

波による渦流れを利用する海水交換促進型 防波堤の現地への適用について

PRACTICAL APPLICATION OF WATER-EXCHANGE BREAKWATERS DRIVEN BY VORTEX FLOWS IN WAVES

中村孝幸¹・高見慶一²・南本浩一³・三重野秀信⁴
Takayuki NAKAMURA, Keiichi TAKAMI, Kouichi MINAMIMOTO and Hidenobu MIENO

¹正会員 工博 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

²工修 復建調査設計株式会社 水工技術部 (〒732-0052 広島市東区光町2-10-11)

³復建調査設計株式会社 水工技術部 (〒732-0052 広島市東区光町2-10-11)

⁴正会員 復建調査設計株式会社 水工技術部 (〒732-0052 広島市東区光町2-10-11)

A seawater exchange breakwater may be useful to exchange seawater between inside and outside harbor for improvement and preservation of seawater quality. In the previous study, a water chamber type water exchange breakwater has been newly proposed, in which the unidirectional current is excited by the vortex flows driven by wave motions in the water chamber. Recently there is a project to construct the water exchange breakwater of this type at the real harbor. In order to accomplish the project, some preliminary examinations and investigations have been carried out for assuring the performance of the designed breakwater, typically physical model tests and theoretical analysis of the breakwater with some variations. It was confirmed that the designed breakwater was effective for both exchanging seawater and reducing incoming waves at the real harbor for given design wave conditions.

Key Words: Practical application, water exchange, gravity-type breakwater, water chamber, vortex flow

1. はじめに

漁港や港湾では、港内の静穏度を確保することを重視するあまりに、多くの外郭施設が建設され、結果として閉鎖性の強い内湾域が形成されている。閉鎖性内湾域では、外海との海水の流れが阻害されることにより慢性的な水質悪化傾向にあり、漁業や生態系への悪影響が懸念されている。これらの問題を解決するために、近年では、透過性防波堤や種々の海水交換機能を有する防波堤が建設されるようになってきている。

既に著者らは、渦流れを利用する海水交換促進型防波堤(導出型)に関する多くの研究成果を報告している。この防波堤は、遊水室内で発生するピストンモード波浪共振により発生する冲向き方向への渦流れが港内水を港外へ導出するものである。これは、従来の海水交換機能を有する防波堤が港外水を港内に導入するのに対し、非常に効果的な工法と言える。また、海水が導出される通水部の位置が底層付近であることから、表層だけでなく、溶存酸素量が低い底層付近の海水を導出するため効果的な海水交換が

可能である。しかし、現地への適用例はまだ少なく、適用方法についての検討を行う必要がある。

本研究は、海水交換促進型防波堤の現地への適用方法とその水理機能について検討することを目的とする。具体的には、図-1に示す海水交換が必要とされる漁港において、本防波堤の断面設計を行い、模型実験による照査を経て最終的な断面を決定するのである。また、決定された本防波堤の現地における機能について試算する。

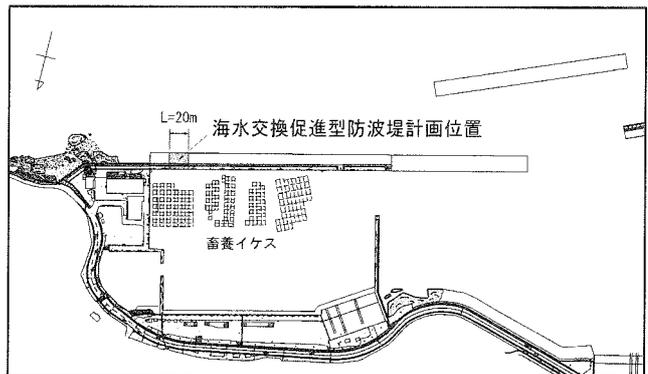


図-1 対象漁港の平面図と計画位置

2. 模型堤体の設計

(1) 現地条件

表-1は、対象とする漁港の現地条件のまとめである。ここで、機能設計波は垂下版吃水深 d_v や遊水室幅 B 等(図-2参照)の海水交換機能や消波機能の特性に係る諸元を決定する際に目安となる波浪条件であり、この波浪条件に対して最も海水交換効率が良くなるように各諸元を設定する。また、今回対象とした漁港では、海水交換を期待する範囲を風速15.0m/s以下の波浪条件としたため、機能設計波は、その範囲のおおよその中央値である $H_{1/3}=0.8\text{m}$ 、 $T_{1/3}=3.3\text{s}$ を設定した。表-2は、海水交換期待範囲の波浪条件であり、これらは現地沖合における平均風速と有効吹送距離によりSMB法で算出したものである。また、出漁限界波は、風速15.0m/sが出漁できる限界であるという判断を基に対象漁港で設定されている。

