# 論文　舗装熱を利用したサーモグラフィー法による炭素繊維シート補強床版の内部欠陥検出に関する研究

金光　寿一*[1]・柳内　睦人*[2]・山本　欣徳*[3]

**要旨**：近年，道路橋床版部の補強方法として CFS が採用されている。その補強後の床版内部の欠陥検出へサーモグラフィー法を適用する場合，日射を利用するパッシブ法では床版下部は日陰となるため検出可能な温度差が期待できず，また各種人為的な加熱を利用するアクティブ法では加熱範囲が制限され検出精度や足場の経費に問題を残す。そこで，本研究では，アスファルト舗装時の熱伝達を利用して床版内部の欠陥検出を試みた。その結果，熱伝達から CFS で補強された試験体下面には欠陥を示す低温域が観測され，舗装熱が CFS 補強後の欠陥検出に適用できることが確認された。

**キーワード**：サーモグラフィー法，舗装熱，道路橋床版，欠陥検出，炭素繊維シート

## 1.　はじめに

近年，道路橋床版部の補強方法として炭素繊維シート(以下，CFS と記す）が採用されているものの，更なる交通条件や環境条件の悪化から既に潜在している欠陥が進行する危険性もあり，将来の安全性・信頼性を確保して供用し続けるためには，橋の状態を計画的かつ的確に診断する技術が重要となる。既に筆者らは，サーモグラフィー法による床版内部の欠陥検出手法として，外気温の変動を利用するパッシブ法では床版部下面は日陰となり欠陥部との温度差が得られないこと，また人為的な加熱を利用するアクティブ法では架設場所及び橋梁形式によっては特殊作業車及び足場の設置が困難になることから，アスファルト舗装時の舗設熱の利用を提案し，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にも有効であることを明らかにしている[1),2)]。しかし，無補強の床版部と比較して補強後の床版部では欠陥検出に必要な温度差が得られないことが推測される。特に，CFS は熱伝導性が大きく，アクティブ法を利用した剥離検査では，欠陥部の高温領域が時間経過とともに急速に消失し，積層数が増加するほど欠陥部の同定が困難となっている[3)]。

そこで，本研究では熱負荷時間の長いアスファルトの舗装熱から CFS で補強された床版内部の欠陥検出を検討した。そ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定常熱伝導解析から明らかにした。

## 2.　実験概要

本手法を利用する CFS で補強された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 CFS の積層数が欠陥検出の評価に影響することになる。実験は CFS の積層数及び欠陥部の大きさやコンクリート下面からの深さを変化させて欠陥の検出が可能となる温度差について表面温度差法から検討した。

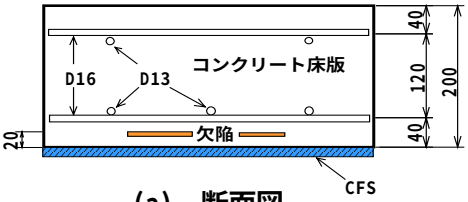
### 2.1　試験体及び欠陥

実験に供したコンクリート試験体は 500×500×200mm の直方体で，接着した CFS の枚数は 1～3 層とした。使用した CFS は，N 社製（高強度カーボン，目付量 200g/m$^2$，シート厚

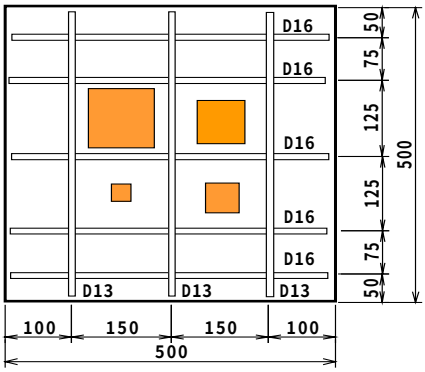
*1 中央工学校　土木測量学部土木建設科　工修　（正会員）
*2 日本大学教授　生産工学部土木工学科　工博　（正会員）
*3 日本大学大学院　生産工学研究科　（学生会員）

