

人工海浜による港内長周期波の低減効果

Reduction of Long Period Waves in Harbor by Artificial Beach

平石哲也*・長谷川準三**・黒木啓司**

Tetsuya Hiraishi, Junzo Hasegawa and Keiji Kuroki

Abstract

Long period waves often cause large surging motion of moored vessels by resonance to natural oscillation of the mooring system composed of the elastic hawsers and ship body. In order to prevent the amplification of long period waves in harbor by the reflection, the wave absorbing beach is proposed. The artificial beach with mild slope can reduce the reflection coefficient. The appropriate installation planning for beaches in harbor is discussed on basis of the results of numerical simulation.

Key Word : Long Period Wave, Absorbing Beach, Port Planning

1. はじめに

苫小牧港などの外洋に面した港湾には、しばしば周期数分の長周期波が侵入し、荷役を中断させたり、係船索の切断等の事故を発生させる(菅沼ら,1995)。港外における長周期波の生成要因は、波群性が強い波が励起する平均水面の変動(拘束波)、汀線付近の碎波点の変動による重複波、海岸線に平行に進むエッジ波や沖合いを通過する低気圧によって生成される自由進行長波と考えられ、それらの要因が重なり合っている(平石ら,1996)。ただし、波高が大きい場合を除いては、自由進行波が卓越し、港内における長周期波の特性は自由進行長波の変形計算式(高山,平石,1988)で検討できる。荷役限界長周期波高については、苫小牧港での観測成果から、有義振幅で10~15cmを越えると船体動揺量が大きくなり、荷役障害が顕著になることが推測できる。

港内における長周期波のエネルギーの主要な部分が自由進行波として伝播すると考えて、以下の手法が対策として提案されている(平石ら,1997)；(i) 防波堤の新設や延長による侵入長周期波の抑止、(ii) 係留システムの改良による共振の防止、(iii) 港内における長周期波の反射による増幅の防止。実際には、港湾の特性に応じて個々の手法を組み合わせ、長周期波の対策を図る必要があると考えられる。上記の3つのなかで、3番目の手法は、風波に対する静穏度向上に関して多用される低反射護岸やスリットケーソン壁と同様の対策で、港内の壁面における長周期波の反射率を下げることで、より多重反射を防ぎ、長周期波高を荷役限界値以下にしようとするものである。通常のスリット壁や、緩傾斜護岸は長周期波に関しては消波効果が小さいと言われているが、砂浜海岸は長い周期の波についても、ある程度消波効果が期待できると考えられる。実際に、平成7年の伊リアンジャヤ地震津波においては、高知県の漁港で港の一方が未完成で自然海岸が残されているところでは周辺に比べて津波による被害が小さかったことが報告されている(小舟ら,1996)。また、消波材を敷き詰めた水路における反射波の測定実験では長周期波に関しても、反射率を低下させることが可能であることが導かれている(富田ら,1998)。そこで、本研究では、港内に設置された人工ビーチの

