

# 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

鎌田敏郎<sup>1</sup>・川瀬貴行<sup>2</sup>・国枝 稔<sup>3</sup>・六郷恵哲<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

<sup>2</sup>学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

本論文は、液体窒素により冷却した鋼板表面の温度分布を計測することにより、鋼板とコンクリートとの間に存在する空隙の平面寸法および厚さを推定する手法について検討したものである。実験では、鋼板とコンクリートとの間に円盤型の人工空隙を配置した供試体を用いた。実験によって得られたサーモグラフィにおいて、局所的な温度変化領域の中心を通る直線上における温度分布曲線の変曲点部分を空隙端部とみなすことにより、空隙の直径が推定できることを明らかにした。また、空隙の実体積と3次元サーモグラフィにおける温度分布局面を用いて算出した体積とが線形関係にあると仮定し、これを利用して空隙の厚さを推定するプロセスについても提案した。

**Key Words :** *nondestructive testing, interfacial defect between steel and concrete, infrared thermography, liquid nitrogen, thermal distribution*

## 1. はじめに

コンクリート構造物の竣工時における検査は、完成した構造物が、要求される性能を満足するものであるかどうかを判断する上で、極めて重要な役割を果たす。なかでも、既設構造物に補修や補強を施す場合においては、完工時検査の必要性はより一層に高いものとなる。

近年、鋼板巻立て工法(図-1)や鋼板接着工法によるコンクリート部材の補強が盛んに行なわれている。この場合、竣工時検査のポイントは、被覆した鋼板と既設コンクリート表面との間に発生する樹脂あるいはモルタルの充填不良による欠陥(空隙)の検出である。空隙は発生箇所のみならず、その大きさや厚さについても定量的に把握できることが望ましい。鋼板表面からの空隙の確認は、目視によっては不可能であるため非破壊検査の適用が不可欠となる。

このケースのように欠陥が構造物の表面部にある場合は、サーモグラフィ法が有効<sup>1)</sup>と考えられており、欠陥が視覚的にとらえられることや、一時に広範囲の検査が可能である等の利点がある。超音波法によっても、鋼板とコンクリートとの間の空隙の有

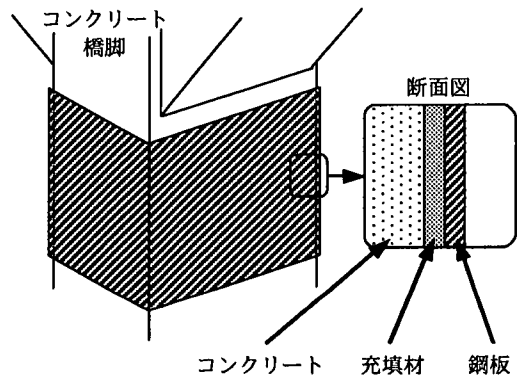


図-1 鋼板巻立て工法

無は判断できる<sup>2)</sup>が、空隙の大きさを把握することは難しく、空隙の厚さの評価は原理的に不可能である。

サーモグラフィを用いたコンクリートの欠陥評価手法としては、日射熱を用いるもの<sup>1)</sup>やコンクリート自体の発熱を利用するもの<sup>3)</sup>、あるいはヒータなどにより人工的に加熱するもの<sup>4),5)</sup>等がある。このうち人工的に熱負荷を与える手法<sup>4),5)</sup>は、他の手法に比べて検査に要する時間が短く、また周囲の気温差による影響も少なく、実用的には有利な面が多いものと考えられる。

著者らは、すでに、液体窒素冷却後の鋼板表面におけるサーモグラフィを用いて鋼-コンクリート間に存在する空隙を検出する手法の提案<sup>6)</sup>を行なっている。この手法の有用性は、筆者らの追加実験<sup>7)</sup>に加えて、上田らの結果<sup>8)</sup>によっても確認されている。これまでの研究によって、検出に適した冷却の方法や、検出可能な空隙の最小厚さ等についてはある程度明らかにしてきたが、検出された欠陥の大きさの評価等いくつかの未検討事項を残しているのが現状である。

そこで本論文では、この手法により検出された欠陥の平面寸法および厚さを推定するため、評価に必要なパラメータの検討を行ない、欠陥寸法の同定を行なうプロセスについて述べる。

## 2. 手法の原理

本手法は、断熱温度場法<sup>9)</sup>と呼ばれるものであり、欠陥による熱拡散の遮断効果を利用するものである。この断熱効果により生じる局所的な温度変化領域には、欠陥の寸法や形状等の影響が含まれていることになる。図-2 に温度変化領域のイメージを示す。

