

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420478

研究課題名(和文)埋立地盤の年代効果を考慮した液状化強度推定手法の開発

研究課題名(英文)Development of estimation method for liquefaction strength considering aging effect of reclaimed ground

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、室内試験機で長期間圧密した砂供試体に対して各種力学試験を行った。圧密期間による砂の液状化強度特性、微小変形特性、静的貫入特性の変化を調べ、長期圧密による液状化強度増加の要因を検証した。

豊浦砂の長期圧密による液状化までの繰返し载荷回数は、14日圧密以降で上昇した。割線せん断剛性とせん断ひずみの関係は、14日圧密から変化し、弾性ひずみ域が増大するような傾向を示した。しかしながら、初期せん断剛性の値は、顕著な変化がみられなかった。豊浦砂の長期水中養生による貫入抵抗は、14日養生から上昇する傾向がみられた。

研究成果の概要(英文)：Various laboratory tests, which are liquefaction strength, local small strain and static penetration tests, were performed using saturated sand specimens through long-term consolidation to detect any change of mechanical properties induced by long-term consolidation.

The number of cycles to liquefaction for long-term consolidation of Toyoura sand increased gradually from 14 days consolidations. The relation between secant shear modulus and shear strain for long-term consolidation of Toyoura sand changed at longer than 14 days consolidation. The change was that threshold of elastic strain region extended. No obvious change in initial elastic shear modulus of Toyoura sand was observed during long-term consolidation. There was a trend that penetration resistance for long-term underwater curing of Toyoura sand increased from 14 days curing.

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

1. 研究開始当初の背景

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のことを年代効果と呼ぶ。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たという報告がある。年代効果の発生要因として様々な見解が挙げられている。しかし、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り、現況の液状化判定基準等に年代効果による影響は考慮されていない。

年代効果メカニズム解明を室内試験より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に長期圧密を与えることによって、液状化強度が上昇するという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紐解く上で重要である。

2. 研究の目的

本研究では、長期圧密による砂の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ことを目指し、長期間圧密させた砂供試体に対して様々な室内土質力学試験を行った。これらの試験より長期圧密による砂の液状化強度特性、微小変形特性、静的貫入特性の変化を調べ、圧密期間による液状化強度特性変化の要因を明らかとすることを目的とする。

3. 研究の方法

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 40% を目標に供試体作製を行い、三軸試験機で行う試験については供試体作製からの全試験過程を三軸試験機上で直接行った。また、飽和非排水繰返し三軸試験については、圧密効果が現れやすいとされている細粒分の影響を検証するため、豊浦砂に細粒分である MC カオリンを質量比で 5% 添加した試料 (以下、MC カオリン含有豊浦砂とする) を用いた試験も行った。Fig.1 に使用した試料の粒径加積曲線を示す。

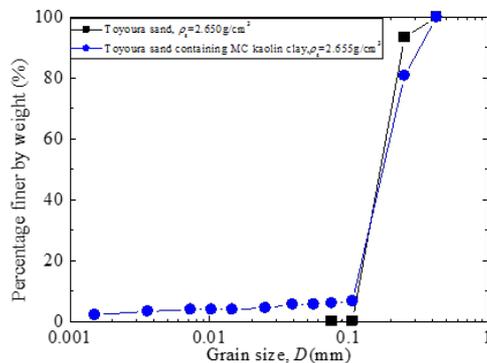


Fig. 1: 使用試料の粒径加積曲線

4. 研究成果

(1) 飽和非排水繰返し三軸試験

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 $p' = 50$ 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、背圧荷重は行わない。所定の圧密期間終了後、軸ひずみ速度 0.1 mm/min で繰返し荷重を行った。試験は、両振幅軸ひずみ $DA = 5\%$ に達した時点を実験終了と定義し、繰返し荷重回数 N_c を算出した。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。

Fig. 2 に、砂試料に対して実施した飽和非排水繰返し三軸試験より得られた繰返し応力振幅比と繰返し荷重回数 N_c の関係を示す。豊浦砂、MC カオリン含有豊浦砂のいずれの結果についても、14 日圧密で得られた結果は、通常圧密で得られた液状化強度曲線より推定される N_c よりも増加していることが分かる。豊浦砂については、最長 58 日の圧密によってさらに N_c の増加がみられ、MC カオリン含有豊浦砂については 1 日の圧密から N_c の増加が確認された。MC カオリン含有豊浦砂については、豊浦砂より早期から圧密効果が明確に発現してくることが分かる。なお、圧密期間の体積変化はわずかであり、圧密前後における飽和度の低下も確認されなかった。

