

重複波の波圧式とその適用限界

——永井・玉井・西村「深い海中に築造された直立防波堤に働く波圧」;
第10回海岸工学講演会に対する討議——

岸

力*

永井氏らは第9, 10回海岸工学講演会に重複波の波圧に関する研究結果を発表し, いくつかの新知見をのべられました。2年にわたる研究の要約として第10回講演会で示された結論の一部はつぎのとおりであります。

1) 直立防波堤前面水深が侵入波高の1.8倍以上あっても ($h/H \geq 1.80$), 侵入波の周期 $T \leq 6 \text{ sec}$ で波形勾配 $H/L \geq 0.040$ の場合には, 部分的な砕波を生じ, その波圧合力の値は Sainflou の方法によって求めた値よりほぼ 10~40% 大きい。

実際の海においては暴風時の波浪はいろいろな周期および波高の波が一緒になって防波堤に衝突するので, 実験の場合以上に砕波を生ずる可能性が多いと考えられる。

2) 上記の範囲を除けば, $h/H \geq 1.80$ であれば $T = 5 \sim 13 \text{ sec}$ の範囲の波は一般に重複波を生ずると考えてよいであろう。重複波を生ずる場合には, 直立壁におよぼす波圧分布および合力は, 微小振幅波理論による浅海波重複波の式が実験値に最もよく合う。ただし $T = 7 \text{ sec}$ 前後の波 ($6 \text{ sec} < T < 8 \text{ sec}$) では $H/L \geq 0.040$ の場合には, この理論式の値よりほぼ 20~80% 大きい値を与える。

3) Sainflou の方法により求めた波圧合力の値は, 重複波を生ずる場合にはすべての波において過大な値を与える。特に $T \geq 8 \text{ sec}$ の波で $H/L \geq 0.040$ の場合には実験値の2~3倍の値を与える。

本文では, 永井氏らの実験結果を無次元量の形で整理し, 結論をさらに一般化してのべる。

波が直立壁に入射するとき, 入射波が砕波であれば直立壁面に作用する波圧は衝撃性を示し, いわゆる重複波圧とは違った性質を示すのは当然であるが, 入射波が砕波でなくても, 波形勾配の大きい波は部分的な砕波を生じ, 波圧は重複波理論より大きくなることが知られている。

重複波型の波圧から砕波型波圧への移行には波圧の2倍周波数成分が重要な役割を演じ, また波圧の2倍周波数成分には波形が関与しており, 結局波高の大きい重複波の波圧には波形が重要な効果をおよぼす。浜田[1956]は重複波型波圧から砕波型波圧への過渡状態を調べ, 波

圧の近似式として式(1)を与えた。

$$\frac{p}{\rho} = \frac{1}{4} \left\{ 1 - \frac{\sinh^2 k(z_t + h)}{\sinh^2 kh} \right\} \frac{d^2}{dt^2} \eta^2(t) + g\eta(t) \frac{\cosh k(z_t + h)}{\cosh kh} - g z_t \dots\dots\dots (1)$$

ただし

z_t : 静止時に z の位置にあった水分子の時刻 t のときの位置で式(2)で与えられる。

$$z_t = \eta(t) \frac{\sinh k(z_t + h)}{\sinh kh} + z \dots\dots\dots (2)$$

$\eta(t)$: 壁面における静水面からの水位変動量

式(1)によれば, 波形勾配がかなりの大きさを持ち, しかも波形の前傾した波が直立壁に入射するときは, 式(1)の右辺第1項が第2項よりも異常に大きくなって砕波型の波圧が生じることがわかる。永井[1962]は壁面に波山が生じた時刻の合波圧の算出式として式(3)を示した。

$$P_c = -\rho g k H^2 (h + H) \left(\tanh kh + \frac{1}{2} k H \right) + \rho g H \frac{\sinh k(h + H)}{k \cosh kh} - \frac{\rho g}{2} (H^2 - h^2) \quad (3)$$

