

空調と外断熱

結露防止と外断熱工法

(株)大林組技術研究所
主任研究員

田 中 辰 明

1. はじめに

昭和40年代の初めに結露による事故や苦情が多発し、これも結露の対策が一般技術者の間に行きわたった為か一時事故報告はかなり減少したようであった。昭和40年代の初めはアルミサッシュが住宅等にも普及しはじめ、建物が従来に比べ急に気密性が良くなり、建物が質的には向上したが、一方暖房設備が伴わないため、室内で多量に水蒸気を発生する直燃焼のガス暖房、石油暖房が行なわれていた為に発生した結露である。

一時減少したかにみえた結露事故が最近また増したように思われる。これは省エネルギーの動きに伴って断熱をしたことによってかえって結露が発生したというものもかなりある。断熱を施す際は湿気の移動も考え断熱設計をしないと結露事故を生じやすいのであるが、従来建物に断熱をする習慣のなかったわが国では設計者も施工者も断熱や防湿に対する知識が乏しいというのが実情である。

2. 結露対策の方針

建物の結露で最も忌避しなければいけないのは、「常時湿っている」という状態である。一時的にでも結露するのを絶対に避けなければいけないという建物はま

ずないはずであるし、一時的に少々結露しても居住者に我慢されるか、又は気付かれないですんでしまうこともある。したがって建物の防湿、防露対策の方針は次のようになる。

① 定常計算によってある所に結露が生じることがわかったら、換気計画、平面計画によって絶対湿度の減少を図り、又は結露場所の断面設計変更により結露を避ける。

② 非定常計算によってある所に結露が生じることがわかったら、それが被害として問題となる程度の結露量か否かを調べる。もし被害が生じる時は、被害を生じない材料ととりかえる。しかし実際は非定常で計算を行なうのは多くの困難が伴うものである。

このような防湿計画は室内や、ある特定位置の湿圧の計算を行なうもので、室温、湿圧、水蒸気量、換気量等の計算を行なう室内気候計画である。ここではそれぞれの因子が他の影響を受けない独立した変数と考えて計算を行なう。実際はこれは正しくないが、そうでないと現象が複雑になりすぎ数学的に解けないからである。

3. 結露の原因について

外壁の結露には表面結露と内部結露がある。壁の内表面温度 (θ_s) が室内空気露点温度 (θ_d) 以下であると壁の表面において水蒸気の凝結を生じ水滴を見るようになる。これが表面結露であって一般にこれを防止するには $\theta_s > \theta_d$ の条件を満たせばよい。壁の表面温度は定常計算によれば次式で求められる。

$$\theta_s = \theta_i - \frac{K}{\alpha_i} (\theta_i - \theta_o) \dots\dots\dots(1)$$

ここに

- θ_s : 壁の室内側表面温度 (°C)
- θ_i : 室温 (°C)
- K : 壁体の熱貫流率 (kcal/m²h°C)
- α_i : 室内側表面熱伝達率 (kcal/m²h°C)
- θ_o : 外気温度 (°C)

室内空気の温度とその空気の露点温度の差は室内湿度が高いほど小さい。したがって当然のことながら湿度が高ければ結露しやすい。ここに例題をもって解説しよう。

例題 25cm厚のコンクリートの外壁がある。外気温-18°C、室内は乾球温度24°C、湿球温度18°Cの時にこの外壁の内表面温度はいくらか、またこの壁面に結露するか。

解 $\alpha_o = 20$, $\alpha_i = 8$, コンクリートの $\lambda = 1.4$ とする。

- 但し, α_o : 外気側熱伝達率 (kcal/m²h°C)
- λ : 熱伝導率 (kcal/mh°C)

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{0.25}{1.4} + \frac{1}{8}}$$

$$= 2.83 \quad (\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}) \dots\dots\dots(2)$$

$$\theta_s = 24 - \frac{2.83}{8} \{ 24 - (-18) \} = 9.14^\circ\text{C} \dots\dots(3)$$

