

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360189

研究課題名(和文) 東日本大震災後の課題に着目した地盤の液状化強度特性に及ぼす諸要因の影響と評価法

研究課題名(英文) Study on factors affecting liquefaction characteristics of sandy deposits considering issues arose after the 2011 off Pacific Coast of Tohoku Earthquake

研究代表者

清田 隆 (Kiyota, Takashi)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：70431814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では地盤の液状化特性について、2011年東北地方太平洋沖地震後に浮き彫りとなった課題を系統的な室内実験により検討した。結果として、地盤の構造に起因する年代効果が微小せん断剛性率と液状化強度に及ぼす影響を示した。これに関連して、N値と微小せん断剛性率を利用することで合理的な液状化予測ができる可能性、および従来採取手法による不攪乱試料を用いた液状化評価の問題点を示した。また、埋戻し地盤の液状化対策と掘削性の確保のためフライアッシュ系改良材の有効性を確認した。更に、地震前後の道路の地下量の計測値から、道路種別毎の液状化指数と沈下量の関係を抽出し、新しいタイプの液状化ハザードマップを構築した。

研究成果の概要(英文)：This study investigated issues on soil liquefaction after the 2011 off Pacific Coast of Tohoku Earthquake based on comprehensive laboratory tests. The aging effects of soils on liquefaction and small strain characteristics were investigated. A rational liquefaction assessment method could be developed based on not only SPT-N value but also the small strain characteristics. In addition, we pointed out a problem of current liquefaction assessment with an undisturbed soil sample taken by conventional tube sampling method. This study also verified experimentally the effects of flyash on liquefaction resistance buildup and excavatability of the improved soil. Finally, we conducted a simple liquefaction assessment in Urayasu city, and the relationship between liquefaction potential and road subsidence were extracted based from the DSMs. Based on the result, an attempt was made to apply the obtained PL and road subsidence relations to attain a unique hazard map.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 三軸試験 微小変形特性 地盤改良 フライアッシュ ハザードマップ 不攪乱試料

1. 研究開始当初の背景

2011年東日本大震災では、東京湾および利根川流域の埋立地盤において深刻な液状化が発生し、戸建て住宅やライフラインに深刻な被害が生じた。また、2010-2011年のニュージーランド・カンタベリー地震でも、クライストチャーチ市の埋立地盤で顕著な液状化が発生している。これらの被害を受け、液状化予測と対策に関する喫緊の課題として、広範な粒度分布を有する地盤の液状化特性の把握、地盤の年代効果が液状化強度に及ぼす影響の把握、および有効な液状化対策の検討が挙げられた。

2. 研究の目的

2011年東北地方太平洋沖地震による顕著な液状化は非塑性細粒分を大量に含む埋立地盤で生じたが、自然地盤では液状化した例は限られていた。この理由として地盤の年代効果が考えられる。本研究では、本地震により顕著な液状化が生じた千葉県浦安市に着目して、埋立地盤の年代効果の発達メカニズムについて検討した。若年埋立地盤の年代効果は土粒子構造の発達により形成されるものと仮定し、それを模擬した液状化試験を現場試料を用いた中空ねじりせん断試験により実施した。

更に、従来の液状化評価法の改善を念頭に、豊浦砂を用いた一連の三軸液状化試験と微小せん断剛性率の計測を実施した。供試体密度を一定に保ち、微小繰返し載荷により砂試料の構造に変化を与え、それが静的強度と液状化強度に及ぼす影響を検討した。これにより、従来のN値のみによる液状化評価の問題と微小せん断剛性率の利用の有効性について言及した。

以上に示した微小せん断剛性率と地盤の構造の関連性は、不攪乱試料の品質評価にも適用できる。従来採取法による不攪乱試料の液状化評価への適用の問題点について、本研究では再構成試料による実験と実験結果を用いた有効応力解析の結果により検討した。

