

3 種類の砂質土試料のせん断弾性波速度に及ぼす飽和度と拘束圧の影響

Effects of Degree of Saturation and Confining Pressure on Elastic Shear Wave Velocity of Three Sandy Soils

三 浦 みなみ 高 田 昌 典 澁 谷 啓
Minami Miura Masanori Takada Satoru Shibuya

1. はじめに

近年多発する集中豪雨や地震などの影響により、高速道路や空港など国内の重要な社会インフラの一部をなす既設盛土の崩壊あるいは変状の被害が多数報告されている。例えば、2005 年に台風 14 号に伴う豪雨により、山陽自動車道の一部において大規模な盛土法面の崩壊災害¹⁾が発生し、2009 年には駿河湾地震により、東名高速道路の盛土法面の崩壊²⁾が確認されている。このように道路盛土などの長距離にわたる線状構造物は、盛土崩壊の発生により人命や構造物などの直接的な被害だけでなく、交通網を寸断することによる経済面などの間接的な被害も受けることとなる。そのため、既設盛土の現状を正確に把握し、自然災害に耐え得る構造物を建設することは重要である。

ここで、盛土のような地盤材料を締固めて構築する土構造物の施工管理には、現在、締固め度 D_c (=それぞれの現場内の任意の箇所で測定した乾燥密度 ρ_d / 代表試料を所定の締固めエネルギーによる室内締固め試験で求めた最大乾燥密度 ρ_{dmax}) の下限値が管理値として用いられている³⁾。道路土工盛土工指針によると、砂質土を用いて路体を造成する場合、締固め度 D_c が 90 %以上となる様、また路床においては締固め度 D_c が 95 %以上となる様に施工することが定められている⁴⁾。しかし、河川堤防や道路盛土など施工現場が広範囲にわたる場合、使用した盛土材料にバラつきがある可能性が考えられる。すなわち締固め度を算出する際に用いる代表試料が、現場内すべての試料の材料特性を反映しているとは限らず、結果として締固め度を過小評価あるいは過大評価する危険性をはらんでいる。さらに、現状の点的な管理方法であれば、測点間の弱部を見落とす恐れがある。これらの危険性を回避するためには、地盤の 2 次元あるいは 3 次元的な情報を正確に把握する必要がある。

そこで本研究では、せん断波速度（以下「S 波速度」と記載）に着目した。S 波速度は、せん断弾性係数および湿潤密度の関数であり、また地盤の強さを示す指標となる N 値とも密接な関係を持つことが明らかとなっている⁵⁾。この S 波速度の情報を、表面波探査を実施することで得ることに工学的意義があると考えている⁶⁾⁷⁾。表面波探査により得られる S 波速度分布は、二次元あるいは三次元的な情報であるため、従来の点的な情報による管理方法のような弱部の見落としを防ぐことができる。さらに非破壊試験であるため、既設盛土などで表層を舗装されており破壊を伴う調査が困難である場合にも有効である。

以上のことから、非破壊かつ簡便に地盤内の S 波速度分布を求めることが可能である表面波探査を用いて現状地盤の評価を行うことが理想である。しかしながら S 波速度と乾燥密度などの施工管理に用いられているパラメータとの直接的な関連性が明らかとなっていないため、表面波探査結果から土構造物の健全度を評価する手法は未だ確立されていないのが現状である。そこで本稿では、表面波探査を用いた地盤評価手法の確立の基礎的な研究と位置付け室内試験を実施した。具体的には、室内ベンダーエレメント試験（室内 BE 試験）を行うことにより S 波速度に影響を与えるパラメータを明確化し、それらの影響を定量的に評価することを試みた。

2. 試験

2. 1 試料および供試体

本研究では材料の違いを検討するために3種類の盛土材料を用いて試験を実施した。用いた試料は、兵庫県三田市で採取した細粒分質砂（以降「三田」と記載）、神戸市西区伊川谷町で採取した細粒分まじり礫質砂（以降「伊川谷」と記載）、神戸大学構内で採取した細粒分まじり砂質礫（以降「神戸大学」と記載）の3種類である。

