

報告 内部に鋼製支保工を含む狭隘な巻立空間の覆工コンクリートの施工

前田 智之^{*1}・小笠原 哲也^{*2}・鶴岡 正^{*3}・小林 勇貴^{*4}

要旨：巻厚内に鋼製支保工を含む覆工コンクリートは、鋼製支保工が障害となるため、コンクリートの円滑な流動が阻害され、かつ作業性が悪い施工環境となる。そこで天端部の充填性確保を目的に、材料に中流動コンクリート、打込み方法に従来の吹上げ方式に加えて小口径の配管を引き抜きながら打ち込む併用型的方式を採用した。また構造上表面気泡が発生しやすい側壁部の表面気泡低減対策として、型枠に透水性シートを設置した。これにより、背面空洞がなく表面気泡が少ない覆工コンクリートを施工することができた。

キーワード：覆工コンクリート、中流動コンクリート、小口径配管、透水性シート

1. はじめに

一般に、覆工コンクリートの施工上の問題点に充填不足による背面空洞の発生があげられる。今回施工した覆工コンクリートは、巻厚内に鋼製支保工等(H150)が 1m 間隔に設置されており、それらが障害となり覆工背面の空洞発生の可能性がとくに大きかった。また覆工コンクリートは側壁部の形状が鉛直より傾斜しているため、表面気泡が発生しやすい。本トンネルは鋼製支保工が巻厚内にあるため締め固めの作業性が悪く、側壁部に表面気泡が発生しやすい施工条件であった。そのため施工時において、これらの問題点に対してそれぞれ対策を行った。

本稿は、天端部の空洞発生防止の対策として実施した中流動コンクリートの使用と施工条件に適した打込み方法への変更と、側壁部の表面気泡低減対策として実施した型枠への透水性シートの取付けについて、検討および施工の結果をまとめたものである。

2. 工事概要

本工事は、昭和 30 年に施工された供用中の既設トンネルの災害防止工事である。本トンネルは中間地点付近に地山の脆弱な箇所があり、鋼製支保工によるセントル工法で地山を補強した区間があった。今回の工事はその区間を含む全線で、既設トンネルの内巻きに、補強の鋼製支保工を巻き込み、巻厚 35cm の覆工コンクリートを構築する工事であった (図-1、2 参照)。

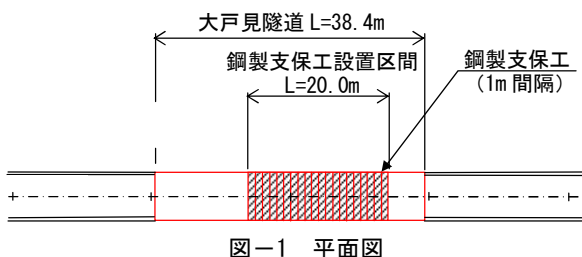


図-1 平面図

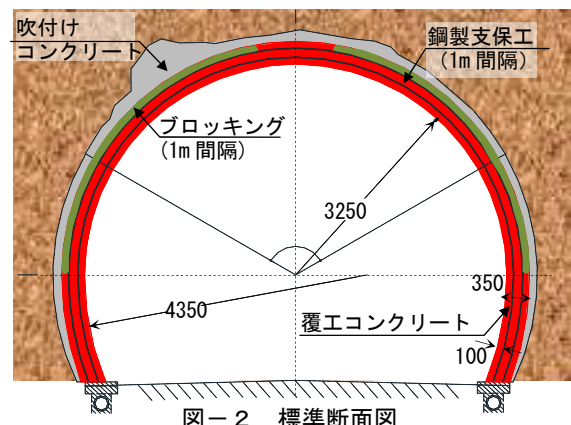


図-2 標準断面図

3. 施工の問題点と対策

3.1 天端部の充填性確保

(1) 施工上の問題点

覆工コンクリートはトンネルの最終形状で、トンネルの使用目的に応じて、標準の設計厚さが 20~40cm 程度である¹⁾。一般に、覆工コンクリートの打込みは型枠に移動式鋼製型枠 (以下、セントルと称す) を使用し、1 スパン長が 10.5m である¹⁾。

