

練上がり温度が強度、耐久性に及ぼす影響と表面塗布剤による諸性状の改善

太平洋セメント(株)	正会員	修(工)	○東 洋輔
太平洋セメント(株)			中山 莉沙
太平洋セメント(株)		修(工)	森 寛晃
太平洋セメント(株)			多田 克彦

Abstract : The objective of this study is to investigate the effect of placing concrete temperature and curing agent for improving durability in hot weather conditions on compressive strength of mortar, pore structure in hardened cement paste and durability of mortar. The main findings of this study are; 1) The compressive strength of mortar decreases with an increase in the placing concrete temperature in the temperature range 32°C to 45°C. Also, chloride ion permeation resistance and carbonation resistance decreases with an increase in concrete temperature. These can be explained by an increase in pore volume of coarse pores with diameter above 20 nm. 2) The curing agent for improving durability improved compression strength of mortar, chloride ion permeation resistance, carbonation resistance and air permeability. This is due to the improvement of pore structures near the surface of mortar treated with curing agent.

Key words : Hot weather concrete, Strength, Durability, Durability improvement curing agent

1. はじめに

暑中期に施工されるコンクリートに関して、JASS5 鉄筋コンクリート工事（解説）の 2015 年改訂版では、近年の気候変動の影響による気温の上昇傾向を受け、対策を講じることを前提として、荷下り時点でのコンクリート温度の上限値が 38°C に緩和された。荷降ろし時点でのコンクリート温度の上限値である 35°C 付近の練上がり温度がコンクリートの強度に及ぼす影響については、実機試験などでのデータは蓄積されつつある^{1),2),3)}。しかしながら、例えば強度に及ぼす影響について統一的な結果を得られていないのが現状である。また、暑中期の練上がり温度上昇や、部材表層を想定した乾燥の有無が強度に与える影響を硬化体の空隙構造の観点から評価・整理した事例は著者らの知る限りない。さらに、35°C 付近の練上がり温度で耐久性を評価した知見は少なく、表面透気係数や中性化抵抗性を評価した文献^{4),5)}がいくつか存在するだけで、表面塗布剤により品質を改善する検討の評価事例もない。

本検討では、暑中期を想定したモルタルの練上がり温度や乾燥の影響などが、強度特性および各種耐久性に及ぼす影響を把握し、表面塗布剤による品質改善効果を併せて検証した。

2. 実験概要

2.1 使用材料とモルタルの配（調）合

表-1 に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は掛川産山砂、混和剤は遅延型の高性能 AE 減水剤を使用した。表面塗布剤はコンクリート表層部の緻密化と内部の養生効果を期待し、アルケニル系エステル化合物および特殊シラン系化合物を含むものとした。養生剤の特徴として、特殊シランの界面活性効果により、疎水性化合物のアルケニル系エステル化合物と硬化体中水分間の反発が緩和され、両者がコンクリート表面に留まることで、アルケニル系エステル化合物が硬化体表面部の細孔に緻密に充填され、外部からの水の浸入を防ぎ、優れた水分浸透抑制効果およびコンクリート養生効果が得られる⁶⁾。

表-2 にモルタルの配 (調) 合を示す。水セメント比は建築分野で一般的な配 (調) 合を想定し 45%とした。フレッシュ性状の目標値は、15 打フロアで 220±20mm, 空気量は圧縮強度へ及ぼす影響を少なくするため 2.0±0.5%とした。モルタルの練混ぜにはホバートミキサを用い、練上がり温度が目標の温度±2°C となるように、水の温度を調整した。練混ぜ時間は注水から練混ぜ完了時で 1 分 30 秒, 打込み完了時で 5 分であった。

2.2 実験要因と水準

表-3 に実験要因と水準を示す。実験要因は練上がり温度, 養生方法および表面塗布剤の有無とした。練上がり温度は, 土木学会コンクリート標準示方書が定める上限温度 35°C を下回る 32°C, JASS5 が条件付きで上限温度を緩和した 38°C および適切な対策を講じず, 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。所定の練上がり温度で打ち込んだ後の養生方法は, 所定の練上がり温度を 6h 与え, 各試験材齢まで封緘養生を行う養生 B, 温度履歴は養生 B と同様で, 材齢 1 日で脱型しその後気中養生を行い乾燥の影響を与えた養生 BD, 所定の練上がり温度を 24h 与え, 材齢 5 日まで封緘養生を行い, その後気中養生を行う養生 CD, 温度履歴は養生 CD と同様で, 脱型する材齢 5 日で表面塗布剤を塗布する養生 CD+とした。

