

論文 赤外線による PC 構造物におけるグラウト充填性状評価システムに関する研究

小池 悠介*1・今井 嵩弓*2・大下 英吉*3・林 詳悟*4

要旨: 著者らは電磁誘導と赤外線の併用により、PC 構造物における新たなグラウトの充填性状を評価するシステム(以下、本システムと称す)の開発に着手している。具体的には、電磁誘導によりシース管を強制加熱し、シース管からコンクリート表面への熱拡散を赤外線サーモグラフィで計測するものである。未充填領域が存在する場合、断熱材の特性を有する空気がシース管内部への熱拡散を抑制し、熱容量の大きいコンクリートへ多量の熱を拡散するため、未充填領域が存在する際のコンクリート表面温度は健全な場合と比べて高くなる。本研究では、この温度性状をもとに本システムの適用性および適用限界を明らかにした。

キーワード: 非破壊検査, PC 構造物, グラウト充填性状, 電磁誘導, 赤外線サーモグラフィ

1. はじめに

我が国における多くのコンクリート構造物は高度経済成長期に建設され、今後供用開始から 50 年以上経過する構造物が急速に増加すると予測されている。しかしながら、その時代に建設されたコンクリート構造物はメンテナンスフリーであるとされており、十分な維持管理がなされていない。そのため、長期にわたって供用されてきたコンクリート構造物には各種の劣化が生じている可能性が高いが、予算の制約上、全ての構造物における劣化状況の確認はできていない。特に、多くの橋梁に用いられる PC 構造物は、引張力に弱いコンクリートにおける構造性能の向上を目的として PC 鋼材にプレストレスを作用させる構造形式であり、PC 鋼材の腐食による構造性能および耐久性性能の低下が大きな問題となっている。

PC 鋼材の腐食を誘発させる主要因として、PC 構造物のポストテンション方式により施工された際に生じるグラウトの充填不良がある。通常、PC 構造物のグラウトはコンクリートとの一体性を確保するだけでなく、水および酸素といった腐食を誘発する有害物質から PC 鋼材を保護する役割を担っている。しかしながら、シース管中にグラウトの充填不良が存在する場合、有害物質の侵入により鋼材腐食が生じ、最終的には破断につながり、構造物の崩壊をも引き起こす恐れがある。そのため、グラウトの充填性状を把握することは PC 構造物の安全性の確保ならびに適切な維持管理による長期延命化を図る上で非常に重要であり、PC 構造物におけるグラウトの充填性状を正確に評価可能とするシステムの開発が急務となっている。

このような背景から、シース管内のグラウトの充填性

状に関する各種非破壊検査手法に関する研究は数多く実施されており、グラウトの充填性状を把握する現状の主たる手法は、衝撃弾性波法やインパクトエコー法などが挙げられる。しかしながら、これらの非破壊検査手法は適用可能な条件が限定される他、多くの PC 部材においてはシース管とコンクリート表面には鉄筋が配筋されており、いずれの手法においても衝撃を与えた際に鉄筋へも弾性波が伝搬する。その結果、鉄筋から発生する波長によって測定誤差が生じる。これらのことから、未充填領域の位置および充填状態に関しても十分な精度を有しているとは言い難い。

そこで本研究では、著者らが提案した RC 構造物の劣化診断システム^{1),2)}を PC 構造物へ拡張することにより、グラウトの充填性状を評価可能とするシステムの構築を目的とした。具体的手法としては、電磁誘導法により非破壊・非接触でシース管を強制加熱し、赤外線サーモグラフィにより計測されたコンクリート表面の温度性状から変状を検知するものである。グラウトの未充填領域が存在する場合、空気が有する断熱材の効果により完全に充填された領域に比べてコンクリート表面の温度が高くなる。すなわち、本システムはこのようなコンクリート表面温度の変状からグラウトの充填性状を評価するものである。

このように、本システムを用いることにより、これまでの手法とは全く異なる簡易的なグラウト充填性状の定性的評価を可能とし、赤外線サーモグラフィの特性を活かして広範囲の計測を一度に評価する手法を提案する。

