Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

# 各種室内試験による廃ガラスの工学的特性

鄭, 珉守
川尻, 峻三
中谷, 圭希
三浦, みなみ
澁谷, 啓

(Citation)
地盤工学ジャーナル,6(1):121-128

(Issue Date)
2011

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(Rights)
©2011 公益社団法人 地盤工学会

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003307

# 各種室内試験による廃ガラスの工学的特性

鄭　珉守[1]，川尻　峻三[2]，中谷　圭希[3]，三浦　みなみ[3]，澁谷　啓[1]

1　神戸大学大学院・工学研究科市民工学専攻
2　神戸大学大学院・工学研究科博士後期課程市民工学専攻
3　神戸大学大学院・工学研究科博士前期課程市民工学専攻

## 概　　要

本ノートでは，一連の室内試験から得られた廃ガラス製品の一種である「ガラスサンド」の地盤工学的特性について述べている。まず，物理試験，透水試験およびpH測定試験から，廃ガラスの土構造物への適用のための基本的な工学的性質と周辺環境への影響を調べた。さらに強度特性を把握するために一面せん断試験，微小ひずみ領域での変形特性を把握するためにベンダーエレメント試験，液状化特性を把握するために非排水繰返し三軸試験を実施して廃ガラスの強度・変形特性を評価した。また，廃ガラスを混合した盛土材料の土質特性の改善効果を調べる目的で，廃ガラスの混合比を変化させた供試体を用いた一連の圧縮試験を実施した。以上の結果から，廃ガラスの一次的性質は自然砂と酷似しており，環境にやさしい材料であること，強度・変形特性は自然砂よりも優れていること，廃ガラスを混合することにより盛土の圧縮沈下特性が改善されることがわかった。

キーワード：廃ガラス，保水性，せん断弾性係数，非排水繰返し載荷試験

## 1.　はじめに

我国では多量の廃棄物による環境問題が顕在化している。一方，国土が狭い日本では，とりわけ都市部において，廃棄物を有効利用して造成された地盤の活用が期待されている。したがって，従来廃棄物として取り扱われていた廃ガラスのような材料をリサイクル材料として積極的に活用することは，地盤工学上の新たな挑戦である。

昨今，政府・民間が協同して，廃ガラスのリサイクル率を高める動きが活発化している。この動きは，平成9年4月に容器包装リサイクル法が施行されてから，なお一層拍車がかかっている[1)]。廃ガラスは，年間約600万トン以上が排出されているが，リサイクル率はまだ28%程度[2)]であり，リサイクルの用途も限られているのが現状である。このような状況で廃ガラスは品質が比較的安定していること，粒度調整が容易であることから，廃棄物地盤材料の高度利用に向けて，近年では地盤工学的性質についての研究が進められている[3)4)5)]。しかし，廃ガラスの盛土材料への適用を目指した研究は少なく，強度・変形特性に関しては不明な点が多い。

また，近年では建設残土の有効利用などの観点から盛土施工において良質な地盤材料を盛土材料と使用することは困難である。すなわち，基本的には現地発生土を盛土材料とする。しかし，現地発生土が必ずしも良質な盛土材料であるとは限らず，むしろ盛土材料としては細粒分を多く含み低品質である場合が多い。特に細粒分が多い土質では，セメント改良などによって盛土材料の品質を改善するが，セメント改良土は透水性が低下するためかえって盛土材料としては不適切となる場合もある。このような細粒分を多量に含む盛土材料の透水係数を低下させずに盛土材料を改良するためには，廃ガラスを混入することによる盛土材料の品質改善が期待できる。

廃棄物を地盤材料に混合するによって品質改善を試みた例を挙げると，李ら[6)]はカキ殻と粘性土を混合した供試体の非排水強度および変形特性を三軸試験によって検討した結果，カキ殻混合率の増加とともに非排水せん断強度が増加すると報告している。しかし，廃ガラスを対象とした類似の研究は少ないのが現状である。

そこで本研究では，廃ガラスの一次的性質，pHの溶出，保水性，一面せん断試験よる強度特性，ベンダーエレメント（以後，BE とする）試験による微小ひずみ領域での変形特性，そして液状化特性を把握するために非排水繰返し三軸試験を実施して，自然砂の試験結果と比較した。さらに河川堤防の強化工事で使用されている細粒分を多量に含む盛土材料に廃ガラスを混入した際の粒度改善効果を圧密試験結果から検討し，廃ガラスの盛土材料としての工学的特性を多角的かつ総合的に評価している。

