

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04342

研究課題名（和文）線形理論にもとづく補正法を用いたベンダーエレメント法の適用限界の拡張

研究課題名（英文）Expansion of application limitation of bender element test using a correction method based on linear system

研究代表者

荻野 俊寛 (OGINO, Toshihiro)

秋田大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：80312693

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：地盤材料のS波速度を簡便に測定する手法であるベンダーエレメント法の測定精度改善を目的として、S波の発生および受信のための素子であるベンダーエレメントの振動をレーザー変位計で多点計測し、振動特性を明らかにした。各素子は複数の固有周波数を持つ多自由度系の減衰振動を示した。実験モード解析の結果、素子の寸法やモニタリング部の有無に関わらず、従来ベンダーエレメントの拳動として想定されていた幅方向の曲げによる固有振動モードを確認した。また、そのモード形状が片持ち板のそれと類似することを利用して、モード形状を解析解で置き換えることでモデル化した。さらに、モデル作成に必要なパラメータの決定法も示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ベンダーエレメント法から得られるS波速度は、地盤材料のせん断弾性係数を求めるために用いられる。せん断弾性係数は土の材料特性を表す重要なパラメータのひとつであり、例えば、数値解析によって地盤の変形や地震応答を計算するために欠かせない。しかし、ベンダーエレメント法はS波の到達点の決定が難しい場合が多く、それが原因となって大きな誤差を生む可能性が従来から指摘されている。本研究はこれを解決するため、同法の測定精度改善を目的としたものである。その鍵となるベンダーエレメントの振動特性を本助成期間において明らかにすることができ、高精度化に欠かせない、振動特性のモデル化の道筋をつけることができた。

研究成果の概要（英文）：For the purpose of improving measurement accuracy of bender element test, which can easily estimate S-wave velocity of ground materials, the vibration characteristics of several types of bender elements were evaluated at multiple points by a laser displacement sensor. The elements exhibited damped vibration following multi-degree-of-freedom system with several natural frequencies. As a result of experimental modal analysis, an unexpected eigen mode consisting of transverse bending motion, which is beyond the assumption was observed in all the elements. Taking advantage of mode shape similarity between the elements and simple cantilever plate, the mode shapes were successfully modeled by replacing with analytical solutions. The determination method of the parameters that is necessary for fitting the model were also demonstrated.

研究分野：地盤工学

キーワード：ベンダーエレメント モード解析 伝達関数

1. 研究開始当初の背景

ベンダーエレメント(BE)法は片持ち梁状に固定した圧電素子の電圧 振動の相互変換の性質を利用して、土供試体内を伝播する S 波速度  $V_s$  を測定する手法である(図 1)。その簡便性から近年、国内外を問わず実務・研究の両面で利用実績が拡大している。米国で 2009 年に規準化されたのを皮切りに、国内でも 2018 年に正式に規準化され、今後地盤材料試験の一つとして国内外でますます利用が加速していくことは確実である。BE 法が学術面で果たす役割は特に大きく、土の力学的性質において近年注目されている重要な研究領域である異方性の解明において、BE 法はせん断弾性係数  $G$  の異方性を評価するための必要不可欠な手法として利用されている(例えば 1)。室内試験で水平方向と鉛直方向の  $G$  を評価可能な方法はこれまでのところ、BE 法以外に存在しない。

BE 法は得られた受信波形の理論的な解釈が十分に進んでいないことから、「S 波の到達をどの点で決定するか」の判断が難しい。そのため、2018 年に規準化された方法を含め、波の到達点の判断はこれまでに蓄積された実験データや文献を頼りにした経験的な手法にもとづいている。しかしこの経験的手法は、セメント改良土などの硬質な土や波の伝播距離が短い場合には適用できず、この到達時間決定の曖昧さが BE 法の適用範囲を制限する足かせとなっている。研究用途で  $G$  の異方性を評価する場合、供試体の側面に BE を設置しなければならず、伝播距離の確保が難しい。そのため、この適用範囲から外れることが多く、この問題はやはり深刻である。したがって、経験的な手法によらない、理論的に明確で信頼性の高い波の到達時間の決定方法を見いだすことができれば、BE 法の適用限界を大幅に拡張できる可能性があるが、そのためには背景となる理論的な解釈を確立することが欠かせない。

