

越波吸収型護岸による海上空港の越波対策

Mitigation of Wave Overtopping Rate in Offshore Airport by Permeable Bed Type Seawall

平石哲也¹・南 靖彦²・長谷川巖³

Tetsuya HIRAISHI, Yasuhiko MINAMI and Iwao HASEGAWA

Large wave overtopping due to storms sometimes causes heavy inundation damage in an offshore airport surrounded with the sea. The wave overtopping rate at seawall lines is significantly changed by the local sea bed topography and the type of seawall. 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 attached with a wave absorbing permeable bed behind it is proposed for the airport seawall and is investigated experimentally. Experimental results demonstrate the wave overtopping rate becomes remarkably small for the new type seawall.

1. はじめに

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。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、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越波対策として考えられる。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、護岸前面は複雑な地形になりやすい。また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ことが多く、従来の越波推定図から越波量を推定することは難しい。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を受けているので、単純に嵩上げすることが困難といった問題がある。

そこで、本研究では、まず実際に越波被災があった関西国際空港（平山ら、2005）を対象モデルとし、多方向不規則波および斜め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、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）との比較を行い、局所的な越波特性を調べた。

消波ブロック被覆護岸以外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、後退パラベット護岸（合田ら、1976a）は、護岸のパラベットを後方に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、二重のパラベ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。一方、最近、横須賀市馬堀海岸護岸で、護岸全体を碎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た（平石ら、2006）。

そこで、実験②として、低天端護岸における越波対策法として、越波した水塊を護岸背後の碎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、越波吸収型護岸とする）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思わ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。

2. 隅角部を含む護岸の越波特性

(1) 実験装置・模型の構成

実験①、②について使用した実験水槽は、幅 48 m、長さ 25 m、深さ 2 m の平面水槽で、長短 2 側壁に沿って、幅 50 cm 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

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 修(工) 国土交通省北陸地方整備局
3 正会員 (株)エコー 沿岸デザイン本部

(平石, 1992). 実験①の対象とした護岸は関西空港島南側の1期島と2期島に挟まれた水域で, 模型の再現範囲は図-1で示した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. なお, 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D1護岸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る. そこで, これらの護岸側の沿い波を重視する観点から実験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護岸の向きを考えて, 実験模型を現地地形に対し上下反転して設置した. 模型縮尺は, 10^{-3} ($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$) オーダーの越波流量まで取り扱えるよう1/30とした.

対象とした関西国際空港2期島周辺の等深線は大きく変化せず, きわめて緩やかな海底勾配となっており, 水深は19mではほぼ一定である. 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した. 実験潮位は+3.2mであるので, 水深は約22.2mとなった. 実験模型は, ブロック壁で護岸直立部を作成し, 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模型断面図を図-2に示す. なお, 模型で対象とした断面は関西国際空港2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(Furudoi, 2006). 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した.

(2) 実験で用いた波と実験手法

本実験では予め, 沖波の観測点(MT局)から実験範囲について非線形波浪変形計算(平山, 2002)を実施した.

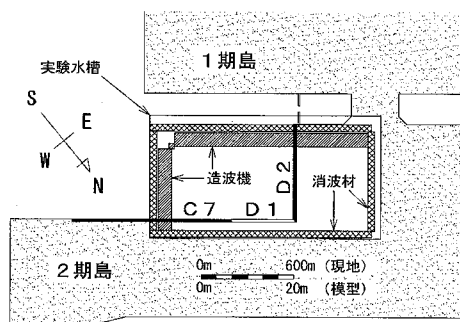


図-1 関西空港2期島を対象とした実験対象区間と実験模型配置図(実地形は上下反転で示している)

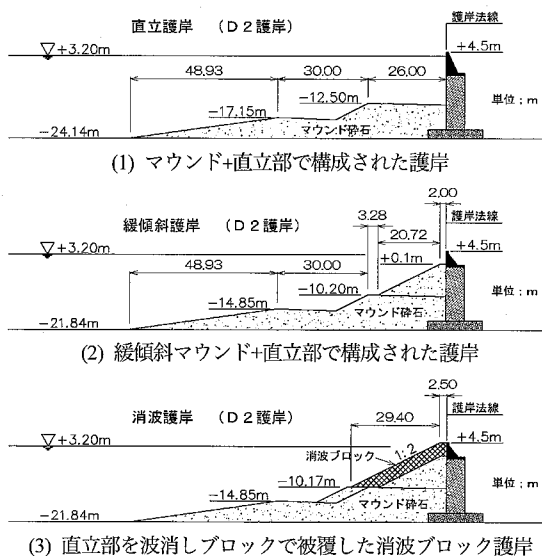


図-2 施工中の緩傾斜マウンド護岸と消波ブロック護岸

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 $H_0=3.30$ m, 周期 $T_{1/3}=7.1$ s, 波向 SW である.

