海水面上昇に対するフレア型護岸の越波阻止性能の保全に関する研究

Study on Maintenance of Non-Wave Overtopping Performance of Flaring Shaped Seawall

against Sea Level Rise

村上啓介¹•新田純也²•真木大介³•上久保祐志⁴•片岡保人⁵

Keisuke MURAKAMI, Jyunya NITTA, Daisuke MAKI, Yuji KAMIKUBO and Yasuto KATAOKA

Hydraulic performances of a non-wave overtopping type seawall were investigated on a supposition of the sea level rise that might occur near future. Two-dimensional hydraulic experiments were carried out under some different water level conditions, which reproducing the sea level rise, to clear the effect of the sea level rise on the hydraulic performances of the non-wave overtopping type seawall. Furthermore, this study proposes an appropriate countermeasure against the sea level rise to maintain an excellent checking effect of the wave overtopping of the seawall. Both the efficiencies of the proposed countermeasure and characteristics of the maximum wave pressure acting on it were evaluated through hydraulic experiments.

1. はじめに

地球温暖化に伴う平均海水面の上昇量は予測シナリオ によって異なるが、21世紀末までに0.18mから0.59mの 範囲で上昇が予測されている(IPPC,2007).沿岸低地に 社会経済活動が集積する我が国では、平均海水面の上昇 の影響は極めて大きく、これまでに様々な視点からその 影響評価と対応策が検討されてきた(例えば、三村ら、 1990;松井ら、1992;国土交通省、2002;細見ら、2005).

平均海水面の上昇は,越波・高潮災害の増大や沿岸構 造物の耐波安定性の低下など,沿岸域の安全性を著しく 低下させる.井上ら(1993,1994)は海面上昇に伴う既 設護岸の越波制御機能の低下を検討するとともに,護岸 形式や護岸断面形状が越波制御機能の低下に及ぼす影響 を評価している.また,高山(1990)は海面上昇による 防波堤の滑動安定性の低下を信頼性理論にもとづいて検 討し,砕波帯内で水深の浅い地点の防波堤ほど海面上昇 による滑動安定性の低下が著しいことを指摘している.

筆者らは越波・高潮災害の低減を目的に,深い円弧状 の断面を有する非越波型防波護岸(以下,フレア型護岸 と呼ぶ)の越波阻止機能と耐波安定性を検討してきた (例えば,村上ら,1996,2005).フレア型護岸の越波阻 止機能は,その円弧部での波返し効果に強く依存するた め,海面上昇が越波阻止機能の低下に及ぼす影響は,一 般的な護岸断面の場合とは大きく異なるものと考えられ る.また,平均海水面の上昇に対してフレア型護岸の越 波阻止性能を効率的に保全するためには,フレア型護岸 特有の水理性能を活用することが重要と考えられる.そ

1正会員 2	工博	宮崎大学准教授 大鉄工業(株)
2 3 正 会 員 4 正 会 員 5 正 会 員	修(工) 博(工) 博(工)	宮崎大学教育研究支援技術センター 八代工業高等専門学校准教授 (株)神戸製鋼所機械研究所

こで本研究では、平均海水面の上昇がフレア型護岸の越 波阻止性能の低下に及ぼす影響を明らかにするとともに, 越波阻止性能の効率的な保全対策の提案とその効果の検 証,および作用波圧の評価を目的とした.

2. 実験の方法

(1) 実験装置と実験水位の設定

反射吸収式の2次元造波水路(長さ15m,高さ0.6m,幅0.4m)を用いて実験をおこなった。図-1に実験模型の概略を示す.水路内に勾配が1/20の一様斜面を設け、 模型縮尺1/30を想定し、マウンド法先水深hが11.5cmになる位置に高さが h_M =5cmのマウンドを設置し、その上にフレア型護岸を固定した.フレア型護岸模型の高さBは14cmとし、上久保(2000)の結果をもとに護岸奥行き深さDはD/B=1/2(7cm)とした.



