

砂州が卓越する河道の河岸浸食実験に用いる 河床材料に関する検討

HYDROULIC EXPERIMENT ON BANK EROSION WITH SANDBARS USING SEWAGE SLUGE ASH

阿部修也¹・渡邊康玄²

Shuya ABE and Yasuharu WATANABE

¹正会員 (独) 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

²正会員 工博 (独) 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

CERI has been preparing for an experiment that uses a large-scale (1:25) model of the planned project section with a movable bed for restoring flow to the meander channel cut off from the Shibetsu River. It is predicted that the meandering channel flow conditions will be predominantly influenced by medium-scale riverbed morphology at the Shibetsu River restoration experiment site. To simulate such phenomenon in a model, it is necessary to create a model with as little distortion as possible. However, if silica sand and washed sand, which are widely used in hydraulic model experiments, are used as riverbed materials, ripples are likely to form due to specific gravities of the materials, which will pose problems for the experiment under the experimental conditions. To lessen these problems, we decided to use light riverbed materials, rather than reducing the particle size. A small channel model experiment showed that the sewage sludge ash is effective in reducing the formation of the ripples that tend to occur in experiments employing gentle slope and shallow-water model, and that sewage sludge ash is effective in improving similarity conditions.

Key Words : Sewage sludge ash, Meander channel, Riverbed morphology, Erosion

1. はじめに

北海道東部の標津川において旧河道を利用した蛇行河川復元の検討が進められており, 本格的な事業着手に向けて, 分岐・合流などの複雑な水理現象を伴う復元手法の確認・課題抽出が必要となっている。このため, 寒地土木研究所では事業予定区間の大型模型実験(移動床縮尺25分の1)を実施する準備を進めている。平成14年春に試験的に旧川を直線河道に接続した現地試験地では, 河床上に形成される砂州によって流れが支配され, 河岸浸食が進行することが確認されている。検討対象となる蛇行河道も試験地と同様に中規模河床形態が支配的な流況になると予想され, 現象の解明には, 河床形態と河岸浸食の両方を同時に再現する水理実験を行う必要がある。検討対象となる河道は緩やかな蛇行を示しているが, 模型の縮尺を歪めると水平軸渦やらせん流が強調され, 蛇行度の大きい箇所の流れや河床変動のパターンに顕著な影響がある¹⁾とされていることから, 無歪み



図-1 標津川下流部と周辺に残る旧河道

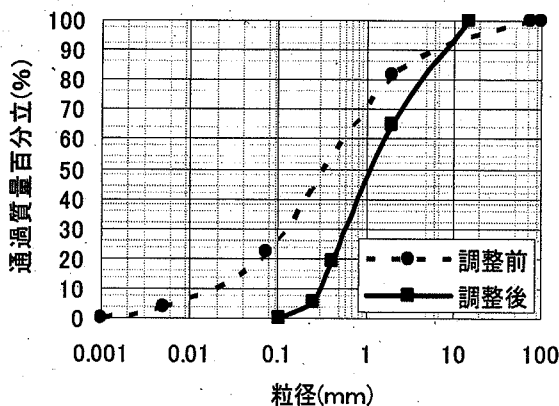


図-2 焼却灰粒径加積曲線図

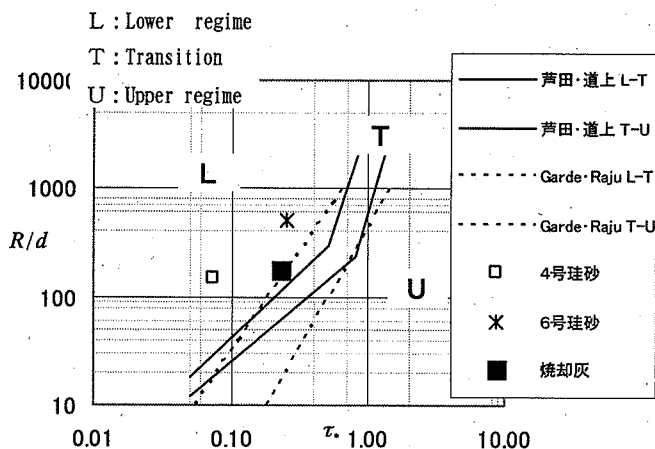


図-3 小規模河床形態区分図

模型とすることとした。また、現地の現象を再現するため、中規模河床形態を規程するパラメータである川幅 B ／水深 H を現地に一致させることにした。しかし、水理模型実験に広く使用されている珪砂や洗い砂を河床材料として用いた場合、模型縮尺に合わせて河床材料を縮小すると、粒子レイノルズ数 Re_p が20以下となることもあり実験に大きな支障となるRippleの形成が懸念される²⁾。また、粒径0.2mm以下の場合、材料の粘着性の影響を受けて非常に浸食しづらい状況となり、検討対象とする蛇行河道の河岸浸食状況の検討に支障をきたす。

