

ブラウン管パネルガラス製発泡ガラス材とその混合土の地盤工学的特性

鳥居宣之* 古宮雅之** 澁谷啓**

Geotechnical Properties of Foamed Glass Material Made from CRT Display and its Mixed Soil

Nobuyuki TORII* Masayuki FURUMIYA** Satoru SHIBUYA**

ABSTRACT

In recent years, the development and the practical application of various recycled materials as a campaign with the formation of a Recycling Oriented Society have been promoted. A foamed glass which is one of the recycling materials of waste bottle glass can be utilized as a geotechnical material. In Japan, because the analog broadcasting was ended on July, 2011, it is estimated that many Cathode Ray Tube (CRT) TVs would be discarded in the near future. Thus, some method for the new usage of a discarded CRT should be studied. The aim of this study is to investigate the applicability as a Geo-Material of a foamed glass material made from the CRT panel glass. A series of the laboratory soil tests using the foamed glass and its mixed soil were carried out.

Keywords : foamed glass material, CRT panel glass, geotechnical property and laboratory soil test

1. はじめに

現在、廃棄物の発生を抑制するとともに、廃棄物をリサイクルすることによって廃棄物の減量を図ることが求められており、廃棄物のリサイクルに関する様々な法整備（例えば、平成12年5月の建設リサイクル法）がなされてきた。これに伴って政府・民間が協同してリサイクル率を高める動きが活発化し、様々なリサイクル製品の開発、活用が進められている。

昨年の7月に地上アナログ放送が終了したことを受け、多量のブラウン管テレビが排出されると予想されている。廃棄されたブラウン管テレビは、ブラウン管と基盤類・プラスチックに分別され、ブラウン管はさらにパネルガラスとファンネルガラスに分割され、それぞれカレット化した後、海外に輸出され、再度ブラウン管へとリサイクルされてきた。しかし、ブラウン管テレビの世界需要は年々減少しており、ブラウン管テレビの廃棄量は増加すると考えられるため、ガラス

カレットの余剰が発生すると予想されている⁽¹⁾。ブラウン管のパネルガラスとファンネルガラスの重量比は2:1⁽²⁾であるため、ガラスカレットの余剰の発生抑制にはパネルガラスの再利用の用途を増加させることが効果的であると考えられ、ブラウン管パネルガラスの新たな再利用方法の確立が求められている。

廃ガラスの再利用の用途として、廃びんガラスを粉末加工したガラスパウダーに発泡剤などの添加剤を加え、高温焼成することで得られる軽量・多孔質の人工骨材である発泡ガラス材が開発され、建設分野への有効利用に向けた研究が行われてきている⁽³⁾。パネルガラスは有害物質を含んでいないため、廃びんガラスと同様、発泡ガラス材としての再利用が可能であると考えられるが、現状では地盤材料としての適用例がほとんどない状況である。また、ブラウン管パネルガラスとびんガラスでは組成が異なる⁽⁴⁾ため、ブラウン管パネルガラスを発泡ガラス材にして地盤材料として再利用する際には、その地盤工学的特性を把握しておく必要があると考えられる。

本研究ではブラウン管パネルガラスから製造された発泡ガラス材の地盤材料としての適用性を調べること

* 都市工学科 准教授

** 神戸大学大学院

を目的に、各種土質試験を行った。具体的には、発泡ガラス材の締固め特性、破碎性、pH、透水性、強度特性などを調べた。また、比較のため発泡ガラス材に土試料を加えた混合土についても同様の試験を行い、その結果から地盤材料としての適用性について考察した。

2. 試料の概要

2.1 試験試料

本研究で用いた発泡ガラス材は、ブラウン管パネルガラスを原料とし、発泡剤として自然材料である二枚貝を使用した環境に配慮したポーラスガラスと呼ばれるものである。一般に土は粒度分布を持つ材料であり、粒度分布が異なるとその性質は変化することが知られている。したがって、粒状材料の地盤工学的性質を評価する場合、基準となる粒度分布を決める必要がある。本研究では同じリサイクル材料であるアッシュストーンの粒度分布を採用することとした。これは、アッシュストーンが発泡ガラス材と同様、軽量かつ吸水率が高いという性質を持つためである。また、発泡ガラス材に混合する土試料には、神戸市内の橋の工事の際に発生した細粒分質礫質砂(SFG)を用いることとした。図1に用いた発泡ガラス材試料（粒径19mm以上）ならびに細粒分質礫質砂の外観を示す。

2.2 試料の基本物性

発泡ガラス材の基本物性を知るため、密度試験、含水比試験、粒度試験ならびに吸水率試験を行った。なお、密度試験は粒径2mm以下の試料について行った。上記試験より得られた基本物性値を表1に、粒径加積曲線を図2に示す。

表1より、発泡ガラス材の密度は2.500g/cm³で、一般的な土と比べてやや小さな値であることがわかる。この結果は、粒子内に間隙がほとんど存在しない粒径2mm以下の試料について試験を行ったもので、発泡ガラス材は粒径が大きくなるにつれて、粒子自体の内部間隙が増えてより軽量になると考えられるので、粒度調整を行った試料全体としては一般的な土と比べて非常に軽量となることが考えられる。吸水率は、多少バ

