

論文 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

重永 裕二^{*1}・新見 龍男^{*2}・茶林 敬司^{*3}・加藤 弘義^{*4}

要旨：温度履歴の最高温度および練上がり温度が普通および中庸熟ポルトランドセメントを使用した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の把握を目的として基礎的な検討を行った。その結果、セメント種類に関わらず、温度履歴の最高温度が 60℃、90℃および 105℃において最高温度が高いほど 7 日強度は高い値となる傾向を示し、練上がり温度 37℃および 41℃における材齢 28 日以降の圧縮強度は、練上がり温度 35℃と同等以上の値を示した。なお、高温履歴を受けたセメントペーストの細孔構造は大部分がゲル空隙および径が比較的小さい範囲の毛細管空隙により構成されていると考えられる。

キーワード：ポルトランドセメント、モルタル、セメントペースト、温度履歴、練上がり温度

1. はじめに

高強度コンクリートは単位セメント量が非常に多いことから、断面厚の大きな部材では、硬化時におけるセメントの水和熱の蓄積により内部温度が著しく上昇する。そのため、セメント種類や単位セメント量、練上がり温度等の諸条件によっては最高温度が 90℃を上回る場合もある¹⁾。セメントの水和反応に及ぼす温度の影響が大きいことは一般的に知られており、構造体コンクリートにおいても強度発現性は硬化時の高温履歴に大きく影響を受ける²⁾。

一方で、近年は暑中時に外気温が 35℃を超えるケースがある。日本建築学会では荷卸し時のコンクリート温度は原則として 35℃以下としている³⁾が、コンクリートの高強度化に伴うセメント量の増加や、暑中時の気温の影響により、コンクリート温度が 35℃を超える可能性も考えられる。しかしながら、その場合のフレッシュ性状や高温履歴を受けた後の硬化性状に及ぼす影響は不明な部分が多い。

そこで本検討では、温度履歴の最高温度および練上

り温度が普通および中庸熟ポルトランドセメントを使用した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を把握することを目的として基礎的な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（以下、NC）および中庸熟ポルトランドセメント（以下、MC）を使用した。細骨材はセメント強さ試験用標準砂を用い、絶乾状態で使用した。混和剤はポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。使用材料の詳細を表-1 に、セメントの鉱物組成を表-2 に示す。

2.2 モルタルの調合条件

モルタルの調合条件を表-3 に、セメントペーストの調合条件を表-4 に示す。練上がり時のモルタルフローは 270±15mm、ペーストフローは 190±10mm とし、混和剤添加率で調整した。モルタルフローは JIS R 5210-1997「セメントの物理試験方法」に準拠し、0 打フローを測定した。ペーストフローは、JASS 15 M-103「セルレベリング材の品質基準」に準拠して測定し、フロー値をペーストフローとした。

2.3 モルタルおよびセメントペーストの混練

モルタルはソイルミキサにより混練した。セメントに

表-1 使用材料

	材料の種類	詳細
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³ 比表面積 3220cm ² /g
	中庸熟ポルトランドセメント	密度 3.21g/cm ³ 比表面積 3400cm ² /g
細骨材	セメント強さ試験用標準砂	密度 2.64g/m ³ 吸水率 0.42%
混和剤	高性能 AE 減水剤	

表-2 セメントの鉱物組成 (Bogue 式)

セメント	鉱物組成 (%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
NC	55	17	10	9
MC	45	35	4	8

*1 (株)トクヤマ セメント企画 Gr. (正会員)

*2 (株)トクヤマ セメント開発 Gr. 工修 (正会員)

*3 (株)トクヤマ セメント開発 Gr. 工修

*4 (株)トクヤマ セメント開発 Gr. リーダー 工博 (正会員)

表－3 モルタルの調合

セメント	W/C (%)	砂セメント比	配合 (kg/m ³)			練上がり時の目標値	
			W	C	S	練上がり温度 (°C)	モルタルフロー (mm)
NC	27	1.35	244	904	1221	20±1, 35±1	270±15
MC			245	908	1226	37±1, 41±1	

