

ガラスビーズのせん断弾性係数および液状化抵抗に与える時間依存性

地盤工学研究室
指導教員

早川飛翼
豊田浩史

1. はじめに

近年、循環型社会の構築に対する意識が高まっており、産業廃棄物・特別管理廃棄物のリサイクルへの取り組みが活発となっている。特に、廃ガラスに関しては、建築材料の他¹⁾、粉碎・加工することで再生砂として利用した砂浜が話題となり、土木分野でも活用が考えられている²⁾。しかしながら、いまだ全国で約60万トン/年にも及ぶ使用済みガラスびんが再利用されず、埋め立てなど廃棄処理をされているのが現状である。このような状況の中、廃ガラスを土木分野で広く利用するために、粉碎・加工ガラスの地盤工学的性質を把握することが重要である。そこで、本研究では、ガラスビーズのせん断弾性係数および液状化抵抗の力学的特性に着目し、室内要素試験である飽和非排水繰返し三軸試験、局所微小ひずみ測定試験、ベンダーエレメント試験及び静的貫入試験を実施した。これらの結果を既往研究³⁾で行われた豊浦砂の結果と比較して、ガラスビーズの時間依存性を検証した。

2. 試験方法

本研究は、ガラスビーズと豊浦砂を試料として用いて、漏斗堆積法及び負圧法により、供試体を作製した。各試料の物理的特性および粒径加積曲線を表-1、図-1に示す。なお、本研究では板ガラス、瓶ガラス等に広く用いられているソーダ石灰ガラスを球形に加工したものをガラスビーズとして使用した。

表-1 各試料の物理的特性

	ガラスビーズ	豊浦標準砂
初期相対密度 $D_{r0}(\%)$	40	40
初期間隙比 e_0	0.670	0.761
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.487	2.650
最大乾燥密度 $\rho_{\max}(\text{g/cm}^3)$	1.582	1.645
最小乾燥密度 $\rho_{\min}(\text{g/cm}^3)$	1.452	1.335

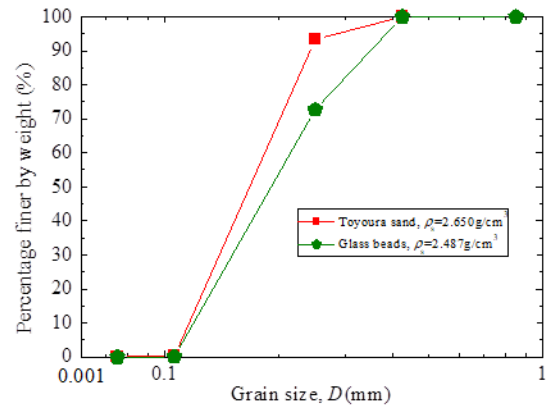


図-1 粒径加積曲線

2.1 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、実地盤が長期間、圧密状態にさらされることを視野に入れた検討も行った。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ため、本研究では、背圧を载荷せずに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、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て、圧密終了後、軸ひずみ速度 0.1 mm/min のひずみ制御と繰返し片振幅 σ_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、载荷周波数一定の試験条件⁴⁾を満たすことができない。しかし、過去の研究成果⁵⁾から、試験結果に与える影響はないといえる。

2.2 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中央に送受信用 BE を設置した。圧密期間に応じて適宜、せん断波を送信して供試体中を伝播するせん断波の速度を測定し、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 を求めた。せん断波の伝播速度 V_s と初期せん断弾性係数 G_0 は次式より算出

した。

$$V_s = L / \Delta t$$
$$G_0 = \rho_t V_s^2$$

ここで、

V_s : せん断波速度(m/s), L : BE 間距離(mm), Δt : せん断波到達時間(msec), G_0 : 初期せん断剛性(kPa), 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、同定した。

2.3 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ガラスビーズ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 ε_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 2.1 と同様である。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)を下式より算出した。また、せん断ひずみ $\varepsilon_s=1\%$ 以降も、外部変位計から排水条件の単調載荷試験(CD 試験)を継続して実施した。

$$\varepsilon_s = 2/3(\varepsilon_a + \varepsilon_r)$$
$$G = q/3\varepsilon_s$$

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。

2.4 コーン貫入試験

本研究では、長期圧密されたガラスビーズの静的貫入特性を調べるため、コーン貫入試験を行った。上載圧 10kPa を作用させた状態で、長期間養生を行ったのち、一定の速度(0.25mm/min)で貫入棒を貫入させ、コーン貫入抵抗を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 液状化強度およびせん断弾性係数