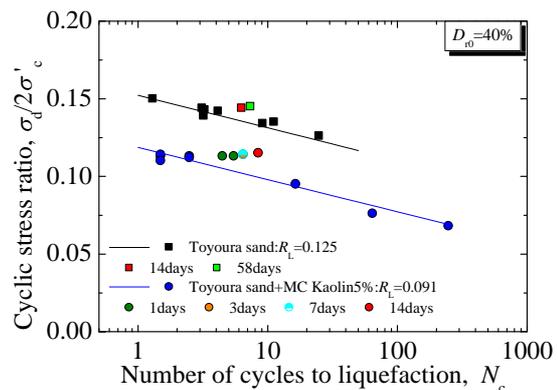


Fig. 2: 液状化強度の増加

(2) ベンダーエレメント (BE) 試験

長期圧密による砂試料の初期せん断剛性 G_0 の変化を調査するため、圧密中の試料に対してベンダーエレメント (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

を結び start-to-start 法を用いて波形記録より同定した。

Fig. 3 に圧密期間 t_c における豊浦砂の初期せん断剛性 G_0 を圧密 10 分後の G_0 で正規化して比較した結果を示す。最長 58 日の圧密期間で若干の変動があるものの、圧密開始から終了までの G_0 に顕著な変化は見られなかった。

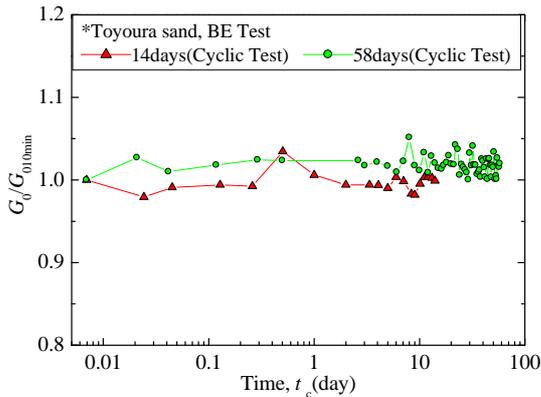


Fig. 3: BE 試験による G_0 の変化

(3) 局所微小ひずみ (LSS) 試験

本研究では、三軸試験により長期圧密された砂試料の変形特性を調査するため、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。Fig. 4 に局所変位計の取付概要を示す。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、排水条件の単調載荷試験 (軸ひずみ速度 0.025mm/min) を実施し、 $\varepsilon_s=1\%$ 程度までのせん断剛性 G を算定する。



Fig. 4: 局所変位計取付概要

Fig. 6 に豊浦砂の圧密期間による割線せん断剛性 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ことを確認できた。

次に $G - \varepsilon_s$ 曲線の形状に着目すると、通常圧密と 3, 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, 28, 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た。弾性ひずみ域から剛性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 $\varepsilon_s=0.002\%$ に近い値を示した。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何等かの影響を与えたと考えられる。

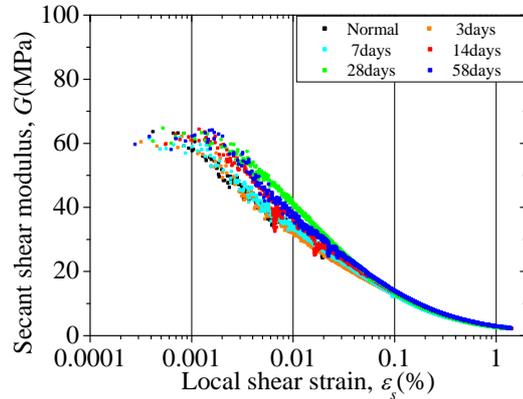


Fig. 5: 割線せん断剛性の変化

(4) 室内静的貫入試験

Fig. 6 に試験装置の概要を示す。載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ー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 (上載圧 10kPa) を載荷する。その後、通水飽和させ、所定期間水中養生させた後、直径 10mm の貫入棒を貫入速度 0.25mm/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 15mm の孔を設けている。なお、供試体上部からの貫入量が 40mm 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、基準とする養生期間を、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。