図は、鋼板とコンクリート間に空隙が存在する場合に、鋼板表面において熱負荷を与えたとき、表面から深さ方向に向かう熱拡散が、空隙のある部分のみにおいて遮断され、局所的な温度変化が生じているのを示している。加熱を行なった場合はその領域は温度が高く、逆に冷却を行なった場合は温度は低くなる。

この温度変化領域の平面的な大きさは空隙の大きさを反映しており、温度変化の大きさは熱負荷の大きさや空隙の寸法（平面寸法および厚さ）に影響されると考えられる。したがって、実験において検討するケースとしては、空隙の平面寸法および厚さ、熱負荷の異なる場合について考える必要がある。また、実際の施工においては鋼板厚が異なる場合が考えられるため、この影響についても検討しておく必要がある。

## 3. 実験および解析概要

### (1) 実験概要

#### a) 供試体の概要

図-3 に供試体および計測の概要を示す。供試体に用いたモルタルは W/C = 50%, S/C = 2.0, 鋼板厚は 4.5mm と 9.0mm, 人工空隙にはスチレンボード

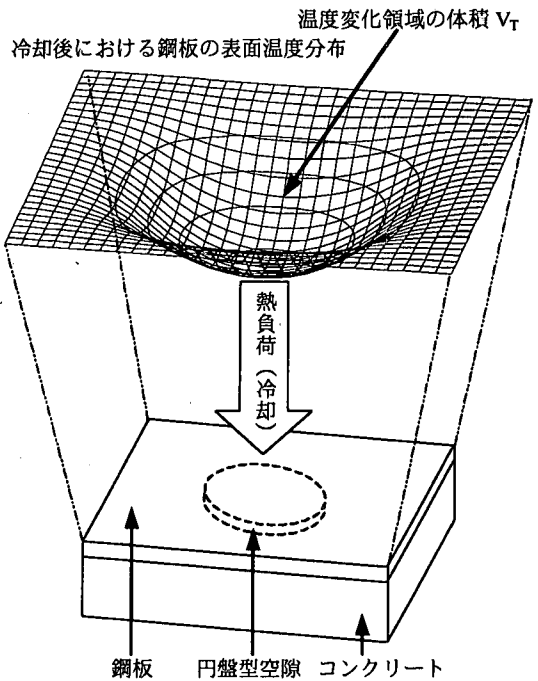


図-2 温度変化領域のイメージ

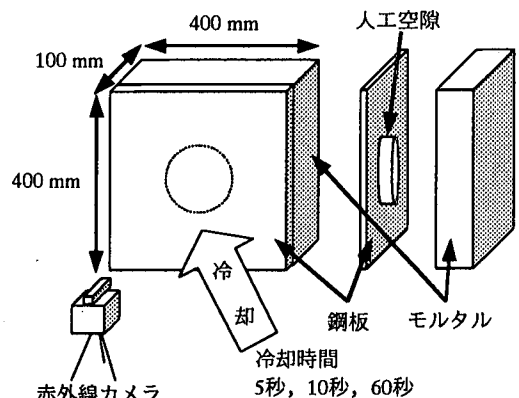


図-3 供試体および計測の概要

表-1 人工空隙の寸法

直径 (mm)	厚さ (mm)	
20	3	10
30	3	10
40	3	10
50	3	10
100	3	10
150	3	10

を使用し、形状は円盤型で鋼板の裏側に貼り付けた。モルタルは鋼板を型枠の底版部に設置後打設し、脱型後 14 日間の気中養生を行なった後、サーモグラフィの計測を開始した。

表-1 に人工空隙の寸法を示す。空隙の厚さについては、筆者らの既往の実験結果<sup>7)</sup>によれば、本実験と同様の条件の場合、0.1mm 程度でも健全部との

表-2 計測装置の仕様

観測視野角	縦 10° × 横 15°
瞬時視野角	2.2m rad モニタ上 1.1m rad
検出器	イリジウムアンチモン (InSb) 10 素子アレイ
検出波長領域	3~5.4 μm
走査線数	100 本
最小検出温度差	0.1°C
温度測定範囲	-20~300°C
冷却方式	スターリングクーラー式

表-3 熱伝導解析に用いた物性値

	熱伝導率 (W/m·K)	比熱 (J/kg·K)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
鋼板	80.31	440	7800
モルタル	2.67	900	2400
人工空隙 (スチレンボード)	0.03	1007	11.8

