

# 論文 アンカーボルトの定着に用いる固着剤劣化に関する非破壊検査手法に関する研究

東田 梨穂\*1・市川 妃奈子\*2・大下 英吉\*3

**要旨：**本研究は電磁誘導加熱を利用して非破壊・非接触にてコンクリート内部のアンカーボルトを模擬したアンカーボルトを加熱し、コンクリート表面の温度性状からアンカーボルトの定着性状を評価する手法の構築を行ったものである。既往の研究ではアンカーボルトを模擬した鉄筋の定着性状を評価するために鉄筋埋設領域を加熱する事の出来る最適システムの構築を解析的に検討した。著者らはアンカーボルトの定着に用いる固着剤劣化による亀裂やアンカーボルトの腐食を想定し電磁誘導解析を行い、本研究における最適システムの適用限界を解析的に検討した。

**キーワード：**アンカーボルト, 電磁誘導, 非破壊検査, 赤外線サーモグラフィ

## 1. はじめに

トンネルの覆工や高架橋などにおけるコンクリート片の剥落は、第三者被害をもたらす社会的な問題である。その代表事例が、平成24年12月に山梨県の中央自動車道上り線笹子トンネルにおける天井板の崩落事故である。この事故を機に、施設の経済効果や防災・減災といった観点から、施設の老朽度合いや重要度合いに関係なく、全トンネルと全長2メートル以上の橋で一律の点検内容・方法が義務付けられた。

構造物において付帯施設の躯体への定着には一般に、アンカーボルトが用いられる。アンカーボルトは構造部材や装置をコンクリートの土台に固定するための部品であり、設備の転倒防止や地震対策に有効である。アンカーボルトの定着性状評価の方法は、目視検査やハンマーを使用した打音検査が基本である。しかし、目視検査では外面のみしか確認できず、打音検査では検査員の経験による検査となり、定量的な評価が行えない。そこで、その他の非破壊検査技術を併用することで、診断の参考となる情報を更に取得することが期待される。

非破壊検査手法のひとつである電磁パルス法<sup>1)</sup>はコイルにパルス電流を印加することにより発生する磁気的な力を利用し、導電体であるアンカーボルトに弾性波を発生させ、設置した受信装置で伝播速度や波形を解析することにより劣化状況を診断する技術である。しかし、アンカーボルトの締め付け度合いや、不良の程度により固有振動数が異なるため定量的な評価が困難であること、アンカーボルトの深部ほど弾性波が減衰するため評価が困難であるといった問題点がある。したがって、高精度で評価可能である確固たる手法が無いため非破壊検査手

法の早急な確立が不可欠である。

著者等によるRC構造物の剥離空洞評価システム<sup>2)3)</sup>は、電磁誘導によりRC構造物内部の鉄筋を非破壊・非接触で強制加熱し、鉄筋からコンクリート表面の伝播した熱を赤外線サーモグラフィで検知することで、各種劣化性状を診断するものである。

既往の研究では、RC構造物の剥離空洞評価システム<sup>2)3)</sup>の原理をアンカーボルト、コンクリートならびにアンカーボルトの定着劣化に起因する剥離空洞に適用することでアンカーボルトの付着性状を評価可能とするシステム(以下、本システムと称す)の構築を行った<sup>4)</sup>。具体的な手法は、電磁誘導によってアンカーボルトを非破壊かつ非接触で強制加熱し、アンカーボルトからコンクリート上表面へと拡散する熱を赤外線サーモグラフィによって計測することで得られたコンクリート上表面の温度性状から定着性状を検知するものである。図-1に示す矩形コイルを使用することで、アンカーボルト露出部の温度を抑制しアンカーボルト埋設部を加熱出来ることがわかった。コイルの巻き数は9巻き、2つのコイルの大きさは550mm×225mmである。2つのコイルの電流を逆向きに流すことで両コイルから発生する磁場を中心部で打ち消しあい、渦電流の発生が抑制される。また、コイルから出る磁束を集中させ、コアの下にある加熱物の温度を上げる働きがあるフェライトコアを同図の位置に設置することでアンカーボルト露出部の過度な加熱を抑制している。