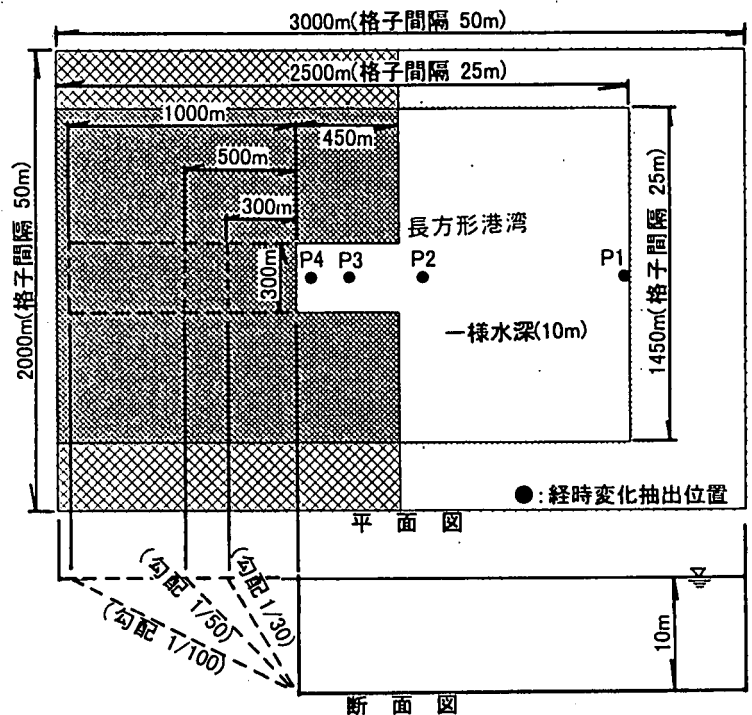


図-1 長方形港湾と緩傾斜ビーチの配置

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
 ** 正会員 (株)エコー 環境水理部

長周期波高低減効果と、その現地港湾への適用性について数値的に検討した。

2. 長方形港湾における長周期波の低減

(1) 計算条件

最初に、単純な長方形港湾における斜面上の長周期波の反射率の低減効果を検討する。図-1は、計算の対象とした長方形港湾の地形で、水深10mの一樣水深海域に長さ450m、幅300mの長方形港湾が位置している。計算領域全体の大きさは3000m×2000mである。計算は線形長波の基礎式を差分式を用いて解く手法を用いている(高山・平石,1988)。この計算は、断面方向に平均した流量と水位変動を変数とする連続式と運動方程式を連立させて解を求める手法を用いている。また、入射波を規則波に限定することによって、岸側からの反射波が境界で再度反射されることを防いでいる。また、防波堤開口部におけるエネルギー損失と海底面における摩擦損失を考慮することにより擬似的に非線形的な効果を検討できる。開口部におけるエネルギー損失 $\Delta\zeta_i$ は次式で考慮する。

$$\Delta\zeta_i = f_R \frac{u^2}{2g} \quad (1)$$

計算では、防波堤の港口部や水路の入口において上記の損失を計算している。なお、 u ：流速、 g ：重力加速度、 f_R ：開口部損失係数(=1.5)である。摩擦損失は運動方程式に以下の損失項を加えて計算する。

$$\frac{gn^2}{(h+\zeta)^{4/3}} u |u| \quad (2)$$

ここで、 n ：マニングの損失係数、 h ：水深、 ζ ：水位上昇量である。

人工ビーチによる反射率の低減効果は、砂浜への浸透による効果も含まれるが、ここでは、海底勾配が緩やかになることによって、浅い水域が長大になり摩擦損失が有効に作用するものとした。緩傾斜ビーチの勾配は、図-1に示すように、1/30、1/50および1/100の3ケースとし、いずれも、勾配のない長方形港湾の最奥部から斜面が始まるとし、25m格子で地形を近似した。

沖合から入射する長周期波については、長周期側のエネルギーレベルを一定とする標準スペクトルが与えられている(平石ら,1997)。図-2に標準スペクトルの考え方を示す。長周期波についても波高がレーリ分布に従うものとする、長周期波高と長周期波のエネルギーは以下の関係を有する。

$$H_{L1/3} = 4.004 \sqrt{m_L} \quad (3)$$

ここで、 $H_{L1/3}$ ：長周期波高(有義値)、 m_L ：長周期波成分の全エネルギーである。標準スペクトル形で、長周期波成分の範囲を30sから180sとすると、 m_L からスペクトル密度 $S_L(f)$ が次式で求められる。

$$S_L(f) = \frac{m_L}{1/30 - 1/180} \quad (4)$$

計算では、長周期波スペクトルを10分割して、それぞれの周波数帯 Δf_i に含まれるエネルギー $(M_L)_i$ を有する規則的な成分長周期波を入力させ、それぞれ港内の波高増幅率を求めた。i番目の成分長周期波の波高 $(H_L)_i$ は次式で計算した。

$$(H_L)_i = 4.004 \sqrt{(M_L)_i} = 4.004 \sqrt{S_L(f) \Delta f_i} \quad (1/180 < f < 1/30) \quad (5)$$

各周期の成分波に対して、計算で港内の成分波高が求められる。ある点での増幅率(港内の成分波高/入射成分波高)を R_i とすると、港内における成分波のエネルギー $(M_q)_i$ は次式で求められる。

$$(M_q)_i = R_i^2 (M_L)_i \quad (6)$$

港内における長周期波高 H_q は成分波の波高を合成することによって次式で算出する。

$$H_q = 4.004 \sqrt{M_q} \quad (7)$$

$$M_q = \int_{1/180}^{1/30} (M_q) df \quad (8)$$

ここに、 M_q は、成分長周期波の港内でのエネルギーである。本計算では、 $H_{L1/3}=20\text{cm}$ 、 $(H_L)_i=6.3\text{cm}$ を用いている。

