

円形セル型防波堤に関する研究

(特に神戸港第5防波堤について)

永井荘七郎*・玉井 佐一**・西村 益夫***

1. 緒 言

水深が深い海中に防波堤を築造しようとする場合、従来わが国および諸外国で実施して来たような混成堤にすると、

(1) 基礎に多量の捨石を必要とするが、最近わが国では多量の捨石を比較的短い年月内に確保することが非常に困難である。また単価も高い。

(2) 混成堤にすると暴風時に激しい砕波を生ずるかで、直立部の断面を大きくし、かつ外海側の捨石堤のり面を大きな捨石またはコンクリート・ブロックで被覆する必要があるので、防波堤の築造費が非常に高くなる。

それゆえ、深い海中に比較的安かつ短い年月で築造できる防波堤が種々考究されて来たが、最近その一つの提案として円形セルを一列に並べることが考えられるようになった。

まず、運輸省第三港湾建設局神戸港工事事務所においては、昭和34年頃から円形セル型防波堤について種々検討が加えられた結果、36年2月に同港第5防波堤をPCコンクリート製円形セル(直径15.50m)で築造することを始め、現在も引続き実施中である¹⁾。

この計画とほぼ時を同じくして、Denmarkにおいて北海に直面した Hanstholm 漁港の防波堤(水深12m)にコンクリート製円形セル(直径12.50m 壁の厚さ約30cm)を用いることを計画し、オランダの水理実験室で実験を行なっている²⁾。

また直径45m くらいの大型鉄筋コンクリート円形セル(壁厚さ60~90cm くらい、中詰は砂)を9m前後の間隔に海中に設置して防波堤にすることを提案している人もいる³⁾。

以上のようにコンクリート製円形セル型防波堤が考案され、すでに神戸港において実施されているが、円形セルの構造、上、下部セルの接続部などセル自身の構造物としての安定および強度の点においていろいろ研究すべき問題を持っているが、当研究室においては昭和36年以来、波圧、越波、遮蔽効果など主として波の立場から円形

セル型防波堤について研究を行なってきた。現在もなお継続中であるが、今までの検討の結果によりこの形式の防波堤が深い海における防波堤として有効であり、また実施可能であることを確かめることができたので、ここにその概要を述べる。

2. 円形セル型防波堤の問題点

波の立場から見た円形セル型防波堤の問題点は

(1) セル相互の接続部をいかにすべきか。すなわち大型セルを10~30cm²程度の間隔にすえつけることは施工上困難であるので、少なくとも1~3m程度の間隔ですえつけなければならないが、その間隔を接続する方法をいかにすればよいか。実験の結果では、両側の円形セルから接続部に向かって波が集中して部分的砕波を起こすので、接続部における波圧が増大し、かつ跳波が大きくなる。接続部の問題がこの型式の防波堤では最も難しい研究課題であった。

(2) 1個のセルに働く波圧の鉛直方向および円周に沿うての分布および最大同時波圧の合力の計算：この問題は接続部の構造によって異なる。また理論的に求めることはできないので、実験によって求めなければならない。

(3) セル頭部の構造および天端高：セルの中詰には一般に砂が用いられるが、これが波によって持去られないようにセル頭部をコンクリートで蓋をする必要がある。この蓋の上部は Parapet-wall にしなければならないが、Parapet-wall に強い波圧が働くと、セル頭部が破壊される怖れがある。また Parapet-wall の天端高(セル頭部および接続部)をいかにすればよいか。

(4) セル接続部を完全に塞ぐことは施工上困難であるので、ある程度の隙間があくが、この隙間からの波の侵入状況などである。

3. セル接続部について

(1) 接続部を平板にした場合

セル相互を平板で接続した場合については昭和36年に大阪湾防波堤について実験を行なった。⁴⁾ 同防波堤のセルは直径20mで間隔は1.5mであった。長さ25m、幅2.0m、深さ1.0mのコンクリート水槽(無風)で縦横とも

* 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 工学部土木工学科
 *** 正員 大阪市立大学大学院学生(修士課程)

