

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

金光寿一¹・柳内睦人²・三星智典³・黒古剛司³・山本欣徳³

1 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)

2 正会員 工博 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)

3 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)

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、維持管理の面から検査技術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 床版下面は日陰となるため検出に必要な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は足場の設置に問題を残す。そこで、本研究ではアスファルト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パッシブ法との比較から本手法の有効性が確認された。

キーワード：サーモグラフィー法、欠陥検出、舗装熱、道路橋床版

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条件及び環境条件の変化などを要因とする損傷欠陥の事例が数多く報告^{1)~3)}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。

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 床版下面は外気温の変動による温度差が余り期待できず、またアクティブ法では加熱や冷却範囲が制限され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ものである。本手法の有効性については、外気温の変動を利用したパッシブ法との比較及び非常定熱伝導解析から検証した。

2. 実験及び解析概要

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検出に必要な温度差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。また、シミュレーションでは欠陥検出が可能な床版厚さ、欠陥の深さ及び厚さの限界や検出許容時間について明らかにした。

(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、厚さを 160mm、200mm 及び 240mm の 3 種類として配筋を施した。施工不良、床版疲労などによって生じる RC 床版内部の層状剥離を想定した空洞・空隙は、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、その木枠内に舗設した。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-1 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

アスファルト混合物の温度管理は、舗装の種類、舗装厚、気象などの施工条件によってかなり異なってくるが予測されるが、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、基層に砕石マス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 標準砂を代用して舗設した。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。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 [2 次元非冷却マイクロボロメータ型, 応答波長領域 8.0～14.0 μm , 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込むことにした (写真-1 参照)。その試験体下面の測定面は、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。

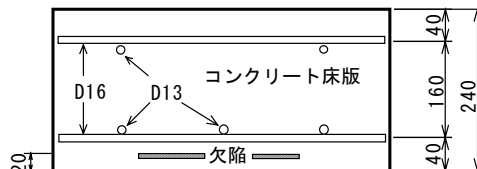
3. 実験結果

(1) 外気温の変動が及ぼす熱画像への影響

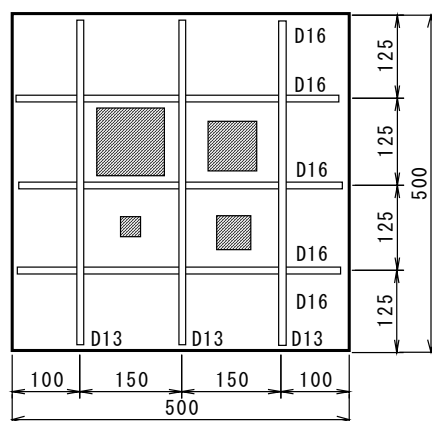
パッシブ法の欠陥検出は、SH240-20 及び SH240-40 から検討した。なお、試験体上面の ISO 標準砂 (厚

表-1 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		
		100×100		



(a) 断面図



(b) 欠陥配置図

図-1 試験体断面図 (SH240-20)



写真-1 測定状況

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

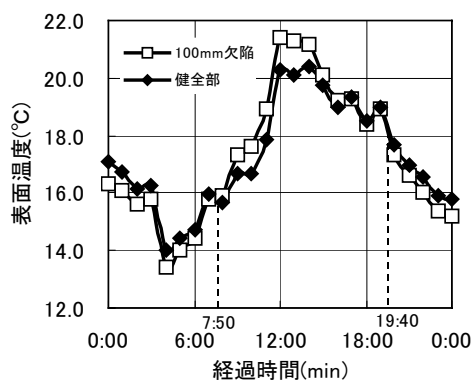


図-2 表面温度の相違 (SH240-20)

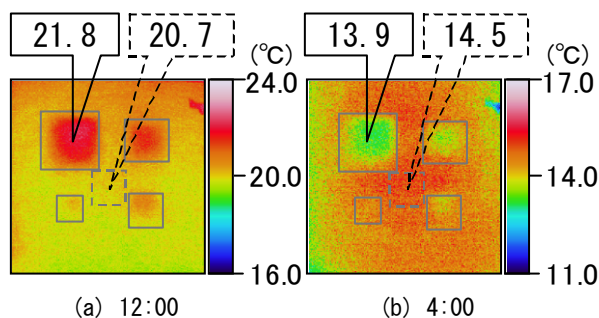


写真-2 パッシブ法で得られた熱画像 (SH240-20)

