

人工リーフの設置に伴う堤体周辺の地形変化と 堤体の沈下に関する研究

TOPOGRAPHY CHANGE AND SETTLEMENT OF BREAKWATER BODY CAUSED BY CONSTRUCTING SUBMERGED BREAKWATER

荒木進歩¹・三好宏和²・井川辰朗³・田中孝幸⁴・出口一郎⁵

Susumu ARAKI, Hirokazu MIYOSHI, Tatsuro IGAWA, Takayuki TANAKA 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) 日本生命保険相互会社 (〒541-8501 大阪市中央区今橋3-5-12)

³ 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 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)

⁵正会員 博工 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)

Topography change in the vicinity of submerged breakwaters is investigated in two-dimensional experiments. Under incident waves with shorter wave period, the sediment under the submerged breakwater was transported offshore, whereas the sediment in front of the submerged breakwater was transported onshore and was deposited in the submerged breakwater body under incident waves with longer wave period. The authors evaluate cross-shore sediment transport rate through the submerged breakwater body from the measured topography change. The authors show the possibility that the sediment behind the submerged breakwater is transported offshore by constructing the submerged breakwater.

Key Words : *Topography change, submerged breakwater, local scouring, cross-shore sediment transport rate*

1. はじめに

人工リーフの設置目的は波浪制御や海浜安定化等であるが、その設置地点は砂層上であることが多く、堤体天端上での碎波およびそれに伴って生じる流れにより地形変化が生じやすい。人工リーフが所要の性能を発揮するためには堤体の形状が保たれていることが必要であり、海底の地形変化により堤体の沈下が生じないように配慮する必要がある。海底地形の変化としては、堤体の法先洗掘や複数基設置された人工リーフ群の開口部での侵食などが挙げられる。

宇多ら¹⁾は、平面水槽内の移動床上に設置した人工リーフ群の堤長と開口幅を変化させた実験を行い、開口部では顕著な洗掘が生じることを示した。浜口ら²⁾は、新潟海岸に設置された人工リーフの法先が洗掘され、堤体が沈下した事例を報告している。また、人工リーフは背後の海浜安定化を図る目的も有することから、堤体背後は堆砂傾向になることが期待されるが、荘司ら³⁾は、

新潟西海岸に設置された人工リーフ(天端幅が15~17mの暫定断面)の背後が侵食されたことを報告している。岡田・河野⁴⁾も、天端幅が比較的狭い潜堤背後で洗掘が生じた調査結果を示している。

以上のことから、本研究では天端幅が比較的短い人工リーフを対象とし、堤体背後の底質移動を考えることとする。堤体背後の侵食は、底質が堤体背後の流れにより人工リーフ開口部から沖に流出することにより発生することも考えられるが、堤体内部を通過して沖に流出する可能性も考えられる。そこで、まずは断面2次元実験により、岸沖漂砂による堤体前後の地形変化を明らかにすることを目的とする。著者ら⁵⁾は、すでに断面2次元水路内の平坦な移動床上に設置された人工リーフの法先洗掘について検討を行っているが、堤体下の底質移動は多くはなく、堤体の沈下が見られるケースはごくわずかであった。これを踏まえて、本研究では1/50の傾斜海浜上に堤体を設置して検討を行うこととする。

2. 水理実験

図-1に示す長さ28.0m、幅0.7mの断面2次元水路内に設置された勾配1/50の固定床斜面の一部を移動床とし、その上に碎石により人工リーフを作製した。移動床に用いた底質の代表粒径は0.12mmで、人工リーフは代表粒径1.59cmの碎石をcore材とし、代表粒径3.36cmの碎石を被覆石とした。堤体の法先水深は $h=15\text{cm}$ であり、沖側、岸側の法面勾配はそれぞれ1:3、1:2とした。堤体の天端幅 B を20、50、80cm、天端水深 R を0、5、10cmに変化させ、波高 H_i が約9cm、周期 $T=1.2$ 、1.5、1.8sの規則波を20,000波まで入射させて人工リーフ周辺の地形を変化させた。現地では不規則波が来襲するが、不規則波を用いた移動床実験では地形の変化が平滑化された形になり、漂砂移動現象の傾向がつかみにくい。そのため本実験では規則波を使用し、重複波動場の腹と節を固定して検討を行った。消波ブロック被覆護岸を対象とした榊山・鹿島⁶⁾の実験においても、不規則波では法先洗掘が生じにくいことが指摘されている。入射波諸元は堀川ら⁷⁾の C_s パラメータをもとに侵食傾向から侵食～堆積の中間の傾向（遷移型）を持つように選定した。周期 $T=1.2$ 、1.5、1.8sに対する C_s の値はそれぞれ9.6、8.3、7.3である。各実験ケースの条件を表-1に示す（表中の D_{A50} および D_{C50} はそれぞれ被覆石の粒径、core材の粒径を表す）。

