

限定充填工法の急勾配隔壁を形成する充填材の開発と適用

Development and Application of Filling Materials Forming Outer Walls with Steep Inclinations for Limited Area Filling Method

坂本昭夫 ^{*1}	杉浦乾郎 ^{*2}	石合伸幸 ^{*2}
Akio Sakamoto	Kenrou Sugiura	Nobuyuki Ishiai
和田幸二郎 ^{*2}	脇田昌彦 ^{*3}	岩城圭介 ^{*4}
Koujirou Wada	Masahiko Wakita	Keisuke Iwaki

【要旨】

近年、広範囲に空洞が分布する地域における道路や鉄道の陥没・沈下対策として、対象とする空洞範囲のみを充填する限定充填工法が施工されている。本工法では対象範囲外に充填材が大量流出することを防止するために、これまでは水ガラスを添加し、そのゲル化作用によって充填材の流動性を制御していた。この充填材は空洞内に注入すると側面が1:5程度の勾配となる。亜炭廃坑のような高さが1~2m程度の空洞内に注入した場合、そのすその広がりには数mにとどまるが、地下採石場跡のような高さの高い空洞に適用すると大量の充填材が必要になる。この課題に対して、充填材への添加剤を急結剤とすることにより固化材の水和反応の促進で急勾配の隔壁を形成する充填材を開発し、実工事へ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 充填工法 限定充填工法 急結剤

1. はじめに

充填工法は、東海地方各地に残存する亜炭廃坑が原因で発生す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技術である^{1),2),3)}。充填工法に用いる充填材は、砕石工場で山砂利選別時に発生する脱水ケーキ（以下、脱水ケーキとよぶ）、あるいは、けい砂工場のけい砂選別残さいなどのリサイクル材料を母材とし、これにセメントを主成分とする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最大の特徴である。充填工事では充填する空洞の規模に応じた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する。プラントから充填孔までの充填材の移送は、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。

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、道路や鉄道が計画される地域に広範囲に亜炭廃坑が分布する所で施設直下の空洞範囲に限定した充填を行うニーズが生まれたことを受け、限定充填工法を開発し、実施工に展開している。限定充填工法は充填材の流動性を制御することで、対象範囲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、対象とする空洞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。

