

論文 ガラス発泡軽量骨材の基礎性状に関する実験的研究

本田 悟^{*1}・椎葉 大和^{*2}

要旨：廃ガラスの有効利用を目的として、廃ガラスより製造されるガラス発泡軽量骨材の基礎的性状を把握するとともに、建設資材としての有用性について検討した。その結果、ガラス発泡軽量骨材は形状がいびつで低強度であるために流動性および強度の低下が顕著に認められ、構造用材料には適さないが、ポーラスコンクリートに使用することにより軽量かつ高保水性をいかした屋上緑化資材としての有用性が確認できた。

キーワード：廃ガラス、リサイクル、ガラス発泡軽量骨材、ポーラスコンクリート

1. はじめに

近年の廃棄物の処理をめぐる状況を見ると、廃棄物の排出の抑制、適切な分別・処理の徹底、再利用、再商品化等を強化するために種々の法整備が進められ、廃棄物の処理をめぐる状況は改善されてきている。しかしながら、現在の日本における廃棄物総量は環境省の統計によると年間約4億5千万トンで、産業廃棄物はこのうち約90%を占めており、年間約4億トン前後で推移している。その中で、ガラスビンは年間約65万トンが廃棄されており、ガラスビン以外のガラス製品、ガラスくず、陶磁器くずを含めると、年間約400万トン以上が排出されており、その有効利用率は60%程度に留まっている。^{1), 2)}

そこで本研究では、廃ガラスの有効利用を目的として廃ガラスより製造されるガラス発泡軽量骨材の基礎的性状を把握するとともに、建設資材としての有用性について検討した。

2. ガラス発泡軽量骨材の製造方法

ガラス発泡軽量骨材は廃ガラスを破砕して得られる0.3～2.5mmのガラス粉に質量比で0.3mm以下のガラス微粉を4%、炭化珪素を0.1～3%加え、700℃以上で30分程度加熱することにより製造される。なお、粉砕条件や燃焼条件を変えることで、かさ密度が0.3～1.2g/cm³程度のガラス発泡軽量骨材が製造される。

*1 福岡大学 工学部建築学科講師 (正会員)

*2 福岡大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

3. ガラス発泡軽量骨材の基礎性状

3.1 試験項目および試験方法

ガラス発泡軽量骨材の試験項目および試験方法は表-1に示すとおりである。

表-1 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法および関連規格
密度・吸水率	JIS A 1109, 1110 に準拠
単位容積質量 実積率	JIS A 1104 に準拠
安定性	JIS A 1122 に準拠
アルカリ骨材反応	JIS A 1146 に準拠
破砕値	BS 812 に準拠
圧縮強度	発泡体塊より3×3×3cm程度の試験片を切り出し測定

3.2 試験結果および考察

ガラス発泡軽量骨材の物理試験結果を表-2に示す。

ガラス発泡軽量細骨材の絶乾密度は1.11g/cm³と通常の細骨材の1/2以下と軽量であるが、骨材自体が多孔質であるため吸水率は33.4%と著

表-2 骨材の物理試験結果

項目 試料	密度(g/cm ³)		24時間 吸水率 (%)	単位容 積質量 (kg/l)	実積率 (%)	10%破 砕荷重 (kN)	安定性 (%)	
	表乾	絶乾						
細骨材	1.48	1.11	33.4	0.387	34.9	-	2.8	
粗骨材	L1	0.547	0.327	55.5	0.165	50.5	5.81	-
	L2	0.615	0.450	28.9	0.241	53.6	-	-
	L3	0.876	0.826	5.46	0.471	56.8	55.3	-

しく大きい。実積率は骨材自体が軽量かつ形状がいびつであるため 34.9%と低い。また、安定性試験による質量損失量は 2.8%と JIS の規定値 (10%以下) を満足している。