このため、河床材料粒径を小さくする代わりに軽量の河床材料を用いることで上記の不都合な点の改善を図ることとした。

2. 実験用河床材料の選定

実験用河床材料の選定は以下の観点より行った。

- ①入手の難易（量、コスト面も含め）
- ②小規模河床波の発生の有無（材料の比重）
- ③その他、実験に関する特性（扱い易さなど）

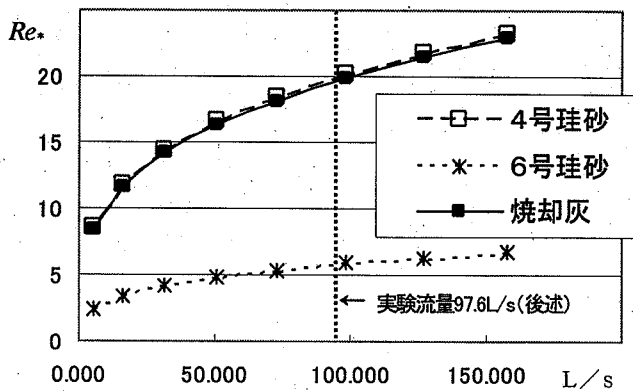


図-4 粒子レイノルズ数 Re_p の推移

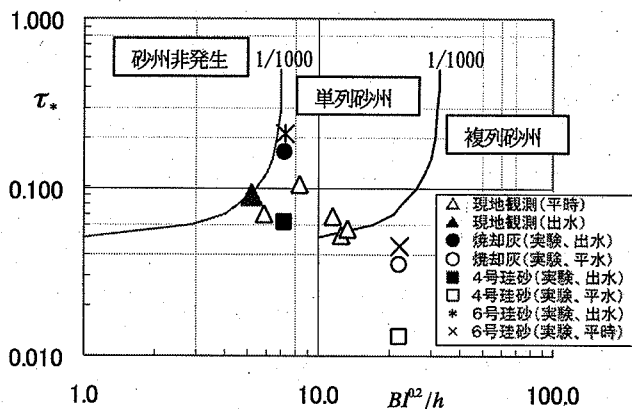


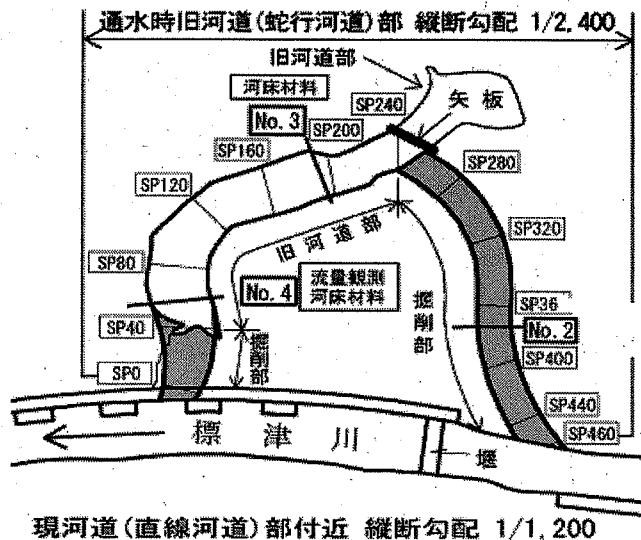
図-5 中規模河床形態区分図

選定対象として、まず過去の実験使用実績等から、珪砂、石炭粉、スラッジライトなどを候補とした。スラッジライトは、下水を浄化する際に処理場で発生する汚泥を焼却した灰を更に1,100℃～1,500℃の高温でさらし、半熔融して空冷したものであり、福岡ら³⁾が軽量河床材料として検討した実績がある。しかし、専用の製造施設を必要とし、また現状において生産施設が限られている。今後予定している大型模型実験では100m³単位 of 材料を必要とすると見積もっていることから、①の点で利用は困難と判断した。石炭粉についても、軽量材料としての使用実績があるものの、近年は均一の材料を安定して入手するのは困難であり①の点で、また通水による流水の汚濁（油浮き）の発生で③の点で使用を断念した。

