

圧送性および充填性に優れた ガスパイプライン敷設工事用中詰材の開発

～ガスパイプライン敷設工事費の縮減に向けて～

Development of a new filling material for Natural Gas Pipeline
having high flowability and filling performance.

～To reduce of construction cost on Natural Gas Pipeline～

青柳 成彰 Shigeaki AOYAGI
日鉄住金パイプライン&エンジニアリング(株)
技術総括部 技術開発室 室長

前田 克年 Katsutoshi MAEDA
日鉄住金パイプライン&エンジニアリング(株)
技術総括部 部長

柳本 速雄 Hayao YANAGIMOTO
日鉄住金パイプライン&エンジニアリング(株)
技術総括部 ゼネラルマネジャー

藤井 伸孝 Nobutaka FUJII
日鉄住金パイプライン&エンジニアリング(株)
資源・エネルギー事業部 設計・技術部 部長

抄 録

推進工法やシールド工法等でトンネルを構築した後、トンネル内にガス管を設置する場合、トンネルとガス管の間との空間には、中詰材を充填する必要がある。中詰材としてエアモルタルが一般的に用いられてきた。しかし、長距離トンネルでは、エアモルタルは1～2時間程度で流動性が失われてしまうため、中詰材を充填するための付帯設備と、トンネル内にこれらを設置するための空間の確保が必要であり、トンネル断面の拡大が避けられず、工事費の上昇を招くことがあった。そこで、中詰材を充填するための付帯設備が不要となる、圧送性および充填性に優れたガスパイプライン敷設工事用中詰材を開発したので本稿にて報告する。

Abstract

This report presents a new filler material that is superior in flowability and filling performance. Air mortar is the traditional materials used to fill a gap between a tunnel and a pipeline. The flow performances fall off in 1-2 hours because of its hardening reaction. It is necessary to design a large cross-section tunnel to provide working efficiency at a construction-site. From the point of gas-pipeline construction, the traditional way raises the total cost because of the areas of a tunnel cross-section and the amount of construction materials.

1 緒言

都市部や河川横断部など、地上からの掘削が困難な場所にガスパイプラインを敷設する場合、推進工法やシールド工法でトンネルを構築した後、そのトンネル内にガス管を敷設する工法が採用されてい

る。この工法では、トンネルとガス管との空間を、中詰材で充填することが一般的であり、万が一のガス漏洩の地上での検知を可能とするための高い透気性が中詰材には要求される。このため、モルタルやセメントミルクに気泡を混合した、エアモルタルやエアミルクといった透気性を有する材料が、広く用

いられている。

しかし、エアモルタルやエアミルクは、製造後、短時間で流動性が失われるため、一度に中詰材を充填できる延長が限られる。そこで、長距離トンネルでは、流動性を有している時間(以下、流動性保持時間)に充填可能な延長毎に、充填区間を分割して、各充填区間へ中詰材を直接供給しなければならない。このため、各充填区間へ中詰材を移送する配管(以下、送給配管)が必要となるが、送給配管を設置する空間をトンネル内に確保するために、トンネル断面の拡大が避けられず、工事費上昇の一因となる場合があった(図1、従来断面)。

そこで、長距離トンネルでの充填において、送給配管を省くことが可能となれば、トンネル断面の最小化が図れ(図1、新中詰材適用断面)、これに伴い工事費縮減が期待できる。そこで、圧送性および充填性に優れたガスパイプライン敷設工事中詰材(以下、新中詰材)を開発した。新中詰材は、硬化後に所定の透気性を満足する空気量を保持しつつも、硬化前の分離抵抗性および流動性に優れ、さらに、流動性を長時間維持する中詰材である(図2)。以下に、新中詰材の概要とその性能について報告する。

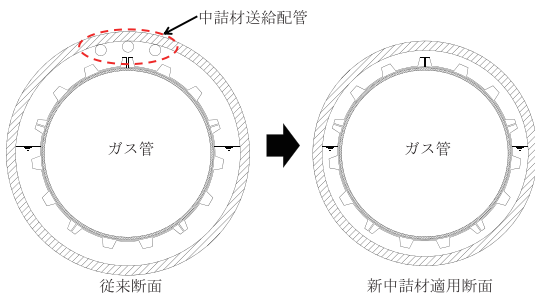


図1 新中詰材適用効果
Fig. 1 Schematic representation of cross-section filled with filling materials.

