

鉄筋コンクリートの非破壊検査に関する計測原理（非破壊検査, 64(3), 113-125, 2015）

コンクリートの水分特性の測定法

Principles of Measuring Moisture Characteristics of Concrete

多田眞作

Shinsaku TADA

Key Words: 測定原理, 相対湿度, 含水率, 水蒸気等温吸着, コンクリート

1. はじめに

コンクリートは多孔質であり、その耐久性は水分の相変化や移動に強く影響される。このため、水分の平衡や移動を定量的に理解し、現場測定やシミュレーションなどで含水率の経時変化を実測、予測することが重要な研究課題となっている。その作業の中でもっとも困難を伴うのがセメントペーストと水分の平衡関係や水分収支式の係数となる各種の水分特性値の実測であり、高信頼性かつ迅速な測定法の開発が望まれている。本稿ではコンクリートの相対湿度、含水率、平衡含水率、水分移動特性値の測定法の原理と特徴を紹介し、一部の測定法には実例を示した。また平衡状態の水分と等温条件の水分移動のみを対象とし、測定法も非破壊測定に限るものではない。

2. コンクリート中の相対湿度の測定

2.1 相対湿度測定の意味

含水率測定に替わりコンクリートの水分状態を表す量として、実用的な面から現場コンクリート内部の相対湿度の直接測定が古くから行われている。また相対湿度の自然対数は水分移動の本質的な駆動力である水の化学ポテンシャル差を直示するため、乾燥収縮応力や内部養生材料とセメントペースト間の水分の移動などを検討する手段としても重要性が認識されている。

しかし市販の相対湿度センサを使用する場合にキャリブレーションの方法が不明なことがあり、また自作のセンサの場合にはトレーサビリティが必ずしも確保されていないなど、一般に信頼性が高いとは言えない。相対湿度には国際的な「原器」の様なものが無く、精度を決めるために遡る先は各国の国立研究機関が保有する標準湿度発生装置である。この装置で校正された鏡面冷却型露点温度計を用いて各湿度センサを校正し、トレーサビリティを確保するのが一般的である。

2.2 相対湿度センサによる現場測定

Menzel¹はコンクリートブロックを粉砕して容器に密封し、市販の湿度計で容器内部の相対湿度を直読する方法について述べている。容器は小型のファンによる攪拌機構を有し、湿度計は毛髪温度計と同様に、動物の薄皮を貼ったダイアフラムの湿度による変形を機械的にメータに表示して直読するタイプである。キャリブレーションは5種の塩の飽和水溶液で行っている。この方法はコンクリート片を容器に採取し、容器内部の湿度を測定するもので、その場測定ではない。Monfore²は相対湿度の変化により伸縮する繊維（Dacron）にワイヤを接着しその電気抵抗の変化を測定した。センサがプローブ型となったためその場測定が可能になったこと、かつ電気信号の出力があるなど今日の相対湿度センサの原型をなすものである。Grasley³は乾燥収縮応力の測定を目的に、プリズム供試体の乾燥方向と平行な様々な深さにプローブを埋設して相対湿度分布を測定した。センサは静電容量型の市販品（Sensirion湿度センサ）であり精度は10～90%レンジで±2%程度である。Granjaら⁴は、既往のコンクリート内部の相対湿度計測システムを広範囲に取り上げ、センサの性能比較、プローブ構成、埋設手法、キャリブレーション手法の比較を行っている。

コンクリート内部の相対湿度の測定は、温度管理された実験室での測定が多いが、構造物の現場測定においては周期変動する温度場の影響があり、その補正が必要と考えられる。FredinとSkoog⁵は、様々な相対湿度で養生した硬化コンクリート供試体（W/C=0.55, ϕ -200 x 100mm）を封緘して温度変化を与え、供試体内部の相対湿度変化を市販の静電容量型湿度センサ（Vaisala HMP44）で連続測定した。空気中では水分量が一定なら温度の上昇と共に相対湿度は低下するが、コンクリート内部ではAndradeら⁶の観察と同様に逆の傾向を示し、初期相対湿度の低いものほど、温度上昇分に対する相対湿度上昇分が大きいことを示した。

3. 含水率の測定

コンクリートに限らず、固体中の水分の測定は広範囲の産業分野の必要性を背景に研究と実践が行われてきた。NISTとアメリカ計測学会の主催による湿度と水分に関する国際会議が1963年に開催され、その後も表1に示す様に継続している。湿度標準や湿度センサ、食品・繊維・化粧品など他材料の水分測定も対象としており、固体中の水分の測定はその一部⁷である。

多孔質材料に適用可能な含水率測定手法のほとんどは土壌物理の分野が先行しているが⁸、コンクリートを含む建設材料への適用性に関するWormaldとBritch⁹の解説がある。またコンクリートの含水率測定法に関しては、非破壊の現場測定を対象としたWhiting¹⁰の総説、およびHundtとBuschmann¹¹、Parott¹²、Phillipson¹³らの解説がある。これらの総説には触れられていないが、水分のエネルギーによる違い（結晶水、吸着水、自由水など）を区別して測定出来るかどうか重要な評価規準である。

表1 International Symposium on Humidity and Moisture における固体の水分研究発表数

	開催年	開催都市	ホスト機関	固体の水分測定論文数（全論文）
第1回	1963	Washington D.C.	National Bureau of Standards	36 (229)
第2回	1985	Washington D.C.	National Bureau of Standards	13 (109)
第3回	1998	Teddington	National Physical Laboratory	31(143)
第4回	2002	Taipei	Center for Measurement Standards, National Measurement Laboratory	18 (90)
第5回	2006	Rio de Janeiro	National Institute of Metrology	13 (81)
第6回	2010	Portoroz (Slovenia)	International Measurement Federation	18 (363) 温度計測も含む

3.1 Nuclear Method

3.1.1 ガンマ線減衰法

単色のガンマ線の平行ビームが試料を通過すると次式に従って減衰する。

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu\rho d \quad (1)$$

ここで I は通過ビームの強度 (counts/s)、 I_0 は試料がない場合の強度、 μ は吸収係数(m^2/kg)、 ρ は試料の密度(kg/m^3)、 d は試料の厚さ(m)である。試料は乾燥した材料自体と水との混合物だから、そこでの吸収は次式となる。

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -d(\mu_s\rho_s + \mu_w\rho_w) \quad (2)$$

ここで、サブスクリプトs、wはそれぞれ試料と水を表す。含水率 $\phi(\text{m}^3/\text{m}^3)$ は次式となる。

$$\phi = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) / \mu_w\rho_w d \quad (3)$$

ここで、 I_s は絶乾試料の強度、 I_w は含水試料の強度である。吸収係数と密度は試料の種類ごとに求める必要がある。

ガンマ線を多孔質材料の含水率測定に利用する試みは土壌物理の分野で1950年代から始まり¹⁴、建設材料にはNielsen¹⁵によってALCの水分伝導率測定のための含水率の非破壊測定に利用された。装置は現場での測定が困難なのでDaian¹⁶、Quenardら¹⁷、Kumaran¹⁸らの利用も実験室に於ける水分伝導率の測定である。建設材料におけるガンマ線減衰法利用の詳細はDescamps¹⁹に詳しい。

3.1.2 NMR法

核磁気共鳴は量子効果であるが、古典的な解釈も可能である。水素原子のように陽子と中性子の数が異なっている原子は磁気双極子モーメント μ を有し、外部磁場 B_0 においては重力場におけるジャイロの如く振る舞う。外部の磁場に置かれると、倒れる寸前のコマのようなすりこぎ運動を生じる。この歳差運動の周波数を ω_0 は外部の場の力に比例する。 γ を材料（核の種類）によって決まる定数（磁気回転比）とすれば

$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0 \quad (4)$$

2つの量子準位のエネルギー差 ΔE は外部磁場 B_0 の大きさ及び原子核の磁気モーメントに依存する。

$$\Delta E = \frac{\gamma \cdot B_0 \cdot \hbar}{2\pi} \quad (5)$$

ここで $\hbar$ はプランク定数である。上記の歳差運動の速さが、試料に照射されるラジオ波の振動数と同じになると吸収が起こる。

実際の試料中の水素原子の量を決定するには、まず試料に一定の磁場をかけ、次いで吸収されたラジオ波のエネルギーを測定する。ラジオ波の振動数と吸収率の関係は励起した核が励起状態に留まる時間（緩和時間）の長さに影響される。緩和時間は水素原子の置かれる環境に依存するので、スピン-格子緩和時間 T_1 またはスピン-スピン緩和時間 T_2 を測定する。前者は水素原子と周囲の水分子構造間のエネルギー交換であり、後者は周囲の水分子構造とは無関係なスピン間のエネルギー交換である。従って T_1 、 T_2 の測定により、水分子の固体による拘束の程度（自由水、吸着水、化学結合水など）が定量的に測定される。緩和時間はコイルに発生する誘導起電力（FID信号）に対応する。この方法は試料中に常磁性のイオンがあれば強く影響される。

核磁気共鳴法（NMR法）のセメント系材料の含水率測定への応用は70年代後半にMatzkaninら²⁰に始まり、Gummerson²¹らは実験室的に高精度で材料内の経時的な含水率変化を求めた。Matzkaninら²²は更に一方向からの測定可能な機器を製作し、現場測定を行っている。水分伝導率の測定には含水率が変化する試料を非破壊で経時的に測定する必要がある。Pel²³は試料を垂直に固定し一面から吸水させながらコイルをトラバースさせて、含水率分布を測定した。Kisselら²⁴は試料を水平に置き、永久磁石を用いた非常にコンパクトな装置で同様の測定を行っている。最大試料寸法（断面）は50 x 50mm、トラバース方向の精度は4mm、含水率測定精度は試料や測定時間にもよるが0.5~0.1 vol %である。測定時間は試料寸法（長さ）が150mmのとき3分から10分、その含水率結果は重量法、ガンマ線減衰法とよく一致したとしている。Cano-Berritaら²⁵はSP-MRI法により ϕ -47 x 100mmの硬化コンクリート供試体をプラスチック型枠のまま片面乾燥を行い、含水率分布を求めた。測定時間は3.5分、空間解像度は2.3mmであった。

3.1.3 中性子線減衰法

ガンマ線やX線は電子と相互作用するが、中性子線は物質の核と相互作用し、特に水素の原子核（プロトン）で大きく吸収・散乱が生じエネルギーを失って熱中性子となる。水素原子核による影響は他の原子に比べ大きいので、検出された熱中性子は試料中の単位体積の水素原子核に比例する。しかしNMRの様に水分の拘束状態に関する情報を得ることはできない。また指向性ビームの線源は原子炉であり設備と取り扱いに難がある。

