

下新川海岸における波力低減型海域制御構造物の 性能特性に関する研究

PERFORMANCE OF PERMEABLE WAVE-DISSIPATING STRUCTURE WITH
EFFECT OF DECREASING WAVE FORCE IN SHIMONIKAWA COAST

安野浩一朗¹・森屋陽一²・山本敦³・熊谷隆宏²・吉保範明⁴・奥井淳⁵
Koichirou ANNO, Yoichi MORIYA, Atsushi YAMAMOTO, Takahiro KUMAGAI,
Kenya Noriaki YOSHIHO and Jun OKUI

¹正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 五洋建設(株) 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

⁴正会員 五洋建設(株) 北陸支店 富山営業所 (〒934-0024 富山県射水市越の潟町820-1)

⁵北陸地方整備局 黒部河川事務所 (〒938-0042 富山県黒部市天神新173)

We have developed an offshore permeable structure, which effectively dissipates sea waves by using S-VHS construction method. Its performance has been verified under usual wave conditions.

In this paper, the performances of the S-VHS structure on both scour reduction and wave dissipation under steep bed-slope conditions are verified through hydraulic experiments. In addition, it is also verified that those performances are realized even in case that wear allowance is considered. Finally, we have realized that S-VHS construction method has well economical efficiency in comparison with the VHS construction method.

*Key Words : Hydraulic experiment, sloping top caisson, slit caisson, MMZ,
S-VHS construction method*

1. はじめに

1986年以降, 旧建設省によるMMZ(Marine Multi Zone)¹⁾計画を契機に多くの海域制御構造物が開発され, 実海域に適用されている。MMZ計画による構造物は, 沿岸漂砂制御や静穏海域の確保といった国土保全機能に加え, 沿岸域の水産や環境保全等に資するという観点から透過性の消波構造物であり, 一定の水理性能を有することが要求されている。要求される水理性能は, 対象海域のエネルギー平均波に対して反射率0.5以下, 透過率0.6以下となっている。

富山県下新川海岸では, VHS工法による海域制御構造物が既に建設されている。VHS工法は, 平成20年2月に富山県を襲った寄り回り波による高波災害においても優れた消波性能を発揮するとともに, 背後施設に減災効果をもたらした²⁾。

これまで筆者ら³⁾⁴⁾⁵⁾は, 上記の消波性能を維持しつつ, 上部斜面構造を採用し波力を低減することで, さらなるコスト削減を可能とする波力低減型海域制御構造物(S-VHS工法)を提案し, その優位性につ

いて検討を行ってきた(図-1, 図-2)。しかし, 下新川海岸に見られるような急峻な海底勾配に対するS-VHS工法の洗掘特性や, 供用開始後の機能維持性能に関してはこれまで十分には確認されていなかった。

