

構造物を越流する流れの解析法の開発

A COMPUTATION METHOD FOR FLOW OVER STRUCTURES

内田 龍彦¹・福岡 捷二²
Tatsuhiko UCHIDA and Shoji FUKUOKA

³正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁴フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授 (同上)

It is important for designs of river structures to understand not only local scale phenomena around structures but also large scale phenomena such as unsteadiness of a flood flow and behaviors of sandbars. Although a numerical model has been applied to various practical problems with the recent progress of computational technique, most of applications of a 3D model have been confined to local scale phenomena in a narrow area. To calculate 3D local flow around a structure integrally with 2D large scale phenomena in a wide area, this paper proposes a practical computation method for flows over structures based on the general bottom velocity computation method of a depth integrated model. It is demonstrated that the method is able to calculate a water surface profile and a pressure distribution for a rapidly varied flow over a structure and vertical structures of a flow in a hydraulic jump. And erosion processes of an embankment are explained by the method coupled with non-equilibrium sediment transport model.

Key Words: bottom velocity computation method, rapidly varied flow, multiscale analysis, non-hydrostatic pressure distribution, non-equilibrium sediment transport model

1. 序論

堰・床止め等の河川構造物設計や越流に対する堤防の強度評価や対策法の検討等において、構造物を越流する流れの解析法は重要であり、古くから様々の研究が行われてきた¹⁾。一般に、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ことが知られている²⁾。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が形成されるため、河床変動解析等においてはこれらを表現する必要がある³⁾。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(例えば、³⁾)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。

図-1は洪水流、氾濫流に関する流れと河床変動の様々な現象の時空間スケールを示している。河川技術分野で明らかにすべき現象のスケールは、河川構造物周辺の局所流等の狭域の水深スケール以下の流れから、広域の流域スケールの流れまで様々であるため、目的とする流れのスケールに応じた解析法が必要である。図-1には、著者らが運動方程式に基づいて提案した平面二次元、三次元解析法及び準三次元解析法の適用範囲⁴⁾を合わせて示

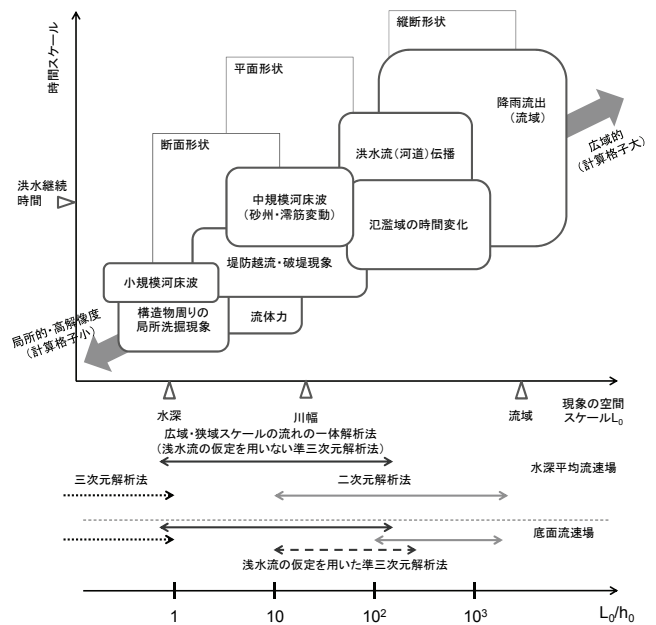


図-1 洪水流、氾濫流に関する流れと河床変動現象の時空間スケールと適切な解析法

す。準三次元解析法は静水圧分布等の浅い流れの仮定を用いる場合と浅い流れの仮定を用いない場合で分けている。解析法の適用範囲は対象とする現象スケール L_0 と水深スケール h_0 の比 h_0/L_0 によって表されるため、図-1の各種現象スケールと解析法の適用範囲は著者らが考える目安であり、厳密には条件によって異なることには注意し

