論文 サーモグラフィ法による超速硬モルタルとコンクリートとの打継ぎ界面に おける欠陥評価手法

山口 岳思*1・鎌田 敏郎*2・桑原 常晃*3・六郷 恵哲*4

要旨:本研究では,超速硬モルタルの補修材としての適用を想定した場合に,モルタルと母 材コンクリートとの打継ぎ界面に発生する欠陥を,モルタルの水和熱を熱源としモルタル表 面におけるサーモグラフィを撮影することによって検出する手法について検討した。実験お よび解析において,硬化過程における健全部と欠陥部との最大表面温度差を評価指標とする ことで,室温,欠陥厚さ,欠陥の大きさが欠陥評価に与える影響を明らかにした。また,欠 陥の検出限界や検出時間帯を把握するとともに,3次元サーモグラフィにおける欠陥部の曲 面内体積と欠陥の実体積との関係から欠陥寸法を推定する手法の可能性を示した。 キーワード:サーモグラフィ法,最大表面温度差,超速硬モルタル,打継ぎ界面,欠陥評価

1. はじめに

吹付け工法や増厚工法により補修補強を行う 際,工期短縮のため超速硬モルタルが頻繁に使 用されるようになってきた。これらの工法では 種々の理由により打継ぎ界面に空隙が発生し, 初期欠陥となる可能性がある。したがって,施 工時点において打継ぎ界面における欠陥(空隙) の有無や規模を要求のレベルに応じて適切に評 価することが重要である。

サーモグラフィ法は,広範囲にわたって効率 的に計測できることや,欠陥を視覚的に判断で きる点が利点であると考えられるが,欠陥の検 出においては健全部と欠陥部との温度差を発生 させるために何らかの熱源が不可欠である。

新設・既設を問わず,診断における代表的な 熱源として,日射¹⁾や赤外線ヒータ²⁾などの人 工的熱負荷があるが,施工時という条件であれ ば水和熱を熱源とした計測が効率的であり,実 際にその有効性も確認されている³⁾。超速硬モ ルタルは水和による発熱が非常に高いため水和 熱の利用が特に有効であると考えられるが,上 面増厚工法などを対象にした診断の場合,フレ ッシュコンクリート面を直接赤外線カメラで撮 影しなければならず,そのような手法の検討に ついては未だ報告がされていない。

そこで本研究では,超速硬モルタルの水和熱 を熱源とした場合の打継ぎ界面における欠陥の 評価手法について検討した。評価原理は,水和 熱がコンクリートに伝達する際に欠陥が熱を遮 断することで,欠陥部が健全部よりも高温にな るというものであり,このとき表面温度は欠陥 部中央付近で最大になる⁴⁾(図-1)。

実験および解析では,室温,欠陥厚さ,およ び欠陥の大きさが健全部と欠陥部との最大表面 温度差に与える影響について検討した。また欠 陥の検出限界,検出時間帯についても検討を加 えた。さらに,3次元サーモグラフィにおける 欠陥部の曲面内体積と欠陥の実体積との関係を 調べた。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体の製作においては,図-2 に示すよう に,まず寸法が 560×600×140mm のコンクリ ート板を母材コンクリートとし,直径が 5,7 および 10cm でそれぞれ厚さが 0.2,1 および

- *1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)
- *2 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)
- *3 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (非会員)
- *4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)



5mmの人工欠陥(以下,5cm欠陥,7cm欠陥お よび10cm欠陥)を母材コンクリート表面に配 置した。その後補修材を鉛直上面から打設した。 人工欠陥の材料として,厚さ0.2mmの欠陥には ポリエチレンフィルムを厚さ1mmおよび5mm の欠陥にはスチレンボードを使用した。

また補修材としては超速硬モルタルを使用し, 打継ぎ厚さを 3cm および 5cm と変化させた。供 試体の種類を表 - 1 に,本実験で使用した材料 の配合を表 - 2 に示す。

