

論文 表面塗布剤が早期脱型したコンクリートの物性に及ぼす影響

七尾 舞*1・兵頭 彦次*2・長塩 靖祐*3・丸田 浩*4

要旨: 養生効果と劣化因子の侵入抑制効果を併せ持つ表面塗布剤の塗布量が早期脱型したコンクリートの物性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、表面塗布剤を用いたコンクリートの圧縮強度は、使用しないものよりも大きくなり、乾燥収縮ひずみは小さくなった。塗布量が多いほど、長期強度の発現が大きくなる傾向であった。一方、乾燥収縮ひずみの抑制効果は塗布量が 150g/m² 以上で頭打ちとなった。材齢 18 時間で脱型し表面塗布剤を 200g/m² 使用したコンクリートの中酸化速度係数、表面透気係数は、型枠に 3 日間存置し気中養生したコンクリートと同程度であった。

キーワード: 表面塗布剤, 早期脱型, 中流動コンクリート, 乾燥収縮, 表面透気係数, 中酸化

1. はじめに

コンクリート構造物の長寿命化・高耐久化の観点から、コンクリートの品質確保は重要な課題とされている。コンクリートの耐久性を向上させる方法のひとつとして、コンクリート表層部を緻密化させるけい酸塩系表面含浸材やコンクリートの表面に撥水性能を付与するシラン系表面含浸材等の表面改質剤を使用し、劣化因子の侵入を抑制する表面保護工法がある¹⁾。この工法は、施工が容易で経済的であることから適用事例は増加している。しかし、このような吸水防止性能や表面改質効果は表面保護・補修の一環として考えられており、所定の期間養生した後に行われる。

一方、早期脱型後に塗布した場合でも、初期材齢における養生効果と長期材齢における表面保護、劣化因子の抑制効果を保持し続けることが可能な表面塗布剤の検討を行い、水分逸散抑制による強度増進効果、初期材齢の乾燥収縮抑制、中酸化や塩害に対する抵抗性向上効果があることを確認している²⁾。

近年では、早期脱型が求められる中流動覆工コンクリートの養生方法のひとつとして膜養生剤が使用される場合もある。中流動覆工コンクリートは、材料分離抵抗性と適切な流動性、型枠バイブレータのみで締固めを行うこと等をコンセプトとしていることから、水セメント比 60%程度の比較的高水セメント比であることが多い。

しかし、これまで検討してきた表面塗布剤では、中流動覆工コンクリートのような早期脱型、高水セメント比のコンクリートを対象にしてはならず、十分な性能確認がなされていない。また、表面塗布剤の塗布量の違いがコンクリートの物性に及ぼす影響についても明らかになっていない。本研究では、表面塗布剤の塗布量が早期脱

型した高水セメント比のコンクリートの物性に与える影響を明らかにすることを目的として行った。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料及び配合

表-1 に、コンクリートの使用材料を示す。水には上水道水、セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には山砂、粗骨材には碎石 2005、化学混和剤には高性能 AE 減水剤、AE 剤を使用した。さらに、材料分離抵抗性の向上を目的として、石灰石微粉末を使用した。表-2 に、コンクリートの配合条件を示す。これらは、「東・中・西高速道路株式会社：トンネル施工管理要領」³⁾に記載されている中流動コンクリートの配合条件に準じた。表-3 に、コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状を示す。単位水量は 162kg/m³、W/C は 60%とした。石灰石微粉末は、80kg/m³ 使用した。

2.2 表面塗布剤

表面塗布剤には、特殊シラン系化合物アルケニル系エステル化合物の養生剤 (CB) を用いた。アルケニル系エステル化合物は疎水性化合物であるため、単独ではコンクリート硬化体に浸透することができない。しかし、組み

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
石灰石微粉末	LS	比表面積4550cm ² /g, 密度2.71g/cm ³
細骨材	S	山砂, 表乾密度2.57g/cm ³
粗骨材	G	碎石2005, 表乾密度2.63g/cm ³
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物
AE剤	AE	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 第2研究部 研究員 修士 (工) (正会員)