原稿受理日：2010年8月23日，採用決定日：2011年2月9日

写真 1　ガラスサンド

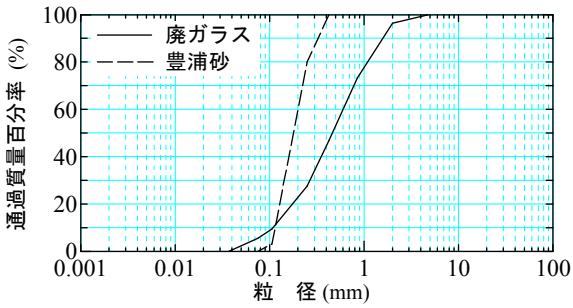


図 1　粒度分布の比較

表 1　基本的物性の比較

| | 豊浦砂 | 廃ガラス |
|---|---|---|
| 土粒子密度 $\rho_s$（g/cm$^3$） | 2.640 | 2.483 |
| 最大間隙比 $e_{max}$ | 0.977 | 1.027 |
| 最小間隙比 $e_{min}$ | 0.605 | 0.504 |
| 最大密度 $\rho_{dmax}$(g/cm$^3$) | 1.645 | 1.651 |
| 最小密度 $\rho_{dmin}$(g/cm$^3$) | 1.335 | 1.225 |
| 平均粒径 $D_{50}$(mm) | 0.162 | 0.435 |
| 均等係数 $U_c$ | 1.46 | 5.51 |

写真 2　ガラスサンドの母材ガラス

## 2.　廃ガラスの一次性質および pH 測定試験

本研究で用いた廃ガラスは，「ガラスサンド」（以後，廃ガラス）と呼ばれる商品であり，廃棄物処理場から搬出された廃ガラスを特殊な破砕機で細かく砕いたものである（写真 1 参照）。表 1 と図 1 は，それぞれ廃ガラスおよび豊浦標準砂の一次的性質（土粒子密度，最大・小間隙比，最大・小密度，平均粒径，均等係数）と粒度分布を比較している。廃ガラスの粒子密度が一般的な土の粒子密度より若干小さいのは，リサイクル過程中にガラスびんに貼ってあったネームシール等の包装材やガラス内部に封入されている空気による影響と考えられる。他の一次的性質は豊浦砂と類似である。一方，今回実験に用いた廃ガラスは，豊浦砂よりも粒度分布が良い。

廃ガラスのような廃棄物をリサイクル材料として盛土などの土構造物に用いる際は，材料の化学的安定性を明らかにして環境への負荷を正しく評価する必要がある。そこで，本研究では室内試験で使用したガラスサンドの母材となるガラス（写真 2 参照）の pH の経時変化を観察した。母材となるガラスは処理場で 30mm 以下程度に粉砕したもので，一切洗浄はしていない。試験は，この母材を洗浄しない無洗浄，5 分間流水にさらしたもの，10 分間流水にさらしたもの，そして入念に洗浄を行ったものの 4 通りの母材ガラスをそれぞれネットに入れ，蒸留水を満たしたビーカーに放置し，一定時間間隔で pH を測定した。図 2 は pH の経時変化である。よく洗浄することで pH が低くなることがわかる。これは無洗浄の母材ガラスには，飲料水の成分など付着しているが，洗浄することで付着した成分が消失したためと考えられる。しかし，全体の pH は 7.0 ~ 7.5

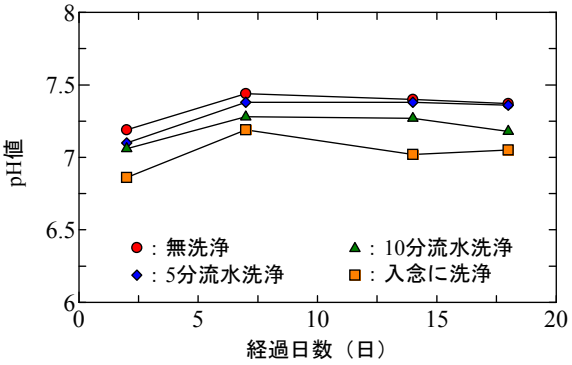


図 2　pH の経時変化

の狭い範囲にあり，盛土材料としての廃ガラスの pH が周辺環境に及ぼす影響は小さいと言えよう。

## 3.　廃ガラスの透水性および保水性

盛土材料としての廃ガラスの適用性を検討するために，透水性および保水性をそれぞれ定水位透水試験および保水性試験により測定した。表 2（文献 7)に加筆修正）は，廃ガラスの透水性と各種砂の透水性の比較である。廃ガラスの透水係数は，間隙比がほぼ等しい砂群と比べ，若干小さい値を示しているが，十分に高い透水性を有していることが分かった。つぎに，相対密度 $D_r$ = 50%の廃ガラス供試体に対して加圧板法による保水性試験を実施した。図 3 に水分特性曲線を示す。図中に筆者らのこれまでの研究で得られた自然砂の水分特性曲線 [8)]も示している。廃ガラスの水分特性曲線は，空気浸入値（A.E.V）の値など自然砂の結果と類似な傾向を示していることが分かる。

表 2　透水係数の比較（文献 7)に加筆修正）

| 試料 | | 平均粒径, $D_{50}$(cm) | 間隙比 $e$ | 透水係数 $k$(cm/s) |
|---|---|---|---|---|
| ガラスビーズ | | 0.20 | 0.60 | 1.3 |
| 豊浦砂 | | 0.01 | 0.70 | $1.5\times10^{-2}$ |
| 川砂 | | 0.02 | 0.70 | $1.1\times10^{-1}$ |
| 成田砂 | | 0.01 | 0.70 | $1.1\times10^{-2}$ |
| 廃ガラス | $D_r$ = 50% | 0.44 | 0.77 | $1.0\times10^{-2}$ |
| | $D_r$ = 80% | 0.44 | 0.61 | $4.7\times10^{-3}$ |

