

# 論文 高温負荷による各種モルタル硬化体の物性変化

木ノ村 幸士\*1・石田 哲也\*2

**要旨：** 混和材を含む低水結合材比配合が有する材料の反応潜在性に着目し、内部養生による内的要因及び高温負荷による外的要因を有効に組み合わせることにより、硬化体内部に残存する未反応粒子の反応潜在性を発現させる基礎的な検討を実施した。その結果、当該配合では、常温封緘養生を長期継続した場合に比べ、材齢 91 日から高温高湿養生を行った場合に高い反応潜在性が発揮され、細孔構造の顕著な緻密化及び追加的な強度増進が生じることを確認した。また、高温負荷時に石灰石骨材が硬化体強度に及ぼす影響についても検討し、同骨材を細骨材として用いた場合には、強度増進効果があることを確認した。

**キーワード：** 高温負荷, 低水結合材比, フライアッシュ, 潜在性, 内部養生, 人工軽量細骨材, 石灰石骨材

## 1. はじめに

セメント硬化体の物性は、使用材料、配合、部材形状等の内的要因及び施工方法、環境条件、養生条件等の外的要因による影響を強く受ける。これらの要因が、初期欠陥や材齢初期の細孔構造形成過程に影響し、耐久性を左右することは広く知られているが<sup>1)</sup>、長期材齢経過後であっても、常温環境下で緻密な細孔構造を有するペースト硬化体が、60~80℃程度の高温高湿環境下で多孔化するという事例も報告されている<sup>2)</sup>。このような現象は、高温負荷に伴い間隙水圧や水蒸気密度勾配等が生じ<sup>3)</sup>、水分の移動・再平衡により細孔構造が変化したことが一要因として影響したと推測される。つまり、極端な外的要因の変化に対しては、作用する材齢に関わらず、硬化体内部に影響を生じる可能性が考えられる。

一方、使用材料、配合等に代表される内的要因は、強度、耐久性、使用性等の要求性能に基づき設計時に考慮される項目であるが、例えば高機能性の観点から設計した高強度配合では、標準養生が潜在的な強度を発現させる養生方法になり得ないなど<sup>4)</sup>、当該配合が有する反応潜在性を十分に発現しているとは言い難い状況も散見される。特に低水結合材比配合では、水和に必要な水分が不足することから、種々の内部養生方法により当該配合の反応潜在性を引き出す研究<sup>5),6),7),8)</sup>や、低発熱系セメントや混和材等の反応率を向上させる目的でその温度依存

性を有効活用する研究<sup>9)</sup>などが行われている。

本論は、混和材を含む低水結合材比配合が有する材料の反応潜在性に着目し、内部養生による内的要因及び高温負荷による外的要因を有効に組み合わせることで、常温時に残存する未反応粒子の反応潜在性を高温環境下で発現させ、高温負荷時の水分逸散による負の影響を凌駕する設計手法の開発を目標に、基礎的な検討を実施したものである。また、石灰石骨材を使用した場合には、フレッシュ性状の向上やアルカリ骨材反応の抑制等の効果がある一方、高温負荷時に骨材とペーストマトリックスの熱膨張係数の差に起因して生じる微視的温度応力により、強度特性が低下するとの研究事例<sup>10)</sup>もあることから、同骨材を配合に用いた基礎的な検討も実施した。

## 2. 試験概要

### 2.1 供試体種類

本論では、高温負荷時の反応潜在性がより顕著に期待される配合として、フライアッシュ(FA)を内割りで30%置換した低熱ポルトランドセメント(LPC)を用いた各種モルタル配合を設定し、供試体を作製した。配合等を表-1に、使用材料の物性を表-2に示す。

シリーズ2は、シリーズ1に対し、細骨材容積の20%を、膨張性頁岩を原料とする非造粒型の市販の人工軽量細骨材(ALS)で置換した配合である。ALSは、数日間

表-1 作製したモルタル供試体の配合及びフレッシュ性状

配合種別	W/B (%)	FA/B (%)	スラブ フロー (mm)	空気量 (%)	使用材料および単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						単位容積 質量 (t/m <sup>3</sup> )	
					水 W	粉体 P		細骨材 S				
						結合材 B LPC	FA	石粉 LP	石灰砕砂 LS	陸砂 S1		人工軽量細骨材 ALS
シリーズ1	30	30	650±50	2.5±1.5	182	425	182	0	0	1,518	0	2.299
シリーズ2	30				182	425	182	0	0	1,214	212	2.206
シリーズ3	45				230	358	153	230	1,287	0	0	2.261
シリーズ4	45				230	358	153	0	0	1,480	0	2.243

