

浮防波堤の現地実証試験について

運輸省第四港湾建設局	正會員	大隈	正登
”	”	江河	直人
”	”	中野	敏彦
”		加藤	英夫

1. はじめに

浮遊式構造物は、国内外で古くから研究開発が進められ、港灣施設としては特にポンツーンが一般的に数多く利用されている。浮防波堤についても、いくつかの研究例があるが、主に小規模な水域の防護を目的としたものであり、施設の規模が小さく、耐久性にも問題がある。今後、沿岸域の開発が大水深、大潮位差、軟弱地盤上等の厳しい立地条件の地域において要請されることを考えると、浮防波堤のような浮遊式構造物の利用の動きが強まるものと予想される。

運輸省第四港湾建設局では、比較的規模の大きい一般の港湾の防波堤として使用することを目的として、単純な形状で耐久性もあり、波の周期や水深の変化にも十分対応できる浮防波堤の開発を進めてきている。これまでに室内模型実験等による検討をふまえ設計を行ない、昭和56～57年度に試験堤体を製作し、57年11月から59年3月までの約1年半の間、熊本港において現地実証試験を行なった。

本文は、この試験で得られた現地計測データをふまえ、浮防波堤の利用上、設計上のポイントとなる、実波浪に対する消波特性、動揺特性及び係留特性について報告するものである。

2. 現地実証試験の概要

(1) 浮防波堤の基本構造¹⁾

今回の実証試験に供した浮防波堤浮体の形状は、製作上の容易さ、平面配置、係留等で有利な矩形とし、消波効果、越波の防止を考慮して、浮体中央に遊水部を持つサイドフロート型とした(図-1)。浮体の材質は、耐久性があり、維持管理が容易なコンクリート製で、“ひび割れ”の心配が少ないPC製構造物である。

浮体寸法は、消波性能、経済性等を考慮して決定した。静穏度確保のための対象波を浮防波堤設置予定位置の波浪特性を考慮して $H_{1/3} = 1.3 \text{ m}$ 、 $T_{1/3} = 4.1 \text{ 秒}$ とし、浮体背後の波高を 0.5 m 以下に抑えることを目安と

