

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1158      June 2007

空港島護岸の越波量低減法に関する模型実験

南 靖彦

平石 哲也

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 隅角部を含む護岸の越波特性（実験①） .....	5
2.1 実験装置・模型の構成 .....	5
2.2 実験条件 .....	10
2.3 実験結果と考察 .....	12
3. 越波対策護岸による越波低減効果（実験②） .....	14
3.1 実験装置・模型の構成 .....	14
3.2 実験条件 .....	17
3.3 実験結果と考察 .....	18
4. まとめ .....	19
参考文献 .....	20
主要記号表 .....	21

# Experiments on Wave Overtopping Mitigation in Maritime Airport Seawall

Yasuhiko MIMANI\*  
Tetsuya HIRAISHI\*\*

## Synopsis

Wave overtopping due to storms sometimes causes heavy inundation damage in an offshore airport surrounded with the sea. In the initial design stage, the wave overtopping rate is calculated and the countermeasures are considered. However, the wave overtopping rate is significantly changed by the local sea bed topography and the type and location of the seawall. Especially the rectangular corner part is risky for wave overtopping because the wave height may become larger than that at the other straight parts.

In this paper the variation of wave overtopping rate along the seawall line including a corner part is studied in an experimental basin with a directional wave maker. In the later part of the paper, the countermeasures to reduce wave overtopping at the seawall are discussed. A seawall equipped with a wave absorbing zone behind it, is proposed for the airport seawall and is investigated experimentally.

Experimental results demonstrate the wave overtopping rate becomes remarkably small for the seawall attached with the wave absorbing backward zone.

**Key Words:** offshore airport, directional wave experiment, wave overtopping rate, seawall

---

\* Member, Wave Division, Maritime Environment and Engineering Department

\*\* Head, Wave Division, Maritime Environment and Engineering Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-8445042 Fax : +81-46-8443888 e-mail:hiraishi@pari.go.jp

# 空港島護岸の越波量低減法に関する模型実験

南 靖彦\*  
平石 哲也\*\*

## 要 旨

近年、台風の大規模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生じており、航空便の欠航による利用者への影響や電気室などの空港施設の機能障害などの経済的な損失を生じさせている。このように空港全体を海で囲まれた海上空港の越波対策を効果的かつ経済的に実施するには、まず、空港島に入射する波の諸元を把握し、それに対し、局所的に越波流量が大きくなる場所の把握すること、さらに、護岸の天端高さに制限がある空港護岸にどのような越波対策をするかが重要である。本研究では、まず実際に 2004 年台風 16 号で越波災害のあった関西国際空港を対象モデルとして、これまで事例が無い、空港の隅角部を含む広い範囲を再現した平面模型実験を行い、護岸の構造を直立護岸、緩傾斜護岸、消波ブロック護岸とした場合について、それぞれタイプ別の越波特性について調べた。さらに、越波対策護岸として越波量の低減を図るとともに、水たたきによる越波水の跳ね上がり低減効果のある新しい護岸構造を考案し、各種タイプの護岸との越波流量の比較を行い、構造的な特徴による越波量低減効果について検討した。また、海上空港は陸地に近い浅海域のみならず、沖合にも位置するので、実際の沖合で起こりえる多方向不規則波と浅海域で生じる一方向不規則波を作用させて越波量の比較を行い、各種護岸における波の多方向性の影響についても調べた。

得られた主要な結論は以下の通りである。(1)越波流量が最も多くなる場所は直立護岸では護岸の隅角部であり、緩傾斜護岸および、消波護岸では護岸の隅角部から離れた場所であった。(2)実験値の平均越波流量と越波推定式から算定した平均越波流量を比較すると、直立護岸では両者の結果は非常によくあっていたが、緩傾斜護岸および、消波護岸では、隅角部に近くなるにつれてその差が大きく、隅角部ではその差が最大であった。(3)直立護岸では入射する波の角度の違いによる越波流量の差は小さかったが、緩傾斜護岸と消波ブロック護岸では波の入射角による越波流量の差が顕著に表れた。(4)越波対策護岸として最も効果があった護岸は護岸背後に碎石（水たたきによる跳ね上がり低減用）が入った排水路を有する“越波吸収護岸”であり、直立護岸と比べて越波流量が約1/100程度に小さくなり、越波低減効果が確認できた。(5)越波吸収護岸では相対天端高 ( $h_c/H_0$ ) が1.0未満の低い場合に対しても著しい越波低減効果があることが確認され、護岸天端高の制限がある空港において、背後地に余裕がある場合には望ましい形式と考えられた。(6)波の方向分散性による越波量への影響は、特に越波吸収型などの対策を施した護岸では低潮位の場合に現れ、同一の入射波高に対して、多方向の場合には著しく越波流量が低下する。

キーワード：越波，天端高，越波対策護岸，平面模型実験，越波吸収護岸，多方向不規則波

---

\* 海洋・水工部 波浪研究室

\*\* 海洋・水工部 波浪研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1

電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:hiraishi@phri.go.jp

## 1. まえがき

近年、台風の大規模化および海上空港の沖合展開化に際し、空港全体を海に囲まれた海上空港では、多くの方向から高潮・高波の影響を強く受けるため、空港島への越波による被災が全国の海上空港で多発し、航空便の欠航による利用客への影響や地下の電気室への浸水など経済的な損失が生じている。なかでも関西国際空港では2004年、台風16号の来襲時に、関西国際空港用地造成会社が所有する波浪観測所（MT局）において既往1位の最大有義波高と既往2位の潮位がほぼ同時刻に観測され、主に図-1に示す範囲（被災箇所として太い白実線で示す）でセキュリティーフェンス倒壊、場周道路陥没、浸水被害が生じた。被災状況を写真-1に示す。このときの主波向は図-1に示すように、ほぼ南向きであった。

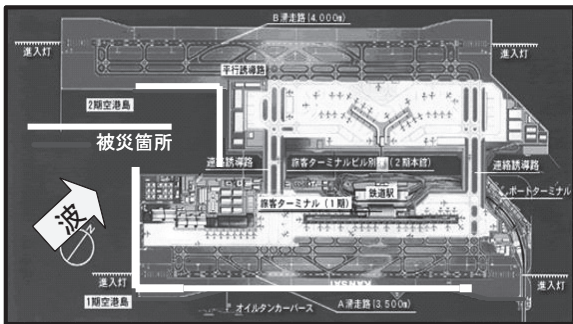


図-1 平成16年 台風16号 関西国際空港被災位置



写真-1 被災状況

このような海上空港での越波による被災に対して効率的かつ経済的な対策を実施するには、事前に模型実験や合田の越波算定図（合田ら，1975）から対象となる空港において越波流量が局所的に大きくなる場所を把握し、許容の越波流量以下になるよう空港護岸の天端高を決定する方法が対策として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、護岸の海側のマウンド幅が長く、さらに護岸前面でマウンドの高さが高くなっていることが多く、護岸前面は複雑な地形になりやすい。また、海上空港では、形状が関西国際空港二期島のように、沿い波によって波が収斂し、波高が大きくなりやすい隅角部を有する形状の空港が多いため、これらの複雑な地形や配置を有する護岸を対象とする場合においては従来の越波推定図から越波量を推定することは難しい。このように複雑な断面を有する護岸の越波を検討する場合は、二次元水路を使い、外力として一方向不規則波を模型護岸に作用させて、越波の検討をしてきた事例がこれまでに多い（高山ら，1982）。しかし、沖合の海上空港周囲に来襲している波は多方向不規則波である。単純な直立護岸に対して、多方向不規則波の影響を調べた実験例（平石ら，1996）はあるものの、隅角部を含むような平面地形を考慮した護岸模型を対象として、沖合で発生するような多方向不規則波を与え、その時の越波特性を検討した平面模型実験の事例はない。

さらに、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、越波を抑止するために単純に嵩上げすることが困難といった問題がある。護岸の天端高に限られた低天端型の護岸に対して、越波量を低減できるタイプの検討は高山ら（1992）により検討されているが、このとき検討した護岸とは異なる新しいタイプの越波対策を施した護岸については知見が少ない。また、それらに対して波の多方向性の影響を検討した例はない。

そこで、本研究では、実際に越波被災があった関西国際空港を対象モデルとし、沖合の多方向不規則波を再現できる平面水槽を使って越波対策に関する平面模型実験を行った。まず実験①として、関西空港2期島南西岸の護岸を含む広い範囲で地形を再現した。そして護岸の形状を直立護岸、緩傾斜護岸および消波ブロックで被覆した“消波ブロック護岸”について、越波特性を調べ、前述の越波算定図（合田ら，1975）との比較を行った。

消波ブロック護岸以外の越波流量を低減するための越波対策護岸としては、各種の形状が提案されている。たとえば、護岸上部にスリット壁を設けて波力を増大させずに背後への越流を抑止する“上部スリット式護岸”（北野ら，2001）が海岸に立地する火力発電所で検討されている。また、井上ら（1991）は緩傾斜護岸を透水性として波のはい上がりを防いで越波流量を低減させている。後退パラペット護岸（合田ら，1976）は、護岸のパラペットを背後へ設けることにより越波流量を低減させるものである。ただし、越波流量を1/10にするためには沖波波高

の数倍程度の後退距離が必要である。そこで、2重のパラペットで越波を抑止する護岸が電力発電所の護岸で実用化されている(榊山ら, 1994)(原論文では、後壁を防潮壁, 前壁と後壁の間を越波排水路と示している)。このタイプは防潮壁の位置と高さを調整することによって、防潮壁背後への越波を抑止できるが、越波排水路への水の打ち込みによる床板にかかる波圧に対する配慮が必要とされている。また2006年には横須賀市馬堀海岸護岸で、護岸全体を砕石で構成し透水性を高めた高潮時の越波対策護岸が実用化されている(平石ら, 2006)。東京都の運河沿いに設置されている護岸上部をプロムナードとした親水護岸(東京都, 2006)もプロムナード自体が緊急時の排水路になった越波対策護岸の一つと考えることができる。