2.3 養生方法

暑中期を想定した練上がり温度水準 (32, 38 および 45°C) の打込みは 30°C, RH70%環境下で行った。養生 B は練上がり温度が 32, 38 あるいは 45°C であることを確認し打ち込んだ後, 恒温恒湿槽 (RH70%) で所定の練上がり温度を 6h 与え, 材齢 28 日まで 30°C, RH70%, 材齢 28 日以降は 20°C, RH60%環境下とし, 試験開始まで封緘養生を行った。養生 BD は試験までの養生温度および湿度を養生 B と同じとし, 材齢 1 日で脱型し気中養生を行った。養生 CD は所定の練上がり温度であることを確認し打ち込んだ後, 恒温恒湿槽 (RH70%) で所定の練上がり温度を 24h 与え, 材齢 28 日まで 30°C, RH70%, 材齢 28 日以降は 20°C, RH60%環境下とし, 材齢 5 日まで封緘養生, その後脱型し気中養生を行った。養生 CD+は養生 CD と同様な養生を行うが, 脱型時に表面塗布剤を標準使用量 (150g/m²) で塗布した。また, 比較として打設・養生を 20°C, RH60%環境下で行う水準を用意した。

3. 試験概要

本検討では, 練上がり温度, 乾燥および表面塗布剤が圧縮強度および空隙構造に及ぼす影響を全水準で評価し, 塩化物イオン (以下, Cl⁻) 浸透深さ, 中性化深さおよび表面透気係数など耐久性に与える影響と表面塗布剤による品質改善を養生CDとCD+で評価した。圧縮強度はφ50×100mmの供試体 (n=3) を用い, 材齢7, 28および91日で試験を行なった。空隙構造の評価はφ50×100mmの供試体 (n=2) の中心部をダイヤモンドカッターで5mm角に切断し, アセトンで水和反応を停止後, 真空乾燥を3日間, D-Dryを7日間行い, 水銀圧入式ポロシメータを用いて細孔径ごとの空隙量を算出した。試験材齢は28, 91日とした。Cl⁻浸透深さは100×100×100mm供試体 (n=3) の型枠側面2面を浸透面とし, 材齢28日から3, 6ヶ月間10%NaCl水溶液に浸漬した。浸漬後は割裂した面に0.1N硝酸銀水溶液を噴霧し,

表-1 使用材料

材料名	備考
普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³
細骨材	表乾密度: 2.56g/cm ³ , 掛川産山砂
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系, 遅延型
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体
表面塗布剤	アルケニル系エステル化合物+シラン系化合物

表-2 モルタルの配 (調) 合

15打フロア (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/C	単用量 (kg/m ³)		
				W	C	S
220±20	2.0±0.5	45	2.5	259	575	1452

表-3 実験要因と水準

名称	練上がり温度	養生温度	養生方法	表面塗布剤の有無
32B	32°C	養生B	脱型: 所定の試験材齢 養生種類: 封緘	無
38B	38°C	練上がり温度保持6h→		
45B	45°C	28dまで30°C→以降20°C		
20B	20°C	20°C一定	養生種類: 1dまで 封緘以後気中	
32BD	32°C	養生BD		
38BD	38°C	練上がり温度保持6h→		
45BD	45°C	28dまで30°C→以降20°C	脱型: 5d 養生種類: 5dまで 封緘以後気中	
32CD	32°C	養生CD		
38CD	38°C	練上がり温度保持24h→		
45CD	45°C	28dまで30°C→以降20°C	脱型: 5d 養生種類: 5dまで 封緘以後気中	
20CD	20°C	20°C一定		
32CD+	32°C	養生CD		
38CD+	38°C	練上がり温度保持24h→	養生種類: 5dまで 封緘以後気中	有
45CD+	45°C	28dまで30°C→以降20°C		

