

# 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

長岡技術科学大学大学院  
長岡技術科学大学大学院  
長岡技術科学大学大学院  
長岡技術科学大学大学院

○早川飛翼  
門脇悠太  
正会員 豊田浩史  
高田晋

## 1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震により、主に埋立地において液状化や再液状化による被害が発生し、液状化が再び注目されている。液状化は主に埋立地盤で発生し、数百年経過した古い埋立地では、被害が軽微であることが確認されている。このことから、堆積年代を経ることで液状化強度が増加する年代効果によって液状化の発生は低下するといわれている。しかしながら、数百年経過した程度で砂質土の固結が進んでいくとは考えにくい。よって、液状化危険度評価には、地盤の年代効果が液状化強度に与える影響を調べることは重要である。また、年代効果は細粒分が多い方が上がりやすいといわれているため、本研究では、砂単体と細粒分を混ぜた試料に対して、圧密時間を変化させて液状化試験（飽和非排水繰返し三軸試験）を実施し、圧密時間が液状化強度に与える影響について検討する。また、圧密時にベンダーエレメント（BE）試験を行い、せん断波速度  $V_s$ 、せん断剛性  $G$  を求め、液状化強度と  $G$  の圧密時間による影響についても比較し、砂質土の年代効果を検討する。さらに、局所微小ひずみ試験を行い圧密時間と微小変形特性の関連を検討する。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験装置

本研究で用いた三軸試験装置は、キャップとロードセルの軸が切断可能な構造となっているため、試験の初期に供試体に等方応力をかけやすくなっている。また、セル内を脱気水で満たす水没型を採用し、供試体の飽和度の低下を防いだ。また、供試体の排水量は、フロート式体積計を用いて計測を行った。

### 2.2 供試体作製

本研究で用いた供試体試料は、豊浦砂および豊浦砂に細粒分（カオリン）を質量比で 5%加えた細粒分含

有試料（以下、カオリン含有豊浦砂と称す）を用いた。細粒分（カオリン）を加えた場合には、質量測定時などにおいて細粒分が舞いやすいため、注意を払って行なった。また、供試体作製は漏斗堆積法と負圧法により行なった。漏斗を用いる際は、モールド内で一定の速さで円を描くように漏斗を上げていき試料を堆積させた。この漏斗は堆積した試料に対して一定の高さを保ち、試料を落下させた。また、初期相対密度  $D_{r0}=40\%$  になるように供試体を作製した。各試料の諸元を表-1に示す。

表-1 試験条件

条件値	豊浦砂	カオリン含有豊浦砂
初期間隙比 $e_0$	0.835	0.869
土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.650	2.655
設定繰返し片振幅	15	12
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c(\text{kPa})$	0.15	0.12
有効圧密応力 $\sigma'_c(\text{kPa})$	50	

### 2.3 液状化試験（飽和非排水繰返し三軸試験）

本研究では、通常圧密に加え、長期圧密を行うため、その目的に沿う試験方法を用いた。通常、背圧を載荷することでセル内に大きな圧力がかかるが、長期圧密をさせる際、停電等によりコンプレッサーが停止すると、所定の圧力を保つことができない。そのため本研究では、背圧を載荷せずに試験を行なっている。そこで、供試体の飽和度を上げる手段として、供試体内外にそれぞれ-100kPa、-85kPaの負圧をかける二重負圧法を用いて、飽和化の促進を図っている。間隙圧係数  $B>0.95$  を満たすと飽和していると判断し、自動制御により平均有効主応力  $p'=50\text{kPa}$  で等方圧密を行う圧密過程に移行する。

圧密開始から排水が終了するまでの圧密を通常圧密

とし、通常圧密に加えて豊浦砂では1日、7日、14日、58日、126日圧密の6通り、カオリン含有豊浦砂では通常圧密に加え1日、3日、7日、14日、30日、126日圧密の7通りの試験を行った。なお、通常圧密は複数回実施し、平均した液状化強度比  $R_L$  を算出した。

圧密終了後、軸ひずみ速度  $0.1\text{mm/min}$  のひずみ制御と繰返し片振幅  $\sigma_d$  を設定し、自動制御で繰返し载荷を行う。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、試験を終了した。本試験方法は軸ひずみ速度一定であるため、载荷周波数一定の試験条件  $\rho$  を満たしていない。しかし、過去の研究成果  $\rho$  から、試験結果に与える影響は小さいといえる。

