

長期圧密された砂の力学特性に与える細粒分及び密度の影響

地盤工学研究室 西村裕平
指導教員 豊田浩史

1. はじめに

2011年に発生し甚大な被害を及ぼした東北地方太平洋沖地震によって液状化現象は再注目された。この液状化現象は、主に埋立地盤で発生し、施工から数百年経過した地盤では被害が軽微だった。同じ埋立地盤でも施工年代によって液状化被害に差が見られ、これは年代効果によって液状化現象が起こり難くなることを意味する。年代効果は、地盤が堆積年代を経ることで液状化強度が上がる現象であるが、数百年経過した程度で砂地盤が固着することは考えにくい。また、被害報告より細粒分を含有すると液状化強度の年代効果は上がると言われている。土の液状化強度に及ぼす要因として細粒分含有率、密度、飽和度、拘束圧等挙げられているが、現状として年代効果のメカニズムは不明確である。

そこで本研究では、相対密度を変化 ($D_{r0}=40, 60\%$)させた豊浦砂及び、豊浦砂にカオリンを質量比で5%添加した(以下、カオリン含有豊浦砂と称す)供試体を長期圧密し、力学試験(液状化試験, BE(ベンダーエレメント)試験, 局所微小ひずみ試験, 室内静的貫入試験)を行なう。上記の試験結果より、力学特性に与える細粒分及び密度の影響を解明することを目的とする。

2. 試験条件

本研究は、標準砂である豊浦砂及び、カオリン含有豊浦砂を試料として使用した。その試料の諸元を表-1に示す。供試体は漏斗堆積法と振動締めを用い、初期相対密度 $D_{r0}=40, 60\%$ となるよう作製した。また、三軸圧縮試験機を用いる試験は、供試体作製から試験最後まで三軸圧縮試験機上で行なっている。

表-1 各試料の物理特性

	土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{g}/\text{cm}^3)$	最小乾燥度 $\rho_{dmin}(\text{g}/\text{cm}^3)$
豊浦砂	2.650	1.645	1.335
カオリン含有豊浦砂	2.655	1.712	1.276

3. 試験方法

3.1 液状化試験(飽和非排水繰返し三軸試験)

本研究では、三軸圧縮試験機に供試体を設置した状態で通常圧密に加え、長期圧密を行なうため、その目的に沿った試験方法を用いている。長期圧密をさせる際、コンプレッサーが停止した場合でも試験を続けられるよう、背圧を载荷せず試験を行なっている。間隙圧係数 $B>0.95$ を満たすと飽和していると判断し、平均有効主応力 $p'=50\text{kPa}$ により等方圧密後、軸ひずみ速度 $0.1\text{mm}/\text{min}$ のひずみ制御で繰返し载荷を行なった。この繰返し载荷過程は、両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ に達した時を液状化したものとし、試験を終了している。繰返し载荷回数の増減より、液状化強度特性の変化について議論する。本研究の圧密期間は、表-2に示す通りである。長期圧密は液状化試験後に、 B 値の低下がないかの確認も行っている。本試験方法は軸ひずみ速度一定で、载荷周波数一定の試験条件¹⁾を満たすことができないが、過去の研究成果²⁾から、試験結果に与える影響はないといえる。

表-2 各試料の圧密期間

	豊浦砂		カオリン含有豊浦砂
相対密度	40%	60%	40%
最長圧密期間	126日のみ	28日	30日のみ

3.2 BE(ベンダーエレメント)試験

キャップとペDESTAL中央に送受信ベンダーエレメントを設置し、圧密期間に応じて適宜、せん断波を発信して供試体を伝播する波を測定し、せん断波速度 V_s を求めた。また、せん断波速度 V_s から初期せん断弾性係数 G_0 を(1)式より算出し、 G_0 よりせん断波伝播特性の変化について議論する。

$$V_s=L/\Delta t, G_0=\rho_t V_s^2 \quad (1)$$

ここで、 V_s :せん断波速度(m/s), L :BE間距離(m), Δt :せん断波到達時間(s), G_0 :初期せん断弾性係数(MPa), ρ_t :湿潤密度(g/cm^3)である。 L はキャップとペDESTALのBE先端間距離をとる tip-to-tip法を、 Δt は送受信波形

