

可塑性グラウトを用いた空洞充填工法の開発

－ 廃坑充填工における端部隔壁の施工報告 －

安井 利彰 ・ 清水 英樹^{*1} ・ 小熊 登^{*1} ・ 赤松 祐介^{*2} ・ 伏屋 学^{*3}

Development of Cave Filling Method with Plastic Grout

－ Construction of the end wall in filling an abandoned mine －

Toshiaki YASUI, Hideki SHIMIZU, Noboru OGUMA, Manabu FUSEYA

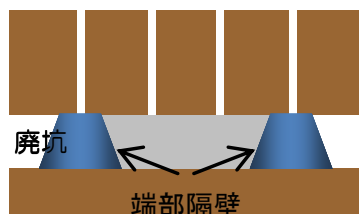


図-1 端部隔壁工のイメージ



写真-1 端部隔壁工試験打設結果

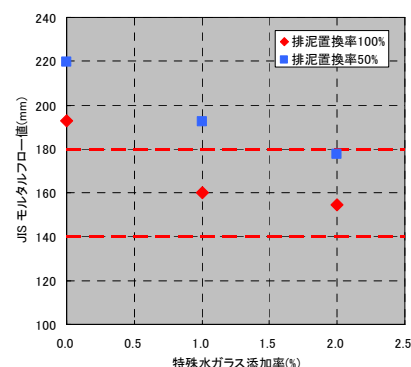


図-2 端部隔壁材料の流動性

研究の目的

土木建築構造物のリニューアルに伴う廃坑処理や琉球石灰岩地域で建設される地下ダム空洞において、陥没防止および止水壁品質確保を目的とした空洞充填工事が多数計画されている。これらの空洞充填工事は、コスト面から必要な範囲だけを充填する限定充填工法が採用される場合が多い。限定充填工法では、先行して端部隔壁の構築が必要となり、その材料は流動性の低い特殊なもの（可塑性材料、急結材料など）を用いることから、コスト面で課題がある。著者は、地下空洞を効率的かつ経済的に限定充填する方法として、先行構築する端部隔壁の充填材料にTLDグラウト[※]）を応用した充填方法を考案した。今回、本工法を廃止トンネルの充填工事において適用する機会を得た。本報は、実施工を通して得られたデータにより、提案充填工法の妥当性を検証するものである。

※） 当社開発のトンネル覆工背面空洞充填材料

技術の説明

本充填工法は、以下に示す特徴を有する。

- ・ TLDグラウトをベースとした充填材料を端部隔壁に適用した工法であり、地下ダム空洞、廃坑およびその他の空洞充填に適用可能である。
 - ・ 充填材料には、地盤改良材の排泥や流動化処理土等のリサイクル材料を積極的に使用することができ、コストダウンおよび現場条件に応じた配合設計が可能である。また、特殊水ガラスの使用により凝結時間を制御できる。
 - ・ 充填状況は、CCDカメラによって管理し、また、出来形管理に3Dスキャナーの適用が可能である。
- 今後、充填状況の解析的アプローチや充填形状制御等の研究に取り組む予定である。

主な結論

今回の施工において、以下に示す内容を確認した。

- ・ 端部隔壁材料として、TLDグラウトの一部を流動化処理土で置き換えた材料および配合設計手法を提案した。
- ・ 提案した充填材料を用いて、端部隔壁工を施工することができた。
- ・ CCDカメラおよび3Dスキャナーを用いた施工管理および品質管理手法の適用性を確認した。

* 1 本店 土木事業本部 土木設計・技術部

* 3 中部支店 土木施工グループ

* 2 外部機関出向中

可塑性グラウトを用いた空洞充填工法の開発 —廃坑充填工における端部隔壁の施工報告—

安井 利 彰 清水 英 樹^{*1}
 小 熊 登^{*1} 赤 松 祐 介^{*2}
 伏 屋 学^{*3}

要 旨

土木建築構造物のリニューアルに伴う廃坑処理や琉球石灰岩地域で建設される地下ダム空洞において、陥没防止および止水壁品質確保を目的とした空洞充填工事が多数計画されている。これらの空洞充填工事は、コスト面から必要な範囲だけを充填する限定充填工法が採用される場合が多い。限定充填工法では、先行して端部隔壁の構築が必要となり、その材料は流動性の低い特殊なもの（可塑性材料、急結材料など）を用いることから、コスト面で課題がある。

著者らは、地下空洞を効率的かつ経済的に限定充填する方法として、先行構築する端部隔壁の充填材料に、当社開発の可塑性グラウトであるTLDグラウトを応用した充填工法を考案した。今回、本工法を廃止トンネルの充填工事において適用する機会を得た。本報は、実施工を通して得られたデータにより、提案充填工法の妥当性を検証するものである。