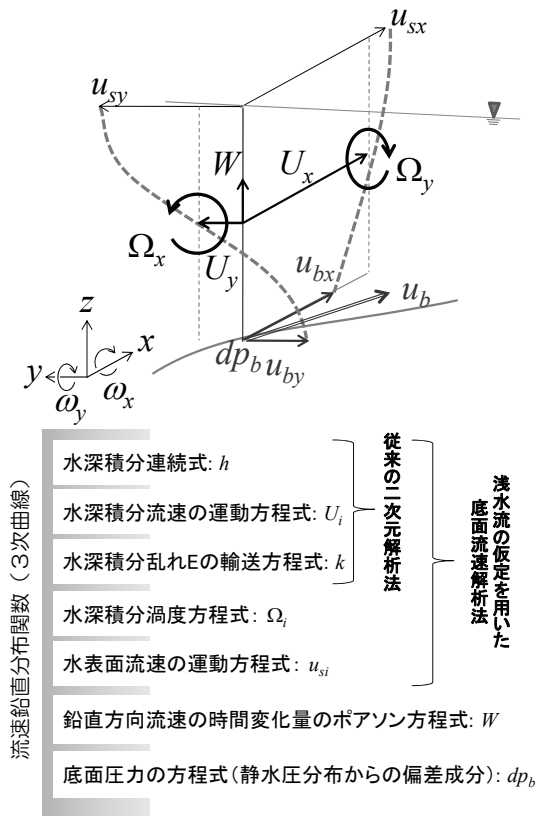


図-2 底面流速解析法の枠組み

なければならない。平面二次元解析法の水深平均流場に対する適用範囲は $10^3 < h_0/L_0 < 0.1$ と広く、河道平面形状、河道断面形状及び洪水流量ハイドログラフ等によって生じる洪水流や氾濫流の重要な現象の多くを解析するのに適切であることが分かる。このため、洪水流や氾濫流解析には、平面二次元解析法が広く用いられている。これまでに様々な浅水流方程式の高精度解析法^{例えば、5)}が提案され、常・射流、ドライ・ウェット混在場のような厳しい流れの解析も可能となってきた。一方、河床変動解析に重要な底面流速場に対しては、平面二次元解析法の適用範囲が $10^3 < h_0/L_0 < 10^2$ とやや狭いことから、洪水時の河床変動解析のために種々の準三次元解析法⁶⁻⁸⁾が検討されている。平面二次元解析法と浅い流れの仮定を用いた準三次元解析法を合わせた底面流速場への適用範囲は $10^3 < h_0/L_0 < 0.1$ となり、縦断的な河床変動、砂州の挙動や洪水による河道湾曲、蛇行部の横断面形状の変化等に対して適切な解析法と考えられる⁶⁻⁸⁾。しかし、水深スケールの10倍以下の流れでは、静水圧分布等の浅い流れの仮定が成立しない⁴⁾ため、構造物近傍の局所的な流れの解析には従来の二次元解析法や浅い流れの仮定を用いた準三次元解析法は適切でない。例えば、破堤点を含む流れの解析はしばしば平面二次元解析で取り扱われるが、破堤部に向かって水平方向の流れが曲げられることにより流速鉛直分布が著しく変形する。これに加え、堤防越流時の鉛直方向の流れの曲率により、法肩直下で圧力低下、法尻で圧力上昇が生じることから、破堤点近傍の流

れや破堤現象の検討には流れの鉛直構造を考慮した解析が望ましい。

以上のことから、図-1に示す広域の平面二次元的な流れ場と構造物周辺の局所三次元流れ場を一体的に考慮できる解析法が求められている。最近著者ら⁴⁾は、広域の流れ場の解析に適用できる水深積分モデルを用いて、構造物周辺の圧力の非静水圧成分と鉛直方向流速の場所的变化を解析できる渦度方程式を用いた底面流速の解析法を提案した。本研究ではこれを応用し、河川構造物を越流する流れの鉛直構造を評価できる実用的な解析法を開発することを目的としている。

2. 水深積分モデルによる構造物を越流する流れの解析方法

(1) 渦度方程式を用いた底面流速解析法の概要

一般底面流速解析法⁴⁾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)、 Ω_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-2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} 及び水深平均流速 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⁶⁾では、式(1)の右辺第3~5項を省略し、静水圧分布を仮定している。浅い流れの仮定を用いた底面流速解析法についての詳細は文献⁶⁾を参照されたい。

