

浅海波および深海波の重複波の圧力式

永井 莊七郎*

1. 緒 言

筆者は第 9,10 および 11 回の海岸工学講演会において、主として直立壁に働く重複波の圧力について発表してきた^{1),2),3)}。その間、周期が短く、波形勾配が大きい波の重複波においては、波圧は水面から水底まで基本波(進行波)の 2 倍の周波数で振動するのと、波形が不安定であるなどのために、静水面以下の波圧の測定および解析に不備があって、実験結果の判断に苦しみ、また一部間違った報告をしてご迷惑をかけたが、昨年 11 月上旬以後、不備な実験はすべて実験をやり直し、今年 6 月上旬で、浅海波から深海波までの重複波に関する予定の実験をすべて終えた。それらの実験結果を検討した結果、浅海波および深海波の重複波に対して、それぞれの実験値に比較的良く合う波圧式を作ることができたのでここに報告する。

2. 実験の種類

実験は中型波浪水槽(長さ 25 m×幅 2 m×深さ 1.2 m)および大型波浪水槽(長さ 60 m×幅 10 m×深さ 2.5 m)を用いて多数の実験を行なったが、ここに記す実験はすべて、水槽の底面全体が水平で、この底面から鉛直に平面直立壁が立っていて(すなわち基礎捨石堤を有しない)、これに進行波が衝突し、直立壁前面で重複波の波高が進行波のちょうど 2 倍になった場合の波に関するものである。

実験の範囲は、相対水深 $h/L=0.081\sim0.870$ 、進行波の波形勾配 $H/L=0.010\sim0.091$ 、周期 $T=1.09\sim2.60$ sec で相当広く、浅海波から深海波までの重複波をふくんでいる。また実験縮尺の影響を調べるために、 h/L および H/L をほぼ同じにして、水深 $h=45, 53, 63, 80, 116, 156$ および 200 cm に変えて実験を行なった。

波圧計は、水深が浅い場合は 6 個、深い場合には 10～12 個を同時に使用した。写真-1 は中型水槽、写真-2 は大型水槽のそれぞれ直立壁および波を示す。表-1 は実験の結果を総括したものである。

3. 水底および水面における波圧の 2 倍周波数の振動について

静水面から z なる点の波圧は一般に次式で表わされ

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

写真-1

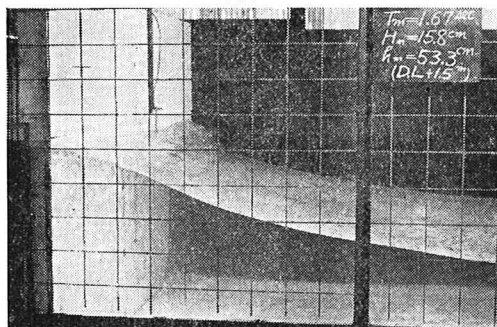
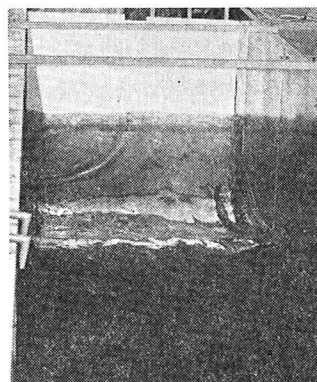


写真-2



る。

$$p = -\rho g z - \rho \left(\frac{1}{2} V^2 + \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_z + \rho f(t) \quad \dots\dots (1)$$

式中 ρ : 静水面から z なる深さの点の波圧強度

V : 水分子の速度 ρ : 水の密度

ϕ : 速度ポテンシャル g : 重力の加速度

$f(t)$: 時間 t のある関数

式 (1) において速度ポテンシャルを

$$\phi = -\frac{2a \cdot n}{m} \cdot \frac{\cosh m(h+z)}{\sinh mh} \cdot \sin nt \cdot \sin mx, \quad \dots\dots (2)$$

重複波の波形を

$$\eta = 2a \cos nt \cdot \sin mx, \quad \dots\dots (3)$$

とにおいて、微小振幅波理論より波圧を求めると次式のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{p}{\omega_0} = & -z + \frac{mH^2 \cdot \sin^2 nt}{\sinh 2mh} \{ \cosh^2 m(h+\eta) - \cosh^2 m(h+z) \} \\ & + \eta \left\{ 1 + \frac{\cosh m(h+z)}{\cosh mh} - \frac{\cosh m(h+\eta)}{\cosh mh} \right\} \quad \dots\dots (4) \end{aligned}$$

