

新形式防波堤の水理模型実験による 構造検討について

下川 良平¹

¹近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 技術支援 (〒651-0082神戸市中央区小野浜町7-30)

本検討は、避難港に指定されている柴山港で港内静穏度確保のため整備されている外防波堤（西）の二重円筒ケーソンに代わる新構造形式を検討したものである。検討にあたっては、要求性能を満足し安定性確保が可能であると考えられる消波ブロック内蔵型円筒セルラーケーソンを新構造形式として抽出し、水理特性及び波力（圧）特性を縮尺1/60の水理模型実験により把握し、実験により得られた結果を基に安定性照査を行い、新構造形式の保有する性能を確認し、本防波堤の構造として採用できるか判断することとした。実験結果としては、新構造形式が保有する性能及び安定性を確認することができたが課題も抽出され、今後、新構造形式の採用にあたっては再度検証が必要である。

キーワード 消波ブロック内蔵型円筒セルラーケーソン，水理模型実験，波圧分布，安定性照査，

1. はじめに

柴山港においては、昭和29年に避難港に指定され、昭和62年度から小型船・中型船（100～3,000GT級）を対象とした避難港整備が進められており、外防波堤（西）450mが計画されている。外防波堤（西）は水深-30m、設計波高9.8mという大水深・高波浪域に建設される防波堤であるため、大水深・高波浪条件に対応する構造物として「二重円筒ケーソン式防波堤」が採用されている。

本報告では、より効率的な施工を可能とする新構造形式を検討するため、要求性能を満足し安定性確保が可能であると考えられる「消波ブロック内蔵型円筒セルラーケーソン」を抽出し、水理模型実験により新構造形式の保有する性能を確認し、本防波堤の構造として採用できるか判断することとした。



図-1 柴山港位置図

2. 設計条件

(1) 潮位

H.H.W.L : +1.50m

H.W.L : +0.40m

L.W.L : -0.10m

(2) 波浪条件

設計波：堤前波 $H_{1/3}=9.8\text{m}$ ， $T_{1/3}=13.8\text{sec}$

計画波：堤前波 $H_{1/3}=7.4\text{m}$ ， $T_{1/3}=12.3\text{sec}$

消波対象波：堤前波 $H_{1/3}=5.0\text{m}$ ， $T_{1/3}=9.0\text{sec}$

3. 水理模型実験断面

本実験に使用する「消波ブロック内蔵型円筒セルラーケーン」とは、プレレスト(PC)コンクリートの壁面で円筒を形成し底版の無いもので、内部に石材と消波ブロックを詰めて壁体としている構造である。

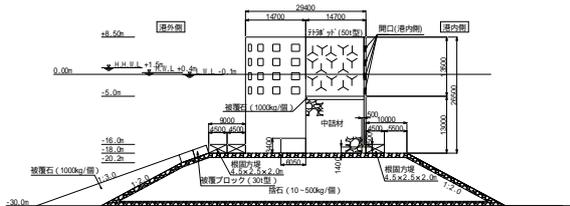


図-2 実験断面 (消波ブロック内蔵型円筒セルラーケーン)

4. 水理模型実験内容・結果

(1) 静的横抵抗測定実験

本実験は、あらかじめどの程度の作用力で滑動などの安定が崩れるかを計測し、安定性照査で用いる摩擦係数を決定するために行った実験である。

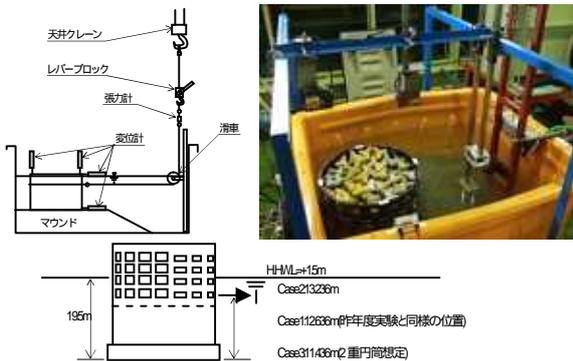


図-3 静的横抵抗測定実験

Case名	荷重作用高	耐力 (kN/函)	摩擦係数 μ	適用
Case3	11.436	104.975	0.584	マウンドが締め固まっている状態
Case1	12.636	94.687	0.527	マウンドが締め固まっている状態
Case2	13.236	95.252	0.530	マウンドが締め固まっている状態
Case1	12.636	92.124	0.512	マウンドが締め固まっていない状態
平均		96.760	0.54	

