

急流河川の河床変動機構と破堤による 氾濫流量算定法の調査研究

ON RIVER-BED VARIATION MECHANISM IN A STEEP CHANNEL AND
METHOD TO CALCULATE INUNDATION DISCHARGE BY DYKE BREACH

福岡捷二¹・山崎憲人²・黒田勇一³・井内拓馬⁴・渡邊明英⁵
Shoji FUKUOKA, Norihito YAMAZAKI, Yuichi KURODA, Takuma IUCHI
and Akihide WATANEBE

¹フェロー会員 Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所調査第一課専門調査員 (〒930-8537 富山市石金3-2-37)

³正会員 国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所工務第一課長 (〒930-8537 富山市石金3-2-37)

⁴学生会員 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻博士課程前期
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

⁵正会員 工博 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

For the flood control measures in a steep channel, to understand the effect of the bed material on the river-bed variation and to estimate the inundation discharge by dyke breach are important. In this study we carried out the field experiment about river-bed variation and inundation by dyke breach in the field of the Joganji River which is a very steep channel. We clarify the characteristics of the river-bed variation and the grain size group which controls the stability of river-bed. Furthermore we affirm the role of the grain size distribution on the river-bed variation by comparing with the result of the field experiment on the Joganji River in 2004. Finally we performed the field experiment estimating discharge hydrograph due to dyke breach and propose a reasonable method to estimate the inundation discharge by dyke breach and verify the applicability of the method from the result of the field experiment.

Key Words : steep slope rivers, graded sediment, field experiment, grain size distribution,
dyke breach, discharge hydrograph

1. 本研究の背景と目的

急流河川は、その勾配と流速が大きく、土砂移動が激しいため、河床・河岸洗掘、流路変動等による災害が生じやすい特性を持つ。このため、中小規模の洪水でも治水上の危険性が高く、洗掘に伴う破堤と氾濫に対する懸念がある。洗掘対策として、護岸の根継ぎ等が行われているが、河床変動が大きく深掘れ深が定まらないことなど、急流河川の管理上解決すべき課題が多く残されている¹⁾。すなわち、いつ、どこで、どれくらいの大きさの河床・河岸洗掘が発生するかを算定できる技術の確立が不可欠である。そのためには、河床材料が大礫を含む広い粒度分布を持つ急流河川の河床洗掘について、大粒径河床材料の存在の影響を明らかにすることは重要である。

また、急流河川に限らず破堤氾濫に対する効果的な治水対策を立案するには、氾濫流量を算出する必要がある。

これまで洪水氾濫量の計算は、測定誤差の大きい破堤点近傍の水位と破堤断面を用い、適用性が低い堰の越流公式から求める必要があった。一方において、平成17年の水防法改正によって氾濫予報が導入された。堤防の決壊により堤内地に氾濫流出する正しい水量を知り、進行予測ができるようにすることは、被害を最小化するための氾濫水の制御や広域的な避難行動・支援のために重要であり、氾濫流量を高精度で評価する一般的な方法が求められている。したがって、氾濫流量の評価方法を確立すること、その評価法のためには、どのような項目を測定すべきかを明らかにすることが課題となる。

急流河川は、その河床勾配の大きさや河床構成材料の粒度分布の幅広さから、実験水路規模では、その水理現象を十分に再現することができないことから、本研究では、急流河川の河床変動と破堤現象について、日本有数の急流河川であり、かつ河川敷の十分広い常願寺川河川敷に水路を掘削し、実験を行なった。

