

直立式消波堤の開発と水理特性

尾崎 晃*・鴻上雄三**・永田 慧**・荻谷広見***・松崎勝夫***

1. まえがき

大規模港湾の出現は、長大で複雑な形状の防波堤を伴うから、沿岸の自然環境にいろいろな影響を与える。防波堤新設のために生ずる反射波は、隣接海岸の高波、浸食災害の誘因となり、防波堤前面で入射波と重合して水粒子速度を大きくし、底質の移動を誘発する。大規模港湾ほど反射波防止対策が重要視されなければならない。

一方、港内では、港湾機能の拡張、整備に伴って岸壁、荷揚場の占有面積が増大し、港口からの侵入波は、そのエネルギーが港内に残されていた自然海岸などで吸収、分散されていたものを失うだけでなく、直立の岸壁相互で反射、重合を繰り返し、港内静穏度を著しく悪化させる傾向にあり、小規模港湾ほどこの影響は大きい。

このような背景から、近い将来における低反射率防波堤あるいは直立式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、開発が急速に進められている。筆者らは、すでに10年前から新型式の消波堤の研究、開発に取り組み^{1)~3)}、消波岸壁としての施工実績をもっているが⁴⁾、改良型の直立式消波堤について一連の水理実験を行い、消波特性を調べるとともに波力による堤体の滑動、天端床板の浮き上がりに対する安定性を検討したので、その概要を報告する。

2. 直立式消波堤の構造および機能

現在、研究、開発されている消波体を、その構造および機能から分類すると次のように大別できる。

- a 位相差を利用してエネルギーを減殺するもの
 - i) 波動と消波体内の水位変動の位相差によるもの
 - ii) 入射波と反射波の位相差によるもの
- b 渦流を発生してエネルギーを減殺するもの
- c 砕波を促進してエネルギーを減殺するもの

改良型の直立式消波堤は、多くの基礎実験結果および施工性に対する検討から、図-1に示す標準寸法をもち、これらの水理機能を満たすような構造となっている。す

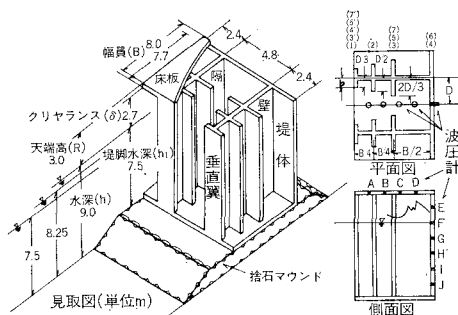


図-1 直立式消波堤概要図

なわち、堤体は、距離 $2D$ に仕切られた隔壁を中心として左右に幅員 $D/3$, $D/2$, $2D/3$ の垂直翼が、堤体前面と距離 $B/4$, $B/2$ の位置に並べられる。

入射波は、堤体前面において垂直翼による反射波と開口部からの透過波に分けられる。透過波は、垂直翼による断面の急縮、急拡の影響を繰り返して受け、翼間でエネルギーを損失するとともに、中間翼、後壁面で生ずる反射波は、再び断面変化の影響を受けながら位相のずれをもって、後続の入射波と干渉する。さらに、堤体内部の水位変動は、入射波のそれと位相差をもち、開口部に岸向き、沖向きの流れを生じて波エネルギーを減殺する。

このような消波体の反射率の解析には、各列の垂直翼を含む面および後壁面における波の透過、反射の重合理論が用いられる^{5)~7)}。たとえば、菅原・長野は、垂直翼の置かれている堤体には消波工が一樣に内蔵されていると考え、堤体の前、後壁面における反射率をそれぞれ r , 1 、透過率を一樣に $\sqrt{1-r^2}$ とし、堤体内で波長が変わらず、位相のずれがないと仮定して、消波体の反射率 K_R を求めている⁶⁾。

$$K_R = \{r^2 + (1-r^2)^2 \gamma^4 + 2r(1-r^2)\gamma^2 \cos(-2kB)\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\gamma = e^{-\epsilon B/L}$: 波高低下係数、 ϵ : 減衰係数、 B : 堤体幅、 L : 波長

