

多孔型ケーソンタイプ消波防波堤の特性

小 川 達 彦*・時 川 和 夫**

1. 緒 言

1961 年 G.E. Jarlan¹⁾ によって発表された孔あき防波堤は、音響学における防音効果の原理をそのまま海岸波浪に適用したものであって、その基本は波動運動伝播の進行と後退ということに立脚している。したがってこの形式の防波堤は進入波と後退波である反射波を時間的にずらせて重複させることによって前面合成波を減衰させることが最も大切な基本になっている。

しかしながら現地における波浪は不規則波で、種々の波長および波向の合成波が重合したものであって、それらはある卓越波の近傍に分散したもので、その出現順序も全く不規則であるから、孔あき防波堤は上記の原則に常時あてはまるとは限らない。また侵入波が規則波のように一様に連続して出現した時は、この種の防波堤は消波効果が発揮されるものと考えられるが、一方上記原則にあてはまらない波浪に対しては消波効果というよりも侵入波それ自体の不規則性で反射波の重合を不均一にして、その結果として一連の波群は防波堤前面で合成波高分布を一樣化してしまうことも考えられる。

本報告においてはまず規則波に対する多孔壁の性質を把握したうえで、これを多孔型ケーソンタイプに使用した場合の消波効果について述べ、さらにかんりの範囲の波浪（波長および波高とも）に対しても消波効果を十分に発揮させるための特殊防波堤の試作を行い、それを改良型としてここに発表する次第である。

2. 実験方法

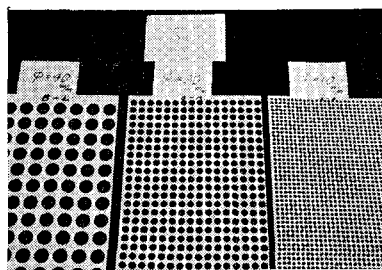
波高の測定は容量式波高計 6 本を使用し、構造物前面には移動式波高計を設置した。これは前方約 7m 間を任意の一定速度で水平移動できるもので、実験では冲向と岸向計 2 回測定した。反射波の測定は消波岸壁の反射率実験²⁾と同様、規則波による Healy の方法によった。使用した実験水槽は一樣水深の 2 次元ガラス水槽 (32m × 0.8m × 0.8m) および 28m ガラス水槽 (28m × 0.8m

× 0.8m) で、周期 $T_m = 0.9, 1.3, 1.6, 1.8, 2.0, 2.3, 2.6$ sec, 波高 $H_m = 4.0 \sim 18.0$ cm, 水深 $h_m = 25 \sim 50$ cm の範囲の実験を行った。

3. 鉛直多孔壁の特性

(1) 実験に使用した模型

実験に使用した孔あき版は厚さ 2.3 mm の鉄板に直径 $\phi_m = 10$ mm, 20 mm, および 40 mm の円形の孔を一樣に配列した (写真—1 参照)。またそれぞれの空隙率は 20, 30, 40, 50, および 60% の計 15 種類とし、これを波の通過にほとんど影響を与えない薄型特殊グレーティング (厚さ 2.3 mm, 幅 30 mm, 間隔 50 mm) 上に固定し、水槽内に鉛直に設置した。



写真—1 実験に使用した多孔版 (空隙率 50%)

(2) 実験結果

a) 反射率

上記の実験の結果孔あき版による反射率は孔の直径の大小による変化はほとんど認められず、いずれも、ほぼ同一の結果となった。しかし空隙率の変化による差異は明確に現われた。図—1 は孔あき版の空隙率と反射率 (実線は一連の実験の上限値、点線はほぼ下限値) を示す。図—2 は一例として空隙率 20% の場合の反射率実験値を示す。