表-1 静的横抵抗測定実験結果

実験結果から、堤体耐力が最も小さい時に92,124kN/函、最も大きい時で104,975kN/函である。この時の自重が現地換算値で179,813kN/函であることから、摩擦係数は μ

$=92,124/179,813 \sim 104,975/179,813=0.512 \sim 0.583$ となる。このことから捨石マウンドと接する面の摩擦係数は $\mu=0.55$ を採用することとした。

(2) 波力・波圧実験

本実験は、安定性照査及び上部工に作用する波力を把握すること、また、堤体各部材に作用する波圧を計測するために行った実験である。

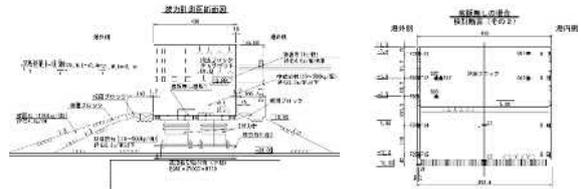
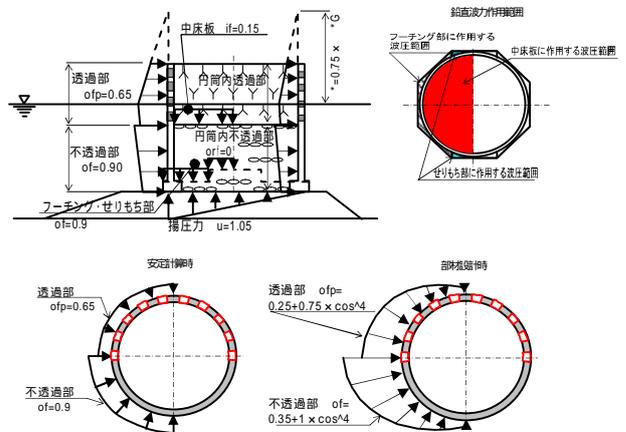


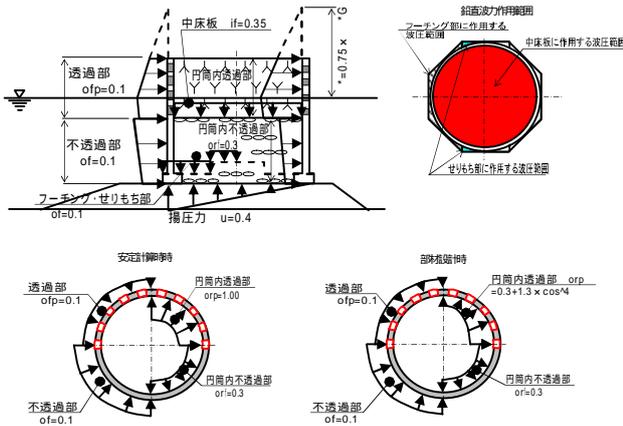
図-4 波力・波圧実験



記号	適用範囲	安定計算	部材設計
ofp	円筒前面透過部	0.65	$0.25+0.75 \times \cos^4$
of	円筒前面不透過部	0.90	$0.35+1 \times \cos^4$
orp	円筒内透過部	0.00	0.00
orf	円筒内不透過部	0.00	0.00
if	中床板	0.15	0.15
u	揚圧力	1.05	1.05

図-5 実験結果による押し波時モデル波圧分布

円筒前半分の水平波力が最大となる押し波では、二重円筒ケーソンと同等の波圧分布を示している。



記号	適用範囲	安定計算	部材設計
ofp	円筒前面透過部	0.10	0.10
of	円筒前面不透過部	0.10	0.10
orp	円筒内透過部	1.00	$0.3+1.3 \times \cos^4$
orf	円筒内不透過部	0.30	0.30
if	中床板	0.35	0.35
u	揚圧力	0.40	0.40