既往の研究<sup>4)</sup>における本システムでは、アンカーボルトが腐食することで、その表面に腐食生成物が堆積した状態をアンカーボルトは鉄筋、腐食生成物はビニールテ

\*1 中央大学 理工学研究科都市人間環境学専攻 (学生会員)

\*2 中央大学 理工学部都市環境学科

\*3 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

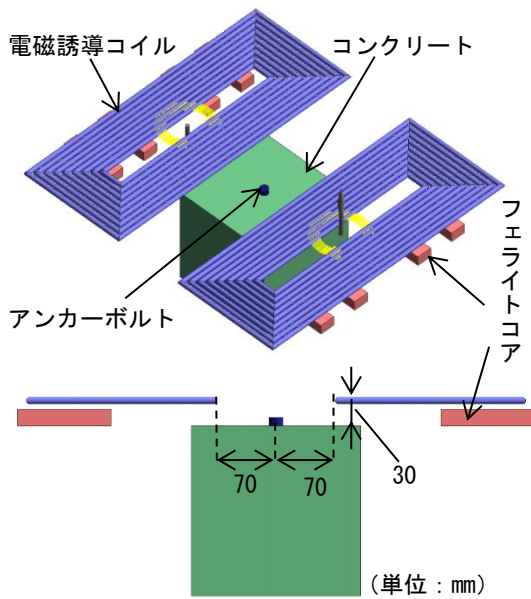


図-1 最適システムによるコイルモデル

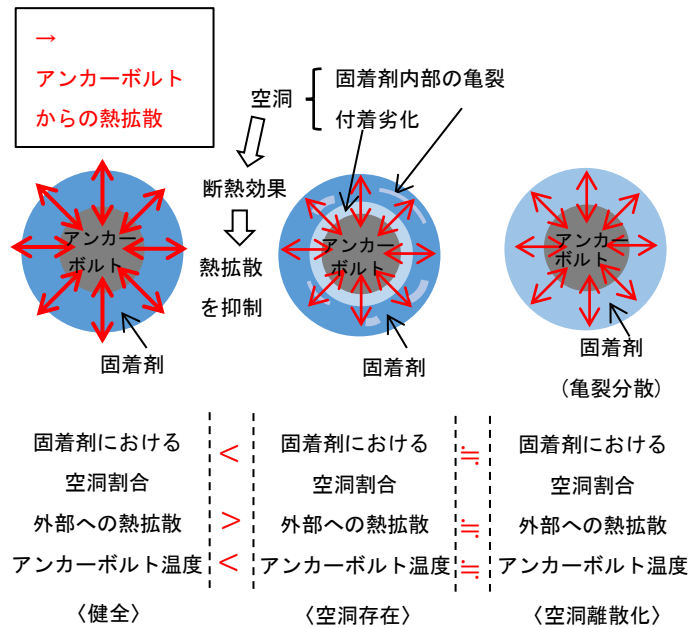


図-3 等価熱物性モデル

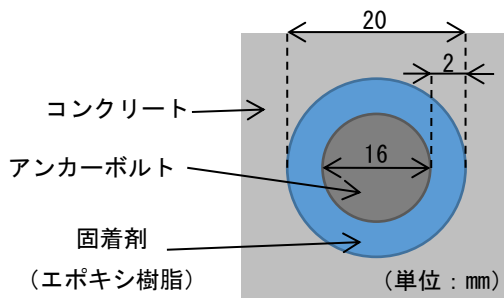


図-2 アンカーボルト上面図

ープで模擬した実験と解析を行い、実験と解析結果との比較検討から解析の適用性を実証した。

本研究では、アンカーボルトの腐食、およびアンカーボルトの定着に用いる固着剤劣化による固着剤内部の亀裂を模擬した電磁誘導解析により、アンカーボルト上面の温度性状からアンカーボルト定着性状を評価し、本システムの適用限界を明らかにした。また、使用する電磁誘導コイルの配置位置による劣化診断手法の高機能化も検討した。

