

混合粒径からなる砂州と河川横断構造物周辺の 河床変動解析法に関する研究

STUDY ON BED VARIATION ANALYSIS METHOD FOR RIVER WITH SANDBAR AND
RIVER STRUCTURES

忠津 哲也¹・下條 康之²・内田 龍彦³・福岡 捷二⁴
Tetsuya TADATSU, Yasuyuki SHIMOJO, Tatsuhiko UCHIDA and Shoji FUKUOKA

¹正会員 東京都建設局第一建設事務所 (〒104-0044東京都中央区明石町2-4)

²正会員 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所
(〒230-0051 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央2-18-1)

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 博(工) 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)

It is important for maintenance and management of river structures to predict movement and transformation of sandbar and local scouring around structures during floods. Bed variation in gravel bed rivers during flood is known to be subject to the grain size composition of sandbar. In this study, we investigate the horizontal and vertical variations in grain size distribution of sandbar formed by previous flood events in the Tama River. And we develop a bed variation computation method by the bottom velocity computation method for rivers with sandbar and structures, taking into account the characteristics of grain size composition of sandbars. Discussion is made on the interactions between local scouring and the Nikaryo-Syukugawara Weir in the Tama River during the 2007 flood.

Key Words: *sediment mixture, grain size distributions, bed variation analysis, sandbar transformation, local scouring*

1. 序論

砂州河道では洪水流によって砂州が移動、変形すると、それに伴って局所洗掘の発生する位置や深さが変化する。そのため、砂州河道における河川横断構造物の維持管理においては、洪水流による砂州の変形機構を把握し、構造物と局所洗掘の相互関係を明らかにすることが重要となる。砂州(砂礫堆)の形成や移動、変形に関する研究は古くから行われてきた^{例えば1)2)}。河川横断構造物周辺の河床変動に関する研究については、水理模型実験における検討³⁾⁴⁾や、実河川の堰をモデルとした堰周辺の土砂堆積や洗掘に関する再現計算が行われている³⁾⁵⁾。著者らは平成19年9月洪水の際に局所洗掘が要因の一つとなって堰上流側の護床工が被災した⁶⁾⁷⁾二ヶ領宿河原堰を対象に堰周辺の河床変動について検討してきた⁷⁾⁹⁾。横断測量データや航空写真を用いて堰周辺と上流の経年的な河床形状を比較した結果、経年的な砂州の移動とともに局所洗掘の発生箇所が堰に接近していたことが分かった。また、洪水時の堰近傍と上流の河床変動について、湾曲部

や構造物周辺の流れの三次元性を考慮できる非定常の準三次元河床変動解析法を検討した。しかし、初期の河床材料に一樣粒径⁷⁾や平面的、鉛直的に同じ粒度分布⁹⁾を与えた解析では、砂州の移動量や変形を十分に説明できなかった。黒田ら¹⁰⁾は、常願寺川の砂州を構成する河床材料の粒径は平面的、鉛直的に変化していることを明らかにし、砂州は洪水による河床変動履歴の影響を受けていることを示した。このことは、砂州を有する礫床河川の河床変動解析において、粒度構成を考慮する必要性を示唆しており、このために粒度構成が洪水時の河床変動にどのように影響するのかを明らかにする必要がある。

本研究では、砂州の粒度構成について、平成20年に行った多摩川の現地砂州(写真-1, 24.6km付近左岸)を対象とした調査⁹⁾に加え、同一砂州を対象として新たに砂州側面の滞筋部や砂州下流部等の河床材料調査(平成22年)を行い、砂州の平面的、鉛直的な粒度構成と洪水流の関係について検討する。次に、現地調査による砂州の粒度構成を考慮した混合粒径河床変動解析法を構築し、その妥当性を検証する。そして、平成19年洪水時における二ヶ領宿河原堰周辺の局所洗掘について検討する。