キーワード 空洞充填／端部隔壁／可塑性グラウト／廃坑／地下ダム

目 次

- | | |
|--------------|-------------|
| 1. はじめに | 3. 端部隔壁施工事例 |
| 2. 端部隔壁材料の検討 | 4. まとめ |

DEVELOPMENT OF CAVE FILLING METHOD WITH PLASTIC GROUT -CONSTRUCTION OF THE END WALL IN FILLING AN ABANDONED MINE-

Toshiaki YASUI Hideki SHIMIZU
Noboru OGUMA Yusuke AKAMATSU
Manabu FUSEYA

Synopsis:

Many constructions of the cave filling are under consideration to prevent the cave-in in an abandoned mine and assure the quality of the cutoff wall in construction underground dam reservoir. The partial cave filling, fill up only the necessary area, is often adopted on their constructions because of the cost. It is necessary to construct the end wall on the partial cave filling. But the materials of the end wall are very expensive.

We contrived the economic and efficient methods to construct the end wall with the plastic grout named Tld grout. We got an opportunity to use this method on the construction of the end wall in filling the abandoned mine.

We report the results to verify the application of this method with the real data.

*1 本店 土木事業本部 土木設計・技術部
 *2 外部機関出向中

*3 中部支店 土木施工グループ

1. はじめに

土木建築構造物リニューアルに伴う地下構造物の後処理や琉球石灰岩地域における地下ダム建設工事において空洞充填のニーズが高まってきている。地下構造物の後処理では、廃止トンネルや採掘空洞の陥没防止のため空洞内を充填する必要がある。一方、地下ダム建設工事では、地下連続壁（ソイルセメント止水壁）の品質確保のため、ダム軸上の空洞を充填する必要がある。

このような空洞充填工事では、コスト面から必要な範囲だけを充填する限定充填工法が用いられることが多い。限定充填時には図-1 に示すように、充填範囲を仕切るための端部隔壁工の施工が必要となる。端部隔壁工には、可塑性のある材料を用いることが多いが、材料が高価であるため、効率よく隔壁を施工することが求められる。また、安全面から、入坑して施工ができず、地上からボーリング孔を介して充填する場合も多く、充填状況のモニタリングが重要となる。

著者らは、地下ダム空洞限定充填に向けて、可塑性グラウトをベースとして地下連続壁施工時排泥を有効利用した端部隔壁材料の開発に取り組んできた。そして、そこで得られた知見を応用し旧水力発電所の廃止導水路トンネル限定充填における端部隔壁の施工を実施した。

本報では、可塑性グラウトを応用した端部隔壁材料の検討結果および廃止導水路トンネルでの端部隔壁工施工事例について報告する。

■ 全充填



■ 限定充填



図-1 空洞充填工法

2. 端部隔壁材料の検討

2.1 可塑性グラウト材

今回、端部隔壁材の検討において、当社開発の可塑性グラウトで、トンネル覆工背面空洞充填で実績がある TLD グラウト¹⁾を使用した。可塑性とは、そのもの自体は流動性がなく、ある程度の硬さを有するが、加圧により押し出すことが可能な状態である。このような性状をもった可塑性グラウトは広範囲かつ狭隘な部分を充填するのに有効な材料である。一般には、粘土系鉱物、ケイ酸ナトリウムなどの可塑材溶液とセメント系固化材溶液を2液混合する。その際、可塑材中のマイナスイオンが、セメントの水和反応で生じた Ca^{2+} と荷電置き換えを生じ、擬似的に凝結して可塑性状を呈する。

2.2 地下ダム空洞充填時の端部隔壁材料配合検討

琉球石灰岩地域で建設される地下ダム（図-2 参照）では、地下連続壁（ソイルセメント止水壁）施工中に予期せぬ空洞に遭遇することがある。空洞は石灰岩が長期的な地下水侵食によって形成されたものであり、地下ダムを必要とする地区に普遍的に分布すると言える。これらの空洞は大小さまざまなものがあるが、ボーリングや物理探査など事前地質調査でも捉えられない大規模な空洞もあり、とくに施工段階で遭遇した場合には地下連続壁の品質を確保するための対策工が別途必要となり、工期遅延や工事費の増大などが問題となっている²⁾³⁾。

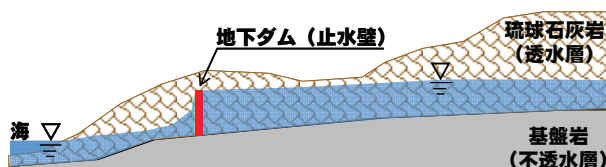


図-2 地下ダムの概要

地下連続壁施工時に固化液の逸走による大量消費の防止や要求性能を満足するためには、施工前に空洞を長期的に安定な材料で充填する必要がある。空洞規模や形状を把握するための調査ボーリング孔等を利用して、最初に地下連続壁施工箇所周辺の空洞内に端部隔壁を構築し、その後、隔壁内側を充填するという2段階の充填方法が合理的と考えた（図-3 参照）。端部隔壁材はトンネル覆工背面空洞充填で実績がある TLD グラウトという可塑性グラウト材を基本材料として適用することとした。TLD グラウトの基本配合を表-1 に示す。TLD グラウトは固化に寄与するA液と可塑性に寄与するB液との2液混合材料である。