図-1 実験模型の概略図

フレア型護岸断面の設計では,設計潮位は護岸曲面の 最奥部と交差する高さに設定している.本研究ではこの 水位を"基準水位"と定義し,平均海水面の上昇を想定 して水路内の水位を基準水位から1.5cmステップで4段階 上昇させた水位条件を設定して実験をおこなった.水位 上昇量が Δh=1.5cmのケースは,想定される海面上昇の 範囲の上限に近い条件で(実スケールで45cm),残りの ケースは更に水位が上昇した場合に相当する.

基準水位の沖水深h。は40cmで、その際の護岸天端高さ hc(以下"基準天端高"と呼ぶ)は7.5cmである.また、 水位上昇に伴い護岸天端高さは相対的に低くなり,その 際の護岸天端高さはhcで表すこととする.

(2) 計測項目と計測方法

実験で計測した項目は,越波限界波高(ある護岸天端 高において越波が生じない最大の入射波高),越波流量, 護岸反射率,および作用波圧である.

まず,水路内の水位を前節の各条件に設定し,各水位 条件の下で水路内に入射波周期がT=1.0sから2.0sの範囲 で規則波を造波して越波限界波高を計測した. 越波発生 の有無は目視で判断することとし,本実験では護岸天端 上に微量の水滴飛沫が付着する程度の状況は越波とは見 なさないこととした.

次に,入射波高を越波限界波高から約1cm間隔で大き くしながら越波流量を計測した.越波流量は,護岸天端 を越流した3~10波分の越水を計量して求めた.

さらに、越波限界波高が護岸に作用する際の護岸反射 率と作用波圧を計測した.反射率の計測には分離推定法 を用いた.また、作用波圧は、図-1に示す護岸表面の5 箇所に直径約1㎝の波圧計を埋め込み、サンプリング周 波数500Hzで計測した.

3. 海面上昇に伴うフレア型護岸の越波阻止性能の変化

図-2は基準水位のケースと水位を上昇させた各ケース における越波限界波高の変化特性を示したものである. 図中の各プロットは基準天端高に対する水位上昇の割合 △*h*/*h*_cを示している.

水位上昇によって護岸天端は相対的に低くなり,その 際の越波限界波高は設計時の値から徐々に低下する.フ レア型護岸は短周期の波ほど越波阻止性能が高い特徴を 持つが,この特徴は水位上昇量が護岸天端高さの20%程 度までは大きく変わらない.一方,水位上昇量が更に大 きくなると,護岸天端高が更に低くなって波返し機能を 担う静水面上の護岸円弧部分は減少し,フレア型護岸特 有の波返し機能は徐々に低下する.そのため越波限界波 高の入射波周期に対する依存特性は徐々に小さくなる.

図-3は水位上昇に伴う越波限界波高の低下率を示した ものである. 越波限界波高の低下率は,基準天端高にお ける越波限界波高(HC)₈に対する水位上昇時の越波限界 波高H_cの比で定義した. なお,基準水位の条件で入射 波周期がT=1.0sの場合は越波限界波高が実験装置の造波 限界を超えていたためデータが得られなかった.

水位上昇によって護岸天端高が相対的に低くなるため 越波限界波高は低下するが、その低下割合は基準天端高 に対する水位上昇の割合 $\Delta h/h_c$ によって概ね決まり、 入射波の周期による差異は非常に小さい.水位上昇量 Δh が1.5cmの場合(実スケールで45cm)には越波限界波 高は設計時の約60%~70%に低下し、 Δh =3cmの場合は (実スケールで90cm)約40%~50%に低下する.



図-2 水位上昇に伴う越波限界波高の変化



図-3 越波限界波高の低下率



図-4 水位上昇による越波流量の増加特性

図-4は、水位上昇によって護岸天端が相対的に低下し たフレア型護岸に対して設計時の越波限界波高が入射し た場合の無次元越波流量($q/(2gH_0^3)^{1/2}$, q:越波流量, H_0 :入射波高)を示したものである.越波流量は各水位 条件において計測した越波量データから,設計時の越波 限界波高に相当する越波流量を内挿して読み取ったもの である.入射波の周期によらず,水位上昇によって越波 流量は急激に増大する傾向が見られる.図中の $\Delta h/h_c =$ 0.2は想定される海面上昇範囲の上限に近い条件である が,この条件において有意な量の越波防生じている.こ のことからも、フレア型護岸の越波阻止機能を保全する ための護岸断面の改良を含めた対策が必要であることが 伺われる.

