包括熱伝導率を用いた 2 層構成外壁の遮熱性能予測

STUDY ON PREDICTION METHOD FOR INSULATION OF DOUBLE-LAYER STRUCTURE
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 predicting the unexposed surface temperature of a double-layer wall is proposed based on "inclusive thermal conductivity," which considers heat and moisture transfer and influence of cracks in materials. Fire-resistance tests were conducted on specimens with fiber-reinforced cement siding and gypsum boards overlaid. Inclusive thermal conductivities are estimated based on the temperature of fire-resistance tests results. In order to estimate that unexposed surface temperature of similar double-layer specimen whose thickness of gypsum board layer is decreasing, the number of inclusive thermal conductivities are reduced. Calculations using this inclusive thermal conductivity sufficiently captured the temperature history.

Keywords : Fire-resistance, Unexposed surface temperature prediction, finite-difference method, Inclusive thermal conductivity, Multiple layers

防耐火性能, 裏面温度予測, 差分法, 包括熱伝導率, 複層

1. はじめに

外壁等の建物の各部位には、日々の快適な生活を維持するとともに火災等の脅威から人命を守るという双方の性能が必要となる。それらの性能を満たすために外壁等は複層構成となっており、必要性能のひとつに挙げられる防耐火性能は生命・財産を守るためにも特に重要な性能である。現在、防耐火性能は業務方法書¹⁾に基づいた性能評価試験によって確認されているが、防耐火試験では構成材料の損傷が激しく、試験体の再使用は困難である。また、外壁の仕様を検討する場合は、軽微な変更であったとしても新たな実大の試験体をその都度用意する必要がある。その際には非常に多くの時間・労力を必要とする上、試験時には煙及び有機ガスが発生し²⁾、試験員の健康を阻害する恐れもある。これまでも一般的な熱伝導解析を用いた温度予測が多く行われてきた³⁾が、精度の向上を図るためには数値計算が複雑化し、数多くの熱物性値の実測が求められ、実用性が乏しいと考えられる。

そこで、著者らは、実用的な遮熱性能⁴⁾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導入し、単体材料（以降、単層とする）をもとに、材料厚さを薄くした場合の裏面温度予測を行った⁵⁾。包括熱伝導率を用いた裏面温度予測により、せっこうボード単層については十分な予測精度が確認できたため、本稿では窯業系サイディングとせっこうボードからなる複層構成の壁体についての検討を行う。

複層壁については、王ら⁶⁾が、強化せっこうボードを用いた乾式間仕切壁について温度予測を行っているが、水分移動及び結晶水の熱分解における比熱の同定を行うと共に、実験結果から実効熱伝導率を同定するため、複数のパラメータの同定が必要である。また、裏面温度計算では物性値を同定するための実験と同一の構成について算出しており、温度予測の域に達していない。また、計算結果は材料内部の水分が残存する範囲に留まり、水分が蒸発した後の予測精度を確認するに至っていない。このとき、同定した実効熱伝導率は、材料内部のいずれの位置においても同一の熱伝導率であり、材料内部で生じる水分の偏りや空隙率等の差⁷⁾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。また、同定した実効熱伝導率は、材料厚さに影響を受けた熱伝導率であるため、材料厚さを変化させる場合の裏面温度予測において、予測精度の確保が難しいと考えられる。一方、著者らの提案する包括熱伝導率は、材料内部において温度依存性の異なる熱伝導率を複数本用いることで、材料厚さを変化させる場合のより精度の高い裏面温度予測を可能としている。Kontogeorgos ら⁸⁾は、正確な数値解析を目的として、せっこうボードを片面 2 枚張りした乾式間仕切壁について、熱・水分同時移動及び材料の熱分解の必要性を検討している。この中で、精度の高い数値解析を行うためには比熱や密度の実測値が必要であり、それらの実測時の加熱速度にも測定値は影響を受けることを示している。したがって、一般的な物性値測定では

^{*1} 大和ハウス工業総合技術研究所^{*2} 大和ハウス工業総合技術研究所 博士(工学)^{*3} 大阪工業大学 特任教授・博士(工学)

Daiwa House Industry Central Research Laboratory

Daiwa House Industry Central Research Laboratory, Dr.Eng.

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

高温時の正確な材料特性を掴むことは難しく、防耐火試験のような画一的な加熱においても温度予測が難しい要因となっている。

そのほか、合成床版等、鋼材とコンクリートの複層構造の裏面温度予測^{9・10}や内部温度予測^{11・12}、木造柱材の温度予測^{13・14}を用いた燃えしろ設計に関する研究も行われ、一定の成果を上げているといえる。しかしこれらは、コンクリートや木材内部の熱伝導、及び、その周囲の空気との熱伝達についての数値計算を行っているものの、材料同士が接する境界の熱伝導は、熱流束において検討しているに留まる。また、これまでの研究は実験を伴わない温度予測に主眼を置いており、本研究のようにひとつの実験結果をもとにして温度予測を行うという考え方は見当たらない。

一般的な外壁は、複数の材料からなる積層構造となっており、効率的な防耐火設計を行うためには材料同士が接する境界の熱伝導計算が重要となる。多層構成の壁体についての温度予測計算手法は、常温域における温熱環境の範囲においては既に一般的であるにもかかわらず、1000℃という高温に曝される防耐火の温度域では実務的な温度予測に取り組んだ研究はほとんど見当たらない。また、いずれの報告においても、材料の熱物性値は、温度依存性を考慮されていても、加熱時の材料内部の各点の状態は十分には考慮されていない。しかし、加熱される材料は、加熱面からの距離によって空隙率等に影響⁷が生じるため、材料内部のクラックや水分移動を考慮することで、精度の向上を図ることができるといえる。

したがって、本研究では、既報⁵によって提案した水分移動やクラックの影響を包含する包括熱伝導率を用いた実用的な遮熱性能予測手法の確立を目的とし、窯業系サイディングとせっこうボードを積層した2層構成の壁体について、裏面温度の予測を行った。住宅に多く用いられる窯業系サイディングは、防耐火試験においては代表板（最も不利とされる板）が用いられるため、厚さを変更させる可能性が低いので、本研究では厚さを変更させる対象はせっこうボードとし、せっこうボード厚さを薄くした場合についての検討を行った。このとき、2層の壁体の加熱実験を行い、その結果から推定した包括熱伝導率を用いた。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に含めることとした。

