

防波堤堤頭部近傍で発生する長周期波に関する 数値シミュレーション

富田 孝史*・平山 克也**

1. はじめに

我が国の幾つかの港では、港内に係留された船舶が長周期波によって動揺して荷役稼働率が低下するという問題が生じている。そのような背景から、最近では、港湾計画において周期数分程度の長周期波への対応が図られるようになってきている（港湾の施設の技術上の基準・同解説検討委員会, 1999）。しかし、既存の港からは長周期波による係留船舶の動揺を軽減させるような対策が強く望まれている。

港内に伝達する長周期波が自由波であれば、それは長波であるので一般的な短周期波に関する議論の延長線上で長周期波への対策を考えることができる。しかし、海洋には波群に伴う長周期波（拘束長周期波）が存在し（永井ら, 1997；山村ら, 1999）、波群が港湾構造物と干渉したときに拘束長周期波に応じて自由長波が発生することが指摘されている。例えば、寛田・水口（1997）は拘束長周期波を伴った波群が構造物によって部分反射されるときに自由長波が発生すること示した。また、Sand（1982）によれば Biésel（1963）は防波堤の回折効果により基本波に拘束された 2 次オーダーの短周期波が自由波になることを実験的に確かめたようである。2 次オーダーの干渉からは短周期波だけでなく長周期波も同時に発生するので、回折効果により自由短周期波が発生すると同時に自由長波も生成されると推論できる。一方、関本（1999）は、基本波の回折現象を理論的に検討して、防波堤境界における水位や流速の連続性を満たすように自由長波が発生するのではないことを明らかにし、防波堤による基本波の回折によって波群が減衰し、それが自由長波を発生させると推論している。また、喜岡ら（1993）は、港内副振動の数値計算を行って、港湾に來襲する拘束長周期波を自由長波とした場合には 2 次以上の副振動モードで増幅率が過小になることを明らかにしている。

以上のことから、港内における長周期波の対策を考えるときには、港に來襲する長周期波には自由長波だけでなく拘束長周期波もあること、そして拘束長周期波を含

んだ波群が港湾構造物と干渉することによって自由長波が発生し、それが港内に伝達することを考慮しなければならないことがわかる。本研究は、防波堤堤頭部に着目して、拘束長周期波を内在した一方向波や多方向波が防波堤によって回折されるとき防波堤背後の長周期波の特性を数値シミュレーションによって検討したものである。

2. 数値計算モデル

数値計算には平山ら（1998）によるモデルを使用した。その基礎方程式は、Madsen・Sørensen（1992）が分散項を補正することによって深い海域における波の分散特性を修正し、さらに緩やかに変化する海底地形に適用できるように改良した平面 2 次元の修正ブシネスク方程式に、砕波による運動量の拡散項（佐藤・Kabiling, 1993）を付加したものである。その修正ブシネスク方程式の差分には ADI 法を使用した。

数値計算の計算領域を図-1 に示す。図中 L は造波境界における有義波の波長である。対象領域の周りには幅 $2L$ のエネルギー吸収帯を設置した。防波堤は対象領域の中心から y 軸に平行に設置した。防波堤の反射率は 1 である。海底地形は造波境界における水深 h を 20 m とし、 x 軸の正方向に浅くなる一様勾配斜面とした。海底勾配 s は 1/100 と 1/50 である。港内における長周期波には底面摩擦が影響するので、数値計算モデルに組み込まれている Jonsson タイプの底面摩擦項の係数を 0.02（佐藤・

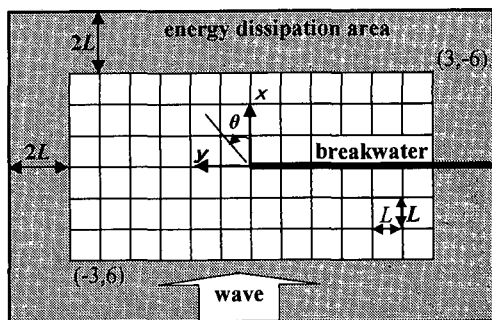


図-1 計算領域の概要

* 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官

** 正会員 工 修 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室

表-1 計算条件

Case	s	θ (deg)	S_{max}
a099	1/100	0	999
a075			75
a025			25
ap99		+30	999
ap75			75
am99		-30	999
am75			75
b099	1/50	0	999

