

シールド工事におけるカーボンニュートラル技術に関する開発

株式会社 大林組 正会員 ○小枝 千尋 正会員 中井 誠
正会員 アフシャニ アリレザ 正会員 三浦 俊彦
フェロー 新村 亮
株式会社 タック 吉田 智哉 吉田 修康

1. はじめに

2020年10月に政府は、気候変動対策として、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「カーボンニュートラル」を目指すことを宣言している。建設工事においても、二酸化炭素(以下、CO₂)の排出量削減・固定化によるカーボンニュートラル実現に向けての取組みが求められている。

シールド工事では、RCセグメントや、セグメント背面と地山との間隙に充填する裏込め注入材に、製造時にCO₂排出を伴うセメント系材料等を使用している。こうした中、シールド工事におけるカーボンニュートラルに向けた取組みとして、RCセグメントに関しては、当社が開発した低炭素型コンクリートを使用したセグメント¹⁾の開発を行っている。加えて、裏込め注入材に関しては、有機物を炭化させたバイオ炭(もみ殻炭および木材炭等)を混合し、炭素を地中に貯留・固定化することでCO₂の排出量を削減する技術の開発を進めている。本稿では、これらシールド工事におけるカーボンニュートラルへの取組みのうち、裏込め注入材にバイオ炭を混合した材料の性能試験結果と製造方法の検討状況について報告する。

2. 裏込め注入材のCO₂排出量

表-1に裏込め注入材の標準配合例を示す。シールド工事における裏込め注入材とは、A液とB液を注入直前に混合し、セグメント背面と地山との間隙部(図-1)に充填することで、地山の緩みや沈下を防止するものである。一般に、この間隙は、トンネル外径が大きいくほど厚みや外周長が増すために、裏込め注入材料の使用量は増大する。ここで、表-1に示す裏込め注入材の標準配合例と使用材料のCO₂排出原単位を基準として、トンネル掘削径と掘削延長の相違による裏込め注入材料のCO₂排出量を試算すると表-2に示す通りとなる。近年、大断面・長距離施工のシールドトンネルが増加するなか、裏込め注入材の使用に起因するCO₂排出量を低減することは、大きな課題のひとつであると言える。

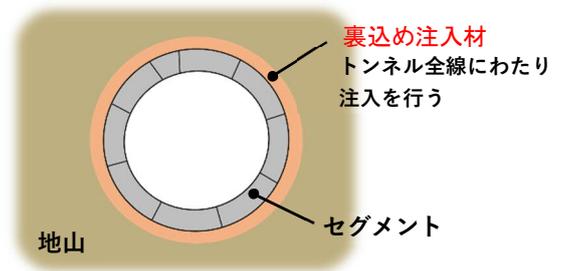


図-1 シールドトンネル横断面図

表-2 裏込め注入によるCO₂排出量の試算

トンネル延長 トンネル外径	1,000m	2,000m	3,000m
Φ2.0m (裏込め注入厚=80mm)	60 t	110 t	170 t
Φ6.0m (裏込め注入厚=90mm)	190 t	370 t	560 t
Φ10.0m (裏込め注入厚=125mm)	430 t	870 t	1300 t

参考：家庭1世帯あたりのCO₂排出量は年間2.59t
(令和4年度排出実態統計調査：環境省)

表-1 標準配合例と使用材料のCO₂排出原単位

材料名	A液(1.0m ³)			B液(0.05m ³)		CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
	硬化材 (高炉セメント B種) (kg)	助材 (kg)	安定剤 (kg)	混練水 (L)	凝結剤 (L)	
標準配合例	235	30	2.5	909	50	+108.32
CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	458.7	112	200	-	38.1	

3. バイオ炭使用によるCO₂排出削減の考え方

木材やもみ殻などの生物由来の有機物資源（バイオマス）は、植物としての生育過程で大気中のCO₂を吸収し、炭素を貯留する。しかし、自然界ではCO₂の吸収は永続的なものではなく、燃焼や腐敗などの分解によって再びCO₂として大気に排出される（図-2）。本稿におけるカーボンニュートラルに向けた取り組みは、木材やもみ殻が燃焼・腐敗する前に炭化させ、炭素を固定したバイオ炭（図-3）を裏込め注入材に使用することで、前項で示した裏込め注入材によるCO₂排出量の削減を実現するものである。なお、今回の試験で使用したバイオ炭のCO₂排出原単位は、以下の算出式²⁾で計算する。

