海底谷が近接する小田原国府津海岸における越波対策の検討

Measures against Wave Overtopping on Khozu Coast in Odawara Located Close to Submarine Canyon

竹内勇一¹・渡辺政雄²・畑澤 俊³・中西勇人⁴
宇多高明⁵・石川仁憲⁶・古池 鋼⁷・野志保仁⁸

Yu-ichi TAKEUCHI, Masao WATANABE, Shun HATAZAWA, Yuto NAKANISHI
Takaaki UDA, Toshinori ISHIKAWA, Kou FURUIKE and Yasuhito NOSHI

Recent beach changes of the Kohzu coast located close to a submarine canyon was reproduced using the BG model considering the grain size composition. Because of steep seabed slope of the coast, wave overtopping has been severe on the coast. Measures against wave overtopping were investigated by numerical simulation using CADMAS-SURF. Combined measure of gravel nourishment by the rate of $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ and raising the crown height of the seawall by 1.5 m along with the construction of parapet on top of the seawall was found to be effective.

1. はじめに

西湘海岸の森戸川河口の東側に位置する小田原国府津海岸（以下、国府津海岸）は（図-1）、酒匂川からの流出土砂量の減少と沖の海底谷を経た深海への土砂落ち込みにより著しく侵食が進み、1947年以降最大50mの汀線後退が起きた。また、国府津海岸は急深な海底谷の谷頭付近に位置しているため、高波浪時には波浪が減衰せずに海岸へ到達し、2007年の台風9号時には背後地で著しい越波被害が生じた（図-2）。2011年の台風15号時にも護岸背後のT.P.+12mまで越波が作用し、民家が損傷するなど著しい越波被害が出た。このように国府津海岸では、侵食により浜幅が狭まった結果越波災害が度々起きている。国府津海岸の侵食対策について、古池ら（2010）は、粒径を考慮した等深線変化モデルを用いて検討し、粒径の粗い酒匂川水系の土砂を2万 m^3/yr の割合で養浜すれば現況汀線の維持が可能なることを明らかにした。しかし、沖の海底谷や露岩域など複雑な海底地形のモデル化が十分でなく、また、対象粒径を細粒、中粒、粗粒の3粒径

に簡便化している等の課題があった。一方、現況汀線を維持しても、30年確率波が作用した場合に既設護岸高では高さが足りないことが海岸保全上の課題となっている。本研究では、国府津海岸の近年の地形変化を分析した上で、Serizawaら（2009）のBGモデルと、数値波動水路CADMAS-SURF（（財）沿岸開発技術研究センター、2008）を用いて当海岸の越波対策について検討した。

2. 近年の地形変化

国府津海岸では、侵食対策として森戸川河口の東側地域において2002年より飯泉取水堰堆砂や酒匂川河床堆砂を用いた平均0.5万 m^3/yr の養浜が継続的に行われてきた。図-3には養浜前の1999年と養浜後の2007、2011年の3時

図-1 西湘海岸の空中写真（2011年）と海底地形（2010年）

図-2 台風9号襲来時の測線No.33付近での波のうちあげ状況

1	神奈川県小田原土木事務所長
2	神奈川県小田原土木事務所河川砂防第一課長
3	神奈川県小田原土木事務所河川砂防第一課副技幹
4	神奈川県小田原土木事務所河川砂防第一課主査
5 正会員	工博 (一般財団) 土木研究センター常務理事
なぎさ総合研究室長兼日本大学客員教授
理工学部海洋建築工学科
6 正会員	工修 (一般財団) 土木研究センターなぎさ総合研究室
海岸研究室 (有)
7	博 (工) (有) アイコムネット環境コンサルティ
ング部

