

捨石潜堤の法先洗掘と洗掘に伴う堤体の変形

LOCAL SCOURING AT TOE OF SUBMERGED BREAKWATER AND DEFORMATION OF SUBMERGED BREAKWATER BODY

荒木進歩¹・麓 博史²・三好宏和³・出口一郎⁴

Susumu ARAKI, Hiroshi FUMOTO, Hirokazu MIYOSHI and Ichiro DEGUCHI

¹正会員 博(工) 大阪大学講師 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²正会員 修(工) 国土交通省 横浜国道事務所 (〒221-0855 神奈川県横浜市神奈川区三ツ沢西町13-2)

³学生会員 大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

⁴正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Local scouring at the toe of submerged breakwater is investigated in two-dimensional experiments. Wave height distribution and water particle velocity around the submerged breakwater are also measured in the experiments. Erosion at the toe of the submerged breakwater and accretion in the breakwater body are observed in many cases. Large erosion takes place at nodes of partial standing wave in front of the submerged breakwater. In a few cases, the height of the crest of the submerged breakwater is reduced because of large local scouring. Offshore directed mean velocity has an influence on the topography change around the submerged breakwater under regular waves. On the other hand, the topography change around the submerged breakwater under irregular waves is similar to that in front of an vertical perforated breakwater which has the same reflection coefficient as the submerged breakwater.

Key Words : local scouring, submerged breakwater, mean velocity, partial standing wave, deformation of breakwater body

1. はじめに

海岸構造物の安定性は構造物自身の耐波安定性, 各部材の安定性などの他に, 地盤の安定性も重要な要素である。海岸構造物は砂層上に設置されることが多く, 代表的な海岸構造物である混成堤や消波ブロック被覆堤, また海岸堤防について, 周辺の砂層の変形, 洗掘に関して多くの研究や現地調査が行われてきた(例えば, 榎木¹⁾, 入江ら²⁾, 木原ら³⁾, 五明ら⁴⁾, 鈴木・高橋⁵⁾)。

しかし, 比較的歴史の浅い構造物である潜堤周辺の洗掘や砂層の変形に関する検討例は多くない。浜口ら⁶⁾は新潟海岸の人工リーフの洗掘と沈下の実態を調べ, 斜め入射時の入射側端部と構造物の漂砂下手端の沈下を注意する必要があることを指摘した。武藤ら⁷⁾は石川海岸での離岸堤および人工リーフ周辺の地形変化を調査した。

一方, 著者ら^{8), 9)}は固定床上での潜堤堤体の変形, 崩壊に関する実験を断面2次元および平面実験で行ったが, 構造物の機能が大きく低下するような大変形, 崩壊は一部のケースを除いて見られなかった。五明ら⁴⁾は現地調査の結果から, 構造物の重量不足以外に, 洗掘または地盤の液状化により法先が沈下し, 堤体全体の安定性が低

下することを指摘しており, 海岸構造物の安定性の喪失および変形には海底地形の変化も考慮に入れる必要があると考えられる。

そこで本研究では, 法先洗掘等の周辺地形の変化が捨石潜堤の変形および崩壊に及ぼす可能性を検討することを目的として, 移動床上で潜堤の変形, 崩壊実験を断面2次元水路で行った。

2. 水理実験

(1) 砂層および堤体の変形実験

水理実験は大阪大学工学部の屋内断面2次元水路で行った。図-1に示すように, 代表粒径0.012cmの砂を用いて水路内の平坦床部に長さ3.6m, 厚さ0.1mの砂層を設け, その上に碎石を用いて捨石潜堤を作成した。4種類の粒径の碎石(代表粒径 $D_{50}=0.58\text{cm}, 1.59\text{cm}, 1.81\text{cm}, 3.36\text{cm}$)により被覆層を持つもの, 全断面均一な碎石としたもの等を作製した。捨石潜堤の天端幅は $B=1.0\text{m}$, 天端水深 $R=0.05\text{m}$, 法先水深 $h=0.2\text{m}$, 法面勾配は1:3と

