

衝突波の二、三の特性について

—羽幌港における実測による—

森 勝 平*・村 木 義 男**・南 英 二***

1. ま え が き

進行してくる波が構造物にさえぎられた場合に生ずる衝突波の研究は海岸構造物設計上重要である。これに関する従来の研究として、Kaplan¹⁾、Ganthem²⁾、Saville³⁾ 建設省土木研究所⁴⁾、京大防災研究所⁵⁾ などによる諸研究があるが、これらはいずれも理論的なものもしくは室内実験的なもので、実際の構造物についての実測による研究はあまりなされていない。

筆者らは羽幌港において衝突波の実測を行ない、沖波、衝突波、波圧相互の関係について二、三考察したので、ここにその結果を報告する。

2. 観 測 方 法

実測を行なった羽幌港は北海道の西海岸、日本海に面した地方港湾である。本港は図-1に示すような形状をなし、現在離岸堤工事が実施されている。図にみる観測所から約 800 m 沖のO点における波高をトランシット

図-1

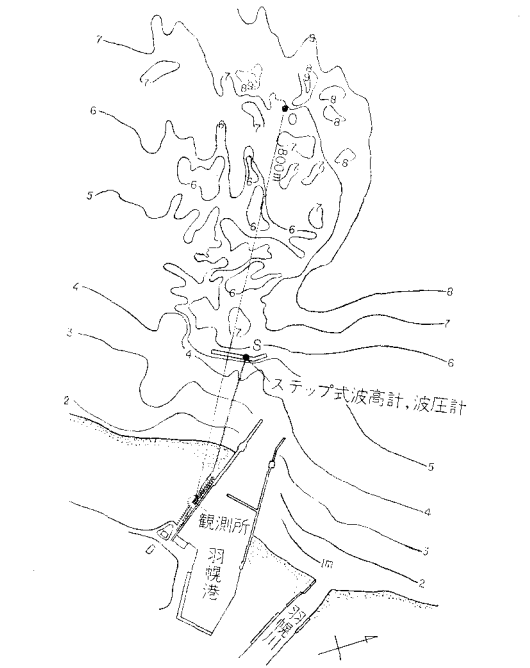
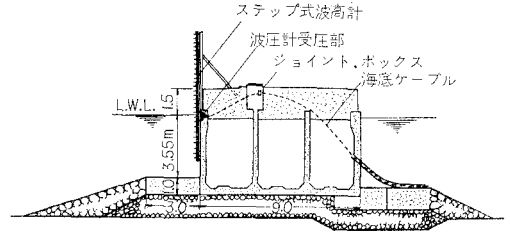


図-2 防波堤断面図



追尾式波高計(宇田居式波高計)により、防波堤壁面における衝突波高を筆者考案のステップ式波高計⁷⁾により測定した。両者は同時測定である。O点における水深は約 7 m, S 点直前水深は約 6 m, この間の海底勾配はほぼ 1/450 である。干満差は年間最大 40 cm 程度である。観測の対象となった波は昭和 35 年 11 月から 12 月にかけての風波である。

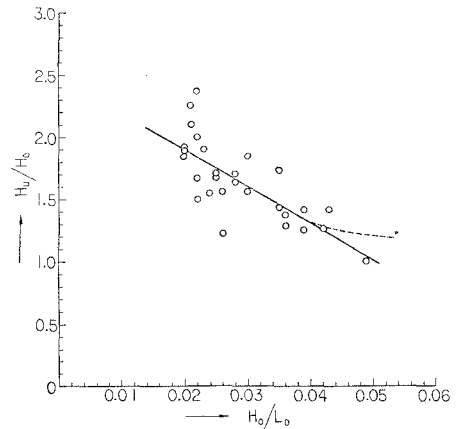
図-2 は計器取り付けに使用した防波堤の断面形状を示すものである。

3. 衝突波頂高と沖波波高との関係

観測結果を一括して表-1に示した。沖波波高、衝突波高いずれも 20 分観測についての 1/3 最大平均である。また沖波波形勾配は 1/3 最大周期と水深とから波長を算出し、この波長を用いて求めたものである。沖波とは今の場合O点における波のことである。

