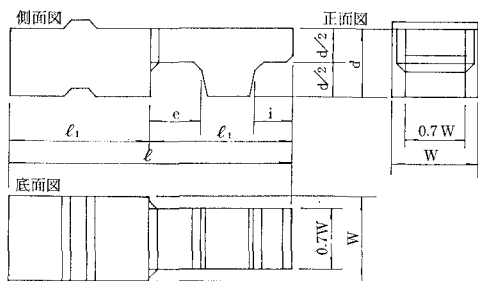


TINE BLOCK の特性

高 隆 二*・木 村 弘**

1. 緒 言

付近海域への影響や港内の高度利用に伴う静穏度低下を改善するため、近年直立消波堤および岸壁は多用されている。各種の直立堤にそれぞれ消波性を与えれば、直立消波堤となる。TINE BLOCK は直立ブロック堤に由来する。剛性、一体性、消波性を兼備するよう図-1の構造を有している。



型式 (ton)	寸 法 (m)				
	W	d	ℓ	e	i
15	1.50	1.20	5.00	0.905	0.655
30	2.00	1.60	3.50	1.002	0.727
50	2.50	2.00	6.00	1.100	0.800
100	3.00	2.40	8.00	1.460	1.060

図-1 TINE 形状図

2. 理 論

(1) 反 射 率

一様水深 h の海中に設置された直立潜堤上に置かれ、表面下 h_0 以浅を占める TINE の消波部は、中央に脚を有する水平棧と見られる。取扱上、波を脚前方で入射波および反射波を合成した堤前面波、脚後方の堤内波に分解する。入射波、反射波および堤内波にそれぞれ添字 I, R, T を付すと、微小振幅波としての速度ポテンシャルは

$$\phi_N = \frac{a_N g}{\sigma_N} \cdot \frac{\cosh k_N(z+h)}{\cosh k_N h} \cos(\sigma_N t \mp k_N x \mp \theta_N) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(\phi_T=0, N=I, R)$$

静水面上の変位は

$$\eta_N = a_N \sin(\sigma_N t \mp k_N x \mp \theta_N) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$(k_T=0, N=I, R, T)$$

と表わされる¹⁾。ここに、 a : 波の振幅、 $k=2\pi/L$ 、 $\sigma=2\pi/T$ 、 L : 波長、 T : 周期、 θ : 初期位相、 g : 重力加速度で、() 内の負号は入射波および堤内波、正号は反射波と対応する。脚前後で、流量の連続方程式は

$$A_1(U_I + U_R) = CA_2 V = A_3 \frac{d\eta_T}{dt} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 A_1 : 堤体断面積、 A_2 : 正面から見た空けき最小断面積、 A_3 : 堤内水面積、 C : 縮流係数、 V : 脚側方通過の噴流流速、 U : 鉛直平均流速である。

Bernoulli の定理から定めた噴流に作用する圧力差は、慣性力 $\rho l' CA_2 \frac{dV}{dt}$ 、摩擦力 $f \frac{\rho}{2} CA_2 |V| V$ の和とつり合う (ρ : 水の密度、 l' : 慣性長、 f : 損失係数)。

運算の結果、運動方程式は、 l' 、 C 、 f 等の関数である定数 B, G, θ を用いて

$$\frac{dV}{dt} + BV = G \sin(\sigma t + \theta) \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表わされる²⁾。堤前面波ならびに堤内波の波高および位相を測定すれば、 θ および式(3)から噴流の流速と位相は定まる。エネルギーのつり合いから損失係数を算出し、 B, G 、次いで l', C は決定され、消波機構を推察する手掛りとなる。堤前面波は

$$\left. \begin{aligned} \eta_I + \eta_R &= A \sin(\sigma t + \theta') \\ A &= a_I \sqrt{1 + 2K_R \cos \theta_R + K_R^2} \\ \theta' &= \tan^{-1} \frac{K_R \sin \theta_R}{1 + K_R \cos \theta_R} \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

であり、反射波の位相により、実用に供される見掛けの反射率 K_R' は真の反射率 $K_R (=a_R/a_I)$ より低下し、

$$\sqrt{1 + 2K_R \cos \theta_R + K_R^2} = 1 + K_R'$$

$$\therefore K_R' = \sqrt{1 + 2K_R \cos \theta_R + K_R^2} - 1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる (図-2)。見掛上反射波を生じない条件は

$$\cos \theta_R = -\frac{K_R}{2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられ、摩擦により主に噴流の運動エネルギーを消耗し、慣性により堤内波および反射波の位相を変えて達成される (図-3)。

