

帶鋼補強土壁に対する表面波探査の適応性

Applicability of surface wave method to reinforced earth wall

共通事業本部 地質部
共通事業本部 地質部

佐藤 貴亮
新妻 重明

帶鋼補強材を用いるテールアルメ工法は、従来のコンクリート擁壁と比べて経済性や施工性に優れることから、現在日本国内で最も多く採用されている補強土壁工法である。国土交通省がメンテナンスサイクルの確立を通達したことに伴い、補強土壁のような土構造物も適切な維持管理手法の確立が求められている。近年では、新たな維持管理手法として表面波探査を用いて土構造物を空間的に把握する試みが多く報告されている。

本稿では、現況で広く用いられている標準貫入試験から得られる N 値や速度検層から得られる S 波速度 $V_{s,log}$ と表面波探査から得られる $V_{s,sw}$ を比較・検討し、既設補強土壁の健全性を把握するツールとして表面波探査の適応性を評価した事例を紹介する。

1 はじめに

帶鋼補強土壁を用いるテールアルメ工法は、従来のコンクリート擁壁と比べて経済性や施工性に優れることから「道路土工・擁壁工指針」¹⁾が発行される頃より日本国内で急速に普及し、現在では補強土壁工法の中では最も多く採用されている工法である。多種多様な工法が存在する補強土壁は、メンテナンスフリーを原則として施工・維持管理されてきたが、2013 年に国土交通省は構造物に対してメンテナンスサイクル(点検⇒診断⇒措置⇒記録⇒(次回点検))の確立を通達したことにより、土構造物における維持管理手法の確立が重要視されるようになった。現状において、土構造物の維持管理手法に用いられる一般的な地盤物性には、標準貫入試験から得られる N 値や速度検層から得られる S 波速度 $V_{s,log}$ が広く利用されているが、点検として定期的に実施する手法としては大がかりである。

以上の事から、土構造物の健全性を適切に評価するために、簡易で迅速に実施可能な維持管理手法を確立する必要がある。

近年では、新たな維持管理手法として 2 次元的に内部性状を把握できる表面波探査から得られる $V_{s,sw}$ を利用し、土構造物を空間的に把握する試みが多く報告されている²⁾。そこで本稿は北海道オホーツク地域にある 3 つの補強土壁(A, B, C)に対してボーリング調査及び標準貫入試験・速度検層・表面波探査をそれぞれ実施し、得られた N 値や V_s 分布を用いて実務的観点から $V_{s,log}$ と $V_{s,sw}$ の比較・検討を行った。

2 調査概要

2.1 補強土壁概要

図 1 に各補強土壁の諸元と展開図・断面図を示す。なお、後述する調査概要・結果等(各種試験条件、ボーリング結果)も併せて図示する。

2.2 ボーリング調査及び標準貫入試験

ボーリング及び標準貫入試験は、各補強土壁に対して 2 孔ずつ、計 6 孔の調査を実施した。ボーリング掘進長は、補強土壁 A は 6.0m(No.1, No.2)、補強土壁 B は 9.0m(No.3, No.4)、補強土壁 C は 6.0m(No.5) 及び 5.0m(No.6) である。掘削は孔径 $\phi 66.0\text{mm}$ である。No.3～No.6 孔は孔壁が崩れやすいためケーシングを用いて掘削を行い、No.2～No.6 孔は後の速度検層を考慮して掘削後に塩ビパイプを用いて孔壁を保護した。ボーリング位置は、壁面パネル背面の補強材や凍上抑制層を回避するため、壁面パネルの継ぎ目付近で背面から約 1.4～1.6m 離れた位置とした。標準貫入試験は、補強土壁 A は深度 6.0m 付近の基礎コンクリートを考慮して深度 0.5m から 1.0m 間隔、補強土壁 B, C は深度 1.0m から 1.0m 間隔で実施した。補強土壁 A では盛土材料試験、補強土壁 B, C では標準貫入試験から採取した試料により各種土質試験も実施している。

