

不燃断熱材の結露性状に関する研究 その5 含水率の予測

結露 含水率 吹付ロックウール

正会員 ○ 権藤 尚^{*1} 同 三原 邦彰^{*1}
同 荒井 良延^{*2} 同 鉾井 修一^{*3}
同 小椋 大輔^{*4}

1. はじめに

鉄骨の耐火被覆等に用いられる半乾式吹付ロックウール（以下吹付 RW）を外壁等に断熱材として使用する場合、内部結露の発生が懸念される。筆者らは既報^{1~3)}において吹付 RW を対象とした実験を行い、内部結露の発生する条件下において重量含水率は上昇するが、結露水は流出しにくいことを検証してきた。本報では建材内の含水率を予測する手法について検討した結果を報告する。

2. シミュレーション方法

2.1 基礎式 材料内部において含水時の液水移動を扱うには水分化学ポテンシャル等に伴う液水移動を考慮した基礎式に基づいた評価を行うべきである。しかし、多少過大評価ではあってもハイグロスコピック領域を対象とした熱湿気同時移動方程式に多少の変更を加えることで評価可能であれば、簡易的な評価手段として実用上有効な手法となりうる。絶対湿度ポテンシャルに基づくハイグロスコピック領域の基礎式では、冬季の外壁における定常状態の場合、水蒸気の流れが室内から外気側に向かい室外側断湿条件の場合には外気に近い質点ではすぐ飽和に達する結果となる。しかし、既報^{1~3)}の実験では飽和になりにくい結果が得られているため、水蒸気移動に関連する湿気伝導率が相対湿度上昇（含水率上昇）に併せて低下するという特徴を考慮して検討を行った。熱湿気同時移動方程式および湿気伝導率の基礎式を表 1 に示す。

2.2 計算条件 既報^{1~2)}に報告した吹付 RW の結露実験を対象として再現計算を行って計算精度について検討を行った。シミュレーション対象部位を図 1 に示す。吹付 RW 試験体（100 mm 角・厚み 50 mm）を対象とし、一次元断面にモデル化して 0.5 mm 間隔に分割、計算ステップは 1 秒間隔として 4 週間（28 日間）ほど後退差分法にて計算を行った。計算ケースおよび条件を表 2 に示す。ケース 1：吹付 RW 50 mm 試験体を境界温湿度一定条件下で実験（実験 I、室外側は断湿条件）、ケース 2：吹付 RW 50 mm 試験体の境界温湿度時変条件下の実験（実験 II、室外側は断湿条件）について再現計算を行った。計算に使用した建材の

表 3 熱湿気物性値

熱伝導率 [kcal/(m·h·°C)]	比熱 [kcal/kg/°C]	密度 [kg/m³]	気乾状態の 湿気伝導率 [g/m/h/(g/kg)]	飽和重量 含水率 [kg/kg]
0.064	0.20	260.0	0.1144	2.086

表 1 熱湿気同時移動方程式の基礎式

■壁体内の熱湿気同時移動

$$c\rho\frac{\partial\theta}{\partial t}=\lambda\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+r\left(\lambda'\frac{\partial^2X}{\partial x^2}\right)\cdots(1)$$

$$\kappa\frac{\partial X}{\partial t}=\lambda'\frac{\partial^2X}{\partial x^2}+\nu\frac{\partial\theta}{\partial t}\cdots(2)$$

$$\text{ただし } \kappa=\frac{\partial\phi}{\partial X} \quad \nu=-\frac{\partial\phi}{\partial\theta}$$

■壁体表面の境界条件

$$-\lambda\frac{\partial\theta_i}{\partial n}=\alpha_c(\theta_R-\theta_i)+\alpha_r(\theta_R-\theta_i)\cdots(3)$$

$$-\lambda'\frac{\partial X_i}{\partial n}=\alpha'_c(X_R-X_i)\cdots(4)$$

■湿気伝導率

$$\lambda'=\lambda'_0(1-h^5)\cdots(5)$$

c: 比熱[kcal/kg/°C]、ρ: 密度[kg/m³]、θ: 温度[°C]、t: 時間[h]、λ: 熱伝導率[kcal/m/h/°C]、x: 位置[m]、r: 吸着熱[kcal/g]、λ': 湿気伝導率[g/m/h/(g/kg)]、X: 絶対湿度[g/kg]、φ: 容積基準含水量[m³/m³]、α_c: 対流熱伝達率[kcal/m²/h/°C]、n: 表面の内向き法線、α_r: 放射熱伝達率[kcal/m²/h/°C]、α': 湿気伝達率[g/m²/h/(g/kg)]、λ'₀: 気乾状態の湿気伝導率[g/m²/h/(g/kg)]、h: 相対湿度[-]
i: 表面、R: 室内

