

消波ブロック被覆型有孔堤の設計波力

Design Wave Force on Perforated Caisson Breakwaters
with Wave-Dissipating Blocks

山本 泰司*・木村 克俊**・谷野 賢二***

Yasuji YAMAMOTO, Katsutoshi KIMURA, Kenji YANO

消波ブロック被覆型有孔堤はケーソンに通水孔を設けたものであり、港内水質環境を保全することを目的として開発された。この構造は、潮流や恒流に対して通水性を保つとともに、波浪エネルギーを利用して外海水を港内に導入することが可能である。

消波ブロック被覆型有孔堤の波力特性を検討するため2次元水理模型実験を実施し、耐波設計法を提案した。これは、合田式を準用した消波ブロック被覆堤の一般的な設計法を拡張したものである。ケーソンの前面および底面には、合田式に波圧低減率を導入した一般的な水平波力および揚圧力が作用すると考える。ただし、通水孔の開口部には受圧面が存在しないことから水平波力は作用させず、通水孔内の上面には孔内揚圧力を作用させる。この設計法の妥当性を、滑動実験により確認した。

《海水交換，耐波設計，水理模型実験》

A perforated caisson breakwater with wave-dissipating blocks, which has passage holes in the caissons, was developed for the purpose of maintaining a superior water quality environment in the landward area of a port. This structure allows permeability of tides and permanent currents, and uses wave energy to introduce seaward water into the landward water area of the port.

In order to examine the wave force characteristics on perforated caisson breakwaters with wave-dissipating blocks, a two-dimensional hydraulic model experiment was conducted. Based on the results, a method of structurally resistive design against wave action was proposed. This method is an expansion the general design method for breakwaters covered with wave-dissipating blocks, upon which the Goda's method had been applied. It is believed that general horizontal wave forces and uplift pressure, which were obtained by introducing the wave pressure reduction coefficient to the Goda's method, are applied to the front and bottom surfaces of the caisson. The horizontal wave force, however, was not applied because there were no pressure receiving surfaces at the openings of the passage holes, but inner-hole uplift pressure was applied onto the upper surface in the passage holes. Appropriateness of this method was confirmed in sliding tests.

Keywords ; sea water exchange, structurally resistive design against wave action, hydraulic model experiment

1. まえがき

近年の漁業を取り巻く諸情勢の変化により、港湾や漁港においては港内静穏域の高度利用に対する要請が高まっている。港内水域は来襲波浪の影響が少なく、かつ、日常管理のためのアクセスが容易であるため、水産生物の蓄養や中間育成等の場として適している。しかしながら、閉鎖性が強い良好な水質環境を確保する技術が求められる。このような問題に対し、著者らは港内外の海水交換を促進できる防波堤構造として、図-1に示す消波ブロック被覆型有孔堤を開発した¹⁻³⁾。この構造は、ケーソンに通水孔を設けたもので、潮流や恒流に対して通水性を保つとともに、波浪時には消波ブロック内の平均水位が上昇することにより外海水を港内に導入することが可能である。

通水孔の開口率は、海水交換量を決定する支配的パラメータである。しかしながら、開口率が堤体の安定性に及ぼす影響や通水孔に働く波圧特性については明らかではない。本研究は、比較的大きな開口率の消波ブロック被覆型有孔堤を対象として、通水孔および堤体直立部に働く波力特性について実験的に検討し、耐波設計法の提案を行うものである。

