

論文 養生方法の違いが覆工コンクリートの諸物性に及ぼす影響

廣中哲也*1・三澤孝史*2・石井敏之*3・東 邦和*4

要旨: トンネルの覆工コンクリートの養生には従来の湿潤養生に加えて新しい方法が開発、実用化されている。しかし、コンクリートの配合や養生条件を変えてパラメトリックに養生性能を評価した事例は少ない。そこで、覆工コンクリートの標準的な配合を用いて、養生方法、養生温度、養生湿度および養生期間等をパラメータとした小型試験体による要素実験を行った。その結果から、乾燥収縮ひずみの比を評価指標の一つとして、ひび割れ低減効果と覆工コンクリートの養生方法の選定に必要な基礎データが得られ、養生方法と養生効果の関係を明らかにした。

キーワード: 養生, 覆工コンクリート, 乾燥収縮ひずみ, 含水率, 表面透気係数

1. はじめに

トンネルの覆工コンクリートの施工では、表面の出来映えや供用期間中の剥落防止に特段の注意が払われている。山岳トンネルの覆工コンクリートの標準的な施工では、コンクリートを打設して1日以内にセントル型枠が脱型され、その後の養生は、ほとんど実施されていなかった。そのため、環境および施工条件によっては、コンクリート表面からの水分の蒸発による乾燥収縮や水和反応の阻害からひび割れ発生等の品質低下が生じる場合がある。

そこで、覆工コンクリートの品質の向上には、一般的なコンクリート構造物と同等の養生が必要であり¹⁾、散水養生、湿布養生、膜養生等の養生方法が開発、適用されている²⁾。しかし、これらの養生方法には、配合や養生条件等をパラメータとして性能を評価した事例が少ないため、環境条件および施工条件等に応じた養生方法の選定が困難となっている。

本研究では、覆工コンクリートの養生方法を選定するために、養生方法および養生条件をパラメータとした要素実験を実施し、覆工コンクリートの養生方法と効果の関係について検討した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合および使用材料

覆工コンクリートの標準的な配合を用いて、養生方法、養生温度、養生湿度および養生期間等の養生条件をパラメータとした。室内試験を実施し、各種物理量の測定からひび割れ低減効果および耐久性を評価した。

表-1にコンクリートの配合および使用材料を示す。鉄道および道路の山岳トンネルで使用されている覆工コ

ンクリートの配合を参考に、骨材の最大寸法 40mm, スランプ 15±2.5cm, 水セメント比を 60%とした。また、セメントには、高炉セメントB種を使用し、コンクリート標準示方書施工編より単位水量を 170kg/m³以下, 単位セメント量を 270kg/m³以上とした。

表-1 コンクリートの配合と使用材料

骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント 比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
40	15±2.5	60	4.5±1.5	41.0	163	272	749	①654 ②436	C× 0.35%
【使用材料】									
セメント: 高炉セメントB種, 密度 3.04g/cm ³									
細骨材: 富津産山砂, 密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 1.95%, 粗粒率 2.45									
粗骨材: ①最大寸法 20mm, 桜川産碎石, 密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.53%, 粗粒率 6.55									
②最大寸法 40mm, 桜川産碎石, 密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.52%, 粗粒率 9.12(粗骨材混合比①:②=60:40)									
混和剤: AE 減水剤: リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体, 密度 1.04~1.10g/cm ³									

2.2 実験要因および測定方法

表-2に実験要因と水準、図-1に養生および乾燥条件を示す。養生温度を10~30℃の3水準、養生中の相対湿度を60%と80%に変化させた。材齢12時間で脱型後、水中養生、散水養生、保湿養生、保温保湿養生、膜養生を実施し、養生期間、養生方法の組合せ、膜養生材料の種類を変化させた。湿度80%養生は、脱型後の相対湿度を80%一定とした。乾燥期間は、養生期間の終了、乾燥収縮低減剤の噴霧および改質材の塗布以降と定義し、乾燥期間中の相対湿度を60%一定とした。なお、養生効果を確認するための試験体は、高炉セメントB種の水セメント比を60%、材齢12時間で脱型し、相対湿度を60%一定で乾燥させた(以降、無対策と呼ぶ)。

*1 (株) 奥村組 技術研究所 土木研究課 (正会員)
 *2 (株) 奥村組 技術研究所 土木研究課 課長 (正会員)
 *3 (株) 奥村組 技術研究所 土木研究課 (正会員)
 *4 (株) 奥村組 技術研究所 土木研究課 博(工) (正会員)

表-3に養生材料の仕様および養生方法、写真-1に各種養生状況を示す。予備実験結果から散水養生では、250ml/分の水を30分に1回の頻度で散布、保湿養生および保温保湿養生では、シートで試験体を覆い、1ℓ/m²の水を3日に1回の頻度で散布して保水させた。乾燥収縮低減剤の噴霧および改質材の塗布は脱型後直ちに実施し、使用量は標準値の150ml/m²とした。また、養生方法の組合せでは、保湿養生または保温保湿養生の終了後、コンクリート表面の水光りが無くなった状態で乾燥収縮低減剤の所定量を噴霧した。

表-4に主な測定項目と評価方法を示す。ひび割れの低減効果を①乾燥ひび割れに影響するコンクリートの表面含水率の比およびコンクリートの収縮ひずみの比、②温度ひび割れに影響するコンクリートの内部温度の差、③耐久性に影響する表面透気係数、促進中性化深さおよび細孔径分布により評価した。

写真-2に小型試験体の形状を示す。覆工厚を考慮した縦300×横500×高さ500mmの試験体（以降、小型試験体と呼ぶ）のひずみ、表面含水率、表面透気係数を測定した。さらに、小型試験体から圧縮強度測定用の直径68×高さ136mmのコア試験体採取した。また、比較用に直径125×高さ250mmの標準試験体を作製した。小型試験体および標準試験体ともに材齢12時間で脱型し、小型試験体の横500×高さ500mmの1面のみを測定面とし、それ以外の面を厚さ50mmの押出法ポリスチレンフォーム保温材で覆い、保温すると共に乾燥を防止した。

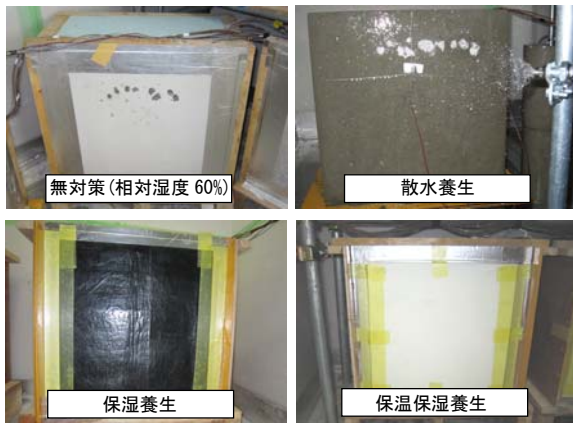


写真-1 各種養生状況

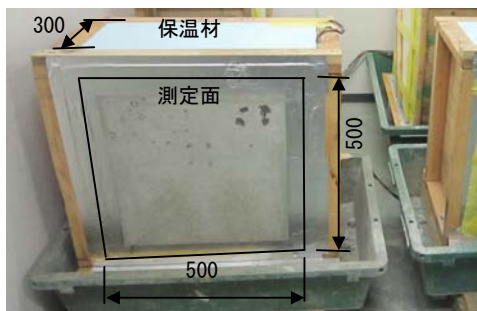


写真-2 小型試験体の形状

表-2 実験要因と水準

要 因		水 準	
基本条件	水セメント比	2水準(50, 60%)	
	セメント種類	2水準(高炉B種, 普通)	
	養生温度	3水準(10, 20, 30℃)	
	相対湿度	2水準(60, 80%)	
養生方法	無対策(比較)	12時間脱型後, 湿度60%養生	
	湿度80%	12時間脱型後, 湿度80%養生	
	水中養生	養生期間3水準 (材齢7, 14, 28日)	
	散水養生		
	保湿養生		
	保温保湿養生		
	膜養生	乾燥収縮低減剤	2水準(A社製, B社製)
		改質材	2水準(C社製, D社製)
組合せ	保湿養生+乾燥収縮低減剤	養生期間3水準 (材齢7, 14, 28日)	
	保温保湿養生+乾燥収縮低減剤		
【備考】			
・脱型材齢は、全て12時間とした			
・養生期間の終了以降を乾燥期間とし、乾燥時の相対湿度は60%とした			

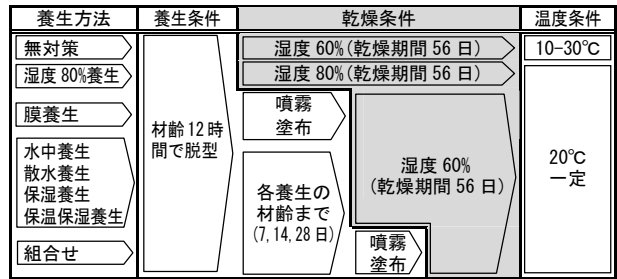


図-1 養生および乾燥条件

表-3 養生材料の仕様および養生方法

種 類	養生材料の仕様および養生方法
無対策	相対湿度60%にて養生
湿度80%養生	相対湿度80%にて養生
水中養生	20℃の水中にて養生
散水養生	250ml/分の水を30分に1回の頻度で散布
保湿養生	・水膨潤ウレタンタイプ、厚さ1.8mm、初期保水量800ml/m ² ・保湿シートで試験体を覆い、1ℓ/m ² の水を3日に1回の頻度で散布
保温保湿養生	・水膨潤ウレタン+発砲ポリスチレンタイプ、厚さ11mm、初期保水量800ml/m ² 、熱伝達率6.2W/m ² ・℃ ・保温保湿シートで試験体を覆い、1ℓ/m ² の水を3日に1回の頻度で散布
膜養生	乾燥収縮低減剤
	改質材
組合せ	保湿養生+低減剤 養生期間終了後、コンクリート表面の水光りが無くなった状態で乾燥収縮低減剤を噴霧 保温保湿+低減剤

表-4 主な測定項目と評価方法

対象効果	測定項目	測定方法	評価方法	試験体形状
乾燥ひび割れの低減	表面含水率	高周波容量式水分計	表面含水率の比	小型試験体 ・縦300mm ・横500mm ・高さ500mm
	収縮ひずみ	埋込み型ひずみゲージ ・表面から30, 50, 150, 250mmに設置	収縮ひずみの比	
温度ひび割れの低減	コンクリート温度	熱電対 ・表面から30, 50, 150, 250mmに設置	内部温度の差	標準試験体(JIS A 1108) ・材齢7, 28, 56日
	水和反応の進行	圧縮強度	圧縮強度の比	
耐久性の向上	表面透気係数	表面透気試験(トレイト法) ・材齢56日	表面透気係数	小型試験体
	中性化深さ	促進中性化試験(JIS A 1152, JIS A 1153)	中性化深さ	小型試験体から採取 (コア試験体)
	細孔量細孔径	細孔径試験(水銀圧入法) ・表面-10, 15-25, 30-40, 45-55, 95-105mmで円板状に切断	累積百分率平均細孔径	小型試験体から採取 (コア試験体) ・直径68mm ・高さ136mm

表面透気係数の測定には、トレント法を採用した³⁾。トレント法は、直径 150mm、厚さ 100mm 程度の平滑なコンクリート面を確保できれば、1箇所 12分程度と非破壊で迅速に測定できる方法である。促進中性化試験では、養生および乾燥期間終了後の小型試験体から採取したコア試験体を用いて、JIS A 1152 および JIS A 1153 に準拠して中性化深さを測定した。また、細孔径試験では、同様に採取したコア試験体を輪切りにした円板から粗骨材分を除去して得られたモルタル状の試料を用いて、水銀圧入法により空隙の大きさとその体積を測定した。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの表面含水率

図-2に各種養生方法とコンクリートの表面含水率を示す。コンクリートの表面含水率では、所定の乾燥期間毎に高周波容量式水分計を用いて測定した。乾燥収縮低減剤および改質材の無対策と比べたコンクリートの表面含水率は、乾燥期間3~7日では大きい傾向を示すが、28日ではほぼ等しくなっている。それに対して、湿度80%、水中、散水および保湿養生は、乾燥期間28日のコンクリートの表面含水率が高い状態にある。

図-3に乾燥期間28日の無対策に対する表面含水率の比を示す。乾燥期間28日の無対策に対する表面含水率の比は、大きい順に水中、散水、湿度80%、保湿養生となり、表面含水率の比で1.0以上を示すことから、コンクリート表面からの乾燥防止および保水効果が乾燥期間28日まで持続することが分かる。これは、養生によりコンクリート中に水分を供給したこと、セメントの水和反応が促進されて密実な組織となったことに起因すると考えられる。ただし、水中養生および散水養生の高含水率の状態では養生を終了した場合、条件によっては微細な乾燥収縮ひび割れが発生したことから、養生期間中の散水量や散水頻度等に留意する必要がある。なお、乾燥期間28日の乾燥収縮低減剤と改質材の無対策に対する表面含水率の比は1.00~1.04倍と小さく、乾燥防止および保水効果は、図-2より一部を除いて乾燥期間3~7日程度である。

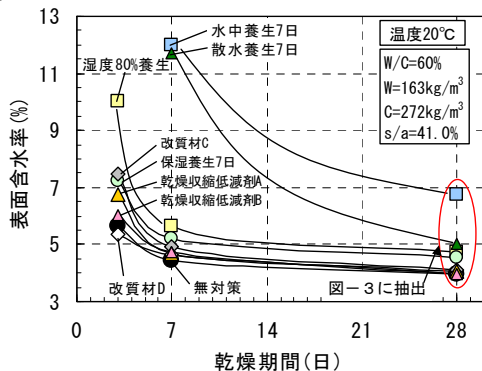


図-2 各種養生方法とコンクリートの表面含水率

3.2 圧縮強度

図-4に材齢56日の標準試験体および小型試験体から採取したコア試験体の圧縮強度と各種養生方法の関係を示す。標準試験体の圧縮強度は、コア試験体の0.5~0.9倍と小さな値を示している。これは、コア試験体は片方の端面だけから乾燥するのに対して、標準試験体は全面から乾燥するため、乾燥の影響を大きく受け、セメントの水和反応が阻害されたのとも考えられる。

図-5に材齢56日の無対策に対するコア試験体の圧縮強度の比を示す。無対策に対するコア試験体の圧縮強度の比は、水分供給のある水中、保湿、保温保湿および散水養生で1.4~1.6倍と大きな値を示し、乾燥収縮低減剤および改質材で1.2程度を示している。なお、湿度80%養生では、1.05倍程度と無対策に対する強度発現効果は小さいことが分かる。

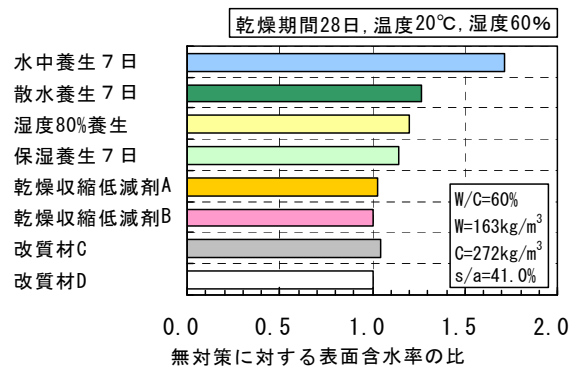


図-3 乾燥期間28日の無対策に対する表面含水率の比

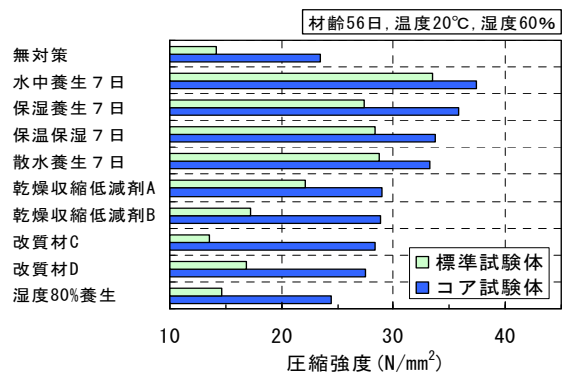


図-4 標準およびコア試験体強度と各種養生方法

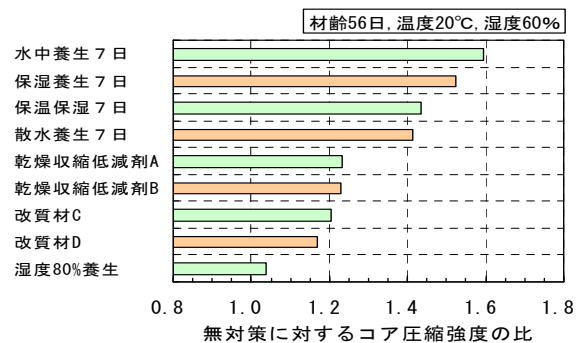


図-5 無対策に対するコア試験体の圧縮強度の比

図-6に養生期間と材齢56日の無対策に対するコア圧縮強度の比の関係を示す。養生期間が長くなるのに伴って、水中養生、保湿養生、保温保湿養生および散水養生の無対策に対するコア圧縮強度の比は大きくなり、養生の実施期間14日以降の増加傾向は小さく、ほぼ収束している。

3.3 コンクリートの収縮ひずみ

図-7に養生方法と表面から30mmのコンクリートの収縮ひずみ、図-8に乾燥期間28日での無対策に対するコンクリートの収縮ひずみの比を示す。乾燥期間28日における各養生のコンクリートの収縮ひずみは、無対策の -400×10^{-6} から水中養生7日の -90×10^{-6} の範囲に分布している。また、無対策に対する収縮ひずみの低減効果は、効果の高い順に水中養生、保温保湿養生、保湿養生、散水養生、湿度80%養生、乾燥収縮低減剤、改質材となり、無対策に対する収縮ひずみの比は、0.2~0.9倍と効果に大きな差があることを確認した。

図-9に各養生終了後に28日間乾燥させた場合の養生期間と無対策に対するコンクリートの収縮ひずみの比を示す。養生期間が長くなるのに伴って、水中養生、保温保湿養生、保湿養生および散水養生の無対策に対する収縮ひずみの比は小さくなり、散水養生では実施期間14日、保温保湿養生および保湿養生では実施期間7日で0.3倍の値を示している。

図-10に打設完了後の養生温度と表面から30mmのコンクリートの収縮ひずみ、図-11に養生温度を10℃としたコンクリートの収縮ひずみに対する各養生温度での収縮ひずみの比を示す。養生温度が高くなるのに伴ってコンクリートの収縮ひずみの比は減少しており、養生温度10℃に対して、養生温度20℃で0.6倍、30℃で0.5倍の値を示している。また、収縮ひずみは、養生温度20℃~30℃区間に比べて、10℃~20℃区間の減少が大きくなっており、冬期の給熱対策が収縮ひび割れ低減に有効であると考えられる。

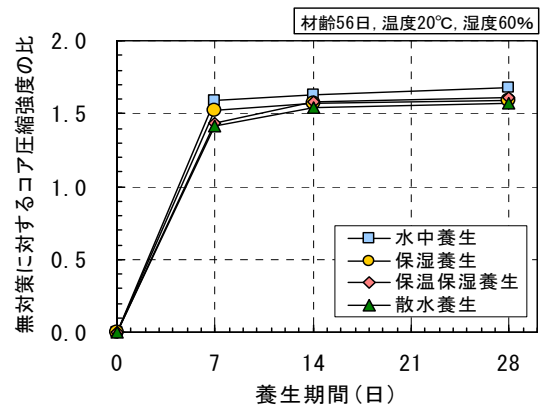


図-6 養生期間と無対策に対するコア圧縮強度の比

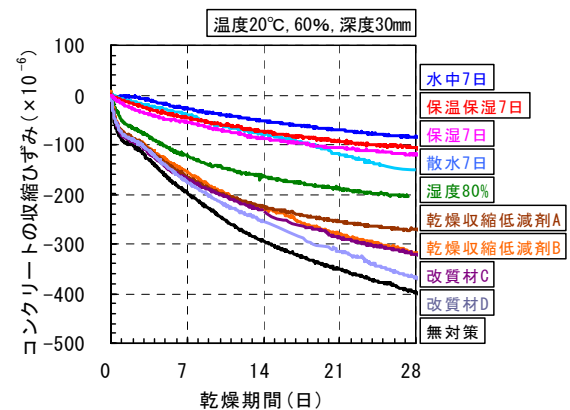


図-7 養生方法とコンクリートの収縮ひずみ

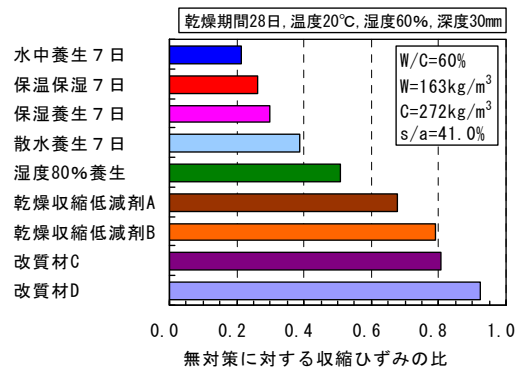


図-8 無対策に対するコンクリートの収縮ひずみの比

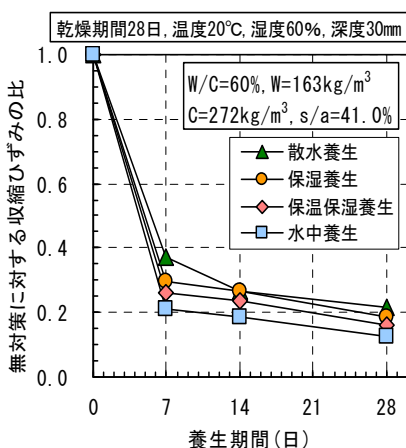


図-9 養生期間と収縮ひずみの比

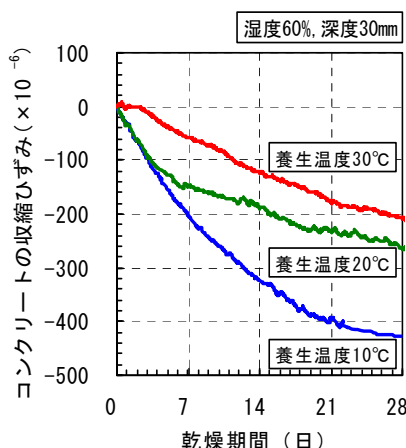


図-10 養生温度と収縮ひずみ

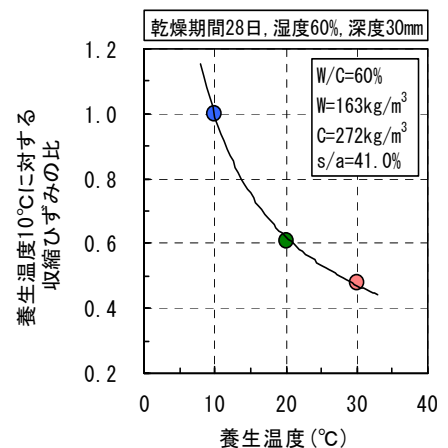


図-11 養生温度と収縮ひずみの比

図-12 に保温保湿養生後に乾燥収縮低減剤を噴霧した場合の無対策に対する収縮ひずみの比、写真-3 に水の噴霧により強調したコンクリート表面の状況を示す。保温保湿養生期間が終了した後に、コンクリート表面の水光りが無くなった時点で乾燥収縮低減剤を噴霧した。図-12 より保温保湿養生7日後に乾燥収縮低減剤を噴霧した場合は、無対策に対する収縮ひずみの比は、保温保湿養生7日と比べて小さくなっており、養生方法の組合せにより収縮ひずみの低減効果が大きくなることを確認した。一方、保温保湿養生の養生期間の長い14日と28日では、無対策に対する収縮ひずみの比にはほとんど変化がなく、組合せによる収縮ひずみの低減効果は得られないことが分かる。これは、保湿養生を14日以上実施することで、セメントの水和反応の進行に伴う十分な引張強度の発現と緻密な組織の形成による収縮ひずみの低減効果が乾燥収縮低減剤の効果を上回ったものと考えられる。また、写真-3 に示す目視観察結果から保温保湿養生と乾燥収縮低減剤の組合わせ使用により、保温保湿養生7日、14日および28日に発生していたコンクリート表面の微細なひび割れを防止できることを確認した。これにより、乾燥収縮低減剤の使用はコンクリート表面の微細な乾燥収縮ひび割れの防止に有効である。

図-13 に水セメント比およびセメント種類と収縮ひずみの比を示す。収縮ひずみの比は、各養生方法における高炉セメントB種を用いた水セメント比60%の収縮ひずみに対する比とした。湿度60%養生では、水セメント比を60%から50%に小さくすることやセメント種類を高炉セメントB種から普通ポルトランドセメントに替えることで、収縮ひずみを1割程度低減できる。

3.4 内部温度

写真-4 にコンクリート温度測定用の熱電対設置状況、図-14 にコンクリート表面30mmと内部150mmの温度履歴、図-15 にコンクリート表面30mmと内部150mmの温度差を示す。保温保湿養生では、無対策に比べて、

コンクリート温度の降下が遅くなり、コンクリート表面と内部の最大温度差で5.5°C程度減少している。これにより、コンクリート表面と内部の温度差に起因する引張応力の発生時期が遅くなるとともに、引張応力の値が小さくなることで、水和熱による温度ひび割れの低減効果を期待できる。

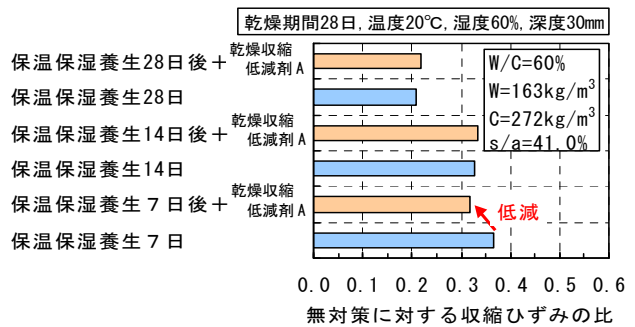


図-12 保温保湿養生と乾燥収縮低減剤の組合せ効果

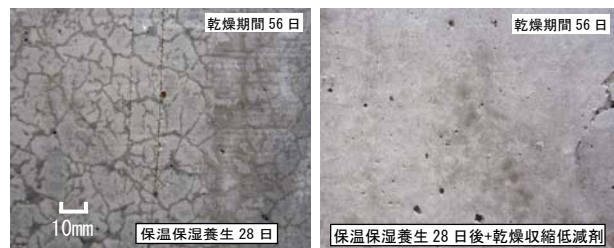
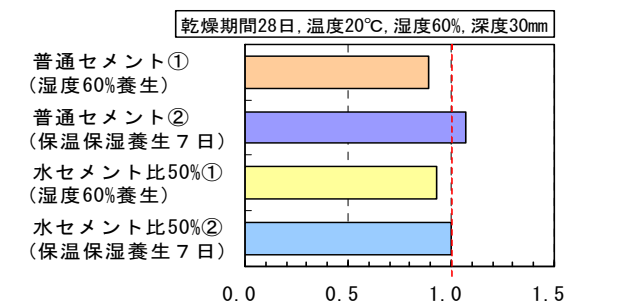


写真-3 水の噴霧により強調した表面の状況の一例



各養生方法での高炉セメント使用のW/C=60%に対する収縮ひずみの比
図-13 水セメント比、セメント種類と収縮ひずみの比

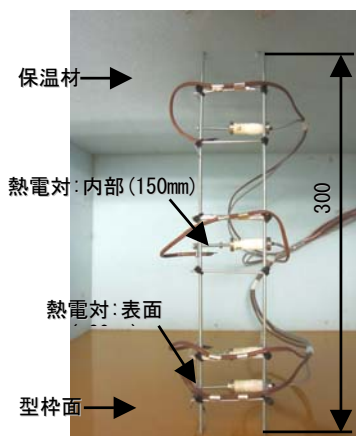


写真-4 温度測定用の熱電対設置状況

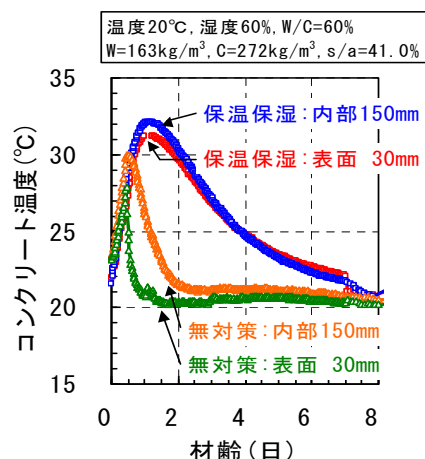


図-14 表面と内部の温度履歴

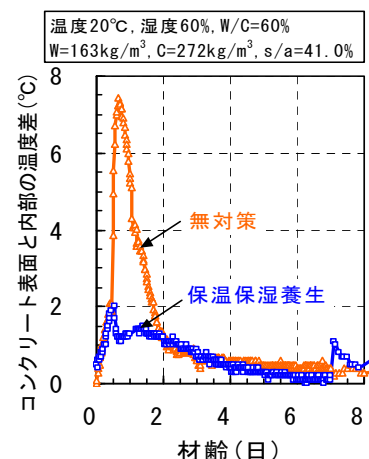


図-15 表面と内部の温度差

3.5 耐久性

図-16にコンクリート表面から深さ10mm区間(コンクリート表面からの平均深さ5mm)の細孔径分布, 図-17に各種養生方法と表面透気係数の関係を示す。細孔径曲線は, 無対策に比べて, 細孔径の小さい側に分布しており, 直径の小さい順に水中, 散水, 保湿, 保温および保温保湿養生となった。また, 表面透気係数も無対策に比べて, 水中, 保湿, 保温保湿および散水養生で小さくなっている。これらの結果から水和反応の促進により緻密な組織が形成されていることが推測できる。

図-18に各種養生方法と促進中性化深さ, 図-19に表面透気係数と促進中性化深さを示す。無対策に対する各養生方法の促進中性化深さは, 促進中性化期間26週で0.40~0.75倍と小さくなっている。また, 表面透気係数

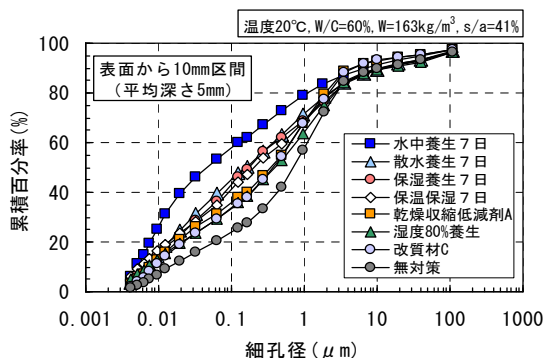


図-16 表面から深さ10mm区間の細孔径分布

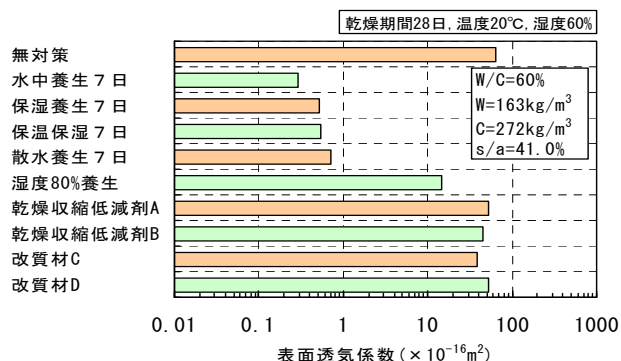


図-17 各種養生方法と表面透気係数

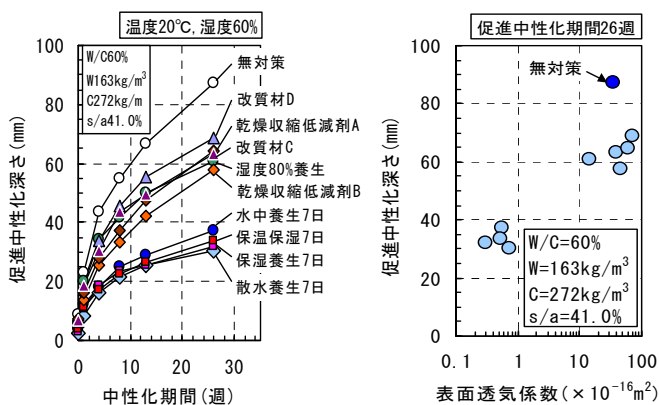


図-18 促進中性化深さ 図-19 透気係数と中性化深さ

が小さいほど促進中性化深さも小さな値を示しており, 組織が緻密になり二酸化炭素の浸透を抑制することで中性化抵抗性が向上したものと考えられる。

4. まとめ

覆工コンクリートの養生方法および養生条件をパラメータとした室内実験から, 以下の事項を明らかにした。

- (1) 無対策に対するコア試験体の圧縮強度は, 水中養生, 保湿養生, 保温保湿養生および散水養生では1.4~1.6倍, 乾燥収縮低減剤および改質材では1.2倍程度である
- (2) 無対策に対する収縮ひずみの低減効果は, 効果の高い順に水中養生, 保温保湿養生, 保湿養生, 散水養生, 湿度80%養生, 乾燥収縮低減剤, 改質材となり, 無対策に対する収縮ひずみは, 0.2~0.9倍と効果に大きな差がある
- (3) 無対策に対する収縮ひずみは, 散水養生では実施期間14日以降, 保温保湿養生および保湿養生では実施期間7日以降で0.3倍以下となり, 養生期間による収縮ひずみの低減効果の目安が得られた
- (4) 養生温度10℃に対する収縮ひずみは, 養生温度20℃で0.6倍, 30℃で0.5倍となり, 10~20℃区間の収縮ひずみの低減割合が大きいので, 冬期の低温時の給熱が収縮ひび割れ低減に有効である
- (5) 保湿養生は, コンクリート温度の降下を遅くし, 表面と内部の温度差を小さくするため, 水和熱による温度ひび割れの低減効果を期待できる
- (6) 養生期間7日の場合に保温保湿養生と乾燥収縮低減剤の組合せによる収縮ひずみ低減効果が得られ, 乾燥収縮低減剤の使用は, 微細な収縮ひび割れの防止に有効である
- (7) 水中養生, 保湿養生, 保温保湿養生, 散水養生および湿度80%養生の細孔径と表面透気係数は, 無対策に比べて小さくなっており, コンクリートの組織が緻密になることで中性化抵抗性が向上する

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・施工編, pp.126-129, 2007
- 2) 例えば, 山田浩幸, 後藤裕一, 水町 実, 坂本全布：温度制御噴霧式覆工コンクリート養生法の開発, トンネルと地下, Vol.39, No.4, pp.45-53, 2008
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.80 構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会(335 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集, pp.30-36, 2008