

有脚式離岸堤構造物による 漂砂制御機能に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SAND DRIFT CONTROL PERFORMANCE OF PILE-SUPPORTED DETACHED BREAKWATERS

西畑剛¹・佐藤慎司²

Takeshi NISHIHATA and Shinji SATO

¹正会員 修(工) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²フェロー 工博 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Recently, new offshore structures have been introduced in several coasts. The structures provide functions of both wave dissipation and littoral drift control. The former function has been investigated intensively through experimental studies and field observations, while the latter function has not been elucidated in detail.

In this paper, we conducted both fixed-bed and movable-bed experiments for pile-supported detached breakwaters in wave basin in order to evaluate sand transport control performance of the structure. The experiments revealed that longshore and cross-shore sediment transport decreased behind the structures, thus mitigating coastal erosion around the structure. We also discuss the appropriate number of the structures to achieve desired performance of the structures.

Key Words : *laboratory experiment, beach erosion control, sand drift control, MMZ, offshore structure*

1. はじめに

1986年の旧建設省によるMMZ(Marine Multi Zone)計画¹⁾以降, 多くの新型海域制御構造物が開発され, 実海域で施工されている. MMZ計画による構造物は, 静穏海域の確保や沿岸漂砂の制御といった国土保全機能を有する構造とされる. 前者に対しては, 各構造物開発時に断面水槽等によって規定の消波性能(反射性能および透過性能)を検証する実験が実施されており, また実海域施工された構造物に対する現地観測も実施されている²⁾. 一方, 後者に対しては, 洗掘等地形変化観測は報告されているものの³⁾, 構造物周辺の沿岸および岸沖漂砂に関する水理性能や漂砂制御機能の詳細に関する研究例は少ない.

本研究では, MMZ計画で開発された有脚式離岸堤の一つを改良したS-VHS工法⁴⁾(図-1)を例として, 平面水槽を用いた水理模型実験を実施した. 最初に固定床実験を行い, 構造物周囲の波浪場, 流況場計測結果から, 漂砂に関する構造物の水理性能を抽出する. 次に移動床による平面実験を実施し, 有脚式離岸堤構造物による海岸保全機能を把握する. そして複数の離岸堤群を想定した場合, 沿岸漂砂制御に有効となる離岸堤配置・数や岸沖漂砂の捕捉効果を考察することを目的とする.

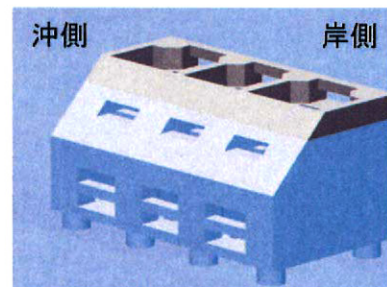


図-1 有脚式離岸堤 (S-VHS 工法)

2. 実験の概要

実験は多方向不規則波を造波できる平面水槽内で実施した. 実験波浪条件や地形条件, 離岸堤形状は静岡県駿河海岸における自然条件を参考にして設定した. 図-2に実験配置図, 図-3に離岸堤構造を示す. 本構造物は前壁斜面部を越波する際の碎波と空隙を有する壁を通過する際の乱れにより消波する構造であり, 水深が深く急勾配の海岸に設置できるよう杭基礎となっている. 実験は常時波浪および高波浪を対象とした波浪条件を設定し, 単一方向規則波を入射させた. なお実験は有脚式離岸堤構造物の有無による比較対照実験を基本とし, 固定床実験では入射波向 0° および 20° , 移動床実験は沿岸漂砂の発達

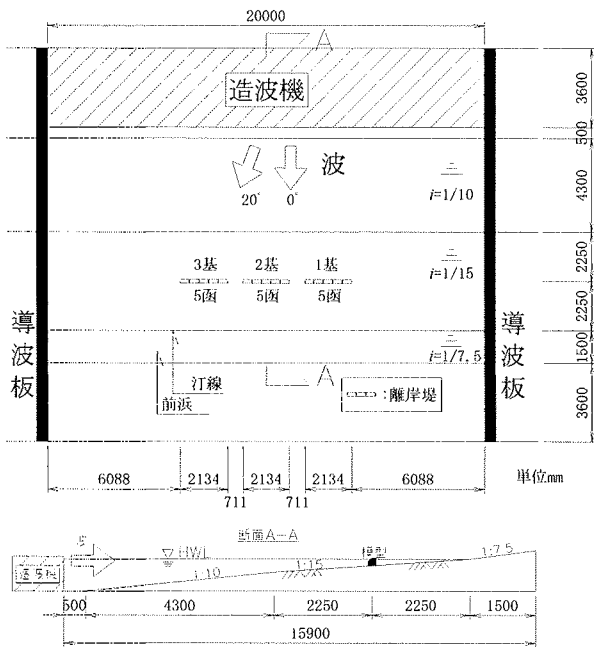


図-2 実験配置図 (固定床)

