論文 熱画像処理に基づくコンクリート内部の鉄筋腐食評価システム構築 に関する基礎的研究

茂木 淳^{*1}・山越 孝太郎^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨:著者ら¹⁾は,新たな非破壊検査として,コンクリート内部の鉄筋を強制加熱するこ とによるコンクリート表面の経時温度変化から鉄筋腐食の有無および程度に関するシステ ムの構築に着手しており,既往の研究までの成果として,腐食した鉄筋の熱的特性を定量 的に解明しなければならないことおよび鉄筋に対する強制加熱手法に問題点が残された。 本研究では,昨年度の問題を解明するとともに,腐食評価システムの構築を行った。 キーワード:非破壊検査,熱的特性,強制加熱手法,鉄筋腐食

1. はじめに

著者らは,既にコンクリート内部の鉄筋腐食 の有無および程度に関する新たな非破壊検査と して,鉄筋を強制的に加熱し,熱画像により測 定されたコンクリートの表面温度履歴から間接 的にそれらを評価可能なシステムの構築に着手 した。しかしながら,既往の手法では,鉄筋の 加熱手法に問題があり,鉄筋表面のみが加熱さ れることによって加熱終了後の自然冷却過程に おいて鉄筋の腐食の有無によるコンクリート表 面温度の差異が明確に表れていない。すなわち, 上述の性状を改良するには,鉄筋の腐食を形成 する錆の熱伝導率,比熱および強制加熱により 蓄えられた鉄筋自体の熱量の増加を考慮する必 要があるわけであった。

本研究では,鉄筋の熱的特性を定量的に解明 することおよび鉄筋全断面が一様な温度となる ような強制加熱手法の再検討を行い,加熱手法 として低周波型交流電流を用いて鉄筋自体を強 制的に加熱させ,コンクリート表面温度を赤外 線センサにより測定し熱画像処理による鉄筋の 腐食評価システムの構築を行った。

2. 鉄筋内部加熱試験

既往の研究で用いた加熱装置は周波数 500Hz

の高周波による直流パルス TIG 溶接機である。 高周波電流は,その性質と通電により鉄筋表面 にしか流れないことから鉄筋表面部分は温度上 昇することに対し,鉄筋内部までは一様に加熱 することが不可能であった。そこで,本研究で は加熱装置に低周波である 50Hz の交流アーク 溶接機を用い,加熱により鉄筋全断面が一様な 温度上昇となるかどうかの検討を行うこととし た。

2.1 実験方法

交流アーク溶接機を用いて長さ 50cm の D13 異形鉄筋に一定出力電流を流し,通電箇所の鉄 筋温度が45 になるまで通電させた。鉄筋への 加熱は,鉄筋の温度制御を行う両端から4cmの 端部領域は剥き出しとし,その他の領域の鉄筋 表面は外気の影響を防止するため発泡スチロー ルで覆った状態で実施した。鉄筋表面温度の測 定は,図-1に示すシステムのように出力電流 を流し鉄筋を45 まで温め,その後鉄筋表面に 覆われている発泡スチロールを取り除いた時点 から1分間隔で30分間実施した。鉄筋表面の温 度測定には赤外線センサを使用し,その性能に 関しては表-1に示す通りである。鉄筋から赤 外線センサまでの距離は100cm であり,室温は 23 の一定条件で実施した。なお,本計測にお

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)
*2 NEC 三栄㈱ 技術本部赤外機器開発部
*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)



表 - 1	赤外線ヤンサの仕様
1. 1	

検出器	2次元非冷却センサ
測定精度	フルスケールの±2.0%
最小検出温度差	0.08
観測測定範囲	- 20 ~ 100
フレームタイム	60フレーム/秒



図 - 2 鉄筋解析モデル

いては,鉄筋表面温度を評価する際,鉄筋表面 色に依存する放射率を無視し,放射率を一定(=1.00)とした。

2.2 熱伝導解析に基づく鉄筋内部温度の評 価

鉄筋内部の温度測定は不可能なため,実験結 果から得られた経過時間に対する鉄筋表面温度 および実験と同様な状態において熱伝導解析を 実施した結果を比較することにより鉄筋内部温 度を評価した。

