

港湾技研資料

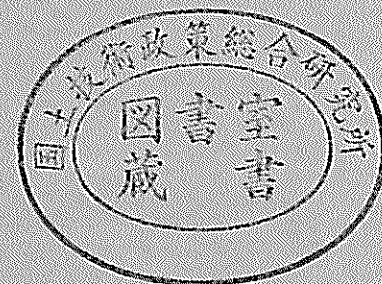
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 874 Sept. 1997

長周期波に対する防波堤の波高低減効果に関する模型実験

藤 咲 秀 可
丸 山 晴 広
平 石 哲 也

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 実験の内容	4
2. 1 実験装置の構成	4
2. 2 実験の方法	5
2. 3 実験に用いた波の特性	6
3. 実験による対策工法の適用性の検討	9
3. 1 港内で計測された波の特性	9
3. 2 対策工法の効果	13
4. あとがき	18
参考文献	18
主要記号表	19

Experiment on Effect of Breakwater for Reduction of Long Period Waves

Hideyoshi FUJISAKU *
Haruhiro MARUYAMA *
Tetsuya HIRAISHI **

Synopsis

Long waves with periods of 1-5 minutes sometimes terminate cargo handling and cause breaking of mooring ropes in Japanese several ports. Large surging and swaying motion induced by resonance between long period waves and mooring system of vessels mainly cause such damages. The amplitude of these long waves are enlarged by local harbor oscillation. Breakwaters are usually constructed against wind waves agitation in harbor, however, they have some effect to prevent long period waves from penetrating into harbors. More effective countermeasures against such long period waves are inevitable for safe cargo handling in harbor. The extension of existent breakwaters are expected to become one of countermeasures to long period waves. The present paper experimentally investigates the effects of breakwaters located at the entrance of a port to reduce the height of long period waves. The main conclusions are as follows:

- (1) The long period wave height is reduced by offshore breakwater.
- (2) Reducing the openings of ports is also effective against penetration of long period waves.

Key words : Long period wave, Set-down wave, Harbor oscillation, Hydraulic model test

* Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division
* * Chief, Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division
Address : 1-1, 3chome nagase yokosuka Post-code:239
Phone : (0468) 44-5010
Fax : (0468) 41-3888
e-mail : hiraishi@cc.phri.go.jp

長周期波に対する防波堤の波高低減効果に関する模型実験

藤咲 秀可*
丸山 晴広*
平石 哲也**

要 旨

近年、港内で係留されている大型船が前後に大きく動揺し、荷役が中断されたり、係留索が切断されるなどの現象が報告されている。動揺する船舶は鉱石運搬船、石炭運搬船、あるいはタンカー等であり、載荷重量トンが約 50,000DWT 前後のものに被害が集中している。その動揺量は最大で数メートル以上にも及ぶ。これらの現象は、各地の港湾での現地観測によって、港内に伝播した周期 1～5 分の長周期波と船舶～ロープからなる係留システムとの共振によって生じていることが確認されている。長周期波は風波に比べて波長が長いため、これまで風波を抑止する目的で建設されてきた防波堤は十分な効果を発揮できていないと考えられる。しかしながら、港外で長周期波が観測されているにもかかわらず、港内で長周期波による被害が生じていない港湾も存在し、これらの港湾においては、ある程度防波堤の抑止効果が期待できることが判明している。

本研究では、模型実験によって、港口部の防波堤による長周期波の低減効果を定量的に検討した。得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1) 防波堤を港口部に配置することにより、対策なしの場合と比較して、港内の長周期波高を最大で約 50% 低減することができる。
- (2) 既存の防波堤開口部を 1/2 に狭めた場合も、港内長周期波高の低減に関して、港口部に防波堤を設置した場合と同様の効果がある。

キーワード：長周期波，セットダウン波，副振動，模型実験

* 水工部 波浪研究室
** 水工部 波浪研究室長
〒 239 横須賀市長瀬 3-1-1
Phone : (0468) 44-5010
Fax : (0468) 41-3888
e-mail : hiraishi@cc.phri.go.jp

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を生じる場合がある（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（平石ら，1996）。これらの被害の生じている港湾においては，長周期の水面変動に対して，風波を押し止す目的で建設された防波堤では効果が小さく，長周期波を十分抑止できていない。このような港内擾乱の対策としては，係留方法の改良による船舶動揺の防止策が提案されているが，係留索の材質が限られているため，十分な効果を上げることができない。また，長周期波の波長は風波の波長に比べて数十～数百倍長いため，港内の消波構造物で長周期波を吸収することは困難である。以上のことから，港内長周期波に対する有効な対策は現状では見つかっていない。

ただし，港外で長周期波が観測されているにもかかわらず，港内での長周期波による被害が生じていない港湾も存在する。たとえば，那覇港で1995年の2月に行われた長周期波の観測結果によれば，港内の長周期波高が，港外の約30%にまで低下している（平石ら，1996）。このような港湾では，防波堤が長周期波に対して有効であると考えられる。すなわち，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低減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。

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，港外で波群による拘束波を主成因として発達した長周期波が，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した。

2. 実験の内容

2.1 実験装置の構成

(1) 実験水槽

実験は縦18m，横40m，深さ1.5mの多方向不規則波造波水槽で行った。当水槽は図-1に示すように，幅50cmの造波板が60台設置されており，最大造波水深は0.7mである。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，実験水槽右側と，実験装置の外側の壁に沿って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。

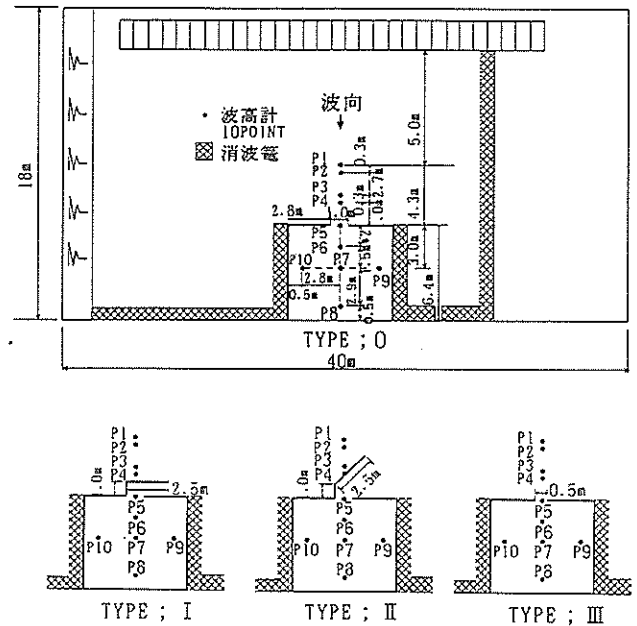


図-1 実験装置平面図

(2) 実験模型および波高計の設置位置

写真-1は，実験装置全体の様子を示す。港湾模型はベニヤ板で製作し，模型の縮尺は1/100を想定している。したがって，港湾地形は模型量で縦6.4m（現地量で640m），横6.6m（同660m）のほぼ正方形で，港口部の幅は1.0m（同100m）である。図-1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1.0m（現地量で100m）延長し，さらに2.5m（同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2.5m（同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。対策工の防波堤は，コンクリー

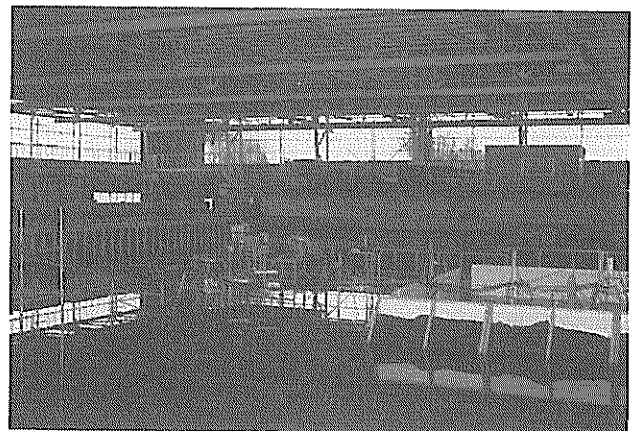


写真-1 実験装置全体写真

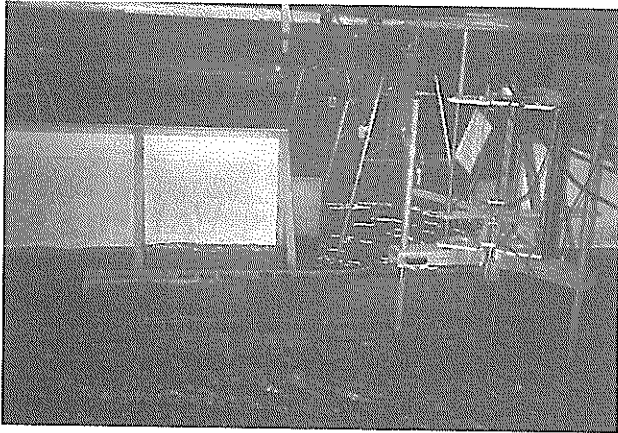


写真-2 港口部 (TYPE ; I)



写真-3 港口部 (TYPE ; II)

トブロックを用いて製作した。写真-2 および写真-3 は、それぞれTYPE; I, TYPE; II の開口部の様子を示す。さらに、対策工の別案として、港口部の幅を5.0m (現地量で50m ; TYPE;0 の1/2) にした港形をTYPE; III とした。造波機から港湾模型までの距離は模型量で9.3m とし、波高計測点は、造波機前面から5.0m の地点のP1 の他に、港外3点 (P2~P4)、港口部1点 (P5)、港内5点 (P6~P10) の計10点設置した。なお、以下の記述については、特に断らない限りすべて現地量を用いる。

