

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

加藤 雅也*・奥村 悠樹**・渡部 靖憲***・佐伯 浩****

1. はじめに

既存形状の防波堤に関する設計手法は概ね確立されていると考えられるが、防波堤の被災は近年減少しているもののほぼ毎年発生している。高橋ら (1999) は、防波堤堤頭部における局所洗掘やマウンド被覆材の散乱が、防波堤の被災パターンの中で大きな割合を占めている被災原因のひとつであると報告している。これまでに、国栖ら (1986)、木村ら (1996)、大野ら (1999) 等による堤頭部マウンド被覆材の安定性に注目した研究や Sumer et al. (1997) による防波堤堤頭部の局所洗掘に関する研究等があり、被災原因として構造物角部底面近傍における局所流に伴う鉛直軸まわりの渦の発生が指摘されている。しかしながら、既往の研究では、測定あるいは計算された流速や圧力とブロック重量や洗掘深との関係について検討しており、防波堤堤頭部周辺における渦の発生、移流、消滅等の時空間変動特性について詳細に調べた例はほとんど無い。防波堤堤頭部近傍では、構造物及び底面や水面の影響を受けて複雑な流動構造を形成していると考えられ、より信頼性、経済性の高い防波堤を設計するためには、そのメカニズムの解明が必要である。また、港湾の多目的利用のため、従来使われていなかった水域にも高い静穏度が求められるようになり、港内に波除堤が建設される場合がある。しかし、波除堤により港内波高が低減する一方で、波除堤端部から渦が発生し、小型船舶の航行障害や水産施設のための有効水域が減少する等の問題が指摘されている。この問題を合理的に解決するためにも、堤頭部近傍の流動構造を把握する必要がある。そこで本研究では、直立堤堤頭部周辺の三次元流動構造に着目し、その基本的性質を把握することを目的とした。

2. 計算方法

本研究では、渡部ら (1998) が適用した 3 次元 Large Eddy Simulation (以下 LES と記す) と同様な数値計算

により直立堤堤頭部周辺の三次元流動構造の時空間変動特性を調べた。Grid scale 成分の計算は、移流と非移流の二段階に分けて差分法により離散化して行い、Subgrid scale 成分のモデル化には、繰り込み群理論によって低 Reynolds 補正された非線形渦粘性モデルを用いている。また、自由表面の取り扱いには密度関数法を用い、移流の計算には CIP 法を用いている。

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 は微小振幅波理論による波長、 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、 Δt は計算時間ステップである。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 と CASE 2 では 2 次クノイド波、CASE 3 では 3 次ストークス波を数値造波して行った。

3. 計算結果および考察

(1) 水理模型実験との比較

本計算手法は、前述したとおり渡部ら (1998) と概ね同様であり、その妥当性は既に碎波の再現計算において

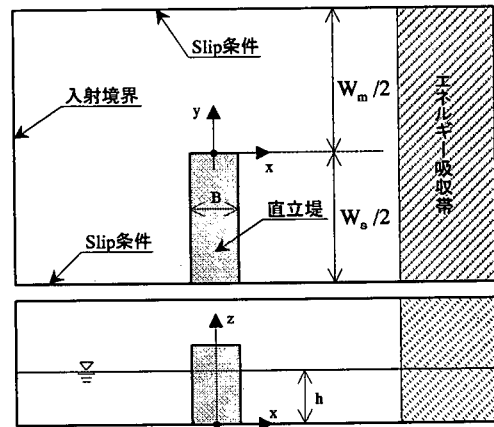


図-1 計算領域および座標系

* 正会員 日本データサービス㈱ 総合解析室
** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
*** 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

表-1 計算条件

	H/h	h/L	B/L	w_s/L w_m/L	$\Delta x/h$ $\Delta y/h$	$\Delta z/h$	$\Delta t/T$
CASE 1	0.40	0.083	0.07	0.4	0.040 ~0.2	0.040	1/512
CASE 2	0.40	0.083	0.07	1.0			
CASE 3	0.33	0.192	0.15	1.0			

良好な結果を得ている。本研究では、新たに直立堤の影響と側面ならびに岸側境界処理の妥当性を検証するため、CASE 2 の条件で水理模型実験を行い、直立堤堤頭部周辺の水位変動を測定した。ただし、計算では計算負荷を低減するため開口部中央での対称性を考慮して半分の領域で計算しているが、実験では開口部左右に堤体のある形状で行っている。図-2 に、結果の一例として波峰通過時の水位の比較を示す。図に示すとおり、計算結果は実験結果と良好に一致し、本計算に用いた各境界処理が概ね妥当であることが確認された。

