ブシネスクモデルを用いた海岸護岸における 護岸越波量の推定

平山 克也¹・森内 政弘²・伍井 稔³・加地 智彦⁴・玉田 崇⁴

¹正会員 (独) 港湾空港技術研究所 海洋研究領域波浪研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:hirayama@pari.go.jp

²(独) 港湾空港技術研究所 海洋研究領域波浪研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:moriuchi-m84vj@pari.go.jp

³いであ株式会社 沿岸・海岸事業部沿岸解析部 (〒224-0025 横浜市都筑区早渕2-2-2)

E-mail:iminoru@ideacon.co.jp

⁴正会員 いであ株式会社 沿岸・海岸事業部沿岸解析部 (〒224-0025 横浜市都筑区早渕2-2-2)

E-mail:kch20312@ideacon.co.jp, tamada@ideacon.co.jp

台風0418号及び台風0423号に伴う高波により海岸護岸背後の国道で通行障害が発生した高知県室津港海岸を対象として、波の碎波・遡上に加え越波計算が可能な平面2次元ブシネスクモデルを用い、道路通行規制実績から見た当時の越波状況の沿岸分布に関する再現計算を行うとともに、代表12断面において修正仮想勾配法を、さらにそのうち3断面でCADMAS-SURF/2Dを適用して得られた打ち上げ高及び護岸越波量と比較し、その妥当性を検討した。

ブシネスクモデルにより推定された越波状況は、護岸消波の影響または平面的な波浪変形が比較的小さいと思われる代表断面において、それぞれ1次元的手法による結果とよく一致するとともに、これらを考慮すべき代表断面及びその他の沿岸方向の各護岸においても、妥当と判断される結果を得た。

Key Words : wave overtopping, wave runoff, seawall, Boussinesq model, CADMAS-SURF/2D

1. はじめに

海岸護岸に打ち寄せる波は、沿岸域の地形・海底特性に応じて変形・集中し、同じ沖波条件に対してもその空間分布は必ずしも一様ではない。このために生じる護岸越波量の空間分布を把握することは、海岸護岸の適切な効率的な設計や背後地の面的防護策の立案等において非常に重要である。しかし、堤脚水深が負である（堤脚地盤が露出している）ことに対応して岸沖方向に代表測線を設け、1次元的手法を適用することは、作業効率のみならず、平面波浪特性を考慮した護岸設計を行う上で限界がある。

そこで本研究では、海岸護岸近傍の平面波浪場と合わせて護岸越波量の空間分布を同時に算定する手法を適用し、その算定結果を現地の越波状況や従来の1次元的手法による結果と比較して、その妥当性を検証した。

2. 海岸護岸における護岸越波量の算定手法

(1) 対象海岸における波浪変形計算

計算対象とした現地海岸地形を図-1に示す。この海岸は隣接する高知県室津港と行当岬に挟まれ、平成16年の台風23号に伴う高波による越波災害が発生した菜生海岸とは、室津港を隔てた反対側に位置している。また、海岸護岸のすぐ背後を通る国道55号（片側1車線）への越波対策として、平成16年当時にも人工リーフ群がすでに数基設置されていたことが図より読み取れる。しかし、道路通行規制実績¹⁾によると、少なくとも平成17年度末の護岸改良実施以前には、特に行当岬側の元海岸付近で越波による通行障害が度々発生していたようである。

そこで、後述する越波計算により当時の状況を推定するために、越波による片側通行規制が開始された台風0418号来襲時の高波（擾乱1）、及び既往最大波高を観測し全面通行止めが実施された台風0423号来襲時の高波（擾乱2）を対象として、汀線近傍の碎波・遡上計算が可能な平面2次元ブシネスクモデル²⁾による波浪変形計算を行い、海岸護岸周辺の進行波による平面波浪場を推定した。対象時刻において近隣のNOWPHAS地点及び気象庁検潮所で観測された波浪諸元及び潮位を表-1に示す。

図-1 平成16年当時の海岸地形とその周辺地形 (L1~12は護岸越波量算定のための代表測線)

表-1 対象擾乱時の波浪諸元及び潮位

擾乱	日時	波高	周期	波向き	潮位	備考
1 台風0418号	9/7 11:30	4.74m	11.0s	N214°	T.P.+0.46m	片側車線規制開始時刻
2 台風0423号	10/20 14:00	13.55m	15.8s	N208°	T.P.+1.99m	ピーク波高の観測時刻