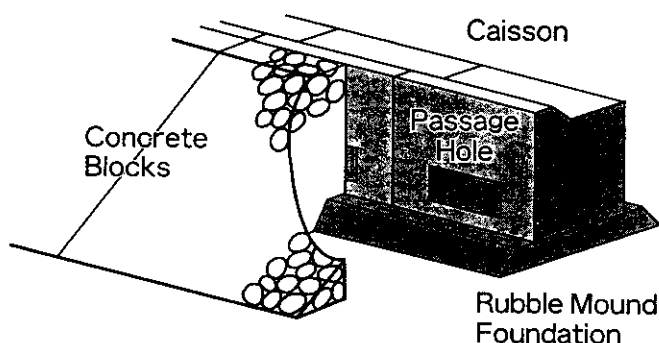


図-1 消波ブロック被覆型有孔堤の概念図

2. 模型実験の概要

2. 1 実験施設と堤体模型

実験に用いた水路は、図-2に示すように長さ28m×高さ1.0m×幅0.8mの2次元造波水路であり、ピス

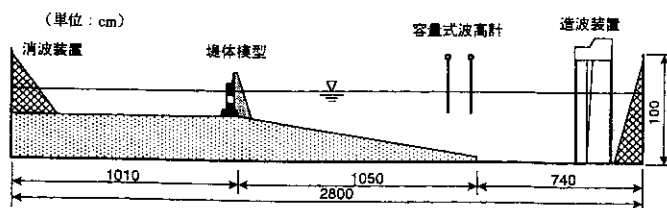


図-2 実験水路

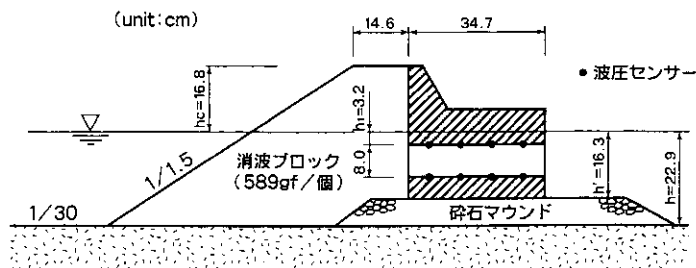


図-3 堤体模型の基本断面

トン式の不規則波発生装置を備えている。海底地形はモルタル製で、堤体の設置位置より沖側は1/30の勾配とし、岸側は水平とした。

堤体模型の基本的な断面図を図-3に示す。水平床上に高さ6.6cmの碎石マウンドを形成し、その上に直立部模型と消波ブロックを設置した。この時、堤体の位置は消波ブロックののり先が水路勾配変化点に一致するように定めた。直立部は高さ33.1cm、幅34.7cmであり、水中部に高さ8.0cmの通水孔が設けられており、前面には重量498gfのモルタル製消波ブロックを天端2個並びで乱積みで設置した。水路の横断方向には、図-4(a)に示すように同型の模型を約3mmの隙間を設け3個並べた。中央の模型はアクリル製で、他の2つ

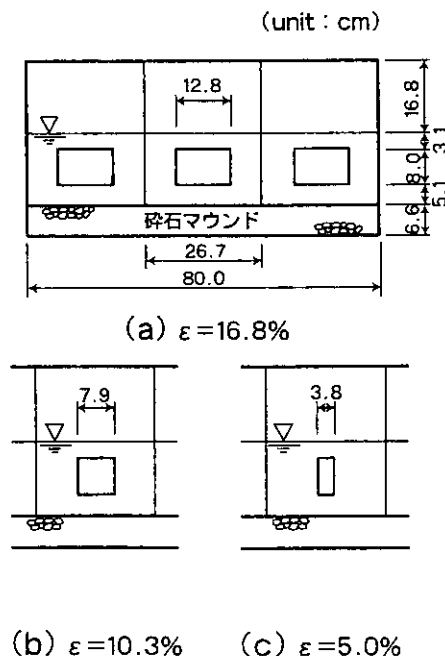


図-4 堤体模型正面図

のダミー模型は木製である。各堤体の通水孔の幅は3種類に変化させることができる(図-4(a)~(c))。実験水深は $h=22.9$ cmで一定としているため、開口率

はそれぞれ $\epsilon = 16.8, 10.3, 5.0\%$ となる。ただしここでは、開口率を $\epsilon (\%) = \text{通水孔断面積} / \text{堤体の没水投影面積} \times 100$ と定義している。

中央の模型には、通水孔内の上面と下面に波圧測定用のセンサーが計 8 個取り付けられている。また、滑動実験を行うため、底版には表面加工したフレキボードを張り付け、コンクリートに近い粗度を持たせている。

孔内波圧測定実験では、通水孔の深さの影響を検討するために、マウンドと堤体の間に木板を挿入し、通水孔の位置を変化させた実験を行った。また、消波ブロックの効果を検討するため消波ブロックで被覆しない混成堤タイプについても実験を行った。

2. 2 実験方法

(1) 通水孔内波圧測定実験

通水孔の内壁に作用する波圧の特性を検討するため、堤体を水路に固定し、不規則波を作用させ孔内の波圧分布を測定した。波圧計測は造波開始 1 分後に行い、通水孔内上面および下面の波圧計によりサンプリング周期 0.005sec で連続的に測定した。この時、管内の状況も目視により観察した。通水孔の断面形状は幅 12.8cm 、高さ 8.0cm で一定とし、孔天端面水深は $h_1 = 3.2, 1.6, 0.0\text{cm}$ の 3 種類に変化させた。

