

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03302

研究課題名(和文)年代効果を考慮した液状化強度変化の推定法とその実証試験

研究課題名(英文) Estimation method for validation of liquefaction strength considering aging effects and its verification tests

研究代表者

豊田 浩史 (Toyota, Hirofumi)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90272864

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：埋立地盤が年代を経ることによって、液状化強度が増えることはよく知られた事実である。しかしながら、このような液状化に対する年代効果のメカニズムは、解明されていない。

砂の年代効果を評価するため、長期圧密された砂の液状化抵抗、初期及び割線せん断剛性率、貫入抵抗を、それぞれ非排水繰返し三軸試験、局所微小ひずみ試験、ベンダーエレメント試験を用いて求めた。三軸試験および静的貫入試験より得られた液状化抵抗は、1年圧密の供試体で、それぞれ約15%および7%増加した。しかしながら、初期せん断剛性率は、圧密時間でほとんど変化しなかった。長期圧密により、線形弾性を示すひずみ領域が、大きなひずみまで拡大した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液状化抵抗が圧密時間とともに増加するメカニズムについて、力学特性の変化に着目して研究を行った。その結果、初期せん断剛性率や貫入抵抗(せん断強さと関係)についての変化は小さく、主に線形弾性を示すひずみ領域が拡大することによって、液状化抵抗が増加することを明らかにした。つまり、実際の地盤の年代効果を考慮した液状化抵抗の変化を評価するためには、地盤のせん断弾性波や貫入抵抗値を測定するだけでは不十分で、弾性ひずみ領域の拡大を推定する必要がある。しかしながら、これは難しいため、初期せん断剛性率ではなく、ダイラトメータ等により、もう少しひずみの大きいところの割線せん断剛性率を測定する方法が推奨される。

研究成果の概要(英文)：It has been well known that liquefaction potential of the ground is increased with an increase of construction or sedimentation ages. However, the mechanism of this aging effect on liquefaction has not been elucidated.

To clarify the mechanism of aging effect in sand, liquefaction resistance, secant shear modulus including G_0 and penetration resistance of long-term consolidated sand were respectively measured using undrained cyclic triaxial test, local small strain (LSS) test, bender element (BE) test and static penetration test. Liquefaction resistances obtained from the triaxial test and the static penetration test were respectively increased by about 15% and 7% in one year consolidated specimen. However, G_0 was scarcely changed with the consolidation time. The difference is that elastic strain region, where linear elastic behavior was exhibited, tend to extend to larger strain for long-term consolidated specimen.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 年代効果 せん断波速度 三軸試験 砂質土 原位置試験

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ここで、年代効果とは、地盤が堆積年代を経ることによって液状化強度が上昇する現象を意味する。2011年の東北地方太平洋沖地震では埋立地盤を中心とした液状化被害が多数発生したが、同じ地盤でも施工年代の違いで地盤の液状化被害の程度に差がみられている。年代効果の発生には、様々な要因が考えられているものの、明確な発生メカニズムの解明には至っていないのが現状である。したがって、経験則的に、原地盤の液状化判定基準に年代効果による影響を取り入れる試みがはじめられている。

実際に年代効果が発生するのかを検証した既往研究において、室内要素試験によって砂質土を長期圧密すると、液状化強度が上昇するという多くの研究結果が報告されている。しかし、強度増加の要因は明確ではなく、液状化強度増加に影響を与えた砂質土の特性変化を明らかにすることは、年代効果の発生メカニズムを解明する上で重要である。

2. 研究の目的

本研究では、長期圧密による液状化強度増加の要因を砂質土の力学特性の変化から検証する(具体的には、液状化強度特性、微小変形特性、貫入強度特性)。さらに、原位置においても、既存のデータを利用しつつ、再度原位置試験を実施して、年代効果の確認を行う。室内試験と原位置試験の年代効果に関する比較を行うことで、それぞれの試験の信憑性を評価する。室内試験に十分な信頼度がありそうなら、力学特性変化の詳細を調べ、どのような原位置調査を実施すれば、年代効果変化を効率的に把握できるのか検討する。最終的に、年代効果を考慮した液状化強度評価手法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 室内試験

本研究では、標準砂である豊浦砂を用いた。漏斗堆積法によって初期相対密度を調整して供試体を作製した。次の3種類の試験を行った。なお、三軸試験においては、ベンダーエレメント(BE)試験により、長期圧密中のせん断剛性率を計測した。

