

図-3 熱的な浮力によって生じる、建物の内外での圧力差(左)。すきまから浸入した湿気が、構造の中の低温側で結露となる(右)。

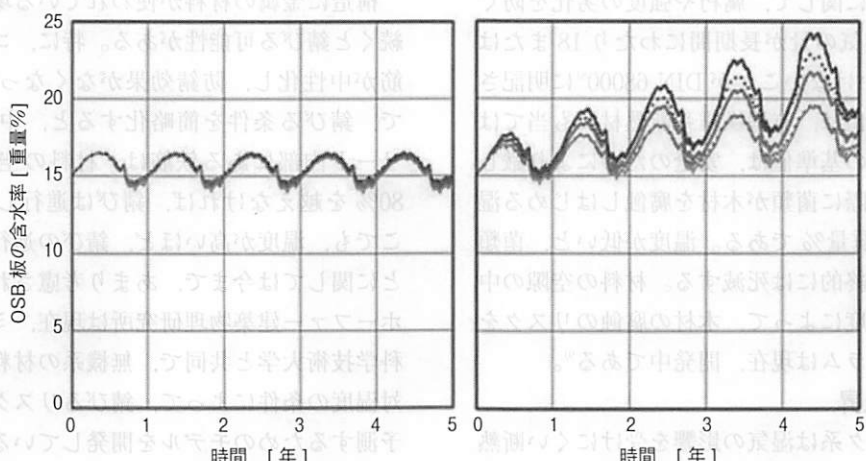


図-4 外側も内側も防湿性が高い、木造陸屋根における外側の構造木材(OSB)の中の水率。室内の湿気負荷に四つのバリエーションを与えてシミュレーションを行った結果の比較。左は完全に防湿であるという仮定で、すべての条件で問題はない。右は湿気の侵入を考慮した結果、すべての条件で含水率が上昇した。

るためには、実際に施工直後に含まれる湿気を考慮する必要がある。そのためにシミュレーションでは、初期含水率(計算を始める時点で含まれる湿気)を高く設定する。例えば、レンガや雨水を吸収した木材などは、施工時に多くの湿気が含まれている。このような初期に含まれる湿気は、構造に害を与えることなく、外に排出されなくてはならない。また、シミュレーションでは、施工後も空気の流れとともに入ってくる湿気や、雨水が構造内部に浸透する現象なども考慮することができる。

4.2 対流による湿気の流入

木造構造は、完全に気密にすることはできない。室内と屋外の圧力差によって、常に空気が構造の中に浸入する。特に冬期は、温かい空気が建物の上部にたまり、最上部の構造体(天井または屋根)の室内側から、構造の中に空気が

浸入する。浸入した空気が、構造の外側に移動するに従って次第に冷やされ、室内空気の露点温度を下回ると、構造の内部で結露が発生する(図-3)。

空気と一緒に入ってきた湿気もまた、外に出て行かなければいけない。木造では、このような空気の浸入を完全に防ぐことはできないため、DIN 68000の改訂版では、この現象をきちんと考慮して熱湿気シミュレーションを行うことを求めている⁸⁾。WUFI[®]では、この現象を、非定常の湿気浸入モデルを使って考慮することができる。つまり、空気とともに浸入する湿気量を、構造や気候条件に合わせて算出し、それを湿気の発生源として、構造の中の特定の場所(設計者が決める)に与える。

