

波力低減型海域制御構造物の開発

DEVELOPMENT ON OFFSHORE STRUCTURE WITH WAVE FORCE REDUCTION

西畑 剛¹・安野浩一朗²・下村直己³・山本 敦⁴・羽田 宏⁴・関本恒浩⁵
Takeshi NISHIHATA, Kouichiro ANNO, Naoki SHIMOMURA, Atsushi YAMAMOTO,
Hiroshi HANEDA and Tsunehiro SEKIMOTO

¹正会員 修（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）

²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）

³非会員 修（工） 五洋建設（株） 本社土木部門土木設計部（〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8）

⁴正会員 五洋建設（株） 本社土木部門土木設計部（〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8）

⁵フェロー 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）

Authors have developed the offshore structure for control of sea environment named S-VHS construction method, which is composed of the sloping top slit-type caisson and steel pipe piles. The sloping top form enables to realize the remarkable reduction of wave force exerted on the dike body compared with the conventional one.

In this paper, hydraulic feature with wave dissipation ability and wave force reduction effect are verified through some hydraulic experiments. After the preliminary study for the valid structure form, reflection and transmission ability for the selected structure models were tested with the hydraulic experiment relevant to the ratio of caisson width and wave length. Finally, wave force experiment was executed and it revealed the performance of wave force reduction. Based on the results, we proposed specific design wave force formula for S-VHS construction method.

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

1. はじめに

1986年以降，旧建設省によるMMZ(Marine Multi Zone)計画を契機に多くの新型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（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）．

透過水平版付スリットケーソン型構造物（以下VHS工法）はMMZ計画の一環として開発された鉛直および水平方向のスリット壁からなる構造物である（図-1）．この構造では前面スリット壁に加わる波力が比較的に大きいと各部材断面が増大し，コストが割高となる課題があった．そこで著者らは有脚式VHS構造物の前面を上部斜面堤として波力を大幅に低減することによって部材断面の縮小を図り，同時に規定の水理性能も満たす新型海域制御構造物（以下S-VHS工法）を開発した（図-2）．

本研究では，2次元水槽を用いた複数の水理模型実験によってS-VHS工法の水理性能および波力低減効果を検証する．そして設計波力評価式を提案することを目的とする．

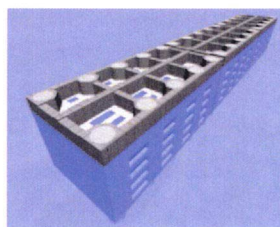


図-1 VHS 工法（従来型）

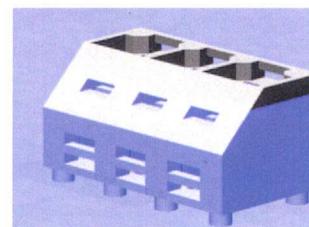


図-2 S-VHS 工法

2. 構造形式の選定

水理模型実験によって詳細な水理性能および波力低減効果を検証する前に，実験対象とするS-VHS工法の構造形式の選定を行った．選定手法は以下に述べる数値解析と予備実験からなり，ここで上部斜面の相対規模，有効なスリット位置，水平版・底版の必要性を検討する．

(1) 数値解析の実施

はじめに上部斜面の相対高を決定するため、数値波動水路による数値解析を実施した。表-1 に解析条件を示す。ここでパラメータ $h1/h$ は図-3 に示す通り上部斜面高天端高比である。

$h1/h$ に対する波力低減効果（前面を直立壁として計算した合田波力に対する低減率）を図-4 に示す。 $h1/h$ が大きい程、波力低減効果が高いことがわかる。但し、構造的には前面に配置される杭と函体との接合代を考慮すると $h1$ をあまり大きくはできないと判断し、斜面傾斜角 45° かつ $h1/h=0.5$ を S-VHS 工法の構造形式として採用することとした。

なお、数値解析上の反射率 Kr ・透過率 Kt はともに要求性能内 ($Kr \leq 0.5, Kt \leq 0.6$) に収まったが、解析条件に応じて変化すると考えられるので、詳細は次項に述べる予備実験を通して検証した。

