

論文

[1113] セメントモルタルの硬化初期における線膨張係数の経時変化

小山 智幸^{*1}・松藤 泰典^{*2}

1. 序

暑中環境下で打設されるコンクリートは、表層部の劣化、特に初期材令時におけるひび割れの発生が問題となる。本研究ではこれまでこの初期ひび割れ発生の原因の一つとしてコンクリート内部と表層部の温度差に着目し、温度差に及ぼす外気温度、湿度、風速および直達日射の影響について実験・検討を行った。その結果、厚さ10cm程度のスラブ試験体の場合、温度差は水和反応速度がピークとなる時期に極大値を示すこと、この極大値は高温低温な環境ほど、風速および日射量が大きいほど大きくなることを明らかにした[1]。また、暑中コンクリートに関して養生開始時期が強度性状および表面性状に及ぼす影響を検討し、養生開始時期は水和反応過程を考慮して定める必要があり、水和反応が加速期に入る前後に開始する必要があること、これに対し水和反応速度がピークとなる時期以降に養生を開始しても強度・表面性状の改善効果は殆ど見られないことを明らかにした[2]。これらの結果は、コンクリートの伸び能力が加速期前後に極小値となること[3]を考慮すると、表層部の劣化や初期ひび割れを防止するためには硬化初期における対策が重要であることを示している。

本研究では、温度差によって試験体表層部に生じる引張りひずみを数値解析により算定し、ひび割れ低減対策およびその効果を定量的に検討することを目的として、数値解析の入力条件となる硬化初期における線膨張係数および、ひび割れ発生条件となる引張り限界ひずみを測定した。本編ではそのうち線膨張係数の経時変化および、同時に測定された試験体の硬化にともなう初期収縮の経時変化について示す。

2. 実験概要

線膨張係数の測定方法としては、温度変化に伴う長さ変化を測定する方法が一般的であるが、本研究の様に打設後24時間程度の硬化初期を対象とする場合には、ひずみゲージ等が使用できないため適当ではない。またこの時期には水和熱が生じて試験体の温度を制御しにくいこと、更に水和反応に伴い初期収縮が生じるため、これらの影響を除去できる方法でなければならない。そこで本研究ではゴム袋に詰めた試験体を熱容量の大きい水中に沈め、水温を上下させて初期収縮を含む体積変化を測定し、一定温度下で測定した初期収縮分を除去して、体積膨張率を測定した。この体積膨張率から、(1)式に示す等方性材料における体積膨張率と線膨張係数との関係[4]を用いて線膨張係数を算定した。

$$(\text{線膨張係数}) = (\text{体積膨張率}) / 3 \quad (1)$$

測定概要を図1に示す。薄さ0.02mmの合成ゴム袋内に詰めた試験体を容器に入れて水を満たし、これを温度調節が可能な恒温水槽内に入れ、各養生温度下で養生温度よりも1～2℃程度上昇させた際の、容器内の水および試験体の体積変化量を自動水位測定装置を用いて測定した。ここで

*1 九州大学講師 工学部建築学科, 工修(正会員)

*2 九州大学教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

測定された体積変化量には、温度上昇による試験体の体積膨張の他に、先に示した初期収縮および水の体積膨張が含まれる。従って、予めモルタル試験体の初期収縮および水の温度膨張率を測定し、上記の体積変化量から差し引いて、試験体の温度上昇による体積膨張量を算定した。なお、初期収縮の経時変化の測定結果に関しては3. 実験結果で示している。水の体積膨張率は容器内に水のみを入れて測定した値 0.24×10^{-4} を使用した。最後に温度膨張量を打設直後の試験体体積および温度上昇量で除して体積膨張率を算定した。測定は打設直後から1時間間隔で24時間までとし、30分毎に温度を上昇および下降させた。測定は容器2個を使用して、各試験体について同時に2体測定を行った。

試験体は打設の際、分離を生じない程度に突き固めて上部に気泡を集め、上部1/3程度の位置で釣り糸で緊縛して上部を切り捨てた。下部1/3も同様に緊縛、除去して試験体形状を球形にした後、初期体積を測定した。試験体の体積は水槽の温度を上下させた際に試験体温度が内部まで均一となるように、また水和熱を拡散させて温度上昇を防ぐことを目的として、約40~70cm³程度とし、単位セメント量の大きい試験体では体積を小さくした。

