浮消波堤の実海域実験

日本鋼管(株)　重工研究所　正会員　吉田　常　松
日本鋼管(株)　重工研究所　正会員　礒崎　総一郎

1．まえがき

浮消波堤のアイデアはかなり古くからあったようであるが、主として係留に対する信頼性の問題から、実用規模で採用されるという例はこれまでほとんど無かった。ところが最近になって、波に対する係留浮体の挙動や係留力の理論解析による予測が、かなりの精度をもって可能になってきたことと、防波堤に対する機能上の要求が多様化し、海水交換を妨げないで静穏な海域が得られるという、浮消波堤にとっての大きな利点が生かせるニーズが高まってきたこと等とが相まって、急速に注目されるようになってきた。そのような背景の中で、当社においても室内模型実験によって、効果的な消波性能を発揮し、合理的な断面形状をもった浮消波堤の開発を進めてきたのであるが、機会を得て、三重県阿曽浦において実機規模の実験を行った。以下はその実験に関して述べたものである。

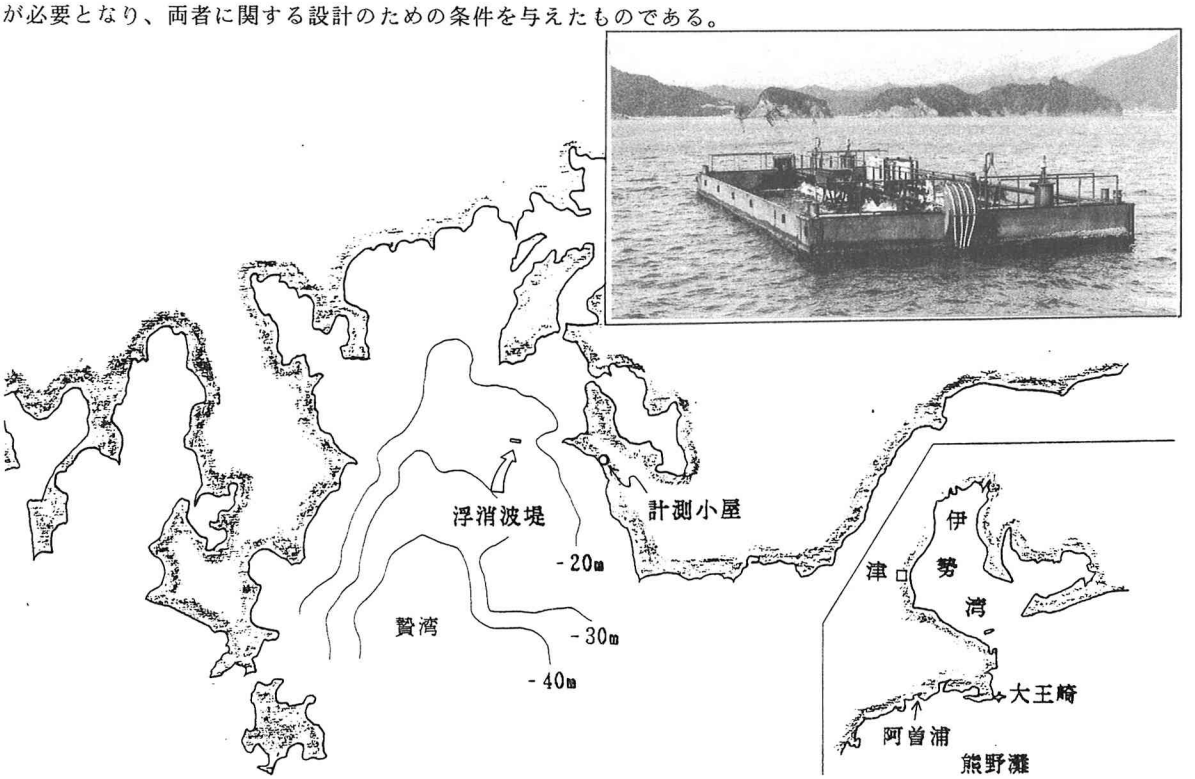
2．堤体及び係留システムの設計

2．1　阿曽浦の地形

阿曽浦のある贄湾は、図－2．1に示すように、熊野灘に面しており、リアス式の大変複雑な海岸線を形成している。実験堤の設置地点あたりは、水深が約30ｍで比較的平担である。また海底の底質は粗砂となっている。図から分るように、湾口が大きく開いているため、設置地点あたりは、外海からのうねりが、ほとんど減衰することなく入りこんで来、浮消波堤にとっては厳しい自然環境となっている。

