

吸 免 波 堤

高 隆 二*・木 村 弘**

1. 結 言

強大な瞬間的砕波衝撃力は防波堤ケーソンの前壁貫通孔や滑動の災害をもたらす。波によるケーソンのロッキングは良く知られており、マウンドの弾性は砕波衝撃力の緩和に有効である。捨石マウンドの属性である弾性の受動的利用を一步進め、ケーソンに下記新構造型式2種を設置して柔構造化し安定性向上を計った(図-1)。

(1) 吸波材：前壁に取付け飽和間隙水を瞬間的に圧縮排水し上方空中と下方水中への噴流に変換して砕波衝撃力を吸収し、前壁保護と堤体安定を目指す海綿状の連続気泡弾性体。(2) 免波材：底面に設置し強大な砕波衝撃力に対する静的安定に代り堤体の水平変位に伴なう慣性力で軽減する免震ゴム状弾性体。

2. 理 論

2.1 吸 波 材

鉛直前面をもち直立壁上で同時に瞬間的衝撃力を及ぼす砕波を速度 v_0 、作用時間 τ 、高さ l 、長さ $b_0 (=v_0\tau)$ の仮想水塊とする(図-1)。

a) 剛性材 在来堤のような剛性材では堤体変位 $x=0$ で、波力は $P(t)=\rho l v_0(v_0-\dot{x})=\rho l v_0^2 \equiv P_0$, $0 \leq t < \tau$ で最大波力 $P_m=P_0$ 、衝撃係数 $\kappa=P_m/P_0=1$, $t \geq \tau$ では $P(t)=0$ となる(図-2)。

b) 弾性材 堤体前壁に防舷材のような弾性体(バネ定数 k)を取付ける。波力は

$$P(t)=\rho l v_0(v_0-\dot{x})=kx \quad \dots\dots\dots (1)$$

の解で $K=k/\rho l v_0$, $P_0=kx_0$ とおき

$$x(t)=x_0\{1-\exp(-Kt)\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\therefore P(t)=P_0\{1-\exp(-Kt)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。力積一定

$$I_0=P_0\tau=\int_0^{\tau_1} P(t)dt=P_0\left\{\tau_1-\frac{1}{K}(1-e^{-K\tau_1})\right\} \quad (4)$$

から超越方程式 $K\tau_1+\exp(-K\tau_1)=K\tau+1$ の解 τ_1 を用い、

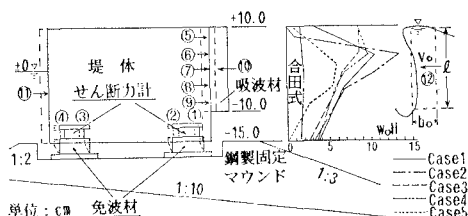


図-1 吸免波堤

$$\kappa=\frac{P_m}{P_0}=\frac{P(\tau_1)}{P_0}=1-e^{-K\tau_1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる(図-2)。最大たわみ $x_1=x(\tau_1)$ は $K\tau=b_0/x_0=\kappa b_0/x_1$ から、例えば $\kappa=0.8, 0.6$ で各々 $x_1/b_0 \doteq 1.0, 2.0$ とかなり大きい。

c) 粘性材 粘性損失係数 c を用い波力は

$$P(t)=\rho l v_0(v_0-\dot{x})=c\dot{x} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\therefore \dot{x}=v_1=\frac{v_0}{1+\varepsilon}, \quad x=\frac{v_0 t}{1+\varepsilon}, \quad P_m=\frac{\varepsilon P_0}{1+\varepsilon}$$

となる($\varepsilon=c/\rho l v_0$)。粘性材は衝撃係数 κ を

$$\kappa=P_m/P_0=\varepsilon/(1+\varepsilon) \quad \dots\dots\dots (7)$$

に低減させる特性をもち、作用時間は $\tau_2=\tau/\kappa$ に延びる(図-2)。粘性材の最大たわみ $x_2=x(\tau_2)=b_0/\varepsilon$ は $\kappa=0.8, 0.6$ で各々 $x_2/b_0=0.25, 0.67$ となり弾性材より大幅に低減する。

d) 吸波材 i) 衝撃作用時 ($0 \leq t < \tau_0$)

