

II—8 透過波の位相, 反射率, 波圧力に及ぼすスリット部材の厚さの影響

北海道大学工学部 正員 牛 恩宗

北海道開発局 正員 竹田英章

北海道大学工学部 正員 尾崎 晃

1. まえがき

港内の静穏化, 構造物による反射波の軽減, ならびに構造物の工費を低減するために, 低反射防波堤や消波岸壁の大量の需要は必然と考えられ, 多孔壁とかスリット壁をもつ堤体の研究, 開発などが急速に進められている。

この種類の構造物はジャーラン (Jarlan) が多孔式ケーソンを提案して以来, 現在その機構を同じくしたものが多く, 港湾技術者の施工の立場より縦スリットケーソンの方が容易と考えられる。

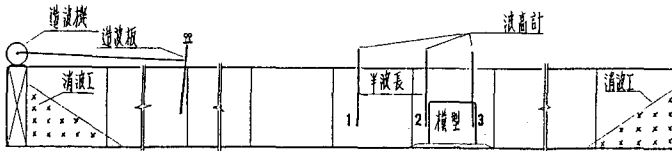
多孔式ケーソンにおけるケーソン外壁の厚さの増加に伴って反射率が減少するという傾向と, 曲面スリットケーソンにおけるスリット部材の厚さが反射率にほとんど影響しないという結果¹⁾があるが, 縦スリットケーソンの場合では一律に論じることができない。実際の設計では, スリットケーソンのスリット部材の厚さは主に外力によって決められているが, その厚さが, 透過波の位相, 合成波の反射率 (すなわち消波効果), 外力にどのような影響を与えるか, についてはあまり明らかになっていない。このため, スリット部材の寸法を評価するために, 実験を通じて透過波の位相, 反射率, 波圧に及ぼすスリット部材の厚さの影響を求めることにした。

大阪大学永井教授等の論文¹⁾の中で透過率 $K_T = 0.62$ のとき, 反射率 K_R が最小となるので, できるだけ $4\ell/L$ が大きい値をとるような構造が望ましく, 理論的には $4\ell/L$ が $1/8$ に近くなるような構造にすることが望ましいとの結論があった (ここに 4ℓ は消波室の幅 ℓ の見掛け上増分, L は波長)。縦スリットケーソンの場合にはその値について実験で定める必要があったので北海道開発局土木試験所港湾研究室の実験施設を用いて実験を行なった。

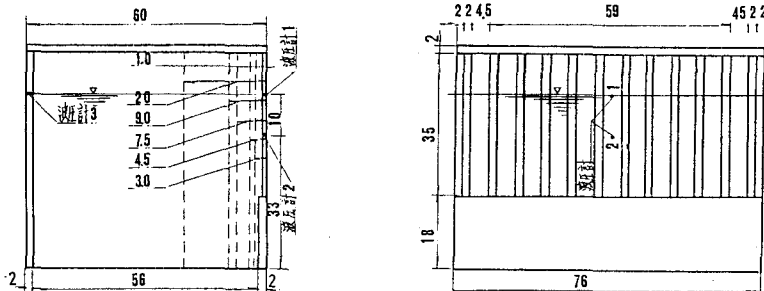
2. 実験施設および実験方法

(1) 実験施設

実験は縮尺 $1/25$ で行なった。実験に使用した水路は図一 / のとおりである。



図一 実験水路



図二 スリットケーソンの模型

造波水路の長さは24 m, 幅1 m, 高さ1 mである。図-2のような木製の模型により実験を行なった。スリットケーソンの開口率は0.2で, 下部の不透過壁の高さは18 cmである。(したがって, 上部のスリット部の開口率は0.2より大きい) 遊水室の幅Bと平均波長Lとの比, B/L は0.21である。スリット部材の幅を4.5 cmとし, その厚さを1.0 cm, 3.0 cm, 4.5 cm, 7.5 cm, 9.0 cm, および20 cmの6種類として, 実験を行なった。

(2) 実験方法

水位変動量を測定するため, スリットケーソンの後壁の前面, 前壁の前面, 前壁の前面から波長 $\frac{L}{2}$ ぐらいの位置の3個所に波高計を設置した。進行波の波高はスリットケーソンを置くまえに測定した。すべての水位変動量は容量式の水位検出部と増幅器を経て無現像オシログラフに記録した。