一方、波の進行方向に幅 b 、間隔 d のスリットが、静水面上から水底まで1列に並べられた場合の波のエネルギーの伝達を考えれば、単位幅を $D=b+d$ として

$$K_T = (1-b/D)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 鹿島建設(株)技術研究所
 *** 日本海上工事(株)

表—1 スリット壁の透過率, 反射率

スリット幅 (<i>b</i>)	スリット間隔 (<i>d</i>)	空隙比 (<i>p</i>)	透過率 (K_T)	反射率 (K_R)
1/3	2/3	0.667	0.816	0.184
1/2	1/2	0.500	0.707	0.293
2/3	1/3	0.333	0.577	0.423

$$K_R = 1 - K_T \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで, K_T : スリット壁の透過率, 垂直翼を含む面3列について K_T , K_R を求めると表—1のとおりである。

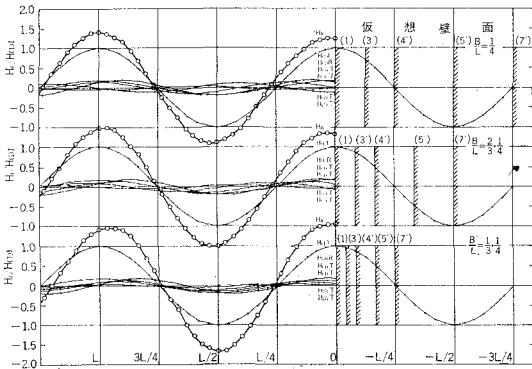
図—1の消波堤について, 単位幅 D に入射する単位波高 $H_{(1)I}$ の波の壁面 (1)~(4) における反射, 透過を考え, 堤体前面の合成波高 H_R を式 (2), (3) によって求める。ただし, 面 (4) の反射波は, 面 (3) で透過波と再反射波 (1度だけで2度目以降は無視) に分離されるものとする。

$$H_R = H_{(1)I} + H_{(1)R} + H_{(3')T} + H_{(4')T} + H_{(5')T} + H_{(7')T} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで,

$$\begin{aligned} H_{(1)I} &= 1.0 \\ H_{(1)R} &= \{1 - (1 - 1/3)^{1/2}\} H_{(1)I} = 0.184 \\ H_{(3')T} &= (1 - 1/3) \{1 - (1 - 1/2)^{1/2}\} H_{(1)I} = 0.195 \\ H_{(4')T} &= (1 - 1/2) (1 - 1/3) \{1 - (1 - 2/3)^{1/2}\} H_{(1)I} = 0.141 \\ H_{(5')T} &= (1 - 2/3) (1 - 1/2) (1 - 1/3) H_{(1)I} = 0.111 \\ H_{(7')T} &= (1 - 1/3) (1 - 1/2) (1 - 2/3) \{1 - (1 - 2/3)^{1/2}\} \\ &\quad \times H_{(1)I} = 0.047 \end{aligned}$$

図—2 は, $B/L = 1/4, 2/3 \cdot 1/4, 1/3 \cdot 1/4$ の場合の H_R を描いたもので, 位相のずれを考慮してある。



図—2 直立式消波堤の前面波形

3. 消波特性に関する実験

(1) 実験設備と実験条件

実験は, $60 \times 0.7 \times 1.5$ m の水路, 縮尺 1/15 の模型により, 規則波で行った。模型の形状および実験条件は図—1, 表—2 のとおりである。

(2) 測定方法

反射波高としては, あらかじめ求めておいた消波堤前面の部分重複波の腹と節の位置に波高計を設置し, それ

表—2 実験条件の範囲

実験条件	範囲
周期 (T)	4.3 sec
波高 (H_0)	0.73~3.42 m
	4.6
	0.73~3.72
	5.0
	1.07~3.95
	5.4
	0.84~4.29
	6.2
	0.98~4.02
	7.0
	1.05~3.68
	8.1
	1.00~3.45
	10.0
	0.98~4.41
	12.0
	0.94~4.26
	15.1
	0.74~3.74
水深 (h)	9.0, 8.25, 7.5 m
マウンド天端水深 (h_1)	7.5, 6.75, 6.0 m
マウンド天端幅員 (W)	2.5 m
マウンドの勾配 (α)	1:2
マウンドの高さ (h_2)	1.5 m
消波堤の幅員 (B)	8.0 m
消波堤天端高 (R)	3.0, 3.75, 4.5 m