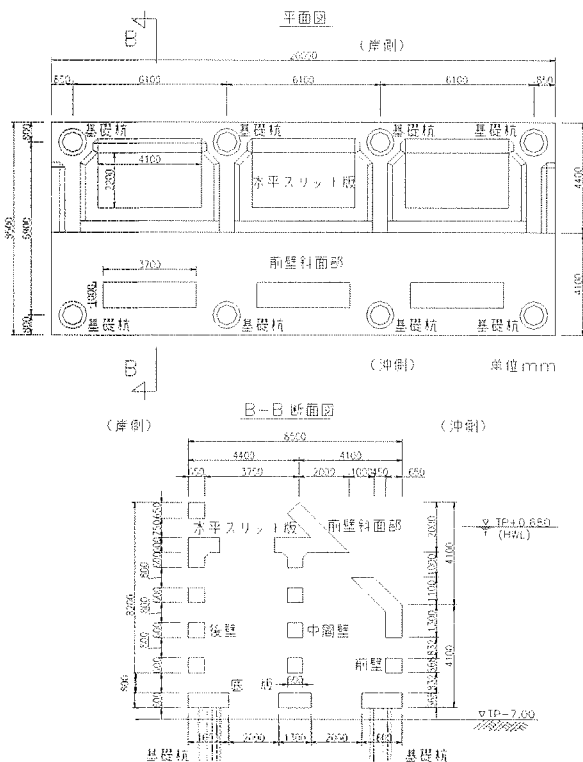


図-3 離岸堤構造図 (現地スケール, 1/100)

が見込まれる入射波向 20° のケースのみ実施した。移動床実験時には中央粒径 0.16mm 、空隙率約 0.4 の6号硅砂を用いた。模型縮尺は $1/50$ としてフルードの相似則を適用し、離岸堤群を3基設置して、1基あたり5函から成る構成とした。これは現地スケールでおおよそ 100m 相当の離岸堤群を 35m 程度の開口部を設けて合計3基、沖合 100m 付近に配置することに相当する。なお模型基礎杭は床面にアタッチメントを埋め込んで着脱可能とし、移動床実験では造波終了後、模型を外して洗掘部も計測できるようにしている。

3. 固定床実験

固定床実験は、消波性能を検証する実験および波高と平均水位分布を把握する実験に大別される。なお模型周辺に配置した電磁流速計から周辺流速値を測定し、想定される無次元掃流力も別途算出した。模型周辺の一部領域ではPTV法による流況場の把握も実施している。表-1に実験条件、図-4に固定床実験における計測機配置を示す。

表-1 実験条件 (固定床)

ケース	波浪	波高 (cm)	周期 (s)	波向 ($^\circ$)	模型	造波時間 (分)
1	常時	5	1.5	0	無	定常状態 (5分以上)
2				20	有	
3				0	有	
4	高波浪	12	1.5	0	無	
5				20	有	
6				0	有	
7				20	有	
8						