粘性材の長所を活用し、次波到達前にほぼ復元する弱い弾性体を複合した吸波材(厚さ D 、高さ l 、実質密度 ρ_0 、間隙比 e)の運動方程式

$$P(t)=m\ddot{x}+c\dot{x}+kx \quad \dots\dots\dots (8)$$

に搾水部質量 $m=\rho_0 l x/e$ を代入した非線形方程式

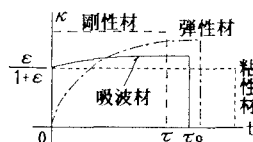


図-2 波 力

* 正会員 (株)日本港湾コンサルタント 参事

** 正会員 (株)日本港湾コンサルタント 水理部第一課長

$$\rho l v_0 (v_0 - \dot{x}) = \frac{\rho_0 l}{e} x \ddot{x} + c \dot{x} + kx$$

の解 $x(t)$ を級数展開し

$$x(t) = v_1 t - a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad \dots\dots\dots (9)$$

と近似する (a_2, a_3 : 正定数). 波力と力積

$$P(t) = \left\{ \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} + \frac{1}{v_0} (2a_2 t - 3a_3 t^2) \right\} P_0$$

$$I_0 = P_0 \tau = \int_0^{\tau_0} P(t) dt = \rho l v_0 \{v_0 \tau - x(\tau_0)\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

から作用時間 τ_0 は変位 $x(\tau_0)$ による衝撃波後端の到達時間として $x(\tau_0) = v_0 (\tau_0 - \tau)$ を満たし

$$\kappa = \frac{P_m}{P_0} = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} + \frac{1}{v_0} (2a_2 \tau_0 - 3a_3 \tau_0^2)$$

となる (図-2). 時刻 τ_0 を $e=0$ となる砕水限界

$$x_c = x(\tau_0) = eD/(1+e) \quad \dots\dots\dots (11)$$

に達する時刻 τ_c に一致させると経済的で

$$\tau_0 = \tau + x_c/v_0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

となり, τ_0 は τ より吸波材の後退距離 x_c を速度 v_0 で走る時間 x_c/v_0 だけ長くなる.

ii) 復元時 ($t \geq \tau_0$) $\tau \ll T$ で復元時の x を無視できるから $c\dot{x} + kx = 0$, $x(t) = x_c \exp(-kt/c)$ となる. 次波到達前に吸波材は復元すべきで, $\mu = c\omega/k$ ($\omega = 2\pi/T$, T : 波周期) を用い, 残留たわみ率 $X = x/x_c = \exp(-2\pi/\mu)$ から所定のバネ定数 k は定まる.

2.2 免 波 材

a) 重複波 仮想質量 $M = m + m'$ (m : 堤体質量, m' : 付加質量) の堤体で運動方程式

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P(t) \quad \dots\dots\dots (13)$$

に規則的な重複波力 $P(t) = P_1 e^{i\omega t}$, 堤体変位 $x(t) = x_1 e^{i(\omega t - \theta)}$ を代入して解き

$$x_1 = P_1/k_1, \quad \theta = \tan^{-1} \{ \mu / (1 - \lambda^2) \}$$

となる. ここで, P_1 : 重複波最大波力, x_1 : 堤体最大変位, $k_1 = k \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + \mu^2}$, $\lambda = \omega/\sigma$, $\sigma = \sqrt{k/M} = 2\pi/T_0$, T_0 : 堤体固有振動周期である. 底面せん断力 $F(t) = c\dot{x} + kx$ の最大 F_m と P_1 の比である波力増幅率

$$\kappa = \frac{F_m}{P_1} = \sqrt{\frac{1 + \mu^2}{(1 - \lambda^2)^2 + \mu^2}} > 1 \quad \dots\dots\dots (14)$$

は共振状態 $\lambda = 1$ で最大 $\kappa_c = \sqrt{1 + \mu^2}/\mu$ となる.

