

論文 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

三星智典^{*1}・柳内睦人^{*2}・菅野 匡^{*3}・金光寿一^{*4}

要旨：近年，道路橋 RC 床版は耐久性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ている。検査効率の高いサーモグラフィー法を利用した欠陥検出では，外気温の変動による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，対象となる床版下面は日射による温度差が余り期待できず，また人為的な加熱では足場が必要となる。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敷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本手法の有効性が確認された。
キーワード：舗装熱，サーモグラフィー法，RC 床版，欠陥検出，表面温度差

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，さらには設計・施工の不良などを要因とする損傷欠陥の事例が数多く報告^{1),2)}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確立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。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評価法として注目され，種々異なる測定環境で実施されて得られた多く

の研究成果から適用範囲や測定能力が体系化され，現場への活用が期待されている。しかし，供用中の RC 床版内部の損傷欠陥に対する点検・診断では，対象となる RC 床版下面は外気温による温度差が余り期待できず，また，各種の人為的な加熱を利用するアクティブ法では足場の必要性が，さらに，鉄道交差では足場の設置も困難になるなどの問題があり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敷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を提案し検討するものである。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いるが，アスファルト敷設時の温度は 160 程度と高く，また，その熱負荷時間も長く広範囲に均一にコンクリート床版上面から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のモニタリング手法として有効であると考えられる。

*1 日本大学大学院 生産工学研究科 (学生会員)

*2 日本大学教授 生産工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 日本道路公団 小田原管理事務所 工修 (正会員)

*4 中央工学校専任講師 土木建設科 工修 (正会員)

2. 実験概要

本手法を利用する床版内部の欠陥検出では、アスファルト舗装時の温度管理や床版厚さが、欠陥の3要素である大きさ、厚さ、深さの評価に影響を及ぼすことになる。実験は外気温の変動を利用したパッシブ法との比較から本手法の有効性を検証するとともに欠陥のパラメータを変化させて診断の適用限界について検討した。

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、500×500mm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。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の位置に設置した。なお、その大きさは30×30×5mm、50×50×5mm、70×70×5mm及び100×100×5mmの立方体とした。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、その木枠内に敷設した。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。

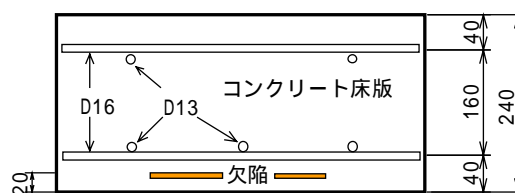
表-1 試験体一覧

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

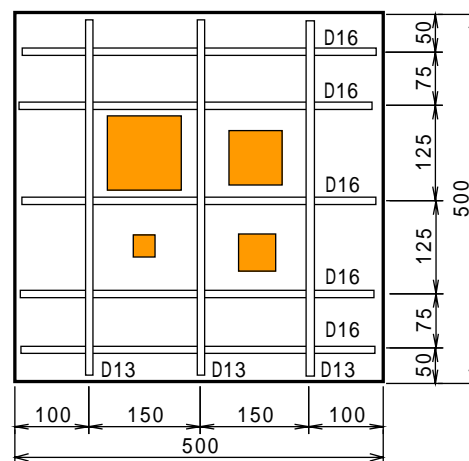
なお、原稿に記述している試験体SHの後の数字はコンクリートの厚さを、-の後の数字は欠陥の深さを示す。

2.2 アスファルト舗装

試験体への舗装は、一般の橋梁舗装に採用されている防水工、砕石マスチック舗装(SMA工法)及び高機能舗装(排水性舗装)の2層仕上げを想定し、繰り返して実験を行うためにISO標準砂



(a) 断面図



(b) 欠陥配置図

図-1 試験体断面(SH240-20)

を代用して温度管理を行い敷設した。その温度管理では、実施工の温度降下を想定してSMA工法及び高機能舗装の敷設時の温度である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時間になるように砂の厚み及び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に降下した時点で敷設し温度管理方法は1層目と同様である。その砂の厚みは、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。

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プロメータ型、応答波長領域12.0~14.0μm、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層敷設直後より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。なお、各欠陥部エリアにおける

画素数は、欠陥の大きさ30mmが128画素、50mmが338画素、70mmが722画素、100mmが1352画素である。また、選択した健全部エリアは50×50mmで338画素であった。