堤体断面および堤体周辺の地形はレーザー変位計により測定した。レーザー変位計による断面地形の測定は水路内に設定した3測線上で行い、これらを平均して断面地形とした。また、堤体下の砂層の変化についても水槽側面のガラス壁を通して測定した。堤体の前後には容量式波高計を設置して入射波高、反射波高および伝達波高を測定し、堤体の沖側および岸側法先では3次元超音波ドップラー流速計を用いて水粒子速度も測定した。

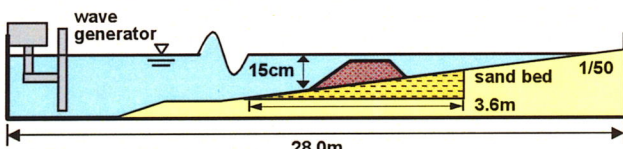


図-1 断面2次元水路

表-1 実験ケース

	H_i (cm)	T (s)	B (cm)	R (cm)	D_{A50} (cm)	D_{C50} (cm)
case1	9.0	1.2	50	5	3.36	1.59
case2	9.0	1.5	50	5	3.36	1.59
case3	8.9	1.8	50	5	3.36	1.59
case4	8.9	1.5	20	5	3.36	1.59
case5	9.0	1.5	80	5	3.36	1.59
case6	9.1	1.8	20	5	3.36	1.59
case7	8.9	1.8	80	5	3.36	1.59
case8	9.1	1.5	50	10	3.36	1.59
case9	9.0	1.5	50	0	3.36	1.59
case10	8.8	1.8	50	10	3.36	1.59
case11	8.9	1.8	50	0	3.36	1.59
case12	8.9	1.5	50	5	3.36	3.36
case13	8.9	1.5	no breakwater			
case14	8.6	1.8	no breakwater			

3. 堤体周辺の地形変化

(1) 入射波の周期の影響

図-2に、周期 $T=1.2\text{s}$ 、波高 $H_i=9.0\text{cm}$ の規則波を20,000波作用させたときの地形変化を示す。天端幅は $B=50\text{cm}$ 、天端水深は $R=5\text{cm}$ である。横軸は入射波長 L で無次元化した岸沖方向距離 x/L で、堤体の沖側法先を原点として岸向きが正、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。細実線は堤体断面および周辺砂層の初期形状、太実線は20,000波の造波終了後の形状で、細点線および太点線は、それぞれ堤体下の砂層の初期形状および造波終了後の形状を表す。また、上側の図には、初期地形上において岸沖方向に10cm間隔で測定された波高を入射波高 H_i で無次元化した岸沖方向の波高分布を示す。なお、地形変化の図の横軸において、 $x/L < -0.73$ の領域は固定床となっている。

このケースでは堤体の沖側法先が大きく洗掘され、沖向きの漂砂移動が生じていることがわかる。堤体下も侵食されたために堤体の天端がやや沈下している。堤体背後には堆積が見られるが、これは図の領域よりさらに岸側からの沖向き漂砂移動によるものである。堤体前面の波高分布を見ると、わずかながら部分重複波の形成が見られ、節の位置で堆積傾向にあるが明瞭ではない。

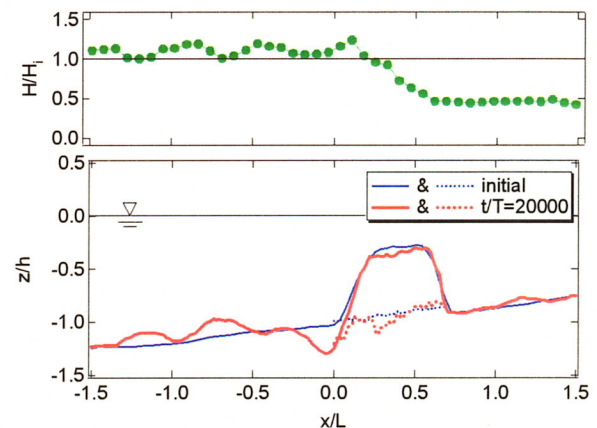


図-2 堤体周辺の地形変形と波高分布 ($T=1.2\text{s}$, Case1)