写真-1 ニヶ領宿河原堰上流の航空写真

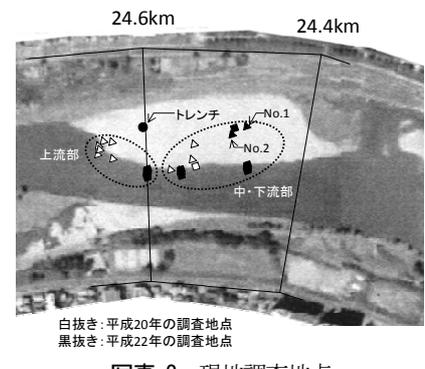


写真-2 現地調査地点

2. 現地河床材料調査

(1) 調査概要

平成22年調査は写真-2の航空写真(平成20年9月)に示すように、平成20年調査(白抜き、詳細は参考文献9)に示す)で不足していた砂州側面の滞筋部や下流部で調査を行った。図-1に示すように、両調査の間(平成20年12月～平成22年9月)における石原観測所(27.8km)での月最大観測水位は、平成19年9月洪水時よりもかなり小さい。4章に示す解析においても、この期間の最大水位時(2009/10, 3.29m)には調査対象砂州の変動はほとんど生じないため、両調査時の砂州の状態はほぼ同じであったと見なせる。粒度調査はふるい分け試験と1.2m×1.2mの枠を用いた画像解析によって行った。砂州側面では、砂州の水際から10m程度滞筋部へ離れた地点を3～5分割し、重機を用いて水面下にある河床表層の材料を採取し、調査した。砂州下流部の▲で示す地点(No. 1, No. 2)では重機を用いて鉛直方向の粒度分布を調査した。重機を用いた調査では、土砂採取深さ(表層の場合は河床表面)から20～30cmの深さの土砂を採取した。●で示す24.6kmの横断側線上の調査地点については、鉛直方向の粒度構成と過去の洪水による河床変動の関係について検討するため、トレンチ(横断方向7.4m、縦断方向4.2m、深さ1.1m)を作成した(写真-3)。

(2) 調査結果

図-2は各調査地点における河床表層の粒度分布を比較したものである。なお、画像解析結果については細粒土砂の粒径を測ることが困難なため、9.5mm以下の材料の割合については枠の面積から9.5mm以上の材料の総面積を引いた値を用いた。実線が砂州の上流部、破線が中・下流部である。上流部では中・下流部に比べ粒度分布が粗く、両者のd50の平均値を比較すると上流部で20mm程度粗い。また、中・下流部の粒度分布は、平成17年度において縦断的に多点で調査された(写真-1の△地点)粒度分布の平均値と同程度である。図-3に上流部の鉛直方向の粒度分布を示す。下層の粒度分布は、表層採取後、20～30cm(図-3、破線)、50～60cm(図-3、一点鎖線)の深さで表面を修正し、画像撮影により計測したものである。

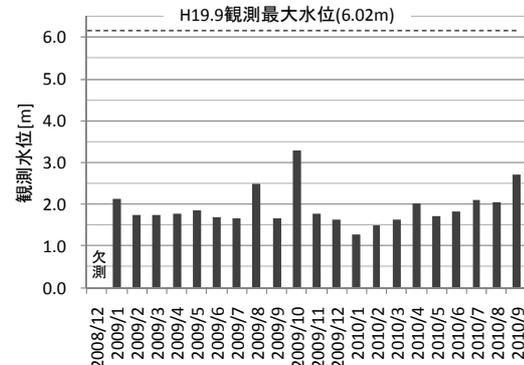


図-1 石原観測所(27.8km)における月最大観測水位

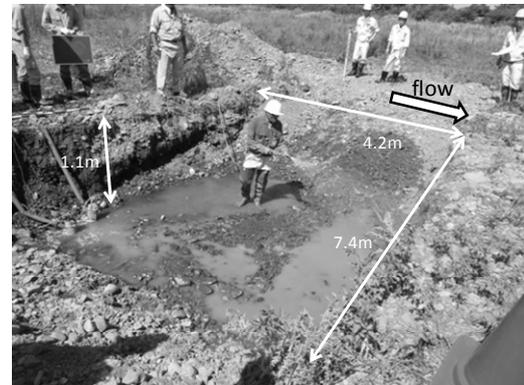


写真-3 作成したトレンチの様子

下層の粒度分布は表層と同じ範囲に分布しており、上流部では表層も下層も粗い河床材料で構成されていることが分かる。図-4に中・下流部である写真-2で示すNo. 1, No. 2地点の鉛直方向の粒度構成を示す。平成17年と平成19年(洪水後)の数値地形データからこの2地点の平成19年9月洪水時における土砂の堆積高はNo. 1が+108cm, No. 2が+59cmである。No. 1(破線), No. 2(実線)共に表層は粗粒化により中層, 下層よりも粗い。しかし, No. 2の最下層の粒度分布は表層よりも粗い。これは、この層が平成19年9月洪水による堆積厚さよりも深いため、これより以前の洪水時にこの地点が砂州前面や滞筋などの低い河床面であったときの粗い粒度分布が観測されたと考えられる。

