

モルタルのプラスチック収縮に及ぼす水結合材比および 細骨材容積比の影響に関する研究

馬場勇介^{*1}・漆原大輔^{*2}・笠井哲郎^{*3}

Effects of Water Cementitious Material Ratio and Volume Fraction of Fine Aggregates on Plastic Shrinkage of Mortar

by

Yusuke BABA, Daisuke URUSHIHARA and Tetsurou KASAI

(Received on Sept. 30, 2003 & accepted on Nov. 26, 2003)

Abstract

It was determined that the plastic shrinkage of cementitious material occurs when the velocity of water vaporization from the surface increased compared with that of bleeding. However, in this present study, it was reported that negative pressure in high-strength concrete of low water cement ratio occurs due to hydration without vaporization. It is suggested that shrinkage is influenced by not only vaporization from the surface but also self-desiccation due to hydration. In this study, the effect of self-desiccation on the plastic shrinkage of cement paste and mortar was investigated on the basis of experimental results of the change in pore water pressure and shrinkage behavior at very early ages. Furthermore, the effects of the volume fraction of fine aggregates and curing conditions on the plastic shrinkage of mortar were investigated. It was found that plastic shrinkage is markedly influenced by the self-desiccation and volume fraction of fine aggregates at low water cement ratio.

Keywords: Plastic shrinkage, Pore water pressure, Chemical shrinkage, Self-desiccation, Volume fraction of fine aggregates

1. まえがき

コンクリートの打込み直後から、まだプラスチックな状態で生じるプラスチック収縮は、コンクリートの表層部分が乾燥することに起因していると考えられている。そのメカニズムについては、ブリーディング上昇速度に比較して、表面からの水の蒸発速度が速い場合、水面が固体粒子層以下となることにより、コンクリート中の間隙水にメニスカスが形成され、負圧が生じるために収縮が起こると説明されている¹⁾²⁾。一方、最近になり、乾燥を受けない状態においても間隙水に負圧が生じる場合がある事が報告された³⁾。このことはプラスチック収縮が水の逸散による乾燥の影響だけでなく、水和反応による間隙水の消費に伴う自己乾燥の影響を受けることを示唆するものである。

近年、コンクリートの高機能化・高耐久化は、単位水量を少なくするという、いわゆる減水効果を利用しているものが主である。1995年にJIS化された高性能AE減水剤は、より優れたセメント粒子分散性能を有しており、これにより、従来のAE減水剤では不可能であった低水結合材比のコンクリートの製造が可能となり、高強度化が実現されている。しかし一方、こうしたコンクリートでは、極初期材齢時に自己乾燥に伴う自己収縮が顕著に生じる。JCI自己収縮研究委員会では、自己収縮を

始発以降のマクロな体積変化と定義⁴⁾しているが、低水結合材比のコンクリートでは凝結以前にも自己乾燥が生じている可能性があり、プラスチック収縮もその影響を強く受けているものと推察される。また、こうしたコンクリートではブリーディングが極めて少量であり、ブリーディングが多量に発生するコンクリートに比較し、水分逸散に伴う乾燥の影響もより強く受ける可能性がある。つまり、低水結合材比のコンクリートのプラスチック収縮は、水分逸散による乾燥と水和反応に伴う自己乾燥の両面を考慮する必要があると考えられる。

他方、複合材料であるコンクリートやモルタルは、セメントマトリックス相(セメントペースト)、分散粒子(骨材)、境界相の3つの構成要素からなるが、このうち、マクロな体積変化の要因はセメントマトリックス相にあり、分散粒子である骨材は収縮拘束要因となる。つまり、骨材容積比の増大は、セメントマトリックス相の絶対容積の減少、さらには収縮拘束効果の増大をもたらす、マクロな体積変化を減少させると考えられる。しかし、モルタルの場合では、細骨材容積比の増大はブリーディングを減少させる為⁵⁾、水分逸散に起因する収縮には不利な条件となる。以上より、プラスチック収縮に及ぼす水結合材比・養生条件・骨材容積比の影響と、相互関係については不明な点が多く、それらの位置づけを明確にする必要がある。

そこで本研究では、セメントペーストおよびモルタルを用い、水結合材比・養生条件・細骨材容積比をファクターとし、経時に伴う体積変化および間隙水圧の変化を実測し、各々がプラス

