

論文 鉄筋強制加熱による熱画像処理に基づいたコンクリート内部の空洞・ひび割れ非破壊検査手法に関する研究

臼木 悠祐^{*1}・茂木 淳^{*1}・谷口 修^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨：著者ら¹⁾は、新たな非破壊検査手法として低周波型交流電流を用い鉄筋自体を強制加熱させ、コンクリート表面温度から鉄筋の腐食評価システムの構築に着手している。本研究は、同様の方法でコンクリート内部に存在する空洞およびひび割れの検出システムの構築をおこなった。その検出原理としては、空洞およびひび割れの熱的特性を利用したもので欠陥部のコンクリート表面および健全部のコンクリート表面、両者の温度差から判定を行うというものである。

キーワード：非破壊検査、通電加熱、空洞、ひび割れ、熱的特性

1. はじめに

コンクリートのひび割れおよび内部空洞の大きさ、深さ、厚さの評価に主として用いられている非破壊検査手法には、電磁誘導法、超音波法、電磁波法、放射線法、打音法等がある。従来、電磁波法の一つである赤外線サーモグラフィ法は、一度に広範囲の計測が可能であるという利点から、主として用いられている一手法である。赤外線サーモグラフィ法には、一般に、自然発生的に生じる欠陥部の温度差をパッシブに計測するパッシブ法、計測対象に熱負荷を与えるアクティブ熱負荷によるアクティブ法がある。前者は、日照や外気温変動により計測を行う方法であり、コンクリート構造物が置かれている立地条件、環境、気象条件等による様々な因子が計測結果に影響を及ぼす等の問題点がある。後者は、コンクリート構造物表面を強制的に加熱させることにより熱流を生じさせる方法であり、加熱むらから生じる検出精度の問題がある。それにもまして重要な問題は、従来の各方法で評価可能な劣化要因は剥離・空洞、ひび割れのみであり、一度に広範囲の計測が可能であるという赤外線サーモグラフィ法の一つの利

点を最大限に活用し、それら劣化要因も包摂した上で他の劣化要因をも評価可能な新たな方法の確立が必至である。

著者ら¹⁾は新たな非破壊検査診断手法として、鉄筋自体の通電性、熱伝導性を利用し低周波型交流電流により通電加熱させ、コンクリート表面を赤外線センサにより測定し、コンクリート表面温度の経時変化より鉄筋腐食の定性的かつ定量的評価に関するシステム(以下、本システムと称す)の構築に着手しており、コンクリート表面の温度分布、温度履歴、それを用いた熱伝導解析手法により、それらの評価が可能であることが確認されている。前述したが、赤外線サーモグラフィ法は、一度に広範囲の劣化計測が可能であるという利点があり、本システムを鉄筋腐食に留まらず、コンクリート内部の剥離・空洞やひび割れ等の劣化に対しても評価対象を拡張することができれば、現在の非破壊劣化手法の大幅な進展につながるわけである。

本研究は、鉄筋コンクリート中の鉄筋を通電加熱することにより、鉄筋の腐食評価だけでなく、鉄筋コンクリート内部の剥離・空洞やひび割れに対して本システムが評価可能であるかどうかの

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 五洋建設(株) 技術研究所 主任 工修 (正会員)

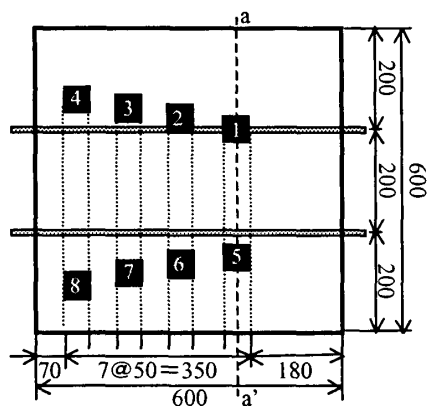
*3 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

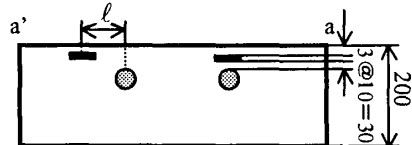
水セメント比 (%)	最大骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
55.5	25	12	45.5	159	257	840	1030

