

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 14 日現在

機関番号：51101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560612

研究課題名(和文)土骨格変化を考慮した火山灰質地盤の地震時挙動と効果的な対策工の提案

研究課題名(英文)Cyclic behavior on volcanic soil considering soil structure under earthquake and proposal of effective liquefaction countermeasure method

研究代表者

清原 雄康 (KIYOHARA, Yukoh)

八戸工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：20369911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：二戸しらすの中密な飽和および飽和度83～88%の不飽和土，5%セメント固化土，Dr90%に突き固めた土についての飽和液状化強度試験，変形特性試験，振動台実験を行った。改良土は剛性の増大と正のダイレタンシー効果により，液状化に対する抵抗性，粘り強さが増加した。Dr:65%の液状化強度に対して，Dr:90%で3.3倍，Dr:65%セメント固化で2.5倍強度が増加した。特に突き固めの効果が大きいことが分かった。加振時の水分特性曲線の変化から，間隙構造の変化を推察した。試験結果から得られたパラメータセットをもとに，土水連成解析による東北地方太平洋沖地震の挙動再現を行ったところ，良好な結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：Saturated and unsaturated cyclic triaxial test and vibration test were performed to investigate the liquefaction behavior on high water content Shirasu soil which caused mud flow failure in 2011 Tohoku earthquake. Liquefaction resistance of densely compacted Shirasu soil was 3.3 times greater than that of normally compacted one and toughness was also improved. Hysteresis of water retention curve during unsaturated cyclic loading and shaking process were clarified. And the results could be guessed the dilatancy and shrinkage behavior of soil. By using cyclic tests results, soil-water coupled FEM-FDM code material parameter set was decided, and earthquake behavior of Shirasu ground was verified. The calculation behavior was agreed with real damage.

研究分野：地盤工学

キーワード：繰返し三軸試験 不飽和土 火山灰質土 土水連成解析 水分特性曲線

1. 研究開始当初の背景

しらすは保水性が高く、地震時に不飽和状態でも液状化し、泥流状崩壊や進行性遅れ破壊が生じやすい特性があり、被害が報告されている。当該地盤の液状化強度、地震動など外力作用時の微視的な変形挙動について知られていないため、飽和および不飽和状態での液状化強度特性、微視構造を反映する水分特性の変化を把握する必要がある。せん断時の微視構造変化に関しては、不飽和状態のローム土を用いて水分特性の変化から微視構造変化を推測する手法を提案したが、さらにこれをベースにしらすなど砂質系地盤でも検討を重ねる必要がある。

さらに、30年以上前に整備された宅地造成地盤の費用効果が最大になるような耐震化も急務である。液状化被害軽減のための対策工法に密度増大工法やセメント固化があるが、対策工の当該地盤での性能評価が必要である。液状化しにくくなり、応力制御の液状化強度試験において、応力レベルの設定によっては、100回以上の繰返し载荷に対しても液状化しない場合があり、液状化強度曲線によって性能評価出来ないような改良土の評価方法など課題も残されている。

また、実規模での性能評価のために、数値解析による方法があるが、コードで用いられる硬化則に関連したパラメータやダイレタンシー特性など複数の材料パラメータ決定が重要になる。パラメータの感度解析なども行われているが、当該土質のパラメータセットについては十分な情報が得られていないのが現状である。

2. 研究の目的

2011年東北地方太平洋沖地震において、高さ5mのしらす宅地地盤が泥流状崩壊を起こした箇所(写真1)の試料土を用いて、飽和および不飽和状態での液状化強度特性、水分特性の変化を把握する。また、不飽和八戸しらすの小型土槽を用いての加振時の水分特性把握も行う。これまで静的载荷で水分特性の変化を把握してきたロームの繰返し特性も把握する。

さらに、被害対策検討のために、セメン



写真1 2011年他東北地方太平洋沖地震時のしらす地盤の泥流状崩壊例

ト固化や締固めによって作製した二戸しらす供試体の変形挙動や強度、粘り強さを把握する。

また、液状化強度試験において、設定軸差応力と発生軸ひずみ、繰返し回数から累積損失エネルギーを算出し、エネルギー的視点からの統一的な液状化強度評価も行う。

さらに、相対密度 $Dr:65%$ 、 $Dr:90%$ 突固め土を対象に、室内試験から求めた材料パラメータセットを用いて、土水連成解析コード LIQCA3d11 による繰返し三軸試験の再現解析から解析パラメータセットを決定し、被害の発生した2011年3月11日の波形を用いての実規模地盤の再現解析と $Dr:90%$ 突固め工法の効果について検討することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 繰返し三軸試験