*1 中央大学 理工学部都市環境学科 (学生会員)

*2 中央大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*3 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

*4 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 技術部 (正会員)

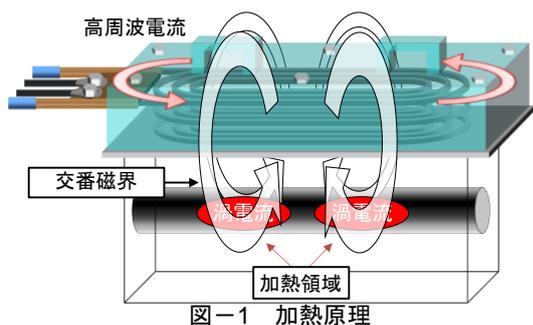


図-1 加熱原理

表-1 各物質の熱的物性値

対象	物性	密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg・°C]	熱伝導率 [W/m・°C]
コンクリート		2300	1.2	1.6
非腐食鉄筋		7800	0.47	0.03
腐食性生物		5300	1.2	0.07
未充填領域(空気)		1.2	1.01	0.03
発泡ポリエチレン		52	1.01	0.22

2. RC 構造物における空洞評価システム

本章では、本システムの基礎となる RC 構造物劣化性状評価システムの概要を示すとともに、赤外線サーモグラフィと電磁誘導の併用によってコンクリート内部の劣化現象を検知するメカニズムについて論じる。

2.1 システムの概要

既往の研究¹⁾²⁾で提案した RC 構造物の劣化性状評価システムは電磁誘導により非破壊・非接触でコンクリート内部の鉄筋を加熱し、鉄筋を熱源とした熱拡散により変動するコンクリート表面温度を赤外線サーモグラフィにより測定することで各種劣化性状を評価するものである。

具体的手法としては、まず電磁誘導コイルを高周波インバーターに接続し、図-1 に示すように高周波電流をコイルに負荷することにより交番磁界を発生させる。発生した交番磁界が RC 構造物内部の鉄筋に接すると、鉄筋に渦電流が通電し鉄筋自体の抵抗により発熱する。そして、発熱した鉄筋とコンクリート表面の温度勾配が卓越した状態では、鉄筋からコンクリート表面への熱拡散が支配的なるため、鉄筋直上のコンクリート表面では鉄筋に供給した熱エネルギーに見合った温度上昇を生じることとなる。

鉄筋からコンクリート表面に向かう熱拡散経路内に腐食生成物や剥離空洞などが存在すると、それらの熱的物性によりコンクリート表面温度に変状が生じることになる。それらの熱的特性は表-1 に示すように、比熱が大きく熱伝導率が小さいといった断熱特性である。したがって、その変状特性は腐食生成物や剥離空洞の熱拡散を抑制するとともに、その内部に熱を蓄積することによってコンクリートの温度上昇を抑制させ、最高温度からの温度低下も緩やかになるといった変状を誘発させることになる。このことはすなわち、鉄筋に与えた熱エネルギーを既知量とすれば、変状の程度に応じた剥離空洞の位置、程度および鉄筋腐食率が定量的に評価可能にもな