θ は x 軸から反時計回りを正とする。

$S_{max}=999$ は一方向波である。

Kabiling, 1993) とした。空間差分間隔は x 方向と y 方向ともに $L/20$ とし、計算時間間隔は $T/60$ (T は有義波周期) とした。作用波は、Bretschneider・光型型周波数スペクトルで光型型方向関数の多方向不規則波である。その有義波周期 T や有義波高 H は造波境界においてそれぞれ 9 s と 2 m に設定した。防波堤に作用する波の方向性の変化を検討するために、造波境界において発生させる波の波向 θ や方向集中度 S_{max} を変化させた。計算したケースを表-1 に示す。本研究では、波の伝播にともなって発達する非線形干渉波を数値的に計算するために計算領域を大きくとる代わりに、造波境界において非線形干渉波を理論的に計算し、それを 1 次の基本波に付加して計算領域を小さくした。非線形干渉波の理論計算は 2 次オーダーまでの非線形干渉理論 (Sand, 1982) に基づいて行った。基本波は、各周波数ごとに一つの波向しか持たないという仮定、いわゆるシングル・サンメーション法により定義し、それらの 2 次干渉によって生じる成分波の中から有義波周期の 1.5 倍以上の周期を持った長周期波を取り出して基本波のスペクトルに足し合わせた。

3. 非線形干渉による長周期波

数値計算に先立ち、基本波の数 N_s について検討した。図-2 は、 $N_s=25, 50$ および 100 について計算した造波水深における波の周波数スペクトルと方向分散特性を、ケース a075 を例にとって示したものである。図中の S は周波数スペクトルであり、 D は微小な方向角内に含まれる方向スペクトルの割合を示している。 N_s によって長周期波のエネルギーレベルが若干変化するが、 $N_s>50$ では周波数特性や方向分散特性は概ね同様であるため、本研究では $N_s=50$ とした。これら基本波の 2 次干渉によって発生する拘束波成分の数は 1000 以上になる。

発生波の周波数スペクトル S と波エネルギーの方向分散特性 D を図-3 に示す。周波数 $f \geq 0.05$ Hz の短周期側のスペクトルは波条件によってほとんど変化していないが、長周期側では変化している。これは、計算時間が長周期波の解析に対して十分長くなかったことに起因していると考えられる。このため、本研究のように計算時間