そのような中、申請者を含む一部の研究者の間でベンダーエレメント試験を一つの線形系としてとらえる解釈が近年一般的になってきた。図 1 に示すように、線形系では送信波  $x(t)$  と受信波  $y(t)$  をそれぞれ系への入力、出力ととらえることができ、両者には周波数領域において以下の関係が成り立つ。

$$Y(f) = H(f) \cdot X(f) \tag{1}$$

ここに、 $X(f)$ 、 $Y(f)$  はそれぞれ  $x(t)$ 、 $y(t)$  のフーリエ変換、 $H(f)$  は BE 試験装置からなる系全体の伝達関数である。伝達関数はその系の振動特性を支配する関数で、振動数  $f$  の関数である。したがって、伝達関数を同定することは、波の到達時間を含め、その系のすべての振動特性を求めることに等しく、従来の BE 法を包含している。実際の伝達関数がどのように表現されるかについては様々な議論があるが、一般的には送信 BE 等、土供試体、受信 BE 等の三つの伝達関数の重ね合わせからなると考えられており(図 1)、全体の伝達関数  $H(f)$  はそれぞれの伝達関数の積で表現される。

$$H(f) = H_{be,t}(f) \cdot H_s(f) \cdot H_{be,r}(f) \tag{2}$$

このことは、従来の BE 法で得られる受信波には、本来必要な土供試体の振動特性の他に、それとは無関係な BE の振動特性も含まれていることを意味している。さらに、これらのうち、BE の伝達関数  $H_{be,t}(f)$ 、 $H_{be,r}(f)$  は減衰振動を呈し、これらが波の到達点の決定を難しくしていることが、申請者をはじめ、複数の研究者によって指摘されている。以上のことから、線形理論にもとづいた、BE の振動特性の除去が、理論的に明瞭で信頼性の高い波の到達時間の決定につながるものと考えられる。

2. 研究の目的

上述のように、BE 試験装置系を線形系と解釈する理論に従えば、系全体の伝達関数  $H(f)$  から送・受信 BE の伝達関数  $H_{be,t}(f)$ 、 $H_{be,r}(f)$  の影響を取り除き、土供試体の伝達関数  $H_s(f)$  を用いて土供試体を伝える  $V_s$  を評価することが理論的に妥当なのは明らかである。したがって、上記に示した線形系としての理論的解釈を構築した上でこのことを実証し、波の到達時間決定の信頼性を飛躍的に向上させることで、その適用限界を拡張することが当初の研究目的とされた。研究遂行上の具体的目標は以下のとおりであった。

- (1) 土のみの伝達関数  $H_s(f)$  を用いることで従来よりもはるかに信頼性の高い土の  $V_s$  測定が可能であることを理論・実験の両面から示すこと。

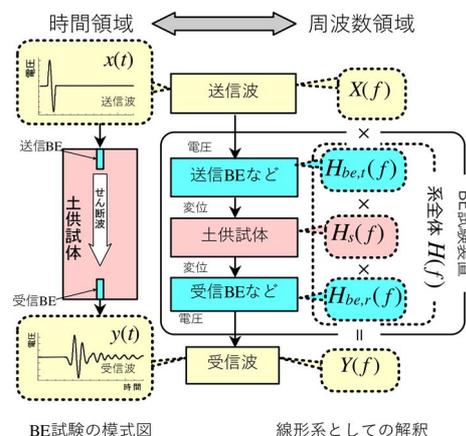


図 1 BE 試験の模式図と線形系としての解釈

- (2) 実験から得られた系全体の伝達関数  $H(f)$  から土供試体の伝達関数  $H_s(f)$  を同定するための補正法を提案し、その適用性を示すこと。
- (3) 提案した補正法がセメント改良土や供試体側面へ設置された環境においても適用可能であり、良好な  $V_s$  測定が可能であることを示すこと。