の立ち上がり点を結ぶ start-to-start 法を用い、波形記録より同定した。

3.3 局所微小ひずみ試験

三軸圧縮試験機により長期圧密された豊浦砂及びカオリン含有豊浦砂の供試体の変形特性を調べるため、図-1に示すような非接触型の局所変位計を供試体に直接取り付け付けた。この局所変位計により、軸及び側方向の変形量を測定し、局所せん断ひずみ ε_s を算出した。なお、供試体作製から圧密までの過程は2.1と同様である。本研究の圧密期間は、表-3に示す通りである。設定した圧密期間終了後、排水条件で単調載荷試験(軸ひずみ速度 0.025mm/min)を行ない、局所せん断ひずみ $\varepsilon_s=1\%$ 程度までの割線せん断弾性係数 G (MPa)を(2)式より算出した。この G より微小変形特性の変化について議論する。

$$\varepsilon_s=2/3(\varepsilon_a-\varepsilon_r), G=q/3\varepsilon_s \quad (2)$$

ここで、 ε_a : 軸ひずみ、 ε_r : 側方向ひずみ、 q : 軸差応力(MPa)である。

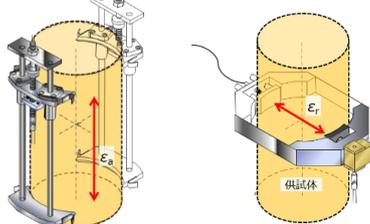


図-1 局所変位計模式図

表-3 各試料の圧密期間

	豊浦砂	カオリン含有豊浦砂
相対密度	40%	
最長圧密期間	126 日のみ	28 日

3.4 室内静的貫入試験

図-2に室内静的貫入試験装置の模式図を示す。この試験装置は載荷装置の取り外しが可能であり、また供試体設置後の乱れを起こさずに試験が実施できる。貫入棒は細く容易に貫入できるため、先端は平滑とした。この貫入棒に不均一な力がかかる可能性をなくすために、貫入棒と貫入ロッドは 10mm と同径に設定した。

供試体は、高さ $H=123.5\text{mm}$ 、直径 $D=104.0\text{mm}$ のモールドを用い、水槽内で漏斗堆積法により初期相対密度 $D_{r0}=60\%$ となるよう作製した。な

お、モールド底部にはポーラスストーンを設け、供試体下部から通水可能としている。供試体作製後は表面を成型し、その上にアクリル製のスパーサーを挟み、上載圧 10kPa として錘を載荷する。上載圧 10kPa を供試体に与えた状態で貫入するため、錘の中央に 15mm の孔を設けている。その後、真空状態で供試体を通水飽和させ、決めた日数の水中養生を行う。試験は、貫入棒を貫入速度 0.25mm/min の一定で行ない、貫入力を測定する。なお、供試体上部からの貫入量が約 40mm となったところで試験を終了する。貫入力から貫入抵抗値を(3)式より算出した。

$$q_c=Qc/A_c \times 10^{-6} \quad (3)$$

ここで、 q_c : 貫入抵抗値(MPa)、 Qc : 貫入力(N)、 A_c : 貫入棒断面積(m^2)である。

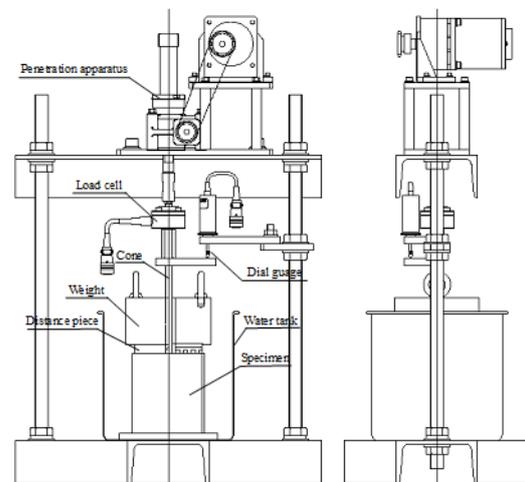


図-2 室内静的貫入試験模式図

4. 試験結果

4.1 液状化試験(飽和非排水繰返し三軸試験)

図-3に、豊浦砂($D_{r0}=40, 60\%$)とカオリン含有豊浦砂に対して行なった液状化試験より得られた繰返し応力振幅比と繰返し載荷回数 N_c の関係を示す。豊浦砂($D_{r0}=40\%$)は 14 日圧密以上から N_c の増加を示した。カオリン含有豊浦砂は 1 日圧密から、豊浦砂($D_{r0}=60\%$)は 3 日圧密から N_c の増加が見られ、いずれも豊浦砂($D_{r0}=40\%$)より早期に圧密効果が見られた。

図-4に、豊浦砂($D_{r0}=40, 60\%$)とカオリン含有豊浦砂の長期圧密の液状化強度増加率と圧密期間の関係を示す。図より、カオリン含有豊浦砂の方が豊浦砂($D_{r0}=40\%$)より早期に液状化強度が増加し、上がりやすい傾向を示した。その要因として、細粒分の混合により続成作用