ガラス発泡軽量粗骨材の絶乾密度は 0.3 ~ 0.8g/cm³ 程度であり、密度の増大により吸水率は減少し、L3 では市販の軽量骨材より軽量であるにも関わらず吸水率は 5%程度と低い。このことはガラス発泡軽量骨材中に存在する空隙の大半が独立空隙であるためと考えられる。また、実積率は 50.5 ~ 56.8%と形状がいびつであるため通常の碎石より低く、10%破碎荷重は絶乾密度の減少に伴い大幅に減少し、L1 は L3 の 1/10 程度である。

次に、粒度別の絶乾密度と吸水率の関係を表-3 に、吸水率の経時変化を図-1 に、骨材の絶乾密度と骨材強度の関係を図-2 に、アルカリ骨材反応試験結果を図-3 に示す。

粒度の増大に伴い絶乾密度は減少しているにもかかわらず、吸水率も大幅に低下している。このことは、粒度の増大に伴い全空隙量は増大するが、独立空隙の割合も増大するため吸水率は低下するものと考えられる。また、吸水率は独立空隙が多く存在するため 7 日程度まで上昇傾向を示す。

骨材強度は絶乾密度の増大に伴い増大し、3 ~ 25N/mm² の範囲内にあり、絶乾密度が 0.4g/cm³ 程度で骨材強度は 8N/mm² 程度、絶乾密度が 0.8g/cm³ 程度で骨材強度は 25N/mm² 程度である。このようにガラス発泡軽量骨材は低強度であるため、通常の構造用骨材としては適していないと考えられる。

アルカリシリカ反応性試験による 6 ヶ月後の膨張量はガラスカレット自体では 25 × 10⁻⁴ と無害でないと判定されるが、ガラス発泡軽量骨材では収縮側に推移し、無害と判定される。このことはアルカリ骨材反応により生じたゲルの吸水により膨張力が生じても、骨材が多孔質でかつ低強度であるために膨張力が吸収されるためと考えられる。

表-3 粒度別骨材の物理試験結果

項目	絶乾密度 (g/cm ³)			24 時間吸水率 (%)		
	5~10mm	10~15mm	15~20mm	5~10mm	10~15mm	15~20mm
L1	0.333	0.327	0.320	87.4	45.7	33.3
L2	0.555	0.409	0.385	33.0	29.7	23.0
L3	0.830	0.827	0.815	10.6	3.35	2.41

