

論 文

熱的探傷法および有限要素法による CFRP - SS400接着接合体の 接着不良部幅の推定法に関する研究 — 接着不良部幅の推定式の誘導 —

倉橋 貴彦¹・大屋 秀顕²・大平 拓郎³・河田 剛毅⁴・近藤 俊美⁵

¹機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nagaoka National College of Technology)

²機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nagaoka National College of Technology)

³機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nagaoka National College of Technology)

⁴機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nagaoka National College of Technology)

⁵機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nagaoka National College of Technology)

(2014年度より: ^{1,2}長岡技術科学大学 機械系) (現: ³エヌ・エス・エス株式会社)

Study on Estimation Method with Respect to Width of Non-adhesive Area
in CFRP-SS400 Bonded Structure by Thermal Testing Method and FEM
- Derivation of Estimation Equation for Width of Non-adhesive Area -

Takahiko KURAHASHI¹, Hideaki OYA², Takuro ODAIRA³,
Yoshitaka KAWADA⁴ and Toshimi KONDO⁵

Abstract

Thermal testing method that is a kind of non-destructive testing, is applied to search for the non-adhesive area in the bonded structure. In the non-destructive testing, there is a few method such as the methods using the radiation, the ultrasonic and the character of electrical conduction with the exception of the thermal testing method. Especially, in the thermal testing method, it is possible to detect flaws in area, and it is easy to search existence of corrosion. Therefore, in this study this method is employed to search delamination in the bonded structure. The difference of temperature occurs on the upper material surface over the adhesive area and the non-adhesive area, because there is the non-adhesive area in the bond layer. Employing this difference of temperature, the non-adhesive area can be detected by the thermal testing method. However, it is difficult to measure the width of non-adhesive area by thermal testing method. Therefore, in this study, employing numerical analysis based on the finite element method, it was investigated that estimation method with respect to width of the non-adhesive area using measurement data of the temperature at two points on surface of the bonded structure that CFRP is bonded to SS400 by epoxy resin with a cavity in the bond layer. As a result of this investigation, it was found that the width of the non-adhesive area relates to evaluation parameter that is defined by the temperature at the two points on surface of the bonded structure.

Key Words : *thermal testing method, finite element method, width of non-adhesive area*

1. 序論

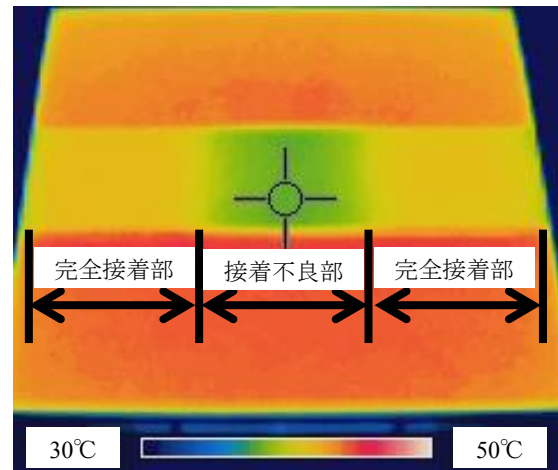
構造物に関する非破壊検査の研究は様々行われている。打音試験により剥離を検出する方法に関する研究¹⁾、また超音波を用いて鉄筋コンクリート内部の欠陥を検出する方法に関する研究^{2),3)}や、日射の影響により熱せられたコンクリート構造物に対してコンクリート下面における温度を計測し、計測値と理論値の誤差を基に欠陥形状を決定する方法について研究が行われている⁴⁾⁷⁾。これらの非破壊検査法は、主構造物であるコンクリートと構造物内にある鉄筋や欠陥といった主構造物とは異なる物性を持った材料等との違いにより、主構造物の表面における計測値から内部に埋め込まれた物体や欠陥の位置や形状を推定するという方法である。超音波による非破壊検査では、主構造物の表面において送信端子から送られる超音波を受信側で計測することで、受信側で計測された超音波の計測時間と超音波の速度から構造物内に埋め込まれた物体や欠陥位置を推定が行われる。また、熱画像による非破壊検査法では、電磁誘導等の原理により物体内部の材料のみを熱し、そこから拡散する熱を主構造物の表面において熱画像や熱伝対で観測することで、欠陥の上部と欠陥のない健全部上部における温度の違いから欠陥の位置・形状の推定が行われる。上記の研究は、主に鉄筋コンクリートを対象としたものであるが、主構造物とは異なる物性の物体が埋め込まれた材料あるいは物体内部に空壁のある材料に対しても適用可能である。

本研究では、軽量かつ高強度の材料として CFRP による接合材料に着目する。CFRP は、2011 年 8 月に米ボーイングの新型中型旅客機「787」の軽量化のために適用もされており、近年幅広く用いられている^{8),9)}。接合材料のモデルとしては、SS400 (母材) に対して CFRP 板を接着した異種材料の接合体を対象とし、材料表面温度を用いた接着不良部の熱的探傷試験に関する検討を行う。このような接着不良部の検査を熱的探傷法により行う場合、完全に接着された領域と、不完全に接着された領域の上面における温度は、接着剤と空壁領域の熱的物性の違いから、物体表面に温度差が生じる。この物体の表面の温度差より接着不良部の特定を行うことになるが、接着不良部と良好に接着されている箇所の境界線が不明確であるという欠点がある。特に CFRP 板の厚さが厚いほど接合体表面の温度の変化がゆるやかになるため、熱画像を用い視覚的に接着不良部の大きさを測定することが困難となる傾向にある (図-1 参