表-1 現地条件のまとめ

①潮位	H.W.L. +2.20(m) L.W.L. ±0.00(m)
②現地盤高	C.D.L. -6.00(m)
③波浪条件	
構造設計波	SSE $H_{1/3}=6.5\text{(m)}$ $T_{1/3}=11.9\text{(s)}$
出漁限界波	ESE $H_{1/3}=1.7\text{(m)}$ $T_{1/3}=4.6\text{(s)}$
機能設計波	$H_{1/3}=0.8\text{(m)}$ $T_{1/3}=3.3\text{(s)}$
④土質条件	表層より基盤層

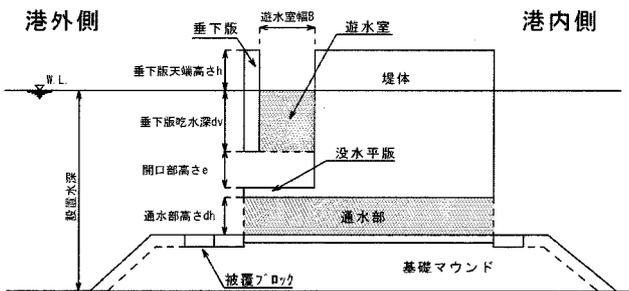


図-2 海水交換促進型防波堤の基本断面

表-2 海水交換期待範囲の波浪条件 (SMB法による)

平均風速 $U\text{(m/s)}$	沖波波高 $H_o\text{(m)}$	沖波周期 $T_o\text{(sec)}$	沖波波長 $L_o\text{(m)}$	換算沖波波高 $H_o'\text{(m)}$
15	1.7	4.6	33.0	1.7
14	1.6	4.4	30.2	1.6
13	1.5	4.3	28.8	1.5
12	1.3	4.1	26.2	1.3
11	1.2	3.9	23.7	1.2
10	1.1	3.7	21.4	1.1
9	0.9	3.5	19.1	0.9
8	0.8	3.3	17.0	0.8
7	0.7	3.1	15.0	0.7
6	0.6	2.8	12.2	0.6
5	0.4	2.5	9.8	0.4
3	0.2	1.8	5.1	0.2
0	-	-	-	-

(2) 構造諸元の設定

図-2に示す構造諸元は以下のように設定した。

a) 垂下版吃水深 d_v

垂下版吃水深は、低潮位から機能設計波の波高分程度とする。従って、L.W.L. -1.00mとする。

b) 開口部高さ e

開口部高さは、既往研究成果より1.00mとする。

c) 遊水室幅 B

遊水室幅は、遊水室内において最も渦流れが激しくなる条件での垂下版吃水深と機能設計波の波長との関係から、1.70mとした。

d) 部材厚と堤体幅

垂下版や没水平版の部材厚と堤体幅は、構造設計波を基に漁港基準等の波圧式により設定した。

3. 模型実験による基本諸元の照査

(1) 実験装置及び実験方法

a) 模型堤体

実験は、図-3に示す模型防波堤を用いて行った。構造諸元は、2章において設定したものであるが、諸元変化により機能に大きな影響を及ぼすと考えられる開口部高さ e と諸元変化による影響が未確認であった垂下版天端高さ h については、模型実験により照査を行うこととし、実験の中で変化させ、最適な諸元を決定した。模型スケールは約1/13.5としている。

