

空洞充填工における範囲限定隔壁材料の開発 および実施工での検証

清水英樹¹・小熊 登¹・安井利彰²・伏屋 学³

¹正会員 工修 前田建設工業株式会社 土木設計・技術部 (〒101-0064 東京都千代田区猿楽町2-8-8)

²正会員 工修 前田建設工業株式会社 技術研究所 (〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16)

³非会員 前田建設工業株式会社 中部支店 (〒460-0008 名古屋市中区栄5-25-25 MKD3ビル)

大規模空洞の充填工を、より効果的かつ経済的なものとするために充填箇所を必要最低限な領域に限定して充填する方法が提案されている¹⁾。しかし、限定充填に必要な隔壁材料に関しては設計・施工面で未解明な部分も多いことから、用途に応じた要求性能と経済性を満足する隔壁材料の開発を行った(平成21年度)。このほど、実工事として行われた廃導水路トンネルの充填工事において、充填区間の端部に位置する隔壁を構築する際に開発材料を適用できる機会を得て、実施工規模での性能および施工性に関する検証データを収集した。本報では開発材料の配合から製造プラント、施工・出来形管理までを概説するとともに今後の展望について述べる。

キーワード: 地下空洞, 限定充填, 隔壁材料, 流動化処理土, 孔内モニタリング

1. 地下空洞の限定充填工法の概要

(1) 地下空洞の現状

地下に形成・残置された空洞が経年劣化等の要因で崩落に至り直上地盤やその周辺に変状をきたす事例は以前より数多く報告されてきた。しかし、亜炭廃坑や廃導水路など人為的に掘削または構築され、残置された地下空洞上の市街化が進むようになると、その危険性が指摘されるようになり、充填対策が講じられるようになってきた。ここで地下空洞を体系的に分類・整理してみると図-1のように示される。図中にある「人工的な地下空洞」に該当する「鉱山廃坑」・「地中構造物」は、結果的に市街地に隣接して存在するケースが増大しつつあり、しばしば地

表面に陥没等を生じさせる要因となっている^{1) 2)}。一方で、「自然形成の地下空洞」に該当する「石灰岩溶食」による空洞は、沖縄諸島や奄美諸島などで多造される「地下ダム」建設の際に支障となる事例が報告されている³⁾。前者は第三者災害の原因となる恐れがある点で、後者は大規模空洞に遭遇する可能性が高く、多大な対策費を要する恐れがある点で効果的・経済的な充填対策技術が必要な重要対象空洞と位置づけられる。

(2) 限定充填工法とは¹⁾

重要対象と位置づけた上記の地下空洞をより効果的・経済的に充填する技術として、限定充填工法に着目した。限定充填工法とは、広範囲に分布する空

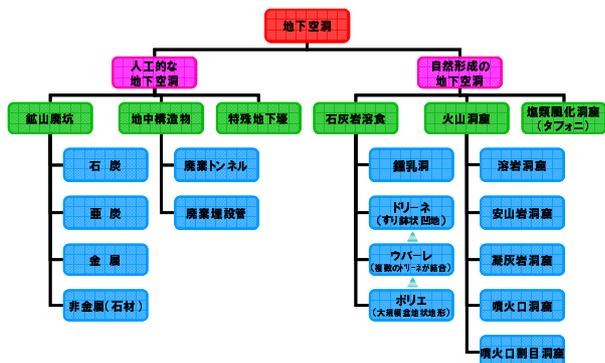


図-1 地下空洞の体系的分類

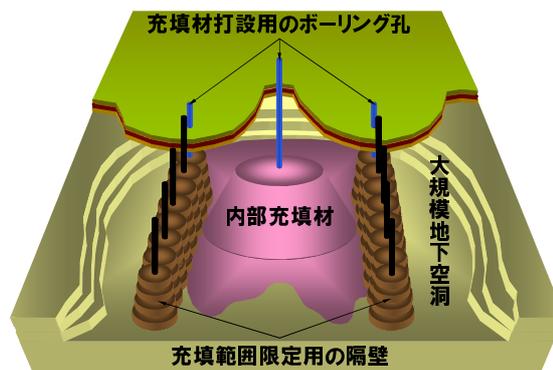


図-2 限定充填工法のイメージ図

洞を全て充填するのではなく、必要十分な範囲を限定して充填する方法である（図-2）。充填範囲を限定するためには、まず当社が開発した可塑性グラウト材料⁴⁾をベースとする自立性に富んだ材料で隔壁を構築する。隔壁内部の充填には特段の強度や止水性などの性能が求められない限り、流動化処理土等の比較的安価な充填材を用いることで充填工費の低減を図ることを特徴としている。

