

地下空洞の陥没対策に有効な限定充填工法の開発と適用

坂本 昭夫・杉浦 乾郎・石合 伸幸

わが国には石炭・亜炭鉱山廃坑、戦時中の地下壕、地下碎石場跡および廃棄された地下埋設物などの地下空洞や空間が至る所に放置されており、ときにこれらが突然崩落し、地表面や地上施設に陥没や沈下・傾斜の災害をもたらしている。東海地方では亜炭廃坑対策として充填工法が施工されている。この充填材は流動性が高いため、狭隘な箇所にも均質に充填できることが特徴であるが、空洞率が大きく広い空洞の場合には充填材が対象区域外に大量流出する課題があった。この課題を解決する技術として、充填材の流動性を制御できる限定充填工法を開発し、実工事に適用してその有効性を検証した。

キーワード：地下空洞, 陥没, 脱水ケーキ, 充填, 限定充填工法

1. 地下空洞による陥没と沈下

放置された地下空洞や地下空間を支える壁、柱あるいは天盤などの部位は、侵入した地下水に伴う乾湿などによる劣化や長期間作用する荷重によるクリープの影響によって破壊され、その影響が地表に伝播して地表面や地上の構造物に突然陥没や沈下を引き起こすことがある。また、近い将来、東海地震のような巨大地震が列島各地に襲来すると予想されているが、放置された廃坑などが大きな地震動を受けると、不安定な坑内の残柱や天盤が広範囲にわたって大崩壊を起こすことが想定される。このように地下に潜む空洞や空間は、常に住民の命や財産を脅かしており、各地で深刻な社会問題となっている。写真—1に地下空洞による陥没被害例を示す。

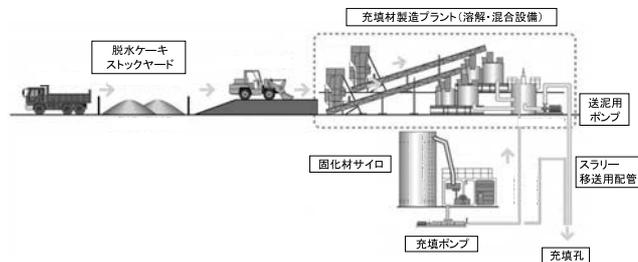


写真—1 陥没被害例（地下碎石場跡）

2. 限定充填工法の概要

限定充填工法は充填工法の応用技術である。充填工

法は、東海地方各地に残存する亜炭廃坑による陥没や沈下などの被害防止のための対策工法として、1975年に名古屋通産局の主導で開発された。充填工法に用いる充填材は、碎石工場で山砂利選別時に発生する脱水ケーキ（粘土キラ）、あるいは、けい砂工場のけい砂選別残さい（砂キラ）などの副産物を母材とし、これにセメント系固化材と水を混練りして製造する。充填材は、材料の特性により高い流動性を有することから、1つの充填孔から空洞内の遠方にまで送ることができ、また、複雑な形状の空洞であっても均質に充填できることが特徴である。充填工事では専用の充填材製造プラントを現地に設置して充填材を製造し、プラントから充填孔まで配管を通じてポンプ圧送することが多い。図—1に充填材の製造と流れを示す。

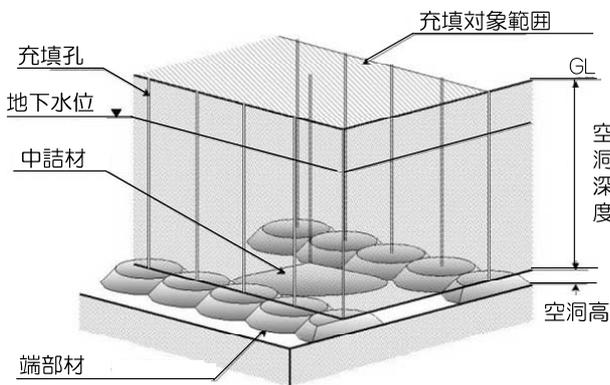


図—1 充填材の製造と流れ

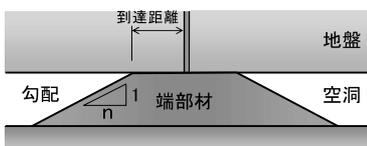
充填工法は、主に宅地開発地域の地下に空洞がある場合の対策工事として施工されてきたが、近年になり、道路や鉄道の計画地域に広く亜炭廃坑が分布する所で、直下の空洞範囲に限定した充填を行うニーズが生まれ、限定充填工法が開発された。限定充填工法は充