解析モデルは,図-2に示すように実験で用 いた鉄筋の 1/4 モデルとし,初期条件は内部の全 節点には温度が不明確なため 35,47 という温 度を変化させて与えた。また,本解析に用いた 熱的特性は,鉄筋の熱伝導率に関しては一般的 な値である 82.79(W/m・)²⁾,比熱は 0.60(kJ/kg・)²⁾とし,表面の熱伝達率は



11.63(W/m²・)²⁾とした。

図 - 3 (a)は強制加熱終了時点での鉄筋軸方 向に 2cm 毎の鉄筋表面温度の実験結果であり, 温度制御した 45 より高い表面温度を示して いる。このことは,加熱段階の際,温度制御を 行う箇所が外気に接していることおよび鉄筋表 面に発泡スチロールで覆っているため,外気の 影響を受けず鉄筋に熱エネルギーが蓄積された ことによるものから,このような温度性状を示

したものと判断できる。また,同図(b),(c)およ び(d)は,同図(a)に対応した位置における強制 加熱終了時点からの温度分布であり、それぞれ 自然冷却 10,20,30 分経過した時点での実験結果 および解析結果である。解析モデル表面の節点 には、同図(a)に示す強制加熱終了時点での温度, 全内部節点に 35 ならびに 47 を与えたもの である。なお,図中に示す実線および破線は仮 定した内部節点 35 および 47 の解析結果を 示している。内部に47 の温度与えた解析結果 はほぼ実験結果と良好な一致を示している。す なわち,鉄筋内部の温度が約47 であるという 解析結果から判断すると,この値は制御した温 度値 45 とほぼ同じ温度であり,本温度制御シ ステムは鉄筋全断面を一様な温度に制御可能で あるものと思われる。

3. 腐食鉄筋の熱的特性

熱伝導率および比熱である熱的特性は,本研 究において必要不可欠なパラメータである。鉄 筋の腐食を形成する錆の熱的特性についての研 究は殆ど報告されておらず,鉄筋が腐食すると その組織は非常に粗となり,鉄筋の腐食領域に おいては,腐食していない鉄筋に比べて熱伝導 率は小さく,比熱は大きくなるという定性的な 観点から,既往の熱伝導解析¹⁾に用いた錆によ る熱伝導率は健全な鉄筋の 1/10,比熱に関して は 10 倍の値を適用したわけである。

したがって,既往の研究をより明確に評価す るためには,錆の熱的性質の定量化が必要であ る。そこで,本章では錆の熱的特性について実 験的に評価した。

3.1 混合法³⁾

加熱炉を用いて一定温度とした錆を低温の水 に投じて水の温度上昇を測定した実験値より錆 の比熱を測定した。なお,錆は10gの粉末状に したものであり,水はビーカーに100g入ったも のを採用した。水温の温度測定には熱電対を使 用し,測定回数は10回とした。

錆の放出する熱量と水が受け取る熱量が等し

いことから,熱量の保存則は次式で表すことが できる。

$$m_{c}c_{c}(q_{c}-q) = m_{w}c_{w}(q-q_{w})$$
 (1)

そして,式(1)を展開することによって,比熱は 次式で表すことができる。

$$c_{c} = \frac{m_{w}c_{w}(q - q_{w})}{m_{c}(q_{c} - q)}$$
(2)

ここで, c_w , m_w は,水の比熱および質量を 表し, c_c , m_c は錆の比熱および質量を表して いる。また, q_w は水の初期温度, q_c は一定温 度まで加熱され水に投じる直前の錆の温度を示 し,qは混合されてからビーカー内の水温が熱 平衡に達したときの温度を示している。

3.2 実験結果

前節の実験方法および算出方法を併用し,計 10回実施した実験値を表 - 2に示す。表 - 2か ら錆の比熱は,0.87~1.85(kJ/kg・)の範囲にあ リ,全実験結果とも腐食していない鉄筋の一般 的な比熱の値である0.60(kJ/kg・)²⁾より大きな 値を示している。すなわち,錆の組織が健全な 鉄筋に比べて粗となり,その間には空気や水分 が存在する状態によって比熱が大きくなる。な お,錆の熱伝導率は実験から算出が困難なため, 本章で得られた錆の比熱を用いて逆解析的に導 くものとした。