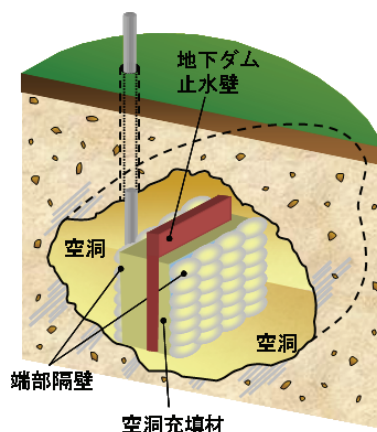


図-3 地下ダム空洞充填のイメージ⁴⁾

表-1 TLD グラウトの基本配合（1.0m³あたり）

A液	セメント系固化材	水	遅延剤	増粘剤
	500kg	323kg	2.5ℓ	10.0ℓ
B液	粘土系無機質材	水		
	45kg	482kg		

一方、地下連続壁施工時には先行削孔～3軸削孔に伴い地山やセメントミルクを含む固化液等の大量の排泥が発生する。この排泥は細粒分を適度に含む良好な粒度分布を持つことから、改良性の高い材料であると想定されるものの現実には廃棄処分されており、環境面からも有効利用することが望まれるものである。そこで、この排泥を TLD グラウトA液中のセメント系固化材および水と置き換えることとした。

以下、地下連続壁施工時排泥を有効利用した端部隔壁材料の適用性について室内試験を実施したので報告する。

試験に使用した排泥は琉球石灰岩で構成される I 島の地下連続壁施工時に発生した排泥である。写真-1 に排泥の状況、図-4 に排泥の粒度分布を示す。



写真-1 地下連続壁施工時排泥

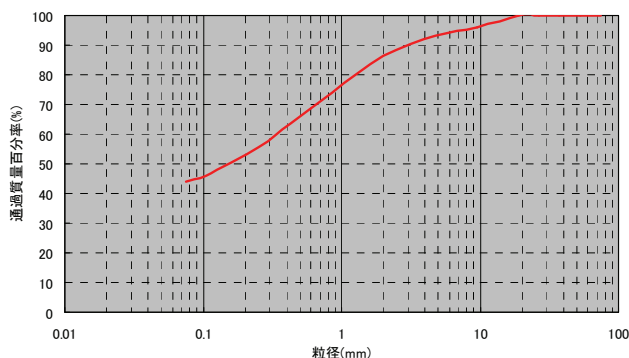


図-4 地下連続壁施工時排泥の粒度分布

端部隔壁材の要求品質を表-2 にまとめた。流動勾配(形状保持)の確保という点でフロー値(JIS R 5201-1981)が重要な指標となる。

表-2 端部隔壁材の要求品質⁵⁾

項目	端部隔壁材 目標性能	備 考
フロー値	JIS R 5201-1981 140～180mm	流動勾配(形状)を確保
一軸圧縮強度	50kN/m ² 以上	凝結開始を早める
充填性	ブリーディング率 3.0%以下	端部隔壁材として機能 するため材料分離抵抗 性が必要
水中 不分離性	水中打設が可能 で地下水汚濁が ない	空洞内に地下水が存在 する場合を想定

※所要強度は空洞規模や中詰材強度等の与条件によって設定する。

フロー値、初期強度および水中不分離性等を確認した。図-5 に示すように TLD グラウトのA液を排泥で置換した

場合(増粘剤は添加)、置換率が高いほどフロー値が小さくなる傾向が確認できた。しかし、置換率 100%のフロー値はわずかに 180mm を超え、目標性能を満足しなかった。そこで、フロー値改善および凝結開始促進のため、特殊水ガラスを添加する配合を検討した。排泥置換率 100%および 50%の 2 ケースにおいて、特殊水ガラス添加率を無添加、1.0%および 2.0%と 3 水準設定した。結果を図-6 に示す。特殊水ガラスを 1.0～2.0%添加すると目標フロー値(140～180mm)を満足した。また、凝結開始状況を定量的に把握するため、排泥置換率 100%のケースにおいてフォールコーン試験(JGS 0142)を実施した。結果を図-7 に示す。短時間で強度発現が始まることを確認した。ブリーディング率については全ケースで 3.0%以下であった。目標強度については、排泥置換率 100%のケースで確認した。結果を図-8 に示す。28 日強度で目標強度である 50kN/m²を満足している。