図-4は、外側も内側も防湿性が高い、木造陸屋根における外側の構造用合板(OSB)の中の水率を示している。

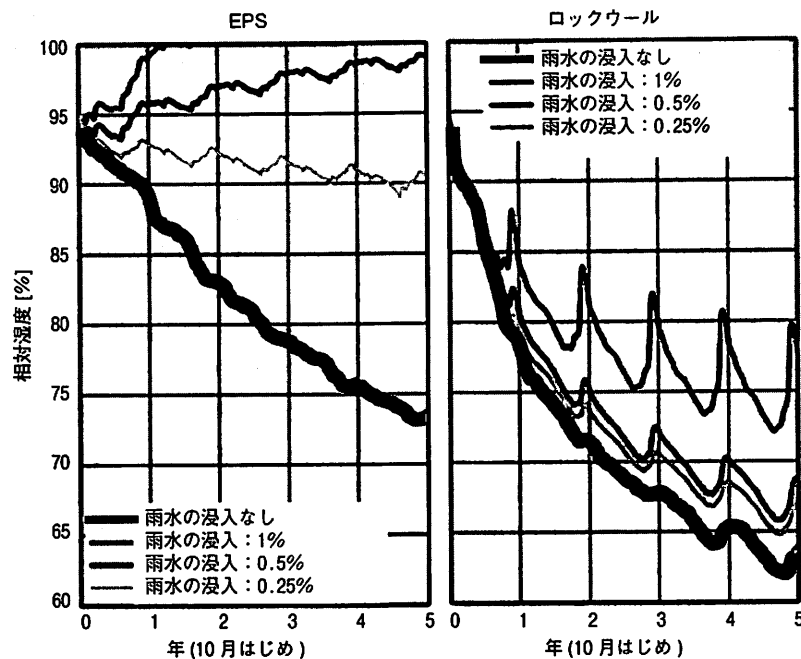


図-5 EPS(ビーズ法発泡スチロール)(左)またはロックウール(右)を使用した湿式外断熱構造のコンクリート躯体内の鉄筋がある場所における相対湿度。外壁に当たった雨が構造の中に浸入する量にさまざまなバリエーションを与えた。

室内の湿気負荷(室内で発生する湿気の量)に四つのバリエーションを与えてシミュレーションを行った結果を比較している。完全に防湿であると仮定すると(左), OSBの中の含水率は14から16質量%であり, 問題がない。しかし湿気の浸入を考慮すると(右), この構造の湿気を逃がす能力がいかに小さいかわかる。わずかな湿気の浸入がある場合でも, 木材の中の含水率が上昇し続け, つまりこの構造は施工不良が決して許されない, ということになる。

4.3 雨水の浸入

外壁に当たった雨水が窓の接合部などから構造の中に入り込み, 外断熱工法の断熱材の外側やサイディングの裏を流れ落ちることがある。これが原因で, 北米や北欧で, 湿気を通しにくい断熱材を使った木造構造, つまり入り込んだ湿気が外に出にくい構造の建物で, 多くの被害が生じた。そのため, 北米のASHRAE Standard 160では, 接合部の施工を念入りに行うことに加えて, 外壁に当たった雨量の1%が構造の中, 具体的には断熱材の外側, に入り込むことを考慮してシミュレーションを行うことを定めている⁹⁾。このようにして入り込んだ湿気をも外に逃がすことのできる構造であれば, 湿気に関して安全であることを保証できる。この1%という量は, 多くのバリエーションでシミュレーションを行い, 実際に, 雨水の浸入による害があった構造と同様の結果となるようにして求められた値である。北欧での検証でも, この1%という量は妥当であ

ることが確認されている。

図-5に, 雨水の浸入をさまざまに考慮してシミュレーションを行った結果を示す。グラフの横軸は経過時間, 縦軸は鉄筋のある場所の相対湿度である。構造は, 断熱層をコンクリートで挟む, いわゆるサンドイッチ工法の外壁とし, 断熱材は, 左側がEPS(ビーズ法発泡スチロール), 右側がロックウールである。太線は, 雨水の浸入がないと仮定した場合で, これによると初期に含まれる湿気が, 素早く外に逃げ, 乾燥していく結果となった。鉄筋のある場所の相対湿度が80%以下であれば, 鉄筋の錆びが進行するリスクはないといえる。細い線は, 浸入する雨水の量をさまざまに変えた場合の結果であり, 透湿性のあるロックウールでは, 基準値となる80%を明らかに下回ることがわかる。一方, 透湿性がほとんどないEPSでは, 浸入した湿気が外に出ることができない, または長時間かかるため, 相対湿度が90%から100%の間となり, 錆びが進行する。

5. 不明なパラメータが結果に与える影響

設計段階では, 計画している構造が建築物的に安全かどうか, シミュレーションを行って構造の良し悪しを判定する。設計者は, 予定している構造, 建物が建つ場所, 建物の用途などの情報を使って, シミュレーションの設定を行う。そして, その結果を評価し, 構造の安全性を判断する。