4. フレア型護岸の越波阻止性能の保全対策について

(1) 対策工の提案と水理模型実験の概要

平均海水面の上昇によってフレア型護岸の越波阻止性 能は低下する.本節では、平均海水面の上昇に対してフ レア型護岸の越波阻止性能を効率的に保全することを目 的に図-5に示す護岸天端を前出しする対策工(Case-A) を提案し、護岸天端を嵩上げする対策工(Case-B)との 比較によりその効果を検討する.

実験は図-1に示した水路を用いておこなった. Case-A では護岸天端の前出し量が ΔC_h =1.5cmと3.0cmの2ケース, Case-Bでは護岸天場の嵩上げ量が ΔV_v =1.5cmと3.0cmの2 ケースについ実験をおこなった. なお, Case-Aの対策工 の厚みはb=1.5cmである.

前節と同様に基準水位の沖水深 h_0 は40mとし、基準水 位と水位上昇を想定した2ケース($\Delta h = 1.5$ cmと3 cm)の 計3ケースについて越波限界波高を計測した.また、越 波限界波高の波が護岸に作用する際の波圧についても計 測をおこなった.なお、入射波周期はT=1.0 sから2.0 sの 範囲で設定した.



図−5 対策工の概略図

(2) 対策工の越波阻止性能の保全特性

図-6は水位上昇量が $\Delta h/h_c$ =0.2の場合についてCase-AとCase-Bの各対策工による越波限界波高の維持特性を比較したものである。図の縦軸は越波限界波高の維持率を表し、基準天端高での越波限界波高(HC)_nに対する各設定水位における越波限界波高 H_c の比で定義している。

Case-Aでは,護岸前面で打ち上げられた水塊の運動方 向が護岸天端の前出し部分で沖向きに変えられることに よって越波阻止機能が保全される(**写真-1(a)**). その結 果,水位上昇量と同じだけ護岸天端を前出しすることに よって($\Delta C_h/\Delta h = 1$), 60%~70%低下した越波限界波 高は $H_c/(H_c)_B = 1$ を若干下回る程度に回復している. また,前出し量が $\Delta C_h/\Delta h = 2$ になると入射波周期の 広い範囲で $H_c/(H_c)_B = 1$ を上回る結果となった. 一方, **Case-B**では護岸天端の嵩上げ量が水位上昇量の2倍 ($\Delta C_v/\Delta h = 2$)でも越波限界波高は80%前後までしか回 復していない.

図-7は図-6よりも水位上昇量が大きい Δh/h_c=0.4の

場合について越波限界波高の維持率を示したものである. 水位上昇量が相対的に大きくなると,写真-1(a)に示す ような護岸天端の前出し部分における波返し機能は明確 ではなくなり,写真-1(b)に示すような鉛直上方への打 ち上げ現象が顕著になる.このような顕著な波の打ち上 げはCase-Bでも同様であり,Case-Aの越波限界波高の維 持率はCase-Bと類似した値を示している.

今回の実験条件において $\Delta h/h_c = 0.2$ はIPCCが想定す



図-6 対策工による越波限界波高の維持率 ($\Delta h/h_c = 0.2$)



図-7 対策工による越波限界波高の維持率 (Δh/h_c=0.4)



(a) $\Delta h=1.5$ cm, T=1.6 s





る海面上昇量の上限に近いケースに相当し、この程度の 水位上昇量に対しては護岸天端を前出しする対策工はフ レア型護岸の越波阻止機能の保全に対して効果的と考え られる.一方、平均海水面の上昇量が想定以上に大きく なると、護岸天端を前出しする対策工によっても十分な 対策効果が得られなくなる.

