

1次元河床変動解析に関する実測データに基づく考察

CONSIDERATION ABOUT ONE-DIMENSIONAL RIVERBED CHANGE ANALYSIS BASED ON OBSERVATION DATA

新庄高久¹・藤田裕一郎²・大橋慶介³

Takahisa SHINJO, Yuichiro FUJITA and Keisuke OHASHI

¹正会員 工博 電源開発株式会社 技術開発センター茅ヶ崎研究所環境科学研究室
(〒253-0041 茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

²フェロー会員 工博 岐阜大学教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜市柳戸1番1)

³正会員 工修 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1番1)

Based on observation data in a large-scale reservoir for power generation, Sakuma reservoir, 1D riverbed variation analyses are carried out and their results are compared with actual data, mainly sediment transport states derived from those of cross sectional survey and grain size distribution. The analyses are applied only to a winter-spring season including an artificial enhancement period of sediment transport in order to eliminate ambiguity of the upstream boundary condition of sediment supply. The results prove that 1D riverbed variation analysis is able to express only a tendency of the actual states and insufficient quantitatively, and that settings of riverbed grain size distribution, sediment transport width, etc. had to be considered carefully.

Key Words : *sedimentation, one-dimensional river-bed change analysis, observation data*

1. はじめに

天竜川は、その源を諏訪湖とし、中央及び南アルプスに挟まれた伊那谷を南下し奥三河、北遠の山岳地帯から遠州平野を経て太平洋に注ぐ河川である。延長は213km、流域面積は5,090km²に及ぶ。天竜川本流には上流から中部電力㈱の泰阜ダム、平岡ダム、電源開発㈱の佐久間ダム、秋葉ダム、船明ダムが、支流には国土交通省あるいは県所管の10ダムが設置されている。このうち、泰阜ダム、平岡ダムの堆砂量は、この20年間ほぼ変化していないことから、天竜川本流を流下してきた土砂はそのほとんどが佐久間貯水池に流入している。現在、佐久間貯水池は総貯水容量の35%が堆砂しており年間約120万m³の土砂が流入している。そのため、堆砂対策として、流砂促進（2月中旬から3月下旬の35日間、佐久間貯水池水位を低下させ、貯水池内中・上流部を自然河道状態とし、この間の流水を利用して堆砂を貯水池下流部の有効容量以下に移動）、湖内移送（浚渫船により貯水池中流部の堆砂を貯水池下流部の有効容量以下に搬送、捨土）、湖外搬出（コンクリート骨材等として砂利業者が

浚渫し貯水池外への搬出）が実施されている。

筆者ら¹⁾²⁾は、佐久間貯水池における適切な堆砂対策の立案を目標に、現地計測結果に基づいて、①佐久間貯水池における年平均流入土砂濃度は低減する傾向にある、②佐久間貯水池の年間流入土砂量は年最大日流入水量と高い相関がある、③流砂促進は、上流部で効果がやや低下しているが、中流部では効果を継続している。しかし、実施期間中のダム水位及び流入量により効果が大きく変化する、ことを明らかにした。そして、流砂促進をより効率的に実施していくために、河床変動解析による検討を行っている。その中で、汎用性が高いとされ、他でも適用・検討されている³⁾1次元河床変動解析法でも、浮流砂の算定方法、河床堆積土砂の適切な粒度分布の把握等、解析目的に応じた適切な情報収集が必要であることが明らかになった。

本文では、上流端土砂供給を考慮する必要がない、冬季から春季に掛けての約1ヶ月の流砂促進期間を含む時期に対して、ダム水位等を変化させたいくつかの設定条件下で1次元河床変動解析を実施し、それらから算出された流砂量と、佐久間貯水池で毎年計測されている測量データをもとに算出された各断面の通過土砂量を比較し、

