

河道水面下における表面波探査の 適用性に関する基礎的研究

森田 大詞¹・川尻 峻三²・渡邊 康玄³・田中 悠暉⁴

¹ 学生会員 北見工業大学大学院 工学研究科社会環境工学専攻 (北海道北見市公園町 165)

E-mail: m1652200151@std.kitami-it.ac.jp

² 正会員 北見工業大学助教 工学部社会環境工学科 (同上)

E-mail: skawajiri@mail.kitami-it.ac.jp

³ 正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (同上)

E-mail: y-watanb@mail.kitami-it.ac.jp

⁴ 学生会員 北見工業大学大学院 工学研究科社会環境工学専攻 (同上)

E-mail: m1652200105@std.kitami-it.ac.jp

常呂川水系無加川では、河床の礫が流出し、その下部の軟岩や火山灰層が露出した場合には、洗掘や河床低下が急激に進行する。このため、洗掘抵抗が低い軟岩や火山灰層の空間的な分布を把握することは防災計画を立案する上で重要である。地盤剛性に関するパラメータである S 波速度の 2 次元分布を取得可能な表面波探査は有用な方法であるものの、水流がある河道内での実施例は無い。本研究では、水流の影響を低減できる治具の開発、水面下での地震計の設置方法、河道内での起振方法について検討した。その結果、新たに検討した手法を用いて得られた水面下での S 波速度は現地の状況と良く一致した。また、深度 6m までの結果に着目すると、水面下の河道内から陸域までの S 波速度分布の連続性は良好であった。

Key Words: river channel, water flow, surface wave method, shear wave velocity, volcanic ash

1. はじめに

常呂川水系無加川では、河道改修に伴う上流河道掘削と併せて多くの横断工作物の設置などによる上流からの土砂供給量の減少や、高水敷による低水路川幅の縮小により、急激な河床低下が進行している。この河床の低下に伴い、河床を覆っていた礫層が流出することで下層に存在していた軟岩や火山灰層が露出している。軟岩や火山灰層が露出した場合には、急激な河床低下が発生し、これによって護岸機能の損失や橋脚の根入れ不足など洪水に対する安全性の損失が発生しているため、早急な河床低下の対策が必要となっている¹⁾。

このような河床低下対策の立案には、河床下の地盤構造を初期値とした河床変動解析を行い、検討することが有用である。無加川では、昭和 54 年から平成 23 年の約 30 年間で 5m 以上の河床低下が発生し、現在も進行している²⁾。このような河床低下を河床変動解析で精度良く予測するために、最低でも河床下 10m 程度までの地盤構造の把握が必要となる。陸域では地盤構造を把握する従来の方法としてボーリング調査による方法がある。この

方法は、ピンポイントの情報を得る方法であるため、広範囲における地盤構造の把握が必要な河川域では多額の費用や労力、時間を必要とする。このようなことから、ボーリング調査による河川域の広範囲の地盤情報取得は現実的に難しい。一方、地盤の剛性を間接的に表現するパラメータである S 波速度を面的に非破壊で取得可能な表面波探査が、近年注目されてきている^{2),3)}。

著者らは、表面波探査の河川域での適用性について着目した検討を行ってきている⁴⁾。その結果、高水敷や礫河原では、表面波探査から取得した S 波速度分布と、従前の地盤調査手法であるボーリング調査から取得した N 値のプロファイルが良く一致し、河川域で表面波探査が適用可能であることが明らかとなった。しかし、水面下の河道内では、陸域よりも S 波速度が極端に小さくなり、現実的な結果が取得できなかった。このため、河川域全体の 3 次元的な S 波速度分布の把握において、水面下での地盤情報は陸域のデータを用いて推定した内挿データが用いられた。また、水面下での表面波探査を行った結果から、使用する地震計の設置方法や人工地震の発生方法などの課題が明らかとなった。

上記の課題を克服できた場合には、河道内の地盤情報を面的に取得できる新たな手法を確立でき、河道形成のメカニズム解明や防災上の弱点箇所抽出等へのツールとしての応用が期待できる。そこで本研究では、流水中の地震計設置方法や、人工地震発生方法について新たな手法を取り入れ、河道内の水面下における表面波探査の適用性について改めて検討した。