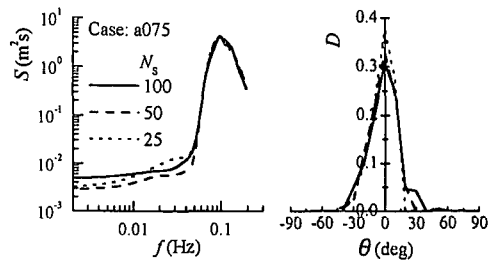


図-2 基本波の数による発生波の特性の変化

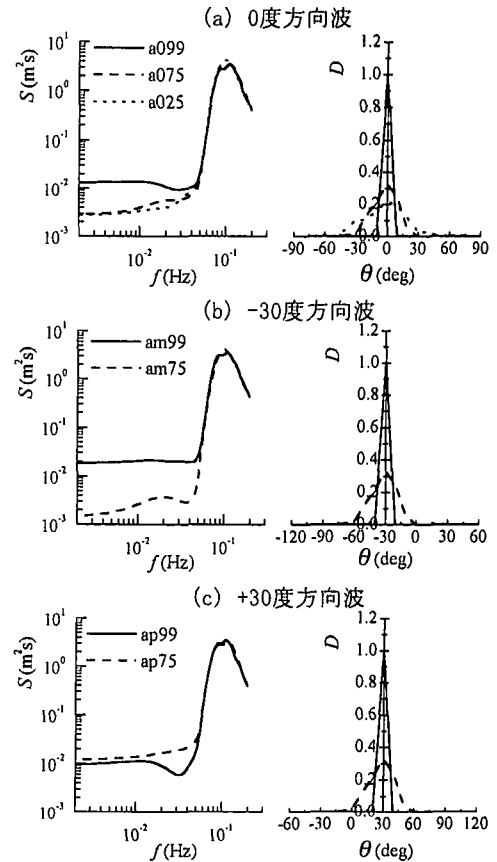


図-3 発生波の周波数スペクトルと方向分散特性

が短い場合には、この発生波における長周期波エネルギーの差異に注意が必要である。

防波堤に作用する長周期波の特性を把握するために、防波堤を設置しない状況下の波の周波数スペクトル特性を図-4 に示す。造波境界における長周期波のエネルギーが波条件によって異なるので、同図では造波スペクトルに対する斜面上のスペクトルの比で定義した伝達関数 T_R を示している。図示したは、 $(x/L, y/L) = (-2, 0), (0, 0)$ および $(1, 0)$ の位置の伝達関数で、 $(x/L, y/L) = (0, 0)$ が防波堤堤頭部の位置に相当する。海底勾配が 1/100 (同図

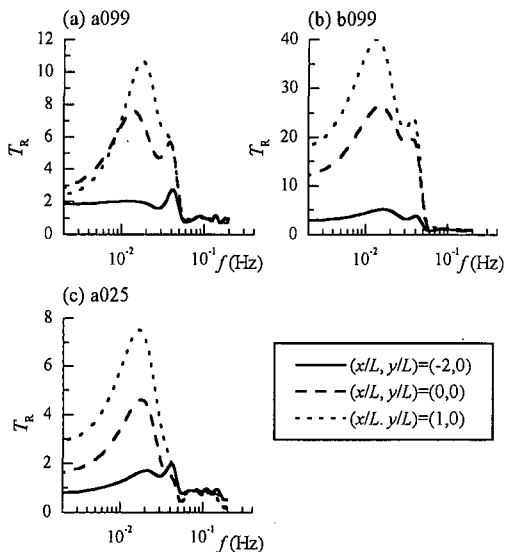


図-4 斜面上の周波数スペクトルの変化

(a) から 1/50 (同図 (b)) へと急になると、長周期波エネルギーは 3～4 倍ほど増加する。これは水深の減少によって拘束長周期波が増大するという理論的な検討結果と一致している。なお、計算結果によると海底勾配が変化しても水深が同じ場合には周波数特性は大きく変化しないようである。さらに、波の方向分散性によっても長周期波のエネルギーレベルは変化する。方向分散性が強い波の場合 (同図 (c)) には、波の伝播につれて水深が浅くなっても一方向性の強い波ほどには長周期波エネルギーは増大しない。

4. 防波堤背後の長周期波

防波堤周りの水面の空間変動は図-5 に例示されるように計算され、防波堤背後に波が回り込んでいる様子が認められる。図示したのは am75 のケースで方向分散性を持った波が防波堤背後に伝達しやすい方向から来襲する場合のものである。

防波堤堤頭部から 45 度の角度で防波堤背後に回り込んだ $(x/L, y/L) = (1, -1)$ と $(2, -2)$ における水面の時間変動波形と、スペクトル解析を行ってそれから 30 s 以上の成分波を抜き出して合成した長周期波の波形をケース a025 を例にとって図-6 に示す。防波堤堤頭部の通過波の長周期波エネルギーが比較的小さくなる $S_{\max} = 25$ の図示した例であっても、大きな波群のところには拘束長周期波に似た形の set-down 波が認められる。さらに $S_{\max}$ が大きくて一方向性が強い波では、set-down 波の振幅はより増大することを確認している。また、防波堤堤頭部から離れるにつれて波群の振幅は小さくなり、それと同時に長周期波の振幅も小さくなっている。このこと