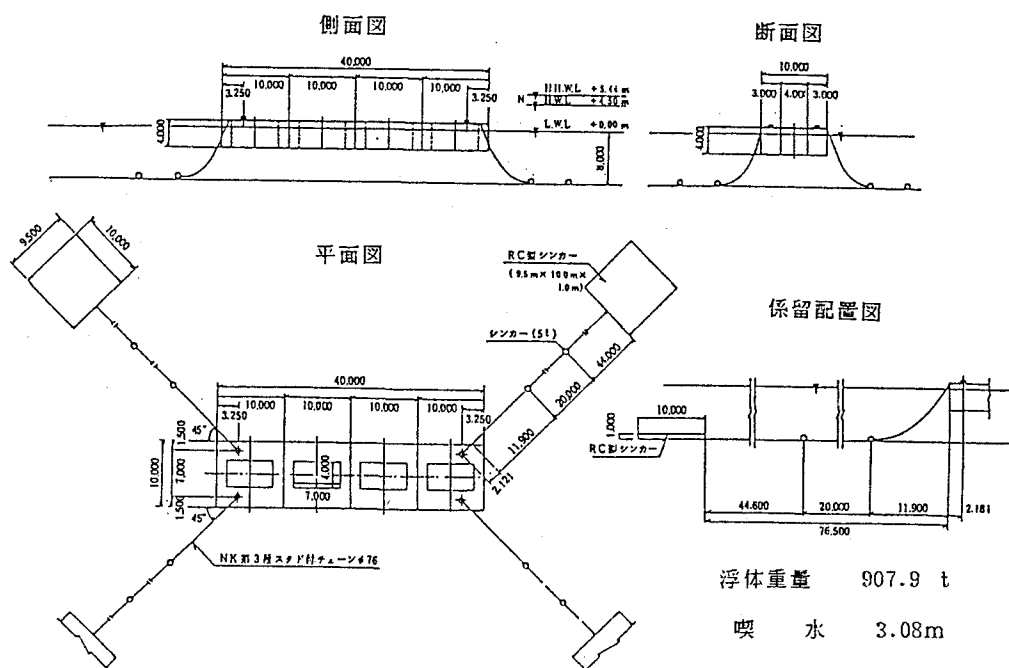


图-1 浮防波堤一般形状图

表-1 設計条件

潮 位	H.H.W.L.=+5.44 m		
	H.W.L. =+4.5 m		
	L.W.L. =±0.0 m		
設置水深	-8.0 m		
波 浪	項 目	10年確率波	1年確率波
	$H_{1/3}$	2.1 m	1.5 m
	H_{max}	3.8 m	2.7 m
	$T_{1/3}$	5.5 s	4.4 s
	波 向	NW	NW
潮 流	流 速 1.3 m/s		
	流 向 NNE, SSW		
風 速	30 m/s		
土 質	海底地盤 -8.0 m~-40.0 m		
	粘 性 土 N 値=0 $\gamma=1.50 \text{ t/m}^3$		
	$C=0.5+0.135z \text{ t/m}^2$ ($z_0=-8.0 \text{ m}$)		

し、水理模型実験結果をふまえて、浮体幅は10mとした。浮体長は、RC製プレキャストブロック（幅10m×長さ10m×高さ4 m）4函を法線方向にPC鋼線で連結（ボストテンション方式）して40mとした（図-1）。

係留ラインには、チェーンを使用し、水深が比較的浅く（L.W.L.時8.0 m）、潮位差が大きい（4.5 m）場所でのチェーンのカテナリー効果をできるだけ発揮させるため、中間シンカーを取り付けるとともに、浮体本体への係留ラインの取り付け位置を浮体上部とした。

（2）現地条件

実証試験位置は、図-2に示すとおり熊本港の沖合約5 kmの地点であり、浮防波堤設置点における設計条件は、表-1のとおりである。浮防波堤法線方向が、主波向のNWに直角となるように設置した。

（3）計測項目

計測項目及び計測方法は、表-2に示すとおりである。なお、58年6月以降59年3月迄は、波向を求めるために星型配置の波高計群を設置した。計測は2時間毎20分間の連続自動計測を行ない、浮体上部に設置した観測小屋内のデータレコーダーに記録した。

3. 消波特性

（1）解析対象波浪

浮防波堤の消波特性を把握するため入射波及び透過波を水圧式波高計により計測した。それぞれの計測位置は図-3のとおりである。解析は波向の影響を考慮する必要があるが、ここでは浮防波堤法線直角方向NWから入射するケースを対象とした。ケースの選択にあたっては、NW系の風向で代用した。これは、波高計群により計測した実測波浪データから方向スペクトルを求めた結果、風向と波向の主方向は約20°以内でほぼ一致していたため風向と波向はほぼ等しいとしたものである。

解析に用いた入射波の波高 $H_{1/3}$ と周期 $T_{1/3}$ を図-4に示す。ここでは、57年11月から58年3月のデータを対象とした。観測された最大の有義波高は1.59 mであり、これは1年確率波にほぼ等しいものである。また、周期は2.8～4.3秒の範囲である。