2. 表面波探査および探査箇所の概要

(1) 表面波探査の概要

表面波探査は地盤の地表付近を伝わる表面波（レイリー波）を測定・解析することにより地盤のS波速度を求めることができる調査方法である⁵⁾。図-1は表面波探査の原理を概略的に示したものである。ハンマーやかけや等で人工的に地表面を起振すると表面波が発生する。この表面波の時間領域の波形記録をフーリエ解析することで周波数と位相速度の関係を算出し、すべての地震計での結果を重ね合わせることで位相速度と周波数の関係である分散曲線が取得できる。一般的に表面波は、その周波数によって伝播する深度が異なり、高周波数の波は浅い地盤の構造を、低周波数の波は深い地盤の構造を反映している。経験的に波長の3分の1が深さに相当するという関係を利用して解析の初期モデルを作成し、波形記録から算出した分散曲線を最も良く再現するS波速度構造

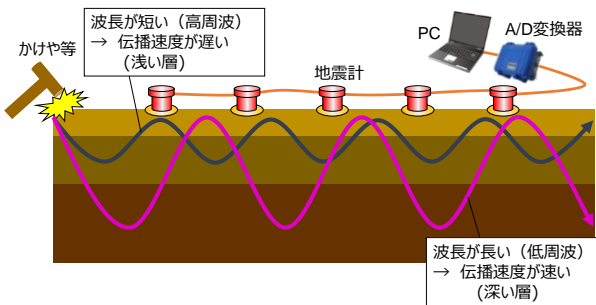


図-1 表面波探査の概念図

造を逆解析によって推定する。この解析を各地震計での分散曲線に応じて行い、各地震計で得られたS波速度構造を測線方向に補間することでS波速度分布が取得できる。地盤剛性を表すせん断剛性は、S波速度の二乗に比例するため、S波速度の増減は地盤剛性の大小を表している。

(2) 陸域における探査箇所及び方法の概要⁴⁾

著者ら⁴⁾は、常呂川水系無加川において洗掘の進行が顕著な領域を対象として、広域での3次元的地盤構造を把握するため、複数の横断測線上で表面波探査を実施し、表面波探査から得られたS波速度の分布と、ボーリング調査から得られたN値を比較し、その有効性を確認している。また、その結果を利用して、流水により顕著に洗掘が進行する火山灰層におけるS波速度の把握を行っている。調査対象範囲は、図-2に示される常呂川の支流である無加川のKP4.5~7.0の左右岸である。また、横断測線上のS波速度の分布を縦断方向に補間することで河床下におけるS波速度の疑似的な3次元分布を作成し、火山灰層の空間分布を把握している。表面波探査の1回の測線長は48mまたは72mとし、表面波を観測する地震計の設置間隔は2m、起振点の間隔も地震計と同様に