手法の適用性について検討を加えたものである。

2. 1次元河床変動モデルの概要と解析条件

(1) 1次元河床変動計算の概要

計算の概要は以下の通りである。まず、河床高、河道幅、河床粒度構成、河道粗度係数、および、境界条件の上流端流入量と下流端水位を入力し、1次元不等流計算によって水理量を算定する。ついで、掃流砂量および浮流砂量を計算し、流砂の連続式から河床変動量を求め、それによって、実測河床断面を水深方向に上下させる。なお、流砂量式については、掃流砂には芦田・道上の粒径別流砂量式⁴⁾、浮流砂の底面濃度にはLane-Kalinskeの式⁵⁾を用いている。

(2) 解析条件

a) 解析期間

佐久間貯水池では、毎年、出水期終了後の11月、流砂促進終了後の5月に堆砂測量を行い、貯水池横断形状や堆砂量、流砂促進による効果を把握している。そこで、出水終了後から流砂促進終了後までの時期であれば流入土砂をほとんど考慮しなくてすむこと、河床構成材料の粒度分布が得られていることに着目して、1997年12月から1998年4月までの期間を解析期間とした。

b) 河床構成材料の粒度

佐久間貯水池では、1997、98、99年にボーリングを行って試料を採取し、ふるい分析と沈降分析によって粒度分布を測定している。実施年が異なる同一断面内の横断形状を比較したところ、ほとんどの断面における変化は5 m以下の範囲に納まっていたので、土砂移動に関わる範囲は、概ね表面から5 m程度に限られていると判断し、表面から5 m程度までのデータを平均化して土砂移動に関わる粒度分布を得た¹⁾²⁾。同一断面で複数点採取されている場合にはそれらも平均している。このようにして得られた粒度分布を図-1に示す。図中の距離はダムからのもので、以下、本文、図表とも同じである。なお、計算に当たって、データの無い断面については、上・下流の断面の粒度を距離で按分している。また、データの無い下流区間の断面の粒度分布については、堆砂デルタの下流という貯水池の状態から、データを有する最下流断面に同じとし、上流側も同様な処理をした。さらに、解析プログラムの関係から10の粒径階に分割し直して入力した。

c) 流砂幅

土砂移動が発生していると想定される幅（流砂幅）については、1次元不等流解析で得られる断面平均的な掃流力が河床土砂の移動限界を上回った場合、水面下（潤边上）ではどこでも砂が移動する可能性があるが、岩盤が露出していたり、樹木に覆われていたりする側岸領域

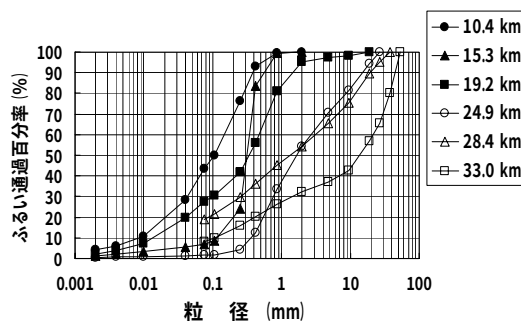


図-1 佐久間貯水池内堆砂の粒度分布(1997, 98, 99年)

ではほとんど土砂移動が発生しないことを考慮して、次のように取り扱った。すなわち、1997年度河床における堆砂が元河床上に水平に堆積したものと仮定して算出される河床高さ（中部方式平均河床高と呼称）における各断面の川幅と、1997年12月1日の流積を水面幅で割った深さを水位から減じた高さ（同、静岡方式平均河床高）における各断面の川幅とを比較して、小さい方の値を流砂幅として与えた。

d) その他

水位の境界条件は実測のダム水位を下流端で与え、流量は、支流流量が微小な期間であるため、流入流量を全区間に与えている。河床交換層は河床粒度や小規模河床波を考慮して10 cmとし、比較のため一部30 cmでも試算した。

