

ブシネスク方程式モデルを用いた 沿岸部越波被害の要因と対策工の検討

A STUDY ON THE CAUSE OF WAVE-OVERTOPPING IN THE COASTAL AREA
AND THE MEASURES USING BOUSSINESQ EQUATION MODEL

大久保陽介¹・嶋田宏²・辻尾大樹³

Yosuke OKUBO, Hiroshi SHIMADA and Daiki TSUJIO

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)

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)

³正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)

The study deals with the factor and the countermeasure of wave-overtopping disaster in shallow sea area using Boussinesq equation model which analyzes shallow sea area with a high degree of accuracy. As a result, it reveals that the model can reproduce wave field more accurately than Takayama method in this area varying water depth widely and being shallow sea area. And reflected wave which is generated by road revetment as upright seawall causes wave-overtopping disaster. Furthermore, plan to set 300 to 400-meter-long wave dissipating blocks in front of road revetment is the most effective countermeasure.

Key Words : Boussinesq equation model, wave transformation, wave-overtopping, coastal area, wave Reflection

1. はじめに

簡易的な波浪変形計算として、港外の計算には波の屈折・浅水変形が計算できるエネルギー平衡方程式を用い、港内においては波の回折・反射が計算できる高山法を用いる線形な計算手法が簡易的であり、実務において広く用いられている。しかしながら、一定水深と仮定して計算する高山法では、波の非線形性が卓越する浅海域の波浪場を精度良く計算することは難しい。

ブシネスクモデルでは、水位や流速の時間変動やその伝播を直接解くことにより、海底地形の変化に伴う波の屈折や浅水変形および防波堤や護岸、陸地等による波の回折や完全反射を同時に精度良く計算することができる。このため、複雑な地形や水深変化の激しい海域への適用が広く検討されている。

また、陸上付近の海域を対象とした波浪変形計算を精度良く行うためには、特に防波堤や護岸における波の反射率を適切に設定する必要がある。平山ら(2001)は現地や水理模型実験で用いられる消波材による波浪減衰過程を、空隙率などの工学的パラメータが考慮された透水層内の波浪変形現象として物理的に捉えることにより、様々な波浪諸元を有する入射波に対して、反射率や部分重複波形を再現する任意反射境界処理法を開発している。このブシネスク

モデルを使用することにより、浅水域のより精緻な波浪変形計算が可能となる。

本研究では、道路護岸の新設により、対岸部において越波被害が発生している現地海域を対象に、波の非線形性が表現でき、浅海域の波浪変形を高精度に解析可能なブシネスク方程式モデルを適用することにより、現地の実態に合った波浪場を再現し、越波被害の要因を検討することを目的としている。さらに、越波被害に対する対策案について検討し、最適な対策案について検討を行う。

2. 計算の概要

(1) 計算対象領域

本研究では、計算精度かつ実績の高い平山(2002)によるブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver. 4. 6c. 7a)を用いて解析を行った。解析対象は図-1に示す日本海側の現地海域とした。本領域は、南西の水深20m付近から北東方向にかけて、徐々に水深が浅くなっている。また、防波堤と湾南部の道路護岸(直立堤)がほぼ同時期に整備され、その後、冬期風浪時や台風時に港内で越波被害が生じるようになった経緯を持つ海域である。道路護岸整備前は写真-1に示すように、緩やかに勾配がついた海底地盤であり、

