

越波吸収型護岸の越波量低減効果に関する模型実験

Experiment on Reduction of wave Overtopping Rate by Seawall with Double Parapet and Permeable Layer

齋藤英治¹・平石哲也²・稲垣茂樹³

Eiji SAITOH, Tetsuya HIRAISHI, Shigeki INAGAKI

Several offshore airports in the Japanese coasts are often damaged these days by the wave overtopping due to storm s. One of the problems in such offshore airports is the limitation of seawall crown height derived from the width, height and distance of runway. Minami et al. (2007) have proposed a new type seawall with a wide permeable layer behind the front parapet to reduce the wave overtopping rate. In this paper, an experiment in a directional wave basin is carried out to determine the most appropriate width of permeable layer and height of its backward parapet. The experimental results reveal that the wave overtopping rate becomes smaller than the allowable level as the permeable layer becomes wider than 6m. The backward parapet has to be higher than 2.5m to prevent the overflow into runways.

1. はじめに

近年、台風の大型化および海上空港の沖合展開化に際し、海上空港では高潮・高波による越波の影響で場周道路や護岸のり面の破壊および浸水被害が発生し、航空便の欠航による利用者への影響や電気室等空港施設の機能障害などの経済的な損失が生じている。

このような海上空港では、事前に模型実験や合田の越波算定図(合田ら, 1975)から、越波流量が局所的に大きくなる場所を把握し、越波流量が許容値以下になるように、空港護岸の天端高を決定する方法が対策の一つと考えられる。しかし沖合に位置する海上空港では、護岸の安定性を高めるために護岸の海側マウンド幅が長く、護岸前面は複雑な地形になりやすいため、越波算定図から簡単に越波流量を算出できない。また、空港護岸は航空機の離発着の障害にならないように、滑走路面を基準とした高さ制限(転移表面)を受けているので、越波を防止するために単に嵩上げすることが困難という問題がある。

護岸の天端高が限られた低天端の護岸に対して、越波量を低減できるタイプの検討は高山ら(1992)によりなされている。検討の結果、緩傾斜護岸で透水性を有するタイプの効果が高いことが判っている。そこで、南ら(2007)は、高さと前面海域への拡張に制限がある海上空港護岸に透水機能を付加できる新しい越波対策護岸として、2重の胸壁と碎石を有する排水路において、越波した水塊を処理する越波対策護岸(以下「越波吸収型護岸」という)を提案した(図-1)。図中の二重胸壁のう

ち、海側に位置するものを「前壁」、陸側に位置するものを「後壁」とする。そして平面模型実験によって、越波流量を測定し、直立護岸や単一壁の緩傾斜護岸と比較して、越波低減効果の検討を行った。ただし、この実験では、現場への適用性はまだ考慮されておらず、排水溝の幅や排水溝後壁の高さについては、どのような幅、高さが最適であるかは確認されていなかった。

本研究では、現場での越波吸収型護岸の設計を進めるために、平面模型実験により最適な排水溝の幅や排水溝の後壁高さについて検討することとした。検討にあたっては、比較のため通常の直立護岸についても実験を行った。また、近年、早急な対策が必要と考えられている津波に対する効果を検討するために、周期が数十秒と長い波が越波吸収型護岸に与える影響について検証実験を行った。なお、越波吸収型護岸を採用すると、数m幅の排水路が必要になり、現在の空港ではこの区間の利用が制限される。将来は空港の場周道路を透水性の舗装路に改良することで、越波吸収が可能となる可能性もあり、ここでは今後の越波対策として活用できる手法の1つとして越波吸収型護岸を位置付けている。

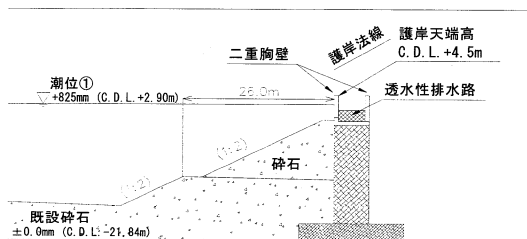


図-1 越波吸収型護岸イメージ

2. 不規則波浪による越波実験

(1) 実験条件

実験に使用した水槽は、幅48m、長さ25m、深さ2mの

1 (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 正会員 博(工)(独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部長
3 (株)エコー 防災・水工部