通常 $\lambda \approx 10^{-1}$ 程度であり重複波によっても底面せん断力は増大せず $\kappa = 1$ と見て良い.

b) 砕波 i) 矩形波力 単位階段関数

$$E(t) = 1 \quad (t \geq 0), \quad 0 \quad (t < 0) \quad \dots\dots\dots (15)$$

を用い作用時間の矩形波力

$$P(t) = P_0 \{E(t) - E(t - \tau)\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

を代入した運動方程式

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_0 \{E(t) - E(t - \tau)\}$$

に Laplace 変換

$$X(s) = \int_0^\infty x(t) e^{-st} dt \quad \dots\dots\dots (17)$$

を施こす.

$$M(s^2 X - s x_0 - \dot{x}_0) + c(sX - x_0) + kX = P_0 (1 - e^{-s\tau})/s$$

に初期条件 $x_0 = \dot{x}_0 = 0$ を代入, $c/M = 2\beta$ として

$$X = \frac{P_0}{M} \frac{1}{s^2 + 2\beta s + \sigma^2} \frac{1}{s} (1 - e^{-s\tau}) \quad \dots\dots\dots (18)$$

となる.

$$F_1(s) = \frac{1}{s^2 + 2\beta s + \sigma^2} \subset \frac{1}{\gamma} e^{-\beta t} \sin \gamma t,$$

$$F_2(s) = \frac{1}{s} (1 - e^{-s\tau}) \subset E(t) - E(t - \tau)$$

に合成定理

$$F_1(s) \cdot F_2(s) \subset f_1(t) * f_2(t)$$

$$= \int_0^t f_1(t - \xi) f_2(\xi) d\xi \quad \dots\dots\dots (19)$$

を適用する ($\gamma = \sqrt{\sigma^2 - \beta^2}$).

$$F_1(s) \cdot F_2(s) \subset \int_0^t \frac{1}{\gamma} e^{-\beta(t-\xi)} \sin \gamma(t-\xi)$$

$$\cdot \{1 - E(\xi - \tau)\} d\xi$$

$$= \frac{1}{\gamma \sigma^2} [\gamma (1 - e^{-\beta t} \cos \gamma t) - \beta e^{-\beta t} \sin \gamma t$$

$$- \gamma \{1 - e^{-\beta(t-\tau)} \cos \gamma(t-\tau)\}$$

$$- \beta e^{-\beta(t-\tau)} \sin \gamma(t-\tau)]$$

となる. $X(s) = P_0 F_1(s) \cdot F_2(s)/M$ を原空間に戻し, さらに $F(t)$ も算定した.

(1) $0 \leq t < \tau$

$$x(t) = x_0 \left\{ 1 - e^{-\beta t} \frac{\cos(\gamma t - \varphi)}{\cos \varphi} \right\}$$

$$F(t) = P_0 \left\{ 1 - e^{-\beta t} \frac{\cos(\gamma t + \varphi)}{\cos \varphi} \right\}$$

(2) $t \geq \tau$

$$x(t) = x_0 p e^{-\beta t} \frac{\cos(\pi + \varphi - \phi - \gamma t)}{\cos \varphi}$$

$$F(t) = P_0 p e^{-\beta t} \frac{\cos(\pi - \varphi - \phi - \gamma t)}{\cos \varphi}$$

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{\beta}{\sigma} = \sin^{-1} \frac{\nu}{2}, \quad \nu = \frac{c\sigma}{k}$$

$$p = \sqrt{1 - 2e^{\beta\tau} \cos \gamma\tau + e^{2\beta\tau}}$$

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \cot^{-1} \frac{1 - e^{\beta\tau} \cos \gamma\tau}{e^{\beta\tau} \sin \gamma\tau}$$

最大値は各々 $t_m = (\pi - \phi)/\gamma$, $\tau_m = (\pi - 2\varphi - \phi)/\gamma$ で生じ

$$X_m = \frac{x_m}{x_0} = p e^{-(\beta/\gamma)(\pi - \phi)}$$

$$\kappa = \frac{F_m}{P_0} = p e^{-(\beta/\gamma)(\pi - 2\varphi - \phi)}$$

となる.