2. 加熱試験

本実験では、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）は JIS A 1422¹⁵の窯業系サイディングとし、2層目（非加熱側）を3種類の厚さの JIS A 6901¹⁶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。試験体は幅300 mm×高さ300 mmとし、Fig. 1 に示す軽量鉄骨製の試験体枠（幅760 mm×高さ760 mm）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、試験体枠から試験体へ熱が伝わらないようにセラミックファイバーを用いて養生し、試験体枠を試験炉に鉛直方向に設置した。試験体枠内における試験体の配置は、試験体総厚さの薄いものを上部とし、燃え抜け等によって他の試験体に影響が出ないよう配慮した。

実験は、（一財）日本建築総合試験所において、加熱面が一辺670 mmとなる小型加熱炉を用いて、式(1)によって表される ISO834¹⁷

に準拠した標準加熱曲線¹⁷に沿うように加熱した。

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

炉内温度は、試験体の加熱面から100 mm離れた位置でK型シー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型熱電対を用いた。また、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、積層した2層の裏面から試験体厚さよりも1 mm短いφ2の穴をあけ、熱電対を試験体裏面から挿入した。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、2層目を貫通するφ2の孔をあけ、熱電対を試験体裏面から挿入し、1層目に接する位置に固定して測定した。熱電対の設置位置をFig. 2 に示す。

試験時間は、燃え抜けるまで、もしくは、定常状態に至るまでとし、計測間隔は30秒とした。試験体枠内の一部試験体が燃え抜けた際は、その箇所にセラミックファイバーを用いて蓋をして試験を継続した。なお、燃え抜けた試験体の試験時間は、燃え抜けた時点までとした。

Table 1 Specimens condition

Specimen No.	ED1	ED2	ED3
Layer 1	Fiber-reinforced cement siding		
Nominal thickness (mm)	15.0		
Moisture content (%)	4.98		
Layer 2	Gypsum board		
Nominal 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 に実験結果を示す。試験時間は 90 分もしくは燃え抜けた時点までとしたため、ED1 は 45.5 分、ED2 は 50 分、ED3 は 90 分までの測定となっている。

表面温度は、試験体によるばらつきは生じず、境界温度は、20 分以上に試験体によるばらつきが生じた。しかし、温度上昇が早い順はせっこうボードの厚さとは関係がないため、境界温度測定用の熱電対の位置に起因するものと考えられる。裏面温度では、ED1 が最初に 100℃超過後の温度上昇をはじめ、ED2、ED3 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、ED3 のみ燃え抜けず、裏面温度は 300℃付近で収束した。また、100℃を超過した後の裏面温度上昇に伴い裏面空気温度が上昇しており、せっこうボードの非加熱側表面紙の燃焼熱や試験体全面からの輻射熱を測定していると考えられる。

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⁵⁾と同様に一次元の解析モデル (Fig. 4) について有限差分法により検討した。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)にて表される。

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

また、式(2)を有限差分法によって離散化すると、各材料内部の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)、裏面温度は式(5)となる。

$$\theta_{i+1}^{t+1} = Fo_{i+1}^t \cdot \theta_{i+1}^t + (1 - 2Fo_i^t)\theta_i^t + Fo_{i-1}^t \cdot \theta_{i-1}^t \quad (i=1 \sim n-1) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} L_2\theta_1^{t+1} = & \{2L_2Fo_2^t \cdot L_2\theta_2^t + (1 - 2L_2Fo_1^t)L_2\theta_1^t \\ & + (1 - 2L_1Fo_n^t)L_2Fo_1^t \frac{L_1\theta_n^t}{L_1Fo_n^t \cdot Q^t} \\ & + 2L_2Fo_1^t \frac{L_1\theta_{n-1}^t}{L_1Fo_n^t \cdot Q^t}\} / \frac{1 + L_2Fo_1^t}{L_1Fo_n^t \cdot Q^t} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \theta_n^{t+1} = & 2Fo_{n-1}^t \cdot \theta_{n-1}^t + \left(1 - 2Fo_n^t - 2h_o \cdot Fo_n^t \cdot \frac{\Delta x}{\lambda_n^t}\right)\theta_n^t \\ & + 2h_o \cdot Fo_n^t \cdot T_o^t \cdot \frac{\Delta x}{\lambda_n^t} \end{aligned} \quad (5)$$

このとき、

$$Fo_j^t = \alpha_j^t \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} = \frac{\lambda_j^t}{\rho_j^t \cdot c_j^t} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (0 \leq Fo_j^t \leq 0.5) \quad (6)$$

$$Q^t = \frac{L_1\Delta t \cdot L_2\lambda_1^t}{L_2\Delta t \cdot L_1\lambda_n^t} \quad (7)$$

$$L_1\theta_n^t = L_2\theta_1^t \quad (8)$$

$$\Delta t = \frac{dt_{im}}{3600}, \Delta x = \frac{dth}{1000} \quad (9)$$

なお、式(3)～(8)中の添字 L1 及び L2 はそれぞれ、1 層目の窯業系サイディングと 2 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 は数値計算に用いる Table 2 中の窯業系サイディング ND1S～ND3S 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)～(7)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(10))。

$$\lambda_j^t = \lambda_{inc,j}^t \quad (10)$$

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

Fig. 3 Fire-resistance test result

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

Table 2 Correspondence of specimen

Fire-resistance test specimen No.		ED1	ED2	ED3
Numerical analysis	Case No.	ND1	ND2	ND3
	Parameter of fiber-reinforced cement siding (L1)	ND1S	ND2S	ND3S
	Parameter of gypsum board (L2)	ND1G	ND2G	ND3G

すものであるため、各分割層の中心温度 θ' (式(11)) に依存するものとし、比熱や密度についても同様とする。

$$\theta_j^n = \frac{\theta_{j-1}^n + \theta_j^n}{2} \quad (11)$$

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 ED3 及び裏面温度の予測対象 ND1～ND3 についての概要を示す。ED3 の試験結果を用いて包括熱伝導率 $ND3S\lambda_{inc}$ (窯業系サイディング) 及び $ND3G\lambda_{inc}$ (せっこうボード) を推定する。Fig. 6 に包括熱伝導率推定のフローチャートを示す。また、4 章において、ND1 及び ND2 の包括熱伝導率の割り当て⁹⁾を行い、それぞれの裏面温度の予測を行う。なお、加熱試験体 ED1 及び ED2 と温度予測対象の ND1 及び ND2 には、それぞれ 0.5 mm の厚さの違いがある。数値計算において、厚さの変更の範囲は分割層の厚さごととなるため、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 ND3 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。
式(2)を用いて熱伝導計算を行う場合、Table 3 の初期条件に加えて、ED3 の実験結果より得られた表面温度 $ND3s\theta_0$ を式(12)の、裏面空気温度 T_0 を式(13)の多項式近似として用いた (Fig. 7)。