しかしながら、後述のように、BE が従来想定されてきた片持ち板の単純な曲げ振動とは大きくかけ離れた複雑な振動特性を示すことが研究の遂行に伴って明らかとなったため、(2)以降の目標を修正し、BE の振動特性を明らかにすることに研究の重心を置いた。

### 3. 研究の方法

- (1) 平成 30 年度～平成 31 年度

研究期間の前半は、受信波形シミュレーションによって受信波形を解析的に求めるための計算スキームの確立および計算結果の妥当性を確認した。計算は線形系理論(式(1)、式(2))にしたがって行った。土供試体の伝達関数  $H_s(f)$  は Sanchez-Salinerio et al.<sup>2)</sup> の解析解を用いてモデル化し、送・受信 BE の伝達関数  $H_{be,t}(f)$  および  $H_{be,r}(f)$  は減衰振動によってモデル化した。

次に、仮想的に BE の寸法や試料の硬さなどの条件を変化させた場合の数多くのシミュレーションを行い、それぞれの条件が従来の経験的手法による波の到達時間におよぼす影響を総合的に理解した。同時に、土供試体の伝達関数  $H_s(f)$  を用いれば、これらの影響を受けずに信頼性の高い到達時間の評価が可能であることを示した。

- (2) 令和 2 年度～令和 3 年度

系全体の伝達関数  $H(f)$  から送・受信 BE の伝達関数  $H_{be,t}(f)$ 、 $H_{be,r}(f)$  の影響を除去し、土供試体の伝達関数  $H_s(f)$  を得るための補正法を提案し、この補正法を用いることで波の到達時間決定の信頼性が向上することを実証することを当初の目的とした。補正法の基本的な考え方は、 $H(f)$  および  $H_{be,t}(f)$ 、 $H_{be,r}(f)$  をそれぞれ実験によって同定し、図 1 および式(2)の関係から土供試体の伝達関数  $H_s(f)$  を求めるというものである。 $H(f)$  の同定にはこれまで申請者が申請者が独自に開発したスイープ波を用いた。送・受信 BE の伝達関数  $H_{be,t}(f)$ 、 $H_{be,r}(f)$  の同定にはこの手法を応用し、スイープ波入力に対する BE の振動を、直接的および間接的に計測することで伝達関数を同定した。直接的な計測には高精度のレーザー変位計を用いた。これによって  $H_{be,t}(f)$  および  $H_{be,r}(f)$  を直接計測した。間接的な計測にはセルフモニタリング型 BE のフィードバック信号を用いた。間接的計測は、レーザー変位計などの特別な測定機器なしに補正を可能とするための手段である。

当初の計画では両者の計測結果の整合性を確認し、レーザー変位計の計測を置き換える予定であったが、実験を進めるにつれ、BE が従来想定されてきた片持ち板の単純な曲げ振動とはかけ離れた複雑な振動特性を示すことがわかってきた。そのため、寸法や形状が異なる種々の BE やセルフモニタリング型 BE を準備し、レーザー変位計による多点計測によってこれらの素子の振動特性を詳細に検討することとした。

### 4. 研究成果

- (1) 平成 30 年度～平成 31 年度

図 2 は線形理論に基づいて、式(1)、式(2)から計算された受信波形と実験から得られた受信波形を比較している。泥炭、砂質土いずれの試料でも計算値は実験値と概ね類似した波形となっており、線形理論によって BE 試験の受信波形が合理的に表現できることがわかる。また、計算値