乾球温度24°C、湿球温度18°Cの露点温度は湿り空気線図より14°Cであるから、9.1°Cの壁面には結露する。この外壁に結露しないように断熱材を用いる場合は $\theta_s > 14$ となるように断熱材を追加すればよい。断熱材の熱伝導率 $\lambda = 0.04$ とすると(1)式より $\theta_s = 14^\circ\text{C}$ になるためには $K = 1.90$ でなくてはならず、そのための断熱材の必要厚さは6.8mmとなる。

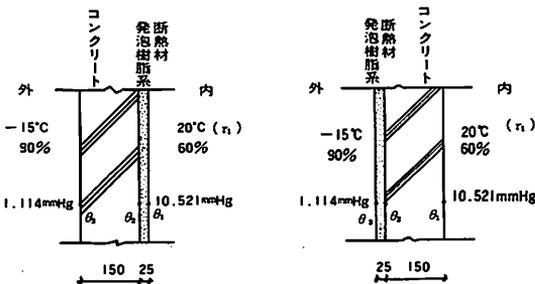
室内空気温度と壁面温度との差が大きいと結露しやすく、そのことから内外温度差が大きいと結露の危険が増すことはもちろん、 α_i が小さいと、またKが大きいほど結露しやすいといえる。Kを小さくするには断熱材厚さを厚くすればよい。室内側の α_i はあまり変化しないので定数とみなし、内外温度差($\Delta\theta$)と室内関係湿度(ϕ_i)、また結露防止に必要なK値を求め、これに適する壁体を設計するとよい。

室内側表面熱伝達率(α_i)が小さいために表面結露を起こす例としては、換気の不十分な押入で起こる結露や断熱の不十分な壁体に家具を近付けて置いた時に家具のうしろの壁体表面に起こる結露がある。

内部結露とは材料や構造体の内部で結露するものをいう。

一般に内部結露を防止するには構造体内部の各点の水蒸気圧(f)がその点における飽和水蒸気圧(F)より

図-1 内部結露のチェックを行なった外壁の諸条件



	熱伝導率 kcal/mh°C	湿気伝導率 gr/mhmmHg
室内側伝導率	8	20
発泡樹脂系断熱材	0.032	0.03
コンクリート	1.3	0.016
外側伝導率	20	50

り小さいことが必要である。

今外気温度-15°C、室内温度20°C、60%で150mm厚のコンクリート外壁内側に25mm厚の発泡樹脂系断熱材を貼った場合と、同じ断熱材を外側に貼った場合を比較してみる。材料の熱伝導率、湿気伝導率が図-1のようであったとすると、

a. 内側断熱の場合

熱貫流率Kを求めると、

$$K = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{0.15}{1.3} + \frac{0.025}{0.032} + \frac{1}{8}} = \frac{1}{1.070} = 0.935 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

外壁の通過熱量Qは

$$Q = 0.935 \{ 20 - (-15) \} = 32.7 \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

各材料の接点の温度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を求めると

$$\theta_1 = \tau_1 - \frac{1}{\alpha_1} Q = 20 - \frac{1}{8} \times 32.7 = 15.92^\circ\text{C} \quad (\text{飽和水蒸気圧 } 13.564 \text{ mmHg})$$

$$\theta_2 = \theta_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} Q = 15.92 - \frac{0.025}{0.032} \times 32.7 = 15.92 - 25.5 = -9.58^\circ\text{C} \quad (\text{飽和水蒸気圧 } 2.020 \text{ mmHg})$$

$$\theta_3 = \theta_2 - \frac{\delta_2}{\lambda_2} Q = -9.58 - \frac{0.15}{1.3} \times 32.7 = -9.58 - 3.63 = -13.21^\circ\text{C} \quad (\text{飽和水蒸気圧 } 1.459 \text{ mmHg})$$