**表-1　試験体一覧**

| 試験体記号 | シート枚数 | 欠陥要因 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 深さ | 欠陥部寸法(mm) | |
| | | (mm) | 大きさ | 厚さ |
| CS0 | 0 | 20<br>40 | 30×30 | 5 |
| CS1 | 1 | | 50×50 | |
| CS2 | 2 | | 70×70 | |
| CS3 | 3 | | 100×100 | |




**(a)　断面図**




**(b)　欠陥配置図**

**図-1　試験体断面(CS1-20)**

0.111mm, 標準施工厚 0.45mm, 熱伝導率 18W/m・K）で，下地処理，エポキシ樹脂プライマー処理後に接着樹脂を含浸した。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)の位置に設置した。なお，試験体は測定面以外からの熱の流出入を遮断するため，側面には厚さ 50mm の発泡スチロールを貼付けている。また，舗装箇所は内寸 480×480 mm の木枠を作製し，その木枠内に舗設した。CFS の積層数と欠陥部の大きさ及び深さを変えて作製した試験体一覧を**表-1** に，その欠陥位置を**図-1(a),(b)**に示す。なお，原稿の試験体記号 CS の後の数字は CFS の積層数を示し，-の後の数字は欠陥の深さを示す。

### 2.2　アスファルト舗装

試験体への舗装は，近年 RC 床版に採用されている防水工，砕石マスチック舗装(SMA)及び排水性舗装の 2 層仕上げを想定し，繰返して実験を行うために ISO 標準砂を代用して温度管理を行った。その温度管理では，気象条件及び施工条件によってかなり温度降下が異なることが予測されるが, 本実験では，SMA 舗装及び排水性舗装の舗設時の温度である 160℃～165℃が 2 次転圧終了温度 60℃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，砂上を断熱材で覆うことで調整した。また，表層を想定した 2 層目は，60℃に降下した時点で舗設し温度管理方法は 1 層目と同様に行った。その ISO 標準砂の厚みは, 1 層が 80mm, 2 層が 60mm である。なお，コンクリート表面には，実橋梁施工で行わ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。

**写真-1　測定状況**

### 2.3 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℃(at30℃)〕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 の真下の位置からパッシブ法では 9:00～21:00 までの 12 時間を, また舗装熱を利用したアクティブ法では 12:00～22:00 までの 10 時間を 10 分間隔で熱画像を得ることにした(**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(**図-1** 参照)。

## 3.　実験結果

### 3.1　パッシブ法で得られた熱画像

**図-2** はパッシブ法で得られた CS0-20 の欠陥の大きさ 100×100mm(以下，欠陥部 100mm と

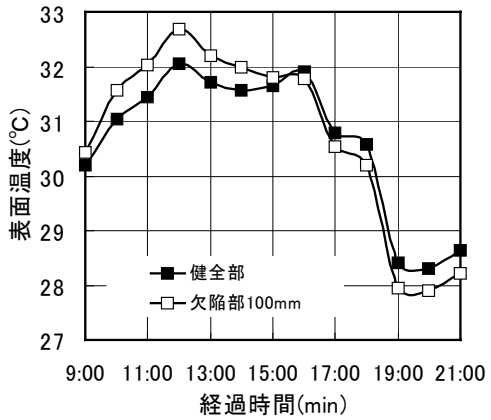



**図-2　表面温度の相違(CS0-20)**

**表-2　パッシブ法で得られた最大温度差**

| 試験体記号 | 測定時の外気温(℃) | | 平均風速(m/s) | 最大温度差(℃)/ 時間 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 開始時 | 終了時 | | 上昇時 | 降下時 |
| CS0-20 | 30.8 | 28.7 | 0.9 | 0.58/12 | -0.36/19 |
| CS1-20 | 31.6 | 28.8 | 0.6 | 0.88/12 | -0.46/20 |
| CS2-20 | 32.0 | 26.6 | 0.7 | 0.96/11 | -0.38/21 |
| CS3-20 | 23.2 | 21.5 | 0.5 | 0.73/12 | -0.28/20 |
| CS0-40 | 30.8 | 27.8 | 0.3 | 0.34/13 | -0.27/21 |
| CS1-40 | 39.3 | 33.3 | 0.4 | 0.30/12 | -0.37/20 |
| CS2-40 | 29.7 | 29.9 | 0.9 | 0.37/11 | -0.39/21 |
| CS3-40 | 29.0 | 26.4 | 0.8 | 0.43/11 | -0.22/18 |

