

コンクリート構造物の非破壊検査システムの開発

－打音法と赤外線サーモグラフィ法－

Development of Non-Destructive Inspections for Quality Assurance of Concrete Structures

- Non-Destructive Inspections by Hammering Test and Infrared Thermography -

川口昇平* 石井敏之* 東 邦和* 廣中哲也*

要 旨

近年、国内の膨大なインフラが耐用年限の域にさしかかり、老朽化する構造物の維持・補修が重要な課題となっている。これらの社会資本ストックの維持には効率的で、低コストな調査が欠かせない。ライフサイクルコストの面からも、適切な時期に適切な補修を施すことが、構造物を維持する上で有利となる。そのため、コンクリート構造物の品質をいかに効率的に調査し、保証するかということに主眼を置き、非破壊検査システムの開発を進めている。本稿では非破壊検査システムのうち、打音法と赤外線サーモグラフィ法による検査を取り上げ、開発の概要について報告する。

キーワード：維持補修、品質保証、非破壊検査、打音法、赤外線サーモグラフィ法

1. まえがき

米国ミネソタ州ミネアポリス市の落橋事故を受けて、橋梁の点検が本格的に進められている。時期は前後するが、日本国内でも木曾川大橋(愛知県)で鋼材の破断が見つかっており、本荘大橋(秋田県)ではトラス部材が破断する事例が発生している。鋼橋に限らず、コンクリート橋やトンネル、上水および下水施設等のコンクリート構造物の多くは、耐用年数が 30～80 年と想定されている。このように構造物の耐久性調査や維持補修の面からも、非破壊検査技術の向上が必要となっている。

さて、非破壊検査と一括りに言われるが、検査対象とする欠陥や劣化は、それぞれの検査機器により検査方法も検査精度も異なる。実際の非破壊検査の場面で、単一の検査機器による調査のみで済むケースは少ない。構造物の状態および品質を検査するためには、原理が異なる非破壊検査手法を適切に組み合わせ、相互に補完しあうことで、検査精度を高めることが重要である。

今回取り上げた打音法と赤外線サーモグラフィ法は、接触時間が短いまたは非接触の検査手法であり、広範囲を迅速に検査できる手法として位置づけている。打音法は、周波数スペクトルの特定の周波数域に検出される周波数ピークから欠陥の有無を判定する手法を開発し、コンクリートかぶり 10 cm の空洞部の検知できる性能を確保した。また赤外線サーモグラフィ法に関しては、太陽

光や外気温により生じる温度差を利用したパッシブ法の検査精度を確認した。

2. 非破壊検査システムの概要

非破壊検査システムは、既存コンクリート構造物の劣化調査や、新設構造物の品質保証に必要な検査項目を抽出し、その検査項目を確実に検出するために必要な検査を組み合わせるものである。非破壊検査システムのフローを図-1に示す。

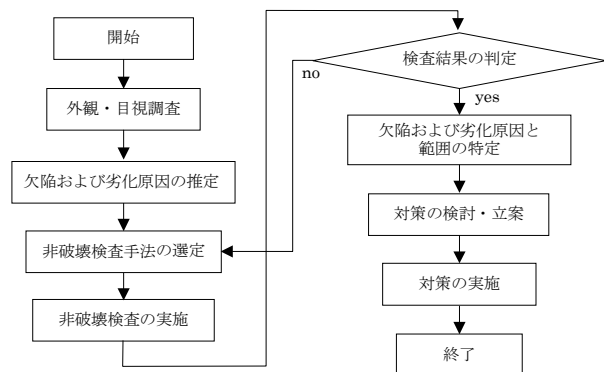


図-1 非破壊検査システムのフロー

*技術研究所

3. 打音法

3.1 打音法システムの概要

打音法システムは、打撃装置とマイクロフォン、データの収録と処理を行う解析用パソコンで構成されている。点検者が目視を行いながら検査できるので、仕様等で規定された頻度の検査の他、欠陥の兆候が見られる箇所では密度の高い検査をすることも可能である。図-2 にシステムの構成を示す。

