水工学論文集,第55巻,2011年2月

石礫複断面直線-蛇行河道の河床変動および河床材料分布に関する研究

STUDY ON RIVER-BED VARIATION AND ITS GRAIN SIZE DISTRIBUTION IN COMPOUND STONY-BED RIVER WITH MEANDERING AND STRAIGHT CHANNEL

前嶋達也[1]・岩佐将之[2]・長田健吾[3]・福岡捷二[4]
Tatsuya MAESHIMA, Masayuki IWASA, Kengo OSADA, and Shoji FUKUOKA

[1]学生会員　中央大学大学院　理工学研究科　土木工学専攻　（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
[2]非会員 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 (〒930-8537 富山県奥田新町2-1)
[3]正会員　博士（工学）　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　中央大学理工学部特任教授，研究開発機構教授（同上）

Distributions of river bed material are important to the bed variation as well as flood discharge and river plan form. The previous flume experimental studies have showed that the mechanism of bed variation in channels with sediment mixture is different from that of uniform sediment. But grain size distributions of the previous experiments are smaller than natural stony-bed rivers and gravel-bed rivers.

In this study, we carried out field experiments by using compound straight-meandering channel in the Joganji river. And we compared the results of field experiments with the results of flume experiments. Furthermore, we performed the numerical analysis of the unsteady quasi-three-dimensional flow and bed variation in stony-bed channel and compared numerical computation results with field experimental results.

Key Words : *field experiments, compound-channel , stony-bed river, meander, grain size distribution, sorting, quasi-3D numerical model*

１．序論

石礫河川の河床構成材料は，300mmを超える巨石から数mm程度の砂まで非常に幅広く存在する．また，河床勾配が急であるため洪水時の流体力が大きく土砂移動が活発となり，中小規模の洪水でも河床変動及び河岸侵食が生じる．我が国の石礫河川の代表である常願寺川では，平均年最大流量規模の洪水が生じると，澪筋位置が変わり河道内全体で河床変動が生じる[1)]．洪水時の河床変動機構は，流量規模，河道平面形状，河川構造物の影響などに加えて河床構成材料が重要となる．芦田ら[2)]は，単断面蛇行流路において混合砂のsorting現象及び平衡河床形状に関する理論的，実験的な検討を行い，河床材料の違い，流量の違いにより深掘れ位置や河床材料分布がどのように変化するかを検討した．しかし，混合粒径に関する既往研究の多くは，室内実験水路で行われているため実験条件が限られ，特に使用できる河床材料の大きさや粒度分布に限界がある．著者らは，2004年から2008年にかけて常願寺川で現地河床材料を用いた大規模現地実験[1), 3) 4), 5)]を行い，河床材料が大きい石礫河川における河床変動機構，河床材料分布特性を調べた．実験は，砂州上に単断面直線及び蛇行水路を開削し異なる流量条件で行った．石礫河川は，河床表層に大きな石が現れることで河床が安定すること，互いに噛み合った大きな石が細かな砂礫を捕捉することで広い粒度分布を形成するなど砂河川や砂礫河川とは異なる河床変動機構，河床材料分布となることを示した．しかし，これらの実験水路は単断面河道であり，断面形状が単断面と複断面では洪水時の流れ場，その結果として生じる河床変動及び河床材料分布は異なる．複断面蛇行河道の河床変動，河床材料分布に関する実験的研究は，芦田ら[6)]，Julio・福岡ら[7)]により検討されているが上述した既往実験と同様に河床材料の粒径が小さく，石礫河川の河床変動現象とは異なると考えられる．本研究は，2009年に常願寺川河川敷水路で行った複断面直線 - 蛇行水路を用いた現地実験結果をもとに，複断面河道における河道縦横断面形状，河床材料分布の時空間変化特性を検討する．そして，既往の混合粒径を用いた単断面直線，蛇行河道及び複断面蛇行河道の室内水路実験結果と比較を行い，石礫河川の河床変動