\*1 大成建設(株) 原子力本部原子力技術第三部 工修 (正会員)

\*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授 博士(工学)(正会員)

水中浸漬し、飽水させた状態で練り混ぜに用いた。

一方、シリーズ3は、シリーズ4に対し、単位水量及び結合材量を一定とし、陸砂(S1)に替えて石灰石微粉末(LP)及び石灰砕砂(LS)を用いた配合である。

細骨材の粒度分布の比較を図-1に示す。ALSは陸砂に比べ0.15mm以下の微粒分が多く0.3~1.2mmの細粒分は少ないが、陸砂に対し容積比20%で混合した粒度分布は陸砂100%のものと同様である。石灰砕砂は、陸砂に比べ細粒分が少なく粗粒分が多い。

混和剤添加量は、練り上がり5分後のスランプフローが650±50mm、空気量が2.5±1.5%となるよう調整し、打込み前に単位容積質量を測定した。供試体はφ5×H10cmの円柱供試体とし、24時間で脱型、7日まで20℃湿布養生の後、91日まで20℃封緘養生を継続した。

## 2.2 養生条件

各シリーズについて、材齢91日以降も20℃封緘養生を継続する「常温封緘(A)」ケース、及び、既報<sup>2)</sup>との比較を目的に、材齢91日より60℃90%RHに曝露する「高温高湿(C)」ケースを設定した。

高温高湿曝露供試体については、曝露直後の急激な温度上昇や各種試験材齢での取り出し時の急冷によるひび割れ導入を避けるため、昇温速度は5℃/hで制御し、取り出し時には事前に放熱特性を確認した供試体外周を断熱シートで覆う簡易的な方法により徐冷した。

以下では、配合種別+養生条件を組み合わせ、供試体名を例えば1A、2Cのように区別する。

## 2.3 試験項目及び試験方法

試験項目及び試験実施材齢を表-3に示す。高温高湿ケースでは、取り出し後、供試体温度が常温まで低下したことを確認した後、常温環境下で各種試験を実施した。

以下、強度試験は3測定の平均値、細孔径分布測定及び示差熱熱重量分析は2測定の平均値を用いて評価する。

### (1) 強度試験

強度試験として、圧縮強度試験及び割裂引張強度試験を実施した。後者は石灰石骨材とペーストマトリックスの線膨張係数の違いにより、高温曝露時に骨材周囲に微細ひび割れが発生する可能性についての基礎的な検討を目的としており、シリーズ3、4を対象に実施した。

### (2) 細孔径分布測定

配合種別及び養生条件の違いが細孔構造に及ぼす影響を確認するため、水銀圧入式ポロシメータによる分析を行った。試料には供試体中心部より採取した約5mm以下の破砕片を、48時間アセトン浸漬後、1週間以上脱気乾燥して用いた。載荷圧は円筒形細孔仮定で3nm~365μmに相当する0~60,000psi(=414MPa)の範囲とした。

### (3) 示差熱熱重量分析

水和の進行及び結合水量を分析するため、示差熱熱重

量分析(TG/DTA)を実施した。分析試料の準備方法は、細孔径分布測定と同様とし、さらに前処理としてメノウ入鉢で試料を微粉碎した。

TG/DTAの測定結果から430℃付近での減量を用いてCa(OH)<sub>2</sub>含有量を算出した。また、結合水量については、シリーズ3で骨材由来の脱炭反応が700℃以降で顕著に生じることから、その影響を避けるため、本論では700℃までの減量を結合水量と仮定して以下の考察に用いた。

## 3. 試験結果及び考察

### 3.1 強度試験

圧縮強度の経時変化及び材齢91日に対する材齢119日の圧縮強度比を図-2に示す。同様に、割裂引張強度の経時変化及び同強度比を図-3に示す。なお、両図の各配合種別では材齢91日までの強度がA、Cで一致しているが、これは同材齢まではいずれも20℃封緘養生であり、共通の供試体試験結果を用いたためである。