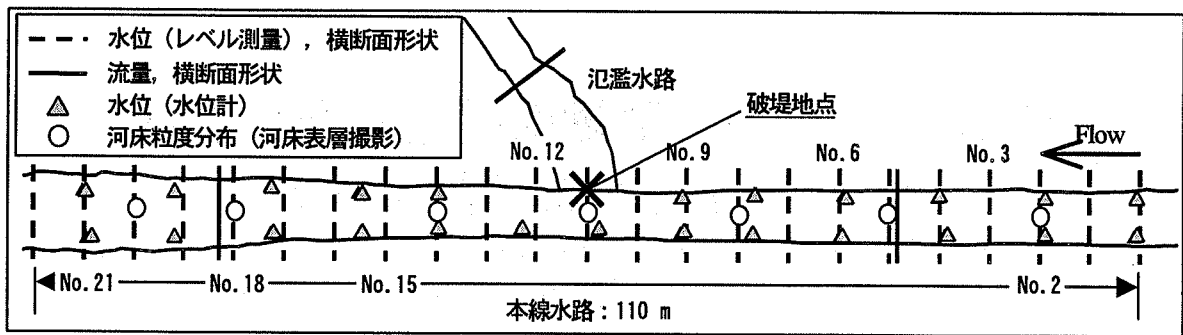


図 - 1 実験水路平面図

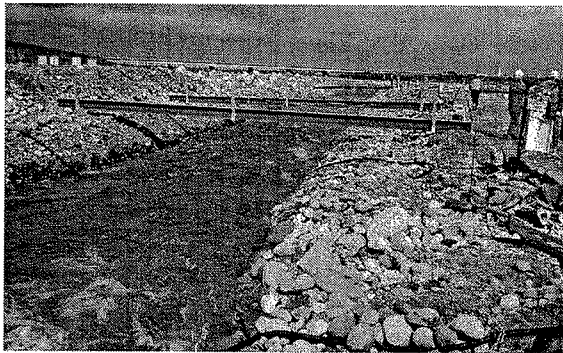


図 - 2 実験水路の全景（水路上流端右岸より）

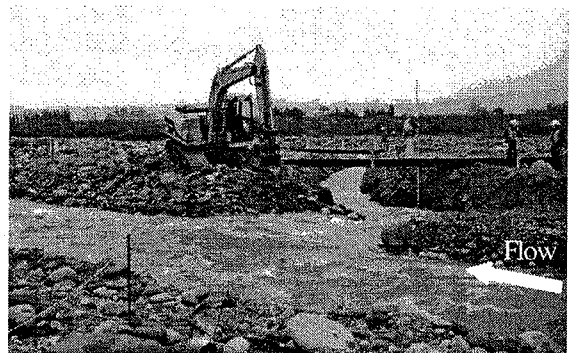


図 - 3 破堤時の氾濫状況

2. 常願寺川現地実験

実験水路は、常願寺川 11.3 km の砂州を掘削することにより設けた、長さ 110 m、幅 5 m、高さ 1.5 m の大きさで、常願寺川の 1 本の滞筋規模に相当する直線水路である。水路の上流端に置いた大型土嚢を移動による水路の開度の調整と水路入口近傍にある他の水路からの排水の組み合わせで流入流量を変化させた。図 - 1 は実験水路の平面図を、図 - 2 はその全景写真を示す。

現地実験は、二種類行なっている。すなわち、Case S：急流河川の河床変動と Case F：破堤による氾濫流量の評価である。

Case S では、最大約 $19 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量まで、徐々に流量を増大させ、河床が安定するまでの水位と流量を観測した。河床が安定した後、排水し水路の縦横断面形状と河床の粒度分布を測定した。これより、大粒径からなる急流河川の通水による水理量と河床変動、河床粒度との関係を検討した。

Case F では、洪水流を模擬する最大流量 $16 \text{ m}^3/\text{s}$ の非定常流を通水し、破堤による氾濫流量の算定法を検討した。破堤は重機を用いて行っている。破堤による氾濫流量を評価する数値計算法を確立する上で、最も重要な水理量は水位の縦断面形の時間変化である。破堤により流出する流量のハイドログラフを高精度で求めるため、圧力式水位計による観測と合わせてレベル測量を実施した。図 - 3 は破堤時の氾濫状況を示す。

