

包括熱伝導率を用いた3層構成外壁の遮熱性能予測

STUDY ON PREDICTION METHOD FOR INSULATION OF TRIPLE-LAYER WALL
USING "INCLUSIVE THERMAL CONDUCTIVITY" IN FIRE-RESISTANCE TEST吉谷公江*¹, 清水貴史*², 吉田正友*³

Kimie YOSHITANI, Takafumi SHIMIZU and Masatomo YOSHIDA

A method for prediction the unexposed surface temperature of a triple-layer wall is proposed by using "inclusive thermal conductivity" which considers heat and moisture transfer, and influence of cracks in materials. In order to estimate that unexposed surface temperature of triple-layer specimen whose thickness of gypsum board layer is decreasing, the inclusive thermal conductivities of fiber-reinforced cement siding and gypsum board estimated for the double-layer wall were used. As a result, it is confirmed that these inclusive thermal conductivities obtained from the walls consisted of less layers can apply for prediction on the walls with more layers well enough.

Keywords : Fire-resistance, Unexposed surface temperature prediction, Finite-difference method, Inclusive thermal conductivity, Triple-layer

防耐火性能, 裏面温度予測, 差分法, 包括熱伝導率, 3層

1. はじめに

一般的に、熱伝導率は、断熱材のように空気を含んだ形で測定される有効熱伝導率や、王ら⁵⁾が提案したように加熱実験の結果から推定する実効熱伝導率があるが、これらは材料内部のいずれの位置においても同一の熱伝導率を与えるため、材料内部で生じる水分の偏りや空隙率等の差⁶⁾が起因となる細かな温度依存性の違いは反映されていない。更に、特定の材料厚さの影響を受けた値であるため、材料厚さを変更する等、異なる厚さの材料に対して有効熱伝導率（もしくは、実効熱伝導率）を用いた場合には、遮熱性能予測において十分な予測精度を得ることができないと考えられる。

一方で、著者らは、防耐火試験時の実用的な遮熱性能¹⁾予測手法の確立を目的として、加熱実験の結果から推定される包括熱伝導率を提案し、単体材料（以降、単層とする）及び2層構成について、せっこうボードの材料厚さを加熱実験よりも薄くした場合²⁾、および、ALC単層について、材料厚さを厚くした場合のそれぞれの非加熱面（以降、裏面とする）の温度予測を行った⁴⁾。その結果、包括熱伝導率を用いれば単層及び2層構成については十分な精度で遮熱性能を予測できることが確認できた。これらの結果包括熱伝導率は、材料内部に生じるクラックや水分移動の影響を包含したものであり、加熱実験の結果をもとにして、数値計算モデルの分割層ごとに温度依存性を考慮して推定した熱伝導率であり、防耐火試験時の材料内部の物性値の実態をとらえているといえる。

本研究では、3層構成外壁に対し包括熱伝導率を用いた遮熱性能予測を行い、多層構成の外壁においても精度の高い結果が得られるかを検討した。このとき、2層構成³⁾にて推定した窯業系サイディ

ングとせっこうボードの包括熱伝導率を転用し、グラスウールボードのみの包括熱伝導率を推定することとした。なお、本報では、実用性を高めるために密度及び比熱を一定値とし、水分移動やクラック等の試験体に生じる変化を全て包括熱伝導率に含めることとした。

2. 加熱試験

本実験では、3層構成の外壁として Table 1 に示す 3 仕様について加熱試験を行った。いずれの試験体も 1 層目（加熱側）を JIS A 1422⁸⁾の窯業系サイディング、2 層目をグラスウールボードとし、3 層目（非加熱側）は 3 種類の厚さの JIS A 6901⁹⁾の普通せっこうボード（以降、せっこうボードとする）とした。幅 300 mm×高さ 300 mm の試験体を Fig. 1 に示す軽量鉄骨製の試験体枠（幅 760 mm×高さ 760 mm、板厚 2.3 mm、鋼製）に配置し、試験体の加熱面が一辺 200 mm となるようにした。試験体と試験体枠の間、及び、試験体枠の加熱面に位置する部分は、セラミックファイバーを用いて養生し、試験体枠から試験体へ熱が伝わらないように配慮した。試験体枠内における試験体の配置は、総厚さの薄い試験体を上部とし、燃え抜け等によって他の試験体に影響が出ないように配慮した上で、試験体枠を試験炉に鉛直方向に設置した。

実験は、(一財)日本建築総合試験所の小型加熱炉（加熱面：一辺 670 mm）を用いて行い、式(1)によって表される ISO834¹⁰⁾に準拠した標準加熱曲線¹¹⁾に沿うように加熱した。

$$T_f = 345 \log_{10}(8t_f + 1) + 20 \quad (1)$$

熱電対の設置位置を Fig. 2 に示す。炉内温度は試験体の加熱面か

*¹ 近畿大学 助教・博士(工学)*² 鳥根大学 准教授・博士(工学)*³ 大阪工業大学 特任教授・博士(工学)

Assist. Prof., Kindai Univ., Dr.Eng.

Assoc. Prof., Shimane Univ., Dr.Eng.

Prof., Osaka Institute of Technology, Dr.Eng.

ら 100 mm 離れた位置で K 型シース熱電対を用いて測定した。裏面空気温度は裏面から 30 mm 離れた位置で K 型熱電対を用いて測定した。また、試験体表裏面及び境界温度の測定においても K 型熱電対を用い、試験体の表面温度は加熱側表面から 1 mm 内部の温度とし、裏面温度は銅板付熱電対を耐火繊維パッド(寸法:30 mm 角、厚さ 2 mm) で覆い固定して測定した。材料間の境界温度は、測定点よりも非加熱側の材料を貫通する径 2mm の孔をあけ、熱電対を試験体裏面から挿入し、測定点よりも加熱側の材料裏面に接する位置に固定して測定した。裏面温度の測定点は試験体中央とし、他の測定点については裏面温度から一定の距離を保ち上下左右へ割り振った。包括熱伝導率を推定するために必要な温度域を得るため加熱時間は 90 分とし、計測間隔は 30 秒とした。

Fig. 3 に実験結果を示す。いずれの試験体も燃え抜けることはなかった。表面温度は、試験体によるばらつきは生じなかったが、ET1 において 36 分時点で熱電対の短絡が生じたと考えられる。境界温度 1 では 50 分時点で 500℃ を超えたあたりから試験体によるばらつきが生じており、グラスウールボードのやせによる隙間等が生じていると考えられる。境界温度 2 では 100℃ を超過した時点から ET3 において高温となる傾向があるため、熱電対の設置位置等のばらつきによるものと考えられる。ET1 では、境界温度 2 が急激に温度上昇した直後に裏面温度が停滞を終えて急激に温度上昇しているため、伝熱による温度変化といえる。また、裏面温度が 100℃ を超過するまでは、せっこうボードの水分蒸発による吸熱が境界温度 2 へ影響していると考えられる。裏面温度では、ET1 が最初に 100℃ 超過後の温度上昇をはじめ、ET2、ET3 とせっこうボードの厚さの順に温度上昇を再開した。なお、ET1 は 2 層構成の時と同様に裏面温度 300℃ 付近で収束した。

3. 包括熱伝導率の推定

3.1. 数値計算手法

本研究では、既報²³⁾と同様に一次元の解析モデル (Fig. 4) について有限差分法を用いて検討した。なお、使用記号の説明は末尾に示す。1次元非定常熱伝導方程式は、式(2)により表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_j^t \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (j = 1 \sim n) \quad (2)$$