## 2. 亀裂分散化による等価熱物性評価

図-1に示す電磁誘導コイルを用いてアンカーボルト定着領域の付着劣化を想定して電磁誘導解析を行った。本研究では径16mmのアンカーボルトを用いた接着系あと施工アンカーを模擬した。図-2に示すように径16mmのアンカーボルトを用い施工する際、母材の穿孔径は20mmであり、周囲にはエポキシ樹脂を主とした固着剤が厚さ2mmで充填されている。

アンカーボルトの定着劣化は腐食劣化および固着剤の劣化により発生する固着剤内部の複数の亀裂である。

固着剤内部に発生した複数の亀裂を忠実にモデル化することは、亀裂の大きさや発生箇所にはばらつきがあるため困難であるとともに効率的ではない。そこで、図-3に示すように複数の亀裂を定量化するために、亀裂の発生が考えられるアンカーボルト周囲の固着剤の要素内に亀裂を一樣に分散させたモデルである、分散亀裂モデルなる解析モデルを用い解析を実施する。

既往の研究<sup>9)</sup>より固着剤とは異なる空洞の熱物性を固着剤領域に一樣に分散化させることによって、健全な固着剤とは異なる等価熱物性として置き換える。図-3に示すように固着剤内部に離散的に発生した亀裂と同体積の空洞を固着剤内部に一樣に分散させる。それによりアンカーボルトを電磁誘導加熱した際のアンカーボルトから外部への熱拡散、アンカーボルト温度が等量となると考えられる。したがってアンカーボルトにおける固着剤内部に発生した複数の亀裂を模擬した、分散亀裂モデルを作成することが出来る。

物質の断熱性状を表す指標は、熱伝導率に代表される。したがって、アンカーボルト上面温度の上昇量によって劣化性状を評価する本手法において、熱伝導率の考慮は必要不可欠である。したがって、本研究では既存の分散系熱伝導率の推定式(1)を用いて亀裂を分散させたモデルの等価熱伝導率を算出した。

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{epo} \cdot \lambda_{po}}{\varphi \lambda_{epo} + (1 - \varphi) \lambda_{po}} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda_{epo}$ は健全なエポキシ樹脂、 $\lambda_{po}$ は空洞、 $\bar{\lambda}$ は空洞が分散化されたエポキシ樹脂の熱伝導率を示し、 $\varphi$ はエポキシ樹脂に対する空洞の体積割合を示す。

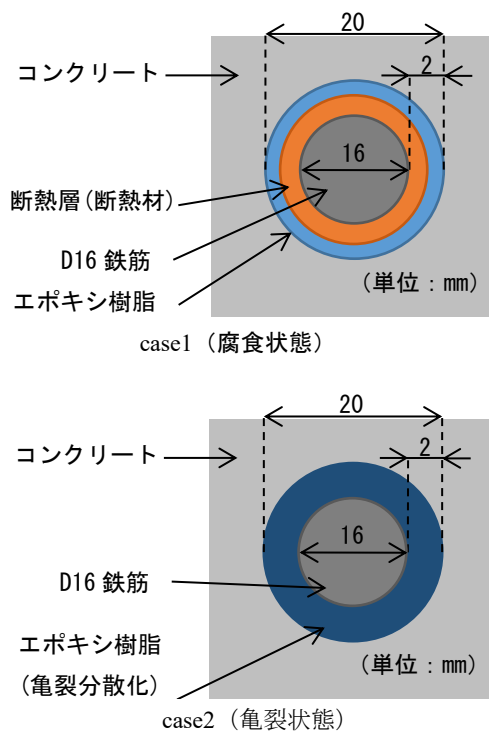


図-4 付着劣化を模擬したアンカーボルト上面図

表-1 解析条件

	比熱 [J/kg°C]	熱伝導率 [W/m°C]	初期温度 [°C]	メッシュサイズ [mm]
コンクリート	1050	1.6	20	5~50
鉄筋	450	80	20	5
断熱材	1420	0.043	20	2
エポキシ樹脂	795	0.209	20	2