平面水槽で、長短2側壁に沿って、幅50cmのピストン型造波機100台が設置された2面式の多方向不規則波造波水槽である。ここでは、斜め方向へ進む規則波（斜め波）、斜め方向へ進む一方方向不規則波および多方向不規則波を造波することができる（Hiraishi, 2002）。実験の対象とした護岸は、南ら（2007）の実験と同じ関西国際空港2期島D1護岸（400m：現地量）とD2護岸（700m：現地量）およびこれらの前面マウンドとした。模型縮尺は1/30とした。また、造波機の位置関係から、現地とは東西を反転させた地形を水槽に再現した（図-2）。

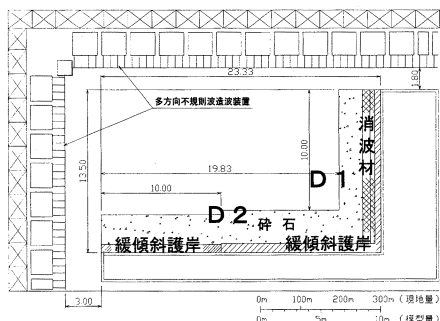


図-2 実験模型配置図

(2) 越波実験方法

実験で対象とした波浪の概要は、表-1のとおりであり、高波浪を想定した不規則波と津波を想定した規則波の2種類とした。不規則波実験の波浪は設計波相当を対象とし、潮位条件はC.D.L.+2.9mとした。この潮位条件は、南ら（2007）が実施した実験の潮位条件2種類（2.0m, 2.9m）のうち、高い側の条件であり、波高2.0m、周期7.0sの波に対する直立護岸背後での越波流量が0.05m³/s程度となると見込まれる潮位条件である。波種類は、一方方向不規則波を3波向（0°, 30°, 45°）と多方向不規則波2波向（0°, 30°）とした。波の入射角0°については、設計波の2割増しの波高も設定した。不規則波の実験波数は約250波、波群は2種類とした。一方、津波を再現するためには長大なストロークが必要となるので、ここでは

表-1 波浪条件

波種類	入射角	区分	諸元	波群
不規則波	0° 30° 45°	設計波相当	$H_{1/3}=2.0\text{m}, T_{1/3}=7.0\text{s}$ ($H/L_{1/3}=0.026$)	2種類
		設計波割増	$H_{1/3}=2.4\text{m}, T_{1/3}=7.0\text{s}$ ($H/L_{1/3}=0.031$)	
		条件1	$\eta_{\max}=2.0\text{m}, T=21.9\text{s}$	
規則波	0°	条件2	$\eta_{\max}=4.0\text{m}, T=21.9\text{s}$	—

注1) 多方向波の方向集中度 $S_{\max}$ は25とした。

注2) 入射角45°は一方方向不規則波のみで実施した。

注3) 不規則波の設計波割増条件については、入射角0°のみで実施した。

注4) 規則波の諸元 $\eta_{\max}$ は津波高であり、静水面から波頂までの高さを表している。

水槽で造波できる最長の波として、津波を模擬した長周期の規則波を設定している。規則波の諸元は2種類とし、入射角は0°の1種類とした。入射波の角度は、護岸に直角に入射する場合を0°として、直角から反時計方向に傾いた角度を示している。

越波吸収型護岸模型断面図を図-3に示す。本実験の主眼は排水溝幅と後壁高さの検討にあるため、後壁の設置位置を20cm間隔（現地量で6m）で3箇所に変えられる構造とした。これにより、後壁を設置しない直立護岸から、後壁設置位置に応じた排水溝幅の越波吸収型護岸までを水槽に再現可能とした。後壁高さについては、後壁の板材を2種類製作し、後壁の天端高を変更した実験も可能とした。排水溝内部に充填する砕石は、現場で使用する砕石を60cm～1m程度と想定し、1/30の模型粒径を2cm程度とした。なお、60cm～1mの砕石は、現在、横須賀市の馬堀海岸高潮対策護岸の透水層の表層に用いられており、高波に対しても安定した機能を表している。今までに吸い出し等の被害は生じていない（京浜港湾事務所, 2007）。砕石層上面の天端高はC.D.L.+1.83mとした。

