環境条件の変動に伴うコンクリート中の水分分布に関する研究

ひび割れの有・無がコンクリート中の水分分布に及ぼす影響

STUDY ON THE MOISTURE DISTRIBUTION IN CONCRETE ASSOCIATED WITH
CHANGE OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Effect of crack on the moisture distribution in concrete

柳 東 佑*, 高 正 遠*, 兼松 学**, 野口 貴文***
*Dong Woo RYU, Jeong Won KO, Manabu KANEMATSU
and Takafumi NOGUCHI*

Regarding durability of concrete, it is important to predict the state of moisture in concrete which is influenced by outside environment. Various deterioration in reinforced concrete structures are caused by moisture movement which is governed mass transfer property of concrete. Moreover, the moisture movement and the reaction velocity of deterioration agent are also influenced by the state of moisture in the concrete. Crack in concrete makes the deterioration agent to easily penetrate into the concrete and causes the reduction of durability of concrete structures. The purpose of this study is to make clear the effect of change in the outside environmental conditions, i.e. temperature and relative humidity, on the moisture distribution inside the concrete by experimental investigation using electrodes and relative humidity sensors embedded in the inner part of concrete. And the moisture distribution is also compared between the concrete.

Keywords : *Temperature, Relative humidity, Relative moisture content, Moisture transfer, Crack, Concrete*

温度, 相対湿度, 相対含水率, 水分移動, ひび割れ, コンクリート

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久設計に関して、仕様規定型から性能規定型への移行が指向される中で、その劣化メカニズムの定量的な把握と高度なモデル化が要求されている¹⁾。コンクリート構造物の耐久設計を確実に実施するためには、外部環境条件に応じてコンクリート中の水分状態を正確に予測することが非常に重要である。なぜならば、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、凍害などの劣化現象は、ほとんどが水分を媒介とした物質移動現象に起因しており、その水分状態によって劣化因子の移動速度や反応速度が大きく左右されるためである。すなわち、コンクリート構造物の劣化現象を定量的に予測するためには、コンクリート構造物が曝される環境条件とコンクリート中の水分移動特性を関連付けて把握しなければならない。

しかしながら、多孔性材料の物理的性質に影響を及ぼす水分の表面張力、密度、粘性などは、温度に依存しており、さらにそれらの相互作用はコンクリート中の水分移動に直接影響を与える。そのため、その移動メカニズムは非常に複雑なものとなっており、コンクリート中の水分移動現象を正確に把握することが困難となっている。

既往の水分移動の研究では、コンクリート中の含水状態が弾性

係数、クリープ、乾燥収縮などの力学的挙動に著しい影響を与えることから、主に乾燥収縮に関する分野で古くから多くの研究が行われてきた²⁾³⁾⁴⁾。また、コンクリート中における水分の拡散係数は、コンクリート中の水分の存在状態に依存しており、含水率や相対湿度が大きいほど大きな値となることが、実験的・理論的に確かめられている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。しかし、コンクリート構造物が曝される実際の環境条件では、乾燥のみならず、温度・湿度の周期的な変動によって乾燥過程・吸湿過程が連続的に繰り返されている。さらに、降雨時には雨が液状水の状態でコンクリート中に直接侵入するため、乾燥や吸湿に比べてコンクリート中の含水率を大きく変化させる。また、実際のコンクリート構造物では水分移動と熱移動が共存するため、温度の水分移動への影響も考慮すべきであるが、温度勾配下の水分移動の影響を検討した研究は少ない。

一方、コンクリートのひび割れ発生は劣化因子の浸透が容易となるため、耐久性を著しく阻害することが指摘されている⁸⁾が、ひび割れと耐久性（主に中性化や塩害による鉄筋腐食）に関する問題は、ひび割れ幅とコンクリート中の鉄筋腐食の因果関係を肯定する見解と明確ではないとする見解に分かれている⁹⁾。また、ひび割れ中の物質移動に関する研究は、透気試験や透水試験を通じてその影響を評価したものがほとんどであり、ひび割れ部での

* 東京大学大学院建築学専攻 大学院生・工修

** 東京理科大学建築学科 講師・博士(工学)

*** 東京大学大学院建築学専攻 助教授・博士(工学)

Graduate Student, Dept. of Arch., The Univ. of Tokyo, M. Eng.