表-1 数値波動水路解析条件

$h1/h$	0.25, 0.50, 0.75			
入射波高	1m	3m	5m	
周期	6s, 9s, 12s	9s	12s	
ポーラス設定	$Cd=1.0, C_M=2.0$			

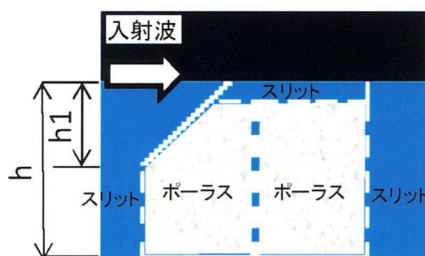


図-3 数値波動水路解析構造

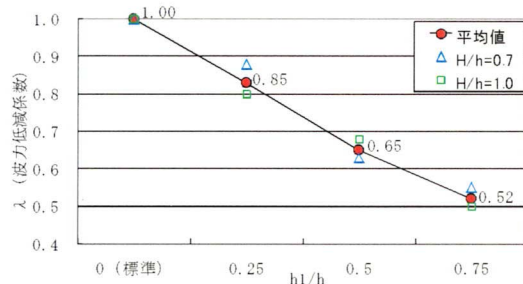


図-4 数値解析による波力低減効果

(2) 予備実験による検討

予備実験では以下の部材の必要性を検証した。

- ①底版の有無
- ②水平スリット版の有無
- ③斜面スリットの有無
- ④後壁上部スリットの有無

図-5 に各部材対応箇所を示す。①～④の順に部材断面を縮小する方向に反射性能、透過性能を検証した。また S-VHS 工法は有脚式で底面にクリアランスを設けた構造を想定するため、天端高クリアランス比も 2 種類 ($h2/h=0.05, 0.2$) 検討した。

ス比も 2 種類 ($h2/h=0.05, 0.2$) 検討した。

なお実験模型および計測結果処理方法等は本実験（水理性能検証実験（図-6））と同様であり、詳細は次章を参照されたい。予備実験は表-4 に示す本実験検討ケースのうち、波高 4cm の波浪条件を中心にケース数を限定して実施した。

①：従来型 VHS 工法で作用波力が小さい部材であった底版を無くした場合、反射率は微減、透過率は微増する。さらに②：従来型 VHS 工法で衝撃波力（揚圧力）が作用した、水平スリット版を無くした場合、反射率は微減、透過率は微増となった。但し、いずれの場合も本構造では反射率が規定値を越えていたため、③：斜面スリットを設けたところ、反射率・透過率ともに堤体幅を調整することにより規定範囲に収まる見込みとなった。最後に④：後壁上部スリットを設けた場合、反射率・透過率とも殆ど変化しなかった。なお④は越波時に後壁に作用する衝撃波圧を緩和することを期待して設定した。表-2 に各部材の有無による反射率、透過率の変化を示す。

以上の検討から、①、②の部材を省略し、③、④を導入した形状を S-VHS 工法の基本形として、水理性能検証実験および波力算定実験を実施する。表-3 に採用した堤体構造の開口率を示す。

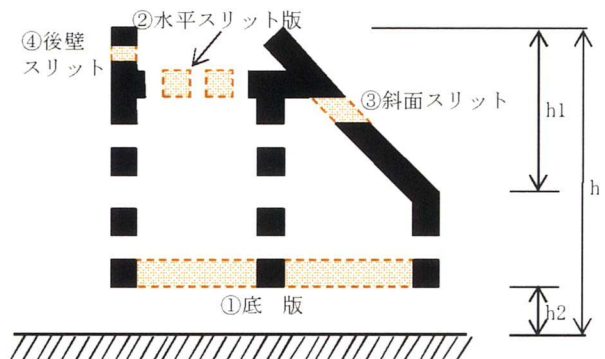


図-5 検討部材

表-2 各部材による反射性能、透過性能への影響

変更する部材	反射率	透過率
①底版の除去	微減	微増
①+②水平スリット版除去	微減	微増
①,②+③斜面スリット追加	減少	微増
①,②,③+④後壁スリット追加	変化無	変化無