## 4.　一面せん断試験による廃ガラスの強度特性

盛土の要素レベルでの破壊および変形モードは，平面ひずみに近いと考えられる。このことからせん断時に平面ひずみ状態を容易に再現できる一面せん断試験によって廃ガラスのせん断強度を求めた。

使用した室内一面せん断試験装置の詳細は，文献 9)を参照されたい。この装置では，鉛直および水平方向の応力あるいは変位制御にダイレクトドライブモーターを用いている。試料に作用する垂直力は，下箱の下部に設置されたロードセルによって測定される。また，せん断中はせん断層の発達を妨げないように，上下せん断箱に土試料のせん断層厚に相当すると考えられる平均粒径の 10 倍程度の隙間を設けた [10]。供試体は円筒状であり，そのサイズは直径 60mm，高さ 40mm である。

図 4a), b)は，それぞれゆる詰め供試体（$D_r$ = 50%）と密詰め供試体（$D_r$ = 86%）のせん断応力$\tau$～ 水平変位$\Delta H$～ 鉛直変位$\Delta V$ 関係である。ゆる詰め供試体ではせん断の進行とともに$\tau$ は増加するものの明確なピークを示さず，密詰め供試体では$\tau$が明確なピークを示しており，砂質土のせん断時の挙動と似ている。また，直線近似より求めたせん断抵抗角$\phi$は，相対密度がおおよそ 50%と 86%でそれぞれ 31.8°と 37.3°であり，豊浦砂と同等な値を示している（図 5 参照）。一方，廃ガラスの粘着力は，11～15kPa と豊浦砂（$c$ = 0kPa）より大きな値を示している。

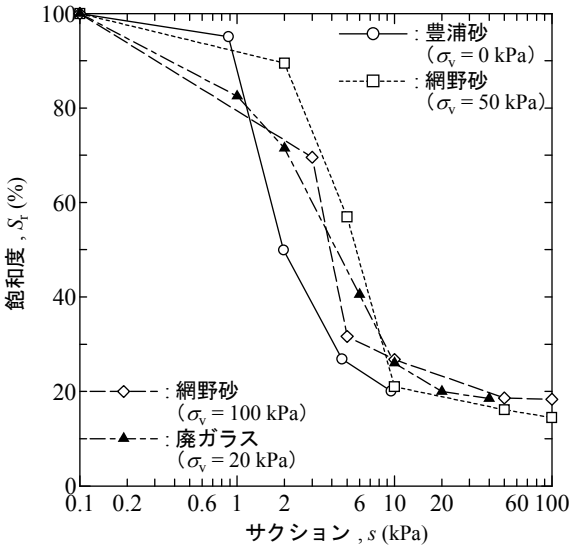


図 3　水分特性曲線の比較

## 5.　BE 試験および非排水繰返し載荷試験による廃ガラスの変形特性

盛土の地震応答解析では微小ひずみレベルの変形特性が重要となる。そこで，圧密 BE 試験を行い，廃ガラスの微小ひずみ領域でのせん断弾性係数 $G$ に与える応力依存性について豊浦砂の試験結果と比較検討した。

BE 試験におけるせん断弾性波速度 $V_s$は次式によって求めることができる。

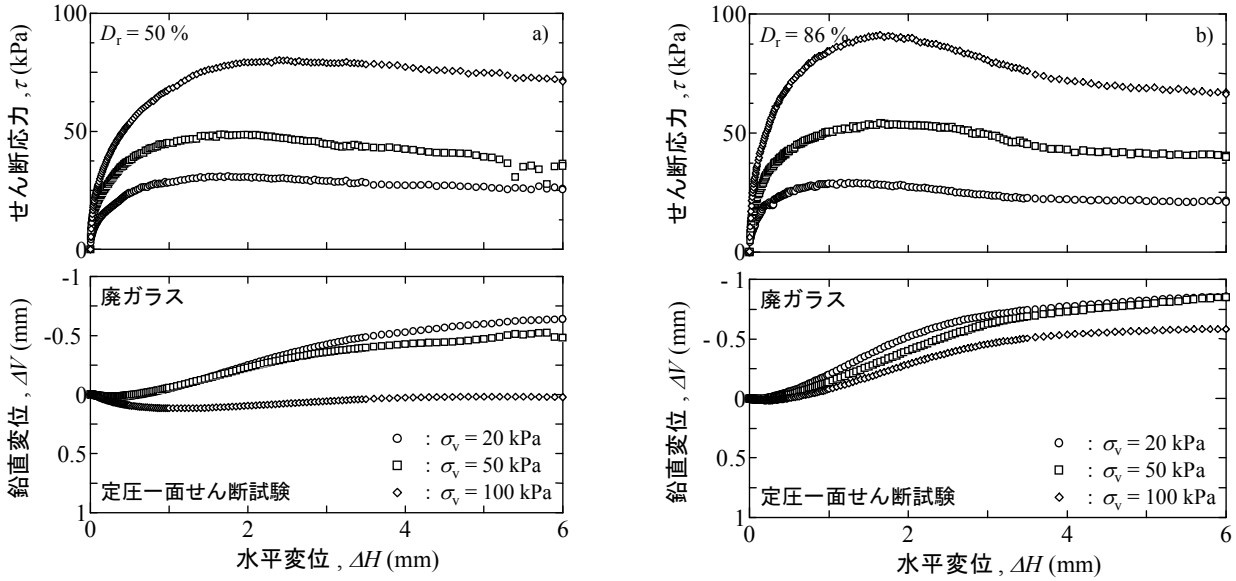


図 4　一面せん断試験のせん断応力$\tau$～ 水平変位$\Delta H$～ 鉛直変位$\Delta V$ 関係（a)$D_r$ = 50%，b)$D_r$= 80%）