(2) 計算の結果

図-3は、図-1に示した測点P4における増幅率を各勾配毎に示したものである。周期が1minより長

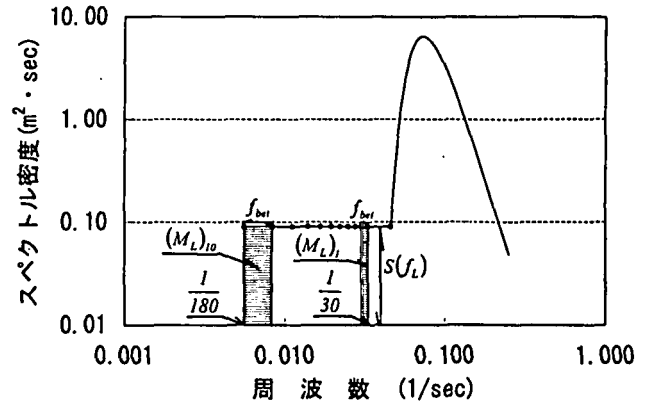


図-2 標準スペクトル形とエネルギー分割手法

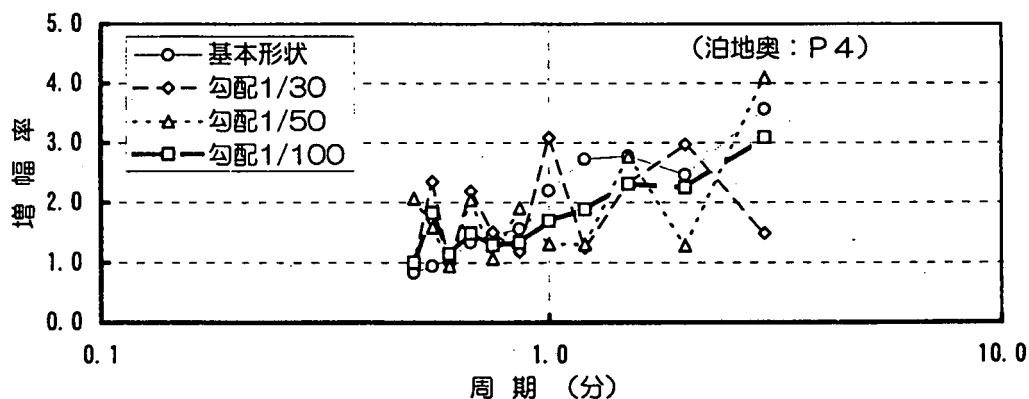


図-3 長方形港湾における増幅率の周期・斜面勾配による増幅率の変化

い場合には水路における共振現象により、勾配が無い場合の基本形状で増幅率が2以上になっている。周期が1min以下の場合には、増幅率が2以下である。斜面をつくると水路長が変化するために共振モードが変化し、周期によって増幅率が細かく変化する。勾配が1/100になると、周期が1min以下では共振が少なくなり、周期1min以上では基本形状よりも増幅率が小さくなる。したがって、対象とする長周期波の周期帯で増幅率を下げるためには、すくなくとも勾配が1/100程度の緩傾斜斜面の設置が必要と考えられる。

次に、港内の成分波高を合成して長周期波高を算出した。図-4は港内の合成波高 H_s の勾配による変化を示したものである。横軸には港内測点の位置を示し、縦軸には、合成波高を示した。港口部のP2地点では、基本形状と比較すると、勾配が存在する方が波高が低下している。港の中央部のP3では、基本形状よりも1/30や1/50勾配の場合に波高が増加しており、これは、増幅率の高い箇所が局所的に生じるためである。勾配が1/100の場合には、増幅率が全周期帯で低下していたため、合成波高も小さくなり、基本形状よりも小さい。

