

論文 水分逸散及び自己乾燥による高強度コンクリート断面内の水分分布

竹内 崇剛*1・楊 楊*2・河合 研至*3・佐藤 良一*4

要旨：本研究は、水セメント比 25%および 35%の高強度コンクリートを対象とし、水分逸散と自己乾燥によるコンクリート内部の水分分布およびその経時変化を検討したものである。凝結時点を基準とした蒸発可能水量と比抵抗の相対的な変化の関係を表すキャリブレーションカーブを作成し、これを用いて封緘および乾燥開始材齢を変えた供試体の内部水分分布を経時的に求めた。さらに凝結直後から発生する自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみを測定し水分量の変化との関係を検討した。

キーワード：高強度コンクリート、相対含水率、比抵抗、自己乾燥、収縮

1. はじめに

コンクリート中に含まれる水分は、水和の進行、強度発現、収縮およびクリープの進行、中性化、鉄筋腐食などの劣化と深く関わっており、その挙動を正確に把握することは重要である。

高強度コンクリートは、普通強度コンクリートに比べ若材齢から生じる自己収縮が大きく、ひび割れの原因になることが明らかとなっている。しかし、コンクリート内部の相対湿度または相対含水率と関連付けることにより乾燥収縮を評価した研究²⁾は多々あるが、高強度コンクリートについて自己収縮を相対湿度または相対含水率に基づいて評価した研究は少なく、自己収縮のメカニズムの解明には至っていない。

高強度コンクリートについては若材齢から乾燥を受ける可能性があり、水和反応が活発な初期材齢において水分移動に関する基本的性質を把握するためには、自己乾燥の影響を受ける水分の挙動を考慮する必要があると考えられる。

そこで本研究は、自己収縮ひずみ及び乾燥収縮ひずみの定量評価を目的として、コンクリート中の水分挙動に関する基礎的データを求めた

め、W/C25%および 35%の高強度コンクリートを対象とし、供試体条件は封緘および乾燥開始材齢 1, 3, 7 日として実験を行なった。あらかじめキャリブレーション試験を行い、得られたキャリブレーションカーブを用いて供試体内部の電気抵抗を測定することにより水分分布を経時的に求めると同時に収縮ひずみも測定した。また自己収縮ひずみ及び乾燥収縮ひずみと相対含水率の変化の関係について検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験では、W/C25%、35%の高強度コンクリートを対象とした。材料として普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³）、鬼怒川産川砂（表乾密度 2.60 g/cm³、吸水率 1.78%、粗粒率 2.78）および鬼怒川産川砂利（表乾密度 2.58 g/cm³、吸水率 2.15%、粗粒率 6.86）を使用し、高性能減水剤としてポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体を使用した。コンクリートの配合は、W/C25%、35%ともにスランプフロー60cm、空気量 2.0%を目標に決定した。

*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻（正会員）

*2 広島大学大学院助手 工学研究科社会環境システム専攻 工修（正会員）

*3 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻 工博（正会員）

*4 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合

記号	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				高性能減水剤 SP (C×%)
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
C-25	20	60	2.0	25	39	167	667	602	956	1.10
C-35	20	60	2.0	35	41	169	483	691	1011	0.85

実験で用いた配合を表-1に示す。

2.2 相対含水率と相対比抵抗の関係

本論文では、凝結時の蒸発可能水量に対する各水分状態における蒸発可能水量の百分率を相対含水率と定義し、供試体内部の水分状態を表すこととした。また同様に凝結時の比抵抗に対する各水分状態の比抵抗の比を相対比抵抗と定義する。キャリブレーション試験においては、供試体断面内の水分分布を極力小さくする目的で、粗骨材には最大寸法 10mm、粗粒率 5.38 のものを用い、寸法 30×50×200mm の小型供試体を作製した。これを用いて内部の水分状態を表す相対含水率と相対比抵抗の関係を求めた。