(3) 限定充填工法における技術的課題

限定充填工法における最も重要な技術的課題として挙げられるのが、先行構築される隔壁材料の性状を利用目的に応じて適用させる配合技術の確立であるといえる。一般に隔壁材の流動性（もしくは自立性）は練り上がり直後のワーカビリティや施工方法などに起因するいくつかの指標によって、図-3のような定性的傾向を示すものと考えられる。したがって、ときに相反し合うこれらの指標を適切にバランスさせながら、例えば流動・充填性を優先するなどかな壁であったり、自立性の高い急峻な壁であったり自在に構築できる配合技術が求められる。併せて様々な添加剤を調合するがゆえに高価となりがちな隔壁材には、必要性能を保持しつつも可能な限り安価な材料を使用して材料単価を低減させることも開発要因と考えた。

そこで、配合設計や施工方法によって最終形状が変化する隔壁材の出来形を用途に応じて自在にコントロールする技術の開発を目指し、まずは地下ダム大規模空洞を想定した隔壁材として、前述の可塑性グラウトをベースに地下連続止水壁（SMW）施工時の排泥を有効利用した材料の開発に取り組んできた^{5) 6) 7)}。次に、そこで得られた知見を旧水力発電所の廃止導水路トンネルにおける限定充填工事に応用できる機会を得たことから、実施レベルでの様々な検証を実施した。

本報では、廃止導水路トンネルの充填区間の端部に位置する隔壁に当該開発材料の適用を図った事例について報告する。具体的には可塑性グラウトに

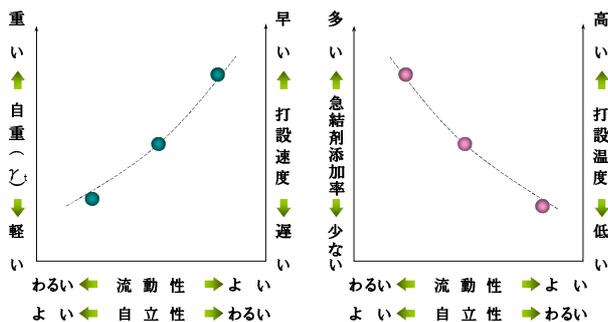


図-3 端部隔壁材の各種指標と性能の定性的な関係

流動化処理土を加えた応用材料の配合から製造プラント、施工・出来形管理までを概説するものである。

2. 端部隔壁材料の検討

(1) 可塑性グラウト材

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性材溶液とセメント系固化材溶液を2液混合する。その際、可塑性材中のマイナスイオンが、セメントの水和反応で生じたCa²⁺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) 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-4）では、地下連続止水壁（SMW）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いえる。これらの空洞は大小さまざまなものがあるが、ボー

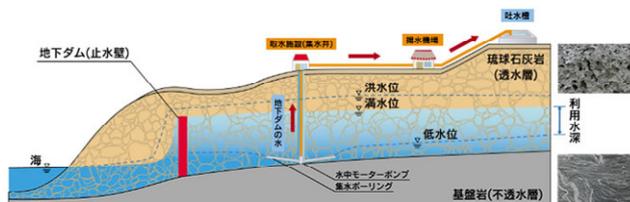


図-4 地下ダムの概要

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^{5) 6)}。

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二段階の充填方法が合理的と考えた（図-2

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		

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⁴⁾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液との二液混合材料である。