(2) 底面近傍流速の時間変化と平均流速

堤頭部周辺の流動構造は、前の周期で残存した渦の影響等によって周期ごとにも若干変化して完全な定常状態は得られないが、本研究ではその基本的性質を把握することを目的としているので、数周期分の計算結果を調べてその様子が概ね同様であると判断したうちの1周期分の結果を用いて検討した。また、CASE 1 と CASE 2 を比較すると、開口幅の違いにより CASE 2 の方が堤頭部近傍の流速が若干小さくなるが、流動構造は定性的に類似していたので以下では CASE 1 と CASE 3 を中心に考察する。

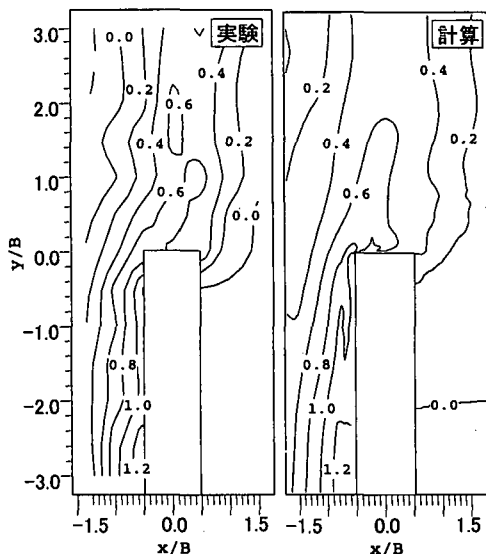


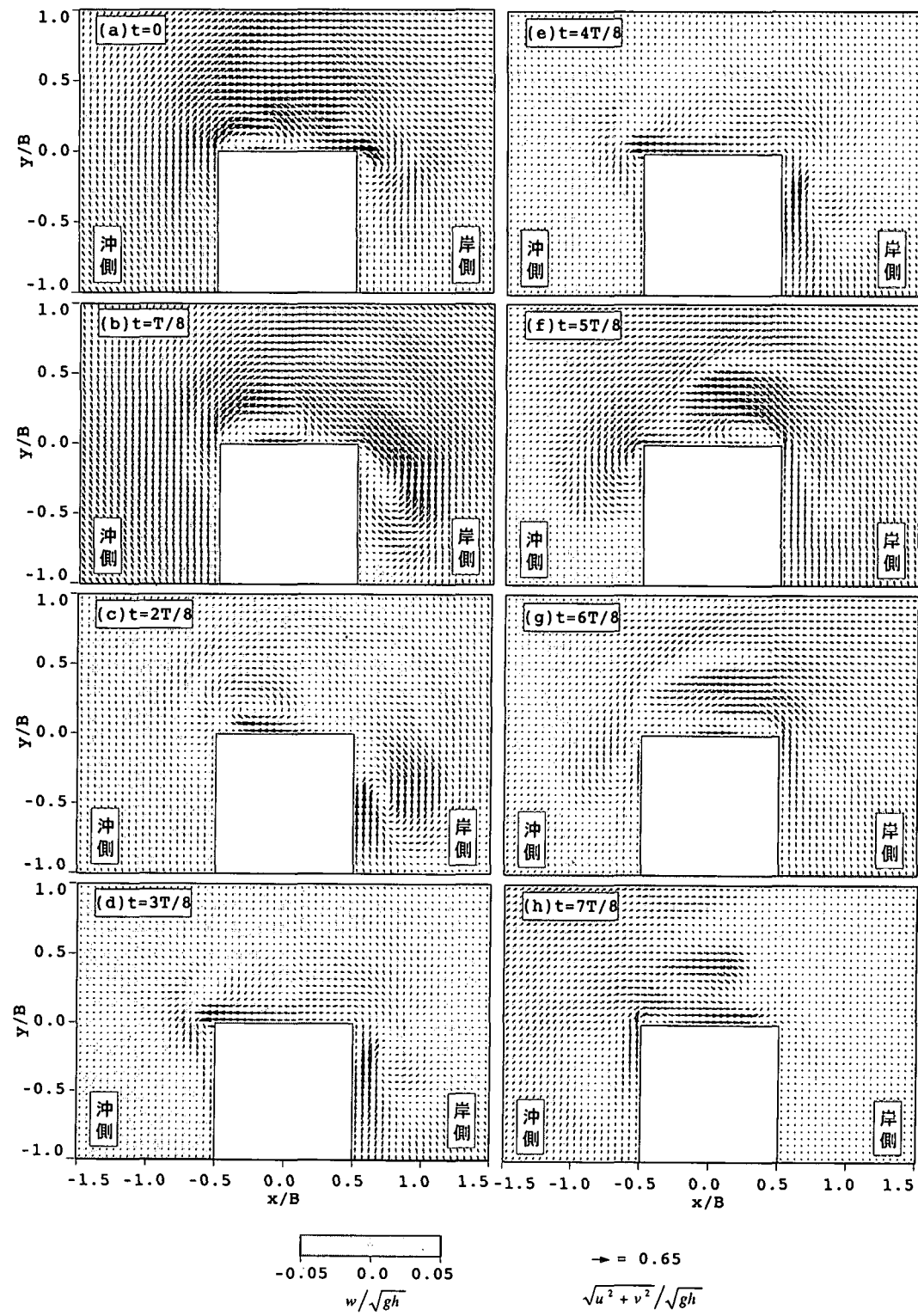
図-2 水位分布の比較 (波峰通過時)

