

## 発泡ガラスを用いた長期強度抑制型路盤材の開発

西脇 敬一\*1・川又 篤\*1・唐沢 智之\*2

## 概 要

営業線における支障物撤去工等での路盤の復旧は、作業時間や作業ヤードが限られた施工条件下となるため、路盤材には簡易な施工性と急硬性が求められる。また、将来、掘削作業を行う場合、所要の強度が得られた後の強度の増進は小さい方が望ましいと言える。このような背景から、路盤としての性能を備え、かつ長期的に強度増進を抑制した路盤材が求められている。そこで、発泡ガラスを用いて長期強度を抑制する路盤材の開発を行った。

本報告は、発泡ガラスを用いた路盤材が長期強度を抑制した新しい路盤材として適用可能であることを、各種試験によって検証した結果について報告するものである。

キーワード：路盤材，発泡ガラス，長期強度

DEVELOPMENT OF A LONG-TERM STRENGTH INHIBITORY  
BASE COURSE MATERIAL THAT USES FOAM GLASS

Keiichi NISHIWAKI \*1, Atsushi KAWAMATA \*1

Tomoyuki KARASAWA \*2

## Abstract

Restoration of the base course in removal of obstacles from lines in operation, etc., is conducted under restricted construction conditions, such as limited work hours and narrow work areas, so base course materials should possess easy workability and quick-hardening properties. Also, taking into consideration the possibility of conducting excavation work in the future, it is preferable to limit any increase in strength after the required strength levels have been achieved. With these considerations, it is necessary to use base course materials that are capable of maintaining the functionality of the road base and at the same time inhibit increase in strength over the long term. In order to meet these requirements, the authors developed a long-term strength inhibitory base course material that uses foam glass.

The paper reports the results of various tests that verify the applicability of this material as a new base course material.

Keywords: Base course material, Foam glass, Long-term strength

---

\*1 Engineering Department, Engineering Division

\*2 Manager, Engineering Department, Engineering Division

## 発泡ガラスを用いた長期強度抑制型路盤材の開発

西脇 敬一\*1・川又 篤\*1・唐沢 智之\*2

### 1. はじめに

営業線における支障物撤去工等での路盤の復旧は、作業時間や作業ヤードが限られた施工条件下となるため、路盤材には簡易な施工性と急硬性が求められる。また、将来、掘削作業を行う場合、所要の強度が得られた後の強度の増進は小さい方が望ましいと言える。特に HEP&JES 工法などの非開削工法で線路下横断工を構築する場合は、路盤の強度が高くなると掘削時の作業効率が低下したり、また、周辺地盤との強度差でエレメントけん引時に地山に変状を与える恐れもある。

このような背景から、路盤としての性能を備え、かつ長期的に強度増進を抑制した路盤材が求められている。そこで、リサイクル材料である発泡ガラスに着目した。発泡ガラスは、圧縮強度が  $2\sim 4\text{N/mm}^2$  程度の低強度であるのが特徴である。これを骨材として用いることで、セメントと砂のモルタル部分の強度が増大しても発泡ガラス自体が破壊されるため、路盤全体の強度増進を抑制できると考えた。

そこで、本開発では、発泡ガラスを用いた路盤材について、各種試験を行い、長期強度を抑制した新しい路盤材として適用可能であることを検証した。本報告は、これらの結果について報告するものである。なお、本開発は、東日本旅客鉄道株式会社および矢崎総業株式会社との共同開発である。

### 2. 長期強度抑制型路盤の目標性能

長期強度抑制型の路盤は、強化路盤<sup>1)</sup>としての性能を備え、かつ長期強度を抑制する性能を満足するために、以下の目標性能を設定した。

- ① 乾燥密度  $1.0\text{g/cm}^3$  以上
- ② 材齢 14 日の圧縮強度  $1.2\text{N/mm}^2$  以上
- ③  $K_{30}$  値  $110\text{MN/m}^3$  以上
- ④ 透水性を有すること
- ⑤ 現場で容易に施工可能なこと
- ⑥ 列車通過時に有害な軌道変状につながる体積変化を生じないこと
- ⑦ 最終の圧縮強度  $5.0\text{N/mm}^2$  以下

