防波堤の直線部を延長し、隅角部の影響を考慮しない重複波高を算出する。
- 隅角部の影響を含んでいる重複波高i)から隅角部の影響を含んでいない重複波高ii)を除いて、隅角部による波高増大率を算定する。

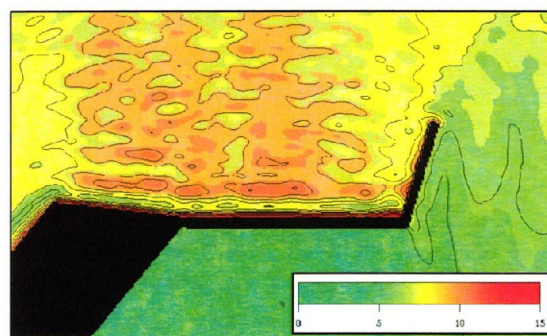


図-4 隅角部有時の波高1での有義波高分布 (ブシネスクモデル)

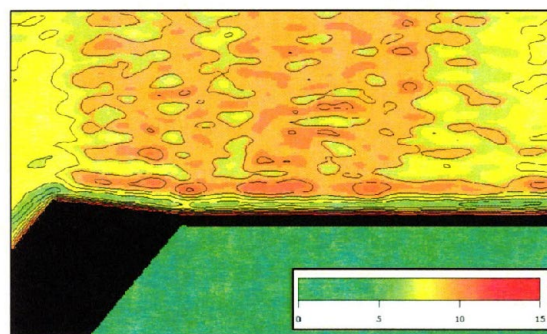


図-5 防波堤延長時の波浪1での有義波高分布 (ブシネスクモデル)

ブシネスク方程式モデルによって算出した波高増大率をケースa)、b)、c)それぞれ、図-6～8に示す。ケースa)、b)、c)での隅角部周辺での波高増大率を表-4にまとめる。表-4からa)、b)、c)それぞれのケースによって、波高増大率が変化することがわかる。

(3) 考察

既往の手法とブシネスク方程式モデルでの計算結果について比較すると、ケースa)については、水深を一定とし、砕波についても発生しない波高を入射させているため、既往の手法(図-3)と同等の条件となる。波浪1～3について既往の手法に比べて、0.01～0.05程度増大率が小さい値となっているが、ほぼ同程度の計算結果が得られている。

ケースb)に関しては、水深は一定であるが、水深14.4mに対して5～7m程度の波高を入射させているため、砕波等の影響で入射境界に比べて防波堤前面での入射波高が小さくなっている可能性が高い。さらに、羽堤による反射波と進行波の重ね合わせ波浪が防波堤の直線部で重複波と形成する際、水深に対する波高の割合が大きくなるため、既往の手法での計算結果に比べて、波高増大率が小さくなっているものと考えられる。