表-2 各測線上の海岸護岸断面 (平成16年当時)

構造物	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
人工リーフ	無	有	有	有	間	有	無	無	無	無	無	無
護岸消波	有	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無
護岸天端高 (T.P.+ m)	8.6	8.6	8.6	10.0	8.2	8.2	10.0	8.2	8.4	7.8	7.8	10.0

※人工リーフにおいて“間”とは、代表断面が人工リーフ間に設定されていることを意味している

ここで、この沖合境界で与える入射波は、NOWPHASによる現地観測データから推定された沖波スペクトルをもとに、エネルギー平衡方程式法で算定した造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによって造波し³⁾、対象日時の観測潮位に加え、沖の周辺・海底地形による平面的な波浪変形を考慮した。また、比較のため、エネルギー平衡方程式法で算定した波浪変形も検討対象とした。

一方、海岸前面の人工リーフ群は、計算では不透過構造物として設定した。また、防波堤、護岸等に沿う曲線で示す反射境界について、エネルギー平衡方程式では凡例に示す反射率、ブシネスクモデルでは消波工に応じた反射率が算定される透水層⁴⁾または碎波・遡上変形が生じる自然地形を設定した。さらに、海岸護岸については、エネルギー平衡方程式法では反射率ゼロ、ブシネスクモデルでは図-2(a)に示すように、T.P.-1.0m以浅に十分な幅のスポンジ層を設定し、海岸護岸からの反射波を抑制した。なお、図-2(b)に模式的に示す海岸護岸境界は、後述する越波計算において設定した。

さらに、ブシネスクモデルの差分計算に用いる格子幅は $\Delta x=5.0\text{m}$ とし、時間間隔は入射波高が比較的小さい台

(a) 海岸護岸なし

(b) 海岸護岸あり

図-2 海岸護岸周辺地形の模式図

風0418号では $\Delta t=T/500\text{ s}$ 、入射波高が大きく計算が不安定になり易い台風0423号では $\Delta t=T/2500\text{ s}$ とした（ここで、 T は入射波の有義波周期）。また、海岸護岸周辺の波浪場が安定するまでの前駆時間に $50T$ 、その後波浪統計量を得るためのデータ収録時間に $150T$ の計算時間を確保した。

ところで、図-1において岸沖方向に設けた線分 (L1~12) は1次元的手法により海岸護岸上の打ち上げ高及び越波量を推定するための代表測線を示す。表-2には、各測線上での平成16年当時の海岸護岸断面の状況を示す。ちなみに、このうちL10~12の区間については現在、人工リーフ (3基) の設置、護岸天端高の1.2m高上げ、及び堤脚部の消波が実施されていることを付記しておく。

対象とした擾乱1, 2に対し、エネルギー平衡方程式

図-3 海岸地形上の平面波高分布（擾乱1）（Pt.1～12は換算沖波波高算定用の波高抽出点，点線は砕波位置）

図-4 海岸地形上の平面波高分布（擾乱2）（Pt.1～12は換算沖波波高算定用の波高抽出点，砕波位置は枠外）

図-5 代表地点で算定された波浪諸元

法及びブシネスクモデルで算定された現地海岸周辺の波高分布を図-3及び図-4に示す。ここで、図中の点線は、別途算定した砕波を考慮しないエネルギー平衡方程式法による波高分布と比較して、波高が7%減衰した位置を示し、本研究ではこれを砕波位置とみなす。ただし図-4では、これは描図範囲を超えた沖合に位置したため、図には示していない。また、これらの図の海岸護岸に沿って設けた代表地点（Pt.1～12）は図-1に示す代表測線上にあり、水深はT.P-2.0m程度である。これらの地点で算定された進行波の波浪諸元（有義波高： $H_{1/3}$ ，サーフビート波高： $HL_{1/3}$ ，平均水位上昇量： η_{bar} ）を図-5に示す。

図-3に示す擾乱1では、沖に人工リーフがないPt.7～12にかけて、ブシネスクモデルで算定された有義波高はエネルギー平衡方程式法によるものよりも大きく、その他の地点で両者はほぼ等しい。これは、人工リーフ上で

