

リーフ上の防波堤に作用する波圧に関する実験的研究

小林 学* ・中山 哲 巖** ・宮地 健 司** ・榎本 一 徳***
金城 哲 男**** ・篠田 邦 裕* ・佐藤 勝 弘*****

1. はじめに

リーフ海岸においては、台風による暴風時に個々の波を上回るような大振幅のサーフビート（長周期波）が発生することが明らかになっており、これらの現象に起因すると考えられる構造物の被害も少なくない。波浪変形については、近年の現地観測資料を基にリーフ上の波浪変形特性の研究が仲座ら（1998 ほか）により進められ、実務設計で用いられているリーフ上波高算定式の再検討も行われた。一方、リーフ上の波圧や波力に関する研究事例は伊藤ら（1974）、仲座ら（1989）のほかは少なく、長周期波が構造物に与える力が、動圧的であるか、静水圧的であるかについても明らかになっていない。また、その影響を考慮した波力算定法も明確となっていない。このため本研究は、リーフ形状、水深、堤体位置、作用波を変えた系統的な 2 次元水路での水理模型実験によりリーフ上の防波堤に作用する波圧特性を明らかにすると共に、長周期波等の影響を考慮した波力算定法の検討を行ったものである。

2. 実験装置および実験の方法

実験は、幅 1.0 m × 深さ 1.5 m（水深 1.0 m）× 長さ 100 m の 2 次元造波水路で、ピストン型規則波・不規則造波機（反射波吸収制御）を用いて行った。地形模型の海底勾配は 1/10。模型縮尺は 1/50 とした。実験波浪はブレットシュナイダー・光易型のスペクトル形状を有する不規則波とし、波高約 5~20 cm と周期約 1.4~2.3 s を組み合わせた 12 種類とした。実験水位（リーフエッジでの水深）は、現地との整合性を考慮し、1 cm、5 cm の 2 水位とした。計測項目は、水面変動と波圧とし、水面変動については、容量式波高計を用い入射波とリーフエッジ沖側斜面からリーフ上の計測を行った。また、波圧については、動歪圧力センサーを用い計測し、計測位置は作用波圧の分布形状が把握できるよう適宜変更した。サ

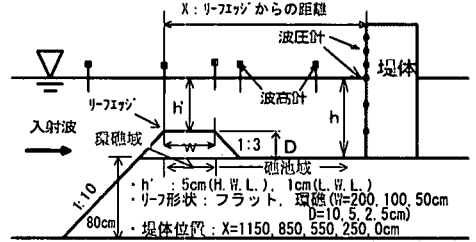


図-1 模型形状図

ンプリング間隔は、水面変動を 50 Hz、波圧を 1000 Hz とし、計測時間は、長周期波の周期を考慮し 5 分程度とした。

模型形状を図-1 に示す。実験は、リーフ形状をフラット型と環礁型の場合で行い、環礁型の場合には、環礁の高さ D を 10 cm とし環礁幅 W を 200, 100, 50 cm と変えたものと、環礁幅を 100 cm に固定し環礁の高さを 5, 2.5 cm と変えたもので行った。波力の位置的变化を検討するために、リーフ形状フラット型で水位 h を 5 cm とし、堤体位置をリーフエッジから 1150, 850, 550, 250, 0 cm の 5 地点で作用波圧の計測を行った。堤体模型は越波を許さない天端高を有する矩形模型とした。また、消波工が波圧に与える影響についても検討を行った。

3. 実験結果および考察

リーフ海岸特有の長周期波が波圧に与える影響について検討するため、計測データを Wavelet Filter を用い短周期成分・長周期成分に分離した。その境界の周期は、入射波の有義周期の 3 倍とし、3 倍以下の周期成分を短周期成分、それ以上の周期成分を長周期成分とした。