ii) 三角形波力 最大波力 P_0 , 作用時間 2τ の対称時間波力を与え

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= \frac{P_0}{\tau} t E(t) - \frac{2P_0}{\tau} (t-\tau) E(t-\tau) \\ &\quad + \frac{P_0}{\tau} (t-2\tau) E(t-2\tau) \supset \frac{P_0}{\tau s^2} (1-e^{-\tau s})^2 \\ X(s) &= \frac{P_0}{M} \frac{1}{s^2+2\beta s+\sigma^2} \frac{1}{\tau s^2} (1-e^{-\tau s})^2 \end{aligned} \right\}$$

..... (22)

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\pi}{2} - \cot^{-1} \frac{2e^{\beta\tau} \cos \gamma\tau - 1}{2e^{\beta\tau} \sin \gamma\tau} \\ s &= \sqrt{2(2-4 \cosh \beta\tau \cos \gamma\tau + \cosh 2\beta\tau + \cos 2\gamma\tau)} \\ \delta &= \frac{\pi}{2} - \cot^{-1} \frac{1 - \cosh \beta\tau \cos \gamma\tau}{\sinh \beta\tau \sin \gamma\tau} \end{aligned} \right\}$$

..... (23)

を同様に解く.

(1) $0 \leq t < \tau$

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{x_0}{\gamma\tau} \{ \gamma t - \sin 2\varphi - e^{-\beta t} \sin(\gamma t - 2\varphi) \} \\ F(t) &= \frac{P_0}{\gamma\tau} \{ \gamma t - e^{-\beta t} \sin \gamma t \} \end{aligned}$$

(2) $\tau \leq t < 2\tau$

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{x_0}{\gamma\tau} \{ \gamma(2\tau - t) + q e^{-\beta t} \sin(\gamma t - 2\varphi - \alpha) \\ &\quad + \sin 2\varphi \} \\ F(t) &= \frac{P_0}{\gamma\tau} \{ \gamma(2\tau - t) + q e^{-\beta t} \sin(\gamma t - \alpha) \} \end{aligned}$$

(3) $t \geq 2\tau$

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{x_0 s}{\gamma\tau} e^{-\beta(t-\tau)} \sin\{\gamma(t-\tau) + \delta - 2\varphi\} \\ F(t) &= \frac{P_0 s}{\gamma\tau} e^{-\beta(t-\tau)} \sin\{\gamma(t-\tau) + \delta\} \\ q &= \sqrt{1 - 4e^{\beta\tau} \cos \gamma\tau + 4e^{2\beta\tau}} \end{aligned}$$

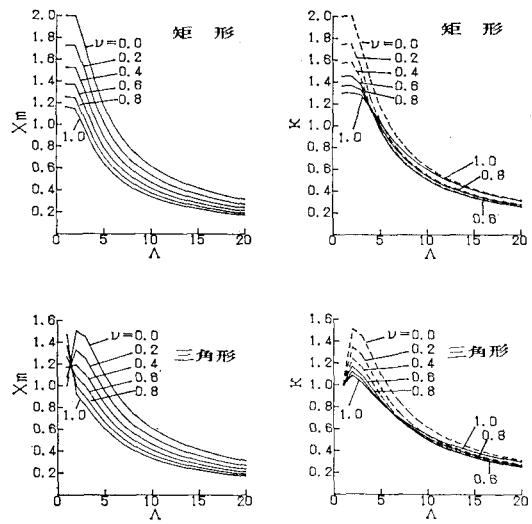


図-3 最大変位と衝撃係数

表-1 最大変位と衝撃係数

Λ	ν	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1		2.000	1.729	1.527	1.372	1.254	1.163
2		2.000	1.729	1.526	1.369	1.245	1.145
3		1.732	1.493	1.311	1.167	1.050	0.954
4		1.414	1.220	1.107	0.950	0.854	0.774
5		1.176	1.014	0.889	0.790	0.709	0.643
6		1.000	0.863	0.756	0.672	0.603	0.547
7		0.868	0.749	0.656	0.583	0.523	0.474
8		0.765	0.660	0.579	0.514	0.462	0.418
9		0.684	0.590	0.517	0.459	0.412	0.374
10		0.618	0.533	0.467	0.415	0.373	0.338
12		0.518	0.447	0.391	0.347	0.312	0.283
14		0.445	0.384	0.337	0.299	0.268	0.243
16		0.390	0.337	0.295	0.262	0.235	0.213
18		0.347	0.300	0.263	0.233	0.209	0.190
20		0.313	0.270	0.237	0.210	0.189	0.171