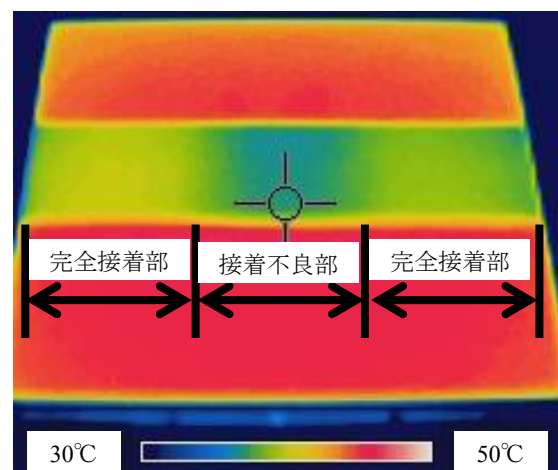
照)。そこで本検討では図-2 に示す CFRP-SS400 接着接合体に対し、有限要素法に基づく数値解析による検討より、物体表面温度から接着不良部の幅を推定する方法について考察を行う。



(a) 実験の様子



(b) CFRP板厚さ3.0mm



(c) CFRP板厚さ6.0mm

図-1 熱画像による接着不良部の検知

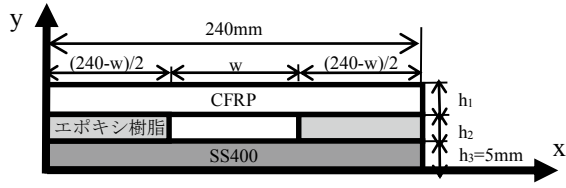


図-2 解析モデル

2. 熱伝導方程式に対する有限要素方程式の誘導

有限要素法による熱伝導解析に用いる基礎方程式は、CFRP板の熱的異方性を考慮し、式(1)に示す熱伝導方程式とする。(エポキシ樹脂およびSS400に対しては、熱的等方性の熱伝導方程式を基礎方程式とする。)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - \left(\kappa_{xx} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \kappa_{yy} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、 ϕ は温度、 κ_{xx} 、 κ_{yy} は x 、 y 方向の熱拡散率を示す。式(1)を数値的に解く場合、丸め誤差や打ち切り誤差などの誤差が生じる。この誤差を残差と呼び、 r とおく(式(2))。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - \left(\kappa_{xx} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \kappa_{yy} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = r \quad (2)$$

ここに残差に対する重みとして重み関数 ω (任意関数)を導入し、各要素内における残差の荷重平均がゼロとなるように考えると式(3)が得られる。式(3)に式(2)を代入すると、式(4)が得られる。

$$\frac{\int_{\Omega_e} \omega r d\Omega}{\int_{\Omega_e} \omega d\Omega} = 0 \quad (3)$$

$$\int_{\Omega_e} \omega \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} - \left(\kappa_{xx} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \kappa_{yy} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) \right\} d\Omega = 0 \quad (4)$$

式(4)を整理し、総和規約により表すと式(5)のように書き表すことができる。

$$\int_{\Omega_e} \omega \dot{\phi} d\Omega - \int_{\Omega_e} \omega (\kappa_{ii} \phi_{,ii}) d\Omega = 0 \quad (5)$$

式(5)の第2項に対して、グリーンの定理を適用すると式(6)のようになり、最終的に式(7)に示す重み付き残差方程式が得られる。

$$\int_{\Omega_e} \omega \dot{\phi} d\Omega - \int_{\Omega_e} (\kappa_{ii} \omega \phi_{,i})_{,i} d\Omega + \int_{\Omega_e} (\kappa_{ii} \omega_{,i} \phi_{,i}) d\Omega = 0 \quad (6)$$

$$\int_{\Omega_e} \omega \dot{\phi} d\Omega + \int_{\Omega_e} (\kappa_{ii} \omega_{,i} \phi_{,i}) d\Omega = \int_{\Gamma_e} (\kappa_{ii} \omega \phi_{,i}) n_i d\Gamma \quad (7)$$

ここに、 Ω_e は要素領域、 Γ_e は要素境界、 n_i は外向きの単位法線ベクトルを示す。三角形一次要素を導入し、ガラーキン法を適用すると、重み関数 ω 、状態変数(温度) ϕ に対する補間関数は式(8)のように表すことができる。

$$\begin{cases} \omega(x,y) = N_1 \omega_1 + N_2 \omega_2 + N_3 \omega_3 = \{N\}^T \{\omega\} \\ \phi(x,y) = N_1 \phi_1 + N_2 \phi_2 + N_3 \phi_3 = \{N\}^T \{\phi\} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 N_1 、 N_2 、 N_3 は形状関数であり、形状関数は式(9)のように表すことができる。

$$\begin{cases} N_1 = a_1 + b_1 x + c_1 y \\ N_2 = a_2 + b_2 x + c_2 y \\ N_3 = a_3 + b_3 x + c_3 y \end{cases} \quad (9)$$

ここで、式(9)における各係数および各定数は式(10)のように書くことができる。

$$\begin{cases} a_i = x_i y_j - x_j y_i \\ b_i = y_j - x_k \\ c_i = x_k - y_j \end{cases} \quad (10)$$

