

# 越波を伴う直立堤堤頭部周辺の 3 次元流速変動特性

加藤 雅也\*・渡部 靖憲\*\*・佐伯 浩\*\*\*

## 1. はじめに

防波堤や潜堤の堤頭部における局所洗掘や被覆材の散乱は、堤幹部における被災とは異なり、剝離を伴う複雑な三次元流れの形成に起因していると考えられる。信頼性、経済性の高い防波堤や潜堤を設計するために、そのメカニズムの解明や高度な設計法(例えば信頼性設計法)に対応したデータの取得が求められているが、堤頭部近傍流速の時空間変動特性について調べた例は少ない(例えば, Sumer ら, 1997)。加藤ら(2000)は、3 次元 Large Eddy Simulation (以下 LES と記す)により、直立堤堤頭部近傍では鉛直軸周りの剝離渦発生に伴い水平渦や旋回渦の 2 次渦が生成され、空間的に複雑な三次元流速分布となり、その構造が時間と共に大きく変動することを明らかにした。しかしながら、その検討条件は非越波状態に限定されているため、被災が発生するような荒天時を想定すると、越波を伴う状況に対しても検討しておく必要がある。そこで越波現象に関して既往の研究を調べると、主として越波伝達波の波高や伝播波形に関する研究は多いが、越波した水塊が着水した後の堤内流速変動特性を調べた例は少ない(例えば, 渡部ら, 1999)。特に、3 次元性を考慮した流速変動特性の検討例はほとんどないようである。そこで本研究では、越波を伴う直立堤堤頭部周辺の波・流れ場をシミュレートし、主として渦の生成、移流、発達、消滅等の時空間変動特性に着目して、流れの解明を図ることを目的とした。

## 2. 計算方法

本研究で用いた数値計算手法は、これまでに著者らが碎波のシミュレーション(渡部ら, 1998)や構造物周辺の流れのシミュレーション(加藤ら, 2000)に適用した 3 次元 LES と同様であり、本計算手法の妥当性は既に多様な条件において検証されている。計算手法の詳細は、既発表論文を参照されたいが、主たる特徴は、Subgrid scale 成分のモデルに非線形渦粘性モデルを用いている

こと、自由表面の取り扱いに密度関数法を用いていること、移流の計算に CIP 法を用いていること等である。

図-1 に計算領域と座標系を、表-1 に計算条件を示す。ここで、 $H$  は入射波の波高、 $T$  は入射波の周期、 $h$  は水深、 $L$  は波長、 $B$  は堤体幅、 $W_s$  は堤体長、 $W_m$  は開口幅、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  は各軸方向の空間メッシュサイズ、 $\Delta t$  は計算時間ステップである。 $R$  は直立堤の天端高であり、静水面を基準としている。したがって、 $R < 0$  は直立堤の天端が静水面以下になる場合を示し、矩形潜堤の問題を扱っていることになる。底面および構造物表面にはノンスリップ条件を用い、側面境界は対称条件としてスリップ条件を用いた。岸側開境界処理はエネルギー吸収帯と速度勾配=0 の自由流出条件を併用した。計算は、沖側入射境界から CASE 1~3 では 2 次クノイド波、CASE 4~6 では 3 次ストークス波を数値造波して行った。なお