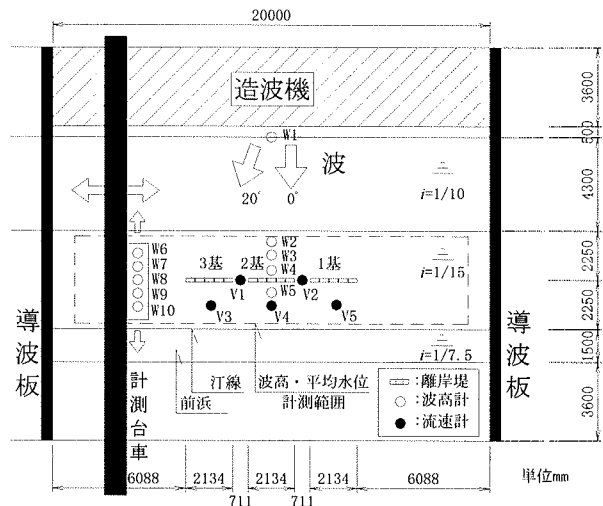


図-4 固定床実験平面図

(1) 消波性能の検証

2基離岸堤模型前後に配置した容量式波高計(W2-W4)計測値から、入射波向 0° のケース2,6について、合田の入射分離手法⁵⁾に従い反射率を算出した。ここで海底勾配による水深の違いおよび模型端部から生じる回折波浪の影響は無視した。また透過率については、波高計W5における模型無条件(ケース1,5)での通過波高との比較から算出した。

表-2に算出した反射率・透過率をまとめる。消波対象波浪に相当する常時波浪条件に対しては、MMZ構造物の規定消波性能(反射率 0.5 以下、透過率 0.6 以下)を満足することがわかる。一方、高波浪条件では常時波浪条件と比べて低天端離岸堤を越波し易いため、透過率は 0.8 程度と高くなった。

表-2 反射率・透過率

	常時波浪	規定	高波浪	規定
反射率	0.42	0.5以下	0.37	-
透過率	0.60	0.6以下	0.80	-

(2) 波高と平均水位の分布

計測台車にセットした容量式波高計(W6-W10)による5分間分の水位計測データから波高と平均水位分布を算出した。計測台車を岸沖および沿岸方向に移動させ、図-4に示す計測範囲を50cm間隔で観測した。

図-5に波高と平均水位の分布例を示す。砕波点は離岸堤周辺で一定しないため、模型がないケースの実験における砕波点を便宜上示している（以下、全実験同様）。離岸堤前面では反射波に伴う重複波浪場が形成される。離岸堤背後では波高低下に伴いウェーブセットアップが、波が消波されずに伝達する開口部背後でウェーブセットダウンが見られる。なお、図中沿岸方向3m付近に生じるセットダウンは、導波板からの反射による重複波浪場形成に伴って生じる。ここでは強い離岸流が発生するが、離岸堤3基目背後付近まではその影響は及ばない。

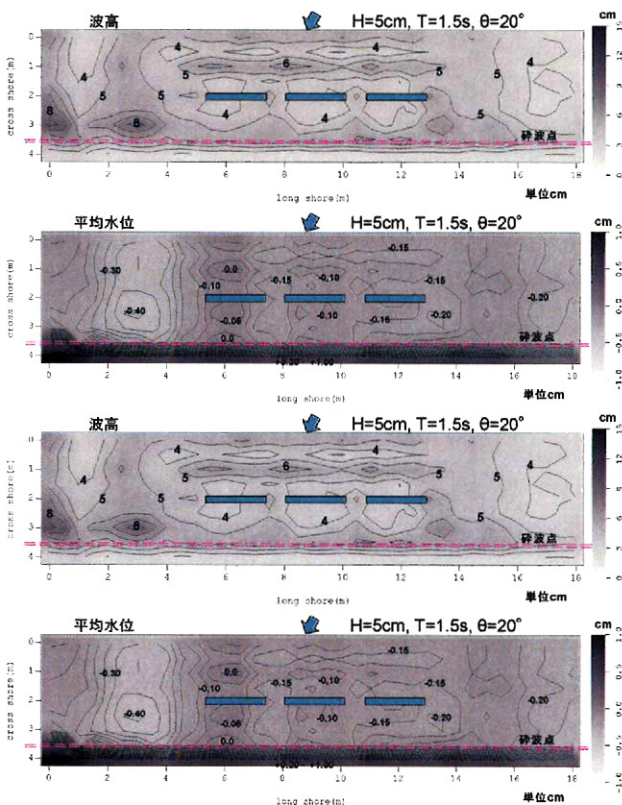


図-5 波高と平均水位分布（上からケース4の波高、平均水位、ケース8の波高、平均水位）

(3) 流況場

離岸堤開口部に設置した流速計(V1, V2)および背後に設置した流速計(V3-V5)より平均流成分を算定している。高波浪のケース8では流速計V1, V2が大きい値を示し、開口部で強い冲向き流れが発生した。各流速計によって計測された平均流速・流向値と流速計付近の計測波高から、交差する波・流れ共存場における無次元掃流力⁶⁾を6号珪砂中央粒径に関して算定すると、実験模型周辺では、常時波浪で掃流移動（遷移状態）、高波浪で浮遊移動の漂砂形態となることが想定される。また砂村・堀川の基準⁷⁾か