(1) 堤体前面の水面変動と波圧の関係

図-2 は、計測された堤体前面（堤体面から 2 cm）の水面変動の静水圧換算値と静水面下 -2.0 cm の波圧の経時変化を比較した例である。

図より、長周期成分については、水面変動の静水圧換算値と波圧波形はほぼ一致しており、静水圧的に作用するものと考えられる。一方、短周期成分は、水面変動のピーク付近で静水圧換算値との差が大きく、長周期波と

* (財) 漁港漁村建設技術研究所
正会員 工修 (独) 水産総合研究センター水産工学研究所
** (独) 水産総合研究センター水産工学研究所
正会員 工修 復建調査設計(株)
*** (独) 水産総合研究センター水産工学研究所
正会員 工修 沖繩県農林水産部漁港課
**** (独) 水産総合研究センター水産工学研究所
正会員 工修 (財) 漁港漁村建設技術研究所

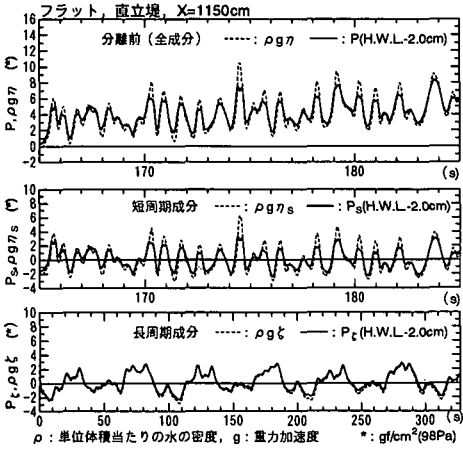


図-2 水面変動の静水圧換算値と波圧の経時変化

は分けて考えるべきと判断される。

このことより、分離前の全波圧および全波力は、短周期成分と長周期成分の波圧および波力をおのおの求め、これらに平均水位上昇量に対応する量を加えて重ね合わせで推定すべきと考えられる。

なお、平均水位上昇量は、静水圧として防波堤の内外で同等に生じると考えられるので、防波堤に作用する波圧としてはその寄与は差し引いて考えるが、後述するように波圧の作用高さの算定には考慮する。

(2) 波圧強度の分布形状

図-3に、計測された全波圧(分離前)の1/10最大波圧強度の分布例を示す。

図より、波圧強度は、静水面上がほぼ三角形、静水面下がほぼ一様となる台形分布であることがわかる。この分布形状は、他のケースでもほぼ同様であり、平均水位上昇量による分を差し引いた防波堤に作用する波圧の分布としては、仲座ら(1989)の提案と同様に平均水面(静水面上に平均水位上昇量を加味した水面)以下を一様とする台形分布と考えて良いことがわかった。

次に、各成分の波圧強度の分布について述べる。

a) 長周期成分の波圧強度の分布形状

前述の(1)で述べたように、長周期成分の分布形状は静水圧分布と仮定できるので、平均水面以下の波圧強度から平均水位上昇量による静水圧分を差し引いて考えると、平均水面から後述する1/10最大波圧発生時に対応する長周期波の振幅を加算した水面(長周期波の作用高さ)まで三角形となり、平均水面以下が一様な台形分布となると考えられる。

b) 短周期成分の波圧強度の分布形状

図-3に示したように、静水面上の分離前の波圧強度はほぼ三角形に分布しているときみなせるので、短周期成分の分布としては、長周期波の作用高さから短周期成分の波圧作用高まで三角形、長周期波の作用高さ以下が一様な台形分布と考えると、分離前(全成分)の波圧強度の分布形状が各成分の重ね合わせとして表現でき合理的である。

