

砕波の波圧と力積

中央大学工学部教授 工学博士 林 泰 造
同 大学院学生 服 部 昌 太 郎
同 工学部 林 憲 吉

まえがき 砕波の実験を筆者等は昭和 31 年度以来行なっており、主としてその圧力についての研究を行なってきた¹⁾²⁾。本報においては、それに継続してさらに、砕波の入射する構造物の弾性的な性質を考慮し、構造物の弾性特性に応じた砕波の波圧のとり方についての研究を示そうとするものである。

記 号

p : 圧力の強さ	p_m : 衝撃時の最大圧力	p_0 : 静圧
ρ : 海水の密度	I : 単位面積当りの力積	H : 全波高 (波底から波頂まで)
t : 時間	U : 波の伝播速度	U_1 : 衝突時の波速
g : 重力の加速度	d_1 : 捨石天端までの水深	d : 捨石底面までの水深
T_s : 衝撃波の継続時間	T_0 : 構造物の固有周期	$n = T_s/T_0$
D : 空気塊の厚さ	w : 海水の単位容積重量	λ : 波長
φ : 衝撃係数	y : 高さ (静水面を 0 とし鉛直上方を正とする)	
h_1 : 衝突時の波高	f : 頻度	S : 浜勾配

1. 砕波の波力に関する従来の諸研究

砕波の波力の研究として従来発表されているものの中、主なるものを一覧とすると表—1 のようである。

表—1 砕波の波力計算式および図表の一覧

砕 波 の 波 圧		砕 波 の 力 積
初 期 衝 撃 圧 力	腰掛部圧力あるいは平均的圧力	
Bagnold ³⁾ $\frac{p}{w} = 0.54 \frac{H}{D} \frac{U^2}{g}$	広井 (平均的圧力) ⁹⁾ , $\frac{p}{w} = 1.5 H$	Bagnold ³⁾ , $I \cong 0.2 \rho U H$.
Minikin ⁴⁾ , $p = p_m - p_m \left[1 - \left(\frac{H-2y}{H} \right)^2 \right], -\frac{H}{2} < y < \frac{H}{2},$ $p_m = 102.4 d_1 \left(1 + \frac{d_1}{d} \right) \frac{H}{\lambda}.$ 他に静圧を考慮する	Larras (腰掛部圧力) ¹⁰⁾ 省 略。 林・服部 (腰掛部圧力) 文献 2) 図—8 浜田・光易・長谷 (平均的圧力) ¹¹⁾ , $\frac{p}{w} = 1.2 H$, 天端高 $0.3 H$ のとき。 $\frac{p}{w} = 1.5 H$, 天端高十分高いとき。	Denny ⁵⁾ , 図—6 参照。 Ross ⁶⁾ , 図—7 参照。
Denny ⁵⁾ , 図—1, 図—2 参照。		
Ross ⁶⁾ , 図—3 参照。		
Rundgren ⁷⁾ , 図—4, 図—5 参照。	永井 (平均的圧力) ¹²⁾ $p = \left(2.50 - \frac{2y}{H} \right) p_0$, 静水面上。 $p = 2.50 p_0$, 静水面下 ただし $p_0 = \frac{w}{g} U_1^2$	
北海道開発局 ⁸⁾ , 省 略。		

2. 従来の砕波の波圧公式についての一般的な問題点

表—1 に記載されたもののうち、現在設計上実際に使用されているものは波圧の諸式であつて、力積の諸式は実際には直接使用されていないようである。しかし波圧公式についてもなお一般的な問題点は残されているように思われるのであつて、例えばつぎのような諸点が考えられる。

(a) 波圧の継続時間について

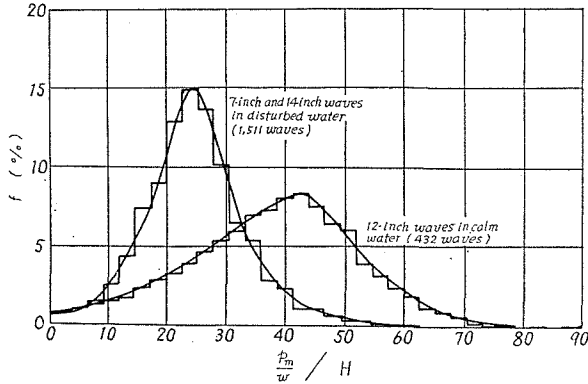
砕波の波圧の継続時間は一般にかなり短かいのがその一つの特徴である。砕圧が大であつても継続時間が十分小であれば、力の効果を生じない筈であるが、従来の砕波の公式は時間の要素を考慮せず、一応単に波圧の絶対値だけを規定している。