二戸しらすの $Dr:65%$ での飽和および飽和度 $83\sim 88%$ 、 $70%$ の不飽和土 5% セメント固化土、 $Dr:90%$ に突固めた土についての飽和液状化強度試験、変形特性試験を行った。飽和試験は、JGS0541-2000 に則って行った。不飽和試験装置について、下部ペDESTALに空気侵入圧 $50kPa$ のセラミックディスク、上部キャップに孔径 $0.5\mu m$ の撥水性を有し、通気性がほとんどない PTFE メンブレンフィルターを用いた。体積変化は二重セルの内セルの水位変化と軸変位から決定し、圧密時や繰返し時の間隙比や飽和度を求めた。

さらに、火山灰質粘性土である飽和不攪乱ローム土の変形特性試験も行った。

(2) 振動台実験

振動台と模型土層を用いて、しらすの不飽和状態での加振時の水分特性の変化をテンシオメーターと土壌水分計で把握した。地盤の変形挙動は、側面から撮影された画像データをもとに定量的に把握した。図1に振動台試験装置の概要図を示す。飽和度 $Sr:26\%$ での試験後、加水しながら、 $Sr:40\%$ 、 $Sr:60\%$ 、 $Sr:80\%$ 、 $Sr:85\%$ での試験を順に行った。

(3) 土水連成解析コードによる数値解析

LIQCA3D11 での構成式には Oka らによる非線形移動硬化則を用いた繰返し弾塑性モデルを用いた。モデルは図2左に示したものを

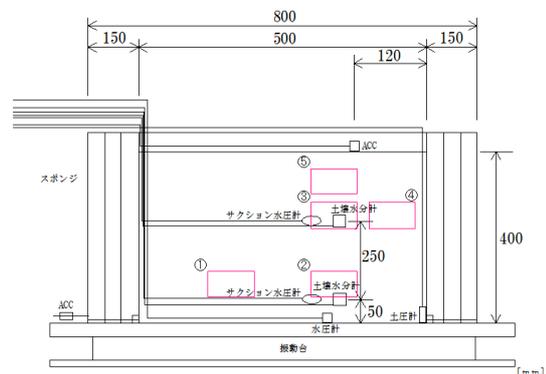


図1 振動台試験装置概要図

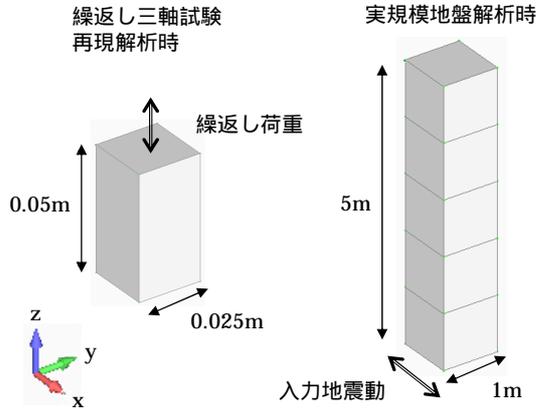


図2 解析に用いたモデル

用い、Dr:65%試料土を対象に、繰返し三軸試験のダイレタンシー特性の把握、解析パラメータセットの決定を行った。

実規模解析では、図2右に示す柱状モデルを用いて挙動予測を行った。入力地震動は、x軸方向にK-net 二戸 IWT24での2011年3月11日14時46分に発生した地表面観測波EW成分での解析を第一段階として行った後、20分の圧密期間を設け、圧密後の応力状態をもとに崩壊の直接の原因となった15時9分に発生した地表面観測波EW成分を用いての解析を第2段階として行った。

4. 研究成果

(1)飽和・不飽和試験時の挙動、セメント固化、突固めによる効果

図3に飽和および不飽和土の繰返し回数に対する飽和度変化を示す。飽和度83~88%の非排水条件下の試験でも正の間隙水圧が発生し、飽和度が上昇しながら液状化に至った。

図4に不飽和試料土の水分特性曲線の変化を示す。飽和度83~88%では5kPa程度のサクシオンが作用することが分かった。繰返し時の土粒子間隙の収縮により、所定の間隙比で水分特性曲線の移動を表現出来、毛管上昇高さが高くなる傾向が確認された。