表-2 各空隙の位置

番号	1	2	3	4	5	6	7	8
距離 ℓ (mm)	0	15	30	45	60	75	90	105



(a) 模擬空洞配置図



(b) a-a' 断面図

図-1 模擬空洞の存在する供試体

確認を行うとともに、コンクリート表面に及ぼすそれら劣化要因の影響を詳細に評価した。さらに、鉄筋から空洞やひび割れまでの距離をパラメータとして本システムを適用することにより、検知可能な鉄筋からの距離に関して本システムの適用範囲を明確にした。

2. 実験概要

本実験で用いた供試体は二種類であり、空洞が存在するコンクリートスラブ供試体およびひび割れが存在するコンクリートスラブ供試体である。

2.1 実験に用いたコンクリートスラブ供試体

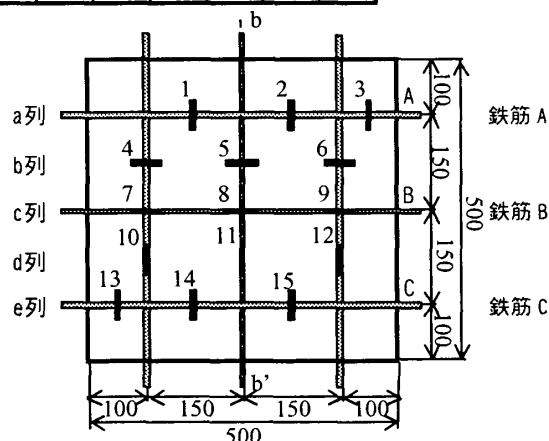
(1) 空洞が存在する供試体

空洞の検出を行うためのコンクリートスラブ供試体は、図-1 に示すように寸法 600×600×200mm であり、かぶり厚さ 30mm の位置に長さ 800mm の D16 異形鉄筋を水平方向に 2 本配置し

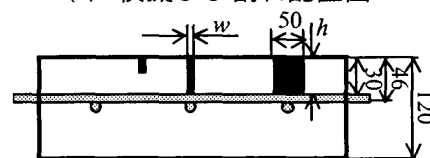
表-3 各ひび割れの幅と深さ

番号	1	2	3	4	5	6	7	8
幅 w (mm)	2.0	1.0	0.3	0.3	1.0	2.0	0.3	1.0
深さ h (mm)	30	30	30	10	10	10	30	30

9	10	11	12	13	14	15
2.0	0.3	1.0	2.0	0.3	1.0	2.0
30	30	30	30	10	10	10



(a) 模擬ひび割れ配置図



(b) b-b' 断面図

図-2 模擬ひび割れの存在する供試体

た。実験で用いた模擬空洞は、空気と熱的特性がほぼ等しい発泡スチロールであり、その寸法は 50×50×10mm の直方体である。模擬空洞は、図-1 (a) および表-2 に示すように 8 箇所を設置した。深さ方向に関しては、図-1 (b) に示すように全ての模擬空洞がコンクリート表面から模擬空洞上面まで 10mm の位置に固定した。ここで、表-2 における距離 ℓ とは、図-1 (b) に示す鉄筋中心から空洞中心までの距離のことであり、本加熱システムによる適用範囲を判断するうえで必要不可欠なパラメータである。なお、コンクリートの配合は、表-1 に示す通りである。