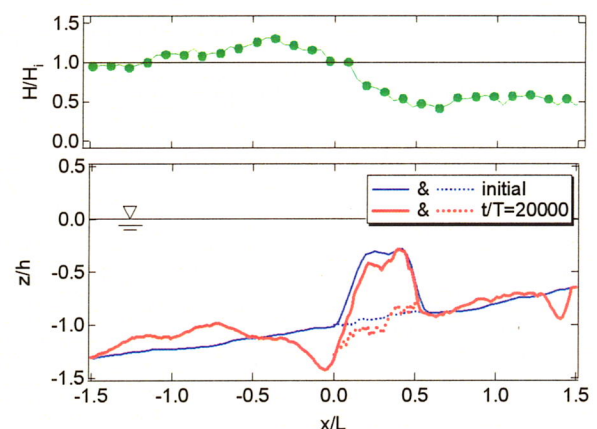


図-3 堤体周辺の地形変化と波高分布 ($T=1.5\text{s}$, Case2)

図-3に、周期 $T=1.5s$ 、波高 $H_f=9.0cm$ の規則波を20,000波作用させたときの地形変化を示す。天端幅は $B=50cm$ 、天端水深は $R=5cm$ である。横軸の $x/L < -0.56$ および $x/L > 1.46$ の領域は固定床となっている。Case1と同様に、沖側法先が大きく洗掘され、沖向きの漂砂移動が生じた。法先付近の堤体下も大きな侵食を受けたため、天端も大きく沈下した。 $x/L=+1.4$ 付近に比較的大きな侵食が見られるが、これはこの地点が移動床と固定床の境目であり、これより岸側から底質の供給がないことに起因するものである。

図-4に、周期 $T=1.8s$ 、波高 $H_f=8.9cm$ の規則波を20,000波作用させたときの地形変化を示す。天端幅は $B=50cm$ 、天端水深は $R=5cm$ である。横軸の $x/L < -0.46$ および $x/L > 1.19$ の領域は固定床となっている。Case1およびCase2とは異なり、堤体前面では岸向きの漂砂移動が見られ、堤体内に底質が大きく堆積した。堤体背後はCase1およびCase2と同様に、沖向きの漂砂移動が見られた。 $x/L=-0.5$ および $+1.2$ 付近で地形がやや不連続になっているのは、これらの地点が前述のように移動床と固定床の境目になっているためである。堤体前面の波高分布は明瞭ではないが部分重複波が形成されていることが確認できる。

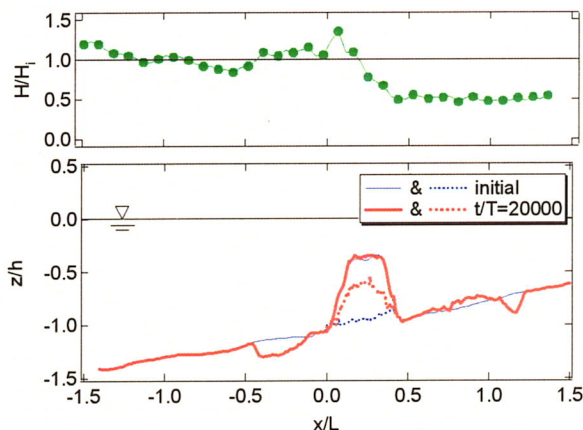


図-4 堤体周辺の地形変化と波高分布 ($T=1.8s$, Case3)

以上、図-2から図-4に示したCase1からCase3の地形変化より、周期 $T=1.2s$ と $1.5s$ の入射波は共に沖向き漂砂移動の傾向があると考えられる。これ以降は沖向き漂砂移動の傾向を持つ周期 $T=1.5s$ と、岸向き漂砂移動の傾向を持つ $T=1.8s$ の入射波に絞って検討を行う。

(2) 天端幅の影響

図-5に、周期 $T=1.5s$ 、波高 $H_f=9.0cm$ の規則波を天端幅 $B=80cm$ 、天端水深 $R=5cm$ の堤体に20,000波作用させたときの地形変化を示す。沖側法先の洗掘形状、堤体沖側および背後での沖向きの漂砂移動等はCase1とほぼ同様である。図示しないが、天端幅 $B=20cm$ 、天端水深 $R=5cm$ の堤体に波を作用させた場合 (Case4) の地形変化の傾向もほぼ同様であったが、堤体前面での地形変化は (沖向きの漂砂量) はやや少なかった。