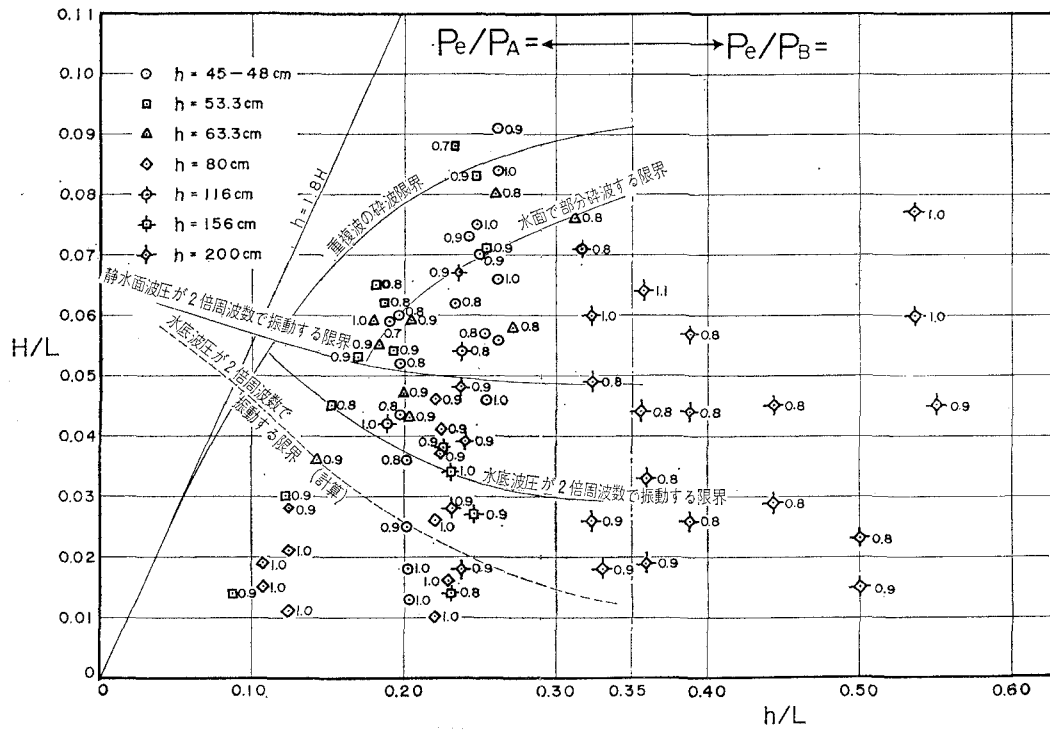
表-1 実験結果の総括表

実験番号	h (cm)	T (sec)	H (cm)	L (cm)	H/L	h/L	P_e (gr/cm)	P_c (gr/cm)	P_s (gr/cm)	P_A (gr/cm)	P_B (gr/cm)	P_e/P_s	P_c/P_s	P_e/P_A	P_c/P_B
1	45	1.11	8.1	177	0.046	0.254	232	104	297	243	185	2.23	0.78	0.96	1.25
2	45	1.09	9.6	172	0.056	0.262	286	101	358	290	207	2.83	0.80	0.99	1.38
3	45	1.12	10.1	178	0.057	0.253	254	116	386	315	225	2.19	0.66	0.81	1.13
4	45	1.33	13.8	229	0.060	0.196	438	218	609	520	370	2.00	0.72	0.84	1.18
5	45	1.35	14.9	244	0.061	0.184	540	285	688	585	418	1.90	0.79	0.92	1.29
6	45	1.14	11.9	192	0.062	0.234	334	126	481	397	275	1.95	0.69	0.84	1.21
7	45	1.11	11.3	172	0.066	0.262	358	73	436	351	238	4.90	0.82	1.01	1.50
8	45	1.13	12.6	180	0.070	0.250	363	77	505	410	369	4.71	0.72	0.89	0.99
9	45	1.15	13.4	185	0.073	0.243	395	94	548	449	290	4.21	0.72	0.88	1.36
10	45	1.12	13.5	181	0.075	0.248	431	53	553	447	287	8.13	0.78	0.96	1.50
11	45	1.12	14.4	172	0.084	0.262	482	—	586	440	280	—	0.82	1.02	1.71
12	45	1.12	15.6	172	0.091	0.262	489	—	658	528	296	—	0.74	0.93	1.65
13	48	1.34	3.1	237	0.013	0.203	103	93	120	105	98	1.11	0.86	0.98	1.05
14	48	1.34	4.3	237	0.018	0.203	140	126	170	147	134	1.11	0.83	0.95	1.05
15	48	1.35	6.0	238	0.025	0.202	200	166	245	211	184	1.21	0.82	0.94	1.09
16	48	1.35	8.4	238	0.036	0.202	249	210	355	306	252	1.19	0.70	0.81	0.98
17	48	1.35	10.7	244	0.044	0.197	316	243	475	404	322	1.30	0.67	0.79	0.98
18	48	1.35	12.8	244	0.052	0.197	388	266	584	502	384	1.46	0.66	0.78	1.01
19	48	1.39	14.8	252	0.059	0.190	442	203	710	611	434	2.18	0.62	0.73	1.02
20	48	1.33	16.0	256	0.063	0.188	463	294	781	668	470	1.58	0.60	0.76	0.99
21	53.3	2.73	8.3	612	0.014	0.087	440	422	464	438	419	1.04	0.95	1.00	1.05
22	53.3	2.17	13.0	438	0.030	0.122	609	562	738	666	588	1.08	0.83	0.91	1.03
23	53.3	1.81	15.8	352	0.045	0.152	652	533	880	776	621	1.22	0.74	0.84	1.05
24	53.3	1.66	16.9	316	0.053	0.169	706	466	934	809	611	1.52	0.76	0.87	1.15
25	53.3	1.52	15.0	278	0.054	0.192	580	340	772	665	490	1.70	0.76	0.87	1.18
26	53.3	1.53	17.7	287	0.062	0.186	642	370	960	821	583	1.73	0.67	0.78	1.10
27	53.3	1.54	19.2	294	0.065	0.181	729	386	1065	937	658	1.89	0.68	0.78	1.11
28	53.3	1.24	14.8	210	0.071	0.254	485	90	730	564	368	5.50	0.71	0.86	1.32
29	55.3	1.28	17.9	216	0.083	0.247	616	—	891	722	436	—	0.69	0.85	1.41
30	53.3	1.29	20.2	229	0.088	0.233	637	—	1066	868	507	—	0.60	0.74	1.25
