

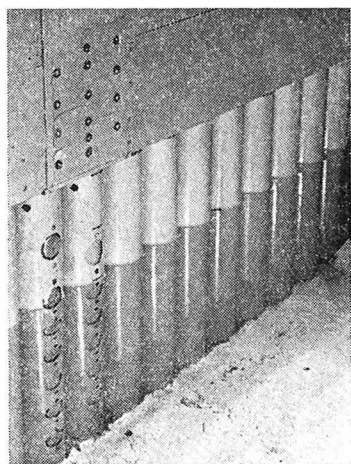
鋼管防波堤に関する研究(第1報)

永井 莊七郎*・久保 直**・時川 和夫***

1. 緒 言

わが国の主要港湾における防波堤のほとんど全部が混成堤であるが、混成堤直立部は波力に対して自重によって抵抗するように設計されるので、自重が大きくなり、軟弱な地盤上に築造する場合には多量の砂の置換えと、非常に大きな基礎捨石堤を必要とする。このようにしてもなおしばしば防波堤は軟弱地盤内に沈下する。それゆえ軟弱な海底上に築造される防波堤は軽い構造物が望ましいわけで、その一つとして考案されたのが鋼管防波堤である(写真-A)。鋼管防波堤は鋼管を1列に打ち並べて波を防ごうとするもので、波力に対しては曲げモーメントで抵抗するものである。したがってその重量は軽く、強度もあまり強くないので、強い碎波の衝撃圧力を受けないように前面水深を設計波高の1.8倍以上にして、なるべく重複波圧あるいはそれに近い弱い波圧を受けるように設計されなければならない。また鋼管防波堤は港外側からの波圧を受けるほかに、引き波の時に港内側から静水圧を受け、また侵入波の2倍周波数の圧力変動も加わって、鋼管はくり返し応力を受ける。このくり返し応力によって鋼管基部がゆるみ、また越波によって根入部が洗掘されるおそれもあるので、鋼管の根入れは十分慎重に決定し、鋼管が傾斜したりあるいは座屈をし

写真-A



たりしないように設計しなければならない。また鋼管の断面は港外側および港内側からの圧力による曲げモーメントに抵抗するだけの強度を持たなければならない。

2. 実験目的および実験方法

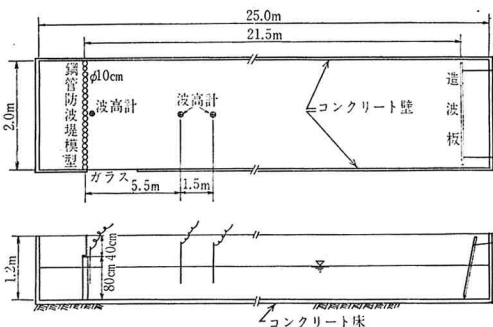
(1) 実験目的

鋼管防波堤は上記の特徴を持っているので、その設計に当たっては、波圧強度とその鉛直分布(波圧の作用点)を測定することが最も大切なことである。またこれらが平面直立壁における値とあまり変わらないかどうかを調べるために、それぞれの実験に対して平面直立壁についても実験を行なった。また鋼管基部補強のための捨石堤の影響についても検討した。

(2) 実験装置

実験に用いた波浪水槽は図-Aに示すごとく長さ25.0m、幅2.0m、深さ1.2m、造波装置はフラッター型である。実物に対する模型の大きさは縦横ともほぼ1/15である。

図-A 波浪水槽の平面図および断面図



(3) 実験方法

実験に用いた波は現地に換算すると周期 $T_p=5\sim7$ sec、波高 $H_p=2.0\sim3.0$ m、波長 $L_p=30\sim60$ m、鋼管の直径 $D_p=1.5$ mである。鋼管防波堤に作用する波圧は鋼管頂部および側部(頂部中心線より 47° 、図-B)において6個の波圧計を用いて測定した。また同一の波を用いて平面直立壁についても波圧強度とその鉛直分布を測定し、両者を比較検討した。また鋼管一本に働く波圧合力をモーメント測定法によって測定した(図-C参照)。波高測定は鋼管模型の前面と沖側に5.5mと7.0m離れた位置で抵抗線式波高計を用いて行ない、周期お

* 正会員 工博 大阪市立大学教授

** 正会員 大阪市立大学助手

*** 正会員 工修 大阪市立大学助手

図-4 写真-4 の波圧分布図

$T_m = 1.54 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 835 \text{ gr/cm}$
$H_m = 17.9 \text{ cm}$	$P_{mA} = 832 \text{ gr/cm}$
$L_m = 285 \text{ cm}$	$P_{mC} = 362 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.063$	$P_{mS} = 975 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.187$	$P_e/P_A = 1.00$
$h/H = 2.98$	$P_e/P_C = 2.38$
	$P_e/P_S = 0.86$

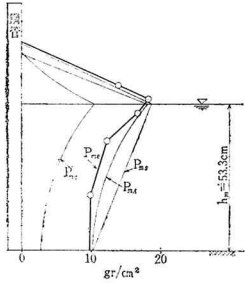


写真-4 図-4 の波の状況

$T_p = 6.0 \text{ sec}$, $H_p = 2.6 \text{ m}$

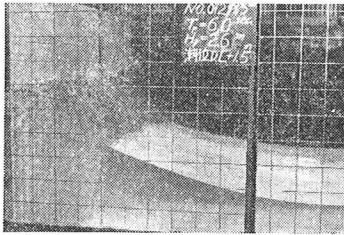


図-5 写真-5 の波圧分布図

$T_m = 1.28 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 612 \text{ gr/cm}$
$H_m = 17.9 \text{ cm}$	$P_{mA} = 722 \text{ gr/cm}$
$L_m = 216 \text{ cm}$	$P_{mC} = 2 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.083$	$P_{mS} = 891 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.247$	$P_e/P_A = 0.85$
$h/H = 2.98$	$P_e/P_C = -$
	$P_e/P_S = 0.67$

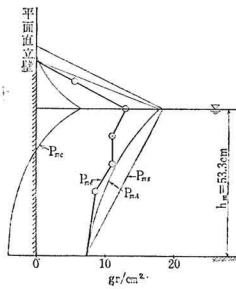


写真-5 図-5 の波の状況

$T_p = 5.0 \text{ sec}$, $H_p = 2.5 \text{ m}$

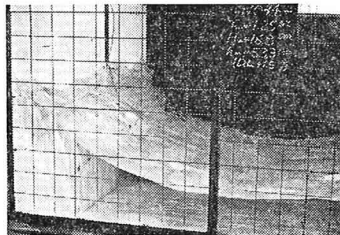


図-6 写真-6 の波圧分布図

$T_m = 1.31 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 643 \text{ gr/cm}$
$H_m = 16.5 \text{ cm}$	$P_{mA} = 681 \text{ gr/cm}$
$L_m = 231 \text{ cm}$	$P_{mC} = 150 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.071$	$P_{mS} = 820 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.231$	$P_e/P_A = 0.94$
$h/H = 3.23$	$P_e/P_C = 4.28$
	$P_e/P_S = 0.78$