また、式(2)を有限差分法によって離散化すると、各材料内部における分割層の境界温度は式(3)、1層目と2層目の境界温度は式(4)、2層目と3層目の境界温度は式(5)、裏面温度は式(6)となる。

$$\theta_i^{t+1} = Fo_{i+1}^t \cdot \theta_{i+1}^t + (1 - Fo_i^t - Fo_{i+1}^t) \theta_i^t + Fo_i^t \cdot \theta_{i-1}^t \quad (i = 1 \sim n-1) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} L_2 \theta_0^{t+1} = & \{ (L_1 Fo_n^t + L_2 Fo_1^t) L_2 \theta_1^t + (1 - L_1 Fo_n^t - L_2 Fo_1^t) L_2 \theta_0^t \\ & + (1 - L_1 Fo_n^t - L_2 Fo_1^t) \frac{L_1 Fo_n^t}{L_2 Fo_1^t Q a^t} L_1 \theta_n^t \\ & + (L_1 Fo_n^t + L_2 Fo_1^t) \frac{L_1 Fo_n^t}{L_2 Fo_1^t Q a^t} L_1 \theta_{n-1}^t \} / (1 + \frac{L_1 Fo_n^t}{L_2 Fo_1^t Q a^t}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} L_3 \theta_0^{t+1} = & \{ (L_2 Fo_n^t + L_3 Fo_1^t) L_3 \theta_1^t + (1 - L_2 Fo_n^t - L_3 Fo_1^t) L_3 \theta_0^t \\ & + (1 - L_2 Fo_n^t - L_3 Fo_1^t) \frac{L_2 Fo_n^t}{L_3 Fo_1^t Q b^t} L_2 \theta_n^t \\ & + (L_2 Fo_n^t + L_3 Fo_1^t) \frac{L_2 Fo_n^t}{L_3 Fo_1^t Q b^t} L_2 \theta_{n-1}^t \} / (1 + \frac{L_2 Fo_n^t}{L_3 Fo_1^t Q b^t}) \end{aligned} \quad (5)$$

Table 1 Specimens condition

| Specimen No. | ET1 | ET2 | ET3 |
|------------------------------|--------------------------------|------|------|
| Layer 1 | Fiber-reinforced cement siding | | |
| Thickness (mm) | 15.0 | | |
| Moisture content (%) | 4.98 | | |
| Layer 2 | Thermal insulation board | | |
| Thickness (mm) | 12.0 | | |
| Density (kg/m ³) | 300.0 | | |
| Layer 3 | Gypsum board | | |
| Thickness (mm) | 9.5 | 12.5 | 15.0 |
| Moisture content (%) | 0.53 | 0.43 | 0.39 |

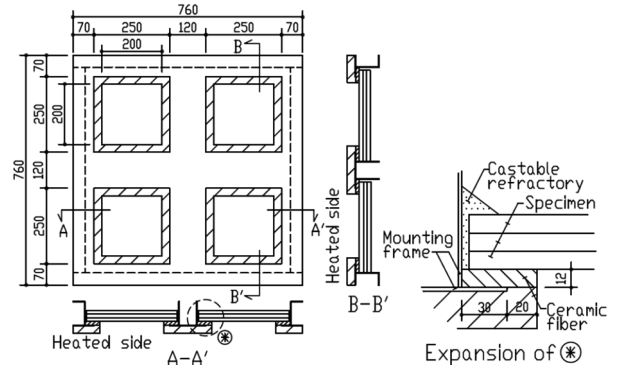


Fig. 1 Schematic (from heated side) (Measurement unit: mm)

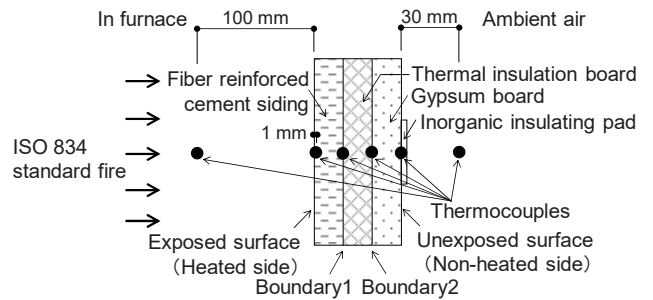


Fig. 2 Configuration of the thermocouples for temperature measurement

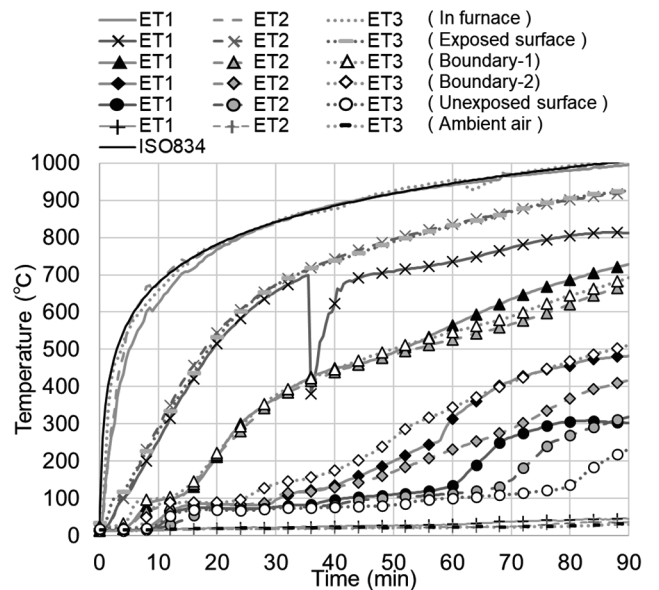


Fig. 3 Fire-resistance test result

$$\theta_n^{t+1} = Fo_{n-1}^t \cdot \theta_{n-1}^t + \left(1 - Fo_n^t - h_o \cdot Fo_n^t \cdot \frac{\Delta x}{\lambda_n^t}\right) \theta_n^t + h_o \cdot Fo_n^t \cdot T_o^t \cdot \frac{\Delta x}{\lambda_n^t} \quad (6)$$

このとき、

$$Fo_j^t = \alpha_j^t \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} = \frac{\lambda_j^t}{\rho c} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (0 \leq Fo_j^t \leq 0.5) \quad (7)$$

$$Qa^t = \frac{L_2 \lambda_1^t}{L_1 \lambda_n^t}, \quad Qb^t = \frac{L_3 \lambda_1^t}{L_2 \lambda_n^t} \quad (8)$$

$$L_1 \theta_n^t = L_2 \theta_0^t, \quad L_2 \theta_n^t = L_3 \theta_0^t \quad (9)$$

$$\Delta t = \frac{dt_{im}}{3600}, \quad \Delta x = \frac{dth}{1000} \quad (10)$$

なお、式(4)～(9)中の添字 L1～L3 はそれぞれ、1層目の窯業系サイディング、2層目のグラスウールボード、3層目のせっこうボードを表す。したがって、 $L_1 \theta_n^t$ と表現した場合、L1 は Table 2 中の窯業系サイディング NT1S～NT3S のいずれかであることを示す。

式(2)による計算結果が実験結果に一致するように、式(3)～(8)における熱伝導率 λ の値を逐次変化させ、一致した際の値を包括熱伝導率 (λ_{inc}) とする (式(11))。

$$\lambda_j^t = \lambda_{inc}^t \quad (11)$$

本研究で推定する包括熱伝導率は、水分を含む材料の、各分割層における水分の蒸発や材料のクラック等の発生を考慮した熱伝導性を表すものであるため、各分割層の中心温度 θ' (式(12)) に依存するものとし、比熱や密度についても同様とする。

$$\theta_j^t = \frac{\theta_{j-1}^t + \theta_j^t}{2} \quad (12)$$

3.2. 包括熱伝導率の推定

Fig. 5 に包括熱伝導率の推定対象 ET3 及び裏面温度の予測対象 NT1～NT3 についての概要を示す。ET3 の試験結果を用いて包括熱伝導率を推定する。このとき、既報にて推定した窯業系サイディング及びせっこうボードの包括熱伝導率を $NT3S \lambda_{inc}^t$ 及び $NT3G \lambda_{inc}^t$ として1層目及び3層目に用い (Fig. 6)、未知である2層目のグラスウールボードの包括熱伝導率 $NT3I \lambda_{inc}^t$ を求めることとした。

式(2)を用いた熱伝導計算において、Table 3 の初期条件に加えて、ET3 の実験結果より得られた表面温度 $NT3S \theta_0$ を式(13)、裏面空気温度 T_0 を式(14)の多項式近似として用いた (Fig. 7)。なお、材料が含む水分の変化、及び、試験体に生じるクラック等の変化を全て包括熱伝導率 λ_{inc} に含めることとし、比熱 c 及び密度 ρ は一定値とした。

Fig. 8 に示す包括熱伝導率推定のフローチャートに基づき、包括熱伝導率の推定において、境界温度 1・2 と裏面温度の計算結果と実験結果ができる限り一致するように2層目の包括熱伝導率を変化させた。具体的には、計算結果と実験結果の差について、以下の点を基準とした。このとき、本研究は防耐火試験時の遮熱性能予測を主目的としているため、境界温度よりも裏面温度について、計算結果と実験結果の差が小さくなるようにした。