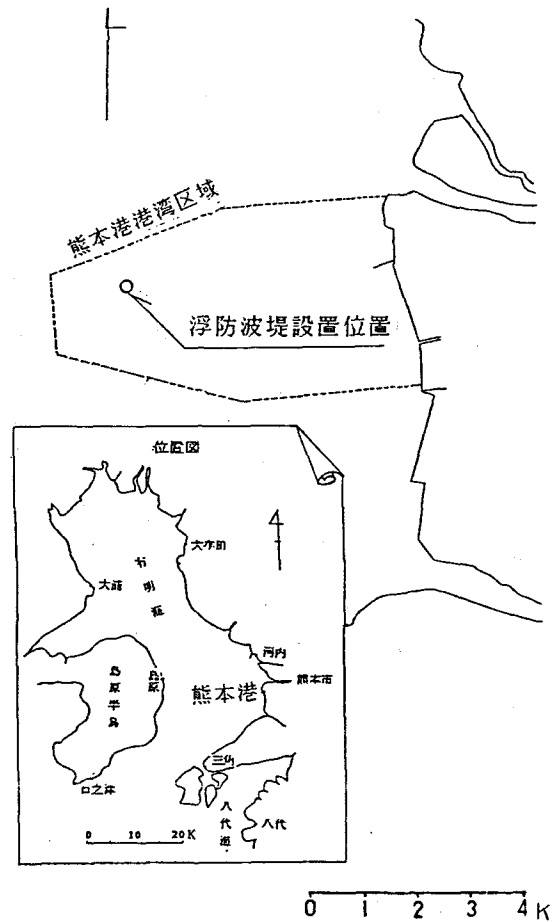


図-2 浮防波堤現地実証実験位置図

表-2 計測項目

計 測 項 目	装 置	測定点数
波 圧	ひずみゲージ式波圧計	3
部 材 応 力	ひずみゲージ式鉄筋計	12
	カーボン式ひずみ計	2
係留チェーン張力	ひずみゲージ式シャーピン張力計	4
波 高	水圧式波高計	2
	超音波式波高計	2
動 圧	チーボ型揺動計	3
	チーボ型加速計	3

(2) 透過率

入射波高と透過波高の比をとり透過率 K_T を求め、浮体幅 B (10m)と周期、水深から求めた波長 L (m)の比 B/L との関係を示したものが図-5である。実測の透過率はばらつきはあるものの、0.3 ~ 0.5 の範囲にあり、当初目標とした値がほぼ得られた。規則波中の浮体の動揺計算により、H.W.L.時とL.W.L.時について求めた計算値と比較すると、 B/L が約0.4 ~ 0.7 (周期約3.1 ~ 4.1 秒)の範囲でほぼ一致しているが、浮防波堤の共振点付近では計算値との差が大きい。また、模型実験結果と比較すると、観測された波浪の周期帯が異なるが B/L が0.4 付近ではよく一致している。この計算値は模型実験結果をよく再現したものであるが、共振点付近での計算で得られるような極端な透過率の減少は実際には起こりにくく、この点について、より精度の高い算定方法を検討する必要がある。

(3) 周波数スペクトル

入射波 $H_{1/3} = 1.46\text{m}$ 、 $T_{1/3} = 4.3$ 秒の場合を例にとり、入射波及び透過波の周波数スペクトルを比較したものが図-6である。入射波に比して透過波のエネルギーは、入射波のピーク周期付近の周期約2~5秒の範囲で著しく減少しており、本浮防波堤はこの範囲での消波効果が極めて高いことがわかる。また、長周期領域で透過波のエネルギーが若干増加しているが、これは後で述べるSWAYING 方向にみられる長周期の動揺によって生じたものと考えられる。

