

深い海中に築造された直立防波堤に働く波圧

永井 莊七郎*・玉井 佐一**・西村 益夫***

1. 緒 言

直立壁前面の水深 h が侵入波の波高 H の 2 倍以上であっても波の特性によっては必ずしも重複波を生じないことは、すでに第 9 回海岸工学講演会において述べたとおりである。特に実際の海においては、暴風時の波は非常に不規則であって、周期および波高が異なっていくつかの波が重なって防波堤に衝突するから、 $h/H \geq 2$ であっても完全な重複波を生ずる場合は比較的少なく、水面付近で部分的に碎波する場合が多い。

実験水槽においては、不規則な暴風時の波に相似な波を再現することが困難であるのと、たとえ再現しても、その波の特性と波圧との関係を理論的にあるいは統計的に整理し、検討することが非常に困難であるので、ただ 1 種類の規則的な浅海波が直立防波堤に衝突する場合について実験を行なった。

2. 実験方法および実験範囲

実験水槽は長さ 25 m, 幅 2 m, 深さ 1 m の小型水槽および長さ 58.5 m, 幅 10 m, 深さ 1.9 m の大型水槽を用いた。防波堤の規模, 水深, 波の特性の現地に対する縮尺は小型水槽では 1/20, 大型水槽では 1/15~1/20 である。また小型水槽における実験はすべて水底が一樣に水平の場合, 大型水槽における実験は, 直立壁直前 70 cm を水平に, それより前方 20 m を 1/30 勾配にした。これはのちに述べるように, 田後港の直立防波堤の実験を行なうために造られたものである。

$h/H \geq 1.7$ の場合について, 両水槽を用いて造りうる最大限の広範囲の浅海波を起こして実験を行なった。ただし周期 T は 1/15~1/20 縮尺で現地に換算して $T_p = 5 \sim 12$ sec の範囲にとどめた。これは直立防波堤の設計波の周期を対称としたからである。

実験の範囲は表一のようにである。

表一 実験の範囲

	実験水槽	現地
波高 H	3.5~38.3 cm	0.70~7.66m
周期 T	1.12~3.10 sec	5~12sec
直立壁前面水深 h	37~90 cm	7.4~18m
h/H	1.74~12.86	1.74~12.86
H/L	0.011~0.096	0.011~0.096

* 正員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
 ** 正員 大阪市立大学助手 同上
 *** 正員 大阪市立大学大学院学生(修士課程)

小型水槽における防波堤はすべて板製の直立壁とし, 大型水槽における防波堤は板製の直立壁およびコンクリートブロックの直立壁(田後港の防波堤の 1/15 模型)を用いた。

3. 重複波の発生条件

表一に示した実験の範囲は, わが国のみならず諸外国の直立防波堤の設計に使用される波の特性および水深の条件のほとんどの場合をふくんでいると思われる。

これらの一様な浅海波に関する実験の結果によると, 重複波が発生するのは, 直立壁前面の水深 h が侵入波高 H のほぼ 1.8 倍以上

すなわち $h/H \geq 1.8$ で,

(1) 周期 $T_p \geq 8$ sec のすべての波形勾配の波

(2) 周期 $T_p = 5 \sim 7$ sec で $H/L \leq 0.040$ の波

の場合である。したがって

$T_p = 5 \sim 7$ sec の波で $H/L > 0.040$ の場合には, たとえ $h/H \geq 1.8$ であっても一般には重複波は起こらず, 部分的碎波を生じる。

水深が 12~15 m あるいはそれ以上の深い海中に直立防波堤が築造される場合, 一般に $h/H \geq 1.8$ であるが, 暴風時の波浪の H/L は必ず 0.040 より大きく, 周期は $T_p = 5 \sim 7$ sec の場合が多い。

太平洋および日本海に直面した港においては最大波高時の周期は $T_p = 12 \sim 13$ sec である場合が多いが, $H_p = 4 \sim 5$ m くらいで $T_p = 6 \sim 7.5$ sec くらいの波がたびたび襲来している。瀬戸内海などにおいては $T_p = 5 \sim 7$ sec くらいの波浪が最も多い。

