

発泡廃ガラス材の工学的特性と有効利用の一例

Engineering Properties of Foaming Waste-glass Material and an Example of its Utilization

鬼塚 克忠 (おにつか かつただ)

佐賀大学教授 理工学部都市工学科

横尾 磨美 (よこお まみ)

日本建設技術(株)技術研究所開発課

原 裕 (はら ゆたか)

日本建設技術(株) 専務取締役

吉武 茂樹 (よしたけ しげき)

日本建設技術(株)技術研究所 所長

1. はじめに

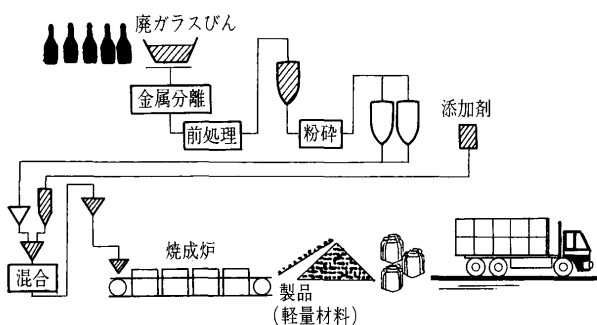
近年、自然環境破壊が深刻化し、社会的に大きな問題として取り上げられるようになった。人間の諸活動によって発生する廃棄物は、環境に多大な悪影響を及ぼすので、その発生量をできる限り押さえるとともに、適切な廃棄物の処理方法を確立しなければならない。また、地球の資源は有限であり、必要以上の資源開発は抑制していく必要がある。これらのことから、廃棄物のリサイクルが重要視され、様々なリサイクル製品の開発、活用が検討されている。

我々も廃棄物の再利用の試みとして、空びんやガラス類などの廃材から作られた新素材の建設分野における有効利用の研究を行っている。この廃ガラスを再利用して開発した新素材（以後、発泡廃ガラス材と呼ぶ）は、微小な間隙からなる多孔質構造を有し、軽量かつ強固である。また、その製造条件により絶乾比重（この名称はコンクリート工学で定義されているものである）は0.3～1.5に調整可能であり、同時に吸水性の大小についても調整可能である。今後、建設材料として地盤材料や軽量骨材など目的に応じた使用方法を確立しようと計画している。

今回は、この発泡廃ガラス材の工学的特性¹⁾および軟弱路床土の改良材としての適用²⁾について報告する。

2. 発泡廃ガラス材の製造と有効利用への試み

発泡廃ガラス材は、発泡剤の配合率といった製造条件より0.3～1.5の絶乾比重の製品ができる。また、微小な独立および連続間隙のどちらかを有することが顕微鏡写真より確認されており、この違いによる吸水性の大小に



図—1 発泡廃ガラス材の製造工程

についても調整が可能である。図—1に発泡廃ガラス材の製造工程を、口絵写真—12～15に発泡廃ガラス材骨材の形状および顕微鏡写真を示す。口絵写真—12は絶乾比重が0.4で、独立間隙を有し、試料の表面のみに水が付着するため、吸水性が小さいもの（吸水率5.8%）である。口絵写真—14は絶乾比重は同じであるが、連続間隙を有し、間隙内へ水の流入が多くなるため吸水性が大きいもの（吸水率25.8%）である。

図—2にこれから計画している建設・建築材料としての利用方法と、新技術について示す。同図の地盤における軽量盛土材および地盤改良材、軽量骨材への適用、また、斜面緑化における新技術の開発^{3),4)}などを考え、実際の現場において施工を行っている。

3. 発泡廃ガラス材の工学的特性

口絵写真—12に示す独立間隙からなる吸水性の小さい発泡廃ガラス材について土質試験およびコンクリートの骨材試験などから工学的特性を調べた。試験は日本工業規格 (JIS)、地盤工学会基準 (JGS)、日本道路公団規格 (JHS) に準じている。試験結果を表—1に示した。