トレンチ調査の結果を示す。図-5は平成11, 14, 20年における24.6kmの低水路横断形状とトレンチを作成した範囲を示している。調査時の河床面は平成20年2月に比べ30cm程度低い。これは、図-6に示すように平成20年8

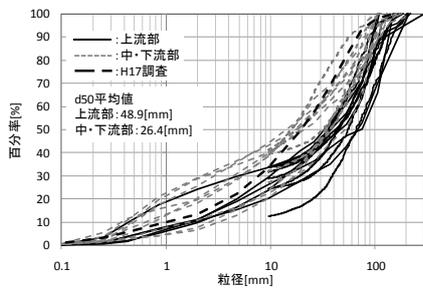


図-2 河床表層の粒度分布

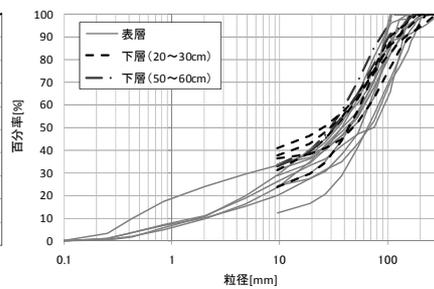


図-3 上流部の鉛直方向の粒度分布

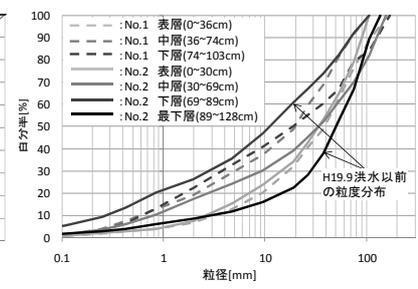


図-4 中・下流部の鉛直方向の粒度分布

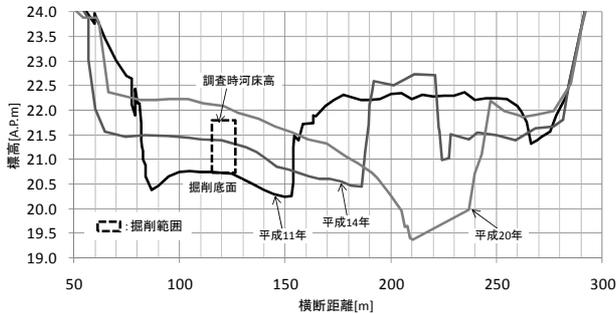


図-5 26.4kmにおける低水路横断面形

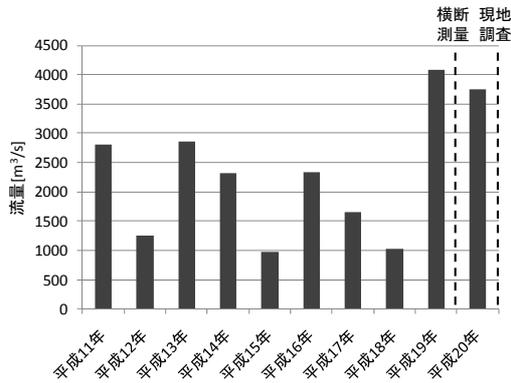


図-6 石原観測所(27.8km)における近年の年最大流量

月の洪水による洗掘のためである。写真-4はトレンチ下流側断面の様子を示している。掘削した底面から調査時の表層より80cm程度の深さ(下の白破線)の範囲には粗い材料が多く存在している。この範囲は図-5で示すように滯筋部であった平成11年付近の河床を捉えていることが分かる。また、この地点は写真-5(a)より湾曲の外岸部に位置していることから、洪水時に流れが集中し易かったことで、粗い材料が多く存在していると考えられる。写真-4では河床表層付近も粗い材料が多いが、これは調査地点が砂州の上流部に位置していたためと考えられる。これらの粗い層の間では比較的粗い粒径が少ない。この層は図-5より平成14年頃の河床表層付近に位置する。当時は写真-5(b)に示すように、砂州の中・下流部に位置していたため粗い粒径が少なくなっていると考えられる。

