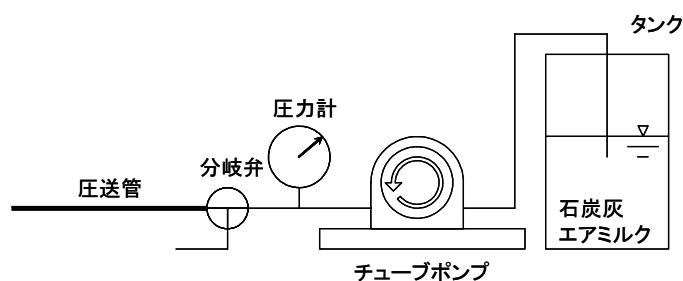


石炭灰を用いたガスパイプラインの中詰め材の開発

高木 亨・佐藤 文則^{*1}・野田 兼司^{*1}・田中 倫之^{*2}

Development of the Material Containing Coal Ash Filling Gap of Gas Pipeline and Tunnel Lining

Toru TAKAKI, Fuminori SATO, Kenji NODA, Tomoyuki TANAKA



小規模圧送実験装置の概要図



実規模圧送実験（500m）

推奨配合（G250F50B10）

試験名	セメント [kg]	石炭灰 [kg]	練混ぜ水 [kg]	ベントナイト [kg]	起泡剤 [L]	希釈水 [kg]	気泡量 [%]	空気量 [%]
推奨配合	250	50	300	10	1.5	28.2	59.4	56.4



石炭灰エアミルク

研究の目的

ガスパイプラインでは、トンネル工法やシールド工法等により掘削されたトンネル坑内にガス管を敷設し、ガス管の周囲を中詰め材で充填する場合があります。中詰め材には、強度や体積変化といった一般的な性能以外にガスパイプライン特有の透気性や導電性といった性能が求められる。場合によっては、特殊な材料を用いることで要求性能を満足しなければならず、このことは、中詰め材のコストの上昇要因となっている。そこで、それらの要求性能をすべて満足しつつ、コスト競争力に優れた材料の開発を行うこととした。

技術の説明

中詰め材として選定した石炭灰エアミルクは、セメント、石炭灰、ベントナイト、気泡および水から構成される。気泡が透気性を、石炭灰が導電性を、ベントナイトが材料分離抵抗性をそれぞれ向上させる。開発した石炭灰エアミルクは長距離圧送性能を有しており、また、費用対効果に優れた材料で構成されていることから、従来の中詰め材よりも大幅にコストが低減されている。さらに、小規模圧送実験装置を用いることで、石炭灰エアミルクの長距離圧送性能を室内試験で評価することができる。

主な結論

①ガスパイプラインの中詰め材に最も適した材料は、その性能およびコストから石炭灰エアミルクである。②石炭灰エアミルクの構成材料として、費用対効果に優れたベントナイトを用いることで長距離圧送性能は向上する。③室内小規模圧送実験装置を用いることで、実規模圧送実験と同様の石炭灰エアミルクの長距離圧送性能に関する評価ができる。④石炭灰エアミルクの構成材料の1つである石炭灰は、その性質によっては構成材料としては使えないため、強熱減量が10%以下の石炭灰を選択する必要がある。⑤推奨配合を用いることで石炭灰エアミルクは要求性能を満足しつつ500mの長距離圧送が可能であることを実規模圧送実験で確認した。

*1 本店 技術本部 ものづくりセンター

*2 関東支店 土木部施工支援G

石炭灰を用いたガスパイプラインの中詰め材の開発

高 木 亨 佐 藤 文 則*¹
野 田 兼 司*¹ 田 中 倫 之*²

要 旨

ガスパイプラインではガス管周囲を中詰め材で充填する場合がありますが、中詰め材にはガスパイプライン特有の性能が求められる。しかし、このことは材料コスト上昇の要因となっている。そこで、著者らは要求性能を満足しつつ、安価な中詰め材料の開発を行うこととした。

まず、室内試験にて材料を選定し、次に室内小規模圧送実験装置を用いて配合を絞り込み、最後に実規模実験で圧送距離500mの長距離圧送性能の確認を行った。その結果、材料分離抵抗性能、流動性および長距離圧送性能に優れ、なおかつコストの低減も可能となる石炭灰エアミルクを開発した。

キーワード ガスパイプライン／中詰め材／石炭灰／エアミルク／透気性／導電性／材料分離抵抗性能／流動性／長距離圧送性能／ベントナイト／コスト低減

目 次

- | | |
|----------------------|--------------|
| 1. 背景と目的 | 4. 室内小規模圧送実験 |
| 2. 中詰め材の要求性能および材料の選定 | 5. 屋外実規模圧送実験 |
| 3. 石炭灰エアミルクの構成材料の選定 | 6. まとめ |

DEVELOPMENT OF THE MATERIAL CONTAINING COAL ASH FILLING GAP OF GAS PIPELINE AND TUNNEL LINING

Toru TAKAKI Fuminori SATO
Kenji NODA Tomoyuki TANAKA

Synopsis:

The material filling gap of gas pipeline and tunnel lining is required several kinds of special properties. But these requirements cause increasing the material costs. Therefore authors carried out development of the gap filling material achieving the criteria of special properties and low cost.

At first, authors selected the raw materials by laboratory experiments. Secondly, authors selected mixture proportion by the indoor small pumping experiment for judging the long-distance pumpability. Finally, authors verified that the designed material have the long-distance pumpability (500m) by the real scale pumping experiment. As a result, it was shown that the designed material containing coal ash takes the resisting segregation, the flowability, the long-distance pumpability and competitive prices.