水および混和剤を投入し低速で 30 秒混練し、細骨材を投入し低速で 30 秒混練した。かき落とした後に中速で 60 秒混練し、300 秒静置して混練を終了した。

セメントペーストはホバートミキサーを用いて混練した。セメントに水および混和剤を投入し低速で 30 秒混練した。かき落とした後に低速で 120 秒混練し、300 秒静置して混練を終了した。

2.4 供試体の作製、養生方法および温度履歴養生条件

モルタルおよびセメントペースト供試体はφ50×100mm の円柱供試体とした。練上がり後のモルタルおよびセメントペーストを型枠に打ち込み、封緘状態として各種養生を行った。

表－5 にモルタルおよびセメントペーストの養生条件の詳細を示す。本検討においては練上がり時から温度上昇開始までの養生を前養生とし、高温養生の開始から終了までの養生を温度履歴養生と定義した。前養生期間は練上がり時の目標温度で 12 時間保持し、温度履歴養生開始後の温度上昇勾配は 5°C/h とした。温度履歴養生の最高温度に到達後は、6 時間保持し、その後は 20°C まで徐冷し、練上がりから 168 時間後に温度履歴養生が終了することとした。温度履歴養生終了後は、20°C で封緘養生とした。

本検討では、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に及ぼす影響を把握することを目的として、練上がり温度と温度履歴の最高温度を組み合わせた。温度履歴の影響の検討では、練上がり温度を

表－4 セメントペーストの調合

セメント	W/C (%)	配合 (kg/m ³)		練上がり時の目標値	
		W	C	練上がり温度 (°C)	ペーストフロー (mm)
NC	27	460	1705	20±1 35±1 37±1	190±10
MC		464	1720	41±1	

20°C とし、温度履歴の最高温度を 60°C、90°C および 105°C とした。練上がり温度の影響の検討では、温度履歴の最高温度 105°C とし、練上がり温度を 35°C、37°C および 41°C とした。

2.5 試験項目

表－6 に試験項目および試験方法を示す。フレッシュ性状は、混和剤の添加率およびモルタルフローにより評価した。経時変化として練り上がり直後、30 分後および 60 分後のモルタルフローを測定した。硬化性状について、モルタルの圧縮強度測定の材齢 7 日、28 日、56 日および 91 日とした。セメントの水和性状に及ぼす温度履歴の影響を把握するため、温度履歴養生終了時の材齢 7 日のセメントペースト供試体を用い、結合水量の測定および細孔量の測定を実施した。なお、細孔量の測定結果について

表－5 養生条件の詳細

水準	前養生期間		温度履歴養生期間				影響要因
	練上がり温度 (°C)	保持時間 (h)	温度上昇勾配 (°C/h)	最高温度 (°C)	保持時間 (h)	徐冷終了材齢 (h)	
1	20	12	5	60	6	168	温度履歴の影響
2				90			
3				105			
4	35	12	5	105	6	168	練上がり温度の影響
5	37						
6	41						

表－6 試験項目および方法

	試験項目	試験方法
モルタル	モルタルフロー	JIS R 5201-1997「セメントの物理試験方法」の0打フロー (測定時間：5分，30分，60分)
	圧縮強度	JSCE-G 505-1999「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法」 (材齢：7日，28日，56日，91日)
セメントペースト	結合水量	1000℃まで強熱した後の質量減少量より算出
	全水隙率	水銀圧入法で測定した総細孔量より算出

て、10 μ m程度以上の空隙はエントラップドエア等の大きな空隙を含むとされていることから^{4),5)}，本検討では総細孔量に占める3nm-2 μ mの範囲のゲル空隙の一部および毛细管空隙を含めた全水隙量⁶⁾により評価した。

