

高潮発生時の越波・越流による浸水対策工の検討

二重パラペット護岸設計手法の提案

千綿 蒔*¹・織田 幸伸*¹・本田 隆英*¹

Keywords : storm surge, prevention of inundation, wave overtopping, double parapet, hydraulic experiment, CFD

高潮, 浸水対策, 越波, 二重パラペット, 水理実験, CFD

1. はじめに

1.1 背景

地球温暖化に伴う気候変動により、海面上昇や台風の大規模化が懸念されており、近年国内外で甚大な高潮災害が発生している。今後、発達した台風が来襲した場合、既設の護岸高を超える水位上昇による越流や高波による越波が発生し、甚大な浸水被害が生じる可能性がある。こうした将来の高潮浸水リスクに対しては、浸水リスクの評価手法を確立するとともに、リスクへの適応策の検討が重要な課題となる。

浸水リスク評価手法に関しては、越波や越流による護岸流入量（越波越流量）の検討や、浸水解析手法の確立など、いくつかの研究がなされている^{1),2)}。一方で、高潮浸水リスクに対する適応策については、検討が不足しており、気候変動に対する具体的な適応策の立案は喫緊の課題となっている。そこで本研究では、増大する高潮浸水リスクに対する適応策の検討を目的とした。

高潮による越波・越流に対する対策工として、図-1に示すように、①既設パラペットの嵩上げ、②透水型二重パラペット、③不透水型の二重パラペットといった選択肢がある。まず、対策工①は比較的低コストで対策可能であると考えられる。一方で、嵩上げするのに十分な地耐力がない場合や、景観の観点で難しい場合も想定される。また、対策工②は、既設護岸前面に捨石（透水層）とともに低天端のパラペットを設ける方法である。他手法に比べて低天端で対策可能であるが、大規模な護岸改良工事が必要であるため、一般に高コストで長期の工事が必要となり、護岸線の変更を伴う場合もある。最後に、対策工③では、既設護岸の陸側にパラペットを新設することで越波越流量を低減

させる。この手法は、透水型の二重パラペットに比べて低コストかつ早期の対策が可能である。また、地耐力や景観の観点で既設パラペットの嵩上げが困難な場合にも有効な手段であり、前述の①または②の代替の対策案として有効である。

高潮発生時の越波・越流による浸水対策として、②透水型の二重パラペットは、別府港海岸、下関港海岸、横浜市福浦地区護岸等で実際に適用されている¹⁾⁻⁶⁾。これらはいずれも、二重パラペットの間が透水性を有しており、越波した海水は速やかに排水される構造となっている。一方、本研究では、既設護岸の改修が困難

