

Smagorinsky 定数の時空間変動が橋脚周辺の流れに及ぼす影響

愛媛大学大学院 学生会員 ○安藤嘉崇
愛媛大学大学院 正会員 伊福 誠

1. はじめに

水理構造物周辺の局所洗掘については、その防災上の重要性からこれまでも多くの研究が行われており、とくに、近年では数値解析による研究が活発に行われている。伊福ら(2011)は、橋脚周辺の局所洗掘について、3次元の LES(Large Eddy Simulation)を用いた数値解析的検討を提案し、計算の際には、隅角部の処理を必要としない σ - β 座標を用いた数値モデルを使用しているが、その有用性を確認している。Smagorinsky 定数は LES に必要な唯一のモデル定数であり、その大きさの選択が計算結果に影響を及ぼす。しかしながら、実際には実験値を再現できるように Smagorinsky 定数を選ぶと流れ場ごとに値が異なる。三宅ら(1987)は、Smagorinsky 定数はチャンネル内乱流での 0.1 前後の値から一様乱流場での 0.25 の値が用いられているとしている。小林(1990)は、Smagorinsky 定数、 C_s を一定として扱ってよいか疑問を呈している。こうしたことから、Yoshizaki(1989)の理論を拡張・最適化して実用的な SGS モデルを提案し、後方段付き流れに対してその有効性を確認している。

本研究では小林の実用的な SGS モデルを使用し、Smagorinsky 定数の時空間変動が橋脚周りの流れや局所洗掘に及ぼす影響について解析しようとしたものである。

2. 数値解析法

(1) 解析モデル

水路モデルは福岡ら(1977)の実験に基づくものである。水路長 27.5m、水路幅 1.5m であり、橋脚模型は直径 20cm の円柱である。流量は 90l/s、平均水深 13.7cm、水路床を構成する砂の粒径および密度は、それぞれ 0.8mm および 2,590kg/m³、移動床の空隙率は 0.4 とした。

(2) 計算格子間隔と各種係数の評価

縦断方向格子間隔は橋脚周辺を 2cm、それ以外を 5~10cm とし、横断方向は水路中央から左岸にかけての範囲を 38 等分、鉛直方向は水深を 10 等分した。また、Manning の粗度係数は 0.02m^{-1/3}・s、時間間隔は 0.001s とした。

3. 数値解析結果

(1) 既往の実験に基づく解析

数値シミュレータの有用性を検証するために、福岡らの実験に基づいた解析を行った。

図 2 は、橋脚周辺の底面から 1cm の高さにおける流速ベクトルの空間分布である。

(a)、(b)および(c)は、それぞれ福岡らの実験ケース 2 の結果、 C_s が時空間変動する結果および C_s が一定の結果である。

(b)をみると、橋脚前面においては、洗掘孔斜面に沿った上流向きの流れが生じている。また、橋脚側面から後面にかけては横断方向への流れが下流向きの流れへと遷移している。この結果は(a)と似た傾向を示す。

(c)をみると、橋脚前面においては、洗掘孔斜面に沿った上流向きの流れが生じている。また、橋脚側面から後面にかけては横断方向への流れから上流向きの流れへと遷移している。 C_s が時空間変化する結果がより福岡の実験結果と似た傾向を示す。

図 3 は地形変化を示すもので、(a)は福岡らの実験結果、(b)は解析結果

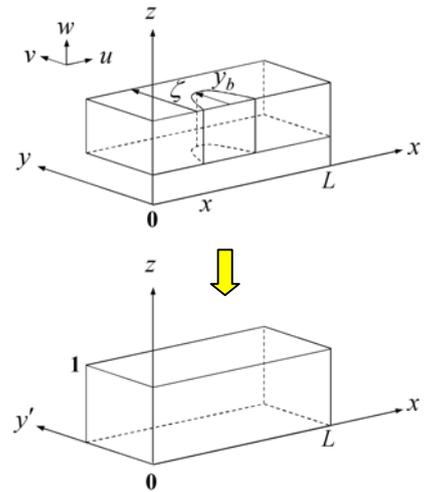


図 1 座標変換 (上:物理座標, 下:計算座標)