(3) 越波阻止機能の保全に必要な対策工の規模

護岸天端を前出しする対策工は,平均海水面の上昇に 対するフレア型護岸の越波阻止機能の保全において効果 的である.また,護岸天端を嵩上げする対策工であって も,嵩上げ量によっては越波阻止機能の保全は可能であ る.そこで,想定される海面上昇量に対して設計時の越 波阻止機能を維持するために必要な対策工の規模につい て検討した.

図-8は、Case-Aの護岸天端の出し量 ΔC_h に対する限 界波高の維持率を海面上昇量が $\Delta h/h_c$ =0.2の場合につ いて示したものである. 図-6と図-7で述べたように、越 波限界波高の維持率は入射波の周期にあまり依存しない ことから、図中には全プロットに対する回帰直線も示し ている(相関係数0.90). 図中の回帰直線より、護岸天 端を前出しする対策工によって設計時の越波限界波高を 維持するためには($(H_c/(H_c)_B = 1 \ge taca)$,海面上昇量 の1.37倍の前出し量が必要となることが読み取れる.



図-8 護岸天端の前出し量と越波限界波高の維持率の関係
(Case-A Δh/h_c=0.2)

同様に, Case-Bの嵩上げ量 *AC*, に対する越波限界波 高の維持率を図-9に示している. 図中には図-8と同様に 全プロットに対する回帰直線を示している(相関係数 0.73). 護岸天端の嵩上げによって設計時の越波限界波 高を維持するためには,海面上昇量の3.78倍の嵩上げが 必要となり, Case-Aに比べて対策断面はかなり大きくな る. このことは,想定される水位上昇量程度であれば, 護岸天端を前出しする対策工は天端を嵩上げする対策工 に比べて小さい断面改良で設計時の越波阻止機能を保全 することが可能であることを示している.



 図-9 護岸天端の嵩上げ量と越波限界波高の維持率の関係 (Case-B Δh/h_c=0.2)

(4) 護岸天端の前出し部分に作用する作用波圧

写真-1に示したように,護岸天端の前出し部分には護 岸前面で打ち上げられた水塊が直接衝突する. 桟橋など 水面付近の水平な構造物に作用する揚圧力については, その算定方法がいくつか示されている(例えば,(社) 日本港湾協会, 1999). ここでは,それらを参考に対策 工部分に作用する波圧について検討する.

図-10は、フレア型護岸断面に作用する最大波圧の分 布を海面上昇量が Δh/h_c=0.2の場合について示したも のである。各測点の波圧は、計測波形のピーク値を数波 分平均して求めたものである。マウンド法先部で前傾し た入射波が護岸に直接作用する静水面付近では、入射波 高相当の静水圧の10倍前後の最大波圧が作用している。 また、護岸天端の対策工部分には(最上部の波圧計測点: z/B=0.61)、若干のばらつきが見られるが入射波高相当 の静水圧の3倍から8倍の最大波圧が作用している。

図-11は護岸天端の前出し部分に作用する最大波圧を、 水位上昇量 $\Delta h/h_c$ と護岸天端の前出し量 $\Delta C_h/\Delta h$ がそ れぞれ異なる場合について比較したものである.



図-10 護岸断面に作用する波圧分布 (Case-A Δh/h_c=0.2)



図-11 対策工部分に作用する最大波圧(Case-A)

護岸天端の前出し量が大きくなると最大波圧も大きく なる傾向が見られる.また、海面上昇量が大きいほうが 最大波圧値も大きい.入射波周期に対する最大波圧値の 変動は若干見られるが、 $\Delta h/h_c = 0.2$ では $\Delta C_v/\Delta h = 1.0$ の場合の平均値は $p/\rho g H_c = 3.9$, $\Delta C_v/\Delta h = 2.0$ の場合 は $p/\rho g H_c = 5.3$ であった.

伊藤ら(1976)は、桟橋上部工の下面に作用する揚圧 力を、等分布を仮定した等価静加重として求め、上部工 の下面には入射波高相当の静水圧の4倍程度の揚圧力が 作用することを示している.伊藤らの結果と比較すると、 図-11に示した各条件の最大波圧値は若干大きい値を示 している.