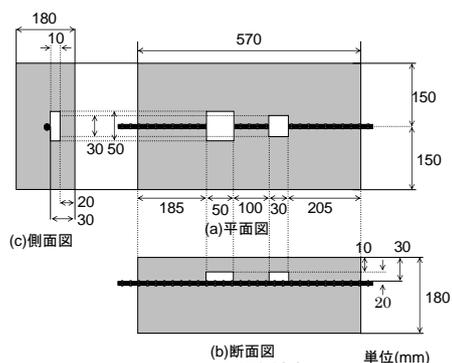


図-2 試験体概要

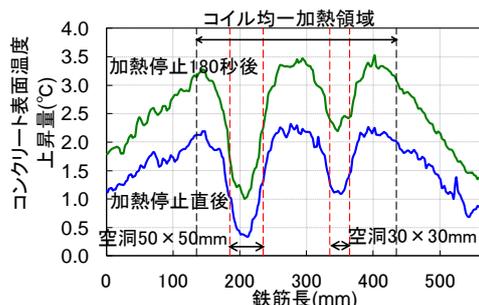


図-3 寸法の異なる空洞を有するコンクリート表面の温度上昇分布

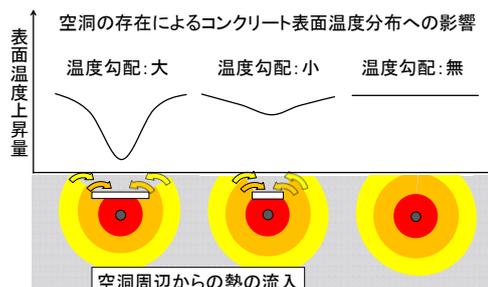


図-4 空洞の大きさと抑制熱量の相関性

る。

2.2 空洞評価メカニズム

図-2 に示す試験体に対して本空洞評価システムを適用することとした。図-3 は、異なる寸法の空洞を有する RC 試験体の鉄筋軸方向に沿ったコンクリート表面の温度上昇量分布を示したものである。図中の青線、緑線はそれぞれ加熱停止直後および加熱停止後 180 秒の時点に対応している。

同図より、50×50×10mm および 30×30×10mm の空洞が存在する位置のコンクリート表面における温度分布は、他の領域に比べてそれぞれ約 2°C および 1°C 程度低くなっている。これは前述したように、空気が断熱材の効果をもっているため、かぶり領域に存在する空洞が鉄筋からコンクリート表面への熱拡散を抑制するためである。

空洞の大きさによる温度低下量の差異は、図-4 に示すように空洞領域が大きいほど鉄筋からかぶりコンクリートへの熱拡散を抑制する面積が大きくなり、それに伴い空洞上部への熱の流入が小さくなるためコンクリート表面の温度低下が顕著に表れる。これはコンクリート表

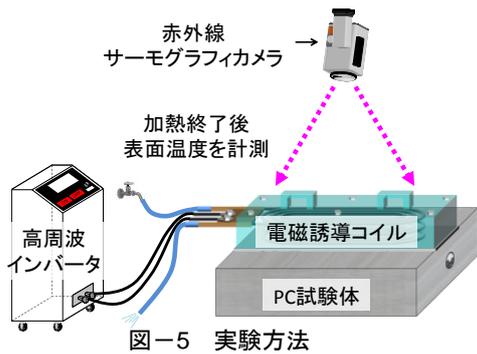


図-5 実験方法

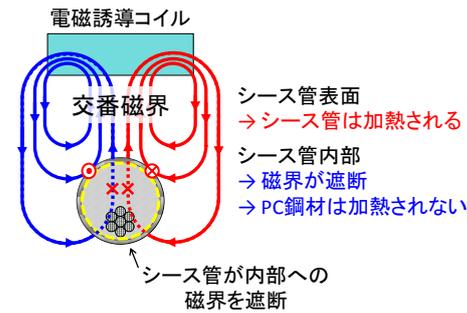


図-6 シース管の電磁気的特性

面の温度勾配にも影響を及ぼし、空洞領域が大きいほど温度勾配も大きくなり、空洞領域が小さいほど小さくなる。

以上のことから、本空洞評価システム²⁾は空洞領域の体積の大きさに比例して空洞の有する断熱材の効果が顕著に表れるという相関性を利用してコンクリート表面の急激な温度勾配に着目することでRC構造物における剥離空洞の位置および程度を評価可能とする。

3. PC 構造物におけるグラウト充填性状評価システム

本研究で提案するグラウト充填性状評価システムは、前章で述べたRC構造物における空洞評価システム²⁾をPC構造物に応用したものである。本章では、本システムの概要を示すとともに、グラウト未充填を評価するメカニズムについて論じる。

3.1 システムの概要

本システムは、前章で示した既往のRC構造物における劣化性状評価システム¹⁾²⁾と同様に、コンクリート内部のシース管を電磁誘導により非破壊・非接触で強制加熱し、シース管からコンクリート表面へ拡散する熱を赤外線サーモグラフィにより検知するものである(図-5)。

