

地下空洞充填におけるシールド泥水の有効利用

平 間 昭 信・川 端 康 夫

東海地区に散在する亜炭廃坑の陥没対策は、東南海トラフ地震などの特定災害における国土強靱化、防災・減災の取組み対象となっている。現在、実施されている亜炭廃坑の陥没対策には、砕石工場で生ずる副産物の脱水ケーキを主材とし、セメント系固化材、水を混合した流動性の高い充填材による充填工法が適用されている。ここでは、シールド工事で生じる余剰泥水を不要地下空洞の充填材として有効活用することを目的とし、大型充填用模型を用いた実験を行い、充填材として良好な品質を有することを確認したことを報告する。

キーワード：地下空洞、充填材、泥水式シールド、汚水、流動性、圧縮強度

1. はじめに

自然災害が多発する日本において、国土強靱化（ナショナル・レジリエンス）基本法が平成 25 年 12 月に策定され、国土強靱化に向けた取り組みが行われている。過去の負の遺産として全国に分布する亜炭廃坑や地下採石場跡、地下防空壕跡など不要地下空洞は、長期的な地盤のゆるみで陥没事故が起きようになり、社会的リスクとなっている。特に、図-1 に示す、東海地区に散在する亜炭廃坑の陥没対策は、東南海トラフ地震などの特定災害における国土強靱化、防災・減災の取組み対象となっている。

現在まで、亜炭廃坑をはじめとする不要地下空洞に対する充填技術の開発、施工実績を積み重ね、過去 20 年間に約 40 万 m³ の空洞を充填した実績を有している。

現在、実施されている亜炭廃坑の陥没対策には、砕石工場で生ずる副産物の脱水ケーキ（粘土キラ、砂キラ）を主材とし、セメント系固化材、水を混合した流動性の高いスラリー材による充填工法が適用されている。一方、これまでにフライアッシュ、下水道汚泥焼却灰、溶融スラグ、ペーパスラッジ焼却灰などのリサイクル材の配合を検討し、良好な適用性を確認してきた²⁾。

本報告では、シールド工事で生じる余剰泥水を不要地下空洞の充填材として有効活用することを目的とし、大型充填用模型を用いた実証実験の結果について報告する³⁾。泥水式シールド工法は、掘削中の切羽を安定させるために、掘削土中の粘土を取り込んだ泥水をシールドマシンのチャンバー内に充填させ切羽を安定させた状態で掘削を行っている。掘削土は泥水とともに地上部に流体輸送され、一次処理装置により 0.075 mm 以上の砂・礫分と、0.075 mm 未満のシルト・粘土分を含んだ余剰泥水に分離される。砂・礫分は残土処分や有効利用されているが、余剰泥水は二次処理装置により脱水ケーキとして処理したのち、廃棄物として最終処分場で処理されている。シールド工事では、この廃棄物となる余剰泥水が大量に生じることから、その有効な再利用方法として余剰泥水を主材とした充填材の検討を行った。

2. 空洞充填工法とは

地下空洞充填工法は、固化材を混練したスラリーを地上からボーリング孔を通じて地下空洞に注入し、閉塞することで地盤の安定化を図る工法である。流動型充填工

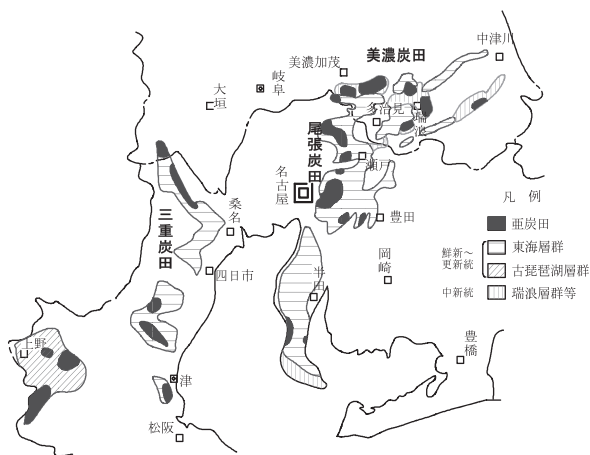
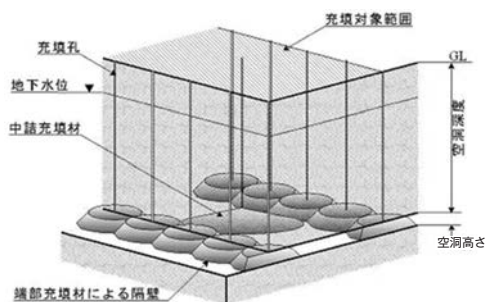
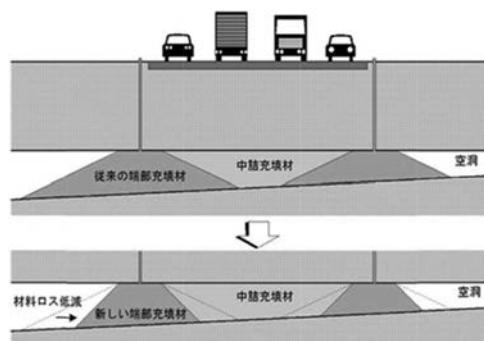


