

論文 高温環境下におけるセメントペースト粘度の経時変化に関する研究

赤嶺 糸織^{*1}・山田 義智^{*2}・崎原 康平^{*3}・細川 佳史^{*4}

要旨: 本研究では、高温環境下におけるセメントペースト中の水分蒸発および水和の進行がセメントペースト粘度の経時変化に及ぼす影響についてそれぞれ検討を行った。セメントペースト中の水分蒸発による影響については、水分蒸発を防いだ試料と自由に蒸発させる試料の温度、蒸発量、粘度変化を比較することで検討を行った。本研究においては、水分蒸発の影響はほとんどないことが確認された。さらに、水和の進行による影響については、セメントペーストの練上がり温度 23°C と 35°C の経過時間によるペーストの粘度変化および水和生成物量を測定し、それらの関係について比較・検討を行った。

キーワード: レオロジー, 粘度, 水和, 温度, セメントペースト, 水分蒸発

1. はじめに

フレッシュコンクリートの打設は様々な環境下で行われており、その環境がコンクリートの施工性や品質に与える影響を把握することは重要である。近年、気候変動に伴い暑中環境は過酷化かつ長期化しており、暑中コンクリートの種々の問題がより顕在化する傾向にある¹⁾と考えられ、暑中環境を考慮したフレッシュコンクリートの流動性変化を把握することは必要である。

高温環境下におけるフレッシュコンクリートの流動性の低下は、セメントペースト(以後、ペーストと略す)部分が温度の影響を受けて、その流動特性を変化させることが原因と考えられる。従って、温度がペーストの粘度に与える影響を明らかにすることは重要であるが、その影響について検討された研究は数少ない²⁾。

ペースト粘度の経時変化に及ぼす温度の影響要因としては、「ペースト中の水分蒸発」、「水和の進行」、「セメント粒子の凝集促進」の3つが考えられる。温度による影響は、これら3つの要因が同時かつ相乗的に作用し、粘度の経時変化に影響を与えると考えられ、それらの要因がそれぞれの程度の影響を及ぼすかを個別かつ明確に検討した研究は、筆者の知る限り見当たらない。

そこで、本研究では、上述の「ペースト中の水分蒸発」および「水和の進行」に着目して、これらが、ペースト粘度に及ぼす影響についてそれぞれ検討を行ったので報告する。なお、上述の「セメント粒子の凝集促進」については、今後の課題とする。

2. 使用材料

今回の試験では、セメントは R 社製の普通ポルトランドセメントを使用した。なお、各試験において使用セメ

ント量は 200g で統一した。表-1 にセメント試験成績表を示す。

試料の練り混ぜには上水道水を用い、500ml のビーカー内で金属製の匙を用いて、斑が生じないように手練にて2分間丁寧に混ぜて試料を作製した。水量も各試験において 90 g で統一した。したがって、全試料とも水セメント比は 45% となる。

各試料には、凝集の影響を取り除くことを目的に、高性能 AE 減水剤(以後、SP と略す)を 0.9%(セメント質量比)添加した。SP は市販のポリカルボン酸エーテル系のものを用いた。SP を入れる理由と添加量については、3章にて詳しく述べる。

表-1 セメント試験成績表

密度 (g/cm ³)	3.16	酸化マグネシウム (%)	1.27
比表面積 (cm ² /g)	3300	三酸化硫黄 (%)	2.09
凝結水量 (%)	29.9	強熱減量 (%)	2.36
凝結始発 (h-min)	2-00	全アルカリ (%)	0.52
凝結終結 (h-min)	3-11	塩化物イオン (%)	0.01

3. 各種試験の概要と試験パラメータ

本研究では、ペーストの練上がり目標温度は 23°C と 35°C とし、静置中の目標室温と湿度は 35°C と 60% とした。ペーストの練上がり温度は材料保管温度および練り混ぜ水の水温にて調節を行った。

ここで、練上がり 23°C の試料は練上がり直後は常温であるが、高温環境下で次第にペースト温度が上昇する場合を想定しており、練上がり 35°C とした試料はペーストが練上がり直後から終始高温下にある場合を想定した。また、暑中環境を想定して室温は 35°C とし、湿度は水分蒸発の影響を大きくすることを目的に日本の暑中環境と

*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (学生会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 博士・工学 (正会員)

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科助教 (正会員)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 (正会員)