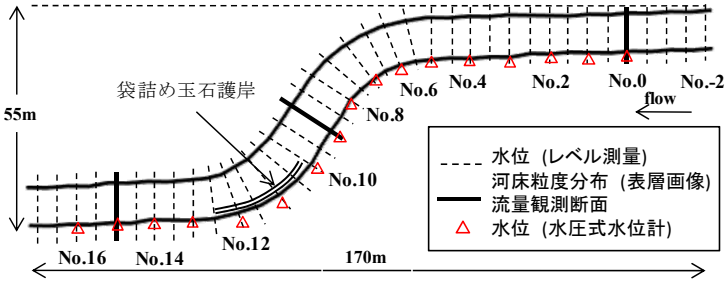


図-1 実験水路平面図

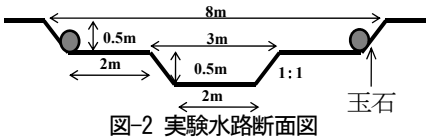


図-2 実験水路断面図

写真-1 玉石護岸の設置状況

表-1 実験諸量

(a) No. 0断面

実験CASE	通水1回目	通水2回目	通水3回目	通水4回目
流量（m^3/s）	2.0	3.2	8.0	12.0
低水路水深(m)	0.34	0.56	0.80	1.10
高水敷水深(m)		0.17	0.41	0.69
水面幅(m)	3.1	6.9	7.8	8.5
平均河床勾配	1/130		1/150	
平均粒径(mm)	70	70	85	95
低水路の無次元掃流力	0.023	0.037	0.044	0.054
高水敷上の無次元掃流力		0.011	0.022	0.034

(b) No. 9断面

実験CASE	通水1回目	通水2回目	通水3回目	通水4回目
流量（m^3/s）	2.0	3.2	8.0	12.0
低水路水深(m)	0.38	0.60	0.71	0.91
高水敷水深(m)		0.16	0.45	0.68
水面幅(m)	3.5	6.9	8.4	9.0
平均河床勾配	1/130		1/150	
平均粒径(mm)	70	70	40～90	40～90
無次元掃流力	0.025	0.040	0.051	0.065
高水敷上の無次元掃流力		0.011	0.032	0.049

に対する現地実験の持つ重要性を示す．また，非定常準三次元洪水流・河床変動解析法を用いた現地実験の再現解析を行い，石礫河川の河床変動解析に対する従来の砂礫を中心とした解析法の課題をまとめる．

２．石礫複断面直線-蛇行水路を用いた現地実験

実験は，常願寺川8.6kmの高水敷上に2つの直線区間とその間に2つの蛇行部を有する複断面直線 - 蛇行水路を掘削し，通水した．**図-1**に実験水路平面図，**図-2**に初期断面形状を示す．2つの蛇行部の蛇行度S（低水路蛇行長/低水路蛇行波長）は1.1である．1つ目の蛇行部(No.5～No.9)は，自然河岸で形成されている．2つ目の蛇行部(No.10～No.13)は，堤防河岸及び高水敷の侵食対策として，外岸から低水路際(2.0m程度)にかけて，高さ0.5m，幅1.0m，奥行き1.0mの袋詰め玉石を複数積んで保護した(**写真-1**)．その他の地点の低水路河岸は，流量規模に応じて断面形状が変形できる自然河岸である．また，堤防河岸の侵食による大量の土砂供給を防ぐために，左右岸の堤防河岸際に，約400mmの玉石を連続的に配置した．

実験水路への流入流量の制御は，建設機械であるバックホーを用いて常願寺川本川にブロックを投入したり，排除したりすることによって，本川水位を調節することにより行った．流入水による実験水路上流端河岸への流れの集中，河岸侵食を防ぐために，No.-2断面上流の左右岸に袋詰め玉石を置き，流れを整流し流入させた．また，この接続区間では，実験中の河床変動を生じさせないように大きな石で河床を被覆し，また，本川及び上流端から水路への土砂供給はない状況で実験を行った．

実験は，異なる定常流を4回通水し，河床形状が安定するまで十分な時間通水した．各実験ケース通水後の河床高，河床材料が次の通水の初期条件を与える．通水1回目は，低水路満杯流量(2.0m^3/s)を1時間40分流し，流量に見合った初期河床高，初期河床材料分布の水路を作成した．通水2回目(3.2 m^3/s)は，流量が若干大きくなるが，高水敷上の水深は縦断的にわずかであり，通水1回目と同規模の実験である．通水時間は50分である．通水3回目は，高水敷水深が40cm程度の流量(8.0m^3/s)を2時間30分通水した．通水4回目は河道満杯流量(12.0 m^3/s)を2時間30分通水した．この流量は，常願寺川の平均年最大流量を単位幅換算した流量(2.6 m^2/s)の6割程度に相当する．通水時間は，目視で動的に河床が安定した時間とした．

測定項目は，水位(水圧式水位計，レベル測量)，流量，河床縦横断形状，河床材料の時空間変化である．水圧式水位計は，低水路左岸沿いに10m毎に設置し，2秒間隔で測定した．レベル測量による水位測定は，流量観測と同時刻に左右岸の水際に沿って5m毎に行った．流量は，上流，中流，下流の3測線でプライス式流速計を用いて測定し，区分横断面積を乗じて求めた．流速測定は，鉛直方向に水位に応じて1点法，または2点法とした．横断方向には3点～5点測った．中流観測地点では，水面から深さ方向に10cm毎に流速を測り，主流速の鉛直分布を調べた．また，流量観測時には各流量観測断面の河床形状を標尺を用いて測定した．河床材料調査は，各通水終了後に表層画像調査を行い，通水4回目終了後にふるい分け試験(上層50cm，下層50cm)を併せて行った．各測定項目の測定位置は，**図-1**に示す．

