

蒸気養生モルタルの強度と耐久性に及ぼす混和材および追加養生の影響

太平洋セメント(株) 正会員 修(工) ○東 洋輔
 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 adding mineral admixtures and secondary wet curing on surface layer quality and durability of steam cured concrete. In order to evaluate the surface layer quality of mortar, air permeability was tested using the Torrent Permeability Tester method and the microstructure development was studied by mercury intrusion porosimetry. Chloride ion penetration depth was measured by the Colorimetric method (0.1N AgNO₃), and it was used to assess the durability of mortar. The main findings of this study are; 1) Secondary curing improves compressive strength and air permeability of steam cured mortars, the effects of secondary curing is larger than that of adding mineral admixtures, and some additives improve a chloride penetration resistance. 2) Secondary curing and adding mineral additives affect the mortars microstructure. It is possible that the structural change contributed to an improvement in air permeability and chloride ion permeation resistance.

Key words : Steam curing, Secondary wet curing, Mineral admixture, Surface layer quality, Durability

1. はじめに

PCa製品は、天候に左右されず製造工程が一貫して管理された工場で製造するため、現場打ちよりもコンクリートの品質は安定していると考えられる。ただし、早期脱型を目的として蒸気養生を行うため、その緻密性は同程度の強度を有する標準養生した場合よりも低いと報告されている¹⁾。また、PCa製品の品質管理は、一般に強度で行われるため、耐久性(物質移動抵抗性)を支配するかぶりコンクリートの密実さは、十分に評価されてこなかった。

コンクリート構造物の表層品質に着目した研究は、ここ数年で活発化しており、透気・透水などの測定から定量的に評価する手法の開発が盛んである²⁾。著者らは、標準養生したコンクリートを対象に、追加で行う養生の種類や期間が透気性や透水性に及ぼす影響を検討し、標準養生後に行う追加の養生によって表層品質(透気性および透水性)が改善されることを示した³⁾。PCa製品においても、LCCの観点から、更なる高耐久化が求められるが、蒸気養生コンクリートを対象に、混和材添加や蒸気養生後の湿潤養生などによる追加の養生(以下、追加養生と称す)による表層品質の改善を評価した事例はほとんどない。

本研究では、各種混和材を用いた早強ポルトランドセメント(以下、Hと称す)モルタルを対象に、混和材の添加や追加養生がモルタルの強度および耐久性に与える影響を検討した。また、普通ポルトランドセメント(以下、Nと称す)を比較対象として、セメント種類による影響も併せて評価した。

2. 実験概要

使用材料を表-1に示す。セメント種類はHおよびNの2種類とした。混和材について、高炉スラグ微粉末(以下、Bと称す)は比表面積6000cm²/g級を用い、初期強度改善のため無水石膏(以下、AHと称す)を併用した。また、フライアッシュ(以下、Fと称す)は比表面積4000cm²/g級、シリカフューム(以下、SFと称す)は比表面積20m²/g級を用いた。また、流動性の調整は高性能減水剤(以

下, Ad1 と称す), 空気量の調整は消泡剤 (以下, Ad2 と称す) により行った。

モルタル配合を表-2 に示す。各配合の W/B は, 蒸気養生を行い材齢 28 日 (以下, 28d) の圧縮強度が 50N/mm² となるよう決定した。そのため, W/B は H を用いた配合の中で, F 混和水準が小さく, H 単味および SF 混和水準が大きくなる配合となり, 混和材によって異なる W/B となる。また, モルタルのフレッシュ性状は, モルタルフロー200±20mm, 空気量 3.0±1.0%を目標とした。混和材の添加割合について, B および F に関しては既往の文献^{4)および5)}を参考に腐食要因物質の浸透抵抗性を改善できる程度とし, SF に関しては少量添加 (基材のセメント重量に対して 3 あるいは 5%) とした。