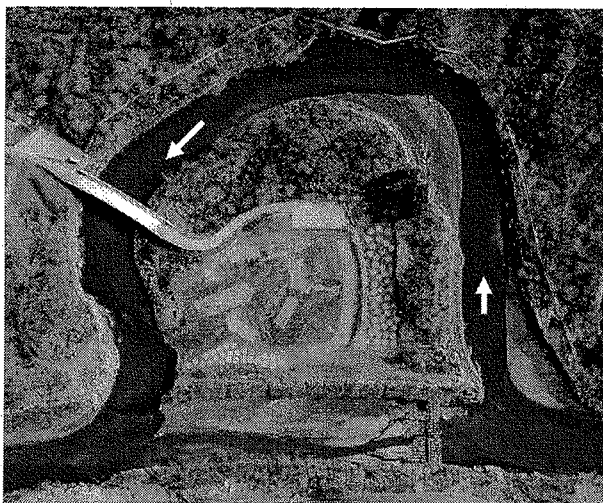
そのため、新たな材料を検討した結果、スラッジライトの原料となる下水汚泥焼却灰を検討対象とすることとした。下水汚泥焼却灰は、通常の下処理に伴う汚泥処理で発生するため、入手は容易である。ただし、施設の処理状況にもよるが、粒径の荒いもの、シルト状の細かい過ぎるものを含む。また汚泥処理の過程で石灰分が添加されることもある。シルト・石灰分は水分を含むと固結し、実験には適さなくなることから、これらを洗浄除去するとともに、水理模型実験に適合するよう

表－1 実験用河床材料検討結果

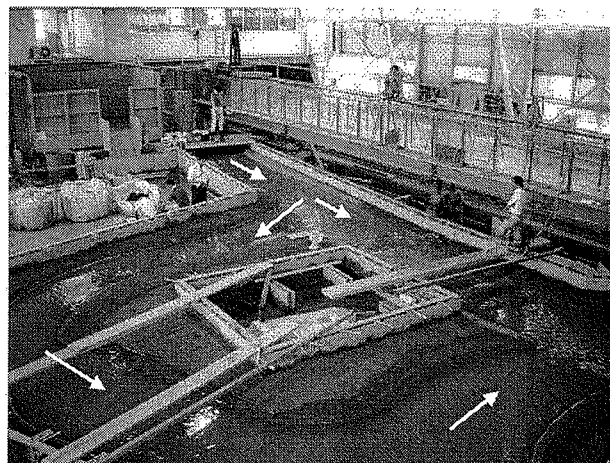
	入手難易	水中比重 g/cm ³	その他の性状	総合判定
珪砂	△ 水路実験に広く用いられているがややコスト高	× 1.65前後 Rippleの発生が懸念される	○ 水路実験に広く用いられている	×
スラッジライト	×	○ 0.8前後 Rippleの発生が懸念される	○ 軽量河床材料としての実績がある	×
石炭粉	×	○ 0.5前後 良好	△ 粉塵の発生及び実験水の変色、油浮き	×
下水汚泥焼却灰	○ 下水汚泥処理の工程から発生	○ 0.7前後 良好	△ 事前にシルト分除去等の調整が必要	○



図－7 試験地の初期形状



図－6 蛇行復元試験地の単列砂州の状況



図－8 模型実験の状況

に粒度調整を行うこととした。この結果、特別な施設での処理を行うことなく、平均粒径 $D_{50}=1.0\text{mm}$ 前後、水中比重 $s=0.64$ 前後の材料を得ることができた。