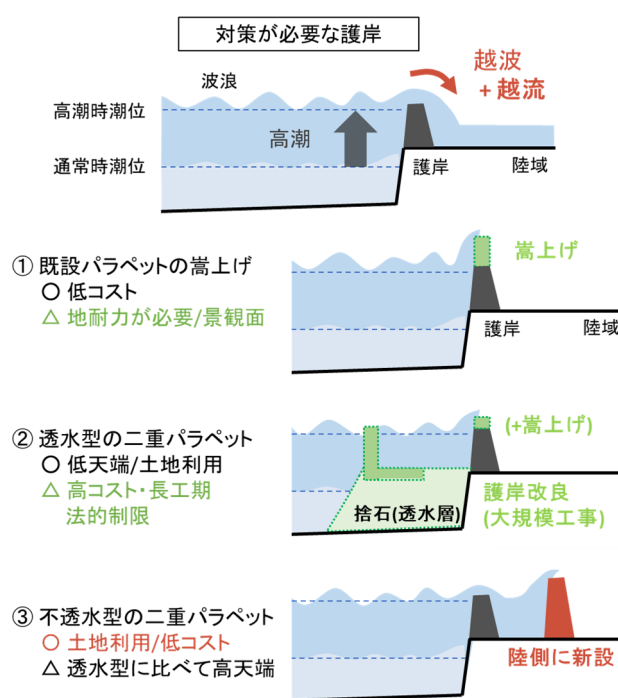


図-1 越波越流量に対する対策工の種類と特徴

Fig.1 Characteristic of countermeasures to reduce overtopping-overflow discharge

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

な場合に、越波浸水対策として陸側にパラペットを新設する③不透水型の二重パラペット護岸（以降、単に二重パラペット護岸とする）について検討する。

1.2 本研究の目的

二重パラペット護岸の越波流量 q_2 （以降、二重パラペット越波流量）に関するパラメータは図-2 に示す通りであり、入射波高 H_0 や波長 L_0 等の波浪条件に加え、護岸前面の水深 h 、海底勾配 i 、前後パラペットの天端高 h_f, h_b および間隔 l 、掘込深 d 等が越波流量に影響していると考えられる。

既設パラペットのみの場合、越波流量 q_1 （以降、既設パラペット越波流量）は、波浪条件と堤前水深、既設パラペット天端高等によって推定可能であり、算定手法が各種提案されている^{7),8),9)}。しかし、二重パラペット護岸のパラメータと越波流量の定量的関係を詳細に分析した既往研究はなく、二重パラペット越波流量の評価式は確立されていない。このため、越波・越流に対する適応策として二重パラペット護岸を検討する場合には、多数のパラメータに対して越波流量を評価する必要があり、現状では、様々なパラメータに対して水理実験や数値解析を実施する必要がある。

本研究では、各パラメータと二重パラペット越波流量の定量的関係を把握し、二重パラペット護岸のパラメ

ータ決定を容易にすることを目的とし、水理実験を行った。また、OpenFOAM を用いた数値実験を行うことで、水理実験よりも広範な条件に対して、二重パラペット越波流量を算定し、その推定式について検討を行った。

2. 水理実験

2.1 実験方法

本実験では、想定模型縮尺 1/20 で幅 80 cm の二次元長水槽（図-3）を用いて、二重のパラペットを配置した直立護岸に対する越波流量の測定を行った。1/30 勾配の海底地形と二重パラペット護岸の模型を製作し、護岸前面の水深は 15 cm で一定とした。造波はフラップ式造波装置を用いて行い、造波位置の水深は 50 cm とした。越波流量は後側パラペットの背後に集水した水量を計測時間で割ることで算出した。また、測定時間前に集水部分に水が流入しないように、後側パラペットの上部にゲートを設け、測定開始と終了によって開閉が可能となる設計とした。

実験ケースを表-1 に示す。入射波は規則波とし、波高 1 種類、周期 2 種類の検討を行った。集水可能な容

表-1 実験条件およびケース

Table 1 Experimental conditions and cases

地形	縮尺	1/20
	海底勾配 i	1/30
	堤前水深 h [mm]	150
規則波	測定波数	5~15波
	波高 H [mm]	100
	周期 T [s]	1.3, 1.8
二重パラペット	前側パラペット天端高 h_f [mm]	0, 30, 50
	後側パラペット天端高 h_b [mm]	30, 50, 100, 200, 300
	パラペット間隔 l [mm]	100, 300
	掘込深 d [mm]	50
単独パラペット	天端高 h_c [mm]	30, 50, 100, 200, 300