ここで、試験体の体積は電子天秤を使用して、以下に示す方法で試験体の体積に相当する水の重量を測定することにより、0.01cm³の精度で算定した。

$$W_{sw} = W_1 - W_2 + W_s \quad (2)$$

W_{sw} : 試験体が排除する容積に相当する水の重量

W_1 : 水のみを注入した際の容器重量

W_2 : 試験体を入れ水で満たした際の容器重量

W_s : 試験体の重量

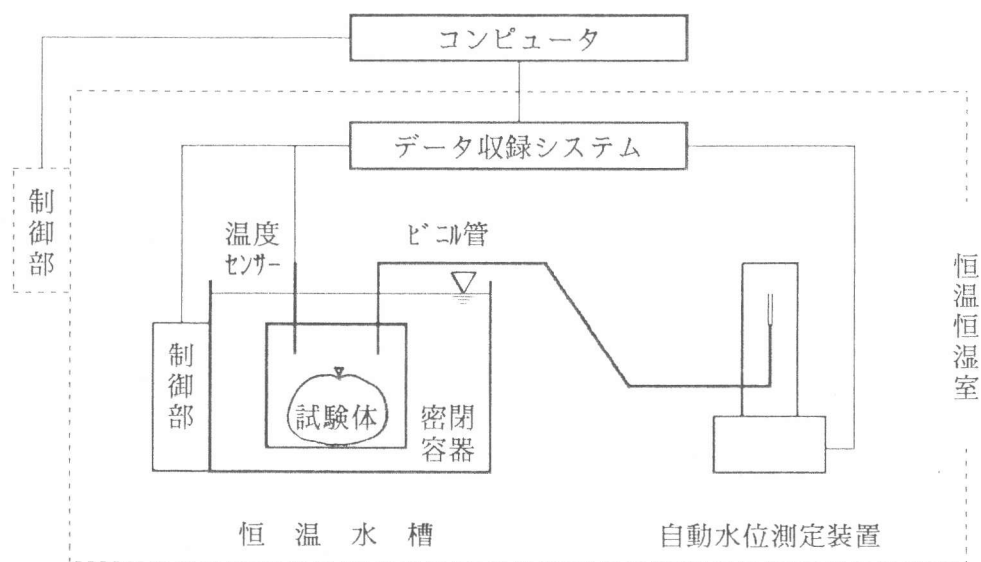


図1 測定装置の概要

2.3 実験項目

実験で使用した骨材の諸元を表1に、結合材については表2に示す。細骨材は海砂、粗骨材には碎石を用い、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

表3に実験項目の一覧を示す。表中、試験体6はセメント重量の10%をシリカフュームで置換し、高性能AE減水剤を使用した試験体で、同様の調合でセメントのみを使用した試験体7と比較して、シリカフュームの影響について検討を行った。試験体8ではコンクリートの線膨張係数を測定したが、試験体体積の制約上粗骨材の最大粒径は10mmとした。養生温度は温度の影響を比較した試験体では15, 25, 35°Cの3種類とし、他の試験体では35°C一定とした。また打設温度はいずれの試験体も養生温度と同じとした。

表1 使用骨材

材 料	種 類	絶乾比重	吸水率(%)	最大粒径(mm)
粗骨材	砕 石	2.75	1.03	10
細骨材	海 砂	2.54	1.67	5

表2 使用結合材

材 料	種 類	比 重	比表面積 (cm ² /g)
セメント	普通ポルランドセメント	3.15	3,400
混和材	シリカフューム	2.34	290,000

表3 実 験 項 目

試験体	調 合 (kg/m ³)						養生温度 (°C)	検 討 項 目
	W C+SF (%)	セメント C	シリカフューム SF	水 W	細骨材 S	粗骨材 G		
1	50	605	-	302	1392	-	35	標準試験体 養生温度の影響
25								
15								
4	40	622	-	311	1430	-	35	水セメント比の影響 単位セメント・水量 シリカフュームの影響 試験体6との比較用 コンクリート
5	50	931	-	456	838	-		
6	25	932	104	259	1005	-		
7	25	1036	-	259	1005	-		
8	50	360	-	180	828	932		

