

## 水深積分モデルを用いた構造物を越流する急変流場の解析法

中央大学研究開発機構  
中央大学研究開発機構

正会員 ○内田 龍彦  
フェロー 福岡 捷二

### 1. 目的

構造物を越流する流れは急変流となり、鉛直方向に加速度を持つため、流れの解析には鉛直方向の圧力分布を考慮する必要がある。また、越流構造物下流では、下流水深によって跳水や潜り噴流等の跳水形態が変化し、複雑な鉛直構造を有する。しかし、構造物を越流する流れの解析に用いられている鉛直二次元解析法を三次元解析法に拡張し、洪水流や氾濫流の時空間的に大きなスケールの現象を取り扱うことは極めて困難である。一方、広域の流れの場を対象とした既往の水深積分モデルの多くは静水圧分布等の浅い流れの仮定が用いられており、構造物近傍の局所的な流れの解析には適切でない場合がある。最近著者ら<sup>1)</sup>によって、広域の流れ場の解析に適用できる水深積分モデルに基づいて、橋脚周辺の圧力の非静水圧成分と鉛直方向流速の場所的変化を解析するため、渦度方程式を用いた一般底面流速解析法が提案された。本研究ではこれを応用し、水深積分モデルを用いた構造物を越流する急変流場の解析法を開発することを目的としている。

### 2. 解析方法

一般底面流速解析法<sup>1)</sup>では、静水圧分布等の浅い流れの仮定を用いない水深積分モデルであり、河床の抵抗評価や河床変動解析に必要な底面圧力と底面流速を、圧力や流速鉛直分布を解かず反直接的に求めることに特徴がある。未知量は、 $h$  (水深)、 $U_i$  (水深平均流速)、 $k$  (水深平均乱れエネルギー)、 $\Omega_i$  (水深平均渦度)、 $u_{si}$  (水表面流速)、 $W$  (水深平均鉛直方向流速) 及び  $dp_b$  (底面圧力偏差) であり、それぞれ図-1に示す基礎方程式により解かれる。底面流速  $u_{bi}$  は、渦度を水深積分した式(1)を用いて評価する。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \frac{\partial W h}{\partial x_i} + w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \quad (1)$$

ここに、 $z_s$ : 水位、 $z_b$ : 河床高、 $w_s$ 、 $w_b$ : 水面、底面の鉛直方向流速である。流速鉛直分布は、 $u_{si}$ 、 $u_{bi}$  及び  $U_i$  を用いた三次多項式により近似している。浅水流の仮定を用いた底面流速解析法<sup>2)</sup>では、式(1)の右辺第3~5項を省略し、運動方程式(水面と水深平均)においては静水圧分布を仮定している。図-2に示すように浅い流れの仮定を用いない一般底面流速解析法の基礎方程式には、浅水流場の底面流速解析法の基礎方程式<sup>2)</sup>に加えて、鉛直方向流速と圧力分布に関する基礎方程式が付加される<sup>1)</sup>。鉛直方向流速の時間変化量のポアソン方程式は  $n+1$  ステップの流速場が式(1)と(三次元)連続式を満たすとして導かれている。底面の静水圧分布からの偏差圧力は、鉛直方向の運動方程式を水深積分し、非定常項と水平応力項を省略した式より解かれる。詳細は文献1)を参照されたい。

図-2に示すように水面に剥離を伴う跳水では、底面近傍に大きな運動量が供給され、洗掘による構造物の危険性を著しく増大させる。ここでは、危険性の高い水面に剥離を伴う跳水の解析方法を検討する。本解析法では水面剥離の発生条件として、水面の剥離限界角度( $\theta_c=1/5$ )を設定する。剥離点下流の水表面流速の移流項の計算では、剥離点の流速をゼロとしている。水深積分渦度の計算では、剥離点において剥離渦の供給を考慮する。剥離渦の供給量は、水面下の厚さのない層から供給されるとして、底面剥離の場合<sup>2)</sup>と同様に求める。また、跳水直下の定在波が不自然に発達することを防ぐために、剥離点直下では圧力を強制的に  $p > 0$  としている。

### 3. 解析結果と考察

本解析法を堤防越流実験<sup>3)</sup>に適用し、急変流場の水面形と圧力分布に対する本解析法の妥当性を検証する。本研究では、図-3に示す2割勾配の実験を対象とする。実験結果では堤防天端で射流となって

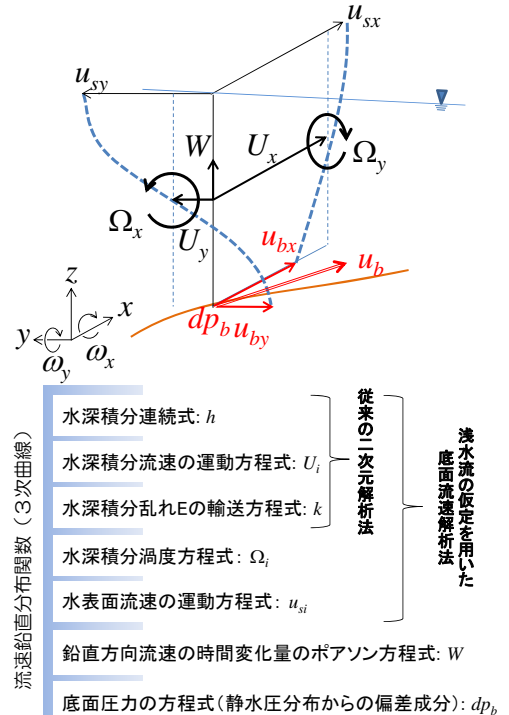


図-1 渦度を用いた底面流速解析法<sup>1)</sup>

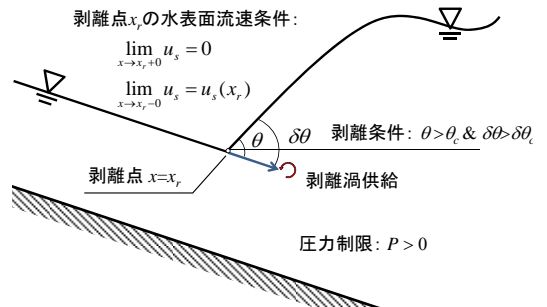


図-2 水面で剥離を伴う流れの解析法

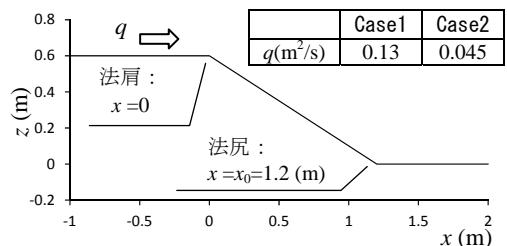


図-3 堤防を越流する流れの実験条件<sup>3)</sup>

キーワード 底面流速解析法, 急変流, マルチスケール解析, 非静水圧分布, 跳水

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31208 中央大学研究開発機構, TEL 03-3817-1617

いたため、上流端境界条件には単位幅流量と水深を与え、下流端水深が合うように底面抵抗係数を決定した。図-4、図-5 に堤防を越流する流れの水面形と底面圧力分布の実験結果と解析結果の比較を示す。堤防天端は射流であるが、法肩直下の圧力低下の影響が上流方向に伝播するため、法肩近傍では水位が低下している。一方、法尻近傍では、圧力が上昇し、水面が盛り上がっている。このような水面形の特徴は平面二次元解析では再現できない(図-4、2D 参照)。これに対し、圧力の非静水圧分布を解く本解析法は、実験結果との差異があるものの法肩近傍の天端の水位低下と法尻近傍の水位上昇を再現できている。このため、堤防を越流する流れの水面形や堤防に作用する外力を評価するためには圧力の非静水圧成分の影響を考慮することが望ましい。図-5 を見ると、底面圧力の解析結果は実験結果と比べて法肩直下の圧力低下量がやや小さい。これは、本解析法では法肩形状が平滑化されるためと考えられる。また、実験では法肩直下で剥離による逆流が生じたことが報告されているが、本解析では剥離による逆流は生じなかった。しかし、法肩近傍の全体的な圧力低下は再現できている。法尻付近の圧力分布を見ると、実験結果の不規則な圧力分布は再現できていないが、法尻部の圧力上昇は概ね再現できている。

盛土構造物の下流水深に起因する跳水を伴う流れに対する本解析法の妥当性を検証する。解析の境界条件は上流、下流に実験水位を与えている。図-6 は水面形と跳水内部の流れの実験結果<sup>4)</sup>と解析結果の時間平均値の比較である。跳水部の水面での剥離を伴う流れにより、越流した流れの運動量が底面付近に輸送されている。解析結果は図-4 と同様に盛土構造物を越流する水面形を再現できている。盛土構造物下流を比較すると、解析結果は実験結果に比べて混合層の厚さ、長さともに小さくなっている。しかし、跳水直下において水面付近で逆流が生じ、底面付近に高速流が生じる特徴を説明できている。図-7 は下流水深が高く不完全跳水(潜り噴流状態)が発生する条件において、水面形と跳水内部の流れの実験結果と解析結果の時間平均値を比較したものである。解析では跳水発生位置で水面が切り立ち、跳水直下の水位が実験に比べて高くなっている。また、跳水内部では混合層の大きさが実験結果に比べて小さく、逆流域は水面極近傍に限られている。潜り噴流では完全跳水の場合に比べて、現象のスケールに比べて水深が深くなることから、本解析法における流速や圧力の鉛直分布の解像度が十分でないと考えられる。しかし、斜面に速い流速が沿う潜り噴流の特徴を解析結果は説明できており、本解析法は下流水深による跳水内部の流れの鉛直構造を解析できると言える。

4. 結論

本解析法は従来の二次元解析法では解析できない盛土構造物を越流する急変流場の水面形と圧力分布を再現できることを示した。また、下流水深の変化に伴う越流構造物背後の跳水形態の変化を説明することができていることが分かった。

参考文献：1)内田・福岡(2012), 水工学論文集, 第56巻, I\_1225-I\_1230. 2)内田・福岡(2011), 土木学会論文集B1 Vol. 67, No. 1, pp. 16-29. 3) 土木研究所資料(1984), 第2074号. 4) Fritz and Hager (1998), Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, No. 9, pp. 963-971.

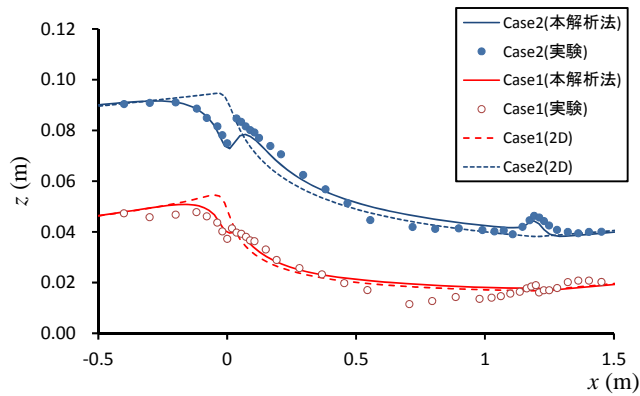


図-4 堤防を越流する流れの水面形の実験結果<sup>3)</sup>と解析結果の比較

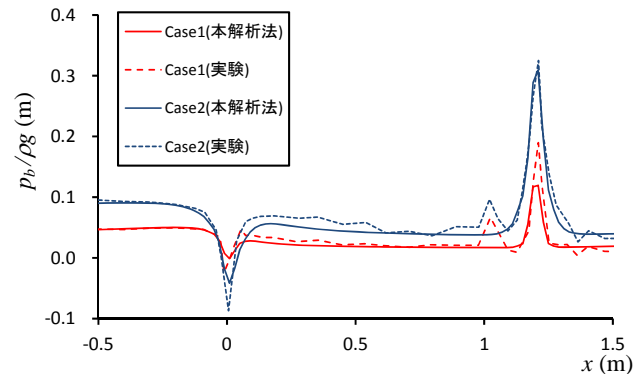


図-5 堤防を越流する流れの底面圧力分布の実験結果<sup>3)</sup>と解析結果の比較

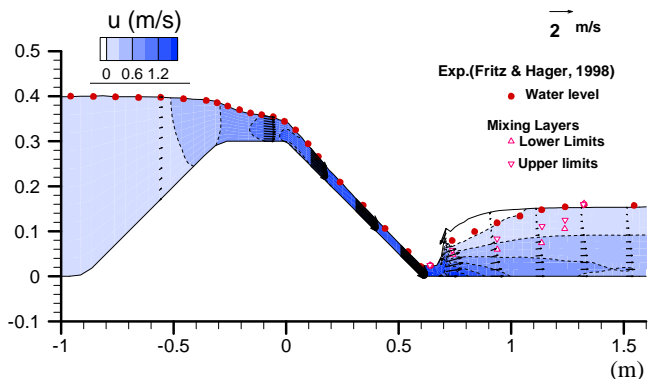


図-6 越流構造物下流の流れの比較 (完全跳水)

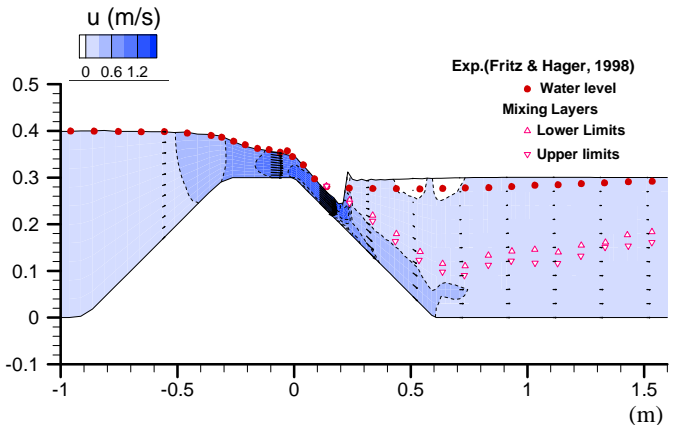


図-7 越流構造物下流の流れの比較 (不完全跳水, 潜り噴流)