これまでの限定充填工法の充填材は、表-1の配合例

1. 名古屋支店土木部 2. 名古屋支店長湫充填作業所 3. 関東土木支店館町作業所 4. 防災R&Dセンター技術研究所

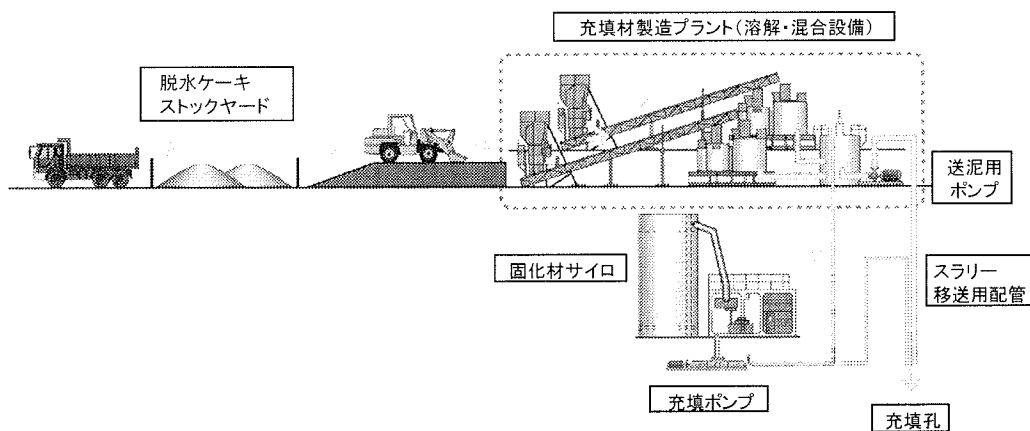


図-1 充填材の製造と流れ

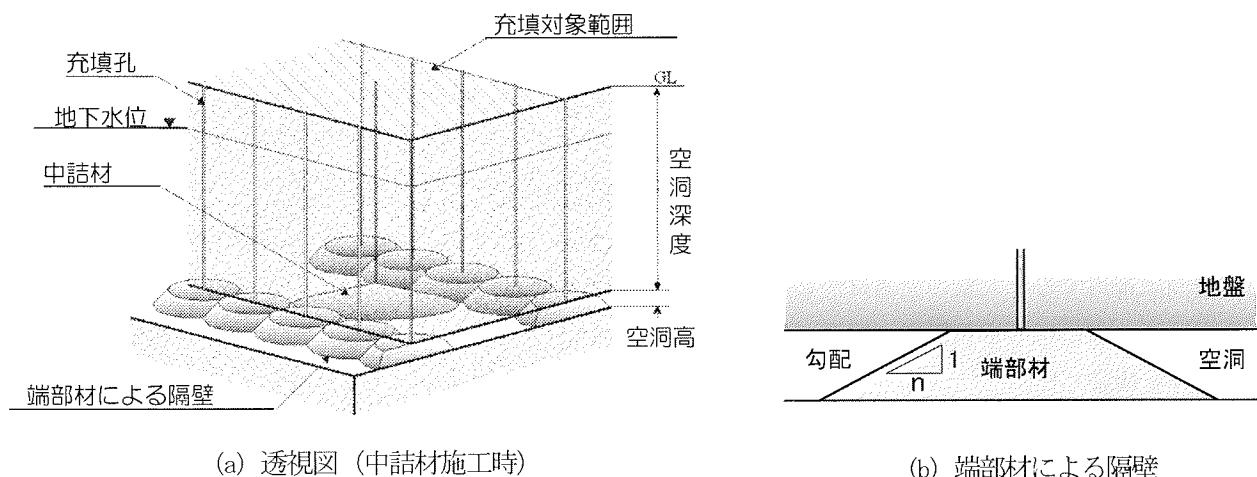


図-2 限定充填工法の概念図

表-1 緩勾配タイプの充填材の配合例⁹⁾

配合種別		単位量 (kg/m ³)				
		A液			B液	
		脱水ケーキ	特殊水ガラス	水	充填用特殊固化材	水
高強度タイプ	端部材	540	48.8(40l)	595	120	120
	中詰材	540	24.4(20l)	575	150	150
低強度タイプ	端部材	540	48.8(40l)	634	90	90
	中詰材	510	12.2(10l)	663	100	100

(注) A液とB液は別々に充填孔付近まで移送し、スタティックミキサにより連続混合して空洞内に注入する。

のように、水ガラスを添加したものである。このうちの端部材は、内部が地下水で満たされた高さ 3m 弱程度までの空洞であれば、適度な流動性低下により、側面勾配を 1:5 程度とすることができる^{4),5),6),7)}。このため、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端部材による隔壁のすそを数 m の広がりにとどめることができるが、高さの高い大規模な空洞の場合には、隔壁を形成するまでに大量の充填材が必要になる。

わが国には地下採石場のように、大きな空洞が放置されている場所がいくつかあり、ときに大規模な陥没事故が発生している。このような空洞に対しても、亜炭廃坑や地下壕のように、限定充填工法でその一部を効率よく充填することが求められるようになった。そこで、上記課題を解決するために、充填材の流動性低下について即効性があり、さらに効果が大きい吹付けコンクリート用急結剤を水ガラスに替えて採用することにした。以下、水ガラスを添加した従来の充填材を緩勾配タイプ、急結剤を添加した新しい充填材を急勾配タイプとよぶ。

ここでは、急結剤を添加することで急勾配の隔壁を形成する急勾配タイプ充填材の開発と実工事への適用について報告する。

2. 急勾配タイプの充填材に用いる材料

表-2に急勾配タイプの充填材端部材に添加する急結剤の諸元の例を示す。急結剤は、一般に、セメントおよ

び水との反応で、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。表に示した急結剤は、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）で、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-3に急勾配タイプの端部材の配合例を示す。ここに、緩勾配タイプの充填材では、A液を脱水ケーキ、水ガラスおよび水の混合液、B液をセメントミルクとして製造し、この両液を空洞注入直前に混合していたが、急勾配タイプの端部材では、A液を脱水ケーキ、固化材および水の混合液、B液を急結剤と水の混合液として製造し、最後に混合する。このように充填材の製造過程が緩勾配タイプと異なるが、充填孔までの両液の移送や空洞内への注入などの施工方法は基本的に同じである⁹⁾。

