非破壊調査によるテールアルメ補強土壁の一体化に関する考察

岐阜大学　　学生会員　○市川将也　松尾一輝
国際会員　　沢田和秀
（一社）日本テールアルメ協会　　正 会 員　　新田武彦　佐藤登

1. はじめに

テールアルメ工法は，国内で採用されてから 40 年以上経過している。全国で多数構築されているテールアルメ補強土壁の維持管理のために，効率的な点検・診断方法の確立が求められている。本研究では，2013 年 1 月に構築した実大実験壁を用いて 2013 年 12 月，2015 年 1 月，2018 年 3 月の計三度にわたり，レーザードップラー速度計（以下，LDV）を用いて壁面パネル（以下，スキン）の振動計測を行い，その卓越周波数を取得した。補強土壁が十分に締め固められ一つの塊として挙動していると仮定すると，補強土壁全体として一つの卓越周波数を持つ。補強土壁が締め固まっているかどうか，この卓越周波数から判断できる可能性がある。並行して行った盛土の締固め具合の判断が可能な 2 次元表面波探査によるせん断波速度の結果と比較することで，補強土壁の一体化という考えのもと，卓越周波数により盛土内部状態を判断可能か考察した。

2. 計測方法

2.1　実験壁概要

計測した実大実験壁の外観写真を写真-1，正面図を図-1 に示す。また，写真-1 に示すように軸方向をそれぞれ，水平左方向を X ，奥行方向を Y，高さ方向を Z と定義した。実験壁全体の寸法は，「幅（X）×高さ（Z）×奥行（Y）」＝「33.7×10.2×10」(m)である。補強土壁背面は，天端は奥行方向に数メートル平坦で，それ以上の奥行きはなだらかな斜面であり，遮水設備はない。両側面はかご枠によって押さえられている。2 次元表面波探査を行う際に設置する速度型地震計（以下，ジオフォン）による計測は，図-1 に示す赤点に番号を付した箇所を計測し，壁面下段から 1～7 段目，右端から 1～24 列目と定義した。この実験壁の計測結果から，盛土の安定度評価手法を検討した。

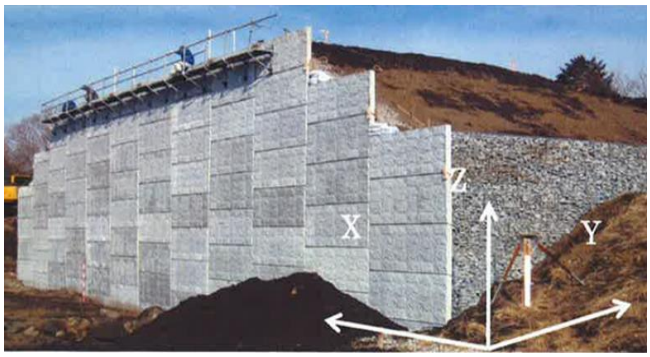

写真-1　実験壁の外観写真

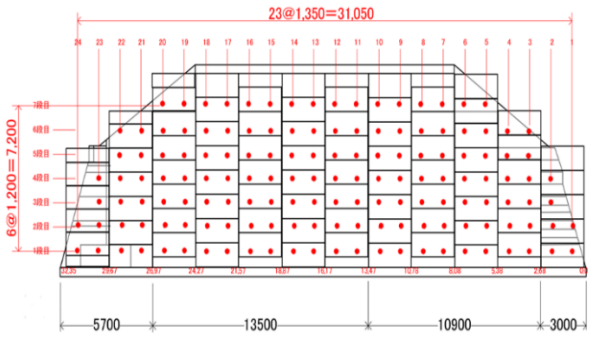

図-1　実験壁の正面図

2.2　2 次元表面波探査

2 次元表面波探査法は，地盤内を伝播する表面波を人工的に発生させ，設置した計測機器により位相速度を計測し解析することで対象地盤のせん断波速度分布を推定する方法である。表面波には波長によって伝播

