

スリット式消波構造物周辺の3次元流れに起因する大規模洗掘

宇多高明*・小 俣 篤**・桂川 哲行***

1. ま え が き

近年、筆者らは外洋に面した海域を静穏化し、沿岸域の有効利用を図るための消波構造物（海域制御構造物）の研究開発を進めてきている（例えば、宇多・小俣、1990）。これらの構造物はその構造上沖合の砂質地盤上に設置される可能性が大きい、その場合堤脚部に著しい洗掘が生じ、構造物の安定性が損なわれることが危惧される（宇多ほか、1988；1989）。それ故、この種の海底地形変化を予測可能とすることは構造物の設計上非常に重要なテーマとなる。海底に設置された構造物周辺に生じる地形変化に関する従来の研究としては、小口径の円柱を扱った水口ほか（1985）、西沢・沢本（1989）による局所洗掘形状の分類や、比較的口径の大きな円柱周りに生じる洗掘に関する 齊藤ほか（1988）、勝井・東江（1990）の研究がある。一方、堤長が波長に比べて十分に長い不透過の防波堤に関しては、入江ほか（1984）の研究成果を用いて重複波により生じる地形変化パターンを予測することができる。しかし、円柱と長い防波堤との中間的スケールの堤長を持つ消波構造物周辺の地形変化に関する研究はほとんど見当たらないのが現状である。

筆者ら（宇多ほか、1990）は、スリット型消波構造物

周辺の地形変化を対象として2次元実験を行い、構造物の沖合では重複波による地形変化と局所洗掘が重なることを明らかにするとともに、この機構を取り入れた地形変化予測モデルを提案した。この種の2次元実験の結果は堤長が波長に比べて十分に長い場合にのみ適用できる。一方、現地海岸では波長程度の堤長を持ち、開口部を有する消波構造物がしばしば計画される。この場合、波高が平面分布を有すること起因して生ずる海浜流や構造物近傍における3次元的な流れが地形変化に影響することが予想され、2次元モデルはそのまま適用することはできなくなる。そこで、本研究では波長と同程度の堤長を持つスリット式の消波構造物を対象として移動床平面実験を行い、これにより3次元的な地形変化の機構を調べた。

2. 実験方法

消波構造物としては駿河海岸に建設された新型離岸堤（浦田ほか、1989）を想定し、現地の諸条件の1/13スケールに実験条件を設定した。実験では、構造物の設置水深を54cmとし、入射波高を $H=12$ cm、周期を $T=2.2$ secに設定した。構造物模型は2列のスリット板からなる有脚式構造物である（図-1参照）。模型の堤体延長は構造物の設置水深における波長 $L=4.5$ mよりやや短く、3.6mに設定し、幅1.0m、高さ0.9m（うち地中部0.18m）とした。実験ではスリット板の空隙率 ϵ と吃水深 h_1 を変えることにより、反射率 Kr を変化させた2ケースの模型を用いた（表-1参照）。

実験は長さ24.0m、幅30.0m、深さ1.0mの平面造波水槽を用いて行った。造波板より2~14mの範囲に厚さ18cmの水平な移動床を整形し、その中央に模型を設置した（図-2）。また、多重反射を防ぐため水槽壁に沿って砂斜面を設けた。実験砂は中央粒径 $d_{50}=$

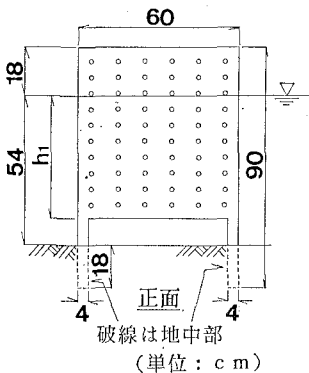


図-1 構造物模型の概要

表-1 模型条件

ケース	h_1 (cm)	ϵ	Kr
1	36.0	0.21	0.21
2	48.0	0.024	0.48

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長
 ** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室研究員
 *** 正会員 工修 東洋建設(株)技術開発部(元部外研究員)