図-3 陸域（礫河原）での表面波探査の実施状況

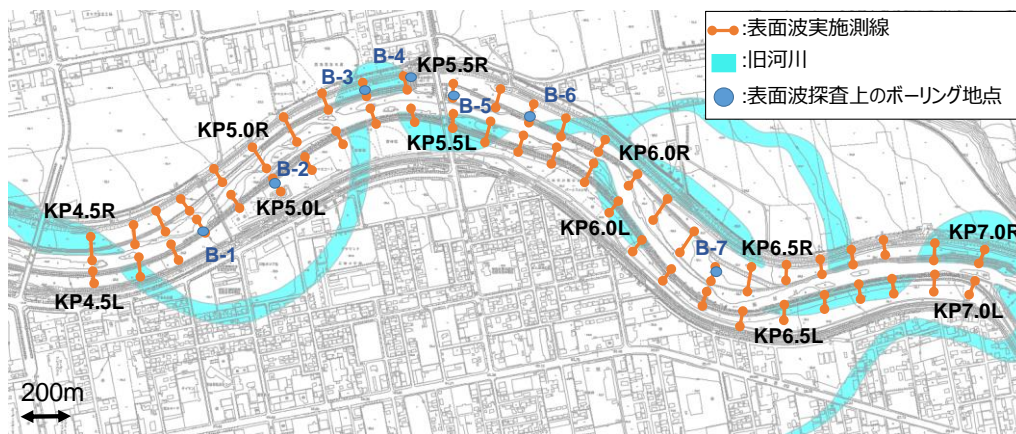


図-2 陸域での表面波探査の実施測線

2m としている。図-3 は例として、礫河原での表面波探査の実施状況を表したものである。比較するボーリング調査箇所は、図-2 に併記した B-1 ~ B-7 の 7 箇所である。また各箇所標準貫入試験で得た N 値と表面波探査で得た S 波速度の比較を行い、河川域での地盤構造把握に対する表面波探査の適用性について検討している。

(3) 水中における探査箇所および方法

水面下の河道内における表面波探査の適用性は、冠水していない陸域および水中のそれぞれで行った表面波探査から取得した S 波速度分布の連続性を比較することで検討することとした。探査箇所の状況を図-4 に示す。当該箇所は、KP5.5 付近の右岸低水路内であり、陸域の一部および河床には軟岩および火山灰層の露出が顕著である。ここで、水中での表面波探査の実施例は、水流の影響が小さい湖や干潟での事例⁹⁾はあるものの、波形データに対して水流の影響を無視できないと考えられる河川での実施事例は、著者が調べた範囲では見当たらない。そこで、地震計が水流の影響を受けないよう図-5 に示すような治具を新たに開発した。この治具の材質、形状、重量は、開水路を用いた予備試験によって決定した。具体的には、地震計と治具が水流によって流出せず、河川の流れによるノイズを直接受けないように鉄製の円筒形状のものとし、地震計の上から被せるように設置するものとした。開水路実験の結果、水深 0.3m の条件で流速 0.7m/s までは治具の中で流速が発生していないことを確

認している。水中での表面波探査は、人工地震発生方法と地震計設置方法を変えた 2 ケースを実施した。Case1 では、通常の陸域での表面波探査と同様に、図-6 で示すように地震計下部に皿鉢状の金属製土台部を取り付けたものとし、これを水面下の河床に直接置いて、さらに図-5 に示した治具を地震計上部から被せた。また、起振方法も陸域での探査手法と同様に、かけやで水面下の河床に直接衝撃を与える方法とした。Case2 では、皿鉢状の金属製土台部を図-6 に示す金属製のニードル状のもの（図中の Case2）に交換し、ハンマードリルを用いて水面下の岩盤河床にあらかじめ削孔した孔へ土台部を差し込むことで地震計を河床上に設置した。さらに Case1 と同様に流速の影響を低減させる治具を地震計上部から被せた。図-7 は河道内での表面波探査の実施状況を示している。起振方法は同図の挿絵に示すような先端が杭状になっている単管を河床上に接地し、この単管の上部をかけやで打撃する方法とした。

図-8 に Case1 および Case2 におけるそれぞれの測線の概略的な横断図を示す。Case1 の測線長は 6m として地震計および起振点の間隔は 1m とした。測線のすべてが水面下の河道内にあり、地震計は 6 つ設置している。一方、Case2 では、測線長は 12m として地震計および起振点の間隔は 1m とした。また、KP1.5 に設置されている北光



