

論文 高温環境下における自己充填モルタルの流動性維持

前田 恵佑^{*1}・大内 雅博^{*2}

要旨：環境温度 80℃までの自己充填モルタルの流動性の経時変化の観察結果から、高性能 AE 減水剤の分散作用とセメント水和反応に着目し、現在使用されている材料を用いた流動性維持の可能性を検証した。高温環境下では高性能 AE 減水剤のセメントへの吸着が促進されても流動性向上には繋がらず、流動性が維持できないことを確認した。高温環境下での流動性維持のため、高性能 AE 減水剤の添加量増加、セメントの一部を石灰石微粉末に置換、そしてセメント粒子間距離の増大の3方法を設定しその有効性を検証した。現時点では石灰石微粉末による置換と高性能 AE 減水剤添加量の増大の併用が効果的であることがわかった。

キーワード：自己充填モルタル, 高温環境, 流動性, 高性能 AE 減水剤, セメント, 石灰石微粉末

1. はじめに

自己充填コンクリートの流動性は高性能 AE 減水剤のセメント粒子分散効果によるところが大きいですが、温度変化が流動性に与える影響を考慮する必要があります。それについての事例は多くあるが、それらは主に 10~30℃の範囲¹⁾であり、それ以上の高温環境下での影響を研究対象とした事例はあまりなく、高温環境での流動性保持性能のメカニズムは不明のままである。

本研究では、高性能 AE 減水剤の分散効果とセメント水和反応に着目し、時間の経過と共に温度が上昇する自己充填モルタルの流動性がどのように影響を受けるかを観察し、流動性維持の方法を確立することを目的としたものである。

最初に、練混ぜ時に 20℃のモルタルが、環境温度 20, 40, 60, 80℃の環境下において、時間の経過及び温度上昇によりどのような流動性低下を起すかを観察した。そして、流動性低下のメカニズムについて仮説を立て、経時により吸着できる高性能 AE 減水剤量を増加させる方法、石灰石微粉末に置換する方法、および、粒子間距離を広げることにより流動性能維持の可能性を実験により確認した。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。細骨材は粗粒率の影響を考慮し、2種類の異なる粗粒率の細骨材を使用することで粗粒率が2.50になるよう調節した。

2.2 モルタル配合及び練混ぜ方法

本研究で使用したモルタルの配合を表-2に示す。細骨材容積率を45%、水粉体容積比を90%、高性能 AE 減水剤の添加量をセメント重量に対し1.3%に設定した。

表-1 使用材料

材料	記号	物性
セメント	C	低熱ポルトランドセメント, 密度 3.24g/cm ³
細骨材	S	石灰石細砂, 密度 2.68g/cm ³ , 粗粒率 2.98
		海砂, 密度 2.60g/cm ³ , 粗粒率 2.30
粉体	Ls	石灰石微粉末, 密度 2.71g/cm ³
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

練混ぜに際し、各材料を 20℃の恒温室にて予め 24 時間以上静置した。また、練混ぜ時の発生熱を考慮し、練混ぜ水をあらかじめ冷やしておくことで練上がり温度が 20℃±2℃に収まるように調節した。

材料の練り混ぜにはパドルミキサを用い、練混ぜ速度は低速（自転速度：毎分 140±5 回転、公転速度：毎分 62 回±5 回転）とした。

セメント、細骨材を投入し 30 秒練混ぜ、一次水（全水量の 7 割）を投入し 60 秒練混ぜる。20 秒間掻き落としをした後、2 次水（全水量の 3 割）と混和剤（ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤）を投入して 90 秒練混ぜた。

表-2 モルタル配合

配合種別	単位量 (kg/m ³)		
	W	C	S
W/C(%)			
28	261	938	1186

2.3 流動性の測定

練混ぜたモルタルの流動性を練上がり直後に測定し、試料を密封容器に入れ、所定の温度に設定した恒温乾燥

*1 高知工科大学 大学院 工学研究科基盤工学専攻社会システム工学コース (正会員)