#### (1) 圧縮強度

図-2の(a)でシリーズ1と2の圧縮強度を比較すると、材齢7日ではシリーズ1>2であったが、材齢91日で強

表-2 使用材料の物性

材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント 密度=3.22g/cm <sup>3</sup> , 比表面積=3,510cm <sup>2</sup> /g
フライッシュ	FA	Ⅱ種:密度=2.29g/cm <sup>3</sup> , 比表面積=3,920cm <sup>2</sup> /g
石灰石微粉末	LP	密度=2.70g/cm <sup>3</sup> , 比表面積=5,180cm <sup>2</sup> /g
細骨材	LS	石灰砕砂: 表乾密度=2.67g/cm <sup>3</sup> , 絶乾密度=2.64g/cm <sup>3</sup> , FM=2.54, 吸水率: 1.17%
	S1	陸砂: 表乾密度=2.61g/cm <sup>3</sup> , 絶乾密度=2.55g/cm <sup>3</sup> , FM=2.55, 吸水率: 2.30%
人工軽量細骨材	ALS	表乾密度=1.82g/cm <sup>3</sup> , 絶乾密度=1.58g/cm <sup>3</sup> , FM=2.58, 吸水率=14.9%
混和剤	SP	高性能AE減水剤(標準形), カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	As	空気量調整剤, ポリアルキレングリコール誘導体

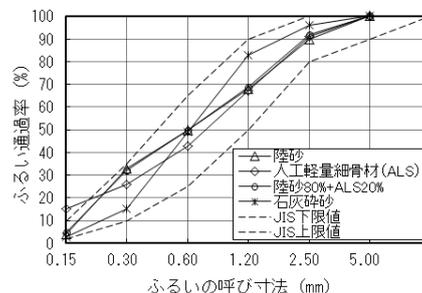
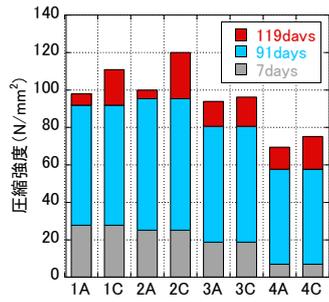


図-1 細骨材の粒度分布の比較

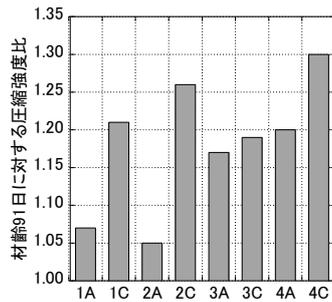
表-3 各材齢で実施する試験項目

試験項目	試験法	試験実施材齢 <sup>1)</sup>
圧縮強度	JIS A 1108	材齢7, 91, 119日
割裂引張強度 <sup>2)</sup>	JIS A 1113	
細孔径分布測定	水銀圧入法	
示差熱熱重量分析(TG/DTA)		

1) 今後も継続的に実施予定, 2) シリーズ3, 4のみを試験対象とする

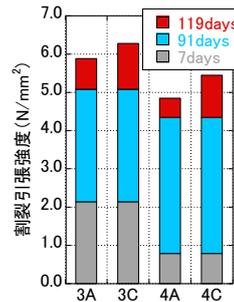


(a) 経時変化

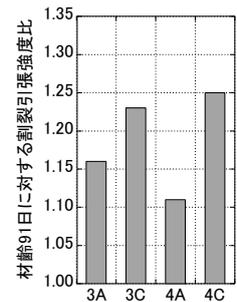


(b) 強度比 (材齢 119 日/91 日)

図-2 圧縮強度



(a) 経時変化



(b) 強度比 (材齢 119 日/91 日)

図-3 割裂引張強度

度は逆転している。また、両配合とも材齢 91 日以降も強度増進が見られるが、(b)より「高温高湿 (C)」での強度増進が大きく、特に 2C で大きいことが確認できる。

一方、シリーズ 3 と 4 を比較すると、前者は 1A, 2A と同等の高強度を示しており、これは後述する緻密な細孔構造に由来すると考えられる。また、材齢 91 日以降の強度増進に着目すると、両配合とも A と C で大差は見られない。(b)では、4C の強度比が大きく見えるが、これは 4C の 91 日強度が他に比べて小さいためである。