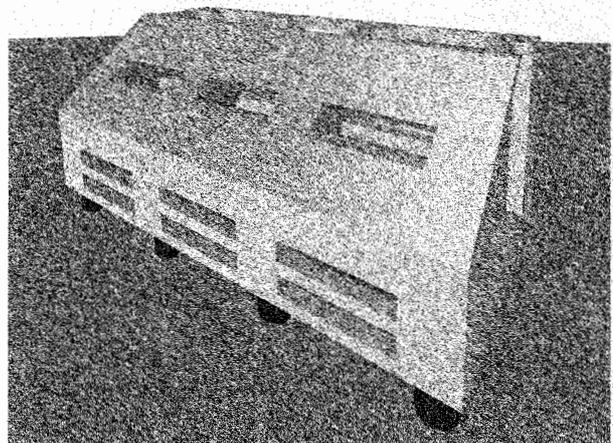


図-1 波力低減型海域制御構造物

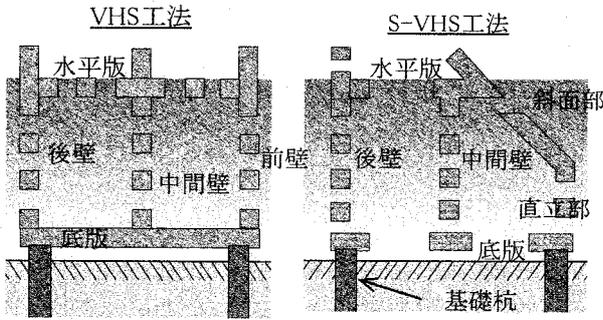


図-2 標準断面図

本研究では、急勾配の二次元移動床実験により、S-VHS工法の堤体周辺の洗掘特性を確認するとともに、洗掘深毎の消波性能を確認した。また、供用開始後にスリット壁へ付着する生物や、設計時に磨耗しろを付加した場合における消波性能の変化についても検討を行った。

2. 水理模型実験

(1) 移動床実験の概要

3つの堤体構造を対象に、断面水槽（長さ50m×高さ1.2m×幅0.6m）を使用した実験模型縮尺1/30の移動床実験を行った。実験に用いた模型構造の正面図を図-3に、各部材の開口率を表-1に示す。図-3中の各構造は、富山県下新川海岸における設計条件を用いて概略設計を行った結果である。VHS工法とは既設の構造形式、S-VHS工法（基本型）とはこれまでに筆者らが提案した形式、S-VHS工法（張出型）とはS-VHS工法（基本型）と同じ開口率の構成であるが、基礎杭の間隔が広い下部構造の形式である。

S-VHS工法（張出型）を導入した経緯は、堤体の両側壁を張り出した形状とすることで、隣接する函体同士の隙間を広げずに、基礎杭同士の間隔を大きくとることが可能であることや、隣接函同士の張り出し部により新たなスリットを構築させて、消波性能を高めることが可能であるためである。なお本実験は、図-3に示すように2函を設置した状態で行っている。

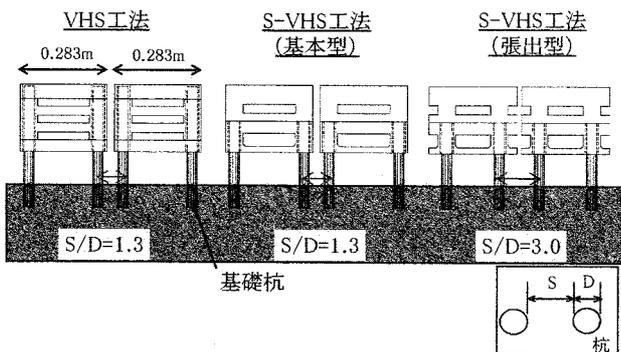


図-3 各構造形式の正面図

表-1 各部材の開口率一覧

諸元	開口率		
	VHS工法	S-VHS工法 (基本型)	S-VHS工法 (張出型)
前壁	25%	斜面部15% 直立部25%	
水平版	15%	30%	
中間壁	25%	25%	
後壁	25%	35%	
底版	0%	30%	
堤体幅	0.333m		
堤体高	0.224m		
堤体長 (1函当り)	0.283m (実験では2函設置)		
杭間隔 (S/D)	1.3	3.0	

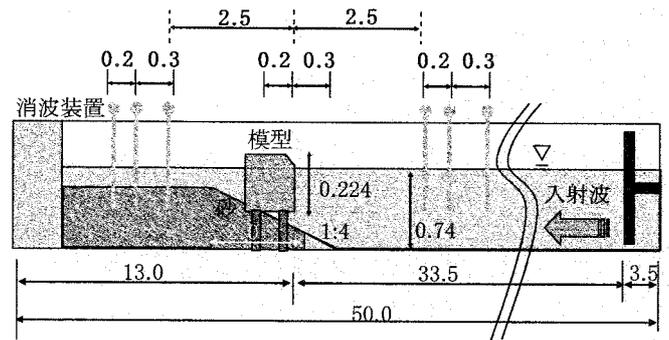


図-4 実験断面図

単位 (m)