2.2 実験の方法

(1) 実験方法

表-1 に実験ケースを示す。水深は20m とし、入射有義波高 $H_{1/3}$ は8.0m とした。有義波周期 $T_{1/3}$ は8.0s および10.0s の2種類を用いた。波向は防波堤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持つ波と、波群性の強い波として、スペクトルの先鋭度を示す peak enhancement factor γ が7である JONSWAP 型の周波数スペクトルをもつ波を用いた。そして、それぞれ乱数を変化させて2回波を作用させた。

表-1 実験条件表

水深	20 m (一定)
有義波高	8 m
有義波周期	8 s, 10 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	999 (単一方向不規則波)

次式に、実験に用いた Bretschneider・光易型スペクトルを示す。

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp(-0.75 T_{1/3}^{-4} f^{-4}) \quad (1)$$

また、JONSWAP 型スペクトルは次式で示される。

$$S(f) = \beta_j H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\{-1.25(T_p f)^{-4}\} \times \gamma^{\exp\{-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2\}} \quad (2)$$

$$\beta_j = \frac{0.0624(1.094 - 0.01915 \ln \gamma)}{0.230 + 0.0336 \gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \quad (3)$$

$$T_p = \frac{T_{1/3}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2) - 0.559} \quad (4)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & (f \leq f_p) \\ 0.09 & (f_p < f) \end{cases} \quad (5)$$

ここに、

f ; 周波数

$S(f)$; 周波数スペクトル

T_p ; 卓越周期

f_p ; 卓越周波数

γ ; peak enhancement factor (=1~7, 実験では7とした)

σ ; バンド幅

である。

Longuet-Higgins and Stewart(1962)の理論に従うと、単一方向不規則波中では、拘束波(セットダウン波)として以下の長周期波が形成される。

$$\eta_l = -\frac{S_x}{\rho(gh - C_g^2)} \quad (6)$$

$$S_x = \frac{1}{2} \rho g a^2 \left(\frac{2C_g}{C} - \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

ここに、

η_l ; 長周期波の水位

S_x ; ラディエーション応力

h ; 水深

a ; 短周期波の片振幅

C ; 波速

C_g ; 群速度

ρ ; 水の密度

である。

(2) 計測および解析方法

計測は容量式波高計からの信号をアナログ・デジタル変換器によってデジタル信号に変換し、パーソナルコンピュータに収録した。

本実験のデータのサンプリング周波数は模型量で20Hzとし、データ数は1ケース1チャンネルごとに16,384個とした。したがって、1ケースごとに819s間のデータを記録した。これは、現地量に換算すると約2時間の連続波形記録に相当する。

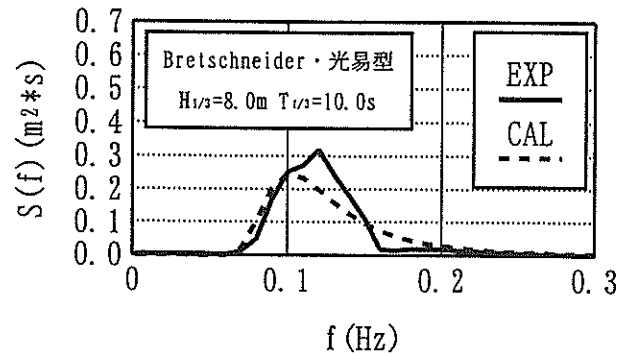
取得したデータはゼロアップクロス法による統計処理を行い、波高・周期の最大値、有義値、平均値と周波数スペクトル密度を算出した。長周期波の解析にあたって

は、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手法を用いることによって、周期20s以上の波として定義した。長周期波についても、統計処理により有義波高 $H_{0.1/3}$ 、有義波周期 $T_{0.1/3}$ を整理した。

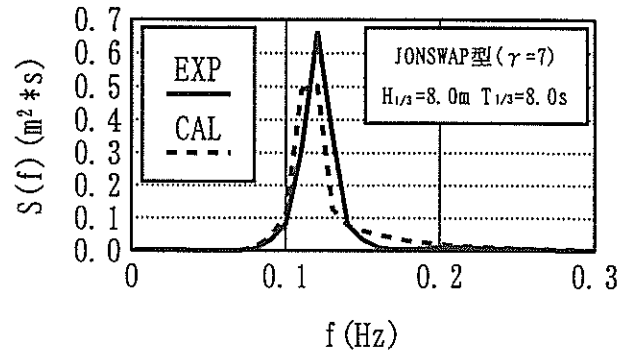
2.3 実験に用いた波の特性

(1) 周波数スペクトル

図-2は、港外のP1で得られた実験波の周波数スペ



(1) Bretschneider・光易型



(2) JONSWAP 型

図-2 周波数スペクトル図

クトルと理論スペクトルとの比較を示す。Bretschneider・光易型、JONSWAP型両ケースとも実験値の方がスペクトルのピークがやや高く現れているが、全体としておおむね目標の周波数スペクトルを持つ波が造波されていることがわかる。

(2) 長周期波とセットダウン波

図-3は、実験水槽内で不規則波を造波したときに生じる通常の風波と理論的に導かれるセットダウン波を示す。図に示すとおり、風波の波高が大きい部分においては、水面を下方に押す力が働いたため、水位が負の値となる。風波の波高が小さい部分では、水位の低下が生じな

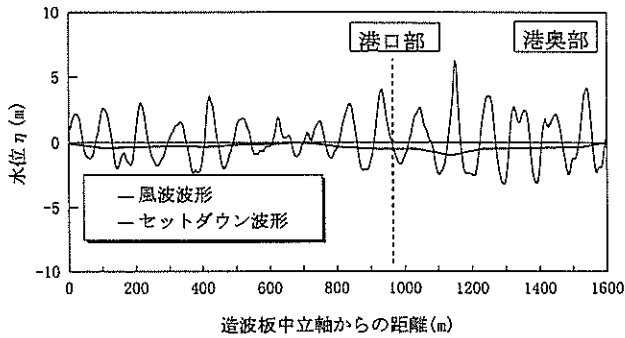


図-3 実験水槽内における風波とセットダウン波

い、これがセットダウン波の生成過程である。

しかしながら、線型理論による風波の造波方法では、造波板面での水粒子運動が微小振幅波理論に従っていないため、図-4に示すとおり、波群に拘束されない自由進行長波が発生する。(Ottesen Hansen et al., 1980)。以上のことから、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、自由進行長波を消去するような項を付加する必要がある(池野・田中, 1995)。ただし、これまでのセットダウン波に関する実験はすべて2次元の水路実験であり、平面実験でのセットダウン波の挙動については未だ解明されていない。また、現在の状況では、実験水槽内での長周期波の反射波制御法が確立されていないこと、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などを考慮して、造波信号の修正は行わず、通常の方法を用いて実験を行った。

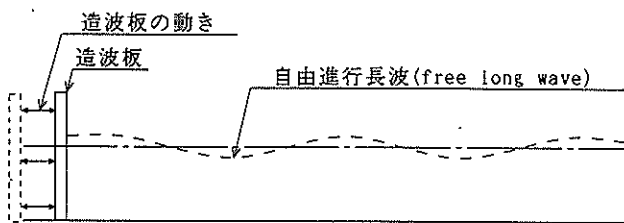
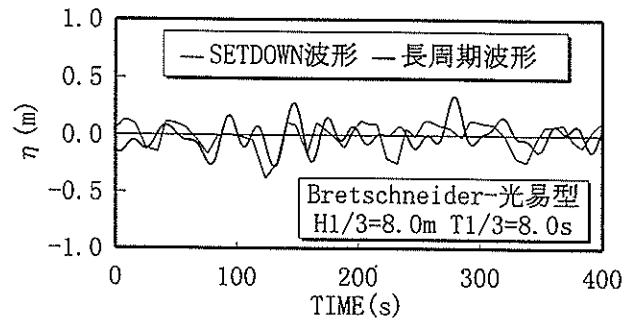
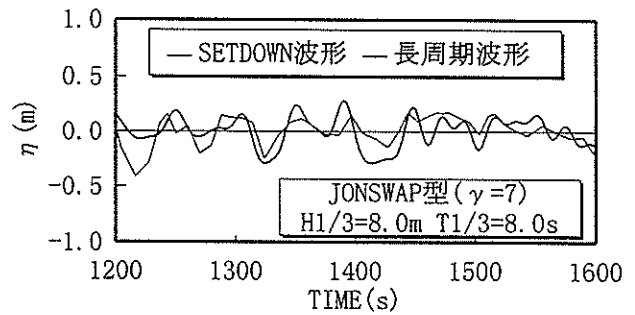


図-4 実験水槽内における自由進行長波

図-5(1)は、 $H_{1/3}=8.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8.0\text{s}$ 、Bretschneider-光易型の入射波をTYPE;0に与えた場合において、港外のP1で測定された波形記録から、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比較したものである。



(1) Bretschneider・光易型



(2) JONSWAP型

図-5 長周期波とセットダウン波の波形

図-5(2)は、 $H_{1/3}=8.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8.0\text{s}$ 、JONSWAP型($\gamma=7$)の場合の波形の比較を示す。いずれの場合も、長周期波形には前述した自由進行長波が含まれているため、長周期波形とセットダウン波形は完全には一致しないが、振幅とピークの出現する位置を比較すると、両者にはある程度の相関が見られる。

