

論文 高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす粗骨材およびシリカフュームの影響

福安 直幸*¹・山田 和夫*²・高村 大*³・柘植 佐代子*⁴

要旨：本研究では、まだ固まらない状態を含む高強度コンクリートの自己収縮の測定に対するレーザ変位計の適用性、並びに高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす粗骨材およびシリカフュームの影響について一連の検討を行った。その結果、自己収縮の測定にレーザ変位計が適用可能であること、高強度コンクリートの自己収縮は、粗骨材の混入の有無によって著しく影響を受けること、並びにセメント質量に対するシリカフュームの質量置換率が大きくなるほど、極初期の自己収縮が特に著しくなること、などが明らかとなった。

キーワード：高強度コンクリート、自己収縮、レーザ変位計、粗骨材、シリカフューム

1. はじめに

近年、コンクリートの高性能化および高強度化に伴い、低水セメント(または結合材)比のコンクリートが使用されるようになってきたが、水セメント比が小さく、単位セメント量の多いコンクリートでは、従来無視できるとされていた自己収縮が増大し、場合によっては自己収縮のみでひび割れが発生することが指摘されているため、自己収縮の機構解明およびその予測方法の確立がコンクリート工学分野における重要な研究課題の一つであり、関連する学・協会においても精力的な検討が行われている^{1,2)}。

筆者らも、この点を踏まえて、従来^{3)~5)}から各種コンクリートの収縮性状について調査を行っている。また、別報⁶⁾では、埋込み型ひずみ計を用いて高強度コンクリートの自己収縮の追跡を行ったが、埋込み型ひずみ計では、剛性の小さい打設後十数時間の範囲におけるコンクリートの収縮性状を正確に追跡するには問題のあることがわかった。そのため、本研究では、まだ固まらない状態を含むコンクリートの自己収縮の測定に非接触型のレーザ変位計を使用し、その適用性について検討するとともに、高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす試験体の形状・寸

法、粗骨材およびシリカフュームの影響について一連の実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本研究では、高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす試験体の形状・寸法(100×100×400mm角柱試験体およびφ100×200mm円柱試験体の2種類)、シリカフューム混入率(水結合材比(W/(C+SF))を一律に30%とし、シリカフューム(SF)を混入していない場合とセメント質量に対するシリカフュームの質量置換率を10および30%に設定した場合の3種類)、並びに粗骨材容積比(コンクリートの単位容積当りの粗骨材容積(V_g/V_c)を0および0.41の2種類)の影響について実験的に調査を行った。

2.2 試験体の製作および養生方法

本実験では、コンクリートおよびモルタルの製作に際して、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂(最大寸法=5mm, 表乾密度=2.65g/cm³)および川砂利(最大寸法=25mm, 表乾密度=2.67g/cm³)、高性能AE減水剤、並びにシリカフューム(密度=2.20g/cm³)を使用した。本実験で用いたコンクリートおよびモルタ

*1 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻(正会員)
 *2 愛知工業大学 工学部建築学科 工博(正会員)
 *3 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻(正会員)
 *4 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻(正会員)

表-1 コンクリートおよびモルタルの調合表

記 号	種 類	標準調合 (kg/m ³)						空気量 (%)
		水	セメント	SF	細骨材	粗骨材	混和剤	
C30SF00	コンクリート	161	536	—	568	1091	5.4	4.5
C30SF10		161	482	54	568	1091	5.4	4.5
C30SF30		161	375	161	568	1091	5.4	4.5
M30SF00	モルタル	282	940	—	996	—	9.5	4.5
M30SF10		282	846	94	996	—	9.5	4.5
M30SF30		282	658	282	993	—	9.5	4.5

ルの調合表を表-1に示す。なお、モルタルは、シリカフェーム混入率が同じコンクリートの混練時に5mmのふるいを用いてウェットスクリーニングすることにより製作した。

100×100×400mm角柱試験体の製作に際しては、図-1(a)に示すように、日本コンクリート工学会「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」の規定¹⁾に準じて、鋼製型枠の底面の内側に厚さ1mmのテフロンシート、両端面の内側に厚さ3mmのポリスチレンボードを挿入してコンクリートの自由な変形が拘束されないようにするとともに、型枠内側の側面、端面および底面に厚さ0.1mmのポリエステルフィルムを敷いてコン