らは、常時波浪条件で中間型、高波浪条件で侵食型の岸沖漂砂が発生することが予想される（表-3, 4）。

一方、模型から汀線にかけてマーカーを投入することで、海浜流の発生状況を把握するとともに、1基から2基にかけての模型前後の一部領域では模型設置時にPTV法による流況場解析⁸⁾も実施した。なおマーカーは水より若干比重が大きいため、底面流速を解析している。斜め入射波条件となるケース3, 7では、砕波点を中心として沿岸流が確認された。また高波浪条件であるケース8では離岸堤背後の循環流と開口部から沖へ向かう離岸流が顕著であり、模型背後では流れが滞留する領域も見られた（図-6）。

表-3 計測流速および無次元掃流力（ケース4）

流速計	波高 (cm)	平均流速 (cm/s)	想定する砂村・堀川シールズ数の基準	
V1	5.7	3.3	0.15	タイプII (中間型)
V2	5.2	3.9	0.12	
V3	4.8	3.9	0.15	
V4	3.9	8.4	0.15	
V5	4.3	2.8	0.13	

表-4 計測流速および無次元掃流力（ケース8）

流速計	波高 (cm)	平均流速 (cm/s)	想定する砂村・堀川シールズ数の基準	
V1	12.3	21.2	0.29	タイプI (侵食型)
V2	12.6	20.0	0.31	
V3	7.0	12.4	0.24	
V4	7.2	12.0	0.34	
V5	7.6	3.0	0.31	

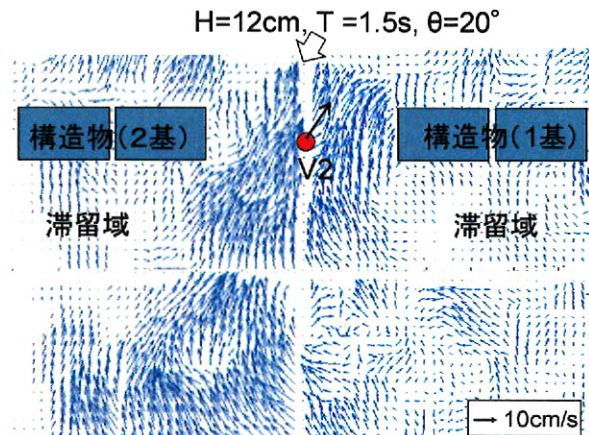


図-6 PTV法による構造物周辺の流況場（ケース8）

4. 移動床実験

移動床実験は、固定床実験の床面の一部を深さ10cm分取り除き、中央粒径が0.16mmの6号珪砂を敷設した（図-7）。実験条件を表-5に示す。造波時間は海浜変形の進行度合、局所洗掘深などを勘案して、常時波浪で150分、高波浪で60分間とした。造波前後で計測台車に設置した光電式砂面計(S1-S3)によって、移動床領域の砂面形状を把握している。計測は5cm間隔を基本として洗掘が見込まれる模型周辺および模型直下では2.5cm間隔で実施した。

表-5 実験条件 (移動床)

ケース	波浪	波高 (cm)	周期 (s)	波向 (°)	模型	サンドトラップ	造波時間 (分)
9	常時	5	1.5	20	無	有	150
10					有		
11	高波浪	12			無	無	60
12					有		