一般的な打込み手順を以下に示す。打始めは側壁部からで、コンクリートを検査窓から投入しパイプレータで締め固め、打上がりに応じて投入口を上方の検査窓に切替える。側壁部完了後、天端部に移る。天端部はセントルの既設コンクリート側に設けた吹上げ口からコンクリートを打ち込む (図-3 参照)。

今回施工した覆工コンクリートは、既設トンネルの内巻きコンクリート (施工延長 38.4m のうち中間の 20m 間) である。地山の補強を目的とした鋼製支保工 (H150) によるセントル工法が応急対策として施されていた。さらにセントル工法の地山補強効果を確実にするため、鋼製支保工と地山の間に耐圧性の袋に加圧充填した無収縮モ

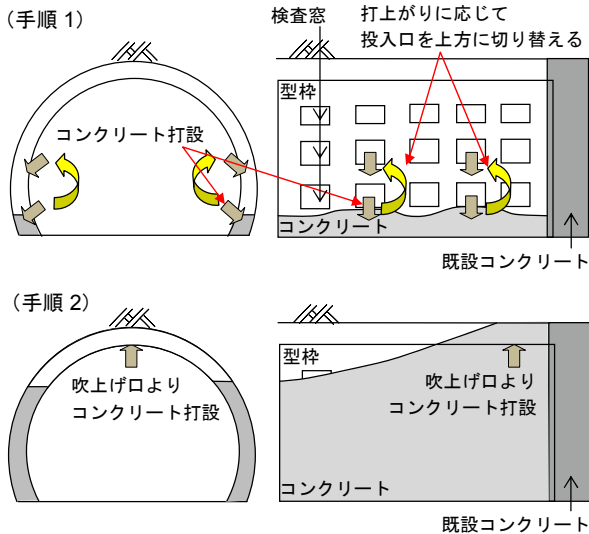
*1 五洋建設 技術研究所課長 (正会員)

*2 五洋建設 技術研究所部長 (正会員)

*3 千葉県君津土木事務所上総出張所 所長

*4 千葉県君津土木事務所上総出張所 技師

ルタル（プレロードシェル工法，以下プレロードシェルと称す）でブロッキングされていた（写真－1参照）。今回の施工は，地山をブロッキングした鋼製支保工を巻き込んで覆工コンクリートを打設するため，鋼製支保工とプレロードシェルが障害となり，コンクリートの流動が阻害されるため，従来の打込み方法では特に天端部で覆工背面に空洞が発生しやすい状況であった（図－4参照）。なお，プレロードシェルは，コンクリートの充填性に配慮して，天端部を約1m空けて施工されていた。



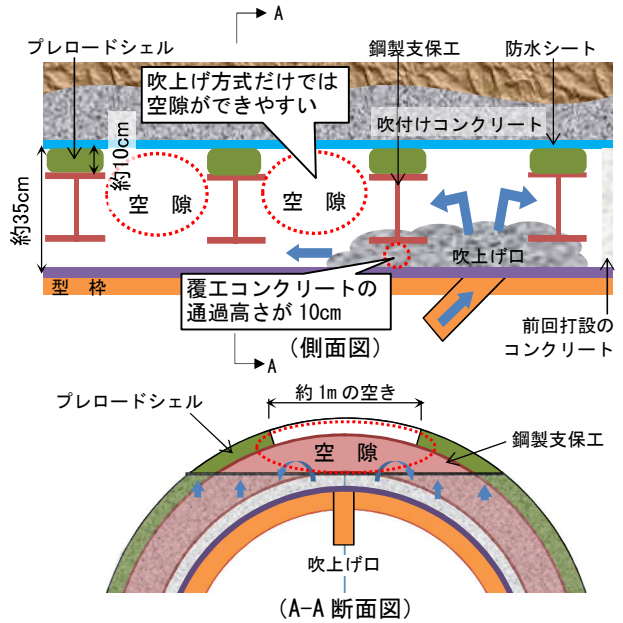
図－3 一般的な覆工コンクリート打設手順¹⁾
(一部加筆修正)