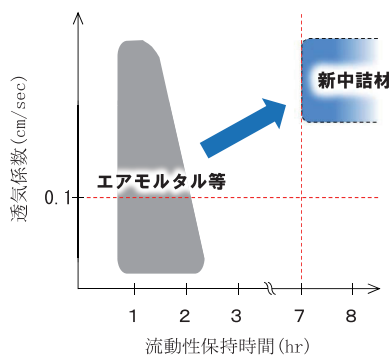


図2 新中詰材性能のイメージ
Fig. 2 Schematic representation of filling materials properties.

2 新中詰材の概要

2.1 開発目標

新中詰材の開発に当たり、河川下等でのガスパイプライン敷設工事を想定して、図3に示す新中詰材の適用想定モデルを設定した。適用想定モデルは、内径1100mm、延長500mの推進管内に外径900mmのガス管を敷設し、推進管端部から、従来の製造・圧送設備を用いて推進管とガス管との空間に中詰材を圧送・充填するものである。

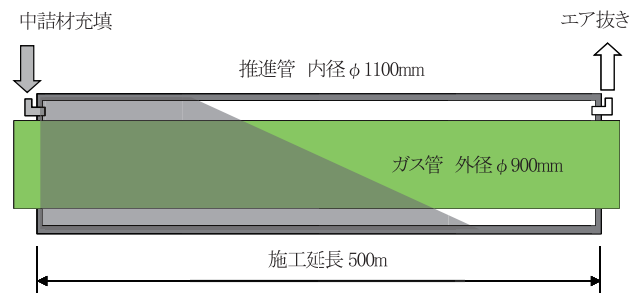


図3 新中詰材の適用想定モデル
Fig. 3 Schematic representation of construction work

この適用想定モデルの実現のために、表1に示す新中詰材の目標性能を設定した。ここで、従来の中詰材では、流動性保持時間は要求性能として設定されていない。これは、1～2時間程度で流動性が失われてしまう従来の中詰材(エアモルタル等)は、流動性保持時間に合わせた充填区間の分割と、送給配管の配置が前提となっていたからである。一方、適用想定モデルでは、送給配管を排し、従来の製造・圧送設備を用いた充填を前提としており、この場合、製造から充填完了までの所要時間は6～7時間が必要となる。よって、流動性保持時間を目標性能

表1 新中詰材の目標性能
Table. 1 Requirements of filling materials properties

項目	目標性能
流動性保持時間	フロ-150mm以上を製造から7時間以上保持
硬化後の透気性	透気係数0.1cm/sec以上
材料分離抵抗性	ブリーディング ^{※1} 率2%以下
強度特性	圧縮強度0.5N/mm ² 以下(材齢28日) ^{※2}
発熱特性	硬化温度60℃ ^{※3} 未満
通電性	ガス管の電気防食のために設置する電極の通電性を妨げないこと ・エレクトロコーティングが生成されないこと、かつ電位がマイナス側に変化しないこと。 ・体積抵抗率は30kΩ・cmを越えないこと。

※1 モルタル中の固体材料(セメント等)と水が分離する現象
※2 ガス漏洩時に人力掘削できる程度の強度として設定
※3 ガス管塗膜の耐熱温度

として設定することとし、フロー150mm以上の流動性を7時間以上保持することとした。また、透気性については、ガス事業者が示す要求性能のうち、最も厳しい値を目標性能に採用した。さらに、その他、各ガス事業者が示す中詰材に対する要求性能を加えた。

2.2 新中詰材の配合

新中詰材は、エアモルタル系の材料で、その使用方法および配合を表2に示す。

表2 新中詰材の使用材料および配合例(1 m³当たり)
Table. 2 Materials and formulation examples

ベースモルタル				気泡		
水	セメント	ベントナイト	混和剤	起泡剤	水	空気
512L	200kg	24kg	4.5kg	0.8kg	19.8L	391L

【使用材料】

セメントC：高炉セメントB種
ベントナイト：特殊ベントナイト
混和剤：流動化剤，リグニンスルホン酸塩系粉末助剤，ノニオン系セルロースファイバー
起泡剤：ノニオン系界面活性剤