なお、短周期成分の波圧作用高は「平均水面に長周期波の振幅を加算した水面」から堤体位置通過波短周期成分の有義波高の1.25倍程度と見られる。

(3) 短周期成分の波圧係数

以上から、短周期成分の波圧強度の分布形状が台形分布であると仮定できるので静水面位置の波圧に着目し、その波圧係数について検討する。

図-4に堤体位置による波圧係数の位置的变化の一例を示す。ここで、波圧係数 $K_{1/n}$ は、短周期成分での波圧強度の統計値 $P_{s1/n}$ (最大, 1/10最大, 1/3最大および平均)を通過波の短周期波有義波高 $H_{s1/3}$ で除したもので、次のように定義する。

$$K_{1/n} = P_{s1/n} / \rho g H_{s1/3} \dots\dots\dots (1)$$

波圧係数は概ね、リーフエッジから奥に向かって小さくなる傾向である。なお、リーフエッジでの波圧係数は他のリーフ上の波圧係数に比べ極端に大きく、エッジ部特有の衝撃碎波的な現象と考えられるので、以下では、リーフエッジからある程度離れたところでの波圧係数について、検討することとした。

波圧係数の位置的变化の要因の一つとして波の非線型

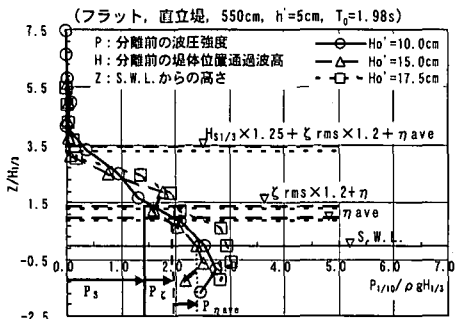


図-3 1/10最大波圧強度の分布例

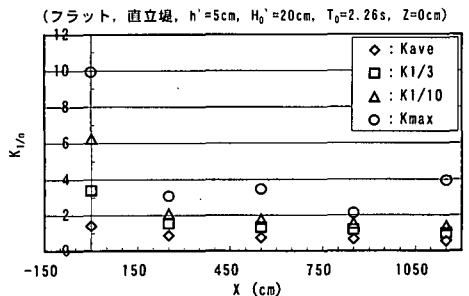


図-4 短周期成分の波圧係数の位置的变化

性的影響が考えられる。そこで、非線型性をあらわすパラメータとして、ひずみ度・尖鋭度・前傾度を用い検討したところ、合田(1985)の提案する前傾度を導入した場合の係数(前傾度/水深波高比)を用いて整理すると、リーフ形状や堤体位置・堤体前面水深によらず波圧係数の変化をよく表せることがわかった。前傾度は次式で表される。

$$\beta_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (\eta_i - \bar{\eta})^3}{\left[\sum_{i=1}^{N-1} (\eta_i - \bar{\eta})^2 \right]^{3/2}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{\eta}_i = (\eta_{i+1} - \eta_i) / \Delta t$$

ただし、N：データ数、Δt：サンプリング間隔。

図-5は、波圧係数の整理に用いた前傾度β₃の位置的变化をリーフ形状フラット、水位H.W.L.(h=5cm)、L.W.L.(h=1cm)の場合について示したものである。

図より、前傾度は、H.W.L.とL.W.L.で若干その傾向が異なるがリーフ形状フラット型の場合では、リーフエッジからの距離により指数関数的に減少することがわかる。なお、ここでは示していないが、環礁型の場合は、環礁域ではフラット型の場合とほぼ同様な指数関数的減衰傾向であり、礁池域になると前傾度はほぼゼロとなる。

図中の実線は、H.W.L.での前傾度より求めた回帰式で、次式で表される。

$$\beta_3 = 48.819 \times \exp\{-0.04639 \times (X/H_0)\} \dots\dots (3)$$

ただし、β₃：前傾度、H₀：換算沖波波高、X：リーフエッジからの距離

次に、図-6に、式(3)から求められた前傾度を用いた場合の波圧係数と堤体位置における水位上昇量を考慮した水深波高比との関係を示す。

図より、波圧係数は、前傾度を水深波高比で割った値とほぼ線形の関係にあり、次式で表される回帰式で推定できる。

$$K_{1/10} = 0.0221 \times [\beta_3 / \{H_{S1/3} / (h + \eta_{ave})\}] + 1.354 \dots\dots\dots (4)$$