また, 波の多方向性を示す方向集中度パラメーターは風波を仮定して, $S_{\max}=25$ を採用した. 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 $H_{in}=1.90$ m, 周期 $T_{1/3}=7.1$ s, 波向 N209°E (北から時計回りへ209°回転した方向) と計算された. 波浪変形計算結果から得られた方向スペクトルはばらつきも少なく, 裾部分の広がりも小さかったので, 入射波検定位置では単一方向不規則波として近似し, 実験波については, 波浪検定位置において, プレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルを目標とした有義波高 $H_{in}=1.9$ m, $T_{1/3}=7.1$ s の単一方向不規則波になるように造波信号を与えた.

波高計の配置位置を図-3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

表-1 入射波の条件

沖波諸元		
波高	周期	波向き
$H_0(\text{m})$	$T_{1/3}(\text{s})$	
3.30	7.1	SW

入射波検定位置					
合成波高	換算沖波	入射波高	周期	波向き	反射率
$H_{1/3}(\text{m})$	$H'_0(\text{m})$	$H_{in}(\text{m})$	$T_{1/3}(\text{s})$	(波高計アレイ位置)	K_r
2.25	2.00	1.90	7.1	N209°E	0.629

(現地量, 約 1 m) 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 1 m (現地量 30 m) 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樣 (現地量: C.D.L-22 m) で, 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, 1976b) を行い, 目標入射波を再現できるように造波信号を調整した。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 30 cm とした。

越波実験で計測する範囲は, 越波集水箱を 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, 380 m (D1 護岸), 400 m (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 1 m (現地換算では 30 m) 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各区間の越波流量とした。越波計測時間は, 250 波相当時間 (模型値で約 290 s) とした。

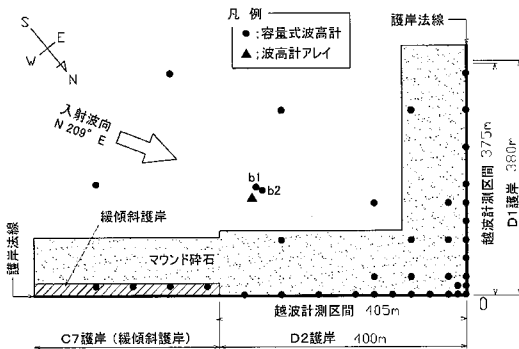


図-3 波高計および越波集水弁の配置図

(3) 実験の結果

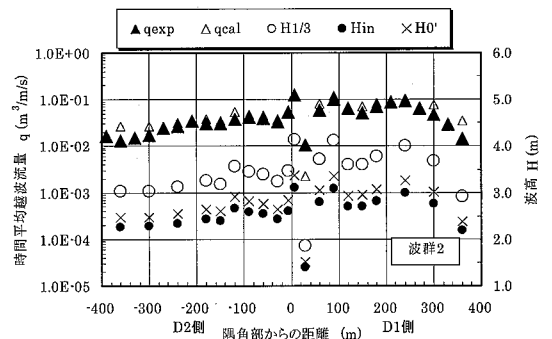
図-4 に D1 護岸, D2 護岸を直立護岸, 緩傾斜護岸, 消波ブロック護岸タイプとした場合に潮位 C.D.L+3.2 m での越波流量の空間分布と波高分布の関係について示す。なお波群を変化させて 2 回計測を実施したが, 波群の差による越波流量の相違は生じなかった。

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 ▲) と, 合田の越波流量推定図 (合田ら, 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

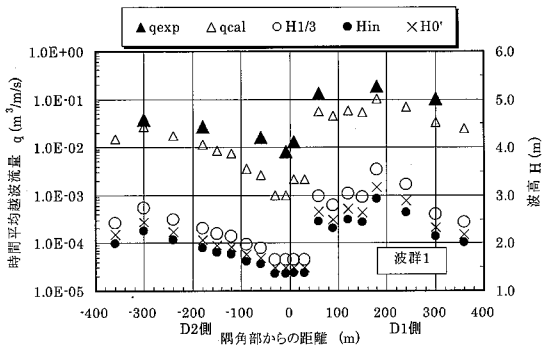
れた波高を表す指標軸 (m : 現地量) である。波高の凡例は, 反射波を含む各護岸前面波高 $H_{1/3}$ (グラフ凡例 ○) と式 (1) より入反分離した護岸前面入射波高 H_{in} (グラフ凡例 ●), さらに護岸前面の入射波高 H_{in} を浅水係数 K_s で割り戻して求めた換算沖波高 H_0' (グラフ凡例 ×) を示す。ここで式 (1) に使用される反射率 K_r は波高計アレイで得られた反射率 (0.629) と等しいとみなして計算し, 換算沖波高は護岸前面水深における浅水係数 ($K_s=0.92$) を用いて求めた。

