

論文 セメント系材料の自己収縮に関する実験的研究

堀田智明*1・名和豊春*2・大沼博志*3

要旨:本研究では新たに提案した低弾性型埋め込みゲージを用いた測定装置により、練り混ぜ直後からのモルタルおよびコンクリートの自己収縮を測定し、セメント系材料の自己収縮に及ぼす配合の影響について検討した。また、自己収縮ひずみと水和反応との関連から、自己収縮のメカニズムについて考察を行なった。その結果、コンクリートおよびモルタルの急激な膨張、収縮はすべて終結以降に生じており、内部温度がピークに達した後は急激な体積変化を示さなくなる。また、水セメント比に拘わらず、自己収縮が急激に進行するのは、内部含水量の減少開始直後からであり、内部乾燥に起因しているものと推察された。

キーワード:自己収縮, 内部抵抗, 内部温度, 内部乾燥, 水セメント比

1. はじめに

高強度・高流動コンクリートなどの高性能コンクリートで、極めて大きな自己収縮が生じることが最近の研究により明らかにされた¹⁾。日本コンクリート工学協会の自己収縮研究委員会報告書では²⁾、自己収縮をひび割れ発生の要因として捉えるため、その起点を凝結始発と定めている。しかし、E.Sellevoidらは³⁾、水和初期の半液体から硬化体へ変化する過程では、形成された骨格が非常に弱いため外的な要因に傷つけられやすいことを指摘しており、この時期の収縮もコンクリートの初期欠陥に大きな影響を与えるものと思われる。また、自己収縮の発生メカニズムを解明するためには、初期の水和反応と対応させた検討が不可欠であるが、練り混ぜ直後から自己収縮を測定できるシステムが構築されていないのが現状である。

このような背景から著者らは、低弾性型ひずみゲージを用いた自己収縮の測定法を提案し、練り混ぜ直後からセメントペーストおよびモルタルの自己収縮を測定できることを前報で報告した^{4), 5)}。本論文では、自己収縮のメカニズムを考察するための基礎的なデータを蓄積すること

を目的とし、モルタルおよびコンクリート自己収縮を練り混ぜ直後から測定した。

自己収縮は、内部乾燥に起因する毛細管張力により発生すると考えられており²⁾、供試体内部の含水状態と自己収縮ひずみをあわせて考察することが重要である。しかし、内部の乾燥状態を連続的に測定することが困難であることから、実験的な検証はほとんど行われてこなかった。最近、コンクリート内部の含水状態を非破壊で測定する方法が幾つか提案されている^{6), 7)}。本研究では、湯浅らの方法⁶⁾により測定を行い、コンクリートの自己収縮に及ぼす配合の影響を内部の温度変化および乾燥状態の変化と対応させて考察することにより、自己収縮のメカニズムについて考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント(密度: 3.16 g/cm³, 比表面積 3510cm²/g)、細骨材には浜厚真産陸砂(密度: 2.71g/cm³, 吸水率 2.1%, F.M.2.71)、粗骨材には手稲産砕石 2005(密度: 2.68 g/cm³, 吸水率 1.5%, F.M.6.70)、混

*1 北海道大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学大学院 助教授 工学研究科 社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*3 北海道大学大学院 教授 工学研究科 社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

表1 コンクリートの配合

記号	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 SP (C×%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	練り温 (度)	凝結試験	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G					始発時間 (h-min)	終結時間 (h-min)
C25	0.25	39.8	170	680	641	960	1.1	19.4	1.8	20.0	5-13	7-8
C30	0.3	43.2		567	738		0.8	18.6	1.9	19.5	4-43	6-5
C35	0.35	45.4		486	808		0.8	14.0	2.0	18.5	4-32	6-1
C40	0.4	47.0		425	860		0.8	16.7	1.7	19.0	4-57	6-19
C50	0.5	49.0		340	933		0.8	10.0	2.2	19.0	5-2	6-30