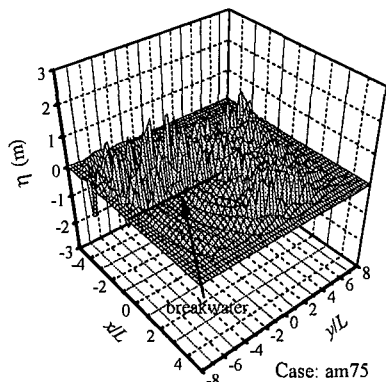


図-5 防波堤堤頭部付近の水面の空間波形

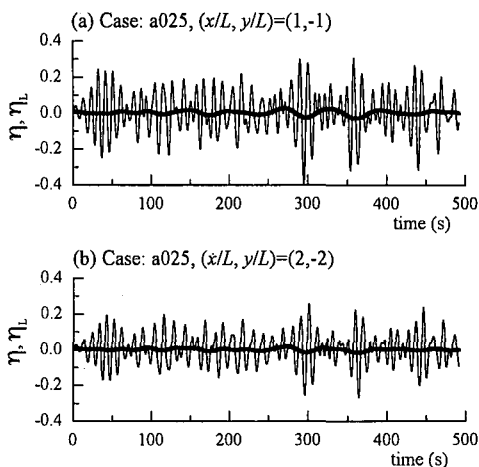


図-6 防波堤背後の波群と長周期波の時間波形

から、この長周期波は拘束長周期波である可能性が高い。しかし、防波堤の回折効果によって生じた自由長波であっても、それは回折波であるために防波堤堤頭部から離れるにつれてそのエネルギーは減少する。防波堤背後の長周期波が拘束波であるのかあるいは自由波であるのかによってその低減対策も異なってくるので、どちらの波が卓越するのかを明らかにすることは重要である。しかし、水深約 15 m における周期 30 s 以上の波では波速と群速度は等しくなってしまうので、これを使った拘束波と自由波の判断はできなかった。

来襲波の波向や方向分散性が防波堤背後の長周期波に及ぼす影響を次に検討する。防波堤背後の $(x/L, y/L) = (2, -2)$ におけるスペクトル S_A 、防波堤がない状況下の防波堤堤頭部 $(x/L, y/L) = (0, 0)$ における通過波のスペクトル S_B およびそれらによる伝達関数 T_R を図-7 に示す。図中の細実線が S_A 、破線が S_B および太実線が T_R である。波の方向分散性や主波向によらず、周波数 $f \geq 0.1$ Hz の短周期波では周波数の増大にともなって S_A は急