3.2 原理

打音法は弾性波を用いた調査手法の一つである。打音法に用いる装置は、ソレノイドコイルの磁力により一定の力で打撃を加えるハンマーと、打撃により発生する音を収録するマイクロフォンの2つの機器で構成されている。図-3 および図-4 に示すように、打音法システムはマイクロフォンで収録した打撃音の振動波形を高速フーリエ変換により、周波数スペクトルに変換して判定を行う。欠陥部の周波数スペクトルは、健全部とは異なる周波数帯に特異なピークが生じるため、それを検出することで判定が可能になる。特に欠陥部で共振により大きなエネルギーを生じる場合、マイクロフォンで収録するエネルギーも大きくなるため、周波数スペクトルの積分値からも判定が可能となる。本システムでの上記の二つの手法により、欠陥の判定を行う。供試体の共振パターンには、たわみ共振や縦波共振などが挙げられるが¹⁾、本装置で検出されるのは主にたわみ共振によるスペクトルである。

3.3 性能確認実験

a. 試験体

かぶりが 25~300mm、一辺の長さが 100mm~500mm の空洞を模擬した欠陥（厚さ 10 mm の発泡スチロール）とする供試体を作製し、打音の測定を行った。欠陥サイズとかぶりの組合せの一覧を表-1 に示す。

b. 打音測定方法

打撃音の測定は、φ25 mm の鋼球により、図-5 のように 100 mm 間隔のメッシュの交点(7×7=49 点)および中心点(8×8=64 点)の計 113 点に対して行った。

c. 欠陥判定方法

(a) エネルギー判定法

エネルギー判定法では、マイクロフォンに収録される打撃音の周波数スペクトルを積分した値で判定する²⁾。打撃により発生した弾性波は、コンクリート表面からの音とコンクリート内部からの音としてマイクロフォンに集音される。欠陥が無い供試体の場合、内部からの反射音が小さいため、収録される音の大半が表面からの反射音となる。欠陥がある場合は、欠陥部の共振により弾性波が返ってくるため、エネルギー値が大きくなり、異常と判定することになる。この方法は内部から比較的大きな反響音を得られる場合には有効である。本供試体の予