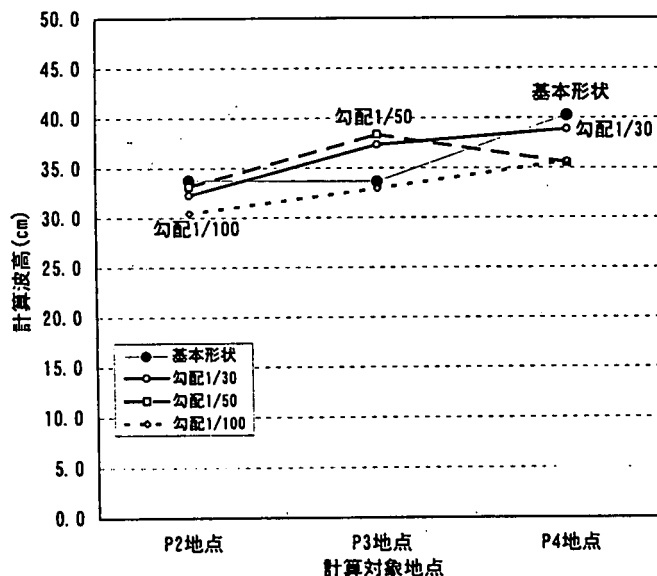


図-4 長方形港湾内の長周期波高の勾配による変化

湾奥のP4では基本形状よりも勾配を設置した場合に、合成波高が小さくなる。特に、1/100勾配の場合には、基本形状の有義波高が40cmに対して1/100勾配の場合には、波高が35cmになる。ここでは、反射面に接した測点での波高 H は、 $(1+K_r)H_i$ になると考えて、入射波高 $H_i=20\text{cm}$ として反射率を概算すると、 K_r は、直立、1/30勾配、1/50勾配および1/100勾配の場合にそれぞれ $K_r=1.0$, 0.9, 0.75, 0.75程度になる。反射率の値だけから判断すると、緩傾斜斜面の勾配は1/50程度で構わないと考えられるが、特定地点での増幅が顕著になることを防ぐためには、1/100程度の緩傾斜斜面または人工ビーチを設置しなければならない。

3. モデル港湾における人工ビーチの適用性に関する検討

(1) 増幅率の変化

実際の港湾では、港湾利用の立場から人工ビーチを設置できる場所が限られ、その効果を有効に長周期波対策に使うことは難しい。ここでは、モデル港湾において、沖合の海域で長周期波が存在するものとして、その対策工法として人工ビーチを設置した場合の効果を数値的に調べた。図-5にモデル港湾の地形図を示す。P5、P6付近に長周期波の被害が報告されている岸壁が建設されている。湾口は、図の左側に開いており、P1に接した境界線より周期0.5～20minで片振幅2cmの規則的な成分長周期波が入射するものと考えた。差分計算の格子間隔は20mである。

ここでは、対策工法として、小型マリナが計画されている小泊地をビーチに変更して親水性空間を形成する案を検討した。図-6(a)に親水性のビーチ計画点を示す。また、ビーチ工法と比較するために、防波堤の一部を開放にして港内の多重反射を防ぐ手法を検討した。図-6(b)に開放防波堤の位置を示す。開口部の幅は20mである。ただし、開放したままでは静穏度が低下するために、20m沖側に一文字堤を配している。

図-7は長周期波成分に対して、P5およびP6における増幅率を示したものである。対策工法の無い状態

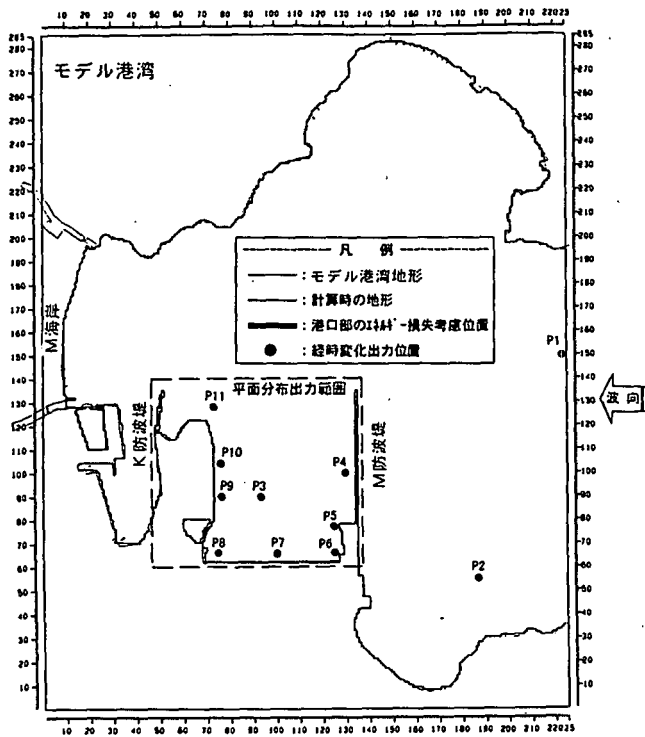
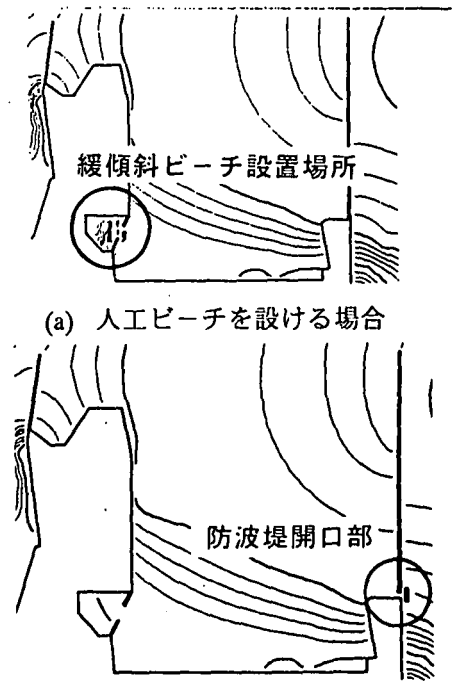


