

# 防波堤の長周期波に対する抑止効果に関する模型実験

藤 咲 秀 可\*・丸 山 晴 広\*\*・平 石 哲 也\*\*\*

## 1. ま え が き

波群による拘束波を主成因として沖合いで発達した周期1～5分の長周期波が、港湾内に進入し、船舶と係留索からなる係留系の固有周期と共振することにより、係留索の切断や荷役障害等が生じる場合がある(永井ら, 1994, 松良ら, 1994, 田端ら, 1995)。また、この長周期波は、港内で局所的な副振動により増幅され、波高が大きくなる場合がある。このような長周期の水面変動に対しては、既存の港湾においては風波を抑止する目的で建設された防波堤では効果が小さく、長周期波に対する有効対策が見つからないのが現状である。しかしながら、防波堤の延長や配置の変更により、長周期波の港内への進入を抑止することができれば、長周期波に対する港内の静穏度を向上させることが可能であると思われる。本研究では、矩形の港湾模型を用いて、単一方向不規則波を造波し、港外で波群の拘束波として発達する長周期波が、港口部の防波堤でどの程度抑止できるかを明らかにするとともに、防波堤の延長による港内副振動への影響を検討することを目的とした。

なお、通常の造波方法で波群性の強い不規則波列を造波すると拘束波以外に数種の自由進行長波が発生するため(Ottesen Hansen et al., 1980; 池野・田中, 1995)、拘束長周期波のみを入射波として与えるためには、造波信号にあらかじめ、それらを消去する波が発生するような項を含ませておく必要がある。しかしながら、実験水槽内では長周期波の反射波を吸収できないこと、現地の港湾において観測される長周期波が、拘束波による長周期波成分以外に自由進行長波をすでに含んでいることを考慮して、ここでは、通常の造波方法を用いても、現地の状況を定性的に近似できると考え、造波信号の修正は行っていない。

## 2. 実験の内容

### 2.1 実験装置と計測機器の設置位置

図-1に、実験装置の配置と波高計の設置位置を示す。実験水槽には、幅50cmの造波板60台からなる総延長30mの造波装置が設置されている。実験水槽の左側面には、碎石による消波工が設置されており、実験水槽右側の消波籠と、実験装置の外側の壁に消波籠を配置することによって、水槽の横方向の反射の影響を低減させている。造波機から港湾模型までの距離は9.3mとし、波高計測点は、造波板前面から5mの地点のP1の他に、港外3点、港口部1点、港内5点の計10点設置した。

模型縮尺は1/100とし、港湾地形は現地量で縦640m、横660mのほぼ正方形とした。港口部の幅は100mとした。図に示すように、港口部に対策工のない基本的な港形をTYPE; 0、港口部の左端から沖側に100m延長し、さらに250mを波向に対して直角となるように配置した港形をTYPE; I、TYPE; Iの防波堤延長部250mを波向に対して45°に傾けて配置した港形をTYPE; IIとした。

### 2.2 実験ケースと実験波の特性

実験水深は20mで一定とし、実験に用いた有義波高は8m、有義波周期は8sと10sの2種類とした。波向は開口部に対して直角方向になるようにし、単一方向不規則波を造波した。実験にあたっては、波群性の弱い波として、Bretschneider・光易型の周波数スペクトルをもつ波と、波群性の強い波として、JONSWAP型でスペクトルの先鋭度を示すpeak enhancement factor  $\gamma$ が7である波の2種類を用いた。Longuet-Higgins and Stewart (1962)の理論に従えば、造波された波が水槽内を進行するにつれて、港外でセットダウン波が生じ、長周期波成分が含まれるようになる。

図-2は、実験に用いた波の周波数スペクトルでJONSWAP型の例を示す。実験値の方が理論値に比べてスペクトルのピークが高く現れているが、全体としておおむね目標の周波数スペクトルをもつ波が造波されている。