Λ	ν	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1		1.000	1.076	1.168	1.267	1.368	1.470
2		1.508	1.330	1.193	1.085	0.997	0.923
3		1.445	1.251	1.102	0.984	0.890	0.811
4		1.273	1.099	0.964	0.857	0.770	0.699
5		1.100	0.949	0.832	0.739	0.664	0.602
6		0.955	0.824	0.722	0.641	0.576	0.522
7		0.834	0.724	0.634	0.563	0.506	0.459
8		0.746	0.643	0.564	0.501	0.450	0.408
9		0.670	0.578	0.507	0.450	0.404	0.366
10		0.608	0.524	0.460	0.408	0.367	0.332
12		0.512	0.441	0.387	0.344	0.309	0.280
14		0.441	0.381	0.334	0.296	0.266	0.241
16		0.388	0.334	0.293	0.260	0.234	0.212
18		0.346	0.298	0.261	0.232	0.208	0.189
20		0.312	0.269	0.236	0.209	0.188	0.170

Λ	ν	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1		2.000	1.744	1.572	1.451	1.363	1.298
2		2.000	1.744	1.572	1.451	1.363	1.298
3		1.732	1.525	1.424	1.374	1.325	1.281
4		1.414	1.245	1.161	1.151	1.161	1.162
5		1.176	1.035	0.965	0.957	0.995	1.025
6		1.000	0.880	0.821	0.814	0.858	0.904
7		0.868	0.764	0.712	0.706	0.748	0.803
8		0.765	0.674	0.628	0.623	0.661	0.720
9		0.684	0.602	0.562	0.556	0.591	0.651
10		0.618	0.544	0.507	0.503	0.534	0.593
12		0.518	0.456	0.425	0.421	0.447	0.503
14		0.445	0.392	0.365	0.362	0.384	0.435
16		0.390	0.343	0.320	0.317	0.337	0.384
18		0.347	0.306	0.285	0.282	0.300	0.343
20		0.313	0.275	0.257	0.254	0.270	0.309

Λ	ν	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1		1.000	0.998	0.998	0.998	0.998	0.996
2		1.508	1.344	1.238	1.167	1.119	1.085
3		1.445	1.270	1.161	1.092	1.048	1.019
4		1.273	1.119	1.028	0.975	0.944	0.927
5		1.100	0.968	0.898	0.862	0.845	0.839
6		0.955	0.841	0.784	0.763	0.757	0.760
7		0.839	0.738	0.689	0.678	0.682	0.692
8		0.746	0.656	0.612	0.606	0.617	0.634
9		0.670	0.590	0.550	0.545	0.562	0.583
10		0.608	0.535	0.499	0.495	0.515	0.539
12		0.512	0.450	0.420	0.416	0.439	0.467
14		0.441	0.388	0.362	0.359	0.380	0.411
16		0.388	0.341	0.318	0.315	0.335	0.366
18		0.346	0.304	0.284	0.281	0.298	0.329
20		0.312	0.274	0.256	0.253	0.269	0.299

最大値は各々 $t_m = \tau + (\pi/2 - \delta + \varphi)/\gamma$, $\tau_m = \tau + (\pi/2 - \delta - \varphi)/\gamma$ で生じる ($A = T_0/\tau$, 表-1, 図-3).

c) 地震 仮定の規則的地震動 $y(t) = y_0 e^{i\omega t}$ による免波堤の変位 $x(t) = x_1 e^{i(\omega t - \theta)}$ は

$$M\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad \dots\dots\dots (24)$$