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⁶⁾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⁴⁾。鉛直方向流速の時間変化量は式(2)で表される。

$$k_1 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(h^2 \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + \phi^P - \phi = 0 \quad (2)$$

ここに、 $k_1=1/20$ 、 $\phi=(Wh)^{n+1}-(Wh)^n$ 、 $\phi^P=(Wh)^P-(Wh)^n$ 、 $(Wh)^P$: Wh の予測値である。式(2)の詳細、および数値解析法は文献⁴⁾を参照されたい。

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

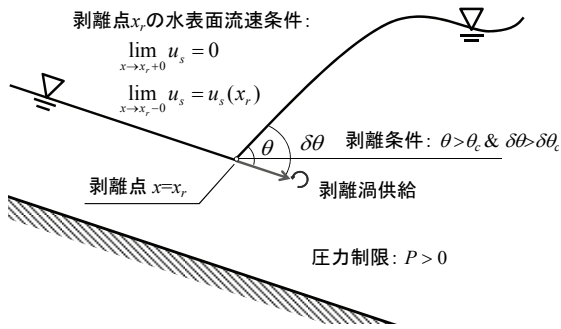


図-3 水面で剥離を伴う流れの解析法

式(3)により解かれる。

$$\frac{dp_b}{\rho} - \tau_{bj} \frac{\partial z_b}{\partial x_j} = \frac{\partial h W U_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

ここに、 τ_{bj} ：底面せん断応力である。本研究では静水圧分布を斜面勾配によらずに常に垂直方向に取っている。このため、斜面垂直方向に静水圧分布となる急斜面等流状態の底面圧力($p_b = \rho g h \cos^2 \theta$)は底面せん断応力の鉛直方向成分(式(3)の右辺第二項)により底面の偏差圧力が低下する($dp_b = -\rho g h \sin^2 \theta$)ことで表現される。

(2) 水面に剥離を伴う噴流の解析方法

構造物を越流した流れは射流となり、下流で跳水を生じる。跳水による激しい流体混合は下流の洗掘や構造物の安全性を低下させる。特に、図-3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³⁾。跳水による流体混合は、浅水流方程式に基づく平面二次元解析では距離ゼロで生じるとされ、原理的に取り扱えない問題である。このような問題に対して、これまでは、自由水面の評価方法に工夫を加えた流速と圧力の鉛直分布を直接解く鉛直二次元解析法^{例えば、3)}(もしくは三次元解析法)が用いられてきた。ここでは、実用性の高い水深積分モデルによって、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($\theta_c = 1/5$)を設定している。水表面流速は剥離点で不連続の条件を課している。即ち、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。この方法は、VOF関数などを用いて自由水面を評価する一般的な解析方法において陰的に含まれるものである。本解析法では、さらに水深積分モデルに水面の剥離の影響を考慮するために、剥離点において剥離渦の供給を考慮する必要がある。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すれば、y方向渦度の供給量は式(4)で表される。

$$P_{s,oy} \Delta y = \begin{cases} -|u_{sx}/2| \cdot u_{sx} & (\alpha_x > \tan \theta_c) \\ 0 & (\alpha_x < \tan \theta_c) \end{cases} \quad (4)$$