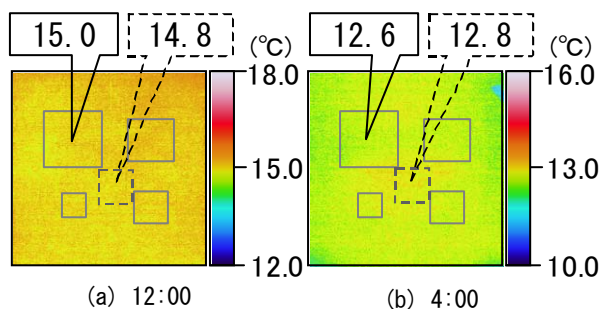


写真-3 パッシブ法で得られた熱画像 (SH240-40)

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 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 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。

その結果、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り、本測定では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。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ができないまでも、各 100, 70, 50mm 及び 30mm の位置に赤色の高温部を検出することができる(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

表-2 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

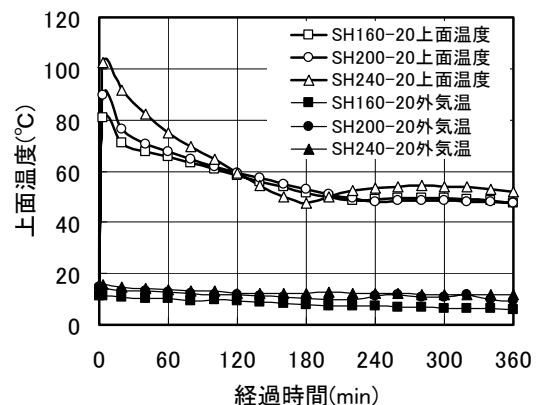


図-3 コンクリート上面温度及び外気温

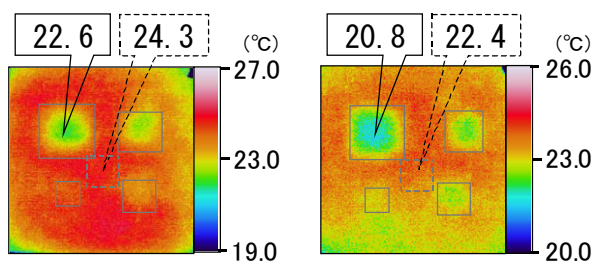
となり、欠陥部 50mm では薄緑色の低温域が一部見られるものの誤診の危険性が、また欠陥部 30mm は検出することができない(写真-2(b) 参照)。その欠陥部 100mm で得られた表面温度の平均値と健全部との温度差(欠陥部-健全部)は、高温時のピークで 1.1°C、低温時のピークで-0.6°Cであった。

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検出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)。

(2) 舗装熱が及ぼす熱画像への影響

表-2 に、実験要因の温度管理を示す。図-3 は、表-2 に示す欠陥の深さ 20mm 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



(a) SH240-20 (280 分後) (b) SH240-40 (320 分後)

写真-4 舗装熱で得られた熱画像

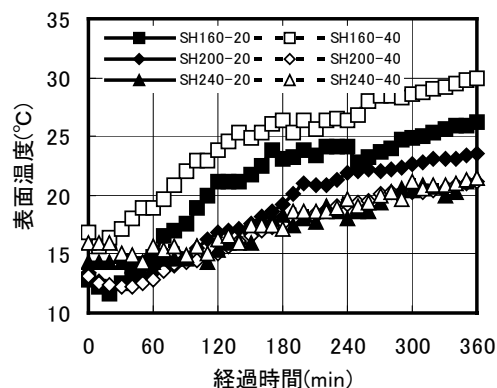


図-4 表面温度の時系列変化

90℃程度に低下し、さらに2層目の舗設からは温度降下した1層目のISO標準砂が介在する熱伝達となるため50℃前後となっている。

SH240-20 及び SH240-40 で得られた熱画像を写真-4(a), (b)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(a)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、欠陥部と健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、パッシブ法で全く検出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。このようにパッシブ法では検出が困難である深さ40mmに位置する欠陥を検出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

