

捨石潜堤の変形に関する平面的な効果

THREE-DIMENSIONAL EFFECT ON DEFORMATION OF SUBMERGED BREAKWATER

荒木進歩¹・柳原哲也²・新島 宏³・麓 博史⁴・出口一郎⁵

Susumu ARAKI, Tetsuya YANAGIHARA, Hiroshi NIJIMA, Hiroshi FUMOTO
and Ichiro DEGUCHI

¹正会員 博(工) 大阪大学助手 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 修(工) 清水建設株式会社 土木事業本部

³学生員 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 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 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 and two-dimensional experiments on deformation of submerged breakwaters are carried out to investigate the differences between their results. It is found that the three-dimensional deformation is featured by the accretion at the landward head of the submerged breakwater. Deformed profile of cross-section at the head of the breakwater measured in three-dimensional experiments is not the same as that measured in two-dimensional experiments due to this accretion at the head. In other words, three-dimensional experiments have to be conducted in order to investigate deformation in this area. Onshore water particle velocity above submerged breakwaters measured in three-dimensional experiments is larger than that in two-dimensional experiments because the difference between mean water surface elevations before and behind the submerged breakwater in three-dimensional experiment is small.

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

1. はじめに

海岸構造物の堤頭部(端部)や隅角部の安定性および水理機能に関する検討, また斜め入射波に対する検討を行う際には平面実験が必要不可欠である。それに対して, 構造物の主幹部(堤体中央部)の安定性や水理機能は, 通常, 断面2次元実験により検討されている。しかし, 断面2次元実験では沿岸方向への流体運動が制限されるため, 平面実験で得られる結果とは異なる可能性がある。Hall¹⁾は水路幅を変化させたバーム式防波堤の変形実験結果から, 堤体主幹部の直角入射波に対する検討についても平面水槽を用いることを推奨している。そうではあるが, 実際のところは平面実験に必要な費用, 労力や実験施設の制約等から断面2次元実験での検討が中心となるため, 断面2次元実験結果と平面実験結果の比較を行い, 差違を明らかにすることが重要である。

近年では, 合理的な施工計画を立てるため, 被覆工が未施工の段階における捨石マウンドの変形を予測することが重要となっていること, また, 変形を許容する設計法に関する研究が進められており, 捨石構造物はそれに適した構造形式であることから,

本研究では潜堤形式の捨石構造物を対象とする。捨石構造物の変形・被災に関して, Burcharth and Frigaard²⁾は捨石防波堤の変形を平面実験により検討し, 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た。また, 松見・大野³⁾は島堤被覆材の安定性を多方向不規則波浪場での実験により検討し, 堤頭部被覆材の安定性の低下について議論した。断面2次元実験による捨石構造物の変形, 被覆材の安定性に関する検討はVan der Meer⁴⁾を初めとして数多くなされている。しかし, 断面2次元実験による結果と平面実験による結果を比較し, その差違を検討した例はない。

著者ら⁵⁾は斜め入射波による捨石潜堤の変形実験を行い, 断面2次元実験の結果と比較した。しかし, 斜め入射波による結果には波向きの影響が含まれるため, 断面2次元実験の結果と厳密な比較はできない。そこで本研究では, 直角入射波による平面実験を行い, 断面2次元実験結果との差違, および堤体中央部の変形と端部の変形の差違を検討する。また, 捨石の移動に寄与する潜堤上での流速を平面実験と断面2次元実験とで測定し, その相違についても検討を加える。

2. 水理実験

(1) 平面実験

平面実験は東洋建設株式会社鳴尾研究所の屋内平面水槽を用いて行った。水槽内には平均勾配1/50の固定床が設置されており、図-1に示すように天端幅 $B=50\text{cm}$ または 100cm 、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 $D_{50}=0.75\text{cm}$ の碎石により作製した。実験スケールは1/25程度を想定している。