(1) 比抵抗

図-1に示す、ステンレス (SUS304) 製の電極を小型供試体中央に埋込み、凝結直後から 50℃の乾燥炉で乾燥を開始した。乾燥時間を変えて相対含水率 100, 80, 60, 40, 20, 5%を目標に調湿した。乾燥炉から取出し、直ちにアルミ箔粘着テープでシールをし、供試体温度が 20℃になるまで恒温室に静置した後、LCR メータを用いて電気抵抗および供試体温度を測定した。測定は、分極を避ける目的³⁾で印加電圧は交流 1V、周波数は 1kHzで行なった。また電極形状の補正のため、電気抵抗 R は形状係数 C[1/cm]を用いて比抵抗 ρ に換算した。

$$R = C \rho \quad (1)$$

電極の形状係数 C は比抵抗 ρ が既知の水溶液中で電気抵抗 R を測定することにより求めた。1%NaCl 水溶液 (25℃, 60[Ωcm]) を用いて測定した結果、本実験で用いた電極の形状係数は、 $C=0.109[1/cm]$ であった。

(2) 蒸発可能水量及び結合水量

電気抵抗測定と同時に、50℃炉乾燥で相対含

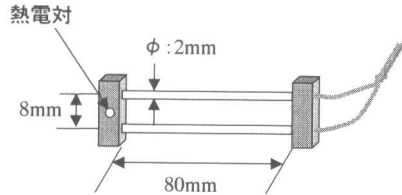


図-1 電極形状

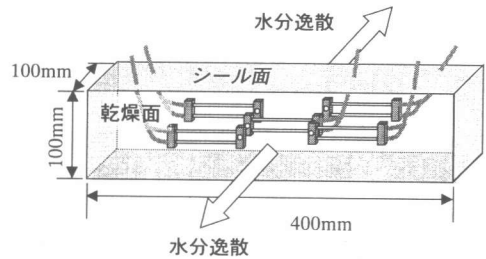


図-2 水分分布試験供試体概要

水率を調整した供試体を粉砕し、2.5mm のふるいを通過した試料約 40g を採取し、質量測定後直ちにアセトンに繰返し浸漬し、水和反応を停止させた。その後 50℃の乾燥炉で質量変化がなくなるまで約 3 日間乾燥させ、逸散水分量を蒸発可能水量とした。ここでは、105℃炉乾燥によるゲル水の蒸発を避ける目的で 50℃を採用した。その後、試料を 1000℃の乾燥炉で 24 時間加熱して強熱減量を求め、さらに強熱減量測定後の試料を約 200ml の 10%HCl 水溶液に入れ、攪拌しながら 6 時間硬化セメントペーストを溶解させた。不溶残分を再び 1000℃の乾燥炉で 3 時間加熱した。以上より、硬化セメントペーストがすべて溶解するとし、骨材の溶解率を補正すれば、セメント 1g あたりの蒸発可能水量及び結合水量が求められる。

2.3 水分分布

供試体の概要を図-2に示す。供試体は、封

緘および乾燥開始材齢 1, 3, 7 日の 4 条件とした。水分移動が 1 次元的となるように乾燥面は 2 面とし、乾燥面からの距離が 5, 15, 25, 35, 50mm となるように電極、熱電対を埋込み、凝結時から経時的に電気抵抗及び供試体温度を測定した。供試体に埋込んだ電極の電気抵抗を測定し、既往の研究⁴⁾に従い温度補正を行った。キャリブレーションカーブを用いて各断面の相対含水率を求めた。

2.4 自己収縮および乾燥収縮

供試体の寸法は 100×100×400mm とした。長さ変化の測定は、JCI 自己収縮研究委員会「自己収縮および自己膨張試験方法 (案)」に準じて行い、測定には高感度変位計(1/1000mm)を用い、脱型後は JIS A 1129 に規定されるコンタクトゲージ法を用いた。