した。

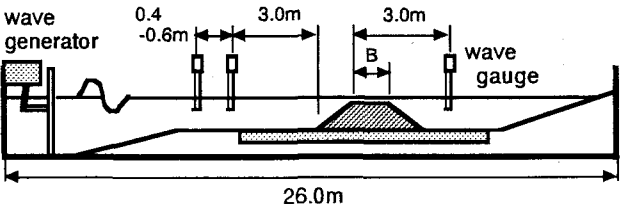


図-1 断面2次元水路

入射波は波高約8cm、周期 $T=1.2, 1.5, 1.8$ 秒の規則波、またはBretschneider-光易型を目標スペクトルとする有義波高 $H_{1/3}=8.1$ cm、有義波周期 $T_{1/3}=1.5$ 秒の不規則波とし、砂層の変形の進行が緩やかになるまで24,000波を堤体に作用させた。一部のケースでは、堤体前後での水位差を低減させるため、ポンプにより堤体背後から沖側へ還流させた。主な実験ケースの諸元を表-1に示す。

造波時には堤体の前後に設置した容量式波高計により水位変動を測定し、1000波もしくは2000波ごとに堤体の形状および堤体沖側の砂層の地形をレーザー変位計により岸沖方向に5cm間隔で測定した。レーザー変位計による断面形状の測定は水路内の中央、および両側壁付近の計3測線上で測定した。また、堤体内部の砂層の変形については、水路側面のガラス壁を通して岸沖方向に1cm間隔で測定した。

表-1 実験ケース

		H ($H_{1/3}$) (cm)	T ($T_{1/3}$) (s)	D_{50} (cm)	
case1	規則波	8.1	1.2	3.36	
case2		8.3	1.5	3.36	
case3		8.0	1.8	3.36	
case4		8.0	1.2	1.59	
case5		7.9	1.5	1.59	
case6		8.1	1.8	1.59	
case7		7.9	1.5	1.59	還流あり
case8		7.8	1.5		直立構築物
case9	不規則波	8.1	1.5	3.36	
case10		8.1	1.5	1.59	
case11		8.1	1.5	1.81 (armor)	0.58cm (core)
case12		8.1	1.5		直立構築物

(2) 波高分布および流速測定実験

変形実験と同じ断面2次元水路（図-1）において、砂層を取り除いた固定床上に堤体を作製し、堤体法肩から約1.5波長沖側の地点から堤体の岸側法先まで、容量式波高計を用いて5cm間隔で水位変動を測定することにより波高分布を得た。

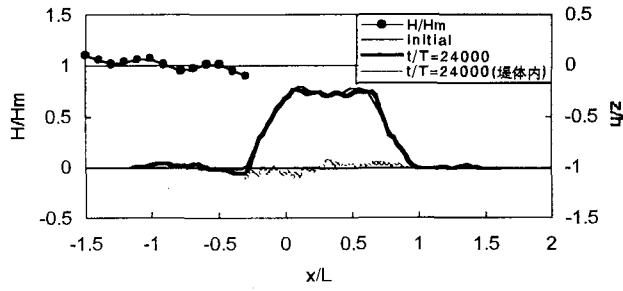
流速の測定は、堤体法肩から約1.5波長沖側の地点から堤体の岸側法先まで、水平2成分の電磁流速計を用いて岸沖方向に10cm間隔、鉛直方向には4地点で行った。鉛直方向の測定位置は $z/h=-0.25, -0.40, -0.65, -0.90$ （ z は静水面を原点とする鉛直上向きの座標）とした。堤体内部の流速については、堤体に直径約6cmの円柱状の空間を金網で作製して測定した。水位変動および流速は0.05秒間隔で51.2秒間の測定を行った。入射波の諸元は砂層および堤体の変形実験と同一とするが、解析を容易にするため規則波のみとした。