測定項目は流量、水位、河床横断面形の時間変化、河

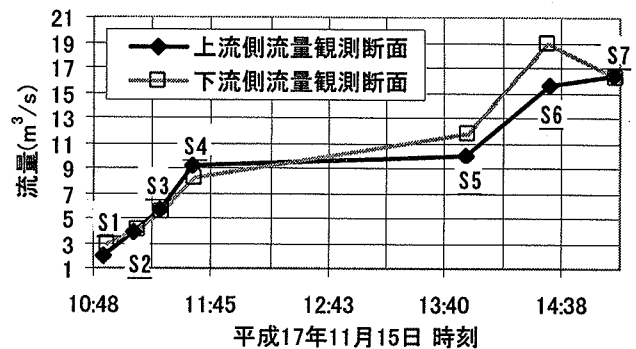


図 - 4 Case S 通水流量の時間変化

床表層の河床粒度分布測定である。

3. 急流河川の河床変動機構と河床粒度分布

(1) Case S の実験結果

図 - 4 は実験 Case S における通水流量の時間変化を示す。上流の流量と下流の流量は同一のはずであるが、差が生じており、それは、観測値がこの程度の誤差を含んでいることを示す。図中の S1～S7 は水位・流量を測定した時刻を表している。また、通水前後の最深河床高と河床安定後の S7 の水面形を図 - 5 に示す。最深河床高縦断面図より、下流区間において河床勾配が小さいことにより初期河床から堆積が、また、縦断距離 20～50 m の区間において、河床洗掘が生じているが、全体的に、ほぼ一様な河床勾配となっている。図 - 6 は、上流側流量観測断面 No.5 における横断面形状の時間変化を示す。河床洗掘は S4～S5 の通水時に発達し、側岸侵食は、S5

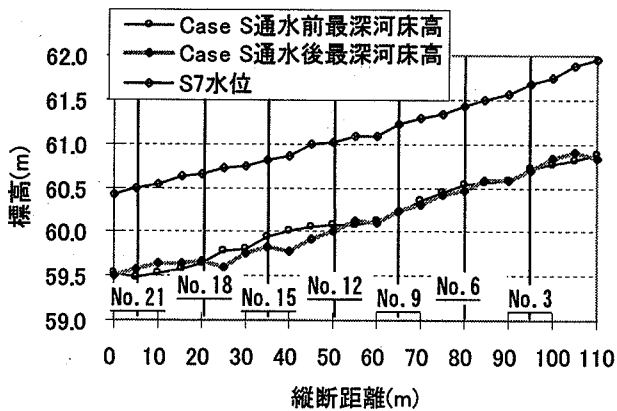


図-5 通水前後の最深河床高とS7の水面形

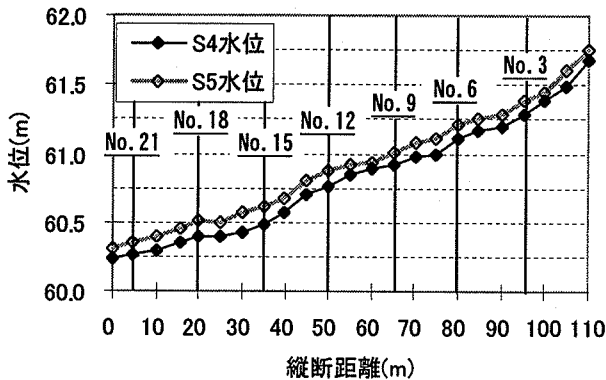


図-7 S4～S5の水位縦断面図

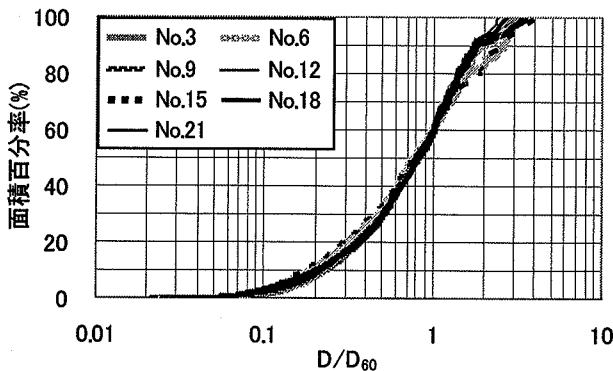


図-9 河床粒度分布の形状の比較

以降の大流量通水時に発達しており、河岸侵食に相当する分、河床が上昇している。したがって、図-7に示すようにS4～S5通水時には、水面形は、縦断距離20～50mの区間で、大きな水面勾配が生じている。その結果として、河床面の掃流力が大きくなり、洗掘が生じたと考えられる。

図-8に、河床の粒度分布を示す。河床変動の状況と同様に、下流区間に対応するNo.21で細粒化が、縦断距離20～50mの区間に対応するNo.15において粗粒化が生じている。図-9は、それぞれの断面の60%粒径 D_{60} で無次元化した粒度分布を示す。その形状は D_{80} 以下においてほぼ同一の分布をしており、 D_{80} 以上については全体に占める最大粒径の割合に依存した分布となっている。この特徴は、縦断的に種々な河床勾配の河道となっ