2.5 環境条件

実験を行なった試験室の環境条件は図-3 に示す通り、概ね温度は $17.5 \pm 2.5^\circ\text{C}$ 、湿度は $50 \pm 10\%$ であった。

3. 実験結果および考察

3.1 キャリブレーションカーブ

W/C25%、35%の相対含水率と相対比抵抗の関係を求めたキャリブレーション試験の結果を図-4 に示す。その値を回帰した近似式も同時に示す。近似式は W/C25%が式(2)、35%が式(3)で表され、相関係数はそれぞれ 0.9915, 0.9786 であった。このことから相対比抵抗と相対含水率は強い相関があると考えられ、求めたキャリブレーションカーブを適用してコンクリート内部の相対含水率を推定することの妥当性を示しているといえる。図-5 にキャリブレーション試験を行なった各時点の結合水量を示す。炉乾燥によるキャリブレーション試験において結合水量の増加が見られ、コンクリート内部の水分分布を求める際に、水和反応の進行に伴う水分状態の変化を考慮できると考えられる。

$$\ln(P) = 7.936 - 1.723 \ln(W) \quad (2)$$

$$\ln(P) = 6.905 - 1.500 \ln(W) \quad (3)$$

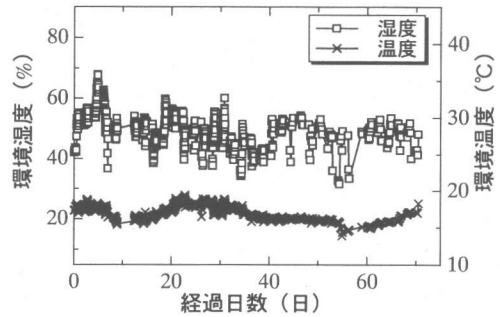


図-3 環境条件

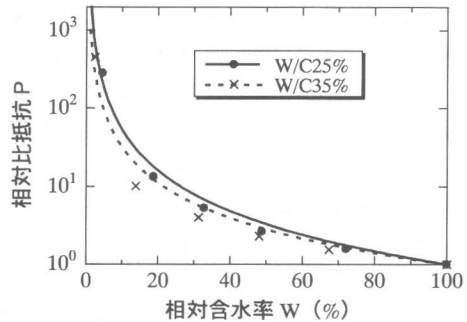


図-4 キャリブレーションカーブ

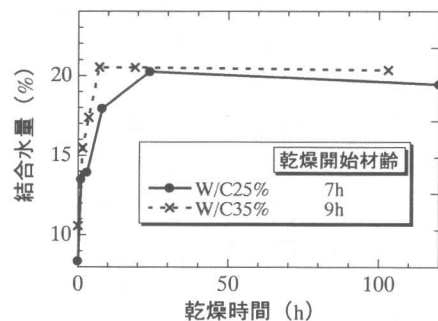


図-5 結合水量

3.2 水分分布

W/C25%および 35%の各乾燥条件下における相対含水率の経時変化をそれぞれ図-6、図-7 に示す。封緘供試体の相対含水率の経時変化は供試体表面からの距離に関わらず乾燥供試体中央の経時変化とほぼ一致したため、図から省いた。また、W/C25%および 35%の各条件下における供試体の相対含水率分布を図-8、図-9 に示す。W/C25%の場合、材齢 1 日で乾燥開始

した供試体については、乾燥面からの距離が15mmまで乾燥の影響を受けていることが分かるが、乾燥開始材齢3, 7日の供試体は乾燥面からの距離が15mmになると材齢28日においても乾燥の影響は見られず、乾燥開始材齢1, 3, 7日の順に乾燥の影響を受ける深さは、15, 5, 5mmであった。一方、W/C35%の場合、乾燥開始材齢1, 3, 7日の順に乾燥の影響を受ける深さは、材齢25日において25, 25, 5mmであった。