ラつきがあるものの、30~40%程度であり、一般的な砂礫材料に比べて非常に大きな吸水性を持つといえる。

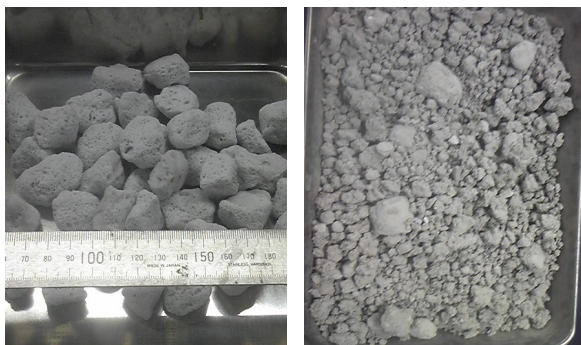
2.3 試料調整

本研究で用いた発泡ガラス材は製造過程で2mm未満、2mm以上5mm未満、5mm以上10mm未満、10mm以上25mm未満に分級されており、所定の粒度分布で試験を行うため、粒度調整を行った。具体的には、発泡ガラス材を、JIS A 1204「土の粒度試験」で使用されるふるい目の大きさに対応した粒度階（小さいものから順に、75μm以下、75~106μm、・・・、9.5~19mm、19~26.5mm）に分級した後、所定の粒度分布になるように各粒度階から必要量を採取し、十分混合したものを試料とした。

混合土の試料調整については、混合土の乾燥質量における細粒分質礫質砂の乾燥質量百分率を混合率と定義し、混合率30%（発泡ガラス材：土=7：3）、50%（発泡ガラス材：土=5：5）の二種類の混合土を作成した。作成した混合土の粒径加積曲線を図2に示す。なお、定義上、発泡ガラス材単体は混合率0%、細粒分質礫質砂単体は混合率100%となる。この定義に従い、所定の混合率になるように発泡ガラス材、細粒分質礫質砂の必要量を採取し、十分に混合したものを混合土試料とした。

表1 基本物性.

物性値	発泡ガラス材
$\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.500
w(%)	0.0
吸水率(%)	30~40
U_c	92.6
U_c'	1.66
$D_{\max}(\text{mm})$	25.0
$D_{50}(\text{mm})$	7.00



a)発泡ガラス材 b) 細粒分質礫質砂

図1 使用した試料の外観.

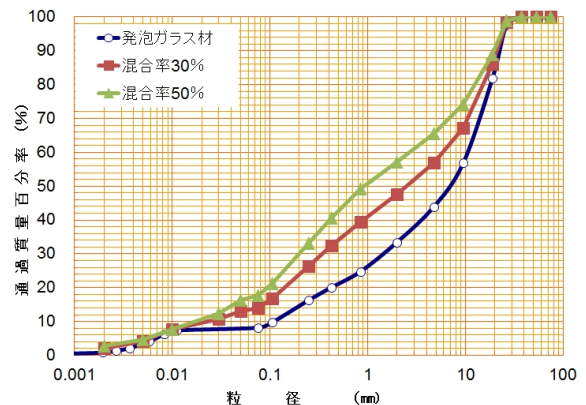


図2 粒径加積曲線.

3. 試験の概要

本研究では、発泡ガラス材単体と混合率の異なる 2 種類の混合土（混合率 30%、50%）について締固め試験、粒度試験（締固めによる破碎性の評価）、pH 試験、透水試験、三軸圧縮試験を行った。

3.1 締固め試験

発泡ガラス材および混合土について締固め試験を実施した。試験は JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験」に準じて行い、試料の最大粒径が 19mm 以上であることと、発泡ガラス材が破碎を生じやすい材料であることを考慮し、突固め方法は B-c 法（湿潤法、非繰り返し法）を採用し、内径 15cm、容積 2209cm³ のモールドを用い、各層 55 回ずつ 3 層に分けて突固めた。なお、突固めは自動締固め試験装置で自動的に行い、2.5kg のランマーを 30cm の高さから自由落下させた。

3.2 粒度試験（締固めによる破碎性の評価）

びんガラスを用いた発泡ガラス材は、破碎を生じやすい材料であることが指摘⁽³⁾されている。粒子破碎が起こると締固め特性や透水性に大きな影響を及ぼすため、締固め前後の粒径加積曲線の比較を行い、本研究で用いた発泡ガラス材の破碎性を検証した。なお、締固め前の粒径加積曲線は、図 2 の粒径加積曲線を採用し、締固め後の粒度試験は、締固め後の試料を全て混合したものから採取した試料を用いて行った。

なお、破碎性を表わす尺度となる破碎率に関してはこれまで様々な提案がなされてきたが、現在汎用されている Marsal⁽⁵⁾の粒子破碎率 B_M を本研究では用いることとした。 B_M とは、各粒度階における粒子破碎前後の残留質量百分率の差の負符号の総和と定義されており、これを式で表すと次のようになる（図 3 参照）。

$$B_M = \sum \Delta m(d_k) \quad (1)$$

ここに、 $\Sigma \Delta m(d_k)$ ：図 3 に示す試験前後の粒径加積曲線より得られた、ふるい目 d_{k+1} を通過し d_k に残留する通過質量百分率 ($m_i(d_k)$, $m_f(d_k)$) の差分 ($\Delta m(d_k) = m_i(d_k) - m_f(d_k)$) に対し、 $\Delta m(d_k) \leq 0$ のみを加えた値。

なお、本研究では、土の粒度試験で使用されるふるい目の大きさに対応した粒度階（小さいものから順に、

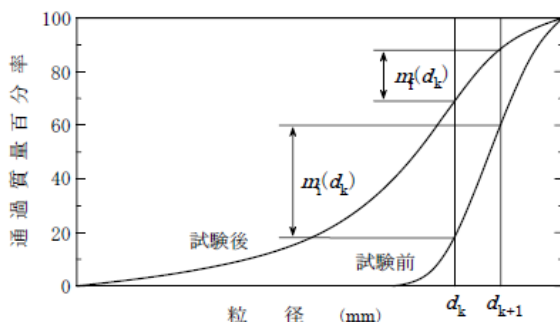


図 3 Marsal の粒子破碎率 B_M の概念図⁽⁵⁾。

75 μ m 未満, 75 μ m 以上 106 μ m 未満, . . . , 9.5mm 以上 19mm 未満, 19mm 以上 26.5mm 未満) を基準に B_M の計算, 比較を行うこととした。