2．2　設計海象条件

大王崎での気象データ，波浪の目視データ，また、近辺の護岸の設計に用いた波浪条件等を参考にして、表－2．1に示すような、堤体，係留ラインの設計を行なうための海象条件を定めた。表に示す如く、係留に関しては、3段階の条件を設定している。これは、今回の実験の主要な目的の1つが、係留チェーンの疲労強度の検討であり、そのために、設置してから約1年後に、疲労によってチェーン(テストチェーン)が破断することを想定した設計を行うことにしたので(2．4で後述)、破断後の堤体の漂流を防止するためのチェーン(安全チェーン)が必要となり、両者に関する設計のための条件を与えたものである。

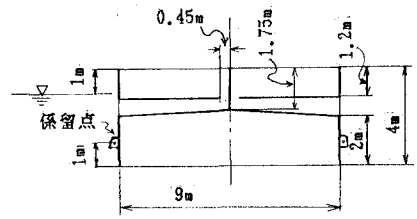


図－2．1　阿曽浦の地形及び浮消波堤

表－２．１　設計海象条件

設計対象		海象 波高(m)	海象 周期(sec)	海象 波形勾配	水深 h (m)	潮流 Ut (m/sec)	吹送流 Uwc (m/sec)	風 Uw (m/sec)	底質
①	消波	≦2.7	≦5	≦0.07	30±1.5	0.3	0.3	40	粗砂
②	係留	2.0	5	〃					
③	係留	6.0	≦7	〃					
④	係留	7.2	≦15	〃					

① 透過波高を1/2以下にする対象波
② テストチェーンが一年後に疲労破断する条件
③ テストチェーンが静的に破断する条件
④ 安全チェーンが静的に破断する条件



図－２．２　堤体の断面形状と寸法

表－２．２　波強制力による水平変位及び定常外力

条件	対象チェーン	波による強制変位 (m)	定常外力*(Ton)
②	テストチェーン	0.7	7.1
③	〃	2.8	11.0
④	安全チェーン	5.1	11.0

* ②に対して、波漂流力(FDW)のみを考慮
③,④に対して、波漂流力＋(潮流,吹送流,風;FDC)を考慮

２．３　堤体の設計

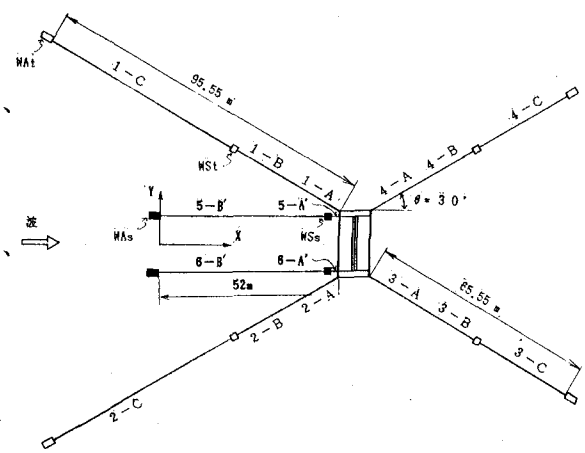
室内模型実験の結果と工場での製作性を考慮して、堤体の断面形状と寸法を決定した。堤体幅は、実験により得られた消波性能曲線と、表－２．１の条件①とから９ｍとなり、また堤体の長さは、種々の制約条件から全長２０ｍとした。材質はsteel で、両端に浮力タンクを取付けることにより所定の喫水で浮かせることにした。図－２．２に最終的に決った断面形状、寸法を示す。なお全重量は５５．４ton となった。

２．４　係留システム

係留システムは、堤体の位置保持と、チェーンの腐食、疲労についての試験を行なうことを考慮して、４本のテストチェーンと、２本の安全チェーンとで構成することにした。つまり、堤体は通常、テストチェーンにより位置が保持されるが、テストチェーンが破断した場合には、安全チェーンの張力がきいて堤体は漂流を防止する。また所要張力の発生、堤体の移動量の拘束等を目的として全てのチェーンに中間シンカーを取付けることにした。このような係留システムに対して、次のような条件を定め、チェーンのサイズ及びアンカー、中間シンカーの重量を決めた(記号は図－２．３を参照)。