(b) 初期衝撃圧力といわゆる腰掛圧力との関係について

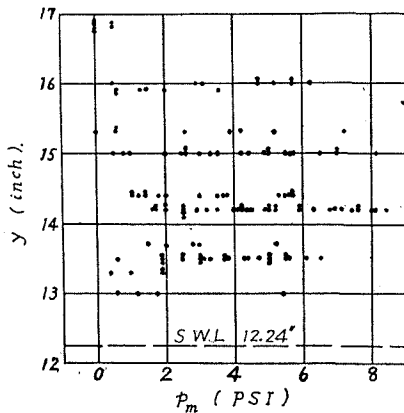
従来の砕波の波圧公式は、初期衝撃圧または腰掛部圧力、あるいはそれらの平均的圧力のいずれかを対象とするものであるが、いずれの圧力を対象とすべきかはなお問題であるように思われる。

(c) 初期衝撃圧の大きさと測定計器の応答感度について

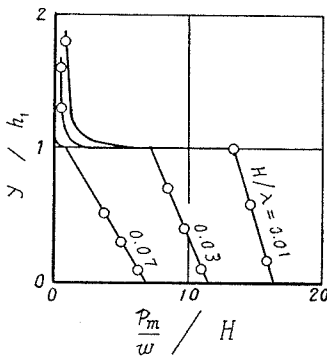
図—1 (Denny)



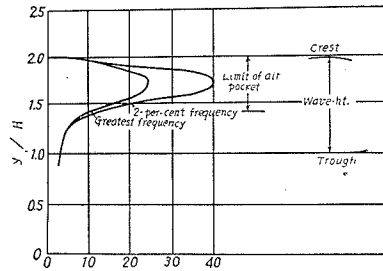
図—3 (Ross)



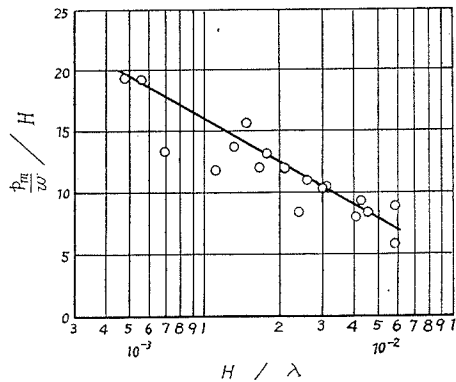
図—5 (Rundgren)



図—2 (Denny)



図—4 (Rundgren)



初期衝撃圧の値は、これまでの研究によれば、圧力水頭にして沖波の波高の数倍ないし 100 倍の程度に変化することが認められている(図—1～5 参照)。しかしこれらの値の記録も、測定計器の応答感度に関係があると考えられ、従来使用されてきた計器よりさらに短い瞬間の圧力変動をも記録しうる計器を使用するならば、あるいはさらに大きな倍率の衝撃が記録されることも予想される。従つて継続時間が小になるにつれていくらかでも大倍率の衝撃が記録されうることが考えられるので、この点からも初期衝撃を取扱う場合には、その継続時間をあわせて考慮しないかぎり、無意味なものとなるのではないかとと思われる。

3. 砕波の力積に関する研究

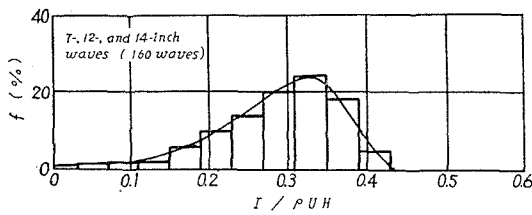
従来の波圧の諸公式には、一般的にいつて、2 に記載したような問題点があるが、これに対して砕波の力積に関する従来の研究に着目してみる。