これらの事例から、低天端型の越波対策護岸としては2重の胸壁と内部に透水性の排水路を有し、越波した水塊をできるだけ排水路の内部へ浸透させる形式の護岸が有効であると考えられる。そこで、実験②として、低天端護岸における越波対策護岸の低減効果の検討として、まず、越波した水塊を護岸背後の砕石を有する排水路で処理し、越波による水たたき力も吸収するといった新しい越波対策護岸(以下、越波吸収護岸とする)を考案し、その越波低減効果を検討することにした。比較のために、対策を施さない前面マウンドを有する直立型および比較的簡単に越波低減を図ることができるとされる波返し工を取り付けた護岸についても実験を行った。また、越波対策護岸に与える波の多方向性の影響について検討するため、入射する波浪諸元は多方向不規則波と一方向不規則波を造波した。そして、その結果を比較し、越波対策護岸に与える波の多方向性の影響について検討を行った。なお、本資料では、実験結果などの値は、できるだけ現地量に換算して整理しているが、但し書きを設けて実験手法などの説明には実験値を用いている。

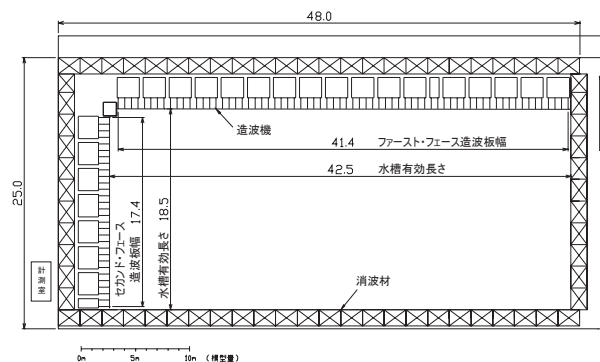


図-2 多方向不規則波造波水槽

## 2. 隅角部を含む護岸の越波特性(実験①)

関西国際空港では、2004年台風16号で越波災害が生じた(平山ら, 2005)。実験①では、関西国際空港2期島を対象モデルとして、空港島の隅角部を含む広い範囲の護岸を平面模型で製作した。そして、護岸の構造を単純な直立護岸にした場合、埋立て盛土の土圧に対する護岸の安定性を高めるために、カウンターウェイトと機能する高マウンドからなる緩傾斜護岸にした場合、波あたりを低減させ、越波量を少なくする目的で設置される消波ブロックで護岸を被覆した場合(消波ブロック護岸)のそれぞれの護岸タイプについて平面水理模型実験を行った。実験では、広範囲における護岸の越波特性を調べるとともに、実験で得られた平均越波流量と越波流量算定図(合田ら, 1975)での計算結果との比較を行った。

### 2.1 実験装置・模型の構成

#### (1) 実験水槽

実験①, ②について使用した実験水槽の平面図を図-2に示す。水槽は、幅48m、長さ25m、深さ2mの平面水槽で、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。多方向不規則波造波水槽はデュアルサーペント型造波水槽とも呼ばれ、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向不規則波および多方向不規則波が造波することができる(平石ら, 1992)。

#### (2) 実験範囲と模型縮尺

実験①の対象とした護岸は図-3の点線で囲んだ部分であり、模型の再現範囲は図中のD2護岸(700m:現地量)、D1護岸(400m)および周辺の護岸と、これらの前面のマウンドとした。D1護岸とD2護岸を実験水槽に配置する方法として、水槽を縦方向に使用する案と横方向に使用

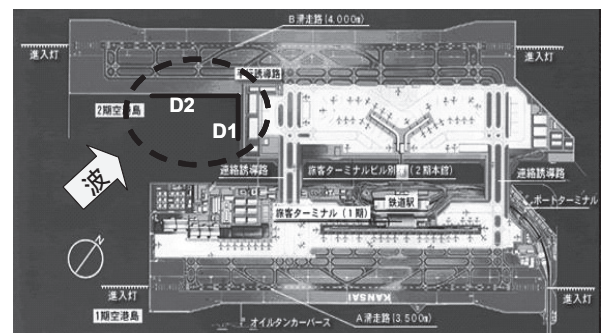


図-3 実験対象範囲



する案が検討されたが、実験で与える波の入射方向と開口部の位置関係から、沿い波はD2護岸及びD2護岸の延長上の西側に位置するC7護岸の線上で発生すると考えられたため、実験水槽でも、これらの護岸側の沿い波を重視する観点から水槽を横方向に使用した。また、造波機が設置されている2面の向きとD1およびD2護岸の向きを考えると、図-4に示すように空港模型を上下反転して水槽に再現する必要があるため、実験模型を現地地形に対し上下反転して設置した。

今回の越波実験では埋立地護岸の標準的な許容越波流量より一桁小さい  $10^3(\text{m}^3/\text{m}/\text{s})$  オーダーの越波流量まで取り扱いたかったため、模型はできるだけ大きく設定し、模型縮尺は1/30とした。この程度の縮尺であれば、現地で30cmの水位変動でも、模型では1cmとなり、精度良く測定できるので、沿い波やコーナー部の波の収れんを再現することができると思われる。

次に、関西国際空港周辺の水深を図-5に示す。対象とした関西国際空港二期島(斜線範囲)周辺の等深線は大きく変化せず、図に示すように、きわめて緩やかな海底勾配となっており、破線で囲んだ対象護岸設置位置の水深は19mでほぼ一定である。そこで、実験で対象とする範囲については、本来水平である水槽の床をそのまま海底地形として活用し、その上に直接、緩傾斜のマウンドと護岸模型を製作することにした。すなわち、実験水槽の造波機前面地盤高は現地換算でC.D.L-19mとした。また、今回の実験潮位は+3.2mであるので、水深は約22.2mとした。

### (3) 模型構造と設置位置について

実験模型は、ブロック壁を護岸直立部の模型の一部として利用した。現地における盛砂と捨石マウンド部分は、実験模型では碎石で整形した。ブロック壁の上には木製の上部工を設置した。D1護岸、D2護岸を直立護岸、緩傾斜護岸、消波ブロック護岸にした場合のD1、D2、C7護岸のそれぞれの模型断面図および模型平面配置図を図-6、図-7、図-8に示す。図-6、図-7、図-8に示す括弧内以外の数字は模型量である。

なお、模型で対象とした断面は関西国際空港二期島の2007年開港時にはC.D.L+8.0mに天端を有している。しかし、これは、その後の10年間の沈下を予想して設計されたものであり、10年後にはC.D.L+4.5mの高さまで沈下するものと考えられている。関西空港二期島は、開港直後は島内にターミナル施設を有せず、越波による浸水で被害を受ける可能性は小さい。また、天端高も高くなっている。しかし、開港10年後には、駐機場や国際化貨物タ

ーミナル等が整備され、越波による浸水は大きな問題となる。そこで、本実験では、10年後に予測されている天端高およびマウンド形状を対象として越波流量の場所的な変化や低減法について検討することを目的とした。

なお、D2護岸の南側(図-4では左側)はC7護岸とよばれ、D2と同様な構造となる予定である。しかし、本実験ではD2部分のみ構造を変化させ、C7護岸部は常に緩傾斜構造を用いた。また、消波護岸で用いる消波ブロックのサイズは、既往の設計事例を参照に現地では3.2t型のテトラポッドが計画されているが、実験で新たに製作することができなかったので、水槽に以前からある材料を用いた。このブロックは実験値に換算すると10t型ブロックに相当する。3.2t型と空隙率は同一であり、消波効果はほぼ同一と仮定し、ここでは実験に作用した。

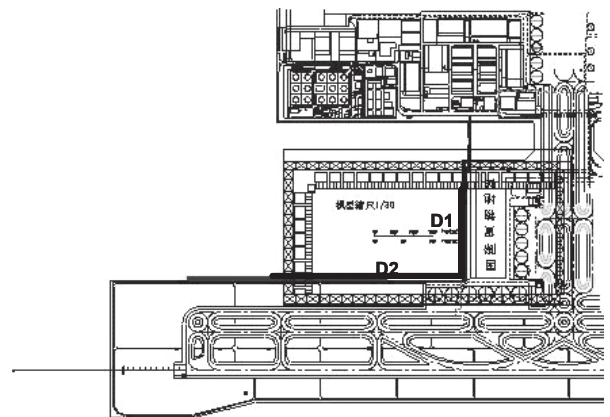


図-4 実験模型配置図(上下反転)

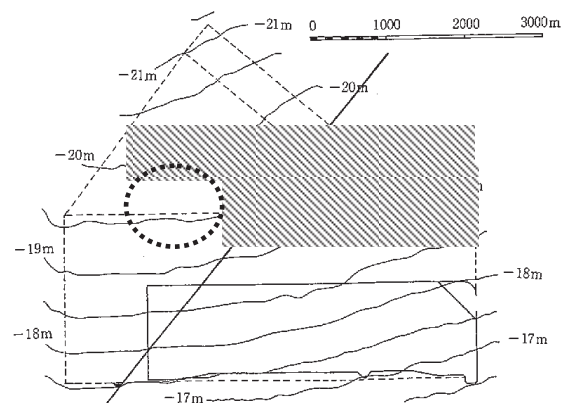
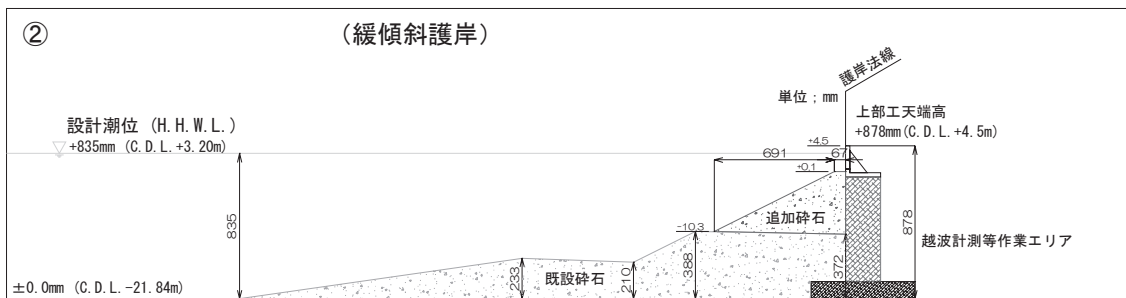
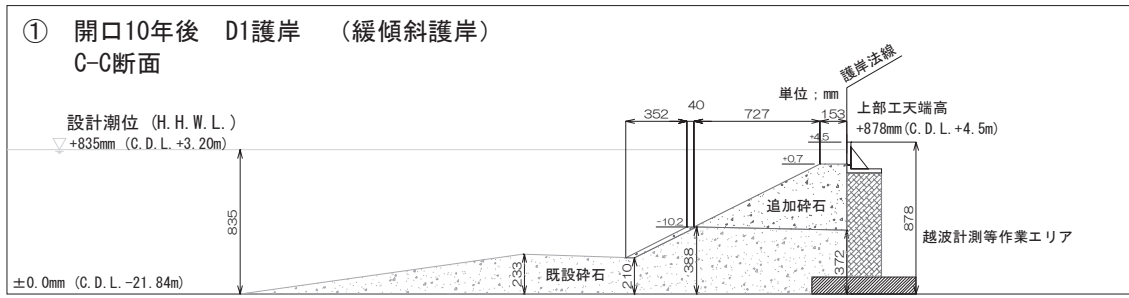