図-8によると、W/C25%の乾燥開始材齢1日供試体については材齢約2日までの若材齢において、供試体中央の相対含水率が乾燥面から35mm, 25mmでの相対含水率と比較して若干小さかった。しかしこの差は相対含水率で約3%と小さく、他の供試体において同様の傾向が見られなかったこと、ならびに打設後の水和発熱に伴う、断面内での温度差はW/C25%で最大0.8℃、W/C35%で0.5℃であったため、水分分布に影響を及ぼすほど水和反応の進行に差がなかったことを考慮したとき、急激な水和反応によりセメント硬化体が乾燥状態になっていることが原因とは考え難い。本研究で用いた供試体寸法より大きな部材の場合、供試体断面内での温度差も大きいことから、さらに水和反応の温度依存性を検討する必要があると考えられる。

3.3 自己収縮及び乾燥収縮

図-10, 図-11に、W/C25%, 35%の各条件下における全収縮ひずみを示す。高感度変位計により測定した脱型以前の長さ変化は、線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を用いて温度ひずみを補正した値である。両配合ともに凝結直後から自己収縮ひずみが急激に増加し、乾燥開始後は乾燥の程度に応じて収縮が増加している。収縮供試体の質量変化率は乾燥開始材齢1, 3, 7日の順に小さくなったのに対し、W/C25%の場合、収縮ひずみは乾燥開始材齢3, 1, 7日、封緘の順に小さくなり、W/C35%については乾燥開始材齢1, 3, 7日、封緘の順で小さくなった。この理由としては、乾燥を開始する材齢において、供試体

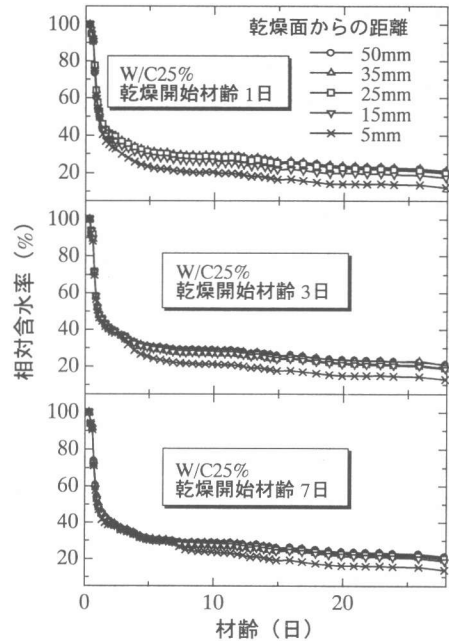


図-6 相対含水率の経時変化

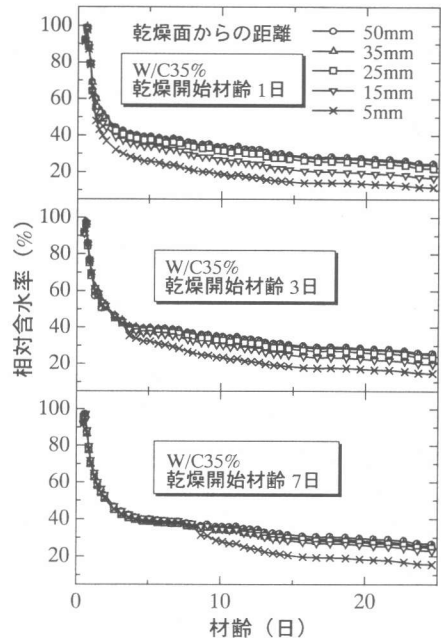


図-7 相対含水率の経時変化

の密度が異なるため、相対的に見た場合、乾燥開始材齢1日の供試体に比べ乾燥開始材齢3日の方が比較的小さい細孔が多いと考えられる。すなわち、W/C25%の乾燥開始材齢1日の場