図-1および図-2に、原粒度および2mmせん頭粒径の粒度分布をそれぞれ示す。試験では供試体サイズを考慮して2mmふるい通過試料を用いた。図-2より伊川谷と神戸大学の粒度分布はおおよそ一致していることが分かる。一方、三田は0.05mm以下の分布はほぼ等しいものの、他の試料に比べて砂分の割合が多いことが特徴である。つぎに、図-3は各試料の締固め曲線を示したものである。締固め試験は、2mmふるい通過試料を用いてJIS A 1210のA-b法に従って実施した。図-3より得られた最大乾燥密度および最適含水比、またそれぞれの物性値を表-1にまとめて記載する。

供試体サイズは直径5cm、高さ10cmであり、含水比を調整した試料を3層に分けてモールドに投入し、所定の締固め度 D_c となるよう油圧ジャッキを用いて静的に締固めた。なお、静的に締固めた場合と動的に締固めた場合では、得られる締固め曲線が異なることは過去の研究で明らかとなっているものの、本研究では現場で用いられている最大乾燥密度の算出方法に従い、動的締固めより算出された最大乾燥密度を使用している。また、供試体を作製する際に静的に締固めを行っているが、これは供試体の密度をより正確に所定の値と一致させるためである。

2. 2 試験条件

本研究では、 D_c を一定とした条件の下で、基底応力 p および w がS波速度 V_s に及ぼす影響を明らかにするためにBE試験を実施した。表-2に供試体の作成条件の一覧を示している。各試料の飽和度 S_r が等しくなる様、加水することで含水比 w を調整し、また所定の締固め度 D_c になる様に供試体作製した。試験に使用した供試体の D_c 、 w および S_r の値をそれぞれ表-3

に示す。BE試験は、供試体を設置した後、初期等方圧密を実施した後、各圧密段階の終了後にそれぞれ実施した。圧

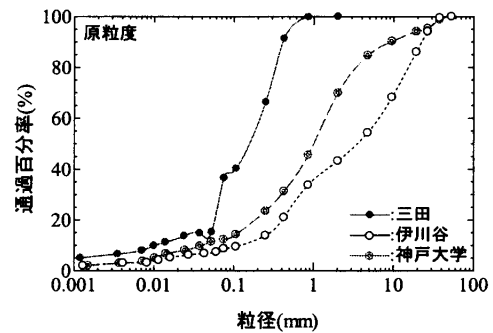


図-1 粒径加積曲線（原粒度）

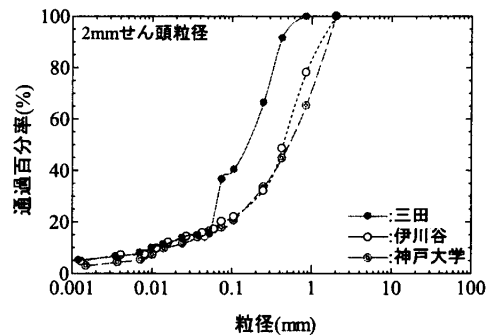


図-2 粒径加積曲線（2mmせん頭粒径）

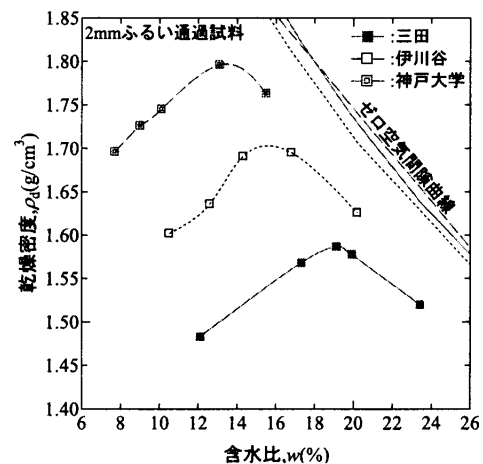


図-3 締固め曲線（2mmふるい通過試料）

表-1 各試料の物性値

試料名	粒径区分	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	細粒分含有率 F_c (%)	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	最適含水比 w_{opt} (%)
三田	SFG	2.659	21	30	36.6	1.589	19.2
伊川谷	SG-F	2.604	54	0.4	8.7	1.701	15.8
神戸大学	GS-F	2.623	30	2.27	12.4	1.796	13.2