防波堤に衝突して生じた衝突波の静水面上の高さ、すなわち衝突波頂高 H_u と沖波波高 H_o との関係を示すと図-3のとおりである。この図から、両者の比 H_u/H_o 。

図-3



* 正員 北海道開発局港湾建設課長
 ** 正員 工博 同 土木試験所
 *** 正員 同 港湾建設課

表-1

沖波波高 H_0	沖波波形勾配 H_0/L_0	衝突波全波高 H_s	衝突波頂高 H_u	H_u/H_s	H_s/H_0	H_u/H_0
0.9m	0.022	2.0	1.5	0.75	2.22	1.67
1.1	0.043	2.3	1.7	0.74	2.09	1.42
0.5	0.022	1.0	1.0	1.00	2.00	2.00
1.4	0.028	2.9	2.3	0.79	2.07	1.64
1.9	0.042	3.1	2.4	0.77	1.63	1.26
2.0	0.039	3.6	2.5	0.70	1.80	1.25
0.8	0.022	2.7	1.9	0.71	3.37	2.37
0.9	0.026	1.7	1.1	0.65	1.89	1.22
1.8	0.049	2.5	1.8	0.72	1.39	1.00
0.6	0.022	1.3	0.9	0.69	2.17	1.50
1.1	0.035	2.2	1.9	0.86	2.00	1.73
1.6	0.035	3.3	2.3	0.70	2.06	1.43
1.6	0.036	2.6	2.2	0.84	1.62	1.37
2.1	0.036	3.7	2.7	0.73	1.76	1.28
1.7	0.039	4.0	2.4	0.60	2.35	1.41
1.6	0.025	3.8	2.7	0.71	2.37	1.68
1.7	0.037	3.2	2.3	0.72	1.88	1.35
1.6	0.030	3.4	2.5	0.74	2.12	1.56
1.3	0.030	2.8	2.4	0.86	2.15	1.84
1.7	0.028	3.8	2.9	0.76	2.23	1.70
0.9	0.020	2.2	1.7	0.77	2.44	1.89
1.0	0.023	1.9	1.9	1.00	1.90	1.90
1.8	0.024	3.7	2.8	0.76	2.05	1.55
1.3	0.020	3.3	2.4	0.73	2.54	1.84
1.2	0.020	3.1	2.3	0.74	2.82	1.91
1.2	0.021	3.5	2.7	0.77	2.92	2.25
1.0	0.021	2.2	2.1	0.95	2.20	2.10
1.5	0.026	—	2.3	—	—	1.56

は沖波波形勾配 H_0/L_0 と密接な関係にあり、波形勾配が小さくなるにしたがって H_u/H_0 の値は大きくなることわかる。すなわち、波形勾配 0.04 では衝突波頂高は沖波波高の約 1.3 倍、波形勾配 0.02 では約 1.9 倍となっている。この傾向は、浅い水深における垂直壁および傾斜面に対する衝突波高、遡上高の模型実験^{3), 6), 8)} では明らかに認められている。深い水深の場合でも(水深/波高 >3)、傾斜面に対する実験では認められており、その傾斜が急になるほどその程度は小さくなるが、やはりこの傾向がある⁸⁾。このことから水深大なる垂直壁の場合でも、ある条件のもとではこのような傾向の示される場合があると考えられる。この点についてはさらに検討が必要であると思うが、ともかく実測結果として上記の傾向が明らかに認められた。