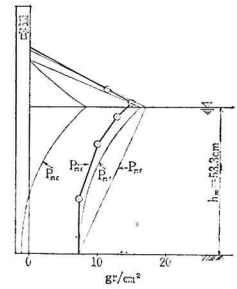


写真-6 図-6 の波の状況

$T_p = 5.0 \text{ sec}$, $H_p = 2.5 \text{ m}$

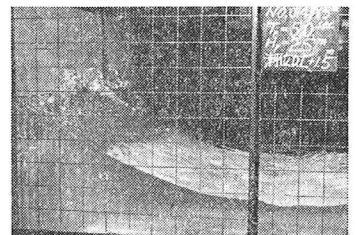


図-7 写真-7 の波圧分布図

$T_m = 1.72 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 655 \text{ gr/cm}$
$H_m = 17.1 \text{ cm}$	$P_{mA} = 559 \text{ gr/cm}$
$L_m = 314 \text{ cm}$	$P_{mC} = 286 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.055$	$P_{mS} = 613 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.170$	$P_e/P_A = 1.19$
$h/H = 1.84$	$P_e/P_C = 2.33$
	$P_e/P_S = 1.09$

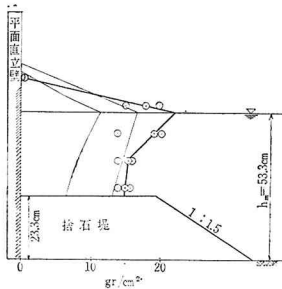


写真-7 図-7 の波の状況

$T_p = 6.5 \text{ sec}$, $H_p = 2.4 \text{ m}$

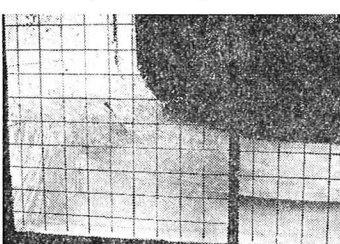


図-8 写真-8 の波圧分布図

$T_m = 1.67 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 746 \text{ gr/cm}$
$H_m = 15.8 \text{ cm}$	$P_{mA} = 559 \text{ gr/cm}$
$L_m = 330 \text{ cm}$	$P_{mC} = 286 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.048$	$P_{mS} = 613 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.162$	$P_e/P_A = 1.34$
$h_1/H = 1.90$	$P_e/P_C = 2.61$
	$P_e/P_S = 1.22$

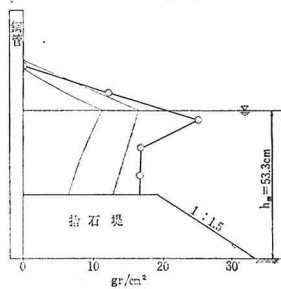


写真-8 図-8 の波の状況

$T_p = 6.5 \text{ sec}$, $H_p = 2.4 \text{ m}$

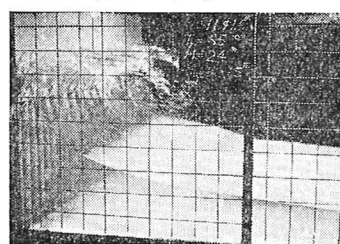


図-9 写真-9 の波圧分布図

$T_m = 1.57 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 948 \text{ gr/cm}$
$H_m = 18.7 \text{ cm}$	$P_{mA} = 631 \text{ gr/cm}$
$L_m = 275 \text{ cm}$	$P_{mC} = 263 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.068$	$P_{mS} = 701 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.194$	$P_e/P_A = 1.50$
$h_1/H = 1.60$	$P_e/P_C = 3.61$
	$P_e/P_S = 1.35$

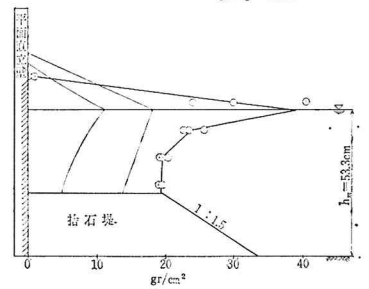


写真-9 図-9 の波の状況

$T_p = 6.0 \text{ sec}$, $H_p = 2.6 \text{ m}$

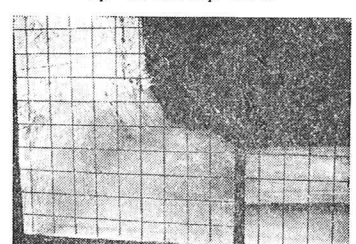


図-10 写真-10 の波圧分布図

$T_m = 1.51 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 1157 \text{ gr/cm}$
$H_m = 17.5 \text{ cm}$	$P_{mA} = 631 \text{ gr/cm}$
$L_m = 296 \text{ cm}$	$P_{mc} = 263 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.059$	$P_{ms} = 701 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.180$	$P_e/P_A = 1.83$
$h_1/H = 1.71$	$P_e/P_c = 4.40$
	$P_e/P_s = 1.65$

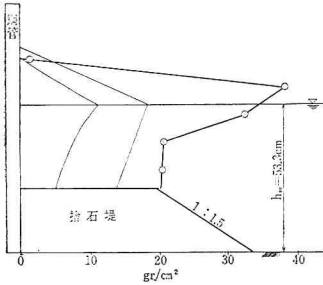


図-11 写真-11 の波圧分布図

$T_m = 1.28 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 625 \text{ gr/cm}$
$H_m = 18.4 \text{ cm}$	$P_{mA} = 546 \text{ gr/cm}$
$L_m = 194 \text{ cm}$	$P_{mc} = 180 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.095$	$P_{ms} = 600 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.269$	$P_e/P_A = 1.15$
$h_1/H = 1.63$	$P_e/P_c = 3.47$
	$P_e/P_s = 1.04$

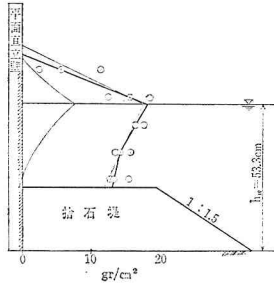


図-12 写真-12 の波圧分布図

$T_m = 1.25 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 661 \text{ gr/cm}$
$H_m = 16.8 \text{ cm}$	$P_{mA} = 546 \text{ gr/cm}$
$L_m = 226 \text{ cm}$	$P_{mc} = 180 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.075$	$P_{ms} = 600 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.236$	$P_e/P_A = 1.26$
$h_1/H = 1.79$	$P_e/P_c = 3.83$
	$P_e/P_s = 1.15$