Study of nondestructive investigation method for reinforced embankment as homogeneous solid:
M. Ichikawa, K. Matsuo, K. Sawada(Gifu Univ.), T. Nitta and N. Sato(Japan Terre Armee Association)

速度が異なる分散と呼ばれる現象が見られ，分散の仕方はせん断波速度分布（地盤の固さ）に依存する。この現象を利用して得られた位相速度を逆解析することでせん断波速度が求められる。つまり，せん断波速度が速いほど締固め具合が密であり，せん断波速度が遅いほど緩いと判断できる。図-2 に 2 次元表面波探査の実施イメージを示す。計測では，スキンに直線状にジオフォンを設置した。写真-2 に用いたジオフォンを示す。ジオフォンを設置する直線は，１～７段目の段ごとに設置して行った。かけやの加振により表面波を発生させ盛土内部の位相速度を計測し，段ごとの奥行方向のせん断波速度分布を求めた。図-3 に測線位置と盛土内部の XY 面のせん断波速度分布の結果表示面のイメージを示す。

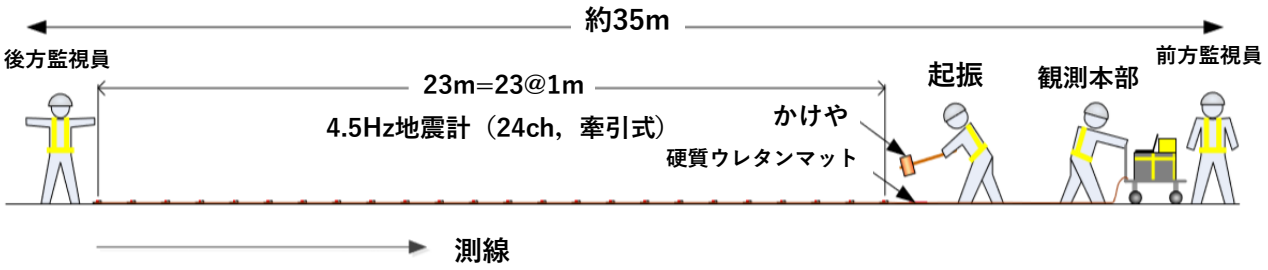

図-2　2 次元表面波探査のイメージ

写真-2　ジオフォン

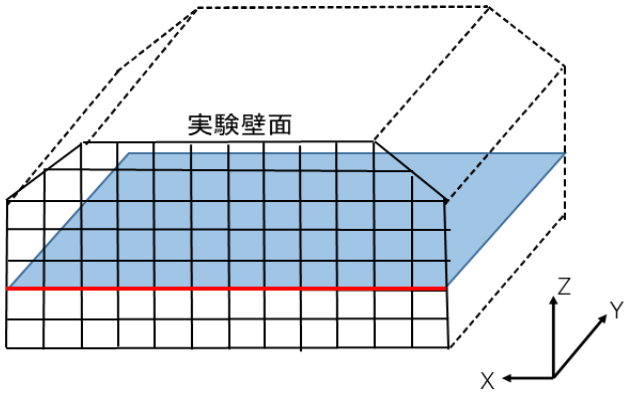

図-3　2 次元表面波探査の結果表示面イメージ

2.3　LDV を用いた振動計測

LDV は，図-4 に示すように計測対象に貼り付けたターゲットにレーザー光を照射し，反射光を受光することでドップラー効果による振動周波数の変化から，対象物の運動速度を検出できる。検出した運動速度を縦軸に，時間を横軸にとりフーリエ変換するとフーリエスペクトルが求まり，スペクトル密度が極大となる周波数を卓越周波数という。卓越周波数が低いほど周期が長く，振幅が大きく揺れやすいため，構造物が安定を保ち難い。この特性を利用して構造物全体の安定度評価が可能と考えられる。写真-3 に LDV の全体図，写真-4 に反射シールを示した。