* 1 本店 技術本部 ものづくりセンター * 2 関東支店 土木部施工支援 G

1. 背景と目的

ガスパイプラインではトンネル工法やシールド工法等により掘削されたトンネル坑内にガス管を敷設し、ガス管の周囲を中詰め材で充填する（図-1(a) (b) 参照）場合がある。中詰め材には、強度や体積変化といった一般的な性能以外にガスパイプライン特有の透気性や導電性といった性能が求められる。場合によっては特殊な材料を用いることで要求性能を満足しなければならない。このことは中詰め材のコストの上昇要因となっている。そこで、著者らはガスパイプラインの中詰め材の要求性能をすべて満足しつつ、安価な材料の開発を行うこととし、ここでは一連の調査および実験により得られた知見を報告する。

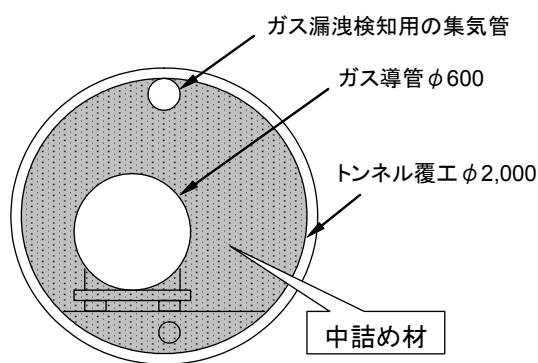


図-1(a) ガスパイプライン断面（例）：
パターンA

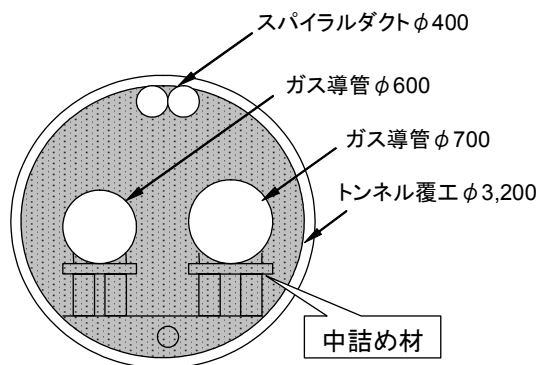


図-1(b) ガスパイプライン断面（例）：
パターンB

2. 中詰め材の要求性能および材料の選定

2.1 中詰め材に要求される性能

ガスパイプラインの中詰め材に要求される性能を一例として表-1 に示す。開発目標である中詰め材はこれらすべての要求性能を満足しなければならない。その中で、ガスパイプライン特有の要求性能として、透気性および導電性がある。

表-1 中詰め材の要求性能の一例

要求性能	品質管理項目	管理値
強度	再掘削が可能で、ガス管への拘束が小さいこと 一軸圧縮強さ(材齢28日)	200～500kN/m ²
体積変化	体積変化を起こさないこと ブリーディング率	3.0%以下
流動性	流動性が高く、長距離圧送が可能であり、間隙へよく回り込むこと シリンドラフロー値	流動性があること
透気性	ガス漏洩検知のための透気性を有すること 透気係数	透気性があること
導電性	砂と同等の防食電流を伝える能力があること 比抵抗値	2,000～10,000Ω・cm
温度	ポリエチレン塗覆装の軟化温度を超えないこと 発熱温度	60℃以下
安定性	ガス管を劣化させないこと pH	アルカリ性
安全性	環境に悪影響を及ぼさないこと 毒物・危険物	N.D.

2.2 中詰め材の選定

中詰め材の材料選定にあたり、まず、一般的に空洞充填材として用いられている以下の7種類の材料について、その性能およびコストに関する検討を行うこととした。ここでは特に透気性および導電性についての試験結果を示す（CB：セメントベントナイト系の略称）。

- ① ソイルモルタル
- ② CB
- ③ エアミルク
- ④ エアモルタル
- ⑤ スラグ石膏セメント
- ⑥ 石炭灰エアミルク
- ⑦ CB（ガスパイプライン用）

(1) 透気性の比較

各材料の透気試験の結果を図-2 に示す。エアミルク、エアモルタルが透気性に特に優れており、次いで石炭灰エアミルクとCB（ガスパイプライン用）という結果となった。これは、エアミルク、エアモルタルは空気（気泡）を構成材料としており、上記の4材料は間隙が他の材料に比べて多いためと考えられる。なお透気性については管理値をガスパイプラインで採用実績のあるCB（ガスパイプライン用）の値とした。

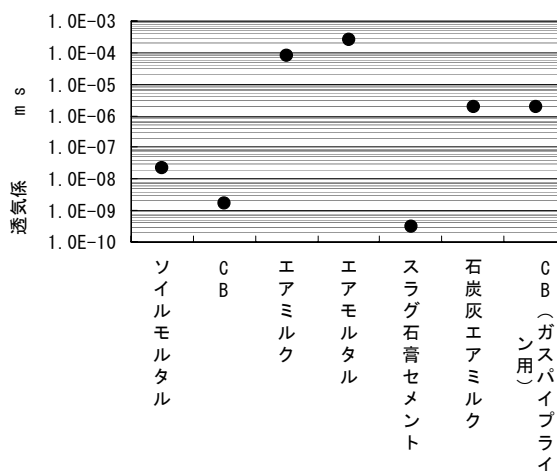


図-2 各材料の透気係数の比較

(2) 導電性の比較

各材料の比抵抗試験の結果を図-3に示す。材齢 28 日（4 週目）で要求性能（2,000～10,000 $\Omega \cdot \text{cm}$ ）を満足したのは石炭灰エアミルクと CB（ガスパイプライン用）の 2 材料のみであった。

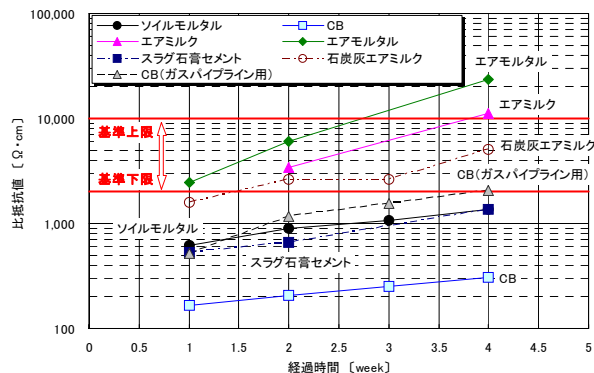


図-3 各材料の導電性の比較

(3) 石炭灰エアミルクの選定

検討結果の一覧を表-2に示す。前述の透気性、導電性等の要求性能を満足しており、さらにコスト性に優れた材料として、総合的判断から石炭灰エアミルクをガスパイプラインの中詰め材として選定した。