3. 性能確認の試験

3.1 必要とする基本性能

性能確認の試験では、急勾配タイプの端部材として必要な基本性能を、空洞高さが3m以上で、内部に地下水が浸入していない状況下でも、打設したときの側面の勾配が1:2.5以下となることを目標とした。この目標を満足する配合を検討するために、事前に配合を変化させた充填材の小規模な打設試験を行い、性能確認試験で検討する配合を選定した。

次に、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、端部材が実大スケールに近い条件下で急勾配の隔壁が形成できることを確認することを目的とした。また、急結剤により急激な凝結が進むことから、空洞内に注入される充填材が、先に注入された充填材を連続し

表-2 急結材の諸元の例

主成分	密度	形態	品質	備考
カルシウムサルフォアルミネート	2.65~2.95	灰白色粉末	JSCE-D-102-2001に適合	市販品

表-3 急勾配タイプの端部材の配合例

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

て押し広げることができることを確認する必要もあった。このときの空洞内での充填孔から横方向への移動量を確認項目として、目標値を2m以上とした。図-3に試験施工における端部材の目標性能の概念を示す。

3.2 試験施工の配合と材料試験

表-4に試験施工の配合を示す。ここに、固化材は特殊土用固化材を用いた。急結剤は表-2に示した急結剤を用いた。表-5に充填材のフレッシュ性状の試験結果を示す。表-5より、急結剤添加量が多いほどゲルタイムは短く、フロー値も小さくなる傾向があり、また短い時間のなかで急激に流動性が低下することがわかった。このとき、配合1のフロー値は時間経過による変化は現れなかったが、触診では急激な流動性低下が感じられ、また、2分経過後には充填材の湿気が消えたことから、凝結が進んでいるものと考えられた。

3.3 勾配試験

端部材の勾配を検証する試験（以下、勾配試験とよぶ）では、高さ3mの空洞を想定し、その1/2スケールとして、屋外で高さ1.5mに設置した配管を通して充填材を吐

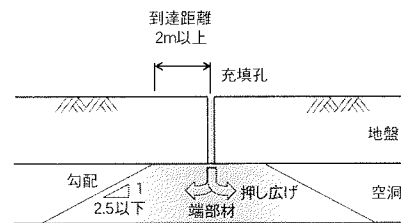


図-3 試験施工における端部材の目標性能

表-4 試験配合

配合No.	単体量 (kg/m ³)				
	A液			B液	
	脱水ケーキ	特殊土用固化材	水	急結剤	水
1	450	100	701	20	100
2	450	100	703	15	100

表-5 フレッシュ性状の試験結果

配合No.	ゲルタイム (秒)	フロー値 (mm)							材料温度 (°C)
		1分	1.5分	2分	4分	6分	7分	11分	
1	44.3	119.0	-	-	119.0	-	-	-	12.0
2	77.7	-	131.0	-	127.0	-	121.0	-	12.0