実験要因は, セメント種類, 混和材種類および養生方法とした。セメント種類は H および N とした。混和材種類は H を基材として, 質量比で B を 50%, F を 20%, SF を 3% および SF5% とした。養生方法は, 常圧蒸気養生 (以下, St と称す), 表層の品質改善を期待して蒸気養生後に湿潤養生 (以下, StW と称す) あるいは封緘養生 (以下, StS と称す) を 7 日間 (一部で 3 日間), 比較用として蒸気養生を行わない 20℃水中養生 (以下, W と称す) とした。

養生方法と実験フローを図-1 に示す。蒸気養生は前置き 20℃で 3h, 昇温 15℃/h, 高温保持 50℃で 5h, 降温 5℃/h とした (図-2)。脱型はすべて 1d で行った。その後 St 水準は 20℃, R.H.60%の恒温恒湿室で気中養生を行った。追加養生水準は St 水準と同環境下において供試体側面に湿潤マットによる湿潤養生を 3 あるいは 7 日間, 養生テープによる封緘養生を 7 日間行い, 残りの面はアルミ粘着テープで封緘した。追加養生後は養生材を除去し, 28d まで気中養生 (20℃, R.H.60%) を行った。W は 21d まで水中養生 (20℃) を行い, 28d まで気中養生 (20℃, R.H.60%) とした。

表-1 使用材料

材料名	備考
H: 早強ポルトランドセメント	密度: 3.14g/cm ³
N: 普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³
B: 高炉スラグ微粉末	密度: 2.91g/cm ³ , 比表面積: 6360cm ² /g
AH: 無水石こう	密度: 2.98g/cm ²
F: フライアッシュ	密度: 2.26g/cm ³ , 比表面積: 3910cm ² /g
SF: シリカフューム	密度: 2.23g/cm ³ , 比表面積: 20m ² /g
Ad1: 高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
Ad2: 消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体

表-2 モルタル配合

配合名	W/B (%)	Mi.Ad/B ※ (%)	S/B	単用量 (kg/m ³)					Ad1 (B × mass%)	Ad2
				W	B			S		
					C	Mi.Ad	AH			
H	49	-	2.5	276	564	-	-	1409	-	0.015
B50	41	50	2	264	313	322	9	1290	0.5	0.015
F20	39	20	2	259	531	133	-	1328	0.35	0.02
SF5	47.5	5	2.5	272	544	29	-	1403	0.6	0.04
SF3	48	3	2.5	273	552	17	-	1408	0.2	0.03
N	37	-	1.9	260	702	-	-	1333	0.5	0.02

※Mi.Ad: 混和材

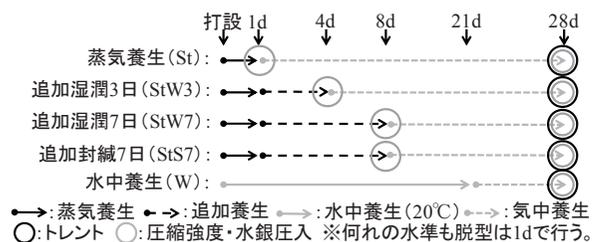


図-1 養生方法と実験フロー

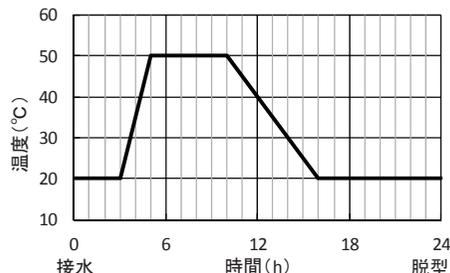


図-2 蒸気養生フロー

試験項目を表-3に示す。表面透気係数の測定は、角柱供試体(15×15×53cm)の側面を対象に行った。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(株式会社ケツト科学研究所製 HI-500, 測定範囲: 表面から深さ 40mm の平均値)を用いて表面含水率を測定した。塩化物イオン(以下、Cl⁻と称す)浸透深さは、円柱供試体(φ5×10cm)の底面を浸透面とした。追加養生水準は浸透面に対して行い、底面以外はエポキシ樹脂により被覆した。各種養生後は 28d まで乾燥させ、NaCl 10%水溶液に3ヶ月間浸漬した。浸漬後は供試体割断面に 0.1N 硝酸銀水溶液を噴霧し、白色に変化した箇所を測定した。細孔径分布測定用の試料は、角柱供試体(10×10×40cm)側面の深さ 5mm までの部位(以下、表層と称す)から採取し、St 水準は供試体断面(10×10cm)の中心付近(以下、内部と称す)からも採取した。