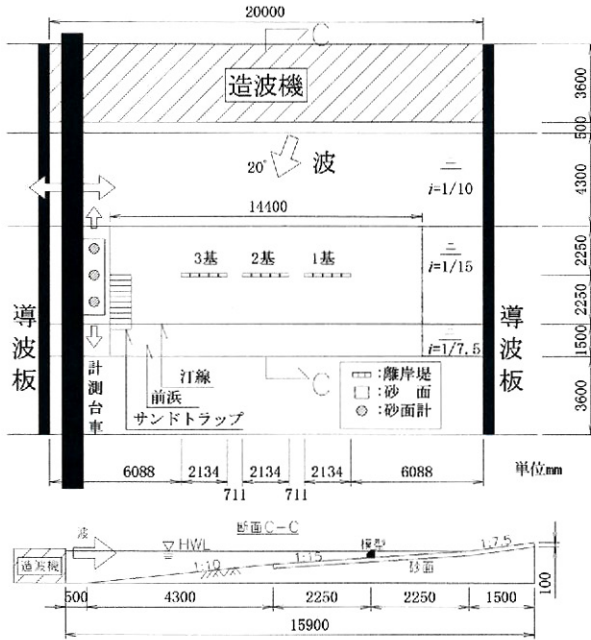


図-7 移動床実験配置図

沿岸漂砂が比較的岸寄りに限定され、漂砂量も比較的少ない常時波浪時には、さらにサンドトラップによって沿岸漂砂の岸沖分布も捉えた。サンドトラップは縦0.25m、横1m、深さ0.1mから成る箱を岸沖方向に10個(汀線より岸側へ0.25m、沖側へ2.25m分)配置し、天端を初期砂面に一致させた。また箱の内部に6号珪砂の最大粒径よりも大きい礫を敷き詰めることにより、トラップ内へ捕捉された砂が波浪によって巻きあがることを防止している。トラップ内に入った砂は溢れ出ないように適宜取り出し、トラップを通過するほぼすべての沿岸漂砂を捕捉した。捕捉した砂は乾燥炉にて水分を飛ばした後、篩い分けによって礫を除去し、乾燥重量を測定している。なお高波浪のケースではサンドトラップを設置していないが、模型を設置したケース12では移動床領域の外へ出た砂を実験後集め、重量を測定している。

(1) 常時波浪による海浜変形

漂砂の上手側は侵食傾向にあり、砕波点を中心とした沿岸流およびステップの形成が見られた。図-8に離岸堤模型がない場合およびある場合の造波後地盤高を示す。離岸堤がない場合、構造物背後は、概ね侵食傾向にある。一方、離岸堤を設置したケースでは、離岸堤背後の波浪遮蔽部汀線付近において舌状砂州が出現し、堆積傾向となった(図-9)。

サンドトラップに捕捉された沿岸漂砂重量の岸沖分布を図-10に示す。模型がない場合、波打ち帯で

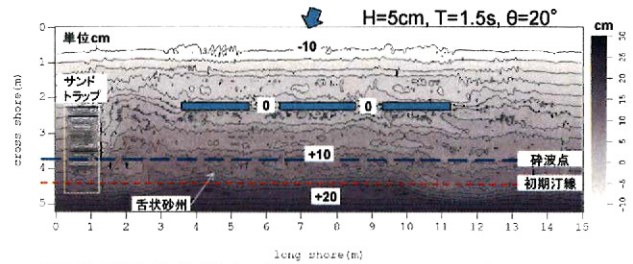
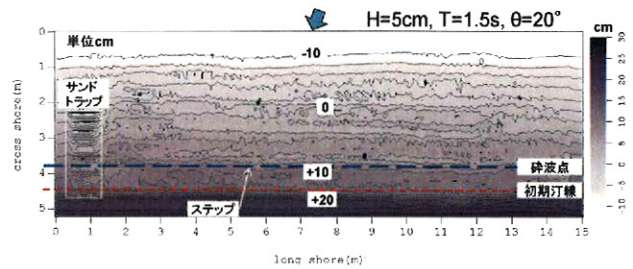


図-8 造波後地盤高 (上: ケース9, 下: ケース10; 模型位置の初期地盤高を0とする)

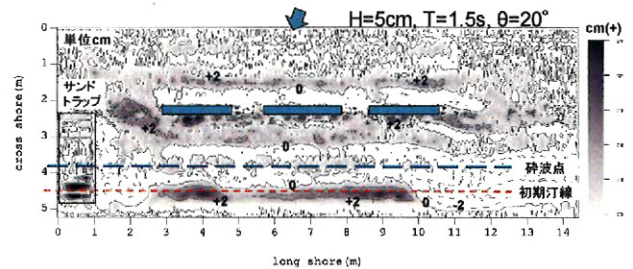


図-9 侵食堆積分布 (ケース10)

