特集2・沿岸海域における環境復元と防災との共生

海水交換防波堤の防波機能と海水交換機能

中村孝幸*

キーワード：防波，海水交換，渦流制御，吸出し流れ

1. ま え が き

従来，港湾では，港内静穏度の向上を目的として，外郭施設の防波堤構造を不透水性あるいはそれに近い構造にすることが多い．外洋に面する港湾では特にその傾向が強く，静穏度を追求するあまり，2重，3重の防波堤配置になる場合なども見られ，港内は閉鎖性の強い海域になりやすい．魚介類など水産物の荷揚げや取引の中心地である漁港は，対象船舶が商船に比較すると小型の漁船であるため，静穏度の基準はより厳しく設定されており，上記したような海域の閉鎖性はより強くなる傾向にある．

漁港では，港内に一時的に魚介類を海に蓄える蓄養施設を設けることが多く，静穏海域であることを利用して養殖施設を設ける例も見られる．しかしながら，漁港域は，水産物の洗浄や加工処理など汚濁負荷の大きい海域であり，上述したように外郭施設に囲まれた閉鎖性の強い海域であることも相乗して，蓄養施設内での魚介類の斃死などが問題になってきている．より重要な社会問題としては，漁港を介して消費者に供給される水産物の安全性確保があり，港湾域を清浄で衛生的な海域とすることの必要性が叫ばれている¹⁾．このような港内水の汚濁は一般港湾においても見られ，その浄化が同様に必要とされている．そして，港湾域の水質浄化を進めるため，多少荒っぽいが既設防波堤の一部を取り除く計画なども提案されている²⁾．

一方，港湾・漁港は，貨物や水産物の荷役場所であるとともに嵐などのときの避難場所でもあることから，本来の機能である高波や強風などに対する商船・漁船の安全性が確保できるものでなくてはなら

ない．このため，これからの港湾・漁港の外郭施設としては，相反する機能ではあるが，商船・漁船の安全性を確保できると同時に，海域の水環境の保全・改善を促進するものが望ましい．

ここでは，主に著者を含む大学の研究者と水産工学研究所（旧水産庁，現独立行政法人）の研究者ならびに民間の実務・設計技術者とが共同研究により開発した海水交換促進型防波堤を例にとり，港内の静穏化に必要な波浪制御機能と港湾域の水質浄化に関係する海水交換促進機能の両面を併せ持つ外郭施設について紹介する．

2. 海水交換促進型防波堤

従来，海水交換型防波堤としては，概念図を図1に示すように，堤体の一部に通水孔を設け，潮流や波浪流等の流れの疎通をよくするものや（小田ら³⁾；森田ら⁴⁾；大村⁵⁾），さらに越流工や弁などを設けて通水孔内の流向を制御するものなど（岡本ら⁶⁾；道下ら⁷⁾；塩崎ら⁸⁾；下迫ら⁹⁾），また別途に潜堤を設けるもの（山本ら¹⁰⁾）などが知られている．いずれもできるだけ防波・消波機能を維持しながら，通水あるいは海水交換機能を持たせるような工夫がなされているが，波の遮蔽効果や反射波低減効果が十分でないものや構造が複雑すぎる例なども見られる．

これらの研究の中には，波エネルギーを原動力として一方向平均流を引き起こし，港内に外海水を導入しようとする海水交換促進型防波堤も見られる．促進工の原理的な機構は，水位差を利用するものがほとんどであり，水位差を引き起こす流体现象としては，碎波に伴う遡上現象や波の峰の盛上がりを利用

Water exchange ability and wave dissipation effect of a seawater exchange breakwater

*愛媛大学 Takayuki NAKAMURA

(a) パイプ式海水交換防波堤

(b) 潜堤付孔空き海水交換防波堤

図-1 従来の海水交換防波堤の例

用する越波現象などがある。いずれも波運動を利用して水位差をつくり、外海水を港内へ導入する方式である。このような促進工の中には、潜堤付き孔空き防波堤¹¹⁾のように既に実用に供されているものもあるが、潮位差のある海域では、機構上潮位により海水導入量が急変するなどの短所のあることも指