表-2 各材料の性能比較

	強度	体積変化	流動性	透気性	導電性	温度	安定性	安全性	材料コスト	総合
ソイルモルタル	○	○	○	△	△	-	○	○	◎	△
CB	○	○	○	△	△	-	○	○	△	△
エアミルク	○	○	○	◎	△	-	○	○	○	△
エアモルタル	○	○	○	◎	△	-	○	○	○	△
スラグ石膏セメント	○	○	○	△	△	-	○	○	△	△
石炭灰エアミルク	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○
CB(ガスパイプライン用)	○	○	○	○	○	-	○	○	△	△

◎：目標値（管理値）を満足し極めて優れている

○：目標値を満足する，△：目標値を満足しない

3. 石炭灰エアミルクの構成材料の選定

本研究で選定した石炭灰エアミルクは、セメント、石炭灰、起泡剤、ベントナイト、水および空気によって構成されている。これらのうち、石炭灰、起泡剤およびベントナイトは石炭灰エアミルクの性能やコストに与える影響が大きいので、その選定には詳細な検討が必要である。したがって、配合選定の前に、まず、石炭灰、起泡剤およびベントナイトそれぞれに関する試験を行ったので、ここではそれらの結果について示す。

3.1 石炭灰の選定に関する検討

石炭灰はクリンカアッシュやフライアッシュ等の総称である。フライアッシュには JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」の規格に合致した分級、精製品であ

る JIS 灰（I～IV種）と発生した状態のままである原粉とがある¹⁾。JIS 灰を用いた場合、性能および品質の確保は容易であるが、材料コストが高くなり、一方、原粉を用いた場合、材料コストは抑えられるが性能および品質の確保が難しくなる。よって、ここではその中間である、比較的品質は安定し、所要の性能が得られ、そして安価と考えられる JIS 灰相当の原粉を用いることとし、本研究では、これを石炭灰と称することとした。

実験では灰種の地域性を考慮し、A1、B1、B2 および C1 の計 4 種類の産出地の異なる石炭灰の性能を確認することとした。ただし、B1 および B2 は、産出地は同じであり、ロットが異なる。実験に用いた石炭灰は、物理的性状のうち、配合においては密度（ g/cm^3 ）、また、消泡においては強熱減量（%）およびメチレンブルー吸着量（MB 吸着量）（ mg/g ）がそれぞれ重要な項目と考えたため、各石炭灰の物理試験はそれらの項目のみ行った（表-3 参照）。JIS 灰の強熱減量の上限が、フライアッシュ II 種で 5.0%、最も大きなフライアッシュ III 種でさえ 8.0%であることから、石炭灰 A の強熱減量値が非常に大きな値であることが分かる。なお、石炭灰の強熱減量は、主に未燃炭素の比率の指標であり、MB 吸着量とも密接な関係（良好な相関関係）にある¹⁾。

表-3 石炭灰の物理的性状の一覧

石炭灰種	密度 [g/cm^3]	MB吸着量 [mg/g]	強熱減量 [%]
石炭灰A	2.19	0.975	16.2
石炭灰B1	2.19	0.57	2.9
石炭灰B2	2.17	0.85	2.93
石炭灰C	2.17	0.75	2.17

(1) 実験方法

実験材料には、セメントは高炉セメント B 種、石炭灰は表-3 の 4 種類、起泡剤は動物性タンパク質系（後述の起泡剤 4）、そして水は水道水を用いた。実験手順は、はじめにセメント、石炭灰および水を 20L のモルタルミキサーを用いて混合し、そこへ気泡（20 倍希釈、20 倍発泡）を投入した。練混ぜは手練りにより行った。これを静置し、初期値、30 分後、1 時間後、2 時間後の経時変化を測定した。要求性能は、一軸圧縮強さ（JIS A 1216）：200～1,000 kN/m^2 、ブリーディング率（JSCE-F 522）：3.0%以下 およびシリンダーフロー値（JHS A 313）：160mm 以上とした。事前に実施した配合試験で上記の要求性能を満足している気泡量 40%および 60%の配合（表-4 参照）を用いて、灰種をパラメータとして実験を行った。

表-4 配合表（気泡量 40%、60%）

試験名	セメント [kg]	石炭灰 [kg]	練混ぜ水 [kg]	起泡剤 [L]	希釈水 [kg]	気泡量 [%]	空気量 [%]
C120F450	120	450	355	1.0	19.0	40.0	38.0
C120F275	120	275	235	1.5	28.5	60.0	57.0

(2) 実験結果および考察

図-4、図-5 は、石炭灰エアミルクの単位体積重量を正規化した（初期値で除した）値の経時変化を示している。いずれの配合においても、石炭灰 A の単位体積重量の増加が著しい。単位体積重量の増加は消泡が大きいことを示すため、石炭灰 A は石炭灰エアミルクの構成材料には適さないことが分かる。また、石炭灰 A 以外は単位体積重量がほとんど変化していない。これは、石炭灰 A の強熱減量が非常に大きい一方で、それ以外の強熱減量は小さいことが関係していると考えられる（表-3 参照）。

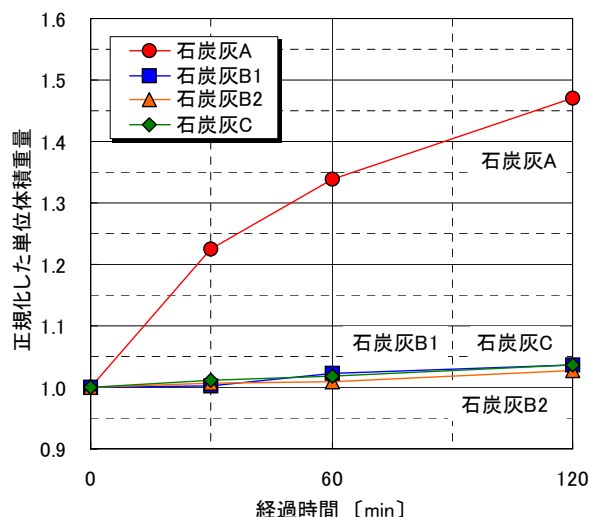


図-4 単位体積重量の経時変化
(起泡剤 4, C120F450)