したがって, そうとう深い海中に直立防波堤(直立壁前面が平面の場合)を築造しても一般には重複波を設計波にとることはできないと考えられる。

4. 重複波圧の理論式の検討

(1) 微小振幅波理論による浅海波重複波の波圧式
 いま x 軸を静水面に, z 軸を鉛直壁に沿って上向きにとると, 水深が浅い場合 ($h/L < 1/2$) の重複波の波圧式は直立壁に波の山がきたとき次式のようになる¹⁾。

$$p = -w_0 z + w_0 H \left\{ 1 + \frac{\cosh m(h+z)}{\cosh mh} - \frac{\cosh m(h+H)}{\cosh mh} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

式中 $m = 2\pi/L$

この式は静水面から $z = -z$ なる点における波圧強度

を表わす。ゆえに水面から水底までの全波圧 P は次式で表わされる¹⁾。

$$P = \int_{-h}^H \rho dz$$

$$= \frac{1}{2} w_0 (h^2 - H^2) + w_0 H \left\{ h + H + \frac{\sinh m(h+H)}{m \cosh mh} - (h+H) \frac{\cosh m(h+H)}{\cosh mh} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

$L=50 \sim 200$ m, $h=2 \sim 18$ m, $H=1 \sim 7$ m の範囲においては

$$P = \frac{1}{2} w_0 (h^2 - H^2) + w_0 H \frac{\sinh m(h+H)}{m \cosh mh} - w_0 m H^2 (h+H) \left(\tanh mh + \frac{1}{2} mH \right) \dots \dots (3)$$

(2) Gerstner のトロコイド波理論による浅海波重複波の波圧式

x, z 軸を微小振幅波理論におけると同じようにとると、静止時に $-z_0$ なる点にあった水分子の波動時における波圧強度 (波の山がきたときに直立壁におよぼす波圧強度) は次式で表わされる。

$$P = w_0 z_0 + w_0 H \frac{2 \sinh m z_0}{\sinh 2mh} + w_0 m H^2 \left\{ \frac{\cosh 2m(h-z_0)}{\sinh 2mh} - \frac{\sinh 2m(h-z_0)}{4 \sinh^2 mh} - \coth 2mh + \frac{1}{2} \coth mh \right\} + w_0 \frac{m^2 H^3}{6} \left\{ \frac{\cosh 3m(h-z_0) - \cosh 3mh}{\sinh^2 mh \cdot \cosh mh} \right\} + w_0 \frac{m^3 H^4}{32} \left\{ \frac{\cosh 4m(h-z_0) - 1}{\sinh^3 mh \cdot \cosh mh} - 8 \coth mh \right\} \dots \dots \dots (4)$$

この波圧の作用点は次式で表わされる。

$$z = -z_0 + \frac{4\pi r r'}{L} + 2r'$$

式中 $r = \frac{H}{2 \sinh mh} \cosh m(h-z_0)$ $r' = \frac{H}{2 \sinh mh} \sinh m(h-z_0)$ $\dots \dots \dots (5)$

水底における波圧強度は、 $z_0 = h$

$$P_h = w_0 h + w_0 H \frac{1}{\cosh mh} + w_0 m H^2 \left(\frac{1}{\sinh 2mh} - \coth 2mh + \frac{1}{2} \coth mh \right) + w_0 \frac{m^2 H^3}{6} \left(\frac{1 - \cosh 3mh}{\sinh^2 mh \cdot \cosh mh} \right) - w_0 \frac{m^3 H^4}{4} \coth mh \dots \dots \dots (6)$$

Gerstner のトロコイド波理論においては、静止時に $-z_0$ にあった水分子は波動時に式 (5) に示される 2 なる場所に上昇するので、水底から水面までの全波圧 P は式 (4) を $z_0 = h$ から 0 まで積分したのではなく、式 (4) と式 (5) から波圧分布図を描いて図式計算をしなければならない。したがって正確に全波圧を求めるには式 (3) よりはるかに多くの時間を要する。

(3) Sainflou 式

Sainflou は上記のように Gerstner 理論による波圧

合力を求めることが非常には複雑であるので、これをさけるために、式 (6) の右辺第 3 項以下の項の値はすべて第 2 項に比してはるかに小さいとして無視し、水底波圧を近似的に次式で表わした。

$$P_h = w_0 h + w_0 H \frac{1}{\cosh mh} \dots \dots \dots (7)$$

また全波圧は水底に式 (7) で表わされる波圧強度をとり、波頂を式 (5) より求め、

$$z = \frac{4\pi r_0 r_0'}{L} + 2r_0' = \frac{1}{2} m H^2 \coth mh + H \dots \dots (8)$$