* 1 工学研究科土木工学専攻博士課程後期

* 2 ライト工業株式会社

* 3 工学部土木工学科助教授

ティック収縮に及ぼす影響を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびセメントペースト・モルタルの製造方法

セメントは、Table 1 に示す市販の普通ポルトランドセメントを使用した。Table 1 の鉱物組成は、セメントの化学成分から Bogue 式により算出した値である。セメントペーストおよびモルタルの水結合材比(W/B)は、20、40%とし、20%の場合のみシリカフューム(SF)をセメントに対し内割で 10%置換し、高性能 AE 減水剤(ポリカルボン散系高分子界面活性剤)を 6.0(B×wt%) 添加した。また細骨材は、砕砂(富士川産、密度: 2.63g/cm³、粗粒率:3.02)を使用し、表面乾燥状態のものをモルタルに対する容積比(V_s)で 0、25、37.5(%)混入した(V_s=0%はセメントペースト)。セメントペーストの練混ぜ方法は、公称容量 20ℓ のホバート型モルタルミキサを用い、水およびセメントの投入後、低速で 1 分間、高速で 2 分間練り混ぜた。モルタルの場合は、その後、細骨材を投入し 1 分間高速で練り混ぜを行った。練混ぜ水の温度を調節し、すべてのセメントペースト、モルタルの練り上がり温度を 20±2℃とした。

Table 1 Used ordinary portland cement

| Density (g/cm ³) | Blaine (cm ² /g) | Mineral composition (%) | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF | CaSO ₄ |
| 3.16 | 3,460 | 62.6 | 12.7 | 8.3 | 8.6 | 4.0 |

2.2 測定機器

(1) 試作埋込みひずみゲージ

本研究では、極初期からのセメントペーストのひずみを測定するために、試作埋込みひずみゲージを用いた。これは、平尾らが提案した方法⁹⁾を参考に、ゲージ長 30mm のポリエステル箔ゲージをシリコンシーラントで防水被覆し試作したものである。また、この試作ゲージの検証を行ったところシリコンシーラントが吸水膨張することが判明した。そこで、この吸水による膨張ひずみ量を測定するために、以下の実験を行った。

まず活性度の低い高炉スラグ微粉末(密度: 2.91 g/cm³、比表面積: 4,160cm²/g)を用いて、W/B=20%および W/B=40%のセメントペーストと水-粉体容積比が同一となる水-高炉スラグ微粉末ペーストをそれぞれ製造する。後述する型枠に本試作埋込みひずみゲージを設置し、上記の高炉スラグペーストをそれぞれ打込み、打込み面を密封した条件で試作埋込みひずみゲージの吸水膨張に伴う膨張ひずみの経時変化を測定した。

その結果を Fig.1 に示す。Fig.1 より、吸水膨張ひずみは、W/B=20%、40%とも、打ち込み後 2~2.5 時間間に最大値を示し、その後は一定となっている。また、配合による差はほとんど見受けられないことから、水結合材比が異なっても、吸水膨張ひずみは、ほぼ同等になるものと考えられる。本研究ではこうした現象が、セメントペーストおよびモルタルのひずみ測定時においても同等に生じるものと仮定し、以降の実験では両者の平均値を吸水補正值とし、実測値から差し引くこととした。また、本試作ゲージを用いて打込み直後からの自己収縮ひずみを測定した一例を Fig.2 に示す。Fig.2 には比較データとし

て、JCI 自己収縮研究委員会「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)」⁴⁾ および宮澤ら⁷⁾が行った非接触変位計を用いて測定した結果も併せて示した。各データは、供試体条件、使用セメントおよび水セメント比等が異なるため、自己収縮ひずみの絶対値には若干の差はあるものの、材齢に伴う収縮挙動は類似している。このことから、本試作ゲージにより、極初期材齢からのセメントペーストのひずみ挙動を相対的に評価できるものと仮定して以下に用いることとした。なお、本試作ゲージにより測定されたひずみの絶対値の信頼性などについては、その補正方法も含めさらに検討する必要がある。