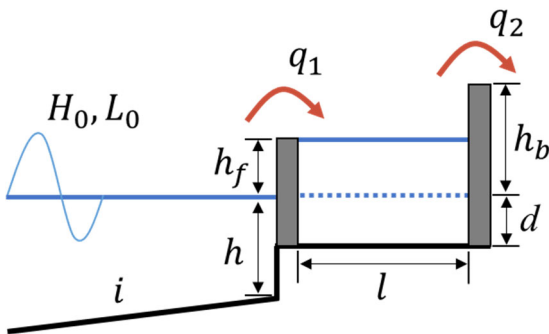


図-2 二重パラペット護岸のパラメータ

Fig.2 Parameters of the double parapet seawall

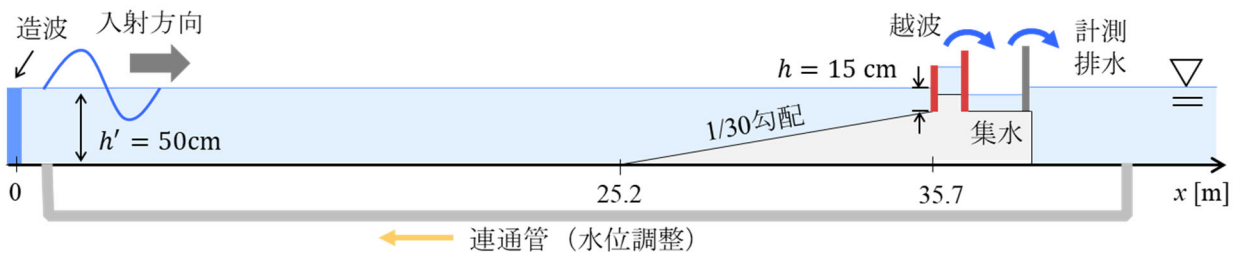


図-3 実験模型全体の断面概略図

Fig.3 Schematic view of experimental set-up

量に限りがあるため、越波流量によって5~15波の範囲で計測対象波数を変え、計測時間(入射波の周期×波数)と総流量をもとに越波流量を算出した。なおここに示した波高は、5章を除き、本実験に先立ち実施した水深 $h' = 15 \text{ cm}$ の一様水深における入射波検定での波高であり、地形模型上での波高ではない。また、5章の二重パラペット越波流量の推定においては、換算沖波波高を用いている。

護岸形状に関連するパラメタとしては、前側パラペットは0, 30, 50 mmの3ケース、後側パラペットは30~300 mmのうち5ケース、パラペット間隔は100, 300 mmの2ケースを検討した。護岸前面水深 h や堀込深 d も越波流量に対して影響すると考えられるが、その他のパラメタに対する越波特性の把握を優先したため、今回の実験では一定値とした。また比較のため、単独パラペットケースも天端高30~300 mmを対象として5ケース実施した。

2.2 計測結果

図-4は護岸周辺の越波状況を示しており、(a)、(b)はパラペット間隔のみが異なるケースであり、それぞれ100 mm, 300 mmである。その他のパラメタ条件については図中に示した。図中の左から波を入射し、後側パラペットの背後に越波している。 $l = 100 \text{ mm}$ の場合は、前側パラペットを越波した水は流速を保ちながら後側パラペットを越波していた。一方 $l = 300 \text{ mm}$ の場合は、一度パラペット間で水の流れる方向が変わることで陸側パラペットを通過する水の流速は小さくなっており、越波流量は半分程度にまで低減した。このようにパラペット間隔の違いによって越波流量が大きく異なることがわかる。

図-5は後側パラペット天端高と越波流量の関係を、波の種類ごとに示したものである。色はパラペット間隔を、マークは前側パラペット天端高を表し、黒破線は後側パラペットと同じ天端高の単独パラペットの結果である。ほとんどのケースで、単独パラペットよりも越波流量は小さくなっており、二重パラペットとすることによる越波流量低減効果が確認できる。後側パラペット天端高が高いほど越波流量は低減し、前述の通りパラペット間隔も大きい方が越波流量が低減する傾向にある。前側パラペット天端高の影響は様々であり、パラペット間隔が小さい場合には、前側パラペット天端高が大きい方が、越波流量が増大する傾向にある。逆に、前側パラペットが高い方が越波流量が低減するケースもあり、二重パラペットの越波流量を検討する際には、各パラメタを組み合わせる必要