① 繰返し非排水三軸試験

砂供試体を作製後、二重負圧および通水を行い十分に飽和化させる。間隙圧係数 $B > 0.95$ を確認後、平均有効主応力 $p' = 50 \text{ kPa}$ の等方圧密を行った。なお、停電時にコンプレッサーからの圧力供給がなくても実験を継続できるように、背圧载荷は行わない。所定の圧密期間終了後、軸ひずみ速度 0.1 mm/min で繰返し载荷を行った。試験は、両振幅軸ひずみ $DA = 5\%$ に達した時点を液状化したものと定義し、繰返し载荷回数 N_c を算定した。長期圧密実施時は試験後に飽和度が低下していないことを確認している。30~60分程度の圧密条件(以下、通常圧密とする)で液状化強度曲線を作成し、長期圧密時の N_c と液状化強度曲線との関係より長期圧密による液状化強度特性の変化を評価した。

② ベンダーエレメント(BE)試験

三軸試験で、長期圧密中の供試体の初期せん断剛性率 G_0 の変化を調査するため、BE試験を実施した。供試体上下端中央に設置したBEよりせん断波を送受信し、計測されたせん断波速度 V_s から G_0 を算出した。なお、 V_s の計測は圧密開始10分後から所定の圧密期間まで毎日実施した。BE試験では、BE先端間距離をとる tip-to-tip 法、送受信波形の立ち上がり点を結ぶ start-to-start 法を用いて波形記録より同定した。

③ 局所微小ひずみ(LSS)試験

三軸試験により長期圧密された砂供試体の微小変形特性を調べるため、非接触型の局所変位計を供試体に直接取り付け、軸および側方方向の変形量を測定することで局所せん断ひずみ ϵ_s を算定した。供試体作製から圧密までの過程は通常の三軸試験と同様である。所定の圧密期間終了後、排水条件の単調载荷試験(軸ひずみ速度 0.025 mm/min)を実施し、 $\epsilon_s = 1\%$ 程度までの割線せん断剛性率 G を算定する。

④ 室内静的貫入試験

図1に試験装置の概要を示す。载荷装置は着脱可能で、供試体設置後の乱れを起こさず、試験の実施が可能である。また、貫入棒の先端は平滑であり、貫入棒と貫入ロッドは同径に設定した。高さ $H = 123.5 \text{ mm}$ 、直径 $D = 104 \text{ mm}$ のモールドで供試体を作製した。なお、モールド底部にはポラスストーンを設置し、下部からの通水を可能としている。表面成形後、アクリル製のスペーサを挟み、錘により上載圧 10 kPa を载荷する。その後、通水飽和させ、所定期間水中養生させた後、直径 10 mm の貫入棒を貫入速度 0.25 mm/min で貫入することで貫入力を測定する。上載圧を与えた状態で試験を実施するため、錘中央には貫入ロッドを通す直径 15 mm の孔を設けている。なお、供試体上部からの貫入量が 40 mm 程度になったことを目安に試験を終了している。本試験では、通常圧密の養生期間を、供試体への通水が完了してから1日養生させたものとした。

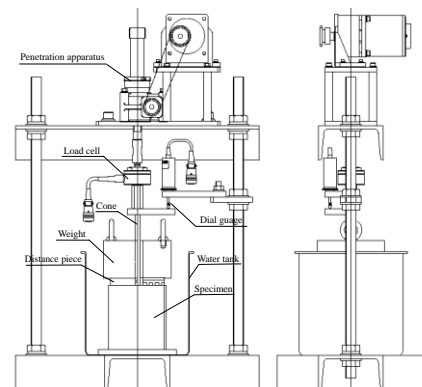


図1: 室内静的貫入試験装置模式図

(2) 原位置試験

液状化地盤に対して、原位置試験を実施したデータを利用して、再度同じ箇所と同じ試験を実施した。

① 2007年新潟県中越沖地震

2007年7月16日に、柏崎沖で発生した地震であり、柏崎市、長岡市、刈羽村で、震度6強を記録した。柏崎市橋場町で、大規模な液状化が発生したので、スウェーデン式サウンディング(SWS)試験を、6地点で実施した。本研究において、2018年10月に、同じ箇所でもSWS試験を再度実施した。

② 2010年クライストチャーチ地震

2010年9月4日にクライストチャーチの西約40kmの地点で発生した地震であり、クライストチャーチ周辺に多大な液状化被害が生じた。2011年2月22日に発生し、日本人を含む多くの死傷者を出した地震とは異なる。この地震後(2010年9月)に、Avonsideで1箇所、Dallingtonで1箇所、Bexleyで2箇所、Kaiapoiで1箇所SWS試験を行った。本研究において、2018年1月と2020年1月(現在結果を取りまとめ中)に、同じ箇所でもSWS試験を実施した。

