

リーフ内に設置される護岸構造物の 設計波浪諸元の算定法に関する提案

A STUDY ON EVALUATION OF DESIGN WAVE CONDITION FOR SEAWALL ON CORAL REEF

平山克也¹・春尾和人²
Katsuya HIRAYAMA, Kazuto HARUO

¹正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²非会員 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-0025 下関市竹崎町4-6-1)

Wave overtopping rate for a designed seawall can be evaluated in the diagrams proposed by Goda (1975) using the equivalent offshore wave height and the water depth in front of the seawall. Moreover, Miyakuni et al. (2008) suggested that the wave set-up and the surf-beat should be added to the design water depth for the seawall on a coral reef flat. The evaluation of such a design condition on the surf, however, is much difficult because the wave transformation is complicated in the target area because of wave breaking and run-up on spatial topography in the reef area. In this study, that is carried out by using the Boussinesq-type wave transformation model developed by Hirayama and Hiraishi (2005), which can reproduce wave dissipating, wave set-up and surf-beat generated in wave breaking zone. Thus, both the design wave height and water level can be directly evaluated with considering wave set-up and surf-beat height. Additionally, the wave overtopping rate on the designed seawall is calculated by using Goda's diagram in order to verify the applicability of this procedure for seawall design in an actual coral reef.

Key Words : Coral reef, wave overtopping, seawall, Boussinesq model

1. はじめに

一般に、護岸の天端高は、合田¹⁾による越波流量推定図で算定される越波流量が、対象となる護岸の重要度や背後の利用状況に応じて定められた許容越波流量を超えないように設計される。

この際に必要となる換算沖波波高は、潮位条件毎に、設計沖波に対する波浪変形計算等を実施して堤前波高(及び堤前水深)を算定したのち、その地点の水深に対応する浅水係数で除して算定される。しかし、浅瀬やリーフ等が発達した複雑な海底地形を有する海域では、波の屈折、浅水変形のほか、碎波や底面摩擦による波浪減衰や平均水位上昇、サーフビートなどが発達するため、堤前波高自体の算定が困難だけでなく、既存の設計体系において多用される換算沖波波高の算定法の整理が必要となる。また、特に越波現象に対しては、水位の長周期変動の影響にも十分配慮する必要がある。

そこで本研究では、このように広域で複雑な波浪変形の解析に近年多用されているブシネスクモデルを活用することを想定し、設計対象地点におけるさまざまな出力結果を用いて、既存の設計体系との整合を図りつつ、リーフ上護岸の天端高の設定に必要な波浪諸元を算定する方法を提案した。

2. リーフ上護岸の波浪設計諸元の算定法

リーフ上護岸の設計では、越波流量推定図を適用する際、リーフ地形特有の波浪特性を考慮した設計水深及び換算沖波波高を用いる必要がある。

例えば、宮国ら²⁾は、リーフ上護岸を対象とした断面越波実験を行い、リーフ上の短周期波高と、平均水位上昇量及び長周期水位変動量を考慮した設計水深に対して越波流量推定図を適用し、越波流量の算定値が実験値と良く一致することを示した。一方、川崎ら³⁾は、同様な断面越波実験を行って得られたリーフ上護岸の無次元越波流量は、越波流量推定図から読み取れる斜面上の護岸に対する値を初期値として、リーフ水深に対する無次元リーフ長が増加するにつれて指数関数的に減少することを示した。

リーフ上護岸に対する越波流量推定図の適用性がこのように異なるようにみえる主たる原因は、換算沖波波高の算定法の違いにある。すなわち、後者では本来の定義に従い、換算沖波波高をリーフ沖で計測された進行波高とその水深に対する浅水係数を用いて算定しているのに対し、前者ではリーフ上の設計対象地点で計測された進行波高とその水深に対する浅水係数を用いて算定しているため、得られた換算沖波波高は、本来の定義で考慮されている沖の屈

折、回折変形のほか、リーフ上の砕波や底面摩擦損失による波浪減衰の効果までも加味されていることになる。しかし、実際の設計においては砕波変形後、リーフ内で再生した波を対象とする場合が多いことから、この方法は実用的には妥当と思われる、かつ越波流量算定に対する適用性は上述の通り高い。