備打撃の結果から健全部のエネルギー値は 1200~1900mV²（平均 1600mV²）であった。

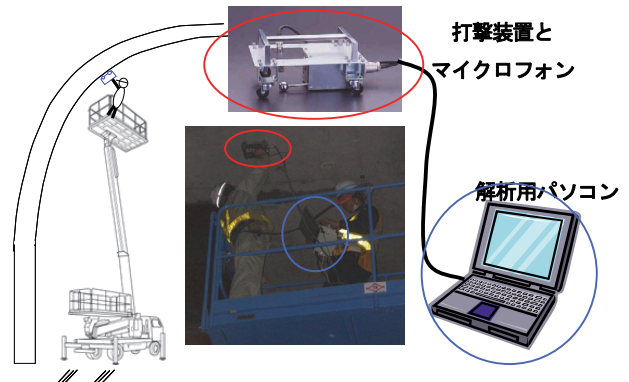


図-2 打音法システムの構成

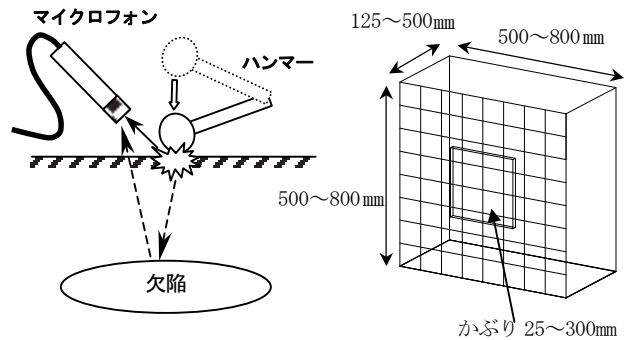


図-3 音の伝播モデル

図-5 供試体形状

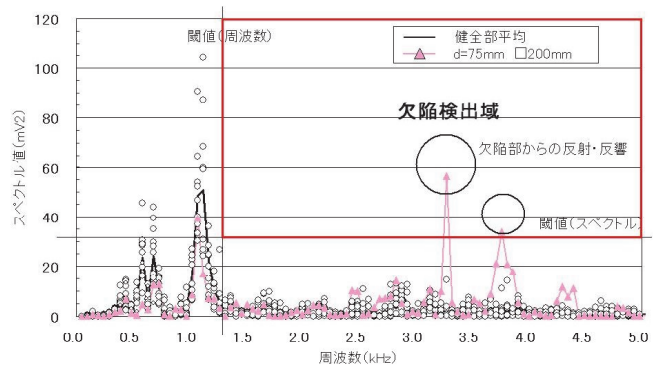


図-4 周波数スペクトルの例

表-1 打音法の供試体シリーズ一覧

供試体 No.	供試体寸法(mm)	欠陥寸法(mm)	かぶり(mm)
1	500×500×125	100×100×10	25, 100
2	500×500×125	150×150×10	25, 100
3	500×500×150	200×200×10	50, 100
4	500×500×150	100×100×10	50, 100
5	500×500×175	150×150×10	75, 100
6	500×500×175	200×200×10	75, 100
7	800×800×350	100×100×10	150, 200
8	800×800×350	150×150×10	150, 200
9	800×800×350	200×200×10	150, 200
10	800×800×350	300×300×10	150, 200
11	800×800×500	500×500×10	200, 300
12	800×800×450	150×150×10	200, 250
13	800×800×450	200×200×10	200, 250
14	800×800×450	300×300×10	200, 250

そこで、今回は健全部のエネルギーデータから 2000mV² 以上を欠陥として設定した。実験ではかぶり 50 mm以下の場合、最小で 100 mm×100 mmサイズの欠陥まで検出が可能であり、欠陥寸法が 200 mm×200 mm以上の場合、かぶり 100 mmまで検出可能である。結果の一覧を表 2 に示す。

(b) 周波数スペクトル判定法

周波数スペクトルは主に表面と欠陥に挟まれた部材のたわみ振動による波形から生じていると考えられる。

有限長平板の周辺固定条件による一次固有振動数 $f_{0,fix}$ は式(1)により表される³⁾。

$$f_{0,fix} = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \left(\frac{2.25}{a^2} + \frac{1.4}{b^2} \right) \left(\frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} h \quad (1)$$

- ここに、 a : 短辺長 (m)
- b : 長辺長 (m)
- h : 平板厚 (m)
- E : ヤング係数 (N/m²)
- ρ : 密度 (kg/m³)

である。式(1)より求めた計算上の共振周波数を表 3 に示す。桃色の部分が今回の打音装置で判定可能な範囲 (2~12kHz の周波数帯) である。実際に周波数ピークが得られた周波数と欠陥寸法およびかぶりの関係を表 4 に示す。これより、表 3 の計算上のたわみ共振周波数と表 4 のピーク周波数測定値の結果が同じ傾向にあることが分かる。

3.4 まとめ

これらの実験より、エネルギー値と周波数スペクトル値による判定では、それぞれ検出できる欠陥の範囲が異なることが分かった。欠陥が浅い範囲はエネルギー法で検出可能であり、やや深い範囲では周波数スペクトル法による検出が期待できる。そこで、それぞれの判定法を複合的に判定を行うことで、概ね、かぶり 100 mmまでの欠陥は検知できることが分かった。表 5 の青色で囲まれた部分は高い精度で欠陥の検出が可能な範囲といえる。

4. 赤外線サーモグラフィ法

4.1 赤外線サーモグラフィ法の概要

赤外線サーモグラフィ法は、対象物の表面温度を測定し、コンクリート表層の健全部と、浮きや剥離部に生じる温度差を把握することにより、欠陥部を検出する調査技術である。特長としては、広範囲を短時間で調査することである。しかし、健全部と欠陥部に生じる温度差は、測定の時間、位置、および環境条件により変化するため、この測定条件の違いが、赤外線サーモグラフィ法の検出精度に大きく影響する。