1/25縮尺で実験を行なったが、セル接続部に波が集中し、この部分に部分的碎波を生じ、相当強い波圧が働くとともに、非常に大きな跳波を起こして多量に越波する。この傾向は周期が4~5secの波ほどいちじるしいことが明らかになった。昭和37年は現在築造中の神戸港第5防波堤について同一の水槽を用い、縦横の縮尺1/20で実験を行なった。第5防波堤のセルは直径が15.5mで間隔は3mである。したがって大阪湾防波堤に比してセル直径と間隔との比が相当小さくなっている。実験結果の詳細は同報告書⁵⁾に記したが、要約すると、 $T=4\sim7$ secの波に対して全般的に接続部への波の集中はかなり弱くなり、したがって波圧強度および跳波も減少した。しかしやはり接続部で部分的碎波を生じた。

両種類の防波堤についての実験の結果、セル接続部を平板にすることは接続部への波の集中が強いので不適当であることが明らかになった。

(2) 接続部とセル頂部の中間を平板で仕切った場合

大阪湾防波堤において、セル頂部から2.50m内側にセル天端からD.L.-5.0mまで平板で仕切り、接続部の窪みを浅くして実験を行なったところ、接続部への波の集中はいちじるしく減少し、跳波も減少したが、この隔壁にかなり強い波圧が働いた。しかし隔壁を設けない場合の接続部の平板に働く波圧よりは小さいので、もしこのような隔壁を施工することができれば、接続部への波の集中を減少するには効果的であると考えられた。しかし実際にはこのような隔壁をセルに取りつけることが非常に困難であるのと、仮りに隔壁を取りつけても、両側のセルが波によって異なった振動を行なうために、隔壁およびセル外壁が破壊する危険性があるので、実施することができないと考えられた。

(3) 接続部に大口径の円管を打込んだ場合

まず、セル相互(間隔3.0m)を直径3.0mの円管で接続した場合(図-1参照)について実験を行なったが、その結果、周期 $T=4\sim5$ secの波の場合にはやはり部分的碎波を生じ、相当大きな跳波を生ずるが、平板

図-1 模型設置図
(断面-IIの場合)

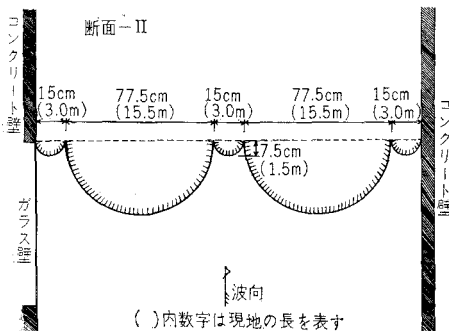
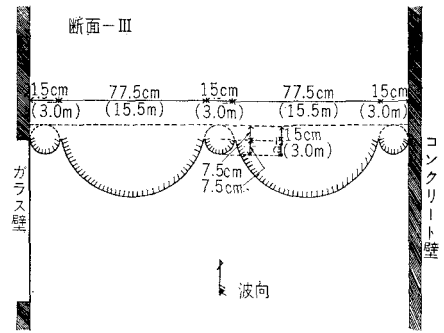


図-2 模型設置図
(断面-IIIの場合)



で接続した場合に比して波圧合力は44~89%に減少した。また跳波もかなり小さくなった。この波圧および跳波の減少は周期が小さい波ほどいちじるしかった。

この実験結果によって最も難問題であったセル接続部における波の集中を軽減する方法が明らかになったので、次の実験においては円管(直径3.0m)の中心を1.5mセルの中心を結んだ面より外海側へ出した場合(図-2参照)について実験した。

その結果、 $T=4\sim5$ secの波の場合にはやはり部分的碎波を生じたが、その波圧および跳波は図-1の場合よりさらに小さくなった。すなわち平板で接続した場合と比較すると波圧合力は30~59%に減少した。

4. セル接続部に円管を打込んだ場合の実験

円形セル型防波堤の最も大きな欠点はセル接続部へ波が集中し、接続部に部分的碎波を生じ、相当大きな波圧および跳波を生ずることである。この接続部における波圧および跳波を減殺するには接続部に大口径の円管を打込むことがきわめて効果的でしかも実施可能な方法であることが明らかになったことはすでに記したごとくである。