以上の結果より、端部隔壁材の配合は排泥リサイクル率およびコスト面を考慮して排泥置換率 100%で特殊水ガラス 1.0%添加とした。

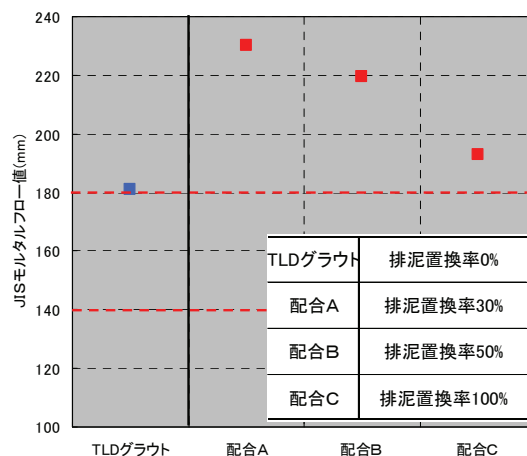


図-5 排泥置換率とフロー値との関係

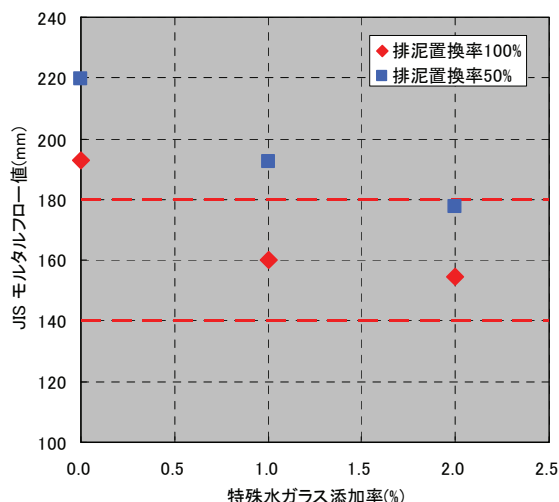


図-6 特殊水ガラス添加率とフロー値の関係

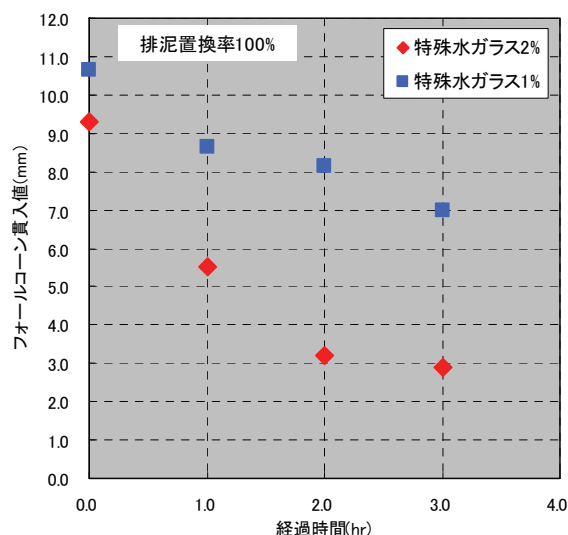


図-7 フォールコーン試験結果

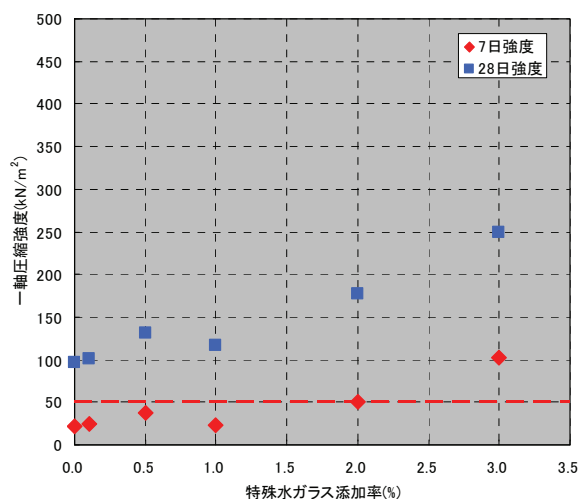


図-8 一軸圧縮強度試験結果

2.3 端部隔壁材の打設形状

表-2 の目標性能を満足した端部隔壁材料の打設形状を確認するために、水槽内での打設実験を実施した。

水を張った水槽内（50cm×30cm×30cm）に図-9 に示すような注入管で 1 時間毎に 5 リフト（1 リフト高さ約 5cm）に分けて打設して端部隔壁材としての適用性を確認した。写真-2 および写真-3 に結果を示す。目視では水中で材料分離するような状況は見られず、積層打設も可能で先行打設部との密着性も良好であった。

以上より、TLD グラウトを基本とし、必要に応じてセメント混入リサイクル材（地盤改良時排泥、流動化処理土等）の有効利用が可能な限定充填工法の端部隔壁材配合計画手法を構築した。