なお、各シリーズにおいて、材齢 91 日以降の A と C での強度増進性状に違いが生じる要因については、次節以降で細孔構造変化の観点から考察を加える。

## (2) 割裂引張強度

図-3 の 3C において、石灰石微粉末及び石灰砕砂の使用による割裂引張強度の低下は見られなかった。本結果は、骨材とペーストの熱膨張係数の差による微視的温度応力により強度低下を生じるのは、石灰石を粗骨材に使用した場合であり、細骨材に使用した場合にはむしろ強度増進効果が現れることを指摘した既報<sup>11)</sup>と一致する。

## 3.2 細孔構造

### (1) シリーズ 1 と 2 の比較

材齢 91 日までの細孔径分布及び累積細孔量の比較を図-4 に示す。材齢 7 日において、ALS を含む 2A では、1A に比べ 100~1000nm の空隙が多く含まれるが、それ以外には両者の分布に顕著な違いは見られない。材齢 91 日においても、2A の 100~1000nm の空隙はほぼ初期の分布のまま残存していることから、同空隙は ALS の内包空隙であり、材齢 91 日時点では、内包空隙への水和析出物の充填は生じていないことが示唆される。

(b)において、しきい細孔径に着目すると、1A, 2A とも、しきい細孔径は材齢経過に伴って小径側にシフトしているが、各材齢でのしきい細孔径はほぼ同じである。

材齢 91 日での両者の細孔構造の違いは 10nm 付近の分布に現れている。2A では ALS の吸水率分 (単位容量換算で 27.5kg/m<sup>3</sup>) だけ内在水量が多く、低 W/B かつ FA 置換率 30%の当該配合では、この余剰水が継続的に水和やポズラン反応に寄与し、より微細に細分化された構造を

形成することで 10nm 付近の毛管空隙を増加させたと推測される。低 W/C 配合や混和材を多く含む配合では、数年間に渡り水和が継続し、細孔構造の微細化や物質移動抵抗性の増加を示す事例が多数報告されている<sup>12),13),14)</sup>。

### (2) シリーズ 3 と 4 の比較

材齢 91 日までの細孔径分布及び累積細孔量の比較を図-5 に示す。3A は高ブレンの LP を含む配合であり、しきい細孔径は材齢 7 日で 200nm 付近、材齢 91 日で 20nm 付近にある。材齢 91 日では 30nm 以上の毛管空隙がほぼ消失しており、分布は 20nm 付近に局所的なピークを有する特徴を示す。3A の場合、主として LP がセメント粒子間中に入り込むことで本来粗大な粒子間骨格が打込み直後から効果的に充填されており、また、LP 自身の反応による AFm 相の生成<sup>15),16)</sup>や物理的な水和促進の誘発<sup>17)</sup>により、早期強度発現や微細な細孔構造の形成に寄与したと考えられる。

一方、4A のしきい細孔径は材齢 7 日で 1000nm (1 μm) 付近にある。4A はセメント粒子径以下の微粉材料を含ま

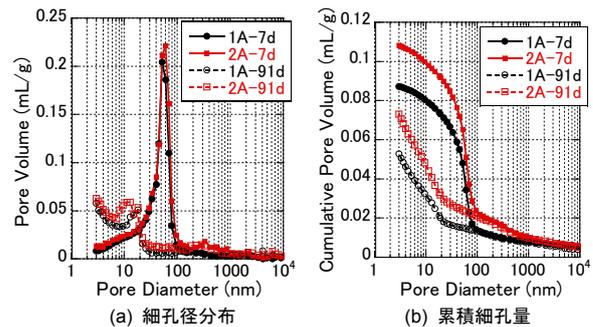


図-4 材齢 91 日までの経時変化 (シリーズ 1, 2)

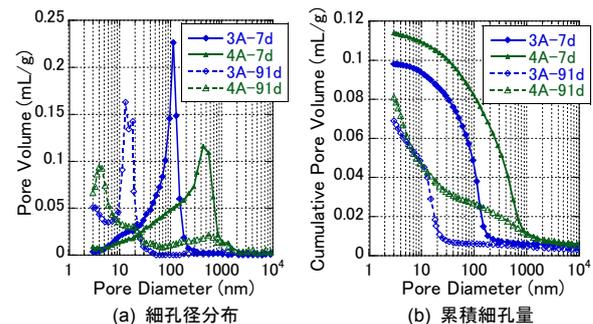


図-5 材齢 91 日までの経時変化 (シリーズ 3, 4)

ないことから、材齢初期に  $1\mu\text{m}$  程度の粗大な空隙を含む骨格構造が形成されていると推測されるが、W/C や使用材料、混和材の有無等の条件にもよるが、画像解析による W/C=40% のペースト凝結時のセメント粒子間距離は数  $\mu\text{m}$  程度との研究事例<sup>18)</sup>もあることから、粗大な初期骨格構造内を水和析出物で充填するには相応の時間を要すると考えられる。これに対し、(a)、(b)の両図より、材齢経過に伴い  $10\sim 1000\text{nm}$  の広範な毛管空隙が継続的に充填される様子が確認できる。

### (3) 養生条件が細孔構造変化に及ぼす影響

各シリーズについて、材齢 91 日より養生条件を変化させた。養生条件変化後のシリーズ 1、2 及びシリーズ 3、4 の細孔構造の経時変化を、図-6 及び図-7 に示す。

シリーズ 1, 2 において、材齢 91 日以降、「常温封緘(A)」を継続しても細孔構造に有意な変化は見られない。一方、「高温高湿 (C)」環境では、 $20\text{nm}$  以下の微細空隙が増加する一方、同径以上の累積細孔量が大幅に減少しており、特に 2C ではその傾向が顕著に見られる。2C では、材齢 91 日まで存在していた ALS の内包空隙 ( $100\sim 1000\text{nm}$  の初期空隙) がほぼ消失しており、材齢 119 日での累積細孔量は、1A とほぼ同等である。このように、高温高湿環境で緻密化が顕著に進展した要因としては、間隙水圧及び温度勾配をポテンシャルとする水分流束の発生やインクボトル空隙中の内在水分の逸散、層間水量にも変化が生じ、追加反応に寄与する水分が供給されたこ

と<sup>3)</sup>、残存する LPC や FA の未反応粒子が高温負荷に伴う反応率の向上により反応に寄与したこと、細孔構造形成過程にも温度依存性があり、高温環境では水和物の析出可能空間が拡大すること<sup>19)</sup>などが挙げられる。

一方、シリーズ 3 では、3C で  $20\text{nm}$  以下の細孔径分布に変化が見られるが、同径以上の細孔構造に有意な変化は見られない。また、シリーズ 4 では、4C の累積細孔量は 4A に比べ減少しているが、 $20\sim 1000\text{nm}$  範囲の細孔量は増加している。両配合については、養生条件変化後の圧縮強度の増進に A と C で大差はなく、高温負荷による強度増進の優位性は認められなかった。両配合の場合、シリーズ 1, 2 に比べ、結合材量が少なく単位水量も多いことから、残存する絶対的な未反応粒子数が少ないこと、また、特に 4C の細孔構造は他の高温高湿ケースに比べて粗く保水性が劣ることから、高温で発揮される配合の反応潜在性が小さいことに起因していると推測される。

以上、得られた試験結果に基づき考察を試みたが、現時点ではいずれも推測の域を出ないことから、今後、温湿度履歴を考慮可能な水分平衡・移動モデルや細孔構造形成過程の温度依存モデルを実装した熱力学連成解析システム<sup>3), 19)</sup>を用いて、比較解析を実施する予定である。また、本論で確認した高温高湿曝露後の細孔構造の緻密化は、 $60\sim 80^\circ\text{C}$  程度の高温高湿環境下で、ペースト硬化体が多孔化するという既報<sup>2)</sup>の指摘と相反している。モルタルとペースト供試体の違い、水結合材比の違い、FA