密速度は $d\sigma_v/dt = 2.0 \text{ kPa/min}$ で $p = 20, 50, 100, 200 \text{ kPa}$ までそれぞれ段階的に等方圧密を行い、圧密終了後のそれぞれ1時間程度排水クリープをさせた。なお本試験では、不飽和状態で試験を実施している。不飽和地盤においては、飽和地盤とは異なり変形・強度特性に影響を与える因子は複雑化する。今回の試験ではそれらの影響を考慮するため、正規圧密状態とした上で飽和度を固定して試験を実施した。図-4は、BE試験の概要図を表したものである。ファンクションジェネレータから発信された電圧信号が送信用BEに送られ、供試体中を伝播したS波が受信用BEに到達することによって電圧信号が生じる。これらの送・受信電圧波形はオシロスコープを通してデジタルデータとしてパソコンに収録され、S波の到達時間を同定する。一般的な受信波の例として図-5にBE実験によって得られる送受信電圧時刻歴を示す。伝播距離は送受信一对のBEにおける先端間の距離 (tip-to-tip) とし、伝播時間は送信波と受信波の立ち上がり点の時間差 (start-to-start) とした⁸⁾。伝播時間については、0.2 kHzの矩形波、2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 15 kHzのsin波の合計5種類の異なる送信波によって得られた受信波形から near-field-effectなどを考慮し、受信点の立ち上がり点は送信用BEと初期の向きが一致する際の極性に対する振幅の立ち上がりとした。BE試験における V_s は次式によって求められる。なお、 L はせん断弾性波の伝播距離、 Δt は伝播時間を表している。

$$V_s = L / \Delta t \tag{1}$$

表-2 供試体作成条件一覧

試料名	締固め度 D_c (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	飽和度 S_r (%)	含水比 w (%)	有効拘束圧 p' (kPa)
三田	95	1.510	60, 75, 90	15.2, 19.2, 22.8	0, 20, 50, 100, 200
伊川谷		1.616		12.2, 15.8, 18.3	
神戸大学		1.701		10.5, 13.2, 15.8	

表-3 実際の締固め度および飽和度

試料名	三田			伊川谷			神戸大学		
目標とした D_c (%)	95			95			95		
実際の D_c (%)	95.2	96.8	94.8	93.9	95.8	94.5	96.5	95.3	95.9
目標とした S_r (%)	60	75	90	60	75	90	60	75	90
実際の S_r (%)	56.0	69.5	82.7	53.5	66.2	78.0	52.9	61.8	78.6

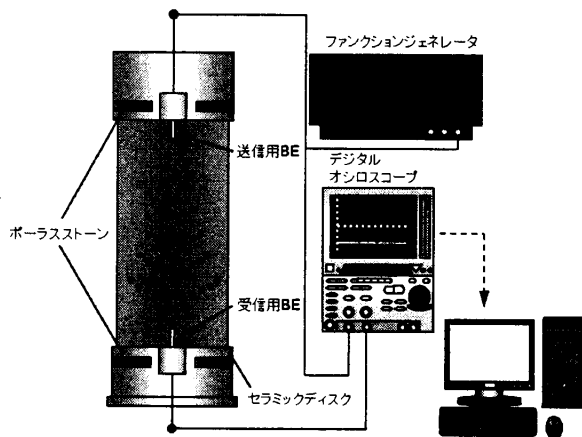


図-4 BE試験の概要図

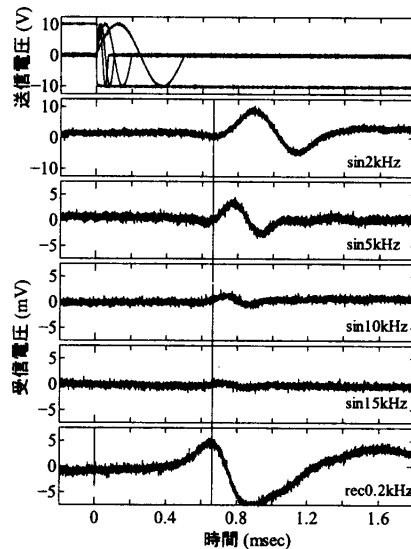


図-5 BE試験の一般的な送受信電圧時刻歴

3. 試験結果

図-6は各圧密載荷終了後の飽和度 S_r と S 波速度 V_s の関係を表している。いずれの試料も S_r が減少するにつれて V_s が増加していることが確認できた。しかし、 $S_r = 30\%$ 程度の変化に対して V_s の変化量は最大でも 30 m/s 程度であることが分かった。これは、本試験で作製した供試体の水分量の範囲であればサクシオン s の変化が大きくないため、S 波速度の値にほとんど影響を与えなかったと推測できる。今回実施した試験ではサクシオン s の計測は行っていないため全応力的な解釈にとどまっている。しかしながら、不飽和地盤においてはサクシオン応力を含む有効応力的な解釈が必須であることから、今後はサクシオンの影響を精査する必要がある。