図-3は、港外のP1で測定された波形記録から、高速フーリエ変換で測定波形を複素有限フーリエ級数に分解

\* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室

\*\* 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室

\*\*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長

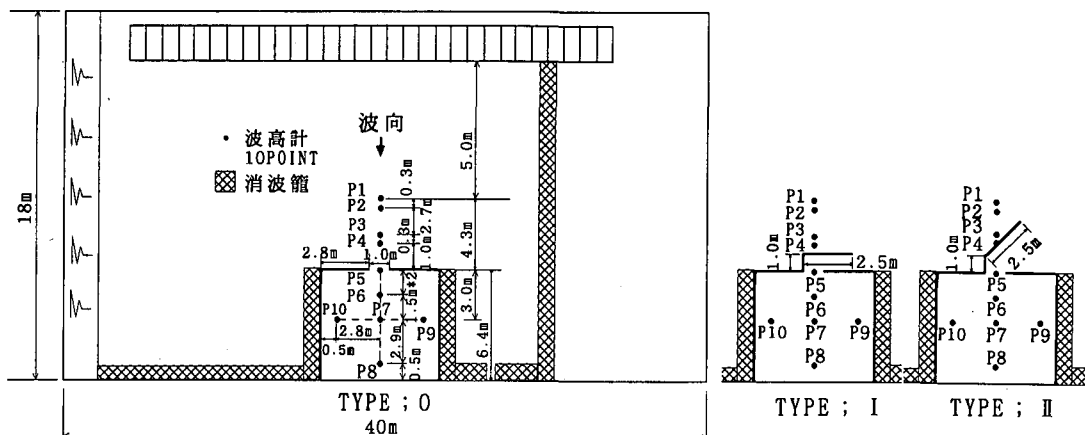


図-1 実験装置の配置および波高計の設置位置

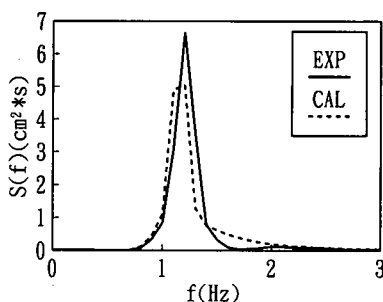


図-2 周波数スペクトル図 (JONSWAP 型)

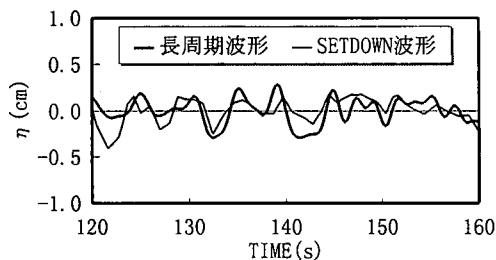


図-3 波形比較図 (JONSWAP 型)

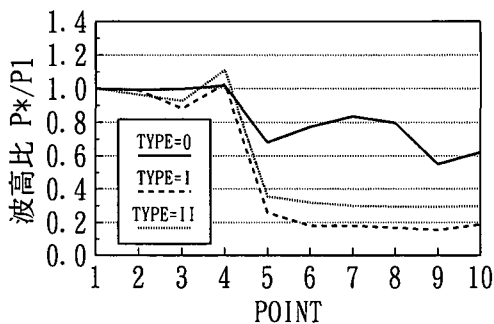
し、対象周期に含まれる級数のみを再合成することにより、周期 20 秒以上の長周期成分のみを抽出した波形と、Longuet-Higgins and Stewart の理論に従って、ラディエーション応力から計算したセットダウン波形を JONSWAP 型の場合で比較したものである。セットダウン波形と長周期波形がおおむね一致していることから、実験水槽内において、波群による拘束波を主成因とする長周期波が形成されていることがわかる。

