

河川域および河道水面下における表面波探査の適用性

APPLICABILITY OF SURFACE WAVE METHOD AT RIVER AREA

北見工業大学大学院 工学科社会環境工学専攻 ○学生員 森田大詞 (Taishi Morita)
 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 正 員 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)
 北見工業大学助教 工学部社会環境工学科 正 員 川尻峻三 (Shunzo Kawajiri)

1. はじめに

北海道常呂川水系無加川では、多くの横断構造物の設置や砂利採取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幅の縮小によって、河床低下が進行している。河床低下に伴い、河床下に存在する軟岩や火山灰層が露出している。軟岩や火山灰層は、浸食に弱い特徴があるため、これらが露出すると急激な河床低下が発生する。この急激な河床低下は、橋脚の根入れ不足や護岸機能の損失など安全性の問題が存在するため、河床低下の早急な対策が必要とされる¹⁾。

河床低下の適切な対策を実施するためには、対象とする河川の河床下の地盤構造の情報を得る必要がある。陸域では、地盤構造を把握する方法として、ボーリング調査のようなピンポイントの情報を得る方法がある。しかし、広範囲において地盤構造の把握が必要な河川域でボーリング調査を実施することは、多額の費用や労力、時間が必要となるため、現実的に難しい。近年、地盤の剛性を間接的に表現するパラメータである S 波速度の 2 次元分布を非破壊で取得可能な表面波探査が、注目されてきている^{2),3)}。

そこで本研究では、河床下の地盤構造の把握に対して

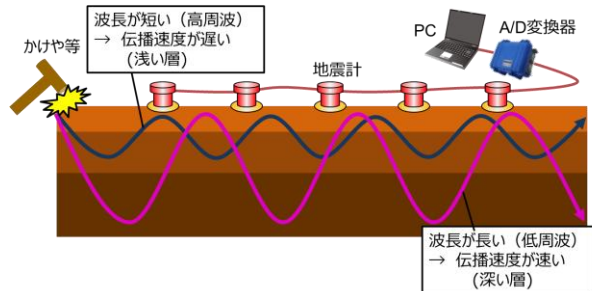


図-1 表面波探査の概要図

表面波探査の適用性を検討するため、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、複数の横断測線上で表面波探査を実施した⁴⁾。表面波探査から得られた S 波速度の 2 次元分布とボーリング調査から得られた N 値を比較し、表面波探査の有効性を評価するとともに、顕著に露出している火山灰層の S 波速度を把握した。さらに、河道内での表面波探査の実施を可能とするための治具を開発し、河道内の水面下における表面波探査の適用性について検討した。

2. 表面波探査の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



図-3 陸域での表面波探査の実施状況

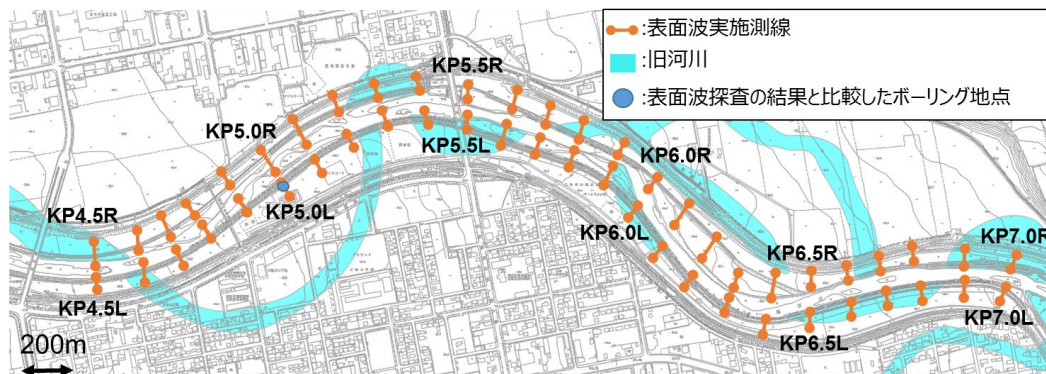


図-2 陸域での表面波探査の実施測線

査の概要を簡潔的に示したものである。ハンマー等による人工起振によって地面に衝撃を与えることで、地面に対して横方向の表面波を発生させる。この表面波は、一般的に周波数の大きさにより横方向に伝播する速度が変化する。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する。この異なる波長の S 波速度を逆解析することで、地盤の S 波速度の 2 次元分布を非破壊で得ることができる。