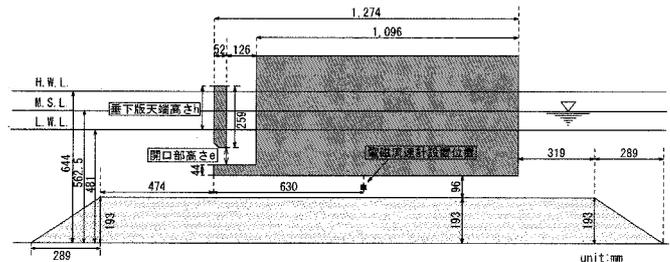


図-3 海水交換促進型防波堤の模型断面 (S=1/13.5)

b) 実験水槽および測定装置

実験には、図-4に示す長さ30.0m、幅1.0m、高さ1.2mの二次元造波水槽を用いた。図に示すように、1:30勾配のスロープと水平床が設けてあり、模型堤体は水平床上に設置した。また、水槽の終端にはヘチマロンと捨石斜面で構成される消波工を設けており、消波工の構造は、捨石斜面の上側だけを隔壁で分断して下側は解放状態としてある。このように、平面的に回流できる構造とし、冲向き方向に発生する平均流の妨げにならないように配慮している。

波変形の測定は、図-4に示す位置に4台の波高計を設置して行った。また、1台を入射波測定用、2台を入・反射分離測定用、残りの1台を透過波測定用とした。

堤体下部の通水部における流速は、図-3に示す位置に電磁流速計を設置して測定した。流速測定値は

周期的に振幅するが、時間的に平均して一方向への流速(平均流速)として取り扱った。また、平均流速に通水部高さを乗じることで、実質的な海水交換量(導出量)を算定した。

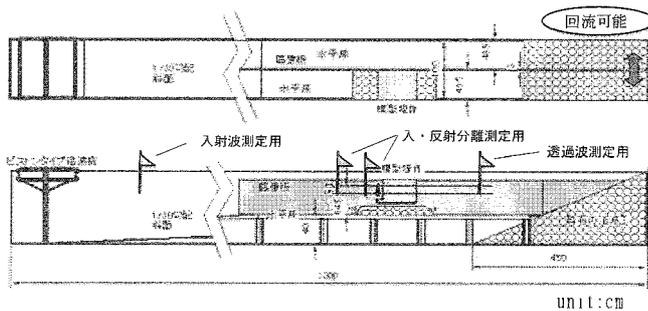


図-4 実験水槽及び波高計設置位置

c) 実験条件

実験は、不規則波と規則波の両者を用いて行った。不規則波の条件は、表-2に示す海水交換期待範囲から抽出したものであり、造波の際にはブレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルを標的とした。規則波の条件は、現地周期 $T=2.9\sim 6.6$ sの範囲で、現地波高 $H=0.8, 1.6$ mの2種類である。ここで、 $H=0.8$ mは機能設計波の有義波高、 $H=1.6$ mは出漁限界波の有義波高に相当するものである。なお、規則波はある波浪条件(周期と波高)における機能を明確にするため、不規則波は、現地により近い状況における機能を考察するために用いた。

また、潮位条件は、高潮位、平均潮位、低潮位の3種類とした。

(2) 諸元の照査

a) 開口部高さ e

図-5は、開口部高さ $e=1.0$ mと 1.5 mの導出量の比較(規則波、平均潮位)を示す。ここで、横軸は現地周期、縦軸は導出量を示しており、縦軸の負方向は港内から港外へ海水導出されることを表している。図によると、開口部高さ e に関わらず、周期あるいは波高が大きくなるほど導出量が多くなる傾向があることが分かる。両結果の導出量を比較すると、波高が大きい時は $e=1.5$ mの方が多く、波高が小さいときは $e=1.0$ mの方が多い結果となった。これは、波高が大きいときは、 $e=1.5$ mの方が遊水部内に波が入りやすく、大規模な渦流れが発生したためと考えられる。一方、波高が小さいときは、垂下版下端で発生する渦流れが小規模となり、垂下版下端が通水部により近い $e=1.0$ mの方が通水部の水塊を効率よく港外側へ導出できたためと考えられる。

以上の結果から、開口部高さ e は、現地において、出現率の多い小波高の条件でより多くの導出量が期待できる $e=1.0$ mと設定する。

b) 垂下版天端高さ h

図-6は、垂下版天端上からの越波の有無による導出量への影響(規則波、高潮位)を示す。越波を許容しない場合と越波を許容する場合の導出量を比較すると、長周期側では越波を許容しないの方が上回るが、海水交換期待範囲である 4.6 sより短周期側では、ほぼ同様の傾向を示す。つまり、海水交換を期待する条件では、越波の有無による影響はほとんどないと考えられる。