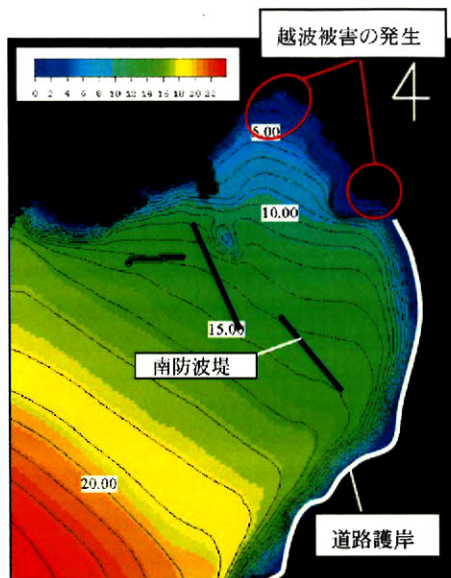


図-1 解析領域（水深図，単位：m）



写真-1 道路護岸造成前



写真-2 道路護岸造成後

傾斜堤護岸であったことが確認できる。写真-2に示す新設道路護岸は、直立堤護岸を海側に拡幅している。

新設道路護岸建設後は、図-1に示すように、湾奥部において越波被害が発生しており、特に湾奥部北側での越波被害が激しいことが確認されている。写真-3に越波被害時の状況を示す。同写真より、船小屋の中にまで水が進入している様子が確認できる。



写真-3 現地被害状況の一例

表-1 計算条件

項目		設定値
入力波浪	波浪条件	1年確率波
	有義波高(m)	1.14
	周期(s)	8.9
	波向(°)	303
	波形勾配	0.009
成分波数		512
S_{MAX}		25
入射波スペクトル		修正BS光易型
潮位(H.W.L、m)		TP+0.5m
計算範囲(沿岸・岸沖)(m)		1180 905
計算格子数(沿岸・岸沖)(メッシュ)		236 181
計算格子($\Delta X=\Delta Y$)(m)		5

(2) 計算条件

表-1に今回の計算条件を示す。新設道路護岸整備後越波被害は毎年のように生じていることから、1年確率波を対象として解析を行った。入力した有義波高および波向は深海域からの大領域においてエネルギー平衡方程式に基づく波浪変形計算を行い、検討領域での入力波浪を算出した。入射波の関数スペクトルは修正ブレッグシュナイダー・光易型を使用した。計算範囲は屈折だけでなく、回折・反射の影響が大きいと考えられる図の領域とし、無反射境域を含めて1180m×905mである。また、海岸線付近の細かな地形を再現するために、計算格子間隔は比較的細かい5mと設定した。反射率の設定は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説、

（社）日本港湾協会、2007」に示されている反射率の概略値を参考に、道路護岸整備後の護岸の反射率は直立壁の場合の0.9、整備前は勾配の緩い捨石斜面であると判断し、0.3と設定した。また、防波堤はカーテンウォール形式であり、反射率0.7、透過率0.7と設計されており、今回の計算においても同