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

表-3 熱伝達開始時間及び上昇温度

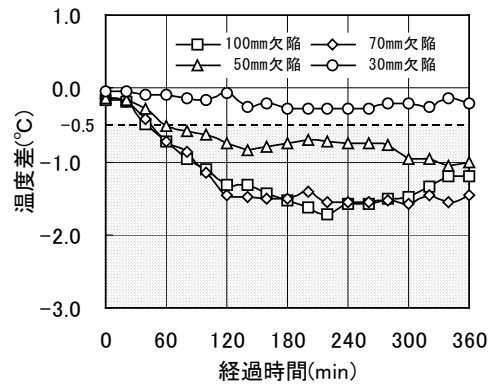
試験体	測定開始時の表面温度(℃)	伝達開始時間(min)	伝達開始時の温度(℃)	最大温度(℃)	上昇温度(℃)
SH160-20	12.8	30	12.6	25.6	13.0
SH200-20	13.4	50	13.1	23.5	10.4
SH240-20	15.2	100	15.7	21.4	5.7
SH160-40	16.9	30	17.2	30.0	12.8
SH200-40	13.1	50	12.8	21.1	8.3
SH240-40	16.0	100	15.7	21.5	5.8

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。

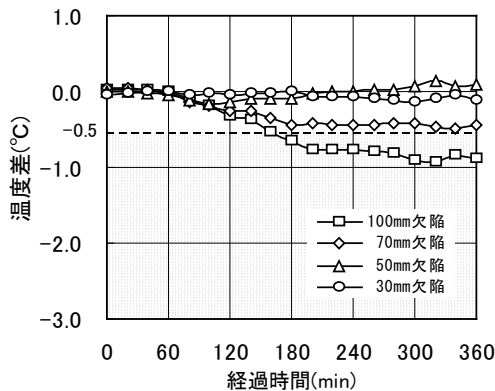
その結果、SH160の経過時間は約30分後、SH200で50分後、SH240で100分後とコンクリートの厚さが大きくなるほど長くなっている。また、表-3に図-4の時系列変化から求めた上昇温度(360分経過後の温度-伝達開始時間時の温度)を示す。その熱伝達から得られた上昇温度は、舗設時の温度管理が若干異なるものの、概ねSH160で約13.0℃、SH200で9.0℃、SH240においても6.0℃程度生じている。

b) 各欠陥部の検出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-5(a), (b)は、SH160-20 及び SH240-40 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。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℃)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℃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℃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-4に、図-5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、測定を終了した360



(a) SH160-20



(b) SH240-40

図-5 温度差の時系列変化

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-5 は、図-5 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-4 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(表-5 参照)。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、欠陥が大きいくほど舗設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検出できるように、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。

表-4 最大温度差及び経過時間

試験体	最大温度差($^{\circ}\text{C}$)/経過時間(min)			
	欠陥の多きさ(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	-1.9/320

表-5 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)			
	欠陥の多きさ(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 ×: 検出不可能

一方、前述したとおり、検出許容時間では図-5 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。しかし、図-5 に示す推移曲線のばらつきからも分かるように、表-5 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-2 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素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が、欠陥検出への評価は供給熱を統一したシミュレーションから明らかにした。

4. 熱伝導解析による数値シミュレーション

SH160-20 の実験要因を用いて、同条件から全て

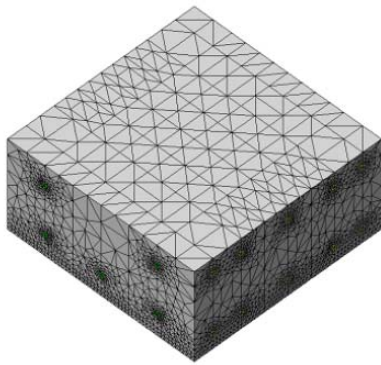


図-6 解析モデル

表-6 解析に用いた熱特性

材料	密度 (kg/m ³)	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
発砲スチロール	28.6	1.300	0.027

の試験体についてシミュレーションを行った。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、厚さ及び深さがコンクリート下面の温度変化にどのような影響を及ぼすのか、またその温度差からの検出限界について検討した。

(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-6に示す。メッシュ分割は、コンクリート下面を10mmのメッシュサイズとし、上面は温度変化が一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) 熱負荷条件と解析設定条件

基層及び表層の舗装熱を想定した熱負荷条件は、SH160-20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熱電対を埋設(コンクリート下面より10mm)して得られた舗設後の経過時間0分時の13.3℃を入力した。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ことになるが、本研究ではシミュレーションを繰返して実験値の表面温度に最も近似した12.0W/m²・Kの一定値とした。健全部及び欠陥部の同定を目的として

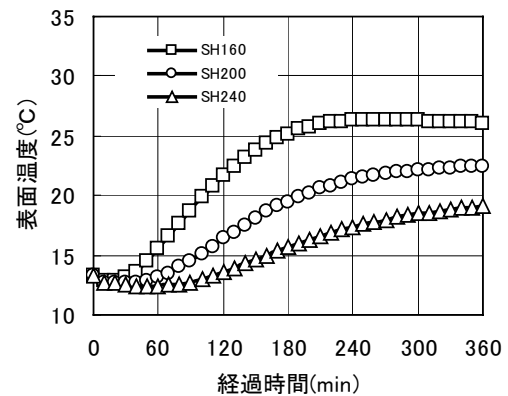


図-7 表面温度の時系列変化

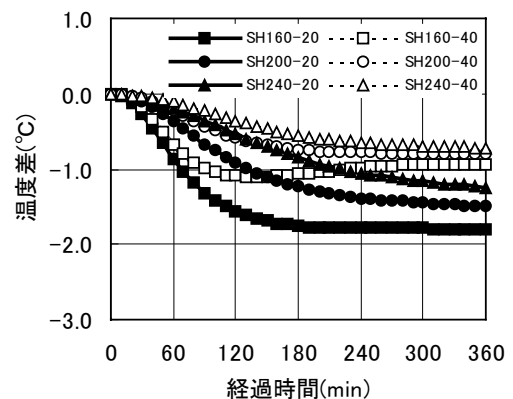


図-8 温度差の時系列変化(100mm欠陥)

用いた熱特性⁴⁾は表-6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) 床版厚さと検出限界

図-7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。図-8には欠陥部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、図-7に示すSH160の表面温度は図-4に示すSH160-20の実験値の推移曲線と良く一致しており、また同様に図-8に示す温度差についても図-5(a)の実験値との誤差は数%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。

図-9は、床版厚さと欠陥検出限界を求めるために図-8に示す360分経過後の温度差と欠陥の大きさの関係を示したものである。図-9に示す各床版厚さ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℃の場合、欠陥の深さ20mmでは340mmまで、欠陥の深さ

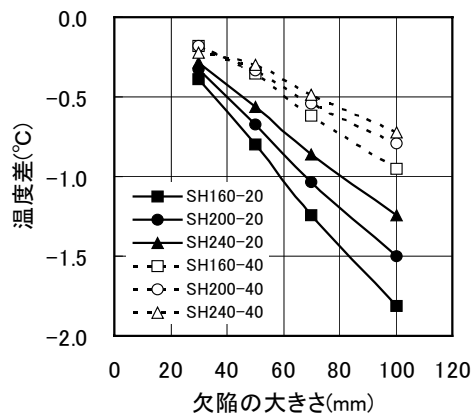


図-9 温度差と欠陥の大きさ(360 分後)

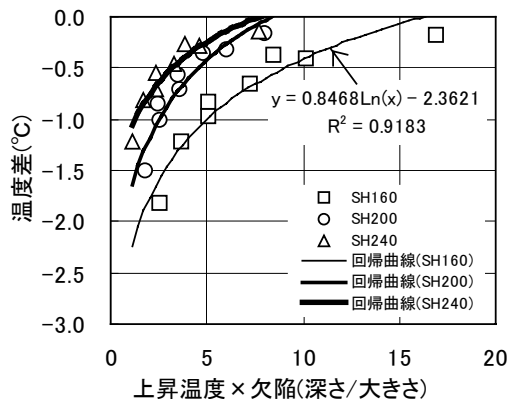


図-10 温度差と欠陥の深さ及び大きさの関係

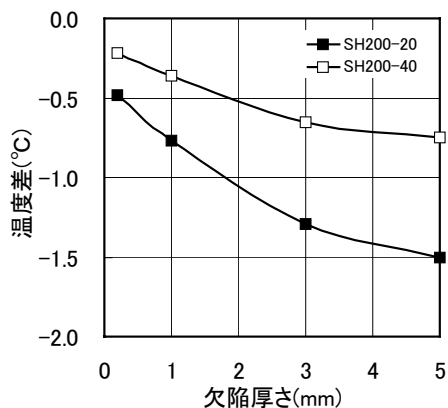


図-11 欠陥厚さと温度差(SH200)

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。

(2) 欠陥深さの検出限界

図-10 は、欠陥の深さがどこまで検出可能かを検討するため、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。

(3) 欠陥厚さの検出限界

次に、欠陥の厚さの相違と検出限界を検討するため、コンクリート厚さ 200mm (SH200) の欠陥部 100mm の厚さを 5mm, 3mm, 1mm 及び 0.2mm と変化させた解析モデルからシミュレーションを行った。その解析モデルは図-1 に示す試験体の欠陥部 70, 50, 30mm の位置に欠陥部 100mm の厚さを変えて配置している。なお、解析条件は同様である。図-11 に 360 分後に得られた欠陥厚さと温度差の関係を示す。