波高分布および流速測定実験では、捨石潜堤堤体は $D_{50}=3.36$ cmの碎石により全断面均一な粒径で作製したものを使用した。

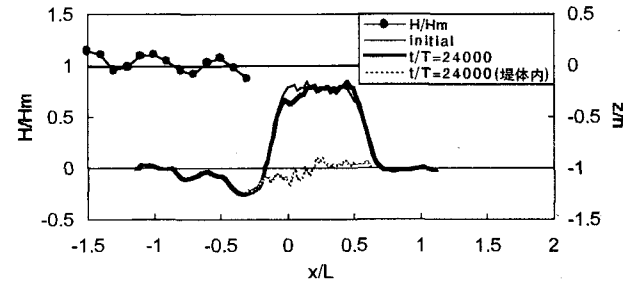
3. 規則波による断面変形

(1) 捨石潜堤周辺の砂層および堤体の断面変形

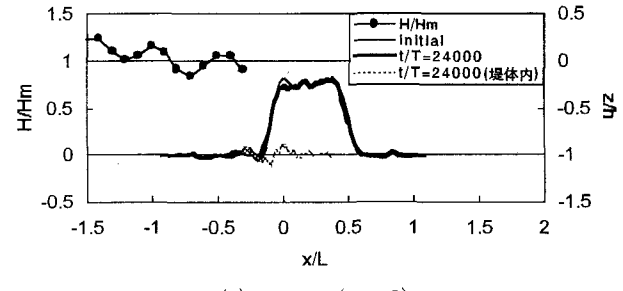
図-2に、全断面均一な粒径 $D_{50}=3.36$ cmの碎石で作製した捨石潜堤の造波終了後の砂層および堤体の形状を示す。横軸は法先での波長 L で無次元化した岸沖方向距離 x/L で、堤体沖側の法肩を原点として岸向きを正としている。また、縦軸は法先水深 h で無次元化した鉛直方向座標 z/h で、静水面が原点である。細実線が初期形状、太実線が造波終了後の形状、点線は造波終了後の堤体内の砂層の形状を示す。図中に示す堤体前後の砂層は、可能な限り堤体内の砂層の形状との連続性を保つため、ガラス壁付近の測線上で測定された形状を示している。図中には、堤体沖側の波高分布も黒丸で併せて示す。この波高分布は堤体沖側での平均波高 H_m で無次元化している。



(a) $T=1.2$ s (case1)



(b) $T=1.5$ s (case2)



(c) $T=1.8$ s (case3)

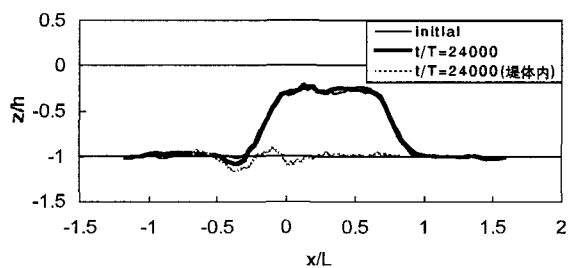
図-2 砂層および堤体の変形 ($D_{50}=3.36$ cm)

図-2(a)は周期1.2秒のケースである。堤体法先の砂層および堤体内部沖側の砂層が侵食された。法先付近の底質は離岸方向に移動して沖側に堆積し、堤体内部では向岸方向に移動して堤体内部の岸側に堆積している。

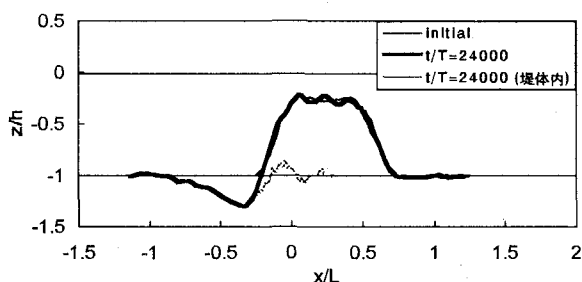
図-2(b)は周期1.5秒のケースである。沖側法先および捨石層下部の底質が流出し、法先が大きく侵食された。また、それに伴い沖側の天端が沈下している。捨石層下部の波高分布から、砂層が大きく侵食されるのは部分重複波の節の位置であることが分かる。これは入江ら²⁾のL-typeの洗掘に相当している。

図-2(c)は周期1.8秒のケースである。このケースでは堤体法先はほとんど侵食されていない。しかし、捨石層下部の沖側では侵食が見られ、底質はほぼ岸向きに移動して堤体内に堆積した。