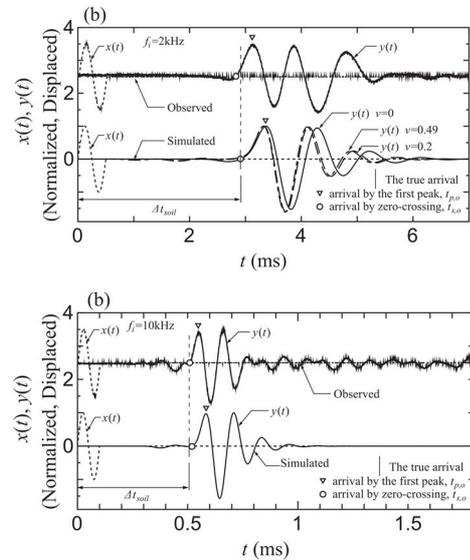


図 2 線形理論に基づいて計算された受信波形と実験から得られた受信波形の比較(上：泥炭，下：砂質土)

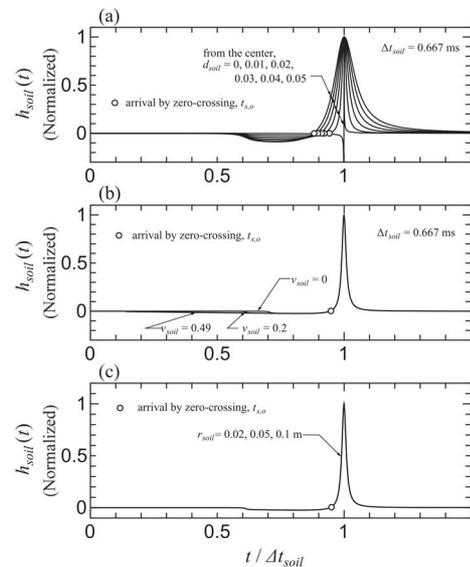


図 3 線形理論に基づいて計算された受信波形と実験から得られた受信波形の比較(上：泥炭，下：砂質土)

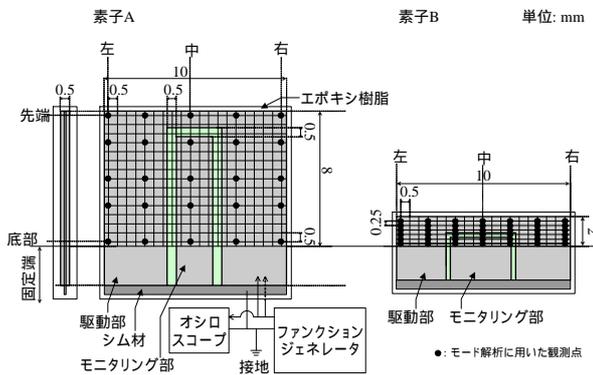


図4 代表的な素子の模式図

上に示された真の到達時間 $\Delta t_{soil}$ は、受信波のゼロクロス点、ピーク点と必ずしも一致していないことから、現在、到達時間決定法として採用されているこれらの方法は必ずしも真の到達時間を与えないことがわかる。図3は計算された受信波形から送信および受信BEの振動特性を取り除いた土供試体の振動特性(インパルス応答)を示している。図中には減衰比 $d_{soil}$ 、ポアソン比 $\nu_{soil}$ 、BE間距離 $r_{soil}$ といった様々なパラメータを変化させた場合の土のインパルス応答が示されているが、いずれの結果も $t/\Delta t_{soil} = 1$ において明瞭なピークを示している。このことから、受信波形からBEの振動特性を取り除き、土供試体のインパルス応答を用いることで、土供試体の条件に関わらずそのピーク点から真の到達時間が容易に決定可能であることがわかる。インパルス応答は伝達関数の逆フーリエ変換であるので、土供試体の伝達関数から信頼性の高い到達時間の評価が可能であることになる。これら一連の研究成果は、参考文献4)によって発表されている。