3.3 pH 試験

廃棄物再生材料を地盤材料として利用する場合、周辺土壤に及ぼす環境的な影響について検討する必要がある。そこで、本研究では発泡ガラス材と混合土の pH を測定することとした。具体的には、蒸留水 2000ml に試料 300g を加えて攪拌して懸濁液を作成し、3 時間後に pH を測定した。図 4 は pH 計測時の様子である。

3.4 透水試験

本研究では、定水位透水試験を行い、発泡ガラス材の透水性と低透水材料に対する透水性改善効果について調べることにした。

発泡ガラス材単体については締固め度 $D_c = 85$ 、95% の供試体について試験を行い、混合土については締固め度 $D_c = 90$ 、95% の供試体について試験を行った。

a) 供試体の作成

透水円筒は内径 10cm、容積 1000cm³ のものを使用し、所定の締固め度になるように試料を準備し、3 層に分けて油圧ジャッキを用いて静的に締固めた。

b) 試験手順

以下に試験手順を示す。

①供試体をセットした透水円筒に透水円筒カラーを装着し、底部から水浸させ、供試体を飽和させる。

②透水円筒カラーに注水し、越流口から越流させ、給水側の水位を一定に保つ。

③越流水槽から越流する様子を調べ、越流量がほぼ一定になることを確認する。

④測定時間における流出水量を測定する。

⑤④を 5 回行い、平均値を求める。

3.5 三軸圧縮試験

発泡ガラス材の強度特性を調べるため、三軸圧縮試験を行った。試料は 19mm ふるい通過分を使用し、締固め試験より得られた最適含水比で、締固め度 $D_c = 95\%$ となるように試料を準備し、直径 10cm、高さ 20cm の供試体を作製した。圧密・せん断条件は圧密排水



図 4 pH 計測時の様子。

(CD) 条件とし、せん断過程で発泡ガラス材が破碎により吸水し、試験結果に影響を及ぼす可能性があることから、この影響を受ける時間を減じるため、一般の三軸圧縮試験より大きいひずみ速度 $0.3\%/min$ でせん断を行うこととした。なお、せん断時の有効拘束圧は $50, 100, 200kPa$ とした。図 5 は、本研究で用いた三軸圧縮試験機である。

a) 供試体の作製

供試体の作製の際には負圧法を用いた。上述した供試体寸法に適合するモールドの内面に負圧を与えてゴムスリーブを密着させ、モールド内に試料を 3 層に分けて動的に締固めることにより供試体を作製した（図 6 参照）。なお、圧力室内では、圧力室内に水を入れ、供試体の有効等方応力を変化させないように負圧をセル圧に置き換えることとした。

b) 供試体の飽和

本研究では、以下の手順で供試体の飽和度を高めた。

- ①セル圧を加えた供試体内の間隙の空気を炭酸ガスと置き換える。
- ②セル圧を加えた供試体内の内部に脱気水を通水する。
- ③供試体内の有効拘束圧を変化させないように $200kPa$ の背圧を加える。

c) 圧密過程

前述した手順で供試体の飽和度を高め、 B 値が 0.95 以上となっているのを確認した後、セル圧を増加させ所定の圧密応力で等方圧密を行った。なお、軸変位量と排水量を計測し、 $3t$ 法で圧密が収束したのが確認できるまで圧密を行った。

d) せん断過程

圧密が完了した供試体をひずみ速度 $0.3\%/min$ で軸ひずみが 15% に到達するまでせん断した。せん断の手順については以下のとおりである。

- ①荷重計と変位計の原点の確認，調整を行う。
- ②セル圧を一定として、ひずみ速度が一定になるように連続的に供試体を圧縮する。
- ③圧縮中は軸圧縮力，軸変位量および体積変化量を計測する。
- ④軸ひずみが 15% に達したとき，圧縮を終了する。
- ⑤供試体を圧力室から取り出し，供試体の変形・破壊状況などを観察し，記録する（図 7 参照）。

4. 試験結果および考察

4.1 締固め試験

図 8 に発泡ガラス材，混合土，細粒分質礫質砂の締固め曲線を，図 9 に混合率と最適含水比 w_{opt} および最大乾燥密度 ρ_{dmax} の関係を示す。

a) 発泡ガラス材の締固め特性

発泡ガラス材の最適含水比 w_{opt} は 51.5% ，最大乾燥密度 ρ_{dmax} は $0.71g/cm^3$ であった。締固め曲線はなだら



図 5 三軸圧縮試験機。

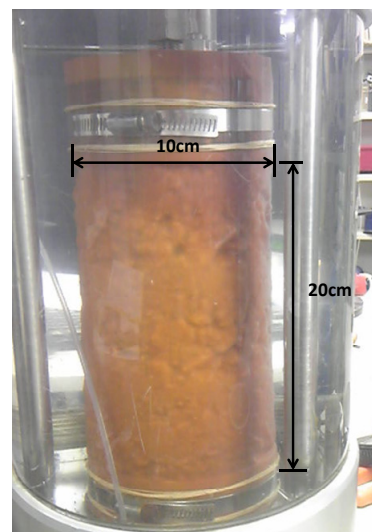


図 6 供試体外観（混合率 30%）。



図 7 せん断終了時の供試体の外観（混合率 30%：有効拘束圧 $200kPa$ ）。

かな形状で、最適含水比から離れた領域においても乾燥密度は大きく変化せず、ほぼ一定の値となった。一般的に粒径幅の広い粗粒土ほど締固め曲線は鋭く立った形状で左上に位置し、このため最適含水比は小さく、最大乾燥密度は高くなる傾向がある⁽⁶⁾とされている。本研究で採用した発泡ガラス材の基準粒度分布は、均等係数 $U_c = 92.6$ 、曲率係数 $U_c' = 1.66$ で粒径幅の広い試料といえるが、上述した傾向とは異なり最適含水比は大きく、最大乾燥密度は小さい値であった。前者の要因としては、発泡ガラス材の吸水性の高さが挙げられ、加えた水が発泡ガラス材の粒子内に吸収され、間隙水として作用するのに多くの水が必要であったため、最適含水比が大きくなったと考えられる。後者の要因としては、発泡ガラス材の軽量性が挙げられる。