③ 2011年東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日に、東北地方の太平洋沖で発生し、それにより引き起こされた大津波により、沿岸地域を中心に大被害を被った。震源から約400km離れた東京湾岸地域の埋立地を中心に、大規模な液状化が発生した。2011年5月に、浦安市の今川団地、高洲中央公園、墓地公園において、簡易動的貫入試験(PDCP)と表面波探査(MASW)を実施した。本研究では、2017年11月にPDCPを、2019年10月にMASWを実施した。ただし、MASWの結果については、現時点で分析中である。

4. 研究成果

(1) 室内試験

① 繰返し非排水三軸試験

図2に、豊浦砂に対して実施した、繰返し応力振幅比と繰返し載荷回数 N の関係を示す。7日圧密まで、通常圧密とほとんど差がないが、14日圧密からは、液状化強度が増加していることがわかる。長期圧密供試体については、1点しかプロットがないが、通常圧密と平行な圧密強度曲線が得られると仮定して(図2参照)、繰返し回数20回における繰返し応力振幅比を求めた。この値を通常圧密時の値で除して(液状化強度比と称する)、圧密時間の対数との関係を示したのが、図3である。1週間程度の圧密までは不明確であるが、それ以降は、直線的に液状化強度比が上昇している。このように、繰返し非排水三軸試験において、液状化強度の増加、つまり、年代効果を観測することができた。年代効果により、砂の力学特性がどのように変化して、その結果として、液状化強度の増加を引き起こすのかについて、次に述べる試験結果より考察していく。

② BE試験

図4に圧密期間における豊浦砂の初期せん断剛性率 G_0 の時間変化を示す。若干の変動があるものの、圧密開始から終了までの G_0 に明確な傾向は見られなかった。液状化強度は増加するにもかかわらず、 G_0 はほとんど変化しないという興味深い結果である。この結果より、せん断速度の測定は、液状化強度の年代効果を評価する上では、鈍感であると言える。