実験に使用した波浪は、プレットシュナイダー・光易型スペクトルの不規則波で、1 波群あたりの波数は 250 波を標準とした。波浪周期は $T_{1/3} = 1.31, 1.63, 1.96$ 秒の 3 種類とし、4 段階の波高レベルの波を使用した。

(2) 滑動実験

水路に並べた 3 個の模型のうち中央の模型を移動可能な状態にして、波浪作用時の滑動量を変位計により連続的に測定した。波浪周期は波圧実験と同様の 3 種類、波高レベルは 7 ～ 8 種類に変化させ、波高レベルの小さな波浪から順次大きな波浪を作用させたときの模型の滑動量を累積して計測した。堤体重量は 3 ～ 5 種類に変化させた。

滑動実験に先立ち、碎石マウンドと堤体間の静止摩擦係数 μ を測定した。堤体重量を 4 種類に変化させ、各重量でそれぞれ 3 回計測したところ $\mu = 0.58 \pm 0.04$ を得た。このため、滑動実験の結果は平均値 $\mu = 0.58$ を用いて整理することとする。

以上の各実験条件を表 1 に整理して示す。

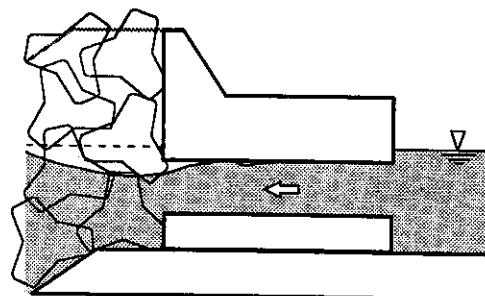
表 1 実験条件一覧

実験種類	構 造	堤体水深 h (cm)	開口率 ϵ (%)	孔天端面水深 h_1 (cm)	波浪周期 T_0 (sec)	沖波波高 H_0' (cm)
通水孔内波 圧測定実験	消波ブロック被覆堤	22.9	16.8	3.2 1.6 0.0	1.96 1.63 1.31	5.6 ~ 21.9 (4 種類)
	混成堤	22.9	16.8	3.2	1.96 1.63 1.31	5.6 ~ 21.9 (8 種類)
	滑動実験	22.9	16.8 10.3 5.0	3.2	1.96 1.63 1.31	5.6 ~ 21.9 (8 種類)

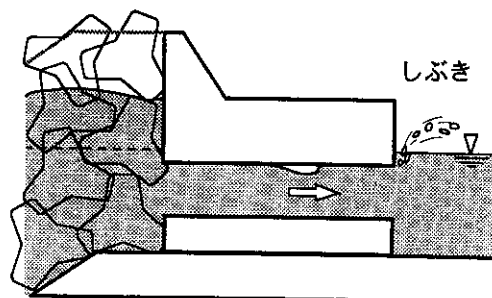
3. 通水孔内波圧特性

3. 1 通水孔への空気塊の進入状況

直立部前面に消波工を設置した場合、孔天端面水深 $h_1 = 3.2\text{cm}$ のケースでは、周期、波高に関わらず通水孔に空気塊は進入しないが、 h_1 が $1.6\text{cm}, 0\text{cm}$ と小さくなるにしたがって空気塊が進入しやすくなる。図 5 に空気塊の進入・伝達の模式図を示す。引き波時に通水孔の一部が空中に露出し空気塊が進入する (図 5 (a))。次の押し波時に、通水孔に取り込まれた空気塊は、孔内水の運動にともなって堤体背後まで移動し、気泡として水面に噴出する (図 5 (b))。空気塊の伝達状況は波浪条件により異なり、波高が大きく、周期の短い方が伝達しやすい傾向にあった。



(a) 引き波時



(b) 押し波時

図 5 空気塊の進入・伝達状況

3. 2 孔内に作用する波圧

図 6 は、消波工を設置した場合における、通水孔内の上面および下面に作用する同時波圧分布の一例である。横軸は堤体前面からの距離 x 、縦軸は最大波圧強度 $p_{\max}$ を水の単位体積重量 w_0 と最大入射波高 $H_{\max}$ で無次元化して表している。図 6 (a) は、孔