この 2 なる点において $p=0$ とし、波頂から水底までは近似的に直線分布をするとして、図式計算する方法を提案した。これが広く知られている Sainflou の方法である。

式 (6) の第 3 項以下の項の値が第 2 項に比して非常に小さいのは、 $L \geq 80 \sim 100$ m で波高が $H \leq 3$ m の場合であって、多くの場合に設計波浪として用いられる $L \leq 80$ m, $H > 3$ m の波形勾配の大きい風浪の場合には第 3 項以下の項の値がさうとう大きくなるので無視することは適当でないが、誤差は安全側にあることはすでに指摘したことである。²⁾

5. 3 式による計算値と実験値との比較

周期 $T_p = 5$ sec (実験波の $T_m = 1.12$ sec), 6 sec (1.34 sec), 7 sec (1.58 sec), 8 sec (1.79 sec), 10 sec (2.24 sec) および 12 sec (2.70 sec) の波において、波形勾配が比較的小さい ($H/L = 0.015 \sim 0.034$) とときと大きい ($H/L = 0.035 \sim 0.088$) とときの実験値について、前記 3 種の式の計算値と比較した結果は 図-1~12 に示すようである。

図-1 波圧分布

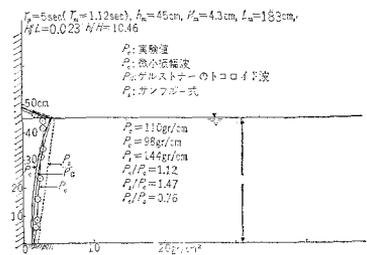


図-2 波圧分布

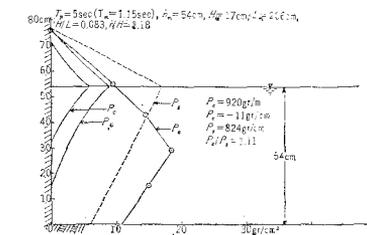


図-3 波圧分布

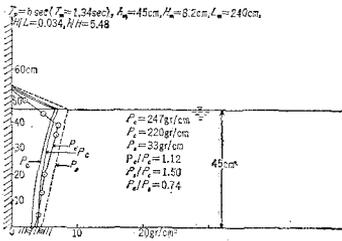


図-4 波圧分布

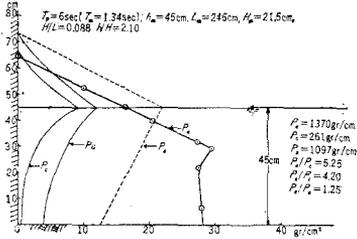


図-5 波圧分布

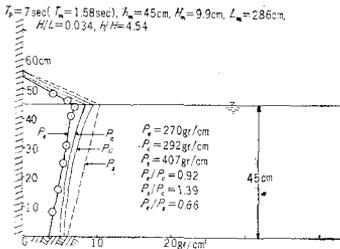


図-6 波圧分布

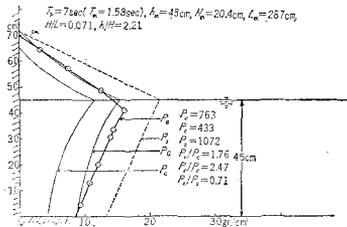


図-7 波圧分布

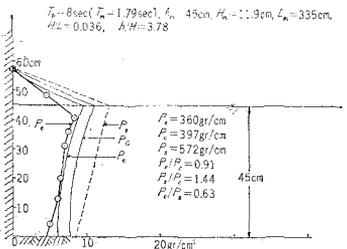


図-8 波圧分布

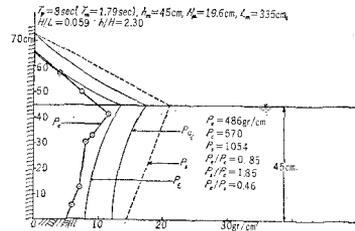


図-9 波圧分布

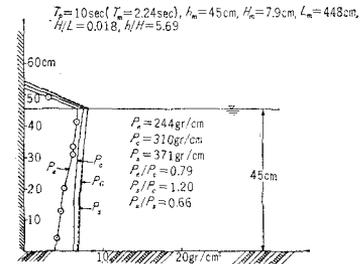


図-10 波圧分布

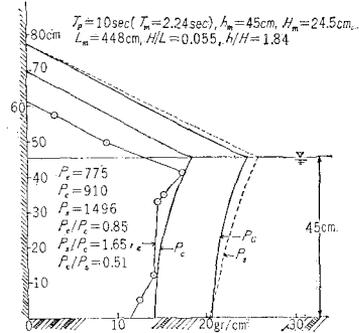


図-11 波圧分布

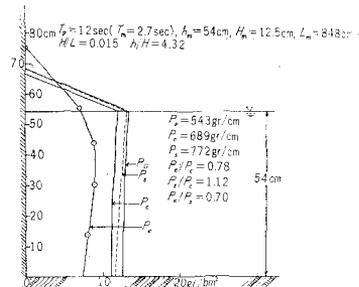
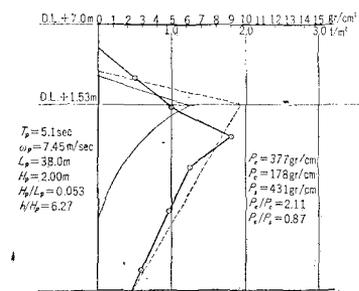


