

論文の内容の要旨

論文題目 吸放湿性建築材料の水分拡散係数に関する動的同定手法の研究

氏名 孟 歌 辛

【背景・目的】

建築材料内部の熱・水分の性状を解析する場合、シミュレーションの予測結果が実測結果と大きくかけ離れることがしばしばある。特に、吸放湿性のある建築材料 ALC にはこのような乖離が起きやすい。その主な原因はシミュレーションに用いた水分拡散係数の値が不適切であると推定されている。

建築材料の水分物性値は、材料製法の少しの違いや劣化の程度などによってかなり異なるので、シミュレーションに用いた物性値は、実際に使用されている材料のサンプルを用い、実験室で測定するべきである。しかし、これまでの水分拡散係数の測定は定常状態で行うものであった。そのため、実験装置が複雑になるとか、定常状態に達するまでに長期間を要するなどの欠点があった。多くのシミュレーション事例は、材料物性については、使用材料そのものの数値を実測するのではなく、同種の材料の既存測定値を引用することが多い。ゆえに、物性値が不適切な場合もあり、含水率などのシミュレーション結果と実測値に大きな乖離を生じていたものと思われる。そのため、非定常状態においても材料の水分拡散係数を簡単かつ速やかに測定する手法が期待されている。

近年、IT 時代の到来に伴い、建物に関する種々の情報の要請がますます高まっている。建築物の劣化程度、結露状況や熱負荷などに関する情報を推定するために、実際の建築物の実測データからその建築物に使用されている外壁材料の水分拡散係数を推定することは、その要請に応えるための第一歩と思われる。

そこで、本研究では、建築材料の水分拡散係数を水分移動の非定常状態において求めるために、制御分野のシステム同定理論を導入し、水分拡散係数を同定するアルゴリズムを構築した。そして、実験によって得られたデータに基づき、吸湿過程および放湿過程において含水率勾配に対する水分拡散係数と温度勾配に対する水分拡散係数を同定した。また、外壁における水分拡散係数の同定手法の簡易化も検討した。

【同定のアルゴリズムの構築】

建築材料内部における水分移動の非定常過程は、定常状態と比べ、いろいろな不安定要素の影響が存在し、物理モデルも複雑になるため、すべての要素及び要素相互の影響は明らかでなく、水分拡散係数を順問題として解析的に求めることは不可能に近い。それゆえ、水分拡散係数が含まれる拡散方程式に基づく水分移動モデルを利用して、逆問題として測定データに基づき水分拡散係数を求めることが、非定常過程における唯一の手法となる。すなわち、本研究で構築した方法とは、モデルに曖昧さと不適切さが存在することを許容しながら、水分拡散係数を求める同定手法である。

同定方法や同定結果の適切性検証という問題に対しは、制御分野のシステム同定理論を導入すれば、それらのアルゴリズムはかなり理解しやすくなる。本研究では、建築材料をシステムに、水分拡散係数をシステムパラメータに見立て、同定のアルゴリズムを考えた。

システムと周囲環境の関係は、システムとそれによる因果関係と見なすことができる。そうすれば、システムに対する入力と出力の関係は、図1のブロック線図で示される。システムにおける様々な同定問題は最終的にこのような原因・結果とそれらの関係を解明することに帰着できる。本研究の水分拡散係数における同

定という問題は、「出力」に基づくシステムパラメータの同定問題、すなわち図1に示すシステムモデルの構造を解明する問題とみなせる。材料の表面含水率を「入力」、内部の含水率分布を「出力」、水分拡散係数を含む水分収支の微分方程式をシステムモデルとすれば、システム(材料)における入力と出力の因果関係は数学モデルで表示できる。システム(材料)の入力データ、出力データを表す簡略図を図2に示す。

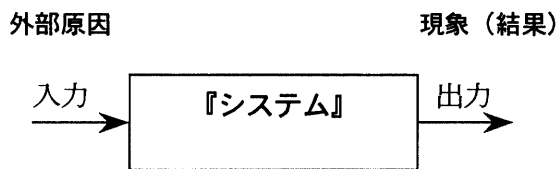


図1 ブロック線図

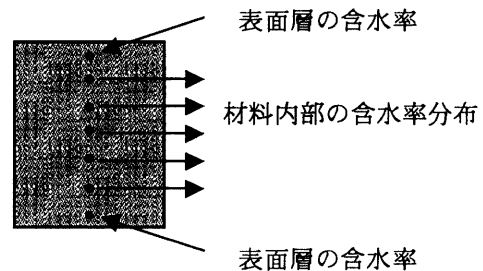


図2 材料システムの入力・出力データ

さらに時間とともに変動する水分拡散係数を含水率のスプライン関数で近似すれば、本研究はスプライン関数の係数に関するシステムパラメータの同定問題になる。本研究ではパラメータの同定には、最小 2 乗法を用いた。実測した含水率とシステムモデルによって推定した含水率との差の 2 乗の和を、パラメータを同定するための評価関数として定義し、それを最小にするようにパラメータを求めた。また、測定に大きな誤差があった場合や異常値が発生した場合は、ロバスト同定手法を用いた。また、得られた同定結果の適切性は AIC 情報、パラメータを求める線形方程式のヤコビアン の条件数、及び、同定された水分拡散係数を用いたシミュレーションによって検証した。

