

数値波動水路を用いた海岸護岸周辺の越波対策工法の検討

Examination of Countermeasures against Wave Overtopping around Revetment using Numerical Wave Flume

川崎浩司¹・菊 雅美²・眞栄里和也³・米須俊彦⁴
嶋田 宏⁵・五味久昭⁶・柴多哲郎⁷・板橋直樹⁸

Koji KAWASAKI, Masami KIKU, Kazuya MAEZATO, Toshihiko KOMESU
Hiroshi SHIMADA, Hisaaki GOMI, Tetsuro SHIBATA and Naoki ITABASHI

The purpose of this study is to numerically discuss countermeasures against wave overtopping around a coastal revetment in main Okinawa Island using a numerical wave flume 'CADMAS-SURF'. Optimum crest height and wave overtopping quantity were examined for three types of revetments of an upright seawall with an offshore breakwater, a seawall covered with wave-dissipating blocks and a flaring-shaped seawall. As a result, it was revealed that the countermeasure can be selected so as to adapt to the characteristics of the region based on the numerical results taking into account economy efficiency of construction, landscape and the coastal environment. The numerical wave flume 'CADMAS-SURF' was, therefore, found to be useful in the examination of countermeasures against wave overtopping.

1. はじめに

海岸線沿いの道路護岸周辺では、台風など低気圧の接近時に発生する越波によって、交通障害による地域分断や飛散物による物的・人的被害などを受ける地域が今日においても後を絶たない。しかしながら、海岸線沿いのすべての主要幹線道路に対して十分な越波対策が施されていないのが現状である。特に、台風常襲地帯である沖縄諸島海域では、台風接近時に発生する越波によって、沿岸道路の通行規制が年数回程度行われており、その際の孤立人口は数千人におよぶと報告されている（内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所、2006）。したがって、防災面や交通利用面などの観点から、このような地域の道路護岸に対して越波対策を早期に講じる必要がある。一方、1999年に抜本的に改正された海岸法により、海岸災害からの防護だけでなく、海域の環境および利用も

考慮した海岸整備が求められている。そのため、越波対策工法の選定には、単に天端高の嵩上げなどによって越波流量の低減を図るのではなく、経済的、景観的、維持管理などを含めた総合的な判断をしなければならない。

沖縄諸島海域を対象とした越波に関する研究例として、仲座ら（1991）は、水理模型実験により、リーフ上での波浪変形が越波量に及ぼす影響について検討し、サーフビートを考慮した越波流量の算定方法を提案している。また、仲座ら（1998）は、現地観測によって、天然リーフ上での波浪特性について把握し、碎波によって生じるセットアップやサーフビートなどの波浪変形を考慮した設計波高について言及している。しかしながら、護岸背後への越波は、沖合の波浪だけでなく、海底勾配や海岸構造物の設置状況など、数多くの要素に影響される。そのため、越波対策工法を選定するには、当該地域の特性を十分考慮して検討を行う必要がある。

従来の越波対策では、合田ら（1976）による越波流量算定図（以下、合田の算定図と呼ぶ）によって越波流量を求め、構造物の必要天端高を算定してきた。しかし、合田の算定図は一樣勾配を対象としているため、リーフ地形など複雑な海底地形を有する海域では、護岸周辺の越波特性を精度よく評価することが困難である。また、合田の算定図では、波浪条件と水深、護岸天端高のみで越波流量が決まるため、波返しの大い護岸など複雑な断面形状の護岸に対しては正確な越波流量の算定が難しい。

そこで、本研究では、近年、実務でも適用されつつある数値波動水路 CADMAS-SURF (SUPER Roller Flume for Computer Aided Design of MARitime Structure)

- | | |
|--------------|-------------------------------------|
| 1 正 会 員 博(工) | 名古屋大学准教授大学院工学研究科社会基盤工学専攻 |
| 2 学生会員 学(工) | 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 |
| 3 | 内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所調査課課長 |
| 4 | 内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所調査課計画係長 |
| 5 正 会 員 | パシフィックコンサルタンツ(株)国土保全技術本部港湾部部長 |
| 6 正 会 員 | パシフィックコンサルタンツ(株)国土保全技術本部港湾部グループリーダー |
| 7 正 会 員 修(工) | パシフィックコンサルタンツ(株)国土保全技術本部港湾部 |
| 8 正 会 員 博(工) | パシフィックコンサルタンツ(株)国土保全技術本部港湾部主任技師 |