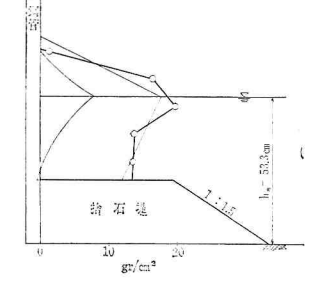


写真-10 図-10 の波の状況

$T_p = 6.0 \text{ sec}, H_p = 2.6 \text{ m}$

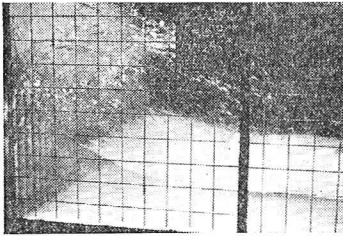


写真-11 図-11 の波の状況

$T_p = 5.0 \text{ sec}, H_p = 2.5 \text{ m}$

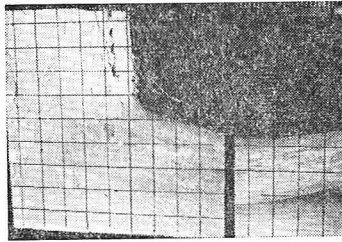


写真-12 図-12 の波の状況

$T_p = 5.0 \text{ sec}, H_p = 2.5 \text{ m}$

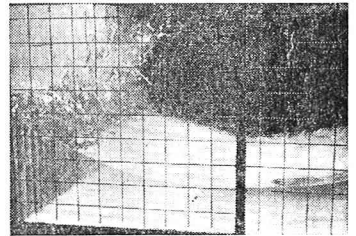


図-13 写真-13 の波圧分布図

$T_m = 1.81 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 830 \text{ gr/cm}$
$H_m = 18.6 \text{ cm}$	$P_{mA} = 853 \text{ gr/cm}$
$L_m = 387 \text{ cm}$	$P_{mc} = 589 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.048$	$P_{ms} = 943 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.164$	$P_e/P_A = 0.97$
$h_1/H = 2.15$	$P_e/P_c = 1.41$
	$P_e/P_s = 0.88$

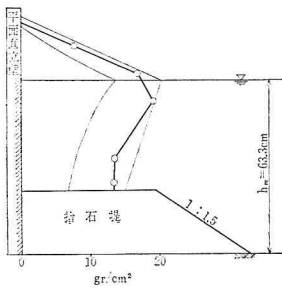


写真-13 図-13 の波の状況

$T_p = 7.0 \text{ sec}, H_p = 2.8 \text{ m}$

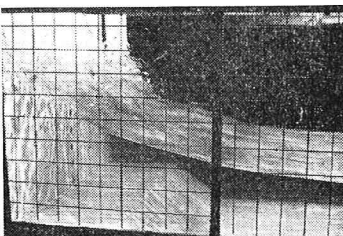


図-14 写真-14 の波圧分布図

$T_m = 1.80 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 1042 \text{ gr/cm}$
$H_m = 19.3 \text{ cm}$	$P_{mA} = 853 \text{ gr/cm}$
$L_m = 380 \text{ cm}$	$P_{mc} = 589 \text{ gr/cm}$
$H/L = 0.051$	$P_{ms} = 943 \text{ gr/cm}$
$h/L = 0.167$	$P_e/P_A = 1.23$
$h_1/H = 2.07$	$P_e/P_c = 1.77$
	$P_e/P_r = 1.11$

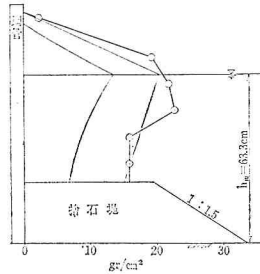


写真-14 図-14 の波の状況

$T_p = 7.0 \text{ sec}, H_p = 2.8 \text{ m}$

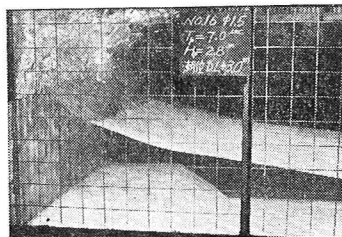


図-15 写真-15 の波圧分布図

$T_m = 1.30 \text{ sec}$	$P_{me} \diamond = 976 \text{ gr/cm}$
$H_m = 15.5 \text{ cm}$	
$L_m = 203 \text{ cm}$	
$H/L = 0.076$	
$h/L = 0.213$	
$h_1/H = 1.29$	

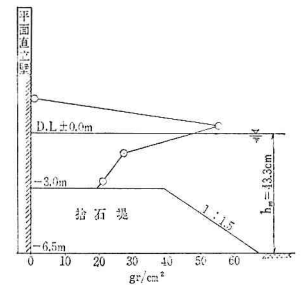


写真-15 図-15 の波の状況

$T_p = 5.0 \text{ sec}, H_p = 2.5 \text{ m}$

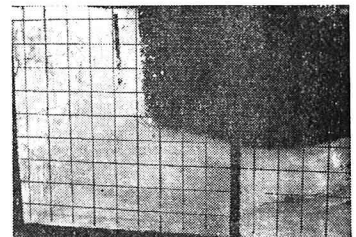


図-16 写真-16 の波圧分布図

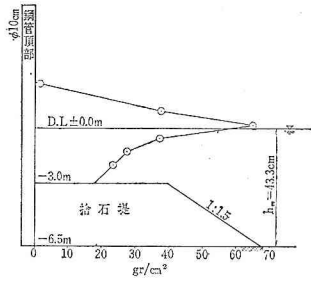


写真-16 図-16 の波の状況

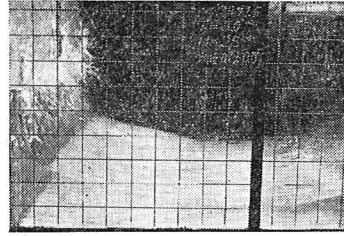
 $T_p = 5.0 \text{ sec}$, $H_p = 2.5 \text{ m}$ 

表-1 鋼管頂部と平面直立壁に働く波圧合力の比較(基礎捨石堤がない場合)

No.	h_m (cm)	T_m (sec)	H_m (cm)	L_m (cm)	H/L	h/L	h_1/H	P_{mA} (gr/cm)	P_{mc} (gr/cm)	P_{ms} (gr/cm)	$P_{me\odot}$ (gr/cm)	$P_{me\triangle}$ (gr/cm)	$P_{\odot}/P_{\triangle}$	$P_{\odot}/P_A$	$P_{\odot}/P_A$
1	63.3	1.24	14.0	223	0.063	0.284	4.50	568	122	729	553	448	1.24	0.79	0.97
2	"	1.27	18.3	248	0.074	0.255	3.46	833	97	1031	761	677	1.13	0.81	0.92
4	"	1.53	18.8	319	0.059	0.198	3.36	987	297	1156	940	820	1.15	0.83	0.95
5	"	1.52	16.8	312	0.054	0.203	3.76	854	428	985	762	684	1.12	0.80	0.89
6	"	1.83	18.9	408	0.046	0.155	3.35	1101	738	1252	1064	890	1.20	0.81	0.97
7	"	2.03	16.2	430	0.038	0.147	3.95	945	706	1051	974	850	1.15	0.90	1.03
10	53.3	1.31	16.5	231	0.071	0.231	3.23	681	150	820	643	612	1.05	0.90	0.94
11	"	1.55	14.9	296	0.050	0.180	3.58	681	420	785	635	598	1.06	0.88	0.93
12	"	1.54	17.9	285	0.063	0.187	2.98	832	362	975	835	785	1.06	0.94	1.00
13	"	1.65	16.2	302	0.054	0.177	3.29	731	422	875	737	715	1.03	0.98	1.01