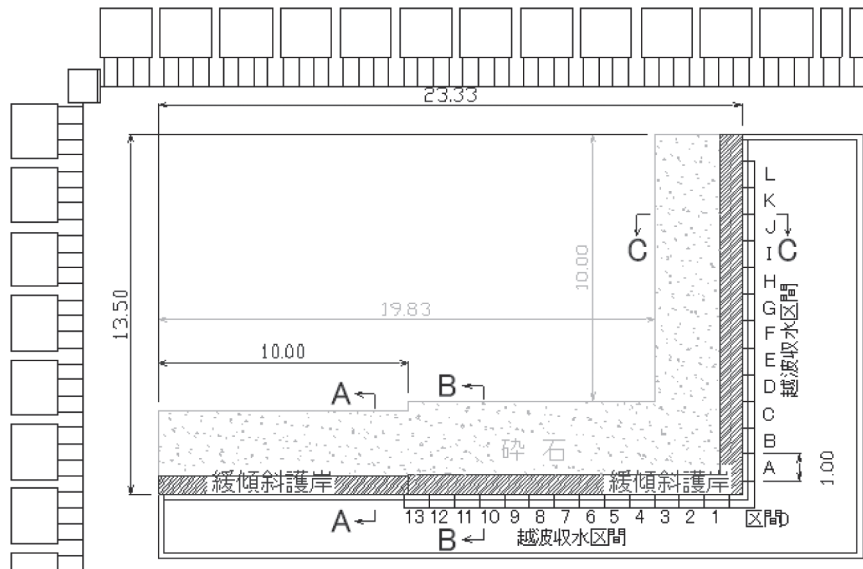
図-5 関西国際空港周辺の等深線図





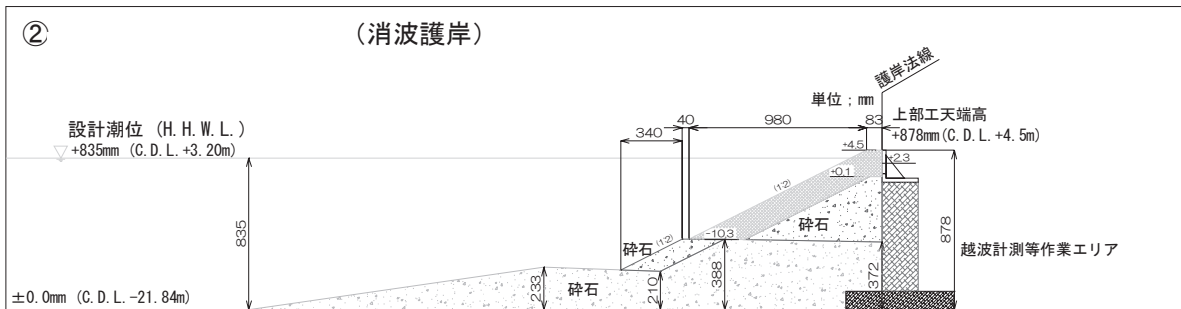
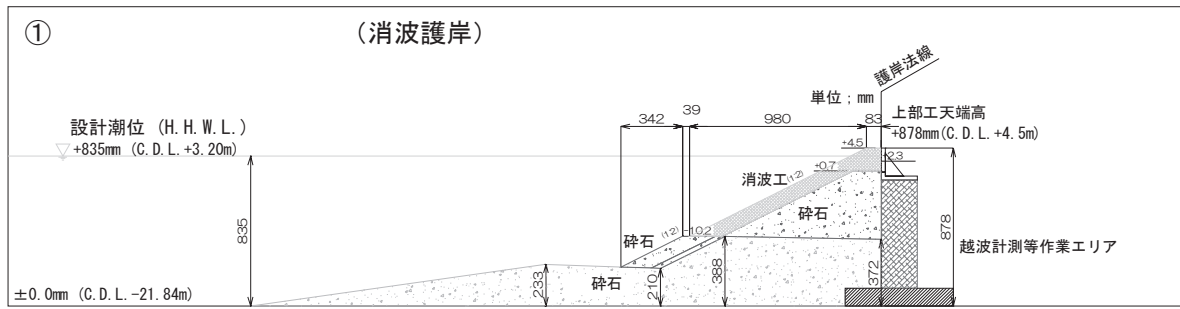


(1) 緩傾斜護岸模型 断面図

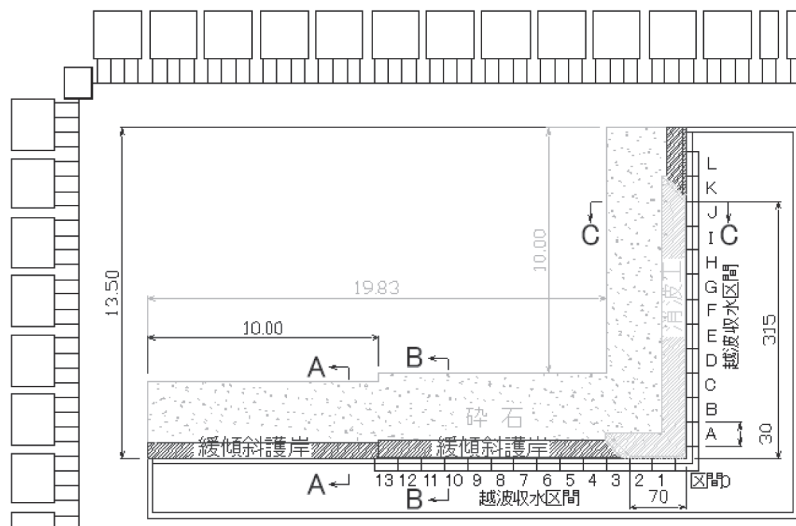


(2) 緩傾斜護岸模型の平面配置図

図-7 緩傾斜護岸模型の構造と設置位置



(1) 消波ブロック被覆護岸模型 断面図



(2) 消波ブロック護岸平面配置図

図-8 消波ブロック被覆護岸模型の構造と設置位置

## 2.2 実験条件

### (1) 実験波の特性と波浪検定方法について

本実験では予め、沖波の観測点 (MT局) から本実験範囲について非線形波浪変形計算 (平山, 2004) を実施した。計算結果を表-1 に示す。表に示すように、沖波の諸元は沖波波高  $H_0=3.30\text{m}$ , 周期  $T_{1/3}=7.1\text{s}$ , 波向 SW である。また、ここで波の多方向性を示す方向集中度パラメータは風波を仮定して、 $S_{\max}=25$  を採用している。波浪変形計算後の入射波検定位置の波浪諸元については表-1 の入射波検定位置に示す。入射波検定位置は、隅角部を含む実験対象水域の入り口に相当し、この点で計算された波の諸元を造波機で再現する。入射波検定位置での波浪諸元は入射波  $H_{0in}=1.90\text{m}$ , 周期  $T_{1/3}=7.1\text{s}$ , 波向 N209°

E が計算されている。波向を数値で表す場合には、北からの波を  $0^\circ$  で定義し、(E)が添え字で付く場合には時計回りを正として角度を定義している。したがって、波向 N210° E とは、北から時計回りへ  $209^\circ$  回転した方向で、ほぼ SSW に相当する。波浪変形計算結果から得られた方向スペクトルは図-9 に示すとおりで、造波方向角は  $69^\circ$  (入射角 N209° であり、この場合の波向は、D1 護岸の延長方向から反時計回りに  $69^\circ$  で入射する) である。方向スペクトルのばらつきは少なく、方向スペクトルの裾部分の広がりも小さい。したがって入射波検定位置では、波の多方向性は小さくなり、ほぼ単一方向不規則波に近い波となっていると言える。したがって実験波については、波浪検定位置において、ブレットシュナイダー・

表-1 入射波検定位置での波浪条件(計算結果)

	沖波諸元			入射波検定位置					
	波高 $H_0$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)	波向	合成波 $H_{1/3}$ (m)	入射波 $H_{0'}$ (m)	入射波 $H_{in}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)	波向 (波高計アレイ位置)	反射率 $K_R$
設計波	3.30	7.1	SW	2.25	2.0	1.90	7.1	N209° E	0.629

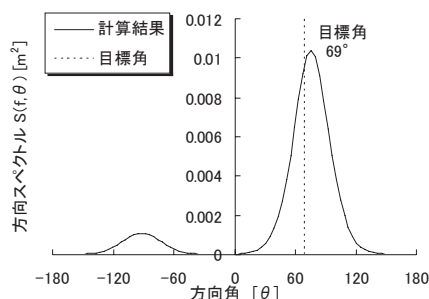


図-9 波高計アレイ位置における方向スペクトル

表-2 計測データ間隔と計測波数

現地量	模 型 量						
$T_{1/3}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{bar}$ (s)	$T_{bar}/20$ (s)	dt (s)	データ数	計測時間 (s)	計測波数
7.1	1.3	1.18	0.059	0.04	8192	327.68	278

表-3 計測待ち時間の検討

現 地 量					模 型 量					
潮位 (m)	地盤高 (m)	水深 h (m)	$T_{1/3}$ (s)	波長 $L_{1/3}$ (m)	波速 C (m/s)	群速 $C_g$ (m/s)	群速 $C_g$ (m/s)	距離 X (m)	$X/C_g$ (s)	待ち時間 (分)
3.2	-19.0	22.2	7.3	78.5	10.8	6.47	1.18	30	153	3

光易型の周波数スペクトルを目標とした有義波高  $H_{0in}=1.9m$ ,  $T_{1/3}=7.1s$  の単一方向不規則波になるように造波信号を与えた。また、波群による影響を確認するために、同じスペクトル条件の波に対し2つの波群の造波信号を作成した。