以上の結果から、垂下版天端高さ h は、高潮位(+ 2.20 m)において機能設計波(0.8 m)が概ね越波しない高さである+ 3.00 m($2.20+0.8$)と設定する。

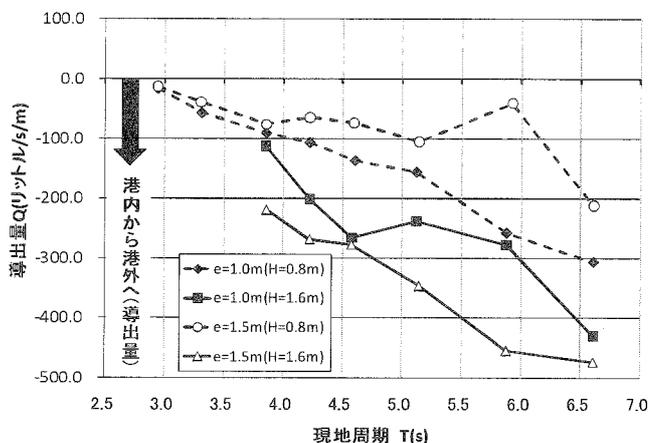


図-5 開口部 e の変化による導出量への影響(規則波、平均潮位)

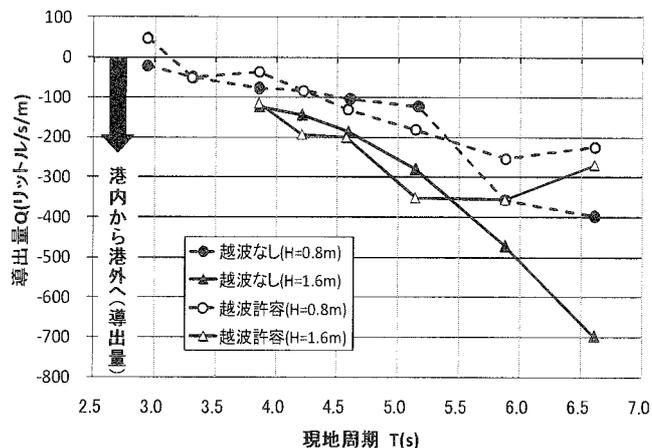


図-6 越波の有無による導出量への影響(規則波、高潮位)

4. 模型実験による機能照査

(1) 海水交換機能

図-7は、海水交換促進型防波堤の規則波と不規則波に対する導出量(平均潮位)を示す。ここでの構造諸元は3章において再設定されたものであり、開口部高さ $e=1.0$ m、垂下版天端高さ $h=+3.00$ mである。規則波と不規則波の結果を比較すると、両者は同様の傾向を示しており、優れた海水交換機能を有する

ことが分かる。また、不規則波の結果から、防波堤延長 1m 当たりにおいて、機能設計波 ($T=3.3s$, $H=0.8m$) の条件では $60\ell/s$ 程度、出漁限界波 ($T=4.6s$, $H=1.7m$) の条件では、 $200\ell/s$ 以上の導出量となることが期待できる。

ここで、出漁限界波が 1 日中作用したと仮定した場合、現地漁港において計画されている防波堤延長 20m 当りに換算すると $34560m^3/day$ 以上の導出量となる。これは本防波堤背後にある泊地内全ての水塊量に相当するものである。

図-8、図-9 は、それぞれ規則波と不規則波に対する潮位変化による導出量への影響を示す。規則波の結果によると、高潮位と平均潮位の導出量は短周期側で同程度であるが、低潮位のそれは、他の潮位と異なり、短周期側で大きい長周期側で減少するなどばらつきが大きい。これは、低潮位のとき長周期側で遡上性の波が下部通水部に入り込み易くなり、港外側へ発生する平均流が阻害されることによると考えられる。不規則波の結果に対しても、規則波と同様に潮位変化による導出量への影響はあるが、どの潮位においても有効に導出できていることが分かる。従来の海水交換機能を有する防波堤は、潮位変化による影響を強く受けるという問題点があるのに対して、本工法は潮位変化にほとんど左右されないことが確認できる。