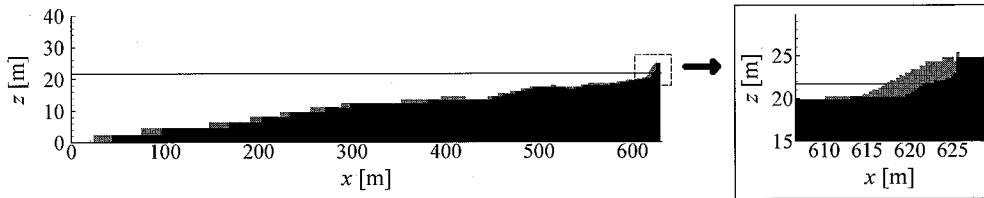


図-1 計算対象領域の海底地形と現況の護岸形状

表-1 解析条件

格子間隔	水平・鉛直方向	0.2 ~ 2.0 m
計算時間	時間間隔	0.001
	終了時間	200 s
移流項の差分	VP-DONOR	0.5
TimerDoor 法	気泡上昇速度	0.2 m/s
	水滴落下速度	3.0 m/s
境界条件	流速・圧力	Slip
	VOF 関数 F	Free
消波工	空隙率	0.5
	慣性力係数 C_M	1.2
	抗力係数 C_D	1.0

(財団法人沿岸開発技術研究センター, 2001) を, 過去に越波災害を被った沖縄諸島海域のある現地海岸に適用し, 護岸の断面形状や天端高を変化させた越波解析を行うことにより, 対象地域の特性に適合した越波対策工法を検討する。

2. 現地地形への数値波動水路の適用

(1) 計算条件

本研究では, 台風接近時に越波被害がみられた地域のうち, 海底地形の状況や道路に隣接する民家などの配置を考慮して, 対策工法の検討を行う代表断面を選定した。図-1 は代表断面における海底地形および現況の護岸形状を示しており, 約 1/30 の比較的緩やかな勾配の海底地形の岸側に, 消波ブロックを有する天端高 EL+5.34 m の護岸が設置されている。

表-1 に解析で使用する各パラメータを示す。本計算では, 海岸護岸周辺の越波状況を高精度かつ効率的に解析できるように, 不等間隔格子を採用した。基礎方程式の移流項の差分には, 1 次精度風上差分と 2 次精度中央差分のハイブリッド差分法を使用した。そして, 両者の比率を示す VP-DONOR の値を変化させた試行計算の結果に基づき, VP-DONOR=0.5 を用いた。また, 護岸前面の消波工内部の係数値は中野ら (2002) を参考に設定した。

(2) 越波量の算定方法

越波量は, 図-2 に示すような越波升を護岸背後に設けることで求めた。具体的には, 水塊が護岸背後に越



図-2 越波量の算定方法

波・越流することによって, 越波升内の VOF 関数 F の面積積分値が変化するため, 式 (1) によって初期値からの増分量を求め, これを越波量 FQ とした。

$$FQ = \iint F_t dx dz - \iint F_{ini} dx dz \dots \dots \dots (1)$$

ここで, F_t はある時刻における VOF 関数 F の値, F_{ini} は VOF 関数 F の初期値である。

(3) 入射波高の選定方法

本研究では, 計算対象地域の沖波波高から, 海底平面地形による波の屈折と回折の影響を考慮した換算沖波波高を求め, これを基に入射波高を決定した。しかし, 数値波動水路では, 不規則波を用いた場合に多大な計算時間を要するため, 実務においては非効率である。そこで, 本研究では, 以下に示すように, 発生頻度を考慮した規則波の越波流量評価を行い, 不規則波を用いた際と同等の越波流量が得られる規則波の波高を算定した。

