

不規則波の重複波圧に関する実験的研究

岩 垣 雄 一* ・ 酒 井 哲 郎** ・ 浅 野 敏 之***
間 瀬 肇***・ 小 関 仁 彦****

1. ま え が き

防波堤直立壁前面の水深が入射波高の2倍以上であれば、一般に重複波が形成され、堤体は重複波圧を受けることになる。直立壁に作用する波圧の設計計算にあたっては、不規則波の場合、最近では有義波の波長と最大波高とによって代表されるような規則波が作用するものとして算定している¹⁾。

規則波の重複波圧については1928年に Sainflou がトロコイド波理論に基づく計算法を提案して以来、理論的にも実験的にも数多くの研究が進められ、ほぼその特性が明らかにされている。しかし、実際の海の波は不規則であり、波圧もしたがって不規則となることは当然である。この不規則の重複波圧についての研究は非常に少ない^{2), 3), 4)}。

本研究では、不規則波を用いた実験を行い、直立壁前面での水位変動をゼロアップクロス法で1波ずつ独立な規則波とみなし、Tadjbakhsh-Keller⁵⁾の第3次近似解より求めた計算波圧とそれに対応する測定波圧との比較を行い、ばらつきの原因について考察した。また、Reid⁶⁾の線型フィルターによって水位変動から波圧変動がどの程度推算できるかを検討した。なお、さらに重複波圧の頻度分布についても研究したが、これは別の機会に発表した⁷⁾。

2. 実験装置および実験方法

実験にあたっては、京都大学工学部土木系教室地下実験室に設置されている長さ27 m、幅50 cm、深さ70 cmの両面ガラス張りの実験水槽を用いた。水槽の一端には不規則波発生機が設置されており、その造波板の前方22.8 mの地点に直立壁を設けた。波圧計は共和電業のひずみゲージ式圧力変換器を用い、水槽底より35 cm上方の直立壁に1個、もう1個は直立壁前面3.5 cmの底面に取り付け、その真上に抵抗線式波高計を設置した。

水深は46 cmに一定とした。したがって、波圧は静

表-1 実験波発生のためのバンドパスフィルター出力周波数およびそのゲイン (空欄はゲイン0を示す)

実験 ケース	周 波 数 (Hz)									
	0.315	0.4	0.5	0.63	0.8	1.0	1.25	1.6	2.0	2.5
1				10						
2					10					
3						10				
4			10	10						
5				10	10					
6					8	8				
7					6	6				
8						8	8			
9							10	10		
10			10	10	10					
11			7	7	7					
12					8	8	8			
13		10	10	10	10					
14					8	8	8	8		
15					6	6	6	6		
16			7	7	7	7	7			
17	7	7	7	7	7					
18						7	7	7	7	7

水面下11 cmと水底において測定したことになる。

実験に用いた不規則波は全部で18ケースであり、これは不規則波発生機に組み込まれているバンドパスフィルターのゲインを表-1のようにして発生させたものである。ゲインは最大が10、最小が0であり、それぞれのゲインの値は直立壁前面で砕波がおこらないように決めた。測定は、一番遅いと思われる成分波の波速を計算し、それが直立壁に到達してから数秒後に開始し、約2分間測定した。したがって、測定中には造波板で反射した波の影響も入っているものと考えられるが、ここでは再反射の影響については一応考えないで、直立壁前面での波高・周期の不規則性に重点をおいた。

波形と波圧は同時に測定し、データレコーダーに収録した。2分間収録したデータのうち90 secを0.05 secごとにデジタル化し、解析に用いた。

* 正 会 員 工 博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正 会 員 工 博 京都大学助教授 工学部土木工学教室

*** 正 会 員 工 博 京都大学助手 工学部土木工学教室

**** 学生会員 京都大学大学院工学研究科

3. 実験結果および考察

直立壁前面での水位変動をゼロアップクロス法で1波ずつ定義すると、それぞれ波高・周期が求められる。これらの量を用いて第3次近似解の波圧強度が計算できる。計算値と測定値との比較は、波圧の全振幅 p_t と最大波圧（静水圧からの最大値） $p_{\max}$ について行った。