図-1 東海地方の亜炭廃坑分布¹⁾



図一 限定充填工法概要図



図二 急硬タイプ端部充填材の適用例

法および限定充填工法の2つの充填工法に分類される。

流動型充填工法とは、安全性の確認された粘土・シルト状の脱水ケーキなどの産業副産物を充填材の母材としてリサイクル利用し、これに固化剤と水を加えて混練したものをを用いる一般的な工法である。

限定充填工法は、図一に示すように、流動性抑制を目的に特殊水ガラスまたは急硬材を添加することで、広い空洞の対策範囲を限定するための隔壁を形成する。その隔壁内部に流動性の高い中詰充填材を充填することで対象範囲外への充填材の漏洩を防止し、効率的な空洞対策を可能とする工法である。地下空洞の条件(空洞高さ、空洞深度、地下水の有無、空洞底面の傾斜など)に応じて、図二に示すように、各種材料を使い分けことができ、多様な地下空洞に対応した充填材を選定できる。

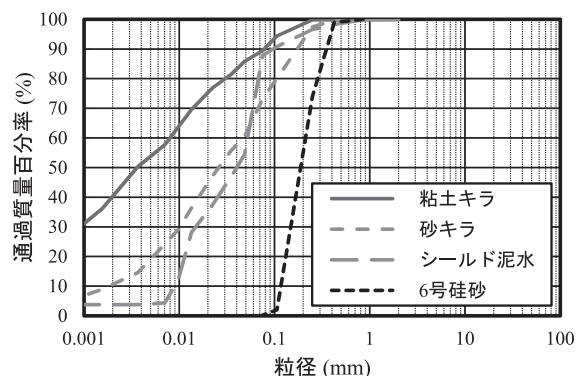
3. シールド泥水を用いた検証実験概要

(1) 使用材料

充填材主材の泥水は、泥水式シールド工法が適用されている現場の泥水を使用した。使用した充填材主材

表一 充填材主材の物理試験結果

項目	粘土キラ	砂キラ	泥水(乾)	6号硅砂
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.64	2.73	2.66	2.70
含水比 (%)	35.5	12.2	234.9	0.8
最大粒径 (mm)	2	2	2	0.85
細粒分含有率 (%)	89	73	88	100
粘土分含有率 (%)	54	19	4	0
50% 粒径 (mm)	0.003	0.025	0.039	0.194
均など係数	22.9	25.1	5.5	1.74



図三 充填材主材の粒度分布

の物理試験結果を表一に、充填材主材の粒度分布を図二に示す。

(2) 充填材の要求性能および配合

充填材の要求性能を表二に示す。この要求性能を満足する配合を室内実験で求めた。求めた配合を表三に示す。

(3) 検証実験方法および測定項目

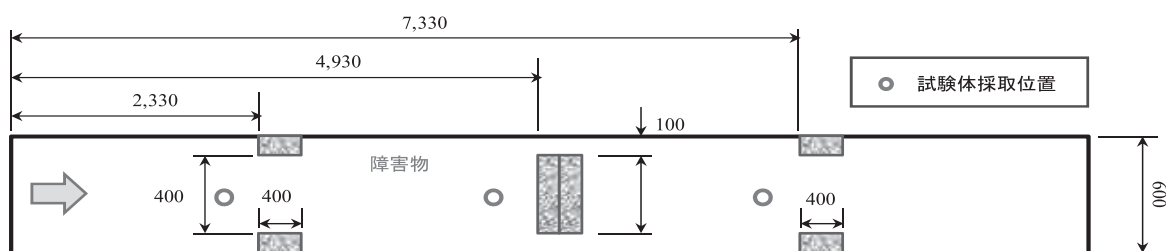
検証実験は、図三に示す障害物を配した模型(長さ10m×高さ0.3m×幅0.6m)に、流下速度60ℓ/分、流下時間10分、流下量約620ℓの条件で充填