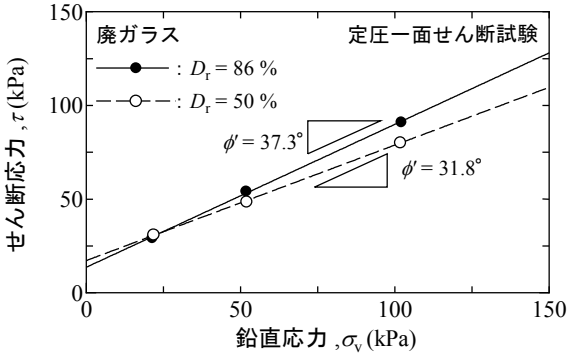


図 5　一面せん断試験結果

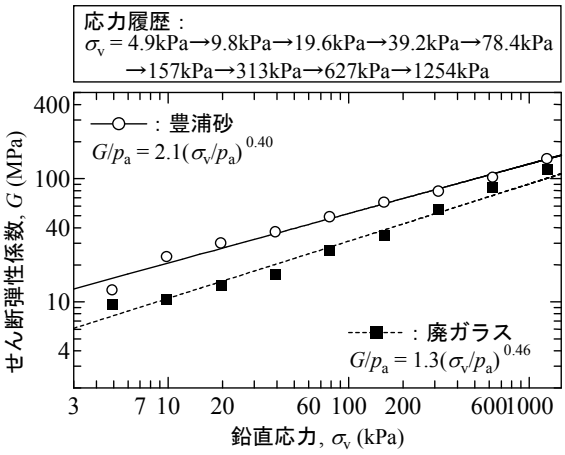


図 6　せん断弾性係数の拘束圧依存性

$$V_s = L / \Delta t \tag{1}$$

ここで，せん断弾性波の伝播距離 $L$ は送・受信一対の BE における先端間の距離先端間の距離（tip-to-tip）とした[11]。また，伝播時間$\Delta t$ はせん断弾性波の送・受信に伴う BE の初動の向きが本来一致すべきことや[12]，周波数や波形の異なる送信波によって得られた受信波形から near-field-effect などを考慮し，せん断弾性波の送・受信が開始する時点間の差（start-to-start）[13]とした。

一方，$G$ を次式により算定できる。

$$G = \rho_t \cdot (V_s)^2 \tag{2}$$

ここで，$\rho_t$は土の湿潤密度である。

供試体は廃ガラスおよび豊浦砂を $D_r$ = 50%となるよう空中落下法で高さ 40mm，直径 60mm の圧密リング内に試料を落下させて作製した。その後，所定の鉛直応力$\sigma_v$で圧縮量が収束したことを確認後に BE 試験を実施した。なお，BE は圧密試験容器のトップキャップおよびペデスタルに設けている。

一般に粒度分布や成分も異なる各種地盤材料の $G$ は次式のような間隙比と有効応力をそれぞれ独立変数（パラメーター）とした関数の積からなる経験式で表現されることが多い[14]。

$$G / p_a = A \cdot f(e) \cdot (p' / p_a)^n \tag{3}$$

ここで，$A$ は実験定数，$f(e)$は間隙比関数，$p'$ は平均有効主応力，$p_a$は無次元化するための基準応力（= 1kPa），$n$，は指数である。本試験結果を式(3)に適用し，$G$ の応力依存性について検討した。

図 6 は $G$ の応力依存性を示している。廃ガラスの $G$ は豊浦砂と比較してやや小さいことがわかる。これは廃ガラスの土粒子密度$\rho_s$ が 2.45g/cm$^3$ であり，供試体乾燥密度$\rho_d$ が小さいことが原因であると考えられる。図中の式に示した指数は $G$ の応力依存性（$\sigma_v$）を示している[15] が，その値は 0.40 ~ 0.46 の狭い範囲にある。以上のことから，廃ガラスの$\rho_s$ および供試体乾燥密度$\rho_d$ が小さいことを考慮すると $G$ の値そのものと応力依存性は自然砂と同程度であると言える。

1995 年に発生した兵庫県南部地震や 2004 年に発生した新潟県中越地震では地震前後の降雨によって高含水比状態にある自然斜面および土構造物に数多くの被害が生じており[16)17)]，水理条件変動が地震時の盛土の安定性に影響を及ぼした複合災害であると報告されている。このことから常時は不飽和状態にある盛土に対しても地震時の液状化に対して検討する必要がある。砂質土を盛土材料と使用する際は特に重要であると考えられる。そこで，地震時の変形特性を把握するために非排水条件下で繰返し三軸試験を行った。供試体は $D_r$ = 50%となるようプラスッチクモールドに空中落下法で試料を落下させて，その後-20℃の冷凍庫で 24 時間凍結させて作製した。また，豊浦砂供試体も同様の方法で作製した。凍結後，供試体をプラスッチクモールドから脱型して，供試体へ脱気水を供給するためのろ紙（1cm×12cm）を供試体の側面に 8 枚貼り付け，ゴムスリーブで覆った供試体を三軸試験装置にセットした。その後，初期有効拘束圧$\sigma'_i$ = 20kPa を保持した状態で二重負圧法と背圧 $u_b$ = 200kPa を与えることで $B$ 値 = 0.96 以上を確保した。$B$ 値の測定後，有効拘束圧$\sigma'_c$ = 50kPa まで d$\sigma'_c$ / dt = 1.0kPa/min で等方圧密を行った。そして，圧密終了を確認後に非排水条件下で片振幅軸ひずみ$(\varepsilon_a)_{SA}$ = 0.1%（周波数 0.05Hz，三角波）の軸ひずみ制御の非排水繰返し載荷を 1250 秒程度実施した。山下ら[18]は中空ねじり試験装置を用いて応力制御とひずみ制御の非排水繰返し試験を実施し，応力制御とひずみ制御の液状化強度の関係は試験法，密度，載荷回数によらずほぼ同一のラインで表現できるとしている。なお，ここでのひずみ制御とは，JGS 0542「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法」[19]および JGS 0543「土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返し三軸試験方法」[20]に準拠するひずみ振幅を一定とする繰返し載荷を指す。さらに山下らは，ひずみ制御の非排水繰返し試験では広範囲のひずみレベ

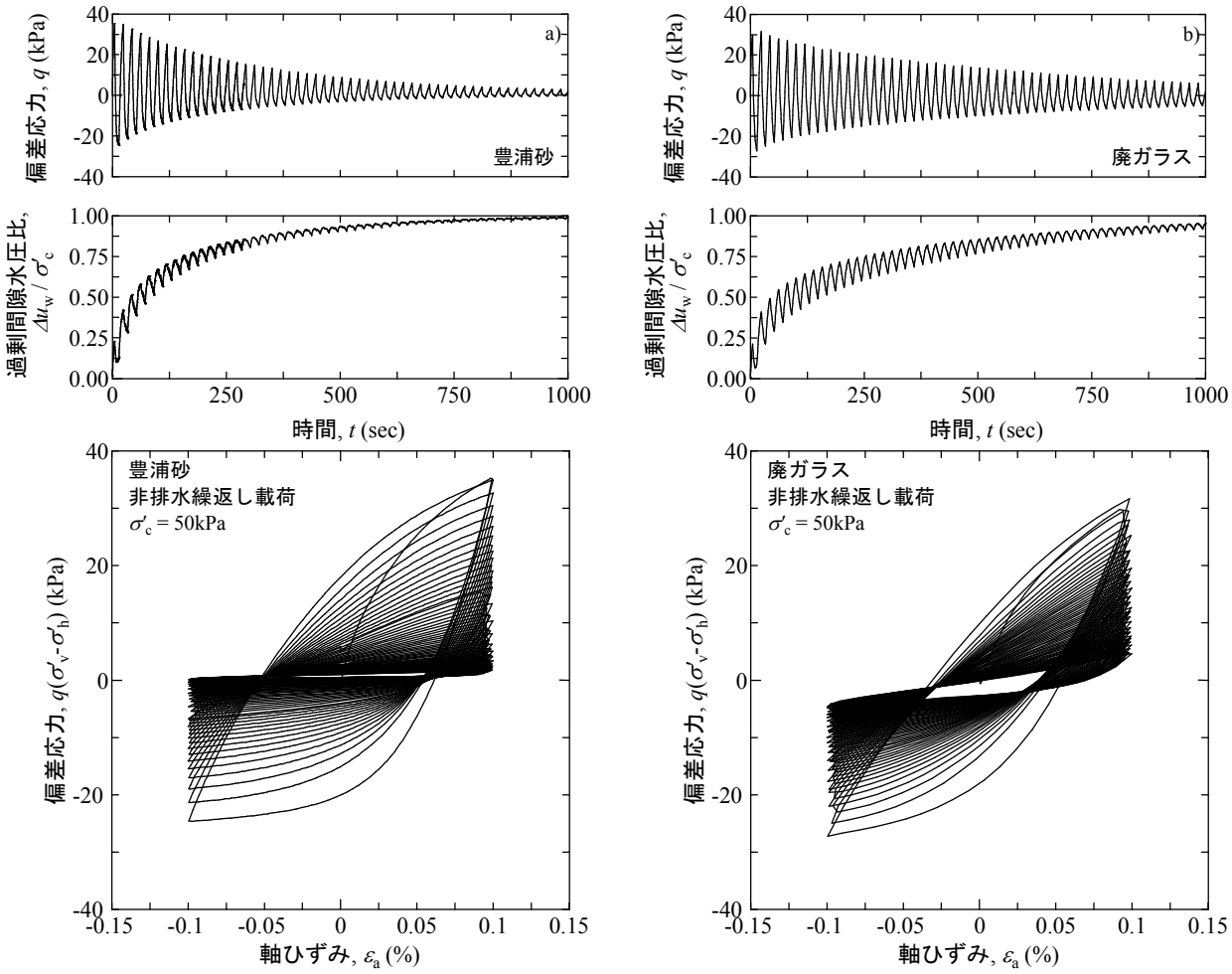


図 7　非排水繰返し三軸試験における偏差応力 $q$ および過剰間隙水圧比$\Delta u_b/\sigma'_c$～$t$ 関係と偏差応力 $q$～ 軸ひずみ$\varepsilon_a$ 関係
(a)豊浦砂，b)廃ガラス)

ルにおいて繰返し載荷時の応力 ～ ひずみ関係（履歴曲線）の閉合性が高いことから変形係数および履歴減衰率を容易かつ正確に測定できるとしている。なお，ここでの履歴曲線の閉合性とは，偏差応力 $q$ が繰返し載荷後に繰返し載荷前の状態となっていることを指している。以上に示した山下ら [18] の試験結果から，ひずみ制御による非排水繰返し載荷は地震時の土要素の変形特性を把握する際には好都合であると考えられるため，本研究においてもひずみ制御による繰返し載荷を実施した。

図 7a), b)はそれぞれ豊浦砂と廃ガラスの非排水繰返し三軸試験結果における偏差応力 $q$ および過剰間隙水圧比$\Delta u_b/\sigma'_c$の経時変化と偏差応力$q$～ 軸ひずみ$\varepsilon_a$関係を示している。豊浦砂は繰返し変形によって過剰間隙水圧が発生し，それに伴い $q$ が低下している。なお，$\Delta u_b/\sigma'_c$は 750 秒付近で 0.95 程度となっている。また $q$～$\varepsilon_a$関係をみると，$q$～$\varepsilon_a$関係の傾きで表すことができるヤング率（剛性）が最終的にはほとんどゼロとなっている。一方，廃ガラスは 1000 秒付近でようやく過剰間隙水圧比$\Delta u_b/\sigma'_c$ が 0.95 程度となっている。また，剛性については豊浦砂ではほぼゼロとなっていたが廃ガラスでは剛性があることがわかる。これは豊浦砂に比べて廃ガラスの粒度分布が良いため，土粒子相互のかみ合わせが良くなったためと考えられる。本研究で用いた $D_r$ = 50%の廃ガラスの変形特性・液状化強度特性は豊浦砂のように分級された自然砂と比べて高いと言えよう。