2.3 速度検層

速度検層は、「ダウンホール法」を用いて 0.5m 間隔で測定を行った(通常 1.0m 間隔より詳細な測定を行うため)。 S 波の起振は板を地面に設置してその側

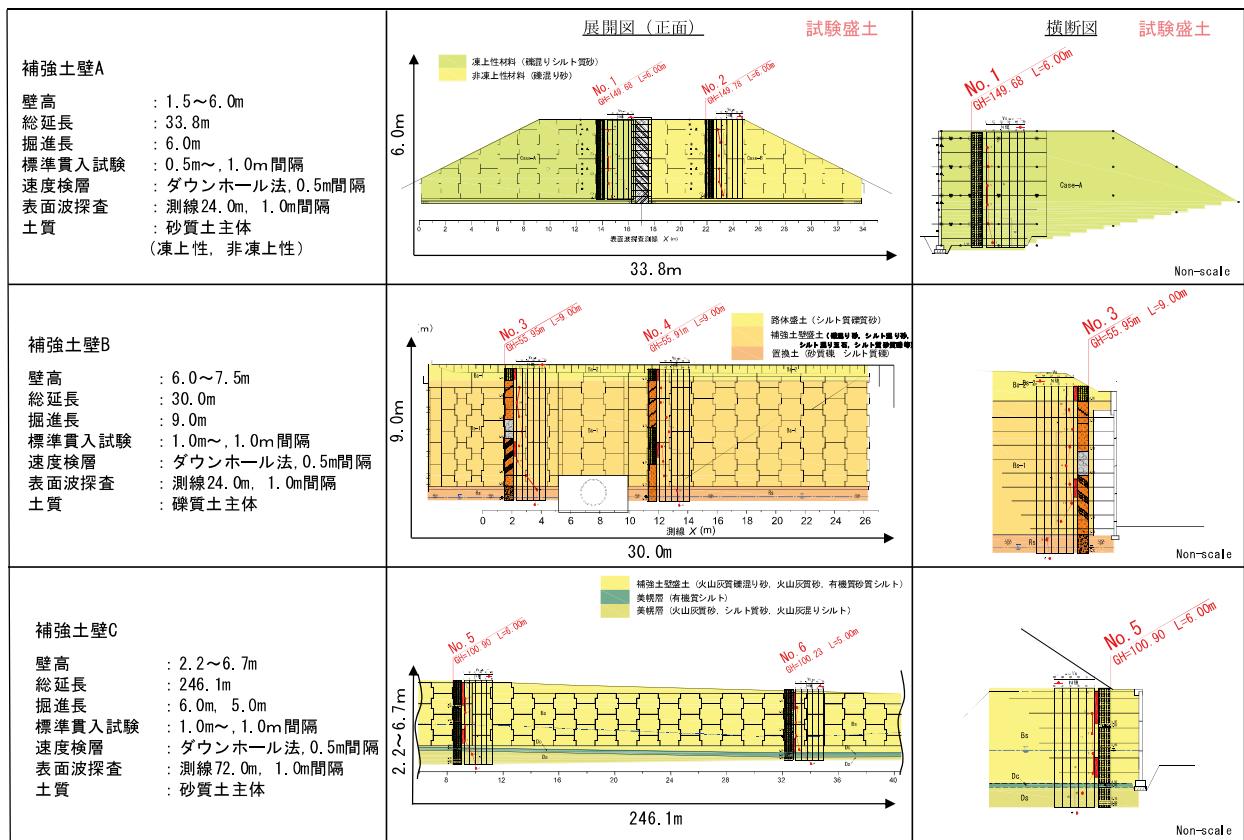


図1 補強土壁概要

面を打撃して発生させる「板叩き法」を用いた。なお、ノイズが大きい場合は「スタッキング処理(複数回起振して加算する)」を用いた。

2.4 各種土質試験

補強土壁 A では、過去に北見工業大学で実施した、土粒子密度試験、粒度試験(レーザー回折)、締固め試験(A-c 法)、凍上試験の結果を使用した。

補強土壁 B, C ではボーリング及び標準貫入試験から得られた試料に対して各種土質試験{土粒子密度試験、含水比試験、粒度試験(沈降分析、ふるい分析)、液性・塑性限界試験、締固め試験(A-a, A-c 法)}を実施した。