強制的に砕波する状況は両者で同様に算定されるものの、図-5(a)に示すサーフビートや平均水位上昇による潮位変化が考慮されないエネルギー平衡方程式法では、斜面上の砕波位置が岸側へ移動する状況を再現できていないためであると考えられる。

また、図-4に示す擾乱2では、かなり沖で砕波することに伴いサーフビートや平均水位上昇による激しい潮位変化が生じていると推定されるが、これらを考慮できないエネルギー平衡方程式法では、この影響が人工リーフ背後の不自然な波高分布となって現れている。一方、ブシネスクモデルでは、これらに加え人工リーフ上での再砕波により平均水位上昇量がさらに増加している様子が、図-5(b)から読み取れる。なお、このとき推定されたサーフビート波高及び平均水位上昇量は、大きいところでそれぞれ約3m及び約0.8mに達している。

(2) 修正仮想勾配法

代表測線上に位置する護岸での1次元的な打ち上げ高及び越波量の推定には、玉田ら⁵⁾⁶⁾による修正仮想勾配法を適用した。ただし、玉田ら⁶⁾のうち、最大打ち上げ高を用いた越波量の算定式(9)及び(10)には誤りがあり、換算沖波波高に対する最大打ち上げ高の比を1/3乗している部分は、正しくは3/2乗とすべきである。

また、この外力となる換算沖波波高の算定には、通常用いられる砕波位置の有義波高ではなく、ブシネスクモデルまたはエネルギー平衡方程式法で算定される汀線付近(図-3及び図-4中のPt.1~12)の有義波高(進行波)から算定したものをを用いた。これは、各擾乱での砕波位置が人工リーフ群の沖にあり、特に擾乱2では、隣接する港湾の沖防波堤よりも沖に位置していることを踏まえ、汀線近傍の人工リーフによる二次的な砕波減衰を含めた海岸地形上の平面的な波浪変形を極力取り込めるよう配慮したものである。なお、この場合、仮想勾配を算定する沖側端は、換算沖波波高を算定した水深T.P.-2.0m程度の代表地点となることに注意されたい。

さらに、汀線付近の有義波高の算定にブシネスクモデルを用いた場合には、同時に算定される平均水位上昇量及びサーフビート波高の1/2(片振幅)を潮位に加算し、換算沖波波高や打ち上げ高を算定することとした。

(3) 越波モデル

対象護岸での打ち上げ高及び越波量の空間分布の推定には、平山・長谷川⁷⁾による越波モデルを備えたブシネスクモデルを用いた。ここで、打ち上げ高は、図-2(b)に示す護岸前面で算定される水位変動の一波毎の極大値に相当し、越波量は、護岸天端高を超える水位変動から越流水深を得て、越流公式により算定される。ただし少なくとも、水面の水粒子が飛び出さないことを前提に導出されたブシネスク方程式では越波飛沫等は算定されないため、これらの護岸前面水位には、断面模型実験から得た補正係数が乗じられていることに注意されたい。

なお、このとき得られた海岸護岸前面の有義波高の平面分布は、進行波のみを対象とした図-3(b)及び図-4(b)

に示した結果と大差ないことを別途確認している。これは、前面の海浜地形上での砕波・壅上変形による顕著な波高減衰により、海岸護岸からの反射波がほとんど発生しなかったためと推測される。

3. 海岸護岸上の打ち上げ高及び越波量の推定

計算対象とした2つの擾乱において、修正仮想勾配法で推定された各代表測線上の護岸での打ち上げ高及び越波量を、ブシネスクモデルで直接算定されるこれらの空間分布と比較し、計算結果の違いを確認した。

さらに、これらの計算精度を検討するために、算定された護岸越波量を車両通行に関する許容越波量(1.0E-05 m³/m/s)と比較し、当時の越波状況の再現性を考察した。

(1) 台風0418号による高波(擾乱1)

このケースでは、修正仮想勾配法、越波モデルによるいずれの推定結果でも、後述する一部の区間を除き護岸越波量はほとんど算定されなかった。そこで、これらで推定される打ち上げ高を図-6に示す。ただし、修正仮想勾配法はL1~12で示す代表測線上にのみ適用し、越波モデルで算定される打ち上げ高の沿岸分布は、護岸前面の各計算格子上の最大水位のうち、場所毎のばらつきを抑えるために前後2格子で移動平均したものを示した。