$(i, j, k) = (1, 2, 3), (2, 3, 1), (3, 1, 2)$

式(8)を式(7)に代入することで、重み付き残差方程式(式(7))は式(11)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_e} \{N\}^T \{\omega\} \{N\}^T \{\phi\} d\Omega + \int_{\Omega_e} \kappa_{ii} \{N_{,i}\}^T \{\omega\} \{N_{,i}\}^T \{\phi\} d\Omega \\ & = \int_{\Gamma_e} \kappa_{ii} \{N\}^T \{\omega\} \{N_{,i}\}^T \{\phi\} n_i d\Gamma \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、式(12)に示す関係を考慮すると、式(11)は式(13)のように変形することができる。

$$\{N\}^T \{\omega\} = \{\omega\}^T \{N\} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_e} \{\omega\}^T \{N\} \{N\}^T \{\phi\} d\Omega + \int_{\Omega_e} \kappa_{ii} \{\omega\}^T \{N_{,i}\} \{N_{,i}\}^T \{\phi\} d\Omega \\ & = \int_{\Gamma_e} \kappa_{ii} \{\omega\}^T \{N\} \{N_{,i}\}^T \{\phi\} n_i d\Gamma \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 $\{\omega\}^T$ は任意定数ベクトルであるため、式(14)のように変形することができ、両辺を $\{\omega\}^T$ で除すれば式(15)が得られる。

$$\begin{aligned} & \{\omega\}^T \int_{\Omega_e} \{N\} \{N\}^T \{\phi\} d\Omega + \{\omega\}^T \int_{\Omega_e} \kappa_{ii} \{N_{,i}\} \{N_{,i}\}^T \{\phi\} d\Omega \\ & - \{\omega\}^T \int_{\Gamma_e} \kappa_{ii} \{N\} \{N_{,i}\}^T \{\phi\} n_i d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_e} \{N\} \{N\}^T \{\phi\} d\Omega + \int_{\Omega_e} \kappa_{ii} \{N_{,i}\} \{N_{,i}\}^T \{\phi\} d\Omega \\ & - \int_{\Gamma_e} \kappa_{ii} \{N\} \{N_{,i}\}^T \{\phi\} n_i d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

また、 $\{\phi\}$ は定数ベクトルであるため積分から外し、熱流束である $\kappa_{ii} \{N_{,i}\}^T \{\phi\} n_i$ を b とおくことで式(16)が得られ、式(16)を簡略化すると式(17)のように表すことができる。

$$\int_{\Omega_e} \{N\} \{N\}^T d\Omega \{\phi\} + \int_{\Omega_e} \kappa_{ii} \{N_{,i}\} \{N_{,i}\}^T d\Omega \{\phi\} = \int_{\Gamma_e} \{N\} b d\Gamma \quad (16)$$

$$[M] \{\phi\} + ([H_{xx}] + [H_{yy}]) \{\phi\} = \{T\} \quad (17)$$

ここで、式(17)における各係数行列、ベクトルは式(18)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} [M] &= \int_{\Omega_e} \{N\} \{N\}^T d\Omega \\ [H_{xx}] &= \int_{\Omega_e} \kappa_{xx} \{N_{,x}\} \{N_{,x}\}^T d\Omega \\ [H_{yy}] &= \int_{\Omega_e} \kappa_{yy} \{N_{,y}\} \{N_{,y}\}^T d\Omega \\ \{T\} &= \int_{\Gamma_e} \{N\} b d\Gamma \end{aligned} \quad (18)$$

また式(17)に対しては、陽的オイラー法を用いて時間方向に離散化を行う。式(17)における温度の時間微分は式(19)と書き表すことができ、式(19)を式(17)に代入することにより式(20)を得ることができる。

$$\{\dot{\phi}\} = \frac{\{\phi^{n+1}\} - \{\phi^n\}}{\Delta t} \quad (19)$$

$$[M] \frac{\{\phi^{n+1}\} - \{\phi^n\}}{\Delta t} + ([H_{xx}] + [H_{yy}]) \{\phi^n\} = \{T^n\} \quad (20)$$

ここに、 $n, n+1$ は時間ステップ、 Δt は時間像分量を示している。式(20)をさらに整理して、 $n+1$ ステップ時の温度を誘導すると式は式(21)のように書くことができる。

$$\{\phi^{n+1}\} = \{\phi^n\} - \Delta t \cdot [M]^{-1} \{([H_{xx}] + [H_{yy}]) \{\phi^n\} + \{T^n\}\} \quad (21)$$

ここで、質量行列 $[M]$ を具体的に書き表すと、式(22)のように示すことができる。

$$[M] = \begin{bmatrix} \int_{\Omega_e} N_1 N_1 d\Omega & \int_{\Omega_e} N_1 N_2 d\Omega & \int_{\Omega_e} N_1 N_3 d\Omega \\ \int_{\Omega_e} N_2 N_1 d\Omega & \int_{\Omega_e} N_2 N_2 d\Omega & \int_{\Omega_e} N_2 N_3 d\Omega \\ \int_{\Omega_e} N_3 N_1 d\Omega & \int_{\Omega_e} N_3 N_2 d\Omega & \int_{\Omega_e} N_3 N_3 d\Omega \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(22)の行列の各成分の計算に対して、積分公式(式(23))を適用し計算すると、式(24)となる。

$$\int_{\Omega_e} N_1^l N_2^m N_3^n d\Omega = \frac{l!m!n!}{(l+m+n+2)!} \times 2Ae \quad (23)$$

$$[M] = \frac{Ae}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

ここに、 Ae は三角形要素の面積を示している。ここで式(24)に示す質量行列に集中化を行うと、集中化質量行列 $[\bar{M}]$ は式(25)のように示すことができる。

$$[\bar{M}] = \frac{Ae}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

よって、熱伝導方程式に対する有限要素方程式は式(26)のように書くことができる。

$$\{\phi^{n+1}\} = \{\phi^n\} - \Delta t \cdot [M]^{-1} \left(([H_{xx}] + [H_{yy}]) \{\phi^n\} + \{T^n\} \right) \quad (26)$$