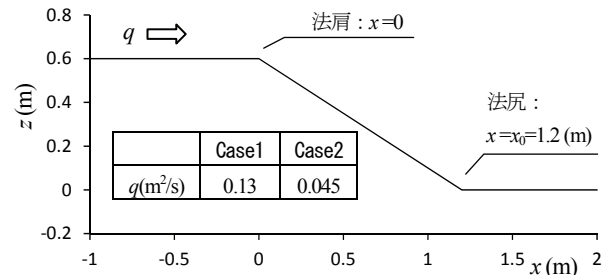


図-4 堤防を越流する流れの実験条件¹⁰⁾

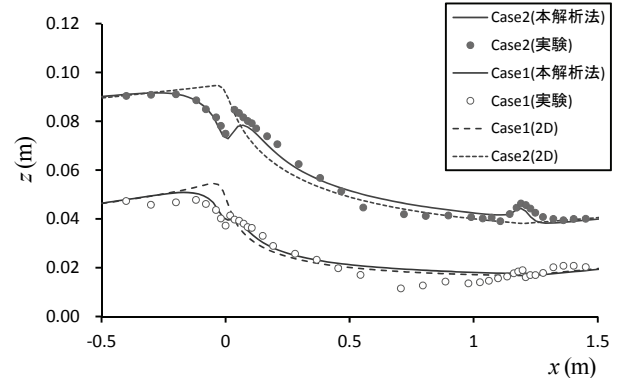


図-5 堤防を越流する流れの水深の縦断分布の実験結果¹⁰⁾と解析結果の比較

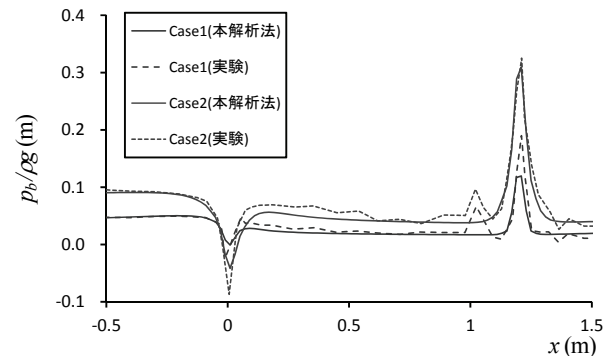


図-6 堤防を越流する流れの底面圧力分布の実験結果¹⁰⁾と解析結果の比較

$P_{s,oy}$ ：水面剥離による単位面積・単位時間当たりのy方向渦度の供給量、 α_x ：x方向の水面勾配の変化量である。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、大気圧下の波動現象では流体内部で負圧が生じないという考え⁹⁾を踏まえ、剥離点直下では圧力を強制的に $p > 0$ としている。

3. 構造物を越流する流れの解析と考察

(1) 堤防を越流する流れの水面形と圧力分布

本解析法を堤防越流実験¹⁰⁾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-4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

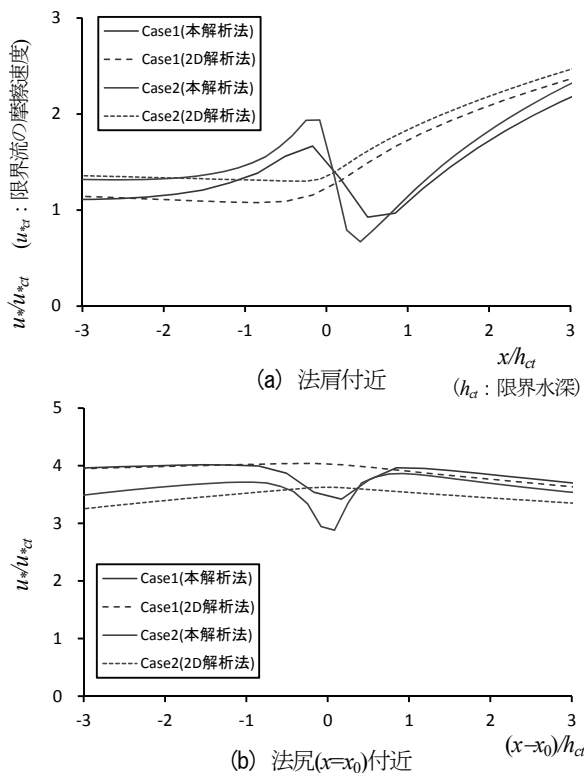


図-7 堤防に作用する摩擦速度の解析結果の比較

ように底面抵抗係数を決定した。図-5、図-6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。比較のため、図-5には平面二次元解析結果を示している(本条件では横断方向に変化がないため、2D解析は浅水流方程式を用いた一次元解析を意味する)。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²⁾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。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。図-7は堤防に作用する摩擦速度を本解析法と平面二次元解析法で比較したものである。平面二次元解析法と本解析法の差は主に法肩と法尻近傍に顕著に表れる。特に、法肩直上流では、法肩直下の圧力低下によって、水位低下に加えて底面付近の流速が加速する(図-9、11参照)ため、これらを考慮できない平面二次元解析結果は本解析結果と比べかなり摩擦速度が小さくなっている。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適切に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必要であることが分かる。図-6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¹⁰⁾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