3. 実験結果および考察

3.1 凝結およびブリーディング率

凝結特性として、始発時間および終結時間を図-3に示す。凝結時間は H と比較して混和材を添加すると遅延傾向であり、始発時間は B50 を除いて 30 分程度遅延した。一方、終結時間は 30 分から 1 時間程度遅延する傾向であった。次に、ブリーディング率とブリーディング停止時間を図-4に示す。H と比較して混和材を添加することによって、ブリーディング率は低減し、停止時間は B50 および F20 で 30 分程度遅延し、SF 水準は同程度であった。

3.2 圧縮強度

圧縮強度結果を図-5に示す。St の各配合は目標強度 50N/mm²を満足した。7d 以後の強度増進は St でわずかだが、追加養生水準は大きい。StW3 および StW7 は追加養生による強度増進効果が大きく、とくに、混和材を使用したもので顕著であった。これは、蒸気養生後の追加養生によって、水分の逸散が抑制されることや、外部からの水分供給が加わることで、未水和セメントや混和材の水和反応が進み、硬化体の組織が緻密になったためと推察される。セメント種類では、養生条件が追加養生水準および W において、H よりも N の方が 28d 以後の強度増進が大きい。

表-3 試験項目

試験項目	備考 (試験方法, 供試体寸法, 計測箇所)
凝結時間	JIS A 1147
ブリーディング率	JIS A 1123
圧縮強度	JIS A 1108, 円柱 φ5×10cm
表面透気係数	トレント法, 角柱 15×15×53cm, 鋼製型枠側面
Cl ⁻ 浸透深さ	NaCl10%濃度水溶液浸漬, 円柱 φ5×10cm, 鋼製型枠底面
細孔径分布	水銀圧入法, 角柱 10×10×40cm, 表層および内部

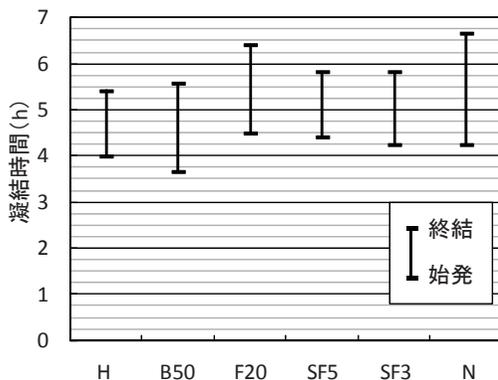


図-3 凝結時間

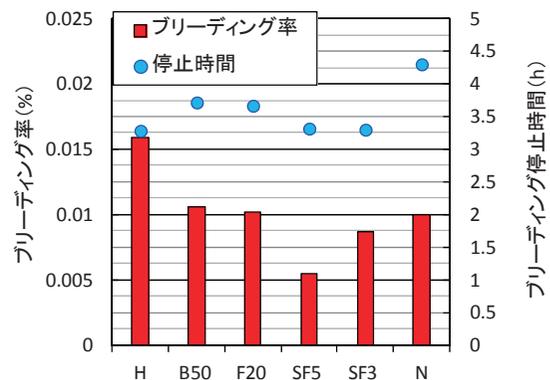


図-4 ブリーディング率と停止時間

3.3 表面透気係数

表面透気係数および表面含水率結果を図-6 に示す。表面含水率は 6.5~7.5%であり、養生方法や混和材種類による傾向は見られない。本検討では、供試体表層部の含水状態は概ね同等と見なし、表面透気係数の数値を比較することにした。St と比較して、追加養生水準の表面透気係数は小さく、W と同程度であった。追加養生の方法に着目すると、StS よりも StW の表面透気係数が小さくなり、湿潤養生の効果が大きいことを確認した。本検討では、追加養生として湿潤養生を 3 日以上行うことで、水中養生と同程度の透気性に改善できることが分かった。また、セメント種類の影響は、何れの養生方法においても同程度の値を示しており、明瞭な差は確認できなかった。