表-2 実験ケース

模型	縮尺	実験室スケール					摘要
		潮位 水深 砂	勾配	波高 (m)	周期 (s)	波形 勾配	
VHS工法	1/30	HHWL	1/4	0.066	2.54	0.018	エネルギー 平均波相当
S-VHS工法 (基本型)		6号ケイ 砂		0.100		0.027	
S-VHS工法 (張出型)		D_{50} 0.15mm		0.190		0.062	設計波

図-4に移動床実験の実験断面図を、表-2に実験ケースをそれぞれ示す。また、本実験は不規則波の条件にて行っている。なお、下新川海岸の現地の底質は、平均φ40mm程度のレキ混じり砂である。

実験時の計測は、①レーザー式砂面計を用いた造波開始前および造波終了後の砂面高計測による洗掘状況や洗掘体積の把握、②実験途中の各時刻における水槽ガラス面の砂面高測量による洗掘断面の経時変化の把握、③あらかじめ杭に設置した目盛を讀取った杭周りの最大洗掘深と讀取時間、ならびに模型前後に設置した水位計による水位の計測値を用いての最大洗掘深の増加に伴う透過率、反射率の変化の把握、について行った。なお、透過率、反射率は合田の入反射分離推定法⁶⁾により評価した。

(2) 生物付着・磨耗しろを付加した実験の概要

S-VHS工法（張出型）の構造を対象に、供用開始後に生物が付着、あらかじめ磨耗しろを加えた場合に消波性能へ与える影響を確認する実験を行った。実験断面は、**図-4**における砂を設置した部分に板を被せた固定床の状態にて行った。

実験に先駆け、2009年8月に既に建設されているVHS工法の生物付着厚を潜水調査にて計測した。**図-5**に全体平面を、**図-6**に潜水調査位置の模式図および生物付着計測状況、ならびに**表-3**に生物付着厚の計測結果を示す。なお、調査時における1号堤は建設から約7年、3号堤は約5年が経過している。

調査結果から、VHS工法の生物付着厚は以下の傾向を示すことが得られた。

計測番号毎に付着厚を比較すると、経過年数が異なる1号堤と3号堤とでは差が殆ど生じていない。水面付近の上部スリット（①～④）周りの付着が全体的に目立つ傾向を示しており、最大で100mm（現地スケール）、平均で65mmとなっている。一方、底面付近のスリット（⑤～⑧）周りは、付着が少なく、最大でも40mm、平均で20mm弱となっている。その他、調査時においては、スリット周辺が磨耗した様子は全く見られなかった。

以上から、実験時に設定する生物の付着厚は、現地での潜水調査の結果を参考にして、上部スリット周りは70mm（現地スケール）、下部スリット周りは20mmとそれぞれ決定することとした。**図-7**に生物付着厚の設定値を示す。