### 3. 実験による対策工法の適用性の検討

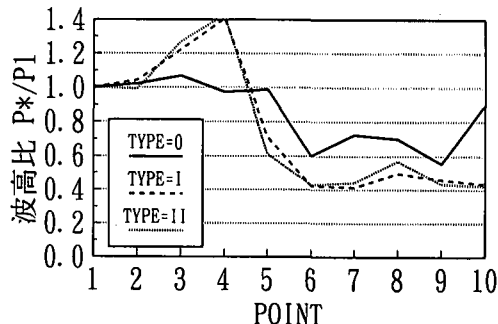
#### 3.1 港内計測点での波高比

長周期波に対する防波堤の効果を定量的に評価するため、各計測点での長周期波成分の平均波高を算出し、港外の P1 に対する港内 5 点の波高比を求めた。図-4 は、 $H_{1/3}=8\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10\text{s}$  の場合の、短周期と長周期の全成分を含む波について港内各点の波高比を示したものである。ただし、この場合は長周期波成分の振幅に比べて短周期成分の振幅がきわめて大きいため、結果的には短周期成分（風波成分）の波高比を示していることになる。図に示すとおり、対策工のない TYPE; 0 では港内測点 P8 の波高比が、20% しか低下していないのに対し、TYPE; I および TYPE; II では同一測点の波高比が 70% 以上低下している。このことから、防波堤の効果が顕著であり、風波成分のエネルギーは、防波堤でよく制御できていることが確認できた。

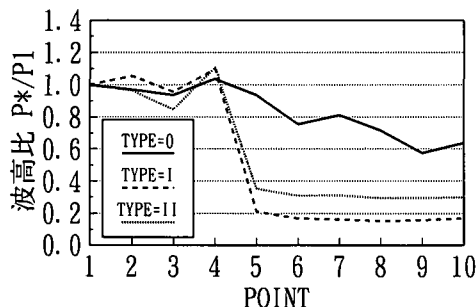
図-5 は、 $H_{1/3}=8\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8\text{s}$  の場合の、長周期波成分について、P1 を基準にした港内の波高比を示したものである。港内の計測点 (P5~P10) について図-4 と比較すると、TYPE; I, II とも、波高比の低下の割合が小さく、長周期波が防波堤で防ぎにくいことがわかる。しかしながら、対策工のない TYPE; 0 と TYPE; I および II で比較すると、TYPE; I および II の波高比が、TYPE; 0 の場合よりも小さくなっている。この割合は、Bretschneider・光易型の場合、P5~P7 で約 30%、P8, P9 で約 15%、P10 で約 50% 程度である。JONSWAP 型の場合には、港内の P5~P10 で約 20~40% 小さくなっている。長周期波の波高が、10~15 cm 以上になると、係留船舶には大きな影響が生じると考えられており（菅沼ら、1995）、今回実験を行った対策工により、港内の長周期波高を 10 cm 以下に低減できれば、船舶の荷役障害を防ぐことが



(1) Bretschneider・光易型

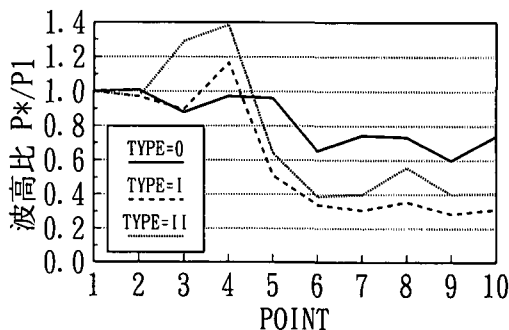


(1) Bretschneider・光易型



(2) JONSWAP型

図-4 各波高計測点での波高比 (全周波数成分)



(2) JONSWAP型

図-5 各波高計測点での波高比  
(長周期波高/ $P_1$ の長周期波高)