31	63.3	2.09	15.8	442	0.036	0.143	850	700	1028	921	775	1.22	0.83	0.92	1.10
32	63.3	1.52	13.4	312	0.043	0.203	585	404	794	657	515	1.45	0.74	0.89	1.13
33	63.3	1.56	15.1	318	0.047	0.199	684	430	1163	762	583	1.59	0.59	0.90	1.27
34	63.3	1.77	19.1	346	0.055	0.183	890	552	1225	990	767	1.61	0.73	0.90	1.16
35	63.3	1.28	13.6	234	0.058	0.271	437	171	714	566	400	2.56	0.61	0.80	1.09
36	63.3	1.55	18.3	310	0.059	0.204	821	417	1108	942	675	1.97	0.74	0.87	1.22
37	63.3	1.70	20.9	352	0.059	0.180	1105	585	1356	1170	845	1.80	0.81	0.95	1.31
38	63.3	1.13	15.5	203	0.076	0.312	505	—	788	600	374	—	0.64	0.84	1.35
39	63.3	1.28	19.4	244	0.080	0.260	668	—	1100	887	544	—	0.61	0.76	1.23
40	80	1.59	3.6	364	0.010	0.220	167	162	220	161	155	1.03	0.76	1.03	1.08
41	80	2.50	7.1	645	0.011	0.124	498	472	535	501	479	1.05	0.73	0.99	1.04
42	80	3.00	11.7	750	0.015	0.107	885	824	950	883	854	1.07	0.93	1.00	1.04
43	80	1.59	5.6	350	0.016	0.229	296	256	339	290	268	1.16	0.87	1.02	1.10
44	80	3.00	14.4	750	0.019	0.107	1063	983	1118	1109	1021	1.08	0.95	0.96	1.04
45	80	2.50	13.5	645	0.021	0.124	1015	890	1078	972	883	1.14	0.94	1.03	1.15
46	80	1.59	9.6	364	0.026	0.220	507	406	625	534	465	1.25	0.81	0.95	1.09
47	80	2.50	18.3	645	0.028	0.124	1281	1172	1582	1408	1232	1.09	0.81	0.91	1.04
48	80	1.58	13.2	357	0.037	0.224	666	482	885	752	608	1.38	0.75	0.89	1.10
49	80	1.60	14.8	358	0.041	0.224	786	502	1140	855	672	1.56	0.69	0.92	1.17
50	80	1.61	16.6	364	0.046	0.220	857	548	1162	987	758	1.56	0.74	0.88	1.13
51	116	2.55	26.1	615	0.042	0.189	2406	1600	2890	2400	1967	1.54	0.83	0.98	1.12
52	116	1.92	26.4	488	0.054	0.238	1830	980	2662	2202	1599	1.87	0.69	0.83	1.15
53	116	1.93	32.6	490	0.067	0.236	2428	1086	3422	2826	1904	2.24	0.71	0.86	1.28
54	116	1.55	26.0	366	0.071	0.317	1325	—	2352	1777	1131	—	0.56	0.75	1.17
55	156	2.24	7.0	675	0.014	0.231	549	629	822	699	658	0.87	0.67	0.79	0.84
56	156	2.22	17.1	635	0.027	0.246	1557	1242	2072	1724	1474	1.25	0.75	0.90	1.06
57	156	2.25	22.9	675	0.034	0.231	2449	1580	2942	2470	2029	1.55	0.83	0.99	1.21
58	156	2.23	25.8	690	0.037	0.226	2453	1820	3462	2856	2303	1.36	0.71	0.86	1.07
59	200	2.53	14.6	840	0.018	0.238	1795	1490	2220	1872	1693	1.20	0.81	0.94	1.06
60	200	2.03	10.7	606	0.018	0.330	958	746	1411	1052	953	1.28	0.68	0.91	1.00
61	200	2.05	16.3	620	0.026	0.323	1490	1085	2216	1683	1412	1.37	0.67	0.89	1.05
62	200	2.60	23.6	870	0.027	0.230	2910	2070	3800	3190	2730	1.41	0.76	0.91	1.06