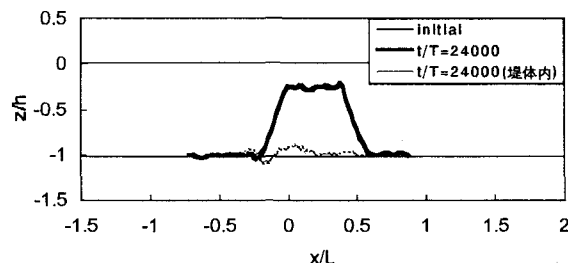
図-3に、全断面均一な粒径 $D_{50}=1.59\text{cm}$ の碎石で作製した捨石潜堤の造波終了後の砂層および堤体の形状を示す。図-2と同様に、横軸は無次元化した岸沖方向距離 x/L 、縦軸は無次元化した鉛直方向座標 z/h で、細実線が初期形状、太実線が造波終了後の形状、点線は造波終了後の堤体内の砂層の形状を示す。



(a) $T=1.2\text{s}$ (case4)



(b) $T=1.5\text{s}$ (case5)



(c) $T=1.8\text{s}$ (case6)

図-3 砂層および堤体の変形 ($D_{50}=1.59\text{cm}$)

図-3(a)および(b)は、それぞれ周期1.2秒、1.5秒のケースである。図-3(a)では、図-2(a)に示した粒径 $D_{50}=3.36\text{cm}$ 、周期1.2秒のケースに比べて法先での侵食が大きく、逆に堤体内部の地形変化はやや小さくなり、砂層の変化は堤体内の沖側の狭い範囲にとどまっている。図-3(b)でも同様に、図-2(b)に示した粒径 $D_{50}=3.36\text{cm}$ 、周期1.5秒のケースに比べて法先での侵食は大きく、堤体内部の地形変化は小さい。これは、堤体を構成する碎石の粒径が小さくなったことにより堤体内の空隙が小さくなり、堤体内部の水の動きが小さくなったためと考えられる。図-3(b)では法先が大きく侵食されているが、法先付近の堤体内部には大きな侵食が発生していないため、図-2(b)とは異なり天端の沈下は見られない。

図-3(c)は周期1.8秒のケースである。図-2(c)に示した粒径 $D_{50}=3.36\text{cm}$ 、周期1.8秒のケースと同様に、法先にはほとんど侵食は見られない。また、全体的にも砂層の地形変化は小さく、図-2(c)と比較しても粒径の違いによる顕著な相違は見られない。

図-2および図-3においては周期1.5秒のケースで大きな法先洗掘が生じたが、周期1.2秒および1.8秒のケースでは法先洗掘の規模は比較的小さく、入射波の周期による影響は明らかにすることができなかった。

(2) 潜堤前後の水位差の影響

断面2次元実験では、Wave Set-upにより堤体背後の水位が過剰に上昇する。この影響を除去するために、ポンプを用いて堤体背後から造波板付近に還流を発生させて堤体背後の水位上昇を抑制し、堤体前後の水位をほぼ同一に保つようにした。

このケースでの砂層および堤体の断面形状を図-4に示す。入射波は波高 $H=7.9\text{cm}$ 、周期 $T=1.5\text{秒}$ であり、堤体は粒径 $D_{50}=1.59\text{cm}$ の碎石で全断面均一に作製されたものである。図-3(b)に示したケースと比較すると、法先での侵食量が小さくなっていることが分かる。堤体背後での水位差を小さくすることにより、堤体上の平均的な沖向き流れが小さくなり、これにより離岸方向への底質移動が抑えられたと考えられる。

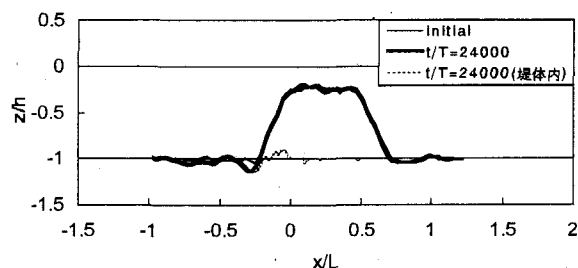


図-4 還流させた場合の砂層と堤体の変形 (case7)