- 1) 裏面温度の変化が急激になる時間 (停滞開始、停滞終了等)、温度上昇速度が一致する。
- 2) 裏面温度の計算結果と実験結果の差を $\pm 5^\circ\text{C}$ の範囲とする。
- 3) 境界温度の計算結果と実験結果の差を $\pm 10^\circ\text{C}$ の範囲とする。

- 4) 材料内部の温度分布が加熱側から非加熱側に段階的に変化する。
- 5) 材料内部の包括熱伝導率において、非加熱側に近づくほど変化が生じる時間が遅くなる。
- 6) 材料内部の包括熱伝導率において、非加熱側に近づくほど低温で変化が生じる。

ただし、加熱実験時に測定された温度が適切でないと判断できる場合や、推定した包括熱伝導率の均整がとれない場合はこの限りではないとし、これらを満たしたなめらかな変化の値をグラスウールボードの各分割層の包括熱伝導率 $ET3I \lambda_{inc}^t$ とした。したがって、30分以降の境界温度 2 においては、実験時の温度低下、及び、裏面温度と境界温度 1 の整合性の優先により、計算結果と実験結果の差が大きくなっている。また、70分以降の境界温度 1・2 においては、裏面温度の整合性を優先したため、計算結果のほうが実験結果よりも温度が低くなっている。

グラスウールボードの包括熱伝導率 $ET3I \lambda_{inc}^t$ を数値計算に用いることができるよう、温度域ごとに区間分けを行い、それぞれを6次以

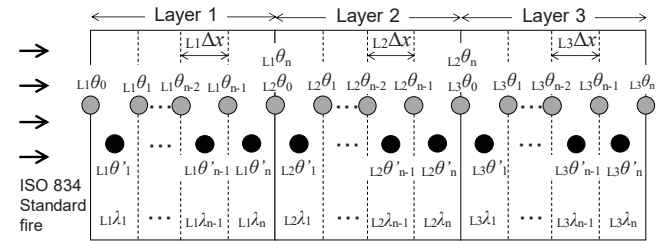


Fig. 4 Model of one-dimensional transient heat conduction equation

Table 2 Correspondence of specimen

| Fire-resistance test specimen No. | | ET1 | ET2 | ET3 |
|-----------------------------------|--|------|------|------|
| Numerical analysis | specimen No. | NT1 | NT2 | NT3 |
| | Parameter of fiber-reinforced cement siding (L1) | NT1S | NT2S | NT3S |
| | Parameter of Thermal insulation board (L2) | NT1I | NT2I | NT3I |
| | Parameter of gypsum board (L3) | NT1G | NT2G | NT3G |

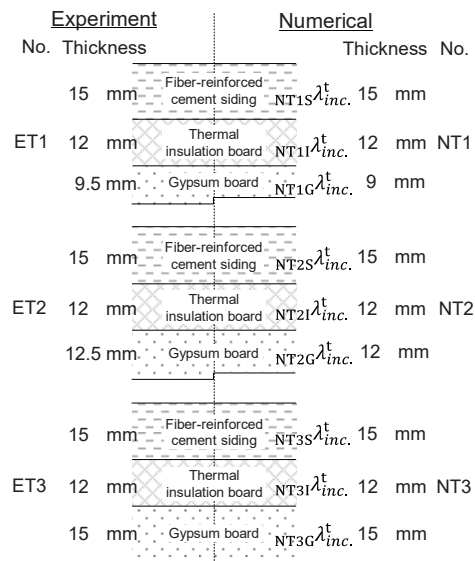
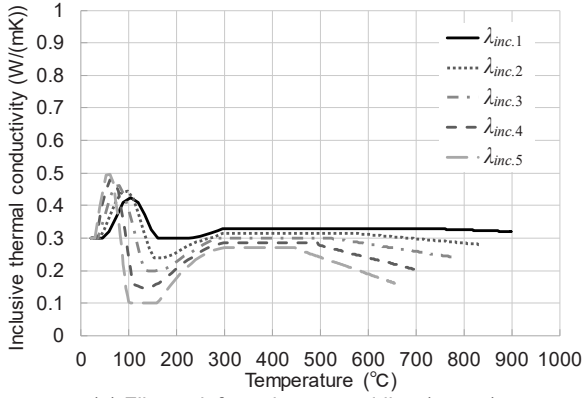
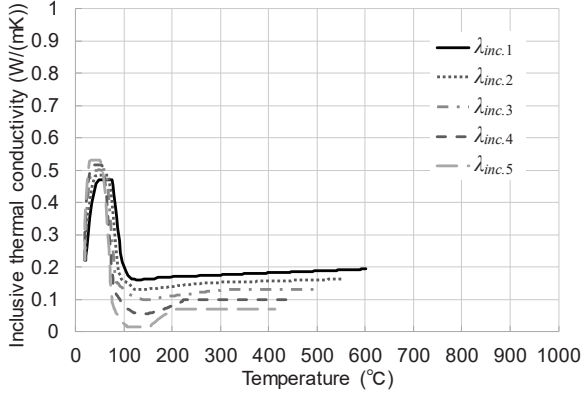


Fig. 5 Specimens and parameters for numerical analysis



(a) Fiber-reinforced cement siding ($_{NT3S}\lambda_{inc}$)



(b) Gypsum board ($_{NT3G}\lambda_{inc}$)

Fig. 6 Approximate curves of inclusive thermal conductivities

Table 3 Initial condition for numerical analysis

| | NT1 | NT2 | (ET3) NT3 | |
|--|---|--------|--------------|------|
| Fiber-reinforced cement siding | Thickness (λ) (mm) | 15.0 | | |
| | Thickness of elements (dth) (mm) | 3.0 | | |
| | Division number (n) | 5 | | |
| | Inclusive thermal conductivity (λ'_{inc}) (W/(mK)) | 0.3 | | |
| | Density (ρ') (kg/m ³) | 1100.0 | | |
| | Specific heat (c') (kJ/(kgK)) | 1.0 | | |
| | Material temperature (°C) | 25.5 | | |
| Thermal insulation board | Thickness (λ) (mm) | 12.0 | | |
| | Thickness of elements (dth) (mm) | 3.0 | | |
| | Division number (n) | 4 | | |
| | Inclusive thermal conductivity (λ'_{inc}) (W/(mK)) | 0.037 | | |
| | Density (ρ') (kg/m ³) | 300.0 | | |
| Gypsum board | Specific heat (c') (kJ/(kgK)) | 0.8375 | | |
| | Material temperature (°C) | 19.4 | | |
| | Thickness (λ) (mm) | 9.0 | 12.0 | 15.0 |
| | Thickness of elements (dth) (mm) | 3 | 3.0 | |
| | Division number (n) | 3 | 4 | 5 |
| | Inclusive thermal conductivity (λ'_{inc}) (W/(mK)) | 0.22 | | |
| | Density (ρ') (kg/m ³) | 775.0 | | |
| Specific heat (c') (kJ/(kgK)) | 1.0 | | | |
| Material temperature (°C) | 19.0 | | | |
| Time (t_f) (min) | | 90.0 | | |
| Time interval ($dtim$) (sec) | | 1.0 | (3.0) 1.0 | |
| Heat transfer coefficient of the unexposed surface (h_o) (W/(m ² K)) | | 10.0 | | |
| Ambient air temperature (°C) | | 14.7 | | |