(4) 消波工の有無による波圧係数の変化

消波工の有無による静水面位置の短周期成分の波圧係数を比較した。

図-7に直立堤に対する消波工被覆堤での短周期成分の波圧係数の比を水深波高比(H_{S1/3}/(h+η_{ave}))で整理したものを示す。

図より、水深波高比により消波工の波圧係数の低減効果が異なり、リーフ形状フラット型の場合である水深波高比が0.35程度では、消波工による波圧係数の低減が見られ直立堤の約80%程度となる。一方、環礁型である水深波高比が0.25程度以下では、波圧係数が1割以上大きくなる状況が見られる。これは、堤体位置水深が堤体位置の波高に対し十分に深いことから重複波としての性質が強くなり、消波工により強制的な碎波が生じるため

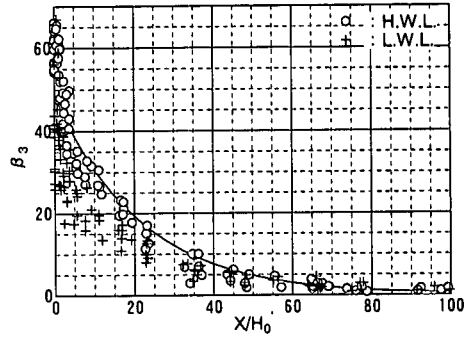


図-5 前傾度の位置的变化

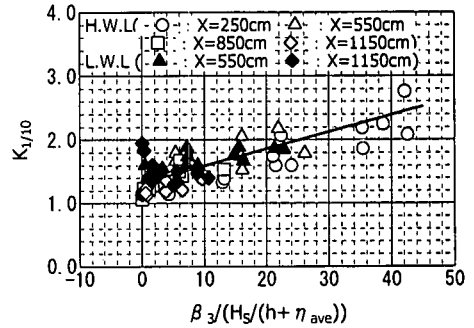


図-6 波圧係数と前傾度/水深波高比の関係

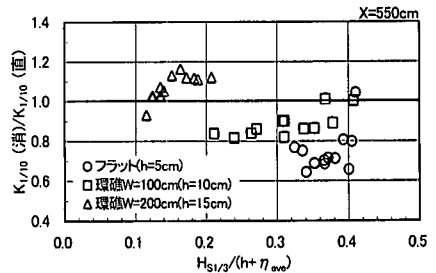


図-7 直立堤と消波工被覆堤との波圧係数の比較

あることが推測される。

このように、リーフ上においても水深波高比が小さくなる場合には、従来の研究(例えば森平ら, 1967)と同様に、消波工による波力低減工が期待できない場合があることがわかる。

4. リーフ上の防波堤に作用する波力算定式の提案

以上の実験結果を踏まえ、構造物の安定と関連づける波力として、統計的に安定し、他の代表波圧強度(有義波圧強度や平均波圧強度)とも線形の関係が強い1/10最大波力について整理し、波力算定式の提案をする。

(1) 波圧作用高

これまでの検討から各成分の水面変動と防波堤に作用する波圧との関係および波圧強度の分布形状は明らかになった。次に、各成分の波力を求めるに当たり各成分の波圧作用高の検討が必要である。図-8に波圧の分布形状の概略図を示す。

図に示すように、各成分の波力は、短周期波力が実線で、長周期波力が点線で囲まれた面積で表される。全波力はそれらの和として算定される。長周期波圧の作用高 η_s^* は平均水面上に、短周期波圧の作用高 η_s^* は平均水面上に長周期波圧の作用高を加えた水面上に算定される。

短周期波の波圧作用高 η_s^* は、3(2)b) で述べたように

$$\eta_s^* = 1.25 \times H_{S1/3} \dots \dots \dots (5)$$

となる。

長周期波による波圧作用高 η_s^* は、 $\eta_s^* = \zeta$ であり、短周期成分と長周期成分の波力を重ね合わせ、防波堤に作用する波力を算定するため、両成分の同時性を考慮して設定する必要がある。