記す)と健全部で得られた平均温度の時系列変化である。なお，この比較する健全部の表面温度は，日射角の影響から健全部に温度差が生じたため，欠陥部外側周辺箇所 8 画素で得られた平均値とした。試験体は測定日前日に実験室より搬出し，試験体上面の ISO 標準砂は無加熱で舗設している。**表-2** に測定時間内の外気温，平均風速及び熱赤外線センサで得られた外気温の上昇時，降下時の欠陥部 100mm と健全部との最大温度差(欠陥部 100mm-健全部)を示す。その外気温及び風速は試験体の直下にて測定している。**写真-2(a)～(d)**に最大温度差が得られた時間の熱画像を示す。

その結果,**図-2** 及び**表-2** から欠陥部と健全部との温度差は外気温の上昇時あるいは降下時に最も大きくなり，高温のピークを示す時間帯は 11 時～13 時頃，低温のピークを示す時間帯は 18 時～21 時頃が顕著で欠陥部の判定には適している。しかし，その判定可能な許容時間は概

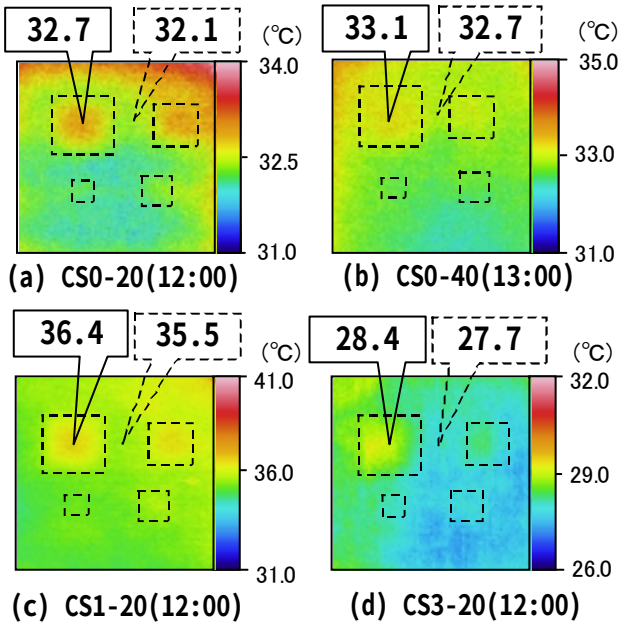



**写真-2　パッシブ法で得られた熱画像**

ね 1～2 時間程度と思われる。**写真-2** に示す熱画像では，欠陥の深さ 20mm の欠陥評価は，高温時のピークから積層数に関係なく欠陥部 100mm を確認することができる。一方，欠陥部の深さが 40mm である CS0-40 では，どの時間帯においても各欠陥全てを確認することはできなかった。従って，視覚的に欠陥を検出できる温度差は，熱赤外線センサの温度分解能（使用機種:0.15℃)の感度に影響されるが，これらの熱画像と温度差とを比較すると確実に検出するためには 0.5℃程度は必要と思われる。

### 3.2　舗装熱で得られた熱画像

**表-3** に，実験要因の温度管理を示す。**図-3** は，**表-3** に示す各試験体への舗設熱から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で測定した時系列変化である。なお，2 次転圧終了温度とする 60℃の確認は ISO 標準砂中に熱電対を埋込んで測定した。各試験体で得られた熱画像を**写真-3(a)～(f)**に示す。なお，熱赤外線センサによる温度測定は，日射の場合と同様に実施し，**写真-3** 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。

