

堤体端部の影響に着目した捨石潜堤の 変形について

INFLUENCE OF SUBMERGED BREAKWATER HEAD ON
DEFORMATION OF SUBMERGED BREAKWATER BODY

荒木進歩¹・宮崎敏弘²・柳原哲也³・新島 宏³・出口一郎⁴

Susumu ARAKI, Toshihiro MIYAZAKI, Tetsuya YANAGIHARA, Hiroshi NIJIMA
and Ichiro DEGUCHI

- ¹正会員 博(工) 大阪大学大学院助手 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 修(工) 五洋建設株式会社
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正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Deformation of submerged breakwater was examined by three-dimensional experiments to investigate the influence of the deformation of the head of submerged breakwater on the total damage of the breakwater. The eroded area at the breakwater heads was larger than that at the breakwater trunk. The rubble stones moved from the upstream head of longshore current were accreted within one wave length from the end of the upstream head. Therefore, there are two types of accretion at the leeside of the submerged breakwater depending on the ratio of the breakwater length to wave length. The difference in deformation between two-dimensional and three-dimensional experiments is large, especially at the upstream head of the breakwater.

Key Words : deformation, submerged breakwater, breakwater head, three-dimensional experiment

1. はじめに

海岸構造物は、設計値を上回る外力が作用した場合において、変形が生じて粘り強く機能を発揮する海岸構造物であることが望ましい。しかし、現行の設計法では、設計外力に対する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構造物の挙動(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がある以上、その際の構造物の挙動を明らかにしておくことは防災上、重要であると考えられる。したがって、構造物の終局状態を考え、変形・崩壊過程およびそれに伴う水理機能の変化を明らかにすることが必要となる。

本研究では、変形や被災に関する報告が十分になされていない捨石潜堤を対象とし、堤体の崩壊過程の解明および変形に伴う水理機能変化の解明を行うことを目的とする。潜堤の堤体には巨石や被覆ブロック等が用いられており、設計外力に対して堤体の構成材料が飛散しないように十分な重量を確保して表層を被覆している。しかし、被災事例(例えば鹿島ら¹⁾、五明ら²⁾)から明らかなように、捨石防

波堤や消波ブロック被覆堤の端部(堤頭部)は被覆材が飛散しやすく、被災を受けやすい。このことから、捨石防波堤および消波ブロック被覆堤端部の被覆材の安定性に関する研究(例えば、Burcharth and Frigaard³⁾、松見・大野⁴⁾、木村ら⁵⁾)がなされ、Burcharth and Frigaard³⁾は端部の被災および斜め入射波による主幹部の被災の検討が重要であると指摘している。また、現行の設計法⁶⁾においても、端部の被覆材に対してHudson式等から算出される安定重量の1.5倍以上の重量を持つ被覆材を用いることが推奨されている。したがって、没水構造物である潜堤についても堤体端部は被災を受けやすいと考えられるが、平面実験により検討された例はほとんどない。

著者ら⁷⁾は断面2次元実験により捨石潜堤の変形を検討したが、変形が早い段階で収束し、変形後の天端が静水面よりも上に現れるという結果が得られた。これは、潜堤の端部は波の作用を受けて変形を生じやすいが、断面2次元実験のために端部の影響が現れなかったためと考えられる。そこで本研究では、捨石潜堤の変形および崩壊には堤体端部の変形が大きく影響しているのではないかと考え、平面実験による検討を行う。また、断面2次元実験による

結果と比較し、その相違についても検討する。

2. 水理実験

水理実験は図-1に示す屋外平面水槽を用いて行った。水槽側壁に設置された造波機から平坦床を経て、造波板と 20° の角度をなして1/10の勾配のモルタル製固定床が設置されている。この1/10斜面上に法先水深 $h=19\text{cm}$ 、天端水深4cm、天端幅 $B=50\text{cm}$ 、堤体長 $L_r=150\text{cm}$ または 200cm 、法面勾配1:3の捨石潜堤を代表粒径 $D_{50}=0.71\text{cm}$ の砕石により作製した。天端が静水面よりも上に現れた断面2次元実験の結果は規則波の場合に顕著であったため、ここでは規則波での実験を中心とした。堤体前面での波高は $H=5\sim 11\text{cm}$ 、周期 $T=1.0\sim 1.5\text{s}$ の規則波を2000波作用させた。造波板と固定床斜面の関係から、波の入射角は堤体に対して 20° となる。

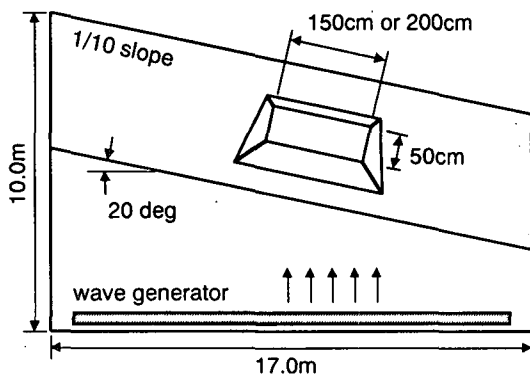


図-1 実験水槽

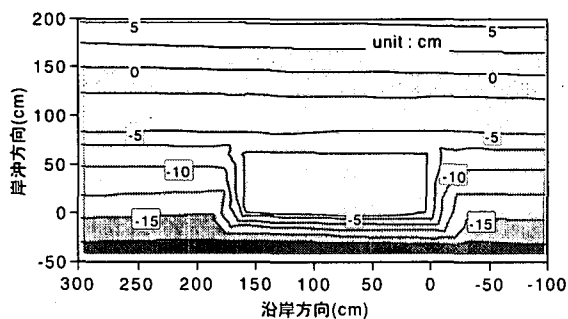


図-2 初期形状 ($L_r=150\text{cm}$ のケース)

堤体の形状は沿岸方向に10cmまたは20cm間隔で設定した測線上で、レーザー変位計により岸沖方向に5cm間隔で測定した。図-2に堤体長 $L_r=150\text{cm}$ の捨石潜堤の初期形状をコンターで示す。縦軸は岸沖方向、横軸は沿岸方向である。縦軸の原点は沖側の法肩として岸向きを正、横軸の原点は沿い流れ上手側端部として沿い流れ下手側を正とする。沿い流れとは、斜め入射であるために潜堤周辺に発生する沿岸方向の流れ(図面上では左向き)を指し、以降は沿い流れの上手側・下手側により潜堤の端部を区別する。また、容量式波高計により捨石潜堤の沖側および背後で水位変動を測定するとともに、水平2成

分の電磁流速計により潜堤背後の水粒子速度を測定した。なお、潜堤背後の波高計は変形に伴う透過率の変化を検討するために設置したが、後述するように堤体背後での捨石移動が激しく、また捨石の堆積域でもあるため、十分な計測ができなかった。

3. 変形形状の平面的特性

(1) 変形形状の全体的な傾向

図-3から図-7に、造波終了後に測定された変形形状の例を法先水深 h で無次元化したコンターで示す。図-3は波高粒径比 $H/D_{50}=8.87$ 、相対天端幅 $B/L=0.420$ 、相対堤体長 $L_r/L=1.26$ のケースでの変形形状である。 L は潜堤法先での入射波の波長であり、右上の矢印は波向きを表す。波高粒径比がそれほど大きくないため堤体変形量は小さいが、変形が生じているのは主として堤体端部である。したがって、捨石防波堤や消波ブロック被覆堤と同様に、捨石潜堤においても堤体端部は被災しやすいことが分かる。沿い流れ上手側端部では、沖側斜面から来襲する波による砕波が天端上に作用するのに加え、堤体側面から背後に回り込む波が砕波して天端上に作用するため捨石が移動しやすいと考えられる。一方、沿い流れ下手側端部においては、沿い流れ上手側端部と同等あるいはそれ以上の侵食が生じ、堤体背後のやや側方に堆積が見られる。これは、砕波等の波の作用により初期移動を始めた捨石が天端上および堤体背後の沿い流れにより側方に流出したためと考えられる。

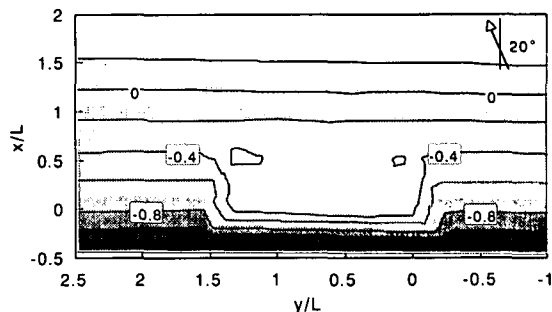


図-3 変形形状 ($H/D_{50}=8.87, B/L=0.420, L_r/L=1.26$)

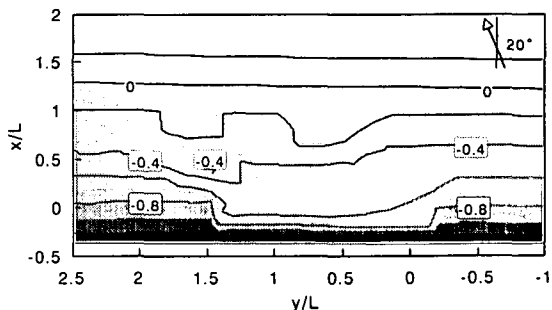


図-4 変形形状 ($H/D_{50}=14.9, B/L=0.420, L_r/L=1.26$)

図-4に波高粒径比 $H/D_{50}=14.9$ 、相対天端幅 $B/L=0.420$ 、相対堤体長 $L_r/L=1.26$ のケースでの変形形状を示す。図-3のケースと相対天端幅および相

対堤体長は等しいが波高粒径比が大きいため、堤体の変形量も大きくなっている。沿い流れ上手側端部では、斜め入射の波の作用により大きく侵食され、端部の捨石が堤体中央部の背後に堆積した。また沿い流れ下手側端部でも大きな侵食が生じ、初期移動を始めた捨石が沿い流れにより側方に流出し、堆積した。

図-5に波高粒径比 $H/D_{50}=14.5$ 、相対天端幅 $B/L=0.283$ 、相対堤体長 $Lr/L=0.849$ のケースでの変形形状を示す。このケースでは波高粒径比が大きいため堤体の変形量が大きい。沿い流れ上手側端部の捨石は岸向きに移動し、初期汀線付近に堆積した。また相対堤体長が短いため、沿い流れ上手側端部の捨石が堤体背後に移動した後、一部の捨石が沿い流れにより沿い流れ下手側端部付近にまで移動し、堤体長全域にわたって背後に捨石が堆積する様子が観察された。それに対して、図-4に示したケースでは相対堤体長が長いため、沿い流れ上手側端部付近にあった捨石の主な堆積位置は堤体中央部の背後であり、沿い流れ下手側端部付近にまで移動している捨石は見られなかった。

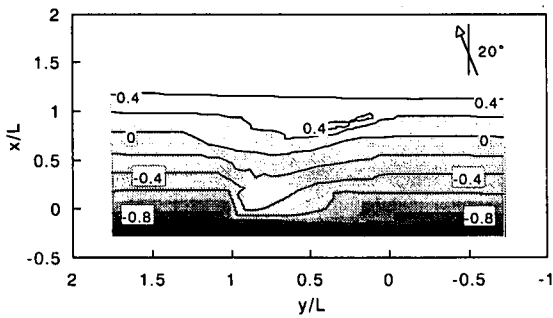


図-5 変形形状 ($H/D_{50}=14.5$, $B/L=0.283$, $Lr/L=0.849$)

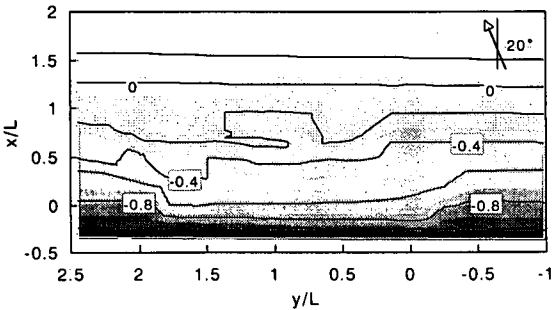


図-6 変形形状 ($H/D_{50}=15.8$, $B/L=0.420$, $Lr/L=1.68$)

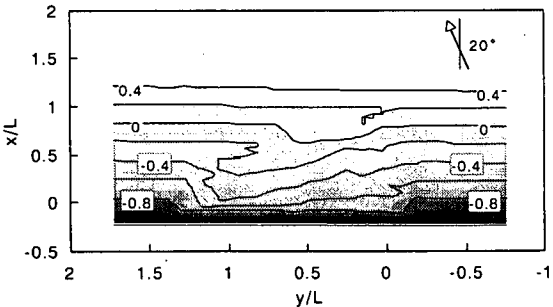


図-7 変形形状 ($H/D_{50}=11.1$, $B/L=0.283$, $Lr/L=1.13$)

図-6は波高粒径比 $H/D_{50}=15.8$ 、相対天端幅 $B/L=0.420$ 、相対堤体長 $Lr/L=1.68$ のケースでの変形形状であり、相対堤体長が長いため、沿い流れ上手側端部付近の捨石は堤体中央の背後に堆積した。

図-7は波高粒径比 $H/D_{50}=11.1$ 、相対天端幅 $B/L=0.283$ 、相対堤体長 $Lr/L=1.13$ のケースでの変形形状であり、相対堤体長がそれほど長くないため、堤体長ほぼ全域にわたって背後に捨石が堆積した。

(2) 岸沖断面諸量の沿岸方向特性

断面2次元実験においては、断面変形により侵食された面積は堆積面積と等しい。しかし、平面実験においては、一つの岸沖方向断面に着目すると、侵食面積と堆積面積は一般に一致しない。そこで、岸沖断面内での侵食面積と堆積面積の沿岸方向分布を検討する。

図-8に、図-3で示したケース ($H/D_{50}=8.87$, $B/L=0.420$, $Lr/L=1.26$)における岸沖方向断面内での堆積面積 Aa および侵食面積 Ae の沿岸方向分布を示す。堆積面積 Aa および侵食面積 Ae は捨石の代表粒径の2乗 D_{50}^2 で無次元化しており、無次元侵食面積 Ae/D_{50}^2 は被害レベル S に相当する。ただし、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。また横軸の沿岸方向距離は、沿い流れ上手側端部を原点として堤体長で無次元化している。このケースでは堤体変形量が小さいので沿岸方向の捨石移動も少なく、岸沖方向断面内で侵食面積と堆積面積はほぼ等しくなっている。

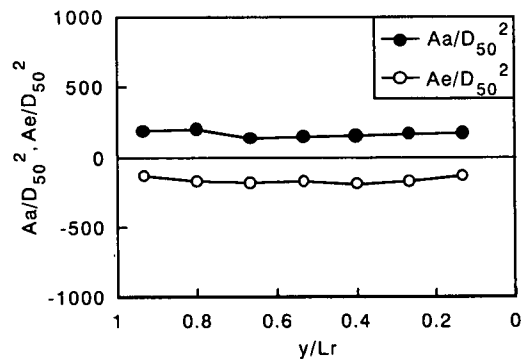


図-8 堆積面積 Aa および侵食面積 Ae の沿岸方向分布 ($H/D_{50}=8.87$, $B/L=0.420$, $Lr/L=1.26$)

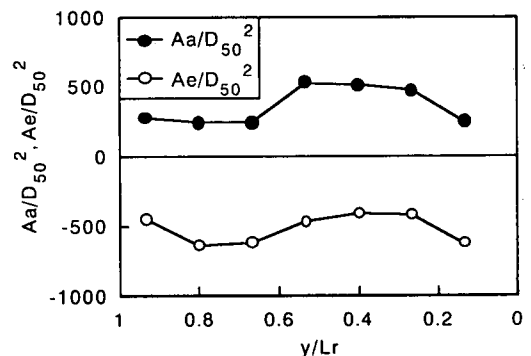


図-9 堆積面積 Aa および侵食面積 Ae の沿岸方向分布 ($H/D_{50}=14.9$, $B/L=0.420$, $Lr/L=1.26$)

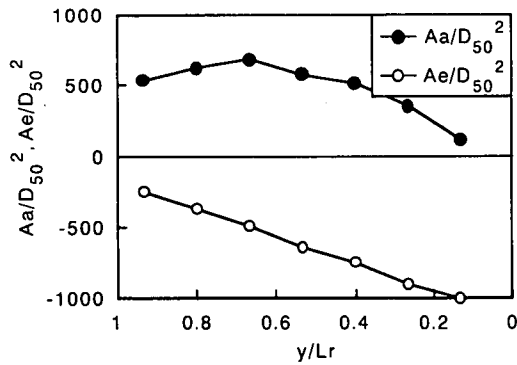


図-10 堆積面積 Aa および侵食面積 Ae の沿岸方向分布
($H/D_{50}=14.5, B/L=0.283, Lr/L=0.879$)

図-9に、図-4で示したケース($H/D_{50}=14.9, B/L=0.420, Lr/L=1.26$)における岸沖方向断面内での堆積面積 Aa および侵食面積 Ae の沿岸方向分布を示す。図-4で示したように、このケースでは相対堤体長が長い場合、沿い流れ上手側端部の捨石が下手側端部付近にまで移動することはなく、堤体背後の堆積域も連続してはいなかった。この図からも、堆積面積および侵食面積の両者とも波状の分布をしていることから、沿い流れ上手側が侵食され、堤体中央部($y/Lr=0.4\sim 0.5$)に捨石が堆積すること、沿い流れ下手側($y/Lr=0.7\sim 0.8$)では堆積面積が少なく新たに侵食が生じていること、などが分かる。なお、図面では天端長部分しか示していないが、堤体端部よりさらに下手側($y/Lr>1$)では侵食面積はゼロになるが、堆積面積はゼロにならず分布を続ける。

図-10に、図-5で示したケース($H/D_{50}=14.5, B/L=0.283, Lr/L=0.879$)における岸沖方向断面内での堆積面積 Aa および侵食面積 Ae の沿岸方向分布を示す。図-5で示したように、このケースでは相対堤体長が短い場合、沿い流れ上手側の捨石が下手側まで移動し、堤体背後に連続した捨石の堆積が見られた。したがって、侵食面積および堆積面積の分布は図-9のような波状ではなく、直線状となっている。沿い流れ上手側から下手側に向けて、侵食面積は一樣に減少し、堆積面積は増加しているの、沿い流れ上手側から下手側へと捨石が移動している様子が分かる。沿い流れ上手側端部の無次元侵食面積はほぼ-1000である。これは変形前の初期堤体断面積 A_0 に対して $A_0/D_{50}^2=-1140$ であることより、沿い流れ上手側端部付近では、初期状態での捨石がほとんどすべて飛散したことになる。また、堆積面積は図-9と同様に、沿い流れ下手側端部以降($y/Lr>1$)にも分布している。

図-11に堆積面積の沿岸方向分布を示す。横軸は潜堤法先での波長 L で無次元化した沿岸方向距離であり、沿い流れ上手側端部を原点としている。波高粒径比にも依存するが、堆積面積は $y/L=0.4\sim 0.7$ の範囲でピークを示す。特に、変形量が大きいケースにおいて、この傾向は顕著である。このことは、堆積面積のピークが沿い流れ上手側端部から1波長以内にあることを示している。すなわち堤体長 Lr が1

波長より大きい場合は図-4、図-6に示すような堤体中央部に捨石が堆積する形状となり、堤体長 Lr が1波長より短い場合は図-5、図-7に示すような堤体長のほぼ全域にわたって背後に捨石が堆積する形状になることを意味する。

図-12には侵食面積の沿岸方向分布を示す。同様に、横軸は潜堤法先での波長 L で無次元化した沿岸方向距離であり、沿い流れ上手側端部を原点としている。沿い流れ上手側端部は大きく侵食されるが、多くのケースにおいて $y/L=0.4\sim 0.7$ 付近で侵食面積は極小となり、その後、緩やかに増加している。したがって、堤体長 Lr が1波長以上の場合には、沿い流れ下手側端部での侵食がやや大きくなることを示している。