*2 高知工科大学准教授 工学部社会システム工学科 博士(工学) (正会員)

機の中に静置した。その後、30分毎に流動性を測定し180分経過又は流動性測定不可能となる時間まで測定を行った。

(1) 変形性の測定

変形性の測定では、文献²⁾に準じ、モルタルフローの広がり最大となる直径とその直角となる直径を測定し平均値を求めた。また、そこから変形性能として相対フロー面積比 Gm を式(1)より計算した。Gm の値が高いほど高い変形性を有していることを示す。

$$Gm = (d_1 \times d_2 - d_0^2) / d_0^2 \quad (1)$$

ここで、 d_0 : フローコーンの底面直径 (mm)

d_1, d_2 : モルタルフロー値 (mm)

(2) 粘性の測定

粘性の定量化方法として、文献²⁾に準じモルタル用 V ーロート試験器を用いて流下時間を測定した。そこから式(2)より相対ロート速度比 Rm として求めた。Rm の値が大きいほど低い粘性を示す。

$$Rm = 10 / r \quad (2)$$

ここで、 r : ロート流下時間 (秒)

(3) 高性能 AE 減水剤吸着量の測定

流動性試験を実施した後、速やかにモルタルサンプルを採取し、遠心脱水(約 7000 G, 7分)を行いモルタルから液相を分離させ、液相を抽出した。その後、液相中の炭素量を全有機炭素測定装置によって測定し、添加量との差を求め吸着量とした。

3. 温度上昇による流動性低下の観察結果

3.1 モルタル温度履歴

練上がり時が 20°C のモルタルが、それぞれ 20, 40, 60, 80°C の環境下に置かれた場合のモルタル自身の温度履歴を図-1 に示す。環境温度が 20°C の場合、モルタル温度に変化は見られなかった。それ以外の環境温度の場合、時間の経過とともに環境温度に応じてモルタル自身の温度が上昇していることがわかる。

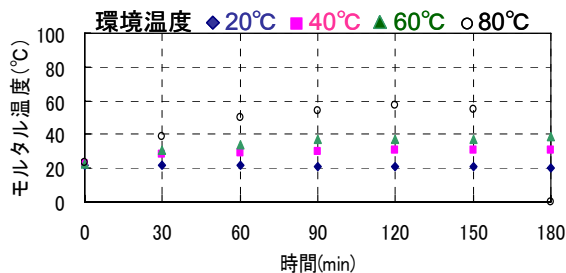


図-1 モルタル温度履歴

3.2 環境温度と変形性の関係

異なる温度環境下に静置した場合の Gm の変化を図-2 に示す。練上がり直後から 30 分後に掛けての経時には

環境温度に寄らず、Gm が大きく低下した。30 分後にモルタル温度が 20°C となる場合の Gm は練混ぜ直後に比べ 54% の Gm を失っており、30 分後のモルタル温度が 40°C になる場合には Gm が 69% 失われた。また、120 分後に環境温度 20°C では練上がり直後に比べ Gm が 51% 失われているのに対し、環境温度が 80°C の場合には Gm が 97% 失われた。

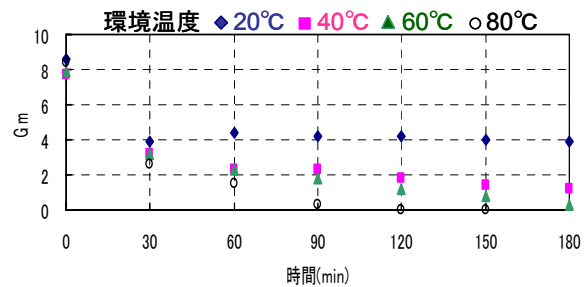


図-2 環境温度と Gm の関係

3.3 環境温度と粘性の関係

20°C のモルタルを異なる温度環境下に静置した場合の Rm の変化を図-3 に示す。モルタル温度が上昇することで、モルタルの Rm が増加していることが分かる。しかし、練上がり直後から 30 分後に掛けての Rm の増加率は、モルタル温度が 20°C となる環境では 24% であったのに対し、モルタル温度が 40°C となる環境では 18% であった。これにより、経時初期におけるモルタル温度の上昇では、高性能 AE 減水剤の粒子分散効果が高まり、セメント粒子間の拘束水を開放したことでモルタル液相中の自由水量が増加しているものと考えられる。