*2 太平洋セメント (株) 中央研究所 第2研究部 主任研究員 博士 (工) (正会員)

*3 太平洋マテリアル (株) 開発研究所土木・混和材料グループ 副主席 博士 (工) (正会員)

*4 太平洋マテリアル (株) 開発研究所土木・混和材料グループ 研究員 修士 (工)

表-2 コンクリートの配合条件

設計基準強度 (材齢28日) (N/mm ²)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	加振変形量 (cm)	U形充填高さ (障害なし) (mm)
24	350~500	4.5±1.5	10±3	280以上

表-3 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (C×%)	スランプフロー(mm)		U型充填高さ (mm)	空気量 (%)
		W	C	LS	S	G		加振前	加振後		
60	52.7	162	270	80	883	882	1.70	470	550	306	4.3

合わせた特殊シランの界面活性効果により水との反発を緩和させ、硬化体表面近傍の細孔に緻密に充填することで水分浸透抑制効果が得られる²⁾。

2.3 コンクリートの養生方法

コンクリート供試体は、成型後、20℃の試験室で封緘養生した。注水から18時間後に脱型し、刷毛を用いてCBを塗布した。塗布量は100, 150, 200g/m²(以下、CB100, CB150, CB200と略記した)とした。極力、供試体の各面で塗り厚さに偏りが生じないように、塗布量を計量しながら塗布を行った。塗布終了後は、温度20℃、相対湿度60%の試験室で保管した。また、比較として注水から18時間後に脱型し、20℃の試験室で水中養生、封緘養生した供試体、注水から18時間、3日、7日後に脱型し温度20℃、相対湿度60%の試験室内で気中養生したCBを使用しない供試体(以下、無塗布-18h、無塗布-3d、無塗布-7dと略記した)も用意した。

2.4 試験項目

(1) 圧縮強度

圧縮強度は、JIS A 1108に準じた。試験には、寸法がφ100×200mmの円柱供試体を用いた。CBを使用した供試体は、塗布完了から7日、28日、91日、つまり、材齢8日、29日、92日に試験を実施した。CBを使用しない供試体(水中、封緘、無塗布-18h)については、材齢7日、28日、91日に試験を実施した。

(2) 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129-2および附属書A(参考)に準じた。寸法は、100×100×400mmの角柱供試体を用いた。水中養生7日後に温度20℃、相対湿度60%の試験室内で保管した。水中養生終了後に、CBの塗布作業を行った。塗布作業は最長で7日を要したが、乾燥収縮ひずみおよび質量変化率は、無塗布のものと同じく材齢7日を基準とする結果を示した。

(3) 表面透気係数

供試体寸法は100×100×400mmとし、CBを使用した供試体は材齢29日、92日に、CBを使用しない供試体は材齢28日、91日にトレント法⁴⁾を用いて測定した。試験

方法は、トンネル施工管理要領に準じて行った。無塗布-3d、無塗布-7dは、材齢91日のみ測定した。また、表面透気係数測定時に供試体の質量も併せて測定した。

(4) 中性化促進試験

表面透気係数試験終了後(CBを使用した供試体は材齢92日、使用しないものは材齢91日)の供試体を用いて、JIS A 1153に準拠して、中性化促進試験を開始した。促進条件は、温度20℃、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5%とした。促進期間1週、4週、8週、13週で、中性化深さを測定した

(5) 簡易透水試験

簡易透水試験は、JIS A 6909の透水試験B法を参考に表面透気係数試験終了後(CBを使用した供試体は材齢92日、使用しないものは材齢91日)の供試体を用い実施した