図-12 波圧分布



また、これらをつくめたすべての実験について波圧合力の値を比較した結果は表-2に示すようである。

図-1~12 および表-2によると、

(1) $T_p=5\sim 6\text{ sec}$ で波形勾配がほぼ 0.040 より大きい場合には部分的砕波を生じる。

(2) $T_p\leq 6\text{ sec}$ の波で波形勾配がほぼ 0.040 より大きい場合には、微小振幅波理論および Gerstner 理論による重複波の水底波圧は急激に小さくなり、波圧分布および波圧合力とも実験値に合わなくなる。したがって、この範囲の波については両理論式は適用できない。

(3) 上記の範囲を除けば、波形勾配の大きいときも小さいときも、周期 $T_p=5\sim 12\text{ sec}$ のすべての波において微小振幅波理論による式が波圧分布および合力とも実験値に最も近い値を与える。ただし $T_p=7\text{ sec}$ で $H/L\geq 0.040$ の波においては微小振幅波理論式は実験値よりほぼ 20~80% 小さい値を与える。

(4) 部分的砕波を生ずる場合 ($T_p=5\sim 6\text{ sec}$, $H/L\geq 0.040$ の波) を除いたすべての波において、Sainflou 式は実験値より大きな値を与える。特に $T_p\geq 8.0\text{ sec}$ の波で波形勾配がほぼ 0.040 以上の場合には実験値のほぼ 2~3 倍の値を与える。

(5) Gerstner 理論による式は $T_p<10\text{ sec}$ の波では Sainflou 式より小さい値を与えるが、 $T_p=10\text{ sec}$ ではほぼ両値は等しくなり、 $T_p=12\text{ sec}$ では Gerstner 式の値がやや大きくなる。

Gerstner 式はほとんどの場合において微小振幅波式より実験値に合わない。

6. 田後港防波堤

田後港は鳥取県の東端にある避難港兼漁港である。その第4防波堤は水深がほぼ 10 m の海中にプレキャスト・コンクリートで直立堤として数年前より築造中である(運輸省第三港湾建設局境港工事事務所が施工)。海底は岩盤で、その上に砂利まじり砂が堆積しているため、直立堤の基礎が波によって洗掘されることを予想して、1~5 m 程度基礎を砂利の中に埋めこんでいる。延長は 120 m で、その基部(施工済)および先端部(近く施工予定)の横断面は図-13 および図-14 のようである。ただし両断面とも当初の計画であって、基部に近いほぼ 50 m の部分の水面以下は図-13 のように築造されたが、当研究室で検討の結果水面上の断面は変更された。

