

港内長周期波の対策工法に関する模型実験

Experiment on Countermeasure to Long Period Wave in Harbor

藤咲秀可*・丸山晴広*・平石哲也*

Hideyoshi Fujisaku, Haruhiro Maruyama, Tetsuya Hiraishi

Long waves with periods of 1-5 minutes sometimes terminate the cargo handling and cause the break of mooring ropes in Japanese several ports. These long waves mainly consist of the setdown waves bounded in the grouping waves. Preventing such long waves from penetrating into harbors has great importance to keep the safe loading and un-loading. The present paper experimentally investigates the effects of breakwaters located at the port entrance for preventing long waves. The amplitudes of long waves can be reduced by the appropriate installation of breakwater without any amplification of harbor oscillation.

Key words : Long wave, Hydraulic model test, Breakwater, Harbor oscillation

1. まえがき

長周期波による船舶の荷役障害は、苫小牧港、能代港、仙台新港など、多くの港湾で報告されている（菅沼ら、1995、田端ら、1995、永井ら、1994）。この原因は、係留船舶の固有振動周期が、i) 港内に直接進入してくる長周期波の周期に近く、係留系が共振を引き起こす場合、ii) 長周期波によって、港内で局所的に生じる比較的短い副振動周期に近く、係留系が共振する場合、に区別できる。これらの長周期波は、波群性の波に伴うセットダウン波に起因するものといわれている（松良ら、1994）。これまでの港湾整備においては、防波堤は風波の影響を低減する目的で建設されており、長周期波への対策は考慮されていない。このため、長周期波に対しては効果が小さく、減衰されない長周期波が、船舶へ影響を及ぼしているものと思われる。しかし、現存する防波堤を延長し、効果的に配置すれば、港外からの長周期波の進入を抑止でき、港内の長周期の水面変動を低減させることが可能であると考えられる。また、既存の港湾においては、この手法が唯一の対策であると考えられる。そこで、本実験では、縮尺1/100の矩形の港湾模型を用いて、波群の包絡線の振幅が大きく、長周期波を発生させやすい単方向不規則波を造波し、港外で形成される長周期波が、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。

2. 実験の内容

2. 1 実験装置と計測機器の設置位置

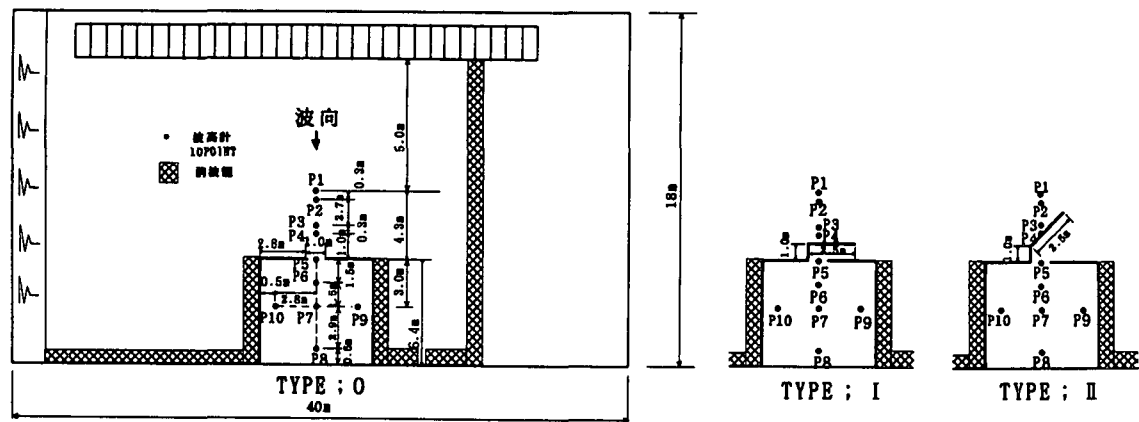
図-1に、実験装置の配置と波高計の設置位置を示す。実験水槽には、幅50cmの造波板60台からなる総延長30mの造波装置が設置されている。実験水槽の左側面には、碎石による消波工が設置されており、実験水槽右側の消波籠と、実験装置の外側の壁に消波籠を配置することによって、水槽の横方向の反射の影響を低減させている。造波機から港湾模型までの距離は9.3mとし、波高計測点は、造波板前面から5mの地点のP1の他に、港外3点、港口部1点、港内5点の計10点設置した。模型縮尺は1/100とし、港湾地形は現地量で縦640m、横660mのほぼ正方形とした。港口部の幅は100mとした。図に示すように、港口部に対策工の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