2.5 壁面傾斜角測定

全補強土壁において各壁面パネル中心部で角度計を用いて壁面傾斜角を測定した。測定については、北見工業大学より試験データを提供頂いた。

2.6 表面波探査

測定方法は多チャンネル方式で実施し、受信器には鉛直指向性の高い 4.5Hz の速度型ジオフォンを用いた。実施測線は全補強土壁で壁裏約 1.0m 程度とし、測線長は補強土壁(A, B, C)でそれぞれ 19.0m、22.0m、70.0m である。受信器間隔は 1.0m で設置し延長方向は壁面パネルと平行である。解析は経験的に波長の 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

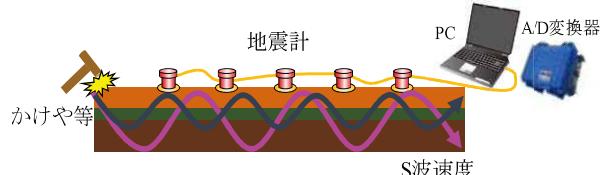


図2 表面波探査概略図

録から算出した分散曲線を最もよく再現する S 波速度構造を逆解析によって推定した。図 2 に表面波探査概略図を示す。

3 調査結果

ボーリング結果から補強土壁背面盛土の土質は補強土壁 A では砂質土主体、補強土壁 B では碎質土主体、補強土壁 C は砂質土主体であった。

補強土壁 A は試験盛土であるため、凍上性及び非凍上性材料を用いて施工しており、ボーリング孔 No.1 は凍上性材料として礫や細粒分を多く含む粒径幅の広い砂(補強土壁 A-1)、No.2 は非凍上性材料として分級された砂を使用している(補強土壁 A-2)。

補強土壁 B では、No.4 孔で深度 2.0~4.0m 地点でコア採取不可な空隙と考えられる箇所があった。

また、補強土壁 C のみボーリング深度約 3.3m に地下水水面が確認された。図 3 にボーリングコア写真一覧を示す。

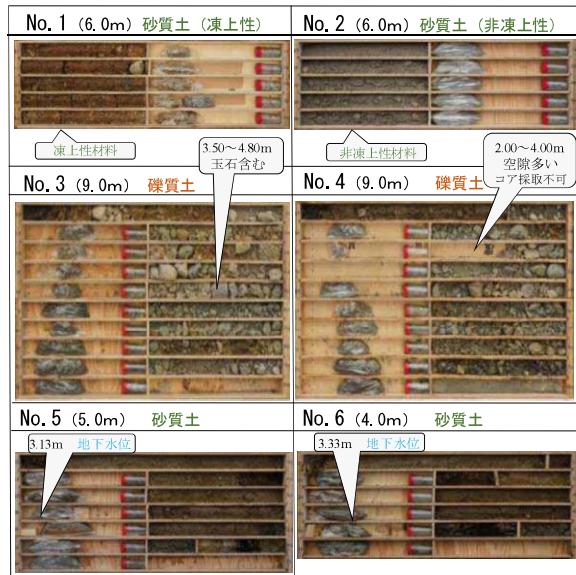


図3 ボーリングコア写真一覧

図4～6に各補強土壁の壁面傾斜角度分布、表面波探査から得られる $V_{s,SW}$ 速度分布を示す。

補強土壁Aでは、凍上性材料で構成されるA-1側で全体的に俯角状態となり、前面にせり出している状態である。最大傾斜角は $\theta_{max}=2.5^\circ$ であった。一方でA-2側は補強土壁上部で俯角、下部で仰角が測定され、全体的に傾斜が少なく全ての箇所で $\theta_{max}=1.0^\circ$ 以下であった。 $V_{s,SW}$ 分布では、A-1上部で $V_{s,SW}$ の大きい領域($V_{s,SW}=140\text{m/s}$)が認められた。