計測では，おおよそスキン全体の卓越周波数を把握できる位置となるように図-1 の赤点で示した位置に L 字金具とスパイクで製作した部品に反射シールを貼り付けた。そして，スキン正面からレーザー光を照射してテールアルメ補強土壁のスキンの卓越周波数を求めた。また，常時微動計測と人工的に発生させた状態（雑振動）について，各計測箇所で複数回計測を行い，得られた計測箇所の時刻歴を用いて Y 方向の平均卓越周波数を求めた。

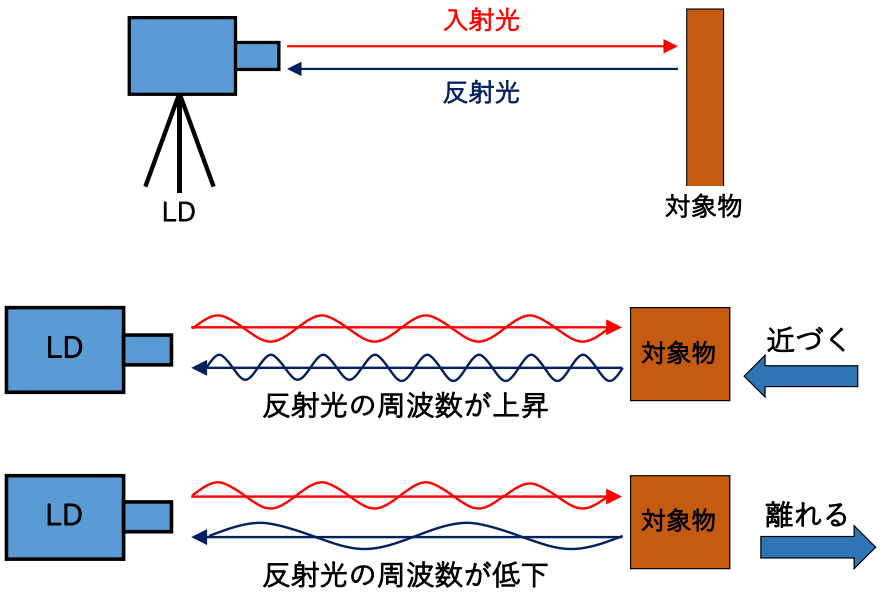

図-4　LDV の計測機構の概念図

写真-3　LDV の全体図

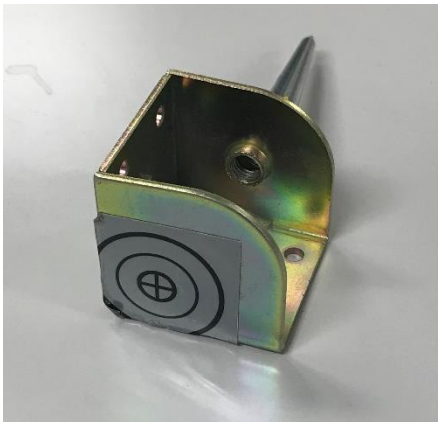

写真-4　反射シール

3. 計測結果

3.1　2 次元表面波探査

図-5 に 2 次元表面波探査によって得られた背面盛土のせん断波速度分布を示した。図-3 のように，下から順に 7 段分の XY 面についての計測結果を示しており，地盤に一番近い計測面を 1 段目，最も高い位置の計測面を 7 段目と定義し，紙面の下側をスキンとして表示した。寒色系はせん断波速度が速く，暖色系はせん断波速度が遅いことを示している。また，1～4 段目のスキンから離れた範囲にみられる 330～500m/s のせん断波速度は背面盛土ではなく地山のものと考えられる。