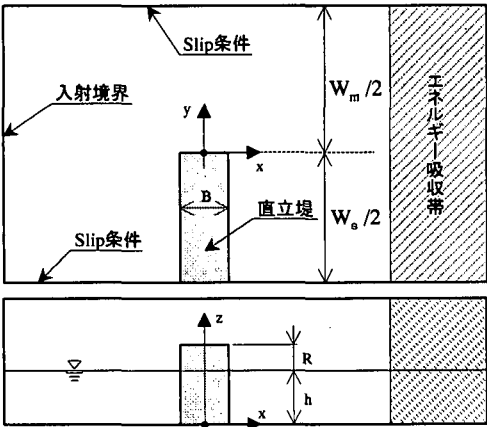


図-1 計算領域および座標系

表-1 計算条件

|        | $H/h$ | $h/L$ | $B/L$ | $w_s/L$<br>$w_m/L$ | $R/h$     | $\Delta x/h$<br>$\Delta y/h$<br>$\Delta z/h$ | $\Delta t/T$ |
|--------|-------|-------|-------|--------------------|-----------|----------------------------------------------|--------------|
| CASE 1 | 0.40  | 0.083 | 0.07  | 0.4                | +0.6(非越波) | 0.040<br>~0.2                                | 1/512        |
| CASE 2 | 0.40  | 0.083 | 0.07  | 0.4                | +0.2(越波)  |                                              | 1/1024       |
| CASE 3 | 0.40  | 0.083 | 0.07  | 0.4                | -0.4(潜堤)  |                                              | 1/1024       |
| CASE 4 | 0.40  | 0.192 | 0.15  | 1.0                | +0.6(非越波) |                                              | 1/512        |
| CASE 5 | 0.40  | 0.192 | 0.15  | 1.0                | +0.2(越波)  |                                              | 1/1024       |
| CASE 6 | 0.40  | 0.192 | 0.15  | 1.0                | -0.4(潜堤)  |                                              | 1/1024       |

\* 正会員 日本データサービス㈱ 総合解析室  
\*\* 正会員 工博 北海道大学大学院助手 工学研究科  
\*\*\* フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科

本研究では、計算時間等の制約から完全な定常状態まで計算することが困難なため、数周期分の計算結果を調べて時間平均流の様子が概ね同様であると判断したうちの1周期分の結果について検討を行った。

### 3. 計算結果および考察

#### (1) 堤体背後の渦の時空間変動特性

計算結果の検討には、vortex core (Jeong・Hussan, 1995) の定義を用いた三次元渦運動の可視化を行った。Vortex core は、Navier-Stokes 方程式の歪みテンソル  $S_{ij}$  と渦度テンソル  $\Omega_{ij}$  から算定される次式の固有値を調べることで特定される。

$$L_{ij} = S_{ij}^2 + \Omega_{ij}^2 \dots\dots\dots (1)$$

Vortex core の定義に従えば、渦度の相対的な強弱に依存せず、渦管によって構成される整構造を鮮明に抽出することができる (渡部ら, 2000)。

図-2 に、CASE 2 の場合の水面形と vortex core の時空間変動を示す。なお、入射波の波峰が開口部中央を通過する時刻を  $t=0$  としている。波峰の通過時に、堤体角部に鉛直軸周りの剥離渦 (縦渦) が形成され、渦中心部の圧力低下によって水面が窪んでいる様子がわかる。剥離した縦渦は周囲に水平渦や旋回渦等の2次渦を励起、発達させながら堤体背後に移動し、流れの反転時に高波

