

# 直立堤堤頭部近傍の局所流体力特性

加藤 雅也\*・渡部 靖憲\*\*・佐伯 浩\*\*\*

ケーソン式混成堤の堤頭部では、剝離を伴う複雑な三次元渦構造が形成されている。そのため、堤頭部における被覆材の散乱は、堤幹部における場合とは異なる複雑なメカニズムを有していると考えられる。本研究では、直立堤堤頭部周辺の流速場を Large Eddy Simulation によりシミュレートし、得られた水理量を用いて局所流体力特性の空間変動特性を調べた。その結果、開口率の小さな中小規模港湾に対して現行設計法によりマウンド被覆材所要質量を算定した場合、被覆材の質量が不足する可能性があることを示した。また、堤頭部近傍では加速度の増幅効果によって、慣性力の寄与が著しく大きくなる場合があることを明らかにした。

## 1. はじめに

ケーソン式混成堤において、堤頭部における被覆材の散乱は主要な被災原因のひとつであるが、そのメカニズムは堤幹部における場合とは異なり、剝離を伴う複雑な三次元構造を有する局所流の形成に起因していると考えられる。現行設計法では、マウンド被覆材の所要質量算定にハドソン式に基づく計算手法が推奨されており、堤頭部での適用に関しては、所要質量算定式中の安定数の算定に堤頭部での流速増幅効果を考慮する形で定式化されている(日本港湾協会, 1999)。この算定手法の妥当性は、数例の水理模型実験により検証されており(高橋ら, 1990)、その簡便さから現行設計法は実務で多用されている。しかしながら、防波堤の設計は信頼性設計法や性能設計法等の高度な設計手法への移行が望まれており、被覆材に関しても局所的な被災による機能低下等を定量的に評価し得る所要質量算定手法の確立が必要となる。これまでに、松本・高橋(2001)が、混成堤堤幹部重複波領域における被覆材の設計手法として、断面二次元の数値シミュレーションを利用した高度な設計手法を提案しているが、堤頭部における3次元性を考慮した検討は行われていない。そこで本研究では、直立堤堤頭部周辺の流速場を Large Eddy Simulation (以下 LES と記す)によりシミュレートし、得られた流速データと流速ベースの所要質量算定式から被覆材の所要質量の空間変動特性等を明らかにする。さらに、堤頭部での加速度の増幅効果に着目し、慣性力の寄与についても考察する。

## 2. 数値計算方法とその検証

### (1) 数値計算方法

本研究では、Subgrid scale 成分のモデルに非線形渦粘

性モデルを用いた3次元 LES を使用した。対象とした計算領域を図-1に示す。基礎方程式やその離散化ならびに境界条件の取り扱い等は、既発表論文(例えば、Watanabe・Saeki, 1999; 加藤ら, 2000)に示したものと同様である。ただし、本研究では計算速度の向上を図るため、ポアソン方程式の収束計算に Watanabe ら(2001)と同様な多重格子法を適用した。本研究では2グリッドサイクルの多重格子法を用いた結果、単一格子の場合に比べて計算負荷を70%程度低減させることができた。表-1に本研究で行った計算条件を示す。ここで、 $H$ は入射波の波高、 $T$ は入射波の周期、 $h$ は静水深、 $L$ 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。

### (2) 計算手法の検証

これまでに、本計算手法の妥当性を水理模型実験による水面波形や流れの可視化画像との比較によって行い、概ね良好な結果を得てきたが、本研究においては流速の定量的な算定精度が重要であることから、新たに水理模型実験による流速データとの比較を行った。実験は、加藤ら(2000)に示したものと同一実験装置を用いて、直立堤堤頭部近傍の流速を3次元超音波流速計で測定した。

図-2に、Case 13の条件における直立堤堤頭部の底面近傍流速の計算値と実験値を比較した一例を示す。図に示した実験結果は瞬時実流速であるが、3次元 LES による計算結果はグリッドスケール成分の流速(格子平均流速)であるため、実験データに含まれる高波数成分の乱れは一部再現できていないが、流速の時系列変動は概ね良く一致しているといえる。