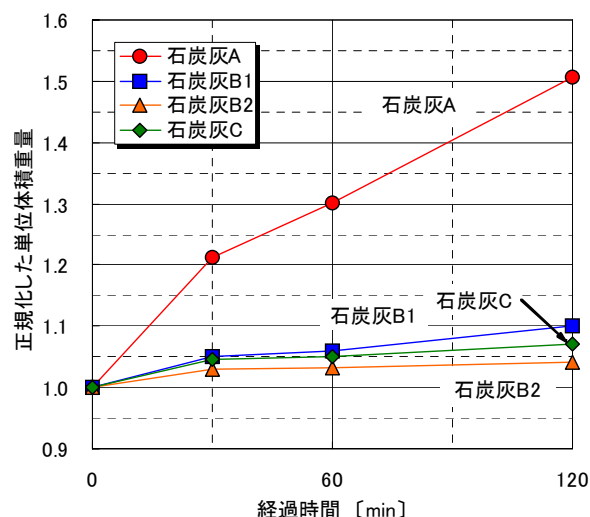


図-5 単位体積重量の経時変化
(起泡剤 4, C120F275)

3.2 起泡剤の選定に関する検討

起泡剤は原材料によって動物性タンパク質系と界面活性剤系の 2 つに大きく分類されるが、各々の製品では、

それぞれ色、臭い、比重、希釈倍率、発泡倍率、硬さ、泡立ち、混合性および温度の影響といった性質や性能並びにコスト等が異なっており、その目的や用途に応じて最適な起泡剤を選定しなければならない。ここでは、石炭灰エアミルクに適した起泡剤を選定するため、新たに試作されたもの（3 種類）、そして既に市販されているもの（1 種類）、計 4 種類の起泡剤を用いて実験を行った（表-5 参照）。なお、起泡剤 1 はエアボール MT（立花マテリアル製）である。

表-5 実験に用いた起泡剤の一覧

起泡剤	密度 [g/cm ³]	種別	特徴	コスト性
起泡剤1	1.17	動物性タンパク質系	気泡は強靱で安定性がある	○
起泡剤2	1.14	動物性タンパク質系	—	○
起泡剤3	1.03	界面活性剤系	気泡とセメントスラリーの混合性に優れている	○
起泡剤4	1.14	動物性タンパク質系	気泡とセメントスラリーの混合性に優れている	△

(1) 実験方法

実験材料、実験手順、要求性能および配合については、「3. 1 (1) 実験方法」と同じ方法とし、表-5 に示す起泡剤の種類をパラメータとして実験を行った。

(2) 実験結果および考察

図-6 に石炭灰 B1、C120F450 を用いた試験結果を示す。図-4、図-5 と同様に石炭灰エアミルクの単位体積重量を正規化した値の経時変化を示している。起泡剤 1 および起泡剤 4 が単位体積重量の増加が少ない。今回の試験条件では、起泡剤 1 と起泡剤 4 の性能は同等であったが、起泡剤 1 のコストが起泡剤 4 の約半分であったことから、起泡剤 1 を選定することとした。

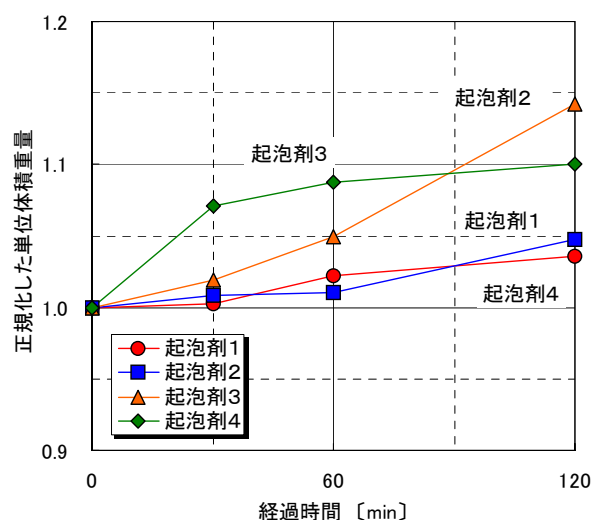


図-6 単位体積重量の経時変化
(石炭灰 B1, 気泡 40%)

3.3 ペントナイトの選定に関する検討

石炭灰エアミルクを材料分離抵抗性能に優れた中詰め材にするために、石炭灰エアミルクの構成材料として、新たにペントナイトを加えることとした。ペントナイトの比表面積は $800\text{m}^2/\text{g}$ であり、カオリナイト系の一般粘土の 50～100 倍の大きさである。水分の吸着能力は比表面積に比例するので、ペントナイトの水分吸着力は非常に大きい。ペントナイトは水中で膨潤、分散し、コロイド粒子は非常に多くの水を拘束するため、流動する自由水が少なく、他の粘土にない粘性を示す²⁾。このペントナイトの持つ特性が、石炭灰エアミルクの材料分離抵抗性能を向上させ、圧送時の消泡を低減すると考えた。

(1) 実験方法

ペントナイトの性能については、石炭灰エアミルクではなく、セメントペントナイトミルクについて検討した。実験材料には、TB-250（立花マテリアル製）、クニゲル V1（クニミネ工業製）および TB-S（立花マテリアル製）の 3 種のペントナイトを用いた。配合は、セメント 250kg、水 215kg、ペントナイト 1～15kg とし、ペントナイトの種類をパラメータとして実験を実施した。実験手順は、まず水とペントナイトを混合し、後からセメントを混合してセメントペントナイトミルクを作製した。測定は、P ロートによる粘性およびブリーディング率の 2 項目について行った。

(2) 実験結果および考察

図-7、図-8 にペントナイトを混合したセメントペントナイトミルクの P ロートを用いた粘性とブリーディング率の測定結果を示す。粘性、材料分離抵抗性ともに、TB-S が単位添加量当たりの効果に最も優れていることが分かった。しかし、費用対効果ではクニゲル V1 が TB-S よりも優れていたため、石炭灰エアミルクのペントナイトにはクニゲル V1 を選定することとした。