つぎに、S 波速度分布を試料ごとに比較する。図-6(a)および(b)の結果より、基底応力が低い状態 ($p = 0\text{ kPa}$, 20 kPa 程度) であれば、いずれの試料もおおよそ等しい値を示しているのに対し、図-6(e)の結果より基底応力が高い状態であれば、三田が $V_s = 220 \sim 240\text{ m/s}$ 程度、神戸大学が $V_s = 240 \sim 260\text{ m/s}$ 程度、伊川谷が $250 \sim 270\text{ m/s}$ 程度と、試料による V_s の差が確認できる。このことから、粒度分布の類似した試料であっても基底応力の増加に伴い、試料による V_s の差が発現することが確認された。一方、基底応力が小さい状態では試料による V_s の差を明確に確認することができない。これらの原因は、試料特性に依るものであるか、あるいは試験条件に依るものであるかなど、より精査していく必要がある。

図-7(a), (b) および (c) は図-6の結果を試料ごとに示して比較したものである。基底応力 p ごとの V_s と S_r の関係に着目すると、いずれの試料についても近似直線の傾きはおおよそ一致していることが分かる。このことから、 p と S_r は独立的に V_s に影響を与えていると推測される。また、 S_r が V_s に与える影響より p が V_s に与える影響の方が大きいことが確認できた。つぎに、図-8(a), (b) および (c) は、各試料の p との関係を示している。この結果からも

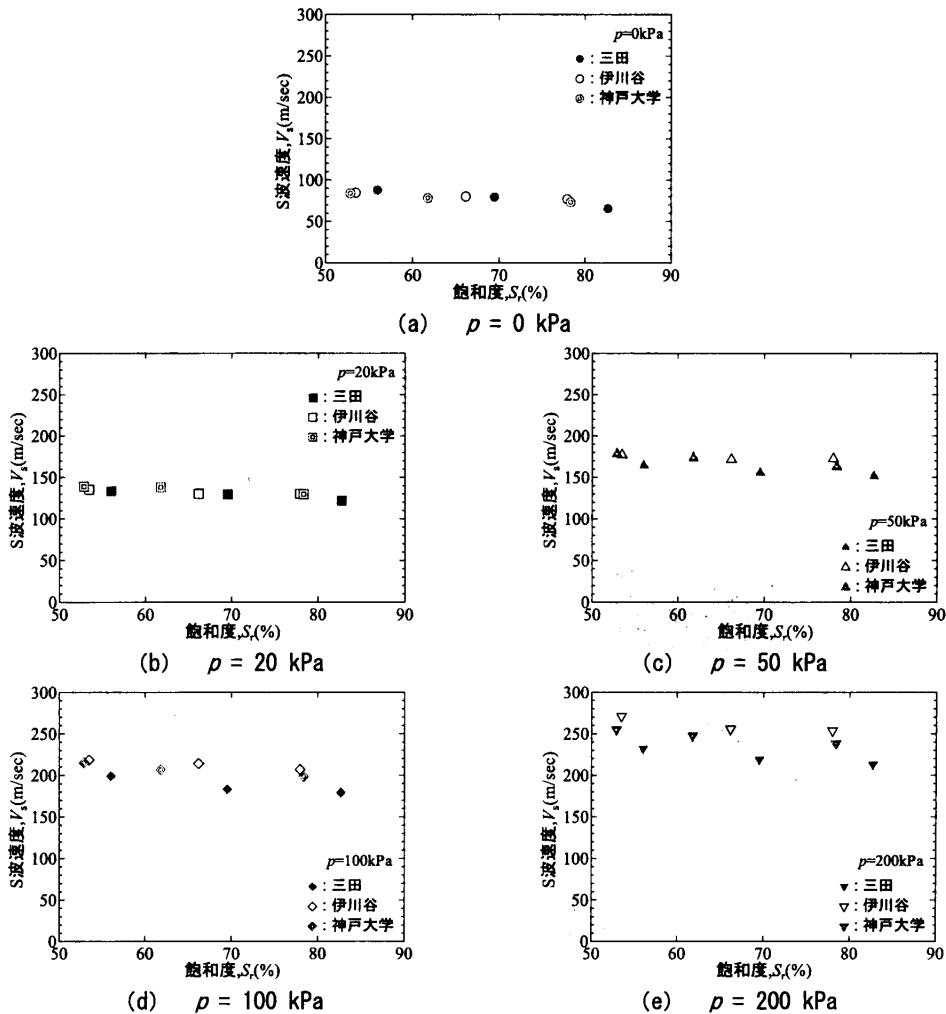


図-6 $S_r \sim V_s$ 関係(基底応力別)