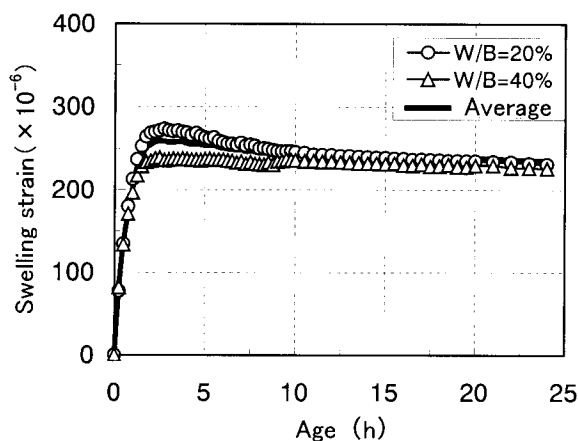


Fig.1 Result of swelling strain of gauges in ground granulated blast furnace slag paste during any age

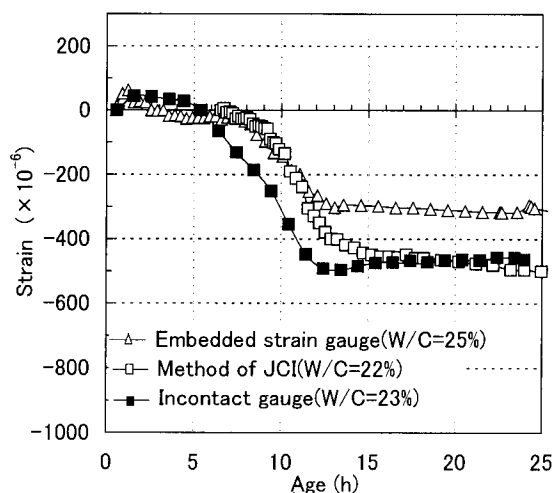


Fig.2 Measured result of autogenous shrinkage

(2) 間隙水圧計

間隙水の負圧の測定には、市販の容量 196kPa (フィルタメッシュ: 40 μm) の間隙水圧計を用いた。しかしこれは、土中や矢板、杭、ポーリング孔における間隙水圧を測定する機器であり、基本的には正の圧力を測定するものである。本研究で目的とする負圧の測定に関しては保証されていないため、Fig.3 に示

すような装置を作製し負圧の測定に関する検証実験を行った。この装置は水を満たした円筒管の一端に間隙水圧計を取り付け、他端からU字真空計を介して真空ポンプで管内に負圧を発生させ、間隙水圧計の値とU字真空計の値とを同時に測定するものである。Fig.4は、本装置を用いて、間隙水圧計とU字真空計から測定された負圧の値を示したものである。Fig.4より両者の値はほぼ一致していることから、本間隙水圧計でも負圧を測定できるものとして以下に用いることとした。

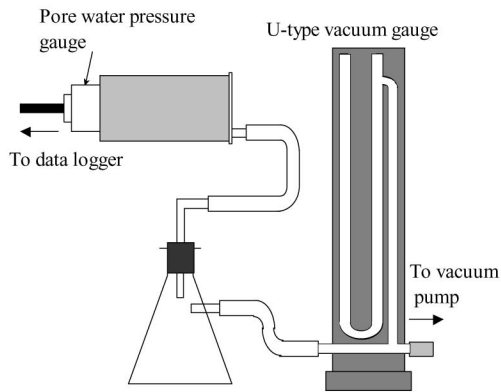


Fig.3 System for inspection of pore water pressure gauge

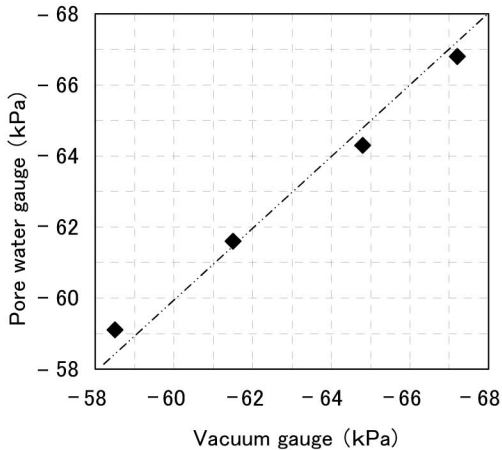


Fig.4 Relationship between vacuum gauge and pore water pressure gauge

2.3 間隙水圧および体積変化の測定

本実験に用いた型枠は Fig.5 および Fig.6 に示す内寸法 100×100×100(mm)の鋼製型枠で、その接合面にゴムパッキンを装着し防水したものを使用した。これに試作埋込ひずみゲージ、間隙水圧計および熱電対をセメントペースト・モルタルの打込み面から25mmおよび50mmの位置に設置し、上部からセメントペーストまたはモルタルを打込み、表面仕上げを行い、間隙水圧および体積変化の測定用供試体とした。また、仕上げ面を鋼製の蓋で密封し、表面からの水の逸散を許さない条件についても行った。なお、以下、上面からの水の逸散を許す条件のものを unseal、上面を密封し水の逸散を許さない条件のものを seal と称することとする。この供試体を温度 20℃、湿度 40% R.H.、風