(2) 令和2年度～令和3年度

図4は実験に用いた代表的な寸法・形状を有した2種類のセルフモニタリングBE(以後、素子と記す)の模式図である。この素子の底部を剛に固定し、図中に示すグリッド点において振動を多点計測した。素子先端中央における周波数応答のスペクトルを図5に示す。スペクトルは複数のピークを有しており、多自由度系の振動を呈することがわかる。図6はモード解析から得られたモード形状を示している。モード形状からいずれの素子も、1次モードでは長さ方向の単純曲げ振動となっているが、2次モードでは幅方向の曲げ振動となっていることがわかる。また、素子Aの3次モードではさらに複雑な挙動を呈している。これまで、BEの振動は1次モードを想定した1自由度系の減衰振動が仮定されており、線形理論でもそれを踏襲したモデル化がなされてきた。しかしながら、このことは素子が高周波領域において想定外の複雑な振動を呈する可能性を示唆している。図7はBE試験で常用される20kHzのサイン波で素子を駆動した場合の振動の様子を示している。素子Aでは2次モードの振動が卓越しており、この複雑な振動は代表的な寸法・形状を有した素子を常用される周波数帯で駆動した場合にも発生することが確かめられ

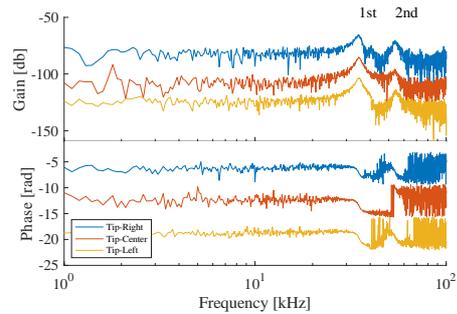
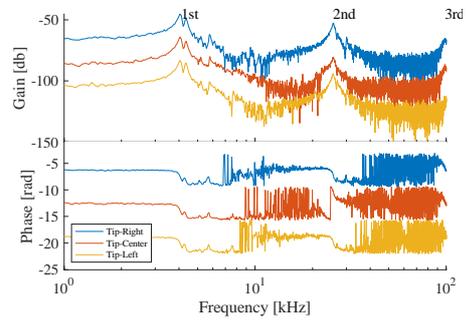
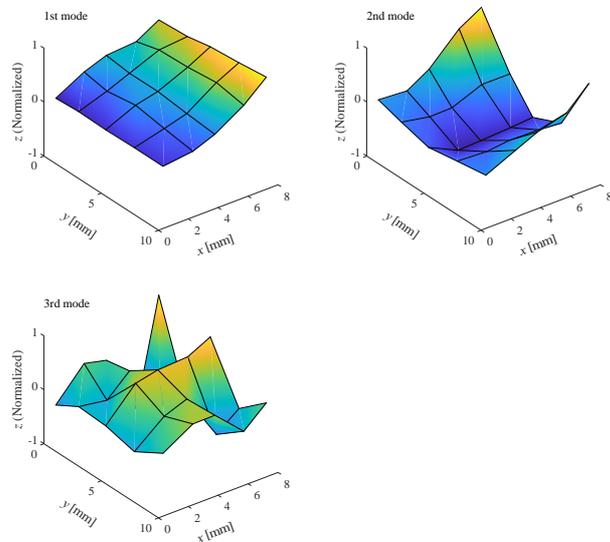


図5 素子の先端部における周波数応答スペクトル

素子A



素子B

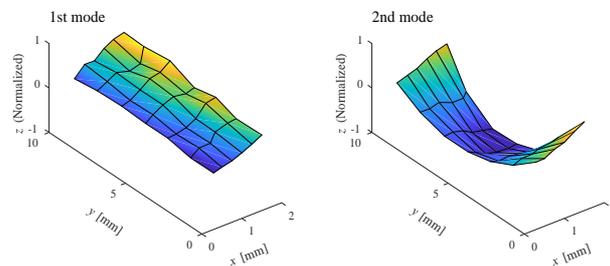


図6 素子のモード形状(左手前の一辺が固定端)