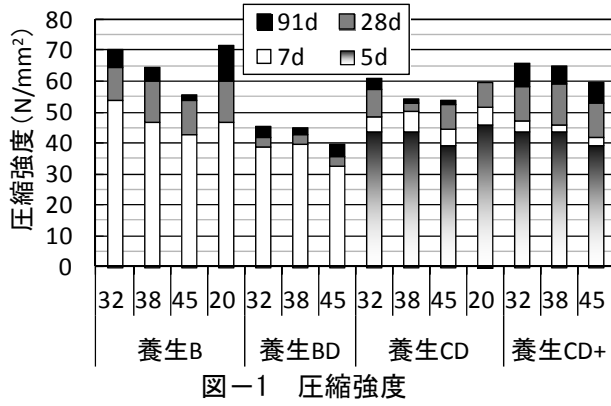


図-1 圧縮強度

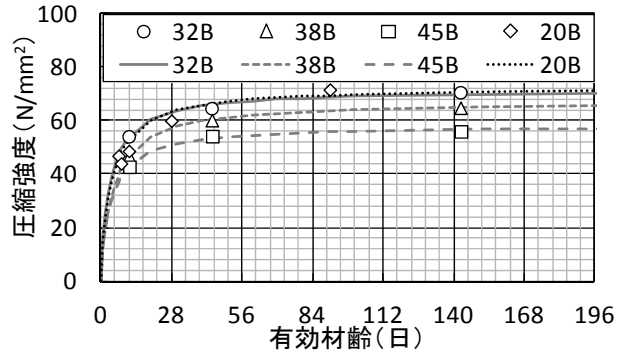


図-2 圧縮強度と有効材齢 (養生 B)

白色変化した領域の深さを測定した。中性化深さは 100×100×400mm の供試体 (n=2) を用い、JIS A 1153 に準拠した。ただし、暴露開始材齢は 28 日から行い、それ以前の養生方法は 2.3 と同様とした。表面透気係数はトレント法⁷⁾に準拠し、供試体 (150×150×265mm, n=2) の型枠側面 2 面の 4 箇所を材齢 28, 56 および 91 日に測定し、測定箇所のコンクリート比抵抗を Wenner 法により併せて測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 フレッシュ性状

モルタルのフレッシュ性状について、練上がり温度は何れの水準も目標に対して±0.5°C の範囲であった。また、モルタルフローと空気量についても目標の範囲内であった。ここで、高性能 AE 減水剤の使用量は 20°C 水準が C×0.556mass%、それ以外の水準が C×0.565mass%であり、練上がり温度が高い場合も所定のモルタルフローを得るための混和剤使用量が増えることはなかった。ただし、その後のモルタルフローの経時変化は、評価していないため留意が必要と考えられる。

4.2 圧縮強度

図-1 に圧縮強度結果を示す。養生 B と BD から練上がり温度の影響として、練上がり温度が高い水準ほど圧縮強度が低下する傾向であった。ただし、材齢 1 日から乾燥の影響を受ける養生 BD は 32°C 水準と 45°C 水準の強度差が養生 B の場合と比べて小さく、乾燥により水和の進行が阻害され、練上がり温度の影響が現れがなくなったと推察される。ここで、図-2 に養生 B の圧縮強度と有効材齢の関係を示す。有効材齢は式(1)より算出し、図中の回帰線は、水準ごとに式(2)の定数 a および b を最小二乗法で求めたものである。図-2 より、32B 水準は 20B 水準と同程度の強度発現性であるが、練上がり温度が 32°C より高い水準は 20B 水準に対する強度発現性が低下したと判断できる。したがって、同配合であっても練上がり温度が高くなることで、その後の硬化体組織形成に違いが生じ、強度増進が阻害されたと推察される。次に、図-1 の養生 CD と CD+から、練上がり温度の上昇に伴い強度低下したが、養生 CD+は材齢 7 日以降の強度増進が大きくなった。これは、表面塗布剤の影響で、水分の逸散が抑制され、セメントの水和が継続したためと推察される。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (1)$$

ここで、 t_e : 有効材齢 (日) , Δt_i : ある一定のコンクリート温度が継続する期間 (日) ,

$T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリート温度 (°C) , T_0 : 1°C

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e}{a + b(t_e)} \quad (2)$$

ここで、 $f'_c(t_e)$: 圧縮強度 (N/mm²) , t_e : 有効材齢 (日) ,

a, b : セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す係数

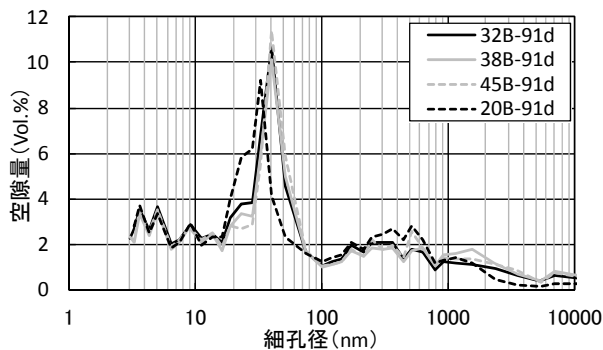


図-3 細孔径分布 (養生 B)