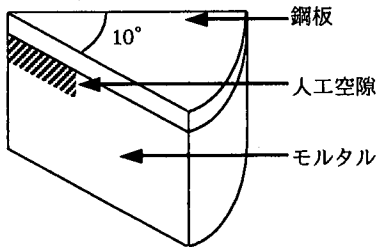


図-4 熱伝導解析に用いたモデル

間に明確な温度差が現れることがわかっている。したがって、本手法は厚さのごく小さい空隙に対する感度は高いものと考えられる。また、本研究で対象とする構造物の場合、工法の制約条件から、鋼板とコンクリート表面とのクリアランスは数 mm 程度であることが多い<sup>10)</sup> ことなどを考慮し、人工空隙の厚さを設定した。

b) 熱負荷の条件

熱負荷は、液体窒素を浸透させた冷却板によって行ない、冷却板の鋼板表面への接触時間を調節することにより、冷却条件の異なるケースを設定した。この実験の場合、熱負荷を与える面は鋼板側であり熱伝導率が非常に大きいので、熱の拡散は奥行き方向だけでなく平面方向にも短時間に生じやすい。したがって、むやみに接触時間を長くすることは、かえって温度変化領域を消失させる方向にはたらくこととなり逆効果である。そこで本実験では、冷却時間を 5 秒、10 秒、60 秒に設定し検討した。

c) サーモグラフィの計測

サーモグラフィの計測には、コンパクトサーモ TVS-2300Mk II ST (日本アビオニクス株式会社製) を用いた。表-2 に装置の仕様を示す。また計測は、冷却終了直後から開始して 60 秒後までは 2 秒間隔、その後は 10 秒間隔で 6 分間行なった。なお、赤外

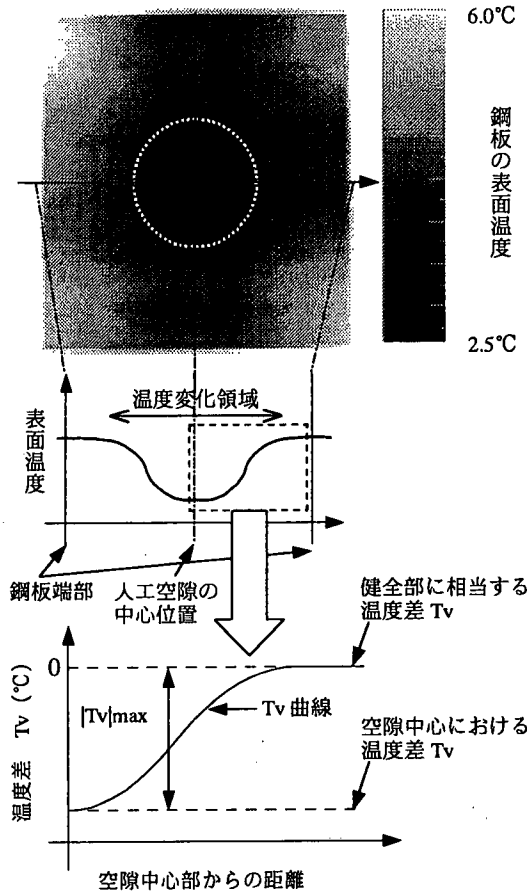


図-5 サーモグラフィの例

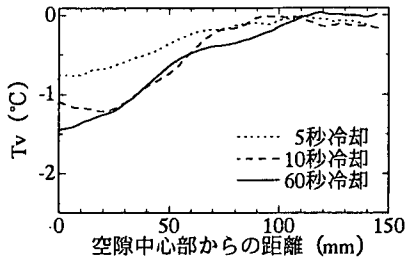
線カメラから鋼板表面までの距離は 2.5 m とした。

(2) 解析概要

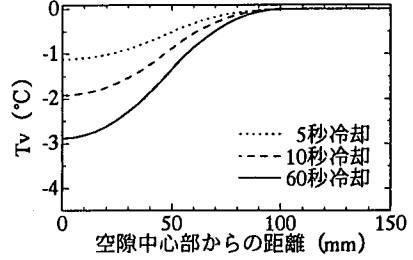
実測値における傾向を解析的にも検証するため、有限要素法による3次元非定常熱伝導解析を行なった。図-4に熱伝導解析に用いたモデル、表-3に各材料の物性値を示す。

4. 平面寸法の推定

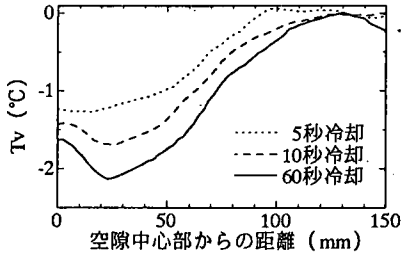
図-5に実験で得られたサーモグラフィの例を示す。この図によれば、空隙の大きさや形状に応じた温度変化領域が確認でき、表面温度は空隙の中心部で最も低く、空隙の外周部分で急激に変化している。本研究では、温度の分布状況をより理解しやすくするため、鋼板上の任意の点と、空隙のない健全部との温度差をTvと定義し、Tvを縦軸に、空隙の中心から半径方向に向かっての距離を横軸にして一次元的な温度分布 (Tv 曲線) として求めたものをもとに結果の考察を行なう。