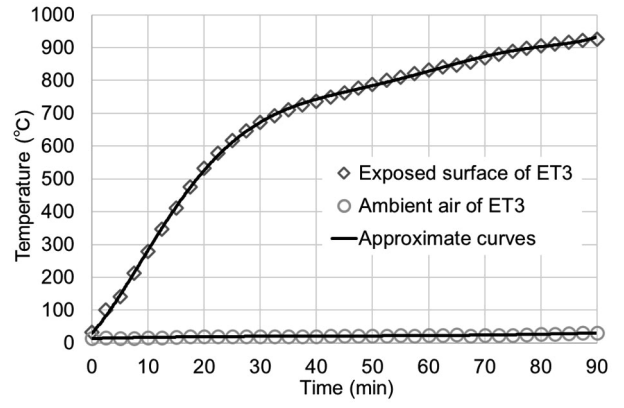


Fig. 7 Approximate curve in exposed surface temperature and ambient air temperature

$$\begin{aligned}
 {}_{NT3S}\theta_0^t = & 4.33671868216648 \times 10^{-8}t_f^6 \\
 & -1.29331336665706 \times 10^{-5}t_f^5 \\
 & +1.45202977341796 \times 10^{-3}t_f^4 \\
 & -7.30529459383433 \times 10^{-2}t_f^3 \\
 & +1.30490887501219t_f^2 + 18.2574457455194t_f \\
 & +29.7254380236845 \quad (0.5 < t_f)
 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 T_o^t = & 6.08084439371534 \times 10^{-5}t_f^3 \\
 & -7.76202395229708 \times 10^{-3}t_f^2 \\
 & +0.393769290988871t_f + 13.5814360672691 \quad (2.5 < t_f)
 \end{aligned} \quad (14)$$

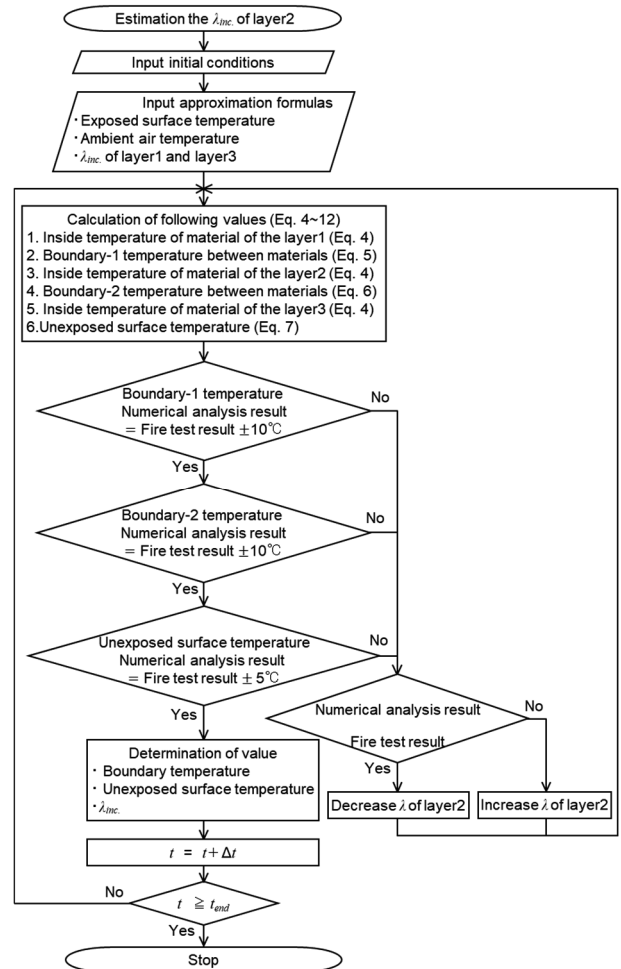


Fig. 8 Subroutine for estimating inclusive thermal conductivities shown as flow chart

下の多項式近似とした。この近似曲線で示される包括熱伝導率を $_{NT3}\lambda_{inc}$ とする。推定した過程の温度履歴を Fig. 9 に、包括熱伝導率 $_{NT3}\lambda_{inc}$ を Fig. 10 に示す。

グラスウールボード自体に水分はなく通気性をもつため、窯業系サイディングから移動してきた水蒸気は $\lambda_{inc,1}$ を透過し、せっこうボードに吸水されるまでは $\lambda_{inc,4}$ において留まると考えられる。また、水蒸気の凝縮熱、液水の熱伝導及び顕熱により、100℃未満において包括熱伝導率が上昇している。液水は各分割層にて再度水蒸気となり非加熱側へ移動する熱水分同時移動が生じる。

水分の影響が小さくグラスウールボード自体の変質もほとんど生じていない温度域 100~200℃においては、初期条件の包括熱伝導率に近い値となるが、その後グラスウールの融解、やせ等における変質によって包括熱伝導率は上昇している。このとき、 $\lambda_{inc,1} \sim \lambda_{inc,4}$ のいずれの位置においても、温度依存性は同一であるといえる。

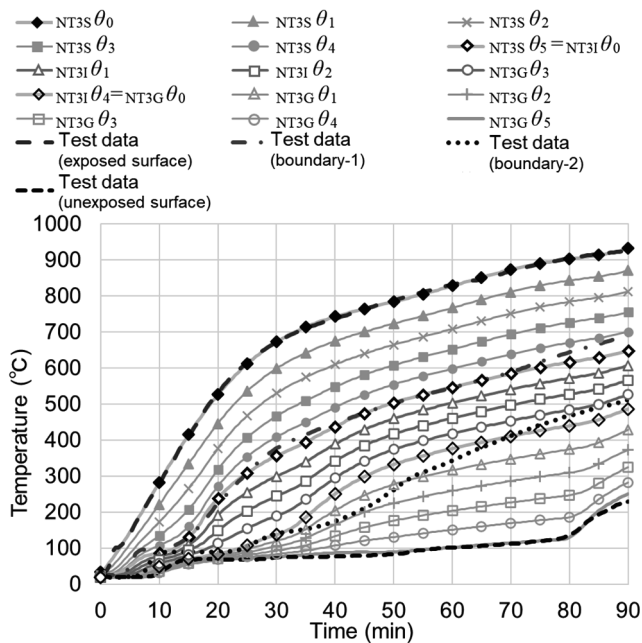


Fig. 9 Temperature distribution inside the specimen (ET3 and NT3)

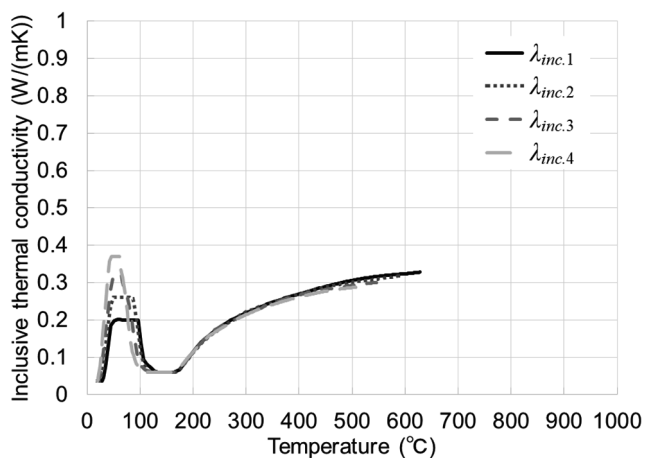


Fig. 10 Estimated approximate curves of inclusive thermal conductivities ($_{NT3}\lambda_{inc}$)

4. 包括熱伝導率を用いた遮熱性能予測の妥当性の検証

4.1. 検証手順

本節では、Fig. 6 及び Fig. 10 に示す $_{NT3}\lambda_{inc}$ をもとに、せっこうボード厚さの異なる 3 層の壁体 NT1 (窯業系サイディング+グラスウールボード+せっこうボード厚さ 9 mm) 及び NT2 (窯業系サイディング+グラスウールボード+せっこうボード厚さ 12 mm) の裏面温度を予測する。窯業系サイディング (1 層目) 及びグラスウールボード (2 層目) は厚さを変更させないため、 $_{NT3S}\lambda_{inc}$ 及び $_{NT31}\lambda_{inc}$ はすべての予測計算で用い、厚さを変化させるせっこうボード (3 層目) については各分割要素の包括熱伝導率 $_{NT1G}\lambda_{inc}$ 及び $_{NT2G}\lambda_{inc}$ を既報と同様に削減する分割層の包括熱伝導率を用いないものとした。以上の値を用いて NT1 及び NT2 の裏面温度を予測し、実験結果 ET1 及び ET2 と比較した。裏面温度予測のフローチャートを Fig. 11 に示す。