## 2.4 BE (ベンダーエレメント) 試験

本研究では、キャップおよびペDESTAL中央に送受信信用 BE を設置した。長期圧密時に圧密開始から10分後(10分圧密)、60分後(60分圧密)、180分後(180分圧密)、360分後(360分圧密)、720分後(720分圧密)、1440分後(1440分圧密)、その後は毎日せん断波速度  $V_s$  を求めた。また、せん断波速度  $V_s$  からせん断剛性  $G$  を求めた。せん断波の伝播速度  $V_s$  とせん断剛性  $G$  は次式より算出した。

$$V_s = L / \Delta t$$

$$G = \rho_t V_s^2$$

ここに、

$V_s$ : せん断波速度(m/s),  $L$ : BE 間距離(mm),  $\Delta t$ : せん断波到達時間(msec),  $G$ : せん断剛性(kPa),  $\rho_t$ : 湿潤密度( $\text{g/cm}^3$ )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、 $\Delta t$  は送受信波形の立ち上がり点を結ぶ start-to-start 法を用い、同定した。表-2 に BE 試験条件を示す。

表-2 BE 試験条件

波形	sin 波
波数	1 波
発信電圧(V)	$\pm 10$
測定周波数(kHz)	15

## 2.5 局所微小ひずみ (LSS : Local Small Strain) 試験

三軸試験により長期圧密された豊浦砂の供試体の変形特性を調べるため、非接触型の局所変位計を供試

体に直接取り付けた。この局所変位計により、軸方向及び側方向の変形量を測定し、局所せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  を算出した。なお、供試体作製から圧密までの過程及び圧密時間は 2.3 と同様である。設定した圧密期間終了後、排水条件で単調载荷試験(軸ひずみ速度  $0.025\text{mm/min}$ )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剛性  $G(\text{MPa})$  を(1)式より算出した。

$$\varepsilon_s = 2/3(\varepsilon_a - \varepsilon_r), G = q/3\varepsilon_s \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_a$ : 軸ひずみ,  $\varepsilon_r$ : 側方向ひずみ,  $q$ : 軸差応力(MPa)である。

## 3. 試験結果および考察

本試験はサイクリックモビリティの発生を確認後の試験を終了した。液状化試験(飽和非排水繰返し三軸試験)により得られた各試料の繰返し载荷回数  $N_c$  と液状化強度  $R_L$  と液状化強度増加率  $R_{LC}$  の試験結果を表-3 に示す。液状化強度増加率を、式(2)に定義し、液状化強度の増加量を評価する。なお、長期圧密試料は繰返し応力振幅比を1ケースしか実施していないため、液状化曲線は、通常圧密試料と平行になると仮定して  $R_L$  を求めた。式からわかるように、通常圧密の液状化強度増加率は1.0である。

$$\text{液状化強度増加率 } R_{LC} = \frac{\text{長期圧密の } R_L}{\text{通常圧密の } R_L} \quad (2)$$

図-1 に繰返し载荷回数  $N_c$  と繰返し応力振幅比  $\sigma_d/2\sigma'_c$  の関係を示す。図よりカオリン含有豊浦砂、豊浦砂の両ケースで圧密時間を長くした際の  $N_c$  の増大に顕著な傾向が見られた。また、通常圧密時の液状化強度比  $R_L$  について、繰返し载荷回数  $N_c=20$  回時の繰返し応力振幅比で定義すると、通常圧密時の液状化強度比  $R_L$  は、豊浦砂 0.125, カオリン含有豊浦砂で 0.090 となった。

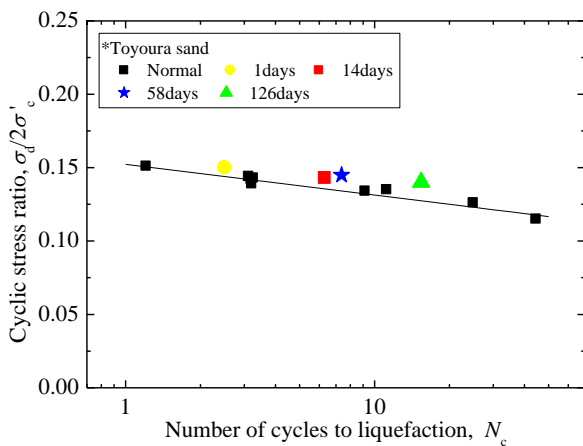
図-2 に液状化強度増加率  $R_{LC}$  と圧密時間の関係を示す。カオリン含有豊浦砂の  $R_{LC}$  は、1日圧密後より、圧密時間を対数で取ると直線的に増加している。豊浦砂は7日圧密までは、 $R_{LC}$  は1を示し、それ以降は、カオリン含有豊浦砂とほぼ同じ傾きで増加している。カオリン含有豊浦砂は豊浦砂よりも液状化強度増加率が大きい、これは早期(1日以内)に増加が大きかったためである。細粒分の混合によって続成作用が促進されたことにより、短期間の圧密で液状化強度が増