天端水深が $h_1=3.2\text{cm}$ のケースで、実験波のうち最も長周期、高波高の波浪($T_0=1.96\text{s}$, $H_0'=21.3\text{cm}$)を作用させた場合である。孔内波圧は堤体前面側で最も大きく、堤体背後に向かって直線的に減少している。上向きと下向きに作用する波圧分布はほぼ対称で互いに打ち消し合っているが、上向きの波圧強度がわずかに大きい。図-6(b)は、同波浪条件下での $h_1=0\text{cm}$ のケースである。 x の増加に対して波圧の減少はみられず、 $h_1=3.2\text{cm}$ のケースに比較して波圧強度も大きくなっている。これは、通水孔内に進入した空気塊の影響と考えられる。

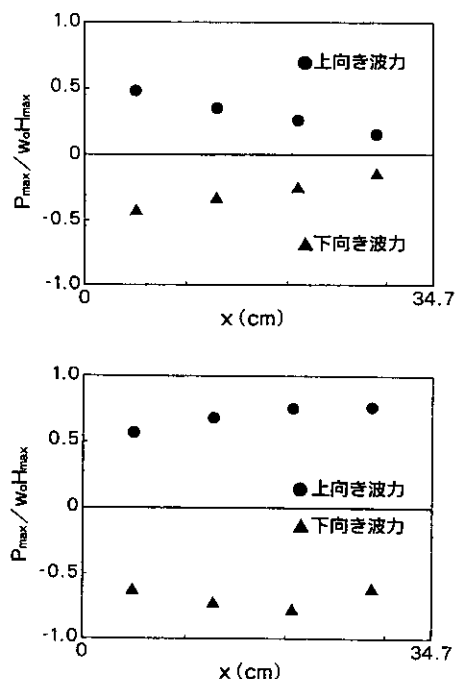


図-6 通水孔内の波圧分布例 ($T_0=1.96\text{s}$, $H_0'=21.3\text{cm}$)

3. 3 通水孔水深の影響

図-7は孔内波圧強度に及ぼす孔水深の影響をみたものである。横軸は入射波高に対する孔水深の比 $h_1/H_{1/3}$ 、縦軸は上向きの同時最大波圧強度の分布から平均値を求め無次元値 $\overline{p_{\max}}/w_0H_{\max}$ で示している。図中に黒丸で示した消波工を設置したケースに着目すると、 $h_1/H_{1/3}$ が0.2程度より大きいと波圧強度は $\overline{p_{\max}}/w_0H_{\max}=0.2\sim0.4$ ではほぼ一定であるが、 $h_1/H_{1/3}$ が0.2程度より小さくなると孔内に空気塊が進入するため波圧強度は増大する。波浪周期の影響はあまり明確ではないが、短周期の方が波圧強度がやや大きい傾向にある。図中に白抜き丸で示した消波工を設置しないケースをみると、 $h_1/H_{1/3}$ が約0.4より大きいと波圧強度 $\overline{p_{\max}}/w_0H_{\max}$ は0.4程度であるが、 $h_1/H_{1/3}$ の減少と

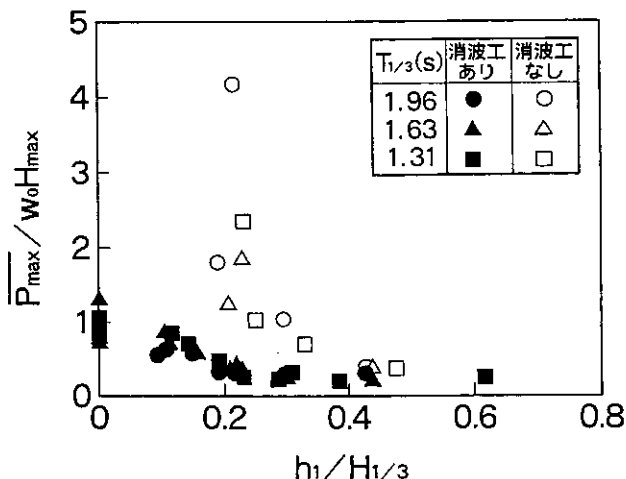


図-7 孔内波圧に及ぼす孔水深の影響

ともに波圧は増大し、 $h_1/H_{1/3}$ が約0.3より小さくなると衝撃的な波圧が作用している。

以上より、消波工を設置することにより、衝撃的な波力の発生を抑制できることがわかる。また、消波工内の平均水位が上昇するため、孔内に空気塊が進入し始める $h_1/H_{1/3}$ の値が小さくなっている。ただし、空気塊の進入状況は、波浪条件のほかに堤体幅によっても異なると考えられるため(鈴木ら⁴⁾)、この実験結果はひとつの目安と考えるべきである。