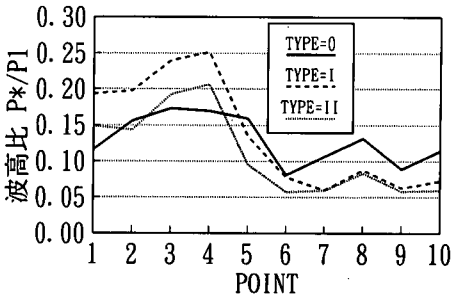
できる。また、開口部を覆うように設置した極端な港形の TYPE; I と航路に配慮した港形の TYPE; II のいずれのケースにおいても、港内の波高比に顕著な差が見られなかったことから、長周期波の波向が把握できれば、防波堤の法線を多少変化させても十分な効果が得られると思われる。なお、図において、TYPE; I, II とも P3 および P4 の波高比が P1 よりも大きくなっているのは、対策工として設置した防波堤による反射波の影響であると思われる。

図-5 に示したとおり、TYPE; I および II の対策工の防波堤は反射波を生じさせ、港外の波高計測点に影響を与えている。このため、港外と港内の長周期波高比を算出する際に、港内の長周期波高が同一レベルであっても、港外の P1 の長周期波高が大きくなっていれば、港内の長周期波高が小さく見える可能性がある。つまり、波高比を算出する際には、基準とした P1 の長周期波の入射波成分のみを抽出する必要がある。しかしながら、長周期波に対する入射分離を行うためには、波高計の間隔をきわめて大きくしなければならないことになり、実験室内では不可能である。このため、港外の P1 と P2 の 2 点の波高計測データから、風波成分の入射分離計算を行うことにした。すなわち、ここでは P1 の短周期の入射波成分は、長周期波の入射波成分と強い相関を持つものと考え、短周期波の入射波成分による波高比を検討した。

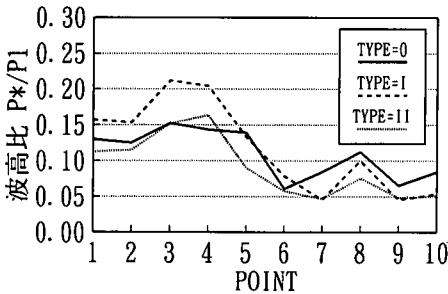
図-6 は、 $H_{1/3}=8\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=10\text{ s}$  の場合の、各計測点の長周期波高と P1 の風波の入射波成分との波高比を示す。Bretschneider・光易型、JONSWAP 型とも TYPE; 0 と TYPE; I, II で比較すると、TYPE; 0 に対して、TYPE; I および II では、港内の波高比は約 30～50% 低下した。また、港外の P3, P4 は TYPE; I の場合でかなり反射波が目立つものの、TYPE; 0 と TYPE; II では、港外の波高比はほぼ同一であり、防波堤からの反射波の影響は小さいことがわかる。これは、TYPE; II では、防波堤が斜めに設置されているためである。

### 3.2 港内計測点での増幅率

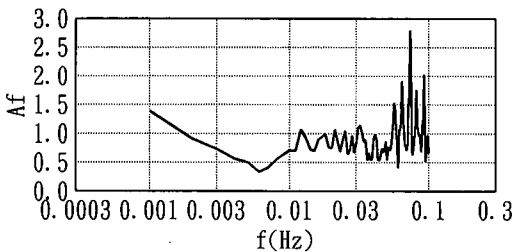
港内の長周期波による擾乱には、港内副振動が原因となっていることがある。港内副振動は、周期が数分～30 分程度のものが一般的であるが、港形によっては港内の一部分でさらに短い周期の振動が起きることがある。たとえば、周期が 1～2 分の副振動は、港外から伝播する長周期波との共振により発生し、船舶の荷役に影響を与える可能性がある。また、港内擾乱を防止するために港内を防波堤で囲むようにすると、さらに擾乱が激しくなる、“ハーバーパラドックス”を生じる恐れがある。今回の実験において、副振動の影響を確認するため、港内計測点と港外の P1 とで増幅率を算出した。なお、副振動の増幅率  $A_f$  は次式で計算している。