摘されている。

図-2には、著者らの共同研究で開発した海水交換促進型防波堤の概略図を示す。堤体下部に通水工があり、堤体の外海側に設けた鉛直カーテン版と本体との間に遊水室と呼ばれる水域が付随している。また、この遊水室の下部には通水路の天井になる水平版があり、後述するようにカーテン版下端よりの渦流れの制御や港内に侵入する透過波の低減に役立つ重要な部材である。

この防波堤の大きな特徴は、一方向平均流を生成するのにカーテン版下端より発生する渦流れを利用することおよび、従来の海水導入方式と異なり、港内水を港外へ吸い出す方式であることなどである。このため、この方式の防波堤を外郭施設とすると、港内汚濁水は防波堤より港外へ輸送されて希釈され、港口部などより外海水が港内へ供給されることになる。上記した海水導入型防波堤を併設すると、外海水の導入部と港内水の吸出し部が任意に設定でき、港内の海水交換を制御することも可能と考えられる。

また、この防波堤は、機構的に遊水室内のピストンモードの波動運動を利用して渦流れを強化するため、波エネルギーを渦運動のエネルギーへと効率的に変換しており、結果的に反射波や透過波も低減できる利点がある。このように、新規開発した海水交換促進型防波堤は、港湾内外の波浪の低減と海水交換の促進という両面を満足する防波堤といえるが、以下にその効果の概要について紹介する。

図-2 新規開発の海水交換促進型防波堤
(波動渦流型海水交換促進防波堤)

図-3 実験に用いた造波長水路

3. 新規防波堤による波浪の低減効果

以下に紹介する成果は、図-3に示す独立行政法人・水産工学研究所の100 m長波水槽を用いた実験結果である。波を動力源とする一方向平均流を伴う実験のため、平均流の発生による水位差の影響が現われないように水路の下部に循環流用の底水路が設けてある。

用いた模型堤体は、現地量の1/20程度の縮尺模型であり、図-4に示す3種類の断面である。これら構造体の鉛直部材・水平部材は、模型・現地堤体ともに全て側壁により支持される構造としてある。また、港内側の背後壁の下部、あるいは水平版の下部と水底との間が空けてあり、港湾内外の通水路になっている。前後壁の間には矩形水域があり、いわゆる遊水室型構造の堤体である。図-4(c)の堤体は、耐波安定性のため背後に矩形重量部を設け、下部通水路が長くなる場合を想定した。

図-5は、図-4(a)の水平版のない堤体に対する反射率 Cr と透過率 Ct の結果を示すもので、図中には減衰波理論¹²⁾という近似的に渦流れ等による波のエネルギー逸散を考慮する理論算定¹²⁾による結果も示してある。この図中では、入射波高 H は

(a)異吃水2重壁式防波堤 unit;cm

(b)水平版付海水交換防波堤 unit;cm

(c)水平版延長型海水交換防波堤 unit;cm

図-4 実験に用いた各種海水交換防波堤の模型

図-5 反射率 Cr 、透過率 Ct ；異吃水2重壁式防波堤

一定値 ($H=10\text{ cm}$) としてあるが、波周期は各種に変化しており、周期と特定の関係にある波長 L と遊水室幅 B の比を用いてこの変化を表してある。

この図に見られるように、背後壁の下部を一部開けただけの海水交換防波堤では、 L/B の大きな長波長の条件、言い換えると長周期の条件下で、透過率は5割を上回るようになり、港内への侵入波が比較的大きいことから港内の静穏化は保てなくなることが分かる。

図-6 は、水平版を設けた場合の代表例として図-4 (c) に示す水平版延長型堤体に対する結果を図-5 と同様にして示す。水平版のない場合の結果と比較すると、特に長周期側での透過率の低下は著しく、水平版がない場合のほぼ1/3程度にもなることが分かる。また、反射率は、水平版を設けるとその極小が長周期側に移行することやその絶対値も低下することなども認められる。