表2 モルタルの配合

記号	水セメント比 W/C	細骨材容積比 Vs/Vm	単位量 (kg/m ³)			混和剤 SP (c×%)
			水 W	セメント C	細骨材 S	
M25	0.25	0.380	273	1093	1031	1.1
M30	0.30	0.438		912	1186	0.8
M35	0.35	0.479		781	1299	0.8
M40	0.40	0.510		683	1383	0.8
M50	0.50	0.554		547	1500	0.8

和剤としては市販のポリカルボン酸系高性能AE減水剤を用いた。コンクリートの配合を表-1に、モルタルの配合を表-2に示す。なお、コンクリートの練り混ぜには50lのパン型強制練りミキサーを、モルタルの練り混ぜには1.5lのホバート型ミキサーを用い、30秒空練りした後水と混和剤を投入し90秒練り混ぜ、掻き落としをした後、更に90秒練り混ぜた。

2.2 試験項目および方法

(1) 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの測定は、既報で提案したように^{4), 5)}市販のひずみゲージをシリコンシーラントで被覆して作製した低弾性型(0.98N/mm²)埋め込みゲージを用いる方法により行なった。ひずみゲージおよびコンクリートの供試体の概要を図-1に示す。コンクリートの供試体は、12.5φ×25cmのプラスチック製の型枠で作製した。モルタルの供試体は既報⁵⁾と同様に、5φ×10cmの鋼製の型枠で作製した。型枠に試料を投入すると同時にゲージを埋設し、試料が長さ変化を起こす際、型枠と試料との間に生じる摩擦を低減するため、型枠の内側にテフロンシートを敷いた。試料の打ち込み後は水分の逸散を防ぐため上部端面を封緘した。作製した供試体は室温20℃、相対湿度60%の恒温室で脱型せずに養生し、供試体作製直後からモルタルは1週間、コンクリートは2週間までのひずみを測定した。なお、コンクリートについて

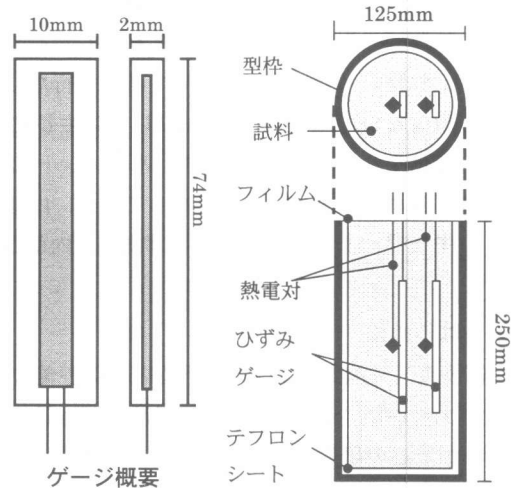


図-1 ひずみゲージおよび供試体の概要

は、各配合につき3本ずつ供試体を作製しその平均値を測定値とした。

(2) 内部抵抗

内部抵抗の測定は湯浅ら⁶⁾が提案している、セラミックセンサーを供試体に埋設する方法により行なった。内部抵抗の測定はコンクリートのみとし、供試体はひずみの測定と同様に12.5φ×25cmの型枠で作製した。センサーは供試体の中央に埋設し、試料の打ち込み後は水分の逸散を防ぐため上部端面を封緘した。作製した供試体は室温20℃、相対湿度60%の恒温室で脱型せずに養生し、2週間までの内部抵抗を測定した。

(3) 供試体内部温度

自己収縮測定用および内部抵抗測定用の供試体の内部温度を銅・コンスタンタン熱電対により測定した。コンクリートでは中央および端から3cmの位置の内部温度を、モルタルでは中央のみの内部温度を測定した。自己収縮ひずみについては、モルタルおよびコンクリートの線膨