吸水率は上述の5.8%であり、普通の砂の1～3%および砂利の0.5～2%と比較すると高い値である。これは骨材表面の間隙に付着する水が多いためである。透水係数は $0.75 E_c$ (E_c : 標準締固め時の仕事量) のエネルギーで締め固めたもので $0.19 \times 100 \text{ cm/sec}$ であり、透水性はよい。CBR試験については、 $0.75 E_c$ の締固めに対して $\text{CBR}=17.7\%$ 、設計CBRでは 30.9% である。 $0.75 E_c$ のエネルギーで締め固めると砂質土と同程度の支持力があると考えられる。三軸圧縮試験による粘着力は緩詰め（投入のみで締固めを伴わない供試体）で $c_d = 0.19 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $0.75 E_c$ で締め固めて 0.79 kgf/cm^2 であり、砂質土と比較すると大きめの値である。また、内部摩擦角は同じく緩詰めで $\phi_d = 29.5^\circ$ とゆるい状態の砂（豊浦標準砂）の値に近く⁵⁾、 $0.75 E_c$ では 32.6° でやや密な状態の砂（豊浦標準砂）の値に近い⁵⁾。エネルギーを変化させた締固め試験後の粒度を求めた。図—3に示すように、締固めエネルギーの増加に伴い破砕が進み、試料の粒度特性が変化する。このため締め固められた粒子間の空隙が減少し、乾燥密度は増加している。すりへり減量値は50%と高い値を示しているが、安定性試験、

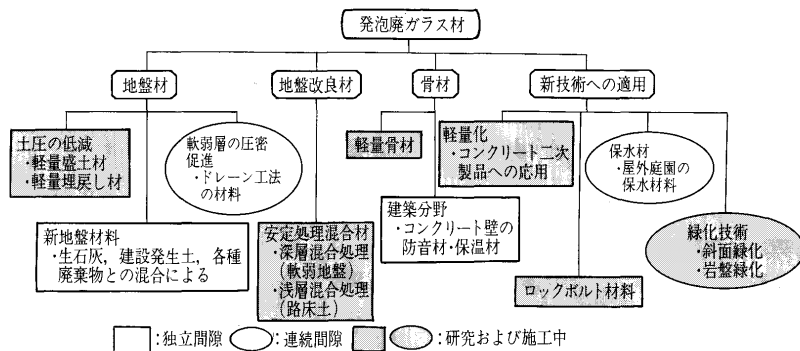


図-2 発泡廃ガラス材の有効利用

る。室内試験において発泡廃ガラス材を破碎するとアルカリ度が高くなる傾向がある。しかし、現場の施工では軽量盛土施工においても破碎はほとんど生じず、地盤環境への影響はないものと考えられる。

4. 発泡廃ガラス材の有効利用

4.1 軽量盛土材としての比較

発泡廃ガラス材と発泡スチロール材といった盛土における軽量材料との比較を表-2に示す。

発泡廃ガラス材は素材がガラスであり、発

表-1 試料の性質

試験項目	試料名	搬入試料	締固めエネルギー変化					
			0 E_c	0.50 E_c	0.75 E_c	1.00 E_c	2.00 E_c	4.00 E_c
含水比 w	%	0						
粒度分布	礫分 %	100	93		85	76	70	
	砂分 %	0	3		8	14	17	
	シルト分 %	0		4	7	10	13	
	粘土分 %	0						
乾燥密度 ρ_d	g/cm ³	0.183	0.185	0.265	0.288	0.321	0.369	0.456
吸水率	%	5.8						
透水係数 K_{15}	cm/s				0.19 × 10 ⁰			
一軸圧縮強度	kgf/cm ²	27.5~46.5 平均35.0						
三軸圧縮強度	c_d kgf/cm ²	0.19			0.79			
	ϕ_d 度	29.5			32.6			
CBR	膨張比 r_e %	0.005	-0.023		-0.001			
	吸水率 %	38.7	21.5		21.5			
	平均 CBR %	30.9	2.6		17.7			
pH	%		8.0		9.8			11.0
単位体積質量	g/cm ³	0.233						
すりへり減量	%	50.4						
スレーキング率	%	0.1						
破碎率	%	32.6						
安定性	%	3.7						
乾湿繰返し吸水量増加率	%	0.36						