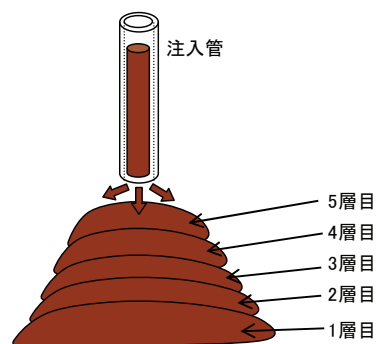


図-9 端部隔壁材打設イメージ

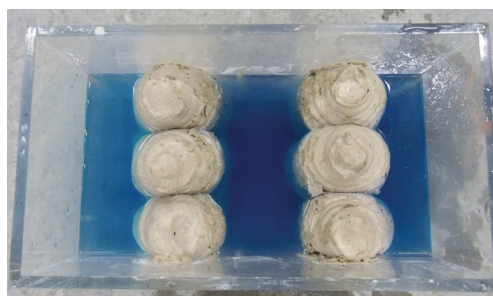


写真-2 水中打設状況（側面）

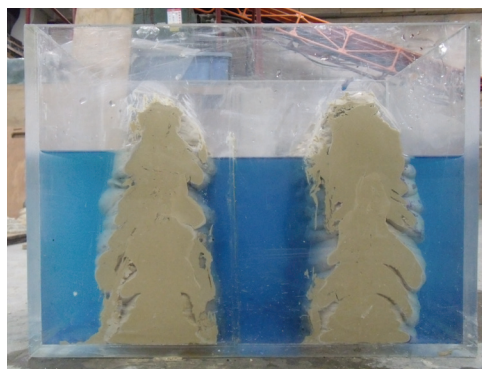


写真-3 水中打設状況（上面）

3. 端部隔壁施工事例

前述の端部隔壁材配合計画手法を応用して、限定充填工法の端部隔壁を施工する機会を得た。以下、事前配合試験および実施工での適用性確認結果を示す⁶⁾。

3.1 施工概要

今回、端部隔壁を構築した空洞は、旧水力発電所の導水路トンネルである。図-10 に示すように、充填対象区間 790mで、流動化処理土で空洞充填する計画である。図-11 に標準断面図を示す。流動化処理土充填工に先立ち、最下流部に端部隔壁を構築することとなっている。TLD グラウトを基本とした材料を用いて、端部隔壁工を施工することとした。

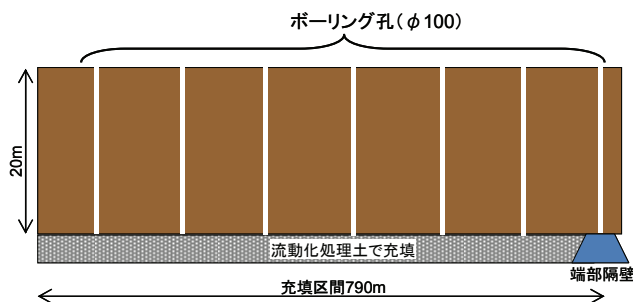


図-10 導水路トンネル縦断面図

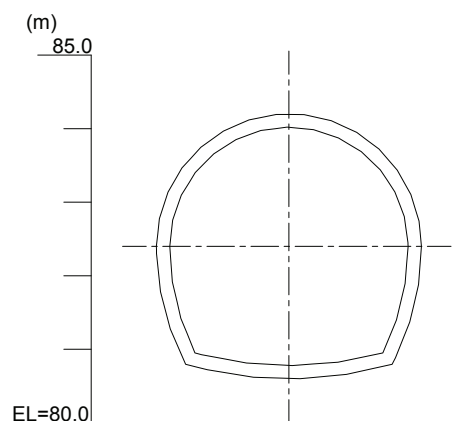


図-11 導水路トンネル標準断面図

3.2 端部隔壁材配合試験

今回の限定充填工は流動化処理プラントで製造された流動化処理土を空洞充填材として使用する。表-3 に空洞充填材(流動化処理土)の設計配合を、表-4 に発注者から提示された要求品質を示す。端部隔壁材については定量的な要求品質が無いため、目標強度およびブリーディング率は空洞充填材(流動化処理土)と同等とした。また、フロー値は140～180mmと設定した。

流動化処理土はリサイクル材料であることから、前述の地下ダム空洞充填端部隔壁材料配合検討時に得た知見をいかし、端部隔壁材の一部として有効利用することとした。具体的には、TLD グラウトA材のセメント系固化材および水を流動化処理土にすべて置き換えることとした。ただし、可塑性状保持および凝結開始促進のため、固化材添加量は表-3 に示す60kg/m³に対して増加させた。配合試験は、固化材添加量を130kg/m³、150kg/m³および200kg/m³の3水準に設定して実施した。また、特殊水ガラスの添加量は1.0%とした。

表-3 空洞充填材(流動化処理土)の設計配合(1.0m³当り)