が促進されたことなどが考えられる。また、豊浦砂 ($D_{r0}=60\%$) も豊浦砂 ($D_{r0}=40\%$) より早期に液状化強度が増加した。

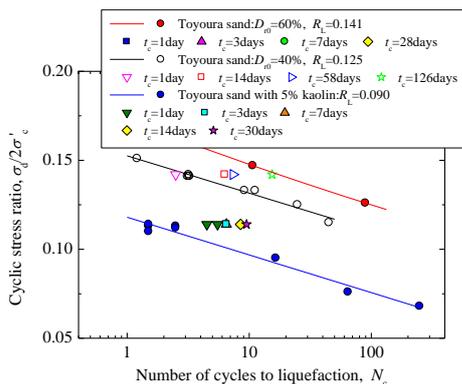


図-3 繰返し応力振幅比-繰返し载荷回数関係

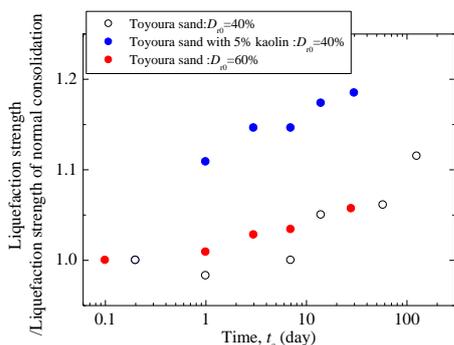


図-4 長期圧密の液状化強度増加率-圧密期間関係

4.2 BE(ベンダーエレメント)試験

図-5 に、豊浦砂 ($D_{r0}=40, 60\%$) とカオリン含有豊浦砂に対し、圧密期間中に行った BE 試験より求めた、初期せん断弾性係数 G_0 と圧密期間 t_c の関係を示す。いずれの試料も、今回の圧密期間では G_0 に顕著な変化は見られなかった。

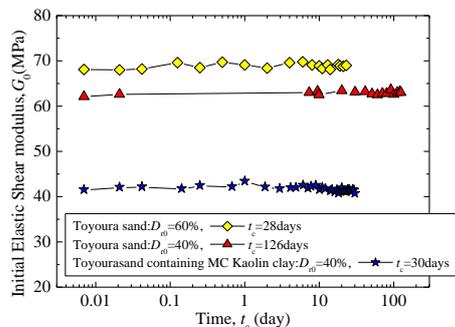


図-5 初期せん断弾性係数-圧密期間関係

4.3 局所微小ひずみ試験

図-6 に、豊浦砂 ($D_{r0}=40\%$) の圧密期間の違いによる、割線せん断弾性係数 G と局所せん断ひずみ ϵ_s の関係を示す。 $\epsilon_s=0.001\%$ 以下の G を

見ると、圧密期間に違いがあっても同程度の値となっている。また、曲線形状に着目すると、圧密期間が 14 日以上になると弾性ひずみ域が伸びるような挙動を示した。割線せん断弾性係数が低下し始めるひずみレベルは、通常圧密から 7 日圧密では $\epsilon_s=0.001\%$ 辺りだが、14, 58, 126 日圧密では $\epsilon_s=0.002\%$ 程度であった。

図-7 に、カオリン含有豊浦砂の圧密期間の違いによる、割線せん断弾性係数 G と局所せん断ひずみ ϵ_s の関係を示す。 $\epsilon_s=0.001\%$ 以下の G を見ると、カオリン含有豊浦砂 ($D_{r0}=40\%$) も圧密期間に違いがあっても、同程度の値となっている。曲線形状について、カオリン含有豊浦砂は 7 日圧密から変化が見られ、豊浦砂よりも早期に弾性ひずみ域が伸びる挙動を示した。

いずれの試料も、液状化強度の増加と弾性ひずみ域の伸びが見られた時期より、微小変形特性の変化が液状化強度特性に影響した可能性がある。

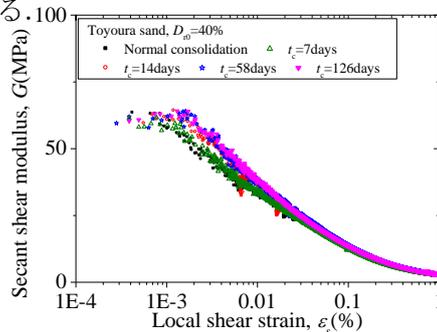


図-6 割線せん断弾性係数-局所せん断ひずみ関係 (豊浦砂 $D_{r0}=40\%$)

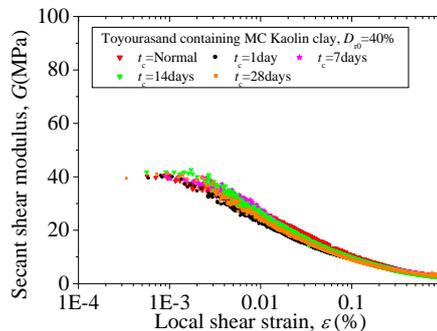


図-7 割線せん断弾性係数-局所せん断ひずみ関係 (カオリン含有豊浦砂)