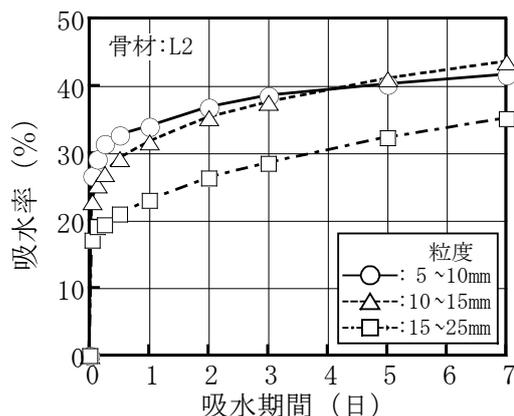


図-1 吸水率の経時変化

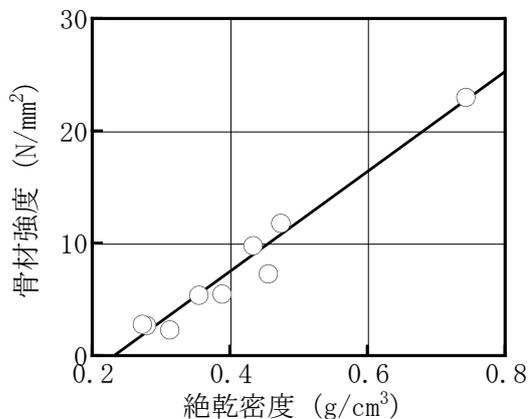


図-2 絶乾密度と圧縮強度

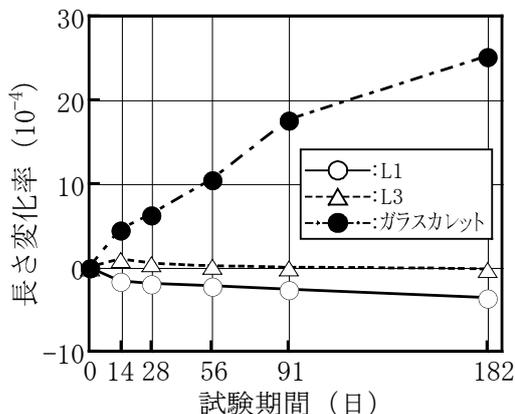


図-3 アルカリ骨材反応試験結果

4. ガラス発泡軽量細骨材を用いたモルタルの性状

4.1 使用材料, 調合および練混ぜ

使用材料は表-4に示すとおりで、ガラス発泡軽量細骨材は表乾状態で使用した。

モルタルの調合は表-5に示すとおりで、JIS R 5201 標準モルタルを基準として、細骨材のかさ容積が一定となるよう設定した。なお、普通モルタルでは高性能AE減水剤でフロー値が一定となるよう調整したが、軽量モルタルではフロー値の調整が困難であったため、普通モルタルと同一添加量とした。また、練混ぜ方法はJIS R 5201 に準じた。

4.2 養生, 試験項目および試験方法

試験体の養生方法は標準養生とした。また、試験項目および試験方法は表-6に示すとおりである。

4.3 試験結果および考察

(1) フロー値および単位容積質量

表-5よりガラス発泡軽量細骨材を用いたモルタルの流動性は大幅に低下している。このことはガラス発泡軽量細骨材は軽量でかつ粒子表面がいびつな形状であるためと考えられる。また、単位容積質量は普通モルタルの65%程度と大幅な軽量化が望める。

(2) 圧縮強度および曲げ強度

水セメント比と圧縮強度の関係を図-4に示す。

ガラス発泡軽量細骨材を用いたモルタルの圧縮強度は普通モルタルの33~51%程度と水セメント比の増大に伴い圧縮強度の低下の割合も大きくなっている。また、曲げ強度については普通モルタルの50%程度であった。このようにガラス発泡軽量細骨材は骨材強度が低いため圧縮および曲げ強度の低下が顕著に認められ、構造用の骨材としては適していないと考えられる。

(3) 乾燥収縮率および耐薬品性

乾燥収縮率の試験結果を図-5に、2%塩酸浸せきによる質量減少率を図-6に示す。

ガラス発泡軽量細骨材を用いたモルタルの乾燥収縮率は普通モルタルの2倍程度となった。このことはガラス発泡軽量細骨材の吸水率が

表-4 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント ($\rho=3.15\text{g/cm}^3$)
細骨材	JIS 標準砂, ガラス発泡軽量細骨材 (表-2)
混和剤	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系)

表-5 モルタルの調合

項目 試料	水セメント比 (%)	セメント (g)	水 (g)	標準砂 (g)	軽量骨材 (g)	混和剤 (%)	フロー値	単位容積質量 (kg/l)
普通	30	596	179	1350	-	1.7	183	2.27
	40	513	205			0.5	177	2.20
	50	450	225			0	181	2.20
軽量	30	816	246	-	565	1.7	108	1.54
	40	706	281			0.5	111	1.46
	50	617	309			0	107	1.45

表-6 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法および関連規格
フロー値	JIS R 5201 に準拠
単位容積質量	JIS A 1116 に準拠
曲げ・圧縮強度	JIS R 5201 に準拠
乾燥収縮率	JIS A 1129-2 に準拠
耐薬品性	2%塩酸, 5%硫酸に浸せき