入射波がスリット部を通過すると透過波の位相が遅れる。その量を測定するため, 重複波の節の位置を水路のガラス面に記録して読み取った。

波圧を測定するため, 波圧計をスリットケーソンの後壁の前面と前壁の前面の静水面の位置, および前壁の前面の静水面から10 cm下のところへ取付けた(図-2)。波圧は, 波圧検出部と動歪計を経て無現像オシログラフに記録した。

今回の実験に採用した周期は1.1秒, 1.3秒, 1.7秒, 2.0秒の4種類で, 波高は4 cm, 6 cm, 9 cm, 11 cmの4種類である。

3. スリット部材の厚さと透過波の位相

入射波(進行波)は, スリットを通過したときの位相が遅れる。その透過波はスリットケーソンの不透過の後壁にぶつかって反射され, もう一度スリットを通過して後続の入射波と干渉する。スリットケーソンの機能の一つは, 透過波の位相を遅れさせて, 位相差を利用してエネルギーを減殺することである。

入射波がスリットを通過して後壁の不透過鉛直壁で完全反射するとき, その反射波 η_{TR} は次式で表わされる。

$$\eta_{TR} = -K_T a \sin(kx + \delta t - 2k(L + \Delta L)) \quad (1)$$

スリットケーソン前面の沖側に形成される合成波 η_c は次式で与えられる。

$$\eta_c = a \sin(kx - \delta t) - K_R a \sin(kx + \delta t) - K_T^2 a \sin(kx + \delta t - 2k(L + \Delta L)) \quad (2)$$

式中, a = 入射波の振幅, $k = 2\pi/L$, L = 入射波の波長, $\delta = 2\pi/T$, T = 入射波の周期, K_T = 透過率, K_R = 反射率。

(1)および(2)式中の ΔL は, 入射波がスリットケーソン前壁を通過した後の透過波の位相の遅れ量である。それは消波室の幅の見掛け上の増分と考えることができる。²⁾

まえがきに述べたように, 永井教授等は, 反射率を最小にするためには, 透過率 K_T を0.62にして $\frac{L}{8}$ ができるだけ $\frac{1}{8}$ に近くなるような構造にすることが望ましいとの結論を得ている。スリットケーソンの場合, $K_T = 0.62$ に対する開口率は0.2~0.35なので,²⁾ ΔL に影響を与える主なものはスリット部材の厚さということになる。

今回の実験結果を表-1, 図-3 および図-4 に示す。表-1の数字はスリットケーソンの前壁の前面か

表-1 スリット部材の厚さと透過波の位相に関する実験結果

b (cm)	T = 1.1 秒				T = 2.0 秒			
	H = 4 cm	H = 6 cm	H = 9 cm	H = 11 cm	H = 4 cm	H = 6 cm	H = 9 cm	H = 11 cm
1.0	131	138	135	150	278	284	289	295
3.0	137	144	147	153	286	289	293	296
4.5	141	146	150	145	292	288	293	296
7.5	144	147	150	154	289	292	295	299
9	146	155	162	167	290	296	301	306
20	149	155	160	166	295	298	302	308

ら波の節までの距離である。図-3 および図-4 いずれにおいてもスリット部材の厚さが 9 cm より小さいとき、すなわちスリット部材の厚さ h とケーソンの幅 b との比が 0.15 より小さい領域ではスリット部材の厚さ

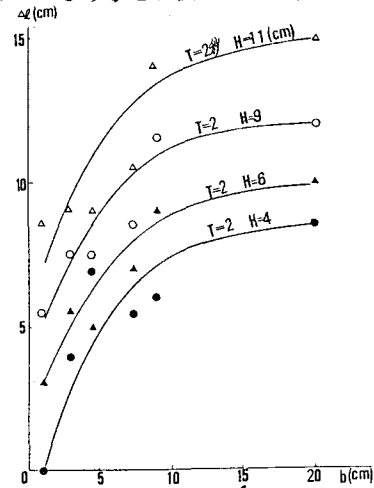
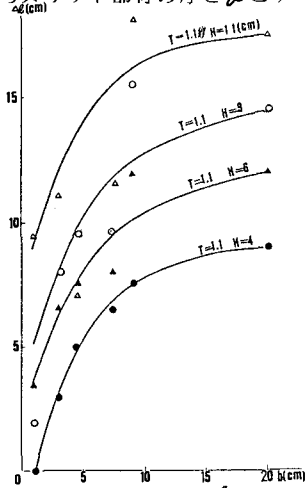