(1) 波圧の全振幅についての比較

実験を行った18ケースのうち、ケース5とケース12の静水面下11cmの波圧について、1波ずつ計算値 p_{tc} と測定値 p_{tm} を比較したものが図-1(a)および(b)である。図中に有義波を用いた波形勾配・相対水深を示している。ただし、波高としては直立壁前面での全振幅をとり波長は微小振幅波理論によって求めた。(a),(b)とも計算値が測定値よりも若干大きめではあるが、よく一致

しているといえる。他のケースも調べてみたところ、相対水深および波形勾配が大きくなるとばらつきが大きくなることがわかった。ケース5とケース12の水底における波圧について計算値と測定値を比較したところ、ケース5では実験値のばらつきが $\pm 10\%$ であったが、ケース12はばらつきが $\pm 25\%$ と大きかった。このケースでは水底で双峯型波圧が現われていた。理論から求められる双峯型波圧は2つの山の高さが同じになるが、不規則波の重複波圧では前後の波の影響を受けるためか、2つの山の高さが異なることが多く、このことが計算値と測定値をばらつかせる原因にもなっているものと思われる。

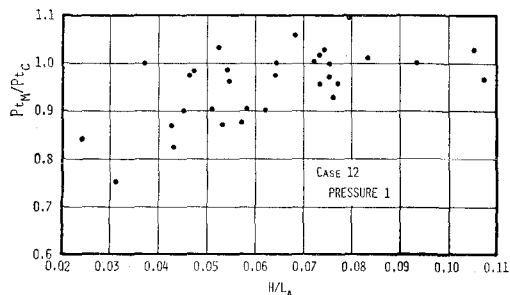
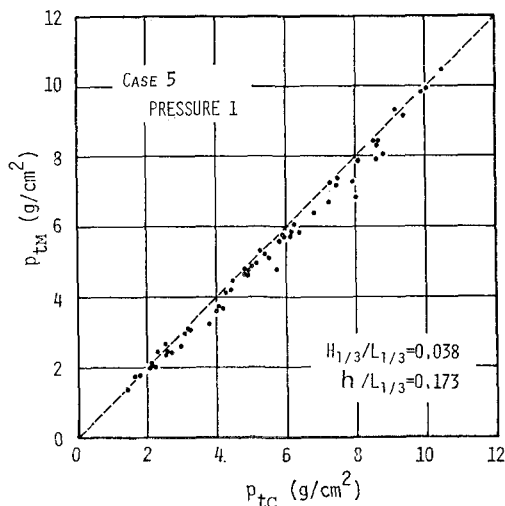


図-2 波圧の全振幅の測定値と計算値の比と波形勾配との関係

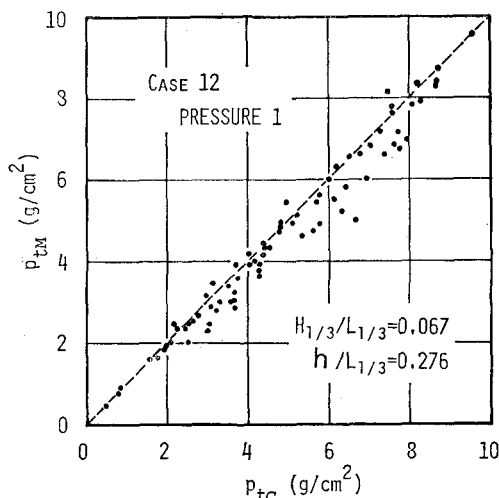
図-2は図-1(b)の測定値のうち小さい方を取除き平均値以上の波圧について、横軸に波形勾配、縦軸に測定値と計算値の比をとり、波形勾配の影響を調べたものである。この図から、波形勾配が小さいときは比の値が1より小さいが、0.07程度より大きいとほぼ1となることがわかる。