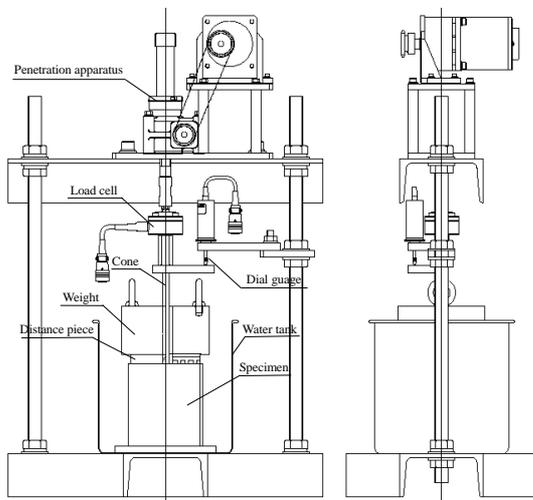


Fig. 6: 室内静的貫入試験装置模式図

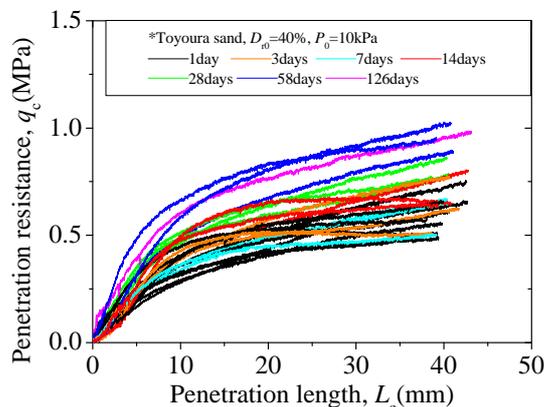


Fig. 7: 貫入抵抗値と貫入長の関係

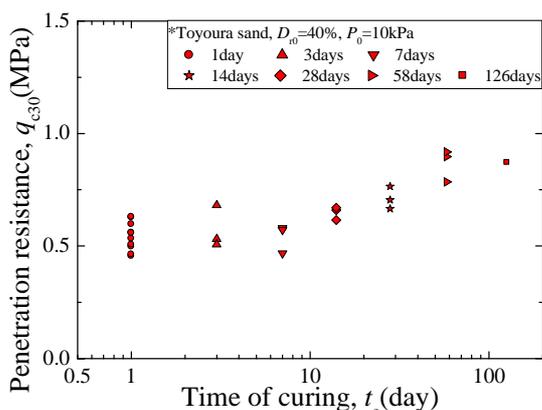


Fig. 8: 貫入抵抗値の変化

Fig. 7 に、豊浦砂の水中養生期間 t_c による貫入抵抗値 q_c と貫入長の関係を示す。同養生期間でも貫入抵抗値の発現にばらつきがみられるが、貫入抵抗値の発現傾向は養生期間によらず類似していることが分かる。また、本試験で計測可能な範囲では明確な最大貫入抵抗値の発現はみられない。そこで、Fig. 8 に貫入長が 30mm 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。Fig. 8 より、14 日養生の結果から q_{c30} の増加傾向がみられ、28, 58, 126 日養生の結果についても、基準とした 1 日養生と同等以上の貫入抵抗値の発現が認められる。

三軸試験機とは異なる圧密条件であるが、同密度の豊浦砂ではいずれも 14 日の圧密・養生期間で特性変化の傾向がみられた。この結果より、原地盤に近い圧密条件でも、三軸試験と同様に力学特性の変化（年代効果）がみられることが示された。

(5) 圧密効果発生メカニズム検証

三軸試験機で長期圧密された豊浦砂は、初期せん断剛性に変化はみられないが、弾性ひずみ域が伸びるような挙動を示し、液状化強度特性も変化する可能性が示された。このような変化に着目すると、過圧密履歴を受けた砂の力学特性の変化と類似した点がみられた。過圧密履歴を受けた砂は、土粒子構造が安定化することで液状化に対する抵抗が増加することが明らかとなっている。

