補強盛土の経年変化を把握するための非破壊調査の試み

岐阜大学 国際会員 沢田和秀,八嶋厚,野々山麻衣子,非会員 ○田中貴洋 ヒロセ株式会社 国際会員 大谷義則 正会員 佐藤 登 地盤防災ネットワーク 国際会員 村田芳信

1. はじめに

テールアルメ工法は、国内で採用されてから約 40 年が経過している。全国で多数構築されているテールアルメ工法による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、テールアルメ補強盛土の非破壊調査法による安定度評価手法の確立を目的に、2 度にわたり、実大実験壁を対象として、壁面の振動計測と背面盛土の2次元表面波探査を実施した。振動計測では、壁面垂直方向における壁面パネル(以下、スキン)の卓越周波数を、2 次元表面波探査では、背面盛土および壁前面地盤のせん断波速度分布を調査した。約1年間を経過した2時期の2次元表面波探査により、雨水浸入や応力解放による背面盛土の状態変化、つまり盛土の劣化を、せん断波速度の変化により確認した。また、表面波探査と同時に実施したスキンの振動計測においても、スキンの卓越周波数が盛土の劣化より低下することを確認した。スキンの振動計測では、加速度計による計測に加えて、遠隔から非接触で安全かつ効率的に測定を行える非接触振動測定器(以下、LDV)を使用して、振動計測を行った。以上から、簡易な高盛土微動計測による補強盛土の安定度評価手法の可能性を検討した。

2. 実験壁概要

計測した実大実験壁は、ヒロセ株式会社製作のスーパーテールアルメ工法による補強土壁である。写真-1 に実験壁の外観写真、図-1 に正面図を示し、実験等で用いる軸方向をそれぞれ、水平左方向を X、奥行方向を Y、鉛直方向上向きを Z と定義した。実験壁全体の寸法は、「幅×高さ×奥行」=「33.7×10.2×10」(m)である。補強土壁背面は、天端は奥行き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。また、両側面は、かご枠によって押さえられている。速度型地震計(以下ジオフォン)による振動計測は、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 列と定義した。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

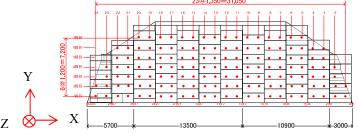


図-1 実験壁の正面図

3. 計測の概要

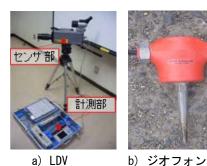
振動計測では、ジオフォンと LDV を使用して、スキンの Y 方向(壁面垂直方向)の振動速度を計測した。現

A Trial of Non-Destructive Investigation to capture the damage of Reinforced Embankment: K. Sawada, A. Yashima, T. Tanaka, M. Nonoyama, (Gifu University), Y. Otani, N. Sato (Hirose Co.,Ltd) and Y. Murata (Network for the Action against Geo-hazards)

地計測で使用した機器と計器設置に用いた器具を写真-2に示した。

今回使用したジオフォンは、固有周波数 (28Hz) 以下の帯域で感度が低い機器であり、この特性に対して、 周波数特性を考慮して、取得データに補正処理を行った。補正処理では、ジオフォンの周波数特性にその逆 数となる関数を掛けることで、平坦な周波数特性に変換し、固有周波数以下の感度の低下を改善した。図-2 と式(1)にジオフォンの周波数出力特性 F と周波数の関係を示す。ここで、f は算定したフーリエスペクトル の周波数、 f_0 は地震計の固有周波数(28Hz)、hは減衰定数である。ジオフォンの計測結果は、これらの補正 を行った振動計測の結果から求まる卓越周波数等を用いた。

LDV は、計測対象にレーザー光を照射し、ドップラー効果を利用して照射方向の振動を非接触で計測でき る。図-3 のように、計測対象に反射板(光波測距用シール)を貼付し、照射したレーザーの入射光と反射光 の振動数変化から運動速度を計測する。LDV は、センサ部からレーザー光を照射し、計測対象から反射する レーザー光を検知することにより対象の運動を計測するが、センサ部自体が振動すると正確な計測が不可能 となる。そのため、LDVには、センサ部自体が受ける振動を自動で除去する機能がある。また、本研究で使 用した LDV では、蓄積された時刻歴データは専用ソフト上でスムージングされ表示される。





