

平成27年度 消波ブロックを活用した防波堤滑動抵抗実験

設計課 課長 鬼頭孝明
係員 富田 健

1. 概要

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波により多くの防波堤が被災した中、一部防波堤の堤頭部ケーソンについては被災を免れた施設がある。この理由として、堤頭部のケーソン背後の消波工が受働抵抗として機能した可能性があると「防波堤の耐津波設計ガイドライン」でも指摘されているところであるが、その効果の定量的な検討は行われていない。

本業務は、防波堤背後（港内側）の消波ブロックの滑動抵抗向上を目的とした補強断面の適用の可能性について、水理模型実験による検証を行うものである。

2. はじめに

以下条件から、清水港外港防波堤を水理模型実験の対象施設（実験断面）として採用した。

- ① 清水港外港防波堤は、耐津波性能の向上を目的として、上部工の嵩上げによる「防波堤の粘り強い構造化」を計画している。
- ② しかしながら、上部工の嵩上げに伴い設計波を対象とした波力が増大し、防波堤（ケーソン）の滑動抵抗を向上させる必要が生じた。
- ③ 滑動抵抗を向上させる目的として、被覆石による背面補強体を設置した対策断面を計画している。
- ④ 各種港湾整備事業に伴い、旧護岸等で利用されていた消波ブロックが不要となり、その有効活用が求められている。

3. 水理模型実験の概要

3.1 静的引張実験

静的引張実験では、引張実験装置の上に防波堤模型を設置し、重錘やウインチで静的に作用荷重を増加させ、滑動限界荷重を把握する。また、その結果から背面補強体とマウンドの摩擦係数を求める。

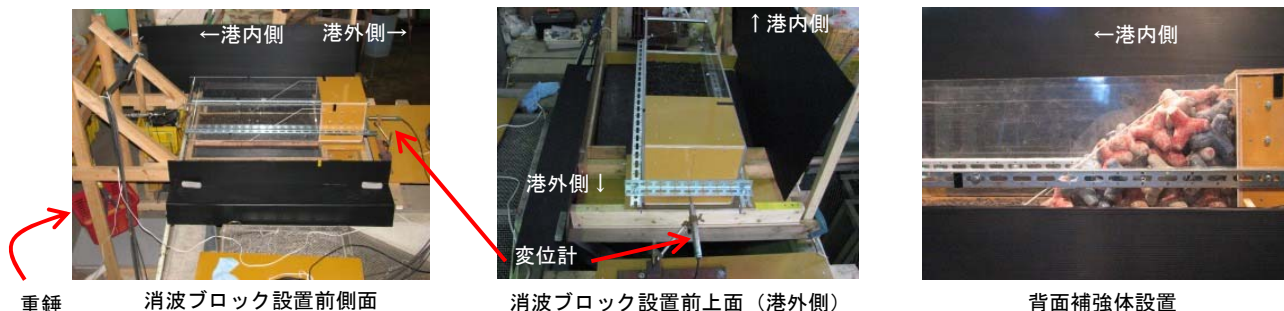
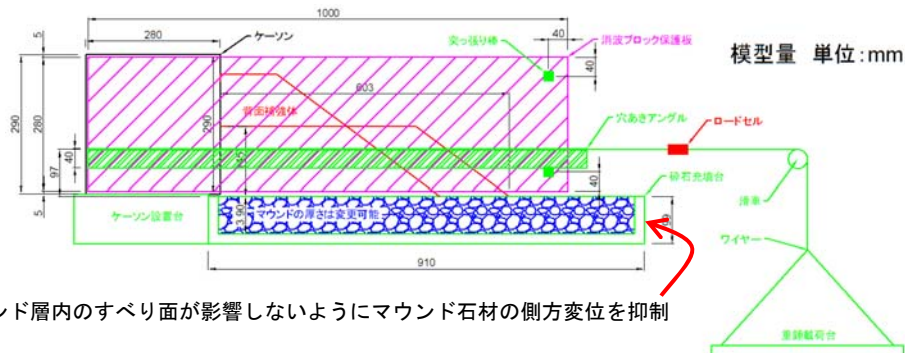