図-3 スリット部材の厚さと Δl との関係 ($T=1.1$ 秒) 図-4 スリット部材の厚さと Δl との関係 ($T=2.0$ 秒)
 の h の増加に伴って透過波の位相遅延量 Δl が著しく増加している。 9 cm より厚い領域では Δl はそれほど増加しておらない。図-3 および図-4 において、 $h = 9\text{ cm}$ と $h = 0$ における Δl の差と波長との比は $\frac{\Delta l}{L} \div \frac{1}{28}$ となった。したがって $\frac{\Delta l}{L}$ を $\frac{1}{8}$ に近くなるような構造を作ることはむずかしいと考えられる。

4. スリット部材の厚さと反射率

スリット部材の厚さが 4.5 cm 、 9 cm 、 20 cm のときの反射率を求めた結果の一例が表-2 および図-5 である。

表-2 実験値より求めた反射率および波圧係数の一例

h/L	H/L	b=4.5cm			b=9cm			b=20cm		
		K_{R1}	p_1	α_1	K_{R1}	p_1	α_1	K_{R1}	p_1	α_1
0.27	0.025	0.40	0.055	1.25	0.41	0.05	1.14	0.57	0.052	1.18
	0.037	0.35	0.07	1.08	0.41	0.067	1.03	0.61	0.070	1.08
	0.055	0.35	0.072	0.74	0.10	0.08	0.82	0.47	0.08	0.82
	0.067	0.32	0.085	0.71	0.04	0.085	0.71	0.34	0.08	0.67
	0.016	0.42	0.058	1.55	0.67	0.058	1.55	0.78	0.06	1.61
0.21	0.026	0.37	0.07	1.18	0.44	0.063	1.07	0.52	0.07	1.19
	0.039	0.34	0.081	0.94	0.39	0.08	0.93	0.51	0.08	0.93
	0.045	0.31	0.09	0.88	0.38	0.08	0.85	0.47	0.092	0.90
	0.014	0.22	0.061	1.36	0.24	0.057	1.27	0.43	0.062	1.38
	0.02	0.20	0.08	1.19	0.38	0.077	1.15	0.44	0.075	1.19
0.15	0.03	0.21	0.092	0.88	0.31	0.088	0.84	0.32	0.088	0.83
	0.034	0.22	0.105	0.94	0.36	0.098	0.87	0.29	0.103	0.92
	0.01	0.175	0.053	1.45	0.25	0.068	1.7	0.20	0.055	1.38
	0.016	0.16	0.069	1.11	0.11	0.073	1.18	0.13	0.063	1.02
0.12	0.024	0.12	0.087	0.93	0.17	0.09	0.96	0.20	0.080	0.85
	0.03	0.12	0.097	0.75	0.12	0.10	0.77	0.16	0.097	0.75

* K_{R1} ; 図-1 の 1 における値より求めた反射率, p_1, α_1 ; 図-2 の 1 における波圧 (kg/cm^2) および波圧係数
 スリット部材の厚さが 4.5 cm の場合について、相対水深 h/L をパラメーターとして反射率 K_R と波形勾配 H/L との関係を求めたものが図-6 である。同図によれば反射率 K_R は H/L の増加に伴って減少している。これは尾崎教授らの結果^{4), 5)}とよく一致している。

