セメント系材料の自己収縮に関する研究

A STUDY ON AUTOGENOUS SHRINKAGE OF CEMENT MIXES

堀田 智明*, 名和 豊春**
Tomoaki HORITA and Toyoharu NAWA

The autogenous shrinkage must be measured immediately after casting in mould because that the concrete is the most sensitive to internal stresses. We proposed a measurement method by using the thin strain gauge covered with water-proof silicone sealant having remarkably lower elastic modulus. The manufacturing method of strain gauge and measuring condition were investigated.

The effects of water to cement ratio and volume concentration of aggregate on autogenous shrinkage of cement based materials were experimentally investigated by using the proposed measuring method. The water to cement ratio have a large influence on the autogenous shrinkage within the age of 1day, but have less influence after the age of 1day. It is conformed that the autogenous shrinkage of cement paste may be closely linked with the hydration of cement because that the rapid initial shrinkage and expansion of cement paste at very early age accompany temperature rising of paste. We tried to estimate the effect of volume concentration of aggregate on shrinkage of cement mixes by using composite models.

Keywords : Autogenous shrinkage, Water to cement ratio, Hydration product
自己収縮, 水セメント比, 水和生成物

1. はじめに

最近、高強度・高流動コンクリートなどの高性能コンクリートの施工実績が伸びている。しかし、水結合材比が小さく単位結合材量の多い高性能コンクリートでは自己収縮が顕在化し、ひび割れの制御や耐久設計に自己収縮を考慮する必要があることが指摘されている¹⁾。このような背景から、自己収縮に及ぼす使用材料、養生条件などの種々の要因が検討されてきているが²⁾、自己収縮のメカニズムを解明する上で重要な、練り混ぜ直後からの収縮性状についての報告例は少なく、さらにセメントの水和と結びつけた研究はあまり例を見ない。

本研究では、自己収縮のメカニズムを解明するための基礎的なデータを蓄積することを目的とし、ヤング係数が約1.2N/mm²である低弾性のシリコンシーラントで被覆した埋め込み型ひずみゲージを用いて混練直後からのセメント硬化体の収縮挙動の測定法を提案した。また、この測定系を用いて、水セメント比がセメントペーストの極初期材齢の長さ変化に与える影響を確認し、内部温度変化との対応から、セメントペーストの長さ変化とセメントの水和挙動との関連について検討した。次に、細骨材量を変化させたモルタルの自己収縮ひずみを測定し、セメントペーストとモルタルの自己収縮の比較を行い骨材の影響について検討した。

2. 自己収縮の測定に関する既往の研究と本研究の位置付け

セメント系材料の自己収縮は材齢1日程度までの収縮速度が最も大きな値を示すため、打込み直後から自己収縮を測定する必要がある。しかし、コンクリートに接触して測定する方法では、セメント系材料の強度およびヤング係数が低いために、極初期材齢の収縮ひずみを測定することはできない。このため、レーザーや渦電流を用いた各種の非接触型の測定方法が提案されている^{3), 4)}。しかし、これらの方法は、測定のための基準点が必要であり、実際の構造物の収縮挙動を測定することは不可能である。一方、日本コンクリート工学協会の提案する自己応力を測定する方法では、実際の構造物にも適用できる方法として、埋め込み型のひずみゲージを用いるものが規定されている²⁾。しかし、提案されている埋め込み型ひずみゲージではヤング係数が大きいため、打ち込み直後からの収縮挙動を測定できないという問題点がある。

本研究で提案したひずみ測定系は、低ヤング係数のシリコンで被覆したひずみゲージを使用しているため、埋め込み型であるが打ち込み直後から自己収縮を測定することが可能である。また、埋め込み型であるため、実際の構造物の自己収縮ひずみの測定に供することが可能なものである。

* 北海道電力株式会社 工修

** 北海道大学大学院工学研究科 助教授・工博

Hokkaido Electric Power Corporation, Civil Engineering & Architecture Dept., M. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Structural and Geotechnical Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