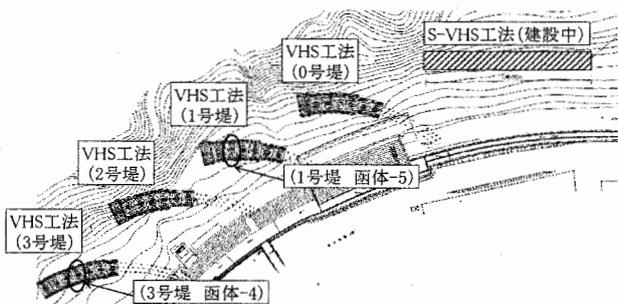


図-5 全体平面図

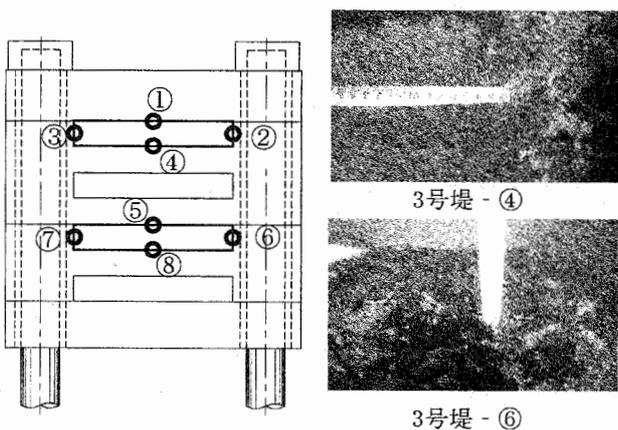


図-6 潜水調査位置の模式図および生物付着計測状況

表-3 生物付着厚の計測結果

T.P.-0.5m付近						
函体No.	生物付着厚(mm)					平均
	①	②	③	④		
1号堤 函体-5	10	50	100	100	65	65.0
3号堤 函体-4	20	50	90	100	65	
T.P.-3.5m付近						
函体No.	生物付着厚(mm)					平均
	⑤	⑥	⑦	⑧		
1号堤 函体-5	30	10	20	0	15	17.5
3号堤 函体-4	40	20	20	0	20	

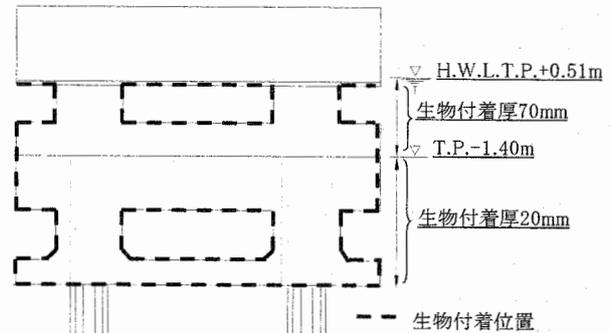


図-7 生物付着厚の設定値(正面図)

建設後に想定されるスリット周辺の磨耗に対しては、スリット外周部にコンクリートの余厚を別途考慮する方針をとることとした。実験は、生物付着と付加する磨耗しろの厚さを変化させたパターンについて実施し、得られた知見を実設計に反映することとした。

本実験では、以下の3つのパターンについて実験を実施した。

- A. 当初の状態(磨耗しろなし+生物付着なし)
- B. 磨耗しろ50mmを付加+生物付着あり
- C. 磨耗しろ100mmを付加+生物付着あり

なお、実験における生物付着厚や磨耗しろは、模擬したプレートを別途模型に設置することで再現した。**図-8**にプレートの設置状況例を示す。

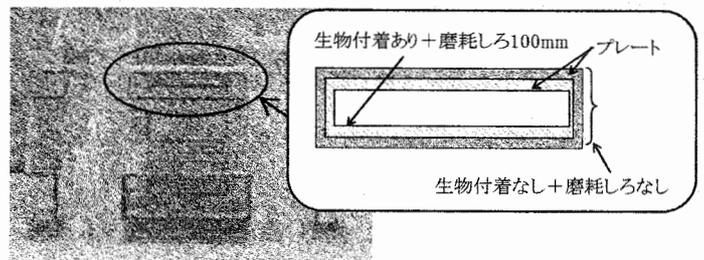


図-8 模型状況例（生物付着あり+磨耗しろ100mm考慮）

3. 水理模型実験の結果

(1) 洗掘状況の経時変化

各構造形式を対象とした洗掘実験により、それぞれの洗掘特性について検討を行った。実験において

は、まず、水槽ガラス面側の洗掘形状の経時変化の測量結果を用いて、洗掘形状の安定化が得られるまでの造波時間に関する確認を行った。図-9および図-10に砂面形状の経時変化例を示す。なお、図中には、構造物の無い場合における完全移動の移動限界水深を合わせて表記している。

有義波高0.066mのケースにおける砂面高の経時変化は、造波から6時間が経過した時点においても、堤体背面側において継続的な変化が見られる傾向があるが、堤体付近は概ね安定する傾向を示している。一方、有義波高0.190mのケースにおいては、造波開始に伴い、急速に砂面高が変化している。造波から1時間経過した時点で、杭周辺の砂面高は0.25mまで及んでいる。図には示していないが、その後も砂面形状は安定せず、砂の移動が継続的であった。

