

# 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

EXPERIMENTAL STUDY ON PERFORMANCE AT HIGH WAVES  
OF WAVE FORCE DECREASE TYPE OFFSHORE STRUCTURE

安野浩一郎<sup>1</sup>・西畑剛<sup>2</sup>・関本恒浩<sup>3</sup>・高橋研也<sup>2</sup>・羽田宏<sup>4</sup>・山本敦<sup>4</sup>  
Koichirou ANNO, Takeshi NISHIHATA, Tsunehiro, SEKIMOTO, Kenya TAKAHASHI,  
Hiroshi HANEDA and Atsushi YAMAMOTO

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>フェロー 工博 五洋建設(株)技術研究所(〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

<sup>4</sup>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)

We have developed the offshore structure for control of sea environment named S-VHS construction method, which it realized the remarkable decrease of wave force and the wave dissipation performance has been verified under the usual wave conditions.

In this paper, the wave dissipation performance under the high wave conditions is verified through hydraulic experiments in some tide level conditions. After the experimental study about transmission performance for the selected structure, we reproduced the transmitted waves to the back revetment with numerical analysis and evaluated the wave dissipation performance of the structure. Finally, we disputed the mechanism of the wave dissipation performance.

**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)<sup>1)</sup>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. 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. 著者らは, 上記の水理性能を満足する構造物として, 図-1に示す波力低減型海域制御構造物を提案するとともに, 実験的研究により, 水理性能の確認および波力算定手法の構築を行ってきた<sup>2)</sup>.

それらの構造物は, 一般に海水交換を促進し, 景観性を損なわないよう透過式の低天端構造となっており, 設計波相当の波浪を制御する防災施設としての性能は求められていない. しかしながら, 2008年

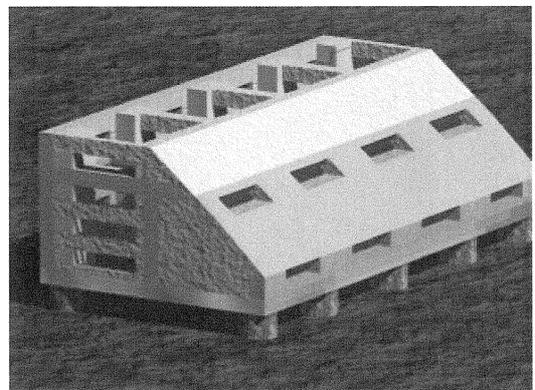


図-1 波力低減型海域制御構造物

2月24日に富山県を襲った高波災害の被害例にも見られるように, 今後の海域制御構造物には, 常時波浪に対する海水交換・消波性能を示すだけでなく, 設計波相当の高波浪に対してどの程度の背面施設の防御機能を有しているかを把握し, 防災計画に適切に反映させることが求められると考えられる. すなわち, 設計波相当の波浪に対する消波性能も明確に

提示することが重要である。

本研究では、波力低減型海域制御構造物の消波性能に関する詳細な検証を行うことを目的に、潮位の異なる消波対象波に対する消波性能の評価、高波浪時の消波効果および消波メカニズムに関する実験を行うとともに、数値計算を用いて背面護岸への打上げ高および越波量の低減効果に関する検討を行うものである。

## 2. 消波性能確認実験

### (1) 実験準備 (構造設計)

実験に先立ち、波力低減型海域制御構造物の構造設計を行った。構造設計の手順は、まず、消波対象波条件に対して透過率および反射率の制約条件を満足するように堤体幅を決定する。次に、設計波条件を基に、構造物の下部構造（杭基礎）および部材厚の諸元を決定する。消波対象波条件は、富山県生地鼻地先および静岡県富士海岸における過去の設計事例を参考にモデル条件を設定し、設計波条件は同地点における50年確率波相当の条件とした。潮位条件については、太平洋側に相当する潮位差1.4mとして設定した。設置水深は、国栖・宇多<sup>3)</sup>の実験条件を参照し、設置水深10.0mとした。表-1にモデル設計条件を示す。構造物の幅は、著者らの手法<sup>2)</sup>を用いて設計し、底面クリアランス天端高比 $h_2/h_3$ は0.05とした。表-2に構造物の諸元一覧および図-2に構造物の模式図をそれぞれ示す。