(2)陸域における探査箇所概要⁴⁾

図-2 は、本研究で対象とした常呂川水系無加川において、表面波探査とボーリング調査を実施した箇所を示している。表面波探査の対象探査範囲は KP4.5～7.0 の右左岸である。図-3 は、表面波探査の実施状況を示している。表面波探査の測線の始点は出来る限り水際に近い場所とし、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 2m としている。KP5.0 の左岸地点においてボーリング調査による標準貫入試験で取得した N 値と、表面波探査で取得した S 波速度の比較を行い、河川域における地盤構造の把握に対する表面波探査の適用性について評価した。

(3)河道水面下における探査箇所および探査方法

図-4 は河道水面下における表面波探査の周辺状況を



図-4 河道水面下における表面波探査の周辺の状況



図-5 河道内での表面波探査の実施状況

示し、図-5 はそこでの表面波探査の実施状況を示す。探査箇所は、KP5.5 付近の右岸低水路内である。この付近は、図-4 にみられるように軟岩および火山灰層の露出が顕著である。KP5.5 付近の右岸で、冠水していない陸域と冠水している箇所において、実施した表面波探査により取得した S 波速度の 2 次元分布の連続性を比較することで、河道水面下における表面波探査の適用性を評価した。探査を実施する際に、地震計が流水によって流出や河川の流れによるノイズを直接受けないようにするため、図-6 の左に示すような鉄製の円筒形状の治具を開発し、地震計の上から被せるように設置した。また、この治具の形状や材質、重さは、同図の右に示すように、開水路実験を実施した結果、水深 0.3m の条件で流速 0.7m/s までは、治具内で流速が 0.1m/s 以下になっていることを確認された。図-7 は開水路実験によって取得した流速のグラフを示したものである。なお、治具内の流速は流速計を治具の上から差し込むように設置し、計測した。

図-8 は、表面波探査を実施する際に陸域と水中に設置する地震計の金属土台部の違いを示したものである。通常の陸域での表面波探査は、地震計の金属製土台部が皿鉢状のものとする。これに対して、河道内で表面波探査を実施する際、流水が存在する状態で地震計を設置するため、陸域で使用する皿鉢状の金属土台部での設置は困難であると判断し、金属製土台部を金属製のニードル状のものと交換し、地震計を河床に差し込むように設置した。探査方法は、図-5 が示す実施状況のように、起振する際、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-9 は、河道水面下で実施した測線の簡易的な横断面図である。測線長は 12m とし、地震計および起振点の間隔は 1m とした。また、探査実施日(2016 年 8 月)の河川水位は 0.5m であり、水際から 3m の範囲は水中に地



図-6 開発した治具と開水路実験の様子

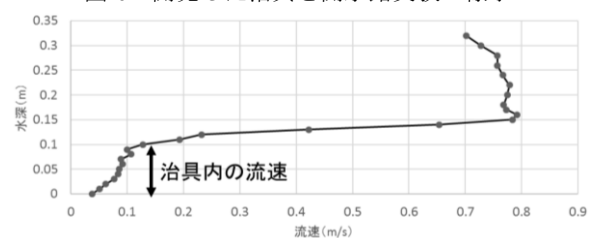


図-7 開水路実験のより取得した流速グラフ

震計を設置し、残り9個は冠水していない陸域に設置した。

3. 結果および考察

(1) 陸域における探査結果⁴⁾

図-10 は、KP5.0 の左岸において、表面波探査を実施し、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 値の深度方向の変化を比較すると、深度 3m の局所的な硬質箇所(礫打ち)を除くと、深度とともに増加する傾向にあった。このことから、河川域における陸域の表面波探査で取得した S 波速度は、ボーリング調査から取得した N 値と同等の地盤性状を表わす指標であり、地盤特性の変化を把握することができると判断できる。S 波速度と土層区分の比較により、火山灰層の S 波速度が 250~300m/s 程度となる結果を得た。しかしながら、S 波速度は、その地点での地盤の密度などに依存することが知られている⁶⁾。火山灰の降灰状況などによって変化するため、S 波速度もこれに対応して変化する。この点については、今回対象河川とした常呂川水系無加川では、地盤探査を実施した範囲内の他のボーリング調査の結果との比較により、KP4.5~7.0 における S 波速度は、250~300m/s 程度が火山灰に相当すると確認された⁴⁾。