(2) 衝撃揚圧力

以下すべて見掛けの反射波を用いる。堤前面波は

* 正会員 (株)日本港湾コンサルタント水理室長
** 正会員 (株)日本港湾コンサルタント水理研究所

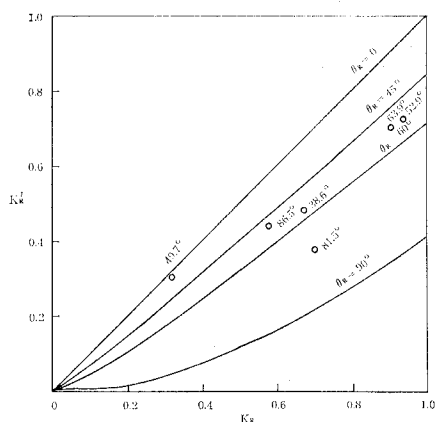
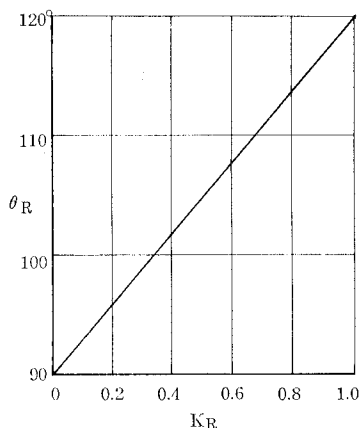


図-2 見掛けの反射率

図-3 K_R と θ_R の関係 (見掛けの反射波なし)

$$\eta = (a_I - a_R) \sin(\sigma t - kx) + 2a_R \cos kx \sin \sigma t$$

時刻 t_0 において、波は静水面上高さ R の水平板沖側端 $x=0$ に達したとすると、

$$R = H \sin \sigma t_0 \quad \therefore \quad t_0 = \frac{1}{\sigma} \sin^{-1} \frac{R}{H} \quad \dots\dots (8)$$

H は重複波に換算した入射波高で

$$H = a_I + a_R \quad \dots\dots\dots (9)$$

である (図-4)。長さ l の水平板岸側端に達する時刻 $t=t_1$ も

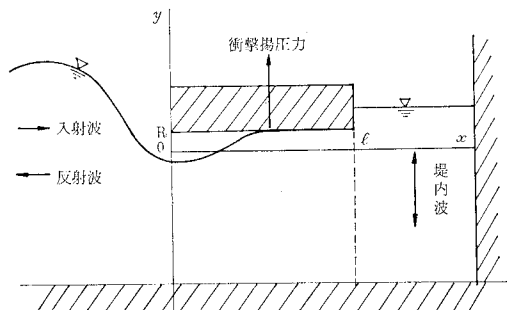


図-4 衝撃揚圧力

$$R = (a_I - a_R) \sin(\sigma t_1 - kl) + 2a_R \cos kl \sin \sigma t_1$$

から求め、衝撃揚圧力の作用時間 $\tau = t_1 - t_0$ は

$$\tau = \frac{1}{\sigma} \left\{ \sin^{-1} \frac{\beta}{\sqrt{\gamma^2 + (1-\gamma^2) \cos^2 \alpha}} - \tan^{-1} \frac{\beta - \gamma \sqrt{1-\beta^2} \tan \alpha}{\sqrt{1-\beta^2} + \gamma \beta \tan \alpha} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\alpha = kl, \quad \beta = \frac{R}{H}, \quad \gamma = \frac{K_R}{1+K_R}$$

となる。衝突により時間 τ 内に運動量を失う水塊の体積は水平板長を一边とする正方形柱とする。衝突時の鉛直流速

$$w_0 = \left(\frac{d\eta}{dt} \right)_{t_0} = \sigma H \cos \sigma t_0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

を用いると、幅 B 当り衝撃揚圧力は式(10)の $\{ \}$ 内を $\{ \}$ と略記して

$$F = \rho l^2 B \frac{w_0}{\tau} = w l^2 B \frac{2\pi H}{L} \tanh kh \sqrt{1-\beta^2} \{ \}^{-1}$$

あるいは無次元化した圧力

$$p^* = \frac{p}{wH \tanh kh} = \alpha \sqrt{1-\beta^2} \left\{ \sin^{-1} \frac{\beta}{\sqrt{\gamma^2 + (1-\gamma^2) \cos^2 \alpha}} - \tan^{-1} \frac{\beta - \gamma \sqrt{1-\beta^2} \tan \alpha}{\sqrt{1-\beta^2} + \gamma \beta \tan \alpha} \right\}^{-1} \quad \dots\dots (12)$$