これらの傾向を踏まえ、各実験ケースの造波時間は、有義波高0.066mのケースで6時間、有義波高0.190mで1時間として、以降の構造形式毎の洗掘特性の比較を行うこととした。なお、参考までに示すと、堤体中央の水深を用いて算出したシールズ数は、有義波高0.066mのケースで0.14、0.190mのケースで0.46程度である。

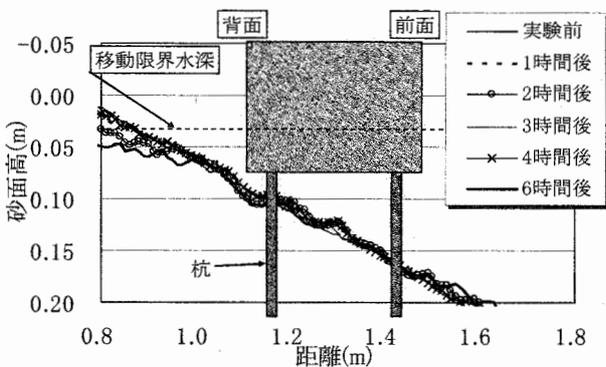


図-9 砂面形状の経時変化例(S-VHS工法(張出型))
($H_{1/3}=0.066\text{m}, T_{1/3}=2.54\text{s}$)

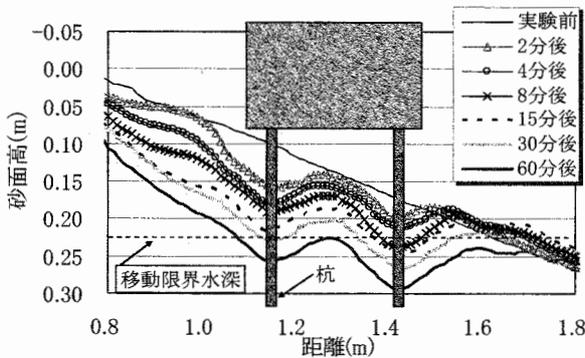


図-10 砂面形状の経時変化例(S-VHS工法(基本型))
($H_{1/3}=0.190\text{m}, T_{1/3}=2.54\text{s}$)

(2) 構造形式毎の洗掘状況の比較

次に、同じ造波時間を作用させた後に砂面計により砂面高を計測した結果を用いて、構造形式毎に比

較した。図-11および図-12に砂面状態の比較結果例を示す。なお、図-11および図-12に示す砂面高は、模型中央の杭周りにおける計測結果を示している。

有義波高0.066mのケースでは、全ての構造形式において背面側の杭周辺で顕著な洗掘が見られる。洗掘深はVHS工法が最も大きく、次いでS-VHS工法(基本型)、最も洗掘深が浅いのがS-VHS工法(張出型)となっている。一方の前面側の杭周辺においては、どの構造形式についてもほぼ同じ洗掘深となっており、明確な差は見られない。

設計波相当の有義波高0.190mのケースについても同様に、S-VHS工法(張出型)の構造形式が最も洗掘深が小さくなる傾向であり、構造形式による差はさらに顕著に見られている。

VHS工法よりも、2つのS-VHS工法の方が優れた洗掘特性を持つ要因は、底版を有孔化したことで底面付近の流速が低減されるためである。また、S-VHS工法(張出型)の洗掘量がさらに緩和されるのは、Sumer⁷⁾らの研究成果と同様に、杭間隔が広がったことによる影響である。

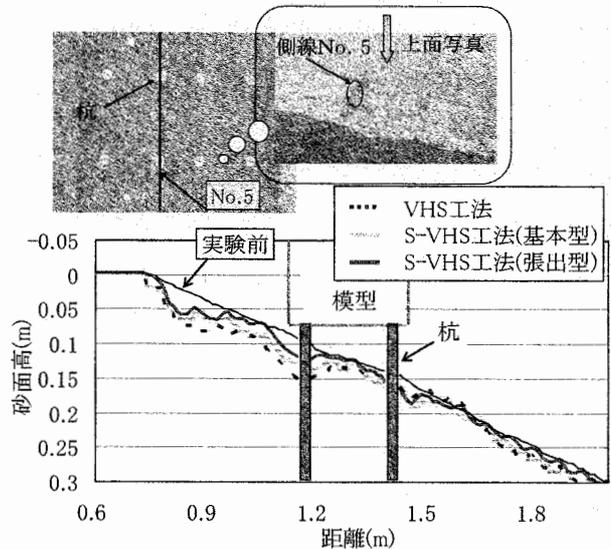


図-11 砂面形状の比較(側線No.5)
($H_{1/3}=0.066\text{m}, T_{1/3}=2.54\text{s}$, 6時間後)

