

論文 蒸気養生中の散水がコンクリート表層部の品質および強度特性に及ぼす影響

鳥海 秋*1・原 洋介*2・宇治 公隆*3・上野 敦*4

要旨: 蒸気養生を実施したコンクリートの細孔構造は同一配合の現場打ちのコンクリートと比較して粗大になり、それにより強度および耐久性が低下することがわかっている。本研究では、蒸気養生中の乾燥抑制を目的に、蒸気養生中の最高温度保持工程および降温工程においてスプリンクラーによる散水を行った。その結果、蒸気養生中に散水を行うことで蒸気養生中の乾燥が抑制され、コンクリート表層部の細孔構造は散水しない場合と比較して密になった。それに伴い、圧縮強度および曲げ強度が増加し、中性化抵抗性も向上した。

キーワード: 蒸気養生, プレキャストコンクリート, 乾燥, 細孔構造, 強度, 中性化

1. はじめに

蒸気養生を行ったプレキャストコンクリート製品（以下、蒸気養生コンクリートと記す）は、高温常圧の水蒸気から熱エネルギーを得ることで材齢初期におけるコンクリートの強度発現を促進し、脱型に要する強度を早期に得ることができる。それにより、型枠の稼働率を向上させ、プレキャストコンクリート製品の生産性を向上させることができる。しかし、既往の研究より蒸気養生コンクリートの細孔構造は同一配合の現場打ちのコンクリートと比較して粗大になることが明らかとなっている¹⁾。また、それに伴い強度、耐久性が低下することもわかっている。これは、蒸気養生中のコンクリート表層部の乾燥が影響していると考えられる。細孔構造が粗になる原因は乾燥にあるという知見もあり²⁾、特に若材齢時の乾燥がコンクリートの細孔構造に顕著な影響を及ぼすと報告されている³⁾。このような背景から、著者らは既往の研究において⁴⁾、蒸気養生中の乾燥抑制を目的に蒸気養生中に散水(20℃)を行うことの効果について検討した。その結果、散水を行った蒸気養生コンクリートは散水を行っていない蒸気養生コンクリートと比較して細孔構造が密になり、強度および耐久性が向上した。しかしながら、設備の制約から散水温度が20℃であったため、蒸気養生中のコンクリートが冷却され、コンクリートに温度ひび割れが生じる可能性が高まったほか、通常の蒸気養生コンクリートと比較して、蒸気養生中のコンクリートの温度が低下するためマチュリティが低下する。以上のことから、蒸気養生中に20℃程度の水で散水を行うことはコンクリートの物性などに悪影響を及ぼす可能性があると言える。また、既往の研究で用いたスプリンクラー

は床置き式のためか、散水を行った場合でもコンクリートの供試体質量は蒸気養生終了後に質量減少しており、十分に水分供給されているとは言えない結果となった。

以上の既往の研究を踏まえ、本研究では散水温度を逐次変化させ、また、スプリンクラー設備を改良し、蒸気養生中の散水がコンクリート表層部の細孔構造および耐久性に及ぼす影響を検討した。さらに、示方書などで定められている現場打ちコンクリートの最低条件で一定期間の封緘養生を実施した現場打ちを模擬したコンクリート（以下、現場打ち模擬コンクリートと記す）と比較検討し、プレキャストコンクリート製品の性能評価を行った。なお、蒸気養生中の蒸気養生槽内、コンクリート表層部および中心部の温度履歴を測定し、散水が蒸気養生中のコンクリートの温度に与える影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートの配合は、実際のプレキャストコンクリート製造工場で適用されているものを参考にした。

表-1 使用材料

結合材	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
細骨材	砕砂, 表乾密度2.63g/cm ³
粗骨材	砕石2005, 表乾密度2.66g/cm ³
混和剤	高性能減水剤: ポリカルボン酸エーテル系
	AE剤: 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	目標スランプ (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能減水剤 WR	AE剤 AE
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
20	8±2.5	4.5±1.5	40	43	170	425	736	987	C×0.70%	C×0.0045%