図-3.1 静的引張実験の実験概略図及び写真

3.2 耐波滑動安定実験

耐波滑動安定実験では、長水路水槽内に防波堤模型を設置し、規則波により波浪荷重を作用させて、滑動限界波高を把握する。また、ケーソンに作用する波圧測定も実施して作用波圧を把握し、滑動限界波高との関係から背面補強体とマウンドの摩擦係数を求める。

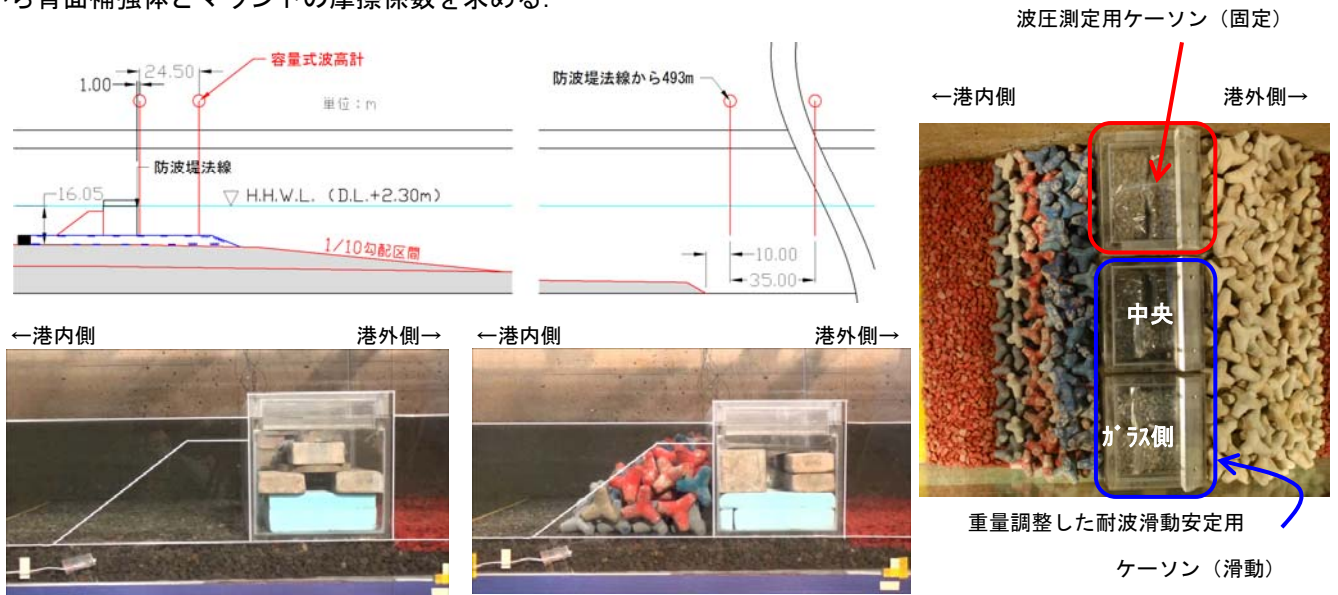


図-3.2 耐波滑動安定実験の実験概略図及び写真

3.3 消波ブロック安定実験

消波ブロック安定実験では、長水路水槽内に防波堤模型を設置し、波浪を作用させることで越波伝達波に対する消波ブロックの安定性を確認する。なお、消波ブロック安定性を正しく評価するため、ケーソンは滑動させないように実験する。

