

堤防前面の海浜変形に関する一考察

細井正延*・荒川忠昭**

1. 緒言

大きな波浪が来襲するような海岸に堤防を設置する際に、堤防の破壊を防止するためにその位置を汀線より陸側の海浜上に定めることが多い。このような所では堤防前面に多量の砂礫が堆積する現象が方々で認められており、これによって遡上波が変化をうけたり、あるいは堤防上が道路になっている場合には、路面に砂礫が堆積して自動車交通に支障をきたすことがある。そこで著者は、汀線より陸側に堤防がある場合について、堤防位置と前面海浜の変形の関係を明らかにするために実験を行ない、その結果については第14回海岸工学講演会で発表した¹⁾。とくに堤防前面の海浜砂の粒径の大きさによって、海浜変形の状態が非常に異なることに着目し、その後研究を続け、(1) 遡上波の大きさを一定にして粒径を種々に変えた場合、(2) 粒径を一定にして遡上波を変えた場合、(3) 堤防前面に砂が堆積する場合、の砂の供給源について検討した。その結果、堤防前面の砂の移動形式が浮遊状態では洗掘を、掃流状態では堆積を生じることなどが明らかになった。

2. 堤防前面の堆積、洗掘の機構

前回の講演会で発表した実験結果はつぎのとおりである。海浜構成砂の粒径は、 $d_{50}=1.2\text{ mm}$, 0.42 mm の2種類で、用いた波は、沖波波高 $H_0=12.4\text{ cm}$, 周期 $T=1.57\text{ sec}$ および $H_0=12.4\text{ cm}$, $T=2.37\text{ sec}$ の2種類である。すなわち $H_0/L_0=0.032$ および 0.014 である。まず海浜勾配 $1/10$ の斜面に砂を敷いて、上記の波をあてて平衡海浜形状をつくった。つぎにその上にのり面勾配が1割または鉛直の堤防模型を、汀線から、陸側へいろいろの位置に置いて、堤防前面の砂面高の変化、汀線の前進・後退量を測定し、それらの量と堤防位置、堤防のり面勾配などの関係を検討した。それらの結果の中で、本論文の実験と同じ種類のものだけを示すと図-1のとおりである。ただし、堤防のり面勾配は鉛直で、 x は無堤時平衡海浜のときの汀線から堤防までの距離、 X_b は同じく汀線から砕波点までの距離を表わす。また ΔH は、図-2の中でのBDの高さを表わす。図-1から、つ

図-1 堆積、洗掘高と堤防位置との関係

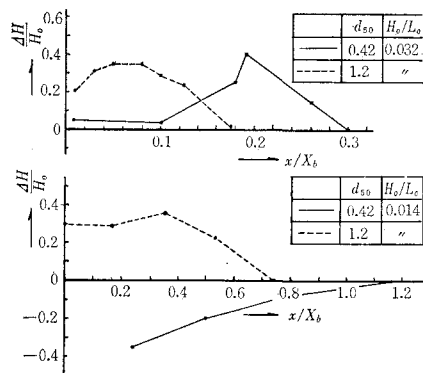
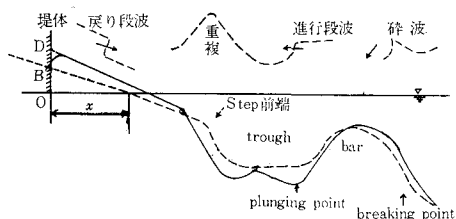


図-2 海浜変形と波



ぎのようなことがわかる。すなわち、 $H_0/L_0=0.032$ の場合には、粒径の大小にかかわらず、陸側から汀線に向けて堤防を設置していくと、最終堆積高は最大値をもつ曲線になる。 $H_0/L_0=0.014$ の場合には、 $d_{50}=1.2\text{ mm}$ では上と同じ状態が見られるが、 $d_{50}=0.42\text{ mm}$ ではすべて洗掘状態が現われる。またどちらの波形勾配でも、粒径が大きい方が堆積しやすい。堆積機構は、進行段波と反射段波とが重複して砂輸送を促し、この砂が堆積する。

上に述べた結果について定量的な考察を行なうために、まず遡上波を同じにして底質粒径を変えた場合、つぎに底質粒径を同じにして遡上波を変えた場合について実験を行ない、堤防前面の海浜変形と砂移動の形式との関係を調べた。実験装置は前回のもと同じで、用いた波は、 $H_0=12.4\text{ cm}$, $H_0/L_0=0.032$, 0.014 (または 0.019) である。また模型海浜砂の50%粒径は、 $d_{50}=1.2$, 0.42 , 0.32 , 0.23 mm の4種類である。

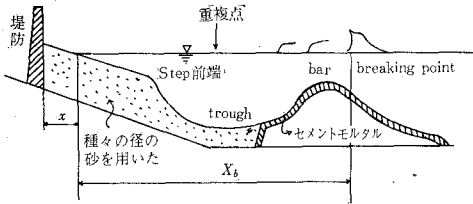
(1) 波を同じにして、底質粒径を変えた場合

堤防前面の海浜変形は、堤防位置や波の大きさを同じにした場合でも、底質粒径の大きさによって大きな違いが

* 正会員 工博 名古屋工業大学教授

** 正会員 工修 大阪市役所

図-3 実験時の模型海浜



生じている。底質粒径による海浜変形の相違を考察する場合に、粒径の大きさによって無堤時の平衡海浜形状が異なる。したがって変形に対して重要な要素である遡上波の性質が変わるわけである。そこで本実験では、粒径が変わっても遡上波をできるだけ一定にするために、有堤時に堆積の供給源となる所、すなわち進行波と反射波の重複点より少し沖側の点から bar 上をセメントモルタルで固定して、砕破点動かないようにした(図-3)。

$H_0/L_0=0.032$, $d_{50}=1.2$ mm の状態で、堤防位置を種々に変えたときの海浜状態は図-1 に示したとおりである。堤防をどこに置いていても堆積することがわかった。そこで $x/X_b=0.1$ の所に堤防を置き、 $d_{50}=1.2$, 0.42 , 0.32 , 0.23 mm の 4 種類の砂を用い、初期海浜形状をすべて $d_{50}=1.2$ mm の無堤時平衡海浜と同一にして、 $H_0/L_0=0.032$ の波を作用させ、各粒径ごとにどのような変形が生じるかを調べた。それらの結果は図-4 に示すとおりである。 $d_{50}=1.2$, 0.43 , 0.32 mm の場合はすべて堤防前面にはかなりの量の砂が堆積しており、とくに 0.42 mm が最も著しく、 0.23 mm では著しく洗掘され砂面が低下している。

堤防を設置すると、反射波によって重複波が生じる。ただしこの場合は堤防位置が砕破点とかなり離れているので、段波性の波が重なったものである。この重複波はほぼ step 前端で腹をもつので、ここでの砂移動の限界水深が大きくなり、洗掘された砂が陸岸側と沖側とに輸送される。実験中の観察によれば、陸岸向きに輸送される砂が掃流状態であれば、これが堤防に衝突したときに砂は沈殿し堆積するが、浮流状態であれば反射波によって浮流砂はふたたび沖側へ戻される。したがって前者の

図-4 底質粒径による海浜変形の比較

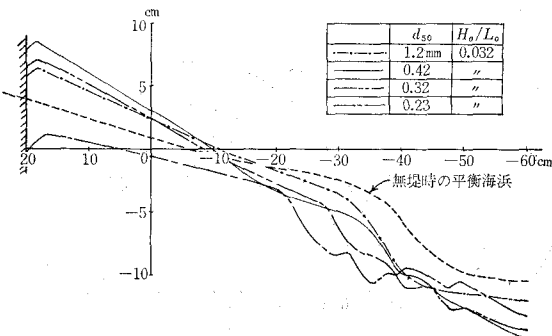
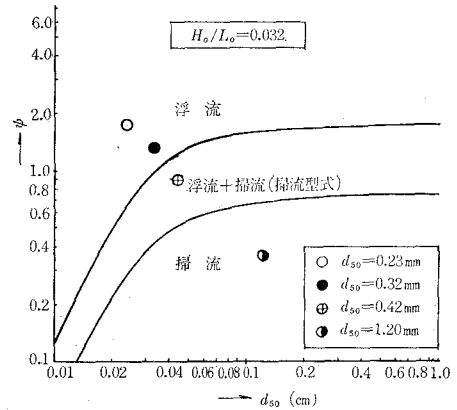


図-5 砂の移動形式



場合には堤防前面の砂床面は上昇し、後者の場合には低下する。

篠原・椿の研究によれば²⁾、砂の輸送形式は無次元量 $\psi = u_*^2/(\sigma/\rho - 1)gd$ と粒径によって、掃流、(掃流+浮流)、浮流の 3 つの範囲に分類される。図-5 は上記の各粒径についての値をプロットしたものである。ここで、 ρ , σ はそれぞれ水および砂粒の密度、 d は砂の平均粒径、 u_* は摩擦速度である。図-5 からわかるように、 1.2 mm, 0.42 mm の場合には砂輸送は掃流形式であり、 0.32 mm は浮流形式と掃流形式の限界付近に、 0.23 mm では完全に浮流形式の範囲にはいっている。また 0.42 mm のときの方が 1.2 mm のときよりも堆積量が多いのは、堆積砂の供給源であるところの step 前端付近の洗掘量が前者の方が大きいからであろう。

ここで、 u_* の値を算定するのにつぎの方法で行なった。Freeman-Méhauté は、dry bed 上への遡上波の先端の特性曲線を用いて、dry bed 上の場所的な流速分布と遡上高に対して次式を導いた³⁾。

$$\frac{U^2}{2} = \frac{U_s^2}{2} - \frac{s+f/a^2}{(1+a)(1+2a)} \cdot \cos \alpha \cdot X \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{R}{h_*} = \frac{U_s^2}{2} \frac{(1+a)(1+2a)}{1+(f/a^2)s} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $X=x/h_*$, $U=u/\sqrt{gh_*}$, $C=\sqrt{\eta/h_*}$ である。汀線に座標の原点をとり、dry bed に沿って x 軸をとっている。 U は X の位置の流速、 U_s は汀線における流速、 s は斜面の勾配で $\tan \alpha$ に等しく、 R は遡上高、 h_* は水槽水平部の水深、 η は斜面から直角方向に測った水深である。また f は、 $\tau = \rho f u^2$ で定義される摩擦抵抗係数である。 a は、遡上波の先端が放物線であることから、 C と U の関係を次式のように仮定した場合の比例定数である。

$$C\sqrt{\cos \alpha} = a \cdot U \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(1),(2),(3)の中で、 a と f が未知数であるから、実験値と式(1)~(3)を用いてそれらの値

を定めねばならない。これについては、岩垣等はつぎの方法によって行なった⁴⁾。汀線直前における波の先端の移動速度 w_s 、静水面からの高さ η_s と、汀線直後における遡上波の先端の移動速度 u_s を実験によって測定すれば、 a の値は次式から求めることができる。

$$W + 2C_s = (1 + 2a) \cdot U_s \quad \cdots (4)$$

ここで、 $W = w / \sqrt{gh_*}$ 、 $C_s = \sqrt{\eta / h_*}$ 、 $U_s = u_s / \sqrt{gh_*}$ である。

つぎに求められた a の値を用い、また遡上高 R を測定して、式(2)から f を算定することができる。

以上のような方法で、本実験の $H_0/L_0 = 0.032$ 、 $d_{50} = 1.2 \text{ mm}$ の場合に対する無堤時平衡海浜形状について a 、 f を求めた結果、 $a = 0.38$ 、 $f = 0.0093$ であった。この f を、 $\tau/\rho = u_*^2 = f \cdot u^2$ に代入し、また u の値としては、一応汀線と堤防位置との中点から堤防までの間の遡上波先端の平均移動速度の測定値の平均値を用いて、 u_*^2 の値を求めた。

つぎに波形勾配を変えて $H_0/L_0 = 0.014$ とし、 $d_{50} = 0.42 \text{ mm}$ の場合の無堤時の平衡海浜をつくり、 $x/X_b = 0.5$ の所に堤防を置き、底質粒径が 0.42 、 0.32 、 0.23 、 1.2 mm の4種類について、 $H_0/L_0 = 0.032$ の場合と同様の実験を行なった。 0.032 の場合には暴風海浜形状で bar が現われたが、 0.014 では bar が発生しないため

図-6 底質粒径による海浜変形の比較

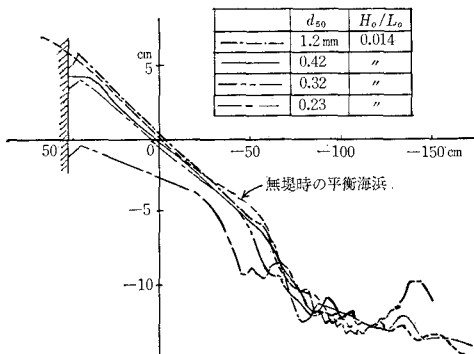
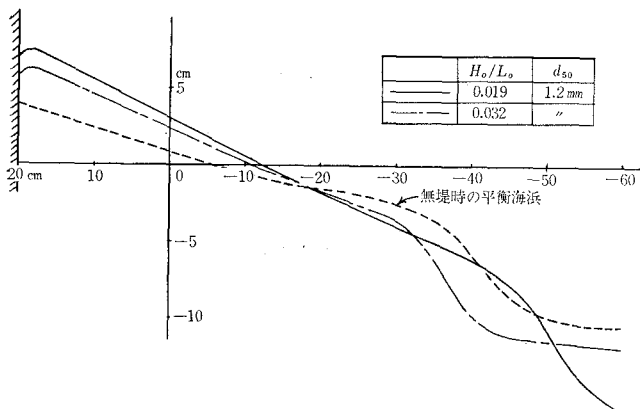


図-8 波の大きさによる海浜変形の比較



に、進行波の砕波点が step よりずっと陸岸側にあるので、遡上波の速度がかなり大きい。各粒径に対する海浜形状および輸送形式は図-6、7のとおりである。ただし、 $a = 0.26$ 、 $f = 0.0049$ である。図-6 からわかるように、 $d_{50} = 1.2 \text{ mm}$ を除いて全部の場合、堤防前面の砂床面が低下しており、 0.23 mm ではその程度がはなはだしい。図-7 から、 1.2 mm は掃流形式で、残りの3つは浮流形式であることが明らかである。実験の観察によると、 0.23 mm の場合には、 0.43 mm や 0.32 mm の場合とくらべて浮流砂がはるかに多量であるように見うけられた。

(2) 底質粒径を同じにして、波を変えた場合

波の大きさが海浜にどのような変形を与えるかを検討する場合でも、たとえ粒径が同じであっても、波の大きさによって無堤時の平衡海浜の形状が違うので砕波点が異なり、遡上波の性質も違ってくる。したがって、ここでは $H_0/L_0 = 0.032$ 、 $d_{50} = 1.2 \text{ mm}$ のときの平衡海浜をつくり、波の重複点よりやや沖側の点から沖側をセメントモルタルで固定させた。つぎに堤防を $x/X_b = 0.1$ ($x = 22 \text{ cm}$) の所に置き、 $H_0/L_0 = 0.032$ および 0.019 の波 (H_0 はともに 12.4 cm で、また砕波位置も同じである)