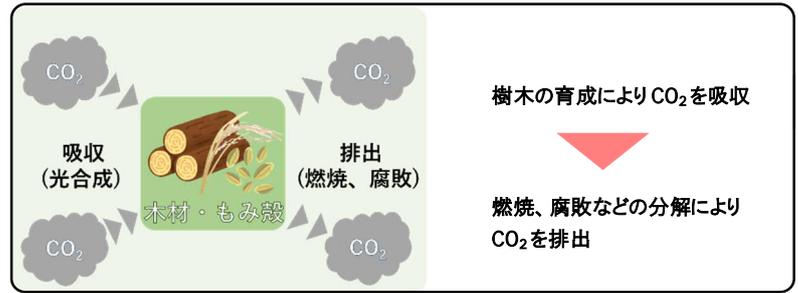


図-2 自然界における有機物のCO₂排出の仕組み

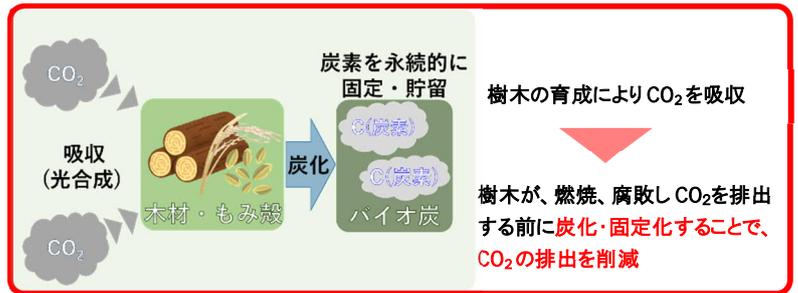


図-3 バイオ炭によるCO₂貯留・固定化の仕組み

CO₂排出原単位 (kg-CO₂/t)

= 炭素含有率 × 炭素残存率 × 44/12 (変換係数)

ここに、炭素含有率：個別の成分分析結果による値

炭素残存率：J-クレジットの方法論による

100年後の炭素残存率

表-3に示す通り、排出原単位は、もみ殻炭で-1,600 (kg-CO₂/t)、木材炭で-2,870 (kg-CO₂/t)となる。

表-3 バイオ炭のCO₂排出原単位算出

	炭素含有率	炭素残存率	変換係数 44/12	CO ₂ 排出原単位 (t-CO ₂ /t)	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)
もみ殻炭	0.49	0.89	3.67	-1.60	-1,600
木材炭	0.88	0.89	3.67	-2.87	-2,870

4. 性能評価試験方法および試験結果

前述したように、シールド工事に使用する裏込め注入材は、製造時にCO₂排出を伴うセメント系硬化材等を使用している。本試験は、裏込め注入材にCO₂排出削減効果のあるバイオ炭を混合することで、裏込め注入材によるCO₂排出量を実質0にする、カーボンニュートラルの実現を試みるものである。表-4に裏込め注入材の目標性能値を示す。バイオ炭としてもみ殻炭（写真-1）および木材炭（写真-2）を採用し、それらを混合した裏込め注入材が、目標性能を満足するか確認するため性能試験を行った。



写真-1 もみ殻炭



写真-2 木材炭

表-4 裏込め注入材目標性能値

項目	目標性能			
	A液		A液+B液	
	フロー値直後	ブリーディング率 1時間	ゲル化	一軸圧縮強度 28日
基準	タック自社基準	シールド可塑性注入工法技術マニュアル ³⁾		
目標値	400±100mm	5%以内	20秒以内	2.0N/mm ²

4-1. もみ殻炭添加試験

(1) 試験方法

もみ殻炭を添加した試験配合表および性能試験結果を表-5に示す。このうち、もみ殻炭の配合量は、裏込め注入材の標準配合例に対し、配合①は28kg/m³とし、配合②は56kg/m³とした。これらいずれの配合も、A液全体量が1.0m³となるよう混練水を減少させ調整した。なお、配合②においては、粉体量の増加および、混練水の減少によりフロー値の低下が見込まれるため、安定剤の添加量を、標準配合例の2.5kg/m³から5.0kg/m³に増加させた。

(2) 試験結果

性能評価試験の結果、配合①、②ともに目標性能を満足することができた。しかし、配合①、②ともに、CO₂排出量の削減は可能であるものの、排出量実質0（カーボンニュートラル達成）には至らなかった。このため、カーボンニュートラルを達成するには、今以上にもみ殻炭の混合割合を増加させる必要がある。しかしながら、もみ殻炭の混合割合を増加させた場合には、フロー値が性能基準値下限（300mm）を逸脱することを、配合②の試験結果から容易に推察できる。このため、次に、もみ殻炭よりもCO₂固定化効果の高い木材炭を使用して性能評価試験を実施するものとした。