実験水槽内で生起された長周期波に対し、セットダウン波がどの程度寄与しているかを定量的に把握するため、コヒーレンスとフェイズを用いて評価した。これらは、両者のクロススペクトルから計算され、コヒーレンスは1.0に近づくにつれて両者の相関が高いことを示し、フェイズは0に近いほど位相のずれが小さいことを示す。コヒーレンスおよびフェイズは、次式で計算される。

$$\text{Coh}^2_u(f) = \frac{\text{Co}^2_u(f) + Q_0^2_u(f)}{S_u(f) \cdot S_u(f)} \quad (8)$$

$$\theta_u(f) = \tan^{-1} \left[\frac{Q_{0u}(f)}{\text{Co}_u(f)} \right] \quad (9)$$

ここに、

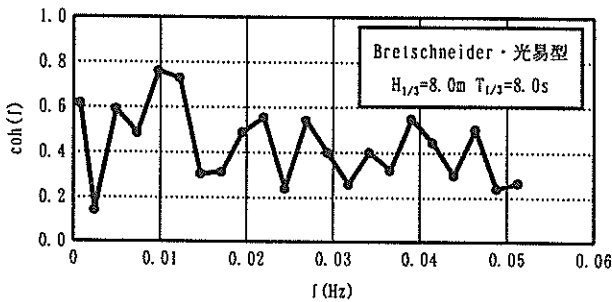
f ; 周波数

- $Coh_{ld}(f)$; 長周期波とセットダウン波のコヒーレンス
- $S_l(f)$; 長周期波の周波数スペクトル
- $S_d(f)$; セットダウン波の周波数スペクトル
- $Co_{ld}(f)$; 長周期波とセットダウン波のコ・スペクトル
- $Qo_{ld}(f)$; 長周期波とセットダウン波のクオドラチャ・スペクトル
- $\theta_{ld}(f)$; 長周期波とセットダウン波のフェイズ

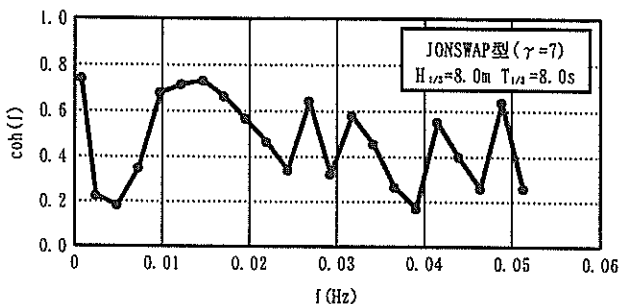
である。

図-6 (1) ~ (2) は、図-5 (1) ~ (2) に対応する長周期波とセットダウン波のコヒーレンスを示し、図-7 (1) ~ (2) は、長周期波とセットダウン波のフェイズを示す。

図-8 は、波群を形成する風波の周期に対するセットダウン波の周期の変化を示したものである。ここでは、Bretschneider・光易型と JONSWAP 型 ($\gamma = 7$) の 2 種類のスペクトルに対し、数値計算によって、 $T_{1/3}$ を 5 ~ 13s までそれぞれ 9 ケース変化させて作成した風波の波形と、風波波形から式 (6) および (7) によって算出されるセットダウン波形について、統計解析によってそれぞれの周期を求めた。図に示すとおり、セットダウ

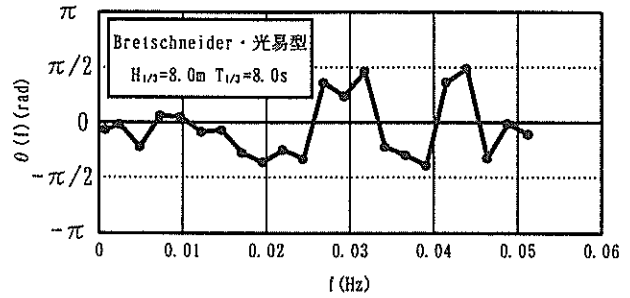


(1) Bretschneider・光易型

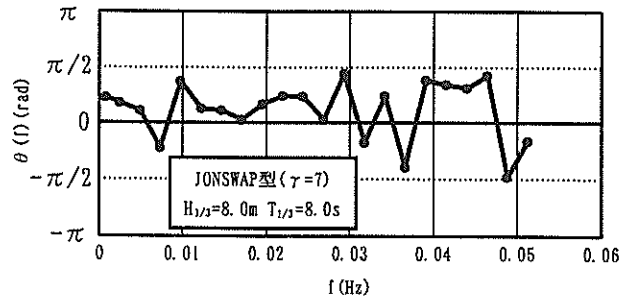


(2) JONSWAP 型

図-6 長周期波とセットダウン波のコヒーレンス



(1) Bretschneider・光易型



(2) JONSWAP 型

図-7 長周期波とセットダウン波のフェイズ

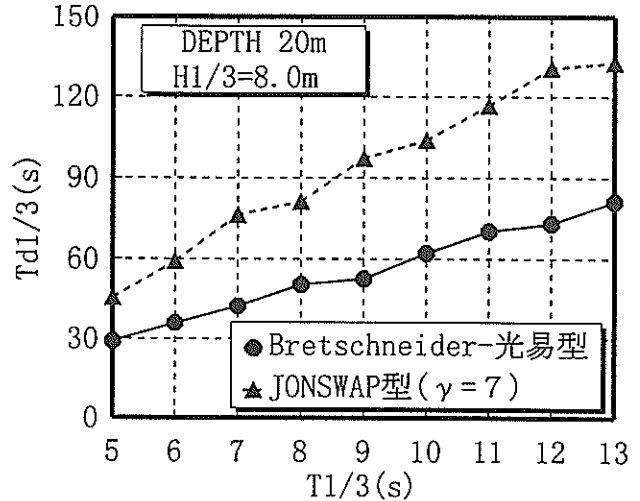


図-8 風波の周期に対するセットダウン波の周期の変化

ン波の有義波周期 $T_{d1/3}$ は、波群性の弱い Bretschneider・光易型では、風波の $T_{1/3}$ の約 6 倍であるのに対し、波群性の強い JONSWAP 型の場合は、約 10 倍となる。したがって、今回の実験で用いた入射波の $T_{1/3}$ が 8.0s と 10.0s の場合は、セットダウン波の $T_{d1/3}$ は、Bretschneider・光易型の場合、それぞれ 48s と 60s 程度となり、JONSWAP 型の場合、80s と 100s 程度とな

る。

図-6(1)の波群性の弱い Bretschneider・光易型のケースにおいては、セットダウン波の卓越する周波数0.02Hz(周期50s)付近でのコヒーレンスは0.5程度である。一方、図-6(2)の波群性の強い JONSWAP型の場合では、周波数0.0125Hz(周期80s)のコヒーレンスの値が0.75となり、Bretschneider・光易型の場合に比べて高くなる。また、周波数0.01~0.15Hz(周期67~100s)の範囲のコヒーレンスの値が0.7前後であり、コヒーレンスの高い範囲が大きくなっている。

図-7(1)の Bretschneider・光易型、(2)の JONSWAP型のフェイズを、それぞれのセットダウン波の卓越する周波数0.02Hz(周期50s)、0.0125Hz(周期80s)付近で比較すると、Bretschneider・光易型では、フェイズが約 $\pi/2$ ずれているのに対し、JONSWAP型のフェイズは0に近く、位相のずれは小さい。

以上のことから、波群性の強い風波は、セットダウン波を顕著に生じさせることが確認された。

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

(1) 港内長周期波の変化

図-9~12は、TYPE;0, I, IIおよびIIIの各港形において、各波高計測点の長周期波高・周期とセットダウン波高・周期を比較したものである。また、表-2(1)~(4)は、各計測点で得られた長周期波高と、風波の波群から計算されるセットダウン波高の割合を示す。

各点で計測された長周期波に占めるセットダウン波高の割合は、対策工のないTYPE;0の場合、表-2(1)に示すとおり、港外の4点(P1~P4)で70%以上である。港外において、長周期波高とセットダウン波高の値が一致しないのは、水槽内で長周期波を消波できないため、多重反射が生じ、長周期波高が大きくなっているものと考えられる。一方、港内(P6~P10)においてはセットダウン波の割合が40%程度に落ちる。これは、波群に拘束された長周期波が港口部に到達する際に、港口部からの回折の影響を受けて波群の振幅が小さくなることにともない、拘束波の振幅も減少するためと思われる。さらに、港口部で水位の不連続点が生じるため、長周期波のエネルギーが不連続になり、そのエネルギーを補うための新たな自由進行長波が発生しているも