表-1 モデル設計条件

条件	諸元	数値
—	設置水深	10.0m
消波対象波	潮位	LWL ( $\pm 0.0$ m)
	有義波高	2.0m
	周期	12.0s
設計波(50年確率波)	潮位	HHWL (+2.1m)
	最高波高	8.0m
	周期	16.0s

表-2 構造物の諸元一覧

諸元	開口率	数値
前壁	斜面部15%	—
	直立部25%	—
水平版	30%	—
中間壁	25%	—
後壁	35%	—
底版	30%	—
堤体幅(B)	—	10.75m
B/L(消波対象波波長)	—	0.10
斜面部高( $h_3/h_4$ )	—	0.5
底面クリアランス天端高比( $h_2/h_3$ )	—	0.05

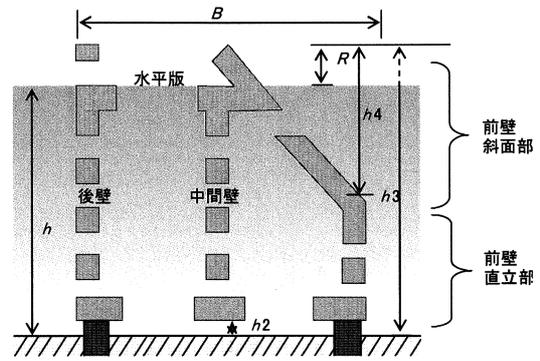


図-2 構造物の模式図

### (2) 水理模型実験 (消波性能条件)

次に、設計した堤体を対象に、消波対象波に対する消波性能の確認を水理模型実験により行った。

この目的は、著者ら<sup>2)</sup>において構築した、堤体幅の設定方法の妥当性の検証である。なお、著者ら<sup>2)</sup>は、堤体幅Bと消波対象波波長Lの比 $B/L$ に対し消波性能を満足する堤体幅を規定することを提案しており、 $h_2/h_3=0.05$ のケースの場合、 $B/L=0.1$ 以上で規定の反射率、透過率を満たす。

実験は、長さ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た。

図-3に実験装置の概要を、表-3に実験条件と検討ケースをそれぞれ示す。波浪条件は、規則波を対象とし、模型設置位置において20波以上のデータを取得できるまで計測を行った。また、潮位変化に伴う消波性能への影響を調べるために、LWL時の潮位条件に加え、HWL時の条件についても実験を行った。反射率と透過率の算出方法は、模型前後に配置した①～③および④～⑥の容量式波高計(20Hz)計測水位から合田による入・反射波分離推定法<sup>4)</sup>により行った。

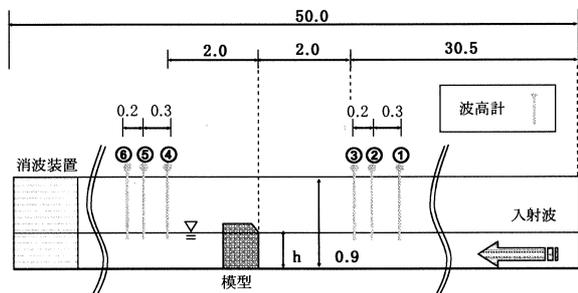


図-3 実験装置の概要 単位:m

表-3 実験条件と検討ケース

縮尺	1/25
海底勾配	一様水深
構造形式	$h_2/h_3=0.05$
堤前潮位(cm)	LWL(40.0), HWL(45.7)
入射波	規則波
波高(cm)	4, 8, 12, 16
周期(s)	1.6, 2.0, 2.2, 2.4, 2.8

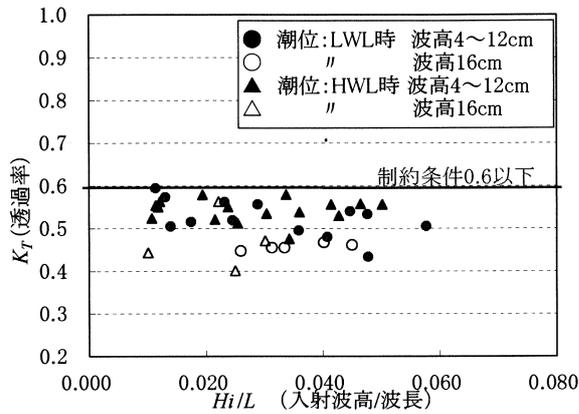


図-4 透過率と波形勾配 (消波対象波)