しては低めの60%(気象庁のデータを参考)で設定した。

試験に用いたペーストの練上がり温度は、練上がり目標温度23℃の試料は23.0±1.8℃、35℃の試料は36.3±1.1℃の範囲であった。以降において、練上がり目標温度23℃、35℃ともに練上がり温度23℃、35℃と略称する。

試験中の恒温恒湿室内の室温は35.0±0.1℃、湿度は60.0±2.0%であった。

本研究では、温度の影響要因における「ペースト中の水分蒸発」、「水和の進行」の粘度の経時変化に及ぼす影響について検討を行うことを目的としている。そのため、「セメント粒子の凝集促進」の影響があると、「ペースト中の水分蒸発」、「水和の進行」が粘度の経時変化に及ぼす影響について正しい検討ができない。そのため、ペースト中の粒子は分散状態である必要がある。

そこで、本研究では、ペーストにSPを添加することでセメント粒子の分散を図った。分散状態の判別は、ペーストの各せん断ひずみ速度における見かけの粘度がほぼ一定となることにより判定した³⁾。

伊波ら⁴⁾の結果より、常温(25℃)において、SPを0.9%添加すれば、ペースト中の粒子は、ほぼ分散状態となることが確認されている。本研究で用いる高温のペーストの場合、SPの吸着性が向上し、より分散性は高まると考えられるため、SPの添加量は0.9%で問題ないと考えた。また、分散の確認については、4.3(1)項にて述べる。

本研究では、温度による「ペースト中の水分蒸発」、「水和の進行」の粘度に及ぼす影響を明らかにするために、(1)温度変化の測定試験、(2)水分蒸発量変化の測定試験、(3)粘度変化の測定試験、(4)水和生成物量変化の測定試験の4つの試験を行った。以下の各節では、その4種類の試験の説明を記す。

3.1 温度変化の測定試験

本試験はすべて温度・湿度ともに管理可能な恒温恒湿室内にて試験を行った。練上がり直後(経過時間0分)と、練上がり後から経過時間10分毎に90分間ペーストの温度を防滴デジタル温度計にて測定した。練上がり温度23℃、35℃とも、ラップをかけ水分蒸発を防いだ試料(以降、ラップ有りと略す)と、ラップをせず自由に水分蒸発させる試料(以降、ラップ無しと略す)の2種類の測定を行った。ここでは、1つのパラメータにつき、3回ずつ測定を行い、その平均値で評価を行った。試料は500mlのビーカー(φ90mm×120mm)にて静置した。表-2に試験諸表を示す。

表-2 温度変化の測定試験の諸表

W/C %	練上がり温度 °C	室温 °C	湿度 %	ラップ	経過時間 min
45	23	35	60	有	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
				無	
	有				
	無				
	35				

3.2 水分蒸発量変化の測定試験

本試験も前節と同様に、すべて温度・湿度ともに管理可能な恒温恒湿室内にて試験を行った。練上がり直後(経過時間0分)と、練上がり後から経過時間30分、60分、90分のペーストの質量を測定し、その減少量を水分蒸発量とした。練上がり温度23℃、35℃とも、ラップ有りとラップ無し試料の2種類の測定を行った。ここでも、1つのパラメータにつき、3回ずつ測定を行い、その平均値で評価を行った。試験中は試料を500mlのビーカー(φ90mm×120mm)にて静置した。表-3に試験諸表を示す。

表-3 水分蒸発量変化の測定試験の諸表

W/C %	練上がり温度 °C	室温 °C	湿度 %	ラップ	経過時間 min
45	23	35	60	有	0, 30, 60, 90
				無	
	有				
	無				
	35				

3.3 粘度変化の測定試験

(1) 粘度の測定方法⁵⁾

粘度測定試験には、外円筒回転式の共軸二重円筒形回転粘度計を用いた。外円筒のサイズはφ70×120mmであり、内円筒のサイズはφ65×35mmである。

ここでは、文献5)と同様な方法で、応力緩和曲線を作成し、ほぼ定常状態とみなせるぎり時間300秒後のせん断応力とせん断ひずみ速度の関係から見かけの粘度を求めた。

なお、外円筒の回転速度は10、20、60、100rpmの4段階である。表-4に回転速度とせん断ひずみ速度の対応表を示す。

1つのせん断ひずみ速度それぞれにおいて、試料を3つ準備して測定を行った。ここでは、その3回の平均値を見かけの粘度として評価した。

表-4 回転速度とせん断ひずみ速度

回転速度(rpm)	10	20	60	100
せん断ひずみ速度(1/sec)	14.2	28.3	84.9	141.6

※内円筒φ65mm、外円筒φ70mmの場合

(2) 粘度変化の測定試験のパラメータ

本試験では、練上がり直後(経過時間0分)と、練上がり後から経過時間30分、90分のペーストの粘度を測定した。練上がり温度23℃、35℃とも、経過時間30分と90分の試料は、ラップ有りとラップ無し試料の2種類の測定を行った。表-5に試験諸表を示す。

