

捨石潜堤の変形と水理機能変化に関する研究

DEFORMATION AND CHANGE IN HYDRAULIC PERFORMANCES OF SUBMERGED BREAKWATER

荒木進歩¹・新島 宏²・麓 博史³・三好宏和⁴・出口一郎⁵
Susumu ARAKI, Hiroshi NIJIMA, Hiroshi FUMOTO, Hirokazu MIYOSHI
and Ichiro DEGUCHI

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

²正会員 修(工) (株)大広 (〒532-0003 大阪市淀川区宮原4-3-39)

³学生員 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

⁴大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

⁵正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Three-dimensional experiments are conducted in a wave basin in order to investigate deformation of submerged breakwater and change in hydraulic performances with its deformation. Transmission coefficient is used as an index of the hydraulic performance of the submerged breakwater. The crest height at the submerged breakwater head decreased in a few cases. However, the authors show that the value of the transmission coefficient did not increase in many cases even though the submerged breakwater was deformed. The authors also show that the incident wave with longer wave period deforms the submerged breakwater more and the rubble stones from the eroded area are accreted at the region of $0.25 L_{1/3}$ from the submerged breakwater head.

Key Words : deformation, change in transmission coefficient, submerged breakwater

1. はじめに

海岸構造物の設計では、通常、設計外力に対する堤体の安定性の照査を行うのみであり、それ以上の外力に対する堤体の変形および変形に伴う水理機能変化は検討されていない。設計外力以上の波浪が来襲する可能性はあり、その際の堤体の変形および水理機能の変化（低下）を把握しておくことは性能設計等の今後の新しい設計法において重要である。このような検討は、粘り強く水理機能を発揮する構造物の開発にもつながり、特に捨石潜堤等の捨石構造物に対して効果的であると考えられる。

潜堤の波高伝達率の測定は田中¹⁾をはじめ、不規則波での測定を行った高山ら²⁾、規則波による波高伝達率の測定に加え、平面実験により堤体周辺に生じる海浜流や地形変化についても検討した宇多ら³⁾が行っている。また、浜口ら⁴⁾は現地での波浪制御効果を観測し、樫木ら⁵⁾は透水層上での波高減衰の理論的な検討も行っている。しかし、これらの検討はいずれも堤体が初期形状を保ったままの状態で行われており、堤体が大きく変形する終局状態での波

高伝達率を測定した例はない。荒木ら⁶⁾は潜堤堤体の変形に伴う波高伝達率の変化を示しているが、規則波を用いた断面2次元実験での検討であったため、堤体の変形に関して現実的ではない結果が得られている。

そこで本研究では、設計外力以上の波浪により潜堤堤体が大きく変形する状態を想定し、その終局状態における堤体の変形形状と波高伝達率の変化を不規則波を用いた平面実験により検討することを目的とする。

2. 水理実験

水理実験は大阪大学工学部の屋外平面水槽を用いて行った。図-1に示すように、水槽内の平坦床部に天端幅 $B=100\text{cm}$ 、堤長 $L_r=300\text{cm}$ 、天端水深 $R=5\text{cm}$ 、法先水深 $h=20\text{cm}$ 、法面勾配1:3の捨石潜堤を碎石により作製した。潜堤堤体は $D_{cs0}=0.71\text{cm}$ の碎石によりcore部を作製し、 $D_{as0}=1.52\text{cm}$ の碎石を用いて1層の被覆を行った。

入射波はBretschneider-光易型を目標スペクトルと

する一方向不規則波とし、変形の進行が緩やかになる（ほぼ収束する）まで20,000波を堤体に作用させた。有義波高は $H_{1/3}=5.4\sim 9.2\text{cm}$ 、有義周期は $T_{1/3}=1.2\sim 1.5\text{s}$ とした。ここでは、主として表-1に示す3つのケースについての結果を報告する。

堤体の前後（図-1の黒丸で示す位置）には容量式波高計を設置し、0.05秒間隔で水位変動を測定した。測定された水位変動の102.4秒間を波別解析し、有義波高を算出した。波高伝達率は堤体端部および中央部のそれぞれに対して堤体背後で測定された有義波高を堤体前面で測定された有義波高で除して算出した。なお、波高伝達率算出のための水位変動の測定は堤体変形実験と同時にを行っているため、水位変動の測定中にも堤体は少しずつ変形している。