(3) 砂州の粒度構成の特徴

前節で示したように、砂礫河川における移動性の砂州は、過去の洪水の影響を受けて粒度構成が平面的、鉛直的に変化している。混合粒径河床変動解析において、解析区間全体の粒度構成を厳密に与えることは現実的でない

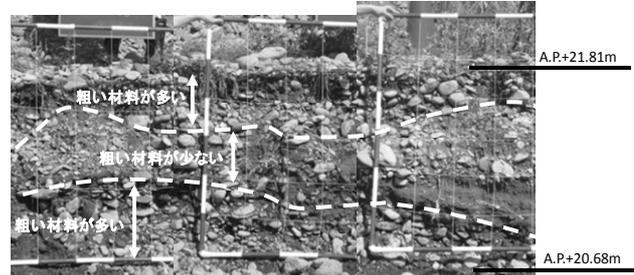


写真-4 トレンチ下流側断面の様子

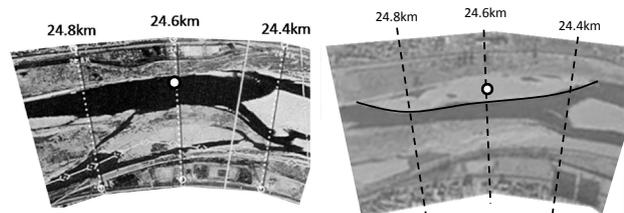


写真-5 過去の調査対象砂州周辺の様子

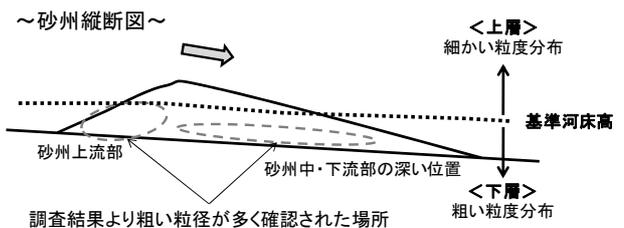


図-7 砂州の粒度構成のイメージ

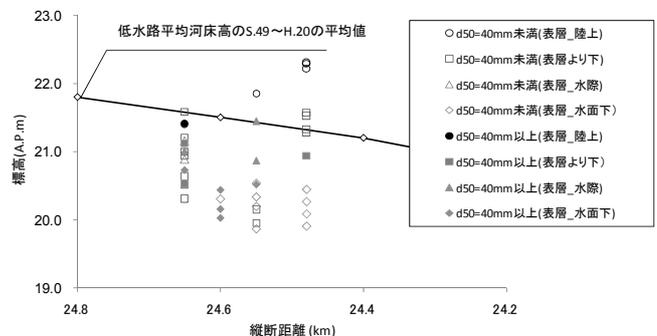


図-8 砂州における基準高さとし粗い河床材料粒径のある高さ

いため、砂州の粒度構成の特徴を踏まえた初期粒度分布を与える必要がある。砂州の移動には大きな石がどこに存在するかが重要であることから、ここでは、初期粒度分布を与えるために、大きな河床材料がどのように分布しているかの特徴を検討する。