図-3 森戸川河口部の空中写真

期の空中写真を示す。西湘バイパスに大きな被害をもたらした2007年9月の台風9号時には森戸川河口導流堤の先端約20mが壊れた。その後、導流堤は20m短い堤長で復旧されたため、図-3に示すように2007、2011年では、1999年と比較して導流堤の西側直近に堆積していた土砂が東向きに流出し、導流堤の左右の汀線の位置での段差が小さくなり、左右岸の汀線がほぼ連続的となった。これに対し、森戸川河口の西400mに位置する突堤Cの東側直近における汀線の段差は2009年の20mから2011年の40mまで増加した。

図-4は、空中写真に基づく1947年基準での2011年までの汀線変化を示す。2007年11月以降、 $X=12\text{km}$ 以東では汀線後退が進んでいるが、養浜区域を含む森戸川近傍($X=1.25\sim 2.5\text{km}$)では、導流堤の短縮の影響もあり汀線維持が図られている。図-5は、図-1に示す国府津海岸に位置する測線No.33の縦断形変化を示す。これによれば、近年では汀線は維持されているものの、水深5m以深の沖合では侵食が進んでいる。

3. BGモデルによる検討

(1) 計算方法

粒径を考慮したBGモデル(Serizawaら, 2009)を用いて養浜と導流堤の短縮も考慮して2011年までの海浜形状の再現を行った。初期海底形状は図-6に示すように、2009年の実測データ(NMB測量結果)とした。再現計算では、2002年以降行われている養浜 $0.5\text{m}^3/\text{yr}$ を考慮し、1999年、2007年台風9号前の2007年、および2011年を比較年とした。国府津海岸の1999～2007年の平均汀線後退速度は約 $1\text{m}/\text{yr}$ であり、既に明らかにしたように導流堤短縮後の2007～2011年では汀線が維持されてい

図-4 汀線変化量 (1947年基準)

図-5 縦断形変化 (No.33)

図-6 初期海底地形

る。計算ではこれらの地形変化を再現した。対象海岸には広く露岩域が分布していることから、実態に合わせて海底谷の勾配変化点T.P.-12m以深は露岩域(固定床)とした。また国府津海岸の東側はT.P.-6mが沖に張り出す不連続な岩盤地形であることから、この範囲ではT.P.-6m以深を露岩域とした。図-6の黄色で示す区域の海底面を露岩域とした。粒径は5粒径(細砂, 中砂・粗砂, 細礫, 中礫, 大礫)とし、図-7に示す海底谷を通る国府津海岸の測線No.33の縦断形と粒度組成を参考として勾配変化点T.P.-7mより陸側での粒径成分は細砂を除く4成分とし、これらの平衡勾配は汀線付近からT.P.-7mまでの海底勾配より1/5とした。一方、T.P.-6m以深は細砂で代表させ平衡勾配は1/10とした。

1999年の再現計算では、エネルギー平均波を80年間作用させて静的に近い安定状態に至るまで地形変化計算を行った。2007年の台風9号襲来前の地形の再現では、実際の汀線後退速度($-1\text{m}/\text{yr}$)を再現するために海底谷背後の範囲($x=1.45\sim 2.45\text{km}$, T.P.+2 $\sim$ -5m)に $2.8\text{m}^3/\text{yr}$ の吸い込みを与え、また1999年以降の平均的な養浜量 $0.5\text{m}^3/\text{yr}$ ($x=1.95\sim 2.3\text{km}$)を湧き出しで与えた上で、1999年から2007年の8年間分の波浪を作用させた。

図-7 縦断形変化、 d_{50} の水深方向分布および粒度組成の水深分布

(a) 再現地形

(b) 汀線比較

図-8 海底地形(1999年)の再現計算結果と実測・計算汀線形状の比較

2011年の再現計算では、養浜は継続しつつ森戸川右岸導流堤を20m短くして2007～2011年の波浪を作用させた。波浪条件は、エネルギー平衡方程式(間瀬ほか, 1999)を用いて、国府津海岸の東約10kmに位置する平塚(水深20m)での観測値(1988～2008年)より算出したエネルギー平均波(波高0.84m, 周期6.3s)を与えた。波の入射角は試行計算より海浜地形の再現性が高い $S32^{\circ}E$ を採用した。計算条件を表-1に示す。