3. 境界条件や物性値に関する検討

3. 1 加熱面の熱伝達境界における熱伝達率

試験片の加熱底面および試験片表面を熱伝達境界として設定する。図-3に示すSS400の試験片の上面の中央における温度が実測値と解析値で概ね一致する様に、ヒーターと試験片間の熱伝達率の決定を行った。解析モデルの概形を図-4に、またメッシュ寸法および時間増分量 Δt を表-1に示す。(5.2節以外の解析においては、図-4および表-1に示す計算条件において、解析を行っている。) SS400の熱的物性値の解析条件として、密度 $\rho=7860 \text{ kg/m}^3$ 、比熱 $c=473 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 、熱拡散率 $\kappa_{xx}=\kappa_{yy}=0.139 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ と設定する。(密度 ρ および比熱 c は熱伝達境界における境界条件の計算の際に用いる。) また、加熱面のヒーターの温度は、実測したヒーターの表面の温度を三次式で近似したものを、ヒーターの表面温度 ϕ として与えることにする(式(27))。

$$\phi = -3.911 \times 10^{-8} t^3 - 3.353 \times 10^{-6} t^2 + 0.056 t + 20.687 \quad (27)$$

熱伝達率を $700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と設定した場合における、試験片上面の中央の点での解析値と実測値の時間履歴を図-5に示す。結果より解析値と実測値はおおむね一致しているため、以後の検討において設定する試験片下面の熱伝達境界における熱伝達率は $700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とする。

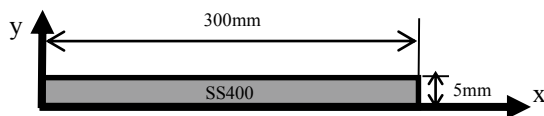


図-3 試験片 (SS400板)

表-1 メッシュ寸法と時間増分量

$\Delta x, \Delta y$	0.5mm
Δt	10^{-3} 秒

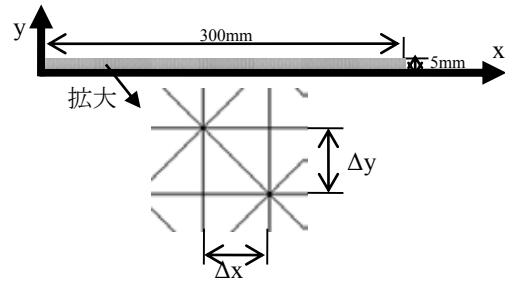


図-4 メッシュ分割の概要図

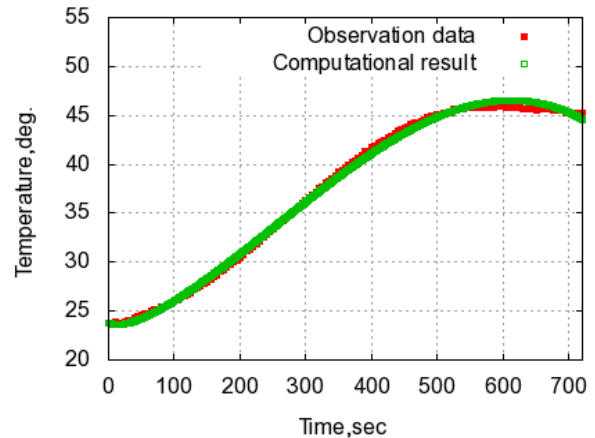


図-5 熱伝達率決定に関する実測値と解析値の比較

3. 2 エポキシ樹脂の密度と熱拡散率

エポキシ樹脂の密度は、体積 1 cm^3 のエポキシ樹脂の試験片に対するアルキメデス法による測定結果、 $\rho=1206 \text{ kg/m}^3$ を解析条件として使用し、比熱は $c=1100 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ と設定する。また、エポキシ樹脂の熱拡散率は、図-6に示す試験片上面の中央における温度の実測値と解析値がおおむね一致するように設定し、本検討ではエポキシ樹脂の熱拡散率は $0.090 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とする。また、前節と同様に、解析には実測したヒーターの表面温度を三次式で近似したものをヒーターの表面温度 ϕ として与えることにする(式(28))。

$$\phi = -9.753 \times 10^{-9} t^3 - 8.866 \times 10^{-6} t^2 + 0.025 t + 25.914 \quad (28)$$

試験片上面の中央の点での解析値と実測値の時間履歴を図-7に、また解析時刻900秒後における断面の温度コンター図を図-8に示す。結果より、解析値と実測値はおおむね一致していることから、以後の検討において設定するエポキシ樹脂の熱拡散率は $\kappa_{xx}=\kappa_{yy}=0.090 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とする。

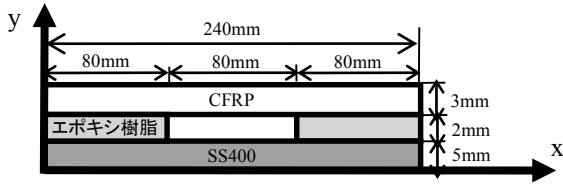


図-6 試験片 (接合体)