Roethig²⁶は工場での含水率管理に中性子散乱法が最良であるとした。表面押し当て方式が東独の工場で用いられているが試料の大きさは20cm立方が必要とされる。Pel²⁷はビームで試料を走査し水分伝導率の測定に利用した。含水率の感度1%、空間解像度は1mmと言われる。中性子照射による感光フィルム上の水分に対応した濃淡像を画像解析したり²⁸、最近では蛍光を可視光に変換してCCDカメラで撮影して画像解析を行い、空間解像度0.1mm程度と精度良く骨材付近の含水率分布とその経時変化を求めることも可能になっている²⁹。

3.2 Electromagnetic method

水分を含んだコンクリートに電磁波を照射すると、その周波数に応じて水分と多様な相互作用が生じ、含水率と相関する信号を分離できる。これを表2に示す。

表2 電磁波応用の水分測定

名称	DC	AC	ラジオ波	マイクロ波			赤外・可視光
				TDR・レーダ	レーダ	テラヘルツ波	
周波数 (Hz)	-	$10^2 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^6$	$10^6 \sim 10^9$	$10^9 \sim 10^{11}$	$10^{11} \sim 10^{12}$	$10^{12} \sim 10^{15}$
材料の応答	レジスタンス	インピーダンス	静電容量	反射	誘電率、透過	透過	吸収
研究例	(29) (30)	(31)	(32) (33)	(37) (38) (39) (40) (41) (42)	(43)		

3.2.1 電気抵抗法

コンクリートの中に2本の電極を埋設し、電極間の抵抗を測定して校正曲線から含水率を推定する方法である。測定自体は簡単かつ自動・遠隔計測にも適する。木材では外部から電極を差し込むことも可能なので、この方法は木材乾燥工学の分野で広く利用されている。木材の電気抵抗は繊維飽和点から炉乾状態の含水率変化に対して 10^7 程の変化を示すが、含水率と抵抗の対数を取ると直線になる。即ち経験的に次式で表される。

$$\ln(\rho) = -K\phi + c \quad (6)$$

ここで ρ は比抵抗、 K と c は定数である。コンクリート分野でも1955年頃から行われ実用レベルにある^{30,31}。しかし、純粋な水も試料自体と同様通電抵抗が大きいので、溶解するイオンがもっぱら電流のキャリアとなる。従ってこの方法は必然的に含有塩分の影響を強く受け、さらにはコンクリート自体の密度の違いや温度にも影響される³²。温度の影響は一般に温度1度につき抵抗値が2~4%の変動と言われ、高含水率域ではさらに影響が大きい。また電極が試料と接触する必要があり、コンクリート中の物質が経時的に界面へ移動・析出することが問題となる。

3.2.2 誘電率法

周波数1GHzにおける水の誘電率は、広い温度範囲で乾燥した建設材料の20~40倍であり、誘電率は含水率に比例する。通常は静電容量を測定して次式から誘電率を求める。

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_v A}{d} \quad (7)$$

ここで、 C は静電容量(F)、 ε は電荷が置かれている媒質の比誘電率、 ε_v は真空誘電率(F/m)、 A は平行版の面積(m^2)、 d はその間隔(m)である。また、湿り材料の誘電率は

$$\varepsilon_m = \sum_i \varepsilon_i v_i \quad (8)$$

ここで、 ε_m は多孔質材料の誘電率、 ε_i は i 番目の物質の誘電率で v_i はその体積分率である。この方法で使用する周波数は1kHz~1GHzのラジオ波帯であるが、高い周波数では溶解しているイオンの影響は少なくなると言われる。また温度の影響も比較的少ない。一般に静電容量と含水率の関係は直線ではないので、含水率を得るにはあらかじめ校正曲線を得ておくなど直流抵抗と同様の準備が必要である。また、得られる含水率は体積分率なので、重量ベースの含水率を得るには試料の密度を求めねばならない。主に土壌や木材の水分の測定に利用され、各種のプロープを持った多くの機器が市販されているが、コンクリートの含水率測定では³³ 2つの周波数で容量測定する方法³⁴や、センサユニットとして完結された埋設用セラミックスセンサ³⁵も開発されている。

3.2.3 TDR法

元来は電話線などのケーブルの保守管理用に開発された試験方法で、欠陥部から離れた試験機から電磁パルスを送り、異なるインピーダンスをもつ欠陥部から反射された電磁波の時間領域の解析から欠陥部の位置を読み取る閉回路レーダである。1969年にFellner-Feldeggにより基本原理が示された。土壌物理では水分量と電気伝導度(溶解塩分濃度)を知る必要があり、これらを同時測定できるTDRが注目され、多くの研究^{36,37}や市販のプロープと測定機器も存在する。またTDRの土壌水分測定に関

する国際会議も継続的に開催されている。

測定原理は、同軸ケーブルの末端の信号源から瞬間的に与えられた1MHzから1GHz程度の電磁パルスの伝達速度や、波形の減衰を利用して終端（プローブ）付近の物性を推定する方法で、測定装置は伝送線（Transmission line）、パルス発生装置、電磁波のサンプリング・レシーバ、オシロスコープ、試料セルあるいはプローブから成る。

測定手順は、パルスがインピーダンス Z_0 の同軸ケーブルを通過し、インピーダンス Z の試料内のプローブに至り反射した際の電圧を測定する。プローブは測定対象の誘電特性に合わせて形状や材料を決める必要があるが、一般にセルは伝送線の末端である内部電極を囲むような円柱状の外部電極から成り、両者は試料のみで接続する。測定前に空のセルを誘電性質が既知の液体（アセトン、メタノール、脱イオン水など）を用いてキャリブレーションを行う。コンクリートの含水率測定への応用^{38,39}も盛んで、特にPlagge⁴⁰は、TDRセンサと相対湿度センサを同位置に埋設して含水率と水分ポテンシャルの同時測定を行っている。

3.2.4 その他の周波数帯域の電磁波を使う方法

周波数1～100GHzのマイクロ波を湿り材料に照射すると主に水分子によって減衰されるが、特に固有緩和周波数である30GHz付近で最も大きい。プロセス水分管理用に透過型の機器が市販されている。Laurens⁴¹は1.3GHzの地中レーダ（GPR）をコンクリートスラブに適用し、体積含水率と相対振幅および誘電率との相関を検討している。Leucci⁴²も1～1.5GHzのGPRを用いて800点の試料を測定し、体積含水率と誘電率の良い相関を得ている。また受信子を移動させて測定した伝播時間から含水率の2次元分布を求めている。Leschnik⁴³は2.45GHzの電磁波を用い、壁体に挿入されたアンテナを移動させて含水率と塩分分布の同時測定を行っている。測定される複素誘電率の実部が含水率に、虚部が塩分量に対応する。

THz帯（周波数0.1～10THz、波長30～3000 μ m）の電磁パルスは、近年フェムト秒パルスレーザの出現によってピコ秒以下のパルス発生・検出が可能になり各種材料の非破壊測定に応用が広がっている。水の様な極性分子による吸収が大きく、特に0.05～0.1THzにおいてセメント硬化体の体積含水率と透過率の相関が良いとされる。また相対湿度を変えた試料を測定し、水分の質の違いを区別できるかについても検討されている⁴⁴。

水分子による赤外線の吸収は赤外線の波長帯の中のある波長で生じるので、フィルタにより吸収の異なる2つの波長の赤外線ビームに分けて試料に照射して表面付近の水分量を求める。この方法による機器も主に製造工程用に市販されている。あまりに鋭敏な検知方法であるため、試料表面を汚染している微量の有機物の影響を受ける。

3.3 Physical method

3.3.1 熱伝導率法

(1) 既往の研究

セメント系材料中の水分は、その熱伝導率に鋭敏にしかも直線的に影響するので、湿り材料の熱伝導率を迅速に測定できればその含水率を知ることができる。特に塩分の影響を受けないのが利点である。このような熱伝導率測定ができるのは非定常熱伝導を利用した熱線法と呼ばれる方法である。

熱線法におけるセンサ部は、極細の発熱線とこれに極めて近いところに配置された温度センサのセットから成り、両者は供試体によって囲まれている必要がある。このため、主として現場用には、ドリルで掘った穴の中に、プローブを挿入する方法が用いられ、実験室用には2枚の板状サンプルにこのセットを挟み込む方式が用いられている。

熱線法の原理は1930年代、Stalhane及びPykによって発案され、1940年代になって、van der Heldが数学的に定式化した。1952年より、スウェーデンGoteborgのChalmers工科大学において、Granholt及びSaare⁴⁵がセメント系材料への応用開発を行った。一方、現場測定のニーズが土木、農業分野からあり、プローブ法についての数学的原理がBlackwell⁴⁶によって報告された。Joy⁴⁷及びVos⁴⁸はプローブを試作し、様々な湿り断熱材の熱伝導率のデータを得ている。特にVosは壁体の含水率測定に応用している。

熱線法による λ 測定法の規格はDIN 51046、JIS R 2618-79 ASTM D 2326-64T等に定められており、これを準拠する測定機器も市販されるに至っている。

(2) 測定原理

発熱体と熱電対の関係は図1に示される様に、発熱体のワイヤは手前から奥へ続いており、感温部の熱電対は奥行がなく、発熱体の単位長さ当りの熱量しか受けとらない。紙面から一度外へ出て、再び熱電対へ廻り込む様な熱流はないと考える。

この場合、供試体は均質であり、発熱体のワイヤは無限に長く、発熱体への供給電源をONにしたときを $t=0$ とすれば、このとき、供試体のどの場所でも $\partial\theta/\partial t=0$ であり、測定中の外乱要因はない、などを仮定する。熱伝導の基礎式は次式で与えられる。

$$Cd \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (9)$$

この式を同心円状の熱伝導の場合について解析的に解くと次のようになる。

$$\theta = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_0^t \frac{1}{t'} \exp\left(-\frac{r^2}{4at'}\right) dt' \quad (10)$$

ここで、 a は熱拡散率 (m^2/s)、 λ は熱伝導率 (W/mk)、 q は線発熱量 (W/m)、 r は発熱体と感温部の距離 (m)、 θ は温度 (K)、 t は時間 (s) である。式 (10) の積分の中の誤差関数の項は1に近似してある。重要なのは θ ではなく温度変化 (時間に対する温度) なので、実験的に $\theta - \ln t$ の関係が直線となって $\partial\theta/\partial \ln t$ が傾きとして求められることから、(10) 式を $\ln t$ で微分すれば

$$\frac{\partial \theta}{\partial \ln t} = \frac{q}{4\pi\lambda} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (11)$$

が得られる。ここでも扱いづらい $\exp(-r^2/4at)$ をなくすために、発熱体に感温部を接近させていくと $r \rightarrow 0$ によって $\exp(-r^2/4at) \rightarrow 1$ 、したがって熱線法の基本式は次式のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial \ln t} = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad (12)$$