3. 測定システムの概要

本研究で用いた測定系は、平尾らが提案した⁵⁾ 埋め込み型ゲージを改善したものであり、市販のひずみゲージをシリコンシーラントで被覆したものを用いた。試作したゲージの概要を図1に示す。なお、このゲージの弾性係数は約 1.2N/mm^2 である。

本研究で提案する自己収縮測定法では、セメントペーストおよびモルタルの供試体は $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ の型枠で作製することとした。図2に供試体の概要とゲージの埋設位置を示す。型枠に試料を投入すると同時にゲージおよび熱電対を供試体中央に埋設した。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目的で、型枠の内側にテフロンシートを敷き、試料の打ち込み後は水分の逸散を防ぐため上部端面をシールした。ひずみと内部温度の測定は、供試体作製直後から連続的に行なった。なお、ゲージが適切に埋設されているかについては、脱型後の供試体を割裂して確認した。

4. 測定条件の検討

4.1 ひずみゲージの前処理

本研究で試作したゲージはシリコンのゲルで被覆されているため、埋め込み前の処理が試料とゲージの平衡含水状態に影響を与え、測定するひずみに影響を及ぼすことが考えられる。このため気乾および24時間イオン交換水浸漬の2種類の前処理を施したゲージをセメントペースト中に埋設し、前処理の影響を確認した。

図1 ひずみゲージの概要

図2 供試体の概要

図3 測定値に及ぼす前処理の影響

図4 測定値に及ぼすゲージ被覆厚さの影響

図5 ひずみゲージの熱特性

供試体は水セメント比が0.30のセメントペーストを用いて作製した。セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 、比表面積 $3350\text{cm}^2/\text{g}$ ）を、練り混ぜ水にはイオン交換水を用いた。測定結果を図3に示す。図より、気乾状態で埋設したゲージは、打設直後から大きく膨張した。これより、気乾のゲージではシリコンがセメントペースト中の水分を吸収することにより、ゲージ自体が膨張し、見掛け上ペーストが膨張した結果が得られたものと考えられる。一方、24時間イオン交換水に浸漬したゲージを用いると、埋設直後のひずみはほぼ0と安定しており、ゲージの吸水の影響が認められない。また、24時間以上イオン交換水に浸漬したゲージの測定データは24時間浸漬のものとはほぼ同じであり、この結果から、ゲージの前処理は24時間イオン交換水浸漬が適当であると判断された。

4.2 ひずみゲージの被覆厚さの影響

本研究で試作したひずみゲージは、シリコンで被覆しており厚みがあるため、試料とシリコン被覆が接している端部とひずみを測定している中央部では、ひずみの大きさが異なるものと思われる。ここでは、水セメント比が0.25のセメントペーストを用いて、ゲージの被覆厚さが測定データに及ぼす影響について検討した。セメントは前項と同じく普通ポルトランドセメントを用い、練り混ぜ水にはイオン交換水を用いた。ゲージの厚さの影響を図4に示す。図より、被覆厚さが4mmのものは若干収縮ひずみが小さくなる傾向が認められたが、その差は小さく、本研究で使用した範囲では、ゲージ厚さの影響は小さいものと思われる。このため本研究では、これ以降はシリコン被覆厚さが2mmのものを用いた。

4.3 ひずみゲージの熱特性と温度補正

自己収縮の測定中にはセメントの水和が活発であり、その水と熱によって供試体の温度が上昇する。その際にひずみゲージと試料の線膨張係数が異なると測定されるデータに影響を及ぼすため、この影響を補正する必要がある。このため、24時間イオン交換水に浸漬したゲージを水中に静置し、温度履歴を与え熱膨張係数を測定した。結果を図5に示す。図より、測定されたひずみと内部温度の間には良好な直線関係が確認され、その熱膨張係数はおよそ 6×10^{-6} である。したがって、測定値には試料とゲージの線膨張係数を含めた補正が必要であるが、両者の弾性係数および断面積比の差が非常に大きいことから、ゲージと試料の線膨張係数の差異は無視することができる。また、試料のひずみが温度ひずみと自己収縮ひ