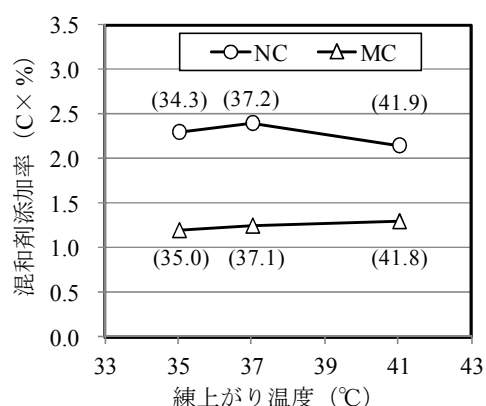
試料の調整方法として，温度履歴養生終了後のセメントペースト供試体をダイヤモンドカッターでスライスし，結合水量の試料は微粉碎し，細孔量測定用の試料は約5mm角に調整した後，アセトンに24時間浸漬して水和停止処理をし，D-dryを行った。

3. 実験結果

3.1 モルタルの流動性

図－1に，練上がり温度35℃以上のモルタルの混和剤添加率を示す。練上がり温度に関わらず，MCの混和剤添加率はNCより少なく，1/2程度の値を示した。混和剤添加率に及ぼす練上がり温度の影響として，NCは練上がり温度37℃では35℃より若干多く，41℃では35℃より若干小さい値を示した。一方，MCの練上がり温度37℃および41℃における混和剤添加率は，35℃と同程度の値を示した。

図－2に，練上がり温度35℃以上で混練したモルタルのモルタルフローを示す。NCは経時によるモルタルフ

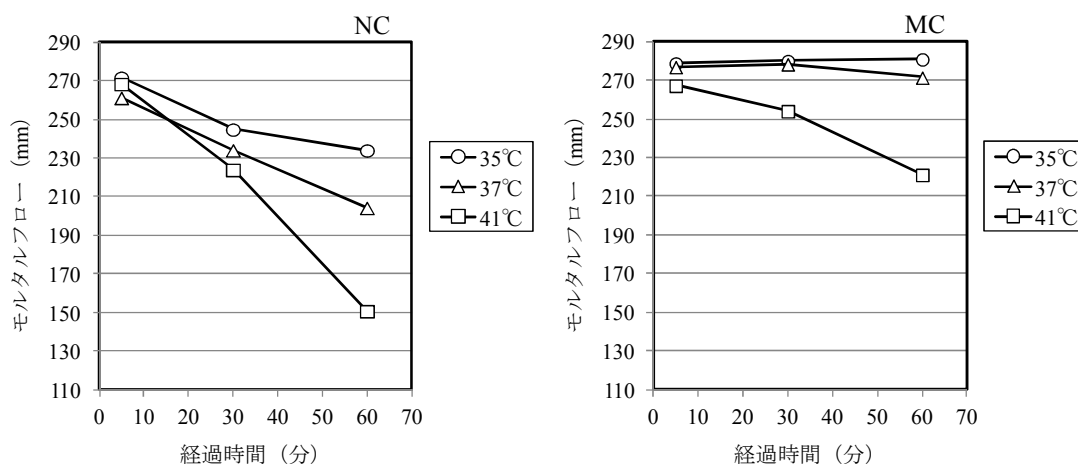


図－1 練上がり温度35℃以上のモルタルの混和剤添加率（括弧内は練上がり温度）

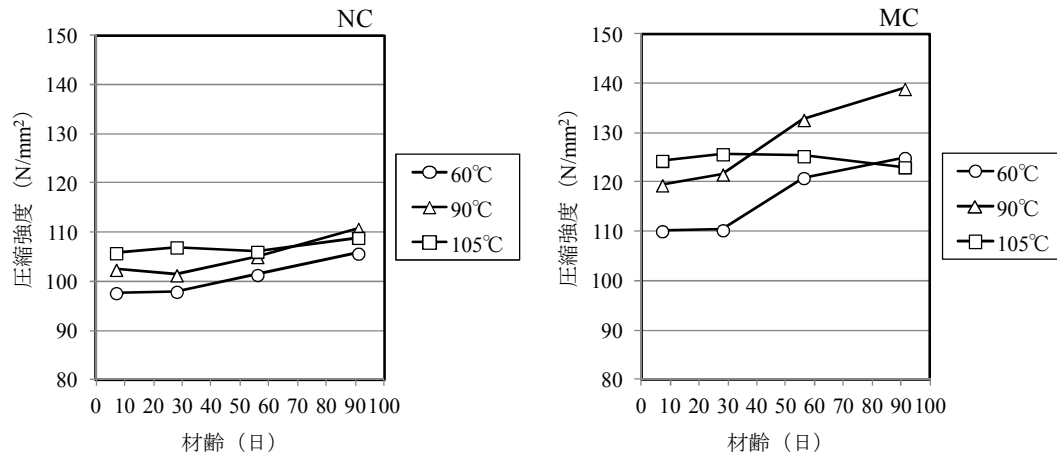
ローの低下が大きく，練上がり温度35℃では60分経過後に40mm程度小さい値を示した。また，練上がり温度が高い程モルタルフローの低下が大きい傾向を示した。MCは，練上がり温度37℃までは経時によるモルタルフローの低下はほとんど確認されなかったが，練上がり温度41℃ではフローの低下を示した。