表-3　実験要因及び温度管理

| 試験体記号 | 1層舗設温度(℃) | 2層舗設までの経過時間 | 2層舗設温度(℃) | 1層舗設時外気温(℃) | 最大風速/平均風速(m/s) |
|---|---|---|---|---|---|
| CS0-20 | 157 | 200 | 159 | 22.8 | 1.3/0.3 |
| CS1-20 | 161 | 200 | 159 | 33.8 | 2.5/0.8 |
| CS2-20 | 160 | 190 | 160 | 30.8 | 2.0/0.6 |
| CS3-20 | 154 | 220 | 156 | 26.4 | 1.3/0.4 |
| CS0-40 | 162 | 240 | 155 | 34.6 | 1.5/0.5 |
| CS1-40 | 161 | 230 | 158 | 37.6 | 2.3/0.6 |
| CS2-40 | 159 | 180 | 159 | 31.2 | 1.5/0.4 |
| CS3-40 | 160 | 180 | 164 | 28.3 | 1.2/0.4 |

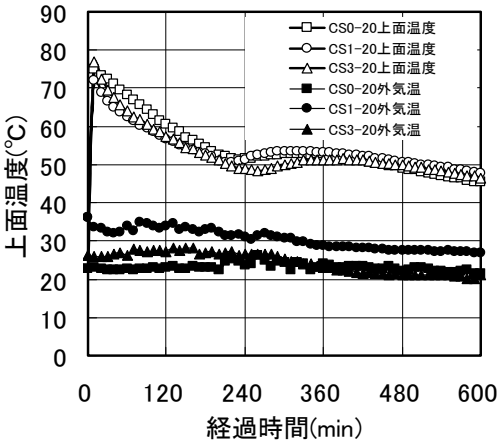



図-3　コンクリート上面温度及び外気温

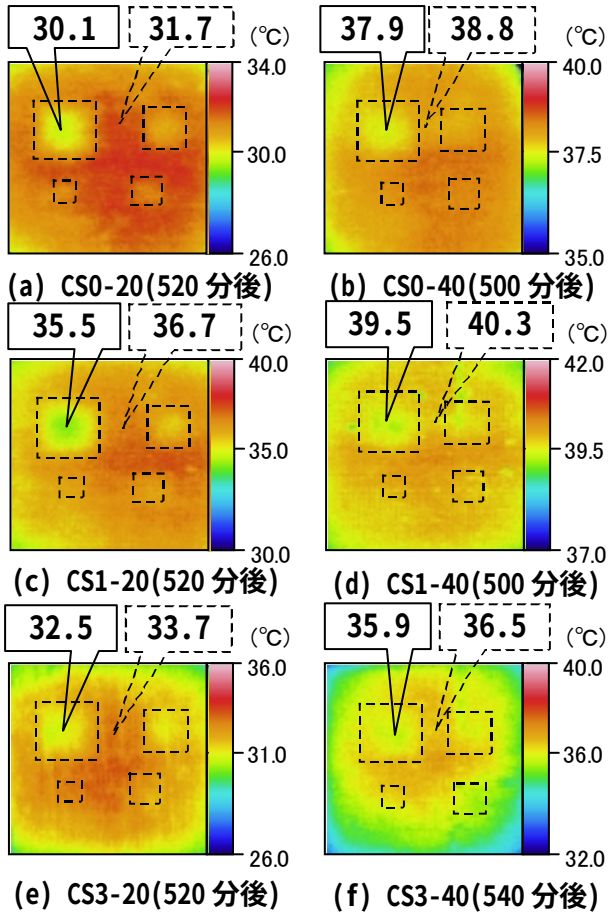



写真-3　舗装熱で得られた熱画像

その結果，**図-3** に示すコンクリートの上面から直接供給される舗設温度は，防水シートが介在するため舗設温度 160℃が 75℃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 層目の標準砂が介在するため 50℃前後となっている。欠陥部の深さ 40mm で CFS を接着していない**写真-2(b)**に示すパッシブ法と**写真-3(b)**との比較では，パッシブ法では全く確認することができなかった欠陥位置に欠陥部 100mm は確実に，欠陥部 70mm は不鮮明ながらも低温域を確認することができる。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 0.34 ℃に対して舗装熱からでは-0.94℃の温度差が得られている。また，**写真-3(d),(f)**の 1 及び 3 層においても，CS0-40 と同様に欠陥部 100mm を確実に検出することができる。その温度差は，CS1-40 で-0.84℃，CS3-40 では欠陥部の境界が不鮮明になるものの，-0.59℃であった。このようにパッシブ法では検出が困難である深さ 40mm に位置する欠陥を評価することが可能である。