加したと考えられる。

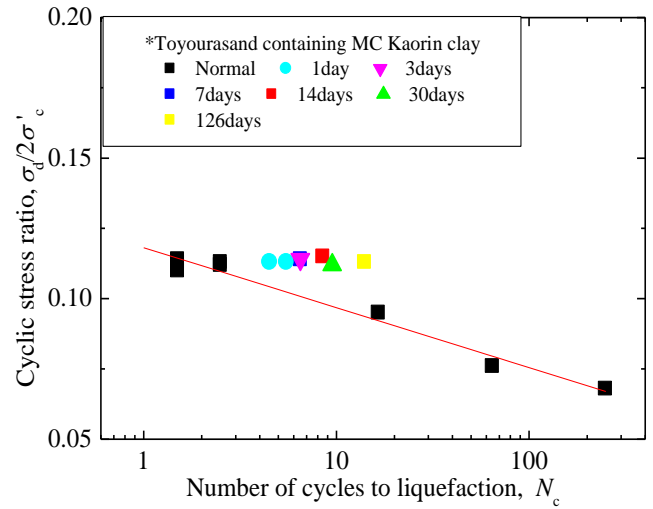
図-3 に、豊浦砂とカオリン含有豊浦砂において、圧密時間によるせん断剛性の推移を示す。このせん断剛性は、BE 試験によって算出されたせん断波速度  $V_s$  を 2.4 で示した (1) 式を用いることで算出した。図-3 より、豊浦砂単体のせん断剛性  $G$  は、カオリン含有豊浦砂のせん断剛性  $G$  を大きく上回っていることが分かる。また、いずれの試料において、せん断剛性  $G$  の値は少し変動するものの、圧密時間効果の発現については確認できなかった。

表-3 各圧密時間の試験結果

圧密日数	豊浦砂		カオリン含有豊浦砂	
	$R_L$	$R_{LC}$	$R_L$	$R_{LC}$
通常	0.125	1	0.090	1
1day	0.123	0.983	0.100	1.109
3days			0.104	1.146
7days	0.125	1	0.104	1.146
14days	0.132	1.050	0.106	1.173
30days			0.107	1.185
58days	0.133	1.061		
126days	0.140	1.115	0.113	1.224