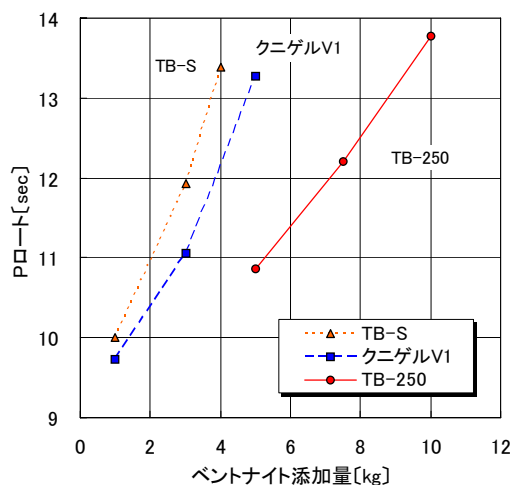


図-7 ペントナイトの粘性（P ロート）

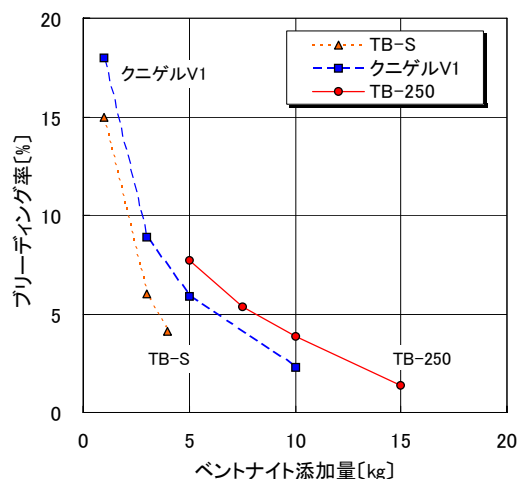


図-8 ペントナイトのブリーディング率

4. 室内小規模圧送実験

石炭灰エアミルクの配合を選定するには、実規模で長距離圧送性能を評価する必要がある。しかし、実規模の圧送実験では、材料、時間および場所並びにコストが膨大となり、実際には数ケースしか行えない。そこで、事前に小規模の圧送実験で長距離圧送性能を評価し、配合を選定することとした。まず、消泡のメカニズムを明確にすることで、要素レベルでの長距離圧送性能の評価手法を検証し、その後それを用いて配合の選定を行うこととした。

4.1 消泡のメカニズム

消泡のメカニズムは物理的メカニズムと化学的メカニズムの二つに大別される³⁾。

物理的メカニズムでは、主要因としては圧力が及ぼす影響が考えられる。特に急激な圧力変化や不連続圧力が泡を破壊（消泡）するとされている⁴⁾。また、川合ら^{5),6)}は、圧送中の密度変化（注：消泡を指すと考えられる）は圧力変動のみの影響は非常に小さく、管内の摩擦力または圧力変動と摩擦力の組み合わせによって生じると示唆している。

一方、化学的メカニズムでは、主要因としては石炭灰中の未燃炭素が及ぼす影響が考えられる。未燃炭素の吸着作用により空気量の変動は大きくなり、時間経過に伴って空気量が低下する⁷⁾。

したがって、実規模と同程度の圧力変動と摩擦力を再現できる試験装置を用いることで長距離圧送性の評価は可能となり、また、未燃炭素量（強熱減量）を少なくすることで消泡を低減できると考えた。

4.2 室内小規模圧送実験装置

(1) 装置の概要

図-9 に考案した室内小規模圧送実験装置の概要を示す。装置は、圧送前の石炭灰エアミルクを貯蔵するためのタ

ンク，圧送するためのチューブポンプ（吐出量：1～10L/min，最大吐出圧：1.0MPa），圧送管（φ：3/8 インチ），そして圧力計（最大 1.0MPa）により構成される．流量はチューブポンプに内蔵されたインバーターを用いて制御する．

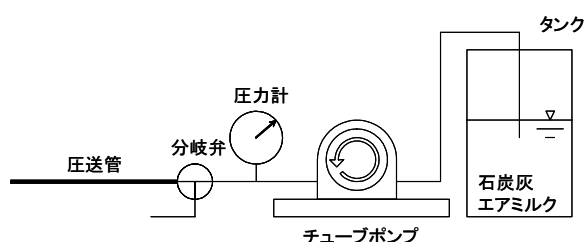


図-9 室内小規模圧送実験装置の概要図

(2) 実験方法

実験手順を図-10 に示す．まず石炭灰エアミルクを貯蔵タンクに所定量投入し，その後チューブポンプにより圧送管内を流動させ，圧送管の先端部にて圧送後の石炭灰エアミルクを採取する．圧送中は圧力や流量等を測定し，圧送前と圧送後の石炭灰エアミルクの単位体積重量，フロー値およびブリーディング率等を測定して石炭灰エアミルクの長距離圧送性能を評価した．

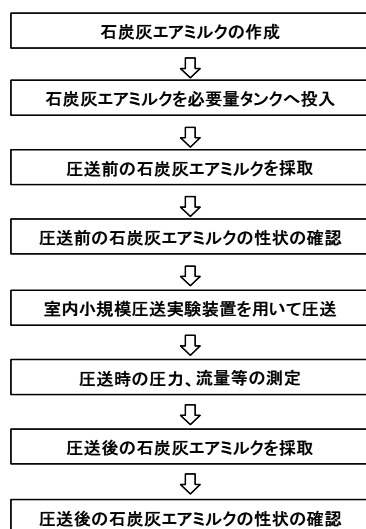


図-10 室内小規模圧送実験フロー

4.3 評価方法の妥当性

(1) 圧送条件

室内小規模圧送実験装置による長距離圧送性能を評価することの妥当性を検証するために，同じ材料（表-4 の C120F275 を使用）を圧送することで実規模圧送実験（後述）と室内小規模圧送実験の比較を試みた．表-6 に圧送条件を比較した結果を示す．圧送時の石炭灰エアミルクの消泡に大きな影響を与える吐出圧や圧力振幅は同程度であった．