堤体の形状は初期状態の後、1,000波、2,000波、4,000波、10,000波、20,000波入射後に、レーザー変位計を用いて岸沖方向に5cm間隔、沿岸方向に20cm間隔で測定した。

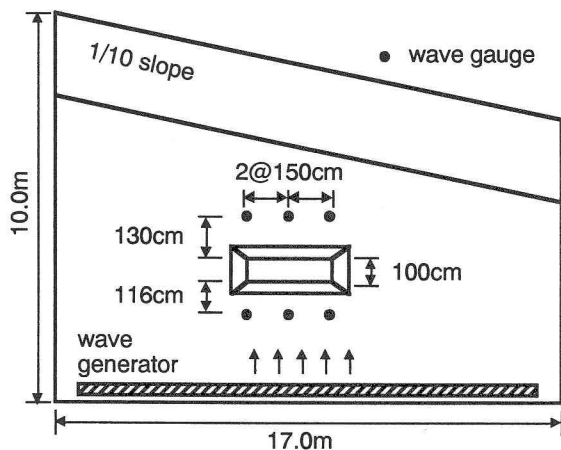


図-1 平面水槽

表-1 実験ケース

	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)
Case 1	6.9	1.2
Case 2	8.7	1.2
Case 3	9.0	1.4

3. 堤体の変形

(1) 平面形状

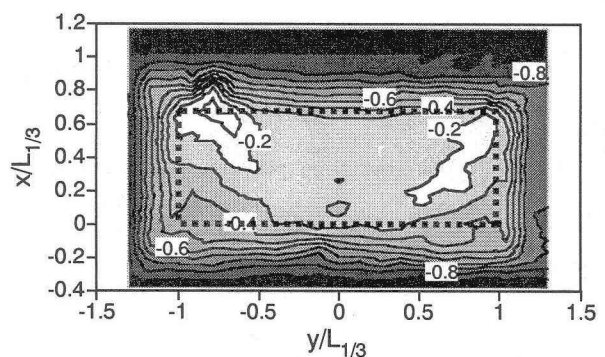
図-2に、表-1に示した3つのケースでの20,000波入射後の堤体の変形形状をコンターで示す。岸沖方向は沖側法肩を原点として岸向きを正、沿岸方向は堤体中央を原点とし、どちらも有義周期に対する法先での波長で無次元化している。また、鉛直方向には法先水深 $h=20\text{cm}$ で無次元化している。天端水深は $R=5\text{cm}$ であるから、初期の天端は $z/h=-0.25$ である。なお、図中の点線は初期の天端位置を表す。

図-2(a)はCase1の変形形状で、堤体両端部の沖側が侵食され、両端部の岸側に堆積している。波高粒

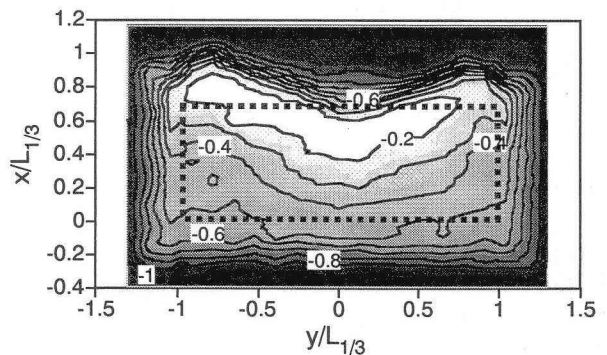
径比が大きくないため、堤体中央部には大きな変形は見られない。

図-2(b)はCase2の変形形状で、堤体両端部の沖側が大きく侵食され、堤体岸側端部に大きく堆積している。堤体中央部の沖側部分も侵食され、堤体岸側に堆積しているが、侵食の程度は堤体端部のほうが大きい。その結果、堤体岸側のコンターは波状を呈している。