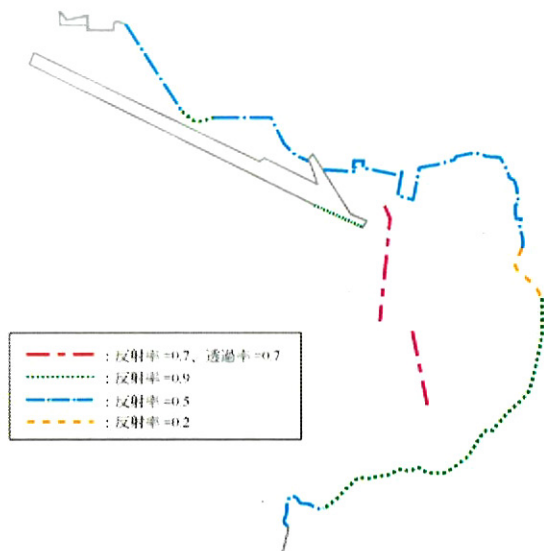


図-2 反射率の設定

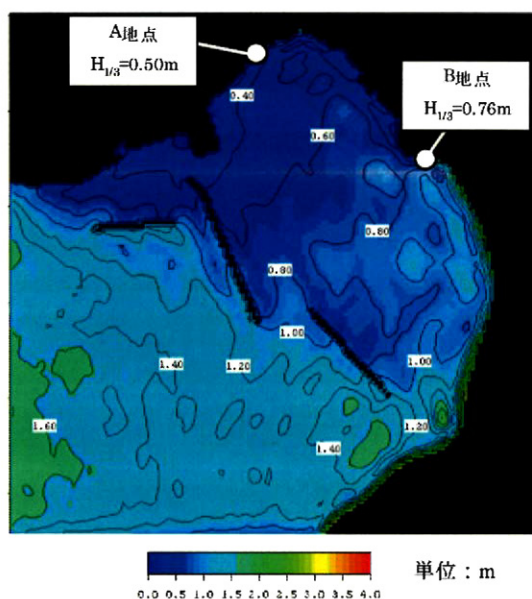


図-3 プシネスクモデルを用いた現況再現

条件を採用した。その他の反射率の設定は図-2に示すとおりである。なお、解析領域の北西側にある栈橋については、前面に前垂れ部がある箇所について直立壁として考慮することとした。

まず現況地形での再現計算を行い、計算精度の妥当性を検証した後、越波被害要因の検討、さらに対策工について検討を行うこととした。

3. 現況再現計算

まず現況地形を対象に、実務における解析手法として、従来の高山法とプシネスクモデルとの比較を行った。なお、プシネスクモデルにおいては、所定の反射率を得るために1次元水路を用いて反射率の検定を行い、エネルギー減衰係数を決定した。

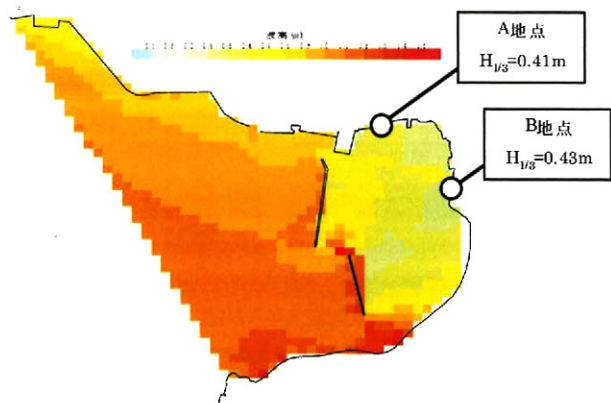


図-4 高山法を用いた現況再現

図-3 にプシネスクモデルを用いた現況再現を示す。同図より、防波堤の間より進入する波および南側の道路護岸からの反射波が湾内に伝播している様子が確認できる。また、越波被害が生じているA地点での有義波高が0.5m、B地点での有義波高が0.76mであり、越波被害が生じる程度の波高となっていることが確認できる。

一方、高山式を用いた現況再現は図-4に示すとおりであり、高山式においても防波堤の間から進入する波および道路護岸で反射していることが確認できる。しかしながら、A地点での有義波高は0.41m、B地点では0.43mであり、プシネスクモデルによる計算よりも小さな波高を示している。この要因としては、高山式においては、水深変化による浅水変形や砕波変形および波の非線形性を考慮できなかったためと考えられる。現地において冬季風浪によって被災が生じた波浪状況からは、A地点において0.5m程度の波高となっていることが確認できる。

以上のことから、水深変化の大きく、浅海域である本対象海域においては、プシネスクモデルを用いた方が精度良く波浪場を再現できることが明らかとなった。

4. 越波被害要因の検討

当該領域における越波被害は、現地へのヒアリング結果より、ほぼ同時期に実施された防波堤と新設道路護岸の整備後から発生している。対象領域での越波被害の要因を検討するために、以下の3ケースの波浪場計算を行うことで、越波被害及び湾奥部における波高増大の原因を究明する。