設計配合			
発生土(kg)	砂(kg)	水(kg)	固化材(kg)
1,182	—	220	60

※：発生土は砕石プラント洗浄時に発生する土砂

表-4 充填材料の要求品質

充填材料	設計数量	要求品質
空洞充填材 (流動化処理土)	6,372m ³	・一軸圧縮強度(材齢28日): $q_u = 100\text{kN/m}^2$ ・ブリーディング率:3%以下
端部隔壁材	207m ³	・流動化処理土の流出を防ぐ ・周辺環境に影響が無いこと

配合試験結果を図-12、13 および 14 に示す。フロー値は、単位セメント量が200kg/m³になると急激に低下する。凝結開始状況はフォールコーン貫入値で評価した。打設後1時間で貫入値が初期値の約50～70%程度に低下しており、特殊水ガラスを添加した効果が確認できた。一軸圧縮強度は全ケースで要求品質を満足している。流動性、凝結開始時間および一軸圧縮強度 q_{u28} から判断して、端部隔壁構築に使用する流動化処理土の単位セメント量は150kg/m³とした。また、材料の重金属溶出試験も実施し、基準値以下であることを確認した。

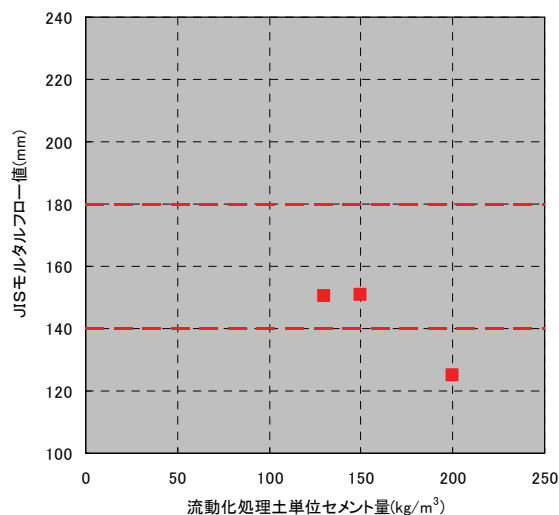


図-12 単位セメント量とフロー値との関係

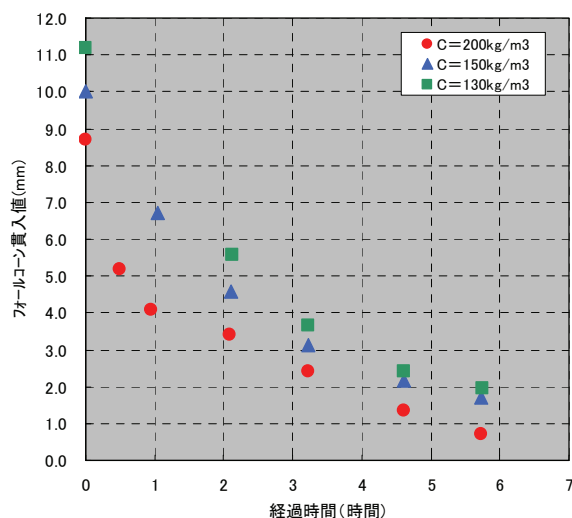


図-13 単位セメント量とフォールコーン貫入値との関係

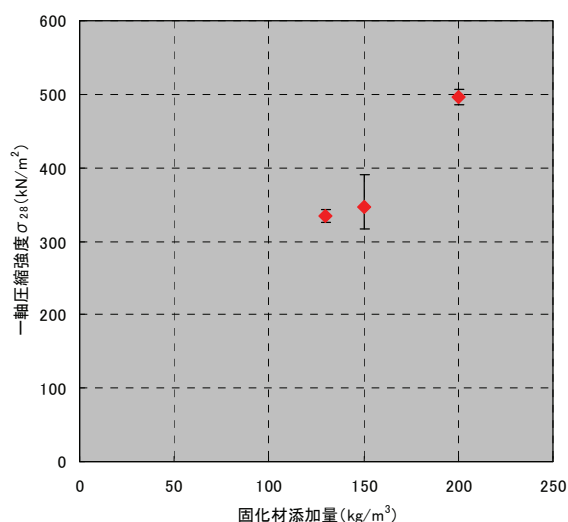


図-14 単位セメント量と一軸圧縮強度との関係

混合性能および打設形状の確認する目的で、実施工に先立って予備実験を実施した。A液およびB液をそれぞれチューブポンプで圧送し、ホース吐出口手前で混合した後、ホース先端から打設した。写真-4 に打設状況を示す。A液およびB液はよく混合されており可塑性状を呈する材料であった。また、積層打設しても、先行打設した材料が後行打設材料の重量により横に広がることもなく、約 50 度の勾配を保って打設することができた(写真-5 参照)。これより、実施工に向けて適用可能と判断した。



写真-4 打設状況



写真-5 打設形状

3.3 端部隔壁工の施工

(1) 打設設備

実施工において、流動化処理土は流動化処理プラントからトラックアジテータで運搬し、現場内のアジテータに貯留した。B液（粘土系無機質材溶液）はジェットミキサーを用いてタンク内で製造した。これら 2 液を写真-6 に示すように、ダイナミックミキサーを用いて混合し、写真-7 に示すボーリング孔よりトンネル内に打設した。増粘剤および特殊水ガラスは特殊混合装置により B 液ライン上に添加した。

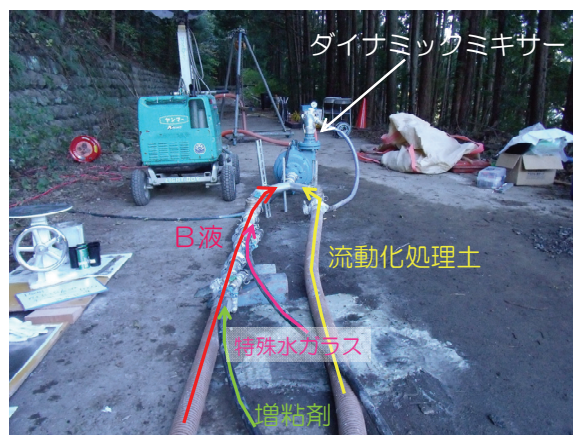


写真-6 端部隔壁打設設備



写真-7 打設孔

(2) 端部隔壁材の品質

端部隔壁材のフロー値と一軸圧縮強度を図-15、図-16 に示す。フロー値は、140mm を下回った。流動化処理土の運搬によるフローロスが原因として考えられるが、圧送性能および充填性能に問題はなかった。端部隔壁としての形状保持（流動勾配確保）という観点では、フロー値の下限値は 100～120mm 程度でも問題ないかもしれない。一軸圧縮強度は材齢 28 日で、100kN/m² を十分満足している。

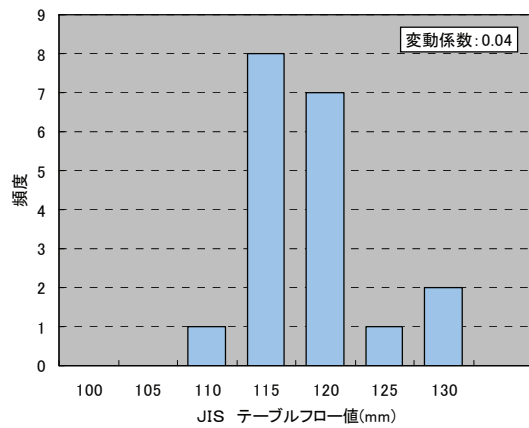


図-15 端部隔壁材のフロー値（実施工時）

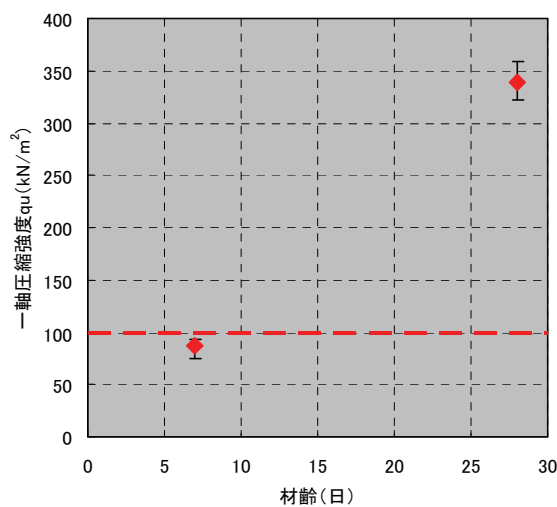


図-16 端部隔壁材料の一軸圧縮強度（実施工時）

(3) 充填状況管理

施工中の充填状況は図-17 に示すように上流側の隣接孔（A孔）から CCD カメラを用いて、リアルタイム管理した（写真-8）。CCD カメラの仕様を表-4 に示す。充填状況は地上のモニター画面上で確認することができる（写真-9）。充填状況の履歴を写真-10 に示す。端部隔壁材が空洞内を良好に充填していることが確認できた。端部隔壁工は、打設高さ 1.0～1.5m/日のペースで施工し、2.5 日で無事完了した。

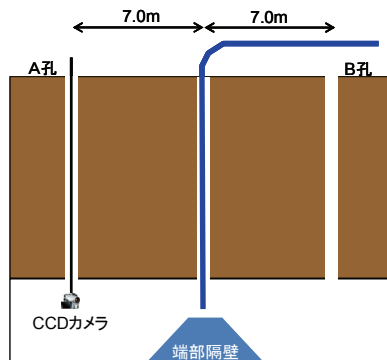


図-17 充填状況管理概要

表-4 CCD カメラの仕様

カメラ本体	25 万画素子 CCD カメラ (耐水压 0. 15MPa)
電源	AC100V
寸法	最大径 φ 80mm × L150mm
重量	800g
出力記録方式	パソコン直結カラー動画
照明	白色 LED (別に補助灯付き)
ケーブル	アーマードケーブル 30m
固定具	アルミ製フレキシブルジョイント
オプション	GPS 機能, 傾斜計測機能他