図－2に下水汚泥焼却灰の調整前後の粒径加積曲線を示すが、これにより調整を経て細粒分が除去できていることが判る。

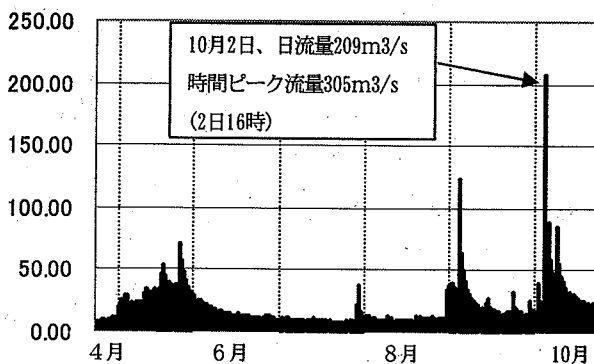
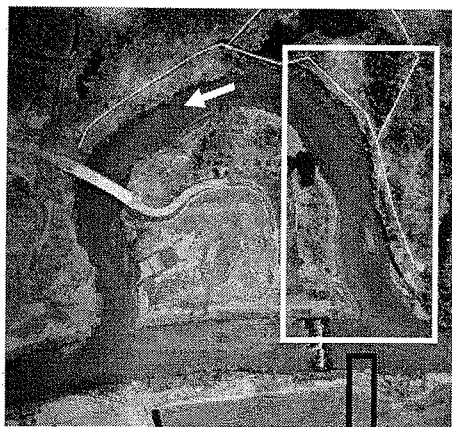
次に、調整した下水汚泥焼却灰について、小規模河床波の発生の有無について検討した。図－3は蛇行復元試験地に近い条件における各種河床材料の位置づけについて、芦田ら⁴⁾の方法による小規模河床形態区分上に示したものである。比較のため珪砂もプロットした。焼却灰はLower regimeとTransition領域の境界に位置している。粒子レイノルズ数 Re_s は図－4に示されるように実験相当流量で20を上回っており、Ripple対策に効果があることが期待できる。次に中規模河床形態についての検討を行う。現地蛇行試験地では、出水時には若干減衰ぎみとなるものの、安定した単列砂州が形成されていることを確認している。図－5は黒木・岸⁵⁾による中規模河床形態の領域区分上に現地蛇行復

元試験地観測値および模型実験で珪砂・焼却灰を用いる場合における位置づけを示した。図－5に示される現地において観測された水理量を基にしたプロットでも平時は単列領域、出水時は砂州非発生側の単列砂州領域となっている。一方、焼却灰を用いた模型実験における位置づけでも、現地の中規模河床形態に近い分布を示しており、良好な再現性が期待できることが判った。

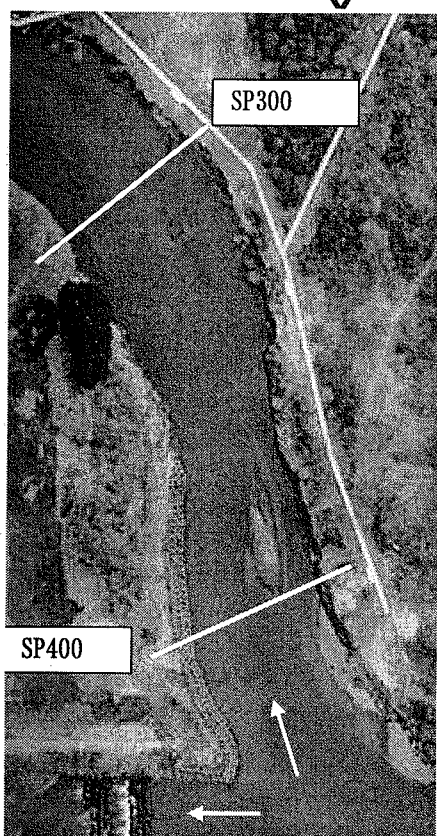
以上を表－1に整理したが、調整した下水汚泥焼却灰が、当該実験のような緩勾配、浅水深の模型実験において発生しやすいRipple対策、相似条件の改善に有効な移動床河床材料であることが明らかになった。

3. 抽出模型実験による再現性の確認

焼却灰を河床材料とした場合における現象の再現性を確認するために、標津川現地にある蛇行復元試験地について、今後予定している実験と同スケールの1/25に縮尺した抽出模型を作製し、実験を行った。