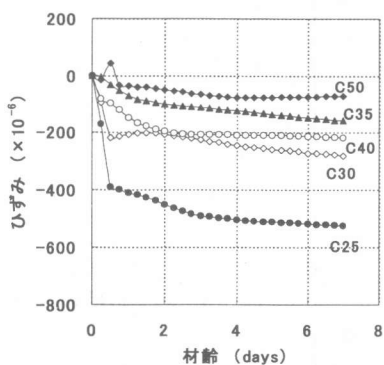


図-2 コンクリートの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響

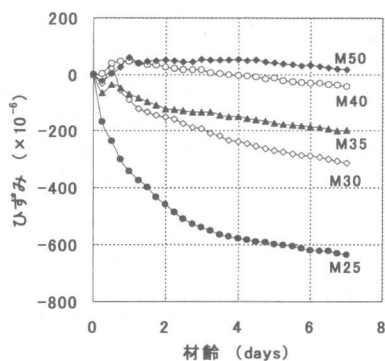


図-3 モルタルの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響

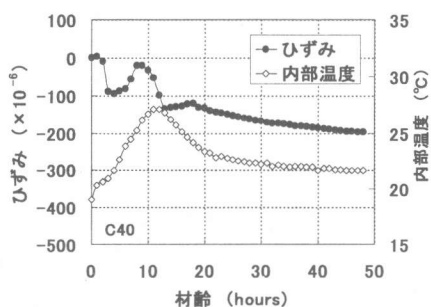
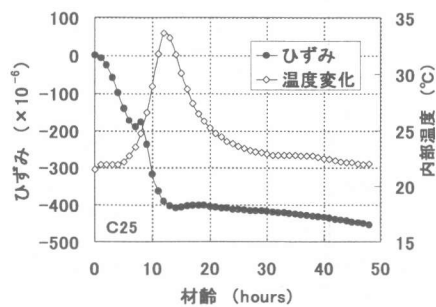


図-4 コンクリートのひずみと内部温度の対応

張係数をそれぞれ $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として温度補正を行なった。

(4) セメントペーストによる熱分析

セメントペーストはコンクリートと水セメント比が等しいものを作製し、混和剤は無添加とした。練り混ぜには、ハンドミキサーを使用し、練り混ぜ時間は3分間とした。作製したセメントペーストは 20°C の恒温室で封緘養生し、所定の材齢に達した時点で粉碎し、アセトンに浸漬して水和を停止させた後 40°C で4時間乾燥し、測定試料とした。熱分析はTG-DTAにより行ない、昇温速度は $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした。

3. 実験結果および考察

3.1 自己収縮に及ぼす配合の影響

図-2、3にコンクリートおよびモルタルの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響を示す。図より、従来からの報告通り²⁾、モルタルおよびコンクリートの自己収縮は水セメント比の影響を大きく受け、水セメント比の低下に伴い自己収

縮が大きくなっていることが認められる。本実験方法で得られた値には、ブリーディングによる沈下も収縮ひずみに含まれているが、自己収縮が顕著になる水セメント比が0.35以下の供試体ではブリーディングは認められなかった。一方、高水セメント比の供試体においては、ブリーディングは認められるものの、ブリーディングが発生している材齢2~3時間では収縮はほとんど生じておらず、両者に相関は認められなかった。また、モルタルと比較してコンクリートでは、極初期材齢で自己収縮の進展する速度が速く、その後の伸びが少ないことも認められる。宮澤らは⁸⁾、供試体の寸法が大きくなることによる温度履歴の相違が自己収縮ひずみに大きな影響を与えることを報告している。本実験においても、コンクリートの供試体の方がモルタルの供試体よりも内部温度の上昇量が大きいことが確認されており、宮澤らの報告と同様に水和による発熱がモルタルの供試体と比較しコンクリートの供試体により多く蓄積され、その結果