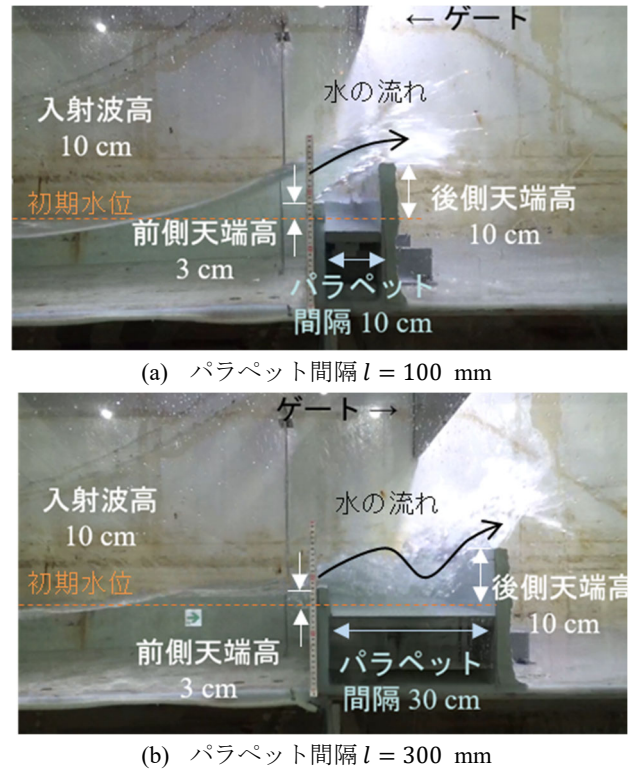


図-4 水理実験状況(護岸周辺)

Fig.4 Experimental situation around the seawall model

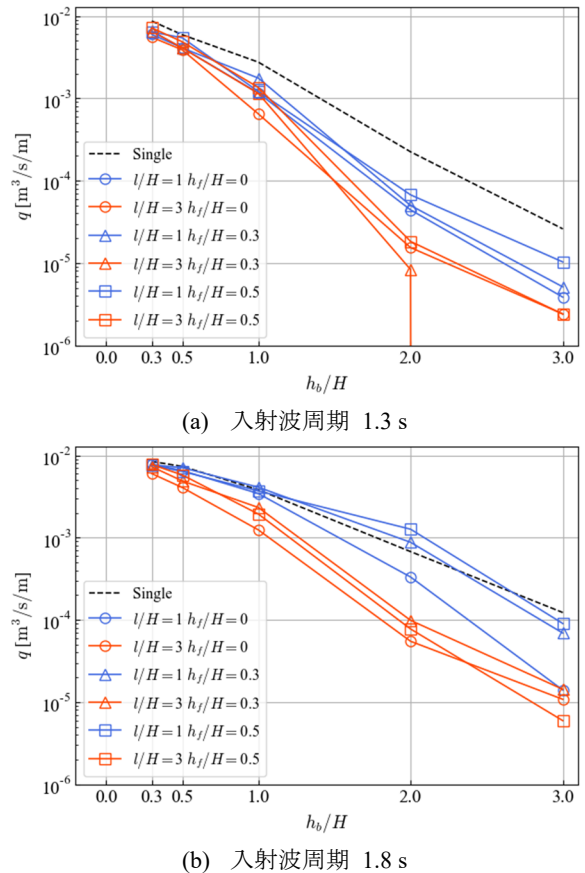


図-5 後側パラペット高と越波流量の関係(水理実験)
Fig.5 Relation of landward parapet height and discharge in hydraulic experiments

または6mの間隔で設置したケースを示す。図-7(d)は、(c)と同一の護岸条件で入射波高を4.0mとしたケースである。各図は、越波流量が最大となる時間の状況を示しているが、二重パラペットによって越波流量が低減していること、パラペット間隔が大きい方が越波流量は低減することがわかる。また、本計算条件である水深 $h = 3.0\text{ m}$ では、波高4.0mの入射波は砕波するため、越波流量はあまり大きくない。

図-8は、図-5と同様に、後側パラペット天端高と越波流量の関係を示したものである。黒破線は後側パラペットと同じ天端高の単独パラペットの場合($h_c = h_b$)の越波流量を示しており、水理実験と同様に、単独パラペットの場合よりも二重パラペットによって越波流量は低減し、後側パラペット天端高が高いほど越波流量は小さくなる。パラペット間隔は大きい方が、越波流量は低減する傾向にあるが、パラペット天端高が小さい場合に、その関係が逆転している部分がある。これらの越波特性は、概ね水理実験結果と一致しており、各パラメータと越波流量の関係については、複数のパラ