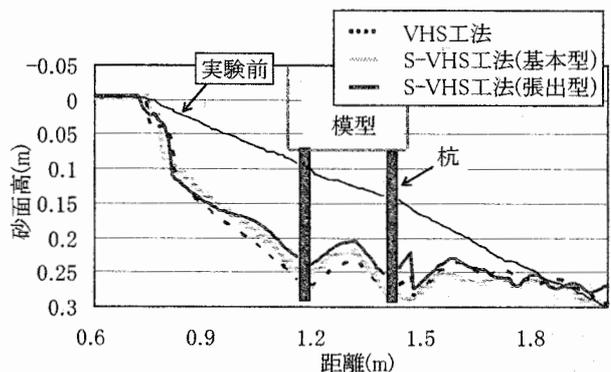


図-12 砂面形状の比較(側線No.5)
($H_{1/3}=0.190\text{m}, T_{1/3}=2.54\text{s}$, 1時間後)

(3) 構造形式毎の最大洗掘深・洗掘体積の比較

堤体周辺の最大洗掘深・洗掘体積を整理した結果を図-13および図-14に示す。なお、洗掘深の最大値および体積は、堤体前後0.2mの範囲を対象として整理した結果である。

図-13および図-14から、最大、平均洗掘深、洗掘体積はいずれも、S-VHS工法（張出型）のタイプが最も小さくなる傾向を示している。特に設計波相当である有義波高0.190mのケースで顕著な差を示している。

本実験の結果、海底勾配が急峻な場合においても、S-VHS工法はVHS工法よりも優れた洗掘特性を有するとともに、張出型とすることで洗掘量をさらに緩和可能であると考えられる。

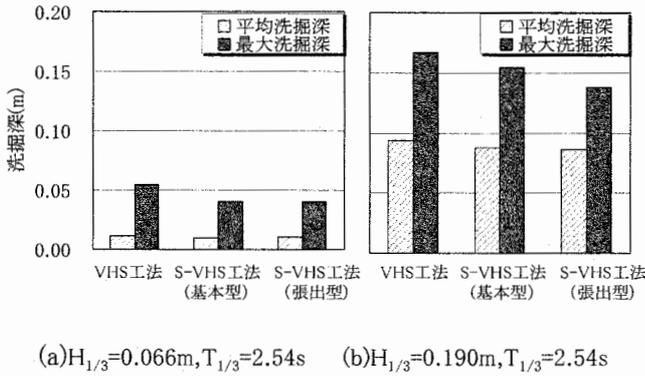


図-13 最大・平均洗掘深の比較

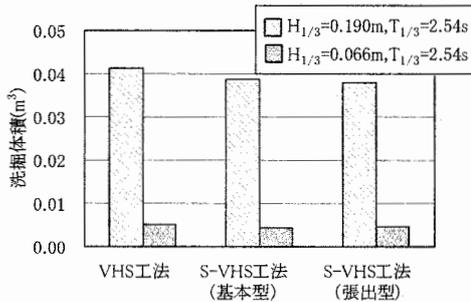


図-14 洗掘体積の比較

(4) 最大洗掘深の変化に伴う消波性能の変化

S-VHS工法（張出型）を対象に、洗掘状況の違いによる消波性能の変化を確認した。実験では、4本の杭に設置した目盛の読取値の最大値を最大洗掘深と定義し、読取前後の水位計の計測値を用いて透過率、反射率を算出した。図-15に消波性能と最大洗掘深を示す。

