

ガラスビーズの力学特性に与える時間依存性

地盤工学研究室
指導教員

門脇悠太
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、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、固化処理土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。¹⁾²⁾³⁾

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改良への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を地盤材料への再利用する際、地盤改良の効果を調べるため、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。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	豊浦砂
最大乾燥密度 $\rho_{\max}(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.582	1.645
最小乾燥密度 $\rho_{\min}(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.452	1.335
土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.487	2.650

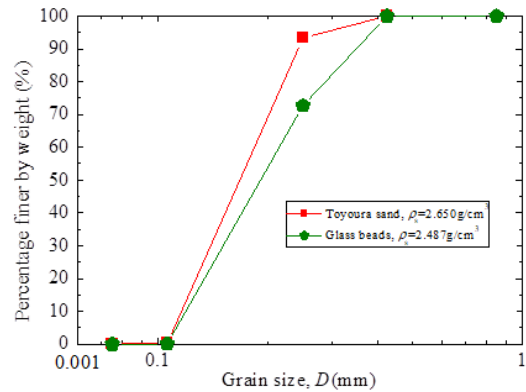


図-1 粒径加積曲線

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、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 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), 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 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.

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.

2.5 赤外分光分析試験

本研究では長期水中に浸潤されたガラスビーズから析出された物質を調べることを目的とし, 赤外分光分析試験を行った.

3. 試験結果および考察

3.1 液状化試験

本研究で行ったガラスビーズ $D_r=30\%$, 豊浦砂 $D_r=60\%$, $D_r=40\%$ の供試体に対する液状化試験より得られた繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_c$ と繰返し载荷回数 N_c の関係を図-2 に, 液状化強度比 R_L と圧密後間隙比 e_c の関係を図-3 に示す. 図-2 より, ガラスビーズの液状化強度曲線がもっとも上に位置しており, 傾きも他の二つと比較しかなり大きい. また, 図-3 より, ガラスビーズがもっとも R_L が大きく, 次いで豊浦砂 $D_r=60\%$, 豊浦 $D_r=40\%$ の順となっているが, 間隙比が大きいほど直線的に R_L が小さくなっている. これはガラスビーズの粒子形状が球形であり, 間隙比が小さくなるためだと考えられる.

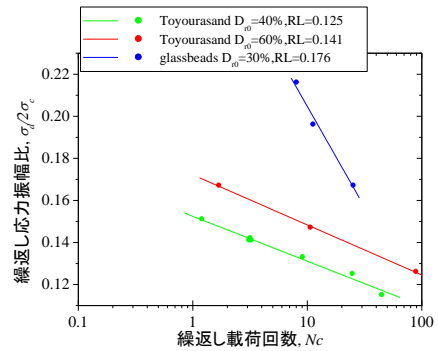


図-2 繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma_c$ —間隙比 e_c 関係

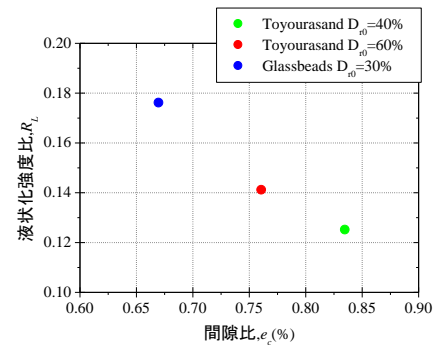


図-3 液状化強度比 R_L —間隙比 e_c 関係

3.2 BE 試験

図-4 にガラスビーズ $D_r=30\%$, 豊浦砂 $D_r=60\%$, $D_r=40\%$ の供試体に対して行った BE 試験により得られた初期せん断弾性係数 G_0 と圧密後間隙比 e_c の関係を示す. 図より, ガラスビーズがもっとも G_0 が大きく, 次いで豊浦砂 $D_r=60\%$, 豊浦 $D_r=40\%$ の順の大きさとなっているが, 間隙比に大きく依存していることがわかる. ガラスビーズの粒子形状は球形であるため, 間隙比が小さくなることわかる.