ずみの単純な和で表わされると考えると、自己収縮ひずみはゲージの自己温度補正を考慮した以下の(1)式で求めることができる。

$$\varepsilon_a = \varepsilon - (\alpha_x - k)\Delta T \quad (1)$$

ここに、 ε_a ：自己収縮ひずみ

ε ：出力されるひずみ

α_x ：試料の線膨張係数（ひずみ/℃）

k ：ひずみゲージの自己温度補正係数（ひずみ/℃）

以上の結果に基づき、本研究では、セメントペーストおよびモルタルの線膨張係数をそれぞれ $20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、 $15 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ として温度補正を行なった。

4.4 ひずみゲージの埋設方向の検討

本研究で提案する自己収縮測定法は、円柱供試体を使用し垂直方向の長さ変化を測定するものである。しかし、セメント系材料の初期の長さ変化を考えた場合、ブリーディングや沈下の影響を受けるため、垂直方向と水平方向で長さ変化が異なる可能性がある。ここでは、水セメント比が0.30、0.35および0.40であるモルタルにより、垂直方向および水平方向の長さ変化を測定する供試体をそれぞれ作製し、本試験法に及ぼすブリーディングおよび沈下の影響について検討した。細骨材は空気を含まないモルタル容積に対し内割で24%混入した。水平方向の長さ変化を測定する際に用いた型枠の概要を図6に示す。なお、垂直方向の供試体と水平方向の供試体では寸法および形状が異なるが、ここではその影響は小さいものと判断し考慮しないものとする。

図7にゲージの埋設方向がひずみに及ぼす影響を示す。図より、いずれの水セメント比においても水平方向の供試体と垂直方向の供試体の間に差異は認められたが、W/Cが0.40の供試体でもっとも大きな差が生じた。図8にセメントペーストの水セメント比とブリーディング量の関係を示す。なお、ブリーディングの測定は、練混ぜ後の試料をφ50×70mmの円柱容器に移し入れ封緘した後、所定の時間が経過した後に上面に滲み出た水量を測定し求めた。図

より、水セメント比が0.35を境にブリーディング量が増大しているのが分かる。また、加藤らは⁶⁾セメントペーストの供試体内部に、ブリーディングによる水セメント比の分布が生じ、上端に近いほど水セメント比が高くなり、下端に近いほど水セメント比が低くなることを報告している。これらのことから、本実験の水セメント比が0.40の水平方向の供試体ではブリーディングが大きいため、内部に水セメント比の分布が生じ、測定部位の水セメント比が低下し、水セメント比が0.35の供試体と類似した結果を示したものと推察される。一方、垂直埋設の場合ではゲージ長の平均的な水セメント比の収縮ひずみが測定されたため、図7に示すように垂直方向と水平方向と収縮量の差が生じたものと考えられる。以上の考察より、水セメント比が部材全体の自己収縮に及ぼす影響は、垂直埋設の方が反映するものと考えられ、本研究ではこれ以降、ゲージの埋設方向は垂直方向を採用することとした。

5. データの検証

5.1 接触型変位計およびレーザー変位計との比較

本研究で提案する測定法により得られた値の検証を行うため、従来から提案されている測定方法との比較を行った。比較に用いた測定系としては、図9に示すようなバネ式の変位計（測定力1.96N）

図9 比較に用いた測定系の概要

図6 水平方向の供試体

図7 ひずみゲージの埋設方向が測定値に及ぼす影響

図8 セメントペーストのブリーディング量

およびレーザー式変位計を用いた方法を選択した。なお、試料の打ち込み後は水分の逸散を防ぐために上面に流動パラフィンを滴下した。供試体は同一調合のセメントペーストにより作製した。セメントは前項と同じ普通ポルトランドセメントを、混和剤としてはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を、練り混ぜ水にはイオン交換水を用いた。調合は、水セメント比を 0.25 とし、高性能 AE 減水剤をセメント重量に対し 0.3% 添加した。図 10 に本測定法およびバネ式変位計により得られた測定結果を示す。なお、レーザー式変位計を用いたものに関しては、電源が不安定であったため、データのバラツキが大きい結果となり、適切なデータが得られていないものと判断し除外した。図より、バネ式変位計を用いたものは初期のひずみが非常に大きくなっているが、これはバネの反力を受けるための鋼板が沈降したことにより、初期のひずみが過大に評価されてしまったためと思われる。図 11 は、供試体の硬化が十分に進行した材齢 1 日のひずみをゼロとして、両者のひずみを比較した結果である。図より、両者は良く一致した値を示していることがわかる。