$\theta - \ln t$ のグラフを描いて $\partial\theta/\partial \ln t$ を求めれば λ が計算できるが、含水率測定が目的の場合には λ を計算する必要はない。

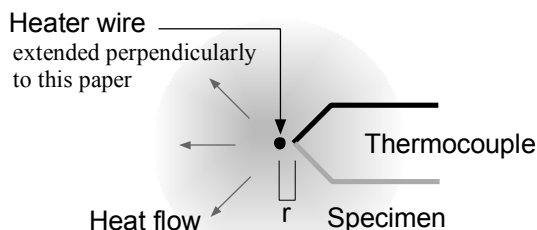


図1 熱線法の発熱・感温部

(3) 測定例

・センサ

熱線法のセンサは一本の発熱線と発熱線の近傍のある一点の温度変化を正確に捉える感温部から成る。試験体に埋め込まれ経時変化を測定するためにそれ自身の耐久性も要求される。センサは、より細かい精度が向上するが、感温部である熱電対の溶接や試料へのセットが難しい。また、熱電対が細いほど起電力は不安定になる。そこで発熱部には、線径は細いが抵抗係数が適当で融点が高く、抵抗率の温度係数が小さいものが良い ($\Phi 0.32\text{mm}$ のコンスタンタン線にテフロン被覆したもの等)。コンスタンタン線の物性は、抵抗係数 $0.5\Omega/\text{mm}^2/\text{m}$ (20°C)、温度係数 $\pm 0.03\Omega/10^{-3}\text{K}$ 、融点 1270°C であり、単位抵抗は $6.217\Omega/\text{m}$ である。

感温部には常温域の起電力が直線的に変化し、しかも、起電力が大きく耐腐食性に優れ、入手が容易な 0.32mm のK熱電対にテフロン被覆したものを使用した。またセンサ部の熱容量で発熱遅れが生じるが、その程度は予備実験から30秒までで、これ以降は時間と起電圧の関係は直線になる。そこで、発熱体への通電開始後30秒以後のデータを計算に用いる。

・ 計算法

熱線法の基本式を変形して、熱電対の熱起電力を用いて表すと次式を得る。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{\partial \ln t}{\partial \theta} = \frac{\partial E}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \ln t}{\partial E} \cdot \frac{q}{4\pi} \quad (13)$$

ここで、 t は時間 (s)、 θ は温度 (K)、 q は発熱量 (W/m)、 λ は熱伝導率 (W/mK) である。 $\partial E / \partial \theta$ は熱電対の起電力 (mV/deg) で、使用した0.32 ϕ のCA熱電対の場合、40℃付近で0.04065である。

起電圧の測定時間はストップウォッチで計るため、読むことが容易な通電開始後30秒と60秒に行うことにし、測定される起電圧をそれぞれ E_{30} 、 E_{60} とする。従って $\ln t$ は $\ln 2$ となる。また $q = I^2 R$ を用いて式 (13) を計算すると次のようになる。

$$\lambda = 6.217 \frac{\ln 2}{E_{60} - E_{30}} \cdot \frac{0.04065}{4\pi} I^2 \quad (14)$$

λ を求めることが目的ではないので、実験では測定結果の $I^2 / \Delta E$ と重量法で測定した試料の含水率を直接対応させる。

・ 測定例

試料として用いた密度500(kg/m³)のALCの含水率の測定範囲は、主に0～150(kg/m³)間であり、その時の熱伝導率は0.1～0.4W/mK程度であるから、その範囲を精度良く測定できるように供給電力を設定する。

前項で決めた30秒・60秒の計測で単位抵抗6.217 Ω /mのコンスタンタン線を使用した時に電流設定を1レンジで計測し、かつ温度上昇を最小に抑える q を設定する。しかし、 $\Delta \theta$ が分母にあるため λ が大きくなれば $\Delta \theta$ が小さくなり、熱電対の起電力分解能に近づくために精度が落ちる。この実験例では低含水率時の精度を考慮して、0.4W/mK付近の値の精度を ± 0.0025 程度に、0.1W/mK付近の精度を ± 0.001 程度になる供給電流を1.6Aに設定した。計測のインターバルは、最低30分以上とし、初期温度を安定させて計測する必要がある。まず試料の初期温度（起電圧）を計測し $\pm 2 \mu V$ 程度に落ち着くまで放置する。計測値が落ち着かない場合は計測を中止する。発熱開始の電源スイッチをONすると同時にストップウォッチで時間を計測し、30秒後と60秒後の起電圧と供給電力を計測する。ALC試験体内部にセンサを埋め込んで含水率を調整し、さらに、予め含水率を調整したALC試験体でセンサ部を挟んだものも準備した。これらの双方について、熱線法の値と含水率の対応を調べると、両者に顕著な違いはなく、図2のように1本の直線（相関係数0.951）になった。

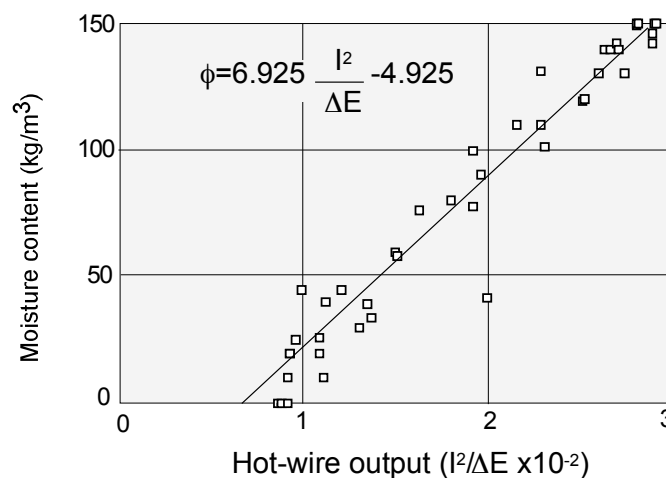


図2 体積含水率と熱線法出力の関係 (ALC)

3.3.2 超音波法

(1) 既往の研究

超音波パルスの伝播速度を測定して試料の動弾性係数やポアソン比を求める方法はASTMにも規定があり、広く用いられている。測定は極めて容易であるが、押し当てる表面の状態に影響される。また発振子と受振子とで挟んで測定するタイプでは、現場での位置合わせが常に可能ではないこと等の欠点がある。超音波利用の非破壊検査は盛んに研究されているが、多孔質材料の含水率を測定したものは木材以外では少ない。熱伝導率法と同様、水に溶解しているイオンに影響されず、測定装置が簡便で現場測定も可能なことは大きな利点といえる。

(2) 測定原理

材料内の超音波パルス伝播速度は含水率に影響される。音速はポアソン比を無視すると一般に次式で表される。

$$c = \sqrt{\frac{E}{d}} \quad (15)$$

ここで c は音速(m/s)、 E はヤング率(Mpa)、 d は密度(kg/m³)である。 d は含水率に依存すると考えれば、次式のように表すことができる。

$$d = (1 - P)d_s + P \cdot S \cdot d_w \quad (16)$$

ここで P は空隙率(m³pore/m³material)、 d_s 、 d_w は材料の真密度および水の密度 (kg/m³)、 S は飽和度(m³water/m³pore)である。Biotの理論に基づき液体で飽和された多孔体中の音波の伝播理論を展開したPlonaとJohnson⁴⁹は、含有水分の粘性と音波の周波数等で決まる係数 α を用いて、音速を次の様に補正した。

$$c = \sqrt{\frac{E}{(1-P)d_s + P \cdot S \cdot d_w (1 - \alpha^{-1})}} \quad (17)$$

ここで $P \cdot d_w \cdot S$ は体積含水率 ϕ (kg/m³)にほかならない。

c と ϕ の実測値から係数 α を逆算すると平均値で $\alpha = -2.80$ となった。従ってここで測定対象としたALCの含水率と超音波パルス伝播速度の関係は次のようになる。

$$c = \sqrt{\frac{196}{50 + 0.136\phi}} \quad (18)$$

ここで c : (km/s)、 ϕ : (kg/m³)である。

(3) 測定例

試料はかさ密度が500(kg/m³)、寸法が40 x 40 x 160mmの標準的なオートクレーブ気泡コンクリート (ALC) である。受信子と発信子で40 x 40mmの断面を挟んで周波数50kHzで測定した。ALCの含水率と超音波パルス伝播速度の測定結果を図3に示す。理論式と実測値は非常に良く一致している。木材やALCでは、超音波パルス伝播速度の含水率への依存性は負の相関を示し、含水率の増加と共に超音波パルス伝播速度は減少する。空隙に含まれる水は超音波パルスの伝播に寄与せず、むしろ減衰させている。これは使用する超音波の周波数や吸着水の粘性によって変化する⁵⁰。周波数28kHzで測定したモルタルでは含水率の増加に伴い、超音波パルスの伝播速度は大きくなる。即ち、超音波の周波数を変えて測定することにより、コンクリートに含まれる水のエネルギーの違いを区別できる可能性があると考えられる。

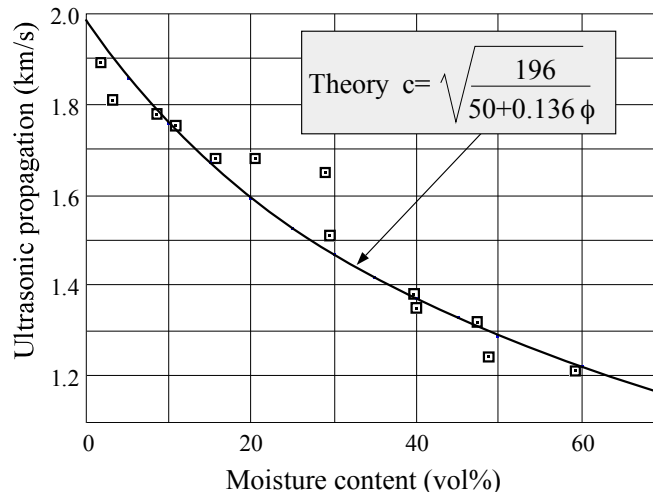


図3 体積含水率を超音波速度の関係 (ALC)

4 平衡含水率と水分特性曲線

4.1 平衡含水率

平衡含水率は相対湿度と吸着量の関係であり、測定技術は質量測定技術と相対湿度発生技術とに大別される。質量測定は試料が真空系にある場合にはマイクロバランス^{51,52}を使用したり、石英スプリングの伸びをカセトメータで読んだり^{53,54}、またはベリリウム-銅合金のカンチレバーの変形を作動トランスで検知したりする方法^{55,56}があるが、試料の質量を測定せず、系の容積既知で吸着質の減量^{57,58}や微小定流量⁵⁹を利用する方法もある。相対湿度の発生法はJIS Z 8806等々に示されるように、塩類の飽和水溶液を用いる方法、温度と圧力もしくはどちらか一方を変える方法、分流法等が利用されている。また化学工学分野では真空系で水蒸気圧のみを変化させる容量法がしばしば用いられる。