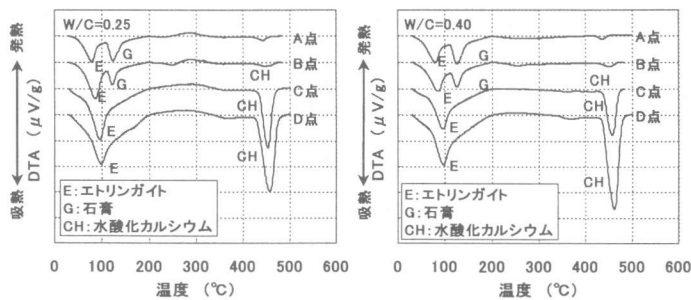


図-5 セメントペーストによる熱分析

コンクリートの水和反応が促進されたものと推察される。実施工においては、部材内部の温度差がより顕著になることが予想され、このことは、コンクリートの成分が均質に分散していたとしても部材内部に収縮量の分布が生じることを示唆している。

3.2 自己収縮ずみと内部温度の対応

図-4に、材齢48時間までのコンクリートのひずみと内部温度の関係の一例を示す。図より、水セメント比が0.25の場合、練り混ぜ直後から収縮が開始しており、材齢7時間で収縮が一端休止した後、内部温度の上昇すなわち C_3S の水和と対応して更に収縮が進行している。一方、水セメント比が0.40の供試体では、上記の休止期と同時期に一端膨張した後に、低水セメント比の供試体と同様に収縮が急激に進行している。本実験では水セメント比が0.35以上の全ての供試体で同じ様に膨張した後に収縮する挙動を示した。また、休止期が現れる時期および膨張が生じる時期はいずれの供試体においても終結以降であり、内部温度がピークに達した後は急激な体積変化を示さなくなることも確認された。高橋らは⁹⁾、セメントペーストの材齢2日以内のひずみに二つの屈曲点が見られ、第一屈曲点は硬化体に強固な骨格(3000gの凝結針が侵入できなくなる点)が形成される時期に現れると報告している。また、再び収縮を開始する第二屈曲点を境にエトリンガイトがモノサルフェートへ転化する傾向が認められたことから、第二屈曲点直後の収縮はエトリンガイトの分解に起因したものであると推察している。図-5に、材

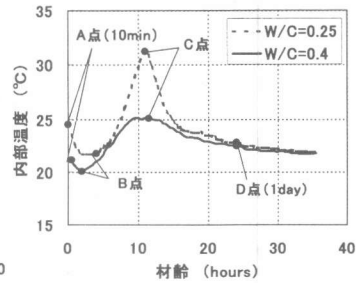


図-6 熱分析用の試料採取点

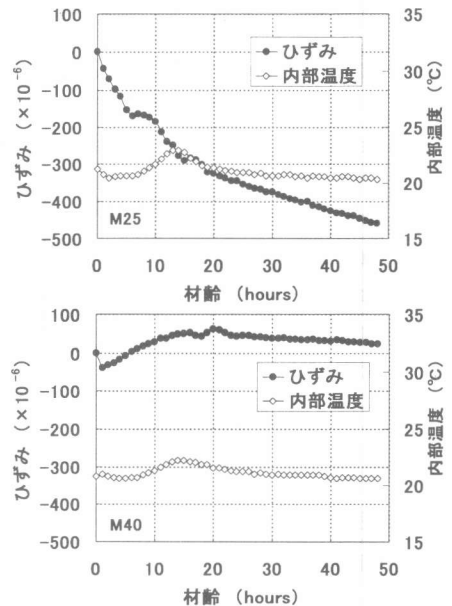


図-7 モルタルのひずみと内部温度の対応

齢1日までのセメントペーストの熱分析結果の一例を示す。なお、試料の採取点は図-6に示すように、セメントペーストの内部温度が変化した点とした。図より、水セメント比が0.25および0.40の試料では、エトリンガイトからモノサルフェートへの転化は認められず、主に C_3S の水和による $Ca(OH)_2$ の生成の増大のみが観察された。また、他の水セメント比においても同様な結果が観察された。したがって、本実験で生じた屈曲点はエトリンガイトのモノサルフェートへの転化以外の原因によるものと推察される。