湿気貫流率K'を求めると

$$K' = \frac{1}{\frac{1}{50} + \frac{0.15}{0.016} + \frac{0.025}{0.0014} + \frac{1}{20}} = \frac{1}{27.27} = 0.0366 \text{ gr/m}^2\text{hmmHg}$$

壁の湿気貫流量Hを求めると

$$H = 0.0366 (10.521 - 1.114) = 0.345 \text{ gr/m}^2\text{h}$$

各材料の接点の水蒸気圧 $\theta'_1, \theta'_2, \theta'_3$ を求めると

$$\theta'_1 = \tau_1 - \frac{1}{\alpha_1} H = 10.521 - \frac{1}{20} \times 0.345 = 10.521 - 0.017 = 10.504 \text{ mmHg}$$

$$\theta'_2 = \theta'_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} \times H = 10.504 - \frac{0.025}{0.0014} \times 0.345 = 10.504 - 6.15 = 4.354 \text{ mmHg}$$

$$\theta'_3 = \theta'_2 - \frac{\delta_2}{\lambda_2} \times H = 4.354 - \frac{0.15}{0.016} \times 0.345 = 4.354 - 3.25 = 1.104 \text{ mmHg}$$

ここで壁の飽和水蒸気圧分布、水蒸気圧分布を描いてみると図-2のようになる。図からあきらかなようにコンクリートのところで水蒸気圧分布が飽和水蒸気圧分布を上回り、結露が生じることがわかる。

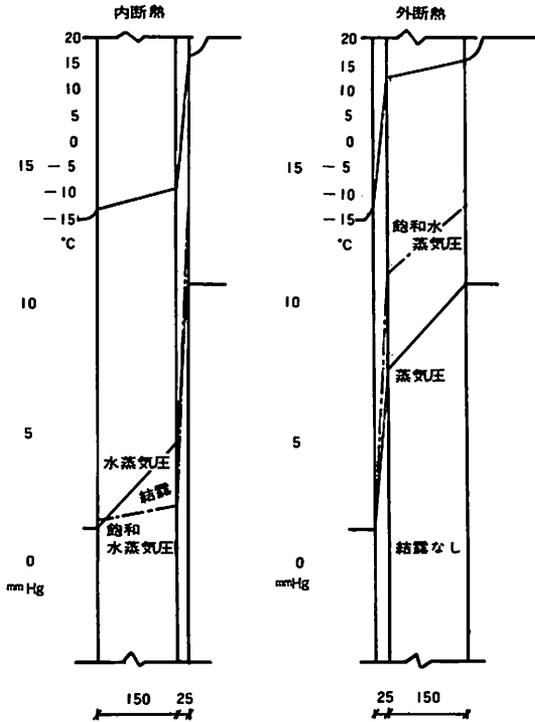
b. 外断熱の場合

そこで発泡樹脂系断熱材の位置を変え、コンクリートの外側に配置した場合について検討する。

熱貫流率Kは断熱材の位置が変わっても同じである。したがって $K = 0.935 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

多壁の通過熱量Qも同じである。

図-2 内断熱・外断熱を行なった場合の水蒸気圧分布



$$Q = 32.7 \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

各材料の接点の温度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を求めると

$$\theta_1 = \tau_1 - \frac{1}{\alpha_1} Q = 20 - \frac{1}{8} \times 32.7 = 20 - 4.08 = 15.92^\circ\text{C}$$

(飽和水蒸気圧 13.564 mmHg)

$$\theta_2 = \theta_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} Q = 15.92 - \frac{0.15}{1.3} \times 32.7 = 12.29^\circ\text{C}$$

(飽和水蒸気圧 10.90 mmHg)

$$\theta_3 = \theta_2 - \frac{\delta_2}{\lambda_2} Q = 12.29 - \frac{0.025}{0.032} \times 32.7 = -13.21^\circ\text{C}$$

(飽和水蒸気圧 1.459 mmHg)