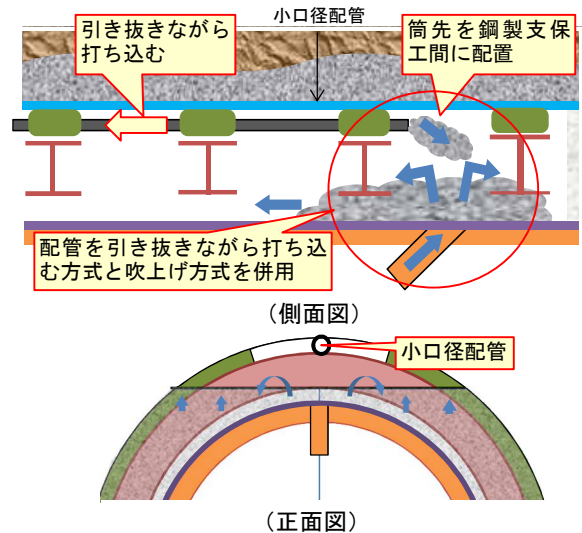
写真－1 施工前の坑内状況

(2) 施工方法の提案1（打込み方法）

鋼製支保工等が障害となってコンクリートの流動が阻害されるため，鋼製支保工と鋼製支保工の間にコンクリートを直接投入することが有効であると考えた。そこで，天端部におけるコンクリート打込み方法を改善することとした。具体的には，天端部のプレロードシェルが空いている鋼製支保工と地山の間に3インチの圧送管を配置し，コンクリートの打上りに合わせ徐々に圧送管を引き抜きながら打ち込む方式と従来の吹上げ方式を併用した方法に変更することとした（図－5参照）。



図－4 本トンネルの覆工施工時の課題



図－5 天端部の打込み方法

(3) 施工方法の提案2（中流動コンクリート）

天端部の地山と鋼製支保工の間に圧送管を配置し，筒先を引き抜きながらコンクリートを打ち込むため，配管径は3インチと小口径になる。そのため，圧送時に管内でコンクリートの閉塞が生じる可能性が高くなると想定された。そこで，圧送距離を短くし施工性を向上するため，セントル長を通常の10.5mから7.5mに短くし，さらに当初仕様であるスランプ15cmのコンクリートから，流動性に優れ材料分離抵抗性がある中流動コンクリートに変更することとした。ただし，側壁部から天端部まで全てのコンクリートを中流動コンクリートに変更することは，材料変更によるコスト増加に加え，コンクリートの側圧増加による大掛かりなセントルの補強が必要になる。そこで石井らによる施工事例²⁾から，天端部のみ中流動コンクリートに変更することとした。

また、選定したレディミクストコンクリート工場との調整の結果、新たな製造設備の設置が困難なことから、中流動コンクリートの製造は、増粘剤を含有した一液型の流動化剤を、現場に到着したコンクリートに後添加してアジデータ車で高速攪拌する方法を採用することとした³⁾。施工前に室内試し練りを行って、3種類の配合を選定し、その後に実施工に則した実機試験を行って最適な配合を選定した。次に最適配合のコンクリートを圧送および模擬型枠内に打設して小口径配管の圧送性と鋼製支保工周辺の充填性を確認した。

3.2 側壁部の表面気泡の低減

(1) 施工上の課題

覆工コンクリートの側壁部は鉛直より傾斜した形状になるため、余剰水や空気が抜けにくく表面気泡が発生しやすい。さらに本トンネルは、巻厚内に鋼製支保工が1m間隔で配置されているため、締固め時の作業性が悪く、表面気泡がとくに発生しやすい(図-6参照)。

