

σ - β 座標系による橋脚周辺の流れと局所洗掘の数値解析

愛媛大学大学院	学生会員	○安藤嘉崇
国土交通省 四国地方整備局	正会員	西岡周平
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(2009)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行ってきた。計算の際には、解析領域において鉛直方向のみを座標変換した σ 座標系を用いる手法をとってきたが、このように直交格子を用いる場合、構造物の外縁境界においては隅角部が生じ、そこでの処理が問題となる。檜谷ら(2007)は、空間格子と物体形状を完全に独立した定義とし、物体で塞がれた計算格子壁面の開口率と体積率を全ての計算格子に割り振ることで、空間格子上に物体の形状を精度よく表現するFAVOR法を用いて橋脚周辺の流れに関する数値解析を行っている。しかしながら、体積率が小さい場合、解が発散するといった問題が生じることを明らかにしており、このような問題点があることから、地形変化の解析ではFAVOR法を用いていない。

そこで、本研究では、伊福ら(2009)が用いた数値モデルに対して、図1に示すような座標変換を行うことで、直交格子座標を用いて解析する際に生ずる隅角部の処理を必要としない σ - β 座標系を用いた新たな数値モデルを提案するとともに、これを用いて実験スケールおよび実河川スケールにおける橋脚周辺の流れと地形変化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

実験スケールでの解析：実験水路は、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。なお、水路横断方向における解析領域は、水路中央から左岸にかけての範囲である。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。

実河川スケールでの解析：解析対象とする河川および橋脚は、それぞれ肱川の支川である大和川およびそこに計画された内子橋の橋脚である。橋脚の形状は長さ 4.5m、幅 1.2m の小判型である。解析水路は水深 4m、河川幅 40m の矩形断面とし、縦断方向距離は 40m、橋脚は中央部に配置した。なお、水路横断方向における解析領域は、水路中央から左岸にかけての範囲である。また、流量は計画流量の 100m³/s、河床を構成する砂の粒径および密度は、それぞれ 1mm および 2,650kg/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

実験スケールでの解析：縦断方向格子間隔は円柱橋脚周辺を 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。

実河川スケールでの解析：縦断方向格子間隔は橋脚周辺を 10cm、それ以外を 20cm とし、横断方向は水路中央から左岸にかけての範囲を 110 等分、鉛直方向は水深を 20 等分した。また、Manning の粗度係数は 0.03m^{-1/3}・s、時間間隔は 0.01s とした。

なお、Smagorinsky 定数は 0.1、計算時間は 1,800s である。

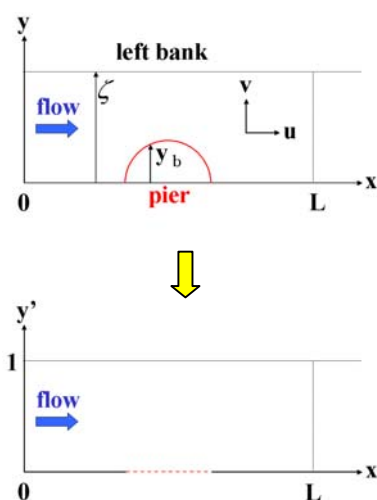
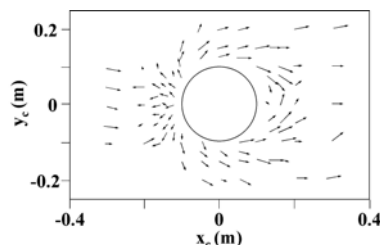
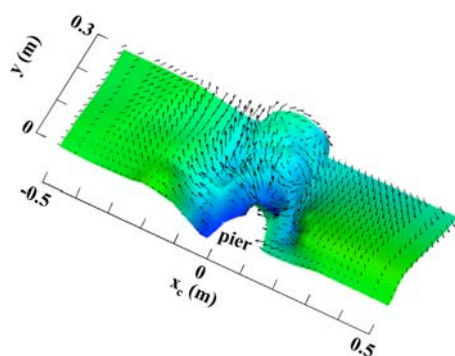


図1 座標変換 (横断方向)
(上:物理座標, 下:計算座標)



(a) 実験結果 (福岡ら)



(b) 解析結果

図2 円柱周辺の流速ベクトル
(底面上1cmの高さ)

3. 数値解析結果

(1) 実験スケールでの解析

初めに、本数値シミュレータの有用性を検証するために、福岡ら(1997)の実験に基づいた解析を行った。

図 2 および図 3 は、それぞれ円柱周辺の底面から 1cm の高さにおける流速ベクトルの空間分布および地形変化を示す。(a)および(b)は、それぞれ福岡らの実験ケース 2 の結果および本解析結果である。また、図 3(c)は、 σ 座標系を用いた場合の解析結果である。なお、実験ケース 2 での最大洗掘深は約 18cm であるので、ほぼその深さに到達する時間における結果である。

図 2(b)をみると、円柱前面において洗掘孔斜面に沿った上流向きの流れが生じている。また、円柱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、後面において洗掘孔斜面に沿った水路中央へ向かう流れが生じている。この結果は(a)と似た傾向を示す。

図 3(b)をみると、最大洗掘深は円柱前面より水路側壁側で生じ、(c)に示すように、 σ 座標系の場合では実験結果との整合性が十分とは言えなかった同心円状の洗掘孔の分布が、 σ - β 座標系ではうまく再現できた。