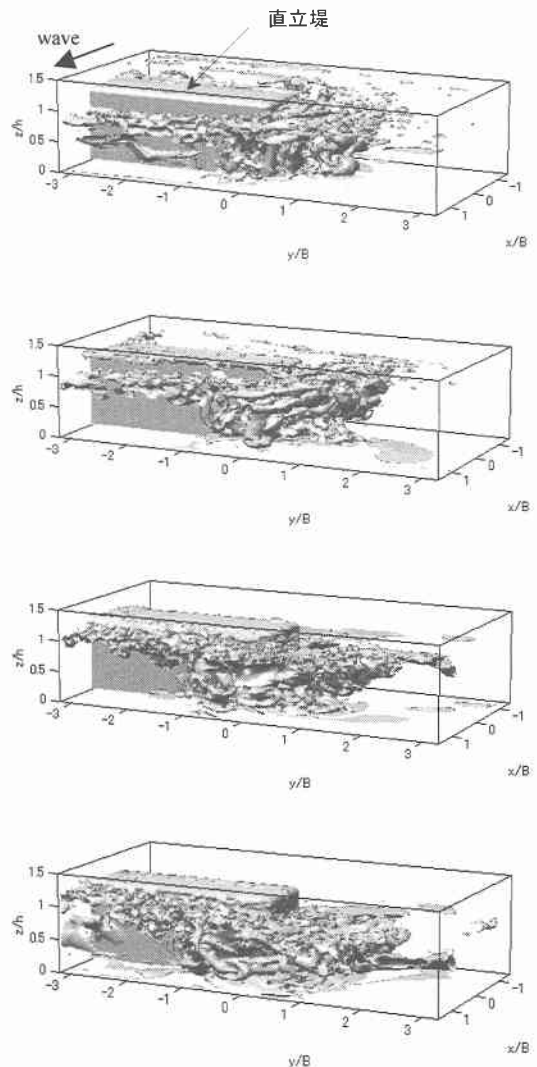
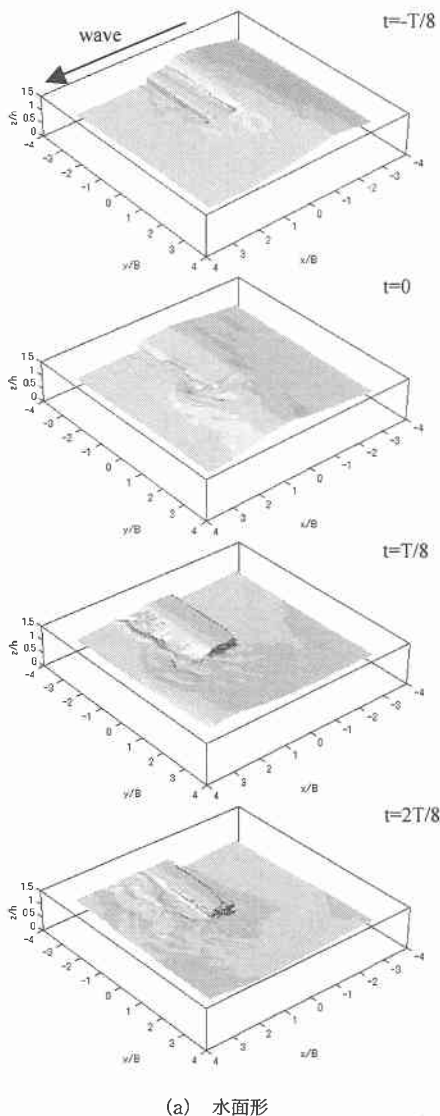


図-2 水面形と vortex core の時空間変動 (CASE 2)

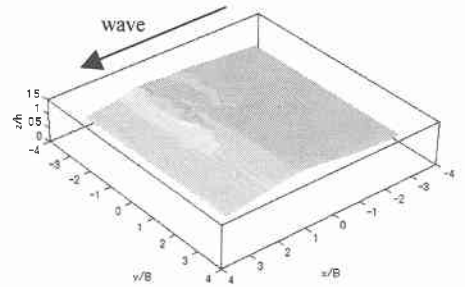
数成分に移行していく。その結果、堤頭部近傍の渦構造は一つの大規模渦が形成されているのではなく、多数の渦管が互いに干渉し、絡み合うような構造になっている。また、越波水の着水によって水面に高周波成分の変動が発生し、回折波との重畳により複雑な水面形が形成されている。この時、小スケールの多量の渦の集合体が、ほぼ一様に着水線に沿って発生しているが、回折波により堤内側の水位が上昇し、越波水の落下高さが相対的に小さくなるため、渦の形成は比較的水面付近にとどまっている。しかしながら、その後水位の低下に従って渦はエネルギーを失いながらも水深中央付近にまで移流している。一方、開口部側では、前の周期で形成、分解、移流した渦が残存しているのに加えて、新たな渦が形成され、水面付近から底面近傍まで広範囲に渦が分布している。

図-3は、CASE 1の場合の  $t=2T/8$  における水面形と vortex core を示している。CASE 2の場合と同様に堤頭部角部周辺に鉛直軸周りの剥離渦とそれに伴う2次渦の形成が見られる。しかしながら、CASE 1ではCASE 2に見られるような開口部側の水面から底面近傍まで広範囲に分布する渦が見られない。このことから、越波が発生する場合、越波により形成される渦の影響が堤体背後の水面付近にとどまらず、渦干渉を通して直接又は間接的に、剥離に起因する渦群の発達に影響を与えていると考えられる。