図-5 において、スリット部材の厚さが大きくなると反射率が増大している。この原因は次のように考えられる。

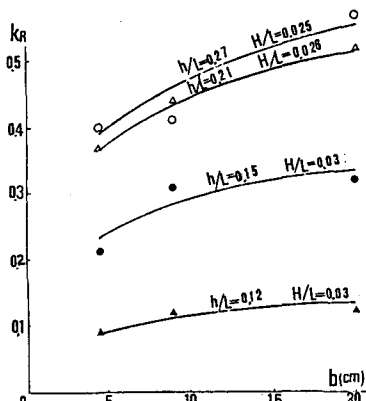


図-5 スリット部材の厚さと反射率との関係

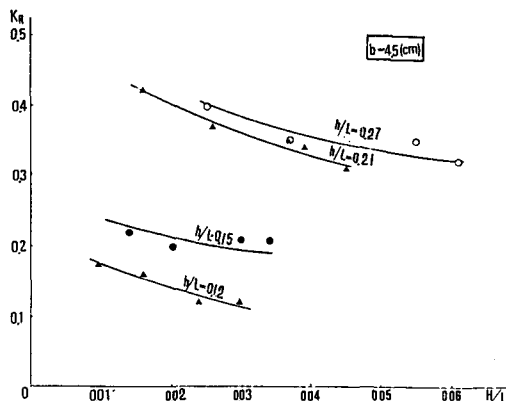


図-6 スリット部材厚さ $b = 4.5 \text{ cm}$ における反射率の特性

1) 入射波と反射波の位相差はスリット部材の厚さの増加に伴って増大するので反射率は低減する。しかし、スリット部材が厚くなるとケーソン内の水位変動量が小さくなるので、その位相差を利用してエネルギーを減殺することが期待できなくなる。

2) スリット部材が厚くなるとケーソン内の水位変動量が小さくなり結果として渦流が弱くなるので、その効果を充分利用できなくなる。

5. スリット部材の厚さと波圧との関係

スリット部材の厚さが 4.5 cm , 9 cm , 20 cm の場合についてスリット部材に作用する波圧を測定した。その結果を表-2 に合せて示した。

同表によれば、スリット部材の厚さが変わっても波圧はほとんど変化していない。したがって、スリット部材の厚さは波圧にほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

図-2 の 1 の波圧計について広井式の表示により波圧係数 $\alpha = \frac{p}{\rho g H}$ を求めてその特性を求めた一例が図-7 である。

同図によれば、波圧係数についても、反射率の場合と同様の特性が得られた。

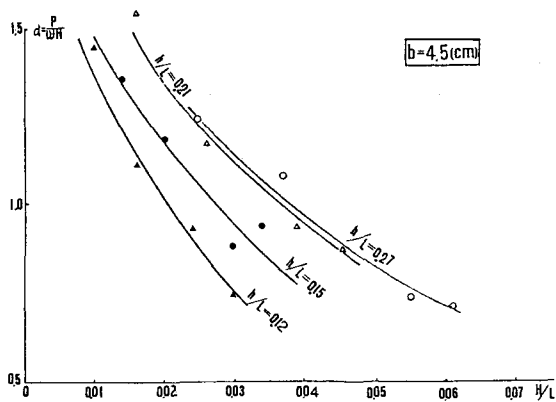


図-7 スリット部材厚さ $b = 4.5 \text{ cm}$ における波圧特性

6. 結論

今回の実験は、スリット部材の厚さが透過波の位相、反射率ならびに波圧に及ぼす影響を調べたものである。

今回の実験におけるスリットケーソンの水理特性は図-6 および図-7 で示されるが、このような水理特性の範囲におけるスリット部材の厚さに関しては、以下のことが明らかになった。

1) スリット部材の厚さと透過波の位相の遅れ量 $\Delta \phi$

スリット部材の厚さ b と透過波の位相の遅れ量 $\Delta \phi$ との関係は図-3 および図-4 で示される。すなわち部材が薄いときには $\Delta \phi$ は著しく増加する。しかし、ある限界を越えるとその増加は緩やかになるので、ある厚さ以上では一定値をとるものと推定される。

2) 部材の厚さと反射率

多孔式ケーソンでは多孔壁の厚さの増加に伴って反射率が減少し、曲面スリットケーソンではスリット

部材の厚さは反射率にほとんど影響しないと言われているが、スリットケーソンの場合、スリット部材が厚くなると反射率が大きくなるとの結果が得られた。

3) スリット部材の厚さと波圧

スリット部材に作用する波圧はほとんどスリット部材の厚さの影響を受けないことが明らかになった。

4) スリット部材の寸法

スリット部材の厚さの増大に伴って透過波の位相が遅れるので、理論的には $\frac{4L}{\lambda}$ ができるだけ大きくなるような構造が望ましいことになるが、縦スリットケーソンの場合には、4で述べた現象によりスリット部材が厚くなると反射率が大きくなる。したがって縦スリットケーソンにあってはスリット部材の厚さをできるだけ小さくするのが望ましいと考えられる。

