円柱群を用いた新たな消波工の開発に関する実験的研究

An Experimental Study on Development of a Break Water Using Circular Cylinder Array

高田浩太郎¹・重松孝昌²・加藤健司³・脇本辰郎⁴・吉岡真弥⁵

Kotaro TAKATA, Takaaki SHIGEMATSU, Kenji KATOH, Tatsuro WAKIMOTO and Shinya YOSHIOKA

In this study, a new type breakwater with a submerged circular cylinder array was developed. Laboratory experiments were carried out for investigation on effect of the height of submerged circular cylinder array on wave absorber function. Experimental results were compared with theoretical solutions. For the other type of a new breakwater with rotatable circular cylinder array, the characteristics of wave absorption were investigated.

1. はじめに

国土交通白書(国土交通省, 2012)によれば, 建設後50年以上経過する港湾岸壁は今後急増し, 2020年には約25%, 2030年には約53%に及ぶ。今後, これらの老朽化する施設を維持・更新する際には, より優れた機能を有する構造物への更新も視野に入れた検討が成されることであろう。

Jarlan (1961) によって直立式の消波構造物が提案されて以来, 特に, 我が国においては, 港湾海域の有効利用や構造物に対する経済性の観点から, 直立式消波構造物に関する活発な研究が遂行されてきた。矩形窓を前面板に有するもの(Terrettら, 1968), 曲面で構成される前面壁を有するもの(谷本ら, 1980), 前面板の柱体の寸法が水深方向に変化するもの(角野ら, 1988), 二重円筒ケーソン(谷本ら, 1988)などは, その代表的なものとして挙げられる。これらの構造物の消波機能は, 基本的には前面板を水粒子が通過する際に渦流が形成され, この渦運動によって流体の運動エネルギーが消費されることによる。渦流の形成は, 波の条件として相対水深, 入射波の波形勾配, 構造条件としてスリット壁の開口比, 遊水室幅, スリット形状など, 多くのパラメータによって変化し, これらの条件に応じて固有の消波対象波が存在する。その消波機能については理論的にも実験的にも多くの研究が成されており, その機能評価手法はほぼ確立されていると言える。しかし, これまでの消波工の多くは前面壁が全水深にわたって様な形状を有しており, 前面壁が没水構造を有するもの, また, 前面

壁が可動な構造を有するものに対する研究はほとんどない。

そこで, 本研究では, まず, 前面壁が没水構造を有する消波構造物を対象として, その消波機能について実験的に検討する。その後, 得られた知見に基づいて, 柱体が波エネルギーによって回転する場合についても, 同様の検討を行う。これらを通じて, 新たな消波構造物を模索することを目的とする。

2. スリット構造物の反射率に関する理論解

角野ら(1986a)は, 角柱や円柱などの柱体列からなるスリット構造物(図-1)を対象として, これに波が入射する場合の反射あるいは透過特性を, 漸近展開接合法(Method of matched Asymptotic Expansion)を適用して, 理論的に求めている。柱体の境界条件を厳密に満足する柱体近傍のポテンシャル流動を解析するために, 柱体断面形状のみによって決定される純理論定数 C (blockage coefficient)を導入したこと, 流体がスリットを通過する際のエネルギー損失を見積もるために, 実部にblockage coefficientを持つ複素blockage coefficient($C_1 = C + iC_p$)を導入したことに独創性がある。円柱列に対する blockage coefficient: C は, 次式で求められる。

$$\frac{C}{D} = \frac{\pi}{8} \left(1 - \frac{2a}{D}\right)^2 (1 + C_a) \dots\dots\dots (1)$$

ここに, D は柱体中心間距離, $2a$ はスリット幅を表し, $2a/D$ は開口率を表す。また, C_a は付加質量係数で, 次式でその第1近似を示すように開口率 $2a/D$ に対して一意的に与えられる。

$$C_a = \frac{12 + \pi^2(1 - 2a/D)^2}{12 - \pi^2(1 - 2a/D)^2} \dots\dots\dots (2)$$