３．実験結果

表-1に直線区間と蛇行区間の代表として流量観測断面No.0，No.9における各通水時の実験諸量を示す．無次元掃流力は平均粒径を用いて求めた．**図-3**に通水2回目～通水4回目の観測水位(レベル測量)と低水路平均河床高の縦断図を示す．流量が大きい通水3回目，通水4回目では，護岸上流部，蛇行区間上流部における水位の堰上げが顕著にみられる．また，自然河岸蛇行部(No.5～No.9)では，左右岸の水位差が5cm～15cm程度生じている．**図-4**に通

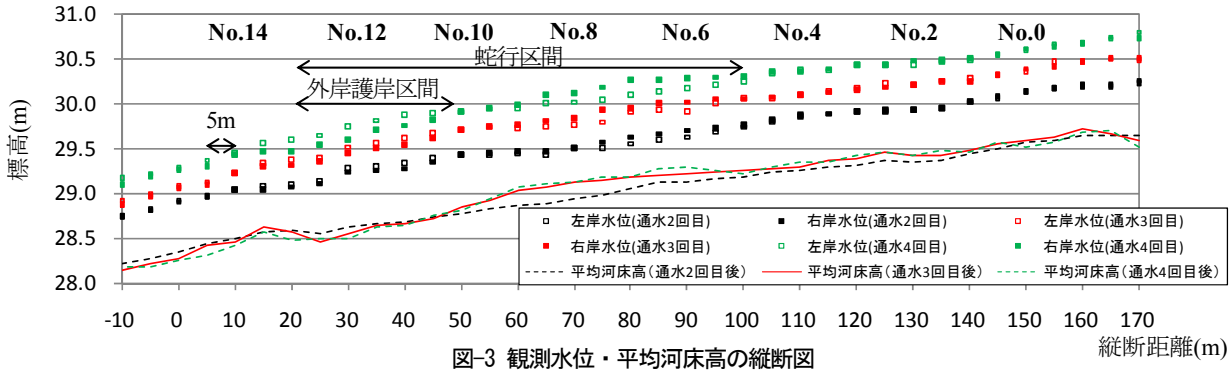
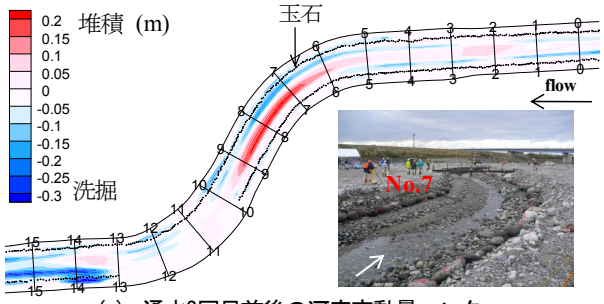
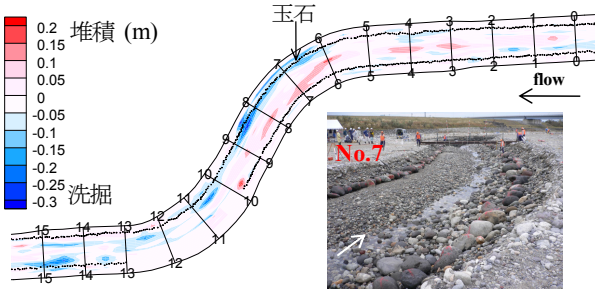


