

# 時間依存性を考慮したガラスビーズの力学特性

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 正会員  
長岡技術科学大学大学院

○LE HOANG KIM  
早川飛翼  
豊田浩史  
高田晋

## 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、土木分野でもリサイクルへの取り組みが活発となっている。例えば廃タイヤを裁断・粉砕して生成したタイヤゴムチップは、溶出試験の結果、環境への負荷が少ないことと、固化処理度と混合した際の靱性の増大や液状化しにくくなる特性から欧米諸国ではここ 10 年で地盤材料として盛んに用いられている。

また、廃ガラスは無色のものについてはガラス製品として再利用されているが、色付きのものはリサイクルが困難である。しかし、廃ガラスはタイヤゴムチップなどと同様に骨材など土木材料として再利用されている。そこで、廃ガラスを地盤材料への再利用が可能となれば、経済的で安全な社会基盤を作ることに寄与できるはずである。本研究では廃ガラスの地盤材料への再利用、地盤改良材の可能性を期待して、ガラスビーズの液状化強度特性、初期せん断剛性、静的貫入特性などの力学的特性と溶出物、構成物質などの化学的特性を明らかにしていく。

## 2. 試験方法

本研究は、ガラスビーズと豊浦標準砂を試料として試験を行った。漏斗体積法及び負圧法により、供試体を作製した。

### 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、将来的に長期圧密を行うことを視野に入れた試験方法を用いた。長期圧密する際、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、背圧を載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  $0.1 \text{mm/min}$  のひずみ制御と繰返し振幅  $\sigma_d$  を設定し、自動制御で繰返し載荷を行う。この繰返し載荷過程は、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、載荷周波数一定の試験条件<sup>1)</sup>を満たすことができない。

しかし、過去の研究成果<sup>2)</sup>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 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  $V_s$  から初期せん断剛性  $G_0$  を求めた。せん断波の伝播速度  $V_s$  と初期せん断剛性  $G_0$  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),  $G_0$ : 初期せん断剛性(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。

### 2.3 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  $10 \text{kPa}$  を作用させ、長期間養生を行ったのち、一定の速度( $0.25 \text{mm/min}$ )で貫入棒を貫入させ、コーン貫入抵抗を測定した。

### 2.4 溶出試験

本研究では、長期養生された試料から溶出される物質を調べるために、一か月間水中で養生させたガラスビーズ、蒸留水に対してイオンクロマトグラフィーによる成分分析を行った。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 ガラスビーズの液状化強度特性

液状化強度を検討するために、豊浦砂、ガスビーズを利用して比較した。試験条件は表-1 に示す。

表-1 飽和非排水繰返し三軸試験条件

	初期 間隙比 $e_0$	初期 相対密度 $D_{r0}(\%)$	有効 圧密応力 $\sigma_c(\text{kPa})$
豊浦砂	0.835	40	50
	0.761	60	
ガラス ビーズ	0.670	30	

各試料の繰返し載荷回数  $N_c$  と繰返し応力振幅比  $\sigma_d/2\sigma_c$  の関係を図-1 に示す。豊浦砂( $D_{r0}=40\%$ )と豊浦砂( $D_{r0}=60\%$ )については既往研究の結果である。なお、液状化強度比  $R_L$  は、両振幅軸ひずみ  $DA=5\%$  における繰返し載荷回数  $N_c=20$  回で定義している。

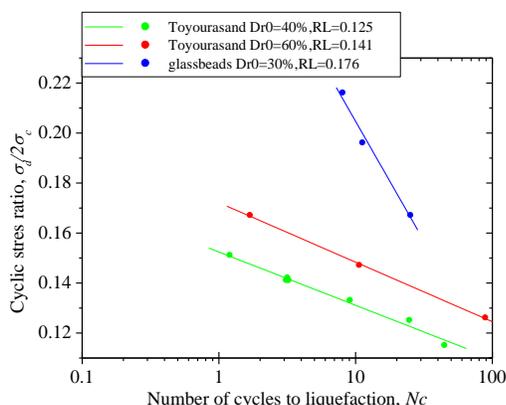


図-1 各試料の通常圧密における液状化強度曲線

図-1 に、各試料の液状化強度曲線は直線的な線状を示した。また、液状化強度曲線の傾きを見ると豊浦砂( $D_{r0}=40\%$ )と豊浦砂( $D_{r0}=60\%$ )はほとんど同じだが、ガラスビーズの傾きは大きい結果となった。表-1、図-1 より、液状化強度  $R_L$  は豊浦砂( $D_{r0}=40\%$ )で 0.125、豊浦砂( $D_{r0}=60\%$ )で 0.141、ガラスビーズ( $D_{r0}=30\%$ )で 0.176 となり、ガラスビーズ( $D_{r0}=30\%$ )>豊浦砂( $D_{r0}=60\%$ )>豊浦砂( $D_{r0}=40\%$ )の順となった。ガラスビーズの液状化強度が高い原因として、粒子形状が球