表 - 2 錆の比熱

実験回数	比熱値(kJ/kg・)	実験回数	比熱値(kJ/kg・)
1	1.27	6	0.91
2	0.91	7	1.02
3	1.08	8	1.42
4	1.60	9	0.87
5	1.85	10	1.03
比熱の平均値		1.20	

- 4. 鉄筋強制加熱に伴う腐食状態によるコン クリート表面温度
- 4.1 実験方法

本実験に用いた供試体は,図-4に示すよう に寸法 10×10×20cm の角柱供試体であり,か ぶり厚さ3cmの位置に長さ40cmのD13 異形鉄



筋を配置した。鉄筋は,同図に示すように長さ 方向に全面非腐食状態,全面腐食状態を有する 2 種類とし,全面腐食鉄筋の腐食領域は表面か ら約 1mm のものを使用した。なお,コンクリ ートの配合は,表-3に示す通りである。

図 - 4 に示した供試体の鉄筋部分の両端に交 流アーク溶接機を用いて,一定出力電流を流し, 鉄筋の温度制御部分を 58 まで一様に加熱し た。なお,鉄筋表面温度の制御部分は,コンク リート近傍部の鉄筋位置で行った。鉄筋への加 熱は,外気温の影響の防止および鉄筋に供給さ れる熱のみをコンクリートに直接伝えるために 断熱材として発泡スチロールを用い,鉄筋とコ ンクリートの底面部および側面部を覆った状態 で行った。コンクリート表面温度の測定は,図 - 1と同様なシステムにより,出力電流を流し た時点から開始し,測定時間は60分,測定イン ターバル10秒とした。なお、供試体から赤外線 センサまでの測定距離を 100cm とし, 室温は 20 の

一定条件で

実施した。

単位量(kg/m³)

細骨材

840

粗骨材

1030

セメント

257

4.2 実験結果

図 - 5 (a) および(b) は強制加熱終了から 1500 秒経過した時点での供試体表面の熱画像 であり、それぞれ全面非腐食および全面腐食の 鉄筋に対する結果である。

この熱画像より,鉄筋腐食の有無によってコ ンクリート表面温度に差異が明確に表れている。 しかしながら,鉄筋腐食の有無という情報が既 知であるため,図-5に示す腐食した鉄筋を有 するコンクリート表面温度の方が腐食していな い表面温度よりも低いものとなることが自明と なるわけである。すなわち,鉄筋腐食の有無を 判断するためには,より詳細な温度の情報が必 要になってくるわけである。図 - 6 (a)および (b)は, a, b 点における全面非腐食および全面 腐食の鉄筋におけるコンクリート表面温度の経 時変化を示している。なお, a および b 点は, 図-4に示すように,コンクリートの中心断面 からそれぞれ 6cm の距離に位置する点である。 図 - 6 (a)および(b)の比較から,腐食の有無に より、コンクリート表面温度の最大値および自

コンクリートの配合表 表 - 3

(%)

45.5

水

159



図-7 鉄筋腐食の有無による熱移動

然冷却過程における最大値からの低下割合が異 なることが分かる。すなわち,比熱が低いと熱 を供給され易く放出し易いこと,逆に比熱が高 いと熱が供給され難く放出し難いという観点か ら,鉄筋腐食の有無に伴い,図-7に示すよう な熱移動に差異が生じる。鉄筋からコンクリー トへの熱移動が大きい全面非腐食の供試体はそ の熱移動を生かし、コンクリート表面を加熱し、 最大値を超えてからも熱移動を行うため最高温 度が高く 温度低下割合は緩やかとなる。一方, 鉄筋からコンクリートへの熱移動が小さい全面 腐食の供試体においては、比熱が高い腐食領域 で温度が保たれるため,コンクリート表面温度 が上がらず,外気温の影響を受け,温度が急激 に低下するものと考えられる。したがって,全 面非腐食の供試体に比べ最高温度が低く,温度 低下割合は急となる。