一方、地下連続壁施工時には先行削孔～三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。



写真-1 SMW施工時に排出される汚泥

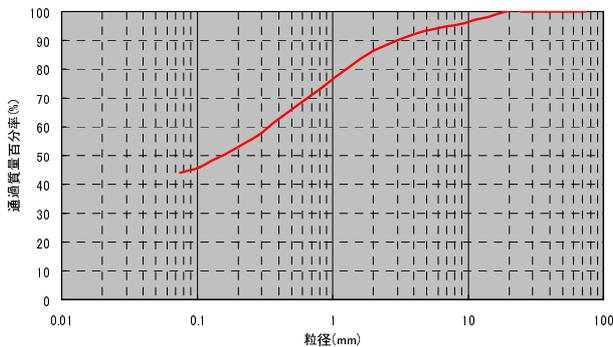


図-5 SMW排泥の粒度分布

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。

表-2 端部隔壁材の要求品質⁷⁾

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	フリートイング率 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。

る。写真-1に排泥の状況、図-5に排泥の粒度分布を示す。

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。

フロー値、初期強度および水中不分離性等を確認した。図-6に示すようにTLDグラウトのA液を排泥で置換した場合(増粘剤を添加)、置換率が大き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、要求品質を満足しなかった。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-7に示す。特殊水ガラスを1～2%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。