その結果、欠陥検出の温度差の閾値を -0.5°C 以下とすると、深さ 20mm は厚さ 0.2mm 以上が、深さ 40mm では厚さ 2mm 以上が検出可能である。しかし、図に示すとおり深さ 20mm の欠陥厚さ 0.2mm と深さ 40mm の厚さ 2mm とでは温度差が同じになり、また、欠陥部 100mm の位置に現れる表面温度分布も両者に相違が見られず、欠陥の厚さと深さの関係を明確にすることは困難であった。

(4) 検出許容時間の限界

検出可能な許容時間は、実現場で得られた舗装熱から検討した。図-12 に示す上面温度は、千葉県下の道路橋で施工された SMA 舗装と排水性舗装の舗設熱を実験と同様にコンクリート上面に熱電対を貼付けて測定したものである。舗装工事の開始時間は、SMA 舗装は 20:50、排水性舗装が 0:00 であった。図-13 にこの供給熱及び外気温から得られた各試験体の欠陥部 100mm と健全部の温度差を示す。なお、解析モデルは図-1 に示すとおりであり、解析条件は同様である。

その結果、欠陥検出の温度差の閾値を -0.5°C 以下とすると、コンクリート厚さが小さいほど舗設後からの検出可能な時間は短くなり、その検出許容時間は SH160-20 で 60 分経過後から 560 分間、SH200-20 で 90 分後から 600 分間、SH240-20 で 150 分後から 590 分間であり、また深さ 40mm では SH160 が 480 分間、SH200 が 480 分間、SH240 が 470 分間検出可能となる。また、最適な検出時間は SH160-20 で 370 分後、SH200-20 で 400 分後、SH240-20 で 450 分後、また深さ 40mm では SH160 が 350 分後、SH200 が 390 分後、SH240 が 420 分後に得られている。

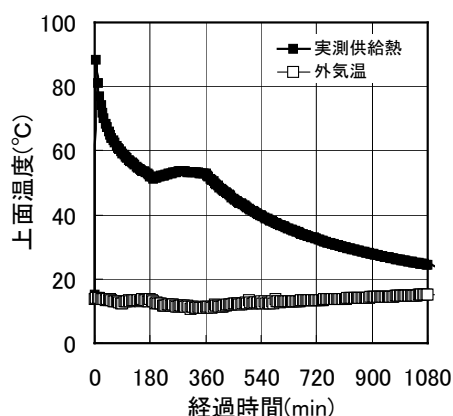


図-12 実現場で得られた上面温度

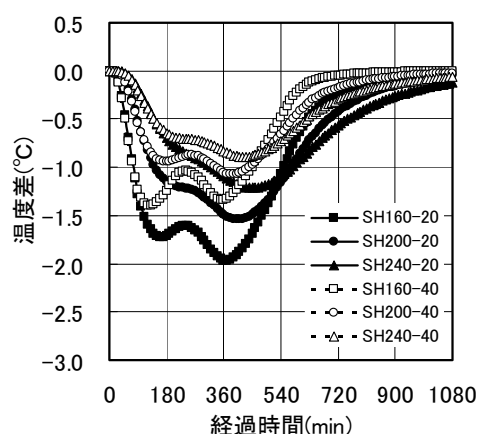


図-13 温度差の時系列変化(欠陥部 100mm)

6. まとめ

サーモグラフィー法を適用した RC 床版内部の欠陥検出法として舗装熱の利用を提案した。実験及びシミュレーションでは、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、検出可能な許容時間は 1~2 時間程度と短く、また深さ 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°C、10.0°C 及び 6.0°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) シミュレーションから求められた欠陥部 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°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。
- (7) 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。
- (8) 欠陥部 100mm が検出できる欠陥の厚さの限界は、コンクリートの厚さ 200mm の場合、検出温度差が -0.5°C とすると、深さ 20mm は厚さ 0.2mm 以上が、深さ 40mm では厚さ 2mm 以上が検出可能である。
- (9) 実現場の舗装熱を供給熱としてシミュレーションから求めた検出許容時間の限界では、欠陥部 100mm の場合、SH160-20 で 60 分経過後から 560 分間、SH200-20 で 90 分後から 600 分間、SH240-20 で 150 分後から 590 分間であり、また深さ 40mm では SH160 が 480 分間、SH200 が 480 分間、SH240 が 470 分間検出可能となり、長大橋梁においても十分な測定時間の確保ができる。

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) 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
- 4) 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