なお、恒温恒湿室で行った練上がり温度23℃、経過時間0分の10、20rpmの測定結果の値が非常に低く、測定ミスの可能性があった。そのため、改めて恒温恒湿室で

ない実験室にて室温23.6±0.1℃、湿度65.0%の環境の下、再試験を行った。ここで、試験対象が練上がり直後(経過時間0分)でペースト温度も同じであることから、室温と湿度の差は、粘度測定に問題を生じさせないものと考えた。

表-5 粘度変化の測定試験の諸表

W/C %	練上がり温度 °C	室温 °C	湿度 %	経過時間(ラップ有無) min		
45	23	35	60	0*	30(有・無)	90(有・無)
	35			0	30(有・無)	90(有・無)

*一部(10, 20rpm)を室温23℃にて再試験を行った

3.4 水和生成物量変化の測定試験

(1) 水和生成物の測定方法

定量に供した水和試料は、ペーストを練り混ぜた後、所定の経過時間経過後、所定量をアセトンに浸せきして水和を停止し、吸引ろ過後ドラフト内で乾燥させて得た。これに、水和物中の非晶質量を定量するために、コランダムを内割りで10%混合し、XRDに供した。また、リートベルト法で求めた水和物の定量値をセメントの質量あたりの量に換算するために、別途水和試料の強熱減量値を、TG-DTAで測定した重量減少量(温度範囲30-1000℃)から算定した。なお、試料調製法や装置、測定条件、解析に用いたソフトおよび定量値の計算方法等の詳細はすべて既往の方法⁹⁾と同じとした。

(2) 水和生成物量変化の測定試験のパラメータ

練上がり23℃および35℃の試料を用いて、練上がり直後(経過時間0分)と、練上がり後から経過時間30分、90分後のペーストの水和生成物を測定した。ここでは、35℃の湯煎にて養生温度の管理を行い、ラップをかけて水分蒸発を防いだ。表-6に試験諸表を示す。

表-6 水和生成物の測定試験の諸表

W/C %	練上がり温度 °C	養生温度 °C	経過時間 min		
45	23	35	0	30	90
	35		0	30	90

4. 結果と考察

4.1 ペーストの温度変化

図-1に、室温35℃、湿度60%の恒温恒湿環境下で静置したペーストの10分毎の温度の測定結果を各記号にて示す。ここで、ペーストの練上がり温度は23℃と35℃で、それぞれラップを施した試料とラップを施していない試料がある。図中には、式(1)の微分方程式⁷⁾の解を用いた近似曲線も併せて示す。なお、近似曲線は、水分蒸発の影響のない(4.2節参照)ラップを施した試料を対象とした。

$$\frac{d\theta}{dt} = k(\theta_r - \theta) \quad (1)$$

ここで、 t は経過時間(分)、 k は係数(1/分)、 θ_r は外気温度(℃)である。 θ はペースト温度である。式(1)では、ペースト温度の時間変化を表す際に、セメントの水和熱を直接的に考慮することはできない。しかし、注水から20分間はエトリンガイトの水和が活発であると考えられるので、この時間帯にはセメントと水の初期温度で定まるペースト温度 θ_0 に水和熱による付加温度 h を加えて、間接的に水和熱の影響を考慮した式(2)と図-2参照)。ペーストの練上がり温度が高いと水和生成物の生成量も活発になると予想される。そこで、付加温度 h は、ペースト練上がり温度に応じてその値を大きくした。なお、注水後の20分の間にも水和熱による温度は変化すると考えられるが、ここでは簡便のため一定温度を与えた。

上記の水和熱による付加温度 h の仮定により、式(1)の解は経過時間に応じて、注水から20分までと20分以降で異なる次式となる。

$$\begin{aligned} \theta &= [(\theta_0 + h) - \theta_r]e^{-kt} + \theta_r & (0 \leq t \leq 20) \\ \theta &= [\theta_{t=20} - \theta_r]e^{-k(t-20)} + \theta_r & (20 < t) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\theta_{t=20}$ は経過20分のペースト温度である。