4.1.1 塩類の飽和水溶液を利用した調湿

塩類の飽和水溶液を利用した相対湿度は温度制御に注意し、容器内の攪拌を行えば1%RHの精度の調湿が可能などことが検証されている⁶⁰。JIS A 1470建築材料の吸放湿特性測定方法では6種の塩類の飽和水溶液から5種以上を選択し、大気圧下、20℃±0.5℃で試料系外の天秤で重量測定を行うものとしている。同様に大気圧下で近江、鈴木はほとんど別種の塩類の飽和水溶液を用いて木材及び吸水性高分子を測定した⁶¹。試料は秤量びんに入れたままデシケータ内に置き、重量測定時は秤量びんのコックを閉めて測定を行っている。いずれの場合も基本的に密閉系であるがデシケータ外から重量測定を行うため、一時的にデシケータが開放され調湿に乱れが起きる。また外部から攪拌用のトルクを導入することも困難で、調湿の回復、平衡時間共に長時間を要する。松本、松下は試料系を完全密閉とし重量測定は石英スプリングにより行ったが一試料に約40日を要した⁶²。Haggymass⁶³は真空下の塩類飽和水溶液+秤量びんによる方法で各種のセメントペーストを測定した。真空下では水蒸気の平均自由行程が長くなり拡散率が大きくなって平衡時間が短縮され、セメントペーストにとっては炭酸化の防止効果もある。この方法は真空下で、精密な温度制御と攪拌を行い、秤量びんに入れた重量測定を行ったとしても、測定できる相対湿度に限られるのが難点である。

4.1.2 温度と圧力のどちらか一方を変える方法

市販の2温度法による装置では、測定温度を20℃の時に相対湿度の下限は30%程度となるので平衡含水率測定には適さない。4℃以下の飽和空気を生産できる飽和槽を有する装置は一般に利用できる状態にあるかは不明で、平衡含水率の測定例は見当たらない。またAhlgrenは2圧力法の装置を自作して、コンクリート、ALC、モルタル、石材、レンガ、各種の木材とその2次製品、プラスチックフォーム等の嵩密度を変えて広範囲に測定した⁶⁴。相対湿度は20～98%の範囲で7点程度である。

4.1.3 分流法

分流法は手早く、広範囲の相対湿度が得られる方法であり、しかも調和空気は常時流出しているので試料槽は攪拌され、系外からの重量測定なども連続的に可能になる。高橋（他）は分流式相対湿度発

生装置の使用条件、精度などを検討し⁶⁵、相対湿度の精度は流量制御に使用する質量流量計の精度と経時変化でほぼ決まり、JISにある式を用いる場合の精度は $\pm 1 \sim 2\%$ 程度としている。Fisherは数個の流量の異なる臨界ノズルを電磁3方弁を用いて流量の加算を行い、分解能1%、流量分割の精度は0.02%という分流装置が可能としている⁶⁶。分流法の場合の1次空気はコンプレッサで室内空気を圧縮し、モレキュラーシーブなどの乾燥装置を通して一旦乾燥空気とするが、SomeshwarとWilkinsonは窒素ガスを直接用いて簡素化した装置で水蒸気吸着を測定した⁶⁷。筆者は市販の分流式相対湿度発生装置を改良し、電子天秤を用いて平衡含水率測定を自動化しALCを測定した⁶⁸。Bristol大学機械工学科の水蒸気吸着等温線測定装置は⁶⁹、乾燥・湿り空気の混合により相対湿度を発生させるが、混合量を定めるファンとダンパのコントロール、試料槽内の達成相対湿度の確認を2本の相対湿度センサにより行う。試料の重量測定は、RS-232C出力を持つ電子天秤（最大秤量3.6kg、分解能0.01g）で行う。これは分流法ではないために達成された相対湿度を相対湿度センサで確認する必要があり、相対湿度発生精度はセンサの精度で決まる。湿り空気または乾燥空気を作る際、混合槽の空気を導入しているので相対湿度の大きな変化を迅速に行うことは分流法に比べて劣るが、大容量の空気を扱い、試料槽も大きいので大型試験体に適している。

4.1.4 真空中で水蒸気圧を変化させる方法

このなかでも容量法は真空系で吸着質（水）を徐々に試料室に導入し、吸着質の減量、蒸気圧、死容積から吸着量を計算するもので過去に非常に多くの測定例があり、また市販装置も多く存在する。また死容積を気にせず、直接吸着量を重量として測定する場合も多い^{70,71}。

4.1.5 迅速測定法

(1) 既往の研究

平衡状態を待つことなく、過渡的な方法で平衡含水率や水分拡散係数を求める手法は幾つか提案されている^{72,73,74,75}。ここでは筆者らによる平衡含水率と水分拡散係数を動的に同時測定する方法⁷⁶を紹介する。

(2) 測定原理

等温条件で、液水の移動が無視できるような比較的乾燥した状態を考える。試料が半径 r の球形の場合、含水量 θ に関する物質収支式は式(19)のようになる。ここで $D_{\theta v}$ は試料の水分拡散係数であり、小さな湿度変化(含水量変化)では一定とする。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_{\theta v} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (19)$$

$u = \theta/r$ とにおいて通常の収支式が得られる。初期条件と境界条件が半径 R の球の表面含水量（に対応する相対湿度）が常に一定で、吸脱着開始時の球内の含水量がゼロ、すなわち、

$$u=0, r=0, t \geq 0$$

$$u=R\theta_0, r=R, t>0$$

$$u=0, 0 < t < R, t=0$$

である時、変数分離法により次式が得られる。

$$m(t) = m_e \left[1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 kt) \right] \quad (20)$$

ここで $m(t)$ は有限時間経過後の流入した全水分量、 m_e は無限時間経過後の流入した全水分量、 $k = D_{\theta v} \pi^2 / R^2$ である。

これらの初期条件と境界条件は実験条件として、(a)試料を測定開始までの間相対湿度0%に十分長時間保持する、(b)次いで試料を一定の相対湿度の空気が連続的に供給されている分流式相対湿度発生装置の試料槽に導入し、吸着による質量変化を与えることにより達成できる。従って、球状の試料について吸着実験を行い次式における係数 a, b, c を非線形カーブフィットにより決定し、 $a = m_e$ を基準乾燥質量で除せば平衡含水量 θ_0 が、 $c = k$ から $D_{\theta v}$ が推定できる。 b は試料の形状に関する係数で、試料が真球ならば定数 $6/\pi^2$ であるが、実際には粉碎された多角形であるため、あえてカーブフィットの対象とした。

$$m(t) = a[1 - b\exp(-ct)] \quad (21)$$

(3) 測定例

水セメント比0.3, 0.4, 0.5のそれぞれに11段階の相対湿度変化を与えた。各相対湿度に対応する1本の曲線のデータ点数は1000点(1分ごと約17時間)である。実際に計算の対象になるのは、吸着時間のごく初期のデータである。この時期に試料表面付近のごく薄い層が外部相対湿度に平衡した含水率となり、この層を通して水分が流入するが、時間の経過と共にこの層は厚くなり計算のための仮定から逸脱する(図4)。このデータに対し式(21)を適用して平衡含水量を推定し、水蒸気吸着等温線として図5に示した。水セメント比0.3のコンクリートの硬化ペースト部分を粉末化し、塩の飽和溶液で調湿して得られた文献値⁷⁷と本実験結果とは良く一致している。

Constant outer relative humidity h

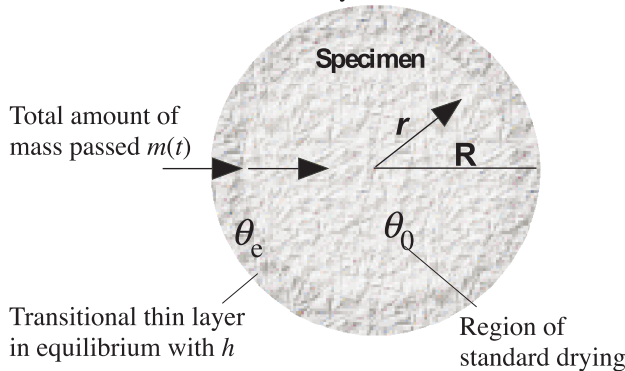


図4 球状供試体の吸着モデル

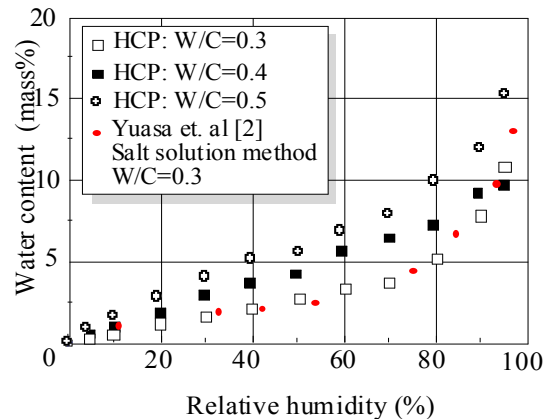


図5 硬化セメントペーストの等温吸着の比較

4.2 水分特性曲線

水蒸気吸着等温線は相対湿度と材料の平衡含水率の関係で、水分の化学ポテンシャルと含水率の関係のハイグロスコピックレンジの関係を示す。高含水率域におけるこの関係は、Water retention curveと呼ばれ、Pressure plateまたはPressure membrane法と呼ばれる方法で測定される。またこれらの2つの含水率レンジを結合したものは水分特性曲線(Moisture characteristic curve)と呼ばれる。水分特性曲線は、材料内の水分の自由水に対する化学ポテンシャル差 $\Delta\mu$ と含水率との関係である。その応用範囲は極めて広く、土壌物理、植物生理学、食品工学、そして建設分野でもしばしば利用され、各々の分野の実用単位の形で測定されることが多い。土壌物理学では $\Delta\mu$ を重量ポテンシャルに換算したpFが用いられる。植物生理学では水ポテンシャル、食品工学では水分活性 a_w などと呼ばれるが、いずれも $\Delta\mu$ に対応しているので、一般的な水分の駆動力を知るために利用される。これによって物性の異なる多様な土に保持される水分を統一的に扱い、植物の吸水との関連を検討することができる。また微生物が生体膜を通じて食品から水分を移動させ、そこに生育可能であるかどうかという問題についても実用的な応用が行われている。建設分野における水分特性曲線の応用として、例えばシルト質の土壌に接するコンクリート基礎は吸水するのか脱水されるのか、コンクリート外壁に生育する微生物が生態膜を通じて水分を補給できるのはコンクリートの含水率がどれほどの場合なのか、内部養生を可能にする軽量骨材の細孔径分布と初期含水率をどう設計するか、などの問題についても明かな答えを出すことができる。