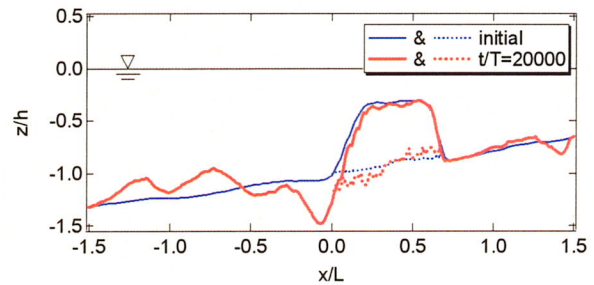


図-5 堤体周辺の地形変化 ($T=1.5s$, $B=80cm$, Case5)

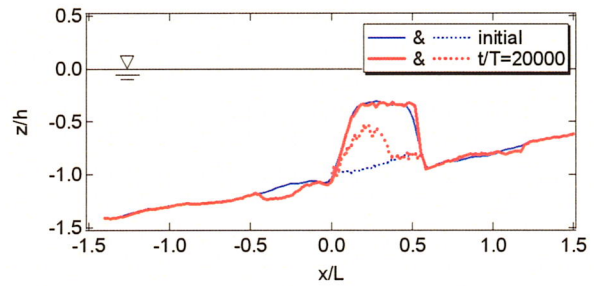


図-6 堤体周辺の地形変化 ($T=1.8s$, $B=80cm$, Case7)

図-6に、周期 $T=1.8s$ 、波高 $H_f=8.9cm$ の規則波を天端幅 $B=80cm$ 、天端水深 $R=5cm$ の堤体に20,000波作用させたときの地形変化を示す。堤体前面での岸向き移動、および堤体内への底質の堆積等はCase3とほぼ同様である。ただし、図から分かるように天端幅が長くなったために、堤体内の岸側部分での底質の堆積は少ないようである。図示しないが、天端幅 $B=20cm$ 、天端水深 $R=5cm$ の堤体に波を作用させた場合 (Case6) の地形変化の傾向もほぼ同様であった。

(3) 天端高さの影響

図-7に、周期 $T=1.5s$ 、波高 $H_f=9.1cm$ の規則波を天端水深 $R=10cm$ 、天端幅 $B=50cm$ の堤体に20,000波作用させたときの地形変化を示す。堤体前面での法先洗掘や沖向き漂砂の傾向はCase2およびCase5と同様であるが、堤体背後での地形変化が大きくなっており、沖向きの漂砂移動により堤体岸側法先付近から堤体内にかけて明瞭な底質の堆積が見られる。これは天端水深が大きい ($R/H_f=1.10$) ために波高の減衰が小さく、堤体背後での漂砂移動が活発になったためである。

図-8に、周期 $T=1.5s$ 、波高 $H_f=9.0cm$ の規則波を天端水深 $R=0cm$ 、天端幅 $B=50cm$ の堤体に20,000波作用させたときの地形変化を示す。沖側法先での洗掘、沖向きの漂砂移動はCase2およびCase5と同様であるが、堤体背後では図-7に示したCase8とは逆に、天端が高いために背後への伝達波高が小さくなった結果、地形変化はほとんど見られない。しかし、堤体下の中央付近は非常に大きく侵食され、底質が沖に流出した。天端水深が大きい場合は堤体背後からの沖向きの戻り流れの大部分は天端上を通過するが、このケースのように天端水深が非常に小さい場合は、堤体背後からの戻り流れが堤体内を通過せざ

るを得なくなり、この流れにより堤体下の底質が輸送されたのではないかと考えられる。

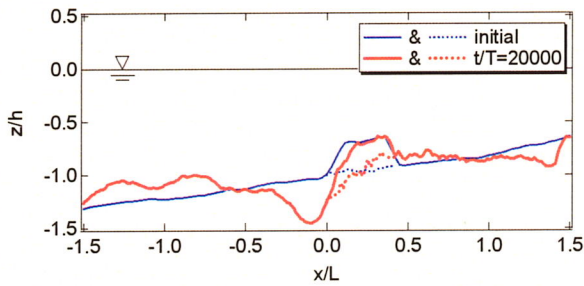


図-7 低天端の場合の地形変化 ($T=1.5s$, $R=10cm$, Case8)