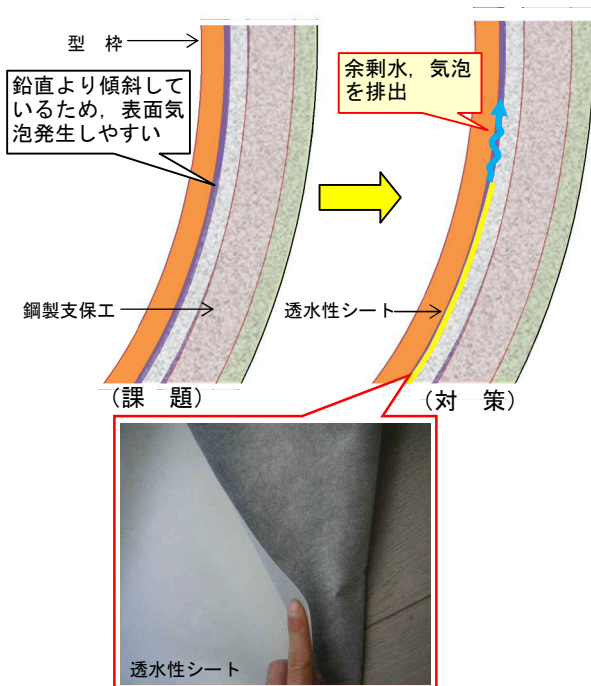


図-6 側壁部の課題と対策(透水性シート)の概要図

(2) 施工方法の提案

表面気泡低減のため、コンクリート中の余剰水や気泡を型枠外に排出させる機能をもつ透水性シートをセントルの側壁部の表面に取り付けた(図-6参照)⁴⁾。

4. 施工結果

4.1 天端部の充填性確保

(1)室内試し練り

施工前に、天端部に適用する中流動コンクリートの室内試し練りを行った。実施工において増粘剤を含有した一液型の流動化剤を後添加することから、ベースコンクリートを90秒間練り混ぜて、フレッシュ性状を確認後、一液型の流動化剤を後添加して75秒間練り混ぜた。強制2軸ミキサを使用して、練混ぜ量は30リットルとした。

使用材料を表-1に示す。流動化剤以外は、レディミクストコンクリート工場が常備している材料を使用した。配合を表-2に示す。実験水準として、コンクリートの圧送性や充填性に大きく影響するセメント量、細骨材率(s/a)を変化させた。セメント量および細骨材率は、レディミクストコンクリート工場にて製造される増粘剤系の中流動コンクリートの基準(案)⁵⁾が最低セメント量を 320kg/m^3 としていること、流動化剤を後添加した配合の実績³⁾、および小口径の管により圧送し、かつ狭間で複雑な箇所には打設することから材料分離抵抗性を高め、かつ粗骨材量を低減することを勧告して決定した。

なお、ベースコンクリートのスランプが $15\pm 2.5\text{cm}$ の範囲となるように、高機能型AE減水剤の添加率を調整し、また中流動コンクリートも流動化剤の添加率を調整

表-1 使用材料

使用材料名	記号	仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント
細骨材	S	君津市小櫃産山砂(密度: 2.60g/cm^3)
粗骨材	G	北斗市峨朗産石灰碎石 2005 (密度: 2.70g/cm^3)
高機能型AE減水剤	Ad	リグニスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
増粘剤一液型流動化剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体

表-2 室内試し練り配合およびフレッシュ性状試験結果

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)						フレッシュ性状試験結果				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 Ad (C×%)	流動化剤 SP (ml/C =100kg)	スランプフロー(mm)			空気量 (%)	U形充填高さ (mm)
									加振前	加振後	変形量		
C=340 kg/m^3 ,s/a=49%	51.5	49	175	340	855	926	0.85	650	440	565	125	3.9	295
C=320 kg/m^3 ,s/a=52%	54.7	52		320	918	880	1.00	700	415	540	125	4.4	292
C=340 kg/m^3 ,s/a=52%	51.5			340	907	872			405	535	130	3.7	295
C=360 kg/m^3 ,s/a=52%	48.6	55		360	900	864	1.30	800	415	525	110	4.7	305
C=340 kg/m^3 ,s/a=55%	51.5			340	962	815			420	540	120	4.0	312
C=360 kg/m^3 ,s/a=55%	48.6			360	952	810			425	550	125	4.6	318

表-3 フレッシュ性状試験項目および規格値

試験項目	試験方法	規格値
スランプフロー	JIS A 1150	350~500mm
空気量	JIS A 1128	4.5±1.5%
加振変形量	NEXCO 試験法 733	100±30mm
U形充填高さ (流動障害なし)		280mm 以上