表-6 圧送条件の比較

圧送条件	屋外実規模圧送実験	室内小規模圧送実験
管径 φ [インチ]	3	3/8
圧送距離 L [m]	500	20
吐出圧 P [MPa]	0.35	0.30
圧力振幅 2A [MPa]	0.10	0.10

(2) 石炭灰エアミルクの性状比較

実規模圧送実験と室内小規模圧送実験の圧送前後の石炭灰エアミルクの性状を比較した結果を表-7 に示す．単位体積重量およびフロー値の増減並びに消泡率（消泡率（%）＝{1-圧送後の気泡量（%）/圧送前の気泡量（%）}×100）は同程度であり，また，前述の圧送条件も同程度であったことから，室内小規模圧送実験装置を用いて長距離圧送性能を評価することは妥当であると考えられる．なお，長距離圧送実績のあるエアミルクでもこの評価手法の妥当性の検証は行っている．

表-7 圧送前後の性状の比較

測定項目	屋外実規模圧送実験	室内小規模圧送実験
単位体積重量 [tf/m³]	圧送前	0.702
	圧送後	1.157
	増減	0.455
気泡量 [%]	圧送前	57.2
	圧送後	27.4
	増減	-29.8
	消泡率	52.1
フロー値 [mm] (増加率は%)	圧送前	270
	圧送後	343
	増減	73
	増加率	127

4.4 石炭灰エアミルクの配合

(1) 配合における石炭灰量について

圧送時の石炭灰エアミルクの消泡には石炭灰中の未燃炭素が及ぼす影響が考えられたため，ここでは石炭灰量をパラメータとした室内小規模圧送実験を実施した（表-8 参照）．なお，石炭灰は石炭灰 B1，B2（表-3 参照）と産出地が同じであり，ロットが異なる B3 を用いた（表-9 参照）．図-11 に室内小規模圧送実験結果を示す．石炭灰量の増加に伴い消泡率も増加している．したがって，圧送時の消泡率を 10%未満（一般的に圧送距離に関係なくエアミルク圧送時に消泡すると言われている値）に抑制するためには，石炭灰 B3 の場合は上限が 50kg 程度と考えられる．

表-8 配合一覧（石炭灰量パラメータ）

試験名	セメント [kg]	石炭灰 [kg]	練混ぜ水 [kg]	ベントナイト [kg]	起泡剤 [L]	希釈水 [kg]	気泡量 [%]	空気量 [%]
C395F0B4	395	0	235	4	1.60	30.3	63.8	60.6
C345F50B4	345	50	235	4	1.58	30.0	63.1	59.9
C245F150B4	245	150	235	4	1.54	29.3	61.7	58.6
C120F275B5	120	275	235	5	1.50	28.5	59.9	56.9

表-9 石炭灰 B3 の物理的性状

石炭灰種	密度 [g/cm³]	MB吸着量 [mg/g]	強熱減量 [%]
石炭灰B3	2.18	0.57	4.3

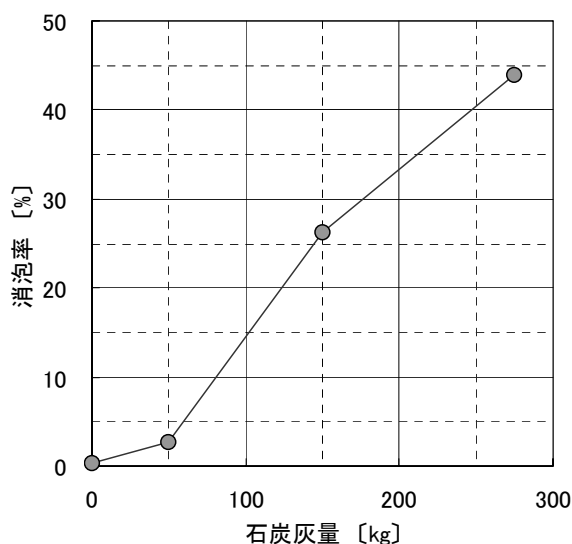


図-11 石炭灰量と消泡率の関係

(2) 要求性能を満足する配合の選定

① 実験方法

長距離圧送性能に優れた石炭灰エアミルクの配合選定にあたり、まず、要求性能である一軸圧縮強さ：200～1,000kN/m²、ブリーディング率：3.0%以下 およびシリンダーフロー値：160mm 以上を満足する配合の絞り込みを行った。実験には表-10 に示す材料を用い、石炭灰量は50kg に固定し、セメントおよび練混ぜ水をパラメータとした実験を実施した（表-11 参照）。なお、ベントナイトの濃度は練混ぜ水の 3.3%に固定した。

表-10 実験材料一覧

材料	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm ³
石炭灰	石炭灰B3:フライアッシュ(JIS外品) 密度:2.18g/cm ³ , MB吸着量:0.57mg/g, 強熱減量:4.30%
起泡剤	起泡剤1, 密度:1.17g/cm ³
ベントナイト	クニゲルV1, 密度:2.50g/cm ³
水	水道水

表-11 配合一覧

試験名	セメント [kg]	石炭灰 [kg]	練混ぜ水 [kg]	ベントナイト [kg]	起泡剤 [L]	希釈水 [kg]	気泡量 [%]	空気量 [%]
C250F50B10	250	50	300	10	1.48	28.2	59.4	56.4
C250F50B15	250	50	450	15	1.10	21.0	44.2	42.0
C250F50B20	250	50	600	20	0.72	13.8	29.0	27.5
C200F50B10	200	50	300	10	1.52	29.0	61.0	57.9
C200F50B15	200	50	450	15	1.14	21.7	45.8	43.5
C200F50B20	200	50	600	20	0.76	14.5	30.6	29.0
C150F50B10	150	50	300	10	1.56	29.7	62.6	59.4
C150F50B15	150	50	450	15	1.18	22.5	47.4	45.0
C150F50B20	150	50	600	20	0.80	15.3	32.2	30.5

② 実験結果および考察

実験結果の一覧を表-12 に示す。要求性能を満足したのは、C250F50B10, C250F50B15 および C250F50B20 の3 ケースであり、要求する強度を満足するためにはセメントは少なくとも 250kg は必要であることが分かった。

