

表面波探査による地質構造の把握と河床変動解析への活用

Utilization of geological profiling by surface wave method for riverbed variation analysis

共通事業本部 地質部 新妻 重明
水工事業本部 水工第1部 濱木 道大

常呂川水系無加川では、高水敷造成等の影響により掃流力が増加して表層砂礫が流失したため、侵食抵抗の小さい軟岩や火山灰層が露出して急激な河床低下を招いていることから、早急な対策の実施が求められている。一方、これらの対策を検討するためには、経年的な河道変化等の土砂動態把握や面的な軟岩分布等の地質状況の把握が重要となる。しかし、従来のボーリング調査では広範囲にわたって複雑に変化する河床下の地質構造を把握するのは困難であった。本論文は、河川における面的なモニタリング手法として表面波探査の適用性を検討した。また、モニタリング結果による地質構造を河床変動解析モデルに反映し、再現計算を行うことにより精度の高い河床変動傾向の予測を試みたものである。

1 はじめに

北海道常呂川水系無加川（以下、無加川とする）では、河床低下によって、低水護岸の機能喪失等、治水安全度の低下が顕在化しており、対策工が検討されている¹⁾。対策工となる落差工や帯工を効果的に配置するためには、数値解析による河床変動予測と対策効果の確認が重要だが、初期条件として河床下の地質構造が必要となる。

地質構造を得るための従来手法としてボーリング調査が挙げられるが、ピンポイントの情報から広範囲の地質構造を把握するためには、多大な費用や労力を要する。これらを補間する手法として、地盤剛性に関するパラメーターであるS波速度 V_s の2次元分布（以下、 V_s 分布とする）を非破壊で簡便に取得できる表面波探査が、近年河川堤防の安定性評価等の分野で活用されている。しかし、河床下の地質構造の把握に対する検討事例はないことから、本論文では新たなモニタリング手法として表面波探査の適用性を検討した。具体的には、複数の横断測線において表面波探査を実施し、 V_s 分布とボーリング調査によるN値等を比較検証した上で、地質断面図の修正を行った。さらに、モニタリング結果を平面2次元河床変動解析モデルに反映し、平成28年8月に発生した出水前後における河床変動量の再現計算することにより、解析モデルの精度向上を図った。

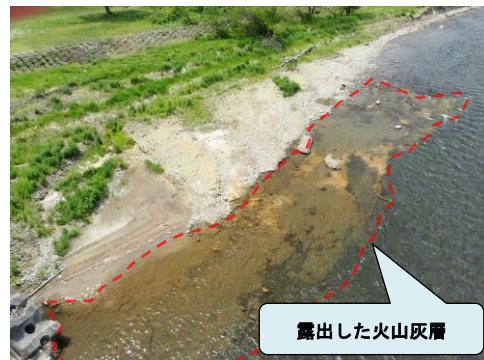


図 1.1 火山灰層の露出状況 (KP5.5R 付近)

2 調査箇所及び方法

2.1 表面波探査の概要

表面波探査は、北見工業大学との共同研究として実施したものである。表面波探査は地盤の地表付近を伝播する表面波（レイリー波）を測定・解析することにより、深度20m程度までの地盤の2次元的なS波速度 V_s の分布を非破壊で得ることができる²⁾。カケヤ等で地表面を起振すると地表近傍には横方向に伝播する表面波が発生する（図2.1参照）。不均一な地盤の地表付近を伝播する表面波は、その周波数によって伝播速度が変化する。すなわち、高周波数の波は浅い地盤の V_s を反映し、低周波数の波は深い地盤の V_s を反映する。一般に地盤の弾性波速度は地盤の深い位置ほど速くなるため、高周波数では表面波の V_s が遅

く、低周波数では V_s が速くなる。この波長による V_s の違いを逆解析することにより、不均質な地盤の V_s 分布を求めることができる。

表面波探査は KP4.5～7.2(常呂川合流点からの距離)の左右岸で実施し、測線の始点は可能な限り水際に近い箇所を選定した(図 2.2 参照)。測線長は 48m もしくは 72m とし、受信点及び起振点間隔は 2m とした。