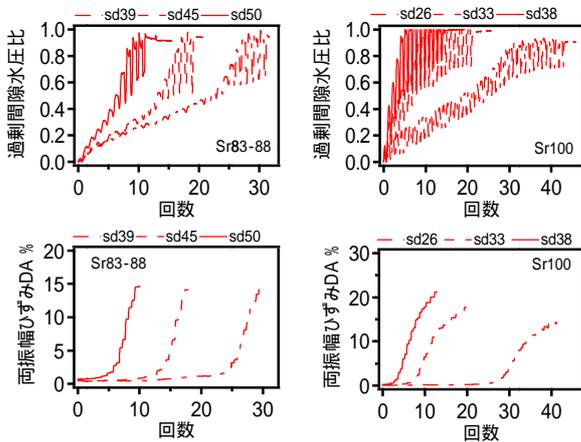


図3 過剰間隙水圧比と両振幅ひずみの変化

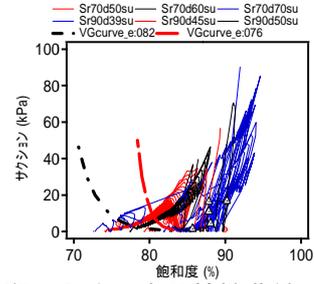


図4 不飽和土の水分特性曲線

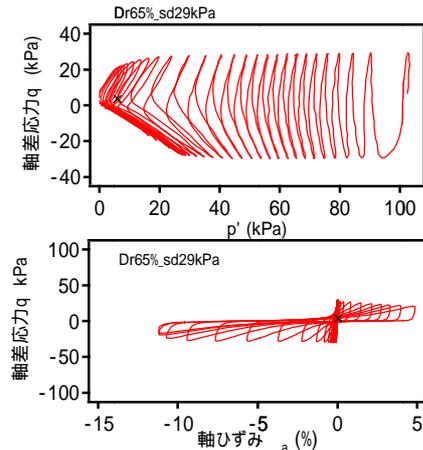


図5 未改良土の応力経路と応力ひずみ関係

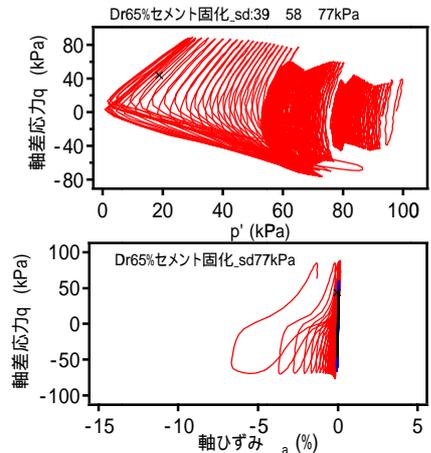


図6 セメント固化土の応力経路と応力ひずみ関係

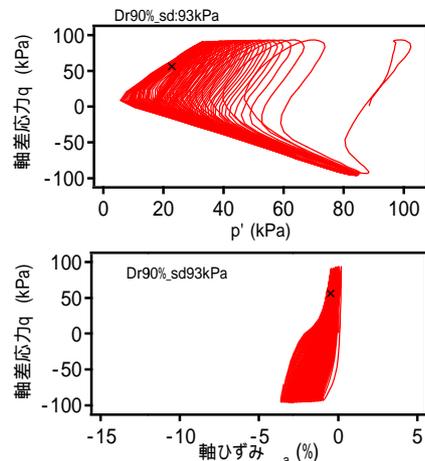


図7 突固め土の応力経路と応力ひずみ関係

図5, 図6, 図7にDr:65%未改良土, Dr:65%セメント固化土, Dr:90%突固め土の応力経路と応力ひずみ関係を示す. 未改良土と比較してひずみの発生が抑えられ, p' - q 経路において, 改良土は正のダイレイタンス効果によると思われる負の水圧により, 初期圧密圧かそれ以上にまで p' が増加, 回復している. 破壊後もこの挙動は持続し, 液状化が持続しにくくなり, 液状化に対する抵抗性, 粘り強さが増加した.

図8に基準化累積損失エネルギー W/ σ'_c に対する軸ひずみ, 過剰間隙水圧比 u/ σ'_c の変化をそれぞれ示す. Dr:65%では正の水圧が進行し, W/ σ'_c が $1\text{J/m}^2/\text{kPa}$ 付近で液状化するのに対し, セメント固化, Dr:90%は振幅がマイナス側まで引き戻され, それぞれ $2\sim 3\text{J/m}^2/\text{kPa}$, $17\text{J/m}^2/\text{kPa}$ 付近で液状化した.