表-3 S-VHS 工法堤体開口率 * () 内は従来型 VHS 工法

前壁	斜面部 15%, 直立部 25%(15-35%)
底版	30% (0%)
水平版	30% (10-30%)
後壁	35% (15-35%)

3. 水理性能検証実験

水理性能検証実験は 50m の断面水槽を使用し、実験模型縮尺は 1/25 としてフルードの相似則を適用している（図-6）。表-4 に実験条件と検討ケース

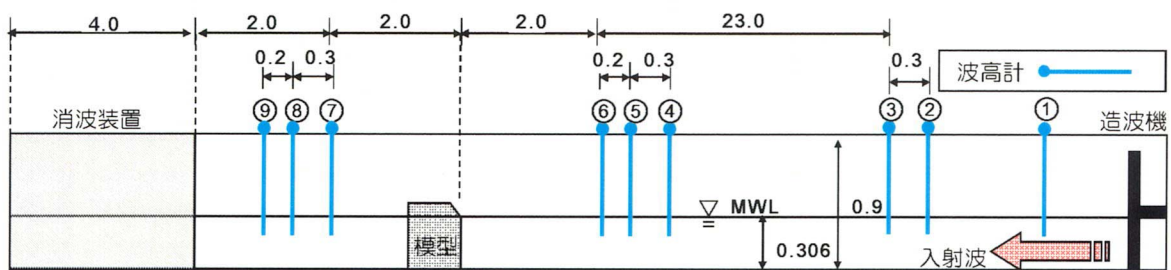


図-6 水理性能検証実験概要

表-4 実験条件と検討ケース

縮尺・海底勾配	1/25・一様水深
構造形式	$B/h=1.04, 1.18$; $h2/h=0.05, 0.2$
堤前潮位(cm)	MWL(30.6)
入射波	不規則波(波高 12cm のみ規則波)
有義波高(cm)	4, 8, 12
有義周期(s)	1.0, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8

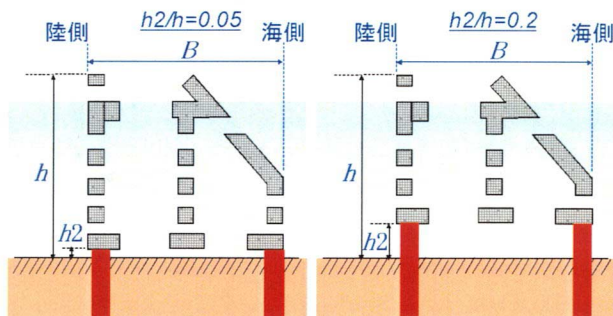


図-7 模型構造形式($B=38\text{cm}, 43\text{cm}$ の 2 種類)

を示す。ここで潮位は MWL とし、入射波は不規則波を基本に高波浪のみ規則波とした。波浪条件は静岡県富士海岸における実海域平均波浪条件にフルードの相似則を適用した。

本実験を行う模型構造形式は、予備実験結果を参考に決定した。選定した模型形式は堤体幅天端高比 B/h を 2 種 (1.04, 1.18; 模型堤体幅 $B=38\text{cm}, 43\text{cm}$)、底面クリアランス天端高比 $h2/h$ を 2 種 (0.05, 0.2) の 4 形式である (図-7)。

実験は不規則波に対しては 400 波以上、規則波は 20 波以上に渡って計測した。そして、模型前後に配置した④～⑥および⑦～⑨の容量式波高計 (20Hz) 計測水位から合田による入・反射波分離¹⁾を行い、反射率と透過率を算出した。図-8 に算出した反射率・透過率を構造形式別に示す。

MMZ 構造物は、堤体幅 B と消波対象波波長 L の比 B/L に対し、消波性能が規定される。本実験において $h2/h=0.2$ のケースでは、 $B/L=0.14$ 以上、 $h2/h=0.05$ のケースでは、 $B/L=0.1$ 以上で規定の反射率、透過率を満たすことがわかる。現地海岸への適用に際しては、消波対象波浪条件から必要な堤体幅・コストを算出し、有利な構造形式を選択可能となることが期待される。