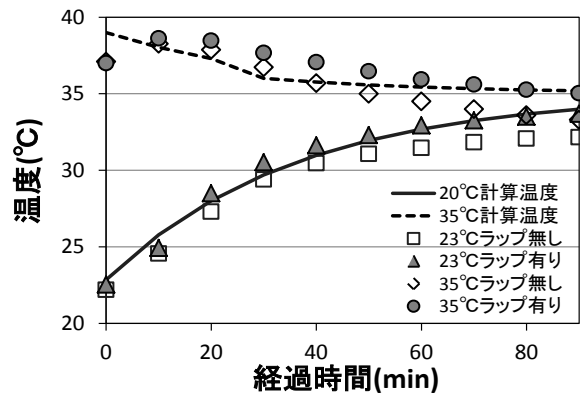


図-1 ペーストの経過時間ごとの温度変化

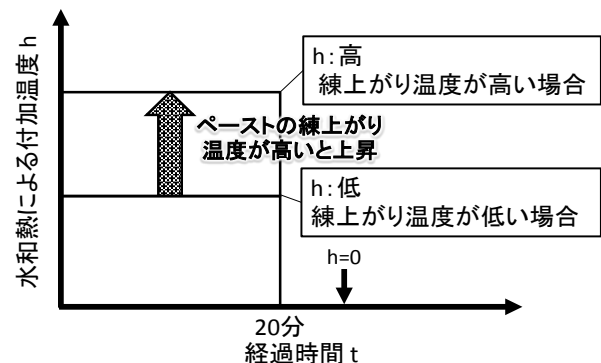


図-2 付加温度と経過時間の関係

図-1 より、近似曲線は簡便な水和発熱による付加温度を用いているため、初期の経過時間において実測とのずれが認められるが、全体的にはよく近似している。

練上がり 35°C の試料では、経過時間 20 分程度まで室温を越えるペースト温度の上昇が認められ、その後、室温に収束していく傾向がある。これは、経過 20 分までの間での水和反応が活発であるためと考えられる。

経過時間に伴い、ラップ無し試料は、ラップ有り試料に比べて温度がわずかに低くなる傾向が認められる。これは、水分蒸発による影響と考えられる。

4.2 ペーストの水分蒸発量変化

図-3 に練上がり温度 23°C と 35°C のペーストを、室温 35°C、湿度 60% の恒温恒湿環境下で静置した場合の水分蒸発量の測定結果と式(3)、(4)より得られる近似曲線を示す。

この近似曲線は、図-1 に示すペースト温度より 10 分毎の平均温度を求め、式(3)に示す Goff-Gratch 式⁸⁾を利用して各温度の水蒸気圧を計算し、温度 35°C で湿度 60% 外気の水蒸気圧との差に湿気伝導率 α を乗じることで計算した(式(4)参照)。なお、湿気伝導率 α の値は、実測値を近似することで決定し、その値は 9.64 (g/m²・h・mmHg) であった。通常、水を対象とした水平面上向き湿流は 20 (g/m²・h・mmHg) であるが、今回はセメントも表面にあり、かつ、水に SP も溶け込んでいるので上記の値になったと推察される。

$$\begin{aligned} \log\{e_{sat}(T)\} &= -7.90298 \left(\frac{T_{st}}{T} - 1 \right) \\ &+ 5.02808 \log \left(\frac{T_{st}}{T} \right) - 1.3816 \\ &\times 10^{-7} \left(10^{11.344(1-T/T_{st})} - 1 \right) + 8.1328 \\ &\times 10^{-3} \left(10^{-3.49149(1-T_{st}/T)} - 1 \right) \\ &+ \log\{e_{sat}(T_{st})\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$H = \alpha \times (e_{sat}(T) - 0.6 \times e_{sat}(308.16)) \quad (4)$$

ここで、 $e_{sat}(T)$ はペースト温度 $T(K)$ における飽和水蒸気圧(mmHg)である。また、 T_{st} は沸点における温度(373.16 K)である。また、 H は水分蒸発量(g/m²h)である。