砕波の力積に関する主な研究としては、表—1 に記載のように、Bagnold, Denny および Ross の各研究がある。

Bagnold は Dieppe における 1935 年 12 月および 1937 年 2 月の暴風時の砕波の波圧の実測結果にもとづき、構造物の単位面積当りに作用する力積 $\int p dt$ と沖波の力積(単位断面面積当りの) ρUH とを比較すると、大約

$$\int p dt / \rho UH = 1/5$$

図-6 (Denny)



であることを示した。

Dennyは実験室における160コの砕波の実験値から $\int p dt / \rho U H$ の比の値を計算し、その頻度分布を求めた。その頻度曲線は図-6 のようであり、その値の最頻値は 0.33 くらい、また、その最大値は 0.43 を越えないことが認められる。

Ross も砕波の実験を行なつて力積の計算を行なっている。図-7 は Ross の測定資料にもとずいて筆者等がプロットした図表であり、壁体に作用する力積の値の鉛直分布を示したものである。ただし横縦軸ともにそれぞれ適当な規準量——沖波の単位断面積当りの力積、および沖波の全波高——に対する比の値として書き表わしてある。これによれば、壁体に作用する力積の値は一樣に $\rho U H$ の大約 0.25 倍の程度であると認められる。

図-7 (Ross の実験資料にもとずく)

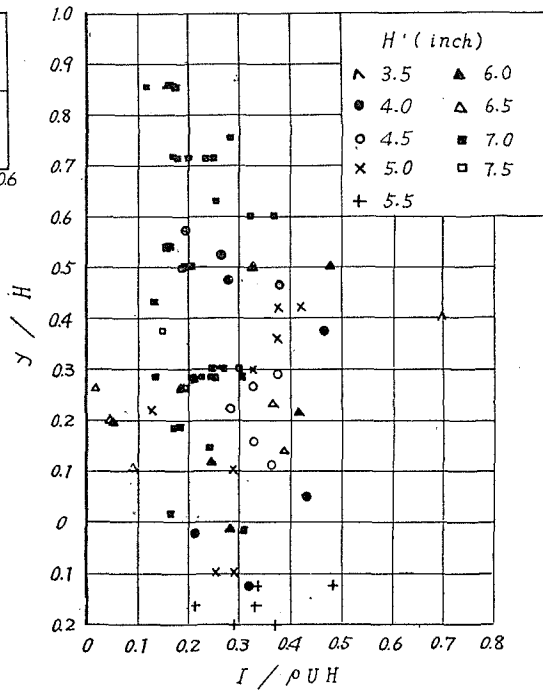


図-8 (筆者等)

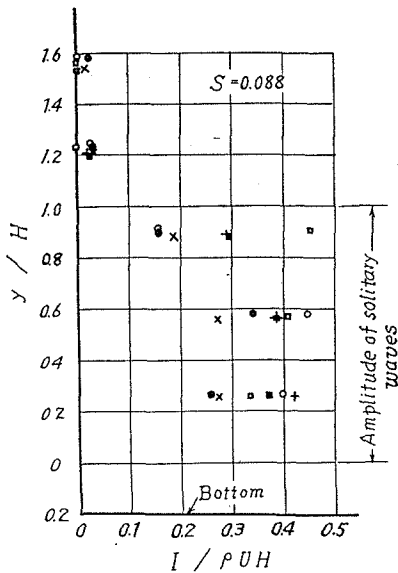


図-9 (筆者等)