この方法を実際に採用するに当り、円管を打込む場所と円管の直径が問題になる。まずここではセル相互の間隔が3.0mの場合について述べる。

神戸港第5防波堤においては円形セルの外径が15.5mでセルの間隔3.0mである。実験は縦横とも実物の1/20の縮尺で行った。実験に用いた潮位および波浪は表-1および2に示すとおりである。

表-1 夏期台風時を対象として実験に用いた潮位および波浪

神戸港潮位 (D.L.+(m))	L(sec)	H (m)	H/L	備 考
3.74	7.1	2.9	0.043	{ 大阪港のD.L.+3.80m に相当し大阪湾防波堤設計 潮位である
"	"	2.5	0.036	
3.20	6.5	3.0	0.052	{ 神戸港設計潮位
"	"	2.5	0.043	

表-2 冬期季節風時を対象として実験に用いた潮位および波浪

潮位 D.L. +(m)	T (sec)	H (m)	H/L
1.53	6.0	2.5	0.050
"	"	2.1	0.041
"	5.1	2.5	0.066
"	"	2.0	0.053
"	4.0	2.0	0.082
"	"	1.4	0.056

防波堤築造場所の水深はほぼ 11m である。

(1) セル相互を直径 3 m の円管で接続した場合 (断面ⅠⅡの場合)

セルおよび円管の配置図は 図-1 に示すとおりである。実験結果のうち、潮位が D.L. +1.53m で、周期 $T_p=6$ sec, 5 sec および 4 sec, 波高 $H_p=2.0\sim 2.1$ m の波のときの円管(頂部)に働く最大同時波圧を示すと 図-3, 4 のごとくである。またそのときの跳波状況は 図-5, 6 および 7 のごとくである。

図-3~7 により明らかなように、 $T_p=6$ sec の場合は重複波であるが、 $T_p=5$ sec および 4 sec の場合には部分的碎波を生じ、波圧および跳波ともかなり大きい。

(2) 直径 3 m の円管の中心をセルの中心面から 1.5 m 外海側へ出して打込んだ場合 (断面ⅠⅢの場合)

図-2 に示すような位置に円管を打込んだ場合に 図-1 の場合と同様の実験を行なった。それらの実験のうち、潮位が D.L. +1.53m で、 $T_p=6$ sec, 5 sec および

4 sec, $H_p=2.00\sim 2.10$ m の波のときの円管に働く最大同時波圧を示すと 図-8, 9 および 10 のごとくである。またそのときの跳波の状況を示すと 図-11, 12 および 13 のごとくである。

図-8~13 から明らかなように、この場合にも断面ⅠⅡの場合と同様、 $T_p=6$ sec の波は重複波であるが $T_p=5$ sec および 4 sec の波のときは部分的碎波を起している。しかしその碎波は非常に弱いものである。

(3) 直径 3 m の円管の中心をセルの中心面から 1.90 m 外海側へ出して打込んだ場合 (断面ⅠⅣの場合)

この場合のセルおよび円管の配置図は 図-14 のごとくである。円管とセルとのすき間は両側とも 20cm である。これは実際に円管を打込むときに必要な最小の間隔であろう。

図-14 のような配置で表-1 および 2 に示すような実験を行ない、円管の頂部、セル頂部および側壁(側面ⅠおよびⅡ 図-23 参照)において 6 個の波圧計を同時に用いて最大同時波圧を測定した。

潮位 D.L. +3.20m および +1.53m の場合の最大同時波圧の分布を示すと 図-15~19 のごとくである。また 図-17, 18 および 19 の場合の波の状況を示すと 図-20, 21 および 22 のごとくである。