以上のことから、本数値シミュレータによって不透過構造物周辺の流れおよび地形変化を再現できると考える。

(2) 実河川スケールでの解析

(2-1) 橋脚周辺の流速ベクトル(u-v)の空間分布

図 4 は、橋脚周辺における流速ベクトル(u-v)の空間分布を示すものである。対象とする領域は、水路縦断方向に $x=15\sim 25\text{m}$ および橋脚中心から横断方向に 4m の範囲であり、 $y_c=0\text{m}$ は河道中央である。また、中央より下半分および上半分を、それぞれ σ 座標系による結果および σ - β 座標系による結果としている。なお、(a)および(b)は、それぞれ底面上 0.2m および 2m の高さにおける結果である。

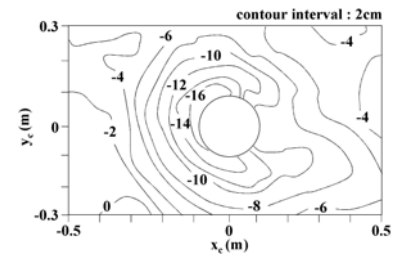
(a)をみると、 σ 座標系の場合、橋脚前面から側面にかけて放射状の流れが生じているのに対し、 σ - β 座標系の場合、時計回りの渦が生じている。また、橋脚側面においては σ - β 座標系の場合が剥離域は広い。

(b)をみると、 σ - β 座標系の場合、橋脚側面において横断方向への流れが生じ、橋脚側面および後面における剥離域が σ 座標系の場合に比べて広い。

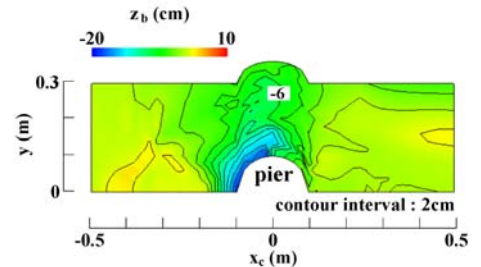
(2-2) 橋脚周辺の地形変化

図 5 は、橋脚周辺における地形変化を示すものであり、底面の変動高さを最大洗掘深の絶対値で除した無次元量 $z_b/|s_{\min}|$ を用いて評価している。また、これは計算開始から 30 分後の結果である。対象とする領域は、水路縦断方向に $x=15\sim 25\text{m}$ および橋脚中心から横断方向に 2m の範囲であり、 $y_c=0\text{m}$ は河道中央である。なお、中央より下半分および上半分を、それぞれ σ 座標系による結果および σ - β 座標系による結果としている。

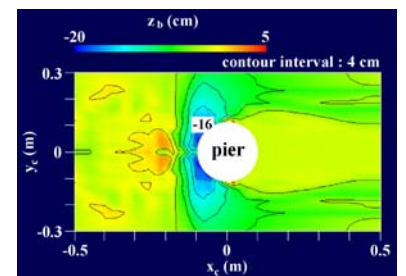
図 5 をみると、 σ 座標系の場合、橋脚前面から側面にかけて同心円状の洗掘孔が生じており、最大洗掘深は $x=18\text{m}$, $y_c=-0.5\text{m}$ の位置で生じ、その規模は約 0.8m である。一方、 σ - β 座標系の場合、橋脚前面から側面にかけて舌状の洗掘孔が生じており、最大洗掘深は $x=17.9\text{m}$, $y_c=0.4\text{m}$ の位置で生じ、その規模は約 0.5m である。すなわち、 σ - β 座標系の場合に比べて、 σ 座標系の場合が局所洗掘の進行が早い。



(a) 実験結果 (福岡ら)

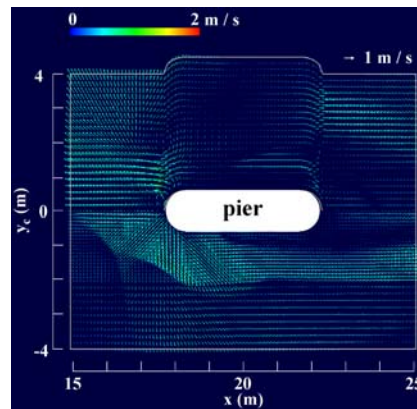


(b) 解析結果

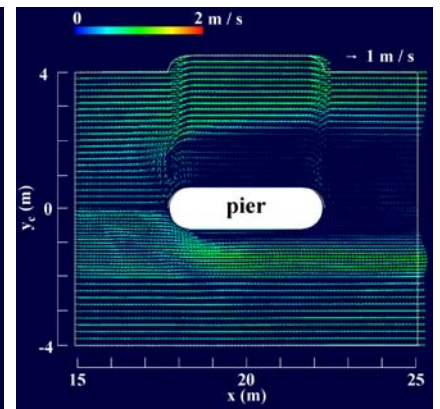


(c) σ 座標系による
解析結果

図 3 円柱周辺の地形変化



(a) 底面上 0.2m



(b) 底面上 2m

図 4 橋脚周辺の流速ベクトル(u-v)の空間分布

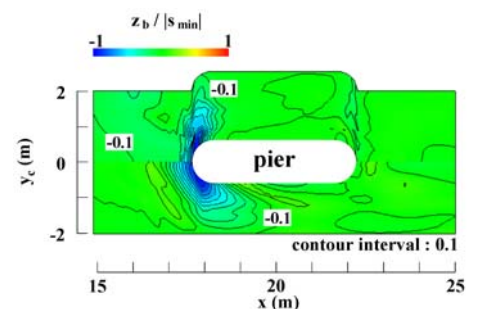


図 5 橋脚周辺の地形変化