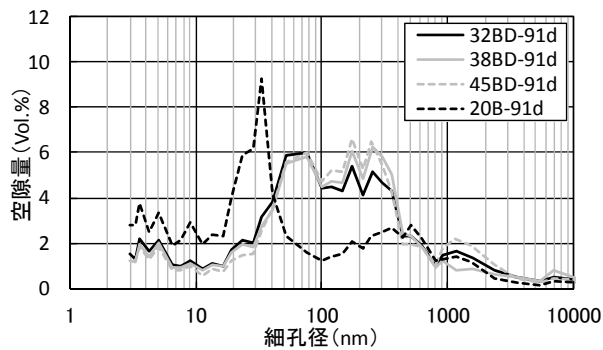


図-4 細孔径分布 (養生 BD)

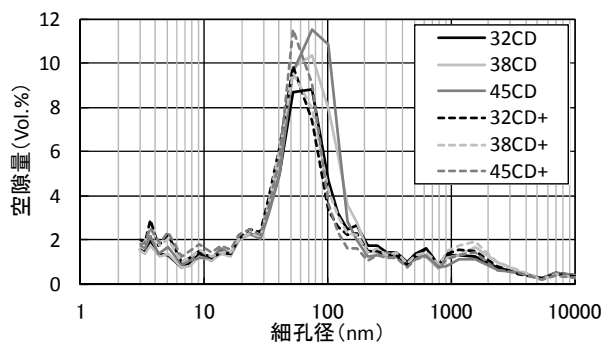


図-5 細孔径分布 (養生 CD・CD+)

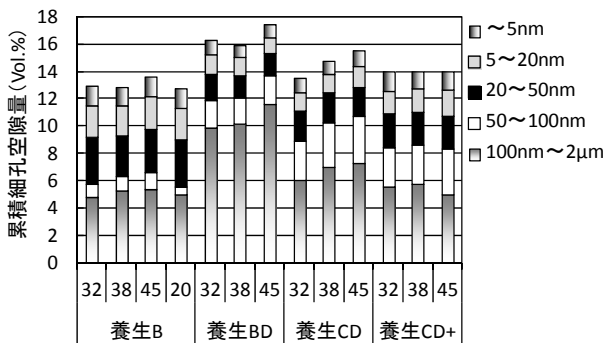


図-6 累積細孔空隙量

4.3 細孔径分布

図-3 に養生 B, 図-4 に乾燥の影響を受けた養生 BD の細孔径分布を示す。何れも材齢 91 日 (n=2 の平均値) の結果であり, 比較として 20B 水準を両図に示した。養生 B (図-3) から, 練上がり温度の違いによって毛細管空隙付近 (約 50nm) のピークが異なり, 20B が 30nm 付近, 32B, 38B および 45B が 40nm 付近で 45B はピークが一番高くなり, 20nm 付近では練上がり温度が低い水準ほど増加する傾向であった。養生 BD (図-4) は, 養生 B (図-3) と比較して, 40~400nm 程度の広範囲の空隙が増え, それより細孔側の空隙が減少した。これは, 初期材齢で乾燥の影響を受けたことで, その後のセメントの水和が妨げられ, 粗大な空隙が残存したためと考えられる。養生 CD と CD+ の細孔径分布を図-5 に示す。練上がり温度の上昇に伴い 50nm 付近のピークが上昇する傾向は養生 B と同様であった。表面塗布剤の効果として養生 CD+ は 50nm 付近のピークが減少する傾向であった。図-6 に材齢 91 日の累積細孔空隙量を示す。20nm 以上の空隙量に着目すると, 練上がり温度が高いほど空隙量は増加する傾向であった。養生種類で比較すると, 20nm 以上の空隙はより早い材齢から乾燥を受けた養生 BD 水準が一番多く, 乾燥の影響を受けない養生 B が一番少なくなった。また, 養生 CD+ は養生 CD より空隙量が減少しており, 表面塗布剤の効果を確認できた。なお, 材齢 28 および 91 日における圧縮強度と 20nm 以上の空隙量との関係には負の相関 ($R^2=0.58$) があった。以上の結果から, 練上がり温度の上昇や乾燥の影響によって, 硬化体の空隙構造が変化し, 粗大な空隙が増えたために圧縮強度は低下したと考えられる。また, 表面塗布剤の塗布による強度の増進は, これら粗大空隙の減少によるものと考えられ, 4.2 で考察したセメント水和の継続を裏付けるものである。