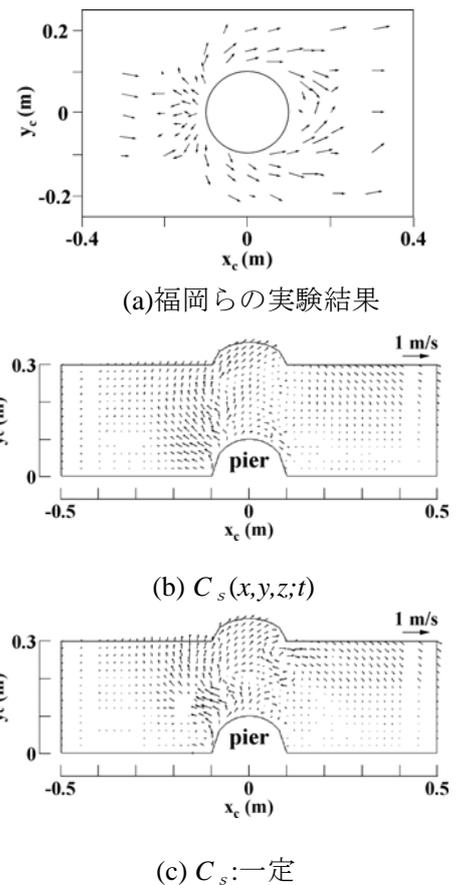


図 2 橋脚周辺の流速ベクトル (底面上 1cm の高さ)

であり、上半分および下半分は、それぞれ C_s が時空間変化する結果および C_s が一定の結果である。

(b)をみると、 C_s が時空間変化する場合、最大洗掘深は橋脚前面よりも水路側壁側で生じており、洗掘孔は(a)と比べると下流向きに舌状に分布している。 C_s が一定の場合、最大洗掘深は橋脚前面よりも水路側壁側で生じており、洗掘孔は下流向きに舌状に分布している。しかし、同心円状とは若干異なる洗掘孔の分布である。なお、側壁側において比較的大きな洗掘が生じていることを除けば、 C_s 定数が時空間変化する結果は福岡らの実験結果と似た傾向を示している。

以上のことから数値シミュレータの妥当性を確認できた。

(2) C_s が流れや底質の移動に及ぼす影響

図4は、水路中央から0.1m側壁側の位置における流速ベクトルと掃流・浮遊砂濃度の縦断方向分布である。対象とする領域は橋脚中心から上流および下流方向に0.5mの範囲である。また、(a)および(b)は、それぞれ C_s が時空間変化する結果および C_s が一定の結果である。

(a)をみると、 $x_c = -0.1m$ 、 $z = 0.3 \sim 0.4m$ 付近で鉛直下降流が生じ、 $z = 0.3m$ 付近から底面にかけては上流向きの流れへと遷移している。 $x_c = -0.1m$ 、 $z = 0.2 \sim 0.3m$ 付近で鉛直下降流が生じ、時計回りの渦を形成している。 $z = 0.3m$ 付近から底面にかけては上流向きの流れへと遷移している。また、 $x_c = 0.1m$ 付近において上流向きの流れが生じている。

$x_c = -0.1m$ 付近においては底面から離脱した底質が洗掘孔斜面に沿って浮遊し水深の約1/2にまで移流・拡散されている。

(b)をみると、 $x_c = -0.1m$ 付近において鉛直下降流が生じている。また、洗掘孔斜面に沿った上流向きの流れが生じており、洗掘孔近傍に時計回りの循環流が生じている。また、洗掘孔斜面を駆け上がる流れによって底質が離脱・浮遊し、 $x_c = -0.1m$ においては水深の約1/2にまで浮遊砂が移流・拡散され、浮遊砂濃度が高くなっている。渦の規模は(a)と比較すると大きく、その結果、(a)より洗掘深が大きくなったことが考えられる。

図5は、橋脚の上流端の横断面における流速ベクトルと掃流・浮遊砂濃度の分布である。対象とする領域は水路中央から水路側壁側に0.3mの範囲である。また、(a)および(b)は、それぞれ C_s が時空間変化する結果および C_s が一定の結果である。

(a)をみると、 $y_c = 0.06m \sim 0.15m$ 付近において鉛直上昇流が生じている。 $y_c = 0.15m$ 付近では鉛直上昇流の影響により、浮遊砂が水深の約1/3程度にまで移流・拡散され、濃度が高くなっている。さらに、 $y_c = 0.18 \sim 0.28m$ 付近では側壁向きの流速が大きいため掃流砂濃度が高くなっている。