## 2.1 電磁誘導解析

アンカーボルトの腐食すなわちその周囲に断熱層が独立して存在する状態（腐食状態）、固着剤劣化すなわちその内部に亀裂が存在する状態（亀裂状態）、およびアンカーボルトが健全な状態の比較を行うために図-1に示す電磁誘導コイルを用いて電磁誘導解析を行った。図-4に示す case1 は腐食状態として、アンカーボルト周囲にエポキシ樹脂における体積割合を 0.5 とする断熱層を独立させた。case2 は亀裂状態として、固着剤領域に case1 と同様の断熱材体積を一様に分散化した。同図に示す case1, case2 と健全状態のエポキシ樹脂を使用し解析を行った。

解析で使用したコンクリート、アンカーボルト（鉄筋）、コルク、エポキシ樹脂の熱的物性値と初期温度、メッシュサイズを表-1に示す。なお、case2 における熱伝導率は前述の式(1)を用いて、健全なエポキシ樹脂の熱伝導率 0.209 W/m°C、断熱材の熱伝導率 0.043 W/m°C、空洞体積

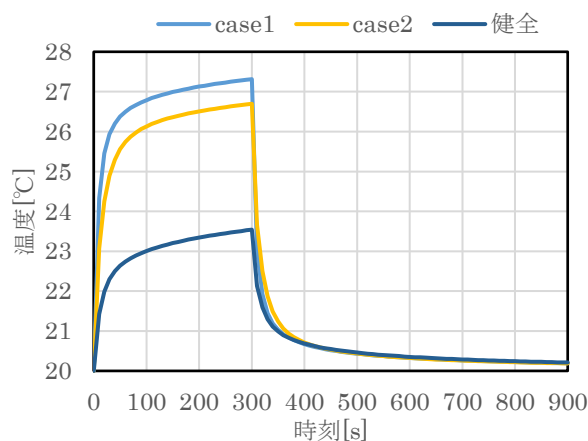


図-5 解析結果

表-2 アンカーボルト上面温度

	上面温度	温度増加
健全	23.54°C	0
case1	27.31°C	16.0%
case2	26.70°C	13.4%

割合 0.5 より算出し、0.071 W/m°Cとした。また、コンクリートのメッシュサイズはアンカーボルト中心から半径 15mm までの領域を 5mm、30mm までの領域を 15mm、30mm 以降は 50mm とした。コイルに付加する電流値は 440A、周波数は  $29 \times 10^3$  Hz、外気温は 20°Cとした。加熱時間は 300 秒である。

解析で得られたアンカーボルト上面温度の加熱後 600 秒までの温度変位を図-5に、加熱終了直後のアンカーボルト上面温度の値と、健全状態のエポキシ樹脂のアンカーボルト上面の温度増加量を基準とした温度増加率の値を表-2に示す。case1 および case2 ともにアンカーボルト上面の温度は、健全な状態に比べ低くなっており、本手法により劣化の有無の判断が可能である。case1 では断熱層の存在によりアンカーボルトからエポキシ樹脂への熱拡散が抑制されるため、アンカーボルト上面での温度は case2 よりも高くなる。一方、case2 ではエポキシ樹脂内部に存在する亀裂の体積割合によって、健全な状態に対する温度増加率は異なるため、本手法の適用限界を明確にしておく必要がある。

## 3. 亀裂分散化手法を用いた本システムの適用限界の解析的検討

本章では、亀裂分散化状態としてアンカーボルト周囲の固着剤であるエポキシ樹脂における空洞の体積割合  $\phi$  を表-3に示すパラメータで設定し電磁誘導解析を行い、本システムの適用限界を解析的に検討した。

表-3 空洞割合に対する熱伝導率

空洞割合 $\phi$	離散化熱伝導率 $\bar{\lambda}$ [W/m $^{\circ}$ C]
0(空洞無し)	0.209
0.06	0.146
0.08	0.133
0.1	0.122
0.2	0.086
0.3	0.067
0.4	0.054
0.5	0.046