合田 (1970) は, 不規則波中の波高の出現確率を考慮した期待越波流量 q_{exp} を式 (2) で示している。

$$q_{exp} = \int_0^{\infty} q_0(H|T_{1/3}) \cdot p(H) dH \dots \dots \dots (2)$$

ここで, $q_0(H|T_{1/3})$ は波高 H , 周期 $T_{1/3}$ での越波流量, $p(H)$ は波高の確率密度関数である。

本研究では, リーフを有する沖縄諸島海域を対象とすることから, モデル化したリーフ地形において, 向原ら (2006) の手法を参考に, 最大波高 H_{max} から越波が生じなくなる波高まで, 徐々に波高を変化させながら越波計算を行った。そして, それぞれの越波量 Q_N を算定し, 式 (3) によって, 数値波動水路で求められる期待越波流量を算定した。

$$q_{exp} = \sum_{j=0}^N \{Q_N(H_j|T_{1/3}) \cdot P(H_j)\} \dots \dots \dots (3)$$

ここで, $P(H_j)$ は波高 H_j に対する超過発生確率である。

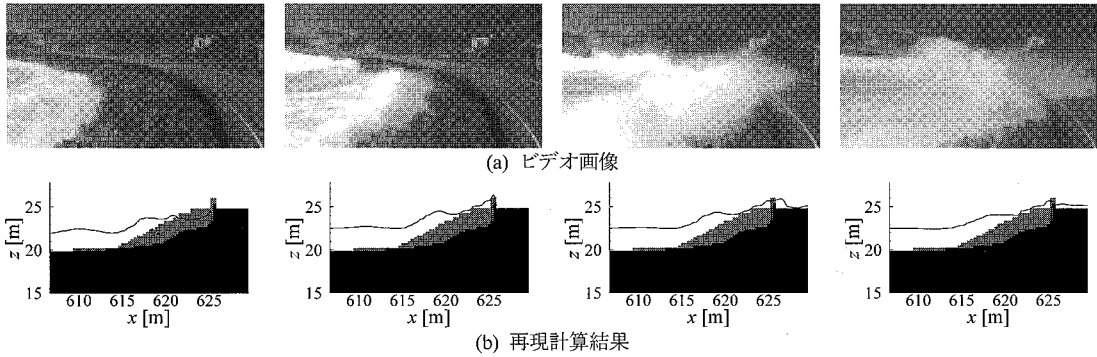


図-3 台風時の越波状況

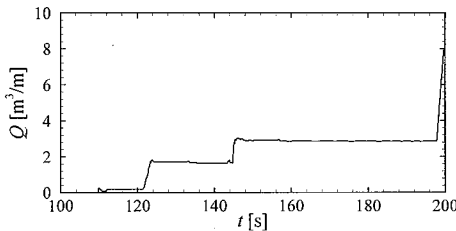


図-4 越波量の時系列変化

つぎに、最大波高から数えて全体の $1/n$ の数となる波の算術平均した波高を $H_{1/n}$ とし、数値波動水路において波高 $H_{1/n}$ の規則波を入射したときの越波流量 $q_{1/n}$ と $1/n$ の積である期待越波流量 q' (式(4)参照) が式(3)で得られた越波流量程度になるまで $H_{1/n}$ を変えて解析を行った。

$$q' = \frac{1}{n} \times q_{1/n} = \frac{1}{n} \times \frac{Q_{1/n}}{N \cdot T} \quad (4)$$

ここで、 $q_{1/n}$ は $H_{1/n}$ に対する単位時間当たりの越波流量 (m^3/s)、 $Q_{1/n}$ は $H_{1/n}$ の N 波成分の越波量 (m^3/m)、 N は越波した波数、 T は波の周期 (s) である。

計算の結果、 $1/10$ 最大波高 $H_{1/10}$ に対する期待越波流量 q' と式(3)で求めた期待越波流量 q_{exp} が同程度のオーダーとなった。よって、当該地形における越波流量の算定として、 $H_{1/10}$ の規則波を用いることにより、不規則波を作用させた場合と同様の越波流量が評価できることを確認した。