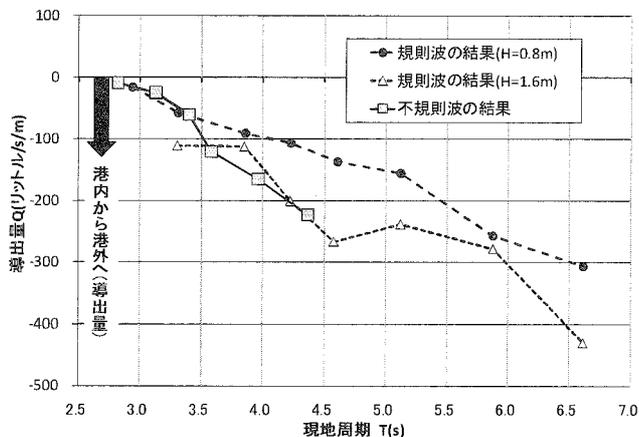


図-7 海水交換促進型防波堤の導出量(平均潮位)

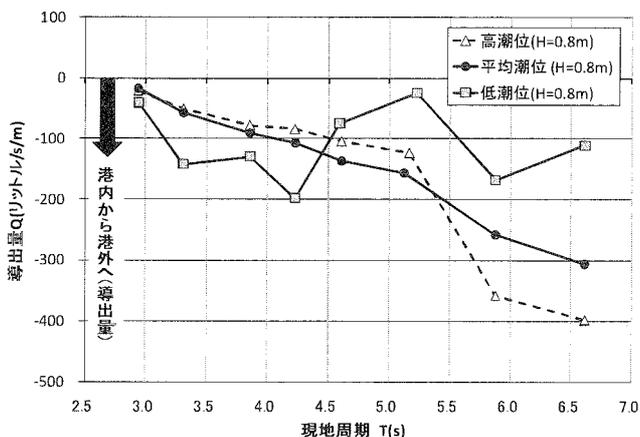


図-8 潮位変化による導出量への影響(規則波)

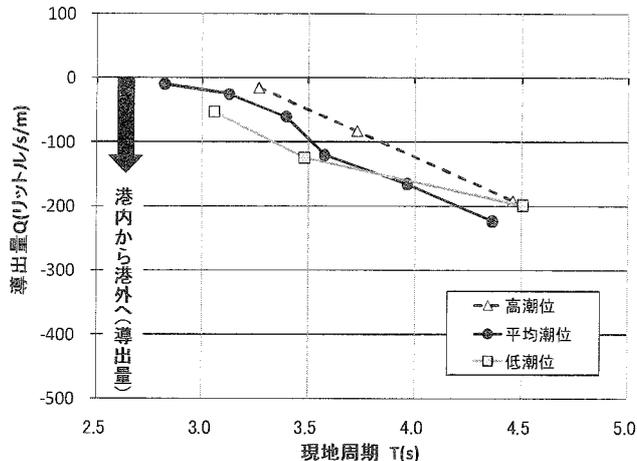


図-9 潮位変化による導出量への影響(不規則波)

(2) 消波機能

図-10は、海水交換防波堤の規則波と不規則波に対する消波機能(平均潮位)を示す。規則波と不規則波の結果と比較すると、両者は同様な傾向を示しており、出漁限界波 ($H=1.7m$, $T=4.6m$) の条件では、反射率 $K_r=0.4$ 、透過率 $K_t=0.1$ 程度となる。

図-11、図-12は、それぞれ透過率 k_t と反射率 k_r への潮位変化による影響(規則波)を示す。ここで、中村ら(1997)による減衰波理論に基づく理論算定(Cal)に用いた線形抵抗係数 f_c は既往の研究成果を参考として、高潮位と平均潮位は 0.2 、低潮位は 0.3 とした。低潮位の f_c を 0.3 という高い値にしたのは、潮位が低くなることによって、没水平版上の水深が浅くなり、エネルギー損失の顕著な砕波に類似した現象が起りやすくなるためである。透過率については、やはり潮位が低くなるにつれて増大していく傾向にある。しかし、低潮位時においても $K_t=0.1$ 程度であり、優れた透過率低減効果が確認できる。一方、反射率については、出漁限界波の条件付近において $K_r=0.4$ 以下となる。また、潮位が低くなるにつれて、反射率の極小値が現れる周期帯が、短周期側に移行していることが分かる。これは、遊水室内の水塊量が少なくなる程、遊水室内で発生するピストンモード波浪共振の現れる周期帯が短周期側に移行するためである。なお、本検討では、波高 $H=0.8m$ と $1.6m$ の両者を作用させたが、 $H=0.8m$ の結果は、 $H=1.6m$ の場合と同様の傾向を示すため省略している。

