

# 論文 赤外線法による RC 柱の鋼板補強の検査方法に関する研究

山下 和博<sup>\*1</sup>・土井 希祐<sup>\*2</sup>

**要旨:** R C 柱の鋼板巻立て補強工法を想定し、赤外線法による、鋼板とコンクリート躯体間への充填材の注入状況確認実験、並びに充填材硬化後の空隙部検出実験を行った。次いで、数値化された赤外線画像データを演算処理することにより、非充填部を客観的に推定する方法を提案し、本実験の結果に基づいて、その妥当性を検討した。その結果、本実験の範囲内では、赤外線法により、有機系充填材の注入状態の確認、および有機系・無機系充填材硬化後の空隙部検出を行い得ることが明らかとなった。

**キーワード:** 赤外線法、鋼板補強、充填材、注入、空隙部、検出精度

## 1. 研究目的

阪神淡路大震災では、高速道路高架の橋脚が破壊されるなど、大きな被害を受けた。これらを補修・補強するために、R C 造の橋脚や建築物の柱を鋼板で巻き立てる工法が採られている。この方法では、鋼板とコンクリート部分との間に充填材を注入し、両者を接着させて力を伝達させるため、充填材の注入が不十分であると鋼板補強の効果は薄れてしまう。そのため、注入不十分箇所を早期に発見することが必要とされている。

充填材の注入不十分箇所の検出法には、打診法や赤外線法などがあるが、現在では打診法が主流で、赤外線法は予備調査に用いられる程度である。これは赤外線法が簡易性・経済性においては優れているが、信頼性が定量的に示されていないためである<sup>1)~4)</sup>。

そこで、本研究では、R C 柱の鋼板補強を想定し、モデル試験体を用いた充填材の注入不十分箇所検出実験を行い、赤外線法の適用性および信頼性を検討することを目的としている。

## 2. 実験計画

### 2. 1 試験体

試験体の形状を図 1 に示す。図 1 において陰影をつけた三角形の部分を空隙部、他の部分を充填部とした。図 2 に示すように、鋼板と

コンクリート版のアキ寸法の精度を確保する目的も兼ねて、コンクリート版の、充填材注入部と空隙部の境界に、所定アキ寸法を高さとするリブを設けた。

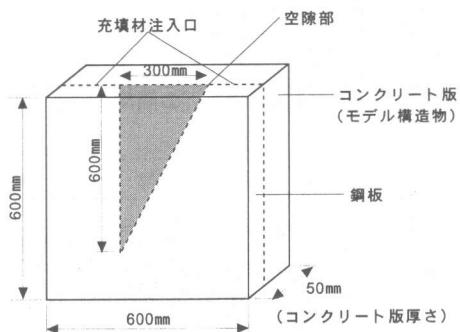


図 1 試験体の形状

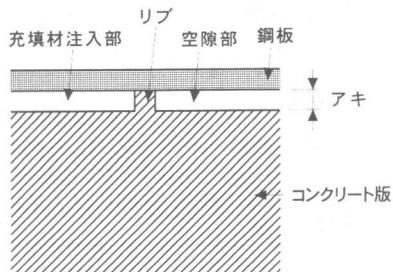


図 2 試験体断面

\*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境システム科学専攻（正会員）

\*2 新潟大学助教授 工学部建設学科 工博（正会員）

## 2.2 試験体の種類・充填材の特徴

実験変数は、鋼板の板厚(4.5mm, 6mm, 9mm), 空隙部のアキ寸法(2mm, 5mm, 8mm, 20mm, 40mm), および充填材種別(有機系, 無機系各2種)とし、表1に示す19体の試験体を製作した。使用した充填材の特徴を表2に示す<sup>2)</sup>。

表1 試験体の種類

試験体番号	充填材の種類	鋼板の厚さ(mm)	アキ <sup>*</sup> (mm)
No.1	A	4.5	5
No.2	A	6.0	5
No.3	A	9.0	5
No.4	B	4.5	5
No.5	B	6.0	5
No.6	B	9.0	5
No.7	A	4.5	2
No.8	A	4.5	8
No.9	A	6.0	2
No.10	A	6.0	8
No.11	C	4.5	40
No.12	C	4.5	20
No.13	C	4.5	5
No.14	D	4.5	8
No.15	D	4.5	5
No.16	D	4.5	2
No.17	D	6.0	5
No.18	D	9.0	5
No.19	D	6.0	40

\* アキ:コンクリート版と鋼板との間隔

表2 充填材の特徴

充填材	特徴
A	エポキシ系のコンクリート用接着剤で、特にひび割れ注入用に開発された充填材。低粘度で、湿潤面でも硬化する特性を持つ。
B	スクイズ工法によって注入するため、低粘度で表面張力が小さい充填材。湿潤面では接着力が落ちる特性を持つ。
C	鋼板巻き立て工法の空隙充填材用高流動モルタル。流動性に優れ、かつ、材料分離やブリーディングを起こさない特性を持つ。
D	高注入性・高耐久性を特徴とするスラグ系微粒子材料を応用した充填材。スラリーとしてあらゆるコンクリート構造物のひび割れ・空隙に注入できる特性を持つ。

## 3. 実験方法

### 3.1 充填材の注入状態確認実験

充填材の硬化熱を利用して、硬化反応進行中に注入状態を検査する方法である。本実験では、

図3に示すように、試験体の注入口から充填材を注入し、鋼板表面に現れた熱を赤外線カメラにより、試験体より5.5m離れた位置から撮影した。撮影は、モニターで画像を確認しながら、注入開始直後から10分間隔で約3時間行った。使用した赤外線カメラの仕様を、表3に示す。試験体の赤外線画像データは、モニター装置によりフロッピーディスク(以下、FDと表記)にデジタルデータとして記録される。

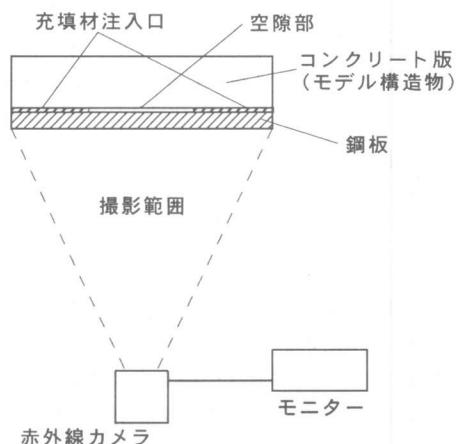


図3 測定方法

表3 赤外線カメラの仕様

走査角	水平15°×垂直10°
走査速度	0.03秒/フレーム
走査線数	100本
検出波長域	3.0~5.4μ
測定距離	20cm以上
冷却方式	アルゴンガス冷却
観測温度範囲	-40~950°C
最小温度分解能	0.1°C
温度設定感度	0.01°C以上
温度精度	フルスケールの±0.4%
記録画素数	25600画素(水平256×垂直100)
ビット数	8ビット

### 3.2 逆転現象を利用した空隙部検出実験

充填材が硬化した後、試験体を加熱し、空中に放置すると、試験体内部から外部に向かって放熱現象が起り、充填部と空隙部に温度差が生じる。鋼板面が熱を受けている間は、熱抵抗の大きい空隙部の表面温度は充填部より高いが、熱を受けなくなるとこの関係が逆転し、充填部の方が空隙部より表面温度が高くなる。本研究においては、このことを逆転現象と呼ぶ。

熱源として太陽の直射光を利用する方法が、建物外壁のモルタル剥離検査に有効であることが示されている<sup>2)</sup>。ただし、本研究においては、試験体毎の実験条件を一定にするため、図4に示す簡易恒温室を用いて、ガスヒーターにより試験体の鋼板表面を加熱し、太陽熱照射に代えた。加熱は、試験体の鋼板表面温度が40°Cに達するまで行った。加熱後、試験体を簡易恒温室から取り出し、注入状態確認実験と同様、赤外線カメラにより、試験体より5.5m離れた位置から撮影した。撮影は、モニターで画像を確認しながら、加熱終了直後から10分間隔で約1時間行った。

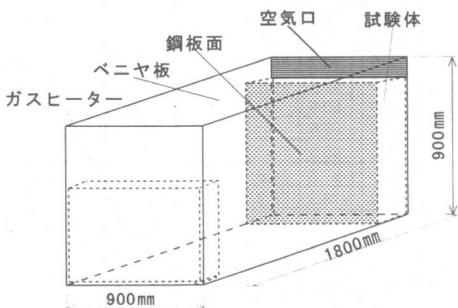


図4 簡易恒温室

#### 4. 実験結果

画像データは、1画像が縦100×横256=25,600画素で構成されている。また、各画素における赤外線放射強度は256階調で記録されている。

本実験では、試験体2体を同時に測定しており、1試験体の画像は約60×100画素で構成されている。本論文においては、各画素の赤外線放射強度値(以下放射強度値と表記)をマトリックス表示したものを数値図と呼ぶ。

#### 5. 結果の解析

以下に、解析の手順を示す。

① 試験体に対応する各画素における放射強度値のコントラストが最大となる画像データを選び出し、注入状態確認実験では前後3回を含めた計7回、空隙部検出実験では前後1回を含めた計3回について、放射強度値を各画素毎に積算した上で、放射強度値の局所的変動を取り除

くため、各画素について、隣接する8画素を加えた計9画素の放射強度値を平均し、当該画素の放射強度値とする平滑化を行う。

② 図5に示すように、試験体において、水平方向にD5～D40の計8箇所の検出精度解析ラインを設定する。

③ ②で設定した検出精度解析ラインに対応する数値図上の各々の行における各画素の放射強度値を3次曲線で近似する。



図5 試験体における検出精度解析位置

④ 本研究においては、放射強度値の変化が最大となる点、即ち近似曲線の変曲点が充填部と空隙部の境界に対応すると仮定した。数値図において、近似曲線から求めた変曲点をそれに応する位置にプロットする。そして、この変曲点に挟まれた部分を、この解析により推定した空隙部(以下、推定空隙部と表記)とする。なお、反曲点が近似区間に存在しない場合は、空隙部検出不可能とした。

⑤ 次に、試験体のコンクリート版と鋼板とを剥がして、実際の空隙部(以下、実空隙部と表記)位置を実測し、実空隙部が存在する位置を④と同様に数値図上にプロットする。なお、本論文においては、充填材が充填部に確実に充填されたことを確認した試験体についてのみ解析対象とした。

⑥ ②で設定した検出精度解析ライン毎に、検出精度を求める。推定空隙部と実空隙部の関係は、図6に示すように、

ケースA：推定空隙部はないが、実空隙部がある場合（見逃し）

ケースB：推定空隙部があり、その部分は実空隙部である場合（正解）

ケースC：推定空隙部はあるが、その部分は実空隙部ではない場合（誤診）

に分類できる。

本研究においては、空隙部の位置、および大きさの双方を一つの尺度で同時に評価するために、以下に示す一致率を用いた。

$$\text{一致率(%)} = \frac{LB}{LA + LB + LC} \times 100$$

ここに、LA、LB、およびLCは、各々ケースA、ケースB、およびケースCに対応する線分の長さを表す。一致率は、充填部と空隙部が完全に位置した場合 100%，全く一致していない場合 0%となる。

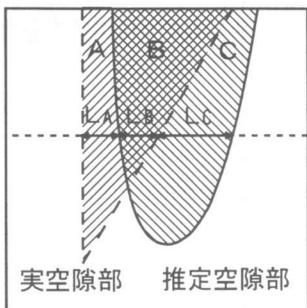


図6 実空隙部と推定空隙部の位置関係

## 6. 検出精度の検討

解析により算出した一致率を表4に示す。

### 6. 1 充填材の注入状態確認実験

無機系充填材（充填材C・D）においては、充填部と空隙部の温度差が小さく、本実験で使用した赤外線カメラでは、注入状態確認実験における空隙部検出はできなかった。これは、単位時間当たりの硬化熱の発生が少ないためであると考えられる。従って、検出精度の検討は、有機系充填材についてのみ行った。

有機系充填材（充填材A・B）においても、

表4 検出精度一覧表

試験体番号	水平方向の位置	一致率(%)		試験体番号	水平方向の位置	一致率(%)	
		注入確認	空隙検出			注入確認	空隙検出
No.1	D5	69.9	95.0	No.9	D5	76.1	89.1
	D10	83.1	85.7		D10	71.1	92.2
	D15	74.1	70.6		D15	66.9	91.3
	D20	67.7	77.8		D20	76.5	76.8
	D25	60.2	78.3		D25	58.9	73.6
	D30	62.5	89.0		D30	46.3	63.2
	D35	61.2	81.3		D35	41.5	—
	D40	77.8	—		D40	—	—
No.2	D5	87.4	88.3	No.10	D5	76.9	68.4
	D10	86.9	82.6		D10	76.6	64.4
	D15	76.2	88.7		D15	67.5	63.4
	D20	69.1	92.7		D20	65.0	65.3
	D25	64.2	90.7		D25	63.1	55.1
	D30	38.8	89.0		D30	56.2	51.5
	D35	53.6	—		D35	74.1	—
	D40	35.8	—		D40	37.5	—
No.3	D5	95.7	92.3	No.13	D5	—	95.5
	D10	83.3	91.4		D10	—	95.2
	D15	74.5	88.2		D15	—	94.6
	D20	73.2	86.1		D20	—	85.2
	D25	67.6	90.4		D25	—	89.1
	D30	60.6	—		D30	—	75.7
	D35	55.6	—		D35	—	58.6
	D40	45.5	—		D40	—	—
No.4	D5	97.8	94.8	No.14	D5	—	83.1
	D10	78.3	88.9		D10	—	85.4
	D15	79.5	84.3		D15	—	81.0
	D20	83.4	85.2		D20	—	81.2
	D25	65.9	75.2		D25	—	78.9
	D30	69.4	48.4		D30	—	65.5
	D35	56.3	—		D35	—	—
	D40	50.4	—		D40	—	—
No.5	D5	79.9	88.3	No.17	D5	—	97.7
	D10	82.9	84.4		D10	—	97.5
	D15	76.2	73.7		D15	—	88.8
	D20	75.1	71.9		D20	—	90.5
	D25	67.7	63.5		D25	—	96.1
	D30	57.2	—		D30	—	69.5
	D35	45.4	—		D35	—	—
	D40	—	—		D40	—	—
No.6	D5	93.5	94.8	No.18	D5	—	92.4
	D10	69.3	89.1		D10	—	100.0
	D15	72.5	77.8		D15	—	90.5
	D20	62.0	83.0		D20	—	89.5
	D25	61.7	83.6		D25	—	75.5
	D30	56.9	83.6		D30	—	71.3
	D35	47.0	—		D35	—	59.6
	D40	29.4	—		D40	—	31.8
No.7	D5	90.9	72.8	No.19	D5	—	87.2
	D10	77.0	72.3		D10	—	90.5
	D15	79.5	65.6		D15	—	86.9
	D20	78.9	61.5		D20	—	82.6
	D25	67.7	57.7		D25	—	74.4
	D30	60.8	—		D30	—	62.4
	D35	50.3	—		D35	—	53.9
	D40	32.4	—		D40	—	37.7
No.8	D5	88.3	78.9	—:検出不可を示す			
	D10	89.0	75.2	—:検出不可を示す			
	D15	81.0	67.3	—:検出不可を示す			
	D20	76.9	61.4	—:検出不可を示す			
	D25	67.4	73.6	—:検出不可を示す			
	D30	64.5	78.8	—:検出不可を示す			
	D35	55.3	54.8	—:検出不可を示す			
	D40	38.3	—	—:検出不可を示す			

実空隙部の横幅（以下、実幅と表記）6cm以下の部分では、空隙部を検出できない試験体が2体あり、検出できた場合も、一致率が50%を下回る場合が大半であった（表4参照）。

なお、充填部と空隙部との温度差は、有機系充填材の場合においても、赤外線カメラの温度測定レンジ2.56°C（温度設定感度0.01°C）に収まるものであった。

#### ①鋼板厚さと検出精度の関係（図7参照）

3体の試験体における一致率は、実幅21cm以上の部分で概ね70%を超える。鋼板厚さ4.5mmの場合の一致率は、実幅12cmの部分まで60%を、実幅9～6cmの部分でも50%を下回ることがな

く、鋼板厚さ6mm、9mmの試験体より平均10%程度高い。即ち、実幅の小さい部分では鋼板厚の薄い方が高い精度で空隙部を検出できる。

#### ②アキと検出精度の関係（図8参照）

アキ5mmの試験体の一致率が実幅21cmの部分で75%を上回っており、他の2体よりも約10%高い。実幅6cmの部分では3体とも一致率40%を下回っており、信頼性の低いことが判明した。アキの大きさと一致率の関係には一定の傾向が見られず、明瞭な相関関係は認められなかった。

#### ③充填材と検出精度の関係（図9参照）

有機系充填材（充填材A・B）の違いは精度に大きな影響を及ぼさない。2体の試験体にお

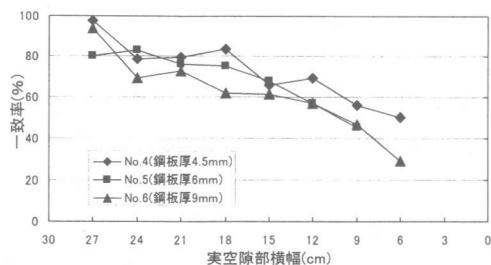


図7 鋼板厚さと一致率の関係（注入確認実験）

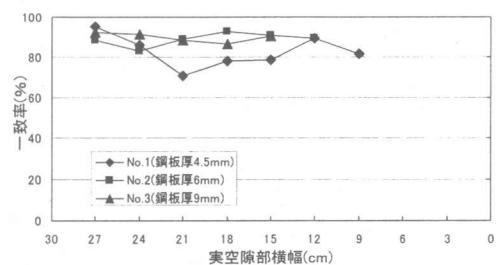


図10 鋼板厚さと一致率の関係（空隙検出実験）

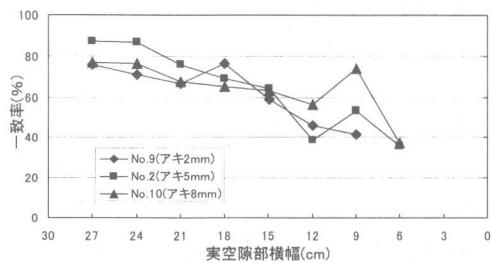


図8 アキと一致率の関係（注入確認実験）

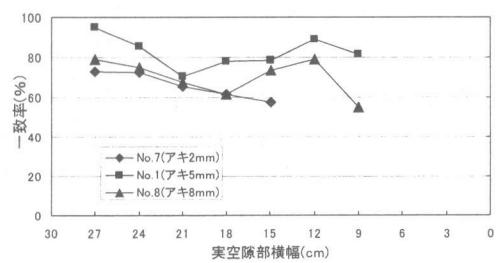


図11 アキと一致率の関係（空隙検出実験）

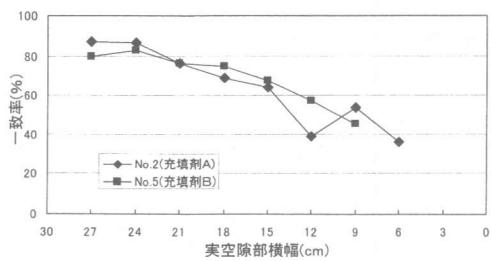


図9 充填材と一致率の関係（注入確認実験）

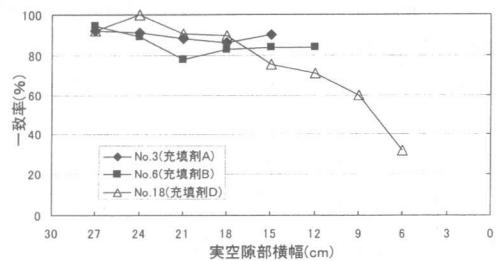


図12 充填材と一致率の関係（空隙検出実験）

ける一致率は実幅21cm以上の部分で75%を、15cm以上の部分で60%を上回っている。

## 6. 2 逆転現象を利用した空隙部検出実験

実幅9cm以下の部分で空隙部検出が不可能な試験体は10体であり、注入状態確認実験と比較して、空隙部検出が可能な限界実幅が大きかった（表4参照）。

### ①鋼板厚さと検出精度の関係（図10参照）

3体の試験体において、空隙部の実幅24cm以上であれば、ほぼ80%以上の一致率で空隙を検出できる。鋼板厚さによる一致率の差は、実幅24cm以上の部分で平均5%程度であり、鋼板厚さは実幅24cm以上の部分では一致率に影響しなかった。しかし、実幅21cm以下の部分では、一致率の変化に一定の傾向がみられず、鋼板厚さと検出精度の間に相関関係は認められなかった。

### ②アキと検出精度の関係（図11参照）

アキが5mmの試験体の一致率は、実幅24cm以上の部分で80%を下回ることがなく、他の試験体の一致率よりも全般的に高い。しかし、アキの大きさと一致率には相関関係が認められなかった。アキ8mmと5mmの試験体では実幅9cmの部分まで検出でき、アキの大きい方が小さい実幅まで検出できる傾向にあった。

### ③充填材と検出精度の関係（図12参照）

無機系充填材の場合の一致率は、実幅15cm以上の部分で75%を上回っており、有機系充填材の場合の一致率に比べ、平均5%未満ではあるが高かった。また、無機系充填材の場合は、最小実幅6cmの部分まで検出できた。

## 7. 結論

赤外線法によるRC柱の鋼板補強における鋼板と躯体コンクリート間への充填材の注入状態確認、および空隙部検出に関するモデル実験を行い、その精度について以下の知見を得た。

### （1）注入状態確認実験

①有機系の充填材では、鋼板厚さの薄い方が、より高い精度で空隙部を検出でき、鋼板厚さ4.5mm以下の場合、21cm以上の空隙に関しては70%

以上の一致率で検出可能であった。

②無機系の充填材では、硬化熱がほとんど発しないため、赤外線での検出は不可能であった。

### （2）逆転現象による空隙部検出実験

①有機系の充填材では、実幅18cm以上の部分において60%以上、特にアキ5mmの試験体においては70%以上の一致率で検出可能であった。

②無機系の充填材では、実幅15cm以上の部分において75%以上の一致率で検出可能であった。

### （3）今後の課題

実用化に向けて、より現実的な条件下での実験データの蓄積と、空隙部検出のための演算処理の自動化が必要である。

## 謝辞

本研究は、新潟大学とCCR工法研究会との共同研究により行われたものである。

本研究の計画立案に尽力いただいた川瀬清孝博士、研究遂行にご協力いただいたCCR工法研究会の栗原勝彦氏、石田秀夫氏、原島進氏、五十嵐治氏、小林禎氏、並びに新潟大学技術職員多田克彦氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 田中一浩ほか：鉄筋コンクリート造建築物におけるタイル剥離検査方法に関する研究、日本建築学会北陸支部研究報告集、第37号、163～166、1994.7、同じく第38号、15～18、1995.8
- 2) 掛川俊一ほか：サーモグラフィーによる外壁補修の検査方法に関する研究－充填材の種類による影響－、日本建築学会学術講演梗概集、材料施工、511～512、1998.9
- 3) 山下和博ほか：赤外線法によるRC柱の鋼板補強の検査方法に関する研究、日本建築学会北陸支部研究報告集、第42号、1999年7月pp133～pp136
- 4) 山下和博ほか：赤外線法によるRC柱の鋼板補強の検査方法に関する研究 その1～その2、日本建築学会学術講演梗概集、材料施工、639～642、1999.9