*試験体6および7は高性能AE減水剤をセメント重量の1.8%添加

3. 実験結果および考察

3.1 初期収縮

a) 養生温度の影響

図2にモルタル試験体の乾燥を伴わない初期収縮の経時変化を示す。同図は養生温度35, 25, 15°Cの試験体1, 2, 3の場合について、打設直後の試験体体積に対する体積収縮率から、長さ変化率に換算した値を示している。いずれの場合も材令とともに収縮率が増大するが、養生温度が高いほど収縮率の増加が急激である一方、早い時期に収縮が横ばいになる傾向がみられる。同じ調合で厚さ10cmのスラブ試験体とした場合の、内部温度の経時変化を、図

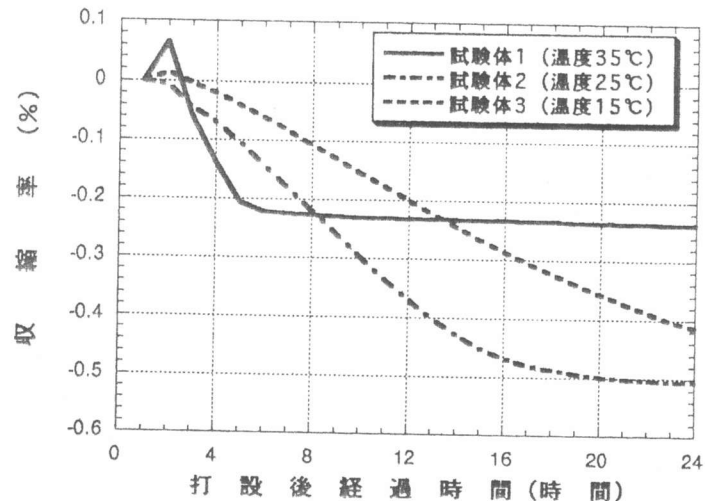


図2 初期収縮の経時変化 (養生温度の影響)

3に示す。同図は試験体1, 2, および3と同様, 養生温度15, 25, 35°Cの場合について示している。養生温度35°Cの試験体1の場合, 試験体温度が急激に上昇し始める打設後2時間頃から収縮が大きくなり, 試験体温度が極大値に達する打設6~7時間前後で収縮率の増加が小さくなり, 減速期に入るとほとんど収縮を示さなくなる。他の養生温度においてもほぼ同様の傾向を示し, 養生温度が高いほど初期の収縮は大きい, 収縮が停止する時期が早い。養生温度が25°C, および15°Cの試験体2, 3は初期の収縮率は小さいがその後の収縮は試験体1よりも大きくなっている。

b) 調合の影響

図4に収縮率に及ぼす調合の影響を示す。同図は養生温度35°Cの場合について示している。単位セメント量が試験体1とほぼ同じで水セメント比が40%の試験体4は, 50%の試験体1よりも打設後初期の収縮速度が大きい, 水和反応が極大値に達する時期が早い。そのため収縮速度の低下も早く, 試験体1よりも収縮量が小さい値となっている。

また試験体1と水セメント比が同じで単位水量および単位セメント量が約1.5倍の試験体5は, 初期の収縮速度は試験体1と同程度であるが, セメント量の影響で収縮量が非常に大きくなっている。

c) シリカフェームの影響

図5に水セメント比25%の試験体7と, セメント量の10%をシリカフェームで置換した試験体6の収縮量の経時変化を示している。両者ともほぼ同様の経時変化を示しているが, シリカフェームを使用した試験体6では収縮量が若干小さくなっている。