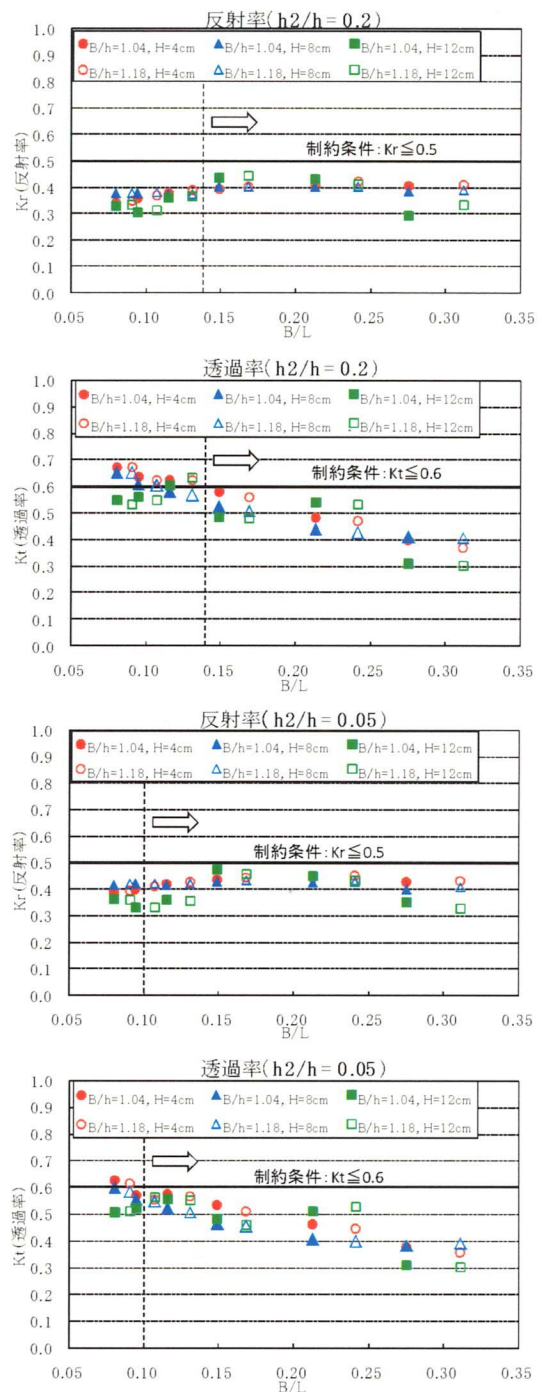


図-8 反射率・透過率の算定結果

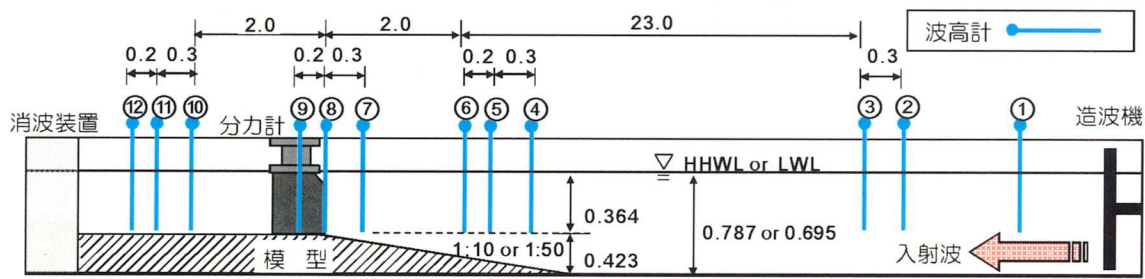


図-9 波力実験概要

表-5 実験条件

縮尺・海底勾配	1/25・勾配 1/10, 1/50
構造形式	$B=38\text{cm}$; $h_2/h=0.05, 0.2$
堤前潮位(cm)	HHWL(78.7): ケース 1-36, LWL(69.5): ケース 37-44
入射波	規則波

表-6 検討ケース (HHWL, 一部 LWL)