この防波堤の特長は

(1) 基礎捨石堤を造らず、海底からプレキャスト・コンクリートの直立堤としたこと。

(2) 天端が D.L.+5.0 m で、従来の日本の防波堤としては天端がさうとう高いこと。

である。

また、この防波堤として検討を要する点は

(1) 波圧計算を砕波として行なうべきか、あるいは重複波として設計してもよいか。

(2) 断面幅を上部に行くにつれて小さくしているが、暴風時の波浪に対してこの断面で安全であるか。

という点であった。

第4防波堤の沖合約 100 m、水深 11~12 m の海底に水圧式日記波高計を沈設して、昭和 33 年 9 月から 37 年 2 月まで実測した記録によると、夏期の台風時の波と冬の暴風時の波とは特性がほぼ同じであって、 H_{\max} は

$$H_{\max}=6.89\text{ m}, T=12.1\text{ sec}$$

$$H=5.40\sim 5.52\text{ m}, T=7.3\sim 13.0\text{ sec}$$

$H_{1/2}$ は 4.0 m 以上の波では

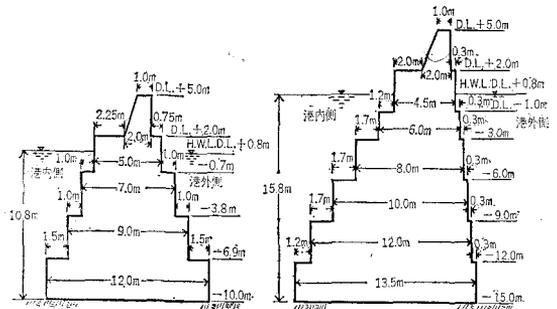
$$H=4.0\sim 5.50\text{ m}, T=8.6\sim 13.5\text{ sec}$$

である。

大型波浪水槽に実物の 1/15 縮尺の直立堤(図-13 および 14)をコンクリートで造り、周期 $T_p=5, 6, 7, 10$

図-13 田後港防波堤 断面図(基部)

図-14 田後港防波堤 断面図(先端部)



および 12 sec、波高 $H_p=4, 5, 6$ および 6.8 m の波を起こして実験を行ない、上記の問題点について検討した。その結果を要約するとつぎのようである。

(1) 波高 $H_p=6\sim 6.8\text{ m}$ であっても周期 $T_p=10\sim 13\text{ sec}$ の波においては重複波を生じ、その波圧分布および波圧合力は微小振幅波理論による浅海波重複式の値にはほぼ一致する。

(2) $T_p=5\sim 7\text{ sec}$ で $H_p=3.5\sim 5.2\text{ m}$, $H/L=0.07\sim 0.10$ の波においては部分的砕波を生ずる。このことは平面の直立壁の実験においてすでに確かめたとおりである。しかし図-13の階段(0.75~1.5 m)は水面付近で砕波することを助長している。この傾向は $T_p=5\sim 6\text{ sec}$ において特にいちじるしい。図-14の階段(0.30 m)はこのような悪い影響はない。

いま同一水深 $h_p=10.8\text{ m}$ (実験水深 $h_m=72\text{ cm}$) で、図-13, 14の断面および平面直立壁断面の3種類の防波堤について、 $T_p=5, 6, 7, 10$ および 12 sec の波における波圧分布および波圧合力の図示は省略する。