一方、東日本大震災ではライフライン等の埋設物が甚大な被害を受けたため、その埋戻し土の液状化対策は喫緊の課題である。しかし、埋戻し土の固化、特にセメントを用いた改良土では室内配合設計で十分な掘削性を確保した場合であっても、過強度発現による掘削時の施工性に問題が残されている。本研究では、その液状化対策工法として、フライアッシュ系改良材に着目し、一連の室内実験を実施して検討を行った。

また、従来の液状化ハザードマップに定量的な情報が含まれると、防災に対して有効な利活用が期待できる。本研究では、地震前後に実施された航空レーザー測量によって得られた道路沈下量と、PL値との関係に及ぼす道路の規格の影響を考慮することで、液状化による道路の沈下量を定量的に予測する新たな液状化危険度マップの構築を試みた。

3. 研究の方法

(1) 中空ねじりせん断試験

本研究で使用した中型中空ねじりせん断試験装置の載荷装置は、内径90mm、外径150mm、高さ300mmの供試体にせん断ひずみ100%以上まで載荷・計測を行うことが可能である。

試料は東日本大震災による液状化によって生じた噴砂試料($F_c=30\%$)である。供試体飽和後、 $\sigma'_m = 50$ kPaまで等方圧密を行い、動的計測手法によるせん断剛性率 G_d を計測した。その後、軸変位固定条件において所定の応力比 τ_d/p' の非排水繰返しねじり載荷試験(以下、液状化試験)を実施した。また、一部試料には $\sigma'_m = 50$ kPaの等方圧密後に排水条件下で応力振幅 ± 5 kPaの鉛直繰返し載荷(以後、載荷履歴)を100回および1000回与えた。これは、埋立地盤の年代効果の影響を検討するために行ったものである。

(2) 三軸・一軸試験

三軸供試体サイズは直径75mm、高さ150mmである。実験試料は豊浦砂を用いた。中空ねじり試験と同様、圧密後の供試体に年代効果を付与する目的で一定振幅(両振幅軸ひずみ0.1%)の排水繰返し載荷履歴を与えた。その後、せん断応力振幅一定条件の非排水繰返し三軸試験、または排水三軸圧縮試験を実施した。

不攪乱試料の品質に関して使用した試料は、浦安市で採取されたシンウォールチューブサンプルとその再構成試料である。再構成試料の供試体密度は、当該試料の元の不攪乱試料の値に合わせた。供試体飽和後、不攪乱試料採取深度の有効土被り圧まで等方圧密を行い、液状化試験を実施した。

なお、上記の試験では、いずれも圧密中と排水繰返し載荷中にせん断弾性波速度 V_s を計測し、微小せん断剛性率($G_d = \rho_{sat} V_s^2$ 、 ρ_{sat} : 試料飽和密度 [g/cm^3])を計測している。

フライアッシュ系改良材 (FAI) の検討では、豊浦砂とFAI (豊浦砂質量比2%または5%)を豊浦砂相対密度が50%になるように作製した。その後所定期間、供試体を水中養生させ、水和反応を促進させた。その後、三軸液状化試験を実施した。

上記改良土の掘削性の検討のため、FAI改良土のほか、セメント改良土 (CEM) を用いて一軸圧縮試験も実施している。

(3) 液状化PLマップの構築と液状化沈下データの抽出

本研究では浦安市を対象として、液状化検討に必要な地盤情報を整備し、PL値分布を道路橋示方書(2012)による液状化判定に基づいて作成した。さらに、東北地方太平洋沖地震前後のデジタル標高モデルの差分から道路沈下量を抽出した。そして抽出された道路沈下量に与える道路の規格の影響を考慮することで、新たな液状化危険度マップの構築を試みた。

4. 研究成果

(1) 地盤の年代効果が液状化強度特性に及ぼす影響

図1に、中空供試体(噴砂試料)の等方圧密後に計測した動的せん断剛性率 $G_d/f(e)$ と排水繰返し载荷履歴回数の関係を示す。繰返し履歴による密度増加は非常に少ないことから、 $G_d/f(e)$ の増加は、試料の密度化の影響ではなく土粒子構造の安定化(インターロッキングの発達)の影響が支配的であると考えられる。