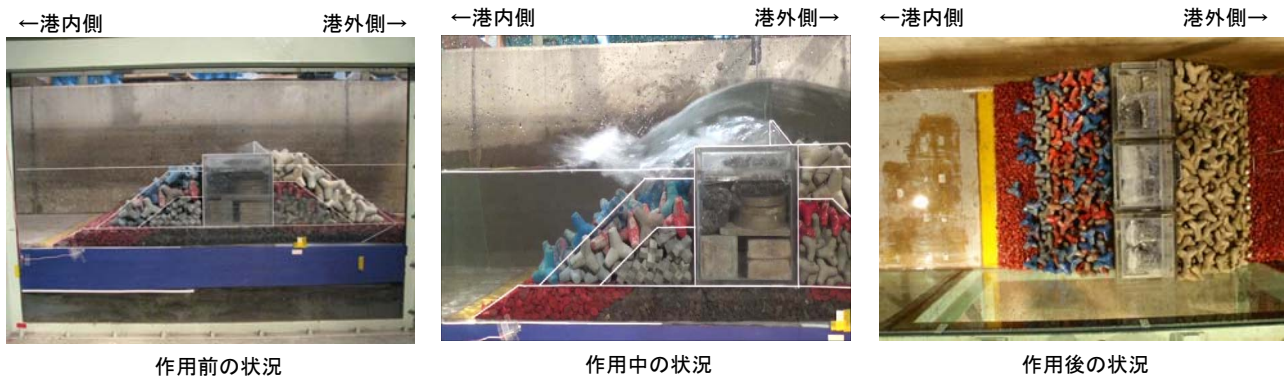


図-3.3 消波ブロック安定実験の実験写真

4. 静的引張実験の結果

4.1 静的引張実験ケース

静的引張実験の実験ケースは表-4.1に示す5ケースとし、実験断面の一例は図-4.1及び図-4.2に示すとおりである。なお、背面補強体を設置する4ケースの他に背面補強体なしの実験も実施している。

なお、港内側消波工の天端高を静水面と一致させると長周期波の反射波抑制効果が高めること、消波工の天端が低い方が、越波に対する安定性が高まることなどを考慮して実験ケースを設定しており、各断面における背面補強体の高さは互いに異なるが断面積が同じとなるように考慮している。

表-4.1 静的引張実験の実験ケース

番号	背面補強体形状	消波ブロック	摘要
①	なし	なし	実験装置の抵抗力を確認する【図-4.3 参照】
②	テトラポッド 40t 型 背面補強体高さ 10.00m 天端高 D.L.+0.14m	テトラポッド 40t 型	テトラポッド 40t 型の標準断面 【図-4.1, 図-4.4 参照】
③	テトラポッド 40t 型 直立部の 1/2 高さ(高さ 10.00m 対応) 天端高 D.L.-2.61m	テトラポッド 40t 型	背面補強体の断面積は②と同じ 【図-4.2, 図-4.5 参照】
④	テトラポッド 40t 型 背面補強体高さ 12.80m 天端高 D.L.+2.94m	テトラポッド 40t 型	背面補強体の高さは, 5.1 耐波滑动安定実験の六脚ブ ロック(A1.10 形)のケースと同じ 【図-4.6 参照】
⑤	テトラポッド 40t 型 直立部の 1/2 高さ(高さ 12.80m 対応) 天端高 D.L.-2.61m	テトラポッド 40t 型	背面補強体の断面積は④と同じ 【図-4.7 参照】

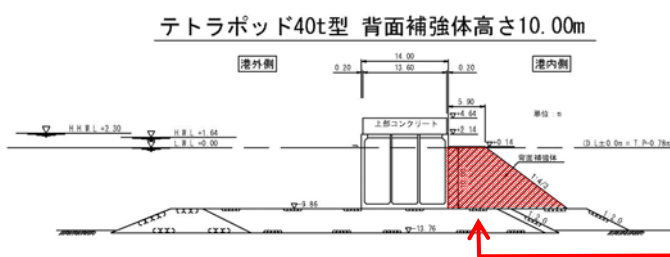


図-4.1 ケース②背面補強体形状

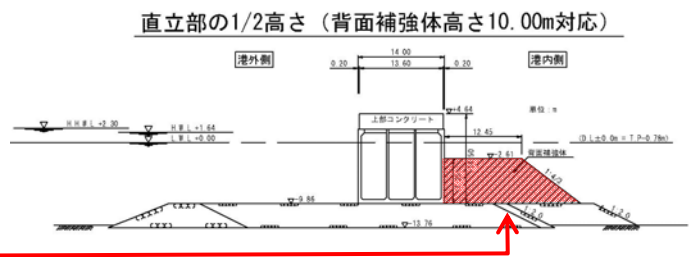


図-4.2 ケース③背面補強体形状

消波工の断面積を一致させる

4.2 静的引張実験の結果

(1) 既往研究との比較

三井ら¹は防波堤背後に設置する消波ブロックの滑动抵抗を, 静的引張実験で検討している. 実験方法は本実験での静的引張実験とほぼ同様であり, 模型縮尺が 1/50 であることも, 今回の実験と同じである. 三井らの報告では抵抗係数は動き出しの時点で 0.6 程度, 最大で 1.2 程度とされている.