現地において不規則な波列を観測すると、最大波高  $H_{max}$  は有義波高  $H_{1/3}$  の1.6~1.8倍となる。ただし、この関係は、波列に波の数が200波以上含まれる場合に統計的に成立するため、模型実験においても波の諸元を統計的に再現するためには、200波以上の波列を造波する必要がある (Goda, 1977)。本実験では、有義値や最大波の諸元を得るために、波の計測では約250波以上に相当するデータを計測した。また、ほぼ連続した波形を得るためには、平均周期  $T_{bar}$  の1/20程度のサンプリングタイム  $dt$  でデジタル波形データを収集する必要がある。表-2にデータの収集に関する諸量を模型値で示す。またスペクトルを高速フーリエ変換で解析するためには、総データ数が  $2^n$  ( $n$  は正の整数) であることが望ましい (たとえば、日野(1977))。本実験では8192( $2^{13}$ )個のデータを用いて波の統計量を計算しており、実際には278波程度を用いたことになる。

250波以上の長時間の波を作用させると、水槽内で反射波が発生する。現地の海域でも護岸前面は入射波と反射波が共存しており、実験でも入射波と反射波が共存す

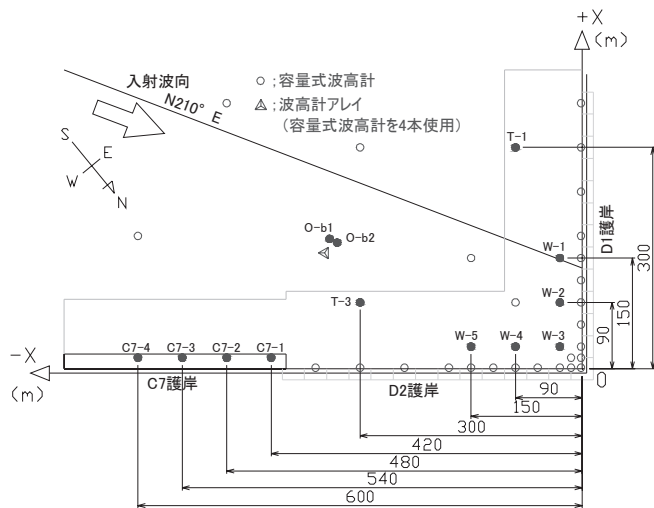


図-10 波高計の配置図

る状態を再現する必要がある。そこで、造波開始後に護岸からの反射波が発生して、対象範囲全域へ伝播するまで (水槽内の波が定常状態に達するまで) 待って、計測を開始した。待ち時間の長さは、造波板から反射面まで

の距離を群速度で割って求めた時間の6倍以上とした。ここでは平面実験であるので、造波板から反射面までの距離は場所によって異なる。そこで、水槽内の最大距離として造波板から模型護岸の対角線の長さ約30mを適用すると、計測待ち時間の検討は表-3のとおりであり、造波開始から3分待って計測を開始した。

波高計の配置位置を図-10に示す。護岸前面沿いの波高分布や隅角部の波高分布などを把握できるように、図中に○印で示す位置に容量式波高計を設置した。護岸前面の波高計測点は、直立護岸では護岸法線から3cm (現地量、約1m) 離れており、緩傾斜護岸、消波護岸は、護岸法線前面にマウンドや消波ブロックが設置されているので、護岸法線から前面に1m (現地量30m) 離れた位置に設置している。なお、前述の入射波検定位置 (造波目標とする波を再現する地点) は△印で示す波高計アレイである (図中の b1, b2 点に隣接して示されている)。この地点での水深は一律で (現地量: C.D.L-22m)、アレイ状に設置された4本の波高計で方向スペクトルを解析した。また、この中の2本 (b1 と b2) を用いて、入射波と反射波の分離計算 (合田ら, 1976) を行った。入・反射波解析用の波高計の間隔と、アレイの波高計間隔は有義波の波長の約1/8の距離が望ましいので、30cmとした。

入射波検定方法としては、容量式波高計を使用して水位変動を計測し、ゼロ・アップ・クロス法による波別解析と波浪統計解析によって有義波の諸元を求めた。また、合田ら(1976)らの方法で得た入射波の諸元を求め、反射波の影響を除去した入射波諸元が目標波高・周期と一致するように造波信号の修正を行った。

## (2) 越波実験方法

越波実験で計測する範囲は、越波集水箱を図-10に示すようにD1, D2護岸背後に設置した範囲で、各護岸の越波観測長は、それぞれ現地換算値で、380m(D1護岸), 400m(D2護岸)とした。越波計測はD1護岸, D2護岸延長上の越波流量の分布を把握できるように、護岸模型を1m (現地換算では30m) ごとに区間分けを行い、その背後に区間毎に1つずつ越波集水箱を設置し、この集水箱に入った水塊量を越波流量とした。越波実験での作用波数と計測範囲についてはD1, D2護岸タイプが直立護岸の場合には、波高などの統計量を算出したときと同様に、作用波数を250波とし、計測範囲もすべての越波集水箱を対象とした。しかし、護岸タイプを緩傾斜護岸、消波ブロック被覆護岸とした場合には、越波流量が多くなり、越波集水箱が短時間で満水になることがあり、250波の間、集水を続けることができなかった (消波ブロック護岸は、越波が顕著

なところに対策として設置したので、越波の絶対量は多い。この場合には、作用波数を100波とし、また計測する範囲も越波集水箱を1箱おきとした。

### 2.3 実験結果と考察

図-11, 図-12, 図-13にD1護岸, D2護岸を直立護岸, 緩傾斜護岸, 消波ブロック護岸タイプとした場合に潮位C.D.L+3.2m, 有義波高 $H_{in}=1.9m$ ,  $T_{1/3}=7.1$ , 波向N210°Eの一方方向不規則波を与えたときの護岸法線方向における時間平均越波流量の空間分布と波高分布の関係について示す。なお波群を変化させて2回計測を実施したが、波群の差による越波流量の相違は生じなかった。

各グラフの横軸は、空港護岸隅角部を原点とし、D1護岸側を正(+), D2護岸側を負(-)として定義した。縦軸左は実験値の平均越波流量 $q_{exp}$ (グラフ凡例▲), 合田の越波流量推定図(合田,1975)から計算で求めた平均越波流量 $q_{cal}$ (グラフ凡例△)を表す指標軸( $m^3/m/s$ : 現地量)であり、縦軸右は実験で得られた波高を表す指標軸( $m$ : 現地量)である。波高の凡例については、反射波を含む各護岸前面波高 $H_{1/3}$ (グラフ凡例○)と式(1)より入反分離した護岸前面入射波高 $H_{in}$ (グラフ凡例●), さらに式(2)より、護岸前面の入射波高 $H_{in}$ を浅水係数 $K_s$ で割り戻して求めた換算沖波 $H_0'$ (グラフ凡例×)とする。ここで式(1)に使用される反射率 $K_R$ は波高計アレイで得られた反射率(0.629)と等しいとみなして計算し、式(2)で使用した浅水係数は護岸前面水深における浅水係数( $K_s=0.92$ )を用いて求めた。護岸の位置によって波の屈折や回折の影響によって前面波高は変化する。反射率から計算した入射波高も変化しているため、 $K_s$ で割った換算沖波波高も場所的に変動する。

$$H_{in} = H_{1/3} / \sqrt{1 + K_R^2} \quad (1)$$

$$H_0' = H_{in} / K_s \quad (2)$$

また、合田の越波流量推定図(合田,1975)から計算で求めた平均越波流量 $q_{cal}$ を算定する際には、前述した換算沖波 $H_0'$ を護岸前面の換算沖波とし、越波流量推定図を使用し、波形勾配は入射波浪諸元から算定し、海底勾配は1/10とした。直立護岸および緩傾斜護岸の場合は、直立護岸の越波流量の推定図を、消波ブロック護岸は、消波護岸の越波流量推定図をそれぞれ用いた。

なお、波群の違いによる実験結果の差は直立護岸以外の他の護岸タイプにおいてもみられなかった。

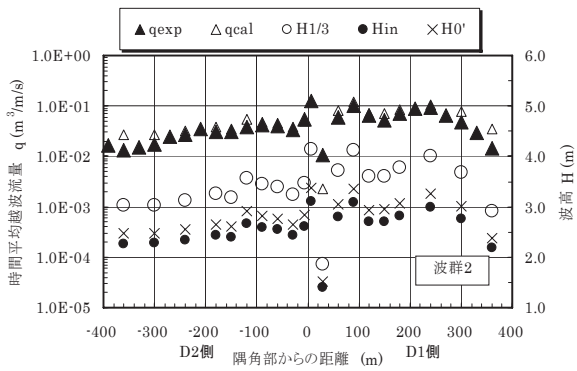
#### (1) 直立護岸での越波特性

図-11に示すように、波高分布は実験値, 計算値とも、D1護岸, D2護岸でほとんど同じ程度の量の波高分布であるが、D2護岸よりもD1護岸の越波流量のほうが若干ではあるが大きい(D1護岸で約 $0.06 m^3/m/s$ 程度, D2護岸で $0.03 m^3/m/s$ 程度)。これは、D1護岸, D2護岸に入射される波の角度の影響であり、それぞれ護岸延長線に対して約 $70^\circ$ (D1護岸),  $20^\circ$ (D2護岸)で入射されることからD1護岸の方がD2護岸より鋭角に波が入射されるためと考えられる。

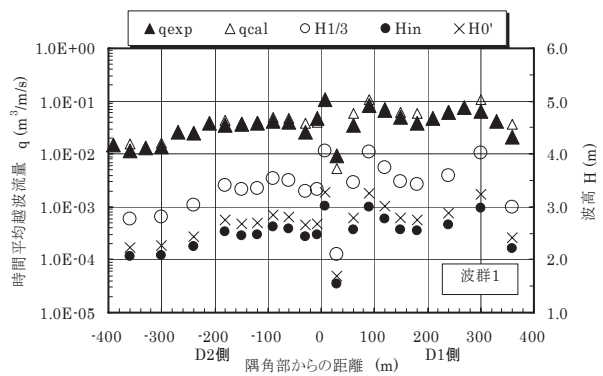
また、越波流量が最も多かった場所は波群1, 波群2とも同じで、隅角部の位置であり、両波群とも約 $0.1 m^3/m/s$ 程度であった。このとき、護岸前面入射波高 $H_{in}$ も隅角部の波高も最も高くなっており( $H_{in}$ ≈ $3.0m$ )、実験結果と越波流量推定図から算定した結果を比較すると、非常によく合っていることがわかる。隅角部以外の部分についても同様であった。これは直立護岸の場合、越波流量推定図の設定条件と実験条件とがよく合致したからであると考えられる。