図-15より、反射率については洗掘深の増加にしたがって低下する傾向を示している。一方、透過率については、地盤と底版のクリアランスが大きくなるため、最大洗掘深の増加に伴ってわずかに上昇する傾向を示している。洗掘深の変化による透過率の増加傾向は極めて小さく、 l/D が1.0以下（現地ス

ケールで最大洗掘深1.0m）の範囲内では、どの波浪条件に対しても0.6以下を概ね維持する結果を示している。その要因は、S-VHS工法は上部斜面上で波を消波する機能が全体の性能へ大きく寄与しているため、堤体直下の隙間が大きくなった時に与える消波性能への影響が比較的小さいからである。

本実験の結果、杭周りが0.06m（現地スケールで1.8m）程度まで洗掘された場合においても、透過率は0.62程度までしか増加しない結果を示しているため、杭周りの洗掘の発生が透過率へ与える影響は小さいものと考えられる。

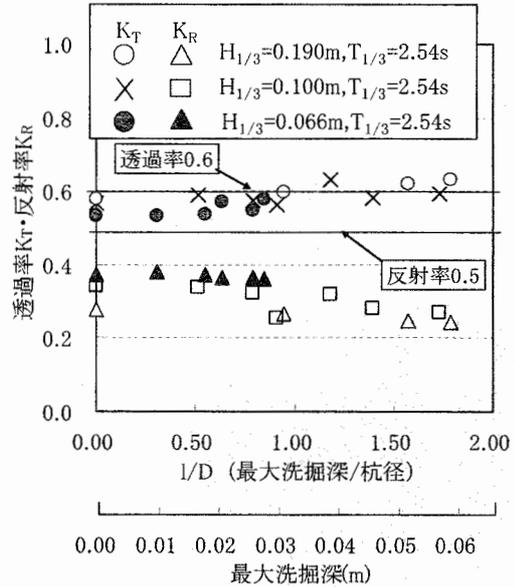


図-15 消波性能と最大洗掘深

(5) 生物付着・磨耗しろを付加した場合の消波性能

S-VHS工法（張出型）を対象に、生物付着や磨耗しろを加えたことによりスリットの開口率が低下した場合に、消波性能へ与える影響を確認する実験を行った。図-16に生物付着・磨耗しろの状態と消波性能の比較結果を示す。

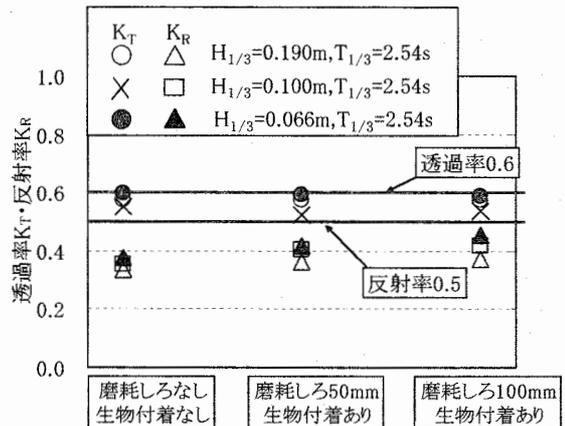


図-16 実験結果（生物付着・磨耗しろを加えた場合）

図-16より、透過率については、すべての波浪条件下において、生物付着や磨耗しろを加えた場合においても殆ど変化しない結果を示した。

反射率については、付加する磨耗しろが厚くなるにつれて、スリットの開口率が低下するため、増加する傾向を示している。しかしながら、増加後の反射率は依然として0.5以下を維持しており、要求される消波性能を十分に満足している。

本実験の結果、S-VHS工法（張出型）は建設後に想定される生物付着量やスリット周辺の磨耗しろをあらかじめ付加した設計を行ったとしても、十分な消波性能を発揮することが可能であると考えられる。

4. 経済性の評価

本実験に用いた3つの構造形式の経済性について概略検討を行った。検討結果を表-4に示す。なお、各工種の数値は、施工延長を100mとした場合のVHS工法に対する直接工事比率で示している。