シース管内に存在するグラウトの充填不良が生じて、未充填領域が存在する場合、コンクリート表面温度は、3.2節で詳述するが、グラウトが完全に充填されている状態に比べて、その最高温度は高くなる。この最高温度の差異を利用することにより、グラウトの充填性状を評価する。

本システムの大きな特徴は、プレストレスが作用する

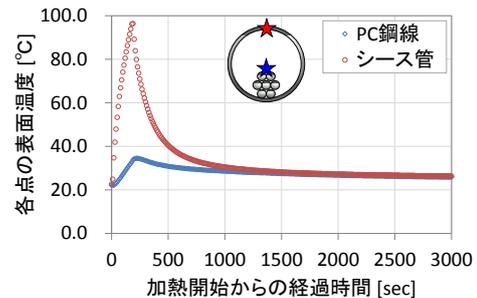


図-7 充填率0%におけるシース管内部およびPC鋼線の表面温度

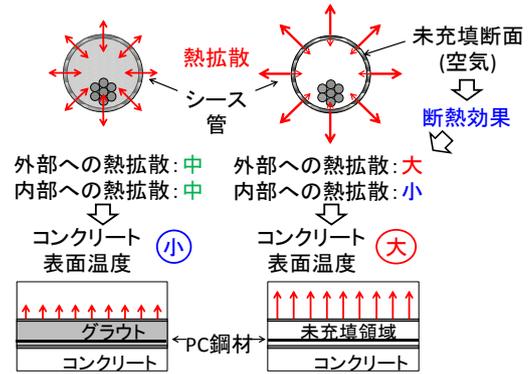


図-8 未充填領域の熱的特性

PC鋼材を加熱せずにシース管のみを加熱することが可能な点である。仮に、PC鋼材が高温に加熱される場合、温度ひずみによる熱応力が発生するため、PC鋼材の腐食により断面減少が生じている場合においてその位置で破断する恐れがある。一般に、電磁誘導法では磁性体を貫通して下部の独立した磁性体に磁場を生じさせることはできない。図-6に示すように、本システム適用時における電磁誘導の際にもコイルから発生する交番磁界はシース管のみに磁場を生じさせる。本来内部に向かう磁界は、シース管により遮断されるため、PC鋼材は電磁誘導による磁場の直接的な影響は受けず、発熱も生じることではない。

図-7は本システム適用時のコンクリート中のシース管およびPC鋼線の温度を計測した結果である。同図から、周囲のシース管が加熱された影響によりPC鋼材の表面温度は10°C程上昇しているものの、シース管における温度上昇量の80°Cと比較して十分に小さいことから、前述の通りPC鋼線は電磁誘導による直接的な加熱が生じていないと言える。

3.2 充填性状評価メカニズム

電磁誘導によりシース管に蓄積された熱量は、図-8に示すように周囲のコンクリート表面およびシース管内部のグラウトに拡散する。グラウト充填不良により生じた未充填領域の熱的物性に着目すると、未充填領域は2章で述べたRC構造物における剥離空洞と同様に断熱材的效果を有している。RC構造物における剥離空洞の場合、熱源と測定面の間のかぶりコンクリートに熱拡散を