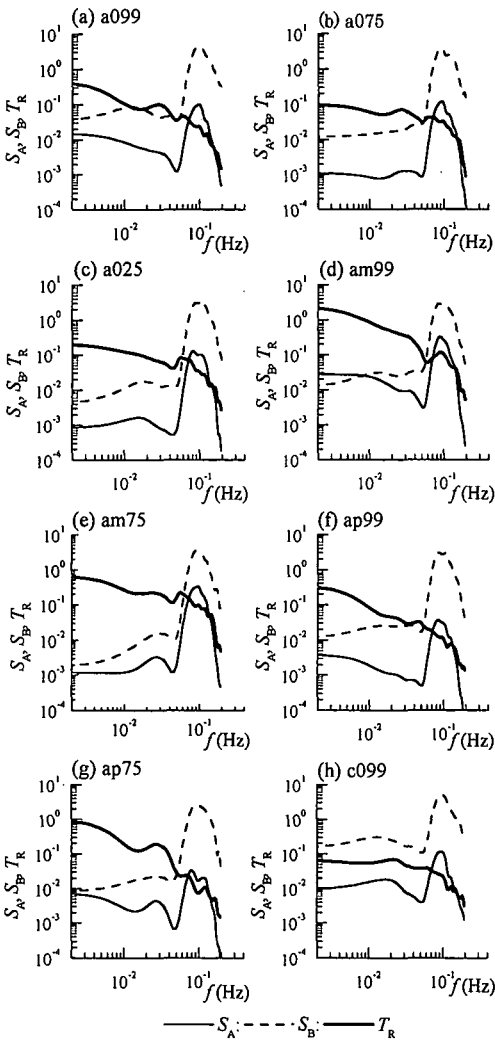


図-7 防波堤背後の伝達波のスペクトル, 防波堤堤頭部の通過波のスペクトルおよびそれらの伝達関数

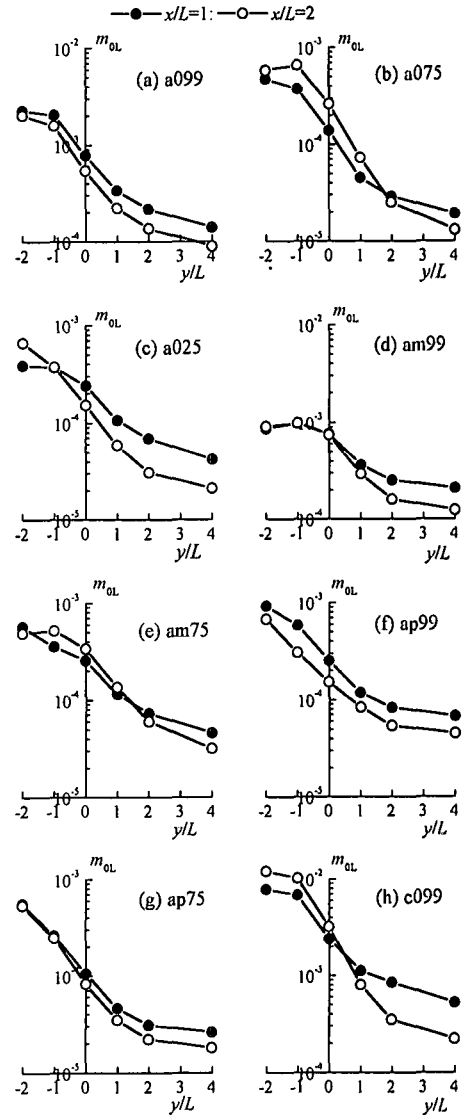


図-8 防波堤背後の長周期波のエネルギー分布

激に減少し、 $f \leq 0.03$ Hz の長周期波でも短周期波ほどではないが防波堤の存在によってエネルギーは減衰している。しかし、波条件によっては防波堤背後に長周期波が伝わりやすい場合もある。例えば、同図の (a), (d) と (f) に示した一方向性の強い波の場合では、来襲波が防波堤背後に伝達しやすい波向の (d) のときに防波堤背後の長周期波エネルギーはあまり減衰していない。逆に、来襲波が防波堤背後に直接的に伝達し難くなるにつれて (同図 (d), (a), (f) の順) 伝達関数は小さな値になり、防波堤背後の長周期波は小さくなる。しかし、同図 (b), (e) と (g) の比較から、方向分散性がある来襲波の場合には、必ずしもそうならないようであり、成分波の方向性等に影響されて主波向による伝達関数の変化特性は明瞭でない。

同じ波向条件である同図 (a), (b) と (c), (d) と (e), あるいは (f) と (g) を比較してみる。来襲波が防波堤背後に伝達しやすい方向から波が来襲する (d) と (e) では、波の一方向性が強い (d) の方が防波堤背後の長周期波の減衰は少ない。逆に、来襲波が防波堤背後に直接伝わらない (f) と (g) では、波の方向分散性の強い (g) の方が防波堤背後の長周期波は減衰し難い。防波堤に対して波が直角に入射する (a), (b) と (c) では、方向分散性の強い波の方が防波堤背後の長周期波は減衰する。ただし、 $S_{\max}$ が 75 と 25 との間には伝達関数の値に大きな差はなかった。以上のことから、港内における長周期波を生起しやすいのは、港内に進入しやすい方向から波が来襲する場合には一方向性の強い波であり、港内に波

が直接的に伝達しないような場合には多方向性の波であると言える。

防波堤背後の長周期波に及ぼす海底勾配の影響について同図 (a) と (h) を比較してみると, $1/100$ や $1/50$ の海底勾配の程度では, 周波数 f が 0.01 から 0.04 Hz 程度までの長周期波の減衰に海底勾配は大きく影響せずに, 伝達関数は 0.1 程度の値になることがわかる。