(a)ベースコンクリート (b)中流動コンクリート
写真-2 流動化剤を後添加した中流動コンクリートのフレッシュ性状 (C=360kg/m³,s/a=52%)

してスランプフローを目標値に合わせた。試験項目と目標値を表-3、各配合の試験結果を表-2、ベースコンクリートと中流動コンクリートの性状を写真-2に示す。

室内試し練りの結果、表-3の試験項目に対して、すべての配合で規格値を満足した。それらの配合のうち、練り混ぜた配合の範囲では、セメント量が多い、もしくは細骨材率が高い配合のU形充填高さが比較的高かった。また、目視性状ではセメント量 320kg/m³もしくは細骨材率 49%では、やや分離傾向が認められた。そこで、「C=340kg/m³, s/a=55%」、「C=360kg/m³, s/a=52%」、「C=360kg/m³, s/a=55%」の3配合を選定した。これまでの配合事例によると、増粘剤系の中流動コンクリートとしては、比較的セメント量の多い配合と考えられるが、小口径配管を使用した圧送、かつ狭隘で複雑な箇所への打設であるため、充填性および材料分離抵抗性をなるべく確保することを重視して、安全側に配合を選定した。なお、圧縮強度の規格値は、18N/mm² (材齢 28 日) であり、すべての配合において規格値を満足した。

(2) 実機試験および模擬型枠内への打設実験

試し練りの結果を受けて、選定した配合に対して実施工の製造方法に則した実機試験と、実際に使用する 2t スライズポンプ車 (吐出量 35m³/h, 吐出圧 2.5MP 級)、3 インチ耐圧ホースおよび模擬型枠を用いて、中流動コンクリートの圧送性と充填性を確認する実験を実施した (写真-3 参照)。模擬型枠は、寸法が幅 270cm, 奥行き 180cm, 高さ 45cm, 上面は開放、内部に鋼製支保工 (H150) を 1m 間隔に配置し、打込みや充填状況を目視できるように側面はアクリル型枠とした。圧送性の確認は、大型土のうにコンクリートを打込み、圧送の可否、打込み時

のポンプ車の圧力上昇の有無および筒先と大型土のう内のコンクリートの分離状況を目視で確認することとした。充填状況の確認は、模擬型枠にコンクリートを鋼製支保工が隠れるまで打込み、打込み後、型枠の土台である山留め材に取り付けた高周波振動モータバイブレータ (出力 550w, 最大遠心力 8.83kN) を起振させ、コンクリート充填状況を目視確認することとした。

まず、ベースコンクリートを 4t アジテータ車に 1m³ 積載し、ベースコンクリートのフレッシュ性状を確認したのち増粘剤を含有した流動化剤を添加してアジテータ車を約 2 分高速回転した。添加後にフレッシュ性状の試験を行い、表-3の規格値を満足できるかを確認した。規格値内にあることを確認した上で、3 インチの耐圧ホースにて圧送し、圧送状況 (分離や圧送圧力等) の目視評価を行った。最も状態が良い配合を模擬型枠内に打ち込み、充填性を確認した。

実機試験は、試し練りで選定した「C=340kg/m³, s/a=55%」、「C=360kg/m³, s/a=52%」、「C=360kg/m³, s/a=55%」の3配合で実施した。

実機試験でのフレッシュ性状の試験結果を表-4に示す。「C=360kg/m³, s/a=52%」は規格値を満足したが、「C=340kg/m³, s/a=52%」は加振変形量、「C=360kg/m³, s/a=55%」はスランプフローが規格値を超過した。少量の材料で行った室内試し練り時より、実機試験のコンクリートが、目視において粘性が低く軟らかい性状を示したことが原因と考えられる。したがって、規格値を満足した「C=360kg/m³, s/a=52%」を用いて、圧送性確認を実施した。その結果、筒先での分離は見られず (写真-4 参照)、ポンプ車の極端な圧力上昇も生じなかった。