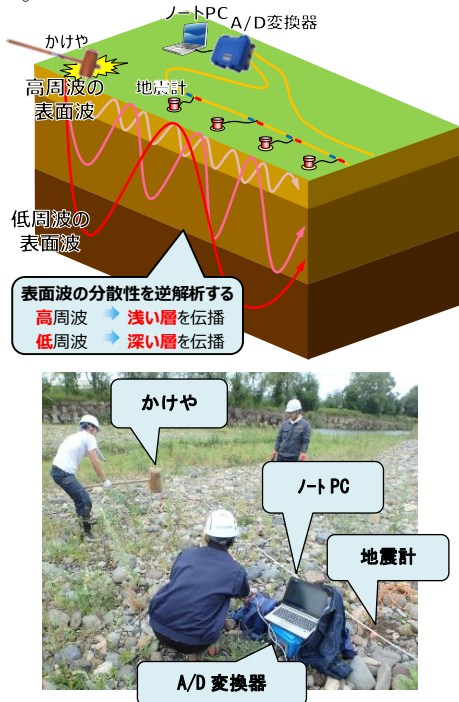


図 2.1 表面波探査の測定原理(上)と実施状況(下)

2.2 ボーリング調査の概要

ボーリング調査は、表面波探査による V_s の妥当性を検証するほか、河床変動解析モデルに必要な地質性状を把握する目的で行った。ボーリングと併せて原位置試験を実施し、標準貫入試験による N 値と、孔内 PS 検層により得られた V_s である $V_{s,b}$ を、表面波探査と比較した。また、孔内水平

載荷試験により得られた変形係数及び降伏応力と、針貫入試験による換算圧縮強度は、河床変動解析モデルにおける侵食速度の調整に用いる一軸圧縮強度を推定するための基礎資料とした。

ボーリング調査は低水路や水際に近い箇所で計 4 箇所実施し、過年度調査箇所と併せて軟岩及び火山灰層の地質性状を効率良く把握できるよう配置した(図 2.2 参照)。

3 調査結果及び考察

3.1 S 波速度と N 値の相関性

N 値は通常の地盤調査で広く用いられるが、ピンポイントでの深度方向のみのデータであるため、この情報のみから空間的な分布を把握することは困難である。一方で、表面波探査から得られた V_s と N 値の相関性が確認できれば、 V_s 分布でボーリングデータを補間することによって N 値の空間的な分布を把握できる可能性がある。そこで、表面波探査から得られた V_s と、 N 値の深度方向の変化を比較した。代表的な例として H27B-2 地点における深度分布図を図 3.1 に示すが、図中には孔内 PS 検層により得られた V_s である $V_{s,b}$ と、式(1)に示す今井らの提案式²⁾を用いて N 値から推定した $V_{s,e}$ も記載している。

$$V_{s,e} = 97.0 N^{0.314} \quad (1)$$

V_s 、 $V_{s,b}$ 及び N 値は、深度とともに増加する傾向にあり良く整合している。このことから、河川域の調査においても表面波探査の V_s は、 N 値と同等の地盤性状に関する指標であると言える。さらに、 V_s と $V_{s,e}$ の整合性も高いことから、河川域の地盤においても表面波探査から得られた V_s を N 値に換算できると言える。なお、 N 値 ($V_{s,e}$) の局所的な増加箇所は、地盤内に局所的な硬い礫の影響(礫打ち)によるものと考えられる。