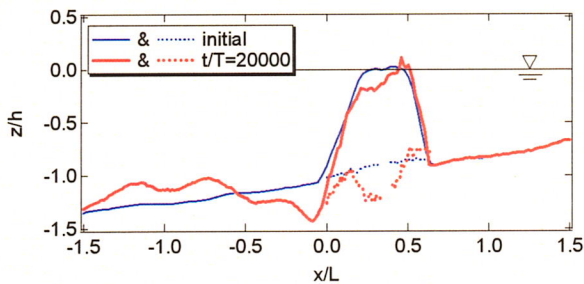


図-8 高天端の場合の地形変化 ($T=1.5s$, $R=0cm$, Case9)

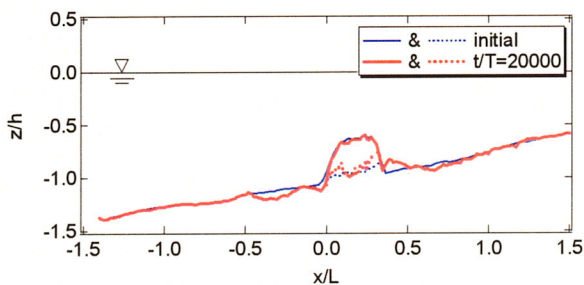


図-9 低天端の場合の地形変化 ($T=1.8s$, $R=10cm$, Case10)

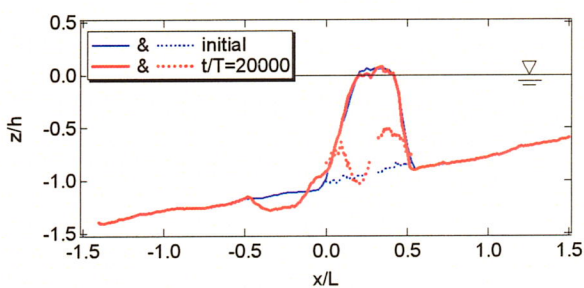


図-10 高天端の場合の地形変化 ($T=1.8s$, $R=0cm$, Case11)

図-9に、周期 $T=1.8s$ 、波高 $H_f=8.8cm$ の規則波を天端水深 $R=10cm$ 、天端幅 $B=50cm$ の堤体に20,000波作用させたときの地形変化を示す。堤体前面での岸向き漂砂の傾向はCase3と同様であるが、法先での洗掘量は大幅に減少している。一般に、構造物前面での洗掘深は反射率の増加とともに大きくなることが知られている。そのため、天端水深の違い（構造物の高さの違い）により反射率に差が生じ、Case3と本ケース（Case10）との洗掘深に差が生じたものと考えられる。ただし、入射波の周期

$T=1.5s$ のケースも含めた場合、洗掘深と反射率の関係は明らかにすることができなかった。

図-10に、周期 $T=1.8s$ 、波高 $H_f=8.9cm$ の規則波を天端水深 $R=10cm$ 、天端幅 $B=50cm$ の堤体に20,000波作用させたときの地形変化を示す。堤体前面での岸向き漂砂移動、法先の洗掘状況などはCase3とほぼ同様である。堤体背後では伝達波高が小さくなるため、漂砂移動はほとんど見られなかった。

(4) 捨石粒径の影響

図-11に、core部を設けずに代表粒径 $D_{50}=3.36cm$ の碎石のみで作製した人工リーフ堤体に、周期 $T=1.5s$ 、波高 $H_f=8.9cm$ の規則波を20,000波作用させたときの地形変化を示す。図-3に示したCase2と比較すると、沖側法先の洗掘、沖向きの漂砂移動、堤体背後の沖向き漂砂移動の傾向は同様であるが、堤体下の砂層の侵食量が大きく、それに伴って天端の沈下も大きくなっている。これは堤体を構成する碎石の粒径が大きくなったために間隙も大きくなり、堤体内の流速が大きくなったためと考えられる。

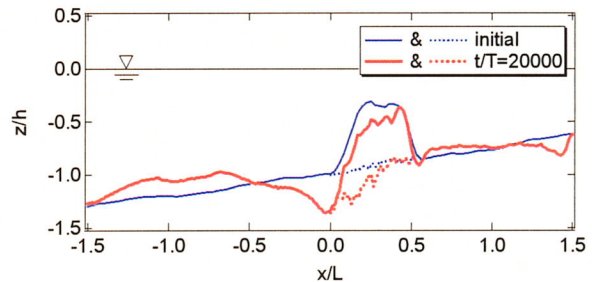


図-11 均一粒径の堤体周辺の地形変化
($T=1.5s$, $B=50cm$, $R=5cm$, Case12)