2013 年と 2015 年の計測結果を比較して，2015 年に全体的に暖色部分が大きくなっていることが確認できることからせん断波速度が遅くなっていると考えられる。特に，4，6 段目で顕著となっている。また，2015 年と 2018 年の計測結果を比較すると，2018 年に全体的に寒色部分が大きくなっていることが確認できることからせん断波速度が速くなっていると考えられる。特に，3～6 段目において顕著である。2 次元表面波探査によって得られたせん断波速度から，背面盛土は緩んだ後に密になったと読み取れる。

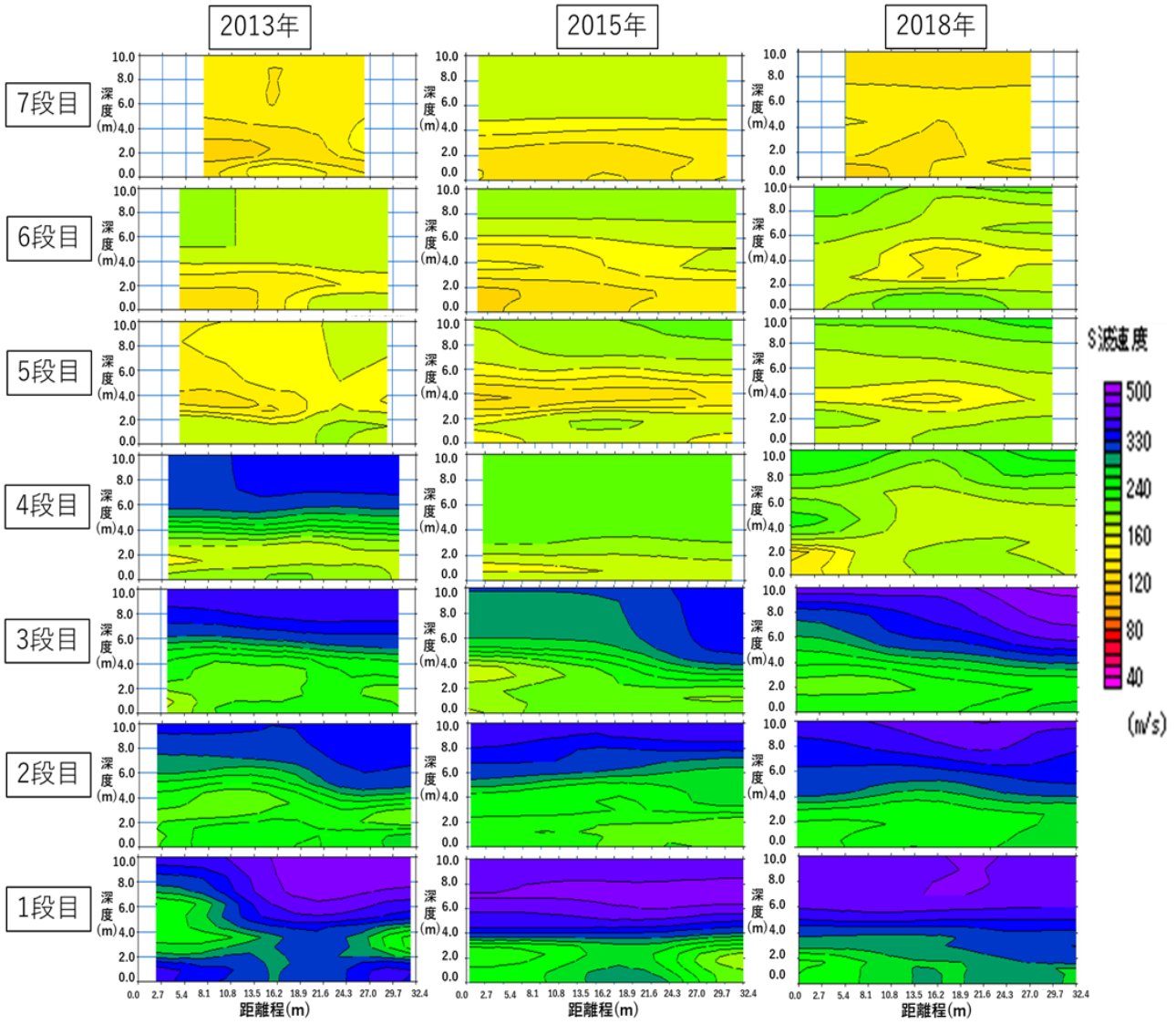

図-5　各計測年の 2 次元表面波探査にせん断波速度分布

3.2　LDV を用いた振動計測

2013 年，2015 年，2018 年にそれぞれ 24 か所，24 か所，21 か所のスキンの振動計測を行った。LDV によって得られた各スキンにおける計測箇所の卓越周波数を図-6，7，8 に示す。各計測箇所において複数回ずつ計測を行ったため，その平均値を示している

				4.8			4.8				
				4.8			4.6				
				7.6			7.3				
				6.3			6.6				
7.5	7.5	5.9	4.7	4.6	7.5	7.3	7.3	7.3	7.1	7.4	7.4
				6.9			7.1				
				4.6			4.7				

図-6　LDV の計測結果（2013 年計測）

		4.5		4.8			4.8				
		5.1	4.8	4.9			4.8				
		4.6		4.9			4.7				
		4.6		4.6	5.3		4.8				
		4.9		4.5		5.4	4.8				
		4.7		4.6			5.2				
		4.6		4.6			5.1				

図-7　LDV の計測結果（2015 年計測）