表二 充填材の要求性能

単位容積質量	P ロート流下時間	ブリーディング率	圧縮強度
1.3~1.5 t/m ³	9~14 秒	3%以下	50 kN/m ² 以上

表三 検証した充填材配合

充填材種類	単 位 量 (kg/m ³)						
	充填材主材				水	固化材	遅延剤
	粘土キラ	砂キラ	泥水	6号硅砂			
キラ配合	360	120	—	—	800	60	0.18
泥水配合	—	—	375	125	793	60	0.18



図—5 大型充填用模型平面図

表—4 測定項目および測定方法

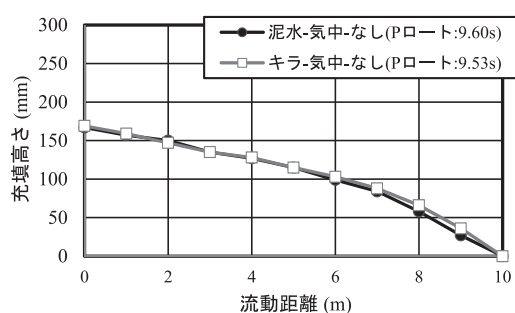
測定項目	測定方法
P 漏斗試験	JSCE-F 521「プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法 (P 漏斗による方法)」に準拠。 写真—1 参照。
ブリーディング試験	JSCE-F 522「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法」に準拠。
流動勾配	各測定ポイントでの充填高さを測定し、流動勾配を求めた。
圧縮強度	JIS A 1216「土の一軸圧縮試験方法」に準拠して、型枠採取により圧縮強度を求めた。
コアによる圧縮強度、 単位容積質量	硬化後、模型内からコアを採取して JIS A 1216「土の一軸圧縮試験方法」に準拠して圧縮強度、単位容積質量を求めた。

材を注入し、流動勾配の測定および圧縮強度、単位容積質量の分布を測定した。なお、不要地下空洞は、地下水などで湛水している場合があることから、検討したケースは実際の充填環境を想定し、模型内を湛水したケース（以下、水中）と湛水しないケース（以下、気中）の2ケースで実施した。測定項目および測定方法を表—4に示す。

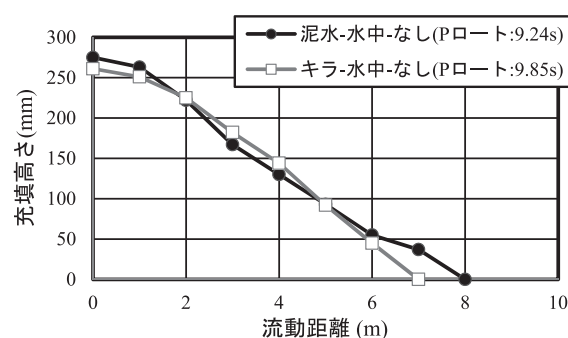
4. シールド泥水を用いた検証実験結果

(1) 流動勾配

気中における充填材の流動勾配を図—6に、水中の流動勾配を図—7に示す。シールド泥水を用いた充填材の流動勾配は、気中および水中ともに、従来のキラ材を用いた充填材とほぼ同等の流動性を有することを確認できた。今回の実験におけるシールド泥水の流動勾配は気中で1.5%、水の抵抗を受ける水中では3.9%だった。なお、注入した充填材のP漏斗流下時間は、9.24～9.85秒であった。