設置用器具 反射シール c) 設置用器具

1.0 0.8 0.6 補正前 0.4 補正後 0.2 0.02.0 28.0 80.0 周波数 [Hz]

写真-2 計測機器と設置用器具

図-2 ジオフォンの周波数特性

 $F = \frac{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + 4h^2\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$

: 算定したフーリエスペクトル (1)

fo: 地震の固有周波数

減衰定数



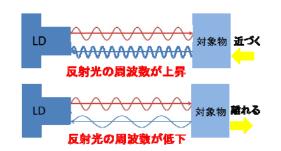


図-3 LDV の計測機構の概念図

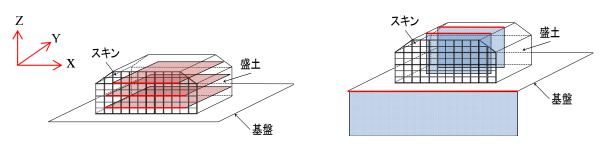
また、盛土内部のせん断波速度分布を把握するため、2次元表面波探査を実施した。2次元表面波探査は、 図-4に示すように、複数のジオフォンを線状に設置し、その測線に沿って振動を与えることで、対象地盤の 深さ方向面(ここでは盛土内部)のせん断波速度分布を取得する。図-5 に配置した測線の概略図を示す。図 -5 の左図は、盛土内部の XY 面のせん断波速度分布、図-5 右図は盛土内部の XZ 面のせん断波速度分布を調 べたイメージである。なお、参考のために盛土を構築してある地盤で、盛土のつま先付近の地盤のせん断波 速度分布も調査した。

現地計測は、平成 25 年 12 月 10~11 日(以下 25 年度計測)と平成 27 年 1 月 21~22 日(以下 26 年度計測)の 2

回実施した。2次元表面波探査は、壁面から Y 方向に7測線(7段分)(図-5 左図参照)、盛土天端から Z 方向に2測線、壁前面地盤から Z 方向に1測線を計測し(図-5 右図参照)、同箇所について、同様の手法で25年度計測と26年度計測を実施した。

振動計測では、「常時微動状態」と「雑振動を人工的に発生させた状態」について、各計測箇所で複数回 計測を行い、得られた計測結果の時刻歴を用いて各計測箇所のY方向の平均卓越周波数を求めた。計測箇所 には、スキンに穿孔した孔にジオフォンを固定した(写真-2 b)参照)。