③ LSS試験

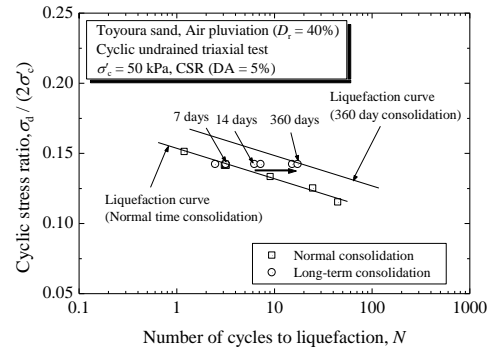


図2：液状化強度の増加

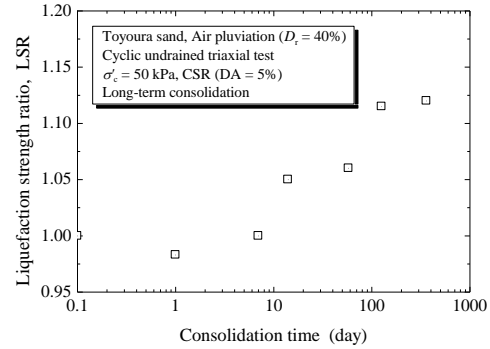


図3：液状化強度比の増加

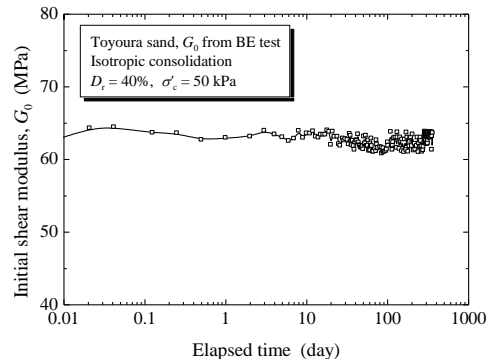


図4：BE試験による G_0 の変化

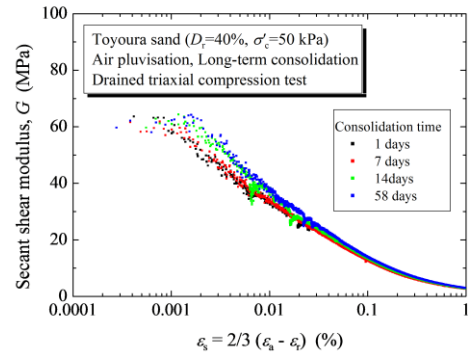


図5：割線せん断剛性率の変化

図 5 に豊浦砂の圧密期間による割線せん断剛性率 G と局所せん断ひずみ ε_s の関係をまとめる。真の弾性ひずみ域とされる $\varepsilon_s=0.001\%$ 以下の G に着目すると、圧密期間によらず同程度の値を示している。BE 試験より確認した圧密期間中の G_0 についても、圧密開始時から顕著な変化がみられず、LSS 試験結果より得られた弾性ひずみ域の G と同程度の値を示した。次に $G-\varepsilon_s$ 曲線の形状に着目すると、通常圧密と 7 日圧密の結果はほとんど等しい曲線形状を示している。一方で、14、58 日圧密の曲線は、圧密期間が長いほど弾性ひずみ域が伸びるような傾向を示している。弾性ひずみ域からせん断剛性率が低下を始めるひずみレベルは、通常圧密では $\varepsilon_s=0.001\%$ 程度であるのに対して、58 日圧密で $\varepsilon_s=0.002\%$ に近い値を示している。長期圧密による微小変形特性の変化は、繰返し載荷回数に変化がみられた圧密期間（14 日）と対応しているため、液状化強度特性の変化には豊浦砂の変形特性の変化が影響を与えたと考えるべきである。この弾性領域の拡大を、既存の原位置試験から捉えることはかなり難しいと考えられ、これに特化した新たな試験方法の確立などが望まれる。

④ 室内静的貫入試験

図 6 に、豊浦砂の水中養生期間による貫入抵抗値 q_c と貫入変位の関係を示す。14 日養生までは、ほとんど変化がなく、それ以降では強くなっているように見える。そこで、図 7 に貫入長が 30 mm に達した時点の貫入抵抗値 q_{c30} を代表値として採用し、各養生期間の結果を比較した。図 7 より、若干ではあるが、 q_{c30} の増加傾向がみられる。管理された室内と違い、原位置では、結果のばらつきもあるため、この程度の差を有効に判別できるかは不確実なところもあり、貫入抵抗値で、年代効果による液状化抵抗を判断するのは難しいと考えられる。

(2) 原位置試験

原位置試験の結果については、分析がまだ終わっていない状態であるが、得られた代表的な結果について説明しておく。

① 2007 年新潟県中越沖地震

図 8 に、柏崎市橋場町の民家の庭で実施した SWS 試験の結果を示す。結果は換算 N 値に直してある。2007 年 9 月と 2018 年 10 月の調査時の写真も付けてあるが、周辺では噴砂が見られたものの、庭からは、盛土のためか、噴砂は見られなかった。

黒線が 2007 年 9 月の結果、赤線が 2018 年 10 月の結果である。深度 7 m 程度まで砂分を含んだ層が分布しており、それ以深は、細粒分の層で、換算 N 値が小さくなっていると考えられる。大変よく似た傾向を示しているが、2018 年の換算 N 値が、2007 年次より、微増しているように見える。

図 9 に、柏崎市橋場町の畑で実施した SWS 試験の結果を示す。2007 年 9 月の調査時には、噴差が見られた箇所である。民家も地盤亀裂による被害を受けており、2018 年 10 月の調査時には、立て替えられていた。

こちらも深度 6 m 程度まで礫分を含んだ砂層が分布しており、それ以深は、細粒分の層と考えられる。2007 年、2018 年とも、よく似た傾向を示しており、大小にばらつきはあるものの、2018