3.4 塩化物イオン浸透深さ

Cl⁻浸透深さの結果を図-7 に示す。Cl⁻浸透深さは混和材添加により減少し、B50 で一番小さく、F20, SF5, SF3 の順で大きくなる傾向であった。一方、追加養生の影響は小さく、St と比較してわずかに小さくなる程度であった。セメント種類の影響は、追加養生の有無によらず H よりも N の方が Cl⁻浸透深さは小さい。追加養生による強度増進は N の方が大きい傾向はあるものの、それだけでは Cl⁻浸透深さの違いを説明することはできない。一般に、C₃A 量の多いセメントペーストの方が高い Cl⁻固定量を示すが、H と N は組成が類似しているため、単位セメント量当たりの Cl⁻固定量は変わらない⁹⁾。しかし、強度レベルを合わせた本検討では、N の方が単位セメント量は多く、その結果、固定される Cl⁻の絶対量が大きくなり、Cl⁻浸透深さが小さくなったと推察される。

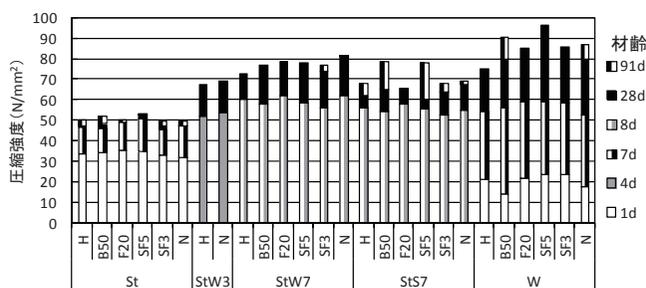


図-5 圧縮強度

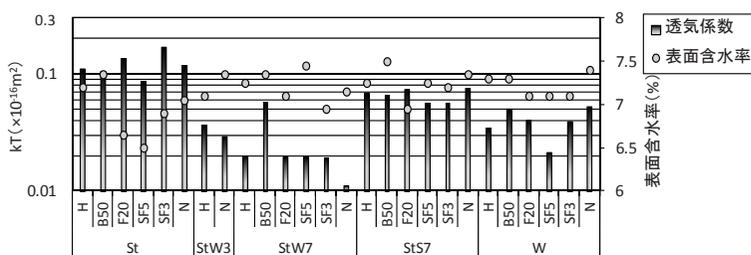


図-6 表面透気係数および表面含水率 (材齢 28 日)

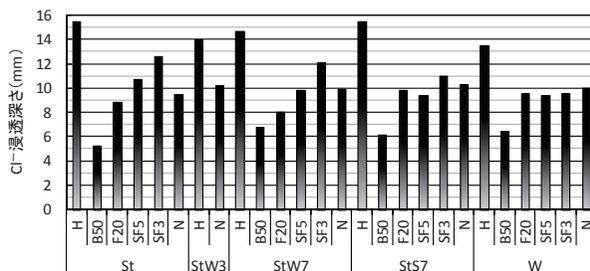


図-7 塩化物イオン浸透深さ (NaCl 10%水溶液、浸漬期間 3 ヶ月)