実験番号	h (cm)	T (sec)	H (cm)	L (cm)	H/L	h/L	P_e (gr/cm)	P_c (gr/cm)	P_s (gr/cm)	P_A (gr/cm)	P_B (gr/cm)	P_e/P_c	P_e/P_s	P_e/P_A	P_e/P_B
63	200	2.50	32.2	830	0.039	0.241	3 760	2 580	5 250	4 370	3 480	1.47	0.72	0.86	1.08
64	200	2.53	40.0	840	0.048	0.237	4 920	2 760	6 768	5 640	4 260	1.78	0.73	0.87	1.15
65	200	2.05	30.4	620	0.049	0.323	2 690	920	4 410	3 320	2 440	2.93	0.61	0.81	1.10
66	200	2.05	37.2	620	0.060	0.323	4 090	540	6 272	4 180	2 870	7.56	0.65	0.98	1.42
67	200	1.60	6.5	400	0.015	0.500	331	170	744	435	390	1.94	0.45	0.76	0.85
68	200	1.20	3.5	230	0.015	0.870	123	32	373	134	122	3.86	0.33	0.92	1.01
69	199	1.90	10.5	550	0.019	0.362	750	695	1 300	958	849	1.08	0.58	0.78	0.88
70	200	1.60	9.1	400	0.023	0.500	415	333	1 066	621	539	1.25	0.39	0.67	0.77
71	200	1.80	13.3	515	0.026	0.388	809	750	1 677	1 169	992	1.08	0.48	0.70	0.82
72	200	1.40	8.0	300	0.026	0.668	307	72	895	414	350	4.41	0.36	0.76	0.91
73	199	1.70	13.0	450	0.029	0.443	819	500	1 584	1 009	845	1.64	0.52	0.87	0.97
74	198	1.90	18.0	550	0.033	0.360	1 068	880	2 363	1 707	1 398	1.21	0.45	0.63	0.76
75	200	1.20	9.0	230	0.039	0.870	275	—	1 019	370	290	—	0.27	0.74	0.95
76	200	1.40	11.9	300	0.040	0.668	396	—	1 378	641	499	—	0.30	0.62	0.80
77	197	1.90	24.3	550	0.044	0.358	1 500	831	3 300	2 380	1 814	1.80	0.45	0.63	0.83
78	200	1.80	22.8	515	0.044	0.388	1 250	580	3 048	2 100	1 950	2.15	0.41	0.60	0.78
79	199	1.70	20.3	450	0.045	0.443	973	264	2 536	1 647	1 245	3.69	0.38	0.59	0.78
80	200	1.56	16.3	364	0.045	0.550	700	—	1 970	1 078	816	—	0.36	0.65	0.86
81	200	1.80	29.3	515	0.057	0.388	1 600	—	4 058	2 790	1 960	—	0.34	0.58	0.82
82	200	1.38	18.2	306	0.059	0.654	368	—	2 251	989	751	—	0.26	0.41	0.67
83	188	1.50	21.4	350	0.060	0.535	941	—	2 554	1 422	968	—	0.37	0.67	0.97
84	200	1.20	14.0	230	0.061	0.870	343	—	1 684	611	417	—	0.23	0.56	0.83
85	197	1.90	35.0	550	0.064	0.358	2 598	—	5 000	3 620	2 430	—	0.52	0.72	1.07
86	188	1.50	27.0	350	0.077	0.535	1 200	—	3 354	1 870	1 150	—	0.36	0.64	1.04
87	200	1.22	20.1	246	0.082	0.813	670	—	2 558	988	592	—	0.16	0.68	1.13

すでにしばしば述べたように、式 (4) には進行波と同じ周期で振動する項と進行波の周期の 1/2 の周期で振動する項とがふくまれている。 H/L および h/L が小さい波においては、基本周波数で振動する項の値が 2 倍周波数で振動する項の値より大きいので、波圧は表面波形と同一の周期で振動する。しかし H/L が大きくなると、2 倍周波数で振動する項の値が次第に大きくなって、基本周波数で振動する項に影響を与えるようになるので、波圧は表面波の 2 倍の周波数で振動するようになる。水底波圧が 2 倍周波数で振動を始める h/L と H/L と