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 博士前期課程 (学生会員)

*2 東京セメント工業株式会社 開発事業部 (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 教授 博士 (工学) (正会員)

*4 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 准教授 博士 (工学) (正会員)

2.2 養生条件および蒸気養生工程

供試体パラメータおよび記号を表-3 に、本研究で用いた蒸気養生工程を図-1 に示す。本研究では、比較的大型のプレキャストコンクリート製品を作製する際に実施されるサイクルを適用した。

2.3 散水方法

蒸気養生槽の地面から高さ 1000mm の位置にスプリンクラーを設置し散水を行った(図-2)。水量は 630ml/min とした。散水温度は蒸気養生槽内温度と同じになるよう、降温工程時にはタンク内の温水に冷水を足し、温度が同じになるように調節した。散水は最高温度保持工程開始時から降温工程終了時まで実施した。

2.4 試験項目

(1) フレッシュ性状

JIS A 1101, JIS A 1128 および JIS A 1156 に従ってスランプ試験, 空気量試験, 練上がり温度測定を行った。

(2) 蒸気養生中の温度測定

蒸気養生中のコンクリートの温度および蒸気養生槽内温度を測定した。コンクリートの温度を測定するために、φ100×200mm の供試体を作製し、供試体中心部と表層部(打設面から 0mm)の温度を測定した。蒸気養生槽内温度は蒸気養生槽内の供試体付近の 3 点で測定を行った。

(3) コンクリートの質量変化測定

二次養生中の質量変化を測定するために 100×100×400mm の角柱供試体を各 3 本作製し、測定を行った。試験材齢は、脱型日(蒸気養生コンクリートは材齢 1 日, 現場打ち模擬コンクリートは材齢 5 日), 材齢 14, 28 および 56 日とした。

(4) 細孔径分布測定

細孔径分布測定試験用に 100×100×400mm の角柱供試体を作製し、細孔径分布測定を行った。試験材齢は、脱型日および材齢 28 日とした。供試体は脱型後に打設側面のうち一面のみを残し、残り 5 面をエポキシ樹脂でシールし、各試験材齢まで養生を行った。コンクリート表層部(0-10mm)における細孔構造が内部に比べて、乾燥の影響が顕著であることを考慮し⁵⁾、表面から深さ 0-10mm 部分の試料を用いて実験を行った。試験には、水銀圧入式ポロシメータ(測定範囲: 5nm-400μm)を用い、細孔直径および細孔容量を測定した。

(5) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠して行い、φ100×200mm の円柱供試体を各 3 体試験した。試験材齢は、脱型日, 材齢 14 日および 28 日とした。

(6) 曲げ強度試験

JIS A 1106 に準拠して行い、100×100×400mm の角柱供試体を各 3 本作製し、試験を行った。試験材齢は材齢 14 日および 28 日とした。

表-3 供試体パラメータおよび記号

種類	W/C (%)	養生条件		記号
		一次養生	二次養生	
蒸気養生 (s)	40	蒸気養生	気中保管 (R.H.60%) (d)	s40-d
		蒸気養生+散水(sp)		s40-sp-d
現場打ち模擬 (n)		封かん養生(5日間)(5r)		n40-5r-d