この作業の過程では、建材の選択や場所、室内気候などの設定に、常に不確かな要素が伴う。また、近くにある大木による日陰のような、時間によって変わるファクタや、建物の用途の変更に伴う、室内での湿気負荷の増加なども考える必要がある。そこで、そのような不確かな要因を、大雑把に仮定して検証を行っても大丈夫だろうか、という疑問がわく。この疑問には、シミュレーションを使って答えを出すことができる。つまり、不確かなパラメータがある場合には、そのパラメータを現実的に考えられる範囲で幾つか変更してシミュレーションを行い、シミュレーションの結果がどのように変わってくるかを検証する。パラメータを変更しても、シミュレーションの結果がほとんど変わらなければ、そのパラメータはそれほど正確な値でなくてもよい、といえる。しかし、シミュレーションの結果が大きく変わるのであれば、そのパラメータは構造の判定に大きく影響を与えるため、正確な値を準備する必要がある。

これは例えば、気象データに当てはまる。多くの気象データは、熱と湿気のシミュレーションを行うための標準年データとして作成されたものではない。そこでEN 15 026では、熱的に標準的な年に、 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の温度差を与えて、“暑い年”および“寒い年”の気象データを作成することを提案している³⁾。または、検証する地域の周辺地域で、より温かいまたは涼しい場所のデータを用いるのも一つの手段である。例えば、ヴェルツブルグでは大丈夫でも、ミュンヘン(ヴェルツブルグの約220 km 南東)では明らかに問題があるような構造は、安全であるとはいえない。このようにいろいろ試してみることは、特に、経験の浅いユーザーには重要で、どのような構造にはどのようなパラメータが大きな影響を持つのかを知るのに役に立つ。

6. 害の検証—計画と実際の比較

湿気は、建物に多くの害をもたらす。ドイツだけでも、湿気による建物の被害額は、さまざまな統計を集計すると、年間で数十億ユーロ(数千億円)にもなる。大雑把に見積ると、“施工後の防湿改修や、実際に害が生じた後の処理にかかる費用は、設計段階で行う防湿対策にかかる費用の10倍”ということが出来る。しかし相変わらず、防湿計画はおまけとして行うもので、ましてコストをかけるという意識は薄いのが現状である。湿気の害が生じないことが実証されている構造であればいいが、近年は断熱材の厚みが増し、外皮を通した熱の出入りが少なくなっている。これによって同時に、湿気も構造の外に逃げにくくなっている。このような目立たない原因が、実は大きな害を引き起こす危険性がある。

ある建物に害が生じた場合、その原因が何であるかにつ

いては、専門家によって意見が分かれることがある。さまざまな要因が考えられる場合は特にそうで、害に関して、どの要因がどの程度の影響力があったのかを判断することは容易ではない。そこで、従来の検証の方法に加えて、熱湿気シミュレーションを使うことが有効となる。例えば、計画案と実際の現象を比較し、構造の熱湿気性状に影響を与えると考えられる要因について分析を行うことができる。

一例として、屋上緑化をしている屋根構造の木材が腐朽した場合の原因を考えてみる。防湿シートの選択が誤っていたのか、断熱層が不連続であったのか、または気密層に穴が開いていたのか、つまり施工不良によって屋根構造に湿気が浸入し、それが害を招いたのか、ということが考えられる。この構造について、一般的な気密性能を持つものと仮定してシミュレーションを行った結果、木材の含水率が冬期に20質量%近くまで上昇した。つまり、この構造は湿気の害に関して十分に安全であるとはいえない。しかし、実際に害が生じた木材の含水率を測定したところ、40質量%であったが、施工が通常通りに行われたとすれば、ここまで含水率が上昇することは考えられない。つまり、屋根の構造について改善の余地があるとはいえ、このケースでは、明らかに施工不良が主な原因であったことがわかる。ちなみに、この訴訟の原告が提案した防湿シートを使用した場合をシミュレーションすると、実際に害があった以上の湿気が、構造に入ってくるという結果が出た。

シミュレーションを行う際には通常、理想的な完璧な施工ではなく、実際の施工状態を仮定する。また、できる限り、その建物があると想定する場所の気象データと、実際の建物の使い方に合う室内気候を気象条件として与え、施工過程の情報(例えば、木材を保管中に雨水に当たったかどうか)から、シミュレーションを始める時点で構造に含まれる湿気の量としてふさわしいものを設定することが望まれる。また、シミュレーションの結果として得られる、構造の中の湿気の量を見る際には、検証する害の種類(さび、木材の腐朽、カビ、凍害など)に適した基準値を考慮して、判断する必要がある。結果を見て、湿気の害が生じる原因を突き止め、場合によっては、対応策、改善策を導くことができる。

