# 河床下地質構造の把握に対する 表面波探査の適用性

APPLICABILITY OF SURFACE WAVE METHOD TO GEOLOGICAL PROFILE UNDER RIVERBED

# 川尻峻三1・渡邊康玄2・森田大詞3・新妻重明4・木下誠一5 Shunzo KAWAJIRI, Yasuharu WATANABE, Taishi MORITA, Shigeaki NIITSUMA and Seiichi KINOSHITA

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 北見工業大学助教 工学部社会環境工学科(〒090-8570 北見市公園町165番地)
<sup>2</sup>正会員 博士(工) 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科(同上)
<sup>3</sup>学生会員 北見工業大学博士前期課程1年 工学研究科社会環境工学専攻(同上)
<sup>4</sup>正会員 修士(理) (株)開発工営社 地質部(〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地)
<sup>5</sup>国土交通省北海道開発局 網走開発建設部(〒093-8544 網走市新町2丁目6番1号)
(現 国土交通省北海道開発局 札幌開発建設部)

This paper is considering the applicability of the surface wave method for understanding the geological profile under the riverbed. The profile of S-wave velocity and the N- value were well matched. Therefore, S-wave velocity in the ground of the river zone can be treated as an indicator similar to the N-value. It is reasonable estimate of the geological cross-sectional view by using the S-wave velocity distribution. In addition, the pseudo-three-dimensional distribution of S-wave velocity, was consistent with the local situation. As a results, the use of the S-wave velocity distribution obtained from the surface wave method, it is possible to create the 3D hazard map for riverbed degradation and improving the accuracy of the analysis model.

Key Words : Surface wave method, S- wave velocity, N - vale, geological profile, under riverbed

# 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, 河道改修に伴う直線化(急勾配化)、低水路幅の縮小, 上流からの土砂供給量の減少によって河床低下が進行し て中上流区間の河床では,軟岩や火山灰層が露出してい る<sup>1)</sup>.この軟岩や火山灰層は流砂等による浸食抵抗が低 いため,露出後には急激な洗掘の発生によって河床低下 を促すことになる.このような河床低下によって,一部 の橋脚では根入れ不足,護岸工では変状が発生している ため,出水に対する安全性の確保を目的とした対策工を 検討している<sup>1)</sup>.ここで,河床低下の対策工となる落差 工や帯工を効果的に配置するためには,数値解析による 河床変動予測および対策効果の確認が重要な情報となる が,この数値解析では初期条件として解析対象領域の河 床下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による地盤調査が挙げられる が、ボーリング調査のようなピンポイント的な情報に よって広範囲に亘って複雑に変化する河床下の地質構造 を把握するためには、多大な費用や労力を要する.この ような課題は河川堤防の安定性評価においても同様であ る.近年では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 簡便に取得することができる表面波探査を用いて迅速に 河川堤防の健全性を評価する手法が提案され、その有用 性が報告されている<sup>2),3)</sup>.しかし、河床下地質構造の把 握に対する表面波探査の検討例や適用性を検討した事例 は無い.

そこで本研究では、河床下地質構造の把握に対する新 たな手法としての表面波探査の適用性を検討した.具体 的には、無加川において洗掘の進行が顕著な領域を対象 として、複数の横断測線上で表面波探査を実施した.表 面波探査から得られたV<sub>s</sub>分布と、ボーリング調査から得 られたN値を比較して得られたV<sub>s</sub>の妥当性を検証し、顕 著に洗掘が進行する火山灰層におけるV<sub>s</sub>を把握した.ま た、横断測線上のV<sub>s</sub>分布を縦断方向に補間することで河 床下におけるV<sub>s</sub>の擬似的な3次元分布を作成し、火山灰 層の空間分布を把握した.さらに、河道内での表面波探 査の実施が可能な治具の開発を行い、水面下での表面波 探査の適用性についても検討を加えた.