図-4 水中での表面波探査実施箇所の周辺状況



図-5 開発した治具と地震計



図-6 地震計下部の金属製土台



図-7 水面下での表面波探査の実施状況

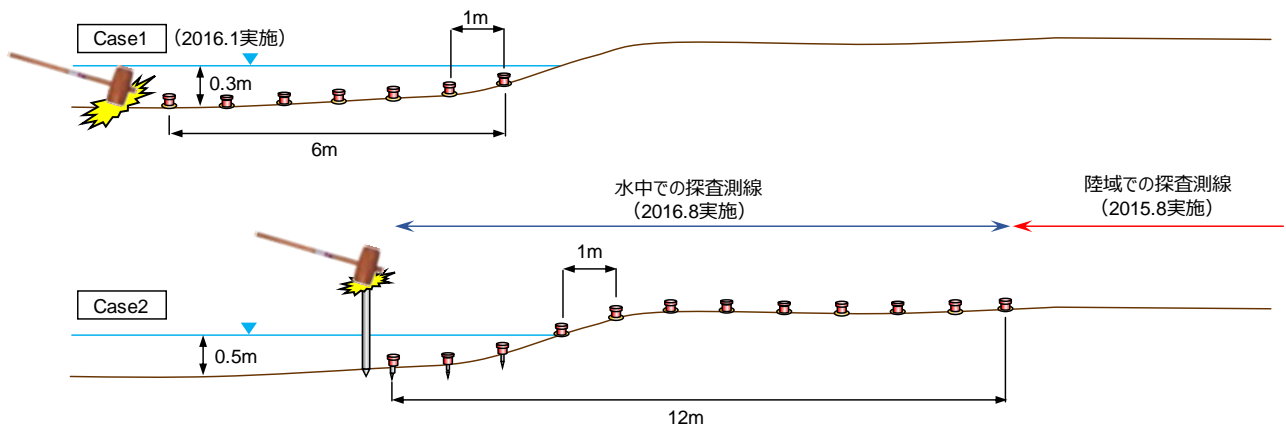


図-8 水面下での表面波探査実施測線の概要

社水位観測所の値ではあるものの、Case2の探査実施日(2016年8月)における河川水位はCase1の探査実施日(2016年1月)よりも20cm程度高いため、Case1と同様の箇所に地震計を設置することは危険と判断された。このため、水中に設置した地震計は水際から3mの範囲のみとし、残りの9個は冠水していない陸域に設置した。なお、後述する陸域での探査日(2015年8月)と水中での探査日(2016年1月と8月)は異なる。

3. 結果および考察

(1) 陸域における探査結果⁴⁾

図-9は、左岸KP5.0における表面波探査から取得したS波速度、ボーリング調査から取得したN値および採取試料から判断した土層区分の深度分布を示している。S波速度とN値は、深度3mでの局所的なN値の増加(礫打ち)を除くと、深度とともに増加する傾向にあり、S波速度によって河川域における地盤特性の変化を把握できると判断できる。次にS波速度と土層区分に着目すると、露岩時に洗掘が進行する火山灰層でのS波速度が250~300m/s程度となっており、この値が本研究で対象とした常呂川において火山灰層の有無を判断する目安となる。ここで地盤のS波速度は、その地点での地盤の密度や拘束応力に依存することが知られている⁸⁾。地盤の密度や拘束応力は、火山灰の物理・化学的性質や降灰状況で変化するため、S波速度もこれに応じて増減する。一方で、今回対象としている無加川では、ボーリング結果との比較から、KP4.5~7.0の範囲内では250~300m/sが火山灰に相当することを確認している⁴⁾。

(2) 水面下の河道内における探査結果

過去に水中で行われた表面波探査では、地表面を伝わる表面波とは異なる水中を伝播するP波(水中でのP波速度 $V_p = 1500\text{m/s}$)が時間領域の波形データから確認されることが報告されている⁹⁾。図-10は、今回取得した地