b) 混合土の締固め特性

細粒分質礫質砂を 30% 含む混合土の最適含水比 w_{opt} は 40.5%，最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 0.88g/cm^3 であった。締固め曲線はなだらかな形状で、発泡ガラス材単体と同様、最適含水比から離れた領域ではほぼ一定の乾燥密度を示した。

細粒分質礫質砂を 50% 含む混合土の最適含水比 w_{opt} は 30.5%，最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 0.98g/cm^3 であった。締固め曲線は最もなだらかな形状を示し、含水比が最適含水比を離れても乾燥密度は大きく変化しなかった。

c) 締固め特性に関する考察

図 8 より、各試料の締固め曲線は、いずれも細粒分質礫質砂と比較してなだらかな形状を示しており、含水比 $w = 10 \sim 50\%$ の広い範囲で乾燥密度が大きく変化しないことがわかる。また、いずれの試料も含水比が高い領域においても締固め曲線がゼロ空気間隙曲線に漸近していないことがわかる。しかしながら、混合率が増加するにつれて締固め曲線が細粒分質礫質砂のそれに近づき、それに伴いゼロ空気間隙曲線に漸近する様子が確認できる。

図 9 より、混合率が高くなるにつれて最適含水比が小さく、最大乾燥密度が大きくなり、細粒分質礫質砂の最適含水比、最大乾燥密度に概ね線形的に近づいていることが確認できる。このことから、締固め特性が大きく変化するような特殊な混合率は存在せず、混合土は発泡ガラス材と細粒分質礫質砂の中間的な締固め特性を示し、混合率を変化させることで $0.7 \sim 1.5\text{g/cm}^3$ 程度の任意の密度に調整することが可能であると考えられる。

4.2 粒度試験(締固めによる破碎性の評価)

図 10 に粒度試験の結果を、図 11 に混合率と破碎率の関係を示す。発泡ガラス材単体については沈降分析を行わず、ふるい分析のみを行なっているが、これは発泡ガラス材単体ではほとんど団粒化しておらず、また、粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の質量百分率が締固め前後であまり変化していなかったためである。

a) 締固め前後における粒径加積曲線の変化

図 10 から、いずれの試料も締固め後の粒径加積曲線が締固め前に比べて左側にシフトしていることが確認できる。これは粗粒分が当初より小さな粒度階へ移動したことを表しており、締固めにより破碎が生じてい

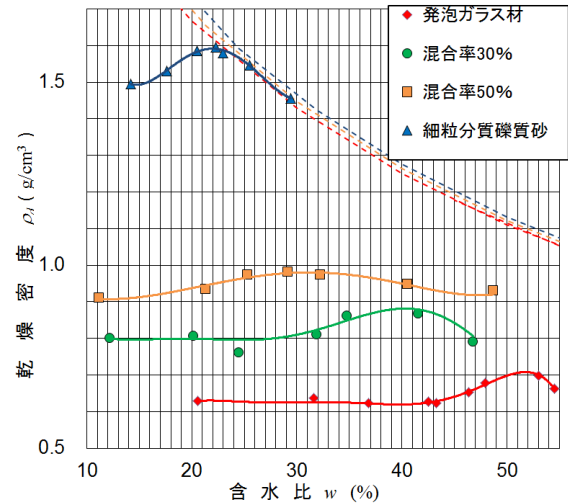
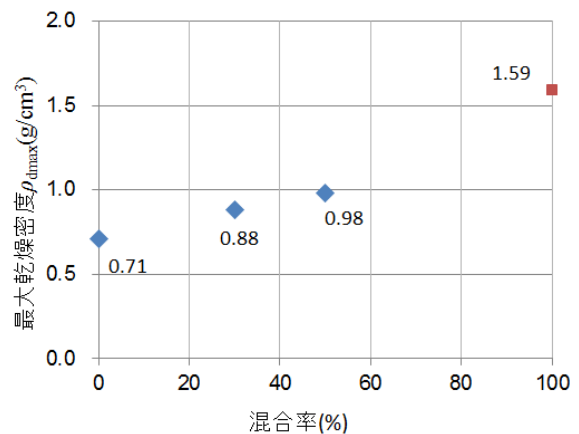
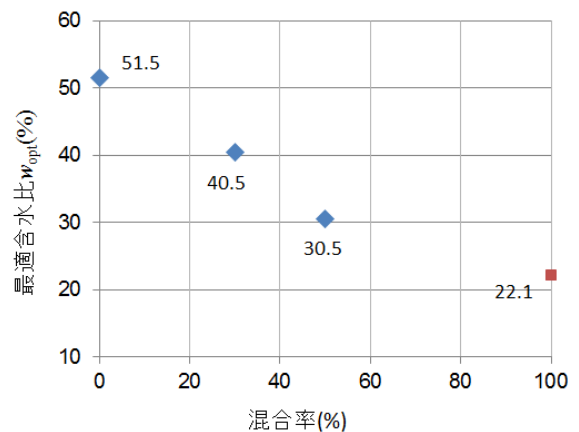


