

河川砂防技術研究開発【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属	役職	
	大塚 悟 (おおつか さとる)	長岡技術科学大学	教授	
②技術研究開発テーマ	名称	落差工周辺の河床構造物の安定性評価のための水・地盤連成解析手法の高度化		
③研究経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。	平成 29年度	平成 30年度	平成 31年度	総合計
	1,892 万円	433 万円	528 万円	2,854 万円
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名	所属機関・役職 (※平成31年3月31日現在)			
細山田 得三	長岡技術科学大学・教授			
楊 宏選	長岡技術科学大学・助教			
中村 文則	長岡技術科学大学・助教			
福元 豊	長岡技術科学大学・助教			
小柳 徹	(株) キタック			
⑤研究の目的・目標	(様式河水-1、河水-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>落差工周辺の河床低下およびそれにともなう護床ブロックや落差工本体の変動は、河川管理上の大きな問題であり、これを防止することは河川工学上の重要な技術課題である。落差工周辺には水叩きや遮水工、護床ブロックが配置されているが、河川流や浸透流などによって変状を受け、さらに河床低下や落差工の損傷や破壊に至る問題がある。</p> <p>本研究では河川工学と地盤工学における室内実験と解析技術を河床構造物の安定性評価に適用することを主要な目的とする。水叩きを有するコンクリート構造の落差工を対象とし、河床洗堀の発生を抑える水叩きの必要長さについて数値実験および小規模の室内実験によって評価する。具体的な解析手法としては、従来の連続体仮説に基づく支配方程式(NS 方程式+VOF 法、非定常浸透流方程式)に基づくものと、粒子法 (DEM, LBM) 法に基づく手法を用い、構造物の破壊局面を支配するメカニズムについて基礎的な解析法について検討する。さらに、これらの知見を河川行政における河川構造物の既往設計法の確認と安全性照査の手法に応用することを目的・目標とする。</p>				

⑥研究成果 (具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

室内実験による落差工周辺の護床ブロックと落差工の挙動の観察:大型実験施設に新しく実験水槽を作成して落差工と護床工の模型を設置して流水実験を行い,その挙動の把握とオープンソースソフト OpenFOAM による数値計算法の妥当性について検証した. 図 1-1 に水槽実験に用いた落差工模型の模式図を示す. 落差工の下流の黄色に着色した部分が護床ブロックを示す. 実験の各ケースは流量および護床工区間の河床を切り下げたものである. これによって跳水位置の変動が生じ,それに伴った高速流の変化やブロックの変更を観察した. 計測項目は流速, 波圧, 間隙水圧, ビデオ撮影である. 流速や圧力の増大は流量の増大に従って大きくなることは容易に想像されるが, 実際の結果を見ると跳水による影響が大きいことがわかった. 跳水ではその前後で射流から常流に遷移するが, 高速流と比較的小さな水深によって圧力が低下するが, 常流では水深の増大やそれに伴う流速の低下がみられ跳水位置の影響が護床ブロックに大きな影響を与えることが示された.

流量を固定して護床工下流端の河床を切り下げた実験を実施した. 本実験は下流側に地盤材料を固定するための鉛直壁の存在を前提としている. 実験ケースごとの流況の違いを確認するとともに, 間隙水圧とブロックに作用する波圧の特性を調べた. 河床低下による圧力の増大, 間隙水圧の増大を確認した. ブロックの流出を観測した結果, 護床工区間の最下流端のブロックと河床面の段落ち (図 1-3) に起因する河床低下が生じ, それに応じて流体力が増大してブロックの被災が下流端から生じ上流に向かって波及していくことが観察された(図 1-4).