b) 透過率

透過率に関しても反射率と同様に孔の直径の大小による変化はほとんど認められず、いずれもほぼ同一の結果になり、空隙率の変化による差異が明確に現われた。

図—3 は孔あき版の空隙率と透過率 (一連の実験の上

* 正会員 北海道開発局土木試験所港湾研究室室長

** 正会員 工修 北海道開発局土木試験所港湾研究室副室長

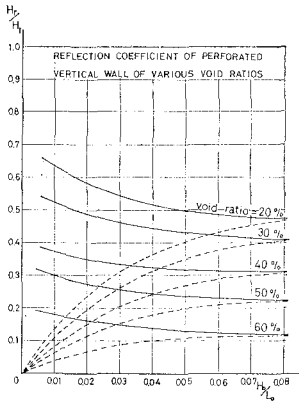


図-1 鉛直多孔壁の反射率と空隙率の関係

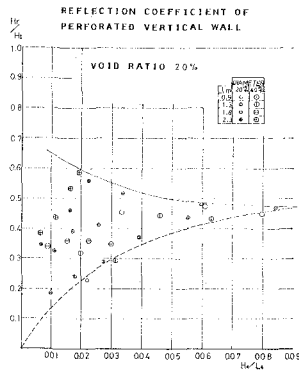


図-2 鉛直多孔壁の反射率（空隙率 20% の場合）

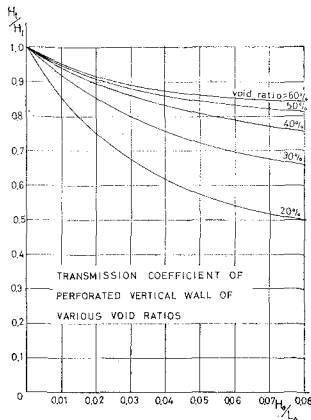


図-3 鉛直多孔壁の透過率と空隙率の関係

限值) の関係を示す。図-4 は空隙率 20% の場合の透過率実験値を示す。

c) 消波効果

孔あき版で失われるエネルギーは入射波エネルギーから反射波と透過波のエネルギーを差引いたものであると仮定すると、損失エネルギーは次式で表わされる。

$$E_L/E_I = 1 - (E_r/E_I + E_t/E_I) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 E_L : 孔あき版の前後で失われるエネルギー、

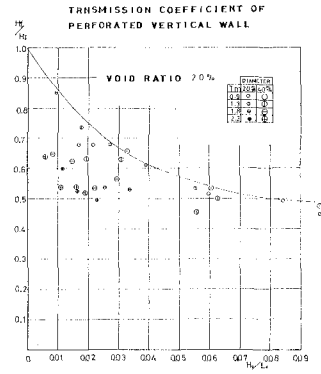


図-4 鉛直多孔壁の透過率（空隙率 20% の場合）

E_I : 侵入波のエネルギー、 E_r : 反射波のエネルギー、 E_t : 透過波のエネルギー、ここで孔あき版の前後で波長の変化は無視されるものと考えると式 (1) は

$$E_L/E_I = 1 - \{(H_r/H_i)^2 + (H_t/H_i)^2\} \dots \dots (2)$$

となる。

いま 図-1, 3 および 2, 4 の実験結果をみると実験値は多少のばらつきはあるが透過波の上限値 (図-4 の実線) と反射波の下限値 (図-2 の点線) が対応している。このことから 図-1, 3 の両曲線を用いて式 (2) の孔あき版によるエネルギー損失率を計算してみると図-5 に示すとおりになる。これによると空隙率が 50% 以上になるとエネルギー損失率の割合はほぼ一定値になって、これ以上空隙率を増大させてもエネルギー損失は期待できないことを示している。また孔の直径の大小の影響は上記実験範囲では顕著でないといえる。