赤線:測線、赤面(XY面)・青面(XZ面):せん断波速度分布 図-5 2次元表面波探査の測線位置と結果表示面の位置イメージ

4. 計測結果

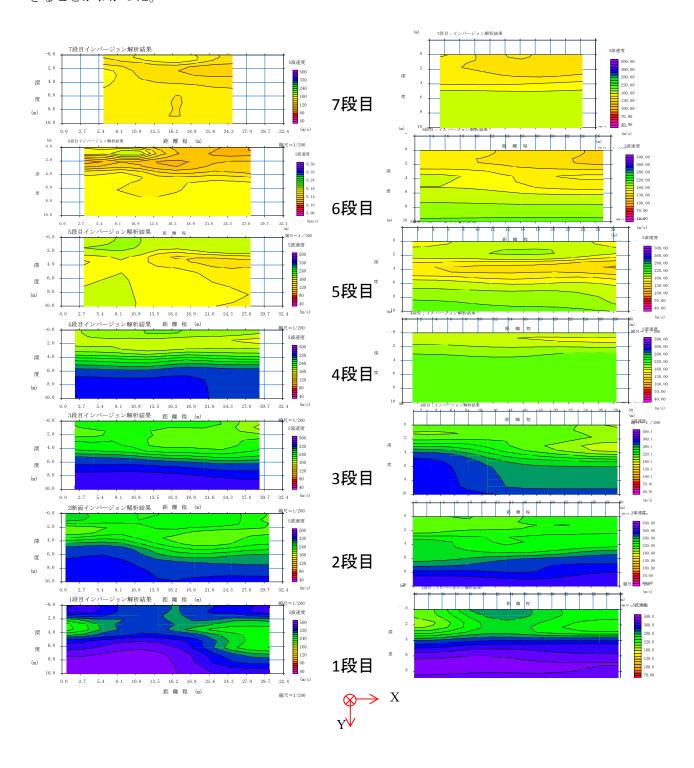
4.1 2次元表面波探查

図-6 に 2 次元表面波探査によって得られた、25 年度計測(左)と 26 年度計測(右)の補強盛土のせん断 波速度分布を示した。図-5 左図のように、下から順に 7 段分の XY 面について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、紙面上側をスキン面として表示した。 寒色系は速度が速く、暖色系は速度が遅いことを示している。計測結果から、25 年度計測と 26 年度計測を比較すると、1 段目から 4 段目(補強盛土)については、25 年度計測より 26 年度計測が、寒色部分が小さくなっていることが確認できることから、26 年度計測の方が、せん断波速度が低くなっていることになる。一方、5 段目から 7 段目の計測結果を比較すると、25 年度計測より 26 年度計測が、暖色部分が小さくなっていることから、26 年度計測の方が、せん断波速度が速くなっていると考えられる。

4.2 ジオフォンによるスキンの振動計測

第3章で示した方法でデータ補正を行った振動計測の結果から求まる、各スキンにおける計測箇所の Y 方向振動の卓越周波数を図-7(25年度計測)および図-8(26年度計測)に示した。それぞれの図は、補強盛土の各スキンにジオフォンを設置し、振動計測により得られた卓越周波数(Hz)を示している。スキンの卓越周波数は、図-7 および図-8 に示した赤色と青色の矢印位置の卓越周波数とフーリエスペクトルの関係(図-9:赤矢印、図-10:青矢印)から目視で読み取った。これらは、複数回の常時微動計測と雑振動計測のそれぞれの結果について、3章で示した補正を行ったデータを移動平均により平均化したデータを用いた。図-7 および図-8 に示す赤枠は、25年度計測と 26年度計測を比較して、25年度計測の卓越周波数が高い箇所を示している。しかし、変化の差はほとんどなく、ジオフォンによってスキン表面で得られる卓越周波数はほぼ変化

ないといえる。ここで対象とした赤矢印の計測箇所は、後述する LDV による計測と同位置である。また、図-9 と図-10 から、最も卓越している周波数はほぼ同じだが、26 年度計測はいろいろな振動を含んでいることがわかる。計測時の状態については、微動状態であっても加振状態であっても、卓越する周波数を把握できることがわかった。



25 年度計測26 年度計測図-6 盛土のせん断波速度分布

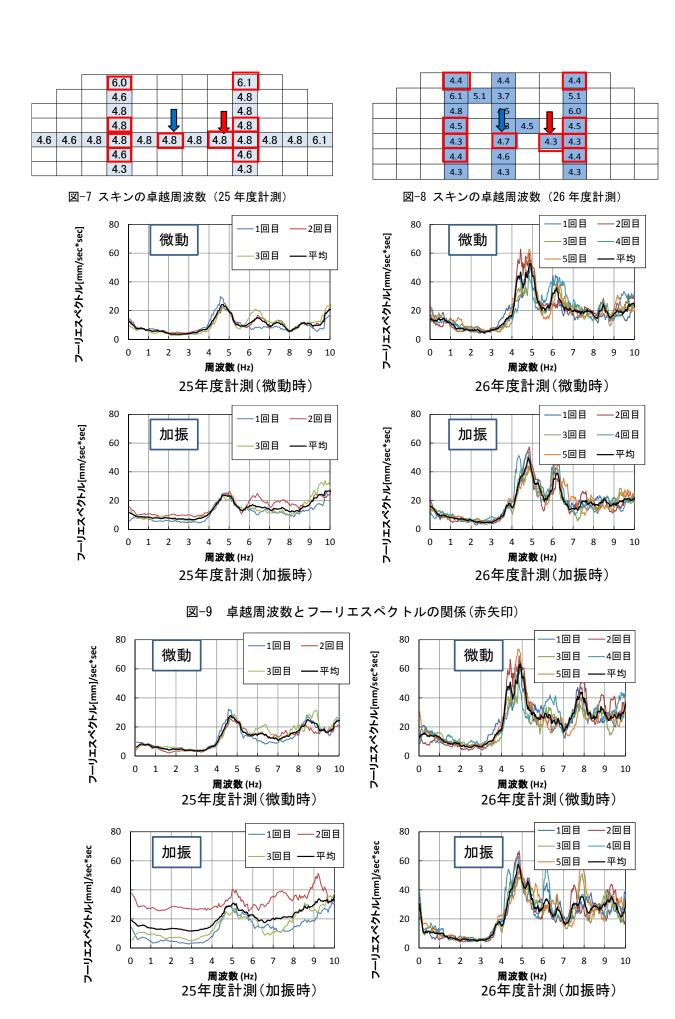


図-10 卓越周波数とフーリエスペクトルの関係(青矢印)

4.3 LDV によるスキンの振動計測

LDV による振動計測も、ジオフォンによる振動計測と同様、常時微動状態と人工的に雑振動を発生させた状態(加振状態)について、設定した計測箇所で複数回計測を行い、得られた結果の時刻歴を用いて各計測箇所のスキン Y 方向の平均卓越周波数を求めた。

25 年度計測は、図-11 中赤丸で示した 26 点を計測箇所とした。ターゲットは、写真-2 c)に示すようにスパイクのある器具に反射シールを貼り付け、スキンに穿孔した孔に差し込み固定した。26 年度計測は、図-12 中赤丸で示した 28 点を計測箇所とし、25 年度と同様に LDV により計測した。ただし、図-12 中に示す青線の箇所では常時微動計測と雑振動計測を実施し、その他の箇所では常時微動計測のみ実施した。

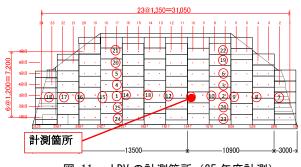


図-11 LDV の計測箇所(25 年度計測)

図-12 LDVの計測箇所(26年度計測)

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-13 (25 年度計測) および図-14 (26 年度計測) に示した。図中の赤枠は、25 年度計測と 26 年度計測を比較して、25 年度計測の卓越周波数が高い箇所を示している。スキンの卓越周波数は、複数回実施した常時微動計測と雑振動計測のそれぞれの結果の平均値から算定している。

			6.1					6.0			_
			4.6					4.6			
			6.0					4.8			
			4.8					4.8			
7.8	7.7	6.1	6.1	6.1	7.9	7.9	4.8	6.3	6.3	7.7	7.9
			4.7					5.7			
			4.8					5.9			

4.8 4.8 5.9 5.9 4.7 4.7 5.9 4.4 4.4 6.2 4.7 4.7 4.7 4.6 4.6 4.7 4.6 4.7 4.7 4.5 7.9 7.9 7.9

図-13 各計測箇所の卓越周波数(25年度計測)

図-14 各計測箇所の卓越周波数(26年度計測)

図-13 から、25 年度計測の結果の方が、図-14 に示した 26 年度計測の結果より、全体的に平均卓越周波数が高いことがわかる。これは、4.2 で示したジオフォンを用いたスキンの振動計測の結果と異なる傾向を示している。図-12 の青線で示した、常時微動状態と人工的に雑振動を発生させた状態の両者で計測している箇所のなかで、25 年度計測と 26 年度計測の同じ計測箇所(図-11 および図-12 赤点計測箇所)のフーリエスペクトルを図-15 に示す。

25 年度計測と 26 年度計測のそれぞれ常時微動時(上段)と雑振動加振時(下段)を比較すると、同じ計測箇所で同程度の卓越周波数が確認できる。これにより、計測対象が同じであれば、微動状態であっても加振状態であっても、LDV によって振動計測が可能であることがわかる。また、雑振動を加えることにより、構造物固有のピークを有する周波数を捉えにくくなっている。

4.4 各種計測結果のまとめ

計測対象とした実大実験壁は、構築から約1年後に25年度計測、その約1年後に26年度計測を実施した。 表面波探査の結果から、25年度計測と約1年経過した26年度計測のせん断波速度分布を比較すると、26年度計測のせん断波速度分布のほうが、下段は速度が小さく、上段は速度が速くなっている。このことにより、1年経過した補強土壁には、下段に「緩み」が生じ、構造物全体にその影響を与えていると考えられる。

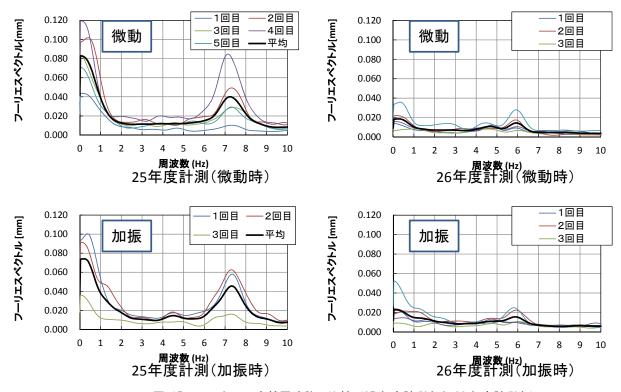


図-15 同スキンの卓越周波数の比較(25年度計測左と26年度計測右)