ぞれに得られる連続5波の記録から最大, 最小を除く平均値を代表値として用いた。反射率は, ① Healy の方法と ② 無堤時の構造物設置点における波高を入射波高として求める方法とがあるが, ① のほうが 10~20% 小さくなるものがあるので, 結果の整理には ② を用いた。

波の打上 (下) げ高の測定は, 堤体前壁と後壁に置いたスケールによって行った。

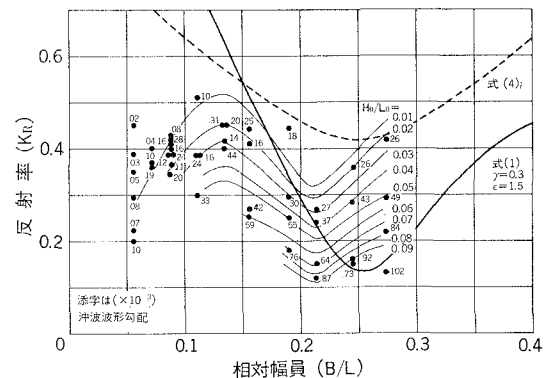
波圧計の記録は, 規則波であっても変動が大きいのので, 波圧計ごとに連続5波のものから最大, 最小を除く平均値を求め, 各点波圧とした。また, 各点波圧のうちの最大値を求め, その波圧計の各点波圧に最も近い記録を示したときの各波圧計の同時波圧を, 最大同時波圧とした。

(3) 実験結果と考察

a) 反射率

1) 相対幅員 B/L の影響

図—3 に水深 $h=9$ m の場合の反射率と相対幅員の関係を示す。反射率は, B/L の刻みを小さくして精度の高い測定を行った結果, これまでに得られている関係とは異なり, H_0/L_0 をパラメータとして整理することができた。図中の実線, 破線は, それぞれ式 (1), (4) によ



図—3 反射率と相対幅員

る理論曲線を表わすが、実験曲線は、 $B/L \approx 0.13, 0.22$ で極大、極小値をもち、 H_0/L_0 の増加とともに K_R が減少するのが特徴的である。

2) 波形勾配 H_0/L_0 の影響

以上の特徴を、他の水深についても反射率と沖波波形勾配との関係で調べると図-4のとおりである。図中の曲線は、図-3の K_R が極大、極小値を示す B/L について h をパラメータに描いたものである。一般に H_0/L_0 が大きいほど消波効果が大きく、 K_R は、 $B/L \approx 0.13$ のとき0.2に、0.22のとき0.1またはそれ以下に漸近する。この結果を直立壁の場合⁸⁾と比較すると、著しく差のあることが認められる。

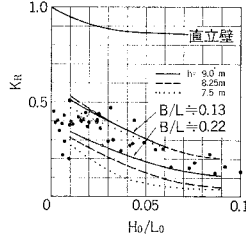


図-4 反射率と沖波波形勾配

b) 打上(下)げ高 (R_U, R_D)

波の打上(下)げ高も消波堤の効果判定し、また、消波体の静水面付近の有効長さの目安を得る要素である。

図-5に消波堤前面および後壁における波の打上(下)げ高と沖波波形勾配の関係を示す。前面の R_{U1}/H_0 は1.0~0.6、 R_{D1}/H_0 は0.8~0.4であり、後壁ではそれぞれ1.5~1.0、1.0~0.5となる。 R_{U1}/H_0 は、異形ブ