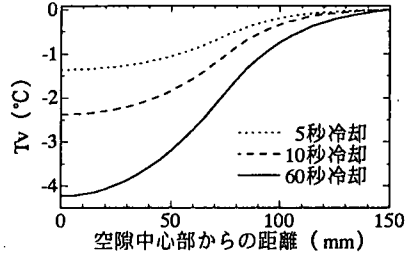
(a) 直径100mm 厚さ10mm (実測値)



(b) 直径100mm 厚さ10mm (解析値)

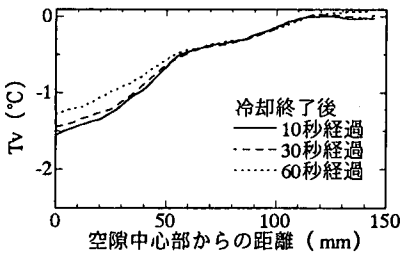


(c) 直径150mm 厚さ10mm (実測値)

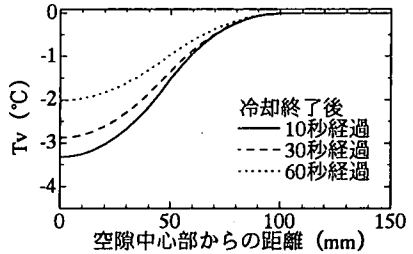


(d) 直径150mm 厚さ10mm (解析値)

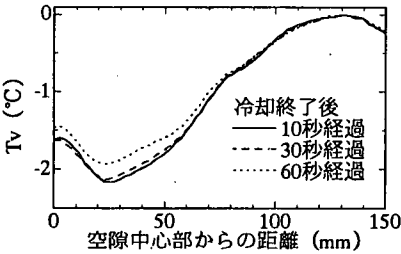
図-6 各冷却時間における Tv 曲線 (鋼板厚 4.5mm, 冷却終了後 30 秒経過)



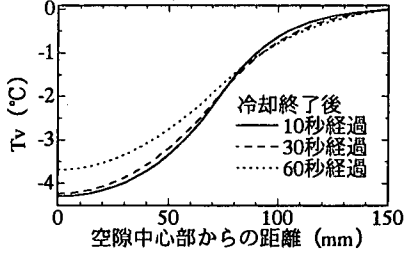
(a) 直径100mm 厚さ10mm (実測値)



(b) 直径100mm 厚さ10mm (解析値)



(c) 直径150mm 厚さ10mm (実測値)



(d) 直径150mm 厚さ10mm (解析値)

図-7 各経過時間における Tv 曲線 (鋼板厚 4.5mm, 60 秒冷却)

(1) 計測条件が温度変化領域の大きさに与える影響

a) 冷却時間による影響

図-6 に各冷却時間における Tv 曲線を直径が異なる 2 つの人工空隙の場合についての実測値(a)(c)と解析値(b)(d)を併せて示す。両者を比較すると、いずれの冷却時間においても空隙の直径の違いにより温度変化領域の大きさが異なっているのがわかる。冷却時間が長くなるにつれ、|Tv| は大きくなるが、温度変化領域の大きさには冷却時間の影響は見られない。解析を行なった結果と比較しても、この傾向

は一致している。

b) 冷却終了後の経過時間による影響

図-7 に、図-6 と同じサイズの空隙(a)~(d)について、計測開始からの各経過時間における Tv 曲線を示す。これらの図によれば、冷却終了直後からの時間経過に伴って |Tv| が小さくなっていくが、温度変化領域の大きさは殆ど同じであり、経過時間が温度変化領域の大きさの評価に与える影響は少ないと考えられる。

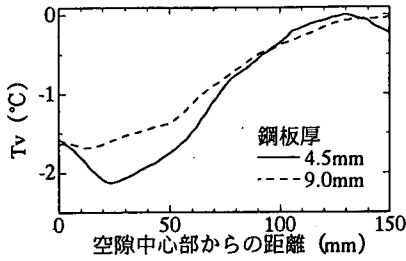


図-8 各鋼板厚におけるTv曲線  
(直径150mm厚さ10mm, 60秒冷却終了後30秒経過)