5.2 先行研究との比較

本研究で提案する試験法により得られた値が、適当な値であるかを判断するため、先行研究の測定データとの比較を行った。比較のための値としては、セメントペーストの自己収縮を比較的初期材齢から測定した田澤らの値⁷⁾を用いた。田澤らの測定方法は、供試体の両端に埋設したゲージプラグの変位を読み取る方法であるが、ここで比較に用いた測定データは極初期の材齢からのひずみを測定できるようにバネを抜いたダイヤルゲージによりプラグの変位を読み取っているものである。本研究でも田澤らと同様に鉱物組成の異なる普通、低熱および早強ポルトランドセメントの 3 種類のセメントを用い、田澤らと同一調合である水セメント比が 0.30 のセメントペーストを作製した。使用したセメントの鉱物組成を表 1 に示す。

本試験法による測定結果および田澤らの測定結果を図 12 に示す。図中の点が本測定法による値を表し、破線は田澤らの値を示す。

表 1 セメントの鉱物組成

セメント種	C ₃ S(%)	C ₂ S(%)	C ₃ A(%)	C ₄ AF(%)
普通ポルトランドセメント	50	25	9	9
低熱ポルトランドセメント	24	58	3	8
早強ポルトランドセメント	65	11	8	8

図 10 測定法の違いが測定値に及ぼす影響

図 11 硬化後の測定値の比較

図 12 先行研究値との比較

す。図より、両測定法の値を比較してみると、いずれのセメントを用いた供試体においても非常に良く対応しており、本研究で提案する測定法により適切なデータが得られているものと思われる。

なお、本試験法の測定開始点は、供試体の弾性係数がゲージの弾性係数を超えた時点であると考えられる。セメントペーストの動弾性係数を超音波を用いた装置により練混ぜ直後から測定した松藤らの報告⁸⁾によると、セメントペーストの動弾性係数は水セメント比が 0.45 と高いもので、材齢 30 分で 1N/mm² 程度であり、水セメント比が 0.27 と低いものでは、材齢 10 分で 30N/mm² にも達している。松藤らの報告および G と E の関係を表す (2) 式から、セメントペーストのヤング係数がゲージのヤング係数 1.2N/mm² に達するのは、水セメント比が高いものでも材齢 30 分程度であることが分かる。これより、本試験法の測定開始点は凝結始発以前と判断され、極初期材齢の自己収縮ひずみを十分捕らえているものと判断される。

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (2)$$

ここに、G：せん断弾性係数

E：ヤング係数

ν ：ポアソン比

6. 提案した測定法による自己収縮の測定

6.1 実験概要

セメントペーストの自己収縮に水セメント比が大きな影響を及ぼすことはすでに報告されている⁷⁾。本実験では、まず、水セメント比がセメントペーストの極初期材齢の長さ変化に与える影響を確認し、内部温度変化との対応から、セメントペーストの体積変化と水和挙動との関連について検討した。次に、細骨材量を変化させたモルタルの自己収縮を測定し、セメントペーストとモルタルの自己収縮の比較を行い骨材の影響について検討した。

6.2 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：3.16g/cm³、比表面積：3350cm²/cm³)、細骨材には浜厚真産陸砂 (密度：2.71 g/cm³、吸水率：2.1%) を、混和剤としてポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。セメントペーストの調合は、水セメント比が