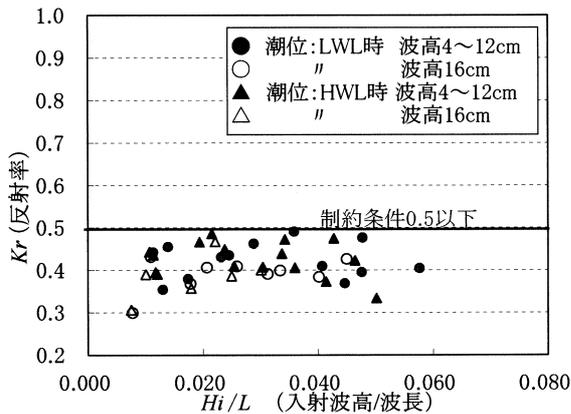


図-5 反射率と波形勾配 (消波対象波)

図-4に実験結果による透過率の算出結果を、図-5に反射率の算出結果をそれぞれ示す。

図-4および図-5から、透過率・反射率ともに制約条件をすべて満足していることがわかる。潮位条件の違いによる透過・反射率の相違は小さく、HWL時の透過率がLWL時に比べて若干大きくなる傾向が伺えるだけにすぎない。よって、潮位変動が消波性能に及ぼす影響は小さいことが確認できた。また、波高16cmの条件においては透過率が低減する傾向を示している。これにより、現地換算で波高4m程度の条件下では、波高の増大に伴い、天端上で碎波が促進され、透過率を抑制する効果がより期待できるものと考えられる。

本実験により、 $h2/h3=0.05$ のケースでは、消波対象波波長 $L$ に対し、 $B/L=0.1$ 以上となる堤体幅 $B$ を設定することで、おのずと消波対象波に対する消波性能を満足されることが確認できた。また、潮位の変化に対しても、消波性能はほとんど変化せず、同様の性能を維持できることがわかった。

### (3) 水理模型実験 (高波浪条件)

設計波相当の波浪条件に対する堤体の消波性能を検証する実験を行った。

模型縮尺は1/25および1/35とし、フルードの相似則を適用した。自然条件は、静岡県富士海岸におけ

る過去の事例を参考に設置水深、海底勾配および潮位条件を決定した。潮位はHWLおよびHHWL、海底勾配は1/50、1/70の2タイプについてそれぞれ実験を行った。図-6に実験装置の概要を示す。また、表-4に実験条件と実験ケースを示す。

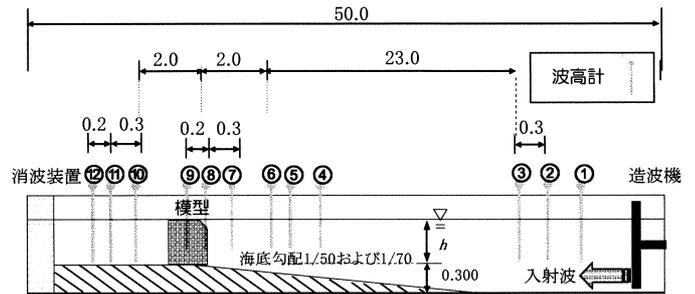


図-6 実験装置の概要 単位:m

表-4 実験条件と検討ケース

縮尺	1/35	1/25
海底勾配 $i$	1/70	1/50
構造形式	$h2/h3=0.05$	
潮位 $h$ (cm)	HHWL(24.7), HWL(21.9)	HHWL(36.4), HWL(33.4)
入射波	規則波	
換算沖波波高 (cm)	11.43, 17.14, 22.86, 28.57, 34.29	16.00, 24.00, 32.00, 40.00
周期 (s)	2.03, 2.20, 2.37, 2.54, 2.70	2.4, 2.6, 2.8, 3.0, 3.2

図-7に波高検定を行った結果を示す。なお、換算沖波波高は、造波板前面に配置した容量式波高計①～③の計測データに入射分離を行った結果から、浅水係数を除して整理した値であり、堤前波高は波高計⑦～⑨の計測データを元に算出した値である。波高検定の結果より、縮尺1/35、潮位HHWL時のケースでは、概ね換算沖波波高22.86cmを超えた時点で碎波し、堤前波高はほぼ一定値となっていることがわかる。なお、縮尺1/25のケースでは、換算沖波波高24.0cmの時点で堤前波高がほぼ一定値となる傾向を示していた。波高検定の結果、潮位が異なる場合における碎波の発生条件には明確な違いは現れず、HWL時は概ねHHWL時と同じ波高で碎波が生じる結果となった。