図-3 観測水位・平均河床高の縦断図



(a) 通水3回目前後の河床変動量コンター



(b) 通水4回目前後の河床変動量コンター

図-4 実測河床変動量コンター

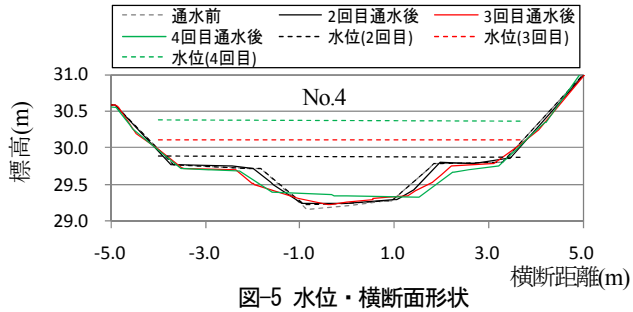


図-5 水位・横断面形状

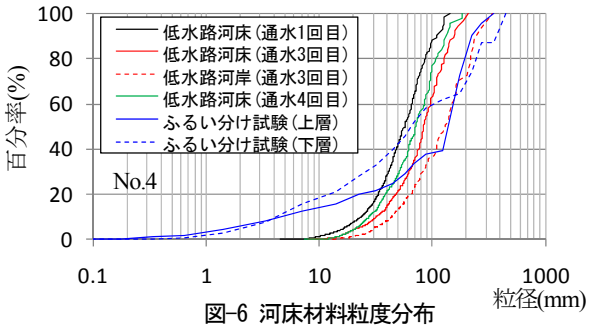


図-6 河床材料粒度分布

水3回目前後，通水4回目前後の河床変動量コンターと各実験終了後の河床状況の写真を示す．低水路満杯流量の通水2回目の前後では，若干の洗掘や堆積は生じたが，変動量は小さくコンター図は示していない．しかし，縦断的に低水路河岸際で河床表層の細かな河床材料が移動し，河床材料の粗粒化が起こり，蛇行部内岸には砂が堆積した．通水3回目では，大きく河床が変動している．直線区間での低水路河岸侵食，蛇行部外岸の侵食と蛇行部内岸での堆積により砂州が発達している．護岸設置区間(No.10～No.13)は，河積が相対的に小さいため内岸河床の洗掘が生じた．河道満杯流量の通水4回目は，自然河岸蛇行部外岸で侵食量が大きい．しかし，流量が大きいにもかかわらず低水路河床の変動量は小さい．以下に上流直線部と自然河岸蛇行部の断面形状，河床材料分布の詳細を示す．

(1) 直線区間

図-5に直線区間の代表断面(No.4)の各通水時の水位と各通水後の横断面形状を示す．高水敷水深が40cm程度の通水3回目において，高水敷河床及び低水路河岸が侵食された．**図-6**はNo.4断面の各通水後の河床材料分布(表層画像解析，ふるい分け試験)を示している．表層画像解析法は，数mm以下の細粒分の粒径の識別は困難であるが，河床表層を構成する石礫の粒度分布を得ることができる．石礫河川では河床表層の石礫が河床変動，河床安定に重要な役割を果たすため，表層画像解析法は有効である[8]．**図-6**に示す河床表層材料は，洪水の影響を強く受けるため通水毎に最大粒径が変化している．通水3回目の直線部の平均粒径に対する無次元掃流力は0.044程度であるが，実際は平均粒径を超える石も河床が安定するまでは移動していた．通水3回目後の河床材料は，低水路河床，低水路河岸の洗掘及び侵食により粗粒化し，平均粒径は約100mmとなった．流量を増大させた通水3回目，通水4回目では，低水路河床には低水路河岸からの土砂供給があり，断面全体で河床材料が粗粒化することにより，縦断的に若干の堆積，洗掘はあるが河床高はほとんど変化せず，断面形状は船底形断面形状[9]に近い形をとっている．河岸侵食により供給された土砂は，石礫に加え砂を多く含んでいる．低水路中心部を大量の細粒分と共に流下する石礫は河床に停止しにくくなる[5]．直線河道の中心部では，低水路河床での石礫の堆積は少なく，一方，低水路際は主に石礫から構成されている．

