

「熱伝導率試験」

その2 熱流計法(HFM法)他各種熱伝導率測定方法

藤本 哲夫*

1. はじめに

10月号では数ある熱伝導率測定方法の中で保護熱板法(GHP法)について紹介したが、本号では、熱流計法(HFM法)を中心に、それ以外の様々な熱伝導率測定方法についても簡単に紹介する。

保護熱板法以外にJISに規定されている熱伝導率測定方法は、JIS A 1412-2(熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法—第2部:熱流計法(HFM法))と同第3部:円筒法の2つの測定法である。このうち、円筒法はパイプカバー等の円筒形の材料の熱伝導率を測定する方法で、やや特殊な方法である。

本号で紹介する熱流計法(以下HFM法と呼ぶ)は、保護熱板法と同様、平板上の材料の熱伝導率を測定する方法で、保護熱板法に比べると装置は単純で、測定も簡単である。このため、最近ではGHP法よりも広く使われるようになってきている。特に、品質管理など迅速性、簡便性が要求される場合に適している。

これらの測定方法以外の熱伝導率測定方法としては、JIS A 1412-2の付属書として規定されている平板比較法、保護熱板式熱流計法や、非正常法である熱線法、熱線法の応用であるプローブ法などが代表的なものである。それぞれ、測定方法ごとに特徴があり、測定に適した試料も異なる。これらの測定法については、簡単に説明する。

2. 熱流計法

2.1 試験装置

(1) 熱流計

保護熱板法(GHP法)は、試験体を通過する熱量を、主熱板に供給する電力で測定するが、熱流計法では熱量の測定を熱流計(Heat Flow Meter)というセンサーを用いて測定する。このセンサーが、HFM法の心臓部ともいえるべきもので、このセンサーの精度がそのまま測定法の精度ともなる。

熱流計にはいくつかの種類があるが、JIS A 1412-2(以下規格という)で規定されているのは「こう配形」と呼ばれるものである。これは、基板となる薄い板状の材料の両面に熱電対を取り付けその両面の温度差を測定して熱量に換算するものである。この基板をある熱量が通過すると、どんなに薄い基板でも必ず両面に温度こう配が生じる。この温度こう配を測定して熱量に換算するため「こう配形」と呼ばれる。

こう配形のなかでも高熱抵抗形と低熱抵抗形の二種類がある。高熱抵抗形は、基板にコルクなどの比較的熱抵抗の大きなものを用いることで、同じ熱量でも大きな温度こう配が得られるため、熱電対の数を少なくしても十分な感度が得られる。このため、製作が容易であり、感度が試験体の種類等によってあまり変化しないという利点がある

* (財)建材試験センター中央試験所 環境グループ 統括リーダー代理



写真1 保護熱板式熱流計

が、逆に応答が遅く、定常状態に達するまでに時間がかかるという弱点もある。

低熱抵抗形の熱流計は、基板としてガラス繊維クロスにエポキシ樹脂あるいはシリコンを含ませた薄くて比較的熱抵抗の小さなものを用い、その両面に熱電対を多数取り付け、感度を上げたものである。熱電対は直列に配列され、微小な温度差を増幅するようになっている。サーモパイルと呼ばれる一種の示差熱電対である。低熱抵抗でかつ熱容量が小さいため、高熱抵抗形のものに比べて非常に応答が早く、感度も充分である。最近の市販の熱流計は、ほとんどがこのタイプのものである。

熱流計の出力は、通常、熱電対の出力である直流電圧であるが、この出力を熱量に変換すること

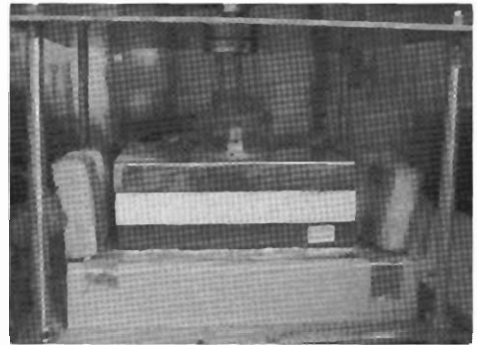


写真2 平板比較法

が必要である。これが、熱流計の校正であり、非常に重要な操作である。この校正如何によって熱流計すなわちHFM法熱伝導率測定装置の精度が決まるといってもよい。校正に関しては、後で項目を立てて説明する。

(2) 熱流計法測定装置の構成

熱流計法の代表的な構成としては、図1に示す5種類のものがある。このうち、一般的なものはa) 試験体1枚・非対称構成方式、b) 試験体1枚・対称構成方式の2つの方式で、最近ではb) 試験体1枚・対称構成方式が多い。当所で所有するHFM法測定装置も、このタイプのものである。以下の説明は、試験体1枚・対称構成方式のものである。