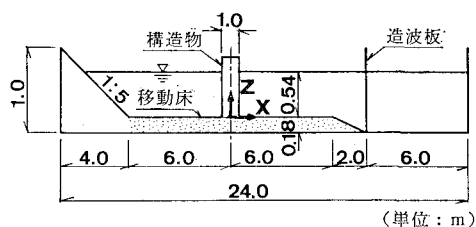


図-2 実験水槽の断面

0.25 mm の細砂である。測定項目は構造物周辺の波高、流速、表面流況および海底地形である。流速は超音波式流速計、流況はフロートのビデオ追跡により測定した。波高、流況、および流速の測定は実験開始直後から5時間以内に実施し、その後海底地形が安定するまで約20時間波を作用させたあと地形を測定した。

3. 構造物周辺の地形変化

反射率の低いケース1について、初期地形と、海底地形がほぼ安定した造波開始24時間後の海底地形より求めた地形変化量の平面分布を図-3に示す。ここに、構造物の中心に原点を置き、沿岸方向にX軸、冲向にY軸をとり、また波高測定により判定した重複波の腹と節の位置を右端に示した。入江ほか(1984)は、重複波による地形変化を、節と腹の中間が侵食され、節に堆積し腹ではあまり変化の生じないN-タイプと、節の部分が侵食され腹に堆積するL-タイプとに分類した。図-3において構造物沖の地形変化量分布を調べると、 $Y=1.7$ m付近にある節の周辺では堆積傾向であるのに対し、 $Y=2.8$ m付近にある腹の周辺ではあまり地形変化が生じていないことから、この実験ではN-タイプの地形変化が生じたと判断される。また、構造物の沖側直近では局所洗掘が生じている。以上のように、反射率が低い場合に

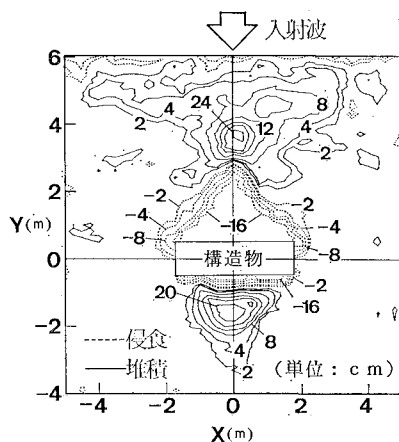


図-4 地形変化量の平面分布 (ケース 2)

は構造物沖側でN-タイプの地形変化と局所洗掘が重なっており、2次元実験の場合(宇多ほか, 1990)と類似した結果が得られた。

一方、図-4に示す反射率が大きいケース2では、構造物沖で3角形状に広域の洗掘が生じ、また洗掘深が18 cm以上に達したため水路床が露出した。さらに、構造物沖の洗掘域の沖合には、集中的な堆積区域が見られる。構造物の岸側では構造物に沿って細長い局所洗掘が見られ、その岸側には小高い丘状に底質が堆積した。ここで地形変化量を計算すると、 $Y=0$ mより沖合での総侵食量が 1.07 m^3 であるのに対し、堆積量も 1.09 m^3 であり、両者は非常に良い対応を示す。同様に、 $Y=0$ mより岸側での侵食量(0.40 m^3)が堆積量(0.41 m^3)とほぼ一致することから、構造物近傍で洗掘された底質は構造物の沖合と岸側に移動したことが分かる。

4. 地形変化機構の検討

(1) 波高分布

ケース1, 2の波高分布を図-5に示す。ケース1の $X=0$ m上の波高の岸沖分布によれば、部分重複波の腹の位置に相当する構造物沖側直近と、 $Y=2.8$ m付近で波高が高く、また構造物近くではその中心より端部へと等波高線が斜めに延びている。これに対し、ケース2の波高分布はケース1とはかなり異なる。腹の位置に相当する $Y=2.8$ m付近でやや高波高の領域が沿岸方向に分布することから、部分重複波の特徴が見られるものの $X=0$ m上の等波高線は岸沖方向に並び、さらに波高の高い領域は $-0.5 \text{ m} \leq X \leq 0 \text{ m}$ の細長い帯状の範囲に集中している。