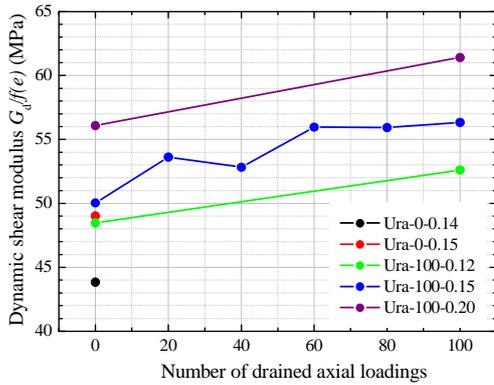


図1 中空供試体(噴砂試料)の動的せん断剛性率と载荷履歴回数の関係

図2に载荷履歴を与えなかった場合と载荷履歴を100回与えた供試体に対してせん断応力比 $\tau/p' = 0.20$ の条件下で液状化試験を行った際の有効応力経路を示した。液状化試験の初期段階において、载荷履歴により繰返し毎の有効応力の減少が抑えられていることが分かる。この傾向は、液状化試験前に行われた排水繰返し载荷履歴による土粒子構造の発達によるものと解釈することができる。同様の結果は既往の研究でも確認されているが、細粒分の非常に多い噴砂試料でも示された例はほとんどない。この結果は、東日本大震災で顕著な液状化が生じた埋立地盤でも、年月とともに作用する応力履歴により、液状化に対する抵抗性が増加することが示唆される。また、セメンテーション効果の期待できない沖積自然地盤において、同地震による液状化の痕跡がほとんど確認されなかったメカニズムにも繋がると考える。

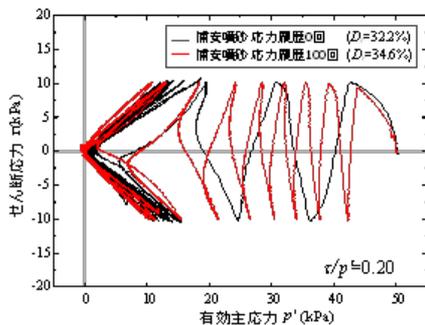


図2 応力履歴の有無による有効応力経路の比較(中空ねじり・噴砂)

(2) 微小変形特性と液状化強度の関係

ここでは、地盤の土粒子構造の発達に起因する年代効果を更に検討する目的で実施した三軸試験結果を概説する。

図3に、豊浦砂の三軸供試体について、等方圧密後の排水繰返し载荷回数とそれに伴う $G_d/f(e)$ の増加率の関係を示す。鉛直ひずみ一定振幅の排水繰返し载荷を与えることで、その回数が増加するほど $G_d/f(e)$ の値も増加している。一方、排水繰返し载荷回数が200回を超えると、 $G_d/f(e)$ の値はほとんど増加しない結果となった。これは、 D_r が一定の条件下で変化し得る土粒子のかみ合わせ効果には限界が存在することを示唆している。

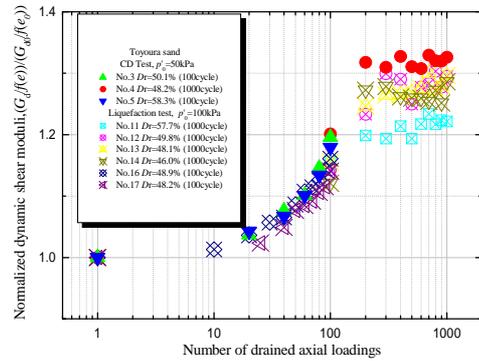


図3 三軸供試体(豊浦砂)の動的せん断剛性率と载荷履歴回数の関係

図4に排水三軸圧縮試験結果を示す。供試体 D_r は約30%, 50%, 60%程度に調整した。試験結果より、 D_r の差が供試体の強度変形特性に及ぼす影響は非常に明瞭であった。一方、 $D_r = 50\%$ の試験結果では、 $G_d/f(e)$ が80~100MPa程度の範囲では、排水三軸圧縮試験による強度変形特性にはほとんど影響を与えない。 D_r とピークせん断強度が N 値と良い相関があると考え、この傾向は N 値で V_s を推定することは難しいことを示唆している。