(3) 図-13および14の防波堤は $T=5\sim 13\text{ sec}$ のすべ

深い地中に築造された直立防波堤に働く波圧

表-2

実験 番号	hm cm	Tm sec	T _D sec	Wm cm/sec	Hm cm	Lm cm	h/H	H/L	h/L	P _{emax} gr/cm ²	P _e gr/cm	P _c gr/cm	P _s gr/cm	P _s /P _c	P _e /P _c	P _e /P _s
1	45	1.12	5.0	163	4.3	183	10.46	0.023	0.246	3.0	110	98	145	1.47	1.12	0.76
2	45	1.12	5.0	163	6.9	183	6.52	0.038	0.246	3.5	150	132	202	1.53	1.13	0.74
3	45	1.12	5.0	163	8.0	183	5.62	0.044	0.246	4.5	190	143	296	2.00	1.33	0.67
4	45	1.12	5.0	163	9.2	183	4.89	0.050	0.246	12.0	418	139	343	2.46	3.00	1.21
5	45	1.12	5.0	163	10.8	183	4.16	0.060	0.246	13.5	478	126	416	3.30	3.78	1.14
6	45	1.12	5.0	163	16.4	183	2.70	0.089	0.246	17.0	719	-18	703	—	—	1.02
7	54	1.15	5.0	179	17.0	206	3.18	0.083	0.260	18.5	920	-11	824	—	—	1.11
8	45	1.34	6.0	174	4.3	233	10.46	0.018	0.192	3.5	120	118	158	1.33	1.01	0.77
9	45	1.34	6.0	177	7.0	237	6.42	0.029	0.190	5.0	202	194	280	1.44	1.04	0.71
10	45	1.34	6.0	179	8.2	240	5.42	0.034	0.187	7.0	247	220	331	1.50	1.12	0.74
11	45	1.34	6.0	178	9.4	238	4.78	0.039	0.190	9.0	310	262	378	1.44	1.15	0.82
12	45	1.34	6.0	178	10.9	238	4.12	0.045	0.190	11.5	471	278	442	1.58	1.69	1.06
13	37	1.34	6.0	157	11.2	231	3.30	0.048	0.160	15.0	530	243	373	1.53	2.18	1.42
14	45	1.34	6.0	183	12.6	246	3.60	0.051	0.183	13.5	787	278	558	2.01	2.83	1.41
15	55	1.34	6.0	190	15.2	255	3.63	0.060	0.216	22.5	1065	277	774	2.79	3.85	1.38
16	37	1.34	6.0	157	14.8	231	2.50	0.064	0.160	18.0	625	269	530	2.00	2.32	1.18
17	45	1.34	6.0	183	16.1	246	2.80	0.066	0.183	22.0	1008	281	750	2.67	3.58	1.34
18	37	1.34	6.0	157	16.9	231	2.19	0.073	0.160	23.0	805	266	730	2.74	3.02	1.10
19	45	1.34	6.0	183	18.0	246	2.50	0.073	0.183	26.5	1123	252	873	3.46	4.46	1.29
20	72	1.35	6.0	216	21.5	292	3.35	0.074	0.246	20.0	1496	193	1399	7.25	6.45	1.10
21	55	1.34	6.0	190	19.9	255	2.77	0.078	0.216	26.0	1258	190	1077	5.66	6.62	1.17
22	45	1.34	6.0	183	19.6	246	2.30	0.080	0.183	27.0	1174	237	974	4.11	4.76	1.16
23	45	1.34	6.0	183	21.5	246	2.10	0.088	0.183	30.0	1370	261	1097	4.20	5.25	1.25
24	45	1.34	6.0	183	23.2	246	1.94	0.094	0.183	28.0	1347	130	1222	9.40	10.30	1.10
25	55	1.34	6.0	190	24.4	255	2.26	0.096	0.216	33.7	1878	-10	1365	—	—	1.34
26	45	1.58	7.0	181	4.5	286	10.00	0.016	0.157	3.5	130	147	185	1.26	0.88	0.70
27	45	1.58	7.0	181	8.2	286	5.48	0.028	0.157	6.0	222	261	355	1.36	0.85	0.63
28	45	1.58	7.0	181	9.9	286	4.54	0.034	0.157	7.0	270	292	407	1.39	0.92	0.66
29	45	1.58	7.0	181	11.1	286	4.05	0.038	0.157	8.5	314	322	495	1.53	0.97	0.63
30	72	1.57	7.0	245	14.5	384	4.97	0.039	0.186	8.5	673	584	982	1.68	1.15	0.68
31	54	1.57	7.0	231	15.0	362	2.93	0.041	0.149	11.5	650	541	842	1.56	1.20	0.77
32	45	1.58	7.0	181	13.1	286	3.43	0.045	0.157	12.0	539	360	598	1.66	1.49	0.90
33	45	1.58	7.0	181	16.8	286	2.68	0.058	0.157	15.0	671	408	837	2.05	1.64	0.80
34	55	1.62	7.0	194	21.0	314	2.62	0.067	0.175	16.5	806	476	1132	2.38	1.69	0.77
35	45	1.58	7.0	181	20.4	286	2.21	0.071	0.156	16.5	763	433	1072	2.47	1.76	0.71
36	54	1.57	7.0	231	28.0	362	1.93	0.077	0.149	16.0	1022	683	1878	2.74	1.50	0.55
37	72	1.57	7.0	246	30.5	386	2.36	0.079	0.186	11.5	794	580	2389	4.12	1.37	0.33
38	45	1.79	8.0	186	3.5	335	12.86	0.011	0.134	3.5	112	125	148	1.18	0.90	0.75
39	45	1.79	8.0	186	4.9	335	9.18	0.015	0.134	4.0	150	173	201	1.16	0.87	0.77
40	45	1.79	8.0	186	6.6	335	6.82	0.020	0.134	5.0	216	228	288	1.26	0.94	0.71
41	45	1.79	8.0	186	11.9	335	3.78	0.036	0.134	9.0	360	397	572	1.44	0.91	0.63
42	45	1.79	8.0	186	13.3	335	3.34	0.039	0.134	10.0	380	440	646	1.47	0.87	0.60
43	45	1.79	8.0	186	15.2	335	2.96	0.045	0.134	11.0	418	486	766	1.58	0.86	0.54
44	45	1.79	8.0	186	16.7	335	2.70	0.050	0.134	11.5	466	518	855	1.65	0.89	0.54
45	54	1.80	8.0	248	23.5	446	2.29	0.053	0.121	16.5	883	920	1548	1.68	0.96	0.57
46	45	1.79	8.0	186	19.6	335	2.30	0.059	0.134	12.5	486	570	1054	1.85	0.85	0.46
47	72	1.80	8.0	252	27.0	454	2.67	0.060	0.158	11.5	813	1049	2139	2.04	0.78	0.38
48	54	1.80	8.0	257	29.7	463	1.82	0.064	0.117	17.0	943	1138	2144	1.88	0.83	0.44
49	45	1.79	8.0	186	21.7	335	2.08	0.064	0.134	12.5	546	596	1213	2.40	0.91	0.45
50	45	1.79	8.0	186	25.0	335	1.80	0.075	0.134	14.0	559	603	1461	2.42	0.93	0.38

