

論文 練上がり温度がモルタルの各種耐久性に及ぼす影響および表面塗布剤による物性改善

中山 莉沙*1・東 洋輔*2・森 寛晃*3・多田 克彦*4

要旨: 普通ポルトランドセメントを用いたモルタルにおいて、暑中期を想定した練上がり温度および脱型後に行う養生剤の塗布が強度および各種耐久性に与える影響を検討した。その結果、練上がり温度が高くなると 20nm 以上の空隙が増加して強度が低下すること、塩化物イオンの浸透や中性化に対する抵抗性が低下することが分かった。ただし、練上がり温度が 35℃を超える場合でも、養生効果のある表面塗布剤を使用することで、モルタル強度は 32℃の場合と同等あるいはそれ以上に回復すること、さらに、耐久性の向上も期待できることが分かった。

キーワード: 暑中コンクリート, 練上がり温度, 養生剤, 圧縮強度, 耐久性

1. はじめに

近年の温暖化等の気候変動の影響で、平年値から得られた適用期間の日数と実際の日数の差がこの 10 年間で大きくなる傾向にある¹⁾。このため、コンクリート温度の低減に関する種々の対策を行っても、荷卸し時点のコンクリート温度が 35℃を超えることが避けられない事態が想定される。このような事態を鑑みて、JASS5 鉄筋コンクリート工事(解説)では、適切な対策を取ることを条件に荷卸し時点のコンクリート温度 38℃までを許容するとの記載がなされた²⁾。

暑中期のコンクリート温度がコンクリートの品質に与える影響に関する検討は、実機試験などでのデータ蓄積がなされつつあるものの、強度への影響ですら統一的な見解が得られているわけではない(例えば、3),4),5)。また、耐久性に関する知見はさらに少なく、指針類で示された上限付近のコンクリート温度(35℃)の影響を検討したものとしては、表面透気係数や中性化深さを評価した文献^{6),7)}がいくつか存在するだけである。

また、コンクリートの練上がり温度が高く、打ち込み後の上昇により 35℃を超えてしまう場合も想定し、コンクリートの品質を確保するための対策を検討しておくことも重要である。

本検討では、暑中期を想定したコンクリートの練上がり温度が強度および各種耐久性に与える影響を把握するとともに、コンクリートの品質を確保するための対策として、表面塗布剤の品質改善効果を検討することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料の一覧を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は掛川産山砂を用い、表乾状態で使用した。混和剤は暑中期のスランプロスを考慮して遅延型の高性能AE減水剤を使用し、空気量の調整には消泡剤を用いた。また、練上がり温度が上昇した場合にコンクリートの品質を確保するための対策の一つとして、脱型後、表面に塗布するタイプの耐久性向上養生剤(以後、CBと称す)を使用した。なお、CBは疎水性化合物の浸透で表層部を緻密化し、かつ特殊シラン系化合物の作用により水分逸散を防ぐことで、保水による養生効果を発揮する養生剤である^{8),9),10)}。

2.2 実験水準および配(調)合

(1) 実験水準

実験要因および水準の一覧を表-2に示す。実験要因は練上がり温度および対策の有無とした。練上がり温度の水準として、コンクリート標準示方書が定める上限温度 35℃を下回る 32℃、2015 年の JASS5 改定において条

表-1 使用材料

種類	材料名	物性および成分
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.18g/cm ³
細骨材	掛川産山砂	表乾密度 2.56g/cm ³
混和剤	高性能 AE 減水剤 遅延型	ポリカルボン酸 エーテル系
	消泡剤	ポリアルキレン グリコール誘導体
養生剤	耐久性向上養生剤	特殊シラン系化合物 アルケニル系 エステル化合物

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所第2研究部 TBC チーム 研究員 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所第2研究部 TBC チーム 研究員 工修 (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所第2研究部 TBC チーム 主任研究員 工修 (正会員)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所第2研究部 TBC チーム リーダー (正会員)