湿気貫流率 K' , 湿気貫流量 H も断熱材の位置を変えない場合と同様で, $K' = 0.0366 \text{ gr/m}^2\text{hmmHg}$,

$$H = 0.345 \text{ gr/m}^2\text{h}$$

各材料の接点の水蒸気圧 $\theta'_1, \theta'_2, \theta'_3$ を求めると

$$\theta'_1 = \tau_1 - \frac{1}{\alpha_1} \times H = 10.521 - \frac{1}{20} \times 0.345$$

$$= 10.521 - 0.017 = 10.504 \text{ mmHg}$$

$$\theta'_2 = \theta'_1 - \frac{\delta'_1}{\lambda'_1} \times H = 10.504 - \frac{0.15}{0.016} \times 0.345$$

$$= 10.504 - 3.25 = 7.254 \text{ mmHg}$$

$$\theta'_3 = \theta'_2 - \frac{\delta'_2}{\lambda'_2} \times H = 7.254 - \frac{0.025}{0.0014} \times 0.345$$

$$= 7.254 - 6.15 = 1.104 \text{ mmHg}$$

この場合の飽和水蒸気圧分布, 水蒸気圧分布も図-2に示したが, ここでは常に飽和水蒸気圧分布が実際の水蒸気圧分布を上回り, 結露が生じないことがわかる。

4. 壁体と水蒸気拡散

断熱を考える時には, 壁体内の水蒸気の拡散も考慮しなければいけない。壁が厚くなり, これが熱的性質の違った材料から構成され, かつ断熱材があるとなると, 結露が起こるチャンスが多くなるからである。

材料内の水蒸気は, 両面の蒸気圧の差に比例して移動する。これは熱流の場合に似ている。すなわち式(4)で示される。

$$W = -\lambda' \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots(4)$$

ここに,

W: 単位時間・単位面積を通過する水蒸気量

(g/m²h)

p: 水蒸気圧 (mmHg)

x: 流路に沿う長さ (m)

λ': 湿気伝導率 (g/m・mmHg・h)

わが国では, 材料の湿気(水蒸気)の通りやすさを湿気伝導率 λ' として整理し, 内部結露の有無のチェックなどに使っているのは, 前節の計算例で示したとおりである。しかし, 残念ながら現在では湿気伝導率 λ' の値は各研究機関等でまちまちに測定され, 統一されたものがない。

これに対して, ドイツでは O. Krischer がこの分野で先駆的な研究を行ない, 各材料の湿気(水蒸気)の通りにくさを水蒸気拡散抵抗係数 μ (Diffusionswiderstandsfaktor) で表わすようになった。J. S. Cammerer が1956年に「建築物の水蒸気拡散の表示と計算法 (Bezeichnungen und Berechnungsverfahren für Diffusionsvorgänge im Bauwesen)」という論文を公表し, それ以来, 水蒸気拡散抵抗係数が統一的に使われて多くの研究者により測定が行なわれ, かなりの材料について実測値が整理され報告されている。参考のため, いくつかの建築材料の μ 値を表-1に示す。

表-1 幾つかの建築材料の水蒸気拡散抵抗係数

材 料 名	μ (-)
気泡コンクリート	6
コンクリート	60
モルタル	10
れんが	5
発泡スチレン	25
ロックウール板	1.2
木毛板	5
プラスタ	9
PVCシート	60,000

μ は無次元数で, 式(5)のように定義されている。

$$\mu = D (P_1 - P_2) / \text{GSR} \cdot T \dots\dots\dots(5)$$

ここに,

- D：空気中における水蒸気の拡散数 (m²/h)
- P₁：試験体外側の水蒸気分圧 (kgf/m²)
- P₂：試験体内側の水蒸気分圧 (kgf/m²)
- G：試験体を通して拡散していく水蒸気重量 (kg/m²h)
- s：試験体の厚さ (m)
- Rd：水蒸気的气体定数 (K)
- T：絶対温度 (K)