図一 垂直壁に働く圧力の実験値と式 (A)、式 (B) による計算値との比較



の限界は、式(4)によると、図-1に示す細い波線の曲線である。しかし実験によると、この限界は式(4)による値よりかなり上方にある。しかし水面波圧が2倍周波数で振動を始める下限は式(4)による限界にほぼ一致していた。

前回の論文³⁾においても述べたように、波形勾配が大きくなると、重複波の波形は不安定となり、水面付近の水分子がある程度波の進行方向に運動するようになる。このため水面付近においては波圧はやや大きくなり、その波圧・時間曲線は図-2に示すように前の波圧の山は多少尖り、部分的碎波の波圧・時間曲線に依てくる。

また、直立壁に衝突したときの水面の形状は、一部の水が直立壁に沿ってはい上り、上方に凹なる曲面を呈する。このような限界を「水面で部分碎波する限界」として図-1の中に記入した。しかしこのような場合でも水面付近における最大波圧強度 $p_{\max}$ が $w_0 H$ を越えることはなかった。

4. 浅海波重複波の波圧式

(1) 微小振幅波理論式の適用範囲

式(4)は波高が非常に小さいという条件のもとに導かれたものであるから、 H/L がやや大きくなると実験結果に合わなくなる。すなわち図-1における細い波線の曲線(式(4)による水底波圧が2倍周波数で振動を始

める限界)より下側においてのみ実験値によく合う。この範囲においては式(4)による波圧合力 P_e と実験における最大同時波圧の合力 P_e との比 $P_e/P_e \approx 1.1 \sim 1.2$ である。

しかしこれから上方、すなわち波形勾配が大きくなるにつれて P_e の値は小さくなり、これに反して実験値 P_e は大きくなるので、全く合わない。

(2) 浅海波重複波の波圧式

浅海波および深海波の重複波に関する多数の実験結果を検討すると、

a) 直立壁における水面から水底までの波圧が進行波の2倍周波数で振動する場合には、波圧の山は表面波形の山の前後において起こるが、その波圧の山が起こる時刻は、水面から水底まで同じではなく、一般に水底波圧の山が水面波形の山から最も遅い時刻に起こり、水底から水面にゆくにつれて波圧の山は水面波形の山に近い時刻に起こる。このような波圧の山の起こる時刻については、微小振幅波式による nt の値は一般には実験結果と一致しない。実験においては水面から水底までの波圧の山の時刻のずれは一般に理論より小さい。

b) 微小振幅波の圧力式(4)による値は、 H/L が大きくなり、水面から水底まで波圧が2倍周波数で振動するようになると、2倍周波数で振動する項の影響が大きくなって、波圧強度は実験値より小さくなり、 H/L および h/L の増大とともに式(4)の値はますます実験値より小さくなる。特に水底付近ではいちじるしく過少で、実験値に全く合わない。

c) 最大同時波圧は、一般に静水面に波圧の山が起こった時に起こり、波圧強度は水面から水底まで、2倍周波数で振動する項の影響をあまり受けていないようである。

以上のような考察から、式(1)における $V^2=0$, $f(t)=0$ とおいた。

すなわち、

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \dots\dots\dots (5)$$

式(5)に式(2)を代入すると、直立壁における波圧は次式で与えられる。

$$p = -w_0 z + w_0 2a \frac{\cosh m(h+z)}{\cosh mh} \cos nt \quad (6)$$

図-2 部分的に碎けた重複波の波圧・時間曲線

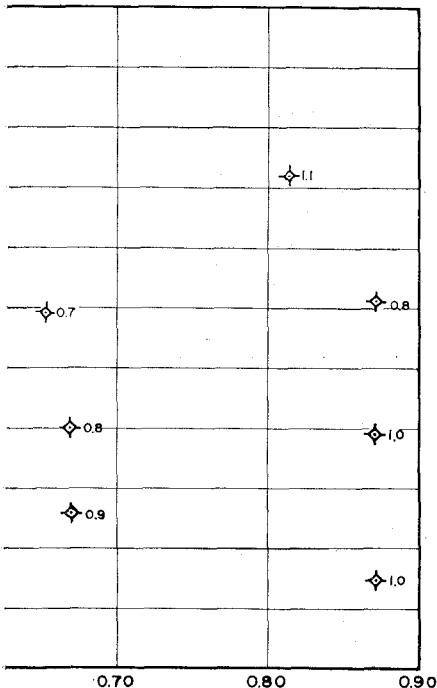
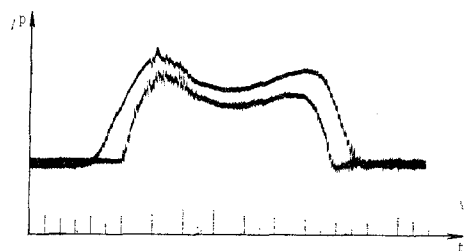