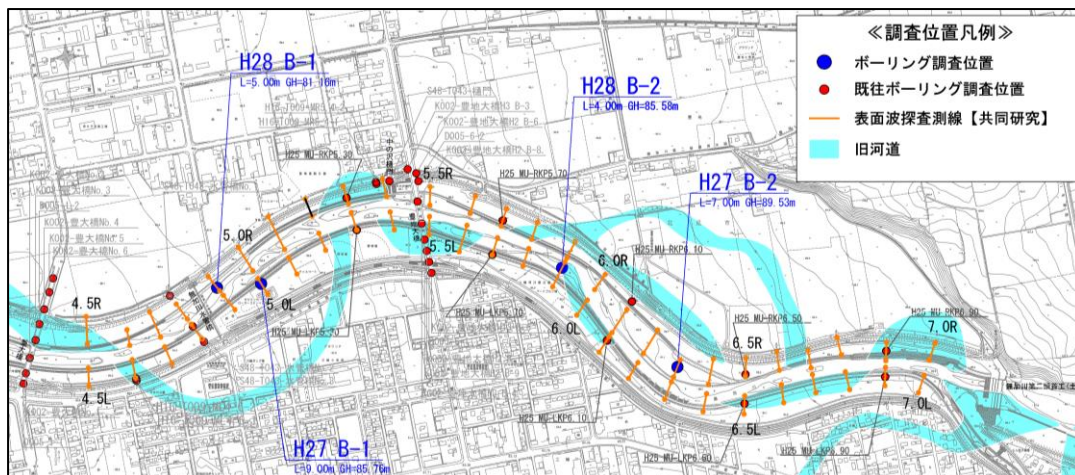


図 2.2 表面波探査及びボーリング調査位置

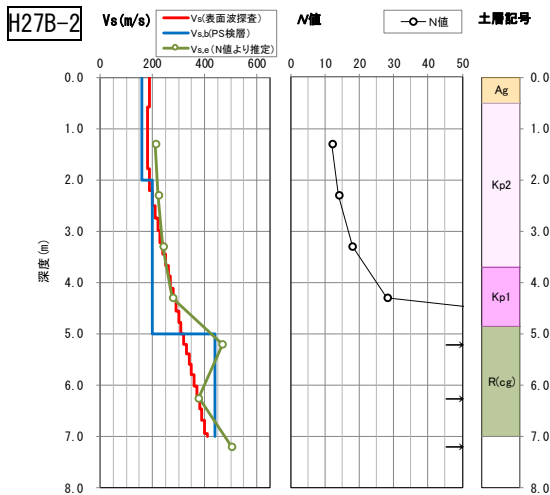


図 3.1 V_s , $V_{s,b}$, $V_{s,c}$ 及び N 値の深度分布 (H27B-2)

次に、表面波探査測線上にあるボーリングデータ(既往調査を含む)を用いて、 V_s と N 値の関係を地質区分毎に整理した(図 3.2 参照)。図中の地質区分はボーリング調査で採取した試料から判断した(図 3.3 参照)。Kp2 と Kp1 は軽石流堆積物(火山灰層)の上部層と下部層である。Kp1 は Kp2 よりも細粒な火山灰層であり、一部では固結した状態である。一方、Kp2 は Kp1 よりも礫および砂分を多く含んでいる。軟岩に区分される礫岩 R(cg)の V_s は概ね 300m/s~500m/s、 N 値は概ね 30~400 の範囲に広く分布しているものの、他の地質とは明瞭に区分できる。なお、 V_s は地盤の含水比や乾燥密度等によって増減することが知られているが、R(cg)の低い V_s 箇所は、緩みなどによる局所的な変化を反映したものと考えられる。

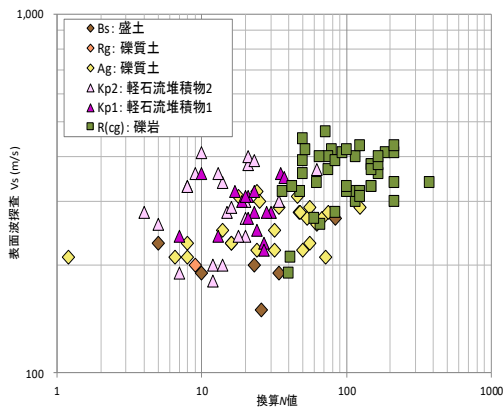


図 3.2 V_s - N 値の関係



図 3.3 火山灰及び礫岩のボーリングコア状況

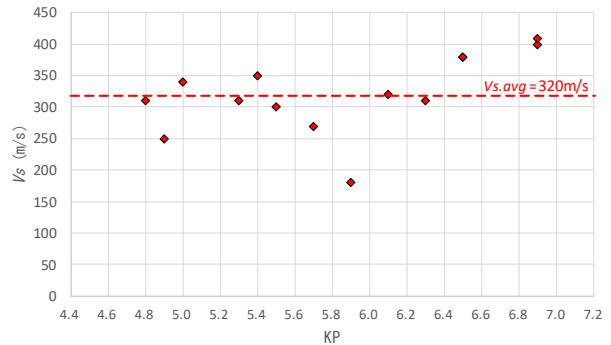


図 3.4 R(cg)のKp1に対する V_s の閾値

図 3.4 はボーリングが実施された各 KP と、Kp1 と R(cg)の境界部における V_s の関係である。今回の結果では、境界部における V_s の平均値($V_{s,ave}$)は 320m/s 程度となり、これが R(cg)と Kp1 の境界における V_s の閾値の目安になると考えた。