なお、浮流砂の計算中に、河床濃度が 1×10^6 ppmを超える数値となって計算が続行できなくなる事態がしばしば生じたので、次のような対応策を講じた。この事態が発生する理由は、河床に浮遊限界を遙かに下回る細粒分が少しでも含まれていると評価式で算定される値までは物理的に制限されることなく河床から水中に取り込まれて、濃度が極端に大きくなるためであった。そこで、浮流砂算定の対象粒径階の土砂が交換層に占めている濃度を流れに取り込まれる最大濃度とする制約条件を課して、浮流砂の量を算出することとした。

3. 解析結果

(1) 河床形状の縦断変化

1次元河床変動解析結果を図-2に示す。図には、計算開始時と計算終了時の最深河床および計算終了時に該当する測量結果から得られた最深河床の貯水池縦断方向の変化が示されている。

解析結果と実測結果とを比較すると、貯水池上流部では、解析結果の変動量がやや小さい傾向にあるものの、両者はほぼ合致しているが、中流部から下流部付近、特に、流砂促進の効果が確認されている9.6 ~ 15.7 km付近で、実測最深河床は大きく低下しているのに対し、

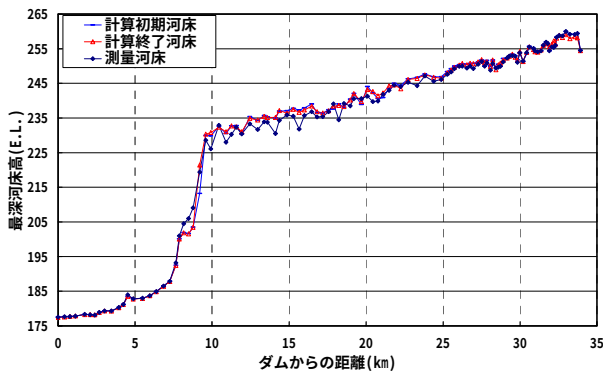


図-2 1次元河床変動解析結果

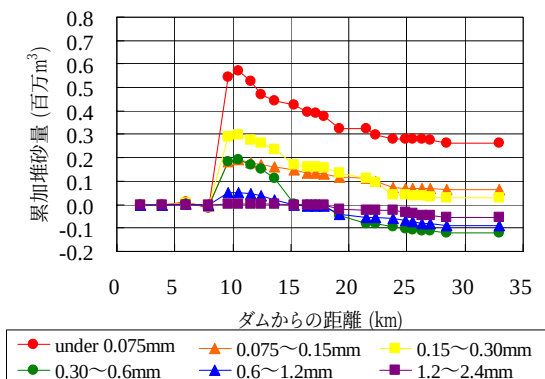


図-3 粒径別縦断方向累加堆砂量

計算解析結果ではほとんど河床は変化しておらず、この低下が表現できていない。

また、デルタ前面の 9 ～ 10 km では解析結果の河床上昇が実測のそれを上回っているが、8 ～ 9 km 付近では、逆に、実測最深河床の上昇が著しいにも拘わらず、解析結果にはそれがほとんど現れていない。中流部で計算結果に侵食低下が生じなかったのは、図-1 にも示すように、微細土砂の占める割合が少なく、結果として、流水による連行・取り込みが少なかったことによる。

(2) 流砂量の比較

毎年の実測データを基に、粒径別に上流に向かって累加した堆砂量の変化を図-3 に示す。また、1次元河床変動解析から算出された全流砂量の変化を図-4 に示す。

実測から算出された量と解析値とを比較すると、ともに 17.0 km 付近から大量に発生し始めた全流砂が 12.5 km 近辺から堆積に転じて減少し、デルタ肩 (9.6 km) に至って 0 になるという変化を示している。しかし、解析では、その上流の 20 km から 23 km までの区間にもかなり大きい流砂量のピークが発生しているが、実測ではその傾向は認められない。この区間は、川幅の狭い区間となっているために、流速が大きくなり、掃流力が増して流砂量が多くなったものと推測されるが、この区間は蛇行が著しいので、1 次元的な評価とは異なっている可能性もある。また、実測では数十万オーダーの土砂移