図-7に示すように、現地調査において、調査対象とし

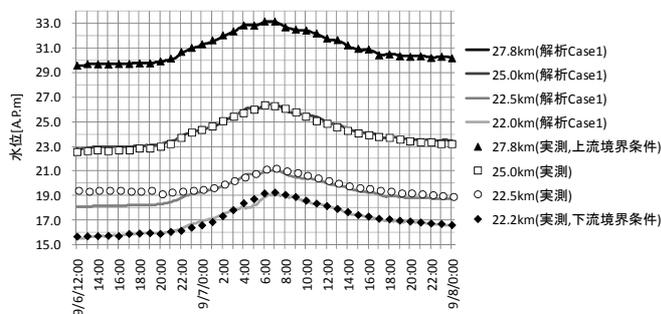


図-9 境界条件に用いた水位ハイドログラフ

た砂州では、砂州の上流部や中・下流部の深い位置等、低い個所に粗い構成材料が存在する傾向が分かった。これと同様の結果は、黒田ら¹⁰⁾によっても報告されている。彼らは常願寺川の河床材料調査により、現在の滞筋部や過去に滞筋部となっていた砂州の下層に粗い粒径が存在することを明らかにしている。そこで、図-7に示すように、基準河床高を境にして砂州上層と下層に分け、粗い材料がどこに存在するかを調べる。この基準河床高については、粒度構成が過去の洪水の影響を受けていることを考慮して決める。本研究では、昭和49, 54, 平成3, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 20の経年的な横断測量データを用いて、各断面における低水路平均河床高の平均値を基準河床高とした。図-8に基準河床高と現地調査による粒度分布調査結果を比較している。細かい粒径と粗い粒径の境界 $d_{50}=40\text{mm}$ は、図-2の河床表層の上流部と中・下流部の粒度分布の境界を参考に決定している。図-8から粗い粒径は基準高よりも下(下層)に存在することが分かる。細かい粒径も下層に位置しているが、これらの多くは、砂州水際や水面下の表層に位置しており、洪水減水期の末期に堆積したものであることから、洪水時には直ちに掃流され、砂州の移動、変形への影響は小さいと考えられる。前節で示したように、砂州の粒度構成は堆積時にその場所が砂州のどの位置に存在していたかによって変化だけでなく、河道線形等の影響も受けて複雑な層構造を成すため、厳密に表現することは難しいが、図-8のように基準河床高を考えると、河床変動解析において重要な砂州河道における粗い粒子の存在位置の特徴を概略的には表現することができると考えられる。

3. 砂州の粒度構成を考慮した混合粒径河床変動解析法

洪水流による砂州の移動、変形や堰周辺の局所洗掘における混合粒径河床変動解析法を検討する。解析区間は21.0~29.0kmとし、対象洪水を平成19年9月洪水とした。解析は、観測された水面形の時間変化に合うように流れと河床変動を一体的に解く。上下流端の境界条件には図-9に示す上流27.8km, 下流22.2kmでの観測水位ハイドログラフを与えている。流れの解析には構造物近傍や河道湾曲部の流れの三次元性を考慮するため、鉛直方向の流

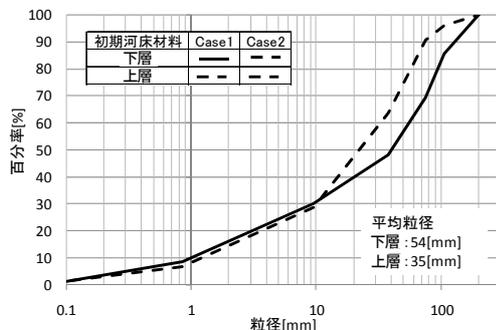
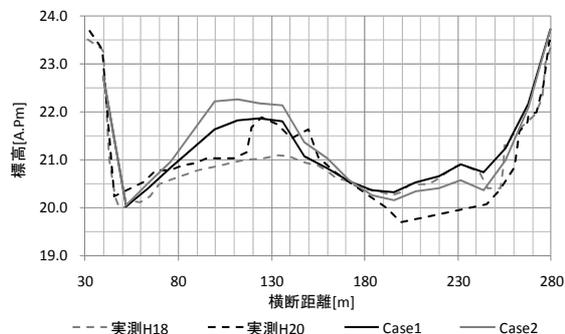
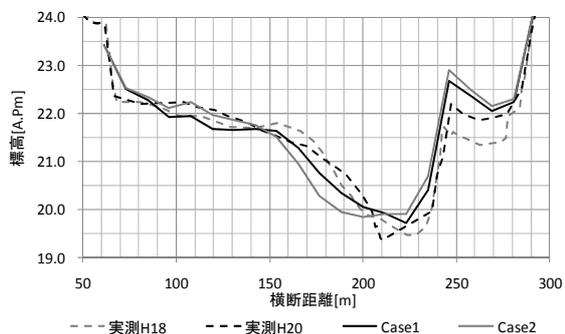