図-17~22 によれば、 $T=6\sim 4$ sec の波においても接続部ではほとんど部分的碎波を生ぜず、重複波と考へて

図-3 最大同時波圧の分布

$T_p=6.0$ sec
 $H_p=2.10$ m

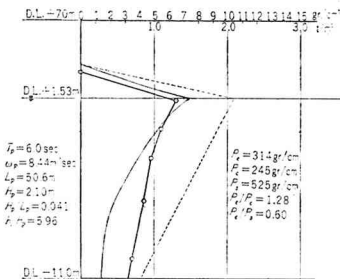


図-4 最大同時波圧の分布

$T_p=5.1$ sec
 $H_p=2.0$ m

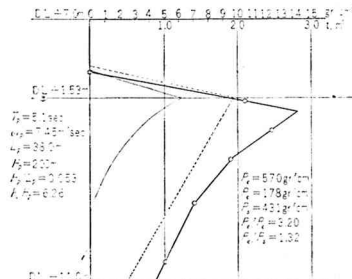


図-5 波の状況

$T_p=6.0$ sec
 $H_p=2.1$ m

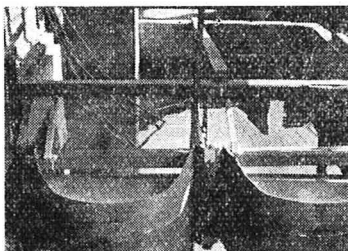


図-6 波の状況

$T_p=5.1$ sec
 $H_p=2.0$ m

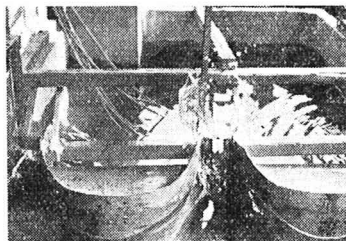


図-7 波の状況

$T_p=4.0$ sec
 $H_p=2.10$ m

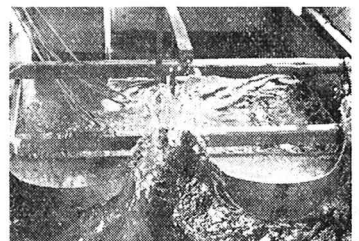


図-8 最大同時波圧の分布

$T_p=6.0\text{sec}$
 $H_p=2.10\text{m}$

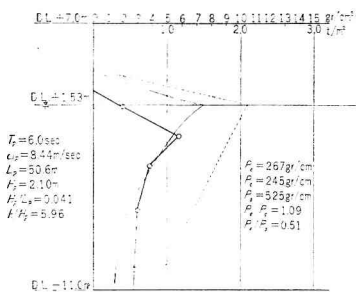


図-9 最大同時波圧の分布

$T_p=5.1\text{sec}$
 $H_p=2.0\text{m}$

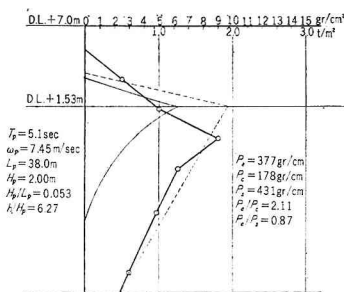


図-10 最大同時波圧の分布

$T_p=4.0\text{sec}$
 $H_p=2.1\text{m}$

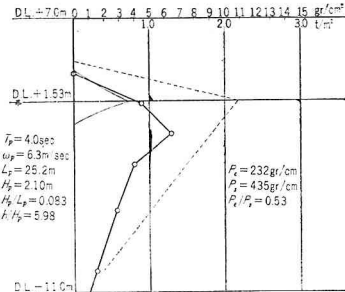


図-11 波の状況

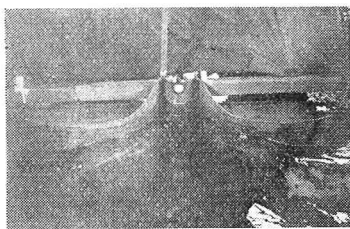


図-12 跳波の状況

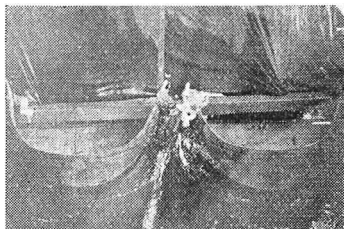


図-13 跳波の状況

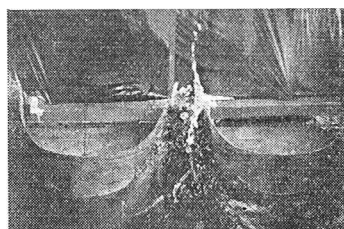


図-14 模型配置図

(断面Ⅳの場合)