## 3. 計算結果および考察

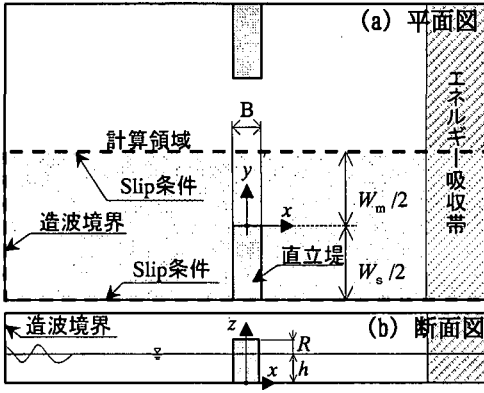
### (1) 堤頭部近傍の流速増幅効果

図-3に、波形勾配  $H/L$  と底面近傍 ( $z/h=0.02$ ) における最大流速増幅率  $\tau_{\max}$  の関係を開口率  $W_m/L$  毎に示す。ここで  $\tau$  は、LES で得られた水平流速を微小振幅波

\* 正会員 博(工) 北海道大学研究員 大学院工学研究科環境資源工学専攻

\*\* 正会員 博(工) 北海道大学助手 大学院工学研究科環境資源工学専攻

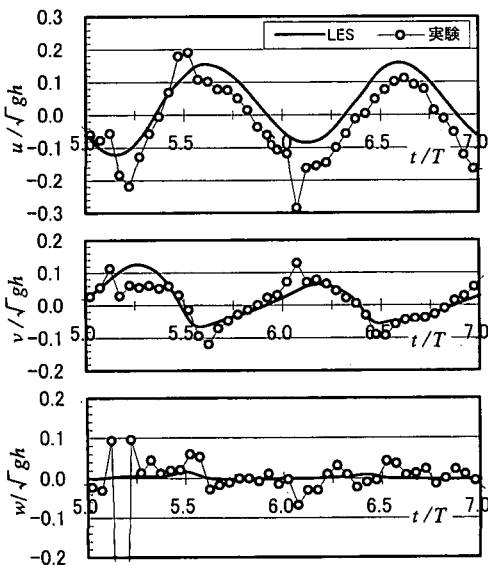
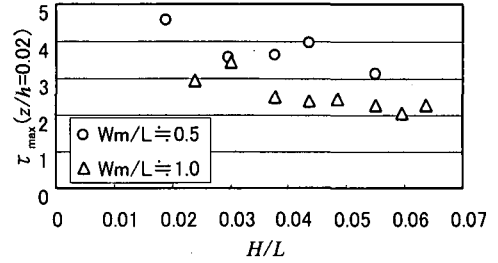
\*\*\* フェロー 工 博 北海道大学教授 大学院工学研究科環境資源工学専攻



図一 計算領域および座標系

表一 計算条件

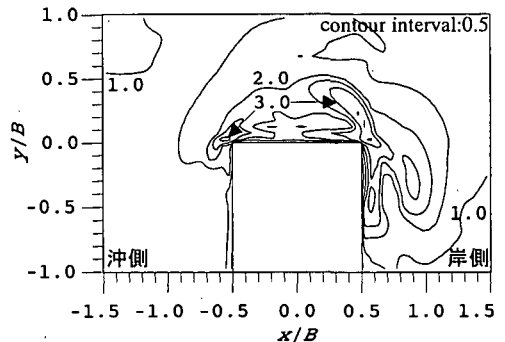
|         | $H/h$ | $h/L$ | $B/L$ | $w_s/L$<br>$w_m/L$ | $\Delta x/h$<br>$\Delta y/h$ | $\Delta z/h$ | $\Delta t/T$ |
|---------|-------|-------|-------|--------------------|------------------------------|--------------|--------------|
| CASE 1  | 0.23  | 0.085 | 0.08  | 0.6                | 0.040<br>~0.2                | 0.040        | 1/512        |
| CASE 2  | 0.35  | 0.085 | 0.08  | 0.6                |                              |              |              |
| CASE 3  | 0.40  | 0.094 | 0.08  | 0.5                |                              |              |              |
| CASE 4  | 0.28  | 0.159 | 0.16  | 0.5                |                              |              |              |
| CASE 5  | 0.29  | 0.192 | 0.15  | 0.5                |                              |              |              |
| CASE 6  | 0.32  | 0.094 | 0.08  | 1.1                |                              |              |              |
| CASE 7  | 0.40  | 0.094 | 0.08  | 1.1                |                              |              |              |
| CASE 8  | 0.28  | 0.159 | 0.08  | 1.0                |                              |              |              |
| CASE 9  | 0.38  | 0.159 | 0.08  | 1.0                |                              |              |              |
| CASE 10 | 0.15  | 0.159 | 0.16  | 1.0                |                              |              |              |
| CASE 11 | 0.31  | 0.159 | 0.16  | 1.0                |                              |              |              |
| CASE 12 | 0.29  | 0.192 | 0.15  | 1.0                |                              |              |              |
| CASE 13 | 0.33  | 0.192 | 0.15  | 1.0                |                              |              |              |