#### (2) 緩傾斜護岸での越波特性

図-12に示すように、実験値の越波流量はD1護岸(約 $0.1 m^3/m/s$ )、D2護岸(約 $0.02 m^3/m/s$ )と直立護岸時に比べて越波流量に1桁程度の差が生じているほど、D1護岸とD2護岸の越波流量の差は大きくなっている。さらに、越波流量の分布について考察すると、直立護岸では隅角部に波が集まり護岸前面入射波高も越波流量も実験値, 計算値とも最大であったが、緩傾斜護岸では隅角部の護岸前面入射波高も実験値の越波流量( $H_{in}$ ≈ $1.4m$ ,  $q_{exp}$ ≈ $0.01 m^3/m/s$ )も最小であった。この原因としては、斜め入射によって生じる護岸前面部での沿い波が、緩傾斜部分で屈折効果によって進行方向を護岸の法線方向に変化させるため、隅角部まで伝播しにくくなり、隅角部に集まる波が小さくなっていることが考えられる。それに対し、緩傾斜護岸のケースで、実験値の越波流量が多くなったのはD1護岸の隅角部から60~300m離れた地点であり、この地点の越波流量は約 $0.1\sim 0.2 m^3/m/s$ であった。緩傾斜護岸のケースで越波流量が多くなる範囲においては、護岸前面波高 $H_{1/3}$ が直立護岸に比べ2割程度小さくなっているのに対し、実験値の越波流量は4割程度大きくなっている。これは緩傾斜護岸ケースでは、直立護岸に比べて反射率が小さいので、前面の反射波は小さくなるものの、緩傾斜部分を波がはい上がりやすくなり、越波に対しては緩傾斜護岸が不利になるためである(高山ら, 1984)。

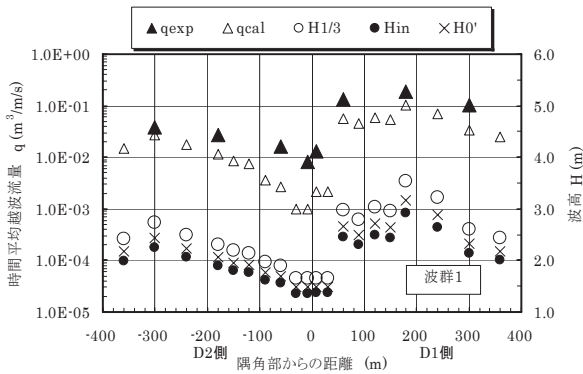


(1) 波群 1

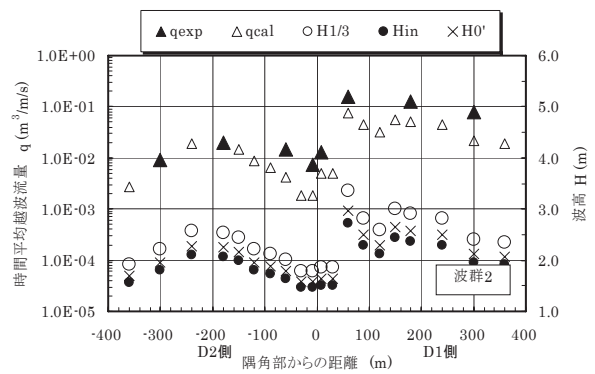


(2) 波群 2

図-11 直立護岸での時間平均越波流量（実験値，計算値）の空間分布と波高の関係

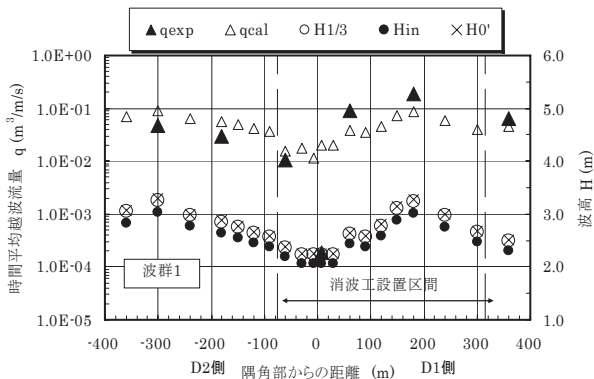


(1) 波群 1

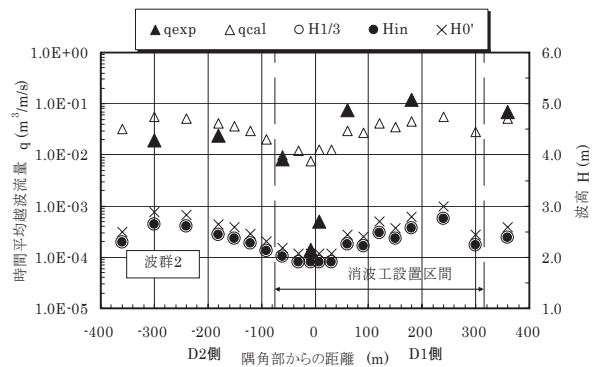


(2) 波群 2

図-12 緩傾斜護岸での時間平均越波流量（実験値，計算値）の空間分布と波高の関係



(1) 波群 1



(2) 波群 2

図-13 消波ブロック護岸での時間平均越波流量（実験値，計算値）の空間分布と波高分布の関係



また、直立護岸では D1 護岸、D2 護岸に入射する波の角度の違いによる越波流量の差は小さかったのに対して、緩傾斜護岸の場合には D2 護岸より約 50 度鋭角状に入射する D1 護岸の越波流量は、D2 護岸の越波流量の 1/10 程度に小さくなった。すなわち、緩傾斜護岸の場合には護岸に対する入射角の違いによる越波流量の差がより顕著になることがわかる。

越波流量について実験結果と越波流量推定図から算定した結果を比較すると、直立護岸の場合に比べ、差が大きい。これは越波推定図で算定する際に、緩傾斜護岸部分をないものとして、直立護岸とみなして算定しているためであり、越波推定図から算定する場合、設定条件となる護岸の条件がない。

また、越波に対し、斜め入射による影響を強く受ける緩傾斜護岸では、直入射の断面実験結果から求められた越波推定図では斜め入射補正をしても実験結果より過小に算定される傾向があった。特に護岸形状が複雑な隅角部では 1/10 程度低い値となった。

### (3)消波護岸での越波特性

緩傾斜護岸の時に越波量が多かった D1 護岸側の隅角部から 60m~300m 離れた地点と D2 護岸側の隅角部から 70m 離れた地点に消波ブロックを設置して越波低減効果を調べた。

実験結果は図-13に示すように D1 護岸の越波流量の最大値は、 $0.1\sim 0.2\text{ m}^3/\text{m/s}$  程度であり、緩傾斜護岸の越波流量の最大値とほぼ同じであり、その越波分布も同じような傾向をしている。したがって消波ブロックの効果は護岸前面波高低減効果には見られたが、越波流量の低減効果は見られなかった。これは護岸の相対天端高が低いため、越波流量が  $0.1\sim 0.2\text{ m}^3/\text{m/s}$  にも達するような D1 護岸部分の隅角部から 60m~300m 離れた範囲については消波ブロックの消波効果が十分に得られなかったためであると考えられる。これは、越波流量が  $0.1\sim 0.2\text{ m}^3/\text{m/s}$  と大きく、波も越流状態で作用し、消波ブロックによる波の低減および越波の低減ができなかったためと考えられる。それに対し隅角部では緩傾斜護岸に比べ越波量が約 8 割程度低減された。これは隅角部においては、消波ブロックによる越波低減効果が直線部よりも顕著なことを示している。また、越波流量について実験結果と越波流量推定図から算定した結果を比較すると、消波ブロック護岸でも緩傾斜護岸同様、複雑な断面地形の隅角部ではその差が最も大きく、実験値の越波流量は越波流推定図から得られた越波量に比べ約 1/100 程度低い結果となった。

## 3. 越波対策護岸による越波低減効果(実験②)

実験②では、一般的な海上空港を想定し、低天端高の護岸に越波対策として改良を施した護岸の越波低減効果の検討を行った。ここで対象とした護岸は、前面地形としては海上空港で、構造安定性上、カウンターウェイトとして望ましい緩傾斜マウンドとし、その陸上側に直立護岸、波返し護岸、直立護岸背後に越波吸収排水路を擁する“越波吸収護岸”とした。実験では、まず護岸構造の違いによる越波量低減効果の相違を調べた、また、波の多方向性による越波低減効果の変化を検討するために、越波対策護岸に多方向不規則波、一方向不規則波を与えその影響について検討した。

第 1 章で示したように、越波吸収護岸とは、火力発電所等の電力関係埋め立て地護岸で用いられた実績がある、護岸の前面のパラペットと背後の防潮壁によって、あたかも 2 重胸壁を有するような構造を持つ排水路付き護岸を、さらに改良したものである。パラペットと防潮壁に挟まれた排水路に透水性を付加することにより、排水路床に作用する打ち込み波力を低減するとともに、排水路内での水面振動を抑制するものである。このタイプの護岸では、護岸パラペットを越えた越波によって、まず排水路内へ水塊が落ちていく。次に排水しきれずに水が滞留したり、波の打ち込みにより排水路内の水面が振動すると、後部の防潮壁を越流して、堤内へ海水が侵入する。最初に排水路内へ越波する水量は、直立護岸の越波流量と同一である。ここでは、後壁である防潮壁を越えて、堤内値へ入った水量を、越波吸収護岸の越波流量と定義する。なお、この定義は、越波対策の効果を示すために用いられるもので、榊山ら(1992)の排水路を有する越波対策護岸でも同様な定義が成されている。

### 3.1 実験装置・模型の構成

#### (1) 実験水槽と模型縮尺について

実験①と同様多方向不規則波造波水槽で実施した。模型縮尺については、実験①同様、 $10^{-3}(\text{m}^3/\text{m/s})$  オーダーの越波流量も取り扱うので、模型縮尺はできるだけ大きく設定し、模型縮尺は 1/30 とした。

#### (2) 実験範囲と模型構造について

各護岸タイプの越波低減効果を同時に検討できるように、図-14に示すように実験①で使用した関西国際空港の D2 護岸の一部分に直立護岸、波返し護岸、越波吸収護岸を並べた。D1 護岸部分には実験使用区間に反射波の影響が

無いように化学繊維を幅80cmの籠に充填して製作した消波層を設置している。図-15に示すように、それぞれの護岸は延長50cm（現地量：15m）まで設置し、越波の計測範囲は、その延長上のほぼ中央部に相当する20cm（現地量：6m）とした。