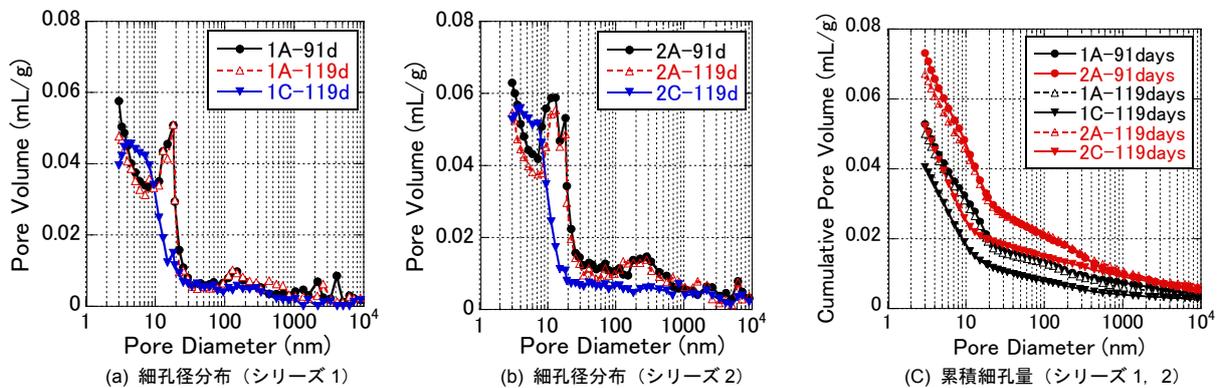


図-6 養生条件変化後の細孔構造の経時変化 (シリーズ 1, 2)

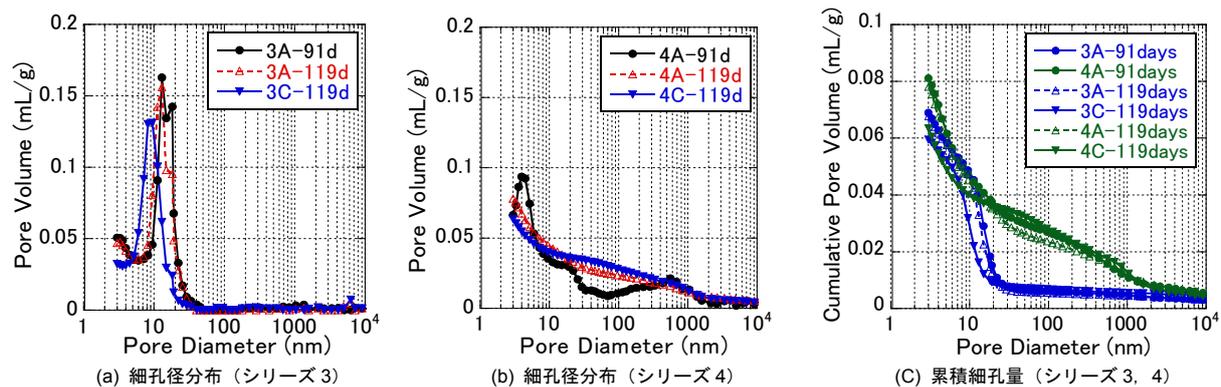


図-7 養生条件変化後の細孔構造の経時変化 (シリーズ 3, 4)

の有無など試験条件の違いもあり、主たる差違の要因は定かではないが、事象の究明は今後の課題である。

### 3.3 空隙率と圧縮強度の関係

前項において、養生条件変化後の細孔構造の変化の特徴の1つに、20nm以上の細孔量の変化が挙げられた。20nm以上の空隙率と圧縮強度の関係を図-8に示す。

両者の関係には比較的良好な相関が認められ、同関係は、配合及び養生条件の違いによらないことが示唆される。

ただし、本論では、日程の都合上、材齢119日までの結果を対象としており、データ数が十分とはいえない。特に、LPCのようにC<sub>2</sub>Sを多く含むセメントでは、強度増進の温度依存性が指摘されている<sup>20),21)</sup>ことから、この点は検証すべき課題である。今後、継続取得する試験結果を活用し、材齢経過に伴う強度増進を積算温度、等価材齢等の観点から整理することにより、圧縮強度は養生条件によらず温度時間関数として整理可能であるのか、あるいは、温湿度等の外的要因との組み合わせにより発揮される反応潜在性が温度時間影響以上に発現強度に影響する可能性があるのかを、見極めたい考えである。

### 3.4 結合水量及びCa(OH)<sub>2</sub>含有量の比較

既報<sup>22)</sup>を参考に、各供試体中の付着水の逸散量(70℃付近)、AFm結合水量(165℃付近)、Ca(OH)<sub>2</sub>結合水量(430℃付近)の変化を確認するため、TG/DTAで測定した減量を30-70℃、70-300℃、300-700℃の各温度域に分類し、図-9に整理した。横軸は、各シリーズとも左から、材齢7日のA、材齢91日のA、材齢119日のA及びCである。ここでは、前述のとおり、700℃までの減量の総和を結合水量として仮定する。