図-9に短周期波力の1/10最大出現時の長周期波の水面変動 $\zeta(F_{S1/10})$ とその振幅(標準偏差値) ζ_{rms} との関係を示す。

なお、全波力のピークの出現と短周期波力のピークの出現は、ほぼ同時であることが確認されている。

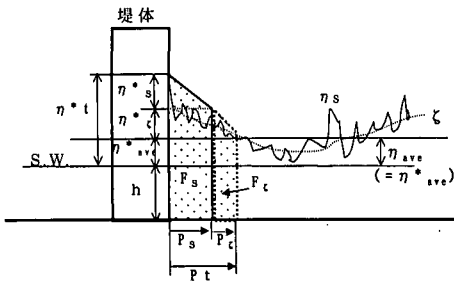
図より、短周期波力の1/10最大出現時の長周期波の水面変動は、その振幅と線形の関係にあり、次のように表せることがわかる。

$$\zeta(F_{S1/10}) = 1.2 \times \zeta_{rms} \dots \dots \dots (6)$$

したがって、長周期波による波圧作用高 η_s^* は

$$\eta_s^* = 1.2 \times \zeta_{rms} \dots \dots \dots (7)$$

と表せる。なお、 ζ_{rms} は、詳細をここでは述べないが、本実験の範囲では、リーフ上の堤体前面で完全反射してお



ηs: 短周期波の水面変動, ζ: 長周期波の水面変動, ηave: 平均水位上昇量, P1: 分離前の波圧, Pl: 長周期波圧, Ps: 短周期波圧, ηs*: 分離前の波圧作用高, ηave: 水位上昇量による波圧作用高, ηs*: 長周期波による波圧作用高, ηs*: 短周期波による波圧作用高, Ft: 単位幅当たりの全波力, Fs: 単位幅当たりの短周期波力, Fl: 単位幅当たりの長周期波力, h: 堤体位置水深

図-8 波圧分布形状の概略図

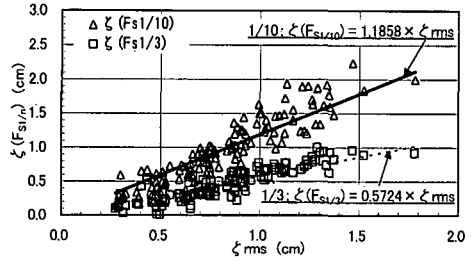


図-9 短周期波力の1/10最大出現時の長周期波水面変動と振幅の関係

り、換算沖波 H_0 のほぼ4~8%であった。

(2) リーフ上の防波堤に作用する波力の算定式

以上から、短周期波力は、次のように表される。

$$F_s = (0.5 \times \eta_s^* + \eta_{ave} + h) \times P_{S1/10} \dots \dots \dots (8)$$

$$\eta_s^* = 1.25 \times H_{S1/3}$$

$$\eta_s^* = 1.2 \times \zeta_{rms}$$

$$P_{S1/10} = K_{1/10} \times H_{S1/3}$$

$$K_{1/10} = 0.0221 \times [\beta_3 / \{H_{S1/3} / (h + \eta_{ave})\}] + 1.354$$

$$\beta_3 = 48.816 \times \exp\{-0.04639 \times (X/H_0)\}$$

図-10に、この短周期波力の算定法により求めた推定値と実験値の比較を示す。なお、堤体位置の短周期波高・平均水位上昇量および長周期波の振幅には実験値を用いた。sainflou公式・合田式(1973)・広井公式による推定値は、堤体位置水深を平均水位上昇量および長周期波の振幅を加算した水面とした。

図から、提案式による推定値は実験値をよく表しており、短周期波力の算定法として妥当であることがわかる。従来の波圧算定式では、リーフエッジから十分離れたところでは比較的実験値との適合度が高いが、リーフエッジ付近では実験値よりも過小になる。これは、位置的な波圧係数の変化が考慮されていないためと考えられる。