新設した水槽を用いて OpenFOAM による計算と比較検討を行った. 図 1-5 には水面計について比較しており, 落差工を越流する水面計に関しては十分一致していることが確認された. 落水後は, 護床ブロック区間での水面計の変動が計算よりもやや小さいが, 概ねよく一致しており, 本計算法の適用性が確認された. 図 1-6 には落差工下部の遮水工を迂回する浸透流が示されており, 計算より求めた等ポテンシャル線 (間隙水圧と高度水頭の和の等高線) が示されており, 染料で示した流線がほぼ等ポテンシャル線と直交しており, 既往の理論と十分一致していることが確認できる.

落差工 (本体と水叩き) の下部に生じる浸透流の挙動: 浸透流の挙動がポテンシャル理論でほぼ説明できることを確認したことから, 落差工の安定を議論するために浸透破壊の現象に着目した. 最終年度に落差工の下部における浸透流現象に着目して破壊実験を実施して間隙水圧の計測と地盤変状の挙動を調べるとともに現行の設計法の照査のための基礎資料を収集した. 同時に浸透流に関するポテンシャル理論に基づく計算を実施して落差工の形状に依存した浸透流の特徴の抽出を行った. 実験水槽は水槽の左右にヘッド差を課すことができるものであり, ヘッド差が大きくなるにつれてパイピング等の浸透破壊が発生する. 破壊が生じた時点が設計法の限界状態と判断できる. 実験ではヘッド差を段階的に与えてその挙動をビデオ撮影するとともに, 間隙水圧を測定して破壊に至るプロセスの特徴について調べた. 図 1-7 には間隙水圧の計測事例の1つであり, 落差工の各所に取り付けた (位置は図中に示した) 間隙水圧計の時系列の結果である. ①の波形がほぼ変動していないのは構造物の左側が一定のヘッドを付加しているからであり. ②の波形は設置位置が低いために, 大きな値となる. ④の波形がており, 3段階目の

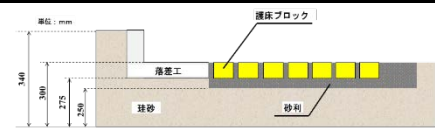


図 1-1 構造物設置状況概要

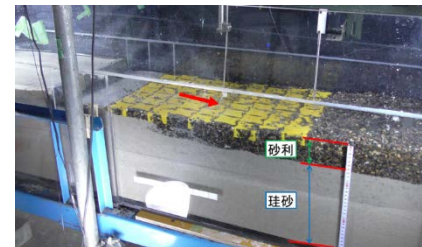


図 1-2 護床工部

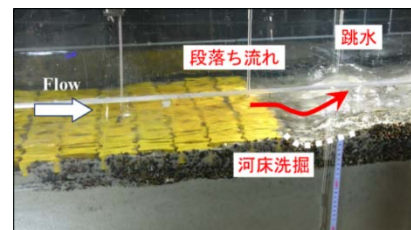


図 1-3 河床洗掘による段落ち流れの発生と跳水位置の変化



図 1-4 護床ブロックの流出形態

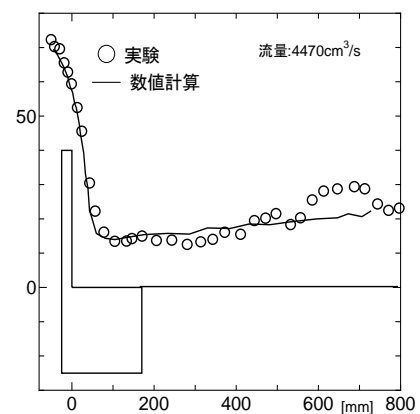


図 1-5 実験と計算の水の形の比較

水位低下で破壊している。このような波形の変化は他の形状でも同様となるが、構造物の形に依存した結果を得ている。②および③の計測点はそれぞれ落差工遮水工先端部および水叩き中央付近である。両波形ともに2段階目では間隙水圧の値が一定ではなく、この時点で破壊が進行していることが分かり、地盤の破壊に特有の進行性破壊が捉えられていることがわかる。