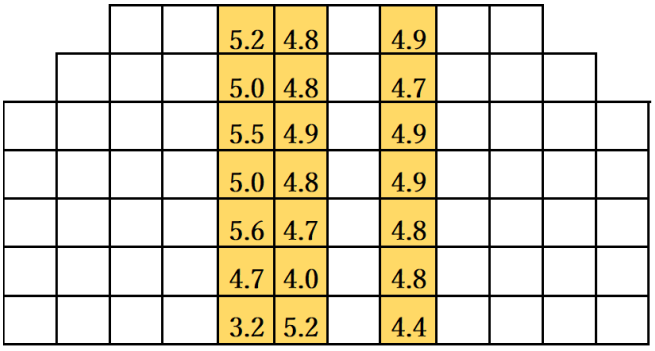

図-8　LDV の計測結果（2018 年計測）

図-6，7，8 より，卓越周波数は全体として概ね 5Hz の卓越周波数を得られた。また，2013 年から 2018 年にかけてわずかに低下し続けていることが分かる。卓越周波数は，経年によって背面盛土は緩み続けたと読み取れる。

3.3　両計測結果の比較

2 次元表面波探査と LDV を用いた振動計測の結果における背面盛土の経年変化を比較する。2 次元表面波探査によるせん断波速度から，背面盛土は 2013 年から 2015 年にかけて緩み，2015 年から 2018 年にかけて密になったと読みとれる。一方，LDV を用いた振動計測の結果からは，2013 年から 2018 年にかけて背面盛土は緩み続けたと読みとることができ，両計測の経年変化の結果に相関は見られなかった。

4. 卓越周波数に関する考察

せん断波速度と卓越周波数の関係を示し，その関係式を用いて 2 次元表面波探査から得られたせん断波速度を周波数として表現することで，スキンの卓越周波数との比較を行った。

4.1　せん断波速度と卓越周波数の関係

2 次元表面波探査における結果と LDV を用いた振動計測における結果で同様の地盤状態が得られているか考察するために，せん断波速度を関係式によって周波数に変換し卓越周波数として表現できることを説明する。表層地盤において，最も周期が大きく，揺れやすい一次モードの波に関しては，波長λと層厚 H の間に次のような関係がある。 ここで，表層地盤より下部は剛基盤とする。

$$\lambda/4 = H \tag{1}$$

テールアルメのような盛土においても，盛土全体が一体かつ一様な材料の構造物として挙動し，また横方向には無限に続いているという仮定の下では，H を壁高として，(1) 式と同様の関係で表せると考えられる。表層地盤，盛土における一次モードの波のイメージを図-9 に示す。