### 3. 使用材料

使用材料は、表-1 に示すように骨材として発泡ガラスと JIS A 5005 に準ずるコンクリート用砕砂、固化材として早強ポルトランドセメント、練混ぜ水として水道水を用いた。発泡ガラスの外観を写真-1 に示す。発泡ガラスは、ガラス瓶などの廃ガラスを粉碎し、発泡剤を加えて  $800^\circ\text{C}$  以上で熔融・発泡させ、急冷自然粉碎して粒形を  $4\sim 10\text{mm}$  としたリサイクル材料で、前述のように圧縮強度が  $2\sim 4\text{N/mm}^2$  程度の低強度であるのが特徴である。

### 4. 実験フロー

実験は、実験シリーズ I と実験シリーズ II とし、実験シリーズ I では、前述した路盤としての目標性能①~⑤を有する路盤材の配合と施工方法の選定を目的とした。

実験シリーズ II では、目標性能⑥と⑦のほか、長期材齢での性能および路盤構築後の掘削の

表-1 使用材料

材料	種類	物性等	製造または産地	
骨材	発泡ガラス	—	絶対密度 $0.45\text{g/cm}^3$ 、吸水率 5%、寸法 $4\sim 10\text{mm}$	ソルテクニカ製
	砂	砕砂	絶対密度 $2.82\text{g/cm}^3$ 、吸水率 1.72%	静岡県浜松産
固化材	セメント	早強ポルトランド	密度 $3.14\text{g/cm}^3$ 、比表面積 $4,510\text{cm}^2/\text{g}$	太平洋セメント製

\*1 土木本部 エンジニアリング部 材料・構造研究開発グループ

\*2 土木本部 エンジニアリング部 材料・構造研究開発グループ グループリーダー

作業性の確認を目的とした。

## 5. 実験シリーズ I

### 5. 1 実験概要

#### (1) 配合確認試験

路盤材の配合を表-2に、試験項目および試験方法を表-3に示す。試験は、路盤材を混合してφ50×100mmの供試体を作製し、乾燥密度、圧縮強度および透水係数を測定した。

#### (2) 施工性確認試験

試験ケースは、表-4に示すように路盤材の配合をパラメータに3ケースとした。試験は、実際の施工を想定して、材料の混合、巻出しおよび転圧を行い、縦75cm×横75cm×深さ30cmの路盤を作製した。材料の混合と巻出しは、0.25m<sup>3</sup>のバックホウを、転圧は60kgのプレートコンパクターを用いて行った。巻出しは1層で行い、転圧回数は、2回、4回および6回に変化させた。

試験項目と試験方法を表-5に示す。試験は、転圧完了後3時間が経過した時点で小型FWD試験と平板載荷試験を、また、路盤の硬化後にφ50mmのコアを採取して、材齢14日に圧縮強度と乾燥密度を測定した。

### 5. 2 実験結果

#### (1) 配合確認試験

試験結果を表-6に示す。圧縮強度は、材齢14日で1.75～2.59N/mm<sup>2</sup>の範囲となり、いずれの配合も目標とした1.2～5.0N/mm<sup>2</sup>を満足する結果であった。乾燥密度は、1.146～1.283g/cm<sup>3</sup>の範囲で、セメント量が少ない配合A5で若干小さくなったが、目標とした1.0g/cm<sup>3</sup>以上を有していた。透水係数は、試験ケースによって明確な傾向を示さなかったが、平均で0.03cm/s程度となり、透水性を有することが確認された。

以上の結果より、いずれの配合も目標とした性能を有することが確認できた。

#### (2) 施工性確認試験

##### ① 試験ケース A



写真-1 発泡ガラスの外観

表-2 配合確認試験の試験ケースと配合

配合No.	配合(重量比)			
	発泡ガラス	砂	セメント	水
A1	1	5.1	1	0.7
A2				0.8
A3				0.8
A4		6.0	0.67	1.0
A5				0.7
A6				1