さらに, 角野ら(1986a, 1986b)は, 柱体列の背面に不透過壁を有する縦スリット直立消波工についても同理論を適用して, 直立消波工の反射率 K_r を次式のように導いている。

$$K_r = \sqrt{1 - \frac{2kC_fC_b}{k^2(C^2 + C_f^2)C_b - 2kC\sin 2k\ell + 1 + kC_fC_b}} \quad (3)$$

1 学生会員	大阪市立大学 大学院工学研究科都市系専攻
2 正会員	博(工) 大阪市立大学教授 大学院工学研究科都市系専攻
3	工博 大阪市立大学教授 大学院工学研究科機械物理系専攻
4	博(工) 大阪市立大学准教授 大学院工学研究科機械物理系専攻
5	博(工) 大阪市立大学准教授 大学院工学研究科機械物理系専攻

図-1 縦スリット消波工の諸元

$$C_b = 2(1 - \cos 2k\ell) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $k = 2\pi/L$ ：波数 (L ：波長)、 ℓ は消波室幅である。また、 C_f は以下の超越方程式を解いて求められる。

$$\frac{C_f}{D} = \frac{4(\sinh^2[kh] + 3)}{9\pi(2a/D)^2(\sinh[2kh] + 2kh)} \gamma \frac{H}{L} \frac{L}{D} f \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 h は水深を表わし、 γ は次式で求められる。

$$\gamma = \sqrt{\frac{C_b}{k^2(C^2 + C_f^2)C_b - 2kC\sin 2k\ell + 1 + kC_fC_b}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(5)を計算する際、不透透壁前面の柱体列が円柱の場合には、損失係数 f は0.75を用いる(角野ら, 1993)。さらに、スリット部におけるエネルギー損失に影響を及ぼすスリット通過水粒子速度振幅 $V_{\max}$ は、入射波の水平水粒子速度振幅 $u_{\max}$ を用いて次式で求められる。

$$\frac{V_{\max}}{u_{\max}} = \frac{\gamma}{2a/D} \quad \dots\dots\dots (7)$$

本研究では、実験によって検証されている上記の理論解を用い、前面壁を形成する円柱列の高さが反射率に及ぼす影響を、さらには、円柱列が波浪によって回転する場合の反射率について検討する。

3. 実験概要

実験は、図-2に示すような、大阪市立大学水理実験場の長さ 20m、幅 0.5m、高さ 0.6mの二次元造波水路を用いて、水深 h を0.40mで一定として行った。造波板より約 18m離れた位置に消波工の模型を設置した。消波工の模型は、不透透壁からその中心軸までの距離(遊水室幅)が ℓ だけ離れた位置に直径 $\Phi = 0.09$ mの塩化ビニル製の円柱 5本を固定して設置した。このとき、開口率は $2a/D = 0.05$ であった。円柱高さ H_w を $H_w/h = 1.075, 0.825, 0.525, 0.325$ と変えて実験を行った(図-3)。模型から約 3.5m沖側に容量式波高計2本を設置して100Hzで水位変動の時系列データを収集し、入・反射波分離推定法(合田ら, 1976)により反射率を求めた。作用波は、周期 $T = 0.6 \sim 1.8$ s、波形勾配 $H/L = 0.01 \sim 0.03$ の規則波とした(表-1、表-2参照)。