表-2 ガラスビーズの各圧密期間での試験実施供試体の諸元一覧

試料		目標相対密度 $D_{r0}(\%)$	圧密日数	初期せん断剛性 $G_0(\text{MPa})$	圧密後相対密度 $D_{rc}(\%)$
ガラス ビーズ	既往研究	40	通常	81.6	36.64
			14	110	34.47
	本研究		21	103.1	34.26
豊浦砂	本研究	60	通常	67.3	60.57
			14	66.1	60.40
			28	71.0	62.50

形であるため間隙比が小さくなりやすいことが考えられる。

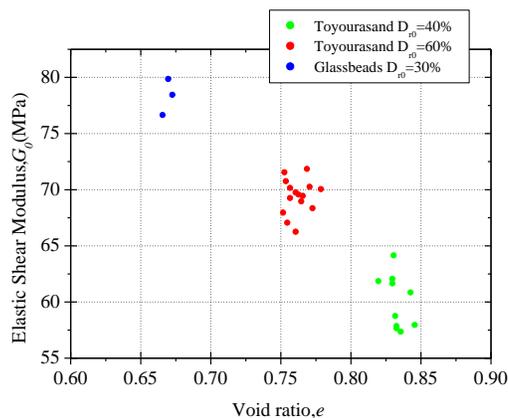


図-2 初期せん断剛性  $G_0$  と圧密後間隙比  $e_c$  の関係

図-2 に  $G_0$  と圧密後間隙比  $e_c$  の関係を示す。図より、間隙比は各試料 0.3 程度のばらつきがあるが、豊浦砂( $D_{r0}=60\%$ )は 65~75MPa、豊浦砂( $D_{r0}=40\%$ )は 57~65MPa、ガラスビーズは 76~80MPa あたりに分布しており、ガラスビーズの初期せん断剛性は豊浦砂のものと比較し大きい結果となった。 $G_0$  は間隙比に大きく依存している結果が得られた。

### 3.2 長期圧密を作用させたガラスビーズの微小変形特性

研究対象としたガラスビーズと豊浦砂に対して実施した LSS 試験により、長期圧密がガラスビーズの微小変形特性に与える影響について比較検討を行った。試験に使用した試料はガラスビーズ( $D_{r0}=40\%$ )、豊浦砂( $D_{r0}=60\%$ )である。供試体の条件を以下の表-2 に示す。

図-3 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おり,  $\varepsilon_s=0.1\%$ 付近まで同一ひずみレベルで通常圧密よりも高い剛性を示している. 弾性ひずみ域のせん断剛性は通常圧密の結果と比較して 25%程度増加している. また, BE 試験より得られた  $G_0$  も LSS 試験結果に対応するように高い値を示している. 図-4 を見ると, 豊浦砂の長期圧密では  $G_0$  の変化はほとんど無い.

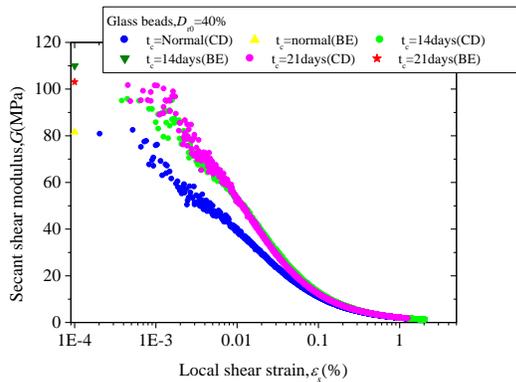


図-3 せん断剛性と局所せん断ひずみの関係 (ガラスビーズ)

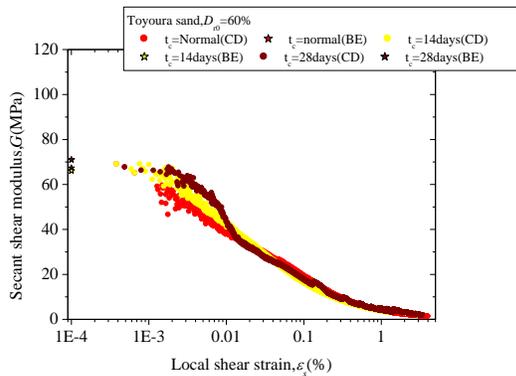


図-4 せん断剛性と局所せん断ひずみの関係 (豊浦砂)

ガラスビーズでの LSS 試験の弾性ひずみ域における  $G$  と, BE 試験より得る  $G_0$  の関係は, BE 試験による  $G_0$  値が LSS 試験における  $G$  値を 10%程度上回る結果となっている. 豊浦砂と比較すると両試験結果の差が大きいが, どちらも  $G-\varepsilon_s$  曲線における初期せん断剛性の変化に対応した値を示している. したがって, 両試験は概ねよい関係性にあると判断できる.