を解き

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{\sqrt{(1-\lambda^2 + \mu^2)^2 + (\lambda^2 \mu)^2}}{(1-\lambda^2)^2 + \mu^2} y_0 \\ \theta &= \tan^{-1} \{ \lambda^2 \mu / (1-\lambda^2 + \mu^2) \} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (25)$$

となる. せん断力 $F(t) = c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y)$ の最大値と在来堤での最大慣性力 $M\omega^2 y_0$ との比とし

$$\begin{aligned} \kappa &= F_m / M\omega^2 y_0 \\ &= \sqrt{(1+\mu^2) / \{(1-\lambda^2)^2 + \mu^2\}} \quad \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

は重複波と同じ表示になる. 共振 ($\lambda=1$) は起り得るが, 実際の地震波は規則波でなく $\kappa \neq 1$ と見て良い.

3. 実 験

3.1 基礎実験

a) 吸波材 (着水衝撃) 吸波堤に作用する瞬間的な碎波衝撃力は時間的, 場所的に変動し波毎にも異なる. 吸波材の基礎的特性を把握するため再現性, 衝突速度調節, 一樣衝撃圧等の面で勝れ繰返しも容易な着水衝撃実験を行った. 加速度計 (20 G, 610 Hz, ㈱共和電業) を取付けた鉄板 (面積 $A = 25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$, 重量 4.5 kg) を水面上 40 cm から落下し, 参考として板面と比較した (表-2). 加速度は上向最大加速度と g の和 α_m を最大とし作用時間 2τ の三角形波で, $I_0 = mv$, $p_m = m\alpha_m/A$, $I = m\alpha_m\tau$, $\kappa = I/I_0$, 吸収率 $\xi = 1 - \kappa$, 反発係

表-2 着 面 衝 撃

case	m (kg)	h (cm)	v (m/s)	α_m (m/s ²)	I_0 (kgm/s)	p_m (kPa)	2τ (ms)	I (kgm/s)	κ	ξ	e
1A I	4.5	40	2.80	287.3	12.60	20.69	16	10.34	0.821	0.179	-
II	"	"	"	235.4	"	16.95	16	8.47	0.672	0.328	-
B I	4.7	"	"	193.2	13.16	14.53	16	7.26	0.552	0.448	-
II	"	"	"	195.2	"	14.68	16	7.34	0.558	0.442	-
2A I	4.5	"	"	470.7	12.60	33.89	18	19.06	1.513	-	0.513
II	"	"	"	317.7	"	22.87	20	14.27	1.133	-	0.133
B I	4.7	"	"	485.4	13.16	36.50	18	20.53	1.560	-	0.560
II	"	"	"	361.9	"	27.21	20	17.01	1.293	-	0.293

受圧面 (水面1、板面2)、吸波材 (乾燥A、湿润B)、スリット (無I、有II)

数 $e = \kappa - 1$ を表わす. 吸波材 (湿润 1B) は弾性体に近い乾燥状態 (1A) より衝撃力を良く吸収し, スリット (波向と平行で等間隔な鉛直平面の楕形切込) も一般に有効である. 吸波材を取付けない鉄板の着面衝撃は過大なため測定不能であった.

b) 免波材 i) 自由振動 後述の本実験に使用する2次元水路 (長さ 30 m , 幅 0.5 m , 深さ 0.8 m , 技研興業 (㈱総合技術研究所) 内に免波材を取付けた堤体を設置し, 堤体を沖側へ 50 kg の力で引張り, 瞬間的に力を解放して自由振動の固有周期 (空中 T_a , 水中 T_w) を測定した (表-3). 付加質量 m' と堤体両側での付加水の慣性長 l'

$$m' = 2\rho l' db \frac{k}{4\pi^2} (T_w^2 - T_a^2) \quad \dots\dots\dots (27)$$

を算出した (d : 堤体水深, b : 堤体奥行). $l'/d = 0.45 \sim 0.55$ で実用上 0.5 と近似すると付加水深は d を一辺とする正方形柱の水塊となり, Westergaard の地震時動水圧近似式 $p_m = 7\rho g \alpha \sqrt{dy}/8$ を深さ y 方向で平均した $l'/d = 0.5833$ に近い (α : 震度).

ii) 上下面せん断力 免波材は柔軟性を増すと上下面でせん断力と位相に差を生じ免波材内部の慣性と粘性による衝撃力緩和を期待できる. 本実験 case 5 で4箇使用した弾性の小さい免波材を2箇に減じ空中で振子式衝撃載荷実験を行った. 堤体滑動と関連する下面せん断力は上面の $0.26 \sim 0.40$ に低減し免波材の一効果として検討に値する.