液状化試験より得られた液状化強度比 R_L と圧密時間 t_c の関係を図-2 に示す。図より、豊浦砂と比較してガラスビーズの液状化強度曲線が高いことがわかる。これはガラスビーズの粒子形状が球形でありながら、初

期間隙比が小さくなっているためだと考えられる。また、ガラスビーズおよび豊浦砂の両ケースで長期圧密により、繰り返し載荷回数 N_c が増加する傾向が確認できる。このことから、液状化強度 R_L は圧密時間に依存性があると言える。そこで、各試料の長期圧密に与える液状化強度増加率を考察した。液状化強度増加率は、式(1)に定義し、液状化強度の増加量を評価する。なお、長期圧密試料は繰り返し応力振幅比を 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。

$$\text{液状化強度増加率 } R_{LC} = \frac{\text{長期圧密の } R_L}{\text{通常圧密の } R_L} \quad (1)$$

図-3 に液状化強度増加率 R_{LC} と圧密時間の関係を示す。ガラスビーズの R_{LC} は、ガラスビーズでは 1 週間以内で曲線的に増加し、1 週間以上に一定となっている。一方、豊浦砂では 1 週間以内で一定、1 週間以上になると微増するような傾向が確認できる。これらより、試料によって、長期圧密の影響が異なること判明した。そこで、BE 試験により得られた初期せん断弾性係数 G_0 と圧密時間 t_c の関係を図-4 に示す。図より、豊浦砂で圧密時間の変化が見られないのに対し、ガラスビーズでは 1 週間程度まで増加する傾向が見られる。これらは、写真-1 に示すようなガラスビーズの粒子固結作用が働いたものと考えられる。一般的に地盤を固化することでせん断弾性係数や液状化抵抗は増加することが知られている⁹⁾。1 週間以上の圧密を行ったガラスビーズ試料には微量ではあるが、固結したガラスビーズ析出物がまばらに混入していた。これらの析出物が液状化抵抗とせん断弾性係数が増加する要因になったことが考えられる。そこで、LSS 試験により、微小域でのせん断弾性係数への影響について調査した。

図-5 に割線せん断弾性係数 G とせん断ひずみ ε_s の関係を示す。図より、長期圧密を与えたガラスビーズは $\varepsilon_s=0.001\%$ 以下とされる弾性ひずみ域での G の値は大きく増加して、 $\varepsilon_s=0.1\%$ 付近まで同一ひずみレベルで通常圧密よりも高い剛性である。また、ガラスビーズにおいて 1 週間圧密と 2 週間圧密の結果は同程度であった。このことから、1 週間程度で固結が完了することが考えられる。また、便宜上 $\varepsilon_s=0.0001\%$ に示されている BE 試験で求めた G_0 と弾性ひずみ域での G の値は概ね同等の結果であることがわかる。

3.2 排水せん断強度および貫入抵抗値

図-6 にせん断弾性係数 G とせん断ひずみ ε_s の関係を示す。この結果より、液状化強度はガラスビーズが高いのに対し、排水せん断強度はガラスビーズの方が1/2程度小さいことがわかる。これはガラスビーズが球形により、粒子間ですべりやすいためと考えられる。また、ガラスビーズおよび豊浦砂の両ケースで2週間圧密と通常圧密で同等の強度を示している。このことから、排水せん断強度には圧密時間の依存性がないことが推測させる。そこで、同じ強度という観点から、コーン貫入試験により貫入抵抗の変化について検証した。図-7 に貫入長さ $L_c=30\text{mm}$ の貫入抵抗値 (以下 q_{c30} と表記する) と圧密時間の関係を示す。図より、ガラスビーズは最大365日、豊浦砂は最大112日の養生を行ったが、貫入抵抗値 q_{c30} の変化はガラスビーズおよび豊浦砂の両ケースで圧密時間に対してあまり変化が見られない。このことから、貫入抵抗値は両ケースで圧密時間の影響はないと考えられる。これらより、ガラスビーズは液状化強度およびせん断弾性係数で長期圧密による増加が確認されたのに対して、排水せん断強度と貫入抵抗値では長期圧密による変化は観測できなかった。この理由として、ガラスビーズに粒子固結作用があることが考えられると、大きなひずみレベルでは、粒子固結が簡単に崩れてしまうことが考えられる。また、ガラスビーズおよび豊浦砂の両ケースの平均値を見ると、豊浦砂よりガラスビーズの貫入抵抗値が1/2程度小さいことがわかる。これは、排水せん断強度と同等の差であることから、貫入抵抗値と排水せん断強度には関連性があることが考えられる。