図-2 実験模型

図-3 没水型円柱を前面壁に持つ消波工

得られた反射率の実験値は角野らによる理論解と比較し、実験の妥当性とともにより円柱高さが消波効果に及ぼす影響について検討した。

さらに、前面壁を構成する円柱が波作用時に自由に回転する構造(回転円柱型)としたうえで、同様の実験を行い、反射率を測定した。このとき円柱は、重松ら(2011)を参考にして、図-4のような2枚の円弧で構成される羽根を有する構造とした。その径は $\Phi = 0.084$ mで、 $2a/D = 0.11$ である。回転円柱の高さは、固定円柱の結果を参照して $H_w = 0.33$ mとした。水流の方向によらず一定方向に回転する性質を持たせた。隣接する円柱の回転方向が互いに逆方向になるようにして、回転円柱間に水流がスムーズに流れ込むようにした。このとき、円柱が回転することによる反射率への影響は、水車の回転性能に依存すると推測されるので、Perma-Tork HC01-1(日本創販(株)社製)を用いて負荷トルクを与えた(図-5下図)。円柱の回転速度は、その円周近傍に一定間隔で孔を開けた回転盤(図-5上図)を円柱上部に取り付け、光電センサを用いて回転速度を計測した。波作用時には5本の円柱の回転速度がほぼ同速度となっていることを確認したうえで、実験を行った。回転円柱間の水粒子速度の測定には電磁流

図-4 回転型円柱

図-5 回転数計測システム

速計（アレック電子株式会社）を使用し、そのセンサー部は常に静水面下 0.27m、円柱中心軸から 0.42cm 沖側に設置して測定した。

4. 実験結果

(1) 固定円柱

固定円柱型消波工の反射率の実験結果を、表-1、表-2に示す。

図-6および図-7は、遊水室幅が $\ell=0.20, 0.38\text{m}$ の場合について、固定円柱の高さ H_w が反射率 K_r に及ぼす影響を相対遊水室幅 ℓ/L の関数として表したものである。図中の曲線は、式(3)より求められる角野ら（1984）の理論解である。 $H_w/h=1.075$ の場合は円柱が水面を常に横切る条件となっており、角野らの理論解との整合性が比較的良好であることが確認される。これらの図からは、 $H_w/h=0.325$ 、0.525と水深に対して水車の高さが低くなると、反射率が高い値を示すこともわかる。これは、スリットを通過する際に波エネルギーを減衰させるに十分な渦が形成されないことを意味していると考えられる。しかし、 $H_w/h=0.825$ の場合には反射率が低下し、特に $\ell=0.38\text{m}$ の場合には、従来型の消波工（ $H_w/h=1.075$ の場合）よりも反射率が大幅に低下することがわかる。反射率 K_r を H_w/h の関数として示した図-8および図-9を見ると、いずれの周期の波に対しても、 $H_w/h=0.82$ の場合に極小値をとることがより明瞭に理解できる。このように $H_w/h \approx 0.8$ の場合に反射率が低下する理由として、スリット通過

表-1 実験条件および結果 ($\ell=0.20\text{m}$)

H_w/h	$T(\text{s})$	ℓ/L	$H(\text{m})$	H/L	K_r
1.075	0.819	0.194	0.008	0.008	1.000
	0.870	0.174	0.011	0.010	0.870
	0.975	0.142	0.017	0.012	0.812
	1.024	0.131	0.016	0.010	0.723
	1.024	0.131	0.016	0.010	0.723
	1.205	0.103	0.016	0.008	0.570
	1.200	0.103	0.017	0.009	0.544
	1.463	0.079	0.026	0.010	0.480
	1.707	0.065	0.033	0.011	0.574
0.825	1.862	0.059	0.033	0.010	0.563
	0.890	0.167	0.013	0.011	0.826
	1.078	0.121	0.020	0.012	0.445
	1.280	0.094	0.021	0.010	0.411
	1.460	0.079	0.025	0.010	0.531
0.525	1.862	0.059	0.032	0.010	0.716
	0.683	0.275	0.008	0.011	1.000
	0.731	0.241	0.006	0.008	1.000
	0.788	0.213	0.007	0.008	1.000
	0.890	0.167	0.011	0.009	0.890
	0.975	0.142	0.013	0.009	0.769
	1.024	0.131	0.016	0.011	0.854
	1.130	0.113	0.019	0.011	0.798
	1.280	0.094	0.023	0.011	0.777
0.325	1.463	0.079	0.020	0.008	0.784
	0.731	0.241	0.009	0.011	1.000
	0.731	0.241	0.007	0.008	1.000
	0.819	0.194	0.009	0.009	0.972
	0.931	0.154	0.014	0.011	0.979
	0.931	0.154	0.011	0.009	0.860
	1.024	0.131	0.013	0.009	0.912
	1.024	0.131	0.018	0.012	0.917
	1.024	0.131	0.014	0.009	0.854
	1.078	0.121	0.017	0.010	0.843
	1.205	0.103	0.017	0.009	0.926
	1.200	0.103	0.018	0.009	0.882
	1.365	0.086	0.022	0.010	0.858
	1.463	0.079	0.028	0.011	0.833
	1.575	0.072	0.033	0.012	0.913
	1.707	0.065	0.026	0.009	0.913