と表わして、 H_I/d の小さい現地観測値と比較する。また運動量を失う水塊の体積を、正面から眺めたT型空げきと見做すと圧力は 1.86 倍され、 p^* と書き H_I/d の大きい実験値と対照した (図-11)。

(3) 変位

自重による抵抗モーメント M_0 の堤体に作用する波力モーメントを、単振動型の部分重複波圧 $M_0 \sin \sigma(t+t_0)$ 、碎波、部分碎波および衝撃揚圧力を含めた矩形状の衝撃圧 $M_S \{E(t-t_1) - E(t-t_1-\tau)\}$ とする。 $E(t)$ は単位関数で、

$$E(t) = 0 \quad (t < 0), \quad \frac{1}{2} \quad (t = 0), \quad 1 \quad (t > 0) \quad \dots (13)$$

変位開始を時間の原点にとり

$$t_0 = \frac{1}{\sigma} \sin^{-1} \frac{M_0}{M_G}$$

モーメントに関するつり合いは

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{I} [M_G \sin \sigma(t+t_0) - M_0 + M_S \times \{E(t-t_1) - E(t-t_1-\tau)\}] \quad \dots\dots\dots (14)$$

(I : 慣性モーメント, θ : 変位角)

時間に関して Laplace 変換を施し、再び原空間に戻すと変位角は正の範囲で

$$\theta = \frac{M_G}{I} \frac{1}{\sigma^2} \{ \cos \sigma t_0 \cdot \sigma t - \sin \sigma(t+t_0) + \sin \sigma t_0 \} - \frac{1}{2I} [M_0 t^2 - M_S \{(t-t_1)^2 E(t-t_1)$$

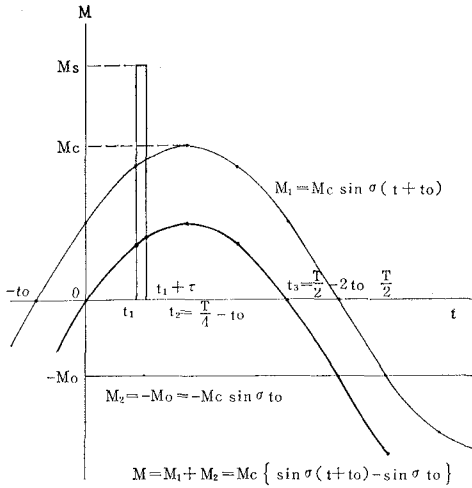


図-5 波力モーメント

$$-E(t-t_1-\tau)^2 E(t-t_1-\tau)] \dots\dots\dots (15)$$

と定まる。衝撃揚圧力に対しては、接触時刻は

$$t_1 = \frac{1}{\sigma} \sin^{-1} \frac{R}{H} - t_0 \dots\dots\dots (16)$$

である。最大変位は式 (15) を微分した $d\theta/dt=0$ を満足する時刻に生じ、衝撃波のみでは $t=t_1+(M_s/M_0)\tau$ 、部分重複波においてはほぼ波谷到達時に起こる。

3. 実 験

幅 0.8m×高さ 1.0m×長さ 30m のフラップ型造波水路を用い、縮尺 1/20 の 15 ton 型 TINE 模型を対象とした。

(1) 反 射 率

消波機能を反射率で代表させ

$$K_R = \varphi\left(\frac{H_I}{L}, \frac{h}{L}, \frac{h_0}{h}, \frac{R_0}{H_I}, \frac{H_I}{d}, \frac{l_1}{L}, \theta\right) \dots\dots\dots (17)$$

(H_I : 入射波高, R_0 : 静水時余裕高, θ : 入射角,

d, l_1 は 図-1 参照)

と表わす。有限振幅波に対しては補正³⁾を加え、各要素の影響を調べる。

a) 段 数 h_0/h

表-1 の条件下で静水面上 3 段に TINE を積み、水中の段数を変えると静水面下 1/5 水深までは反射率を低

表-1 実験条件 (h_0/h)