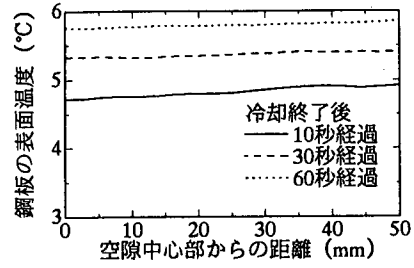
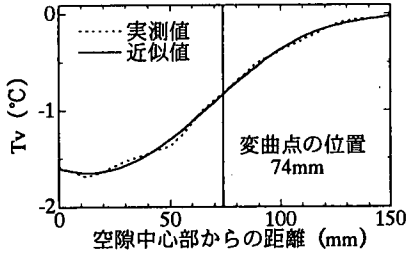
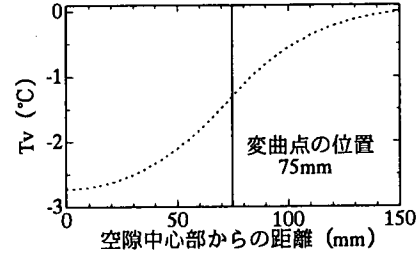


図-9 表面温度分布  
(直径30mm厚さ10mm, 鋼板厚4.5mm, 60秒冷却)



(a) 実測値



(b) 解析値

図-10 変曲点の位置による平面寸法の推定例  
(直径150mm厚さ10mm, 鋼板厚9.0mm, 60秒冷却終了後30秒経過)

### c) 鋼板厚による影響

図-8に、前出の空隙のうちの1つのケースについて各鋼板厚におけるTv曲線の例を示す。この図に示されるように、鋼板が厚くなると|Tv|が幾分か小さくなるが、温度変化領域の大きさへの影響は小さいと考えられる。なお直径が異なる空隙についても、傾向は同じであった。

### (2) 平面寸法の検出限界

空隙の直径が20mm, 30mmでいずれの空隙厚さにおいても、温度変化領域を明確に定義するのは難しく、Tv曲線を得ることはできなかった。図-9にその例を示す。なお、縦軸は鋼板の表面温度を示している。したがって、本研究の範囲内においては、円形空隙の平面寸法の検出限界は、直径40mm程度であると考えられる。

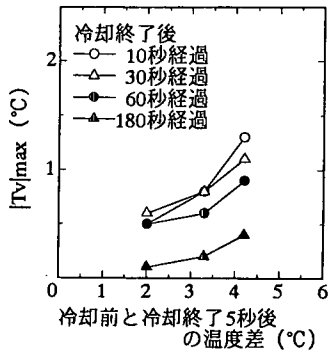
### (3) 平面寸法の推定

4(1)において、温度変化領域の大きさは空隙の直径、つまり平面寸法と対応することが明らかとなった。そこでTv曲線から平面寸法を求める方法を検討した。図-10にその例を示す。実測値を関数近似してその変曲点の位置を求めると、この例においては74mmとなった。この場合、直径が150mmであるので、空隙端部の位置は横軸上において75mmに相当する。したがって、変曲点の位置と空隙端部の位置とは極めて近い値となっている。一方、解析値においては、変曲点の位置が空隙端部の位置と一

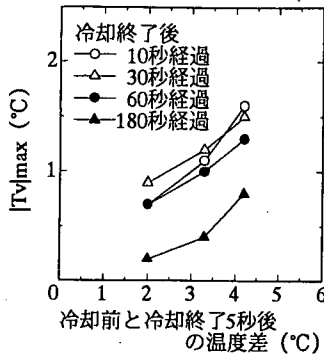
表-4 空隙端部の位置と変曲点の位置との比較

空隙の寸法 (mm)		鋼板厚 (mm)	空隙端部の位置 (mm)	変曲点の位置 (mm)	
直径	厚さ			実測値	解析値
40	10	4.5	20	23	20
		9.0	(40/2)	—	
50	10	4.5	25	26	25
		9.0	(50/2)	27	
100	10	4.5	50	48	50
		9.0	(100/2)	54	
150	10	4.5	75	72	75
		9.0	(150/2)	74	
		冷却時間 (sec)			
100	10	5	50 (100/2)	49	50
		10		54	
		60		48	
150	10	5	75 (150/2)	70	75
		10		70	
		60		72	
100	10	10	50 (100/2)	46	50
		30		47	
		60		48	
150	10	10	75 (150/2)	71	75
		30		71	
		60		72	

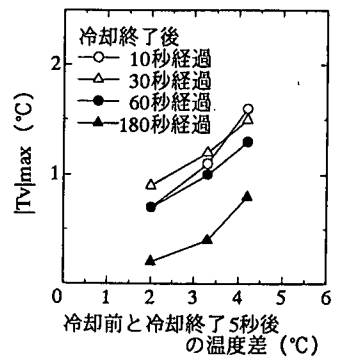
致した。表-4にその他の空隙に対して変曲点の位置を求め、空隙端部の位置と比較した結果を示す。鋼板厚、冷却時間、経過時間が異なる場合でも、両者の位置が近い値となることがわかる。したがって、Tvの関数近似曲線の変曲点は、円形空隙の直径を推定するのに有効であると考えられる。