 P_A : 浅海波の重複波圧式(A)による波圧合力 P_c : 微小振幅波理論式による波圧合力 P_s : サンプル式による波圧合力 $P_{\odot}$: 捨石堤がない場合の鋼管頂部の波圧合力 $P_{\triangle}$: 捨石堤がない場合の平面直立壁の波圧合力

表-2 鋼管頂部と平面直立壁に働く波圧合力の比較(基礎捨石堤がある場合)

No.	h_m (cm)	T_m (sec)	H_m (cm)	L_m (cm)	H/L	h/L	h_1/H	P_{mA} (gr/cm)	P_{mc} (gr/cm)	P_{ms} (gr/cm)	$P_{me\odot}$ (gr/cm)	$P_{me\triangle}$ (gr/cm)	$P_{\odot}/P_{\triangle}$	$P_{\odot}/P_A$	$P_{\odot}/P_A$
1	63.3	1.24	14.0	223	0.063	0.284	2.86	510	153	592	506	451	1.12	0.89	0.99
2	"	1.27	18.3	248	0.074	0.255	2.19	731	34	839	756	644	1.18	0.88	1.04
4	"	1.53	18.8	319	0.059	0.198	2.13	806	274	884	1065	911	1.17	1.13	1.32
5	"	1.52	16.8	312	0.054	0.203	2.38	701	384	778	835	746	1.12	1.06	1.19
6	"	1.83	18.9	408	0.046	0.155	2.12	853	589	943	1042	830	1.26	0.97	1.22
9	53.3	1.29	13.0	221	0.059	0.240	2.31	402	164	440	453	417	1.09	1.10	1.13
10	"	1.31	16.5	231	0.071	0.231	1.82	546	180	600	661	625	1.06	1.15	1.21
11	"	1.55	14.9	296	0.050	0.180	2.01	509	328	534	1154	849	1.36	1.67	2.27
12	"	1.54	17.9	285	0.063	0.187	1.68	631	263	701	1157	948	1.22	1.50	1.83
13	"	1.65	16.2	302	0.054	0.177	2.04	559	286	613	746	655	1.14	1.17	1.34
27	43.3	1.32	14.8	220	0.067	0.197	1.35	—	—	—	1125	976	1.15	—	—
28	"	1.51	12.5	261	0.048	0.166	1.60	—	—	—	838	825	1.02	—	—

 $P_{\triangle}$: 捨石堤がある場合の鋼管頂部の波圧合力 $P_{\odot}$: 捨石堤がある場合の平面直立壁の波圧合力

表-3 鋼管の頂部と側部に働く波圧合力の比較(基礎捨石堤がない場合)

No.	h_m (cm)	T_m (sec)	H_m (cm)	L_m (cm)	H/L	h/L	h_1/H	P_{mA} (gr/cm)	$P_{me\triangle}$ (gr/cm)	$P_{me\odot}$ (gr/cm)	$P_{\triangle}/P_{\odot}$	$P_{\triangle}/P_A$
17	60.0	1.25	14.1	231	0.061	0.260	4.26	604	489	521	0.94	0.87
18	"	1.27	17.3	242	0.072	0.248	3.47	760	644	646	1.00	0.85
19	"	1.52	16.7	312	0.054	0.192	3.60	833	815	717	1.14	0.86
20	"	1.55	18.0	318	0.057	0.189	3.34	918	858	796	1.08	0.87
21	"	1.77	16.1	380	0.044	0.158	3.62	900	864	811	1.07	0.90

 $P_{\triangle}$: 捨石堤がない場合の鋼管側部の波圧合力

表-4 鋼管の頂部と側部に働く波圧合力の比較(基礎捨石堤がある場合)

No.	h_m (cm)	T_m (sec)	H_m (cm)	L_m (cm)	H/L	h/L	h_1/H	P_{mA} (gr/cm)	$P_{me\triangle}$ (gr/cm)	$P_{me\odot}$ (gr/cm)	$P_{\triangle}/P_{\odot}$
1	63.3	1.24	14.0	223	0.063	0.284	2.84	510	520	506	1.03
2	"	1.27	18.3	248	0.074	0.255	2.19	731	803	756	1.06
4	"	1.53	18.8	319	0.059	0.198	2.13	806	958	1065	0.90
5	"	1.52	16.8	312	0.054	0.203	2.38	701	745	835	0.89
6	"	1.83	18.9	408	0.046	0.155	2.12	853	1108	1042	1.06

 $P_{\triangle}$: 捨石堤がある場合の鋼管側部の波圧合力

a) 捨石堤がない場合 鋼管側部に働く波圧合力 P_{Δ} と鋼管頂部に働く波圧合力 $P_{\odot}$ との比較を示すと表-3のごとくであって、側部でも波圧はあまり大きくない。

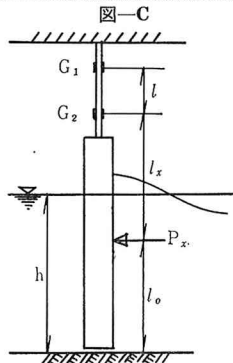
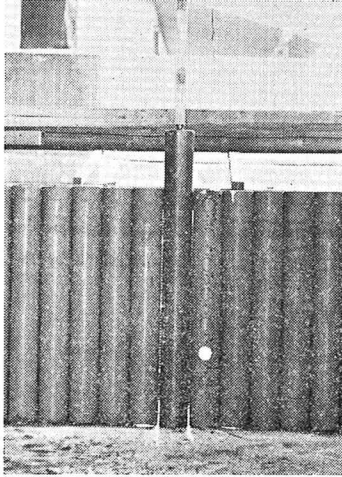
b) 捨石堤がある場合 鋼管側部に働く波圧合力 $P_{\diamond}$ と鋼管頂部に働く波圧合力 $P_{\odot}$ との比較を示すと表-4のごとくで、この場合にも側部における波圧はあまり増大していない。