Assist. Prof., Dept. of Arch., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Arch., The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

水分移動と関連付けた研究は少ない。

劣化現象の定量的予測手法および鉄筋コンクリート構造物の耐久設計手法を確立するためには、使用環境下におけるコンクリート中の水分の存在状態および変動状況の把握が不可欠であるが、以上のように、周期的な温度・湿度変化におけるコンクリート中の水分挙動を総合的に検討した例はあまり見当たらない。また、コンクリート中の水分の存在状態は通年的（季節間変動）にも短期的（日内変動）にも変動するが、水分移動に伴う劣化因子の移流を考える上では、短期的な変動の方が重要である。

したがって、本研究では、外部環境条件（温度、相対湿度）の日内における周期的な変動がコンクリート中の水分分布に及ぼす影響を明らかにするため、電極法による相対含水率の測定および湿度センサーによる相対湿度の測定を行うとともに、ひび割れの存在の有無がコンクリート中での水分分布に及ぼす影響に関して実験的に検討した。ここで、同じ飽水状態でも試験体により含水率に差が生じるので、本研究では、試験体に実際に含まれている含水量の飽水状態の含水量に対する比を「相対含水率」と定め、比較検討の指標とした。

2. 実験概要および測定方法

2.1 実験概要

図1に示すように、試験体の形状・寸法は30×30×10cmの角柱試験体とし、水セメント比は30%、60%の2水準とした。また、試験体の種類はひび割れの無い試験体と曲げひび割れを有する試験体の2種類とした。乾燥過程における質量変化および含水率は、直径10cm、高さ10cmの円柱試験体を用いてその質量差から求めた。測定位置に関しては、電極および熱電対は乾燥面（開放面）から1、3、5、7、9cmの深さとし、湿度センサーは1、3cmの深さとした。相対湿度の測定は、ひび割れの無い試験体のみ行った。養生方法については、測定期間中の水和による水分の消失および空隙構造の変化を避けるため、材齢1日で脱型を行い、材齢30日まで水中養生（温度60℃）を行った。また、試験体の内部温度が平衡状態（温度20℃）となるまで10日間水中冷却させた。開放面（打設上面30×30cm部分）以外の熱および水分の移動を避けるため、開放面を除く5面にエポキシ樹脂を塗布し、発泡スチロールを用いて断熱した。その後、実構造物においての水分移動は、主に不飽和状態で生じていると仮定し、前処理として恒温恒湿室（20±0.5℃、60±1%RH）で45日間試験体を乾燥させた後、実験を行った。

図1 試験体の形状・寸法

一方、曲げひび割れを有する試験体は、予めD16mmの異形鉄筋を開放面から5～7cmの深さに1本配置し、水中養生（60℃）後40℃に調節した乾燥機で5日間乾燥させたものを図2のように載荷し、コンクリート中央部の電極位置に非貫通の曲げひび割れを導入した。この時、パイ型変位計を用いて平均ひび割れ幅が0.1mmおよび0.3mmに達した時点で載荷を終了し、ひび割れ幅と同じ厚さのステンレス板をひび割れ開口端部にそれぞれ挟み、曲げひび割れ幅を制御した。しかし、除荷後のひび割れ幅は、ひび割れ開口両端の距離が長いので、端部からの制御のみでは限界があった。表1に最終的な表面ひび割れの幅および深さを示す。

また、平均ひび割れ幅および深さは、デジタルカメラで撮影した画像から画像処理ソフトウェアを用いて算定した。平均ひび割れ幅はひび割れ面における等間隔の10点の平均値より求め、平均ひび割れ深さは試験体両端面で測定したひび割れ深さの平均値とした。なお、ひび割れの無い試験体と同じように飽水状態からの乾燥に伴う含水状態の経時変化を検討するため、曲げひび割れを導入した後、10日間再び水中に浸漬させた。