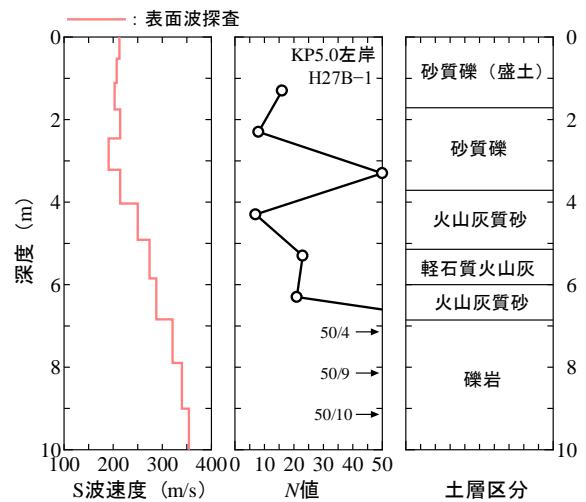


図-9 左岸KP5.0のS波速度、N値、土層区分

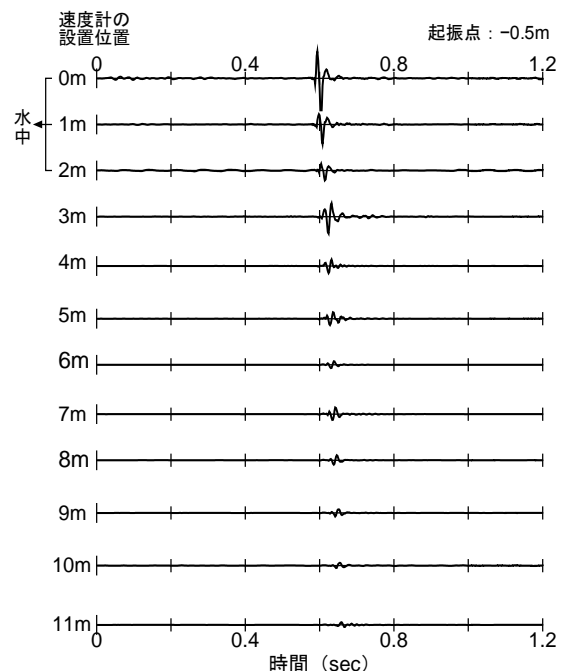


図-10 波形データの例 (Case2, 起振位置-0.5m)

震計の波形データの一例 (Case2における起振位置-0.5m)での各地震計での波形データ)である。図中の0m, 1m, 2mは、水中における波形データを示したものであるが、P波の到達は確認できない。この理由は、流速の影響を

低減するための治具によって、加振時に発生する水中を伝播する波の影響も低減したためと考えられる。地震計および治具を水中に設置した際に、常時モニターで確認した波形データに流速の影響がなかったことから上記の理由が説明できる。このことから、本研究で使用した治具を用いることで、表面波の観測には、ノイズとなる水中を伝播するP波の影響を低減し、水面下の河床における表面波を比較的容易に観測できる可能性がある。なお、図-10の波形データ取得時における河道内の流速は不明である。しかし、河道内で歩行して作業可能であったことと、水深0.5mであったことを歩行困難度⁹⁾に対応させると、流速は概ね0.5m/s以下と推測され、開水路実験の結果を勘案すると治具内では流速は発生していないと考えられる。このように流水が波形データに及ぼす影響を適切に除去できた場合には、流水および静水条件に依らず、同様のS波速度分布を取得できると予想される。

図-11は、右岸KP5.5の水面下の河道内および陸域で実施した表面波探査から得られたS波速度分布である。Case1のS波速度分布を見ると、水面下の火山灰層が露出している河床では $V_s = 150\text{m/s}$ であり、図-9に示した結果と整合しない。また、陸域での結果と比較しても水面下でのS波速度は低い値であり、水中から陸域にかけてのS波速度分布の連続性は低い。この原因としてCase1では、かけやによって直接河床を打撃する過程でかけやが水中を通過するため、本研究で使用した地震計で計測可能な表面波を発生させるための起振力が十分ではなかったことや、地震計を皿鉢状の治具を介して岩盤が露出している河床に設置したため、地震計が不安定であったために表面波の観測精度が低かったことが予想される。

一方、Case2の水面下でのS波速度分布は、深度2m程度までは $V_s = 250 \sim 300\text{m/s}$ であり、深度3m~6m程度までは $V_s = 300 \sim 350\text{m/s}$ である。図-11中には火山灰層に相当する領域を黒点線で示しているが、図-4に示したように当該箇所周辺では、固結度の低い火山灰層が露岩しており、図-9に示した結果を勘案するとCase2で得られたS波速度分布は妥当である判断できる。すなわち、探査実施箇所では、水面下の河床下においても火山灰層が2m程度堆積していると推定される。また、後述する陸域で火山灰層の領域も含めて、図-11に示したような火山灰層の分布は、築堤の履歴、出水時の土砂供給や洗掘によって形成されたと予想されるが、詳細は不明なため河床変動解析によって今後明らかにしていきたい。