補強土壁Bでは全体として下部が俯角、上部が仰角を示す「く」の字型であった。下部俯角部で $\theta_{max}=2.6^\circ$ であった。 V_s 分布は表層部分で起点側が $V_{s,SW}=180\text{m/s}$ と低いのに対して終点側は $V_{s,SW}=256\text{m/s}$ と高い傾向を示した。

補強土壁Cは全体的に傾斜角が小さく、 $\theta_{max}=0.5^\circ$ 程度とわずかであった。 $V_{s,SW}$ は探査測線14～36m付近の表層付近では、 $V_{s,SW}=190\text{m/s}$ を示すのに対してその他区間は $V_{s,SW}=100\text{m/s}$ 程度と極めて低い速度を示した。探査測線14～36mでは灌木が密に繁茂しており、根による影響も懸念された。

4 考察

図7に速度検層から得られる $V_{s,log}$ と N 値の関係を示す。図8に表面波探査から得られる $V_{s,SW}$ と N 値の関係をそれぞれ示す。なお、両図には既往の推定式も図示している(今井ら³⁾、道路橋示方書⁴⁾)。○で囲った部分は各補強土壁の V_s プロット範囲である。ここで、土質に制限されていない既往の推定式である今井らの提案式である $V_s=97.0N^{0.314}$ (式1)に対して分散 S^2 と標準偏差 S を算出し、式1に対する実測値のバラツキを比較した。