表-2 実験要因と水準

表記	練上がり温度(°C)	脱型後の対策
32°CBL	32	なし
32°C CB		耐久性向上養生剤 CB
38°CBL	38	なし
38°C CB		耐久性向上養生剤 CB
45°CBL	45	なし
45°C CB		耐久性向上養生剤 CB
20°CBL	20	なし

表-3 配(調)合

W/C (%)	S/C	単体量 (kg/m ³)		
		W	C	S
45	2.5	259	575	1435

件付きで許容された上限値の 38°C, さらに適切な対策を講じず, これら上限温度を大幅に逸脱した 45°C の 3 水準と比較用の 20°C とした。対策は, 表面塗布剤 CB の有無とした。

(2) 配(調)合

配(調)合を表-3 に示す。水セメント比 45%, 砂セメント比 2.5 のモルタルとした。フレッシュ性状の目標としてモルタルフローは 15 打フローで 220±20mm, 空気量は 2.0±0.5%, 練上がり温度は目標値±2°C とした。フレッシュ性状の目標値を表-4 に示す。

2.3 練混ぜおよび養生方法

(1) 練混ぜ方法

練混ぜにはホバートミキサを用い, 注水後低速で 60 秒, 中速で 90 秒間練り混ぜた。モルタル練上がり温度の調整方法として, 練上がり温度が 32°C の試験水準は, 30°C の練混ぜ水を用い, 38°C および 45°C の水準は, 練混ぜ水の注水時温度の検討を事前に行い, 目標温度になるように温水を適宜用いた。練混ぜは 30°C 恒温恒湿室 (R.H.70%) にて行い, 水以外の材料は全て 30°C 恒温恒湿室 (R.H.70%) に 1 日保管したものを使用した。

(2) 養生方法

各水準の養生方法の概略を図-1 に示す。暑中期を想定した 3 水準は, 所定の練上がり温度であることを確認したうえで, 各温度に設定した恒温恒湿槽内で 24 時間封緘養生を行い, その後 30°C 恒温恒湿室 (R.H.70%) へ移動して, 各試験の材齢まで保管した。比較の 20°C 水準は 20°C 恒温恒湿室 (R.H.60%) にて練混ぜを行い, そのまま封緘養生を行った。脱型は JASS5 が定めた湿潤養生期間の下限値である 5 日に行い, その後は各温度の恒温恒湿室で気中養生を行った。CB を塗布する水準は, 脱型直後に供試体全面に CB を塗布し, 無塗布水準と同じ恒温恒

表-4 フレッシュ性状の目標値

練上がり時の目標値		
練上がり温度 (°C)	15 打フロー (mm)	空気量 (%)
32±2, 38±2 45±2, 20±2	220±20	2.0±0.5