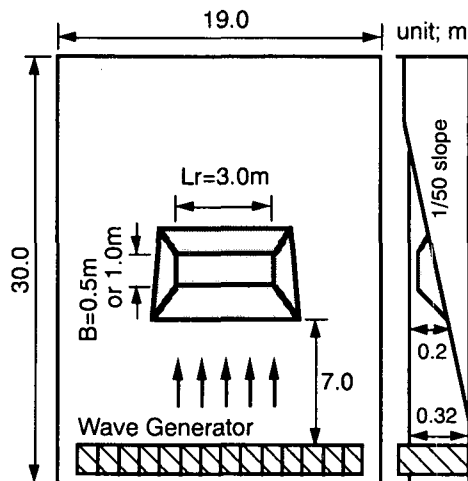


図-1 平面水槽

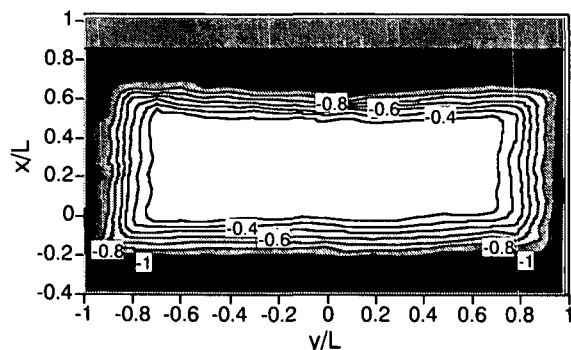


図-2 堤体の初期形状

a) 堤体変形実験

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10,000～24,000波を堤体に対して直角に入射させた。その後、初期形状への整形は行わずに波高を増加させ、再び10,000～24,000波を入射させた。有義周期は $T_{1/3}=1.5\text{s}$ （一定）、入射波の有義波高は $H_{1/3}=5.2\text{cm}$ から約2cmずつ3段階にわたって増加させた。堤体の前後には容量式波高計を設置し、水位変動を測定した。また、堤体の形状は初期状態、1,000波後、2,000波後、その後2,000～4,000波ごとにレーザー変位計を用いて測定した。

図-2に堤体の初期形状をコンターで示す。岸沖方向（縦軸）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、どちらも周期1.5sの波の法先波長で無次元化している。また、水深は法

先水深で無次元化している。

b) 流速測定実験

解析を容易にするために入射波は規則波とし、水平2成分電磁流速計を用いて初期形状の堤体表面より3cm上方の岸沖、沿岸方向水粒子速度 u, v を岸沖方向に10cm間隔、沿岸方向に25cm間隔で測定した。ただし、直角入射であるので、沖側から見て左半分のみ測定を行った。入射波の周期は $T=1.5\text{s}$ で一定とし、波高 H は5cm程度と9cm程度の2種類とした。 $H=5\text{cm}$ 程度の入射波は堤体表層にある捨石の安定限界付近に相当し、 $H=9\text{cm}$ 程度の入射波は堤体上の捨石を大きく移動させる。そこで、 $H=9\text{cm}$ 程度の入射波を用いたケースでは、堤体上の捨石が移動しないように表層の捨石を十分な質量の被覆ブロックに置換し、堤体を被覆して実験を行った。水粒子速度は0.05秒間隔で51.2秒間測定した。

(2) 断面2次元実験

断面2次元実験は大阪大学工学部の屋内断面2次元水槽を用いて行った。図-3に示すように平坦床上に平面実験と同寸の捨石潜堤を $D_{50}=0.71\text{cm}$ の碎石により作製した。平坦床上に捨石潜堤を設置したため、平面実験とは条件面で若干の差がある。

堤体変形実験および流速測定実験での実験波および実験手順は平面実験と同様に行った。ただし、堤体の形状の測定および水粒子速度の測定は、水槽中央の1測線上でのみ行った。なお、水槽幅は70cmである。

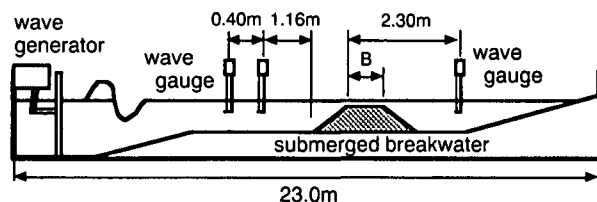


図-3 断面2次元水槽

3. 変形形状

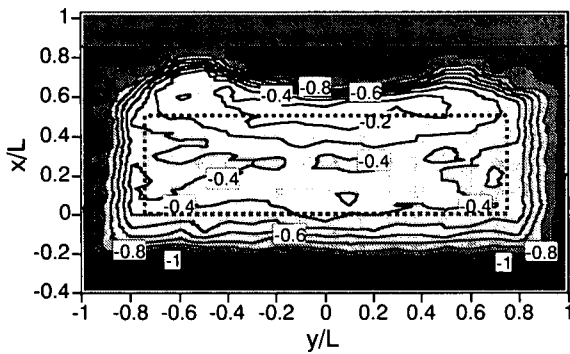
(1) 平面実験による変形の沿岸方向特性

まず平面実験で測定された変形形状より、堤体中央部と端部の変形について検討する。図-4(a)および(b)に、それぞれ波高粒径比 $H_{1/3}/D_{50}=10.2$ および $H_{1/3}/D_{50}=12.0$ の段階での造波終了後（24,000波造波後）の堤体形状を示す（相対天端幅 $B/L=0.495$ 、相対堤長 $L_r/L=1.49$ ）。これらは、段階的に増加させた波高の2段階目、および3段階目に相当する。図中の点線は初期の天端位置を表す。なお、波高の1段階目（ $H_{1/3}/D_{50}=6.93$ ）では堤体はほとんど変形しなかった。

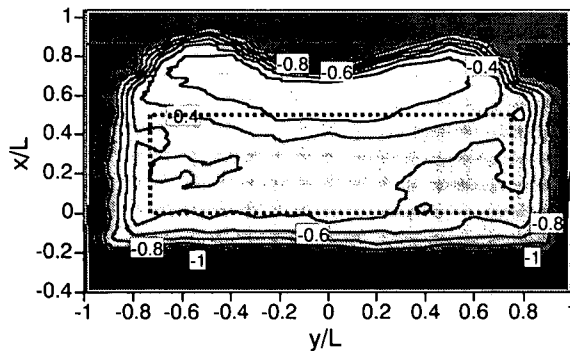
図-4(a)より、堤体沖側の法肩（ $x/L=0.0$ ）付近が侵食され、岸側法肩から岸側斜面（ $x/L=0.5\sim 0.7$ ）にかけて捨石が堆積していることが分かる。また、堤体中央部よりも端部のほうが侵食されており、堤体端部

は被災しやすいことも確認できる。堤体岸側の両端部には捨石が大きく堆積している箇所がある。これは堤体端部の沖側法肩および側斜面付近の捨石が、堤体端部から堤体背後へと回り込む波の作用により堆積したものと考えられる。

図-4(b)では、入射波高の増大に伴い、沖側法肩の侵食と堤体背後での捨石の堆積がさらに進行している。堤体側面から回り込む波の影響による堤体岸側両端部の堆積域は、より岸側に拡大するとともに堤体中央部付近にまで及んでいる。



(a) $H_{1/3}/D_{50}=10.2, B/L=0.495, Lr/L=1.49, t/T=24000$



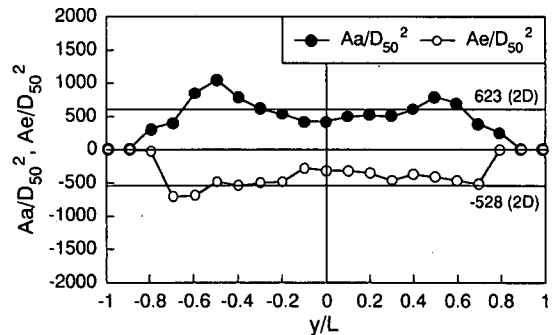
(b) $H_{1/3}/D_{50}=12.0, B/L=0.495, Lr/L=1.49, t/T=24000$

図-4 平面実験による堤体変形状

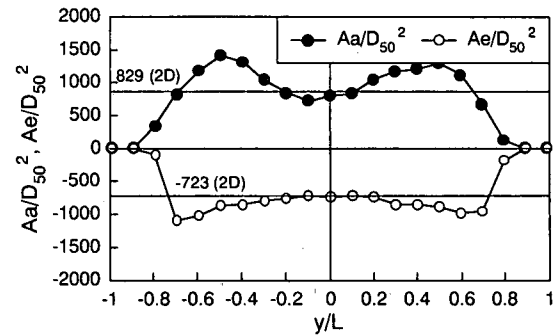
図-5(a)および(b)に、それぞれ図-4(a)および(b)のケースにおける岸沖断面内での堆積面積 Aa と侵食面積 Ae の沿岸方向分布を示す。堆積面積 Aa と侵食面積 Ae の定義を図-6に示す。図-5の縦軸は粒径の2乗で無次元化した堆積面積 Aa および侵食面積 Ae 、横軸は堤体中央を原点とした沿岸方向座標で、法先波長で無次元化している。したがって、無次元侵食面積 Ae/D_{50}^2 は被災レベル S に相当するが、ここでは便宜上、堆積面積を正、侵食面積を負の数として扱う。

図-5に示される Aa/D_{50}^2 および Ae/D_{50}^2 の値は500以上とかなり大きい。これは本実験では中詰に相当する小さな砕石が表層に剥き出しになっている状態を想定しているためである。また、図中の(2D)が付された横実線は断面2次元実験から求めた Aa/D_{50}^2 および Ae/D_{50}^2 であり後述する。図-5(a)および(b)より、堤体中央部に比べて堤体端部の侵食が大きいこと、また、端部から堤体背後へ回り込む波の作用により、端部の侵食域よりやや中央寄りに大きな堆積域が現

れることが分かる。また、波高が増大しても最も侵食が激しい箇所は $y/L=\pm 0.7$ 付近、最も捨石が堆積する箇所は $y/L=\pm 0.5$ 付近でほとんど変化はない。 $y/L=\pm 0.75$ が端部であるから、最も侵食が激しい箇所は堤体端部、最も捨石が堆積する箇所は端部から0.25~0.30波長中央寄りの地点と言える。



(a) $H_{1/3}/D_{50}=10.2, B/L=0.495, Lr/L=1.49$



(b) $H_{1/3}/D_{50}=12.0, B/L=0.495, Lr/L=1.49$

図-5 Aa と Ae の沿岸方向分布

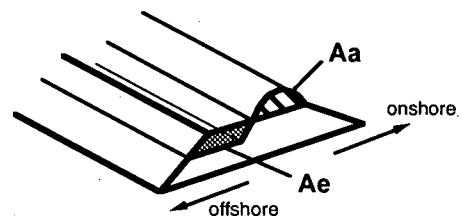


図-6 Aa と Ae の定義

(2) 断面2次元実験との比較

図-7に、図-4(a)で示した段階 ($H_{1/3}/D_{50}=10.2$, 24,000波作用後)における岸沖断面形状と、ほぼ同条件で行った断面2次元実験による断面形状の比較を示す。点線が初期形状、細実線が断面2次元実験結果、太実線が平面実験結果である。堤体天端上の侵食に関しては、全体的に沿岸方向のどの地点においても、平面実験と断面2次元実験とで大差はなく、同程度にまで侵食されている。しかし、堤体岸側においては、図-4に示したように平面実験での堤体変形が沿岸方向に一様ではないため、断面2次元実験結果とは大きな違いが見られる。堤体中央部 $y/L=0.0$ (図-7(a))では、断面2次元実験のほうが堤体岸側での堆積が大きく、したがって、堤体変形に関し

ては断面2次元実験での検討は安全側となる。堤体中央部と端部の中間 $y/L=-0.297$ (図-7(b))では、平面および断面2次元実験による変形形状はほぼ同一となり、堤体変形に関して断面2次元実験での検討が可能である。堤体端部のやや中央より $y/L=-0.495$ (図-7(c))では、平面実験での堤体岸側への堆積が非常に多い。したがって、堤体変形に関しては断面2次元実験での検討は変形量を過小に評価していることになり、平面実験による検討が必要である。なお、断面2次元実験においても変形は水槽幅方向に一様ではなく、測定した水槽中央の測線で最も大きな変形が生じていた。