(2) 最大波圧についての比較

図-3(a)および(b)は最大波圧の計算値 $p_{\max c}$ と測定値 $p_{\max m}$ を比較したものである。全振幅のときに計算値とよく一致していたものでも、最大波圧をとるとばらつきが大きくなっている。いずれのケースも双峯型波圧が現われていないので、その影響とは考えられず、また波形勾配について調べてみたが図-2のような傾向もみられなかった。そこで、最大波圧と波の峰の高さについて考えてみる。図-4において、いま(A)がTadjbakhsh-Kellerの第3次近似解より求められる水面波形であるとする。不規則波の場合、理論波形と同じ波高 H ・波長 L を持っても(B)あるいは(C)のような波が考えられる。(C)のような波の場合には測定波圧の方が計算波圧よりも大きくなることが予想され、逆に(B)のような波の場合には計算波圧の方が大きくなるものと思われる。すなわち、単にゼロアップクロス法で各波を定義すると各波の平均水面が静水面に一致しなくなるため、最大波圧の測定値と計算値が合わない

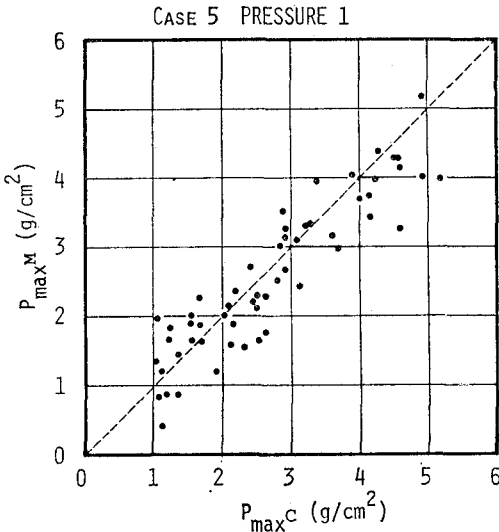


(a)

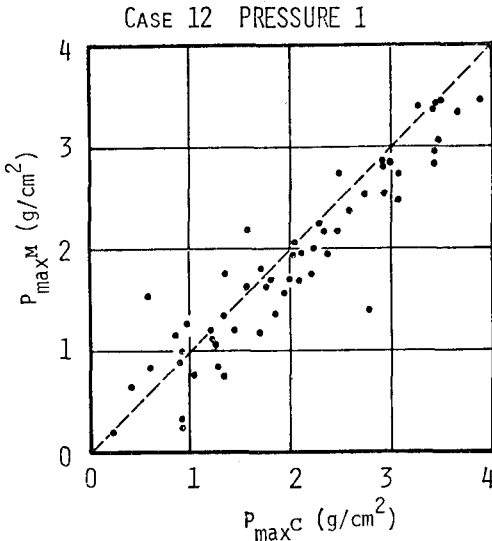


(b)

図-1 波圧の全振幅の計算値と測定値との比較



(a)



(b)

図-3 最大波圧の計算値と測定値との比較

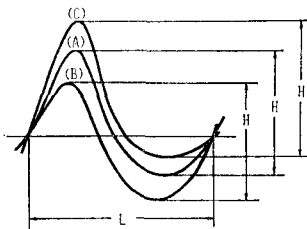


図-4 水面波形

る。理論波形の波の峰の高さとゼロアップクロス法で得られた測定波の峰の高さの差が $\pm 10\%$ 以内の波を対象として、最大波圧の計算値と測定値を比較すると良い一致が見られた。このように最大波圧は波の峰の高さに関

係がある。最大波圧を求めるには、ゼロアップクロス法で周期を求め、波高としては静水面から波の峰までの高さを2倍したものをを用いた方がよいと思われる。

(3) Reid の線型フィルター法による波圧変動の推算

岩垣・酒井・石田⁹⁾は Reid の提案した対称および反対称フィルターを用いて、水位変動の時間記録から不規則波の水粒子速度および加速度を算出し測定値と比較した。ここでも同様の手法を用いて、水位変動から直立壁に働く波圧変動を推算する。重複波は有限振幅の影響が強く現われるが、線型フィルターではその効果を入れることはできない。鹿島⁹⁾は Dean の流れ関数法および EXVP 法を用いて抗に作用する不規則な水平波力変動を解析しているが、解析できる波の数が限られていて、線型フィルター法にくらべて面倒である。ここでは、非線型性が強く現われる重複波圧に対して Reid の線型フィルター法がどの程度適用できるかを検討した。