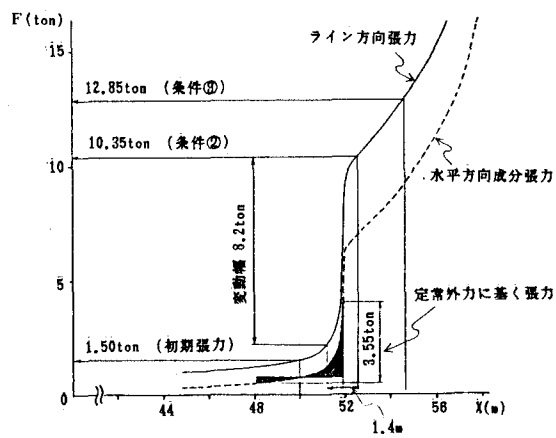
(1) Ａのチェーンのサイズ ; Φ22
(2) Ｂのチェーンのサイズ ; Φ44
(3) 海象条件（以下 '条件' とよぶ）②でＡの張力変動が８ton。
(4) 条件③、④でそれぞれＣ,Ｂ'のアンカー取付部が水平を保つ。
(5) テストチェーン破断後、条件④において、わずかな変位を許すだけで、堤体の漂流を阻止する。
(6) アンカー、中間シンカーの空中重量は７０ton 以下でコンクリート製とする。

ここで(1)、(3)は室内での疲労実験の条件に対応して決めたものである。また、外力に対する堤体の変位量は、波と流れを考慮して、室内模型実験の結果から表－２.２に示す値を定めた。以上より係留点と発生張力、ライン形状の関係を繰返し計算によって求め、図－２．３に示す値が決まった。なお、このときのテストチェーンの係留点の水平変位と発生張力の関係は、図－２．４に示されるようになっている。