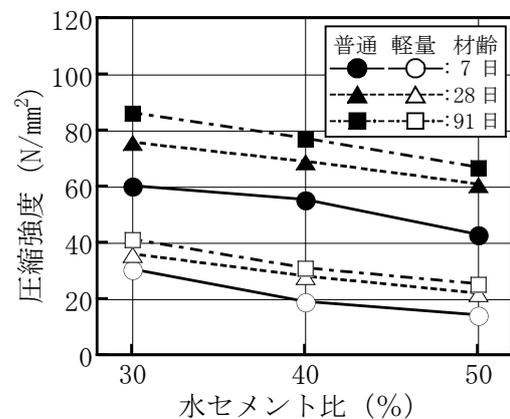


図-4 水セメント比と圧縮強度の関係

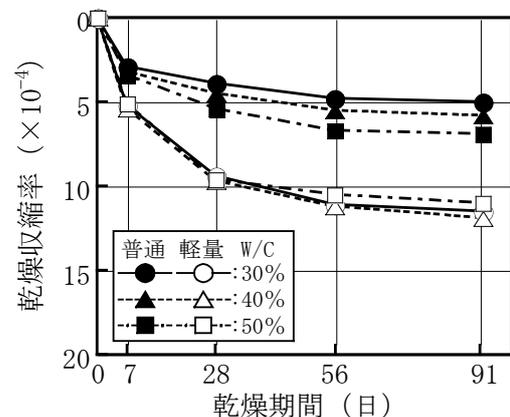


図-5 乾燥収縮率試験結果

きいことと実積率の低下に伴うペースト量の増大に起因すると考えられる。

ガラス発泡軽量細骨材を用いたモルタルの耐薬品性は普通モルタルと同等か若干劣る結果となった。このことはガラス発泡軽量細骨材は多孔質なためにモルタル内部に薬品が浸透しやすいこととペースト量の増大に起因すると考えられる。

5. ガラス発泡軽量粗骨材を用いたポーラスコンクリートの性状

5.1 使用材料，調合および練混ぜ

使用材料は表-7に示すとおりで、ガラス発泡軽量粗骨材は絶乾状態で使用した。

調合条件は表-8に示すとおりで発泡廃ガラス粉末をセメント質量の内割りで0, 25, 50, 75%置換した。

コンクリートの練混ぜには強制練りミキサ(容量: 50ℓ)を使用し、30秒間空練り後注水し2分間練混ぜた。

5.2 成形，養生，試験項目および試験方法

コンクリートの成形にはテーブルバイブレータ(振動数: 1800r.p.m.)を用い、0.01N/mm²の圧力で加圧した状態で10秒間振動を加えた。また、養生方法は蒸気養生(最高温度: 65℃)とし、試験項目および試験方法は表-9に示すとおりである。