クリートが型枠と直接接しないようにし、また自己収縮を測定するために型枠両端中央部に開けた直径3.5mmの穴にφ2×70mmのゲージプラグを試験体の長軸と一致するように設置してコンクリートの打設を行った。なお、ゲージプラグと型枠との間にはグリスを塗って摩擦の低減および水漏れの防止を図った。打設されたコンクリートは、表面仕上げを行った後直ちに仕上げ面をポリエステルフィルム(厚さ0.1mm)と湿布で覆い、表面からの水分の逸散を防いだ。

φ100×200mm円柱試験体の製作に際しては、図-1(b)に示すように、楊ら²⁾の方法に準じ

て型枠内側の底面および側面に厚さ0.1mmのテフロンシートを敷いてコンクリートの変形が拘束されないようにするとともに、テフロンシートと型枠の間に厚さ2mmの発泡ポリエチレンシートを挿入して温度上昇によって生じるコンクリートの膨張が拘束されないようにしてコンクリートの打設を行った。コンクリートの打設終了後直ちに表面仕上げを行った後、収縮ひずみを測定するための長さ30mmのゲージプラグを

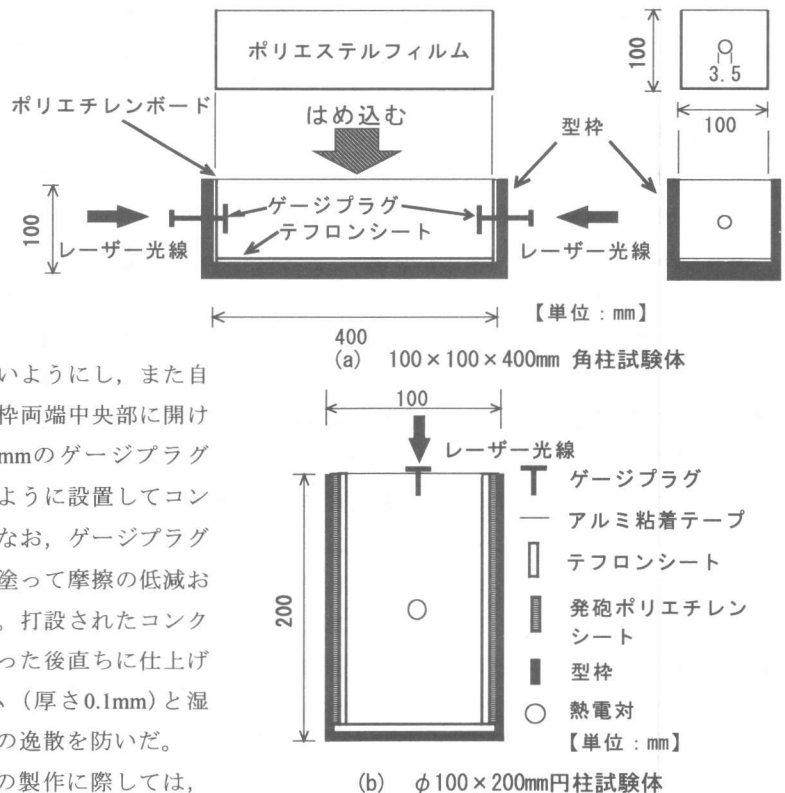


図-1 試験体の形状・寸法および測定位置

表－２ 本実験で用いたコンクリートおよびモルタルの凝結試験結果

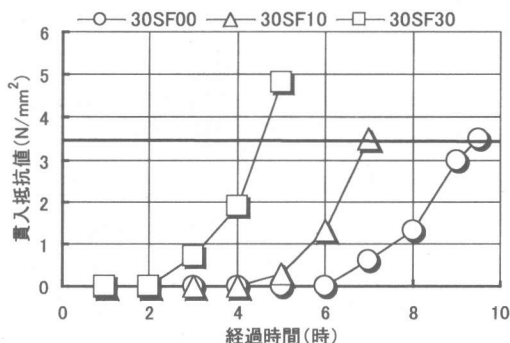
記 号	1時間経過ごとの貫入抵抗値 (N/mm ²)											始発時 (時)
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9.5	
30SF00	0	0	0	0	0	0	0	0.6	1.3	3	3.5	9.5
30SF10	0	0	0	0	0	0.3	1.3	3.5	－	－	－	7
30SF30	0	0	0	0.7	1.9	4.8	－	－	－	－	－	5

円柱試験体の表面中央部にセットし、その後アルミ粘着テープとグリスで試験体上面をシールして試験体表面からの水分の逸散を防いだ。