表-3 配合確認試験の試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	試験時期
圧縮強度	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法	材齢14日
乾燥密度	φ50×100mmの試験体を作製して、硬化後に乾燥させ、絶乾重量/容積で算出	材齢14日
透水係数	JCI エココンクリート研究委員会 <sup>2)</sup> ポーラスコンクリートの透水試験方法(案)	材齢14日

表-4 施工性確認試験の試験ケース

試験ケース	A	B	C
配合(重量比)	1:5.1:1:0.8	1:5.1:1:0.5	1:5.1:0.67:0.5
発泡ガラス:砂:セメント:水			
転圧回数	4   6	2   4	4

表-5 施工性確認試験の試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	試験時期
K <sub>HFW</sub> 値	小型FWD試験	転圧3hr後
K <sub>30</sub> 値	JIS A 1215 道路の平板載荷試験方法	
圧縮強度	JIS A 1107 コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法	材齢14日
乾燥密度	採取したコア供試体を乾燥させ、絶乾重量/容積で算出	材齢14日

表-6 配合確認試験の結果

配合No.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	透水係数 (cm/s)
A1	2.59	1.208	0.031
A2	2.29	1.256	0.015
A3	1.85	1.283	0.025
A4	1.75	1.269	0.035
A5	1.76	1.146	0.052
A6	2.03	1.192	0.007

配合は、配合確認試験で圧縮強度のばらつきが最も小さかった配合A2とした。試験結果を表-7に示す。材料の混合は0.25m<sup>3</sup>のバック

ホウを用いて行ったが、写真-2に示すように各材料は均一に分散しており、発泡ガラスを用いた路盤材は、バックホウによって混合可能であると判断された。

転圧後の表面状況を写真-3に示す。目視観察では、十分に締固められていると判断された。小型 FWD 試験における  $K_{HFWD}$  値および平板載荷試験の  $K_{30}$  値は、転圧回数の増加によって増大した。目標性能とした  $K_{30}$  値は、転圧回数 4 回程度で得られることが判った。

採取したコアの外観の一例を写真-4に示す。圧縮強度は、転圧回数により変化し、4 回で  $4.27\text{N/mm}^2$ 、6 回で  $4.72\text{N/mm}^2$  で、いずれも目標範囲内であった。

以上の結果より、本ケースは、施工性や圧縮強度など目標とした性能を有することが確認できた。しかしながら、転圧時には、上面に練混ぜ水が浮き上がる状況が観察されたこと、また、配合確認試験時に比べ圧縮強度が増大する傾向が見られたため、以後の試験ケースでは配合の修正を行った。

## ② 試験ケース B と試験ケース C

試験ケース B では、練混ぜ水量を低減し、試験ケース C では、試験ケース B からさらにセメント量も低減する配合の修正を行った。

試験結果の一覧を表-8に示す。試験ケース B は、練混ぜ水を低減したことで、転圧時に余剰な水が浮き上がる状況は見られず、試験ケース A と比較して、良好な施工性を有すると判断された。また、圧縮強度等の目標性能については、いずれも満足する結果であった。

試験ケース C は、他の試験ケースに比べて圧縮強度が小さくなった。これは、セメント量を低減したことに起因すると考えられるが、目標とした  $1.2\text{N/mm}^2$  以上を有していた。

なお、試験ケース C では、平板載荷試験を実施しなかったが、他の試験ケースで  $K_{HFWD}$  値と  $K_{30}$  値には、ほぼ同等の関係が見られたため、 $K_{30}$  値は目標とした  $110\text{MN/m}^3$  を有すると考えられる。

表-7 施工性確認試験の結果 (試験ケース A)

試験ケース	A	
転圧回数	4	6
圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ )	4.27	4.72
乾燥密度( $\text{g/cm}^3$ )	1.30	1.37
$K_{HFWD}$ 値( $\text{MN/m}^3$ )	130	155
$K_{30}$ 値( $\text{MN/m}^3$ )	133	162



写真-2 路盤材の混合後の状況



写真-3 転圧後の表面状況



写真-4 コアの外観の一例

表-8 施工性確認試験の結果 (試験ケース B と C)