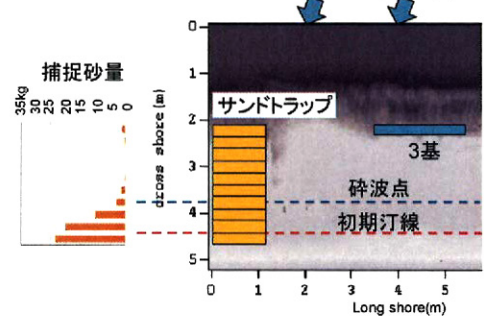
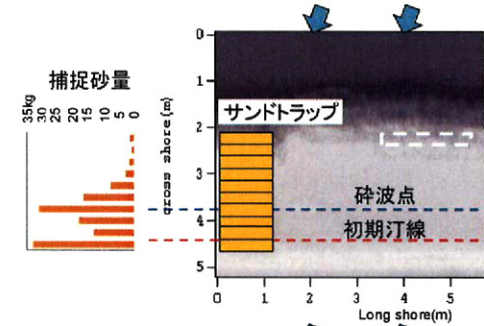


図-10 捕捉砂量岸沖分布 (上: ケース9, 下: ケース10)

沿岸漂砂量が局所的に大きくなるが、全体的には砕波点付近に極大を有する沿岸漂砂の岸沖分布となる。一方、模型を設置した場合、沿岸漂砂の岸沖分布に砕波点付近における極大は見られない。これは離岸堤設置によって背後へは透過率0.6程度の波浪しか伝達しないため沿岸流が抑制されたこと、舌状砂州

を発達させる岸沖方向への流れの発生に伴い、沿岸方向の流速が弱まったことが原因と考えられる。

(2) 高波浪による海浜変形

高波浪時には、砕波点は沖側にシフトするため、沿岸流軸やバー形成位置も沖へ移動する(図-11)。また常時波浪に比べ入射波浪が大きいため、沿岸漂砂に加え岸沖漂砂も発生した。模型を設置した場合、離岸堤背後で舌状砂州の発達が見られるものの常時波浪と比較して離岸堤における透過率が大きいため、堆積傾向は顕著ではない(図-12)。

高波浪実験では、移動床全面に波長5cm程度の砂れんが発生したが、これよりも長い80cm程度の波長スケールの岸沖方向への地盤変動が見られる。模型なしのケースでは汀線やバーからの反射波による部分重複波浪場の形成に伴うものと考えられ、実際、上記波長は移動床部の平均水深に対する波の半波長分に近い長さである。一方、模型を設置したケースでは、構造物前面において模型からの反射波によってこの変動はより顕著に現れ、部分重複波の節で侵食傾向、腹で堆積傾向となる。例えば模型背面は部分重複波の腹に相当するため流速は弱まり、岸沖漂砂の堆積が見られる。これは固定床実験で見られた

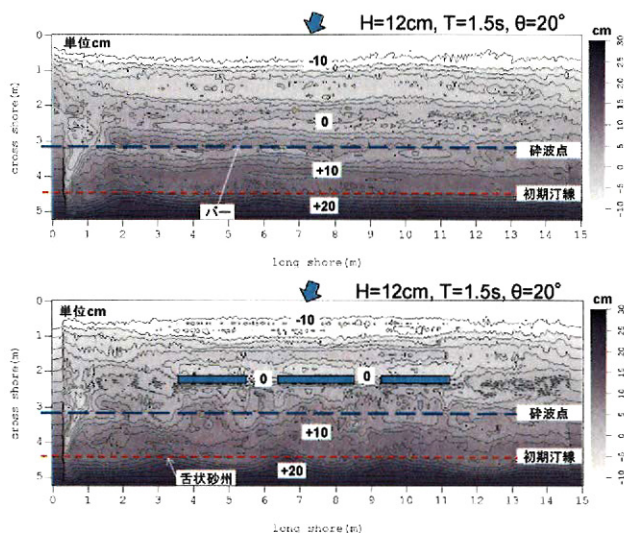


図-11 造波後地盤高(上: ケース11, 下: ケース12; 模型位置の初期地盤高を0とする)

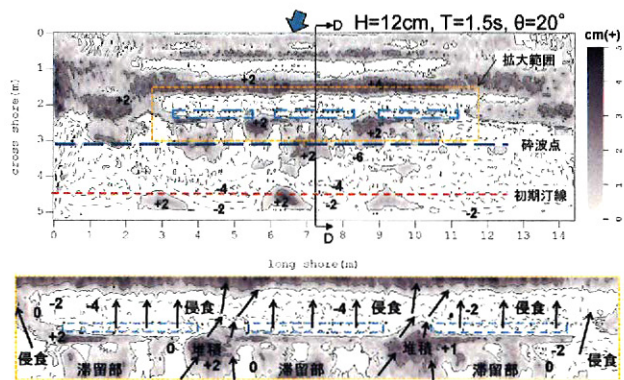


図-12 侵食堆積分布(ケース12; 上: 全体, 下: 拡大)