3.2 本 実 験

a) 方法 堤体前壁で丁度鉛直波面となる衝撃碎波を発生させるため試行を繰返して調整し海底勾配 $1/10$, マウンド勾配 $1/3$, 設置水深 15 cm とした (図-1). 前記2次元水路内に想定縮尺 $1/25$ の模型を設置し, 模型規則波は周期 $T_m = 2 \text{ s}$ (現地 $T_p = 10 \text{ s}$) とし前壁で碎波させる造波板振幅 300 mm に設定した. 堤体は1 (在来堤), 2 (免波堤), 3 (吸波堤), 4 (吸免波堤, $\kappa > 1$), 5 (同, $\kappa < 1$) を

表-3 付加質量

case	m (kg)	M (kg)	m' (kg)	T_a (ms)	T_w (ms)	k (kN/m)	l'/d
1	50.0	60.6	10.6	109	120	166.2	0.491
2	100.0	112.0	12.0	154	163	166.6	0.557
3	150.0	159.6	9.6	190	196	164.2	0.445

表-4 波圧係数

波圧計	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	P_0 (kg)	F_m (kg)	κ
case 1	5.44	10.53	8.24	6.17	5.45	220.52	278.83	1.264
2	1.03	13.25	10.13	6.55	5.25	221.84	357.25	1.610
3	8.40	8.38	6.23	5.63	4.52	200.90	274.84	1.368
4	8.89	9.59	6.61	5.40	4.60	214.01	354.30	1.656
5	1.63	4.12	5.22	5.13	2.31	113.71	70.49	0.620

表-5 減衰振動諸定数

case	T_1 (ms)	β (s ⁻¹)	γ (s ⁻¹)	σ (s ⁻¹)	ϕ (°)	T_0 (ms)	k (kN/m)	τ (ms)	ν	λ
4	192.0	2.856	32.725	32.849	4.987	191.3	127.92	40	0.1775	0.0976
5	388.6	1.267	16.168	16.217	4.481	387.5	33.03	47	0.1563	0.1938

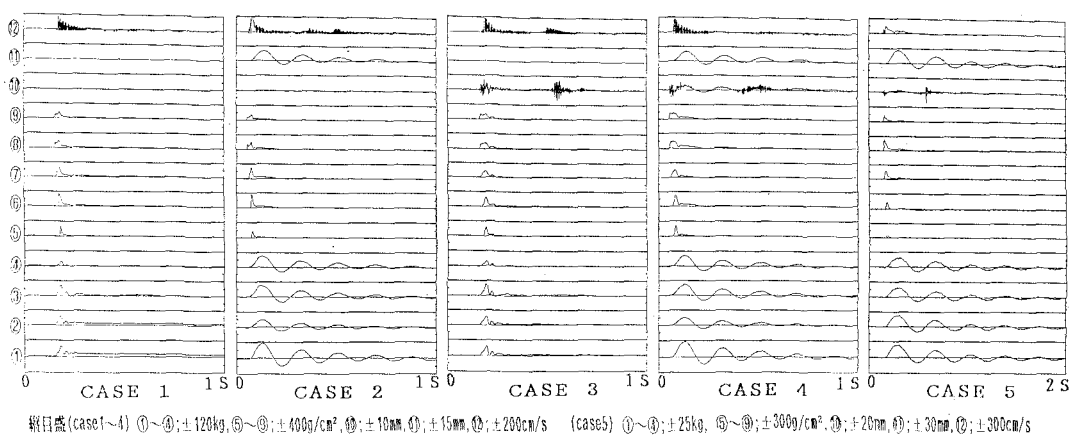


図-4 測定記録

case 1~5 とし底面四隅にせん断力計を設置した。

b) 計測機器 せん断力計①~④ (100 kg, 150 kg), 波圧計⑤~⑨ (0.5 kg/cm², 9.1 kHz), 吸波材変位⑩ (ウレタン式, ±40 mm), 堤体変位計⑪ (±50 mm, 鋼共和電業), 流速計⑫ (300 cm/s) を使用し記録を 1 ms 毎にデジタル解析した (図-1, ⑩以外側三計エンジニアリング)。