装置の基本構成は、試験体に温度差を付けるための加熱板及び冷却板、装置全体を納める恒温槽が主なもので、これに厚さ測定装置などが付属す

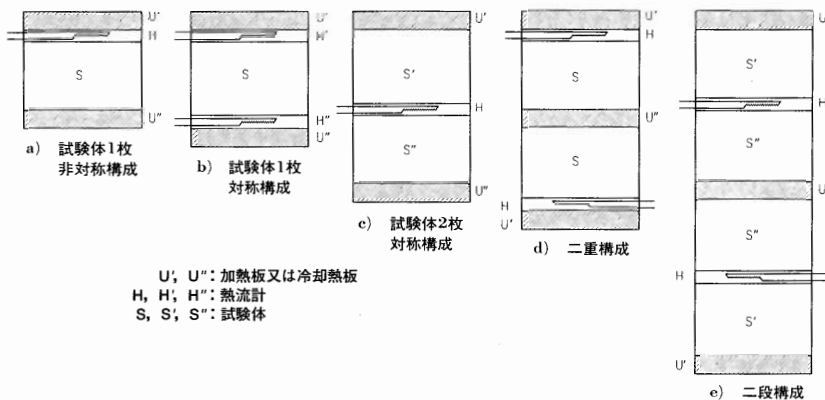


図1 熱流計法の代表的構成

るのが一般的である。

加熱板、冷却板ともに熱源は何でもよいが、通常、加熱板は電気ヒータ、冷却板は恒温水を用いることが多い。加熱板は、GHP法と異なり温度さえ安定していれば電力が多少変動してもかまわない。

当所のHFM法装置は、加熱板及び冷却板寸法が200mm×200mmで、最大測定厚さ約30mmである。この測定部は恒温槽内に納められ、加熱板温度、冷却板温度、恒温槽温度はプログラムによって自動的に設定できるようになっている。このため、開始時に試験体をセットした後は、測定が終了するまで全て自動である。

(3) 温度の測定

熱流計には、熱電対や白金抵抗体といった温度センサーが埋め込まれ、熱量と同時に温度測定ができるものが多い。このため、別途試験体に温度センサーを取り付ける必要はないが、温度計の校正も重要である。

2.2 装置の校正

前項でも述べたように、熱流計の出力は熱電対の出力として取り出されるため、直流電圧である。これを熱量に変換することが必要となる。これが熱流計の校正である。

校正は、熱流計を通過する熱量を測定し、そのときの熱流計出力との関係から感度係数を求めるが、この熱量の測定に校正用標準板を用いる。校正用標準板に要求される条件としては、熱伝導率既知でなおかつ経時的に熱伝導率が変化しないもの、さらには被測定材料と類似の熱特性を持つもの等である。

校正用標準板の熱伝導率は、GHP法で測定する。通常は、この校正用標準板の熱伝導率をHFM法測定装置で測定し、GHP法での測定値と±1%以内で一致することを確認する。一致しない場合は、感度係数を変えることになる。

校正は、実際の測定の前24時間以内と測定後24

時間以内の2回行うことが規格に規定されているが、熱流計が短期的にも長期的にも安定していることが確認できれば、その校正周期を最大30日とすることができる。

このように、HFM法は熱流計の校正が全てといってもよく、そのため校正用標準板は常に検定しておくことが必要である。検定はGHP法で行うが、規格では、校正用標準板の検定は少なくとも5年間隔以内と規定されている。しかし、できれば1年あるいは2年に1回の検定が望ましい。

2.3 試験体

測定可能な試験体厚さは、装置（加熱板と熱流計）の寸法によって変わってくる。この事情に関してはGHP法も同様であるが、いずれにしても、温度解析を行って最大厚さを決める必要がある。当所の200mm×200mmの装置では、約30mmである。さらに、JIS規格では試験体の平滑度を試験体厚さの2%以下（厚さ25mmで0.5mm以下）と規定している。また、規格では、測定可能な試験体の熱抵抗は $0.1\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 以上と規定している。

GHP法と同様、試験体の養生についての規定はないが、通常は気乾状態での測定が多い。気乾状態とは、室内（通常温度15～30℃、相対湿度40～60%程度）である程度養生した状態をいうが、試験体の含水状態によって熱伝導率が変化する材料（ほとんどがそうであるが）は、測定時の含水率をきちんと把握しておくことが重要である。

GHP法では、表面にわずかな凹凸がある試験体を測定する場合、薄いゴムシートなどを挟み込んで加熱板あるいは冷却板と密着させて測定する場合があるが、HFM法の場合、GHP法と同じ主熱板の周囲に保護熱板を持つ方式の装置以外は、通常、精度が悪くなるため、こういった緩衝材を挟み込むことは行わない。