両ケースの波高分布に差が見られた理由を検討するために、構造物沖側の面を任意反射境界とした数値計算により各ケースの波高分布を求めた。計算には、清川ほか(1982)による波動方程式の直接差分法を用い、構造物の

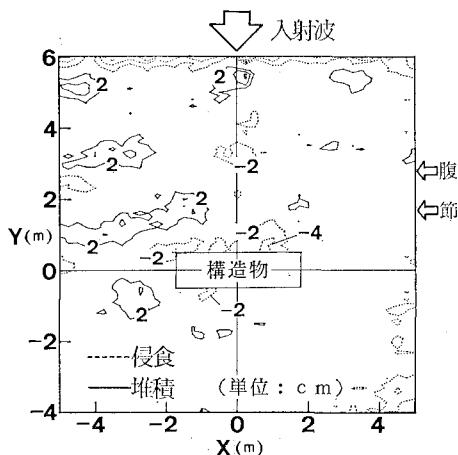


図-3 地形変化量の平面分布 (ケース 1)

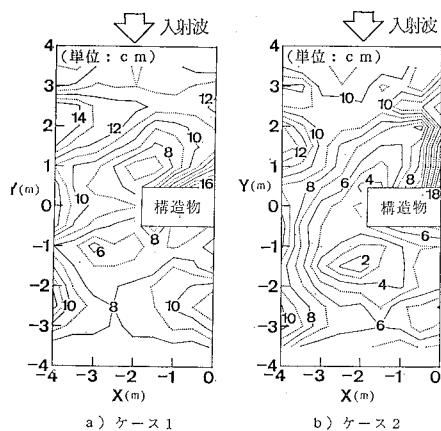


図-5 波高分布図 (実験値)

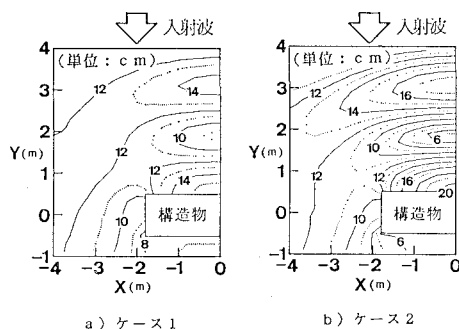


図-6 波高分布図 (計算値)

反射率には2次元実験による測定値を用いた。また、構造物岸側の面は造波境界として、透過側の波高分布が実験と一致するように造波波高(透過率)を設定した。計算結果を図-6に示す。構造物の沖合に注目すると、ケース1では構造物中央から端部に向かう波高の低下は実験の方がやや急であるものの、実験と計算は全体に一致している。一方、ケース2の計算値は、波高の絶対値の差はあるもののケース1と同様の波高分布を示し、構造物中央の沖合で波高が著しく高くなる実験状況を再現していない。ケース1では構造物を単純な反射境界とすることにより実験と同様の波高分布が計算されたのに対し、ケース2では、計算と実験による波高分布には著しい相違が見られる。このことは、ケース2では構造物の沖側面を単純に反射境界として扱うのでは不十分であり、重複波の場合とは大きく異なる流体運動が生じたことを示唆する。

(2) 構造物周辺の3次元的な流速場

ケース1, 2の表面流況をそれぞれ図-7, 8に示す。両ケースとも構造物沖では沖向きの強い流れが生じている。構造物沖での沖向き流れの発生は、スリット式の消波構造物では共通して見られる(建設省土木研究所,