図-13は、別途行った激浪波に対する実験の中から、構造設計波 ($T=11.9s$, $H=6.5m$) に対する消波機能(不規則波)の結果のみを示す。ここで、横軸は現地波高を示しており、作用させた波の周期はいつでも $T=11.9s$ である。図によると、波高による変化はほとんどなく、ほぼ一定の値を示している。透過率については、潮位に関わらず 0.2 程度となっており、優れた透過波低減機能を有することが確認できる。一方、反射率については、高潮位時が 0.8 程度、低潮位時が 0.7 程度となり、比較的大きな値となる。これは、機能設計波の条件 ($H=0.8m$, $T=3.3s$) に対し

表-4 越波測定実験結果のまとめ

実験断面	越波流量(現地換算)	
	q(m ³ /m/s)	
海水交換促進型防波堤 (大型波返し工付)	0.0048	
海水交換促進型防波堤 (大型波返し工なし)	0.1160	
直立壁	0.1002	

6. 現地における機能の試算

ここでは、現地漁港においてどの程度の導出量が見込めるか試算する。また、対象期間は港内の水質が最も低下すると考えられる夏季(6~8月)とした。

表-5は、現地における夏季の波浪出現率を考慮した海水導出量のまとめである。表中に示す原単位は、各風速階級の条件(代表風速)に対する海水交換促進型防波堤の導出量を示しており、図-7の平均潮位における不規則波の結果を用いて算出している。ここで、平均潮位の実験結果のみを用いたのは、図-8、図-9に示す様に、海水交換の期待範囲であるT=4.6sより短周期側において、導出量は、高潮位<平均潮位<低潮位で概ね線形関係となることから、平均潮位の結果に基づき、一日あたりの導出量を算出することが可能なためである。それら原単位に各風速階級の波浪出現率を乗ずることで、現地における海水導出量とした。

表によると、夏季において防波堤延長1mあたり平均10.20/s程度の海水が港外側へ導出されることが分かる。また、一日あたりの導出量に換算すると、防波堤延長1mあたり約880m³/day、計画延長20mあたりにすると約17600m³/dayとなる。ただし、これは海水交換促進型防波堤の波に対する機能としての導出量であり、潮流による海水の流れは考慮していない。また、現地における潮流の方向は、本防波堤の法線とほぼ同じ方向であるため、潮流の流れに引きずられる形で、通水部を介して港内から港外へ海水が導出されることが、別途、潮流シミュレーションにより明らかになっている。つまり、潮流は、海水交換促進型防波堤の海水導出量を増大させる要因となる。また、波高が非常に小さく海水交換促進型防波堤による導出量が期待できない場合でも、実際には通水部として機能しており、海水が導出されると考えられる。

表-5 夏季における現地波浪出現率を考慮した海水導出量

風速階級	代表風速	出現数		出現率		海水導出量	
		ENE~S	ENE~S	ENE~S	ENE~S	原単位	出現率考慮
m/sec	m/sec	回	%	%	%	%/(s·m)	%/(s·m)
0~5	—	1592	24.3			少量であるため無視	
5~7	6	415	6.3			-8	-0.5
7~9	8	229	3.5			-30	-1.05
9~11	10	162	2.5			-113	-2.83
11~13	12	75	1.1			-160	-1.76
13~15	14	56	0.9			-200	-1.8
15~	15	63	1			-225	-2.25
合計		2592					-10.19

※全方位の計測数(母数)は6542である

7. 結語

対象漁港の条件で検討した結果以下のことが明らかになった。

(1) 海水交換促進型防波堤の導出量は、不規則波の結果から、防波堤延長1m当たりにおいて、機能設計波(T=3.3s, H=0.8m)の条件では600/s程度、出漁限界波(T=4.6s, H=1.7m)の条件では、2000/s以上の導出量となることが期待できる。また、出漁限界波が1日中作用したと仮定した場合、現地漁港において計画されている防波堤延長20mあたりに換算すると34560m³/day以上の導出量となる。これは本防波堤背後にある泊地内全ての水塊量に相当するものである。