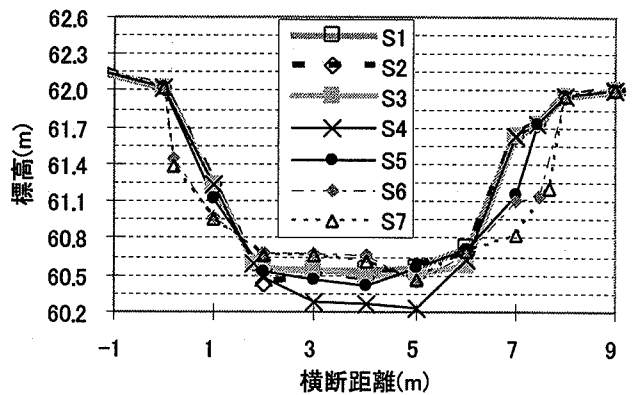


図-6 上流側流量観測断面の形状の時間変化

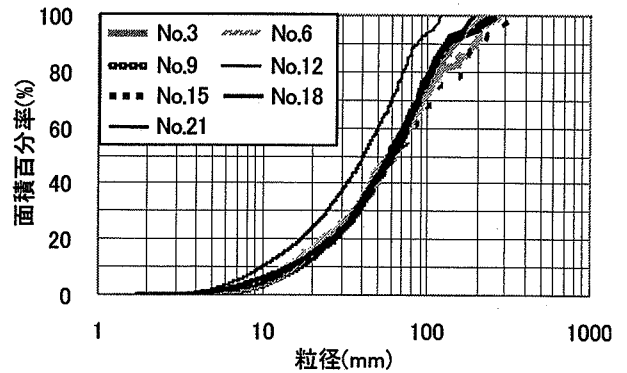


図-8 粒度分布曲線(河床表層画像分析による)

た流量規模の異なる平成16年度の現地実験と同様である²⁾。

このことは、土砂移動が活発で広い粒度分布を持つ急流河川の滞筋部では、河床表面を構成する砂礫の粒度曲線をそれぞれの場所の D_{60} で無次元化すると、ほぼ相似形状を持つことを示している。

図-10は、図-9に示した粒度分布測定箇所における掃流力と限界掃流力について比較したものを示す。河床粒度が粗い分布となっているNo.6、No.15では、 D_{80} 程度以上の粒径が河床の安定に寄与している。No.3、No.12では、河床粒度が相対的に細かい分布となっており、 D_{90} 見てとれる。しかし、実際には、どの箇所においても、計算から得られる限界掃流力以下の小さな粒径集団も、河床中に存在している。礫河道では、小粒径に対してEgiazaroffの式が対象とした以上の遮蔽効果が生じていることが考えられる。以上から、礫床河川では D_{80} 程度以上の粒径集団により河床の安定が支配されていること、また、混合粒径に対するEgiazaroffの限界掃流式の再検討が必要であることが明らかとなった。また、礫床河川の滞筋について、一箇所の粒度分布を分析していれば、他の箇所では、 D_{60} を知れば、土砂移動が活発な滞筋の粒度分布がほぼ推定可能となることが明らかとなった。