式(3)の右辺第1項が式(1)の右辺第1項に相当するものである。

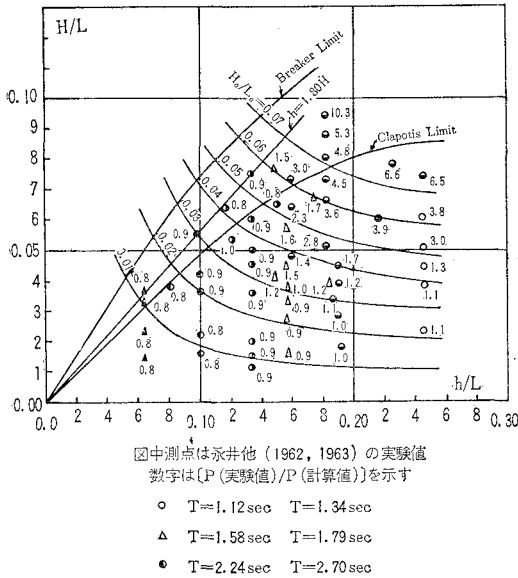
重複波の波圧式の適用限界を考える場合, 式(1)の右辺第1項と第2項の大きさの比が重要なパラメーターになるであろう。第1項と第2項の比は (η/gT^2) で表わされる。 η を H_0 に gT^2 を L_0 に置きかえると (η/gT^2) は (H_0/L_0) でも表わされる。また重複波の波圧式は当然重複波の砕波限界内でのみ適用されるものであるから重複波の砕波限界も波圧式の適用範囲を考える一つの条件となるであろう。

そこで永井らの実験結果を図-1のように整理してみた。図-1には進行波の砕波限界, 重複波の砕波限界を記入した。前者は砕波波圧の適用範囲を示すものである。図にはさらに, 一般に用いられている重複波の適用限界 $h = 1.80 H$ の線も記入してある。図-1に永井らの実験値を記入し, パラメーターとして (H_0/L_0) の等値線を描いた。図中の実験値に付した数字は, 波圧合力の実験値と式(3)による計算値との比を示すものである。

図によればつぎの事実が見出される。

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部

図-1 垂直壁に働く圧力の実測値と計算値との比較



図中測点は永井他 (1962, 1963) の実験値
数字は [P (実験値)] / P (計算値) を示す

- T=1.12 sec T=1.34 sec
- △ T=1.58 sec T=1.79 sec
- T=2.24 sec T=2.70 sec

1) 入射波の波形勾配が $(H_0/L_0) \leq 0.03$ ならば重複波の波圧は式 (3) でほぼ正確に求められる。また $h = 1.80 H$ という重複波圧の適用限界も妥当なものといえる。重複波波圧が波形の上昇加速度に影響されることを考えると、波圧式の適用に関して、波形勾配にある上限が存在することは常識的にも認められるであろう。

2) $h/L < 0.12$ の場所では、 $h = 1.80 H$ を重複波圧の適用限界と考えてもだいたいさしつかえない。

3) $h/L > 0.16$ の場所では、入射波の波高が重複波の砕波限界以下であっても、式 (3) の計算値の数倍におよぶ波圧が生じうる。波圧の実測値と計算値との比は、 (H_0/L_0) の値が増すにつれて大となっている。

4) 同一の (H_0/L_0) をもつ波であれば、 h/L が大であるほど、波圧の実測値と式 (3) による計算値との比は大きくなる傾向がある。

2), 3), 4) の性質は部分砕波という考えでは説明が困難である。特に 4) の性質は、重複波の波圧に対する2倍周波数成分の効果の特性を想起させる。式 (1) において、小振幅波を仮定すれば右辺第1項と第2項の比は表-1 のようになる。表-1 で明らかなように式 (1) における右辺第1項と第2項の比は h/L および H/L の大きいほど大である。同一波形勾配の波では h/L が大きい

表-1 重複波圧における基本周波数成分と2倍周波数成分の振幅比 (浜田 [1956])

s δ	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05
0.01	0.36	0.19	0.10	0.05	0.021	0.010
0.03	1.10	0.58	0.30	0.15	0.064	0.030
0.06	2.20	1.17	0.61	0.30	0.130	—
0.09	3.30	1.75	0.91	0.45	—	—
0.12	4.40	2.34	1.21	—	—	—