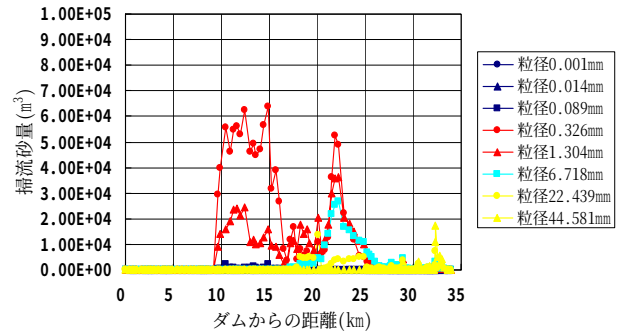


図-4 縦断方向全流砂量

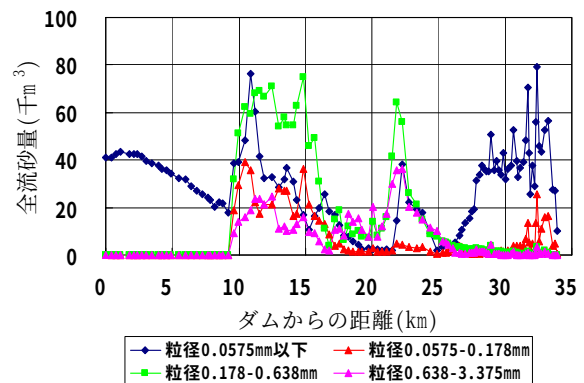


図-5 粒径別掃流砂量

動が生じているのに対し、解析では数万程度にすぎず、実測値と解析値の差が大きい。この差は、実測ではダム上流から微細土砂供給される結果となっていることが主因であるが、これは冬期の実状に合わず、デルタ部の測量精度に起因する誤差によるものと考えられる。

(3) 粒径別の土砂流送状況

a) 掃流砂量の変化

図-5 は、流砂促進期間終了時までの掃流砂量の粒度別貯水池縦断方向の変化を示したものである。いくつかの粒径について、1 ～ 3 の区間において掃流砂量が増大している大小のピークが認められる。

これらのうち、9.6 km から 17.6 km 付近にあたる最下流区間に位置するピークは、粒径約 0.2 mm ～ 約 3 mm の掃流砂量によるものであって、17.0 km 付近から大量に発生し始めた掃流砂が 12.5 km 近辺から堆積に転じて減少していき、デルタ肩 (9.6 km) に至って 0 になるという変化を示している。このように、デルタ肩よりも下流では掃流砂が発生していないことから、掃流砂はデルタ肩の直下流に堆積してしまう現象が解析にも明らかに現れている。

図-6 は、図-5 で掃流砂量の多かった粒径階 0.326 mm、すなわち、粒径範囲 0.178 mm ～ 0.638 mm の掃流砂量の経時変化を計算開始からそれぞれの経過日数まで累積して貯水池縦断方向に示したものである。9.6 km

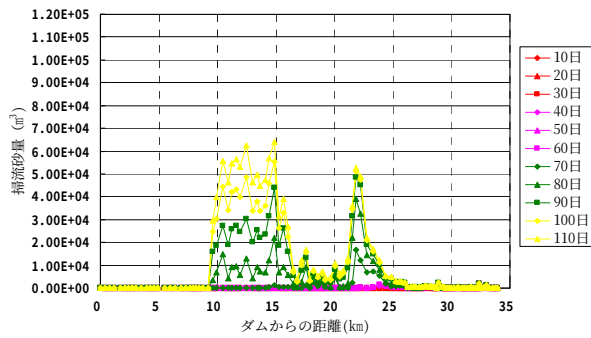


図-6 累積掃流砂量の経時変化(粒径 0.178～0.638mm)