Case	記号	h (m)	T (sec)	L (m)	h/L	H_I/L	H_I/h	H_I/d	d_0 (m)
1	○	6.4	9.1	68.0	0.094	0.016	0.17	0.92	0.052
2	●	6.4	9.1	68.0	0.094	0.025	0.27	1.40	0.125
3	△	6.4	6.4	45.4	0.141	0.017	0.12	0.64	0.035
4	▲	6.4	6.4	45.4	0.141	0.035	0.25	1.30	0.163
5	⊗	6.4	4.5	28.4	0.225	0.038	0.17	0.92	0.169

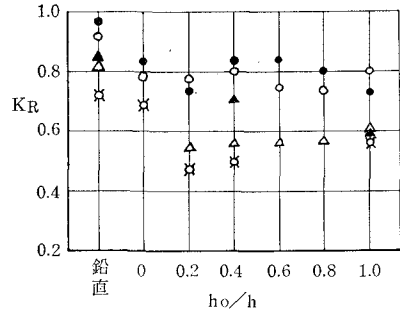


図-6 段数の影響

下させる (図-6)。ただし、以下の実験では海底まで TINE を設置している。

b) 相対水深 h/L

表-2 の条件により測定した反射率は、図-6 と同様相対水深の増加に伴い低下する (図-7)。

表-2 実験条件 (h/L)

Case	記号	H_I/d	l_1/L	H_I/L	h/L	h (m)	T (sec)	H_I (m)	L (m)
I-1	×	1	0.0208	0.01	0.1	12.0	11.8	1.2	120
II-1	○	1	0.0625	0.03	0.1	4.0	6.8	1.2	40
II-2					0.2	8.0	5.5		40
II-3					0.3	12.0	5.2		40
II-4					0.35	14.0	5.1		40
III-1	●	1	0.104	0.05	0.2	4.8	4.1	1.2	24
III-2					0.3	7.2	4.0		24

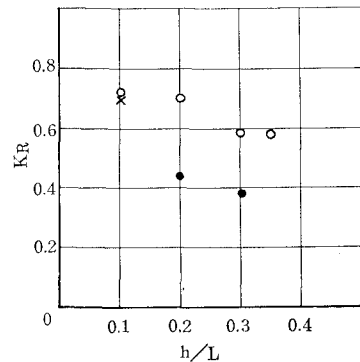


図-7 相対水深の影響

c) 波形勾配 H_I/L

波形勾配の急な波の反射率は低い (図-7)。

d) 水位 R_0/H_I

表-3 の実験条件では、TINE の高さに対し波高の低い波は、 R_0/H_I の増加とともに反射率を低減し、高い波に対する水位の影響は認められない (図-8)。

e) 波高と TINE 高さの比 H_I/d

表-4 の条件下では、影響なし (図-9)。

f) TINE 消波部長と波長との比 l_1/L

表-3 実験条件 (R_0/H_I)

Case	記 号		R_0/H_I	H_I/L	h/L	H_I/d	H_I (m)	R_0 (m)
	K_R	η/H_I						
I-1			1.4					0.6
I-2	○	⊙	0.7	0.012	0.15	0.45	0.54	0.3
I-3			0					0
I-4			-0.7					-0.3
II-1			0.34					0.6
II-2	●	⊙	0.17	0.039	0.15	1.5	1.78	0.3
II-3			0					0
II-4			-0.17					-0.3

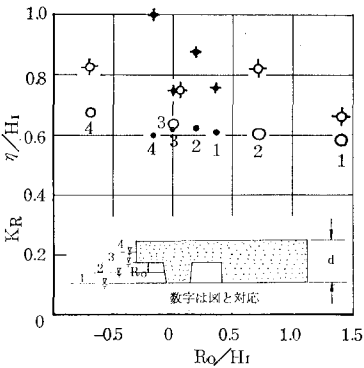


図-8 水位の影響

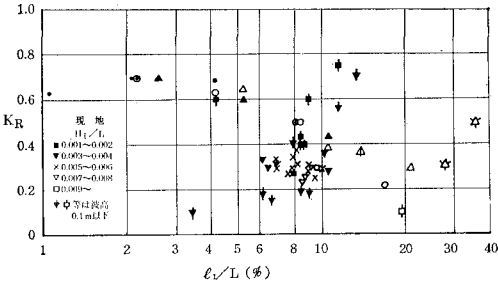


図-9 l_1/L の影響

一般に各要素の影響を個別に抽出するのは簡単ではなく、TINE 高さは一定、消波部の長さを原型の 1/2 および 2 倍とした。反射率を規定する最重要要素で、 $l_1/L \approx 0.15$ で反射率は極小となる (図-9)。

g) 入射角 θ

造波板延長 16 m, 面積 900 m² の平面水槽の側壁をサンフックスで消波した。延長約 7 波長半無限 TINE 堤の反射率は入射角の増加とともに単調に低下する (図-10)。