実験 番号	hm cm	Tm sec	Tp sec	Wm cm/sec	Hm cm	Lm cm	h/L	H/L	h/L	Pemax gr/cm ²	Pe gr/cm	Pc gr/cm	Ps gr/cm	Ps/Pc	Pe/Pc	Pe/Pc
51	45	2.24	10.0	199	6.9	448	6.52	0.016	0.100	5.0	192	241	315	1.12	0.80	0.61
52	45	2.24	10.0	199	7.9	448	5.69	0.018	0.100	6.5	244	310	371	1.20	0.79	0.66
53	45	2.24	10.0	199	9.6	448	4.68	0.022	0.100	7.5	291	383	459	1.20	0.77	0.64
54	45	2.24	10.0	199	16.1	448	2.81	0.036	0.100	14.0	568	649	852	1.32	0.88	0.66
55	54	2.25	10.0	290	24.5	653	2.20	0.038	0.082	17.5	1060	1278	1734	1.35	0.82	0.61
56	45	2.24	10.0	199	18.8	448	2.38	0.042	0.100	14.5	618	729	1053	1.45	0.85	0.59
57	45	2.24	10.0	199	20.3	448	2.21	0.045	0.100	15.0	650	805	1163	1.45	0.80	0.56
58	72	2.25	10.0	306	33.0	690	2.18	0.052	0.104	17.5	1399	1514	2970	1.89	0.92	0.47
59	45	2.24	10.0	199	23.8	448	1.91	0.053	0.100	17.0	734	881	1445	1.64	0.89	0.50
60	45	2.24	10.0	199	24.5	448	1.84	0.055	0.100	17.5	775	910	1496	1.65	0.85	0.51
61	90	2.24	10.0	263	35.1	590	2.56	0.060	0.152	17.5	1379	1730	2884	1.66	0.80	0.47
62	90	2.24	10.0	263	38.3	590	2.85	0.065	0.152	18.5	1498	1780	3181	1.78	0.84	0.47
63	72	2.70	12.0	333	9.5	900	7.57	0.011	0.080	7.5	469	652	687	1.05	0.72	0.68
64*	54	3.10	12.0	332	12.5	1030	4.32	0.012	0.052	9.0	492	720	779	1.11	0.70	0.62
65	54	2.70	12.0	314	12.5	848	4.32	0.015	0.064	9.0	543	689	772	1.12	0.78	0.70
66*	54	3.10	12.0	323	16.6	1000	3.25	0.017	0.054	14.0	698	941	1089	1.16	0.74	0.64
67	72	2.70	12.0	333	18.0	900	4.00	0.018	0.080	14.5	906	1264	1461	1.15	0.72	0.62
68	54	2.70	12.0	314	20.0	848	2.70	0.024	0.064	17.0	905	1156	1369	1.17	0.78	0.66
69	72	2.70	12.0	328	29.0	886	2.48	0.025	0.081	22.5	1543	2076	2594	1.24	0.74	0.59
70*	54	3.10	12.0	323	27.0	1000	2.00	0.027	0.054	21.0	1172	1626	2039	1.25	0.72	0.57
71	54	2.70	12.0	314	29.0	848	1.86	0.034	0.064	21.5	1310	1682	2228	1.32	0.77	0.58
72	72	2.70	12.0	333	30.5	900	2.36	0.034	0.080	22.0	1680	2177	2830	1.30	0.77	0.59
73	54	2.73	12.0	314	31.0	848	1.74	0.037	0.064	25.5	1452	1827	2552	1.40	0.79	0.57