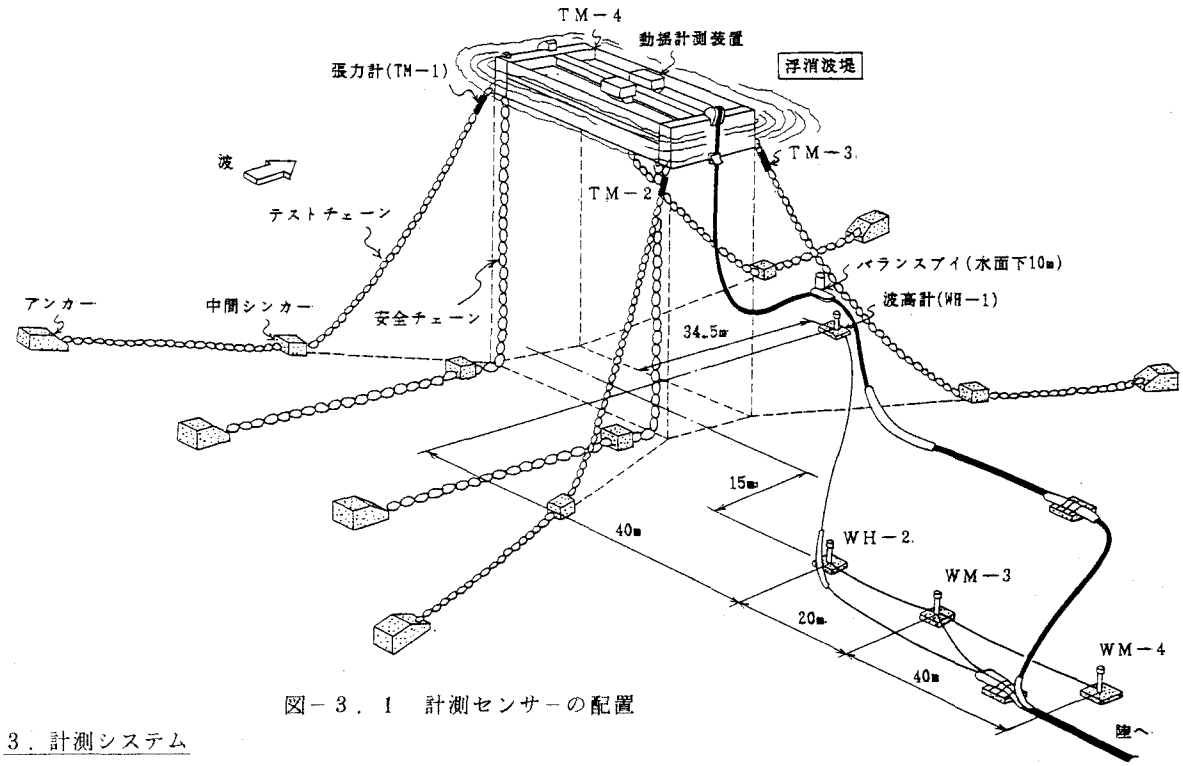


チェーン 符号	径	長さ	符号	径	長さ	アンカー,シンカー 符号	重量(水中)
1－A	φ22 (3 種)	23 m	1－C	φ34 (2 種)	60 m	WAt	17.8ton
2－A			2－C			WAs	23.5ton
3－A			3－C		30 m	WSt	4.9ton
4－A			4－C			WSs	8.8ton
1－B	φ44 (2 種)	22 m	5－A'	φ44 (2 種)	30 m		
2－B			6－A'				
3－B			5－B'		46 m		
4－B			6－B'				

図－２．３　係留システム



図－２．４　テストチェーンの変位－張力の関係



図－３．１　計測センサーの配置

３．計測システム

３．１　計測項目及び計測システムの考え方

計測は、チェーンの張力と堤体近傍の波、及び堤体の動揺の３項目に関して行った。そのシステムは前２者と後者の２つに大きく分けられるが、各々のシステムを組むにあたって考慮した条件は以下の通りである。

（１）張力及び波に関する計測システム

① 通年にわたって定時刻(偶数正時から１６分間)の計測を行う。

② 計測は、テストチェーンの堤体取付部での張力と、入射波、透過波に関して同時刻に行う。

③ データは全て海底ケーブルによって陸上へ送られるようにする。

④ 電源は商用１００Ｖとし、さらに停電時のバッテリー(自動切換で５時間続行)を用意する。

⑤ 定時刻以外にも、波高の大きな波(１．５m以上)が来たら自動的に計測を開始するようにする。

⑥ 計測は全て陸上のコントローラーの制御のもとで無人で行い、データは全て陸上のアナログデータレコーダーに記録する。

（２）動揺に関する計測システム

① 動揺の計測は通年にわたっては行わず、大きな波の来襲する時にのみ行う。

② 張力、波の計測と同期させる。

③ 計測及び記録に必要な電力は、堤体上に設置したバッテリーから供給する。

④ 計測は全て、堤体上のコントローラーの制御のもとに無人で行い、データは全て堤体上のアナログデータレコーダーに記録する。

なお、計測センサーの配置は図－３．１に示すとうりである。

３．２　張力、波高の計測

張力計(ＴＭ－１～４)は定格荷重５０ton のストレインゲージ式防水型ロードセル、波高計(ＷＨ－１～４)は、最大計測波高１５m の海底設置型超音波発信式である。これらを図－３．１に示すように配置した。この中でＷＨ－１は透過波用、またＷＨ－２～４は入射波用で、波向を計算できるように堤体と平行に一列に並べた。既に述べたようにデータは海底ケーブルを通じて陸上へ送られるが、そのケーブルは二重鎧装の強固なものを採用して、波や流れによる抵抗に耐えられるようにした。

３．３　動揺の計測

計測内容はPitch, Roll, Heave, Surge, Sway, Yawの６成分で前２者はジャイロにより、残りは加速度計の記録を解析することにより求めた。なおジャイロは、堤体のほぼ中央に、加速度計は、堤体の中央及びコーナーに方向を考慮して合計４個配置した。動揺は大きな波の来襲するときに計測するということで、Heave の加速度が所定の値(３５gal)を超えたときにトリガーがかかり、波高等の計測時刻と合わせて１６分間ずつ連続４回計測するようにした。