速 0.45m/s の条件の恒温恒湿槽に unseal, seal 条件のものを同時に静置し、ひずみ、間隙水圧、供試体温度の変化を材齢 24 時間までそれぞれ測定した。なお、ひずみの測定値については、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った。

Placing of cement paste or mortar

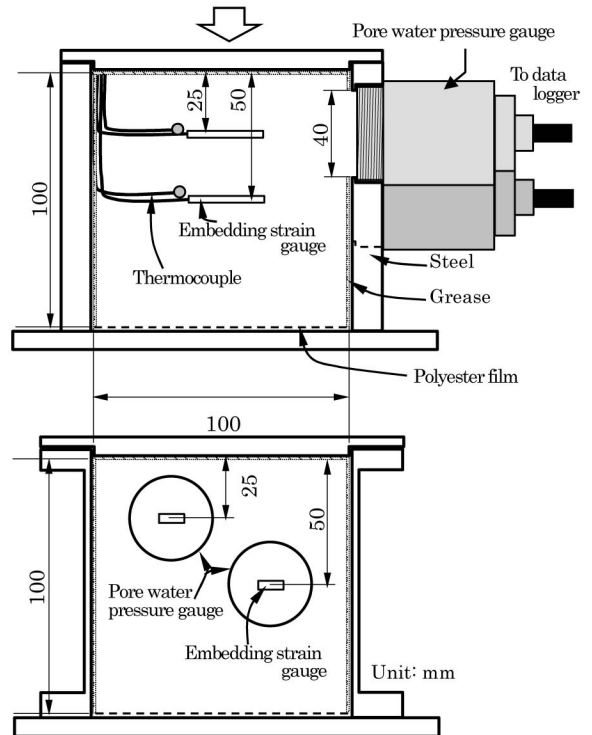


Fig.5 Mold and specimen

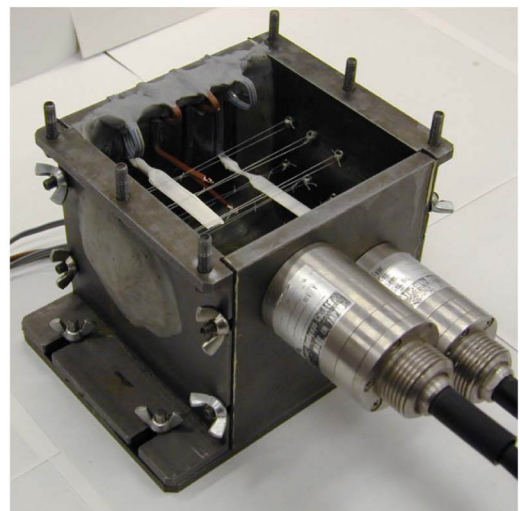


Fig.6 Appearance of mold

2.4 セメントペーストの凝結時間の測定

セメントペーストの凝結時間は、2.1の方法で製造したセメントペーストを、「セメントの物理試験方法」(JIS R 5201-1997)で定める凝結試験に準じた方法で測定した。

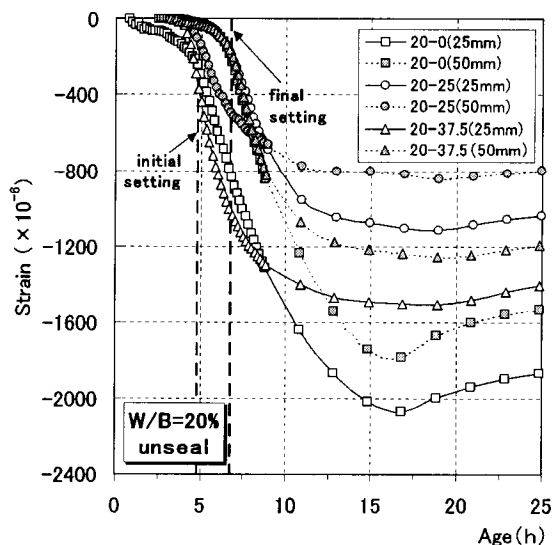


Fig.7 Change of strain of cement paste and mortar during any age (W/B=20%, unseal)