排水繰返し载荷履歴を与えることにより、液状化強度も増加した(図5)。図6のように、同程度の D_r であっても G_d の増加により液状化強度も増加することが確認された。言い換えると、 D_r が同じ供試体であっても、液状化強度は最大2倍程度異なり、その違いは微小変形特性で表せることを示した。

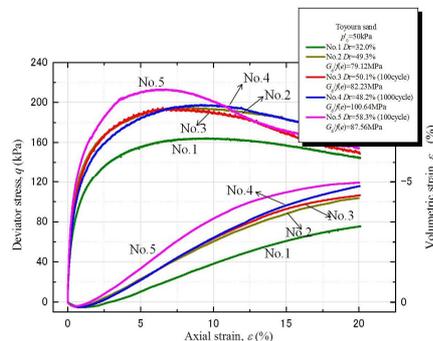


図4 初期微小せん断剛性率の異なる三軸供試体(豊浦砂)の排水単調载荷試験結果

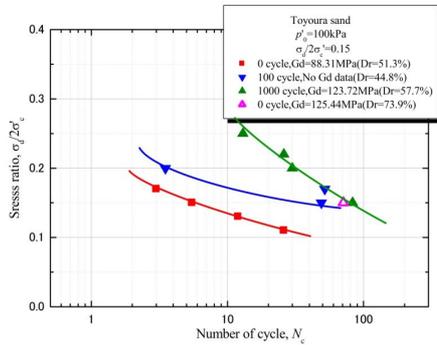


図5 三軸供試体(豊浦砂)の液状化強度曲線

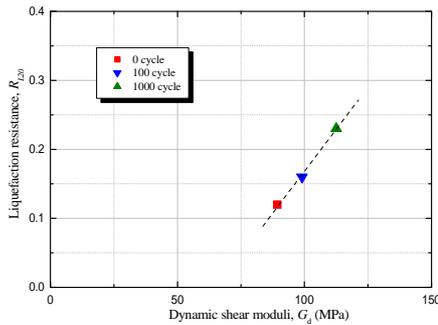


図6 三軸供試体(豊浦砂)の動的せん断剛性率と液状化強度の関係

(3) 微小変形特性に基づく不攪乱試料の液状化強度特性の評価

2011年東北地方太平洋沖地震後、液状化が発生した東京湾埋立地で採取された不攪乱試料(シンウォールサンプリング)を用いて実施された室内試験による液状化強度曲線を図7に黒い線で示す。実験結果は、同地震による地震動継続時間が非常に長かったことを考慮しても、事実との整合性はあまり高くないと言える。この原因の一つとして、試料採取地盤が非常に緩く(平均N値5程度)、試料採取時に密度化、および土粒子構造の強化が生じた可能性が考えられる。

従来の採取法による不攪乱試料の状況を踏まえ、不攪乱試料に代えて再構成試料で原地盤の液状化強度を検討する試みは、古くから提案されている。Tokimatsu et al., (1986)は、試験供試体に初期せん断を与え、そのせん断剛性率を原位置速度検層に基づくせん断剛性率の値に調整することで、再構成試料でも原地盤の液状化強度を再現できることを提案した。また、Kiyota et al. (2009)は、土粒子の構造に基づく砂地盤の年代効果にはセメンテーションとインターロッキングの効果があるとし、後者が支配的な沖積地盤や埋立地盤ではTokimatsu et al., (1986)の手法により、原位置の液状化強度特性を適切に評価できることを示した。このようなせん断剛性率を基準とした試験供試体の評価は、実務でも実施されている。図7の不攪乱試料では微小せん断剛性率が計測されていないため定量的な判断はできないが、採取時の乱れを受けていた可能性が高い。