なお、加熱試験体 ET1 及び ET2 と温度予測対象の NT1 及び NT2 には、それぞれ 0.5 mm の厚さの違いがある。包括熱伝導率を用いた材料厚さを変更した場合の数値計算において、厚さの変更は分割層の厚さに伴うため、双方の温度予測時に 0.5 mm の差が生じないようにするためには分割層の厚さを 0.5 mm にする必要がある。しかし、基準となる NT3 の包括熱伝導率の本数を 30 本とすることは裏面温度予測手法として実用性に欠けるものとなる上に、0.5 mm は表面温度の熱電対設置の誤差範囲であり、また、0.5 mm の違いによる温度差は非常に小さいと考え、無視できるものとする。

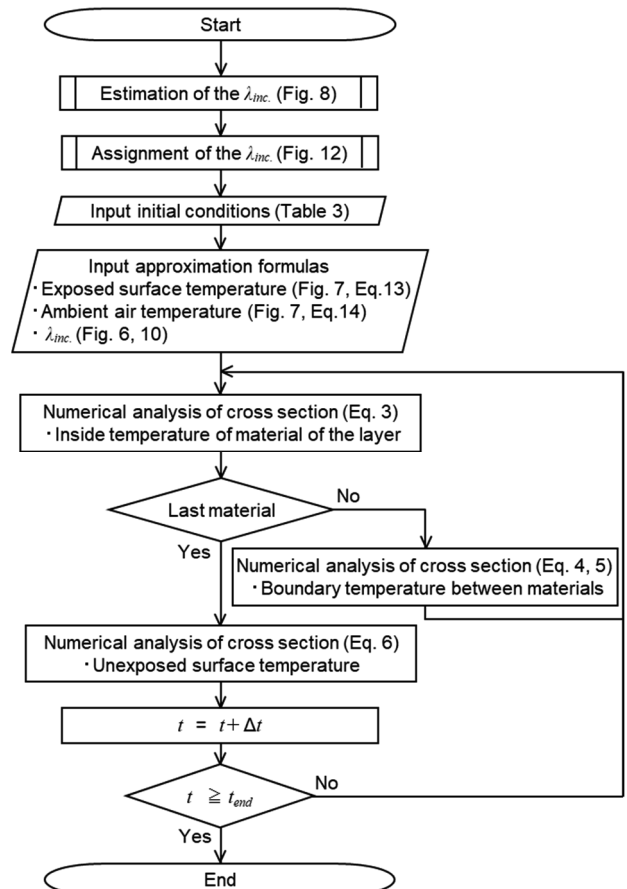


Fig. 11 Main routine calculation of unexposed surface temperature shown as flow chart

4.2. 遮熱性能予測の妥当性の検討

3層構成のうち、厚さを変化させるせっこうボードにおいては、既報²⁾と同様に、基準となる材料 (NT3G) よりも予測したい材料 (NT1G もしくは NT2G) の厚さが薄くなるため、包括熱伝導率の割り当てにおいては、厚さの差と等しくなるだけの分割層の数を、基準となる材料の分割層の数から削減する (Fig. 12 参照)。このとき、表裏面の分割層は水分やクラック等の影響を大きく受けるため、材料内部の分割層を削減する。したがって、NT3 を基準として NT1 及び NT2 の裏面温度を予測する場合、分割層を1つ削減する NT2G では $\lambda_{inc.3}$ を削減し、 $\lambda_{inc.4}$ を $\lambda_{inc.3}$ 、 $\lambda_{inc.5}$ を $\lambda_{inc.4}$ とする。また、分割層を2つ削減する NT1G では $\lambda_{inc.2}$ 及び $\lambda_{inc.3}$ を削減し、 $\lambda_{inc.3}$ を $\lambda_{inc.2}$ 、 $\lambda_{inc.5}$ を $\lambda_{inc.3}$ とする。なお、窯業系サイディング及びグラスウールボードの厚さはいずれの仕様においても等しいため、窯業系サイディングの包括熱伝導率は $\lambda_{inc.1} = \lambda_{inc.2} = \lambda_{inc.3}$ 、グラスウールボードの包括熱伝導率は $\lambda_{inc.4} = \lambda_{inc.5}$ となる。

NT1~NT3 の裏面温度を、初期条件 (Table 3)、NT1S~NT3S、NT1I~NT3I、及び、推定した NT1G~NT3G の包括熱伝導率をもとに、式(2)に示す一次元非定常熱伝導方程式を用いて算出した。このとき、近似式化した包括熱伝導率を式(7)として式(3)~式(6)に代入して計算を行った。また、数値計算を行う際には、ET3 の表面温度の近似式である式(13)を $\theta_0' = \theta_0 = \theta_0'$ として用い、裏面空気温度に式(14)を用いた。

実験結果と計算結果の裏面温度比較を Fig. 13 に示す。ET3 を基に NT3 の包括熱伝導率を推定しているため、NT3 の計算結果は Fig. 9 と等しい。NT1 及び NT2 の予測結果は、せっこうボードの水分蒸発による停滞開始時間がほぼ等しく、水分蒸発後の立ち上がりのタイミングが実験結果と 2~3 分程度の差であり、包括熱伝導率を用いて計算した裏面温度予測結果はよく合っているといえる。なお、NT1 において、75 分以降では ET1 との差が大きくなっているが、防耐火試験における裏面温度の合否判定基準のうち最高温度は初期温度 + 180℃ であるため、300℃ 以下の温度域での精度は良好といえ、それよりも高温における温度差については許容できると考えられる。

5. まとめ

本報では、窯業系サイディング、グラスウールボード及びせっこうボードを積層した3層構成の壁体について、実験結果から推定した包括熱伝導率を用いて、3層目のせっこうボード厚さを薄くした場合の裏面温度予測を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) グラスウールボードの包括熱伝導率は、100℃未満の温度域において非加熱側に近い分割層ほど水分の熱伝導率や顕熱を含むことで低温では大きくなり、100℃以上では分割層の位置によらず同等の値となった。
- 2) 裏面温度は、せっこうボード厚さを 15 mm から 12 mm 及び 9 mm に薄くした場合、300℃以下の温度域では良好に予測できた。
- 3) 2層構成で推定した窯業系サイディングとせっこうボードの包括熱伝導率を3層構成に適用した場合でも、裏面温度を精度よく予測できた。

以上より、本研究で提案した包括熱伝導率を用いることで、3層

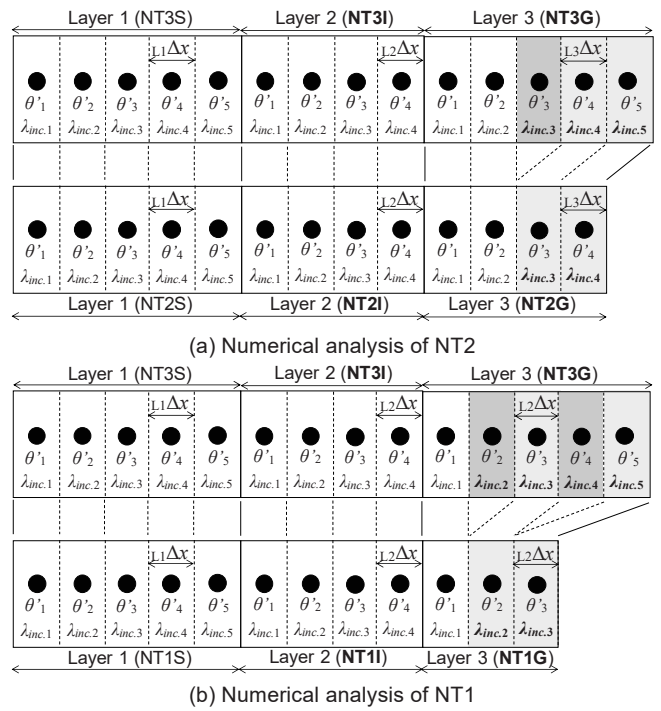


Fig. 12 How to decrease the number of inclusive thermal conductivities

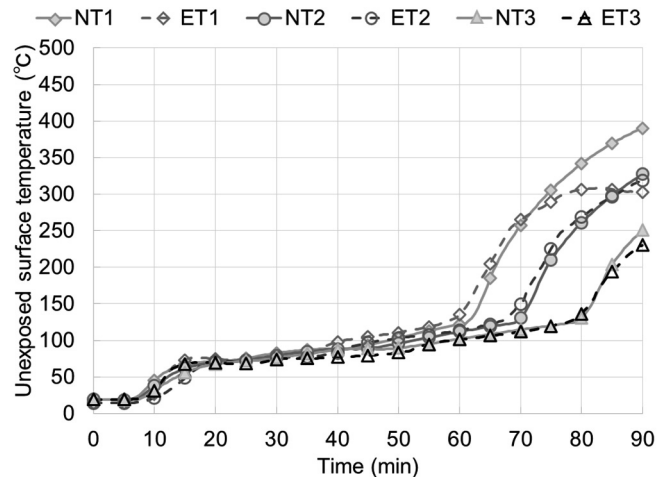


Fig. 13 Comparison of fire-resistance test results and numerical results

構成においても、せっこうボードを薄くした場合の遮熱性能を予測することができる。また、その際に、2層構成で推定した包括熱伝導率を3層に用いることが可能であるといえる。なお、包括熱伝導率を実用可能なものとするため、近似式の桁数の精査を行っていく必要がある。