微小振幅波理論によると、規則波の場合の水位変動と波圧変動の関係は

$$p = \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \eta \dots\dots\dots (1)$$

で表わされるので、Reid の提案した対称フィルターを用いれば、不規則水位変動 $\eta(t)$ から $p(t)$ を算出することができる。すなわち、不規則波の水位変動を

$$\eta(t) = \int_0^\infty M(\omega) \cdot \cos(\omega t - \theta(\omega)) d\omega \dots\dots\dots (2)$$

のように表現すると、波圧変動 $p(t)$ は微小振幅波理論を用いて

$$p(t) = \rho g \int_0^\infty R_p(\omega) \cdot M(\omega) \cdot \cos(\omega t - \theta(\omega)) d\omega \dots\dots\dots (3)$$

$$R_p(\omega) = \cosh k(h+z) / \cosh kh \dots\dots\dots (4)$$

$$\omega^2 = gk \tanh kh \dots\dots\dots (5)$$

と表わすことができる。ただし、 θ は初期位相、 $M(\omega)$ は振幅スペクトルに相当するものである。Reid の提案した対称フィルターは τ をサンプリング間隔とすれば、

$$G_s[y(t)] = a_0 y(t) + \sum_{n=1}^N a_n [y(t+n\tau) + y(t-n\tau)] \dots\dots\dots (6)$$

によって表わされるが、この式の $y(t)$ に式(2)の $\eta(t)$ を代入すると、

$$G_s[\eta(t)] = \int_0^\infty \left[a_0 + 2 \sum_{n=1}^N a_n \cos n\omega\tau \right] \times M(\omega) \cdot \cos(\omega t - \theta(\omega)) d\omega \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、係数 a_n を $R_p(\omega)$ のフーリエ係数とすれば、水位変動から波圧変動を計算することができる。なお、実際の計算にあたっては、 $\tau = 0.05 \text{ sec}$ 、 $N = 50$ とした。