(6) 細孔径分布

細孔径分布は水銀圧入式ポロシメータを用いて測定した。なお、試料はCBを使用した供試体は材齢92日(CB200)、CBを使用しない供試体は材齢91日の圧縮強度試験後の供試体中心より採取した。試料は、水和反応を停止させるために、アセトンに浸漬した後、真空乾燥容器中に3日間保管し、D-乾燥を7日間行った。

3. 試験結果

3.1 コンクリートの物性

(1) 圧縮強度

図-1に、圧縮強度試験結果を示す。CBを塗布したコンクリートの圧縮強度は、塗布しないものよりも大きくなった。両者の強度差は、CBの塗布量が多いほど、また材齢が長期になるほど大きくなる傾向であった。CBを塗布することによる圧縮強度の増加割合は、無塗布-18hに対し、材齢7日で10~15%、材齢28日で14~22%、材齢91日で13~28%であった。また、材齢28日から91日の圧縮強度発現性は、水中養生や封緘養生した場合よりも、いずれも緩慢であるものの、無塗布-18h、CB100、CB150が4%であったのに対し、CB200は9%と相対的に

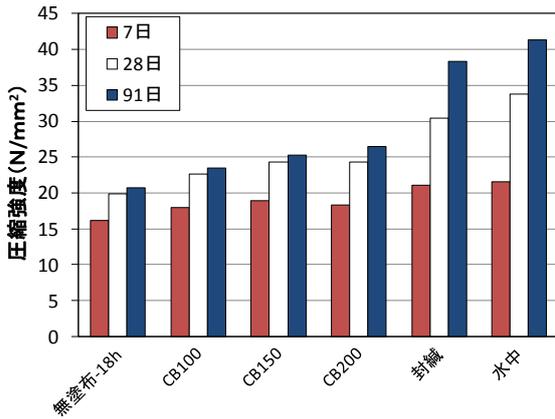


図-1 圧縮強度

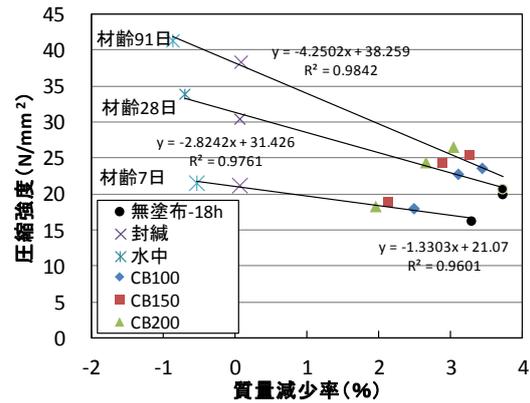
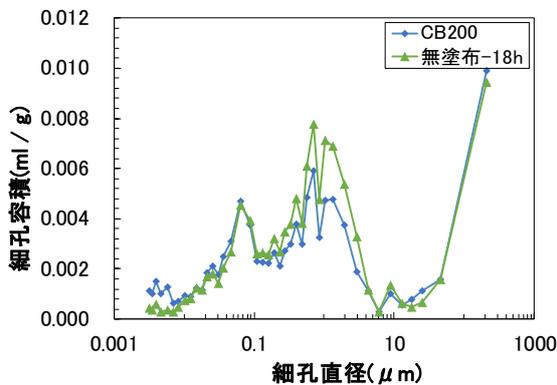
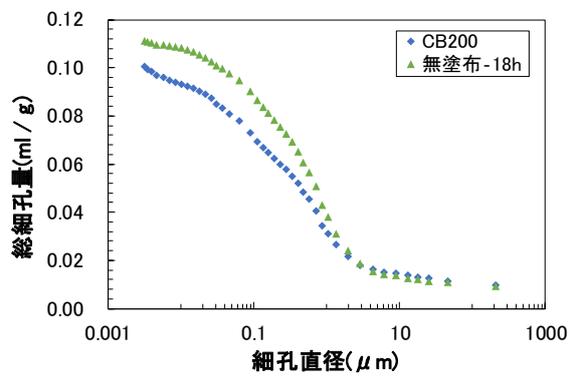