5.3 試験結果および考察

(1) 空隙率，透水係数および単位容積質量

空隙率と透水係数の関係を図-7に、空隙率と単位容積質量の関係を図-8に示す。

空隙率と透水係数の関係は骨材密度による影響

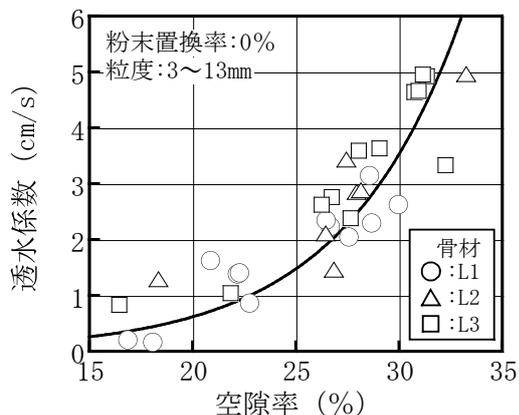


図-7 空隙率と透水係数の関係

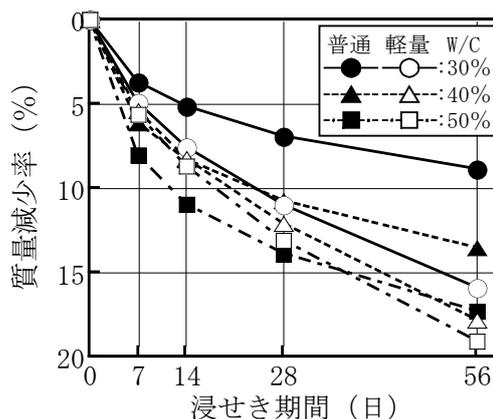


図-6 2%塩酸浸せき試験による質量減少率

表-7 使用材料

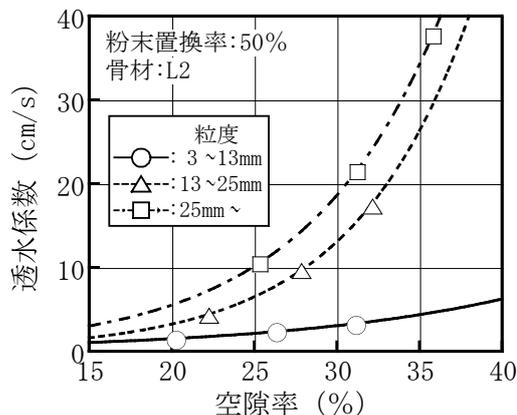
セメント	普通ポルトランドセメント ($\rho=3.15\text{g/cm}^3$)
発泡廃ガラス粉末	0~0.3mm ($\rho=2.25\text{g/cm}^3$)
ガラス発泡軽量粗骨材	L1, L2, L3 (3~13mm, 13~25mm, 25mm以上)

表-8 調合条件

目標空隙率 (%)	粉末置換率 (%)	水粉体比 (%)	骨材補正係数
20, 25 30, 35	0	26	0.95
	25	29	
	50	32	
	75	44	

表-9 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法および関連規格
空隙率	文献3)に準拠
透水係数	
単位容積質量	JIS A 1116に準拠
曲げ・圧縮強度	文献3)に準拠
静弾性係数	
衝撃強度	30×30×10cmの試験体を作製し、質量30kgの砂袋を90cmの高さから10回落下
植生試験	30×30×10cmの植栽システムを25セット使用し、芝の植生試験を実施



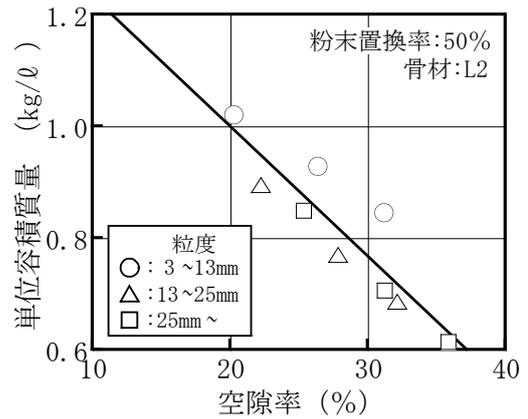
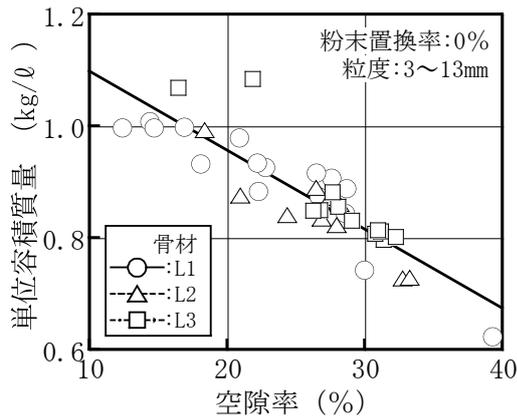