流速場の滞留域に一致する。さらに離岸堤開口部では、固定床実験において強い沖向き流れが計測されたにもかかわらず、堆積傾向にある。有脚式離岸堤は空隙の大きい構造であり、図-5で見られる構造物背後の水位上昇分は、開口部へ向かう離岸流のみならず、構造物内部、特に底版下部で局所的に強い沖向き流速を発生させる。これによって局所洗掘が生じるため杭基礎構造物の安定性という観点からはデメリットとなる。しかしながら、離岸堤直下で沖向きに質量輸送が強まるため離岸堤開口部における離岸流は相対的に弱まる(図-12下)。よって通常の離岸堤開口部で見られる洗掘は無くなり、沖への漂砂流出を離岸堤群全体で低減させやすい構造と言える。

(3) 有脚式離岸堤構造物による漂砂制御機能

移動床実験におけるサンドトラップによる捕捉漂砂量や移動床領域外への砂の移動量を表-6にまとめる。ケース9, 10から常時波浪時の沿岸漂砂が把握できるが、構造物設置によって沿岸漂砂による侵食量がほぼ半減している。

実験終了までの沿岸漂砂の岸沖断面通過量分布を図-13, 14に示す。構造物設置断面において沿岸漂砂量は、下手側へ行くに連れて減少していく。なお、以下に示すCERC公式⁹⁾から沿岸漂砂量は、波高の3乗にほぼ比例するといえるため、模型がないケース9の漂砂量に透過率の3乗を乗じた量を参考までにグラフ上に示した。

表-6 漂砂量の結果一覧

ケース	波浪	時間 (min)	砂面計侵食分 (kg)	サンドトラップ (kg)	領域外捕捉砂 (kg)	想定した侵食量 (kg)
9	常時波浪	150	135	126	0	126
10	H=5cm, T=1.5s	150	15	60	0	60
11	高波浪	60	336	-	-	336
12	H=12cm, T=1.5s	60	479	-	369	369

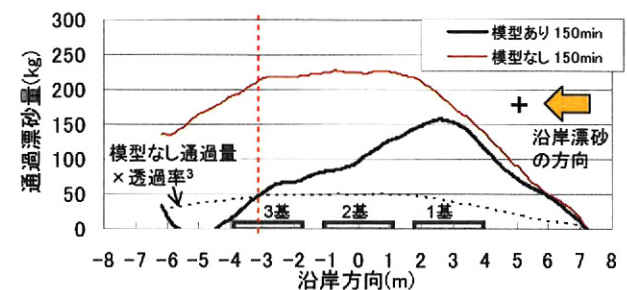


図-13 沿岸漂砂通過量(ケース9, 10)

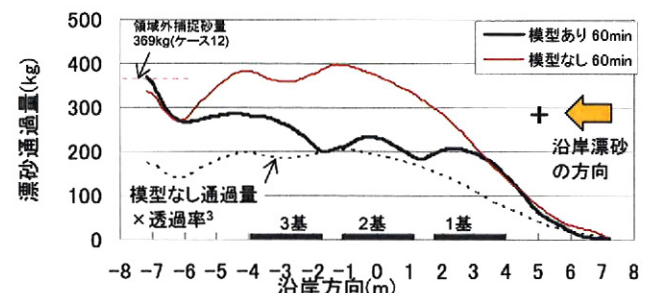


図-14 沿岸漂砂通過量(ケース11, 12)

$$Q = \frac{K(EC_g)_b}{(\rho_s - \rho)g(1-\lambda)} \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (1)$$