実験では、50 分までに ED1 及び ED2 が燃え抜けたため、50 分以降においてはそれらの影響を受けて裏面空気温度が上昇しやすくな

Experiment		Numerical	
No.	Thickness	Thickness	No.
ED1	15 mm	ND1S λ_{inc}^t	15 mm
	9.5 mm	ND1G λ_{inc}^t	9 mm
ED2	15 mm	ND2S λ_{inc}^t	15 mm
	12.5 mm	ND2G λ_{inc}^t	12 mm
ED3	15 mm	ED3S λ_{inc}^t	15 mm
	15 mm	ED3G λ_{inc}^t	15 mm
			ND3

Fig. 5 Specimens and parameters for numerical analysis

Fig. 6 Subroutine for estimating inclusive thermal conductivities shown as flow chart

ったと考えられるが、ED1 及び ED2 の温度予測においても同じ計算条件を用いるため、50 分以前の温度推移の 2 次の多項式近似(式(13))を、50 分以降においても継続して使用した。なお、材料に含まれる水分の変化、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。

Table 3 Initial condition for numerical analysis

	ND1	ND2	(ED3) ND3
Fiber-reinforced cement siding	Thickness (x) (mm)	15.0	
	Thickness of elements (dth) (mm)	3.0	
	Division number (n)	5	
	Inclusive thermal conductivity (λ_{inc}^t) (W/(mK))	0.3	
	Density (ρ) (kg/m ³)	1100.0	
	Specific heat (c) (kJ/(kgK))	1.0	
	Material temperature (°C)	22.5	
Gypsum board	Thickness (x) (mm)	9.0	12.0 15.0
	Thickness of elements (dth) (mm)	3.0	
	Division number (n)	3	4 5
	Inclusive thermal conductivity (λ_{inc}^t) (W/(mK))	0.22	
	Density (ρ) (kg/m ³)	775.0	
	Specific heat (c) (kJ/(kgK))	1.0	
	Material temperature (°C)	18.1	
Time (t_f) (min)		90.0	
Time interval ($dtime$) (sec)		1.0	(3.0) 1.0
Heat transfer coefficient of the unexposed surface (h_u) (W/(m ² K))		10.0	
Ambient air temperature (°C)		13.6

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

$$ND3s\theta_0^t = -3.83722231181577 \times 10^{-5} t_f^4 + 8.91946054270676 \times 10^{-3} t_f^3 - 0.799145073919135 t_f^2 + 37.9968729914981 t_f - 1.34641738823848 \quad (0.5 < t_f) \quad (12)$$

$$T_0^t = -1.13647458406563 \times 10^{-3} t_f^2 + 0.376753839861411 t_f + 13.2121593884118 \quad (2.0 < t_f) \quad (13)$$

包括熱伝導率の推定において、境界温度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 1 層目と 2 層目の包括熱伝導率を同時にそれぞれ変化させた。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。

- ・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。
- ・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。
- ・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。
- ・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。
- ・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。
- ・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、実験において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 ED3 の各分割層の包括熱伝導率 $_{\text{ED3S}}\lambda_{\text{inc}}$ 及び $_{\text{ED3G}}\lambda_{\text{inc}}$ とした。

これらの包括熱伝導率 $_{\text{ED3}}\lambda_{\text{inc}}$ 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 $_{\text{ND3}}\lambda_{\text{inc}}$ とする。推定した過程の温度履歴を Fig. 8 に、各材料の包括熱伝導率 $_{\text{ND3S}}\lambda_{\text{inc}}$ 及び $_{\text{ND3G}}\lambda_{\text{inc}}$ を Fig. 9 に示す。

$_{\text{ND3S}}\lambda_{\text{inc}}$ 及び $_{\text{ND3G}}\lambda_{\text{inc}}$ のいずれにおいても、非加熱側に近づくにつれて包括熱伝導率の変化量が大きくなり、最裏面層の包括熱伝導率 $\lambda_{\text{inc.5}}$ において最も顕著な変化が現れている。100℃超においては蒸発潜熱による包括熱伝導率の低下が生じ、100℃未満においては材料自体の熱伝導性に加えて自由水の熱伝導性及び顕熱による影響が含まれた包括熱伝導率の上昇が生じている。このとき、 $\lambda_{\text{inc.1}}$ においても 100℃以下の包括熱伝導率が上昇している要因は、初期状態にて分割層内部に水分が存在しているためであり、 $\lambda_{\text{inc.1}}$ よりも $\lambda_{\text{inc.5}}$ の方が低温で高い値となる主な原因は水分移動によると考えられる。

$_{\text{ND3S}}\lambda_{\text{inc}}$ の高温域においては、加熱表面の温度上昇速度に対して境界の温度上昇速度が緩やかであることから、窯業系サイディングの反り等によって境界にわずかな隙間が生じたと考えられ、 $\lambda_{\text{inc.5}}$ に近づくほど熱伝導性が低下したと考えられる。また、 $_{\text{ND3G}}\lambda_{\text{inc}}$ では、 $\lambda_{\text{inc.5}}$ が 200℃弱において急激に上昇しており、非加熱側の表面紙の燃焼によって発生した熱が影響している。また、高温になるほどに包括熱伝導率が上昇している理由としては、せっこうボードに生じたクラックによって熱が伝わりやすくなったと考えられる。

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. 9 に示す $_{\text{ND3}}\lambda_{\text{inc}}$ をもとに、せっこうボード厚さの異なる 2 層の壁体 ND1（窯業系サイディング+せっこうボード厚さ 9 mm）及び ND2（窯業系サイディング+せっこうボード厚さ 12 mm）の裏面温度を予測する。加熱側の材料となる窯業系サイディングは厚さを変えさせないため $_{\text{ND3S}}\lambda_{\text{inc}}$ を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では各分割要素の包括熱伝導率 $_{\text{ND1G}}\lambda_{\text{inc}}$ 及

Fig. 8 Temperature distribution inside the specimen

(a) Fiber-reinforced cement siding ($_{\text{ND3S}}\lambda_{\text{inc}}$)

(b) Gypsum board ($_{\text{ND3G}}\lambda_{\text{inc}}$)