図-6 実験結果による押し波 時モデル波圧分布

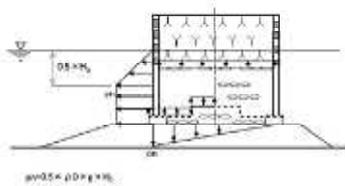


図-7 実験結果による引き波時モデル波圧分布

堤体の安定性では、既存検討結果及び波力実験結果から押し波 時が最も不安定になる位相であることは解っていたが、円筒内の波圧分布など部材設計に用いる必要があるため、円筒後ろ半分の水平波力が最大となる押し波 時、さらに引き波時の波圧分布を作成した。

(3) 中詰め抜け出し実験

消波ブロック内蔵型円筒セルラーケーソン堤は、堤体内部に石を詰め込んだセルラー形状であるために、波浪作用時に中詰め材の抜け出しや堤体の滑動が起こる可能性があるため本実験を行った。



図-8 中詰め抜け出し実験

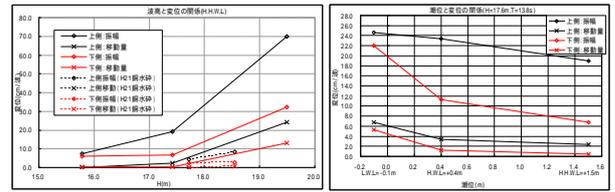


図-9 中詰め抜け出し実験結果 (左:波高と変位の関係, 右:潮位と変位の関係)

実験結果では、堤体からの中詰め材の抜け出しや転倒は見られなかった。しかし、滑動に関しては図-9左の「波高と変位の関係」グラフより、設計波の最高波高相当である $H_{max}=17.6m$ の下端滑動量は $0.43cm/波$ であり振幅量は大きいと判断されるが、図-9右の「潮位と変位の関係」グラフより、L.W.Lでの下端滑動量は $5.35cm/波$ であるため、この状態では安定条件を満足しないと考えられる。

よって、堤体重量が不足していると判断し、本実験では堤体重量を増加させるため、消波ブロックの投入個数を増加させて再度中詰め抜け出し実験を行った。

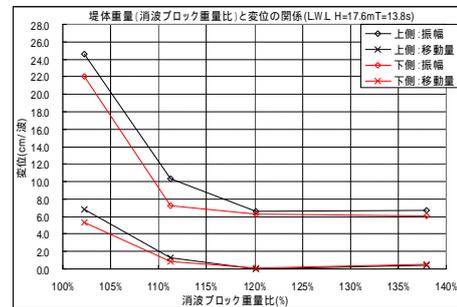


図-10 堤体重量と変位の関係

図-10より、下端滑動量が安定条件を満たすであろう $1cm/波$ 以下程度になる重量は消波ブロック重量比で120%を超えたあたりであることが解った。

(4) 揚圧力

波力・波圧実験時と中詰め抜け出し実験時に揚圧力の測定を行った。図-11に両実験時の揚圧力時系列図を示す。波浪条件はどちらも $H=17.6m$, $T=13.8s$, H.H.W.Lである。このグラフより、波力・波圧実験時よりも中詰め抜け出し実験時の方が揚圧力値が大きいことが解る。測定値に差が生じた要因として、図-12に示すとおり実験時に用いた底版に違いがあるためではないかと考えられる。

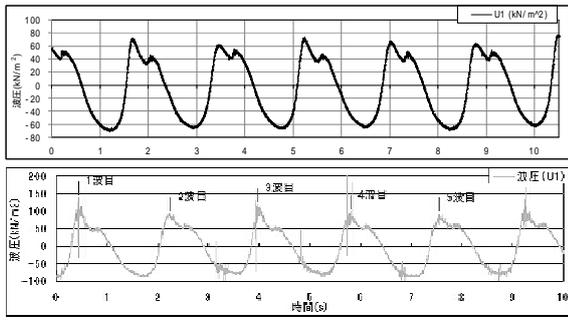


図-11 揚圧力時系列図(上:波力・波圧実験,下:中詰め抜け出し実験)