4.2 原理

あらゆる物質は温度をもっており、その温度に応じた量の赤外線を放出している。赤外線サーモグラフィ法は被測定物から放出されている赤外線量を計測することで、表面温度を読み取る装置である。測定方法にはパッシブ法とアクティブ法の2種類がある。パッシブ法は太陽光や外気温の熱の授受によって、浮きや剥離部と健全部の表面温度の上昇と下降に伴う温度差を見る方法である。もう一方のアクティブ法は熱の授受をヒーターなどで行うものである。

表 2 エネルギー判定法の結果一覧 単位 mV²

欠陥サイズ (mm)	欠陥までのかぶり (mm)						
	0	25	50	75	100	125	150
50							
100	16117		2915		1686		1606
150	22637		4512	1585	1605		1504
200	69018		5763	2119	2128		1424
250							
300			16970				1659
350							
400							
450							
500							

表 3 たわみ共振周波数の計算値 単位 kHz

欠陥サイズ (mm)	欠陥までのかぶり (mm)												
	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
50	48	97	145	193	241	290	338	386	435	483	531	579	
100	12	24	36	48	60	72	84	97	109	121	133	145	
150	5.4	11	16	21	27	32	38	43	48	54	59	64	
200	3.0	6.0	9.1	12	15	18	21	24	27	30	33	36	
250	1.9	3.9	5.8	7.7	9.7	12	14	15	17	19	21	23	
300	1.3	2.7	4.0	5.4	6.7	8.0	9.4	11	12	13	15	16	
350	1.0	2.0	3.0	3.9	4.9	5.9	6.9	7.9	8.9	9.9	11	12	
400	0.8	1.5	2.3	3.0	3.8	4.5	5.3	6.0	6.8	7.5	8.3	9.1	
450	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2	
500	0.5	1.0	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.3	4.8	5.3	5.8	

表 4 ピーク周波数の測定値 単位 kHz

欠陥サイズ (mm)	欠陥までのかぶり (mm)												
	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
50													
100	7.8	8.6			×		×		×				
150	4.9	5.9	6.5	7.0		×		×		×			
200		4.3	5.1	5.1		×		×		×			
250													
300		2.3							4.1		5.2		
350													
400													
450													
500									3.1				3.2

表 5 打音法で判定可能な欠陥範囲

欠陥サイズ (mm)	欠陥までのかぶり (mm)												
	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
100	○	○	○	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×
150	○	○	○	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×
200	○	○	○	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×
250	○	○	○	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×
300	○	○	○	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×
350	○	○	○	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×
400	○	○	○	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×
450	○	○	○	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×
500	○	○	○	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×

高い精度で判定可能な範囲
エネルギー値による判定が可能な範囲
周波数スペクトルによる判定が可能な範囲

4.3 性能確認試験

a. 試験体

試験体は、欠陥の大きさを 50mm、100mm、200mm の 3 パターン、かぶりを 10mm、30mm の 2 パターンとする 6 体と、欠陥のない 3 体、計 9 体とした。試験体の作製は、型枠 250×250×100mm～400×400×100mm 中に欠陥（厚さ 5mm の発泡スチロール）を埋設し、コンクリートを打設した。試験体形状の詳細を表-6 に示す。

b. 計測

写真-1 に示すように、9 体の試験体を一面（正面）以外には直射日光が当たらないように合板で覆った。さらに、単管パイプで組み立て、試験体の向きを東西南北に回転できるようにした。