なお、コンクリートの打設および自己収縮ひずみの測定は、いずれの場合も温度 $21\pm 3^{\circ}\text{C}$ に制御された恒温養生室内で行った。

2.3 測定方法

本実験では、前掲の図－１に示すゲージブラグ端面（寸法： $10\times 10\text{mm}$ ）から約 40mm の位置にレーザ変位計（分解能： $2\mu\text{m}$ ，測定範囲： $\pm 10\text{mm}$ ）を設置して高強度コンクリートの自己収縮ひずみの測定を行うとともに、角柱試験体および円柱試験体内部に熱電対をセットしてコンクリートおよびモルタルの内部温度の管理も行った。計測は、試験体がシーリングされた直後から開始し、材齢7日まで静ひずみ計とパソコンを用いて自動計測を行った。結果の整理に際しては、JIS A6204付属書1⁸⁾の規定に準じてコンクリートの凝結試験を行い、得られた始発時間を自己収縮測定時間軸の原点と定めた。本実験で用いたコンクリートおよびモルタルの凝結試験結果および始発時間を表－２および図－



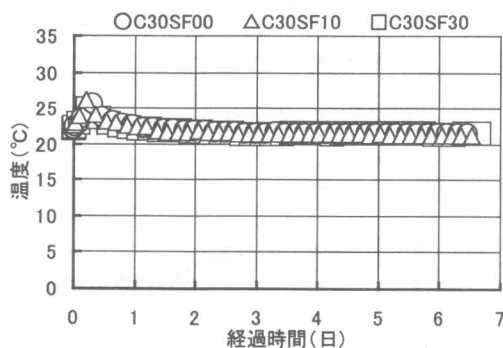
図－２ 貫入抵抗値の経時変化

2に示す。なお、計測されたひずみデータは、熱線膨張係数をコンクリートの場合が $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，モルタルの場合が $15\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として、計測された試験体内部の温度を用いて補正した¹⁾。

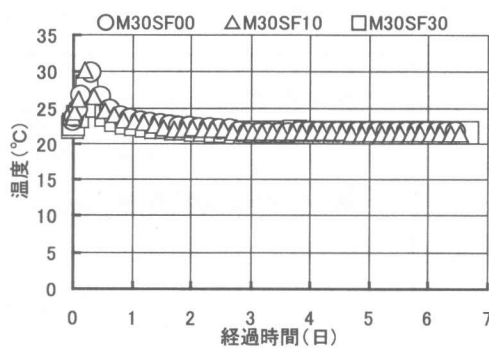
3. 実験結果とその考察

3.1 コンクリート・モルタルの内部温度

図－３(a)および(b)は、それぞれ本実験で得られたコンクリートおよびモルタル円柱試験体内部の温度の経時変化を示したものである。これらの図によれば、最高温度および始発時間から最高温度に達するまでの経過時間は、シリ