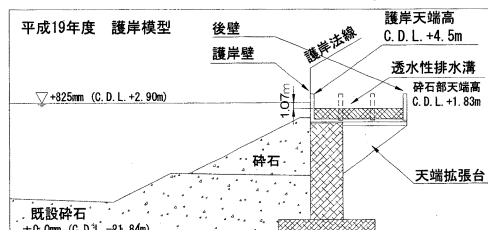


図-3 越波吸収型護岸模型断面図

実験ケースについては、排水溝幅を3種類と後壁高さ2種類を組み合わせた4断面と、比較のための直立護岸1断面の合計5断面で実施した。

越波流量は、不規則波の約250波を対象として計測した。このような長時間の計測では反射波の影響が現れるので、造波を開始した後に反射波が安定するのを待ってから250波程度の計測を行い、計測中は常に反射波が含まれる状態にした。なお、入射波高の特定には、Gunzら（1984）の線形長波理論による入・反射波分離解析を用いた。

造波開始から計測を開始するまでの3分間は、前面パラペット部に越波防止板を設置して護岸背後への越波を抑制し、造波開始3分後に越波防止板を除去すると同時に波浪データの計測を開始した。波浪データの計測は、時間間隔 Δt を0.04sとし、8192データの計測を行って計測波数が250波以上となるようにした。

実験における波浪データの計測位置は、図-4のとおりである。実験では、護岸模型を図-4に示す護岸法線の60m区間（模型量2m区間）に設置し、その中央6m区間

(模型量0.2m区間)を越波計測の対象とした。実験中に越波する水塊は、導水路を通じて越波箱に貯水させ、越波箱に溜まった水量を導水路の幅と越波計測時間で除して時間平均越波流量を求めた。また、越波箱の中の水位変化を容量式波高計で計測し、水位の時間変化から越波量の時間変化を求めるものとした。なお、越波吸収型護岸については、排水溝から流出する水を両端部に設置した別な越波箱に溜めて計測した。越波の時系列の測定において、直立護岸のケースは、護岸の直前に設置した容量式波高計により、前面水位が護岸の天端高を超えるかどうか確認することにより、越波が生じたかどうか判別することができる。なお、ここで言う「前面水位」とは二重胸壁前面護岸壁面の水位を指す。越波箱の中にも容量式波高計を設置して、流下水量の時間変化を把握できるようにした。入射波高は、波高計と流速計のデータを組み合わせて、Guzaら (1984) に従って、入反射波分離を行って計算している。

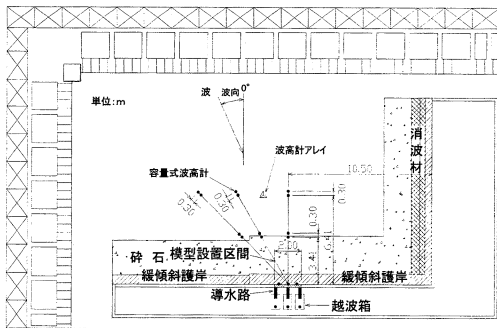
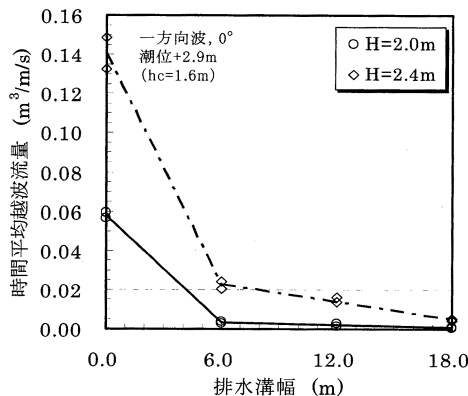


