

大水深潜堤背後の海底洗掘要因について

山城 賢*・吉田明徳**・入江 功***

1. 緒 言

潜堤は、水質交換能力に優れしかも景観を損なうことなく静穏化水域を創生するため、海岸侵食防止や海域利用の多様化に広く活用されつつある。今後、静穏化水域の拡大の要請と共に、潜堤は沖合に設置されるようになると思われるが、潜堤の沖合化に伴い、これまで見られなかったような海底洗掘が背後に発生することが明らかになってきている。例として図-1に汀線からおおよそ 400 m の沖合に大規模な潜堤を設置している新潟西海岸の断面地形図を示す(第一港湾建設局, 1999)。荘司ら(1991)、中田ら(1992)等の報告によると、新潟西海岸では潜堤より遠く離れた位置で広く侵食傾向を示す領域があることが報告されており、図-1の断面図をみても、潜堤から約 100 m 岸側の位置で約 4 m の洗掘が生じている。

このような海底洗掘の原因については現段階では明らかではないが、傾斜海浜における地形変化について研究している小野ら(1999)によれば、底面流速変動の非対称性の効果により海底砂が移動するとしていることから、大水深潜堤背後における海底洗掘においても、一因として底面流速変動の非対称性が考えられる。ただし、傾斜海浜の場合は、波の浅水変形が流速変動の非対称性の原因となるのに対し、大水深潜堤の場合は、波と潜堤との非線形干渉で生じる高次の周波数成分波が原因であると考えられる。

以上の観点から、本研究は、大水深潜堤背後における海底洗掘の原因を明らかにするため、底面流速変動の非対称性に着目し、底面流速変動の非対称性と海底洗掘との関連について検討した結果を示すものである。

2. 研究 内 容

実験は、台形型不透過潜堤を対象に、まず固定床実験をおこない潜堤および入射波の条件による底面流速変動の非対称性および定常流速の特性について検討した。次

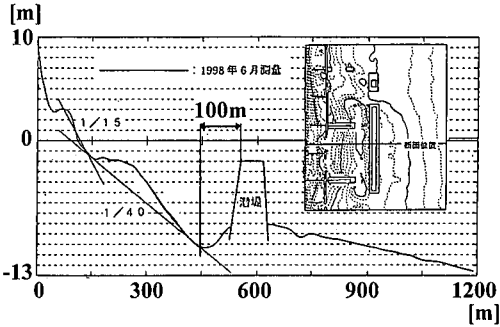


図-1 断面地形図(新潟西海岸)

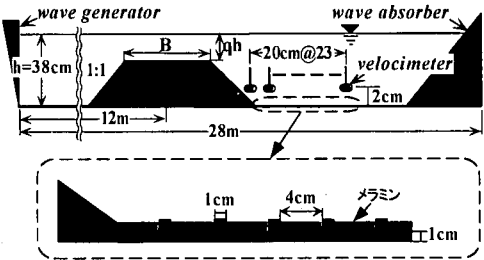


図-2 実験装置図

いで移動床実験をおこない底面流速変動の非対称性と海底地形変化との関連について検討した。

実験は、図-2に示す末端に消波装置を有する幅 30 cm、深さ 50 cm、長さ 28 m の反射吸収式 2 次元造波水路を用い、水深 (h) を 38 cm とし、潜堤を造波板から 12 m の位置に固定しておこなった。

2.1 固定床実験

底面流速の測定では、入射波は規則波と不規則波を用い、周期 (T) および有義周期 ($T_{1/3}$) は 1.79, 1.43 sec ($kh=0.75, 1.00$) の 2 種類とし、波高 (H) および有義波高 ($H_{1/3}$) は 2, 4, 6, 8 cm とした。なお、不規則波は *Bretschneider-Mitsuyasu spectra* を目標に造波した。潜堤は天端水深 (qh) を $0.2h, 0.3h$ 、天端幅 (B) を $2.0h, 4.0h$ とした。測定は超音波ドップラー流速計 (*Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)*) を用い、潜堤背後における水底から 2 cm の高さでの水平流速を、潜堤岸側端から 20 cm 間隔でおおよそ 5 m 区間について、データ個数を

* 正会員 工博 (株)エコー 環境水理部
** 正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院
*** 正会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院

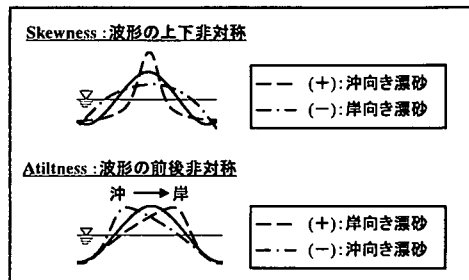


図-3 Skewness, Atillness と波形の関係

8192 個, サンプル周波数 10 Hz で測定した。測定位置を図-2 中に示す。

測定した流速の時系列データから流速変動の非対称性を表す指標として, *Skewness* (*Sk*) と *Atillness* (*At*) を次の式(1), (2)より算定した。

$$Sk = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^3 / \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^2 \right]^{3/2} \quad \dots\dots (1)$$

$$At = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\eta_i - \bar{\eta})^3 / \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\eta_i - \bar{\eta})^2 \right]^{3/2} \quad \dots\dots (2)$$

ただし、式中の η は各サンプリング点の増分 $\Delta\eta$ をサンプリング時間 Δt で割ったもので、サンプリング間隔ごとの波形の傾きを表わす。また、 $\bar{\eta}$ は時系列データの平均値であり、各測点における定常流速を意味する。

図-3 に *Sk* および *At* と波形との関係を示す。*Sk* は波形の上下非対称性の程度を表す指標であり、*Sk* が正の値を取るときは峰が尖り谷が平らな波形を表し、負のときはその逆の波形を表す。*At* は波形の前後非対称性を表す指標であり、*At* が正の値を取るときは岸向きに傾いた波形を表し、負のときは沖向きに傾いた波形を表す。海浜断面に関する研究においては、*Sk* が正の場合は沖向き、負の場合は岸向きの漂砂、*At* が正の場合は岸向き、負の場合は沖向きの漂砂に寄与するものと言われている(小野ら, 1999)。

2.2 移動床実験

移動床実験では、天端幅が $B/h=2.0$ の潜堤を対象として、まず潜堤背後にガラスビーズ(粒径 0.08 mm, 比重 2.5)を厚さ約 3 cm でおよそ 6 m にわたって敷き詰め、 $T=1.79$ s, $H=14$ cm の規則波を 12 時間作用させ、目視およびビデオ撮影により地形変化の様子とガラスビーズの移動の向きを確認した。次いで、底質移動の方向を定量的に調べることを目的に図-2 に示す 1 cm×1 cm の格子を用いた 4 cm 間隔の栈粗度を潜堤背後におよそ 5 m にわたって設置し、各栈粗度間に 35.0 g のメラミン(粒径 0.2 mm, 比重 1.6)を一様に敷き詰め、規則波($T=1.79$ s, $H=8$ cm)および不規則波($T_{1/3}=1.79$ s, $H_{1/3}=8$ cm)を作用させ、各栈粗度間におけるメラミ

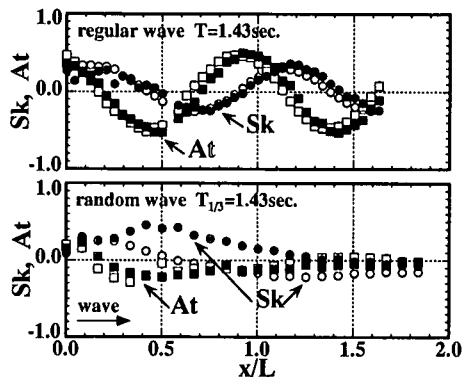


図-4 入射波高による *Skewness* と *Atillness* の変化 ($B/h=2.0$, $qh=0.2h$; $\circ$: $H=H_{1/3}=4$ cm, $\bullet$: $H=H_{1/3}=8$ cm)

ンの増減を調べた。ただし、造波時間は規則波の場合は 90 分、不規則波の場合は 270 分とした。

3. 底面流速変動の非対称性

3.1 規則波と不規則波による比較

図-4 上図に規則波, 下図に不規則波が入射する場合について、底面流速波形の *Skewness* ($\circ$, $\bullet$), *Atillness* ($\square$, $\blacksquare$) の空間分布を示す。横軸は潜堤岸側法先からの距離 (x) と入射波の波長 (L) (不規則波の場合は入射波の有義周期の波の波長) との比 (x/L) である。

まず、規則波の場合について考察する。傾斜海浜における底面流速波形は浅水変型のため一般的に上に尖り岸向きに傾くものとなり *Sk* と *At* はともに + の値を取る。しかし、図-4 上図の *Sk* と *At* はともに空間的に正負の値を取って変動しており、これは大水深潜堤背後の一定水深海域では下に尖る波形や沖向きに傾く波形が生じることを示している。また、*Sk* と *At* は空間的に周期的な変動を示している。これは、基本周波数成分波と潜堤上での非線形干渉で生じた 2 倍周波数成分自由波の位相速度が異なるため、流速波形が空間的に変化し、一定の距離ごとに同じ流速波形を取るため、この距離(再帰距離 L_r) は式(3)で与えられる。

$$L_r = \frac{C^{(1)}C^{(2)}}{C^{(1)}-C^{(2)}} \cdot \frac{T}{2} = \frac{2\pi}{k^{(2)}-2k^{(1)}} \quad \dots\dots (3)$$

ただし、 T , $C^{(1)}$, $k^{(1)}$ は基本周波数成分波の周期, 位相速度および波数, $C^{(2)}$, $k^{(2)}$ は 2 倍周波数成分自由波の位相速度および波数である。

次いで、図-4 下図の不規則波の結果をみると、潜堤直後で極大値をとり潜堤から離れるにつれ減少し極小値をとるという様相は規則波の場合と同様であるが、潜堤から離れるにつれ *Sk*, *At* は一様に小さくなり、約 1.5 波長以上 ($x/L > 1.5$) ではほぼ 0 となって、規則波と不規則波の場合で *Sk*, *At* の分布は大きく異なる。この規則波と

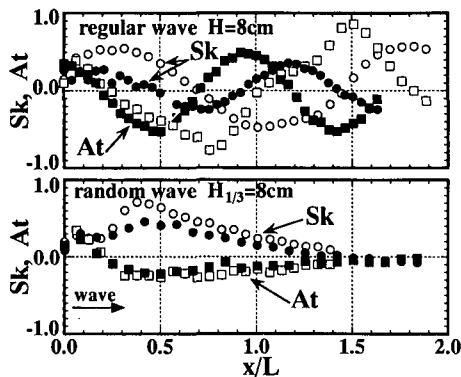


図-5 周期による Skewness と Atiltness の変化 ($B/h=2.0$, $qh=0.2h$; ○□: $T=T_{1/3}=1.79$ s, ●■: $T=T_{1/3}=1.43$ s)

不規則波の Sk , At の分布の違いは、潜堤背後海域の海底地形変化に大きな違いを生じるものと考えられる。

3.2 入射波の波高と周期による比較

図-4 には、入射波高が異なる場合の Sk および At を併せて示している。入射波高が増大すると、規則波、不規則波の場合ともに、 Sk と At の変動の極値が岸側に移動する。岩田ら (1997) によると潜堤上での碎波に伴う乱れた領域は天端水深 (qh) が一定であれば波形勾配 (H/L) が大きいほど広がると報告している。このことから入射波高の増大に伴う碎波による潜堤直背後の乱れの領域の拡大により、 Sk , At の極値が岸側に移動したものである。しかし、定性的な分布の様子は入射波高の大小に関係なく概ね同じといえる。

図-5 に周期が異なる場合の Sk , At を示す。規則波の場合、入射波の周期(波長)により Sk , At の分布が大きく異なることがわかる。周期が長い $T=1.79$ s の場合は、 Sk , At の極値が繰り返し現われる再帰距離が長く、周期が短い $T=1.43$ s の場合は再帰距離が短い。式(3)により算定した再帰距離は、 $T=1.79$ s の場合が $L_r=13.1h$ 、 $T=1.43$ s の場合が $L_r=6.2h$ で、潜堤直背後では碎波の影響により Sk , At の極値が多少岸側へ移動するため、実験値より求めた Sk , At の再帰距離は式(3)の算定値と若干異なるが、潜堤から水深の3倍以上岸側に離れた海域では式(3)で与えられる再帰距離で Sk , At はほぼ同じ値となる。不規則波の場合、有義波の波長に対する Sk , At の相対的な分布は、定性的には有義周期によらずほぼ同じで、 $x/L > 1.5$ で Sk , At ともにほぼ0となる。ただし、潜堤からの絶対的な距離を考えると、入射波の有義周期(有義波長)により Sk , At の分布は空間的に変動するといえる。

3.3 潜堤の天端水深と天端幅による比較

図-6 に天端水深が異なる場合について示す。前述したように天端水深が同じで入射波高が異なる場合は、入

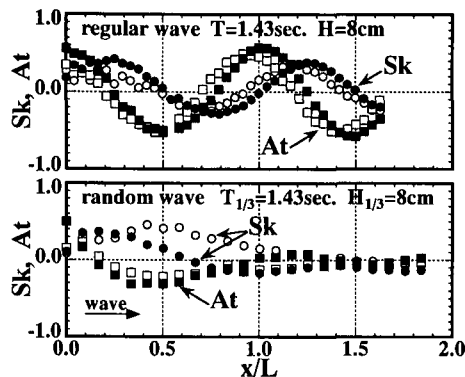


図-6 天端水深による Skewness と Atiltness の変化 ($B/h=2.0$; ○□: $qh=0.2h$, ●■: $qh=0.3h$)

射波高の増大につれ Sk , At の分布は極大値が岸側に移動する(図-4)。これは、潜堤上での碎波の程度が激しくなり、碎波による潜堤直背後の乱れの領域が拡大することによって説明した。潜堤上での碎波の程度は天端水深にも左右され、天端水深が浅くなると碎波は激しくなる。図-6 をみると、不規則波の場合は天端水深が浅くなると Sk と At の分布(特に Sk)が岸側へ移動しているが、規則波の場合は逆に沖側に移動している。本研究での実験では、ほとんどの場合において天端水深が浅くなると Sk , At の分布は岸側に移動したが、沖側に移動するケースも規則波の場合に幾つか見られた。これは基本周波数成分波と2倍周波数成分自由波との位相差および両者の振幅の相対的な大きさが天端水深により変化することから、碎波による潜堤背後の乱れ領域がより岸側へ拡大することよりも、基本周波数成分波と2倍周波数成分自由波との関係が Sk と At を沖側に移動させる方により強く現れたことによると考えられる。

図-7 は天端幅が異なる場合について比較したものである。規則波、不規則波ともに Sk , At は天端幅により若干大きさが異なるものの、ほぼ同じ分布を示しており、 Sk , At への天端幅の影響は小さいといえる。

4. 底面流速変動の非対称性と海底洗掘の関連

4.1 底面流速変動の非対称性による地形変化の推測

前述した Sk , At が寄与する漂砂の向きを考慮すると、図-4～図-7の結果から、 Sk が+で At が-となる潜堤直後の海域においては、入射波が規則波、不規則波の場合ともに、冲向きの漂砂が発生することが推測される。しかし、その後は規則波と不規則波で異なり、規則波の場合は侵食と堆積が交互に生じ、不規則波の場合は潜堤から1.5波長以上離れると大きな地形変化は生じないことが推測される。また、洗掘がもっとも活発に生じる位置は、規則波では Sk , At の正負が変わる位置であり、不

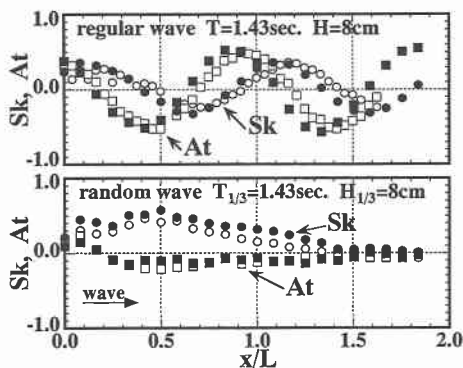


図-7 天端幅による Skewness と Atiltiness の変化 ($qh=0.2h$; $\bigcirc, \square: B/h=2.0$, $\bullet, \blacksquare: B/h=4.0$)

規則波の場合は Sk , At がほぼ 0 となる潜堤から約 1.5 波長の位置よりも若干沖側で、潜堤から 1 波長程度の位置と推測される。この推測と図-1 に示した新潟西海岸の断面地形図を照らし合わせると、新潟西海岸でもっとも洗掘が生じている位置は潜堤の岸側法肩から約 100 m の位置であり、この距離は現地の波浪状況 ($T=8\sim 11$ s, $L=68\sim 98$ m) から考えると入射波長の約 1.1~1.5 倍となり、不規則波の実験結果から推測される洗掘発生位置を潜堤法肩からに換算すると両者はほぼ一致する。この結果は潜堤背後の海底地形変化と Sk , At との関連を示唆するものである。

4.2 底面流速変動の非対称性と漂砂の向き

図-8 にガラスビーズ (粒径 0.08 mm, 比重 2.5) を用いた移動床実験の結果を、波作用後の地形の様子と砂漣形状について、あらかじめおこなった固定床実験により得られた底面流速波形の Sk , At の分布とともに示した。図中には目視およびビデオ撮影の記録から確認したガラスビーズの移動の向き、および Sk , At が寄与する漂砂の向き (Sk , At の正負により判別) を矢印で示している。

ガラスビーズの移動の向きをみると、図中 (A) の位置で方向が変わり、(A) の位置より沖側では沖向き、岸側では岸向きとなっている。このガラスビーズの移動の向きと、 Sk , At が示唆する漂砂の向きを比較すると、 Sk による漂砂の向きとガラスビーズの移動の向きは完全に合致しており、 At が示す漂砂の向きも、向きが反転する位置 (At の正負が変わる位置) から若干沖側の範囲と潜堤直背後を除けば、ほぼガラスビーズの移動の向きと一致する。したがって、大水深潜堤の背後海域においては底面流速変動の Sk , At の空間的な変動が洗掘の一因であることは明らかといえ、漂砂の向きが反転する位置 (図中 (A)) で洗掘が生じるものと推測される。

また、砂漣の形状が位置によって異なり、目視とビデオ撮影記録から確認した沖向きの漂砂の領域では砂漣は

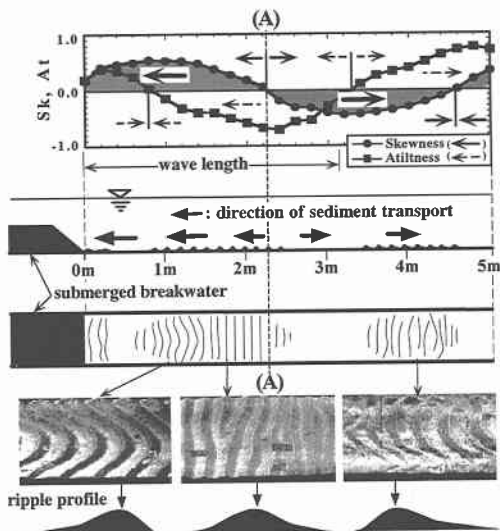


図-8 Skewness および Atiltiness の分布とガラスビーズの移動の向きおよび砂漣形状

沖向きにすそが長く、岸向きの漂砂の領域では岸向きにすそが長くなっている。砂漣の歪みは、 Sk で表わされる岸沖方向の非対称な流速変動により、砂漣頂部の両側で大きさが異なる渦が生じ、渦が大きく発生する側に砂漣がえぐられることで生じるものと思われる。小野ら (1999) によると岸向きに歪んだ砂漣は沖向きの漂砂を促進し、沖向きに歪んだ砂漣は岸向きの漂砂を促進する。この歪み砂漣による漂砂の向きは Sk が寄与する漂砂の向きと等しく、したがって Sk と歪んだ砂漣による相乗効果で岸沖漂砂が活発に生じる。

4.3 底面流速変動の非対称性と洗掘位置の関連

Sk , At と洗掘が生じる位置との関係を定量的に調べるため、比重が小さいメラミンを用いた移動床実験をおこなった。図-9 には不規則波の場合について、 Sk , At および定常流速 U_0 (入射波の水底流速振幅 U_{0b} により無次元化) の分布と各栈粗度間のメラミンの増減率を示す。なお、定常流速 U_0 は正が岸向き、負が沖向きの流れを意味する。図中には Sk , At および定常流速 U_0 による漂砂の向きが図中に示す一次式 (D) の正負で表されると仮定し、 Sk , At および定常流速 U_0 の寄与率 (式中の係数 C_s , C_A , C_V) を漂砂の向きに最も大きく寄与すると推測される Sk を基準 ($C_s=1.0$) に取り、 C_A と C_V を 1.0 および 0.5 に変化させて得られた D の値を示している。 D は正で岸向き、負で沖向きの漂砂を表す。メラミンの増減率の分布から、大水深潜堤背後における洗掘 (陰影の部分) は図中に示す①と②の 2ヶ所で生じている。まず、潜堤直背後での洗掘①の原因について考察する。潜堤直背後では、図-9 の定常流速 U_0 の分布より沖向きの