Penner⁷⁸は土壌物理におけるSuctionの概念を建設材料分野に初めて導入し、測定法と共に木材についての水分特性曲線の測定例を示し、SeredaとHatcheon⁷⁹、筆者ら⁸⁰は気泡コンクリートについての測定例を示した。Bomberg⁸¹は土壌物理の知見を建築材料に広範囲に適用し、含水率と毛管圧の関係をALC、レンガ、軟質繊維板について測定した。このように、建設材料分野での水分特性曲線の測定は、土壌物理学の知見に負うところが大きく、その測定手法もpFのそれを踏襲するところが多い。

4.2.1 Pressure plate法

湿り材料に毛管圧に等しい空気圧をかければ、その毛管圧に対応するケルビン半径以上の細孔に含ま

れる水は自由水となり重力によって移動する。空気圧 P と離脱水分の関係から毛管圧-含水率曲線すなわちWater retention curveが求められる。

$$P = -\frac{2\phi}{r} \cos\theta \quad (22)$$

ここで、 P は空気圧（毛管圧）、 r はケルビン半径、 θ は接触角、 ϕ は気-液界面自由エネルギーである。この方法では離脱した水分を系外へ導出し、精度よく重量を測定する方法が難しい。Kisselら⁸²の装置では多孔質基盤の下にゴムの膜を配し、水を集めるようにしてある。また、加圧ではなく下方から吸引する方法もあり、これらの測定法に関するFagerlund⁸³のレビューがある。この方法は動的水分排除法などとも呼ばれ⁸⁴、細孔分布測定用に市販の測定装置も存在する⁸⁵。測定には手間がかかるので自動化された装置も提案されている^{86,87}。

4.2.2 サイクロメータ法

(1) 既往の研究

熱力学的な原理に基づく露点温度測定により0.960から0.999の範囲の水分活性の測定ができる。この測定に使用される熱電対サイクロメータは農業科学の分野で開発された機器である⁸⁸。高湿度域の相対湿度の直接測定は一般に難しいが、気体の露点温度を測定するため精度が高い。

(2) 測定原理⁸⁹

露点温度降下 ΔT を測定するため、プローブ内の熱電対の一つの接点に電流を流し、ペルチエ効果によってその接点を冷却する。もう一つの接点を用いて熱電対にも用いられているゼーベック効果による測温を行う。

温度が T 、露点温度が T_d である1モルの水蒸気の相対圧 P/P_s が高く、また $\Delta P = P_s - p$ も $\Delta T = T - T_d$ も小さいときに、クラウジウス-クラペイロンの式によって

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{\Delta H}{TV_g} = \frac{P_s \Delta H}{RT^2}, \quad (23)$$

ここで V_g は水蒸気の体積で、水のそれよりも十分に大きい。 ΔH は水の相変化に伴うエンタルピー変化である。また理想気体に於ける $P_g V_g = RT$ の関係をを用いている。

冷却用接点と測温接点間の熱電対の熱起電力 E は熱起電力計数を ε として次式で表される。

$$E = \varepsilon \Delta T = \varepsilon [RT^2/\Delta H][(P_s - P)/P_s] = \varepsilon [RT^2/\Delta H](1 - P/P_s) \quad (24)$$

この式の P/P_s を $\exp(-\Delta\mu/RT)$ で置き換えて整理すると次式を得る。

$$E = \varepsilon [RT^2/\Delta H][1 - \exp(\Delta\mu/RT)] = \varepsilon [RT^2/\Delta H][(\Delta\mu/RT) - (\Delta\mu/RT)^2/2!] \cong \varepsilon \Delta T \Delta\mu/\Delta H \quad (25)$$

水蒸気圧が変化せず、水の相変化に伴うエンタルピー変化 ΔH も温度に依存せず、 ΔT そのものも小さいとすれば、水蒸気そしてこれと平衡状態にある材料中の水分の化学ポテンシャルは以上のようにして露点温度降下から得られることになる。測定可能な範囲は冷却能力と微小電圧の測定精度で決まり、 $-5 \times 10^3 \sim -10^2$ (J/kg) 程度である。

5 水分移動係数

5.1 湿気伝導率

5.1.1 カップ法

カップ法はASTMなど各国の規格に定められている標準試験法⁹⁰である。JISでは直径 $\phi 60$ mm、深さ15mmの容器内の試料下面に吸湿材を入れ、試料を通して外部の湿分が透過するようにし、容器の全重量の定常的な増加を確認して湿気伝導率を求める。湿気伝導率は相対湿度の関数となるが、この方法は、各種建材のように厚さが大きく、吸放湿性のある試料では定常になるまでの時間が長くなる。また、主要な誤差要因として、試料が厚い場合にカップと接する周辺部の湿気の流れに1次元性が確保されない場合があること、表面の湿気拡散抵抗の再現性の問題が指摘されており、補正法も提案さ

れている⁹¹。この方法ではセメント系材料についての測定は多くない⁹²。

5.1.2 2-Box法

2種の調湿剤で水蒸気圧差を付けた2つの箱の境界に試料を設置し、調湿剤の容器の重量を連続測定して定常状態を確認して湿気伝導率を求める。測定原理はカップ法と同じであるが、大版の試料の測定が可能となり、湿流の1次元性が向上する。また箱内の空気を攪拌できるので表面の湿気拡散抵抗の再現性も向上する。しかし装置の構成に標準が無く、研究者により異なるため、測定結果も一致を見ないことが多い。大沢は各装置を比較検討している⁹³。

5.1.3 Sorptivity method

(1)測定原理

液相水分の流れが無視でき、また含水率の変化も小さく水分拡散係数 $D_{\theta v}$ が含水率に依存しないとき、水分の保存の式は等温条件で次のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_{\theta v} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) \quad (26)$$

半無限固体において、境界条件が $c=c_0$ ($x=0, t \geq 0$)、初期条件が $c=c_0$ ($x \geq 0, t=0$)であるとき、表面絶対湿度の変化に対する全移動水分量 W (kg/m^2) は次のようになる。 $D_{\theta v}$ は変化した含水率範囲の平均の水分拡散係数である。

$$W = 2(c_i - c_0) \left(\frac{D_{\theta v} t}{\pi} \right)^{1/2} \quad (27)$$

c は絶対湿度(kg/m^3)に対応する材料の含水率(kg/m^3)である。水分拡散係数と湿気伝導率 D_v には次の関係がある。

$$D_{\theta v} = \rho_{vs} \frac{\partial h}{\partial \theta} D_v \quad (28)$$

従って変化した含水率範囲の平均の湿気伝導率 D_v (kg/msPa)は次のようになる。

$$D_v = \frac{\pi}{4(c_i - c_0)^2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial h} \right) \left(\frac{W}{\sqrt{t}} \right)^2 \quad (29)$$

測定は、材料の環境の相対湿度を急激に変化させ、吸湿または放湿による含水率の変化を時間の平方根に対してプロットしその傾きを求める。また $\partial \theta / \partial h$ は吸着等温線の傾きで別途測定しておく。

この方法は表面の湿気伝達抵抗を考慮せず、試験体も実際には半無限ではないこと、湿気拡散率の含水率への依存が小さいなどの仮定を含んでいるが、中尾ら⁹⁴はその誤差の評価を行い、必要な精度で測定するための条件を検討している。

(2) 試験例

精密相対湿度発生装置に、コンプレッサ、電子天秤、及びパソコンを組み合わせる実験装置とする。電子天秤は最大秤量260g、分解能は1mmgで、デジタル出力(RS-232C)を持つ。湿度変化による試料の重量変化1分ごとにパソコンに取り込み、計算を行う。試料は水セメント比が0.3、0.4、0.6、0.8のコンクリートでそれぞれ100 x 1000 x 10 mm程度の大きさとした。サンドペーパーにより切断面を調整し、試料の吸放湿面以外の面をアルミテープで断湿処理した。試料をステンレスワイヤで電子天秤から吊り下げ、相対湿度発生装置の試料層の中央に位置させる。まず、温度20℃一定の条件の下で相対湿度60%で平衡状態となった試料を設置した後、試料槽を急激に90%に変化させこれを維持し、積算質量変化量 ΔM (kg)について、勾配 $\Delta M / S \Delta t$ ⁷⁹を求める。ここで S は試料の表面積(m^2)である。湿気伝導率は式(29)から計算でき、図6のようになった⁷⁹。

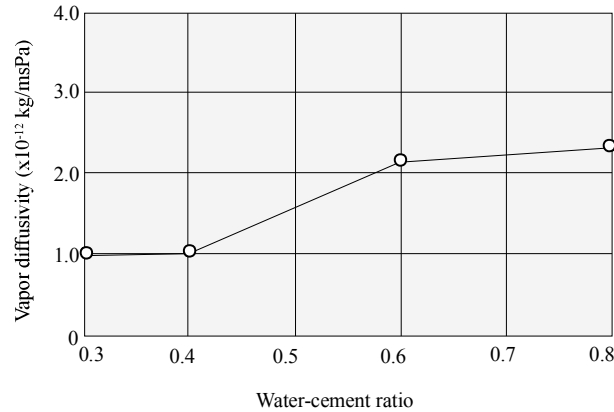


図6 硬化セメントペーストの水セメント比と湿気伝導率の関係

5.2 水分伝導率

建設材料分野では不飽和水分移動係数を水分伝導率と呼ぶことが多い。Jenz⁹⁵は高含水率に於ける水分伝導率測定法を各種検討している。

5.2.1 水分の流束と含水率分布を求める方法

この方法は、水分の流束の式

$$J_L = -\rho_L D_\theta \nabla \theta \quad (30)$$

を用いて、水分の流束 J_L と $\nabla \theta$ を測定して D_θ を求めるものである。水分の流束 J_L の求め方には次の2つの方法がある。

試料に吸収された水分を実測する方法

Kooi⁹⁶、松本⁹⁷は重力の影響を最小限にするため、水平方向の一面吸水により水分を試料に移動させ、流入量はピペットのメニスカスの移動から求めている。流入量が一定になった時点で、試料を切断し、含水率分布を求める。この方法では得られる含水率の範囲が狭く、吸水過程の水分伝導率のみが測定される。

試料全体の重量変化を利用する方法

Jonel⁹⁸らはALCの垂直方向の自由吸水試験を行い、幾つか用意しておいた同じ試験体を一定時間に順番に切り出し、流入量を全体質量増と切り出した各断片の含水率から求めている。筆者ら⁹⁹は吸水過程の水分伝導率測定にJonelらの方法を、乾燥過程の水分伝導率測定にKooiの方法を用いた。乾燥過程での試験法は、飽和吸水させた5面断湿試料の一面から放湿させ、試料内の含水率量分布の経時的な変化と全体の質量減を測定して D_θ を求めた。