## 6.　廃ガラスの混合による粒度改善効果

そこで，本研究では河川堤防の強化工事で使用されている細粒分を多量に含む盛土材料に廃ガラスを混入した際の粒度改善効果を圧密試験結果から検討した。

図 8 は混合した試料の粒度曲線である。用いた試料は淀川の堤体強化工事で用いられている細粒分質礫質砂

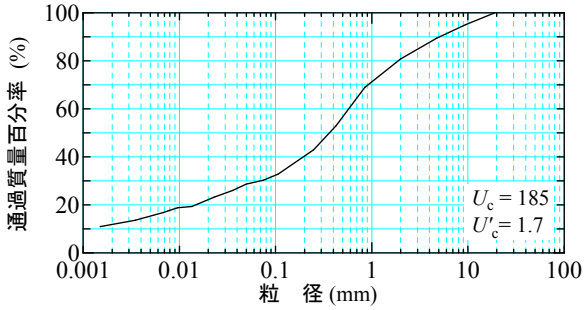


図 8　混合した土の粒度分布

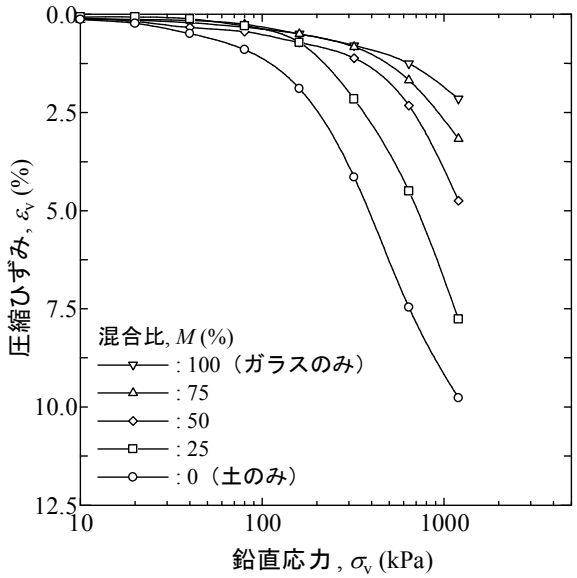


図 9　鉛直応力$\sigma_v$ ~ 圧縮ひずみ$\varepsilon_v$ 関係

（SFG）（$D_{max}$ = 53mm, $U_c$ = 185, $U'_c$ = 1.7, $\rho_s$ = 2.65 g/cm$^3$, $w_L$ = 33.9%, $w_P$ = 20.8%）の 2mm ふるい通過分試料である。なお，最適含水比 $w_{opt}$ および最大乾燥密度$\rho_{dmax}$ は締固め試験（A-b 法）の結果，それぞれ $w_{opt}$ = 11.8%と$\rho_{dmax}$ = 1.953g/cm$^3$ であった。供試体は，供試体体積の占める廃ガラスの体積割合を混合比 $M$ として $M$ = 0, 25, 50, 75, 100%群の供試体を作製した。なお，本研究では供試体の中の廃ガラス量が圧縮特性に及ぼす影響を明確にするためにそれぞれの $M$ で $e$ = 0.65 程度なるように供試体を作製した。それぞれ混合比が異なる供試体間の $e$ の違いは±0.001 であった。供試体は所定の混合比となるように廃ガラスと混合土の 2mm ふるい通過分試料をよく撹拌して，高さ 40mm，直径 60mm の圧密リングに所定の $e$ となるよう静的に締固めて作製した。なお，混合土は $w_{opt}$ となるよう含水比を調整している。

図 9 に圧縮ひずみ$\varepsilon_v$ と鉛直応力$\sigma_v$ 関係を示す。混合比 $M$ = 0%（土のみ）の$\sigma_v$ = 1254kPa における$\varepsilon_v$ は$\varepsilon_v$ = 10%程度であるのに対して，$M$ = 100%では$\varepsilon_v$ = 2.5%程度と約 1/4 程度となっていることがわかる。図 10 は鉛直ひずみ$\varepsilon_v$ と混合比 $M$ 関係を鉛直応力$\sigma_v$ ごとに示している。この関係より廃ガラスの混合による圧縮特性の改善効果は$\sigma_v$ が大きいほど顕著であることがわかる。以上の結果は，廃ガラスの混合比の増加に伴い，混合土中に占める廃ガラスの割合が増加し，廃ガラスの力学特性が卓越したためである。

以上の結果から廃ガラスを混合することで圧縮特性が大きく改善でき，廃ガラスの混合は細粒分を多量に含んだ盛土材料を使用した際の盛土の沈下抑制に有効な改良工法である可能性がある。一方，大嶺・落合 [21]はカオリン粘土と豊浦砂を混合した供試体を用いて圧密試験を実施し，細粒分含有率 $F_c$ が低下すると体積圧縮係数 $m_v$ が小さくなると報告している。このことから，今後は本研究で用いた廃ガラスと同程度の粒度分布を有する砂質土に対しても同様の実験を行い，廃ガラス材特有の物性が混合土の力学

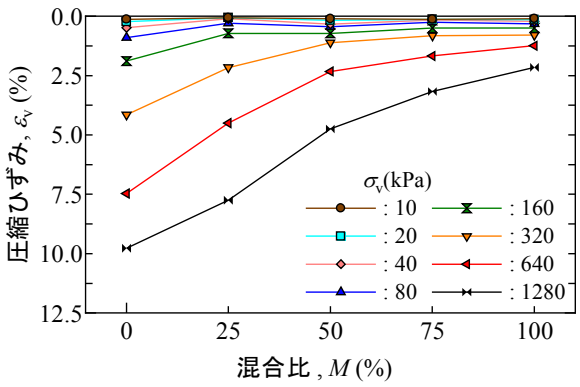


図 10　混合比$M$~ 圧縮ひずみ$\varepsilon_v$ 関係

特性に関与しているかどうかを検討する必要がある。

## 7.　まとめ

本研究では廃ガラスの地盤工学分野での有効利用促進のために，工学的性質を一連の室内試験により廃ガラスの工学的特性を明らかにし，自然砂の試験結果と比較することで今後の利用価値について議論している。本研究より得られた主な知見を以下にまとめる。

(1)　本研究で用いた廃ガラスの粒度特性は自然砂よりも良好であり，透水特性および保水性は自然砂とほぼ同程度であった。土粒子密度は廃ガラスに付着したラベルやガラス内に封入された空気などの影響で一般的な土粒子密度より小さい値となった。

(2)　pH の経時変化はガラスの洗浄の有無では大きな違いはなく，pH = 7.0 程度であった。

(3)　一面せん断試験の結果から，内部摩擦角に関しては豊浦砂と同程度の値であったが，粘着力は若干大きい値となった。

(4)　微小ひずみ領域でのせん断弾性係数については，廃ガラスの密度が低いことを考慮すると応力依存性も含めて豊浦砂と同程度であった。

(5)　ひずみ制御の非排水繰返し三軸試験の結果から，同じ相対密度および有効拘束圧では廃ガラスは豊浦砂と比べて液状化しにくいことがわかった。

(6)　廃ガラスを混合することによって本研究で使用したシルト質土については圧縮特性が改善された。すなわち廃ガラスを混合による粒度改善効果を期待した盛土材料の改良が有効であることが示唆された。

今後は，廃ガラスの粒子形状や粒径に着目し，同様の試験を実施して，廃ガラスの盛土材料への適用性をより詳細に検討していく予定である。

## 謝辞

本研究の一部は財団法人 兵庫県環境クリエイトセンター「廃ガラス適正リサイクル研究会」の研究の一環として行われたものである。また，廃ガラスの保水性試験に関して，神戸大学大学院工学研究科研究員の金秉洙氏に多大な協力を受けた。末筆ながら記して深甚なる謝意を表す。