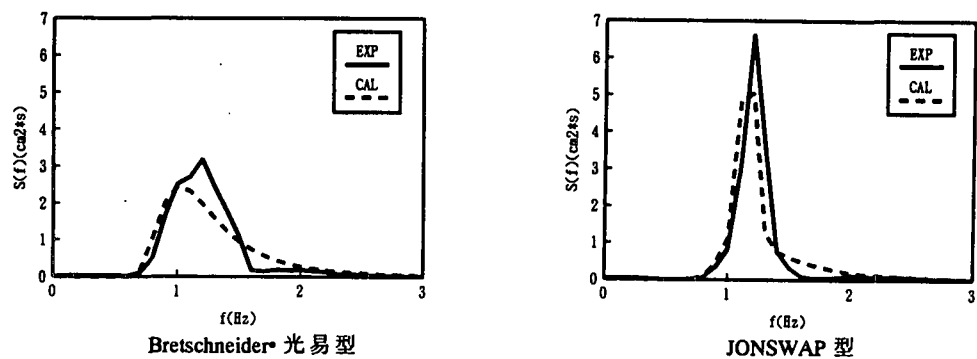
表-1に実験ケースを示す。実験水深は20mで一定とし、実験に用いた有義波高は8m、有義波周期は8sと10sの2種類とした。波向は開口部に対して直角方向になるようにし、単方向不規則波を造波した。実験にあたっては、波群性の弱い波として、Bretschneider* 光易型の周波数スペクトルをもつ波と、波群性の強い波としてJONSWAP型でスペクトルの先鋭度を示す peak enhancement factor $\gamma = 7$ の波の2種類を用いた。なお、造波された波が水槽内を進行するにつれて、Longuet-Higgins and Stewart(1962)の理論に従えば、港外でセットダウン波が

* 正会員 運輸省 港湾技術研究所 水工部 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

生じ、長周期波成分が含まれるようになる．図－２は、造波した波の周波数スペクトルを示す． Bretschneider 光易型、 JONSWAP 型のどちらも実験値の方が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ことがわかる．



図－１ 実験装置の配置および波高計の設置位置

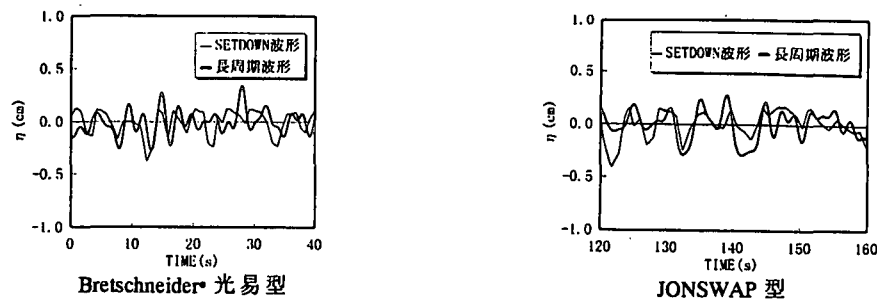


図－２ 周波数スペクトル図

図－３は、港外の P 1 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 2 0 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比較したものである． Bretschneider 光易型、 JONSWAP 型の場合ともに、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、実験室内において、波群によって拘束されたセットダウン波として、長周期波が形成されていることがわかる．

表－１ 実験ケース

水 深	2 0 m（一定）
有義波高	8 m
有義波周期	8 s， 1 0 s
スペクトル形	Bretschneider-光易型， JONSWAP型($\gamma = 7$)
波 向	開口部に対して直角方向
S max	9 9 9（単一方向不規則波）



図－３ 波形比較図

3. 実験による対策工法の適用性の検討

3. 1 港内で計測された波の特性

図-4は、 $H_{1/3}=8\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=8\text{ s}$ 、JONSWAP型スペクトルを有する波をTYPE:0、TYPE:IおよびTYPE:IIの港形に作用させたときに、港外のP1、港内のP8およびP10で計測された波の周波数スペクトルを示したものである。TYPE:0は、港内へ進入する波に対して遮るものがないため、港内でのスペクトル値に変化が見られず、港外の波がそのまま港内へ進入していることがわかる。これに対し、TYPE:IおよびTYPE:IIの防波堤による対策工を施した港湾地形においては、短周期成分と長周期成分を含む全周波数帯においてエネルギー密度の値が $1/10$ 以下となり、風波だけでなく、長周期波についても対策工の効果が大きいことが確認された。