図-7 は、水平版延長型堤体に対する波のエネルギー逸散率 EL を示す。この逸散率は、入射した波

のエネルギーが構造物との干渉の後に波動エネルギーとして保存されない割合を示す指標である。失われた波エネルギーは、渦流れや平均流に変換されたかもしれないし、熱になり消失したかもしれない。

この図より、逸散率 EL は、8割程度以上にもなるなど、水平版延長型堤体による波エネルギーの逸散は極めて大きいことが認められる。このように大きな逸散を引き起こす機構は既に解明されており、概略的には図-8 (次頁) のように説明される。簡単に言えば、遊水室内のピストンモードの波動運動を原動力として、沖側にある前面カーテン壁の下端から強い渦流れが生じることによる。

このとき、重要となるのは遊水室の下部にある水平版の役目で、この水平版の存在により、まず下部通路内の流体の鉛直運動が抑制され、これにより透過波が有意に低下することが判明している¹³⁾。また、この機構図に示すように、水平版は押し波時に遊水室内に形成される渦をこの部屋に閉じ込める効果ならびにこの渦による通路への影響を遮断す

図-6 反射率 Cr 、透過率 Ct ；水平版延長型海水交換防波堤

図-7 波エネルギー逸散率 EL ；水平版延長型海水交換防波堤

図-8 平均流の発生機構および反射波・透過波の低減機構

る効果を持つ。このため、通水路内の流体は、結果として引き波時に前面カーテン壁の沖側に形成される渦の影響をより強く受け、沖側へ向かう一方向平均流が誘起されることになる。また、水平版があると遊水室内の水深は、局部的に浅くなり、水深に対応して波長が短くなることから、結果的に遊水室内のピストンモードの波浪共振点が長周期側に移行する効果もある。これが図-5、6に示した極小反射率の出現条件の相違の理由である。

4. 堤体下部通水路の流動特性と海水交換量

図-9、10は、それぞれ図-4 (a), (c) の堤体に対する下部通水路の水平流速時間波形を示す。流速の測点は図-4中に示すとおりで、ほぼ下部開口部の港内側境界に位置する。水平版がないときの図-9では、岸向き・沖向き流速の絶対値にあまり差は見られない。一方、水平版延長型堤体の結果である図-10では、沖向きの流速が岸向きに比較して大きく卓越する波形であり、平均的に沖向きの流れが発生することが推測できる。

このように遊水室内に水平版を設けると平均流の特性が大きく変化するのは、上述したように波運動により発生する渦流れの通水路部流体への影響が水平版により押し波時の半周期間にわたり遮断される結果と考えられる。また、図-9、10の比較から、開口部水平流速の絶対値は、水平版を設けると大幅に低下することが認められ、このことが透過波の低

減に関係すると判断される。

図-11には、水平流速の時間平均から求まる一方向平均流速を用いて算出した平均輸送流量を各堤体について示す。図中では、一周周期当たりの平均輸送流量 Q を波運動により半周期当りに移動する水塊量($HL/2\pi$)で除した無次元流量で示す。

この図に見られるように、堤体下部の通水路を介しての平均輸送流量は、水平版を設けると沖側へ発生することや通水路の長い水平版延長型堤体でより多く、波運動により半周期当りに移動する水塊量の約半分にもなることなどが分かる。また、水平版のない異吃水2重壁式堤体では、平均流は逆に岸向きに発生することなども分かる。

波浪の低減効果を示す図-6、7と合わせて見ると、沖向きへの平均輸送流量が大きくなるのは、ほぼ反射率が極小を示す $L/B=10$ 付近より長周期側であり、反射波の低減効果と輸送流量の間には強い相関のあることが推定できる。

5. まとめと今後の展望

以上、主に著者らのグループにより新規開発した海水交換促進型防波堤を例にとり、その防波機能と海水交換機能について紹介してきた。従来、防波機能と海水交換機能を同時に満足する防波堤を開発することは至難の技と考えられてきたが、ここでは、波運動による渦流を利用するアイデアを提案するとともにその有効性を示す水理実験結果等を紹介して