そこで本研究では、ブシネスクモデルを用いて算定された実海域の各地点の進行波高に対しこの方法を適用し、設計に用いる換算沖波波高を算定することを提案する。ただし、リーフ縁付近にある設計対象地点の作用波は砕波減衰過程にあることから、換算沖波波高は、単なる（非線形）浅水係数ではなく、砕波帯内波高比で除することを合わせて提案した。さらに、リーフ上では顕著なサーフビートが算定されることを示し、これを考慮した設計潮位の具体的な設定法についても提案することとした。

(1) 設計水深

リーフ上の水深は、リーフ縁で生じる砕波に伴う平均水位上昇とサーフビートに大きく依存する（図-1）。宮国らは、リーフ地形をモデルとした断面越波実験を行い、リーフ上護岸前面の水深 h_d として、潮位を含めた静水深 h に、平均水位上昇量 η_{bar} とサーフビート波高 $H_{L1/3-S}$ を加えた次式を提案している。

$$h_d = h + \eta_{\text{bar}} + aH_{L1/3-S} \quad (1)$$

ここで、 $H_{L1/3-S}$ は、断面模型実験で計測されたデータをもとに設定されているため、護岸前面で形成される重複波高を意味している。

さらに、係数 a は、サーフビートによる水面の長周期変動のうち、最も水面が上昇したときの水面高さを表すように設定するのがよいと考えられる（すなわち、越波流量の算定に際して、設計上の安全側を考える）。仮に、サーフビート波形の振幅が平均水位に対して対称であるとする、 $a=0.5$ と設定できる。なお、これは、護岸前面の水位変動の片振幅にあたる水位上昇が、全越波時間を通じて継続すると仮定したことに相当する。一方、サーフビート波形の上下非対称性が顕著にみられる場合には、波の谷が浅くなり、波の峯が高くなる結果、平均水位より上の水位変動量は波高の半分よりも大きくなるが、その分、その水位の継続時間は短くなる。

宮国らは、リーフ上護岸の越波流量算定に与えるサーフビートの影響を前述の断面越波実験により確認し $a=0.7$ を得ている。しかし、この検討例を除いて、いまのところ、係数 a の値を決定する確かな根拠は定まっていない。そこで現時点では、概ね $a=0.5\sim0.7$ とするのが良いと思われる。

一方、式(1)は、護岸前面の水位の長周期変動のうち、沖から入射する進行波の有義波高 $H_{L1/3-1}$ を用いると、次式のように表わされる。

$$h_d = h + \eta_{\text{bar}} + a \cdot b H_{L1/3-1} \quad \text{ここで、} H_{L1/3-S} = b H_{L1/3-1} \quad (2)$$

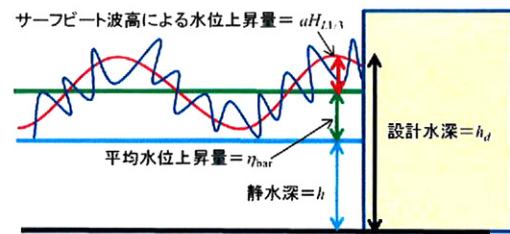


図-1 リーフ上護岸に対する設計水深の考え方

すなわち、進行波の波浪変形計算結果から直接推定されるサーフビート波高は、短周期波と同じ進行波の波高であるから、これを護岸前面の重複波高に換算するために係数 b を乗じる。さらに、サーフビート波形は護岸において完全反射され、この水面変動は規則的であると仮定すると、サーフビートにより形成される護岸前面の重複波高は、入射波高の2倍となることが想定される（ $b=2$ ）。なお、この妥当性については、護岸前面の重複波高をブシネスクモデルで直接計算することにより、別途確認する。

以上より、リーフ上護岸の越波流量算定に必要な設計水深は次式で表わされる。

$$h_d = h + \eta_{\text{bar}} + 0.5 H_{L1/3-S} = h + \eta_{\text{bar}} + 1.0 H_{L1/3-1} \quad (3)$$

(式(2)において、 $a=0.5$ 、 $b=2$)