次にCase2と陸域でのS波速度分布を比較し、S波速度分布の連続性から水中の探査で得られたS波分布の妥当性を検証する。ここで、陸域とCase2の水中での探査では、探査区間の重複箇所はあるものの、陸域での探査時期(2015年8月)と水中での探査時期(2016年8月)が異なり、この間の出水によって洗掘が進行して河床お

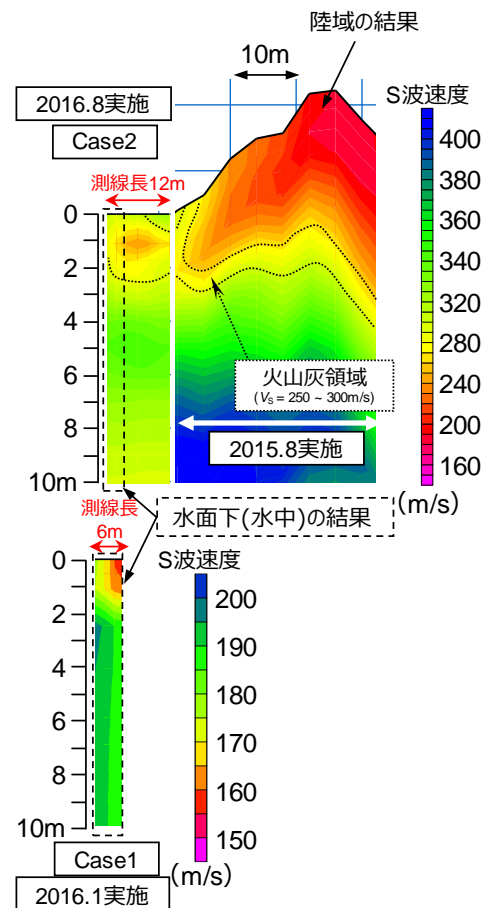


図-11 水面下および陸域でのS波速度分布

よび河道形状が大きく変化した。このため、同一地点での比較は困難であると判断し、洗掘の影響を受けていない比較的深度が深い箇所での連続性に注目することで、探査結果の妥当性の検証を行った。深度4~5m程度までは良く一致しており、S波速度分布の連続性が確認できる。このことから、新たに開発した水流の影響を低減されるための治具と、Case2で採用した地震計の設置方法および起振方法を用いることで、深度4~5m程度までの河川域における水中から陸域までの連続したS波速度分布が取得可能であると言える。一方、深度5m以深に着目すると、水面下と陸域での結果は異なっており、陸域では $V_s = 380\text{m/s}$ 以上の高速度層となっている。この高速度層では、ボーリング調査の結果から N 値 = 50以上の硬質の礫岩層であることを確認している⁴⁾。このため、今回の検討した範囲では、水面下の深度5m以深でのS波速度分布の信頼性は低いと考えられる。2.(1)に示したように表面波探査では、低周波成分の表面波ほど、より深度の深い箇所の地盤構造を反映することができる。このことから、Case2で採用した打撃方法では、低周波成分の表面波が発生していない可能性がある。水面下の河道においてより深い深度のS波速度分布を取得するためには、低周波成分の表面波の発生が可能な起振方法の検討が必要であると考えられる。今後は、今回と異なる他

の起振方法で観測データを取得し、観測波形に対するスペクトル解析結果等から低周波成分の発生が期待できる起振方法について検討する予定である。

4. まとめ

本研究では、水面下の河道内における表面波探査の適用を検討するため、地震計の設置方法および起振方法を変えた2つの探査を行った。本研究から得られた新たな知見を以下にまとめる。