Fig. 9 Estimated approximate curves of inclusive thermal conductivities

び $_{\text{ND2G}}\lambda_{\text{inc}}$ を設定し、それらの値を用いて ND1 及び ND2 の裏面温度を予測し、実験結果 ED1 及び ED2 と比較した。裏面温度予測のフローチャートを Fig. 10 に示す。

Fig. 10 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

包括熱伝導率の割り当てにおいては、既報⁵⁾と同様に、基準となる材料 (ND3G) よりも予測したい材料 (ND1G もしくは ND2G) の厚さが薄くなるため、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. 11 参照)。このとき、表裏面の分割層は水分の影響やクラック等の影響を大きく受けるため、厚さに係わらずほぼ一定であると考えられる。そのため、材料厚さを薄くする場合には、材料内部の分割層を削減する。このとき、削減する分割層の場所は、外部からの影響が最も少ない中心に近い部分を優先し、複数層削減する場合は材料内部からバランスよく削減する。非加熱側に近いほど分割層が持つ水分量が多く、削減する分割層の位置が偏ると、水分蒸発による温度停滞時間へ影響を及ぼす可能性が考えられるためである。

ND3 を基準として ND1 及び ND2 の裏面温度を予測する場合、分割層を 1 つ削減する ND2G では $\text{ND3G}\lambda_{inc.3}$ を削減し、 $\text{ND3G}\lambda_{inc.4}$ を $\text{ND2G}\lambda_{inc.3}$ 、 $\text{ND3G}\lambda_{inc.5}$ を $\text{ND2G}\lambda_{inc.4}$ とする。また、分割層を 2 つ削減する ND1G では $\text{ND3G}\lambda_{inc.2}$ 及び $\text{ND3G}\lambda_{inc.4}$ を削減し、 $\text{ND3G}\lambda_{inc.3}$ を $\text{ND1G}\lambda_{inc.2}$ 、 $\text{ND3G}\lambda_{inc.5}$ を $\text{ND1G}\lambda_{inc.3}$ とする。なお、窯業系サイディングの厚さは等しいため $\text{ND3S}\lambda_{inc} = \text{ND2S}\lambda_{inc} = \text{ND1S}\lambda_{inc}$ となる。

Table 3 に示す初期条件、ND1S~ND3S、及び、推定した ND1G~ND3G 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 ND1~ND3 の裏面温度を算出した。このとき、近似式化した包括熱伝導率を式(10)として式(3)~式(7)に代入して計算を行った。また、数値計算を行う際には、表面温度に ED3 の近似式である式(12)を $\text{ND3S}\theta'_0 = \text{ND2S}\theta'_0 = \text{ND1S}\theta'_0$ として用い、裏面空気温度に式(13)を用いた。

(a) Numerical analysis of ND2

(b) Numerical analysis of ND1

Fig. 11 How to decrease the number of inclusive thermal conductivities

Fig. 12 Comparison of fire-resistance test results and numerical results

境界温度及び裏面温度それぞれについての実験結果と計算結果を Fig. 12 に示す。ここで、ND1 及び ND2 は包括熱伝導率を用いた予測結果であり、ND3 は包括熱伝導率を推定するために回帰的に計算した結果である。裏面温度の予測結果では、100°Cを超えた点における水分蒸発後の立ち上がりの時間は、実験結果との差が ND1 では 1.5 分、ND2 では 1 分であり、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。ND1 よりも ND2 のほうが若干ながら精度が良い理由は、削除した分割層に含まれる水分量の差異によると考えられる。

また、境界温度においては ND1～ND3 の温度のばらつきが少なく実験結果とは異なる結果となった。2 章でも触れた通り、20 分以降に見られる実験結果の温度のばらつきは熱電対の位置によるものと考えられるため、計算結果と一致しない結果となった。

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、裏面温度予測結果を最重要と考える。したがって、境界温度については包括熱伝導率を推定するためには必要となるが、温度予測においては熱電対の設置位置のばらつきによって大きく変化するといえる。

5. まとめ

本報では、窯業系サイディングとせっこうボードを積層した 2 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、2 層目のせっこうボードを薄くした場合の裏面温度予測を行った。

- 1) 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、いずれも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にて大きくなり、蒸発潜熱を含むことで幅広い温度域で小さくなった。
- 2) 裏面温度予測においては、分割層に含まれる水分量の影響を受けて、基準となるせっこうボード厚さ 15 mm から削減する分割層の数が少ない 12 mm のほうが 9 mm よりも若干ながら精度の高い結果となった。
- 3) 包括熱伝導率を用いた裏面温度計算において、良好な予測結果が得られた。

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、窯業系サイディングとせっこうボードとを積層した仕様について、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といえる。

近年の住宅では、多層構成の外壁が一般的であるため、今後は、更に層を増やした複層壁において、包括熱伝導率の推定及び裏面温度予測の適用可能性についても検討を行っていく。また、防耐火試験は実大の外壁を用いた試験であり、本研究で行った試験体よりも大きいため、試験体材料に生じるクラックや材料間の目地の開き等、試験体に生じる劣化条件が大きく異なると考えられる。そのため、試験体の大きさを変化させた場合でも、包括熱伝導率を用いた裏面温度予測の可能性を検討していく。

(使用記号)

T_f : 炉内温度(℃)、 T : 温度(℃)

t 及び t_f : 時間(t : h、 t_f : min)

x : 材料厚さ(m)

n : 分割層の数

α'_j : 熱拡散率(m²/s)

θ'_j : 第 j 層の非加熱側境界温度(℃)

λ'_j : 第 j 層の熱伝導率(W/(mK))

ρ'_j : 密度(kg/m³)

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'_s : 裏面空気温度(℃)

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/Nabc (例: ED1G)

E/N a b c
 — c: 材料 (S: 窯業系サイディング、G: セッコウボード)
 ※2層構成全体を示す場合は記載しない。
 — b: 試験体No. (1、2、3...)
 ※同一層構成にて連番とする。
 — a: 層構成 (D: 2層)
 — E: 加熱試験 N: 数値解析

(添え字) $m \lambda'_j$ (例: ED1G $\lambda'_{inc,1}$, $s\rho'_j$)

$m \lambda'_j$
 — t: 時間
 ※まとめて記載する際は省略する。
 — j: 分割層番号
 ※分割層番号1～5を明示しない場合は省略する。
 — m: 試験体番号
 ※数値解析に用いるパラメータにおいて、同一の値を用いる場合は一部もしくは全てを省略する。