3. 現況護岸に対する台風時の越波再現計算

図-1に示す現況断面での越波状況を把握するため、越波により通行規制が実施された台風時を対象に再現計算し、越波流量を算定した。入射条件は波高 $H=4.5\text{ m}$ 、周期 $T=12.0\text{ s}$ である。

図-3は台風時にビデオカメラによって記録された越波画像と計算結果を比較したものである。図-3(a)に示す画像から、消波ブロックに沿って水位上昇が生じ、越

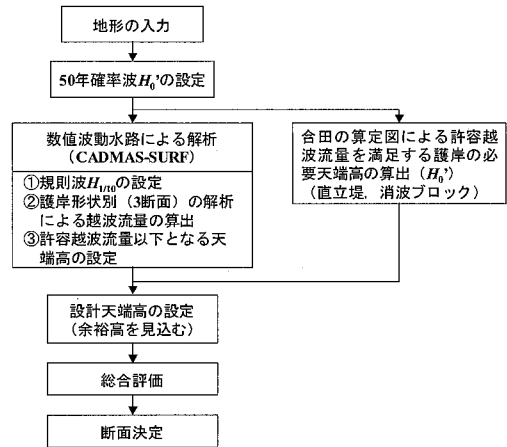


図-5 越波対策工法の選定方法

波水塊が山側の道路車線まで達している様子が確認できる。一方、図-3(b)に示す計算結果においても、波浪来襲時に水塊が消波ブロックに沿って打ち上がり、護岸天端上を流れる様子がみられることから、数値波動水路は実際の越波状況を良好に再現しているといえる。

図-4は数値波動水路によって算出された越波量の時系列変化を示す。同図を基に式(4)より平均越波流量を求めたところ、 $10^{-2}\text{ m}^3/\text{m/s}$ オーダーとなった。一方、合田の算定図から求められる越波流量は $10^{-4}\text{ m}^3/\text{m/s}$ オーダーであり、土木工事設計要領(沖縄総合事務局開発建設部, 2004)で定められている許容越波流量 $1.0 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{m/s}$ を下回っている。しかし、実際には台風来襲時に当該地域で通行規制が行われており、車両通行に危険性があると判断されるほどの越波が発生していることから、計算結果の方が実現象を再現していると考えられる。