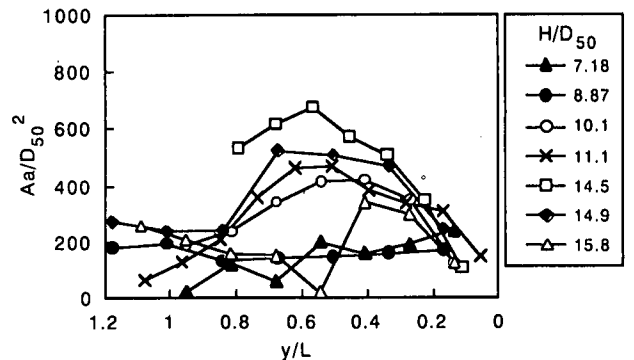


図-11 堆積面積 Aa の沿岸方向分布

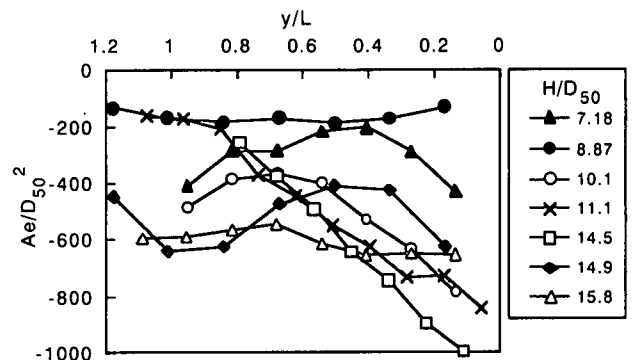


図-12 侵食面積 Ae の沿岸方向分布

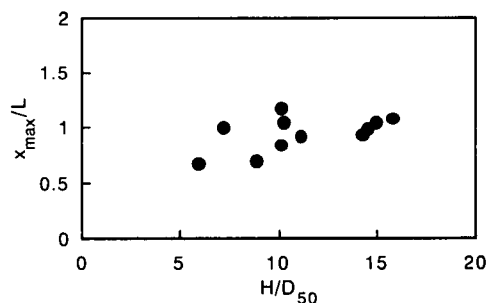


図-13 捨石の岸側堆積位置

(3) 捨石の岸向き移動距離

図-13に、変形が最も岸側にまで及んだ位置、すなわち捨石が最も岸側に堆積した位置 x_{max} を法先波長 L で無次元化して示す。波高粒径比が大きくなるに若干 x_{max} も大きくなるようであるが、ほとんどの

ケースにおいて x_{max}/L が1前後の値を示している。図-3～図-7からも、初期汀線の位置に関係なく $x/L=1$ 付近にまで捨石の堆積が生じていることが分かる。また、 x_{max} が生じる沿岸方向の位置は、ばらつきはあるが $y/L<0.4$ の範囲にあるケースが多かった。

4. 断面2次元実験との比較

(1) 断面形状に関する定性的な比較

平面実験においては、沿岸方向の流体運動およびそれに伴う沿岸方向への捨石移動が生じるため、断面2次元実験結果とは異なる結果が得られると考えられる。ここでは、条件がやや異なるが著者ら⁷⁾の断面2次元実験の結果を用い、変形が大きかった図-5のケースの平面実験結果との比較を行う。図-14(a)～(c)に、図-5のケースの岸沖方向の断面形状を示す。また、比較のために図-15(a)に波高粒径比 $H/D_{50}=12.1$ 、相対天端幅 $B/L=0.168$ のケースの断面2次元実験の結果、図-15(b)に波高粒径比 $H/D_{50}=29.5$ 、相対天端幅 $B/L=0.168$ の断面2次元実験の結果を示す。ただし、断面2次元実験はどちらも1/20勾配の固定床上に作製された捨石潜堤であり、入射波は1000波までしか作用させていない。

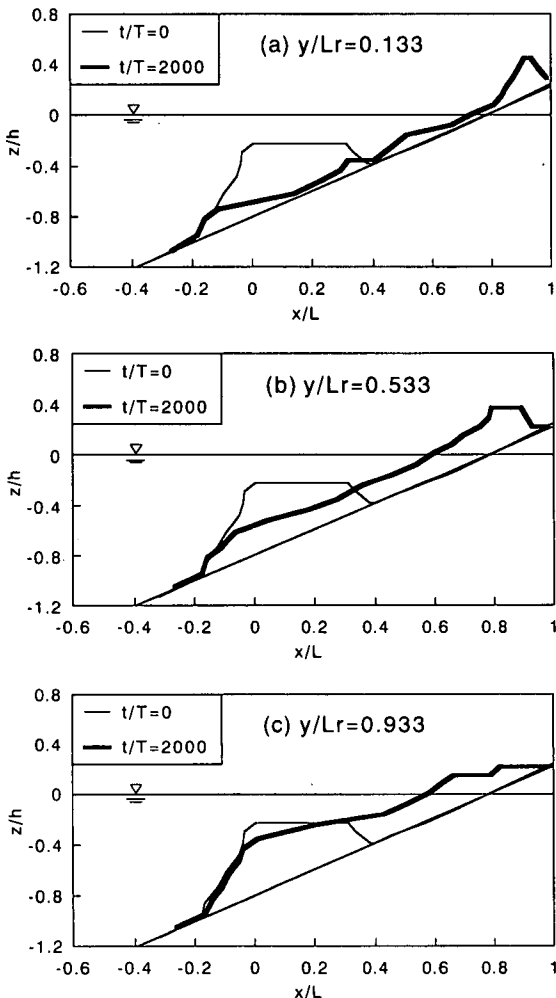


図-14 平面実験による各断面の変形
($H/D_{50}=14.5$, $B/L=0.283$, $Lr/L=0.849$)