No	波高 (cm)	周期 (s)	No	波高 (cm)	周期 (s)	No	波高 (cm)	周期 (s)	No	波高 (cm)	周期 (s)
1	18.0	1.8	12	25.0	2.0	23	30.0	2.4	34	45.0	2.4
2	18.0	2.0	13	25.0	2.4	24	30.0	2.8	35	45.0	2.8
3	18.0	2.4	14	25.0	2.8	25	30.0	3.2	36	45.0	3.2
4	18.0	2.8	15	25.0	3.2	26	35.0	1.8	(以下LWL)		
5	18.0	3.2	16	27.5	1.8	27	35.0	2.0	37	35.0	2.8
6	23.0	1.8	17	27.5	2.0	28	35.0	2.4	38	35.0	3.2
7	23.0	2.0	18	27.5	2.4	29	35.0	2.8	39	40.0	2.4
8	23.0	2.4	19	27.5	2.8	30	35.0	3.2	40	40.0	2.8
9	23.0	2.8	20	27.5	3.2	31	40.0	2.4	41	45.0	2.4
10	23.0	3.2	21	30.0	1.8	32	40.0	2.8	42	45.0	2.8
11	25.0	1.8	22	30.0	2.0	33	40.0	3.2			

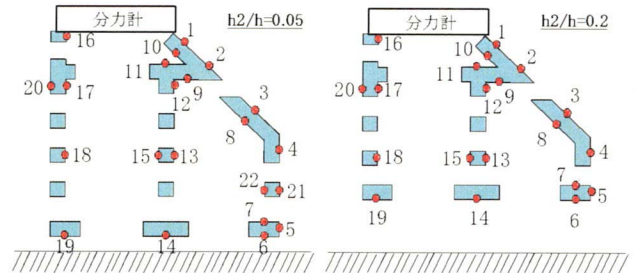


図-10 波圧センサー配置 ($h_2/h=0.05$:22個, $h_2/h=0.2$:20個)

4. 波力実験

波力実験では、水理性能検証実験と同様に模型縮尺を 1/25 とし、静岡県富士海岸における設計波浪を目標に規則波による実験を行った。ここで潮位は HHWL と LWL を想定した。図-9 に実験模型概要、表-5 に実験条件、そして表-6 に検討ケースを示す。なお、模型堤前には $i=1/10$ および $i=1/50$ のスロープを設け、模型を設置しない状態で波高検定を行い、波高計⑧・⑨の計測結果から合田の入反射分離手法により入射波高を決定している。実験は、S-VHS 模型天端に分力計 (2 成分、サンプリング周波数 500Hz) を設置固定し、水平波力と揚圧力を計測した。一方、各部材に配置した波圧センサー (サンプリング周波数 500Hz) から部材波圧を 20 波分以上に渡って計測した。図-10 に波圧センサー配置を示す。

図-11 に分力計による水平波力および揚圧力を計測した結果例を示す。ここでは従来型 VHS 工法に対する設計算定値を比較しているが、S-VHS 工法では VHS 工法よりも水平波力を大幅に低減可能であり、揚圧力も低減されることがわかった。その他の斜面勾配、構造形式に対する算定結果も同様の傾向であった。

次に分力計・波圧計による計測水平波力、揚圧力、波圧時系列例を図-12 に示す。ここでは $i=1/10$, $h_2/h=0.05$, HHWL 時を対象としている。符号は、揚圧力は正で鉛直下向きを、波圧計は正で部材圧縮力