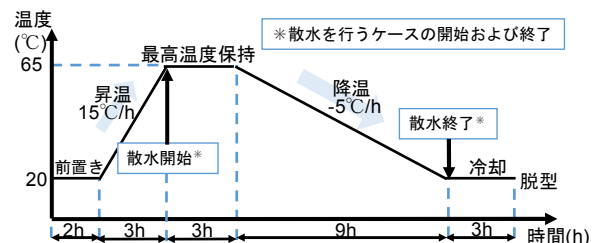


図-1 蒸気養生工程

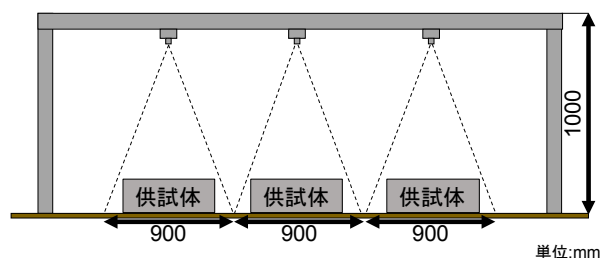


図-2 散水装置概要図

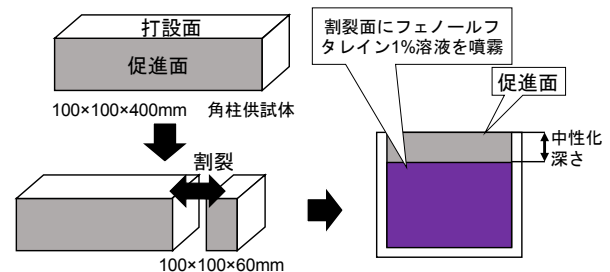


図-3 促進中性化試験概要図

(7) 促進中性化試験

JIS A 1152 および JIS A 1153 に準拠し促進中性化試験を行った。供試体は、それぞれの養生条件に対して 100×100×400mm の角柱供試体を 1 本作製し、材齢 56 日まで所定の養生を行った後、打設側面のうち一面を除く 5 面を、エポキシ樹脂でシールした。その後、供試体を二酸化炭素濃度 5.0%、温度 20℃、湿度 60%の促進中性化槽内に移動し促進中性化試験を実施した(図-3)。

中性化深さの測定は、促進材齢 1, 4 週で実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 蒸気養生中の温度履歴

散水を行っていない蒸気養生中のコンクリートの中心部温度, 表層部温度および養生槽内温度の履歴を図-4

に示す。図より、前置き工程および昇温工程においてはコンクリート中心部と表層部の温度に大きな差はなく、また、養生槽内温度とも大きな差が生じていないことがわかる。

一方で、最高温度保持工程時においては、コンクリート中心部温度が、養生槽内温度と比べて約 8℃高くなっている。これは、蒸気によるコンクリートの加熱に加え、コンクリート内部で生じている水和熱によりコンクリート中心部温度が高くなっていると考えられる。

降温工程においては、コンクリート表層部温度と養生槽内温度に温度差が生じている。温度差が生じている 2 点間には蒸気圧勾配が生じることで水分の移動を生じる。つまり、温度差が生じることでコンクリート表層部から養生槽内へと水分が移動し、コンクリートが乾燥すると考えられる。コンクリートおよび養生槽内の相対湿度を 100%と仮定すると、降温工程終了時（開始から 17 時間経過時）には、コンクリート表層部温度は 32.0℃（飽和水蒸気圧：47.60hPa）、養生槽内温度は 22.6℃（飽和水蒸気圧：27.43hPa）となっているため蒸気圧勾配が生じ、コンクリート表層部の相対湿度は約 58%まで低下すると考えられる。

冷却工程においても、コンクリート表層部と養生槽内に温度差が生じており（コンクリート表層部：26.2℃、養生層内：19.2℃）、コンクリート表層部の相対湿度は約 65%となり、冷却工程においてもコンクリート表層部が乾燥していると考えられる。

次に、散水を行った蒸気養生中のコンクリートの中心部温度、表層部温度および養生槽内温度の履歴を図-5 に示す。図-4 の散水を行っていない場合と比較して、コンクリート中心部温度、表層部温度および養生槽内温度のそれぞれの温度差が小さくなっていることがわかる。これは、散水の温度を養生層内温度と同じになるように調整しているため、コンクリート表層部温度が養生槽内温度に近づくためである。また、散水開始時から散水終了まで養生層内温度の値の振れ幅が大きくなっているが、これは、散水によって温度計に水がかかることで値が変化していると考えられる。