シリーズ1,2の結合水量を比較すると、材齢7日では、シリーズ1>2であるのに対し、材齢91日では逆転している。特に300-700℃域に見られる逸散水量の両者の差は、シリーズ2でALSによる内在水量の増分だけ付加的に未反応セメント粒子による水和が生じ、Ca(OH)<sub>2</sub>含有量が増加したことを示唆していると考えられる。表-4は、430℃付近のTG曲線の減量から求めたCa(OH)<sub>2</sub>含有量の経時変化である。2Aでは1Aに比べ、材齢7日から91日かけてCa(OH)<sub>2</sub>含有量の顕著な増加が確認できる。本論で扱う各配合はFAを30%含むことから、Ca(OH)<sub>2</sub>含有量の増減は、セメント水和による同鉱物の生成とボゾラン反応による消費の大小関係に依存する。2Aでは材齢119日で同含有量が微減であるのに対し、1Aで微増であるのは、両者の程度の差違によるものと考えられる。

一方、シリーズ3,4の結合水量を比較すると、両者は単位水量及び結合材量が同一であるにも関わらず、いずれの材齢においても3Aの方が結合水量は大きい。この結果は既往の知見<sup>23),24)</sup>とも一致しており、LPによるAFm相の生成や物理的な水和促進等による結合水量の

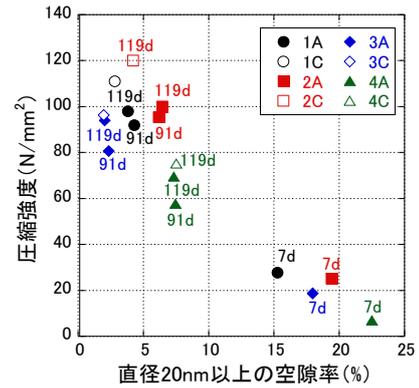


図-8 直径20nm以上の空隙率と圧縮強度の関係

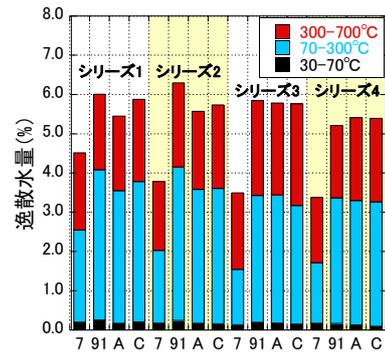


図-9 各温度域における逸散水量(結合水量)

表-4 Ca(OH)<sub>2</sub>含有量(%)の経時変化

種別	材齢7日	材齢91日	材齢119日
1A (1C)	1.7 (---)	1.9 (---)	2.1 (2.0)
2A (2C)	1.5 (---)	2.2 (---)	2.1 (2.0)
3A (3C)	1.2 (---)	1.0 (---)	1.3 (1.3)
4A (4C)	1.5 (---)	2.6 (---)	2.1 (1.4)

増加がその差の主要因として挙げられる。なお、表-4において、3AのCa(OH)<sub>2</sub>含有量は他に比べ小さい結果となっているが、その真偽については、粉末X線回折分析(XRD)により確認する予定である。

## 4. まとめ

FAを内割りで30%置換した各種LPCモルタル供試体を作製し、内部養生及び高温高湿曝露により配合が有する反応潜在性を発現させる基礎的な検討を主に行った。

本論で得られた知見を以下に示す。

- (1) FAを含む低水結合材比配合について、ALSを含む配合は、材齢91日時点でALSを含まない配合の圧縮強度を上回り、その後、高温高湿環境に曝露したケースでは、さらに顕著な強度増進が認められた。
- (2) 陸砂に替えて石灰石微粉末及び石灰砕砂を用いた配合では、骨材とペーストの熱膨張係数の差による微視的温度応力による強度低下は生じず、むしろ強度増進効果があることを確認した。