次節ではこのような鉄筋腐食の有無によるコ

表-4 解析に用いた熱的特性

材料	熱伝導率 (W/m・℃)	比熱 (kJ/kg・℃)
コンクリート	2.50	1.05
腐食していない鉄筋領域	82.79	0.60



ンクリート表面の温度性状を熱伝導解析により 評価し,錆の熱伝導率を導くものとした。

4.3 熱伝導解析の適用性評価

錆の熱伝導率を同定するに際し,熱的特性が 全く異なる物質同士が混在するこの種の現象に 対して,熱伝導解析が適用可能であるか否かを 判断する必要がある。そして,その適用性が評 価されれば,逆解析的に算出された錆の熱伝導 率はある程度信頼性のある値であるものと考え られる。まず,前節に示した全面非腐食の鉄筋 を有する実験結果に対して熱伝導解析を行い, 実験結果と解析結果との対比により熱伝導解析 手法の適用性評価を行うこととする。

解析モデルは,図-8に示すようにかぶり 3cmの位置に全面非腐食を配置したものであり, 10×10×20cmの形状寸法に対する1/2モデルと した。解析に用いた熱的特性は,表-4に示す ような一般的な値を適用した。また,外気およ び発泡スチロールの熱伝達率は,それぞれ 11.63²¹,1.74(W/m²・)²¹とした。

図 - 9は全面非腐食の鉄筋を有する a 点での 実験結果と解析結果を比較し示したものである。 解析結果の温度低下割合が若干ながら急である ものの,本実験結果の傾向を精度良く評価して いる。したがって,本解析手法の適用性は評価 されたものと判断できる。



4.4 逆解析的手法に基づく錆の熱伝導率

全面腐食を有する鉄筋における実験結果と前 節で適用性が評価された熱伝導解析手法を用い た解析結果を比較することにより,錆の熱伝導 率を定量的に評価した。

解析モデル,コンクリートおよび腐食してい ない領域の熱的特性は,前節と同じものを使用 した。腐食領域は表面から 1mm としその比熱 は混合法より算出された平均値である 1.20(kJ/kg・),熱伝導率は 1.16,8.13, 82.79(W/m²・)の3通りの値を適用させた。

図 - 10は,全面腐食を有する a 点の実験結 果と解析結果を比較したものである。なお,図 中に示す実線,破線および点線は,それぞれ熱 伝導率1.16,8.13,82.79を与えた解析結果であ る。図 - 10に示すように,熱伝導率の値を変 化させて与えたが,コンクリート表面温度に差 異が生じないことが分かる。このことは,鉄筋 を熱源とするコンクリート表面は熱伝導率に依 存せず,鉄筋を熱源とするコンクリートの表面 温度変化は鉄筋腐食の有無以外は全て同じ状態 であれば,比熱のみに依存することを示してい る。したがって,上述の状態においては鉄筋の 比熱が,図-7に示すような一連の熱移動に影響を及ぼす結果として,最高温度および低下勾配に影響を及ぼすものと判断できる。

しかしながら,本研究で対象とした鉄筋腐食 領域は,鉄筋表面から約 1mm であり,より広 範囲の腐食領域を有する状態における熱伝導率 の影響に関しては未解明であるため,錆の熱伝 導率を定量的に評価しなければならないことは 言うに及ばない。

5. まとめ

本研究では,鉄筋腐食性状評価に対する新た な非破壊検査を目的として,鉄筋の熱的特性に 起因するコンクリート部材の表面温度変化から 評価可能なシステムの構築に着手した。

本研究から得られた結果を以下にまとめる。

- 低周波交流アーク溶接機を用いた鉄筋強制 加熱は,鉄筋全断面を一様な温度に制御可 能であることが確認された。
- 2) 錆の比熱は 0.87~1.85(kJ/kg・)の範囲にあ り,一般的な鉄筋の比熱より高いことが確 認された。
- 3) 鉄筋を熱源とした強制加熱によるコンクリート部材の表面温度変化は腐食の有無により,最高温度および低下割合に差異を生じ,本研究から鉄筋腐食を評価できる。
- 4) 錆の熱伝導率に関しては、本研究から定量 的な値は困難なことから、今後の課題とし たい。

参考文献

- 茂木淳,一ノ瀬晴幸,大下英吉:熱画像処 理に基づく鉄筋コンクリート部材の劣化性 状評価システムに関する基礎的研究,コン クリート工学年次論文報告集,Vol.24,No.1, pp1593-1598,2002
- 2) 文部科学省国立天文台:理科年表,丸善株 式会社,2002
- 3) 国分正胤:土木材料実験,技報堂出版株式 会社,2000