各護岸前面には、一般的な海上空港の護岸前面に構造成上カウンターウェイトとして使用される緩傾斜のマウン

ド上に図-16、図-17、図-18に示すような直立護岸、波返し護岸、直立護岸背後に越波吸収排水路を擁する越波吸収護岸を設置した。各護岸の天端高はC.D.L+4.5mで、波返し護岸の波返し部分の張り出し幅は25mm（現地量75cm）とした。越波吸収護岸は直立護岸背後の排水路の幅を約150mm（現地量4.5m）を設けた。また、水たたきによる水の跳ね上がりを吸収するための砕石を、排水路の深

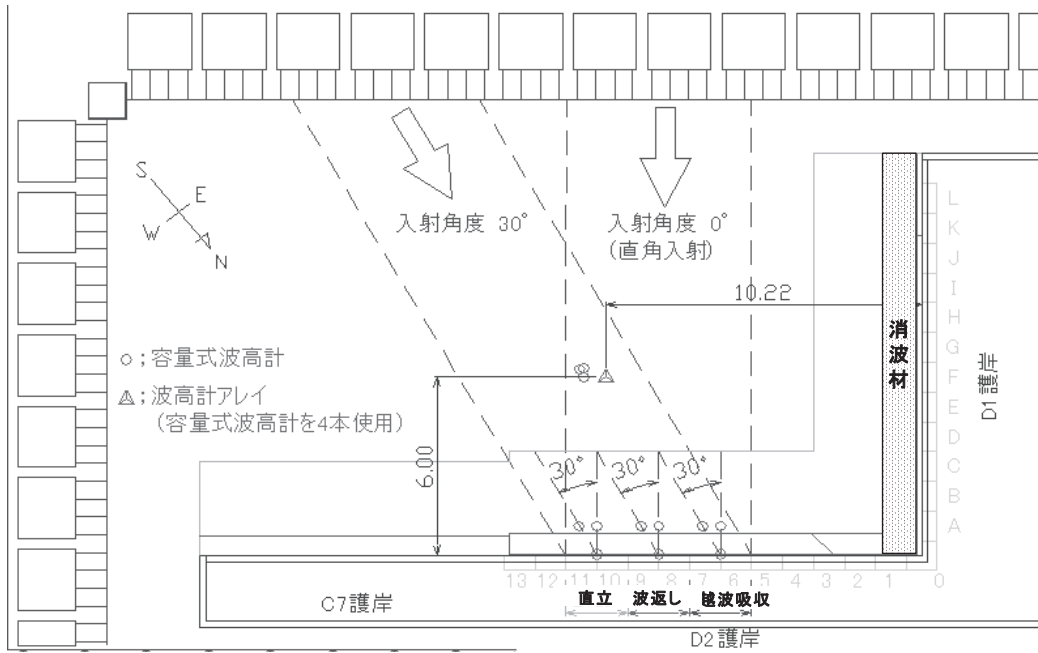


図-14 越波実験対象範囲および計測器配置位置

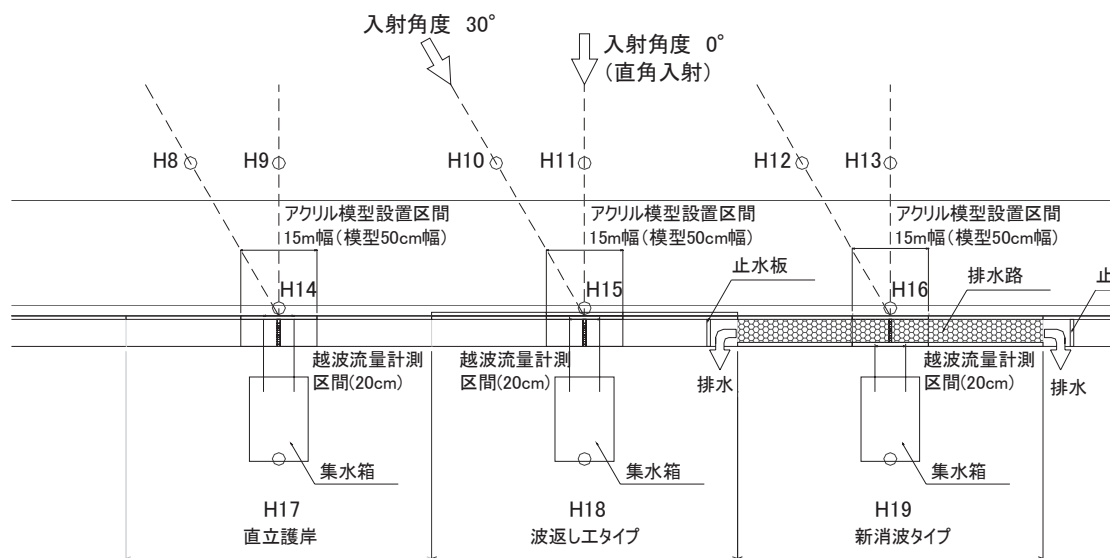
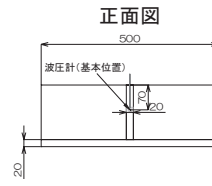
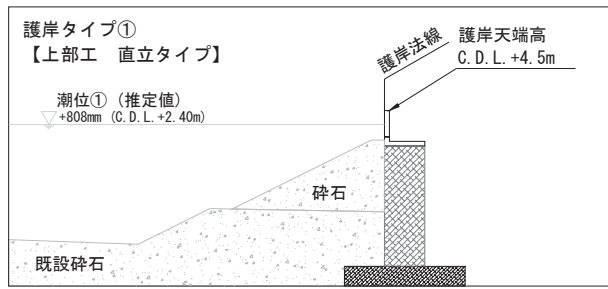
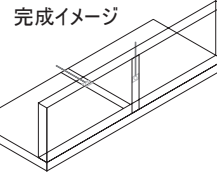
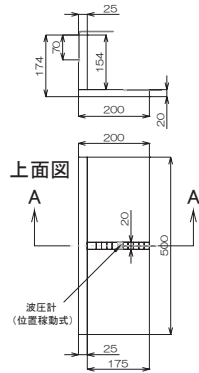


図-15 越波実験対象範囲および計測器配置位置

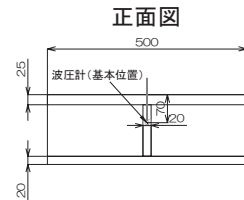
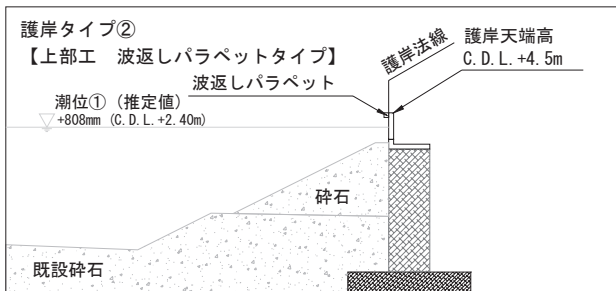


A-A断面図

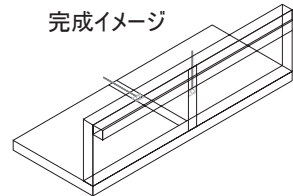
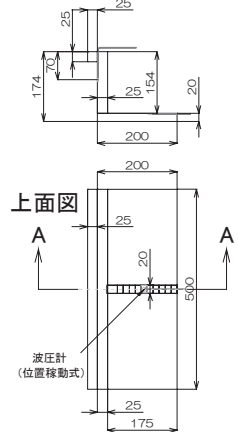


単位 : mm  
材質 : アクリル  
波圧計出力線の配線加工も行う

図-16 直立護岸の模型断面図

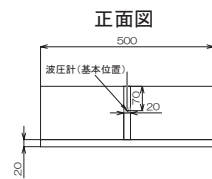
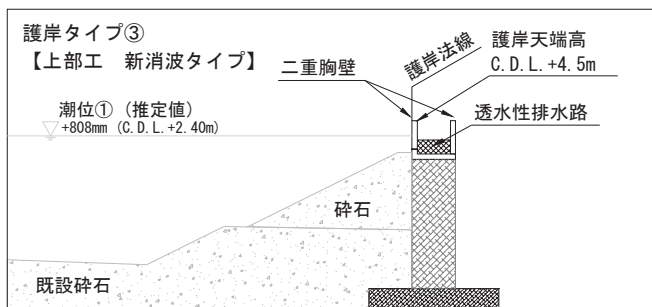


A-A断面図

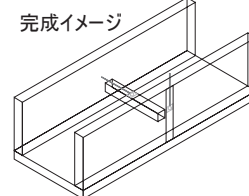
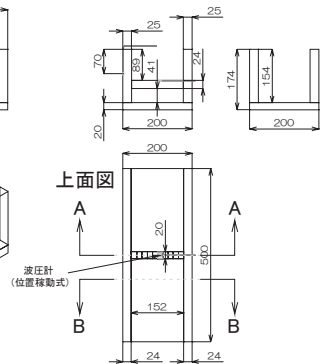


単位 : mm  
材質 : アクリル  
波圧計出力線の配線加工も行う

図-17 消波ブロック護岸の模型断面図



A-A断面図 B-B断面図



単位 : mm  
材質 : アクリル  
波圧計出力線の配線加工も行う

図-18 越波吸収護岸模型断面図

さ150mm(現地量5.5m)に対し、深さ約80mm(現地量2.4m)まで入れるようにした。

本実験では、便宜上、排水路に入った越波水は排水路に溜まらないように、排水路の両端に開口部を設け、そのまま実験場の床へ落下できるようにした。すなわち、排水路の中では決して水がたまらず、常時、水が排水できる構造とした。現地の空港では、排水路の水を排水する場所が必要であり、実際には波が来襲している空港の護岸面ではなく、波向きに対して裏側にある空港護岸面に排水溝の開口部を設ける等の工夫が必要になる。

### 3.2 実験条件

#### (1) 実験波の特性と波高計の配置について

実験波は、直立タイプの護岸での時間平均越波流量が、護岸法線に直角方向となる波に対して、越波流量が $0.02\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$  前後 $\sim 0.05\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$  前後となるように潮位と波高を組合せて設定した。入射波高、周期は波形勾配が同じになるように波浪① $H_{1/3}=2.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=7.0\text{s}$  (波形勾配:  $0.026$ )、波浪② $H_{1/3}=1.6\text{m}$ ,  $T_{1/3}=6.3\text{s}$  (波形勾配:  $0.026$ ) とし、それに対し上記越波流量を満たすような潮位を採用した。また、実験②では、斜め入射や波の分散性による越波流量への影響についても検討するため、実験波の入射角は、護岸法線に対して直角となる $0^\circ$ と $30^\circ$ の2種類であり、それぞれ一方向波と多方向波( $S_{\max}=25$ )に