表-5 試験配合表および性能試験結果（もみ殻炭添加）

材料名	配 合						性能試験結果				CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
	A液(1.0m ³)					B液 (0.05m ³)	フロー値 (mm)	ブリー ディング率 (%)	ゲル タイム (秒)	一軸圧縮強度 (N/mm ²) 28日	
目標性能	-	-	-	-	-	-	400±100	5%以内	20秒以内	2.0	
標準配合例	235	30	2.5	909	-	50	400	0.5	10	2.03	+108.32
配合①	235	30	2.5	890	28	50	360	1.0	9	2.54	+66.54
合否	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	△
配合②	235	30	5.0	869	56	50	310	0.5	9	3.34	+24.73
合否	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	△

4-2. 木材炭添加試験

(1) 試験方法

木材炭を添加した試験配合表および性能試験結果を表-6に示す。まず、試験配合ケースを決定するため、予備配合試験として、標準配合例に対し木材炭の添加と混練水の調整のみを実施する配合③の試験を行った。この結果、フロー値およびゲルタイムにおいて目標性能を確保できなかった。このため、これらの改善を目的に、粉体量（硬化材+助材）の再調整を実施したうえで、安定剤添加量を3.0~10.0kg/m³の範囲で変化させ配合④~⑥の試験を実施した。

(2) 試験結果

配合④~⑥のいずれの試験配合も目標性能を満足するとともに、カーボンニュートラルを超えたCO₂排出量の削減が可能となることを確認できた。一方で、これら配合試験の一軸圧縮強度（σ₂₈）試験結果をみると、目標性能を25~50%程度上回る結果が得られている。今後は、単位セメント量の減少を含め、最適配合の確立を目指して、追加の試験を実施する予定である。

表-6 試験配合表および性能試験結果（木材炭添加）

材料名	配 合						性能試験結果				CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
	A液(1.0m ³)					B液 (0.05m ³)	フロー値 (mm)	ブリー ディング率 (%)	ゲル タイム (秒)	一軸圧縮強度 (N/mm ²) 28日	
目標性能	-	-	-	-	-	-	400±100	5%以内	20秒以内	2.0	
標準配合例	235	30	2.5	909	-	50	400	0.5	10	2.03	+108.32
配合③ (予備試験)	235	30	2.5	848	50	50	270	0.5	22	2.83	-24.73
合否	-	-	-	-	-	-	×	○	×	○	○
配合④	285	20	3.0	835	50	50	300	0.5	11	2.99	-6.97
合否	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○
配合⑤	285	20	5.0	834	50	50	320	0.5	12	2.84	-6.59
合否	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○
配合⑥	285	20	10.0	830	50	50	390	0.5	13	2.52	-5.64
合否	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○

5. 現場混練時の課題と解決策

バイオ炭は、かさ比重の小さな粉体であるため、材料混練時における粉体の飛散や、混練後材料の均一性不良などの問題発生が危惧される。この対策のひとつとして、バイオ炭を硬化材や助材等の他の粉体材料とプレミックスすることで解決できるものと考え、適用性について検証試験を行った。試験には、前述の試験結果のうち、カーボンニュートラルを達成し、かつフロー値に余裕のある配合⑥（木材炭使用）を採用するものとした。「木材炭と硬化材」および「木材炭と助材」をそれぞれプレミックスし、プレミックス後に実際の保管を想定した養生期間を設け、養生期間を経たプレミックス粉体が、サイロ供給に適用可能か確認するためのふるい試験と、裏込め注入材の性能に与える影響調査のための性能確認試験を実施した。



写真-3 木材炭+硬化材

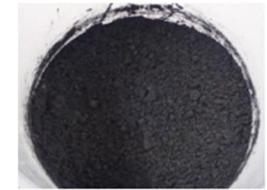


写真-4 木材炭+助材

5-1. ふるい試験

(1) 試験方法

一般にバイオ炭は、製造過程において発火防止のために散水されており、一定量の水分を含有している。このため、プレミックス品を長期保管すると、セメントやベントナイトがバイオ炭の水分と反応し、セメントは水和反応、ベントナイトは吸水固結を誘発し、裏込め注入材本来の性能を阻害するおそれがある。そこで、セメント系硬化材とベントナイト系助材、それぞれを木材炭と混合した後、28日（4週）の養生期間を設定し、混合直後から28日（4週）経過後までの粉体形状の経時変化を確認するため、ふるい試験を実施した。なお、養生期間の設定は、プラントでプレミックス後、現場搬入までに14日保管し、現場搬入後、裏込め注入材作液までにさらに14日保管した場合を想定した。