試験体厚さの重要性はGHP法と同様であるが、JISの規定では試験体の4隅及び中央部の計5カ所

を測定することになっている。一般に市販されている装置では、これら5カ所の測定ができるものは少ない。このため、中央部は装置の加熱板（あるいは冷却板）の移動距離で、4隅は装置にセットしない状態で測定することが必要となる。

ただし、今後JISの規定を「試験体の4隅または中央部1ヶ所」というGHP法と同じ規定に変更することが検討されている。

2.4 測定

測定は、市販の装置では前述したように自動で行われるものがほとんどである。最近では、パソコンで制御・測定を行うものが主流であり、このため、測定上の注意点といったものもあまりないが、とにかく熱流計の校正には注意が必要である。換言すれば校正板の管理だけに注意すればよいとも言える。

測定が自動でできるということは、逆に、測定の核心部分がブラックボックスの中であることを意味する。このため、測定値が以前のものに変化してきた場合、熱流計の感度係数が変化したのか、校正板が変化したのかといった見極めはかえって困難になるのではないだろうか。このためにも、信頼できる校正板の重要性というものがあると思う。

3. 比較法

比較法は、現在JIS A 1412-2の付属書として規定されているが、その歴史は古く、GHP法と同時にJIS A 1413（平板比較法）として制定されたものである。GHP法に比べてはるかに測定が容易であるため広く使われた測定方法である。測定原理は、熱伝導率既知の標準板と試験体との温度差の比較によって熱伝導率を測定するものである。この標準板を熱流計に換えればそのまま熱流計法となる。つまり、標準板が熱流計の代わりとなっているのである。



写真3 熱流計法

熱伝導率測定方法のJIS規格改正の折り、比較法を廃止しようという意見もあった。しかしその時点では、依然として品質管理に比較法を使っている例も多数あったため付属書に規定として残したものである。

比較法は、熱伝導率標準板をそのまま熱流計代わりに使うため、HFM法のように熱流計の校正が必要なく、標準板の検定だけで測定精度を維持できるという大きな利点がある。また、実際の測定でも温度の測定だけで済むというのも実用上は大きな利点である。ただし、試験体と標準板を2枚重ねて測定するため、試験体端部からの熱損失が大きくなるといった弱点があり、測定精度にも限界がある。

4. 保護熱板式熱流計法

保護熱板式熱流計法は、当初JIS A 1427として厚い断熱材の熱伝導率を測定するために規定されたものである。この測定装置は、基本的にはGHP法であり、熱量測定に熱流計を用いている。

今から20年近く前、断熱材の熱伝導率は厚さが厚くなると大きくなる（悪くなる）といわれており、そういった報告もなされていた。特に繊維系断熱材はその傾向が強いといわれていた。当時は、また省エネの推進期であり断熱材の厚さもどんどん厚くなってきていた頃でもあった。では、本当

にそうなのかを調べようということで硝子繊維協会の依頼により当センターで開発したのが、この保護熱板式熱流計法である。厚い断熱材を測定するために、加熱板の寸法を910mm×910mmとし、測定厚さを200mmまで可能にした。

測定原理はGHP法と同様であり、熱量の測定に関してはHFM法と同様である。この装置により、200mmの厚さの断熱材の測定が可能となり、その結果、厚さによって熱伝導率は変化しないという実験結果を得ている。

この測定方法も、比較法と同様、先のJIS改正で扱いが検討されたが、現在でも広く使われていることを鑑み、付属書の規定として残したものである。

この測定法は加熱板が大きくなった時に非常に有効である。現在60cm×60cmというHFM法の装置が市販されているが、構造はGHP法であり、まさにこの保護熱板式熱流計法装置である。

現在では、熱伝導率によっては厚さ300mmまでの測定も可能である。

通常、試験体が大きくなり厚さも厚くなると測定には非常に時間がかかるものであるが、熱流計を採用することで短時間での測定を可能としている。

5. 円筒法

建築の断熱材の分野ではほとんど関係がないが、パイプカバー、すなわち水道管や給湯器関係の配管の保温材というのは重要である。このため、保温筒の熱伝導率は古くから測定が行われている。形状が円筒状であるため平板状の材料の測定に比べ工夫が必要となる。

JIS A 1412-3として規定されているのは、その必要性の高さを物語っているといえるだろう。円筒法は、基本的には棒状のヒータに円筒形の試験体を取り付けてその熱移動量を測定するものであ