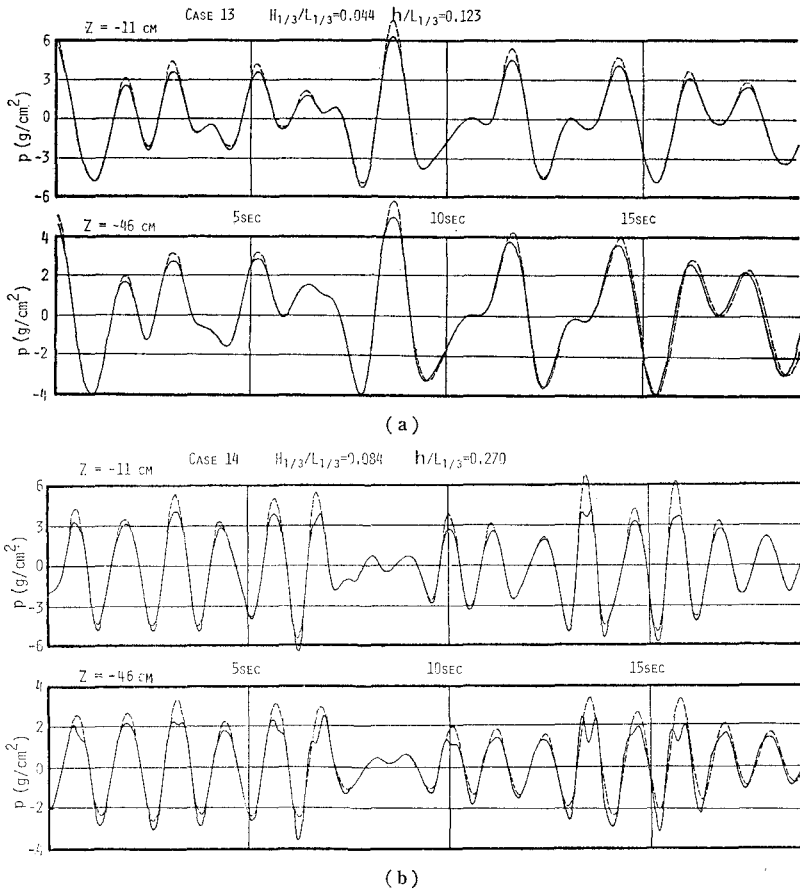


図-5 重複波圧の時間変化

図-5(a) および (b) はそれぞれケース 13, 14 について、水位変動から推算した波圧変動(破線)と測定した波圧変動(実線)を比較したものである。ケース 13 は相対水深が $h/L_{1/3} = 0.123$ であり、ケース 14 は $h/L_{1/3} = 0.270$ であり、後者の場合には静水面下 11 cm および水底の波圧に双峯型波圧が現われている。この図においては、平均値を差引くという平均操作は行わなかった。また、静水面下 11 cm の波圧については波高計と波圧計の位置が 3.5 cm 離れているので実際には位相差が現われるが、ここでは適当にずらして位相を合わせた。図から波圧の振幅が小さいときは計算波圧と測定波圧がよく一致しているが、振幅が大きくなると山の位置で計算波圧が測定波圧よりも大きくなり、谷の位置では逆に測定波圧の絶対値が大きくなっていることがわかる。これは水面波形は山が尖って谷が平らな形をしているのに対し、波圧の方は 2 倍・3 倍周波数成分が山を低くするように作用するためである。(a) で山において計算波圧が若干大きくなっているが、良く波圧変動を表わしているといえる。それに比べ (b) においては双峯型波圧が現われており、線型フィルターではそれを表現することがで

きない。

表-1 で示した全部の実験ケースについて調べたところ、不規則波の代表量 $T_{1/10}\sqrt{g/h}$, $h/H_{1/10}$ が土屋・山口¹⁰⁾によって提案された有限振幅重複波理論の適用限界を表わす図の第 1 次近似の領域に入っていれば、線型フィルターによって十分波圧変動が推算できることがわかった。しかし、その場合でも波圧の全振幅についてみるとやはり差があるので、この差を調べるために 図-6(a) および (b) を作成した。これは不規則波の重複波圧が全振幅についてみると第 3 次近似解と比較的良好合うことから、静水面下 11 cm と水底において、微小振幅理論による波圧の全振幅と第 3 次近似解によるその比 n を縦軸に、相対水深を横軸にとり、波形勾配をパラメーターとして示したものである。これによれば、静水面下 11 cm においては

微小振幅波理論による波圧の方が大きく、水底においては相対水深が小さいときのみ微小振幅波理論による波圧の方が大きいことがわかり、図-5(a), (b) の傾向をこれによって説明することができる。図-6(a), (b) 中の実験値は水位変動の 1/10 最大波を用いて微小振幅波理論により求めた波圧の全振幅と、測定した波圧変動から直接求めた 1/10 最大波圧の全振幅の比をプロットしたものであるが、理論曲線と傾向が似ていることがわかる。したがって、この図から Reid の線型フィルターで推算した波圧変動と実際の波圧変動の大きさの差を推定することができると思われる。

4. 結 び

この研究は、直立壁に働く不規則波の重複波圧について、直立壁前面の水位変動と波圧変動の関係を調べたものであり、主要な結果は次のとおりである。

(1) 波圧の全振幅に関して、双峯型波圧の現われないようなケースでは、不規則波をゼロアップクロス法で 1 波ずつ独立な規則波とみなして波圧を有限振幅波理論から算定することができる。一方、双峯型波圧が現われ

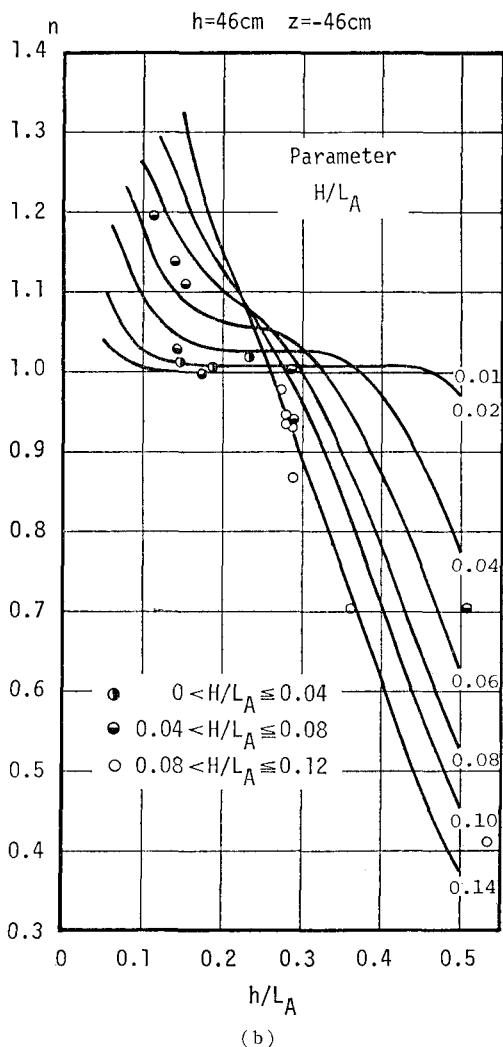
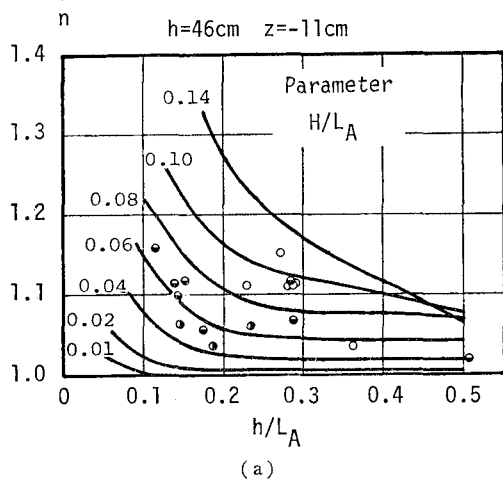


図-6 微小振幅波理論による波圧と第3次近似解による波圧との比

る場合には $\pm 25\%$ の誤差範囲内で理論から算定できるが、波形勾配が大きくなると測定波圧の方が計算波圧よりも大きくなる傾向がある。

(2) 最大波圧を算定する場合には、第3次近似解の波の峰の高さと実測の波の峰の高さの違いにより、ゼロアップクロス法によって求めた測定値は計算値とは必ずしも一致しない。

(3) Reid の線型フィルターで水位変動から波圧変動を推算する場合、不規則波の代表量 $T_{1/10}\sqrt{g/h}$, $h/H_{1/10}$ が波圧公式の第1次近似解の適用範囲にあれば、推算値は測定値と良く一致する。しかし、適用範囲外の場合には波圧の山に双峰型の変動が現われ、その近傍では一致しなくなる。両者の全振幅の相違は有限振幅波理論によってある程度推定が可能である。

なお、この研究は文部省自然災害特別研究(代表者 榎木 亨教授)による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1979.
- 2) 合田良実・柿崎秀作: 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第5巻10号, 57p., 1966.
- 3) 橋本 宏: 海岸堤防に作用する不規則波の波力, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 285~289, 1973.
- 4) 小森修蔵・田中寛好・和田 明: 外海波浪実験設備による現地波浪のスペクトル近似と波圧問題への適用, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 318~322, 1977.
- 5) Tadjbakhsh, I. and Keller, J.B.: Standing surface waves of finite amplitude, Jour. Fluid Mech., Vol. 8, pp. 442~451, 1960.
- 6) Reid, R.O.: Correlation of water level variation with wave forces on a vertical pile for nonperiodic waves, Proc. 6th Conf. Coastal Eng., pp. 749~786, 1957.
- 7) 間瀬 肇・岩垣雄一・浅野敏之: 不規則重複波圧の頻度分布に関する実験的研究, 第34回年次学術講演会講演概要集, 1979.
- 8) 岩垣雄一・酒井哲郎・石田 啓: 不規則波の水粒子速度と水面変動との相互関係に関する研究, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 149~154, 1972.
- 9) 鹿島遼一・丸山康樹・長谷川寛: 杭に作用する水平波力変動の解析, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 342~346, 1977.
- 10) 土屋義人・山口正隆: せつ動解による有限振幅重複波理論の適用限界について, 第16回海岸工学講演会講演集, pp. 7~13, 1970.