図二 実験と計算の比較例—流速時系列変動—( $x/B=0.5$ ,  $y/B=0.1$ ,  $z/h=0.02$ )

図三 底面近傍最大流速増幅率

理論による無堤時の最大水平流速で除した値で、 $\tau_{\max}$ は水深毎に得られる最大値である。図から、波形勾配が減少すると $\tau_{\max}$ が増加する傾向が認められる。さらに、開口率が小さい場合に $\tau_{\max}$ の著しい増加が見られ、既往の研究(高橋ら, 1990)で示されている最大増幅率の目安である $\tau_{\max}=2.5$ を大きく上回る結果が得られた。そこで $\tau$ の空間分布について調べると、 $\tau$ が最大となる位置は概ね高橋ら(1990)の結果と同様に堤体岸側角部近傍であったが、Case 4, 5, 9, 12では堤体沖側角部近傍から開口部側に至る領域で $\tau$ が最大となっていた。また、開口率が小さい場合については、図-4に示すように比較的広範な領域で現行基準(日本港湾協会, 1999)に用いられている値 $\tau=1.4$ (以下、標準値と記す)を上回る場合があることがわかった。以上に示したとおり流速増幅効果は入射波条件や港口幅によって変化するので、被覆材所要質量を現行設計法で算定する場合、設計条件にしたがって適切な $\tau$ を選定する必要があるといえる。特に、比較的港口部が狭い中小規模港湾では、現行の標準値で設計すると被覆石質量が不足する可能性があるので十分な注意が必要である。

ところで、既往の研究(例えば、加藤ら, 2001)から明らかとなっており、堤頭部近傍の流速場は、剝離渦や2次渦の形成によって複雑な3次元構造を形成している。そこで $\tau$ の分布に関する $z/h$ による相違を調べた。図-5

図四 流速増幅率分布 (Case 3,  $z/h=0.02$ )

(a) は、計算条件による  $\tau_{\max}$  の鉛直分布の相違を示し、図-5(b) は、領域比 (堤頭部周辺領域  $[-1.5 \leq x/B \leq 1.5, -1.0 \leq y/B \leq 1.0]$  ) においてある  $\tau$  以上となる面積の割合) の鉛直分布の一例 (Case 3) を示している。Case 3 の場合、 $\tau_{\max}$  は底面付近で大きく変化し、 $z/h=0.06$  で底面付近における最大値 ( $\tau_{\max}=4.11$ ) となり、前述した底面近傍 ( $z/h=0.02$ ) の増幅率よりもさらに大きな増幅率が認められた。また、同ケースに関して領域比について調べると、 $z/h \leq 1.0$  の範囲で、 $\tau_{\max}$  の大きな領域が  $z/h$  の増加にしたがい広がっている。このような  $\tau_{\max}$  と各  $\tau$  の領域比の水深変化に関して、入射波周期が長い場合は概ね同様な傾向となっているが、周期が短い場合は水深による変化が他のケースほど顕著ではない。これは、周期が短い場合は剝離する縦渦の規模が比較的小さく、2次渦の形成も顕著でないためであると考えられる。

## (2) 所要質量に関する検討

ここでは、3次元 LES の計算結果と流速を用いた所要質量算定式から被覆石所要質量を算定し、現行設計法による算定値との比較を行う。

流速を用いた所要質量算定式には、松本・高橋 (2001) に倣い、以下の (1) 式を用いる。なお、この式は基本的に流れに対する被覆材の所要質量算定式として提案されているものである (例えば、(社)日本港湾協会, 1999)。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $U$ ；捨石等の上面の流速 (m/s)、 $g$ ；重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)、 $y$ ；イスバッシュ定数 (埋め込まれた石にあっては、1.20、露出した石にあっては 0.86)、 $\theta$ ；水路床の軸方向の斜面勾配 (°) である。ただし、本研究においては、松本・高橋 (2001) を参考にして  $y=0.8$  とした。

図-6 に、(1) 式によって算定した堤頭部被覆石所要質量と現行設計法による算定結果との比を示す。図には質量比をグレースケールと等値線で示している。Case 13 の場合、現行設計法による被覆石所要質量がやや過大な