図1-8には取得したビデオ画像をPIV解析によって変位を計測しさらにひずみ解析によって最大せん断ひずみの分布を求めた結果である。構造形状は3種類であるが、最大せん断ひずみは水叩きの直下と地盤の境界で生じることが分かる。水叩きが短いケース（左）では遮水工付近で大きな値を取っているがある程度水叩きを大きくすると水叩きの下流端で大きなせん断ひずみとなり、落差工の健全性を評価する上で水叩き直下流付近の変状を調べることが有用であるとの結果を得た。またポテンシャル理論に基づいた簡易計算によっても水叩き下流端の河床付近と遮水板先端で大きな動水勾配の結果となり、遮水板先端は土被りによる地盤変状が抑制されることから、比較的モニタリングしやすい水叩き下流端の変状が構造物の健全性を照査する部位になるとと思われる。

構造物周辺の水理解析：非圧縮性気液二相流VOFモデルの運動方程式に多孔質物体中の流れを扱うダルシー則の抵抗項を組み込むアプローチで自由水面を有する河川流と浸透流を同時に解いた。計算結果は直壁型と緩傾斜型の床止め工の水理実験の水面形・圧力などによく一致した。

図2-1に長岡技大の堰の模型実験に対する計算で得られた流線網を示す。水叩き先端の直下に等ポテンシャル線の集中が見られる。これは堰の浸透流の特徴であり、平均動水勾配でパイピングを評価するレインの式で安全と評価されても、水叩き先端の隙間は動水勾配の視点から、最も吸出しやパイピングのリスクが高い位置である。

図2-2に国総研の被覆ブロック形式傾斜型床止めの模型実験に対する計算で得られた流線網・ブロックの表面と裏面の圧力・間隙水圧を示す。

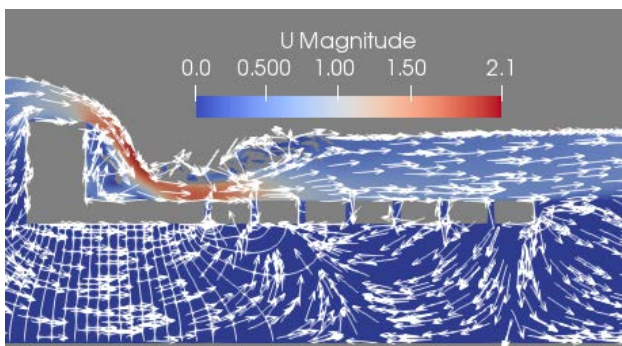


図 2-1 堰の模型実験に対する計算で得られた流線網

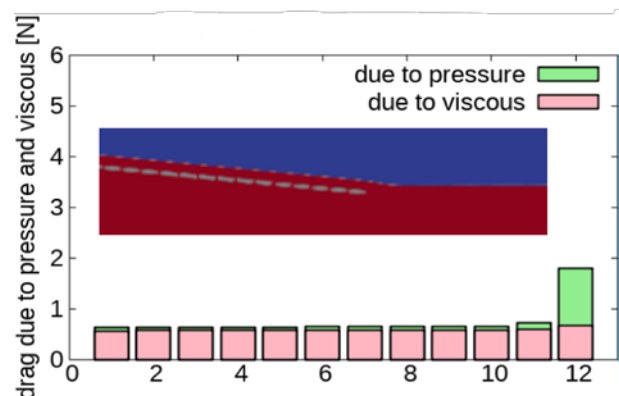


図 2-3 護床ブロックの受ける抗力とその内訳 (下流端ブロックの番号は 12, 赤は α 値が 1)