計測項目は、試験体の熱画像と可視画像、および外気温と試験体正面への日射量とした。熱画像と可視画像の測定は、測定の方角（東西南北）に向けた試験体正面に正対した測定距離 5m の位置から、赤外線サーモグラフィで撮影した。また、外気温および試験体正面への日射量の測定は、温度計および日射量計を配置して行った。計測器の仕様を表-7 に示す。

c. 実験ケース

今回検討する影響因子は、気象、測定時間、撮影角度および欠陥部の形状とした。表-8 に実験ケースを示す。

d. 欠陥部の検出方法

熱画像による欠陥部は、撮影した熱画像を図化処理し、目視で検出して評価を行った。健全部と欠陥部との温度差ができるだけ明確になるように、画像の色調整を行い、5 段階で目視により欠陥部を評価した。「大きさ・形状は判定できないが、ほぼ欠陥があると判断できる」場合を判定値 3 とし、3 以上は欠陥ありと判定した。表-9 に評価判定基準を示す。評価検出に用いた熱画像の出力例を図-6 に示す。8:00 では画像に差がないが、13:20 になると明らかな差が出ているのが分かる。

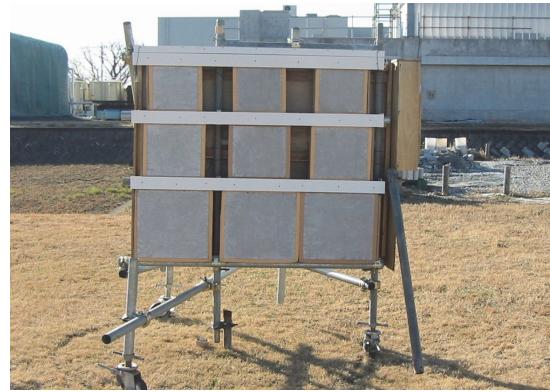


写真-1 試験体設置状況

表-6 赤外線サーモグラフィ法の試験体のシリーズ

試験体名	コンクリート		欠陥部	
	寸法	厚さ	寸法	かぶり
1 C05-0	250×250	100		
2 C05-1	250×250	100	50×50	10
3 C05-3	250×250	100	50×50	30
4 C10-0	300×300	100		
5 C10-1	300×300	100	100×100	10
6 C10-3	300×300	100	100×100	30
7 C20-0	400×400	100		
8 C20-1	400×400	100	200×200	10
9 C20-3	400×400	100	200×200	30

表-7 赤外線サーモグラフィ法の計測器の仕様

測定項目	測定器名およびメーカー型式	仕様
熱画像	赤外線サーモグラフィ NEC三栄機 TH9001PMV	測定範囲 : -20～100°C (0～200°C)
		最小検知温度 : 0.06°C (at30°C60Hz時)
		測定精度 : ±2°C
		検出器 : 二次元非冷却(マイクロボロメータ)
		測定波長 : 8～14 μm
可視画像	温度センサー 日置電機機 3633温度ロガー +9631温度センサー	熱画像画素数 : 320×240
		可視画像画素数 : 752×480
		重量 : 約1.6kg
気温/湿度	温度センサー 日置電機機 3633温度ロガー +9631温度センサー	入力 : 1CH
		測定範囲 : -40～180°C
		温度センサー : サーミスタ
日射量	全天日射計センサー 株式会社製作所 LP-PYRA-03	精度 : ±1°C
		測定範囲 : 0～2000W/m ²
		スペクトル範囲 : 305nm～2800nm
		視角 : 2π sr
		重量 : 0.45kg

表-8 赤外線サーモグラフィ法の実験ケース

ケース名	天候	撮影角度				撮影時間	撮影角度	備考
		東	西	南	北			
ES	晴天	●				6:00～19:00 20分間隔	正対	撮影距離 5m
WS			●					
SS				●				
NS					●			
EC	曇天	●						
WC			●					

表-9 評価判定基準

判定値	検出評価基準
1	判別が難しく、欠陥部が無いと判定できる
2	判断が難しいが、欠陥部がありそうである
3	大きさ・形状は判定できないが、ほぼ欠陥部があると判断する
4	欠陥部の大きさ・形状がほぼ判定できる
5	欠陥部の大きさ・形状が明確に判定できる