本システムによる劣化診断に際し、限界閾値を設定しなければならない。長田等<sup>9)</sup>は、赤外線サーモグラフィを用いた空洞診断を行う際の限界閾値に関する研究を実施し、その値が 0.5 $^{\circ}$ Cであれば判別性に十分な信頼があるとされている。しかし、周囲の気温や湿度といった環境条件や測定箇所における日射の有無により測定可能な温度差は変化する。本システムでは、前述の環境条件等を考慮し、赤外線サーモグラフィカメラが見分けることが出来る温度差に余裕をもたせ、健全なアンカーボルト上面温度との差が 1 $^{\circ}$ C以下を適用限界とした。

### 3.1 電磁誘導解析

解析で使用したコンクリート、アンカーボルト(鉄筋)、エポキシ樹脂の熱的物性値と初期温度、メッシュサイズを表-1に示す。このとき、エポキシ樹脂の熱伝導率は式(1)により算出した表-3に示す空洞の体積割合 $\phi$ に対応する離散化熱伝導率 $\bar{\lambda}$ の値を使用した。また、コンクリートのメッシュサイズ、電流値、周波数、外気温、加熱時間は前章と同様とした。

解析で得られたアンカーボルト上面の加熱後 600 秒までの温度履歴を図-6に、表-3で示したエポキシ樹脂における空洞の体積割合 $\phi$ に対応する加熱終了直後のアンカーボルト上面温度の値と、空洞無しすなわち健全なエポキシ樹脂を用いたアンカーボルト上面温度増加を基準とした温度増加率の値を表-4に示す。図-6より、エポキシ樹脂の空洞体積割合が小さいほど温度上昇量が小さいことがわかる。また、表-4より、エポキシ樹脂の空洞体積割合が 0.06 のとき、健全なエポキシ樹脂を用いたアンカーボルト上面との温度差が 0.83 $^{\circ}$ Cと 1 $^{\circ}$ C以下となり、本システムの適用限界となることがわかった。

以上の結果より、本システムではアンカーボルトの腐食および固着剤の劣化により発生する固着剤内部の複数の亀裂をアンカーボルト周囲に充填されたエポキシ樹脂層に様に分散化させ、エポキシ樹脂における空洞体積割合が 0.08 程度まで、評価可能であることがわかった。

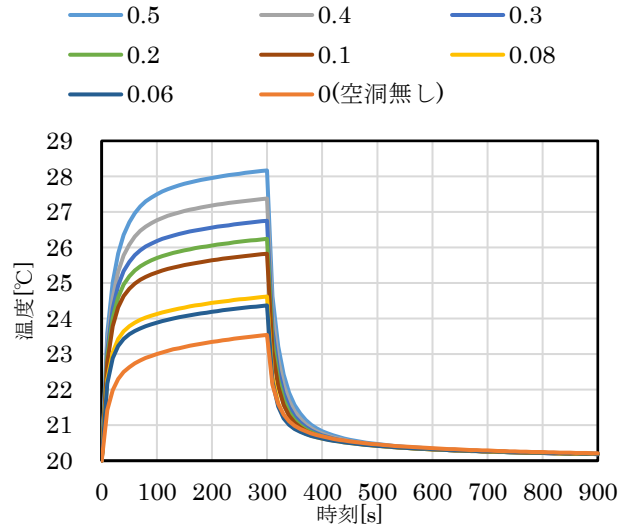


図-6 解析結果

表-4 アンカーボルト上面温度

空洞割合 $\phi$	上面温度	温度増加率
0(空洞無し)	23.54 $^{\circ}$ C	0
0.06	24.37 $^{\circ}$ C	3.5%
0.08	24.62 $^{\circ}$ C	4.6%
0.1	24.86 $^{\circ}$ C	5.6%
0.2	25.98 $^{\circ}$ C	10.4%
0.3	26.93 $^{\circ}$ C	14.4%
0.4	27.83 $^{\circ}$ C	18.2%
0.5	28.17 $^{\circ}$ C	19.7%