(a) 直径100mm 厚さ3mm  
鋼板厚4.5mm

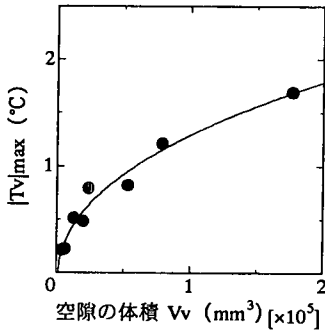


(b) 直径100mm 厚さ10mm  
鋼板厚4.5mm

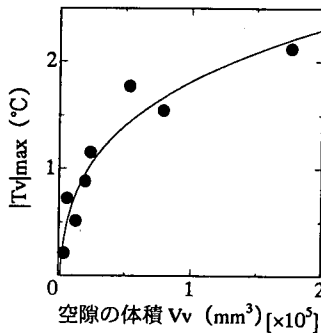


(c) 直径100mm 厚さ10mm  
鋼板厚9.0mm

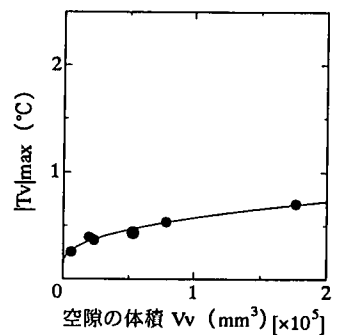
図-11 冷却条件と  $|Tv|_{max}$



(a) 鋼板厚4.5mm  
10秒冷却終了後30秒経過



(b) 鋼板厚4.5mm  
60秒冷却終了後30秒経過



(c) 鋼板厚9.0mm  
10秒冷却終了後30秒経過

図-12 空隙の体積と  $|Tv|_{max}$

これにより、評価可能な温度分布が得られる範囲内であれば、欠陥の平面寸法を推定することが可能となる。また、この推定が目的であれば、冷却時間、経過時間、鋼板厚の計測条件は、評価結果にはあまり影響を与えないものと思われる。

## 5. 厚さの推定

空隙の平面寸法が同じであっても、厚さが変わると温度変化領域における温度変化の程度が異なる。これは、断熱温度場法においては、空隙の体積は熱拡散の断熱効果に直接影響を与えることから容易に理解できることである。このため、厚さの推定では、平面方向の大きさに加えて温度差そのものが重要となる。そこで、温度変化の代表値として、空隙による温度変化領域の温度差の最大値  $|Tv|_{max}$  を定義し(図-5参照)、その傾向について考察する。

### (1) $|Tv|_{max}$ の傾向

図-11(a)~(c)に冷却条件(冷却直前と冷却終了5秒後の鋼板の表面温度差)と  $|Tv|_{max}$  の関係を示す。 $|Tv|_{max}$  は冷却条件によって変化し、この場合冷却

時間を長くし、熱負荷を大きくするほど大きくなる。(a)と(b)を比較した場合、空隙が同じ直径で厚さが増すほど大きくなった。これは厚さが増すことによって、さらに熱の遮断効果が増すためであると思われる。また全体を通して、冷却を終了してからの時間経過に伴い、 $|Tv|_{max}$  が小さくなっている。 $|Tv|_{max}$  の低下は、60秒経過後までは小さいが、それ以降で大きくなる傾向が見られる。また、(b)と(c)を比較した場合、空隙が同じ寸法では鋼板厚が増すと  $|Tv|_{max}$  は小さくなる。さらに、熱負荷を増やしたことによる  $|Tv|_{max}$  の変化も、厚い鋼板の方が緩やかである。これは鋼板厚が増すと熱拡散の大きい領域が増え、冷却の効果が低減することによるものであると思われる。

以上の結果をまとめると、 $|Tv|_{max}$  は冷却条件、計測開始からの経過時間、鋼板厚といった計測条件により影響を受けることがわかる。

### (2) 空隙の体積と $|Tv|_{max}$

$|Tv|_{max}$  は空隙の平面寸法および厚さの両方に影響されると同時に、計測条件により影響を受けることが明らかになったので、同一の計測条件の下、図-12に示すように空隙の体積(円盤の体積)と