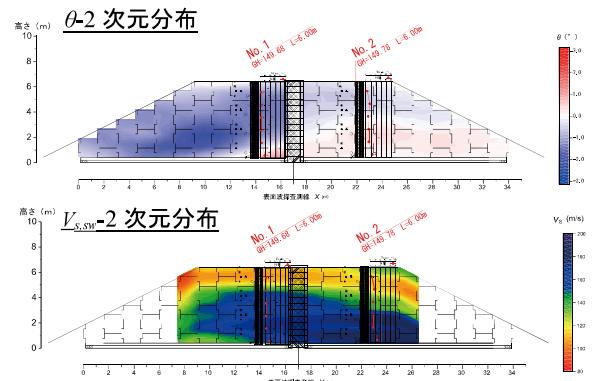


図4 壁面傾斜角度・ $V_{s,SW}$ 速度分布（補強土壁A）

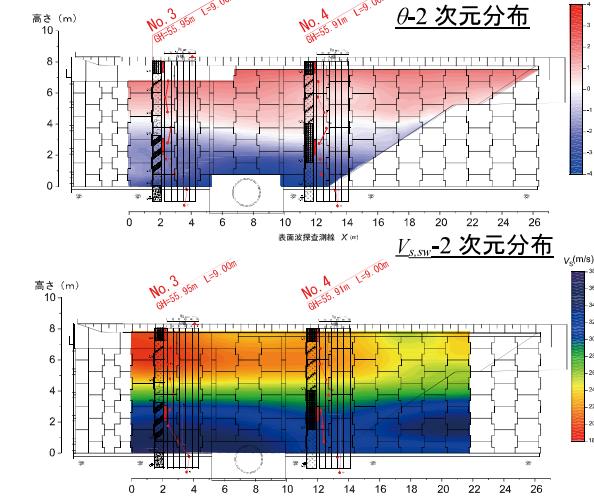


図5 壁面傾斜角度・ $V_{s,SW}$ 速度分布（補強土壁B）

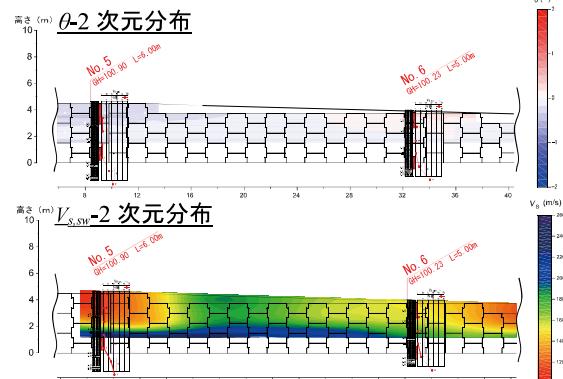


図6 壁面傾斜角度・ $V_{s,SW}$ 速度分布（補強土壁C）

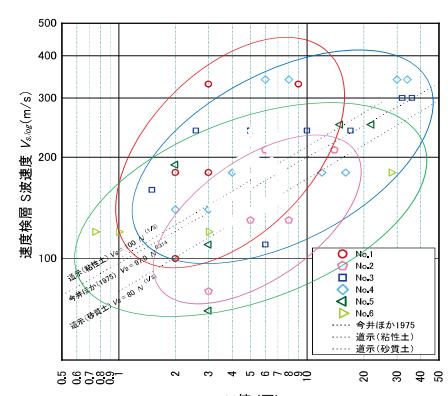


図7 $V_{s,log}$ と N 値の関係

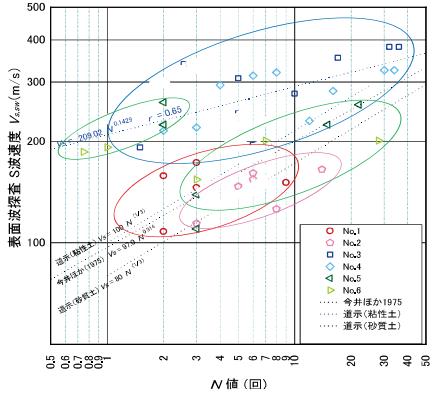


図 8 $V_{s,sw}$ と N 値の関係

表 1 に各補強土壁における $V_{s,log}$ と $V_{s,sw}$ の式 1 に対する分散 S^2 と標準偏差 S を示す。表 1 に示した各補強土壁の標準偏差 S から、今回の速度検層や表面波探査による $V_{s,sw}$ は、分級された砂では約 32.0m/s～104.3m/s 程度、礫を含む粒径幅の広い砂質土や礫質土では 72.8m/s～104.0m/s 程度のバラツキが生じることが確認された。各補強土壁の $V_{s,sw}$, $V_{s,log}$ の式 1 とのバラツキを比較すると、

- ・A-1 $V_{s,sw}(S=32.0 \text{m/s}) < V_{s,log}(S=204.3 \text{m/s})$
- ・A-2 $V_{s,sw}(S=36.5 \text{m/s}) < V_{s,log}(S=42.2 \text{m/s})$
- ・B $V_{s,sw}(S=104.0 \text{m/s}) > V_{s,log}(S=72.8 \text{m/s})$
- ・C $V_{s,sw}(S=36.5 \text{m/s}) < V_{s,log}(S=42.2 \text{m/s})$

となり、補強土壁 B 以外では全て $V_{s,sw}$ が式 1 と整合性のある結果となった。なお、補強土壁 C は地下水による影響を考慮して $N < 2$ を除外して算出した。

表 1 $V_{s,log}$, $V_{s,sw}$ の分散 S^2 と標準偏差 S

		補強土壁 A-1 砂質土 (液上性)	補強土壁 A-2 砂質土 (非液上性)	補強土壁 B 礫質土	補強土壁 C 砂質土
$V_{s,log}$	S^2	$S^2=10878$	$S^2=1779$	$S^2=5294.8$	$S^2=2405$
	S	$S=104.3$	$S=42.2$	$S=72.8$	$S=49.0$
$V_{s,sw}$	S^2	$S^2=1022$		$S^2=7977$	
	S	$S=32.0$		$S=104.0$	