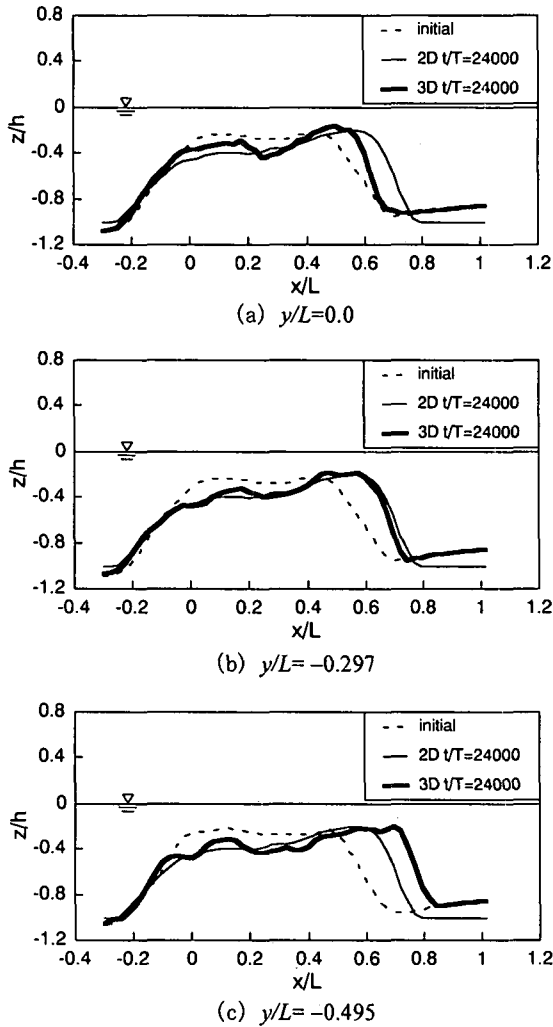


図-7 岸沖断面形状 ($H_{1/3}/D_{50}=10.2, B/L=0.495$)

図-8に、図-4(b)で示した段階 ($H_{1/3}/D_{50}=12.0, 24,000$ 波作用後)における岸沖断面形状と、ほぼ同条件で行った断面2次元実験による断面形状の比較を示す。堤体天端上の侵食に関しては、図-7の段階と同様に、全体的には沿岸方向のどの地点においても、平面実験と断面2次元実験とで大差はない。一方、堤体岸側での変形に関しては、堤体中央部 $y/L=0.0$ では平面および断面2次元実験による変形形状はほぼ同一であるが、 $y/L=-0.297$ では平面実験のほうが堤体岸側での堆積がやや多く、また堤体端部

付近の $y/L=-0.495$ では平面実験での堤体岸側への堆積が非常に多い。したがって、堤体中央部以外では、堤体変形に関する断面2次元実験での検討は変形量を過小評価することになり、平面実験による検討が必要である。