参考文献

- 1) GBRC: Fireproof performance test and evaluation procedure, 2015. [in Japanese]
 日本建築総合試験所: 防耐火性能試験・評価業務方法書, 2015.
- 2) Ishihara, S.: <REVIEW>Smoke and Toxic Gases Produced during Fire, Wood research and technical notes, Kyoto University, 16, pp. 49-62, 1981. [in Japanese]
 石原茂久:<総説>火災時の煙と有毒ガス, 木材研究・資料 16, 京都大学木材研究所, pp. 49-62, 1981.
- 3) Matsumoto, M.: Study on the simultaneous movement and moisture accumulation of heat and moisture in the building wall, Doctoral Thesis, Kyoto University, 1979. [in Japanese]
 松本衛: 建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究, 京都大学博士論文, 1979.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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]
 王翕翔, 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.
- 7) 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. [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.
- 8) Kontogeorgos, D., Ghazi Wakili, K., Hugi, E. and Founti, M.: Heat and

moisture transfer through a steel stud gypsum board assembly exposed to fire, Construction and Building Materials, 26, pp. 746–754, 2012.

- 9) M. Yoshida: Study on the Fire Damage diagnosis method of concrete-based structural member, Doctoral Thesis, Osaka University, 1997. [in Japanese]
吉田正友: コンクリート系構造部材の火害診断手法に関する研究, 大阪大学博士論文, 1997.
- 10) K. Harada and T.Terai: A Quantitative Relationship Between The Cross Sectional Shape of Composite Floor And Fire Resistance Time, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 476, pp. 177-183, 1995. 10. [in Japanese]
原田和典, 寺井俊夫: デッキプレート合成床版の断面形状と耐火時間の関係に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 476 号, pp. 177-183, 1995. 10.
- 11) J. Myllyrnaki and D. Baroudi: Simple Method to Predict Fire Resistance of Composite Columns, Fire Safety Science 6: pp. 879-890, 2000.
- 12) Park, S., Kim, H., Kim, H. and Hong, K.: Fire Resistance of the Korean Asymmetric Slim Floor Beam Depending on Load Ratio, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 413-420, 2011.11.
- 13) S. Yoshida, M. Kawarasaki, A. Kawahara and R. Hiradate: Development of estimation method for fire resistance of wood-stud wall -Estimation method for residual shape and strength of wood-column following wood pyrolysis-, Journal of the Hokkaido Forest Products Research Institute 539, pp. 16-32, 2010. [in Japanese]
由田茂一, 河原崎政行, 河原映, 平舘亮一: 木造軸組外壁を対象とした耐火性能推定手法の開発—軸組部材の熱分解による断面形状と強度の推定—, 林産試験場報, 第 539 号, pp. 16-32, 2010.
- 14) T. Yamaguchi, Y. Hasemi, N. Yasui, R. Takase and N. Itagaki: Engineering Design Method of Wooden Fireproof Construction by Sacrifice-Layer Concept : Part-2 Full-scale Beam Test: Validation of the Bench-scale Test Method and Feasibility of Numerical Method, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp. 109-110, 2015. [in Japanese]
山口智世, 長谷見雄二, 安井昇, 高瀬棕, 板垣直行: 燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計法に関する研究 その 2 実大部材への適用及び数値的設計手法の開発可能性の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp. 109-110, 2015.
- 15) JIS A 1422: Fiber reinforced cement sidings, 2014.
JIS A 1422: 窯業系サイディング, 2014.
- 16) JIS A 6901: gypsum boards, 2014.
JIS A 6901: せっこうボード製品, 2014.
- 17) ISO 834-1: Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements, 1999.

補遺

Fig. 9 の近似式を、式 (a-1) ～ (a-26) 及び式 (b-1) ～ (b-26) に示す。窯業系サイディングにおける $\lambda_{inc.1}$ は式 (a-1) ～ (a-5)、 $\lambda_{inc.2}$ は式 (a-6) ～ (a-10)、 $\lambda_{inc.3}$ は式 (a-11) ～ (a-15)、 $\lambda_{inc.4}$ は式 (a-16) ～ (a-20)、 $\lambda_{inc.5}$ は式 (a-21) ～ (a-26)、せっこうボードにおける $\lambda_{inc.1}$ は式 (b-1) ～ (b-6)、 $\lambda_{inc.2}$ は式 (b-7) ～ (b-13)、 $\lambda_{inc.3}$ は式 (b-14) ～ (b-20)、 $\lambda_{inc.4}$ は式 (b-21) ～ (b-27)、 $\lambda_{inc.5}$ は式 (b-28) ～ (b-35) である。

$$ND3S\lambda_{inc.1}^{t+1} = 0.3 \quad (ND3S\theta_1^t \leq 44.11) \quad (a-1)$$

$$ND3S\lambda_{inc.1}^{t+1} = 9.90815179977966 \times 10^{-9} ND3S\theta_1^{t4} - 4.06270680602412 \times 10^{-6} ND3S\theta_1^{t3} + 5.53957901496199 \times 10^{-4} ND3S\theta_1^{t2} - 2.81853955015746 \times 10^{-2} ND3S\theta_1^t + 0.775400960616269 \quad (44.11 < ND3S\theta_1^t \leq 161.04) \quad (a-2)$$

$$ND3S\lambda_{inc.1}^{t+1} = -1.36242807490458 \times 10^{-12} ND3S\theta_1^{t5} + 1.11647888931971 \times 10^{-9} ND3S\theta_1^{t4} - 2.92713255685073 \times 10^{-7} ND3S\theta_1^{t3} + 1.8315546492101 \times 10^{-5} ND3S\theta_1^{t2} + 2.93081475337021 \times 10^{-3} ND3S\theta_1^t - 0.028035961611076 \quad (161.04 < ND3S\theta_1^t < 296.50) \quad (a-3)$$

$$ND3S\lambda_{inc.1}^{t+1} = 0.33 \quad (296.50 \leq ND3S\theta_1^t < 750.00) \quad (a-4)$$

$$ND3S\lambda_{inc.1}^{t+1} = -5.30066243656968 \times 10^{-5} ND3S\theta_1^t + 0.367779083040069 \quad (750.00 \leq ND3S\theta_1^t) \quad (a-5)$$