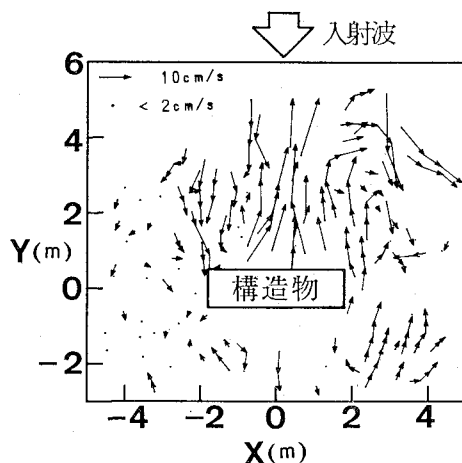


図-7 ケース1の表面流況

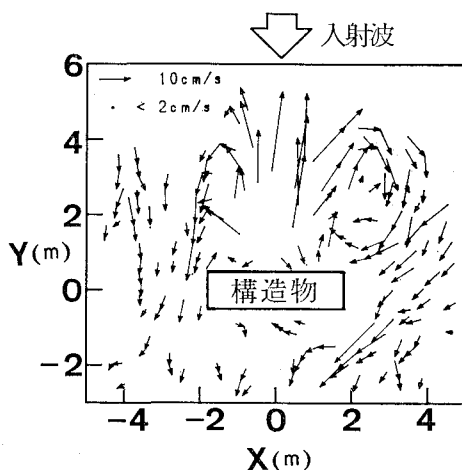


図-8 ケース2の表面流況

1988)。一般に、不透過な防波堤や従来タイプの離岸堤の沖合で生ずる重複波は、海浜流を発生させる原因にはならない(例えば、渡辺ほか, 1984)。したがって、本研究のようにその下部にかなり広い間隙を有することが構造物沖側での顕著な沖向き流れの発生と密接に関連すると推定される。しかも、構造物岸側の平均流は弱いため、沖向きの平均流が構造物を横切って流出したとは考えられない。したがって、構造物近傍での流体運動が沖向き流れの発生に関与しているはずである。特に、ケース2の沖向き流れはケース1より狭い範囲で生じ、流速も速いことは注目に値する。ケース2では構造物近傍で侵食された底質が強い沖向き流れにより輸送され、沖合に堆積したと考えられるからである。この点は、底面付近での流速測定値よりさらに明らかにすることができる。

ケース1の底面上の高さ $z'=1\text{cm}$ と 10cm における

平均流速を図-9に示す。上下層の流向にあまり大きな差は見られず、構造物中心上では冲向きであり、構造物端部の側面に流れ込むような補償流が発生している。また、類似した補償流は流況図(図-7)にも見られる。しかし、構造物沖の底面近くの流速はそれほど速くない。このため構造物近くの底質は沖合に流出し得なかったと考えられる。

一方、ケース2の底面近くの平均流速(図-10)には、構造物沖で強い冲向き流れが見られ、鉛直方向にほぼ一様な冲向き流れが生じている。これに対しケース1と同様の補償流も見られるが、そのみでは流量の連続条件が満足され得ない。したがって、図-10の $X=-1.8 \sim 0$ m の間でこれを補う岸向き流れが発生していると推定

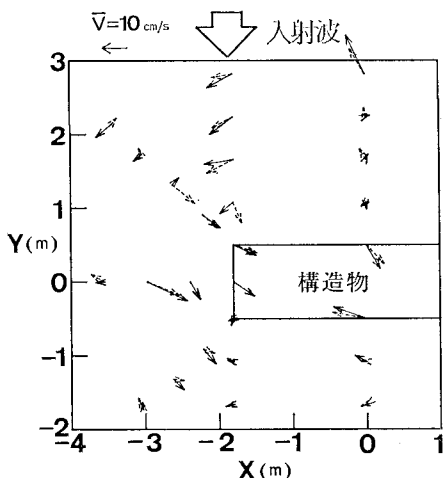


図-9 底面付近の平均流速分布 (ケース1, 実線は $Z'=10$ cm, 破線は $Z'=1$ cm での測定値)

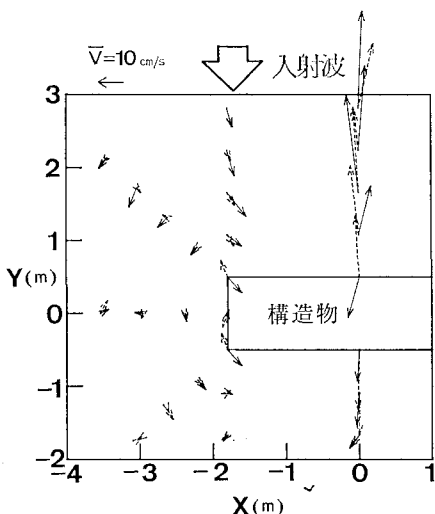


図-10 底面付近の平均流速分布 (ケース2, 実線は $Z'=10$ cm, 破線は $Z'=1$ cm での測定値)