c) 結果 i) 波圧⑤~⑨ 静水面上 2 cm ($\delta=0.130 H$) で強大な衝撃波圧 (8~13) $w_0 H$ に達し, 作用時間は静水面以上で $2\tau \pm 0.02 T$ の三角形波, 静水面以下ではやや先行し $\tau=(0.02 \sim 0.03) T$ の矩形波に近づく (表-4, 図-1, 4)。case 5 の波圧は調整不十分なため過小である。

ii) 底面せん断力①~④ 底面せん断力は免波材の無い case 1, 3 で波圧とほぼ相似な時間波形を示すが, $\kappa=1.264, 1.368$ となるのは堤体の微小変位に伴う慣性力と位相差に起因する (表-4)。免波材を設置した case 2, 4, 5 で F_m は最大波圧時より遅れ, 周期 $T_1=2\pi/r$, 減衰係数 β の減衰自由振動を行なう (表-5)。case 4 の $\kappa=1.656$ は実際には case 4 と 3 での F_m の比 $354.30/274.84=1.291$ に近いと見られ, 全波力の $\tau=56$ ms と $A=191.3$ ms/56 ms=3.42 を用いた計算値 $\kappa=1.224$ と近似する (表-1, 4, 5)。case 1~4 の上面せん断力と異なり, case 5 では下面せん断力を測定しており $\kappa=0.620$ は $T_0=387.5$ ms, $\tau=57$ ms, $A=6.80$ を用いた計算値 $\kappa=0.714$ より若干低く, 免波材内部の吸収効果による影響と見られる。

iii) 吸波材変位⑩ 吸波材は $F(t)$ と同位相の伸縮と共に高周波の碎波流速変動を複合する。最大変位は case 3 (0.736 cm), 4 (0.547 cm), 5 (0.143 cm) で厚さ (模型 4 cm, 現地 1 m) と比較し変形は不十分である。吸波材を設置した case 3, 4 で P_0 は case 1, 2 とほぼ等しく波力を低減しないが, 静水面直上での最大波圧を case 3, 4 では各々 case 1, 2 の 0.810, 0.724 に低下し波圧分布を一様化する。衝撃波圧の急な鉛直勾配は最大波圧を空中と水中への噴流に変換して吸収し, 前壁貫通孔の発生防止に有効である (表-4)。

iv) 免波材変位⑪ 堤体, つまり免波材の変位 $x(t)$ は $c\phi$ を含む $F(t)$ より位相 2ϕ だけ遅れる。 x_m は case 2 (1.034 cm), 4 (1.001 cm), 5 (2.616 cm) で各々 25.85 cm, 25.03 cm, 65.40 cm と現地換算される。

v) 碎波流速⑫ case 1~4 で碎波流速 $v_0=180.8, 7 \sim 184.98$ cm/s, $H_b=30.6 \sim 31.0$ cm, $V_b=v_0/\sqrt{gH_b}=1.037 \sim 1.068$ となる。case 5 では $V_b=147.67/\sqrt{32.2g}=0.831$ と過小である。

4. 結 言

ケーソン堤の前壁保護と底面せん断力低減を目標に免波堤を提案した。吸波材は静水面直上に集中する強大な碎波衝撃圧 (8~13) $w_0 H$ を吸収し前壁貫通孔の発生防止に有効である。免波材では堤体固有周期 T_0 と碎波作用時間 $\tau=(0.010 \sim 0.015) T$ との比 $A=6 \sim 15$ 程度に保ち適度な粘性 ν を与えれば, 次波到達前に自由振動は減衰し衝撃係数 $\kappa=0.3 \sim 0.8$ を実現出来る。