図-4 計測機器配置図

(3) 実験結果

まず、波の入射角 0° の一方向波に対して2種類の入射波高による実験結果を比較すると、後壁高さが低くなる



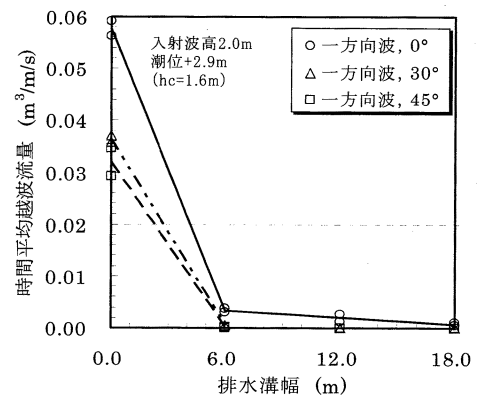
(1) 波高による変化

に従い、波高の違いによる越波流量の差が大きくなる傾向が認められた。入射角 0° の時間平均越波量は入射角 30° や 45° と比べて後壁高さの違いによる越波流量の差が大きい。これに対して入射角 30° や 45° では、後壁高さの違いによる時間平均越波流量の違いは小さい。

また、入射角 0° の多方向波に対して2種類の入射波高による実験結果を比較すると、後壁高さがC.D.L.+2.5m以下において波高の違いによる時間平均越波流量の違いは概ね一定となっていることがわかった。さらに、入射波高2.0mの波に対して、入射角 0° と入射角 30° の実験結果を比較すると、入射角 0° の時間平均越波流量は、入射角 30° と比べて、ほとんど変わらない結果となった。

これは、多方向波が方向分散性を有するため、今回の多方向波の方向集中度 $S_{max}=25$ では違いが表れなかったものと考えられる。

次に排水溝幅と時間平均越波流量の関係を図-5に示す。図には目安として時間平均越波流量 $0.02\text{m}^3/\text{m/s}$ を破線で示した。時間平均越波流量 $0.02\text{m}^3/\text{m/s}$ は、永井ら (1964) により示された背後地の重要度からみた許容越波流量の「その他の重要な地区」における許容越波流量に該当する。適用したデータは後壁高さがC.D.L.+4.5mのケースであり、直立護岸の実験結果は排水溝幅を0mとした。つまりこの条件の結果が天端高+4.5mの通常の直立護岸の結果となり、実験結果の比較対象の基準となる。図-5を見ると、排水溝幅6mで既に越波流量が急激に低減されていることがわかる。この結果は、排水溝を有する越波吸収型護岸の高い越波低減特性を示すものである。なお、図-5(1)は一方向波 0° における波高2.0m、2.4mの際の排水溝幅と時間平均越波流量の関係を表したグラフであり、図-5(2)は一方向波、波高2.0mにおける波高 0° 、 30° 、 45° の際の排水溝幅と時間平均越波流量の関係を表したグラフである。排水溝幅をさらに拡幅すると緩やか



(2) 波高を2mとした時の波向による変化

図-5 排水溝幅と時間平均越波流量の関係
(一方向不規則波 後壁+4.5m)

ではあるが越波流量がより低減されていることがわかる。

また、一方向不規則波、多方向不規則波とも直角入射 0° 方向からの波による時間平均越波流量が最も大きく、入射角が傾くに従い時間平均越波流量が小さくなる傾向が確認できた。ただし、多方向不規則波は波の方向分散性を有するため、一方向不規則波と比べて入射角の違いによる時間平均越波流量の違いが小さいことがわかった。

図-6は、越波吸収型護岸による時間平均越波流量と同一天端高の直立護岸による時間平均越波流量との比を表したものである。図を見ると、越波吸収型護岸は、直立護岸の時間平均越波流量を8割以上も低減させており、高い越波低減特性が示されている。

また、後壁高さと時間平均越波流量の関係についても整理を行った。結果は図-7のとおりである。図には、目安として時間平均越波流量 $0.02\text{m}^3/\text{m/s}$ を破線で示した。適用したデータは直立護岸のケースと排水溝幅が12mのケース（後壁+4.5m, +2.5m）であり、直立護岸の実験結果は背後の水叩き部の天端高（-0.12m）を後壁高さとして利用した。

図から波高2m以下であれば、後壁高さは2.5mで十分

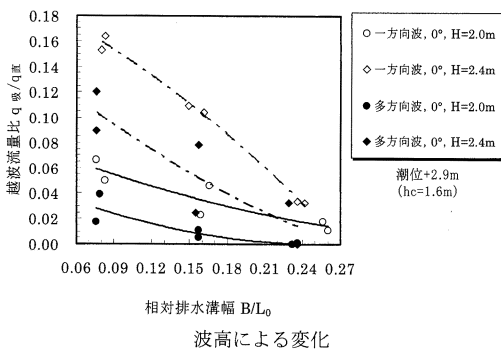


図-6 相対排水溝幅と越波流量比
(対直立護岸比 後壁+4.5m)