$$ND3S\lambda_{inc.2}^{t+1} = 0.3 \quad (ND3S\theta_2^t < 38.63) \quad (a-6)$$

$$ND3S\lambda_{inc.2}^{t+1} = 4.53307028708024 \times 10^{-11} ND3S\theta_2^{t5} - 8.76961887763328 \times 10^{-9} ND3S\theta_2^{t4} - 8.67738924594147 \times 10^{-7} ND3S\theta_2^{t3} + 2.37929095269661 \times 10^{-4} ND3S\theta_2^{t2} - 1.0741381422248 \times 10^{-2} ND3S\theta_2^t + 0.42523688176521 \quad (38.63 \leq ND3S\theta_2^t < 152.51) \quad (a-7)$$

$$ND3S\lambda_{inc.2}^{t+1} = 1.20507560704392 \times 10^{-9} ND3S\theta_2^{t4} - 1.11974347364554 \times 10^{-6} ND3S\theta_2^{t3} + 3.8406136650251 \times 10^{-4} ND3S\theta_2^{t2} - 5.69681303013231 \times 10^{-2} ND3S\theta_2^t + 3.31948525214377 \quad (152.51 \leq ND3S\theta_2^t < 286.00) \quad (a-8)$$

$$ND3S\lambda_{inc.2}^{t+1} = 0.315 \quad (286.00 \leq ND3S\theta_2^t < 558.00) \quad (a-9)$$

$$ND3S\lambda_{inc.2}^{t+1} = -1.29004128104254 \times 10^{-4} ND3S\theta_2^t + 0.387992703715581 \quad (558.00 \leq ND3S\theta_2^t) \quad (a-10)$$

$$ND3S\lambda_{inc.3}^{t+1} = 0.3 \quad (ND3S\theta_3^t < 35.00) \quad (a-11)$$

$$ND3S\lambda_{inc.3}^{t+1} = -1.9450262612059 \times 10^{-10} ND3S\theta_3^{t5} + 1.03909087846456 \times 10^{-7} ND3S\theta_3^{t4} - 2.01042746535107 \times 10^{-5} ND3S\theta_3^{t3} + 1.68207994582062 \times 10^{-3} ND3S\theta_3^{t2} - 5.75098147191058 \times 10^{-2} ND3S\theta_3^t + 0.970237399845418 \quad (35.00 \leq ND3S\theta_3^t \leq 132.22) \quad (a-12)$$

$$ND3S\lambda_{inc.3}^{t+1} = -1.87431071746181 \times 10^{-13} ND3S\theta_3^{t6} + 2.34994497380934 \times 10^{-10} ND3S\theta_3^{t5} - 1.21050392203246 \times 10^{-7} ND3S\theta_3^{t4} + 3.27161847237816 \times 10^{-5} ND3S\theta_3^{t3} - 4.87794991801272 \times 10^{-3} ND3S\theta_3^{t2} + 0.379753776932488 \times ND3S\theta_3^t - 11.8554964902655 \quad (132.22 < ND3S\theta_3^t < 275.00) \quad (a-13)$$

$$ND3S\lambda_{inc.3}^{t+1} = 0.3 \quad (275.00 \leq ND3S\theta_3^t < 520.00) \quad (a-14)$$

$$ND3S\lambda_{inc.3}^{t+1} = -2.26725050272742 \times 10^{-4} ND3S\theta_3^t + 0.417699236176641 \quad (520.00 \leq ND3S\theta_3^t) \quad (a-15)$$

$$ND3S\lambda_{inc.4}^{t+1} = 0.3 \quad (ND3S\theta_4^t < 32.00) \quad (a-16)$$

$$ND3S\lambda_{inc.4}^{t+1} = 4.87629195468226 \times 10^{-8} ND3S\theta_4^{t4} - 1.29292124182078 \times 10^{-5} ND3S\theta_4^{t3} + 1.04476319680575 \times 10^{-3} ND3S\theta_4^{t2} - 2.61463897581297 \times 10^{-2} ND3S\theta_4^t + 0.44820307737421 \quad (32.00 \leq ND3S\theta_4^t < 107.78) \quad (a-17)$$

$$ND3S\lambda_{inc.4}^{t+1} = -3.71636412838976 \times 10^{-14} ND3S\theta_4^{t6} + 4.67907487203464 \times 10^{-11} ND3S\theta_4^{t5} - 2.37357792577788 \times 10^{-8} ND3S\theta_4^{t4} + 6.13233540803447 \times 10^{-6} ND3S\theta_4^{t3} - 8.36291370914224 \times 10^{-4} ND3S\theta_4^{t2} + 5.64679309777388 \times 10^{-2} ND3S\theta_4^t - 1.31114493294415 \quad (107.78 \leq ND3S\theta_4^t < 290.00) \quad (a-18)$$

$$ND3S\lambda_{inc.4}^{t+1} = 0.285 \quad (290.00 \leq ND3S\theta_4^t < 494.00) \quad (a-19)$$

$$ND3S\lambda_{inc.4}^{t+1} = -3.71229643608131 \times 10^{-4} ND3S\theta_4^t + 0.462722275101309 \quad (494.00 \leq ND3S\theta_4^t) \quad (a-20)$$

$$ND3S\lambda_{inc.5}^{t+1} = 0.3 \quad (ND3S\theta_5^t < 28.70) \quad (a-21)$$

$$ND3S\lambda_{inc.5}^{t+1} = -1.4155664734978 \times 10^{-10} ND3S\theta_5^{t5} + 1.53089456492477 \times 10^{-7} ND3S\theta_5^{t4} - 3.14774565844289 \times 10^{-5} ND3S\theta_5^{t3} + 2.29550931437028 \times 10^{-3} ND3S\theta_5^{t2} - 6.06187902772254 \times 10^{-2} ND3S\theta_5^t + 0.795508929870361 \quad (28.70 \leq ND3S\theta_5^t < 100.50) \quad (a-22)$$

$$ND3S\lambda_{inc.5}^{t+1} = 0.1 \quad (100.50 \leq ND3S\theta_5^t < 160.00) \quad (a-23)$$

$$\begin{aligned} \text{ND3S}\lambda_{inc.5}^{t+1} = & -7.89804336612525 \times 10^{-6} \text{ND3S}\theta_5^t{}^2 \\ & +4.83979138052397 \times 10^{-3} \text{ND3S}\theta_5^t \\ & +7.96867412742796 \quad (160.00 \leq \text{ND3S}\theta_5^t < 293.87) \end{aligned} \quad (\text{a-24})$$