図－9 平成14年春～秋の試験地における日流量〔m³/s〕



図－10 試験地の河岸浸食（左、H15年5月撮影）と実験の浸食（右、12時間）

(1) 蛇行復元試験地の概要と河道変化状況

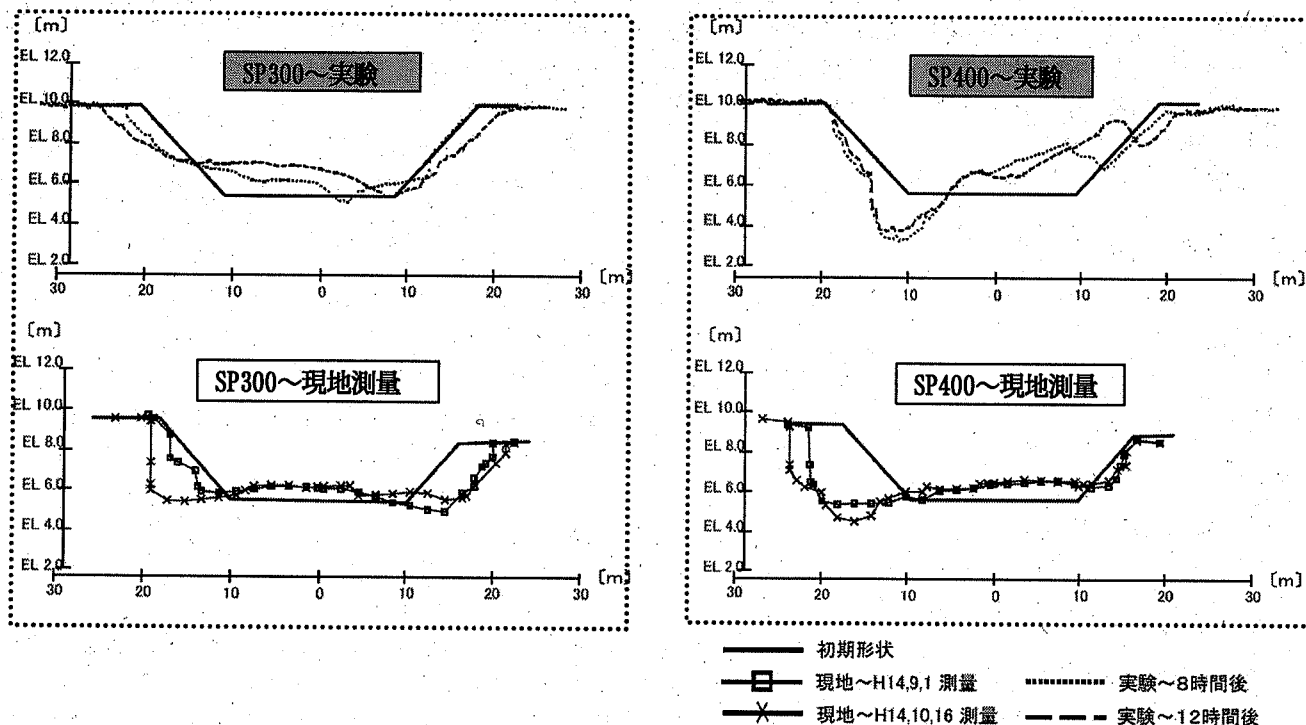
標津川の蛇行復元に先立ち、技術的な課題の把握と解決を目的として、KP8.4～8.6 kmの右岸高水敷上の三日月湖（旧川）を本川と接続した試験地が設けられている。試験地の通水初期の形状は図－7のとおりショートカット時に埋め戻されていた部分を河床幅20m、河岸勾配2割の単断面で開削した開削部及び閉鎖性水域となっていた旧川跡部により成る蛇行河道部と旧川河岸（蛇行部）の大幅な改変、拡幅を行わずに治水安全度確保のために現河道（直線河道部）を残した2way河道とされている。これに伴い蛇行部の河床勾配が直線部よりも緩やかになるため、土砂堆積による蛇行河道の埋設

が懸念されたため、平常時の大半の流量を蛇行部に導く半透過性の堰を分岐部下流30mの直線河道に設置することで対応している。

また、通水直後よりSP400の左岸側が激しく浸食したため、ネットに玉石を詰めた護岸が施されている。ネット護岸の足元は深掘が進行するとともに、対岸では固定砂州が大きく発達した。また、SP300付近では、左岸側に州が発達するとともに、この州の発達により右岸側が大きく浸食されている。

(2) 模型実験

この試験地を対象として、焼却灰を河床材料とした



図一 1 1 試験地の河岸浸食横断面図 (H14年10月) と実験の浸食 (1 2時間)

1/25移動床模型を作成して実験を行った。模型では、直線部の護岸を板で、透過性の分岐堰には、編み目1mm程度の生ゴミネットに粒径10mmほどの碎石を詰めたものを配置することで再現している。また、現地試験地SP400付近左岸に通水開始後に敷設されたネット護岸についても、これも生ゴミネットに碎石を詰めたものを施工位置に、あらかじめ埋め込んでおく事で再現している。

実験条件としては、試験地通水後に最もインパクトの大きく、低水路がほぼ満杯となった平成14年10月2日洪水の流量305 [m³/s] (合流点観測所流量436 [m³/s] から流域面積比換算) 規模を通水する事とした。この場合、フルード数を模型と現地で等しくするフルード則に基づき、流量の縮率は $Q_r = (L_r)^{5/2} = (1/25)^{5/2}$, によって模型での流量 $Q_m = 97.6$ [L/s] で通水を行った。