(注)ゲルタイムはカップ倒立法に、フロー値はフロー試験（テーブルフロー；JIS R 5201）による。

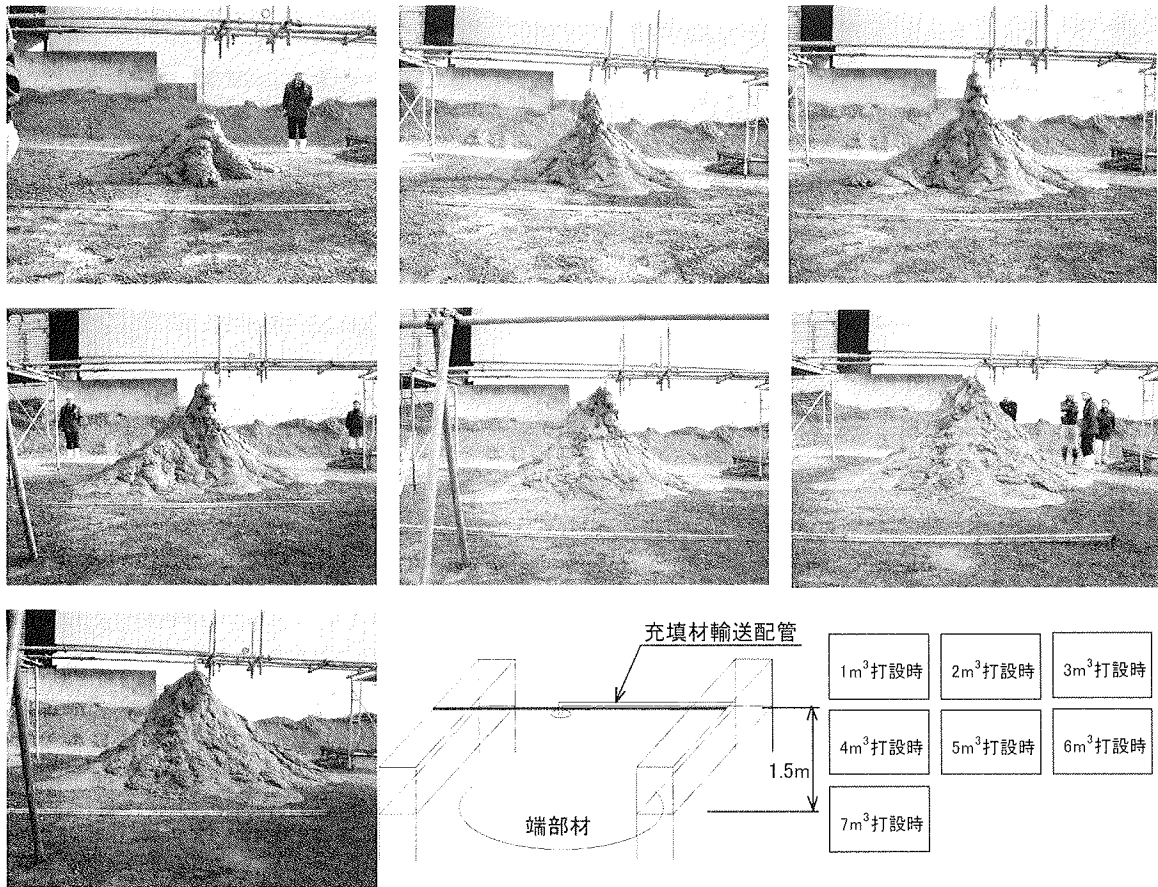
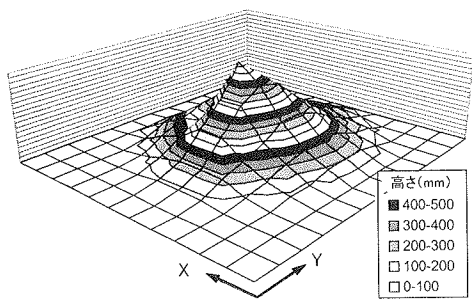
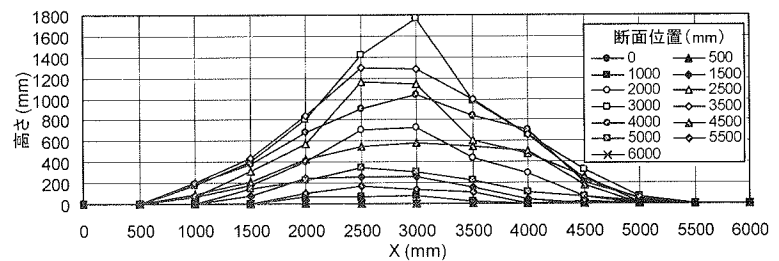


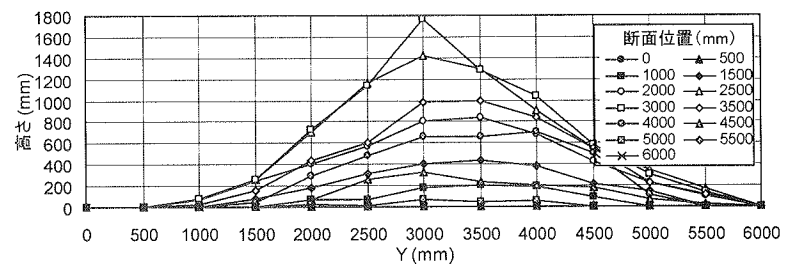
写真-1 勾配試験状況 (配合1)



(a) 3D イメージ



(b) X 方向断面



(c) Y 方向断面

図-4 勾配試験最終形状 (配合1)

出口から地表に落下させたときの側面勾配などの全体形状を測定した。なお、実際に 3m の高さの充填材を施工する場合に要する時間と一致するように、施工速度を $1/8$ ($=1/2^3$) に設定した。写真-1 に配合 1 の勾配試験の状

況を定点から撮影した状況を示す。また、図-4 に配合 1 の打設完了後に測定した形状を示す。これらの勾配試験の結果、配合 1 および配合 2 の端部材側面勾配は、それぞれ平均で $1:1.8$, $1:2.3$ 程度となり、試験施工として