## 参 考 文 献


1) 環境省，容器包装リサイクル法，http://www.env.go.jp/recycle/yoki/outline/index.html，2009.
2) 福岡県リサイクル総合研究センター，福岡県リサイクル総合研究センター 第4回 研究成果発表会：http://www.recycle-ken.or.jp/k_seika/2006/PDF/resultGlassRecycle.pdf，2009.
3) 鈴木壽，板坂悠司，槙野 積志：ヒートアイランド対策用路盤材料としての廃ガラス発泡骨材の熱的・力学的特性，地盤工学ジャーナル，Vol. 1，No. 3，pp.85-93，2006.
4) 鈴木 壽，高橋和希，槙野 積志：廃ガラスカレットの地盤材料としての熱的・力学的性質に関する研究，地盤工学ジャーナル，Vol. 4，No. 3，pp.225-232，2009.
5) 三上大道，リ ジナ，古関潤一，佐藤剛司，矢嶋千浩：廃ガラスリサイクル粗粒材料の繰返し三軸試験, 生産研究 Vol.60, No.6，pp.571-574，2008.
6) 李基豪，風間基樹，寺田賢二郎：カキ殻混合土の非排水せん断強度・変形特性, 土木学会論文集, No.701/Ⅲ-58, pp.303-314, 2002.
7) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説－二分冊の 2－，丸善㈱，pp.458，2009.
8) Kawajiri, S., Shibuya, S., Kato, S. and Kawaguchi, T. : Effects of matric suction on elastic shear modulus for three unsaturated soils, Proc. of Fifth International conference of unsaturated soils, pp.271-275, 2010.
9) Shibuya, S., Kawaguchi, T. and Chae, J. : Failure of Reinforced Earth as Attacked by Typhoon No.23 in 2004, Soils and Foundations, Vol.47, No.1, pp.153-160, 2007.
10) Shibuya, S., Mitachi, T. and Tamate, S. : Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear, Géotechnique, Vol.47, No.4, pp.769-790, 1997.
11) Viggiani, G. and Atkinson, J. H. : Interpretation of bender element tests, Géotechnique, Vol.45, No.1, pp.149-154, 1995.
12) 桑野二郎，本江邦旬，内田智也：ベンダーエレメントによる三軸供試体内せん断波速度計測，第 34 回地盤工学研究発表会概要集，1，pp.991-992，1999.
13) 川口貴之，三田地利之，澁谷啓，佐野佶房：室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数 $G$ の評価，土木学会論文集，No.694/Ⅲ-57，pp.195-207，2001.
14) 例えば，Hardin, B.O. and Richart, F. E. Jr. : Elastic wave velocities in granular soils, Journal of SMF Div., ASCE, Vol.89, No.SM1, pp.33-65, 1963.
15) 例えば，澁谷啓，小高猛司，龍岡文夫：地盤材料の小ひずみでの非線形性と地盤変形問題への適用2.地盤材料の変形特性（その 1），土と基礎，Vol.45，No.4，pp59-64，1997.
16) 沖村孝，二木幹夫，岡本敦，南部光弘：兵庫県南部地震による宅地地盤被害と各種要因との関係分析，土木学会論文集，No.623/III-43，1999.
17) 佐々恭二，福岡浩，汪発武，王功輝二：2004 年新潟県中越地震による斜面災害, 京都大学防災研究所年報, 第 48 号, 2005.
18) 山下聡，鈴木輝之，高橋公志，千葉晋明：トルクおよび回転角制御 DD モータを用いた中空ねじり試験装置の試作, 第 31 回地盤工学研究発表会，pp.21-22，1996.
19) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説－二分冊の 1－，丸善㈱，pp.750-767，2009.
20) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説－二分冊の 1－，丸善㈱，pp.767-783，2009.
21) 大嶺聖，落合英俊：二種混合体の応力－ひずみ関係と混合土の一次元圧縮特性への適用, 土木学会論文集, No.448/Ⅲ-19, pp.121-130，1992.


（2010. 8. 23　受付）

# Engineering properties of a waste glass by laboratory tests

MinSu JUNG[1], Shunzo KAWAJIRI[2], Yoshiki NAKATANI[3]
Minami MIURA[3] and Satoru SHIBUYA[1]

1 Graduate School of Civil Engineering, Kobe University
2 Graduate School of Civil Engineering, Kobe University
3 Graduate School of Civil Engineering, Kobe University

## Abstract

Engineering properties of waste glass is evaluated and discussed in this paper. Firstly, the basic properties of a waste glass were examined by performing the physical properties test as well as pH test. Secondly, the deformation and strength of waste glass were measured by bender element test, direct shear test and triaxial cyclic loading test. Finally, consolidation test was carried out to examine the effect of evaluate waste glass content to improve the compressibility of a silty soil. Based on the results of these laboratory tests, a practical implication is posed how we possibly improve the properties of waste glass fragment in use for geotechnical engineering works.

Key words : waste glass, water retantively, elastic shear modulus, undrained cyclic triaxial test