条件が異なるため、平面実験結果と断面2次元実験結果を単純に比較することはできないが、沿い流れ上手側端部付近($y/Lr=0.113$)の断面形状については、堤体背後での堆積形状が断面2次元実験結果と似ている。断面2次元実験では直角入射であるため、潜堤は波の作用を受けて変形し、構造物の周囲に発生する流れの沿岸方向成分は存在しない。したがって、断面2次元実験結果との比較から、沿い流れ上手側端部の変形は主として波の作用によるものであると考えられる。しかし、岸向きの捨石移動量には大きな違いがあり、平面実験では初期汀線付近に捨石が堆積した。これは、断面2次元実験においては捨石の移動方向の自由度が岸沖方向に限定されていること、また潜堤背後で生じた水位上昇が沿岸方向に消散せず、すべて戻り流れとなって天端上を通過するためであると考えられる。

一方、沿い流れ下手側端部付近($y/Lr=0.933$)の断面形状については、断面2次元実験結果とは大きく異なっている。これは沿い流れ下手側端部付近の変形には、波の作用以外の影響、すなわち沿い流れの影響が大きいことを示していると言える。

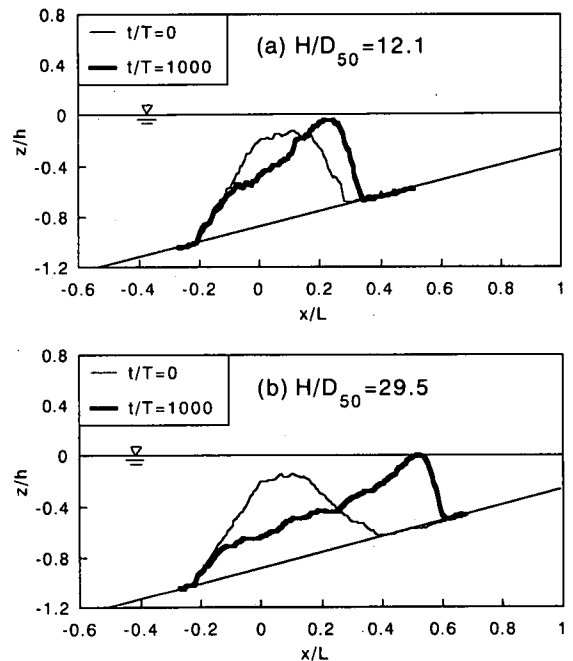


図-15 断面2次元実験による変形($B/L=0.168$)

(2) 被害レベルSに関する比較

被害レベル S ($S=Ae/D_{50}^2$, Ae :侵食面積)は、堤体岸沖方向の一つの断面に着目して算出した。図-16に、被害レベル S に関する平面実験の結果と断面2次元実験の結果の比較を示す。断面2次元実験の結果は、著者ら⁷⁾の結果からカーブフィットした実線で示している。平面実験と断面2次元実験の相違を純粋に比較するためには、直角入射波による堤体中央部(主幹部)の変形を取り扱う必要があるが、斜め入射波により堤体端部に大きな被災が生じる可能性があるため、ここでは堤体端部の比較も行った。

図-16(a)に示す沿い流れ上手側端部($y/Lr=0.133$)

での比較では、断面2次元実験の平均値とは大きく異なり、激しく侵食されていることが分かる。図-16(b)に示す堤体中央部($y/Lr=0.533$)では、被害レベルの値は断面2次元の実験結果の平均値より依然として大きい。沿い流れ上手側端部ほどの差は見られない。したがって、今回の実験条件内においても、堤体中央部では堤体端部の影響が小さくなっていると言える。図-16(c)に示す沿い流れ下手側端部($y/L=0.933$)では、平面実験の結果がややばらついており、沿い流れ下手側の端部の影響が現れていると考えられる。以上のことから、端部の影響があまり見られない堤体中央部に関しては、断面2次元実験の結果を用いて捨石の安定性および堤体の変形の議論は可能であるが、堤体端部、特に斜め入射時の沿い流れ上手側端部に関しては、断面2次元実験の結果では捨石の安定性や堤体の変形の議論を行うことは難しい場合もあると考えられる。