なお,超速硬モルタルは,可使時間が約 30 分になるように凝結遅延剤の量を調節した。

2.2 実験方法

実験では,図-3に示すように,室内におい て,供試体側面を厚さ2cmの発泡スチロール板 で断熱し,補修材を打設した直後から,補修材 表面を赤外線カメラで撮影した。サーモグラフ ィの計測には,サーマルビデオシステムを用い た。撮影距離は2.74mであり,撮影は4分間隔 で8時間行った。また,サーモグラフィの計測 と同時に,補修材内部の温度を熱電対により2 分間隔で8時間計測した。熱電対の配置を図-2 に示す。室温の条件は,5~25 の範囲とした。 なお,打設時には,加水してから撮影開始まで の時間も計測した。



表-1 供試体の種類

欠陥厚さ 打継ぎ厚さ	0.2mm	1mm	5mm
3cm			
5cm			

表-2 材料の配合

林才坐礼	W/C	単位量(kg/m ³)					
ባ/J ተተ	(%)	W	С	S	G	Ad	Re
母材コンクリート	47	170	362	696	1152	3.62	-
超速硬モルタル	40	268	701	1261	-	12.61	

凝結遅延剤:可使時間が30分になるように調整



図-3 計測概要



材料	熱伝導率	密度	比熱	熱伝達率	
	(kcal/mh)	(kg/m)	(kcal/kg)	(kcal/m ⁻)	
コンクリート	2.2	2400	0.25		
欠陥	0.05	1.24	1.0	11.0	
超速硬モルタル	2.2	2260	0.2		

3. 解析概要

解析は,FEM による2次元非定常熱伝導解析 を行った。解析モデルを図-4 に示す。境界条 件としては,供試体側面を断熱境界,補修材表 面および母材コンクリート底面を熱伝達境界と した。解析で用いた物性値を表-3 に示す。超 速硬モルタルの断熱温度上昇の評価式は,大塩, 岡田ら 5)および塚山,宮地ら 6)の論文を参考に 以下のように設定した。

$$T = K(1 - e^{-B(t - t_0)})$$
 (1)

ここで,*T*は上昇温度(),*t*は時間(hr), *t*₀は遅れ時間(hr),*K*,*B*は定数である。本 研究では*K*=90,*B*=7とし,*t*₀は実験値とした。

4. 実験結果および解析結果

4.1 水和熱発生の特徴

図 - 5 に打継ぎ厚さ 5cm で欠陥厚さ 5mm に おける補修材の内部温度および Ts の経時変化 として代表的なものを示す。ここで Ts とは,サ ーモグラフィ上での欠陥部(人工欠陥設置部分) における最大表面温度から健全部(人工欠陥の ない部分)における表面温度の平均値を減じた 値である。

内部温度は,加水後約2時間で急激に上昇し 始め,その約30分後に最高値に達した後,緩や かに低下している。また,Tsも,内部温度がほ ぼ最高値を示す時間に最大値となった。この傾



向は全ての供試体で一致したが,最高温度に達 するまでの時間にはばらつきがあった。

4.2 Ts_{max}による欠陥評価

(1) 室温が Ts_{max} に与える影響

本研究では,Tsの経時変化における最大値を Ts_{max} と定義し,欠陥の評価指標として用いた。 Ts_{max}を欠陥評価の指標として用いる場合,補修 材の打継ぎ厚さや欠陥直径および厚さが同じで も,室温によりTs_{max}が異なってくる可能性があ る。そこで,打継ぎ厚さ5cm欠陥厚さ5mmの 場合において,室温の違いがTs_{max}に与える影響 を調べた。

実験および解析で得られた Ts_{max} を,室温が異 なる4つのケースについて図-6に示す。室温 は計測時間内ではほぼ一定であり,その平均値 はそれぞれ6.31,12.54,16.24,24.79 であった。実験値は,5cm 欠陥ではばらつきが あるものの,7cm 欠陥および10cm 欠陥ともに 室温が異なってもTs_{max}はほぼ同じ値を示した。 この傾向は解析値でも同様であった。実験値と 解析値において絶対値が異なっているのは,解 析における物性値等の設定によるものと考えら れるが,この点はさらに検討が必要である。以 上より,本研究の範囲内においては,Ts_{max}は欠 陥直径にかかわらず室温による影響が小さいパ ラメータであることがわかった。