写真-3 全景, 圧送管 (直径 3 インチ) および模擬型枠

表-4 フレッシュ性状試験結果

網掛けは規格値外

項目	規格値	圧送性確認						充填性確認	
		C=340kg/m ³ , s/a=52%		C=360kg/m ³ , s/a=52%		C=360kg/m ³ , s/a=55%		C=360kg/m ³ , s/a=52%	
		ベース	添加後	ベース	添加後	ベース	添加後	ベース	添加後
スランブ(cm)	15±2.5	17.0	-	17.0	-	18.0	-	16.5	-
添加後スランブフロー(cm)	350~500	275	455	300	475	320	520	310	470
空気量(%)	4.5±1.5	4.7	4.9	3.8	4.6	5.1	5.4	5.7	4.8
コンクリート温度(°C)	-	22	-	23	-	22	-	20	-
加振変形後フロー試験(mm)	-	-	615	-	595	-	実施せず	-	540
加振変形量(mm)	100±30	-	160	-	120	-	実施せず	-	70
U形充填高さ (mm)	280mm 以上	-	332	-	313	-	332	-	337

模擬型枠へは「C=360kg/m³, s/a=52%」の1配合を打設した。フレッシュ性状試験結果を表-4に示す。打込み時はフランジ背面に空隙がみられたが、打込み完了後パイブレータを30秒起振した結果、起振時間10秒では空洞が残っていたが、20秒を経過した時点で空隙がなくなることを目視で確認できた(写真-5参照)。施工する配合は「C=360kg/m³, s/a=52%」とし、打込み完了後に型枠パイブレータを20~30秒間起振することとした。



写真-4 圧送性確認状況

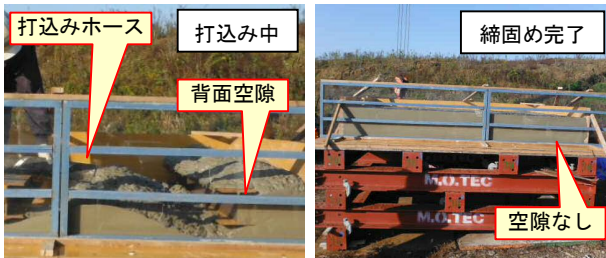


写真-5 模擬型枠内への打込み

(3) 施工と仕上がり

吹上げ口用のピストンポンプ車(吐出量78m³/h, 吐出3.8MPa級)と小口径配管用のスクイズポンプ車(吐出量35m³/h, 吐出圧2.5MPa級)の2台を配置し(写真-6参照), 吹上げ口と小口径配管から交互に連続して打込めるようにした(写真-7参照)。中流動コンクリートへの変更は、コンクリートの投入口を検査窓から天端部吹上げ口に切替える時点で行った。また施工時に天端部のコンクリートの充填状況を確認するため、充填検知センサを鋼製支保工と鋼製支保工の間に配置した。

施工中、小口径配管内の閉塞や極端な圧力上昇はなく、全ての充填検知センサにてコンクリートの充填が確認できた。今回の施工方法を採用することで、狭隘な巻立空間を、空洞なくコンクリートを打ち込むことができた。



写真-6 天端部の配管設置状況



写真-7 施工状況

4.2 側壁部の表面気泡の低減

(1) 打込みと仕上がり

透水性シートを側壁部に取り付けた。透水性シートによる施工の支障はなく、コンクリート表面の仕上がりは表面気泡がほとんどみられなかった(写真-8参照)。



(透水性シートなし) (透水性シートあり)
写真-8 側壁部のコンクリート仕上がり状況

(2)表面気泡量と透気係数

表面気泡量を低減したコンクリートの耐久性を評価するため、トンネル覆工の側壁部を模擬した型枠で供試体を作成し、表面気泡と耐久性の関連性を室内実験で調査した。実験は、供試体を 750×300×300mm の角柱、養生を気中養生として実施した。耐久性はコンクリートの劣化因子通過に対する抵抗性を考え、透気性を評価した。トレント法による透気試験を実施して透気係数を算出し、表面気泡量と比較した(図-7、写真-9参照)。表面気泡量は平野ら⁶⁾が行った圧力測定フィルムを用いた画像解析による面積率で定量化した。なお、表面気泡量の測定は脱枠直後、トレント法は材齢 28 日以降に行った。