設計となっていることがわかる。また、Case 7 の場合は堤頭部角部近傍に被覆石質量が不足する極小さな領域が存在するが、概ね現行設計法は安全側の設計であるといえる。一方、開口率が小さく流速の増幅率  $\tau$  が大きい Case 3 では、堤頭部周辺に被覆石質量が不足する領域が比較的広く分布している。以上のように、現行設計法と流速ベースの設計法では、所要質量が設計条件や対象地点ごとに異なった結果となる。これは、現行設計法では流速比  $\tau$  を一定としているため、個々の条件の相違による堤頭部近傍の流速変動に対応していないためである。このことは逆に、流速をベースとした所要質量算定法を用いることで、所要質量の空間変化や設計条件の相違に対応でき、より経済性・安全性の高い設計が可能となることを示している。

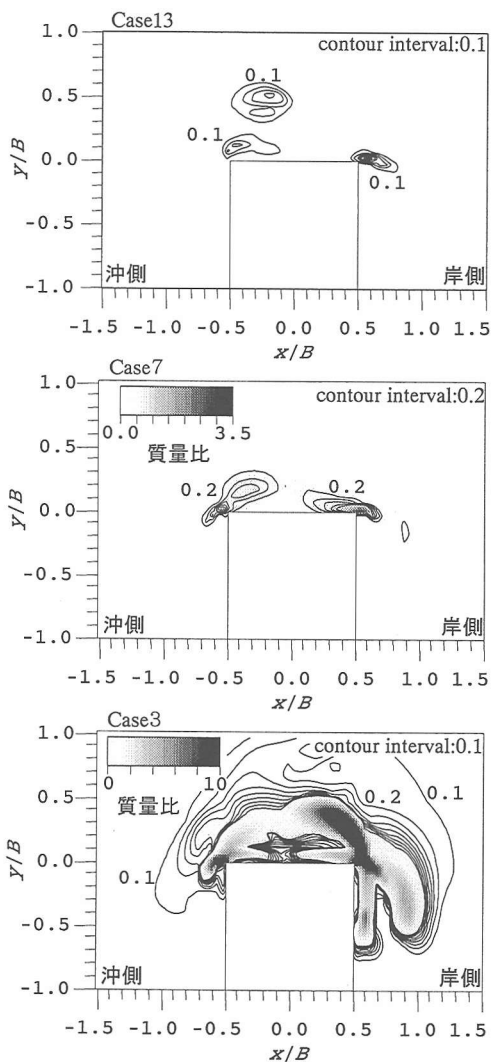


図-6 被覆材所要質量比の空間分布

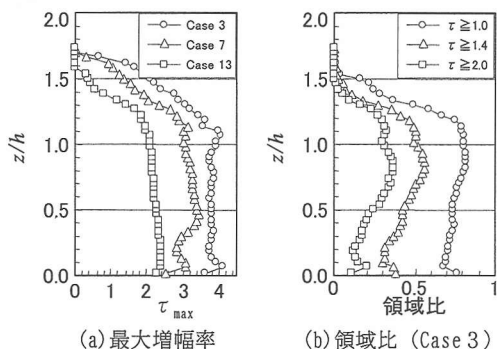


図-5 流速増幅効果の鉛直分布

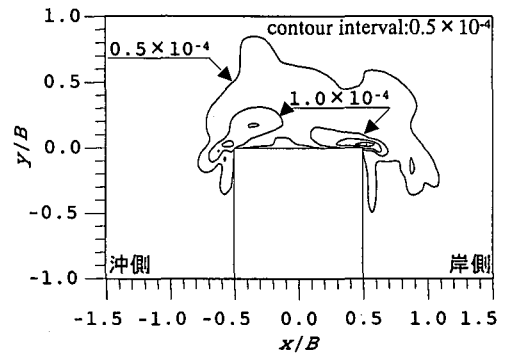
### (3) 慣性力の寄与

前述した(1)式は、定常流中の被覆石を対象として被覆石に作用する抗力と摩擦等の抵抗力との釣り合いから導出されたものである。一般に、波動場においても、対象となる物体が波動運動のスケールに比して小さい場合は抗力が支配的であり、慣性力の寄与は小さいと考えられている。しかしながら、堤頭部近傍では入射波のスケールとは異なった時間スケールの流体運動があり、被覆石規模の物体に作用する流体力特性が他の領域とは異なる可能性がある。図-7は、堤頭部における加速度増幅率の1周期間時系列と最大値空間分布の一例を示したもので、この図から速度と同様に加速度も著しく増幅されていることがわかる。そこで、以下では、被覆材を球体でモデル化し、3次元LESで求めた堤頭部近傍の流速および加速度データに基づいて波力特性を調べ、主として慣性力の寄与を明らかにする。