の勾配の目標値である 1 : 2.5 以下を満足した。

3.4 押し広げ試験

次に、空洞内での端部材の押し広げ性を検証する試験（以下、押し広げ試験とよぶ）を行った。押し広げ試験では、高さ 30cm、一辺の長さ 2m、上下面に板を張り、側面を隣接 2 面閉塞・2 面開放として内部を空洞に模した試験装置を作成し、閉塞側のコーナーから充填材を内部に圧送した。図-5 に試験装置の概念図を、写真-2 に配合 2 の試験状況を示す。その結果、配合 1 および配合 2 ともに、吐出口に取り付けた圧力ゲージの読み取りで 0.020~0.025Mpa にとどまる無理のない程度の圧力で、試験装置の長さ 2m を超えて外まで充填材を押し出すことができた。このことから、実際の空洞内においても 2m 以上の押し広げが可能であると考えられた。

以上の試験施工の結果、押し広げ性の目標値を満足し、また端部材をより急勾配とすることができる配合 1 が適すると考えられた⁹⁾。

4. 実工事への適用と検証

4.1 実工事の施工

試験施工で性能を確認した急勾配タイプの端部材の配合 1 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 507m³、中詰材 190m³、計 697m³

この工事は、道路直下に限定した範囲を充填する工事

で、対象空洞の高さは高い箇所でも約 3m 程度と、同採石場跡としては低い部類に属する空洞であった。充填材強度の目標値は 100kN/m² 以上と規定されていた。空洞は地下水の浸入がなく、また、底面が傾斜しているため、緩勾配タイプの端部材では、充填材が対象外に流出する距離は約 15m にも及ぶと想定されていた。

図-6 に充填完了後の出来形平面図を示す。図の左下が採掘されていない境界の壁、右下が廃石やコップなどが詰まっている箇所、図の上方に向かって底面が下に傾斜した広がりを持つ空洞内部の状況で、この壁と廃石・コップで囲われた一角を充填する工事であった。

施工にあたっては、写真-3 のように、ボーリング孔から空洞内に挿入した空洞カメラで空洞内の充填材の流動状況を直接確認しながら施工し、また同じ孔から挿入したレーザー発信・受信機により、空洞内で高さを変化させて水平に測距を行い、最初に施工する端部材の勾配を測定した。

充填の施工を開始したところ、端部材の流動性低下時間が試験施工のときと比べて遅れることが判明した。これは、施工期間中の最高気温が 2℃~10℃程度にとどまる冬期の施工であり、充填材の材料温度も試験施工の 3 日間の温度は約 12℃であったのに対して、実施工の期間中は約 8℃であったことから低温の影響と考えられた。このため、空洞カメラによる充填状況の観察により、流動性低下の時間遅れが生じないように、急結剤の添加量を増加する方向で調整しながら施工した。図-7 に気温の変動ともなって急結剤添加量を変化させたときの記録を示す。図より、日最高気温が 6℃を下回る場合に、特に添加量が急増していることがわかる。