(3) 鋼管防波堤内の 1 本の鋼管に働く波圧

a) 実験方法

写真-B

写真-B に示すように模型の鋼管と同じ直径 10 cm の円柱を上部固定端より鉛直に防波堤の中央につし、下端は波の進行方向に自由に動き得るようにした。この円柱をつるしてある支柱の 2 か所にストレインゲージをはり、これら 2 点のひずみ量を電磁オシログラフ上に波高と同時に記録させた。図-C に示すごとく、 G_1 点のモーメント M_1 と G_2 点のモーメント M_2 を知れば波圧 P_x およびその作用点 l_x は次式で算定できる。



$$P_x = \frac{M_1 - M_2}{l}, \quad l_x = \frac{M_2}{M_1 - M_2} l$$

b) 実験結果 水深 $h_m = 53.3$ cm で捨石堤がない場合について行なった実験結果およびこれらの値を波圧強度分布より求めた鋼管頂部の単位幅当たりの波圧合力 $P_{\odot}$ と比較した結果は表-5 に示すごとくである。表-5 によると鋼管 1 本に働く波圧合力 P_x の方が、鋼管の頂部

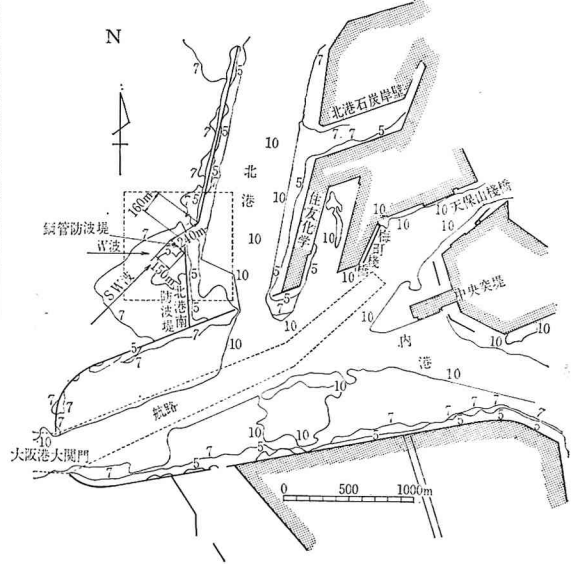
の波圧分布より求めた値より 13~23% 大きくなっている。鋼管と鋼管との接続部には波が集中することを考えると、 P_x の値が正しいであろうと考えられる。

4. 大阪港北港の鋼管防波堤に関する実験

(1) 実験の目的

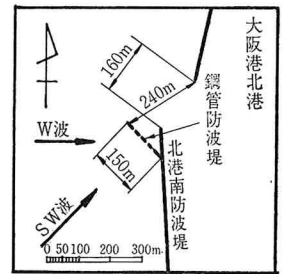
大阪港北港の港口 (幅 160 m) からの侵入波を防ぐために 図-D, E に示すような位置 (海底 D.L. -8.0 m) に鋼管 (直径 2.0 m) を 1 列に打込んで鋼管防波堤が築

図-D 大阪港平面図



造されることになった。この実験はこの鋼管に作用する波圧強度およびその鉛直分布、ならびに鋼管防波堤からの波の透過率を測定するのが目的である。

図-E 大阪港北港港口付近平面図



(2) 実験装置および実験方法

本実験はフラッター型の造波装置を有する大型波浪水槽 (長さ 60.0 m, 幅 10.0 m, 高さ 2.5 m (図-F 参

図-F 波浪水槽平面図

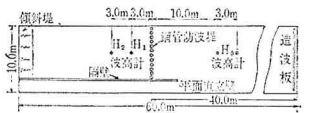


表-5 鋼管 1 本に働く波圧合力 (基礎捨石堤がない場合)

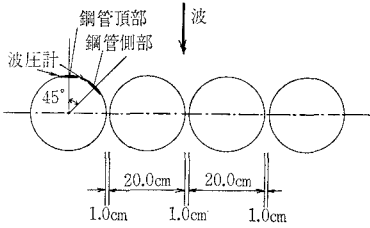
No.	h_m (cm)	T_m (sec)	H_m (cm)	L_m (cm)	H/L	h/L	h/H	P_{mA} (gr/cm)	$P_{m\odot}$ (gr/cm)	$l_{\odot}$ (cm)	P_x (gr/本)	l_{lx} (cm)	$P_x/P_{\odot} \times \phi$
9	53.3	1.29	13.0	222	0.059	0.241	4.10	604	481	37.1	5890	43.0	1.23
10	53.3	1.31	16.5	231	0.071	0.231	3.23	681	643	37.9	7360	38.2	1.15
12	53.3	1.54	17.9	285	0.063	0.187	2.98	832	835	37.2	9400	41.0	1.13
13	53.3	1.65	16.2	302	0.054	0.187	3.29	731	737	35.8	8970	39.0	1.22

P_x : モーメント測定法により算出した鋼管 1 本当たりに働く波圧合力

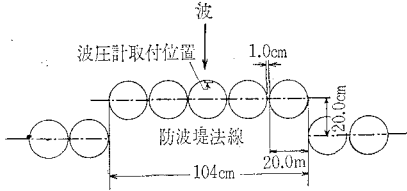
$P_{\odot} \times \phi$: 鋼管頂部の波圧分布が鋼管の側面に一様に分布するものと考えて算出した波圧合力

照)を用いた。模型の縮尺は縦横ともに現地の 1/10 とし、図—G に示すように、直径 20 cm の鋼管を設置して鋼管の頂部および側部の波圧を測定した。さらに鋼管

図—G 鋼管防波堤平面図



図—H 鋼管防波堤平面図



表—6 実験条件

実験条件	鋼管直径に対する間隔 (%)	しゃへい板 D.L. ±0.0~天端	鋼管天端の変位 δ_m (cm)	潮位 D.L. + (m)	鋼管天端高 D.L. + (m)	実験対象	備考
A	5	あり	0	3.6 1.7	5.0 7.0	波圧 透過率	表—7(a)
B	5	あり	2.0	3.6	5.0 7.0	波圧	表—7(b)
C	5	なし	0	3.6 1.7 1.1	5.0 7.0 5.0	波圧 透過率	表—7(c)
D	5	なし	0	3.6	5.0	波圧 透過率	表—7(d) (防波堤法線の一部を沖側に移動した場合)
E	5	なし	7.0	3.6	7.0	透過率	表—7(e)

表—7 (a) 実験結果 (鋼管天端固定, しゃへい板あり)