写真-8 CCD カメラ挿入状況



写真-9 充填状況確認

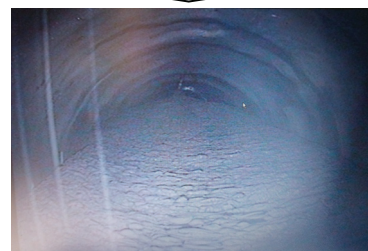


写真-10 充填状況の履歴

(4) 端部隔壁の出来形管理

端部隔壁材の出来形確認は3Dスキャナーを用いて行った。図-18に示すように、上下流の隣接孔(A孔およびB孔)より3Dスキャナーを坑内に挿入した。先端に取付けられたレーザーにより端部隔壁の表面をスキャンしていく。3Dスキャナーの仕様を表-5に示す。スキャンングデータを3D-CAD上で処理した結果を図-19に示す。端部隔壁材の使用量は設計数量の約75%で済み、効率的な施工を実現した。これらより、3Dスキャナーが出来形管理に有効であることを確認できた。また、その後の空洞充填工(流動化処理土)も問題なく施工することができた。

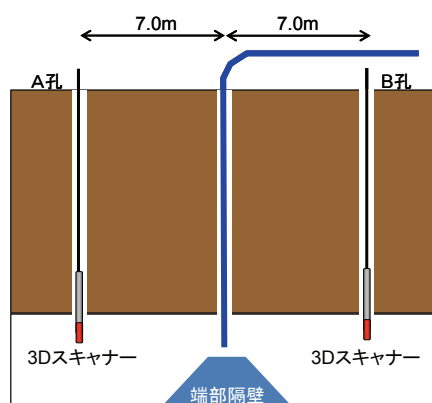


図-18 出来形管理概要

表-5 3Dスキャナーの仕様

本体	C-ALS (MDL 社製)
レーザー	クラス1アイセーフレーザー
本体寸法	φ50mm×L2000mm
本体重量	10kg
スキャン方式	360° 連続 200点/秒
計測機能	デジタルコンパス, 2方向傾斜計

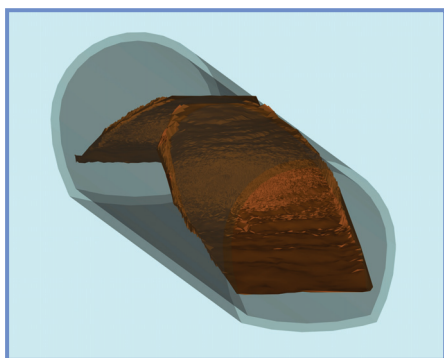


図-19 3D-CADで処理した端部隔壁出来形図

4. まとめ

限定充填工法において、TLDグラウトを基本とした端部隔壁材料の配合設計手法を確立し、現場適用性を確認した。

リサイクル材料の有効利用も可能な配合設計手法であるため、環境にやさしい充填材料である。

今後、現場のニーズに応じた端部隔壁構築を目指し、

施工管理および品質管理手法の充実をはかる。

謝辞：今回の端部隔壁工施工において、中部支店の現場職員の皆様には、多大なるご協力をいただきました。この場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) トンネル覆工背面の空洞充填材TLDグラウト，渡部・佐藤・長岡，建設機械 533. vol. 45. No. 7 2009. 7
- 2) 地下ダム施工時の排泥を利用した空洞充填材の開発（その1）～地下連続壁排泥を利用した空洞内仕切壁材の適用性について～，安井，洞，小熊，第45回地盤工学研究発表会講演集，pp.555-556，2010. 8
- 3) 地下ダム施工時に発生する排泥の空洞充填材への適用性確認結果（その1），安井，三輪，小熊，洞，平成23年土木学会全国大会 第66回年次学術講演会講演集，pp.743-744，2010. 9
- 4) 地下ダム施工時の排泥を利用した空洞充填材の開発（その2）～地下連続壁排泥の内空洞充填材としての適用性について～，清水，内田，島村，第45回地盤工学研究発表会講演集，pp.557-558，2010. 8
- 5) 充填技術協会：新版 空洞充填調査施工マニュアル，一般社団法人 充填技術協会，2010. 10.
- 6) 空洞充填工法の開発－廃坑充填工における端部隔壁の施工－，安井，清水，伏屋，赤松，第46回地盤工学研究発表会講演集，pp.515-516，2011. 7