図-7 砂の移動形式

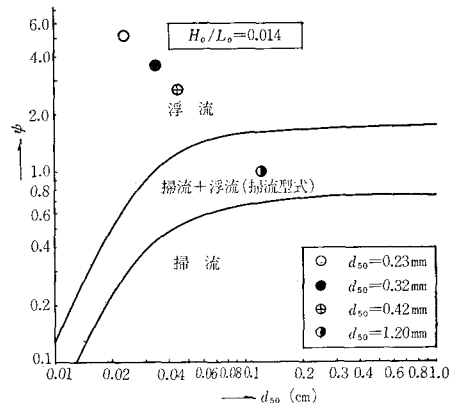
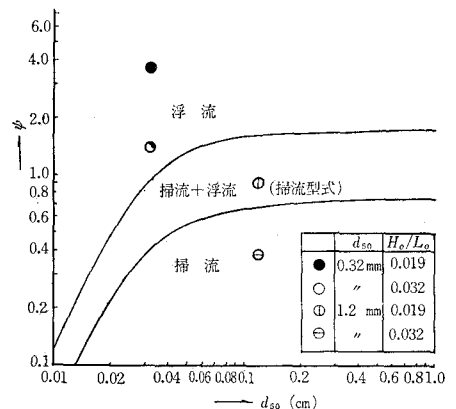
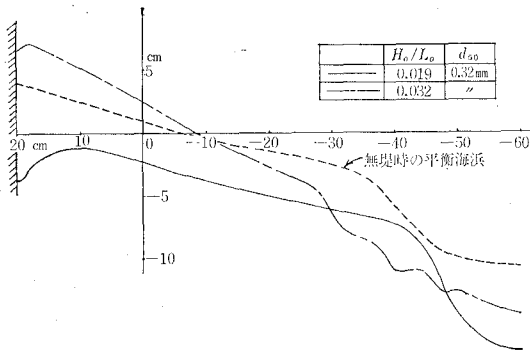


図-9 砂の移動形式



を作用させ、変形を調べた。その結果は図-8 のようで、また輸送形式は図-9 に示すとおりである。両者とも堤防前面には砂が堆積し、掃流形式である。つぎには、 $d_{50}=0.32\text{ mm}$ の砂を、上記の 1.2 mm のときの海浜形状と同じ形にしきつめて、 $H_0/L_0=0.032, 0.019$ の2つの波を作用させた。その縦断形状は図-10 のようで、また輸送形式は図-9 のとおりであって、波形勾配が 0.032 の場合は浮流と掃流形式の限界付近にあるが、 0.019 の場合には完全に浮流形式の範囲にはいっている

図-10 波の大きさによる海浜変形の比較



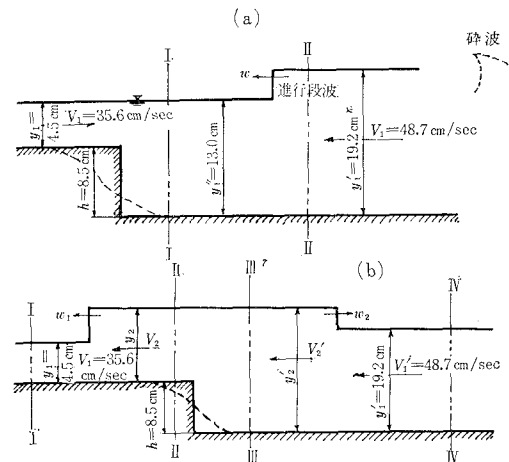
上記の結果から、遡上波によって運ばれる砂が掃流状態であるほど堤防前面には堆積が行なわれるが、反対に浮流量が多くなるほど大きな洗掘が現われることが明らかになった。しかし堆積量を考える場合には、堆積砂の供給源であるところの波の重複点における洗掘量が密接な関係をもつと思われるので、次節でこの問題について若干の考察を行なった。