(2) ひび割れが存在する供試体

ひび割れの検出を行うためのコンクリートス

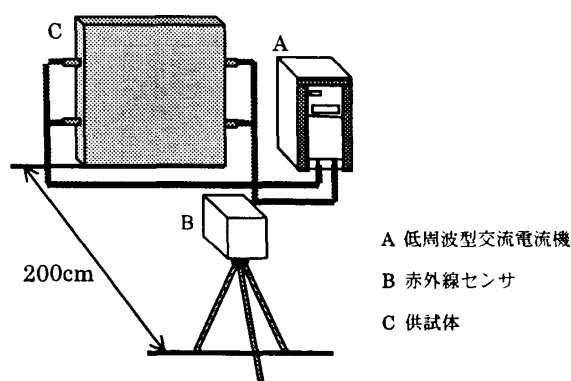


図-3 計測システム

ラブ供試体は、図-2 に示すように寸法 $500 \times 500 \times 120\text{mm}$ であり、かぶり厚さ 30 および 46mm の位置に長さ 700mm の D16 異型鉄筋を格子状に配筋したものである。模擬ひび割れは、通電加熱を行う鉄筋の直上或いは鉄筋から離れた箇所においても評価可能か否かを検証するため図-2 (a) に示す通り 15 箇所の位置に設置した。本実験における模擬ひび割れのパラメータは図-2 (b) に示すひび割れ幅 w とその深さ h であり、模擬ひび割れ幅 w は 0.3, 1.0 および 2.0mm の 3 種類、ひび割れ深さ h は 10 および 30mm の 2 種類である。なお、供試体に設置した模擬ひび割れ幅と深さは、表-3 に示す通りであり、模擬ひび割れ長さは全て 50mm とした。コンクリートの配合は、空洞が存在する供試体と同じ配合とした。

2.2 赤外線センサによる実験方法および条件

空洞の検出およびひび割れの検出手法は、図-3 に示すように、図-1 および図-2 に示したコンクリートスラブ供試体の鉄筋両端に低周波型交流電流を用いて一定電流 300A で 3 分間通電加熱し、赤外線センサを使用しコンクリート表面温度の測定を通電直後から 5 秒間隔で 60 分間測定した。なお、コンクリートスラブ供試体から赤外線センサまでの距離は 200cm、室温は 24°C の一定条件で実施した。

3. 空洞供試体の通電加熱試験結果

3.1 コンクリート表面の熱画像

鉄筋に強制的に与えられた熱は鉄筋からコンクリートに伝達されるわけであるが、図-4 に示

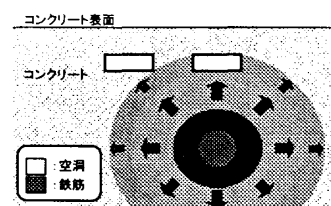


図-4 鉄筋からの熱伝達性状

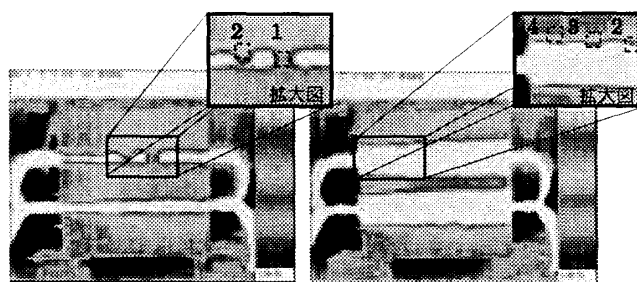
すようにその伝達性状は、温度勾配が卓越するコンクリート表面に向かって鉄筋から同心円状に伝達される。したがって、鉄筋近傍のコンクリートと鉄筋から離れたコンクリートでは熱の伝達する時間が異なってくるわけであり、鉄筋から異なる位置に存在する空洞に対して熱の伝達時間が異なってくる。すなわち、任意箇所に設置された空洞を評価するためには、時刻暦により変化するコンクリート表面温度性状により捉える必要がある。そこで、本実験の測定時間 60 分を、0～3 分、3～20 分、20～30 分、30～40 分、40～60 分の 5 区間に分け、それぞれの時間帯における各空洞部の検出時間を熱画像により評価した。

(1) 測定開始後 0～3 分

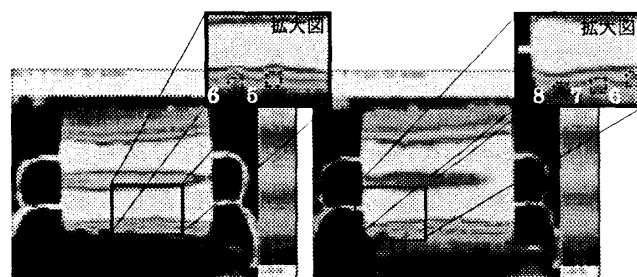
図-5 (a) は測定開始から 3 分後すなわち通電加熱終了直後におけるコンクリート表面の熱画像である。図-5 (a) より、鉄筋直上に位置する空洞部直上のコンクリート表面温度は低くなっており、その形状を明瞭に確認することができる。したがって、鉄筋直上に位置する空洞番号 1 と 2 の検出が可能である。一方、鉄筋直上に位置しない空洞すなわち空洞番号 1 と 2 以外は通電加熱停止直後では確認することが不可能である。これは、加熱停止直後では鉄筋から周りのコンクリートに十分熱が伝わっていないものと考えられるからである。

(2) 測定開始後 3～20 分

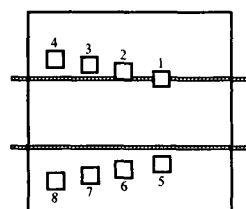
図-5 (b) は、測定開始から 10 分経過した時点の熱画像である。鉄筋に蓄えられた熱は徐々にコンクリートに移動し、この時間帯においては空洞番号 3 と 4 まで熱が伝わっていることから、鉄筋側の空洞部分直上のコンクリート表面温度が、周りの健全部のコンクリート表面温度に比



(a) 通電加熱終了直後 (b) 測定開始 10 分後



(c) 測定開始 25 分後 (d) 測定開始 35 分後



(e) 空洞供試体全体図

図-5 空洞を有するコンクリート表面の熱画像

べ低くなっている。また、空洞 3, 4 よりも鉄筋から距離が離れている空洞 5, 6, 7 および 8 には熱が伝わっていないことから、空洞部直上と健全部のコンクリート表面の温度差がなく検出不可能である。

(3) 測定開始後 20～30 分

図-5 (c) は測定開始から 25 分経過した時点での熱画像である。この時間帯では、鉄筋からの熱がより広範囲に伝達するため、空洞番号 5 および 6 の直上のコンクリート表面温度がその周りの健全部に比べると低くなっていることがわかる。一方、この時間帯から、空洞が熱を遮断していた箇所すなわち、空洞部直上コンクリート部にも徐々に熱が伝達するため、今まで確認できた空洞部直上のコンクリート表面温度にはその周りの健全部のコンクリート表面には温度差がなくなり、空洞 1, 2, 3 および 4 の確認が困難となる。

(4) 測定開始後 30～40 分

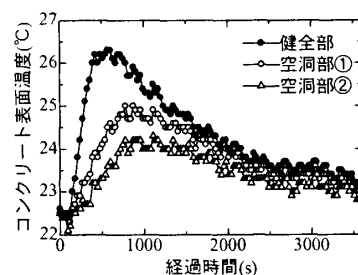


図-6 空洞部 1, 2 および健全部のコンクリート表面経時温度変化

図-5 (d) は測定開始から 35 分経過した時点での熱画像である。この時間帯では、コンクリート全体に熱が伝わっていることから、空洞 7 および 8 の直上のコンクリート表面温度が低くなっている。また、空洞 1, 2, 3 および 4 とその周りの健全部のコンクリート表面温度には差異がなくなることから、検出が不可能となっている。

(5) 測定開始後 40～60 分

コンクリート全体に熱が移動するため、外気温の影響を受け全ての空洞部直上と健全部のコンクリート表面温度に差異がなくなり、空洞部の確認が不可能となる。

以上より、鉄筋から空洞までの距離が長くなるにつれ、検出時間は異なるものの本加熱手法によれば鉄筋中心から 10.5cm 離れた空洞に対しても評価可能であるものと考えられる。本手法により、空洞部直上に位置するコンクリート表面温度は、空洞が存在しない健全部のコンクリート表面温度よりも低くなる性状を示すわけである。次節では、上述した空洞部直上に位置するコンクリート表面の温度性状を熱的特性に基づいて詳細に評価することとする。

3.2 空洞部直上のコンクリート表面温度性状

図-6 は、空洞番号 1 および 2 直上のコンクリート表面とその周りの健全部のコンクリート表面における温度経時変化である。図中の●, ○ および△は、それぞれ健全部、空洞番号 1 および 2 直上のコンクリートに対応している。図-6 より、健全部の最高温度は空洞部と比較すると高く、また空洞部の温度低下割合は健全部に比べ緩やかであることがわかる。これは、比熱が

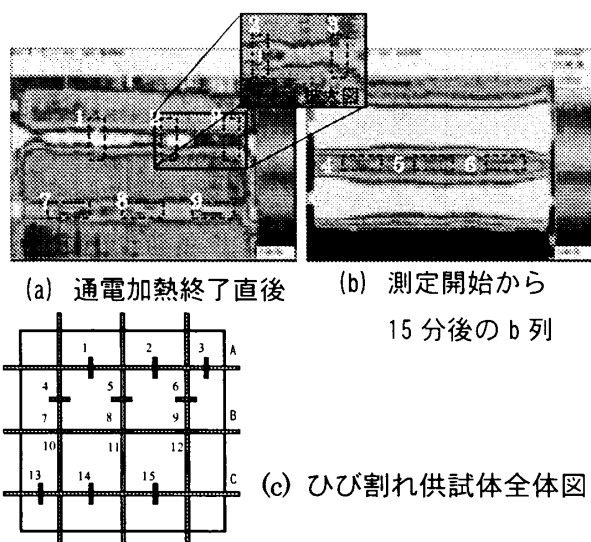


図-7 ひび割れを有するコンクリート表面の熱画像

大きく熱伝導率が小さいという空洞の熱的特性すなわち空洞部は温まり難く冷め難いということによるものであり、前節で示した熱画像において全ての空洞部直上のコンクリート表面温度がその周りの健全部のコンクリート表面温度と比較して低い結果となっていたことと一致する。また、空洞番号 1 と 2 の最高温度を比較すると、空洞 1 の方が空洞 2 より高い結果となっている。これは、鉄筋から空洞までの距離に起因するものと考えられ、空洞 1 が鉄筋中心の直上に位置することに対し、空洞 2 は鉄筋の直上からわずかながら離れており、鉄筋と空洞間に存在するコンクリートのボリュームに応じて熱が奪われるためである。

4. ひび割れ供試体の通電加熱試験結果

図-2 (a) に示す各ひび割れパラメータを明確にするために、ひび割れ番号 1~3 を a 列、4~6 を b 列、7~9 を c 列、10~12 を d 列、13~15 を e 列と称することとし、a, c, e 列は、かぶり厚さ 30mm に配筋した鉄筋軸上、b, d 列はかぶり厚さ 30mm に配筋した鉄筋と鉄筋の間である。また、各列にはパラメータの一つであるひびわれ幅 w の異なるひび割れが存在し、その深さ h および向きは全て同じである。一方、列による差異は、ひび割れの深さ h 、向きおよび位置である。ここで、ひび割れの向きとは、かぶり厚

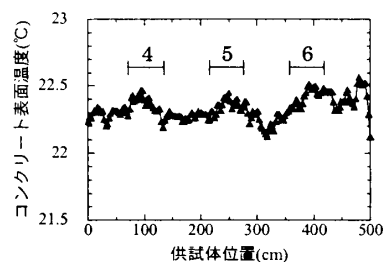


図-8 b 列のコンクリート表面温度分布図

さ 30mm に配筋した鉄筋軸方向に対して直行或いは平行の向きであり、ひび割れの位置とは、かぶり厚さ 30mm に配筋した鉄筋の直上に位置するか、または鉄筋間に位置するかである。

本実験で通電加熱を行った鉄筋は、全てかぶり厚さ 30mm の位置に配筋した鉄筋である。ここで、図-2 (a) に示す a 列、c 列および e 列の鉄筋をそれぞれ鉄筋 A、鉄筋 B および鉄筋 C と称することとする。なお、測定時間は空洞供試体の通電加熱実験と同様に、通電直後から 5 秒間隔で 60 分間である。

4.1 向きおよび位置に対するひび割れの温度性状

鉄筋 A と鉄筋 B を通電加熱することで、ひび割れの向きの差異による温度性状の評価を a 列および c 列の比較から行った。

(1) 鉄筋の直上に位置し向きの異なるひび割れの温度性状

図-7 (a) は通電加熱終了直後におけるコンクリート表面の熱画像である。同図より、鉄筋直上である a 列および c 列の全てのひび割れが、周りの健全部のコンクリート表面温度と比較すると高くなっていることが確認できる。また、c 列においては、ひび割れの長さすなわち 50mm の長さが明瞭に確認できる。すなわち、ひび割れが鉄筋直上に位置する場合、鉄筋軸方向に対して平行に位置するひび割れは直交に位置するひび割れに比べ鉄筋と重なる領域が大きく、その領域より放熱しやすいためである。

(2) 鉄筋間に位置するひび割れの温度性状

b 列の温度性状から鉄筋間に位置するひび割れが、本加熱手法において評価可能であるかを

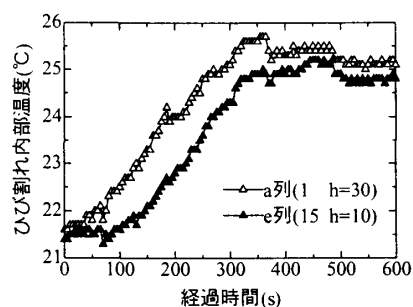


図-9 ひび割れ幅 2.0mm
の経時温度変化

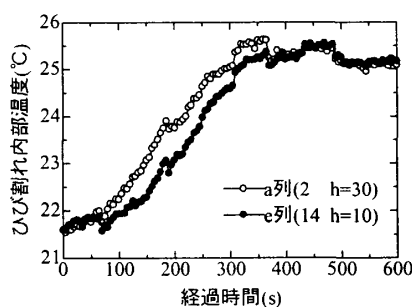


図-10 ひび割れ幅 1.0mm
の経時温度変化

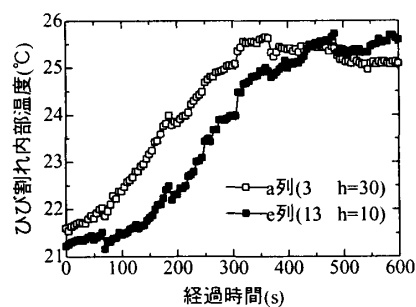


図-11 ひび割れ幅 0.3mm
の経時温度変化

検証した。図-7 (b) は、測定開始 15 分後の b 列の熱画像である。ここで、熱画像からひび割れを確認することは可能ではあるものの、必ずしも明瞭ではない。したがって、同時刻におけるひび割れ中心部のコンクリート表面温度分布図を図-8 に示す。同図より、全てのひび割れ部において、その温度は周りの健全部のコンクリート表面温度に比べて高くなっていることが確認できる。したがって、本強制加熱手法によって鉄筋間に存在するひび割れの検出は評価可能であることが確認された。

4.2 深さに対する温度性状の検証

鉄筋 A と鉄筋 C を通電加熱することでひび割れ深さによる温度性状の評価を行った。

a 列のひび割れ深さは 30mm であることにに対し、e 列のひび割れ深さは 10mm であり、それぞれのひび割れ内部の温度経時変化を比較することで、ひび割れ深さの影響を評価した。図-9~11 は、a 列および e 列においてひび割れ幅がそれぞれ 2.0, 1.0 および 0.3mm のひび割れ幅内部の温度経時変化である。まず、各図において、コンクリート表面温度が最高となる時間および各時間における温度に着目する。いずれのひび割れ幅においても、a 列のひび割れが最高温度となる時間が早く、また各時間帯における温度も高い。これは、ひび割れ深さが深いほど、鉄筋とひび割れ先端間に存在するコンクリートボリュームが少ないため放熱しやすいためである。すなわち、本システムは設定した各種幅を有するひび割れの評価が可能である。

以上より、本加熱手法において、ひび割れが

鉄筋直上に位置しひび割れの向きが鉄筋軸方向に平行に位置すれば、直交に位置するひび割れよりもひび割れの形状を明瞭に確認できる。また、本加熱手法において、鉄筋直上に位置するひび割れに限らず鉄筋間のひび割れの評価も可能であることがわかった。

5. まとめ

本研究は、著者らが着手している鉄筋の腐食性状を評価する新たな非破壊検査手法と同方法で、コンクリート中の空洞およびひび割れの検出システムの構築に着手した。

以下に本研究から得られた結果をまとめる。

- (1) 本手法において、鉄筋通電加熱後の空洞部直上のコンクリート表面温度は周りの健全部のコンクリート表面温度に比べ低くなることがわかった。また、本手法によれば鉄筋の中心からの距離が 10.5cm 離れた空洞に対しても評価可能である。
- (2) 本手法において、鉄筋通電加熱後のひび割れ内部温度は、周りの健全部のコンクリート表面温度に比べ高くなることがわかった。また、本手法から鉄筋直上に位置するひび割れに限らず鉄筋間のひび割れに対しても評価可能である。

参考文献

- 1) 茂木淳, 山越孝太郎, 大下英吉: 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, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.25, No.1, pp1679-1684, 2003