● 温度履歴計測点

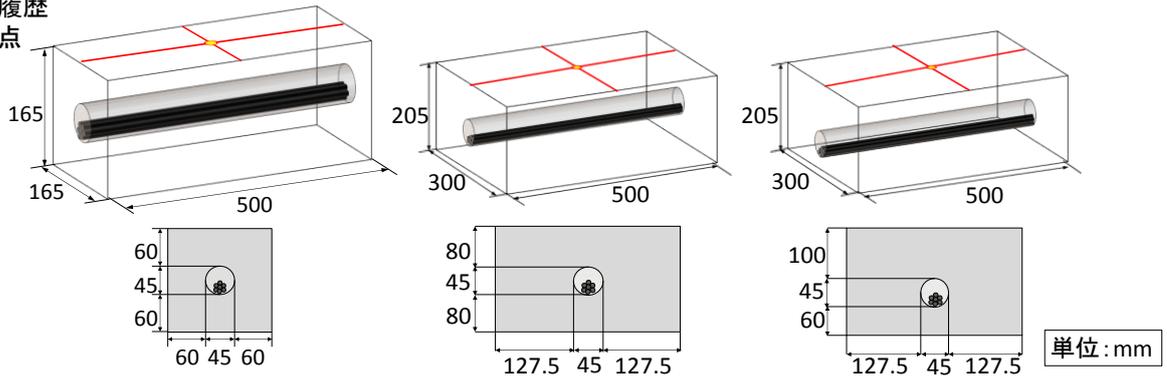


図-9 試験体概要

表-2 配合表

単位:kg/m ³				
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE
158	319	712	1105	1.3

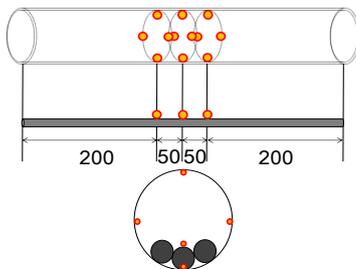


図-10 熱電対設置位置

抑制する空洞が存在するため、コンクリート表面温度が低下していた。一方、PC 構造物におけるグラウト充填不良の場合、熱源となるシース管下部、すなわち RC 構造物で言えば鉄筋下部に空洞が存在するため、鉄筋下部方向の熱拡散が抑制されて、コンクリート表面温度は上昇する。

また、未充填領域の大きさはコンクリートの表面温度に影響を及ぼす最も重要な要因であり、未充填領域が大きいほどコンクリート表面の温度上昇量が大きくなる。これは、前章において RC 構造物の剥離空洞の体積による影響と空洞の断熱材の効果における相関性について論じたが、熱拡散方向に存在する空洞の体積が大きいほど空洞領域への熱拡散も抑制され、それに伴いコンクリート表面に拡散する熱量が増加することによる。

以上のことから、本システムは前章で示した RC 構造物における既往の空洞評価システム²⁾と同様に、空洞領域の大きさと断熱材的效果の相関性からコンクリート表面の温度上昇量に着目することで未充填領域の存在に加え、その程度を定性的に評価する。

4. 電磁誘導加熱による PC 構造物の温度性状

前章においては、本システムによるグラウト充填性状

評価のメカニズムについて論じた。本章においては、PC 部材に本システムを適用した結果を示すとともに、その適用性および適用限界について論じる。

4.1 実験概要

試験体概要を図-9 に示す。かぶり 60, 80 および 100mm の位置に PC 鋼線を挿入した直径 45mm のシース管を配筋した。試験体は同図に示すように、かぶり 60mm の試験体においてはシース管断面に対してグラウト充填率が 100, 75, 50, および 0% の 4 パラメータとし、かぶり 80mm および 100mm の試験体においてはグラウト充填率が 100% および 0% の 2 パラメータとする。また、かぶり 60mm の試験体では、シース管内部ならびに PC 鋼線上に熱電対を設置することにより、シース管および PC 鋼線の温度を計測した。なお、コンクリートの配合は表-2、熱電対の設置位置は図-10 に示す通りである。

電磁誘導による加熱パラメータは、かぶり 60mm の試験体では出力 1.6kW-300 秒間、80mm の試験体では出力 1.8kW-600 秒間および 100mm の試験体では出力 1.8kW-900 秒間加熱した。コンクリートの表面温度の測定は赤外線サーモグラフィによるものとした。なお、試験体名称は PC(プレストレストコンクリート)、K(かぶり厚)、G(グラウト充填率)とする。

4.2 グラウト充填率の影響

図-11 はかぶり 60mm の試験体 PCK60G100, PCK60G75, PCK60G50 および PCK60G0 におけるコンクリート表面の温度履歴、図-12 はかぶり 60mm シース管の温度履歴をそれぞれ示している。

グラウト充填率が高いほど温度上昇は小さく、グラウト充填率が低いほど温度上昇が大きいことがわかる。これは前述したように未充填領域が大きいほどシース管内部への熱拡散を抑制し、熱容量の大きい周囲のコンクリートへ熱を拡散するためである。