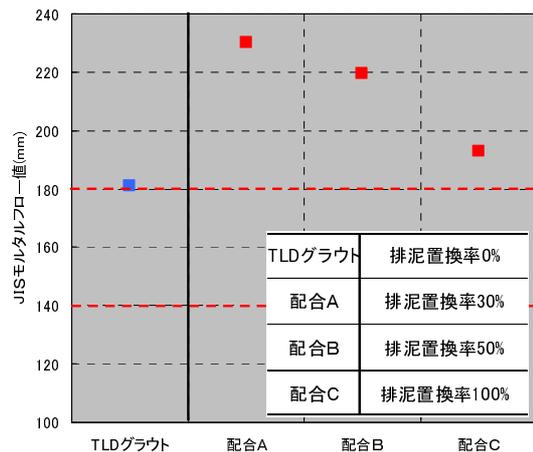


図-6 排泥置換率とフロー値の関係

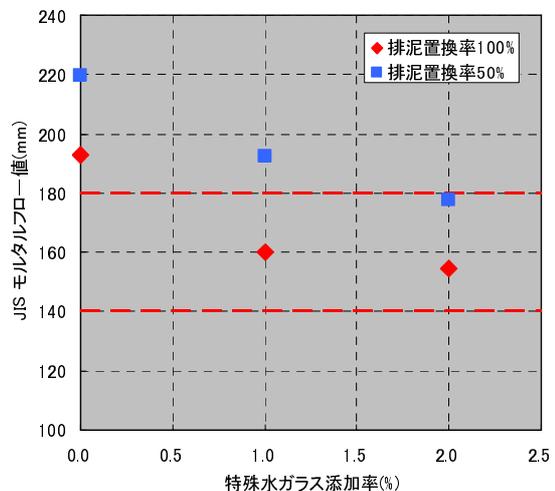


図-7 水ガラス添加率とフロー値の関係

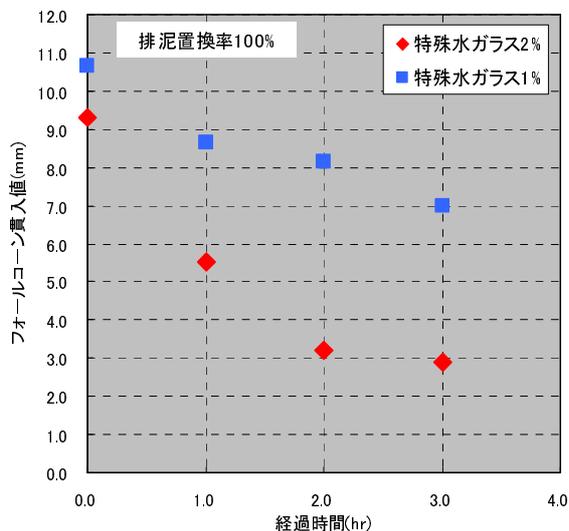


図-8 フォールコーン試験結果

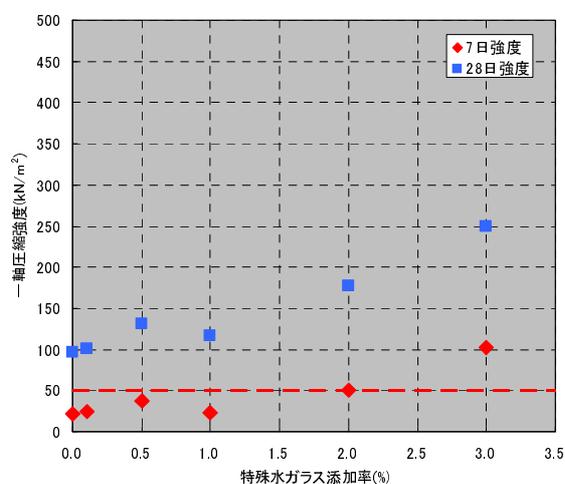


図-9 一軸圧縮強度試験結果

結果を図-8に示す。短時間で強度発現が始まり、数時間経過後には積層打設が可能な程度まで凝結する状況が確認できた。また、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-9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、TLDグラウトのA液100%置換、特殊水ガラス1.0%添加のケースにおいて目標品質を満足することが確認できた。

(3) 端部隔壁材の打設形状

表-2の要求品質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。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%添加とした。水を張った水槽内(50cm×30cm×30cm)に図-10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)に分けて打設して仕切壁としての適用性を確認した。写真-2および写真-3

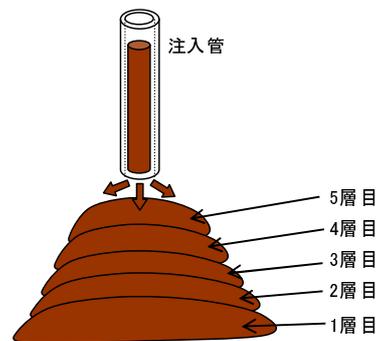


図-10 端部隔壁材の打設イメージ



写真-2 水中打設状況(上面)

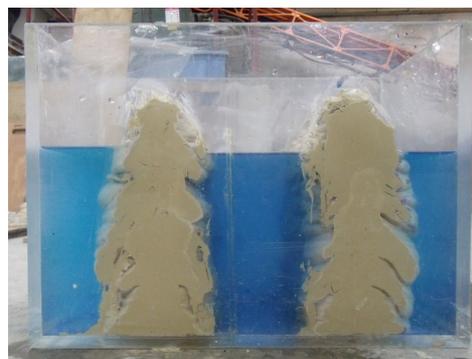


写真-3 水中打設状況(側面)

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。

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⁸⁾。

(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-11に示すように、充填対象区間790mで、流動化処理土で充填する計画

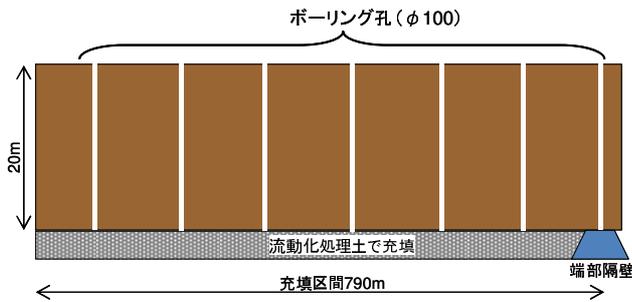


図-11 導水路トンネル縦断面図

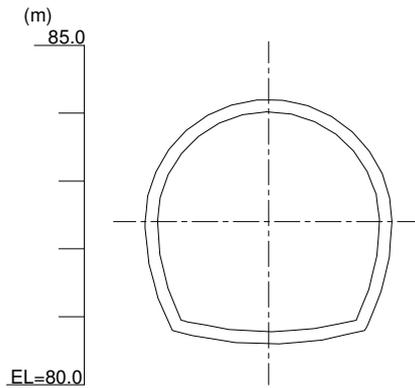


図-12 導水路トンネル標準断面図

である。図-12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。この端部隔壁にTLDグラウトをベースとした材料を用いて施工することとした。