のと思われる(木村ら,1996)。ただし、そのメカニズムについては未解明な点が多い。

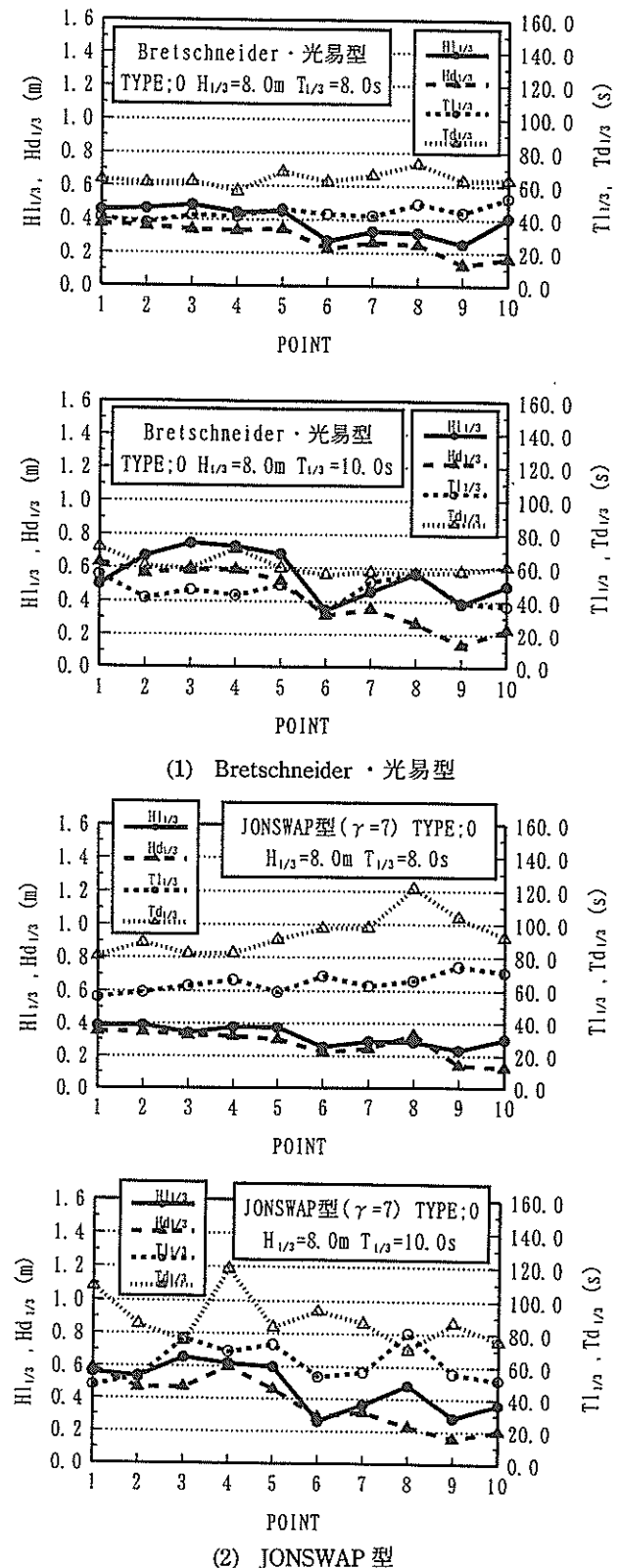
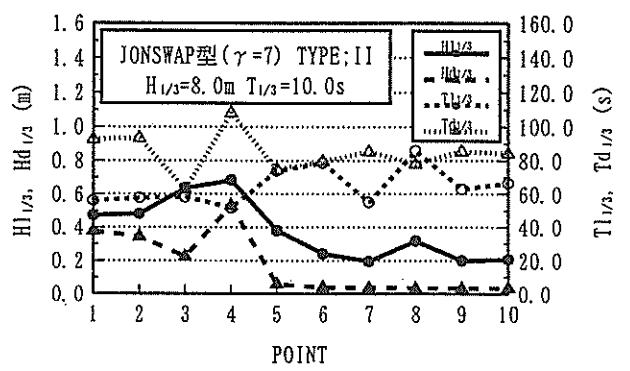
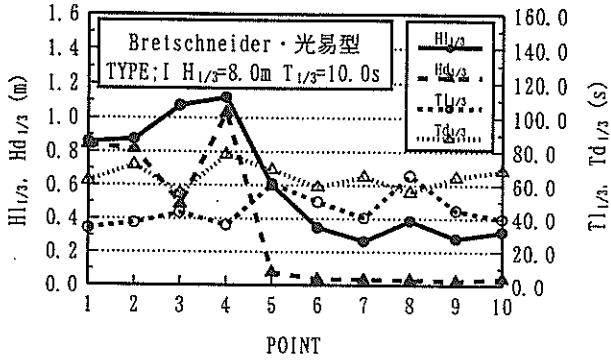
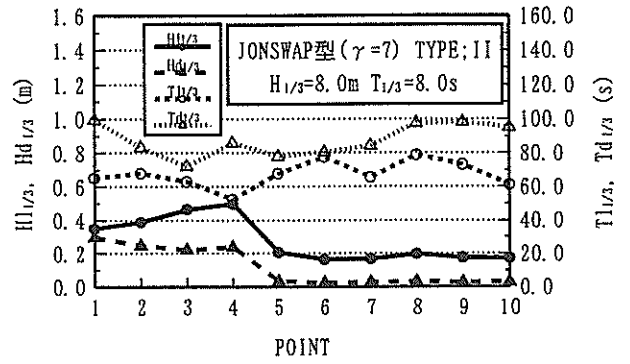
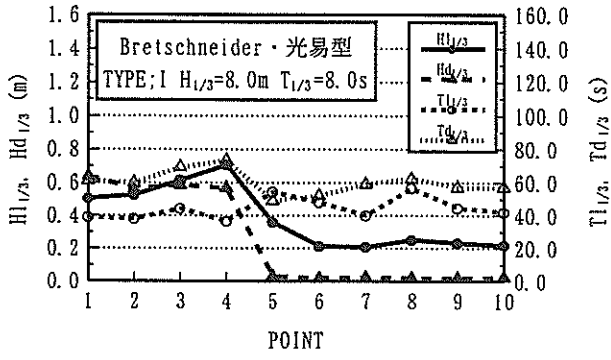
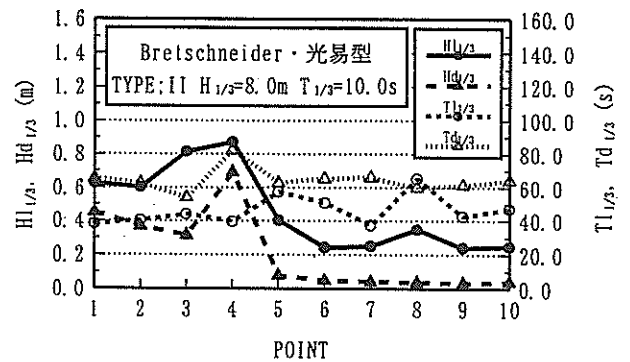
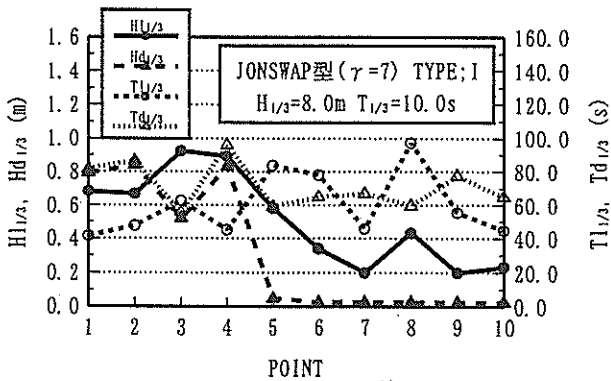
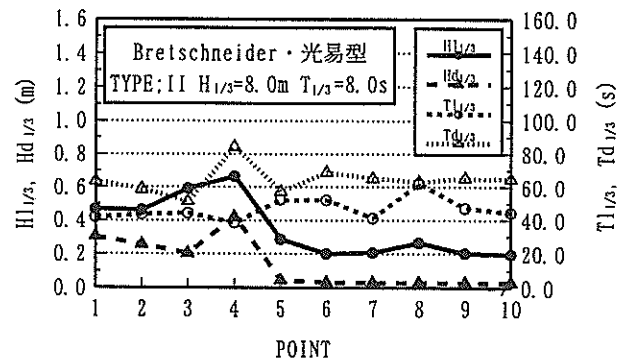
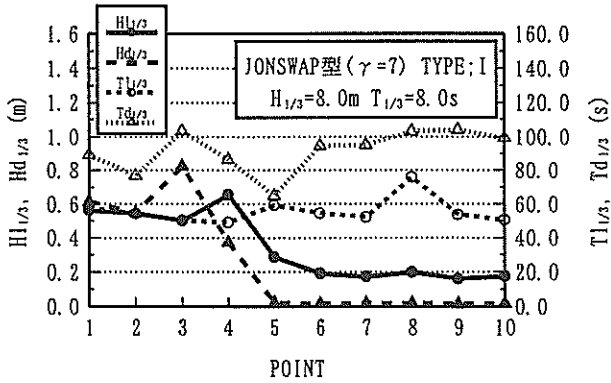


図-9 各計測点での長周期波とセットダウン波の比較 (TYPE;0)



(1) Bretschneider・光易型

(1) Bretschneider・光易型

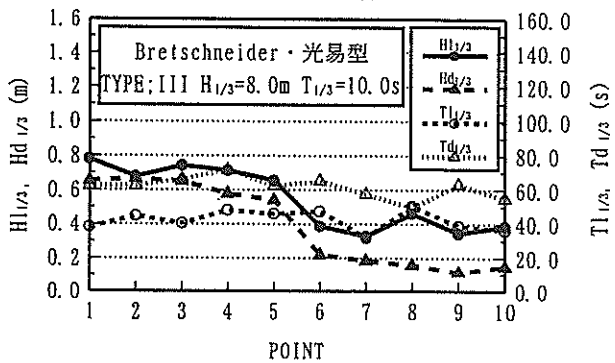
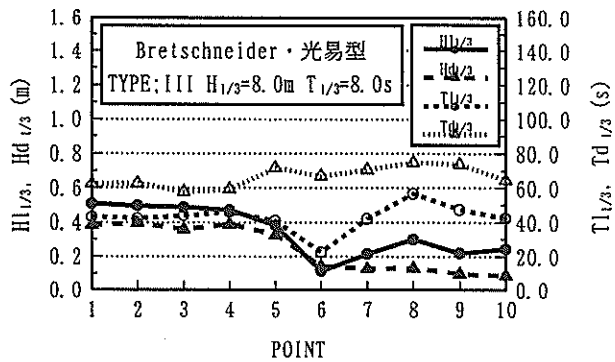