3.2 モルタルの圧縮強度

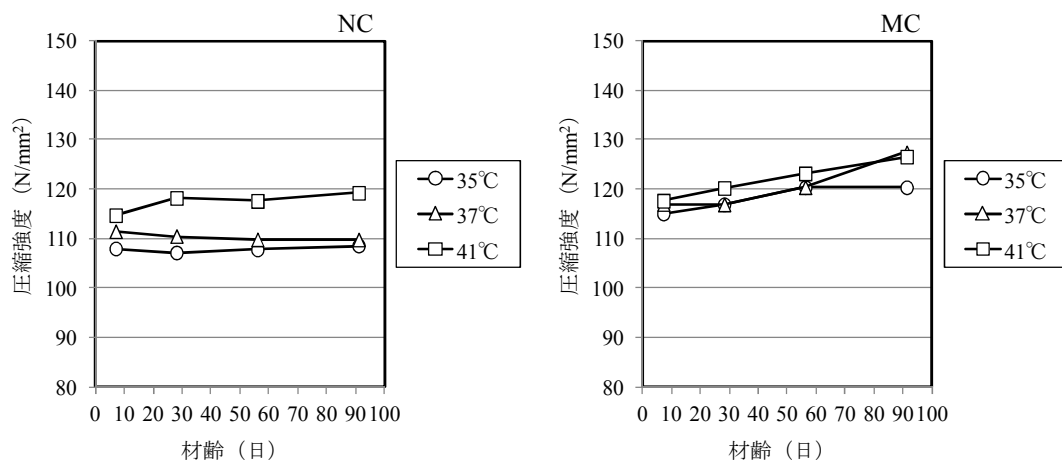
図－3に，練上がり温度20℃で最高温度60℃，90℃



図－2 練上がり温度35℃以上のモルタルのモルタルフロー



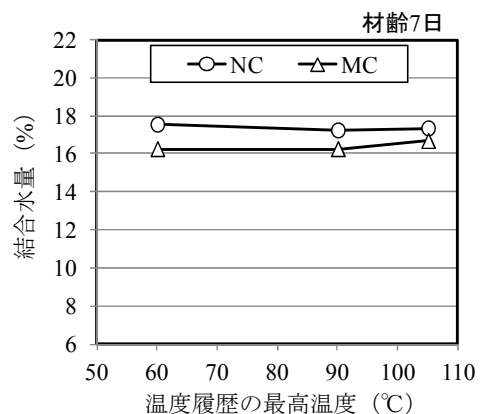
図－３ 練上がり温度 20℃で温度履歴を受けたモルタルの圧縮強度



図－４ 練上がり温度 35℃以上で温度履歴を受けたモルタルの圧縮強度

および 105℃の高温履歴を受けたモルタルの圧縮強度を示す。NC は、温度履歴養生の最高温度が高いほど、7 日強度が高い値となる傾向を示した。また、温度履歴の最高温度が 60℃および 90℃では、材齢の経過により若干の強度増進が確認されたが、最高温度が 105℃では強度増進はほとんど確認されず、91 日強度は最高温度 90℃が最も高い値を示した。MC は NC と同様に、温度履歴の最高温度が高いほど 7 日強度が高くなる傾向を示し、最高温度 90℃で長期強度が最も高く、最高温度 105℃では強度増進は確認されなかった。なお、最高温度 60℃および 90℃における強度増進は NC より大きかった。