## 2. 探査箇所および方法

## (1) 表面波探査および探査箇所の概要

図-1は本研究で対象とした表面波探査の概念図を示している.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程度までの地盤の二次元的なS波速度 $V_s$ の分布をボーリング孔を掘ることなく非破壊で得ることができる<sup>4</sup>.カケヤ等の人工振源により地表面を加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.不均一な地盤の地表面付近を伝播する表面波は,その周波数の大きさによって伝播する速度が変化する.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 $W_s$ が速く,高周波数では表面波の $V_s$ が速く,



図-1 表面波探査の測定原理

低周波数ではVsが遅くなる.この波長によるVsの違いを 逆解析することにより、不均質な地盤のVsの分布を求め ることができる.

図-2は本研究で対象とした無加川における表面波探査 とボーリング調査の実施箇所を示している. 表面波探査 は右岸のKP4.5~6.3, 左岸のKP4.5~5.8で実施した(KP は、本川である常呂川との合流点からのおおよその距離 をkm単位で表したものである). 図-3は表面波探査の 実施状況例を示している. 測線の始点は可能な限り水際 に近い箇所を選定した. 測線長は48mもしくは72mとし, 受信点および起振点間隔は2mとした.また,表面波探 査結果との比較対象となるボーリング地点はB-1~B-7の 7地点であり、各地点で標準貫入試験を行ってN値を取 得している. なお、今回の調査範囲では、図-4に示すよ うにKP5.5付近で軟岩及び火山灰層の露出が顕著であっ た. 図-5はKP5.5周辺の河道構造物の状況を示している が、橋脚基礎の根入れ不足を防止するためのブロック積 み工や護岸工の変状が確認できたため、当該箇所では河 床低下が顕著であることが伺える.

## 3. 探査結果および考察

## (1) Vs分布とN値の相関性

N値は地盤の強度や変形特性の指標となる値であり、 通常の地盤調査で広く用いられているが、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た 場合には、 $V_s$ 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。**図**-6は代表的な結果としてB-1、B-4、B-7における $V_s$ とN値の比較を示している。なお、図中には



図-2 表面波探査測線およびボーリング位置



図-3 表面波探査の実施状況

式(1)に示す今井らの提案式<sup>5)</sup>を用いてN値から推定した VsであるVseも記載している.

$$V_{\rm S,e} = 97.0 \, N^{0.314} \tag{1}$$

Vsおよび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、河川域における地盤 調査においてもVs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、VsとVse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VsをN値に換算することが可能であると言える.また, N値(Vse)の局所的な増加箇所は、地盤内に局所的に存 在している硬質な礫の影響(礫打ち)によるものと考え られる.このようなN値の局所的な増加箇所でのVsの増 加は確認できない. このことから, 表面波探査から得ら れるVsはN値と比較して、より平均的な地盤性状を反映 していると解釈できるため、Vsを用いることで局所的な 礫の影響を受けない地盤の平均的なN値を推定できる可 能性がある.一方この結果は、表面波探査から得られる Vs分布では、N値の礫打ちとして測定されるような局所 的な礫の把握は、困難であることを示唆している.

つぎに図-7は、VsとN値の関係を土質区分毎に整理し



図-4 火山灰層の露出状況 (KP5.5R)



図-5 護岸工の変状状況(KP5.5R~KP5.6R)

た結果である. 図中の土質区分はボーリング調査で採取 した試料(図-8参照)から判断した. 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. また, N値が50を超えるデータについては 式(2)による換算N値とした.

#### 換算N值 = 50回 × 30cm / 50回打擊時貫入量(cm) (2)

図-7より, 礫岩R(cg)の $V_s$ は300m/s ~ 500m/s, 換算N値 は30 ~ 400の範囲に広く分布しているものの,他の土質 とは明瞭に区分できる.次に火山灰層に着目すると, Kp1の $V_s$ はKp2よりも大きい傾向にあり,Kp2は盛土Bs の $V_s$ と同程度の値である.一方,礫質土Agについては,  $V_s$ および換算N値ともにバラつきが大きく,他の土質と の明瞭な大小関係は確認できない.なお, $V_s$ は地盤の含







水比や乾燥密度などの状態量の変化によって増減することが知られている.このため、局所的な状態量の違いを反映したと考えられる箇所では、土質区分と $V_s$ の大小関係が整合していないものの、図-7よりR(cg)と他の土質  $EV_s$ によって概ね区分できることがわかる.次に、B-1 ~ B-7のボーリング地点でのKplとR(cg)の境界部で $V_s$ を整理した.図-9はB-1~B-7についてボーリングが実施された各KPと、Kpl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、各ボーリング地点での境界部での境界部での境界部でである.すなわち、河床変動解析において地盤状況の違いを設定する際には、 $V_s = 310m/s$ を目安として、砂礫の収支によって変動する 領域と軟岩の砂礫の衝突によって浸食する領域とに分ける等、合理的な初期条件の設定が可能になると言える.