一方、その後の経時により、120 分後のモルタル温度が 20°C の場合、練上がり直後に比べ Rm の増加率は 37% であったが、モルタル温度が 60°C になる場合には 75% になった。

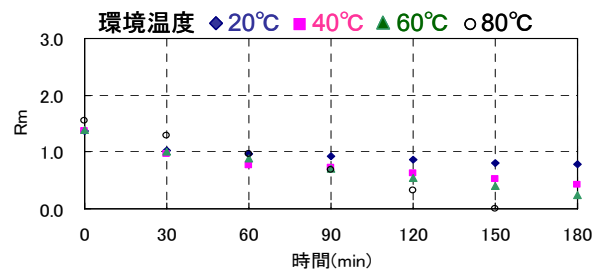


図-3 環境温度と Rm の関係

3.4 環境温度と高性能 AE 減水剤吸着量の関係

モルタル中の高性能 AE 減水剤吸着率の推移を図-4 に示す。環境温度 20°C では温度上昇の影響を受けないため、

吸着は経時により緩やかに進み、30分後では添加量の41%が吸着した。一方、環境温度80℃の場合では時間の経過と共にモルタル温度が上昇することで、吸着量も大幅に増加し、30分後では47%の高性能AE減水剤が吸着した。環境温度20℃と80℃を比べ、30分後にはモルタル温度に20℃差が生じ、高性能AE減水剤の吸着率が環境温度80℃の方が6%増加したことになる。

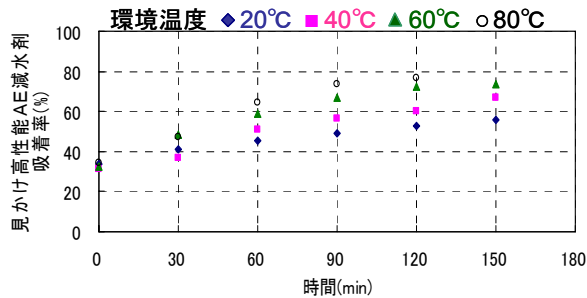


図-4 環境温度と高性能 AE 減水剤吸着率の関係

以上の結果より、経時により温度が上昇するモルタルは変形性の低下及び粘性の増加を起し、流動性を数時間維持することが困難であることが明らかとなった。モルタルの温度上昇により高性能 AE 減水剤の吸着は促進されたが、いずれの時刻においても流動性の向上は確認されなかった。

4. 流動性維持性能の向上

4.1 高温環境下での流動性変化のメカニズムについて仮説

高温環境下ではセメント水和生成物の成長により粘性が増加するとともに、その水和生成物に高性能 AE 減水剤の分散基が覆われることでの反発力が失われる結果、流動性が失われるという仮説を立てた。そして、これらの仮説をもとに、一般に用いられている材料を使用する前提で配合上の工夫により高温環境下で流動性を維持する方法を設定した。①材料分離を生じさせない範囲で高性能 AE 減水剤添加量を増加させる、②セメントの一部を石灰石微粉末で置換する、③セメント粒子間距離を大きくする、の3つである。次章においてそれぞれの効果を検証する。

4.2 高性能 AE 減水剤添加量を増加させた場合

モルタル液相中に未吸着で存在している高性能 AE 減水剤の量によりモルタル流動性の維持性能が変化することが報告されている³⁾。そこで、モルタル液相中の未吸着な高性能 AE 減水剤を増加させることで流動性の維持性能の向上を試みた。

モルタルの基本配合は表-2と同じである。高性能 AE 減水剤の添加率をセメント重量に対し、1.0、1.2、1.3、1.6、1.8%とした。また使用材料の物性は表-1に示す通りであり、環境温度80℃にて静置した。モルタルの温度履歴は図-1に示す通りである。