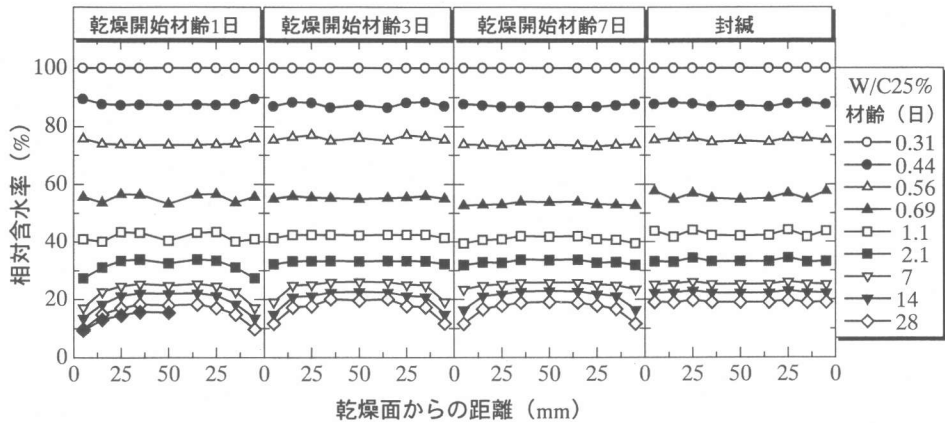


図-8 相対含水率分布

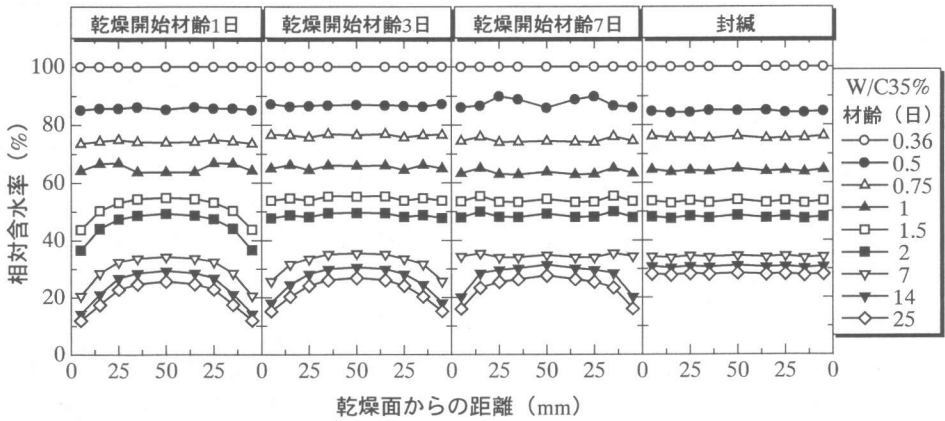


図-9 相対含水率分布

合、乾燥の影響が大きいいため、水和が阻害され、そのために生じる自己収縮の減少、および細孔構造の相違による毛細管張力の低下から、全収縮としてみた場合、乾燥開始材齢が1日より3日の方が大きい結果となった。封緘供試体を除いた供試体の相対含水率がほぼ等しいが、収縮ひずみが異なる。これも細孔構造の相違が理由として考えられる。したがって相対含水率に基づいて収縮ひずみを評価する際には、水和生成物や細孔構造の把握が必要になると考えられる。断面内で平均化した相対含水率と収縮ひずみの関係を図-12、図-13に示す。W/C25%は相対含水率45%、W/C35%は相対含水率40%付近に変曲点をもつことから、2直線で近似することにより比較的精度よく収縮ひずみを求めるこ

とが可能であると考えられる。表-2に2直線近似した結果を示す。変曲点を示す材齢はW/C25%が約1.5日、W/C35%が約4日であった。これは水和反応により内部構造が緻密になることと、ある程度乾燥が進むと、より小さい径の細孔からも水分の蒸発し始めることから、大きな毛細管張力が働き、同じ相対含水率の変化量に対しても、収縮量が異なる結果となる。

表-2 相対含水率の変化量あたりの収縮ひずみ

W/C	相対含水率(%)	収縮ひずみ変化量($\times 10^{-6}$) /相対含水率変化量(%)
25%	100-45	2.68
	45-18	14.49
35%	100-40	2.27
	40-19	17.33