図-3 より、練上がり 23°C の試料温度が室温に伴い高くなるにつれて水分蒸発量が多くなることなど、式(3)、(4)による計算結果は実測値をよく表している。

ラップ無しの試料は、経過時間とともに水分蒸発が認められるが、ラップ有りの試料では水分蒸発量はほとん

ど認められない。なお、ラップ有りの練上がり 23°C の試料で経過 30 分後に約 0.002g/cm² の蒸発量が認められたが、60 分、90 分では変化がない。このことから、この約 0.002g/cm² の蒸発量については、初期値測定の実測値もしくは、30 分経過までの間にラップによる試料の密閉が不十分であった可能性がある。

ラップ無しの試料では、練上がり温度が高い方が蒸発速度は大きい。ただし、経過 90 分で約 0.03 g/cm² (試料当たり約 2.0g) の蒸発量であり、今回の調査では、その影響は水セメント比が約 1% 低下する程度である。

このことより、今回の試験の条件においては、水分蒸発の粘度への影響はほとんどないものと考えられる。

コンクリート運搬の際のアジテータ車はほぼ密閉空間であり、高湿度であるため水分蒸発量は少ないものと考えられる。さらに、今回の条件である湿度 60% の環境は日本の平均的な暑中環境に比べて湿度は低く設定しており、より水分蒸発が生じやすい条件である。このことから、国内の暑中環境においては、「ペースト中の水分蒸発」がコンクリートの流動性に及ぼす影響については小さいものと推測される。

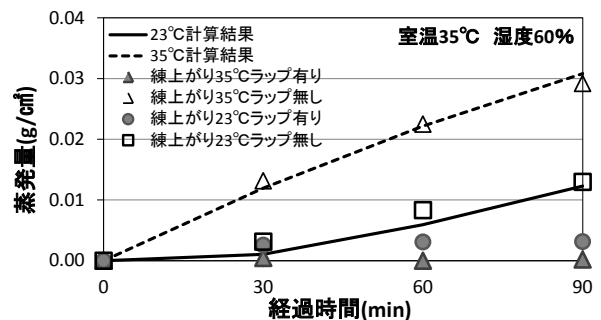


図-3 ペーストの経過時間ごとの蒸発量変化

4.3 ペーストの粘度変化と水和の関係

ここでは、まず粒子の分散状態の判別について示し、次に水和による粘度変化について示す。

(1) 分散状態の判別

セメント粒子が分散していることを確かめるため、各せん断ひずみ速度におけるの見かけの粘度の測定を行った。

図-4 にペーストの各せん断ひずみ速度と見かけの粘度の関係を示す。

セメント粒子が分散している場合、せん断ひずみ速度に関わらず、見かけの粘度はほぼ一定となる。ただし、粒子が分散時においても、せん断ひずみ速度に応じて粒子の配向や乱流が発生するため、見かけの粘度に若干の変化が生じると考えられる。一方、凝集が生じている場合はせん断ひずみ速度が小さいと見かけの粘度が大きく、せん断ひずみ速度の増加に伴い見かけの粘度が大きく低

下する³⁾。図-4の結果は、各せん断ひずみ速度に伴う見かけの粘度に凝集時に見られるような大きな粘度低下は認められず、ほぼ一定か若干の変化が生じる分散状態の粘度挙動であると判断した。

セメント粒子が分散していることと、4.2節で示したように、水分蒸発の粘度への影響はほとんどないと考えられることから、経過時間に伴うペーストの粘度上昇は水和生成物による影響であると考えられる。なお、水和生成物は対象とした経過時間が90分までであることから、エトリンガイトが主であると考えられる。

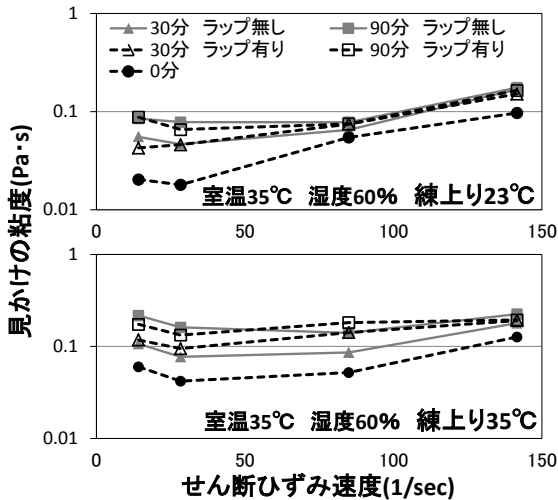


図-4 各せん断ひずみ速度の見かけの粘度

(2) 水和による粘度変化への影響

図-5に経過時間に伴う粘度変化の過程を示す。ここで、粘度は図-4の各せん断ひずみ速度に伴う見かけの粘度の平均の値である。

経過時間とともに各試料とも粘度が上昇する傾向が認められる。練上がり35°Cの試料は、練上がり23°Cの試料に比べて粘度の経過時間に伴う上昇率が大きい。また、経過時間30分までの粘度の上昇率は経過時間30~90分の上昇率に比べて大きい。これは、初期の水和で主に生成されるエトリンガイトが練り混ぜから30分間で活発に生成され、その後の生成は緩やかになることで生じて