次に、レーザー測距により端部材の勾配を測定した結

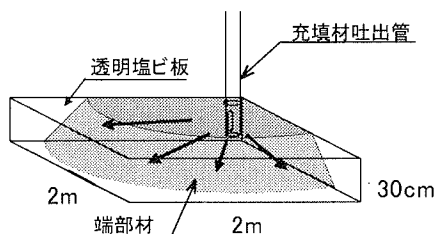


図-5 押し広げ試験装置

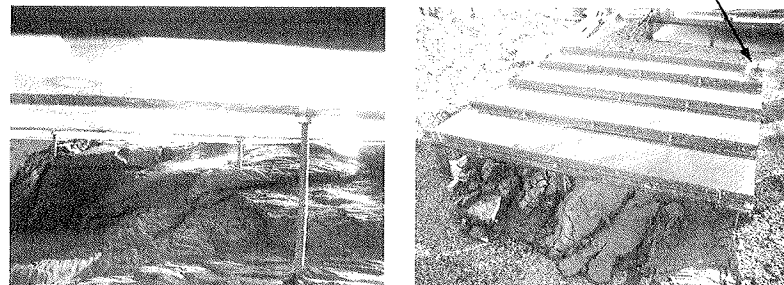


写真-2 押し広げ試験状況（配合 2）

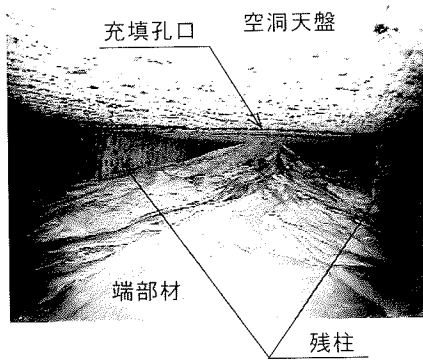


写真-3 空洞カメラの観察による坑内の端部材充填状況

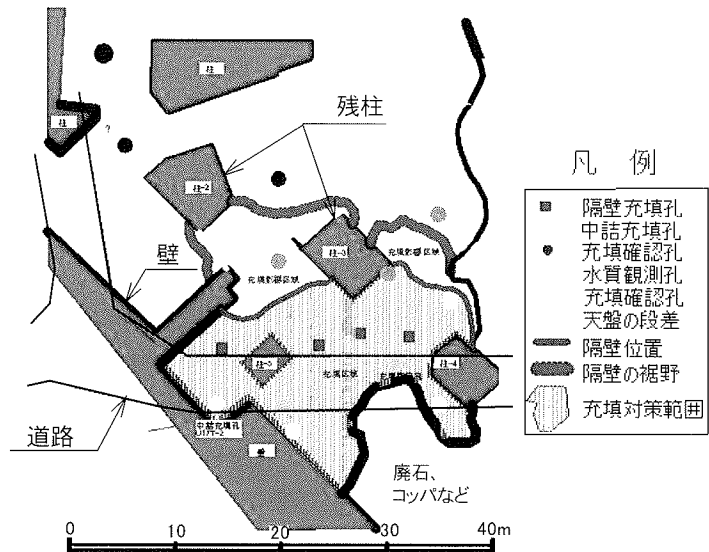


図-6 充填出来形平面図

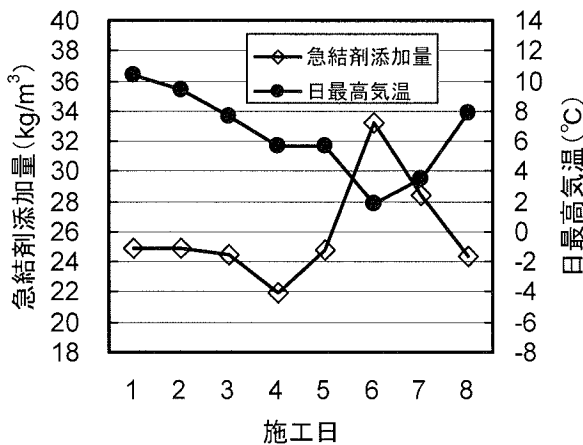


図-7 気温変動による急結材添加量の変化

表-6 隔壁勾配の測定結果

測定孔番号	平均勾配
1	1:2.25
2	1:3.49
3	1:2.75
4	1:2.75
単純平均	1:2.8

果を表-6に示す。表より、測定した4箇所の勾配は1:2.25~1:3.49の範囲にあり、単純平均では1:2.8であった。これは試験施工で得られた配合1の勾配の約1:1.8より緩やかな勾配であり、温度の影響により充填材の流動性低下時間が遅延したことが1つの原因と考えられた。

4.2 室内試験における温度の影響の検証

端部材の流動性低下が遅延した原因を温度の影響と考えたが、充填施工完了後にこのことを検証する目的で低温環境下における充填材のフレッシュ性状について検討する室内試験を行った。室内試験では、A液の温度を6.5°C、10.6°Cおよび20.2°Cの3ケースとし、それぞれに急結剤添加量を20kg/m³、25kg/m³、30kg/m³、40kg/m³と変化させた。図-8にA液温度と急結剤添加量によるゲルタイムの測定結果を、図-9にA液温度と急結剤添加量の組み合わせ別のフロー値の経時変化を、また図-10にフロー値が一定値に低下するまでの所要時間を示す。ここに、図-9に示した曲線は、測定値の点の他に、