図-5 モデル港湾の地形図と計算結果の出力点



(a) 人工ビーチを設ける場合
(b) 防波堤に開口部を設ける場合
図-6 モデル港湾の対策工法

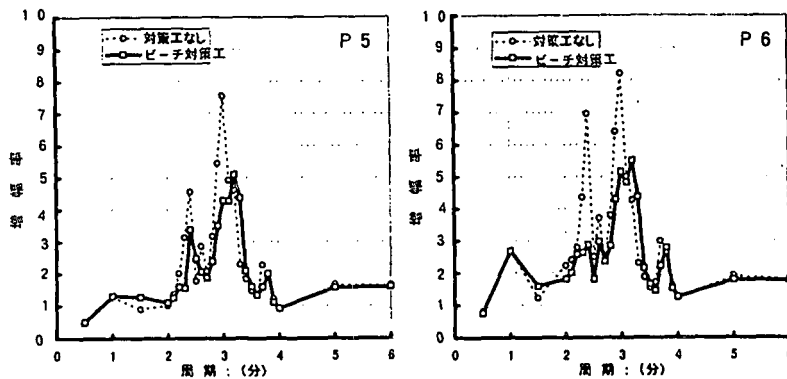


図-7 港内のP5およびP6における増幅率の変化

に比較すると、緩傾斜のビーチを設置した場合には周期1~4min程度の範囲で成分波の増幅率が低下している。特に、周期3minで現れたピークの値が6割程度に小さくなっており、緩傾斜のビーチが港内での増幅を抑制するのに有効であることがわかる。防波堤の一部に開口部を設ける案の場合には、成分波の増幅率の変化は基本形状と大きく変化しなかった。

(2) 静穏度による評価

防波堤や対策工法が有効であるかどうかは、港内静穏度の観点から評価されることが多い。そこで、モデル港湾における長周期波に対する港内静穏度を計算した。まず、モデル港湾の沖合において過去数年の波浪観測がなされ、図-8に示すような頻度分布が得られていると仮定する。通常の波浪観測では、毎偶数時20min間の観測がなされ風波について波高・周期がまとめられている(永井ら,1997)。したがって、頻度分布に関しても周期範囲は1~20s程度になる。本来は、各波向毎に頻度分布表が整理されるが、ここでは、波向はほぼ一定でばらつきは小さいと考える。

図-9は、観測期間中で比較的波高が大きいケースのスペクトルを平均した分布形を示す。平均スペクトルは、短周期側に明瞭なピークを有するとともに長周期波側のエネルギー密度が大きくなっている。図-2に示した標準スペクトルをあてはめると、太い実線でしめしたモデルスペクトルを代表値として考えることができる。長周期波側のエネルギー密度は、短周期波側のピークにおけるエネルギーレベルの1/100程度であるので、風波のスペクトルとして「レットシュナイダー」-光易型を適用して、次式で長周期波側のエネルギー密度を考える。

$$S_L(f) = 0.01 S(f_p) \quad (1/180 < f < 1/30) \quad (9)$$

$$S(f_p) = 0.257 H_{1/3}^2 T_p (T_p f_p)^{-5} \exp[-1.03 (T_p f_p)^{-4}] \quad (10)$$

ここで、 $T_p = 1.05 T_{1/3}$ 、 $f_p = 1/T_p$ である。沖合の波の $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ が判り、各周期帯の増幅率が求められてい