3.5 細孔径分布

Stの蒸気養生直後(1d)および追加養生終了時(8d)の結果を図-8に、28dの結果を図-9に示す。1d、8dおよび28dの径50~100nmの細孔量を養生種類毎に平均した結果を図-10に示す。図-8より、いずれの配合についても1d時点の表層Stおよび内部Stの細孔径分布、総細孔量に大きな相違はないが、図-9の28d時点では、内部Stの方が総細孔量は小さく、追加養生を行った水準(StW7およびStS7)でも小さい傾向である。また、径5~50nmの累積細孔量に着目すると、表層、内部ともに減少したが、径50~100nmの細孔量は、特に内部でその減少が顕著であった(図-10参照)。この径50~100nmの細孔量の減少は乾燥の影響を受けにくい供試体内部で、表層よりも水和が進行したためと推察される。図-10より、追加養生を行った水準でも28d時点の径50~100nmの細孔量は表層Stと比べて小さくなっており、これは追加養生で表層部が湿潤環境に置かれたことで、供試体の内部環境に近い状態で水和が進行したことを示唆するものである。

図-9より、28dの径5nm以上の細孔量は、混和材種類によって大きく影響を受け、養生種類の影響は小さかった。ここで、28dの細孔径分布の測定結果をもとに、全細孔量、径5nm以下、径5nm以上、径50nm以上、径100nm以上、径5~50nmおよび径50~100nmの累積細孔量とCl⁻浸透深さの相関を調べたところ、径5nm以上の細孔量とCl⁻浸透深さの相関が最も高かった(図-11参照)。既往の文献⁷⁾では、イオン透過性は径50nm以上の細孔量に影響を受けるとされているが、径50nm以上の細孔量の相関係数は径5nm以上の細孔量と同程度($R^2=0.4517$)であった。今回は何れの細孔量をとっても相関係数は小さい結果であったが、これには、混和材添加によってCl⁻固定化量が変化したことや、生成する水和物の違いによって拡散経路長(屈曲度)⁸⁾が変化したことなどが影響している可能性があり、これらを考慮した評価については今後の検討課題としたい。

図-8および図-9よりセメント種類の影響について、径5nm以下の細孔量がNで高く、材齢の経過に伴いHよりもNの方が増加傾向にあることが特徴的であった。しかしながら、径5nm以下の細孔量が圧縮強度、表面透気係数およびCl⁻浸透深さに影響を与えた関連性は、本検討において確認できなかった。今後は、Nを基材とした混和材の影響について評価する予定であり、データの蓄積後に再評価したい。

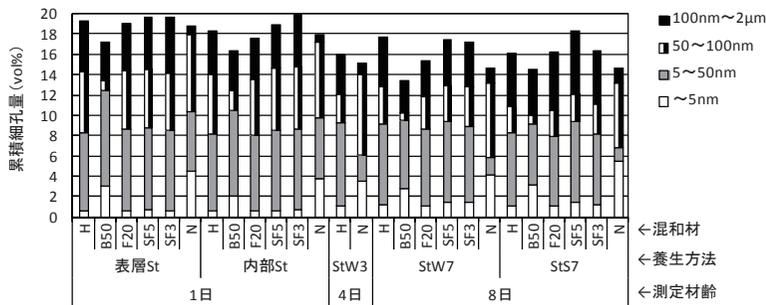


図-8 細孔径分布 (材齢1日および追加養生終了時)

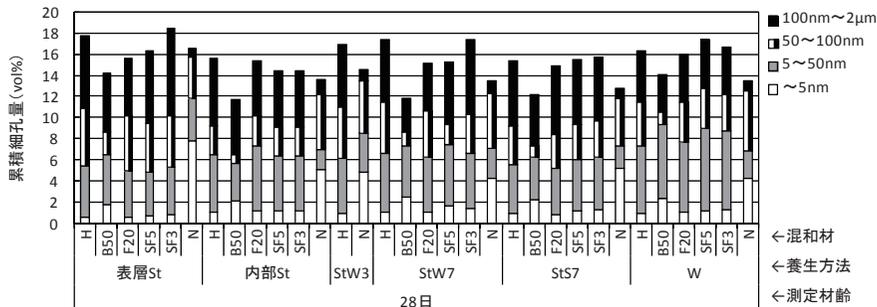


図-9 細孔径分布 (材齢28日)