特に、降温工程において、コンクリート表層部温度と蒸気養生槽内温度の温度差が小さくなっている。また、散水を行っているためコンクリート表層部は常に湿潤状態であり、散水を行っている最高温度保持工程および降温工程においては、相対湿度を 100%に保つことができていると考えられる。

冷却工程において、コンクリートおよび養生層内の相対湿度を 100%と仮定すると、冷却工程終了時（開始から 20 時間経過時）には、コンクリート表層部温度は 22.6℃（飽和水蒸気圧：27.43hPa）、養生層内温度は 20.7℃

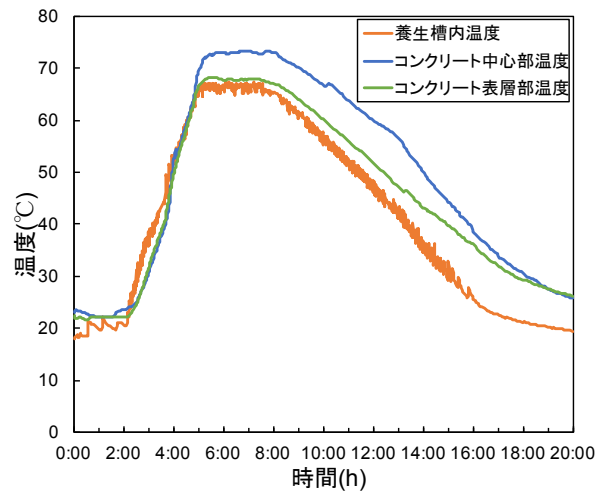


図-4 散水を行っていない蒸気養生中の温度履歴

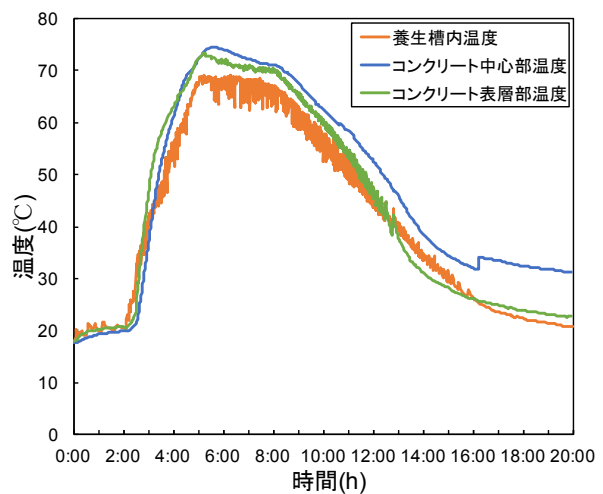


図-5 散水を行った蒸気養生中の温度履歴

表-4 コンクリートのフレッシュ性状

記号	スランプ(cm)	空気量(%)	練上がり温度(℃)
s40-d	10.5	4.9	18.5
s40-sp-d	10.5	5.3	17
n40-5r-d	10.5	4.9	18.5

（飽和水蒸気圧：24.42hPa）となっており、コンクリート表層部の相対湿度は約 89%となる。つまり、散水を行わない場合と比較して、相対湿度の低下を防ぐことができた。

以上のことから、蒸気養生中に散水を行うことで蒸気養生中のコンクリート表層部と養生槽内の温度差が低減される。それに伴い、蒸気圧差が低減され、コンクリート表層部の相対湿度が低下することを防ぐことがわかった。

3.2 フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状を表-4 に示す。スランプは 10.5cm、空気量は 4.9-5.3%の値が得られた。なお、練上がり温度は 17.0-18.5℃であった。

3.3 蒸気養生中の散水が蒸気養生コンクリートに及ぼす影響

(1) 細孔構造

既往の研究より、コンクリート表層部(0-10mm)における細孔構造が内部に比べて、乾燥の影響が顕著であること⁵⁾、また、中性化進行に支配的な影響を及ぼすのは40nm以上の細孔量であること^{6,7)}から、本研究においては、コンクリート表層部における総細孔量と40nm以上の細孔量を供試体ごとに示した。