充填材の流動性を制御することで、対象外の空洞に充填材が大量流出するのを防止する工法である。施工手順は、最初に端部材とよぶ充填材を空洞内に注入して対象とする範囲の境界線上に連続した隔壁を形成する。その後、内部に中詰材とよぶ充填材を注入して、全体で空洞の所定の領域を充填する。図—2 にその概念図を示す。

端部材の流動性を制御するための添加剤には水ガラスと急結剤があり、それぞれの勾配は、1：5 程度（緩勾配タイプ）、1：3 程度（急勾配タイプ）が得られる。また、端部材の上面が充填孔から空洞内部で広がる到達距離は、緩勾配タイプで 4 m を、急勾配タイプで 2 m 程度を確保できていることがわかっている。連続した端部材で隔壁を形成するためには、充填孔間隔は到達距離の 2 倍以下とすることになり、コストに影響する。表—1 に限定充填工法端部材の標準性能を示す。



(a) 透視図（中詰材施工時）



(b) 端部材断面図

図—2 限定充填工法の概念図

表—1 限定充填工法端部材の標準性能

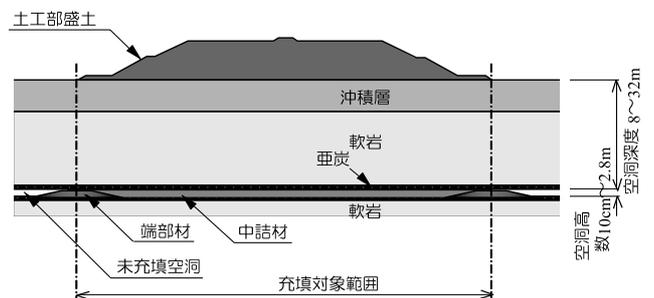
	緩勾配タイプ	急勾配タイプ
流動性制御用添加剤	特殊水ガラス	急結剤
ゲルタイム	10 秒程度	2分以内
フロー値	160～180 mm 程度	110～140 mm 程度
隔壁の勾配	1：5 程度	1：3 程度
到達距離	4 m 程度	2 m 程度
空洞高さの適用範囲	3 m 弱程度以下*	3 m 以上

*空洞内部が地下水で充填している場合

3. 緩勾配タイプの開発と施工

(1) 必要性能と開発経緯

岐阜県可児郡御嵩町の比衣地区から隣接する可児市柿田地区では、広範囲に亜炭廃坑が分布し、たびたび陥没などの被害が発生していることから、この地域を通る東海環状自動車道と可児御嵩バイパスの建設工事の計画にあたり、亜炭廃坑の陥没等による影響が懸念された。そこで（財）先端建設技術センター内に「亜炭坑施工技術委員会」が設置され、充填工事などにより対策を行うこととされた。また、充填は道路直下の空洞範囲を対象とするため、これより外側に充填材が流出することを極力制限し、確実に対象範囲の廃坑を充填することが必要とされた。これに対して、構想のレベルにあった限定充填工法について、現地の実際の亜炭廃坑を対象に実大規模の試験施工を行い、委員会での審議を経て実工事に採用された。図—3 に東海環状自動車道の土工部充填箇所の完成断面概念図を示す。



図—3 東海環状自動車道完成断面概念図（土工部充填箇所）

(2) 工法に用いる材料

緩勾配タイプの限定充填工法では、端部材の隔壁を形成するために、水ガラス（ケイ酸ナトリウム； $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ （ n ；モル比））を添加し、固化材中のセメント成分との反応によるゲル化作用で充填材の流動性を低い値に制御する。