上記の式を波の速度 V，周波数 f 及び波長 λ の関係式である V=fλ に代入すると，次のような波の速度と周波数の関係式を得る。

$$f = V/4H \tag{2}$$

上記の式にせん断波速度を代入することで周波数に変換し，卓越周波数と比較することができる。

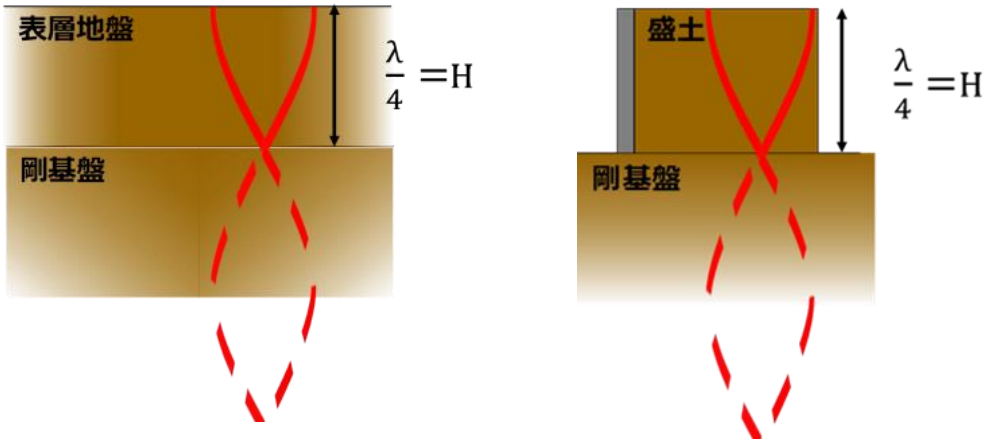

図-9　一次モードの波のイメージ図（左：表層地盤，右：盛土）

4.2　両計測結果の比較

前節で，せん断波速度を周波数に変換することで卓越周波数と比較できることを示した。これを用いて，2 次元表面波探査で得られたせん断波速度を周波数に変換することで，LDV を用いた振動計測で得られた卓越周波数と比較する。

ここで，LDV を用いた振動計測で得られた卓越周波数はスキンの振動を計測したものであるが，スキンと盛土は一体かつ一様な材料として挙動しているという仮定の下で上式を適用する。しかし，盛土全体ではなく，背面盛土のある範囲において一体として挙動していることも考えられるため，いくつかのパターンに分けて考察を行う。

1. 盛土全体の振動を表しているパターン
2. 盛土のストリップ長さの範囲内のみの振動を表しているパターン
3. 盛土の主働領域内のみの振動を表しているパターン

4.2.1　パターン 1：盛土全体の振動を表しているパターン

LDV を用いた振動計測において，盛土全体の振動を計測していると仮定したとき，盛土全体のせん断波速度を平均して周波数に変換し，卓越周波数の平均値と比較した結果を表-1 に示す。なお，せん断波速度の平均の際には自然地盤の範囲に含まれるデータは省き，LDV を用いた振動計測で得た卓越周波数はすべてのデータを平均した。

4.2.2　パターン 2：盛土のストリップ長さの範囲内のみの振動を表しているパターン

LDV を用いた振動計測において，盛土のストリップ長さの範囲内のみの振動を計測していると仮定したとき，盛土のストリップ長さの範囲内に含まれるせん断波速度を平均して周波数に変換し，卓越周波数の平均値と比較した結果を表-2 に示す。ここで，ストリップ長さの範囲は図-10 の赤色部に示す。また，この範囲外でのせん断波速度については考慮せず，かつ範囲内のせん断波速度には干渉していないものとする。なお，LDV を用いた振動計測で得た卓越周波数はすべてのデータを平均した。