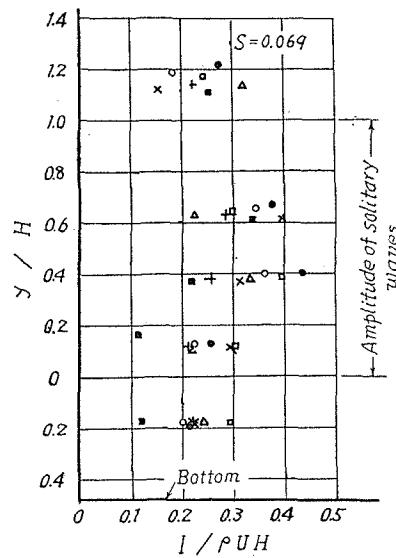


図-8~10は、同様にして筆者等の行なつた実験資料からプロットした力積の鉛直分布図であり、直立壁前方の傾斜面勾配がそれぞれ 0.088, 0.069, および同じく 0.069 の場合のものである。実験は前2報の場合と同じく長さ 14.03 m, 幅 1 m の片面ガラス張り鉄筋コンクリート造水槽において、孤立波を起動して行なつた。この孤立波は、この水槽の他端におかれた浜勾配に相当した傾斜部で砕け波となつて直立壁に衝突する(写真-1)。図-11 は図-8~10 の3図の点をあわせてプロットしたものであつて、Ross の実験結果とかなりよく一致し、波圧の絶対値とは異なり、力積の値は比較的バラツキが少なく、資料としては波圧よりも取り扱いやすく、平均値のもつ信頼度が波圧の場合よりも高いものであることを示している。

図-10 (筆者等)

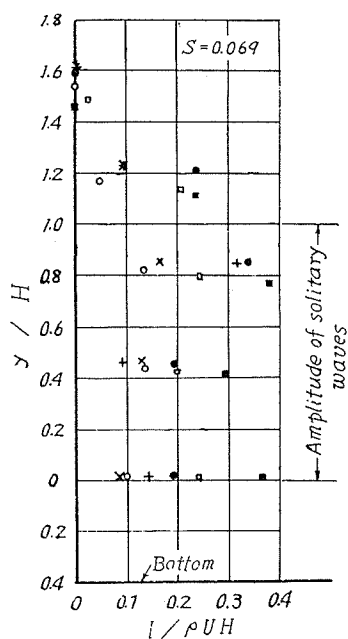


図-11 (筆者等) (The authors)

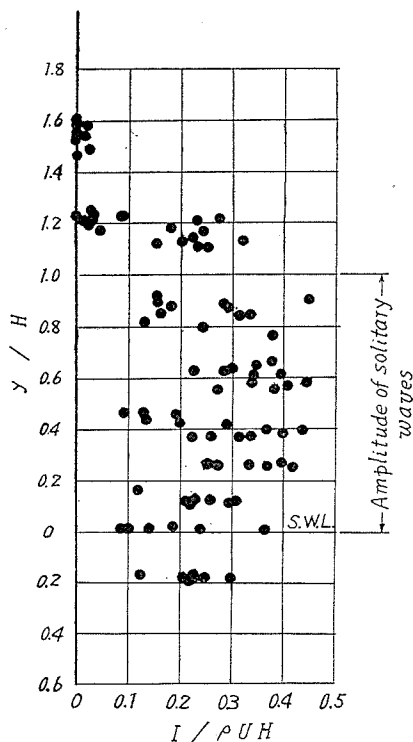
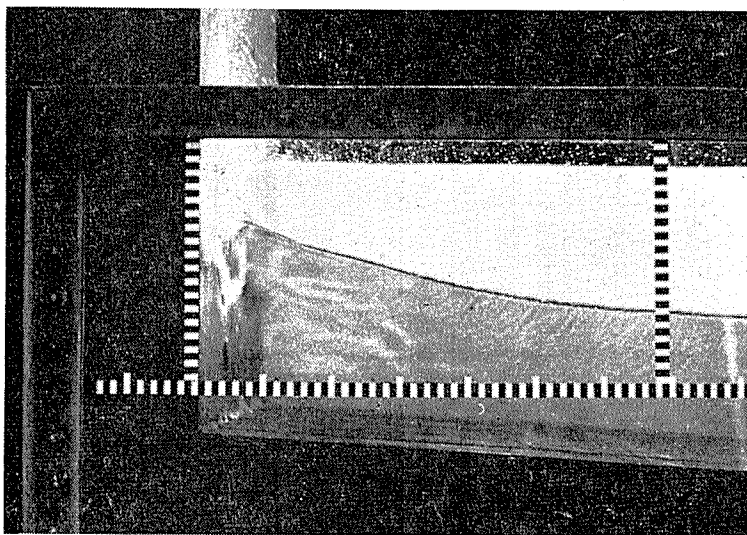


写真-1 砕波の衝突の瞬間 (Breaker at impact)