ゲルタイムでのフロー値を300mm、15分後のフロー値を110mmとした点を通るスムーズラインである。図-8より、10.6°Cおよび6.5°Cの場合は20.2°Cに比べて、温度が低いほどゲルタイムが遅れ、急結剤添加量を多くすることでゲルタイムの遅れを小さくできることがわかった。次に、図-9および図-10より、最終的にフロー値は120mm程度に収束する傾向であったものの、10.6°Cおよび6.5°Cの場合は温度が低いほど、また急結剤添加量が少ないほど、一定値に収束するまでの時間の遅れがみられた。特に、添加量20kg/m³の場合は、25kg/m³に比べて遅れが顕著であった。以上により、急結剤添加量20kg/m³では10°C程度以下の温度の場合に適合せず、25kg/m³以上とする必要があるといえ、実施工で添加量を増加させたことの妥当性を裏付けた⁹⁾。

しかし、図-8よりわかるように、たとえば添加量20kg/m³、10.6°Cのゲルタイムから、6.5°Cとなることによるゲルタイムの遅れは急結剤添加量を増加させたとしても完全に補うまでには至らなかった。これが1つの原

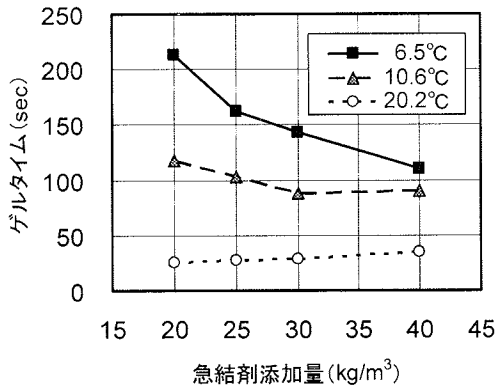


図-8 急結材添加量とA液温度によるゲルタイム

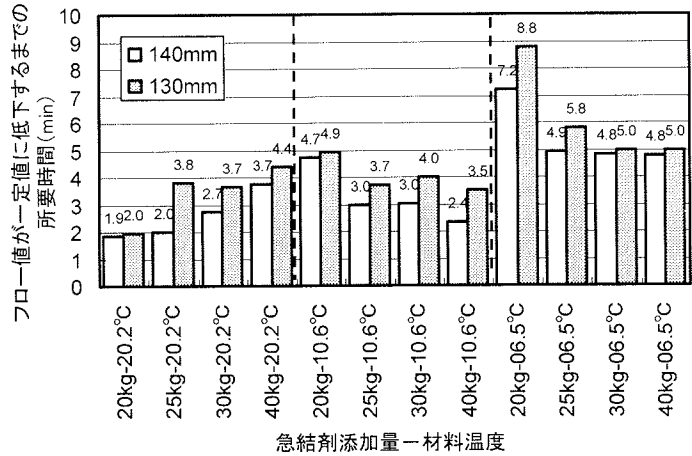


図-10 フロー値が一定値に低下するまでの所要時間

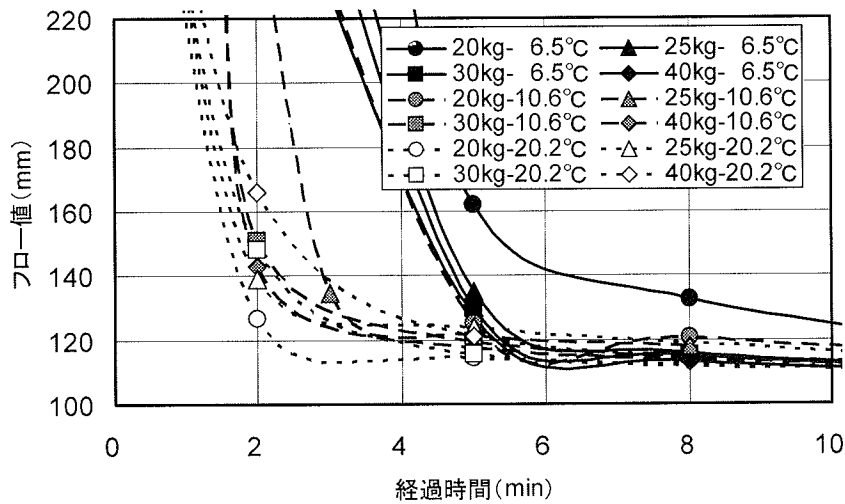


図-9 フロー値の経時変化

因となり、先に述べたように、実工事での端部材の勾配が試験施工での勾配より緩やかであったものと考えられる。また、試験施工の場合、充填速度を遅く設定していたため、充填材の吐出の勢い（運動エネルギー）も小さく、横に広がらずに立ち上がりやすかったと考えられる。