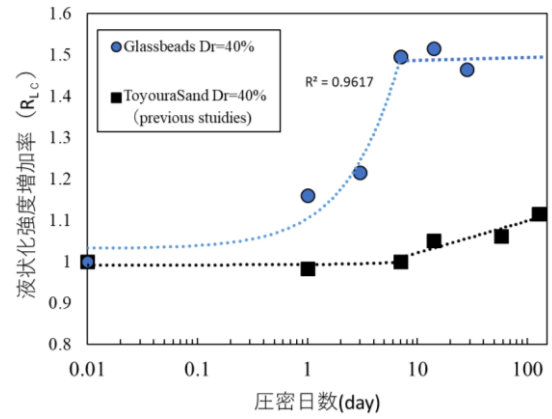


図-3 液状化強度増加率 R_{LE}

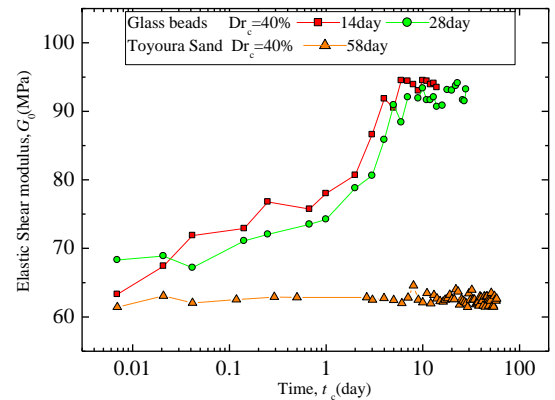


図-4 初期せん断弾性係数 G_0 - 圧密時間 t_c 関係

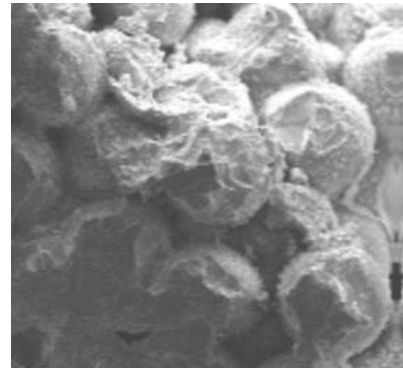


写真-1 長期圧密によるガラスビーズの固結作用

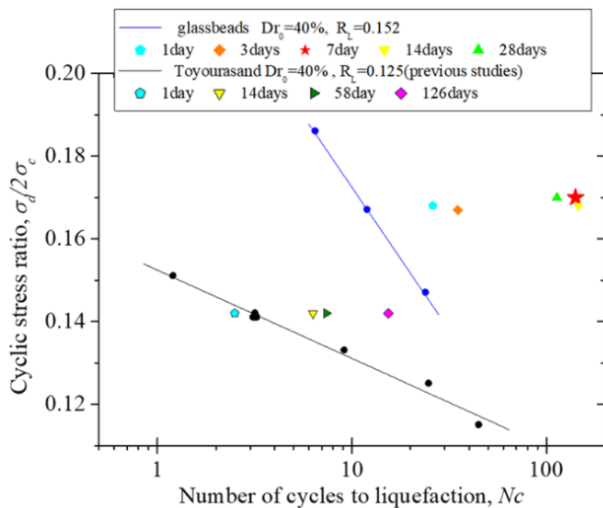


図-2 液状化強度比 R_L - 圧密時間 t_c 関係

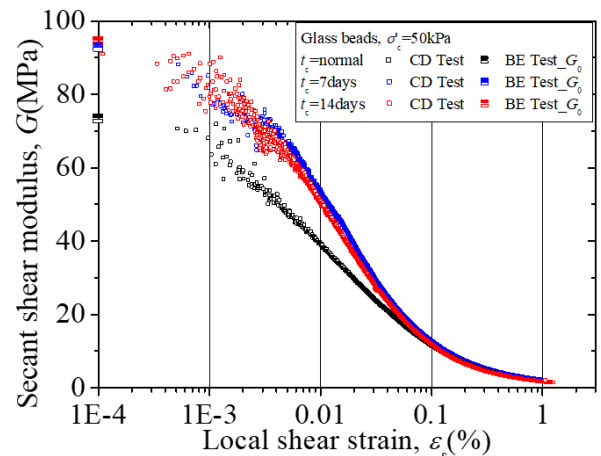


図-5 $G - \varepsilon_s$ 関係 (ガラスビーズ)