プラントサイロからの粉体移送時においては、縦スクリュウを閉塞させることなく移送するために、粉体粒径は、ケーシング内径とスクリュウ外径とのクリアランスを通過できる直径5mm未満（図-4）とする必要がある。このため、ふるい試験においては、4.75mmふるいの残留率が5%以下となることを判断基準とした。

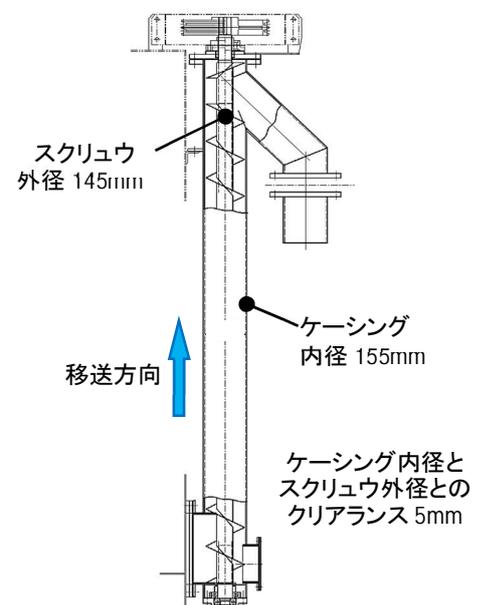


図-4 サイロ搭載縦スクリュウ断面図(例)

(2) 試験結果

硬化材と木材炭のプレミックス品、助材と木材炭のプレミックス品ともに、28日経過後も目標残留率を満足し、性状に問題ないことを確認した。なお、設定した28日以降も継続して経時変化を確認したところ、56日経過後に硬化材とのプレミックス品については残留率の大幅な上昇（4.67%）を確認した。これは、木材炭の水分と硬化材のセメント分との水和反応が進行したためと考える。一方で、助材とのプレミックス品については56日後も大きな変化は見られなかった。

表-7 プレミックス品ふるい試験結果

		直後	1日	7日	14日	28日	参考:56日
目標残留率		5.0%以下					
硬化材 +木材炭	残留質量(g)	1.1	1.7	1.7	1.7	1.7	46.7
	残留率(%)	0.11	0.17	0.17	0.17	0.17	4.67
	写真						
助材 +木材炭	残留質量(g)	5.0	5.6	5.6	5.6	5.6	6.2
	残留率(%)	0.50	0.56	0.56	0.56	0.56	0.62
	写真						

5-2. 性能確認試験

(1) 試験方法

次に、これら保管期間を経たプレミックス品が、裏込め注入材の性能に与える影響を確認するため、「木材炭と硬化材」および「木材炭と助材」をそれぞれプレミックス後、28日養生した材料を使用して性能確認試験を実施した。

(2) 試験結果

性能試験結果を表-8に示す。硬化材と木材炭のプレミックス品は、ゲルタイムおよび一軸圧縮強度の目標値を満足できなかった。これは、木材炭に含まれる水分により、プレミックス養生期間中にセメント分が水和反応を始め、裏込め注入材本来の性能を阻害したためだと考えられる。また、ブリーディング率に関しても非プレミックス試料と比較して上昇しており、品質の低下を確認した。一方、表の赤枠内に示す助材と木材炭とのプレミックス品については、全ての項目で目標性能を満足し、28日の養生期間を経ても裏込め注入材としての品質を確保できることを確認した。

ふるい試験および性能試験結果より、助材は、木材炭とのプレミックス品として適用性があると言える。また、木材炭を助材とプレミックスすることで、作液時の粉体飛散や混練後の材料均一性不良などは確認されなかった。

表-8 プレミックス品 性能試験結果

材料名	プレミックスケース	配 合						性能試験結果				CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
		A液(1.0m ³)					B液(0.05m ³)	フロー値 (mm)	ブリーディング率 (%)	ゲルタイム (秒)	一軸圧縮強度 (N/mm ²) 28日	
目標性能		硬化材 (kg)	助材 (kg)	安定剤 (kg)	混練水 (L)	木材炭 (kg)	凝結剤 (L)	400±100	5%以内	20秒以内	2.0	
配合⑥	プレミックスなし	285	20	10.0	830	50	50	390	0.5	13	2.52	-5.64
合否		-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○
配合⑥	「硬化材+木材炭」のプレミックス	285	20	10.0	830	50	50	450	5.0	45	0.96	-5.64
合否		-	-	-	-	-	-	○	○	×	×	○
配合⑥	「助材+木材炭」のプレミックス	285	20	10.0	830	50	50	395	1.5	17	2.33	-5.64
合否		-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○