(3) 重複波動場での砂層の変形

潜堤の沖側斜面上または天端上では、一般に碎波が生じる。この碎波による影響を取り除き、重複波動場での

砂層の変形を調べるために、潜堤設置時と同等な反射率を持つ金網状の直立構造物（ヘチマロンで作製）を設置し、波高 $H=7.8\text{cm}$ 、周期 $T=1.5\text{s}$ の規則波を入射させた。なお、この金網状の直立構造物設置時には構造物前後の水位差もほとんど生じない。

このケースでの砂層の断面形状を図-5に示す。波高分布はこの直立構造物設置時にも測定し、結果を併せて図中に黒丸で示す。直立構造物の前面は侵食されているが、図-3(b)で示したケースに比べると侵食量はかなり小さくなっている。図-4に示した堤体前後の水位差を低減したケースでも法先が大きく洗掘されていないことから、冲向きの平均流が法先の洗掘に影響を及ぼしていると考えられる。また、砂層が侵食されるのは部分重複波の節の位置であることも分かる。

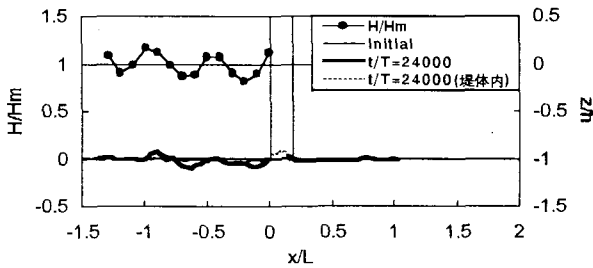


図-5 直立構造物設置時の砂層の変形 (case8)

4. 捨石潜堤周辺の流速場

図-6(a)～(d)に底面付近 ($z/h=-0.90$) で測定された流速の時系列を示す。図-6(a)は $x/L=-0.52$ で部分重複波の腹の付近、図-6(b)は $x/L=-0.22$ で部分重複波の節（堤体の法先）付近の流速であるが、両者の波形に大きな差は見られない。岸向きの最大値は冲向きの最大値より大きい。冲向きに流れる時間が長いことから平均的には冲向きの流れになっている。図-6(c)および図-6(d)は、それぞれ $x/L=-0.02$ （沖側法肩付近）および $x/L=+0.27$ での流速波形であり、どちらも堤体内で測定された流速である。図-6(c)の沖側法肩付近では、岸向き最大値が冲向き最大値より小さく、また波形も他の地点とは異なり、正弦波に近い。図-6(d)での流速波形は、再び岸向きの最大値が冲向きの最大値より大きくなっている。堤体内で測定された流速波形は、図-6(c)に示す沖側法肩付近以外はほぼ図-6(d)に示す波形に近い形であった。

図-7(a)、(b)および(c)に、それぞれ周期1.2秒、1.5秒および1.8秒のケースにおいて堤体沖側および堤体内部で測定された平均流速の空間分布を示す。横軸は法先での波長 L で無次元化した岸沖方向距離 x/L で、堤体沖側法肩が原点であり、岸向きを正とする。縦軸は法先での長波の波速 $\sqrt{gh}$ で無次元化した水平方向平均流速 $\bar{u}$ で、岸向きが正である。