図9に液状化強度曲線を示す. 液状化強度比 $(\sigma'_d/2 \sigma'_c)_{N=20}$ は不飽和土の方が飽和土より1.5倍程度抵抗性が増すが, 0.2程度にとどまっている. Dr:65%の $(\sigma'_d/2 \sigma'_c)_{N=20}$ に対して, Dr:90%で3.3倍, Dr:65%セメント固化で2.5倍強度が増加した.

繰返し変形特性試験により, せん断ひずみとせん断剛性の変化を求めたところ, 初期等価せん断剛性 G_{eq0} はDr:65%しらすで29MPa, Dr:65% Sr:83%の不飽和しらすで30MPa, Dr:65%セメント固化しらすで83MPa, Dr:90%しらすで33MPa, 八戸ロームで20MPaであった.

(2) 振動台実験による地盤内水分特性の変化と変形挙動

加水時, 加振時の体積含水率とサクシオン S_u の関係(水分特性曲線)を図10に示す. 加水により S_u が大きくなるにつれ, S_u は低下傾向にある. S_u には一意的な対応関係があり, 加振時において, S_u : 0.2~0.3の範囲では振動による変化は見られなかったが, 0.4付近では振動により S_u が低下する結果が得られた.

地表面の沈下について, 図11に示すようにSr:60%の周波数15Hz, 振幅0.5mmの加振後までは, ほとんど変化が見られなかった. S_u :80%以降は徐々に地表面が沈下し, 最終的に1.3cm沈下した. 負のダイレイタンス効果が顕著に現れ, 加振中間隙径の収縮によりSrが増加し, S_u が低下する挙動が確認できた.

(3) 土水連成解析コードによる数値解析のためのパラメータセットの決定

等方圧密試験結果や飽和繰返し三軸試験結果に合うよう試行錯誤によってパラメータセットを決定した.

図12, 図13にDr:65%およびDr:90%における過剰間隙水圧比の変化と応力ひずみ関係の解析値と実測値をそれぞれ示す. p' - q 経路より, p' はDr:65%, Dr:90%の実測1波目でそれぞれ, 10kPa, 20kPa程度の特大きな減少が生じるが, 解析では, 1波あたりの減少