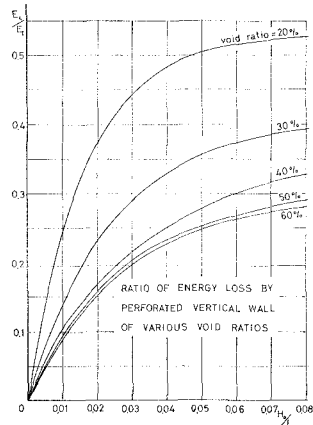


図-5 鉛直多孔壁のエネルギー損失率

4. 多孔型ケーソンタイプ消波防波堤

(1) 実験に使用した模型

G. E. Jarlan¹⁾, R. Boivin³⁾, 榎木・岩田⁴⁾らの研究結果および前記基礎実験を基に消波効果と施工性、経済性

表—1 実験に使用した多孔型ケーソン消波防波堤

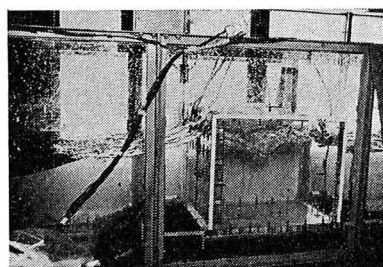
分類	消波防波堤断面図	分類	消波防波堤断面図
A		H	
B		I	
C		I'	
D		J	
E		K	
F		L	
G		M	

を勘案して 表—1 に示す 14 種類の多孔型ケーソンタイプの消波防波堤を試作し試験した。これらはケーソン高さ 8.5m, 幅 10m, 7m, および 5m, 前壁の孔の直径 1.0m, 空隙率 32.7%, 後壁の孔の直径 0.5m, 空隙率 10.9%, 前壁厚 0.9m, その他ケーソン壁厚 0.5m である。また改良型に試作したケーソンの遊水部における有孔突起斜版はのり勾配 1:1.25, 孔の直径 0.75m, 空隙率 18.4%, 2m 間隔ごとに高さ 1m の突起版を 3 箇所設置し, 斜版の下に換算重量 0.5~1.0t 前後の捨石を填充した。また中詰異形コンクリートブロックには 2t 型の中空三角を使用した。ケーソンは一様水深 -7.1m 上の天端高 -5.0m の捨石マウンド上に設置 (図—9~12 参照) して潮位 +0.4m, 縮尺 1/30 で実験を行った。写真—2 は実験状況の一例 (B 型ケーソン) を示す。

(2) 実験結果

a) 反射率

表—1 に示す A~M 型の消波防波堤の反射率は 図—



写真—2 B 型消波防波堤の実験状況

6 の曲線で示すとおりである。これらは前記 2. の実験結果の中, それぞれの実験ケースのほぼ上限値を示すものである。また図中には同様にして行った 2 割および 3 割勾配の不透過斜面およびスリット型ケーソンタイプ (中詰中空三角ブロック填充) (図中一点鎖線) の反射率も示してある。これによるとこの種の消波防波堤の反射率はほぼ 2 割勾配の不透過板の反射率と同程度であるが, 全般的に $H_0/L_0 < 0.05$ でこれより小さく $H_0/L_0 >$

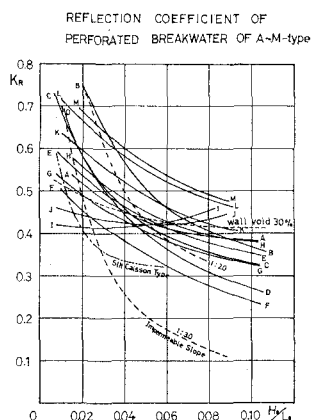


図-6 多孔型ケーソン消波防波堤の反射率

0.05 でこれより大きくなる傾向がある。

また上記A～M型の消波防波堤の前壁空隙率は32.7%であるが、前記 3. (2) a) における鉛直孔あき版、空隙率 30% の場合の反射率(図中点線)と比較すると、平均的にほぼ一致しており、反射率は構造物反射体の表層空隙率に大きく影響されることを示している。

b) 伝達率

A～M型の消波防波堤の越波および透過による波高の伝達率は図-7に示すとおりである。これによると後壁に孔を設けない場合の波高伝達率 K_T は侵入波の H_0/L_0 が大きくなるにつれて増大するが、ある一定値をすぎると漸次減少する傾向がある。これは H_0/L_0 が大きくなるにつれて消波防波堤を越波していく波高は増大していくが、一定値をすぎると防波堤上で碎波現象が生じ、それ以上波高が大きくなっても伝達波高は増大しないことを示す。

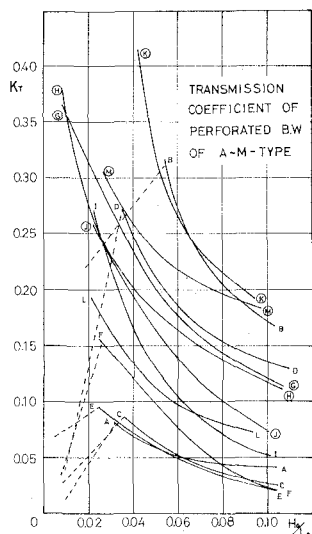


図-7 多孔型ケーソン消波防波堤の伝達率

上部床版 close の場合はケーソン幅 B が $B=10\text{m}$ および $B=7\text{m}$ ともにほぼ $K_T \leq 10\%$ となる。また上部床版, open の場合はほぼ $K_T < 35\%$ となり、ケーソン幅が小さくなるに従って K_T の値は小さくなる傾向がみられる。

後壁に孔を設けた場合は上部床版の open の影響は顕著でなくなり、透過率は防波堤透過壁の最小空隙率により決められる傾向がみられる。ただし遊水部に斜版および中詰ブロックを填充した場合は、しない場合より透過率は減少する。すなわち中詰捨石およびブロックの透過率におよぼす効果は例えばK型とM型を比較すれば、填充した場合は、 H_0/L_0 の小さい範囲において K_T は減少し、 $H_0/L_0 < 0.04$ では K_T は 30% 以上の減少となっていることがわかる。しかし遊水部に斜版を設置した場合は例えばG型とJ型を比較すると填充した場合は全般的に K_T は 10% 程度減少している。すなわち入射波のエネルギーは大部分が遊水部内の有孔突起斜版上で損失された後、ゆるやかな流れとなって斜版下面の捨石の間を通過し、この間で約 10% が損失されていることが理解される。

c) 作用波圧

A～M型の消波防波堤に作用する波圧合力は合計 15 個の小型圧力変換器(受圧面直径 $\phi_m=8\text{m/m}$ 、水中固有振動数 $f \approx 800\text{c/s}$) をケーソン前壁前面、後面、後壁前面および上部床版下面にそれぞれ受圧面がケーソン壁面と一致するように設置し、これらの同時最大波圧強度を測定することからケーソン全体に同時に作用する波圧合力を算定した。作用波圧は一般に前壁前面、後壁前面、床版下面および前壁後面の順で作用し、それぞれの壁面における最大同時波圧は $(1/10 \sim 1/3) \cdot T_m$ 秒ずれて移行して行くが、上部床版が close の場合で、しかも入射波高 H と消波防波堤の静水面上から天端までの距離 R との関係が $R \leq H$ となると、ケーソン内部における各壁の最大波圧合力が、それぞれ同時に作用するようになる。防波堤の水平方向の安定性、特に滑動に関しては、前壁前面と後壁前面との同時最大波圧合力($P_a + P_b$)のみが参与するものとし、前壁後面の同時点における作用波圧合力 P_c が期待できる場合は(すなわち上部床版が close で $R \leq H$ の場合)これを安全側に作用するものとして考慮せず、実験値を $P_m = (P_a + P_b)_{\max}$ とした。また実験値はサンフルー簡略波圧合力: P_S 、永井重複波圧 A式: P_A 、および合田波圧式: P_G と比較したが上記の実験範囲では一般に P_S が大きく P_A と P_G はほぼ同じ値を示したが、わずかに P_G の方が小さくなった。図-8に P_m と P_S の関係を示す。横軸に侵入波長 L とケーソン幅 B の無次元値をとり図中の曲線はそれぞれの実験値のほぼ上限値をつらねたものである。これによ