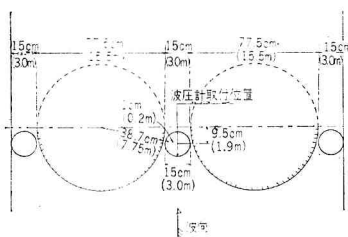


図-15 最大同時波圧の分布

(円管の頂部)
D. L. +3.20m
 $T_p=7.1\text{sec}$
 $H_p=2.64\text{m}$

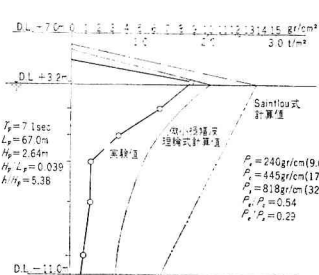


図-16 最大同時波圧の分布

(円管の頂部)
D. L. +3.20m
 $T_p=6.5\text{sec}$
 $H_p=2.46\text{m}$

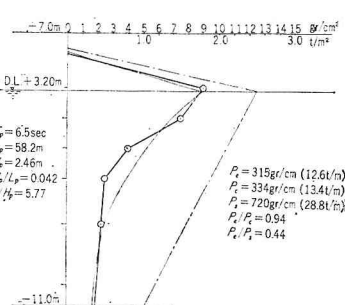


図-17 最大同時波圧の分布

(円管の頂部)
D. L. +1.53m
 $T_p=6.0\text{sec}$
 $H_p=1.94\text{m}$

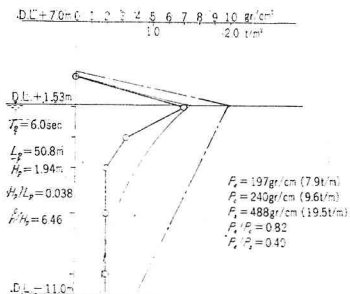


図-18 最大同時波圧の分布

(円管の頂部)
D. L. +1.53m
 $T_p=5.0\text{sec}$
 $H_p=2.08\text{m}$

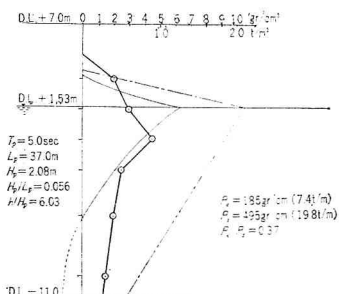


図-19 最大同時波圧の分布

(円管の頂部)
D. L. +1.53m
 $T_p=4.0\text{sec}$
 $H_p=2.02\text{m}$

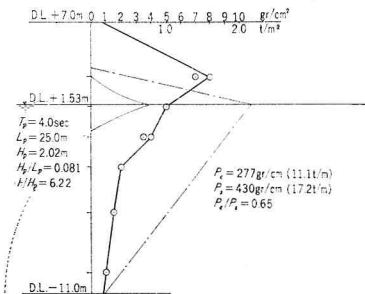


図-20 波の状況

D. L. +1.53m
 $T_p=6.0\text{sec}$
 $H_p=1.94\text{m}$

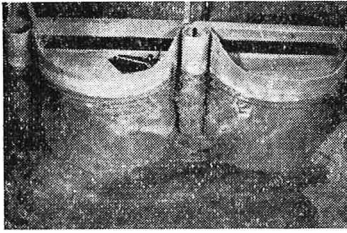


図-21 波の状況

D. L. +1.53m
 $T_p=5.0\text{sec}$
 $H_p=2.08\text{m}$

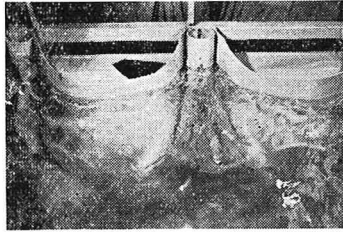
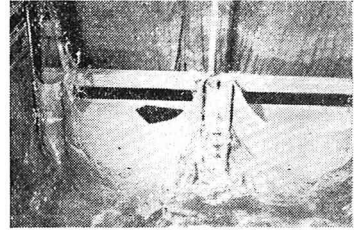