なお、本手法による実構造物におけるアンカーボルトの腐食性状や固着剤の劣化性状(亀裂発生性状)の手御量的評価手法であるが、まず、健全状態におけるアンカーボルト表面の温度性状(上昇量)は初期温度と環境条件によって唯一に決定される量である。この唯一の量と実構造物におけるアンカーボルト上面温度の実測値との比較により、劣化の存在が判別できる。さらに、温度差を入力値として逆解析を実施することで劣化の程度(亀裂の体積比など)も評価可能になると考えられる。

## 4. 電磁誘導コイルの配置位置による劣化診断手法の高機能化

実構造物に置けるアンカーボルトの施工箇所は他の構造部材と近接しており狭い箇所が多い。したがって、大きな規模の電磁誘導コイル、並びに電源装置を実現場で運用することは困難であると考えられる。前章までで検討してきた電磁誘導コイルは、2つのコイルを合わせて 550mm $\times$ 690mm の大きさを有している。また、電源装置は一般的に出力可能な電流値が大きいほど出力電力も大

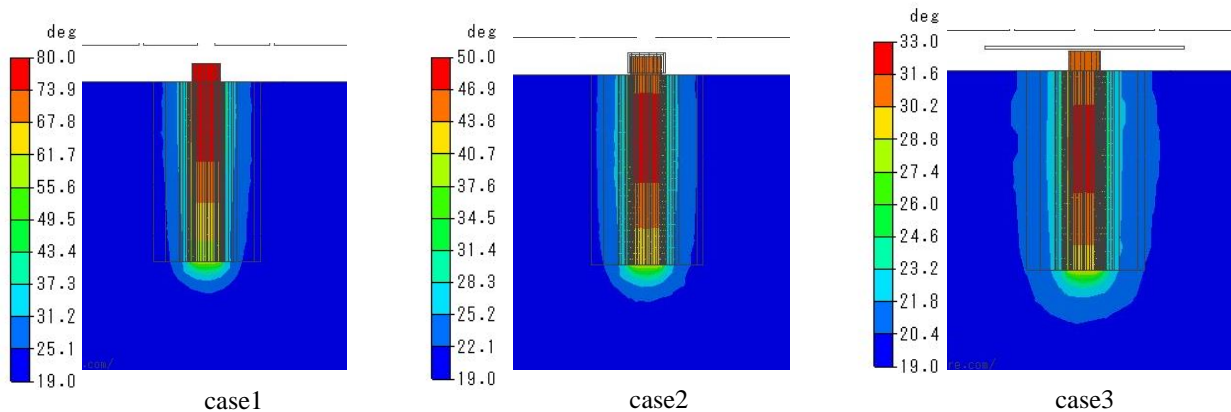


図-9 解析結果

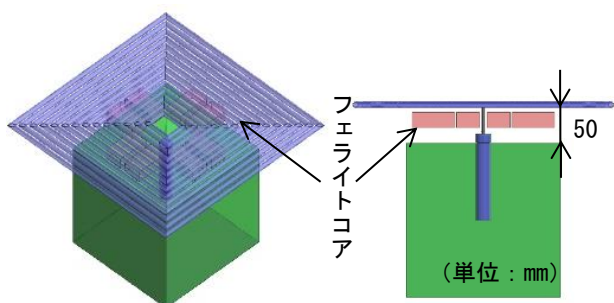


図-7 小型化させた電磁誘導コイル

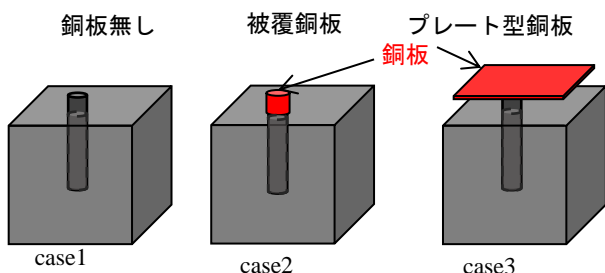


図-8 銅板の設置箇所

きくなり、それに伴い電源装置も大規模化する。

したがって、本章では本システムにおける劣化診断手法の高機能化として、コイルの形状の小型化、およびコイルに付加する電流値を小さくし、使用する電源装置の出力を抑えた小規模な電源装置を使用するシステムを解析的に検討する。