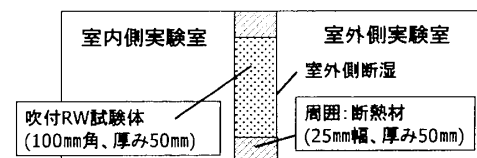


図 1 シミュレーション対象（実験試験体）

表 2 計算ケース

case	厚み	内容	室内条件	外気条件	下地
1	50 mm	実験 I	24°C 70%	0°C (一定)	なし
2	50 mm	実験 II	22°C 40%	東京 TAC2.5%	なし

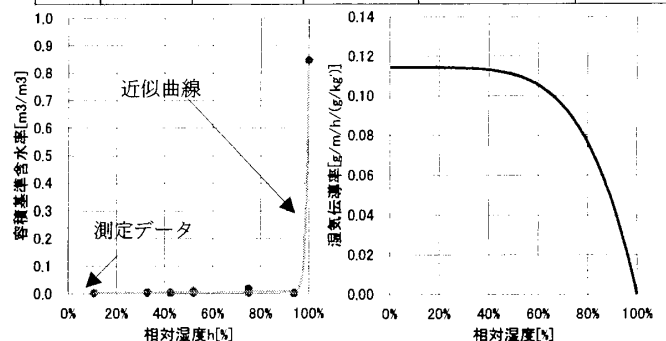


図 2 吹付 RW 平衡含水率曲線

図 3 湿気伝導率

物性値を表 3 に、吹付 RW の平衡含水率曲線を図 2 に、湿気伝導率の相対湿度との関係を図 3 に示す。実験で把握した試験体内部の温度・含水率および全体重量と計算結果を比較した。

3. シミュレーション結果

3.1 温湿度変化 ケース 1 の実験結果及びシミュレーション結果による試験体内の温度変動を図 4 に示す。計算結果(図 4-b)の外気側に近い質点は $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 実験結果(図 4-a)より高く誤差が生じており、含水により熱伝導率の値が大きくなっている可能性がある。なお、実験結果において室外温度はデフロストによる影響を受けて一日に 1 回高くなり、試験体内部温度もその影響を受けている。ただし、再現計算では室外温度一定として扱った。相対湿度変動を図 5 に示す。相対湿度は測定していないため、計算結果だけ示す。内部の相対湿度は 90% 以上と高くなっている。その際の湿気伝導率の値(計算結果)を図 6 に示す。90% 以上となる場所では気乾状態の湿気伝導率に対して $1/4$ から $1/5$ 程度となった。

3.2 重量含水率 ケース 1 の実験結果及びシミュレーション結果による試験体内の重量含水率の分布を図 7 に示す。横軸は室内側表面からの距離[mm]を示す。実験結果(図 7-a)は 4 週間経過後に試験体の外気側 10 mm の平均重量含水率は 50% 程度なのに対して、計算結果(図 7-b)では 68% となった。ケース 2 (図 8) では実験結果(図 8-a) 25%、計算結果(図 8-b) 30% となった。誤差は 2~4 割程度あるが、計算結果の方が実験結果より値が大きく安全側の評価となった。

3.3 重量変化 28 日後の試験体の含水による重量増加について実験結果とシミュレーション結果を比較して図 9 に示す。誤差は 3 割程度あるが、各ケースとも吹付 RW の重量はシミュレーション結果の方が大きく安全側の評価となった。

4. まとめ ハイグロスコピック領域を対象とした基礎式を元に湿気伝導率の扱いを変更することで含水率の再現性を向上する手法を提案した。今回の実験条件の範囲内においては重量含水率を誤差 2~4 割程度精度で予測でき、安全側の結果になっていることを確認した。なお、含水率に依存した熱伝導率の変化の影響および、試験体が大きくなった場合の重力の影響についてはさらに検討が必要である。