表-12 配合試験結果

試験名	一軸圧縮強さ [kN/m ²]	ブリーディング率 [%]	フロー値 [mm]
C250F50B10	388.9	0.0	179
C250F50B15	266.7	0.0	222
C250F50B20	327.5	0.0	268
C200F50B10	194.3	0.5	188
C200F50B15	105.5	0.0	255
C200F50B20	119.9	1.9	303
C150F50B10	78.0	4.8	199
C150F50B15	70.1	2.6	292
C150F50B20	54.2	4.8	317

(3) 圧送実験による配合の選定

① 実験方法

前述の配合試験で要求性能を満足した C250F50B10, C250F50B15 および C250F50B20 の3 ケースを用いた室内小規模圧送実験を実施した。実験方法は、「4.2 室内小規模圧送実験装置」に示す内容に従った。ただし、圧送条件は圧力条件をより厳しくするため、圧送距離は 20m から 60m へ変更した。

② 実験結果及び考察

実験結果の一覧を表-13 に示す。圧送前後の性状がほとんど変わらず、消泡率が最も小さかったのは C250F50B10 であった。したがって、C250F50B10 を石炭灰エアミルクの推奨配合に選定した。

表-13 室内小規模圧送実験結果

試験名	単位体積重量 [tf/m ³]		気泡量 [%]		消泡率 [%]	フロー値 [mm]		ブリーディング率 [%]		一軸圧縮強さ [kN/m ²]
	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後		圧送前	圧送後	圧送前	圧送後	
C250F50B10	0.612	0.642	58.2	56.1	3.5	171	181	0.0	0.0	423.7
C250F50B15	0.773	0.886	45.2	37.2	17.7	209	210	0.0	0.5	305.7
C250F50B20	0.928	0.959	29.5	27.1	8.0	289	276	0.0	1.5	224.3

(4) 石炭灰の強熱減量について

推奨配合は選定されたが、これは石炭灰 B3 を構成材料とした場合であって、これ以外の石炭灰を用いた場合についても、石炭灰エアミルクの長距離圧送性能について確認する必要がある。図-12 に、石炭灰中の強熱減量をパラメータとした室内小規模圧送実験結果を示す。強熱減量の増加に伴い消泡率も増加している。したがって、推奨配合を用いて圧送時の消泡率を 10%未満に抑制するためには、強熱減量が 10%未満の石炭灰を採用すべきと考えられる。

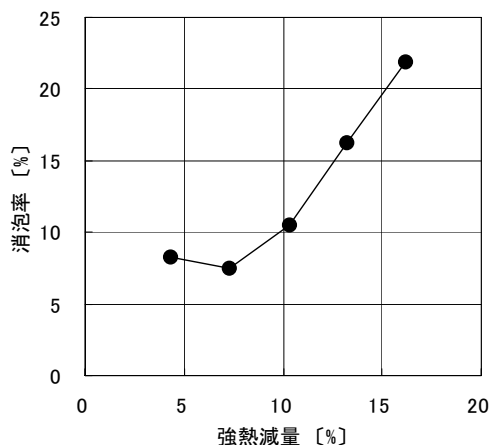


図-12 強熱減量と消泡率の関係

(5) 推奨配合の性能

表-14 に推奨配合 (C250F50B10) を用いた石炭灰エアミルクの性能を示す。ガスパイプラインの中詰め材の要求性能の 1 つである発熱温度 60℃とは、固化時の発熱によってガス管周囲のポリエチレン塗覆装の軟化温度 80℃に安全を見込んだ値であるが、推奨配合（セメント量 250kg）の場合は断熱温度上昇特性が高い結果となった。そこで、推奨配合の断熱温度上昇特性結果を用いた FEM 解析 (MASCOT) により、ガスパイプラインの中詰め材の発熱温度を検討することとした。境界条件として外側地盤を 20℃、ガス管内を 40℃とし、解析断面は、図-1 (b) ガスパイプライン断面（例）：パターン B とした。

温度解析結果を図-13 に示す。中詰め材内部の温度は高いが、管理位置であるガス管周囲はガス管内の温度と同等（最大で 43℃）であり、温度の管理値である 60℃を超えることはなかった。これは、ガス管表面の放熱による温度低下と考えられる。また、実施工ではガス管内の温度が 60℃を超えることも想定されるが、その場合はガス管内の送風（エアークーリング）により、ガス管内を 40℃以下に十分管理できると考えている。

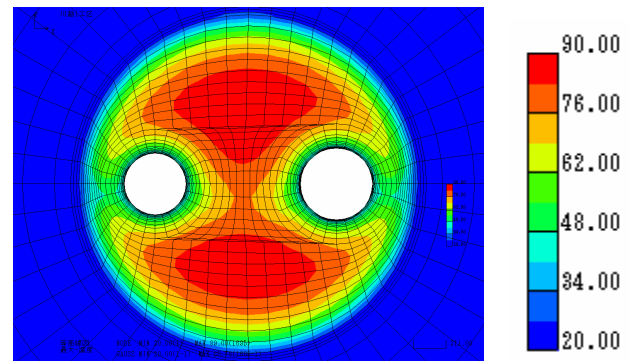


図-13 温度解析結果

5. 屋外実規模圧送実験

推奨配合の長距離圧送性能の確認を目的として、屋外実規模圧送実験を実施した。

5.1 実験方法

プラントの全景を写真-1 に示す。圧送距離は 500m とし、圧送管は管径 3 インチの鋼管を用いた。圧送ポンプは真空スクイズ方式とし、最大吐出量は 520L/min (260L/min × 2 機) を使い、実験では流量を 400L/min に設定した。また、圧力計を圧送管の 0m, 50m, 100m, 160m, 200m, 300m, 400m の位置に計 7 箇所設置した。実験は、ベントナイトを用いない C120F275 とベントナイトを用いる推奨配合 (C250F50B10) の 2 ケースとした（表-15 参照）。実験材料は室内小規模圧送実験と同じ材料とした（表-9 参照）。ただし、C120F275 については、セメントは高炉 B 種（密度：3.04g/cm³）を用いた。実験手順は、まず石炭灰エアミルク作製し、それをアジテーターに所定量投入し、その後スクイズポンプにより圧送管内を流動させ、圧送管の先端部にて圧送後の石炭灰エアミルクを採取した。圧送中は圧力や流量等を測定し、圧送前と圧送後の石炭灰エアミルクの単位体積重量、フロー値およびブリーディング率等を測定して石炭灰エアミルクの長距離圧送性能を確認した。