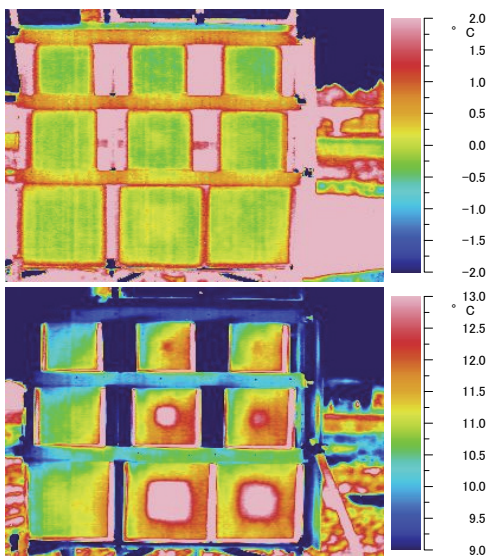
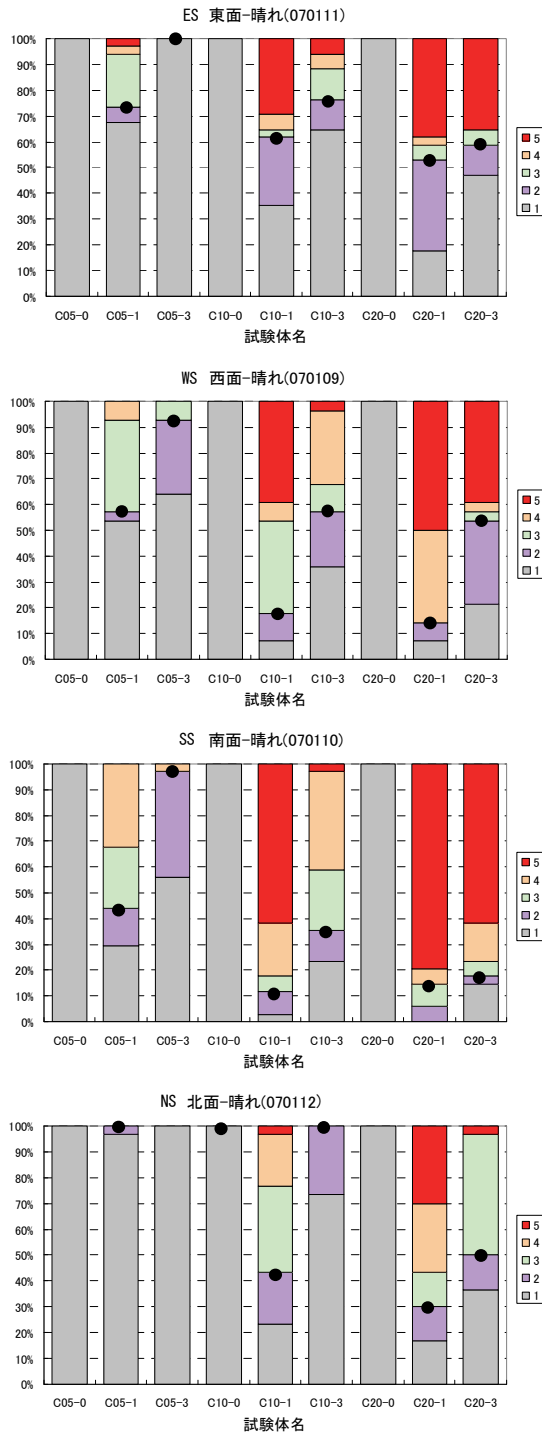


図-6 熱画像出力例 (上: WS - 08:00 下: WS - 13:20)

e. 検出結果

北面配置以外では以下のことがいえる。

- i. 欠陥部の大きさが、 100×100 mm以上で、かぶりが30 mm以下であれば、ほぼ欠陥部が検出できる
- ii. 欠陥部の大きさが 50×50 mmの場合、かぶりが10mmで検出することができる
- iii. かぶりが30mmでは、検出することが難しい