ついて実施し、1つの波浪諸元に対し2波群実施した。実験ケースの詳細は表-4に示すとおりである。

波浪検定方法は前述している実験①と同様であり、図-14に△印で示す護岸の沖側の一様水深部に波高計アレイを設置して実施した。検定項目は、波高・周期・波向(波の入射角、多方向波の場合には方向スペクトル)とした。波浪検定では、計測波数は実験①と同様に約250波とした。波浪計測の主な計測位置は、護岸前面の波高を護岸法線より1m(現地:30m)離れた位置で計測し、護岸直前では水位の計測も行った。

#### (2) 越波実験方法

越波の計測については、集水箱と容量式波高計を用いた。実験では、護岸背後に設置した集水箱内の水位の時系列を容量式波高計により計測し、得られた水位の時系列を水量の時系列に換算することで越波流量の時系列を得る。ここでの越波流量を計測する上での定義としては各護岸の越波計測範囲の護岸上を越波する水であるが、越波吸収護岸については、護岸背後の碎石を有する排水路を溢れた水を越波流量として計測した。

なお、本実験では、現地で6m幅の区間で越波流量を計測している。島堤のような長い構造物の壁面に沿って、回折の影響で波高が変化する現象があり、計測場所によって波高が異なる場合がある。今回の実験では、対象と

表-4 実験ケース表(波の諸元は現地換算値)

ケース番号	入射角	波種類	護岸先端高 C.D.L. (m)	潮位		実験波浪			
				区分	C.D.L. (m)	区分	入射波高 $H_{1/3}$ (m)	入射波周期 $T_0$ (s)	
1	$0^\circ$	一方向波	4.5	潮位①	2.9	波浪①	2.0	7.0	
2					2.0	波浪②	1.6	6.3	
3				潮位②	2.0	波浪①	2.0	7.0	
4					2.0	波浪②	1.6	6.3	
5		$30^\circ$	多方向波 ( $S_{\max}=25$ )	4.5	潮位①	2.9	波浪①	2.0	7.0
6						2.0	波浪②	1.6	6.3
7					潮位②	2.0	波浪①	2.0	7.0
8						2.0	波浪②	1.6	6.3
9	$0^\circ$		一方向波	4.5	潮位①	2.9	波浪①	2.0	7.0
10						2.0	波浪②	1.6	6.3
11					潮位②	2.0	波浪①	2.0	7.0
12						2.0	波浪②	1.6	6.3
13		多方向波 ( $S_{\max}=25$ )	4.5	潮位①	2.9	波浪①	2.0	7.0	
14					2.0	波浪②	1.6	6.3	
15				潮位②	2.0	波浪①	2.0	7.0	
16					2.0	波浪②	1.6	6.3	

注1)  $H_{1/3}$ は入射波検定位置(波高計アレイ)での波高である。

注2)各ケースとも2波群の実験を実施する。

注3)実験波浪は波浪①( $H_{1/3}=2.0\text{m}$ ,  $T=7.0\text{s}$ )を基本条件とする。

注4)潮位条件および波浪条件は、直立護岸タイプ(既設護岸部)に対して目安越波流量を満たすように条件を設定する。なお、いずれも一方向波の入射角 $0^\circ$ の波に対して条件を設定する。

注5)潮位①は、波浪①に対して直立護岸部での越波流量が $0.05\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ となるような条件を設定した。

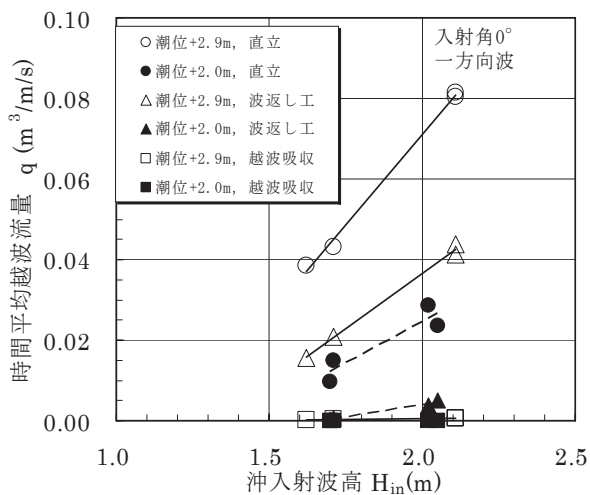
注6)潮位②は、波浪①に対して直立護岸部での越波流量が $0.02\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ となるような条件を設定した。

注7)波浪②は、潮位①に対して直立護岸部での越波流量が $0.02\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ となるような条件を設定した。

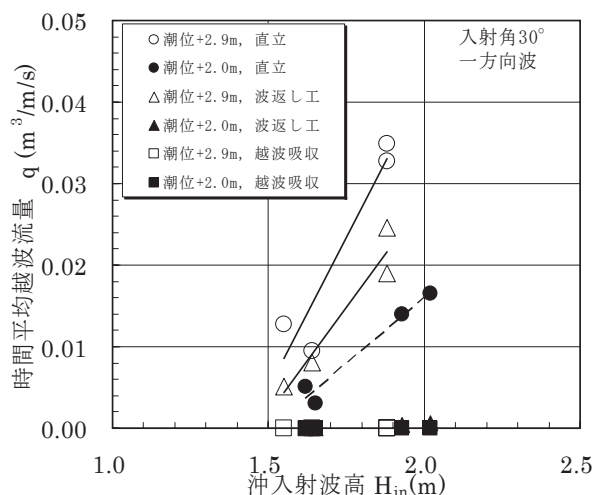
した護岸を端部に消波層を設置しており、回折の影響は生じない、また、実験でも護岸沿って波高を計測したが、波向きが護岸法線および30度傾いたケースのみを実験しており、回折現象や沿い波の影響によって、場所的に波高が大きく変化する現象は、実験②では生じなかった。また、隣接する構造の異なる護岸によって波が変形して、護岸によって作用する波の状況が異なるという現象は少なくとも目視では見られなかった。

### 3.3 実験結果と考察

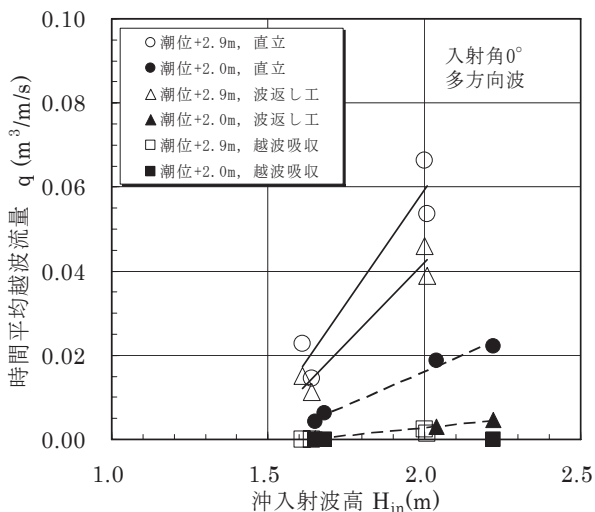
#### (1) 護岸構造の違いによる越波流量の低減効果について



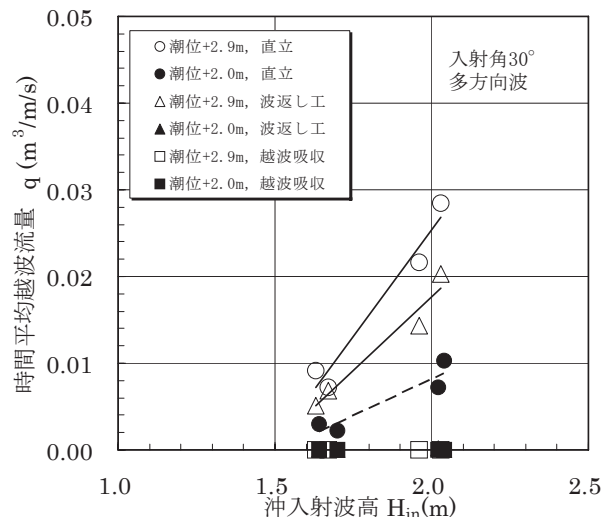
(1) 入射角0° 一方向不規則波



(2) 入射角0° 多方向不規則波



(1) 入射角30° 一方向不規則波



(2) 入射角30° 多方向不規則波

図-19 護岸構造の違いによる越波流量と沖入射波高の関係

図-19 に護岸構造の違いによる越波流量と沖入射波高の関係について示す。横軸の沖入射波高 ( $H_{in}$ ) は波浪検定位置(波高計アレイ)での入射波高である。

護岸構造の違いによる越波流量の低減効果については、護岸に対して、最も越波流量が多くなると考えられる入射角0° (護岸に対し直角に入射)、一方向不規則波の場合(図-19(1))で検討した。図-20は図-19(1)の図を相対天端高で表したものである。潮位がC.D.L+2.9mで、同じ沖合入射波高に対する各護岸構造の越波流量について比較したところ(図中の○直立護岸, △波返し工護岸, □越波吸収護岸), 直立護岸の越波流量に対し波返し護岸では約



1/2程度の越波量低減効果であったが、越波吸収護岸では約1/160~1/120と著しい越波低減効果が確認された。このとき、沖入射波高が2.0mの場合と1.6mの場合を比較すると、沖入射波高の違いによる波返し護岸の越波流量の低減効果は、各波高とも約1/2程度の低減率であった。

これより潮位が低いC.D.L+2.0mの場合は沖入射波高の

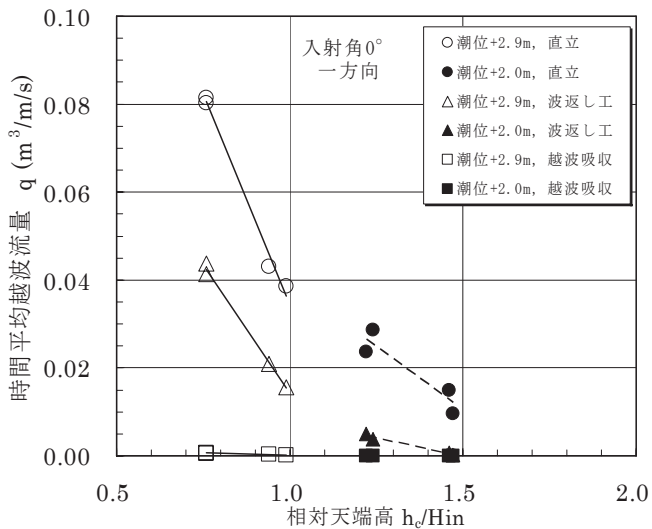


図-20 護岸構造の違いによる越波流量と相対天端高の関係

違いによる越波流量の変化は大きく、沖入射波高が2.0mの場合と1.6mの場合を比較すると、波返し護岸では約1/10程度越波流量が低減し、また、越波吸収護岸では越波流量が0  $m^3/m/s$ となり、越波流量は観測されなかった。護岸構造の違いによる越波流量と相対天端高の関係を図-20に示す。