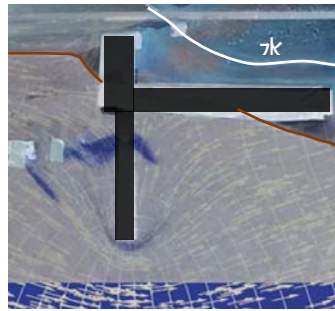


図 1-6 遮水板を設置した場合の浸透流

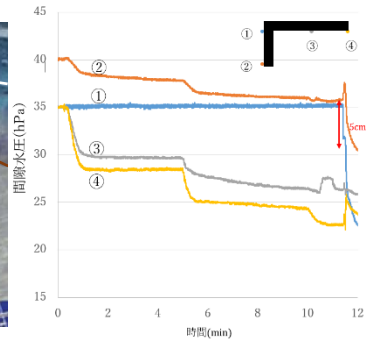


図 1-7 間隙水圧の時系列

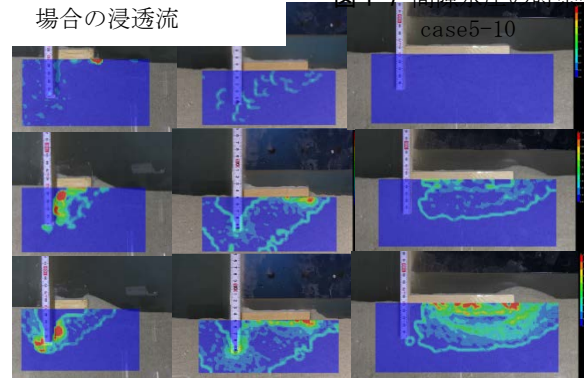
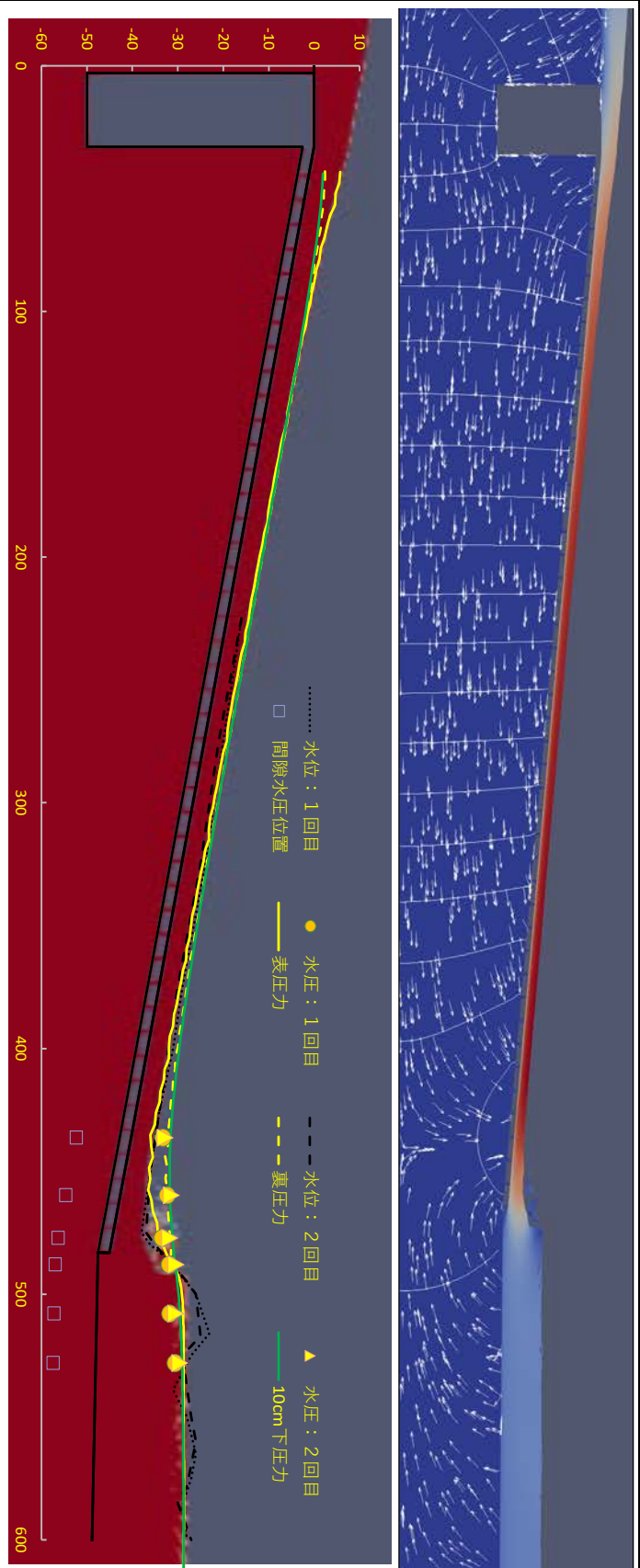