表2に実験因子および水準を示す。また、表3および表4に、それぞれ使用材料およびコンクリートの調合を示す。

図2 曲げ試験による曲げひび割れ試験体

表1 曲げひび割れ試験体のひび割れの幅・深さ（単位：mm）

W/C(%)	平均ひび割れ幅	最大ひび割れ幅	平均ひび割れ深さ
30	0.11	0.15	59
	0.22	0.30	84
60	0.10	0.15	58
	0.18	0.25	86

表2 実験因子および水準

因子	水準
W/C	30%、60%
試験体の種類	ひび割れの無い試験体 ひび割れ（幅0.1mm、幅0.2mm）試験体
測定項目	温度、相対湿度、相対含水率

表3 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm ³ ）
粗骨材	青梅産硬質砕岩砕石（表乾密度2.65g/cm ³ ）
細骨材	大井川水系陸砂（表乾密度2.59g/cm ³ ）
化学混和剤	AE減水剤

表4 コンクリートの調査表

W/C (%)	W (kg/m ³)	質量(kg/m ³)			s/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	AE 減水剤 (C×%)
		C	S	G				
30	170	567	769	855	48	21.0	3.2	0.75
60	170	283	825	1035	45	14.5	3.7	0.5

2.2 測定方法

試験体中に直径 6mm の湿度センサーを埋め込み、直接コンクリート中の相対湿度を測定するとともに、熱電対および含水率測定用の電極を埋め込み、コンクリート中の温度および電極間抵抗の経時変化をデータロガーおよび LCR メーターを用いて連続に測定した。

2.2.1 内部湿度の測定方法

既往の文献¹⁰⁾に見られる湿度センサーを用いた測定方法では、高含水域での測定が困難であることから、本研究では小型湿度センサー（直径 6mm）に透湿性シートで防水処理を施すことにより高含水時からの測定を可能とした。湿度センサーの処理は図3のように、直径 8mm（内径 6mm）のアクリルパイプ中に湿度センサーを挿入し、Oリングを挟み込んでパイプと湿度センサー間の隙間をシールし、外部および測定部分からの湿気が漏れることを阻止した。また、先端部は液状水の浸透を防ぐために、透湿性シートで防水処理を施した。予備実験を通じて確認した結果、高含水域での長期間測定では高湿度（99.9%RH）が維持されることから、センサー内部の電子回路基板が劣化することが明らかとなった。そのため、湿度感知センサー部を除いた基板部分にはマニキュアを塗布して高湿度による基板の損傷を防止した。本研究で使用する湿度センサーの相対湿度測定範囲は 10～95%RH、測定精度は±1.5%（15～35℃、30～90%RH）である。

図3 相対湿度センサーの処理

2.2.2 相対含水率の推定

電極によるセメント硬化体の含水率測定方法は、十代田らの研究¹¹⁾、鎌田らの研究¹⁰⁾をはじめ、数多くの研究が報告されているが、本実験では一瀬らが提案した測定方法¹²⁾を用いた。

電極は図4に示すように、ステンレス製電極棒 SUS304（φ=1.5mm、d=8.3mm、L=80mm）を使用した。測定に関しては、分極を避ける目的¹³⁾で、印加電圧を交流 1V、周波数を 1kHz と設定し、LCR メーターを用いて電極間抵抗を測定した。

相対含水率推定のためのキャリブレーション試験は、寸法 4×4×16cm の試験体を用いて行った。また、相対含水率の目標値を 100、85、70、55、40、25% の 6 水準に設定し、所定の相対含水率に達した試験体は、直ちにアルミテープで巻いた後、エポキシ樹脂で密封し、内部水分が平衡状態になるまで恒温恒湿室内（20

±1℃、60±1%RH）に1ヶ月間静置した。その後、温度ごとによるキャリブレーション試験を実施した。本研究で用いた相対含水率は式(1)によって算出した。

$$RM (\%) = \frac{W - W_{dry}}{W_{sat} - W_{dry}} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 RM : 試験体の相対含水率、 W : 試験体の気乾質量(g)、 W_{dry} : 試験体の絶乾質量(g)、 W_{sat} : 試験体の飽水質量(g)である。