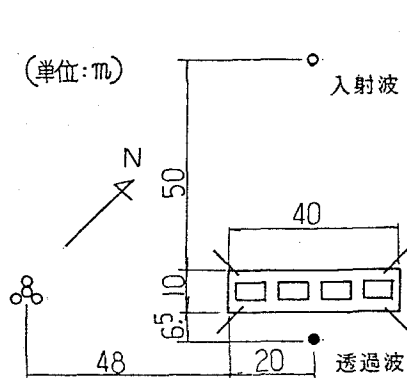


図-3 波高計設置位置

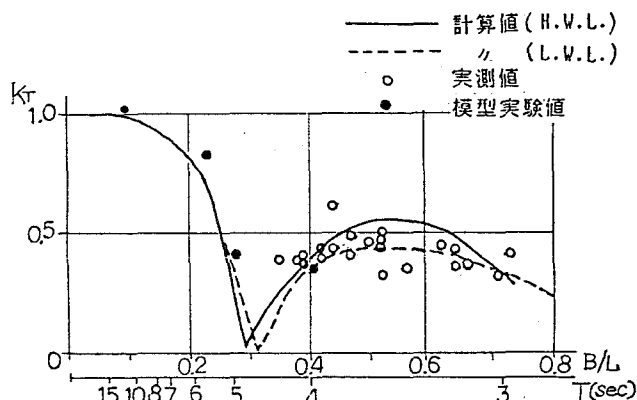


図-5 浮防波堤の透過率

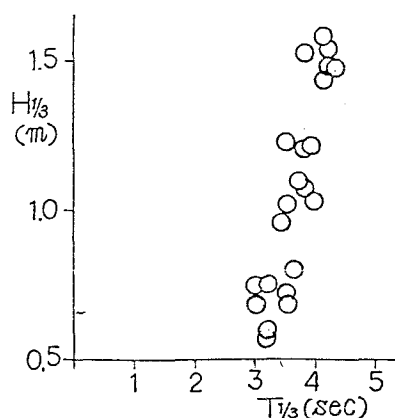


図-4 解析対象入射波

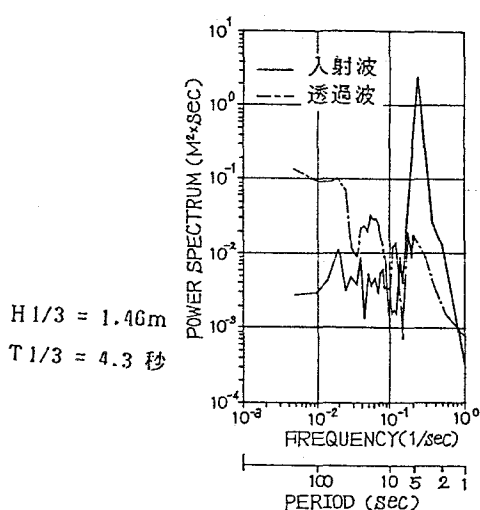


図-6 入射波及び透過波の周波数スペクトル例
(S 57, 12, 5 17:50~18:10 観測)

4. 動揺特性

(1) 動揺量の計測

動揺量は6方向について、浮体の重心軸上に設置した加速度計 (SWAYING, SURGING, HEAVING) 及び傾斜計 (ROLLING, PITCHING, YAWING) を用いて、それぞれ変位及び角度の振幅を計測した。先に示した入射波高 $H/3 = 1.46\text{m}$ 、 $T/3 = 4.3$ 秒の場合、各方向の動揺の両振幅の最大値は、SWAYING 1.3 m、SURGING 0.4 m、HEAVING 0.4 m、ROLLING 0.15rad、PITCHING 0.06 rad、YAWING 0.04 rad であった。

(2) 規則波中の浮体動揺応答特性

一般に、波浪中の係留浮体の運動方程式は下記に示すような線型近似の微分方程式で表われ、これを解くことにより波浪中の動揺を求めることができる。

$$\sum_{j=1}^6 \{ (M_{ij} + M_{aij}) \ddot{X}_j + N_{ij} \dot{X}_j + (B_{ij} + C_{ij}) X_j \} = E_0 i + E_i e^{i\omega t}$$

ここで、 M_{ij} ; 浮体の質量 (慣性モーメント)
 M_{aij} ; 附加質量 (附加慣性モーメント)
 N_{ij} ; 造波減衰力係数
 B_{ij} ; 浮体の復元力係数
 C_{ij} ; 係留系の復元力係数
 $E_0 i$; 定常外力
 E_i ; 波浪強制力
 X_i ; 浮体の動揺変位
 i, j ; 運動モード (SWAYING, HEAVING, etc)

この解法としては、2次元矩形浮体の動揺解析法の代表的なものの1つである井島ほかによる領域分割法を用いた。本浮防波堤のような遊水部を有する浮体の動揺解析法については、減衰係数の適切な修正を行なうことにより2次元浮体の解析法が適用できることが、模型実験結果の解析によって示されている。²⁾