4. 設計波力

4. 1 滑動波力に及ぼす開口率の影響

消波ブロック被覆型有孔堤は、一般的な消波ブロック被覆堤に通水孔を設けた構造であるから、設計外力としては、通常の消波ブロック被覆堤の波圧分布を基本にして、通水孔の影響を考慮すればよいと考えられる。以下に、消波ブロック被覆型有孔堤の設計波力について述べるが、ここでは通水孔に空気塊が進入しない $h_1=3.2\text{cm}$ の実験結果に基づいて検討することとし、空気塊が進入するような場合は対象としない。

図-8は、滑動実験結果から開口率の影響をみたものである。横軸は、滑動量 $S=1\text{mm}$ を基準にして求めた滑動開始波高 $H_s(\text{cm})$ 、縦軸は堤体重量 W を W_0 で無次元化して示している。ここで W_0 は、 H_s に対応する滑動限界重量を通水孔のない消波ブロック被覆堤に対して計算した値である。あわせて同図には、開口率 ϵ をパラメーターとして開口率毎の平均値を直線で示してある。

データのばらつきは大きい、 $\epsilon=0\%$ では W'/W_0 の平均値がほぼ1であることから、本実験の妥当性が確認できる。また、開口率が大きくなるにしたがって

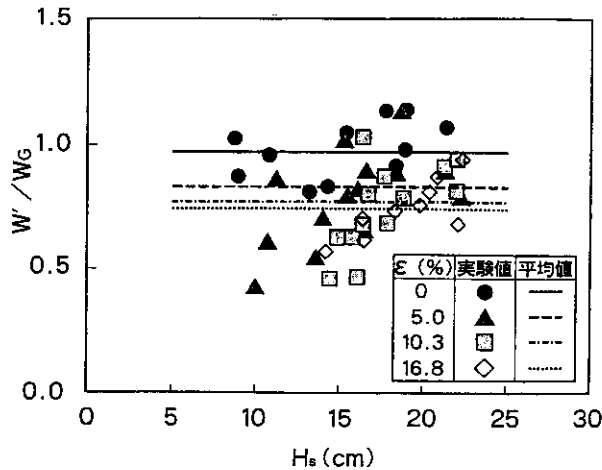


図-8 滑動波力に及ぼす開口率の影響

W'/W_G の平均値が小さくなっており、作用波力が減少していることがわかる。

4. 2 設計波圧分布の仮定

ここでは、堤体の耐波設計に用いる波圧分布を図-9に示すように仮定する。すなわち、堤体前面および下面には、合田式に波圧低減率を導入した通常の水平波力および揚圧力が作用すると考える。ただし、前節で述べたように開口率の影響を考慮して、開口部では受圧面が存在しないことから水平波力は作用させない。

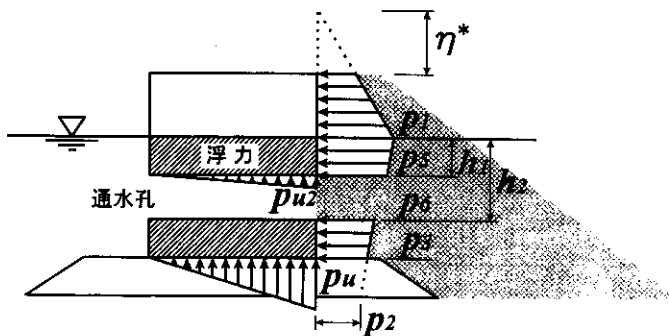


図-9 消波ブロック被覆型有孔堤の波圧分布

また、通水孔上面には、堤体前面波圧強度が p_{u2} で堤体後端にかけて三角形分布する孔内揚圧力が作用すると考える。これは、3章で述べた孔内波圧の測定結果を考慮して導入したものである。 p_{u2} は孔上面と下面の水深における水平波圧強度 p_5, p_6 の差で表す。