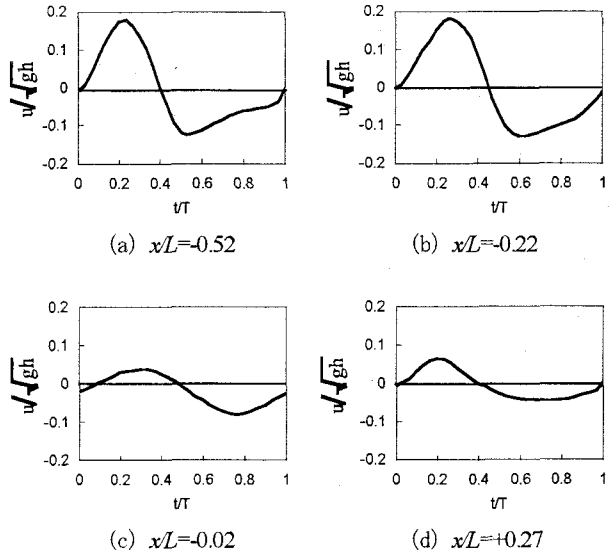
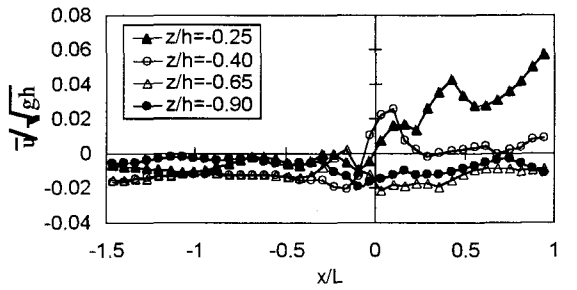
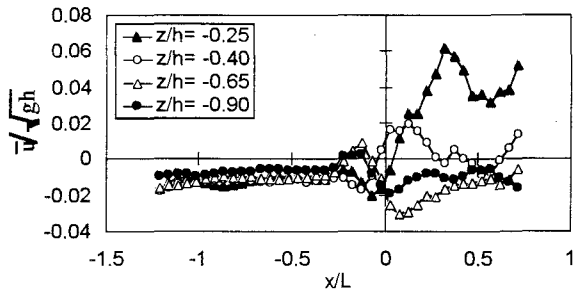


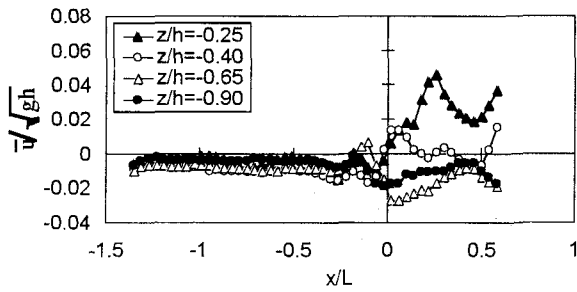
図-6 流速時系列



(a) $T=1.2\text{s}$



(b) $T=1.5\text{s}$



(c) $T=1.8\text{s}$

図-7 潜堤周辺の平均流速 ($D_{50}=3.36\text{cm}$)

入射波の周期にかかわらず、3つのケースとも法先より沖側では沖向きの平均流が存在しており、堤体沖側では離岸方向の底質移動が生じやすいと考えられる。しかし、この沖向き平均流は、底面に近い $z/h=-0.90$ の地点だけでなく、最も水面に近い $z/h=-0.25$ の地点においても存在しており、水面付近では大きな岸向きの質量輸送が生じていることが予想される。また本実験の結果は、底面からの高さにより節から腹、または節から腹への平均流が示されている入江ら²⁾の実験とは異なる結果となった。

沖側法肩より岸側 ($x/L > 0$) では、碎波に伴い発生した強い岸向きの平均流が天端面付近 ($z/h=-0.25$) で見られる。また、底面付近 ($z/h=-0.65, -0.90$) では、周期1.5秒および1.8秒のケースの法先付近で岸向きの平均流が生じているものの、堤体内にはほぼ沖向きの平均流が生じている。堤体内では岸向きの底質移動が見られたが、これは堤体内の流速が大きくないために底質が浮遊せず、掃流状態で移動するために平均流の向きが影響しなかったと考えられる。

5. 不規則波による断面変形

(1) 捨石潜堤周辺の砂層および堤体の断面変形

図-8に、有義波高 $H_{1/3}=8.1\text{cm}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=1.5$ 秒の不規則波を入射させたケースでの造波終了後の砂層および堤体の形状を示す。横軸は法先での波長 L で無次元化した岸沖方向距離 x/L 、縦軸は法先水深 h で無次元化した鉛直方向座標 z/h である。細実線が初期形状、太実線が造波終了後の形状、点線は造波終了後の堤体内の砂層の形状を示す。潜堤堤体は粒径 $D_{50}=3.36\text{cm}$ の碎石で均一に作製した。法先にはわずかな洗掘が見られ、堤体内には底質が堆積している。図-2(b)に示した規則波実験の結果と比べると、沖側で砂層の侵食が見られる範囲は同程度であるが、法先での侵食量、洗掘深は大きく減少している。また、天端の沈下も見られない。