図-5に高性能 AE 減水剤の添加率の違いによる練り上がり直後の Gm の違いを示す。高性能 AE 減水剤添加率を1.0%から1.3%まで増加させた場合、モルタルの Gm は直線的に増加した。一方、添加率1.3%以上では添加率に関わらず一定の Gm を示した。高性能 AE 減水剤添加率1.3%以上では未吸着で存在している高性能 AE 減水剤量が増加することが考えられる。この方法を利用することにより、効き目が失われた分を補うために新たに吸着する高性能 AE 減水剤量を増加することが可能であると想定した。

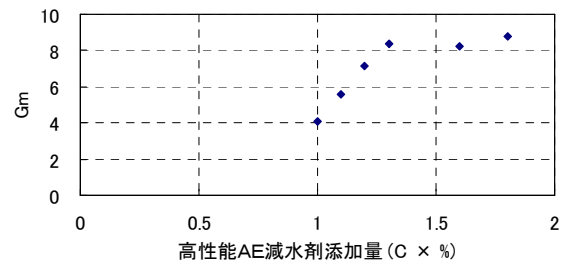


図-5 高性能 AE 減水剤の添加量と Gm の関係

環境温度を80℃とし、高性能 AE 減水剤添加量を変化させた場合の Gm の変化と Rm の変化を図-6に示す。変形性の試験結果より、練り上がり直後の変形性は高性能 AE 減水剤の添加率を大きくすることで増加しており、モルタル温度上昇の影響が現れる30分以降の Gm においても高性能 AE 減水剤の添加率が多いものほど流動性の維持性能が高いことが分かる。しかし、添加率を1.8%まで上げた場合においても、150分後にはその変形性測定は不可能であった。

また、粘性の試験結果より、高性能 AE 減水剤の添加率を増加させることで、経時によるモルタル温度の上昇による Rm の増加を抑制する効果を高めていることが分かる。一方、高性能 AE 減水剤添加率が1.0%の場合では、粒子分散効果が小さく時間の経過に応じて吸着できる高性能 AE 減水剤が少ないことにより、練混ぜ直後から30分後にかけての Rm 増加が最も激しく、Rm が67%増加した。また、高性能 AE 減水剤添加率1.2%と1.8%を比較すると、練り上がり直後の Rm は添加率1.2%の方が18%小さかった。しかし、添加率1.2%の場合では経時変化における Rm の増加率は30分後で35%となり60分後では65%に達しているのに対し、添加量1.8%では30分後で

33%の増加, 60 分後では 51%の増加にとどまっている

以上, 配合上の高性能 AE 減水剤添加率を増加させることで時間の経過に応じて吸着できる高性能 AE 減水剤量を確保した場合, 練上がり直後の Gm が同じ場合でも, Gm 及び Rm の経時保持性能が向上した。しかし, 添加率を 1.8%まで増加させた場合でも 150 分後には流動性測定が不可能となった。

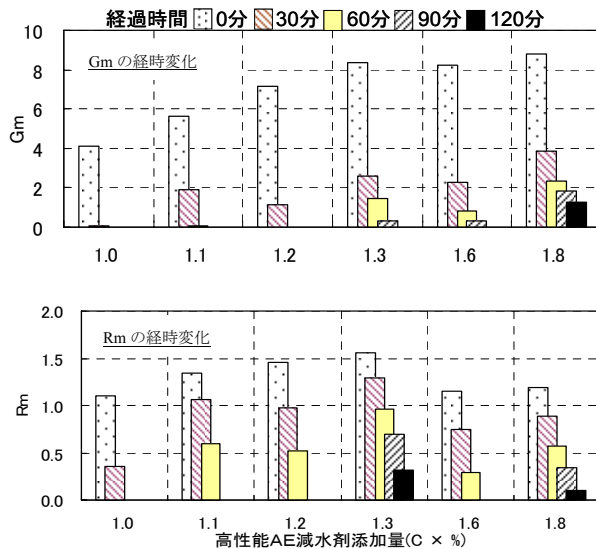


図-6 高性能 AE 減水剤添加率増加と Gm 及び Rm の経時変化の関係

4.3 セメントの一部を石灰石微粉末に置換した場合

セメントの一部を化学的に不活性な粉体に置換することでセメントの水和生成物の量を抑制し, 流動性の低下を抑制し, 流動性維持性能が高まることが報告されている⁴⁾。そこで本研究においても, セメントの一部を石灰石微粉末に置換することで水和生成物の発生量を減少する方法を検討し, その効果を検証した。