図-7(1)~(3)は SWAYING, ROLLING, HEAVINGについて、この計算方法により規則波中の動揺周波数応答特性を求め、実測値と比較したものである。ただし、共振点付近の様子が変わり易いように、図の横軸は浮体幅 B と波長 L との比 B/L としてある。実測値は、図-4に示した各ケースの動揺振幅の有義値をとり有義波高で除し無次元化したものである。計算では、模型実験結果の解析をふまえ、SWAYING, ROLLINGの減衰係数を5.0倍、HEAVINGの減衰係数を1.25倍するという修正を加え、H.W.L.時とL.W.L.の場合について計算したものである。また、波向はNWとし、係留系の復元力係数は静的係留特性曲線の定常変位近傍の値を用いた。減衰係数を修正しない場合 (減衰係数1.0倍) と比較すると、共振点付近での修正の影響の度合いが大きい。動揺の計算値と実測値を比較すると、概ね傾向が一致していることがわかる。共振点付近では、データが少ないこともあり、評価は難しいが、今回の実測データについては、動揺量を本計算方法により算定できる。

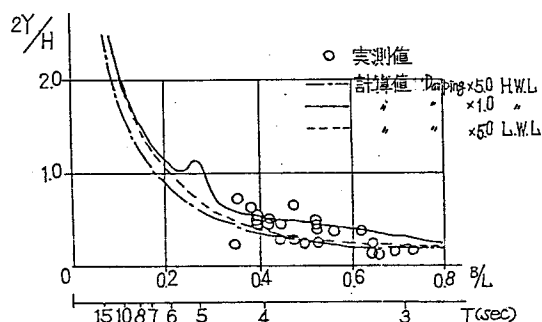


図-7 (1) 動揺振幅の実測値と計算値 (SWAYING)

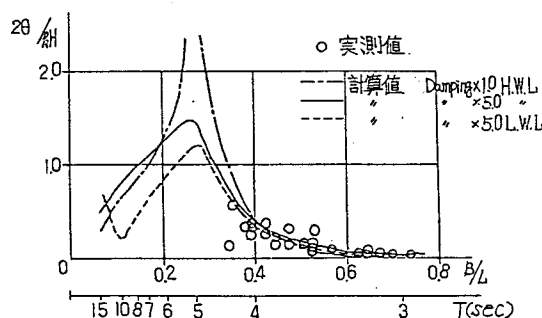


図-7 (2) 動揺振幅の実測値と計算値 (ROLLING)

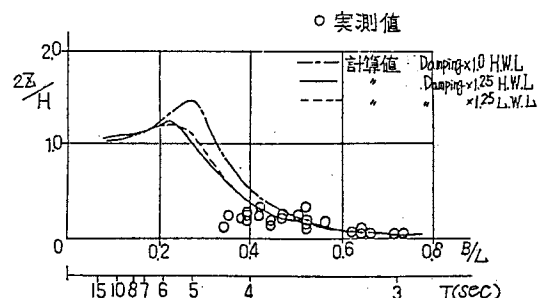


図-7 (3) 動揺振幅の実測値と計算値 (HEAVING)

(3) 動揺応答スペクトル

前項は、規則波中の動揺特性の計算値との比較を行なったものであるが、実際の海の波は不規則波であり、不規則波中の動揺特性について検討した。先に示した入射波 $H_{1/3} = 1.46\text{m}$ 、 $T_{1/3} = 4.3$ 秒を例にとり、動揺応答スペクトルの実測値と計算値を比較したものが図-8 (1) ~ (3) である。不規則波中とは、動揺の応答値の線型重ね合わせが成り立つとの前提のもとに、動揺の周波数応答特性を求め、次式のエネルギー・スペクトル法により、動揺応答スペクトルを算出したものである。

$$S_m(f) = S(f) |A(f)|^2$$

$S_m(f)$: 動揺応答スペクトル

$S(f)$: 波浪スペクトル (Bretschneider - 光易型スペクトルを用いた。)