スキンの Y 方向の振動を直接計測するジオフォンによる振動計測では、25 年度計測および 26 年度計測において対象としたスキンの平均卓越周波数は、1 年の経過によってほぼ変化がないことがわかった。このことは、周波数とフーリエスペクトル関係からも確認できる。また、周波数とフーリエスペクトル関係から、26 年度計測は補強盛土の複雑な振動の影響を示していると考えられる。

一方、スキンの Y 方向の振動速度を非接触で計測する LDV 計測では、ジオフォンを用いた振動計測とは 異なり、25 年度計測のほうが平均卓越周波数は大きく、26 年度計測では小さくなっている。これは、表面波 探査で調査した、盛土の剛性の低下を表現しているといえる。

実大規模の補強盛土に対して、3 つの異なる計測手法による計測結果を用いて、1 年を隔てた 2 時期の結果を比較した。どの計測手法による比較においても、1 年の経過により補強土盛土が緩んだ影響が現れていると考えられる。

ジオフォンの計測結果は、卓越周波数の変化を明確に捉えることはできなかった。これは、今回の計測で使用したジオフォンの特性に依るもので、計測対象の補強盛土の振動を適切に捉えられる仕様のジオフォンを用いれば、LDV の計測結果のように、盛土の特徴的な振動を正確に把握できると考えられる。調査には、対象に適したセンサを用いることが重要であることが再確認できた。

5. おわりに

テールアルメ補強盛土の非破壊調査法による安定度評価手法の確立を目的に、2 度にわたり、実大実験壁を対象として、ジオフォン及びLDV を用いたスキンの振動計測と背面盛土の2次元表面波探査を実施した。

3 つの異なる非破壊計測手法による計測から、補強盛土は、どの計測手法による比較においても、1 年間に盛 土が緩んだと考えられる結果となった。

実験壁の状況として、盛土天端は未舗装であるため、雨水の浸入しやすい状態であった。また、盛土側面は、かご枠で土留めされているのみの状態で、雨水の浸入や応力解放が生じやすい状態である。これらの状況から、構築から約2年間の盛土の劣化過程が容易に想像できる。つまり、25年度計測と26年度計測の2次元表面波探査の結果の比較から、盛土内部のせん断波速度が低下したことは、上記のような盛土状態の変化を捉えた結果と考えられる。

実験壁を均質な盛土と仮定すると、盛土の剛性が低下すると、全体の固有振動数も低下すると考えられる。このことから、盛土の締固め具合(剛性)は、盛土内に敷設されている補強材(ストリップ)と盛土の摩擦に影響し、盛土と密着しているスキンの振動状態にも影響すると考えられる。以上のことから、2次元表面波探査による盛土内部のせん断波速度分布の低下と、スキンの卓越周波数の低下には、明確な関係性が確認できる。つまり、盛土の経年的劣化をスキンの微動計測から把握できる可能性を確認した。

人工的な振動でなく、常時微動のようなさまざまな振動が含まれていた方が、明確に卓越周波数を得やすい。今回の実験のように、人工的な雑振動を加えることは、特定の卓越した周波数をもつ振動を加えることになり、本来得たい計測対象の卓越周波数を把握しにくくしている。

LDV を使って、テールアルメ実験壁のスキンの振動を計測した結果からも、盛土の状態変化を捉えることができた。つまり、今回の計測対象であるスキンに、確実に反射ターゲットを貼り付けることができれば、実験壁の振動状態に関わらず、振動のスペクトルから、卓越した振動特性を得ることができる。

これらのことから、計測対象に、LDVによって計測するための反射ターゲットを、確実にかつ継続的に 貼付しておくことができれば、足場の建設を必要としない安全な振動計測を簡単に実施できる。今回の実 験により、計測対象にターゲットを確実に固定できれば、遠隔から非接触で安全かつ効率的に、補強盛土 の状態変化をモニタリングできる可能性を示すことができた。

LDV によるモニタリング方法を用いた補強土盛土の安定性評価手法を実用化するには、より多くの計測 データを蓄積して、補強盛土の剛性とスキンの面外方向の振動特性の関係について、詳細な分析を継続す る必要がある。