この方法は定常状態でなくとも実施できるので迅速であり、含水率分布を求める時間（切断する時間）を調節すれば、広い範囲の含水率における水分伝導率が得られる。しかし、時間をおいて次々に別な試料を切り出すためにばらつきが大きく、切断しやすい試料に限られることなどが問題であるが、含水率分布をガンマ線減衰法で非破壊測定したNielsen¹⁰⁰とCammerer¹⁰¹の結果とはよく一致している。

(1) 吸水過程

プリズム形状のモルタル試験体（40 x 40 x 160 mm）を10個用意し、それぞれに分断し易い様に予め20mmピッチにノッチを付けておく。これらを20℃、98%の環境に1週間放置する。次いで下面5mmを残してアルミ фольで断湿処理する。浅く水を張った容器に解放面を水に接するように立て吸水させる。吸水開始後1、2、3、4、6、8、10、15、20、30日に各1個を回収し、8個に分断して各ピースの質量を測定する。 k 番目のピースの質量を q_k (kg)、その105℃乾燥重量を q_{dk} (kg)、その体積を v (m³) とすれば、体積含水率 θ_k は $(q_k - q_{dk})/v$ である。試料の断面積を A (m²)、回収のインターバルを Δt (sec) とすれば k 番目のピースにとっての水分流束は $(kg/m^2s) \sum_k^8 (q_i - q_{di})/A\Delta t$ であり、 $D_{\theta k}$ は次のように表される。

$$D_{\theta K} = \frac{\sum_k^{\infty} (q_i - q_{di}) / A \Delta t}{\left(\frac{\theta_k - \theta_{k+1}}{\Delta x} \right)} \quad (31)$$

(2) 放湿過程

吸水過程と同様の試験体を準備する。前述の湿潤装置を利用して、全ての試料を20℃の水道水で飽水状態にする。全ての試料について上面のみを残してアルミ фольで断湿処理し、恒温恒湿室に放置して乾燥を開始する。およそ1、2、3、4、6、8、10、15、20、30日に各1個を回収し、8個に分割して各ピースの質量を測定する。以後は吸水過程と同様な計算により $D_{\theta K}$ が求められる。オートクレーブ気泡コンクリートについての広い含水率範囲の測定結果を、迅速法やガンマ線減衰法の結果と共に図7に示す。

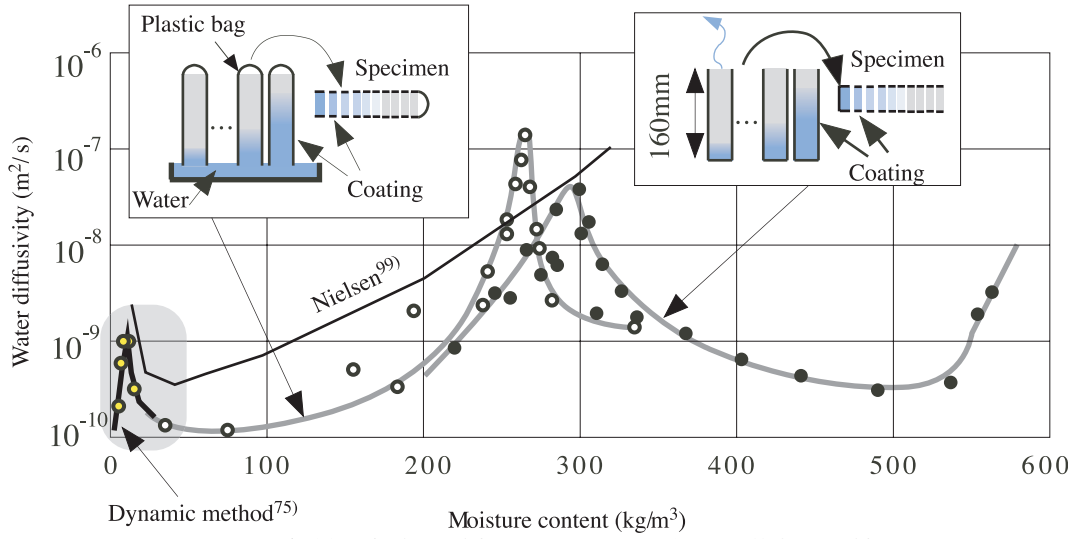


図7 各種の方法で測定された ALC の水分伝導率の比較

5.2.2 保存式をBoltzmann変換して求める方法

この方法は、等温条件の水分収支式

$$\nabla(D_{\theta} \nabla \theta) + \rho_L \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (32)$$

を、初期・境界条件 ($x=0$ のとき、どの時間でも $\theta = \theta_0$ 、 $t=0$ のとき、どの x でも $\theta = \theta_i$) の下でボルツマン変数 $\lambda = x/\sqrt{t}$ を導入すれば上式は常微分方程式

$$\frac{d}{d\lambda} \left(D_{\theta} \frac{d\theta}{d\lambda} \right) + \frac{1}{2} \lambda \frac{d\theta}{d\lambda} = 0 \quad (33)$$

となり、 $x(\theta, t) = \lambda(\theta) t^{1/2}$ の形の解をもつ¹⁰²。この式を積分すると、 D_{θ} は次式となる¹⁰³。

$$D_{\theta} = -\frac{1}{2} \lambda \left(\frac{d\theta}{d\lambda} \right) \int_{\theta_0}^{\theta} \lambda d\theta \quad (34)$$

各時刻の含水率分布を求めることにより、 θ とボルツマン変数 λ の関係を求め、 $(d\lambda/d\theta)$ と積分項を計算すれば D_{θ} が得られる。この方法は、建設材料に限っても多くの測定例があり、誤差の検討も行われている¹⁰⁴。

5.2.3 ルンド大学とCSTBの方法

(1) モーメント法

ClaessonとGaffner¹⁰⁵は含水率分布も水分流束も測定することなく水分伝導率を測定する方法を開発した。長さ L 、断面積 A のプリズム形状の試験体を含水率 θ_1 に調整する。この試験体の5面を断湿処理し、残りの一面（長軸に直行する面の1つ）を異なる水分環境に解放しその含水率が θ_2 となるようにする。試料の片面は図8のように支持され、片面は天秤に乗せかけ、または吊られて水分移動による重量変化を測定する。時間による質量変化が定常状態となったとき、その直線の勾配 dm/dt と D_θ との関係は次のようになる。

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{A}{L} \int_{\theta_1}^{\theta_2} D_\theta (\theta) d\theta \cong -\frac{A}{L} D_\theta \Delta\theta \quad (35)$$

すなわち、こ θ_1 と θ_2 の差が十分小さく D_θ は一定と見なせると仮定している。従って水分伝導率は

$$D_\theta = -\frac{L}{A(\theta_2 - \theta_1)} \cdot \frac{dm}{dt} \quad (36)$$

となる。ここで求められた D_θ は θ_1 と θ_2 の平均の含水率における水分伝導率である。この測定法によりALC、レンガ等が測定されている¹⁰⁶。

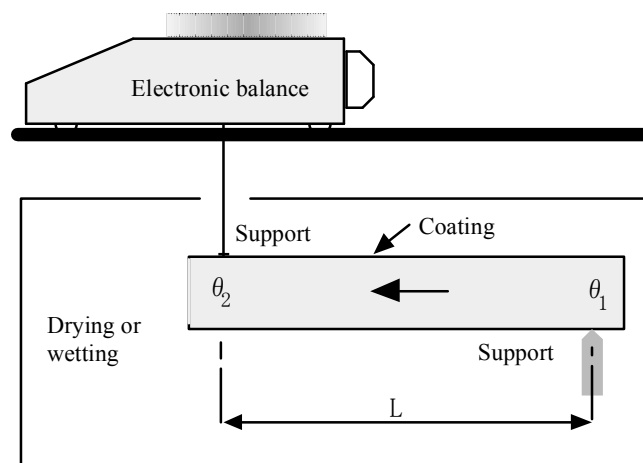


図8 モーメント法の原理

(2) CSTBの方法¹⁰⁷

濃度の異なるポリエチレングリコール溶液を試料の両側に配し、一定の化学ポテンシャル勾配を作る。半透膜を介しているため水分だけが低濃度側から高濃度側に移動し、その量は液面レベルの比較から求められる。しかし、2つの溶液は共に十分大量にあるため、この水分移動による濃度の変化はないものとしている。また定常状態で試料内部の厚さ方向で駆動力は一定と考えている。

$$J_L = -D_\mu \frac{RT d \ln(c_1/c_2)}{dx} \quad (37)$$

ここで、 D_μ は水分の化学ポテンシャル差を駆動力にしたときの水分伝導率、 c は溶液のモル濃度である。高分子溶液の濃度差で直接化学ポテンシャル差を与えるため、それ以外の水分駆動力（蒸気圧、温度、重力）などのはいる余地がない。また濃度の組み合わせを変化させることにより、含水率の関数として水分伝導率を求めることも出来る。装置は非常に簡単で、運転にも高度な技術を必要としない。

6. おわりに

水分量の測定は建設材料に限らず、食品、土壌、美容分野でも大きな関心の対象となっている。様々な国際会議が定期的に開催されているので、前述のSymposium on Humidity and Moisture以外にも、Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, International Symposium on Time Domain Reflectometryなどを検索すれば、最新の情報が得られる。本稿ではコンクリート中の水分に関わる物性値の測定法を、測定原理を主眼として解説した。紹介されている測定法自体は必ずしも非破壊試験とは云えないが、読者が測定原理を応用して非破壊測定法を開発する際の一助となれば幸いである。

¹ C. A. Menzel: A Method for Determining the Moisture Condition of Hardened Concrete in terms of Relative Humidity, PCA R&D Laboratories Bulletin D4, p. 26, (1955)

² G. E. Monfore: A Small Probe-Type Gage for Measuring Relative Humidity, Journal of the PCA Research and Development Laboratories, 5(29), pp. 41-47, (1963)

³ Z. C. Grasley: Internal Relative Humidity, Drying Stress Gradients and Hygrothermal Dilatation of Concrete, PCA R&D Serial No. 2625, Portland Cement Association, p. 73, (2003)

⁴ J. L. Granja, M. Azenha, C. de Sousa, R. Faria and J. Barros: Hygrometric Assessment of Internal Humidity in Concrete: Practical Application Issues, Journal of Advanced Concrete Technology, 12, pp. 250-265, (2014)

⁵ H. Fredin and H. Skoog: Moisture measurement in Concrete: Temperature Effects and Corrections on Relative Humidity Measurements, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, (2005)

⁶ C. Andrade, J. Sarria and C. Alonso: Relative Humidity in the Interior of Concrete Exposed to Natural and Artificial Weathering, Cement and Concrete Research, 29, pp. 1249-1259, (1999)

⁷ L. E. Marley: Continuous moisture analysis instrumentation, Int. Symp. Moisture and Humidity, 15-18, April, Washington DC, pp. 649-657, (1985)

⁸ K. Yabe: Soil Moisture Measurement, SPCPG, (41), pp. 90-94, (1980) (in Japanese)

⁹ R. Wormald and A. L. Britch: Method of measuring moisture content applicable to building materials, Build. Sci., 3, pp. 135-145, (1969)

¹⁰ D. Whiting: Assessment of potential techniques for in-situ, real time moisture measurement in building envelope systems - A literature survey, DOE report, W-7405-eng-26, p. 85, (1983)

¹¹ J. Hundt and J. Buschmann: Moisture Measurement in Concrete, Materials and Structures, 4(22), pp. 253-256, (1971)

¹² L. Parrott: A Review of Methods to Determine the Moisture Conditions in Concrete, in J. Kropp and H. K. Hilsdorf eds., Performance Criteria for Concrete Durability, E & FN Spon, London, (1995)

¹³ M. C. Phillipson, P. H. Baker, M. Davies, Z. Ye, A. McNaughtan, M. Phil, G. H. Galbraith and R.C. McLean: Moisture measurement in building materials: an overview of current methods and new approaches, Building Service and Engineering Technology, 28(4), pp. 303-316, (2007).