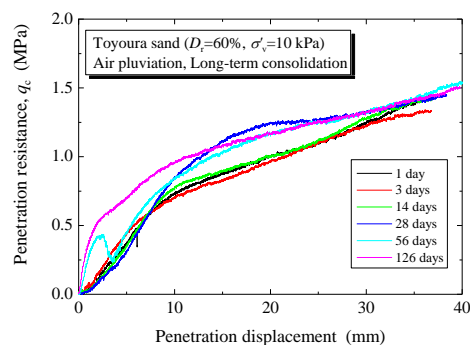


図 6：貫入抵抗値と貫入長の関係

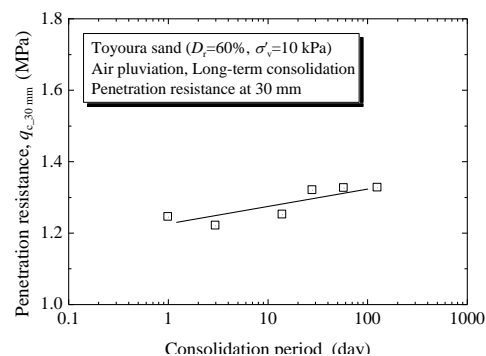


図 7：貫入抵抗値の変化

地点3-1-5

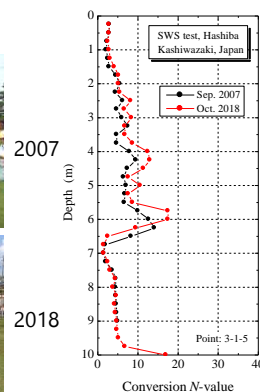


図 8：換算 N 値の変化（橋場町その 1）

地点3-1-6

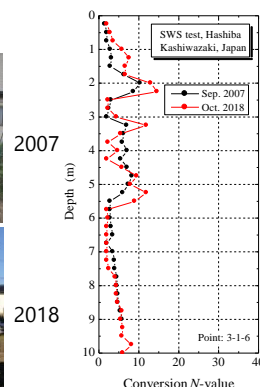


図 9：換算 N 値の変化（橋場町その 2）

年の換算 N 値が、2007 年次より、大きくなっている箇所が多いようである。以上より、明確な年代効果は現れていないが、室内貫入試験でも得られた程度の、貫入抵抗値の微増が計測された。

② 2010 年クライストチャーチ地震

図 10 に、クライストチャーチ、Aivonside の民家の庭で実施した SWS 試験の結果を示す。2010 年 9 月には庭が噴砂で覆われているのがわかる。2017 年 9 月には、民家がなくなっているが、液状化被害の大きかったところは、ニュージーランド (NZ) 政府により、立ち入り禁止区域に指定され、すべての住民が立ち退いた。危険な地盤を改良するより、他の安全な場所に移る選択は、人口に比べ土地に余裕のある NZ ならできる対策と思われる。

2010 年 9 月の調査では、換算 N 値は、深さとともに緩やかに増加している。2017 年 9 月の比較であるが、3.5 m 以浅は、ほとんど変化がみられないが、3.5 m 以深は、確実に換算 N 値が増加している。この理由として、この地域は、2010 年の調査後も、大きな地震に見舞われ (2011 年 2 月 22 日, 2011 年 6 月 13 日, 2011 年 12 月 23 日)、何度も液状化することにより、3.5 m 以深は高密度化した可能性がある。しかしながら、浅い箇所はまだゆるいままと思われ、明確な年代効果は見られない。

図 11 に、クライストチャーチから北に約 17 km にある、Kaiapoi の民家の裏庭で実施した SWS 試験の結果を示す。2010 年 9 月の写真は、民家の液状化被害を示してあるが、SWS 試験はこの民家の裏庭で行われた。こちらも NZ 政府により立ち入り禁止区域に指定され、2018 年 1 月には、民家がなくなっている。

2010 年 9 月の調査では、換算 N 値は、6.5 m まであまり変化せず、小さな値を示している。しかしながら、2018 年 1 月の調査では、一部礫当たりと思われる換算 N 値が 10 を超える箇所もあるが、3 m 以浅は、ほとんど変化がみられない。3 m 以深では、Aivonside の結果と同様、換算 N 値が増加している。やはり Kaiapoi においても、初回調査後の地震の影響があったと思われる。浅い箇所については、地震の影響や年代効果は明確ではない。

③ 2011 年東北地方太平洋沖地震

図 12 に、浦安市の今川団地において行った PDCP 試験の結果を示す。こちらも結果は N 値に換算してある。初回調査は、2011 年 8 月に行われ (図の黒線)、再調査は、2017 年 12 月である (図の赤線)。両試験とも、非常によく似た傾向を示している。また、再調査時には、若干換算 N 値が増加しているようにも見える。

以上、地震直後と約 10 年後に行った原位置貫入試験の結果より、柏崎市と浦安市においては、貫入抵抗の微増、NZ においては、深い (3 m 以上) 箇所、貫入抵抗が増加していた。

Aivonside

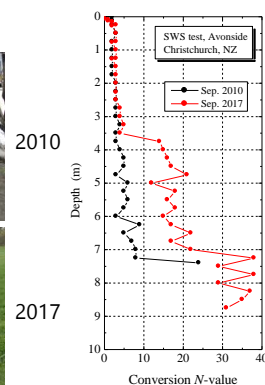


図 10: 換算 N 値の変化 (Aivonside)