図4 電極の形状

図5に温度ごとの相対含水率と電極間抵抗の関係を示す。この関係に基づき求めた近似式を用い、電極によって測定された電極間抵抗値を相対含水率に換算して評価した。

図5 キャリブレーションカーブ

2.2.3 模擬環境条件

図6に示す模擬環境条件としては、東京都の過去30年間の気象庁統計¹⁴⁾¹⁵⁾を参考に夏（21.9～28.3℃、57～89.7%RH）の気象環境を模擬した。過去の統計より、昼間の気温が最高値になる午後1時前後を 28.3℃、57%RH とし、夜間は気温が最低値になる4～5時を 21.9℃、89.7%RH とした。1サイクルは大気気象条件と同じ24時間とした。

図6 模擬環境条件

3. 実験結果および考察

3.1 乾燥に伴うコンクリート中の相対含水率分布の経時変化

図7に飽水状態の試験体を、恒温恒湿（20±0.5℃、60±1%RH）環境下で45日間乾燥した場合のコンクリート中の相対含水率分

布の経時変化を示す。飽水しているコンクリートが乾燥を受けると、表面から水分の蒸発が生じる。このような蒸発を熱力学的観点から見ると、雰囲気環境湿度が100%に満たない場合、不安定な液相は気相に状態変化する傾向を持つと言え、これは大気中の蒸気圧を飽和させるように、液相の表面から自発的に気化する現象である¹⁶⁾。この蒸発量は、与えられた環境条件に応じて内部からの水分の供給速度の低下に伴って徐々に減少し、表層部では乾燥が進行する。これは、気液相変化の位置が蒸発によって表層部から徐々に内部に向かって後退し、乾燥初期の液状水移動よりも毛細管水の連続性が絶たれる不飽和領域での水蒸気移動が卓越する¹⁷⁾ことを意味する。このような水分の供給速度（または蒸発速度）は水分移動の経路である毛細管空隙の構造および毛細管空隙の連続性によって大きく支配される¹⁸⁾と考えられる。

上記の考察は本実験結果を示した図7および図8においても現れていると考えられ、図7に示すように、相対含水率は、試験体の種類に関係なく、表層部に近いほど、各乾燥材齢において乾燥開始とともに、急激に減少する傾向を示した。

図7 乾燥によるコンクリート中の相対含水率分布の経時変化

図8 乾燥過程における質量変化

また、すべての試験体において、乾燥初期での相対含水率の減少が著しく、その後、相対含水率の減少幅は一定値に収束する傾向を示した。このような傾向は、図8の乾燥材齢と水分蒸発量との関係においても同様であり、水分の拡散係数が含水率に依存していることを考えると、水セメント比60%の場合、含水率70~80%程度以下になれば、水分の拡散係数は顕著に減少するという阪田らの実験結果⁶⁾とほぼ同じ結果が得られた。

ひび割れの無い場合、乾燥開始前の相対含水率は、水セメント比60%では深さ9cmを除いたすべての深さで100%の値を示したのに対し、水セメント比30%ではすべての深さで100%にならなかった。これは、水中養生にもかかわらず養生水が表層部だけにしか浸透せず、試験体内部は水和による自己乾燥状態となるために生じた現象¹⁹⁾と考えられる。また、水セメント比60%の場合より水セメント比30%の方が、乾燥に伴う相対含水率の減少は緩やかな傾向を示した。これは、水セメント比30%の場合、自由水量（蒸発可能な水分量）が少なく、空隙構造が緻密であることにより、外部への水分の逸散が抑制された²⁰⁾ためと考えられる。