※式1に対する計算結果

補強土壁 B の $V_{s,log}$, $V_{s,sw}$ に着目すると、 $V_{s,sw}$ は極めてバラツキが大きく式 1 より高い傾向を示す。ここで、補強土壁 B の $V_{s,sw}$ に関して累乗関数による近似式を算出すると $V_s = 209.02N^{0.1429}$ が得られた。相関係数 R は $R=0.65$ となった。これは補強土壁 B に対しては、式 1 とは異なる推定式の適用が必要であることを示唆するものである。図 9 は粒度試験から算出した礫分含有率と $V_{s,sw}$ の関係を示している。補強土壁 B は他の補強土壁に比べて礫分が多い。礫分含有率が 10%～20% の場合、砂分による締固め度や含水比の影響と考えられる $V_{s,sw}$ のバラツキが確認できるが、礫分含有率が 20% を超えると礫分含有率の増加に伴い $V_{s,sw}$ が増加する正の相関関係が認められた。これは、礫質土に対して V_s の測定を行った

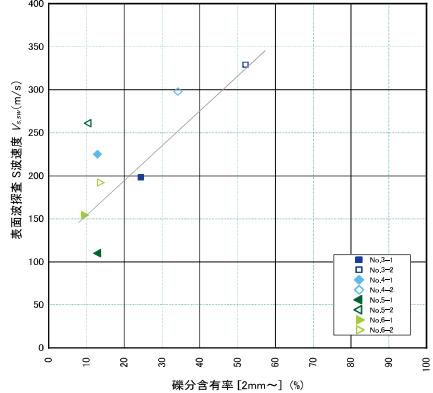


図 9 磯分含有率と $V_{s,sw}$ の関係

場合、せん断波は選択的に剛性の高い礫部分を伝播していることを示唆している。一方、標準貫入試験による N 値は剛性の高い礫部分は避けて、基質部分を通過しやすい傾向があるため 2 値間の差が生じやすく、その差を表面波探査では顕著に捉えていると推測する。

以上の検討から、今回の調査で土質や条件によって生じる V_s のバラツキを把握できた。実務において、速度検層や表面波探査を使用する際には、試験方法によってバラツキが生じることに留意が必要である。表面波探査については、本稿で対象とした 3 つの補強土壁において、礫質土を除き既存の推定式に対するバラツキは小さい結果となった。速度検層は実務において多くの実績を持ち広く活用されているが、速度検層にはボーリングが不可欠で多大な費用や労力を要する。また、掘削孔が不安定である場合や起振条件に大きく左右されるといった課題も挙げられる。そこで、簡易で迅速に実施可能であり、2 次元的な S 波速度分布を表現できる表面波探査手法も有効に活用することを検討していただきたい。今後は室内試験などを行い、 $V_{s,log}$ と $V_{s,sw}$ で測定結果に差が生じる詳細なメカニズムの解明やデータの蓄積を行う必要がある。

5 謝辞

本稿作成にあたり北見工業大学川尻峻三准教授から多大なご支援・ご指導を頂いた。また、北見工業大学地盤防災技術研究室の学生の皆様には、表面波探査の測定においてご協力を頂いた。ここに心から感謝を表します。

[参考文献]

- 1) (社)日本道路協会:道路土工—擁壁工指針, pp.132-149,
- 2) 川尻ら:盛土内性状に対する表面波探査の適応性, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.1, 61-74
- 3) 今井ら:日本の地盤における弾性波速度と力学特性, 第 4 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.89-96, 19754) (社)日本道路協会:道路土工—擁壁工指針, pp.132-149, 1999