- 1) 開水路実験を行い、水深 0.3m、最大流速 0.7m/s の条件で地震計の流出を防ぐことが可能な治具を開発した。この治具を用いることで、実際の河道内での水流によるノイズや水中を伝播する P 波の影響を低減した波形データの取得が可能であった。
- 2) 1)に示した治具に加えて、地震計下部にニードル状のものを取り付け、岩盤河床にあらかじめ削孔した孔にニードル部を挿入する地震計の設置方法と、杭状の単管を岩盤河床に接地して単管の上部を打撃する起振方法を採用することで、水面下の河床において火山灰層に対応する S 波速度を取得できた。さらにこの結果は現地の露岩状況とも整合していた。
- 3) 深度 4~5m までは、水面下の河道内と陸域での S 波速度分布の連続性が確認できたことから、1)および2)の手法によって河川域における水中から陸域までの連続した S 波速度分布の取得が可能である。しかし、深度 5m 以深では、水面下で取得した S 波速度は陸域の結果よりも遅かったため、低周波成分の表面波を発生させる起振方法など、更なる検討が必要であることがわかった。

なお、今後は、今回の探査手法を無加川での他の測線に援用し、水面下および陸域での S 波速度分布を取得し、河床変動解析の初期モデルに反映させる予定である。これにより、高精度な予測解析を行い、経済的かつ効果的

な対策工の決定に資するデータを取得する予定である。

謝辞：本研究は、国土交通省北海道開発局、寒地土木研究所、北海道、建設コンサルタント、北見工業大学で構成される「無加川河床低下対策勉強会」の研究成果の一部である。国土交通省 北海道開発局 網走開発建設部 北見河川事務所から適切な現場をご紹介頂いた。結果の解釈について、開発工営社 濱木 道大氏と新妻 重明氏との議論が参考となった。末筆ながら記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高橋紳吾, 木下誠一, 鈴木利幸, 小泉和久, 渡邊康玄, 中村 哲: 常呂川水系無加川における軟岩河床の低下対策に関する試験施工とその有効性, 河川技術論文集, Vol. 20, pp.229-234, 2014.
- 2) 稲崎富士: 河川堤防安定性評価への統合物理探査情報の活用, 河川技術論文集, Vol. 14, pp.85-89, 2008.
- 3) 杉井俊夫, 前田健一, 斎藤秀樹, 小林剛, 尾畑功: EPS 盛土を使った堤体横断面の表面波探査, 河川技術論文集, Vol. 18, pp.315-320, 2012.
- 4) 川尻峻三, 渡邊康玄, 森田大詞, 新妻重明, 木下誠一: 河床下地質構造の把握に対する表面波探査の適用性, 河川技術論文集, Vol. 22, pp.55-60, 2016.
- 5) Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J.: Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, Vol. 64, No. 3, pp. 800-808, 1999.
- 6) 林 宏一, 藤村 尚, 北 高穂, 鴨下 智裕, 齋藤 正徳: 水底における表面波探査の現場実験, 物理探査学会学術講演会講演論文集, Vol. 112, pp.141-144, 2005.
- 7) 渡部要一, 佐々真志, 金子崇, 橋本裕司: 人工干潟におけるMASWによる浚渫土砂構造モニタリング: 水没エリアでのハイドロフォンの適用性, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 72, No. 2, I_449-454, 2016.
- 8) Hardin, B.O. & Drnevich, V.P.: Shear modulus and damping in soils; Design equations and curves, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.98, No.7, pp.667-692, 1972.
- 9) 末次忠司: 氾濫源管理のための氾濫解析手法の精度向上と応用に関する研究, 博士論文, 九州大学, 1998.

(2016.9.30 受付)

BASIC STUDY ON APPLICABILITY OF SURFACE WAVE METHOD UNDERWATER RIVER CHANNEL

Taishi MORITA, Shunzo KAWAJIRI, Yasuharu WATANABE and Yuki TANAKA

In the Muka River, the Tokoro River system, if the outflow of small stones occurs, and the exposure of the soft rock and volcanic ash layer under them is accelerated, this will result in severe scouring and riverbed degradation. In this research, we worked on how to develop a tool that can reduce the effect of a water flow, to install a seismograph under water, and to excite vibrations in a river course. The results have told that underwater shear wave velocity measured with the method newly developed well represent the site conditions. In addition, the resulting shear wave velocity distribution has good continuity from the underwater river course to the land at a depth of up to 5 meters.