4.4 室内静的貫入試験

図-8 に、豊浦砂 ($D_{r0}=60\%$) の室内静的貫入試験によって得られた貫入抵抗 q_c と貫入長 L_c の関係を示す。同養生期間でも貫入抵抗値に多少ばらつきが見られる。しかし、養生期間の違い

によらず本研究で計測可能な範囲ではピークを確認できず、類似した貫入抵抗推移を示しており、養生期間の違いによる貫入抵抗値の変化を判断できない。そのため、図-9に豊浦砂 ($D_{r0}=60\%$)と既往研究の豊浦砂 ($D_{r0}=40\%$)の貫入量が 30mm 時の貫入抵抗 q_{c30} と圧密時間 t_c の関係を示し、任意の貫入長における貫入抵抗値と養生期間に関連性がみられるか、また密度の違いによる影響があるか検討する。1日養生の貫入抵抗値と各長期養生期間の貫入抵抗値を検定し評価を行なった結果、 $D_{r0}=60\%$ は静的貫入特性を変化させる効果は見られず、液状化強度特性変化との関連性は確認できなかった。一方、既往研究の $D_{r0}=40\%$ は14日養生から増加傾向が見られている。これは液状化強度特性変化が見られた期間が一致しており、 $D_{r0}=60\%$ とは異なる結果である。また、液状化強度は $D_{r0}=60\%$ の方が大きかったように、貫入抵抗値も $D_{r0}=60\%$ の方が高い結果となり、密度の違いによる影響を確認できた。

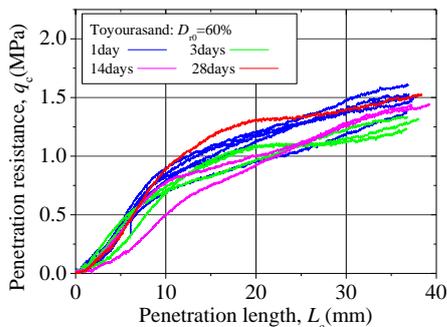


図-8 各養生期間におけるコーン貫入長 L_c -コーン貫入抵抗値 q_c 関係 ($D_{r0}=60\%$)

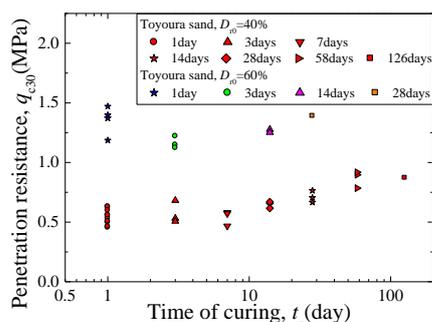


図-9 養生時間 t_c -30mm 貫入抵抗 q_{c30} 関係 (豊浦砂 $D_{r0}=40,60\%$)

5. まとめ

本研究より得られた知見は以下の通りである。

【細粒分の影響】

- ・カオリン含有豊浦砂の方が早期に、液状化強度の増加、弾性ひずみ域に伸びが見られた。これは、細粒分の混合によって続成作用が促進されたことが要因として考えられる。
- ・液状化強度増加が見られた時期から、微小変形特性の変化が液状化強度特性に影響した可能性がある。
- ・BE試験から得られた初期せん断弾性係数は、圧密期間の違いで、顕著な変化は見られなかった。

【密度の影響】

- ・密な供試体では、早期に液状化強度の増加が見られた。
- ・BE試験から得られた初期せん断弾性係数は、圧密期間の違いで、顕著な変化は見られなかった。
- ・密な供試体では、今回の養生期間において静的貫入特性に変化は見られなかった。

6. 結論

本研究は、力学特性に与える細粒分及び密度の影響を解明することを目的に試験を行ない、以下の結論が得られた。

- ・細粒分及び密度によって、早期に液状化強度が増加し、弾性ひずみ域は伸びる。
- ・BE試験から得られた初期せん断弾性係数 G_0 は、今回行った長期圧密期間内において、顕著な変化は確認できなかった。

【参考文献】

- 1) 社団法人地盤工学会編：液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集，p.25，1999。
- 2) 久野達彦，中瀬明男，中野堂裕文：繰返し載荷時の間隙水圧挙動と粒度の関係，第33回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.136-137，1978。
- 3) 白井翔也：砂の液状化強度に与える長期圧密の影響，平成27年度長岡技術科学大学修士論文，2016。
- 4) 田中将平：長期圧密が砂の力学特性に与える影響，平成28年度長岡技術科学大学修士論文，2017。