試験ケース	B		C
転圧回数	2	4	4
圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ )	2.89	3.87	2.37
乾燥密度( $\text{g/cm}^3$ )	1.15	1.24	1.18
$K_{HFWD}$ 値( $\text{MN/m}^3$ )	120	145	146
$K_{30}$ 値( $\text{MN/m}^3$ )	128	135	



## 6. 実験シリーズⅡ

実験シリーズⅠでは、乾燥密度、材齢 14 日の圧縮強度、 $K_{30}$  値について所要の性能が得られる配合や施工方法が確認できた。このため、実験シリーズⅡでは、路盤としての長期材齢での性能および路盤構築後の掘削の作業性について検討を行った。なお、実験シリーズⅡでは、実験シリーズⅠの施工性確認試験で良好な結果が得られた試験ケース C の配合を用いた。

### 6. 1 実験概要

#### (1) 長期耐久性試験

##### ① 耐アルカリ性試験

一般に通常のガラスは、耐アルカリ性が小さく、高アルカリ環境下では溶解することが知られている。そこで、発泡ガラスを用いた路盤材について、想定されるアルカリ環境下での耐アルカリ性の確認を目的に試験を行った。

試験体は、路盤としての耐アルカリ性の確認のため全材料を混合して作製した  $\phi 50 \times 100\text{mm}$  の円柱試験体と発泡ガラス単体の 2 種類とした。

試験は、各々の試験体を pH12.5 の水溶液に浸漬して  $60^\circ\text{C}$  の恒温庫内に保管した。所定の浸漬材齢で試験体を取り出し、円柱試験体は圧縮強度を、発泡ガラス単体の試験体は浸漬前後の質量を測定して溶解率を求めた。

##### ② 繰返し載荷試験

鉄道路盤は、列車荷重を繰返し受けるため、繰返し荷重に対する安全性が求められる。通常、鉄道路盤は、横方向には拘束があるため、大きな変位を生じないと考えられ、試験は、図-1 に示すように試験体の外側に鋼管を施し、横方向の変位を拘束した状態で、一軸方向の載荷を繰返す方法で行った。

載荷応力は、列車荷重で路盤に生じる応力の  $0.1\text{N/mm}^2$  を上限とし、振幅を片振幅の 5Hz で行った。載荷は、材齢 3 時間から開始し、載荷回数は 200 万回とした。試験中は、継続して路盤上面の変位を測定した。

##### ③ クリープ試験

鉄道路盤は、繰返し荷重のみならず、持続荷重に対しても体積変化が小さいことが望ましい。そこで、持続荷重に対する性能の確認を目的としてクリープ試験を行った。試験方法は、「JIS A 1157 コンクリートの圧縮クリープ試験方法」に準じた。載荷応力は、繰返し載荷試験と同様に  $0.1\text{N/mm}^2$  とした。

クリープひずみは、載荷中に生じたひずみから、同一環境下で静置しておいた無載荷の試験体のひずみ（温度や乾燥の収縮ひずみ）を差し引いて求めた。

#### (2) 長期材齢での性能確認および掘削の作業性に関する試験

試験は、実験シリーズⅠの施工性確認試験と同様の方法で、材料の混合、巻出しおよび転圧を行って縦  $100\text{cm} \times$  横  $100\text{cm} \times$  深さ  $30\text{cm}$  の路盤を作製した。転圧回数は 4 回とした。

試験項目および試験方法を表-9 に示す。試験項目は、 $K_{30}$  値、乾燥密度、圧縮強度および、はつり速度とした。はつり速度は、作製した路盤で実際にはつり作業を行い、単位時間当たりのはつり量で表した。掘削の作業性は、はつり速度で評価を行った。はつりの方法は、表-10 に示す 4 つの方法とし、材齢 5 ヶ月に行った。また、長期材齢での性能の確認として、材齢 5 ヶ月に圧縮強度と  $K_{30}$  値を測定した。