図—6 気中における充填材の流動勾配



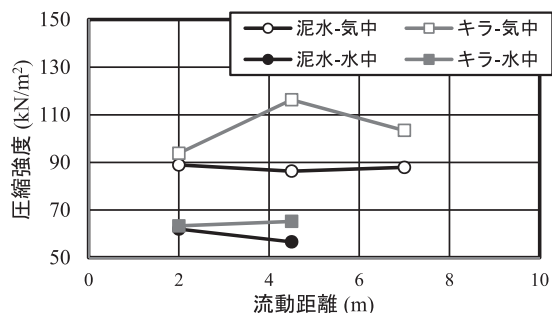
図—7 水中における充填材の流動勾配

(2) 圧縮強度および単位容積質量の分布

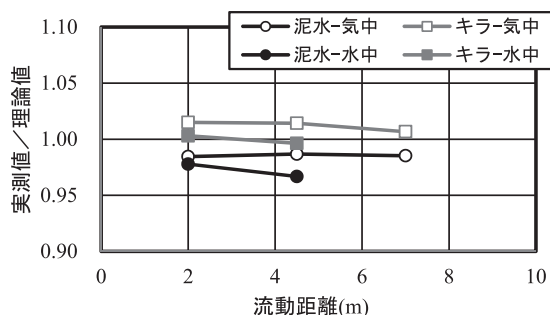
圧縮強度の測定結果を図—8に、単位容積質量の測定結果を図—9に示す。模型内の2 m、4.5 m、7 mの位置でサンプルを箱抜きし、硬化後コア抜きして測定を実施した。なお、水中の実験では、7 mの位置で試験体採取が行えなかったことから4 mまでの結果を示した。

圧縮強度は泥水、キラ材の各配合ともに、流動距離の影響を受けず、ほぼ同じ圧縮強度であった。一方で、水中の試験では材料投下時の攪拌が若干影響し、気中に比べて水中の圧縮強度が小さな値を示したが、流動距離の影響はなく、要求性能の50 kN/m²を満足する結果であった。

配合表に基づく設計単位容積質量 (1.353 t/m³) に対する比は、気中が0.98～0.99であり、水中では0.97～0.98の結果であり、単位容積質量も流動距離および水中での流動の影響はほとんど確認されなかった。



図—8 圧縮強度測定結果：材齢 28 日



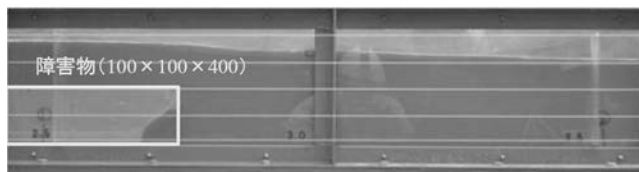
図—9 単位容積質量測定結果：材齢 28 日

(3) 充填状況

図—5 の模型平面図に示したように、気中および水中ともに、充填材の流動を障害する障害物を複数配置して、流動状況を観察した（写真—1）。写真—2



写真—1 P 漏斗試験状況



写真—2 充填材の充填状況



写真—3 水中における充填材の流動状況

に示すように、流動方向に対して障害物の背面側にも充填材が充填されており、高い充填性能を確認した。また、写真—3 に示すように、水中を流動させた充填材については材料分離は確認されなかった。

5. おわりに

実際の泥水式シールド工法の採用現場で生じた余剰泥水を主材とした充填材の配合を選定し、大型充填用模型を用いて充填性を検証した。今回実施した実験で得られた知見を以下に示す。

- ・P ロート流下時間など、これまでの充填材の要求性能を満足する配合を選定することにより、キラ材を用いた従来の充填材と同等の流動勾配および充填性が得られた。
- ・圧縮強度は、泥水、キラ材の充填材とともに、水中においても流動距離の影響を受けず、要求性能の 50 kN/m^2 を満足した。

今回の検証実験において、シールド工事から排出される余剰泥水は、充填材取材として高い適用性が確認できた。ただし、実際のシールド工事の現場では、地質条件によって、余剰泥水の密度、粒度分布などの品質が異なるため、充填材の配合や性状に影響を与えることが考えられる。このことから、今後は、これら地質条件が充填材の性状に及ぼす影響を把握し、充填材の要求性能を満足する配合設計を選定するための検討を進めていく予定である。

JCM/A

《参考文献》

- 1) 日本充てん協会編：改訂版 空洞充填施工マニュアル，—空洞による災害防止と地盤安定化のための技術—，日本充てん協会，2004。
- 2) 坂本昭夫，山田則紀利，岩城圭介，川本眺万：リサイクル材料の空洞充填材への適用性，材料，第 54 巻第 11 号，pp.1123-1128，2005。
- 3) 川端康夫，松原利之，望月泰彦，平間昭信，坂本昭夫：土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ部門，pp.121-122，2015.9。

〔筆者紹介〕

平間 昭信（ひらま あきのぶ）
飛鳥建設
土木事業本部 エンジニアリング部
インフラ防災グループ
首席技術員



川端 康夫（かわばた やすお）
飛鳥建設
土木事業本部 エンジニアリング部
インフラ防災グループ
部長