一方、ひび割れのある場合、水セメント比30%ではひび割れ面が新たな水分の移動経路になって大気中に水分が逸散しやすくなるため、ひび割れ幅が大きいほど、表層部に近いほど相対含水率の減少幅が大きくなる傾向が見られた。しかし、水セメント比60%の場合は、表層部に近いほど相対含水率の減少が若干速い傾向を示したものの、水セメント比30%と比べると乾燥に伴う相対含水率の減少に対するひび割れの影響は顕著ではなかった。これは、乾燥環境下ではひび割れ面だけではなく毛細管空隙を通じても水分移動が生じたため、表層部から急激に相対含水率が減少したものと考えられる。また、水セメント60%の場合について、これを深さごとに比較すると、ひび割れ幅0.2mmの場合にはひび割れの無い場合と概ね等しい経時変化が見られたが、ひび割れ幅0.1mmの場合には深さ5~7cmの範囲で相対含水率が高くなった。これは、ひび割れ試験体を、ひび割れの無い試験体と同じように最初に飽水状態とするため、ひび割れ導入後、再び水中に浸漬させた結果、ひび割れを有する試験体では、ひび割れ幅に関わらずひび割れの無い試験体よりも内部まで水分が浸透するが、乾燥過程においては、ひび割れ幅0.1mmの試験体では、コンクリート内部から表面への水分移動が、ひび割れ幅0.2mmの試験体よりも緩慢であったことが原因であると考えられる。以上より考えるとひび割れ幅0.2mmの試験体は、見かけ上、ひび割れの無い試験体と同様の挙動を示したが、実際には乾燥が速かったと言える。

図9 相対湿度の変化に伴うコンクリート中の水分分布の経時変化

図10 温度の変化に伴うコンクリート中の水分分布の経時変化

図11 温・湿度の変化に伴うコンクリート中の水分分布の経時変化

図 12 水分移動に及ぼすひび割れの影響 (深さ 1cm)

このような現象は、水セメント比が高いほど、ひび割れ幅が大きいくほど生じやすいと考えられる。

3. 2 環境因子がコンクリート中の水分分布に及ぼす影響

図 9～図 11 は、温度および相対湿度がコンクリート中の水分分布に及ぼす影響を調べるため、①温度一定・湿度変化 (20℃、57～89.7%RH)、②湿度一定・温度変化 (60%RH、21.9～28.3℃)、③温・湿度の同時変化という 3 条件下で実験を行い、得られたコンクリート中の水分分布の経時変化を示したものである。

一般に、自然環境に曝されたコンクリート構造物は、周囲の環境条件の変化により、コンクリート内部の水分状態がその位置での水蒸気圧と局所的な平衡を維持しながら、外気の蒸気圧と平衡状態に至るまで絶えず変動するものと考えられる。すなわち、大気と接しているコンクリート表層部では、外部環境と拡散による水分交換 (吸着/脱着⇔凝縮/蒸発) が行われ²¹⁾、それにより生じる含水率および温度勾配を駆動力として、水蒸気および液状水の移動を引き起こす。コンクリートのような多孔質材料は、親水性の表面を有し、しかも比表面積が大きい。そのため、コンクリートでは、蒸発可能な水分の大部分が固体表面からの表面張力によって吸着水膜として存在するなど、表面における水分の物理的吸脱着が水分移動現象に決定的な影響を持っている²²⁾²³⁾。

図 9 は、等温状態で相対湿度の変化を生じた場合におけるコンクリート中の水分分布の経時変化を示したものである。図 9 によれば、いずれの試験体においても表層部から深さ 1cm でのみ僅かに相対含水率 (相対湿度) の増加する現象が見られた。また、ひび割れ幅 0.1mm の場合、ひび割れの無い試験体と概ね等しい経時変化が見られたが、ひび割れ幅 0.2mm での相対含水率の増加はごく僅かであった。なお、水セメント比 60% の場合における試験体内部の水分変化は、水セメント比 30% の場合とは異なり、周期的な外部相対湿度の変動に伴い、一定間隔 (約 5～6 時間) の遅れで連動して徐々に増加する傾向を示した。これは、外部相対湿度の変化に対応する水分の吸脱着量の変化は時間依存性をもっており、水セメント比が大きいほどセメント硬化体の比表面積が大きい²⁴⁾ため、水セメント比 30% に比べて水セメント比 60% における水分の吸脱着速度が速いことに起因するものと考えられる。また、含水率が増加したことは本研究で模擬した中高湿度