3.2 S 波速度分布による地質断面の修正

過去に推定した地質断面図に対して今回の調査で取得した V_s 分布を適用して、地質断面図の修正を行った。代表的な例として KP5.0 における修正前後の地質横断面図と V_s 分布を図 3.5 に示す。ボーリングデータを反映した修正前の地質横断面図は、各地質が水平に堆積した成層地盤を推定しているが、 V_s 分布を見ると速度領域の分布形状が異なるなど水平に堆積していないことがわかる。また、河道部のデータが存在しないが、左右岸での V_s 分布の連続性は確保されているため、この結果を用いて河道部の地質構造の推定は十分に可能である。修正後の地質断面図は、修正前と比較してより自然な成層地盤を推定できた。

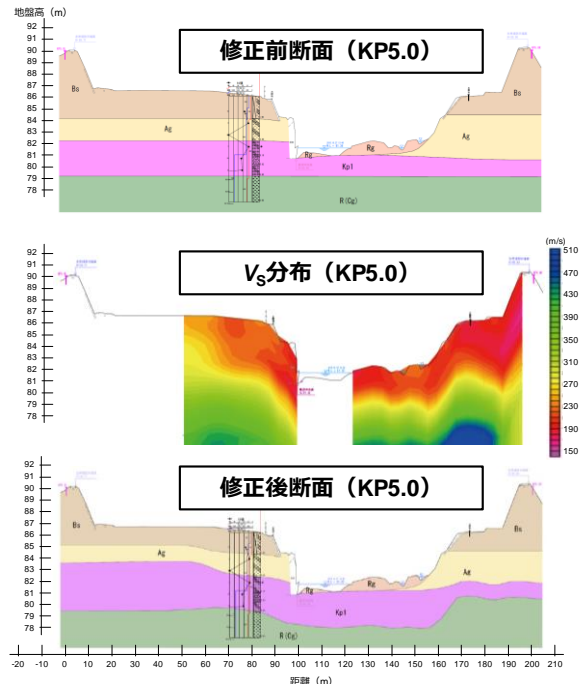


図 3.5 修正前後での地質横断面図及び V_s 分布

4 地質構造を反映させた河床変動計算

無加川では、平成 28 年 8 月の度重なる台風被害により、全川の河床低下が進行し、大きな被害が発生している。本論文では、前節までのモニタリング結果を解析モデルに反映させ、この出水前後の河床変動量の再現計算することにより、解析モデルの精度向上を図った。

平面 2 次元河床変動解析には、河川の流れ・河床変動解析ソフトウェア iRIC (International River Interface Cooperative) ³⁾ の「Nays2DH」を改良 ⁴⁾ して用いた。解析モデルは、軟岩及び火山灰層の侵食速度、岩床の砂礫層被覆率、流砂の移動形態を考慮したほか、前節で修正した地質構造を踏まえて、深さ方向の岩種の変化等を反映し、岩盤侵食の精度向上を図った。また、侵食速度の調整に用いる一軸圧縮強度は、ボーリング調査における孔内水平載荷試験結果や露岩部の針貫入試験等を考慮して設定した。

平成 28 年 8 月出水前後の再現計算を行った結果を図 4.1 に示す。出水後の最低河床高は、実測値 (H28.10 測量) とほぼ同程度で、出水による河床変動を概ね再現できたと考えられる。

前節までのモニタリング結果を、河床変動解析モデルに反映したことにより、軟岩の平面分布や鉛直方向の侵食強度変化の再現性が向上し、より精度の高い解析が可能となった。また、再現性が確認できた解析モデルを使用して将来予測計算を行うことにより、信頼性の高い対策工の配置検討や対策工実施後の河床変動を予測することが可能となった。