0.25、0.30、0.35、0.40 および 0.50 の 5 水準とした。一方、モルタルの調査は、水セメント比を 0.25 および 0.30 の 2 水準とした。水セメント比が 0.25 の場合、細骨材混入率を空気を含まないモルタル容積に対し内割で 34% および 48% の 2 水準とし、水セメント比が 0.30 の場合は 24%、34%、43% および 48% の 4 水準とした。なお、水セメント比が 0.25 のセメントペーストおよびモルタルには、セメント重量に対し 0.1% の高性能 AE 減水剤を添加した。また、セメントの水和遅延が自己収縮に及ぼす影響を確認するため、水セメント比が 0.25 のセメントペーストについては、高性能 AE 減水剤をセメント重量に対し 0.3% 添加した供試体も同時に作成した。

6.3 実験結果および考察

(1) セメントペースト

図 13 にセメントペーストの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響を示す。図より、セメントペーストの自己収縮は水セメント比の影響を大きく受け、低水セメント比のセメントペーストほど収縮量が大きくなっている。また、水セメント比は練り混ぜから 1 日以内の自己収縮量に大きな影響を与えており、1 日以降は水セメント比によらずほぼ同程度の収縮挙動を示し、材齢 1 日から 7 日までの収縮ひずみは約 500×10^{-6} となった。

図 14、15 にセメントペーストのひずみと内部温度の対応を示す。なお、水セメント比が 0.25 のものは、練り混ぜ直後から内部温度が上昇していた。これはセメントペーストの材料を 20℃ と管理したため、粘性の高い低水セメント比の試料で練り混ぜ時に摩擦による発熱の影響が現れたものと思われる、(1) 式により温度補正を行なった。図より、水セメント比が 0.25 と小さい場合は、内部温度の上昇すなわち C_3S の水和開始とほぼ同時に急激な収縮が開始しているのに対し、水セメント比が 0.40 と大きい場合は、 C_3S の水和開始とともに逆に膨張しているのが認められた。水セメント比が高いセメントペーストで初期材齢に膨張が生じることは岩崎ら⁹⁾ や丁ら¹⁰⁾ により報告されているが、そのメカニズムについては統一された見解が得られていない。水セメント比が低い供試体で、打ち込み直後から収縮が生じているのは、極

初期から内部が乾燥状態となったため、自己収縮が早期に進展したものと推察される。

図 16 に凝結が遅延したセメントペーストのひずみと内部温度の対応を示す。図より、 C_3S の水和の遅れに伴い収縮の開始も遅れ、凝結が遅延した場合でも水和の開始と長さ変化の開始時間が良く対応していることがわかる。

セメントペーストの収縮は練り混ぜ直後からの収縮膨張する時期と屈曲点を経てその後に続く収縮が緩慢な時期の二つの領域に分けられる。本研究では前者を一次収縮、後者を二次収縮と呼ぶことにする。図より、一次収縮は内部温度の上昇とよく対応した長さ変化であり、二次収縮は内部温度のピーク以降の水和反応が比較的落ち着いた領域での収縮である。前述のように、水セメント比による収縮ひずみの差のほとんどはこの一次収縮で生じている。自己収縮のメカニズムは、自己乾燥に起因した毛細管張力によるものと考えられているが、供試体内部の乾燥状態や毛細管張力を実際に測定し自己収縮ひずみのデータと併せて考察した報告例は皆無である。しかし、自己収縮のメカニズムを解明するには、極初期材齢で生じる一次収縮の挙動を水和反応および内部乾燥状態とあわせて考察することが重要であると思われる、今後の課題である。

(2) モルタル

図 17 にモルタルの自己収縮に及ぼす細骨材混入量の影響を示す。図より、細骨材量の増加に伴い、自己収縮が低減されているのが確認される。モルタルをセメントペーストと細骨材の 2 相系材料と考えた場合、水和により自己収縮を生じるのはセメントペースト部分

図 13 セメントペーストの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響

図 14 ひずみと内部温度の対応 (W/C=0.25)

図 15 ひずみと内部温度の対応 (W/C=0.40)