(2) 換算沖波波高

換算沖波は、屈折や回折などによる波高変化の影響を設計計算に取り入れるための仮想的な波であり、換算沖波波高 H_0' は、回折係数 K_d 、屈折係数 K_r 、沖波波高 H_0 を用いて、次式で定義される。

$$H_0' = K_d K_r H_0 \quad (4)$$

一方、港湾・海岸構造物の設計計算においては、換算沖波波高 H_0' を用いて整理された各種の算定図表を利用するために、対象地点で得られた有義波高 $H_{1/3}$ から換算沖波波高 H_0' を逆算することがよく行われる。このとき、換算沖波波高に含める波高変化の範囲により、その逆算方法が異なる。そこで以下では、a) 本来の定義（式(4)）に従う場合（＝相当深水波）、b) 本来の定義に加え、実際の設計における適用性・利便性の観点から、沖から対象地点までに生じる砕波等による波高減衰まで含める場合、の2通りの場合に分けて、それぞれの算定法を概説する。

a) 相当深水波としての換算沖波（本来の定義）

例えば、エネルギー平衡方程式等を用いた波浪変形計算により算定される、砕波帯外の有義波高 $H_{1/3}$ に対する換算沖波波高 H_0' は、次式で算出できる。

$$H_0' = H_{1/3} / K_s \quad (5)$$

ここに、 K_s は首藤による非線形浅水係数である。

同様に、砕波変形を考慮できるブシネスクモデル等により算定される砕波帯内の有義波高 $H_{1/3}$ に対して、平山⁴⁾は、合田による砕波帯内波高の略算式より得られる波高比 K_{sb} を用いて、次式で算定することを提案している。

$$H_0' = H_{1/3} / K_{sb} \quad (6)$$

なお、これは、対象地点で得られた砕波帯内波高 $H_{1/3}$ に対して、式(5)と等価な換算沖波（＝相当深水波）波高を逆算するものである。

具体的には、これらは図-2(a)に示す手順により算定する。まず、設計水深 h_d と海底勾配 $\tan\theta$ において、初期値として設定した H_0' に対する相対水深 h/H_0' を求め、この値が4より大きいときは沖で砕波しないものとみなし、非線形浅水係数算定図などを用いて浅水係数 K_s を得る。一方、相対水深 h/H_0' が4以下の場合には砕波帯内の有義波高の略算式から波高比 $H_{1/3}/H_0'$ を得る。次に、設計潮位に対して得られた対象地点の波高 $H_{1/3}$ をこれらの浅水係数、または波高比で減ずることにより、換算沖波波高 H_0' を得る。この作業を繰り返し、得られた H_0' と相対水深等を得る際に仮定した H_0' とが等しくなるときの H_0' を、換算沖波波高として採用する。

b) 波高減衰効果を含む換算沖波（便宜的な方法）

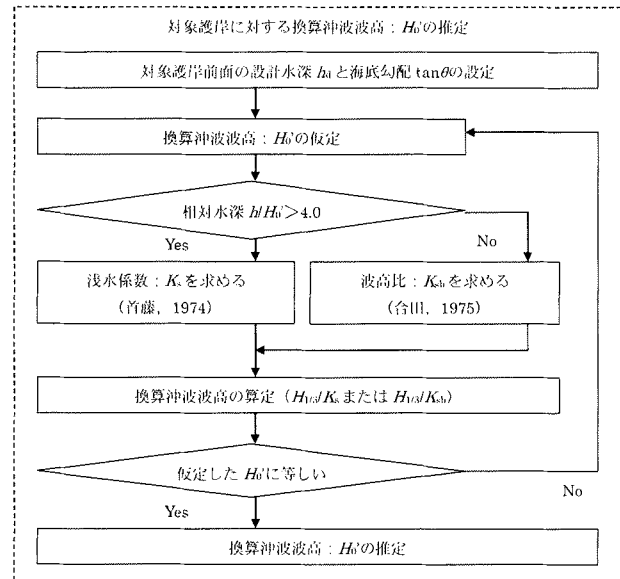
砕波帯内やリーフ上に設置される構造物に作用する波は、沖での屈折、回折変形に加え、岸近くの浅水、砕波変形等の影響を受けて波高が変化している。このうちリーフ縁近傍の波高に対する換算沖波波高は式(6)によって算定できる。しかし、砕波後の波がリーフ上を伝播する過程である程度再生する場合、このような波が作用する構造物の設計計算においては、砕波減衰後の波高に対する換算沖波波高 H_0' を算定する必要があると考えられる。なお、越波流量算定図をリーフ上護岸に適用した宮国らの研究も、このような考え方に基づいているものと思われる。