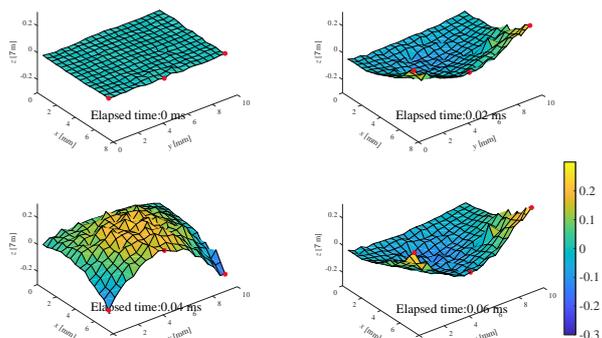
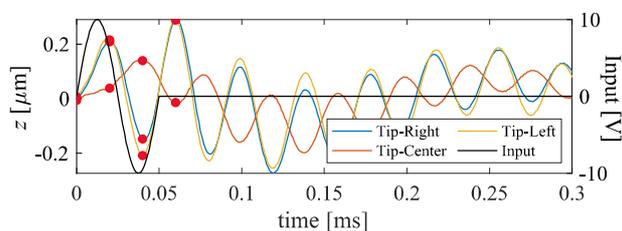
た。一方、素子長が短い素子 B では固有周波数が高周波側にシフトするため(図 5), 素子は 1 次モードで振動している。

図 8 は 20kHz のサイン波で駆動した場合の, 素子 A のフィードバック信号の波形を示している。比較のため, 素子先端中央における振動も示している。フィードバック信号の波形は素子先端中央の振動とは一致しておらず, 当初計画していたように, 素子先端の実際の振動をフィードバック信号で直接置き換えることは困難である。これは図 7 に示すように, 素子が 2 次モードによる複雑な振動を呈しているためと考えられる。しかしながら, 両者の周波数は一致しており, これは 2 次モードの固有周波数に等しい。このことから, フィードバック信号によって直接素子先端の振動を置き換えることは容易ではないが, 素子の固有周波数を得ることは可能であるということが明らかとなった。これら一連の研究成果は参考文献 5)~8)によって発表されている。

【参考文献】

- 1) S. Nishimura: Assessment of anisotropic elastic parameters of saturated clay measured in triaxial apparatus: Appraisal of techniques and derivation procedures. Soils and Foundations, Vol. 54, No. 3, pp. 364-376, 2014.
- 2) Sanchez-Salinero et al.: Analytical studies of body wave propagation and attenuation. Texas univ. at Austin geotech. eng. center, 1986.
- 3) J. S. Lee and J. C. Santamarina: Bender elements: performance and signal interpretation. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 131, No. 9, pp. 1063-1070, 2005.
- 4) Toshihiro Ogino: Travel time observation using numerical simulation of bender element testing in time and frequency domain, Soils and Foundations, Vol.59, No.3, pp. 657-670, 2019.
- 5) 荻野俊寛：セルフモニタリングベンダーエレメントの振動特性に及ぼす素子形状の影響, 応用力学シンポジウム, 2022.
- 6) Toshihiro Ogino: Correlation between motion of source bender element and feedback signal induced by self-monitoring, Soils and Foundations, Vol. 61, No. 1, pp. 175-184, 2021.
- 7) 荻野俊寛：モード解析によるセルフモニタリングベンダーエレメントの振動特性, 応用力学シンポジウム, 2021.
- 8) 荻野俊寛：モード解析によるセルフモニタリングベンダーエレメントの振動特性, 土木学会論文集 A2 ( 応用力学 ), Vol. 77, No. 2 ( 応用力学論文集, Vol. 24 ), 2022.