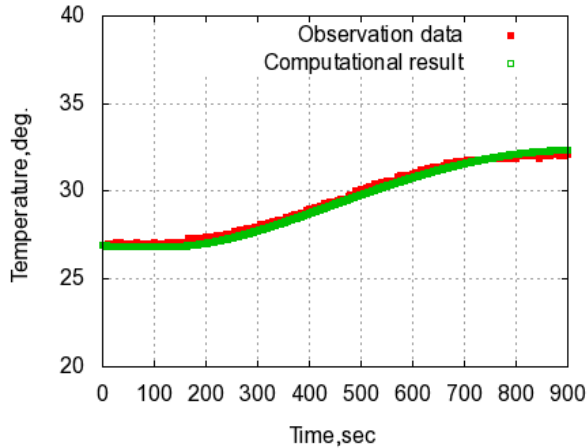


図-7 熱拡散率決定に関する実測値と解析値の比較

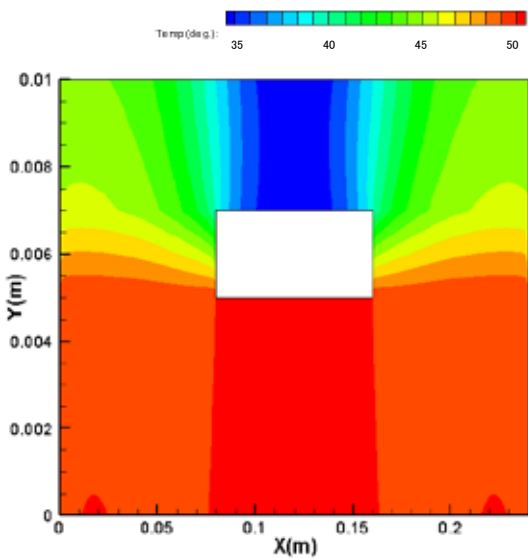


図-8 加熱時間 900 秒時の温度分布図

4. 接着不良部幅 w を推定するための評価パラメータ E の決定

4. 1 接着不良部幅 w に対して推定可能性のある評価パラメータ E

接合体下面を加熱した際に現れる表面温度分布 (図-1参照) を利用して接着不良部幅を推定するため、接着不良部幅を推定するための評価パラメータ

E について検討する. 図-2に示す接合体について、接着不良部中央の直上の $x=120\text{mm}$ の点での温度 T_L と、表面上のある点の温度 T_H との比を評価パラメータ (式(29)) として、接着不良部幅 w と評価パラメータ E の関係に関する検討を行った. ここで、CFRP と SS400 の各物性値とエポキシ樹脂の比熱については参考文献^{10),11)}に示された値を使用する. また、エポキシ樹脂の密度と熱拡散率の値は前章で決定した値を用いる (表-2). 解析結果を図-9に示す. 解析結果より、接着不良部幅 w は $x=120\text{mm}$ における温度 T_L と接合体上面のどこの点の温度 T_H の比をとっても、接着不良部幅 w と評価パラメータ E は一次関数に近い関係にあることがわかる. 本研究では接合体上面において $x=120\text{mm}$ における温度 T_L と $x=60\text{mm}$ における温度 T_H により評価パラメータ E の計算を行う.

$$E \equiv \frac{T_L}{T_H} \quad (29)$$

4. 2 評価パラメータ E が加熱温度に依存しないための条件

評価パラメータ E と加熱温度や雰囲気温度 (外気温) との関係性について検討を行う. 図-10に示す解析結果より、雰囲気温度が零°C の場合において、評価パラメータ E の変動がないと見なせる程度に加熱

表-2 各材料の熱的物性値

	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kg·K]	熱拡散率 [×10 ⁻⁶ m ² /s]	
			x 方向	y 方向
CFRP	1268	1198.8	11.8	0.395
エポキシ樹脂	1206	1100	0.090	
SS400	7860	473	0.139	

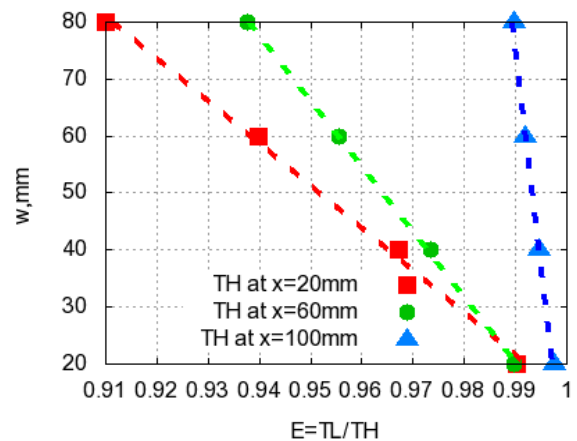


図-9 評価パラメータ E と接着不良部幅 w の関係

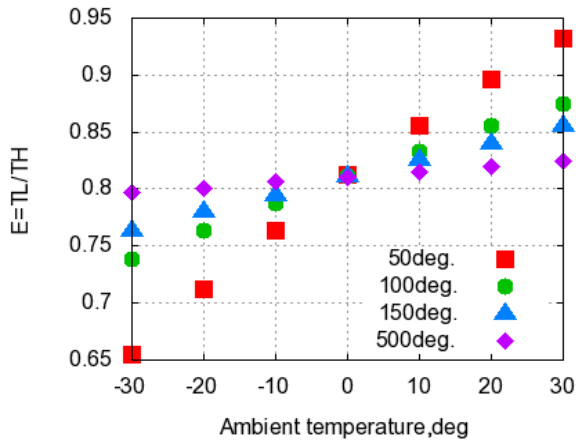


図-10 加熱温度に対する雰囲気温度と評価パラメータ E の関係

開始から十分に時間が経った時には、評価パラメータ E は加熱温度に依らずおおむね同じ値となることがわかった。この結果より、雰囲気温度が零°C の状況下において、評価パラメータ E の径時変化が落ち着くまで加熱した場合、加熱温度により接着不良部幅 w の推定式を変えないこと、接着不良部幅 w の推定可能であると考えられる。