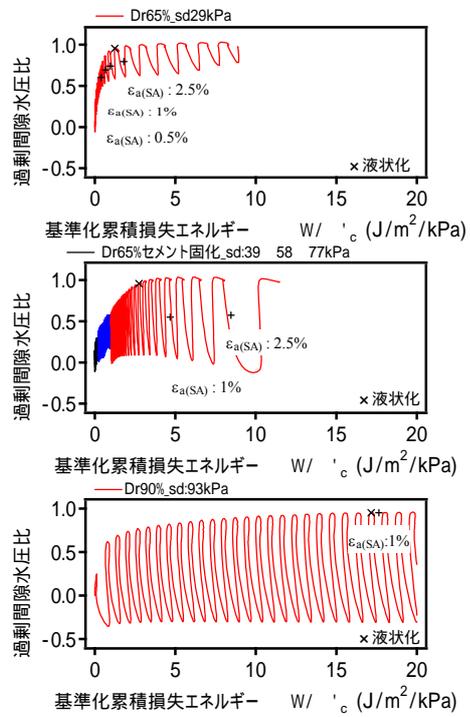


図8 W/ σ'_c に対する u/ σ'_c の変化

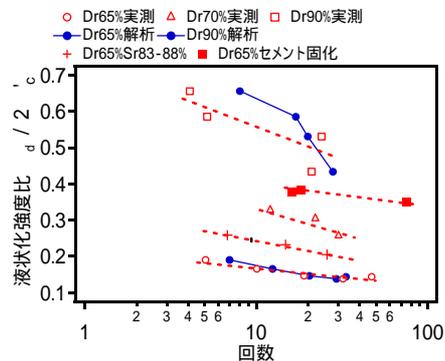


図9 液状化強度曲線

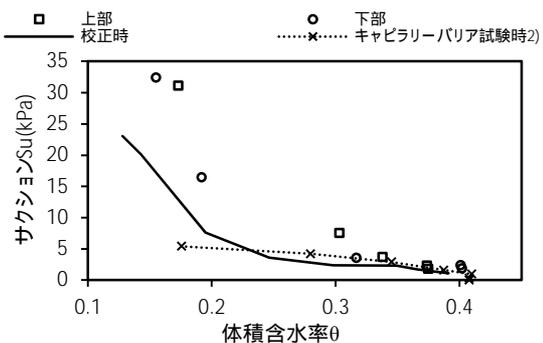


図10 加振時の水分特性

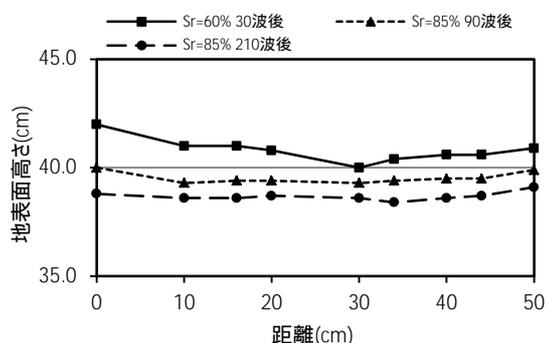


図11 加振時の地表面の沈下挙動

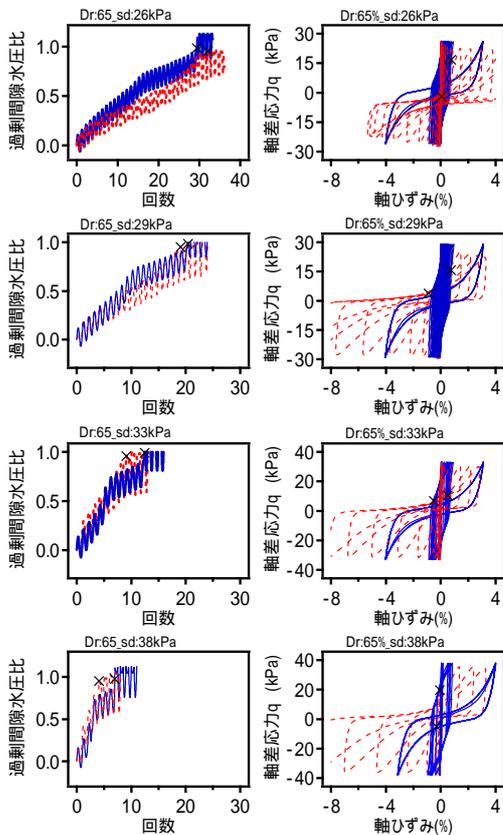


図 12 繰返し三軸試験の解析値と実測値の比較例 (Dr:65%)

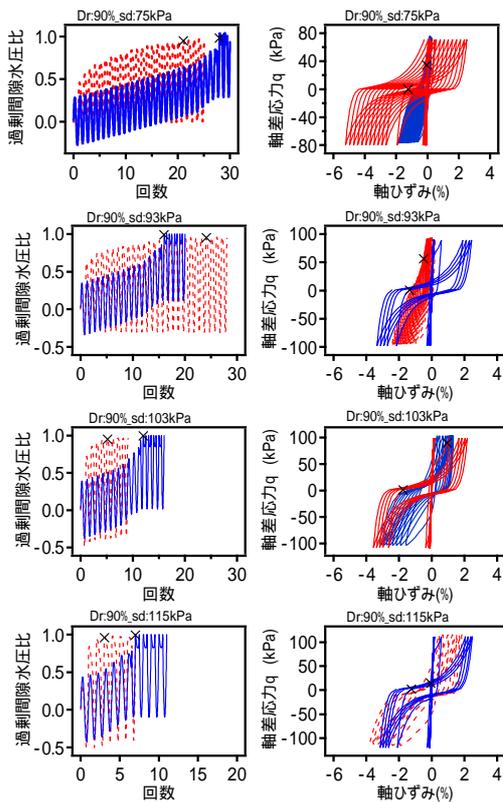


図 13 繰返し三軸試験の解析値と実測値の比較例 (Dr:90%)

量は小さくなっている．液状化に至るまでの軸ひずみの発生量は解析と実測でほぼ同じ挙動となることが確認された．

(4)土水連成解析コードによる実規模地盤を想定した検証

Dr:65%, Dr:90%の繰返し三軸試験から求めたパラメータセットをもとに, 実規模での地震時挙動を図 14 に示す. 過剰間隙水圧比の Dr:90%での上昇量は, Dr:65%より小さく抑えられたが, 下層では経過時間 90 秒付近から過剰水圧比が 1 に至った. 地震後の圧密過程において, 過剰水圧は Dr:65%では約 400 秒後にはほぼゼロに戻るが, Dr90%ではほとんど消散しない結果となった. 原因として, 透水係数が Dr:65%より Dr:90%の方が約 1/39 倍となっており, 排水速度が遅かったことが考えられる.