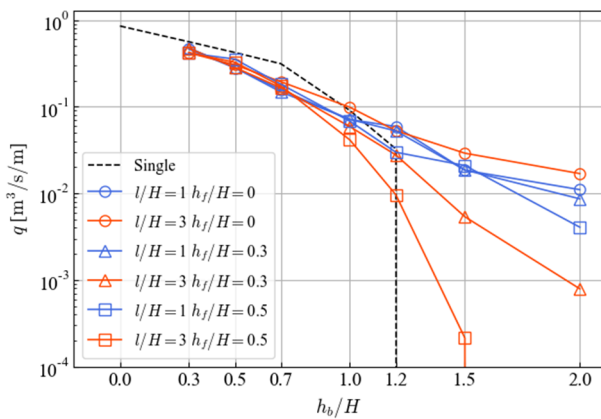
メタを組み合わせる必要があることが、数値実験によっても示された。

4. 二重パラペット越波流量の推定式

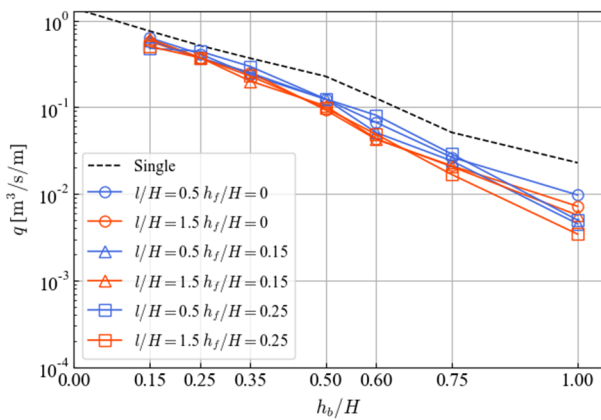
水理実験(図-5)と数値実験(図-8)の結果より、二重パラペット護岸における越波流量と各パラメータの定性的関係を把握した。基本的には、後側パラペット天端高が高いほど、パラペット間隔が大きいほど越波流量は小さくなることがわかった。前側パラペットは、あまり大きな影響はないものの、実験条件によっては大きく越波流量に影響するため、後側パラペット天端高との関係を考慮する必要がある。

上記の特性を考慮して、二重パラペット越波流量の推定式について検討する。二重パラペット護岸を通過する越波流量については、図-2で示したように、既設パラペット越波流量 q_1 に対し、後側パラペットの存在によって q_2 まで低減すると考えることができる。越波流量の低減については、前後のパラペット天端高やパラペット間隔の他、入射波諸元が関係すると考えられる。ここでは、実験縮尺等の影響を除くため、入射波高で無次元化した無次元越波流量 $q^* = q/\sqrt{gH^3}$ によって評価する。また、既設護岸に対する二重パラペット越波流量の低減を越波流量低減率 q_2^*/q_1^* として評価する。

図-9は、越波低減率と、二重パラペット護岸および入射波に関する無次元パラメータの関係を示したものである。縦軸は越波低減率の対数であり、横軸は無次元パラメータである。無次元パラメータは、沖波波高に対す



(a) $H = 2.0\text{ m} \cdot T = 8.0\text{ s}$



(b) $H = 4.0\text{ m} \cdot T = 8.0\text{ s}$

図-8 後側パラペット高と越波流量の関係 (数値実験)

Fig.8 Relation of landward parapet height and discharge in numerical experiment

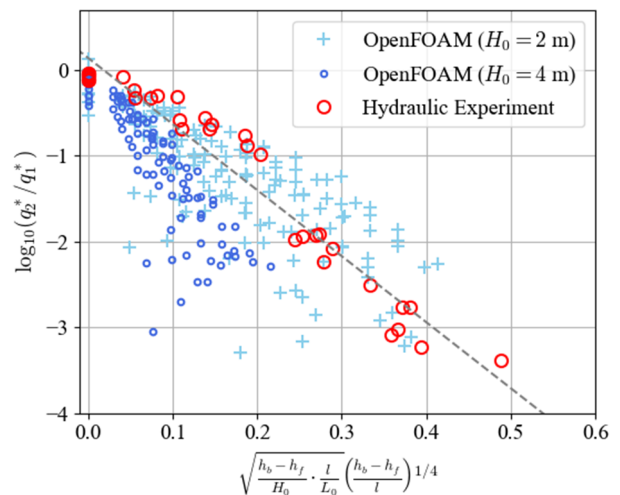


図-9 護岸に関する無次元量と越波低減率

Fig.9 Relation of decreasing rate of overtopping discharge and dimensionless quantity on wave and seawall