Kaiapoi

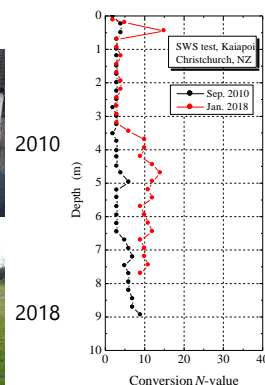


図 11: 換算 N 値の変化 (Kaiapoi)

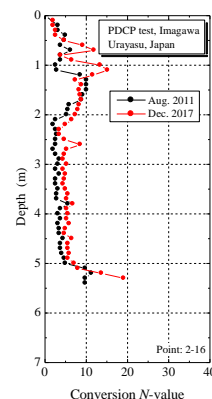
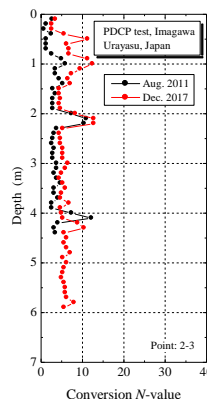


図 12: 換算 N 値の変化 (今川団地)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Toyota, H., and Takada, S. | 4. 巻 Session S3-1-3 |
| 2. 論文標題 Reliquefaction and Aging Effects on Liquefaction Estimated from Triaxial Tests | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 International Conference for the Decade Memory of the Wenchuan Earthquake | 6. 最初と最後の頁 77-84 |
| 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 Toyota, H., Takada, S. and Le, B. N. | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Estimation of reliquefaction considering from soil element tests | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 International Conference on GIS and Geoinformation Zoning for Disaster Mitigation | 6. 最初と最後の頁 135-142 |
| 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 Toyota, H. and Takada, S. | 4. 巻 143 |
| 2. 論文標題 Variation of liquefaction strength induced by monotonic and cyclic loading histories | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE | 6. 最初と最後の頁 1-11 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001634 | 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 Hara, T. | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Resilience Efforts in the Kochi Prefecture in Preparation for the Nankai Trough Earthquake | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Disaster Research | 6. 最初と最後の頁 755-765 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2017.p0755 | 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 Toyota Hirofumi、Takada Susumu、Le Bao Ngoc | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 Estimation of reliquefaction considering from soil element tests | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Society Special Publication | 6. 最初と最後の頁 53～60 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgssp.v06.G1Z08 | 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 Toyota Hirofumi、Takada Susumu | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 Effects of gravel content on liquefaction resistance and its assessment considering deformation characteristics in gravel-mixed sand | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Canadian Geotechnical Journal | 6. 最初と最後の頁 1743～1755 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1139/cgj-2018-0575 | 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6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 早川飛翼, 門脇悠太, 豊田浩史, 高田晋 |
| 2. 発表標題 圧密時間を経た砂質土の液状化強度に与える細粒分の影響 |
| 3. 学会等名 第36回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|----------------------------|
| 1. 発表者名 西村裕平, 豊田浩史, 高田晋 |
| 2. 発表標題 長期圧密による砂の力学特性変化 |
| 3. 学会等名 第52回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高田晋, 豊田浩史 |
| 2. 発表標題 過圧密履歴を受けた砂の応力履歴消失を伴った再液化化特性に関する研究 |
| 3. 学会等名 第52回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 門脇悠太, 西村裕平, 豊田浩史, 高田晋 |
| 2. 発表標題 細粒分を含む砂における長期圧密が液化強度に与える影響 |
| 3. 学会等名 第35回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 原 忠, 林聖淳, 三村佳織, 沼田淳紀 |
| 2. 発表標題 丸太打設により改良された海岸埋立地の地震・間隙水圧計観測システムの概要 |
| 3. 学会等名 第52回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 原 忠, 林聖淳, 沼田淳紀, 三村佳織 |
| 2. 発表標題 丸太打設により改良された埋立地盤の現地観測結果に関する考察 |
| 3. 学会等名 地盤工学会四国支部平成29年度技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 原 忠, 他 | 4. 発行年 2019年 |
| 2. 出版社 株式会社エヌ・ティー・エス | 5. 総ページ数 338 |
| 3. 書名 地盤・土構造物のリスクマネジメント～地盤崩壊・液状化のメカニズムとその解析、監視、防災対策～ | |

〔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 | 杉本 光隆 (Sugimoto Mitsutaka) (50196755) | 長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102) | |
| 研究 分担者 | 原 忠 (Hara Tadashi) (80407874) | 高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授 (16401) | |