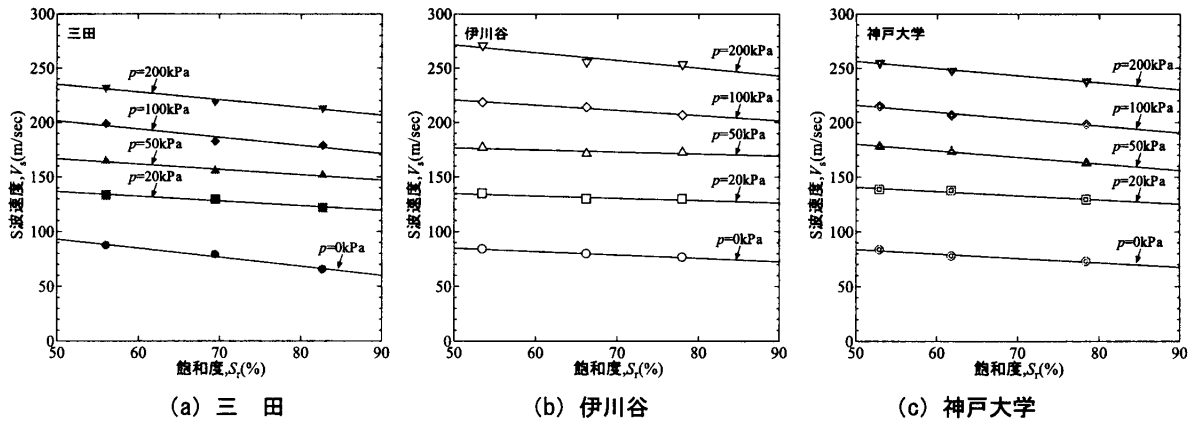


図-7 $S_r \sim V_s$ 関係(試料別)

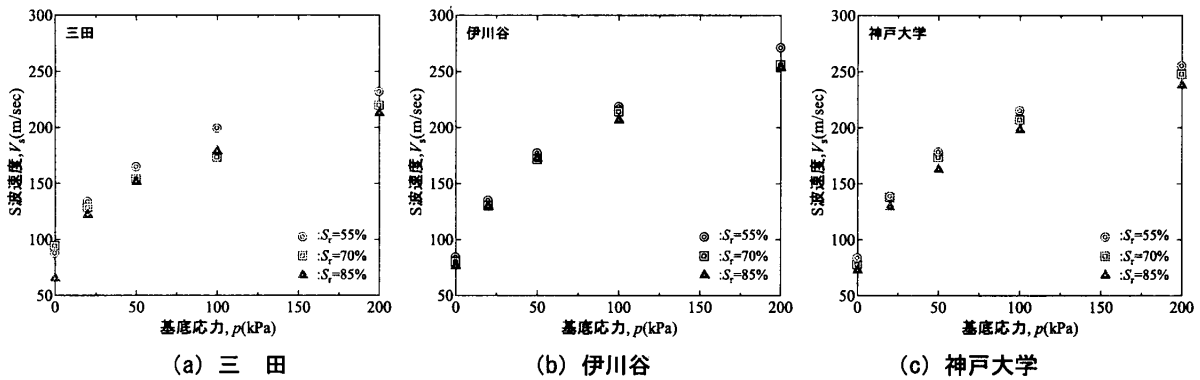


図-8 $p \sim V_s$ 関係

p を増加させると V_s が増加していることが確認できた。これは、飽和供試体において有効応力の増加に伴う V_s の増加と同様の傾向を示している。

図-9 は、各供試体の細粒分含有率 F_c と S 波速度 V_s の関係を示したものである。得られた結果より、いずれの基底応力においても F_c が低いほど V_s が大きくなる傾向が得られた。また基底応力が低い場合、S 波速度は F_c による影響をほとんど受けることなく試料によらずおおよそ等しい値を示している。一方、基底応力が $p = 200 \text{ kPa}$ 程度まで大きくなると V_s の差が 40 m/s 程度と大きくなり、試料の違いによる影響を大きく反映することが分かった。このことから、 F_c は V_s に影響を与え、その影響は p が高いほど大きく発現することが示唆された。今後は、試料特性が S 波速度に与える影響をより明確化するために、さらに粒度分布が異なる試料を用いた同条件の BE 試験を行い、より詳細な傾向の把握に努める。