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

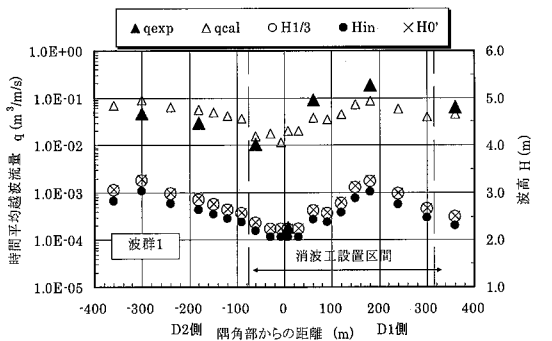
合田の算定図により平均越波流量 q_{cal} を算定する際には, 護岸前面の換算沖波高を用いて, 波形勾配は入射波浪諸元



(1) 直立護岸



(2) 緩傾斜護岸



(3) 消波ブロック被覆護岸

図-4 護岸に沿った越波流量の分布

から算定し、海底勾配はマウンドの影響を考慮して1/10とした。直立護岸および緩傾斜護岸の場合には直立護岸の越波流量推定図、消波ブロック護岸には消波護岸の推定図をそれぞれ用いた。

図-4に示すように、緩傾斜マウンドによる屈折と反射波との打ち消し合いにより隅角部の越波流量は最大とはならず、隅角部から数波長離れた地点で越波流量が増加する。この値は直立護岸より大きかった。この部分で消波ブロックによる被覆を実施したが、本実験範囲では、護岸天端高が低く、消波工の効果が十分活用できなかったため、越波流量は $0.1\text{ m}^3/\text{m/s}$ を超えることはほとんど無くなるものの、緩傾斜護岸に比べて大幅に低下することはなかった。護岸背後地に駐機場等が設けられ、越波をさらに抑止する場合には新しい護岸提案が必要である。

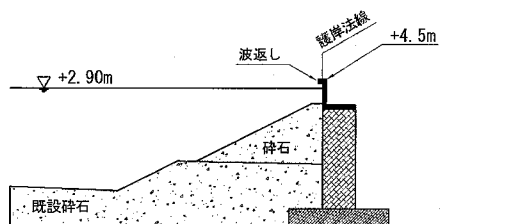
3. 越波対策護岸による越波低減効果

(1) 実験範囲と模型構造について

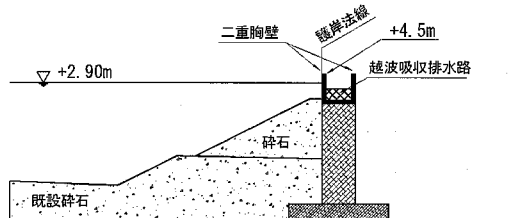
各護岸タイプの越波低減効果を同時に検討できるように、実験①で使用した関西国際空港のD2護岸の一部分に直立護岸、波返し護岸、越波吸収護岸を並べた。D1護岸部分には実験使用区間に反射波の影響が無いように化学繊維を幅80cmの籠に充填して製作した消波層を設置している。それぞれの護岸は延長50cm(現地量:15m)まで設置し、越波の計測範囲は、その延長上のほぼ中央部に相当する20cm(現地量:6m)とした。

越波対策断面として、緩傾斜のマウンド上に図-5に示すような対策なしの直立護岸、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。越波吸収護岸では直立護岸背後に、幅約150mm(現地量4.5m)の排水溝を設けた。また、水たたきによる水の跳ね上がりを吸収するための碎石を、排水路の深さ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、現地で6m幅の区間で越波流量を計測し、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。また、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させた。すなわち、排水路の中には水が溜まらず、常時、水が排水できる構造とした。現地の空港では、越流水を排水するために波向に対して裏側にあた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。

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 $0.02\text{ m}^3/\text{m/s}$ 前後～ $0.05\text{ m}^3/\text{m/s}$ 前後となるように潮位と波高を組合せて設定した。実験波の詳細は表-2に



(1) 波返し工を取り付けた護岸断面



(2) 越波吸収護岸の断面(透水排水路の後壁を越えた水量を越波量と定義する)

図-5 越波対策護岸の断面図(模型値)(対策無し断面は省略)