## 6. 2 試験結果

### (1) 長期耐久性試験

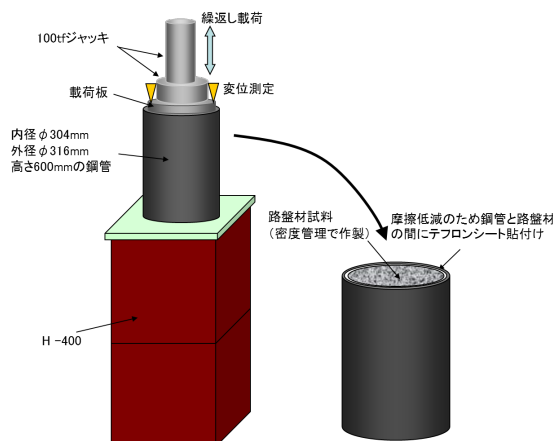


図-1 繰返し載荷試験

① 耐アルカリ性試験

発泡ガラスの溶解率の測定結果を図-2に示す。浸漬材齢 182 日まで溶解率は、最大 3.8% で微細な変動であった。しかしながら、その後急激に溶解が進行して、浸漬材齢 252 日に溶解率は 10.9% となった。

円柱試験体の圧縮強度の試験結果を図-3に示す。図中には、アルカリ水溶液に浸漬せずに標準養生を行った試験体の圧縮強度も併記した。圧縮強度は、ばらつきが大きいのが、全体としては、アルカリ水溶液に浸漬した試験体は、浸漬していない試験体に比べて、わずかに小さい傾向を示した。しかしながら、浸漬材齢 365 日までは、圧縮強度に急激な低下は見られなかった。

今回の 60℃の恒温庫内に試験体を保管しての試験は、既往の文献<sup>3)</sup>によれば 20℃の環境下の 16 倍程度の促進環境下と想定され、浸漬材齢 182 日は 8 年程度、365 日は 16 年程度に相当すると考えられる。これより、発泡ガラスを用いた路盤材は、8 年程度の期間は、耐アルカリ性を十分に有するものと考えられる。

② 繰返し载荷試験

繰返し回数と最大変位の関係を図-4に示す。最大変位は、载荷開始時に 1mm 程度生じたが、その後は、繰返し载荷 200 万回まで増大するような傾向は見られなかった。载荷後、試験体の上面に変状等は認められなかった。

これより、発泡ガラスを使用した路盤は、繰返し荷重に対して十分な安全性を有するものと考えられる。

③ クリープ試験

载荷材齢とクリープひずみの関係を図-5に示す。クリープひずみは、载荷開始から 7 日後に 160μ 程度まで増加したが、その後は材齢とともに増大する傾向は見られなかった。

これより、発泡ガラスを使用した路盤は、持続荷重に対して有害な変位を生じないことが確認された。

表-9 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	試験時期
K <sub>50</sub> 値	JIS A 1215 道路の平板载荷試験方法	転圧3hr後、材齢5ヶ月
圧縮強度	JIS A 1107 コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法	材齢14日、28日、56日、91日、158日
乾燥密度	採取したコア供試体を乾燥させ、絶乾重量/容積で算出	材齢14日
はつり速度	はつり量/はつり時間で算出	材齢5ヶ月