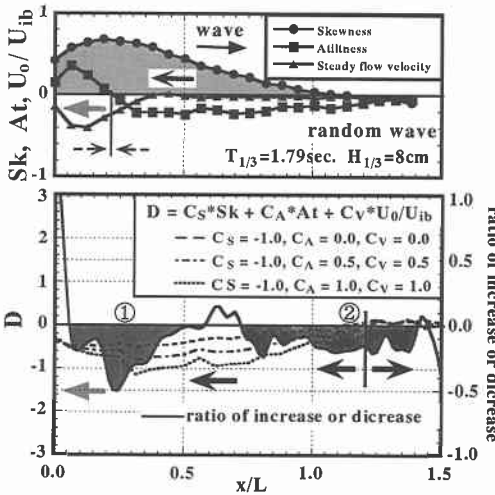


図-9 Skewness, Atillness と定常流速による漂砂の向きとメラミンの増減

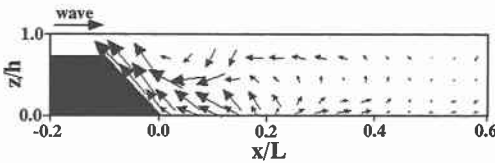


図-10 定常流速の鉛直 2 次元分布 ($T=1.43$ s, $H=4$ cm, $B/h=2.0$, $qh=0.1$ h)

強い流れが発生していることがわかる。岩田ら (1996) は、2 次元波動場に設置された潜堤背後では、潜堤上で碎波にともない鉛直 2 次元的な循環流が発生すると報告しており、本研究においても一例として、規則波が入射する場合について潜堤背後の定常流速を断面 2 次元的に測定した。図-10 にその結果を示す。図のケースは潜堤上で比較的激しく碎波を生じるケースであり、岩田ら (1996) の報告と同様に潜堤の直背後で鉛直 2 次元的な循環流が発生している。また、この循環流は入射波が不規則波の場合でも潜堤上で碎波が生じる場合は同様に発生する。したがって、潜堤直背後では碎波に伴う鉛直 2 次元的な循環流による強い冲向きの流が洗掘の原因といえる。

次いで、より岸側の位置で生じている洗掘②について考察する。メラミンの増減率の分布から、 $x/L=0.7$ 付近を除くとほぼ全域で減少しており、特に $x/L=1.2$ 付近で活発に洗掘が生じていることがわかる。 D が示す漂砂の方向と比較すると、 D も約 $x/L=1.2$ で正負が変化しており、 D から推測される洗掘位置で実際に洗掘が生じている。また、この位置における定常流速 U_0 は非常に小

さいことから、 $x/L=1.2$ 付近で生じた洗掘は Sk , At の効果によるものといえる。なお、 $x/L=0.7$ 付近に見られる堆積は、 Sk , At および定常流速による漂砂の向きとは必ずしも対応していない。この理由としては、水路末端からの反射により流速振幅が空間的に異なりそれとともなって底質の巻き上げ量が空間的に一定でないこと等、水槽内における複雑な流体運動が考えられる。

5. 結 言

潜堤背後における海底地形変化と、底面流速変動の非対称性との関連を明らかにすることを目的として実験をおこなった結果、流速波形の非対称性の指標である *Skewness* (Sk) と *Atillness* (At) によって示される漂砂の向きが反転する位置で洗掘 (冲向きから岸向きに反転する位置) もしくは堆積 (岸向きから冲向きに反転する位置) が生じることが確認された。したがって、新潟西海岸でみられるような、大水深潜堤から離れた位置で生じる海底洗掘は、本文で述べたとおり底面流速変動の非対称性が大きく影響しているものと思われる。

本実験は 2 次元実験によるもので、沿岸流などの 3 次元的な流れについては考慮していないが、通常、沖合に構造物を設置する場合、沿岸方向に長大なものとなるため、本実験で想定している大水深潜堤の背後海域においては 2 次元的な考察で対応できるものと思われる。

今後、底面流速変動の非対称性の程度と漂砂量や地形変化量との定量的な特性を解明するためには、より詳細な実験をおこなって検討することが必要である。

謝辞：最後に、本研究を実施するに際し、小野信幸九州大学助手、越智宏充君 (現九州大学大学院) には多大に御助力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・川崎浩司・亀崎大輔 (1996): 碎波に伴う潜堤周辺の波・水粒子速度場の細部構造に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 56-60.
- 岩田好一朗・川崎浩司・安藤敏弘 (1997): 潜水構造物による碎波再生過程と碎波持続距離に関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 71-75.
- 小野信幸・入江 功・西岡悟史 (1999): 砂れん上の底質移動に及ぼす海底勾配の効果と海浜の安定化機構, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 591-595.
- 莊司喜博・中山春雄・滝口要之助・高橋豊喜・黒木敬司・坂井隆行 (1991): 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.
- 第一港湾建設局, 新潟港湾空港工事事務所 (1999): 新潟西海岸技術調査委員会資料
- 中田博昭・鈴木 勝・阿部勝雄・川又良一・南 将人 (1992): 潜堤周辺の地形変化に関する数値モデルと現地観測結果との比較, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 431-435.