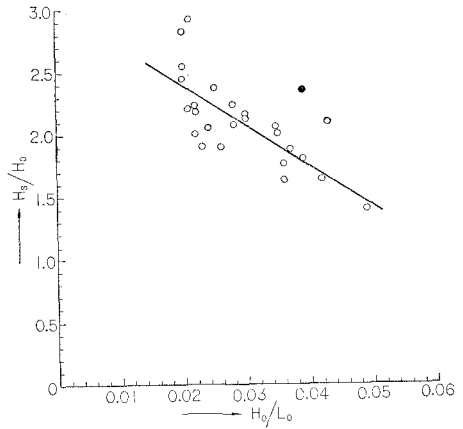
図-3 の直線を実験式で示せば

$$\frac{H_u}{H_0} = -30 \frac{H_0}{L_0} + 2.5$$

である。図-3 のプロットは曲線で示されるのが適当と思われるが簡単のため直線で示した。表-1 に示してあるように、観測された沖波波高の範囲は 0.6~2.1m であり、また天端高 $h_t=1.5$ m、水深 $h=6$ m であることから、防波堤の形状が当港防波堤とほぼ類似の形状であれば、波形勾配 0.02~0.04 の範囲の風波に対しては、 $10>h/H_0>3$, $3>h_t/H_0>0.75$ の条件のもとで上式を用い衝突波高を求めてもさしつかえないものと思う。

衝突波の全波高 H_s と沖波波高 H_0 との関係を示すと図-4 のとおりである。衝突波頂高の場合と同様、波形勾配の減少とともに H_s/H_0 の値が大となる傾向が認められる。すなわち $H_0/L_0=0.02$ では約 2.4 倍、0.04 では約 1.7 倍となっている。Greslon および Mahe の実験では波形勾配が増大すると反射率が減少する結果を示しているようであるが⁶⁾、傾向としてはこれと一致し

図-4

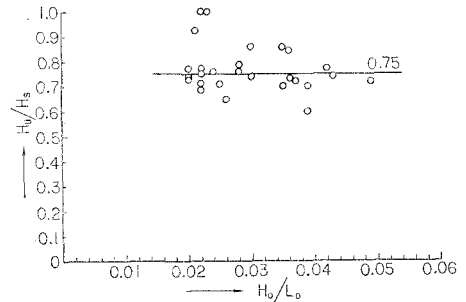


ているといえよう。

4. 衝突波頂高と衝突波全波高との比

衝突波頂高 H_u と衝突波全波高 H_s との比を沖波波形勾配 H_0/L_0 を横軸として示すと図-5 のとおりである。プロットした点はばらついてはいるが、波形勾配 0.02~0.05 の範囲の波に対しては波形勾配にほとんど関係なくほぼ一定の値をとるとみてよい。その値として平均値をとるとほぼ 75% である。

図-5



一般に、進行してくる波の静水面から波頂までの高さは、砕波点より沖では有限振幅波の理論からも求められ、実験値とも比較的良好一致をみており、その値は 50~60% である。砕波点では約 75% とみるのが適当とされている。今の場合は衝突波であるが、完全な反射波(重複波)と考えれば、やはり 50~60% の値をとることになる。われわれの実測結果では 75% でこれとはかなりの違いがあるが、これは、実際の衝突波は理想的な完全反射とは性質を異にしたほかの要素をふくんでいるためと考えられる。現地条件が当港とほぼ類似の場所であれば、われわれが得たこの 75% という値を適用してさしつかえないであろう。

5. 越波を許さない天端高

一般に越波の限界は

- ① 波はもちろん飛沫もまったく越えない場合
- ② 波は越えないが飛沫は越える場合
- ③ 波そのものが流れとなって越える場合

の3つの場合に区分されている³⁾。このうちどれを天端高決定の基準にとるかは背後地の条件によりきまることであるが、いまの場合②の基準にしたがって実測結果を考察する。

3. で述べたように、衝突波頂高と沖波波高との比 H_u/H_0 は波形勾配により異なり、実測された波、すなわち波形勾配 0.02~0.04 の波に対しては H_u/H_0 の値は 1.9~1.3 の値をとる。したがって、②の基準にしたがえば、これらの波に対する天端高は沖波波高の 1.3~1.9 倍、最悪条件をとれば 1.9 倍のものが必要となる。また、したがって波形勾配 0.04 の波に対しては天端高の 77% までの、0.02 の波に対しては 53% までの沖波は越波を生じないことになる。本港の天端高は 1.5 m であるから越波を生じない波は波形勾配 0.04 では 1.15 m, 0.02 では 0.8 m である。