そこで、砕波減衰後にリーフ上で再生した波が、仮想的にはリーフ沖から来襲したものであったと考え、その換算沖波波高 H_0' は、一様な波高分布となるリーフ内の対象地点で得られた有義波高 $H_{1/3}$ に対して、砕波帯外に対するものと同様に、式(5)で算定できると考えられる。なお、対象地点における水深は、式(3)による設計水深を用いる。

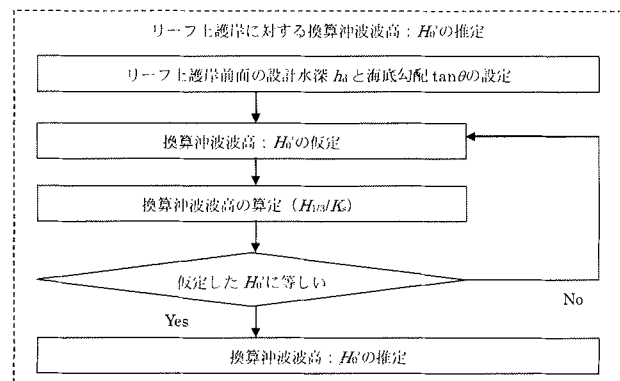
具体的には、図-2(b)に示す手順により算定する。

3. ブシネスクモデルを用いた波浪場の算定

上述した方法によりリーフ上護岸の設計波浪諸元を算定する場合、対象地点における有義波高と設計水深、特に、リーフ上の砕波に伴う波浪減衰や平均水位上昇、及びサーフビート等について、ブシネスクモデルを用いて精度よく算定できることが前提と



(a) 相当深水波としての換算沖波



(b) 波高減衰効果を含めた換算沖波

図-2 換算沖波波高の算定手順

なる。そこで、これらの算定精度について、リーフ地形が広がる那覇港周辺海域で観測された水位変動に対する再現計算を行い検証した。対象としたリーフ地形及び波浪観測地点を図-3に示す。

(1) 現地波浪観測及び再現計算の概要

現地波浪観測は、リーフ長手方向から来襲する波向き(SW)が卓越する夏季(2008/7/15~8/6)の期間に、リーフ沖側(St. 3)、外縁(St. 1, St. 2)、及びリーフ上(St. 4, St. 5)の各地点に超音波式波高計を設置して実施された。ただし、設置水深が非常に浅いSt. 4については、満潮時に、水圧式波高計による水位観測のみが実施された。なお、潮位は、那覇港内の検潮所で観測されているものを用いた。

このうち、ここでは台風0808号来襲初期の満潮から下げ潮に移行する時刻(2008/07/28 03時)に観測された水位変動データに着目して、リーフ上の波高減衰及びサーフビートの発生・発達状況の再現を試みた。なお、水深が非常に浅いリーフ上の波浪場に対する再現計算においては、潮位や潮汐流の違い