4.2.3　パターン 3：盛土の主働領域内のみの振動を表しているパターン

LDV を用いた振動計測において，盛土の主働領域内のみの振動を計測していると仮定したとき，盛土の主働領域内に含まれるせん断波速度を平均して周波数に変換し，卓越周波数の平均値と比較した結果を表-3 に示す。ここで，主働領域とは最大引張応力の位置を結んだ線より壁面側であり，過去の多くの測定結果よりテールアルメの仮想壁高の 30%を超えて盛土側へ侵入しないとする [1]ため，壁高の1/2より上部は 0.3H の位

置，それより下部では壁面下端より$\tan^{-1}0.6$の角度で引き上げた線より壁面側となる図-11 の赤色部に示す範囲を適用した。また，この範囲外でのせん断波速度については考慮せず，かつ範囲内のせん断波速度には干渉していないものとする。なお， LDV を用いた振動計測で得た卓越周波数はすべてのデータを平均した。

表-1　両計測結果の比較（盛土全体）

計測	2 次元表面波探査で得たせん断波速度（m/s）	せん断波速度から変換した周波数（Hz）	LDV を用いた振動計測で得た卓越周波数（Hz）	差
2013 年	212.59	5.21	6.32	1.11
2015 年	204.16	5.00	4.82	0.18
2018 年	218.53	5.36	4.79	0.57

表-2　両計測結果の比較（ストリップ長さの範囲内）

計測	2 次元表面波探査で得たせん断波速度（m/s）	せん断波速度から変換した周波数（Hz）	LDV を用いた振動計測で得た卓越周波数（Hz）	差
2013 年	206.85	5.07	6.32	1.25
2015 年	190.95	4.68	4.82	0.14
2018 年	205.37	5.03	4.79	0.24

表-3　両計測結果の比較（主働領域）

計測	2 次元表面波探査で得たせん断波速度（m/s）	せん断波速度から変換した周波数（Hz）	LDV を用いた振動計測で得た卓越周波数（Hz）	差
2013 年	205.88	5.05	6.32	1.27
2015 年	185.00	4.53	4.82	0.29
2018 年	207.02	5.07	4.79	0.28

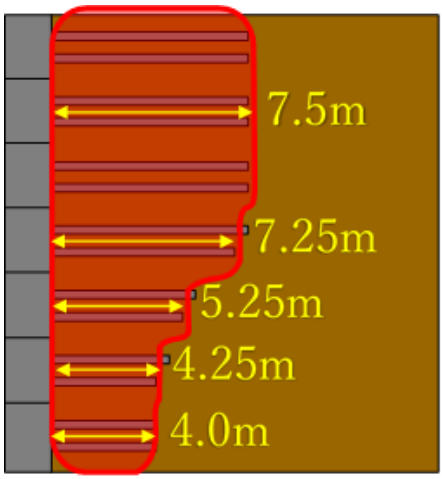

図-10　ストリップ長さの範囲

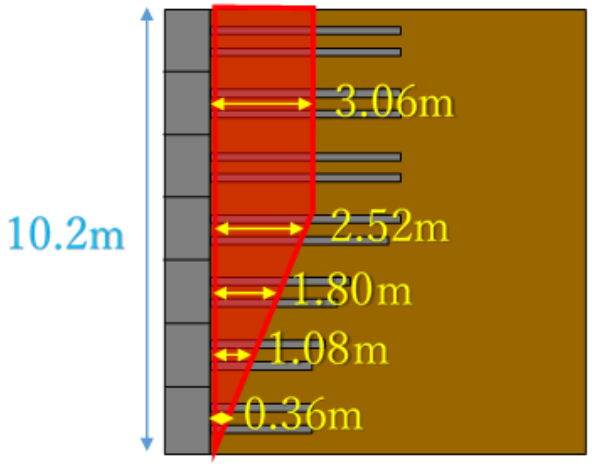

図-11　主働領域の範囲[1)]