- Case1: 防波堤を仮想的に撤去
- Case2: 新設道路護岸整備前（旧道路護岸）
- Case3: 旧地形（防波堤整備・道路護岸整備前）

Case1の地形における有義波高分布を図-5に示す。

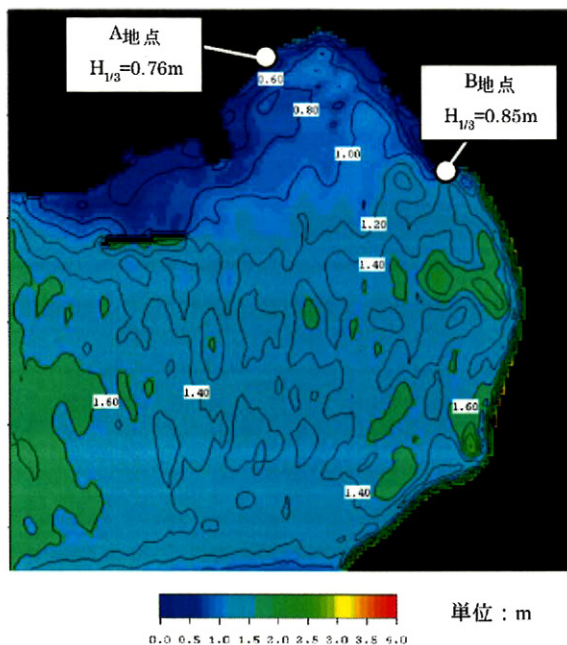


図-5 Case1（防波堤整備前）における有義波高分布

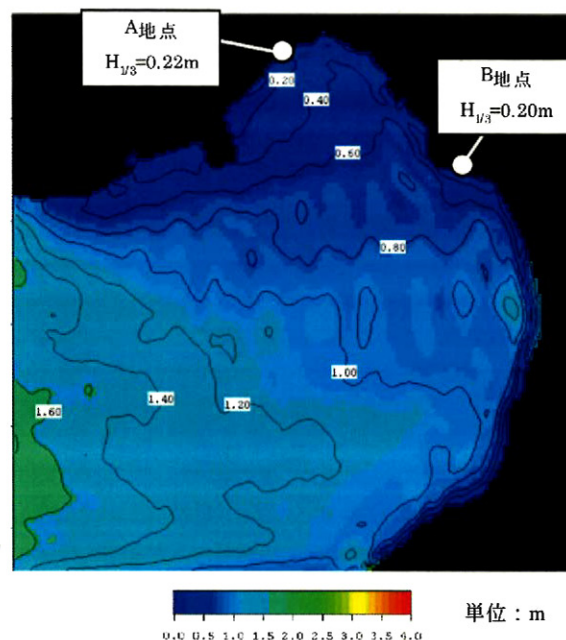


図-7 旧地形（防波堤整備・道路護岸整備前）における有義波高分布

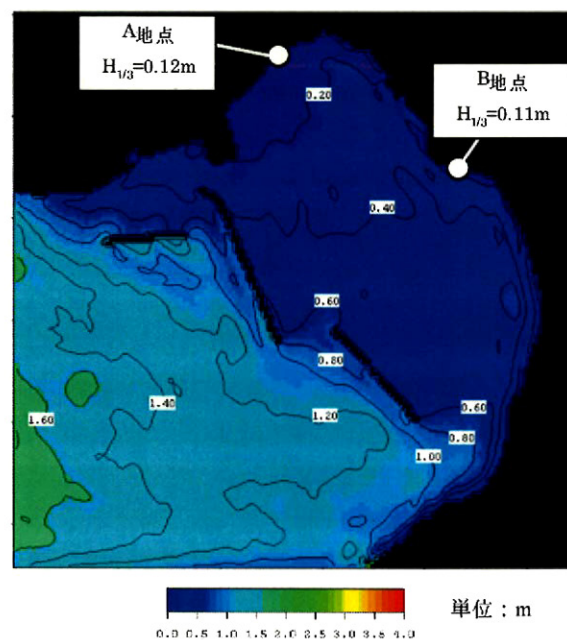


図-6 Case2（道路護岸整備前）における有義波高分布

同図より、防波堤がなく、直接越波被害が生じている海域に波が進行するため、計算領域全域で現況よりも大きな有義波高となっていることがわかる。また、A 地点における有義波高は 0.76m、B 地点では 0.85m となっており、防波堤は湾内の波浪状況を静穏にするために大きく寄与していることが確認できる。