(3) 実験結果

実験では、まず通水直後から現地試験地での現象と同様に分岐部近くの蛇行河道左岸 (SP400左岸上流部) が激しく浸食し始め、通水4時間後にはあらかじめ埋め込んであったゴミネット護岸に達した後、護岸の足元で深掘れが発生し始めた。それに伴い護岸対岸のSP400付近右岸では州が発生し始め、また浸食により流下した土砂もSP300付近左岸の湾曲部内側に固定砂州を形成し始め、その固定砂州の発達とともに通水8時間後くらいから対岸のSP300右岸側河岸の浸食が進行し始めた。河道変化速度は通水12時間以降も平衡状態とはなっていないものの、かなり小さくなった。

実験における浸食の状況と実際の現地試験地河道状況を図一 1 0、図一 1 1に示す。図一 1 1からも現地試験地で特徴的なSP400左岸側での深掘れと右岸の州の発達、SP300左岸での州の発達とそれに伴う右岸河岸浸食の進行が確認できており、平面形状もまた類似した変化を見せていることから、調整済み下水汚泥焼却灰を河床材料とした1/25移動床水理模型実験の現地状況の再現性には問題ないことが明らかとなった。また、実験12時間経過の河岸浸食状況が、実河道の平成14年10月の測量データと類似していた。

(4) 時間縮率の検討

移動床実験において重要なポイントとなるのが時間の縮率の設定である。

清水ら⁶⁾ は、石炭粉を用いた移動床模型実験において、流砂量による時間縮率の検討を行っており、この検討の中で流砂量の連続式は次式で表すことができる。

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \cdot \frac{\partial (Bq_B)}{\partial x} = 0 \quad \dots \dots (2)$$

式 (2) より、現地と模型との現象が相似であるためには、各変量に模型と現地との比に添え字 r を付して次式が得られる。

$$t_r = (1-\lambda) r x_r h_r q_{Br}^{-1} \quad \dots \dots (3)$$

ここに、 B ; 川幅、 h ; 水深、 q_B ; 単位幅流砂量、 t ; 時間、 x ; 流れ方向の距離、 z ; 河床高、 λ ; 河床材料の空隙率 とする。

(3) 式中の $(1-\lambda)r$ は、実験河床材料及び現地河床材料から求まり、 x_r は模型の縮尺である1/25、 h_r は前出の流量縮率を用いることにより x_r と等しい1/25となるので、残される q_{Br} 、即ち模型と現地の流砂量の比から時間縮率が算定できる。

流砂量 q_B は、Meyer-Peter and Müllerの式

$$q_B = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \dots \dots \dots (4)$$

より求まるから、有次元化した流砂量から推定する時間縮率は

$$t_r^{-1} = q_{Bm} / q_{Br} = 40.77$$

と求められた。

ここに、 q_{Bm} ：模型の単位幅流砂量、 q_{Br} ：試験地における単位幅流砂量 とする。

4. あとがき

今回の検討により、次の事が明らかになった。

- ・緩勾配、浅水深の模型実験において発生しやすい Ripple対策、相似条件の改善のために用いられる軽量河床材料として下水汚泥焼却灰は有効である。
- ・下水汚泥焼却灰を河床材料に用いた河岸浸食の模型実験は、比較的良好に現地状況を再現できた。
- ・実験の河岸浸食による時間縮率は、 $t_r^{-1} = 40.77$ となった。

上記には記述していないが、下水汚泥焼却灰の調整、実験への使用にあたっては、多くの予備試験・実験によるトライアンドエラーが重ねられてここに至っている。同材料の使用については、経験による部分、定量化しきれていない部分もあるため、今後、更に現地での観測結果、実験データに基づいた検証を積み重ねて、性状の定量化、精度向上を計っていきたい。

謝辞：本検討において、札幌市建設局下水道施設部からは、河床材料とした下水汚泥焼却灰を譲渡いただいた。また(株)水工リサーチについては、河床材料の調整・実験の実施において多くの試行、工夫を重ねていただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 須賀堯三：水理模型実験，山海堂，P38，1990
- 2) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善株式会社，P200，1985
- 3) 福岡捷二，林 正男：移動床模型実験の相似則の提案，土木技術資料30-9，(財)土木研究センター，P469，1988
- 4) 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，1972
- 5) 黒木幹男，岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集第342号
- 6) 清水康行，福田義昭，板倉忠興：石狩川大型水理模型実験，昭和60年度開発局技術研究発表会論文，1986

(2006. 4. 6 受付)