図-10 解析初期粒度分布



(a) 24.4km



(b) 24.6km

図-11 現地調査砂州周辺における解析と実測の低水路横断形状の比較

速分布を評価できる渦度方程式を用いた底面流速解法¹¹⁾を適用している。河床変動解析では流砂の連続式と平衡流砂量の算定に芦田・道上式¹²⁾を用いている。堰等の固定構造物の存在する区間では河床高が敷高以下にならないようにしている。粒度分布の各粒径階の限界掃流力については芦田・道上による修正Egiazaroff式¹²⁾を用いた。また、粒度分布については河床表層に交換層(0.2m)、その下に貯留層(0.2m)を26層設けて、土砂堆積などによる鉛直方向の粒度分布の変化を連続式より算出している。初期河床形状の設定は、砂州河床の河床変動解析で重要であることから、平成18年の横断測量データに加え、平成17年の数値地形データを用いて高水敷や砂州の形状を実河床を再現するように作成した。計算メッシュは縦断方向には21.0~28.0km区間で10m程度に分割、横断方向には左右岸の高水敷を10分割、低水路を20分割している(横断幅約350~450m)。

解析に用いる初期粒度分布を図-10に示す。初期粒度分布は、図-8に示したように基準河床高を境に上層と下

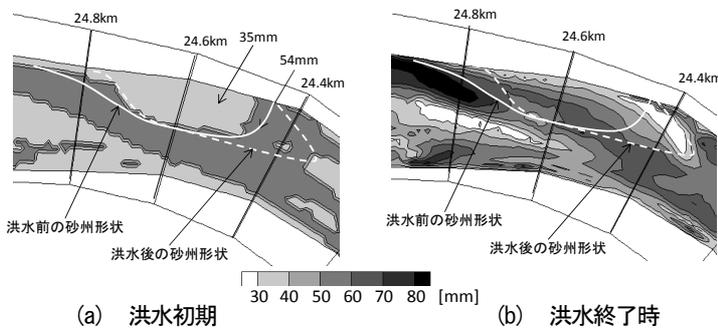


図-12 平均粒径コンター

層に分け、上層に平成17年度に解析区間内で行われた調査の結果を平均した粒度分布、下層に砂州上流部の調査結果の平均値である粗い粒度分布粗を与える(以下Case1)。また、粒度構成の効果を検証するため、平面的、鉛直的に同じ粒度分布(平成17年の平均値)を与えた解析(以下Case2)を行い、Case1と比較する。

4. 洪水流による砂州の移動、変形と堰周辺の局所洗掘に与える砂州の粒度構成の影響

(1) 砂州の移動と粗粒化

砂州の粒度構成を考慮した初期粒度分布が解析結果に与える影響と、実測との再現性について検討する。図-11は24.4kmと24.6kmにおける解析(Case1, 2)と洪水前後(平成18, 20年)に測量された低水路の横断形状を示している。24.6kmは砂州上流部の断面である(写真-2)。24.6kmの断面では、Case2では濡筋幅が実測やCase1に比べて広くなり、最深河床高が高く、砂州幅が小さくなっている。また、24.4kmでは、右岸側の濡筋部について、Case1, Case2ともに実測のように河床高が低下しない。しかし、左岸側の砂州に着目すると、Case1ではCase2に比べ実測の土砂の堆積量を再現している。

図-12にCase1の解析初期と解析洪水終了時の平均粒径コンターを示す。解析洪水終了時では白破線で示す砂州の形状より中・下流部に比べ、上流部で粗い傾向にあることが分かる。これは、2章で示した現地調査による平面的な傾向に対応している。また、初期に与えた粒度分布の平均粒径(35[mm], 54[mm])より上流部を中心に粗く、粗粒化し、砂州の下流に細粒分が堆積していることが分かる。

(2) 二ヶ領宿河原堰周辺の局所洗掘

図-13は写真-1で示す二ヶ領宿河原堰上流の22.5kmと22.6kmにおける解析と実測の低水路横断形状を示している。22.5kmでは解析Case1, Case2共に実測で示すように右岸側の洗掘部で河床高が低下している。22.6kmでは右岸側の局所洗掘に着目すると、粗い粒度分布を考慮したCase1で洗掘部が低く、洪水後実測のように洪水前の河