図 16 混和剤による凝結遅延の影響

図 17 モルタルの自己収縮に及ぼす細骨材量の影響

のみであるため、細骨材を混入することにより収縮力が生じるペースト部分の体積が減少すること、骨材による拘束効果が生じることに自己収縮は低減されると考えられる。

宮澤らは¹¹⁾、凝結の始発以降のコンクリートに生じる自己収縮には、セメントペーストと骨材の2相系材料として乾燥収縮をモデル化したHobbsモデル¹²⁾が適用できるとしている。ここでは、Hobbsモデルの適用性を検討すると共に、材料のポアソン比を0とした大野モデル¹³⁾についても比較検討した。また、骨材の複合則の中でも、最大値、最小値をそれぞれ表す、直列モデルおよび並列モデルについての比較検討も行った。Hobbsモデル、大野モデル、直列モデルおよび並列モデルを(3)式、(4)式、(5)式および(6)式にそれぞれ示す。

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} = \frac{(1-V_a)(K_a/K_p + 1)}{1 + K_a/K_p + V_a(K_a/K_p - 1)} \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} = \frac{1}{1 + \frac{E_a A_a}{E_p A_p}} \quad (4)$$

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} = 1 - V_a \quad (5)$$

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} = \frac{(1-V_a)}{(\frac{E_a}{E_p} - 1)V_a + 1} \quad (6)$$

ここに、 ε_m ：モルタルの自己収縮ひずみ

ε_p ：セメントペーストの自己収縮ひずみ

V_a ：骨材の体積濃度

K_p ：セメントペーストの体積弾性係数 ($K_p = E_p/3(1-2\nu)$)

K_a ：骨材の体積弾性係数 ($K_a = E_a/3(1-2\nu)$)

ν ：ポアソン比 (0.2と仮定)

E_p ：セメントペーストのヤング係数

E_a ：骨材のヤング係数

A_p ：セメントペーストの断面積

A_a ：骨材の断面積

図18に細骨材混入率の異なるモルタルの自己収縮ひずみをHobbsモデル、大野モデル、直列モデルおよび並列モデルから算定した予測値と実測値の比較を示す。ここで、モルタルの自己収縮の予測値は、セメントペーストの自己収縮の実測値より算出した。セメントペーストのヤング係数は石田¹⁴⁾らの提案した強度発現モデルと建築学会の強度とヤング係数の関係式より計算したものを用い、細骨材のヤング係数には一般的な値80kN/mm²を用いた。

図18より、モルタルの自己収縮の実測値は、Hobbsモデルあるいは大野モデルと良く似た値を示しており、これらのモデルによりおおよそその値を推定することは可能と思われる。また、実測値は骨材混入率の増加に伴い並列モデルに近づいて行くことも確認される。これは、骨材量が多くなるほど、収縮力が発生するペースト部分の体積割合が減少し、また、ペースト部分と骨材の接触面が増加することにより、骨材の拘束力が大きくなり、その結果、骨材の拘

図18 モルタルの自己収縮の実測値と骨材モデルの比較

束力が系全体の収縮に及ぼす影響が大きくなり、並列モデルに近づいてゆくものと考えられる。

次に図 18 より、骨材混入率が 34% と等しく水セメント比がそれぞれ 0.25 および 0.30 のモルタルの収縮量を比較すると、水セメント比が 0.30 のモルタルでは、実測値は概ね直列モデルと並列モデルの間であり、大野モデルとよく対応している。一方、水セメント比が 0.25 のモルタルでは、実測値は直列モデルに近づき Hobbs モデルに良く対応している。すなわち、水セメント比が大きいくペースト部分の収縮力が小さい場合、骨材の拘束効果が顕著に現れているのに対し、水セメント比が小さくペーストの収縮力が大きい場合、骨材の拘束効果は系全体の収縮には大きな影響を与えていないものと考えられる。このことは、骨材混入率が等しくても、その拘束効果は必ずしも等しくはないことを示しており、骨材の拘束効果は、マトリックス相の収縮力も考慮する必要があることを示唆している。換言すると、モルタルの自己収縮はペーストの収縮力と骨材の拘束力のどちらが卓越するかにより決定するものと考えられる。