る前後パラペット天端の高低差の比，沖波波長に対するパラペット間隔の比，およびパラペット間隔に対するパラペット天端高低差の比の3要素で構成されている。水理実験結果（規則波）を見ると，無次元パラメータと越波低減率は概ね比例関係にあり，次のような関係式によって表すことが可能と考えられる。

$$\log_{10}\left(\frac{q_2^*}{q_1^*}\right) = \alpha \sqrt{\frac{h_b - h_f}{H'_0} \cdot \frac{l}{L_0} \left(\frac{h_b - h_f}{l}\right)^{1/4}} + \beta \quad (1)$$

ここで， α ， β は比例定数である。前述の通り， q_1^* は各種の手法によって推定可能であるため，本式と併用することで，不透水型二重パラペット護岸の諸元を設定することができる。規則波の水理実験結果より推定した場合， $\alpha = -7.41$ ， $\beta = 0.13$ となった。数値実験結果のなかで，波高4mの結果は，推定式に対してやや下方に外れている。波高4mのケースでは護岸前面で碎波していることを確認しているが，本推定式では沖波で評価したため，これを考慮できていないためと考えられる。このように，護岸前面で碎波が生じる場合の取り扱いについては，今後継続して検討を行う予定である。また本検討では，護岸前面水深や海底勾配，掘込深等，パラメータのケース数が十分とはいえず，さらに不規則波に対して係数値の適用可否を確認する必要がある。一方で，今回の検討ケースに対しては水理実験結果を概略再現することができており，二重パラペット護岸の設計時，必要天端高や間隔の設定のために活用可能と考える。

5. 二重パラペット越波流量の推定式を用いた検討例

ここでは，仮想的な護岸および高潮条件に対する越波流量低減方法として二重パラペットを施工する場合を想定し，後側パラペットの必要な高さおよび位置を提案式を用いて検討するケーススタディを実施する。検討条件を図-10および表-3に示す。ここで仮定した高潮偏差，波浪，既設パラペット天端高等の条件から，想定される越波流量を高山ら⁷⁾の推定式によって求めると， $q_1 = 0.0472 \text{ [m}^3/\text{s/m]}$ となる。港湾基準¹⁰⁾では，重要地区に対する許容越波流量として， $q_2 = 0.02 \text{ m}^3/\text{s/m}$ を定めており，これを二重パラペット設置後の目標越波流量とする。このとき，越波流量低減率は $\log_{10}(q_2/q_1) = -0.373$ となる。

二重パラペット越波流量の推定式(1)は，以下のように変形可能である。

$$h_b = \left\{ \beta - \log_{10}\left(\frac{q_2}{q_1}\right) \right\}^{4/3} (H'_0 L_0)^{2/3} \{(-\alpha)^4 l\}^{-1/3} + h_f \quad (2)$$

上式に，与条件 $H'_0 = 3.0 \text{ m}$ ， $T_0 = 10 \text{ s}$ から求めた $L_0 = 156.0 \text{ m}$ ，および $\alpha = -7.41$ ， $\beta = 0.13$ ，越波流量低減率 -0.373 を代入すると，下記のように後側パラペットの必要高さを求めることができる。後側パラペットの高さは，前後パラペットの間隔との関係式として求められる，パラペット間隔 $l = 3, 5, 10 \text{ m}$ の場合，表-4のようになる。