による影響が無視できないが、これらについては別の機会に報告することとしたい。

一方、常にウェーブセットアップが生じる現地リーフ上で静水面を定義することは困難であったた

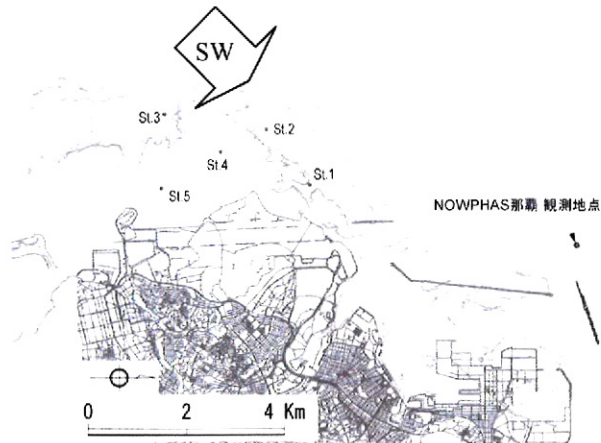


図-3 再現計算で対象としたリーフ地形及び波浪観測地点

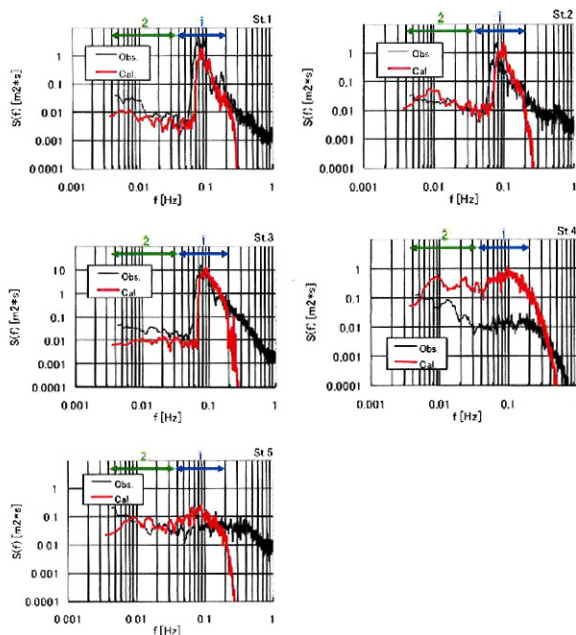
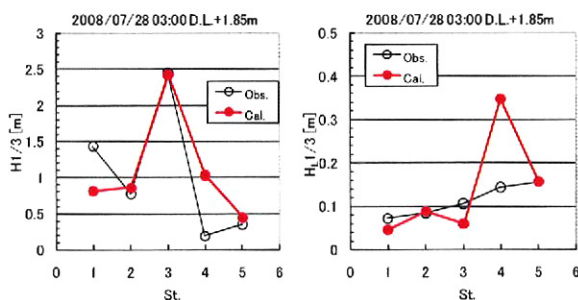


図-4 周波数スペクトルの再現性

(①短周期波の周波数帯, ②サーフビートの周波数帯)



(a) 短周期波高

(b) サーフビート波高

図-5 リーフ上及び周辺波高の再現性

め、平均水位上昇量の再現性を検証することはできなかった。しかし、ブシネスクモデルによるこれらの計算精度は、現地リーフ地形を対象とした模型実験結果に対する再現計算（例えば、平山ら⁵¹）などで確認することができる。

対象時刻にリーフに入射する波は、まず、その沖側に位置するSt.3で観測されると考えられる。そこで、計算領域の沖側境界に与える入射方向スペクトルは、St.3で観測された波浪諸元（有義波高 $H_{1/3}=1.83\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=8.9\text{s}$ 、波向216度、 $S_{max}=73$ ）を再現するように与えた。潮位はD.L.+1.85mである。また、再現計算に用いた格子幅は5m、底面摩擦係数は、リーフ内外を問わず、 $f=0.02$ とした。

再現計算では、代表周期の200波分程度を対象として、観測地点で得られた時系列波形のスペクトル解析及びゼロアップクロス解析を実施した。ここで、このような解像度で行うブシネスク計算では、水深5m程度のリーフ上を伝播する周期5s未満の波の再現性は保証されないため、短周期波成分の周期帯を5~30s、サーフビートの周期帯を30s以上と定義し、観測結果もこれらと同様に整理して比較した。

(2) 再現結果

満潮時には、ほぼすべてのリーフが水没し、さらに下げ潮へと移行する過程では、波で押し上げられていたリーフ上の水塊が、潮流とともにリーフエッジから沖へ流出し始める状況が想定される。

このような海象条件における周波数スペクトルの再現結果を図-4に示す。それぞれ、細線は観測結果、太線は計算結果である。また、図中に示した区間①、②はそれぞれ、短周期波、サーフビートの周波数帯を示す。さらに、各地点におけるそれぞれの波高の再現結果を図-5に示す。それぞれ、○は観測結果、●は計算結果である。