4.4 塩化物イオン浸透抵抗性

図-7 に Cl⁻ 浸透深さを示す。表面塗布剤の有無に係わらず, 練上がり温度が高いものほど Cl⁻ 浸透深さは大きい。また, 表面塗布剤の効果として, 養生 CD+ の Cl⁻ 浸透深さは養生 CD よりも大きく減少した。暑中期を想定した練上がり温度によって空隙構造が粗大化し, Cl⁻ 浸透深さが大きくなったと推察されるが, 表面塗布剤による表層の緻密化やセメント水和継続による粗大空隙の減少により, Cl⁻ の浸透が抑制されたと考えられる。

4.5 中性化深さ

図-8 に中性化深さの実験値と実験値を基に式(3)を用いて最小二乗法により定数 α を求め算出した回帰線, 表-4 に中性化速度係数を示す。これらの結果より, 20°C を除いて練上がり温度の上昇に伴い, 中性化深さおよび速度係数が大きくなる傾向であった。また, 養生 CD+は養生 CD と比較して, 中性化深さおよび速度係数が小さくなった。したがって, 暑中期を想定した練上がり温度によって空隙構造が粗大化し, 中性化抵抗性が低くなると推察される。また, 表面塗布剤による表層の緻密化やセメント水和継続による粗大空隙の減少により, 中性化抵抗性が向上したと考えられる。なお, 養生 CD+は材齢 91 日時点で中性化の開始を確認した。この理由は特定できていないが, 1mm 未満でかつ中性化初期段階であるため, 長期的な計測を踏まえた上で再度評価する予定である。

$$y = a\sqrt{t} \quad (3)$$

ここで, y : 中性化深さ (mm), t : 材齢 (d)

a : 中性化速度係数 (mm/年)

4.6 表面透気係数

表面透気係数およびコンクリート比抵抗の関係を表-9 を例として図-9 に示す。材齢 28 日の結果は材齢の経過に伴い, コンクリート比抵抗および表面透気係数はいずれも大きな値となったが, 各水準の優劣は材齢 91 日と同様であった。コンクリート比抵抗は乾燥と細孔構造の緻密化の影響を受けて上昇し, 表面透気係数は乾燥による上昇と細孔構造の緻密化による減少の影響により結果として上昇したと推察される。次に, 練上がり温度の影響は, 表面透気係数の結果から確認されなかった。一方, 表面塗布剤の影響として, 養生 CD+は養生 CD に比べて表面透気係数が小さくなり, トレント法の評価区分⁷⁾(図中赤線で明示)で養生 CD が「normal」, 養生 CD+ が「normal & good」であった。これは, 表面塗布剤の効果により空隙構造が緻密化したためと考えられる。

4.7 結果の整理と考察

練上がり温度が高いものほど, 圧縮強度が低下するのは, 温度の上昇によって硬化体の空隙構造が変化し, 粗大な空隙が増えたためと考察した。渡辺らは, セメント水和度 (反射電子像の画像解析より算出) が同じでも, 高温養生の硬化体強度が小さい理由として, ゲルスペース比 (空隙量と水和物量に対する水和物量の比) の違いから説明を試みている⁸⁾。また, 森本らは, 見かけの水和率が同じでも, 高温養生の場合, 体積換算したセメントの水和物量が少なくなり, 結果として 20nm 以上の空隙が多くなるとしている⁹⁾。また, 高温で養生を行った普通セメントペーストのセメント粒子周りに