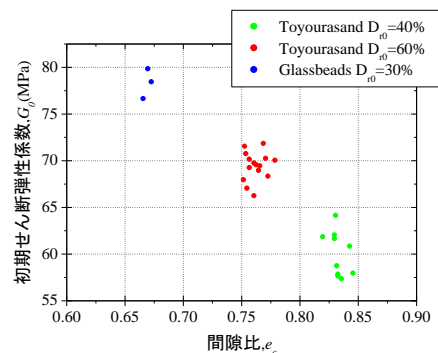


図-4 初期せん断弾性係数 G_0 —間隙比 e_c 関係

3.3 コーン貫入試験

ガラスビーズ $D_r=40\%$ 、豊浦砂 $D_r=60\%$ の供試体に対して行ったコーン貫入試験より得られた貫入抵抗値 q_c と貫入長さ L_c の関係を図-5 に示す。図より、ガラスビーズの貫入抵抗値 q_c は貫入長さ $L_c=30\text{mm}$ の位置(以下 q_{c30} と表記する)で豊浦砂の 1/2 程度の値となっている。これはガラスビーズの粒子形状が球形であり、せん断抵抗が小さいためだと考えられる。

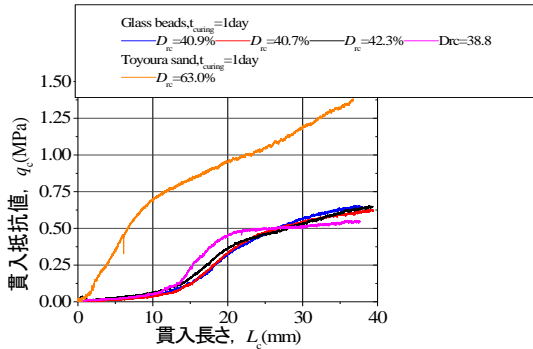


図-5 貫入抵抗値 q_c —貫入長さ L_c 関係

3.4 長期試験 (BE 試験, コーン貫入試験)

長期圧密を作用させたガラスビーズ $D_r=40\%$ 、豊浦砂 $D_r=60\%$ の供試体に対して行った BE 試験より得られた G_0 の増加率 $G_0/G_{010\text{min}}$ と圧密時間 t_c の関係を図-6 に、コーン貫入試験により得られた q_{c30} の増加率 $q_{c30}/q_{c301\text{day}}$ と圧密時間 t_c の関係を図-7 に示す。図より、 G_0 と q_{c30} の増加率はともに豊浦砂において、最も長い圧密期間を作用させたケースでも増加率はほとんど変化しなかったのに対し、ガラスビーズでは圧密時間を作用させると、最大 1.5~1.7 倍程度と高い増加率を示した。また、長期圧密後のガラスビーズ供試体からは、析出物のような物質が確認された。これは、ガラスビーズや間隙水が何らかの化学反応を起こしている可能性があり、その点について詳しく調べていく。

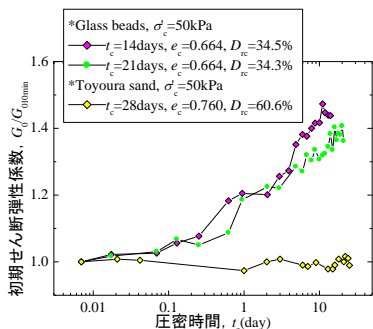


図-6 G_0 増加率 $G_0/G_{010\text{min}}$ —圧密時間 t_c 関係

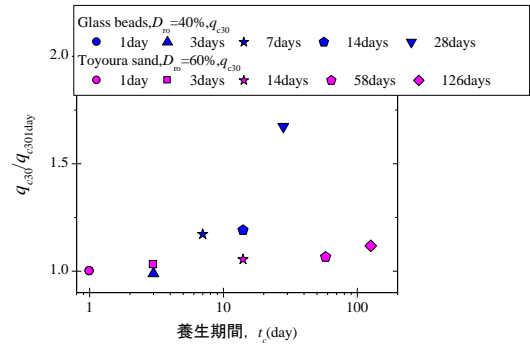


図-7 q_{c30} 増加率 $q_{c30}/q_{c301\text{day}}$ —養生時間 t_c 関係

3.5 溶出試験

豊浦砂とガラスビーズの物質構成を表-2 に示す。いくつかの違いはあるが、ここでは、カルシウム Ca について着目する。ガラスビーズには 10%程度カルシウム Ca が含まれているのに対し、豊浦砂にはほとんど含まれていないことがわかる。そこで、イオンクロマトグラフィーを用いて測定したカルシウムイオン Ca^{2+} の溶出量を図-8 に示す。図より、蒸留水からは何も検出されなかったのに対し、ガラスビーズからはカルシウムイオン Ca^{2+} が 17mg/L 程度検出された。このことよりカルシウムイオン Ca^{2+} の溶出が析出物の発生に関わっていると考えられる。