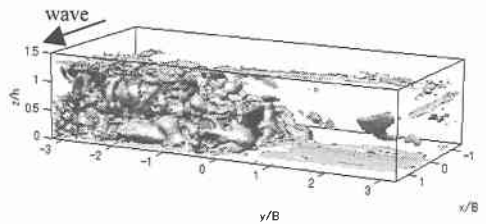
図-4は、CASE 3の場合の  $t=2T/8$  における水面形と vortex core を示している。本ケースは堤体天端が静水面下にあり(矩形潜堤)、堤体を覆うように大小さまざ

まな渦管が形成されている。ここで、堤体背後に形成されている渦はCASE 2の場合と形成要因が異なり、堤体天端から剥離した水平軸周りの渦とそれに巻きつくように発達する2次渦が顕著に現れ、渦の規模が底面近傍に達するほど大きなものとなっている。

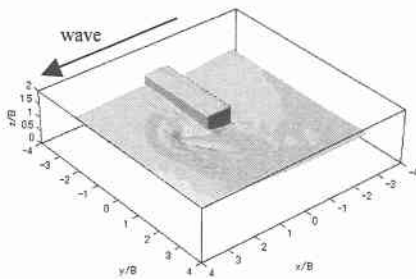
図-5は、CASE 5の場合の  $t=2T/8$  における水面形と vortex core を示している。CASE 2の場合に比べて入



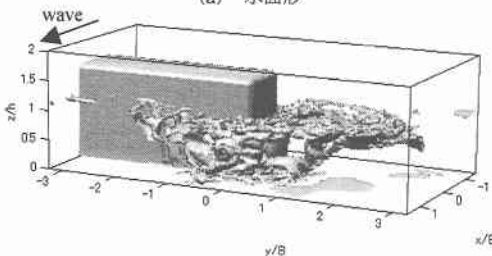
(a) 水面形



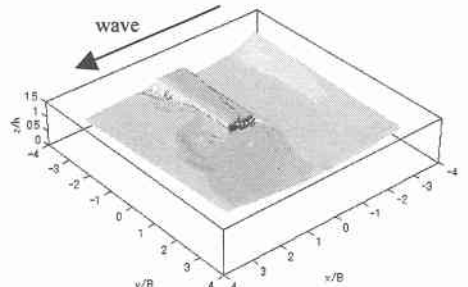
(b) Vortex core

図-4 水面形と vortex core ( $t=2T/8$ , CASE 3)

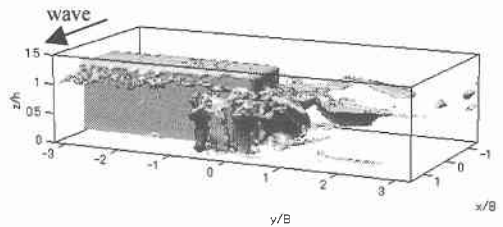
(a) 水面形



(b) Vortex core

図-3 水面形と vortex core ( $t=2T/8$ , CASE 1)

(a) 水面形



(b) Vortex core

図-5 水面形と vortex core ( $t=2T/8$ , CASE 5)

射波周期が短く、越波規模が小さくなっている。そのため堤体背後に形成される渦が非常に小さくなっている。また、堤体角部では、鉛直軸周りの剥離渦（縦渦）が支配的で、CASE 2 の場合に見られるような縦渦に随伴する2次渦の形成は顕著でない。

## (2) 底面近傍の定常流

図-6および図-7に、CASE 2およびCASE 3の底面近傍 ( $z/h=0.02$ ) の1周期平均流速分布を示す。図中、ベクトルが  $x-y$  平面内の流速を、グレー・スケールの濃淡が鉛直流速を表している。CASE 2 の場合、剥離渦の影響により、構造物に沿った流れや構造物から離れる方向に発生する流れ、構造物近傍の比較的大きなスケールの循環流等が形成され、それらの流速は定量的にも他の領域と比べ非常に大きい。さらに、鉛直流速分布に不均一