(2) 滞筋における河床変動機構

昨年度²⁾および今年度の現地実験およびその検討から、

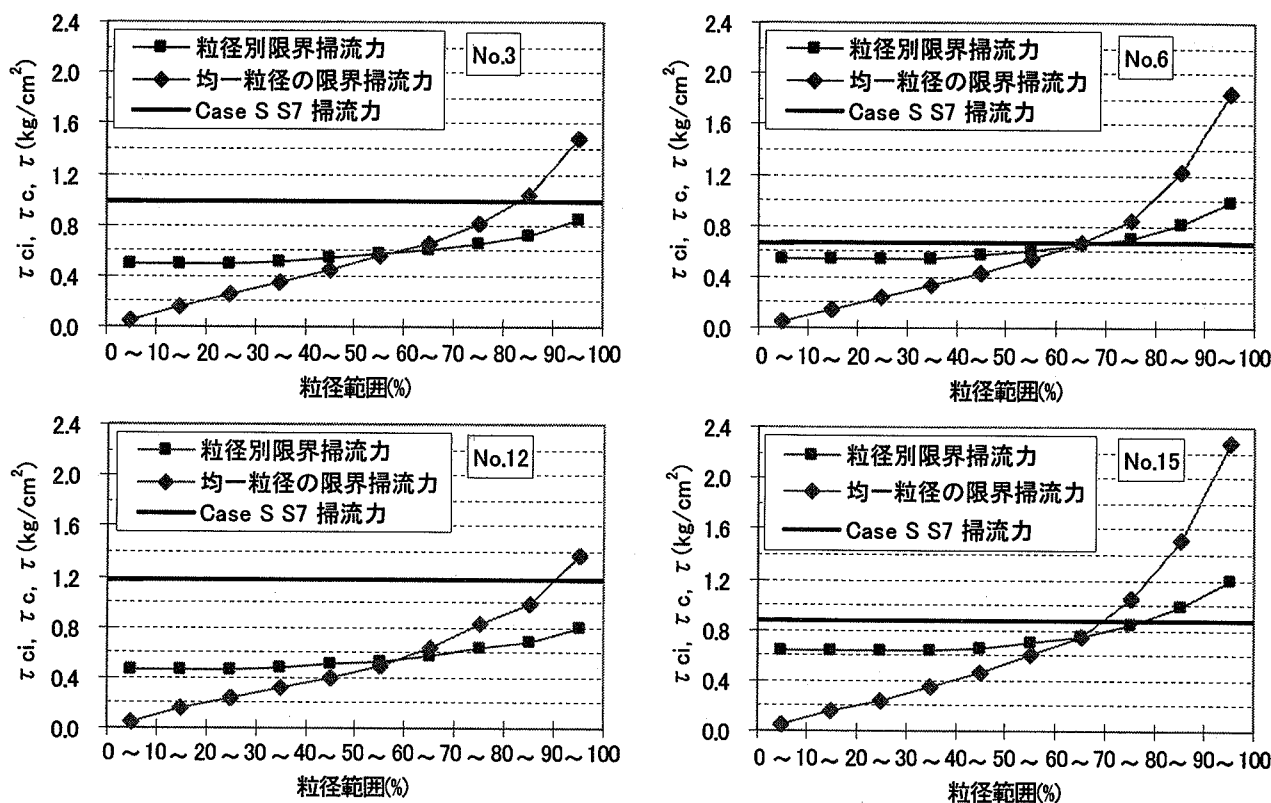


図-10 掃流力と限界掃流力の関係

急流河川の河床変動機構について考察する。急流河川はその流れのもつ運動量の大きさから安定した流れとなるためには、流路の抵抗が流れの運動量とバランスする必要がある。実験水路においては、河床の縦断勾配が平均的に一様であっても、そこに存在する有効な河床材料の分布によっては、局所的な河床洗掘が生じ、最終的に流れの掃流力と平衡する河床抵抗、特に、河床勾配と粒度分布となるまで河床変動は進展し、やがて河床は安定に至る。

また、常願寺川の既往洪水資料の分析から、平均年最大流量規模の洪水では、滞筋の位置関係が変化する流路

変動が生じ、中小洪水規模程度であれば、河床変動は各滞筋内でのみ生じることが分かっている²⁾。このような流量規模に対する変動機構の違いは実験水路においても見られた。本大型実験では、中小洪水によるものはS4～S5における通水時流量に対応しており、平均年最大流量規模の洪水によるものは、S5以降における大流量通水時に対応していると考えてよい。すなわち、

「各々の滞筋は、中小規模の洪水の流下により、安定な状況が形成されるが、平均年最大流量規模の洪水では、礫からなる側岸は安定に至っているわけではなく、流路の拡幅が進展し、最終的には、滞筋の位置が移動するなどの流路変動が起こる。これが、現在まで明らかになった急流河川の河床変動機構である。