(2) 欠陥厚さが Tsmax に与える影響

打継ぎ厚さが3cmおよび5cmの場合において, 欠陥厚さを0.2,1 および5mmとしたときの Ts_{max}を図-7に示す。これによれば,打継ぎ厚 さにかかわらず欠陥直径が大きいほどTs_{max}が 大きく,欠陥厚さが大きくなるにしたがって Ts_{max}も増加することがわかる。また,Ts_{max}の増 加傾向は欠陥厚さが0.2mmと1mmの間では大 きいが,1mm以上では緩やかとなることもわか った。これは解析でも同様の傾向を示した。こ の理由としては,欠陥直径および欠陥厚さが大 きくなるほど欠陥による断熱効果が大きくなる ためであると考えられる。

(3) 欠陥の検出限界に関する検討

表 - 4 に,実験で得られた Ts_{max}の値を全ての ケースについて示す。両カッコで示してある Ts_{max}は,熱画像上で目視によって欠陥を明確に 判別できなかったケースを示す。さらに,図 - 8 に,Ts_{max}が得られた時の熱画像を示す。これら

表-4 Ts_{max}

打継ぎ厚さ	欠陥厚さ	室温	Ts _{max} ()			
			5cm欠陥	7cm欠陥	10cm欠陥	
3cm	0.2mm	11.03	(0.18)	0.56	0.99	
	1mm	12.97	0.54	0.69	1.14	
	5mm	12.45	0.48	0.73	1.45	
5cm	0.2mm	13.23	(0.29)	(0.31)	(0.35)	
	1mm	11.92	(0.45)	0.53	1.00	
	5mm	6.31	(0.14)	0.61	0.98	
		12.54	0.48	0.55	1.20	
		16.24	(0.15)	0.44	0.98	
		24 79	(0.42)	(0.40)	0.95	







欠陥厚さ 1mm

欠陥厚さ 1mm



欠陥厚さ 5mm 欠陥厚さ 5mm (a) 打継ぎ厚さ 3cm (b) 打継ぎ厚さ 5cm 図 - 8 熱画像

によれば,温度ムラの影響を考慮しても,欠陥 を検出するのが不可能であるのは,打継ぎ厚さ 3cm で欠陥厚さ 0.2mm の 5cm 欠陥の場合,およ び打継ぎ厚さ 5cm で欠陥厚さが 0.2mm の 5,7 および 10cm 欠陥の場合であった。

この結果より,本研究の範囲内では,Ts_{max}が 0.5 以上であれば欠陥の存在を判別できる可 能性が高く,Ts_{max}がそれ以下の場合は欠陥の有 無の判別が難しくなることがわかった。 4.3 欠陥の体積評価に関する検討

著者ら⁴⁾は,鋼板とコンクリート間における 欠陥寸法の評価法として、図-1に示すような3 次元サーモグラフィにおける欠陥部の曲面内体 積(V_T)を求めることで,欠陥の実体積を推定 する手法を提案している。本研究では,その手 法を本実験結果に適用し,欠陥の体積の評価指 標としての有効性を検討した。

 V_{T} を求める手順としては, Ts_{max} を得た時 の熱画像において,図-1に示すように最高温 度を示す点を含む直線上における1次元温度分 布曲線を求め,それを4次関数で近似する。 その曲線の変曲点を求める。 変曲点における 温度と曲線上の各点における温度の差をとる。

で求めた各点において以下の式により V_{T} を求める。

$$V_{T} = \pi \sum_{i=0}^{n-1} \left(X_{i+1}^{2} - X_{i}^{2} \right) \left(\frac{T_{i+1} + T_{i}}{2} \right) (2)$$

ここで, X_i は最高温度を示す点からの距離 (mm), T_i は で得られた温度差()である。

図 - 9 に,打継ぎ厚さ 3cm における V_T と欠陥 の実体積との関係を実験値と解析値についてそ れぞれ示す。これによれば,実験および解析と もに欠陥の実体積が大きくなるほど V_T は増加 する傾向にあり,欠陥の厚さごとに 2 次の相関 があることがわかった。また,実験値と解析値 において絶対値が異なっているのは 4.2 の(1) 同様,解析における物性値等の設定によるもの であると考えられるが,解析値の変動傾向は評 価パラメータの特性を検証する上で有効な役割 を果たしている。これらにより,Ts_{max}における 欠陥直径と欠陥厚さの関係および V_T と欠陥体 積の関係を併用することによって欠陥寸法をあ る程度把握する手法の可能性が示された。

4.4 検出時間帯に関する検討

本手法の実際への適用において,欠陥の検出 が可能となる時間帯(以降,検出時間帯とする) を把握しておくことが重要である。一般的に,



加水してから検出時間帯までの時間はモルタル の配合等により変化する。そこで,補修材の内 部温度における経時変化のグラフ形状から検出 時間帯を決定する手法について検討した。

ここでは、内部温度の経時変化曲線において, 任意の時間における曲線の傾き(2分間隔ごとの温度の変化率とした)を算出し評価指標とし て用いた。

図 - 10 に,打継ぎ厚さが 3cm で欠陥厚さが 1mm における 5cm 欠陥の内部温度曲線の傾き を示す。これによれば,5cm 欠陥の検出が可能 な時間帯は,傾きが最大値を示した時から,そ の後初めて最小値になるまでであり,その他の ケースにおいてもほぼ同じ傾向が見られた。

したがって実際に現地で計測する際には,あ らかじめ予備試験により補修材の内部温度の経 時変化曲線を計測しておけば,本研究で提案し た検出時間帯を予測することが可能となる。

次に図 - 11 に、打継ぎ厚さ 3cm における検出 時間帯の長さ(欠陥の識別が可能となってから, 判別不能となるまでの時間)を欠陥直径と対応 させて示す。これによれば、欠陥直径が大きく なるほど検出時間帯の長さは大きくなることが わかる。また、欠陥厚さ 0.2mm および 1mm に おける検出時間帯の長さはあまり変わらないの に対して、欠陥厚さ 5mm ではそれらとの差が 大きくなっており、その傾向は欠陥直径が大き くなるほど顕著になることがわかった。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

- (1) Ts_{max}は、欠陥厚さおよび欠陥直径が大き いほど大きな値を示す。
- (2)室温が5 から25 程度の範囲内において, Ts_{max}の値の変動は小さく,室温の違いが Ts_{max}に与える影響は小さいものと考えられる。
- (3)Ts_{max}が0.5 以上であれば欠陥の存在を判 別できる可能性が高い。
- (4) 欠陥の実体積が大きくなるほど V_{τ} は増加

する傾向にあり,それらは欠陥の厚さごと におよそ2次の相関があることがわかった。

(5) 補修材の内部温度曲線の傾きが最大値を 示した時から,その後初めて最小値になる までの時間帯であれば,欠陥の検出が可能 である。

本研究では,Ts_{max}による欠陥の存在の識別, さらにV_Tを評価指標に加えることによる欠陥 寸法の推定手法の可能性を示した。今後はより 現実的な環境において実験を行い,定量的評価 手法としての確立を目指し検討していく予定で ある。

参考文献

- 西川忠,平野彰彦,鎌田英治:赤外線法に よるタイル仕上げ外壁の剥離診断に関する 実験的研究,日本建築学会構造系論文集, No.529, pp.29-36,2000.3.
- 2) 山田和夫,安藤秀則:強制加熱を利用した サーモグラフィー法によるコンクリートの 内部評価,コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1485-1490, 2002.
- 3) 渡部正,魚本健人:型わく面の熱画像解析 によるコンクリート打込み時の欠陥検出法 に関する研究,土木学会論文集, No.478/V-21, pp.51-59, 1993.11.
- 4) 鎌田敏郎,川瀬貴行,国枝稔,六郷恵哲: サーモグラフィによる鋼-コンクリート間 空隙の平面寸法および厚さの推定,土木学 会論文集,No.665/V-48,pp.75-82,2000.8.
- 5) 大塩明,岡田光芳,遠藤康夫,中村秀三: 超速硬セメントコンクリートの発熱特性, 小野田研究報告,第36巻,第2冊,第112 号,pp.21-30,1983.
- 6) 塚山隆一,宮地日出男:各種セメントを用 いたコンクリートの温度上昇,セメント技 術年報,XXV,pp.220-224,1971.