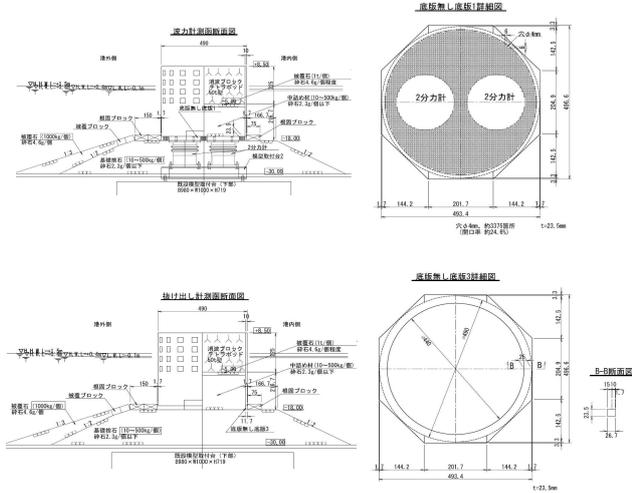


図-12 模型構造図(上:波力・波圧実験,下:中詰め抜け出し実験)

図-13に揚圧力値をまとめたグラフを示す.これらの値から,波圧低減率 =0.9~1.0程度を考慮する.

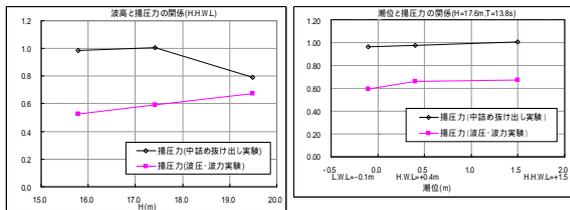


図-13 揚圧力値と波高・潮位の関係

(5) 伝達・反射率実験

本実験は,消波ブロック内蔵型円筒セルラーケーソンの伝達率及び反射率を測定するために行った.



図-14 伝達・反射率実験

No.	波浪		潮位	断面条件				実験回数	反射率		伝達率		
	波高(m)	周期(s)		名称	中詰め材等	開口径(D)	その他		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
1	3.1	7.0	L.W.L +0.1m	消波ブロック 50t	+8.5 ~ -5.0m 中詰めめ石 20~50kg/個	20.0	16.0	ケーソン 間隔 0.6m	1	0.485	0.193	0.481	0.191
									2	0.478	0.191		
									3	0.481	0.188		
2	5.0	9.0	L.W.L +0.1m	消波ブロック 50t	+8.5 ~ -5.0m 中詰めめ石 20~50kg/個	20.0	16.0	ケーソン 間隔 0.6m	1	0.530	0.203	0.529	0.204
									2	0.527	0.204		
									3	0.529	0.204		
3	6.1	12.0	H.W.L +0.4m	消波ブロック 50t	+8.5 ~ -5.0m 中詰めめ石 20~50kg/個	20.0	16.0	ケーソン 間隔 0.6m	1	0.547	0.254	0.547	0.295
									2	0.547	0.296		
									3	0.547	0.296		
4	7.4	12.3	H.W.L +0.4m	消波ブロック 50t	+8.5 ~ -5.0m 中詰めめ石 20~50kg/個	20.0	16.0	ケーソン 間隔 0.6m	1	0.518	0.218	0.521	0.221
									2	0.521	0.219		
									3	0.526	0.225		
5	7.4	14.0	H.W.L +0.4m	消波ブロック 50t	+8.5 ~ -5.0m 中詰めめ石 20~50kg/個	20.0	16.0	ケーソン 間隔 0.6m	1	0.538	0.280	0.539	0.280
									2	0.541	0.282		
									3	0.539	0.279		
6	7.4	14.0	H.W.L +0.4m	消波ブロック 50t	+8.5 ~ -5.0m 中詰めめ石 20~50kg/個	20.0	16.0	ケーソン 間隔 0.6m	1	0.559	0.281	0.558	0.281
									2	0.558	0.281		
									3	0.559	0.281		

表-2 伝達・反射率実験結果

伝達率は計画波 $H_{1/3}=7.4m$, $T_{1/3}=12.3s$ の波浪条件で $K_t=0.28$ と目標の 0.1 程度には及ばなかった. また, その他の周期でも $K_t=0.1$ を上回る結果となった.