表-2 実験条件および結果 ($\ell=0.38\text{m}$)

H_w/h	$T(\text{s})$	ℓ/L	$H(\text{m})$	H/L	K_r
1.075	0.853	0.342	0.010	0.009	0.936
	1.070	0.233	0.013	0.008	0.808
	1.280	0.179	0.016	0.008	0.648
	1.463	0.150	0.025	0.010	0.616
0.825	0.819	0.368	0.009	0.009	1.000
	0.819	0.368	0.012	0.012	1.000
	0.975	0.271	0.016	0.011	0.834
	1.200	0.196	0.019	0.010	0.522
	1.280	0.179	0.020	0.009	0.470
	1.463	0.150	0.028	0.011	0.189
	1.575	0.137	0.031	0.011	0.181
0.525	1.862	0.112	0.028	0.008	0.259
	0.640	0.595	0.007	0.011	0.951
	1.024	0.250	0.014	0.009	0.719
	1.205	0.195	0.018	0.009	0.771
	1.280	0.179	0.016	0.008	0.719
0.325	1.862	0.112	0.035	0.010	0.756
	1.078	0.230	0.019	0.011	0.907
	1.078	0.230	0.020	0.012	0.838
	1.078	0.230	0.014	0.008	0.907
	1.280	0.179	0.025	0.012	0.954
	1.707	0.124	0.026	0.008	0.865

図-6 固定円柱の反射率 ($\ell = 0.20\text{m}$) 図-8 固定円柱高さと反射率 ($\ell = 0.20\text{m}$) 図-7 固定円柱の反射率 ($\ell = 0.38\text{m}$) 図-9 固定円柱高さと反射率 ($\ell = 0.38\text{m}$)

流速が増加することによって柱体背後に渦が発生するとともに、円柱上部を流体が通過することによって強いせん断流が発生し、より大きなエネルギー低減が期待できることを示していると考えられる。既述のように、スリット式直立消波工は強い周期依存性を有しているが、図-6～図-9からは、固定円柱の高さが変化しても反射率が低下する周期には大きな変化がないことが確認される。

(2) 回転円柱型

前節の実験で用いた固定円柱とほぼ同じ径を有する回転円柱を用いてその高さが $H_w/h = 0.8$ の前面壁とした場合の反射率 K_r を、図-10に相対遊水室幅 ℓ/L の関数として示した。同図の曲線は角野らによる理論値である。回転円柱を擁する消波工の消波特性は、固定円柱を擁する消波工と同様に、周期依存性を有する傾向を示すことがわかる。ただし、反射率は角野らの理論値と比較すると高くなる。

図-11は、回転円柱を設置した時の反射率 K_r と回転円柱間通過水粒子速度 $V_{\max}$ を入射波の水平水粒子速度の振幅

$u_{\max}$ に対する比を示す。角野ら(1986a)によれば、 $V_{\max}/u_{\max}$ が大きな値を取るときに K_r が減少するが、本実験条件では $V_{\max}/u_{\max}$ に大きな変動がなく、その結果として反射率も大きな変動を示していないことがわかる。

回転円柱間を通過する水粒子速度 $V_{\max}/u_{\max}$ と円柱回転数 ω との関係を示す。図-12に示す。同図によれば、水粒子速度 $V_{\max}/u_{\max}$ が大きい条件では、円柱の回転数が大きくなる傾向があることが確認される。