### 3.3 長期水中養生したガラスビーズの静的貫入特性

長期水中養生させたガラスビーズにおいて静的貫入試験を実施した結果をまとめる. この結果より, 養生期間の違いが貫入抵抗値  $q_c$  に与える影響について考察を行う.

図-5 に養生されたガラスビーズに静的貫入試験を実施し得られた貫入長  $L_c$  と貫入抵抗値  $q_c$  の関係を示す. 図-5 より数ケース行った 1 日養生において, 貫入抵抗の推移は類似しているが, 貫入抵抗値にはある程度ばらつきが生じている.

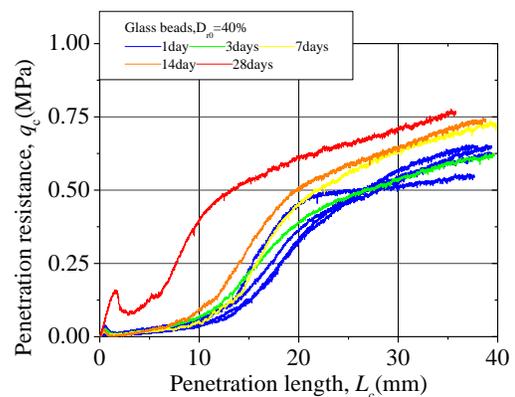


図-5 各養生期間におけるコーン貫入長  $L_c$  とコーン貫入抵抗値  $q_c$  の関係

養生期間によらず 40mm 程度の貫入長では貫入抵抗のピークは確認できないが, 養生期間が 7 日以上になると, 貫入抵抗値が大きくなる傾向が見られる.

### 3.4 長期水中養生したガラスビーズの化学的特性

写真-1 はガラスビーズを長期水中養生したものを電子顕微鏡で撮影した画像である. 長期水中養生したガラスビーズから, 何らかの物質が析出されて, 粒子間が結合していることが確認できる.

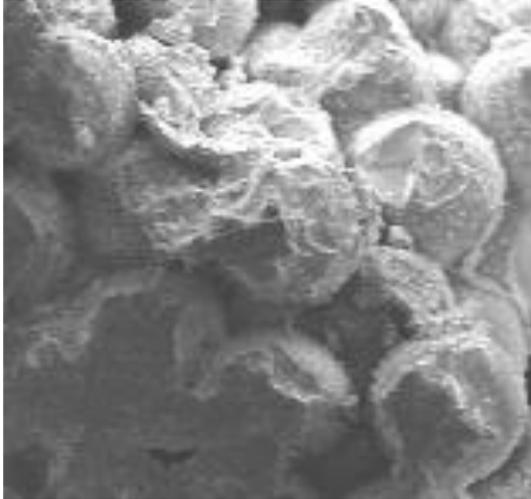


写真-1 電子顕微鏡で撮影した  
ガラスビーズの析出物

表-3 に一ヵ月養生を行ったガラスビーズと蒸留水に対して行った溶出試験結果を示す。長期ガラスビーズを浸した蒸留水からは、カルシウムイオン  $\text{Ca}^{2+}$  が検出された。

表-3 長期養生されたガラスビーズの溶出  
試験結果

試験対象	$\text{Ca}^{2+}$ (mg-Ca/L)
蒸留水	0
ガラスビーズ	17.439

また、ガラスビーズからの析出物に対して赤外分光分析試験を行った結果、 $\text{CaCO}_3$  の生成が確認された。溶出したカルシウムイオン  $\text{Ca}^{2+}$  が長期養生中に二酸化炭素と結合し、炭酸カルシウム  $\text{CaCO}_3$  を生成したと予測される。この様な化学作用により、ガラスビーズの粒子間が結合し、力学特性が変化する原因の一つであると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究より得られた知見は以下の通りである。

- ・ガラスビーズの液状化強度比  $R_L$ 、初期せん断弾性係数  $G_0$  は豊浦砂より大きい。これは、ガラスビーズの粒子形状が球形であり、間隙比が小さいためだと考えられる。
- ・ガラスビーズの貫入抵抗値は、豊浦砂より小さい。これはガラスビーズの粒子形状が球

形であり、せん断力に対する抵抗が弱いことが原因だと考えられる。

・長期圧密により、豊浦砂の初期せん断弾性係数  $G_0$ 、貫入抵抗値  $q_c$  はほとんど増加しなかったのに対し、ガラスビーズは初期せん断弾性係数、貫入抵抗値は増加傾向を示した。これは析出物の発生が原因だと考えられる。

・ガラスビーズから  $\text{Ca}^{2+}$  の溶出が確認された。また、ガラスビーズの析出物に  $\text{CaCO}_3$  が含まれている。このことより、ガラスビーズから溶けた  $\text{Ca}^{2+}$  と間隙水に存在した  $\text{CO}_3^{2-}$  が結合し  $\text{CaCO}_3$  を生成したことが析出物発生の原因だと考えられる。

#### 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.