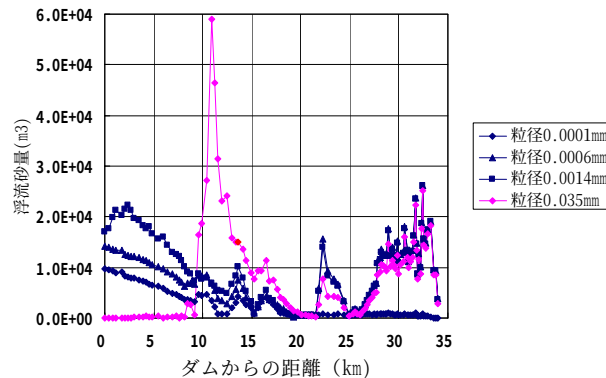


図-7 粒径別浮遊砂量

から 17.6 km 付近の掃流砂量は、計算開始後 70日を経過すると急激に増加し始め、110日経過後まで増加を継続している。この期間は、流砂促進期間の2月14日～3月20日（76～110日目）に合致しており、ここでも、流砂促進による顕著な土砂移動が明確に示されている。

b) 浮流砂量の変化

次に、浮流砂の移動について検討する。図-7 には、流砂促進期間終了時中までの粒度別浮流砂量の貯水池縦断方向の変化を示している。図に示す粒径より大きい粒径については、貯水池の全区間で浮流砂量がほとんど算定されておらず、数値解析からは浮流形態での土砂移動の発生しないことが確認される。粒径階 0.014mm（粒径範囲 0.009mm～0.025mm）以下の粒子については最上流部、23 km付近およびデルタ肩付近で発生し、デルタ肩付近で発生した浮流砂はダム地点まで到達して流出している。粒径階 0.035mm（粒径範囲0.025mm～0.0575mm）の細砂は、デルタ肩の直上流部で多量に浮流しているが、デルタ肩下流で全て沈降して行くことが判る。

図-8 および図-9は、それぞれ、粒径階 0.001 mm（粒径範囲 0.003 mm 以下）および粒径階 0.014mm（同 0.009 mm～0.025 mm）の細砂について、図-7 と同様に、経時的な浮流砂量の変化を経過日数までの累積値として貯水池縦断方向示したものである。これらの図によれば、貯水池の中・上流部では計算を開始して1～2日後に、下流部でも同じく10日後には経時的な累積浮流砂量が変化しない解析結果となったために、1本の線に重

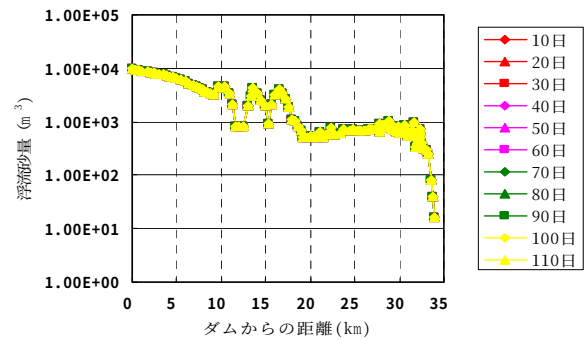


図-8 累積浮流砂量の経時変化(粒径 0.003mm以下)

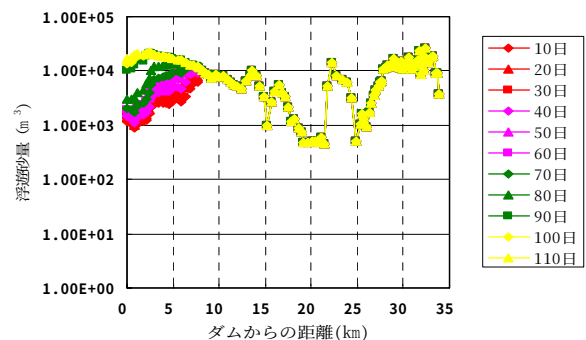


図-9 累積浮流砂量の経時変化(粒径 0.009～0.025mm)

なったものである。すなわち、河床に含まれる当該粒径の土砂が、浮流砂として計算開始直後に全て移動してしまう結果となったことを表しており、流砂促進を実施していない通常時でも貯水池全区間で河床表層から浮遊し全てが放流されることがわかる。また、この流出総量は約1万m³と推算されていて、佐久間発電所に設置されている濁度データから求められた流出量¹⁾²⁾よりもオーダーが1桁小さい。