* 印は 1/15 模型実験

ての波の場合に大きな横振動(rocking)を起こした。その振動の周期は波の周期と同一である。横振動の振幅は $T_p=12.0\sim 12.8\text{ sec}$, $H_p=6.3\sim 6.8\text{ m}$ の波の場合に最大であった。これは波圧合力による転倒モーメントが最も大きいからである。

(4) 水面付近でそうとう強い部分的砕波を生ずる場合には、水面付近の断面が切断される怖れがある。

以上の結果により、-13, 14 の断面を増大するとともに、今後の施工においては、港外側の階段を極力小さくするように改められた。

7. 結 論

以上の検討により、つぎのことが結論できるであろう。

(1) 直立防波堤前面水深が侵入波高の 1.8 倍以上あっても ($h/H \geq 1.80$)、侵入波の周期 $T \leq 6\text{ sec}$ で波形勾配 $H/L \geq 0.040$ の場合には、部分的な砕波を生じ、その波圧合力の値は Sainflou の方法によって求めた値よりほぼ 10~40% 大きい。

実際の海においては暴風時の波浪はいろいろな周期および波高の波が一緒になって防波堤に衝突するので、実験の場合以上に砕波を生ずる可能性が多いと考えられる。

(2) 上記の範囲を除けば、 $h/H \geq 1.80$ であれば、 $T=5\sim 13\text{ sec}$ の範囲の波は一般に重複波を生ずると考えて

よいであろう。重複波を生ずる場合には、直立壁におよぼす波圧分布および合力は、微小振幅波理論による浅海波重複波の式が実験値に最もよく合う。ただし $T=7\text{ sec}$ 前後の波 ($6\text{ sec} > T > 8\text{ sec}$) では $H/L \geq 0.040$ の場合には、この理論式の値よりほぼ 20~80% 大きい値を与える。

(3) Sainflou の方法により求めた波圧合力の値は、重複波を生ずる場合にはすべての波において過大な値を与える。特に $T \geq 8\text{ sec}$ の波で $H/L \geq 0.040$ の場合には実験値の 2~3 の倍の値を与える。

(4) Gerstner の長円トロコイド波理論を厳密に解いて求めた波圧式はその計算が非常に面倒であるだけで大部分の場合に実験値に合わない。その精度は、Sainflou の簡略法と同程度かむしろ低い場合が多い。したがって計算がめんどろな厳密式を用いる必要はない。

(5) 直立防波堤の外海側は極力平面の鉛直壁に造る必要がある。もし施工上やむをえず階段を設ける場合でも幅(step)を 0.30 m 以上にはしてはならない。

参 考 文 献

- 1) 永井：「重複波の発生条件と重複波の波圧」, 第 9 回 海岸工学講演会講演集 pp.122, 昭和37年10月
- 2) 永井：「水工学の立場から見た最近の波の研究」, 水工学の最近の進歩 昭和28年 3月
永井：港湾工学 57~58頁