一般的な外壁の中には、木材等の可燃物が使用されているものが多く、さらに空気層をもつこともあるため、今後は試験体内部に可燃物がある場合及び空気層を含む場合等、実際の外壁仕様について包括熱伝導率を用いた遮熱性予測について検討していく必要がある。また、防耐火性能評価試験は3m角以上の試験体であるため、実規模の試験において包括熱伝導率を用いた遮熱性能予測について検討していく必要がある。

(使用記号)

T_f : 炉内温度(°C)

T : 温度(°C)

t 及び t_f : 時間(t : h, t_f : min)

x : 材料厚さ(m)

n : 分割層の枚数

α_j : 熱拡散率(m^2/s)

θ_j : 第 j 層の非加熱側境界温度(°C)

λ_j : 第 j 層の熱伝導率(W/(mK))

ρ_j : 密度(kg/m^3)

c_j : 比熱(kJ/(kgK))

Fo_j : フーリエ数

h_o : 非加熱側熱伝達率(W/(m²K))

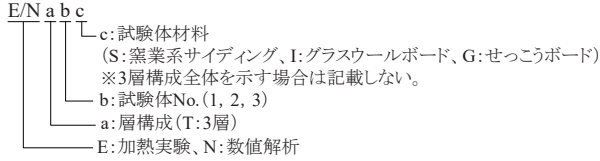
T_o : 裏面空気温度(°C)

Δt 及び $dtim$: 刻み時間(Δt : h, $dtim$: sec)

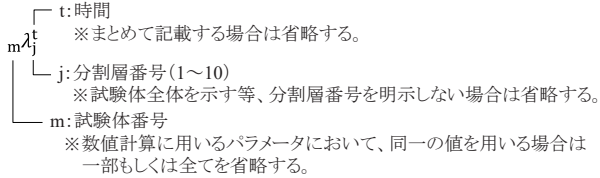
Δx 及び dth : 分割層の厚さ(Δx : m, dth : mm)

λ_{incj} : 包括熱伝導率(W/(mK))

(試験体番号) E/N a b c (例: ET1G)



(添え字) $m \lambda_j$ (例: ET1G $\lambda_{inc,1}^t, \rho_j^t$)



参考文献

- 1) JIS A 1304: Method of fire resistance test for elements of building construction, 2017.
JIS A 1304: 建築構造部分の耐火試験方法, 2017.
- 2) K. Yoshitani, T. Shimizu and M. Yoshida: Study on Prediction Method for Insulation of Gypsum Board Using “Inclusive Thermal Conductivity” in Fire-Resistance Test, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), vol.82, No.741, pp. 915-925, 2017. 11. [in Japanese]
吉谷公江, 清水貴史, 吉田正友: 防耐火試験における包括熱伝導率を用いたせっこうボードの遮熱性予測, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第741号, pp. 915-925, 2017. 11.
- 3) K. Yoshitani, T. Shimizu and M. Yoshida: Study on Prediction Method for Insulation of Double-Layer Structure Using “Inclusive Thermal Conductivity” in Fire-Resistance Test, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), vol.84, No.755, pp. 1-10, 2019. 1. [in Japanese]
吉谷公江, 清水貴史, 吉田正友: 包括熱伝導率を用いた2層構成外壁の遮熱性予測, 日本建築学会環境系論文集, 第84巻, 第755号, pp. 1-10, 2019. 1.
- 4) K. Yoshitani, T. Shimizu and M. Yoshida: Study on Prediction Method for the Insulation of Autoclaved Lightweight Aerated Concrete using Inclusive Thermal Conductivity in Fire Resistance Tests, Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering, vol.68, No.3, pp. 63-73, 2018. [in Japanese]
吉谷公江, 清水貴史, 吉田正友: 防耐火試験における包括熱伝導率を用いたALCの遮熱性能予測, 日本火災学会論文集, 第68巻, 第3号, pp. 63-73, 2018.
- 5) Yu-Hsiang Wang, Jun-ichi Suzuki, Tomohiro Naruse, Ryo Tomiyama, Yasutomo Kodaira and Yoshifumi Ohmiya: Temperature Rise Properties of Drywall Assemblies Exposed to Different Fire Severities ~Influence of Thermal properties of Gypsum Board and Light Gauge Steel~, JAFSE Annual Symposium, pp. 70-71, 2017. [in Japanese]

王俞翔, 鈴木淳一, 成瀬友宏, 富山涼, 小平康智, 大宮喜文: 多様な火災加熱を受ける乾式間仕切壁の温度上昇特性~強化石膏ボードと軽量鉄骨の熱特性の影響~, 平成29年度日本火災学会研究発表報告会概要集, pp. 70-71, 2017.

- 6) K. Yoshitani, T. Shimizu and M. Yoshida: Experimental study on the influence on porosity distribution in ALC caused by one sided heating on fire test, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp. 225-226, 2017. 7. [in Japanese]
吉谷公江, 清水貴史, 吉田正友: 片面加熱がALC内部の空隙率分布に与える影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp. 225-226, 2017. 7.
- 7) K. Yoshitani, T. Shimizu and M. Yoshida: Experimental study on internal change of various gypsum boards after fire test, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp. 375-376, 2018. 7. [in Japanese]
吉谷公江, 清水貴史, 吉田正友: 火災加熱を受けた普通及び強化せっこうボードの内部の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp. 375-376, 2018. 7.
- 8) JIS A 1422: Fiber reinforced cement sidings, 2014.
JIS A 1422: 窯業系サイディング, 2014.
- 9) JIS A 6901: gypsum boards, 2014.
JIS A 6901: せっこうボード製品, 2014.
- 10) ISO 834-1: Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements, 1999.
- 11) Ex, GBRC: Fireproof performance test and evaluation procedure, 2015. [in Japanese]
例えば, 日本建築総合試験所: 防耐火性能試験・評価業務方法書, 2015.

補遺

Fig. 10に示すグラスウールボードの包括熱伝導率 $NT_{31} \lambda_{inc}$ の近似式を、式(a-1)~(a-28)に示す。 $\lambda_{inc,1}$ は式(a-1)~(a-7)、 $\lambda_{inc,2}$ は式(a-8)~(a-14)、 $\lambda_{inc,3}$ は式(a-15)~(a-21)、 $\lambda_{inc,4}$ は式(a-22)~(a-28)である。なお、Fig. 6に示す窯業系サイディング及びせっこうボードの包括熱伝導率は既報と同等であるため $ND_{3S} \lambda_{inc} = NT_{3S} \lambda_{inc}$ 、 $ND_{3G} \lambda_{inc} = NT_{3G} \lambda_{inc}$ とし、近似式は既報を参照されたい。

$$NT_{31} \lambda_{inc,1}^{t+1} = 0.037 \quad (NT_{31} \theta_1^t \leq 27.63) \quad (a-1)$$

$$NT_{31} \lambda_{inc,1}^{t+1} = -3.14068545467054 \times 10^{-5} NT_{31} \theta_1^{t,3} + 3.60543383040194 \times 10^{-3} NT_{31} \theta_1^{t,2} - 0.126171110597484 NT_{31} \theta_1^t + 1.4331552514903 \quad (27.63 \leq NT_{31} \theta_1^t < 44.51) \quad (a-2)$$