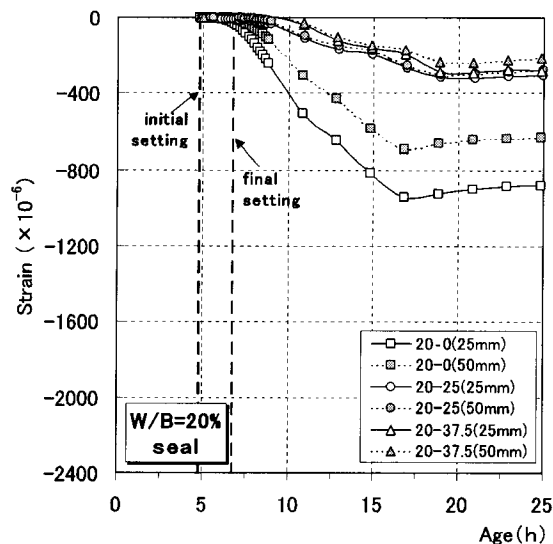


Fig.8 Change of strain of cement paste and mortar during any age (W/B=20%, seal)

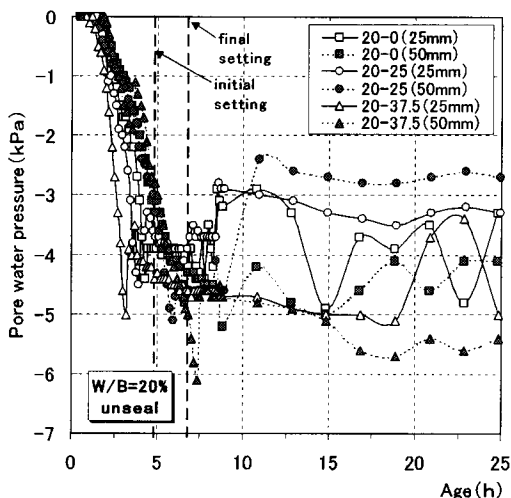


Fig.9 Change of pore water pressure of cement paste and mortar during any age (W/B=20%, unseal)

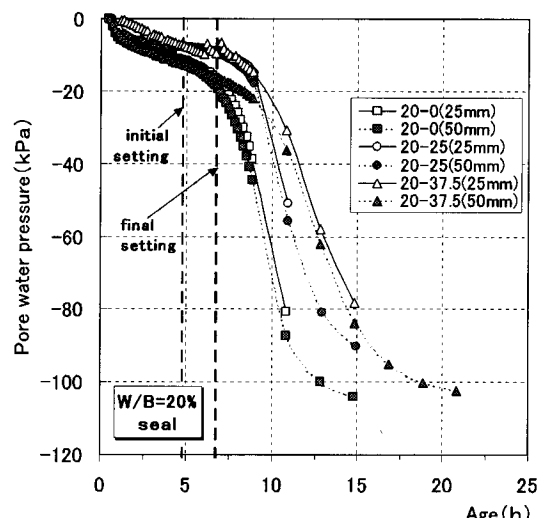


Fig.10 Change of pore water pressure of cement paste and mortar during any age (W/B=20%, seal)

3. 実験結果および考察

2.3 に示す方法でひずみの測定を行った結果、W/B=20, 40%共に、初期に膨張ひずみが観察された。さらにこの膨張ひずみは、細骨材容積比が高いほど大きい傾向であった。これは、骨材の沈降に伴うモルタルマトリックス全体の下方流動が影響しているものと考えられる。つまり、モルタルをセメントペーストマトリックスとインクルージョンで捉えた場合、両者には密度の差があり、インクルージョンである骨材は下方に沈降しようとする。セメントペーストは粘性および付着性を有している為、骨材の沈降と共に下方へ流動し、底部のモルタルを側方へ流動させる。ひずみゲージを配置した水平方向には、結果的に側方流動が生じるため、見かけ上の膨張ひずみが観察されたものと考えられる。これは、細骨材容積比が高いほど膨張ひずみが大きかったことから説明できる。しかし、本研究では、細骨材容積比がプラスチック収縮に与える影響の検討が目的であるため、収縮開始材齢を基準とし、そこからの変化量を評価した。

3.1 水結合材比による影響

W/B=20%の収縮ひずみの経時変化を Fig.7, Fig.8 に、間隙水圧の経時変化を Fig.9, Fig.10 に示す。同様に W/B=40% の場合の測定結果を Fig.11, Fig.12 および Fig.13, Fig.14 に示す。図中の凡例の 20-0(25mm)等は、W/B-V_s(打込み面からの位置)として示すものとする。なお間隙水圧計は測定が不能となった場合、負圧が急激に上昇する傾向を示した。そこで本研究ではその直前までの値を間隙水圧の測定値として示し検討を行った。また各図の始発および終結時間は、セメントペーストの凝結時間である。

W/B=20%の収縮ひずみは、Fig.7, Fig.8 より、unseal は注水時間から 2.5 時間後、seal は始発時から収縮が開始しており、unseal ではより早い段階から水分逸散に伴う乾燥の影響を受けていることが確認できる。また、収縮ひずみの増大は、unseal では始発と終結の間で、seal では終結直後から観察され、材齢 0.5 日以降の増加量は少なかった。unseal においては、上面から 25mm のひずみが、50mm に比べ乾燥の影響を強く受け、収縮量が大きいことが確認できる。

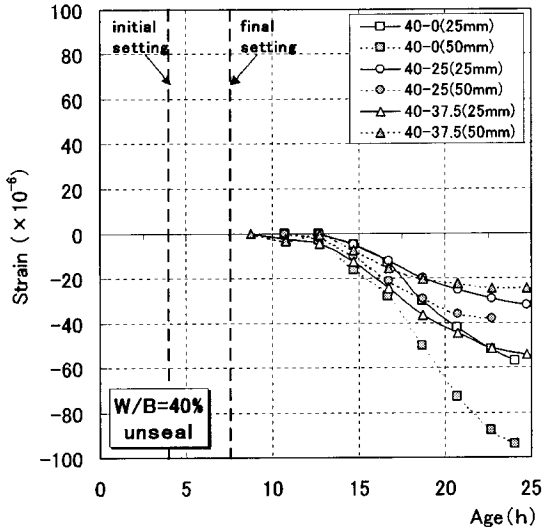


Fig.11 Change of strain of cement paste and mortar during any age (W/B=40%, unseal)

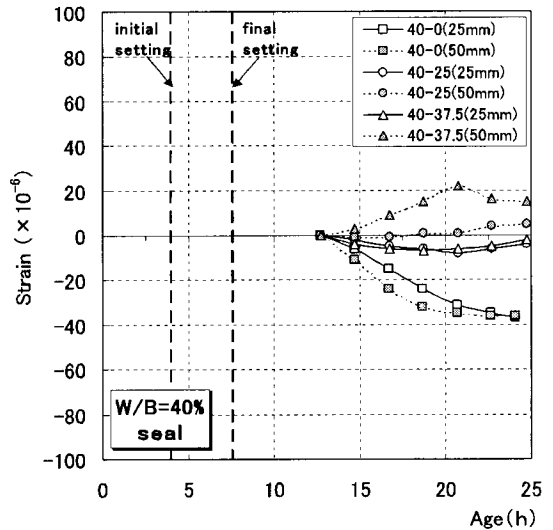


Fig.12 Change of strain of cement paste and mortar during any age (W/B=40%, seal)

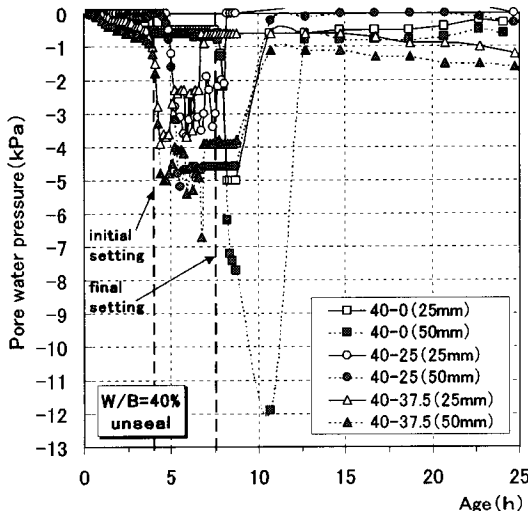


Fig.13 Change of pore water pressure of cement paste and mortar during any age (W/B=40%, unseal)