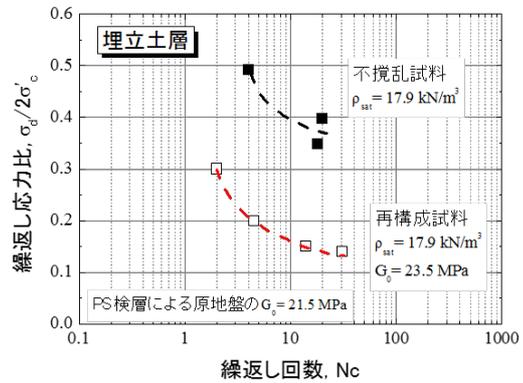


図7 不攪乱試料と初期せん断剛性率を原位置に合わせた再構成試料の液状化強度曲線

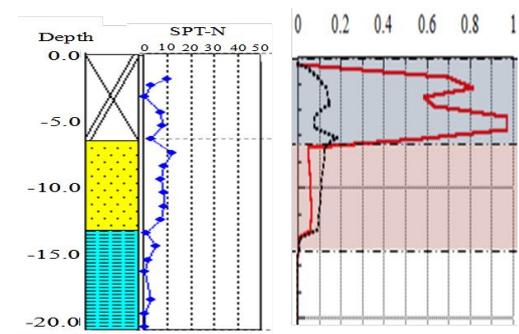


図8 柱状図と有効応力解析による過剰間隙水圧比(黒:不攪乱試料、赤:せん断剛性率を調節した再構成試料)

本研究では上記手法を参考に、原位置PS検層に基づく微小せん断剛性率と同等の値になるよう作成した再構成試料を用いて液状化試験を実施した。再構成試料の供試体密度は不攪乱試料と同等であるが、その液状化強度曲線は図7の赤線に示すように不攪乱試料よりもかなり低い位置となっている。

また、この液状化試験結果を基にパラメータを設定した実施した一次元有効応力解析結果を図8に示す。従来の採取手法による不攪乱試料を用いた場合、東北地方太平洋沖地震の地震動を与えても過剰間隙水圧比は0.2以下である。一方、上記の再構成試料では埋立地盤全体の水圧が上昇しており、実際に生じた埋立地盤の液状化現象を適切に説明できていると言える。

(4) フライアッシュ系改良材による液状化対策と掘削性に関する検討

一軸試験による掘削性の検討

図9に、FAI改良土の一軸圧縮強度と養生日数(1~28日)の関係を示す。養生日数およびFAI添加率の増加に伴い一軸圧縮強度が増加することが分かる。なお、図9には比較のためCEM改良土(改良材添加率2%, 養生28日)の結果も併記している。

既存の掘削性評価法に基づけば、CEM添加率2%供試体では液状化抵抗性を満足する一方で、掘削性に問題が残されている。FAI改良土では、FAI添加率2%および5%供試体に

において、液状化抵抗性および掘削性を満足する。

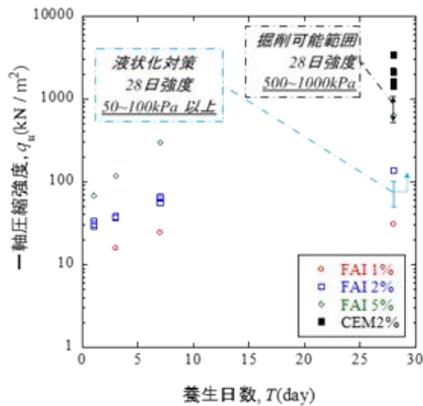


図 9 一軸圧縮強度と養生日数関係（養生 28 日まで）

三軸試験による FAI 試料の液状化対策効果の検討

FAI 試料と無改良試料を用いた液状化試験結果を図 10 に示す。未改良供試体、FAI2% 供試体共に繰返し回数 20 回以上で DA5% に達した実験は行われていないが、図 10 より推定される RL20 は、それぞれ 0.16、0.35 であり、液状化強度特性に対する FAI 改良効果を確認できる。FAI5% 供試体の液状化強度は、さらに高いことを考慮すると、添加率の増大に伴う液状化抵抗性の増大が推察される。