図-9 の粒径階 0.014mmの場合では、デルタ肩（9.6 km）より上流については、やはり、貯水池の中・上流部では計算を開始して1～2日後で、河床に含まれる当該粒径の土砂が、全て浮流砂として移動している。一方、デルタ肩下流では、浮流砂量が段々と流下方向に増加していて、侵食の生じていることが示されている。この堆積も、流水掃砂に入る前に比べ、掃砂期間中は、70日～90日間の変化のように、その量が増加しながら下流に限定されていくことが明らかで、この粒径の土砂もダム地点まで到達し流出している。

図-10 は、粒径階 0.035 mm（粒径範囲 0.025 mm～0.0575 mm）の浮流砂量について、その時間的累加量の貯水池縦断方向変化をこれまでと同様に経時的に示したものである。流砂促進時期では 13.6 km～15.7 km の貯間において、浮流砂量が増加するものの、デルタ肩の直下流で大量に沈降し、出水時の場合はそれよりも下流に浮流砂の発生が認められるが、ダム地点まで到達するものは極めて僅かであることが示されている。

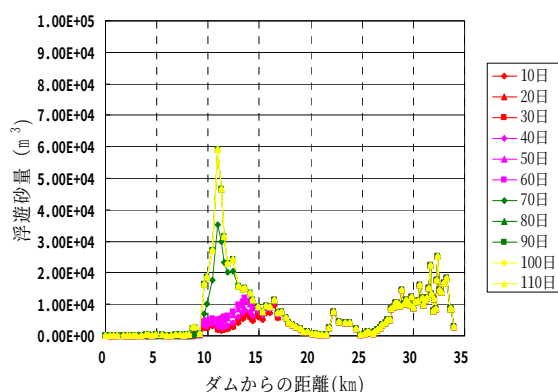


図-10 累積浮流砂量の経時変化(粒径 0.025～0.0575mm)

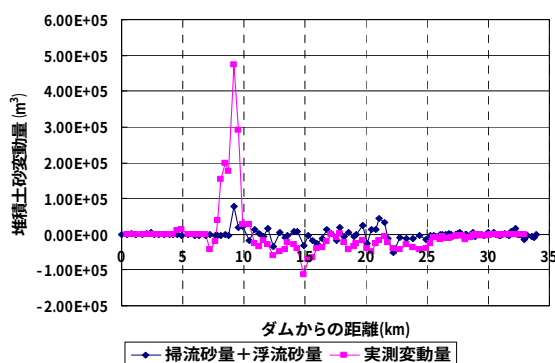


図-11 侵食・堆積土砂の変化量

c) 土砂収支量の変化

各隣接断面間における流砂量の差を考慮し、土砂収支の形で、解析結果の侵食・堆積土砂変動量と実測変化量とを比較したのが、図-11 である。同図では、貯水池中流部において、実測値は明らかに全体的な侵食傾向にあるのに対し、解析結果はほとんど侵食傾向を示していないが、細部の変動を示す凹凸の出現状況は実測の変動状況と類似している。また、侵食量が少ない分、デルタ肩付近の土砂堆積量に差が生じてはいるが、最大の堆積箇所は一致している。

デルタ肩付近での堆積量に差が生じていることについては、浮流砂量の算出に誤差が生じていることが要因の1つと推定される。これは、浮流砂量の発生を交換層に制限したことが、逆に浮流砂量を過小に見積もってしまった可能性があり、実際それを30cmとした場合には僅かに改善されていた。今後、交換層の厚さの設定や浮流砂発生量の制限方法などを検討していけばより妥当な結果の得られる可能性が高いと判断される。