4．設置工事

昭和55年10月中旬から約1ケ月間にわたって設置工事を行った。堤体は当社津製作所で製作され、そこから阿曽浦まで約1昼夜かけて曳航した。現地ではまず台船上に載せられたアンカー、中間シンカー、チェーンを互いに結合し、それらを陸上の2点から視準しながらクレーンで海底の所定の位置に設置した。その後、海底のチェーン端部を引上げ、堤体と結合して係留を完了した。次に波高計を所定の位置に同様の方法で設置し、そこから延びるケーブルを、張力計からのものと一緒にして、約1km先の陸上の計測小屋まで敷設した。その途中の要所要所にはコンクリートブロックを没設しケーブルを固定した。

5．計測結果

5．1　概要

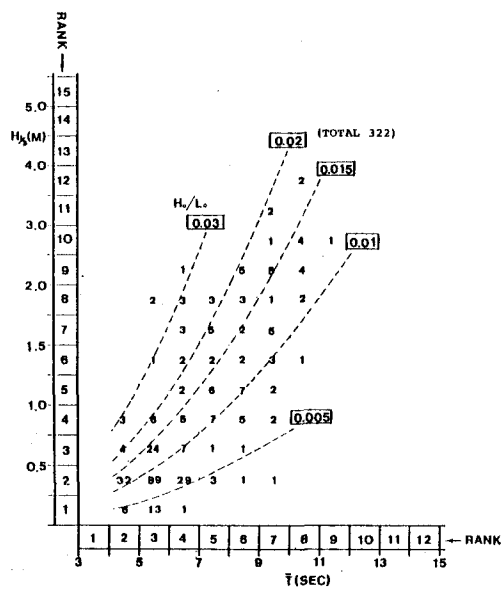
計測は昭和55年12月から昭和58年 8月までの2年9ケ月にわたって行なわれた。その間、予期せぬトラブルに見舞れ、中断を余儀なくされることもあったが、おおむね順調にデータを収録することができた。なお、テストチェーンは設置してから約1年半後に2－A(図－2．3参照)の堤体取付点から約5m の所で破断した。その後、2つの部分を新規のものと交換して、計測を続行した。以下に、海象、消波効果、張力(疲労強度)、動揺について、概要を述べることにする。

5．2　海象

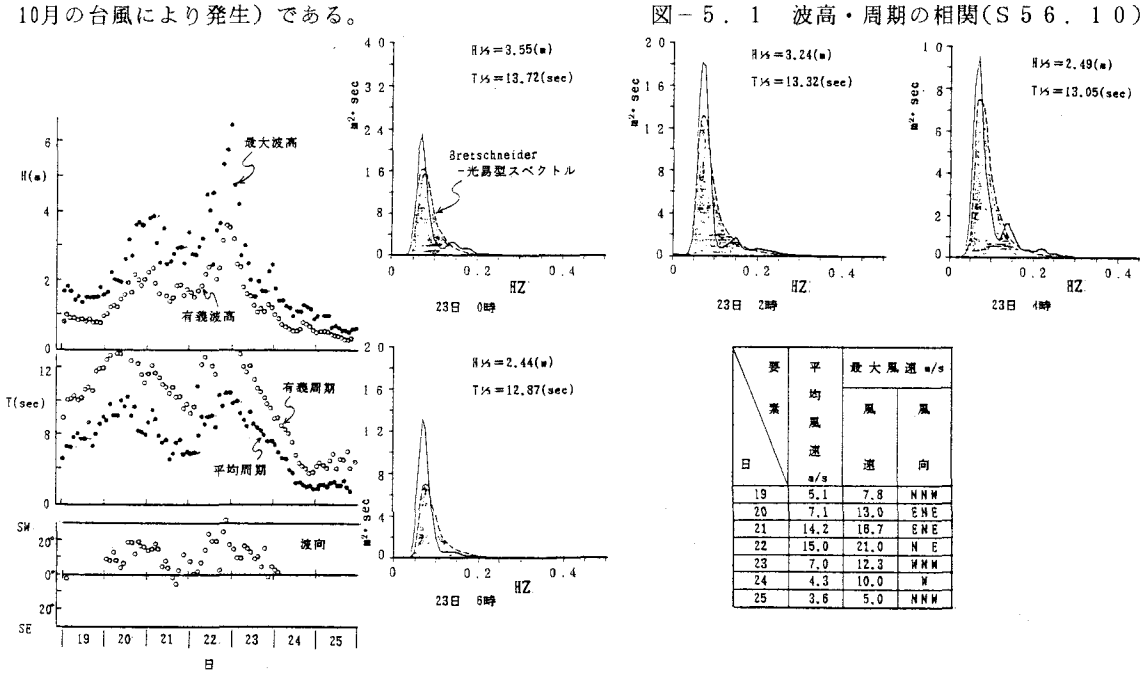
図－5．1に波高、周期の相関図、図－5．2に有義波高、最大波高、波向及び入射波のエネルギースペクトルの例、また表－5．1に波高、周期の月別、季節別の平均値、表－5．2に代表波諸元間の関係及び全データを通しての波高、周期の平均値を示す。海象に関するデータはこのような形でまとめたのであるが、全体を通して次のようなことがいえる。