図－４に、練上がり温度 35℃以上で最高温度 105℃の高温履歴を受けたモルタルの圧縮強度を示す。NC は、練上がり温度が高いほど 7 日強度は高い値を示した。材齢の経過による強度増進は、最高温度 60℃および 90℃では確認されなかったが、最高温度 105℃では 7 日から 28 日にかけて強度増進を示し、28 日以降も僅かに強度が増加した。MC は、練上がり温度に関わらず 7 日強度は同程度であり、いずれの練上がり温度でも材齢の経過によ



図－５ 練上がり温度 20℃で温度履歴を受けたセメントペーストの結合水量

り強度増進を示した。なお、練上がり温度 37℃および 41℃の材齢 28 日以降の圧縮強度は、いずれのセメントにおいても練上がり温度 35℃と同等以上の値を示した。

3.3 セメントペーストの結合水量

図－５に、練上がり温度 20℃で、最高温度 60℃、90℃および 105℃の高温履歴を受けたセメントペーストの温

度履歴養生終了時の結合水量を示す。NC および MC はいずれも温度履歴の最高温度の違いによる影響は小さく、60℃、90℃および105℃で同程度の値を示した。

図-6に、練上がり温度35℃以上で最高温度105℃の高温履歴を受けたセメントペーストの結合水量を示す。NC および MC はいずれも、練上がり温度37℃および41℃では、練上がり温度35℃と同程度の値を示した。

3.4 セメントペーストの細孔構造

図-7に練上がり温度20℃で最高温度60℃、90℃および105℃の高温履歴を受けたセメントペーストの温度履歴養生終了時における全水隙量および全水隙中の空隙割合を示す。練上がり温度20℃で高温履歴を受けた場合の全水隙量はNC および MC とともに最高温度の違いで異なるものの、全水隙中の空隙割合は大部分が50nm までの空隙で占められていることが確認された。既往の研究において、初期に高温履歴を受けたセメントペーストは、50~100nm 程度以上の細孔がほとんど存在しないことが報告されており^{7) 8)}、本検討においても同様の傾向を示した。また、一般にゲル空隙は数 nm であり、毛細管空隙は約10nm 以上とされていることから⁹⁾、本検討で高温履歴を受けたセメントペーストの細孔構造は、大部分がゲル空隙および径が比較的小さい範囲の毛細管空隙により構成されていると考えられる。なお、最高温度の違いについて比較した場合、NC は最高温度60℃と90℃および105℃で、10nm を境界として細孔径の分布割合の傾向が異なっている。過去の研究において、NC を使用したセメントペーストを高温養生した場合の空隙組織構造の形成は温度により異なり、40~60℃に境界があること、境界以下の温度ではセメント粒子付近から緻密な組織が形成されて組織が成長するが、境界以上の温度では水和反応が急激に起こり毛細管空隙などの大きい空隙から急激に減少することが報告されている⁵⁾。NC に関して、最高温度60℃の場合は比較的境界に近い温度であることから、90℃および105℃と細孔の分布が異なり10nm 以下の空

隙割合が多かったと考えられる。また、MC に関しては、早期の強度発現性を示すC₃SがNCより少ないことから、最高温度90℃においてもNCより急激な水和反応が起こらなかったために最高温度60℃と同様の分布の傾向となった可能性が考えられるが、セメントの鉱物組成の違いが高温履歴を受けたセメントペーストの組織形成に及ぼす影響は不明な点が多く、今後詳細な検討が必要であると考えられる。