そこで本研究では、さらに圧密効果の発生メカニズムを検証するため、同条件の豊浦砂に応力履歴として過圧密履歴を与えた場合の力学特性の変化を調べ、長期圧密を与えた場合の特性変化との比較を行った。なお、初期圧密を与えるまでの全過程は、長期圧密後飽和非排水繰返し三軸試験、および LSS 試験を実施した供試体と同条件で行っている。

Fig. 9, 10 に、過圧密履歴を与えた砂に実施した飽和非排水繰返し三軸試験、LSS 試験の結果をそれぞれ示す。また、長期圧密の結果もあわせて示している。

Fig. 9 より、過圧密比 OCR の大きさに対応して液状化強度曲線が右上方に位置していることが分かる。一方で、長期圧密によって発現した N_c の増加量は過圧密履歴を受けた場合の液状化強度特性の変化量と比べると非常に小さいことが確認できる。

次に Fig. 10 をみると、過圧密履歴を受けた豊浦砂の結果は、いずれも通常圧密 (OCR=1) と比較して弾性ひずみ域で記録した G の値には顕著な変化はみられないものの、弾性ひずみ域が増大する傾向を示すという特徴がみられた。BE 試験より算出する G_0 についても、OCR の大きさによらず顕著な変化はみられず、長期圧密で得られた結果と同じ傾向を示した。しかしながら、弾性ひずみ域の伸びは長期圧密の結果と比較してわずかである。また、 $\varepsilon_s=0.006 \sim 0.1\%$ のひずみ域では、過圧密履歴を受けた供試体において高いせん断剛性を発揮する傾向が示された。これらの傾向は長期圧密を与えた豊浦砂でみられた変化とは異なるものである。したがって、変形特性の変化について長期圧密効果と過圧密効果で、完全に一致する対応関係は確認できなかった。過圧密履歴を与えた場合に長期圧密の結果を大きく上回る液状化強度特性の変化がみられたのは、小ひずみ域 (0.006 ~

0.1%)において高いせん断剛性を発揮したことが要因と考えられる。

本検証結果より、長期圧密によって豊浦砂の微小変形特性が変化したことを示す結果が得られた。これより、長期圧密による豊浦砂の液状化強度特性の変化は、微小変形特性の変化が影響を与えていると考えられる。

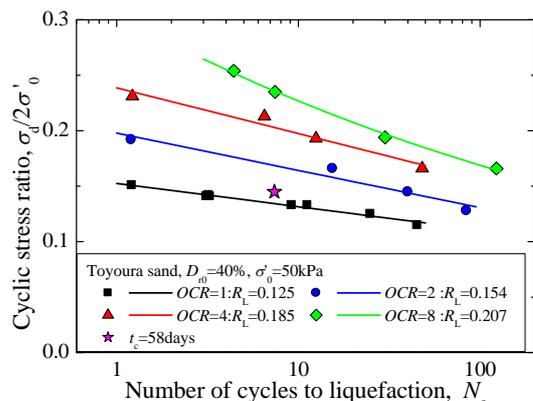


Fig. 9: 過圧密履歴の影響（液状化強度）

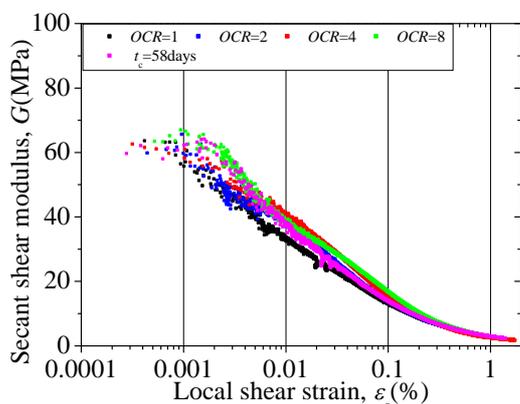


Fig. 10: 過圧密履歴の影響（変形特性）

(6) まとめ

本研究では、長期圧密が砂の力学特性に与える影響について、主に豊浦砂で構成された砂質土試料を長期間圧密させ、各種室内要素試験を用いた実験結果より検討を行った。以下に、本研究で得られた主な知見をまとめる。