図-22 波の状況

D. L. +1.53m
 $T_p=4.0\text{sec}$
 $H_p=2.02\text{m}$



よい。いちじるしい跳波も起こっていない。

接続部が平板の場合に比して、 p_{max} の値は26~86%に、 P の値は25~58%に減少している。また断面一Ⅲの場合に比較すると、 p_{max} の値は $T=5\text{sec}$ の波以外では22~73%増大しているが、 p_{max} の最大値は僅かに 1.9t/m^2 ($T=6.5\text{sec}$, $H=2.90\text{m}$ のとき)である。 P を比較すると、 $T=7\text{sec}$, および 4sec の波のときはわずかに増大しているが、 $T=6.5\text{sec}$, 6sec および 5sec の波のときは46~92%に減少している。

以上の結果より、断面一Ⅳ(図-14)のような位置に円管を打つことは、円管に働く波圧および跳波がいちじるしく減少するので、円形セル接続部における波の集中を減殺するにはきわめて有効にしてかつ実施可能な方法であるということができよう。

参考までに、円管頂部における波圧合力を平面直立壁の場合の波圧と比較すると、 $T=7\text{sec}$ の波においては平面直立壁の波圧のほぼ $1/2$ 、 $T=6.5\text{sec}$ の波ではほぼ90%、 $T=6\sim 4\text{sec}$ の部分的碎波を起こす場合にはほぼ $1/3\sim 1/2$ 程度である。

5. 円形セルの側面に働く波圧

断面一Ⅳ(図-14)のような位置に円管($\phi 3\text{m}$)を打込んだ場合に、セルの頂部、側面一ⅠおよびⅡ(図-23)に働く波圧を測定した。これらの実験結果のうち、潮位がD. L. +3.20mおよび+1.53mの場合の最大同時波圧を示すと、図-24~27のごとくである。ただし側面一ⅠおよびⅡの波圧は円周面に垂直方向(中心軸方向)の圧力である。

図-24~27により明らかなように、セル頂部および側

図-23 円形セル側面における波圧計取付位置

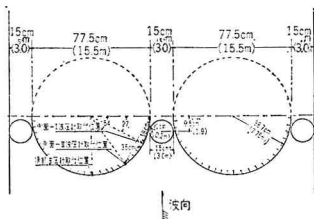


図-24 最大同時波圧の分布

D. L. +3.20m
 $T_p=7.1\text{sec}$
 $H_p=2.64\text{m}$

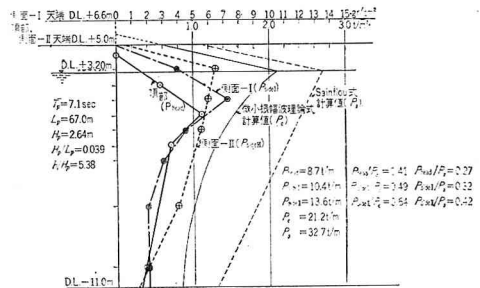


図-25 同上

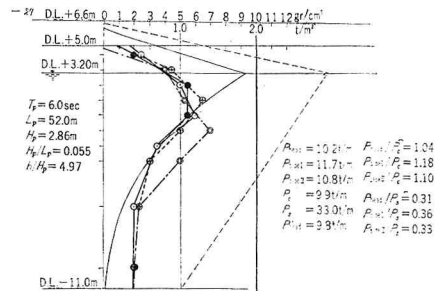
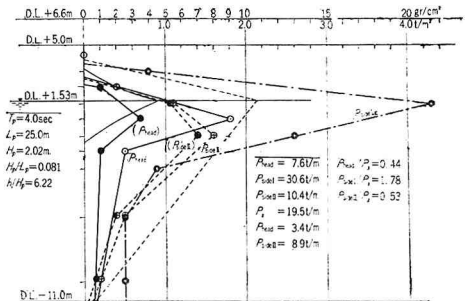


図-26 同上



面一Ⅰ、Ⅱにおける波圧(中心軸方向)の大きさは、微小振幅波理論による重複波圧式が適用できる。 $T \geq 6.5\text{sec}$ の波においては、一般に理論式による計算値 P_0 より小