4. 破堤実験と氾濫流量の評価

(1) 観測水面形と非定常二次元解析による氾濫流量の数値解析

多点で観測された水位から求まる水面形と浮子を用いた流量観測では水面形の方が流量観測よりも十分精度が高い。福岡・渡邊らは、高精度で観測される水面形が、洪水流れの各時間での解であることを利用して、水面形を用いた非定常二次元流解析によって種々の河道状況及び洪水条件下における流量ハイドログラフを高精度で求めている^{1), 4), 5), 6)}。水面形を解とする解析法の基本的考え方は、実験水路内に所定の水面形を作る方法と同じである。すなわち、水位の境界条件となる上・下流端に仮想の池を設け、堰によって池の水位を調整しながら、各時間の河道の水面形が実測水面形になるように粗度分布を調整し、推定された粗度係数分布と水位縦断形から流量ハイドログラフを求めるものである。

従来の破堤計算は、河道線形や河床勾配などから破堤幅および形状の時間変化を推定し、破堤点近傍の水位を用いた越流公式により氾濫流量を計算しており、精度の高い方法とはいえない³⁾。ここでは、福岡らの方法^{2), 4), 5), 6), 7)}を用い堤防の決壊にともない時々刻々変化する河道の水位縦断形の時間変化を与え、破堤断面形状や堰公式を使わずに、二次元非定常流解析によって、直接的に氾濫流量ハイドログラフを求めるものである。つまり、破堤点を挟んだ上下流域において、水位観測断面を