ケースc)については、水深変化を考慮しており、入射した波浪が水深の影響を受けているため、既往

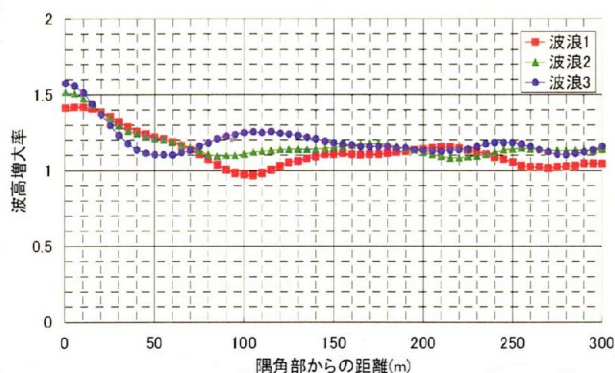


図-6 a) 水深一定、波高小での波高増大率

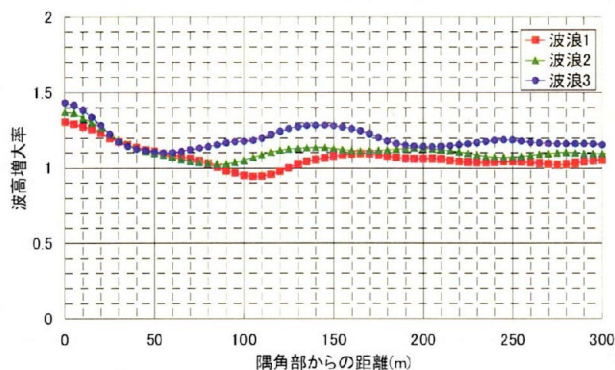


図-7 b) 水深一定での波高増大率

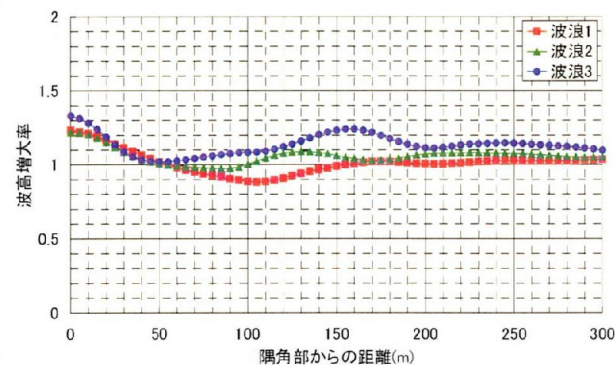


図-8 c) 水深変化有りでの波高増大率

表-4 隅角部での波高増大率のまとめ

波浪	波向 (°)	波高増大率			
		既往の 手法	a)水深 一定、 波高小	b)水深 一定	c)水深 変化有
1	9	1.47	1.42	1.30	1.23
2	22	1.57	1.52	1.37	1.22
3	34	1.58	1.57	1.43	1.33

の手法での増大率と0.25程度の差が生じている。

これは、隅角点に入射する波浪が、凸の水深地形によって、より防波堤に沿う方向に波向が変化し、羽堤との角度が小さくなるため、隅角部による増大率がケース b) に比べてさらに小さくなっていると

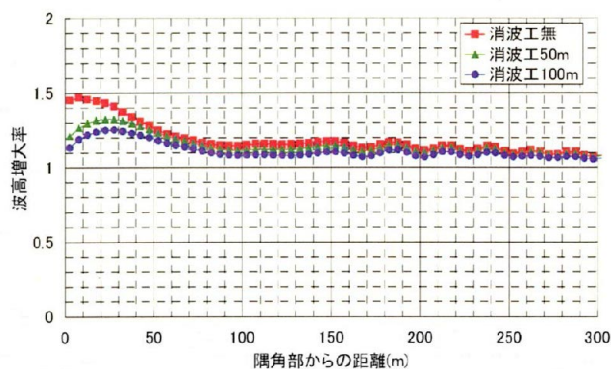


図-9 波高増大率（既往の手法、消波工有）

考えられる。

既往の手法とブシネスク方程式モデルのケース a) ～ c) の計算結果から、計算条件、手法によって、隅角部の波高増大率は様々に変化することがわかった。

4. 消波ブロックによる波高増大率の低減

隅角部では急激に波高が増大する傾向があることから、隅角部周辺に消波ブロックを設置して、波高や波力を低減する対策を採用することが多い。

本検討においても、消波ブロック設置による波高増大の低減を試みる。

(1) 既往の手法による計算結果

小舟・大里の既往の手法を用いて、隅角部周辺に消波ブロックを配置し、隅角部における波高増大の低減を試みた。本手法では、入射波の防波堤への入射角に関係なく、消波ブロックを設置した区間では、設定した0.4の反射率で反射する。

計算結果として、波浪1を対象として、隅角点から羽堤側に消波ブロックを50mおよび100m設置した際の波高増大率を図-11に示す。比較対象として、消波ブロックを全く設置しない場合の結果も示している。図から消波ブロックを設置しない場合（増大率1.47）に比べて、50m消波ブロック設置では、増大率1.32に、100m消波ブロック設置では、増大率1.25に低減していることがわかる。また、消波ブロックによる増大率の低減は、隅角点から70～80m（半波長）程度の範囲で顕著に現れている。

(2) 反射率の検定

ブシネスク方程式モデルを用いて、消波ブロック設置に伴う隅角部の波高増大の低減効果を検討する前に、検討条件に対する消波ブロックの反射率特性を把握する必要がある。検討対象地形を対象として、図-10に示すような一次元水路を用いて、反射率の検定を行った。