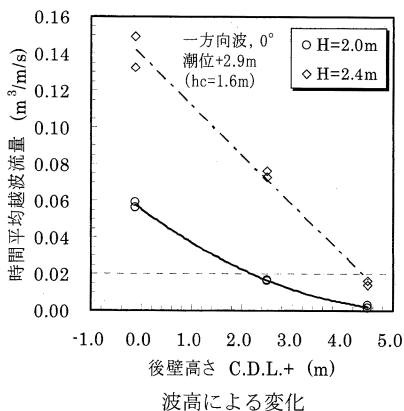


図-7 後壁高さと時間平均越波流量の関係
(一方向不規則波)

に越波を低減できていることがわかる。特に斜め入射波については、後壁高さが2m以上となると越波流量低減効果が顕著となる傾向が見られ、さらに排水溝幅との関係と同様に入射角が傾くに従い時間平均越波流量が緩やかではあるが、小さくなる傾向が見られる。

実験の結果より時間平均越波流量 q と短時間平均越波流量の最大値 $q_{\max}$ の比($q_{\max}/q$)について、全ての実験結果を用いて q と $q_{\max}/q$ の関係について示すと、図-8が得られる。図には目安として時間平均越波流量 $0.02\text{m}^3/\text{m/s}$ を破線で示した。図によると、例えば時間平均越波流量が $0.02\text{m}^3/\text{m/s}$ 程度の場合には、短時間平均越波流量の最大値 $q_{\max}$ は、時間平均越波流量 q の約18倍程度($0.36\text{m}^3/\text{m/s}$ 程度)となると試算される。つまり、瞬間的な越波流量は最大で平均越波流量の約18倍になる可能性があり、排水溝の能力が小さいと短時間で大量に流入する越波には対応できない場合も起こりうる。したがって、この数値は排水施設の短時間能力を検討するために有用である。

また、各実験ケースにおける入射角 0° の時の1波あたりの時間平均越波流量の出現率の整理を行った。その結果より以下のことがわかった。

①直立護岸のケースの入射角 $H_{1/3}=2.0\text{m}$ のケースでは、一方向波で作用波数の6割程度、多方向波で作用波数の4割程度が越波している。入射波高が $H_{1/3}=2.4\text{m}$ のケースになると、一方向波で作用波数の8割程度、多方向波で作用波数の6~7割程度が越波している。

②越波流量の出現率の分布形は、一方向波と多方向波で類似的傾向にある。

③入射波高が $H_{1/3}=2.0\text{m}$ から $H_{1/3}=2.4\text{m}$ になると、1波あたり 10^1 オーダーで越波出現率が上昇している。