(2) 計算結果

海底地形(1999年)の再現計算結果と、実測・計算汀線形状を図-8に示す。計算汀線は実測値とほぼ一致しており、計算によってほぼ妥当な結果が得られた。そこで図-8(a)を初期地形として与えて求めた2007年までの水深変化量と実測・計算汀線形状を比較したのが図-9である。2007年までに国府津海岸では汀線に沿って帯状の侵食域が広がり、汀線が沿岸方向に約1.4kmの区域で平均8m程度後退するという特徴が計算によりほぼ再現された。これに続いて森戸川右岸導流堤を20m短縮した上で行った、2007～2011年の再現計算結果で得られた2011年までの水深変化量と実測・計算汀線形状の比較を図-10に示す。計算結果は実際の汀線変化に比べて導流堤近傍の変化量が小さいが、導流堤の短縮により導流堤

表-1 計算条件

計算モデル	粒径BGモデル (Serizawaら, 2009) 波浪変形計算: エネルギー平衡方程式 (間瀬ら, 1999)
計算対象区域	国府津海岸: 沿岸方向2km×岸沖方向1km
初期地形	2009年の海底地形 (NMB)
計算ケース	再現計算: 1999年 (養浜前), 2007年 (T0709被災前), 2011年 将来予測計算: 現況汀線の維持・前進のための養浜
計算期間	1999年再現: 80年 (エネルギー平均波), 2007年再現: 8年, 2011年再現: 4年, 将来予測計算: 5年
入射波条件	$H=0.84m$, $T=6.3s$, $\theta_w=S32^{\circ}E$ 入射波スペクトル: 光易型方向関数 (合田, 1990), 周波数分割数 $N_F=3$, 方向分割数 $N_\theta=16$, 方向集中度 $S_{max}=10$, 最小水深 $h=3m$
潮位	M.S.L. $\pm 0.0m$
計算空間メッシュ	$\Delta X=10m$
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=2.0hr/step$
計算ステップ数	4380step/yr
粒径	粒径と平衡勾配: d_1 : 代表0.27mm (細砂), $\tan\beta=1/10$, d_2 : 代表0.64mm (粗砂・中砂), $\tan\beta=1/5$, d_3 : 代表2.85mm (細礫), $\tan\beta=1/5$, d_4 : 代表11.88mm (中礫), $\tan\beta=1/5$, d_5 : 代表36mm (大礫), $\tan\beta=1/5$ 交換層厚: 1m, 含有率 (交換層A) 再現計算: 1999年地形を-6mで浅・以深で区分し, 沖側は粒径1の含有率を100%, 岸側は粒径2～5の含有率を25% 将来予測計算: 2011年再現結果 含有率 (交換層B): 再現計算では交換層Aと同一, 将来予測計算では2011年再現結果
沿岸漂砂量の水深方向分布	一樣
波による地形変化の限界水深	$h_c=12m$
バーム高	$h_R=3m$
漂砂量係数	$K_s=A\sqrt{d_{50}}$, $A=0.16$, 岸沖漂砂量係数 $K_1/K_s=0.2$ 小笹・Brampton係数 $K_2=1.62K_1$ ($\tan\beta=1/30$), 土砂落ち込みの限界勾配: 陸上1/2, 水中1/3
境界条件	左右端, 岸沖端: $q=0$
養浜条件	養浜量: 再現計算0.5万 m^3/yr , 将来予測計算0.5～2万 m^3/yr 養浜範囲: 再現計算 $x=1950\sim2300m$ (-6m), 将来予測計算 $x=1500\sim2300m$ (-6m) 含有率: 再現計算養浜実績値 $\mu_1=0.06(d_1)$, $\mu_2=0.56(d_2)$, $\mu_3=0.10(d_3)$, $\mu_4=0.2(d_4)$, $\mu_5=0.07(d_5)$ 予測計算: 想定される養浜粒度6ケース $\mu_1=0.04(d_1)$, $\mu_2=0.59(d_2)$, $\mu_3=0.18(d_3)$, $\mu_4=0.17(d_4)$, $\mu_5=0.02(d_5)$
構造物条件	構造物の波高伝達率 $K_r=0.4$