(a) 豊浦砂



(b) カオリン含有豊浦砂

図-1  $\sigma_d/2\sigma'_c - N_c$  関係

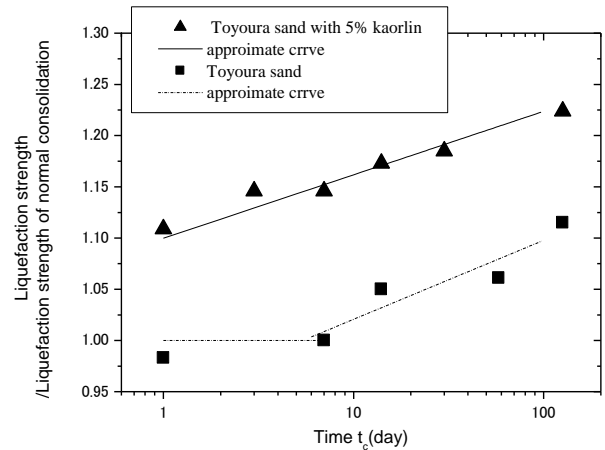


図-2 長期圧密による予想液状化強度増加率

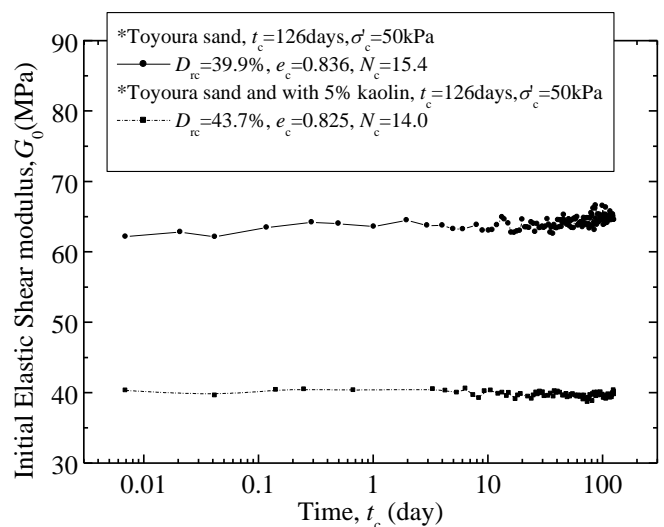
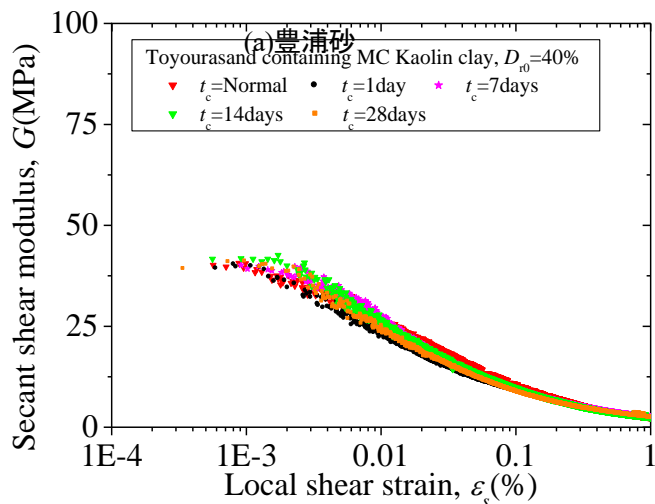
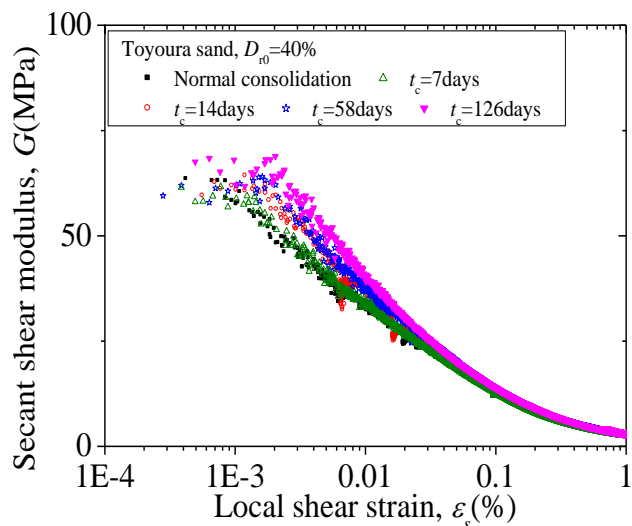


図-3  $G_0 - t_c$  関係

図-4に、局所微小ひずみ (LSS : Local Small Strain) 測定試験により得られた豊浦砂とカオリン含有豊浦砂の  $G$ - $\varepsilon_s$  の関係を示す。豊浦砂の LSS 試験より得られたせん断剛性  $G$  と局所せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  の関係は、通常圧密の結果と比較して 3~7 日圧密にかけて同等の関係を示した。一方で、14~58 日圧密を与えた結果では、弾性ひずみ域から  $G$  が低下するひずみレベルに変化がみられ、圧密期間を経るほど、剛性が低下を始めるひずみレベルが大きくなった。今回行った 126 日圧密を与えた結果では、剛性が低下を始めるひずみレベルが更に大きくなった。このことより、長期圧密によって  $\varepsilon_s=0.001\%$  以下とされる豊浦砂の真の弾性ひずみ域が大きくなったと考えられる。弾性ひずみ域で得られる初期せん断剛性は、ほぼ一定値を示した BE 試験の結果と違い、圧密期間とともに、若干大きくなっているようにも見える。

カオリン含有豊浦砂の LSS 試験より得られたせん断剛性  $G$  と局所せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  の関係は、7 日圧密から弾性ひずみ域の  $G$  が低下するひずみレベルに変化がみられ、14, 28 日圧密ではそれ以上または同等の剛性低下を始めるひずみレベルとなった。この結果より、カオリン含有豊浦砂の方が早期に弾性ひずみ域に伸びが示された。また、長期圧密によって両試料の弾性ひずみ域が変化したことにより、繰返し載荷時により大きなひずみレベルまで剛性を保つことが、液状化に対する抵抗性を増加させた要因の 1 つであることが考えられる。また、BE 試験より算出する初期せん断剛性  $G_0$  との関係は、最大でも 6% 程度のずれであり、両試験で得られる初期せん断剛性は概ねよい関係性を示した。



(b)カオリン含有豊浦砂

図-4  $G$ - $\varepsilon_s$  関係

#### 4. まとめ

本研究より得られた知見は以下の通りである。

- ・カオリン含有豊浦砂、豊浦砂の両ケースで圧密時間を長くした際、 $N_c$ が増大する傾向が見られた。
- ・カオリン含有豊浦砂と豊浦砂の液状化強度増加率は圧密時間を対数でとると、ほぼ同じ傾きとなった。ただし、カオリン含有豊浦砂は、早期に増加が見られるため、液状化強度増加率は大きくなった。
- ・豊浦砂、カオリン含有豊浦砂の初期せん断剛性  $G_0$  は、圧密期間中ではいずれも圧密開始から圧密終了時まで  $G_0$  の顕著な増減は確認されなかった。
- ・カオリン含有豊浦砂は豊浦砂よりも早期に弾性ひずみ域に伸びが示された。
- ・長期圧密によって両試料の弾性ひずみ域が大きくなった。このため、繰返し載荷時に塑性ひずみが現れにくくなり、液状化に対する抵抗が増加したと考えられる。

#### 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.