以上により、急勾配タイプの端部材の勾配は、実施工の結果を重視し、1:3程度を標準的な性能と考える。

5. まとめ

限定充填工法の従来の緩い流動性低下特性を改善した急勾配タイプの充填材端部材の開発と実工事への適用を踏まえ、得られた知見を以下に示す。

- ① 急結剤を充填材に添加することにより、限定充填工法の端部材による隔壁を急勾配とすることができる。急結剤の添加量および環境温度により勾配は変化するが、配合 1m³あたりの添加量が 20~25kg でおお

むね 1:3 程度の勾配となる。またそのときの到達距離は 2m（直径 4m）を確保できる。

- ② 急結剤を添加した端部材は、急結剤の添加量により、塑性状態となるゲルタイムおよびその後の流動性低下を表すフロー値は大きく変化する。
- ③ 急結剤を添加した端部材の 10°C 程度以下の冬期の施工においては、端部材の流動性低下時間が遅延する傾向があることから、低温の影響を考慮した急結剤添加量の設定が必要である。
- ④ 限定充填工法を施工する場合は、空洞状況などを考慮して、緩勾配タイプと急勾配タイプを使い分ける必要がある。表-7にこの2つのタイプの性能の目安を示す。

また、今後の課題として、さらに急勾配となる隔壁のニーズが生じると思われる。これは急結剤添加量を増量することである範囲までは可能と考えられる。ただし、

表一七 限定充填工法用端部材の性能の目安

	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	吹付けコンクリート 用急結剤
ゲルタイム	10秒程度	2分以内
フロー値	160～180mm程度	110～140mm程度
隔壁の勾配	1:5程度 ※	1:3程度
到達距離	4m程度	2m程度以上

※ 内部が地下水で充填した高さが3m弱程度までの空洞の場合

ゲル化後の充填材の流動性は今以上に急低下するような状態変化を示すと思われるため、材料の温度管理や充填材の混合から空洞内に注入されるまでの時間管理をより適切に行う必要がある。また、急結剤の改良など、材料面での検討も必要と考える⁹⁾。

謝辞

限定充填工法の急勾配隔壁を形成する充填材端部材を現場に適用するにあたり、ご理解およびご指導を賜りました宇都宮市建設部道路維持課の関係各位に心よりお礼を申し上げます。

【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，一空洞による災害防止と地盤安定化のための技術一，日本充てん協会，2004。
- 2) 川本眺万・藤井紀之：産業副産物活用の道を開いた地下空洞充填工法，充てん，第45号，pp.1～10，2004。
- 3) 藤井紀之・小松幹雄・杉浦乾郎：東海地方の亜炭採掘跡の調査と対策事例，基礎工，No.375，pp.66～71，2004.10。
- 4) 杉浦乾郎・石合伸幸・岩瀬彰・白畑智幸・竹内健一・岩城圭介：亜炭廃坑対策に用いる新しい充填工法の提案，とびしま技報（土木），No.51，pp.109～116，2001.11。
- 5) 小木曾繁・青山秀樹・栗山隆之・杉浦乾郎・石合伸幸・和田幸二郎・山田紀利・宮沢義博・岩城圭介：地下空洞陥没対策に用いる限定充填工法の開発と施工，第38回地盤工学研究発表会講演集，pp.647～648，2003.7。
- 6) 杉浦乾郎・山田紀利：東海環状可児亜炭坑充填工事を終えて，充てん，第44号，pp.8～17，2003。
- 7) 杉浦乾郎・石合伸幸・山田紀利・坂本昭夫：地下空洞陥没対策に有効な充填工法の開発，電力土木，No.308，pp.105～109，2003.11。
- 8) 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。
- 9) 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，2006.9。

Summary When roads and railroads are built in areas where underground cavities are distributed over a wide range, we have filled up such cavities by the limited area filling method as measures to prevent collapse and subsidence. We have added silicate grout to the filling material so far to prevent it from flowing out into other cavities, while controlling its fluidity by the gel action. The inclination of the sides of the fill was around 1:5 when injected in a cavity. This value posed no problem while the cavities are small, such as abandoned lignite mines, but large quantities of filling materials were necessary for big cavities such as underground quarries. To cope with this problem, the authors developed a filling material containing an accelerator to accelerate cement hydration, thereby forming outer walls with a steep inclination. The material was applied to actual construction to verify its effectiveness.

【Keywords】 underground cavity, collapse, cavity filling method, limited area filling method, accelerator