(b)をみると、 $y_c = 0.02m$ 付近においては鉛直下降流が生じており、底面に達すると洗掘孔斜面に沿う側壁向きの流れに遷移している。また、 $y_c = 0.06m$ 付近においては鉛直上昇流が生じている。掃流・浮遊砂濃度は、 $y_c = 0.2 \sim 0.25m$ にかけては高く、 $y_c = 0.06 \sim 0.2m$ 付近における鉛直上昇流によって浮遊砂が水深の約1/3程度にまで移流・拡散されており、浮遊砂濃度が高くなっている。なお、側壁に近づくにつれ、流速が減衰しせん断力が小さくなることから掃流・浮遊砂濃度は低くなる。

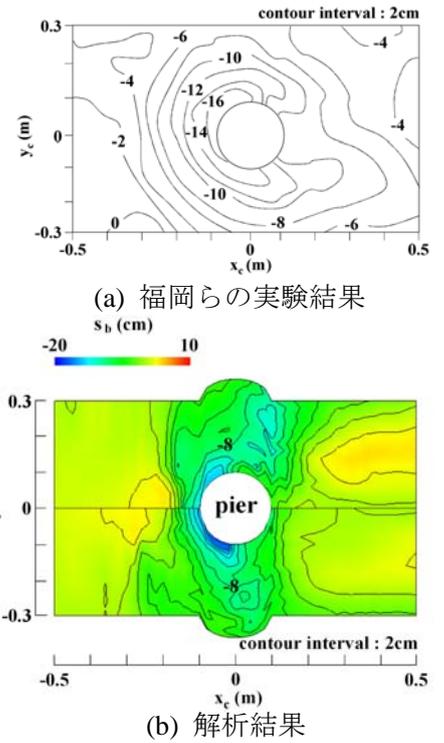


図3 橋脚周辺の地形変化

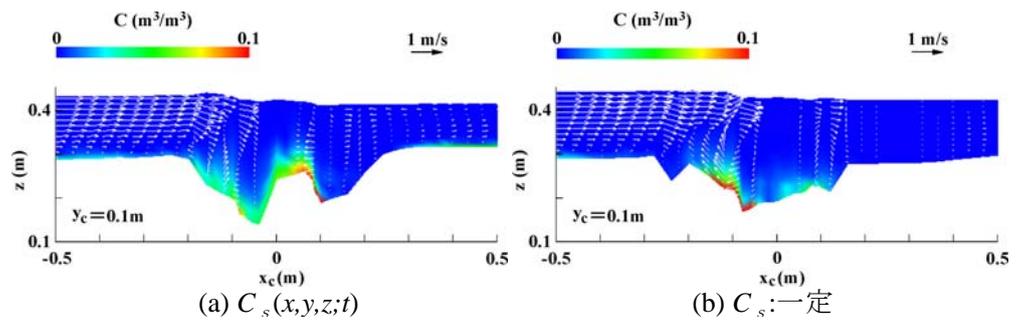


図4 掃流・浮遊砂濃度 ($y_c = 0.1m$)

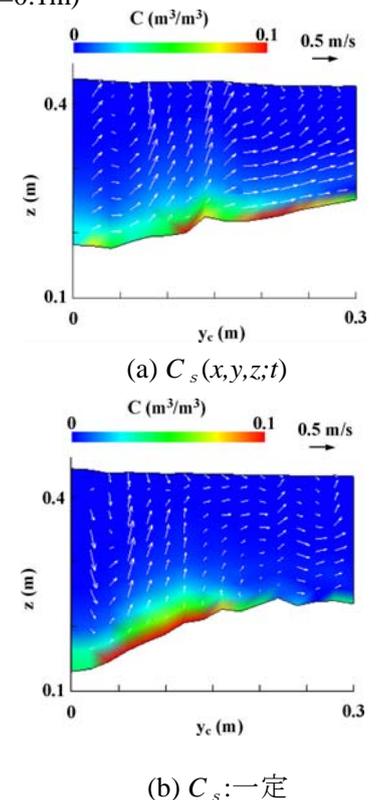


図5 掃流・浮遊砂濃度 ($x_c = -0.1m$)