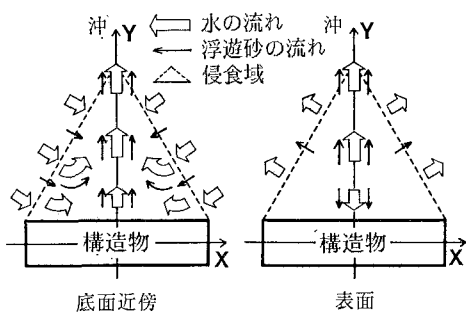


図-11 ケース2の流れの場の模式図

される。以上の点より、ケース2に関する構造物沖合の模式的な流れの分布は図-11のように整理される。底面近傍では、構造物沖の三角状の区域を横切って構造物方向へと向かう弱い岸向き流れがあり、この流れは構造物直近より冲向きに流れるとともに、その一部は上昇し、表面付近での冲向き流れとなる。この流れの分布をケース2の地形変化と関連付けると、3角形状の広い範囲での洗掘の原因を説明できる。すなわち、 $X=-1.8 \sim 0$ m の範囲の沖合では浮遊した底質が弱い岸向き流れにより構造物方向へと運ばれるが、構造物中央では強い冲向き流れがあるから侵食傾向となり、構造物の沖合は深くなる。一方、輸送された底質は構造物中央の沖合で沈降堆積する。

(3) 沖側スリット面での流れ

図-11に示す3次元的な流れには、構造物の中央部沖における高速の冲向き流れが深く関与する。ケース2の流況図(図-8)と流速ベクトル図(図-10)より、構造物の沖側スリット面位置での流れを調べると、底面では冲向き、底面より10cmと表面では岸向き流れが生じている。したがって、構造物の沖側スリット面では鉛直循環流が生じていたと考えられる。このような流れはケース1には見られないことから、構造物形状の差がその主因となる。ケース2は吃水が深く、スリット板と海底面との間隙が狭いが、その影響は、 $X=0$ m 測線上の流速測定データから求めた構造物沖の水平流速振幅 $\hat{V}$ の岸沖分布より調べられる(図-12)。これによると、まず、ケース1の $\hat{V}$ は $Z'=1$ cm ではほぼ一様であり、 $Z'=10$ cm では節点付近で最大、腹で最小となる部分重複波の分布形を示す。また、両者の絶対値にあまり差はない。一方、ケース2の $\hat{V}$ は沖側スリット位置の $Z'=1$ cm で 63.6 cm/s とかなり大きく、 $Z'=10$ cm の $\hat{V}$ のほぼ2倍である。これは、ケース2ではスリット板下の間隙に流れが集中し、かなりの高流速が生じたことを意味する。この原因は次のように考えられる。まず、ケース2では空隙率が小さく、吃水深が大きいのでカーテンウォール式構造物のようにスリット板下の間隙に流れが集中したこと、また、反射率が高いことから入射側と透

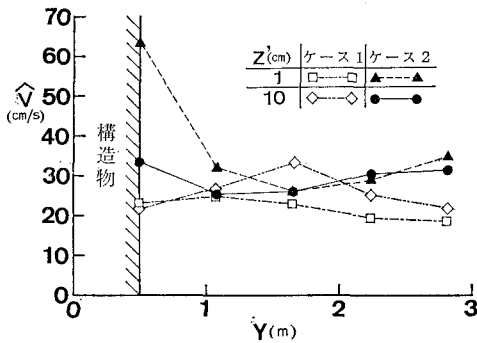


図-12 底面付近の水平流速振幅の岸沖分布

過側の水位差が大きくなり、このことが高流速を助長したことである。参考までに、水位差にスリット位置での半波高を与え、流量係数を0.6として潜りオリフィスにより間隙部の流速を求めると約75 cm/sとなり、測定値とほぼ一致する。このことより、上記の推定がほぼ妥当なことが分かる。