材料分離抵抗性を高めるため、ベースモルタルは、セメント，ベントナイト，水を基本構成とした。ベントナイトは、優れた膨潤性を有するものを選定した。混和剤は、長時間の流動性保持のため、従来の2倍程度の流動化剤を添加するとともに、材料分離抵抗性と独立気泡の安定化を目的としてノニオン系セルロースファイバーを加えたものとした。

起泡剤は、安定して大きな気泡が形成できるノニオン系界面活性剤を選定した。

2.2.1 流動性保持時間と透気性の両立

新中詰材と従来の中詰材の性能において、大きく異なる点は、長い流動性保持時間と、高い透気性の両立にある。

流動性保持時間は、流動化剤の増量により延長が可能であるが、流動化剤の増量は、材料分離抵抗性を低下させ、ブリーディングが発生しやすくなる。

透気性は、ベースモルタルに対して起泡剤を発泡させて生成した気泡(以下、気泡)を混合する割合(以下、エア量)を増やすことで向上する。また、エア量を増やすことで、材料分離抵抗性も向上する。しかし、エア量の増加にしたがい、製造直後の流動性が低下し、これに伴い流動性保持時間が短くなる。

つまり、流動性保持時間と透気性の両立において、流動化剤の添加量とエア量は、相対する作用を及ぼすのである。図4にこれらの関係の模式図を示す。

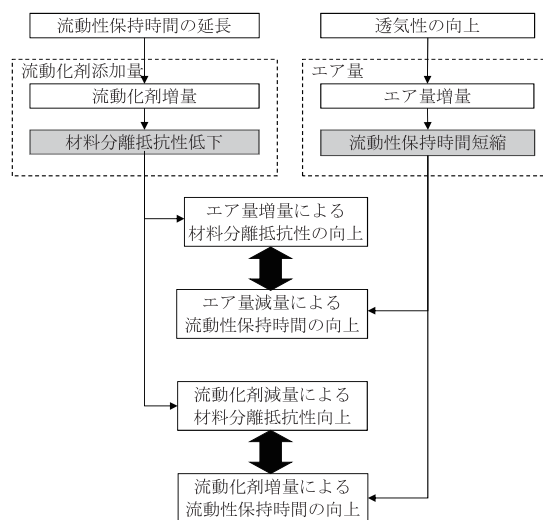


図4 流動化剤添加量とエア量の関係

Fig. 4 Relation between added amount of plasticizer and air quantity

しかし、透気性の確保において、エア量に下限があることは明らかであり、この関係を打破するためには、最小限のエア量で最大限の透気性を引き出すことが必要である。

当初、長時間の流動状態における気泡の消失を防ぐ効果を期待して、細かな気泡が生成でき、数多くの適用実績があるアニオン系起泡剤を選定していた。一方、新中詰材の開発過程において、エア量が同じであっても、個々の気泡の大きさにより透気性が変わること(図5)を見出した。そこで、アニオン系起泡剤に比べて大きな気泡の形成が可能なノニオン系起泡剤を適用することとした。

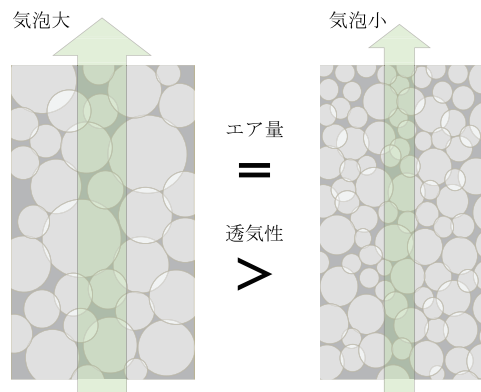


図5 気泡の大きさと透気性の関係

Fig. 5 Schematic representation of air bubbles in mortar

しかし、流動状態において、大きな気泡は分割・分散・消失が懸念され、さらに気泡の消失はブリーディングの発生に繋がることから、これらを防ぐために増粘剤を添加することとした。ここで、セメント・ベントナイトからなるベースモルタルに対して増粘剤を添加する事例は稀であることから、各種増粘剤の適合性を確認し、電気的に中性であるノニオン系セルロースファイバーが最適であることを見出した。