三井らと同様に横軸に変位, 縦軸に抵抗係数のグラフを作成すると, 本実験の結果は, 図-4.3~図-4.7 のとおりである. 滑り出しの時点で 0.5 程度, 最大で 1.05 程度であるので三井らの研究より若干小さいが, ほぼ同様の結果であると言える.

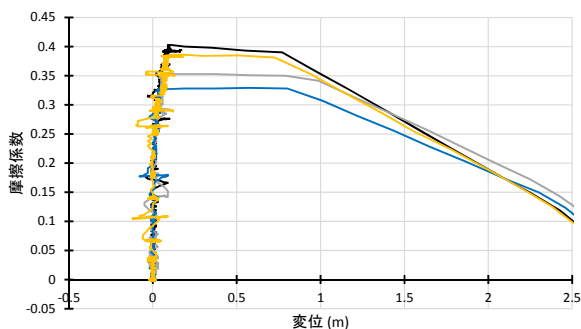


図-4.3 変位と摩擦係数 (ケース①)

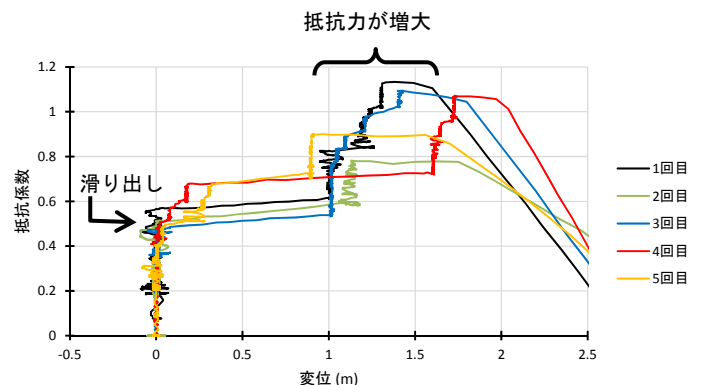


図-4.4 変位と抵抗係数 (ケース②)

1 三井順・丸山草平・松本朗・半沢稔: 津波に対する防波堤背後の消波ブロックの滑动抵抗の検討, 土木学会年次学術講演会, 2015 年

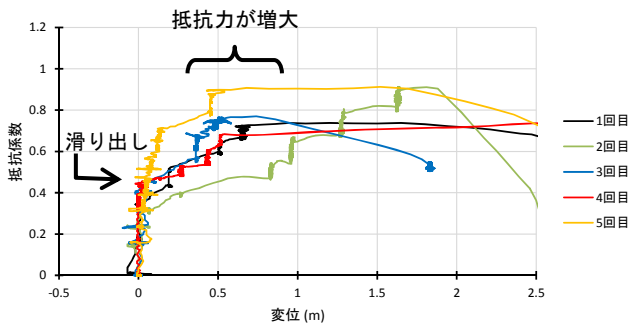


図-4.5 変位と抵抗係数 (ケース③)

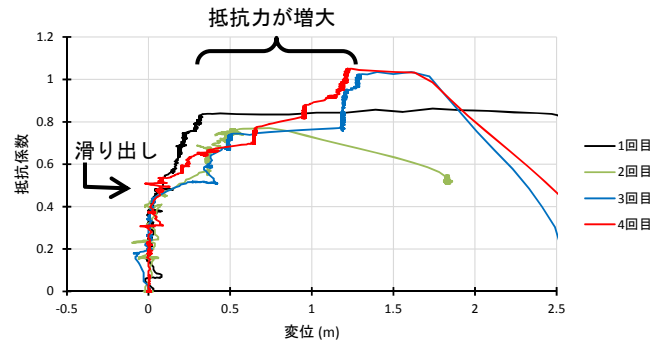


図-4.6 変位と抵抗係数 (ケース④)