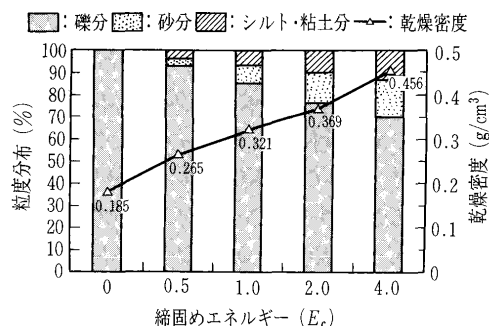


図-3 締固めエネルギー変化時の粒度分布と乾燥密度の変化

スレーキング試験、乾湿繰返し試験などで得られる耐久性の指標は一般の骨材よりも低い値を示し、地盤材料および粗骨材として耐久性に優れた材料であると考えられ

る。室内試験において発泡廃ガラス材を破碎するとアルカリ度が高くなる傾向がある。しかし、現場の施工では軽量盛土施工においても破碎はほとんど生じず、地盤環境への影響はないものと考えられる。

4.2 軟弱路床土の改良

発泡廃ガラス材と生石灰を用いた道路路床・路盤の改良を目的とする室内試験 (CBR 試験) を実施した。

今回試験に用いた発泡廃ガラス材は工学的性質で述べた、絶乾比重が0.4の吸水率の小さいものである。改良の対象となる路床土は、佐賀県東松浦郡鎮西町波戸地内の玄武岩類の風化土、いわゆる“おんじゃく”と呼ばれ

表-2 軽量材料の比較^{6),7)}

項目	材料	発泡廃ガラス材 (本研究対象)	廃ガラス材 (他社製品)	発泡スチロール材
単位体積重量		$\gamma_t=0.25\sim0.30 \text{ tf/m}^3$ (施工時)	—	$\gamma_t=0.01\sim0.03 \text{ tf/m}^3$ (施工時)
比重		0.3~0.4	0.3~0.4	0.01~0.03
強度特性		一軸圧縮強さ $q_u=2.5\sim4.5 \text{ tf/m}^2$ (単体) 三軸試験結果 $c=3.0 \text{ tf/m}^2, \phi=30^\circ$ CBR=15% ($\rho_t=0.3 \text{ tf/m}^3$)	点荷重強度 3~7 tf/m^2	許容圧縮応力 2.0~5.0 tf/m^2 (ひずみ1%相応)
材料の特性 (長所・短所)		<ul style="list-style-type: none"> • 素材がガラスのため熱、薬品などに対して強く、非腐食性で劣化しない。 • 独立間隙(ハニカム状)をもっており、吸水性は小さい(製造条件により吸水性の大きいものも作れる)。 • 転圧などにより若干破砕する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 素材がガラスのため熱、薬品などに対して強く、非腐食性で劣化しない。 • 吸水性は小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> • 熱(65°C)、薬品、ガソリンなどにより溶解する。 • 多孔質性のため、吸水する。 • 比重が軽く、浮力に弱い。 • 人力により積重ね、接合の作業が必要。 • 状況により素材が廃棄物となる可能性有り。
施工性 (粒径・運搬 敷ならし・締固め)		<ul style="list-style-type: none"> • 粒度は5~40 mmの不定形で、粒度分布は必要に応じてコントロールする。 • 大型機械を必要としない。 • 運搬、まき出し、転圧などの施工が容易。 • 約1~2 m^3のフレコンバックにより、所定の場所に吊下げてまき出しする。小型締固め機で転圧する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 粒度は0.3~5.0 mmの球形で、粒度分布は1号(0.3~1.2 mm), 2号(1.2~2.5 mm), 3号(2.5~5.0 mm)の3種類となっている。 	<ul style="list-style-type: none"> • 人力だけで施工可能で、大型機械を必要としない。 • 転圧、締固め作業の必要がない。 • 不陸調整用の敷砂、コンクリートスラブが必要となる。

表-3 改良の対象土の性質

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.823	
自然含水比 (%)	52.3	
最大粒径 (mm)	19.0	
粒度分布	礫分 (%)	16.3
	砂分 (%)	24.9
	シルト分 (%)	34.7
	粘土分 (%)	24.1
液性限界 (%)	57.8	
塑性指数	15.4	
最大乾燥密度 $\rho_{d \max}$ (g/cm ³)	1.332	
最適含水比 w_{opt} (%)	35.3	
統一分類法	CH	
設計 CBR (%)	0.2	