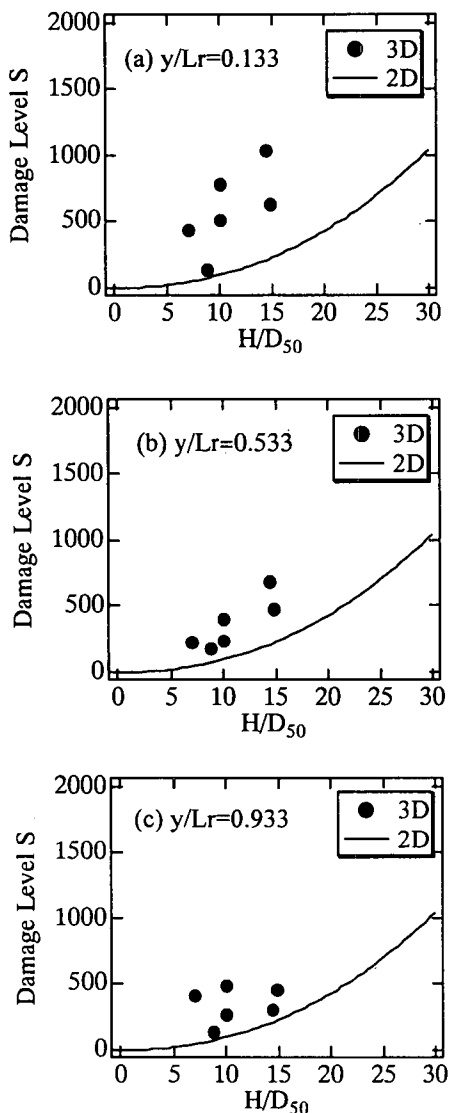


図-16 被害レベル S の比較

5. 結語

本研究では、設計値を超える外力が作用する場合における捨石潜堤の変形を平面実験により検討した。得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 潜堤の堤体端部は変形しやすく、沿い流れ上手側端部では沖側からの碎波と側面からの碎波により捨石が移動しやすく、沿い流れ下手側端部では初期移動を始めた捨石が沿い流れにより側方に流出しやすいと考えられる。
- (2) 沿い流れ上手側の侵食域にあった捨石は沿い流れ下手側に移動するが、その大部分は上手側端部から1波長以内に堆積する。したがって、堤体長 Lr と入射波長 L の比 Lr/L が1以下の場合には堤体長全域にわたって背後に捨石が堆積し、 Lr/L が1以上の場合には堤体中央部に捨石が堆積することになる。
- (3) 平面実験では断面2次元実験よりはるかに大きな侵食が堤体に生じ、捨石の岸向き移動距離も大きくなった。平面実験での岸沖断面ごとに被害レベル S を算定したが、特に端部において断面2次元実験の結果とは大きく異なった。したがって、断面2次元実験では安定性の議論ができない場合もあると言える。

謝辞：本研究を行うにあたり、前田記念工学振興財団の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鹿島遼一, 今泉正次, 戸田泰和: 被災事例から見た防波堤・防波護岸の波浪被災特性, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 626-630, 1986.
- 2) 五明美智男, 堀和彦, 高山知司, 寺内潔, 高橋重雄: 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, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 901-905, 1995.
- 3) Burcarth, H. F. and Frigaard P.: on 3-Dimensional Stability of Reshaping Breakwater, *Proc. of the 21st Int'l Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 2284-2298, 1988.
- 4) 松見吉晴, 大野賢一: 多方向不規則波に対する堤頭部上の流速特性と被災パターン, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 881-885, 1995.
- 5) 木村克俊, 上久保勝美, 坂本洋一, 水野雄三, 竹田英章, 林倫史: 消波ブロック被覆堤の堤頭部におけるブロックの耐波安定性, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 956-960, 1997.
- 6) 社団法人 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 132-135, 1989.
- 7) Araki, S., Fujiwara, Y., Miyazaki, T. and Deguchi, I.: Experimental Study on the Influence of the Crest Width on the Deformation of Submerged Breakwater, *Proc. of the 11th Int'l Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE, Vol. III, pp. 624-630, 2001.