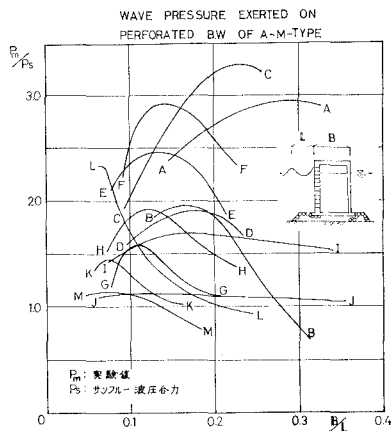


図-8 多孔型ケーソン消波防波堤に作用する最大同時波圧分布

ると波圧合力は B/L が0に近づくと $P_m/P_s \div 1.0$, また B/L が増大するにつれて P_m/P_s は大きくなり最大値を示すが, 再び漸次減少して $P_m/P_s \div 1.0$ に向かう傾向がある。全般的に上部床版が close の場合は P_m/P_s は大きく $(P_m/P_s)_{\max} \div 3.0$: (A, C 型), open の場合は $(P_m/P_s)_{\max} \div 2.0$: (B, D, L 型), 上部床版, および後壁とも open にすると $(P_m/P_s)_{\max} \div 1.5$: (K 型), また中詰消波をして上部床版および後壁とも open にすると $(P_m/P_s)_{\max} \div 1.1$: (M, J 型) となり, ほとんど

B-11 $T_m=1.88^{\text{sec}}(7.3^{\circ})$, $H_m=21.0^{\text{m}}(3.15^{\circ})$, $B=10.0^{\text{m}}$

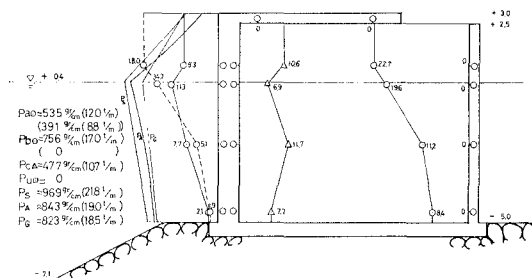


図-9 A型消波防波堤に作用する波圧強度分布(最大同時波圧分布)

A-11 $T_m=1.85^{\text{sec}}(7.2^{\circ})$, $H_m=21.3^{\text{m}}(3.20^{\circ})$, $B=10.0^{\text{m}}$

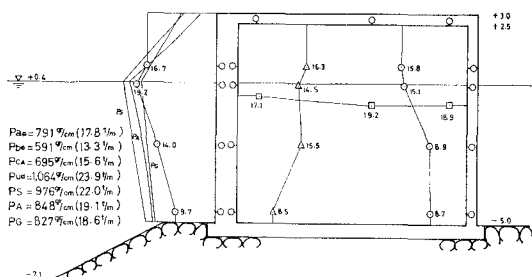


図-10 B型消波防波堤に作用する波圧強度分布(最大同時波圧分布)

J-11 $T_m=1.86^{\text{sec}}(7.3^{\circ})$, $H_m=20.7^{\text{m}}(3.11^{\circ})$, $B=7.0^{\text{m}}$

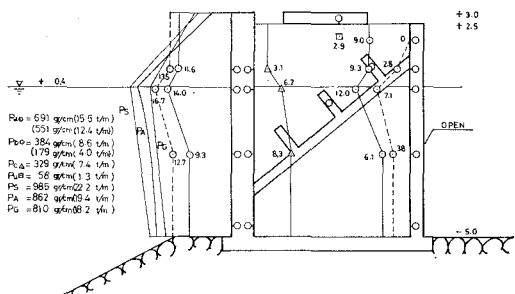


図-11 J型消波防波堤に作用する波圧強度分布(最大同時波圧分布)