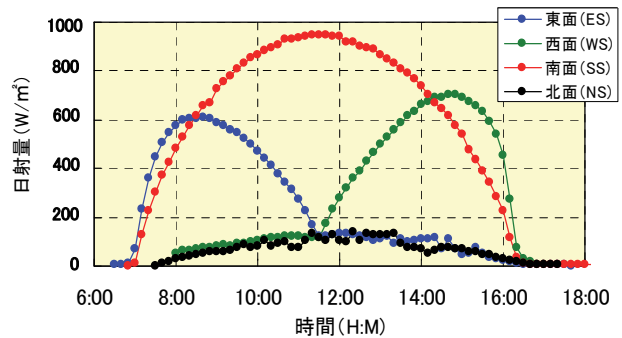
図一七 評価分布 (●は判定境界)

また、北面配置では以下のことがいえる。

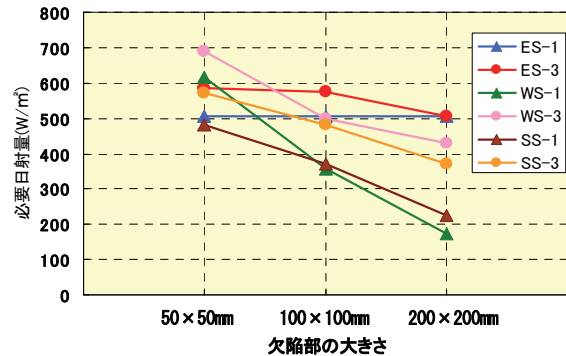
- i. 欠陥部のかぶりが 10mm までであれば 100×100 mm以上の欠陥部の検出ができる
- ii. かぶりが 10 mmより深いものは検出が難しい

欠陥部の検出の割合から、配置による検出のしやすさは、南面>西面>東面>北面の順となった。図一七に評価判定結果の分布を示す。縦軸は計測時の判定値の割合を表示している。●は欠陥あり(判定値3)と欠陥なし(判定値2)の境界を表している。北面に比べ、南や西、東で●の位置が下方に、つまり欠陥ありと判定できる割合が高くなっているのが分かる。また、図一八に測定方角と日射量の関係、図一九には欠陥部の大きさと異常(判定値3以上)と判定されたときの日射量(必要日射量)との関係を示した。これより $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ の欠陥を検出するには 600 W/m^2 程度の日射量があればよいことが分かる。また $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 以上でも、かぶりが30 mm以下であれば、 $400 \sim 500 \text{ W/m}^2$ でも十分に検出することが可能である。

図一十に、欠陥部の熱画像による評価判定結果(判定値3以上)と測定面の方角および測定時間との関係を示す。なお、1月9日~1月12日の期間の日の出、および日の入りは 6:50 および 16:45 頃で、南中時刻は 11:45 頃であった。今回の実験では、方角別の測定に最適な時間は、東面が 8:00~10:00、南面が 10:00~13:00、西面が 13:00~15:00、北面が 10:00~11:00 と 12:30~13:30 となっている。また日の入りの 16:50 頃になると、