写真-1 測定状況

3. 実験結果

3.1 外気温の変動による欠陥評価

パッシブ法に使用した試験体は、コンクリート厚の最も大きいSH240-20及びSH240-40から検討した。なお、試験体上面のISO標準砂(厚さ:140mm)は、測定開始前日に無加熱で敷設している。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。

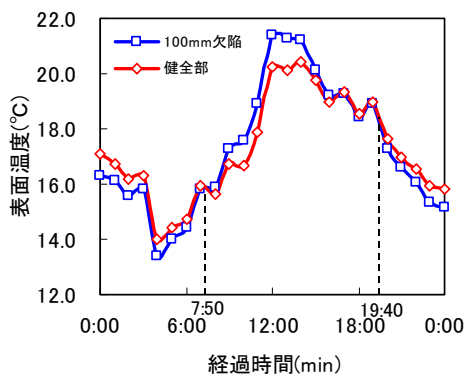


図-2 表面温度の相違(SH240-20)

図-2に熱赤外線センサで得られたSH240-20の欠陥の大きさ100×100mmエリアと健全部エリア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付近5箇所の大きさ50×50mmエリア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。既往の研究³⁾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、本測定においても高温時(上昇時)のピークが12:00、低温時(降下時)のピークは4:00に現れた。

SH240-20の欠陥評価では、高温時のピークから欠陥の大きさ100,70,50及び30mmを確認することができる。また、欠陥部と健全部の表面温度が逆転する低温時のピークでは、熱画像が日中で得られたものより不鮮明となり、欠陥の大きさ50mmでは誤診の危険性が、また欠陥の大きさ30mmは確認することができない。その欠陥の大きさ100×100mmエリア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、高温時のピークが1.1℃、低温時のピークは-0.6℃であった。

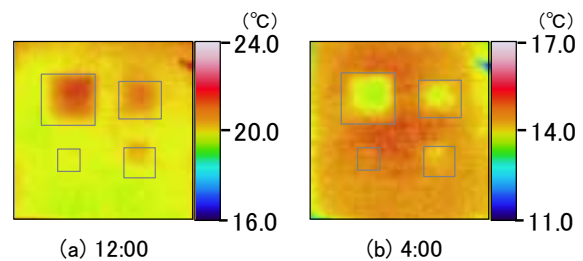


写真-2 パッシブ法による熱画像(SH240-20)

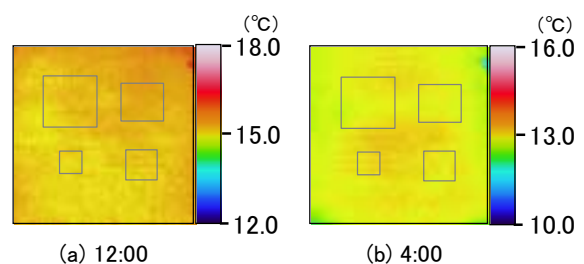


写真-3 パッシブ法による熱画像(SH240-40)

一方、写真-3に示す欠陥深さが40mmのSH240-40の熱画像は、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。その欠陥の大きさ100×100mmエリア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0.0℃、低温時のピークは-0.2℃であった。

3.2 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 40mm の試験体に敷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）と外気温を熱電対(T-G, 芯線構成:0.65×2,熱起電力:100 /mV)及びC社製デジタル記録計で測定した時系列変化である。その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、パッシブ法の場合と同様に実施し、写真-4は1層敷設後からの経過時間において、欠陥の大きさ 100×100mm エリア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-2 実験要因による温度管理

試験体	1層敷設時刻	1層敷設温度(°C)	2層敷設までの経過時間(min)	2層敷設温度(°C)	1層敷設時外気温(°C)
SH160-20	14:23	162.6	194	162.7	11.2
SH200-20	14:32	155.8	212	152.8	14.1
SH240-20	15:59	165.2	180	165.3	15.6
SH160-40	15:49	161.2	150	156.4	17.2
SH200-40	14:51	153.4	157	168.1	13.1
SH240-40	15:49	163.3	215	163.3	17.0

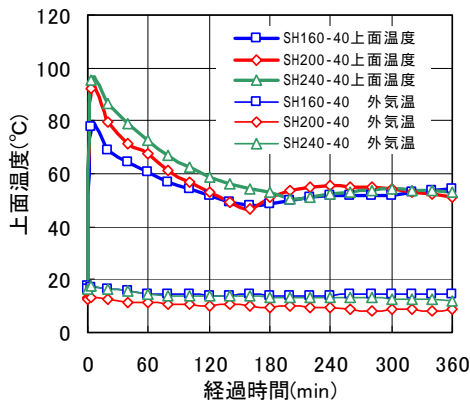


図-3 内部温度及び外気温(欠陥深さ 40mm)