堤沿いに入射波、水深は多少不均一であり、先端から 1~3 波長の範囲の反射率を直立壁と比較し、写真 (1/4 秒間隔に撮影) より読取った。

(2) 波 圧

a) 衝撃揚圧力

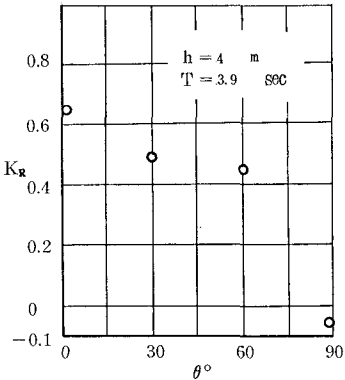


図-10 入射角の影響

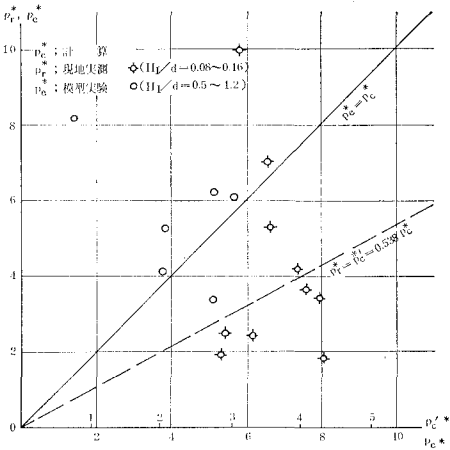


図-11 衝撃揚圧力

表-4 実験条件 (l_1/L)

Case	記 号	H_I/d	l_1/L (%)			h/L	H_I/L	h (m)	T (sec)	H_I (m)	L (m)
			$\frac{1}{2}l_1$ 型	原 型	$2l_1$ 型						
1	○	0.25	4.17	8.33	16.7	0.1	0.01	3.0	5.9	0.3	30
2	⊙	0.50	2.08	4.17	8.33	0.1	0.01	6.0	8.3	0.6	60
3	☆	0.58	—	—	35.5	0.3	0.05	4.2	3.5	0.7	14
4	▲	0.75	—	—	27.8	0.3	0.05	5.4	4.0	0.9	18
5	△	1.00	1.04	2.08	4.17	0.1	0.01	12.0	11.8	1.2	120
6	△	1.50	5.20	10.4	20.8	0.3	0.05	7.2	4.0	—	24
7	▲	2.00	—	—	13.9	0.3	0.05	10.8	5.6	1.8	36
			2.60	5.2	10.4	0.3	0.05	14.4	5.7	2.4	48

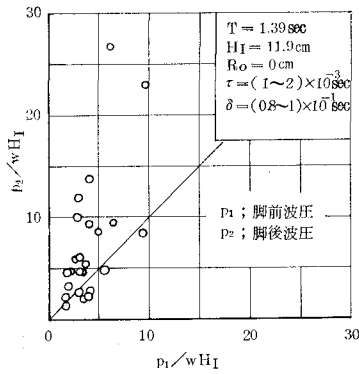


図-12 脚前後の衝撃揚圧力(模型)

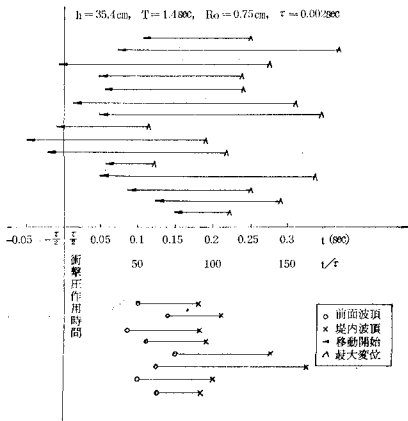


図-13 波圧と変位の起時(模型)