図-6 に道路護岸整備前とした Case2 の計算結果を示す。同図より、旧道路護岸の反射率は低かったことにより、道路護岸から湾内に反射する波は小さく、A 地点で 0.12m、B 地点で 0.11m と静穏な状況となることがわかる。

また、防波堤整備・道路護岸整備前の Case3 の有義波高分布を示す図-7 をみると、旧地形の場合には Case1 と同様、防波堤がないため、越波被害が生じている海域に直接進入しているものの、道路護岸からの反射の影響が現況よりも小さいことにより、湾内の有義波高についても現況より小さくなっていることが確認できる。A 地点での有義波高は 0.22m、B 地点では 0.2m であり、現況の 1/2 以下の波高であったことがわかる。

以上の計算結果より、対象海域での湾奥部北側の越波被害の原因としては、直立護岸として整備された道路護岸からの反射波が主要因であると考えられる。

5. 対策工の検討

ここでは、前節での越波被害要因の検討を踏まえて、越波被害対策として、①突堤設置案（延長 25m）、②南側防波堤延伸案（延長 50m）、③消波ブロック設置案（延長 680m）の 3 ケース（図-8）に対して比較・検討を行った。

図-9 に突堤を設置した場合の有義波高分布を示す。同図より、突堤を設置することで道路護岸に沿う波を多少軽減できているものの、南側の防波堤と突堤の間から波が進入し、道路護岸で反射することにより、A 地点においては現況との波高比が 0.96（有義波高 $H_{1/3} = 0.48m$ ）であり、対策の効果はほとんどみられない。B 地点においては現況との波高比が 0.82（有義波高 $H_{1/3} = 0.62m$ ）と波高が少し減少している。