図 1-8 最大せん断ひずみの分布 初期・中期・末期
左段より Case 5-5, 5-10, 5-15

なお、水面形と比較するために圧力はポテンシャルに換算されている。被覆ブロック形式の特徴は、1)ブロック間隙間による余剰間隙水の開放効果で動水勾配の集中がない。2) 上下流の浸透流がぶつかって跳水手前の河床から湧き出る。その結果、浸透流が河床に平行する区間でブロックの裏側の圧力は表面とほぼ同じになり揚力は小さいが、浸透流が湧昇する区間で浸透流の流線にそって圧力（ポテンシャル）が下がり、揚力が大きく上昇する。「床止めの構造設計手引き」において、揚力係数・抗力係数に基づく揚力・抗力とブロックと河床の摩擦力で滑動安全性を評価してブロックの重量を算出するとしているが、跳水手前の浸透流が湧昇する区間では揚力は速度ではなく、圧力で決まるので、揚力係数に基づく評価は明らかに不適切である。図2-2(a)の場合、跳水手前でブロック裏面と表面の圧力差が大きく、ブロックが移動する判定になる。図2-3は一樣流の場合、下流端ブロックが最大抗力を受けるのを示している。これは下流端ブロックと下流河床の段差によるブロック後ろの圧力低下が原因である。

解析結果による対策の提案：1)図2-1のような堰に対して、水叩き先端直下に粒径の大きい砂利等を設けると良い。透水係数増加による抵抗減少で、この場所の動水勾配を下げると同時に、粒径の増大でクリープ比が小さくなり、パイピングと吸出しの防止に寄与する。また、止水矢板の長さが変わらない場合、レイン式による評価は変わらないものの、堰上流端よりも水叩き先端に設置した方が、この場所の動水勾配を下げる果があることを計算で確認した。2) 図2-2のような被覆ブロック形式床止め工に対して、浸透流が河床に平行でなければ揚力係数による揚力の見積もりはしないこと。跳水位置手前での浸透流湧昇による揚力増大を考慮に入れ、減圧孔を設けたりブロックの重量を増やしたりして対策を講じる必要がある。3)移動床模型実験で下流端ブロックの流失が一連の連鎖的ブロック流失のきっかけであった。計算結果も図2-3の通り、下流端ブロックが流されるリスクが大きい。ブロックの後ろの圧力低下を抑えるために下流端ブロックの下流側形状を流線形にしたり、下流端ブロックに根入れを持たせたりして流されないようにする対策が望ましい。



(a)河床低下前：間隙水圧と水面形 (b)(a)の擬似的な流線網 (赤は α 値が1)

図2-2 水面形・圧力の計算と実験との比較 軸単位:cm

(仕様書の3, 報告書の4.2に対応する内容)
 前項で述べたポテンシャル流の数値解析だけでは考慮できない地盤の変状・破壊を観察することを目的として、DEM(個別要素法)とLBM(格子ボルツマン法)による粒子-流体の連成解析手法の適用性を検討した。図3-1(a)のように、落差構造物周りの浸透破壊の数値解析で対象とした範囲は200mm×100mmの領域とした。模型実験で水叩き長と矢板の根入れ深さを変化させたことに対応させて、3種類の構造物の形状を検討した。この3ケースの最小の浸透流路長は同じである。地盤を構成する土粒子の大きさは模型実験で用いた粒径に近い平均粒径500μmとし、200mm×50mmの範囲を地盤領域とした。