(2) 河道内水面下における探査結果

過去に水中における表面波探査が実施されているが、その結果では、時間領域の波形データにおいて、地表面に伝播する表面波とは異なる水中に伝播する P 波(速度は 1500m/s)が確認されることが報告されている⁷⁾。このように、これまでは、S 波よりも早く P 波が到達することにより、S 波の測定が困難なものとなっている。しかしながら本研究で実施した際に取得した波形データでは、P 波の到達が確認できなかった。理由として、流水による影響を防ぐために開発した治具により、単管を打撃した際に発生した水中を伝播する波の影響を軽減したためと考えられる。治具を上から被せられた地震計は、常時モニターで確認した波形データに流水による影響がないことを確認している。このように、本研究で開発した治具を使用することで、河道内水面下における S 波速度の調査の妨げとなる水中を伝播する P 波による影響を軽減し、河道水面下の河床における S 波速度を調査できる可能性がある。

図-11 は、KP5.5 の右岸の河道内水面下および陸域で実施した表面波探査から取得した S 波速度分布である。2016 年 8 月の実施により、河道水面下で取得した測線長 3m 分の S 波速度分布において、深度約 2m までは、250~300m/s であり、深度約 3~6m までは、300~350m/s である。図-11 に本研究において、火山灰に相当する S 波速度 250~300m/s を黒点線で示した。図-4 で示したように、実施した際の周辺には、露出した火山灰層が存在していることから、河道内水面下における表面波探査で取得した S 波速度分布は冠水していない箇所での結果