$A(f)$: 動揺の周波数応答

f : 波浪周波数

この図では、Swaying, Rolling, Heaving の3成分とも、ピークの位置は、計算値と実測値ではほぼ一致している。これより波高の小さいケースについても同様の計算を行なった結果、ピークの高さは、計算値と実測値ではほぼ一致したが、ピーク位置については、計算値が実測値よりやや長周期側にずれる傾向がみられた。波高が小さい場合、測定精度の点で不利であることを考えると、波の不規則性を考慮しても、このような計算法で、ほぼ妥当な再現性を有すると考えられる。

なお、Swaying のスペクトルの低周波数領域に高いピークがある。実測のSwaying の波形記録をみると、40 sec 程度の周期をもつ成分のあることが認められ、これが低周波数領域の高いピークに対応している。これは長周期の波浪漂流力が現われていると考えられる。

また、以上の動揺計算は、近似解法としての2次元領域分割法を用いたものであるが、任意形状浮体に適用できるより厳密な解法である三次元特異点分布法との計算方法の比較を行なった。結果は同じ図中に○印で示してある。2次元領域分割法との対応をみると、両計算法の差異は小さく、2次元領域分割法で実用上十分な精度が得られる。

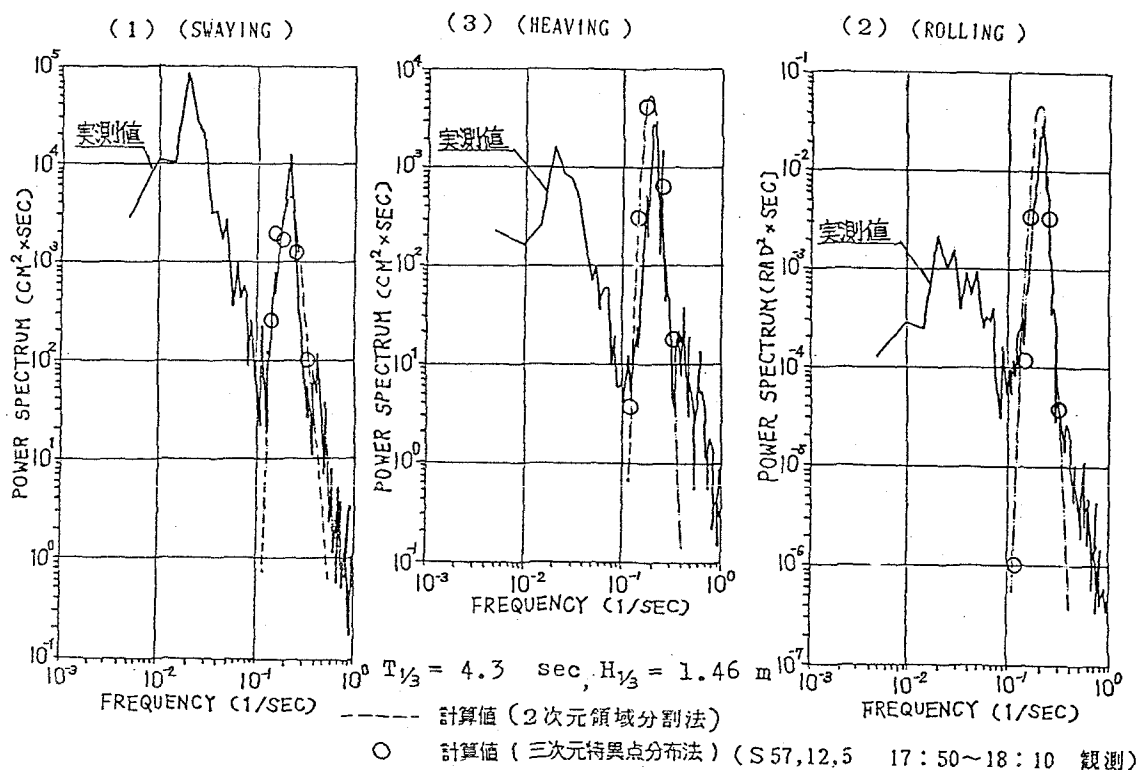


図-8 動揺スペクトルの実測値と計算値

5. 係留特性

係留系の張力の成分は、初期張力、定常外力による張力、変動張力の3つに分類した。初期張力は、浮防波堤設置時にかける張力であり、定常外力としては、波浪漂流力、潮流力、風圧力を考慮した。変動張力は、波浪による浮体の動揺に伴って発生する張力である。