モルタル配合を表-3 に示す。細骨材容積率を 45%, 水粉体容積比を 90%と設定した。環境温度 80°C の条件下, 石灰石微粉末への置換率を 0, 15, 30%と変化した場合の Gm の変化と Rm の変化を図-7 に示す。また, モルタル配合は練上がり直後の Gm が 7 ± 0.5 となるように高性能 AE 減水剤量を調整した。モルタル自身の温度履歴は図-1 と同じであった。

変形性の試験結果より, 練上がり直後の Gm が同じであっても経時 30 分間において石灰石微粉末へ無置換の場合, Gm の低下率は 83%であったが, 石灰石微粉末に 15%置換した場合は 77%, 30%置換した場合は 52%の低下にとどまった。これにより, 練上がり直後の Gm に依らず, 時間の経過と共にモルタル温度が上昇する場合においても, セメントを石灰石微粉末に置換した場合

表-3 モルタル配合

配合種別	単位量 (kg/m ³)				SP 添加量 (C x %)	
	W / C (%)	Ls / P (%)	P			S
			C	Ls		
28	0	261	938	0	1186	1.2
33	15		797	117		1.2
40	30		657	234		0.8

では流動性維持性能が向上した。

また粘性の試験結果より, 練上がり直後から経時 30 分間において石灰石微粉末無置換の場合, Rm の増加率は 33%であった。一方, 石灰石微粉末へ 15%置換した場合は 34%の増加, 30%置換した場合は 7%にまで抑えることが出来た。この差は 60 分後の粘性測定では更に顕著になった。

以上の結果より, セメントの一部を石灰石微粉末に置換し水和生成物量を減少させることで流動性能を維持する効果を確認することができた。しかし, 置換率を最大 30%とした場合でも, 90 分後には流動性測定が不可能となった。

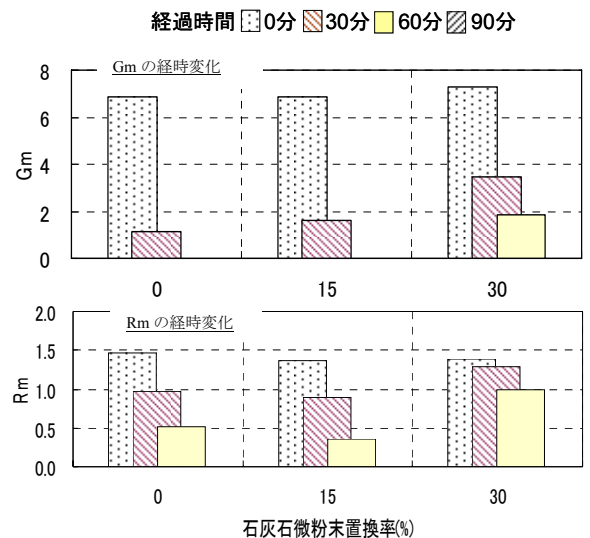


図-7 石灰石微粉末置換率と Gm 及び Rm の経時変化の関係

4.4 セメントの粒子間距離を広げた場合

時間の経過に伴い析出するセメントの水和生成物により, セメント粒子間の接触頻度が高まることから粒子間摩擦が増加し, モルタルの粘性が増加することが報告されている⁴⁾。この点に着目し, セメント粒子間距離を広げ粒子間摩擦を抑制することで流動性低下の抑制を