性が見られ、定常流も堤頭部近傍では複雑な三次元構造を有していることがわかる。しかしながら、これらの傾向は越波しないCASE 1の場合と概ね同様であり、越波の影響は底面近傍の定常流成分には顕著に表れていない。一方、CASE 3の場合、CASE 2の場合とは異なり、堤頭部堤体背後の時計周りの循環流は形成されず、また開口部側の循環流の対称性が失われている。これは、潜堤上を岸向きに流れる流れの補償流として開口部底面近傍に岸向きの流れが発生しているためであると考えられる。さらに、(1)に示したとおり、堤体天端から剥離した水平軸周りの渦とそれに伴う2次渦の影響が底面近傍に達し、多様な渦が定常的に存在するので、堤体背後の広範な領域で局所的に強い流れを伴った複雑な定常流構造が形成されている。

## (3) 流跡線による流れの可視化

(2)に示したような底面近傍の定常流の構造は、底質移動と深い関係があり、局所的に大きな流速は局所洗掘の原因になっていると考えられる。そこで、堤体近傍の水粒子運動に追従するマーカーを追跡することにより、物質輸送の観点から構造物近傍の水粒子移動特性について調べた。

図-8および図-9に、CASE 2におけるマーカーの移動軌跡の一例を示す。図には●で示す初期位置からスタートし、 $t=T/8$  から一周分の軌跡を細線で示している。図-8によれば、堤体近傍で底面近傍の水粒子が、堤頭部に形成される剥離渦に捕捉されることなく、上昇しながら構造物から離れていく様子がわかる。これは、剥離渦近傍において、水粒子の移動が渦内で閉じているわけではなく、渦外へ放出される傾向があることを示している。また、図-9は、図-8に比べて若干堤体から離れた底面近傍の水粒子を追跡している。堤体から離れた開口部寄りの水粒子は、入射波周期に従った周期運動を示し、概ね初期値に近い位置に戻ってくる。しかしなが

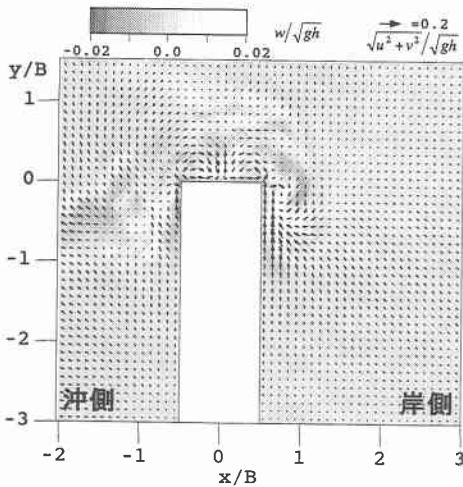


図-6 底面近傍定常流速分布 ( $z/h=0.02$ , CASE 2)

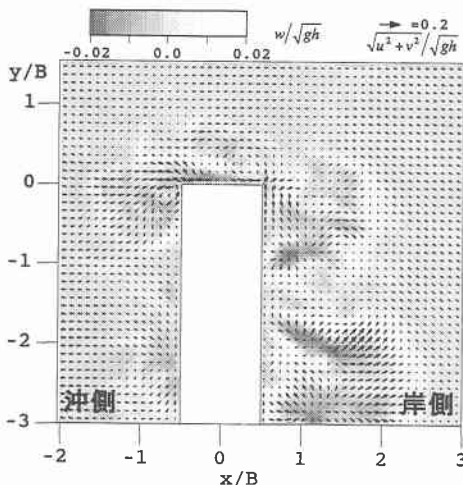
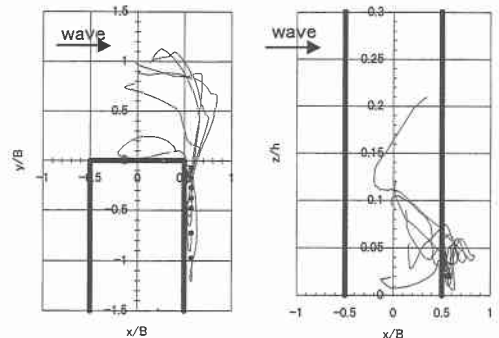