また、今回の解析では、貯水池のどの断面においても総流入流量に等しい流量として計算している。実際には、それとは異なる発電使用水量で貯水池は運用されており、流れも厳密には定常流ではない。このような発電取水との関係を考慮するとともに、その発電取水に含まれている土粒子の粒度分布を測定することなどにより、数値解析の手法や結果の妥当性を検証・評価する必要がある。

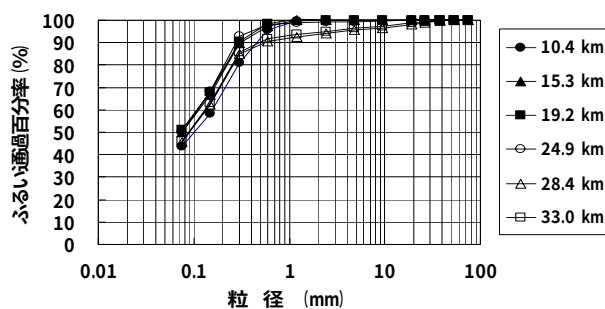


図-12 実測値から算出された移動土砂粒度分布

4. 1次元河床変動解析の適用性に関する考察

前出の粒径別累加曲線(図-3)から、この期間で実際に移動したと考えられる土砂の粒度分布を示したのが図-12 である。一方、貯水池に堆積している堆砂は、図-1 に示されるように、水流による篩い分け効果もあり、上流ほど粗い粒度分布を有している。しかし、図-12 のように、移動した土砂は、堆砂デルタ肩より上流では、貯水池内の場所によらずほぼ同じ粒度分布を有している。しかも、前述のように誤差を含んではいるが、かなり細粒分の多い粒度分布となっており、ダム地点から 10.4 km 付近の堆積土砂粒度とほぼ同じである。このように、貯水池の河床変化に関わっている土砂の粒度は、そこに堆積している土砂のうち、細粒分の比重が高いことが判る。また、1 mm を超える土粒子の移動は、19.2kmから下流ではほとんど生じていないが、24.9kmよりも上流では数%以上発生していることも示されている。今回実施した1次元河床変動解析では、流砂促進期間を中心としたものではあるが、貯水池中上流部では 0.3 mm 程度の粒径の掃流砂が多く発生しており、1 mm 程度の粒径の掃流砂もかなり発生していた。また、浮流砂の発生は、0.3 mm 程度以下に限られていた。このように、河床変動解析結果でも概ね1 mm 程度以下の粒径が土砂移動に関係していることが明らかであって、実測の移動土砂の粒度特性との整合性が確認される。

なお、図-2 によれば、解析結果に貯水池中流部での河床低下はほとんど認められない。図-4, 5 では、これらの断面においても相当量の掃流砂や浮流砂は発生しているので、洗掘されていても、より上流から移動してきた土砂が堆積して、僅かな河床変動という結果となっているにすぎない。このように、上流からの供給土砂の量と質(粒度分布)に河床変動が大きく支配されることはここでの解析結果でも明らかであり、侵食が卓越する区間ではとくに河床粒度の設定が重要になる。一方、堆積区間についても、交換層を通じて河床土砂との混合が線

り返されるので、解析モデルにおけるその設定は流砂量の算定に影響を与えることとなり、河床粒度を適切に設定する必要がある。

例えば、ボーリング調査により河床土砂の粒度分布を測定するにしても、直接的には土砂移動に起因して河床変動が生じていることを考慮して実施すること、また、粗粒化の可能性のある上流部や横断方向に粒度が大きく変化する彎曲部については、河床表面の写真撮影等による粒度測定等、多箇所でも比較的容易に測定できる手法を合わせて実施すること等で、より精度の高い解析に繋げることができるものと思慮される。

浮流砂量の算出では、一般的な浮流砂量式でもそのまま適用すると、際限なく浮流砂濃度が上昇する結果となる場合があって、適切な制約条件を課す必要があることを指摘した。ここでは、該当する粒径階の土砂が交換層に占める割合から制約条件を付して、物理的に不合理と判断されるような発生量を抑えることはできた。このように、解析モデルの適用に当たっては、簡単ではあるが合理的と見なされる条件を設定しなければならない場合のあることが明らかになった。今回導入した制約条件についても今後妥当性の検証を継続していく必要があると考えている。