No.	実験条件	鋼管天端高 (m)	h (cm)	T_0 (sec)	L_0 (cm)	H_0 (cm)	H_0/L_0	h/L_0	P_A (gr/cm)	P_{Δ} (gr/cm)	P_{Δ}/P_A	P_{Δ}/P_{Δ}	H_1 (cm)	H_2 (cm)	透過率 (%)	越波
1	A	5.0	1.58 (5.00)	346 (34.6)	17.7 (1.77)	0.051	0.336	1 096 (10.96)	942 (9.42)	929 (9.29)	0.86	0.99	3.4	3.6	20	わず
2			1.58 (5.00)	365 (36.5)	22.3 (2.23)	0.061	0.318	1 464 (14.64)	1 168 (11.68)	1 351 (13.51)	0.80	1.16	4.1	4.3	20	やや
3			1.92 (6.08)	488 (48.8)	21.2 (2.12)	0.054	0.238	1 637 (16.37)	1 668 (16.68)	1 789 (17.89)	1.02	1.07	7.3	7.3	31	多い
4			1.93 (6.12)	513 (51.3)	26.7 (2.67)	0.052	0.226	2 216 (22.16)	1 895 (18.95)	2 290 (22.90)	0.86	1.21	8.5	8.9	39	〃
5			2.20 (6.97)	616 (61.6)	23.6 (2.36)	0.037	0.188	2 150 (21.50)	1 881 (18.81)	2 119 (21.19)	0.87	1.13	7.9	8.1	30	〃
6		7.0	1.58 (5.00)	346 (34.6)	17.7 (1.77)	0.051	0.336	1 103 (11.03)	1 001 (10.01)	1 126 (11.26)	0.91	1.13	3.1	3.1	14	せず
7			1.58 (5.00)	365 (36.5)	22.3 (2.23)	0.061	0.318	1 498 (14.98)	1 363 (13.63)	1 570 (15.70)	0.71	1.15	4.2	4.3	16	〃
8			1.92 (6.08)	488 (48.8)	21.2 (2.12)	0.054	0.238	1 713 (17.13)	1 662 (16.62)	1 846 (18.46)	0.99	1.11	2.9	3.1	17	〃
9			1.93 (6.12)	513 (51.3)	26.7 (2.67)	0.052	0.226	2 297 (22.97)	1 990 (19.90)	2 273 (22.73)	0.87	1.14	4.0	4.0	19	〃
10			2.20 (6.97)	616 (61.6)	23.6 (2.36)	0.037	0.188	2 196 (21.96)	1 994 (19.94)	2 070 (20.70)	0.91	1.04	3.9	4.1	17	〃
11			1.58 (5.00)	415 (41.5)	18.0 (1.80)	0.043	0.210	—	—	—	—	—	3.3	3.5	19	〃
12			1.80 (6.00)	546 (54.6)	22.0 (2.20)	0.040	0.177	—	—	—	—	—	4.3	4.5	20	〃

() 内の数字は現地に換算した値

の天端高, 鋼管の変位およびしゃへい板の有無による波圧強度の変化ならびに波の透過率の変化を比較検討するため実験条件を表—6 のように変えて実験を行なった。波の周期は $T_p=5.0\sim7.0$ sec とし, 波高は $H_p=2.0\sim3.0$ m を用いた。実験条件 A, B, C における鋼管の配置は図—G に示されている。実験条件 D は図—H に示すように防波堤法線の一部を沖側に 2.0 m 移動させた場合で, これは小図—I 鋼管天端の変位測定図 図—J しゃへい板設置図の衝突などによって防波堤の一部 (10 m) が破壊された後に補修した場合を想定したものである。鋼管の変位は図—I に示すように, 上部を固定した針で測定した。しゃへい板は図—J に示すように鋼管の間隔を D.L. ±0.0 m から天端までをしゃへいした。

(3) 実験結果

実験結果を示すと表—7 (a)~(e) のとおりである。表—7(a) の実験番号 No. 5, 10 の波圧分布を示すと図—K のようである。また写真—17 (a), (b) はこの実験における波の越波状況を示す。表—7 (a) は鋼管天端を固定し, しゃへい板を設けた場合の実験結果である。これによると頂部の波圧合力は式(A) による計算値にほぼ近い値を

表-7 (b) 実験結果 (鋼管天端の変位 $\delta_m = 2.0$ cm, シャへい板あり)

No.	実験 条件	鋼管 天端高 (m)	h (cm) (m)	T_0 (sec) (sec)	L_0 (cm) (m)	H_0 (cm) (m)	H_0/L_0	h/L_0	P_A (gr/cm) (t/m)	$P_{\diamond}$ (gr/cm) (t/m)	$P_{\triangle}$ (gr/cm) (t/m)	$P_{\diamond}/P_A$	$P_{\triangle}/P_{\diamond}$	H_1 (cm)	H_2 (cm)	透過率 (%)	越波
1	B	5.0	116 (D.L. +3.6)	1.58 (5.00)	346 (34.6)	17.7 (1.77)	0.051	0.336	1096 (10.96)	1129 (11.29)	1863 (18.63)	1.03	1.65	—	—	—	—
2				1.58 (5.00)	365 (36.5)	22.3 (2.23)	0.061	0.318	1464 (14.64)	923 (9.23)	1743 (17.43)	0.63	1.89	—	—	—	—
3				1.92 (6.08)	488 (48.8)	21.2 (2.12)	0.054	0.238	1637 (16.37)	1309 (13.09)	2318 (23.18)	0.80	1.77	—	—	—	—
4				1.93 (6.12)	513 (51.3)	26.7 (2.67)	0.052	0.226	2216 (22.16)	1721 (17.21)	2370 (23.70)	0.78	1.38	—	—	—	—
5				2.20 (6.97)	616 (61.6)	23.6 (2.36)	0.037	0.188	2150 (21.50)	1841 (18.41)	2430 (24.30)	0.86	1.32	—	—	—	—
6		7.0	116 (D.L. +3.6)	1.58 (5.00)	346 (34.6)	17.7 (1.77)	0.051	0.336	1103 (11.03)	1191 (11.91)	1550 (15.50)	1.08	1.30	—	—	—	—
7				1.58 (5.00)	365 (36.5)	22.3 (2.23)	0.061	0.318	1498 (14.98)	1177 (11.77)	2183 (21.83)	0.79	1.82	—	—	—	—
8				1.92 (6.08)	488 (48.8)	21.2 (2.12)	0.054	0.238	1713 (17.13)	1746 (17.46)	2591 (25.91)	1.02	1.48	—	—	—	—
9				1.93 (6.12)	513 (51.3)	26.7 (2.67)	0.052	0.226	2297 (22.97)	1924 (19.24)	2281 (22.81)	0.84	1.19	—	—	—	—
10				2.20 (6.97)	616 (61.6)	23.6 (2.36)	0.037	0.188	2196 (21.96)	1746 (17.46)	2431 (24.31)	0.80	1.39	—	—	—	—

表-7 (c) 実験結果 (鋼管天端固定, シャへい板なし)