まず、入射スペクトルの合わせ込み対象としたSt.3は当然として、より波下側のリーフ外縁に位置するSt.2やSt.1でも、ピーク付近の波エネルギー及び短周期波高（0.08~0.2Hz（5~12.5s））は非常によく再現されている。ただし、リーフの切れ目の沖に位置するSt.1では、短周期波の計算波高は観測波高に対して過小となっている。これは、現地において、潮汐または波による平均水位上昇によりリーフ上に溜まった水塊が、リーフの切れ目から沖へ流出することにより、波と流れが干渉して波高増大が生じていたことなどが推察される。一方、再現計算で得られた0.08Hz以下（12.5s以上）のうねり・サーフビート成分の波エネルギー分布及び波高について、入射境界ではこの周波数帯の波エネルギーを造波していないにもかかわらず、観測結果を比較的良好に再現していることがわかる。これは、沖から入射する自由波を除き、リーフ縁付近で伝播・生成された長周期波成分が再現されたものと考えられる。

次に、リーフ上に位置するSl.4では、観測された波エネルギーに対して、計算結果は1オーダー以上大きな値となっている。しかし、Sl.4の水位変動データは水圧式波高計でのみ取得されているため、微小な水位変動を計測できなかった可能性があり、したがって、この比較による計算精度の検証は困難である。そこで、ある程度の水深が確保されたリーフ内のSl.5において、両者のスペクトル及び波高を比較すると、短周期波成分で計算結果が若干高めではあるが、うねり・サーフビート成分を含め、両者は比較的よく一致している。

これらの結果より、リーフ内の波高減衰や波の非線形干渉等による周波数スペクトルの平滑化などの算定が可能なブシネスクモデルでは、リーフ上の波浪場を非常によく再現できることが確認された。

4. ブシネスクモデルによる設計諸元の算定

ここでは、リーフ上の短周期波高、平均水位上昇量、及びサーフビート波高を算定できるブシネスクモデルを用いて、リーフ上護岸の設計波浪諸元を算定する具体的な手順、及びその算定例を示す。

(1) 算定方法

リーフ上護岸の設計波浪諸元を算定する具体的な手順を図-6に示す。

まず、リーフ上の波浪変形計算を行うブシネスクモデルの沖側の造波境界の位置と、そこで与える入

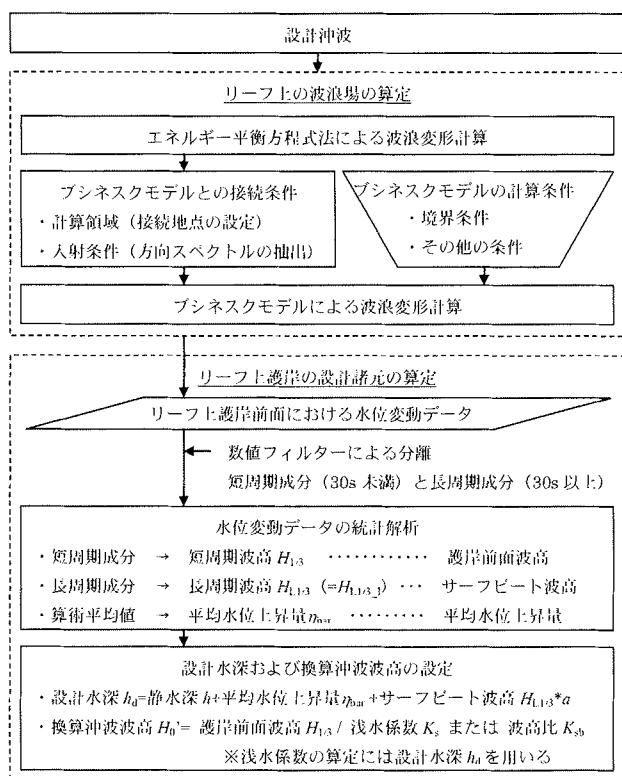


図-6 リーフ上護岸の設計波浪諸元の算定手順

射波諸元を設定するため、エネルギー平衡方程式法を用いて、設計沖波に対する波浪変形計算を行う。

次に、陸地や構造物による反射条件等の境界条件、および差分計算に必要なその他の条件（タイムステップ等）を設定する。その際、護岸法線上に構造物境界は設けず、代わりに、背後の陸地境界による反射波を抑制するために、十分な幅のスポンジ層を設定する。これは、換算沖波波高が対象地点における進行波の波高に対して定義されているためである。