(2) 蛇行区間

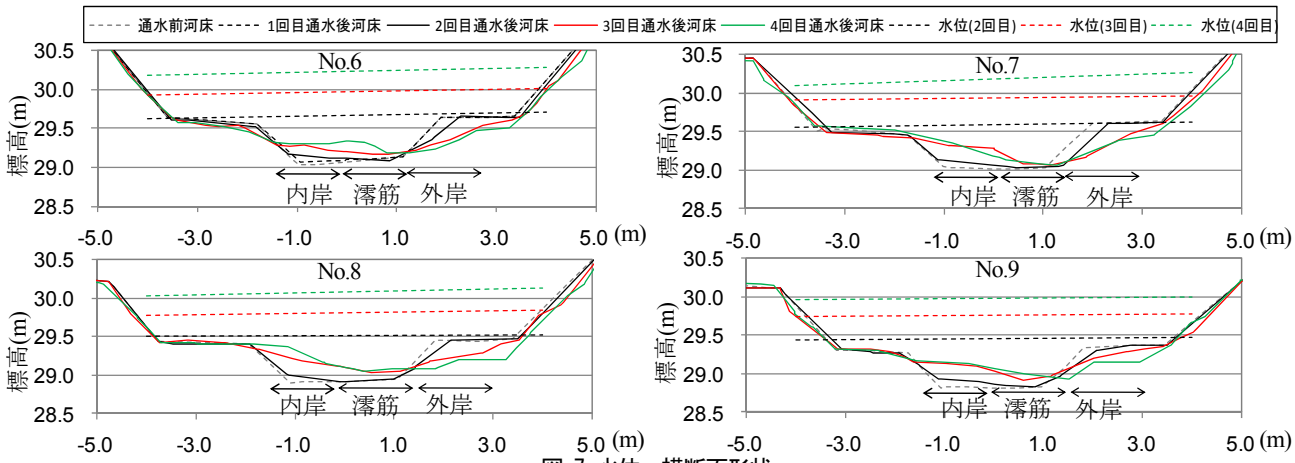


図-7 水位・横断面形状

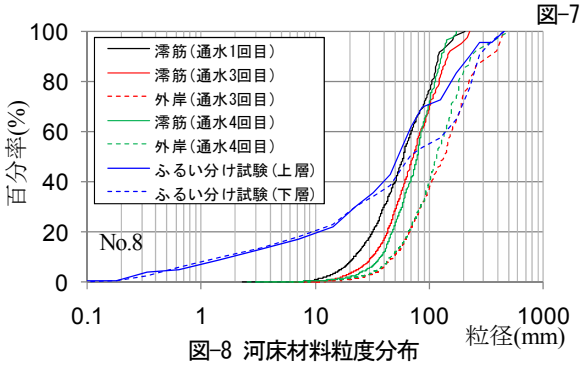


図-8 河床材料粒度分布

(a) 通水3回目終了後　　(b) 通水4回目終了後

写真-2 蛇行部通水終了後の河床状況

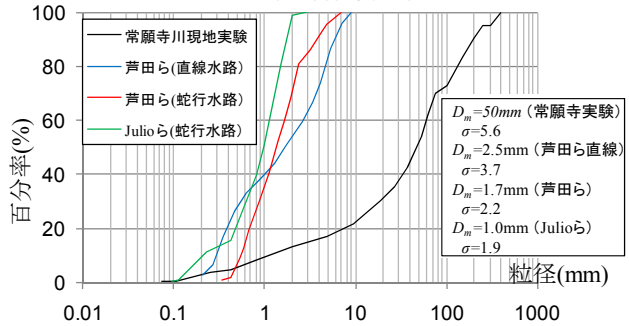
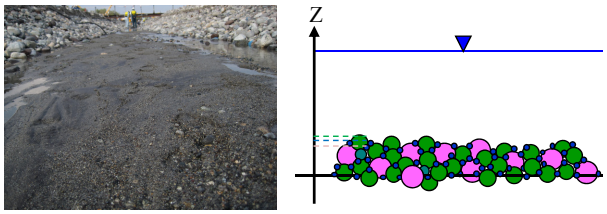


図-9 水路実験と現地実験の河床材料分布の比較

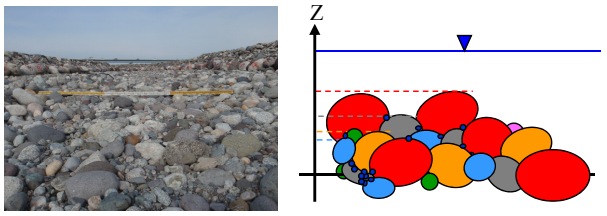
図-7に蛇行部(No.6～No.9)における各通水中の水位と通水後の横断面形状，**図-8**にNo.8断面の河床材料分布を示す．**図-7**の内岸，澪筋，外岸とは，表層画像解析を実施した範囲を示している．No.6断面は水衝部に位置するため右岸高水敷は大きく侵食された．しかし，蛇行部入口のため二次流が十分発達しておらず，No.7，No.8断面に比して内岸への土砂堆積量は少ない．蛇行頂部に位置するNo.7～No.8断面は，外岸河床の洗掘，内岸の堆積が顕著に生じた．蛇行部では，遠心力に起因する二次流が発達し，外岸の侵食と内岸の堆積により初期の複断面形状から滑らかな横断河床勾配をもつ船底形断面形状[9]に変化した．通水3回目終了後の平均粒径は，侵食された外岸で約100mm～200mm，澪筋で約70mm～100mm，内岸で40mm程度となった．**写真-2(a)**を見て分かるように横断面内で河床材料が顕著に分級している．通水4回目は，平均粒径の無次元掃流力が約0.065となり，石礫が活発に移動し断面形状の船底化は進行するが，大きな石が露出し河床が安定する．**写真-2(b)**が示すように蛇行部内岸の堆積土砂は通水3回目に比べて大きく，河床材料の分級がさらに目立つとともに河床表層材料の噛み合いが強くなり，同じ方向を向いて重なって堆積する覆瓦構造が顕著になった．また，高水敷河床が侵食されて大きな石礫が低水路に供給されるため，流量が増大しても洗掘が進行するのではなく，むしろ河床高が上昇した．側岸侵食による大きな石礫の供給は，断面形状及び河床材料分布特性に重要な役割を果たすことを示している．