長田ら³⁾は赤外線サーモグラフィを用いた RC 構造物における剥離空洞診断を行う際の限界閾値に関する研究を実施し、その値が 0.5°C であれば判別性に十分な信頼があるとされており、本研究においても限界閾値に 0.5°C を設

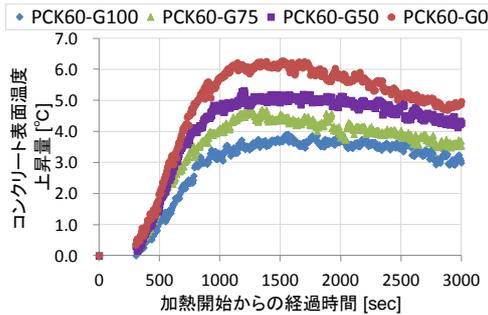


図-11 かぶり 60mm におけるコンクリート表面の温度履歴

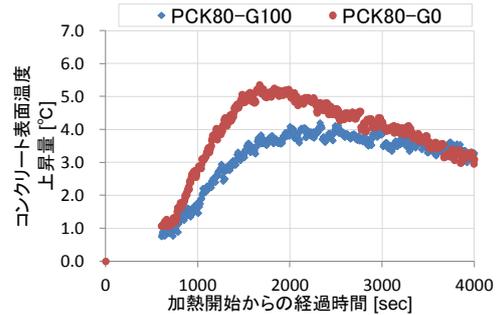


図-13 かぶり 80mm におけるコンクリート表面の温度履歴

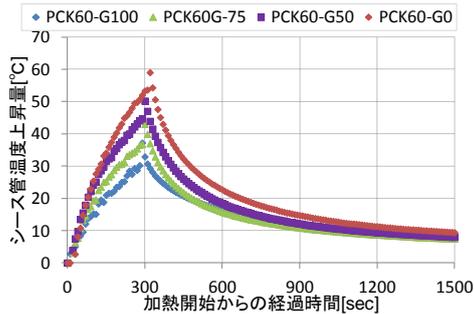


図-12 かぶり 60mm におけるシース管の温度履歴

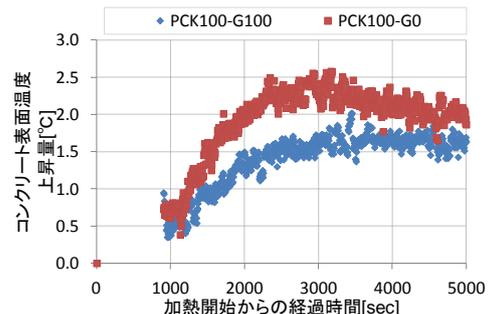


図-14 かぶり 100mm におけるコンクリート表面の温度履歴

表-3 実験結果

		かぶり60mm				かぶり80mm		かぶり100mm	
		100%(健全)	75%	50%(底面半充填)	0%(未充填)	100%(健全)	0%(未充填)	100%(健全)	0%(未充填)
温度(°C)	初期	28.9	24.8	27.8	22.0	17.5	18.9	14.5	16.0
	最高	32.8	29.6	33.1	28.2	21.7	24.3	16.5	18.6
	4時間経過	29.5	25.9	29.7	23.6	19.1	19.7	15.8	17.3
温度上昇量(°C)	最高	3.9	4.7	5.3	6.3	4.2	5.4	2.0	2.6
	4時間経過	0.6	1.1	1.9	1.6	1.6	0.8	1.3	1.4

定する。この値からグラウト未充填領域の有無が判別可能となる。充填率の差異によるコンクリート表面温度履歴を表-3に示す。コンクリート表面が最高温度となるまでの温度上昇量(以下、最高温度上昇量と称す)は試験体 PCK60G100, PCK60G75, PCK60G50 および PCK60G0 において、それぞれ 3.9°C, 4.7°C, 5.3°C および 6.3°C であり、グラウトの充填率が異なる各試験体間の最高温度上昇量の差異に着目すると、それらの温度差は全てにおいて 0.5°C 以上であり、これは限界閾値を満たしている。