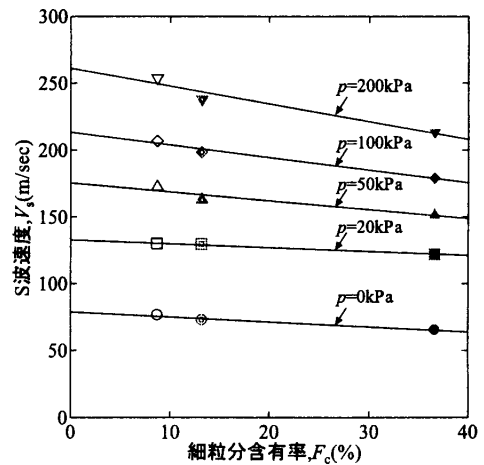


図-9 $F_c \sim V_s$ 関係

4. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 同一の締固め度で作製された供試体について、飽和度 S_r の減少に伴い S 波速度 V_s が増加していることが確認できた。しかし、本研究のような飽和度の変化であれば、飽和度の変化に依るサクシヨンの変化量が大きくないと推測

され、 S_r が V_s に与える影響は小さいと言える。表面波探査結果を考察する際に、地盤内の含水量（飽和度あるいは含水比）が本研究のような狭い範囲で分布している場合、水分量の影響を考慮する必要性が小さいことが示唆された。

- 2) 飽和供試体と同様に、基底応力 p の増加と共にS波速度 V_s が増加することを確認できた。
- 3) 試料ごとにS波速度を比較すると、 F_c が低いほど V_s が大きいことが確認できた。また F_c は V_s に影響を与え、その影響は p が高い程大きく反映されることが分かった。
- 4) S波速度に影響を及ぼすパラメータとして、基底応力 p 、飽和度 S_r および細粒分含有率 F_c について検討したが、このうち p がもっとも大きく影響していることが分かった。さらに、 p と S_r は独立的に V_s に影響を与えているのに対して、 F_c は p に従属的に影響を与えていると推測される。

本研究では粒度分布の類似している3種類の試料を使用した。しかし、試料によって異なるS波速度を示しており、とりわけ基底応力が大きい供試体ではそれらの影響が大きく反映されている。このことから、表面波探査の結果を解釈する際に、試料が異なることによるS波速度の差異を考慮する必要があることが示唆された。しかしながら、今回使用した試料は3種類かつ限定的であるため、今後、慎重に試料特性の影響を考察していく必要がある。また、今回の試験はサクシオン応力を計測しておらず、全応力的な結果の比較にとどまっている。このことから、今後は応力状態を考慮し有効応力的な解釈を進めていく。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省：平成17年9月台風14号と前線豪雨について（最終報），2005.9.
- 2) NEXCO 中日本高速道路株式会社：東名高速道路牧之原地区地震災害検討委員会報告，2009.11.
- 3) 平川大貴・川原園美幸・龍岡文夫：砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響，土木学会論文集 C Vol.64No.2, pp.253-266, 2008.4.
- 4) 社団法人日本道路協会：道路土工盛土工設計（平成22年度版），pp.218-223, 2010.4.
- 5) 鈴木晴彦・林宏一・信岡大：表面波を用いた地震探査—二次元探査への応用—，物理探査学会第103回学術講演会公演論文集，pp.221-225, 2000.
- 6) 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性質，第4回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.89-96, 1975.
- 7) 三浦みなみ，河野祐斗，澁谷啓：焼却灰最終処分場建設予定地の基礎地盤の工学的特性把握のための原位置および室内試験，第48回地盤工学研究発表会，CD-ROM, 2013.
- 8) 山下聡・中田幸男・川口貴之・三上武子・藤原照幸・澁谷啓：ベンダーエレメント試験方法の標準化に関する研究，科学研究費補助金研究成果報告書，2006.

著 者

三浦 みなみ	神戸大学大学院博士後期課程，修士（工学）
高田 昌典	神戸大学大学院博士前期課程，学士（工学）
澁谷 啓	所員，Ph.D, 博士（工学），地盤工学