図-3 に、CASE 1 の底面近傍 ($z/h=0.02$) の流速の時間変化を示す。なお、波峰が開口部を通過する時の位相を $t=0$ としている。図中のベクトルが $x-y$ 平面内の流速分布を示し、白黒の濃淡が鉛直流速を示している。ただし流速は長波の波速で無次元化して表示している。波峰および波谷の通過に伴い、堤頭部の沖側角ならびに岸側角から鉛直方向に軸を持つ剥離渦 (縦渦) が発生している。ただし、剥離する際の流速の大きさや後流域の状態の相違により、発生する渦は対称とはならない。特に、波谷の通過に伴い発生する沖側の縦渦は規模が小さく、この点は入射波周期が短い CASE 3 の場合に顕著で、図-4 に示すとおり波谷通過時に沖側角からは剥離する様子が見られない。一方、岸側角では図-4 に示す位相から 90 度遅れて非常に規模の小さい渦が発生するが、直ちに消滅する。ただし CASE 3 の場合も、波峰通過時には岸沖両端から比較的規模の大きな縦渦が発生している。図-4 に見られる縦渦は回転の方向からもわかるとおり、波峰通過時に発生した剥離渦が残存しているものである。また、底面近傍に見られる比較的規模の大きな縦渦は、底面から水面まで形成されているが、それらの構造は時間と共に大きく変化し、それぞれ異なった発達特性を示す。例えば、渦の中心位置や渦の規模は水深ごとに異なり、水面近傍の渦は時間と共に急速に減衰するのに対して、底面近傍ではほとんど減衰せず強い回転を維持する。本研究において算定された底面近傍 ($z/h=0.02$) の最大水平流速は、構造物が無い場合の進行波の水平流速と比較すると、2.3~3.4 倍であった。さらに、鉛直流速分布を調べると、縦渦の周囲は下降流で渦の中心付近は上昇流となり、局所的に速い流速を伴った複雑な三次元構造を形成している様子がわかる。底面近傍 ($z/h=0.02$) の最大鉛直流速は、構造物が無い場合の進行波の鉛直流速と比較すると、10.7~30.7 倍であった。ただし、本研究で算定された $z/h=0.02$ における鉛直流速は水平流速の概ね 1/10 である。

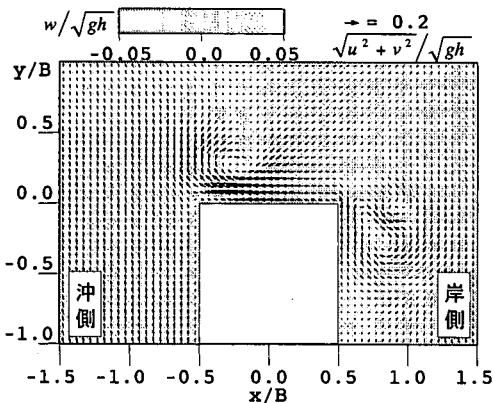
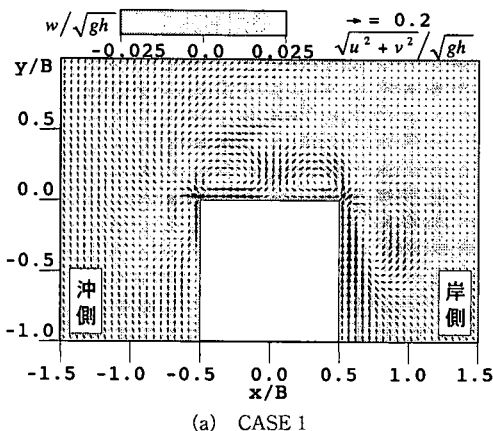
図-5 に CASE 1 と CASE 3 の底面近傍 ($z/h=0.02$) の 1 周期平均流速を示す。剥離渦の影響により、構造物に沿った流れや構造物から離れる方向に発生する流れ、構造物近傍の大きなスケールの循環流が形成され、その流速は定量的にも他の領域と比べ非常に大きい。また、縦渦の非対称性が平均流にも表れている。さらに、鉛直流速分布の不均一性から、平均流も堤頭部近傍では複雑な三次元構造を有していることがわかる。