④越波吸収型護岸のケースでは、直立護岸と比べて非越波となる割合が非常に大きく、作用波数の約7割以上の越波を抑制している。

⑤越波吸収型護岸における1波あたりの越波流量は、ほぼ 10^2 のオーダーでの出現率が大きい。

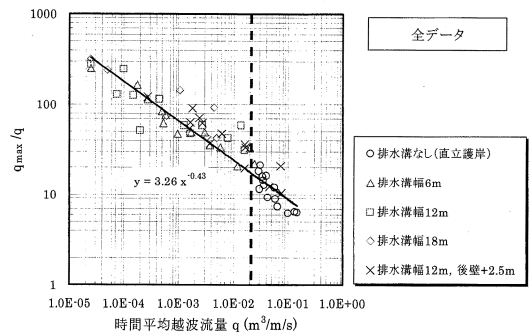


図-8 時間平均越波流量と短時間越波流量（最大値）の対数表示

3. 長周期規則波による越流実験

(1) 実験方法

津波を想定した規則波による越波実験では、データ収集は造波開始と同時に実施した。データの計測地点やデータ収集条件は、波浪実験と同様の条件とした。

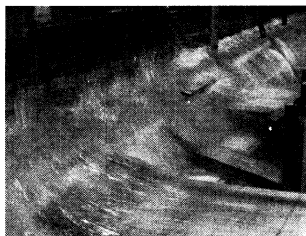


写真-1 越波の様子（規則波，周期 20 s，津波高 4 m）

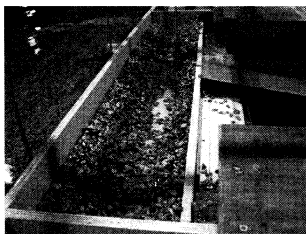
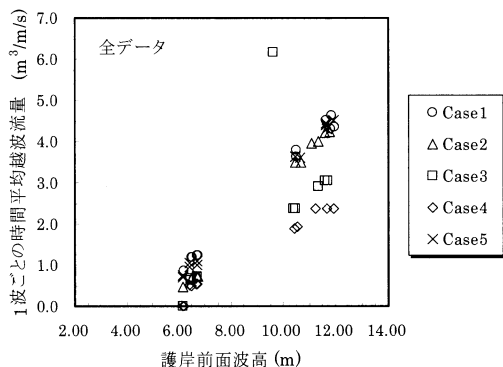


写真-2 石材飛散状況（規則波，周期 20 s，津波高 2 m）



注) Case1: 直立護岸

Case2: 越波吸収護岸, 排水溝幅 6m

Case3: 越波吸収護岸, 排水溝幅 12m

Case4: 越波吸収護岸, 排水溝幅 18m

Case5: 越波吸収護岸, 排水溝幅 12m, 後壁天端高+2.5m

図-9 護岸前面波高と1波ごとの時間平均越波流量の関係（長周期規則波）

(2) 越波実験結果

津波高2mでは、越波排水溝内へ大量の水塊が流れ込み、越波排水溝から跳ねた水塊が背後へ流れて行く。一方、津波高4mでは、護岸の天端高に対して前面水位が大きく立ち上がり、排水溝を乗り越えて越流していた。

波作用後における越波排水溝内の石材の飛散状況を調べたところ、津波高2m作用時では、石材の飛散状況が著しく、津波高4m作用時の石材は比較的安定していた。写真-1に、周期の長い波が排水溝を超える様子を示す。また、写真-2は、飛散した石材の様子である。

津波を想定した規則波実験における護岸前面波高と1波ごとの時間平均越波流量の関係を図-9に示す。図中の護岸前面波高6m付近のプロットは津波高2m、護岸前面波高12m付近のプロットが津波高4mの結果を示す。

図-9を見ると、越波流量は多いけれども、すべてのCaseで1波ごとの時間平均越波流量が直立護岸（Case1（○印））を下回っている。特に排水溝幅が18mのCase4（◇印）では、Case1に比べて越波流量は50%以下に小さくなっている。したがって、越波吸収型護岸では、このような周期の長い波に対しても一定の越波低減効果が期待できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、越波吸収型護岸の適用性を検証するため、排水溝の幅と後壁高さについて越波実験を行った。その結果、排水溝幅6mを境に越波流量が急激に減少していることから、本実験条件では排水溝幅は6mで越波を十分に防げると言える。

参考文献

- 京浜港湾事務所 (2007): 横須賀港馬堀海岸高潮対策事業の整備効果, 京浜港湾事務所ホームページ
<http://www.pa.ktr.mlit.go.jp/keihin/event/news/news033/index.pdf>
- 合田良美・岸良安治・神山 豊 (1975): 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.4-44
- 高山知司・池田直太・立石義博 (1992): 新しい護岸構造による越波流量低減効果, 港湾技研資料, No.736, 88p.
- 永井荘七郎・高田 彰 (1964): 海岸堤防の越波に及ぼす消波堤の効果, 第11回海岸工学講演会講演集, pp.279-286.
- 南 靖彦・平石哲也 (2007): 空港島護岸の越波流量低減法に関する模型実験, 港湾空港技術研究所資料, No.1158, 21p.
- Guza, R.T., E.B. Thornton and R.A. Holman (1984): Swash on Steep and shallow beaches, Proc. 19th international Conference of Coastal Engineering, Vol.1, 99, pp.708-723
- Hiraiishi T. (2002): Wave transformation in multi-face current generation basin, Proc. 12th International Polar and Offshore Engineering Conference, pp.167-172