謝辞

今回の実験は、北海道開発局土木試験所港湾研究室の坂本洋一研究員ならびにサンコーコンサルタントKKの室谷雄司技師と協同で実施した。ここに記して両氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 運輸省研究協議会新防波堤構造開発ワーキンググループ；新防波堤構造開発ワーキンググループ報告書，部内資料，1981
- 2) 永井莊七郎・角野昇八；スリット型防波堤に関する研究，第23回海岸工学講演会論文集，1976
- 3) 竹田英章；従来ケーソンの外側隔室を消波室とした防波堤の設計，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，1982
- 4) 尾崎 晃・鴻上雄三・永田慧・刈谷広見・松崎勝夫；直立式消波堤の開発と水理特性，第24回海岸工学講演会論文集，1977
- 5) 尾崎 晃・鴻上雄三・中込国喜・刈谷広見・田崎邦男；直立式消波堤の波力に対する安定性，第25回海岸工学講演会論文集，1978

附；実験データー（合成波高および進行波高の数値はcm）

T (秒)	H (cm)	b = 4.5 (cm)												b = 9 (cm)												b = 20 (cm)																	
		合成波高				進行波高				波圧 (kg/cm ²)				合成波高				進行波高				波圧 (kg/cm ²)				合成波高				進行波高				波圧 (kg/cm ²)									
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4						
1.1	4	6.16	5.3	4.2	4.4	4.1	4.0	0.055	0.035	0.035	0.035	0.035	6.2	5.4	4.1	4.4	4.1	4.0	0.052	0.037	0.025	0.025	0.025	6.9	6.5	3.4	4.4	4.1	4.0	0.052	0.04	0.03	0.03	6.9	6.5	3.4	4.4	4.1	4.0	0.052	0.04	0.03	0.03
	6	8.8	9.3	6.4	6.5	6.3	7.1	0.07	0.06	0.035	0.035	0.035	9.2	9.5	8.7	6.5	6.3	7.1	0.067	0.058	0.035	0.035	0.035	10.5	9.6	5.1	6.5	6.3	7.1	0.076	0.053	0.03	0.03	10.5	9.6	5.1	6.5	6.3	7.1	0.076	0.053	0.03	0.03
	9	13.1	13.9	10	9.7	9.6	9.8	0.072	0.04	0.038	0.038	0.038	11.8	13.8	9.9	9.7	9.6	9.8	0.080	0.086	0.037	0.037	0.037	14.3	16.4	7.9	9.7	9.6	9.8	0.080	0.093	0.040	0.040	14.3	16.4	7.9	9.7	9.6	9.8	0.080	0.093	0.040	0.040
	11	15.8	17.3	13.6	11.9	11.4	12.1	0.085	0.12	0.047	0.047	0.047	12.4	17.8	12.9	11.9	11.4	12.1	0.085	0.110	0.047	0.047	0.047	16.0	13.2	9.8	11.9	11.4	12.1	0.08	0.116	0.048	0.048	16.0	13.2	9.8	11.9	11.4	12.1	0.08	0.116	0.048	0.048
1.3	4	5.3	5	4.5	3.7	3.8	3.7	0.058	0.033	0.045	0.045	0.045	6.2	5.5	4.5	3.7	3.8	3.7	0.058	0.043	0.035	0.035	0.035	6.6	5.7	5.0	3.7	3.8	3.7	0.06	0.037	0.04	0.04	6.6	5.7	5.0	3.7	3.8	3.7	0.06	0.037	0.04	0.04
	6	8.13	8.9	8.4	5.9	5.9	5.8	0.070	0.058	0.043	0.043	0.043	8.5	8.9	6.4	5.9	5.9	5.8	0.063	0.063	0.04	0.04	0.04	9.0	8.5	8.0	5.9	5.9	5.8	0.07	0.053	0.045	0.045	9.0	8.5	8.0	5.9	5.9	5.8	0.07	0.053	0.045	0.045