一方, 反射率では, 消波対象波 $H_{1/3}=5.0m$, $T_{1/3}=9.0s$ の波浪で $K_r=0.53$ 程度であることから, 目標となる $K_r=0.5$ 程度の範囲に収まっており, また, その他の周期においても $K_r=0.5$ 前半であるために目標を達成しているものと考えられる.

(6) 消波ブロックの安定性

伝達・反射率実験時にセルラー内に設置している消波ブロックの安定性実験を行った. 波浪条件としては, 伝達率実験で使用した計画波 $H_{1/3}=7.4m$, $T_{1/3}=12.3s$ の不規則波と設計波の最高波高相当である $H_{max}=17.6m$ を使用した.



図-15 消波ブロックの造波前(左)と造波後(右)の状況(不規則波: $H_{1/3}=7.4m$, $T_{1/3}=12.3s$)



図-16 消波ブロック落下状況(規則波: $H_{max}=17.6m$, $T_{1/3}=13.8s$)

図-15に示すとおり不規則波では消波ブロックの移動・落下等は見受けられなかった. 一方, 規則波では図-16に示すとおり消波ブロックの落下が確認された.

よって, 本実験ではテトラポッド50型を使用したが大ドソン式で所要重量を想定すると80型が必要であると考えられる.

5. 安定性照査

(1) 照査方法

全ての実験結果を総合して表-3に示す方法により安定性照査を行う。

照査項目	押し波I	押し波II	確認事項
堤体の滑動	仮想底面を有する堤体滑動の照査を行う。 部分係数は $\mu=1.0$ とし、構造解析係数 $a=1.2$ とする。 摩擦係数は $\mu=0.55$ とする。		$R_0/(S_0 \times a)$ 1.0
堤体の転倒 (中詰め の抜け出し 抵抗を考慮)	仮想底面を有する堤体の転倒照査を行う。転倒抵抗力には中詰め抜け出し抵抗を考慮する。 抵抗力を算出する際には、以下の図に示すモデルで算出するものとし、摩擦面の摩擦係数は $\mu=0.68$ 、土圧計数は $K=0.53$ とする。 部分係数は $\mu=1.0$ とし、構造解析係数 $a=1.2$ とする。		$R_0/(S_0 \times a)$ 1.0
堤体の転倒 (鋼板セル 境の転倒抵抗 モーメントを考慮)	仮想底面を有する堤体の転倒照査を行う。転倒抵抗力には置きセル式転倒に対する転倒モーメントを考慮する。 部分係数は $\mu=1.0$ とし、構造解析係数 $a=1.1$ とする。		$R_0/(S_0 \times a)$ 1.0
堤体の転倒 (中詰め のせん断抵抗 モーメントを考慮)	仮想底面を有する堤体の転倒照査を行う。転倒抵抗力には置きセル式転倒に対するせん断抵抗モーメント(中詰めせん断抵抗モーメント)を考慮する。 部分係数は $\mu=1.0$ とし、構造解析係数 $a=1.2$ とする。		$R_0/(S_0 \times a)$ 1.0
基礎の偏心 傾斜	仮想底面を有する堤体としたときの端圧と水平力から、基礎の偏心傾斜を簡易ビショップ法で照査する。ただし、基礎部の端圧は角形底板の形状を考慮する。		$R_0/(S_0 \times a)$ 1.0
基礎の支持 力	仮想底面を有する堤体としたときの堤体重量から、基礎の支持力を修正フェレニウス法で照査する。(永続時)		$R_0/(S_0 \times a)$ 1.0