西側直近から東向きに土砂が流出することによる導流堤東側の汀線維持がほぼ再現された。以上のように、本モデルによれば、国府津海岸の1999～2011年の地形変化

がほぼ再現可能となったことから、当モデルにより養浜時の予測計算を行った。

2011年の再現計算結果を用いて、実際に調達可能な養浜材の量と質を種々変えて計算を行ったところ、近年は導流堤の短縮より汀線は維持されていたが、現状の $0.5 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜を継続しても国府津海岸では侵食が進み、5年後に汀線が最大10m後退し、浜幅が狭まって災害危険度が著しく増すことが分かった。そこで、礫を多く含む酒匂川水系の土砂を、現状より450m沿岸方向に広い区域($X=1.5 \sim 2.3 \text{ km}$)で $2 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で投入する案について検討した(図-11, 12)。結果的に広い区域で汀線の維持・前進を図れることが分かった。

4. 数値波動水路による検討

地形変化予測計算の結果によれば、現状汀線の維持のためには $2 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜が必要なが分かった。一方、この場合の浜幅は50mであり、設計波(30年確率波)を最大とする波浪が作用した場合に、既設護岸高T.P.+9mの越波防止に必要な浜幅80mに対して狭い。浜幅の不足分30mを補うにはさらに大量の養浜材が必要となり、実現性が乏しい。そこで本研究では、既設護岸改良による越波対策の検討を行った。

(1) 計算方法

数値波動水路CADMAS-SURFを用いて、図-2に示した越波箇所に対応する測線No.11の断面を対象として、高波浪時の越波状況を再現し、その上で護岸改良による越波低減効果を調べた。波浪条件としては、台風9号襲来時に小田原海岸に作用した波浪(推算)は $H_{1/3}=8\text{m}$ 、 $T_{1/3}=14.2\text{s}$ であるが、危険側の検討として同じく台風9号襲来時に平塚で観測された有義波と最大波の関係 $1.55 H_{1/3}=H_{\max}$ (2007年9月5～7日)を用いて、 $H_{\max}=12.4\text{m}$ 、 $T=14.2\text{s}$ とした。潮位は、湘南港での実測高潮位の1.3mに加え、2mと2.3mと設定し、再現計算により適合値を選択した。波は規則波とし、また計算は静水面から開始するため、造波後3波目で設定した波浪が作用するよう波高を段階的に高めた。評価対象は、越波流量と波の打ち上げ高であり、護岸背後に仮想的な升を置いて越波量を求めた。対象波は、造波開始後に波が安定する4～8波目とした。計算条件を表-2に示す。

(2) 計算結果

潮位を1.3, 2, 2.3mと変えた場合によれば、いずれの潮位の場合も6波目の越波流量が多く、波の打ち上げ高も高かった(図-13)。図-2に示した越波状況より、台風9号襲来時は既設護岸高T.P.+9mに対し、T.P.+11.4mの波の打ち上げ高が記録されている。この波の打ち上げ高に近い値は、潮位1.3mの場合の11.3m(6波目)であり、図-14(a)に示す6波目の越波状況からも実際の状況を

図-9 2007年までの水深変化量と実測・計算汀線形状の比較

図-10 2011年までの水深変化量と実測・計算汀線形状の比較

図-11 養浜 $2 \text{ m}^3/\text{yr}$ を行った場合の5年後の地形変化予測結果(水深変化量)