#### (2) Vs分布による地質断面図の修正

前節での検討から、地盤調査におけるV。はN値と同程 度の地盤情報に関する指標値であり、Vsの大小から土質 区分を設定できる可能性を見出した. そこで, 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Vs分布 を適用し、より合理的な地質断面図の修正を試みた.図 -10は代表的な例として、KP5.0における修正前の地質断 面図, Vs分布, 修正後の地質断面図を示している. 修正 前の地質断面図は、図-3に示したボーリングデータを用 いて、縦断および横断方向の地質断面図を推定した結果 である. 左岸で実施したボーリングデータを反映した修 正前の地質断面図は、各土質が水平に堆積した成層地盤 を呈していると推定されている.一方, Vs分布を見ると, 大局的には成層地盤であるものの、右左岸でVs = 310m/s 以上の速度領域の分布形状が異なるなど、詳細には水平 には堆積していないことわかる. また, 河道部について は、表面波探査を行っていないためデータが存在してい ないが、右左岸でのVs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 可能であると判断できる.このようなVs分布を地質断面 図に反映し、地質断面図を修正した. Vs分布の反映に際 しては、先述した閾値であるVs = 310m/sを採用すること と, 表面波探査の測線端部では探査精度が低下している 点に考慮した.修正後の地質断面図では、修正前と比較 してより自然な成層地盤を推定できている.

#### (3) Vs分布の空間分布

前節では、*V*<sub>s</sub>分布を用いることで地質構造を合理的に 推定できることを示した. さらに発展させて、*V*<sub>s</sub>の3次 元的な空間分布を把握できた際には、河床変動解析の解 析モデルの検討のみならず、効果的な河床低下対策箇所 の選定など、実務上極めて有用な情報となる. そこで、 各横断測線で取得した2次元の*V*<sub>s</sub>分布を縦断方向に補間 し、探査対象としたKPの範囲内における*V*<sub>s</sub>の擬似的な3



次元分布の推定を試みた.

2次元分布の3次元化には、市販の3次元可視化ソフト であるVoxler4を用いることとした.本ソフトでは、3次 元散布図、等高線、カラー化した複数の等値面等が容易 に作成できる.さらに、ズームや回転等がマウスによっ て簡単に操作可能である.なお、補間方法に関する数学 的な記述は紙面の関係上割愛する.詳細は参考文献6)を 参照されたい.

図-11は補間前のVs分布図を示している.3次元化にあたり,各横断面において連続データであるVs分布を深度および延長方向に受信点間隔と同様の2m間隔で抽出して、全4280データに離散化した.また、水面を0mとして水面より下部の地質構造を3次元化した.図-12に3次元分布図として、先述した礫岩と他の土質との閾値であるVs = 310m/sの等値面図を示す.なお、図中にはVs = 310m/s以下の代表的な結果としてVs = 210m/s、260m/sの等値面図も記載している.2(1),(2)での検討結果から、Vs = 310m/s以下の領域は洗掘と河床低下の急激な進行が生じる火山灰層であるが、KP5.5右岸側にわずかに存在するVs < 260m/sの領域は図-4に示した火山灰の露出箇所と対応していることがわかる.また、当該領域では顕著

な洗掘と河床低下が発生しているため、 $V_{\rm S} < 260$ m/sの低 速度領域が他の箇所と比較して小さくなったと予想され る. KP4.5やKP6.3では $V_{\rm S} < 310$ m/sの領域が河道沿いに存 在しており、今後の外力条件によっては、さらに河床低 下が発生する可能性がある.このように土質区分と関連 付けられた $V_{\rm S}$ の空間分布は、洗掘・河床低下発生に対す る3次元ハザードマップ的な役割を果たし、実務レベル での予防保全的な防災対策の実施に対して有益な情報に なると言えよう.