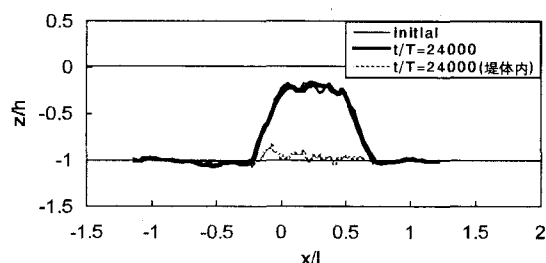


図-8 砂層および堤体の変形 ($D_{50}=3.36\text{cm}$, case9)

図-9に、有義波高 $H_{1/3}=8.1\text{cm}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=1.5$ 秒の不規則波を入射させたケースでの造波終了後の砂層および堤体の形状を示す。潜堤堤体は粒径 $D_{50}=1.59\text{cm}$ の碎石で均一に作製した。粒径 $D_{50}=3.36\text{cm}$ で堤体を作製したケースと同様に、法先はわずかに侵食され、堤体内に底

質が堆積している。図-3(b)に示した規則波実験の結果と比べると、法先での侵食量、洗掘深が大きく減少している。また、図-8のケースに比べると堤体内の空隙が小さく、堤体内の流速が低減するために、堤体内での底質が堆積する領域は小さくなっている。

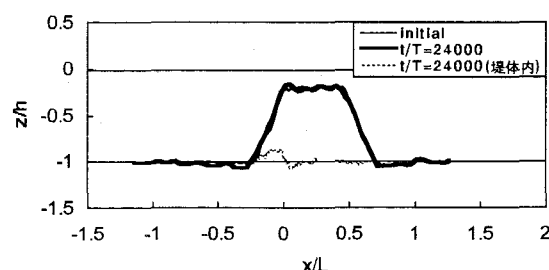


図-9 砂層および堤体の変形 ($D_{50}=1.59\text{cm}$, case10)

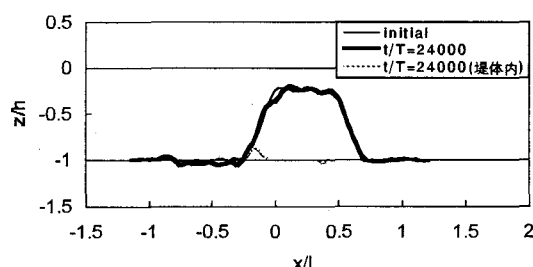


図-10 一層被覆した堤体周辺の砂層と堤体の変形 (case11)

図-10に、粒径 $D_{50}=0.58\text{cm}$ の碎石で作製した捨石マウンドを粒径 $D_{50}=1.81\text{cm}$ の碎石で1層被覆した潜堤に、有義波高 $H_{1/3}=8.1\text{cm}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=1.5$ 秒の不規則波を入射させたケースでの造波終了後の砂層および堤体の形状を示す。堤体内の空隙がさらに小さくなることにより堤体内の流速が低減し、堤体内での底質移動が抑制されているようである。したがって、堤体内部の碎石の粒径を小さくすると、捨石層下部の底質が安定すると言える。これは木原³⁾や鈴木・高橋⁵⁾が他の構造形式について言及している通りである。しかし、入射波による堤体法肩の変形量は他のケースで見られなかったほど大きく、図-9に示す粒径 $D_{50}=1.59\text{cm}$ の堤体のケースより表層(被覆層)の粒径は大きいにもかかわらず碎石の移動量は多かった点は留意すべきである。

(2) 重複波動場での砂層の変形

規則波の場合と同様に、堤体斜面上での碎波の影響を取り除き、重複波動場での砂層の変形を調べるため、潜堤設置時と同等な反射率を持つ金網状の直立構造物を設置し、有義波高 $H_{1/3}=8.1\text{cm}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=1.5$ 秒の不規則波を入射させた。

このケースでの砂層の断面形状を図-11に示す。直立壁の直下で洗掘がわずかに見られ、構造物内には底質が堆積している。構造物の沖側での地形変化がそれほど大きくないため明瞭ではないが、図-8および図-9に示した捨石潜堤設置時の砂層の変形と比べると、底質の移動傾