### 3.3　各欠陥部の評価と表面温度差の関係

舗装熱が及ぼす各欠陥部への影響は，健全部との表面温度差から検討した。**図-4** は，その熱伝達から得られた欠陥部 100mm の外側周辺箇所 8 画素で得られた健全部の表面温度である。**表-4** に熱伝達開始時の表面温度からの上昇温度を示す。また，**図-5** は欠陥部 100mm と健全部間で得られた温度差の時系列変化であり，**表-5** には各欠陥部と健全部間の最も大きな温度差をパッシブ法と比較して示す。

その結果，**図-4** に示す表面温度の推移から熱伝達開始時間は CFS の有無による影響は小さく，ほぼ 50 分～60 分経過後から始まり，最大表面温度はほぼ 300 分以降から 520 分にかけて得られ，その上昇温度は約 8℃前後となっている。その熱伝達から得られた欠陥部 100mm と健全部との温度差では，**図-5** に示すとおり日中

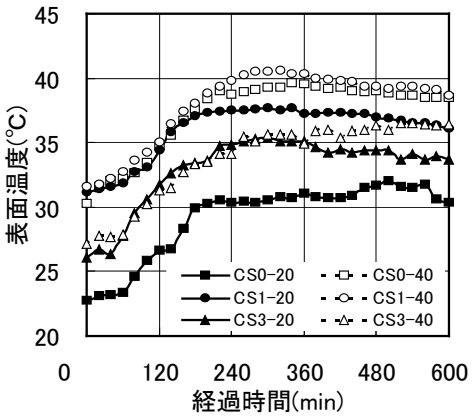



**図-4　表面温度の時系列変化（健全部）**

**表-4　熱伝達開始時間及び上昇温度**

| 試験体記号 | 測定開始時の表面温度(℃) | 伝達開始時の表面温度(℃) | 最大表面温度(℃)/経過時間(min) | 上昇温度(℃) |
|---|---|---|---|---|
| CS0-20 | 22.2 | 23.4 | 32.0/500 | 8.6 |
| CS1-20 | 31.1 | 31.9 | 37.7/300 | 5.8 |
| CS2-20 | 28.5 | 29.6 | 37.8/340 | 8.2 |
| CS3-20 | 26.1 | 27.8 | 35.4/300 | 7.6 |
| CS0-40 | 30.2 | 32.2 | 39.6/340 | 7.4 |
| CS1-40 | 31.6 | 32.7 | 40.6/320 | 7.9 |
| CS2-40 | 32.5 | 32.9 | 41.1/380 | 8.2 |
| CS3-40 | 27.2 | 27.9 | 36.5/520 | 8.6 |