図-8に練上がり温度35℃以上で最高温度105℃の高温履歴を受けたセメントペーストの温度履歴養生終了時における全水隙量および全水隙中の空隙割合を示す。練上がり温度35℃以上で高温履歴を受けた場合、NC は練上がり温度37℃では35℃と同程度の全水隙量を示し、41℃では若干大きい値を示した。MC は練上がり温度に関わらず同程度の全水隙量を示した。全水隙中の空隙割合について、NC は練上がり温度35℃および37℃では、50nm 以下の空隙が80~85%、100nm 以下の空隙が98%程度を占め、練上がり温度41℃では50nm 以下の空隙は60%程度であるものの100nm 以下の空隙は90%近くを占めていることが確認された。また、MC については、練上がり温度に関わらず50nm 以下の空隙が90%程度、100nm 以下の空隙が95%程度を占め、NC、MC とともに練

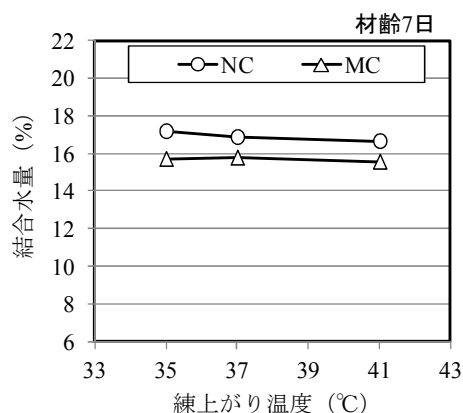


図-6 練上がり温度35℃以上で温度履歴を受けたセメントペーストの結合水量

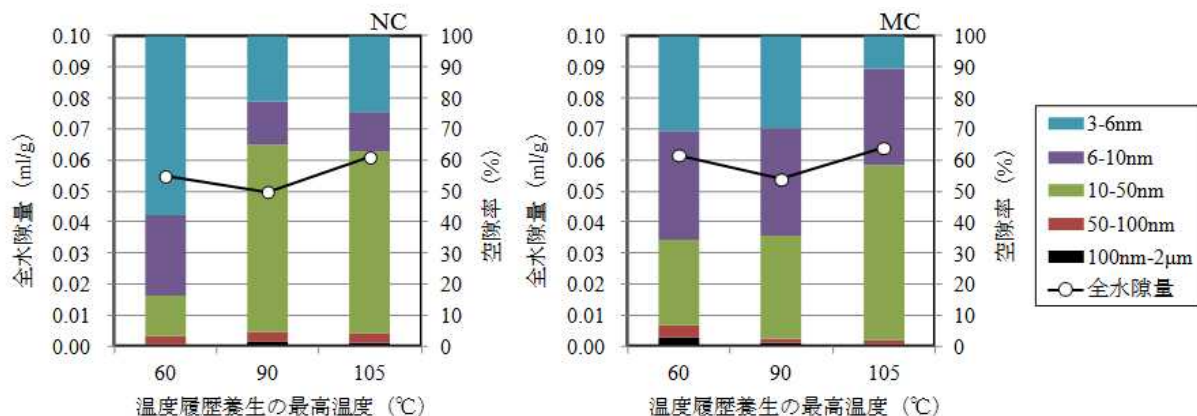
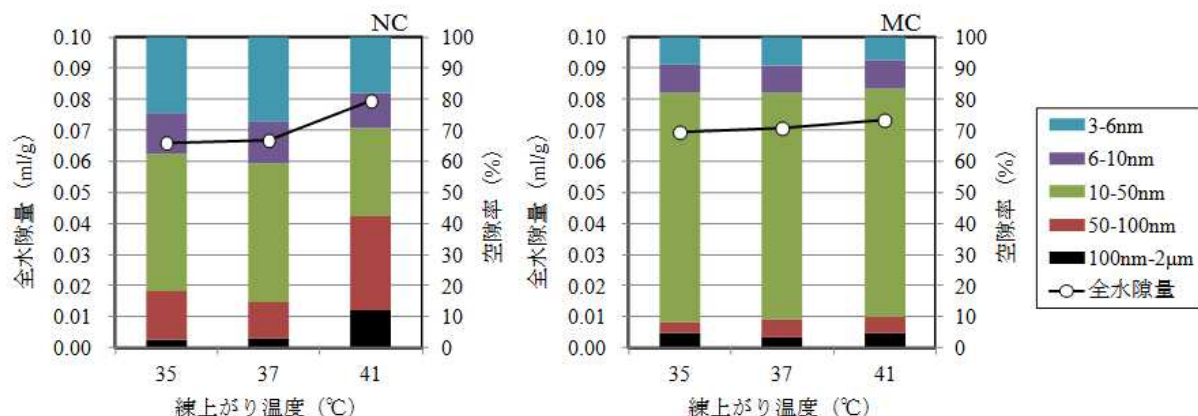