1	C	5.0	116 (D.L. +3.6)	1.58 (5.00)	365 (36.5)	22.3 (2.23)	0.061	0.318	1464 (14.64)	1039 (10.39)	1405 (14.05)	0.71	1.35	9.3	9.4	42	やや多い
2				1.93 (6.12)	513 (51.3)	26.7 (2.67)	0.052	0.226	2216 (22.16)	1561 (15.61)	2221 (22.21)	0.70	1.42	11.4	11.6	43	多い
3				2.20 (6.97)	616 (61.6)	23.6 (2.36)	0.037	0.188	2150 (21.50)	1694 (16.94)	2239 (22.39)	0.79	1.32	9.9	9.9	42	やや多い
4		7.0	116 (D.L. +3.6)	1.58 (5.00)	365 (36.5)	22.3 (2.23)	0.061	0.318	1498 (14.98)	1078 (10.78)	1333 (13.33)	0.72	1.24	6.2	6.3	28	せ ず
5				1.93 (6.12)	513 (51.3)	26.7 (2.67)	0.052	0.226	2297 (22.97)	1728 (17.28)	2165 (21.65)	0.75	1.25	7.9	8.1	30	〃
6				2.20 (6.97)	616 (61.6)	23.6 (2.36)	0.037	0.188	2196 (21.96)	1788 (17.88)	2133 (21.33)	0.81	1.19	6.5	6.7	26	〃
7		5.0	97 (D.L. +1.7)	1.58 (5.00)	415 (41.5)	21.0 (2.10)	0.051	0.210	—	—	—	—	—	6.1	6.1	29	〃
8				1.80 (6.00)	546 (54.6)	23.0 (2.30)	0.040	0.177	—	—	—	—	—	7.5	7.7	33	〃
9				2.22 (7.00)	652 (65.2)	18.0 (1.80)	0.028	0.149	—	—	—	—	—	5.0	5.1	28	〃
10		5.0	91 (D.L. +1.1)	2.22 (7.00)	652 (65.2)	15.0 (1.50)	0.023	0.140	—	—	—	—	—	4.9	5.0	33	〃

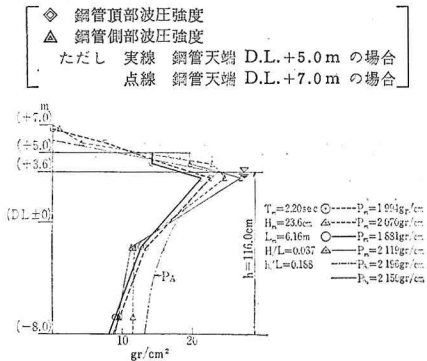
表-7 (d) 実験結果 (鋼管天端固定, シャへい板なし)

1	D	5.0	116 (D.L. +3.6)	1.58 (5.00)	365 (36.5)	22.3 (2.23)	0.061	0.318	1464 (14.64)	1132 (11.32)	—	0.77	—	9.1	9.2	41	やや多い
2				1.93 (6.12)	513 (51.3)	26.7 (2.67)	0.052	0.226	2216 (22.16)	1802 (18.02)	—	0.81	—	11.4	11.6	43	〃
3				2.20 (6.97)	616 (61.6)	23.6 (2.36)	0.037	0.188	2150 (21.50)	1682 (16.82)	—	0.78	—	10.1	10.2	43	〃

表-7 (e) 実験結果 (鋼管天端の変位 $\delta_m = 7.0$ cm, シャへい板なし)

1	E	7.0	116 (D.L. +3.6)	1.74 (5.50)	423 (42.3)	21.0 (2.10)	0.051	0.274	—	—	—	—	—	5.4	5.5	26	せ ず
2				1.74 (5.50)	423 (42.3)	23.0 (2.30)	0.054	0.274	—	—	—	—	—	8.4	8.6	37	わず かい
3				1.74 (5.50)	423 (42.3)	27.0 (2.70)	0.064	0.274	—	—	—	—	—	9.9	10.1	37	〃
4				1.80 (6.00)	546 (54.6)	30.0 (3.00)	0.055	0.212	—	—	—	—	—	10.5	10.5	35	〃
5				2.06 (6.50)	563 (56.3)	30.0 (3.00)	0.053	0.206	—	—	—	—	—	10.4	10.6	35	〃
6				2.22 (7.00)	652 (65.2)	24.0 (2.40)	0.037	0.178	—	—	—	—	—	6.6	6.8	27	せ ず
7				2.22 (7.00)	652 (65.2)	30.0 (3.00)	0.046	0.178	—	—	—	—	—	8.2	8.6	28	わず かい

図-K 波圧分布
(実験条件 A, 実験番号 No. 5, 10)



示し、両者の比は $P_{\diamond}/P_A=0.80\sim1.02$ である。側部波圧合力と頂部波圧合力の比は $P_{\Delta}/P_{\diamond}=0.99\sim1.16$ で側部波圧がやや大きく、これを鋼管を1列に密に並べた場合の実験値 $P_{\Delta}/P_{\diamond}=0.94\sim1.14$ (表-3 参照) と比較すると、この場合はほぼ同じ値である。これは鋼管の間げきが5% あってもしゃへい板があるために接続部では鋼管を密に並べた場合と同じ状態になったものと考えられる。表-7 (b) (鋼管天端の変位 $\delta_m=2.0$ cm だけ許した場合) によると $P_{\diamond}/P_A=0.63\sim1.08$ で鋼管の天端が動くと、波圧は多少減少している。また側部との比は $P_{\Delta}/P_{\diamond}=1.19\sim1.89$ で鋼管の変位を許す場合は周期が小さい場合には鋼管間げきへの波の集中がかえって大

きくなるようである。表-7 (c) (鋼管を固定し、しゃへい板がない場合) によれば $P_{\diamond}/P_A=0.70\sim0.81$ でしゃへい板を撤去して、間隔をあけると鋼管に働らく波圧が10~20% 減少している。また $P_{\Delta}/P_{\diamond}=1.19\sim1.42$ で間げきへの波の集中が大きいことが知られる。表-7 (d)

(鋼管を固定し、しゃへい板がない場合で防波堤法線の一部を沖側に移動させた場合) によれば $P_{\diamond}/P_A=0.77\sim0.81$ で、鋼管の一部(10 m)を沖側へ移動しても鋼管に働く波圧はあまり変化しないようである。写真-18 (a), (b) は実験条件 C, D における越波状況で防波堤法線の一部沖側へ移動しても越波状況に変化はなかった。透過率に関する実験はその条件を A, C, D, E とした。実験条件 A (鋼管を固定し、しゃへい板がある場合)における潮位は異常高潮時と満潮時 D.L.+3.6 m, +1.7 m について行ない、鋼管の天端高は D.L.+7.0 m, +5.0 m について行なった。それぞれの透過率は14~20%, 20~29% (表-7 (a) 参照) で天端が D.L.+7.0 m の方が6~19% 小さい。また越波させない場合の透過率はほぼ一定で水深、波高、周期の影響はないようである。実験条件 C (鋼管を固定し、しゃへい板がない場合)における結果は表-7 (c) に示すごとくである。天端高が D.L.+7.0 m, +5.0 m の透過率はそれぞれ28~30%, 42~43% でこの場合でも越波がなかった場合(天端高 D.L.+7.0 m)の方が13~14% 小さくなっ