4. 人工リーフ堤体設置に伴う地形変化

(1) 堤体設置前の地形変化

人工リーフ堤体設置に伴い、漂砂移動および海底地形がどのように変化したかを検討するために、堤体を設置しない状態での地形変化を測定した。

図-12に、周期 $T=1.5s$ 、波高 $H_f=8.9cm$ の規則波を人工リーフ堤体を設置していない1/50勾配の斜面に20,000波入射させたときの地形変化を示す。前述の通り、横軸の $x/L < -0.56$ および $x/L > 1.46$ の領域は固定床となっている。構造物は設置されていないため反射波は小さく、波高分布を見ても $x/L < 0$ での波高はほぼ一定で、 $x/L \approx 1.8$ 付近で碎波している。海底地形は人工リーフを設置したとき同様に沖向きの漂砂移動が卓越し、波状を呈している。

図-13に、周期 $T=1.8s$ 、波高 $H_f=8.6cm$ の規則波を人工リーフ堤体を設置していない1/50勾配の斜面に20,000波入射させたときの地形変化を示す。前述の通り、横軸の $x/L < -0.46$ および $x/L > 1.19$ の領域は固定床となっている。波高分布は若干の変動は見られるものの、 $x/L < -0.5$ での

波高はほぼ一定で、 $x/L=+0.2$ 付近で碎波している。海底地形は人工リーフを設置したときとは異なり、漂砂量は少ないながらも沖向きの漂砂移動が生じている。

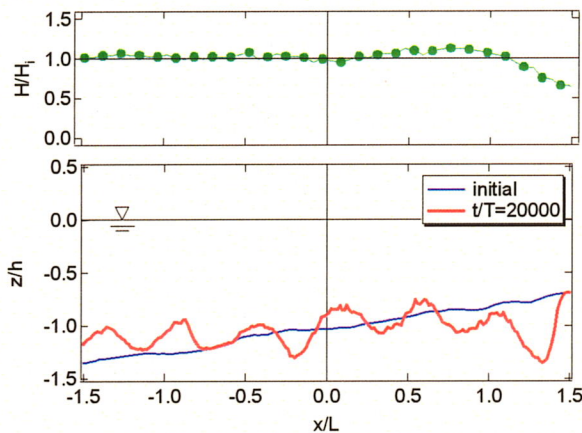


図-12 堤体がない場合の地形変化 ($T=1.5s$, Case13)

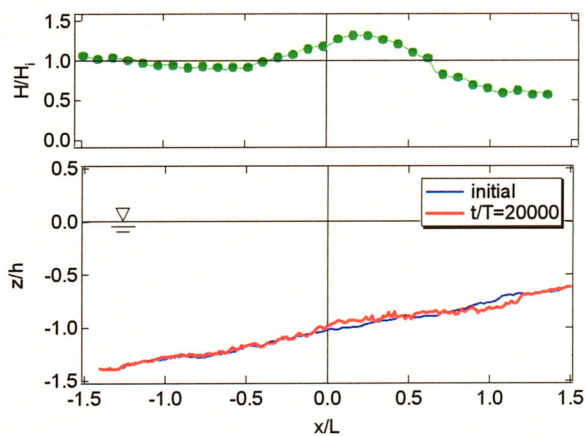


図-13 堤体がない場合の地形変化 ($T=1.8s$, Case14)

(2) 堤体を通過する岸沖漂砂量

堤体を設置することにより漂砂量がどのように変化したかを検討するために、図-14に示すように堤体周辺の地形を堤体前面、堤体下、堤体背後の3つの領域に分け、それぞれの境界を断面Iおよび断面IIとして考える。この2つの断面を岸向きに通過する漂砂量をそれぞれ Q_1 および Q_2 とし、堤体を設置していない場合の同地点を通過する漂砂量をそれぞれ Q_{10} および Q_{20} とする。これらの漂砂量は、それぞれの領域において地形変化が生じた断面積から、底質の空隙率を0.5として算定する。なお、底質が堤体内に堆積した場合は、堤体内に堆積した面積に捨石層の空隙率0.46を乗じて漂砂量とした。