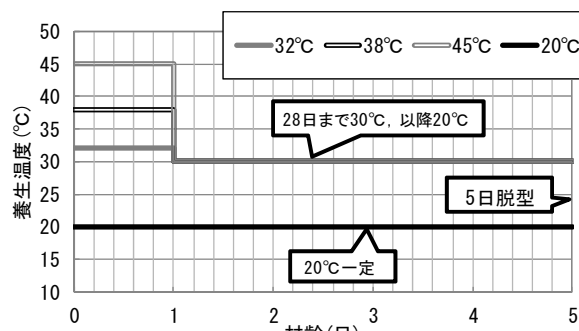


図-1 養生方法

表-5 試験項目および試験方法

試験項目	備考 (試験方法, 供試体寸法等)
圧縮強度	圧縮強度: JIS A 1108
静弾性係数	静弾性係数: JIS A 1149
乾燥収縮	JIS A 1129-3 ダイヤルゲージ法 試験体: 40×40×160mm (材齢 5 日で脱型・基長を行い, 乾燥開始)
塩化物イオン浸透深さ	JSCE-G 572 (供試体の前処理等の一部) 試験体: 100×100×100mm (材齢 28 日から NaCl 濃度 10% 水溶液に浸漬開始)
中性化深さ	JIS A 1153 試験体: 100×100×400mm 角柱切出し (材齢 28 日から 20°C, R.H.60%, CO ₂ 濃度 5% 環境下)
表面透気係数	表面透水係数: トレント法 ¹¹⁾ 表面含水率: 高周波容量式水分計 試験体: 150×150×265mm (材齢 28 日から 20°C, R.H.60% 環境下)
表面含水率	
細孔径分布	水銀圧入法 試験体: φ50×100mm 測定部: 中心部 (材齢 28 日から 20°C, R.H.60% 環境下)

湿室で保管した。

2.4 試験項目

試験項目および試験方法を表-5 に示す。

圧縮強度と静弾性係数の測定は、材齢 5 日、7 日、28 日および 91 日に行った。

長さ変化の測定は、JIS A 1129-3 の方法を参考に行った。材齢 5 日の脱型時に基長測定を行い、その後、30℃恒温恒湿室(R.H.70%)にて保管し、所定材齢において供試体の長さおよび質量を測定した。暑中期を想定した 3 水準は、質量減少が収束した後、20℃恒温恒湿室(R.H.60%)へ移動し、測定を継続した。なお、練上がり温度 20℃の水準は、期間を通じて 20℃恒温恒湿室(R.H.60%)に保管した。

塩化物イオン浸透深さの測定は、100×100×100mm の供試体を用い、供試体の前処理や浸漬試験方法は JSCE-G 572 を参考に行った。塩水浸透面を型枠側面の 2 面とし、その他の面はエポキシ樹脂で被覆した。材齢 28 日から塩水への浸漬を開始し、3 ヶ月後に硝酸銀噴霧法によって塩化物イオン浸透深さを測定した。

中性化促進試験は、促進開始材齢を 28 日としたこと以外は、JIS A 1153 に準じて行った。なお、中性化深さの測定は JIS A 1152 に準拠して行った。

表面透気係数の測定は、150×150×265mm のモルタル供試体の側面を対象に行い、4 箇所での平均値とした。なお、測定箇所の含水状態を把握するため、高周波容量式水分計(測定範囲：表面から 40mm 程度)を用いて表面含水率を測定した。

細孔径分布の測定は水銀圧入式ポロシメーターで行った。測定用の試料は、モルタル供試体 φ50×100mm の中心部からダイヤモンドカッターで 5mm 角に切断したものと、測定前の調整として、アセトンで水和停止後、真空乾燥を 3 日間、D-Dry を 7 日間行った。試験材齢は 28 日および 91 日とし、細孔径毎の空隙量を算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

各水準の練上がり温度、15 打フロー値および空気量は目標の範囲内であった。

3.2 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度の試験結果を図-2 に示す。脱型時の材齢 5 日では、練上がり温度の違いによる強度差は明瞭ではないが、練上がり温度が高い水準は、その後の強度増進が小さい。材齢 91 日では、38℃や 45℃の圧縮強度は比較の 20℃や 32℃と比べて小さく、32℃を基準とした場合、約 10%低下した。CB を塗布した水準は、材齢 7 日以降の強度増進が大きく、いずれの水準も材齢 91 日で無塗布のものを大きく上回る結果となった。練上がり温度 45℃の場合にも、CB を塗布した水準で強度改善が認められ、材齢 91 日強度は比較の 20℃や CB を塗布していない 32℃の水準と同等であることが分かる。

次に、静弾性係数の試験結果を図-3 に示す。練上が

り温度が高い水準は、32℃と比べて静弾性係数がやや低下したが、比較の 20℃とほぼ同等であった。また、CB を塗布した水準は、無塗布よりも改善される傾向があり、圧縮強度の傾向と概ね、同様と言える。