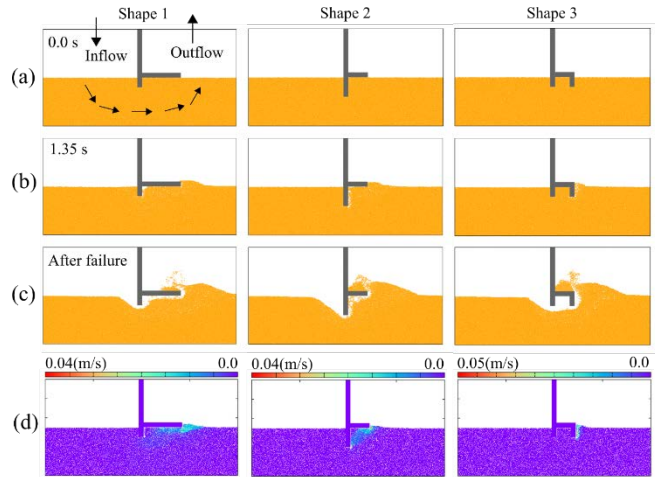


図3-1 数値解析結果 (a) 初期状態 (b) 破壊前の状態 (c) 破壊後の様子 (d) 地盤変形初期の土粒子の速度分布図

図3-1(b), (c)は、それぞれ破壊前の途中経過

の状態、破壊後の様子を示している。とくに図3-1(c)の破壊後の侵食された地盤領域の形状は、模型実験と近いものが得られた。図3-1(d)は、地盤変形初期の土粒子の速度分布図を示しており、浸透流路長が同じであっても異なった破壊モードがみられることがわかった。Shape 1の場合は水叩き先端部から浸透破壊が進行するが、Shape 2の場合は水叩き先端と矢板下端の両方で同時に浸透破壊が進行していることが観察される。Shape 3のように矢板が上流側と下流側に2つ設置された場合には、下流側の矢板近傍から浸透破壊が始まることわかった。

以上の結果は模型実験とポテンシャル流の数値解析で得られた傾向とも一致した。地盤領域の大変形を考慮できる粒子-流体の連成解析手法を検討過程に加えることで、地盤中の危険箇所がどのように破壊するのを含めて推測できるようになった。

落差工の設計法(レイン式)の照査:

レイン式は落差構造物が持つ浸透破壊に対する安全性の指標であり、安全条件を満たすように設計する。式が意味する内容は平均動水勾配が所定の値よりも十分小さくなるように設計するものであるが、平均動水勾配を計算するための浸透流路長として水叩きと遮水工による値とで重みを持たせるものとなっている。具体的には水叩き長による浸透流路長は鉛直遮水工によるもの

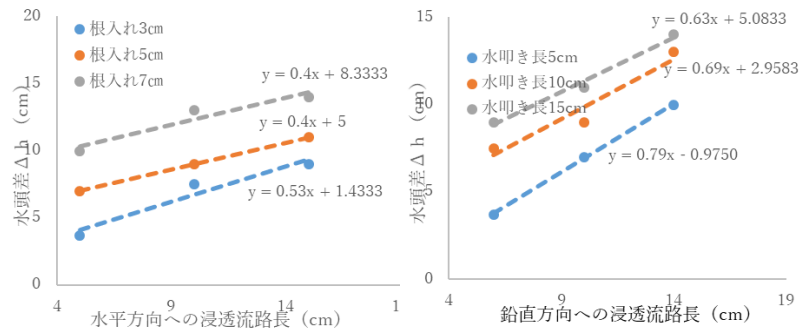


図4-1 限界水頭差と構造条件の比較

の3分の1しか有効ではないというものである。このためレイン式の限界状態に相当する破壊実験を構造条件を変化させながら実験し、限界状態の水頭差と構造条件の違いについて検討した。図4-1の左右はそれぞれ水平浸透流路、鉛直浸透流路の伸びに対する限界水頭差の違いであり、鉛直方向の方が有効であることを示しているが、傾きの差は2分の1程度であった。また図4-2は水叩き下流端の最大動水勾配に対する水平方向浸透流路長(横軸)、鉛直浸透流路長(縦軸)依存性を示しており、等高線の傾きから重みを推定することができるが、点線で示すように水平方向の効き方は鉛直方向よりも弱い事が示された。レイン式の根拠を確認され、式の有効性と安全性を示すことができた。