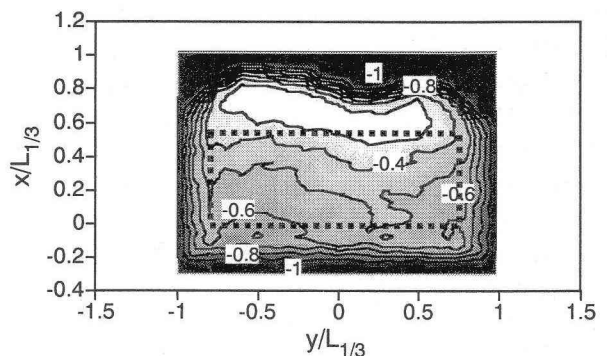
図-2(c)はCase3の変形形状で、Case2と同様に堤体中央部より端部のほうが侵食の程度は大きい。ただし、堤体中央部での侵食がCase2より大きい。また、堤体岸側のコンターもCase2に比べると直線的である。また、Case2との比較から同一諸元の潜堤堤体に対して波高がほぼ同一の波が入射する場合、周期が長いほうが変形が大きくなることが分かる。



(a) Case1 ($H_{1/3}/D_{c50}=9.69$, $B/L_{1/3}=0.658$, $Lr/L_{1/3}=1.97$)



(b) Case2 ($H_{1/3}/D_{c50}=12.3$, $B/L_{1/3}=0.658$, $Lr/L_{1/3}=1.97$)



(c) Case3 ($H_{1/3}/D_{c50}=12.6$, $B/L_{1/3}=0.529$, $Lr/L_{1/3}=1.59$)

図-2 20,000波入射後の変形形状

(2) 岸沖断面形状の沿岸方向への変化

平面実験では、岸沖方向の断面形状は沿岸方向に一様ではなく変化する。ここでは、堤体の変形形状の沿岸方向への変化を表す指標として、岸沖方向断面内での堆積面積 Aa と侵食面積 Ae を取り上げ、以下に各ケースでの特徴を見ていく。堆積面積 Aa と侵食面積 Ae の定義は図-3に示す。岸沖方向断面内において、初期形状と比較して堆積している面積が堆積面積 Aa 、侵食している面積が侵食面積 Ae である。

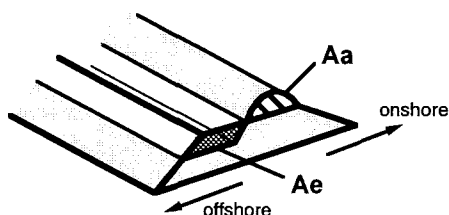


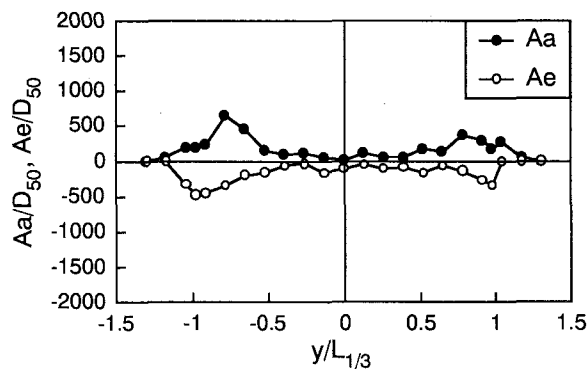
図-3 堆積面積 Aa と侵食面積 Ae の定義

図-4に堆積面積 Aa と侵食面積 Ae の沿岸方向分布を示す。図の縦軸はcore部の粒径 $D_{c50}=0.71\text{cm}$ の2乗で無次元化した堆積面積 Aa と侵食面積 Ae 、横軸は堤体中央を原点とした沿岸方向座標で、有義周期に対する法先での波長で無次元化している。無次元侵食面積 Ae/D_{c50}^2 は被災レベル S に相当するが、ここでは便宜上、堆積面積を正、侵食面積を負の数として扱う。

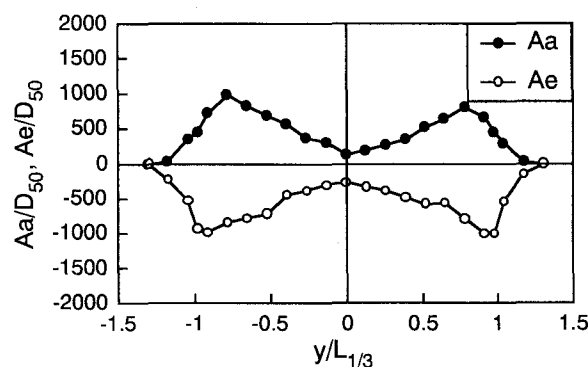
図-4(a)に、Case1での堆積面積 Aa と侵食面積 Ae の沿岸方向分布を示す。堤体端部は $y/L_{1/3}=\pm 0.99$ であるから、堤体端部で侵食面積 Ae が最大となり、堤体端部から少し中央寄りの地点で堆積面積 Aa が最大となることが分かる。堤体中央部では堆積面積 Aa も侵食面積 Ae もゼロに近い。これは、図-2(a)の変形形状でも述べたが、初期形状からの変形が小さいことを示している。