試みた。モルタル配合を表-4 に示す。

表-4 モルタル配合

配合種別		単体量 (kg/m ³)			SP 添加量 (C × %)
Vw/Vc	W / C	W	C	S	
90	28	261	938	1186	1.30
95	29	268	914		
100	31	275	891		

環境温度を 80℃とし、水セメント比を変化させた場合の Gm と Rm の経時変化を図-8 に示す。

変形性の試験結果より、高性能 AE 減水剤添加量を一定にしても、練上がり直後の Gm に大きな差は見られなかった。一方、経時変化における Gm の低下は粒子間距離が広いほど小さい。これは、セメント粒子間距離を広げたことで水和生成物の接触頻度が低下した結果によるものと考えられる。

粘性の試験結果より、セメントの粒子間距離を大きくすることにより練上がり直後の Rm が大幅に増加した。また、経時による Rm の低下は粒子間距離が広いほど緩やかとなっている。セメント粒子間距離を大きくすることで、経時変化による水和生成物の成長による粒子同士が接触するまでの距離が伸び、モルタル温度が上昇する場合においても粒子間の接触頻度を抑制することができた。

しかし、水セメント容積比 100%の場合であっても 90 分後には変形性を測定することが不可能となった。練上がりから 60 分程度までは、大きな粒子間距離を有した場合でも、それ以後、水和生成物がさらに成長して接触が急激に増加した瞬間から、急激に流動性低下を起し十分な時間流動性を維持することが出来なかったものと考えられる。

以上の結果より、セメント粒子間距離を広げることで粒子間摩擦が減少し、セメント水和生成物の接触頻度が低下することで流動性低下をある程度抑制することができた。

5. 高性能 AE 減水剤添加量の増加と石灰石微粉末置換の併用による効果の確認

高温環境下での流動性維持のため、高性能 AE 減水剤の添加量増加、セメントの一部を石灰石微粉末に置換、水セメント比を大きくする、の3つの方法を検証したが、長時間流動性を維持することができなかった。そこで、高性能 AE 減水剤の添加量増加とセメントの一部を石灰石微粉末へ置換、の併用により高温環境下での流動性維持効果を検証した。モルタル配合を表-5 に示す。なお、

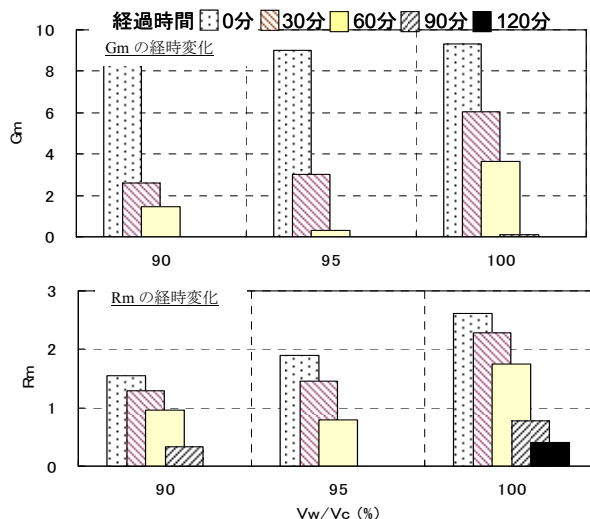


図-8 粒子間距離の拡大と Gm 及び Rm の経時変化の関係

水セメント比を高くする方法では材料分離を起す可能性が高まるため、採用しなかった。

表-5 モルタル配合

タイプ	配合種別		単体量 (kg / m ³)				SP 添加量 (C × %)
	W/C (%)	Ls/ P (%)	W	P		S	
				C	Ls		
基本配合	28	0	261	938	0	1186	1.6
併用配合	37	25		703	195		

環境温度を 80℃とした場合の、併用効果による Gm の経時変化と Rm の経時変化を図-9 に示す。

変形性の試験結果より、経時により温度が上昇するモルタルにおいて、セメントの一部を石灰石微粉末に置換し、高性能 AE 減水剤添加率を増加させた場合、Gm の低下を大幅に抑制することができた。