3.3 乾燥収縮

長さ変化率および質量減少率の結果をそれぞれ図-4 および図-5 に示す。ここで、20℃水準以外の曲線が乾燥材齢 56 日以降変化しているのは、供試体を 30℃恒温恒湿室(R.H.70%)から 20℃恒温恒湿室(R.H.60%)へ移動したためであり、湿度変化によって水分逸散量が増加し、収縮量が大きくなったと考えられる。20℃水準は、湿度が 60%一定で保管していることに留意されたい。

図-4 で暑中期を想定した 3 水準に着目すると、練上がり温度 38℃の長さ変化率が最も大きく、続いて、32℃、45℃の順となっている。一方、図-5 より、これら 3 水準の質量減少率に大きな差異はなく、概ね、同程度の水分逸散量であることが分かる。なお、38℃の水準で収縮量が大きかった原因については不明である。

次に、CB を塗布した水準は、無塗布と比べて、長さ変化率、質量減少率ともに小さくなった。乾燥条件下での質量減少率が無塗布の試験体よりも小さくなるのは、既往の検討⁸⁾と同様の結果であり、供試体表面からの水分逸散が抑制され、水分が保持されたことを表すと考えられる。したがって、3.2 で確認した強度の増進は、CB の塗布で硬化体中の水分が保持され、セメントの水和が

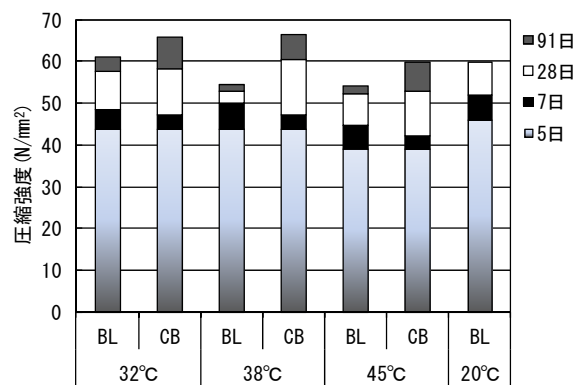


図-2 圧縮強度

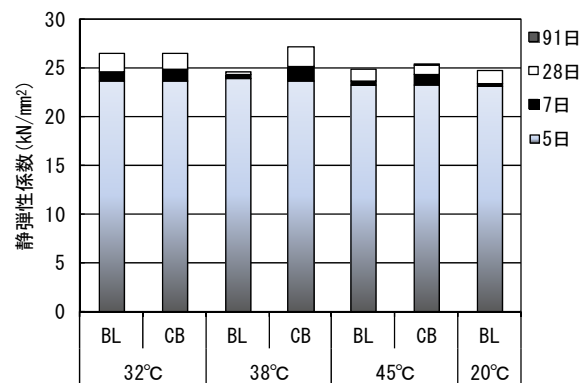


図-3 静弾性係数

継続したためと推察される。

3.4 塩化物イオン浸透深さ

浸漬材齢 3 ヶ月の塩化物イオン浸透深さの結果を図-6 に示す。練上がり温度が高いほど、塩化物イオン浸透深さは大きくなる傾向がある。また、塩化物イオン浸透の抑制程度は、練上がり温度によって異なるものの、CB を塗布した水準は、いずれも塩化物イオンの浸透深さが無塗布より小さくなった。練上がり温度が 32°C では、既往の検討⁸⁾と同様、塩化物イオン浸透深さは約半分になったが、38°C および 45°C では CB による塩化物イオン浸透抑制の効果は若干鈍くなった。