¹⁴ E. S. B. Ferraz: Gamma-ray Attenuation to Measure Water Contents and/or Bulk Densities of Porous Materials, Proc. Isotope and Radiation Technology in Soil Physics, pp. 449-460, (1983)

¹⁵ A. F. Nielsen: Gamma-ray Attenuation used for Measuring the Moisture Content and Homogeneity of Porous Concrete, Building Science, 7, pp. 257-263, (1972)

¹⁶ J-F. Daïan: Condensation and Isothermal Water Transfer in Cement Mortar, Transport in Porous Media, 3, pp. 563-589, (1988)

¹⁷ D. Quenard and J. Sallee: A Gamma-Ray Spectrometer for Measurement of the Water Diffusivity of Cementitious Materials, MRS Symp. Proc. Boston, 137, pp. 165-169, (1989)

¹⁸ M. K. Kumaran, G. P. Mitalis, R. Kohonen and T. Ojanen: Moisture Transport Coefficient of Pine from Gamma Ray Absorption Measurements, ASME-HTD 123, pp. 179-183, (1989)

¹⁹ P. Descamps: Continuum and Discrete Modeling of Isothermal Water and Air in Porous Media, PhD. Thesis, Katholic University of Leuven, (1997), <http://www.bwk.kuleuven.ac.be/bwk/physics/fd01.htm>

²⁰ G. A. Matzkanin and C. G. Gardner: Nuclear Magnetic Resonance Sensors for Moisture Measurement in Roadways, Transport Research Record, No. 532, pp. 77-85, (1975)

²¹ R. J. Gummerson, C. Hall, W. D. Hoff, G. N. Holland and W. S. Moore: Unsaturated Water Flow within Porous Materials Observed by NMR Imaging, Nature, 281, pp. 56-57, (1979)

²² G. A. Matzkanin, A. DeLosSantos and D. A. Whiting: Determination of Moisture Level in Structural Concrete using Pulsed NMR, PB82-230491, p. 83, (1982)

²³ L. Pel: Moisture Transport in Porous Building Materials, PhD. Thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, (1995)

²⁴ K. Kissel and M. Krus: Experimental Determination of Building Materials Properties for Moisture Calculation, Proc. Int. Workshop on Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components - Models and Characterization of Transfer Properties, Paris, pp. 322-342, (1995)

- ^{2 5} P. F. de J. Cano-Berrita, B. J. Balcom, T. Bremner, M. B. MacMillan and W. S. Langley: Moisture Distribution in Drying Ordinary and High Performance Concrete Cured in a Simulated Hot Dry Climate, *Materials and Structures*, 37, pp. 522-531, (2004)
- ^{2 6} R. Roethig: Zerstörungsfreie Prüfung von Gasbetonelementen. Eine Untersuchung zum Stand der Technik, *Baustoffind. Ausg.*, 19(2), pp. 16-21, (1976)
- ^{2 7} L. Pel: *ibid.*
- ^{2 8} H. Justnes, K. Bryhn-Ingebrigtsen and G. O. Rosvold: Neutron Radiography: An Excellent Method of Measuring Water Penetration and Moisture Distribution in Cementitious Materials, *Advance in Cement Research*, 6(22), pp. 67-72, (1994)
- ^{2 9} I. Maruyama, M. Kanematsu, A. Teramoto, H. Hayano, H. Iikura and T. Noguchi: Evaluation of Water Behavior between Aggregate and Cement Paste Matrix by Neutron Radiography, *J. Struct. Constr. Eng.* 74(645), pp.1905-1912 (2009)
- ^{3 0} M. Tabata, E. Koh, and E. Kamada: Measurement of Moisture Content by Electric Resistance Method, *Prep. Annual Meeting AIJ*, (Tokai), pp. 117-118, (1976) (in Japanese)
- ^{3 1} Nakane, S. et. al., Measurement of Moisture Content in Concrete Structure, *Cement and Concrete (Japan)*, No. 473, pp.8-14, (1986) (in Japanese)
- ^{3 2} O. Katsura, T. Yoshino, M. Tadada and E. Kamada: Theoretical Study of Concrete Moisture Content as Measured with the AC 2-Electrode Method, *Proc. Annual Meeting of JCI*, 16(1), pp.735-740, (1999)
- ^{3 3} A. Berg, G. A. Niklasson, K. Brantervik, B. Hedberg and L. O. Nilsson: Dielectric Properties of Cement Mortar as a Function of Water Content, *J. Appl. Phys.*, 71(12), pp. 5897-5903, (1992)
- ^{3 4} P. Hudec, C. MacInnis and M. Moukwa: The Capacitance Method of Measuring Moisture and Salt Content of Concrete, *Cem. Concr. Res.*, 16, pp.481-490, (1986)
- ^{3 5} Y. Kasai, et. al.: Measurement of Moisture Content of Concrete by Embedded Ceramic Sensors, *Proc. Annual Meeting of JCI*, 13(1), pp. 397-402, (1991)
- ^{3 6} H. Dehghanisani, T. Yamamoto and M. Inoue: Practical Aspect of TDR Simultaneous Measurements of Water and Solute in a Dune Sand Field, *J. Jpn. Soc. Soil. Phys.*, 98, pp. 21-30, (2004)
- ^{3 7} S. B. Jones, J. M. Wraith and D. Or: Time Domain Reflectometry Measurement Principles and Application, *Hydrol. Process*, 16, pp. 141-153, (2002)
- ^{3 8} C. J. Korhonen, V. C. Janoo and C. M. Berini: Time-Domain Reflectometry of Water Content in Portland Cement Concrete, *Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Special Report 97-27*, p.15, (1997)
- ^{3 9} E. J. de Place Hansen and M. H. Hansen: TDR measurement of Moisture Content in Aerated Concrete, In: *Building Physics 2002*, 6th Nordic Symposium, Session 9, pp. 381-388, (2002)
- ^{4 0} G. A. Scheffler and R. Plagge: Application of Instantaneous Profile Measurement of Moisture Content and Moisture Potential in Porous Materials, *Materials and Structures*, 44, 1517-1536, (2011)
- ^{4 1} S. Laurens, J. P. Balyssac, J. Rhazi, G. Klysz and G. Arliguie: Non-destructive Evaluation of Concrete Moisture by GPR: Experimental Study and Direct modeling, *Materials and Structures*, 38, pp. 827-832, (2005)
- ^{4 2} G. Leucci: Ground Penetrating Radar: an Application to Estimate Volumetric Water Content and Reinforced Bar Diameter in Concrete Structures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10, pp. 411-422, (2012)
- ^{4 3} W. Leschnik and U. Schlemm: Measurement of the Moisture Content and Salt content of Building Materials, in: Uomoto, ed. *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, pp. 209-218, (2000)
- ^{4 4} I. Maruyama, N. Kishi and K. Kawase: Measurement of Moisture Content in Hardened Cement Paste using Terahertz Radiation, *J. Struct. Constr. Eng.* 75(652), pp.1073-1079, (2010)
- ^{4 5} E. Saare and I. Jansson: Measurement of Thermal Conductivity of Moist Porous Building Materials, *RILEM Int. Conf. Lightweight Concr., Goteborg*, pp. 353-370, (1960)
- ^{4 6} J. H. Blackerll: A Transient-Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Materials in Bulk, *J. Appl. Phys.*, pp.137-144, (1954)
- ^{4 7} F. A. Joy: Thermal Conductivity of Insulation Containing Moisture, *Symp. ASTM*, pp. 65-80, (1957)
- ^{4 8} B. H. Vos: Measurement of Moisture Content in Building, *Proc. RILEM/CIB Symp. Moisture Problem in Building*, Helsinki, (1966)
- ^{4 9} T. J. Plona and D. L. Johnson: Acoustic Properties of Porous Systems: I. Phenomenological Description, *Physics and Chemistry of Porous Media*, AIP conf. Proc. No.107, pp. 89-104, (1984)
- ^{5 0} N. Sobue: Simulation Study on Stress Wave Velocity in Wood above Fiber Saturation Point, *J. Timber Society of Japan*, 39(3), pp. 271-276, (1993)
- ^{5 1} H. H. Willems, J. A. Poullis and C. H. Massen: Microgravimetric Measurements of Water Vapour Sorption on Hydrated Cement Pastes, *Thermochimica Acta*, 103 (1), pp. 137-145, (1986)
- ^{5 2} S. Fujimoto and H. Inoue: Water Vapor Adsorption on Vicol Glass, *Journal of Chemical Engineering (Japan)*, 11(1), pp. 41-47, (1985) (in Japanese)
- ^{5 3} M. Matsumoto and Y. Matsushita: Sorption-Desorption Behavior of Aerated Concrete in the Hygroscopic

Range I - Verification of Analysis Based on the Local Equilibrium and Linear Model, Tans. AIJ, No. 302, 37-45, (1981) (in Japanese)

^{5 4} M. Minahata and Y. Toyoda: Measurement of Equilibrium Noisture Content of Building Materials, Prep. Annual Meeting of AIJ, (Design and Planning), pp.1039-1040, (1986) (in Japanese)

^{5 5} A. Sakota, K. Chiara and M. Suzuki: Application of Microcomputer to Testing Apparatus - Determination of Sorption Equilibrium and Sorption Rates, Kagaku-Souchi, 24, pp. 31-36, (1982)