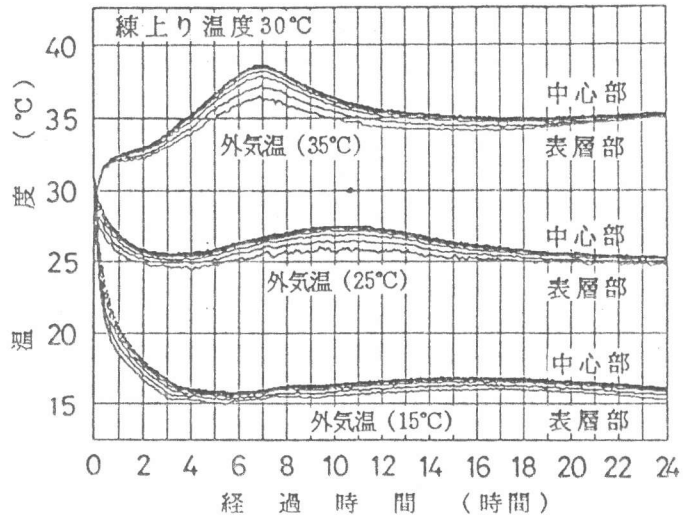


図3 温度経時変化に及ぼす養生温度の影響 [1]

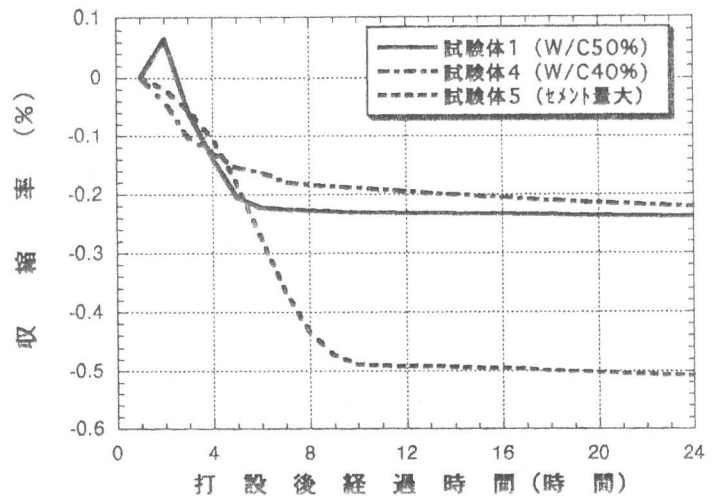


図4 初期収縮の経時変化 (調合の影響)

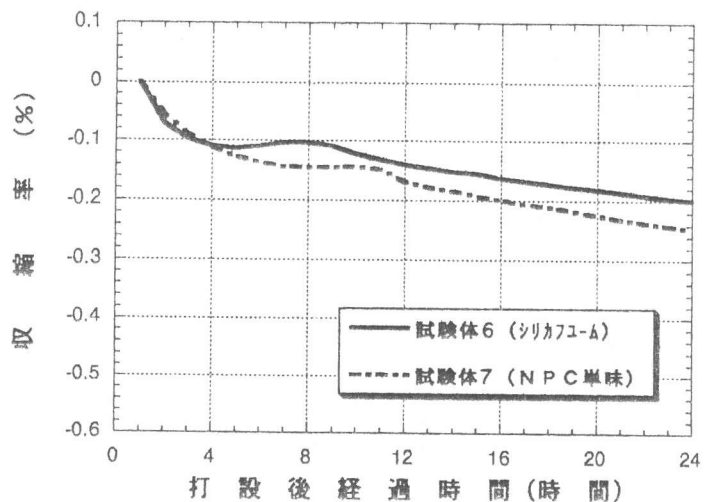


図5 初期収縮の経時変化 (シリカフェームの影響)

以上のように、硬化に伴う初期収縮に関して温度および調合の影響を検討したが、初期収縮を長さ変化より測定した横山等の研究[5] とほぼ同様の結果が得られた。

3.2 線膨張係数

線膨張係数は打設直後から水和反応速度が極大値を示す時期の約1~2時間前までは、試験体中の気泡やブリージング水の膨張の影響により試験体によってかなりのばらつきを示した。また、水和反応速度が大きい時期には発熱による温度上昇を完全には抑えることができなかったため、それ以降の時期よりも大きい値を示したが、発熱が低下するとともにほぼ一定値もしくは若干低下する傾向がみられた。