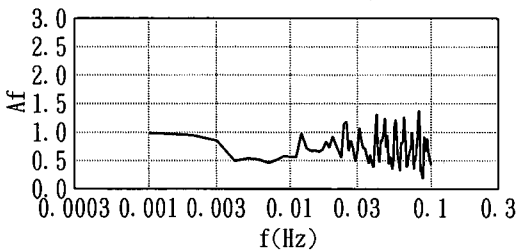
(1) Bretschneider・光易型



(2) JONSWAP 型

図-6 各波高計測点での波高比  
(長周期波高/ $P_1$  の入射波高)

(1) P8



(2) P10

図-7 増幅率 (TYPE; 0)

$$A_f = \sqrt{S(f)_{港内} / S(f)_{P1}} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $S(f)$  は周波数スペクトル密度、 $f$  は周波数である。

図-7 は、 $H_{1/3} = 8 \text{ m}$ 、 $T_{1/3} = 8 \text{ s}$  で、JONSWAP 型のスペ

クトルを有する波を TYPE; 0 に作用させた場合に、港内の P8 および P10 で得られた増幅率を示す。周波数が、 $0.003 \sim 0.03 \text{ Hz}$  (周期  $30 \text{ s} \sim 5 \text{ min}$ ) の範囲に着目すると、増幅率はおおむね 1.0 前後であり、副振動は生じておらず、港内へ進入した長周期波は、増幅されていないことがわかる。図-8 は、TYPE; II での増幅率を示す。対策工のある TYPE; II では、増幅率が 0.5 以下となり、副振動は生じていない。TYPE; I の港形でも TYPE; II の結果と同様であった。これは、対策工のない TYPE; 0 の港形でも、港内が広く、もともと副振動が生じていないことに加え、副振動を引き起こす長周期波のエネルギーが、防波堤によって抑えられていることによるものと思われる。

#### 4. 長周期波の増幅計算法の適用性の検討

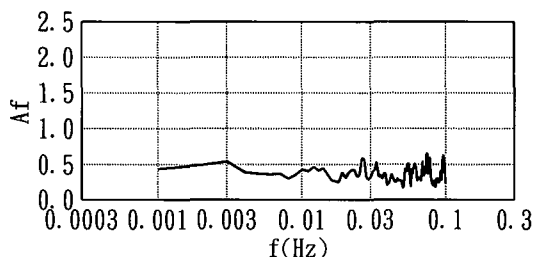
長周期波の対策を現地の港湾に施す場合、事前に数値計算による対策工の効果を検討することが必要となる。長周期波に対する増幅計算法としては、線形長波の運動方程式と連続式を連立させて解く手法 (高山ら, 1988) がある。対策工法を検討した今回の港形では、副振動が生じず、数値計算法の適用性を検討することができない。そこで、長方形の港形を用いて、実験において副振動を生じさせ、数値計算の結果と比較した。

図-9 は、実験に用いた港形を示す。港形は縦  $640 \text{ m}$ 、横  $100 \text{ m}$  の長方形とした。このときの 1 次モードの共振周期は約  $3 \text{ min}$ 、2 次モードで約  $1 \text{ min}$  となる。今回の  $1/100$  の模型実験においては、それぞれ  $18.3 \text{ s}$ 、 $6.1 \text{ s}$  となり、不規則波を造波して、その拘束波としてこのような波を発生させることは造波機の性能上困難である。このため、周期を  $1 \sim 20 \text{ s}$  (現地量で  $10 \text{ s} \sim 3.3 \text{ min}$ ) の間で 13 ケース変化させた規則波を造波して入射波とした。波高は  $2 \text{ cm}$  で一定とした。