4. 越波対策工法の検討

(1) 越波対策工の選定方法

図-5に越波対策工法の選定方法を示す。越波対策工

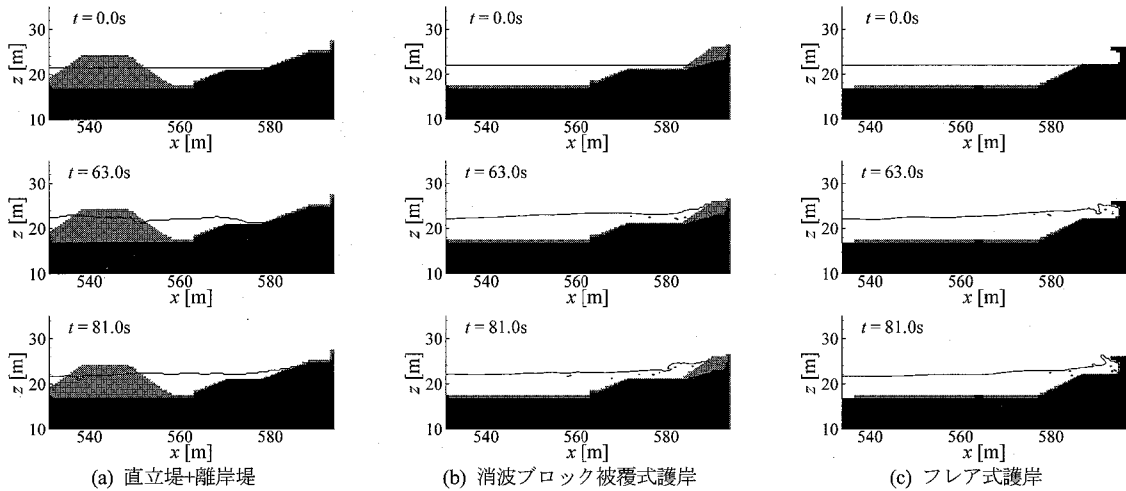


図-6 数値波動水路による越波計算例

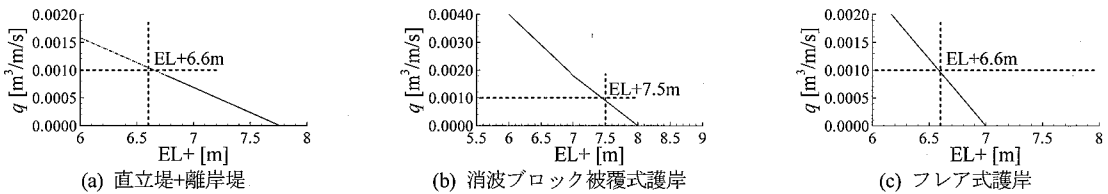


図-7 数値波動水路による護岸天端高の設定

表-2 越波低減のための最低天端高の比較および設計天端高の決定

現況護岸天端高	直立堤 + 離岸堤		消波ブロック被覆式護岸		フレア式護岸
	数値計算	合田の算定図 ^{*1}	数値計算	合田の算定図	数値計算
EL+5.34 m	EL+6.60 m	EL+11.90 m	EL+7.50 m	EL+8.10 m	EL+6.60 m
	設計天端高	EL+7.5 m	設計天端高	EL+8.0 m	設計天端高
					EL+7.5 m

^{*1}直立堤前面の離岸堤は考慮していない

法として、図-6に示すように、沖合50mに離岸堤を有する直立堤、消波ブロック被覆式護岸、フレア式護岸(村上ら, 1998)の3断面を取り上げた。設計波高は50年確率波とし、波高 $H=6.2$ m、周期 $T=15.39$ sを入射させた。本研究では、数値波動水路による解析結果だけでなく、合田の算定図によって得られた天端高も参考にすることにより、余裕高を含む設計天端高を決定することとした。さらに、天端高の設定のみならず、各断面における工事費や海域環境への影響なども考慮した総合的な評価により、護岸形状の選定を行った。以下にその詳細を示す。

(2) 設計天端高の設定

設計天端高を決定するために、3形状の護岸に対して護岸天端高を1.0 m単位で変化させて数値解析を行った。

図-6に各断面での護岸周辺における水面波形の空間

変化を例示する。同図から、(a)では離岸堤設置の効果による進行波の減衰、(b)では消波ブロック内での進行波の消散効果、(c)では特殊断面形状による沖合への波返しがみられ、数値波動水路によって各護岸形状の特徴が計算できていることがわかる。

図-7は数値波動水路によって算出した、各断面における天端高と越波流量の関係を示している。同図を用いて、許容越波流量 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 以下となる必要天端高を求めたところ、離岸堤を有する直立堤ではEL+6.6 m、消波ブロック被覆式護岸ではEL+7.5 m、フレア式護岸ではEL+6.6 mとなった。したがって、計算結果より、前面に離岸堤を有する直立堤およびフレア式護岸は、消波ブロック被覆式護岸よりも天端高を低く抑えられることが明らかとなった。さらに、離岸堤を有する直立堤と消波ブロック被覆式護岸に関して、表-2に示すように、合田の算定図から求めた許容越波量を満

表-3 各種護岸形状の比較

	直立堤 + 離岸堤	消波ブロック被覆式護岸	フレア式護岸
設計天端高	○ EL+7.5 m	△ EL+8.0 m	○ EL+7.5 m
経 済 性	△	○	◎
環 境 性	× 捨石による抑え盛土が多量であり、 海岸への影響が大きい	○ 消波ブロックによって景観が損なわ れる	◎ 前面に張出した構造で、海岸環境への 影響が小さく景観もよい
施 工 性	△ 離岸堤の施工は海上施工となる	○	△ 製作運搬・据付に大型トラレーヤや仮 設ヤードの確保が必要である
総 合 評 価	△ 不経済であり、離岸堤によって景観 も好ましくない	○ 消波ブロックにより景観性が損なわ れる	◎ 天端高を低く抑えられ、経済性、景 観面でも優れている