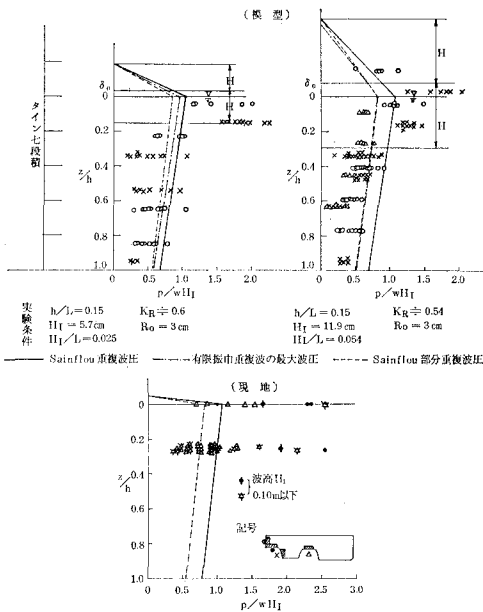


図-14 部分重複波圧鉛直分布

消波部の水平下面に圧力変換器(共和電業製, 受圧面直径 6 mm, 9.5 mm, 固有振動数 20 kHz)を取り付け, 脚前後の波圧 p_1 , p_2 を測定した。衝撃圧は水面接触時に生じ, 運動量を失う水塊を T 字型部とみると, 脚前の波圧は大略式 (12) に従う。多く対称な負圧を従がえる脚後方の波圧 p_2 は p_1 の約 2 倍, 起時は重複しない(図-11, 12)。

衝撃圧による変位はほぼ作用時間の 2 乗と波圧に比例するから, 水平板を脚で三分した TINE の変位は, 水平板の約 $1/3^3$ となり, 事実最大変位は部分重複波圧によって生じる(図-13)。

b) 部分重複波圧

安定を支配する部分重複波圧の測定値は, 渦, 乱れなどにより変動するとはいえ, 水平, 鉛直ともに Sainflou 部分重複波圧¹⁾で近似される(図-14)。ただし, 部分碎波により静水面上下 $H_1/2$ 程度の範囲に $(1.5 \sim 2.0)wH_1$ の波圧を生じている。一例として $H_1/L = 0.05$, $h/L = 0.15$, $K_R = 0.55$ の波に対しては, 波の質量輸送により堤内波の軌道中心は $H_1/6$ 程度前面波より上昇し, 海底付近で戻り流れを形成する。堤内下方に向うと波圧は急減し, 段数の影響とも関連するであろう。

c) 碎波圧

静水面上 3 段, 水中 2 段に積んだ TINE 直前で碎けた巻波状碎波の波圧鉛直分布は, 静水面直上で最大, 波頂

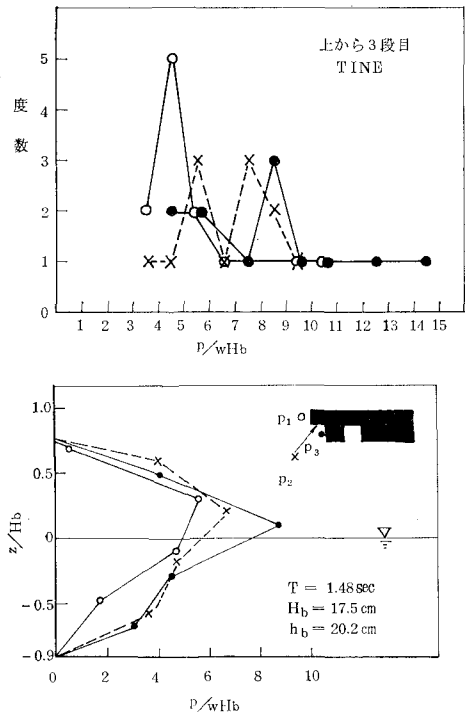
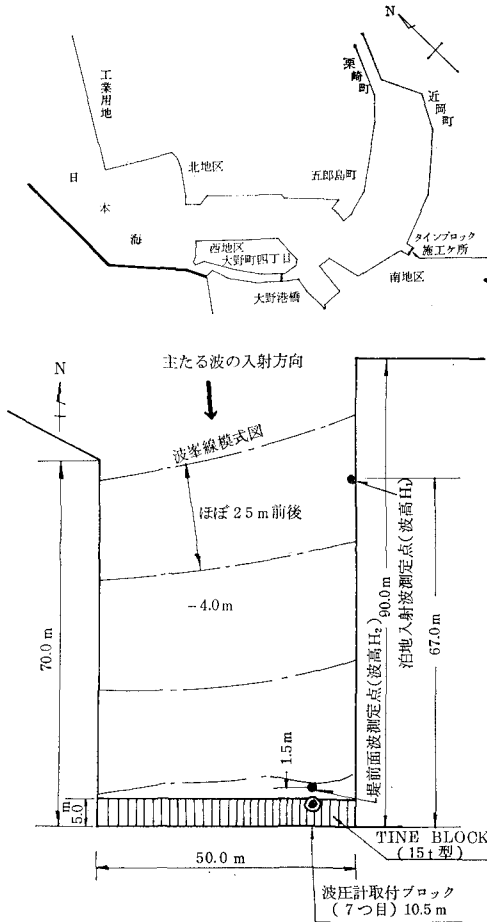