$$\text{ND3S}\lambda_{inc.5}^{t+1} = 0.27 \quad (293.87 \leq \text{ND3S}\theta_5^t < 448.10) \quad (\text{a-25})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3S}\lambda_{inc.5}^{t+1} = & -5.12714030658183 \times 10^{-4} \text{ND3S}\theta_5^t \\ & +0.497359889781631 \quad (448.10 \leq \text{ND3S}\theta_5^t) \end{aligned} \quad (\text{a-26})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.1}^{t+1} = 0.22 \quad (\text{ND3G}\theta_1^t < 28.70) \quad (\text{b-1})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.1}^{t+1} = & -3.06186079382849 \times 10^{-4} \text{ND3G}\theta_1^t{}^2 \\ & +2.99854404427775 \times 10^{-2} \text{ND3G}\theta_1^t \\ & -0.261064134067343 \quad (28.70 \leq \text{ND3G}\theta_1^t < 43.00) \end{aligned} \quad (\text{b-2})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.1}^{t+1} = 0.47 \quad (43.00 \leq \text{ND3G}\theta_1^t < 73.90) \quad (\text{b-3})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.1}^{t+1} = & 2.01691709690744 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_1^t{}^3 \\ & -5.13836907503935 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_1^t{}^2 \\ & +0.422401838749973 \text{ND3G}\theta_1^t \\ & -10.8225495099144 \quad (73.90 \leq \text{ND3G}\theta_1^t < 100.00) \end{aligned} \quad (\text{b-4})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.1}^{t+1} = & 1.6020140593428 \times 10^{-8} \text{ND3G}\theta_1^t{}^4 \\ & -9.10738476537441 \times 10^{-6} \text{ND3G}\theta_1^t{}^3 \\ & +1.93733687214215 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_1^t{}^2 \\ & -0.182680135479601 \text{ND3G}\theta_1^t \\ & +6.60076868707847 \quad (100.00 \leq \text{ND3G}\theta_1^t < 171.80) \end{aligned} \quad (\text{b-5})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.1}^{t+1} = & 5.96735835819116 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_1^t \\ & +0.157632568433928 \quad (171.80 \leq \text{ND3G}\theta_1^t) \end{aligned} \quad (\text{b-6})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.2}^{t+1} = 0.22 \quad (\text{ND3G}\theta_2^t < 19.70) \quad (\text{b-7})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.2}^{t+1} = & 4.35849521744636 \times 10^{-7} \text{ND3G}\theta_2^t{}^5 \\ & -6.92648765215796 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_2^t{}^4 \\ & +4.36871523668998 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_2^t{}^3 \\ & -0.13702419016279 \text{ND3G}\theta_2^t{}^2 \\ & +2.15120685970667 \text{ND3G}\theta_2^t \\ & -13.2352882056248 \quad (19.70 \leq \text{ND3G}\theta_2^t < 40.00) \end{aligned} \quad (\text{b-8})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.2}^{t+1} = 0.485 \quad (40.00 \leq \text{ND3G}\theta_2^t < 66.70) \quad (\text{b-9})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.2}^{t+1} = & 3.0529463147872 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_2^t{}^3 \\ & -7.16979203779517 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_2^t{}^2 \\ & +0.54404370004031 \text{ND3G}\theta_2^t \\ & -12.9646610304424 \quad (66.70 \leq \text{ND3G}\theta_2^t < 92.00) \end{aligned} \quad (\text{b-10})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.2}^{t+1} = & -7.90990957502929 \times 10^{-9} \text{ND3G}\theta_2^t{}^5 \\ & +4.53328591164404 \times 10^{-6} \text{ND3G}\theta_2^t{}^4 \\ & -1.03428235324288 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_2^t{}^3 \\ & +0.117427493105231 \text{ND3G}\theta_2^t{}^2 \\ & -6.63574475297959 \text{ND3G}\theta_2^t \\ & +149.508425682847 \quad (92.00 \leq \text{ND3G}\theta_2^t < 132.50) \end{aligned} \quad (\text{b-11})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.2}^{t+1} = & 1.5547893411353 \times 10^{-4} \text{ND3G}\theta_2^t \\ & +0.108495599659359 \quad (132.50 \leq \text{ND3G}\theta_2^t < 259.60) \end{aligned} \quad (\text{b-12})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.2}^{t+1} = & 3.86658453169256 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_2^t \\ & +0.140768409571574 \quad (259.60 \leq \text{ND3G}\theta_2^t) \end{aligned} \quad (\text{b-13})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.3}^{t+1} = 0.22 \quad (\text{ND3G}\theta_3^t \leq 19.00) \quad (\text{b-14})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.3}^{t+1} = & -9.06330682435841 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_3^t{}^4 \\ & +9.09774231069344 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_3^t{}^3 \\ & -0.341460929132579 \text{ND3G}\theta_3^t{}^2 \\ & +5.69574901553312 \text{ND3G}\theta_3^t \\ & -35.3200458922503 \quad (19.00 < \text{ND3G}\theta_3^t \leq 29.30) \end{aligned} \quad (\text{b-15})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.3}^{t+1} = & -3.07053634948651 \times 10^{-9} \text{ND3G}\theta_3^t{}^6 \\ & +8.66215374487413 \times 10^{-7} \text{ND3G}\theta_3^t{}^5 \\ & -1.00986824613989 \times 10^{-4} \text{ND3G}\theta_3^t{}^4 \\ & +6.2269203017494 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_3^t{}^3 \\ & -0.214150450779918 \text{ND3G}\theta_3^t{}^2 \\ & +3.89433379809401 \text{ND3G}\theta_3^t \\ & -28.7531651305131 \quad (29.30 < \text{ND3G}\theta_3^t < 64.10) \end{aligned} \quad (\text{b-16})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.3}^{t+1} = & 3.87313473198397 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_3^t{}^3 \\ & -8.44498587369477 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_3^t{}^2 \\ & +0.593564493564785 \text{ND3G}\theta_3^t \\ & -13.0731963114311 \quad (64.10 \leq \text{ND3G}\theta_3^t < 86.00) \end{aligned} \quad (\text{b-17})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.3}^{t+1} = & -7.23862016143578 \times 10^{-8} \text{ND3G}\theta_3^t{}^3 \\ & +4.21132749068465 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_3^t{}^2 \\ & -7.68573749507521 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_3^t \\ & +0.548105432753076 \quad (86.00 \leq \text{ND3G}\theta_3^t \leq 165.90) \end{aligned} \quad (\text{b-18})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.3}^{t+1} = & 1.84462473358695 \times 10^{-4} \text{ND3G}\theta_3^t \\ & +0.0733152697361014 \quad (165.90 < \text{ND3G}\theta_3^t < 299.10) \end{aligned} \quad (\text{b-19})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.3}^{t+1} = 0.13 \quad (299.10 \leq \text{ND3G}\theta_3^t) \quad (\text{b-20})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.4}^{t+1} = 0.22 \quad (\text{ND3G}\theta_4^t < 18.60) \quad (\text{b-21})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.4}^{t+1} = & -1.00092696905278 \times 10^{-2} \text{ND3G}\theta_4^t{}^4 \\ & +0.80613022034535 \text{ND3G}\theta_4^t{}^3 \\ & -24.3426637285943 \text{ND3G}\theta_4^t{}^2 \\ & +326.687853164469 \text{ND3G}\theta_4^t \\ & -1643.91205755459 \quad (18.60 \leq \text{ND3G}\theta_4^t < 21.22) \end{aligned} \quad (\text{b-22})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.4}^{t+1} = & -7.29477537110643 \times 10^{-9} \text{ND3G}\theta_4^t{}^5 \\ & +6.04125852565202 \times 10^{-7} \text{ND3G}\theta_4^t{}^4 \\ & +3.25156943364046 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_4^t{}^3 \\ & -4.97064484699109 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_4^t{}^2 \\ & +0.179482570658467 \text{ND3G}\theta_4^t \\ & -1.59191514144088 \quad (21.22 \leq \text{ND3G}\theta_4^t < 29.90) \end{aligned} \quad (\text{b-23})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.4}^{t+1} = 0.515 \quad (29.90 \leq \text{ND3G}\theta_4^t < 54.00) \quad (\text{b-24})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.4}^{t+1} = & 1.27956968262689 \times 10^{-6} \text{ND3G}\theta_4^t{}^4 \\ & -3.03773945336728 \times 10^{-4} \text{ND3G}\theta_4^t{}^3 \\ & +2.61713360657114 \times 10^{-2} \text{ND3G}\theta_4^t{}^2 \\ & -0.976813192825007 \text{ND3G}\theta_4^t \\ & +13.8983989487609 \quad (54.00 \leq \text{ND3G}\theta_4^t < 80.80) \end{aligned} \quad (\text{b-25})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.4}^{t+1} = & 7.59176446818976 \times 10^{-10} \text{ND3G}\theta_4^t{}^4 \\ & -5.5835353770083 \times 10^{-7} \text{ND3G}\theta_4^t{}^3 \\ & +1.56507133484029 \times 10^{-4} \text{ND3G}\theta_4^t{}^2 \\ & -1.9260476515182 \times 10^{-2} \text{ND3G}\theta_4^t \\ & +0.92360084386959 \quad (80.80 \leq \text{ND3G}\theta_4^t < 220.20) \end{aligned} \quad (\text{b-26})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.4}^{t+1} = 0.1 \quad (220.20 \leq \text{ND3G}\theta_4^t) \quad (\text{b-27})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.5}^{t+1} = 0.22 \quad (\text{ND3G}\theta_5^t < 18.22) \quad (\text{b-28})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.5}^{t+1} = & 2.08138338890873 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_5^t{}^3 \\ & -0.141265958211157 \text{ND3G}\theta_5^t{}^2 \\ & +3.21121519777482 \text{ND3G}\theta_5^t \\ & -23.9864796454322 \quad (18.22 \leq \text{ND3G}\theta_5^t < 24.43) \end{aligned} \quad (\text{b-29})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.5}^{t+1} = & -6.7814294409975 \times 10^{-9} \text{ND3G}\theta_5^t{}^6 \\ & +1.62673956946521 \times 10^{-6} \text{ND3G}\theta_5^t{}^5 \\ & -1.61299600524887 \times 10^{-4} \text{ND3G}\theta_5^t{}^4 \\ & +8.45920700108183 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_5^t{}^3 \\ & -0.247391782146126 \text{ND3G}\theta_5^t{}^2 \\ & +3.8241576611098 \text{ND3G}\theta_5^t \\ & -23.8727935410778 \quad (24.43 \leq \text{ND3G}\theta_5^t < 52.40) \end{aligned} \quad (\text{b-30})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.5}^{t+1} = & 2.60634489986072 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_5^t{}^3 \\ & -5.42243397305331 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_5^t{}^2 \\ & +0.350614273448043 \text{ND3G}\theta_5^t \\ & -6.70639054115086 \quad (52.40 \leq \text{ND3G}\theta_5^t < 74.50) \end{aligned} \quad (\text{b-31})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.5}^{t+1} = & 7.11951427520482 \times 10^{-8} \text{ND3G}\theta_5^t{}^4 \\ & -2.70316890401269 \times 10^{-5} \text{ND3G}\theta_5^t{}^3 \\ & +3.870940196683 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_5^t{}^2 \\ & -0.249639577402071 \text{ND3G}\theta_5^t \\ & +6.19102751830935 \quad (74.50 \leq \text{ND3G}\theta_5^t < 105.20) \end{aligned} \quad (\text{b-32})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.5}^{t+1} = 0.015 \quad (105.20 \leq \text{ND3G}\theta_5^t < 154.20) \quad (\text{b-33})$$