このように設定した入射波諸元・境界条件を用いて、ブシネスクモデルによる波浪変形計算を実施し、計算終了後、リーフ上護岸前面の各代表点における水位変動データを抽出する。これらの時系列データを、数値フィルターを用いて短周期波成分（30s未満）と長周期波成分（30s以上）に分離したうえで、それぞれゼロアップクロス解析を行うことにより、リーフ上護岸前面における短周期波高 $H_{1/3}$ 、サーフビート波高 $H_{L1/3}$ 、および平均水位上昇量 η_{bar} が算定できる。最後に、これらを式(3)に代入することにより設計水深が、また、図-2の算定手順に従い各リーフ上護岸に対する換算沖波波高が、それぞれ算定できる。なお、計算結果として合わせて出力される、波高や平均水位の平面分布、および残差流（波による流れ）や平均波向きのベクトル分布等を適宜活用することにより、リーフ周辺で形成される波浪場を平面的に把握することも可能である。

(2) 設計対象

設計対象とした護岸法線上の代表点（P4～27）及びその周辺地形を図-7に示す。この海域には発達したリーフが広がり、水深は浅く平坦である。一方、リーフ縁はこの沖合約2.0kmに位置し、水深25m程度まで急に深くなる。また、対象海域における波浪は、夏の台風期にWSW、冬期風浪時にNNWが卓越することから、対象護岸における設計沖波の波向はN～NW～WSWの6方位で代表される。これらの波高、周期は、波向きにより異なるが、概ね $H_{1/3}=11\text{m}$ 、 $T_{1/3}=14\text{s}$ である。したがって、ブシネスクモデルへの入射波諸元は、設計沖波の設定地点においてこれらが再現されるように与えた。なお、護岸天端高に対する設計潮位はD. L. +3.2m (H. H. W. L.) である。

(3) 算定結果

計算格子幅 5m、差分時間間隔 $T_{1/3}/400 \sim T_{1/3}/800$ として、各波向きに対する波浪変形計算を実施した。これらのうち、波向き NNW について、護岸法線上の進行波の短周期波高、サーフビート波高、平均水位上昇量の算定結果を図-8に示す。短周期波高は地形の影響を大きく受け、前面にリーフが広く発達した箇所では低く、リーフが狭いか切れ目に当たる箇所では高い。一方、長周期波高や平均水位上昇量は、護岸法線に沿って変化する様子はほとんどみられない。ただし、設計水深に寄与するサーフビート波高及び