(2) 端部隔壁材配合試験

今回の限定充填は流動化処理プラントで製造された流動化処理土を内空充填材として使用する。表-3に内空充填材（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、強度およびブリーディング率は内空充填材（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の隔壁材料の配合を検討した際に得られた知見を活かし、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、可塑性性状の保持と凝結促進のため、固化材添加量を

表-3 内空充填材（流動化処理土）設計配合
(1.0m³あたり)

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で洗浄時に発生する土砂を使用

表-3に示した当初配合量60kg/m³よりも割増すこととした。したがって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。

配合試験結果を図-13、14および15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

表-4 充填材料の要求品質

充填材料	設計数量	要求品質
内空充填材 (流動化処理土)	6,372m ³	<ul style="list-style-type: none"> 一軸圧縮強度(材齢28日): q_u=100kN/m² ブリーディング率:3%以下
端部隔壁材	207m ³	<ul style="list-style-type: none"> 流動化処理土の流出を防ぐ 周辺環境に影響が無いこと

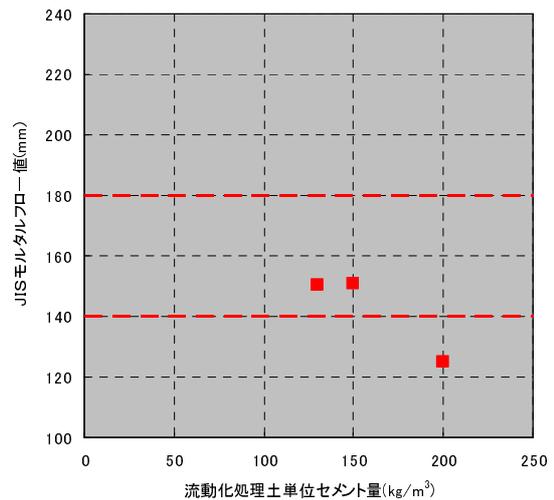


図-13 単位セメント量とフロー値の関係

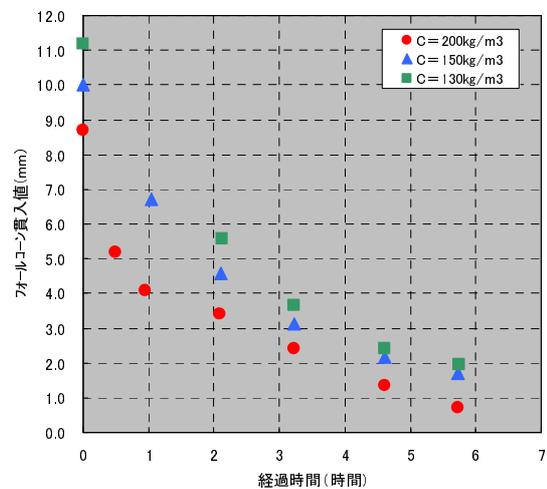


図-14 単位セメント量とフォールコーン貫入値との関係

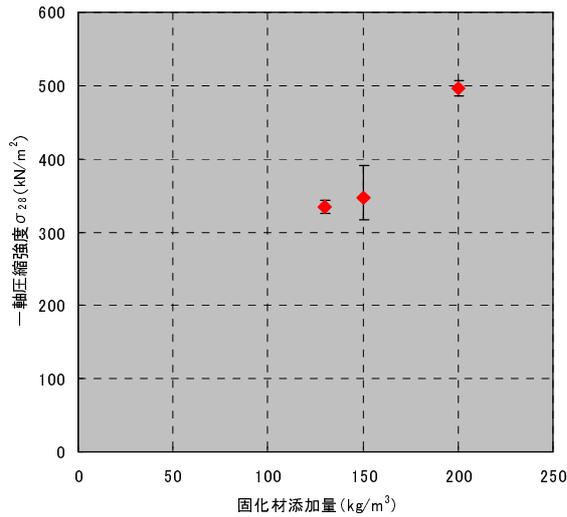


図-15 単位セメント量と一軸圧縮強度の関係

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/m^3 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。