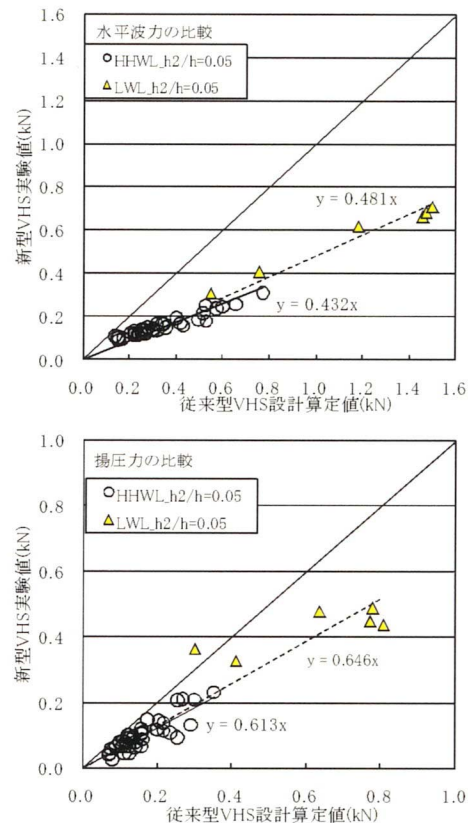


図-11 水平波力と揚圧力 ($h_2/h=0.05$, $i=1/10$)

を表し、計測値は初期の静水圧を控除している。水平波力は巻波砕波に伴う衝撃波力によるピークを計測し、揚圧力の極大とは位相差が生じている。堤体前面斜面部 (No. 1) でも衝撃波力が作用しており、後壁 (No. 16) でも若干ピークが見られる。

最後に最大波力作用時の波圧分布例を図-13 に示す。斜面部では、後に述べる細山田らの式²⁾とほぼ一致するが、直立部および揚圧力については整合し

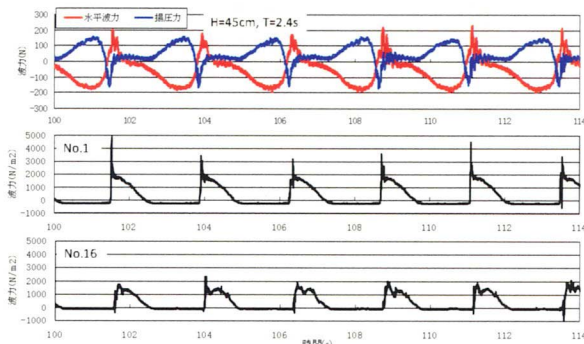


図-12 計測波力時系列(ケース34, $h_2/h=0.05$, $i=1/10$)

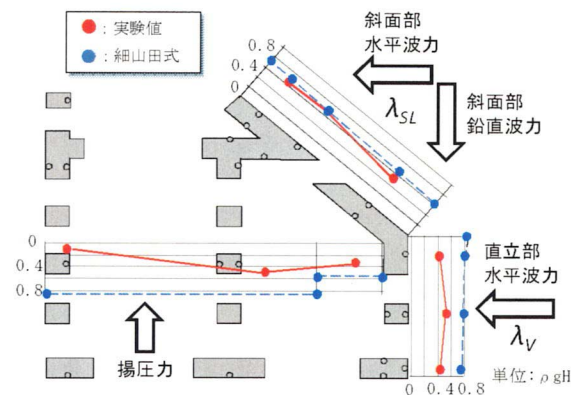


図-13 波圧分布例(ケース33, $h_2/h=0.05$, $i=1/10$)

ない。なお、ここでの実験波圧は壁面前後の差圧を取っていない値である。

5. 波力算定式の提案

(1) 全波力

前章で述べた波力実験から、S-VHS 工法は、従来型 VHS 工法に作用する波力より水平波力・揚圧力ともさらに低減されることがわかった。本工法においては上部斜面形を導入したことが波力低減効果の主因と考えられる。上部斜面ケーソンに対する波力低減効果は、細山田らの式²⁾によって算定可能であり、実験でも斜面部での波圧分布は同式算定による分布と類似した。以下に細山田式における波力低減係数算定式を示す。

$$\lambda_{SL} = \min[\max\{1.0, -23(H/L)/\tan^2 \alpha + 0.46/\tan^2 \alpha + 1/\sin^2 \alpha\}, 1/\sin^2 \alpha] \quad (1)$$

$$\lambda_V = \min[1.0, \max\{1.1, 1.1 + 11d_c/L\} - 5.0(H/L)] \quad (2)$$

ここで、 λ_{SL} ：斜面部水平波力にける低減係数、 λ_V ：直立部水平波力にける低減係数、 H ：波高(m)、 L ：波長(m)、 α ：斜面部傾斜角度、 d_c ：静水面から斜面下端までの距離(m、静水面より上にある場合を正)である。上部斜面ケーソンに作用する