その結果、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の境界部周辺が若干不鮮明になるものの、欠陥部と健全部との温度差はより顕著に現れている。

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つた欠陥位置に剥離

の大きさ 100 及び 70mm が確実に検知することができる。しかし、欠陥の大きさ 30mm については、どのようにカラーバーを調整しても視覚的な判断は困難であった。

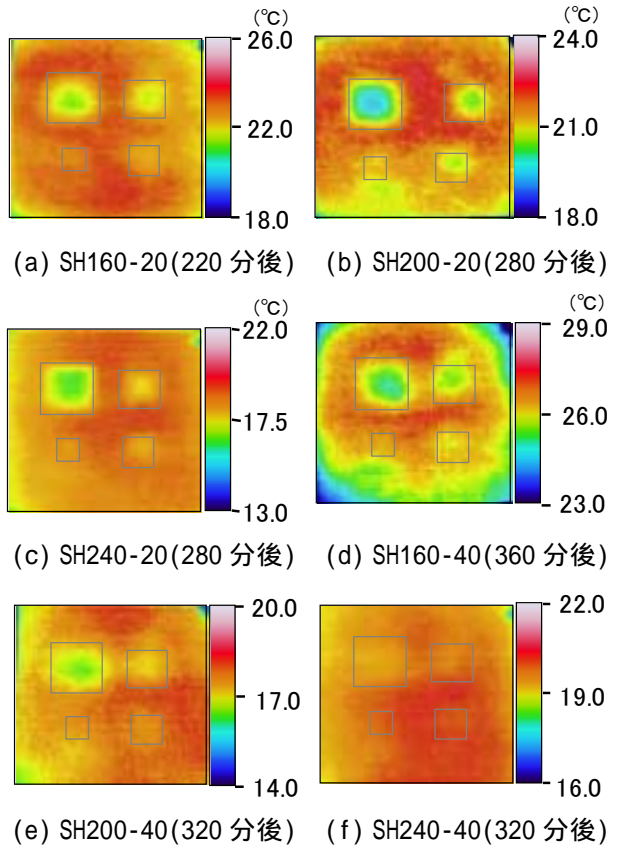


写真-4 アクティブ加熱による熱画像

3.3 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。

(1) コンクリート厚さと上昇温度の関係

図-4 は、敷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、写真-2に見られるように日較差での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。伝達開始経過時

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。

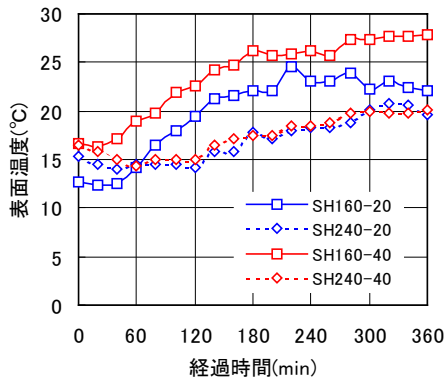


図-4 表面温度の時系列変化

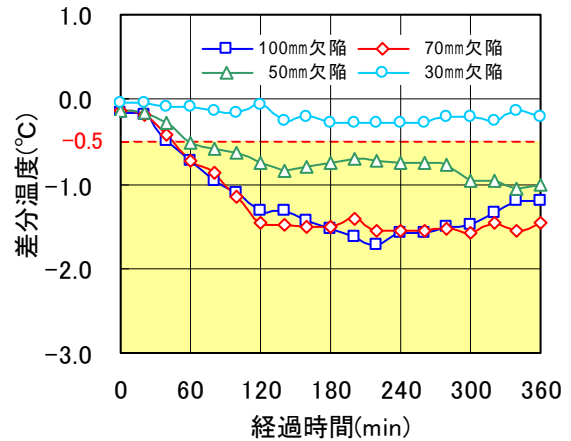
表-3 熱伝達開始時間及び上昇温度

試験体	測定開始時の表面温度(°C)	伝達開始時間 (min)	最大温度 (°C)	上昇温度 (°C)
SH160-20	12.7	30	22.9	10.2
SH200-20	13.2	50	20.8	7.6
SH240-20	15.4	100	20.1	4.7
SH160-40	16.6	30	27.7	11.1
SH200-40	12.8	50	18.8	6.0
SH240-40	16.5	100	20.4	3.9

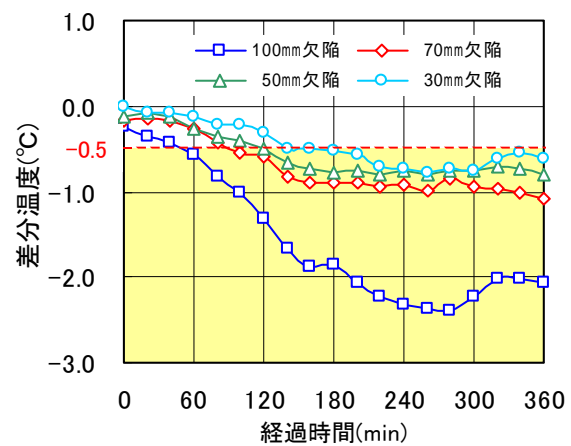
その結果、SH160 の経過時間は約 30 分後、SH200 で 50 分後、SH240 で 100 分後とコンクリート厚さが大きくなるほど指数関数的に長くなっている。また、表-3 に図-4 の時系列変化から求めた上昇温度(最大温度 - 測定開始時の温度)を示す。その伝達されて得られた上昇温度は、敷設時の温度管理が若干異なるものの、概ね SH160 で約 10、SH200 で 7.0、SH240 においても 4.0 程度生じている。

(2) 各欠陥部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-5(a), (b)は、SH160-20 及び SH240-20 における各欠陥のエリア内の平均温度と健全部エリア 5 箇所 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。表-4 には、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を示す。



(a) SH160-20



(b) SH240-20

図-5 差分温度の時系列変化(SH160, SH240)

表-4 最大差分温度と経過時間

試験体	最大差分温度(°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

結果、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。しかし、熱画像内から各欠陥エリアで得られた表面温度差を利用して視覚的に欠陥を検出する場合、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測定分

解能(使用機種: 0.15)の感度に影響されるが、熱画像と表面温度とを比較した結果、欠陥の大きさ 30mm 以上を確実に評価するためには -0.5 以下が必要であった。従って、表-4 に示す結果から -0.4 は誤診の危険性が、また -0.2 での欠陥評価は困難であった。

次に、表-5 は図-5 に閾値(-0.5)を設定して求めた各欠陥検出のための検出開始時間ならびに測定の許容時間である。検出開始時間とは、敷設後に欠陥を初めて検出できる時間を差し、許容時間とはその後継続して欠陥を検出できる時間帯である。

表-5 欠陥検出時間及び検出結果

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

なお、この許容時間は熱赤外線センサで測定した 360 分内で求めている。その結果、検出開始時間では SH160-20 が 60 分経過時に欠陥大きさ 50mm を検出することが可能となり、その後 300 分間は 50mm 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 分経過時に欠陥の大きさ 30mm を、80 分経過後から欠陥の大きさ 50mm が検出できることになる。このように、コンクリート厚が小さいほど、欠陥が大きいほど敷設後の早い時間から欠陥検出が可能となる。欠陥の深さによる影響では、伝達熱が欠陥側面から廻り込むため健全部との差分が小さくなり、欠陥の大きさ 70mm で比較すると検出開始時間が極端に遅くなる。

一方、検出許容時間では、図-5 から測定終了時の 360 分以降もしばらくは -0.5 以下の差分温度が継続し、長時間の欠陥検出が可能である。

4. まとめ

舗装熱を利用した RC 床版内部の欠陥検出では、試験体下面の内部空洞位置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本手法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) 外気温の変動による測定では、高温時のピークが 12:00、低温時のピークは 4:00 に現れたが、深さ 40mm に位置する欠陥を評価することは困難であった。
- (2) 舗装熱の伝達は、コンクリート厚さ 160mm で 30 分後、200mm で 50 分後、240mm で 100 分後から始まり、その上昇温度は約 10.0 , 7.0 , 4.0 程度得られた。
- (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厚さ 240mm の欠陥の大きさ 70mm 以上を熱画像から検出することができた。
- (4) 健全部と欠陥部の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 分にかけて得られた。
- (5) 欠陥検出のための開始時間は、欠陥の大きさ及び深さによって変化するが、SH160-20 では欠陥の大きさ 70mm 以上を敷設後 40 分以降から検出できる。
- (6) 熱画像の視覚的な欠陥評価では、欠陥の大きさ 30mm 以上を確実に検出するためには -0.5 以下の温度差が必要であった。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 新井洋一ほか：赤外計測によるコンクリート剥離の検出,赤外線技術,10号,pp.32-42, 1985