混合性能および打設形状を確認する目的で、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



写真-4 予備実験における打設状況



写真-5 予備実験における出来形確認状況

より、実施工に向けて適用可能と判断した。

(3) 端部隔壁の施工

a) 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。

b) 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-16、図-17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/m^2 を十分満足している。

c) 充填状況管理

施工中の充填状況は図-18に示すように打設孔に

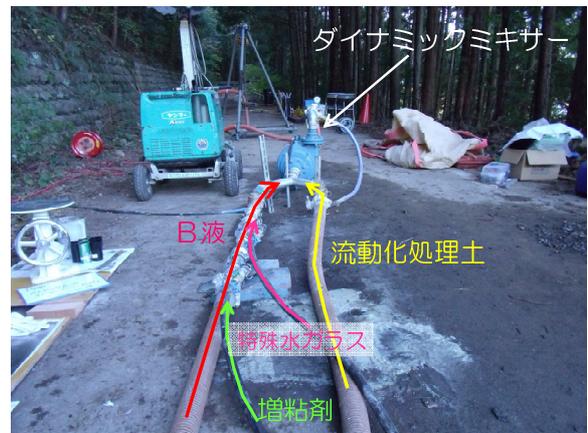


写真-6 実施工における端部隔壁打設設備



写真-7 実施工における端部隔壁打設孔

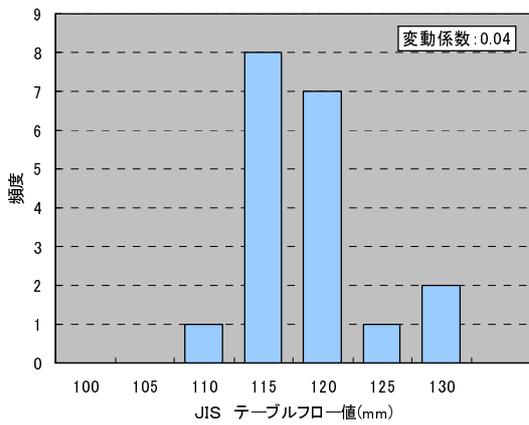


図-16 端部隔壁材のフロー値 (実施工時)

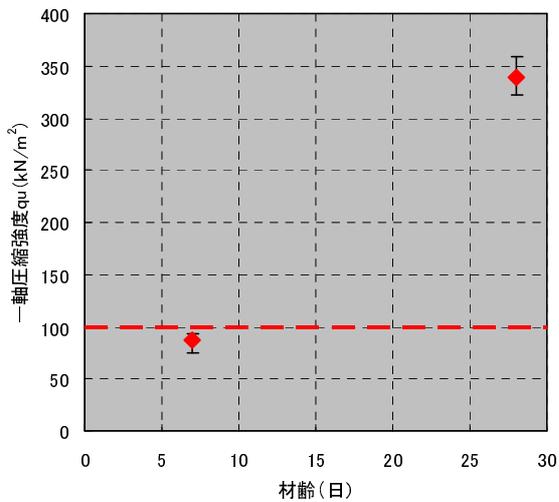


図-17 端部隔壁材料の一軸圧縮強度 (実施工時)

隣接した観察孔(B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。

d) 端部隔壁の出来形管理

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-19に示すように、打設孔に隣接した観

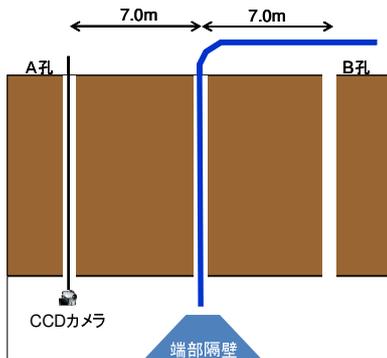


図-18 充填状況管理方法の概要

察孔(A・B孔)より3Dスキャナーを挿入する。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ニングしていく。レーザースキャナーの仕様を表-5に示す。スキャニングデータを3D-CAD上で処理した結果を図-20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

表-4 CCDカメラの仕様一覧

カメラ本体	25万画素子 CCDカメラ (耐水圧 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 (左) CCDカメラ挿入状況と写真-9 (右) モニタリングの状況