図-8 は防波堤背後の 30 s 以上 120 s 以下の長周期波のエネルギー m_{0L} の場所的な変化を示したものである。図中, $\bigcirc$ は $x/L=1$, $\bullet$ は $x/L=2$ の線上のデータを示している。一方向性の強い波 (同図 (a), (d) と (f)) や海底勾配が急な場合 (同図 (h)) には, 防波堤堤頭部に来襲する長周期波エネルギーが大きいため, 防波堤背後でも長周期波のエネルギーは高い。また, 防波堤背後まで来襲波が直接的に伝達する方向から波が来襲する (d) や (e) の場合には防波堤背後の奥までエネルギーが伝わっている。ただし, 方向分散性の強い波の場合には, 防波堤堤頭部に来襲する長周期波エネルギーは一方向性の強い波に比べて小さいので, 港内の奥まで伝達する長周期波は非常に小さなものとなる。逆に, 港内へ比較的大きな長周期波が伝達するのは, 一方向性が強い波浪が港内に入りやすい方向から来襲する場合である。これは, 台風の前後に生じるような強いうねり性の波が港に来襲するときに港内に長周期波が伝達しやすいことを示唆している。

5. おわりに

防波堤堤頭部に拘束長周期波を内在する波群が来襲したときの防波堤背後の長周期波をブシネスク方程式に基づいたモデルを使った数値計算から検討した。防波堤は短周期波に対するのと同様に港内に伝達する長周期波の低減に有効であるが, その低減効果は短周期波の場合ほど高くなかった。来襲波の一方向性が強い場合には, 防波堤堤頭部に作用する長周期波のエネルギーは高くなり, そのときに防波堤背後の長周期波エネルギーも高くなる。しかし, 防波堤背後の長周期波は, 自由波であ

うが拘束波であろうが, 回折波のように空間的に広がるため防波堤堤頭部から離れるにつれて長周期波エネルギーは減衰する。その減衰特性は来襲波の主波向や方向分散性の影響を受ける。また, 防波堤背後の長周期波は防波堤背後に伝達する波群と強い相関が認められたが, それが波群に拘束された長周期波であるのかあるいは自由長波であるのかの検討は今回でできず今後の課題として残された。今回使用した数値計算モデルでは, 計算領域に設置したエネルギー吸収帯内で自由長波が発生する可能性があり, さらにその外側境界において自由長波が反射され計算領域内で重複波が形成されている可能性は否定できず, 自由長波に対する無反射境界の導入といった改良も今後必要である。

参 考 文 献

- 港湾の施設の技術上の基準・同解説検討委員会 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1181 p.
- 佐藤慎司・Kabiling, M. (1993): Boussinesq 方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 386-390.
- 関本恒浩 (1999): 港湾内外の長周期波の特性とその評価に関する研究, 中央大学博士論文, 130 p.
- 寛田博章・水口 優 (1997): 波群の反射と長周期波, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 201-205.
- 永井紀彦・橋本典明・白石 悟・川口浩二・清水勝義・上野成三・小林昭男・東江隆夫・柴田孝雄 (1997): 現地連続観測による沖合長周期波の発達・減衰過程と港内係留船舶の動揺, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 226-230.
- 平山克也・上原 功・永松宏一・平石哲也 (1998): 珊瑚礁リーフにおける波と流れの計算法の適用性, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 161-165.
- 山村易見・青木伸一・舟橋 香 (1999): 入射波の方向分散性を考慮した拘束長周期波の推定と自由長周期波の伝播特性, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 286-290.
- Biésel, F. (1963): Radiating second-order phenomena in gravity waves, IAHR, Proc. 10th Congr., pp. 198-204.
- Madsen, P. A. and Sørensen, O. R. (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry, Coastal Eng., Vol. 18, pp. 183-204.
- Sand, S. E. (1982): Long waves in directional seas, Coastal Eng., Vol. 6, pp. 195-208.