(3) 混合粒径を用いた芦田ら[10]の直線水路実験及び芦田ら[2]・Julioら[7]の蛇行水路実験結果との比較

図-9に芦田ら[2, 10]，Julioら[7]が実験で用いた粒度分布と常願寺川実験砂州上でのふるい分け試験による粒度分布を示す．室内水路実験と常願寺川実験では，中央粒径(D_m)は約20～50倍，標準偏差(σ)は2～3倍程度異なっており，現地石礫河川の河床材料は著しく広い粒度分布で構成されていることが分かる．芦田ら[10]は，混合砂礫の流砂現象を調べるために直線水路の河床勾配を変えて異なる7つの条件を設定し，上流からの土砂供給を0とした状態で実験を行った．用いた河床材料は，平均粒径が2.5mm，σが3.7である．流れの条件により河床変動及び河床材料分布の違いは見られるが，いずれの実験も河床低下と河床材料のarmor化が見られた．例えば，初期河床勾配1/100，単位幅流量392.5 cm^2/s，無次元掃流力0.13の条件で行った実験では，600分の通水で平均粒径が2.5mmから5.2mm，σが3.7から1.5となった．常願寺川実験の水路上流端は上流からの土砂供給はほとんどなく同様な条件と言える．通水4回目(無次元掃流力0.054)終了後の水路上流端のD_mは200mm，σは3.0となった．芦田らの実験では，細かい砂が抜け出し河床材料分布が一様化



(a) 砂河川，砂礫河川の河床状況



(b) 石礫河川の河床状況

図-10 砂河川，砂礫河川と石礫河川の河床状況

する傾向にあるが，常願寺川実験は，大きな石礫の間隙に小さな砂礫が留まることができるため河床材料は粗粒化するものの広い粒度分布を維持したまま安定できる[3),11)]．また，大きな石が河床表層を覆うため河床低下は生じていない．

次に蛇行水路実験との比較を行う．芦田ら[2)]は，単断面蛇行水路において一様砂と混合砂を用いて，それぞれ2つの流量条件(1.2l/s, 3.6l/s)，無次元掃流力(0.052，0.13)で実験を行い，流量条件と河床材料の違いによる河床形状の変化と河床材料の分級を調べた．小流量では，河床表層の細かな粒子が移動する程度の変動であるが，流量を増やすとすべての粒子が移動するため，外岸域での洗掘による粗粒化，内岸域での堆積による細粒化が進んだ．このときの河床材料は，外岸はD_m=3.0～3.8mm，σ=3.5，内岸はD_m=0.9～1.1mm，σ=2.0であった．著者らの常願寺川実験では，断面形状，河床材料分布は，流路形状，流れに応じて縦横断方向に変化する．通水4回目終了後の蛇行部外岸(無次元掃流力0.065)は，D_m=120～130mm，σ=6.6，内岸はD_m=30mm，σ=4.4であった．どちらの実験も標準偏差は，粗粒化する外岸で大きくなり，堆積する内岸で小さくなった．粗粒化した外岸域における平均粒径の初期粒度分布からの変化は，どちらの実験も約2倍，内岸と外岸の横断方向の平均粒径の差を見ても約3～4倍となり，変化の程度はそれほど異ならないように見える．しかし，平均粒径の変化率及び標準偏差がほぼ同じ値を示していても，河床材料が大きい石礫と河床材料が小さい砂礫ではそれらの持つ意味は異なる．それは，砂河川・砂礫河川は，粒度分布がある程度の広がりを有していても，図-10(a)に示すように河床材料の粒径が小さいため河床表層の凹凸(空隙)は小さく，時空間的に河床凹凸は大きく変わらない．一方，石礫河川は，初めは細かい材料で河床表層は覆われているが，図-10(b)に示すように洪水の作用により大きな石礫が河床表層に露出するため，河床凹凸(空隙)が時空間的に大きく変化し，砂礫河川に比べて極めて大きくなる．また，大きな石礫や大きな河床凹凸による河床抵抗は砂礫に比べて大きく，流れに及ぼす影響が異なってくる．加えて，石礫河床では，はまり石状の石が多くみられること，石礫の形状が様々であるため，石礫が互いに噛み合い容易に移動することができなくなる．そのため，石礫河川の土砂移動機構は，砂礫河川と同様に従来の掃流力，限界掃流力を用いた考え方や遮蔽効果を考慮する考え方だけでは説明することが難しいと考えられる[11)]．河床材料の粒径及び河床材料粒度分布は，流砂・河床変動現象を支配する極めて重要な要素である．このことは，河床材料が大きい石礫河川の河床変動に関しては現地での検討が特に重要であることを示している．