図-7 練上がり温度20℃で温度履歴を受けたセメントペーストの全水隙量および全水隙中の空隙割合



図ー 8 練上がり温度 35℃以上で温度履歴を受けたセメントペーストの全水隙量および全水隙中の空隙割合

上がり温度 35℃以上においても細孔構造の大部分はゲル空隙および径が比較的小さい範囲の毛細管空隙で構成されていると考えられる。空隙の分布に関して、NC は練上がり温度 35℃および 37℃は同様の空隙率の傾向を示したが、練上がり温度 41℃では 50nm 以上の割合が多かった。一方で MC は、練上がり温度に関わらず空隙率の分布は同様の傾向を示した。NC、MC ともに練上がり温度 20℃で高温履歴を受けた場合よりも 10nm 以上の空隙が占める割合が多く、前養生時の温度が高いことにより初期の水和が促進された影響が考えられるが、詳細に関しては前養生時の水和の状態や生成される水和物について検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

- (1) 練上がり温度 35℃以上における混和剤添加率は、MCの方が NC より少ない値を示した。
- (2) 練上がり温度 35℃以上におけるモルタルフローに関して、NC はいずれの温度でも経時によりフローの低下を示したが、MC は 37℃までフローは低下しなかった。
- (3) 練上がり温度 20℃で高温履歴を受けたモルタルの強度発現性に関して、NC と MC は同様の傾向を示したが、最高温度 60℃および 90℃における強度増進は MC の方が大きかった。
- (4) 練上がり温度 35℃以上で高温履歴を受けたモルタルの強度発現性は、セメント種類により異なる傾向を示すものの、材齢 28 日以降の強度はいずれのセメントでも練上がり温度 35℃よりも高い値を示した。
- (5) 練上がり温度 20℃で高温履歴を受けたセメントペーストの温度履歴養生終了時の結合水量は、いずれのセメントでも、温度履歴の最高温度に関わらず同程度の値を示した。
- (6) 練上がり温度 35℃以上で高温履歴を受けたセメント

ペーストの温度履歴養生終了時の結合水量は、いずれのセメントでも 35℃と同程度の値を示した。

- (7) 高温履歴を受けたセメントペーストの細孔構造は、温度履歴養生の条件に関わらず、いずれのセメントでも大部分がゲル空隙および径が比較的小さい範囲の毛細管空隙により構成されていると考えられる。

参考文献

- 1) 杉山央：高強度コンクリートの温度履歴養生特性と強度発現性，コンクリート工学，Vol.38，No.7，pp.3-9，2009
- 2) 榊田佳寛，杉山央：構造体コンクリート強度に関する研究 その動向と課題，セメント・コンクリート，No.743，pp.13-21，2009
- 3) 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 2009，p.60，2009
- 4) セメント協会：わかりやすいセメント科学，pp.46-52，1993
- 5) 伊藤一聡，岸利治，魚本健人：種々の養生温度下で形成されたセメント硬化体の空隙構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.489-494，2002
- 6) 羽原俊祐：硬化コンクリートの組織および空隙構造と物性の関係に関する研究，慶応義塾大学大学院学位論文，pp.148-152，1994
- 7) 安伸二，丸嶋紀夫，黒川健嗣：初期に高温履歴を受けたセメント硬化体の水和組織・組成の検討，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.98-103，1996
- 8) 杉山央，阿部道彦，前田弘美：高温履歴を受けたコンクリートの細孔分布と強度発現，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.122-127，1996
- 9) セメント協会：クリップボード [セメント化学編]，pp.54-55，2008