足する必要天端高は計算値を上回っている。特に、離岸堤を有する直立堤に対し、合田の算定図では、沖合に設置された離岸堤を考慮できないため、離岸堤による消波効果が反映されていない。このことから、特殊形状を有する構造物や複雑な海底地形を対象とする場合、数値波動水路の有用性がより発揮されるといえる。

堤防天端高の設定においては、海岸保全施設技術研究会(2004)によると、若干の不確実性を考慮し、最大1.0 m程度を限度とする余裕高を設定した方がよいとされている。そこで、越波の現況や護岸背後の状況、合田の算定図によって得られた結果などを勘案し、余裕高を含む最終的な設計天端高を、離岸堤を有する直立堤ではEL+7.5 m、消波ブロック被覆式護岸ではEL+8.0 m、フレア式護岸ではEL+7.5 mとして比較を行った。

(3) 各種越波対策工法に対する総合評価

検討箇所における各護岸の概算工事費、検討地域の特性を踏まえた施工性、施工に伴う海岸環境への負荷、完成後の景観などを考慮し、越波対策工法の総合評価を各護岸に対して行った。表-3に各護岸形状に対する総合評価結果を示す。概算工事費を算出した結果、検討箇所における施工では、フレア式護岸が最も低く費用を抑えられ、経済的であることがわかった。また、他の工法と比較して、フレア式護岸は海岸環境への影響が小さい断面形状のため、景観・環境面に優れた特徴を有しており、さらに、消波ブロック被覆式護岸よりも天端高を低く抑えられる。以上のことから、検討箇所ではフレア式護岸が最も適合した越波対策工法であると推定される。

5. おわりに

本研究では、数値波動水路 CADMAS-SURF を、過去に越波被害を受けた沖縄諸島海域のある現地海岸に適用し、護岸の断面形状や天端高を変化させながら越波解析を行った。その結果、従来、合田の算定図では解析できなかった複雑な海底地形や特殊形状護岸に対する越波

流量を適切に算定することができることを示した。さらに、計算結果に基づき、各種護岸形状に対して総合的に評価することにより、経済的で景観や環境面にも優れた護岸断面の提案が可能となった。以上のことから、対象地域の特性に適した越波対策工法の選定検討に、数値波動水路が活用できるといえる。

参 考 文 献

- 沖縄総合事務局開発建設部(2004):土木工事設計要領, pp. 270-298.
- 海岸保全施設技術研究会(2004):海岸保全施設の技術上の基準・同解説, pp. 3-27 ~ 3-29.
- 合田良實(1970):防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第9巻, 第4号, pp. 3-41.
- 合田良實・岸良安治・神山 豊(1976):不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.
- 財団法人沿岸開発技術研究センター(2001):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.
- 内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所(2006):沖縄県北部地域における道路行政の平成17年度達成度報告書/平成18年度業績計画書(オンライン), http://www.dc.ogb.go.jp/hokkoku/douro_ir/gyouseki/img/18gyouseki.pdf, 参照 2007-04-25.
- 仲座栄三・津嘉山正光・玉城重則・川満康智・吉田 繁・田中 聡(1998):湾状リーフ海岸における波・サーフビート, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 281-285.
- 仲座栄三・津嘉山正光・日野幹雄・田場 浩(1991):リーフ上の護岸越波特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 511-515.
- 中野 修・奥野俊也・安田勝則・藤井直樹(2002):規則波・不規則波による傾斜堤の波力・越波伝達波への数値波動水路の適用性について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 726-730.
- 向原 健・稲垣 聡・池谷 毅(2006):数値波動水路を用いた不規則波越波流量の算出, 第61回年次学術講演会講演概要集, pp. 187-188.
- 村上啓介・上久保祐志・入江 功・香月 理・片岡保人・中岡威博(1998):低天端消波工による非越波型防波護岸に作用する衝撃波圧の低減, 海洋開発論文集, 第14巻, pp. 375-380.