3. 力積破壊の理論

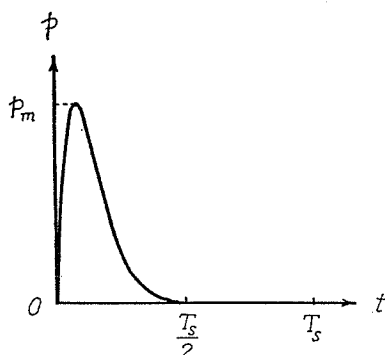
瞬間的な圧力による構造物の弾性振動の研究としては、武藤教授によつてなされた爆圧についての研究⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾があり、これは砕波の衝撃圧による構造物の安定性の研究の上にも有用のものと思われる。

武藤教授は

$$\left. \begin{aligned} \dot{p} &= \dot{p}_m \frac{1}{K} e^{-\frac{4\pi}{T_s} t} \cdot \sin \frac{2\pi}{T_s} t \\ K &= e^{-2 \tan^{-1} \frac{1}{2}} \cdot \sin \left(\tan^{-1} \frac{1}{2} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ただし

図-12 爆圧曲線(Assumed curve for impact)



で表わされる爆圧（図-12）による構造物の変形を振動理論により一般的に説明し、この爆圧による任意の質点系における応力あるいは変形を、静的に作用する圧力に換算して説明するために衝撃係数*を誘導し、その値が図-13のようになることを示された。これによれば、衝撃係数は、爆圧周期 T_s と構造物の固有振動周期との比によつて定まるものであり、急激な爆圧に対しては衝撃係数は1以下であるが、爆圧の周期が大となるに従つて衝撃係数も大となり、固有振動周期の3.4 倍の爆圧周期のとき最大衝撃効果を生じて1.9 程度の係数を示す。また、さらに爆圧が緩慢になると、かえつて衝撃効果を減じ、限界においては静圧となり、衝撃係数は1 となることが認められる。

特に注目されるのは爆圧周期が構造物の固有振動周期よりも短い場合 ($n = T_s/T_0 < 1$ の場合) であつて、衝撃係数 φ の値を摘記するとつぎの数字が得られる。

表-2 衝撃係数の値の摘要 ($n \leq 1$ の範囲における)

n	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
φ	0.11	0.22	0.34	0.45	0.56	0.67	0.85	1.02

従つて注意されることは、 $n \leq 1$ の範囲においては φ がほとんど n に比例するという点である。すなわち

$$\varphi \propto n \dots\dots\dots (2)$$

このことから、一定の構造物に対し（従つて T_0 を一定とし）、爆圧時間 T_s （すなわち n ）が漸次変化する場合には、その効果は作用時間に比例することがわかる。一方、効果が爆圧の大きさ p_m にも比例することを考え合わせると、結局爆圧の力積に比例することが認められる。このことにより、瞬間的爆圧による構造物の応力または変形は爆圧の力積に比例することがこの理論により認められる。

4. 力積理論と波圧公式の融合、並びに新しい波圧公式の提案

2. において、砕波の波力の資料としての波圧の資料と力積の資料とを比較すると、平均値のまわりの偏差が比較的小さいという点で力積の資料の方が取り扱いやすいものであることを記述した。

しかし構造計算の上からは、波力を圧力の形で与えるのが便利であつて、力積を用いて計算を行うことは不便である。そこで、もし砕波の力積の値からその構造物の安定計算上必要な波圧の値を算定することができれば好都合である。

このために、前節に記述した力積の資料から設計波圧を算出する方法を以下に逐次考えてみる。

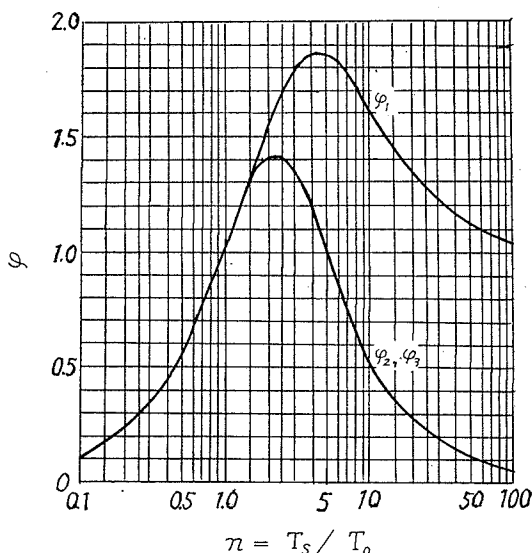
1) まず、沖波の U, H の資料から ρUH の値を計算する。

2) Denny, Ross および筆者等の実験結果にもとずき、直立壁に作用する力積（単位面積当りの）の分布を

$$I = 0.33 \rho UH \quad -\frac{H}{2} < y < \frac{H}{2} \dots\dots\dots (3)$$

* ここにいう衝撃係数とは、図-12で示されるような衝撃圧により生ずる応力（または変位）の最大値と、圧力 p_m （図-12の衝撃の最大値）が静的に作用したときの応力（または変位）との比の値のことをいう。

図-13 衝撃係数 (Impact coefficient) (φ_1 : 加圧中の最大正衝撃係数, φ_2 : 加圧中の最大負衝撃係数, φ_3 : 爆圧経過後の最大衝撃係数) (武藤教授)



と仮定する。

3) 構造物の安定性に関係したモードの固有振動周期 T_0 の値を定める。

4) 一般に砕波の衝撃時間 T_s は T_0 より短かく、 $n=T_s/T_0 \leq 1$ と考えられるので、力積破壊理論を適用することができるものとする。力積破壊理論によれば、構造物の応力または変位は構造物に加わる力積に比例し、 $T_s=T_0$ のとき図-12 のような衝撃が構造物に生ずる応力または変位は、同図の p_m の圧力が静的に作用するときの応力または変位にほとんど等しいことに留意する。

5) 衝撃時間 T_s の値はいろいろであろうが、静たわみと等しい動たわみを生ずべき衝撃時間は上記のように T_s の値が $T_s=T_0$ となつた場合であるので、 T_s の値を

$$T_s = T_0 \dots \dots \dots (4)$$

ととる。

6) (1) 式の両辺を t で積分すると

$$\int_0^{T_s} p dt = \frac{1}{5K} (1 - e^{-4\pi}) p_m \cdot \frac{T_s}{2\pi}$$

となり、従つて

$$p_m = \frac{5K}{1 - e^{-4\pi}} \frac{2\pi}{T_s} I$$

$$\therefore P_m = 5.56 \frac{I}{T_s} \dots \dots \dots (5)$$

である。従つて (5) 式と (4) 式とから

$$\frac{p_m}{w} = 5.56 \frac{I}{w T_0} \dots \dots \dots (6)$$

上式に (3) 式を代入すると

$$\frac{p_m}{w} = \frac{1.83 U}{g T_0} H \quad -\frac{H}{2} < y < \frac{H}{2} \dots \dots \dots (7)$$

となり、これが衝撃圧に応じた所要の圧力分布となる (図-14)。

7) 一方、静圧 p_0 を Minikin と同じように

$$\left. \begin{aligned} p_0 &= w \left(\frac{H}{2} - y \right) && \text{静水面上} \\ p_0 &= w \frac{H}{2} && \text{静水面下} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

と仮定する。

図-14 設計波圧 (Pressure of the breaker proposed to assume.
 T_0 : Natural period of oscillation of structure.)

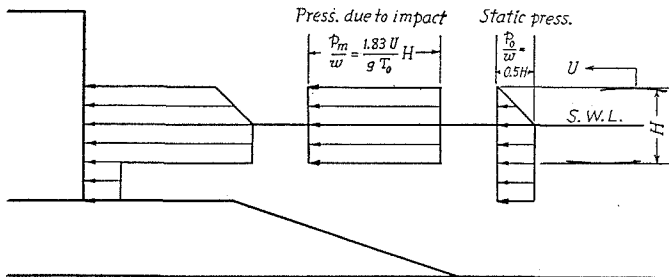
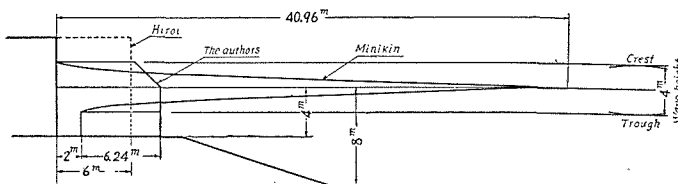


図-15



8) (7)式で算出した p_m を (8) 式の p_0 に加算したものを設計波圧とする (図-14)。直立壁の基礎が十分透水性の場合には静圧による分の揚圧力を考慮する。

数値計算例

全波高 $H=4$ m, 波長 $\lambda=60$ m, $d_1=4$ m, $d=8$ m, $T_0=1.0$ s のときの砕波波圧を計算する (図-15参照)。 $d/\lambda=8/60=1/7.5$ であるから浅水表面波と考えられるので波の伝播速度は

$$U = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{\lambda}} \left[1 + \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\coth^2 \frac{2\pi d}{\lambda} \Bigg]^{\frac{1}{2}} = 8.37 \text{ m/s}$$

したがつて (7) 式から

$$\frac{p_m}{w} = \frac{1.83 \times 8.37}{9.80 \times 1} H = 1.56 H$$

図-15 には比較のため広井公式および Minikin の公式によるこの場合の値もあわせて記してある。

5. 結 び

本研究は砕波の入射する 構造物の弾性的な性質を考慮し、構造物の特性に応じた砕波の設計波圧のとり方を示したものである。本研究において提案する砕波の設計波圧のとり方はつぎのようなものである。

砕波の動圧として

$$\frac{p_m}{w} = \frac{1.83 U}{g T_0} H \quad -\frac{H}{2} < y < \frac{H}{2}$$

砕波における静圧として

$$\begin{aligned} \frac{p_0}{w} &= \frac{H}{2} - y & 0 < y < \frac{H}{2} \\ &= \frac{H}{2} & y \leq 0 \end{aligned}$$

附 記 本研究は波力の研究に関する昭和 33 年度文部省試験研究費（主任研究者永井荘七郎教授）並びに、
 潜堤の研究に関する同年度文部省総合研究費（主任研究者 本間 仁教授）の補助によつてなされたものであり、
 深甚なる謝意を捧げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 林 泰造・服部昌太郎：孤立波の砕波とその波圧について，土木学会第 3 回海岸工学講演会講演集，昭和 31 年 11 月，pp. 37-48.
- 2) 林 泰造・服部昌太郎：砕波の波圧について，土木学会第 4 回海岸工学講演会講演集，昭和 32 年 11 月，pp. 15-24
- 3) R.A. Bagnold: Interim report on wave-pressure research, Journal of the Institution of Civil Engineers, Vol. 12, 1939, pp. 202-226.
- 4) R.R. Minikin: Winds, waves and maritime structures, (Charles Griffin), 1950.
- 5) D.F. Denny: Further experiments on wave pressures, J. Inst. Civ. Eng., 1951, pp. 330-345.
- 6) C. Ross: Laboratory study of shock pressures of breaking waves, Beach Erosion Board, Tech. Memo. 59, Feb. 1955.
- 7) L. Rundgren: Water wave forces, Stockholm, 1958.
- 8) 北海道開発局港湾部：羽幌港における波圧測定について，第 5 回波浪分科会報告資料，昭和 33 年 6 月。
- 9) 広井 勇：築港，前編（丸巻）明治 31 年。
- 10) J. Larras: Le déferlement des lames sur les jetées verticales, Annales des Ponts et Chaussées, 1937, pp. 643-680.
- 11) 浜田徳一，光易 恒，長谷直樹：構造物に作用する波力，土木学会第 3 回海岸工学講演会講演集，昭和 31 年 11 月，pp. 67-83.
- 12) 永井荘七郎，八敏 功，玉井佐一，小木正道：防波堤に働く砕波の圧力，土木学会第 4 回海岸工学講演会講演集，昭和 32 年 11 月，pp. 3-14.
- 13) 武藤 清：爆圧による構造物の弾性振動について，建築学会大会論文集，昭和 15 年 4 月，pp. 347-355.
- 14) 武藤 清：力積破壊の世界，建築学会大会論文集，昭和 16 年 4 月，pp. 246-251.