5 まとめ

本論文では、無加川において新たなモニタリング手法として表面波探査を実施した。表面波探査から得られた S 波速度は、M 値の深度方向の変化と良く整合しており、河川域における地盤情報に関する指標として利用できる。また、S 波速度を利用することで合理的な地質断面図を推定できる可能性がある。さらに、地質構造の推定結果等を河床変動解析モデルに反映することにより再現性が向上し、より精度の高い解析が可能となった。[謝辞]

本論文は、土木学会水工学委員会河川部会、河川技術論文集 ⁵⁾ に投稿した内容を含んでおり、論文作成にあたり北見工業大学の川尻峻三助教、北海道開発局網走開発建設部から多大なご支援・ご指導を頂いた。また、北見工業大学大学院の皆様には、表面波探査の測定において多大なる協力を頂いた。ここに心から謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 濱木道大, 戸村翔, 渡邊康玄, 井上卓也, 安田裕一, 古溝幸永: 水理模型実験と現地試験施工を踏まえた軟岩露出河川に対する河床低下対策工の検討, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp. 477-482, 2017
- 2) 今井常雄, 麓秀夫, 横田耕一郎: 日本の地盤における弾性波速度と力学的特性, 第 4 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 89-96, 1975.
- 3) <http://i-ric.org/ja/>
- 4) 井上卓也, 船木淳悟: 岩床と砂礫床が混在した河川における河床変動計算手法の構築, 寒地土木研究所月報, No. 737, 2014
- 5) 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, 第 22 巻, pp. 55-60, 2016

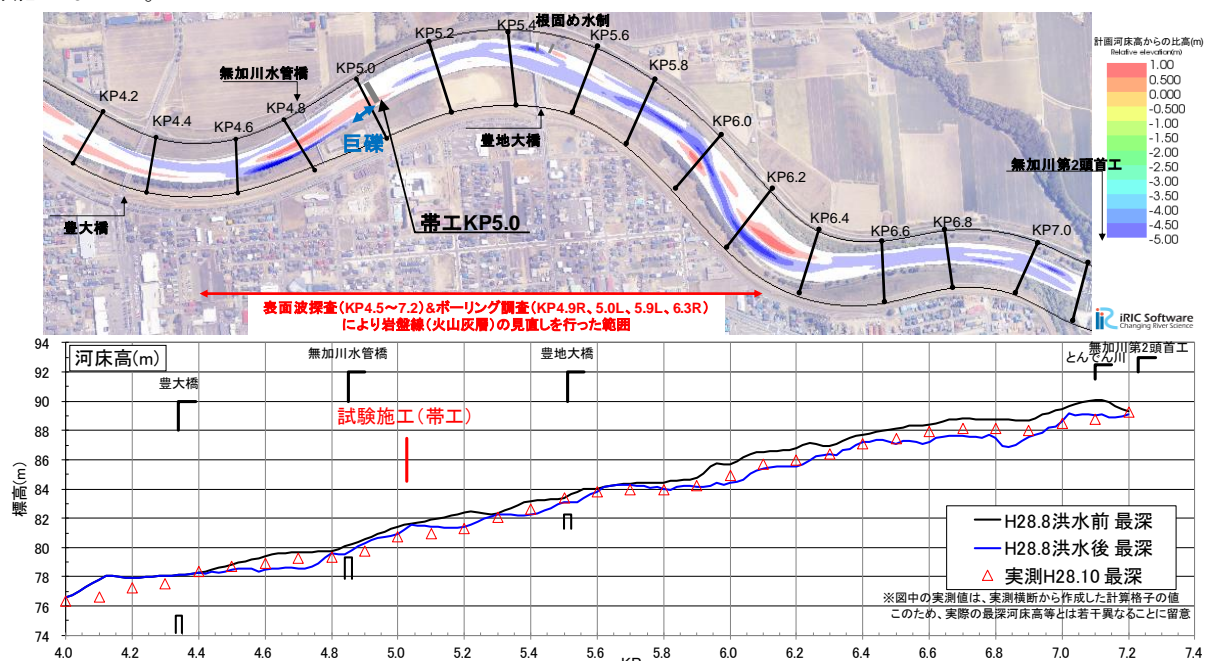


図 4.1 平成 28 年 8 月出水の再現計算結果 河床変動量コンター図(上)及び河床高(下)