図-7に材齢48時間までのモルタルのひずみと内部温度の関係の一例を示す。図より、コンクリートで見られた内部温度の上昇に伴う急激な膨張が、モルタルでは認められない。このこ

とは、粗骨材と細骨材ではその混入効果が異なり、細骨材と粗骨材を単純な寸法の異なる骨材としては評価できないことを示唆している。

3.3 乾燥状態と水和反応および自己収縮

図-8に内部抵抗と内部温度の関係を示す。なお、図中の矢印は凝結点を表す。図より、いずれの供試体においても内部抵抗が上昇し始めるのは終結以降である。また、水セメント比が大きいものは、終結から内部抵抗が上昇し一定勾配になるまでの時間が長くなっている。コンクリートの内部に硬化体としての骨格が形成された時点では、セメントと水和していない水分の量が水セメント比の影響を大きく受ける。すなわち、水セメント比により、終結時点での内

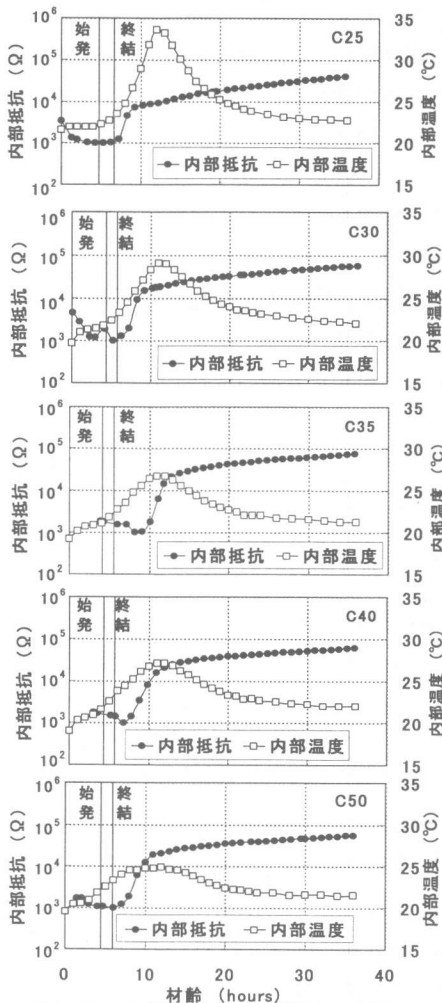


図-8 内部抵抗と内部温度の対応

部の乾燥状態が著しく異なることが考えられ、内部抵抗の変化にこの乾燥状態の違いが反映されているものと思われる。湯浅らは、内部抵抗の変化に及ぼす配合や温度の影響を検討し、内部抵抗の変化から供試体の質量含水率を推定することができることを報告している⁶⁾。本研究で測定を行なったような極初期の材齢では、内部抵抗は液相中のイオン濃度の変化の影響も受けるため、内部抵抗値から含水率の絶対値を直接算定することはできないが、内部抵抗の変化を乾燥が開始する材齢や速度を表す指標と捉えることはできるものと考えられる。このような観点から考えると、先の終結から内部抵抗が上昇し一定勾配になるまでの時間は、供試体内部の乾燥の進展速度と関連しているものと考えられる。

図-9に、コンクリートのひずみと内部抵抗の関係の一例を示す。図より、水セメント比の大小に拘わらず、内部抵抗の上昇直後から急激な収縮が生じていることが確認される。したがって、この急激な収縮は内部乾燥に起因しているものと推察される。A.Radoceaは¹⁰⁾、セメントペーストの自己収縮ひずみは、間隙水に負圧が発生した直後から生じることを報告しており、E.Sellevoldらは³⁾、この間隙水圧が負圧になる点の前では、ペースト内部に骨格が形成されていないことを指摘している。本実験でも