(3) $y-z$ 断面流速分布

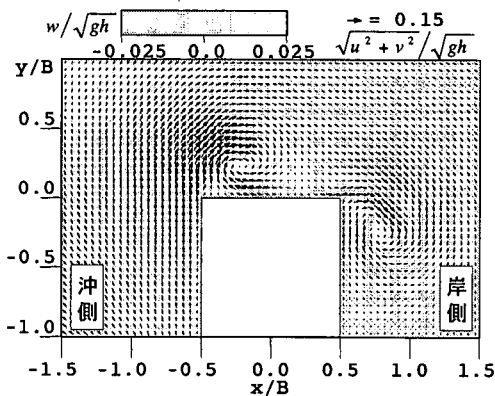
図-6 に、CASE 1 の $t=T/8$ における縦渦の中心付近 ($x/B=0.725$) の $y-z$ 断面流速分布を示す。岸向き流れによって堤体背後に生成した縦渦の中心付近では、底面近傍での局所的な強い上昇流や入射波の進行方向に軸を



図一3 底面近傍の流速分布の時間変化 (CASE 1, $z/h=0.02$)

図-4 波谷通過時の流速分布 (CASE 3, $z/h=0.02$)

(a) CASE 1



(b) CASE 3

図-5 底面近傍の一周期平均流速分布 ($z/h=0.02$)

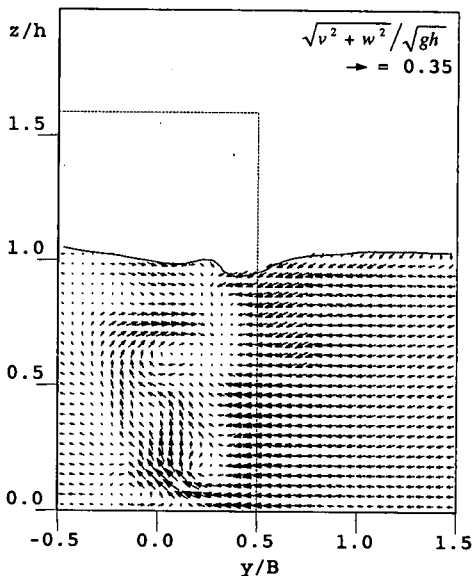
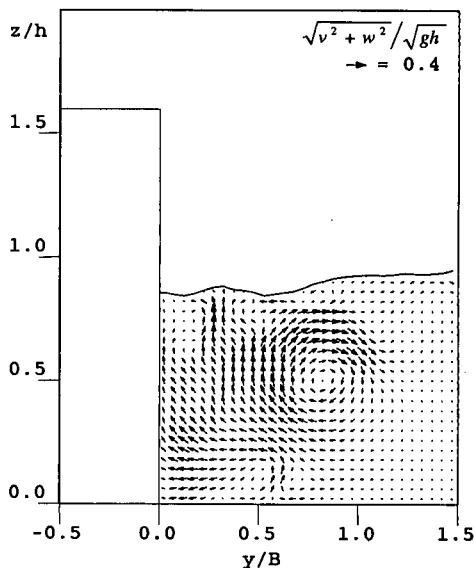
持つ渦(旋回渦)が発生して、複雑な三次元構造を有していることがわかる。このような底面近傍の局所的な流速の空間変動が、マウンド被覆材の散乱や局所洗掘を引き起こしていると考えられる。