現在アメリカ、フランス、スペインなどで多く用いられている式⁸⁾は

$$H_u = 1.25 H$$

H : 壁のない場合のその位置における波高

で、 H を沖波にとれば 1.25 より多少大きくなる。また模型実験^{9), 10)}によれば H_u/H_0 の最大値は 1.4 ぐらいとなっている。これにくらべると、われわれの結果は波形勾配小なる場合はかなり大きな値を示すことになる。

今、設計波高を周期 10 秒、波高 4.5 m とすれば、波形勾配は 0.058 となる。波形勾配 0.04 以上の実測資料がほとんどないのでこれの適用は困難であるが、図-3 で示した関係が波形勾配大なる部分については点線で示した曲線で表わされるものとすれば、 $H_u/H_0 \approx 1.2$ で天端高は沖波波高の 1.2 倍となり上記した 1.25, 1.4 とほぼ近い値を示す。この場合、設計波高は 4.5 m であるから所要の天端高は 5.4 m となる。

前節で衝突波頂高と衝突波全波高との比が波形勾配にほとんど関係なくほぼ一定の値 0.75 であることを示したがこれを重複波に適用して所要天端高を求めてみる。進行する波が防波堤により完全に反射するものと考え、重複波波高は沖波波高の 2 倍すなわち $2H_0$ となる。静水面上高さはその 75% であるから、 $H_u = 2H_0 \times 0.75 = 1.5H_0$ となり所要天端高は沖波の 1.5 倍となる。この値は図-3 の波形勾配 0.03 の H_u/H_0 の値にほぼ等しい。いいかえれば、われわれの観測した波の平均衝突波頂高 $1.6H_0$ にほぼ近い値を与え

る。また、反射率 80% とすれば $H_u = 1.25H_0$ となりわれわれの実測した波形勾配 0.04 以上の波の場合によく一致する。したがって、先にふれた Greslon, Mahe の実験結果を考慮すれば、0.04 以上の波に対しては、われわれの実測結果にかなりよい一致が期待できそうである。前にも述べたように、衝突波全波高は波形勾配に関係し、われわれの観測範囲では沖波波高の 1.75 倍から 2.4 倍である。普通波の反射を考えた場合 2 倍以上にはならないはずである。しかし実際には 2 倍以上のものが観測されている。この事実、実際の衝突波は単純に反射波(重複波)のみで解釈するのは至当でなく、衝突にともなう飛び上がり効果をもたらす、ほかの要素を考慮合わせることが必要であるように思う。その意味でつぎに J.J. Stoker の理論^{11), 12)}、すなわち衝撃波の垂直壁による反射理論を適用してみると、波高 0.5 m で衝突波頂高は沖波波高の 1.65 倍、波高 2 m では 1.78 倍となる。これには波形勾配を考慮していないのであるが、われわれの場合の波形勾配の小さい場合、すなわち 0.03~0.02 の波に対しよく一致している。

以上のことを総合すると、観測された範囲の波については、波形勾配の小さい波(衝突波全波高が沖波波高の 2 倍近く、またはこれ以上となる)には衝撃波の扱いをした Stoker の理論がよく合い、波形勾配の大なる側の波については重複波として扱ったものがよく合っているといえる。

われわれが実測に用いた防波堤の天端高は 1.5 m で、すでに越波をゆるしているのであるから、このような条件のもとでの資料をもって越波を許さない垂直壁の場合の重複波、Stoker の理論と比較するのは無意味のようにも思われるが、近似的には許されるものと思う。

6. 衝突波頂高と波圧との関係

ステップ式波高計と静水面に取りつけた波圧計とにより、波が防波堤に衝突したときの衝突波頂高と波圧とを

図-6

図-7

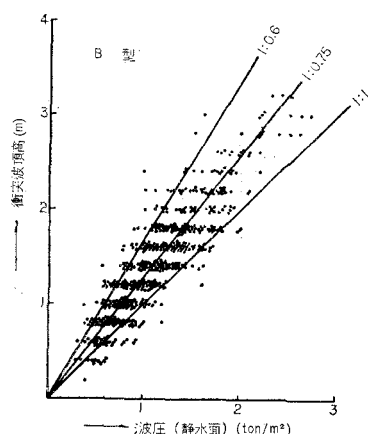
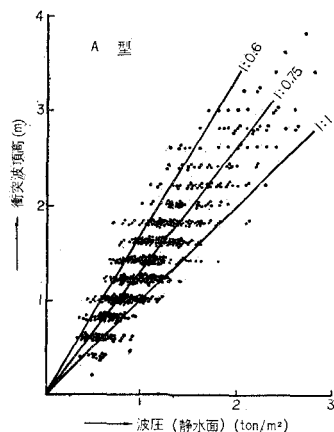