$$NT_{31} \lambda_{inc,1}^{t+1} = -1.86176949670195 \times 10^{-8} NT_{31} \theta_1^{t,4} + 5.64727141647116 \times 10^{-6} NT_{31} \theta_1^{t,3} - 6.33488908565865 \times 10^{-4} NT_{31} \theta_1^{t,2} + 3.1112674705912 \times 10^{-2} NT_{31} \theta_1^t - 0.363800647033547 \quad (44.51 \leq NT_{31} \theta_1^t < 96.77) \quad (a-3)$$

$$NT_{31} \lambda_{inc,1}^{t+1} = 4.36748650397244 \times 10^{-7} NT_{31} \theta_1^{t,4} - 2.11901221405061 \times 10^{-4} NT_{31} \theta_1^{t,3} + 3.84161296918794 \times 10^{-2} NT_{31} \theta_1^{t,2} - 3.0864670585988 NT_{31} \theta_1^t + 92.8564073402538 \quad (96.77 \leq NT_{31} \theta_1^t < 120.17) \quad (a-4)$$

$$NT_{31} \lambda_{inc,1}^{t+1} = 2.54564240615915 \times 10^{-8} NT_{31} \theta_1^{t,4} - 1.50541356613891 \times 10^{-5} NT_{31} \theta_1^{t,3} + 3.33300357960601 \times 10^{-3} NT_{31} \theta_1^{t,2} - 0.327446250722007 NT_{31} \theta_1^t + 12.1047612806776 \quad (120.17 \leq NT_{31} \theta_1^t < 175.50) \quad (a-5)$$

$$NT_{31} \lambda_{inc,1}^{t+1} = 2.50505489668684 \times 10^{-8} NT_{31} \theta_1^{t,3} - 2.41292618517472 \times 10^{-5} NT_{31} \theta_1^{t,2} + 8.32451010791858 \times 10^{-3} NT_{31} \theta_1^t - 0.78283313980557 \quad (175.50 \leq NT_{31} \theta_1^t < 335.59) \quad (a-6)$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.1}^{t+1} &= 1.04095728249162 \times 10^{-13} \text{NT}_{31}\theta_1^{t5} \\ &\quad - 2.4417158382113 \times 10^{-10} \text{NT}_{31}\theta_1^{t4} \\ &\quad + 2.26090495590539 \times 10^{-7} \text{NT}_{31}\theta_1^{t3} \\ &\quad - 1.04040370855834 \times 10^{-4} \text{NT}_{31}\theta_1^{t2} \\ &\quad + 2.4305402452511 \times 10^{-2} \text{NT}_{31}\theta_1^t - 2.09039280402132 \\ &\quad (335.59 \leq \text{NT}_{31}\theta_1^t) \end{aligned} \quad (\text{a-7})$$

$$\text{NT}_{31}\lambda_{inc.2}^{t+1} = 0.037 \quad (\text{NT}_{31}\theta_2^t < 22.59) \quad (\text{a-8})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.2}^{t+1} &= -2.21061209906177 \times 10^{-5} \text{NT}_{31}\theta_2^{t3} \\ &\quad + 2.39188355445462 \times 10^{-3} \text{NT}_{31}\theta_2^{t2} \\ &\quad - 7.4001797177273 \times 10^{-2} \text{NT}_{31}\theta_2^t + 0.743794917237898 \\ &\quad (22.59 \leq \text{NT}_{31}\theta_2^t < 50.16) \end{aligned} \quad (\text{a-9})$$

$$\text{NT}_{31}\lambda_{inc.2}^{t+1} = 0.26 \quad (50.16 \leq \text{NT}_{31}\theta_2^t < 80.42) \quad (\text{a-10})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.2}^{t+1} &= 2.92576675695277 \times 10^{-9} \text{NT}_{31}\theta_2^{t6} \\ &\quad - 1.75274546413 \times 10^{-6} \text{NT}_{31}\theta_2^{t5} \\ &\quad + 4.35422660640169 \times 10^{-4} \text{NT}_{31}\theta_2^{t4} \\ &\quad - 5.73996997694732 \times 10^{-2} \text{NT}_{31}\theta_2^{t3} \\ &\quad + 4.23385531257154 \text{NT}_{31}\theta_2^{t2} - 165.652809149429 \text{NT}_{31}\theta_2^t \\ &\quad + 2685.97117546952 \quad (80.42 \leq \text{NT}_{31}\theta_2^t < 116.43) \end{aligned} \quad (\text{a-11})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.2}^{t+1} &= 4.86023962789877 \times 10^{-9} \text{NT}_{31}\theta_2^{t4} \\ &\quad - 2.88136133986343 \times 10^{-6} \text{NT}_{31}\theta_2^{t3} \\ &\quad + 6.41100682617612 \times 10^{-4} \text{NT}_{31}\theta_2^{t2} \\ &\quad - 6.34635589730377 \times 10^{-2} \text{NT}_{31}\theta_2^t + 2.41879474015277 \\ &\quad (116.43 \leq \text{NT}_{31}\theta_2^t < 170.29) \end{aligned} \quad (\text{a-12})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.2}^{t+1} &= -1.15466175563772 \times 10^{-11} \text{NT}_{31}\theta_2^{t5} \\ &\quad + 1.38872200571529 \times 10^{-8} \text{NT}_{31}\theta_2^{t4} \\ &\quad - 6.59117002898615 \times 10^{-6} \text{NT}_{31}\theta_2^{t3} \\ &\quad + 1.53779165474448 \times 10^{-3} \text{NT}_{31}\theta_2^{t2} \\ &\quad - 0.17451645887591 \text{NT}_{31}\theta_2^t + 7.70965970519748 \\ &\quad (170.29 \leq \text{NT}_{31}\theta_2^t < 313.69) \end{aligned} \quad (\text{a-13})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.2}^{t+1} &= 5.37102907543975 \times 10^{-14} \text{NT}_{31}\theta_2^{t5} \\ &\quad - 9.78702452484276 \times 10^{-11} \text{NT}_{31}\theta_2^{t4} \\ &\quad + 6.67418035466905 \times 10^{-8} \text{NT}_{31}\theta_2^{t3} \\ &\quad - 2.1289616592332 \times 10^{-5} \text{NT}_{31}\theta_2^{t2} \\ &\quad + 3.5913153912022 \times 10^{-3} \text{NT}_{31}\theta_2^t - 0.0767822302917298 \\ &\quad (313.69 \leq \text{NT}_{31}\theta_2^t) \end{aligned} \quad (\text{a-14})$$

$$\text{NT}_{31}\lambda_{inc.3}^{t+1} = 0.037 \quad (\text{NT}_{31}\theta_3^t < 20.44) \quad (\text{a-15})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.3}^{t+1} &= -1.67007847121118 \times 10^{-4} \text{NT}_{31}\theta_3^{t3} \\ &\quad + 1.77473036540753 \times 10^{-3} \text{NT}_{31}\theta_3^{t2} \\ &\quad - 4.95926691109349 \times 10^{-2} \text{NT}_{31}\theta_3^t + 0.451045815359047 \\ &\quad (20.44 \leq \text{NT}_{31}\theta_3^t < 52.40) \end{aligned} \quad (\text{a-16})$$