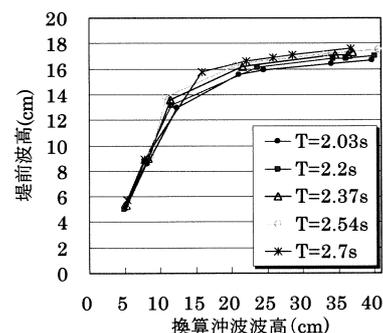


図-7 波高検定結果 (HHWL,  $i=1/70$ )

図-8に海底勾配1/70の実験結果を、図-9に海底勾配1/50の結果をそれぞれ示す。なお、図中のシンボルは潮位毎に碎波と非碎波とで区分して整理した。

実験結果における透過率は、全て0.8以下となっており、設計波相当の波浪条件に対して、少なくとも2割以上の背面波高の低減効果を得られることがわかった。

海底勾配1/70における碎波条件の透過率は、非碎波の場合よりも全体的に小さくなる傾向を示しており、同じ周期で概ね同じ堤前波高の同士の透過率を比較すると、碎波条件の方が約0.05程度小さくなる傾向を示した。また、透過率は波形勾配による影響を受けず、ほぼ一定値となる傾向を示していた。

海底勾配1/50の実験結果は、碎波に伴う不安定に起因すると考えられるばらつきが生じている。また、透過率は波形勾配の増加に伴い、やや小さくなる傾向を示しているものの、全体の傾向としては概ね海底勾配1/70と同等であると考えられる。

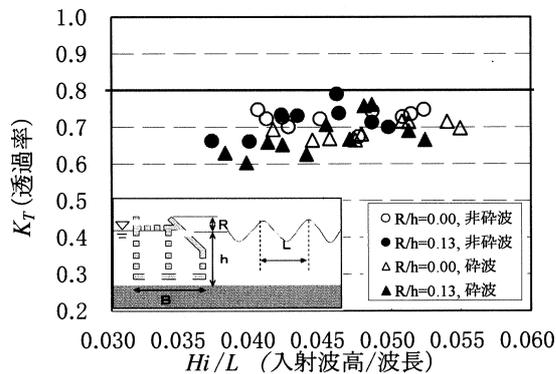


図-8 透過率と波形勾配 ( $i=1/70$ )

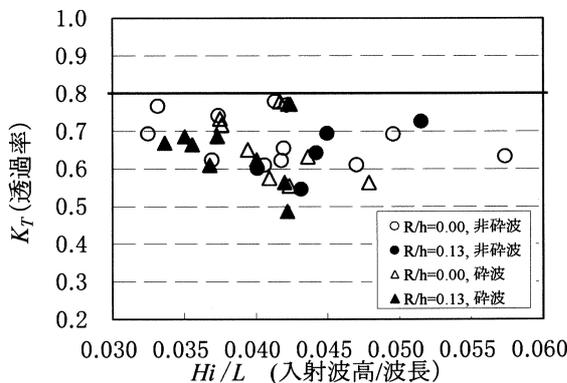


図-9 透過率と波形勾配 ( $i=1/50$ )

次に、碎波による影響を確認するために、透過率を算出する際の入射波高を堤体位置ではなく、透過波と同じ位置での入射波高値を用いて透過率を再度整理した。図-10に海底勾配1/50と1/70の整理結果を同時に示す。透過率0.8以下を満足し、平均的には透過率0.7程度となった。波形勾配が大きくなるに従って、透過率は小さくなる傾向を示した。

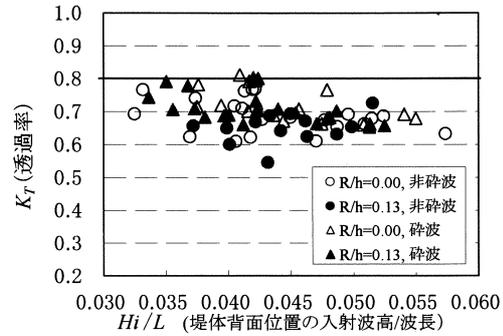


図-10 透過率と波形勾配

### 3. 背面護岸への打上げ高と越波量の検討

#### (1) 検討内容

2章の水理模型実験により波力低減型海域制御構造物の高波浪時における消波性能を確認したため、実海域における背面護岸への打上げ高および越波量の低減効果についても期待できると考えられる。そこで、本章では背面護岸における打上げ高および越波量の定量的評価を行うことを目的に、図-6に示す断面水槽による水理模型実験を対象とし数値解析を行った。