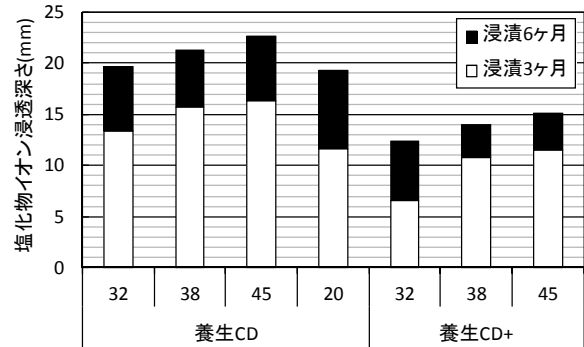


図-7 塩化物イオン浸透深さ

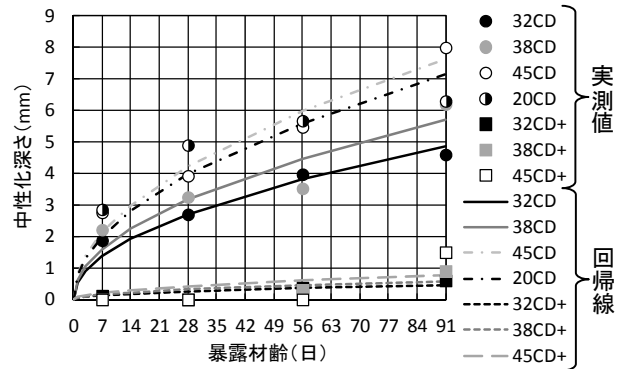


図-8 中性化深さ

表-4 中性化速度係数

水準	32CD	38CD	45CD	20CD
a (mm/年)	0.51	0.60	0.80	0.75
水準	32CD+	38CD+	45CD+	
a (mm/年)	0.05	0.06	0.08	

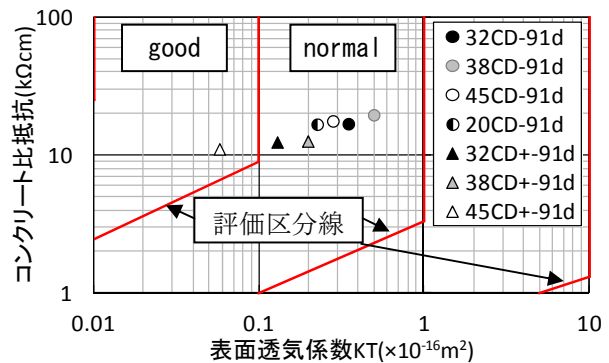


図-9 表面透気係数 (材齢 91 日)

は、Ca/Si比の高いセメント水和物が生成する¹⁰⁾とされており、暑中期の練上がり温度を想定した本検討においても、材齢初期にCa/Si比の高い水和物が生成したために、粗大な空隙が増えた可能性がある。この点については、今後、セメントの水和解析などの結果を踏まえ評価したいと考える。

次に、表面塗布剤の効果について整理と考察をする。表面塗布剤を塗布することにより、供試体表面からの水分逸散が抑制され、セメントの水和が継続することで粗大な空隙が減少し、硬化体組織が緻密化したと考察した。本検討では、強度と耐久性いずれも改善される結果を得ており、これら空隙構造の変化が影響したと考えられる。なお、表面塗布剤による耐久性向上効果は、既往の検討⁶⁾でも確認されているが、暑中期を想定した練上がり温度が35°Cを超える場合でも、表面塗布剤は水分保持による養生効果を発揮し、耐久性向上に寄与することが分かった。したがって、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の一つとして、今回用いた表面塗布剤は有効だと考えられる。

5. まとめ

暑中期を想定した練上がり温度(32, 38, 45°C)と脱型に伴う乾燥が、圧縮強度、細孔構造および耐久性に及ぼす影響を評価し、表面塗布剤による品質の改善効果を検証した。その結果を以下に記す。

- (1) 指針類のコンクリート温度上限(規定)値(35°C)を超える範囲で練上がり温度が上昇すると、空隙構造が粗大化し、圧縮強度、塩化物イオン浸透抵抗性および中性化抵抗性が低下する。
- (2) 脱型に伴う乾燥により空隙構造が粗大化し、圧縮強度が低下する。また、乾燥の影響を受けてかつ練上がり温度が上昇する場合、空隙構造がより粗大化し、圧縮強度も低下する。
- (3) 表面塗布剤により、圧縮強度、塩化物イオン浸透抵抗性、中性化抵抗性および表面透気係数が向上する。これは、表面塗布剤によって空隙量が減少したことによって説明ができる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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 実験概要および結果概要, 日本建築学会大会学術講演概要集, A-1, pp.657-658, 2012
- 5) 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
- 6) 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研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.2041-2046, 2013
- 7) R. Torrent, G. Frenzer : A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the "coverconcrete", International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, pp.985-992, 1995
- 8) 渡辺暁央, 五十嵐心一, 川村満紀: 養生条件の相違によるセメントペーストの細孔構造の変化と圧縮強度特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.539-544, 2003
- 9) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.7, No.1, pp.153-159, 1996
- 10) 森寛晃, 久我龍一郎, 高橋晴香, 鶴澤正美: 高温履歴を受けたセメント硬化体の強度発現メカニズムと添加材による物性改善の試み, 材料, Vol.59, No.10, pp.743-750, 2010