3. 外浜の変形

砕破点付近より陸側の地形は、波の作用時間の経過とともに変化し、ほぼ5時間後に安定状態に達する。堤防前面に堆積が行なわれる場合に問題となる点の一つは、堆積砂の供給源で、この位置は進行波と反射波の重複点付近である。重複点では岸向きの掃流力が、無堤時の岸向きの進行波による掃流力よりも大きくなるために、その場所が洗掘され、その砂が遡上波によって堤防前面に運ばれる。そして洗掘がある深さまで達すると、すなわち無堤時の掃流力に等しい掃流力に達すると、洗掘は終るものと推定される。そこでこの点を確かめるために、つぎのような検討を行なった。

(1) 堤防を置かないときの平衡海浜、(2) 無堤の平衡海浜を固定し、その上に堤防を置いた場合、(3) 無堤の平衡海浜に堤防を置き、海浜が変形を終った状態の3つについて、進行波と反射波を段波と仮定し段波の重複理論を用いて step 前端付近の流速を計算し、実験値と比較した。計算を行なう場合に、step 前端と trough

図-11 Step を通過する段波



の間を図-11 のように段工と仮定した。

(1) 堤防を置かないときの平衡海浜

堤防のない場合は反射波はほとんど生じないので、step 前端では、進行段波がそこを通過直後に岸向きの流速が最も大きくなる。図-11 の (a) は進行段波が段工を通過する前、(b) は通過直後の状態である。運動量式と連続式を用いると、段波の進行速度、平均流速、段波の高さなどの間につぎの式が導かれる。

段波が段工を通過する前に対して、

$$w = \left\{ \frac{gy_1'}{2} \left(1 + \frac{y_1'}{y_1''} \right) \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$V_1' = \frac{2w(w^2 - gy_1')}{2w^2 - gy_1'} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(5)、(6)から、 $w=152.4\text{ cm/sec}$ 、 $V_1'=48.7\text{ cm/sec}$ となる。

段波が段工を通過した後に対して、

$$(V_1 + V_2)^2 = (y_2 - y_1)^2 \frac{(y_1 + y_2)g}{2y_1y_2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$(V_1' - V_2')^2 = (y_1' - y_2')^2 \frac{(y_1' + y_2')g}{2y_1'y_2'} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$y_2 + h = y_2' \quad \dots\dots\dots (9)$$

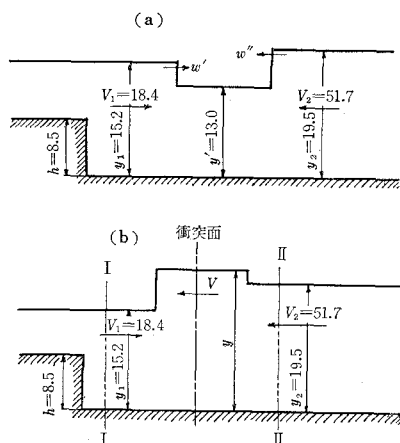
$$V_2 \cdot y_2 = V_2' \cdot y_2' \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、未知量は V_1 、 V_1' 、 V_2 、 y_2 、 y_2' の5個であるが、 V_1 として冲向きの流速に測定値 35.6 cm/sec を代入すると、 $V_2=61.2\text{ cm/sec}$ 、 $V_2'=36.4\text{ cm/sec}$ 、 $y_2=12.5\text{ cm}$ 、 $y_2'=21.0\text{ cm}$ となる。

(2) 無堤の平衡海浜を固定し、その上に堤防を置いた場合

(1) と同一の海浜の表面をセメントモルタルで固定し、その上に汀線から 20 cm の dry bed の上に堤防を置く。この状態では反射波が生じ、それが step を通過した直後に重複する。反射波が冲向きに段工を通過した直後における状態は、運動量式と連続式を用いて計算した結果は、 $V_1=18.4\text{ cm/sec}$ 、 $y_1=15.2\text{ cm}$ となる(図-