表-2 豊浦砂とガラスビーズの物質構成

豊浦砂 (%)		ガラスビーズ (%)	
ig,loss	0.5	C	8.6
SiO_2	92.6	O	29.0
Al_2O_3	3.7	Na	7.5
Fe_2O_3	0.7	Mg	1.4
CaO	0.5	Al	1.1
MgO	0.2	Si	40.5
		K	1.2
		Ca	10.7

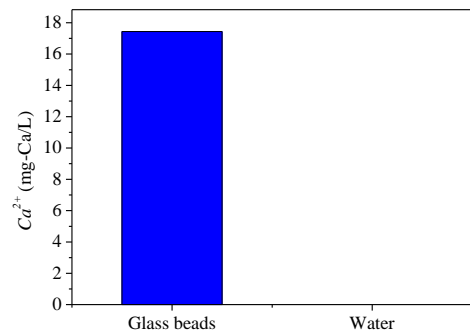


図-8 各試料のカルシウムイオン Ca^{2+} 溶出量

3.6 赤外分光分析試験

図-9, 図-10 に赤外分光分析により得られた未使用のガラスビーズとガラスビーズ析出物の IR スペクトルを示す。図よりガラスビーズ析出物の IR スペクトルにおいて、炭酸カルシウム CaCO_3 のピーク値 (波数: 1500cm^{-1}) 近辺に小さなピークが確認されることより、 CaCO_3 が含まれていることが分かった。このことより、ガラスビーズから溶けた Ca^{2+} と水に溶けた二酸化炭素 CO_2 により炭酸イオン CO_3^{2-} が生成され、これらが結合し 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。

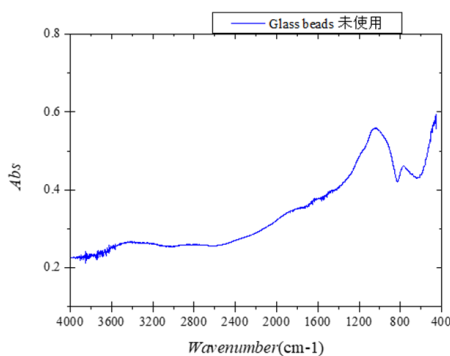


図-9 IR スペクトル (未使用ガラスビーズ)

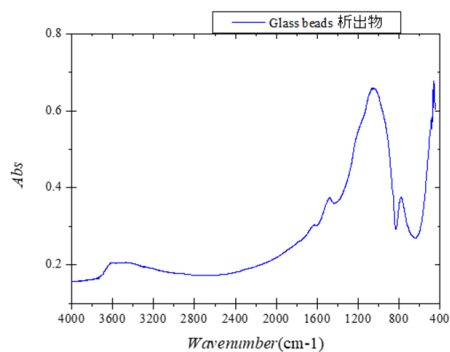


図-10 IR スペクトル (ガラスビーズ析出物)

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である。
- ・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小さいことが原因である。
- ・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 G_0 、貫入抵抗値 q_c は増加傾向を示した。

・ガラスビーズから Ca^{2+} の溶出が確認された。また、ガラスビーズの析出物に CaCO_3 が含まれていた。このことより、ガラスビーズから溶けた Ca^{2+} と間隙水に存在した CO_3^{2-} が結合し 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。

5. 結論

本研究により、ガラスビーズを砂に混入することで、液状化強度とせん断剛性の増大とせん断強度の減少が発生することが分かった。また、ガラスビーズを水中で長期間圧密することで、せん断剛性とせん断強度の増加が見込まれるため、地盤改良材としても有用である。

参考文献

- 1) 御手洗義夫, 安原一哉, 菊池喜昭, 大谷順, Ashoke K Karmokar : 古タイヤゴムチップの地盤材料としての有効利用と環境影響について, 第6回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.351-358, 2005.
- 2) 近者淳史, 兵動正幸, 湊山美怜, 今田光一, 野田翔兵 : タイヤチップの力学特性と戸建住宅基礎地盤への適用による液状化防止と応答の低減効果, 土木学会論文集 C(地盤工学), Vol.71, No.1, pp.33-46, 2015.
- 3) 御手洗義夫, 安原一哉, 菊池喜昭, Ashoke K Karmokar : 古タイヤゴムチップを固化処理土に混合した新しい地盤材料の開発と力学的特性, 土木学会論文集 C(地盤工学), Vol.63, No.3, pp.881-900, 2007.
- 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.