粘性の試験結果より、石灰石微粉末に置換し、高性能 AE 減水剤添加量を増加させた場合、Rm の低下を大幅に抑制できた。これは、石灰石微粉末に置換しセメント水和生成物量を抑制したことにより粒子間摩擦が減少したためと考えられる。

以上の結果より、高性能 AE 減水剤の添加量増加により、経時により吸着できる高性能 AE 減水剤が確保され分散基の消失を抑制、さらにセメントの水和生成物量の抑制、の併用効果により所要の流動性(Gm で3以上を想定)を維持する時間を2倍近くに延ばすことが出来た。

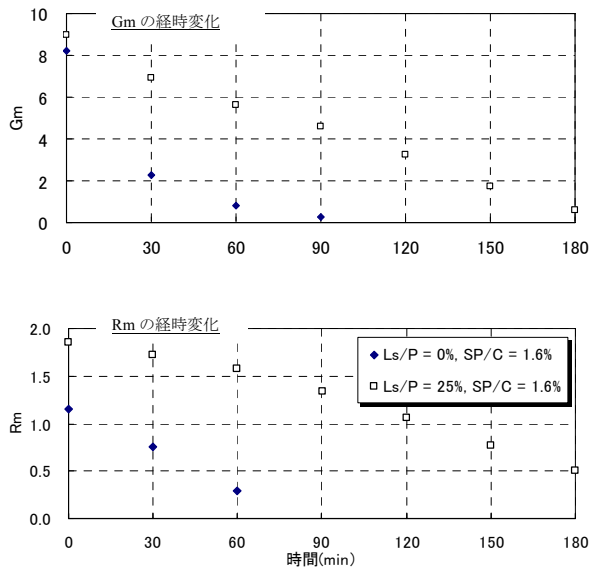


図-9 併用による変形性及び粘性の経時変化の関係

6. まとめ

本研究では、高温環境下での自己充填モルタルの施工を可能とするため、環境温度 80°Cでの自己充填モルタルの流動性の維持向上を目指し、高性能 AE 減水剤の分散効果とセメントの水和反応に着目し、現在使用されている材料を用いて、その方法を検討した。以下にまとめを記す。

(1) 環境温度 80°Cまでの自己充填モルタルの流動性の経時変化の観察結果から、高温により高性能 AE 減水剤のセメントへの吸着が促進されても流動性向上に繋がらなかった。練混ぜ直後や経時初期には高性能 AE 減水剤が多く吸着することによりセメント粒子自体が多く分散されて、自由水が多く生じて Rm が増加したものとされるが Gm はむしろ小さくなった。

(2) モルタル自身の温度上昇によりセメントの水和反

応の促進に伴う生成物の成長促進により、高性能 AE 減水剤による反発作用を妨げ、そして経時変化においてセメント粒子間摩擦を増大させて Rm を低下させたものと仮定した。

(3) 上記の仮定をもとに、高温環境下での流動性の維持の方法として、材料分離しない範囲内で高性能 AE 減水剤添加量を多くする、セメントの一部を石灰石微粉末に置換する、水セメント比を大きくする、の 3 つを設定し、それぞれの効果を検証した。その結果、それぞれの方法に効果は認められたが、実施工には不十分であった。

(4) セメントの一部を石灰石微粉末に置換し、さらに材料分離しない範囲で高性能 AE 減水剤の添加量を大きくする方法を併用することで、現在使用されている材料を用いて、環境温度 80°Cの高温環境下での施工に適応可能な流動性維持性能を有する自己充填モルタルの配合を得ることができた。

参考文献

1. たとえば、柳澤太一、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, 1999
2. 大内雅博、日比野誠、菅俣匠、岡村甫：自己充填コンクリート用高性能 AE 減水剤の効果の定量評価法、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.1, pp.129-134, 1998
3. 加藤弘義、吉岡一弘、中村昭則：高性能 AE 減水剤によるセメント粒子の分散効果に及ぼす温度の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.2, 1999
4. 稲葉美穂子、丸山久一、皆口正一、坂田昇：高流動コンクリートの流動性保持機構に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, 1996