図-2 質量減少率と圧縮強度の関係



(a) 細孔径分布



(b) 累積細孔量

図-3 細孔径分布

大きい結果であった。図-2 に、圧縮強度用供試体の質量減少率と圧縮強度の関係を材齢ごとに示す。また、同一材齢のデータを養生条件によらず最小二乗回帰した直線を併記する。いずれの材齢においても、質量減少率が小さいものほど圧縮強度が大きくなり、両者には相関関係があることがわかる。既往の検討²⁾において、CBの塗布によってコンクリート中の水分が保持されるため、セメントの水和が継続的に進行し、強度が増進することが確認されている。本実験においても、同様の効果によって強度が増進したと考えると、塗布量が多いものほど水分保持の作用が高いため、塗布量が少ないものよりも相対的に強度が大きくなったと考えられる。回帰直線によれば、材齢が経過するとともに傾きが大きくなり、質量減少率の増加に対する圧縮強度の低下割合が大きくなっていることがわかる。このことから、コンクリート中の水分保持・供給は、長期の強度発現に及ぼす影響が相対的に大きいことを示していると考えられる。なお、材齢91日のCB200の圧縮強度は、水中養生した場合の65%、封緘養生した場合の70%程度に相当した。

また、既往の検討²⁾では、実験条件は若干異なるものの、W/C50%のコンクリートにCBを150g/m²塗布した場合の材齢91日強度が、無塗布の場合よりも6%程度増

加することが報告されている。一方、W/C60%とした本実験では、CB150において22%の強度増進が確認された。これは、水分逸散量が相対的に大きい高水セメント比のコンクリートのほうが、CBを塗布する効果が大きくなる可能性を示唆している。

(2) 細孔径分布

図-3(a)に、CB200と、無塗布-18hの細孔径分布を示す。CB200は、無塗布-18hと比べて、細孔直径が0.1μmから10μmの量が減少し、0.01μm以下の細孔量が増加しており、細孔径の分布が小径側にシフトしていることがわかる。図-3(b)に示した累積細孔量によれば、CB200は無塗布-18hよりも細孔量が9.5%減少しており、CBを塗布することによる水分逸散の抑制およびそれとともなってセメントの水和反応が継続したことを裏付ける結果といえる。

(3) 乾燥収縮ひずみ

図-4に、CBの塗布量別の乾燥収縮ひずみを、乾燥期間28日、91日、182日について示す。乾燥収縮ひずみはCBを塗布することにより、無塗布の場合よりも小さくなった。乾燥期間28日の乾燥収縮ひずみは、無塗布の場合、約450×10⁻⁶であるのに対し、塗布した場合、200~270×10⁻⁶程度となり、CBを塗布することによって乾燥