3.5 中性化深さ

中性化深さの結果を図-7 に示す。中性化深さに関しても、練上がり温度が高いほど大きくなる結果であった。また、CB を塗布した水準は、無塗布のものに比べて中性化深さは小さくなった。練上がり温度が 38°C や 45°C の CB 水準は、材齢 91 日ではじめて中性化領域を確認した。この理由は定かではないが、1mm 未満の小さいオーダーであるため、材齢 91 日以降の進行を鑑みて評価していきたい。既往の検討⁸⁾では、CB 塗布後、試験開始材齢が長いほど、3.2 に示す CB の養生剤としての効果が期待でき、硬化体表面が緻密化することで、より中性化に対する抵抗性が向上するとされている。本試験では、塗布材齢 5 日から試験開始材齢 28 日までの間に硬化体組織が緻密化したことが示唆される。

3.6 表面透気係数

材齢 28 日と材齢 91 日の表面透気係数の結果をそれぞれ図-8 および図-9 に示す。暑中期を想定した 3 水準の表面含水率は、ほぼ同等とみなして、以下、考察を行う。いずれの水準も、材齢の経過に伴って表面含水率は小さく、表面透気係数は大きくなる傾向であった。表面含水率の低下は、材齢 28 日以降、供試体の保管を 20°C 恒温恒湿室(R.H.60%)で行ったためと考えられ、供試体表面の乾燥により透気性が変化したものと推察される。

暑中期を想定した 3 水準について、練上がり温度の影響による表面透気係数の差はあるが、明確な傾向ではなかった。また、CB を塗布した水準は、無塗布のものに比べて表面透気係数は小さくなった。今回の表面透気係数の数値はオーダーが概ね同じであり、結果の差異が有意かどうか不明であるが、少なくとも、CB を塗布することで透気性に悪影響を及ぼすことはないと言える。

3.7 細孔径分布

材齢 91 日の累積細孔径空隙量の結果を図-10 に、材齢 91 日における各温度の細孔径分布をそれぞれ図-11 ~ 図-13 に示す。図-10 より、練上がり温度が高い水準ほど、全空隙量は大きくなり、中でも 20nm 以上の累積細孔径空隙量の違いが顕著であった。また細孔径分布よ

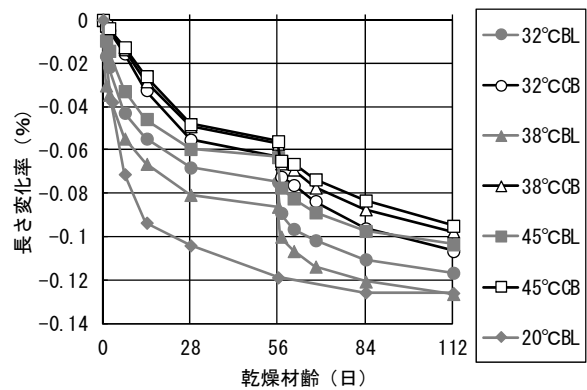


図-4 長さ変化率

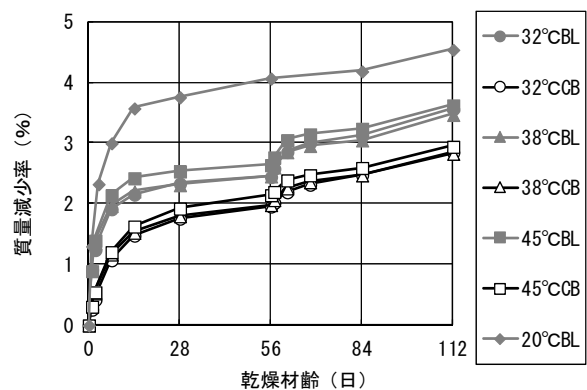


図-5 質量減少率

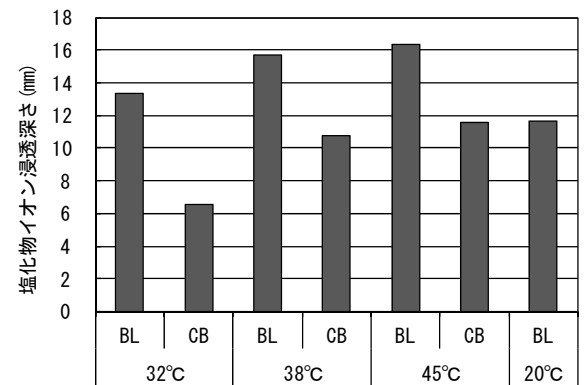


図-6 塩化物イオン浸透深さ (浸漬材齢 3 ヶ月)

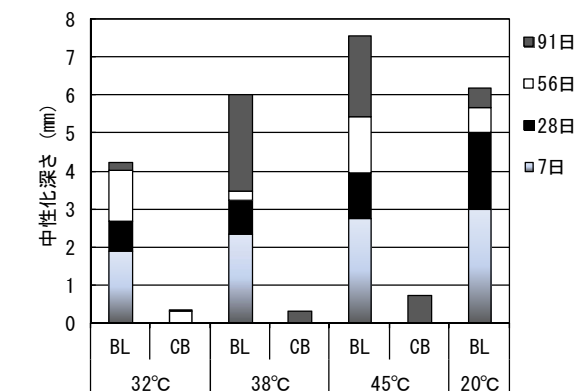


図-7 中性化深さ

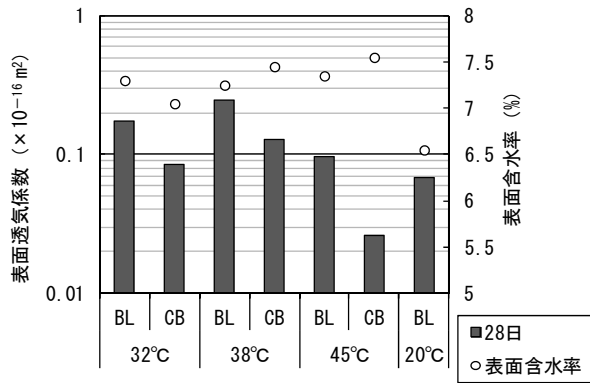


図-8 表面透気係数 (材齢 28 日)

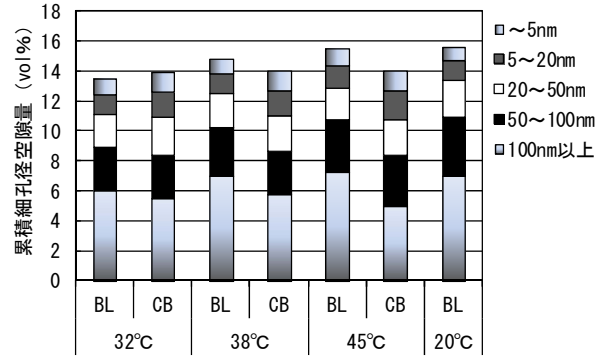


図-10 累積細孔径空隙量 (材齢 91 日)

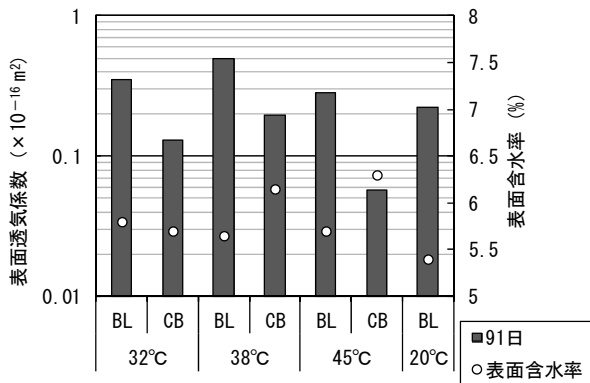


図-9 表面透気係数 (材齢 91 日)

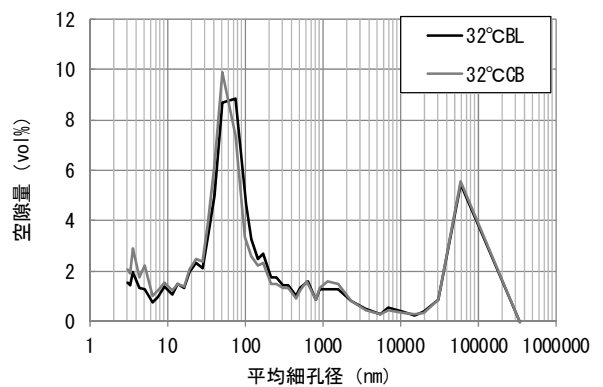


図-11 細孔径分布 (32°C, 材齢 91 日)

り、練上がり温度が高い水準ほど、50nm～100nm 付近のピークが高くなり、空隙の粗大化がうかがえる。高温養生を行うと、見かけの水和率が同一であっても、体積換算した時の水和物量が減少することで径 20nm 以上の細孔が増え、圧縮強度は低下するとの報告がある¹²⁾。したがって、3.2 節で示した練上がり温度の上昇による強度低下は、径 20nm 以上の空隙量の増加によるものと考えられる。

次に、図-10より、CBを塗布した水準では、20nm以上の空隙量が減少し、20nm以下の空隙量が増加した。その結果、全空隙量は、練上がり温度38°Cと45°Cの場合、無塗布のものより小さくなった。また、細孔径分布に着目すると、CBを塗布したものは、50nm～100nm付近のピークが細孔側へとシフトしており、かつ10nm以下の空隙量が多いことが分かる。これは、CB塗布による養生効果によって、セメント水和が継続し、細孔構造が緻密になったことを表すと考えられる。

3.8 結果の整理と考察

得られた結果を踏まえ、練上がり温度が強度特性および各種耐久性に与える影響を整理・考察する。

練上がり温度が高い水準は、32°Cと比較して、材齢 5 日以降の強度増進が小さくなる傾向であり、材齢 91 日では約 10%強度が低下した。練上がり温度が高くなると全

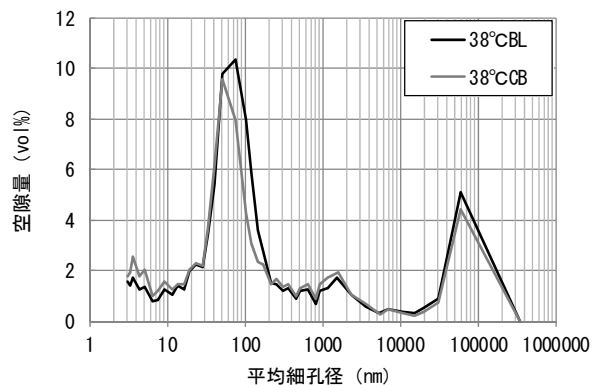


図-12 細孔径分布 (38°C, 材齢 91 日)

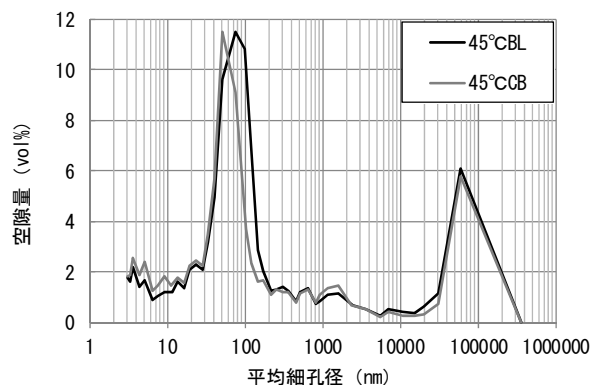


図-13 細孔径分布 (45°C, 材齢 91 日)

空隙量は大きくなり、中でも 20nm 以上の空隙量に違いが現れた。耐久性に関する試験項目では、塩化物イオン浸透深さと中性化深さは、練上がり温度が高いものほど大きくなり、強度低下の傾向と概ね対応する結果であった。一方、乾燥収縮と表面透気係数では、練上がり温度の違いによる明瞭な傾向は認められなかった。したがって、練上がり温度の上昇により、強度が低下する場合には、耐久性が低下する可能性があると考えられる。

次に、表面塗布剤 CB の使用の効果について整理する。CB により、供試体表面からの水分逸散が抑制され、水分が保持されることで、セメントの水和が継続し、材齢 7 日以降の強度増進が大きくなる。今回検討を行った耐久性の試験項目に関しては、全ての項目で無塗布のものより改善される結果であった。CB の耐久性向上効果は、既往の検討⁸⁾において確認されているが、練上がり温度が 35°C を超えるケースでも水分保持による養生効果を発揮し、耐久性は向上することが分かった。したがって、CB の塗布は、練上がり温度が 35°C を超えることが避けられない場合の対策として、極めて有効だと考えられる。

4. まとめ

本検討で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 練上がり温度が高くなるほど、圧縮強度は低下し、塩化物イオン浸透深さおよび中性化深さは大きくなった。また、細孔径分布は粗大な空隙が多くなった。
- (2) 養生剤を塗布することで、圧縮強度や、耐久性を検討した全ての項目において無塗布のものより改善される結果であった。
- (3) 暑中コンクリートに関して、練上がり温度が 30°C 度、30°C 後半および 40°C を超える各状況では耐久性の結果に差が確認できた。38°C のような高い練上がり温度においては JASS5 に記載があるように、適切な対策を講じることで耐久性は向上する。

参考文献

- 1) 松本侑也, 小山智幸, 小山田英弘: 気候変動下における暑中コンクリート工事中の予測方法, 都市・建築学研究 (九州大学大学院人間環境学研究院紀要), Vol.24, pp.117-122, 2013
- 2) 日本建築学会: 暑中コンクリート工事, 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.418-440, 2015

- 3) 栗延正成, 前田郎, 岩清水隆, 山崎順二: 暑中コンクリートの品質確保に関する実験的研究 その 2 コンクリートの圧縮強度および長さ変化率, 日本建築学会大会学術講演概要集, A-1, pp.851-852, 2010
- 4) 重永裕二, 新見龍男, 茶林敬司, 加藤弘義: 温度履歴および練上がり温度がモルタルおよびセメントペーストの諸性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1111-1116, 2015
- 5) 宮野和樹, 梶田秀幸, 舟橋政司, 栢田佳寛: 暑中期におけるコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1141-1146, 2015
- 6) 立山創一, 柳田淳一, 板谷秀彦, 河野政典, 住学, 高橋裕一: 暑中コンクリートの品質に関する実験 その 1 実験概要および実験概要, 日本建築学会大会学術講演概要集, A-1, pp.657-658, 2012
- 7) 大倉真人, 若林信太郎, 田中克幸, 山田雅裕, 安田正雪, 梅本宗宏: 暑中コンクリートの品質に関する実験 その 2 室内試験, 日本建築学会大会学術講演概要集, A-1, pp.659-660, 2012
- 8) 高橋洋朗, 俵道和, 吳承寧, 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研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.2041-2046, 2013
- 9) 菅彰, 橋爪進, 小林智史, 郭度連: 表面改質効果を有する耐久性向上養生剤 (その 1: 作用機構に関する一考察), 日本建築学会大会学術講演概要集, A-1, pp.477-478, 2012
- 10) 吳承寧, 俵道和, 小林俊秋, 郭度連: コンクリート表面品質の向上に及ぼす養生剤と表面改質剤の影響に関する研究, プレストレストコンクリート工学会 第 21 回シンポジウム論文集, pp.573-578, 2012
- 11) R. Torrent and L. Fernandez Luco, Non-destructive methods to measure gas-permeability, Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover - State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 189-NEC, RILEM report40, pp.35-70, 2007
- 12) 森本丈太郎, 魚本健人: 初期高温養生したポルトランドセメントの細孔構造に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp.153-159, 1996