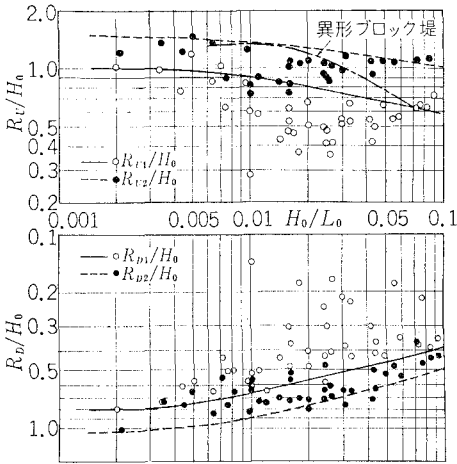


図-5 波の打上(下)げ高と沖波波形勾配

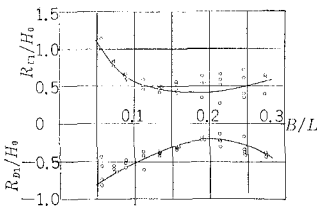


図-6 波の打上(下)げ高と相対幅員

ロック堤に比べてかなり小さい。

図-6に前面の打上(下)げ高と相対幅員の関係を示す。 $B/L \approx 0.15 \sim 0.25$ の範囲に打上(下)げ高の小さくなる部分が認められる。

c) 波圧

1) 波圧波形の分類

図-7に波圧波形の分類を示す。波圧波形は、波高が増大すると完全重複波型から波圧時間曲線の山が二つに割れた双峰波型となり、さらに増大すると、第1の山のほうが高い非対称な部分砕波型となり、次第に鋭い立ち上がりをもつ衝撃性の砕波型が現われる。この衝撃性の砕波が生ずる場合に各測点の波圧はほとんど同時に極大値に達する。波圧波形が重複波から部分砕波、砕波、さらに砕波後の波へと移行するときの波圧変化は、連続的、かつ徐々に起こる。

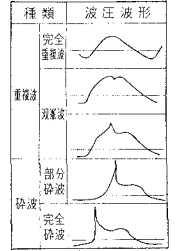


図-7 波圧波形の分類

2) 消波堤内における波の砕波限界

図-8に c) 1) の分類に基づく消波堤内における波の砕波限界を実線で示す。

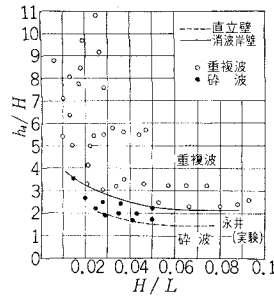


図-8 消波堤内の波の砕波限界

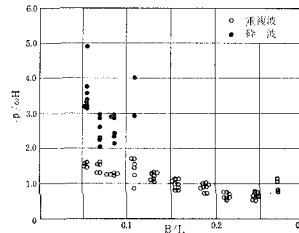
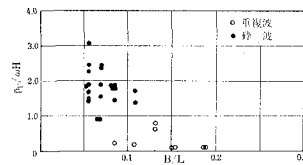


図-9 平均波圧係数と相対幅員

一般に、直立壁では前面水深が波高の2倍以上あると波は砕けずに重複波となるが、永井は、混成堤における多くの実験結果から、波形勾配の大きい波では、 $h_1 < 2H$ のときにも重複波になるとして、図-8の破線のよ

3) 平均波圧係数と相対幅員

平均波圧係数を波圧波形によって分類し、相対幅員との関係で示せば図-9のとおりである。

平均波圧係数は、重

重複波で 0.5~2.0, 砕波で 2.0~5.0 であり, 平均揚圧力係数は, 重複波で 0.1~1.0, 砕波で 1.0~3.0 である。なお, 図は示していないが, 最大波圧係数は, それぞれ 1.0~2.0, 3.0~6.0, 最大揚圧力係数は, それぞれ 0.1~2.2, 2.0~5.0 である。

図-3 によれば, $B/L \approx 0.13$ を山として K_R が低下する傾向が認められるが, 図-9 からは $B/L \approx 0.06 \sim 0.11$ の範囲で衝撃的な砕波が生じるから, $B/L = 0.11$ 以上の堤体幅員を選ぶのが有利である。