波返し護岸では相対天端高が低い場合は、直接、護岸上を波が越波するため、構造上直立護岸と同じタイプになってしまうので、波返しの効果を小さくなり、越波低減効果はそれほど期待できなかったためと考えられる。したがって、波返しの効果は発揮させるためには最低でも相対天端高が1.0以上は必要である。すなわち、波返し護岸の越波低減効果は、相対天端高によって大きく影響されることがわかる。それに対し、越波吸収護岸では相対天端高が1.0以下と低い場合でも、直立護岸と波返し護岸では $10^{-2} m^3/m/s$ オーダーの越波流量を与える波浪条件に対して、 $10^{-4} m^3/m/s \sim 10^{-3} m^3/m/s$ オーダーまで越波流量を低減させることが可能であることがわかった。以上より、波返し護岸で越波流量を抑えるには、最低相対天端高が1.0以上であることは必要である。これに対して、越波吸収護岸では相対天端高を1.0未満の低い場合に対しても著しい越波低減効果があることが確認され、護岸の天端高制限のある海上空港では望ましい形式と考えられる。

しかし、越波吸収護岸の護岸前面形状は直立護岸とまったく同じ構造であるので、直立護岸の越波流量が排水路に入ることとなる。今後の課題として、排水施設の構成や能力は非常に重要になってくる。

次に波の分散性による影響を検討するため、入射角 $0^\circ$ の多方向不規則波( $S_{max}=25$ )の場合(図-19(2))の各護岸の越波流量について比較した。一方向不規則波の場合に比べ、波の分散性により、各護岸とも越波流量が若干少なくなる傾向が現れた。これは平石ら(1996)の結果にも一致する。沖入射波高の低下に伴う越波流量の低下傾向も多方向不規則波の場合、より顕著に低下する傾向が生じていた。また、潮位が低いC.D.L+2.0m場合、波返し護岸では、同一の沖入射波高に対し、越波流量が $10^{-2} m^3/m/s$ オーダーの越波流量が $10^{-3} m^3/m/s$ 以下まで低くなり、越波吸収護岸においては、本実験の多方向不規則波の全ケースにおいて越波流量が観測されなかった。

斜め入射による影響を確認するために入射角 $30^\circ$ (護岸に対し $60^\circ$ で入射)の一方向不規則波の場合(図-19(3))の各護岸の越波流量について比較したところ、入射角 $0^\circ$ 、一方向不規則波の場合(図-19(1))とほぼ同じ越波流量であり、斜め入射の影響はほとんどなかった。これは護岸に入射される角度が護岸法線に対し $30^\circ$ と鋭角であったため、護岸に沿う波というよりも、直入射に近い入射角度であったためである。また、斜め入射による多方向不規則波の及ぼす越波流量への影響(図-19(4))は入射角 $0^\circ$ の場合とほぼ同じ傾向であった。

#### 4. まとめ

本資料では、実験①で空港の隅角部を含む広い範囲を再現した平面模型実験を行った。そして、その越波状況をはじめ、越波実験結果と和田の越波推定図から算定した計算結果との比較を行い、護岸越波の特性を検討した。次に、実験②で越波対策護岸として、波返しによる越波量の低減を図る波返し護岸、および水たたきによる越波水の跳ね上りを抑え、後壁背後への越波を低減できる越波吸収護岸とを提案し、直立護岸の越波流量と比較して、構造的な相違による越波量低減効果について検討した。また、実際の沖合で起こりえる多方向不規則波と、これまで検討事例が多い単一多方向不規則波を与えた場合の、各種越波対策護岸に与える波の多方向性の影響についても平面模型で実験を行った。その結果、以下のような特性を確認した。

##### 4.1 実験①のまとめ



(1)越波流量が最も多くなる場所は直立護岸では護岸の隅角部であるのに対し、緩傾斜護岸、消波護岸では護岸前面の沿い波の減衰効果により隅角部では越波流量が最小となり、越波流量が最も多かった場所は隅角部から約60m以上離れた場所であった。この結果により、模型実験で、護岸前面形状の違いにより、越波流量が局所的に大きくなる範囲を確認することができた。

(2)実験値の平均越波流量と越波推定式から算定した平均越波流量を比較すると、直立護岸では両者の結果は非常によく一致していたが、緩傾斜護岸および消波護岸では、隅角部に近くなるにつれてその差が大きくなり、隅角部ではその差が最大であった。したがって、隅角部など複雑な断面形状でかつ、複雑な波が入射される場所では算定式による越波推定が難しく、護岸の設計時には模型実験を実施することが望まれる。

(3)直立護岸では入射する波の角度の違いによる越波流量の相違は顕著に見られなかった。それに対して、緩傾斜護岸および消波護岸の場合には、波の入射角によって越波流量が大きく変化した。

#### 4.2 実験②のまとめ

(1)越波対策護岸として最も効果があった護岸は護岸背後に碎石（水たたきによる跳ね上がり低減用）が入った排水路を有する越波吸収護岸であり、直立護岸と比べて約1/100程度に越波流量が小さくなり、越波の低減効果が高かった。

(2)波返し護岸では、相対天端高によって越波低減効果が大きく変化した。すなわち、波返し護岸で越波低減を図る場合には、相対天端高は1.0以上必要であることが判明した。

(3)越波吸収護岸では、相対天端高が1.0未満の低い場合に対しても著しい越波低減効果があることが確認され、護岸天端高の制限のある空港には望ましい形式であることがわかった。

(4)波の分散性による越波量の影響は、波返し護岸や越波吸収護岸で顕著に表れた。特に、これらの護岸では、低潮位の場合に、同一の入射波高に対して、著しく越波流量が低下することがわかった。

#### 4.3 今後の課題

本研究では、モデル海上空港における護岸越波流量の検討を行い、隅角部などで局所的に越波流量が大きくなることを示した。実験①では、直立護岸、緩傾斜の前面マウンドを持つ緩傾斜護岸および消波ブロック被覆護岸を対象とした。3者のなかでは、消波ブロック被覆護岸

が越波低減に効果があることがわかったが、波高が大きくなり越波流量が大きくなると、波が越流状態になり、越波低減効果が現れなくなった。

そこで、実験②で波返しを取り付けた護岸と透水構造を有する排水路を背後に付けた越波吸収護岸を検討した。その結果、相対天端高 $h/H_0$ が1.0以下でも越波低減効果が高いタイプは越波吸収護岸であった。ただし、このタイプは排水路に海水がたまり、排水路の水位が高くなると波の打ち込みにより水面が振動し、後壁を越えて越波流量として扱われる量が増えていく。したがって、排水路の平面的な設計が重要で、滞水が無くスムーズに海水が流れるような配置を考えなければならない。まず考えられることは、本文中で述べたように排水路を延長し、海上空港島で波が来襲していない側面から外部へ排水できるような配置を考案することである。

ただし、近年の台風来襲時には高潮が発生しているので、空港島周囲の水位がすべて高く、排水路の出口のところに波が作用し、逆流するような支障が出る可能性がある。このように、今後は排水路の平面的な配置、排水路中の水流动を予測するモデルの確立等が課題として考えられる。また、越波吸収護岸は一つのアイデアであった、より越波低減効果が高いタイプの護岸についても開発を進めていく必要がある。

最後に、モデルとした護岸断面等について資料を提供していただいた関西空港株式会社ならびに関西空港用地造成株式会社の関係の皆様深く感謝いたします。

(2007年3月9日受付)

#### 参考文献

- 井上雅夫・島田広昭・円間弘起(1991)：透水性を有する緩傾斜護岸の越波特性，海岸工学論文集，第38巻，pp.541-545。
- 北野正夫・目見田哲・八木典昭・殿最浩司(2001)：上部スリット式護岸の開発とその背後に設置する越波排水路の設計法について，海岸工学論文集，第48巻，pp.751-755。
- 合田良実・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，pp4-44
- 合田良実 (1975)：浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，第14巻 第3号，pp59-106
- 合田良実・岸良安治(1976a)：不規則波による低天端型護岸の越波特性実験，港湾技研資料，No.242, 28p.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治 (1976b)：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技術資料，No.248, 24p

- 榊山勉・鹿島遼一・窪泰浩(1994) : 人工島式立地発電所への越波量評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.661-665.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦(1982) : 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.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦, 関口忠志(1984) : 斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.542-546.
- 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, 港湾技術資料, No.736.
- 東京都(2006) : 親水護岸の紹介, 東京都港湾局ホームページ(<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp>)
- 日野幹雄(1977) : スペクトル解析, 朝倉書店, 統計ライブラリー, pp.231.
- 平石哲也 (1992) : 多方向波の発生とその応用に関する研究, 港湾技術研究所資料, No.723, 176p.
- 平石哲也・望月徳雄・佐藤一央・丸山晴広・金澤 剛・榊本達也 (1996) : 護岸越波量における多方向性の影響, 港研技術研究所報告, 第35巻第1号, pp.39-64.
- 平石哲也・奥野光洋・安藤興太・国栖広志(2006) : 砂礫層内における長周期水流動の現地観測, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.831-835.
- Goda, Y.(1977) : Numerical experiment on statistical variability, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.16, No.2, pp.3-26.

#### 主要記号表

$dt$	: サンプルングタイム(s)
$H_0^*$	: 換算沖波(m, cm)
$H_{in}$	: 入射波高 (波高計アレイ位置) (m, cm)
$H_{1/3}$	: 有義波高(m, cm)
$K_s$	: 浅水係数
$K_R$	: 反射率
$q$	: 護岸越波流量 ( $m^3/m/s$ )
$q_{exp}$	: 実験値の時間平均越波流量 ( $m^3/m/s$ )
$q_{cal}$	: 合田の越波推定図から求めた時間平均越波流量 ( $m^3/m/s$ )
$S_{max}$	: 方向集中度パラメーター
$T_{1/3}$	: 有義周期(s)
$T_{bar}$	: 平均周期(s)

港湾空港技術研究所資料 No. 1158

2007. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 新高速印刷株式会社

Copyright © (2007) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。