	9	11.6	12.8	13.6	8.6	8.6	8.7	0.081	0.089	0.053	0.053	0.053	12.0	14.3	10.7	8.6	8.6	8.7	0.080	0.10	0.045	0.045	0.045	13.0	14.0	12.5	8.6	8.6	8.7	0.08	0.10	0.055	0.055	13.0	14.0	12.5	8.6	8.6	8.7	0.08	0.10	0.055	0.055
	11	13.4	17.5	15.4	10.2	10.6	10.6	0.09	0.012	0.062	0.062	0.062	14.1	15.5	11.9	10.2	10.6	10.6	0.087	0.117	0.055	0.055	0.055	15.0	16.7	15.3	10.2	10.6	10.6	0.09	0.13	0.065	0.065	15.0	16.7	15.3	10.2	10.6	10.6	0.09	0.13	0.065	0.065
1.7	4	5.5	6.9	5.9	4.5	4.3	3.9	0.061	0.057	0.048	0.048	0.048	5.6	6.6	5.4	4.5	4.3	3.9	0.067	0.056	0.03	0.03	0.03	6.4	6.6	5.0	4.5	4.3	3.9	0.062	0.050	0.035	0.035	6.4	6.6	5.0	4.5	4.3	3.9	0.062	0.050	0.035	0.035
	6	8.06	10.6	9.3	6.7	6.6	6.9	0.08	0.097	0.05	0.05	0.05	9.3	12.1	19.0	6.7	6.6	6.9	0.077	0.101	0.05	0.05	0.05	10.2	11.7	7.8	6.7	6.6	6.9	0.075	0.096	0.045	0.045	10.2	11.7	7.8	6.7	6.6	6.9	0.075	0.096	0.045	0.045
	9	12.8	14.7	13.6	10.5	9.2	9.6	0.092	0.121	0.062	0.062	0.062	13.8	15.3	13.6	10.5	9.2	9.6	0.088	0.142	0.06	0.06	0.06	13.9	16.0	10.0	10.5	9.2	9.6	0.088	0.15	0.06	0.06	13.9	16.0	10.0	10.5	9.2	9.6	0.088	0.15	0.06	0.06
	11	13.6	19.5	17.1	11.2	11.7	11.9	0.105	0.155	0.078	0.078	0.078	15.3	19.0	16.5	11.2	11.7	11.9	0.098	0.165	0.07	0.07	0.07	14.4	19	12.2	11.2	11.7	11.9	0.103	0.167	0.067	0.067	14.4	19	12.2	11.2	11.7	11.9	0.103	0.167	0.067	0.067
2.0	4	4.7	5.8	4.6	4	4.1	4	0.058	0.044	0.038	0.038	0.038	5	6.3	3.7	4	4.1	4	0.068	0.049	0.047	0.047	0.047	4.8	6.0	5.2	4	4.1	4	0.055	0.056	0.032	0.032	4.8	6.0	5.2	4	4.1	4	0.055	0.056	0.032	0.032
	6	7.2	8.2	6.4	6.2	7.0	6.7	0.089	0.076	0.037	0.037	0.037	6.9	8.9	6.2	6.2	7.0	6.7	0.073	0.073	0.037	0.037	0.037	7.0	8.6	7.4	6.2	7.0	6.7	0.063	0.07	0.032	0.032	7.0	8.6	7.4	6.2	7.0	6.7	0.063	0.07	0.032	0.032
	9	10.5	11.9	9.2	9.4	10.1	9.1	0.087	0.104	0.045	0.045	0.045	11.0	13.2	10.4	9.4	10.1	9.1	0.090	0.104	0.053	0.053	0.053	11.3	12.7	10.2	9.4	10.1	9.1	0.08	0.117	0.042	0.042	11.3	12.7	10.2	9.4	10.1	9.1	0.08	0.117	0.042	0.042
	11	14.2	14.7	13.2	13.0	13.6	12.1	0.097	0.156	0.063	0.063	0.063	14.6	15.8	14.5	13.0	13.6	12.1	0.10	0.13	0.065	0.065	0.065	14.6	15.6	12.9	13.6	12.1	12.1	0.097	0.136	0.065	0.065	14.6	15.6	12.9	13.6	12.1	12.1	0.097	0.136	0.065	0.065