Julio・福岡らは，高水敷を固定した複断面蛇行水路に中央粒径(D_m)が1mmとなる混合砂を用いて，単断面的蛇行流れ(相対水深Dr=0.26)，無次元掃流力0.075と複断面的蛇行流れ(Dr=0.44)，無次元掃流力0.10について実験を行った．ここで相対水深Drは高水敷水深と低水路水深の比で定義される[12)]．Dr=0.26の単断面的蛇行流れでは，低水路外岸河床が洗掘された．洗掘により粗粒化した地点の河床材料は，D_m=1.27mm，σ=1.5となった．Dr=0.44の複断面的蛇行流れでは，低水路流れと高水敷流れの混合により単断面的蛇行流れに比べて蛇行部外岸の洗掘深が小さくなり，蛇行部内岸側で粗粒化が生じた．粗粒化した地点の河床材料は，D_m=1.29mm，σ=1.4であり，初期粒度分布からの変動は小さい．また，粗粒化する澪筋以外の場所では，河床変動量が小さく粒度分布の変化はあまり見られない．常願寺川実験は，初期の複断面形状が洗掘を受け船底形形状へと断面形が変化する．一方，高水敷が固定された複断面河道では，単断面河道に比べ顕著な河床変動及び分級は見られない．その理由は，高水敷が維持されるため低水路水深及び流れの混合が大きくなり，その結果低水路河床に作用する掃流力が小さくなるためと考えられる[12)]．断面形状の違いは，河床変動，河床材料分布に重要な影響を及ぼすことが分かる．

4．準三次元洪水流・河床変動解析

(1) 解析手法，解析条件

水路は蛇行しているため，流れ場，その結果として生じる河床変動，河床材料分布は二次流の影響を強く受ける．本解析では，流れの方程式に平面二次元解析で用いる連続式と運動方程式に加えて，内田・福岡[13)]の水深積分した渦度方程式を用いて底面流速を算出する準三次元洪水流解析を用いた．河床変動解析法は，慣用的な方法で行う．即ち，粒径別流砂量式には芦田・道上式，粒径別河床の連続式には平野の式を用いた．交換層厚はD90とした．本研究では，通水3回目を解析対象とし，上下流の境界条件に，No.1，No.15で観測された水位ハイドログラフを用いた．上流端からの土砂供給は，実験と同様に0とした．河岸際に連続配置した玉石の流れ場への

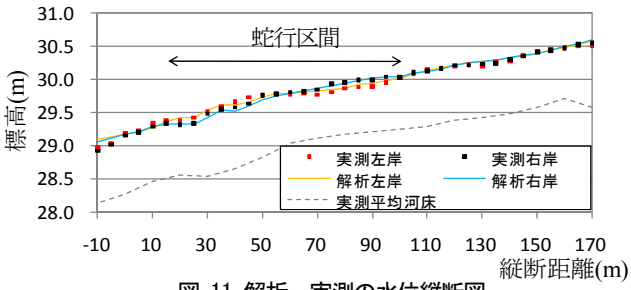


図-11 解析・実測の水位縦断図

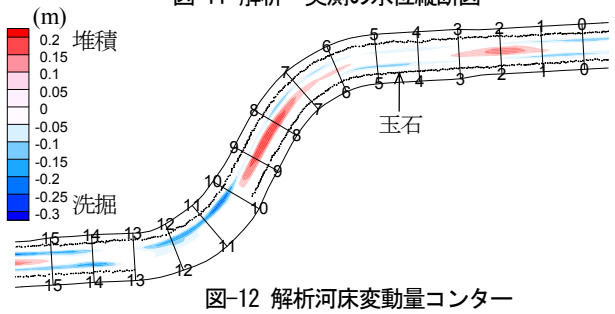


図-12 解析河床変動量コンター

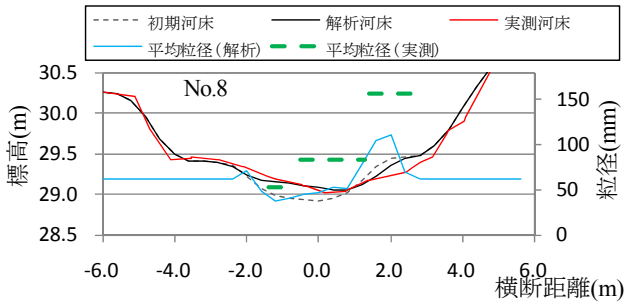


図-13 最終河床形状と平均粒径の横断分布

抵抗を考慮するために，解析メッシュ内に占める玉石の割合を算出し，玉石に働く抗力を考慮した．解析で使用した初期河床材料粒度分布は，図-6，図-8に示す結果をもとに表層と下層に分けて与えた．