前後パラペット間隔を3mとすれば，後側パラペット高は2.16m必要であるが，パラペット間を10mとすることで，後側パラペットの天端高を40cm程度小さ

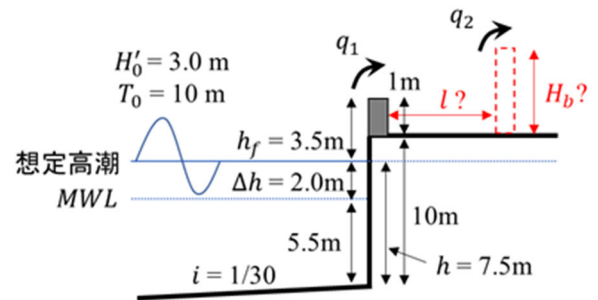


図-10 ケーススタディの波浪・護岸条件

Fig.10 Wave and seawall parameters in the case study

表-3 ケーススタディの波浪・護岸条件

Table 3 Wave and seawall parameters in the case study

換算沖波波高 H'_0 [m]	3.0
沖波周期 T_0 [s]	10.0
想定高潮偏差 Δh [m]	2.0
既設パラペット天端高 h_f [m]	3.5
護岸前面水深 h [m]	7.5
海底勾配 i [-]	1/30
越波流量（対策前） q_1 [$\text{m}^3/\text{s/m}$]	0.047
許容越波流量 q_2 [$\text{m}^3/\text{s/m}$]	0.020

表-4 ケーススタディの結果

Table 4 Results of the case study

パラペット間隔 l [m]	後側パラペットの必要高 H_b [m]
3.0	2.16
5.0	1.98
10.0	1.77

くすることができる。このように、二重パラペット越波流量の推定式を用いることで、想定される越波・越流のリスクに対し、新設する後側パラペットの高さおよび位置を推定することができる。

6. 結論

本研究では、水理模型実験および OpenFOAM を用いた数値実験によって、高潮浸水に対して比較的簡易に対策可能な不透水型二重パラペット護岸の越波流量について検討を行った。実験結果より、越波流量低減に対する有効性を示すとともに、越波流量低減のためには、前後パラペットの天端高や間隔等の複数のパラメタの組み合わせを考慮する必要があることを示し、波浪や護岸諸元を用いて二重パラペット越波流量を算定可能な実験式を提案した。また、既設護岸において想定される越波・越流リスクに対して二重パラペット護岸を検討する場合に、新設する後側パラペットの位置および必要高さを簡単に推定できる手順を示した。本研究では、堤前水深や掘込深等の一部パラメタは一定値としたためさらなる検討が必要であるが、二重パラペット護岸の設計に資する有用な成果が得られた。

参考文献

- 1) 千綿蒔, 羽角華奈子, 織田幸伸, 伊藤一教: 高潮浸水評価の高精度化に関する研究, 越波・越流による護岸通過流量の数値実験, 大成建設技術センター報, No.53, 2020.
- 2) 千綿蒔, 織田幸伸, 橋本貴之: 高潮浸水評価の高精度化に関する研究, 越波・越流による護岸通過流量及び浸水位に関する水理実験, 大成建設技術センター報, No.54, 2021.
- 3) 平石哲也・南靖彦・長谷川巖: 越波吸収型護岸による海上空港の越波対策, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.741-745, 2007.
- 4) 梅崎康浩・小島治幸・南正治・鬼童孝・白井博巳・笹井剛・石本健治・松原弘晃: 二重パラペット型護岸(透水性)に対する数値波動水路と水理模型実験を用いた効果的な設計に関する考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_741-I_745, 2012.
- 5) 長澤大次郎・岸良安治・高山知司・梅崎康浩・久米英輝: 透水性二重護岸の越波特性の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_691-I_695, 2011.
- 6) 長澤大次郎・高山知司・久保田進: 透水性二重護岸による護岸改良の各種海岸への適用法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_1141-I_1146, 2015.
- 7) 高山知司, 永井紀彦, 西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, Vol.21, No.2, pp.151-205, 1982.
- 8) 間瀬肇, 金洙列, 由比政年, 武田将英, 榎田真也, 川崎浩司, 松下紘資: フルスケール実験に基づく越波・越流遷移モデルと高波・高潮浸水シミュレーションへの実装, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.76, No.1, pp.7-19, 2020.
- 9) 合田良美・岸良安治・神山豊: 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, Vol.14, No.4, pp.3-44, 1975.
- 10) 公益社団法人 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻), p.176, 2018.