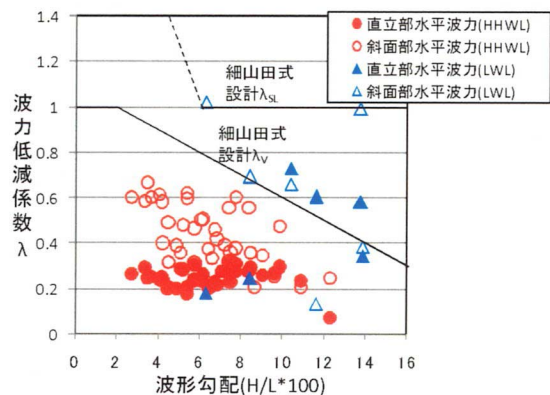


図-14 波力低減係数 ($h_2/h=0.05$, $i=1/10$)

波力の定義は図-13 を参照されたい。ここでは λ_{SL} と λ_V の実験値との整合を見る。なお細山田ら²⁾は水理模型実験を数種類の形状に対して行っており、このうち、同論文の斜面傾斜角 45° かつ低天端のType4 ないし Type 5 の形状と潮位条件が S-VHS 工法形状および本実験潮位 LWL 時に最も類似していると考えられる。

細山田式は、森平ら³⁾の上部斜面ケーソン堤に対する波力式に対して、斜面部で波形勾配 $0.02 \sim 0.06$ 、直立部で 0.02 以上の範囲の波に対して波力が単調減少するとして補正した点に特徴がある。図-14 に実験から求めた波力低減係数を示す。ここで直立部および斜面部水平波力、分力計の計測水平波力最大時における波圧センサー計測値を模型受圧面に按分して求めた。計測値は部材前後のセンサー値から差圧を与えており、細山田らの実験結果($\lambda=0 \sim 2$)と比較して低減係数は小さく、細山田式を用いた波力算定は安全側の評価になると考えられる。但し、LWL の実験は富士海岸での設計波浪($H/L=0.10$)を想定したため波形勾配 0.06 以上の波浪で実施しており、それ以下の範囲に関しては HHWL 時の結果を踏まえた推定に留まる。斜面部に対する低減係数 λ_{SL} は右肩下がりとなり同式波力低減係数と同様の傾向を示す。直立部に対する λ_V は単調減少せず傾向が異なる。S-VHS 工法はスリットや底面クリアランスが存在するのに対し、細山田らの実験は混成堤ケーソンを対象としており、直立部および底面では波力低減メカニズムが異なると考えられる。

そこで直立部の水平波力および揚圧力については、従来型 VHS 工法に対して国栖ら⁴⁾が採用した手法によって別途、波力低減係数を評価する。国栖らは波高水深比と I_r 数(surf similarity parameter)によって合田の波力算定式⁵⁾に対するスリットによる波力低減効果を次式の通り評価できている。

$$\lambda_V = a + b(H/h) + c \cdot I_r \quad (3)$$

ここで a, b, c はパラメータであり、実験結果から最小自乗法によって海底勾配および構造形式別に算出

表-7 S-VHS 工法設計波力算定パラメータ

海底勾配 i	構造形式 h2/h	a	b	c
1/10	0.05	0.35	0.25	-0.12
1/10	0.2	0.35	0.41	-0.12
1/10	従来型 VHS	0.35	0.37	-0.12
1/10	揚圧力	0.42	0.21	-0.12
1/50	0.05	0.25	0.18	0.40
1/50	0.2	0.25	0.33	0.40
1/50	従来型 VHS	0.25	0.32	0.40
1/50	揚圧力	0.19	0.23	0.40

表-8 部材波圧係数

部材No	α	部材No	α	部材No	α
1	1.50	9	1.10	17	1.25
2	1.65	10	1.25	18	0.60
3	1.35	11	1.00	19	0.60
4	1.30	12	2.00	20	0.60
5	1.30	13	0.60	21	1.35
6	0.60	14	0.60	22	1.35
7	0.60	15	0.60		
8	0.60	16	1.75		