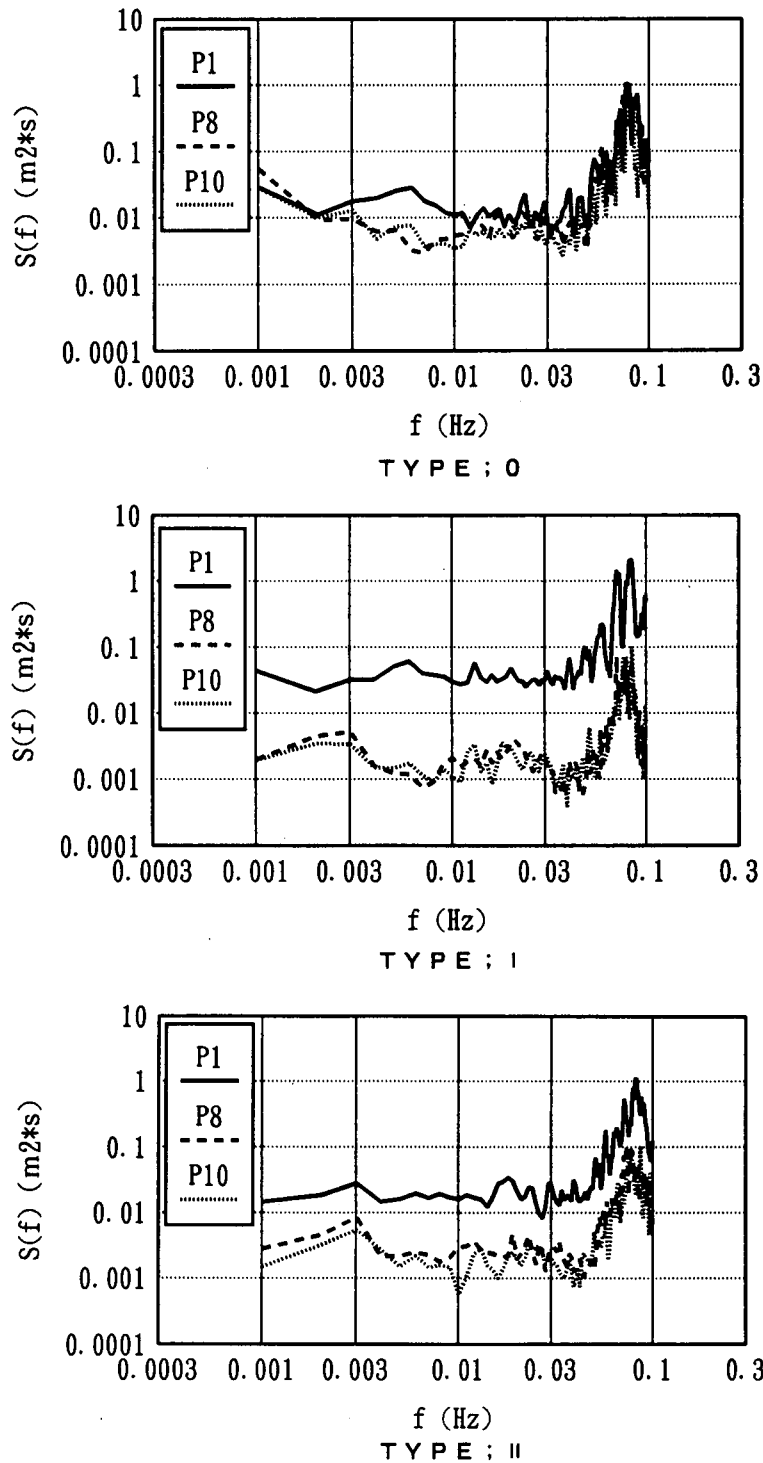


図-4 港外および港内の周波数スペクトル図

3. 2 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-5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、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、短周期波成分（風波成分）の波高比を示すことになる。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された。