図-8

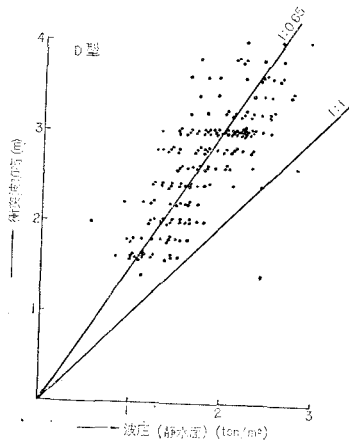
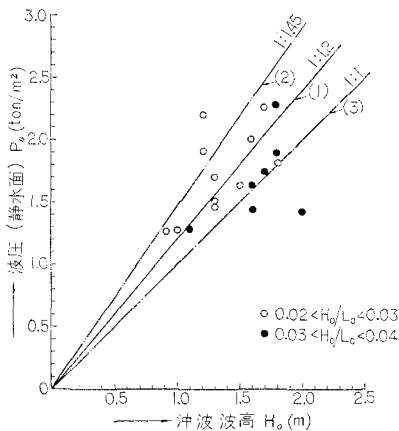


図-9



同時測定し、各一波一波について両者の関係を調べてみた。その結果は図-6～図-8のとおりである。図-6は重複波形波圧で波形が前傾のもの、図-7は同じく重複波形で波形が前後対称のもの、図-8は砕波形波圧に関するものである。これらの図からわかるように、重複波形波圧では、静水面における波圧は衝突波頂高のほぼ75%であり、砕波形波圧ではほぼ65%である。衝突波頂高が完全に静水圧として働けば100%の波圧が得られるはずであるが、進行する実際の波は周期波であり、さらに衝突波は上向きの飛び上がり効果をもっているために、衝突波頂高相当静水圧より下まわる値を示すものと思われる。

自然の海において砕波形波圧は、たまたまある条件がそろえば突然発生する特異現象とみるべきであるから、砕波形波圧を生ずるような衝突波も一般の衝突波とは様子を異にし、その飛び上がり高も異状が多い。このようなことから、砕波形波圧の場合は衝突波頂相当静水圧よりかなり小さい65%という値を示すものと思われる。

7. 沖波波高と波圧との関係についての考察

同じ羽幌港において沖波波高と波圧（静水面）とを同時観測し、1/3 最大平均について両者の関係を調べてみた。表-2 および図-9はその結果を示したのである。図-9 からわかるように、プロットした点はばらつきが大きい、これらの平均をとれば図中(1)なる直線で示され、 $P_0=1.2 H_0$ なる関係を得る。

一般に沖波波高と波圧との関係は、純理論的、または室内実験的には波圧公式と称され多数出されているが、実際の海岸でも、これらの公式がそのまま使用できるのか、確とした結果は出されていない。われわれの場合、上記したように沖波波高の1.2倍という結果を一応得たが、図からわかるようにばらつきが大きく、信頼性において疑問がもたれる。そこでこのばらつきについて検討したところ、前に述べた波形勾配と衝突波頂高との関係および衝突波頂高と波圧との関係により、これが説明されることがわかった。

表-2

H_0	P_0	H_0/L_0
m	t/m ²	
1.7	0.29	0.028
1.8	1.81	0.024
1.3	1.71	0.020
1.2	1.91	0.020
1.2	2.20	0.021
0.9	1.24	0.020
1.0	1.27	0.022
1.5	1.63	0.027
1.3	1.50	0.026
1.6	1.43	0.032
1.3	1.48	0.029
1.1	1.29	0.035
1.6	1.63	0.035
2.0	1.42	0.039
1.7	1.74	0.039
1.8	1.89	0.034
1.6	2.00	0.025
1.8	2.26	0.033