表-4 工事比率の比較

工種	VHS工法	S-VHS工法 (基本型)	S-VHS工法 (張出型)
函体製作工	1.00	0.97	0.98
基礎杭 製作工		0.91	0.89
基礎杭 打設工		1.00	0.99
杭頭処理工		1.05	1.05
総価格	1.00	0.90	0.88

表-4から、S-VHS工法（基本型）およびS-VHS工法（張出型）は、いずれもVHS工法よりも総価格の比率が1.0以下となり、コスト縮減効果が得られる結果を示している。その要因としては、S-VHS工法は斜面構造であるため、堤体へ作用する波力の低減が可能となり、基礎杭の製作工において大きなコスト縮減を果たすことができるからである。また、函体製作工においても、堤体の軽量化による若干のコスト縮減を果たしている。

S-VHS工法（基本型）とS-VHS工法（張出型）の経済性については殆ど差が生じていないが、S-VHS工法（張出型）の方が総価格は2%縮減できる結果を示している。S-VHS工法（張出型）は函体側面を張り出すことで函体製作工のコストがやや大きくなるものの、杭間隔を広くしたことで、支持力設計時に群杭による支持力の低下などを回避でき、杭構造のスリム化が可能となったことが若干のコストダウンにつながっていると考えられる。

S-VHS工法の杭頭処理工については、斜面部に杭が設置されるために、杭を切断するなどの費用が別途必要となりややコスト高となっている。

以上から、2つのS-VHS工法は共に、VHS工法よりも十分なコスト削減効果が得られることがわかった。

5. 結論

- (1) 二次元移動床実験における、実験後の砂面高の分布は、S-VHS工法で杭間隔が広い構造タイプ（S-VHS工法（張出型））が全体的に最も洗掘深、洗掘体積が小さくなる傾向を示している。特に背面側の杭周辺において、堤体構造の違いによる洗掘深の違いが顕著に現れている。
- (2) S-VHS工法（張出型）は、供用開始後の生物付着やスリットへの磨耗しろを付加する設計方針の採用により、スリット壁の開口率に多少の変動が生じたとしても消波性能への影響は殆どなく、透過率0.6以下、かつ反射率0.5以下を満たしている。
- (3) S-VHS工法（張出型）は、杭周りの最大洗掘深0.066m（現地スケール2.0m）程度の範囲内においては消波性能へ与える影響が少ない。
- (4) S-VHS工法は、VHS工法と同等に消波性能の要求性能を満足しつつ、コスト低減を図れるとともに、洗掘深も低減・緩和できる構造物であることを確認した。
- (5) 下新川海岸に見られるような急峻な海底勾配にS-VHS工法を適用した場合について、供用開始後の堤体周辺の洗掘特性ならびに機能維持に関する知見が得られた。

参考文献

- 1) 宇多高明:海洋利用空間の創成・保全技術の開発-MM Z構想-, 土木学会誌, Vol.76, No.6, pp18-19, 1991.
- 2) 西川一, 渡邊正一: 全国初の有脚式突堤の整備と効果について, 河川, 2009-3月号, pp55-59.
- 3) 西畑剛, 安野浩一朗, 下村直己, 山本敦, 羽田宏, 関本恒浩: 波力低減型海域制御構造物の開発, 海洋開発論文集, 第24巻, pp525-530, 2008.
- 4) 安野浩一朗, 西畑剛, 関本恒浩, 高橋研也, 羽田宏, 山本敦: 波力低減型海域制御構造物の高波浪時消波性能に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第25巻, pp605-610, 2009.
- 5) 高橋研也, 安野浩一朗, 西畑剛, 関本恒浩: 3次元数値波動水槽を用いた波力低減型海域制御構造物に関する数値実験, 海岸工学論文集, 第56巻, pp756-760, 2009.
- 6) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊地治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, pp.1-24, Dec. 1991.
- 7) B.M.Sumer, J.Fredsoe: Wave Scour Around Group OF Vertical Piles, Journal of waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering/September/October 1998. pp248-256.