$$\text{NT}_{31}\lambda_{inc.3}^{t+1} = -1.0 \times 10^{-4} \text{NT}_{31}\theta_3^t + 0.3293 \quad (20.44 \leq \text{NT}_{31}\theta_3^t < 52.40) \quad (\text{a-17})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.3}^{t+1} &= -1.8616771430707 \times 10^{-8} \text{NT}_{31}\theta_3^{t5} \\ &\quad + 8.15463577843749 \times 10^{-6} \text{NT}_{31}\theta_3^{t4} \\ &\quad - 1.41255029728483 \times 10^{-3} \text{NT}_{31}\theta_3^{t3} \\ &\quad + 0.120948359747159 \text{NT}_{31}\theta_3^{t2} - 5.12626149394643 \text{NT}_{31}\theta_3^t \\ &\quad + 86.4767847125016 \quad (64.90 \leq \text{NT}_{31}\theta_3^t < 100.81) \end{aligned} \quad (\text{a-18})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.3}^{t+1} &= 3.50726909578085 \times 10^{-9} \text{NT}_{31}\theta_3^{t4} \\ &\quad - 2.09647658399855 \times 10^{-6} \text{NT}_{31}\theta_3^{t3} \\ &\quad + 4.68929165875632 \times 10^{-4} \text{NT}_{31}\theta_3^{t2} \\ &\quad - 4.65135012984341 \times 10^{-2} \text{NT}_{31}\theta_3^t + 1.7861914131217 \\ &\quad (100.81 \leq \text{NT}_{31}\theta_3^t < 165.24) \end{aligned} \quad (\text{a-19})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.3}^{t+1} &= 3.59565227123833 \times 10^{-12} \text{NT}_{31}\theta_3^{t6} \\ &\quad - 4.54259377567012 \times 10^{-9} \text{NT}_{31}\theta_3^{t5} \\ &\quad + 2.38212097331561 \times 10^{-6} \text{NT}_{31}\theta_3^{t4} \\ &\quad - 6.63815061923694 \times 10^{-4} \text{NT}_{31}\theta_3^{t3} \\ &\quad + 0.103690445984789 \text{NT}_{31}\theta_3^{t2} - 8.60742506107309 \text{NT}_{31}\theta_3^t \\ &\quad + 296.615925031959 \quad (165.24 \leq \text{NT}_{31}\theta_3^t < 255.39) \end{aligned} \quad (\text{a-20})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.3}^{t+1} &= -1.06531924760325 \times 10^{-13} \text{NT}_{31}\theta_3^{t5} \\ &\quad + 2.2966759798096 \times 10^{-10} \text{NT}_{31}\theta_3^{t4} \\ &\quad - 1.92958746438297 \times 10^{-7} \text{NT}_{31}\theta_3^{t3} \\ &\quad + 7.77502175900049 \times 10^{-5} \text{NT}_{31}\theta_3^{t2} \\ &\quad - 1.4381581936569 \times 10^{-2} \text{NT}_{31}\theta_3^t + 1.14061811595736 \\ &\quad (255.39 \leq \text{NT}_{31}\theta_3^t) \end{aligned} \quad (\text{a-21})$$

$$\text{NT}_{31}\lambda_{inc.4}^{t+1} = 0.037 \quad (\text{NT}_{31}\theta_4^t < 19.51) \quad (\text{a-22})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.4}^{t+1} &= -2.39724725313341 \times 10^{-5} \text{NT}_{31}\theta_4^{t3} \\ &\quad + 2.29619379778611 \times 10^{-3} \text{NT}_{31}\theta_4^{t2} \\ &\quad - 5.9583545537525 \times 10^{-2} \text{NT}_{31}\theta_4^t + 0.432331758945943 \\ &\quad (19.51 \leq \text{NT}_{31}\theta_4^t < 42.91) \end{aligned} \quad (\text{a-23})$$

$$\text{NT}_{31}\lambda_{inc.4}^{t+1} = 2.0 \times 10^{-4} \text{NT}_{31}\theta_4^t + 0.3598 \quad (42.91 \leq \text{NT}_{31}\theta_4^t < 60.63) \quad (\text{a-24})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.4}^{t+1} &= -1.09555099569373 \times 10^{-7} \text{NT}_{31}\theta_4^{t5} \\ &\quad + 4.23320170426956 \times 10^{-5} \text{NT}_{31}\theta_4^{t4} \\ &\quad - 6.49341925991232 \times 10^{-3} \text{NT}_{31}\theta_4^{t3} \\ &\quad + 0.49428316106541 \text{NT}_{31}\theta_4^{t2} - 18.6829662946669 \text{NT}_{31}\theta_4^t \\ &\quad + 281.087604670268 \quad (60.63 \leq \text{NT}_{31}\theta_4^t < 87.81) \end{aligned} \quad (\text{a-25})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.4}^{t+1} &= 2.53653014144532 \times 10^{-12} \text{NT}_{31}\theta_4^{t6} \\ &\quad - 2.09674828503473 \times 10^{-9} \text{NT}_{31}\theta_4^{t5} \\ &\quad + 7.25895328816109 \times 10^{-7} \text{NT}_{31}\theta_4^{t4} \\ &\quad - 1.34613253221716 \times 10^{-4} \text{NT}_{31}\theta_4^{t3} \\ &\quad + 140889170083138 \times 10^{-2} \text{NT}_{31}\theta_4^{t2} \\ &\quad - 0.788184480955037 \text{NT}_{31}\theta_4^t + 18.4512354835957 \\ &\quad (87.81 \leq \text{NT}_{31}\theta_4^t < 169.90) \end{aligned} \quad (\text{a-26})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.4}^{t+1} &= -1.57407936770849 \times 10^{-7} \text{NT}_{31}\theta_4^{t3} \\ &\quad + 9.05630662670575 \times 10^{-5} \text{NT}_{31}\theta_4^{t2} \\ &\quad - 1.56634847148115 \times 10^{-2} \text{NT}_{31}\theta_4^t \\ &\quad + 0.885141481677196 \quad (169.90 \leq \text{NT}_{31}\theta_4^t < 237.82) \end{aligned} \quad (\text{a-27})$$

$$\begin{aligned} \text{NT}_{31}\lambda_{inc.4}^{t+1} &= -1.95055244395234 \times 10^{-11} \text{NT}_{31}\theta_4^{t4} \\ &\quad + 3.20723603422529 \times 10^{-8} \text{NT}_{31}\theta_4^{t3} \\ &\quad - 2.06653215225708 \times 10^{-5} \text{NT}_{31}\theta_4^{t2} \\ &\quad + 6.48260296375322 \times 10^{-3} \text{NT}_{31}\theta_4^t \\ &\quad - 0.578361758120838 \quad (237.82 \leq \text{NT}_{31}\theta_4^t) \end{aligned} \quad (\text{a-28})$$

STUDY ON PREDICTION METHOD FOR INSULATION OF TRIPLE-LAYER WALL USING "INCLUSIVE THERMAL CONDUCTIVITY" IN FIRE-RESISTANCE TEST

Kimie YOSHITANI^{*1}, *Takafumi SHIMIZU*^{*2} and *Masatomo YOSHIDA*^{*3}

^{*1} Assist. Prof., Kindai Univ., Dr.Eng.

^{*2} Assoc. Prof., Shimane Univ., Dr.Eng.

^{*3} Prof., Osaka Institute of Technology, Dr.Eng.

In this study, a method for predicting the unexposed surface temperature of triple-layer wall is proposed by using "inclusive thermal conductivity" which considers transfer of heat and moisture, and influence of occurring cracks and contained water in materials. In our previous studies, the unexposed surface temperature was predicted by using the inclusive thermal conductivity for single- and double-layer wall. In each case, more accurate temperature history was also obtained by this numerical calculation. The proposed method will enable the estimation of thermal conductivities of materials that are difficult to assess using conventional technologies. Fire-resistance tests were conducted on specimens with fiber-reinforced cement siding, insulation, and gypsum boards overlaid. Fire-resistance tests were conducted based on ISO834. Inclusive thermal conductivities are estimated based on the results of temperature measurements from fire-resistance tests.

The inclusive thermal conductivities are calculated by using the finite differential method. The inclusive thermal conductivities of fiber-reinforced cement siding and gypsum board that were estimated in the study on the double-layer wall were examined whether it is possible to work well enough on the prediction for triple-layer. The inclusive thermal conductivity of the insulation was estimated using the inclusive thermal conductivities for the double-layer which were estimated in our previous study. On the estimation of the inclusive thermal conductivity, the calculated internal temperatures of the materials, temperature between materials, and unexposed surface temperature were compared with the experimental results. Additionally, on estimation of inclusive thermal conductivities the influence of the moisture behavior and cracks in the materials are considered. Since the inclusive thermal conductivities have some peaks and/or dips at various temperatures, they are approximated to polynomial approximation for each temperature region.

In order to estimate that unexposed surface temperature of similar triple-layer specimen whose thickness of gypsum board layer is decreasing, the number of inclusive thermal conductivities are reduced. In the case of estimating the specimen thickness whose thickness is changed, the inclusive thermal conductivities of predictive calculations were performed by removing layers of the same thickness as the divided layer. The calculations using this inclusive thermal conductivity sufficiently captured the temperature history. The prediction accuracy of numerical analysis using the inclusive thermal conductivity was found to be practically sufficient. As a result, the inclusive thermal conductivities estimated for double-layer can apply the prediction for triple-layer well enough.

(2020年5月7日原稿受理, 2020年9月1日採用決定)