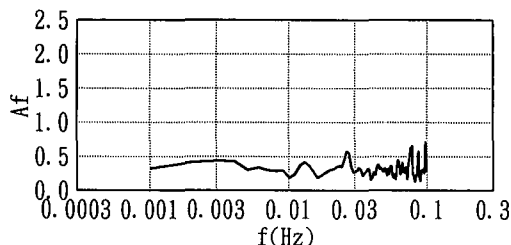
図-10 は、港口部の P5 に対して、港内の P6～P8 の 3 点の増幅率を、実験値と計算値と比較したものである。港内の各点とも、ピークの出現する周波数がよく一致しており、増幅率も P6 の  $0.016 \text{ Hz}$  (2 次モード) で 2 倍程度の誤差が生じるほかは、全体として一致している。したがって、今回用いた数値計算法は適用性が確認でき、港内副振動の対策の効果を数値計算で検討することができる。

#### 5. あとがき

本実験では、防波堤を延長することにより、長周期波の港内への進入を抑止できることを確認した。しかしながら、実際の港湾に適用する場合には、航路の計画や操船方法などから、実施に制約を受ける場合が予想される。したがって、既存の港湾における対策工の規模には



(1) P8



(2) P10

図-8 増幅率 (TYPE;II)

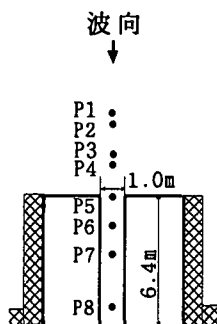
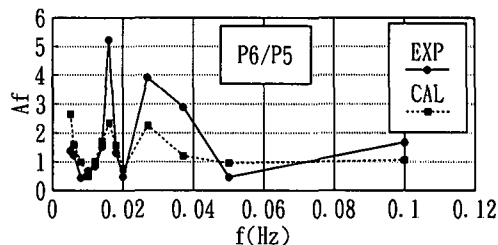


図-9 実験装置の平面図

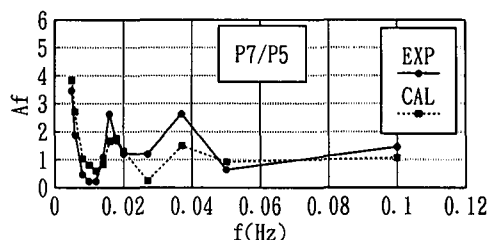
制約があり、港湾計画の段階から長周期波に対する検討を行うことが必要である。

### 参考文献

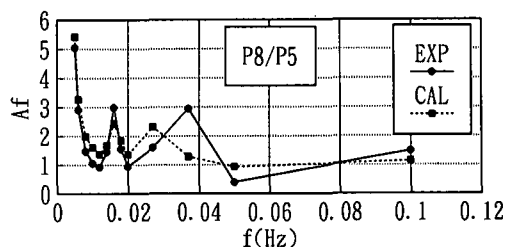
- 池野正明・田中寛好 (1995): 自由長波制御により造波された波群拘束長周期波の浅水・碎波変形と構造物による重複波の特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 156-160.
- 菅沼史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信男 (1995): 現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺予測の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 951-955.
- 高山知司・平石哲也 (1988): 数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討, 港湾技研資料, No. 636, 70 p.
- 田端竹千穂・田所篤博・平石哲也・玉城重則 (1995): 港湾にお



(1) P6



(2) P7



(3) P8

図-10 増幅率の比較

ける長周期波の増幅現象に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 301-305.

- 永井紀彦・橋本典明・浅井 正・戸引 勲・伊藤一教・東江隆夫・小林昭男・柴田孝雄 (1994): 現地データに基づく港内係留船舶の動揺に及ぼす港内長周期波, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 931-935.

- 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲 (1994): 波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 71-75.

- Longuet-Higgins, M. S., and Stewart, R. W. (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats', J. Fluid Mech., 13, pp. 481-504.

- Ottesen Hansen, N. E., S. E. Sand, H. Lundren, Torben Sorensen, H. Gravesen (1980): Correct reproduction of group-induced long waves, Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 784-800.