次に、南側防波堤を延伸した場合の有義波高分布

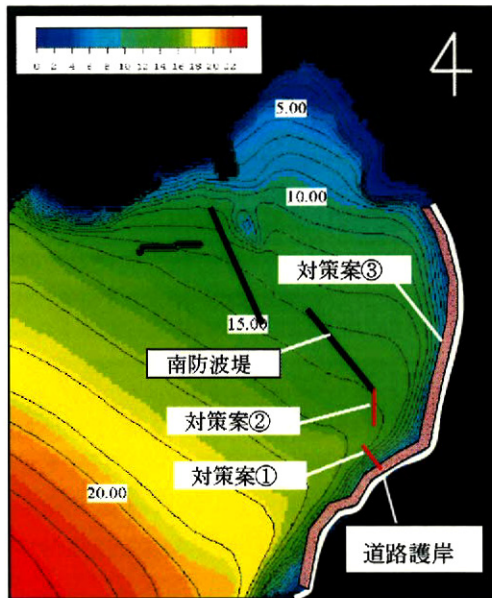


図-8 越波被害の対策工

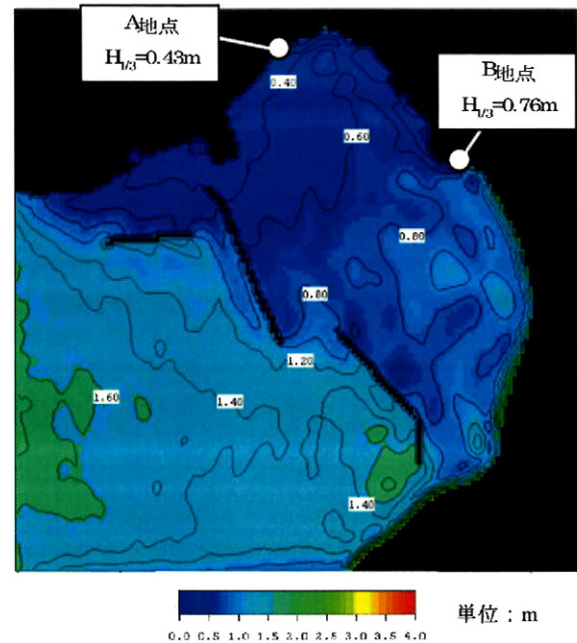


図-10 南側防波堤延伸案（延長50m）

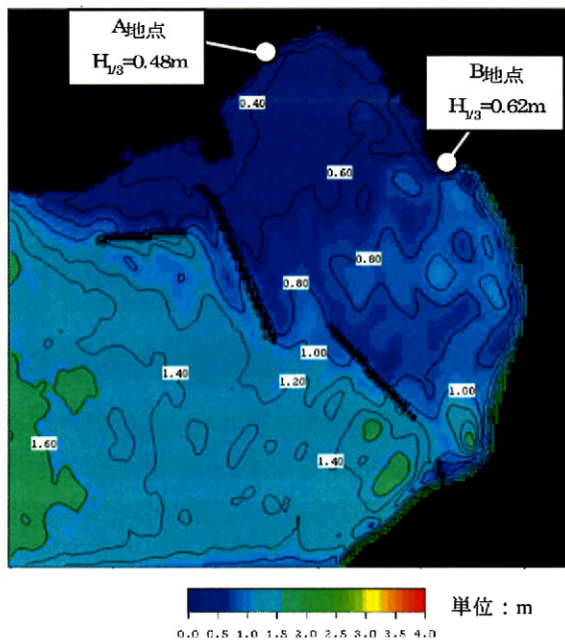


図-9 突堤設置案（延長25m）

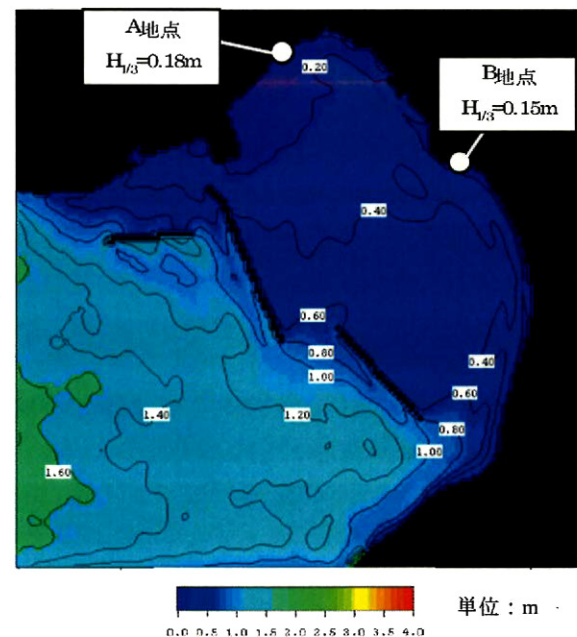


図-11 消波ブロック設置案設置延長（680m）

を図-10 に示す。この図をみると、突堤案と同様、道路護岸と南側防波堤の間より進入する波をある程度抑えてはいるものの、湾内の波浪状況にはほとんど影響がないことがわかる。A 地点における現況との波高比は 0.86（有義波高 $H_{1/3}=0.43\text{m}$ ）、B 地点における現況との波高比は 1.00（有義波高 $H_{1/3}=0.76\text{m}$ ）と、越波被害が生じている箇所の波高減少にはほとんど効果を発揮していないことがわかる。

図-11 に示すのは、道路護岸前面に消波ブロックを設置して道路護岸の反射率を小さくした場合の有義波高分布である。なお、消波ブロックの反射率は「港湾の施設の技術上の基準・同解説、（社）日本港湾協会、2007」を参考に 0.4 と設定した。同図より、道路護岸の反射率を低減することで湾内の高波

浪が抑えられていることが確認できる。A 地点における現況との波高比は 0.36（有義波高 $H_{1/3}=0.18\text{m}$ ）、B 地点における現況との波高比は 0.20（有義波高 $H_{1/3}=0.15\text{m}$ ）であることから、道路護岸の前面に消波ブロックを設置する対策は有効であることがわかる。

表-2 に示すのは、対策案の効果として A、B 地点の有義波高及び現況との波高比をまとめたものである。この表からも、対策案③の消波ブロック設置案は道路護岸前面への消波ブロック設置案が道路護岸からの反射波と道路護岸沿いに進入する波の双方を低減でき、最適な工法であることがわかる。