【実験室での水分拡散係数の同定】

上に提案した非定常状態のデータを用いた水分拡散係数の同定手法を確かめるために、まず、実験室で与えることができる境界条件の下で実験を行い、その測定データを用いて同定を行った。実験は、【1】放湿過程における D_{ϕ} (含水率勾配に対する水分拡散係数) を同定するための実験、【2】吸湿過程における D_{ϕ} を同定するための実験、及び、【3】 D_T (温度勾配に対する水分拡散係数) を同定するための実験、に分けて行われた。

●実験【1】:放湿過程における D_{ϕ} の同定

広い含水率範囲において、含水率分布の均一なデータが得られた。それをもとにして、水分拡散係数の同定に対し以下の検討を行った。水分拡散係数の同定結果はスプライン関数の節点の数・位置、測定データの数、及びシステムモデルを離散させる時の時間間隔・空間間隔の設定によって左右される。それゆえ、これらの設定条件を変更させ、AIC 情報によって放湿過程における D_{ϕ} の最適モデルを選択した。また、条件数によって同定手法の適切性を評価し、シミュレーションによって結果の適用性を検証した。

以上の検討によって、本研究で提案した同定手法の設定条件に関して、いくつかの知見が得られた。

1) 含水率の広い範囲における水分拡散係数に対しては、スプライン関数の節点の数は二つか三つを選択すれば適切である。それより少なくすると、水分拡散係数の変化の特徴が十分に表現できない。また、節点の数が多くすると、スプライン関数の滑らかさが失われてしまい、残差が増大し、AIC の値も大きくなるため、同定結果が不適切となる。2) スプライン関数の節点の位置に関しては、含水率範囲の両側に置くと、ヤコビアン行列の条件数が大きくなり、同定手法は誤差に左右されやすくなる。節点の位置を含水率範囲の中間に設定することが適当であり、安定かつ精度のよい結果が得られる。3) 離散の時間間隔を小さくすると、同定結果の精度が高くなる一方、計算量が増大するので注意する必要がある。4) 実測含水率の情報が不十分の場合に、その範囲における同定結果の精度が落ちることがある。

●実験【2】:吸湿過程における D_{ϕ} の同定

吸水実験において得られた材料の含水率分布データは異常値があるので、最小2乗法に有効重みを導入したロバスト同定手法を適用して同定した。また、実測データが少なく、AIC 情報は適用しないため、同定における設定条件は実験【1】を参照することにした。その結果、放湿過程の D_{ϕ} より大きな水分拡散係数が得られた。

●実験【3】:温度勾配に対する D_T の同定

放湿過程で得られた D_{ϕ} の同定結果(実験【1】)を既知条件として用いて、 D_T の同定を行った。その結果、既存の測定データと同程度の妥当な結果が得られた。

【簡易同定手法の提案】

以上の同定では、実験室で得られたデータを用い、提案した同定手法に基づいて水分拡散係数 D_{ϕ} 、 D_T を同定した。この同定法は、従来型の水分拡散係数の定常測定手法と比べると、測定には特別な実験装置は必要でなく、結果は速やかに得られる。しかし、 D_{ϕ} と D_T の二つの水分拡散係数があるために、二つの独立した実験を行わなければならない。そこで、本研究では、さらに独立な実験を行わずに、 D_{ϕ} と D_T を同時に同定する簡易手法を検討した。

提案した簡易手法は材料内部の水分移動のさまざまな状況に適用できるために、本研究では材料の境界における温度と湿度はステップ励振、矩形波励振、及び外界気象の励振である三つのケースを対象とした。主に温度を無視して D_{ϕ} の同定、と D_{ϕ} 、 D_T の同時同定に関して検討を行った。

【まとめと今後の課題】

本研究では、水分移動の非定常な状態において建築材料の水分拡散係数を同定する手法を提案した。そして、その手法を実験データに適用し、含水率のスプライン関数として水分拡散係数を同定することに成功した。

しかし、この同定では材料内部の含水率分布を出力と想定したため、それを測定しなければならず、測定方法も複雑で、雑音も混入されやすいものとなった。今後は、ガンマ線を利用した含水率分布測定機などを利用し、測定をより簡易するなどの改良が必要であろう。