水ガラスは一般に溶脱によって長期耐久性が低下する傾向があるため、充填材の長期耐久性に配慮した材料の選定が重要である。水ガラス系グラウトの耐久性を向上させるには、劣化原因となるアルカリ分の Na_2O の溶脱を低下させるか、またはグラウト固化体の強度を高めることが有効とされる。このため、本工法で用いる水ガラスは、前者の対策方法として、 Na_2O の含有量の少ない特殊水ガラスを用いることとした。一方、後者の対策として、固化材の量を多くする方法もあるが、本工法では固化材に微粉碎高炉スラグを混入したスラグ—セメント系固化材を用いること

とした。スラグはアルカリ塩類を含む水に対して水和物を生成して凝結および硬化反応を起こす、いわゆる潜在硬化性を持っていることから、固化材中のセメントクリンカーのアルカリ分に加え、水ガラスのアルカリ分とも反応して強度増進を図ることができるためである。この水ガラスによるスラグの凝結および硬化は、水ガラスのアルカリ分をスラグの硬化に消費させることになるため、アルカリ分の溶脱低下にも有効と考えた。表—2に緩勾配タイプ充填材の配合例を、表—3に品質目標値の例を示す。

表—2 緩勾配タイプ充填材の配合例³⁾

配合種別	単位量 (kg/m ³)						
	A 液				B 液		
	粘土キヤ	砂キヤ	特殊水ガラス	水	充てん用特殊固化材	水	
高強度仕様 (橋梁部)	端部材	360	180	48.8	595	120	120
	中詰材	360	180	24.4	575	150	150
低強度仕様 (土工部)	端部材	360	180	48.8	634	90	90
	中詰材	340	170	12.2	663	100	100

表—3 緩勾配タイプ充填材の品質目標値の例³⁾

配合種別	目標値			ブリーディング率
	フロー値	一軸圧縮強度	ブリーディング率	
高強度タイプ (橋梁部)	端部材	160 ~ 180 mm	400 kN/m ²	3%以下
	中詰材	180 mm 以上	以上	
低強度タイプ (土工部)	端部材	160 ~ 180 mm	100kN/m ²	
	中詰材	180mm 以上	以上	

(3) 実工事への適用

工事の概要は以下のようである。

工事件名：平成12年度東海環状可見亜炭坑充填工事

工事場所：岐阜県可見郡御嵩町顔戸～可見市柿田

発注者：国土交通省中部地方整備局多治見工事事務所

工期：平成13年3月16日～平成14年10月31日

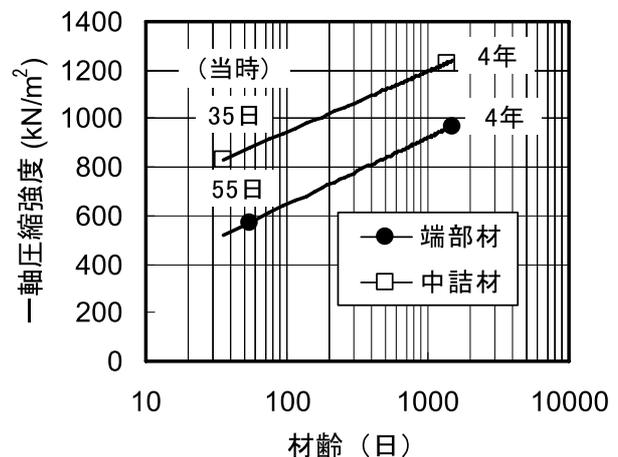
充填量：81,147 m³

充填は空洞率が約70%の残柱式の亜炭廃坑が対象とされ、空洞の深さは8～90m、空洞高さは数10cm～2.8m程度であった。また、空洞内は水が充填した状態であった。さらに、施工予定地には、上下2層で採掘された亜炭廃坑も存在した。当地の地層は、上部より沖積層、軟岩層、亜炭層と続く構成である。

実工事では確認ボーリングによる充填材採取コア(4週材齢)のすべての強度は品質目標値を満足し、また出来形としても確認ボーリングのすべてにおいて充填材と空洞天端の間に空隙がないことを確認した¹⁾。

(4) 充填材の長期耐久性の検証

実工事で施工した土工部充填材(低強度仕様)を、約4年の長期間を経過した後、コア採取し、一軸圧縮試験を行った。サンプリング位置は、施工当時の確認ボーリングを行った位置の直近である。充填材コアはきれいな棒状で採取された。また、空洞下部に存在していたと思われる堆積土砂にも充填材が脈状に入り込んで固化しており、充填工法の良い充填性も確認できた。図—4に、この採取コアの強度を、当時の確認ボーリングによる4週材齢経過後の強度からの変化として示す。図より、端部材および中詰材ともに強度は大きく増加しており、劣化の傾向は認められないことから、長期耐久性に配慮した材料の選定の妥当性を示すものと考えられた。