表-3は、 $T=1.078\text{s}$ 、 $\ell = 0.20\text{m}$ の場合について、回転円柱に作用させる負荷トルク T_q が反射率および回転数に及ぼす影響を示したものである。負荷トルク T_q が大きくなるとともに回転数が減少する傾向を示すが、本実験では反射率に及ぼす影響はほとんど見られない。角野らの理論によれば、柱体列を擁するスリット式消波工の反射特性は、blockage coefficient (C) の実部で表現される慣性抵抗と、 C の虚部で表現される渦流によるエネルギー損失によって決定される。したがって、本実験結果によれば、回転円柱の存在は、回転体としての慣性抵抗を形成するも

図-10 反射率 (回転円柱)

図-12 回転数と通過水粒子速度

図-11 反射 Kr と回転円柱間通過流速

表-3 実験結果 ($l=0.20m$)

$T(s)$	l/L	H/L	$T_q(\times 10^{-3} N \cdot m)$	Kr	$\omega(rpm)$
1.078	0.121	0.026	0.532	0.553	57.4
		0.026	1.653	0.523	50.4
		0.025	1.866	0.521	46.2
		0.026	2.000	0.532	0.0

の、固定円柱と比較すると慣性抵抗が減少し、その結果として背後に形成する渦流が十分に発達しないのではないかと推察される。

5. 結論

本研究は、縦スリット消波工の前面壁を構成する柱体高さを変化させた場合の消波機能について検討するとともに、柱体が回転する場合の消波機能についても検討を行った。本研究によって得られた結論を要約すると以下のようである。

- 1) 前面壁の柱体高さは、従来のような水面を常に横切る場合よりも水深の 80% 程度の高さの方が高い消波能

力をもつことが明らかになった。このとき、周期依存性については、従来型の場合との相違はほとんど見られない。

- 2) 回転円柱スリットは固定円柱スリットと同様に周期依存性を持つことがわかった。
- 3) 回転円柱スリットは既往の理論値より反射率が高くなる傾向があることがわかった。最適構造条件の模索は今後の課題である。

参考文献

- 角野昇八・小田一樹 (1986a) : 任意断面柱体列による波の反射率および透過率の境界値問題解析, 土木学会論文集, 第 369 号, II-5, pp. 213-222.
- 角野昇八・小田一樹・村本哲二・芳田利春 (1986b) : 複素係数の blockage coef. を導入した漸近展開接合法—スリットにおけるエネルギー損失量の評価—, 海岸工学論文集, 第 33 巻, pp. 407-411.
- 角野昇八・小田一樹・重松孝昌・芳田利春 (1988) : 広周波数帯域にわたって低反射機能を有する直立消波工の開発, 海岸工学論文集, 第 35 巻, pp. 557-561.
- 角野昇八・仲田義弘 (1993) : エネルギー損失を考慮した多列柱体列による波の透過と反射に関する研究, 土木学会論文集, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 661-665.
- 国土交通省 (2012) : 国土交通白書 2012 平成 23 年度年次報告, ぎょうせい, 393p.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地治 (1976) : 不規則波における入・反射波の分離推定法, 港湾技術研究所資料, No. 248.
- 重松孝昌・加藤健司・脇本辰郎・吉岡真弥 (2011) : 縦スリット式直立消波工を利用した波力発電の試み, 海岸工学論文集, 第 67 巻, pp. 1231-1235.
- 谷本勝利・原中祐人・富田英治 (1980) : 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 19 巻, 第 4 号, pp. 3-54.
- 谷本勝利・下迫健一郎 (1988) : 二重円筒ケーソンに働く滑動波力に対するマウンドの影響, 海岸工学論文集, 第 35 巻, pp. 642-646.
- Jarlan, G. L. E. (1961) : A perforated vertical wall breakwater, The Dock & Harbour Authority, Vol. 41, No. 486, pp. 394-398.
- Terrett, F. L., Osorio, J. D. C., and Lean, G. H. (1968) : Model studies of a perforated breakwater, Proc. 11th conf. on Coastal Engng., pp. 1104-1120.