図-3

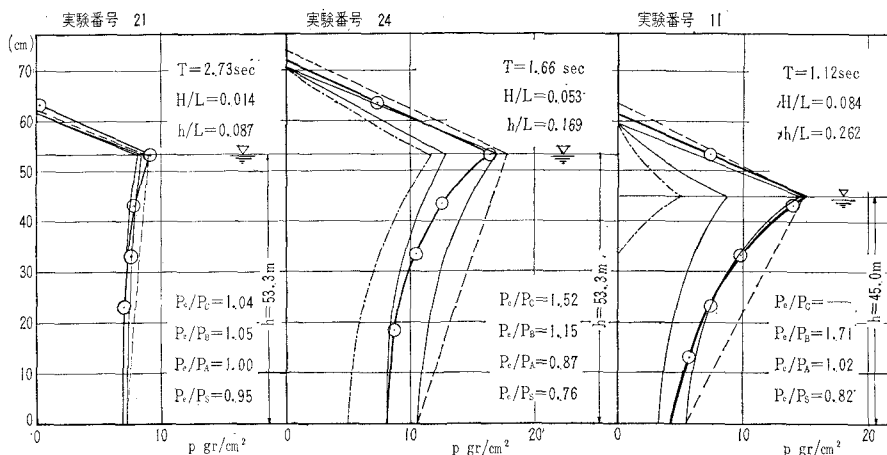


図-4

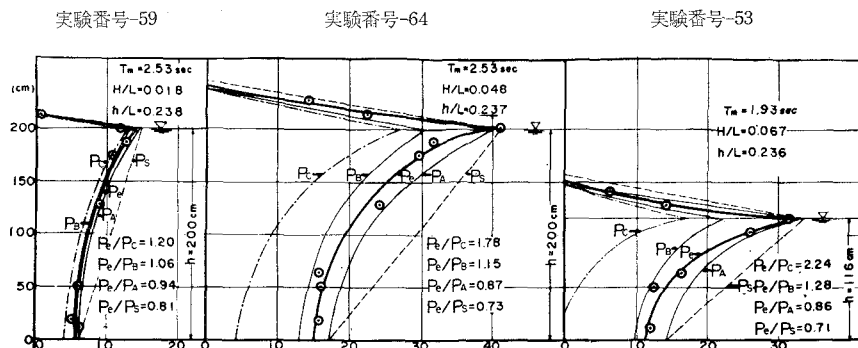
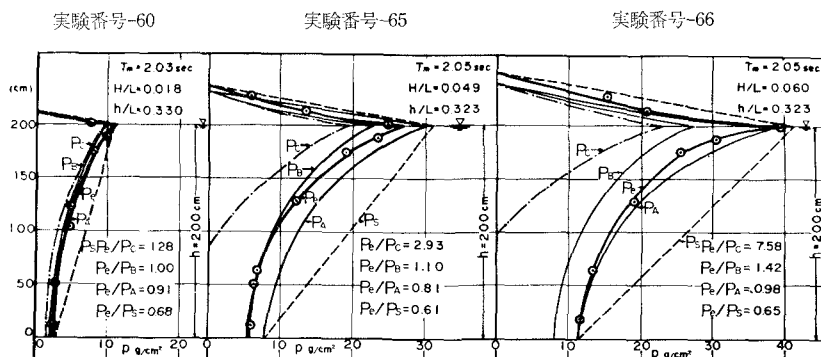


図-5



式中 $\rho g = w_0$

波の山が直立壁に来たときは、

$$\eta = 2a \cos nt = H$$

であるから、

$$p = -w_0 z + w_0 H \frac{\cosh m(h+z)}{\cosh mh} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(7)は静水面 $z=0$ において、

$$p = w_0 H$$

水面 $z=-h$ において、

$$p = w_0 h + w_0 \frac{H}{\cosh mh} \quad \dots\dots\dots (8)$$

である。しかし水面 $z=H$ においては、 $p=0$ なる条件を満足しないが、いま近似的に静水面以上は $z=H$ において $p=0$ 、静水面において $p=w_0 H$ なる三角形分布をすると仮定する。このように考えると式(7)による水面から水底までの波圧合力 P_A は次式のようになる。

$$P_A = \frac{1}{2} w_0 (h^2 + H^2) + w_0 \frac{H}{m} \tanh mh \quad \dots\dots\dots (A)$$

式(7)による波圧強度およびその鉛直分布は、相対水深 h/L がほぼ 0.35 より小さい浅海波のすべての場合において実験値(最大同時波圧)に比較的良好に合、その合

力 P_A の値は実験における最大同時波圧の合力 P_e の値に等しいか、わずかに大きく、両者の比は、

$$P_e/P_A \approx 0.8 \sim 1.0$$

であって、この比が1以上の場合は1回もなかった。実験値との比較の一部を示すと 図-3,4 および 図-5 のごとくである。

5. 深海波重複波の波圧式

浅海波重複波の速度ポテンシャルの式(2)は、表面波の条件式を近似的に $z=\eta \approx 0$ と置いて求めたものであるが、 $z=\eta$ において表面波の条件式を用いると、