図—4 原位置コア供試体の長期材齢と強度(低強度タイプ)

4. 急勾配タイプの開発と施工

(1) 必要性能と開発経緯

緩勾配タイプの充填材端部材は、亜炭廃坑や地下壕などのように空洞高さが比較的低い場合は、充填孔から注入された充填材は周囲に数mの広がりにとどまるが、高さの高い大きな空洞の場合には、充填量が多くなる課題があった。急勾配タイプの限定充填工法を開発することになった契機は、宇都宮市にある大谷石採石場跡の上を通過する道路の一部が陥没し、その復旧対策として充填工事が検討されたことであった。対象位置における空洞高さは3m程度で内部に地下水が侵入していないこと、また、下盤が対象範囲外の方に傾斜しており、緩勾配タイプの充填材を用いたとしても大量に対象範囲外の空洞部分に流出すると想定された。このため、地下水のない空洞において、高さが3m以上の急勾配の隔壁が形成できる端部材を開

発することとした。

(2) 工法に用いる材料と試験施工

先に述べたように、急勾配タイプには急結剤を添加する。一般に、添加剤はセメントと水の反応でセメントの水和反応を早めて凝結時間を著しく短くする混和剤であるが、ここでは水との反応性を弱めたスラリー急結剤（水と混合して添加する粉体急結剤）とした。この急結剤はカルシウムサルフォアルミネートを主成分としているため、エトリンガイトの生成による早期の強度発現が期待できるものである。表—4に急勾配タイプ充填材の配合例を示す。

表—4 急勾配タイプ充填材の配合例

単体量 (kg/m ³)				
A液			B液	
脱水ケーキ	固化材	水	急結剤	水
450	100	701	20	100

必要性能を満足する配合を検討するために、実際の施工に近い規模を想定して、フィールドで充填材を製造および打設する試験施工を行った。試験施工では端部材による急勾配の隔壁が形成できることを確認する試験と空洞内に注入される充填材が先に注入されて急激な凝結が進行している充填材を押し広げることができることを確認するための試験を行った。写真—2に急勾配の隔壁形成を確認する試験の様子を示す。試験施工で得られた勾配は1：1.8～1：2.3であった。



写真—2 試験施工状況（急勾配隔壁形成の確認）

(3) 実工事への適用

試験施工で性能を確認した配合の充填材を大谷石採石場跡の空洞充填工事に適用した。工事の概要は以下のようなものである。

工事件名：道路保全工事（地下空洞充填）

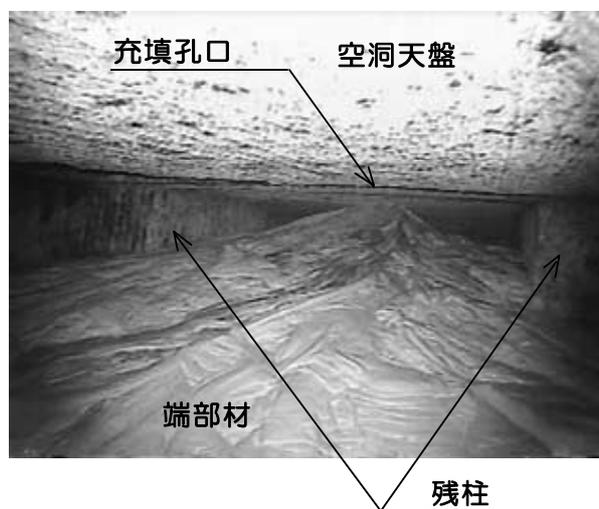
工事場所：栃木県宇都宮市

発注者：宇都宮市

工期：平成17年12月2日～平成18年3月24日

充填量：端部材 507 m³，中詰材 190 m³，計 697 m³

実工事の施工にあたっては、ボーリング孔から挿入した空洞カメラ・レーザー受発信機で端部充填材の形状を常時観察し、急結剤の添加量を調整した。その結果、4箇所の孔で測定した端部材の勾配は平均で1：2.8であった。試験施工での勾配より緩い勾配となった原因は、実工事が冬期の施工であったため、気温の低下が凝結時間に影響を与えたものと考えられる。これについては、後の室内での配合試験でその傾向を確認した²⁾。写真—3に空洞カメラで観察した坑内の端部材充填状況を示す。