a) 養生温度の影響

図6に、線膨張係数の経時変化に及ぼす養生温度の影響を示す。水和反応の加速期前後にはかなり大きな値が測定されるが、その後徐々に低下してほぼ一定値となるが、一定値を比較すると養生温度の影響はほとんど見られない。

b) 調合の影響

図7に調合の違いが線膨張係数の経時変化に及ぼす影響を示す。水セメント比が40%の試験体4の線膨張係数は、50%の試験体1と比較すると、若干小さい値となっている。これに対して水セメント比が試験体1と同じで単位セメント量の大きい試験体4では、加速期前後の線膨張係数が試験体1よりもかなり大きい値を示した。これは試験体5では単位セメント量が大きいため、水和発熱による影響を除去できなかったためであると考えられる。水和発熱が小さくなるとともに試験体5の線膨張係数は低下し、試験体1と同程度の

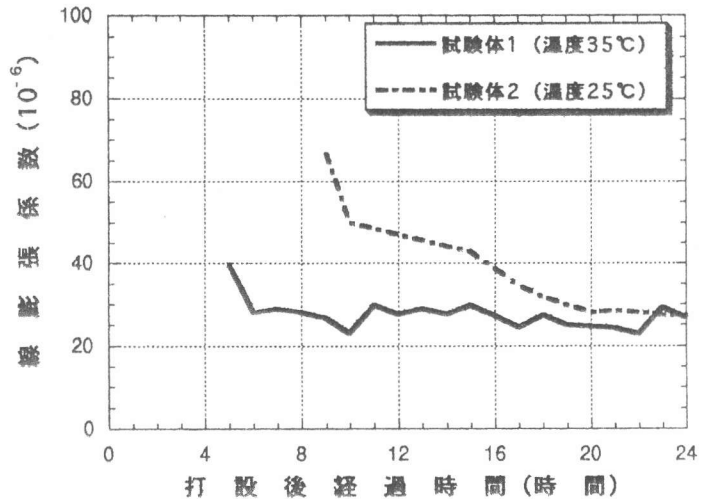


図6 線膨張係数の経時変化 (養生温度の影響)

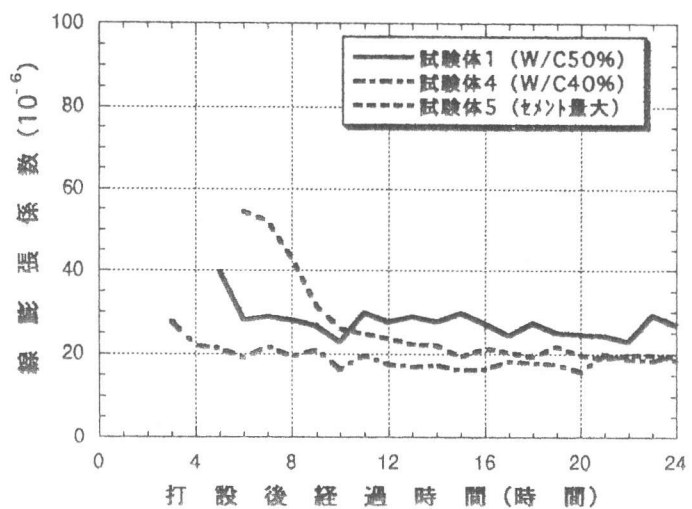


図7 線膨張係数の経時変化 (調合の影響)

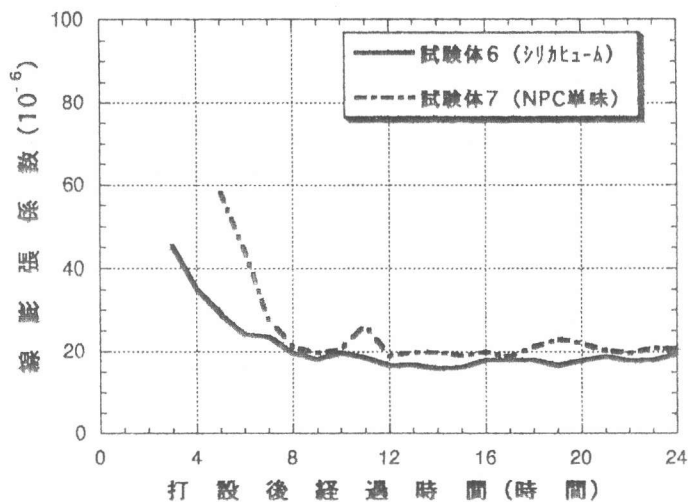


図8 線膨張係数の経時変化 (シリカ1-Aの影響)