図-15に、周期 $T=1.5s$ の入射波を作用させた各ケースにおいて断面Iを通過した漂砂量 Q_1 を、堤体を設置しない場合の断面Iを通過した漂砂量 Q_{10} の絶対値で除して示す。いずれのケースも堤体設置前よりも沖向きの漂砂量が大きくなっている。ケース間での差はそれほど大きくないが、堤体を $D_{50}=3.36cm$ の碎石のみで構成したCase12において特に沖向き漂砂量が大きくなっている。

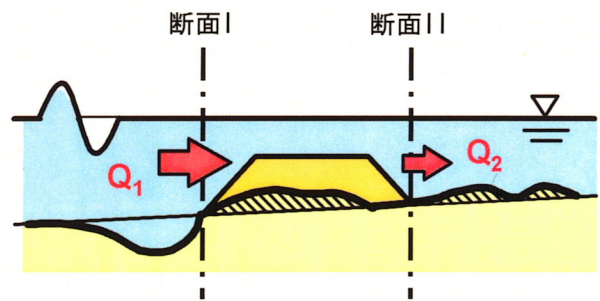


図-14 断面Iと断面IIを通過する漂砂量

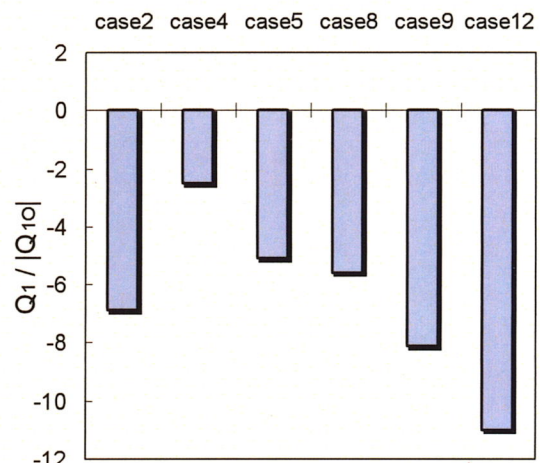


図-15 周期 $T=1.5s$ のケースでの断面Iを通過する漂砂量

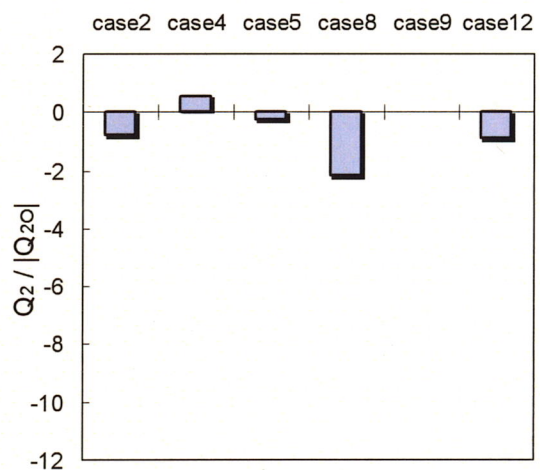


図-16 周期 $T=1.5s$ のケースでの断面IIを通過する漂砂量

図-16に、周期 $T=1.5s$ の入射波を作用させた各ケースにおいて断面IIを通過した漂砂量 Q_2 を、堤体を設置しない場合の断面IIを通過した漂砂量 Q_{20} の絶対値で除して示す。岸側法先に位置する断面IIを通過する漂砂量は、沖側法先に位置する断面Iを通過する漂砂量とは異なり、ほとんどのケースで Q_2/Q_{20} の値が-1以上となっている。これは本実験の範囲内においては、人工リーフにより背後の底質が沖側へ流出することを抑制していることを示

している。唯一、Case8のみが-2以下の値を取っているが、これは天端水深が $R=10\text{cm}$ と深いケースである。このケースでは断面Iを通過する漂砂量も人工リーフ設置前より多くなっているため、人工リーフの設置が堤体背後の底質の流出を助長している可能性がある。