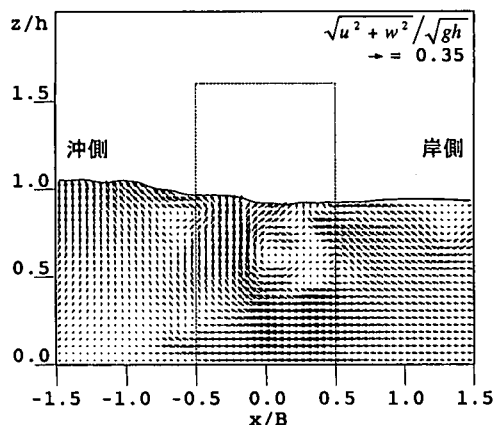
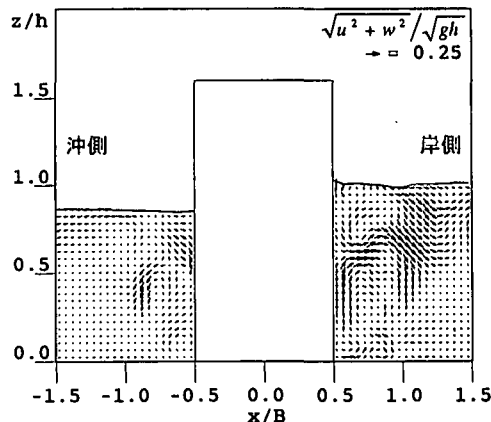
図-7 に、CASE 1 の $t=5T/8$ における開口部中心付

近 ($x/B=0.0$) の $y-z$ 断面流速分布を示す。冲向き流れによる縦渦の生成に伴い、縦渦の外側に水深中央付近に中心をもつ比較的大きな旋回性の二次渦が発生している。

(4) $x-z$ 断面流速分布

図-8 に、CASE 1 の $t=6T/8$ における開口部堤体近傍 ($y/B=0.225$) の $y-z$ 断面流速分布を示す。 $t=4T/8 \sim 5T/8$ の位相で堤体岸側角から生成された縦渦に伴う強い冲向き流れによって堤体法線方向に軸を持つ渦(水

図-6 断面流速分布 (CASE 1, $x/B=0.725$, $t=T/8$)図-7 断面流速分布 (CASE 1, $x/B=0.0$, $t=5T/8$)

図-8 断面流速分布 (CASE 1, $y/B=0.225$, $t=6T/8$)図-9 断面流速分布 (CASE 1, $y/B=-0.225$, $t=3T/8$)

平渦)が発生し、その水平渦は図-8に示すように流れの反転時 ($t=6T/8$) に大きく発達する。

図-9に、CASE 1の $t=3T/8$ における堤頭部近傍 ($y/B=-0.225$) の y - z 断面流速分布を示す。図-9に示した位相は岸向き流れから沖向き流れに反転するところで、岸向きに剝離した縦渦は消滅しつつある。このとき堤体沖側と岸側共に、堤体壁面や底面の影響で、堤体に沿う速い流れを伴う水平渦や底面と堤体の交差するコーナー近傍の水平渦等いくつかの渦が形成され、複雑な3次元構造を形成している。

4. おわりに

3次元 LES により、直立堤堤頭部近傍の流動構造について調べ、その基本的性質が概ね明らかとなった。直立堤堤頭部近傍では、堤体角部に生成される鉛直軸周りの剝離渦(縦渦)が支配的な流れとなっているが、その縦渦に伴い水平渦や旋回渦が生成され空間的に複雑な3次元構造を形成し、その構造が時間と共に大きく変動する。また、生成される渦の規模や生成・消滅過程は、入射波や堤体の諸元によっても異なり、特に水平渦や旋回渦は周期の長い波が作用した場合に顕著に生成された。そこで、堤頭部の被覆材等の設計に際しては、剝離に伴う局所的な流れを考慮した流速を用いる必要があると考えら

れる。本研究で算定された渦の発生に伴う底面近傍の局所流の流速は、構造物が無い場合の進行波の流速と比較して水平方向で2.3~3.4、鉛直方向で10.7~30.7倍となった。

今後は、マウンドの影響や波向きの違いによる流動構造の相違について調べると共に、渦や局所流の低減法についても検討したいと考えている。

参考文献

- 大野賢一・松見吉晴・木村 晃 (1999): 多方向不規則波における堤頭部被覆材の安定重量に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 911-915.
- 木村克俊・水野雄三・須藤賢哉・桑原伸司・林 倫史 (1996): 混成堤堤頭部のマウンド被災特性と被覆材の安定重量算定法, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 806-810.
- 国栖広志・洞谷邦弘・清水虎重 (1986): 混成式防波堤堤頭部根固め方塊ブロックの安定性に関する研究, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 437-441.
- 高橋重雄・木村克俊・下迫健一郎・鈴木高二朗・五明美智男 (1999): ケーソン式混成堤の主要な被災パターンについて, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 816-820.
- 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.
- Sumer, B. M. and J. Fredsoe (1997): Scour at the head of a vertical-wall breakwater, Coastal Eng., Vol. 29, pp. 201-230.