汎用性のある有効な数値解析手法としては、2次元数値波動水路が挙げられる(例えば、佐貫ら<sup>5)</sup>)。しかしながら、今回対象とする波力低減型海域制御構造物は、指定の空隙率を持つスリットを多用しているため、3次元的な渦の発生による波の消波効果を十分に考慮する必要があり、2次元数値波動水路は不向きである。2次元問題で解決するには、ある代表断面で近似すると共に、堤体の構造に抵抗則などを導入し、実験結果との合わせこみを必要とする。

そこで、本研究においては現在開発が進められている3次元数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)<sup>6)</sup>を用いて本構造物の3次元的特性を活かした数値実験を行うことにより、背面護岸における打上げ高および越波量について評価した。

#### (2) 計算条件

表-5に計算条件を、図-11に計算領域を、および図-12に解析モデルをそれぞれ示す。計算条件は、縮尺1/25、海底勾配1/50とし、富士海岸における設計波相当の波浪条件とした。堤体背面には直立護岸を設置し、直立護岸前面での波の打上げ高、および護岸背面への越波量を計算した。計算領域は、計算時間を短縮するために水路長24.88mに縮小し、一樣勾配斜面の終着点から約1波長沖側に離れた地点を造波境界として計算を行うこととした。なお、格子間隔には構造物周辺を密にする不等間隔格子を用い、30秒間計算を行った。計算ケースは堤体有無の2ケースとし、両者の計算結果を比較することで、堤体による波の打上げ高の抑制、および越波量の低減効果を評価した。越波量の算定方法は、護岸背後

(越波升内)におけるVOF関数 $F$ の体積積分値を求め、初期値からの増分を越波量とした。なお、著者ら<sup>2)</sup>が行った実験の再現計算を3次元数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)により行い、透過率に関する適用性を確認した<sup>7)</sup>。

表-5 計算条件

縮尺	1/25
海底勾配 $i$	1/50
構造形式	$h_2/h_3=0.05$
潮位 $h$ (cm)	HHWL(36.4)
入射波	規則波
入射波高(cm)	32.0
周期(s)	3.2
造波関数	流れ関数法B(19次)
差分スキーム	DONOR 0.2
計算領域(m)	24.88×0.6×1.5
格子間隔(m)	$\Delta x=0.025\sim 0.040, \Delta y=0.025, \Delta z=0.010$
格子数	$x:637, y:24, z:150, \text{総数}:2,293,200$
計算時間(s)	30.0

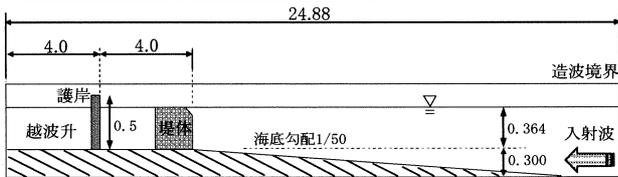


図-11 計算領域 単位:m

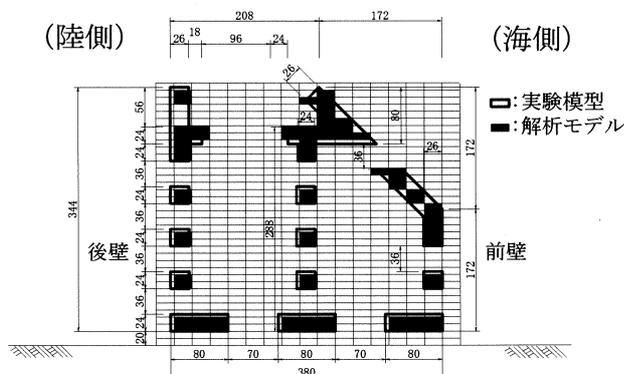


図-12 解析モデル 単位:mm

### (3) 計算結果

図-13に1波当たりの越波量の比較を示す。堤体を設置することによる越波量の低減率は概ね40%となっている。なお、護岸前面の波の打上げ高については13%の低下を示した。