図-8 空隙率と単位容積質量の関係

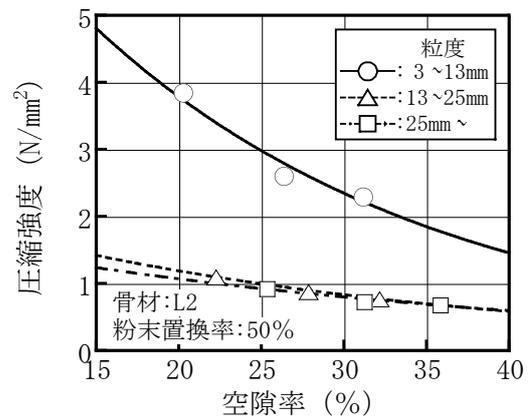
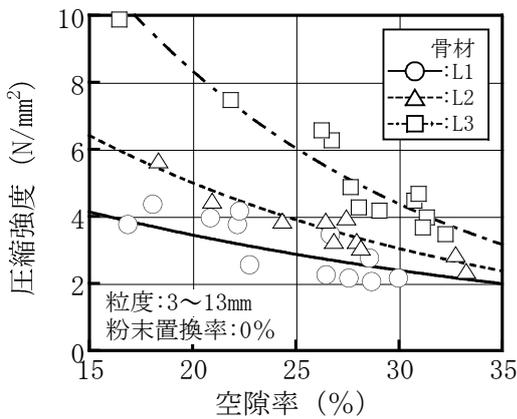


図-9 空隙率と圧縮強度の関係

は認められないが、骨材粒度が大きくなると空隙径の増大により透水係数も大きくなる傾向にある。

単位容積質量は空隙率の増大に伴い減少し、空隙率が20%で1.0kg/l程度、空隙率が30%で0.8kg/l程度である。

(2) 圧縮強度、曲げ強度、静弾性係数および衝撃強度

空隙率と圧縮強度の関係を図-9に、粉末置換率と圧縮強度の関係を図-10に、空隙率と曲げ強度の関係を図-11に、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-12に、空隙率と衝撃試験で破損が認められた時点での落下回数との関係を図-13に示す。

圧縮強度は空隙率の増大に伴い低下し、骨材強度が圧縮強度に及ぼす影響は明確であり、骨材粒度が大きくなると骨材間の節点数が減少するため圧縮強度も低下傾向にある。また、粉末置換率の増大に伴い圧縮強度は低下傾向を示すが、粉末置換率75%においても2N/mm²程度の強度が得られた。

曲げ強度に関しては圧縮強度の場合と同様な

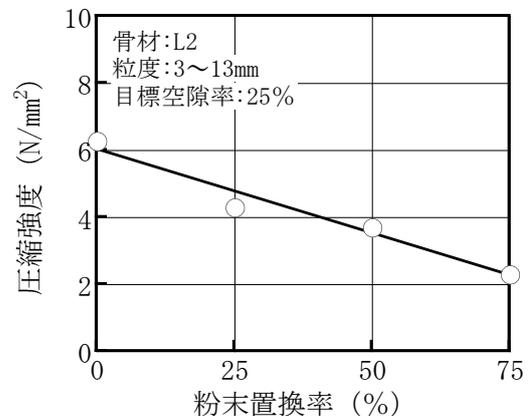


図-10 粉末置換率と圧縮強度の関係

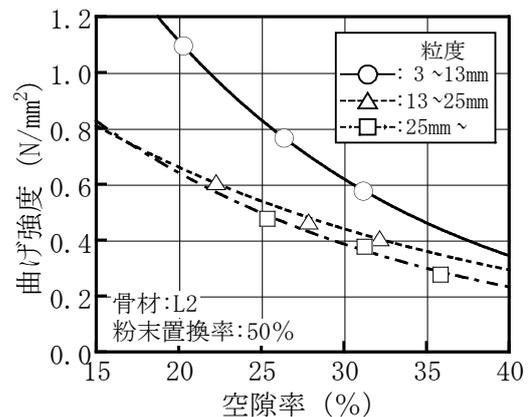


図-11 空隙率と曲げ強度の関係

傾向を示した。また、圧縮強度と静弾性係数の関係に骨材密度が及ぼす影響は認められず、日本建築学会 RC 規準式の 2 倍程度の値となった。

衝撃試験では粒度 3 ~ 13mm では破損は認められなかったが、13mm 以上では粒度および空隙率の増大に伴い衝撃強度は低下している。

(3) 植生試験

植栽システムの概要を図-14 に示す。植生層には L2 (粒度 : 13 ~ 25mm) を用い、粒度 2.5mm 以下の培養土を充填した。排水層は保水性を考慮して L2 (粒度 : 3 ~ 13mm) を用いた。また、目標空隙率は 25% とし、アルカリ量の低減を目的として粉末置換率を 75% とした。なお、植生試験では 30 × 30 × 10cm の植栽システム 25 セット用い、10 月中旬より実施した。