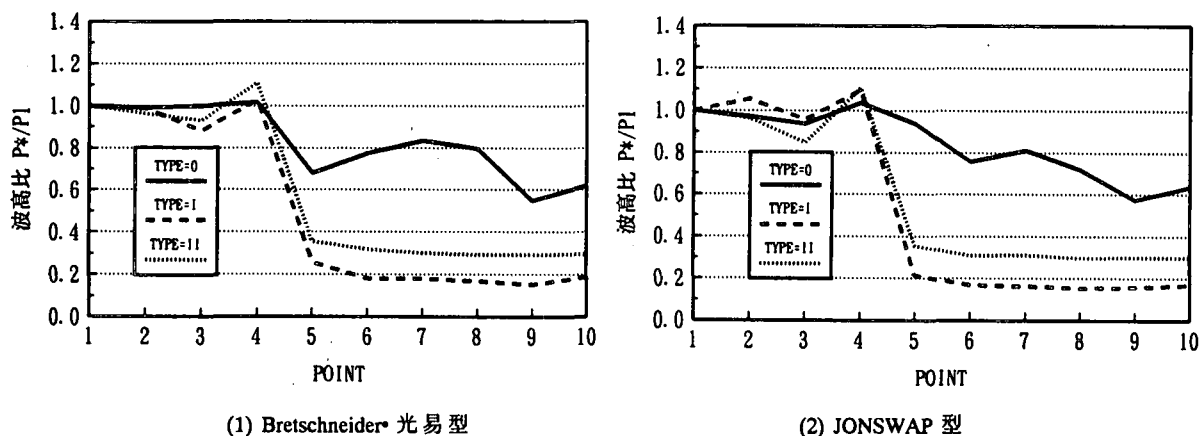


図-5 各波高計測点での波高比（全周波数成分）

図-6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-5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Bretschneider 光易型の場合、P5～P7で約30%、P8、P9で約15%、P10で約50%程度小さくなり、JONSWAP 型の場合には、港内のP5～P10で約20～40%小さくなった。長周期波の波高は、10～15cm以上になると、係留船舶には大きな影響を与えることを考慮すれば（菅沼ら、1995）、今回実験を行った対策工は、長周期波高の低減に関する効果が高いといえる。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ことがわかった。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、対策工の防波堤による反射波の影響であると思われる。

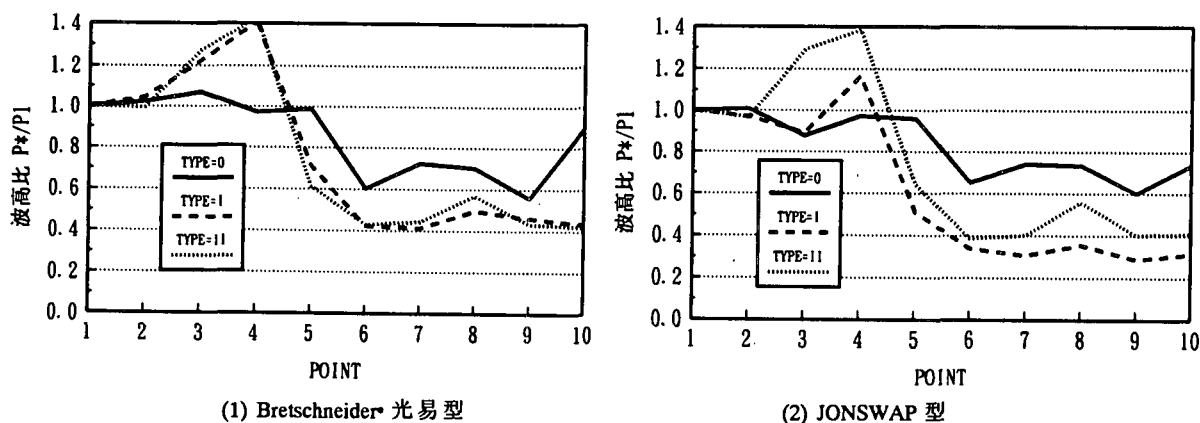


図-6 各波高計測点での波高比（長周期波高/P1の長周期波高）

図-6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反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、風波の入反射分離計算を行った。ここでは、P1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して用いた。図-7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と思われる。したがって、図-6で示した長周期波高比の結果は汎用性があると考えられる。