土砂移動が発生していると想定される幅（流砂幅）も、計算結果に大きく影響する。現象としては、水面下（潤边上）ではどこでも、掃流力が移動限界を上回った場合に砂が移動する可能性があり、それを反映して幅を選定する必要がある。今回のような貯水池では、通常の河川とは違い、幅に比して水深が大きいので、潤辺に側岸部の占める割合が高くなることを前提として幅を決定している。しかしながら、このようにして与えた流砂幅も、デルタよりも上流の区間では、流砂促進時の流れは通常の河川と同じ状態になるので再検討の必要性も指摘できる。実際、佐久間貯水池でも堆砂面の一部にのみ流水が存在するような広い彎曲部等では、水位変動の大きい実現象を想定して適切にきめ細かく流砂幅を設定する必要があるものと思われる。このため、実測横断形状を保持した解析法を採用しているが、現時点ではその利点を十分に活かしていない。

一方、佐久間貯水池においては、堆砂デルタ肩からダム堤体まで約 10 km あり、水深もダム近傍では 50 m を超えることから、浮流砂の多くが沈降するものと思われる。しかし、前出の図-8、図-9 にも示されるように、非常に粒径の小さい土砂については浮遊したままダム地点まで到達していることが確認され、これが、放流濁度から算定した年間数万 m^3 オーダーの排出土砂量に対応していることも指摘できる。今後、ダム近傍でダム湖水に含まれる土粒子の粒度分布を測定し、解析結果の妥当性を詳しく検証する必要であると考えている。

5. 結論

佐久間貯水池における堆砂動態について、1次元河床変動解析を行い、既往の調査結果と比較検討して、以下の諸点を明らかにすることができた。

- ・佐久間解析では貯水池では、流砂促進により主に中流部で土砂が移動していることが、実測及び解析から明らかになった。しかしながら、解析では実測に比べ、流砂量が過小に算出されて河床低下が僅かになる傾向にあった。この原因としては、中流部の河床構成材料に細粒分が少ないことが挙げられる。
- ・河床から不合理な量の浮流砂が発生しないよう、物理的な制限を設ける必要性を指摘したが、設けた制限条件では、逆に浮流砂量が過小に見積もられ、デルタ肩付近での堆積量も実測に比して過小となった。この点から、解析精度の向上には、河床粒度や交換層厚の適切な設定の重要性が再確認された。

なお、今回は、系外からの土砂流入がないという理想的な条件で解析を実施した。しかし、出水期には大量の土砂が流入しており、その量と質をどのように把握して解析に反映させていくかが重要なことは言うまでもない。

謝辞：本報告をまとめるにあたり、電源開発株式会社中部支店、佐久間電力所及びJPビジネスサービス社会環境部の各位にはデータ収集、解析にご尽力頂いた。また、岐阜大学大学院学生鷹野敏弥君、と同工学部学生小山達郎君にはデータ整理に協力頂いた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 新庄高久，藤田裕一郎：発電用大規模貯水池（佐久間貯水池）における堆砂に関する考察，水工学論文集，第48巻，pp.1153-58，2004.
- 2) T.Shinjo, Y.Fujita, J.Takahama: Hydraulic studies of sedimentation and artificial acceleration sediment transport in a large-scale reservoir for power generation, XXXI IAHR CONGRESS, pp.1800-1809,2005
- 3) 櫻井寿之，鎌田昌之，柏井条介，鈴木伴征：混合粒径河床変動モデルによる貯水池堆砂・排砂現象の再現，ダム工学，Vol16 No.1, pp.30-40, 2006
- 4) 土木学会編：水理公式集（平成11年版），丸善(株)，pp.163, 1999.
- 5) 土木学会編：水理公式集（平成11年版），丸善(株)，pp.167, 1999.

(2006.9.30受付)