図 8 各試料の締固め曲線。



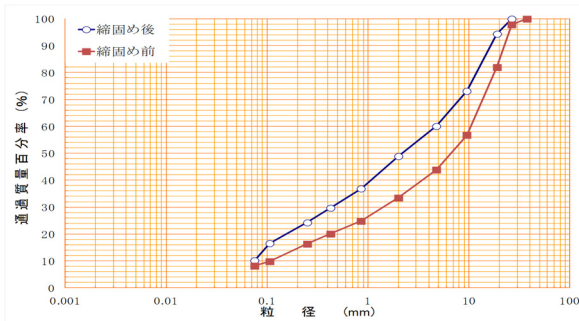
a) 混合率 vs 最大乾燥密度



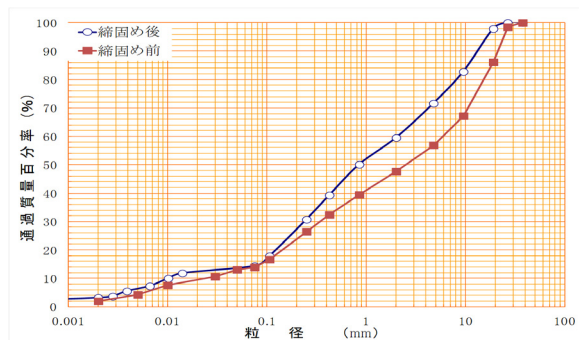
b) 混合率 vs 最適含水比

図 9 混合率と最大乾燥密度、最適含水比の関係。

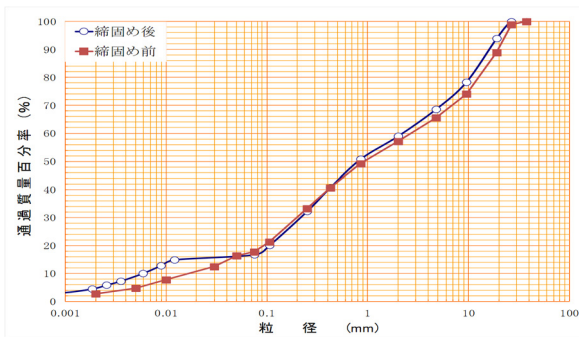
るといえる。締固め前後の粒径加積曲線の変化は発泡ガラス材単体が最も大きく、混合率 30%、50%の順に



a) 発泡ガラス材



b) 混合土（混合率 30%）



c) 混合土（混合率 50%）

図 10 各試料の粒度試験結果.

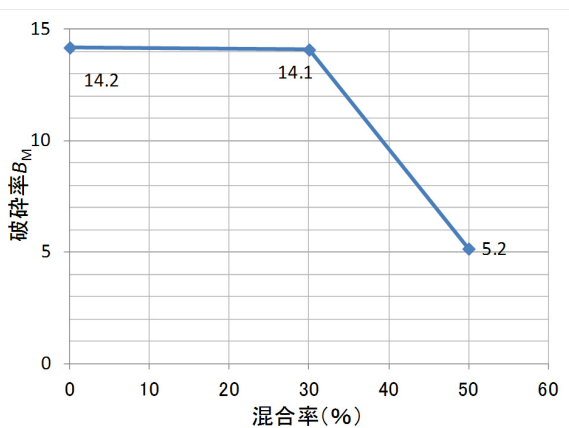


図 11 混合率と破砕率の関係.

小さくなっており、細粒分質礫質砂の割合が大きくなるほど粒径加積曲線が変化していないことがわかる。また、混合率 50%では、他の試料と比べて粒径加積曲線の変化が非常に小さく、締固め前の粒径加積曲線とほぼ同じ形状を示した。

b) 混合率と破砕率の関係

図 11 から、混合率が増加するにつれて破砕率が減少し、混合率 50%では破砕率が大幅に低下することが確認できる。これは、土粒子が発泡ガラス材の間隙を充填し、緩衝材として作用したためであると考えられる。また、発泡ガラス材単体と混合率 30%ではほとんど破砕率が変化していないことから、土粒子の緩衝作用は一定の混合率に到達した際に発揮されるものと考えられる。

4.3 pH 試験

表 2 に pH 試験の結果を示す。

表 2 から、発泡ガラス材および混合土の pH は、いずれも 10 以上で高いアルカリ性を示すことが分かる。また、混合率が増加し、発泡ガラス材の割合が減少するにつれて、若干ではあるが pH が減少することが確認できる。

水質汚濁防止法による排水基準の pH の許容限度は 5.8~8.6（海域 5.0~9.0）⁽⁷⁾と定められており、発泡ガラス材はこの許容値を超えている。したがって、河川、湖沼、下水道等の公共用水域および地下水に溶出水が流入する恐れのある場合には、覆土を施すなどの対策が必要であると考えられる。

4.4 透水試験

表 3 に透水試験の結果を示す。

表 3 から、発泡ガラス材の透水係数は締固め度 $D_c = 85\%$ で $4.25 \times 10^{-4}(\text{m/s})$ 、 $D_c = 95\%$ で $1.09 \times 10^{-4}(\text{m/s})$ であり、良好な透水性を示すことがわかる。また、いずれの試料も締固め度が大きくなると透水性が低下していることがわかる。つぎに各材料の透水性の比較を行う。

a) アッシュストーンとの比較

締固め度 $D_c = 85\%$ においては、発泡ガラス材、アッシュストーンともに同程度の透水性を示しているが、締固め度 $D_c = 95\%$ においては、発泡ガラス材がアッシュストーンの約 2 倍の透水性を示している。また、締

表 2 pH 試験結果.

試料	pH
発泡ガラス材	10.73
混合土（混合率 30%）	10.39
混合土（混合率 70%）	10.13
細粒分質礫質砂	8.91

表3 透水試験結果.

	試料	締固め度 D_c		
		85%	90%	95%
透水係数 k_{15} (m/s)	発泡ガラス材	4.25×10^{-4}	-	1.09×10^{-4}
	混合率30%	-	1.85×10^{-5}	2.59×10^{-6}
	混合率50%	-	4.30×10^{-5}	4.98×10^{-6}
	細粒分質礫質砂	-	3.83×10^{-7}	-
	アッシュストーン	4.70×10^{-4}	-	5.90×10^{-5}

固め度が 85%から 95%へ増加した際に、発泡ガラス材は透水係数が約 1/4 に減少したのに対し、アッシュストーンは約 1/10 にまで減少している。これらのことから、発泡ガラス材はアッシュストーンと同等以上の透水性を持つと考えられる。

b) 細粒分質礫質砂との比較

表3の締固め度 $D_c = 90\%$ の列から、発泡ガラス材の透水性改善効果が読み取れる。混合率 30%の透水係数が $1.85 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ 、混合率 50%の透水係数が $4.30 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ となっており、細粒分質礫質砂の透水係数 $3.83 \times 10^{-7}(\text{m/s})$ と比較して大幅に透水性が改善されていることがわかる。また、混合率 50%については、混合率 30%に比べて細粒分質礫質砂の割合が増加しているにもかかわらず透水係数が減少せず、むしろ増加していることが分かる。これは、2つの混合土の破碎性の違いに起因するものと思われる。すなわち、混合率 30%の破碎率が 14.1%に対して混合率 50%の破碎率が 5.2%と小さく、破碎による透水性の低下が、混合率の増加による透水性の低下を上回ったものと考えられる。

c) 混合土との比較

表3の締固め度 $D_c = 95\%$ の列から、発泡ガラス材と混合土の透水性を比較すると、透水性は高い順に発泡ガラス材、混合率 50%、混合率 30%となっており、破碎率は最も高いものの、発泡ガラス材は単体で最大の透水性を示すことがわかる。混合土については、締固め度 $D_c = 90\%$ の時と同様、破碎性の影響で混合率 50%が混合率 30%より高い透水性を示している。

d) 透水試験のまとめ

発泡ガラス材と混合土について透水試験を行った結果、発泡ガラス材が高い透水性を示すことがわかった。また、混合土が土試料単体と比較して非常に大きな透水性を示したことから、発泡ガラス材が細粒質土の透水性を改善する効果があると考えられる。このとき、透水性の改善効果は発泡ガラス材の割合だけでなく、破碎の影響も受けることがわかった。

4.5 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験の結果を図12に、混合率と強度定数の関係を図13に示す。

図12, 図13から、発泡ガラス材および混合土は混合

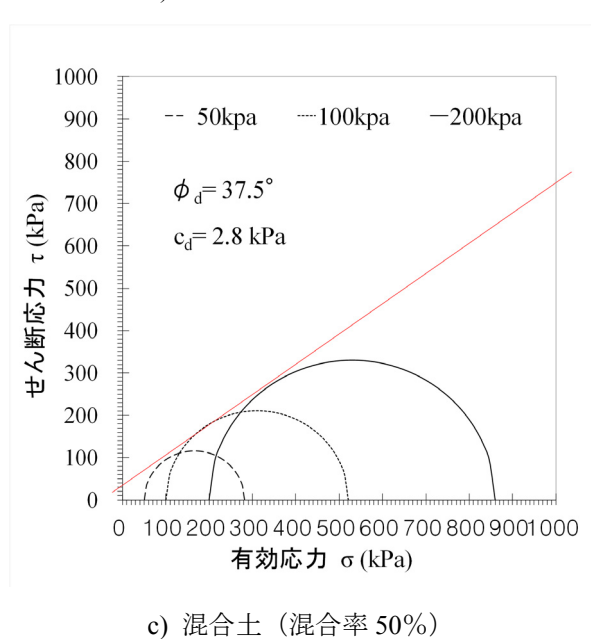
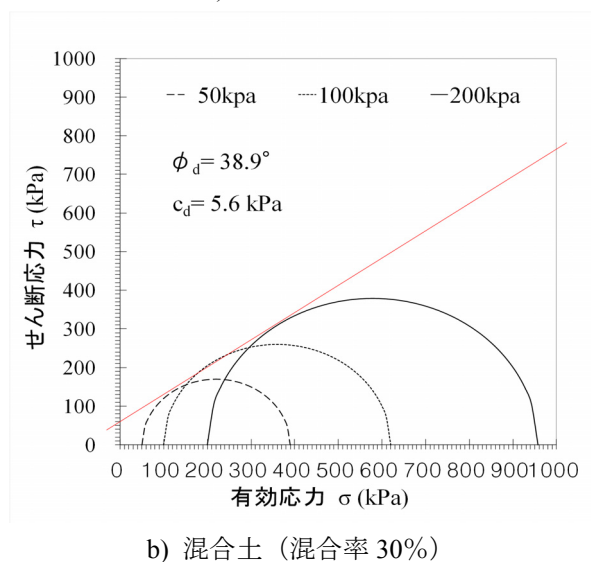
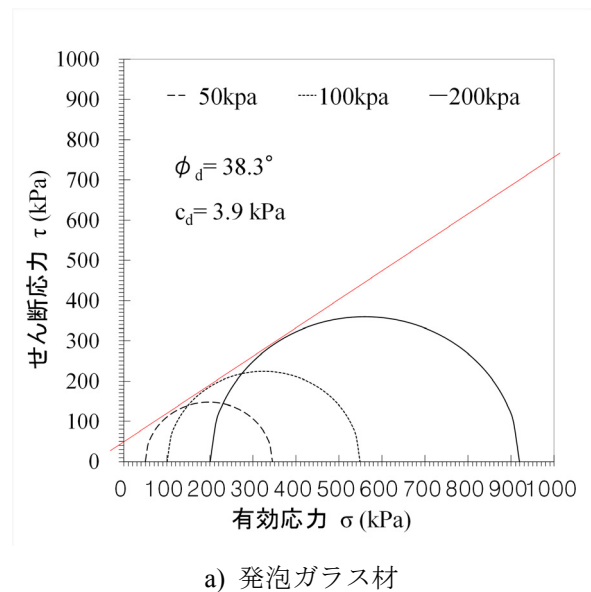
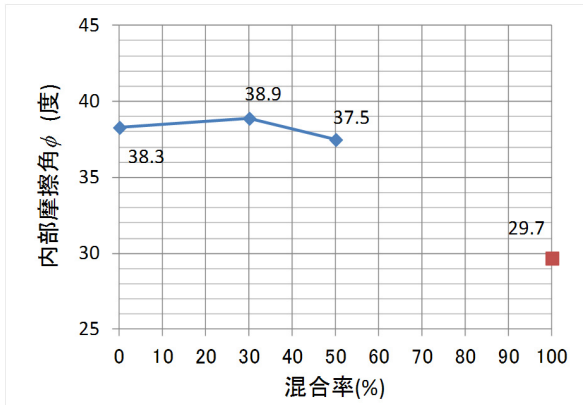
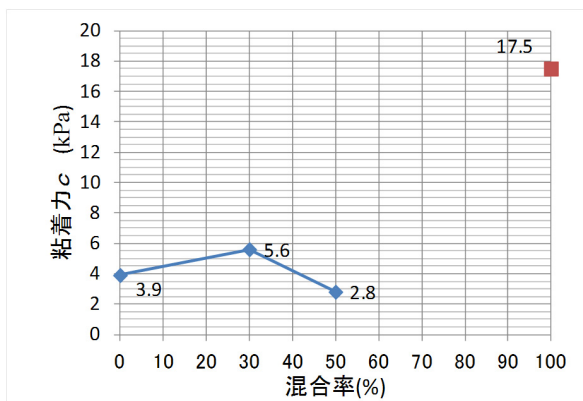