（1）波高、周期

- 高波は主に春先の日本海低気圧、あるいは南岸低気圧の通過と、夏から秋にかけての台風の接近によりもたらされる。前者の場合の継続期間は2～3日、後者の場合は4～5日となっている。
- 冬期は比較的穏やかな海象が続く。
- 波高と周期の間にはそれほど強い相関関係は見出せないが、波形勾配で 0.015～0.020 あたりに収れんしてゆく様子がうかがえる。
- 今回の計測期間内に測定された最大波高は6.56m(S56.10月の台風により発生）である。



図－5．1　波高・周期の相関(S56．10)



要素 / 日	平均風速 m/s	最大風速 m/s 風速	最大風速 m/s 風向
19	5.1	7.8	NNW
20	7.1	13.0	ENE
21	14.2	16.7	ENE
22	15.0	21.0	N E
23	7.0	12.3	WNW
24	4.3	10.0	W
25	3.6	5.0	NNW

図－5．2　有義波高・最大波高・波向及びエネルギースペクトル（S56．10）

表－５．１　波高・周期の月別・季節別平均値

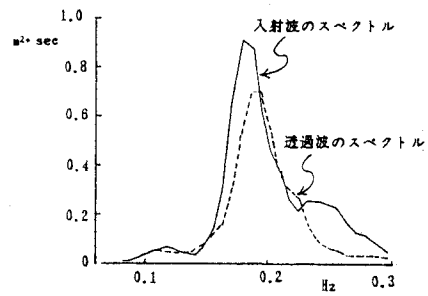
年	月	データ数	Hmax (m)	月別平均値 H⅓(m)	月別平均値 $\overline{T}$(sec)	季節別平均値 H⅓(m)	季節別平均値 $\overline{T}$(sec)	季節
S55	12	243	2.84	0.37	5.16			
S56	1	231	2.71	0.34	5.16	0.40	5.39	冬
	2	288	3.06	0.49	5.86			
	3	356	5.10	0.63	6.25			
	4	307	6.22	0.71	6.14	0.63	5.99	春
	5	124	3.30	0.56	5.59			
	6	－	－	－	－			
	7*	49	4.49	1.02	6.78	－	－	夏
	8	220	6.17	1.05	6.97			
	9	359	5.35	0.74	6.52			
	10	322	6.56	0.73	6.26	0.63	6.21	秋
	11	280	2.84	0.42	5.85			
	12	356	2.79	0.40	5.45			
S57	1	353	3.29	0.41	5.65	0.38	5.75	冬
	2	332	4.09	0.34	6.16			
	3	351	5.00	0.61	6.16			
	4	294	4.40	0.56	5.72	0.58	5.88	春
	5	307	2.85	0.57	5.75			
	6	290	4.61	0.65	5.85			
	7	208	3.44	0.79	6.29	0.72	6.14	夏
	8*	10	3.81	1.77	6.92			
	9	－	－	－				
	10	－	－	－		－	－	秋
	11	－	－	－				
	12	－	－	－				
S58	1	－	－	－		－	－	冬
	2	－	－	－				
	3	188	3.10	0.59	5.86			
	4	344	4.38	0.76	5.48	0.68	5.70	春
	5	305	4.82	0.65	5.76			
	6	361	4.00	0.62	6.16			
	7	350	2.79	0.68	5.32	0.70	5.84	夏
	8	191	5.35	0.79	6.05			