表-3 安定性照査方法

(2) 照査結果

4.(3)中詰め抜け出し実験で言及した滑動を抑えるために必要な重量増加対策を講じた後の断面により安定性照査を行った。

項目	耐力作用比			備考
	押し波	引き波	OK/NG	
滑動	押し波	1.081	> 1.000	OK
	押し波	1.454	> 1.000	OK
	引き波	2.170	> 1.000	OK
転倒	押し波	1.483	> 1.000	OK
	押し波	2.143	> 1.000	OK
	引き波	5.620	> 1.000	OK
	押し波	1.103	> 1.000	OK
	押し波	1.859	> 1.000	OK
	引き波	4.748	> 1.000	OK
	押し波	1.068	> 1.000	OK
	押し波	1.757	> 1.000	OK
	引き波	4.506	> 1.000	OK
	鋼板セルの転倒に対する変形抵抗モーメントに対する検討			
地盤反力	押し波	739.30(kN/m ²)	> 700(kN/m ²)	NG
	押し波	-	-	-
	引き波	533.70(kN/m ²)	< 700(KN/m ²)	OK
偏心傾斜	押し波	1.383	> 1.000	OK
	押し波	-	-	-
	引き波	1.383	> 1.000	OK
鋼板セルのせん断変形に対する変形抵抗モーメントに対する検討				

表-4 安定性照査結果

表-4に示すとおり、滑動、転倒、偏心傾斜については耐力作用比を満足したが、地盤反力については目標である700kN/m²を上回った。地盤反力についてはセルラード下の底板構造を別途解析することにより安定性を満足するものと考えられる。

6. 実験結果まとめ

(1) 静的横抵抗測定実験

実験結果より、摩擦係数 $\mu=0.55$ を採用する。

(2) 波力・波圧実験

堤体全体に作用する波力及び各部材に作用する波圧を計測し、その結果から波圧分布図を作成した。

(3) 中詰め抜け出し実験

堤体に波浪を作用させ移動量、振幅量を計測した。その結果、当初想定した重量では不足することが判明した。不足する重量を想定し、再度実験を行った結果、消波ブロック重量を20%増加させることで安定することが解った。

(4) 揚圧力

波力・波圧実験時及び中詰め抜け出し実験時に測定した揚圧力値を勘案し、波圧低減率 $=0.9 \sim 1.0$ 程度を考慮する。

(5) 伝達・反射率実験

伝達率は計画波 $H_{1/3}=7.4m$ 、 $T_{1/3}=12.3s$ において $K_t=0.28$ と目標伝達率である $K_t=0.1$ 程度を上回る結果となった。反射率は、消波対象波 $H_{1/3}=5.0m$ 、 $T_{1/3}=9.0s$ において $K_r=0.53$ となり、目標値である $K_r=0.5$ 程度になっている。

(6) 消波ブロックの安定性

30年確率波の不規則波では消波ブロックの移動は見られなかったが、50年確率波の規則波実験では移動、堤体からの落下が確認された。

7. 課題

(1) 伝達率

計測結果が $K_t=0.28$ 程度であったことから、伝達率を低下させる必要がある。対策としては、ケーソン本体の天端高を上げるかケーソン背面の開口率を低下させることが考えられるが再度水理模型実験を行い確認する必要がある。

(2) 消波ブロックの安定性

50年確率波の規則波で移動、堤体からの落下が確認されたため80t型テトラポッドに変更する案を考案したが、このような重量級の消波ブロックが波浪作用時に動揺するとケーソン壁に損傷を与える可能性が大きい。その対策として、ケーソン壁を厚くする、ゴムマット等をセルラー内に取り付ける等の対策が考えられるが、これらの対策が有効か又は80t型テトラポッドで動揺しないかの確認が必要である。

(3) セルラーの構造

セルラーケーソン構造は、二重円筒ケーソンと違い底板が不要になるが、内部に投入される消波ブロックなど

で円筒内のフープテンションが増加するものと考えられる。現状の二重円筒ケーソンがPC構造であることを考えると、テンションの増加がPCへ影響する可能性がある。

8. 総括

本実験により、消波ブロック内蔵型円筒セルラーケーソンの保有する性能及び安定性を確認できた。しかし、柴山港のような大水深・高波浪域で使用するには、まだ課題が残されている。ただ、消波ブロック内蔵型円筒セルラーケーソンは、消波性能が大きい割には通水断面が大きいこと、また、潮位差などでの遮蔽される内部の海水交換性がよい構造であるため、海水交換を必要とする場所で、反射波を低減したい場所への設置は有効であると考えられる。

今後、近畿地方整備局は基より管内に限らず、消波ブロック内蔵型円筒セルラーケーソンを採用できる港があれば積極的に提案し、本実験の成果を活用したいと考える。