今後は、調査や養生条件等から決定するペーストの収縮力と、骨材の拘束力とのバランスを考慮した予測式を構築する必要があると考えられる。

7. おわりに

本研究では、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、測定条件および測定データの検証を行なった後、本測定法を用いセメントペーストおよびモルタルの自己収縮の測定を行なった。得られた結果を以下に示す。

- (1) 本研究で提案する測定法の測定条件について検討を行ったところ、ひずみゲージの前処理として 24 時間イオン交換水浸漬が適当であること、本研究で使用した範囲ではゲージ被覆厚さの影響は小さいことが分かった。また、試料とゲージの弾性係数の差が大きいこと、ゲージ自身の温度ひずみは無視することができること、ゲージは垂直方向の埋設とした方がゲージ長全体の長さ変化を良く反映することが分かった。
- (2) 本測定法の測定開始点は、高水セメント比で遅いものでも材齢 30 分程度であり、極初期材齢の自己収縮ひずみを十分捕らえることができるものと判断された。また、適当な測定法によるものと判断される先行研究との比較を行ったところ、本測定法でもほぼ同様な測定値を得られることが確認された。
- (3) 本実験の範囲では、水セメント比はセメントペーストの極初期の自己体積変化に大きな影響を与え、材齢 1 日以降の収縮に与える影響は小さいものと判断された。また、セメントペーストの初期の収縮および膨張は内部温度の上昇とよく対応しており、セメントの水和反応が遅延した場合でも両者は良く対応することが確認された。
- (4) モルタルの自己収縮は骨材混入率の増加に伴い低減される。また、モルタルの自己収縮の実測値は、高水セメント比でペー

ストの収縮力が小さく、骨材の混入量が多くなるほど並列モデルによる推定値に近づき、低水セメント比でペーストの収縮力が大きく骨材混入量が少ない場合、直列モデルによる推定値に近い値を示した。このことから、骨材の拘束効果には骨材混入率のみではなく、ペーストの収縮力とのバランスも考慮する必要がある、モルタルの自己収縮は、ペーストの収縮力と骨材の拘束力のどちらが卓越するかにより決定しているものと推察された。

参考文献

- 1) 田澤栄一、宮澤伸吾、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) 田澤栄一、宮澤伸吾:コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究、土木学会論文集、No.571/V-36、pp.211-219、1997.8
- 4) 楊楊、佐藤良一、許明:高流動コンクリートの収縮および拘束応力に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、pp.631-636、1998
- 5) 平尾宙、内川浩、羽原俊祐:硬化セメントペーストの湿度および硬化体の構造の変化と自己収縮、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.705-710、1996
- 6) 加藤佳孝、魚本健人:コンクリート内部の不均一性に関する研究-硬化セメントペーストの場所的不均一性に関する実験的検討-、東京大学生産技術研究所生産研究 48 巻 12 号、1996.12
- 7) 田澤栄一、宮澤伸吾:セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響、土木学会論文集、No.502/V-25、pp.43-52、1994.11
- 8) 松藤泰典、河上嘉人:超音波横波法によるセメントペーストの凝結過程に関する検討、セメント技術年報 34、pp.63-66、1980
- 9) 岩崎訓明、西林新蔵、青柳征夫:フレッシュコンクリート・硬化コンクリート、技報堂出版、p.201、1981
- 10) 丁海文、河野広隆、渡辺博志、鈴木雅博:水和熱による高温履歴が高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.2、pp.1117-1122、1999、
- 11) 宮澤伸吾、北田悦子、井田敦師:コンクリートの自己収縮に及ぼす骨材混入率の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、pp.667-672、1998
- 12) Hobbs D.W.: Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete, Journal of ACI, Vol.71, No.9, pp.44-450, 1974
- 13) 大野和夫:モルタルおよびコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究、北海道大学工学部研究報告、No.9、1953.12
- 14) 石田哲也、R.P.CHAUBE、岸利治、前川宏一:微視的機構に基づくコンクリートの自己収縮、乾燥収縮およびその複合に関する解析的研究、土木学会論文集、No.578/V-37、pp.111-121、1997.11

(1999年12月24日原稿受理、2000年11月13日採用決定)