表-1，2，3 を比較すると，2 次元表面波探査で得たせん断波速度から変換した周波数と LDV を用いた振動計測で得た卓越周波数との差は，2013 年ではパターン 1 で小さく，2015 年，2018 年ではパターン 2 で小さいといった結果となった。

表-1，2，3 を元にした LDV を用いた振動計測によって得られた卓越周波数と，盛土全体，ストリップ長さの範囲内，主働領域内それぞれにおいてせん断波速度を変換した周波数の比較を図-12 に示す。

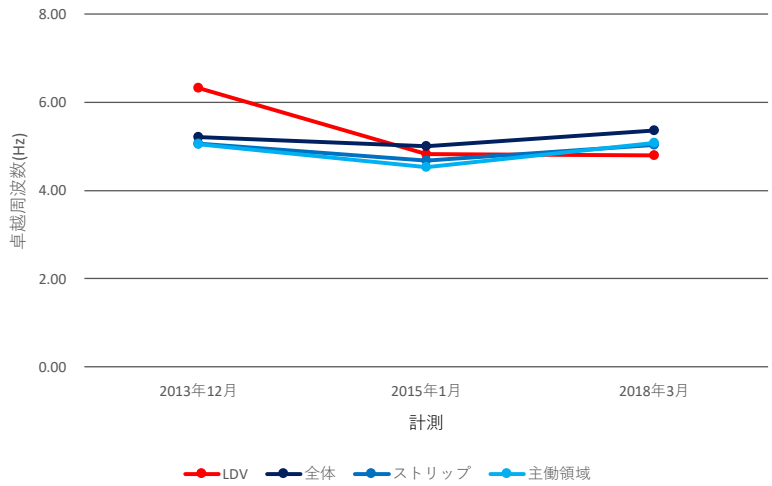

図-12　盛土奥行方向における周波数の比較

図-12 より，経年変化に違いは見られるものの比較した周波数の値は近い値を取っていて，せん断波速度における結果と卓越周波数における結果はおおよそ同様な地盤状態を示しているということが確認できる。また，LDV を用いた振動計測において，盛土内のストリップ長さの範囲内や主働領域内での振動のみを計測できているとしたパターンの方が，特に 2015 年，2018 年において卓越周波数とせん断波速度から導かれた周波数がわずかに近い値を取っていることが分かる。

5. 本研究のまとめ

テールアルメ補強土壁の非破壊調査による安定度評価手法の確立を目的に，3 度にわたり，実大実験壁を対象として，背面盛土の 2 次元表面波探査と LDV を用いたスキンの振動計測を行った。卓越周波数が得られる LDV を用いた振動計測の結果と，地盤内部のせん断波速度が得られる 2 次元表面波探査の結果を比較した。これにより，補強土地盤の安定度調査に対する指標として，より簡易で効率的に計測が可能な卓越周波数適応の有意性を検討した。

両計測結果の経年変化について相関はみられなかったものの，図-12 のようにして一定の条件の下でせん断波速度と卓越周波数の関係に基づいて比較を行うことで，2 次元表面波探査と LDV を用いた振動計測で概ね同様な地盤状態を得られている可能性が高いことが確認できた。

以上より，スキンの計測から得られる卓越周波数が，補強土壁の安定度調査指標として有意である可能性が示唆された。

盛土全体が一体として挙動すると仮定し，せん断波速度と卓越周波数の関係を適用するにあたり，一体として挙動するとする範囲，また変状などの地盤状態による影響を考慮することが重要となる。条件の異なる既存のテールアルメ補強土壁に対しての計測を行うことにより，卓越周波数の変化やせん断波速度との関係性の変化の把握に努め，せん断波速度と卓越周波数の関係をより詳しく調査することが必要となる。

6. 参考文献

1) 財団法人土木研究センター:補強土（テールアルメ）壁工法設計・施工マニュアル第 4 回改訂版，2014.