図-12 5年後の汀線変化量の比較

よく再現できている。このことから、潮位にはT.P.+1.3mを採用し、対象波浪を6波目として以降の検討を進めた。

表-2 CADMAS-SURFの計算条件

計算モデル	数値波動水路CADMAS-SURF ((財) 沿岸技術研究センター, 2008)
計算対象	測線No.11, 海底地形 (2010年)
再現計算	2007年台風9号襲来時の波のうちあげ・越波状況の再現 ケース1: 斜路あり潮位T.P.+1.3m, 2m, 2.3m ※台風9号襲来時の観測潮位 (湘南港) はT.P.+1.34m
計算ケース	構造物撤去による波のうちあげ・越波状況 ケース2: 斜路撤去 ケース3: 斜路撤去+後浜高調整 (T.P.+4.2m) ケース4: 斜路撤去+後浜高調整+護岸嵩上げ (+1.5m) ケース5: 斜路撤去+後浜高調整+護岸嵩上げ+パラベット
地形条件	2011年1月測量
波浪条件	2007年の台風9号襲来時の波浪 $H_{\max}=12.45\text{m}$ ($H_{1/3}=8.3\text{m}$), $T=14.2\text{s}$
成分波数	$N=9$
計算領域	水平420m×鉛直100m
格子間隔	水平0.2m×鉛直0.2m
格子数	水平2100×鉛直500
計算時間	100s

表-3 CADMAS-SURFによる越波流量および波のうちあげ高さ計算結果 (6波目)

	越波流量 ($\text{m}^3/\text{m/s}$)	波のうちあげ 高 (T. P. m)
ケース1 現況	1.04	11.3
ケース2 斜路撤去	0.42	11.9
ケース3 後浜高をT.P.+4.2mに調整	0.19	17.1
ケース4 護岸を1.5m嵩上げ	0.07	16.4
ケース5 パラベット有り	0.00	13.8

現地踏査と住民へのヒアリング調査によれば、越波は護岸前面の大規模な階段護岸や斜路部、後浜高が高い箇所著しかった。そこで現況 (ケース1)、斜路撤去 (ケース2)、後浜高をT.P.+4.2mに調整 (ケース3)、護岸を1.5m嵩上げ (ケース4)、パラベット有り (ケース5) と段階的に各対策を複合した5断面について越波低減効果を調べた。計算結果を表-3に示す。斜路を撤去することで越波流量は1/2に減少し、さらに後浜高の調整、護岸の嵩上げによれば越波流量がさらに低減する。最終的に、パラベットを設けて全ての対策を複合した場合の越波流量は $0.00\text{m}^3/\text{m/s}$ となり、越波を防止することができた。図-14 (b) にはケース5の6波目の越波状況を示すが、うちあげ高は高いもののパラベットによる波返しの効果もあり、背後への越流が起らないことが分かった。

5. まとめ

国府津海岸の越波対策は、酒匂川水系の堆砂を用いた

図-13 波のうちあげ高の計算結果 (測線No.11, 2007台風19号襲来時)

図-14 台風9号襲来時と越波対策後の越波状況

図-15 国府津海岸の越波対策

2万 m^3/yr の粗粒材養浜により維持・回復する砂浜の消波機能とともに、図-15に示すように、護岸前面の構造物 (階段護岸、斜路) を撤去し、後浜高をT.P.+4m程度に維持管理した上で、護岸天端高を現況から1.5m嵩上げ (T.P.+10.5m) し、嵩上げ部にパラベットを設ければよいとの結論に達した。

参考文献

- (財) 沿岸技術研究センター (2008): CADMAS-SURF実務計算事例集, p. 306.
- 古池 鋼・宇多高明・細川順一・塩入 同・石川仁憲・芹沢真澄・三波俊郎 (2010): 海底谷への土砂落ち込みの定量予測モデル-国府津海岸への適用, 海岸工学論文集, 第57巻, pp.471-475.
- 間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋 (1999): 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 628/II 48, pp.177-187.
- Serizawa, M., Uda, T., San-nami, T., Furuike, K. and Ishikawa, T. (2009): Prediction of topographic changes of sand spit using BG model, Jour. Coastal Res., SI 56, pp. 1060-1064.