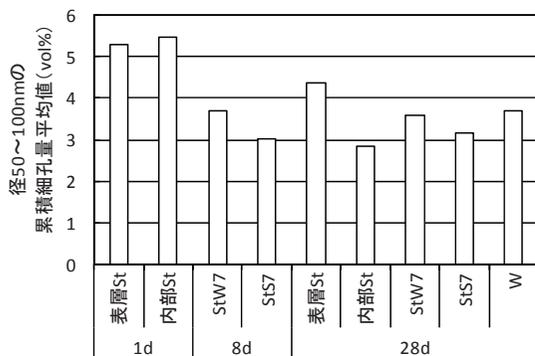


図-10 1d, 追加養生終了時 (8d) および 28dの径50~100nmの細孔量

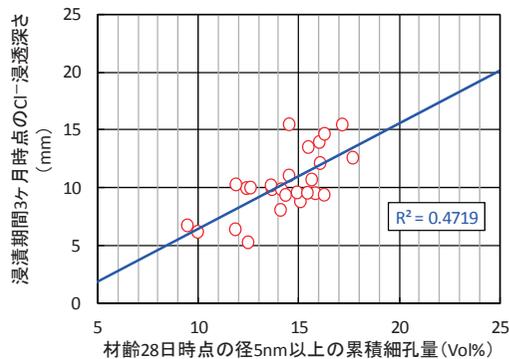


図-11 径5nm以上の累積細孔量と塩化物イオン浸透深さの関係

4. まとめ

本研究では、早強セメントを用いた蒸気養生モルタルを対象に、混和材の添加や追加養生が強度、表面透気係数 (材齢 28 日)、塩化物イオン浸透深さ (材齢 28 日から浸漬) および空隙構造に与える影響を検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1)蒸気養生後の追加養生は、材齢 28 日までの強度増進を大きくし、その効果は混和材を用いた場合に顕著である。
- 2)蒸気養生後の追加養生は透気性を改善し、その効果は封緘よりも湿潤養生の方が、追加養生期間は長い方が大きい。
- 3)混和材種類によっては塩化物イオン浸透抵抗性が改善される。また、追加養生種類の効果は小さい。
- 4)追加養生を行うことで、モルタル表層部は内部環境に近い状態に置かれるため、追加養生しない場合よりも水和の進行とそれによる総細孔量の減少が期待できる。また、径 5nm 以上の累積細孔量は塩化物イオン浸透深さの結果と相関が最も高くなった。

参考文献

- 1)佐々木謙二, 岡野耕大, 片山 強, 原田哲夫: 蒸気養生を模擬した温度層を与えたコンクリートの水分逸散性状と緻密性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1540-1545, 2012
- 2)岡崎慎一郎, 八木 翼, 岸 利治, 矢島哲司: 養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.227-234, 2006
- 3)東 洋輔, 福島万貴: 脱型後の養生種類および期間がコンクリートの表層品質に及ぼす影響, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-466, pp.931-932, 2014
- 4)祝井健志, 松下博通, 近田孝夫, 前田悦孝: 高炉スラグ微粉末の混和が高強度コンクリートの中性化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.771-776, 2004
- 5)宮野暢紘, 久保善司, 坪倉幹治: 蒸気養生を施したフライアッシュ含有コンクリートの ASR 抑制効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1291-1296, 2009
- 6)平尾 宙, Hassan ZIBARA, 高橋晴香, 山田一夫: 塩化物イオンの固定に及ぼすセメント組成の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.855-860, 2004
- 7)羽原俊祐, 沢木大介: 硬化コンクリートの空隙構造とその物性, 石膏と石灰, No.240, pp.314-323, 1992
- 8)佐々木謙二, 横澤良太, 佐伯竜彦: セメント系硬化体の塩化物イオン拡散性状に及ぼす炭酸化の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1035-1040, 2007