各手法による算定結果のうち、エネルギー平衡方程式法またはブシネスクモデルで算定される換算沖波波高を用いた修正仮想勾配法についてみると、堤前の潮位上昇分(平均水位上昇量及びサーフビート波高の片振幅)を考慮していない前者は、後者よりも打ち上げ高が小さい。さらに、後者は、前面に消波工が設置されていない直立護岸(L6~12)では越波モデルで直接算定される打ち上げ高と比較的よく一致するが、消波護岸(L1~5)上の打ち上げ高は越波モデルに比べ過大評価となる。これは、消波工法面を地盤とみなす仮想勾配法では、護岸前面の消波工による波浪減衰を考慮できないためと考えられる。

また、このときの高波により片側車線規制が開始され

図-6 台風0418号来襲時の高波に対して推定された海岸護岸上の打ち上げ高

たL11付近に着目すると、越波モデルでは、この地点において護岸天端高を超える打ち上げ高とともに許容越波量 $1.0\text{E-}05\text{ m}^3/\text{m/s}$ を僅かに上回る護岸越波量が算定され、当時の越波状況をよく再現していることが確認された。さらに、図には示していないが、護岸前面波形と越波発生時刻との関係より、この越波は、護岸前面でみられる顕著なサーフビートと短周期波群の峰が重なる際に発生していることを確認した。

(2) 台風0423号による高波(擾乱2)

修正仮想勾配法、越波モデルでそれぞれ推定された打ち上げ高及び護岸越波量の沿岸分布を図-7に示す。このケースでは、特に越波モデルで推定された護岸越波量は、当時の護岸断面に対しほぼすべての護岸で車両通行に係る許容越波量を大きく上回る結果が得られた。これらは、ちょうどL1~12の区間に相当する1.4kmに渡る背後道路で越波による路面冠水が生じ、全面通行止めが実施されていた当時の状況によく符合している。

一方、修正仮想勾配法で推定された代表測線上の打ち上げ高及び護岸越波量のうちL1~5の区間では、いずれも越波モデルによるものを下回っていた。この原因には、このときの高波浪に伴う潮位上昇により護岸前面の消波工がほぼ水没した状態にあり、消波工法面を仮想勾配の一部とみなすことの影響が小さかったことに加え、堤前波の周期を沖波と同じに仮定したことにより波形勾配を過小評価したことなどが考えられる。また逆に、堤脚部

が消波されていないL6~12の区間では、ブシネスクモデルと組み合わせた修正仮想勾配法で推定された打ち上げ高及び護岸越波量は、越波モデルによる算定結果と比較的よく一致した。ただし、前面の比較的急な海底勾配上で碎波し、越波飛沫が生じ易いと考えられるL6~7及びL9~11では、これらを見積もるために補正係数が乗じられた越波モデルによる打ち上げ高は、修正仮想勾配法による最大打ち上げ高に比べ過大に算定されている。

そこで、これらの算定精度をより詳細に検討するために、L3, L7, L11の測線上のT.P.-8.0m以浅の断面地形(図-1を参照)を対象としてCADMAS-SURF/2D[®]による越波計算を実施した。ただし、入射波高の検定地点が碎波帯内に位置するためその沖での碎波変形が再現されていないことに加え、平面波浪場の影響が考慮されないために、予備計算で算定された汀線付近の代表地点Pt.3, Pt.7, Pt.11でのサーフビート波高及び平均水位上昇量はブシネスクモデルに比べかなり過小評価された。そこで、これらの差: Δh を造波境界での初期水位に加算し、修正仮想勾配法と同様、汀線付近での潮位上昇量を予め考慮することとした。なお、計算スキームにはVP-DONOR 0.2を用い、水平・鉛直格子間隔はそれぞれ0.8mと0.4m、ポーラス下限値は0.1とした。また、消波工内の慣性力係数は1.2、抵抗力係数はDF則に従うものとした。越波量は越波升法により算定した。