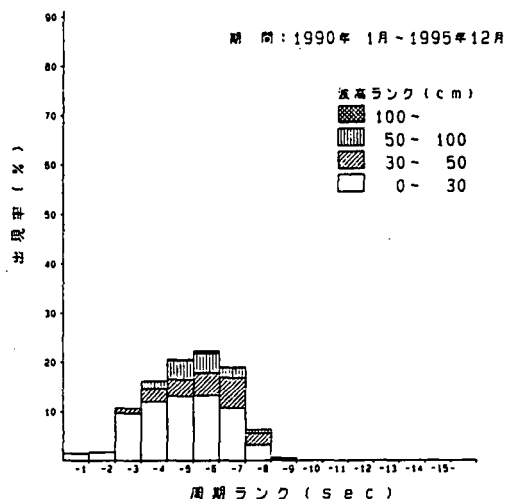


図-8 モデル港湾における風波の出現頻度分布

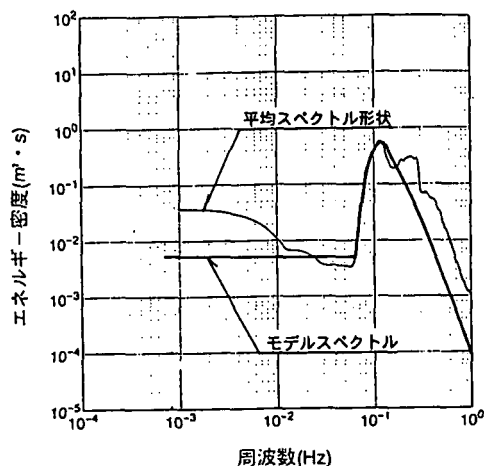


図-9 観測した周波数スペクトルの平均値

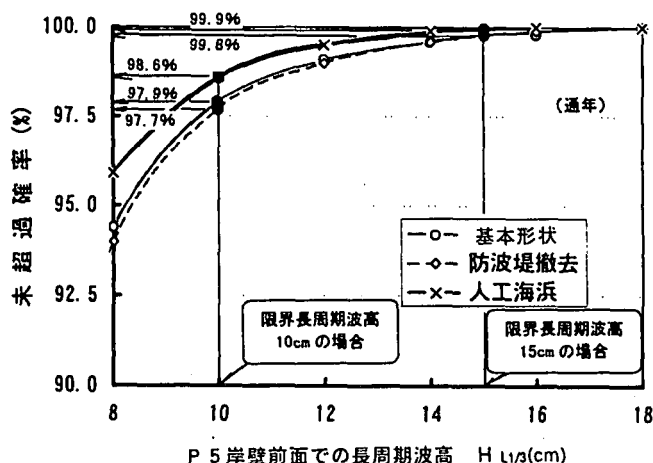


図-10 P5における長周期波高の未超過確率

るので、港内の対象点の波高 H_p は、前述の式(5)に $S_L(f)$ を代入して算出できる。沖合の $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ の出現頻度がわかっているため、算出できた対象点の $H_{L1/3}$ に関しても、出現頻度および超過確率が求められる。

図-10は対象点(P5)における長周期波高の未超過確率を示したものである。対象岸壁前面の波高が許容値を超える確率が設定値よりも大きくなると、港湾の静穏度に問題が生じるため何らかの対策が必要になる。図に示すように、長周期波高の許容値を10cmとした場合には、基本形状では未超過確率(静穏度)が97.9%であるのに対して、人工ビーチの設置により静穏度が98.6%に上昇することが判る。限界波高が15cmの場合には、基本形状で99.8%の静穏度が確保できる。

5. あとがき

ここでは、長波近似式による計算によって港内に侵入した長周期波の波高低減率を求め、緩勾配ビーチの設置により、その反射率を0.75程度に低減させることができることを示した。また、モデル港湾において、港内の一部を人工ビーチに変化させた場合には、港湾の稼働率の面からの評価ができて、静穏度の向上に有効であることがわかった。

参考文献

- 小舟浩治・永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義(1996):1996年イリアンジャヤ地震津波の特性, 港湾技研資料, No.842, 96p.
- 菅沼史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信男(1995): 現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.951-955.
- 高山知司・平石哲也(1988): 数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討, 港湾技研資料, No.636, 70p.
- 富田孝史・平石哲也(1998): 長周期波の反射低減に関する一考察, 海洋開発論文集 Vol.14(印刷中).
- 永井紀彦・菅原一晃・渡邊弘・川口浩二(1997): 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS1995), 港湾技研資料, No.859, 318p.
- 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可(1996): 港湾で観測された長周期波の特性, 港湾技術研究所報告, 第35巻, 第3号, pp.3-36.
- 平石哲也 他6名(1997): 長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査, 港湾技研資料, No.873, 39p.
- 平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三(1997): 港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.246-250.