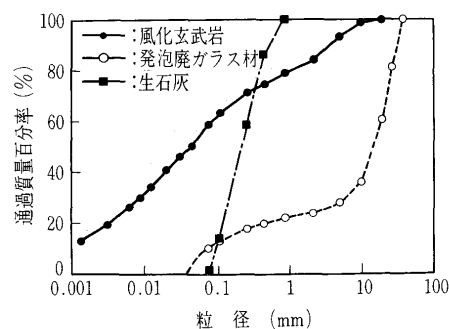


図-4 路床土および改良材の粒度分布

表-4 発泡廃ガラス材および生石灰の混合率

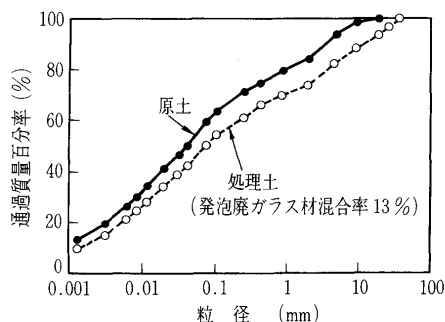
ケース	改良材	原土の乾燥質量に対する混合率(%)		
		7.0	10.0	13.0
ケース1	発泡廃ガラス材	7.0	10.0	13.0
ケース2	生石灰	7.0	10.0	13.0
ケース3	発泡廃ガラス材	3.5	5.0	6.5
	生石灰	3.5	5.0	6.5

るシルト質粘土または砂質シルトに属するものである。その物理的特性を表-3に、粒径加積曲線を発泡廃ガラス材・生石灰と併せて図-4に示している。表-3に示しているように、改良の対象土の自然含水比は約52%と高い。また、自然含水比と液性限界の差は5.5%程度と小さく、極めて保水性が大きい。CBRも原土は設計CBRは0.2%であり、現状のままでは路床土として不適当で、改良する必要がある。

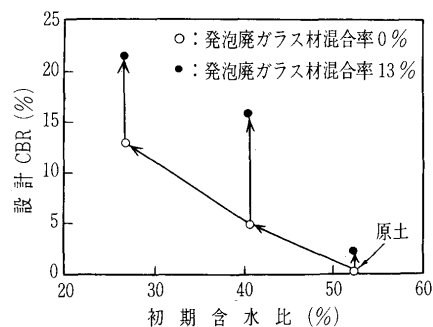
そこで、発泡廃ガラス材と生石灰を改良材として原土に混合した。改良土の路床土としての適否を調べるため、室内CBR試験を行っている。供試体は、自然含水比で3層67回の突固めで作製し、4日間の水浸後、貫入試験を実施し、設計CBRを求めた。試験は、発泡廃ガラス材のみを混合した場合(ケース1)、生石灰のみを混合した場合(ケース2)、発泡廃ガラス材と生石灰を同時に混合した場合(ケース3)の3種類である。この時の

発泡廃ガラス材および生石灰の混合率は表-4に示している。

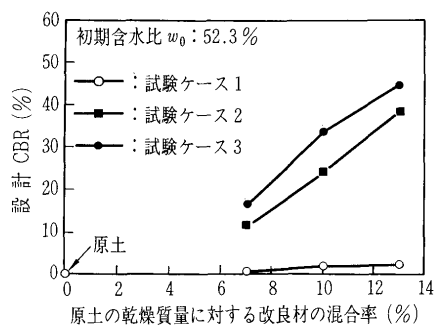
図-5は原土およびこれに発泡廃ガラス材のみを13%混合した場合の処理土の粒度分布である。また、図-6に両改良材の混合率を変化させた場合の設計CBRの改良効果の違いを示す。各改良材ともに混合率の増加に伴い、改良効果が増す傾向にある。発泡廃ガラス材のみを混合した試験ケース1については、混合率を増加してもその改良効果はあまり得られない。発泡廃ガラス材13%混合では、図-5から分かるように粗粒径が若干増加するが、上記のような初期含水比の高い試料を改良する場合、粒度調整による効果はあまり期待できない。一方、生石灰のみを混合した試験ケース2に