にて評価する。

$$q = \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (4)$$

ここで、 q ：各部材に作用する波圧強度(kN)、 ρ ：海水密度(kN/m³)、 g ：重力加速度(m/s²)、 H ：設計波高(m)である。部材毎の波圧係数 α は、各構造形式、海底勾配、潮位条件毎に波圧計測値の極大値平均を取り、その中の最大値から決めた。なお部材裏表でセンサーが対となっているものは差圧を取って評価した。表-8に決定した各部材の波圧係数を示す。部材位置は図-10の波圧センサー位置に対応する。

6. まとめ

(1) S-VHS工法の構造形式を定め、水理性能検証実験から制約条件を満たす堤体幅を設定した。対象波浪(波長 L)に対する必要堤体幅 B は、構造形式別に $B/L > 0.1$ ($h2/h=0.05$)、 $B/L > 0.14$ ($h2/h=0.2$)と求まる。

(2) 波力実験結果からS-VHS工法は従来型VHS工法に比べて水平波力を大幅に低減可能であり、揚圧力も低減されることがわかった。

(3) 細山田式における直立部水平波力に対する低減係数を(3)式に修正したものをS-VHS工法設計波力式として提案する。

(4) 部材波力については(4)式で算定される。

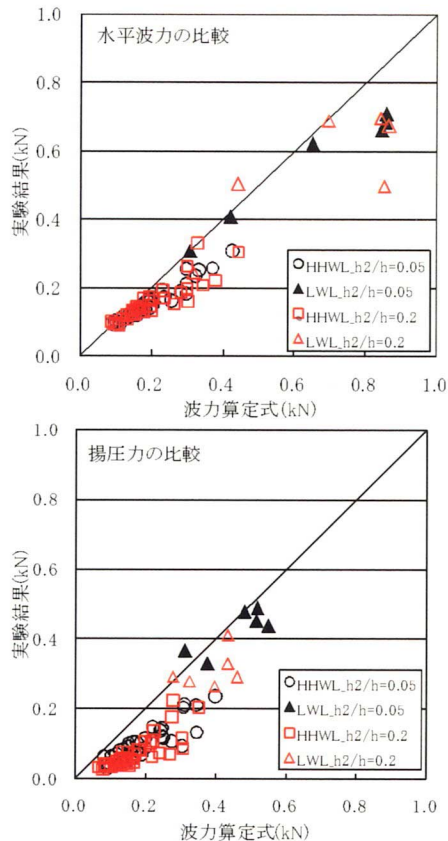


図-15 実験値と設計値 (上：水平波力，下：揚圧力)

した。定数項 a および Ir 数係数 c については従来型VHS工法とほぼ同等の値となったため、以後、従来型と同じ値とする。一方、波高水深比 H/h の係数 b は安全側の波力評価式とするため割り増して補正し、水平波力算定式を確立した。

表-7に確立した波力算定パラメータを示す。また図-15には実測値との比較例を水平波力、揚圧力に関して示す。揚圧力は、位相差を考慮した滑動合成波力として水平波力と一括で評価する方法も考えられるが、今回は水平波力とは別々に算定し、安全側の設計となるようにした。低減係数の算定手法は水平波力と同様である。新しく確立した波力算定手法は、全体的に実測値より大きい目の波力を与えている。

(2) 部材波力

部材波力の設計は、従来型VHS工法と同様に次式

参考文献

- 1) 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.
- 2) 細山田得三, 高橋重雄, 谷本勝利: 離島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海岸工学講演会論文集, 第41巻, pp.706-710, 1994.
- 3) 森平倫生, 国田 治: 斜面壁堤の水理特性に関する模型実験, 海岸工学講演会論文集, 第26巻, pp.295-298, 1979.
- 4) 国栖広志, 近藤浩右, 清水正己, 宇多高明, 村井禎美: 透過式消波構造物の波力特性に関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, 第36巻, pp.569-573, 1989.
- 5) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.12, No.3, pp.31-70, Sep. 1973.