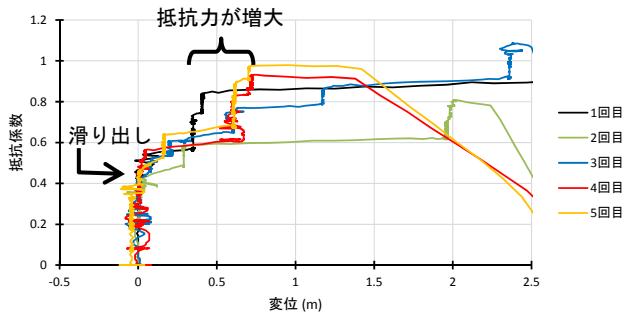


図-4.7 変位と抵抗係数 (ケース⑤)

(2) 背面補強体断面形状による補強効果の比較

背面補強体の最大抵抗係数は表-4.2 に示すとおりで、②が 1.01 程度で、③が 1.00 程度であり、両者の抵抗係数に差はない。ただし、④と⑤では、背面補強体の断面積が同じでも、背面補強体の高さが高く幅が狭い断面の抵抗係数がやや大きい。しかし、②と③の抵抗係数が④と⑤の抵抗係数より大きいので、③と④を比べると背面補強体の高さが高いほうが有利であるとは言えない。

このほか、天端幅、背面補強体の高さ、底面幅、背面補強体断面積などの条件と最大抵抗係数を見比べると、底面幅が最大抵抗係数と反比例の傾向であり、表-4.2 の最下段に示すとおり、最大抵抗係数の比と一致する乗数は $1/3$ 乗であった。

表-4.2 背面補強体断面形状による補強効果のまとめ

	②	③	④	⑤		
	背面補強体高さ 10.00m	直立部の 1/2高さ (高さ 10.00m 対応)	背面補強体 高さ 12.80m	直立部の 1/2高さ (高さ 12.80m 対応)	③/②	⑤/④
最大抵抗係数(平均値)	1.012	0.997	0.949	0.878	0.985	0.925
繰り返しの標準偏差	0.133	0.097	0.120	0.082		
天端幅(m)	5.9	12.45	5.9	20.56		
背面補強体高さ(m)	10	7.25	12.8	7.25		
斜面勾配	1:4/3	1:4/3	1:4/3	1:4/3	—	—
底面幅(m)	19.23	22.12	22.97	30.23		
背面補強体断面積(m ²)	125.7	125.3	184.7	184.1	0.997	0.997
最大抵抗係数の比	1.000	0.985	0.938	0.868		
底面幅の逆数の比	1.000	0.869	0.837	0.636		
底面幅の逆数の比 ^{1/3}	1.000	0.954	0.942	0.860		

5. 耐波滑動安定実験の結果

5.1 耐波滑動安定実験ケース

耐波滑動安定実験の実験ケースは表-5.1 に示す5ケースで、各2回の繰り返し実験を行う。なお、背面補強体を設置する4ケースの他に背面補強体なしの実験も実施した。波浪条件は表-5.2 のとおりである。

表-5.1 耐波滑動安定実験の実験ケース

ケース	背面補強体断面			潮位	周期	波高
	ブロック種類	大きさ	天端高			
ケース1	なし	なし	なし	H. H. W. L.	設計波周期	5段階
ケース2	テトラポッド	40t型	背面補強体高さ 10.00m [*]	H. H. W. L.	設計波周期	5段階
ケース3			直立部の1/2高さ (高さ 10.00m 対応)	H. H. W. L.	設計波周期	5段階
ケース4		25t型	-0.88m ^{**}	H. H. W. L.	設計波周期	5段階
ケース5	六脚ブロック	A1.10形	背面補強体高さ 12.80m [*]	H. H. W. L.	設計波周期	5段階

※背面補強体とマウンドの摩擦係数を0.6として設定された天端高である。

※※テトラポッド25t型の天端高は、背面補強体の断面積がテトラポッド40t型の設計天端高と同じになるように設定した。天端幅はテトラポッド40t型の5.90mを上回る最小の天端幅として、天端3個並びの8.00mを採用した。

表-5.2 耐波滑動安定実験の波浪・潮位条件

波高	ランク1	ランク2	ランク3	ランク4	ランク5
		7.7m	8.9m	10.1m	11.3m
周期	16.3s				
潮位	H. H. W. L. D. L. +2.30m				