表-14 推奨配合 (C250F50B10) の性能

一軸圧縮強さ(材齢28日)	400kN/m ²
ブリーディング率	0%
フロー値	180mm
透気係数	1.1 × 10 ⁻⁴ cm/sec
比抵抗値	4,000 Ω・cm (40days)
断熱温度上昇特性	70℃



写真-1 屋外実規模圧送実験プラント全景

表-15 屋外実規模圧送実験の配合表

試験名	セメント [kg]	石炭灰 [kg]	練混ぜ水 [kg]	ベントナイト [kg]	起泡剤 [L]	希釈水 [kg]	気泡量 [%]	空気量 [%]
C120F275	120	275	235	0	1.5	28.5	60.0	57.0
C250F50B10	250	50	300	10	1.5	28.2	59.4	56.4

5.2 実験結果および考察

(1) 石炭灰エアミルクの品質

屋外実規模圧送実験結果を表-16 に示す。C120F275 は圧送後の気泡量の減少やブリーディング率の増加といった品質の低下が著しかった。一方、ベントナイトを構成材料の 1 つとする推奨配合 (C250F50B10) は圧送後の品質の低下はほとんどなく、500m 圧送可能な材料であることが確認された。

表-16 屋外実規模圧送実験結果

測定項目		C120F275	C250F50B10
単位体積重量 [tf/m ³]	圧送前	0.702	0.633
	圧送後	1.157	0.727
気泡量 [%]	圧送前	57.2	59.8
	圧送後	27.4	53.9
	消泡率	52.1	9.9
フロー値 [mm]	圧送前	270	157
	圧送後	343	167
ブリーディング率 [%]	圧送前	7.5	0
	圧送後	10.3	0
一軸圧縮強さ [kN/m ²]	圧送前	750	639
	圧送後	1542	790

(2) 圧力測定結果

図-14 に推奨配合の圧送時における圧力測定結果を示す。圧送距離 0m (圧送ポンプ) で最大 0.97MPa の圧力が作用しており、m 当たりの圧力損失は 0.00185MPa と試算される。また、今回の実験ではスクイズポンプを用いているため、圧送中の圧力は振幅しており、設置した圧力計でもそれは確認できた。圧力振幅は圧送距離が長くなるにつれて次第に小さくなっており、圧送距離 200m までははっきりと図中に示されている。このことは、その間消泡の要因の 1 つである不連続圧力が圧送中の石炭灰エアミルクに作用していたことを示しており、実施工において施工条件が許すのであればスクイズポンプ (振幅する) ではなくモーターポンプ (振幅しない) を選択した方がよいと考えられる。

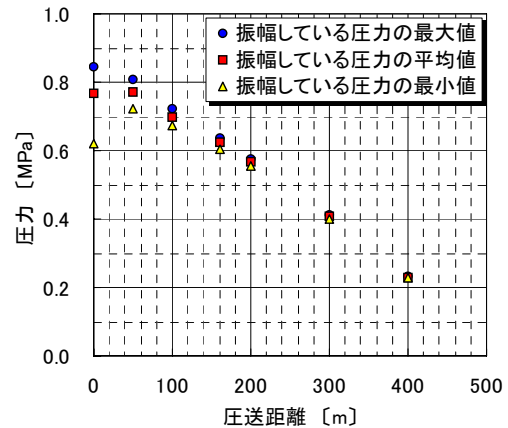


図-14 圧送距離と圧力の関係 (推奨配合)

6. まとめ

本研究開発で得られた主な知見を以下にまとめる。

- ① ガスパイプラインの中詰め材に最も適した材料は、その性能およびコストから石炭灰エアミルクである。
- ② 石炭灰エアミルクの構成材料として、費用対効果に優れたクニゲル V1 (ベントナイト) を用いることで長距離圧送性能は向上する。
- ③ 室内小規模圧送実験装置を用いることで、実規模圧送実験と同様の石炭灰エアミルクの長距離圧送性能に関する評価ができる。
- ④ 石炭灰エアミルクの構成材料の 1 つである石炭灰は、その性質によっては構成材料としては使えないため、強熱減量が 10%以下の石炭灰を選択する必要がある。
- ⑤ 推奨配合を用いることで石炭灰エアミルクは要求性能を満足しつつ 500m の長距離圧送が可能であることを実規模圧送実験で確認した。

謝辞: 本研究開発は東洋建設株式会社と当社の共同研究開発であり、研究開発にあたり多大なるご協力、ご意見を頂きました。また、技術研究所の山下研究員には温度解析においてご協力頂きました。末筆ながら謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本フライアッシュ協会, 石炭灰ハンドブック, pp. I-16- I-18, 2005 年
- 2) 前田忠昭: ベントナイト物語, 株式会社立花マテリアル, p. 17, 2005 年 7 月
- 3) 応用界面・コロイド化学ハンドブック, 株式会社エヌ・ティー・エス, p. 681, 2006 年 1 月
- 4) 最新・界面活性剤の機能創製・素材開発・応用技術, 株式会社エヌ・ティー・エス, p. 193, 2006 年
- 5) 川合 弘之, 御手洗 義夫, 川辺 克明, 遠藤 千秋: 気泡混合軽量土の打設時の圧送圧力が密度変化に与える影響について, 第 36 回地盤工学研究発表会,

pp. 853-854, 2001 年 6 月

- 6) 川合 弘之, 岸田 隆夫, 御手洗 義夫, 遠藤 千秋: 気泡混合軽量土の圧送中の管内摩擦が密度変化に与える影響について, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp. 909-910, 2002 年 7 月
- 7) コンクリート混和材料ハンドブック, 株式会社エヌ・ティー・エス, pp. 299-300, 2004 年 4 月