波力低減型海域制御構造物は設計波に対して、背面護岸への打上げ高および越波量を低減する効果を有することが確認された。

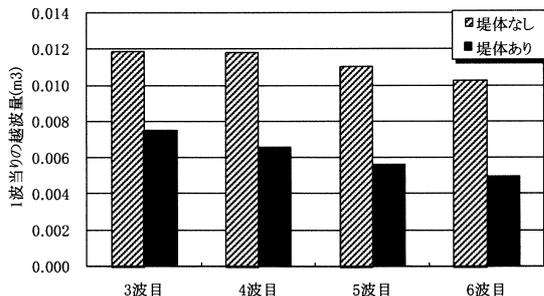


図-13 1波当たりの越波量の比較

## 4. 消波メカニズムの検討

### (1) 動画解析 (高波浪時)

堤体の消波メカニズムを把握する目的で、着色した浮遊子の挙動を解析する実験を別途行った。実験における模型縮尺は1/35とした。浮遊子の比重は0.99~1.03の範囲となるものを用意し、造波中に模型の上および前後から投入した。浮遊子の挙動は、真横から撮影したビデオデータを動画解析することで把握した。なお、動画解析におけるサンプリング間隔は10Hzとした。

図-14にHHWL時、波高17.14cm、周期2.2sにおける動画解析結果を示す。図-14は、浮遊子50個の動画解析結果のうち、代表的な9個の1波あたりの軌跡を示したものである。

前壁より沖側にある浮遊子No.1~No.3は、押波時に堤体天端を乗り越えており、乗り越えた後の挙動は、水平版から堤体内部に落下し渦を形成するNo.1と、堤体背後に到達するNo.2、および後壁のスリットを通過するNo.3とに区分される。前壁付近のNo.4および後壁付近のNo.7は移動距離が少なく、各スリットを行き来するのみである。前壁斜面部のNo.5は、小さな渦を形成している。No.6は、底版下の開口部を前後に移動しており、1波あたりの移動距離は、No.1~No.3と概ね一致する。堤体背面にあるNo.8およびNo.9は、共に大きな渦を形成している。これは、堤体天端を乗り越えた波と前面を通過してくる波との干渉による影響であると考えられる。

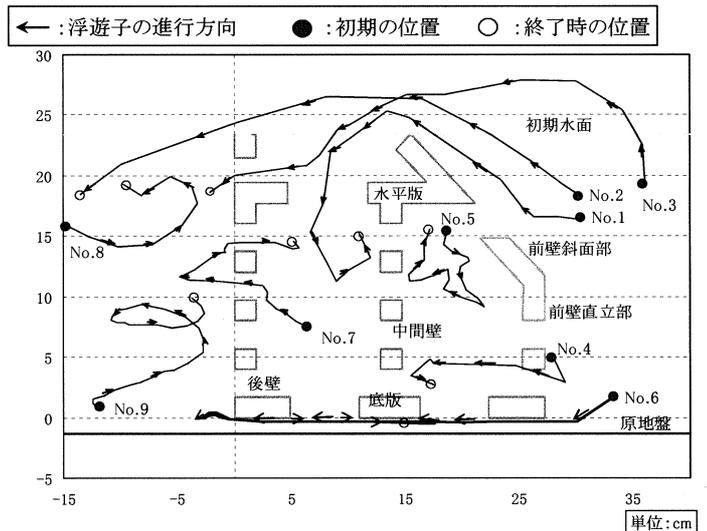


図-14 動画解析結果 (浮遊子の軌跡)

(HHWL時、波高17.14cm、周期2.2s)

浮遊子の挙動を解析した結果、渦は水平版と堤体背面付近で主に発生していることがわかる。したがって、高波浪時には、水平版および前面斜面部の部材が消波を促進しているものと考えられる。

以上より、高波浪時の消波メカニズムについて整理すると以下の通りとなると考えられる。

1. 堤体を越波した波が水平版を介した堤体内部に流入による渦の励起.
2. 越波した波と各スリットを通過した波の堤体背後での干渉による渦の励起.
3. 前壁斜面部スリット付近での乱れ

## (2) 動画解析 (消波対象波)

図-15に波浪条件が消波対象波であるHWL時、波高5.71cm, 周期1.69sの場合の動画解析結果を示す.