図-9 のプロットした点を波形勾配により区別すると波形勾配が比較的小さい値 0.02～0.03 の範囲にある波（○印）は(1)なる直線の近くか、もしくは上側に、波形勾配の比較的大きい 0.03～0.04 の波（●印）は(1)なる直線の近くか、もしくは下側にあり、波形勾配の小さい波ほど大きな波圧を示し、両者の領域は明瞭に区分されている。今、図-9 に用いられた波のほぼ平均の波形勾配 0.03 をとり、図-3 により衝突波頂高を求めると沖波波高の1.6倍となる。図-6,7 に示してあるように静水面における波圧は衝突波頂高のほぼ75%であるから、これを用いて沖波波高と波圧との関係を求めると、 $P_0=1.6 H_0 \times 0.75=1.2 H_0$ となる。これは直接測定により求めた図-9の全体の平均をとった(1)なる関係直線と一致する。図-9 に示されている波の波形勾配は0.02～0.04の範囲であり、(1)なる直線の付近には○●両印のプロットがあることからわかるように、この部分の波形勾配はほぼ0.03に近いものであるから、(1)なる直線は実は波形勾配がほぼ0.03なる波に対する関係を示すものと考えた方が至当である。

つぎに波形勾配 0.02 (図-9 に用いた波形勾配小なる方の限界)をとると、図-3 より $H_u=1.9 H_0$ となり、前と同様にして $P_0=1.9 H_0 \times 0.75=1.42 H_0$ となり図の(2)なる直線で示され、波圧のほぼ上限を示す。こ

の部分は波形勾配の小さい方の限界であるから直接測定で求めた関係とよく一致する。また波形勾配 0.04 (波形勾配大なる方の限界) をとり、前と同様にして波高と波圧との関係を求めると $P_0 = 1.3 H_0 \times 0.75 = 0.98 H_0$ となり (3) なる直線で示され、波圧のほぼ下限を示し、直接測定により求めた関係とよく一致する。波形勾配 0.025 および 0.035 をとり同様にして波高と波圧との関係を求めると、それぞれ (1), (2) の, (1), (3) の中間の直線で示され、それぞれ○印プロット, ●印プロットの平均の関係を示す。

このように波高と波圧との関係はよく説明づけられ、実測結果のばらつきは測定法によるものでなく、現象そのものであることがわかる。

8. むすび

従来あまり試みられたことのない実測的立場から衝突波の考察を行ない、沖波、衝突波、波圧相互の関係について二、三の結果を得たが、これまでに観測された波は比較的波高の小さい波 (2 m 以下) であるため、波形勾

配の大なる領域については明らかでない。今後は波高の大きい波の観測に意を用い、これらの関係をさらに検討したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) Kaplan, K. : Effective Height of Seawalls, The Bulletin of the Beach Erosion Board, Corps of Engineers, Dept. of the Army, Vol. 6, April (1952).
- 2) Grantham, K.N. : Wave Run-up on Sloping Structures, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 34, No. 5, Oct. (1953).
- 3) Saville, T. Jr. : Wave Run-up on Shore Structure, Proc. A.S.C.E., Vol. 82, W.W. 2 (1956).
- 4) 佐藤清一・岸 力 : 海岸堤防に関する研究(1), 土木研究所報告, 第 88 号, (昭. 29. 9)
- 5) 佐藤清一 : 海岸堤防の設計について, 土木学会海岸工学研究発表会論文集, (昭. 29. 11)
- 6) 石原藤次郎・岩垣雄一・鈴木雄太 : 海岸堤防の設計, 特にその有効高について, 海岸工学講演会講演集, (昭 30.11)
- 7) 村木義男・鎌田新悦・海谷利一 : ステップ式波浪計の改良について, 北海道開発局土木試験所月報, 第71号, (1959)
- 8) 土木学会 : 海岸保全施設設計便覧, (昭. 32)
- 9) Stoker, J.J. : Water Waves, Institute of Mathematical Sciences, New York University.