5. 数値解析による補強材および接着層の厚さ h_1 , h_2 が評価パラメータ E に与える影響に関する検討

5. 1 補強材 (CFRP) の厚さ h_1 が評価パラメータ E に与える影響

CFRP板厚さ h_1 が評価パラメータ E に与える影響を調べる。図-2の解析モデルに対して、エポキシ樹脂層厚さ h_2 を1.0mmと設定し、CFRP板厚さ h_1 に対する評価パラメータ E の変化について解析を行った。結果として、CFRP板が厚くなるに従い評価パラメータ E の変化が小さくなることがわかった (図-11)。この結果より、CFRP板厚さが8.0mm以上において評価パラメータ E の変化が 10^{-2} 以下となることから、本研究ではCFRP板厚さが $8.0\text{mm} \leq h_1$ において評価パラメータ E はCFRP板厚さに依存しないとみなすことにする。

5. 2 エポキシ樹脂層厚さ h_2 が評価パラメータ E に与える影響

次に、エポキシ樹脂層厚さ h_2 が評価パラメータ E に与える影響を調べる。図-2の解析モデルに対し、CFRP板厚さ h_1 を8.0mmと設定し解析を行った (図-

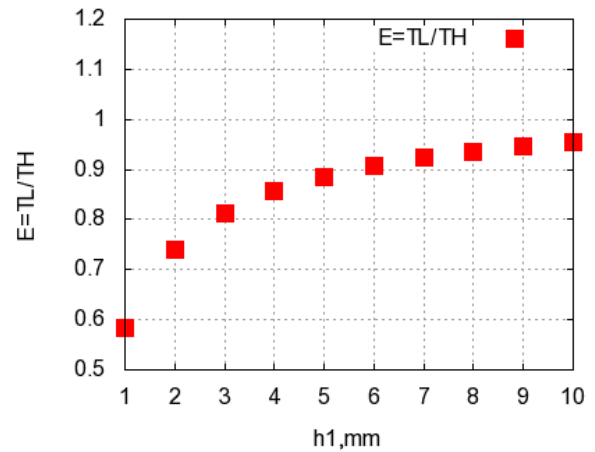


図-11 CFRP板厚さ h_1 と評価パラメータ E の関係

12)。本検討に用いるメッシュの寸法および時間増分量を表-3に示す。解析結果より、全体を通してエポキシ樹脂層厚さ h_2 が厚くなるに従い、評価パラメータ E の値は減少するが、大きく変化することはないことがわかった。また、エポキシ樹脂層厚さが $0.75\text{mm} \leq h_2 \leq 2.0\text{mm}$ において、評価パラメータ E の変化が 10^{-2} 以下であることから、エポキシ樹脂層厚さが $0.75\text{mm} \leq h_2 \leq 2.0\text{mm}$ の範囲において評価パラメータ E はエポキシ樹脂層厚さ h_2 に依存しないとみなすことにする。

6. 接着不良部幅 w の推定式の決定

CFRP板厚さ h_1 とエポキシ樹脂層厚さ h_2 が評価パ

表-3 メッシュ寸法と時間増分量

$\Delta x, \Delta y$	0.25mm
Δt	10^{-4} 秒

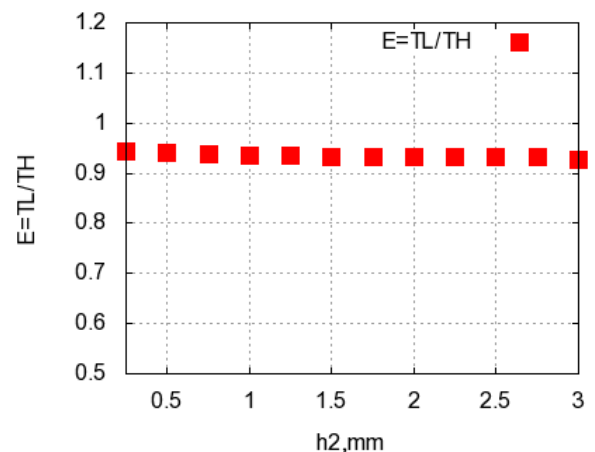


図-12 エポキシ樹脂層厚さ h_2 と評価パラメータ E の関係

ラメータ E に与える影響を考慮し，図-2の解析モデルに対し，CFRP板厚さ h_1 を8.0mm，エポキシ樹脂層厚さ h_2 を1.5mmと設定して数値解析を行った．図-13に示す解析結果より，接着不良部幅 w と評価パラメータ E の関係は，近似的に式(30)と表すことができる．

$$w = -1153.9E + 1162.7 \quad (30)$$

また，前章までの検討結果より，接着不良部幅 w の推定式(式(30))が適用可能と想定される範囲を表-4に示す．また，その他の実験条件として，4.2節の結果を考慮し，式(30)は雰囲気温度が零℃の状態に対して導出した式であること，および接合体上面の $x=120\text{mm}$ における温度 T_L と $x=60\text{mm}$ における温度 T_H により評価パラメータ E の計算を行っている点にも注意する必要がある．以上の条件下においては，式(30)を使用することで接着不良部幅 w が推定できるものと考えられる．

7. 実証実験による接着不良部幅 w の推定式の妥当性に関する検討

7. 1 雰囲気温度が零℃の状態における評価パラメータ E の加熱温度への依存性の確認

表-4 接着不良部幅 w に関する推定式の適用可能範囲

CFRP 板厚さ h_1	$8.0\text{mm} \leq h_1$
エポキシ樹脂層厚さ h_2	$0.75\text{mm} \leq h_2 \leq 2.0\text{mm}$
SS400 板厚さ h_3	$h_3 = 5.0\text{mm}$
接着不良部幅 w	$20\text{mm} \leq w \leq 80\text{mm}$

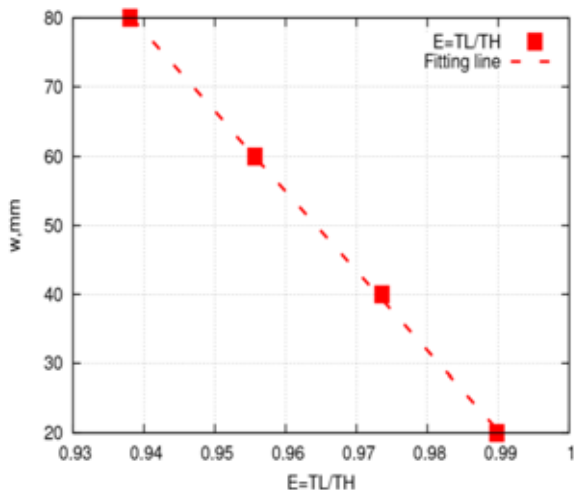


図-13 評価パラメータ E と接着不良部幅 w の関係

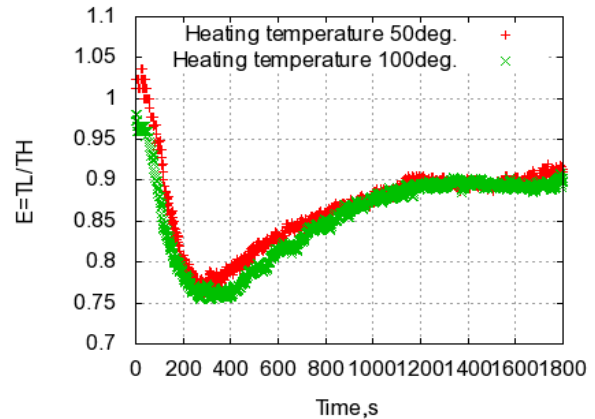
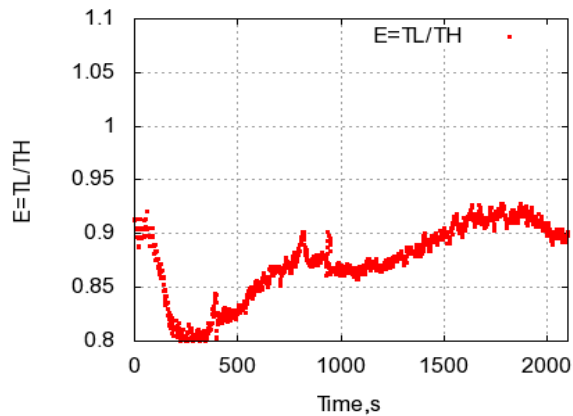


図-14 実証実験の結果：加熱温度への依存性の確認

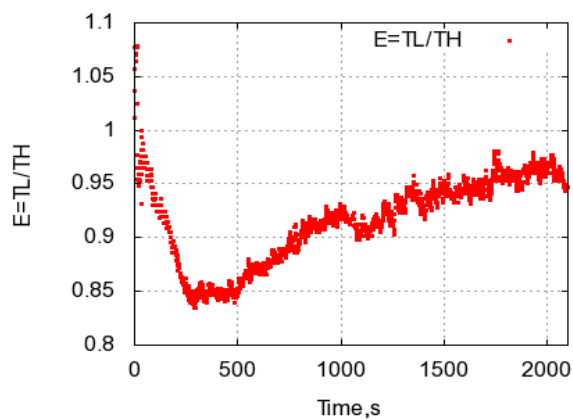
図-2の解析モデルに対し，CFRP板厚さ h_1 が9.0mm，エポキシ樹脂層厚さ h_2 が1.0mm，奥行きが60mmの接合体を用意し，雰囲気温度が2℃の状況下で，加熱温度が約50℃の場合と約100℃の場合について2回の実証実験を行った(図-14)．実証実験の結果，加熱温度を変化させた場合においても，評価パラメータ E の値はおおむね同じ値に落ち着くという結果となった．この結果から，雰囲気温度が零℃に近い条件の下，接合体の下面を加熱し，接合体上面の2点の温度 T_L ， T_H より求められる評価パラメータ E は，加熱温度に依存しないことが確認できた．

7. 2 接着不良部幅 w の推定式の妥当性に関する検討

次に，本研究において考案した接着不良部幅 w の推定式(式(30))の妥当性を確認するため，図-2の接合体に対し，CFRP板 $h_1=9.0\text{mm}$ ，エポキシ樹脂層厚さ $h_2=1.0\text{mm}$ ，接着不良部幅 $w=80\text{mm}$ ，奥行き60mmである接合体を製作し，雰囲気温度が3℃の状態(case1)と0℃の状態(case2)の2回の実証実験を行った．実証実験の結果を図-15に示す．case1の実証実験で得られた評価パラメータ E の時間履歴(図-15(a))より，1600秒から1800秒付近においては変化が落ち着いているとし，1780秒から10秒間の評価パラメータ E の平均値を用い，接着不良部幅 w の推定式(式(30))より接着不良部幅 w を計算したところ，接着不良部幅 w は96.4mmとなった．また同様に，case2の実証実験で得られた評価パラメータ E の時間履歴(図-15(b))より，1800秒から2000秒付近において変化が落ち着いているとし，1870秒から10秒間の評価パラメータ E の平均値を用いて推定式(式(30))より接着不良部幅 w を計算したところ，接着不良部幅 w は64.2mmとなった．実際の接着不良部幅 w は80mmであるため，接着不良部幅 w の推定式