鉛直ひずみ z は, 下層部が最も大きく, Dr:65%のケースで 2 段回目の波形終了までで 8%発生した. 通常 5%を破壊の基準としていることが多く, このケースでは崩壊する結果となり, 実際に生じた被害挙動とも整合する. Dr:90%では z はほとんど発生しない結果となった.

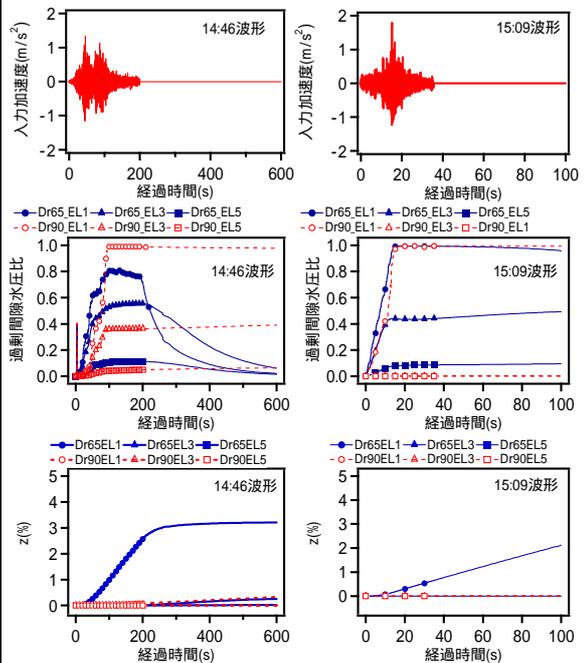


図 14 実規模地盤の解析挙動

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

清原雄康: 飽和・不飽和二戸しらすの液状化強度および変形特性試験, 土木学会論文集 C(地圏工学), 2016(校正完了).

Y. Kiyohara and M. Kazama: Shearing behavior and modeling of disturbed volcanic cohesive soil considering dependence of hydraulic hysteresis on void ratio, Proceedings of the sixth international conference

on unsaturated soils, UNSAT2014, Sydney, Australia, 2-4 JULY 2014, pp.1349-1355, 2014.

清原雄康, 風間基樹: 排水条件下における不飽和ローム土の水分特性・変形特性を考慮したモデル化, 地盤工学ジャーナル, Vol. 8, No. 1, pp.15-22, 2013.

清原雄康, 風間 基樹: 構造の異なる不飽和ローム土の単調せん断時における間隙径変化の推定, 土木学会論文集 C, Vol. 69, No. 1, pp.152-161, 2013.

〔学会発表〕(計 8 件)

清原雄康: セメント固化と締固めによるしらす地盤の液状化対策効果, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016.

清原雄康: 東北地方太平洋沖地震において泥流状崩壊した二戸しらすの飽和・不飽和液状化強度試験, 第 50 回地盤工学研究発表会, pp.1885-1886, 2015.

清原雄康, 坂本智美: 圧密沈下予測のための土・水連成有限要素解析法による定式化のまとめ, 八戸工業高等専門学校紀要, 第 49 号, pp.71-74, 2014.

清原雄康: 八戸ローム土のせん断時水分特性曲線の変化挙動が予測解析に及ぼす影響, 平成 26 年度不飽和土研究会研究発表論文集, pp.53-58, 2014.

清原雄康, 平野和也, 平間勇輝: 二戸しらすの繰り返し三軸試験における載荷周波数依存性, 平成 26 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, -24, 2015.

吉田顕介, 清原雄康: 小型振動台実験によるしらす地盤の応答特性, 平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, -45, 2014.

神久保知希, 清原雄康: 液状化解析コード LIQCA2D を用いたしらす地盤の地震時挙動予測, 平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, -28, 2014.

清原雄康, 風間基樹: 不飽和三軸試験から求めた水分特性曲線の間隙比依存性を考慮したせん断挙動予測, 第 47 回地盤工学研究発表会平成 24 年度発表講演集, pp.677-678, 2012.7.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清原雄康 (KIYOHARA, Yukoh)

八戸工業高等専門学校 准教授

研究者番号: 20369911

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: