

進行波による水底圧力の変動

運輸技術研究所 工学博士 浜 田 徳 一
同 光 易 恒
同 長 谷 直 樹

ま え が き

浅海における進行波による水底圧力の変動は波浪理論それ自体としても興味のある問題であるが、現在の研究段階においては水圧式の波高計を用いて水底圧力の変動から水面の波高を推算するためにも、また水底に位置するブロック等の構造物に作用する外力その他を推定するためにも重要な問題である。ことに砕波点付近における水底圧力の変動の性質を知ることが、港湾その他の海岸構造物の設計上欠くことのできないものであろう。こうした見地にたつてわれわれはこの問題についての実験を継続中であるが、本報告には現在までの実験により得られた結果を要約して発表することとする。

実験に使用せられた造波水路は延長 22 m, 巾 60 cm であり、水深 35 cm で一端にフラッター型の造波板を設け、他端には 1/15~1/10 の斜面をもつて砕波領域をとり（特に必要な場合は 1/5 の勾配とする）、実験に際しては反射波の発生に注意し、極力その影響のない時間領域を用いている。実験における使用波の諸元は表-1 のごとくである。

実験結果にもとづいて波形・水底圧力についての有限振巾波理論による検討、いわゆる波高補正係数の変動及び浅海部より砕波点にいたるまでの間の波形・底圧力の変化についての考察、水底ブロックに作用する圧力についての考察が行われた。測定計器には波高計としては電気抵抗型波高計、圧力計としては strain gauge 型及び磁ヒズミ型の両者であり（小ブロックにかかる圧力測定に際しては受圧面の直径は 1~0.7 cm にとつて

表-1

名称	T_{sec}	H_{cm} ($h=35\text{cm}$)	L_{cm} ($h=35\text{cm}$)	δ_0	H_b cm	h_b cm	L_b cm
I-1	1.94	8.4	348	0.019	12.1	10.0	205
I-2	1.40	9.8	238	0.038	13.4	14.4	164
I-3	1.55	14.3	266	0.048	16.5	18.7	204
I-4	0.75	5.9	93	0.069	5.9	7.7	61
II-1	2.65	10.2	526	0.0104	12.8	8.5	240
II-2	2.05	9.8	367	0.020	12.5	12.7	224
II-3	1.43	10.2	249	0.037	11.7	13.5	157
II-4	1.03	10.2	149	0.067	8.8	10.2	96

いる）、流速計としては小型プロペラ型流速計を用いている。

1. 波形と圧力変動

水深 35 cm の水路を波長 2~5 m, 波高 10 cm 内外の波が進行するこの実験では、進行する波が単一周期の波であるにもかかわらず、普通の正弦波形を仮定する微小振巾波としての取扱いは成立しない。この場合の波形とそれにとりなす圧力変動とを一般的に解くことは困難であるが、波長の短い波、特に深海波の場合についてはこれを permanent type の非回転の運動と仮定して計算が行われ、その結果は実験結果とよく一致している。

M. Miche¹⁾, T.V. Davies²⁾ 等は同様の仮定にたつて有限水深の場合の波形の計算を行い、F. Suquet 及び A. Wallet³⁾ の実験結果によると Miche の計算値は実験による波形ときわめてよい一致を示し、 $h/L=s>1/5$ の領域においてはその一致はほぼ確かなものと思われる。Miche もまた彼の計算方法は $s>1/6.5$ の領域において十分正確であり、 $1/6.5>s>1/10$ の領域においても近似的に用いると述べているが、筆者もこれと同じ観点に立ち波形と水底圧力との検討を行った。

計算値としては Stokes の方法を浅海の場合に延長したものとして田中氏⁴⁾ の算式を用い、波形及び水底圧力についての 2 倍周波数までの成分をとれば、波形につき

$$\begin{aligned} \eta = & \frac{\pi}{L} \frac{H^2}{4} \coth \frac{2\pi h}{L} + \left\{ 1 - \frac{3}{64} \frac{\pi^2}{L^2} H^2 \left(3 \coth^2 \frac{2\pi h}{L} - 1 \right) \right. \\ & \times \left(3 \coth^4 \frac{2\pi h}{L} + 1 \right) \left. \right\} \frac{H}{2} \cos \frac{2\pi}{L} x + \frac{1}{4} \frac{\pi}{L} H \coth \frac{2\pi h}{L} \left(3 \coth^2 \frac{2\pi h}{L} - 1 \right) \\ & \times \left\{ 1 - \frac{3}{32} \frac{\pi^2}{L^2} H^2 \left(9 \coth^6 \frac{2\pi h}{L} + 13 \coth^4 \frac{2\pi h}{L} + 11 \coth^2 \frac{2\pi h}{L} - 1 \right) \right\} \\ & \times \frac{H}{2} \cos \frac{4\pi}{L} x + \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

また水底圧力につき

$$\begin{aligned} \frac{p}{\rho} = & \frac{p_0}{\rho} + gh + \text{const.} + \frac{gH}{2} \frac{1}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \left[1 + \frac{3}{64} \frac{\pi^2 H^2}{L^2} \left\{ -9 \coth^6 \frac{2\pi h}{L} \right. \right. \\ & + 11 \coth^4 \frac{2\pi h}{L} - 27 \coth^2 \frac{2\pi h}{L} + \frac{43}{3} - 8 \frac{\coth \frac{2\pi h}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L} \cosh \frac{2\pi h}{L}} \left(\coth^2 \frac{2\pi h}{L} \right. \\ & \left. \left. - 1 \right) \right\} \cos \frac{2\pi x}{L} + \frac{\pi}{4} \frac{H^2}{L} g \frac{1}{\cosh^2 \frac{2\pi h}{L}} \left\{ 1 - \frac{1}{64} \frac{H^2 \pi^2}{L^2} \left(54 \coth^6 \frac{2\pi h}{L} \right. \right. \\ & + 6 \coth^4 \frac{2\pi h}{L} + 114 \coth^2 \frac{2\pi h}{L} - 46 \right) \left\{ \frac{3}{2} \coth \frac{2\pi h}{L} \left(\coth^2 \frac{2\pi h}{L} - 1 \right) \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{2} \coth \frac{2\pi h}{L} \right\} \cos \frac{4\pi x}{L} + \dots \right] \quad (2) \end{aligned}$$

となる。

従つて波高 H 、水底の圧力差 ΔP はそれぞれ $\eta = \text{const.} + a_1 \cos \frac{2\pi x}{L} + a_2 \cos \frac{4\pi x}{L} + \dots$, $p = \text{const.} + b_1 \cos \frac{2\pi x}{L} + b_2 \cos \frac{4\pi x}{L} + \dots$ で表わすとき、 $H = 2a_1$, $\Delta p = 2b_1$ で与えられ、いま H, h, L を与えるとき、 a_1, a_2, b_1, b_2 はそれぞれ (1), (2) 式により計算される。次に $0.37 > s > 0.1$, $15 \text{ cm} > H > 5 \text{ cm}$ (ただし水深 35 cm で) の範囲内において進行波による実験を行い、それにより測定せられた波形及びこれに対応する底圧力とを周期分析した。すなわち基本周期を進行波の周期に一致させて調和分解し、いずれの場合もその第 5 分振動までを求めた。

このようにして実測から求められた a_1, a_2, b_1, b_2 と (1), (2) 両式により計算されたそれらとを比較したものが図-1, 2 である。図-1 は波形に関するもの、図-2 は底圧力に関するものであり、ともに横軸は $h/L = s$ ととられており、縦軸は $2a_1/H$, $2b_1/\Delta p$ となっている。これによれば計算値と実測値とはきわめてよい一致を示しており、 $s = 0.1$ の付近においてさえそれは十分認められる。また (1), (2) 両式による計算からして当然予想されるごとく、実測値においても底圧力の 2 倍周波数成分は波形の場合に比してきわめて減衰し、 s が大になるとともにその傾向はいちじるしい。このようにして非回転の permanent type の有限振巾波の理論は、すくなくとも実験室の単一周期の波に対しては十分にその性質を説明しうることがわかる。

2. 波高補正係数 n について

ここにいう波高補正係数とは進行波による水底の圧力変動から波高を推定する際に用いられ、次式中の n で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{y=-h} &= \frac{\rho g H}{n \cosh \frac{2\pi h}{L}} \\ \text{または } \Delta p &= \frac{\rho g H \cosh \frac{2\pi(h+y)}{L}}{n \cosh \frac{2\pi h}{L}} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ただし上式は圧力測定が水底で行われるとき、下式は圧力測定が任意水深で行われるときに用

図-1 波形のフーリエ分解

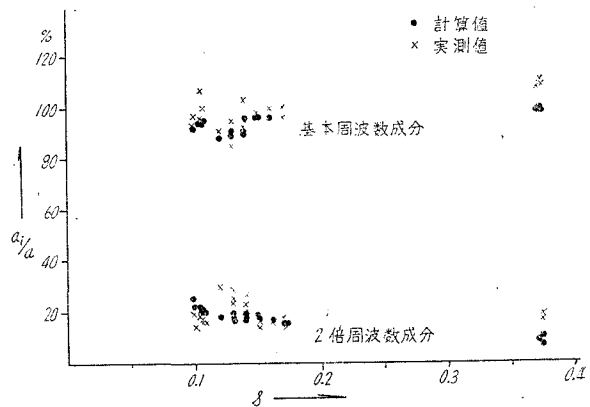
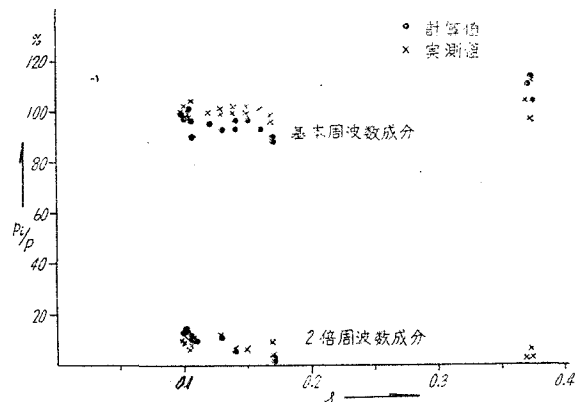


図-2 水底圧力のフーリエ分解



いられる。

(3) 式中の n の値は 1 より大きな常数として 普通用いられているが、その詳細は不可解なまま残されている。R.G. Folsom⁵⁾ によれば Vicksburg の水理実験所での試験では、任意に撰択された波に関する n の値の平均値は 1.07 となり、Berkley の加州大学の水理実験所においては $0.82 > s > 0.22$ の波を用い、 $0.63 > y/h > 0.21$ の任意水深中で圧力変動を測定し、 n の平均値として 1.1 を得ている。これに対し外洋における実測では、有名な Seiwel の Cuttybank, Bermuda の観測で平均 1.35, また加州の Estero 湾の観測では 1.18, Halfmoon 湾の観測では 1.08 から 1.06 等となつている。わが国の井島, 柴山, 高橋等⁷⁾の観測では平均 1.34 を得て、換算には Seiwel の 1.35 を用いているが、 n の値の散乱は 0.41 から 3.13 にまで達しており、大部分の値は 1.0~2.0 の間にあるが、一定海面の特定期間の観測においてさえ、 n の値の決定はきわめてむづかしいと思われる。

また Pierson⁸⁾ が最近発表している wave spectrum の考えに従う波高分析の場合にも、用いられる考えは正弦波の線型的な結合によつていから、水底圧力のエネルギースペクトルを波高のエネルギースペクトルに換算する場合にはやはり (3) 式を用い、これも不明瞭な n に依存せざるを得ない。

この n の値に影響するものとしては

- (i) 表面波形の非線型性によるもの
- (ii) 水底形状によるもの (水底の起伏, 底質の透水性等の問題)
- (iii) 表面波が多数の波により合成されていること
- (iv) 水底の流れの影響
- (v) 測定装置の特性の影響

等があげられる。われわれの水路実験においては (i), (ii) の問題についてそれによる n の値の変動を検討し、その傾向を求めてみることにする。

まづ一様水深 $h=35$ cm において無差別な波の steepness (H/L), shallowness (h/L) において、水底に関する n の値を求めてみると表-2 のごとくなり、その平均値は前述の Vicksburg 水理実験所, 加州大学における実験値とほぼ一致する。

ただし n は実測の波長を用い、 n' は微小振巾波として計算された波長を用い、(3) 式によつて求められている。

次にこれらの進行波が砕波点に向つて進む場合の n の変化を求めてみる。使用された波は表-1 の I-1~I-4 のものに、さらに波長の長い波一種を加えている。砕波を生ずる斜面としては 1/15 及び 1/10 を用いている。砕波点に向つて波高を増大し、波長を減少しつつ、波形は前傾しており、周期の長い波は特にその傾向がいちじるしい。いわばこのようにして波形の非線型性が増大してゆくこととなるが、これに応じて n がどのように変化してゆくかを実験により求めたわけである。測定結果を表示すれば表-3 のごとくなる。

ただし δ_b, s_b は 1/15 slope における値を示している。本表によれば波高補正係数 n は砕波点に向い単調に増大し、砕波点 (この場合の砕波点としてはいわゆる initial breaking point, すなわち波形を維持している最終点をとつている) ではその値は 1.3~1.4 に達している。使用した波の initial steepness は 0.0045~0.069 であるから、このような傾向はわれわれの観測するほぼすべての海面波についていいうるものと考えられる。

波長の長い波については J.J. Stoker⁹⁾ にもとづく取扱いがあり、すくなくとも砕波点における一般的傾向は彼の計算により得られた結果とよく一致している。それにもかかわらず実験において $n=1.3$ 内外の補正係数を必要とすることは、特に波頂付近に注目して考察するとき、長波としての一般的な取扱いが砕波点付近での実体を説明するに不十分なことを示すものといえよう。他方この実験結果からいえば、現在用いられている水底圧力変

表-2

No.	T_{sec}	H/L	h/L	n	n'
1	3.32	0.018	0.063	1.13	1.14
2	1.94	0.024	0.100	1.06	1.03
3	1.40	0.040	0.150	1.03	1.01
4	1.55	0.054	0.132	1.07	1.06
5	0.75	0.064	0.378	1.07	0.93
6	3.50	0.0058	0.052	1.12	1.12
7	2.18	0.022	0.081	1.14	1.10
8	1.04	0.047	0.214	1.08	1.01
平均				1.09	1.05

表-3

No.	δ_0	δ_b	s_b	$n_{h=-35\text{cm}}$	1/15 slope		1/10 slope	
					$n_{h=-50\text{cm}}$	n_b	$n_{h=-20\text{cm}}$	n_b
1	0.0045	0.026	0.018	1.14	1.13	1.32	1.10	1.10
2	0.017	0.049	0.038	1.05	1.00	1.33	1.04	1.18
3	0.037	0.078	0.080	1.01	1.24	1.43	1.22	1.63
4	0.045	0.077	0.084	1.08	1.52	1.52	1.31	1.38
5	0.069	0.098	0.116	1.07	1.00	1.48	1.43	1.48
平均				1.07	1.18	1.41	1.22	1.33

動よりの波高推算法は砕波点付近にまで、利用範囲を拡大することは避けねばならないと思われる。

次に水深 35 cm の一様部に 10 cm 立方のブロックを波の進行方向に正対して沈置し、その各面の中央に圧力計を備えてブロックの各面において n の値がいかに変化するかを調べた。すなわち各圧力計により測定せられた値から (3) の第 2 式を用いて n を算出した。その結果を図示したものが 図-3 である。この実験においては $H/h \approx 0.28(\text{const.})$ としたため、 n の値の h/L に対する変化を見ることができる。

図-3 波高補正係数 n の分布

水深 = 35 cm, $H/h \approx 0.28$ (一定), ブロック 10 cm 立方

図-3 によれば各測定位置により n の値は相当大きく変動し、これを平均値につき比較すれば 表-4 のごとくなる。

表-4

位 置	ブロック 前 面	背 面	下 面		上 面	側 面	
			A	B		右	左
n	1.04	1.20	1.17	1.09	1.09	1.15	1.14

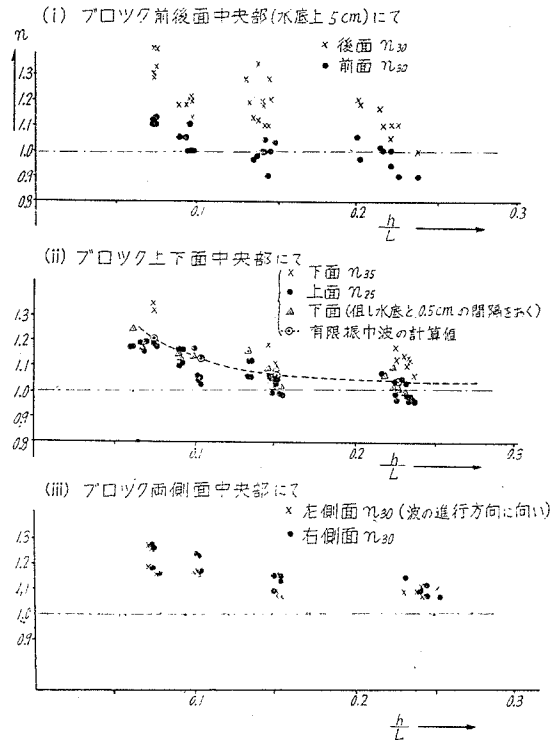
ただし下面につき、Aはブロックが水底に接している場合、Bは水底との間に 0.5 cm の空間が存する場合である。これによれば表-2 に示される n の平均値 1.09 と比較して、ブロック前面の n は小さく、背面のそれは大きく動水圧の影響が相当に存することが示される。これに比較してブロックの上下両面では水底に接している場合を除き、 n の値は表-2 のそれとあまり差異はない。側面では波の頂きと谷とが通過するときに、流速の増大と剥離現象とが生ずるために n の値は増大し、1.14 を示している。これにより圧力計の位置によつて n の値がいかに変動するかの概要を知ることができたが、この結果からみると単独ブロックの場合にはその前後の水粒子は進行波にともないブロックの側面を通過して運動し、上下面に対するその影響は少ないと考えられる。

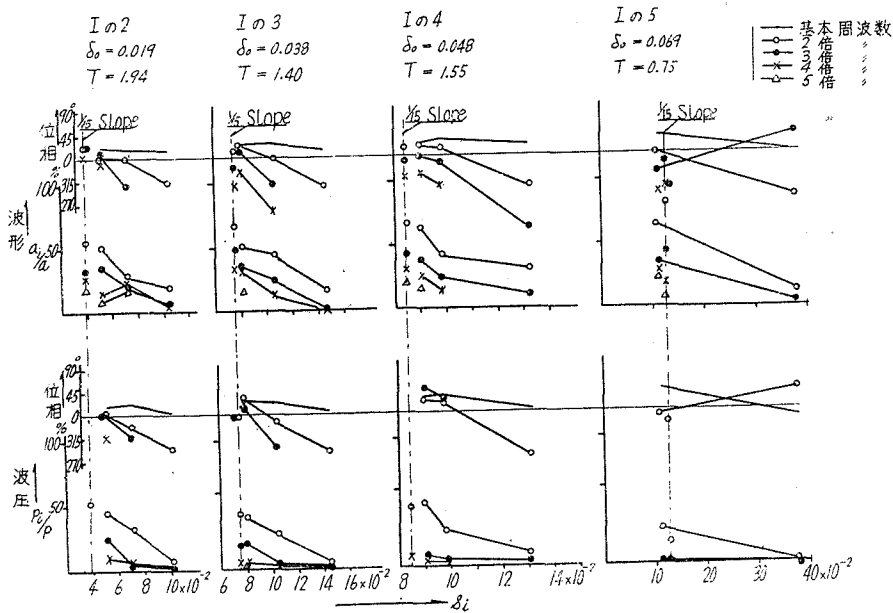
また 図-3 によれば h/L に対する n の変化の傾向を知ることができる。 n は一般に h/L , H/L の函数であるが、この実験では $H/h \approx 0.28$ としているから、 h/L のみの函数となる。図-3 のうち点線で記入されている曲線は (1), (2) 両式を用い、この実験に於いて計算された n の理論値を示しているが、 $1/2 > h/L > 1/10$ の範囲内では上述の結果からみて十分信頼しうるのであろう。これに対する実験値より求められた n の値は、圧力計の位置いかんにかかわらず常に h/L の減少とともに増加の傾向を示し、その増加傾向も全体として理論曲線とほぼ似た性質を持つている。さらに平均の n の値が 1.09 となり、表-2 の n の平均値と一致したブロック上下面（ブロック下面は水底より 0.5 cm 上方）に関する n の値の個々の分布は計算値にきわめて接近している。以上われわれは単一周期の波が進行するとき、不透水の滑らかな水底における圧力変動から波高を推定する場合の波高補正係数 n につき、その概要を知ることができた。この結果からすれば、 n を一定として取扱う現在の推算法は修正を必要とし、また現用の水圧式波高計は $H/h < 1/3$, $0.3 > h/L > 0.1$ 程度の領域において使用されるべきもののように思われる。

3. 波形および圧力変動の調和解

次に波形および圧力の記録を調和解して、各分調波の振巾位相について調べてみた。これは砕波点に向つての波形の変動、また砕波点における波形の特性を各分調波の大いさ・位相によつて明らかにしようと考えたからである。

実験結果としては I-1, 2, 3, 4 の各波の記録を採用し、各波について原点を波形が静水表面を切る点にとり、一波長の波形記録およびこれに対応する水底の圧力変動記録を 12 等分して正弦波として、その第 5 分調波までの成分を求めた。さらに同種の波については 4~6 個の波形についての計算値の平均をもつて各分調波の振巾・位相を代表させることとした。このようにして求められた結果を図-4 に示す。水深 35 cm の一様部より砕波点に向



図—4 各波の $S_i(h/L)$ の変化による高周波成分の変化状況 (Slope 1/10)

つての変化の状態を明らかにするため、横軸には h/L をとり、縦軸には各分調波の振巾の第一分調波の振巾に対する比及び各分調波の位相角をとっている。この場合の波の initial steepness は $0.019 < \delta_0 < 0.069$ の範囲にあるから長いうねりの場合を除いてはほぼ一般の波を含むものと言えよう。

図—4 によれば

(i) 砕波点に向つて波形・底圧力ともに高調波成分は急激に増大し、波形に関していえば第2分調波の振巾はいずれの場合も第1分調波のその50~80%に達しており、水深35cm部の10~30%に比しはるかに大である。また底圧力についても20~50%となり、水深35cm部のそれは10%以下である。

(ii) 1/15 勾配と 1/10 勾配において両者の差は明らかではなく、ほぼ相似たものと思われる。また initial steepness によつて生ずる差異もこの実験の範囲内では明らかでない。いわば砕波点付近における各分調波の振巾の割合は相似たものである。

(iii) 各高調波の位相について考える。波形については水深35cmの一樣部で第1分調波と第2分調波との位相差は $65^\circ \sim 95^\circ$ と得られているが、砕波点では第2分調波の位相が前進するため、両者の値はきわめて近迫し、 $0.019 \leq \delta_0 \leq 0.048$ では一例を除いて 15° 以内、 $\delta_0 = 0.069$ では $35^\circ, 45^\circ$ となつている。第3分調波についてもその位相は $\delta_0 = 0.069$ の場合を除いて第1分調波の位相に接近する傾向が示される。この傾向はいずれも波形の急激な前傾を指示しており、 $\delta_0 = 0.069$ のものはその前傾の程度が他のものに比較して小であることとなる。水底の圧力変動についてもこの前傾の傾向はよく現われている。

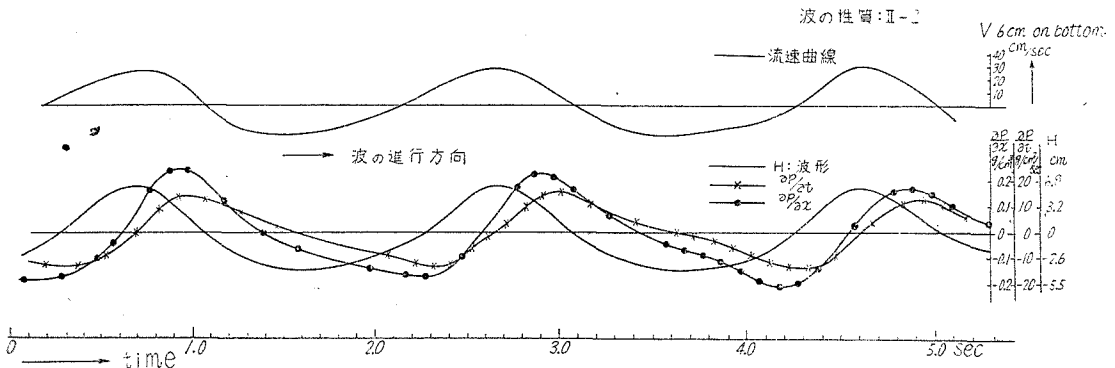
われわれはこの計算によつて、いわゆる巻き波型・崩れ波型の2つの砕波形式について、相当大きな変化が高調波成分、その位相に関して見られるのではないかと予想したのであるが、得られた結果からすれば砕波点付近においていずれもきわめて大きな高調波成分を持ち、位相の前傾もまた相似たものであつた。initial steepness が 1/100 以下の場合についても検討の必要があるであろうが、この実験の範囲内では巻き波型・崩れ波型の両砕波形式はきわめて広い過渡領域を持ち、initial steepness と斜面勾配によつて両形式の限界線を厳格に決定することは困難なのではないかと思われる (Iversen-速水の実験によれば巻き波型と崩れ波型との限界の initial steepness は 1/15 勾配で 0.042, 1/10 勾配で 0.060 となつている)⁽¹⁰⁾。

4. 水底ブロックにはたらく力

水底におかれたブロックに作用する進行波による水平力その他の力を調べるため、10cm立方、5cm立方の2つの型のブロックを水深35cmの一樣部の水底の中心線に、波の進行方向に正対させておいた。実験に使用した進行波は表—1のⅡ-1, 2, 3, 4の4種である。ブロックの前後面中央にある圧力計により圧力記録を、またブロックの中央上部及びその沖方50cmに設置された波高計により波形及び波速を求めた。波形記録によればこの程度のブ

ロックの存在によつては進行波の波形及び波速はほとんど変化しないことが明らかである。また水底上 5 cm の高さに 4 個のプロベラ流速計を水路の横断方向に配置し、ブロック側面の流速分布、及びブロックのない場合の流速分布を求めた。測定により得られた波形・波圧及び流速記録の一例を 図-5 に示した。図中流速はブロックのない場合の上記の測定値、 $\partial p/\partial x$ はブロック両面の圧力差をそれぞれ 10 cm, 5 cm で除した値であり、 $\partial p/\partial t$ は両面における $\partial p/\partial t$ の平均値である。 $\partial p/\partial t$ としてはブロックのない場合の水底上 5 cm, 2.5 cm の点のそれが必要なわけであるが、図-3 の結果からみてブロックの前後面のそれぞれの平均値はほぼ所要の $\partial p/\partial t$ に一致すると考えられたのでこの方法を用いた。これにより波の山の進行にともない、まづ $\partial p/\partial t$ の最大があらわれ、これは波形が静水面を切る点にやや遅れて生じ、 $|\partial p/\partial x|$ の最大がこれにつぎ、ついで波の頂きが現われており、波頂では $\partial p/\partial t$ はほぼ 0 となっている。この場合の $\partial p/\partial x$ はブロックの形状抵抗を表わす量であり、本節では主としてその構成について調べてみることにしよう。

図-5 進行波の波形、流速、圧力曲線の一例（水深 35 cm，ブロック 10 cm 立方）



まづ $\partial p/\partial x = F(H/L, h/L, h_s/h)$ の関係が考えられる。ただし h_s/h は水深に対するブロックの大きさを示す指数とし、この実験では h_s としてブロックの高さをとつてよい。また $H/h \approx 0.28$ の関係が成立するから、 $\partial p/\partial x$ と h/L との関係拾うと、ブロック 10 cm 立方の場合について $|\partial p/\partial x|_{\max}$ の値をとり、表-5 の関係がえられる。

表-5

h/L	0.0607	0.095	0.140	0.233
$(\frac{\partial p}{\partial x})_{\max} \text{ gr/cm}^3$	0.20	0.22	0.22	0.16
$(\frac{\partial p}{\partial x})_{\min} \text{ gr/cm}^3$	0.18	0.18	0.21	0.20

これによれば波長の長い波はブロックを前方に押す力がつよく、波長の短い波はブロックを沖方にひく力がつよいことがわかる。しかし絶対値には顕著な変化は見られず、他の要素 $H/h, h_s/h$ についての変動

を調べる必要がある。

つぎに $\partial p/\partial x$ の構成要素としては波形によるものと、水粒子運動によるものとが考えられる。波頂、波谷では $\partial p/\partial t = 0$ となり、 $\partial p/\partial x$ はほぼ水粒子運動のみから構成され、かつその場合 u の大きさは最大となっているから、これを $\partial p/\partial x$ の正負の最大と比較すれば $\partial p/\partial x$ の値に及ぼす水粒子運動の影響の程度を知ることができる。これを表示すれば 表-6 のごとくである。

表-6

h/L	0.0607				0.095			
$(\frac{\partial p}{\partial x})_{\max} \text{ gr/cm}^3$	-0.22	-0.19	0.19	0.17	-0.25	-0.23	-0.17	0.18
$(\frac{\partial p}{\partial x})_{\min} \text{ gr/cm}^3$	-0.08	-0.07	0.06	0.05	-0.05	-0.06	-0.06	0.06
ratio	2.75	2.72	3.16	3.40	5.00	3.84	2.84	3.33
h/L	0.140				0.233			
$(\frac{\partial p}{\partial x})_{\max} \text{ gr/cm}^3$	-0.21	-0.22	-0.22	0.20	-0.16	-0.16	-0.16	0.22
$(\frac{\partial p}{\partial x})_{\min} \text{ gr/cm}^3$	-0.04	-0.05	-0.04	0.04	-0	-0.01	-0	0.02
ratio	5.25	4.40	5.50	5.00	∞	16	∞	11

表-6 によれば h/L の増大（すなわち波長の減少）にともない進行波の水粒子運動がブロックに作用する水平力に影響を及ぼさなくなつてゆくことは明らかであり、他方波形による圧力勾配は逆の傾向をもつて両者互いに相補い、 H/h をほぼ一定に保つたこの実験では $|\partial p/\partial x|$ の最大値にはそれほど変化がないことがわかる。

一様水路部の実験では進行波はその進行にともない波形は変化せず、かつこの場合波形に及ぼすブロックの影響はほとんど無視しうることが実験結果より明らかである。従つて $\partial p / \partial x$ は次のようにおくことができよう。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_1 + \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_2 \dots \dots \dots (4)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_1 = -\frac{\alpha}{c} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_1 \dots \dots \dots (5)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_2 = \mp \frac{\rho}{2} C_R \frac{u^2}{\Delta x} \dots \dots \dots (6)$$

ただし (6) の右辺の負号は u が正のとき、正号は u が負のときに用いる。

従つてブロック前面・後面の $\partial p / \partial t$ の平均値により $(\partial p / \partial t)_1$ を表わしうるものとすれば

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\alpha}{c} \frac{\partial p}{\partial t} \mp \frac{\rho}{2} C_R \frac{u^2}{\Delta x} \dots \dots \dots (4')$$

(5) 式においてもブロックがなければ $\alpha=1$ であり、ブロックのある場合は h_s/h により変化があるものと予想される。また (6) 式の C_R は主として Reynolds 数及び運動が非定常であるための影響を受けると思われるが、ブロックの場合は流速の増大にともない Reynolds 数の影響はすみやかに消失するであろう。

実験結果はほぼ波頂において u は最大、 $\partial p / \partial t=0$ であることを示し、波形が静水線を切る点において $u=0$ であることを示している。よつてこの2点に注目して (4') 式から、 α, C_R を求めることとする。Reynolds 数はブロック一辺の長さを長さの代表とし、おのおのの進行波の u の最大値を速度の代表とすると、10 cm 立方ブロックにつき 23 400~31 000 であり、5 cm 立方ブロックではその 1/2 となる。表-7 はこの計算結果を示している。

表-7

case	T_{sec}	H_{cm}	H/h	h/L	$C_R \times 10^3$ (gr-cm 単位)		α	
					5 cm ブロック	10 cm ブロック	5 cm ブロック	10 cm ブロック
II-1	2.65	10.2	0.29	0.067	2.0 (1.5) 2.2 (1.6)	2.5 (1.9) 2.3 (1.8) 2.1 (1.6)	2.8 (2.7) 2.4 (2.7)	2.4 (2.0) 2.3 (2.0) 2.4 (2.2)
平均					2.1 (1.6)	2.3 (1.8)	2.6 (2.7)	2.4 (2.1)
II-2	2.05	9.8	0.28	0.095	1.6 (1.7) 1.7 (1.9)	2.0 (2.4) 2.1 (2.3) 2.1 (2.3) 2.1 (2.3)	2.3 (2.3) 2.3 (2.1)	2.3 (2.3) 2.2 (2.3) 2.6 (2.5)
平均					1.6 (1.8)	2.1 (2.3)	2.3 (2.2)	2.3 (2.4)
II-3	1.43	10.2	0.29	0.140	1.5 (1.3) 1.5 (1.3) 1.8 (1.5)	2.0 (1.8) 1.8 (1.8)	2.4 (2.0) 2.0 (1.7) 2.3 (2.0)	2.4 (2.3) 2.3 (2.3) 2.3 (2.2) 2.3 (2.1)
平均					1.6 (1.4)	1.9 (1.8)	2.2 (1.9)	2.3 (2.2)
II-4	1.03	10.2	0.29	0.233			2.5 (1.9) 2.5 (1.9) 2.4 (1.8) 2.2 (1.7) 2.1 (1.5) 2.1 (1.8)	2.2 (2.0) 2.1 (2.0) 2.3 (2.0) 2.4 (2.0) 2.4 (2.0)
平均							2.3 (1.8)	2.3 (2.0)
総平均					1.8 (1.6)	2.1 (2.0)	2.3 (2.2)	2.3 (2.2)

ただし () 内の数字は (4') 式において左辺の $\partial p / \partial x$ は実測値を用い、 $\partial p / \partial t, c, u^2$ には微小振巾波としての計算値を用いて算出したものである。

表-7 によれば C_R は 5 cm 立方ブロックに関する値は 10 cm 立方ブロックに関するものよりもやや小さく、一般に Reynolds 数から考えられるものの逆になっており、この場合の C_R は Reynolds 数には無関係に、形状効果によつていと考えてよい。

M.P. O'Brien と J.R. Morrison¹¹⁾ とは球の場合について進行波により生ずる水平力を測定し、今回と同様に C_R を求め、波の進行による非定常波の場合には、その大きさが Reynolds 数 10 000 の付近で定常流のその約

2倍になっていることを指摘している。われわれの得た C_R は全体としてのブロックにかかる水平力から計算されたものではなく、その点考慮の余地はあるが、正方形板が垂直に定常流にさらされた場合の抗力から求められた $C_R=1.16$ (C.G.S. 単位) と比較し、その 1.5~1.8 倍に達しており、球の場合と同様の傾向を示すこととなる。

α の値については 5 cm, 10 cm の両ブロックともにほぼ相似した値を得て全体として 2.2~2.3 程度が妥当と思われる。すなわち h_s/h が 1/7~1/3.5 の範囲内ではブロック寸法は α の値に影響を与えていない。またこの場合用いられた進行波の initial steepness は 0.0104~0.067 の範囲内にあるから、普通の海岸に見られる波についてはこのことは言うものと考えられる。この 1 より大きな α の存在により、今回の実験のような障害物の存する場合の進行波による圧力勾配は、単に微小振巾波の取扱いにより計算される値よりもはるかに大となり、これは浅海における構造物の設計上十分な注意を必要とする問題となる。碎波点近傍、さらに碎波後の磯波によってブロックその他に作用する水平力の問題は、より複雑かつ変動しやすい量を取り扱うこととなり、広範囲な測定資料とその詳細な検討とが行われなければならない。

これに関する実験は現在進行中であり、追って報告することとする。

参 考 文 献

- 1) Miche : "Mouvements Ondulatoires De La Mer Eu Profondeur Constante ou Décroissante" Annales des Ponts et Chansseés, 1944.
- 2) Davies : "Gravity Waves of Finite Amplitude" Quarterly of Applied Mathematics, 1952.
- 3) F. Suquet and A. Wallet : "Basic Experimental Wave Research" Proceedings Minnesota International Hydraulics Convention, 1953.
- 4) 田中 : "防波堤の水理" 水工学の最近の進歩, 1953.
- 5) R.G. Folsom : "Measurement of Ocean Waves" Transaction of American Geophysical Union, 1949.
- 6) H. R. Seiwel : "Investigation of underwater pressure records and simultaneous sea surface patterns" Transaction of American Geophysical Union, 1947.
- 7) 井島・柴山 : "波高計による波浪の観測 (第 2 報)" 運輸技術研究所報告, 1953.
井島・高橋 : 同上 (第 3 報) 同上 1954.
- 8) W.J. Pierson : "An Electronic Wave Spectrum Analyzer and its use in Engineering Problems", Technical Memorandum Beach Erosion Board, 1954.
- 9) J.J. Stoker : "The Formation of Breakers and Bores" Communications on Applied Mathematics, 1948.
- 10) 速水 "風による波の発生と発達, 海岸の碎波" 1955.
- 11) M.P. O'Brien and J.R. Morrison "The force exerted by waves on Objects" Transaction of American Geophysical Union, 1952.