3 性能試験

試験室での少量製造で確認した性能が、図6に示す実現場で使用されるモルタルプラントでの製造および圧送でも再現可能であることを確認するため、表3に示す項目および試験方法による性能試験を実施し、新中詰材がガスパイプライン敷設工事に問題なく適用可能であることを確認した。

表3 性能試験項目
Table. 3 Performance test items

性能確認項目	試験方法
充填性	実大充填試験
	長延長充填解析
流動性保持時間	フロー値測定
材料分離抵抗性	ブリーディング率測定
発熱特性	断熱容器内での硬化時温度測定
透気性	透気性測定
強度特性	一軸圧縮試験
通電性	エレクトロコーティング生成試験
	体積抵抗率測定

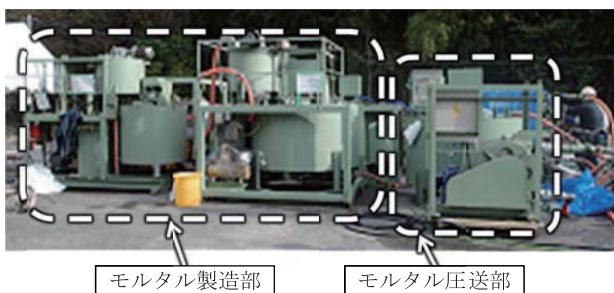


図6 モルタルプラント全景
Fig. 6 External view of mortar plant facilities

3.1 充填性

3.1.1 実大充填試験

図3に示す適用想定モデルにおいて、想定される新中詰材の状況を再現するため、表4に示す試験ケースを設定し、実大規模の円筒状鋼製型枠(図7)

へ新中詰材の充填を行った。いずれのケースにおいても、良好な充填状況が得られることを確認し、製造から7時間を経た状態でも、良好な充填性を有していることを確認した(図8)。

表4 実大充填試験ケース
Table. 4 Full-size filling test case

試験ケース	充填方法
CASE 1	混練直後、一括充填
CASE 2	混練直後からアジテート*を継続して、7hr後に一括充填
CASE 3	混練直後からアジテート*を継続して、混練直後から1hr毎に7hr後まで分割充填

※製造した新中詰材をモルタルプラントの貯槽内で充填中の流動状態を模した攪拌を行った。

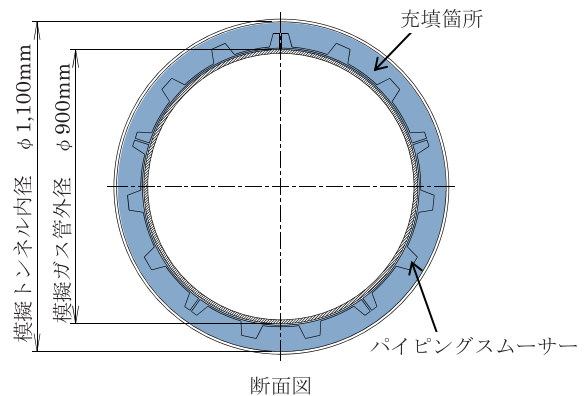


図7 円筒状鋼製型枠
Fig. 7 Experiment view and cross-section of full scale test body.



図8 充填完了状況(CASE3硬化後)
Fig. 8 View of the hardened full scale test body

3.1.2 充填解析

図3に示す想定モデルにおける延長500mの充填性の検証は、実大試験が困難であったため、数値シミュレーションによって行った。

プログラムは、STREAM(株式会社クレイドル)を使用し、Navier-Stokesの運動方程式を基礎とする乱流エネルギーと乱流損失率に関するk-ε方程式を用いたモデルとした。

始めに、基本となる等倍の数値解析モデル(以下、基本解析モデル、図9)を構築した。基本解析モデルにおける構造体は、対称性(図7、断面図)を考慮して、片側半分を解析対象とし、新中詰材の流入域

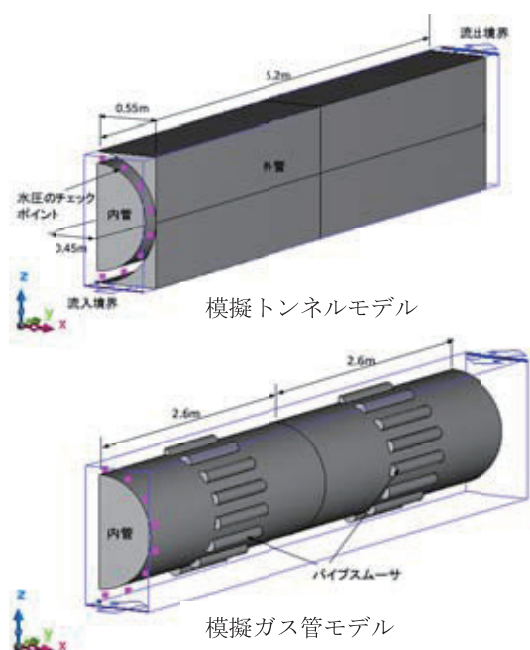


図9 基本解析モデル
Fig. 9 Basic analysis model

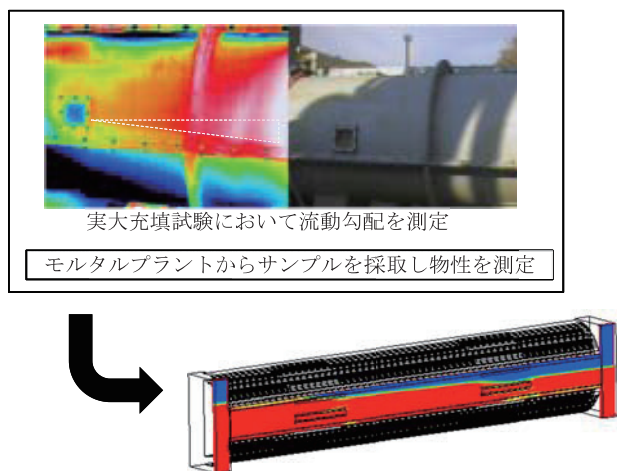


図10 充填再現モデル
Fig. 10 Filling reproduction model

は内管と外管に挟まれた空間のみであるため、これを解析領域とした。

次に、基本解析モデルによる数値シミュレーションと実大充填試験との合わせ込みを行い、実大充填試験を再現する等倍の数値解析モデル(以下、充填再現モデル、図10)を構築した。ここで、中詰材の物性は経時的に変化し、数値解析モデルでの再現は困難である。そこで、適用想定モデルにおいて、充填が最も困難となる状態である、製造7時間後の新中詰材の物性を用いることとし、実大充填試験CASE2の試験状況および結果を合わせ込みの対象に選定した。

この後、充填解析モデルを延長方向に拡張した数値解析モデル(以下、充填検証モデル、図11)を構築し、延長500mの適用想定モデルにおける充填性の検証を行った。この結果、フロー150mm以上を製造から7時間以上保持が可能である新中詰材は、適用想定モデルに充填が可能であることを確認した。

3.2 流動性保持時間

実大充填試験において製造した新中詰材から、1時間毎にサンプルを採取してフロー値を測定した(図12)。この結果、開発目標であるフロー150mm以上を製造から7時間以上保持可能であることを確

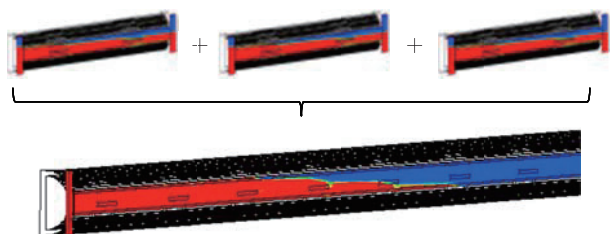


図11 充填検証モデル
Fig. 11 Filling verification model

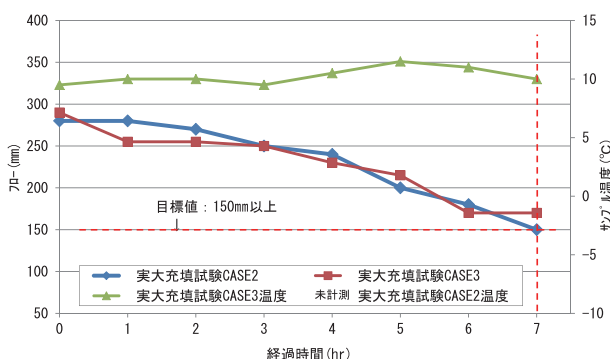


図12 フロー値の経時変化
Fig. 12 Change with time of flow value

認した。なお、サンプル温度が20℃程度であっても、同等の結果が得られることも確認している。

3.3 材料分離抵抗性

実大充填試験において製造した新中詰材からサンプルを採取して、フリーディング率の測定を行った。全ての実大充填試験ケースから採取したサンプルにおいて、ブリーディングの発生はなく、開発目標であるブリーディング率2%以下であることを確認した(図13)。

さらに、実大充填試験後の充填完了状況の確認においても、フリーディング発生痕跡は見られなかった(図14)。

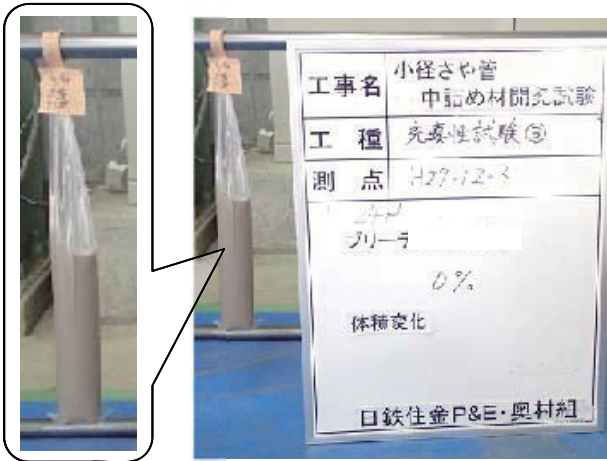


図13 ブリーディング発生観察状況
Fig. 13 View of the Bleeding occurrence observation



図14 充填完了状況(円筒状鋼製型枠底部)
Fig. 14 View of the hardened full scale test body

3.4 発熱特性

実大充填試験において製造した新中詰材からサンプルを採取して、断熱容器内で硬化させ(図15)、この時の温度測定を行った。最高到達温度は約30℃であり、ガス管の被覆への影響を及ぼさない目標値

60℃を十分に下回ることを確認した(図16)。



図15 硬化温度測定
Fig. 15 Measurement of mortar curing temperature

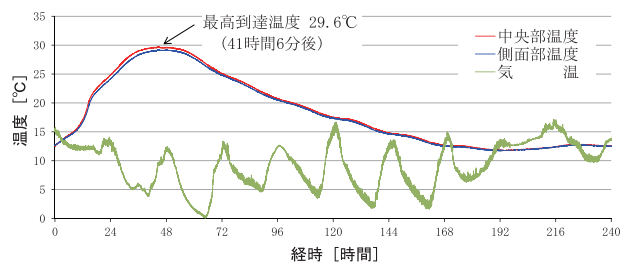


図16 硬化時温度変化
Fig. 16 Stability of mortar curing temperature

3.5 透気性

実大充填試験において製造した新中詰材からサンプルを採取して、材齢28日まで気中養生した円柱供試体の側面をエポキシ樹脂でコーティングした試験体を製作し、下面より圧力を段階的に変化させた時の透気量を測定し、透気係数を導出した。

透気係数は、コンクリートの透気性に関する、試料の下端の圧力分布と流速が比例関係にあるとの考えに倣い、図17に示す試験装置により、試料下端の圧力勾配(動気勾配)と流速を測定し、この測定値に対する原点を通る直線回帰を行い、導いたものである(表5)。この結果、透気係数は目標性能である0.1cm/sec以上が得られることを確認した。

3.6 強度(一軸圧縮強度)

実大充填試験において製造した新中詰材から採取したサンプルを用いて製作した試験体により、一軸圧縮強度を測定した。測定結果は、表6に示す通り、目標値の0.3N/mm²程度(材齢28日)であることを確認した。併せて、実大充填試験の硬化後に行った円筒状鋼製型枠の解体作業において、スコップ等による突き崩しも容易であり、人力掘削が可能であることも確認した。

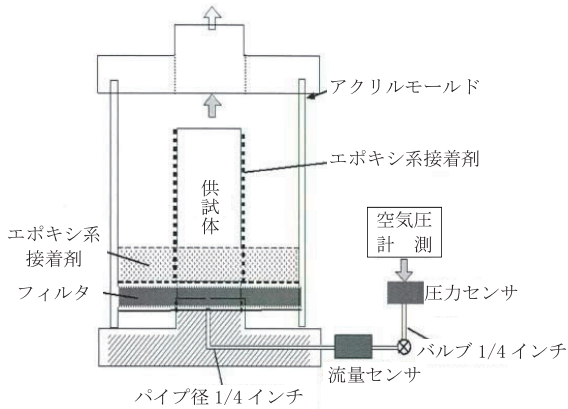


図17 透気量測定装置
Fig. 17 Air permeability measurement device

表5 透気量測定結果および透気係数
Table. 5 Air permeability measurement result and air permeability coefficient

供試体 No.	動気勾配	流速 cm/sec	透気係数 cm/sec
1 実大充填試験 CASE 2 よりサンプル採取	1	0.392	0.412
	2	0.417	
2 実大充填試験 CASE 3 よりサンプル採取	1	0.455	0.479
	2	0.971	

表6 一軸圧縮強度
Table. 6 Uniaxial compressive strength

サンプル採取	一軸圧縮強度	サンプル採取タイミング
実大充填試験 CASE 1	0.26N/mm ²	混練直後
実大充填試験 CASE 2	0.27N/mm ²	7 hr 後
実大充填試験 CASE 3	0.28N/mm ²	混練直後
	0.26N/mm ²	7 hr 後

3.7 通電性

実大試験と共に、エレクトロコーティング生成確認試験ならびに抵抗率測定を行い、ガス管の電気防食のために設置する電極の通電性を妨げないことを確認した。

3.7.1 エレクトロコーティング生成確認試験

エレクトロコーティング生成確認試験を、図18に示す試験装置を用いて実施した。試験期間(90日間)後に電極表面にエレクトロコーティングが生成されていないことを確認した(図19)。さらに、試験期間を通して、電位が試験開始時点の電位に対してマイナス側に変化しないことを確認した(図20)。

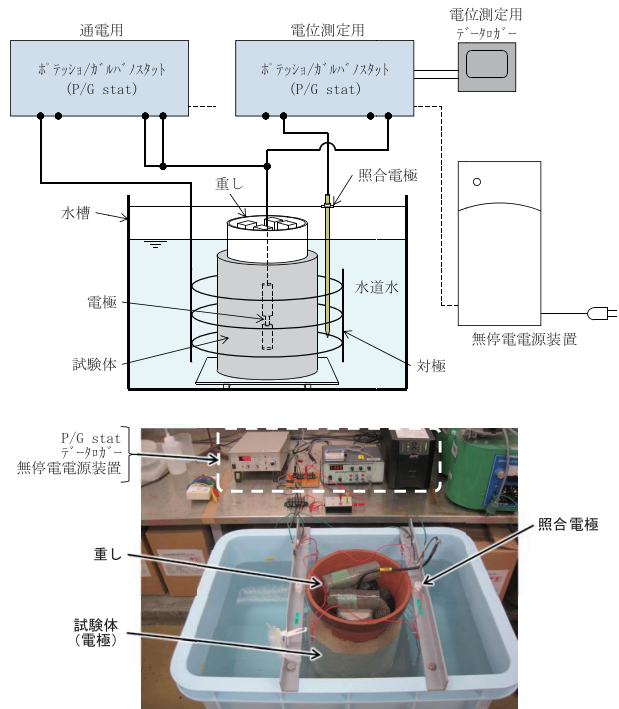


図18 エレクトロコーティング生成試験装置および試験状況
Fig. 18 Electro coating generation test apparatus and test situation

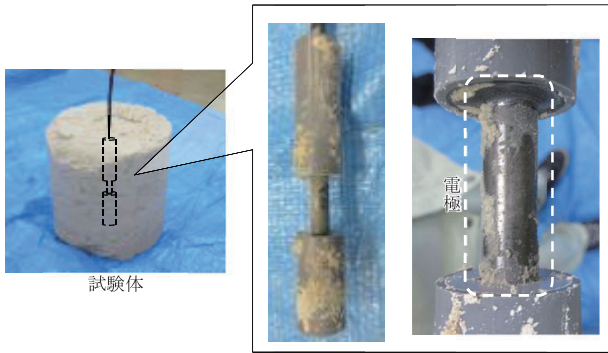


図19 エレクトロコーティング生成試験終了後状況
Fig. 19 Test body of electro coating generation

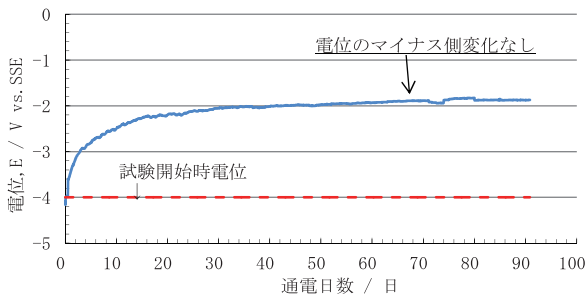


図20 エレクトロコーティング生成試験電位測定結果
Fig. 20 Stability of electro coating generation

3.7.2 抵抗率測定

図21に示す試験装置を用い、体積抵抗率の経時変化を測定した。試験期間(90日間)において、体積抵抗率が $30\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ を越えることはなく、防食電流を阻害しないことを確認した(図22)。なお、全体的な抵抗率の増加傾向については、試験終了後に、試

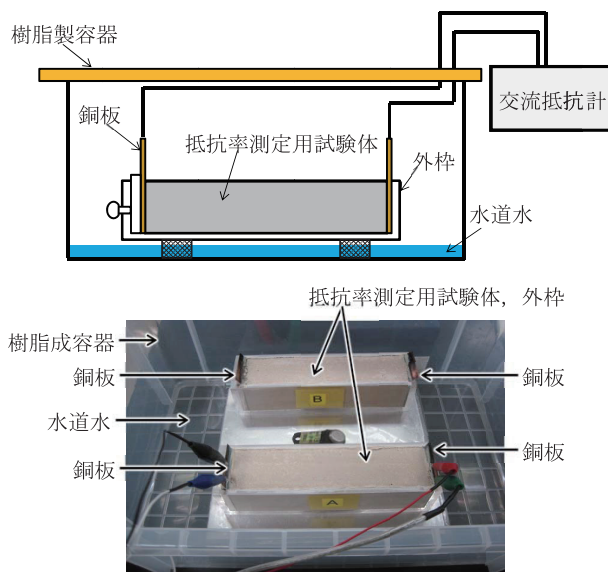


図21 抵抗率測定装置および試験状況
Fig. 21 Resistivity measurements test equipment

験体表面に水分を加えて抵抗率の低下を確認したことから、試験期間中に試験体中の水分量が徐々に減少したことに起因すると推察し、実際の適用環境である、土中の閉鎖空間では湿潤状態が保たれると想定されることから、問題はないと判断した。

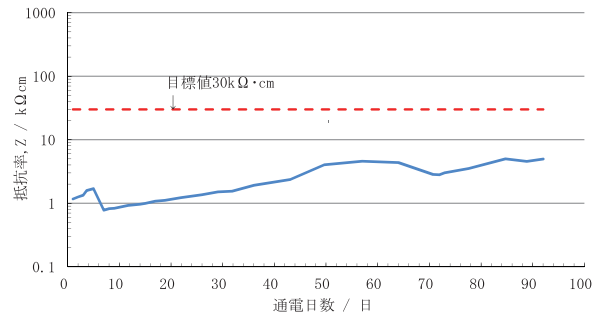


図22 抵抗率測定結果
Fig. 22 Stability of resistivity

4 結言

以上、開発した新中詰材は、各種の試験により、現場においても目標性能を満足し、加えて、ガス管の電気防食を妨げることなく、ガスパイプライン敷設工事に問題なく適用可能であることを確認した。今後は、ガスパイプライン敷設工事において工期短縮や工事費低減に寄与する材料として積極的に提案したいと考える。

最後に、株式会社奥村組殿および株式会社タック殿には、共同開発という枠組みを超えて、多大な協力と得難い知見の提供を頂いた。ここに謝意を表す。

【共同開発】

新中詰材は、日鉄住金P&E、(株)奥村組、(株)タックの3社による共同開発品

【公的登録】

特許出願中