初期張力は、静穏時の静的張力測定結果を平均して求めた。ライン1が20.0t、ライン2が12.0t、ライン3が20.2t、ライン4が15.2tであった。波浪時の変動張力について、SWAYINGの実測値との関係を見たのが図-9である。実測値は張力振幅、SWAYING変位とも有義値で示してある。動揺量が大きくなるにつれ変動張力も大きくなっており、計算値とも傾向がよく一致している。計算値は、定常外力（全ケースの平均値）に対する定常変位位置を原点とし、カテナリー理論による静的係留特性曲線を計算したものである。また、波向はNWとし、外力はライン1と2で均等に分担するものとして求めた。係留ライン1の方がライン2に比して変動張力が大きいのは、波向の影響や初期張力の違いによるものと考えられる。

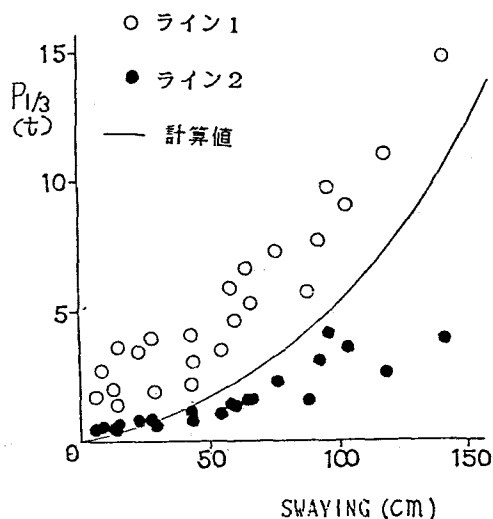
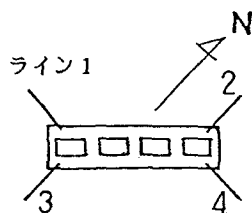


図-9 変動張力実測値

6. 結論

以上より、主要な結論をまとめると、次のとおりである。

(1) 本浮防波堤の消波性能については、有義周期4秒程度の波に対し、透過率0.3~0.5程度が得られ、実験値および設計値にはほぼ一致している。ただし、動揺計算により求めた場合、共振点付近では実験値が計算透過率より大きくなり消波性能を過大評価する可能性があるので、計算方法等について今後さらに検討を加えていく必要がある。

(2) 動揺特性については、本浮体のような遊水部をもつ形状についても、2次元矩形浮体の領域分割法による動揺計算を用い、減衰係数を修正するという簡単な方法で算定できる。

(3) 係留ラインの張力は、比較的弱い拘束状態であり、変動張力は有義値で最大15t程度で、強度的に十分安全であった。張力の算定は、カテナリー理論より求めた係留特性曲線を用いて定常張力と動揺変位に対応した変動張力を求める方法により行なえる。

7. おわりに

今回の浮防波堤の実証試験では、今回報告した設計上の知見だけでなく、施工面においても浮体の海上接合工法などの成果も得られ、浮防波堤にとどまらず今後、広く海洋構造物の建設工事に生かされるものと期待される。また、現在、この浮防波堤は長崎県口之津港において耐久性試験を継続中であり、浮体本体、係留ラインの耐久性についても確認して、総合的に評価していく予定である。

最後に、浮防波堤の開発及び今回の報告のとりまとめは、関係各位の協力を得て進めたものでありここに謝意を表します。

(参考文献)

- 1) 木暮他 : 「浮防波堤の設計と施工」、第30回海岸工学講演会論文集, 1983
- 2) 木暮他 : 「浮防波堤に作用する波漂流力について」 同上