写真-17 (a) 実験条件 A-No. 5 の波の状況
 $T_p=7.0$ sec, $H_p=2.4$ m, 鋼管天端高 D.L.+5.0 m

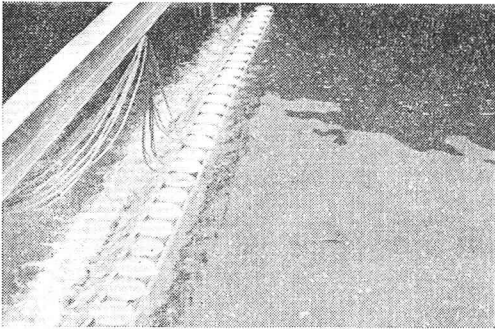


写真-17 (b) 実験条件 A-No. 10 の波の状況
 $T_p=7.0$ sec, $H_p=2.4$ m, 鋼管天端高 D.L.+7.0 m

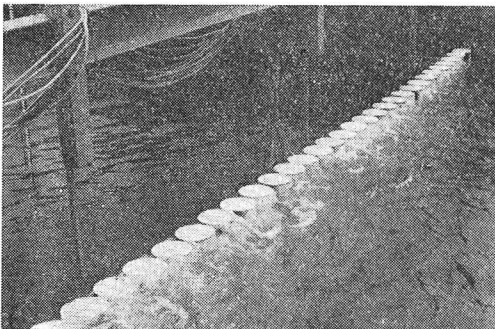


写真-18 (a) 実験条件 C-No. 1 の波の状況
 $T_p=5.0$ sec, $H_p=2.2$ m

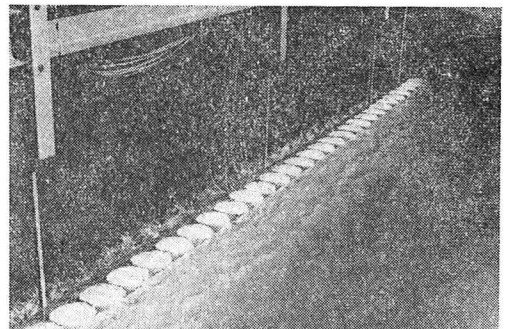
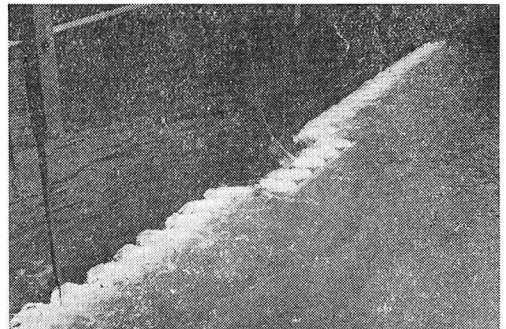


写真-18 (b) 実験条件 D-No. 1 の波の状況
 $T_p=5.0$ sec, $H_p=2.2$ m



ている。つぎにしゃへい板が透過率におよぼす影響について述べると、越波がない場合(鋼管天端高 D.L.+7.0 m)、また越波のある場合(鋼管天端高 D.L.+5.0 m)ともにしゃへい板のある場合が 10~20% 減少している。実験条件 E (鋼管天端の変位 $\delta_m=7.0$ cm, しゃへい板がない場合)における結果は表-7(e)に示すごとくである。この結果によれば鋼管天端の変位を許したために天端高 D.L.+7.0 m の場合でもわずかに越波を生じ、透過率は 26~37% で天端を固定した場合(表-7(c))の透過率 28~30% よりわずかに大きくなっている。

5. 結 論

以上の実験結果より鋼管防波堤に働く波圧の特性を示すと、

(1) 鋼管を密に 1 列に並べた場合の特性

① 鋼管防波堤頂部に働く波圧合力は基礎捨石堤がある場合、ない場合とも一般に平面直立堤に働く波圧合力よりほぼ 10~20% 大きく、浅海波重複波の圧力式(A)の値 P_A より 0~10% 小さい。

② 鋼管防波堤頂部に働く波圧強度分布は平面壁の場合より静水面上、あるいはそれより上方においてわずかに大きい。これは鋼管の凹部に集中した波が鋼管に沿ってはい上るためと考えられる。

③ 鋼管側部に働く波圧合力は鋼管頂部に働く波圧合力とほぼ同じかわずかに大きい(ただし側部の波圧測定位置は頂部中心線より中心角 47° の位置)(図-B 参照)。

④ 鋼管 1 本当たりに作用する波圧合力は、頂部の波圧強度分布が鋼管の側面に一様に分布するものと考えて算出した波圧合力よりもほぼ 10~20% 大きい。これは鋼管の凹部に波が集中し凹部で波が頂部以上にはい上り、頂部の波圧強度より大きな圧力が生じるものと考えられる。

⑤ 図-1~6 と 図-7~12 および 写真-1~6 と 写真-7~12 とを比較すれば明らかなように、基礎捨石堤を設置すると、波は砕けて直立壁に衝突するので、水面

付近の圧力が増大する。したがって鋼管防波堤においては基礎捨石堤を設置してはならないと考えられる。もし鋼管基部を補強する目的で捨石を投入する場合には、床掘をして、捨石を海底下に積むように施工する必要がある。

(2) 鋼管を間げき 5% (鋼管の直径に対して) で 1 列に並べた場合

① 鋼管を固定した場合でしゃへい板のある場合(図-J 参照)は鋼管頂部の波圧合力 $P_\diamond$ は浅海波重複波圧式(A)の値 P_A に等しいか、やや小さい(10%以内小さい)。また鋼管側部の波圧合力 $P_\blacktriangle$ は頂部の波圧合力 $P_\diamond$ より 10~20% 大きい。これは(1)の実験結果と同じである。

② 鋼管を固定した場合でしゃへい板のない場合は、鋼管頂部の波圧合力 $P_\diamond$ は P_A より 20~30% 小さく、鋼管側部の波圧合力 $P_\blacktriangle$ は頂部の波圧合力 $P_\diamond$ より 20~40% 大きい。これはしゃへい板を撤去したために鋼管接続部において波の集中が増大し、しゃへい板のある場合より側部の圧力が増加するためであると考えられる。

③ 鋼管天端の変位が $\delta_m=2.0$ cm ある場合で、しゃへい板のある場合は、鋼管頂部の波圧合力 $P_\diamond$ は P_A より 0~20% 小さいが、側部波圧合力 $P_\blacktriangle$ は頂部波圧合力 $P_\diamond$ より 20~90% 大きい。これは鋼管の変位を許したために、越波量が多くなって接続部での波の集中が増加するためである。なお波圧合力は天端の高い D.L.+7.0 m の場合の方が D.L.+5.0 m の場合に比べてわずかに大きい。

④ 透過率に関しては越波による影響がかなり大きく、鋼管の変位による影響は少ないようである。

以上の結論(1)は直径 10 cm の鋼管についての実験によるものであるが、今後は鋼管の直径を数種に変えて実験を行ない、鋼管の直径と波の特性および波圧との関係を研究する予定である。

付記：本実験を行なうにあたり大学院学生稲垣紘史君ならびに研究員 佐伯 譲君の助力を得た。ここに記して感謝の意を表する。