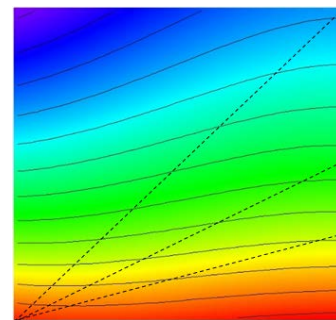


図4-2 ポテンシャル理論で求めた水叩き下流動水勾配の変化
 横軸: $\Delta L/dh$, 縦軸: $\Delta \Sigma li/dh$

【「F S 研究（新規課題）」の場合記載】

⑦一般研究にむけた実施計画

（一般研究へ移行した場合の今後の研究開発の実施計画を具体的かつ明確に記入下さい。2ページ程度。）

【「一般研究」の場合記載】

【「F S 研究（新規課題）」の場合記載】 【非公表】

⑧研究成果の発表状況・予定

（本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。）（以下記入例）

- ・ これまでに発表した代表的な論文
 - ・ 著書（教科書、学会抄録、講演要旨は除く）
 - ・ 国際会議、学会等における発表状況
 - ・ 主要雑誌・新聞等への成果発表
 - ・ 学術誌へ投稿中の論文（掲載が決定しているものに限る）
 - ・ 研究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
 - ・ 企業とのタイアップ状況
 - ・ 特許など、知的財産権の取得状況
 - ・ 技術研究開発成果による受賞、表彰等
- 1) 楊宏選, 福元豊, 細山田得三, 大塚悟: 水・地盤連成解析手法による落差工周辺の河床構造物の安定性評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), 74(5), I_655-I_660, 2018.
 - 2) 楊宏選, 福元豊, 細山田得三, 大塚悟: 落差工による跳水・浸透流およびそれらの河床構造物の安定性に及ぼす影響, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp.655-660, 2018.
 - 3) 細山田得三, 楊宏選, 福元豊, 大塚悟: 河川を横断する落差工周囲の河川流と浸透流の相互作用, 第 6 回河川堤防技術シンポジウム, pp.49-52, 2018.
 - 4) 楊宏選, 山本陽子, 福元豊, 細山田得三, 大塚悟, 福島雅紀: 二次元固定床模型実験及びそれを再現する数値解析モデルによる床止め工の圧力と流速等の考察, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp.451-456, 2019.
 - 5) 楊宏選, 福元豊, 細山田得三, 大塚悟: 落差床止め工の流れ場および安定性について, pp.149-150, 第 65 回理論応用力学講演会・第 22 回土木学会応用力学シンポジウム講演論文集, 2019/6.
 - 6) 楊宏選, 福元豊, 細山田得三, 大塚悟: 落差床止め工の流れ場および安定性について, 土木学会論文集 A2(応用力学), 第 75 巻, 2 号, I_519-I_530, 2019.

予定:

- 7) 楊宏選, 山本陽子, 福元豊, 細山田得三, 大塚悟, 福島雅紀: 浸透流と河川流の同時計算に基づく流体力による護床工ブロックの安定性評価, 河川技術シンポジウム, 2020.
- 8) 楊宏選, 福元豊, 細山田得三, 大塚悟: 浸透流を含む河川の水利模型実験の相似性について, 第 23 回土木学会応用力学シンポジウム講演論文集, 2020.
- 9) Yutaka Fukumoto, Tokuzo Hosoyamada, Hongxuan Yang, Satoru Ohtsuka: 2-D direct numerical analyses of sand boils around obstacles with various shapes by using a coupled LB-DE model, COMPSAFE2020, December, 2020.