4) 波圧分布

図-10 に水深一定, 周期 3 種類について波高を変えた場合の波圧分布を示す。 $T=10, 15 \text{ sec}$ では波高変化による波圧分布の変化がよくみられ, 重複波から砕波に移行するとき波圧計 E, F, G の値が均等化し, H, I, J では周期による大きな変化がない。揚圧力の変化は, 波圧計 A, B において少なく, C, D において著しい。

$T=12 \text{ sec}$ では, 波圧, 揚圧力とも重複波的分布を示す。これは, $T=10, 12, 15 \text{ sec}$ で $L=88, 108, 137 \text{ m}$ となり, $B=7.7 \text{ m}$ から $2B/L=0.175, 0.143, 0.112$ を求めて, 図-3 を参照することにより肯定できる。

なお, ここで波圧分布というのは, 消波堤開口部中央線上の後壁および天端床板内側のものであり, 後壁, 床板の全体に作用するものではない。

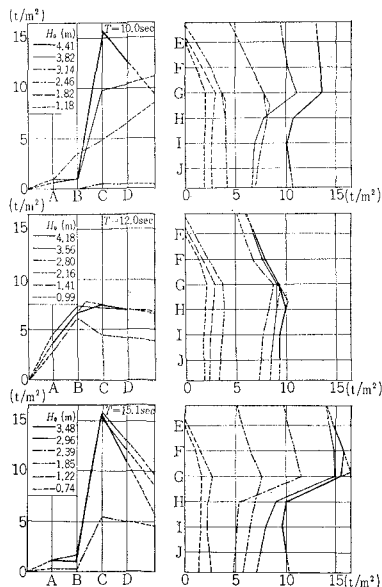


図-10 波圧分布

5) 波圧係数と波高水深比

図-11 に最大波圧係数と波高水深比との関係を示す。

6) 波圧係数の比較

実験による最大波圧係数と平均波圧係数を, 現行の波圧公式から得られるそれらと比較すると表-3 のとおり

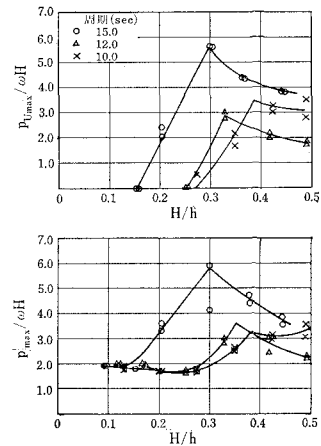


図-11 最大波圧係数と波高水深比

表-3 波圧係数の比較

種 別	最大波圧係数 $p_{max}/\rho H$	平均波圧係数 $\bar{p}/\rho H$
重 複 波		
実 験 値	1.11	0.82
サンフルー式	1.04	0.79
合 田 式	1.33	1.05
部分砕波圧式	1.50	0.97
砕 波		
実 験 値	4.09	3.12
広 井 式	1.50	1.50
ミニヤン式	10.77	1.52
合 田 式	1.84	1.32
永井式一般砕波	8.82	1.19
異常砕波	17.80	2.06

である。重複波においては, 最大, 平均波圧係数ともに公式のそれより小さいか同等であり, サンフルー式が最も近い。

また, 砕波においては, 最大波圧係数は中間的な値を, 平均波圧係数は大きい値を示す。前者は, 垂直翼により波圧が垂直方向に分散, 均等化されるため, 後者は, 分散による均等化と後壁開口部中央への集中のためと考えられる。

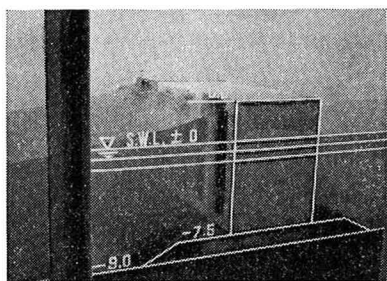
4. 安定性に関する実験

前項でも触れたが, 直立式消波堤の構造上の特徴から波圧分布の測定によって堤体の安定性の検討はできないので, 次のような実験を行った。

(1) 実験方法

写真-1 に示すとおり, 捨石マウンドの上に比重を管理した堤体 (縮尺 1/30, 重量 19.2 kg, $\rho=2.50$) を置き, 6 種類の周期について入射波高を少しずつ変えて堤体の移動距離を測定し, 滑动限界波高を求めた。変動を伴いやすい実験なので, 一つの測定は 3 回行った。天端床板 (重量 1.97 kg) の浮き上がりに対しても同様である。