消波対象波の場合における浮遊子の挙動は、高波浪時とは大きく異なり、前壁・中間壁・後壁のスリット間での渦の形成が目立つ。また、前壁斜面スリット部でも同様の傾向が見られ、その様子は高波浪時の条件の場合よりも明確であった。これは、低潮位条件であるために、引き波時には水面がスリットを下回ること、および堤体内部と前面とでの水位差が生じていることであり、引き波時のスリットからの水の流出量が顕著になることによるものと考えられる。

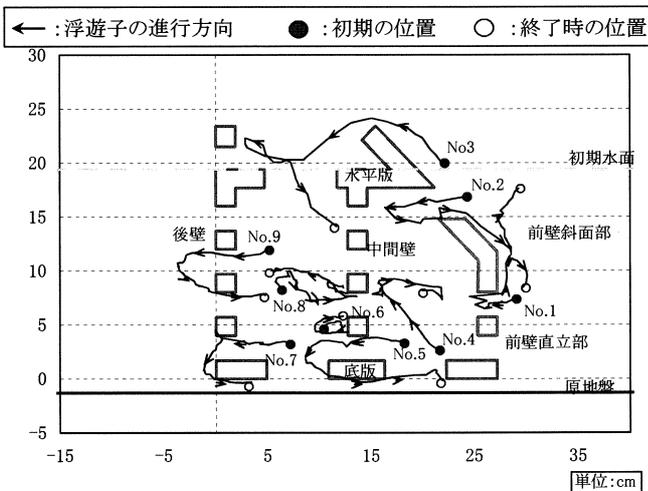


図-15 動画解析結果 (浮遊子の軌跡).  
(HWL時, 波高5.71cm, 周期1.69s)

浮遊子の挙動を解析した結果、波の渦は、3枚の鉛直スリット、および前壁斜面部のスリット部で主に発生していることがわかる。したがって、消波対象波においては、これらの部材によって、波の消波を促進しているものと考えられる。また、その他に高波浪時と同様である、図中のNo. 3のような天端を越波して波の乱れを励起する効果も挙げられる。

以上より、消波対象波条件における消波メカニズムについて整理すると以下の通りと考えられる。

1. 前壁・中間壁・後壁にある3枚の鉛直スリット壁による乱れ
2. 斜面スリットからの流出入水による乱れ
3. 越波に伴う砕波によるエネルギー消散

## 5. 結論

(1) 底面クリアランス天端高比 $h2/h3=0.05$ のタイプの波力低減型海域制御構造物は、消波対象波波長 $L$ に対し、 $B/L=0.1$ 以上を確保するように堤体幅 $B$ を決定することで、おのずと消波対象波に対する消波性能を満足できることがわかった。また、その場合において、太平洋側の潮位差1.4mに相当する水位の変動に対して消波性能の変化は殆どないことを確認した。

(2) 消波性能を満足する波力低減型海域制御構造物は、設計波相当の高波浪時に対する透過率が0.8以下を満足し、堤体背後の波高を20%以上低減させる機能を有することが確認された。

(3) 3次元数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)を用いた数値計算により、波力低減型海域制御構造物は設計波相当の波浪に対して、背面護岸への打上げ高を13%、および越波量を概ね40%それぞれ抑制できる効果を有することが確認された。

(4) 浮遊子の動画解析により、波力低減型海域制御構造物の高波浪時における消波メカニズムを把握した。その内容は、消波対象波条件においては、3枚の鉛直スリット壁を主として消波を促進していたのが、高波浪時には前壁斜面部、後壁および水平版が波の消波を促進する主たる役目を担っていると考えられる。

謝辞：本研究における3次元数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)の活用にあたっては、数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会(事務局(財)沿岸技術研究センター)の協力を得た。関係各位に深謝を表する次第である。

## 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) 西畑剛, 安野浩一郎, 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.
- 3) 国栖広志, 宇多高明:透過水平版付スリット堤の消波性能, 第42回年次学術講演会, II-260, pp.16-17, 1987.
- 4) 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.
- 5) 佐貫宏, 藤田龍, 関本恒浩, 清水琢三:数値モデルによる越波量の評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.736-740, 2001.
- 6) 有川太郎, 山野貴司, 秋山実:数値波動水槽における砕波変形計算の高精度化, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.71-75, 2007.
- 7) 高橋研也, 安野浩一郎, 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, 2009(投稿中).