図12 各試料の三軸圧縮試験 (CD) 結果.



a) 混合率 vs 内部摩擦角



b) 混合率 vs 粘着力

図 13 混合率と強度定数の関係。

比によらず 35 度以上の内部摩擦角を示し、砂礫と同等以上の強度を持つことがわかる。また、細粒分礫質砂と比較して内部摩擦角が大幅に増加していることが確認できる。混合率 30% のときに強度が最大となっており、混合率と強度の関係にピークがある可能性が示唆されるが、この点に関しては他の混合率についても試験を行い検証する必要があると考えられる。内部摩擦角は混合率 50% で最小となっているが、最大値との差は小さく、土を 50% 混合しても強度が維持されているといえる。また、粘着力に関しても混合率の違いによる差はあまり見られない。

これらのことから、発泡ガラス材は単体でも十分な強度を持ち、それ自身より強度の低い土を混合したとしても強度低下は小さく、地盤材料として単体での使用や、細粒質土の改良材として使用可能であると考えられる。

4.6 びんガラス製発泡ガラス材との比較

一連の実験からブラウン管パネルガラスから製造された発泡ガラス材の地盤工学的特性が明らかになった。本節では、ブラウン管パネルガラス製発泡ガラス材と既往の研究成果^{(3), (8)}から明らかになっているびんガラス製発泡ガラス材の地盤工学的特性の比較・考察を行

う。

a) 発泡ガラス材単体の比較

2 種類の発泡ガラス材の地盤工学的特性を表 4 に示す。

表 4 から、発泡ガラス材は原料によらずアルカリ性を示すことがわかる。ブラウン管パネルガラス製発泡ガラス材が細粒分を含んでいることと、びんガラス製発泡ガラス材が破碎により pH が増加していることから、発泡ガラス材は細粒分が多いほど pH が大きくなる傾向があるといえる。これは、細粒分が多いほど水と接触する面積が大きくなるためであると考えられる。透水係数は、いずれの試料も大きな締固めエネルギーを加えなかったときの値であるが、びんガラス製のものの方が高い値となっている。これは、粒度の違いによるもので、びんガラス製のものは細粒分が少ないためであると考えられる。しかしながら、細粒分を含んでも発泡ガラス材は優れた透水性を示すことがわかる。破碎率については、びんガラス製のものの評価方法が記載されていなかったため比較はできないが、発泡ガラス材が破碎しやすい材料であることがわかる。強度特性については、ブラウン管パネルガラス製のものがびんガラス製のものに比べて大きな内部摩擦角を示すことがわかる。

b) 混合土の比較

表 5 に各種混合土の地盤工学的特性を示す。

表 5 から、発泡ガラス材に現地発生土を混合したとき、締固め特性は土の割合が増えるにつれて、混合した土のそれに近づく傾向が確認できる。このことから、原料によらず、発泡ガラス材混合土は発泡ガラス材と土の中間的な締固め特性を示すと考えられる。強度特性については、細粒分質礫質砂を混合したケースとロームを混合したケースでは、土単体と比べて内部摩擦角が著しく増加する点と、土の割合が増えるにつれて内部摩擦角が低下する点が一致している。一方、山砂と混合したケースではこれらの傾向は示さず、強度特性はほとんど変化していない。このことから、強度の改善効果は土により異なると推測される。透水性については、ブラウン管パネルガラスを原料とした発泡ガ

表 4 原料の異なる発泡ガラス材の地盤工学的特性の比較。

区分	原料	
	ブラウン管パネルガラス	びんガラス
粒度	アッシュストーンの粒度に調整 (~25mm)	5~20mm
pH	10.73	8.0~11.0 (破碎により増加)
透水係数 k (m/s)	4.25×10^{-4} ($D_c=85\%$)	1.90×10^{-3} ($0.75E_c$)
破碎率 (%)	14.2 (B_M 値)	32.6
内部摩擦角 ϕ (度)	38.3 ($D_c=95\%$)	32.6 ($0.75E_c$)
粘着力 c (kPa)	3.9 ($D_c=95\%$)	7.7 ($0.75E_c$)

表5 原料の異なる混合土の地盤工学的特性の比較.