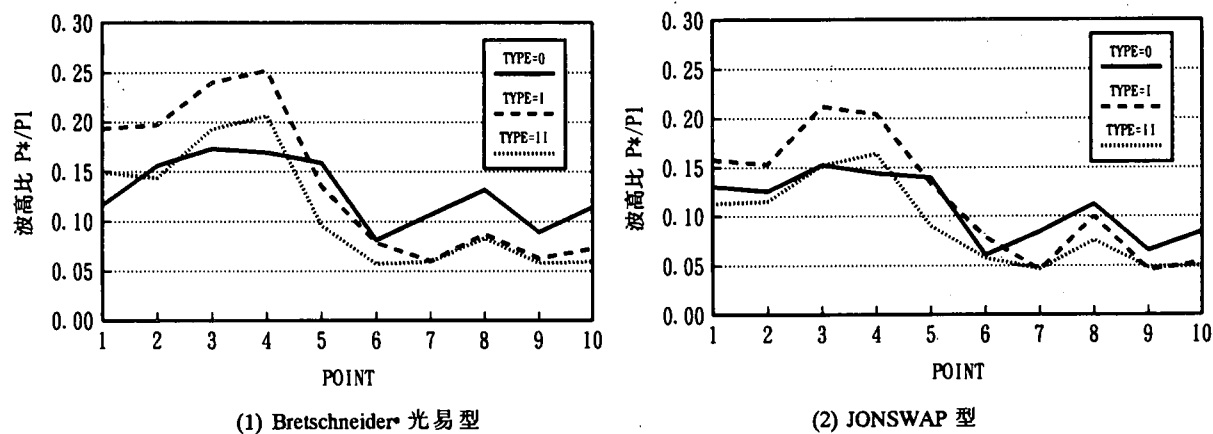


図-7 各波高計測点での波高比（長周期波高／P1の入射波高）

3.3 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、増幅率 A_f は次式で計算している。

$$A_f = \sqrt{S(f)_{\text{港内}} / S(f)_{P1}}$$

図-8は、 $H_{1/3} = 8 \text{ m}$ 、 $T_{1/3} = 8 \text{ s}$ 、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、0.003～0.03 Hz（周期30 s～5 min）の範囲に着目すると、増幅率はおおむ

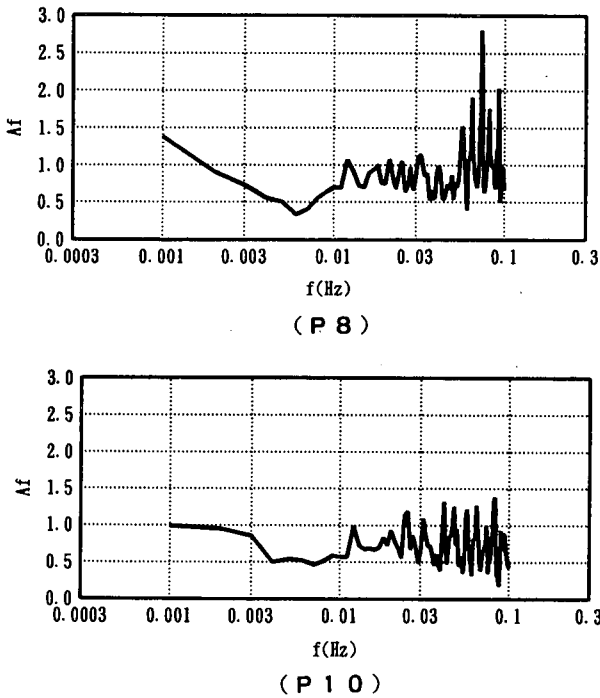


図-8 増幅率（TYPE ; 0）

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-9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. 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

- 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.
- 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.
- 田端竹千穂・田所篤博・平石哲也・玉城重則(1995)：港湾にお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.
- 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.

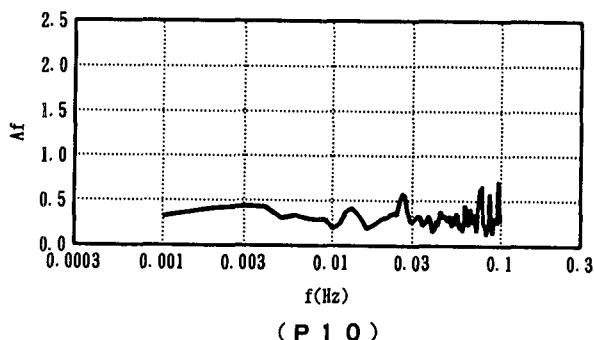
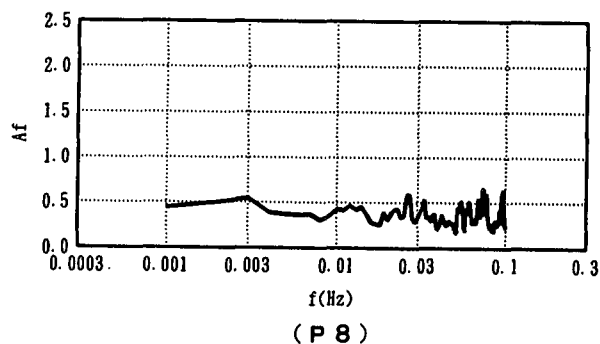


図-9 増幅率 (TYPE; II)