次に、フラウンホーファー建築物理研究所で行った、建物構造の湿気に関する検証を幾つか紹介する。

- 1) ある木造の建物において、施工後5年で木材が腐敗した。この構造をシミュレーションしたところ、施工後10年で木材の含水率が22質量%あたりで周期的に変動する状態に至った。つまり、この構造は湿気に関して十分に安全であるとはいえないが、5年以内に木材が腐敗することはない。よってこのケースでは、

施工時に含まれる湿気量および気密性を検証する必要がある。

- 2) ある基礎のコンクリート層に、規格で定められているアスファルト防水施工ではなく、防湿シートが使用されていた。シミュレーションによると、防湿抵抗が小さい防湿シートにもかかわらず、この施工によって、害が生じるほどの湿気が含まれる可能性はないことがわかった。よって建築物物理的な視点からは、特に変更する必要はないといえる。
- 3) あるジャガイモ貯蔵庫の木造屋根の室内側をはじめ、防湿シートを重ねたもので覆われているだけであった。数年後、垂木に含まれる湿気量が増えたため、改修が必要となり、より透湿抵抗の高いシートで覆われた。しかしその結果、垂木の湿気はさらに増加し、事態が悪化したため、シミュレーションにより検証することとなった。すると、屋根の防水シートが、防湿シートよりも湿気を通しやすいため、夏に外気の湿気が構造の中に浸入することがわかった。つまり、透湿抵抗の小さな防湿シートを使えば、木材の中の湿気を室内側に逃がすことができるため、この問題が解決される。
- 4) 工業建物のトタン屋根で、湿気による害が生じた。その原因は、気密性が低いために、室内空気の湿気が屋根に入り込むことであると予想された。そこで、明らかに低い気密性を想定してシミュレーションを行った結果、実際に生じたような、湿気の増加は見られなかった。その後、害の状況および湿気の年間の変動についてさらに詳しく検証した結果、外側の防水性能が十分ではないために、構造の中の湿気が上昇したことが明らかとなった。
- 5) 吊り天井を施工するために、屋根構造の防湿シートに、ねじ穴が開けられた。そこでシミュレーションによって、屋根構造の湿気を逃がす能力がどの程度か、またどの程度の室内空気からの湿気の流入が許容されるかについて、検証を行った。その結果、気密性は $q_{50} \leq 4 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ である必要があることがわかった。後に現場で気密性テストを行うと、気密性能は前述の値を大きく下回っていることが確認された。

前の章でも述べたように、熱湿気のシミュレーションを使って防湿計画および湿気による害を検証する際には、構造の中の湿気が外に逃げる能力と、ある程度の施工不良による湿気の浸入を許容する能力を考慮することが重要である。施工が完璧で、湿気をまったく通さないという仮定のもとでしか安全ではない構造は、現在では計画のミスと見なされる。実際には不可能な条件を仮定しても意味がない。したがって、計画段階で、ある程度リスク要因を考

慮しておくことが大事で、さらに、想定していなかった湿気が少し構造に入ってきたとしても害が生じない安全性を確保しておかなければならない。

まとめ

建物構造は完全に乾燥することはなく、またその必要もない。防湿とはつまり、外壁や屋根などの構造体に入ってくる湿気量と、出て行く湿気量のバランスをとることである。防湿の原則は、“必要なだけ湿気を通しにくく、できるだけ湿気を通しやすく”である。構造体に湿気による害が生じるか否かを判定するためには、構造体の中に湿気が入ってくる原因とその量、そして湿気が外に出る可能性をできるだけ正確に把握することと、また、一般的な施工レベルを考慮して、ある程度の湿気の浸入を仮定することが重要である。定常計算では、このような検証を十分に行うことはできない。