向および変形量とも比較的似ている。規則波の場合は同一の波高、周期を持つ波が入射し、碎波およびそれに伴い発生する流れが継続するのに対し、不規則波の場合は碎波が生じない波も多く入射するため、重複波動場の影響が比較的強く現れるものと考えられる。

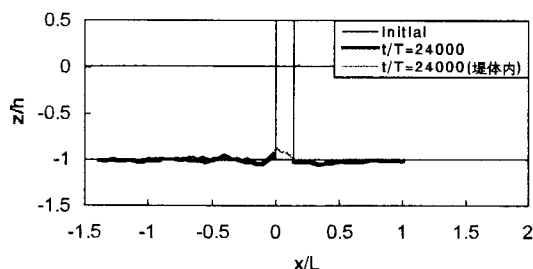


図-11 直立構造物設置時の砂層の変形（不規則波，case12）

6. まとめ

本研究では、捨石潜堤の法先洗掘とそれに伴う堤体の変形、および潜堤沖側の砂層の地形変化を断面2次元実験により検討した。得られた主要な結果をまとめる。

- 1) 堤体の法先で洗掘が生じ、捨石層下部の底質も岸向き、または沖向きに移動した。大規模な洗掘が生じて堤体の天端が沈下したケースもあった。また、堤体内の捨石の粒径が小さくなると、空隙内の流速が低減し、堤体内の底質移動は抑制された。
- 2) 規則波を作用させた実験において、堤体背後から沖側に還流させたケースや金網状の直立構造物を設置したケースでは法先洗掘の規模が小さくなった。これは堤体前後の水位差により発生する平均的な沖向き流れが法先洗掘に影響を及ぼしていることを示唆している。
- 3) 不規則波を作用させた実験では、堤体前面の砂層の変化に及ぼす重複波波動場の影響が比較的強く現れた。また、堤体内部の砕石を小さくすると堤体内の底質移動は抑制されるが、表層の捨石（被覆石）は入射波により移動しやすくなる傾向がある。

堤体法先での洗掘は多くのケースで見られたが、洗掘に伴う堤体変形が生じたケースは多くはなかった。そのため、洗掘に伴って生じる堤体変形の詳細については議

論を深めることができなかった。今後は、実験条件、実験スケールの再考とともに、不規則波実験における波動場の測定および考察、また平面実験の実施も考えていく。

謝辞：本研究は財団法人 鴻池奨学財団から助成を受けて行った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 榎木 亨：海岸堤防基部の局所洗掘機構に関する研究（その1），第14回海岸工学講演会論文集，pp.329-335，1967。
- 2) 入江 功，近藤隆道，赤石正広，寺崎賢次：重複波による防波堤前面での海底洗掘—底質の移動機構に着目した研究—，第31回海岸工学講演会論文集，pp.350-354，1984。
- 3) 木原 力，甲斐正義，鳥居雅孝，望月規行：防波堤前面の洗掘対策について，第35回海岸工学講演会論文集，pp.402-406，1988。
- 4) 五明美智男，高橋重雄，鈴木高二朗，姜 閔求：消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査（第2報），海岸工学論文集，第44巻，pp.961-965，1997。
- 5) 鈴木高二朗，高橋重雄：消波ブロック被覆堤のブロック沈下に関する一実験—マウンドとブロック下部の洗掘—，海岸工学論文集，第45巻，pp.821-825，1998。
- 6) 浜口達男，宇多高明，市ノ瀬栄彦，五十嵐晃：新潟海岸の人工リーフの沈下実態調査，海岸工学論文集，第36巻，pp.434-438，1989。
- 7) 武藤和彦，宇多高明，島 敏明，岡本俊策：高波浪によるバーの大規模変動の観測—石川海岸の離岸堤・人工リーフ沖の地形変化—，海岸工学論文集，第39巻，pp.446-450，1992。
- 8) 荒木進歩，宮崎敏弘，柳原哲也，新島 宏，出口一郎：堤体端部の影響に着目した捨石潜堤の変形について，海洋開発論文集，第18巻，pp.269-274，2002。
- 9) 荒木進歩，柳原哲也，新島 宏，麓 博史，出口一郎：捨石潜堤の平面的な効果，海洋開発論文集，第19巻，pp.201-206，2003。