表-2 実験②の波条件

入射角	波種類	護岸天端高 C.D.L.(m)	潮位 C.D.L.(m)	実験波		
				種類	入射波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 T_0 (s)
0°	一方向波	4.5	2.9	波浪①	2.0	7.0
			2.9	波浪②	1.6	6.3
			2.0	波浪①	2.0	7.0
			2.0	波浪②	1.6	6.3
	多方向波	4.5	2.9	波浪①	2.0	7.0
			2.9	波浪②	1.6	6.3
$S_{\max}=25$			2.0	波浪①	2.0	7.0
			2.0	波浪②	1.6	6.3

示す。実験②では波の方向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、一方向波と多方向波($S_{\max}=25$)についても比較した。波の測定方法は実験①と同様である。

(2) 実験の結果

図-6に護岸構造の違い(図中の○直立護岸, △波返し護岸, □越波吸収護岸)による越波流量と沖入射波高の関係について示す。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で検討すると(図-6(1)), 潮位がC.D.L+2.9mの場合には、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と著しい越波量低減効果が確認された。また、沖入射波高が2.0mの場合と1.6mの場合を比較しても、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。越波吸収護岸では越波流量が $0\text{ m}^3/\text{m/s}$ に近

くなり、顕著に低減した。

図-6(3)の相対天端高で整理した結果を見ると、波返し護岸では相対天端高が1.0より小さい場合は、直接、護岸上を波が越流するため、構造上直立護岸と同じようなタイプになってしまうので、波返しの効果が小さくなり、越波低減効果はそれほど顕著には生じなかった。したがって、波返しの効果を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 $10^{-2} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 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

$\text{m}^3/\text{s} \sim 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ オーダーまで越波流量を低減させることが可能になった。したがって、越波吸収護岸が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が、直立護岸と同程度の越波流量が排水路に入るので、排水施設の構成や能力が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° の多方向不規則波($S_{\max}=25$)の場合(図-6(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少なくなる傾向が現れた。沖入射波高の低下に伴う越波流量の低下傾向もより顕著になった。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 $10^{-2} \text{ m}^3/\text{m/s}$ オーダーの越波流量が $10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 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。

4. ま と め

本研究では、海上空港島の護岸越波特性を模型実験で調べ、(1)緩傾斜マウンドの場合には、屈折と反射波との相互干渉により、隅角部の越波流量が最大とはならず、隅角部から数波長離れた地点で越波流量が増加すること、(2)越波対策施設としては、越波吸収護岸が h_c/H_m が1.0以下でも、対策無しに比べて越波流量が1/100以下となり、著しい越波流量低減効果があることを明らかにした。

参 考 文 献

- 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, pp. 4-44.
- 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, 28 p.
- 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, 港湾技研資料, No. 248, 24 p.
- 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.
- 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, 176 p.
- 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.
- 平山克也(2002): 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港技研資料 No. 1036, 162p.
- 平山克也・平石哲也・南靖彦・奥野光洋・峯村浩治(2005): 2004年台風による高波災害の被災パターンについて, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1316-1320.
- Furudoi, Y. (2006): Second phase construction project of Kansai International Airport-Largescale reclamation works on soft deposits-, Proc. 16th Inter. Conf. On Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 313-322.

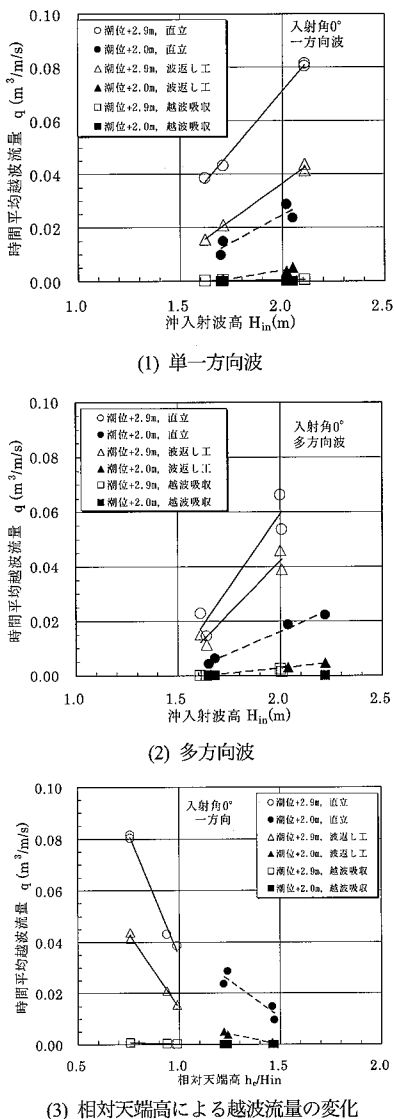


図-6 各種護岸構造の越波流量の比較