次に、長周期波力 F_l は

$$F_l = (0.5 \times \eta_s^* + \eta_{ave} + h) \times \rho g \zeta_{rms} \dots \dots \dots (9)$$

$$\eta_s^* = 1.2 \times \zeta_{rms}$$

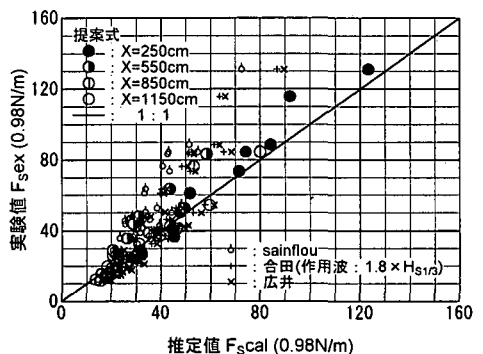


図-10 短周期波力の実験値と推定値の比較

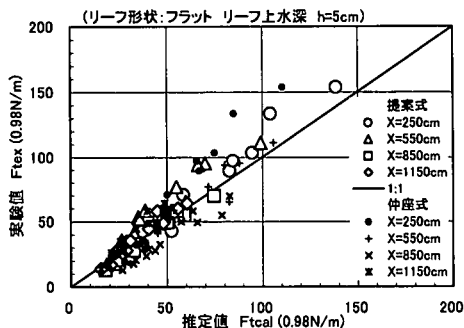


図-11 全波力の実験値と推定値の比較

と表される。

以上から、リーフ上の防波堤に作用する波力 F_t は短周期波力式 (8) と長周期波力式 (9) の和で

$$F_t = F_s + F_l \dots\dots\dots (10)$$

となる。

図-11 は、堤体位置の短周期波高・平均水位上昇量および長周期波の振幅には実験値を使用し、提案する算定式を用いて算定した全波力の推定値と実験値とを比較したもので、提案式による波力は、堤体位置によらず推定値は実験値をよく表し、リーフ上の波力の算定式として妥当であると云える。また、図中の仲座ら (1989) による算定式は、リーフエッジ付近で若干小さくなっているものの両者は、同様の傾向を与えているものと考えられる。

5. ま と め

本研究により、リーフ上の防波堤に作用する波圧の特

性が明らかとなり、その作用波力は同時性を考慮することにより、短周期成分・長周期成分の各成分に分けそれぞれを算定し、それらの和として求められることがわかった。

なお、リーフ形状や水位が変わった場合の前傾度の変化とその推定、防波堤を挟む港内外の長周期波の位相差等による水位差 (水頭差) の把握、防波堤に作用する波力として 1/10 最大波力が防波堤の安定性を考えた場合の妥当性、提案した波力算定式の現地への適用性等については、今後検討が必要である。

最後に、本研究を行うにあたっては、琉球大学工学部津嘉山教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科磯部教授、琉球大学工学部仲座助教授より貴重なご助言を頂いた。また、実験計測や膨大なデータの整理等において国際気象海洋機関の滑川・白土両氏をはじめ皆様にも多大な協力を頂いた。ここに記し、謝意を表します。

参 考 文 献

伊藤啓行・谷本勝利・小舟浩治・北谷高雄・轟 雅彦 (1974): リーフ上の堤体に作用する波力実験, 港研資料, No. 189, pp. 1-18.
 合田良実 (1973): 防波堤の設計に関する研究, 港研報告, Vol. 12, No. 3, pp. 31-69.
 合田良実 (1985): 波浪の統計的性質に関する二, 三の数値的検討, 港研報告, Vol. 24, No. 4, 89 p.
 仲座栄三・日野幹雄・津嘉山正光・大城 勉 (1989): リーフ地形海岸における防波堤に作用する波力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 589-593.
 仲座栄三・津嘉山正光・川上和宏・渡慶次健忠・鹿田正一・駒口友章 (1998): リーフ海岸における平均水位上昇量に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 276-280.
 森平倫生・柿崎秀作・菊谷 徹 (1967): 異形ブロックの波力減殺効果に関する研究, 港研報告, Vol. 6, No. 4, pp. 10-16.