値を示した。

c) シリカフュームの影響

図8に線膨張係数の経時変化に及ぼすシリカフュームの影響を示す。セメント量の10%をシリカフュームで置換した試験体6は、試験体7よりも若干小さい値を示している。

以上のように、線膨張係数の経時変化は材令や養生温度および調合の違いによって影響を受けるが、いずれの場合も打設後24時間以内では硬化体の線膨張係数よりも大きい値を示した。

d) コンクリートの線膨張係数

図9にコンクリートの線膨張係数の経時変化を示す。コンクリートの線膨張係数は、同じ水セメント比のモルタル試験体1よりも小さい値を示し、打設24時間後で 15×10^{-6} 程度の値となった。

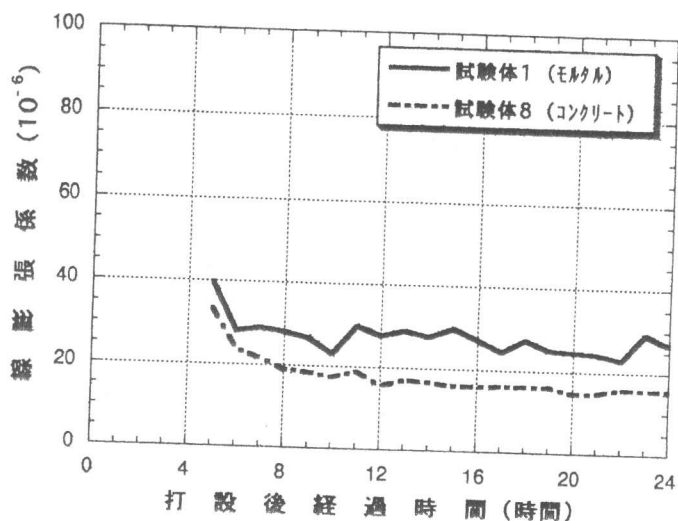


図9 コンクリートの線膨張係数の経時変化

4. 結論

本研究では打設後24時間程度まで時期におけるモルタル試験体の線膨張係数を測定した。主な結果を以下に示す。

①硬化に伴う初期収縮は打設直後においては温度が高いほど急激であるが、水和反応が極大値を示すとともに収縮速度が低下し、養生温度が 35°C の場合には養生温度が低い他の試験体よりも収縮量が小さくなった。また調合の影響に関しては、水セメント比が小さいと収縮は小さく、単位セメント量が大きい試験体では大きくなる傾向がみられた。

②硬化初期におけるモルタル試験体の線膨張係数を、温度変化に伴う体積変化を測定することにより算定することが出来た。ただし、特に加速期前後の値に関しては初期ひび割れ生じやすい時期でもあり、更なる精度向上が必要であると考えられる。

<謝辞> 本研究は文部省科研費(奨励研究A, 課題番号05750546)の助成を受けた。また本研究の遂行にあたり文部技官津賀山健次氏, また大学院生山野義則氏, 西誠二氏, および卒論生木村幸藏君の協力を得た。末尾ながら謝意を表す。

<参考文献>

- [1]松藤泰典他:「暑中環境下で打設されるコンクリートの初期ひび割れに関する研究」日本建築学会大会学術講演梗概集 1990.10, pp.275-pp.276
- [2]松藤泰典他:「養生方法が暑中環境下で打設されるコンクリートの品質に及ぼす影響」コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, 1993, pp.555-pp.560
- [3]松藤他泰典:「練り混ぜ後24時間までのモルタル試験体の線膨張係数及び引張り限界ひずみの測定」日本建築学会九州支部研究報告 1994.3
- [4]理科年表
- [5]横山 清他:「養生温度・湿度を変えたコンクリートの初期収縮」セメント技術年報 34, 昭和55年, pp.226-pp.229