[参考文献] 1) 榎藤尚他:「不燃断熱材の結露性状に関する研究その 1」、日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学 II, p.329-330, 2007 年 8 月 2) 榎藤尚他:「不燃断熱材の結露性状に関する研究その 2」、日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学 II, p.311-312, 2008 年 9 月 3) 榎藤尚他:「不燃断熱材の結露性状に関する研究その 3・4」、日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学 II, p.257-260, 2009 年 8 月

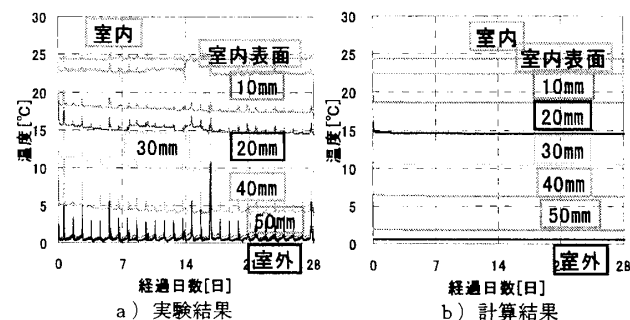


図 4 ケース 1: 温度変動

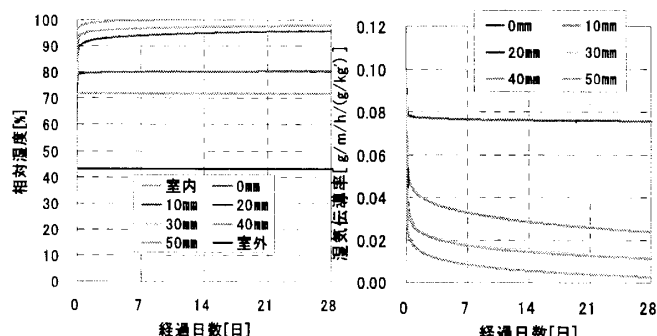


図 5 ケース 1: 相対湿度変動

図 6 ケース 1: 湿気伝導率

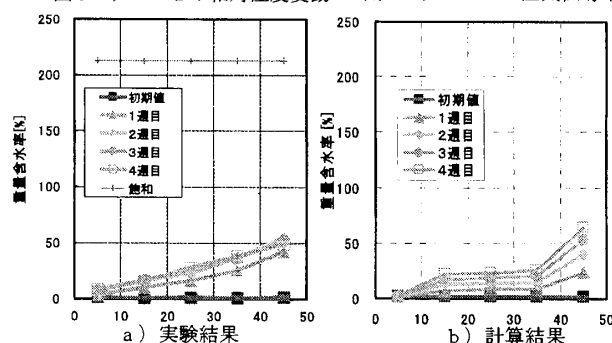


図 7 ケース 1: 重量含水率分布

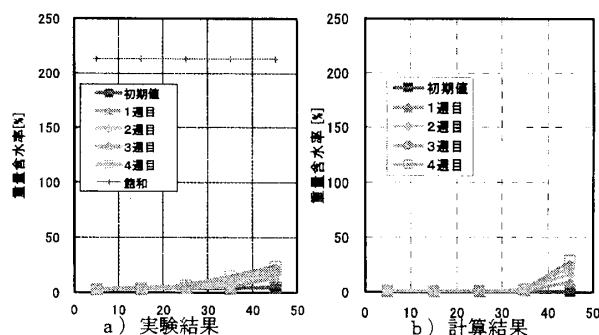


図 8 ケース 2: 重量含水率分布

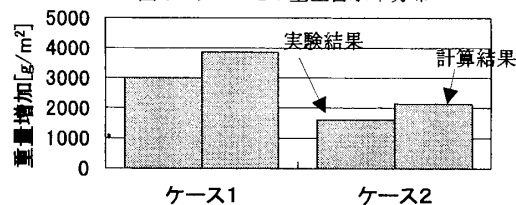


図 9 吹付 RW 含水量(4 週間後)

*1 鹿島 技術研究所 工修

*2 鹿島 技術研究所 工博

*3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授 工博

*4 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授 工博

*1Kajima Technical Research Institute Ms. Eng

*2Kajima Technical Research Institute Dr. Eng

*3Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng

*4Assoc.Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng