

# 舗装熱を利用したサーモグラフィー法による RC床版内部の欠陥検出に関する研究

金光寿一<sup>1</sup>・柳内睦人<sup>2</sup>・三星智典<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 中央工学校 土木測量学部土木建設科(〒114-8543 東京都北区王子本町一丁目 26-17)

E-Mail:kanamitu\_j@chuoko.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 博(工) 日本大学教授 生産工学部土木工学科(〒275-8575 千葉県習志野市泉町一丁目 2-1)

E-Mail:yanai@civil.cit.nihon-u.ac.jp

<sup>3</sup>学生会員 日本大学大学院 生産工学研究科(〒275-8575 千葉県習志野市泉町一丁目 2-1)

E-Mail:c13220@cit.nihon-u.ac.jp

近年、道路橋RC床版は耐久性の低下や早期劣化などによる損傷欠陥の事例が数多く報告され、維持管理の面からモニタリング体制の構築が望まれている。検査効率の高いサーモグラフィー法を利用したRC床版内部の欠陥検出では、日射量の変動を利用したパッシブ法と人為的な加熱によって温度差を生じさせるアクティブ法から検討されている。しかし、対象となるRC床版下面は日射による温度差が期待できず、また人為的な加熱では温度むらや架設場所によって足場の設置に問題を残す。そこで、本研究では改修工事におけるアスファルト舗設時の舗装熱を利用したRC床版内部の診断法を提案した。その結果、試験体下面の内部空洞位置には、欠陥を示す低温域が観測され検出精度の面からも本手法の有効性が確認された。

**Key Words :** *heat of pavement, thermography, slab bridge, diagnosis of detection, difference of surface temperature*

## 1. はじめに

現在、RC造の高架橋や高速道路の床版部は交通量の増加、車輛の大型化などの交通条件の変化から過大な輪荷重による疲労損傷が発生したり、また凍結防止剤による鉄筋腐食や塩害、中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学的腐食、さらには配力鉄筋量や床版厚の不足、コンクリートの品質や施工不良などを要因とする損傷欠陥の事例が数多く報告<sup>1)9)</sup>され、維持管理の必要性から合理的かつ検出精度の高い経済的な検査手法の構築が急務となっている。

一方、このような背景からコンクリートのひび割れ及び内部空洞の大きさ、深さ、厚さの進展状況を定量的に評価するため、打音法、超音波法、電磁誘導法、電磁波及び放射線法などの非破壊検査法が適用されている<sup>7)9)</sup>。特に、電磁波法の一つであるサーモグラフィー法は、1)非接触で短時間に検査が可能、2)広範囲な検査が可能、3)視覚的な検査が可能などの特徴や温度計測の分解能が格段に向上したことからコンクリート表面近傍部の欠陥検出法として注目され、種々の異なる測定環境下で実施されて得られた多くの研究成果から実現場への活用が期待されて

いる<sup>9)15)</sup>。そのサーモグラフィー法の診断手法では、日射量及び外気温の変動を利用したパッシブ法と各種人為的な加熱や冷却を利用するアクティブ法から検討されているが、対象となるRC床版下面は日射による温度差が余り期待できず、またアクティブ法では温度むらから起こる検出精度の問題、さらに鉄道交差部では足場の設置が困難となるなど合理的な検査手法とは言い難い。

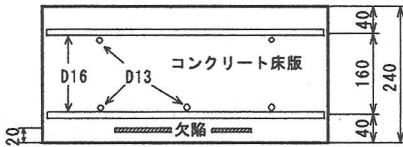
そこで、本研究ではこれらの問題を解決するためにアスファルト舗設時の舗装熱を利用したサーモグラフィー法によるRC床版内部の欠陥検出手法を検討し提案するものである。その検出原理は、コンクリート内部に生じる空洞・空隙が熱の不良導体となって熱伝達を阻害することになるため、欠陥部下面は健全部よりも低温域となり、両者の温度差から判定することができる。一般に、アスファルト舗装の改修工事は数年程度の間隔で実施されており、アスファルト舗設時の温度は160℃程度と高く、また、その熱負荷時間も長く広範囲で均一にコンクリート床版上面から舗装熱が伝達されることになり、検出精度の面からも内部欠陥検出システムの定期的検査として有効であると考えられる。

表-1 コンクリートの配合

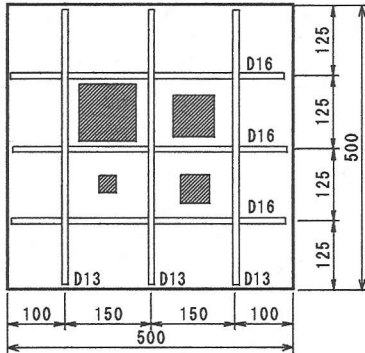
粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位置量(kg/m <sup>3</sup> )					物理的特性		
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
20	11.5	58.0	4.1	44.5	164	283	805	1031	2.83	33.0	26.0	0.18

表-2 試験体一覧

試験体	コンクリート厚さ(mm)	欠陥寸法(mm)		深さ(mm)
		大きさ	厚さ	
SH160	160	30×30	5	20
SH200	200	50×50		40
SH240	240	70×70		40
		100×100		40



(a) 断面図



(b) 欠陥配置図

図-1 試験体断面 (SH240-20)

## 2. 実験概要

本手法を利用するRC床版内部の欠陥検出では、アスファルト舗設時の温度管理及び床版厚さが、欠陥の大きさ(面積)や厚さ、さらにコンクリート下面からの深さの評価に影響を及ぼすことになる。実験は欠陥の大きさ及び深さを変化させて欠陥の検出が可能となる開始時間、最適な検出時間及び検出許容時間について表面温度差法から検討した。なお、検出開始時間とはアスファルト舗設後に欠陥を初めて検出できる経過時間を指し、最適な検出時間は欠陥部と健全部間に最も大きな温度差が生じた経過時間を、また検出許容時間とは検出開始時間以降で継続して欠陥を検出できる時間帯として定義した。本手法の有効性については、外気温の変化を利用したパッシ

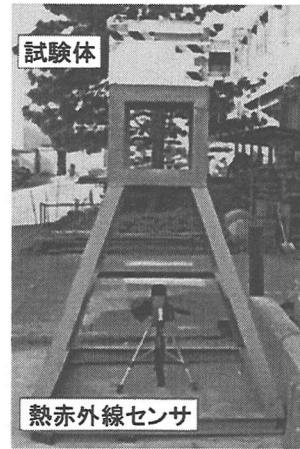


写真-1 測定状況

ブ法<sup>19)</sup>との比較及び非定常熱伝導解析から検証した。

### (1) 試験体及び欠陥

実験に供したコンクリート試験体は、500×500mmの正方形で、実橋梁の設計断面を勘案して厚さを160mm、200mm及び240mmの3種類として配筋を施した。作製したコンクリートの配合及び実験開始時の物理的特性を表-1に示す。RC床版内部の空洞・空隙を想定した擬似欠陥は、発泡スチロールを加工して、コンクリート下面から20mm及び40mm(表面間寸法)の位置にピアノ線を張って固定した。その大きさは30×30×5mm、50×50×5mm、70×70×5mm及び100×100×5mmの直方体とした。なお、試験体は測定面以外からの熱の流入を遮断するため、側面には厚さ50mmの発泡スチロールを貼付けている。また、舗装箇所は500×500mmの試験体に対して内寸480×480mmの木枠を作製し、その木枠内に舗装した。コンクリートの厚さと欠陥深さを変えて作製した6種類の試験体一覧を表-2に、その欠陥位置を図-1(a)、(b)に示す。なお、本論文の試験体記号SHの後の数字はコンクリートの厚さを示し、-の後の数字は欠陥の深さを示す。

### (2) アスファルト舗装

実現場におけるアスファルト混合物の温度管理は、舗装の種類、混合物の性状、舗装厚、気象条件及び転圧機械の種類などの施工条件によってかなり異なる

ってくるのが予測されるが、本実験では、近年RC床版において積極的に採用されている防水工、基層に碎石マチックアスファルト舗装（SMA舗装）及び表層に排水性舗装の2層仕上げを想定し、繰返して実験を行うためにISO標準砂〔天然けい砂、密度：2.64(g/cm<sup>3</sup>)<sup>17)</sup>を代用して舗設した。このISO標準砂を利用したアスファルト舗装の再現は、アスファルト混合物の舗設時の温度と経過時間に対する温度降下の勾配によって評価できるものと考えられ、本実験では、ある実測された温度管理及び転圧時における温度測定の結果を参考に設定した<sup>18)</sup>。その1層目の温度管理では、SMA舗設時の温度である160℃～165℃が2次転圧終了温度（約60℃程度）に降下するまでの時間を、概ね3～4時間になるように設定し、ISO標準砂上を断熱材で覆うことで調整した。また、排水性舗装を想定した2層目はISO標準砂が60℃に降下した時点で舗設し、温度管理は1層目と同様に実施した。なお、ISO標準砂はアスファルト混合機を用いて舗設温度になるまで攪拌しながら加熱し、試験体への敷きならしは、再度ISO標準砂を攪拌しながら木枠内に投入しハンドスコップで締め固めを行った。そのISO標準砂の厚みは、1層が80mm、2層が60mmである。また、コンクリート表面には、実橋梁の施工で実施されているエポキシ樹脂プライマー処理後にシート系の防水加工を施している。

### (3) 熱赤外線センサによる測定方法及び条件

熱赤外線センサ〔二次元非冷却マイクロボロメータ型、応答波長領域8.0～14.0μm、感度0.15℃(30℃黒体炉にて)〕による温度測定は、高さ2.0mのL形鋼で試験体を支え、測定距離1.35mの真下の位置から1層舗設直後より10分間隔で6時間連続して時系列の熱画像を撮り込むことにした(写真-1参照)。その試験体下面の測定面は、500×500mmの試験体に対して400×400mmの範囲である。また、各欠陥の大きさにおける画素数は、欠陥30×30mm(以下、欠陥部30mmと記す)が128画素、欠陥部50mmが338画素、欠陥部70mmが722画素、欠陥部100mmが1,352画素であった。

## 3. 実験結果

### (1) 外気温の変動が及ぼす熱画像への影響

パッシブ法での欠陥検出は、舗装熱と比較するため舗装熱からの伝達熱が減少し欠陥検出が最も困難になるコンクリートの厚さの大きいSH240-20及びSH240-40から検討した。なお、試験体上面のISO標準

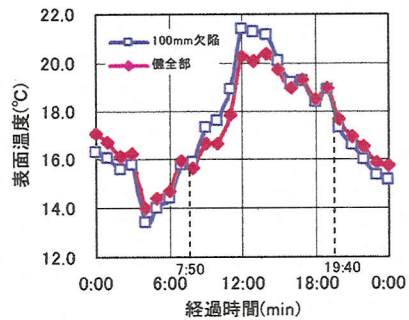


図-2 表面温度の相違(SH240-20)

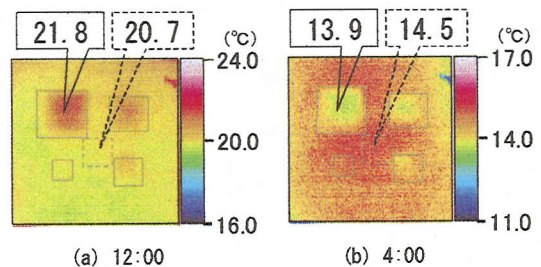


写真-2 パッシブ法による熱画像(SH240-20)

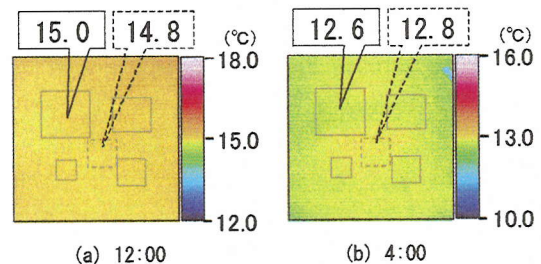


写真-3 パッシブ法による熱画像(SH240-40)

砂(厚さ:140mm)は、測定開始前日に無加熱で舗設している。熱赤外線センサによるコンクリート下面の温度測定は、両試験体ともに10分間隔で24時間行った。測定日の天候は、両日とも晴れ後曇りで、SH240-20の測定日の平均温度は17.6℃、日較差は12.3℃、またSH240-40の測定日では12.7℃及び10.0℃であった。温度測定に影響する風速は、SH240-20の測定日の最大風速が0.8m/s、平均風速が0.4m/sであり、SH240-40の測定日ではそれぞれ1.0m/s及び0.5m/sであった。

図-2に熱赤外線センサで得られたSH240-20の欠陥部100mm(構成画素数:1,352画素)と健全部で得られた平均温度の時系列変化を示す。なお、この健全部の表面温度は、試験体の欠陥の無い中央部の大きさ50×50mm(構成画素数:338画素)で得られた平均値である。そのSH240-20の12:00及び4:00に得られた熱

表-3 実験要因及び温度管理

試験体	1層舗設温度 (°C)	2層舗設までの経過時間 (min)	2層舗設温度 (°C)	1層舗設時外気温 (°C)	最大風速/平均風速 (m/s)
SH160-20	163	194	163	11.2	1.0/0.5
SH200-20	156	212	153	14.1	0.4/0.3
SH240-20	165	180	165	15.6	1.2/0.5
SH160-40	161	150	156	17.2	1.1/0.5
SH200-40	153	157	168	13.1	3.0/0.9
SH240-40	163	215	163	17.0	0.8/0.6

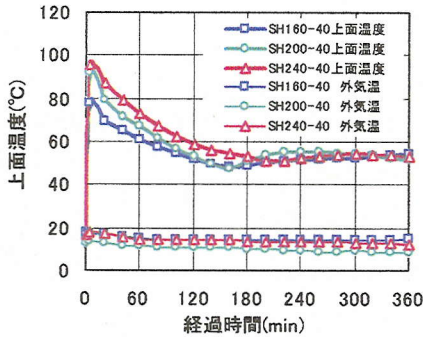


図-3 コンクリート上面温度及び外気温

画像を写真-2(a), (b)に、また、同時刻で得られたSH240-40を写真-3(a), (b)に示す。既往の研究<sup>19)-20)</sup>では、測定時間帯が気温の上昇時あるいは降下時に欠陥部と健全部との温度差が最も大きくなることが報告されており、本測定においても両者ともに高温時のピークが12:00、低温時のピークは前日4:00に現れた。

その結果、SH240-20の欠陥検出では、高温時のピークから欠陥の大きさを正確に評価することはできないまでも、各100, 70, 50mm及び30mmの位置に赤色の高温部を確認することができる(写真-2(a)参照)。また、低温時のピークでは、日中で得られた熱画像より不鮮明となり、欠陥部50mmでは薄緑色の低温域が一部見られるものの誤診の危険性が、また欠陥部30mmは確認することができない(写真-2(b)参照)。その欠陥部100mmで得られた表面温度の平均値と健全部との温度差(欠陥部-健全部)は、高温時のピークで1.1°C、低温時のピークで-0.6°Cであった。

一方、SH240-40の欠陥検出では、どの時間帯においても熱画像から各欠陥部の全てを確認することはできなかった。その欠陥部100mmで得られた表面温度と健全部との温度差は、高温時のピークが0.2°C、低温時のピークは-0.2°Cであった(写真-3(a), (b)参照)。

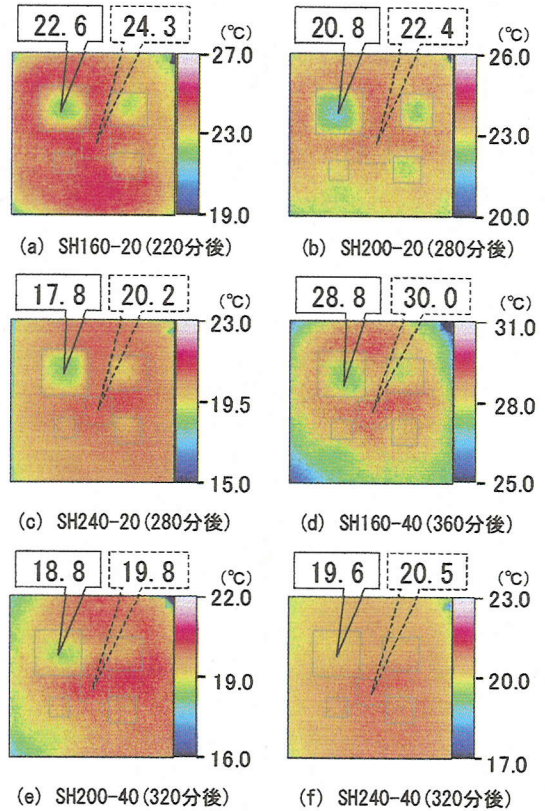


写真-4 舗装熱による熱画像

## (2) 舗装熱が及ぼす熱画像への影響

表-3に、実験要因の温度管理を示す。図-3は、表-3に示す欠陥の深さ40mmの試験体に舗設した舗装熱で得られたコンクリート上面温度(プライマーと防水工間)及び外気温を熱電対(T社製、芯線構成:0.65mm×2本、熱起電力:100°C/mV)で測定した時系列変化である。なお、各試験体の実験開始時間(1層舗設時間)は、14:20~15:50の範囲であり、外気温は試験体の下面直下にて測定し、2次転圧終了温度とする60°Cの確認はISO標準砂中に熱電対を埋め込んで測定した。

その結果、コンクリートに直接供給されることになるコンクリート上面温度は、防水シートが介在するため敷きならし直後において舗設温度160°Cが90°C程度に低下し、さらに2層目の舗設からは温度低下した1層目のISO標準砂が介在する熱伝達となるため50°C前後となっている。しかし、各実験要因の温度管理では、舗設温度及び2層舗設までの経過時間にばらつきが生じている(図-3参照)。これは、ISO標準砂が均一に加熱できていなかったこと、木枠内に投入するまでの時間に若干の遅れが生じたこと、あるいは締固めが均一でなかったことなどが要因と

して考えられるが、欠陥検出への評価は供給温度を統一したシミュレーションから明確にした。

各試験体で得られた熱画像を写真-4(a)～(f)に示す。なお、熱赤外線センサによる温度測定は、外気温の変動による場合と同様に実施し、写真-4は1層舗設後からの経過時間において、欠陥部100mmと健全全部間に最も大きな温度差が現れた熱画像として示している。写真-4(c)に示すSH240-20の熱画像とパッシブ法で得られた熱画像との比較では、アクティブな舗装熱で得られた熱画像の方が各欠陥部の境界が若干不鮮明になるものの、欠陥部と健全全部との温度差がより顕著に現れている。その欠陥部100mmと健全全部間で得られた最大温度差は、パッシブ法では高温時のピークが1.1℃、低温時のピークが-0.6℃に対して、舗装熱からでは-2.4℃の温度差が得られている。

一方、SH240-40の比較では、パッシブ法で全く確認することができなかった欠陥位置に欠陥部100mm及び70mmを確実に検出することができる。その欠陥部100mmの最大温度差は、パッシブ法では高温時のピークが0.2℃、低温時のピークが-0.2℃に対して、舗装熱では-0.9℃の温度差が得られている。しかし、欠陥部30mmについては、どのように熱画像の温度幅を調整しても視覚的な判断は困難であった。このように欠陥検出に影響するコンクリートの厚さ、欠陥の大きさ及び深さの熱画像への影響は、写真-4に示す熱画像からコンクリートの厚さが小さいほど、欠陥の大きさ(面積)が大きいほど、また欠陥の深さが小さいほど鮮明に現れており、特にパッシブ法では検出が困難である深さ40mmに位置する欠陥を評価することが可能である。

### (3) 舗装熱を利用した欠陥検出の適用限界

熱赤外線センサで得られた熱画像からコンクリート内部の欠陥を検出する場合、欠陥部と健全全部間には検出可能な表面温度差が必要であり、熱伝達に伴う上昇温度量から検出可能な開始時間、最適な検出時間及び検出許容時間が存在することになる。

#### a) コンクリートの厚さと上昇温度の関係

図-4は、舗設後からコンクリート下面に伝達される開始時間を検討するため、健全部の表面温度を時系列で示したものである。その時系列変化では、図-2に示す時系列変化からも確認できるように、実験開始時間(14:20～15:50)では日中蓄積された内部温度と外気温の相違による熱放射が生じているため、表面温度が測定開始時から僅かに低下し、その後、熱伝達から急激に上昇していることが分かる。伝達開始時間は、その温度降下から明らかに表面温度の

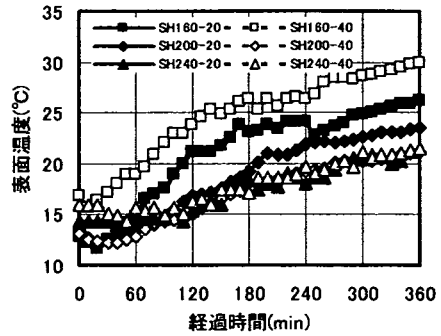


図-4 表面温度の時系列変化

表-4 熱伝達開始時間及び上昇温度

試験体	測定開始時の表面温度(°C)	伝達開始時間(min)	伝達開始時の温度(°C)	最大温度(°C)	上昇温度(°C)
SH160-20	12.8	30	12.6	25.6	13.0
SH200-20	13.4	50	13.1	23.5	10.4
SH240-20	15.2	100	15.7	21.4	5.7
SH160-40	16.9	30	17.2	30.0	12.8
SH200-40	13.1	50	12.8	21.1	8.3
SH240-40	16.0	100	15.7	21.5	5.8

勾配が変化した時間として読みとった。

その結果、SH160の経過時間は約30分後、SH200で50分後、SH240で100分後とコンクリートの厚さが大きくなるほど長くなっている。また、表-4に図-4の時系列変化から求めた上昇温度(360分経過後の温度-伝達開始時間時の温度)を示す。その熱伝達から得られた上昇温度は、舗設時の温度管理が若干異なるものの、概ねSH160で約13.0℃、SH200で9.0℃、SH240においても6.0℃程度生じている。

この上昇温度が適正か否かについては、熱電対を各試験体中央の健全部に埋設して測定したコンクリートの内部温度からコンクリート下面の温度を算出して照査を行った。その熱電対の埋設位置は、各試験体のコンクリート下面より10mmの位置と上面方向に30mmの間隔で配置している。図-5に一例としてSH160-20の60分及び360分経過時における各深さ位置で得られた内部温度を示す。また、図中の回帰式はコンクリートの厚さ160mmの下面温度(表面温度)を算出するために、360分経過時の上面より30～150mmまでの5点を回帰したものである。その結果、コンクリートの厚さ160mmの360分経過時における表面温度は回帰式から27.1℃となる。図-6に同様に算出して得られた各試験体の表面温度と経過時間の関係を示す。また、表-5には熱赤外線センサで測定された

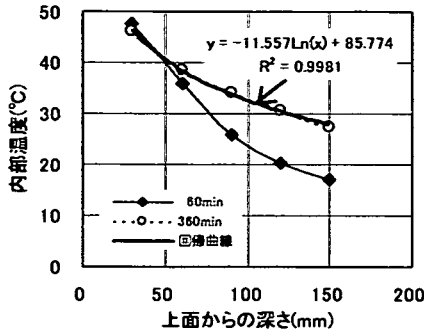


図-5 内部温度と深さの関係(SH160-20)

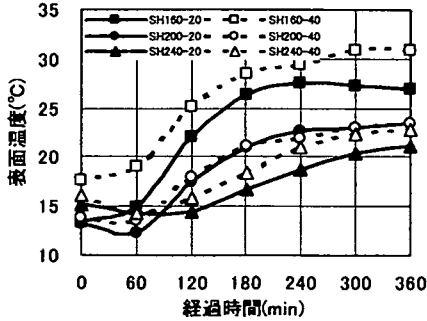


図-6 熱電対から算出した表面温度変化

表-5 表面温度計測の比較

試験体	熱赤外線センサ(°C) / 熱電対(°C)				
	経過時間(min)				
	0	60	120	240	360
SH160-20	12.8/13.3	14.8/14.9	21.2/22.0	24.9/27.5	25.6/27.1
SH200-20	13.4/13.1	13.4/12.3	16.8/17.5	21.9/22.6	23.5/23.4
SH240-20	15.2/15.6	14.3/14.2	15.4/14.5	18.1/18.7	21.4/21.1
SH160-40	16.9/17.6	19.0/19.0	23.8/25.1	26.4/29.3	30.0/31.0
SH200-40	13.1/13.9	12.8/13.5	15.1/17.9	19.3/21.9	21.1/23.5
SH240-40	16.0/16.2	15.7/14.2	16.2/15.9	19.6/21.0	21.5/22.8

表面温度と熱電対から算出した表面温度との比較を示す。

その結果、表-5に示す両者の比較では、熱赤外線センサで得られた表面温度の方が若干小さくなる傾向が見受けられるもののほぼ一致している。また、表-4と同様に求めた熱電対での上昇温度は、各コンクリートの厚さでの平均値として、概ね SH160で13.5°C、SH200で10.0°C、SH240で6.1°C程度であった。

#### b) 各欠陥部の評価と表面温度差の関係

舗装熱が及ぼす欠陥検出への影響は、健全部との表面温度差から最適な検出時間、検出開始時間及び

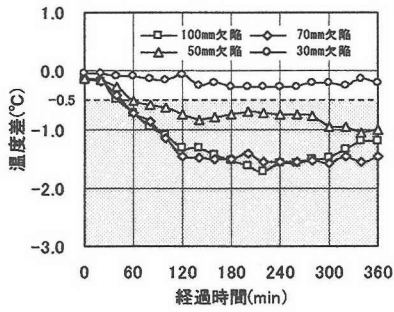
検出許容時間を求めることで検討した。

図-7(a)~(f)は、SH160、SH200及びSH240における各欠陥部の平均温度と健全部で得られた平均温度との差分を時系列に示したものである。その表面温度差を利用して熱画像内から各欠陥部を視覚的に検出する場合、検出可能な表面温度差を求めておく必要がある<sup>21)</sup>。この表面温度差は、熱赤外線センサの冷却方法ならびに温度分解能(使用機種:0.15°C)の感度に影響されるが、熱画像と表面温度差とを比較した結果、欠陥部30mm以上を確実に検出するためには-0.5°C以下が必要であった。図中の灰色のエリアは温度差が-0.5°C以下の範囲で熱画像内から欠陥検出が可能な時間帯を示すものである。表-6に、図-7から得られた各欠陥部と健全部間の最も大きい表面温度差とその測定開始からの経過時間(最適な検出時間)を示す。なお、最大温度差が得られる経過時間及び検出許容時間は、図-7あるいは図-4及び図-6の時系列変化の推移から実際には360分以降に得られる試験体も含まれているものと推測されるが、測定を終了した360分以内で求めている。また、温度差を用いての欠陥検出では、熱画像からの視覚的な判定基準として、-0.4°Cは誤診の危険性が、また-0.3°C及び-0.2°Cでの欠陥検出は困難であるとした。

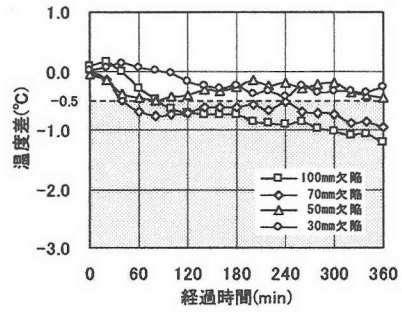
表-7は、図-7に-0.5°Cの閾値を設定して求めた各欠陥検出のための検出開始時間、検出許容時間ならびに検出判定の結果である。

その結果、表-6に示すとおり最大温度差として現れる経過時間は、ほぼ240分以降から測定終了時の360分にかけて得られている。その温度差が-0.5°Cに達する検出開始時間では、SH160-20が60分経過時に欠陥部50mmを検出することが可能となり、その後300分間は50mm以上の欠陥を検出できる時間帯を維持することができる。また、SH200-20では160分経過時に欠陥部30mmを、80分経過後から欠陥部50mmが検出できることになる。このようにコンクリートの厚さが小さいほど、欠陥が大きいほど舗装後の早い時間から欠陥検出が可能となることが分かる。また、欠陥の深さが及ぼす影響では、深さの異なる同厚試験体から確認できるように、伝達熱が欠陥側面からの拡散によって廻り込むことになるため健全部との温度差が小さくなり、欠陥部が深くなるほど検出開始時間が遅くなることが分かる。

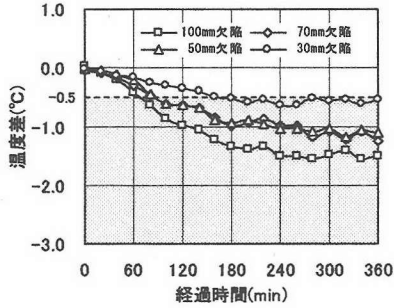
一方、前述したとおり、検出許容時間では図-7に示す温度差の時系列変化から、測定終了時間の360分以降もしばらくは-0.5°C以下の温度差を保持して推移するものと考えられ、長大実橋梁を想定しても十分にモニタリングの可能な時間帯を確保できることが分かる。長大実橋梁の欠陥検出を想定した場合、



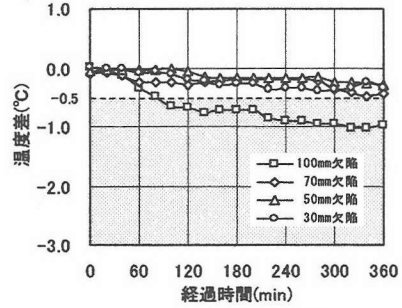
(a) SH160-20



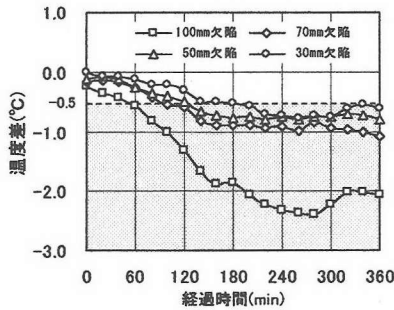
(d) SH160-40



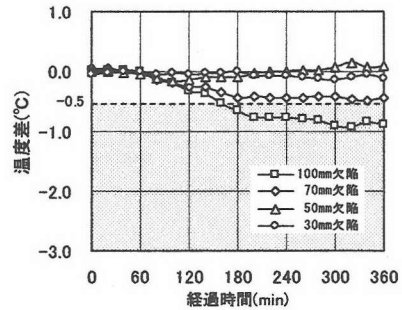
(b) SH200-20



(e) SH200-40



(c) SH240-20



(f) SH240-40

図-7 温度差の時系列変化

表-6 最大温度差及び経過時間

試験体	最大温度差(°C) / 経過時間(min)			
	欠陥の大きさ(mm)			
	30	50	70	100
SH160-20	-0.3 / 260	-1.1 / 340	-1.6 / 300	-1.7 / 220
SH200-20	-0.6 / 240	-1.2 / 320	-1.3 / 360	-1.6 / 280
SH240-20	-0.8 / 280	-0.8 / 360	-1.1 / 360	-2.4 / 280
SH160-40	-0.4 / 240	-0.5 / 360	-0.9 / 360	-1.2 / 360
SH200-40	-0.4 / 280	-0.3 / 360	-0.5 / 340	-1.0 / 320
SH240-40	-0.2 / 300	-0.2 / 340	-0.5 / 340	-0.9 / 320

表-7 欠陥検出時間及び許容時間

試験体	検出開始時間(min) / 許容時間(min)			
	欠陥の大きさ(mm)			
	30	50	70	100
SH160-20	×	○ 60/300	○ 40/320	○ 40/320
SH200-20	○ 160/200	○ 80/280	○ 80/280	○ 70/290
SH240-20	○ 150/210	○ 120/240	○ 90/270	○ 50/310
SH160-40	△ 240/120	○ 80/280	○ 40/320	○ 80/280
SH200-40	△ 280/80	×	○ 340/20	○ 80/280
SH240-40	×	×	○ 340/20	○ 160/200

○:検出可能 △:誤診 ×:検出不能

部分欠陥などから発生メカニズムを推定するため一般に主桁と横桁に囲まれた1パネル毎の判定が行われている。アスファルトフィニッシュによる敷きならし速度は10 m/min程度、また締固め作業速度は約3km/hと歩く程度速度であり、1パネル毎を移動しながら測定できる十分な許容時間であると考えられる。しかし、図-7に示す推移曲線のばらつきからも分かるように、表-7に示すSH200-20とSH240-20の欠陥部100mmでは、SH240-20の方が検出開始時間が早くなったり、また、SH200-40では欠陥部30mmが誤診するのに対して欠陥部50mmが検出不能となるなどの矛盾も見られた。この要因としては、表-3及び図-3に示すとおりコンクリート上面から供給される熱量及びその温度降下勾配や外気温が異なっていること、さらに健全部及び欠陥部での画面間の表面温度のばらつき、コンクリート打設及び締固め時における欠陥位置のズレなどの要因から同試験体における各欠陥部に若干の変動が見られたものと考えられる。

#### 4. 熱伝導解析による数値シミュレーション

表面温度の解析方法は、等方性材料に関する非定常熱伝導問題の基礎微分方程式の式(1)によって求められる<sup>22)</sup>。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (1)$$

ここに、 $T=T(x, y, z, t)$  は温度であり、物体内 $(x, y, z)$ 及び時間 $t$ の関数となる。 $\rho$ は密度、 $c$ は比熱、 $\lambda$ は熱伝導率、 $\dot{Q}$ は単位時間に単位体積当たり供給される熱量である。この式(1)に示す方程式から $t+\Delta t$ 後の温度経過を計算するためには、現実の問題に合う物体内の位置 $(x, y, z)$ に関する境界条件と時間に関する初期条件の基で解くことに帰着する。その三次元非定常熱伝導シミュレーションには、汎用FEMプログラムCOSMOS/M Ver2.7を使用して、コンクリート上面からの舗装の舗設熱に対し、熱伝達によりコンクリートの厚さ、欠陥の大きさ及び深さがコンクリート下面の温度変化にどのように影響を及ぼすのか検討した。

##### (1) 解析モデルと条件

解析モデルは本実験値との整合を図るため、図-1(a), (b)に示す断面を要素分割した。その要素分割モデルを図-8に示す。メッシュ分割は、コンクリー

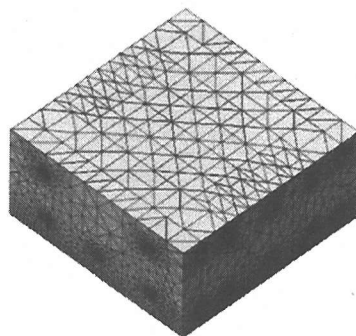


図-8 解析モデル

表-8 解析に用いた熱特性

材料	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 [kJ/(kg·K)]	熱伝導率 [W/(m·K)]
コンクリート	2,400	0.950	1.5
鉄筋	7,850	0.465	43.0
発泡スチロール	28.6	1.300	0.027

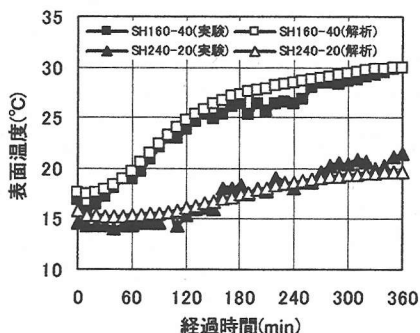


図-9 実験値と解析値の表面温度

ト下面を10mmのメッシュサイズとし、上面は温度変化が様に伝導するものとして比較的大きなサイズ(約40mm)で作製している。また、鉄筋は直径の1/2サイズのメッシュを生成した。

##### (2) 熱負荷と解析設定条件

基層及び表層の舗装熱を想定した熱負荷条件は、図-3に示す各試験体で得られたコンクリート上面温度をコンクリート表面に直接供給した。日中蓄積されたコンクリートの内部温度は、解析初期条件として表-5に示す熱電対から得られた舗設後の経過時間0分時の温度を採用した。また、コンクリート表面と外気との冷却条件である熱伝達係数は、屋外の環境、観測面の方向、風速及び外気温の温度差などによって時々刻々変化するため、本研究では風速の相違及び観測面が下向きであることを考慮して6.0、12.0及び18.0W/m<sup>2</sup>·Kの3ケースから実験値に最も近



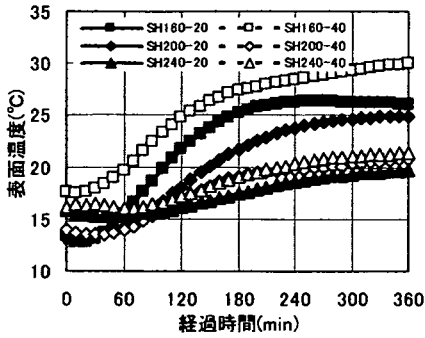


図-10 表面温度の時系列変化

表-9 実験値及び解析値の表面温度の比較

試験体	熱赤外線センサ(°C) / シミュレーション(°C)				
	経過時間(min)				
	0	60	120	240	360
SH160-20	12.8/13.3	14.8/15.5	21.2/21.7	24.9/26.3	25.6/26.1
SH200-20	13.4/13.1	13.4/14.3	16.8/18.1	21.9/23.8	23.5/24.9
SH240-20	15.2/15.6	14.3/15.3	15.4/16.1	18.1/18.6	21.4/19.7
SH160-40	16.9/17.6	19.0/19.7	23.8/24.7	26.4/28.4	30.0/30.0
SH200-40	13.1/13.9	12.8/13.9	15.1/16.9	19.3/19.8	21.1/20.8
SH240-40	16.0/16.2	15.7/16.0	16.2/17.2	19.6/20.4	21.5/21.4

似した値を採用した。また、健全部及び欠陥部の同定を目的として用いた熱特性<sup>23)</sup>は表-8に示すとおりである。ただし、加熱面は500×500mmの全面とし、試験体側面は完全断熱境界としている。なお、解析は反復法ソルバを使用し、解析時間間隔は5分、結果の出力は10分間隔で行った。

## 5. シミュレーション結果

### (1) 熱伝達から得られた表面温度と上昇温度

図-9は、熱伝達係数を $12.0\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ に設定して得られたSH160-40及びSH240-20の試験体中央の健全部1節点における表面温度と熱赤外線センサで得られた同位置での表面温度の時系列変化である。図に示す両者の表面温度の誤差は数%であり、シミュレーションの妥当性を確認することができる。その熱伝達係数を変えてシミュレーションを行ったSH160-40の360分経過後の表面温度では、熱伝達係数 $6.0\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ で $34.4^\circ\text{C}$ 、 $18.0\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ で $26.4^\circ\text{C}$ であった。その他の試験体では、SH160-20及びSH200-20は $12.0\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ を、またSH200-40及びSH240-40は $18.0\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ を採用した。図-10に全てのシミュレーションで得られた健全部1節点の表面温度と経過時間の関係を示す。また、表-9にはシミュレーションと表-5に示した熱

赤外線センサで得られた表面温度との比較を示す。

その結果、図-10に示すシミュレーションの表面温度は、図-4、図-6及び表-9との比較から、実測値の表面温度と良く一致して推移していることが分かる。最大表面温度が得られる経過時間では、いずれも実験での測定終了時である360分に現れており、その上昇温度は、SH160の平均値として $12.6^\circ\text{C}$ 、SH200で $8.9^\circ\text{C}$ 、SH240で $5.2^\circ\text{C}$ 程度生じている。また、伝達開始時間は、コンクリートの厚さが小さいほど明瞭に現れ、SH160で30分後、SH200で50分後、SH240で70分後であった。しかし、SH160及びSH200は表-4に示す実験値と一致するものの、コンクリートの厚さの大きいSH240については実験値で60~120分における上昇温度が不明瞭なため誤差が生じている。

### (2) 各欠陥と表面温度差の関係

図-11(a)~(f)は、360分経過後の表面温度分布である。図-12(a)~(d)は、図-7の実験値と同様にSH160及びSH240における各欠陥部の平均温度と健全部で得られた平均温度との差分を時系列で示したものである。

その結果、図-11に示す表面温度分布では、写真-4に示す熱画像と同様に欠陥部下面に低温域が鮮明に再現されており、各欠陥の相対的な大きさや位置を確認することができる。また、図-12に示す各欠陥部の温度差では、コンクリートの厚さが小さいほど短時間で急激に大きくなり、その後の推移曲線の変化率は緩やかになる。特に、温度差は欠陥が小さいほど経過時間に対する増加率が極端に小さくなる傾向があり、実橋梁での欠陥検出では、図-12から推測できるようにコンクリートの厚さが大きいほど、欠陥の大きさが小さいほど、また欠陥が深い位置にあるほど検出開始時間が遅くなることを理解しておくべきである。

表-10に図-12から得られた各欠陥部の平均温度との最大温度差を、また表-11には実橋梁では欠陥の大きさが確認できないことから各欠陥部の中央1節点で得られた最大温度差を示す。表-10に示す実験値との比較では、熱画像から視覚的に検出できる温度差を $-0.5^\circ\text{C}$ 以下とすると、前述したように欠陥部の画素間のばらつきなどの要因から若干の相違が見られるが、パッシブ法では検出することが困難であるSH240-40の欠陥部70mm以上がシミュレーションからも検出可能であることが同定された。しかし、シミュレーションでは実験値で検出が可能であったSH200-20及びSH240-20における欠陥部30mmが、SH240-20及びSH160-40の欠陥部50mmが $-0.5^\circ\text{C}$ 以上となり検出できないことが示された(表-7参照)。この実験値

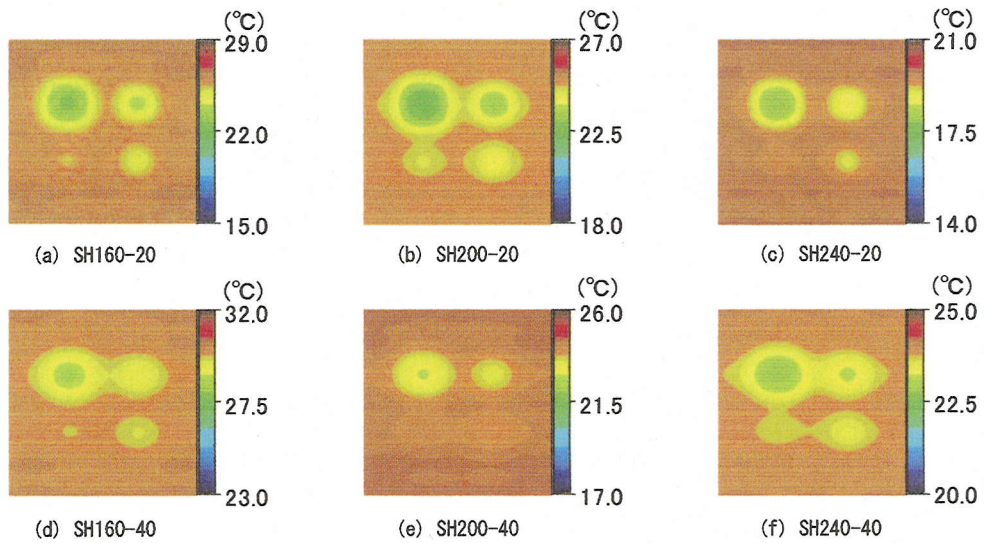


図-11 表面温度分布の相違(360分経過時)

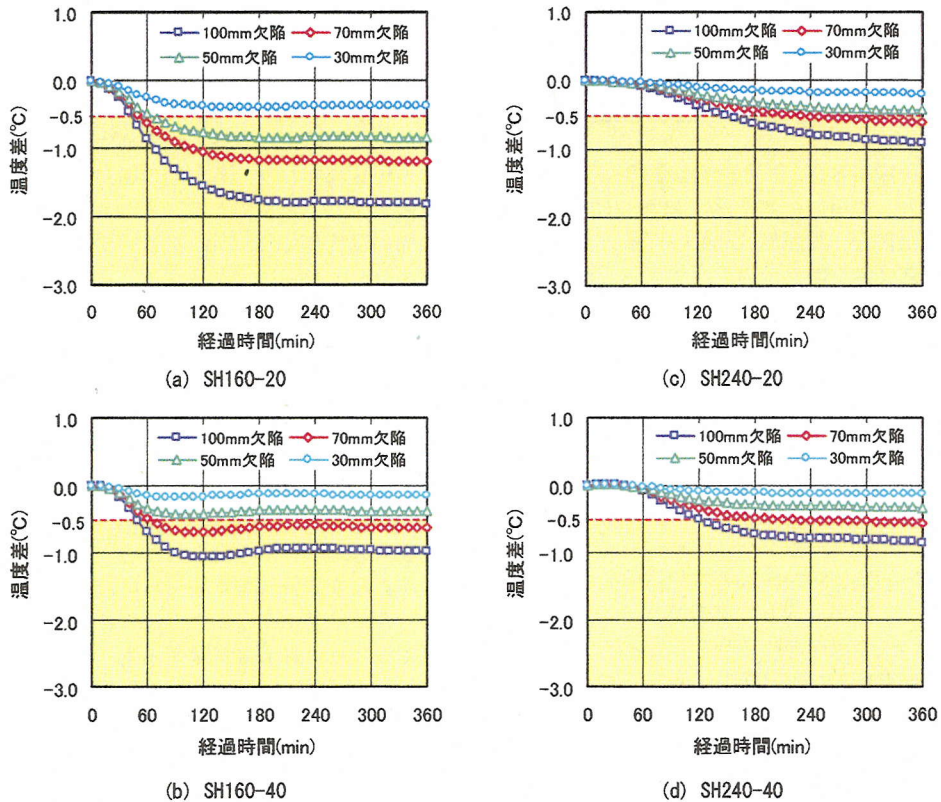


図-12 温度差の時系列変化

とシミュレーションの相違については、表-9に示す健全部の表面温度が両者は良く一致していることから、欠陥部の表面温度が影響したことになる。実験値では、表-6に示すとおり各試験体における各欠陥

の大きさで得られた最大温度差に相関性が見いだせないことから、コンクリート打設及び締固め時に発泡スチロールを支えたピアノ線がゆるみ欠陥の位置が下がったことや浮力による浮き上がり及び傾い

表-10 最大温度差の比較(欠陥部の平均)

試験体	実験値(°C) / シミュレーション(°C)			
	欠陥の大きさ(mm)			
	30	50	70	100
SH160-20	-0.3/-0.37	-1.1/-0.83	-1.6/-1.18	-1.7/-1.81
SH200-20	-0.6/-0.28	-1.2/-0.63	-1.3/-0.88	-1.6/-1.34
SH240-20	-0.8/-0.19	-0.8/-0.43	-1.1/-0.60	-2.4/-0.91
SH160-40	-0.4/-0.17	-0.5/-0.43	-0.9/-0.69	-1.2/-1.07
SH200-40	-0.4/-0.19	-0.3/-0.47	-0.5/-0.74	-1.0/-1.09
SH240-40	-0.2/-0.14	-0.2/-0.33	-0.5/-0.56	-0.9/-0.85

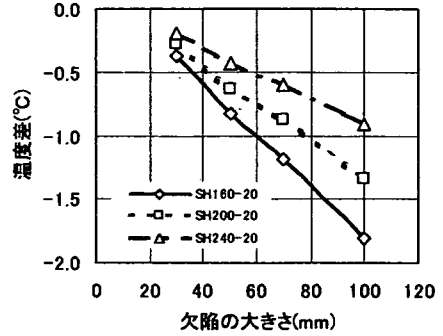
表-11 最大温度差(欠陥部の中央1節点)

試験体	欠陥の大きさ(mm)			
	30	50	70	100
SH160-20	-0.68	-1.46	-2.34	-3.58
SH200-20	-0.52	-1.10	-1.74	-2.65
SH240-20	-0.36	-0.75	-1.19	-1.80
SH160-40	-0.29	-0.56	-0.99	-1.61
SH200-40	-0.32	-0.61	-1.02	-1.61
SH240-40	-0.24	-0.45	-0.75	-1.18

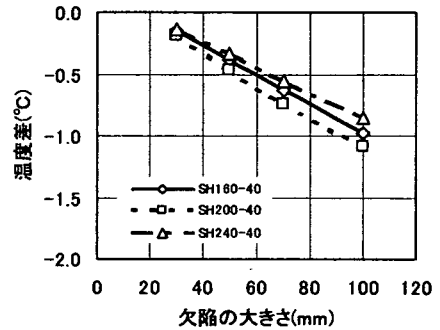
たことによる誤差と考える。

一方、表-11に示す欠陥部中央1節点の最大温度差では、表-10の平均値との比較から欠陥の深さ 20mm はほぼ 2倍に近い温度差が得られている。例えば、視覚的に検出する温度差を-0.5°CにするとSH160-20 及びSH200-20の欠陥部30mmが、またSH160-40及びSH 200-40では欠陥部50mmが検出可能となる。しかし、2次元の広がりをもつ欠陥部の温度分布は、写真-4に示すとおり欠陥部の中心箇所を頂点として欠陥端部に向かって温度差が徐々に小さくなり、熱画像で表示される僅かな色彩の変化からでは欠陥か否かの判定を難しくしている。

図-13(a),(b)は、シミュレーションから得られた360分経過後の欠陥の大きさと温度差の関係である。両者の温度差は、欠陥の深さ20mmでは各欠陥の大きさにほぼ比例して大きくなる傾向にあるが、深さ40mmでは各欠陥の大きさに対する温度差の較差が極端に小さくなっていることが分かる。欠陥部下面の熱流パターンは、流れが熱の不良導体である欠陥部に当たると熱流速が急激に減少して僅かに通過する熱とよどみ点を中心として両側に分岐し、熱拡散によって欠陥部下面に移動する熱流とが現れることとなる。そのコンクリートの厚さ160mmと240mmの温度差は、欠陥の深さ20mmの欠陥部100mmでは0.9°Cの較差が生じているのに対し、深さ40mmでは供給温度や外気温の相違からコンクリートの厚さ200mmと240mmの較差で0.2°Cと極端に小さくなっている。特に、コ



(a) 欠陥の深さ20mm



(b) 欠陥の深さ40mm

図-13 温度差と欠陥の大きさの関係(360分後)

ンクリートの厚さが小さくなるほど欠陥部周辺及び表面に伝達される熱容量が大きくなるものの、欠陥部と表面までの寸法が小さい場合には、欠陥部の側面まわりから欠陥部下面に戻る熱移動が小さいため健全部との温度差は大きくなる。一方、欠陥部と表面までの寸法が大きい40mmの場合には、熱流の戻りが欠陥部下面から離れるほど成長してくるため、温度差は欠陥の深さ20mmより小さくなる。また、各欠陥の大きさに対する温度差の増加率及び較差が欠陥の深さ20mmより極端に小さくなる現象では、欠陥部下面への熱移動が欠陥部上面に伝導される熱量に密接に関連するものの、その温度差は健全部に伝達された熱量との差分であり、コンクリートの厚さが小さくても欠陥が深くなると熱量の相違ほど温度差としては現れないものとする。

### (3) 欠陥の大きさと深さの評価

欠陥の大きさと深さの関係を明らかにする場合、熱伝達から得られる欠陥部と健全部との表面温度差から検討することになる。しかし、実験では同じコンクリートの厚さにおいても測定環境の相違とともに図-3に示したとおり、ISO標準砂の加熱及び攪拌

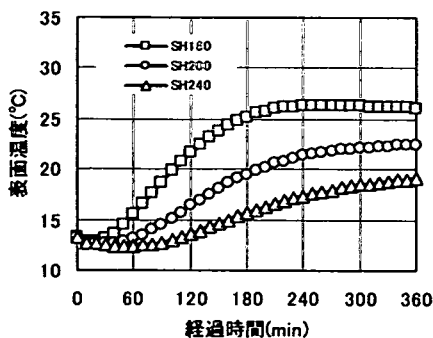


図-14 表面温度の時系列変化

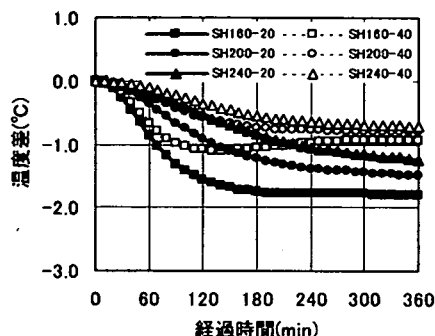


図-15 温度差の時系列変化(100mm 欠陥)

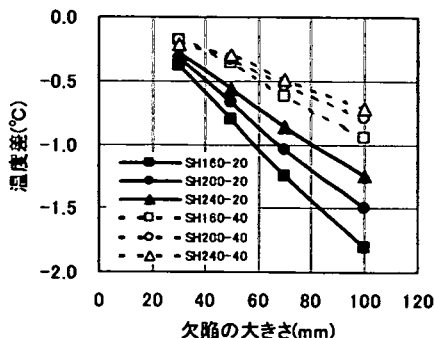


図-16 温度差と欠陥の大きさ(360分後)

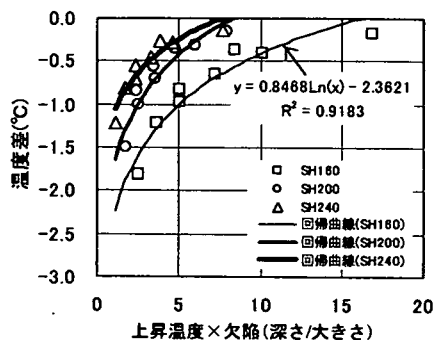


図-17 温度差と欠陥の深さ及び大きさの関係

による不具合などからコンクリート上面温度にもばらつきがみられる。また、図-13(b)に示したとおり、欠陥の深さが40mmではコンクリートの厚さの相違に対して各欠陥部で得られた温度差の較差が僅かであり、コンクリートの厚さに対する欠陥の深さの関係が明確に示されているとは言い難い。そこで、SH160-20の解析条件を用いて、同条件から全ての試験体についてシミュレーションを行った。図-14は、供給温度、外気温及び同一境界条件で得られたコンクリートの厚さのみが異なる健全部の表面温度である。また、図-15には同一条件による欠陥部100mmの平均温度と健全部との温度差を時系列で示す。

その結果、同一条件による360分経過時の上昇温度は、図-14からSH160で12.7°C、SH200で9.0°C、SH240で5.8°Cとほぼ表-4の実測値と一致しており、図-3に示すコンクリート上面温度の相違から考えられる上昇温度差とはなっていない。その表面温度の推移曲線は、コンクリートの厚さが小さいほど比較的早い経過時間から上昇温度の勾配が緩やかになり、コンクリートの厚さの大きいSH240では360分経過後もさらに上昇することが推測される。また、図-15に示す温度差では、図-7(a)に示すSH160-20の欠陥部100mmとの比較から両者の推移は良く一致してお

り、同舗装熱の基でコンクリートの厚さに対する欠陥検出をより明確にすることができる。その欠陥の深さ20mmではコンクリートの厚さが小さいほど比較的早い経過時間から温度差が一定となり、コンクリートの厚さが大きくなるほど徐々に増加する傾向が見られ、最大温度差はいずれも360分経過後に得られている。しかし、欠陥の深さ40mmの温度差では、SH160は経過後120分に、またSH200では240分後、SH240では360分後に最大となり、ほぼ240分以降は変化なく推移していることが分かる。そのコンクリートの厚さの小さいSH160-40では120分経過後に最大温度差となり、その後僅かではあるが240分後まで減少傾向にある。特に、この現象は欠陥の深さ40mmにおいてもSH160のみに現れたものである。図-14に示すとおりSH160の健全部の表面温度は供給熱の降下から180分経過後に変曲点を迎えている。また、欠陥部の表面温度の推移では、欠陥部に伝達された熱容量によって下面への熱移動の増分が変化することになるが、深さ20mmは200分後に、深さ40mmでは220分後と健全部に現れる変曲点より遅れて迎えており、180分経過後から一定値をたどる健全部との温度差に減少域が現れたものとする。

一方、図-16に示す360分経過後の温度差と欠陥の

大きさの関係では、図-13(b)に示す上昇温度の相違から見られる両者の相関性が同一境界条件の基では明瞭な温度差として現れている。この温度差から欠陥部100mmが検出できるコンクリートの厚さの限界を算出すると、温度差が $-0.5^{\circ}\text{C}$ の場合、欠陥の深さ20mmでは340mmまで、欠陥の深さ40mmでは300mmまで検出することができる。また、欠陥部50mmでは、欠陥の深さ20mmで255mmまで、欠陥の深さ40mmでは95mmまでとなる。

次に、図-17は、欠陥の深さがどこまで検出可能かを検討するために上昇温度と欠陥の大きさ及び深さをパラメータとして温度差との関係を示したものである。なお、図中の回帰式はコンクリートの厚さ160mm(SH160)の欠陥の深さ20mm及び40mmで得られたものである。その結果、両者には良好な相関性が見られ、回帰式より欠陥部100mmが検出できる欠陥の深さの限界を算出すると71mmまで、欠陥部50mmでは35mmまで可能である。同様にコンクリートの厚さ240mmでは、欠陥部100mmが検出できる欠陥の深さの限界は54mmまで、欠陥部50mmでは27mmまで可能である。

## 6. まとめ

舗装熱を利用したRC床版内部の欠陥検出では、欠陥位置の試験体下面に欠陥を示す低温域が観測され、パッシブ法との比較から検出できる欠陥の大きさや深さに、また検出可能となる許容時間及び精度面での有効性が確認できた。本研究で得られた所見は、以下に示すとおりである。

- (1) パッシブ法による欠陥部と健全部との表面温度差は、高温時のピークが12:00、低温時のピークが前日の4:00に現れたが、深さ40mmに位置する欠陥を検出することは困難であった。
- (2) 舗装熱の伝達は、コンクリートの厚さ160mmで30分後、200mmで50分後、240mmで100分前後から始まり、その上昇温度はそれぞれ約 $13.0^{\circ}\text{C}$ 、 $10.0^{\circ}\text{C}$ 及び $6.0^{\circ}\text{C}$ 程度が得られた。
- (3) 舗装熱を利用することにより、パッシブ法では検出できなかったコンクリートの厚さ240mmの場合の欠陥部70mm以上を熱画像から検出することができた。
- (4) 欠陥部と健全部の最大温度差として現れる経過時間は、実測値ではほぼ240分以降から測定を終了した360分にかけて得られた。
- (5) 欠陥検出のための測定開始時間は、欠陥の大きさ及び深さによって変化するが、コンクリート

の厚さ160mmの場合、欠陥の深さ20mmでは欠陥部100mmを舗設後40分以降から、またコンクリートの厚さ240mmの場合、欠陥の深さ40mmでは160分後から検出できる。

- (6) シミュレーションでは、360分経過後に最大差分温度が得られ、その温度差と経過時間の推移から長大橋梁においても十分な測定時間が確保できることが分かった。
- (7) 欠陥部100mmが検出できるコンクリートの厚さの限界は、検出温度差が $-0.5^{\circ}\text{C}$ の場合、欠陥の深さ20mmでは340mmまで、欠陥の深さ40mmでは300mmまで検出することができる。
- (8) 欠陥部100mmが検出できる欠陥の深さの限界は、コンクリートの厚さ160mmの場合71mmまでが、コンクリートの厚さ240mmでは54mmまで検出できる。

謝辞：本研究を進めるにあたり有意義な御示唆を頂きました日本大学西川 肇教授、試験体の受け台作成では高橋建設㈱代表取締役高橋修一氏ならびに数値解析では横河技術情報㈱島村覚智氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表する次第であります。

## 参考文献

- 1) 魚本健人：コンクリート構造物の維持管理とコンクリート診断士，コンクリート工学，Vol. 39, No. 4, pp. 10-13, 2001. 4.
- 2) 芦田義則：土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言，コンクリート工学，Vol. 39, No. 5, pp. 14-18, 2001. 5.
- 3) 広瀬鉄夫：阪神高速道路の維持管理における今とこれから，土木学会誌，Vol. 86, pp. 17-18, 2001. 12.
- 4) 高木千太郎：東京都の橋梁管理現状と健全度調査について，土木学会誌，Vol. 86, pp. 21-22, 2001. 12.
- 5) 松村英樹：コンクリート構造物の点検・調査・診断技術の現状，コンクリート工学，Vol. 39, No. 6, pp. 8-15, 2001. 6.
- 6) 金海 鈺，葛目和宏，宮本文穂：コンクリート橋損傷要因のファジィ階層化と維持管理への適用，コンクリート工学論文集，第3巻，第2号，pp. 71-84, 1992. 7.
- 7) コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書，(社)日本コンクリート工学協会，1992. 3.
- 8) コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書，(社)日本コンクリート工学協会，2001. 3.
- 9) 神田昌幸：赤外線による鉄筋コンクリート床版の健全度診断，道路建設，No. 574, pp. 96-97, 1995. 11.

- 10) 官田信裕：トンネル検査車の開発, JREA, Vol. 42, No. 7, pp. 26274-26277, 1999. 7.
- 11) 三木博史, 小橋秀俊：熱赤外線映像法による吹付のり面老朽化診断技術の現状と課題, 土木技術, 49巻, pp. 89-103, 1994. 2.
- 12) 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検査に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 1321-1326, 1997. 7.
- 13) 山田和夫：サーモグラフィ法を適用したコンクリート内部探査, 非破壊検査, 44巻, 第4号, pp. 228-234, (社)非破壊検査協会1995. 4.
- 14) 川瀬貴行, 鎌田敏郎, 岩波光保, 六郷恵哲：サーモグラフィによる鋼・コンクリート間の空隙評価に関する基礎的研究, 建造物の診断に関するシンポジウム論文集, pp. 285-288, 土木学会構造工学委員会, 1998. 7.
- 15) 柳内睦人, 金光寿一：サーモグラフィ法によるRC道路橋床版の内部性状診断, 建造物の診断に関するシンポジウム論文集, pp. 303-306, 土木学会構造工学委員会, 1998. 7.
- 16) 阪上隆英, 込山貴仁：赤外線サーモグラフィによるコンクリートの非破壊試験, 非破壊試験, 第47巻, 10号, pp. 723-727, (社)非破壊検査協会, 1998. 10.
- 17) セメント協会編：セメント規格がわかる本 -JIS解説書-, p. 175, (社)セメント協会, 1997. 3.
- 18) 松野三郎, 山下弘美：舗装技術の質疑応答, pp. 145-149, 建設図書, 1983. 3.
- 19) 新井洋一, 江尻公一, 立川道義, 増谷光正, 高垣信行：赤外計測によるコンクリート剥離の検出, 赤外線技術, pp. 32-42, 第10号, 1985. 10.
- 20) 新井洋一：赤外線センサーによるタイル外壁剥離検知器, 建築の技術施工, pp. 98-101, 1986. 3.
- 21) 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研究, 土木学会論文集, No. 442/V-16, pp. 91-100, 1992. 2.
- 22) 矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門, p. 103, (株)培風館, 1998. 1.
- 23) 日本機械学会編：電熱工学資料, pp. 317-322, (社)日本機械学会, 1986. 10.

(2002. 5. 22 受付)

## A STUDY OF FLAW DETECTION INSIDE RC FLOOR SLABS BY THERMOGRAPHY METHOD USING PAVEMENT HEAT

Juichi KANAMITSU, Mutsuhito YANAI and Tomonori MITSUBOSHI

In the thermographical detection for the internal flaw of RC floor slabs, several way as new detection method have been discussed, such as the passive method using the fluctuation in solar radiation and the active one using the difference of temperature by the artificial heating system. However, resulting from our continuous experiment, two primary issues should be solved were obtained; first, few difference of temperature on the RC floor slab bottom on the passive method and uneven state of heating and second, set up of the scaffoldings on the active method. In this study, a new diagnosis method focused upon the pavement heat of the asphalt was proposed. As a result, the part of low-temperature at the bottom faces of specimens, which clearly indicates the flaw, was visualized and detected.