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}\right)_{z=\eta} = -g \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z=\eta}, \quad \eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_{z=\eta} \quad \dots(9)$$

式(9)を用いて速度ポテンシャルを求めると次式を得る。

$$\phi = -\frac{2an}{m} \cdot \frac{\cosh m(h+z)}{\sinh m(h+\eta)} \sin nt \cdot \sin mx \quad (10)$$

式(10)を式(5)に代入すると波圧は次式で与えられる。

$$p = -w_0 z + w_0 \eta \frac{\cosh m(h+z)}{\cosh m(h+\eta)} \quad \dots(11)$$

波の山が直立壁に来た時は、

$$p = -w_0 z + w_0 H \frac{\cosh m(h+z)}{\cosh m(h+H)} \quad \dots(12)$$

この式は $z=H$ において $p=0$ なる条件を満足する。

また静水面 $z=0$ においては、

$$p = w_0 H \frac{\cosh mh}{\cosh m(h+H)}$$

水底 $z=-h$ においては、

$$p = w_0 h + w_0 \frac{H}{\cosh m(h+H)}$$

水面から水底までの波圧合力 P_B は次式のようにになる。

$$P_B = \frac{1}{2} w_0 (h^2 - H^2) + w_0 \frac{H}{m} \tanh m(h+H) \quad \dots(B)$$

式(12)および式(B)の値を実験値と比較した結果によると、 h/L がほぼ 0.35 より大きい重複波においては、波高が大きいときも小さいときも波圧強度およびその鉛直分布は実験より求めた最大同時波圧と比較的良好に、したがって最大同時波圧の合力 P_e と P_B との比は、

$$P_e/P_B \approx 0.70 \sim 1.0$$

であった。実験値との比較例を示すと 図-6 および 図-7 のごとくである。

6. 実験における縮尺の影響について

実験における縮尺の影響を調べるために、現地の水深をほぼ $h_P = 10 \sim 20$ m、波の周期 $T_P \approx 4 \sim 12$ sec、波高 $H_P \approx 1 \sim 5$ m の範囲において、実験の縮尺を現地のほぼ 1/25, 1/15, 1/10, 1/5 に変化し、相対水深 h/L および波