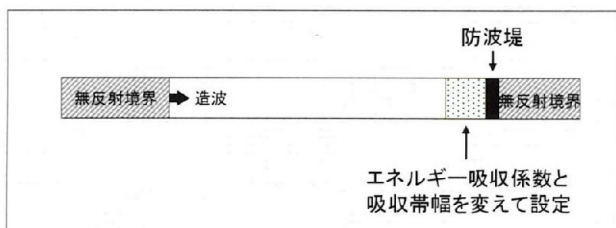


図-10 一次元水路のイメージ図

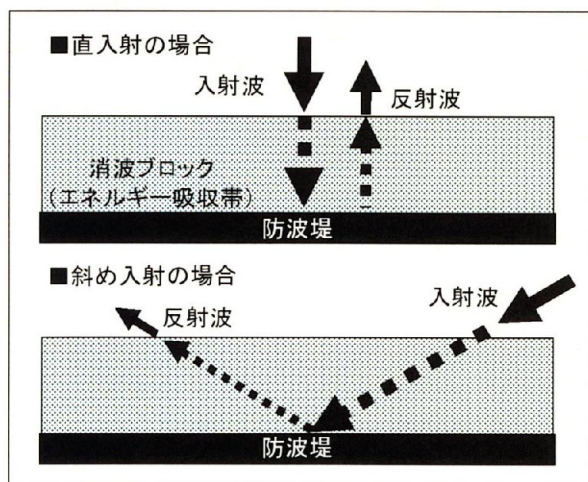


図-11 斜め入射のイメージ図

本検討では、図-11に示すように、隅角部に入射する波浪は羽堤に対して沿い波で進入する。その結果、直入射の場合に比べてエネルギー吸収帯を通過する距離が長くなり、直入射よりも反射率が低下すると考えられる。これは、実際に波浪に対しても起こりうる現象であるが、エネルギー吸収帯の設置幅によっては、波浪を過小評価する危険性があるため、設置幅には留意する必要がある。そこで、可能な限り少ないメッシュで所定の反射率を得るために、エネルギー吸収帯を2～4メッシュ(10～20m)で設定し、エネルギー吸収係数をメッシュ毎に変えて配置し、反射率の感度分析を行った。

感度分析の結果、エネルギー吸収帯が3メッシュ(15m)で反射率0.54程度、4メッシュ(20m)で0.42程度を得た。本対象防波堤に來襲する波浪が羽堤部に沿って斜め入射するため、実際の消波工断面幅に対するエネルギー吸収帯の再現性を考慮して、やや反射率は高いが3メッシュ、反射率0.54を採用した。

(3) ブシネスク方程式モデルによる計算結果

次に、ブシネスク方程式モデルを用いて、(2)で採用したエネルギー吸収帯を設置して、消波ブロックによる波高増大の低減を試みた。

計算対象としては、既往の手法と同様に、波浪1を対象とし、消波ブロックを隅角点から羽堤側に50mおよび100m設置したものを検討した。

図-12に本モデルで計算した防波堤前面波高の分

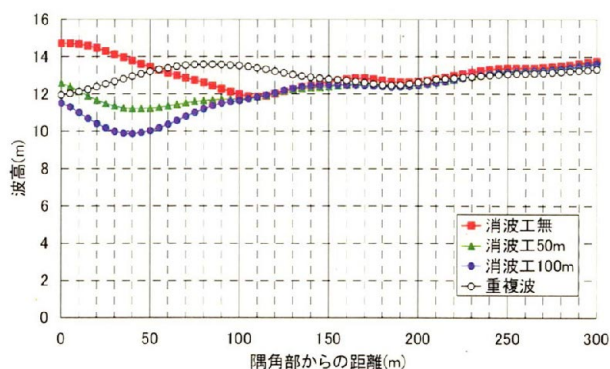


図-12 防波堤前面の波高分布（ブシネスクモデル、消波工有）

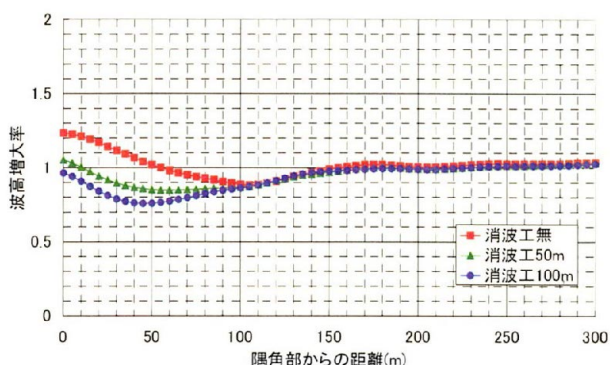


図-13 波高増大率（ブシネスクモデル、消波工有）

布を示す。図から消波ブロックを全く設置していない場合に比べ、50m、100m消波ブロックを設置した場合は、急激に波高が小さくなっていることがわかる。

次に、図-12中の○(重複波)で各ケースの前面波高を除した波高増大率を図-13に示す。図から隅角点周辺での増大率は、1.23(消波工無し)、1.05(消波工50m)、0.96(消波工100m)となった。図-12から、ブシネスクモデルでの計算結果には、重複波の腹と節が現れていることがわかる。そのため、節的な区域の重複波高を腹的な区域の重複波高で除すと、1.0を下回ることがある。これは、設計波と異なる波長の波浪が来襲した際には、このような腹と節の区域が変わり、設計波よりも大きな波浪となることが想定される。

そのため、前後半波長、すなわち1波長間に腹的な区域が含まれているという仮定のもと、前後半波長間の最大値を算出し、それらを用いて波高増大率を算出した。前後半波長間の最大値を図-14に、算出した波高増大率は図-15に示す。○の重複波は前後半波長間に節的な区域が含まれているという仮定のもと、前後半波長間の最小値を算出している。なお、図-12および図-13から、隅角部から150m以降はほぼ変化がないため、隅角部による波高増大の影響は、隅角点から約1波長の150m程度であることがわかる。図-15に示した波高増大率では、1.25(消波