さらに、抽出した消波ブロック設置案に対して経

表-2 対策案の効果

		対策案① 突堤設置案	対策案② 南防波堤延伸案	対策案③ 消波ブロック 設置案
A地点	有義波高	0.48m	0.43m	0.18m
	現況との波高比	0.96	0.86	0.36
B地点	有義波高	0.62m	0.76m	0.15m
	現況との波高比	0.82	1.00	0.20

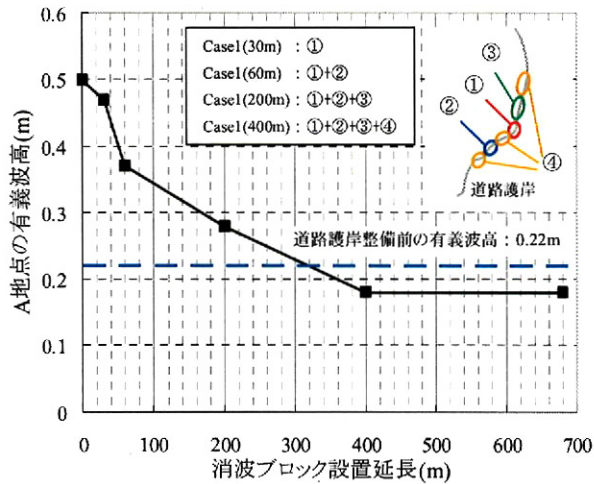


図-12 消波ブロックの設置延長とA地点の有義波高

済性を追求するために、消波ブロックの設置延長と特に被害の大きいA地点での有義波高との関係を調べた(図-12)。この図より、消波ブロック設置延長400mまでは消波ブロックの設置延長を長くする方が港内静穏度に対してより効果を発揮することがわかる。一方、設置延長を400mより長くしても効果はそれほど上がらないといえる。また、道路護岸整備前のA地点での波高が0.22mであり、消波ブロックを図-13に示すように、300~400m程度設置すれば、A地点の有義波高を道路整備前程度まで低減できることがわかった。この関係性に加えて、道路護岸整備前のA地点での波高を考慮した結果、消波ブロックの最適な設置延長としては、300~400m程度である結果となった。

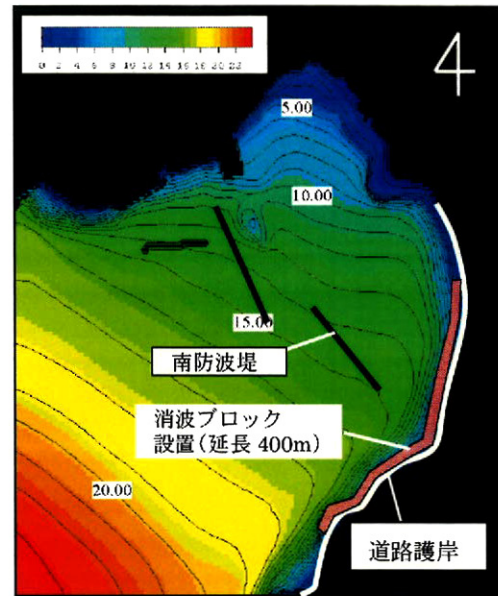


図-13 最終対策案

6. おわりに

本研究では、浅海域を高精度に解析可能であるブシネスクモデルを用いて現地海域での越波被害の要因及び対策工について検討を行った。その結果、水深変化が大きく、浅海域である本対象海域においては、高山法よりもブシネスクモデルを用いた方が精度良く波浪場を再現できることが明らかとなった。対象海域での越波被害の要因は直立護岸として整備された道路護岸からの反射波であることがわかった。また、新設道路護岸前面に消波ブロックを300~400m設置する案が最も有効な対策工であることがわかった。

なお、今回設定した消波工の反射率を満足する消波工の天端高および天端幅については数値波動水路等を用いて検討を行う予定である。

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 2) 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, 第48巻, pp.26-30, 2001.
- 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.