領域では脱着量より吸着量が大きく、乾湿繰返しに伴うヒステリシスによって水分の蓄積が生じている²³⁾²⁵⁾²⁶⁾ためと考えられる。

一方、図 10 に示すように、高低温の繰返しによるコンクリート中の水分分布の経時変化は、相対湿度のみが変動する場合と比べると、表層部で相対含水率 (相対湿度) の減少傾向が明確に見られた。温度は多孔質材料中の水分挙動に最も直接的な影響を及ぼす要因である。つまり、液状水の粘性、密度および表面張力は温度が高くなると減少し、水蒸気の場合には飽和水蒸気圧が増加するなど、温度依存性を有する²⁷⁾²⁸⁾。したがって、水分の表面吸着および毛細管凝縮が表面張力の結果であることを考えると、高温下におけるコンクリート内部の水分の表面張力の変化および外部の相対湿度の低下が逸散水量の増加を引き起こしたと考えられる。このような現象は、既往の文献²⁹⁾³⁰⁾においても、乾燥・湿潤過程によって保持する含水率が異なる (乾燥過程における含水率は常に湿潤過程の含水率を上回る) ものの、吸脱着等温曲線を通じて説明されている。すなわち、乾燥過程に対する液状水の挙動を見ると、同じ湿度条件下での温度の増加はインクボトル効果²⁸⁾³¹⁾によって閉じ込められていた水分の逸散を増加させ、飽水度 (相対含水率) の低下が速やかに生じる。これは換言すれば、同じ湿度条件下での温度の増加は毛細管凝縮が生じ得る Kelvin 半径の縮小を意味し、同じ飽水度を維持するためにはより高い相対湿度が必要となると言える。

図 11 は、温・湿度の変化に伴うコンクリート中の水分分布の経時変化を示す。いずれの場合も表層部の深さ 1cm でのみ僅かな相対含水率 (相対湿度) の増加が見られ、相対湿度のみが変動する場合と同様の傾向が見られた。

また、図 12 は、図 11 の温・湿度の同時変化に伴うひび割れ試験体の表層部における水分分布の経時変化を水セメント比 60% のみを対象として示した一例である。図 12 によると、ひび割れ幅 0.2mm の乾燥速度 (実線の矢印) がひび割れ幅 0.1mm の乾燥速度 (点線の矢印) より大きいことを示している。

以上のように、外部温度および相対湿度がコンクリート中の水分分布に及ぼす影響を因子ごとに比較検討した結果、ひび割れない場合には、水分分布の変化は表層部でのみ生じており、内部では極めて緩慢な水分の減少を示した。また、水分移動に及ぼすひび割れの影響に関しては、ひび割れ幅が大きいほど乾燥速度が若干大きくなる傾向を示した。

4. 結論

本研究では、外部環境条件 (温度、相対湿度) の日内における周期的な変動がコンクリート中の水分分布に及ぼす影響を明らかにするため、夏の環境条件を模擬して実験的検討を行った。さらに、ひび割れがコンクリート中の水分分布に及ぼす影響に対しても検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 乾燥に伴うコンクリート中の相対含水率分布の経時変化は、試験体の種類に関係なく、表層部に近いほど、各乾燥材齢において乾燥開始とともに急激に減少する。特に、乾燥初期での相対含水率の減少が著しい。一方、ひび割れ試験体においては、水セメント比 30% の場合、ひび割れ幅が大きいほど

相対含水率の減少幅も大きくなったが、水セメント比 60% の場合には、水セメント比 30% と比べると乾燥に伴う相対含水率の減少に対するひび割れの影響は顕著ではない。