表-10 はつり方法

No.	使用器械	のみの種類
①	電動ハンマー	針のみ
②	電動ハンマー	スコップのみ
③	チッパー	平のみ
④	ピック	平のみ

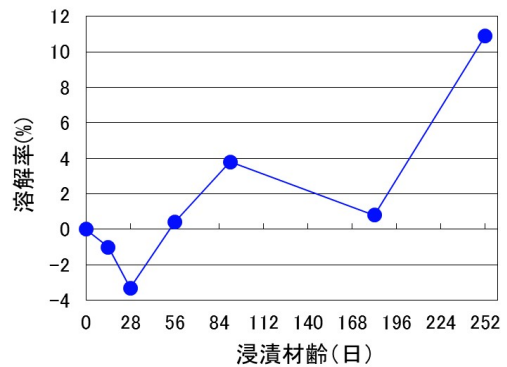


図-2 浸漬材齢と溶解率の関係

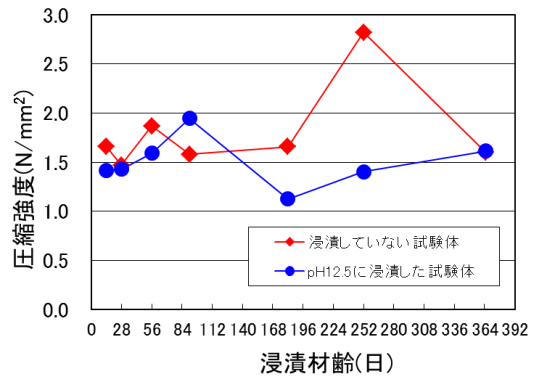


図-3 浸漬材齢と圧縮強度の関係

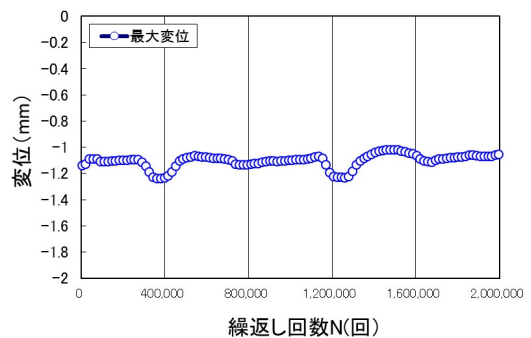


図-4 繰返し回数と最大変位の関係

(2) 長期材齢での性能確認および掘削の作業性に関する試験

路盤材の混合状況を写真-5に、転圧状況を写真-6に示す。また、転圧後の路盤の表面状況を写真-7に示す。

材齢3時間で行った平板荷試験における沈下量と荷重応力の関係を図-6に示す。K<sub>30</sub>値は、300MN/m<sup>3</sup>以上となり、目標性能とした110MN/m<sup>3</sup>を十分に上回る結果であった。また、実験シリーズIと比較してK<sub>30</sub>値が大きくなったが、これは、夏期に試験を行ったため、セメントの硬化速度が早くなったことに起因すると考えられる。次に材齢5ヶ月経過した後に行った平板荷試験における沈下量と荷重応力の関係を図-7に示す。これから、算出されるK<sub>30</sub>値は700MN/m<sup>3</sup>以上であり、材齢の経過に伴うK<sub>30</sub>値の低下は見られず、長期的にも十分な支持力を有することが確認された。

コア供試体による圧縮強度の試験結果を図-8に示す。材齢14日の圧縮強度は、1.2N/mm<sup>2</sup>以上であった。その後の材齢でも圧縮強度の増進は見られず、目標性能とした1.2~5.0N/mm<sup>2</sup>の範囲となった。また、乾燥密度は1.214g/cm<sup>3</sup>であった。

はつりの作業状況の一例を写真-8に、はつり速度の試験結果を表-11に示す。なお、試験は、既往の路盤材を用いて同様に路盤を作製してはつり作業を比較した。「電動ハンマー+針のみ」による方法は、内部に針のみが刺さり、路盤が裂けるような状態とならないため、はつりに時間を要した。その他の方法は、路盤の内部にのみが刺さるような状況にならず、はつりの作業性は良好であった。これらの中で「チップ+平のみ」による方法は、器械寸法が小さいため軽量であり、作業性が良いと考えられた。また、発泡ガラスを用いた路盤でののはつり速度は、既往材料と比較して3~4倍程度となった。これより、発泡ガラスを用いた路盤材は、既往の路盤材と比較して掘削の作業性が高いと判断された。