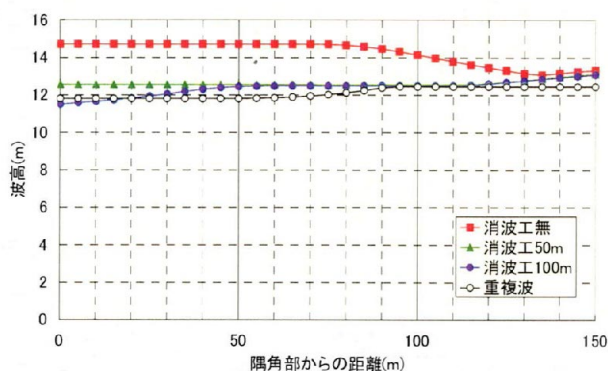


図-14 前後半波長毎の最大値を用いた防波堤前面波高分布（ブシネスクモデル，消波工有）

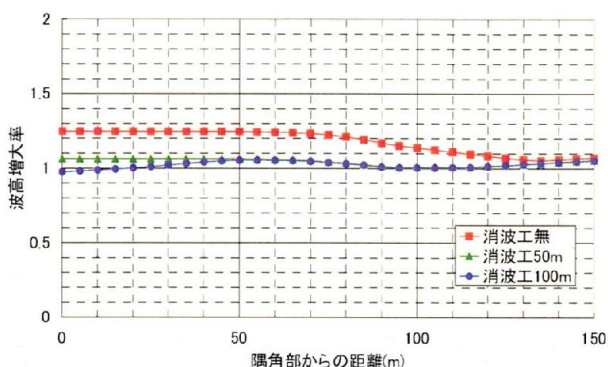


図-15 前後半波長毎の最大値を用いた波高増大率（ブシネスクモデル，消波工有）

工無し），1.06（消波工50m），0.98（消波工100m）となった。

(4) 考察

隅角部周辺に消波ブロックを設定した場合の波高増大率について，ブシネスク方程式モデルの場合，消波ブロックを設置すると既往の手法に比べて，増大率が大きく低下する。これは，既往の手法では入射波浪と羽堤のなす角に関係なく反射率0.4として計算しているが，ブシネスク方程式モデルは，消波ブロック設置区間の平面形状を考慮しており，波浪の入射角によって，エネルギー吸収帯を通過する区間が変わり，直入射に比べて反射率が小さくなっていることに起因していると思われる。さらに，前述のように，ブシネスク方程式モデルで水深変化，波高の違いを考慮すると，本対象防波堤の場合，隅角部の増大率は小さくなることにも起因している。

5. おわりに

本研究では，隅角部を有する防波堤において，小舟・大里の既往の手法とブシネスク方程式モデルによる手法を用いて，隅角部周辺で増大する防波堤前面波高の増大率を検討した。

主要なまとめを以下に示す。

- ・ 検討対象防波堤においては，既往の手法による増大率とブシネスク方程式モデルによる増大率を比較すると，同一条件での計算では，ほぼ同様の結果となる。しかし，ブシネスク方程式モデルでは，水深や S_{max} 等の変化の影響を考慮していることから，水深変化，大きい波高を入射させた場合の波高増大率は既往の手法に比べて，25%程度小さくなった。
- ・ 隅角部周辺に消波ブロックを設置した際，ブシネスク方程式モデルでは，設置した消波ブロック幅を考慮した反射波を算出するため，反射率を一定で与えている既往の手法による波高増大率よりも大幅に小さくなる。

消波ブロック設置部分に斜め入射する波浪に対する反射率について，ブシネスク方程式モデルでは平面形状を考慮したエネルギー吸収帯を設定している。しかし，適切なエネルギー吸収帯幅に適切なエネルギー吸収係数を設定できているかは，直入射での反射率で検証しているため，実際の斜め入射に対する反射率を適切に設定できているかは不明である。

今後は，断面や平面の水理模型実験等によって，斜め入射に対する反射率とブシネスク方程式モデルでのエネルギー吸収帯の関係についての検証が必要と考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり，国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所 下迫健一郎所長をはじめ，小濱英司設計室長，藤村公宜建設管理官より貴重な意見を賜った。ここに謝意を表する。また，(独)港湾空港技術研究所 平山克也波浪研究チームリーダーから計算理論やプログラム使用法について指導いただいた。併せて深謝する。

参考文献

- 1) 小舟浩治，大里睦男：防波堤隅角部付近の波高分布に関する研究，港湾技術研究所報告，第15巻，第2号，pp.55-58，1976。
- 2) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007。
- 3) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1036，P.162，2002。