写真—3 端部材充填時の坑内状況

5. まとめ

限定充填工法の開発と適用による検証を踏まえ、その成果をまとめると次のようになる。

- 1) 限定充填工法は、端部材の連続充填による閉塞した隔壁の形成と、その内側の中詰材の組み合わせにより、一定領域の空洞充填が可能である。
- 2) 限定充填工法には添加剤の種類によって、2つのタイプを使い分けることができる。1つは空洞高さが比較的低い場合に適合する水ガラスを添加する緩勾配タイプで、充填材の到達距離が大きいため、充填孔間隔を大きくできる。もう1つのタイプは空洞高さが比較的高い場合に適合する急結剤を添加する急勾配タイプである。充填孔間隔を小さく取る必要があるが、端部材による隔壁を急勾

配とすることができる。

- 3) 緩勾配タイプの充填材では水ガラスを添加するが、固化材にスラグセメント系固化材および水ガラスに特殊水ガラスを用いることで長期耐久性を確保できる。
- 4) 急勾配タイプの端部材は塑性状態となった後も急激に流動性が低下し続け、また急結剤の添加量および環境温度により流動性は大きく変動するため、施工に際しては時間管理を十分に行い、また、冬期施工の場合は端部材の流動性低下に配慮した急結剤添加量の設定が必要である。

最後に、東海環状可児亜炭坑充填工事に限定充填工法を適用するにあたり、国土交通省中部地方整備局、同多治見工事事務所（現 多治見砂防国道事務所）、(財)先端建設技術センター、亜炭坑施工技術委員会の方々には多大なるご指導とご助言をいただきました。また、急結剤を用いた限定充填工法を大谷石砕石場跡の充填工事に適用するにあたり、宇都宮市建設部道路維持課の方々にはご理解とご指導をいただきました。以上の皆様に心よりお礼を申し上げます。

JICMA

《参考文献》

- 1) 坂本昭夫・杉浦乾郎・山田紀利・岩城圭介：地下空洞限定充てん工法の開発と施工，土木学会論文集F，62 [3] pp.546-557 (2006.8)
- 2) 坂本昭夫・岩城圭介・杉浦乾郎・石合伸幸・和田幸二郎・岩城圭介：急結剤を用いた限定充填工法用充填材の開発，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集，pp.867-868 (2006.9)
- 3) 国土交通省中部地方整備局多治見工事事務所：平成12年度東海環状可児亜炭坑充填工事土木工事追加特記仕様書，pp.4-5 (2000)

【筆者紹介】

坂本 昭夫 (さかもと あきお)
飛鳥建設㈱
中日本土木支社
名古屋土木事業部
担当部長



杉浦 乾郎 (すぎうら けんろう)
飛鳥建設㈱
中日本土木支社
名古屋土木事業部
所長



石合 伸幸 (いしあい のぶゆき)
飛鳥建設㈱
中日本土木支社
名古屋土木事業部
課長



建設の施工企画 2006年バックナンバー

平成18年1月号(第671号)～平成18年12月号(第682号)

1月号(第671号)
夢特集

5月号(第675号)
施工現場の安全特集

10月号(第680号)
情報化施工とIT特集

2月号(第672号)
環境特集 温暖化防止に向けて(大気汚染防止・軽減)特集

6月号(第676号)
リサイクル特集

11月号(第681号)
ロボット・無人化施工特集

3月号(第673号)
環境特集 環境改善(水質浄化・土壌浄化)

7月号(第677号)
防災特集

12月号(第682号)
基礎工事特集

4月号(第674号)
特集 品確法 公共工事の品質確保

8月号(第678号)
標準化特集

■体裁 A4判
■定価 各1部840円
(本体800円)

9月号(第679号)
維持管理・延命化・長寿命化特集

■送料 100円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>