M-11 $T_m=1.88^{\text{sec}}(7.3^{\circ})$, $H_m=21.5^{\text{m}}(3.23^{\circ})$, $B=5.0^{\text{m}}$

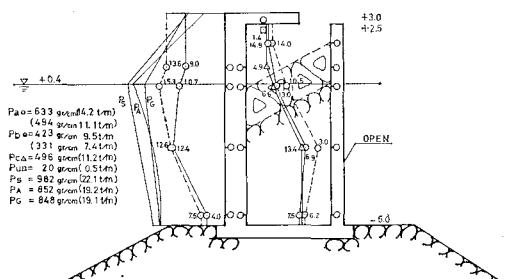


図-12 M型消波防波堤に作用する波圧強度分布(最大同時波圧分布)

重複波圧しか作用しないようになった。いま一例として $T_P=7.3 \text{ sec}$, $H_P=3.2 \text{ m}$ の場合の作用波圧強度分布を示すと図-9~12のとおりである。

5. 改良型消波防波堤の提案

以上の実験結果から多孔型ケーソンタイプ消波防波堤の改良型は, 低反射率の構造にするには I, J, F, G 型がよくまた, 滑動に対する安全性からは, M, J, K, G 型がすぐれている。したがって総合的に J 型, G 型を改良案として提案するが, ケーソン内に孔突起斜版を設置することが困難な場合は, これを異形コンクリートブロックに置き換えることも可能であるので J 型が望ましい。J 型の波高伝達率は $H_0/L_0=0.02$ 付近で $K_T \div 0.25$, $H_0/L_0=0.06$ で $K_T \div 0.15$ となる。

6. 結 論

以上の実験結果から多孔型ケーソンタイプの消波防波堤の特性として次の事項を挙げることができる。

(1) 上部床版の構造は揚圧力の発生防止, 後壁での作用波圧軽減, および反射波の低減のために open 構造にすべきであり, close の場合は防波堤の天端高を静水面上高くして, $H_{\max} < R$ にすべきである。

(2) 遊水部の効果は反射波の形成とその位相差発生に役立つものと思われるが、上部空間の気密性の程度によってはそれら効果は認められず、一般に反射率が小さくなる $B/L \approx 1/4$ 付近の侵入波に対してもかえって反射波および作用波圧を増大させる場合が発生するので注意を要する。

(3) 多孔型ケーソン消波防波堤の反射率、伝達率および作用波圧合力は 図-6, 7 および 8 に示した。

(4) 改良型消波防波堤として、広範囲の侵入波浪 (H_0/L_0) に対し低反射率でかつ安定性も良く、しかも比較的軽量である特殊防波堤として、J型またはG型、およびJ型の変形として内部有孔突起斜版の代りに同等の透過性と粗度を持った異型コンクリートブロックを設置したものを提案する。

(5) 前壁および後壁に多孔壁を有する上記改良型消波防波堤は港内海水の交換および、浄化にも役立ち今後

港湾の環境保全対策上さらに有用になるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) Jarlan, G.E.: A Perforated vertical wall breakwater, The Dock & Harbour Authority, Vol. XII, No.486, pp. 394~398, 1961.
- 2) 時川和夫: 直立消波岸壁の反射率に関する実験的研究, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 409~415, 1974.
- 3) Boivin, R.: Comments on vertical breakwaters with low coefficients of reflection, The Dock & Harbour Authority, Vol. XLV, No.524, pp. 56~61, 1964.
- 4) 榎木 亨・岩田好一朗: 多孔壁式鉛直消波岸壁の水理特性に関する二、三の考察, 土木学会論文報告集第220号, pp. 53~63, 1973.