図一八 測定方角と日射量の関係



図一九 欠陥部の大きさと必要日射量の関係

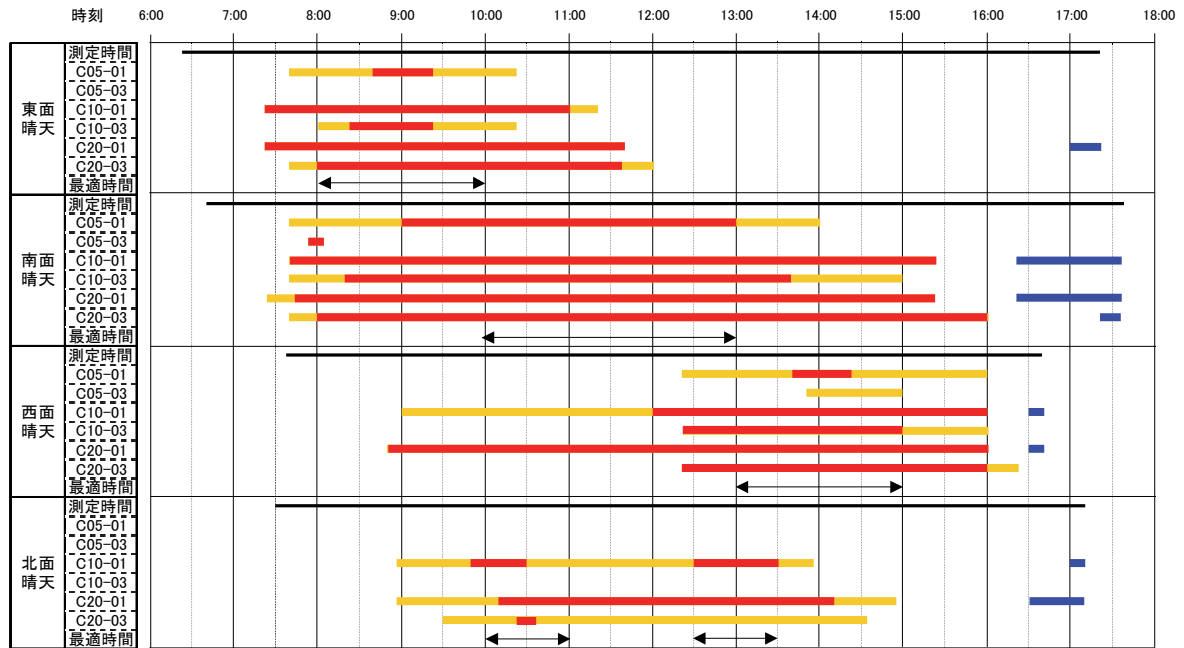


図-10 欠陥部の検出結果と測定時間の関係
 ■ 判定値3以上
 ■ 判定値4以上
 ⇔ 検査に適した時間帯
 ■ 判定値3以上(低温)

測定方向に関係なく全ての実験ケースにおいて、欠陥部のほうが低温となって、欠陥部が検出できる時間帯があった。

4.4 まとめ

以下に、得られた結果のまとめを示す。なお、これらの知見は関東地方の測定に対して有効である。

- i. 今回の実験より熱画像による欠陥部の検出を行った結果、測定方向別の最適な測定時間は、以下のとおりであった
 - 東面 8:00~10:00
 - 南面 10:00~13:00
 - 西面 13:00~15:00
 - 北面 10:00~11:00 と 12:30~13:30
- ii. 測定方向の違いによる欠陥部の検出のしやすさは南面>西面>東面>北面の順であった
- iii. 欠陥部の検出に影響している因子は、測定面への日射量である
- iv. 欠陥部の大きさが 100×100 mm以上で、かぶりが 30 mm以下であれば、欠陥部の検出に必要な日射量は 400~500 W/m²程度以下である

5. 結論

打音法に関しては、周波数スペクトル法とエネルギー判定法により、かぶり 50 mm程度の欠陥検知の精度が確

認できた。赤外線サーモグラフィ法に関しては、冬期にパッシブ法で試験を行った結果、測定面への日射量の影響が大きかったことが分かった。検出のしやすさは南面、西面、東面、北面の順であり、400~500W/m²程度の日射量があれば欠陥が検出できることが分かった。

6. あとがき

赤外線サーモグラフィ法は今後、春夏について実験を行い、打音法は打撃力とかぶり、周波数スペクトルの関係について実験を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 川口昇平、東 邦和、廣中哲也、「打音法によるコンクリート内部の欠陥検出手法の検討」、土木学会年次学術講演会第5部、pp.25-26、2007.9
- 2) 社団法人土木学会編、「弾性波法によるコンクリート非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集」、2004.8
- 3) 社団法人日本音響材料協会編、「騒音・振動対策ハンドブック」、技報堂、1982.2
- 4) 財団法人土木研究センター、「土木コンクリート構造物のはく落防止用赤外線サーモグラフィによる変状調査マニュアル」、2005.3