平均水位上昇量は、護岸前面の重複波として算定すべきであるので、別途、護岸法線上に完全反射境界を設置した計算を行い、その影響を確認した。

表-1には、護岸前面の各代表点（図-7のP4～P27）で算定されたサーフビート波高と平均水位上

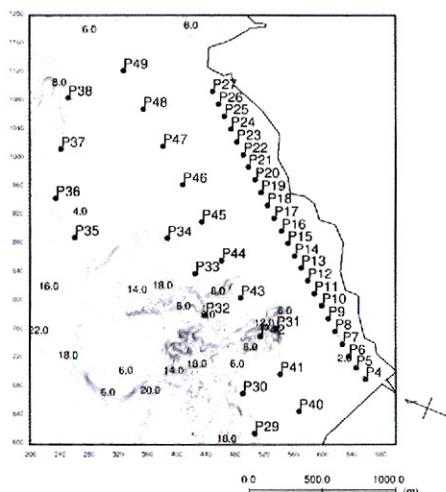


図-7 護岸法線上の代表点（P4～27）と周辺のリーフ地形

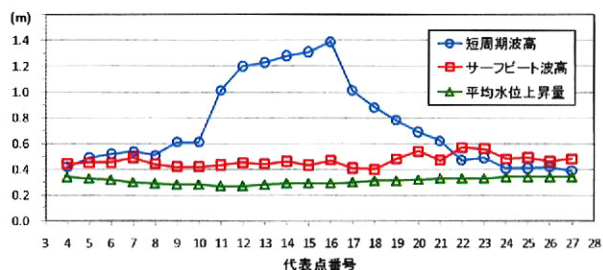


図-8 リーフ上護岸法線上の波高と水位上昇量（NNW）

表-1 護岸の有無による各算定値の比較

(a) サーフビート波高比の平均値

$H_{L1/3}$	N	NNW	NW	W	WSW	WNW	平均
平均	2.09	1.93	2.10	1.94	2.45	1.96	2.08

(b) 平均水位上昇量比の平均値

η_{bar}	N	NNW	NW	W	WSW	WNW	平均
平均	0.93	0.95	1.02	0.98	0.96	1.00	0.97

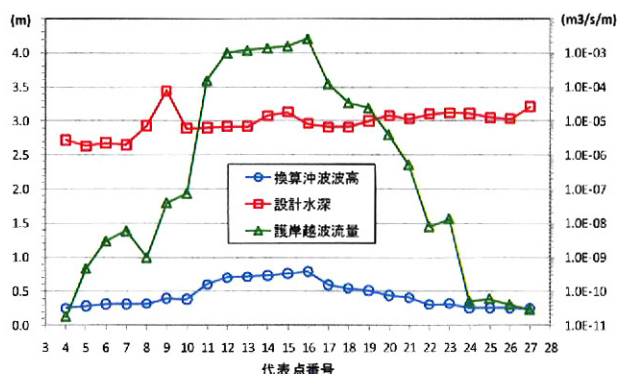


図-9 リーフ上護岸の設計波浪諸元と越波流量（NNW）

昇量について、“護岸有り／護岸無し”として算定した値の比を、波向き毎に平均した結果を示した。

これより、平均水位上昇量については、護岸有りと護岸無しで特に有意な違いは認められない（±5%以内）。また、サーフビート波高については、各波向きで若干差があるものの、概ね重複波高は進行波高の約2倍となることが確認された（すなわち、 $b=2$ ）。

最後に、これらの結果をもとに、護岸法線上の代表点において、式(3)及び図-2のフローに従い算定した設計水深と換算沖波波高、及び天端高 D.L.+5mと想定した直立護岸に対し、これらを越波流量推定図に適用して算定した越波流量を図-9に示す。まず、設計水深については、周辺よりも地盤高が低いP9を除き、リーフの地形特性を反映してほぼ一様となっている。なお、この付近を含め、平均水位上昇量およびサーフビート波高はほぼ一様であるから、この差は地形（すなわち、静水深 h ）に起因するものである。一方、換算沖波波高及び越波流量は、短周期波高と同様に前面にリーフが発達した区間で小さく、リーフの切れ目周辺で大きい。

5. おわりに

本研究では、砕波・遡上変形を考慮できるブシネスクモデルを用いて、実海域のリーフ内及びリーフ縁付近で様々な波浪諸元を実用上十分な精度で算定できることを示すとともに、それらを用いた設計諸元の算定法を示した。リーフ上護岸の設計においては、リーフ内では波高減衰効果を加味した換算沖波波高、沖を含めたリーフ縁付近では本来の定義に従う換算沖波波高を採用することを提案し、それらの算定方法を示した。特に、進行波として算定されたサーフビート波高を護岸前面の重複波高に換算する際には、単純に2倍すればよく、さらに、この片振幅にあたる0.5～0.7倍を、サーフビートによる水位上昇分として設計潮位に加算することを提案した。

参考文献

- 1) 合田良実，岸良安治：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港研報告第14巻，第4号，44p，1975。
- 2) 宮国敏秋，又吉昭太，仲座榮三・宇座俊吉：リーフ上の護岸越波に関する研究，海洋開発論文集，第24巻，pp.951-955，2008。
- 3) 川崎浩司，菊 雅美，舟橋 徹：直立護岸越波に及ぼすリーフ形状と波浪諸量の影響について，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. B2-65，No. 1，pp.751-755，2009。
- 4) 平山克也：ブシネスクモデル（NOWT-PARI）を用いた高精度港内静穏度解析法の提案，港湾空港技術研究所資料，No.1159，90p，2007。
- 5) 平山克也，平石哲也：平面2次元ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法の開発と現地適用，海岸工学論文集，第52巻，pp.11-15，2005。