(2) JONSWAP 型

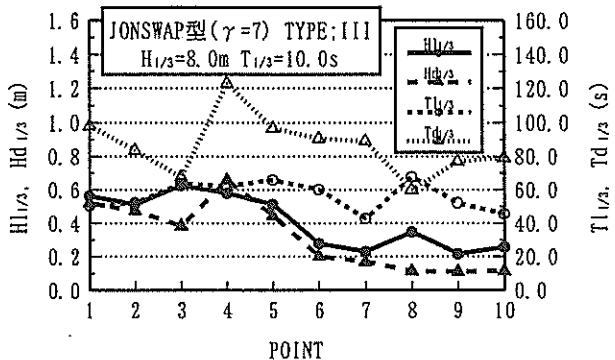
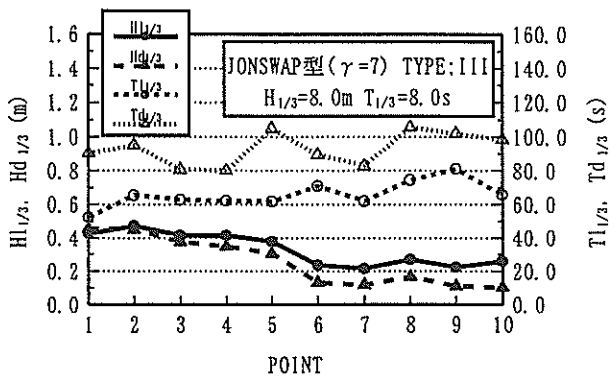
(2) JONSWAP 型

図-10 各計測点での長周期波とセットダウン波の比較 (TYPE ; I)

図-11 各計測点での長周期波とセットダウン波の比較 (TYPE ; II)



(1) Bretschneider・光易型



(2) JONSWAP型

図-12 各計測点での長周期波とセットダウン波の比較 (TYPE ; III)

表-2 長周期波高に占めるセットダウン波高の割合

(1) TYPE ; 0

	TYPE: 0			
	Bretschneider・光易型		JONSWAP型	
	H1/3=8.0m			
	T1/3=8.0s	T1/3=10.0s	T1/3=8.0s	T1/3=10.0s
P1	82%	126%	91%	105%
P2	78%	85%	89%	87%
P3	70%	79%	96%	72%
P4	76%	81%	85%	97%
P5	76%	77%	81%	77%
P6	83%	91%	88%	110%
P7	80%	77%	85%	87%
P8	78%	47%	115%	47%
P9	50%	35%	61%	56%
P10	40%	47%	42%	56%

(2) TYPE ; I

	TYPE: I			
	Bretschneider・光易型		JONSWAP型	
	H1/3=8.0m			
	T1/3=8.0s	T1/3=10.0s	T1/3=8.0s	T1/3=10.0s
P1	126%	98%	110%	116%
P2	107%	93%	101%	125%
P3	95%	46%	165%	56%
P4	80%	92%	57%	93%
P5	9%	13%	7%	8%
P6	9%	11%	8%	7%
P7	11%	13%	10%	12%
P8	8%	8%	9%	5%
P9	8%	9%	8%	11%
P10	11%	12%	9%	10%

(3) TYPE ; II

	TYPE: II			
	Bretschneider・光易型		JONSWAP型	
	H1/3=8.0m			
	T1/3=8.0s	T1/3=10.0s	T1/3=8.0s	T1/3=10.0s
P1	47%	72%	85%	80%
P2	42%	61%	63%	72%
P3	26%	38%	48%	35%
P4	49%	79%	48%	78%
P5	12%	19%	16%	15%
P6	12%	20%	14%	16%
P7	11%	17%	16%	19%
P8	8%	11%	16%	10%
P9	11%	13%	15%	16%
P10	12%	16%	16%	16%

(4) TYPE ; III

	TYPE: III			
	Bretschneider・光易型		JONSWAP型	
	H1/3=8.0m			
	T1/3=8.0s	T1/3=10.0s	T1/3=8.0s	T1/3=10.0s
P1	76%	84%	107%	93%
P2	80%	98%	95%	93%
P3	74%	87%	91%	61%
P4	83%	81%	84%	114%
P5	86%	83%	81%	87%
P6	126%	57%	56%	73%
P7	59%	56%	55%	73%
P8	43%	34%	62%	32%
P9	44%	33%	50%	51%
P10	35%	38%	39%	45%

TYPE; I, TYPE; II の場合は、表-2 (2) ~ (3) に示すとおり、港内各点での長周期波高に占めるセットダウン波高の割合は5~20%である。これは、港内のセットダウン波高が、港口部の防波堤によって大きく減衰していることを示している。したがって、風波が十分に抑止されている港内で計測される長周期波は、ほとんどが自由進行長波であると考えられる。また、TYPE; I の港外の波高計測点で顕著に見られる100%以上の値については、対策工の防波堤からの反射によって風波の波群が大きくなり、結果として計算されるセットダウン波高が長周期波高よりも大きくなっているものと思われる。

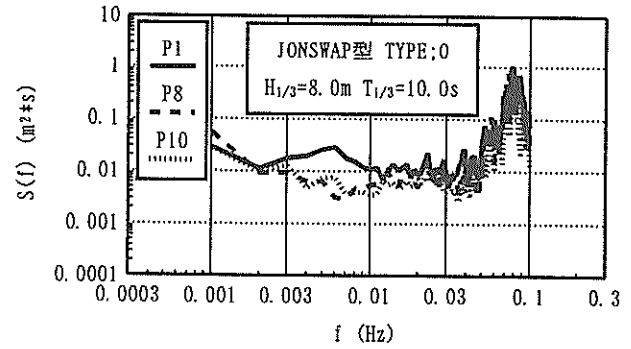
開口部の幅をTYPE;0の1/2にしたTYPE; III の場合は、表-2 (4) に示すとおり、港内計測点のセットダウン波の割合は30~50%であり、TYPE;0の場合と同様に、港内においてもセットダウン波が存在している。

長周期波の有義波周期 $T_{1/3}$ とセットダウン波の有義波周期 $T_{d1/3}$ を比較すると、ほとんどのケースで長周期波の周期の方が小さくなっている。これは、水槽内での長周期波の多重反射による位相干渉が原因と考えられる。

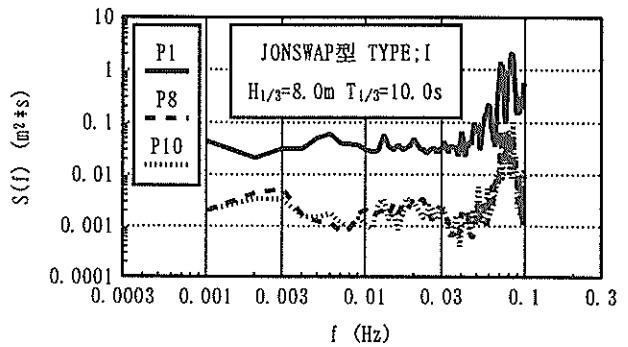
なお、加藤ら (1991) が波崎海洋研究施設の水深-24m地点において測得した長周期波高と、Longuet-Higgins and Stewart の理論から計算されたセットダウン波高を比較した結果によれば、観測値が計算値よりも約10~50%大きく、現地では、セットダウン波以外の要因による長周期波も存在している。今回の実験で作用させた長周期波高に占めるセットダウン波高の割合は、現地観測データと同様の結果となっており、今回の実験は、現地の状況を定性的に近似していると考えられる。

(2) 周波数スペクトル

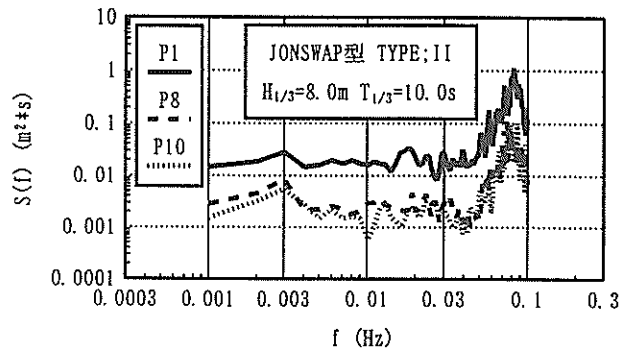
図-13 (1) ~ (4) は、 $H_{1/3}=8.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10.0\text{s}$ で、JONSWAP型スペクトルを有する波をTYPE;0, TYPE; I, TYPE; II およびTYPE; III の港形に作用させたときに、港外のP1, 港内のP8およびP10で計測された波の周波数スペクトルを示したものである。TYPE;0では、周波数が0.003~0.01Hz (周期100s~5min) の範囲で、エネルギースペクトル密度の値が約50%減少していることを除けば、P1, P8, P10の各点のスペクトル値に変化が見られず、港外の波がほとんどそのまま港内へ伝播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スペクトル密度の値が10



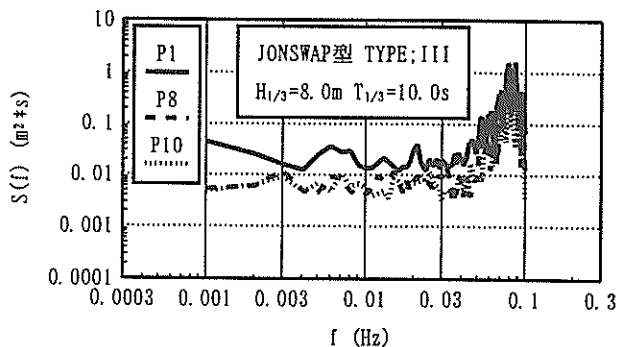
(1) TYPE ; 0



(2) TYPE ; I



(3) TYPE ; II



(4) TYPE ; III

図-13 港外および港内の周波数スペクトル図

%以下となり、対策工の防波堤によって、長周期波の港内への進入が抑止されていることが確認された。また、港口部の幅を50mにしたTYPE;Ⅲの港形では、エネルギースペクトル密度は約50%に減衰した。したがって、既存の防波堤の開口部を狭くすることも、長周期波の港内への進入に対する効果を期待できる。

3.2 対策工法の効果

(1) 長周期波高比

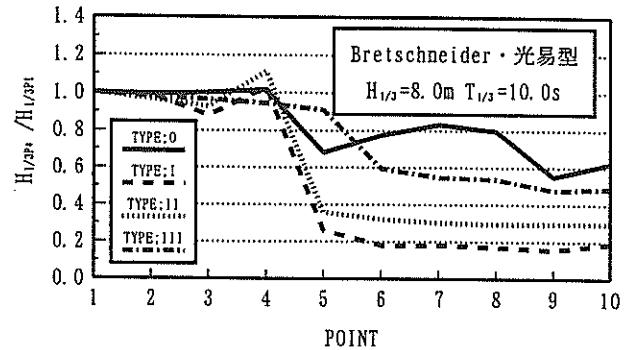
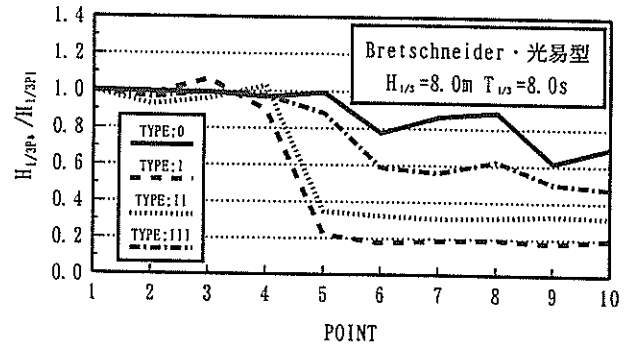
長周期波に対する防波堤の効果を定量的に評価するため、各計測点での長周期波成分の有義波高を算出し、港外のP1に対する港内の波高比を求めた。図-14(1)~(2)は、 $H_{1/3}=8.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8.0\text{s}$ および 10.0s の場合の短周期と長周期の全成分を含む波について、各計測点の波高比を示したものである。ただし、この場合は長周期波成分の振幅に比べて短周期波成分の振幅がきわめて大きいため、結果的には短周期波成分（風波成分）の波高比を示していることになる。

図に示すとおり、対策工のないTYPE;0では、港外P1に対する港内計測点の波高比が0.6~0.8程度にとどまっているのに対し、TYPE;Iでは0.2、TYPE;IIでは0.3にまで低下している。また、TYPE;Ⅲの場合は、0.4~0.6の範囲内であった。

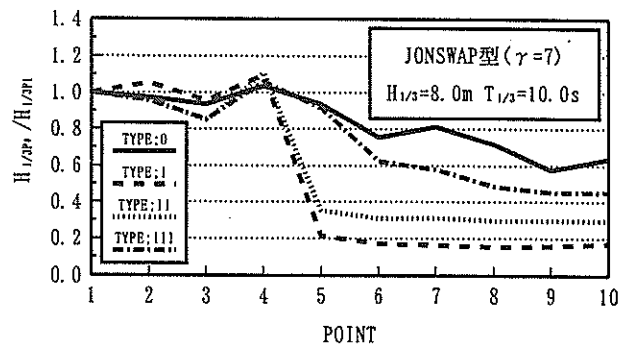
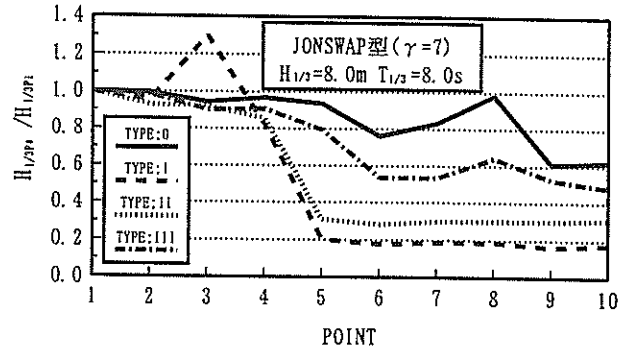
表-3(1)~(2)は、港口部P5および港内計測点P6~P10について、TYPE;I~ⅢのTYPE;0に対する風波の波高比減少率を示したものである。港内計測点の波高比減少率は、TYPE;Iで68~81%、TYPE;IIでは46~69%、TYPE;Ⅲでは14~36%であった。このことから、港口部を覆うように設置した防波堤の効果は顕著であり、風波成分のエネルギーは、防波堤でよく制御できていることが確認できた。一方、港口部の幅を狭めたTYPE;Ⅲでは、波高比の減少率はTYPE;IIの約半分であり、風波に対する効果はあまり大きくない。

図-15(1)~(2)は、 $H_{1/3}=8.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8.0\text{s}$ および 10.0s の場合の、長周期波成分について、P1を基準にしたときの各計測点の波高比を示したものである。

港外P1に対する港内計測点(P6~P10)の波高比は、対策工のないTYPE;0で0.1~0.5、TYPE;I、IIの場合が0.2~0.6、TYPE;Ⅲでは0.1~0.6である。



(1) Bretschneider・光易型



(2) JONSWAP型

図-14 各波高計測点での波高比（全周波数成分）

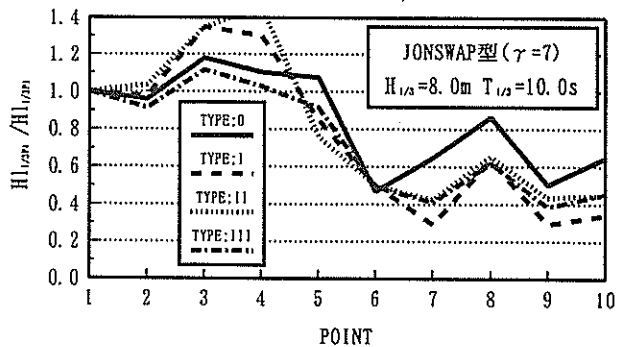
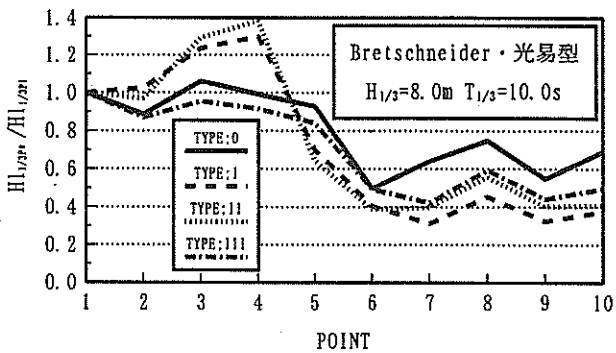
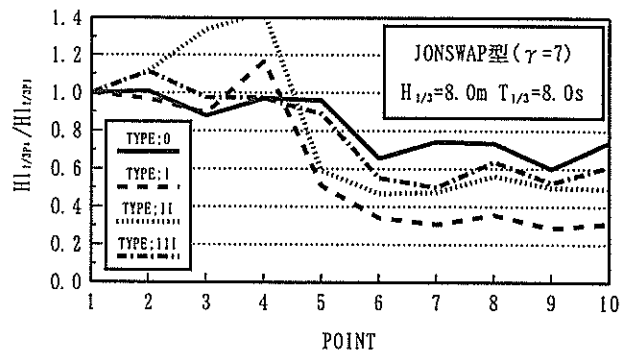
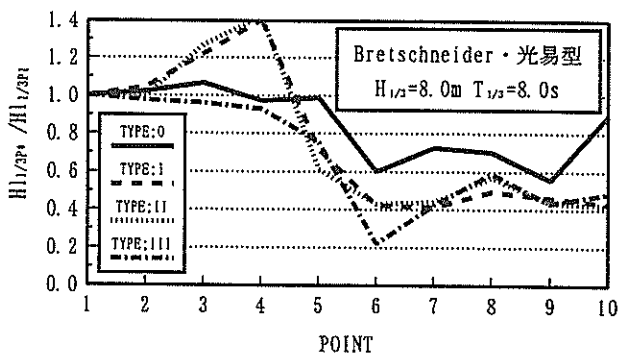
表-3 港内各点の波高比減少率（全周波数成分）

(1) Bretschneider・光易型

	Bretschneider・光易型					
	H _{1/3} =8.0m T _{1/3} =8.0s			H _{1/3} =8.0m T _{1/3} =10.0s		
	TYPE: I /TYPE: O	TYPE: II /TYPE: O	TYPE: III /TYPE: O	TYPE: I /TYPE: O	TYPE: II /TYPE: O	TYPE: III /TYPE: O
P5	78%	65%	11%	68%	48%	-34%
P6	78%	58%	24%	77%	59%	23%
P7	78%	64%	35%	77%	64%	34%
P8	78%	65%	30%	76%	63%	33%
P9	71%	47%	18%	68%	46%	14%
P10	72%	55%	32%	69%	52%	22%

(2) JONSWAP型

	JONSWAP型					
	H _{1/3} =8.0m T _{1/3} =8.0s			H _{1/3} =8.0m T _{1/3} =10.0s		
	TYPE: I /TYPE: O	TYPE: II /TYPE: O	TYPE: III /TYPE: O	TYPE: I /TYPE: O	TYPE: II /TYPE: O	TYPE: III /TYPE: O
P5	79%	67%	15%	72%	62%	2%
P6	77%	63%	30%	76%	59%	17%
P7	78%	64%	36%	78%	62%	29%
P8	81%	69%	35%	76%	59%	32%
P9	73%	50%	14%	73%	48%	21%
P10	72%	51%	23%	71%	53%	29%



(1) Bretschneider・光易型

(2) JONSWAP型

図-15 各波高計測点での波高比（長周期波高 / P1の長周期波高）

表-4 (1) ~ (2) は、TYPE; I ~ IIIのTYPE; 0 に対する長周期成分の波高比減少率を示す。港内計測点の波高比減少率は、TYPE; I で 17 ~ 59%、TYPE; II で 13 ~ 53% である。一方、TYPE; IIIの減少率は 1 ~ 63% であるが、計測点や実験ケースによってばらつきが大きい。

これらの結果から、長周期波成分の波高比減少率は、風波の波高比減少率に比べて小さいものの、対策工を施した港形においては、港内の長周期波高の低減が見られた。

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、防波堤を港口部に配置することによって、港内の長周期波高を低減できるといえる。さらに、開口幅 50m のTYPE; IIIの場合も、TYPE; II とほぼ同等の効果が得られた。なお、図において、TYPE; I, II とも P 3 および P 4 の波高比が P 1 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。

港内における長周期波の波高が約 10 ~ 15cm 以上になると、係留船舶には大きな影響が生じる（菅沼ら、

1995）と考えられていることから、防波堤が対策工として有効に作用し、港内の長周期波高を 10cm 以下に低減できれば、船舶の荷役障害を防ぐことが可能となる。

図-15 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 P 1 の長周期波高が大きくなっていけば、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 P 1 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、不規則長周期波に対する反射率計算手法は現状では確立されていないため、長周期波の入射波成分を知ることができない。そこで、P 1 の長周期波の入射波成分は短周期の入射波成分と強い相関を持つものと考え、港外の P 1 と P 2 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い、長周期波の入射波成分の代わりに短周期波の入射波成分を用いて、長周期波高比を比較した。

図-16 (1) ~ (2) は、 $H_{1/3} = 8.0m$ 、 $T_{1/3} = 8.0s$ および $10.0s$ の場合の、各計測点の長周期波高と P 1 の風波の入射波成分との波高比を示す。また、表-5

表-4 港内各点の波高比減少率（長周期波高 / P 1 の長周期波高）

(1) Bretschneider・光易型

	Bretschneider・光易型					
	$H_{1/3}=8.0m$ $T_{1/3}=8.0s$			$H_{1/3}=8.0m$ $T_{1/3}=10.0s$		
	TYPE: I /TYPE: 0	TYPE: II /TYPE: 0	TYPE: III /TYPE: 0	TYPE: I /TYPE: 0	TYPE: II /TYPE: 0	TYPE: III /TYPE: 0
P5	28%	38%	24%	25%	31%	9%
P6	30%	29%	63%	19%	22%	1%
P7	43%	39%	41%	52%	38%	34%
P8	29%	19%	16%	39%	25%	21%
P9	17%	22%	22%	40%	26%	19%
P10	52%	53%	46%	46%	41%	28%

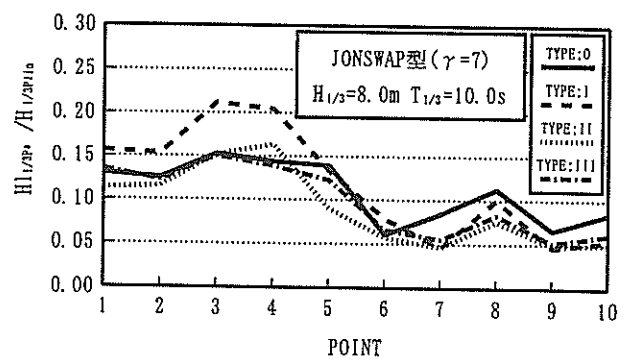
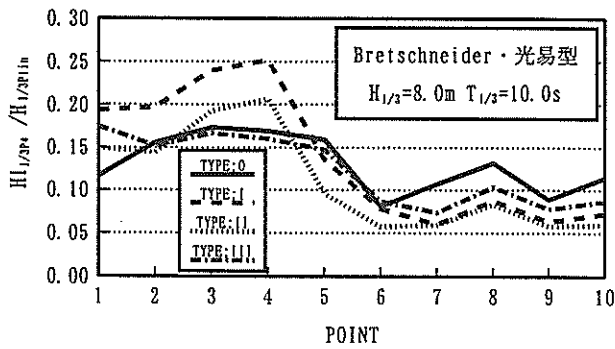
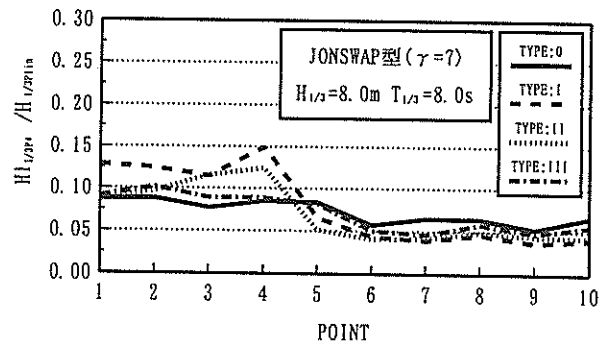
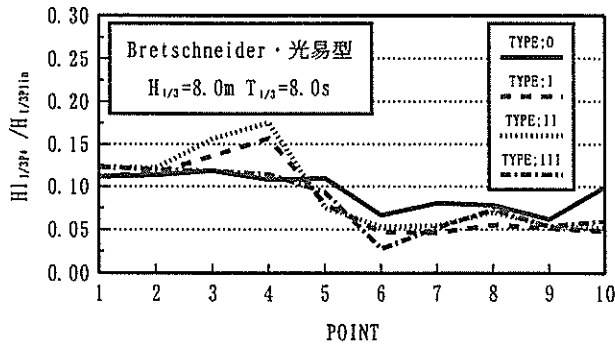
(2) JONSWAP 型

	JONSWAP型					
	$H_{1/3}=8.0m$ $T_{1/3}=8.0s$			$H_{1/3}=8.0m$ $T_{1/3}=10.0s$		
	TYPE: I /TYPE: 0	TYPE: II /TYPE: 0	TYPE: III /TYPE: 0	TYPE: I /TYPE: 0	TYPE: II /TYPE: 0	TYPE: III /TYPE: 0
P5	47%	39%	8%	21%	29%	15%
P6	48%	28%	15%	-7%	-6%	-6%
P7	59%	36%	32%	55%	35%	37%
P8	52%	23%	13%	26%	25%	29%
P9	52%	17%	13%	42%	13%	24%
P10	58%	33%	17%	47%	31%	30%

(1) ~ (2) は、TYPE; I ~ III の TYPE; 0 に対する波高比減少率を示したものである。

波高比減少率は、TYPE; I で 3 ~ 52%，TYPE; II で 6

~ 48%，TYPE; III では 7 ~ 59% である。また、TYPE; I の場合には港外計測点でかなり反射波が目立つものの、TYPE; 0 と TYPE; II では、港外 P 1 および P 2 の波高比は



(1) Bretschneider・光易型

(2) JONSWAP 型

図-16 各波高計測点での波高比 (長周期波高 / P 1 の入射波高)

表-5 港内各点の波高比減少率 (長周期波高 / P 1 の入射波高)

(1) Bretschneider・光易型

	Bretschneider・光易型					
	H1/3=8.0m T1/3=8.0s			H1/3=8.0m T1/3=10.0s		
	TYPE: I /TYPE: O	TYPE: II /TYPE: O	TYPE: III /TYPE: O	TYPE: I /TYPE: O	TYPE: II /TYPE: O	TYPE: III /TYPE: O
P5	28%	31%	15%	15%	40%	8%
P6	29%	21%	59%	3%	29%	-7%
P7	43%	33%	35%	44%	44%	31%
P8	29%	10%	7%	34%	37%	21%
P9	17%	14%	13%	29%	35%	13%
P10	52%	48%	40%	37%	48%	24%

(2) JONSWAP 型

	JONSWAP 型					
	H1/3=8.0m T1/3=8.0s			H1/3=8.0m T1/3=10.0s		
	TYPE: I /TYPE: O	TYPE: II /TYPE: O	TYPE: III /TYPE: O	TYPE: I /TYPE: O	TYPE: II /TYPE: O	TYPE: III /TYPE: O
P5	22%	39%	3%	4%	35%	12%
P6	24%	29%	12%	-29%	6%	-9%
P7	40%	36%	29%	46%	45%	35%
P8	29%	24%	10%	11%	33%	26%
P9	30%	17%	9%	30%	26%	21%
P10	40%	35%	16%	36%	41%	28%

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。また、TYPE; IIIでは、長周期波高の低減についてTYPE; IIと同等の効果が得られた。したがって、航路の配置に影響を与えない状況であれば、開口部を狭めることも有効な対策になり、対策工の建設費も沖側に防波堤を設置する場合に比べて小さくすることができる。

(2) 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、副振動の増幅率は次式で計算している。

$$A(f) = \sqrt{\frac{S(f)_{港内}}{S(f)_{P1}}} \quad (10)$$

ここで、

$A(f)$; 増幅率

f ; 周波数

$S(f)_{港内}$; 港内計測点の周波数スペクトル密度

$S(f)_{P1}$; 港外P1の周波数スペクトル密度

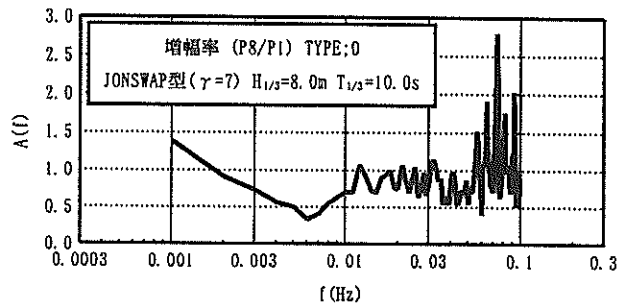
である。

図-17(1)～(2)は、 $H_{1/3}=8.0m$ 、 $T_{1/3}=10.0s$ 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、0.003～0.03Hz(周期30s～5min)の範囲に着目すると、増幅率はおおむね0.5～1.0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。

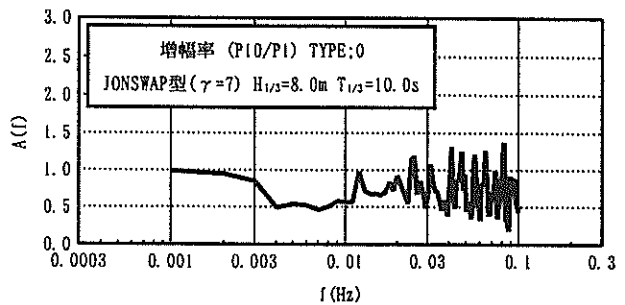
図-18(1)～(2)は、TYPE; Iの増幅率を示し、図-19(1)～(2)は、TYPE; IIでの増幅率を示す。対策工のあるTYPE; IおよびTYPE; IIでは、増幅率が0.5以下となり、副振動は生じていない。また、図-20

(1)～(2)は、TYPE; IIIの場合の増幅率である。増幅率はおおむね0.4～0.8の範囲であり、TYPE; 0とTYPE

; IおよびTYPE; IIの中間の値である。いずれのケースにおいても港内の長周期波は増幅されていない。これは、

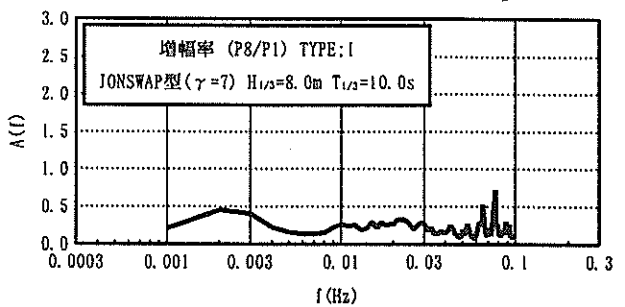


(1) (P8)

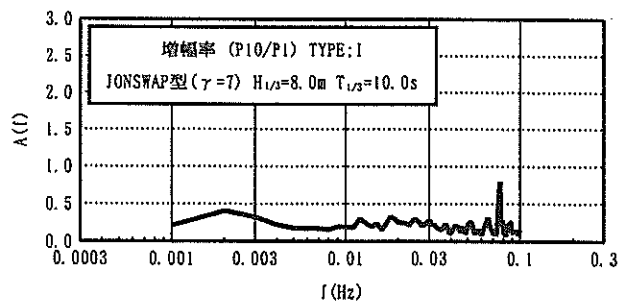


(2) (P10)

図-17 港内計測点での増幅率 (TYPE; 0)

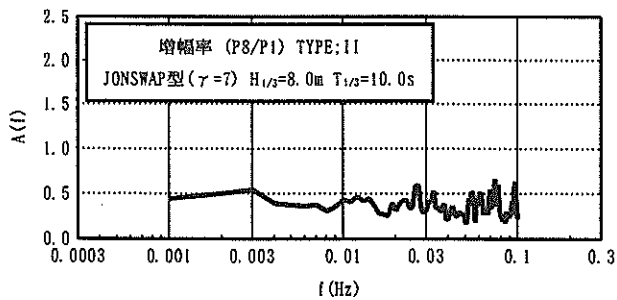


(1) (P8)

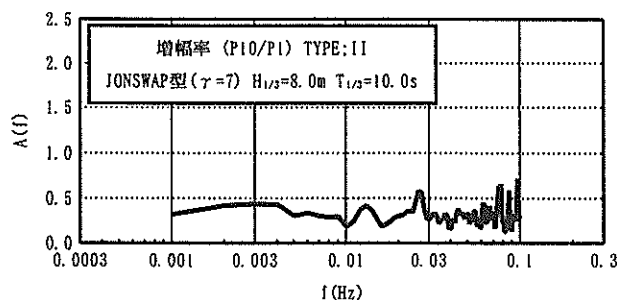


(2) (P10)

図-18 港内計測点での増幅率 (TYPE; I)

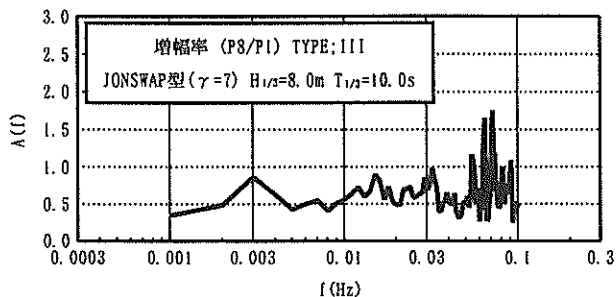


(1) (P8)

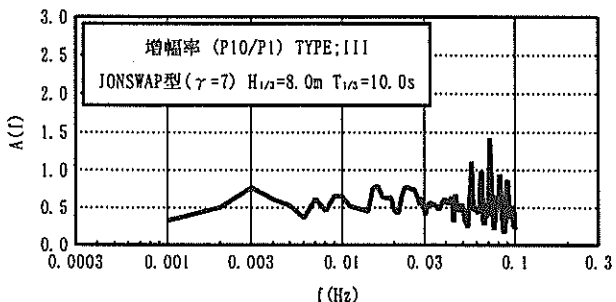


(2) (P10)

図-19 港内計測点での増幅率 (TYPE; II)



(1) (P8)



(2) (P10)

図-20 港内計測点での増幅率 (TYPE; III)

対策工のないTYPE;0の港形でも、もともと副振動が生じていないことに加え、対策を施した港形では、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、平面水槽内において、波群性の強い波から生じるセットダウン波を主要な入射長周期波として再現し、防波堤の長周期波高低減効果を検討した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 港口部に防波堤を設置することによって、港内の長周期波高は最大で約50パーセント減衰した。したがって、防波堤は港内長周期波高の低減に効果を有する。
- (2) 既存の防波堤開口部を1/2に狭めた場合も、港口部に防波堤を設置した場合と同様の効果を期待できる。

これらの対策を、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。

(1997年6月30日受付)

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.
- 加藤一正・中村聡志・池田直太(1991)：波の連なりを考慮した長周期波の波高の推定—波崎海洋研究施設における現地観測にもとづく検討—，港湾技術研究所報告，第30巻第1号，pp.137-163.
- 菅沼史典・神谷昌文・瀧美洋一・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.
- 木村 晃・喜田昌裕・山崎樹実也(1996)：2次長周期波による港湾の振動について，海岸工学論文集，第43巻，pp.211-215.
- 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.
- 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.

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.15-17.

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

$T_{1.3}$; 有義波周期
 $T_{d1.3}$; セットダウン波の有義波周期
 $T_{l1.3}$; 長周期波の有義波周期
 T_p ; 卓越周期
 γ ; peak enhancement factor (=1~7)
 η_l ; 長周期波の水位
 $\theta_{ld}(f)$; 長周期波とセットダウン波のフェイズ
 ρ ; 水の密度

主要記号表

a ; 短周期波の片振幅
 $A(f)$; 増幅率
 C ; 波速
 C_g ; 群速度
 $Co_{ld}(f)$; 長周期波とセットダウン波のコ・スペクトル
 $Coh_{ld}(f)$; 長周期波とセットダウン波のコヒーレンス
 f ; 周波数
 f_p ; 卓越周波数
 g ; 重力加速度
 h ; 水深
 $H_{1.3}$; 有義波高
 $H_{1.3P1}$; P1で計測された有義波高
 $H_{1.3P1in}$; P1における入射波の有義波高
 $H_{1.3P*}$; 各点で計測された有義波高
 $H_{d1.3}$; セットダウン波の有義波高
 $H_{l1.3}$; 長周期波の有義波高
 $H_{l1.3P1}$; P1で計測された長周期波の有義波高
 $H_{l1.3P*}$; 各点で計測された長周期波の有義波高
 $Qo_{ld}(f)$; 長周期波とセットダウン波のクオドラチャ・スペクトル
 $S(f)$; 周波数スペクトル
 $S_l(f)$; 長周期波の周波数スペクトル
 $S_d(f)$; セットダウン波の周波数スペクトル
 $S(f)_{港内}$; 港内計測点の周波数スペクトル
 $S(f)_{P1}$; 港外P1の周波数スペクトル
 S_x ; ラディエーション応力

港湾技研資料 No.874

1997.9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所

印刷所 阿部写真印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright ©(1997) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。