空気の水蒸気拡散抵抗係数は1となり、一般材料の水蒸気の伝導抵抗は $\mu s N$ で表わされる。sは前出の材料の厚さ(m)で、Nは空気の水蒸気伝導抵抗であり、

表-2 温度と空気の水蒸気伝導抵抗Nの関係

温度(℃)	空気の水蒸気伝導抵抗 $N = RdT/D$ [m·h·kgf/m ² ·kg]
30	0.1425×10^6
20	0.1462×10^6
10	0.1504×10^6
0	0.1549×10^6
-10	0.1597×10^6
-20	0.1648×10^6
-30	0.1702×10^6

$N = RdT/D$ で表わされる。Nは温度により変化し、表-2に示すようになるのであるが、常温附近での変化は小さいとみれば、壁体の内部結露をチェックするのに実用的には μs のみをもっていくこともできる。

多層壁を構成する各材料を並べるにあたり、内部結露が起これないように配慮しなければいけない。この判断を簡単に行なうため、Neufertは状態係数(Lagefaktor)という値を導入している。状態係数は $\mu \lambda$ (kcal/mhK) で表わされ、各層の状態係数を室内から外へできるだけ減少するように並べるのが、内部結露を起こさないし、建築物理学的に正しいとしている。

また、H.HebgenとF.Heckは状態値(Lagewert)という値を導入し、内部結露の起こりやすさの判定は状態係数だけですべきでなく、これに各材料の厚さを乗じて判断しなければいけないとし、状態値を $\mu \lambda s$ で定義している。この場合も、室内から外へできるだけ状態値が減少するように配置すべきであるとしている。

状態値にしろ、状態係数にしろ、ドイツの建築物理学者が主張しているのは、建物躯体の外側には熱伝導率の小さい材料すなわち断熱材を配置し、防湿層は室内側へ設ける外断熱の勧めである。

5. 外断熱工法

本稿3節、4節で結露防止の上からも外断熱が有利であることを述べた。外断熱工法については別稿で「通気層のない外断熱工法の実際」として工法の紹介を行

なった。

この工法は実は防湿層が存在しない。わが国では結露防止のためには防湿層を室内側に設け、室内で発生する水蒸気は室内を換気することで外へ捨てるという考え方をしている。これに対しこの工法は室内で発生した水蒸気は壁を通して湿圧の低い外気側へ抜くという考え方をしている。換気をすることで室内で発生する水蒸気を捨てるのは潜熱だけでなく顕熱も捨てることになり寒地では全く省エネルギー的でなくもったいないことなのである。

この外断熱工法は水蒸気をうまく室内から外へ捨てるというのがみそである。したがって一番外側の仕上材も外からの雨水は決して通さないが、水蒸気は通すという性質を持っている。わが国は雨量が多く多湿でもあることから、仕上材でも完全防水、防湿型のもが多く、なかなか水蒸気であれば通るという材料がない。

写真-1 通気層のない外断熱の構成



写真-2 バリコン工法による実験建物の施工

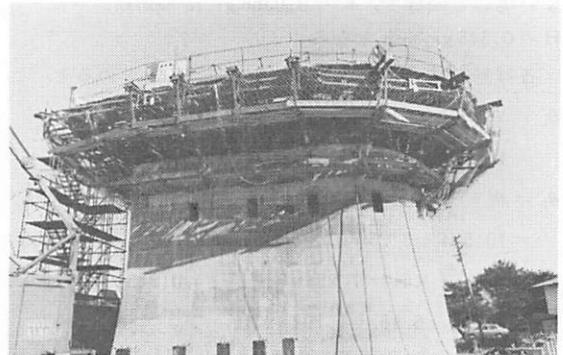


写真-1に本誌別稿で紹介した通気層のない外断熱工法の構成を示す。ここでは白い仕上材の上に更に細かい砂利をちりばめた仕上げを示した。これは一般住宅