通常の蒸気養生コンクリート(s40-d)、散水を行った蒸気養生コンクリート(s40-sp-d)および現場打ち模擬コンクリート(n40-5r-d)の脱型日(蒸気養生コンクリートは材齢1日、現場打ち模擬コンクリートは材齢5日)の細孔径分布測定の結果を図-6に示す。図より、散水を行った蒸気養生コンクリート(s40-sp-d)は、通常の蒸気養生コンクリート(s40-d)と比べて、総細孔量および40nm以上の細孔量が減少する傾向が見られた。これは、最高温度保持工程および降温工程に散水を行ったことで蒸気養生中の乾燥が抑制されたこと、また水分供給されたことでs40-dに比べて比較的良好な水和反応が継続されたためと考えられる。また、同一配合の現場打ち模擬コンクリート(n40-5r-d)と比較して、s40-sp-dの総細孔量はわずかに多いが、40nm以上の細孔量はn40-5r-dよりも少ない値を示した。

次に、材齢28日における各養生条件の総細孔量と40nm以上の細孔量を図-7に示す。図より、材齢28日においても散水を行ったs40-sp-dはs40-dおよびn40-5r-dよりも密な細孔構造を形成していることがわかる。これは、s40-sp-dは脱型時において表層部の細孔構造が密であったため、脱型後の乾燥の影響を受けにくく、二次養生においても良好な水和反応が継続したためと考えられる。

以上のことから、蒸気養生中に散水を行うことで蒸気養生中の乾燥を抑制し、通常の蒸気養生コンクリートよりも密な細孔構造を形成することができる。また、同一配合の現場打ち模擬コンクリートと比較しても、密な細孔構造を形成する傾向が見られた。

(2) 材齢の進行に伴うコンクリートの質量変化測定

材齢の進行に伴う各供試体のコンクリートの質量変化率を図-8に示す。養生条件の異なる蒸気養生コンクリート(s40-dおよびs40-sp-d)を比較すると、まず脱型日において、散水を行ったs40-sp-dは散水の影響により水分が供給され質量が約0.6%増加している。一方で、散水を行っていない蒸気養生コンクリートは質量が約0.2%減少している。これは、前述した通り蒸気養生中のコンクリート温度と養生槽内温度の差によって生じる蒸気圧勾配によって水分が逸散したため質量が減少したと考え

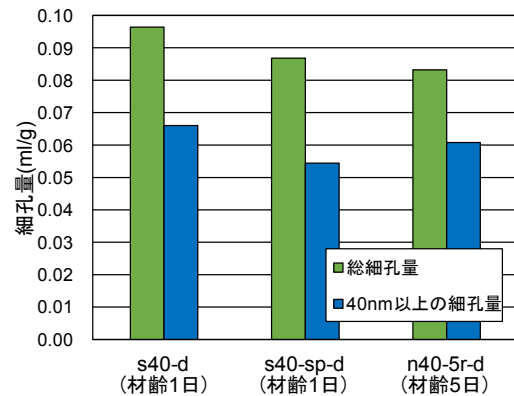


図-6 脱型時の細孔構造

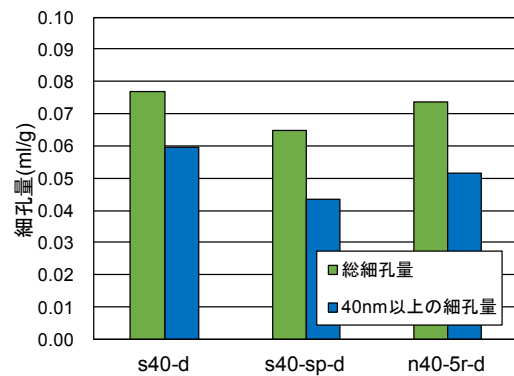


図-7 材齢28日の細孔構造

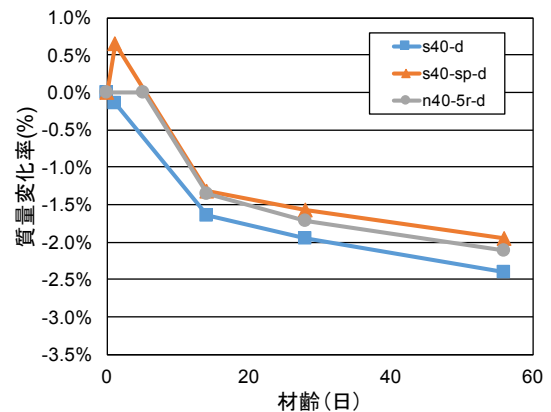


図-8 材齢の進行に伴うコンクリートの質量変化率

られる。その後、材齢が進行した材齢56日において、s40-dは約2.5%減少したが、s40-sp-dは約2.0%減少となった。s40-sp-dは散水を行ったことで蒸気養生中の乾燥が抑制され、二次養生中の気中保管による乾燥の影響を低減することができたと考えられる。また、コンクリートの質量減少率が少ない、つまり、コンクリート中の水分が逸散されなかったため、s40-sp-dは二次養生中の気中保管においても良好な水和反応が継続したと考えられる。

次に、散水を行ったs40-sp-dと同一配合の現場打ち模擬コンクリート(n40-5r-d)を比較する。n40-5r-dは封緘養生であるため脱型日である材齢5日までは質量変化は

生じなかった。しかし、その後は散水を行った s40-sp-d とほぼ同様な推移で質量減少した。既往の研究において⁸⁾、乾燥履歴によらず水和が停止した時の水和率とその時の自由水量には強い相関性があることが報告されている。したがって、質量減少、すなわち養生中の自由水の逸散と水和率には高い相関性があると考えられる。つまり、蒸気養生中に散水を行うことで、コンクリート表層部が緻密化し、同一配合の現場打ち模擬コンクリートと同様な水和反応が継続し同様な水和率を得られる可能性が示唆された。

(3) 圧縮強度

各養生条件の圧縮強度試験の結果を図-9 に示す。養生条件の異なる蒸気養生コンクリート (s40-d および s40-sp-d) を比較すると、脱型日においては、散水を行った蒸気養生コンクリート (s40-sp-d) よりも散水を行っていない場合の蒸気養生コンクリート (s40-d) の方が高い値を示した。これは、圧縮試験をする際に s40-d のテストピースは乾いていたのに対して、s40-sp-d は散水の影響で濡れた状態のまま試験を行ったこと、また、散水を行ったためコンクリートが冷却されマチュリティが低下したため圧縮強度が若干低下したと考えられる。材齢 14 日においては、散水を行った s40-sp-d は散水を行っていない s40-d に比べて高い値を示した。これは、s40-sp-d は散水によって蒸気養生中の乾燥が抑制されたため、s40-d に比べ表層部の細孔構造が密になり、二次養生中の気中保管による乾燥の影響を受けにくく、内部で比較的良好な水和反応が継続したためであると考えられる。材齢 28 日においても同様な結果となっており、散水を行っていない s40-d は散水を行った s40-sp-d に比べコンクリート表層部の細孔構造が粗であるため、気中保管による乾燥の影響を受けやすく、水和反応が停滞してしまい、材齢 14 日から 28 日の間の強度増進はほとんど見られなかった。最終的に、散水を行った s40-sp-d は散水を行っていない s40-d と比べて、材齢 28 日において約 10%高い圧縮強度を示した。

一方で、散水を行った蒸気養生コンクリート (s40-sp-d) と同一配合の現場打ち模擬コンクリート (n40-5r-d) を比較すると、脱型日 (蒸気養生コンクリートは材齢 1 日、現場打ち模擬コンクリートは材齢 5 日) においては現場打ち模擬コンクリート n40-5r-d が s40-sp-d と比較して 20%ほど高い値を示した。しかし、材齢の進行に伴い s40-sp-d は強度増進し、材齢 14、28 日において n40-5r-d と同程度の値を示した。

以上のことから、蒸気養生中に散水を行ったコンクリートは、散水を行わない場合と比較して材齢 14、28 日において高い圧縮強度を得ることができる。また、同一配合の現場打ち模擬コンクリートと同等の強度を得ることが

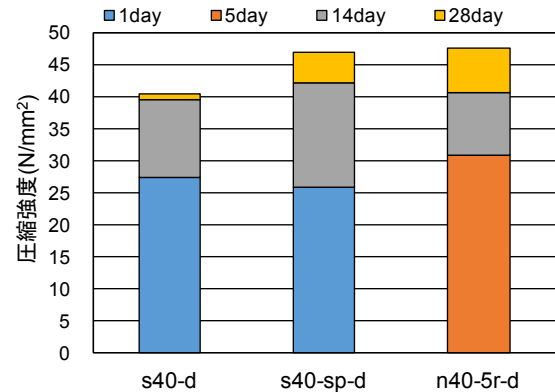


図-9 圧縮強度の比較

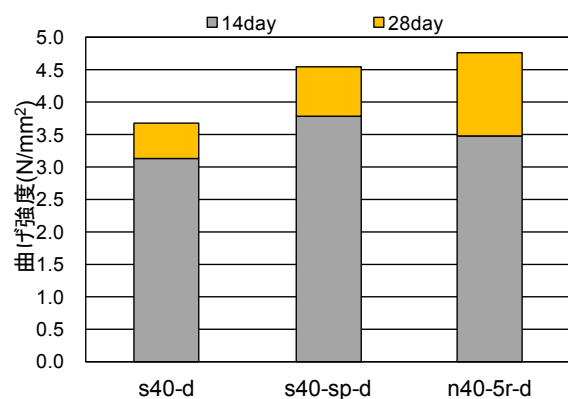


図-10 曲げ強度の比較

できる。

(4) 曲げ強度

各養生条件の曲げ強度試験の結果を図-10 に示す。養生条件の異なる蒸気養生コンクリート (s40-d および s40-sp-d) を比較すると、前述の圧縮強度と同様に、材齢 14、28 日において、散水を行っていない s40-d よりも散水を行った s40-sp-d の方が高い値を示した。s40-d は蒸気養生中に乾燥し収縮することが考えられ、コンクリート内部に収縮ひずみが発生していると考えられる。一方で、散水を行ったことで s40-sp-d は、蒸気養生中の乾燥が抑制されることで、コンクリート内部の収縮ひずみが減少し、曲げ強度が高くなったと考えられる。

s40-sp-d と同一配合の現場打ち模擬コンクリート (n40-5r-d) を比較すると、材齢 14 日においては s40-sp-d が若干高い値を示したが、材齢 28 日には n40-5r-d のほうが高い値を示した。しかし、その値の差は 10%未満であり、誤差が大きくなりがちな曲げ強度試験であることを考慮すると、蒸気養生中に散水を行うことで同一配合の現場打ち模擬コンクリートと同程度の曲げ強度を得ることができたと考えられる。つまり、蒸気養生中に散水を行うことで、現場打ち模擬コンクリートと同程度までコンクリートの乾燥を抑制することができると考えられる。

(5) 中性化速度係数

各養生条件の促進中性化試験の結果を図-11に示す。蒸気養生中の散水の有無による影響を検討すると、散水を行ったs40-sp-dは、散水を行っていないs40-dに比べ、中性化速度係数が低下していることがわかる。これは、蒸気養生中に散水を行うことで乾燥が抑制され、前述の細孔径分布測定結果からわかるよう散水を行うことで40nm以上の細孔量が減少したため、中性化速度係数が低下したと考えられる。

散水を行ったs40-sp-dと同一配合の現場打ち模擬コンクリートn40-5r-dを比較すると、s40-sp-dがn40-5r-dよりもわずかに小さい値を示した。前述の細孔径分布測定の結果から、s40-sp-dの方がn40-5r-dよりも40nm以上の細孔量がわずかに少ないことと対応し、それに伴い中性化速度係数も低下する傾向が認められた。

4. まとめ

本研究において、蒸気養生中の乾燥機構、ならびに蒸気養生中の散水が蒸気養生コンクリート表層部の細孔構造および強度、耐久性に及ぼす影響を検討し、本研究で設定した試験環境下で、以下のことが明らかとなった。

- (1)一般的な蒸気養生コンクリートは、蒸気養生中、コンクリートの表層部温度が養生槽内温度よりも高くなる傾向がある。そのため、コンクリートと養生槽内に蒸気圧勾配が生じ、蒸気養生中であってもコンクリート中の水分は逸散すると考えられる。
- (2)蒸気養生中に散水を行うことで、蒸気養生中のコンクリート中の水分の逸散を抑制することができる。
- (3)蒸気養生中に散水を行うことで、コンクリート表層部の細孔構造が密になり、コンクリート内部の水分が逸散しにくくなり、二次養生中の質量減少率が低下する。それに伴い、同一配合の現場打ち模擬コンクリートと同様な水和反応が継続し、同様な水和率を得られる可能性が示唆された。
- (4)蒸気養生中に散水を行ったコンクリートは、散水を行わない場合と比較して圧縮強度、曲げ強度が増加する。また、材齢28日において同一配合の現場打ち模擬コンクリートと同等の強度を得ることができる。
- (5)蒸気養生中に散水を行うことで、コンクリート表層部の細孔構造が密になり、それに伴い中性化速度係数も低減され、同一配合の現場打ち模擬コンクリートよりも高い中性化抵抗性を有することができる。

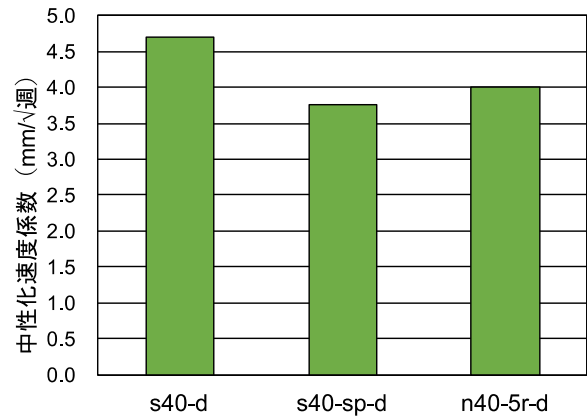


図-11 中性化速度係数の比較

参考文献

- 1) 住吉宏, 窪山潔, 今橋太一, 塩谷勝: コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響, セメント技術年報, Vol.35, pp.290-293, 1981
- 2) 大森淑孝, 河野俊夫: 蒸気養生コンクリートの耐久性におよぼす諸要因の影響, セメント技術年報, Vol.40, pp.431-434, 1986
- 3) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢時の乾燥がセメント硬化体の内部組織形成と物理特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.551-556, 2003
- 4) 鳥海秋, 宇治公隆, 上野敦, 原洋介: 蒸気養生中の散水がコンクリート製品の強度特性および細孔構造に及ぼす影響, 土木学会第72回年次学術講演会, V-379, pp.757-758, 2017
- 5) 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦: 乾燥によるコンクリート組織の不均質化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.711-716, 2002
- 6) 関健吾, 宇治公隆, 上野敦, 原洋介: 蒸気養生を実施したコンクリートの細孔構造および中性化性状, 土木学会第65回年次論文学術講演会, pp.605-606, 2010
- 7) 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦: 養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価, 土木学会論文集, Vol.57, No.718, pp.59-68, 2002
- 8) 高羅信彦, 伊代田岳史, 足立一郎, 魚本健人: 乾燥が自由水量の変化と細孔構造の形成に与える影響, 土木学会第55回年次学術講演会, V-257, pp.514-515, 2000