図-8 地震計の金属製土台部

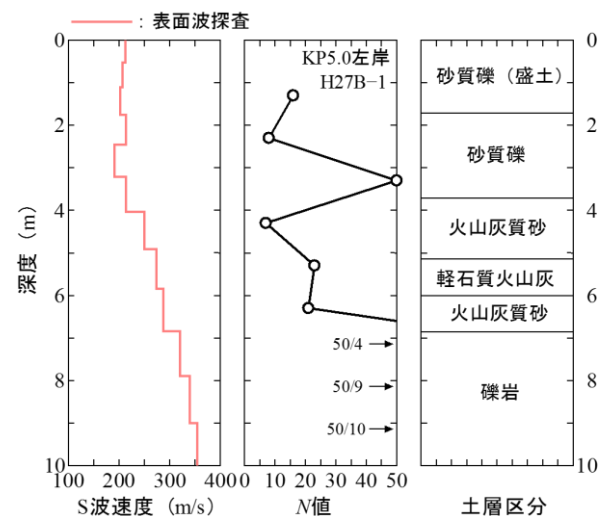


図-10 KP5.0 の左岸の S 波速度, N 値, 土層区分

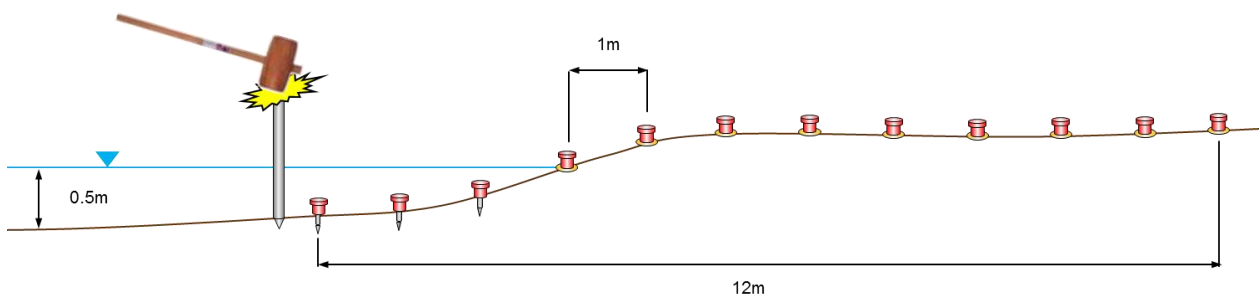


図-9 河道内での表面波探査の実施測線の横断図

とともに、地盤構造を適切に表現しているものと判断できる。

次に、2016年8月の実施により、取得したS波速度分布と2015年8月の実施により、取得したS波速度分布を比較して分布の連続性から2016年8月の実施により取得したS波速度分布の整合性を評価する。河道内水面下と陸域での探査では、探査区間が重複箇所ではあるが、河道内水面下の探査実施日(2016年8月)と陸域での探査実施日(2015年8月)が異なるため、この期間の出水により洗掘が進行し、河床や河道の形状が大きく変化していた。以上のことから、同一箇所での比較は難しいと判断し、比較的深度が大きく洗掘の影響を受けていない箇所の連続性に注目し、探査結果の整合性を評価した。約深度5mまでは良く一致しており、S波速度の連続性を確認できる。このことから、開発した治具により、流水による影響を軽減することを可能にし、陸域とは異なる起振方法および地震計の設置方法をとることで、約深度5mまでの河川域における水中から陸域までの連続したS波速度分布を取得することが可能であると言える。

4. まとめ

本研究では、河川域および河道内水面下における表面波探査の適用性を評価した。表面波探査から取得したS波速度とボーリング調査から取得したN値は、深度方向の変化の傾向が良く一致している。このことから河川域における表面波探査から取得したS波速度は、ボーリング調査から取得できるN値と同等の地盤情報を把握する指標であることがわかった。また、河道内水面下で表面波探査の実施を可能とするために、開水路実験で、水深0.3m、最大流速0.7m/sの条件のもとで地震計の流出を防ぐことを可能とする治具を開発し、実際の探査の際に、治具を使用することで、河道内で流水による影響を軽減した波形データの取得を可能とした。さらに、地震計下部の金属製土台部をニードル状のものにし、地震計を水面下河床に差し込む設置方法や杭状になっている単管を河床上に接地し、この単管上部をかけやで打撃する方法といった陸域とは異なる方法を採用することで、本研究が対象とする常呂川水系無加川における河川域の火山灰層の範囲を河道内水面下でも取得できた。加えて、S波速度分布において、約深度5mまでは、陸域および河道内水面下で取得したS波速度分布の連続性が確認できたため、治具を使用することや新たな地震計の設置および起振方法を採用することで河道内水面下から陸域まで連続したS波速度分布が取得を可能とした。

今後は、今回開発した治具および新たな探査方法を用いて、他の測線での実施し、河道内水面下および陸域でのS波速度分布を取得して河床変動解析の初期モデルに反映させる予定である。

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。

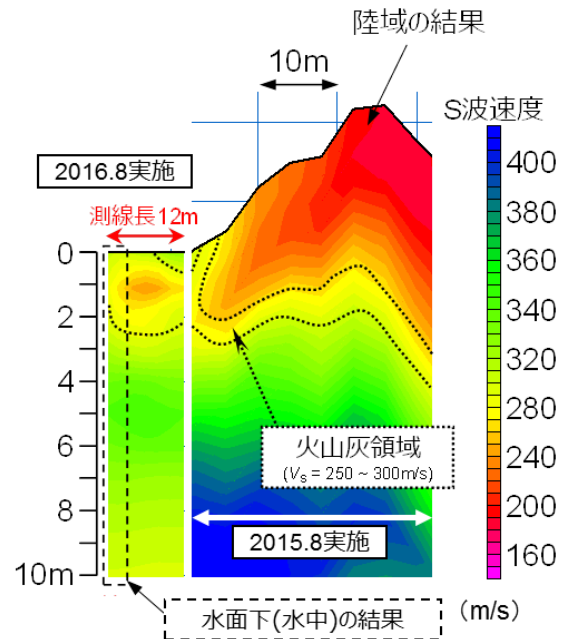


図-11 河道内および陸域でのS波速度分布

8. 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) 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.
- 7) 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.