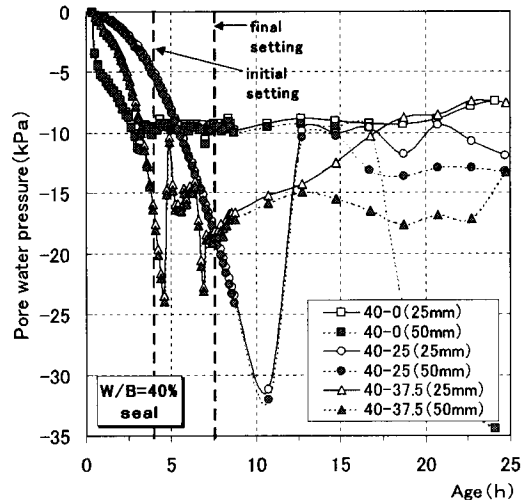


Fig.14 Change of pore water pressure of cement paste and mortar during any age (W/B=40%, seal)

間隙水圧は Fig.9, Fig.10 より, unseal は測定開始から 1~2 時間後すぐに負圧が発生し, 始発前後において -4~-6kPa の範囲まで達すると圧力は上下している。これは, 負の圧力がある一定値を超えると, 表層部を密封していないため負圧が打込み面より開放され, この現象が繰り返されているため図のような挙動として生じていると考えられる。seal の場合は, 打込み直後から負圧が発生し, その負圧が開放されることなく徐々に増大し, 終結直後から急激に -100kPa 前後まで発生した。収縮ひずみと間隙水圧の両者の関係は, unseal, seal とともに定量的には一義的な関係は表れていない。しかし, 打込み面より負圧が開放されない seal の条件では, 収縮ひずみと間隙水圧の増大時期が一致していることが確認できる。

W/B=40% の収縮ひずみは, Fig.11, Fig.12 より, unseal は終結後から収縮が開始している。一方, seal において $v_s = 0\%$ (セメントペースト) は材齢 10 時間以降から収縮が開始しているが, W/B=20% に比べ unseal, seal とともに, 収縮ひずみは大幅に小さいことが確認できる。

間隙水圧は Fig.13, Fig.14 より, unseal では W/B=20% に比べ, 負圧の発生時期が遅く, 打込み直後は, ほとんど負圧は発生せず, 材齢 5 時間前後に急激に発生し, 終結後に増大している。これは, プリーディング水の上昇速度に比較して水の蒸発速度が遅く, 水分の逸散による乾燥が生じにくいことや, 自己乾燥が生じた場合でも, プリーディング水から固相中の空隙内に水分が供給され, 間隙水にメナスカスが生成されないため負圧が大きく発生しなかったものと考えられる。その後セメントの水和によってプリーディング水が消費されたため負圧が急激に発生したと推察される。seal は打ち込み後すぐに急激に負圧が発生する。これは, W/B=20% の場合と同様に, 圧力が開放されることなく負圧が残留した結果である。ひずみと間隙水圧の両者の関係は, W/B=20% の場合とは異なり, unseal, seal とともに間隙水圧が発生後, 収縮開始までにタイムラグが生じている。

W/B=20, 40% の unseal・seal 各々の条件での収縮ひずみの比較では, W/B=20% の場合は W/B=40% に比較し, 自己乾燥に伴う収縮が顕著に生じ, さらには水分逸散による乾燥の影響も極め

て大きく、低水結合材比の場合は、プラスチック収縮が生じやすい条件となっているものと考えられる。また、 $W/B=20\%$ の場合、始発時から収縮が生じるのは、硬化体の骨格形成に伴う収縮応力の導入がこの時期と一致するからであると考えられる。また、材齢 0.5 日以降は、水和の進行に伴い間隙水が不連続になったため収縮量が著しく増加しなかったものと推察される。一方 $W/B=40\%$ は、極初期から間隙水に負圧が発生した場合でも、硬化体としての骨格が形成される時期が遅いため、収縮応力が発生せず、収縮開始材齢が遅れたものと推察される。

3.2 細骨材容積比による影響

$W/B=20\%$ の場合、Fig.7, Fig.8 より、unseal の収縮ひずみは 25, 50mm とともに $V_s = 0, 37.5, 25\%$ の順に収縮量が多い。seal は、25, 50mm とともに $V_s = 0\%$ の収縮量が最も大きく、差は小さいものの 25, 37.5% の順であった。Fig.9, Fig.10 より unseal の間隙水圧は、 $V_s = 37.5, 25, 0\%$ の順に負圧の発生時期が早い。seal では測定開始から材齢 5 時間程度までは、細骨材容積比にかかわらずほぼ同じ挙動を示しているが、5 時間を過ぎると細骨材容積比により差が見られ、材齢 10 時間を過ぎると $V_s = 0, 25, 37.5\%$ の順に負圧が大きくなっている。

$W/B=40\%$ の場合、Fig.11, Fig.12 より unseal の収縮ひずみは、25mm では、最初に $V_s = 37.5\%$ が収縮し始め、 $V_s = 0, 37.5, 25\%$ の順で収縮量が多い挙動を示した。また、それ以外 (unseal-50mm, seal-25・50mm) では、細骨材容積比が低いほど収縮量が大きくなる挙動を示している。Fig.13, Fig.14 より間隙水圧は、unseal では 5 時間前後から、 $V_s = 37.5, 25, 0\%$ の順に負圧が発生している。

細骨材容積比が収縮ひずみに及ぼす影響は、 $W/B=20, 40\%$ 共に unseal 条件では、細骨材容積比に比例して収縮ひずみは減少しなかった。また、unseal 条件の間隙水圧の発生時期は、細骨材容積比の高いモルタルほど早く発生する結果となった。これは、細骨材を混入することにより、セメントマトリックス相の絶対容積の減少により収縮ひずみは低減するものの、細骨材容積比の高いモルタルほどブリーディングの発生量が少なくなり、水分の逸散による乾燥の影響を強く受けた為であると考えられる。また seal では、水分の逸散を許さない条件である為、その影響を受けることなく、収縮拘束効果の影響のみを受けた為、細骨材容積比の高いものほど収縮ひずみが小さくなったものと考えられる。

以上より、細骨材容積比がプラスチック収縮に及ぼす影響は、水分の逸散を許す条件の場合、乾燥の影響を大きく受けるため、その関係が単に細骨材容積比だけからでは説明できないが、水分の逸散を許さない条件の場合、細骨材容積比の増大により収縮が低減することが判明した。

4. 結論

本論文において得られた結論を以下に示す。

- (1) 極初期材齢の収縮の原因は、水分の逸散による乾燥だけではなく、水和反応に伴った自己乾燥にも起因しており、初期よりこの影響を受ける。
- (2) 極初期材齢では、低水結合材比ほど自己乾燥に伴う収縮が大きく、さらには水分逸散に伴う乾燥の影響も強く受ける。

- (3) 低水結合材比の場合、始発・終結頃から収縮ひずみが増大する。また材齢 0.5 日以降の収縮の増加量は少ない。
- (4) 水の逸散を許す条件の場合、細骨材容積比の高いモルタルほど負圧の発生時期が早い。
- (5) 細骨材容積比がプラスチック収縮に及ぼす影響は、水分の逸散を許す条件の場合、乾燥の影響を大きく受けるため、その関係が単に細骨材容積比だけからでは説明できないが、水分の逸散を許さない条件の場合、骨材混入により収縮が低減する。

参考文献

- 1) 宮澤伸吾, 田澤榮一, 中山良治: モルタルのプラスチック収縮特性, 土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.35-36(1985)
- 2) 馬場勇介, 笠井哲郎: 低水比セメントペーストのプラスチック収縮に関する研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.760-761(1998)
- 3) Sellevold, E.: High performance Concrete, Early Volume Change and Cracking Tendency, RILEM International Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, pp.229-236(1994)
- 4) (社)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.191-198(1996)
- 5) 笠井哲郎, コムサン・マレシィー, 岩佐志都: 使用セメントおよび配合条件によるブリーディング率の推定方法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.188-194(2000)
- 6) 平尾宙, 内川浩, 羽原俊祐: 硬化セメントペーストの湿度及び硬化体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)
- 7) 田澤榮一, 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)