マウンドは, 台形に整形した蛇籠状の金網に砕石を詰



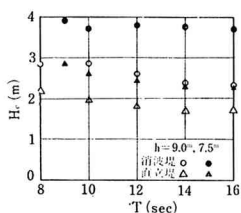
写真—1 直立式消波堤の安定実験

めたもので、上方を木板で軽く叩いて堤体との接触状態を一定に保つよう努めた。なお、比較の対象とした直立堤は、直立式消波堤を逆向きに設置した場合である。

(2) 実験結果

a) 堤体の滑動に対する安定性

図—12 に滑動限界波高と周期の関係を示す。直立堤と消波堤を比較すると、 $h=9, 7.5\text{ m}$ のとき後者のほうがそれぞれ $1.32\sim 1.45, 1.38\sim 1.64$ 倍大きい波高に対して安定であることがわかる。これは、波の作用時の堤体内水位の上昇による堤体重量の増加、揚圧力(浮力)の増加、垂直翼による波の作用時間差などの効果によるものと考えられる。



図—12 滑動限界波高

得られた滑動限界波高を図—8により分類すると、重複波あるいは限界線付近に分布するため、波の作用時間差の効果の大きい砕波領域における資料での検討が必要である。

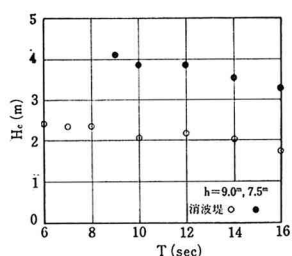
b) 天端床板の浮き上がりに対する安定性

図—13 に床板の移動限界波高と周期の関係を示す。いずれの水深でも右下がりの傾向を示し、波高クリヤランス比は $h=9\text{ m}$ のとき $0.64\sim 0.90$, $h=7.5\text{ m}$ のとき $0.79\sim 0.98$ である。

得られた移動限界波高を図—8により分類すると、 $h=9\text{ m}$ は重複波、 $h=7.5\text{ m}$ は砕波領域に分布する。

ここで、 $p=\alpha\omega H$ (p : 床板重量の $1/2$, H : 波高) から α を求めると、 $h=9\text{ m}$ のとき

$1.72\sim 2.40$, $h=7.5\text{ m}$ のとき $1.01\sim 1.26$ が得られる。



図—13 移動限界波高

5. む す び

以上の検討により、改良型の直立式消波堤について

a) 消波機能とそれを構成する各要因の効果

b) 堤体の波力に対する安定性

など、定量的に設計資料を得ることができた。今後は垂直翼の部材力、揚圧力を減少するための水平棚の効果を調べ、外郭防波堤としての実用化を図るための改良を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) 尾崎ほか: 消波岸壁に関する研究, 土木学会 第20回年講 (1965).
- 2) 尾崎ほか: 直立式消波岸壁について, 土木学会 第26, 27回年講 (1971, 1972).
- 3) 鴻上・時川ほか: 消波機能を内蔵する岸壁について, 北海道開発局土木試験所月報第208号 (1970.9).
- 4) 高野哲三: 館浜漁港の消波機能を有する -2.5m 物揚場工事について, 第16回漁港建設技術研究発表会講演集 (1971.11).
- 5) 長尾・加藤: 直立式消波岸壁に関する二・三の実験的研究, 第17回海講 (1970.11).
- 6) 菅原・長野: 消波岸壁の反射率に関する研究, 農業土木試験場報告第13号 (1975.3).
- 7) 永井・角野: スリット型防波堤に関する研究, 第23回海講 (1976.11).
- 8) 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回海講 (1974.11).