#### 4.1 電磁誘導解析に基づく電磁誘導コイルの小型化

##### (1) コイル形状の検討

コイル形状は図-7に示すような正方形コイルを1つ用いることとする。コイルの巻き数は14巻き、コイルの大きさは1辺225mmの正方形である。フェライトコアは同図の位置に8個配置した。

##### (2) 銅板の設置

アンカーボルトの加熱むらの抑制を図るため、磁場の発生を制御可能な銅板を用いた検討を行う。このとき銅板は電磁誘導コイルと試験体の間に設置する。銅は比透

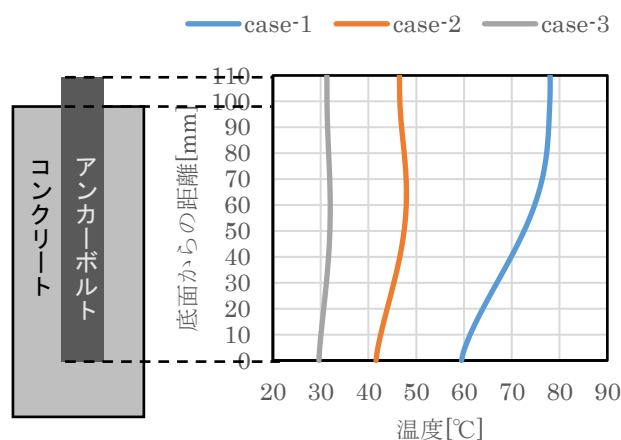


図-10 アンカーボルトの温度分布

磁率が低く常磁性体に分類される。そのため、電磁誘導においては比較的弱く磁化され通過した磁束を弱める効果が見られる。アンカーボルトを銅板で覆う面積が大きいほど加熱むらは抑制されるが、それに伴い磁場の発生を弱める範囲が広くなりアンカーボルト上面の温度上昇量も小さくなる。

銅板の有用性を調べるために、銅板の設置箇所による解析を行った。銅板を設置した位置を図-8に示す。case1は銅板無し、case2は厚さ1mm、外径20mmの筒状の銅板でアンカーボルト露出部を覆い被せるよう設置、case3はアンカーボルト上面から1mm離れた位置に100mm×100mm×1mmの寸法の銅板を設置した。

解析で使用したコンクリート、アンカーボルト(鉄筋)、エポキシ樹脂の熱的物性値と初期温度、メッシュサイズを表-1に示す。また、コンクリートのメッシュサイズは前章と同様とした。コイルに付加する電流値は140A、周波数は10 Hz、外気温は20°Cとした。加熱時間は300秒である。

解析で得られた加熱終了時のアンカーボルト断面のコンター図を図-9に、アンカーボルトの断面中心の温度分布を図-10に示す。銅板を設置していないcase1

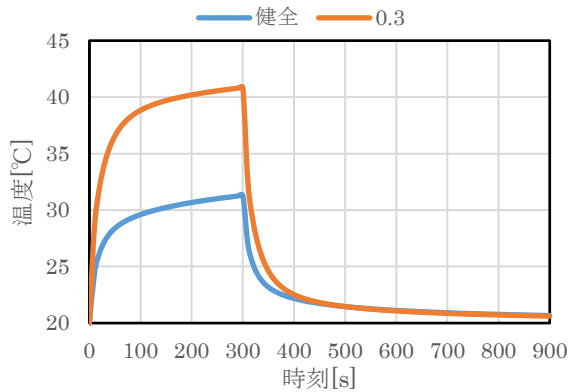


図-1 1 解析結果

ではアンカーボルト露出部の温度が最も高く埋設部にかけて温度差が発生している。銅板を設置している case2, case3 では最高温度に達している位置が埋設部であり, case1 に比べ均質に加熱されていることがわかる。さらに, 図-1 0 より case2, case3 を比較すると case3 はよりアンカーボルトの加熱むらが抑制されており, 温度上昇量は少ない。したがって, 図-8 の case3 に示す銅板形状で設置することでアンカーボルトの加熱むらは低減し, 加熱も抑制されることがわかる。