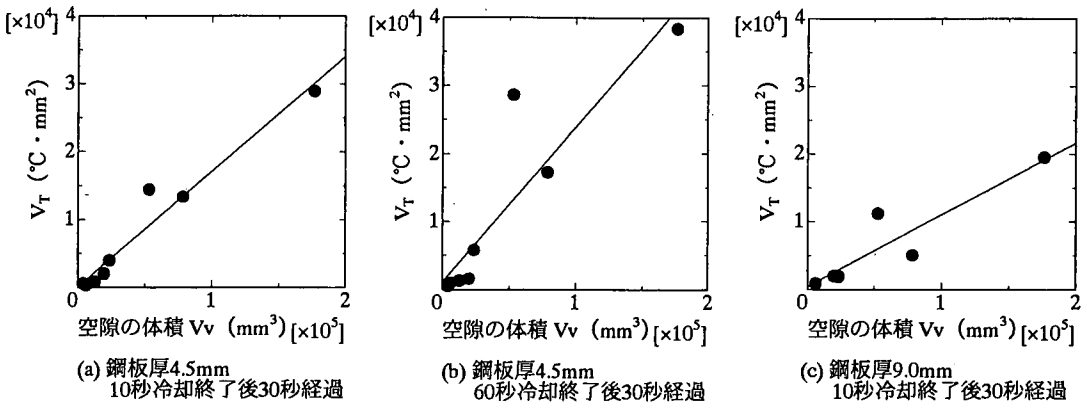


図-13 空隙の体積と  $V_T$

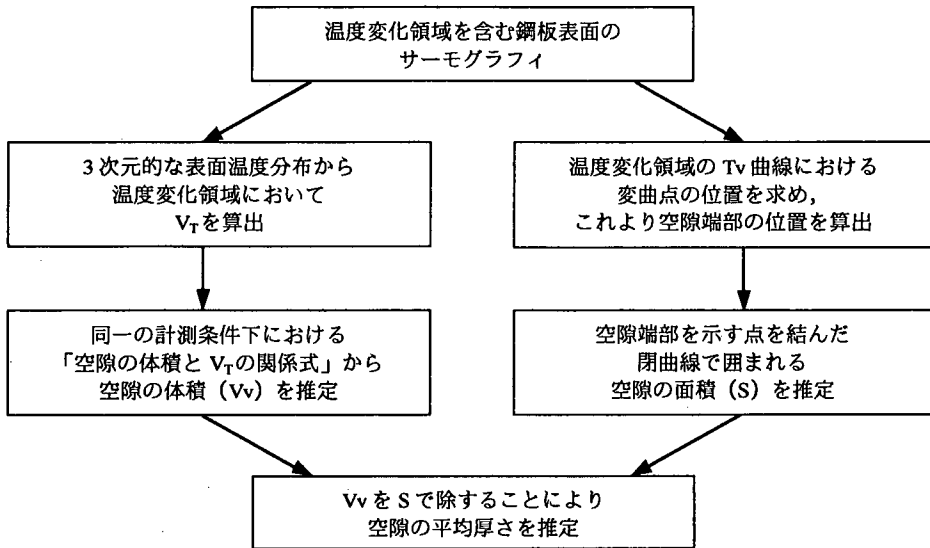


図-14 空隙の平面寸法および厚さ推定のプロセス

$|Tv|_{\max}$  との関係調べた。空隙の体積が大きくなるに従って、 $|Tv|_{\max}$  の値は増加するが次第に頭打ちになるようである。

### (3) 空隙の体積と $V_T$

温度変化領域の鋼板表面上の微小面積とその部分の温度差の積の総和（温度変化領域を立体的に表した場合の体積，図-2 参照）を  $V_T$  と定義し，これと空隙の実際の体積との関係を調べた。図-13 にこの関係を示す。なお  $V_T$  は式(1)にて算出した。

$$V_T = \int_S |Tv| dA \quad (1)$$

ここに、 $Tv$ ：健全部の温度を  $0^\circ\text{C}$  としたときの温度変化領域における温度差， $dA$ ：鋼板の微小面積， $S$ ：検査領域である。 $V_T$  は空隙による熱の遮断効果の程度を表す指標であり， $V_T$  によれば空隙の平面寸法や厚さの影響を評価することができるものと

考えられる。

これによれば，空隙の体積は  $V_T$  と良い相関があり，しかも直線関係にあることがわかる。したがって， $V_T$  が算出できれば，この関係を用いて空隙の体積を推定することが可能になると思われる。さらにこの関係を使うことにより，前節で示した  $|Tv|_{\max}$  が頭打ちになるような，規模の大きな空隙に対しても，評価が可能になると考えられる。