図-4(b)に、Case2での堆積面積 Aa と侵食面積 Ae の沿岸方向分布を示す。Case1と同様に、堤体端部で侵食面積 Ae が最大となり、堤体端部から少し中央よりの地点で堆積面積 Aa が最大となることが分かる。堆積面積 Aa が最大となるのは、堤体端部から中央へ0.25波長程度の地点である。荒木ら⁷⁾は、入射波的作用により捨石が最も堆積するのは堤体端部から0.25～0.30波長中央寄りの地点であると指摘したが、入射波条件が異なる場合においても同様の結果が得られることが確認された。

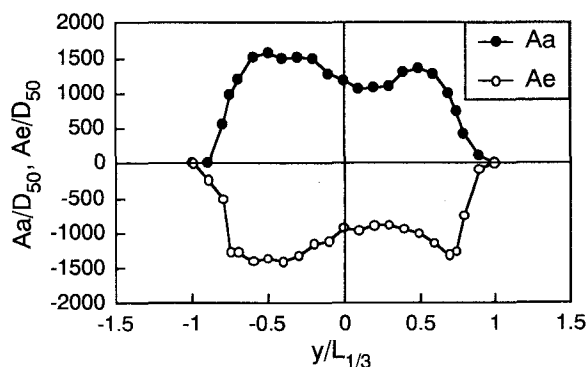
図-4(c)に、Case3での堆積面積 Aa と侵食面積 Ae の沿岸方向分布を示す。堤体の沿岸方向全域にわたり大きな変形が生じていることが分かる。特に、Case1およびCase2とは異なり、堤体中央部においても大きな侵食を受け、また捨石の堆積も見られる。このケースでは $y/L_{1/3}=\pm 0.80$ が堤体端部である。やや不明瞭であるが、このケースにおいても堆積面積 Aa が最大となるのは堤体端部から中央へ0.25～0.30波長程度の地点であることが確認できる。



(a) Case1 ($H_{1/3}/D_{c50}=9.69$, $B/L_{1/3}=0.658$, $Lr/L_{1/3}=1.97$)



(b) Case2 ($H_{1/3}/D_{c50}=12.3$, $B/L_{1/3}=0.658$, $Lr/L_{1/3}=1.97$)



(c) Case3 ($H_{1/3}/D_{c50}=12.6$, $B/L_{1/3}=0.529$, $Lr/L_{1/3}=1.59$)

図-4 堆積面積 Aa と侵食面積 Ae の沿岸方向分布

(3) 天端水深の変化

潜堤の波高伝達率は天端水深と天端幅に大きく影響され、特に天端水深は大きな影響を与える。本実験では、堤体が大きく変形するのに伴い天端の形状も変化し、波高伝達率に影響を及ぼすと考えられる。変形した天端面において天端幅を定義するのは難しいため、ここでは堤体の変形に伴う天端水深の変化について検討する。堤体変形後の天端水深は、図-5に示すように鉛直方向に最も高く堆積した地点と静水面の距離 hc として定義した。

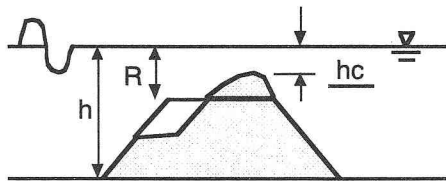
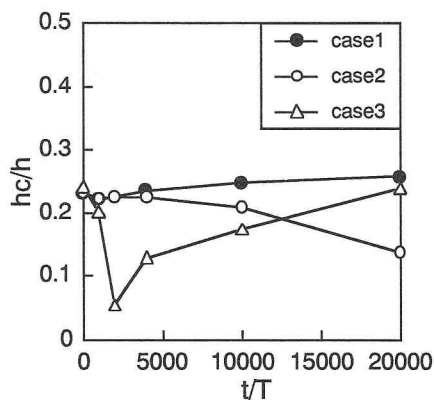
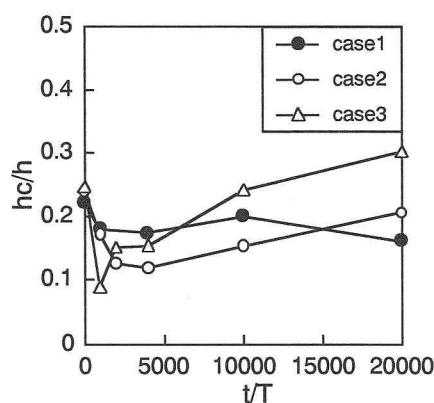


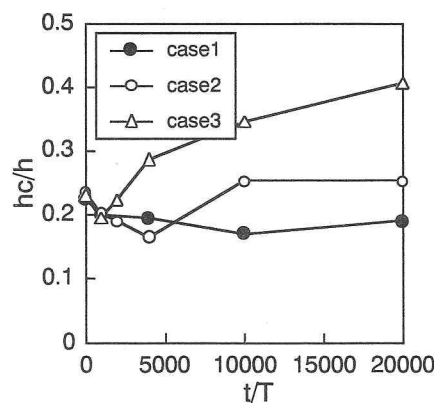
図-5 堤体変形後の天端水深



(a) $y/L_{1/3}=0.0$



(b) Case1, 2: $y/L_{1/3}=+0.789$, Case3: $y/L_{1/3}=+0.635$



(c) Case1, 2: $y/L_{1/3}=+0.987$, Case3: $y/L_{1/3}=+0.794$

図-6 天端水深 hc の経時変化

図-6に堤体の変形に伴う天端水深 hc の経時変化を示す。図-6(a), (b), (c)はそれぞれ堤体中央部、堤体端部よりやや中央寄りの地点、堤体端部での天端水深 hc の変化を示す。横軸は入射波の作用波数である。

Case1では変形量が大きくなかったため天端水深の変化も小さい。図-6(a)に示す堤体中央部において天端水深 hc がやや増加するが、図-6(b), (c)に示す堤体端部では天端水深 hc はやや減少している（天端高さが増加している）。

Case2では堤体中央部で天端水深 hc が減少、堤体端部で天端水深が増加しているほか、端部よりやや中央寄りの地点（図-6(b)）ではいったん減少した後、増加している。これは沖側法肩の捨石が天端上に堆積した後、さらに波の作用を受けて捨石が堤体岸側斜面に転落していったためである。20,000波の造波終了時点での天端水深 hc は初期形状での天端水深 R とほぼ同じである。

Case3では図-6(c)に示す堤体端部では天端水深 hc は大きく増加している（天端高さが大きく低下している）。また、堤体中央部および堤体端部よりやや中央寄りの地点においては、天端水深 hc がいったん減少した後、増加している。

変形後の天端水深 hc については本実験で作用させた20,000波の入射の時点で完全には平衡状態に達しておらず、さらに波を入射させることにより、天端水深 hc が増加することも考えられる。

4. 水理機能

(1) 初期形状の堤体周辺での水理特性

図-7に初期形状の堤体周辺での波高分布を示す。これは堤体変形実験とは別途行ったもので、変形が生じないように堤体を金網で覆い、岸沖方向に20cm間隔、沿岸方向に25cm間隔で設定した測点で水位変動を測定した。図中の有義波高は、同じ入射波に対して潜堤がない状態での各測点での有義波高 $H_{nol/3}$ で無次元化しており、図中の点線は堤体位置を表す。

また、図-8には同ケースの有義波高の岸沖分布を示す。

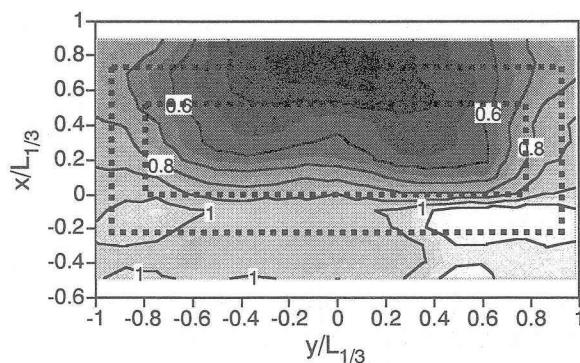


図-7 堤体周辺の波高分布 $H_{1/3}/H_{nol/3}$ ($R/H_{1/3}=0.610$, $B/L_{1/3}=0.497$, $Lr/L=1.49$)

堤体の沖側斜面上での砕波により波高が1.1倍強まで増大した後、天端上で大きく減衰し、岸側では0.5～0.7倍の波高となっていることが分かる。堤体端部付近 ($y/L_{1/3}=\pm 0.743$) での波高は堤体端部から堤体背後へと回り込む波の影響を受け、堤体中央部ほどは波高の減衰は見られない。

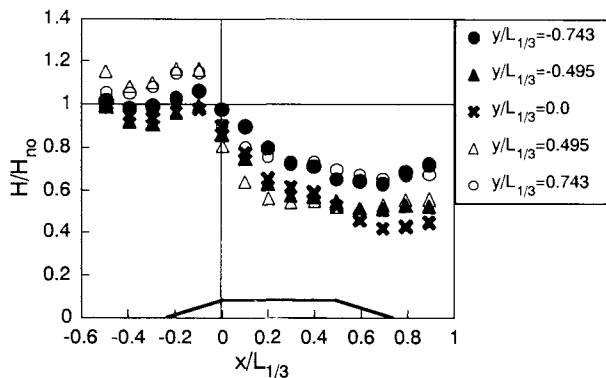


図-8 波高の岸沖分布 $H_{1/3}/H_{01/3}$ ($R/H_{1/3}=0.610$, $B/L_{1/3}=0.497$, $Lr/L=1.49$)

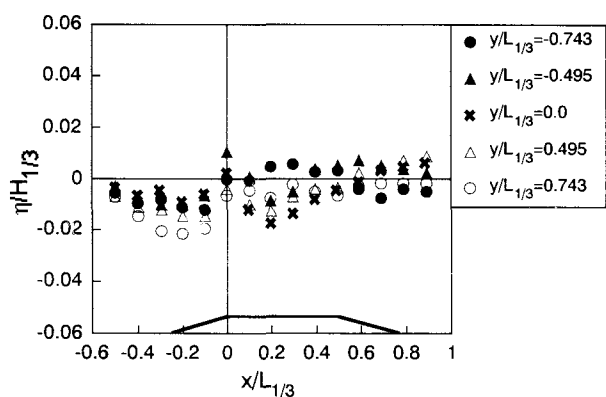


図-9 平均水位の岸沖分布 $\eta/H_{1/3}$ ($R/H_{1/3}=0.610$, $B/L_{1/3}=0.497$, $Lr/L=1.49$)

図-9には同ケースの平均水位 η の岸沖分布を示す。平均水位は静水時をゼロとしている。砕波点付近にあたる堤体沖側斜面では平均水位が低下し、天端上にかけて平均水位が徐々に上昇しているが、断面2次元実験のような顕著な水位上昇は見られない。また、堤体中央部と端部とでの相違は特に見られない。

(2) 波高伝達率の経時変化

図-10に堤体中央部での堤体変形に伴う波高伝達率の変化を示す。Case1では堤体中央部の天端水深はやや増加しているが、波高伝達率は変形の進行とともに減少している。Case2では堤体中央部の天端水深は減少しているが、波高伝達率はわずかに減少傾向を示すもののほとんど変化はない。Case3では堤体中央部の天端水深はいったん減少した後、増加しており、20,000波の造波終了時点での天端水深は初期状態での天端水深 R とほぼ同じである。しかし、波高伝達率は一様に増加している。

これらは堤体端部での天端水深の変化の影響を受けていると考えられる。すなわち、堤体中央部岸側に設置された波高計は天端上を通過する伝達波だけでなく、堤体端部から回り込む波にも影響を受ける。Case1では堤体端部の天端水深はやや減少しており、Case2およびCase3では堤体端部の天端水深は増加している。したがって、堤体中央部で波高伝達率の変化は堤体中央部の天端水深の変化のみでは説明できず、堤体端部での天端水深の変化の影響が現れていると考えられる。

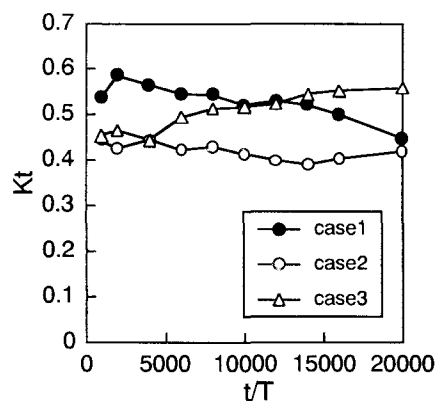


図-10 堤体中央部での波高伝達率の経時変化

図-11に堤体端部での堤体変形に伴う波高伝達率の変化を示す。Case1では堤体端部の天端水深がやや減少し、波高伝達率の値はわずかながら減少傾向にある。Case2では堤体端部の天端水深が減少した後、増加しているが、波高伝達率の値にも同様な傾向が見られる。ただし、天端水深が最小となる作用波数と波高伝達率が最小になる作用波数にはずれが見られる。Case3では堤体端部で天端水深が顕著に増加しており、それに伴い波高伝達率の値も増加している。

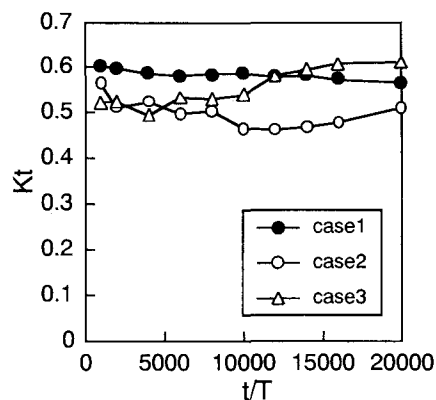


図-11 堤体端部での波高伝達率の経時変化

堤体中央部および堤体端部での波高伝達率の変化を図-10、図-11に示した。Case3では堤体が大きく変形し、堤体端部の天端水深が増加したため波高伝達率が悪化した。Case2では堤体が大きく変形したにもかかわらず、波高伝達率の値が小さくなるこ

とはあっても、逆に悪化することはなかった。また、Case1でも波高伝達率が悪化することはなかった。

5. まとめ

本研究では、捨石潜堤の変形および変形に伴う波高伝達率の変化について検討した。得られた主要な結果を以下にまとめる。

- 1) 同一諸元の潜堤堤体にほぼ同一の波高を持つ波が入射すると、周期が長い入射波のほうが変形が大きくなった。
- 2) 捨石潜堤堤体の変形は堤体端部で大きく変形するが、堤体背後に捨石が大きく堆積する位置は堤体端部から0.25波長程度の地点であることを入射波の周期の異なる実験から確認した。
- 3) 潜堤の変形時には沖側法肩付近の捨石が天端上に堆積するため、天端水深が浅くなった。ただし、これは過渡的な段階であると考えられ、入射波の波高が大きい場合、さらに波の作用を受けると天端上に堆積した捨石は堤体岸側に転落し、天端水深は増加した。
- 4) 堤体中央部の波高伝達率は、一部のケースでは堤体端部での天端水深が大きく増加したことにより悪化したが、その他のケースでは堤体が大きく変形しても波高伝達率が悪化することはない。

謝辞：本研究は石原藤次郎奨学基金の助成により行った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中則男：天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について，第23回海岸工学講演会論文集，pp.152-157，1976.
- 2) 高山知司，永井紀彦，関口忠志：広天端幅潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験，第32回海岸工学講演会論文集，pp.545-549，1985.
- 3) 宇多高明，小俣 篤，横山揚久：人工リーフの機能と設計法，土木研究所資料，第2696号，79p，1988.
- 4) 浜口達男，宇多高明，井上 力，五十嵐晃，中山修：人工リーフの波浪制御効果に関する現地実験，第35回海岸工学講演会論文集，pp.128-132，1988.
- 5) 榎木 亨，出口一郎，岡原義典：幅広潜堤の波浪減衰効果とその縮尺効果について，海岸工学論文集，第36巻，pp.633-637，1989.
- 6) 荒木進歩，藤原由康，宮崎敏弘，出口一郎：個別要素法を用いた捨石潜堤の断面変形計算，海岸工学論文集，第47巻，pp.761-765，2000.
- 7) 荒木進歩，柳原哲也，新島 宏，麓 博史，出口一郎：捨石潜堤の変形に関する平面的な効果，海洋開発論文集，Vol.19，pp.201-206，2003.