図-9 異吃水2重壁式堤体の後壁下部の開口部水平流速
($T = 1.8 \text{ s}$, $H = 10 \text{ cm}$)

図-10 水平版延長型堤体の下部通水路の水平流速
($T = 1.8 \text{ s}$, $H = 10 \text{ cm}$)

図-11 各堤体の1波あたりの平均輸送流量Q ($H = 10 \text{ cm}$)

きた。

その結果、異吃水2重壁式防波堤の遊水室下部に通水路が構成されるように水平版を設けると、防波機能である反射・透過波の低減効果が向上することや、従来の常識を覆す冲向きへの一方向平均流が誘起されることなど、興味深い結果が得られた。そして、これらの効果は、波運動により発生する渦流の強化と水平版による渦流の制御によるものであることが確認されている。

現段階では、波運動から渦運動へ、さらには平均流の発生へと、非線形性の強い流体現象の理論的な解明は十分に進んでおらず、最適断面の検討などを理論的に行うことができない状況にある。このため、今後は、このような渦流を利用する海岸構造物の設計等が容易に行えるように、渦流れの理論的な取り扱いやその近似算定法の開発を進める必要がある。

また、本稿では、最も簡単な断面2次元的な取り扱いに限定してきたが、現地の海水交換特性は平面場で検討されるべき3次元問題であり、今後は海水交換防波堤の平面配置およびそれによる3次元的な流れの特性の把握など残された課題は多い。これらの課題については、さらに鋭意検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 中泉昌光, 池田順, 丹羽真: 環境・衛生管理型漁港づくりの取り組み, 全国漁港漁場整備技術研究発表会講演集, pp.32-41 (2002)
- 2) 伊藤雅和, 西多道祐, 今林弘, 菅原健一, 渥美洋一: 羅臼漁港の環境・衛生管理型漁港づくりの課題と対策, 全国漁港漁場整備技術研究発表会講演集, pp.42-54 (2002)
- 3) 小田一紀, 真栄平宣之, 中西昭人, 田中彬夫: 波浪によるパイプ式透過堤の海水導入特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1116-1120 (1995)
- 4) 森田修二, 出口一郎: スロープ水路を有する透過性防波堤に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1101-1105 (1999)
- 5) 大村智宏: 円孔式海水導入工の開発研究, 水産工学, Vol.39, No.2, pp.151-158 (2002)
- 6) 岡本博, 森下敏夫: 海水交換機能を持つ弁式有孔堤について, 海岸工学論文集, 第32巻, pp.540-544 (1985)
- 7) 道下勲・国栖広志・葛原徹: 鉛直管の水面固有振動を利用した海水交換防波堤の水理特性, 海岸工学論文集, 第35巻, pp.577-581 (1988)
- 8) 塩崎禎郎, 磯崎総一郎, 中村滋, 堀内博: 海水交換機能を有する透過型スリットケーソンの水理特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1226-1230 (1996)
- 9) 下迫健一郎, 近藤充隆, 藤堂ひろみ, 福井正幸, 高橋重雄: 越波造流型海水交換防波堤の開発とその水理特性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1096-1100 (1999)
- 10) 山本正昭, 中泉昌光, 間辺本文: 潜堤付防波堤による海水交流工法の開発, 海岸工学論文集, 第34巻, pp.675-679 (1987)
- 11) 森口朗彦, 藤原正幸, 山本正昭, 田中輝男: 潜堤付孔空き防波堤の実海域での導水特性と泊地内水環境予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.886-890 (1992)
- 12) 中村孝幸, 井手義彦: 波の逸散現象を考慮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)
- 13) 中村孝幸, 高木伸雄, 中山哲蔵, 河野徹: ピストンモード波浪共振を利用する低反射・低透過構造の海水交換型防波堤の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.661~665 (2002)