素子 A



素子 B

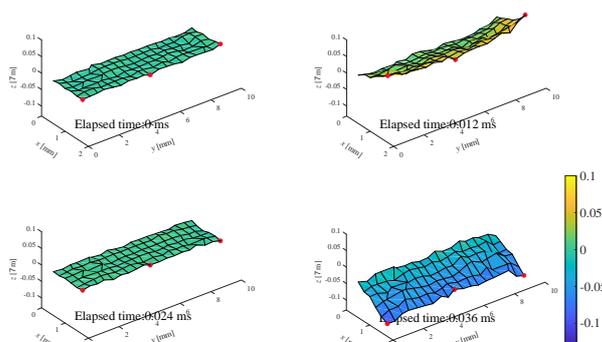
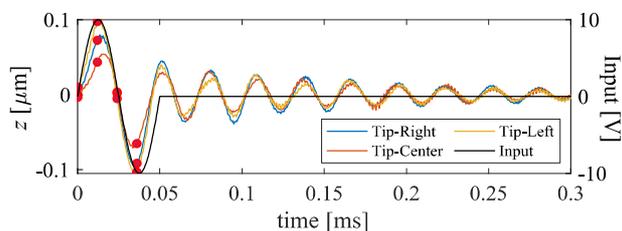


図 7 sin 波入力に対する素子の挙動(左側奥の辺が固定端)

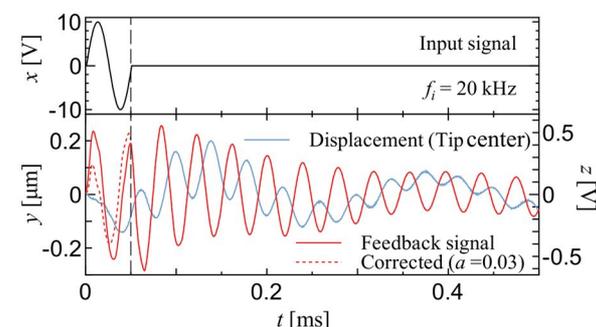


図 8 フィードバック信号と素子先端中央の振動の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ogino Toshihiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Correlation between motion of source bender element and feedback signal induced by self-monitoring	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 175 ~ 184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2020.11.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toshihiro Ogino	4. 巻 Vol.59
2. 論文標題 Travel time observation using numerical simulation of bender element testing in time and frequency domain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 pp. 657--670
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2019.01.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石川光甫, 荻野俊寛, 田口岳志	4. 巻 -
2. 論文標題 レーザー変位計およびセルフモニタリングによるベンダーエレメントの伝達関数の同定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第54回地盤工学研究発表会	6. 最初と最後の頁 cd-rom
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石川光甫, 荻野俊寛, 田口岳志	4. 巻 -
2. 論文標題 レーザー変位計およびセルフモニタリングによるベンダーエレメントの振動特性の評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 平成30年度土木学会東北支部技術研究発表会	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toshihiro Ogino	4. 巻 77
2. 論文標題 モード解析によるセルフモニタリングベンダーエレメントの振動特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_3 - I_11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2.I_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 石川光甫
2. 発表標題 レーザー変位計およびセルフモニタリングによる ベンダーエレメントの変形挙動の評価
3. 学会等名 地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荻野俊寛
2. 発表標題 モード解析によるセルフモニタリングベンダーエレメントの振動特性
3. 学会等名 土木学会 応用力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川光甫
2. 発表標題 レーザー変位計およびセルフモニタリングによる ベンダーエレメントの振動特性の評価
3. 学会等名 地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荻野俊寛
2. 発表標題 セルフモニタリングベンダーエレメントの振動特性に及ぼす素子形状の影響
3. 学会等名 土木学会 応用力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田口 岳志 (TAGUCHI Takeshi) (00452839)	秋田大学・理工学研究科・助教  (11401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------