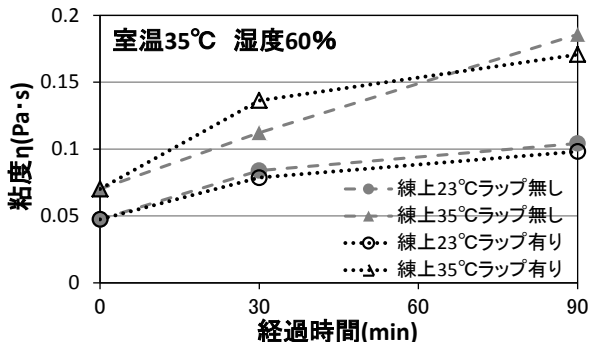


図-5 経過時間とペーストの粘度

いると考えられる。

ラップの有無による水分蒸発の粘度への影響はほとんど認められなかった。これは、4.2節で示したように今回の試験においては、最大でも水セメント比が1%程度低下するような影響しかないためである。

ところで、ペースト温度によって、SPのセメントへの吸着量に差が生じ、粘度が異なることも考えられるが、柳沢ら²⁾の研究によると、常温時(20°C)は高温時(30°C)と吸着量がほとんど変わらない結果が示されていることから、図-5に示す粘度差はSPの吸着量の差に因るものではなく、水和生成物の差であると考えられる。

図-6に経過時間毎のエトリンガイトの生成量を示す。練上がり温度23°C、35°Cともに経過時間に伴い生成量が多くなった。また、経過0~30分での生成量より30分~90分の生成量は少ない。このエトリンガイトの生成量の経過時間変化は、前述の図-5で示した粘度の経過時間変化と対応しており、粘度上昇とエトリンガイト生成量に相関が認められる。このことより、粘度が経過時間に伴い上昇する原因はセメント粒子が水和することで生じるエトリンガイトによる固相の体積の増加と比表面積の増加²⁾に因るものだと考えられる。

図-7にエトリンガイト生成量と粘度の関係を示す。横軸はエトリンガイト生成量(セメント質量比)であり、縦軸はペーストの粘度である。エトリンガイトの生成量

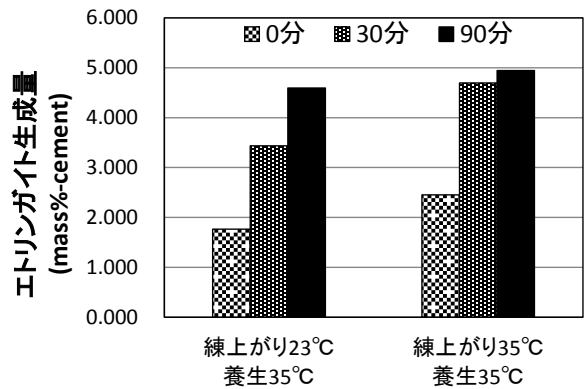


図-6 エトリンガイト生成量

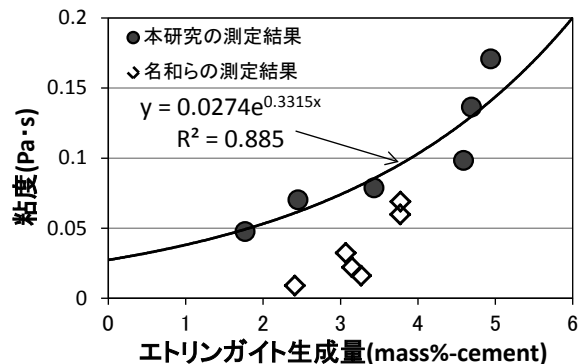


図-7 エトリンガイト生成量と粘度

が増えると、図に示すような関係で粘度も大きくなる傾向が見られた。同図には名和ら⁹⁾のナフタレン系高性能減水剤(以下、NSFと略す)を0.6%添加したペーストのエトリングイト生成量と粘度との関係も示している。ここで、名和らの結果は、粒子が完全に分散している状態であるか、論文より確認できなかったが、NSFの添加量が最も多い0.6%の結果を合わせて示した。