（注）＊のついた月はデータ数が少ないため、季節別平均値の計算には用いない
（S56年夏の平均値は、8月のみのデータしかないので算出しない）

表－５．２　代表波諸元間の関係及び平均有義波高・平均周期

計測期間	S55.12 ～ S58. 8
データ数	7019
T⅓／$\overline{T}$	1.32
Hmax／H⅓	1.83
$\overline{\overline{T}}$	5.92 (sec)
$\overline{H⅓}$	0.61 (m)

計測時刻	S56. 5.11, 19:00～19:20
H⅓	0.94 m
$\overline{T}$	4.55 sec
T⅓	5.05 sec
Hmax	1.84 m



図－５．３　入射波と透過波のスペクトル

（２）波向

有義波高１ｍ以上の場合、真南～真南から２０度振った方向の間から波が来襲してくることが多い。

（３）波のエネルギースペクトル

各季節で比較的波高の大きいときを選んでスペクトルを計算してみると、うねりと風波の共存した、２つのピークをもつ形が得られた。十分に発達した風波に対する代表的なスペクトルの１つである、Bretschneider －光易型スペクトルと比較してみるとピークが鋭く尖っており、うねり成分へのエネルギーの集中の度合が大きいことが分かる。

５．３　消波効果

今回は、堤体の長さが２０ｍと短いために波向、回析波の影響が大きいという問題があって、実海域における消波効果の確認を行うには条件は十分ではなかったのであるが、図－３．１に示されるＷＨ－１の波高計で計測されたものが透過波であるとして、エネルギースペクトルを計算し、入射波と比較してみた。図－５．３にそれを示す。図から分かるように、周期の長い領域では消波効果は無いが、短い領域では、相応の消波効果を示している。

５．４　張力（疲労強度）

図－３．１に示されるように、堤体取付部における張力を計測したが、堤体に最も近いΦ22のチェーン（ＮＫ規則３種チェーン）に関して、そのデータを用い疲労強度を検討した。なお、検討の対象とした期間はＳ５８．３月～同７月の４．５ケ月である。チェーンの張力波形は、波と同周期の比較的振幅の大きい波形と、周期の小さい比較的振幅の小さい波形とが重畳されたものとなっていたが、それをレインフロー法により解析した。そして、当社で実施した、室内での疲労実験の結果(図－５．４参照)を用いて、累積疲労被害度を計算した。なお計算は、疲労限以下の応力は疲労被害度に影響しないとするマイナー則と、その影響を考慮する修正マイナー則の両者で行った。表－５．３にその結果を示す。この表より、海水中の累積疲労被害度は空気中の３～４倍となっていることが分かる。また、最も値の大きいＴＭ－２についてみると、この期間の海象が連続的に続くとした場合、寿命は約５年となる。

表－５．３　各チェーンの累積疲労被害度

チェーンNo.	条　　件	D（計測期間中）	D（１年間に換算）
TM－1	空　気　中（修正マイナー則）	0.0172	0.0459
	空　気　中（マイナー則）	0.0162	0.0433
	海　水　中（修正マイナー則）	0.0592	0.158
TM－2	空　気　中（修正マイナー則）	0.0231	0.0617
	空　気　中（マイナー則）	0.0221	0.0590
	海　水　中（修正マイナー則）	0.0742	0.198
TM－4	空　気　中（修正マイナー則）	0.0164	0.0438
	空　気　中（マイナー則）	0.0154	0.0411
	海　水　中（修正マイナー則）	0.0574	0.153

＊　疲労限は、$\Delta\sigma_N/\sigma_B \leq 0.1$ とした。

５．５　動揺

動揺の計測から得られた各モード（但し、データの信頼性の問題があってSway，Yaw は省く）のスペクトル、及び√(動揺スペクトル)／(入射波スペクトル)から求めた応答関数を図－５．５に示す。 Surgeを除いて、それぞれの固有振動数のところで応答が最大になることがうかがえる。 Surgeは、固有振動数は図の範囲よりも小さいところにあるが、波のピークに同期したピークがみられたので、同じ範囲で比較のため載せた。