図-15 タイプブロックの碎波圧鉛直分布(模型)

と海底とを結ぶわずかに非対称な三角形を示す(図—15)。TINEの形状は、水平部後端の波圧 p_3 を砕波通過時間だけ前端より遅らせて衝撃圧を分離し、砕波波速を孤立波で近似すると、 $T=1.46\text{ sec}$ 、 $H_b=17.5\text{ cm}$ の砕波衝撃圧の作用時間 τ および巻込空気厚 Δ は、 p_1 に対し 0.004 sec 、 1.98 cm 、 p_3 に対し 0.004 sec 、 1.75 cm となり、かなりの空気を挟在させ、波圧を軽減させる役目をしている。波圧 p_1 、 p_2 、 p_3 の受圧面積はそれぞれ35、35、30%であり、起時も一致しないので、衝撃波圧は三分される。なお不安定時には静水面上のTINEは一体となって変位していた。

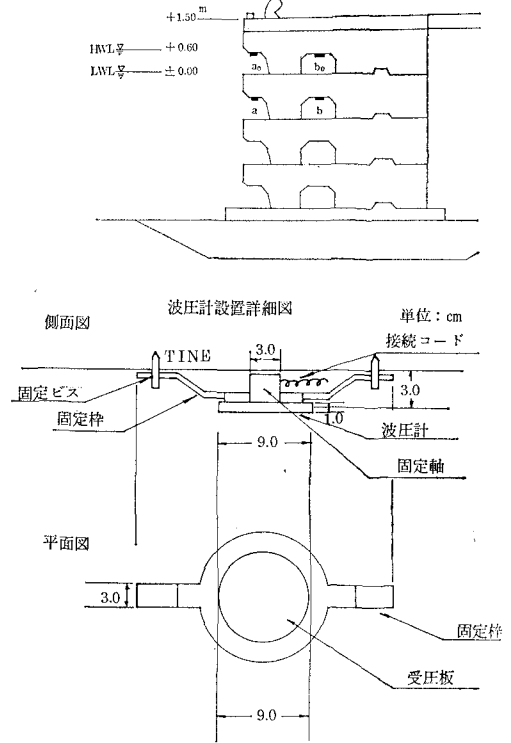
4. 現地観測

初めてTINEを施工した金沢港-4m物揚場は港奥に位置し、まれに波高0.5m程度の波を生起する(図—16)。観測当日本年5月2日午前3時の天気図には、朝鮮南西端に中心気圧992mbの弱い低気圧が見え、金沢港における風は14時に最大風速5.0m/sec、風向N、港外水深-10mの位置で超音波式波高計により測得し

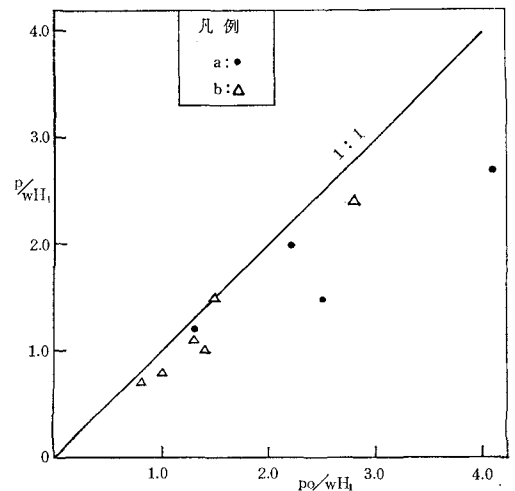


図—16 金沢港平面図

た最大有義波は18時に波高0.59m、周期8.4sec、また観測時間13~16時の天文潮は0.4~0.45mであった。西側対岸からトランシットにて観測した泊地への最大入射波高は0.23m、周期6.6sec、新たに開発した副振動計により測定した最大の堤前面波高は0.3m、気象潮および波による水位上昇を含め、最高潮位は0.63m、波圧計にて測った最大波圧は 0.4 t/m^2 である(図—17)。水面波形は不規則でTINEによる散乱波を重ね、水位