以下に堤体の作用波圧の計算式を示す。

$$\eta^* = 1.5\lambda H_D \quad (1)$$

$$p_1 = \lambda \alpha_1 w_0 H_D \quad (2)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h / L)} \quad (3)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (4)$$

$$p_u = \lambda \alpha_1 \alpha_3 w_0 H_D \quad (5)$$

$$p_{u2} = p_5 - p_6 = \frac{h_2 - h_1}{h'} (p_1 - p_3) \quad (6)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h / L}{\sinh(4\pi h / L)} \right]^2 \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \min \left[\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_D}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_D} \right] \quad (8)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h / L)} \right] \quad (9)$$

ここに、

η^* ; 静水面上波圧強度が0となる高さ (m)

p_1 ; 静水面における波圧強度 (tf/m²)

p_2 ; 海底面における波圧強度 (tf/m²)

p_3 ; 直立壁底面における波圧強度 (tf/m²)

p_5 ; 通水孔上面における波圧強度 (tf/m²)

p_6 ; 通水孔下面における波圧強度 (tf/m²)

p_u ; 直立壁底面前趾における揚圧力強度 (tf/m²)

p_{u2} ; 通水孔前端における揚圧力強度 (tf/m²)

h ; 直立壁前面における水深 (m)

h_b ; 直立壁前面から沖側へ有義波高の5倍だけ離れた地点での水深 (m)

h' ; 直立壁底面の水深 (m)

d ; 根固め工またはマウンド被覆工天端のいずれか小さい方の水深 (m)

h_1 ; 通水孔上面の水深 (m)

h_2 ; 通水孔下面の水深 (m)

w_0 ; 海水の単位体積重量 (tf/m³)

H_D ; 設計計算に用いる波高 (m)

L ; 水深 h における設計計算に用いる波長 (m)

λ ; 消波ブロック被覆による波圧の低減率 ($\lambda = 0.8$)

4. 3 通水孔内揚圧力の検証

前節において仮定した孔内揚圧力分布の妥当性を検討するため、孔内平均揚圧力の計算値と実験値の比較結果を図-10に示す。縦軸の実験値には、上向きの波力が最大となる瞬間の同時波圧から、下向き波圧を差し引いた値を示している。計算値に比べ実験値は約0.5

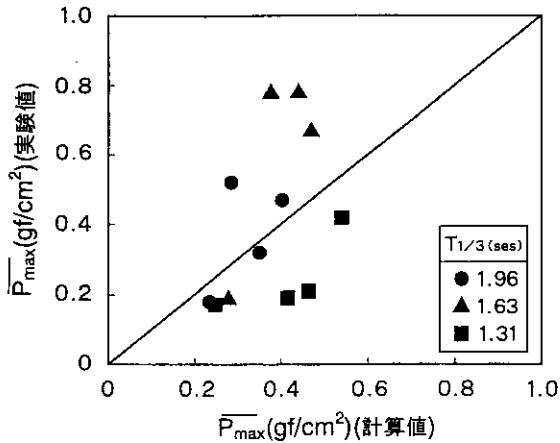


図-10 通水孔内揚圧力の計算値と実験値の比較

～2 倍の範囲で分布しばらつきは大きい、1:1 の直線の周辺に分布していることから、仮定した揚圧力式はおおむね妥当であると言える。

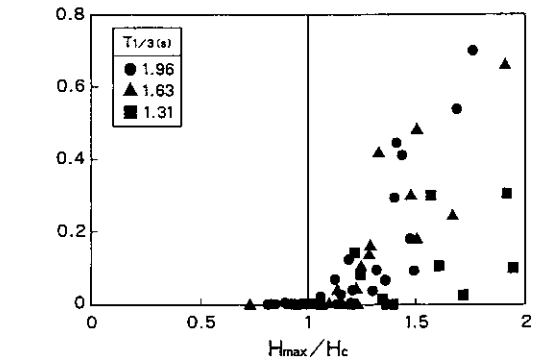
4. 4 設計法の妥当性の確認

図-11(a)～(c)は、前節で仮定した波圧分布に基づいて滑動実験結果を整理したものである。横軸は、入射最大波高 H_{max} を前節で仮定した波圧分布から計算した滑動限界波高 H_c で無次元化し、縦軸は滑動量 S を H_c で無次元化しており、周期をパラメーターとして示している。どの開口率の結果についても、波高が $H_{max}/H_c = 1$ を超えると滑動量が大きく増加していることから、前節で仮定した波圧分布は、有孔堤の設計波圧分布として妥当であることが確認できる。