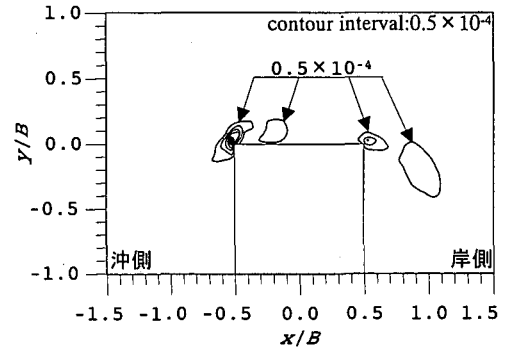
図-8は、Case 7における底面近傍( $z/h=0.02$ )の(a)最大水平抗力、(b)最大水平慣性力および(c)最大水平波力と最大水平抗力の比の平面分布を示している。波力の計算には、被覆材を球体と仮定し、(2)式のMorison式を用いて行った。(2)式の右辺第1項が水平抗力、第2項が水平慣性力、以上2項の和 $F_H$ が水平波力である。なお、加速度には移流項を含めた全加速度を使用している。

$$F_H = \frac{1}{8} C_D \rho \pi D^2 U |U| + \frac{1}{6} C_M \rho \pi D^3 \dot{U} \dots\dots\dots (2)$$

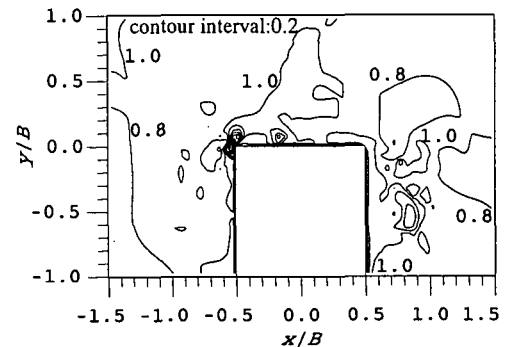
ここで、 $F_H$ ：水平波力ベクトル、 $U$ ：水平流速ベクトル、 $\dot{U}$ ：水平加速度ベクトル、 $D$ ：球の直径、 $C_D$ ：抗力係数、 $C_M$ ：慣性力係数である。ただし、実際の計算では、3次



(a) 水平抗力



(b) 水平慣性力



(c) 水平波力/水平抗力

図-8 底面近傍流体力分布 (Case 7)

元LESの計算と同様に各パラメータを静水深と重力加速度で無次元化して行い、以下に示す図中の流体力に関する表示は全て同様に無次元化したものである。計算に用いた球の直径 $D$ と水深 $h$ との比は $D/h=0.08$ であり、抗力係数 $C_D$ と慣性力係数 $C_M$ は、岩田・水谷(1989)等を参考に、 $C_D=0.5$ 、 $C_M=1.5$ としている。最大慣性力は抗力の最大値よりも大きい、その発生領域は堤頭部沖側角部の極めて狭い領域に限られている。しかしながら、最大水平波力と最大抗力の比を見ると、比較的広い領域で1.0を越え(最大2.7)、抗力だけを算定したのでは不十分であり、慣性力の影響を考慮する必要性が認められた。

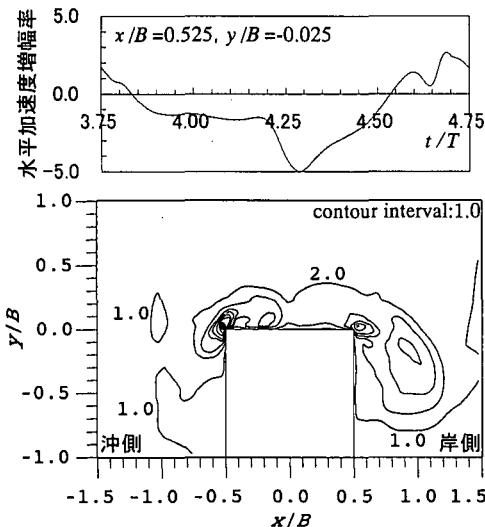


図-7 加速度の増幅効果 (Case 3,  $z/h=0.02$ )