※波高ランク1の7.7mは設計波の有義波高。波高ランク5の12.5mは設計波の最高波高。

波高ランク2から4は波高ランク1と波高ランク5を等分割で設定した。

5.2 耐波滑動安定実験の結果

背面補強体の抵抗係数の評価にあたっては4種類の方法（本報告では詳細を省略）で算定しているが、設計上で安全側の算定方法である『動き出し直前の波高ランクの波力を滑動限界波力とし、ケーソンとマウンドの摩擦係数は静的引張実験の結果を適用して、背面補強体の抵抗係数を求めた方法』を採用した。

この方法による背面補強体抵抗係数は、繰り返し実験の平均値として表-5.3 のとおりである。この結果を適用すれば、抵抗係数が六脚ブロックは0.6、テトラポッドが0.7を期待できるものの、実験ケースが限定的であるため、「既往の設計に適用している背面補強体の抵抗係数0.6が得られることを確認した」と評価する。

表-5.3 耐波滑動安定実験結果に基づく背面補強体の抵抗係数

ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
0.74	0.75	0.70	0.61

6. 消波ブロック安定実験の結果

6.1 消波ブロック安定実験ケース

消波ブロック安定実験の実験ケースは表-6.1 に示す4ケースで、不規則波1000波（3波群）を作用波浪、ブロック長さの1/2以上移動したブロックを被害ありとして、各断面の被害率及び被災度を評価したほか、被害の判定基準1/2以上に満たない軽微な変位について、微動率及び微動度として整理した。

表-6.1 消波ブロック安定実験の実験ケース

背面補強体断面			潮位	波高	周期	波群
ブロック種類	大きさ	天端高				
テトラポッド	40t 型	背面補強体高さ 10.00m	H. H. W. L.	30 年確率波高 $H_{1/3}=7.7\text{m}$	30 年確率波周期 $T_{1/3}=16.3\text{s}$	3 波群
		直立部の 1/2 高さ	H. H. W. L.			
六脚ブロック	A1.10 形	背面補強体高さ 12.80m	H. H. W. L.	30 年確率波高 $H_{1/3}=7.7\text{m}$	30 年確率波周期 $T_{1/3}=16.3\text{s}$	3 波群
テトラポッド 六脚ブロック	40t 型 A1.10 形	消波ブロック体積 が六脚ブロックと 同等となる高さ	H. H. W. L.	30 年確率波高 $H_{1/3}=7.7\text{m}$	30 年確率波周期 $T_{1/3}=16.3\text{s}$	3 波群

6.2 消波ブロック安定実験の結果

背面補強体の消波ブロックの被害率及び被災度を表-6.2 に示す。背面補強体の天端が高い断面では消波ブロックの移動を生じ、天端が低い断面では消波ブロックの移動を生じなかった。この結果から、背面補強体の天端が低い断面では、表層のブロックも含めて背面補強体の全体を補強体として取り扱うことができる。背面補強体の天端が高い断面では、移動を生じる範囲の消波ブロックの扱いについて留意する必要がある。

表-6.2 背面補強体の消波ブロックの被害率及び被災度

背後補強体断面			項目	波群1	波群2	波群3	波群平均
ブロック種類	大きさ	天端高					
テトラポッド	40t型	背面補強体高さ10.00m	被害率 (%)	0.6	0.6	0.0	0.4
			被災度 N_0	0.060	0.060	0.000	0.042
		直立部の1/2高さ	被害率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.0
			被災度 N_0	0.000	0.000	0.000	0.000
六脚ブロック	A1.10形	背面補強体高さ12.80m	被害率 (%)	10.5	4.7	1.3	5.6
			被災度 N_0	1.830	0.849	0.236	1.007
テトラポッド 六脚ブロック	40t型 A1.10形	消波ブロック体積が六脚ブロックと同等となる高さ	被害率 (%)	4.1	5.5	0.9	3.5
			被災度 N_0	0.536	0.715	0.119	0.459

※港外側消波ブロックで一般的に適用されている許容被害率は1%、許容被災度は0.3

ここに、被害率(%)=検査範囲の被害個数/同総個数

被災度 N_0 =検査範囲における単位ブロック幅当りの被害(被害率で表すと、ほぼ1%)



a) 波群1 (被害率 10.5%)



b) 波群2 (被害率 4.7%)



c) 波群3 (被害率 1.3%)

写真-6.1 波作用後の背面補強体の状況(六脚ブロック A1.10 形) ※写真左側が背面補強体