- (2) 外部の温度・相対湿度がコンクリート中の水分分布に及ぼす影響を因子ごとに比較検討した結果、水分分布の変化は表層部でのみ生じており、内部では極めて緩慢な水分の減少を示した。また、ひび割れの影響に関しては、ひび割れ幅が大きいほど乾燥速度が若干大きくなる傾向を示す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説、1997.1
- 2) G.Pickett : Shrinkage Stress in Concrete, Journal of the ACI, Vol.17, No.3, 1946.1
- 3) T.C.Powers : Mechanism of Shrinkage and Reversible Creep of Hardend Cement Paste, Proc. Int. Symp. Concr., London, France, 1965
- 4) R.H.Feldman : Sorption and Length Change. Scanning Isotherms of Methanol and Water on Hydrated Portland Cement, Proc. Fifth Int. Symp. Chem. Cement, Tokyo, Part III, Vol. III, 1968
- 5) Z.P. Bazant, and L.J. Najjar : Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materials and Structures, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972
- 6) 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、土木学会論文報告集、Vol.316, pp.145-152, 1981.12
- 7) 秋田宏、藤原忠司、尾坂芳夫：乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法、土木学会論文集 No.490/V-23, pp.101~110, 1994.5
- 8) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の構造・耐久設計境界問題研究委員会報告書、1998.7
- 9) 今本啓一：コンクリート工学、日本コンクリート工学協会、Vol.43, No.5, pp. 67-74, 2005.5
- 10) 鎌田英治、田畑雅幸、中野陽一郎：コンクリート内部の含水量の測定、セメント技術年報、XXX, pp.288-292, 1976
- 11) 十代田三郎、十代田三知男、中村恭：モルタルおよびコンクリートの含水率の電気的測定法、日本建築学会研究報告、第 34 号、1955.11
- 12) 一瀬賢一、長尾寛博、中根淳：高温加熱されるコンクリート中の含水率測定法、大林組技術研究所報、No.32, 1986
- 13) 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, 1994
- 14) 気象庁：日本気候表、その 1、月別平年値(1961~1990)、日本気象協会、1991
- 15) 気象庁：地上気象観測毎時月表(1990~2000)、観測編集データ
- 16) 岡部拓也：熱力学の基礎、丸善株式会社、2005.2
- 17) 柳博文、福原輝幸、脇敬一・松岡茂：不飽和コンクリート中の水蒸気移動特性と水蒸気拡散係数、コンクリート工学論文集、Vol.12, No.3, 2001.9
- 18) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書、pp81, 2002.9
- 19) 田澤栄一、宮澤伸吾：水和による自己収縮、コンクリート工学、Vol.32, No.9, 1994.9
- 20) Nilsson, L.-O. : Long-term moisture transport in high performance concrete, Material and Structures, Vol.35, pp641-649, 2002.12
- 21) C.Andrade, J.Sarria, C.Alonso : Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, Cement and Research, Vol.29, pp.1249-1259, 1999
- 22) 多田眞作：硬化セメントペースト水系の熱力学、セメントコンクリート、No.476, 1986.10
- 23) 氏家大介、大下英吉：セメント系材料中の微細空隙壁面への水分の吸・脱着現象を考慮した拡散性状に関する研究、コンクリート工学年次報告論文集、Vol.22, No.2, 2000
- 24) 多田眞作、内海秀幸：セメント系材料の有効比表面積、Cement Science and Concrete Technology, No.56, 2002
- 25) 深堀伸一、氏家大介、大下英吉：セメント系材料中の微細空隙壁面への水分の吸・脱着速度に関する実験的研究、コンクリート工学年次報告論文集、Vol.22, No.2, 2000
- 26) James M. Aldred, S. Swaddiwudhipong, S. L. Lee, and T. H. Wee : Effect of Moisture Content on Water Transport in Silica Fume Concrete, Materials and Structures, Vol.97, No.4, pp.493-500, 2000
- 27) 小野周：物理学 OnePoint9-表面張力、共立出版株式会社、2005
- 28) 宮崎毅：環境地学、東京大学出版会、2000.6
- 29) 楠原千佳子、石田哲也、前川宏一：セメント硬化体中に存在する液状水量の温度依存性と時間効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.1, 2004.
- 30) D.QUENARD, H.SALLEE : Water vapour adsorption and transfer in cement-based materials: a network simulation, Materials and Structures, vol.25, pp.515-522, 1992
- 31) 石田哲也、Rajesh P.CHAUBE, 岸利治、前川宏一：任意の乾湿繰り返しを受けるコンクリートの含水状態予測モデル、土木学会論文集、No.564 / V - 35, pp.199-209, 1997.5

(2006年5月10日原稿受理、2006年11月6日採用決定)