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 水和反応による水分の消費を考慮して相対含水率と相対比抵抗の関係を求め、凝結直後からコンクリート内部の水分分布を求めた。
- 2) 本実験に用いた供試体寸法においては、水和反応による断面内の温度差が小さく、自己乾燥による水分分布は小さい。部材厚が大きい場合はさらに、水和反応の温度依存性について検討が必要と思われる。
- 3) 高強度コンクリートが若材齢から乾燥を受けた場合、乾燥を受ける深さは乾燥開始材齢によって異なり、W/C25%の場合材齢28日で5~15mm、W/C35%の場合材齢25日で5~25mmであった。
- 4) セメント硬化体は材齢と共に密実になるため、W/C25%、35%それぞれ、相対含水率45%、40%を境界に相対含水率の変化量に対する、収縮ひずみが異なる。W/C35%の場合材齢25日で5~25mmであった。
- 5) 相対含水率の変化量に基づき、収縮ひずみの変化量を予測する場合、細孔構造の把握が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 田澤榮一・宮澤伸吾ら：コンクリートの自己収縮，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.14, No.1, pp.561-566, 1992
- 2) 例えば，阪田憲次・蔵本修：乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究，土木学会論文集，第316号 pp.145-152, 1981.12
- 3) 桂修・吉野利幸・田畑雅幸・鎌田英治：交流2電極法によるコンクリート中の含水率測定についての理論的検証，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.735-740, 1994
- 4) 田中良樹・河野広隆・丁海文・鹿島孝之：硬化コンクリートの比抵抗と含水率の関係，土木学会第55回年次学術講演概要集，V-266, 1999

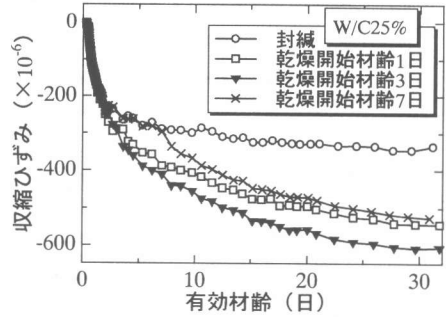


図-10 収縮ひずみ

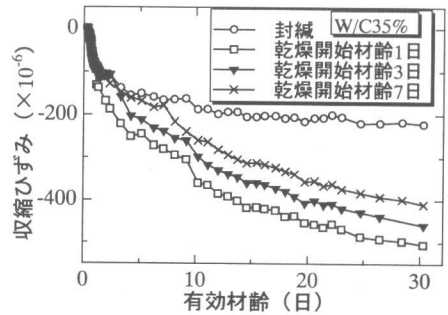


図-11 収縮ひずみ

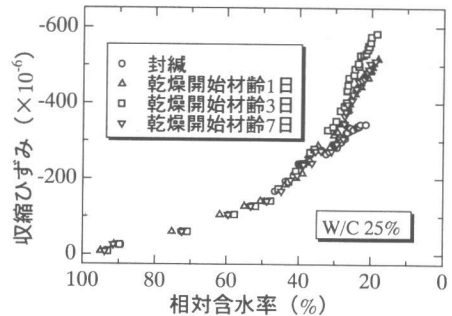


図-12 相対含水率～収縮ひずみ関係

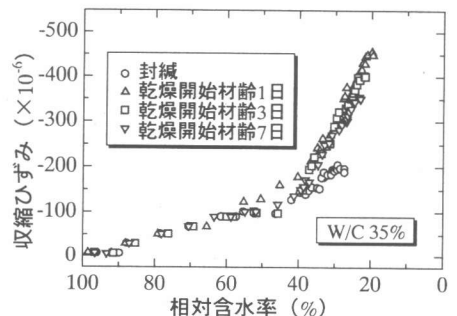


図-13 相対含水率～収縮ひずみ関係