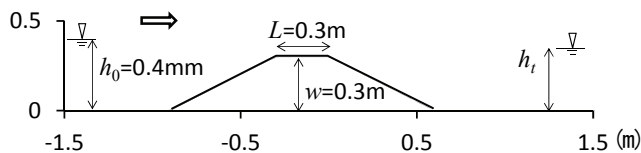


図-8 盛土構造物を越流する流れの実験条件¹¹⁾

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。以上のように、実用性の高い水深積分モデルを用いた本解析法は、堤防を越流する急変流場の水面形と底面圧力分布を説明できることが明らかとなった。

(2) 下流水深による越流構造物下流の流れ

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。図-8に実験条件¹¹⁾を示す。Case3は完全跳水、Case4は潜り噴流状態である。解析の境界条件には、上下流端に実験水位を与えた。

図-9に完全跳水時の解析結果を示す。解析開始後しばらくして跳水発生位置は法尻直下で安定するが、跳水下流の水面形は安定しなかった。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。図-10は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の比較である。ここでは、水位と混合層の範囲の実験結果¹¹⁾を示しているが、跳水内部では底面付近に流れが集中する流速鉛直分布が計測されている。解析結果を見ると、図-5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-11に下流水深が高く不完全跳水時(潜り噴流状態)の解析結果を示す。解析では跳水発生位置が低下する際には水面形が滑らかとなり、上昇するときは跳水で水位が切り立つようである。その後、やや切り立った水面形で跳水は安定した。図-12は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の比較である。跳水内部の解析結果は混合層の大きさが実験結果に比べて小さく、跳水後の水位が高くなっており、完全跳水の場合と比較して再現性がやや低下している。これは、潜り噴流では水深が深く、相対的に現象スケールが小さくなるためと考えられる。しかし、解析結果は底面に沿う流れが発生する潜り噴流の流れの特徴¹¹⁾を説明できていると言える。

4. 越流堤防侵食現象の解析と考察

開発した流れの解析法を応用し、越流堤防侵食現象の実用的な解析法を検討する。計算条件は、奥田ら¹²⁾に

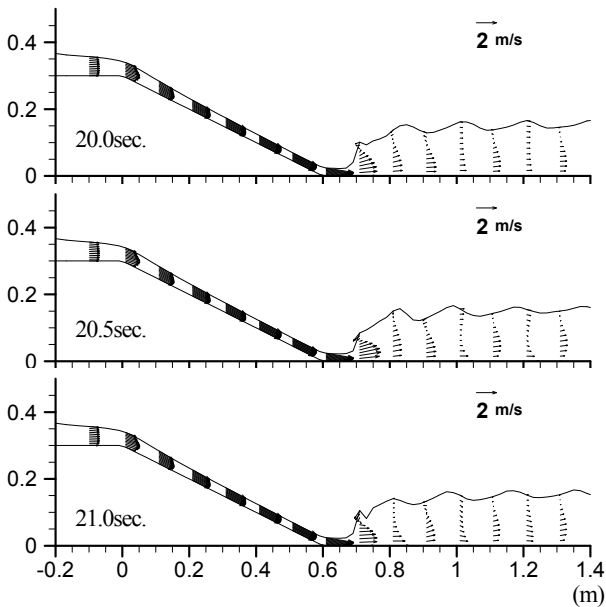


図-9 完全跳水の解析結果

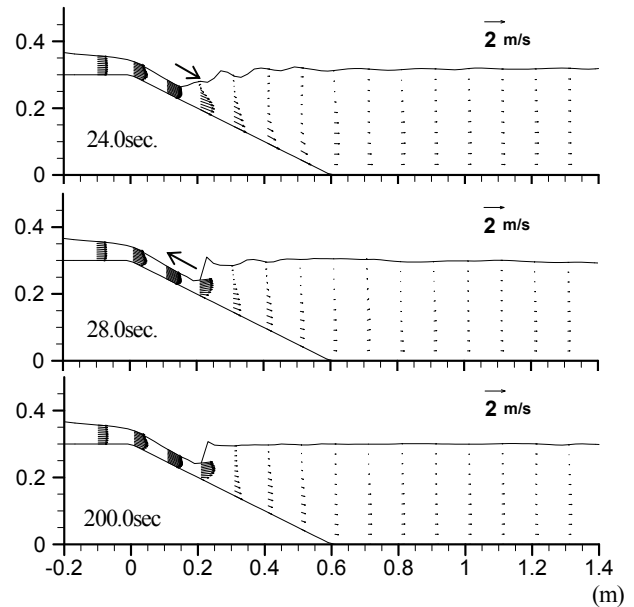


図-11 不完全跳水(潜り噴流)の解析結果

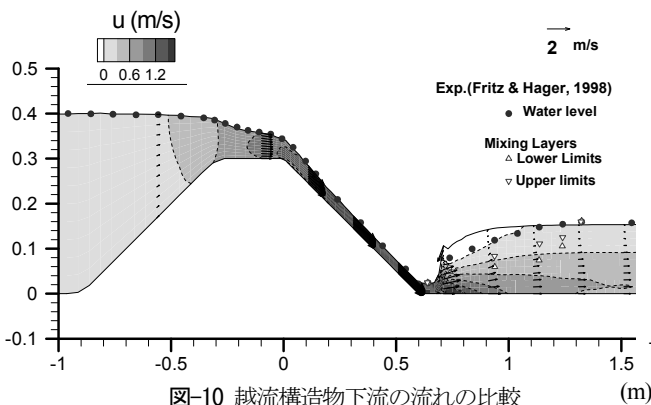


図-10 越流構造物下流の流れの比較
(完全跳水)

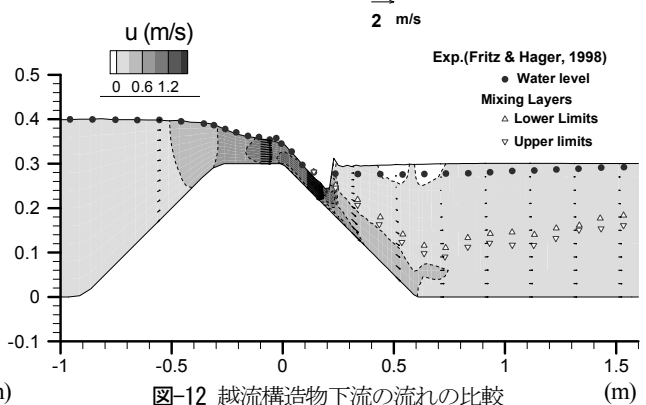


図-12 越流構造物下流の流れの比較
(不完全跳水, 潜り噴流)

よって行われた実験条件(堤防高1.0m, 天端幅0.7m, 表裏法面2割勾配, 越流水深0.3m, 平均粒径1mm)としている。解析の初期条件は, 河道側の水位を天端高, 堤内地をドライ状態とし, 河道側の水位を $t=10$ 秒で0.3m上昇させている。下流端(堤内地側の端)は段落ち条件としている。堤防を越流する高速流による激しい土砂輸送を解析するため, 土砂輸送解析には流砂の運動方程式に基づく非平衡流砂量式⁶⁾を用いる。ただし, 堤体や基礎地盤は締め固められており, 粘着性のない移動性の砂と力学特性が異なる。ここでは, 開発した流れの解析法の適用性を検討することを主目的とし, 浸食(土砂の離脱)計算に用いる限界掃流力 τ_{*c} と摩擦角 ϕ を大きくすることによって, 締め固められた影響を簡易的に表現する。侵食量(離脱量)の算定に用いた式形を移動性の砂の場合⁶⁾と同じとする妥当性はなく, 適切な侵食量算定式にはさらなる検討が必要である。堤体の限界掃流力は実験¹²⁾の初期侵食箇所を参考に $\tau_{*c}=5$ ($u_{*c}=0.27\text{m/s}$)とした。摩擦角 ϕ は重力による付加掃流力や斜面崩壊に用いる。本解析法では有限な解析メッシュ($\Delta x=0.05\text{m}$)では垂直な斜面を取り扱うことはできないことから, $\tan\phi=3$ としている。堤体か

ら離脱した土砂の挙動や堆積した砂の再離脱については, 従来の土砂解析⁶⁾と同様に解析している。基礎地盤は一般に堤体よりも締め固め度が大いだがここでは堤体と同一の条件とした。

図-13に堤防侵食過程の解析結果, 図-14に3, 5分後の水面形と圧力分布の解析結果を示す。初期段階において, 法尻を中心に円弧上に侵食が生じている。その後時間とともに法尻の侵食深が発達するが, 洗掘がある程度以上となると跳水が形成され(図-14), その後埋め戻されている。裏法面の侵食過程を見ると, 侵食が進行すると, 切り立った斜面が形成されている。既往の実験結果^{10,12)}では, この斜面勾配はほぼ垂直となることが報告されている。本解析では, 先に述べたように流れの解析法と解析格子の大きさにより斜面勾配の大きさが制限されているが, 既往の堤防裏法面侵食過程^{10,12)}を説明できていると考えられる。図-14は法面侵食部の水面形と圧力(静水圧からの偏差)の解析結果である。侵食によって勾配が急変する部分で圧力が低下し, その直下が水叩き部となり圧力が上昇している。堤体に作用する圧力偏差水頭は数10cmと水深に比べて大きく, 非静水圧分布成分が堤体

に作用する流体力や堤体内の浸透流に与える影響は比較的大きいと考えられる。勾配変化点付近では底面近傍の流速は加速し、侵食力は大きくなるとともに、勾配変化点付近の土塊には大きな流体力が作用する。堤防の越流破堤現象には、法面侵食のほかに天端にクラックが生じて、土塊が崩落する現象¹⁰⁾が報告されている。土塊の崩落法面侵食が法肩まで進行すると(図-14, 5分後), 流れの曲率がさらに大きくなり、流体力が大きくなるため土塊の崩落現象が生じやすくなると考えられる。

5. 結論

本研究では、水深積分モデルに基づく渦度方程式を用いた底面流速の解析法を応用し、構造物を越流する流れの実用的な解析法を構築し、検証した。主要な結論を以下に示す。

- 1) 盛土構造物を越流する急変流場において、本解析法は従来の二次元解析法では解析できない法肩近傍の天端の水深の現象、法尻付近の水深の増加、およびこれらを生じさせる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ることが分かった。
- 2) 開発した流れの解析法と土砂輸送解析には流砂の運動方程式に基づく非平衡流砂量式を応用した堤防侵食解析法は既往の実験で得られた堤防裏法面の侵食過程を説明できることを示した。

本研究では解析法の越流構造物周辺の局所流場に対する妥当性の検証に留まっているが、解析法は水深積分モデルに基づくため、図-1に示したような砂州の挙動等のより大きなスケールの流れ場に適用可能である。また、本解析法と平面二次元解析法のハイブリッド化は容易であり、これにより流域スケールの流れと構造物周辺の局所スケールの流れの一体解析が可能となる。例えば、波源の断層モデルを含む広域の流れから堤防などの構造物近傍の流れを扱う必要がある津波の河川遡上及び津波氾濫流に関する検討は、このようなマルチスケールの解析が必要な典型的な例であり、今後の検討対象課題である。

参考文献

- 1) 水理公式集[平成11年版], 土木学会編, 丸善, 2001.
- 2) 福岡捷二, 福嶋祐介: 円頂げき上の開水路急変流の力学, 土木学会論文報告集, 第329号, pp.81-91, 1983.
- 3) 内田龍彦, 福岡捷二, 渡邊明英: 床止め工下流部の局所洗掘の数値解析モデルの開発, 土木学会論文集, No.768/II-68, pp.45-54, 2004.
- 4) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデ

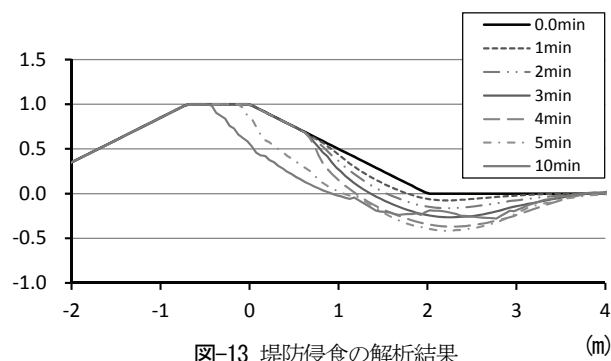


図-13 堤防侵食の解析結果

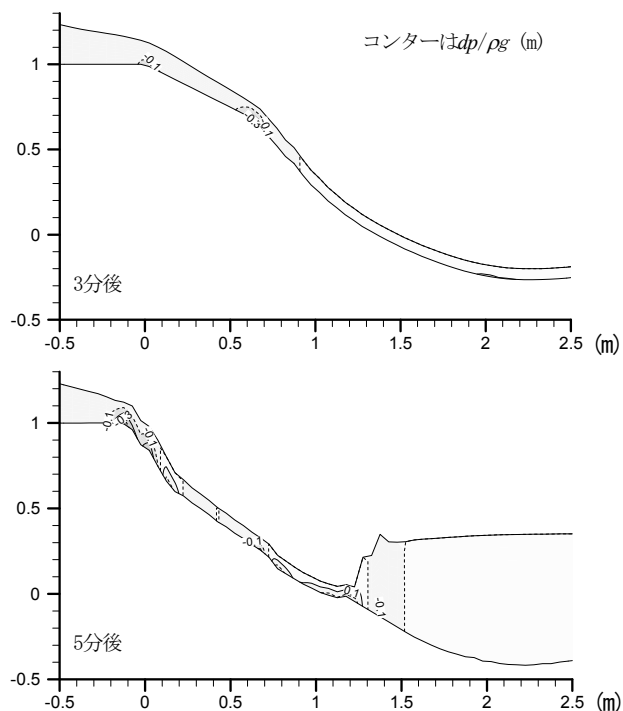


図-14 堤防侵食解析における水面形と圧力分布

ルによる底面流速の解析法, 水工学論文集, 第56巻, I_1225-I_1230, 2012.

- 5) 内田龍彦, 河原能久: 地形変化を有する二次元浅水流の保存型CIP陽解法, 応用力学論文集, Vol.9, pp.917-924, 2006.
- 6) 内田龍彦, 福岡捷二: 底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析, 土木学会論文集B1 Vol. 67, No. 1, pp.16-29, 2011.
- 7) 忠津哲也, 下條康之, 内田龍彦, 福岡捷二: 洪水流による砂州の移動・変形機構と粒度構成の変化, 河川技術論文集, 第16巻, pp.119-124, 2010.
- 8) 岡村誠司, 岡部和憲, 福岡捷二: 洪水流の縦断水面形変化と準三次元流解法を用いた石狩川河口部の河床変動解析, 河川技術論文集, 第16巻, pp.125-130, 2010.
- 9) 灘岡和夫, 大野修史, 栗原礼: 波動場の力学状態に基づく砕波過程の解析と砕波条件, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.81-85, 1996.
- 10) 越水堤防調査最終報告書—解説編一, 土木研究所資料, 第2074号, 建設省土木研究所, 1984.
- 11) Fritz, H.M. and Hager, W.H.: Hydraulics of embankment weirs, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.124, No.9, pp.963-971, 1998.
- 12) 與田敏昭, 中川一, 関口秀雄, 岡二三生, 後藤仁志, 小俣篤: 越水に対する堤防強化に関する小型堤防による越流侵食実験, 河川技術論文集, 第16巻, pp.347-352, 2010.

(2012. 4. 5受付)