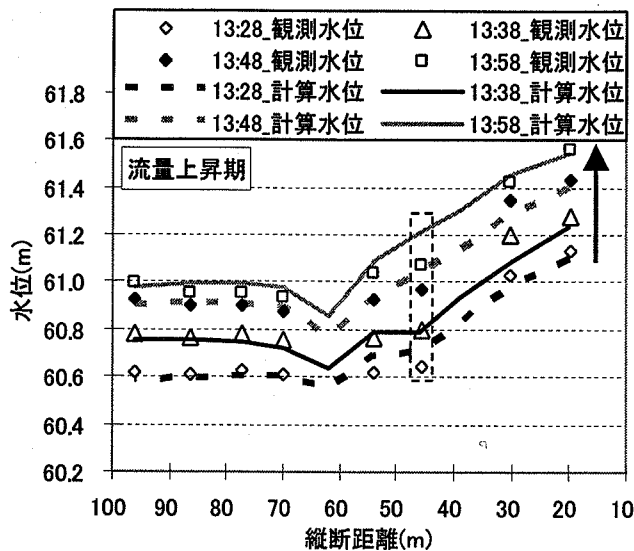


図 - 11 (a) 観測水位と計算水位の縦断分布

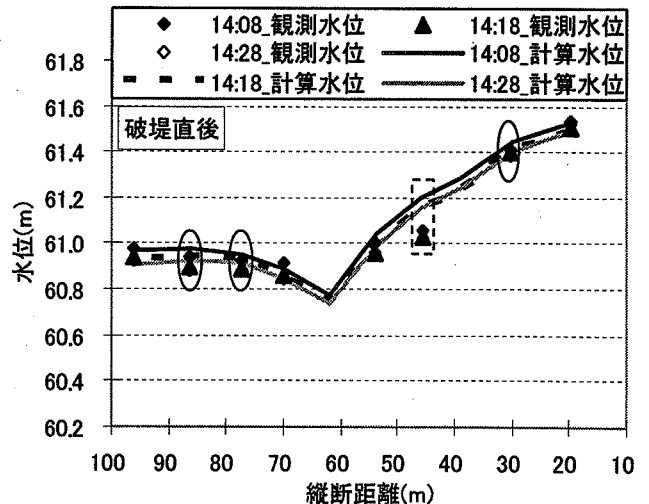


図 - 11 (b) 観測水位と計算水位の縦断分布

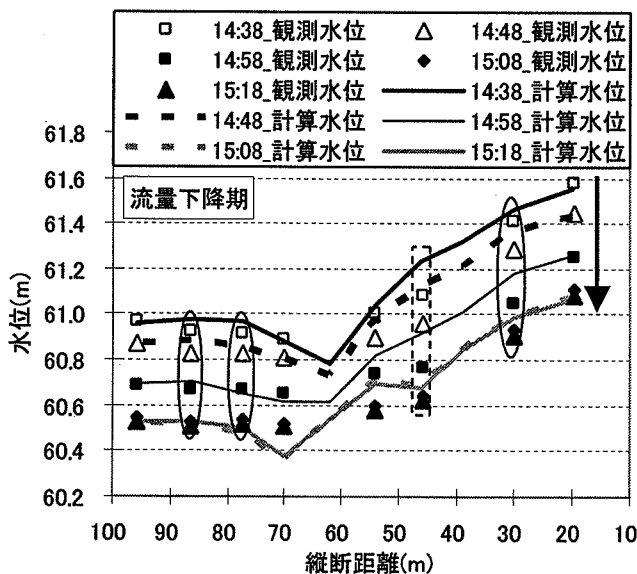


図 - 11 (c) 観測水位と計算水位の縦断分布

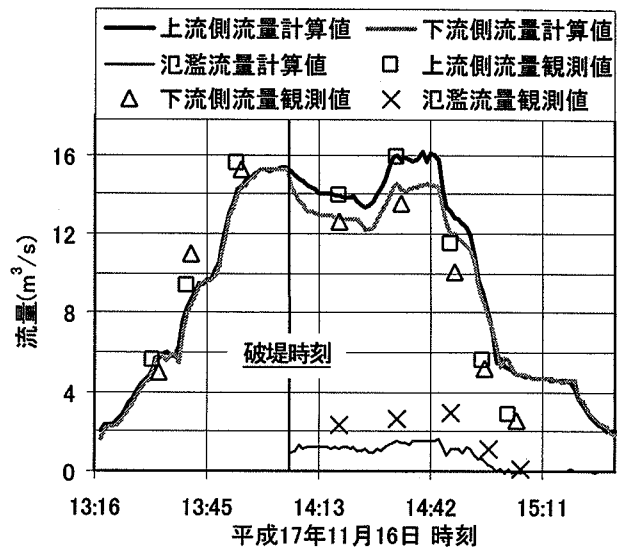


図 - 12 観測流量と計算流量の時間変化

数箇所選定し、各断面における観測水位と計算水位の時間変化の差が全体的に小さくなるように、氾濫水路の下流端に設けた堰の高さを調整することにより、氾濫流量が決定するようにしている。

(2) 解析条件

Case F の洪水流は、平成 17 年 11 月 16 日 13 時 00 分から 15 時 30 分の 2 時間 30 分通水され、解析対象時間も同じ時間としている。対象区間は上下流の影響を除くため、図 - 1 の平面図に示す No.2～No.19 としている。

流量観測は、図中の実線で示される破堤点上・下流断面、氾濫水路断面の計 3 断面で実施されている。しかし、氾濫水路断面では、流量観測の側線数が他の断面より少ないために、観測精度は低くなっている。水位は圧力式水位計により、2 秒間毎に上流域で 10 m 間隔、破堤点付近で 8 m 間隔、下流域で 9 m 間隔で観測されており、同時に、レベル測量により、破線で示す断面で 5 m 間隔で、15 分毎に観測されている。圧力式水位計での観測値の標高換算は、レベル測量と同時刻で測定することに

表 - 1 本線の粗度係数縦断分布

水路上流端からの距離(m)	粗度係数
19～25	0.038
25～30	0.036
30～44	0.054
44～54	0.022
54～60	0.032
60～65	0.025
65～74	0.010
74～85	0.013

より行った。解析に用いる低水路の粗度係数は、計算水面形が破堤前の観測水面形に全体的に合致するように試行錯誤的に検討され、最終的に表 - 1 の値を得た。実験の都合上、水路下流端でのせき上げのために下流域の水面勾配は小さく、このため、粗度係数は他の区間に比べ小さい。本川水路の縦・横断面形状は、Case S において大流量 (19 m³/s) を通水したため、Case F (最大流量

16 m³/s) においては、河床変動は生じなかった。このため、Case Fは、固定床として扱っている。解析格子は、縦断方向に 120 分割、横断方向には 10 分割されている。仮想の氾濫水路については、Case F 通水後の破堤幅を用い、水路の形状および大きさは破堤氾濫量を大略推定し決めている。

(3) 解析結果と考察

a) 水位の縦断分布

図 - 11(a)～(c)に、流量上昇期、破堤直後、流量下降期における左岸観測水位と左岸計算水位の縦断分布を示す。なお、氾濫流量は、破堤直後、流量下降期の水位縦断分布図において丸で囲んだ水位観測断面における観測値と計算値の差により決定している。