【「一般研究」の場合記載】

⑨研究成果の社会への情報発信

（ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。）

本研究の目的は技術開発および成果の社会への還元にある。技術開発に関しては、研究成果を学協会に投稿するほか、口頭発表により社会への情報発信に努めている。また研究成果の社会への還元については、国土技術政策総合研究所との共同研究や情報交換を通して、開発した技術の特徴や優位性について国土技術政策総合研究所の研究員に情報共有を図るほか、成果の社会実装について具体的な提案を行っている。

【「一般研究」の場合記載】

⑩表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑧⑨に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

福元豊：平成 28 年度地盤工学会論文賞（英文部門），2017 年

福元豊：平成 28 年度応用力学論文奨励賞，2017 年

福元豊：平成 28 年度地盤工学会北陸支部奨励賞，2017 年

【「一般研究」の場合記載】

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究によって河川工学と地盤工学の融合研究を実施できたことは、河川工学における新しい視点を提供し、今後の研究発展に繋がる大きな意義がある。特に流体（河川）と地盤動力学では運動が非平衡状態である共通点があり、河川構造物の諸問題の解決には今後も分野を超えた連携が必要である。今回の 2 分野の共同研究によってわかったことは、現象を支配する時間スケールの違いをどのように緩和するかということがあげられる。従来、河川水（流体）の運動とその影響を受けて変状する地盤や河川構造物の変状の時間スケールの違いから両分野において個別に解析されてきた。しかしながら、今後は計算機演算速度の向上により時間スケールによる研究分野の融合が進むことが想定され、より高度な解析技術が進展するものと思われる。特に DEM 法、LBM 法のような計算法は次世代の標準解析法としての位置を確立しつつあり、両分野の交流はますます進展するものと思われる。水と地盤分野に留まらず構造系も含めた土木工学における 3 つの力学（水、地盤、構造）分野の融合による総合的な構造物の安定性評価へと発展するものと期待できる。

本課題を実施して未踏課題と思われるものは、DEM 法や LBM 法といった比較的新しい計算手法を河川構造物の安全性に対する標準手法である浸透流や河川流と十分融合できなかったことと 3 次元化であり、今後の課題と考えている。

【「一般研究」の場合記載】

⑫研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

本研究における成果の 1 つとしては落差工の安定性に対して河川水と地盤の浸透流の連成解析法の確立したことをあげることができる。従来、例えば洪水時の河川堤防の安定性を考慮する場合、水面の上昇は考慮するが、水の動的な運動は考慮されないことが多かった。すなわち、水面の上昇は静水圧として考慮され、堤防内部を流れる浸透流は堤外側の水面上昇に起因する圧力上昇による現象に限定されていた。本研究では非定常非線形の浸透流モデルを構築して落差工を越流する河川水と落差工上下流の水位差によって落差工下部地盤内に生じる浸透流の連成を計算する手法を構築して浸透流現象と河川の流水を同時に評価できることによってより実際の現象に即応した現象を取り扱うことができるようになった。この計算手法は今回の課題では断面 2 次元に限らされているが、国総研河川研究室の実験（実河川を対象）に適用しその妥当性が評価され、現場への適用性に関して十分な妥当性を有することが分かった。

さらに、落差工上下流の水位差による浸透流のみならず、浸透流による土砂の移動を評価するための粒子法による計算手法を用いて地盤の変状の時間発展を計算する手法を導入してその妥当性を検証した。室内実験と比較した結果、地盤の大変形の過程を再現することができ、十分な適用性を有することが分かった。また、既往設計法（レイン式）を室内実験と比較した結果、レイン式の妥当性や浸透破壊に対するモニタリングポイントとして水叩きの下流部や水叩き中央下部の間隙水圧の挙動を計測することの有効性が示された。