さく、41~95%である。これは円形セルの効果によるもので、反対にセルの接続部に波が集中するわけである。周期 $T=6\sim4$ sec の波のときには $T=7\sim6.5$ sec の波よりも波圧は増しているが、大部分の場合においては部分的碎波が起こらず、波圧も小さい。ただし側面一I (円管に近い部分) においては、 $T=6\sim4$ sec の波のときに水面付近に部分的碎波が起こっている。特に $T=5$ sec および 4 sec の波のときには相当大きな衝撃圧力が働いている (図-27)。すなわち $T=4$ sec, $H=2$ m の波においては水面付近に $p_{max}=4.3$ t/m² の衝撃圧力が働き、そのときの最大同時波圧の合力 $P=30.6$ t/m である。これ

おける波圧は平面直立壁の場合の波圧と比較して $1/2\sim 2/3$ 程度である。

図-24~27 によれば、一つの潮位および波の場合に、セル頂部、側面一I および II における最大同時波圧の分布並びに3つの p_{max} の大きさおよび位置が多少異なっている。それゆえ、3つの p_{max} のうちの最大の p_{max} が起こった時刻における頂部、側面一I および II における同時波圧の分布を求め、その合力の値を3つの測点上に Vector で記入すると 図-27のごとくである。

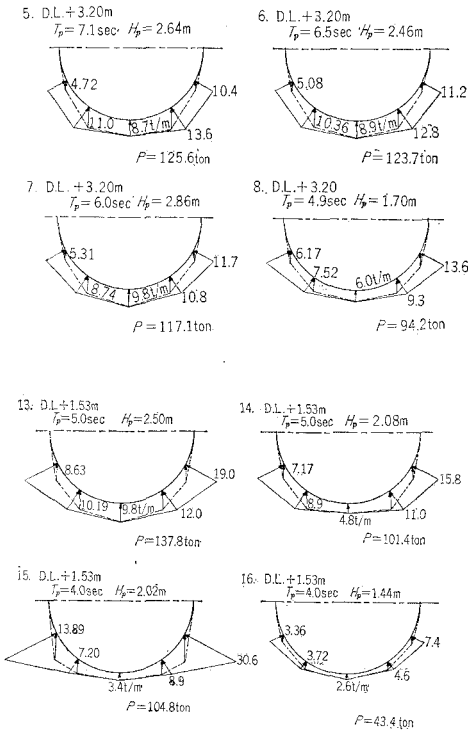
図-27 より、防波堤法線に直角方向 (波の侵入方向) の最大同時波圧の合力 P (水底 D. L. -11m から波頂まで) を求めると 表-3のごとくである。

表-3 セル全側面 (港外側) に働く波圧合力

No.	D. L. + (m)	T_p (sec)	L_p (m)	H_p (m)	H_p/L_p	波圧合力 P (ton)
1	3.74	7.1	68.0	3.00	0.044	144.2
2	"	"	"	2.49	0.035	121.7
3	"	6.5	58.0	2.90	0.050	142.0
4	"	"	"	2.50	0.043	120.2
5	3.20	7.1	67.0	2.64	0.039	125.6
6	"	6.5	58.2	2.45	0.042	123.7
7	"	6.0	52.0	2.85	0.055	117.1
8	"	4.9	37.6	1.70	0.045	94.2
9	1.53	7.1	66.6	2.10	0.032	124.9
10	"	6.5	60.0	3.10	0.052	115.3
11	"	6.0	50.8	2.50	0.049	114.3
12	"	"	"	1.94	0.038	83.7
13	"	5.0	37.0	2.50	0.068	137.8
41	"	"	"	2.08	0.056	101.4
51	"	4.0	25.0	2.02	0.081	104.8
16	"	"	"	1.44	0.058	43.4

参考文献

- 1) 第三港湾建設局神戸港工事事務所：神戸港第5防波堤工事について、昭和37年11月。
- 2) Lundgren, H.: A New Type of Breakwater for Exposed Positions, Dock & Harbour Auth., Nov., 1962.
- 3) Waller, W.: Butts for sea Defences and Jetties, Dock & Harbour Auth Aug., 1962.
- 4) 永井荘七郎：大阪湾防波堤に衝突する波の圧力並びに衝突波形に関する研究報告、昭和37年3月。
- 5) 永井・玉井・西村：神戸港第5防波堤に関する研究報告書、昭和38年3月。



らの値は断面一IVの配置においてセル側面に働く波圧のうちで最大であって、セル側壁の設計などにおいて考慮すべき波圧資料である。この場合を除けば、セル側面に