算出された透気係数は、5 段階にレベル分けされた指標によるトレント法のグレーディングでは、いずれも「悪い」に属し差異はみられない。しかし、表面気泡面積が大きくなれば透気係数も大きくなる傾向がある。透気係数はばらつきや異常値が生じやすいことが知られている。今回は測定数が少ないため、今後は詳細な検討が必要であるが、表面気泡量と透気係数、すなわち表面気泡量は耐久性に相関性があることが示唆された。特に型枠に透水シートを用いた供試体は表面気泡量、透気係数が他に比べて小さい結果となった。このことから、狭隘な巻立て空間においても、透水シートを使用することで耐久性のある覆工コンクリートを施工することができたと考える。



写真-9 試験状況

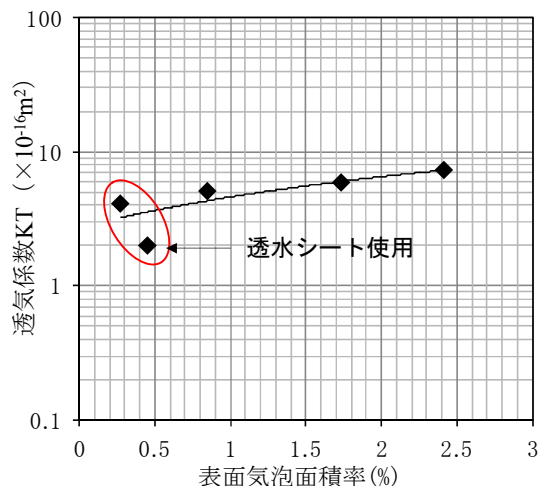


図-7 透気係数と表面気泡量

5. おわりに

本施工により、以下のような知見が得られた。

- (1) 増粘剤を含有した流動化剤で製造した中流動コンクリートを使用することで、3 インチ配管内を材料分離や閉塞なく圧送し、コンクリートを打ち込むことができた。
- (2) 圧送管を引き抜きながらコンクリートを打ち込むことで、狭隘な空間に直接コンクリートを投入することが可能になり、内部に鋼製支保工を含む狭隘な巻立空間の覆工コンクリートを、背面空洞の発生なく施工することができた。
- (3) 表面気泡が発生しやすい覆工側壁部の型枠に透水性シートを取り付けることで、側壁部の表面気泡を大幅に低減することができた。
- (4) トンネル覆工側壁部を模擬した供試体を用いた面積率により定量化した表面気泡量とトレント法による透気係数には相関性があることが示唆された。

謝辞

本工事の施工および透気試験実施にあたり、多大な御協力をいただいた吉武勇先生(山口大学大学院准教授)、平野正幸君(山口大学大学院)、稲川雪久氏(岐阜工業)、平岡照規氏(岐阜工業)、竹内太郎氏(BASF ジャパン)に謝意を表します。

参考文献

- 1) トンネルコンクリート施工指針(案), 土木学会
- 2) 石井義信, 高田克也, 木佐一伸, 斎藤泰信, 為石昌宏, 後藤裕一: 異なるスランブのコンクリートを用いた覆工コンクリートの打設について, 土木学会第 63 回年次技術講演会, pp.599-600, 2008.9.
- 3) 瀧 宏史, 鈴木信行, 三河内永康, 藤倉祐介: 現場添加で製造した中流動覆工コンクリートの試験施工, 土木学会第 68 回年次技術講演会, pp.829-830, 2013.9.
- 4) 一宮一夫, 加藤優子, 大野道秀, 藤川隆太: 透水型枠工法適用時の表面美観に及ぼすコンクリートのフレッシュ性状の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1353-1358, 2004
- 5) 岩尾哲也, 水野希典: 高速道路トンネルにおける中流動覆工コンクリートの標準化, トンネルと地下, Vol.44, No.11, pp.43-51, 2013.11
- 6) 平野正幸, 吉武 勇, 平岡照規, 稲川雪久: トンネル覆工コンクリートの側壁に生じる表面気泡の評価に関する基礎研究, セメント・コンクリート論文集, 2013, No.67 (掲載決定)