ここで、

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \propto H^2 \quad (2)$$

であり、砕波帯で波浪は極浅海波を仮定し、スネルの法則を考慮すると、

$$(C_g)_b \approx \sqrt{g(h+\eta)} \propto H^{0.5} \quad (3)$$

$$\sin \alpha_b \approx C_b \approx \sqrt{g(h+\eta)} \propto H^{0.5} \quad (4)$$

以上より沿岸漂砂量は波高の3乗にほぼ比例する。なお式中、 Q ：沿岸漂砂量、 K ：漂砂に関する係数(=0.77)、 E ：エネルギーフラックス、 C ：波速、 C_g ：群速度、 ρ_s ：砂の密度、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 λ ：空隙率、 α ：波向角度、 H ：波高、 h ：水深、 η ：水位変動、添字 b は砕波点における値を意味する。

本実験では、常時波浪において3基目以降の断面から構造物の透過率に見合った沿岸漂砂の低減効果が実現された。よって消波対象程度の波浪に伴う沿岸漂砂を実験と同様の配置および同等の消波性能を有する構造物で制御するためには、少なくとも3基以上の離岸堤配置が望まれる。

一方、高波浪時は、移動床領域全体で構造物設置による沿岸漂砂の低減効果は明瞭ではない。しかしながら、構造物を設置した場合、離岸堤開口部は堆積傾向にあり、離岸堤背後でも、高波浪時に卓越する岸沖方向への漂砂は構造物背後で捕捉される(図-15)。離岸堤がない場合は、これらの領域は逆に侵食傾向にあり、模型位置直下から前面が堆積傾向となる。以上の議論から、消波対象波を上回る高波浪が来襲した場合においても離岸堤群全体で沖への土砂流出を低減する効果が認められるため、有脚式離岸堤は高波浪時の海岸保全に対しても有効である。

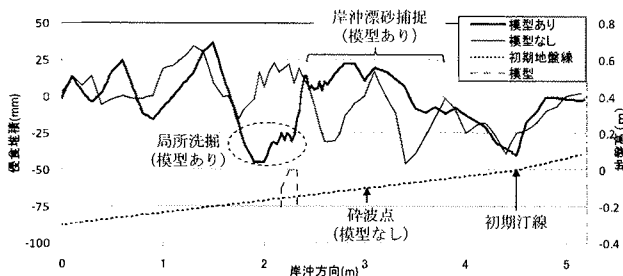


図-15 縦断地形変化 (図-12 D-D断面；ケース11, 12)

5. 結論

(1) 平面水槽実験により、透過型の有脚式離岸堤構造物の消波性能が平面波浪場においても規定の性能(反射率0.5以下、透過率0.6以下)を有することがわかった。

(2) 現地消波対象波浪に相当する常時波浪に対して、沿岸漂砂を制御するために有効となる離岸堤配置、基数が検証された。

(3) 高波浪時に卓越する岸沖漂砂に関しては、離岸堤群全体で捕捉する効果が見られるため、暴浪時も離岸堤による海岸保全効果が期待できる。

(4) 構造物底板直下では局所洗掘が発生するが、洗掘の発生は開口部における侵食を緩和する効果がある。洗掘の進行は基礎杭の根入れ長の設計に影響するため、洗掘対策が今後の課題である。

謝辞：本実験は五洋建設株式会社技術研究所の水理実験棟施設を利用した。関係者には謝意を表し、ここに記します。

参考文献

- 建設省土木研究所：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(1)，土研資料，第2454巻，1987。
- 進藤裕之，笹倉伸男，長谷川泰亮，関本恒浩，西畑剛，片山裕之：現地観測による有脚式突堤の効果の検証-下新川海岸 黒部市生地地先-，海岸工学論文集，第51巻，pp.616-620，2004。
- 宇多高明，中村瑛佳，村井禎美，松永博史：有脚式離岸堤周りの初期洗掘の現地観測，海岸工学論文集，第36巻，pp.409-413，1989。
- 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，pp.525-530，2008。
- 合田良実，鈴木康正，岸良安治：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。
- 田中仁，A. Sana：交差する波と流れの抵抗則の検討，土木学会論文集，No.533/II-34，pp.273-277，1996。
- Sunamura, T. and Horikawa, K.: Two dimensional shore transformation due to waves, *Proc. 14th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.920-938, 1974.
- 下園武範，佐藤慎司，磯部雅彦：砕波帯における海浜流場の発達機構，海岸工学論文集，第52巻，pp.121-125，2005。
- U. S. Army Corps of Engrs., Coastal Engineering Research Center: *Shore Protection Manual*(4th Ed.), U. S. Gov. Print. Office, 1984.