試験項目		混合した発泡ガラス材の原料										
		ブラウン管パネルガラス			びんガラス							
		混合率		細粒分質 礫質砂	発泡ガラス材:ローム(体積比)			ローム	発泡ガラス材:山砂(体積比)			山砂
		30%	50%		1:0.5	1:1	1:3		1:0.5	1:1	1:3	
締固め 特性	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	0.88	0.98	1.59	0.54	0.62	0.70	0.70	0.80	0.95	1.15	1.55
	最適含水比 $w_{opt}(\%)$	40.5	30.5	22.1	58.0	61.5	63.0	91.0	26.0	27.0	29.4	23.0
強度特性	種別	CD		CD	UU			UU	UU			CD
	内部摩擦角 ϕ (度)	38.9	37.5	29.7	16.7	21.5	9.7	5.3	27.2	31.6	29	33.3
	粘着力 c (kPa)	5.6	2.8	17.5	3.2	1.8	3.1	2.5	0.78	1.2	2.2	3.6
透水係数 $k(\times 10^{-6}m/sec)(D_c=90\%)$		18.5	43	0.38	0.8	0.28	0.38	0.1~0.2	9.1	4.4	3.2	1~5

ラス材は土の透水係数を著しく増加させているのに対し、びんガラスを原料とした発泡ガラス材は、透水性改善効果は小さかったといえる。このことから、排水材としてはブラウン管パネルガラスから製造された発泡ガラス材の方が優れていると考えられる。

5. まとめ

本研究では、ブラウン管パネルガラスから製造された発泡ガラス材の地盤工学的特性を調べるため、単体と混合土について各種土質試験を行った。その結果を以下に示す。

- ①本研究で使用した発泡ガラス材の土粒子密度は $2.500g/cm^3$ で一般的な土と比べてやや小さく、吸水率は30~40%と高い。また、比重、吸水率については製造条件により調整可能である。
- ②締固め試験の結果から、発泡ガラス材および混合土の締固め曲線はなだらかな形状を示し、最適含水比の近傍以外では含水比によらずほぼ一定の乾燥密度となった。また、混合率が高くなるにつれて細粒分質礫質砂の締固め特性に近づく。
- ③締固め試験を行った後の試料を用いて粒度試験を行った結果、発泡ガラス材が破碎しやすい材料であることがわかった。細粒分質礫質砂を30%混合した場合にもこの傾向は変わらず、細粒分質礫質砂を50%混合した場合には破碎率が大幅に低下した。
- ④pH試験の結果から、発泡ガラス材および混合土がpH値10以上の高いアルカリ性を示すことがわかった。これは水質汚濁防止法における排水基準のpHの許容値を超過しており、地盤材料として使用する際には溶出水の処理が課題になると思われる。
- ⑤透水試験の結果から、発泡ガラス材はアッシュストーンと同等以上の透水係数を示し、良好な透水性を持つことがわかった。細粒分質礫質砂を混合しても

それほど透水性は低下せず、細粒分質礫質砂の透水性の向上が確認できた。また、透水係数は混合率だけでなく破碎の影響も受ける可能性が示唆された。

- ⑥三軸圧縮試験の結果から、発泡ガラス材は35度以上の内部摩擦角を示し、砂礫と同等以上の強度を持つことがわかった。混合土は、混合率50%で内部摩擦角が若干低下したものの、細粒分質礫質砂より高い内部摩擦角を示した。これらのことから、発泡ガラス材は地盤材料として単体での使用や、現地発生土の改善材として使用できると考えられる。

謝辞

試験試料を提供していただいた清水美希様をはじめとする(株)ポーラステックの皆様、三軸圧縮試験を実施するに当たりご協力いただいた平野様をはじめとする財団法人地域地盤環境研究所の皆様には、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会電気・電子機器リサイクルワーキンググループ中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会家電リサイクル制度評価検討小委員会合同会合：家電リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書，pp.21-22，2008.
- (2) 独立行政法人物質・材料研究機構：鉛マテリアルフロー作成のための基礎調査，2004.
- (3) 例えば、鬼塚克忠，横尾磨美，原裕，吉武茂樹：発泡廃ガラス材の工学的特性と有効利用の一例，地盤工学会，土と基礎，47-4，pp.19-22，1999.
- (4) 稲野浩行，橋本祐二，工藤和彦：還元溶融による廃ブラウン管ガラスからの鉛分離，北海道立工業試験場報告，304，pp.71-77，2005.
- (5) Marsal, R.J. : Soil properties-Shear Strength and Consolidation, *Proceedings of 6th International Conference of SMFE*, III, pp.310-316, 1965.
- (6) 地盤工学会：土質試験—基本と手引き—（第二回

改訂版), pp.71-78, 2010.

- (7) 建設汚泥再生利用指針検討委員会：pH および悪臭に関する留意事項, 第1回検討委員会参考資料, p.11, 2005.
- (8) 岩間大輔, 浮田和俊, 水谷仁：廃ガラスを再利用した軽量混合土の工学的特性について, 第26回土木学会関東支部技術研究発表会, pp.528-529, 1999.