熱湿気シミュレーションは、専門的な知識をもって使用すれば、ほとんどすべての建築物物理的に重要な挙動、例えば雨水の浸入、日射の吸収、湿気の逆流、保水性、液体としての水の輸送、施工直後に含まれていた湿気の放出、湿気の長期的な蓄積などを把握し、構造の防湿性能の良し悪しを判定することができる。判定には、その建物がある地点と構造体の方位や傾斜を考慮し、構造体が降雨や日射から受ける影響をシミュレーションする。建物の内部の温度や湿度はその建物の用途によって、住宅のほかにも冷蔵保管倉庫から屋内プールまでさまざまに設定できる。また、検証したい内容に合わせて、計算を開始する時点で、多くの湿気が含まれている施工直後か、またはその湿気が放出した後の状態を設定することができる。そして、施工が完璧であるとは仮定せず、例えば気密施工や防水施工の欠陥によって湿気が構造体の中に入ってくるリスクをあらかじめ与えることもできる。シミュレーション結果の精度は、入力データの精度に依存するため、建材の物性データや気象データとしてふさわしいものを使用するとともに、建物における熱と湿気に関する十分な基礎知識と、設計者や専門家としてのある程度の経験も必要である。

構造体に湿気の害が生じた場合には、シミュレーションをすることによって、計画されたものと、実際の害を比較することができる。例えば、計画された構造条件をシミュレーションした結果、湿気による害が見られる場合は、計画のミスであることがわかる。しかし、計画された構造条件を、一般的な施工レベルで考えられる、構造体に湿気が浸入するリスクを加味してシミュレーションした結果、湿気による害が見られない、または実際に生じた害よりも明らかに小さな害であれば、実際に生じた害は、すべてまたは一部、施工者の責任であると判断できる。ここでも、判

断を行う専門家は、害の原因となる要因を正しく把握するために、熱湿気のシミュレーションで把握できる現象と把握できない現象、要因についてよく知っておく必要がある。

熱湿気シミュレーションは、入力データの妥当性や結果の解釈など、定常計算に比べると設計者にかかる責任は大きいですが、その分、構造体の湿気に対する安全性について、より詳しく検証し、専門的な判断を行うのに役に立つ。

参考文献

- 1) Zirkelbach, Daniel: "Hygrothermische Simulation - Anwendungsmöglichkeiten für Planer und Sachverständige," in IAK 2013 - 12. Internationale Baufach- und Sachverständigentagung Ausbau und Fassade, Regensburg, (2013).
- 2) 2001 - 07: DIN 4108 - 3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.
- 3) 2007 - 07: DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation.
- 4) 2002 - 05: WTA-Merkblatt 6 - 2 - 01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse.
- 5) 2001 - DIN EN ISO 13788: 2001 - 11: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Oberflächentemperatur zur Vermeidung von kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren.
- 6) 2009 - ASHRAE ANSI Standard 160: Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings.
- 7) 2012 - 11: WTA-Merkblatt E 6 - 5 - 12/D: Innendämmung nach WTA 2 - Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren..
- 8) 2012 - DIN 68800 - 2: Holzschutz Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau.
- 9) Kehl, D: "Holzschutz ist berechenbar - Bewertung WTA vs. Holzschutznormung.," in Tagungsband Bauphysik Forum, Mondsee, (2013).
- 10) Sedlbauer, K: Universität Stuttgart: Vorhersage von Schimmelpilzen auf und in Bauteilen.
- 11) URL www.wufi-pro.com
- 12) Marra, E: Politencino di Milano: Environmental Factors Affecting Corrosion of Steel Inserts in Ancient Mansions. (2016/9/20 原稿受理)

“海外文献紹介”は、当学会が所定の手続きを踏まえて翻訳・掲載していますので、訳文の無断転載を禁じます。

海外文献紹介欄は海外における幅広い分野の知見を、広く会員の皆様に紹介するページです。ゼミや研究会での成果、また、職務の資料用に翻訳された原稿はありませんか。学会誌委員会海外文献紹介小委員会では投稿を随時受け付けています。

投稿にあたっては執筆要綱などがございますので、当小委員会事務局担当までお問合せください。

SHASE-S 013-2014 建築設備用配管ねじ接合シール材

〈主要目次〉 適用範囲／用語及び定義／種類／要求事項／試験方法／検査／引用規格／付属書 A(参考)

- ・平成27年発行 A4判 30頁
- ・価格 1,667円+税 会員価格 1,500円+税

当学会ホームページ (<http://www.shasej.org/>) にて、PDFファイルのダウンロード販売を行っております。詳細は、ホームページ“発行図書案内”をご覧ください。