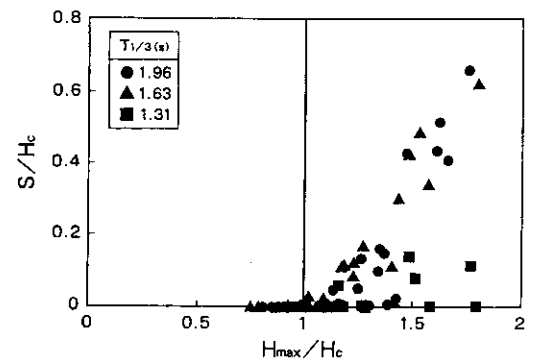
5. まとめ

有孔堤の波力特性について2次元模型実験結果に基づき検討を行い、消波ブロック被覆型有孔堤の設計波力を提案した。本論で得られた主要な結論を以下にまとめる。

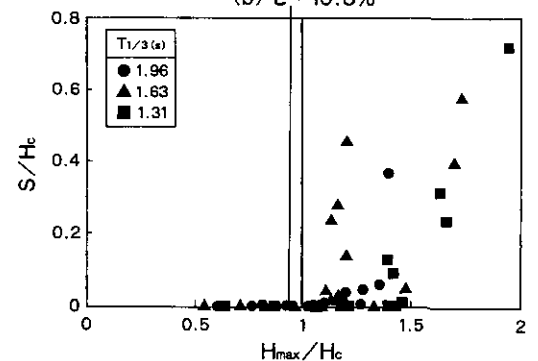
- (1) 堤体条件や波浪条件によっては通水孔に空気塊が進入し、堤体背後で気泡として水面に噴出する。空気塊が進入すると孔内波圧も増大する。この現象の発生条件は、孔天端水深と入射波高の比 $h_1/H_{1/3}$ で表すことができる。
- (2) 堤体前面の消波工により、通水孔内での衝撃波圧の発生を抑制することができる。
- (3) 消波ブロック被覆型有孔堤の設計波力は合田式を拡張して、図-9 および式(1)～(9)で表すことができる。本設計法の妥当性を滑動実験により確認した。



(a) $\varepsilon = 5.0\%$



(b) $\varepsilon = 10.3\%$



(c) $\varepsilon = 16.8\%$

図-11 滑動実験の結果

6. あとがき

港内静穏度の確保と水質環境の保全は、一方を優先すると他方が犠牲になるという相反する関係にある。消波ブロック被覆型有孔堤は、現場条件を考慮して両者の要求の妥協点を開口率により設定することができるため実用的で有効な構造形式であり、今後現地への適用例が増加すると考えられる。

本報は、2次元模型実験に基づき設計波力を検討したものであり、防波堤に対する波浪の入射角度の影響は考慮していない。本文で提案した方法は合田式を拡張したものであるため、波向き補正も合田の方法が適用できると考えられるが、模型実験などにより確認す

る必要がある。

本研究の実施にあたり貴重なご助言をいただいた、北海道開発局水産課関口設計係長、並びに北海道開発局瀬棚港湾建設事業所山田所長に対し、誌面を借りて厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 開発土木研究所港湾研究室ほか：海水交換型防波堤の開発研究(Ⅲ)、第36回北海道開発局技術研究発表会 発表概要集

(4)、pp.163-172、1993.

- 2) 開発土木研究所港湾研究室ほか：海水交換型防波堤の開発研究(Ⅳ)、第37回北海道開発局技術研究発表会 発表概要集(4)、pp.173-182、1994.

- 3) 猿川弦・水野雄三・笹島隆彦・木村克俊・高橋哲美：消波ブロック被覆型有孔堤の海水交換特性に関する研究、海岸工学論文集 第40巻、pp.971-975、1993.

- 4) 鈴木孝信・山本泰司・明田定満：有孔堤背後の流況特性について、第39回北海道開発局技術研究発表会 発表概要集(4)、pp.285-288、1996.



山本 泰司*

環境水工部
水産土木研究室
副室長

(元港湾研究室)
主任研究員



木村 克俊**

環境水工部
港湾研究室
副室長
(工学博士)



谷野 賢二***

環境水工部
水産土木研究室長
(工学博士)