- (3) FA を含む低水結合材比配合では、材齢 91 日以降、常温封緘を継続しても細孔構造に有意な変化は見られないが、高温高湿環境では 20nm 以下の微細空隙が増加する一方、同径以上の累積細孔量が大幅に減少しており、高温負荷により配合が有する高い反応潜在性が発揮された。
- (4) 一方、FA を含む一般的な水結合材比の配合では、高温負荷による養生の優位性は認められなかった。
- (5) 直径 20nm 以上の空隙率と圧縮強度の関係は、配合及び養生条件によらず良い相関があることが認められた。ただし、LPC の温度依存性の影響程度については、今後検証する必要がある。
- (6) 結合水量及び  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含有量を分析した結果、両者の経時変化は概ね整合していることを確認した。

#### 参考文献

- 1) コンクリート技術シリーズ 97: 構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会 (JSCE335 委員会) 第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集, 土木学会, 2012.7
- 2) 蔵重勲ほか: 各種温湿度雰囲気中に曝露したセメント硬化体の細孔構造, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.615-620, 2008
- 3) 石田哲也ほか: 温湿度履歴に関するセメント硬化体中の水分平衡・移動モデルの高度化, 土木学会論文集, No.795/V-68, pp.39-53, 2005.8
- 4) 都築正則ほか:  $150\text{N}/\text{mm}^2$  を超える超高強度コンクリートの各種性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.121-126, 2007
- 5) 加藤俊充ほか: 軽量骨材による内部養生が高強度コンクリートの内部組織形成に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.675-680, 2004
- 6) 小川由布子ほか: 養生条件の異なるフライアッシュコンクリートに対する廃瓦粗骨材の内部養生効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.592-597, 2012
- 7) 荒金延明ほか: 空間分布特性から見た超吸水性ポリマーの内部養生効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.449-454, 2010
- 8) Nguyen Van Tuan et al.: Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash, Cement and Concrete Research 41, pp.1104-1111, 2011.6
- 9) 菅俣匠ほか:  $150\text{N}/\text{mm}^2$  級コンクリートの強度発現性に及ぼすシリカフェーム反応率の影響, コンクリート工学論文集, Vol.18, No.2, pp.1-11, 2007.5
- 10) 田澤栄一ほか: 高温の影響を受けるコンクリートの力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No.1, pp.13-18, 1987
- 11) 細田暁, 藤原浩一, 青木千里: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの力学的特性に対する微視的温度応力の影響, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.549-561, 2007.10
- 12) 堺孝司ほか: 改質ビーライト系セメントコンクリートの長期強度発現とそのメカニズム, 土木学会論文集, No.753/V-62, pp.1-11, 2004.2
- 13) 庭瀬一仁, 杉橋直行, 辻幸和: 低レベル放射性廃棄物処分施設の低拡散層の実規模試験による初期性能の設定, コンクリート工学論文集, 第 21 巻第 3 号, pp.53-61, 2010.9
- 14) V. Baroghel-Bouney et al.: Easy assessment of durability indicators for service life prediction or quality control of concretes with high volumes of supplementary cementitious materials, Cement and Concrete Composites 33, pp.832-847, 2011.5
- 15) 井元晴丈, 坂井悦郎, 大門正機: 石灰石フィラーセメントの水和反応解析, セメントコンクリート論文集, No.50, pp.218-225, 2001
- 16) 池田隆徳ほか: モルタルの DEF 膨張に及ぼすセメントおよび骨材種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.987-992, 2007
- 17) 長塩靖祐ほか: 石灰石粗骨材の微粒分量がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.99-104, 2008
- 18) 五十嵐心一, 渡辺暁央, 河村満紀: セメント粒子径が粗大な毛細管空隙構造に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.533-538, 2003
- 19) 半井健一郎ほか: セメント硬化体組織構造の温度依存性に基づく熱力学連成解析の高度化, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.61-78, 2005.11
- 20) 因幡芳樹ほか: 各種セメントを用いたコンクリートの強度発現に及ぼす養生温度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.475-480, 2000
- 21) 谷口円ほか: 各種セメントを使用したコンクリートの圧縮強度増進性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.357-362, 2008
- 22) 田代忠一ほか: セメント・コンクリート中の水の挙動, セメント・コンクリート研究会水委員会, 1993
- 23) 石森正俊, 名和豊春, 胡桃澤清文: 石灰石砕砂を用いたモルタルの強度発現と乾燥収縮に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.109-114, 2009
- 24) G.Kakali et al.: Hydration products of  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_3\text{S}$  and Portland cement in the presence of  $\text{CaCO}_3$ , Cement and Concrete Research, 30, pp.1073-1077, 2000