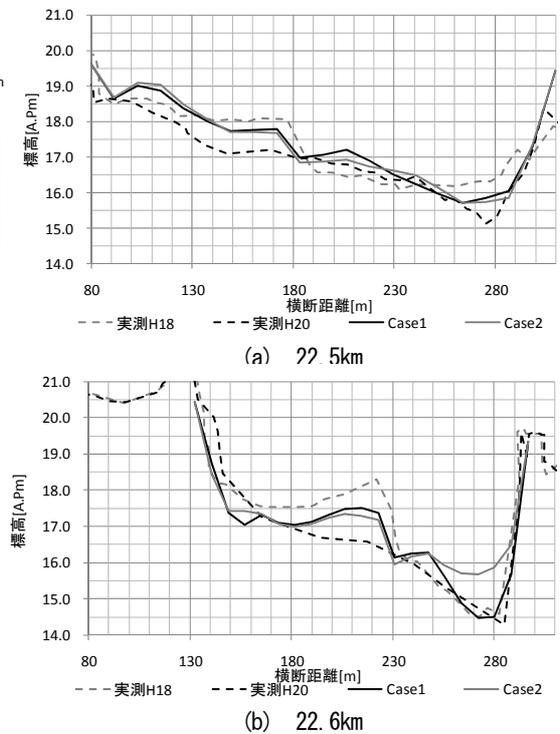


図-13 二ヶ領宿河原堰上流における解析と実測の低水路横断形状の比較

床高を維持していることが分かる。これは、粗い粒度分布を考慮したことで、局所洗掘箇所の位置や形状が維持されたためと考えられる。

このように、初期粒度分布に砂州の粒度構成を考慮することによって、洪水後の河床形状の再現性が向上することが確認できた。

5. 洪水中の二ヶ領宿河原堰周辺の局所洗掘

Case1の河床変動解析から洪水時における二ヶ領宿河原堰周辺の河床変動について検討する。平成19年9月洪水による二ヶ領宿河原堰上流側の護床工の被災は、現地の監視カメラより洪水ピーク付近(9/7/7:00頃)に発生していること、また、洪水後の調査より右岸側を中心に被災していたことが確認されている¹⁾。図-14は堰周辺における河床形状の時間変化を示す。堰上流では、洪水初期に比べ、洪水ピークや終了時において左岸側で砂州が下流に移動し、そのために右岸側で局所洗掘が堰に接近していることが分かる。図-15に堰上流(22.45~22.8km, 護床工上流端:22.45km)における最深河床高縦断図の時間変化を示す。堰上流では最深河床高が洪水前から護床工敷高(A.P.+17.0m)よりも低い状態にあった。22.45~22.6km においては上流から局所洗掘箇所が移動してくることで、最深河床高が低下している。また、図-16は堰直上流の22.5kmにおける洪水ピーク時の河床形状と流速分布を示している。堰直上流では右岸側の洗掘と河道湾曲や堰右岸側に設置されている土砂吐きの影

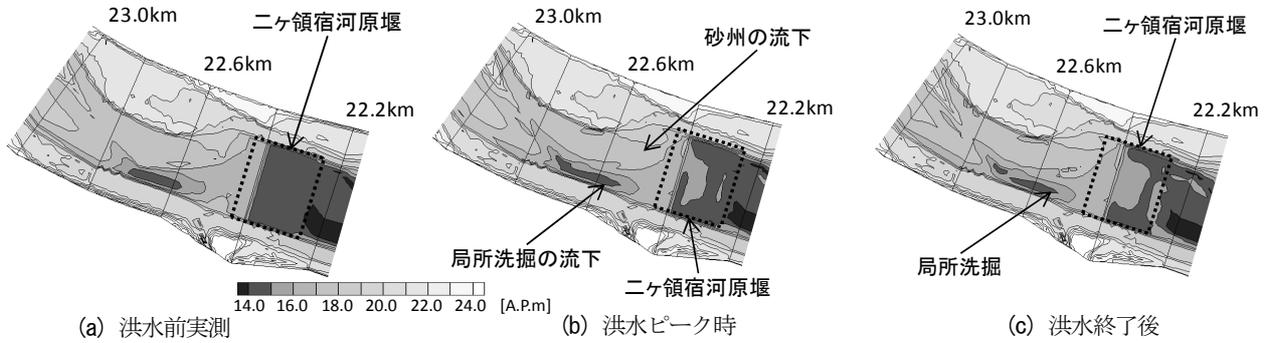


図-14 ニヶ領宿河原堰周辺における河床形状の時間変化

響を受けて、右岸側で流速が大きくなっていることが分かる。そのため、洪水ピーク付近の堰上流では右岸側を中心に護床工の安全性が低下していたと考えられる。

6. 結論

本研究では、砂礫河道における砂州の平面的、鉛直的な粒度構成を現地調査により調べた。また、それを考慮した混合粒径河床変動解析を行い、砂州の移動変形について検討した。以下に主要な結論を示す。

- (1) 砂礫河川の砂州の河床材料調査から、砂州表層では粒度分布が中・下流部に比べ上流部で粗い。下層では上流部だけでなく中・下流部の深い位置にも粗い材料が存在することがある。
- (2) 砂州の粒度構成を考慮した混合粒径河床変動解析法は、考慮しない場合に比べ、砂州の移動、変形や堰周辺の局所洗掘箇所の位置や大きさについて再現性が向上することを示した。
- (3) 河床変動解析から、平成19年9月洪水時のニヶ領宿河原堰直上流では、砂州の下流への移動変形とともに、局所洗掘も下流に移動することで右岸側の洗掘深が増大した。このことから、洪水ピーク付近では右岸側を中心に護床工の被災の危険性が増大していたと考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会水理委員会：洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究，土木学会論文集，No.345/II-1，pp.41-52,1984.
- 2) 木下良作：河床における砂礫堆の形成について，土木学会論文集，No.42，pp.1-21,1957.
- 3) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法 治水と環境の調和した川づくり，森北出版，2005
- 4) 福岡捷二，三代俊一，荒谷昌志，中須賀敦，岡田将治，田中正敏：堰の位置及び構造の違いによる堰上流，下流の河道水理量の変化，水工学論文集，第45巻，pp.397-402，2001.
- 5) 森本輝，越智繁雄，林義範，中川達郎，清水敦司：河川構造物を有する区間における準三次元解析について，第57回土木学会年次学術講演会公演概要集，第II部門，pp.209-210，2002.
- 6) 第12回多摩川水系河道計画検討委員会，国土交通省京浜河

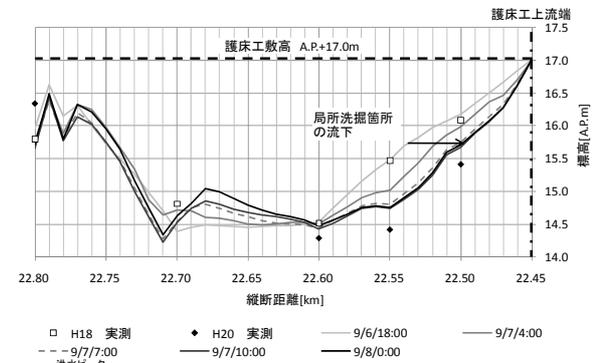


図-15 ニヶ領宿河原堰直上流の最深河床高縦断面の時間変化

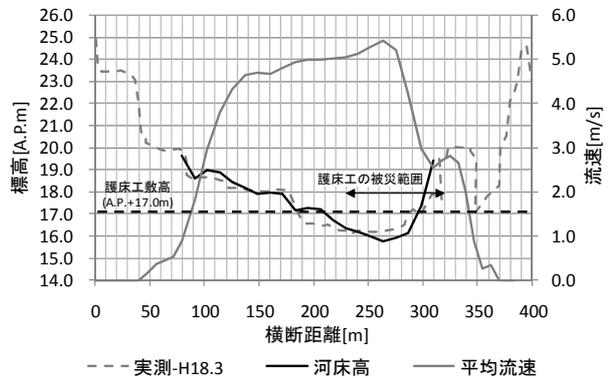


図-16 洪水ピーク時の河床形状と平均流速(22.5km)

川事務所，2007.

- 7) 忠津哲也，内田龍彦，石川武彦，福岡捷二：洪水時の砂州の変形と河川構造物周辺の局所洗掘，水工学論文集，第54巻，pp.829-834，2010.
- 8) 忠津哲也，鈴木研司，内田龍彦，福岡捷二：洪水流による土丹河床高さの経年変化と堰周辺の砂州変形に伴う洗掘深の増大について，河川技術論文集，第15巻，pp.249-254，2009.
- 9) 忠津哲也，下條康之，内田龍彦，福岡捷二：洪水時による砂の移動・変形と砂州粒度構成の変化，河川技術論文集，第16巻，pp.119-124，2010.
- 10) 黒田勇一，福岡捷二，山本輝，吉田和弘，井内拓馬：礫床河川の滯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.363-368，2005.
- 11) 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.16-29，2010.
- 12) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69，1972.

(2011. 5. 19受付)