1. 豊浦砂の長期圧密による繰返し載荷回数 N_c は、14 日の圧密期間を経ることで、通常圧密より得られた液状化強度曲線から推定する N_c よりも増加した。また、58 日の圧密期間を与えた場合はさらなる増加が確認された。
2. 豊浦砂に MC カオリンを 5% 混ぜた試料（MC カオリン含有豊浦砂）の N_c は、1 日の圧密期間を経ることで、通常圧密より得られた液状化強度曲線から推定する N_c よりも増加した。また、最長で 14 日の圧密期間を与えた場合はさらなる増加が確認された。これより、細粒分である MC

カオリンを 5% 程度混ぜることで、豊浦砂単体よりも早期に年代効果が現れることが確認された。これは、細粒分混合による続成作用の促進化などが要因として挙げられる。

3. BE 試験より得られた初期せん断剛性 G_0 は、最長で 58 日行った圧密期間内で、顕著な変化は見られなかった。
4. 豊浦砂の割線せん断剛性 G と局所せん断ひずみ s の関係は、通常圧密から 7 日圧密にかけて変化は観測できなかった。一方で、14, 28, 58 日の圧密を与えた場合、通常圧密で得られた結果と比較して、 $\epsilon_s=0.001\%$ 以下とされる真の弾性ひずみ域が大きくなり、剛性が低下を始めるひずみレベルが大きくなった。また、28, 58 日と圧密期間が長くなるほど、弾性ひずみ域が大きくなる傾向が確認された。
5. 水中養生させた豊浦砂の貫入長 L_c と貫入抵抗値 q_c の関係は、基準とした 1 日養生の結果と比較して、14 日の養生を与えた結果から同一貫入長 (30mm) における q_c の増加傾向が確認できた。また、28, 58, 126 日と養生期間が増加するとともに、 q_c の増加も確認された。
6. 長期圧密と過圧密履歴を与えた場合で、 G_0 は変化せず、弾性ひずみ域が大きくなるという類似点が確認された。しかしながら、過圧密履歴を与えた場合は、小ひずみ域 (0.006 ~ 0.1%) において長期圧密供試体より高いせん断剛性を発揮した。また、長期圧密による N_c の増加は、過圧密履歴を与えた場合と比較してわずかな変化量であった。

上記の知見より、長期圧密による豊浦砂の液状化強度特性の変化は、長期圧密によって微小変形特性が変化し、繰返し載荷に対してより大きなひずみ領域まで高い抵抗性を発揮したことが主な要因と考えられる。

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 1 件)

豊田浩史, 高田晋, 原 忠, 竹澤請一郎. 室内要素試験による既存の液状化被害調査結果の解釈, 日本地震工学会論文集, Vol. 15, No. 7, pp. 114-120, 2015.

[学会発表](計 7 件)

豊田浩史, 高田晋, 原 忠, 竹澤請一郎. 液状化被害調査と室内要素試験から考える液状化特性, 第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 2337-2346, 千葉, 2014. 白井翔也, 豊田浩史, 高田晋. 様々な細粒分を含む砂の液状化特性, 第 32 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, No. 3207, pp. 208-211, 2014.

白井翔也, 豊田浩史, 高田晋. 砂質土の液状化強度に及ぼす圧密時間による影響, 第 50 回地盤工学研究発表会, pp. 487-488, 札幌, 2015.

田中将平, 白井翔也, 豊田浩史, 高田晋. 細粒分を含む砂の液状化強度に及ぼす圧密時間の影響, 第 33 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, No. 3209, pp. 194-197, 2015.

田中将平, 白井翔也, 豊田浩史, 高田晋. 三軸試験機で長期圧密された砂の液状化強度, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp. 465-466, 岡山, 2016.

西村裕平, 豊田浩史, 高田晋, 田中将平. 細粒分を含む砂における圧密時間が液状化強度に与える影響, 第 34 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, No. 3315, pp. 206-209, 2016.

西村裕平, 豊田浩史, 高田晋. 長期圧密による砂の力学特性変化, 第 52 回地盤工学研究発表会, 名古屋, 2017.

6 . 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

杉本 光隆 (SUGIMOTO MITSUTAKA)
長岡技術科学大学・工学研究科・教授
研究者番号 : 50196755

(3)研究協力者

原 忠 (HARA TADASHI)