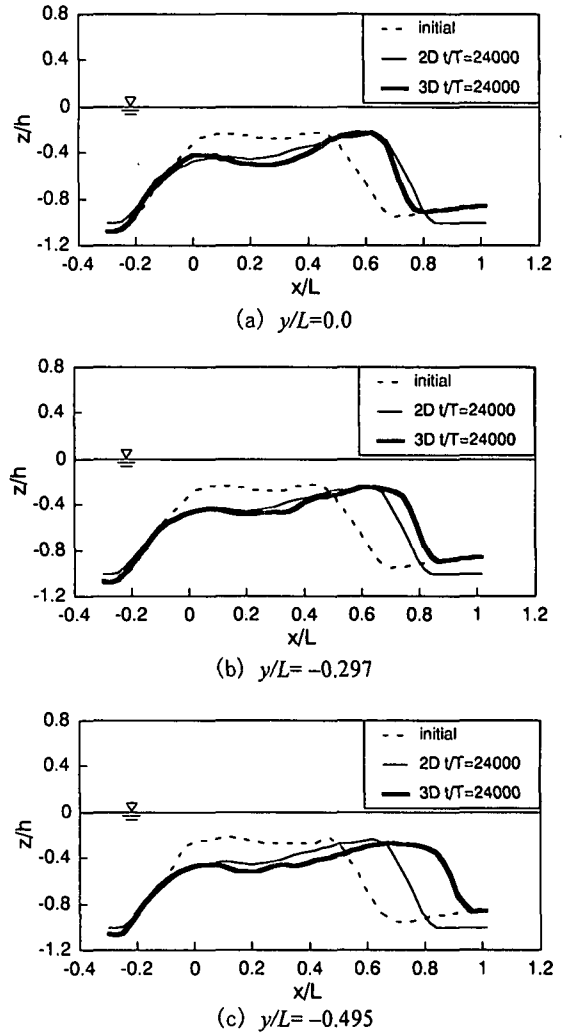


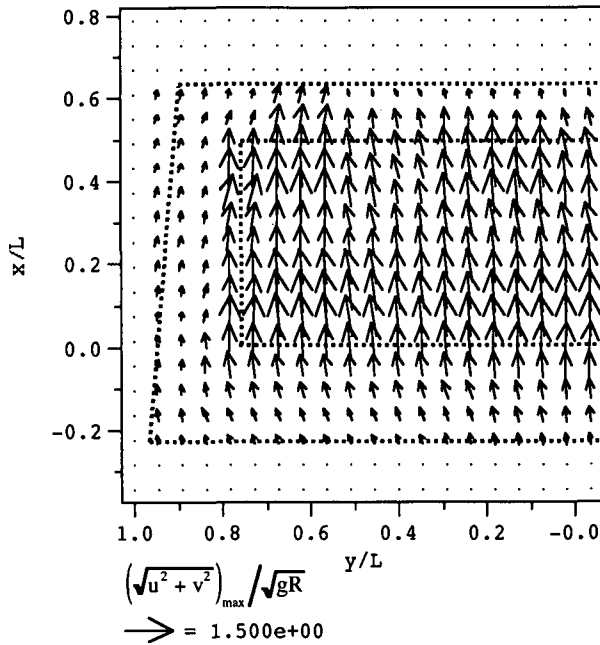
図-8 岸沖断面形状 ($H_{1/3}/D_{50}=12.0, B/L=0.495$)

表-1 断面2次元実験での Aa および Ae

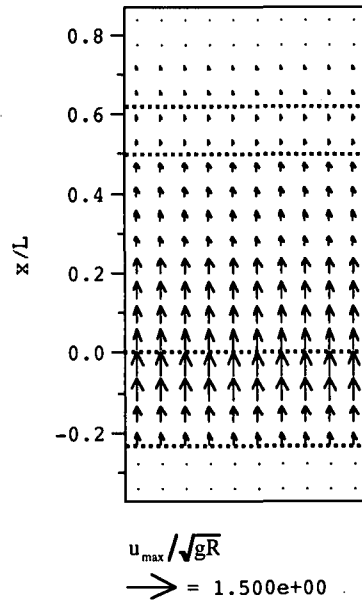
Case	Aa/D_{50}^2	Ae/D_{50}^2
$H_{1/3}/D_{50}=10.2, B/L=0.495$	623	-528
$H_{1/3}/D_{50}=12.0, B/L=0.495$	829	-723

表-1に断面2次元実験による断面形状から求めた無次元堆積・侵食面積 ($Aa/D_{50}^2, Ae/D_{50}^2$)を示す。これらの値を図-5(a)または(b)と比較することにより、沿岸方向各位置において平面実験と断面2次元実験との変形量の相違を確認することができる。

なお、ここでの議論は同一諸元の入射波を24,000波作用させたときの変形形状をもとにしている。この作用波数で変形はほぼ収束していたが、特に平面実験では、さらに作用波数を増加させることにより端部からの変形が緩やかに進行する可能性がある。したがって、作用波数が非常に多い場合は、別途検討が必要であると考えられる。



(a) 平面実験



(b) 断面2次元実験

図-9 岸向き最大流速ベクトル

4. 堤体上の水粒子速度

(1) 岸向き最大流速

堤体の変形形状から捨石はほぼ岸向きに移動していたので、まず捨石の移動に直接寄与すると考えられる岸向きの最大流速について調べる。

図-9に平面実験($H/D_{50}=11.7$, $B/L=0.495$, $Lr/L=1.49$)と断面2次元実験($H/D_{50}=12.0$, $B/L=0.495$)での、堤体表面上の岸向き最大流速を、天端水深に対する線形長波の波速で無次元化して示す。ここで、岸向き最大流速は、測定された水粒子速度時系列で u^2+v^2 が岸向きに最大となる時の流速ベクトルと定義した。図中の点線は堤体の天端および法先を示す。断面2次元実験の岸向き最大流速は、水槽の中央1測線で測定した結果を水槽幅方向に複数表示している。ただし、水槽幅方向の成分については考えず、岸沖成分のみで表示している。

図-9(a)の平面実験および図-9(b)の断面2次元実験どちらも沖側法肩付近では同程度の流速が作用しているが、天端中央から岸側法肩にかけて($x/L=0.3 \sim 0.5$)は平面実験での流速のほうが大きくなっている。これは、平面実験では堤体背後において沿岸方向へ流体運動が生じるので、相対的に天端上を岸向きに通過する流体運動が大きくなったためと考えられる。堤体端部の岸側では堤体背後に回り込む流れが見られ、端部の変形につながったと考えられる。一方、堤体中央部岸側では平面実験での流速が大きい、変形量は断面2次元実験のほうが大きい点(図-7(a), 図-8(a))については検討中である。

(2) 平均流速

図-10に平面実験($H/D_{50}=11.7$, $B/L=0.495$,

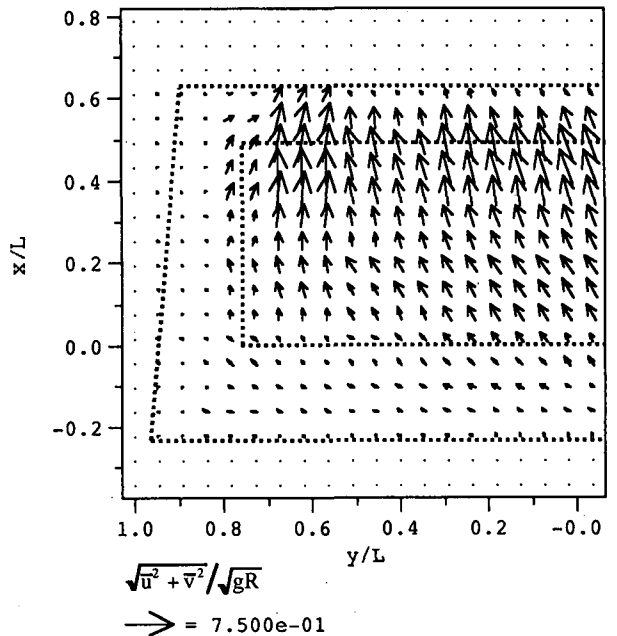


図-10 平均流速ベクトル

$Lr/L=1.49$)での堤体表面上の平均流速ベクトルを線形長波の波速で無次元化して示す。図中のベクトルのスケールは図-9とは異なっている。堤体天端上で岸向きの平均流速が卓越しており、沖側法肩付近より岸側法肩付近の平均流速のほうが大きい。したがって、図-9(a)と比較すると堤体岸側端部での岸向き最大流速に占める平均流速の割合は約半分であることが分かる。また、端部から堤体背後へ回り込む流れにも平均流成分の寄与が大きい。なお、断面2次元実験での平均流速は図示しないが、全体的に沖向きで、平均流速の大きさは平面実験結果の1/5~1/10と非常に小さい。

(3) 堤体上での流速変動特性

図-11に平面実験($H/D_{50}=11.7$, $B/L=0.495$, $Lr/L=1.49$)と断面2次元実験($H/D_{50}=12.0$, $B/L=0.495$)での岸向き最大流速の岸沖方向変動を線形長波の波速で無次元化して示す。平面実験での岸向き最大流速は沖側法肩付近で極大となった後、岸側法肩付近でも極値を取る。図中、黒丸で示す断面2次元実験での岸向き最大流速は、堤体沖側斜面($x/L < 0.0$)では平面実験結果と等しいが、天端上($x/L > 0.0$)では平面実験結果より小さくなる。この差は、沖側法肩付近では水粒子速度の波動成分、岸側法肩付近では平均流成分の差に起因しており、平面実験では相対的に岸向きの流体運動が大きいことが原因であると考えられる。また、沖側法肩付近で最大値が発生する地点は、平面実験では $x/L=0.1$ 付近、断面2次元実験では $x/L=0.0$ 付近と若干の差が見られる。

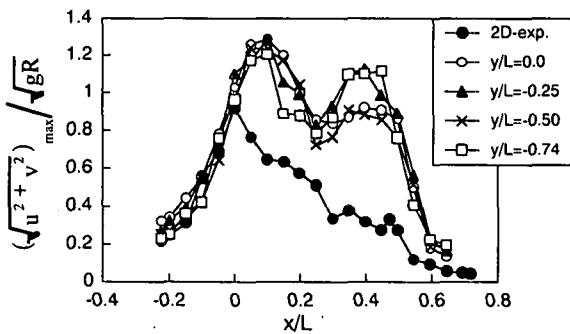


図-11 岸向き最大流速の岸沖方向変動($B/L=0.495$)

表-2 潜堤前後での平均水位の差

	3D-exp		2D-exp	
	R/H=0.99	R/H=0.56	R/H=0.99	R/H=0.56
$\Delta\eta/H$	0.016	0.032	0.141	0.167

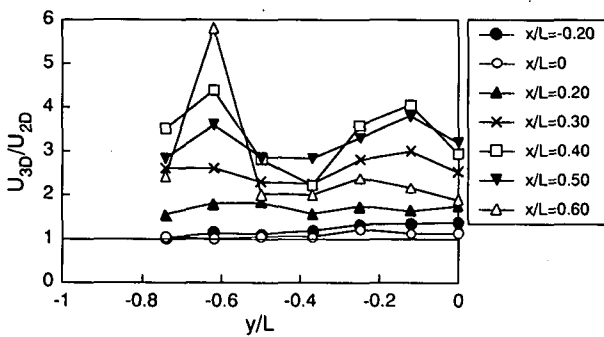


図-12 岸向き最大流速の沿岸方向変動($B/L=0.495$)

表-2に堤体前後での平均水位の差 $\Delta\eta$ を示す。平面実験での平均水位の差は断面2次元実験の1/10程度であり、堤体背後で過剰な水位上昇が生じていない。したがって、平面実験での堤体背後では、沿岸方向への流体運動が生じ、天端上では相対的に岸向きの流体運動が大きくなっていることが分かる。

図-12に平面実験($H/D_{50}=11.7$, $B/L=0.495$, $Lr/L=1.49$)と断面2次元実験($H/D_{50}=12.0$, $B/L=0.495$)

での岸向き最大流速の沿岸方向変動を両者の比(u_{3D}/u_{2D})として示す。堤体沖側斜面から沖側法肩にかけて($x/L < 0.0$)は両者の比は1に近く、また沿岸方向の変動も小さいが、天端中央より岸側($x/L > 0.30$)では両者の比が2を超え、沿岸方向の変動が大きくなる。特に、岸側斜面の $x/L=0.60$ では端部付近での変動が大きい。これらは堤体端部から堤体背後へと回り込む波の影響であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、捨石潜堤堤体の変形について平面実験と断面2次元実験を行い、両者の相違を検討した。得られた主要な結果を以下にまとめる。

- 1) 平面実験では、堤体の変形が沿岸方向に変動し、堤体端部から背後へと回り込む波の作用により、堤体岸側斜面の端部付近(端部から0.25~0.30波長の地点)には捨石が大きく堆積する。
- 2) 堤体岸側端部付近に大きく堆積する捨石の影響のため、波高と粒径の比にも依存するが端部から0.40~0.50波長までの変形は平面実験で検討する必要がある。それより中央寄りの領域では断面2次元実験により変形を検討することが可能であるが、安全側であり、平面実験より変形量をやや多く見積もる。
- 3) 堤体上での水粒子速度は、端部付近だけでなく全体的に断面2次元実験より平面実験のほうが大きい。これは、平面実験では堤体前後での平均水位の差が小さく、天端上での岸向きの流体運動が相対的に大きいことが一因と考えられる。

謝辞：本研究での平面実験は東洋建設株式会社鳴尾研究所の実験施設を用い、同社の金澤 剛氏、小沢貴生氏と松村章子氏にはお力添えを頂いた。ここに記して謝意を表します。また、本研究の一部は石原藤次郎奨学基金の助成により行った。併せて、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Hall, K. R.: Two dimensional effects in modelling berm or reshaping breakwaters, *Proc. of the 23rd Int'l Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1203-1216, 1992.
- 2) Burcharth, 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.
- 3) Van der Meer, J. W.: Stability of breakwater armour layers - design formulae, *Coastal Engineering*, Vol. 11, pp. 219-239, 1987.
- 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) 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*, Vol. 18, pp. 269-274, 2002.