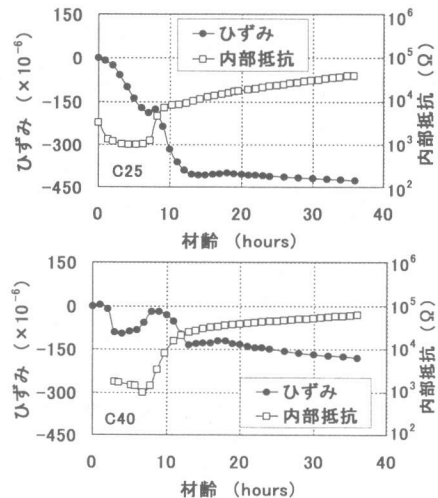


図-9 自己収縮ひずみと内部抵抗の対応

A.Radoceaの報告と同様に終結直後から間隙水圧に負圧が生じているものと推察されるが、間隙水圧は間隙水に働く応力を測定するものであり、その全てが内部の乾燥状態、すなわち毛細管張力に起因する応力であるとは限らない。従って、本実験の範囲では、内部乾燥状態と間隙水圧の関係を論じることはできないが、内部抵抗を、結合水量、細孔容量および液相中のイオン濃度と合わせて考察することにより、空隙の相対湿度および毛細管張力などの指標を導くことが可能であると思われる。したがって、終結以降に生じる急激な収縮のメカニズムを考察するにはこれらの指標を含んだ総合的な研究が必要であり、今後の検討課題である。

4. おわりに

以上の結果から、以下のことが分かった。

(1) モルタルおよびコンクリートの自己収縮は水セメント比の影響を大きく受け水セメント比が小さいほど自己収縮が大きくなる。

(2) 水セメント比が低い供試体では、練り混ぜ直後から収縮が開始し、休止期を経た後 C_3S の水和開始と対応して急激に収縮が進行している。一方、水セメント比が 0.35 以上の供試体では、 C_3S の水和開始と同時に一端膨張した後に、収縮が急激に進行している。

(3) コンクリートおよびモルタルの急激な膨張、収縮はすべて終結以降に生じており、内部温度がピークに達した以降は急激な体積変化を示さなくなる。

(4) いずれの供試体においても内部抵抗が上昇し始めるのは終結以降である。また、終結から内部抵抗が上昇し一定勾配になるまでの時間は水セメント比の影響を受ける。

(5) 水セメント比に拘わらず、自己収縮が急激に進行するのは、内部抵抗の上昇直後からであり、内部乾燥に起因しているものと推察された。

謝辞

本研究にあたり、北海道電力総合研究所の荻

原淳平氏、日本大学生産工学部の湯浅昇氏、北海道立寒地住宅都市研究所の桂修氏の御協力を得ました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田澤栄一, 宮澤信吾, 重川幸司: 水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積減少, セメント・コンクリート論文集, No. 45, pp. 122-127, 1991
- 2) 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, pp. 22-45, 1996
- 3) E. Sellevold et al: High performance concrete: Early volume change and cracking tendency, Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, pp. 229-236, 1994
- 4) 堀田智明 他: セメントペーストの自己収縮に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, No. 54, pp. 881-886, 2000 (掲載予定)
- 5) 堀田智明, 名和豊春: セメント系材料の自己収縮に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 (投稿中)
- 6) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 埋め込みセラミックセンサーの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 498 号, pp. 13-20, 1997. 8
- 7) 桂修 他: 化学ポテンシャルを考慮した交流 2 電極法による含水率, 凍結水率の算定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 781-786, 1998
- 8) 宮澤信吾, 黒井登起雄, 松村仁夫: 高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす供試体寸法の影響, セメント・コンクリート論文集, No. 50, pp. 472-477, 1996
- 9) 高橋 他: セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響, コンクリート工学論文集, 第 7 巻第 2 号, pp. 137-142, 1996. 7
- 10) A. Radocea: Autogenous volume change of concrete at very early age, Magazine of Concrete Research, 50, No. 2, pp. 107-113, Jun. 1998