図—17 波圧計設置図



図—18 波圧の比較

も数 cm 程度は常に変動している。散乱波高は風波に匹敵し、水位変動と波の不規則性、空気泡の中断ない巻込等により、常に水中にあっても水表面と相似の正負衝撃波圧を生じている (図-18)。\$h/L=0.125\sim0.175\$, \$H_I/L=0.003\sim0.01\$, \$l_1/L=0.05\sim0.1\$ の範囲では、反射率におよぼすこれらの影響は不明 (図-9)。波高に対し水位変動はかなり激しく、部分重複波圧の \$0.5\sim3.0\$ 倍に拡がる (図-14)。\$H_I/d\$ は小さく、運動量を失う水塊を水平部長を一辺とする角柱と見ると、衝撃揚圧力を式 (12) で表現してもよからう (図-17)。

5. 検 討

(1) 消 波 性

見掛けの反射率の一例を図-2 に示す。図-19 の I-I で切断した効果のほぼ等しい両者は TINE に一体化されると別の消波機構を持つ。反射率とともに重要な波頂高は平面的に一樣ではなく、水位の単調関数とはならない (図-8)。しかし、\$\eta/H_I=(1+K_R)/2\$ とみて良く、天端床版により堤内水の遡上は妨げられるので、越流量も部分重複波と見積って大きな誤りはない²⁾。

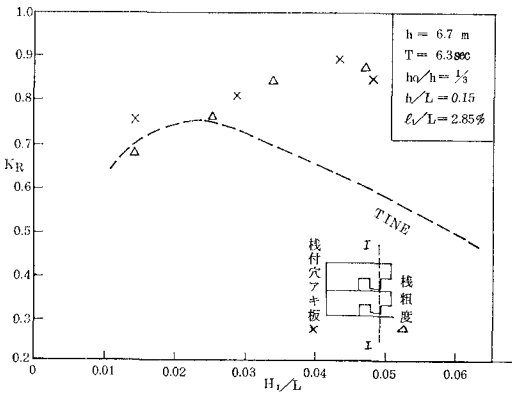


図-19 棧粗度と穴あき板の反射率

(2) 安 定 性

水平面を脚で三分し衝撃圧に対し安定な TINE におい

ても、砕波に対しては腰掛部圧力と見られる⁴⁾ 広井式波圧で設計すべきであり、重複波に対しても静水面上下 \$H_I/2\$ の範囲には広井公式を適用すべきであろう。

(3) 一 体 性

上下 TINE の一体性は、相互の突起沿いの摩擦により果たされる。突起の傾斜角 \$\varphi=45^\circ\$、波力 \$P\$ の作用方向を水平より上向きに \$\psi(<\varphi)\$ すると、滑上しない条件は

$$P < \frac{\sin(\varphi + \theta_0)}{\cos(\varphi - \psi + \theta_0)} W' \doteq \frac{W'}{\sin(71^\circ - \psi)} \dots (18)$$

(\$\theta_0\$: TINE 相互の摩擦角 \$\tan^{-1} 0.5 = 26^\circ\$, \$W'\$: TINE 水中重量)

で与えられる。

6. 結 言

ある TINE の上面を設計潮位と一致させると、波形勾配の急な深水性の波に対しては、必ずしも海底まで用いる必要はなく、消波機能は \$K_R = \varphi(l_1/L)\$ と第一次近似され、特定の \$l_1/L\$ で極小となる。脚で三分された消波部は、かなりの空気層を挟み、衝撃揚圧力および砕波圧の起時をずらせ変位も激減する。衝撃揚圧力および砕波衝撃圧の作用時間 \$\tau \sim 10^{-3} T\$, \$M_S \sim 10 M_0\$ としてそれぞれ部分重複波および砕波腰掛圧による変位の比は

$$\left[\frac{M_S \{t^2 - (t - \tau)^2\}}{M_0 / \sigma^2} \right] \sim 10^{-3} \quad t = (M_S / M_0) \tau$$

となり、おのおの後者に対して無視できる。結局、所定の天端高で一体性を確保すれば、水平鉛直波力とも衝撃圧を無視した従来の波圧公式を適用できる。

参 考 文 献

- 1) 高 隆二・木村 弘: Crenellated Breakwater の伝達波, 第19回海岸工学講演会論文集, 1972
- 2) 高 隆二・木村 弘: TINE BLOCK, 日本港湾コンサルタント, 1973
- 3) Goda, Y. & Abe, Y.: Apparent Coefficient of Partial Reflection of Finite Amplitude Waves, 港研報告第7巻3号, 1968
- 4) 土木学会: 海岸保全施設設計便覧, 改訂版, 1969