名和らの使用しているセメントは粒度分布のそれぞれ異なる試作セメントであり、本研究結果の粘度の測定値と多少異なるが、エトリングイト生成量が増加するにつれ、粘度が上昇する傾向は同じである。

5. まとめ

本研究では、ペースト粘度の経時変化に及ぼす温度の影響要因として「ペースト中の水分蒸発」および「水和の進行」について検討を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 練上がり 35℃の試料では、経過時間 20 分間で水和反応による温度上昇がみられた。また、経過時間に伴い、ラップ無し試料は、ラップ有り試料に比べて温度が低くなった。
- (2) ラップ無し試料は、経過時間とともに水分蒸発が認められたが、ラップ有り試料では水分蒸発はほとんど認められなかった。ラップ無し試料では、練りあがり温度が高い方が蒸発速度は大きい、その 90 分経過後の蒸発量は今回の条件においては、水セメント比に換算すると約 1%低下する程度であった。
- (3) SP を 0.9%添加することで、練上がり 23℃と 35℃の試料は、90 分経過後まで見かけの粘度がほぼ一定となる分散状態の粘度挙動を示した。
- (4) 全試料とも、経過時間にともない粘度は上昇した。練上がり温度の高い試料の方が経過時間に伴う粘度の上昇は大きくなった。さらに、経過時間 30 分までの粘度の上昇率が経過時間 30～90 分の上昇率に比べて大きい。
- (5) ラップの有無による水分蒸発の粘度への影響はほとんど認められなかった。
- (6) 経過時間に伴いエトリングイトの生成量が多くなった。また、0～30 分での生成量より 30 分～90 分の生成量は少なく、上述した経過時間に伴う粘度変化と同様の傾向となった。
- (7) エトリングイトの生成量が増えると粘度も大きくなるのが分かった。これは、エトリングイトによる固相の体積および比表面積の増加が影響していると考えられる。

なお、「セメント粒子の凝集促進」の粘度の経時変化に与える影響については、今後の課題としたい。

謝辞

日本大学の湯浅昇教授には、恒温恒湿試験室の提供および実験にご協力頂いた。琉球大学大学院 1 年次の伊波咲子氏、琉球大学 4 年次の上原義己氏には実験にご協力頂いた。また、本研究は、JCI 九州支部研究専門委員会「温暖化環境下におけるコンクリート施工品質の確保に関する調査研究(代表：小山智幸九州大学准教授)」の一環として行った。各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小山智幸, 小山田英弘, 伊藤是清: 暑中コンクリートの現状と対策, コンクリート工学, Vol.50, No.3, pp. 239-244, 2012.3
- 2) 例えば, 柳沢太一, 山田 一夫, 羽原 俊祐, 須藤 俊吉: 練混ぜ温度が高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響の作用機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp547-552, 1999.6
- 3) 赤嶺糸織, 伊波咲子, 山田義智, 細川佳史: 水和によるセメントペーストの粘度変化特性に関する研究, セメント技術大会講演要旨, No.66, pp42-43, 2012.4
- 4) 伊波咲子, 赤嶺糸織, 山田義智, 崎原康平: 各種セメントの分散状態におけるレオロジー特性に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 2013.3
- 5) 東條良太, 山田善智: セメントペーストの流動構成式に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.32, No.1, pp.1881-1186, 2010.6
- 6) Hoshino, S. Yamada, K. and Hirao, H.: XRD/Rietveld Analysis of the Hydration and Strength Development of Slag and Limestone Blended Cement, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol4, No.3, pp. 357-367, Oct.2006
- 7) 松原泰典, 大久保孝昭, 原田志津男, VICTOR SAMPEBULU: 暑中コンクリートのスランプおよび打設温度に及ぼす外気温の影響, 日本建築学会大会学術講梗概集, pp.211-212, 1988.9
- 8) 浦野良美, 中村洋: 建築環境工学, 森北出版株式会社, pp257-262, 1996.6
- 9) 名和豊春, 江口仁, 大久保正弘: セメントペーストおよびモルタルの流動性に及ぼすセメントの粉末度および粒度分布の影響, 土木学会論文集, No.433, pp.139-147, 1991.8