#### 4.2 高機能化システムを用いた劣化診断手法

図-8 に示す case3 のモデルを用い, アンカーボルト周囲のエポキシ樹脂が健全状態と劣化状態の解析を行った。劣化状態に関しては, 前述の亀裂を分散化させる手法を用いエポキシ樹脂における空洞体積割合が 0.3 とし式(1)より熱伝導率を算出し解析に用いた。

解析で得られたアンカーボルト上面

温度の加熱後 600 秒までの温度変位を図-1 1 に示す。空洞体積割合が 0.3 とした最高温度は, 加熱 300 秒時点で健全状態と比べ 10°C ほど高く温度上昇している。したがって, 図-7 に示した電磁誘導コイルを用いて, 図-8 に示す case3 の位置に銅板を配置することで本システムの高機能化が可能であることがわかった。

#### 5. 結論

本研究は, 既往の研究における最適システムを用いてアンカーボルトの腐食劣化および固着剤の劣化により発生する固着剤内部の複数の亀裂を, アンカーボルトの定着に用いる固着剤領域に一樣に分散化させることで劣化性状を模擬し, アンカーボルト上面の温度性状から定着性状を評価し本システムの適用を明らかにした。

また, 実構造物におけるアンカーボルトの劣化診断を想定し, 本システムにおける劣化診断手法の高機能化として既往の研究における最適システムの小規模化を検討した。

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) アンカーボルトにおける固着剤に, 劣化による亀裂を分散化させた等価熱伝導率を設定し解析を行った。本システムの適用限界の温度差を 1°C としたとき, 固着剤の体積に対する空洞の体積割合が 0.08 程度まで, 評価可能である。
- (2) 電磁誘導加熱において, 銅板を電磁誘導コイルとアンカーボルトの間に設置することで加熱むらの発生を抑制しつつアンカーボルトを加熱することが出来る。
- (3) 設置する銅板が大きいほど加熱むらを低減させることが出来るが, それに伴いアンカーボルトの温度上昇量も減少する。
- (4) 本研究の範囲内においては, 最適システムを高機能化した電磁誘導コイルに, 100mm×100mm×1mm の寸法の銅板を設置することで加熱むらをほとんど発生させることなくアンカーボルトを加熱することが出来, 定着性状を評価することが出来る。

#### 参考文献

- (1) 木村貴圭, 内田慎哉, 宮田弘和, 鎌田敏郎: 電磁パルス法による接着系あと施工アンカー固着部の非破壊評価手法に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2116-2121, 2014
- (2) 大下英吉, 堀江宏明, 長坂慎吾, 谷口修, 吉川信二郎: 電磁誘導加熱によるコンクリート表面温度性状に基づいた RC 構造物の鉄筋腐食性状に関する非破壊検査手法, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.1, pp.76-92, 2009
- (3) 谷口修, 重松文治, 堀江宏明, 大下英吉: 電磁誘導加熱を利用したコンクリート表面の温度性状に基づく RC 構造物の空洞検出システムの開発に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.173-185, 2008.2
- (4) 東田梨穂, 大下英吉: アンカーボルトを模擬した鉄筋の定着劣化性状評価に関する非破壊検査手法の基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1270-1275, 2022
- (5) 根本早季, 今井嵩弓, 大下英吉, 林詳悟: 鉄筋腐食推定手法の剥離空洞存在領域への拡張, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1825-1830, 2013
- (6) 長田文博, 山田裕一, 虫明成生, 赤松幸生: 熱画像による鉄道高架橋コンクリートの空洞診断手法の開発, 土木学会論文集 No.760/V-63, pp.121-133, 2004.5