図-7 底面近傍定常流速分布 ( $z/h=0.02$ , CASE 3)



(a)  $x-y$  平面

(b)  $x-z$  断面

図-8 水粒子の移動軌跡-1 (CASE 2)

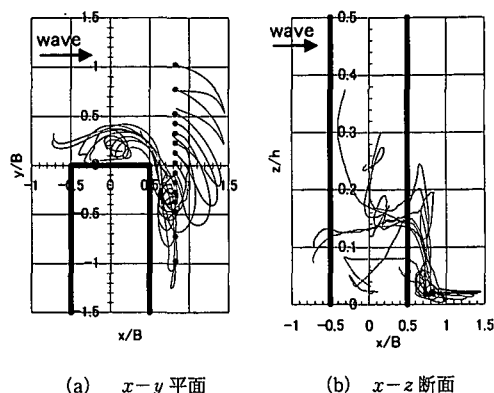


図-9 水粒子の移動軌跡-2 (CASE 2)

ら、堤体背後の水粒子は、堤頭部に形成される剝離渦に捕捉されて回転を伴った上昇運動を行うもの、一旦渦に近づくが再び加速されて堤体から離れていくものがある。さらに、ここには示していないが、初期位置が浅くなるに従って運動軌跡は長くなり、堤体幅の2倍以上動く場合もあった。したがって、底面近傍から上昇を伴って水深の中央付近まで移動した水粒子は、数周期後には堤体幅の数倍程度の位置まで移動する可能性がある。

底質の初期移動に関しては底面せん断力との関係により決定されと考えられ、また、流体中の底質粒子の運動に関してはその重量や流体との相互作用を考慮する必要がある。したがって、ここで追跡したマーカーは、水粒子の動きに追従するもので、必ずしも底質の動きを追ったものではない。しかしながら、底質粒径が小さい場合、うねり程度の周期の入射波によっても、堤頭部近傍では底質が巻き上げられ、港内あるいは港外へ底質が運ばれる可能性があることが示された。

#### 4. おわりに

越波を伴う直立堤堤頭部周辺の流れ場に LES を適用し、その流れの複雑な三次元構造を調べた。vortex core の定義を用いることにより、堤頭部周辺の複雑な三次元渦運動を明瞭に捉えることができた。その結果、越波水着水時に高波数の渦が形成され堤頭部近傍の渦構造に影響を及ぼすことが分かった。さらに、矩形潜堤の場合、堤体天端からの剝離渦とそれに随伴する2次渦の影響が底面近傍に達し、堤体背後の広範な領域で局所的に強い流れを含んだ複雑な定常流構造が形成されていることが分かった。

また、流跡線を調べることにより、堤頭部近傍の剝離渦周辺では周囲の波動運動とは明らかに異なる水粒子の運動形態、例えば、底面近傍から回転を伴い上昇する水粒子や渦に捕捉されずに堤体から離れる水粒子の運動等、が存在することを示すことができた。

#### 参 考 文 献

- 加藤雅也・奥村悠樹・渡部靖憲・佐伯 浩 (2000): 直立堤堤頭部周辺の流動構造に関する3次元数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 776-780.
- 渡部靖憲・森 憲広・佐伯 浩 (1998): 碎波の3次元 Large Eddy Simulation, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 146-150.
- 渡部靖憲・王 毅・早川哲也・佐伯 浩 (1999): 越波に伴う渦生成, 高周波水位変動と伝達波に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 741-745.
- 渡部靖憲・安原幹雄・佐伯 浩 (2000): 碎波後の大規模渦の壁構造に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 146-150.
- Jeong, J. and F. Hussain (1997): On the identification of a vortex, J. Fluid Mech., Vol. 285, pp. 69-94.
- Sumer, B. M. and J. Fredsoe (1997): Scour at the head of a vertical-wall breakwater, Coastal Eng., Vol. 29, pp. 201-230.