4. まとめ

本研究より得られた知見は以下の通りである。

① 液状化抵抗およびせん断弾性係数

- ・ガラスビーズの方が豊浦砂より大きい。理由として、ガラスビーズの初期間隙比が小さいことが影響したと考えられる。

- ・長期圧密により、ガラスビーズでは1週間程度まで増加の傾向を示したが、豊浦砂には増加傾向は見られなかった。ガラスビーズの粒子固結作用が働いたものと考えられる。

② 排水せん断強度および貫入抵抗値

- ・ガラスビーズの方が豊浦砂より小さい。理由として、ガラスビーズは球形で、粒子間ですべりやすいためと考えられる。

- ・ガラスビーズと豊浦砂の時間依存性はほとんど観測できなかった。①の結論より、ガラスビーズに固結作用があることを考えると、大きなひずみレベルではこの固結が簡単に崩れてしまうことが考えられる。

参考文献

- 1) 工藤和彦, 橋本祐二, 長谷部正: 廃ガラスを利用した軽量材料の開発, 平成 14 年度技術研究発表会, 2003.
- 2) 三上大道, 佐々木哲也, 石原雅規: 廃ガラスリサイクル粗粒材料の埋設管理戻し材としての利用に関する基礎的研究, 地盤工学ジャーナル, Vol. 10, No. 1, pp. 127-140, 2015.
- 3) 田中将平: 長期圧密が砂の力学特性にあたる影響, 平成 28 年度長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, 2017.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 吉見吉昭, 福武毅芳: 地盤液状化の物理と評価・対策技術, 技報堂出版, pp. 110-112, 2005.
- 7) 門脇悠太: 長期圧密されたガラスビーズの力学特性に与える時間依存性, 平成 30 年度長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, 2019.

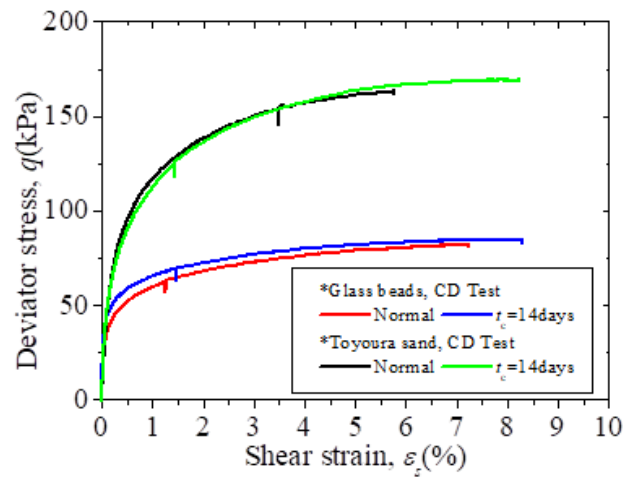


図-6 排水せん断強度 q とせん断ひずみ ϵ_s の関係

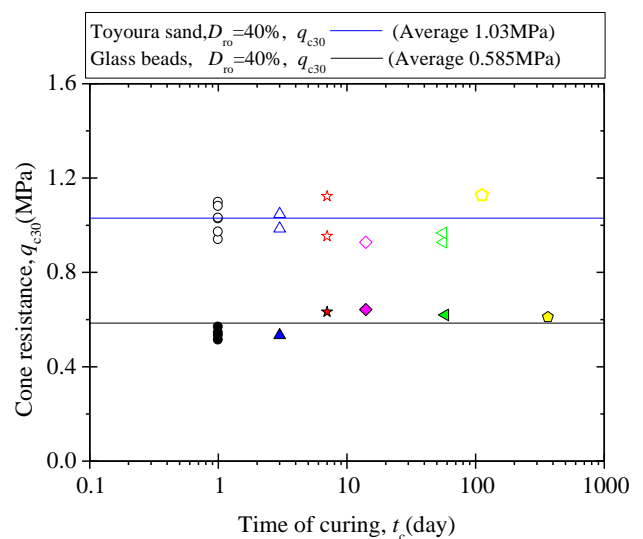


図-7 貫入抵抗値 q_{c30} - 養生時間 t_c 関係