６．あとがき

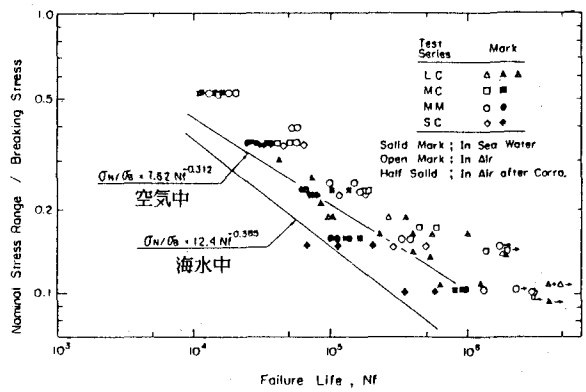
浮消波堤のような、いわゆる'係留浮体'に関する実海域での実験は、当社にとって初めての経験であり、しかも設置場所が、太平洋に直接面した所だったことから設置から撤去までの約３年間は、様々な面で心配は尽きなかったが、なんとか無事に終えることができ、かつ、多くの貴重なデータを蓄積することができた。頁数の関係から、ここに示すことのできたデータは全体のごく一部に限られてしまったが、多少でも役に立てていただける情報が含まれていれば幸である。

なお、本プロジェクトの遂行にあたっては、三重県水産関連部署、地元町並びに阿曽浦漁協の関係各位に多大なる御援助、御協力を賜りました。深甚なる謝意を表します。

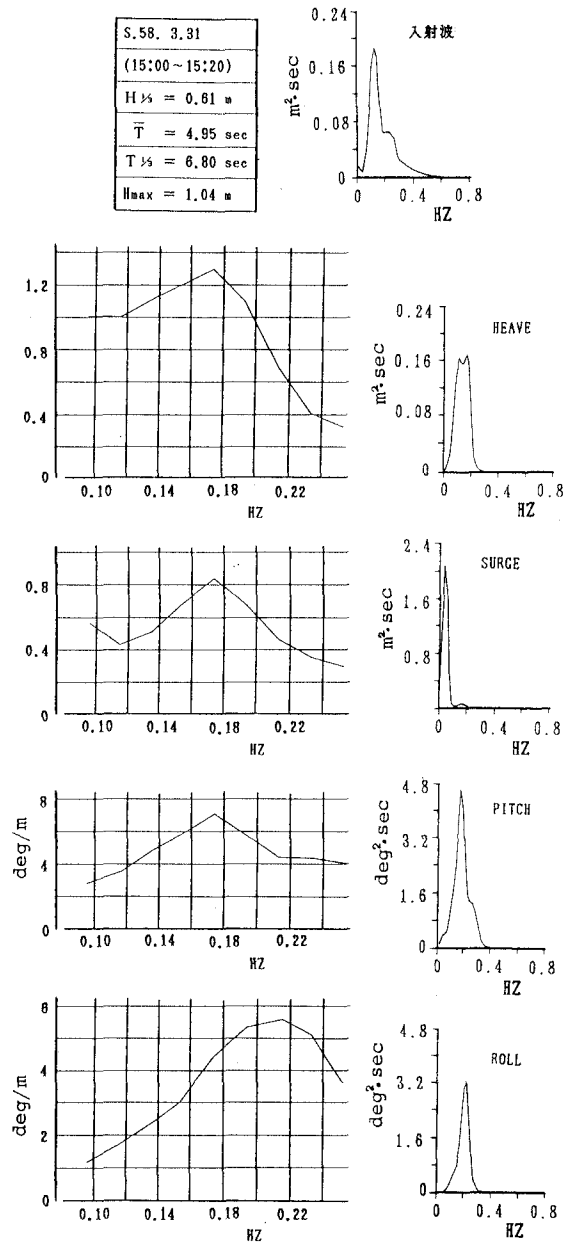
〈参考文献〉

・吉田、磯崎　；浮消波堤に関する実験的研究、第２７回海講論文集、PP. 285～288、1980

・浅野、石川 他 ；海洋構造物係留用チェーンの疲労強度、第７回海洋工学シンポジウム、PP.311～320、1984



図－５．４　チェーンのＳＮ線図



図－５．５　動揺のスペクトル及び応答関数