(a) コンクリート



(b) モルタル

図－３ 高強度コンクリートの内部温度の経時変化

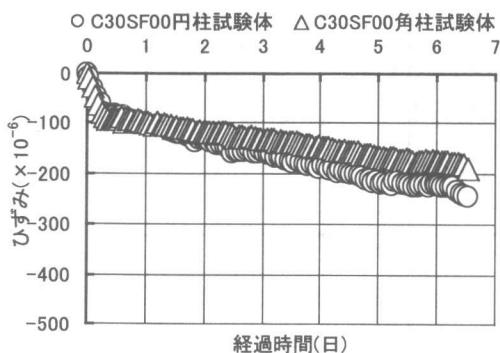


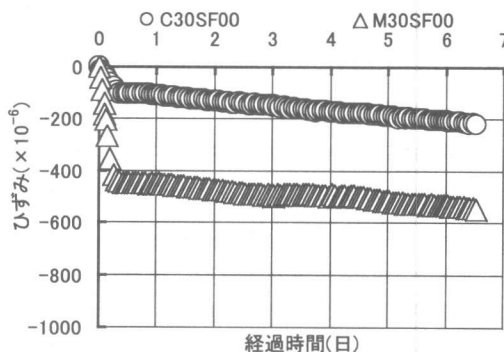
図-4 自己収縮ひずみの経時変化に及ぼす試験体の形状・寸法の影響

カフューム混入率を0, 10および30%に設定したコンクリートの場合が, それぞれ25.6℃および6時間, 26.2℃および4時間30分, 並びに25.4℃および4時間30分, またモルタルの場合が, それぞれ31.3℃および6時間, 30.3℃および4時間30分, 並びに28.7℃および4時間30分であり, 最高温度はコンクリートよりもモルタルの方が3.3~5.7℃高くなっている。ただし, コンクリートおよびモルタル内部の最高温度に及ぼすシリカフューム混入率の影響は明確ではない。

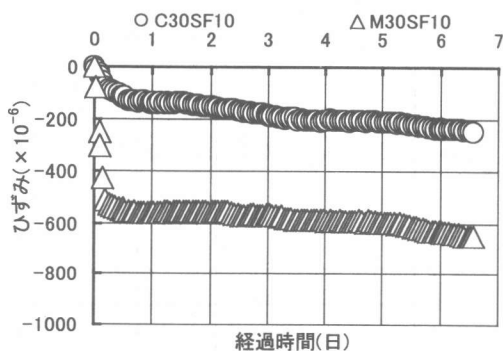
3.2 自己収縮に及ぼす試験体の形状・寸法の影響

図-4は, C30FS00試験体を用いて計測された自己収縮ひずみの経時変化に及ぼす試験体の形状・寸法の影響を示したものである。図によれば, $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱試験体を用いた場合の測定結果は, $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 角柱試験体を用いた場合の結果と比較して材齢1日までの範囲で

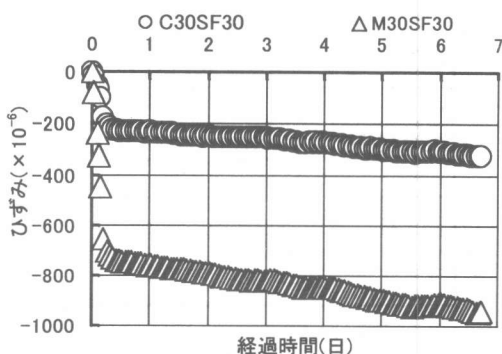
は若干小さく, それ以降の材齢になると逆に若干大きくなっているのが認められる。例えば, 材齢0.5日の自己収縮ひずみは, $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱試験体を用いた場合が -86μ であるのに対して, $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 角柱試験体を用いた場合が -93μ であるが, 材齢6日では, それぞれ -222μ および -176μ となっている。ただし, その差は比較的小さく, 本実験の範囲では, 自己収縮ひずみの測定結果に及ぼす試験体の形状・寸法の影響は, 無視できる程度であると言える。従って, 日本コンクリート工学協会「セメントペースト, モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験法(案)」で規定されている $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 角柱試験体の代わりに $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱試験体を用いた場合であっても, コンクリートの始発時間を時間軸の原点とすれば, 測定結果の信頼性の低下は殆ど無いものと考えられる。また, 収縮ひずみの計測に非接触型レ