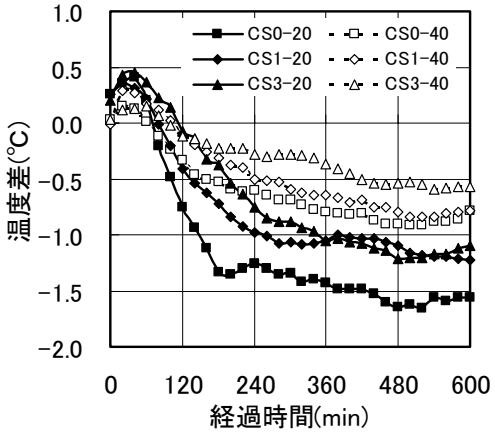



**図-5　温度差の時系列変化（欠陥部 100㎜）**

の外気温の上昇から熱伝達が開始されるまで欠陥部の表面温度が上昇し，その後熱伝達から急激にマイナス域に転じていることが分かる。この温度差を用いての欠陥検出では，熱画像からの視覚的な欠陥検出温度を-0.5℃とすると，最も検出が困難である CS3-40 においても 420 分～600 分までの 180 分間検出可能であることが分かる。しかし，**図-4** 及び**表-4** に示すとおり外気温など各実験要因が異なるために CFS の積

**表-5　最大温度差の比較**

| 試験体記号 | 日射による最大温度差(℃)/舗装熱による最大温度差(℃) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 欠陥部(mm) | | | |
| | 30 | 50 | 70 | 100 |
| CS0-20 | 0.06/−0.21 | 0.20/−0.50 | 0.38/−0.69 | 0.58/−1.65 |
| CS1-20 | 0.00/−0.13 | 0.29/−0.30 | 0.51/−0.50 | 0.88/−1.23 |
| CS2-20 | 0.21/0.06 | 0.33/−0.21 | 0.70/−0.51 | 0.96/−1.30 |
| CS3-20 | 0.24/−0.04 | 0.33/−0.29 | 0.46/−0.45 | 0.73/−1.20 |
| CS0-40 | −0.06/−0.20 | 0.12/−0.28 | 0.30/−0.44 | 0.34/−0.94 |
| CS1-40 | 0.01/−0.04 | 0.06/−0.17 | 0.18/−0.47 | 0.30/−0.84 |
| CS2-40 | 0.15/−0.14 | 0.18/−0.19 | 0.27/−0.38 | 0.37/−0.64 |
| CS3-40 | 0.12/−0.01 | 0.17/−0.17 | 0.30/−0.28 | 0.43/−0.59 |

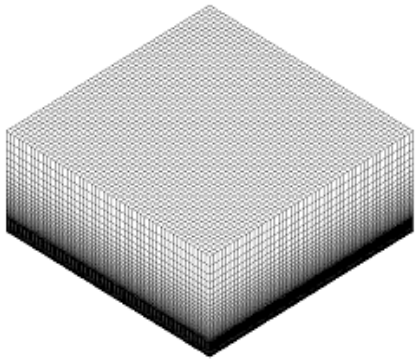


**図-6　解析モデル**

**表-6　解析に用いた熱特性**[4)]

| 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 | 0.95 | 1.5 |
| 発泡スチロール | 28.6 | 1.3 | 0.027 |
| エポキシ樹脂 | 1,850 | 1.1 | 0.3 |
| CFS(繊維/直角) | 1,268 | 1.61 | 18/0.3 |

層数による温度差への影響を明確にすることは困難である(**表-5** 参照)。そこで，CFS の影響は供給温度及び外気温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

三次元非定常熱伝導解析には，汎用 FEM プログラム COSMOS/M Ver2.7 を使用し，CS0-20 で得られた実験要因を採用してシミュレーションを行った。

### 4.1 解析モデルと解析条件

解析モデルは，**図-1** に示す断面を要素分割した。メッシュ分割は，コンクリートを 10mm メッシュサイズとし，CFS の厚さは 0.11mm，エポキシ樹脂の厚さは施工厚から片面を