(2) 解析結果

図-11に通水3回目の解析と実測の水位縦断図を示す．解析水位は，断面形状がほぼ安定した通水開始から2時間後を示している．水面形の解析値は実測値を概ね説明しているように見える．図-12に解析結果の河床変動量コンター，図-13にNo.8断面の最終河床形状と平均粒径の横断分布を示す．平均粒径の実測値は，河床表層が粗くなった状態を示しているに対し，解析値は一定の層厚内における平均的な粒度分布を計算しているため実測値に比べて小さい． 3. (3)に示したように，石礫河川の河床変動及び河床材料粒度分布は，河床材料が砂礫からなる流路での現象とは異なることから，従来の粒径別限界掃流力を用いる流砂量式と河床材料の空隙率を一定とする平野の式を用いた解析法では，石礫の土砂移動量及び河床表層の材料分布を十分再現できていない[11]．このため，図-4(a)の実測コンターと比較して，河床材料が粗粒化する区間での河床変動を再現できていない．

5．結論

1) 石礫河川の複断面直線区間，蛇行区間では低水路河岸が侵食され河床材料が断面全体で粗粒化し，複断面形状から船底形断面形状へと変化する．河床材料分布は，流れ，断面形に応じて空間的に変化し，蛇行部では外岸の侵食と内岸の堆積により顕著な分級が生じた．

2) 混合砂礫を用いた室内水路実験結果と現地石礫河川結果では，河床材料分布と河床変動は顕著に異なる．石礫河川のように河床材料の粒径及び分布の幅が大きくなると河床表層の凹凸，河床抵抗，移動形態が砂礫河川とは異なる．石礫河川の河床変動機構の解明には，現地での検討が特に重要である．

3) 大きな石の河床変動機構及び輸送過程を考慮できていない従来の河床変動解析モデルでは，石礫河川の河床変動及び河床表層の粗粒化は十分再現できない．

参考文献

1) 黒田勇一，福岡捷二，山本輝，吉田和弘，井内拓馬：礫床河川の澪筋形成機構と河床粒度分布特性，河川技術論文集，第11巻，pp.363-pp368, 2005.

2) 芦田和男，江頭進治，劉炳義，梅本正樹：蛇行流路におけるSorting現象および平衡河床形状に関する研究，京都大学防災研究所年報，第33号 B-2, pp.261-279, 1990.

3) 福岡捷二，長田健吾，安部友則：石礫河川の河床安定に果たす石の役割，水工学論文集，pp.643-648, 2008.

4) 塚本洋祐，福岡捷二，須賀正志，澤原和哉，長田健吾：石礫河川の粒度分布特性と安定河道形状，河川技術論文集，第14巻， pp.7-12, 2008.

5) 須賀正志，前嶋達也，藤本昌利，長田健吾，福岡捷二：澪筋化・低下した石礫河川の河床高回復技術の開発研究，河川技術論文集，第15巻， pp273-278, 2009.

6) 芦田和男，江頭進治，劉炳義，滝口将志：蛇行低水路を有する複断面流路における流れの特性と河床変動機構，京都大学防災研究所年報，第32号 B-2, pp.527-551, 1989.

7) Julio Masis Himenez，福岡捷二，重村一馬，山本輝：複断面蛇行流れにおける河床材料の分級機構と河床材料調査の提案，河川技術論文集，第9巻，pp341-346, 2003.

8) 山崎憲人，寺沢直樹，福岡捷二：巨石を含む広い礫径分布を有する礫床河川における粒度分布調査手法，河川技術論文集，第13巻，pp141-146, 2007.

9) 福岡捷二：これからの河川管理を考える一自然河川に学ぶ，河川 66巻，第3号，pp.3-9, 2010.

10) 芦田和男，道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第14号B, pp.259-273, 1971.

11) 福岡捷二：石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋，第44回水工学に関する夏期研修会講義集，A-1, 2008

12) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005.

13) 内田龍彦，福岡捷二：浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用，水工学論文集，第53巻，pp1081-1086, 2009.

(2010. 9. 30受付)