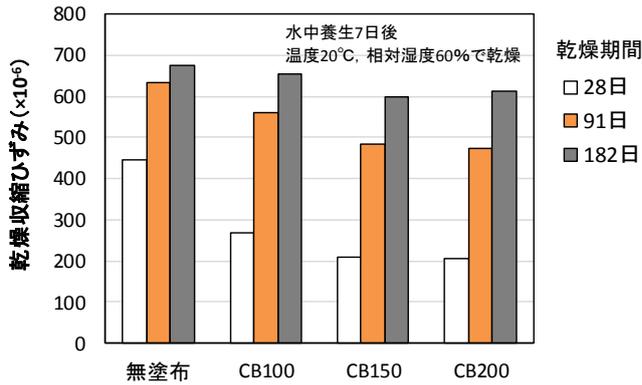


図-4 乾燥収縮ひずみ

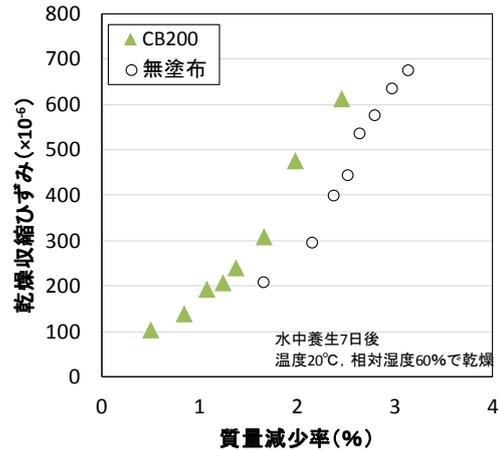


図-5 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

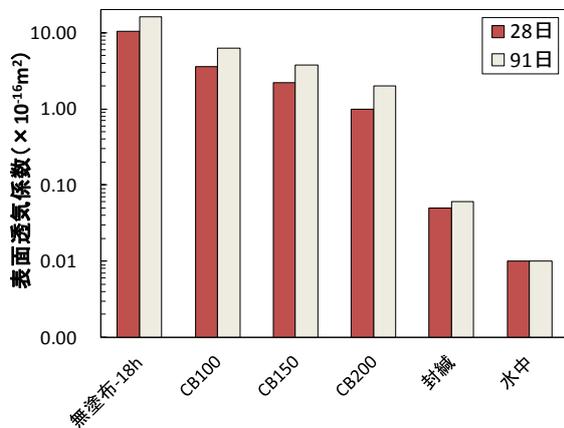


図-6 表面透気係数に及ぼす表面塗布剤の影響

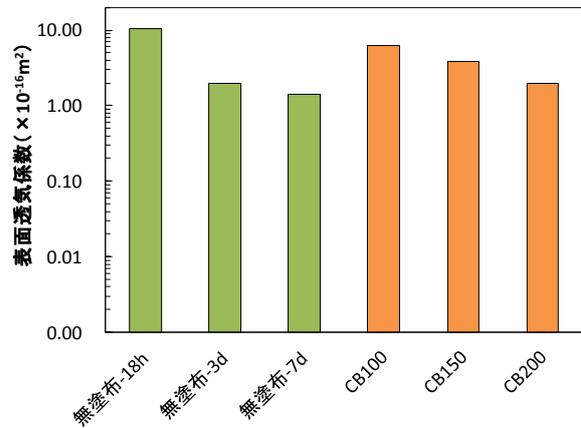


図-7 脱型時期と表面透気係数

収縮ひずみは 45～60%低減された。一方、乾燥期間 182 日の乾燥収縮ひずみを比較すると、無塗布が 670×10^{-6} 程度であるのに対し、CB を塗布すると $560 \sim 650 \times 10^{-6}$ 程度となり、収縮低減効果は 3～16%と、乾燥期間 28 日より相対的に低下した。また、CB の塗布量を増加させると、CB100 に対して CB150 は乾燥収縮ひずみが低減されたが、CB150 と CB200 では明確な違いは認められず、効果が頭打ちになる傾向が認められた。

図-5 に、CB200 および無塗布の場合の質量減少率と乾燥収縮ひずみとの関係を示す。同図より、CB200 のほうが無塗布の供試体よりも相対的に質量減少率が小さいことがわかる。このことから、CB を塗布することによる乾燥収縮低減効果は、水分逸散を抑制したことによると考えられる。一方、同一質量減少率で比較すると、乾燥収縮ひずみは、CB200 のほうが無塗布の場合よりも総じて大きい。同じ逸散水量の場合、細孔構造が緻密なコンクリートほど、収縮駆動力が大きくなることが知られている。本実験においても、図-3 (a) の細孔径分布より硬化体が緻密化され、総細孔量が減少していることが確認されている。そのため、CB を塗布したほうが、同一逸散水量において乾燥収縮ひずみが増大したと考えられる。

以上のことから、CB を塗布することによって、乾燥初期では、水分逸散を抑制する効果が支配的となるため、無塗布の場合よりも収縮が大幅に抑制される。一方、乾燥期間が経つと、硬化体の空隙構造が支配的になるため、収縮発現速度が大きくなり、長期的には収縮抑制効果は低減することが明らかとなった。

(4) 表面透気係数

図-6 に、CB の塗布量と表面透気係数の関係を示す。表面透気係数は、塗布量が増加するほど小さくなり、材齢 28 日の表面透気係数は無塗布-1d が $10.6 \times 10^{-16} \text{m}^2$ であるのに対し、CB100, CB150, CB200 ではそれぞれ $3.57 \times 10^{-16} \text{m}^2$, $2.23 \times 10^{-16} \text{m}^2$, $1.00 \times 10^{-16} \text{m}^2$ となった。「東・中・西高速道路株式会社：トンネル施工管理要領」³⁾ では、膜養生剤を使用した場合の材齢 28 日の表面透気係数の基準を $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下と定めている。今回の結果によれば、 200g/m^2 塗布した場合にこの基準を満足することを確認した。また、水中養生を行った場合を除き、いずれも表面透気係数は材齢 28 日より材齢 91 日のほうがやや大きくなる傾向が認められた。これは、コンクリートの透気性は、水分が逸散した空隙の量の影響を受けるとされており⁶⁾、材齢にともなう供試体内の含水率の変化が影響したものと考えられる。

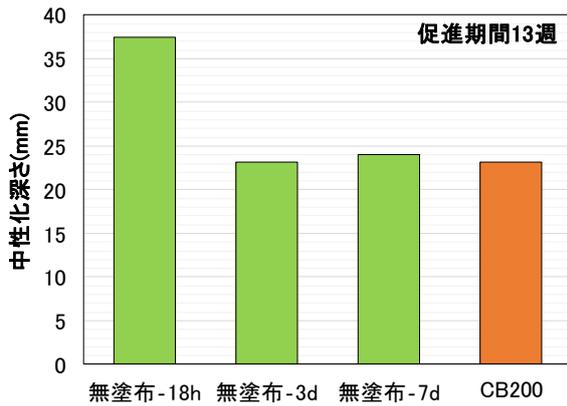


図-8 中性化深さ (促進 13 週)

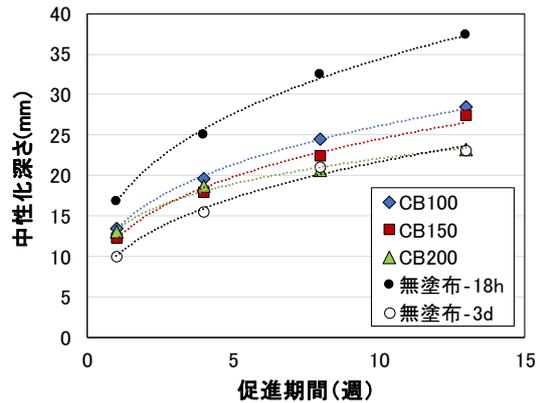


図-9 促進期間と中性化深さの関係

図-7 に、脱型時期を 18 時間、3 日、7 日に変化させ CB を無塗布の供試体と、CB100、CB150、CB200 の材齢 91 日における表面透気係数を示す。脱型時期が 18 時間の場合 $16.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 、3 日の場合 $1.97 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 、7 日の場合 $1.43 \times 10^{-16} \text{m}^2$ となり、脱型時期が遅くなるほど表面透気係数が小さくなる傾向を示した。また、脱型時期が、3 日と 7 日ではそれほど表面透気係数が変わらないのに対し、脱型時期が 18 時間の場合、著しく表面透気係数が大きくなる傾向が確認された。一方、CB を塗布した供試体の表面透気係数の常用対数は、おおむね塗布量に比例した。CB200 の表面透気係数は $2.00 \times 10^{-16} \text{m}^2$ であり、脱型時期を 3 日にした場合とおおむね一致した。

(5) 中性化抵抗性

図-8 に、促進中性化試験における促進期間 13 週の中性化深さを、CB を塗布した場合、脱型時期を変化させた無塗布の場合および水中、封緘養生の場合について示す。促進期間 13 週の中性化深さは、CB の塗布量が多くなるほど浅くなる傾向であった。また、18 時間脱型の無塗布の場合、中性化深さが 37.5mm であるのに対し、CB200 の場合は 23.2mm となり 38%程度抑制された。脱型時期を 18 時間から 3 日に延長すると中性化深さが 40%程度減少し、7 日まで延長した場合とほぼ同程度の結果であった。また、CB200 の中性化深さは、ほぼ脱型時期を 3 日あるいは 7 日にした場合と同様であり、前述の表面透気係数における大小関係と一致した。

図-9 に、促進期間にともなう中性化深さの進行を示す。同図より、促進期間 1 週では CB の塗布量によらずほとんど中性化深さが同程度であることがわかる。一方、促進期間の経過にともなって CB200 の中性化深さの進行がその他の場合よりも著しく遅くなっていることがわかる。これが、養生効果による硬化体組織の変化によるものなのか、CB の特性であるかは現状明らかでなく、今後、確認する必要がある。

(6) 簡易透水試験

図-10 に、簡易透水試験における透水時間と透水量と

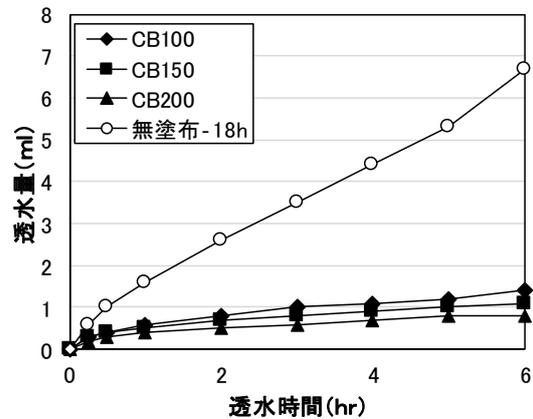


図-10 簡易透水試験結果

の関係を、CB100、CB150、CB200 および無塗布-18h について示す。なお、測定開始時の供試体の表面含水率は 4.0~4.7%であり、供試体間の含水状態の違いの影響は小さいと考えられた。CB を塗布することによって無塗布-18h よりも、透水量が大幅に減少した。透水 6 時間後の透水量は、無塗布-1d と比べて、1~2 割程度となった。また、無塗布-18h の供試体は、透水 6 時間以降も透水量が増加する傾向であるのに対し、CB を塗布したものは、いずれも透水量の増加が頭打ちになる傾向であった。透水 6 時間における CB100、CB150、CB200 の透水量は、それぞれ 1.4mm、1.1mm、0.8mm であり、CB の塗布量にともなう透水量の変化は 50g/m^2 あたり 0.3mm であった。

3.2 表面透気係数とその他物性との関係

近年では、表面透気係数は耐久性評価する有効的手段として検討がなされており、中性化抵抗性や塩分浸透抵抗等と高い相関性を有することも報告されている⁷⁾ことから、本実験においても、表面透気係数を用いて圧縮強度、中性化速度係数との関係を整理した。なお、促進中性化試験を材齢 91 日より実施していることから、強度および表面透気係数についても同様に、材齢 91 日を基準とすることにした。