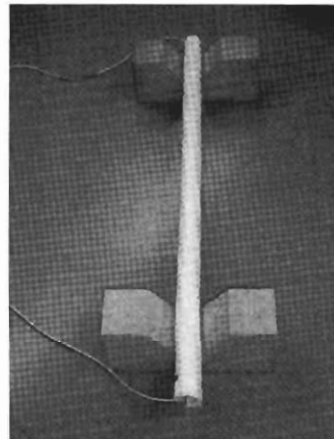


写真4 円筒法

る。熱量測定の方法には色々あるが、日本国内でもっとも一般的に用いられるのが抜山式と呼ばれる方法で、端部熱損失量を別途電的に校正を行った校正値から求める方法である。この方法は、ISOでも採用されている。

円筒法では、平板の材料と異なり伝熱面積が熱流の方向に対して変化するという特殊な事情があるため、正確な意味での熱伝導率ではなく、平均厚さに対する熱伝導率となる。

6. その他の測定方法

熱伝導率の測定方法としては、これまで述べてきたものが「定常法」と呼ばれる温度、熱量ともに時間的に変化しない状態での測定方法であった。この方法は、時間というパラメーターを含まないために、それだけ簡単であるという最大の利点がある。しかし、そのため、測定に非常に時間がかかるという欠点もある。測定が早いという、今回紹介したHFM法でも一回の測定には最低でも数時間は必要である。これに対して、短時間での測定が必要な場合も多々ある。短時間（長くても数分）での測定を行うためには、非定常法という方法が用いられる。非定常一温度的に定常では

ない状態、すなわち温度が時間とともに変化する状態、での熱伝導率測定が非定常法と呼ばれる測定方法であり、機械分野その他様々な分野で用いられている。ここでは、建材分野における非定常法の代表的な測定方法である熱線法とプローブ法を紹介する。

6.1 熱線法

非定常熱伝導率測定方法の代表的な測定方法である。測定では、細いヒータ（熱線）を試験体に埋め込み、そのヒータに一定電力を供給し、ヒータに取り付けた熱電対でヒータの温度上昇を測定する。ヒータに供給するのが同じ熱量であれば、試験体の熱伝導率が小さければヒータの温度上昇は急激となり、試験体の熱伝導率が大きければヒータはあまり温度が上昇しない。このことから試験体の熱伝導率を測定する。測定では、ヒータの温度とヒータに供給する熱量を測定する。測定は、通常3分程度である。

測定は非常に簡単であるが、熱伝導率を求める際に熱伝導の理論解を用いているため、まず試験体が無限固体という仮定が必要となる。近似的にこの仮定が成り立つ場合は、測定もうまくいくが、そうでない場合には測定自体が不可能となってしまう。しかし、非常に短時間で測定できるという利点は大きく、含水した状態での熱伝導率の測定や高温での測定、極低温での測定などで広く使われている。特に流体の測定では対流が起こる前に測定できるため広く使われている。ちなみに、機械分野では「細線加熱法」と呼ばれることが多い。

6.2 プローブ法

プローブ法は、熱線法を応用したもので、熱線に熱電対をつけたものを熱伝導率既知の材料に取り付けてプローブの形にし、それを試験体に押し当ててヒータの温度上昇から試験体の熱伝導率を測定する方法である。従って、プローブ固有の定数が存在する。測定時間は、1分である。非常に

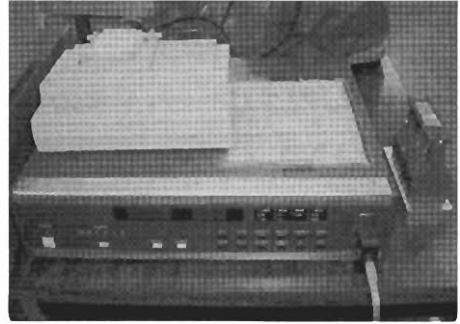


写真5 プローブ法

簡便かつ再現性もさほど悪くないが、正確な測定とはいえない。当所では京都電子製の装置を使っているが、主に現場測定、特に入居状態での断熱実態調査などに威力を発揮している。

測定精度を問題にしなければ、非常に使いやすい装置である。経験的にはそれなりの精度もあるといってもいいであろう。このくらい簡単に熱伝導率が測定できれば本当にいいだろうと思う。そういった意味では名機といってもいいかもしれない。

7. おわりに

10月号、今月号と2回にわたって熱伝導率測定法について紹介した。熱伝導率は材料の物性値の中では基本的な物理量であり、非常に重要な物性値である。基礎的な物理実験では、扱うものが単一な素材である場合が多いが、建築ではほとんどのものがコンポジット、複合材である。そのため、測定の困難さが増す場合もあり、逆に簡単になる場合もある。いずれにせよ熱伝導率測定の困難さは、やればやるほど身にしみてくるというのが実感である。

2回に亘り、建材の熱伝導率測定方法について紹介したが、果たして試験のみどころ・おさえどころになっていたかどうかは、はなはだ心許ない。熱伝導率といってもこういった様々な試験方法が有るということを理解いただければ幸いである。