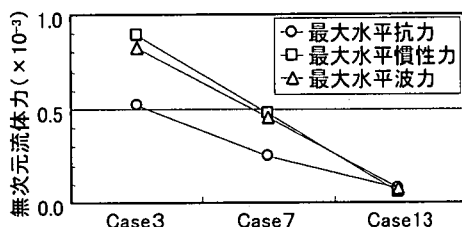


図-9 最大水平流体力の比較

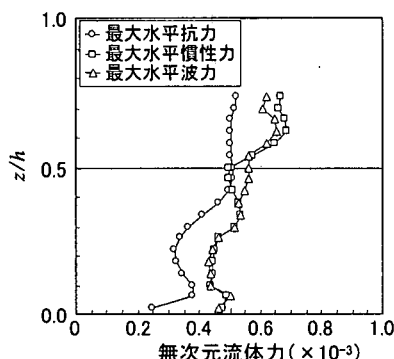


図-10 最大水平流体力の鉛直分布 (Case 7)

図-9は、Case 3, Case 7 および Case 13 の底面近傍 ( $z/h=0.02$ ) における最大水平抗力 (○), 最大水平慣性力 (□) ならびに最大水平波力 (△) を比較したものである。剥離渦形成に伴う局所流の規模が大きいケースで慣性力が大きな値となり、最大水平波力の支配的要因になっていることが明瞭に示されている。

図-10は、Case 7 における最大流体力の、底面近傍から入射波のトラフレベルまでの鉛直分布を示している。計算に用いた球径、抗力係数および慣性力係数は、各々  $D/h=0.08$ ,  $C_D=0.5$ ,  $C_M=1.5$  である。慣性力は、抗力に比べると鉛直方向に若干複雑な変化をし、また、定量的には水深中央付近以外は抗力よりも大きな値を示している。その結果、図に示されるとおり、最大水平波力の各水深の最大値は概ね慣性力が支配的であるといえる。

以上に示した堤頭部における水平波力の特性から、設計入射波周期が長い場合や、開口率の小さな小規模港湾を対象とする場合には、流速の増幅による抗力の増大と共に、加速度の増幅による慣性力の増大に対して十分に考慮する必要があるといえる。なお、マウンド被覆材の検討に対して鉛直波力は概ね無視できると考えられるが、例えば消波ブロックの重量低減に関する検討を行うような場合には鉛直波力についても検討する必要がある。

る。本論文には紙数の都合により水平波力についてのみ記したが、鉛直波力についても同様に慣性力の寄与が認められたことを付記しておく。

#### 4. おわりに

本研究では、3次元 LES による数値計算データをベースとして、直立堤堤頭部近傍の局所流体力特性について検討した。堤頭部近傍の流速増幅率は、開口率の小さな中小規模の港湾において現行設計法で用いられている値を大きく上回る可能性があり、増幅率の設定に注意が必要であることを示した。同時に、数値計算データと流速ベースの流体力算定式による所要質量算定方法を、堤頭部近傍という3次元性の高い領域に適用して現行設計法と比較した。その結果から、堤頭部近傍においても、高精度な数値計算に基づいた流速ベースの算定法が、現行設計法から局所被災等を考慮し得るより高度な設計法に発展させる手法の一つとなり得ることを示した。さらに、堤頭部近傍では加速度の増幅効果によって慣性力の寄与が増大し、所要質量算定の支配要因となる可能性があることを示した。しかしながら、本研究においてはブロックを球状と仮定するなどの基本的な検討に止まっており、今後はさらにブロックの形状等を考慮した詳細な検討が必要と考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、日本データサービス㈱から多大なる御支援を賜りました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 岩田好一朗・水谷法美 (1989): 没水球体に作用する波力の特性に関する研究, 土木学会論文集, 第405号, II-11, pp. 215-224.
- 加藤雅也・奥村悠樹・渡部靖彦・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.
- 加藤雅也・渡部靖彦・佐伯 浩 (2001): 越波を伴う直立堤堤頭部周辺の3次元流速変動特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 786-790.
- 社団法人日本港湾協会 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上), 573 p.
- 高橋重雄・木村克俊・谷本勝利 (1990): 斜め入射波による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究, 港研報告, 29巻, 2号, pp. 3-36.
- 松本 朗・高橋重雄 (2001): 流況場に基づく混成堤マウンド被覆材の高度設計法, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 911-915.
- Watanabe, Y. and H. Saeki (1999): Three-dimensional Large Eddy Simulation of Breaking Waves, CEJ, Vol. 41, pp. 281-301.
- Watanabe, Y., M. Kato, M. Yasuhara, Y. Okumura and H. Saeki (2001): Advanced numerical method for a practical simulation of water waves, Proc. 1st APACE, pp. 96-105.