芝の生育状況は播種後 10 日程度で発芽し、8 週目で緑被率⁴⁾は 90% 程度、草丈は 30mm 程度、根長は 50mm 程度と、生育状況は良好である。

6. まとめ

- (1) ガラス発泡軽量骨材の絶乾密度は 0.3 ~ 0.8g/cm³ で空隙の大半は独立空隙である。また、骨材強度は 3 ~ 25N/mm² 程度である。
- (2) ガラス発泡軽量骨材は形状がいびつで低強度であるため、流動性および圧縮強度の低下が顕著に認められ、構造用骨材には適さない。
- (3) ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートは圧縮強度は 2 ~ 10N/mm² 程度であるが、ガラス発泡軽量骨材の保水性とポーラスコンクリートの排水性を生かした屋上緑化植栽基盤としての可能性が確認できた。

謝 辞

本研究は、福岡県リサイクル総合研究センターの研究開発事業の一環として行った(株)荒木セメント、大同コンクリート工業(株)、太陽工業(株)、くら(有)との共同研究であると同時に、平成 18 年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(C) (課題番号:18560570, 研究代表者:椎葉大和)の助成を受けた。ここに深く感謝の意を表す。

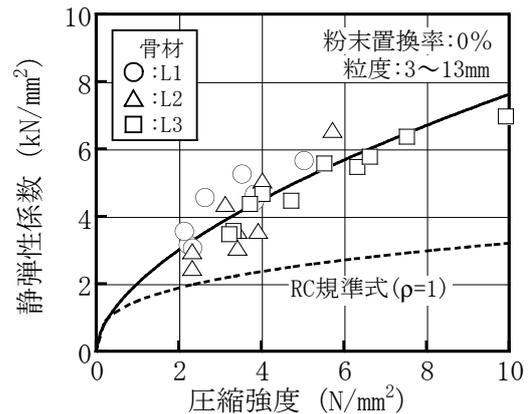


図-12 圧縮強度と静弾性係数の関係

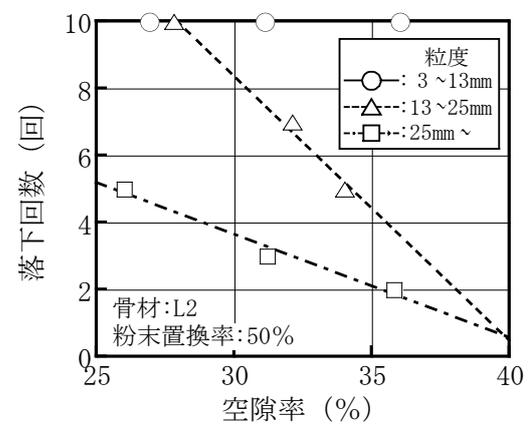


図-13 空隙率と落下回数との関係

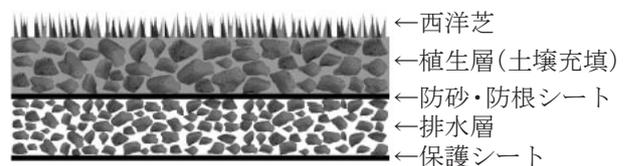


図-14 植栽システムの概要

参考文献

- 1) 環境省ホームページ 廃棄物処理に関する統計・状況 : http://www.env.go.jp/recycle/waste/wastetoukei_index.html
- 2) ガラスびんリサイクル促進協議会ホームページ : <http://www.glass-recycle-as.gr.jp/>
- 3) (社)日本コンクリート工学協会: ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書, pp.176 ~ 189, 2003.5
- 4) 山田敏昭, 米沢敏男, 柳橋邦生, 中西康博: 緑化コンクリートに生育した植物の冠水抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1033-1038, 1997.6