(a) 30SF00シリーズ

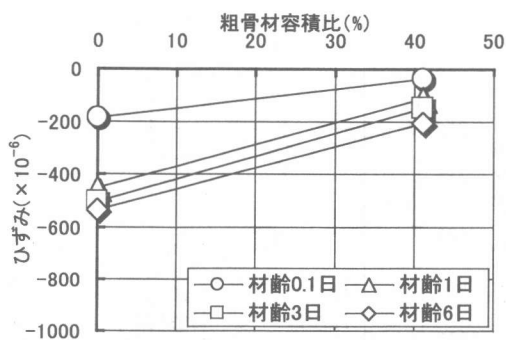


(b) 30SF10シリーズ

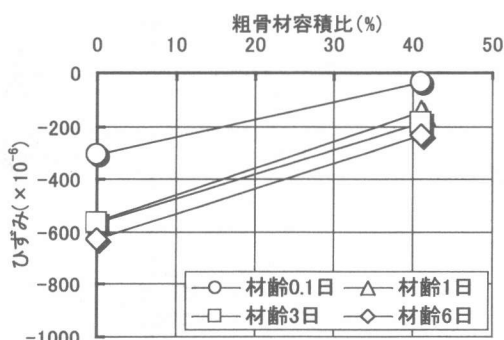


(c) 30SF30シリーズ

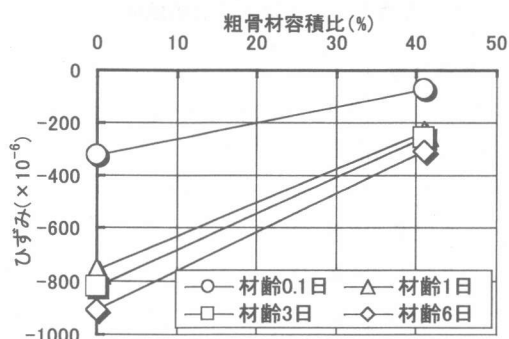
図-5 高強度コンクリートの自己収縮ひずみの経時変化



(a) 30SF00シリーズ



(b) 30SF10シリーズ



(c) 30SF30シリーズ

図-6 高強度コンクリートの自己収縮
ひずみと粗骨材容積比との関係

一ザ変位計を用いた場合、測定結果は極めて安定しており、かつ試験体の変形を全く拘束することも無いため、コンクリートまたはモルタルがまだ固まっていない段階の計測結果の信頼性は、収縮ひずみの計測に通常用いられているバネ式変位計と比べて格段に優れていると言える。この点を踏まえて、本研究では、自己収縮ひずみをレーザ変位計とφ100×200mm円柱試験体を用いて測定し、一連の検討を行うこととした。

3.3 自己収縮に及ぼす粗骨材の影響

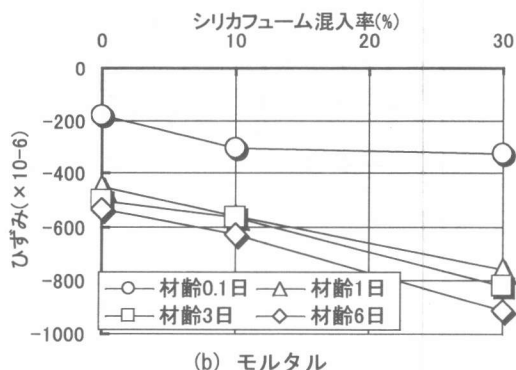
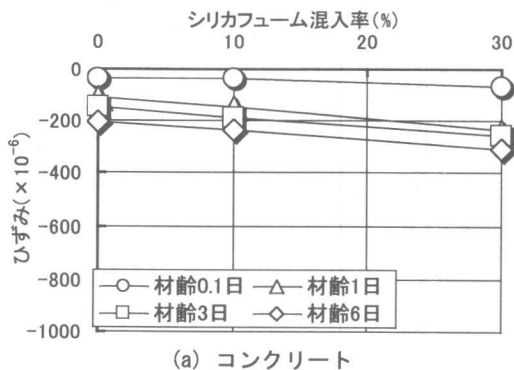
図-5(a)~(c)は、自己収縮の経時変化に及ぼす粗骨材容積比の影響をシリカフューム混入率別に、図-6(a)~(c)は、材齢0.1, 1, 3および6日時点の自己収縮ひずみと粗骨材容積比との関係をシリカフューム混入率別に示したものである。これらの図によれば、自己収縮ひずみは、シリカフューム混入率に関わらずモルタル中に粗骨材が混入されることによって著し