6. 木材炭含水率の適用範囲確認

(1) 試験方法

5-1ふるい試験、5-2性能試験結果より、助材と木材炭とのプレミックスが有効であることがわかった。一方で、助材とのプレミックス品として適用可能な木材炭の含水率の範囲を把握するため、含水率を変化させた木材炭を助材と混合し、5-1と同様にふるい試験を実施した。前述の試験では含水率31.5%の木材炭を使用しており、今回のふるい試験では、含水率37.5%、41.2%、44.4%、50%、60%、66.6%、74.5%の木材炭を使用して試験を実施した。

(2) 試験結果

ふるい試験結果を表-9に示す。含水率60%以上の木材炭を使用した試料は、プレミックス直後にベントナイトが吸水団粒化し目標残留率5%を上回った(写真-5)。含水率50%の木材炭混合試料は、3日経過後に目標残留率を上回った(写真-6)。表中赤枠内の含水率44.4%以下の木材炭混合試料は28日経過後まで目標残留率を超過しなかった(写真-7)。

以上の結果より、木材炭の含水率は、高いほど団粒化しやすく、4.75mm粒径の残留率を5%以下とするためには44%以下である必要があると言える。今後は、これら含水率44%以下の木材炭を混合した助材とのプレミックス試料に対し、性能確認試験を実施することで、裏込め注入材としての適用性を確認する予定である。

表-9 ふるい試験結果

プレミックス後の経時 木材炭含水率		直後	1日	3日	7日	14日	28日	合否
		目標残留率 5.0%以下						
31.5%	残留質量(g)	5.0	5.6	5.6	5.6	5.6	6.2	○
	残留率(%)	0.50	0.56	0.56	0.56	0.56	0.62	
37.5%	残留質量(g)	19	19	19	20	21	21	○
	残留率(%)	1.9	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1	
41.2%	残留質量(g)	26	31	31	33	35	36	○
	残留率(%)	2.6	3.1	3.1	3.3	3.5	3.6	
44.4%	残留質量(g)	34	40	41	45	48	50	○
	残留率(%)	3.4	4.0	4.1	4.5	4.8	5.0	
50.0%	残留質量(g)	43	49	55	59	60	66	×
	残留率(%)	4.3	4.9	5.5	5.9	6.0	6.6	
60.0%	残留質量(g)	69	-	-	96	105	122	×
	残留率(%)	6.9	-	-	9.6	10.5	12.2	
66.6%	残留質量(g)	123	-	-	144	177	190	×
	残留率(%)	12.3	-	-	14.4	17.7	19.0	
74.5%	残留質量(g)	250	-	-	297	-	-	×
	残留率(%)	25.0	-	-	29.7	-	-	



写真-5 含水率 74.5% 試料(直後)



写真-6 含水率 50.0% 試料(3日後)



写真-7 含水率 44.4% 試料(28日後)

7. まとめ

今回の試験により、裏込め注入材に木材炭を添加することで、所定の品質基準を満足し、かつ、CO₂排出量を実質0以下にできる結果が得られた。また、助材と木材炭を事前に混合するプレミックス品について、含水率や養生日数を規定することで、品質的に問題ないことを確認し、現場混練時の課題に対しても解決策を見出した。現在、プラントでの材料管理方法や現場での作液方法の検証を進めている。今後、さらなる試験データの蓄積と検証を進めることで、シールド工事におけるカーボンニュートラル実現に向け、環境負荷低減裏込め注入材の実用化を目指す。

【参考文献】

- 1) 谷田部勝博他：低炭素型のコンクリートのシールドセグメントへの適用検討，土木学会，第78回年次学術講演会，VI-836，2023
- 2) Jクレジット制度 HP: 方法論 AG-004(ver.1.4) バイオ炭の農地施用 https://japancredit.go.jp/pdf/methodology/AG-004_v1.4.pdf，P.3，閲覧日：2024年8月1日
- 3) 可塑状グラウト協会：シールド可塑状注入工法技術マニュアル，P.23.28.43，2018