^{5 6} M. J. Schuch and K. S. Udell: A Study of the Thermodynamics of Evaporation and Condensation in a Porous System, Am. Soc. Mech. Eng. Heat Transfer Div., 46, pp.159-165, (1985)

^{5 7} H. Naono and M. Hakuman: Evaluation of Particle Surfaces and Pore Structure, Surface (Japan), 29(5), pp. 364-375, (1991) (in Japanese)

^{5 8} K. Miura and M. Tanioka: An Improved Measurement of the Water-Vapor Adsorption Devised as One of the Multiple System of Indirect Measurement, Applied Physics (Japan), 46(6), pp. 589-596, (1977) (in Japanese)

^{5 9} A. Raoof, J-P. Guilbaud, A. Dupas and N. L. Tran, An Automatic Micro-Gravimetric Water Sorption Apparatus, Proc. Int. Workshop on Mass-Ennergy Transfer and Deterioration of Building Components - Models and Characterisation of Transfer Properties, Paris, pp. 386-396, (1995)

^{6 0} H. Kitano, T. Takahashi and T. Inamatsu: A Method to Provide the Humidity Fixed Points by Saturated Salt Solutions, Bulletin of the Measurement and Control Society, 23(12), pp. 1246-1253, (1987)

^{6 1} M. Ohmi and M. Suzuki: Water Vapor Adsorption of Woods and Water Absorbing Polymers, Bulletin of Tokyo Agricultural University, (22), pp. 17-23, (1985)

^{6 2} M. Matsumoto and Y. Matsushita: *ibid.*

^{6 3} J. J. Haggymassy: Pore Structure Analysis by Water Vapor Adsorption, PhD. Thesis, Department of Chemistry, Clarkson College of Technology, (1970)

^{6 4} L. Ahlgren: Fuktfixering i Poroosa Byggnadsmaterial., Report 36, Division of Building Technology, Lund Institute of Technology, (1972)

^{6 5} T. Takahashi, T. Inamatsu and H. Kitano: Construction of a Humidity Generator by Flow-Division Method, Bulletin of the Measurement and Control Society, 24(6), pp. 557-562, (1988)

^{6 6} R. S. Fisher: An Accurate Flow-Division Humidity Generator, Proc. Int. Symp. Moisture and Humidity, pp. 247-249, (1985)

^{6 7} A. V. Someshwar and B. W. Wilkinson: Study of Electric Field-Induced Effects on Water Vapor Adsorption in Porous Adsorbents, Ind. Eng. Chem. Fundam, 24 (2), pp. 215-220, (1985)

^{6 8} S. Tada: Pore Structure and Moisture Characteristics of Porous Inorganic Building Materials, in Advance in Autoclaved Aerated Concrete, Balkema, Rotterdam, pp. 53-63, (1992)

^{6 9} H. Saidani-Scott and B. F. Day: Measurement of Moisture Migration in Building Materials: Part 1, Experimental apparatus and Procedure, Part 2, Mathematical Analysis and Results, Proc. Int. Workshop on Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components - Models and Characterization of Transfer Properties, Paris, pp. 295-321, (1995)

^{7 0} H. H. Willems, J. A. Poulsen and C. H. Massen: Microgravimetric Measurements of Water Vapour Sorption on Hydrated Cement Pastes, Thermochimica Acta, 103(1), pp. 137-145, (1986)

^{7 1} S. Fujimoto and H. Inoue: *ibid.*

^{7 2} B. Perrin, V. Baroghel Bouny and L. Chemloul: Méthodes de Détermination de la Diffusivité hydrique de Pâtes de ciments durcies: Materials and Structures, 31, pp. 235-241, (1998)

^{7 3} J. Drchalova and R. Cerny: Non-Steady-State Methods for Determining the Moisture Diffusivity of Porous Materials, Int. Commun. Heat Mass Trans., 25(1), pp. 109-116, (1998)

^{7 4} J. Arfvidsson and M. J. Cunningham: A Transient Technique for Determining Diffusion Coefficients in Hygroscopic Materials, Building and Environment, 35, pp. 239-249, (2000)

^{7 5} A. Anderberg and L. Wadso: Method for Simultaneous Determination of Sorption Isotherms and Diffusivity of Cement-Based Materials, Cement and Concrete Research, 38, pp. 89-94, (2007)

^{7 6} S. Tada and K. Watanabe: Dynamic Determination of Sorption Isotherm of Cement Based Materials: Cement and Concrete Research, 35(12), pp.2271-2277, (2005)

^{7 7} N. Yuasa, Y. Kasai, S. Tada and O. Okawara: Sorption Isotherm and Moisture Conductivity of Cover Concrete, Cement Science and Concrete Technology, 52, pp.1042-1049 (1998) (in Japanese).

^{7 8} E. Penner: Suction and its use as a measure of moisture content and potentials in porous building materials, in Waxler, A. ed., Humidity and Moisture, Vol. 4, Reinhold publ., (1965)

^{7 9} P. J. Sereda and N. B. Hatcheon: Moisture equilibrium and migration in building materials, ASTM Special Tech. Publ., 385 (1965)

^{8 0} S. Tada and S. Nakano: Microstructural Approach to Properties of Moist Cellular Concrete, Autoclaved Aerated Concrete -Moisture and Properties, F. H. Wittmann ed., Elsevier, pp. 71-88, (1983)

^{8 1} M. Bomberg: Moisture flow through porous building materials, Lund Institute of Technology, Report 52

(1974)

^{8 2} K. Kissel and M. Krus: Experimental Determination of Building Materials Properties for Moisture Calculation, Proc. Int. Workshop on Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components - Models and Characterisation of Transfer Properties, Paris, pp. 322-342, (1995)

^{8 3} G. Fagerlund: Determination of Pore Size Distribution by Suction Porosimetry: Materials and Constructions, 6(33), pp. 191-201, (1973)

^{8 4} C. Gelinas and R. Angers: Improvement of the Dynamic Water-Expulsion Method for Pore Size Distribution Measurement, Am. Ceram. Soc. Bull., 65(9), 1297-1300, (1986)

^{8 5} L. Zager: Porengrößenverteilung nach dem Luft-Wasser-Verdrängungsverfahren. Auswertung der Messergebnisse mit Hilfe eines elektronischen Tischrechners, Ber. Dt. Keram. Ges., 55(1), pp. 13-17, (1978)

^{8 6} I. Shishido and M. Suzuki: A new measurement method of liquid transport properties, Proc. Int. Symp. Drying, 2, pp. 764-768, (1984)

^{8 7} D. Boels, J. B. H. M. van Gils, G. J. Veerman, and K. E. Wit: Theory and systems of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivities, Soil Science, 126, pp. 191-199, (1978)

^{8 8} L. A. Richards: A Thermocouple Psychrometer for Measuring the Relative Vapor Pressure of Water in Liquid or Porous Materials, in Wexler, A. ed., Humidity and Moisture, Reinhold publ. Co. NY, 4, pp. 3-18, (1965)

^{8 9} S. Tada: Pore Structure and Moisture Characteristics of Porous Inorganic Building Materials, France-Japan workshop on simultaneous heat and moisture transport, Tokyo, p. 19, (1991)

^{9 0} F. A. Joy and A. G. Wilson: Standardization of the Dish Method for Measuring Water Vapor Transmission, Int. Symp. Humidity and Moisture, Washington DC., (4), pp. 259-270, (1963)

^{9 1} A-C. Andersson: Verification of Calculation Methods for Moisture Transport in Porous Building Materials, Document, Swedish Council for Building Research, D6, p.223, (1985)

^{9 2} B. Kari, B. Perrin and J. C. Foures: Perméabilité à la Vapeur d'eau de Matériaux de Construction: Calcul Numérique, Materials and Constructions, 24, pp. 227-233, (1991)

^{9 3} T. Ohsawa: Water Vapor Transfer Measurement Method for Building Materials, 6th Workshop of heat subcommittee in building environment committee in AIJ, pp. 39-46, (1976) (in Japanese)

^{9 4} M. Nakao and K. Ohshima: Dynamic Method for Measuring Moisture Properties of Building Materials, Research Paper of AIJ, No. 315, pp. 76-82, (1982) (in Japanese)

^{9 5} M. Janz: Methods of Measuring the Water Diffusivity at High Moisture Levels, PhD.Thesis, Lund Institute of Technology, TVBM-3076, (1997)

^{9 6} J. van der Kooi: Moisture Transport in Cellular Concrete Roofs, PhD Thesis, Technische Hogeschool Eindhoven, P.104, (1971)

^{9 7} M. Matsumoto: A Study on Simultaneous Heat and Moisture Transport and Moisture Accumulation in Building Walls, PhD. Thesis of Kyoto University, (1978) (in Japanese)

^{9 8} P. Jonel, V. Karamustafaoglu and R. Tepfers: Determination of the Coefficient of Capillary Flow for Steam-Cured Lightweight Concrete, Rilem Symp. Lightweight Concrete, Goteborg, pp. 433-437, (1960)

^{9 9} S. Tada and S. Nakano: Microstructural Approach to Properties of Moist Cellular Concrete, Autoclaved Aerated Concrete -Moisture and Properties, F. H. Wittmann ed., Elsevier, pp.71-88, (1983)

^{1 0 0} A. F. Nielsen: Moisture Distribution in Cellular Concrete During Heat and Moisture Transfer, Tech. Univ. Denmark, Copenhagen, Report 29, p. 219 (1974)

^{1 0 1} W. F. Cammerer: The Capillary motion of Moisture in Building Materials, Proc. 2nd Int. Symp. Moisture Problems in Building, Rotterdam, 2.1.2, (1974)

^{1 0 2} J. R. Philip: Theory of Infiltration, Adv. Hydrosoci., 5, pp. 215-296, (1969)

^{1 0 3} R. R. Bruce and A. Klute: The Measurement of Soil Moisture Diffusivity, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 20, pp.458-462, (1956)

^{1 0 4} B-X. Wang and Z-H. Fang: Water Absorption and Measurement of the Mass Diffusivity in Porous Media, Int. J. Heat and Mass Transfer, 31(2) pp. 251-257, (1988)

^{1 0 5} J. Claesson and D. Gaffner: Fukt i Porösa Byggnadsmaterial, Lund Institute of Technology, Report 1977.1, (1977)

^{1 0 6} A-C. Andersson: Verification of Calculation Methods for Moisture Transport in Porous Building Materials, Document, Swedish Council for Building Research, D6, p.223, (1985)

^{1 0 7} T. Duforestel and A. Miquel: Advanced Hygrometric Measurements, Proc. Int. Workshop on Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components - Models and Characterization of Transfer Properties, Paris, pp.365-385, (1995)