く減少することがわかる。例えば、セメントに対するシリカフュームの質量置換率を0, 10および30%とした場合の材齢1日の時点における自己収縮ひずみは、粗骨材が混入されていないモルタルの場合、それぞれ-451μ, -557μおよび-758μであるのに対して、粗骨材容積比が0.41の場合には、それぞれ-110μ, -146μおよび-236μとなっており、自己収縮ひずみは粗骨材の混入によって24.4~31.1%程度にまで減少している。

3.4 自己収縮に及ぼすシリカフュームの影響

図-7(a)および(b)は、それぞれコンクリートおよびモルタル試験体によって得られた材齢0.1, 1, 3および6日の時点における自己収縮ひずみとシリカフューム混入率との関係を示したものである。これらの図から明らかなように、自己収縮ひずみ量は、粗骨材容積比に関わらずシリカフューム混入率の増加とともにほぼ直線的に増大する傾向を示している。また、モルタルの自己収縮は、シリカフュームの混入量によって著しく影響を受けるが、コンクリートの場合は、モルタルに比べて自己収縮に及ぼすシリカフュームの影響が小さくなっているのがわかる。例えば、モルタルの場合にシリカフュームをセメント質量に対して30%置換すると、材齢1日時点の自己収縮ひずみは-306μ増大しているのに対して、コンクリートの場合には、-125μ程度の増大に止まっている。

以上のことから、高強度コンクリートの自己収縮に及ぼすシリカフュームの影響は、粗骨材



図ー7 高強度コンクリートの自己収縮ひずみとシリカフューム混入率との関係

の存在によって著しく相違することがわかった。今後は、高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす粗骨材の影響に関するより詳細な、かつ定量的な検討が必要である。

4. 結 論

本研究によって得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) コンクリートの始発時間を時間軸の原点とした場合、自己収縮ひずみの測定結果に及ぼす試験体の形状・寸法の影響は無視できる。また、レーザ変位計による収縮ひずみの計測結果は極めて安定しており、まだ固まらない状態を含む計測に適している。
- 2) 自己収縮ひずみは、シリカフュームの混入量に関わらずモルタル中に粗骨材が混入されることによって著しく減少する。
- 3) 自己収縮ひずみは、粗骨材容積比に関わらずシリカフューム混入率の増加とともにほぼ直線的に増大する。
- 4) モルタルの自己収縮は、シリカフュームの混入量によって著しく影響を受けるが、コンクリートの場合は、モルタルと比べてシリカフュームの影響が小さい。

謝 辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た愛知工業大学学部学生の井上致君および今中稔君に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，218pp.，1996
- 2) 土木学会コンクリート委員会（クリープ・乾燥収縮小委員会）編：コンクリートのクリープおよび乾燥収縮，コンクリート技術シリーズNo.24，130pp.，1997
- 3) 小林 健，山田和夫，山本俊彦：コンクリート内部の水分移動に起因した乾燥収縮および強度発現に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.633-638，1995
- 4) 山田和夫，小林 健，山本俊彦：4面乾燥状態にあるコンクリートの水分移動性状に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.466-471，1996
- 5) 福安直幸，山田和夫：高強度コンクリート内部の水分移動性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.607-612，1998
- 6) 山田和夫，福安直幸：高強度コンクリート内部の水分移動と収縮性状に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.705-711，2000
- 7) 楊 楊，佐藤良一，許 明：高強度コンクリートの収縮および拘束応力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.631-636，1998
- 8) JIS A6204 付属書I：コンクリート用化学混和剤「コンクリートの凝結時間試験法」，1995