(a) 実証実験の結果：case1



(b) 実証実験の結果：case2

図-15 実証実験の結果：接着不良部幅の推定式(式(30))の妥当性の確認

(式(30))を用いることによる推定誤差は、 $-19.8\% \leq \text{error} \leq 20.5\%$ 程度であると考えられる。

8. 結論

本研究では、CFRP-SS400の接着接合体を対象として、有限要素法による熱伝導解析により、熱的探傷試験時における接着不良部の幅に関する推定式の誘導を行った。本研究により得られた知見を以下に整理する。

- ・熱的探傷試験時に接着不良部幅を推定したい断面において、材料表面の最低温度と隣接する他の点の温度の比（評価パラメータ E ）と接着不良部幅の関係は線形の関係により表せることがわかった。

- ・接着不良部幅の評価パラメータ E について、雰囲気

気温度（外気温）の関係を整理したところ、加熱温度に依らず線形の関係で表せることがわかった。また、雰囲気温度が零℃の状態においては、加熱温度に依らず評価パラメータ E の値はおおむね一定の値を示すことがわかった。

- ・接着不良部幅の評価パラメータ E とCFRP板厚さおよびエポキシ樹脂層厚さの関係を調べたところ、CFRP板厚さ h_1 が $8.0\text{mm} \leq h_1$ 、エポキシ樹脂層厚さ h_2 が $0.75\text{mm} \leq h_2 \leq 2.0\text{mm}$ という条件下において、接着不良部幅の評価パラメータ E の値は各厚さに依らずおおむね一定の値を示すことがわかった。

- ・CFRP板厚さ h_1 が $8.0\text{mm} \leq h_1$ 、エポキシ樹脂層厚さ h_2 が $0.75\text{mm} \leq h_2 \leq 2.0\text{mm}$ という条件下において、接着不良部幅の評価パラメータ E と接着不良部幅 w の関係を整理したところ、線形の関係により表せることがわかった。

- ・実証実験において、接着不良部幅 w の推定式を適用したところ、推定誤差が $-19.8\% \leq \text{error} \leq 20.5\%$ の範囲で、接着不良部幅 w を推定することができた。

本研究では、二次元断面モデルを対象としたため、奥行き方向に対する熱移動も考慮した三次元モデルへの拡張を行うことにより、接着不良部幅の推定誤差は軽減できるものと考えている。将来的には、実際の探傷の現場において適用可能なレベルまで接着不良部幅 w に関する推定精度の向上を目指している。

謝辞：本論文を執筆するにあたり長岡技術科学大学より「H24年度 高専一長岡技科大共同研究助成」の援助を受けた。ここに謝意を表す。本論文の解析結果は、九州大学情報基盤研究開発センターの高性能アプリケーションサーバSR16000を使用し計算を行ったものである。計算機の使用についても、センター関係者の方へ謝意を表す。また、本研究は、高専・両技大間教員交流制度による長岡技術科学大学・長岡工業高等専門学校間における人事交流中の内容であり、長岡工業高等専門学校の機械工学科の教職員からは、研究成果発表会等を通じてたくさんの建設的な意見を頂いた。合わせてここに謝意を表す。

参考文献

1) 金光寿一, 柳内睦人, 三星智典, 黒古剛司, "サーモ

- グラフィック法および打音法を利用した炭素繊維シート補強コンクリートの剥離検知手法", コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.625-630, 2001.
- 3) 木本和志, 廣瀬壯一, "SH 波超音波リニアアレイ探触子の時間領域モデリング", 応用力学論文集, Vol. 9, pp.115-121, 2006.
 - 4) 阪上隆英, "赤外線サーモグラフィによる構造物の非破壊検査", 溶接学会誌, Vol.72, No.4, pp.27-31, 2003.
 - 5) 太田佳秀, 曾根彰, 増田新, 射場大輔, "熱画像解析を用いたコンクリート構造物の欠陥検出に関する研究", 応用力学論文集, Vol. 9, pp.95-105, 2006.
 - 6) 大下英吉, 長坂慎吾, 倉橋貴彦, 谷口修, "コンクリート表面温度に基づく鉄筋腐食厚および腐食率の推定手法に関する研究", 土木学会論文集, Vol.65, No.4, pp.442-458, 2009.
 - 7) 倉橋貴彦, 大下英吉, "コンクリート表面における実計測温度を用いた部分腐食領域を有する鉄筋コンクリ
 - 2) 山田真幸, 大西正浩, 北原道弘, "線形化逆散乱解析法による非均質材料内の欠陥形状再構成", 応用力学論文集, Vol. 7, pp.83-90, 2004.
 - ートに対する鉄筋腐食形状の推定問題", 日本応用数理学会論文誌, Vol.23, No.3, pp.25-44, 2011.
 - 8) 北野彰彦, "航空機の軽量化を支える炭素繊維複合材料", 化学と教育, Vol.59, No.4, pp.226-229, 2011.
 - 9) 玉井宏章, 高松隆夫, 櫻庭誠, 灰谷徳治, 服部明生, "高強度鋼 (780N/mm² 級) と炭素繊維プレートとの複合建築構造材料の基本的力学特性", 広島工業大学紀要研究編 Vol.41, pp.159-167, 2007.
 - 10) 田坂英紀, 伝熱工学, 第2版, 森北出版, p.178, 2005.
 - 11) 三井雅一, 福澤公夫, 沼尾達弥, "赤外線サーモグラフィ法を用いた FRP シート・コンクリート間の欠陥検出", 土木学会論文集, No.655, pp.107-117, 2000.

(2014. 3. 31 受付)