流量上昇期について、計算水位は上流域で水面勾配が大きく、下流域で下流端のせき上げのために、水面勾配が小さくなっているのを再現できている。破線で囲んだ水位観測値は、水位が高くなると、誤差を持ち込む原因となるため考慮しなかった。破堤直後は、破堤の影響のため、破堤点より上流で水面勾配がさらに大きくなっているのを再現できている。同様に丸で囲んだ箇所において計算値は観測値をよく追従できている。

流量下降期について、全体的に計算水位は観測水位を再現できているが、水位が低いときの河床の抵抗増大による粗度係数の変化を考慮せず一定値を用いているために、再現性がやや低くなっている。

b) 流量および氾濫流量ハイドログラフの比較

図 - 12は、観測流量と計算流量のハイドログラフの比較を示す。二次元非定常解析では縦断的に各断面で流量が計算されるために、氾濫流量の計算値は破堤点直上・直下流の計算流量値を差し引くことにより求めている。なお、氾濫流量の観測値は、測定点が少なく、本川上・下流流量観測値よりも精度が低い、時間変化の傾向を把握するための参考値として示している。

計算流量は観測ピーク流量およびそのハイドログラフをかなりの程度再現している。しかし、水位縦断図と同様に、流量下降期において、その再現性が悪くなっている。

5. 結論と今後の課題

本研究で得られた結論と今後の課題を以下に示す。
急流河川の河床変動機構について

- 1) 急流礫床河川の河床の安定には、大きな礫の存在が不可欠であり、本研究では、80%程度以上の粒径が河床の安定を支配していることが明らかとなった。
- 2) 礫床河川の礫筋における粒度分布を最低限一箇所測定していれば、他の箇所では D_{50} を知ることで、粒度分布がほぼ推定可能となる。

- 3) 中小規模の洪水により河床洗掘は進展するが、流路の幅幅は、平均年最大流量規模の洪水によって進展する。
- 4) これまでの検討から、急流河川では、礫筋流れが河岸に衝突するところでの局所洗掘深とそこでの河床を構成する石礫の大きさの分布との関係を知ることが、護岸、根固め設計に必要な最大深掘れ深を決めることになるかと推定される。今後、この点を十分工夫した現地実験を行なう必要がある。

破堤による氾濫流量の評価について

- 1) 破堤点を含む水面形の時間変化を与え、二次元非定常解析を用いることで、破堤断面形状の時間変化等を考慮せずに氾濫流量ハイドログラフを高精度で見積もる数値計算方法を示し、現地での破堤実験によって本方法の適用性を検証した。その結果、本方法は、破堤氾濫流量ハイドログラフの推定に有効であり、堤内地の氾濫解析と合わせて用いることによって、精度の高い氾濫予報を行える学問的背景が出来上がった。
- 2) 実河川における破堤氾濫流量の把握のためには、ヘリコプター等で空中から河道の水面形の写真撮影を行い氾濫時の水面形の時間変化を把握することが望ましい。同時に、氾濫域の空中写真も撮影し、氾濫域の広がりや、氾濫水深機動力を使って観測するしっかりした体制整備が望まれる。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 2) 黒田勇一，福岡捷二，山本輝，吉田和弘，井内拓馬：礫床河川の礫筋変動機構と河床粒度分布特性，河川技術論文集，第11巻，pp.363-368，2005。
- 3) 建設省土木研究所：氾濫シミュレーション・マニュアル（案）－シミュレーションの手引き及び新モデルの検証－，土木研究所資料，第3400号，1996。
- 4) 福岡捷二，渡邊明英，原俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，第761号/Ⅱ-67，pp.45-56，2004。
- 5) 福岡捷二，渡邊明英，原俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，第761号/Ⅱ-67，pp.45-56，2004。
- 6) 福岡捷二，永井慎也，佐藤宏明：河川合流部を含む本・支川の流量ハイドログラフ，貯留量の評価－利根川・渡良瀬川の平成13年9月洪水を例として－，水工学論文集，第49巻(1)，pp.625-630，2005。
- 7) 福岡捷二，渡邊明英，田端幸輔，風間聡，牛腸宏：利根川・江戸川分派点を含む区間における流量ハイドログラフと粗度係数・樹木群透過係数の評価，水工学論文集，CD-ROM(50)，2006。

(2006. 4. 6 受付)