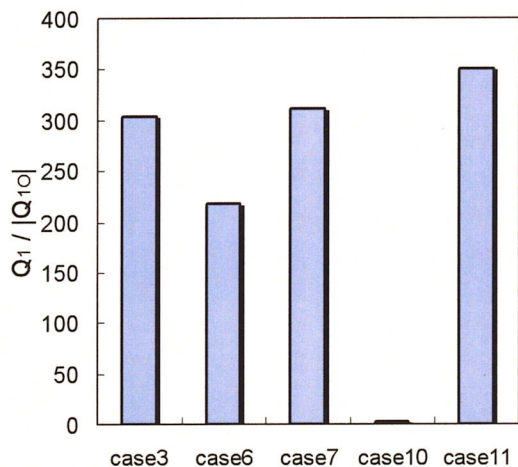


図-17 周期 $T=1.8\text{s}$ のケースでの断面Iを通過する漂砂量

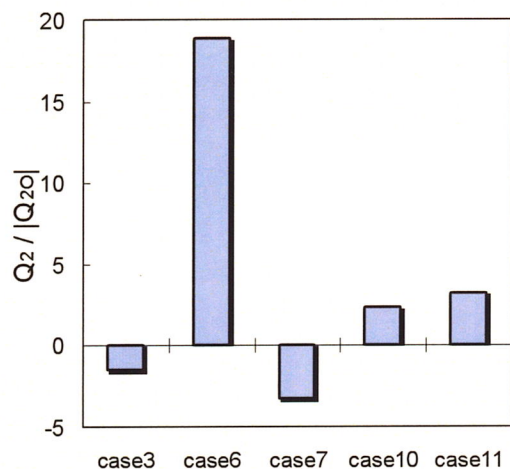


図-18 周期 $T=1.8\text{s}$ のケースでの断面IIを通過する漂砂量

図-17に、周期 $T=1.8\text{s}$ の入射波を作用させた各ケースにおいて断面Iを通過した漂砂量 Q_1 を、堤体を設置しない場合の断面Iを通過した漂砂量 Q_{10} の絶対値で除して示す。天端水深が $R=10\text{cm}$ と大きかったCase10を除いた他のケースでは、断面Iを通過する岸向き漂砂量が非常に増えたことを示している。

図-18に、周期 $T=1.8\text{s}$ の入射波を作用させた各ケースにおいて断面IIを通過した漂砂量 Q_2 を、堤体を設置しない場合の断面IIを通過した漂砂量 Q_{20} の絶対値で除して示す。すべてのケースで $Q_1/|Q_{20}|$ の値が1以上または-1以下であり、人工リーフ設置前より漂砂量が増加しているが、断面Iを通過する漂砂量はすべて岸向きであるため、断面IIを冲向きに通過した底質はすべて堤体内に堆積し

たことになる。また、Case6は天端幅が $B=20\text{cm}$ と短いケースである。本実験で用いた入射波に対しては、結果的に堤体前面の底質を堤体背後にまで持ち込んだことにはなるが、波高の減衰効果、平面実験による検討などを含めて総合的に性能を評価する必要がある。

5. まとめ

本研究では、比較的天端幅の短い人工リーフを設置したときの岸沖漂砂移動に着目して断面2次元実験を行い、堤体内部から堤体前面への漂砂移動、および堤体背後から堤体内部への漂砂移動について検討を行った。その結果、入射波の周期により漂砂移動の方向が大きく変わるほか、堤体の天端高さにより堤体内部への堆砂状況や、堤体下の侵食状況にも相違が現れることが分かった。本研究では限られた実験条件の下での検討であるので、他の条件についての検討や標準的な天端幅を持つ人工リーフについても検討中である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（若手研究(B)：研究代表者 荒木進歩，課題番号：17760407）の補助を受けて行われたことを付記し，謝意を表します。

参考文献

- 1) 宇多高明，小俣 篤，横山揚久：人工リーフ周辺に生じる海浜流と地形変化，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 337-341，1987.
- 2) 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.
- 3) 荘司喜博，中山春雄，滝口要之助，高橋豊喜，黒木敬司，坂井隆行：新潟西海岸の潜堤設置による波，流れおよび地形変化の観測，海岸工学論文集，第38巻，pp. 316-320，1991.
- 4) 岡田 豊，河野二夫：青島海岸に設置された潜堤の効果に関する現地調査，海岸工学論文集，第38巻，pp. 321-325，1991.
- 5) 荒木進歩，麓 博史，三好宏和，出口一郎：捨石潜堤の法先洗掘と洗掘に伴う堤体の変形，海洋開発論文集，Vol. 21，pp. 921-926，2005.
- 6) 榊山 勉・鹿島遼一：消波ブロック被覆工の法先洗掘と波浪条件に関する研究，海岸工学論文集，第45巻，pp. 886-890，1998.
- 7) 堀川清司，砂村継夫，近藤浩右，岡田 滋：波による二次元汀線変化に関する一考察，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 329-334，1975.