一方,図-12に示した等値面図と旧河道との関連性は 確認できない.これは、旧河道が流下していた地盤高が 現在の河道よりも高い位置にあった等の可能性が考えら れるが,詳細は不明である.今後は表面波探査の実施領 域を拡大し,詳細な検討を行う予定である.

#### (4) 河道内の水中での表面波探査結果

 $V_{s}$ の2次元分布を用いた地質断面図の修正では、河道 部の $V_{s}$ 分布は不明であった.また、3次元分布において は、河道部の $V_{s}$ 分布は補間した値で構成されている.右 左岸での $V_{s}$ 分布の連続性が確保できているため、河道部 の地質構造の推定結果の精度は比較的高いと考えられる



図-12 Vsの等値面図

ものの,推定の域を脱していない.そこで,河道内の水中において表面波探査を行い,陸上でのVs分布との比較を行った.

図-13に河道内での表面波探査の実施状況を示す.実施箇所は,顕著な露岩を確認したKP5.5の右岸である. 河道内の流水によって受信器が流下しないことと,流水によるノイズを除去する目的で図-13中に示す鉄製の円筒状カバーを受信器の上から設置した.なお,別途実施した開水路実験で流速0.7m/sにおいてもカバー内の受信器が移動しないことを確認している.表面波探査の測線長は6m,受信・起振点間隔は1mとした.また,起振はかけやによって直接水面下の河床を打撃する方法とした. なお,探査時のは水深は30cm程度であった.

図-14にKP5.5の陸上および水中での探査結果を示す. 水中での探査箇所は,陸上での探査測線を6m河道側に 延長した箇所である. V<sub>s</sub>分布を見ると,水中でのV<sub>s</sub>は陸 上の結果よりも大幅に小さい値となっており,V<sub>s</sub>分布の 連続性が確認できない. 探査時には流水によるノイズは 確認できなかったが,打撃を検知するトリガーが作動し 難い状態であった.また,水中ではS波よりもP波が先に 受信器へ到達し,波形データに反映されると考えられる が,今回の探査では明瞭なP波の到達は確認できなかっ た.このため,河床の打撃方法やトリガーの作動方法に 問題があると考えられ,今後の課題として取り組む予定 である.

## 4. まとめ

本研究では、河床下の地質構造把握に対する表面波探 査の適用性について検討した. その結果, 表面波探査か ら得られたS波速度とN値の深度方向の変化は、良く整 合しており、河川域における地盤調査ではS波速度はN 値と同様の地盤情報に関する指標として利用可能である ことがわかった.また、S波速度を利用することで、よ り合理的な地質断面図を推定できる可能性がある. さら に、S波速度の2次元分布を縦断方向に補間して作成した 擬似3次元分布において、火山灰層の露出箇所とS波速度 の低速度領域は整合した.また、当該箇所では顕著な洗 掘の発生によって火山灰層が流出したため、S波速度の 低速度領域は他の箇所と比較して小さくなったと予想さ れる.以上のように、S波速度の擬似3次元分布は現地の 洗掘状況と整合しており、洗掘・河床低下発生に対する 3次元ハザードマップとして活用できることを見出した. 一方、河道内の水中における表面波探査結果は、陸上部 よりもS波速度が遅い結果となり、整合性が確認できな かった.しかし、起振方法等の精度向上の課題が明らか となった.

なお,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



図-13 河道内での表面波探査の実施状況



図-14 水中および陸上でのVs分布の比較(KP5.5R)

構成される「無加川河床対策勉強会」における研究成果 の一部である.今後は、今回の探査で得られた結果を河 床変動解析モデルに反映させ、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:表面波探査の実施に際し,北見工業大学大学院 鈴木信太朗氏(現日本工営㈱),田中悠暉氏,猶原有 希子氏の協力を得た.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.
- Park, C.B., miller, R.D., Xia, J. : multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, Vol. 64, No. 3, pp. 800-808, 1999.
- 5) 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.
- 6) Golden Software, Inc. : Voxler 4 Full User's Guide, 2012. (2016. 4. 4受付)