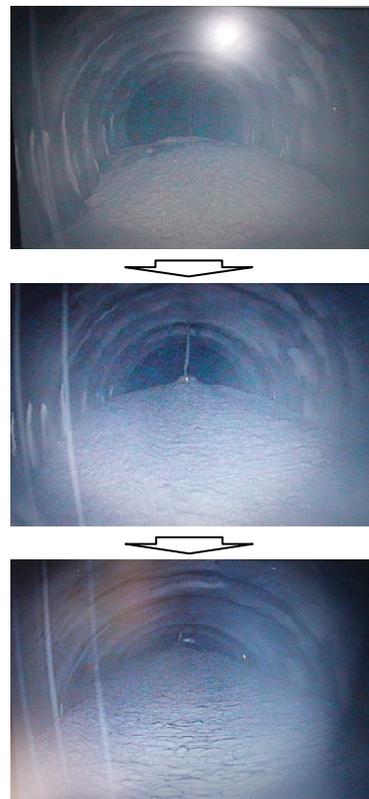


写真-10 充填状況の経時変化

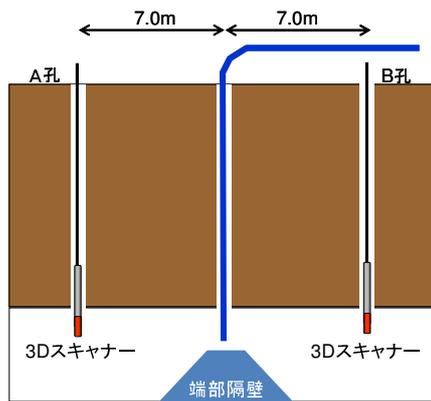


図-19 出来形管理方法の概要

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

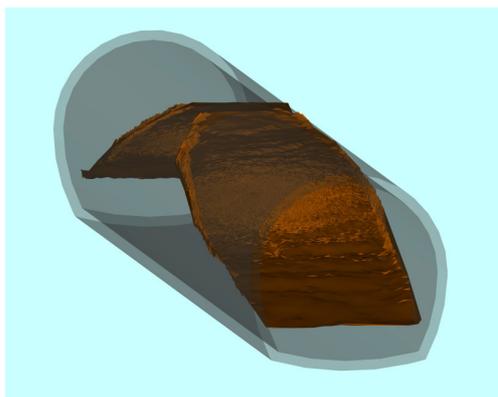


図-20 3D-CADで処理した端部隔壁の出来形図

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。

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、経済性に富んだ環境にや

さしい充填材料といえる。今後は、様々な用途の現場ニーズに応じた空洞充填技術の確立を目指し、施工管理および品質管理手法の充実をはかっていく所存である。

参考文献

- 1) 一般社団法人 充填技術協会（旧称：充填技術センター）：新版 空洞充填調査施工マニュアル－空洞災害の防止と地盤安定化のための調査・施工技術－Ⅰ. 共通編, 2010. 10
- 2) 亜炭廃坑による特定鉱害（浅所陥没）と疑われる陥没について, 岐阜県商工政策課・記者発表資料など, 平成22年7月22日
- 3) 大城・宮城・大沢・持田：琉球石灰岩中に発達する大規模空洞の処理について－カンジン地下ダム の事例－, 農業土木学会全国大会講演要旨集 pp. 504-505, 2003
- 4) 渡部・佐藤・長岡：トンネル覆工背面の空洞充填材 TLD グラウト, 建設機械533. Vol. 45 No. 7 2009. 7
- 5) 安井・洞・小熊：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～, 第45回地盤工学研究発表会講演集, pp555-556, 2010. 8
- 6) 安井・三輪・小熊・洞：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）, 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, 2010. 9
- 7) 清水・内田・島村：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充填材としての適用性について～, 第45回地盤工学研究発表会講演集, pp557-558, 2010. 8
- 8) 安井・清水・伏屋・赤松：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－, 第46回地盤工学研究発表会講演集, pp515-516, 2011. 7 20-33, 1994.