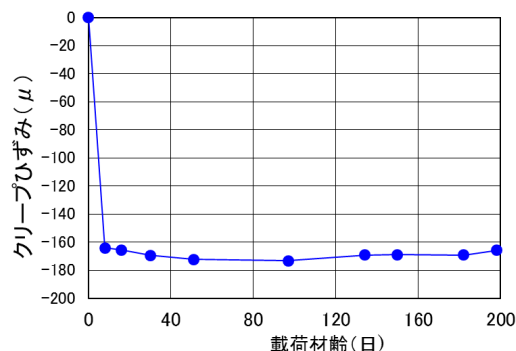


図-5 載荷材齢とクリープひずみの関係



写真-5 路盤材の混合状況



写真-6 転圧状況



写真-7 転圧後の表面状況



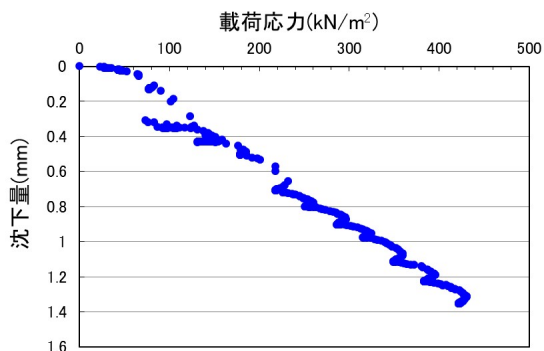


図-6 沈下量と載荷応力の関係 (材齢3時間)

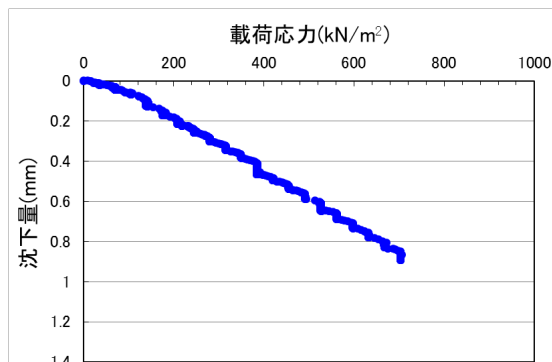


図-7 沈下量と載荷応力の関係 (材齢5ヶ月)

### 7. まとめ

今回、長期強度を抑制する目的として発泡ガラスを用いた路盤材について各種試験を行った。その結果、発泡ガラスを用いた路盤は、通常の路盤としての性能のほかに、長期強度の増進が見られず、掘削の作業性が高いこと、また、持続荷重や繰返し荷重に対しても有害な変位を生じないことが確認できた。これらより、発泡ガラスを用いた路盤材は、長期強度を抑制した新しい路盤材として適用可能であると判断された。ただし、耐アルカリ性については、路盤として強度の低下は見られなかったが、発泡ガラス自体は時間とともに溶解することが判った。このため、長期間供用する部位へ適用する場合は、定期的な維持管理が必要であるといえる。

### 謝辞

本報告を作成するにあたり、東日本旅客鉄道株式会社の鈴木啓晋氏、富田直幹氏、矢崎総業株式会社の三宅敏文氏、鈴木幸雄氏に多大なるご助言をいただきました。感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物，2007.1
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：エココンクリート研究委員会報告書，pp.56～58，1995.11
- 3) 土屋博之：実験器具に用いられる素材の特徴，ぶんせき，2011.1

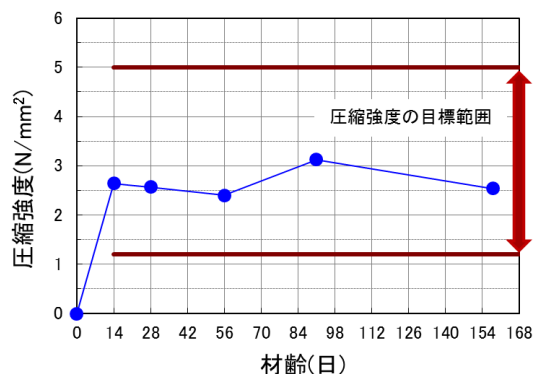


図-8 コアの圧縮強度



写真-8 はつりの作業状況

表-11 はつり速度の試験結果

No.	使用器械	のみの種類	はつり速度(m <sup>3</sup> /10分)	
			開発路盤	既往材料の路盤
①	電動ハンマー	針のみ	—	—
②	電動ハンマー	スコップのみ	0.03	0.01
③	チッパー	平のみ	0.05	0.02
④	ピック	平のみ	0.1	0.02