図-12 進行波と反射波の重複



12 (a)). つぎに重複したときの状態は図-12 (b) に示すとおりで、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} (V_1 + V)^2 &= (y_1 - y)^2 \frac{(y + y_1)g}{2yy_1} \\ (V_2 - V)^2 &= (y_2 - y)^2 \frac{(y + y_2)g}{2yy_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(11)$$

式 (11) に y_1 , y_2 , V_1 , V_2 の値を代入すると, $V=33.3$ cm/sec, $y=22.2$ cm が得られる。さらにこの重複波が陸向きに段工を通過した直後の流速と波高を, (1) に述べたのと同じ方法で求めると, $V_2=77.5$ cm/sec, $V_2'=48.5$ cm/sec, $y_2=14.2$ cm, $y_2'=22.7$ cm となる。ただし記号は図-11 (b) と同じである。

(3) 無堤の平衡海浜に堤防を置き、海浜が変形を終わった状態

この場合には step 前端付近が洗掘されるので、段工の落差が大きくなり、 $h=10.9$ cm である。計算の方法は (2) とまったく同じで、 $V_2=61.0$ cm/sec, $V_2'=32.4$ cm/sec, $y_2=12.4$ cm, $y_2'=23.3$ cm である。

上記の流速値をまとめ、実験値と比較すると表-1 のようである。計算値において、堤防あり (変形前) の流速が無堤時の値よりも大きくなっていること、無堤時の値が堤防あり (変形後) の場合の値とほぼ等しいこと、実験値の方が計算値よりも全般的に小さいけれども相関関係はよく似ていることは、段波の重複理論を用いるの

表-1 波の重複点付近の流速値

	計 算 値		実 験 値	
	step 前端	trough	step 前端	trough
無 堤	61.2	36.4	47.2	30.0
堤防あり (変形前)	77.5	48.5	63.8	36.0
堤防あり (変形後)	61.0	32.4	46.2	23.6

が正しいことを示している。なお流速測定は、パラフィンで比重が 1 に近い粒子をつくり、16 mm 撮影機で粒子の移動速度を測るという方法を用いた。ここでは step 前端と trough 上の流速を未知数として求めたのであるが、もしも砕波後の進行段波と反射段波の性質が与えられるならば、堤防を置いて変形した後の流速を無堤時の流速に等しく置くことにより、重複点付近の洗掘深を算定することができる。さらに何らかの方法で陸側の平衡勾配を求めることができるならば、堤防前面の堆積高、堆積量を推定することができるであろう。

4. 結 論

(1) 遡上波によって dry bed 上を運ばれる砂が、掃流形式の場合には堤防前面に砂が堆積し、浮流形式の場合には洗掘、低下する。この判定は、たとえば 図-5 のように $\psi=u_*^2/(\sigma/\rho-1)gd$ と d との関係を調べることによって可能である。

(2) 堤防前面に砂が堆積する場合の堆積量は、進行波と堤防による反射波との重複点付近における海底の洗掘量と密接な関係をもっている。その洗掘深は、段波の重複理論を用い、無堤時の重複点付近の流速と有堤時変形後のそれとを等しく置くことによって推定することができる。

参 考 文 献

- 1) 細井正延：堤防設置による海浜変形について、第14回海岸工学講演集、昭 42.10.
- 2) 椿東一郎：水路床砂礫の掃流量について、九州大学流体力学研究所報告、第7巻、第4号、昭 26.
- 3) Freeman, J.C. and B.L. Méhauté : Wave Breakers on a Beach and Surges on a Dry Bed, Proc. ASCE, Vol. 90, No. HY 2, 1964.
- 4) 岩垣雄一・井上雅夫・大堀晃一：のり面上の波の遡上機構に関する実験的研究、第13回海岸工学講演集、昭 41.12.