$$\begin{aligned} \text{ND3G}\lambda_{inc.5}^{t+1} = & -8.5493312735939 \times 10^{-6} \text{ND3G}\theta_5^t{}^2 \\ & +406718680368328 \times 10^{-3} \text{ND3G}\theta_5^t \\ & -0.406036871165342 \quad (154.20 \leq \text{ND3G}\theta_5^t < 210.00) \end{aligned} \quad (\text{b-34})$$

$$\text{ND3G}\lambda_{inc.5}^{t+1} = 0.07 \quad (210.00 \leq \text{ND3G}\theta_5^t) \quad (\text{b-35})$$

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

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

^{*1} Daiwa House Industry Central Research Laboratory

^{*2} Daiwa House Industry Central Research Laboratory, Dr.Eng.

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

In this study, a method for predicting the unexposed surface temperature of a double-layer wall is proposed based on "inclusive thermal conductivity," which considers heat and moisture transfer and influence of cracks in materials containing water. 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 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 actual fire-resistance tests.

The inclusive thermal conductivities are calculated by using the finite differential method. 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 double-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. Calculations using this inclusive thermal conductivity sufficiently captured the temperature history. The good accuracy on unexposed surface temperature prediction result is obtained as the difference the thickness of estimated test specimen and predicted specimen is smaller. The prediction accuracy of numerical analysis using the inclusive thermal conductivity was found to be practically sufficient.

(2018年5月1日原稿受理, 2018年10月1日採用決定)