$s = h/L, \delta = H/L$

ほど第1項と第2項の比が増大し、たとえば $h/L = 0.1$ と $h/L = 0.3$ の場合をくらべると、比の値は後者が前者のほぼ5倍となっている。

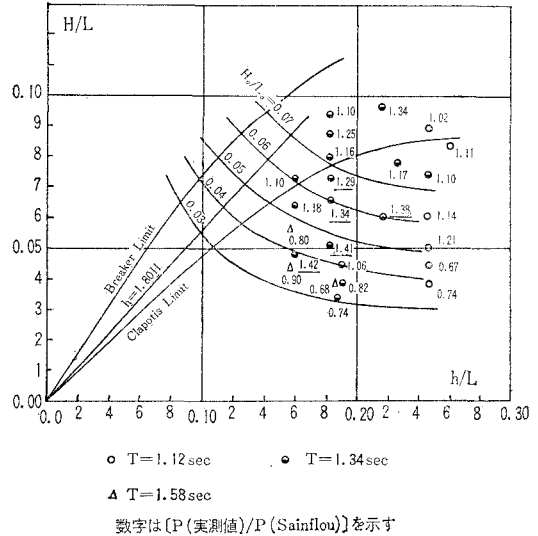
もともと式 (3) は小振幅波を仮定して導かれたものであり、波形勾配が大きな波に対しては精度が劣ってくるであろう。4) に指適した傾向は、式 (3) で行なった補正が正確でないために生じたものと思われる。

実験の結果では、波形勾配が大きい波では、実測の波圧は式 (3) による計算波圧より大である。その傾向は、 h/L の大なる領域ほどいじりくしく、図-1 によれば、 $h/L \geq 0.16$ となれば実用波圧式として式 (3) 以外の式が必要であると思われる。式 (3) に代えて、高次の重複波理論を用いることも考えられるが、それも波形の変形効果など考えると必ずしも波圧計算の精度を向上させないかも知れない。

現在まで重複波の波圧式として広く用いられてきた Sainflou の式は式 (3) の右辺第1項を省略したものであり、式 (3) より大きな波圧を与える式であるから、 $(H_0/L_0) > 0.03, h/L > 0.16$ の範囲に対しては実測波圧と Sainflou の式による計算値とを比較してみる。結果を図-2 に示した。

図-2 で下線を付した測定値は、ほぼ同一の h/L の測定値の中で H/L の小さな波のほうが $[P_{\text{exp}}/P_{\text{sainflou}}]$ の比が大となり測定誤差が大きいと想像されたものである。

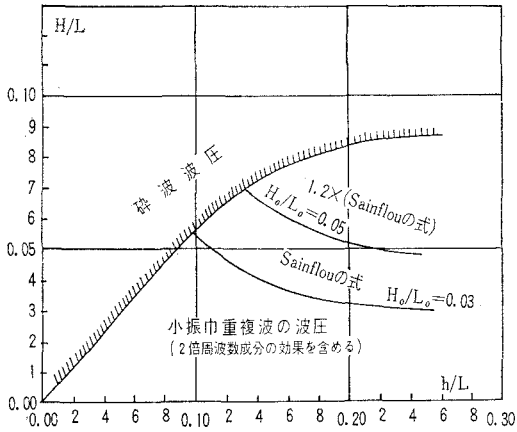
図-2 圧力の実測値と Sainflou 式による計算値との比較



- T=1.12 sec ● T=1.34 sec
 - △ T=1.58 sec
- 数字は [P (実測値)] / P (Sainflou) を示す

図-1 と 図-2 とを比較すると、 $(H_0/L_0) > 0.03, h/L > 0.16$ の範囲では、Sainflou の式による計算波圧は結果的には2倍周波数成分を補正した式 (3) よりも実測値に近いことが認められる。図-2 によれば重複波の限界以下の波形勾配ならば、Sainflou の式による計算波

図—3 垂直壁に働く波圧の算出基準案



圧の誤差はおおよそ 20% 以内であろうと考えられる。

図—1, 2 の結果に, さらに多少の安全性を見込み, 筆者は垂直壁に対する波圧の実用的な算出基準として図—3 を提案する。図中砕波波圧と重複波型波圧との境界線は $h=1.80H$ の線と重複波の限界曲線とを $h/L=0.12$ の近くで滑らかに接続させたものである。また重複波型波圧を $H_0/L_0=0.03$ および 0.05 の線で 3 部分に分けた。砕波波圧と重複波型波圧の境界線の近傍には, 今後さらに波圧の実験が進めば, 部分砕波を示す過渡領域が当然設定されるであろう。