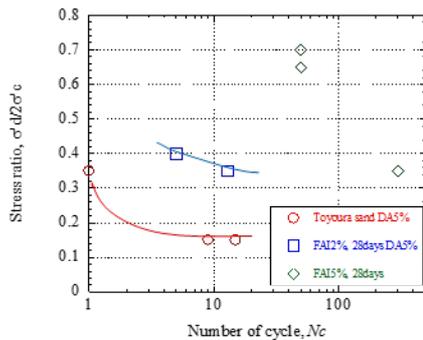


図 10 FAI 改良土の液状化強度曲線

(5) 新しい液状化ハザードマップの構築に向けて

地盤情報の整備

本研究では、東北地方太平洋沖地震後に実施された浦安市内 109 箇所のボーリング調査結果ならびに 23 箇所の土質試験結果を用いて液状化判定用のパラメータの推定法を構築した。具体的には、N 値、細粒分含有率および地層の連続性から、浦安市の地層を F(埋土層)、中間層(F 層と沖積層に挟まれたシルト層)、As1(N 値の高い上部沖積砂質土層)、As2(N 値の低い下部沖積砂質土層)に区分した。次に、それぞれの地層で液状化判定に必要なパラメータの推定を行った。

液状化指数 PL 値分布の構築

東北地方太平洋沖地震で生じたと考えら

れる最大加速度を用いた浦安市の PL 値分布を図 11 に示す。PL 値分布は、109 箇所のボーリング地点で計算された PL 値をクリギングによって空間補間を行い作成した。なお、今回の液状化判定では、地震動特性による補正係数は 1.0 としており、地震動継続時間の影響等は考慮していない。図 11 の PL 値分布は、地震後の被害調査結果と同様、元町の液状化被害が中町・新町と比較して小さかったことを反映している。

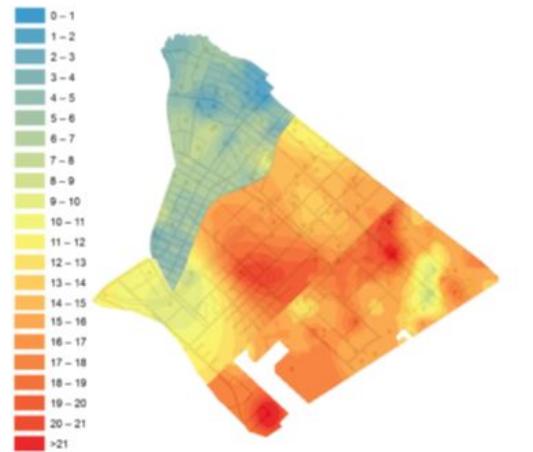


図 11 東北地方太平洋沖地震の最大加速度を想定した浦安市の PL 分布

液状化危険度マップの構築

須山ら(2013)は液状化に伴う道路被害は、同じ PL 値を示す場所でも非液状化層と考えられる道路舗装・路盤厚によって大きく異なることを明らかにしている。そこで、本研究では市内の埋立年代の異なる 3 つの地域において、159 地点の道路沈下量と PL 値を抽出した(図 12)。