(2) 海水交換促進型防波堤の導出量は潮位に関わらず有効に導出することが可能であり、従来の海水交換機能を有する防波堤は、潮位変化による影響を強く受けるといった問題点があるのに対して、本工法は潮位変化にほとんど左右されない。

また、海水交換を期待するT=4.6sより短周期側における導出量は、高潮位<平均潮位<低潮位で概ね線形関係にあることから、平均潮位の結果に基づき、一日あたりの導出量を算出することが可能である。

(3) 海水交換促進型防波堤の消波機能は、出漁限界波の条件(T=4.6s, H=1.7m)では、反射率Kr=0.4、透過率Kt=0.1程度、構造設計波の条件(T=11.9s, H=6.5m)では、反射率Kr=0.8(高潮位)、透過率Kt=0.2(高潮位、低潮位)程度となる。

(4) 現地における夏季の海水交換促進型防波堤の導出量を試算すると、防波堤延長1mあたり平均10.20/s程度となる。また、一日あたりの導出量に換算すると、防波堤延長1mあたり約880m³/day、計画延長20mあたりにすると約17600m³/dayとなる。

(5) 本研究のように、対象漁港の現地条件に合わせた模型実験を行い、断面諸元等を決定すれば、優れた機能を有する海水交換促進型防波堤の設計が可能である。また、今後、現地調査を行い、導出量を測定し、本検討で試算した導出量との整合について検討する予定である。

参考文献

- 1) 中村孝幸・大村智宏・大井邦昭：渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の効果について、海岸工学論文集、第50巻、pp.806-810、2003。
- 2) 中村孝幸・井出善彦：波の逸散現象を利用した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法、海洋開発論文集、第13巻、pp.177-182、1997
- 3) 中村孝幸・大村智宏・楨本一徳：波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤の効果的な断面について、海洋開発論文集、第21巻、pp.541-546、2005

て最も海水交換効率が良くなるように各諸元を設定したことにより、反射率の極小値が短周期側 ($T=4.4s$ 付近)で現れるためである。ここで、反射率の極小値が現れる条件は、遊水室内の渦流れが最も激しくなるときであり、海水交換率の極大値が発生する周期条件と類似することを付記する。例えば、機能設計波の周期を長周期側にして諸元を設定した場合、構造設計波の反射率は低下することとなる。

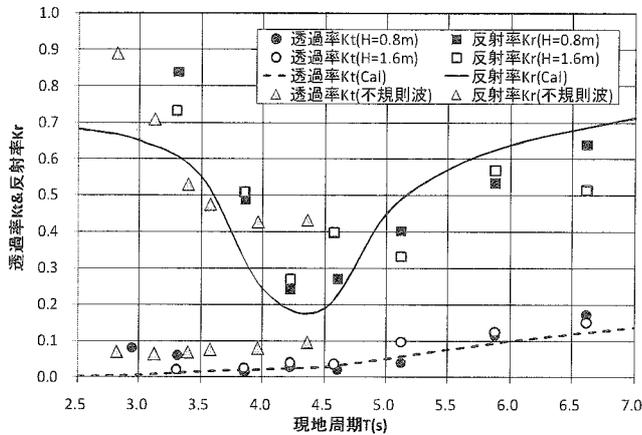


図-10 海水交換促進型防波堤の消波機能 (平均潮位, 規則波, 不規則波)

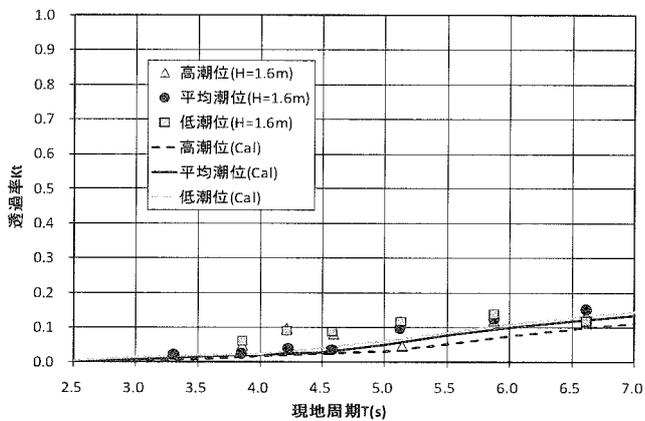


図-11 潮位変化による透過率への影響 (規則波)

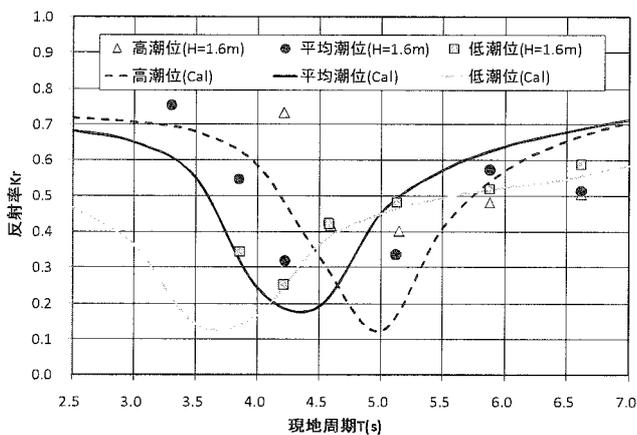


図-12 潮位変化による反射率への影響 (規則波)

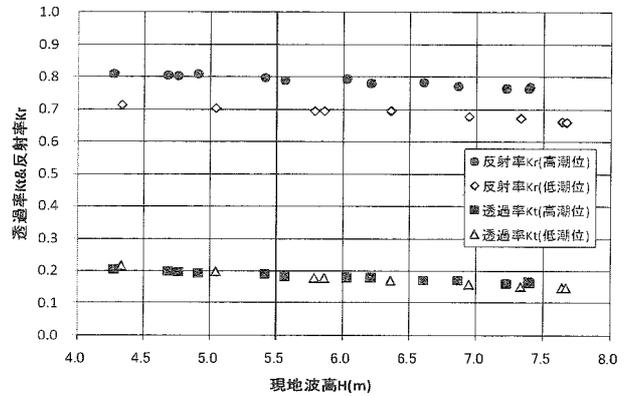


図-13 構造設計波に対する消波機能 (不規則波)

5. 断面の決定

図-14 は、模型実験による基本諸元の照査と以下の検討により決定された標準断面図である。また、これらの検討は、別途行った激浪波浪に対する模型実験の結果を基に行ったものであるが、本論文では結果のみの記載とする。

(1) 安定計算

安定計算は、模型実験により得られた構造設計波に対する波圧分布を基に行った。表-3 に、安定計算結果のまとめを示す。

(2) 越波に対する配慮

図-1 に示す様に、本防波堤の計画位置の背後には畜養イケスが存在しており、越波を抑える必要があるため上部工形状は大型波返し工とした。また、大型波返し工の有効性は越波測定実験により確認した。表-4 に越波測定実験の結果のまとめを示す。

(3) 被覆ブロックの選定

被覆ブロックは、通水部の流れを阻害しないように大型のものを避け、高比重コンクリートを使用して小型のものをを使用した。また、安定性は被覆ブロックの安定実験により確認した。

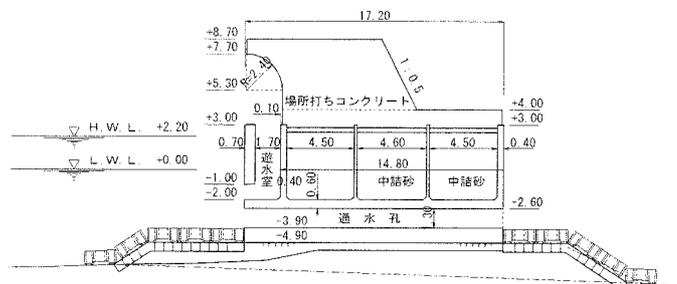


図-14 海水交換促進型防波堤の標準断面

表-3 安定計算結果

検討項目	安全率	許容安全率	判別
滑動	1.21	> 1.2	OK
転倒	2.56	> 1.2	OK
偏心傾斜荷重	1.28	> 1.0	OK
直線すべり	1.54	> 1.2	OK