ところで、図-12によればケース2の $Y=1.2$ m 位置における $Z=1$ cm の $\hat{V}$ はスリット位置に比べ著しく小さく、 $Z=10$ cm の $\hat{V}$ との差はほとんどない。したがって、スリット下の間隙で生ずる高流速の振動流は、スリットの直ぐ沖では鉛直方向に振動方向が変わっているはずである。すなわち、間隙部で生じた高流速の振動流が構造物沖側の近傍で著しい水面変動をもたらしたと考えられる。ケース2の波高分布に構造物中央部の沖側で著しく波高が高い部分が見られるのは、このことが原因と考えられる。また、構造物の中央部に波高の高い範囲が集中しているのは、数値計算の結果（図-6参照）にあるように、有限堤長の構造物では元々堤体中央部の波高が高くなるので、大きな水位差に起因する間隙部の高流速も中央部に集中したものと考えられる。さらに、このことが構造物の中央部沖で沖向きの集中した流れが形成された原因とも考えられる。

5. 結 論

2列のスリット板からなる消波構造物の空隙率と吃水深を変えて洗掘実験を行った。これによると、スリット板の空隙率が小さく、吃水深が大きいとスリットにより流体運動が拘束され、スリット板下の間隙で高流速の振動流が生じた。この高速の振動流が構造物の沖側近傍で

著しい水面変動もたらし、構造物の中央部沖で速い沖向き流れを生じさせる。この結果、構造物沖側には3次元の循環流が生じ、大規模な洗掘をもたらす。透過率を低く抑え反射率の高い条件でこのような洗掘を防止する方法としては、スリット板を海底面にまで設ける方法がある。この場合にも、わずかな洗掘を生じることにより、洗掘部に間隙を生じて同様の洗掘をもたらす恐れがある。したがって、スリット板下の間隙をあまり大きくせず空隙率もある程度大きくして、スリットの列数を増すことなどにより透過率を下げるか、あるいは高速振動流の発生を抑制するためにスリット列間に底板を設ける方法などが有効と考えられる。

参 考 文 献

- 入江 功・近藤隆道・赤石正広・寺崎賢次 (1984): 重複波による防波堤前面での海底洗掘, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 350-354.
- 宇多高明・小俣 篤 (1990): 海域制御構造物の開発, 土木技術資料, Vol. 32, No. 12, pp. 2-5.
- 宇多高明・小俣 篤・峯松麻成 (1990): 透過式消波構造物沖合の地形変化機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 409-413.
- 宇多高明・堤 博志・村井禎美・藤原隆一 (1988): 杭式海洋構造物周りの洗掘実態調査, 海洋開発論文集, Vol. 4, pp. 123-128.
- 宇多高明・中村英佳・村井禎美・松永博史 (1989): 有脚式離岸堤周りの初期洗掘の現地調査, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 409-413.
- 勝井秀博・東江隆夫 (1990): 大口径円柱周辺の底質の移動限界と洗掘, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 379-383.
- 浦田健一・中村英佳・大石英男・宇多高明・村井禎美 (1989): 駿河海岸における新型離岸堤の建設とその後の追跡調査, 海洋開発論文集, Vol. 5, pp. 309-314.
- 建設省土木研究所 (1988): 海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(7), 土木研究所資料, 第2661号, pp. 5-23.
- 清川哲志・大山 巧・小林 浩 (1982): 波動方程式の直接差分による港内波高分布解析法, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 90-94.
- 斉藤栄一・佐藤慎司・柴山知也 (1988): 波動場における大口径円柱周辺の局所洗掘に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 392-396.
- 西沢 勝・沢本正樹 (1989): 波による円柱まわりの局所洗掘, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 414-418.
- 水口 優・小島巨人・小宮山正二・佐藤 忍 (1985): 波動による小口径円柱まわりの局所洗掘に関する実験的研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 430-434.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海波変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.