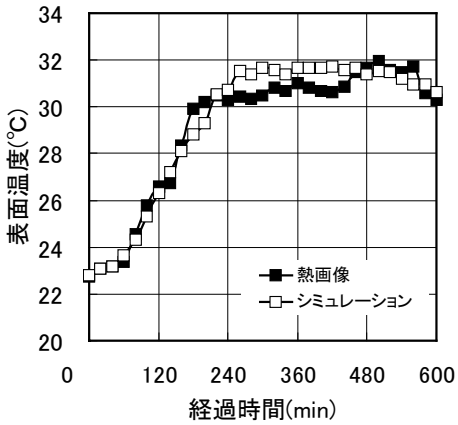



**図-7　実験値と解析との比較（健全部）**

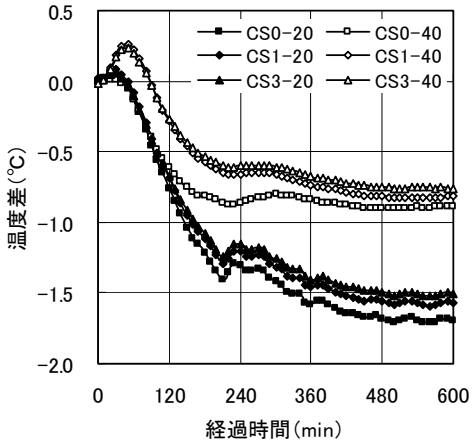



**図-8　積層数と温度差の関係（欠陥部 100㎜）**

0.17mm とした。従って，1 層モデルでは 0.17+0.11+0.17mm とし，CFS の熱伝導率は繊維方向とその直角方向で異なる値を設定した。ただし，鉄筋は配置していない。その要素分割モデルを**図-6** に，解析条件 [4] を**表-6** に示す。解析初期条件であるコンクリートの内部温度は 22.2℃，また，熱伝達係数は**図-4** に示す CS0-20 の表面温度の推移にほぼ一致した 21.0W/m$^2$・K の一定とし，解析時間間隔は 5 分，結果の出力は 10 分間隔とした。なお，側面は完全断熱境界としている。

### 4.2　シミュレーションの結果

**図-7** はシミュレーションと実験値で得られた CS0-20 の健全部の表面温度である。また，**図-8** には CS0-20 の実験要因に統一してシミュレートした欠陥部 100mm と健全部間の温度差を示す。その結果，**図-7** に示す両者の表面温度，また**図-5** 及び**図-8** に示す CS0-20 の温度差との誤差は数%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。その統一して得られた温度差では，CFS の影響をより明確にすることができる。欠陥深さ 20mm の無補強と 3 層との比較では、600 分後で 0.19℃，深さ 40mm では 0.12℃と格差が非常に小さいことが分かる。また，検出が最も困難である CS3-40 では，検出許容時間は 400 分間以上確保されているものと思われ，舗装熱を利用する診断法の有効性が明らかとなった。

## 5.　まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

(1) パッシブ法では，高温時のピークは 11 時～13 時頃に現れるものの，検出可能な許容時間は 1～2 時間程度である。

(2) パッシブ法では，深さ 40mm に位置する欠陥を評価することは困難である。

(3) 舗装熱の熱伝達は，コンクリートの厚さが 200mm の場合 50～60 分後から始まり，その上昇温度は約 8.0℃程度得られた。

(4) 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深さ 40mm に位置する欠陥部 100mm を検出できた。

(5) シミュレーションでは，積層数が及ぼす温度差の影響は僅かで，検出が最も困難である CS3-40 の欠陥部 100mm は 170 分経過後から 400 分間以上検出可能であった。

### 参考文献

1) 三星智典，柳内睦人ほか：舗装熱によりアクティブに加熱された RC 床版のサーモグラフィーによる内部剥離検出の実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1587-1592，2002.6

2) 金光寿一，柳内睦人ほか：舗装熱からの熱伝達を利用したサーモグラフィー法による RC 床版内部の欠陥評価，春季大会講演概要集，日本非破壊検査協会，pp.137-138，2002.5

3) 阪上隆英ほか：赤外線サーモグラフィーによるコンクリート構造物の非破壊検査，第 2 回サーモグラフィーによる非破壊評価技術シンポジウム，日本非破壊検査協会，pp.25-29，1998.12

4) 日本機械学会編：電熱工学資料，日本機械学会，pp.317-322，1986.10