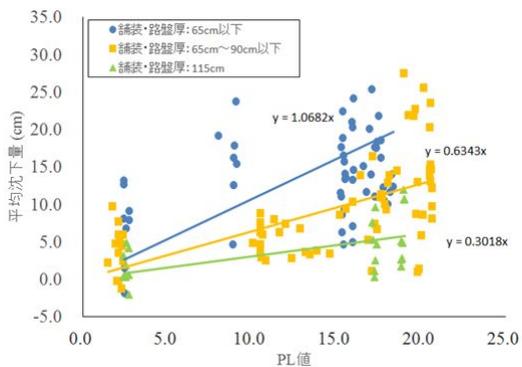


図 12 道路の舗装・路盤厚毎の PL 値と沈下量の関係

PL 値と沈下量の関係は非常にばらついてはいるが、地盤表層条件(道路舗装・路盤厚)で分類すると、PL 値と道路沈下量の関係はより明確となる。ばらつきが大きくなる原因として、道路の沈下は必ずしも一様には生じず、噴砂の発生などにより局所的に変化するためであると考えられる。また、液状化の程度が激しかった地域では、一様な沈下ではなく

起伏が激しくなっていたという報告もある。そのため、本研究ではばらついている道路沈下量に対して、それらの平均を取るようには回帰直線を引き、対象となる道路路線の沈下の全体像を定量的に表現することを試みた。



図 13 液状化道路沈下マップ

図 12 に示した関係を用いて、GIS ソフトウェアにより作成した液状化による道路沈下マップを図 13 に示す。液状化判定や沈下量の推定方法について検討すべき点が多いが、図 13 の新たなマップは道路の種類で液状化による沈下の程度が異なるという、被害調査結果と整合する傾向がよく表れている。このような液状化危険度マップは、液状化被害予測だけでなく、緊急輸送道路や避難ルートの検討など、防災戦略への有効な利活用にも適用できると考えられる

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 31 件)

1. 吳杰祐、清田隆、片桐俊彦 (2014): 排水繰り返し載荷履歴が豊浦砂の微小変形特性と液状化強度に及ぼす影響, 生産研究, Vol. 66, No. 6, pp. 537-541. (査読無)
2. 清田隆 (2014): 震災後の液状化調査に関する取り組み, 土と岩, No. 62, pp. 13-20. (査読無)
3. Kiyota, T., Koseki, J. and Sato, T. (2013): Relationship between limiting shear strain and reduction of shear moduli due to liquefaction in large strain torsional shear tests, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 49, 122-134. (査読有)
4. Konagai, K., Kiyota, T., Suyama, S., Asakura, T., Shibuya, K. and Eto, C. (2013): Maps of soil subsidence for Tokyo bay shore areas liquefied in the March 11th off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering,

53, 240-253. (査読有)

[学会発表](計 16 件)

1. Chiaro, G., Kiyota, T. and Koseki, J. (2014): Large-strain behavior of liquefiable sandy sloped ground evaluated by undrained cyclic torsional shear tests, International Symposium on Geohazards, Science, Engineering and Management.
2. Pokhrel, R.M., Kiyota, T., and Uemura, K. (2014): GIS-based study on liquefaction-induced soil subsidence in Urayasu area due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake (M=9), The 6th Japan-Taiwan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall.
3. Konagai, K., Kiyota, T., Asakura, T., Suyama, S., Kyokawa, H., Shibuya, K. and Eto, C. (2012): Subsidence map of Tokyo bay area liquefied in the March 11th Great East Japan Earthquake, The 15th World Conference of Earthquake Engineering.
4. Kondo, Y., Kiyota, T. and Kyokawa, H. (2012): Aging effect of reclaimed sandy soil on liquefaction characteristics in large strain torsional shear test, The 5th Taiwan-Japan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.gdm.iis.u-tokyo.ac.jp/research_liquefaction.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

清田 隆 (KIYOTA, Takashi)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号: 7 0 4 3 1 8 1 4

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

小長井 一男 (KONAGAI, Kazuo)
横浜国立大学大学院・都市イノベーション学
府・教授
(申請時は東京大学・生産技術研究所・教授)
研究者番号: 5 0 1 2 6 4 7 1