### (4) 厚さの推定

図-14 に空隙の厚さを推定するフローチャートを示す。このように，空隙の体積と  $V_T$  との関係が予め把握できれば，ここに示す手順により空隙の厚さの推定が可能である。空隙の体積と  $V_T$  の関係については，ある計測条件（冷却時間および計測時の経過時間）のもとで体積の異なるいくつかの空隙について実験を行ない，1 次関係式を求めておくことが

必要である。また、実際に近い適切なモデルを構築し、この関係を解析的に求めることができれば、厚さの推定はより簡潔に行なえるようになるものと考えられる。

## 6. おわりに

本研究において提案する鋼-コンクリート間空隙の平面寸法および厚さの推定手法をまとめると、以下のようになる。

- (1) 空隙の平面寸法を推定するには  $T_v$  曲線を用いる。温度変化の変曲点の位置から円形空隙の端部の位置が推定できる。この場合、冷却時間や測定時の経過時間、鋼板の厚さの影響は殆ど受けない。
- (2) 空隙の厚さを推定する場合は、ある計測条件下における「空隙の体積と  $V_T$  の関係式」を用いる。推定の手順としては、まず、サーモグラフィにおいて  $V_T$  の値を算出する。次に「空隙の体積と  $V_T$  の関係式」を用いて空隙体積の推定を行なう。さらに、同じサーモグラフィの  $T_v$  曲線から空隙端部の位置を求め、空隙の平面寸法を推定する。平面寸法を得たところで空隙の面積を求め、推定された空隙体積より空隙厚さの算出を行なう。

今後は、実構造物における計測を実施し、現場での適用に関する問題点の抽出および検討を行なう予定である。検討項目としては、まず、検査の効率を高めるための迅速で簡易的な冷却方法の開発や、サーモグラフィのポスト処理のシステムの構築が考えられる。さらに任意形状の空隙の取り扱いについても検討を加えていくつもりである。

また、一方で、空隙の大きさや厚さと補強効果との関係を把握し、これを基に評価におけるしきい値を設定することにより、適確な健全度判定ができるよう工夫していくことも重要と考える。

## 参考文献

- 1) たとえば、谷川恭雄、森 博嗣、安 龍男：サーモグラフィによるRC構造物の内部欠陥探査、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10, No.2, 1988.
- 2) 丸茂文夫、神谷 誠、飯束義夫、菅野 匡：鋼板接着されたコンクリート床版の剥離非破壊検査法の研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.1, pp.1249-1254, 1995.
- 3) 渡辺 正、魚本健人：型わく面の熱赤外線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.
- 4) 柳内睦人、魚本健人：熱赤外線計測技術によるコンクリート構造物内空隙・鉄筋の判読に関する基礎的研究、土木学会論文集、No.442/V-16, pp.91-100, 1992.
- 5) 相良健一、魚本健人：炭素繊維シートで補修・補強されたRC構造物の欠陥の検知について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.1203-1208, 1996.
- 6) 長瀧重義、鎌田敏郎、矢崎剛吉、黒坂 基、岩波光保：非破壊試験による鋼・コンクリート合成構造の欠陥評価法に関する研究、土木学会論文集、No.564/V-35, pp.133-143, 1997.
- 7) 岩波光保、鎌田敏郎、長瀧重義、大即信明：赤外線サーモグラフィ法による鋼・コンクリート間の空隙評価、非破壊検査、第47巻11号、pp.825-829, 1998.
- 8) 上田信二、福島浩一、鳥居和之、松田康孝：赤外線サーモグラフィによる鋼板巻立てコンクリート橋脚の空隙探査に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.1, pp.1321-1326, 1997.
- 9) たとえば、阪上隆英、小倉敬二、Douglas Burleigh, Jane W.M.Spicer：赤外線サーモグラフィを用いた非破壊欠陥計測技術の動向、非破壊検査、第45巻11号、pp.788-797, 1996.
- 10) 土木学会：コンクリート構造物の維持管理指針(案)、コンクリートライブラリー81、p.108, p.112, 1995.

(1999.9.20 受付)

## DETECTION OF INTERFACIAL FLAWS BETWEEN STEEL PLATES AND CONCRETE MEMBERS USING THE THERMOGRAPHIC TECHNIQUE

Toshiro KAMADA, Takayuki KAWASE, Minoru KUNIEDA and Keitetsu ROKUGO

This paper describes a nondestructive method to evaluate the size and depth of interfacial defects between the concrete members and the enclosing steel plate by the infrared thermographic technique. In this procedure, in order to investigate the influence of a defect in a thermography, liquid nitrogen is used to cool the surface of the steel plate. Its thermal distribution are measured. From these measurements, it is possible to estimate the diameter of circular defects from the calculated inflection points in the thermal distribution curve. The process to evaluate the depth of the defects by using the relation between the volume of the defects and proposed thermal parameters is also presented.