図-6

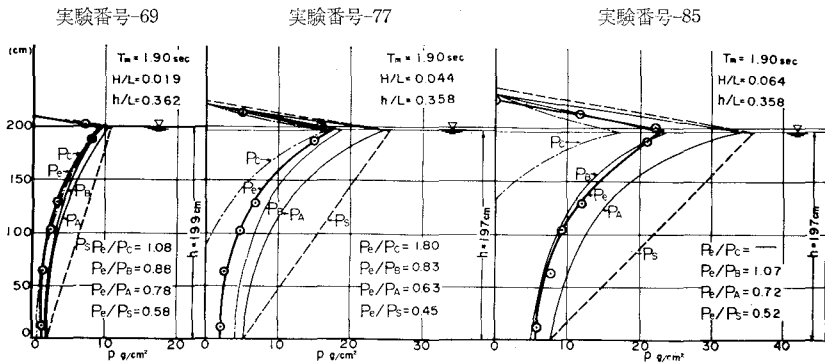


図-7

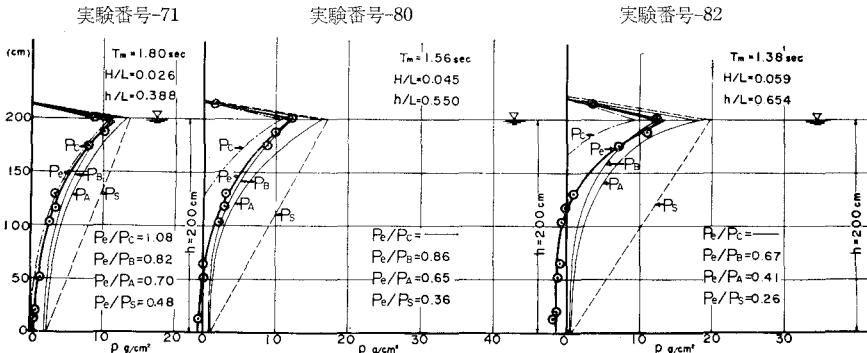


図-8

$h=45$ cm, $T=1.11$ sec, $H=8.1$ cm,
 $L=177$ cm, $Pe=232$ gr/cm
 実験番号-1

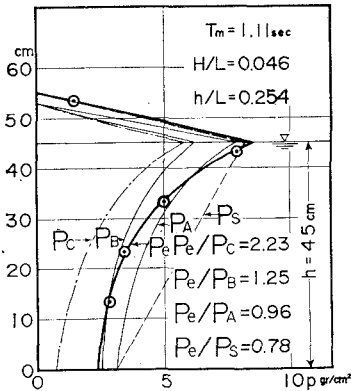


図-9

$h=116$ cm, $T=1.92$ sec, $H=26.4$ cm,
 $L=488$ cm, $Pe=1830$ gr/cm
 実験番号-2

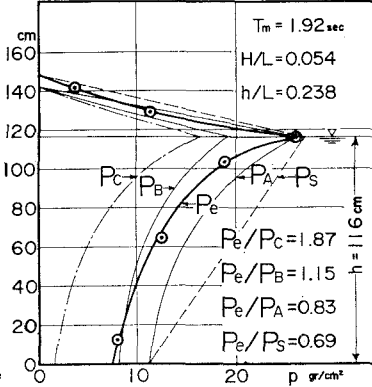
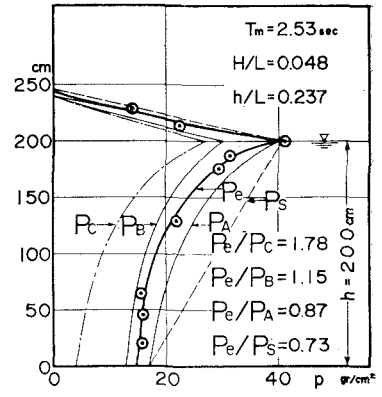


図-10

$h=200$ cm, $T=2.53$ sec, $H=40.0$ cm,
 $L=840$ cm, $Pe=4920$ gr/cm
 実験番号-3



形勾配 H/L をほぼ等しくした場合の最大同時波圧の強度およびその鉛直分布を比較した。その結果、いずれの場合にも波圧強度およびその鉛直分布とも比較的良く合、実験の縮尺がほぼ $1/25$ 以上である場合には、縮尺による影響は全くないことが証明された。このことは、すでに混成堤の直立部に働く碎波の衝撃圧力についても証明されたことで^{4),5)}、碎波よりも波形が安定で圧力強度も小さい重複波においては当然予想されていたことである。図-8,9 および 図-10 に比較例の一部を示す。

図-8,9 および 図-10 を水深 $h_p=12$ m に換算して比較すると表-2 のごとくである。これらの実験における波高の換算値がそれぞれ $H=2.16$ m, 2.72 m および 2.40 m, したがって $H/L=0.046$, 0.054 および 0.048

表-2

縮 尺	周 期 T_p (sec)	水面の波圧強度 P_{max} (t/m ²)	水底の波圧強度 p (t/m ²)	Pe (t/m)
1/26.7	5.74	2.32	0.64	16.5
1/10.3	6.15	2.72	0.72	19.4
1/6	6.20	2.43	0.80	17.7

と違っていることを考慮すると、これら実験の波圧強度およびその鉛直分布は良く合っているといえることができるであろう。

7. 結 論

(1) 重複波でも波形勾配 および相対水深 h/L が小さいときは(図-1 参照)、波圧は進行波(基本波)と同一の周期で振動する。この範囲においては微小振幅波の理論は実験値にほぼ一致する。

(2) 波形勾配および相当水深が大きくなると、まず始めに水底圧力が基本波の $1/2$ の周期で振動し、 H/L がさらに大きくなると(図-1 参照)水底から水面まで

の圧力がすべて $1/2$ 周期で振動するようになる。この範囲には微小振幅理論は適用できない。

水底から水面まで圧力が $1/2$ 周期で振動する場合には直立壁における波圧の山は表面の波の山の前後において起こるが、その波圧の山が起こる時刻は水面から水底まで同じではなく、表面の波の山を中心にして考えると、一般に水面において最も波の山に近く、水底に向うにつれてわずかなづつ波の山から遠ざかる。しかしこの時間のずれは、比較的小さいので、静水面あるいはその付近における最大波圧強度 p_{max} が起こる時刻の同時波圧強度は、2倍周波数の項の影響を余り受けないようである。

(3) それゆえ、浅海波および深海波の重複波とも波圧式は2倍周波数で振動する項を無視した(7)、式(A)および(12)式(B)が実験値に比較的良く合う。

付記：この研究に用いた実験は主として助手の久保直君、時川和夫君、大学院学生 稲垣紘史君、および研究員東洋建設 KK 社員 佐伯譲君が行なった。ここに付記にしてその努力に対して心より、深甚なる謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) 永井莊七郎：「重複波の発生条件と重複波の波圧」，第9回海岸工学講演会。
- 2) 永井莊七郎：「深い海中に築造された直立防波堤に働く波圧」，第10回海岸工学講演会。
- 3) 永井莊七郎：「重複波に関する二、三の問題について」，第11回海岸工学講演集，p. 32 (1964)。
- 4) 永井莊七郎：「防波堤に働く碎波の圧力に関する研究」，土木学会論文集，第65号，別冊3-3，昭和34年12月。
- 5) S. Nagai："Shock pressures exerted by breaking waves on breakwaters"，Trans. of ASCE, No. 3261 (1960)