図—5 発泡廃ガラス材混合による粒度分布の変化



図—7 初期含水比の違いによる改良効果



図—6 改良材混合率の増加による改良効果

については、水和反応による含水量の低下によってかなりの改良効果が得られる。このことは、逆に発泡廃ガラス材が鉱物性で化学的に安定しているが、表面の独立間隙に水を取り込む程度で、水とは化学的な反応を起こさず、含水量の低下という効果は期待できないと思われる。

また、発泡廃ガラス材と生石灰を混合した試験ケース 3 については、生石灰の水和反応による含水量の低下と発泡廃ガラス材を粗骨材とする粒度調整効果が相まって、すなわち、両改良材の相乗作用により大きな改良効果が得られる。

そこで、ケース 3 (発泡廃ガラス材と生石灰) の試験結果を用いて、設計 CBR 4% を目標 (原土の設計 CBR 0.2%) にした場合の各混合率における路床 (路床厚 100 cm) の改良厚さを求めると、混合率 7% で 55 cm, 10% で 40 cm, 13% で 35 cm となる。

図—7 には、発泡廃ガラス材だけを 13% 混合した場合 (図中の●) の突固め時の初期含水比の違いによる改良効果の違いを示している。突固め時の初期含水比を低下させると、発泡廃ガラス材を混合しなくてもある程度の改良効果は得られる。しかし、発泡廃ガラス材を混合すると、これが粗骨材の役割を果たし、粒度調整が行われるため、より大きな改良効果が得られる。

生石灰だけを混合した場合は、発泡廃ガラス材を混合した場合のような初期含水比の違いによる改良効果は見られない。これは、初期含水比が小さいので、混合時あるいは突固め時の水和反応が活発でなくなり、CBR 試験の水浸時に水を取り込んでしまい改良効果が発揮でき

ないためと考えられる。

5. まとめ

以上の結果から、発泡廃ガラス材の特性および軟弱路床土の改良効果は次のようである。

- ① 発泡廃ガラス材は、空きびんなどのガラス廃材を再利用して作られた新素材であり、軽量かつ強固である。
- ② 製造条件により絶乾比重 (0.3~1.5) および吸水性の調整が可能である。
- ③ 地盤材料 (軽量盛土材)・地盤改良材・骨材・その他新技術への適用など、新材料・新技術として建設・建築の分野で幅広く活用できる。
- ④ 軟弱路床土において原土の初期含水比が大きい場合、発泡廃ガラス材と生石灰を改良材として用いると、生石灰の水和反応による含水量の低下と、発泡廃ガラス材が粗骨材として粒度調整効果が相乗効果により、大きな改良効果が得られる。
- ⑤ 原土の初期含水比を最適含水比付近まで減少するように調整すると、発泡廃ガラス材のみを混合した粒度調整効果だけでも、かなりの改良効果は期待できる。

参考文献

- 1) 横尾磨美・鬼塚克忠・原 裕・蒲池 豊：廃ガラス材の特性と有効利用への試み, 第33回地盤工学研究発表会, pp. 2519~2520, 1998.
- 2) 吉武茂樹・鬼塚克忠・原 裕・落合一明・岡部弘幸：廃ガラス材を利用した軟弱路床土の改良, 第33回地盤工学研究発表会, pp. 2521~2522, 1998.
- 3) 原 裕・鬼塚克忠・吉武茂樹・麻生夏雄・横尾磨美：廃ガラス材を用いた斜面緑化工法の事例—礫混じり土とポター, 第33回地盤工学研究発表会, pp. 2523~2524, 1998.
- 4) 横尾磨美・鬼塚克忠・原 裕・吉武茂樹・岡部弘幸：廃ガラス材の工学的特性と斜面緑化への試み, 土木学会第53回年次学術講演会, pp. 478~479, 1998.
- 5) 土質工学会：N 値および $c \cdot \phi$ —考え方と利用法—, pp. 133~161, 1994.
- 6) 大日本インキ(株)：カタログおよび技術資料.
- 7) (株)サンライト：カタログ.

(原稿受理 1998.7.24)