初期潮位補正後にCADMAS-SURF/2Dで算定された汀線付近の代表地点での有義波高及び潮位上昇量は、いず

図-7 台風0423号来襲時の高波に対して推定された海岸護岸での打ち上げ高と越波量

図-8 ブシネスクモデル及びCADMAS-SURF/2Dで算定された代表地点での波浪諸元の比較

れもブシネスクモデルによるものと比較的良好に一致した(図-8)。ただし、Pt11で算定されたCADMAS-SURF/2Dによる有義波高が非常に大きいのは、行当岬側へ向かう屈折変形が考慮されないためと考えられる。また、図-7中に+印で示してあるCADMAS-SURF/2Dで算定された打ち上げ高及び護岸越波量をみると、L11を除き、飛沫を伴う越波現象を直接再現したその計算結果は修正仮想勾配法による算定結果に近く、またこれを上回る場合にも、越波モデルによる算定結果とよく一致していることがわかる。したがって、前述の議論と合わせて考えると、海岸護岸前面の平面波浪場とともにブシネスクモデルで直接算定される打ち上げ高及び護岸越波量の沿岸分布は、概ね妥当な結果を与えていると判断できる。

4. おわりに

本研究では、波の碎波・遡上に加え越波計算が可能な平面2次元ブシネスクモデルを用い、越波による通行障害が生じた現地海岸における当時の越波状況を再現するとともに、その妥当性を道路通行規制実績及び代表断面に適用した修正仮想勾配法及びCADMAS-SURF/2Dによる算定結果と比較し検証した。この結果、越波モデルを備えたブシネスクモデルは、断面計算では扱えない平面的な波浪変形や堤前水深の変化をも考慮しつつ、護岸越

波量のより詳細な分布を直接算定できることがわかった。

参考文献

- 1) 四国地方整備局災害対策本部：台風 23 号の影響による被害状況（第 4 報），2004。（<http://www.skr.mlit.go.jp/bosai/sikoku/sokuhou/h16sokuhou.html>）
- 2) 平山克也，平石哲也：ブシネスクモデルによる碎波・遡上計算法とその適用性，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.11-15，2004。
- 3) 平山克也，岩瀬浩之，加島寛章：任意水深の造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによる多方向不規則波の造波，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66, No.1, pp.11-15，2010。
- 4) 平山克也：透水層を用いた任意反射境界処理法の高精度化と遡上計算への適用，海洋開発論文集，第 22 巻，pp.241-246，2006。
- 5) 玉田 崇，間瀬 肇，安田誠宏：複合断面に対する波の不規則性を考慮した打上げ高算定法に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.B2-65, No.1, pp.936-940，2009。
- 6) 玉田 崇，間瀬 肇，安田誠宏：波の打上げを考慮した越波流量算定法の提案，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66, No.1, pp.926-930，2010。
- 7) 平山克也，長谷川巖：ブシネスクモデルによる護岸越波・浸水過程に関する再現計算，土木学会論文集 B3（海洋開発）特集号，Vol.67, No.4，2011。
- 8) 財団法人沿岸開発技術研究センター：数値波動水路（CADMAS-SURF）の研究開発，沿岸開発技術ライブラリー，No. 12，457p，2001。

EVALUATION FOR DISTRIBUTION OF WAVE OVERTOPPING DISCHARGE ALONG COASTAL SEAWALL WITH H2D BOUSSINESQ MODEL

Katsuya HIRAYAMA, Masahiro MORIUCHI,
Minoru ITSUI, Tomohiko KACHI and Takashi TAMADA

The distributions of wave overtopping discharge along the coastal seawall next to Murotsu harbor in Kochi prefecture occurred by Typhoon SONGDA (No.0418) and TOKAGE (No.0423) are reproduced with the horizontal 2D Boussinesq model. Their validity for the locations and quantities of wave runoff and overtopping is confirmed with not only the records of regulation of traffic along the Route 55 behind the coastal seawall but also the results estimated with the modified imaginary gradient method and CADMAS-SURF/2D on the several representative cross sections.

The condition of wave overtopping evaluated with the Boussinesq model can explain the records of regulation of traffic as the allowable wave overtopping discharge is set to $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$ for the traffic. And their values correspond to the results estimated with the above methods on the cross sections without the armor blocks covered with seawall and the horizontal wave transformations. In addition, they can suppose appropriate results on the other cross sections with such conditions.