図-11 に、材齢 91 日における表面透気係数と圧縮強

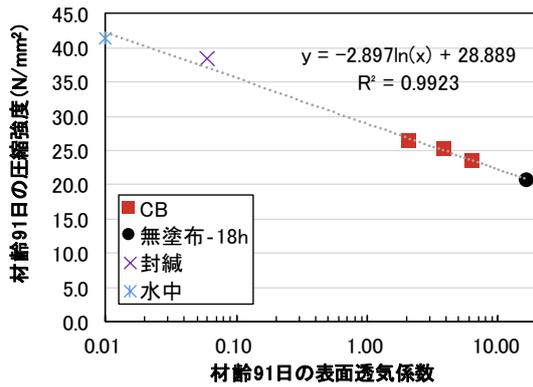


図-11 表面透気係数と圧縮強度の関係

度との関係を示す。表面透気係数が小さいものほど、圧縮強度が大きくなる傾向であり、養生方法の違いにかかわらず、両者の関係は一致した。

図-12に、材齢91日の表面透気係数と中性化速度係数の関係を示す。CBを無塗布の場合(無塗布-18h, 封緘, 水中)の表面透気係数と中性化速度係数の関係を最小二乗回帰結果によれば、両者には高い相関があることがわかる。一方、CBを塗布したものは、無塗布のものよりも中性化速度係数がやや小さくなる傾向であった。これは、前述した中性化の進展挙動が無塗布の場合と塗布した場合で異なったことに由来すると考えられる。すなわち、CBを塗布した場合、促進初期の中性化を抑制する効果はあまり認められないのに対し、長期になると明確な中性化抑制効果が認められる。そのため、 \sqrt{t} 則に従って最小二乗回帰した中性化速度係数は、CBを塗布したほうが、無塗布の場合よりも小さく算出されたものと考えられる。これについては、さらに長期的な試験結果に基づき、判断する必要がある。

4. まとめ

早期脱型し気中養生した水セメント比60%の中流動コンクリートに、表面塗布剤を用いた場合の物性に及ぼす影響について検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 表面塗布剤を用いたコンクリートの圧縮強度は、使用しないものよりも大きくなった。塗布量が多いほど、長期強度の増進が大きくなる傾向であった。これは、表面塗布剤によって硬化体中の水分が保持され水和水が継続したためであると考えられ、細孔構造の変化からもその傾向が確認された。
- (2) 表面塗布剤を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、使用しないものよりも小さくなった。収縮抑制効果は、乾燥初期に大きく、長期になるほど小さくなった。塗布量が150g/m²以上では、効果は頭打ちとなった。

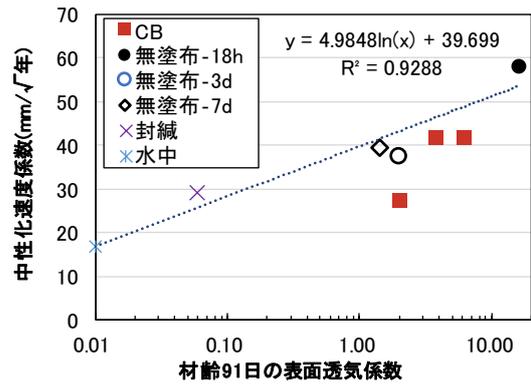


図-12 表面透気係数と中性化速度係数の関係

- (3) 表面塗布剤を200g/m²使用することで、トンネル施工要領に示される基準値 $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を満足した。これは、材齢3日まで型枠に存置した供試体とほぼ同等の結果であった。
- (4) 表面塗布剤を200g/m²使用した場合の中性化速度係数は、材齢3日まで型枠に存置した場合とほぼ同等の結果であった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー137 けい酸塩系表面含浸工法的设计施工指針(案), 2012.7
- 2) 高橋 洋朗, 俵 道和, 呉 承寧, 郭 度連：コンクリートの養生効果および耐久性向上効果を有する表面塗布剤に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 3) 東・中・西高速道路株式会社：トンネル施工管理要領, 2016.8
- 4) R.J.Torrent：A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, No.150, pp.358-365, 1992
- 5) 郭 度連, 国府 勝郎, 宇治 公隆, 上野 敦：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす水セメント比および養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003
- 6) 河野 俊一, 氏家 勲：乾燥によるコンクリートの透気係数の変化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, 1999
- 7) 早川 健司, 水上 翔太, 加藤 佳孝：表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.68, No.4, pp.385-398, 2012