伊藤ら(1976)は桟橋上部床版に作用する揚圧力強度 のピーク値の算定式についても示している.図-12は本 実験で得られた揚圧力値pと算定式から求めた値peelとの 比を示したものである.算定式は,一波ごとの波圧ピー ク値にかなりの変動があることを前提に求められたもの である.本実験においても,同一条件下でも一波ごとの 波圧ピーク値にはかなりの変動があったことを考慮する と,本実験で得られた最大波圧値と算定式から求めた揚 圧力強度のピーク値とは概ね一致していると考えられる. なお,実験値と算定値の波圧比に関して,入射周期が短 くなるほど波圧比が小さくなる傾向が見られる.これは, フレア型護岸の曲面部での波返し効果が短周期の波入射 波ほど顕著であることによるものと考えられる.

5. おわりに

平均海面の上昇に伴いフレア型護岸の越波阻止機能は 低下し,その低下割合は基準天端高に対する海面上昇量 で概ね決定される.また,海面上昇に対して設計時の越 波阻止性能を保全する対策として,護岸天端を前出しす る対策工を提案し,越波阻止機能の保全特性と作用波圧 の特性について検討した.その結果,想定される海面上 昇量程度であれば,護岸天端を前出しする対策工は大端 を嵩上げする対策工に比べて小さい断面改良で設計時の



図-12 対策工部分に作用する最大波圧に関する計測値と算 定値の比較

越波阻止機能を保全することが可能であることを示した. さらに、対策工部分に作用する最大波圧は、桟橋の上部 床版に作用する揚圧力強度のピーク値の算定式を用いて 評価できることを示した.

参考文献

- 伊藤喜行,竹田英章(1967):桟橋に作用する波の揚圧力,港 湾技術研究所報告, Vol.6, No.4, pp.37-68.
- 井上雅夫,島田広昭,坂本佳弘(1993):海岸護岸の越波特性 に及ぼす海面上昇の影響,海岸工学論文集,第40巻, pp.696-700.
- 井上雅夫,島田広昭,坂本佳弘(1994):海面上昇に伴う海岸 護岸の越波防止機能低下について,海岸工学論文集,第 41巻, pp.676-680.
- 上久保祐志(2000): 非越波型護岸断面に関する基礎的研究, 九州大学学位論文, pp.122.
- 国土交通省(2002):地球温暖化に伴う海面上昇に対する国土 保全研究会報告書, pp.107.
- (財)日本港湾協会(1999):港湾の設計の技術上の基準・同 解説,上巻,pp.573.
- 酒井和彦,岡安章夫(2004):温暖化による海面上昇を考慮し た防波堤の信頼性設計法,海岸工学論文集,第51巻, pp.686-690.
- 高山知司(1990):防波堤の滑動安定性に及ぼす海面上昇の影響,海岸工学論文集,第37巻, pp.873-877.
- 細見寛,角湯克典,内田智,五味久昭,板橋直樹,三村信男 (2005):地球温暖化に伴う海面上昇に対する住民意識と 長期的対策のあり方,海岸工学論文集,第52巻,pp.1291-1295.
- 松井貞二郎,立石英機,磯部雅彦,渡辺晃,三村信男,柴崎 亮介(1992):海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響予 測,海岸工学論文集,第39巻, pp.1031-1035.
- 三村信男,磯部雅彦,灘岡和夫(1990):海面上昇・気候変動 による沿岸域への影響とその対応策,海岸工学論文集, 第37巻, pp.863-867.
- 村上啓介,入江功,上久保祐志(1996):非越波型防波護岸の 護岸天端高さと作用波圧について,海岸工学論文集,第 43巻,pp.776-780.
- 村上啓介,清水健太,上久保祐志,片岡保人(2005):マウン ドを有するフレア型護岸の越波流量と波圧について,海 岸工学論文集,第52巻,pp.661-665.
- IPCC(2007) : Working Group I Report, "The Physical Science Basic", pp.747-846.