これらのことは、本システムの適用によりコンクリート表面に生じる最高温度上昇量の差異からグラウト充填性状すなわち空洞領域の割合を評価可能であることを示している。

4.3 かぶり厚の影響

かぶり 80mm および 100mm の試験体に対する本システム適用時の温度履歴を図-13, 図-14に示す。

まず、かぶり 80mm 試験体に着目すると、最高温度上昇量は健全(充填率 100%)試験体において 4.2°C であることに対して、未充填(充填率 0%)試験体では 5.4°C である。その差は 1.2°C であることから限界閾値 0.5°C を満たし、

かぶり 80mm において本システムは適用可能であることを示している。

次に、かぶり 100mm 試験体に着目すると、最高温度上昇量は健全試験体において 2.0°C であることに対して、未充填試験体では 2.6°C であり、その差は 0.6°C である。

そのため、かぶり 80mm と同様に限界閾値 0.5°C を満たしており、かぶり 100mm においても本システムは適用可能である。

また、本システムを用いてかぶり 150mm 試験体における検討を行ったが、電磁誘導の際に生じる交番磁界は深いかぶりに位置するシース管へ接し難く、十分な加熱が不可能であったため、かぶり 150mm 試験体におけるコンクリート表面の温度上昇は検知できなかった(図-15)。そのため、本研究の範囲内における本システムの適用限界はかぶり 100mm となる。しかしながら、より深い位置にシース管が設置された部材への本システムの適用手段は、単に電磁誘導コイルの能力を向上させるだけのことであり、このことは問題では無い。

4.4 空洞存在位置による影響

測定面に対する空洞領域の位置が本システム適用時の

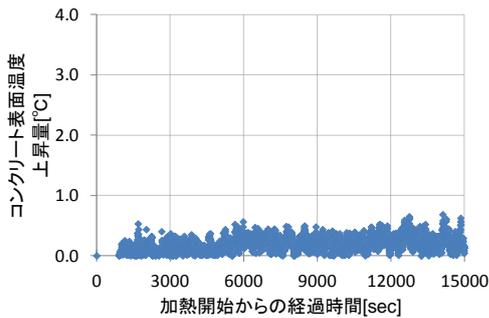
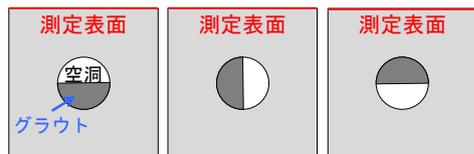


図-15 かぶり 150mm における
コンクリート表面の温度履歴



(a) 底面半充填 (b) 側面半充填 (c) かぶり面半充填
図-16 未充填存在領域

コンクリート表面温度に及ぼす影響について検討する。

図-16(a)~(c)はPCK60G50試験体を90度ずつ回転させることで測定面に対する未充填領域の位置を変えた試験体の断面図である。なお、グラウトの充填状況において(a)を底面半充填、(b)を側面半充填、(c)をかぶり面半充填と称す。

図-17は各実験時の温度履歴である。同図から各試験体の最高温度上昇量は底面半充填において6.4℃、側面半充填において6.3℃、かぶり面半充填においては6.1℃であり、各試験体間の差異は最大で0.3℃程度と非常に小さいものであった。これは前述した限界閾値の0.5℃と比べても小さい温度差であることから、本システム適用時のコンクリート表面温度性状に差異をもたらす要因はグラウト充填率の影響が支配的であり、測定面に対する相対的な未充填領域の存在位置による影響はほとんどないと考えられる。

また、本システムにおけるグラウト充填率と温度上昇率の相関性を図-18に示す。同図の横軸である温度上昇率は健全時の温度上昇量に対する実測の温度上昇量の割合である。同図の近似曲線からもわかる通り、温度上昇率の増加に従って、ほぼ線形にグラウト充填率が低下していることが確認できる。実測値と健全時におけるコンクリート表面温度上昇量の相对比较からおおよそのグラウト充填率が推定可能であることを示している。

5. まとめ

電磁誘導加熱を利用した際に赤外線サーモグラフィによるPC構造物のグラウト充填性状の診断について、本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1) 本システムは、電磁誘導加熱終了後からの最高温度

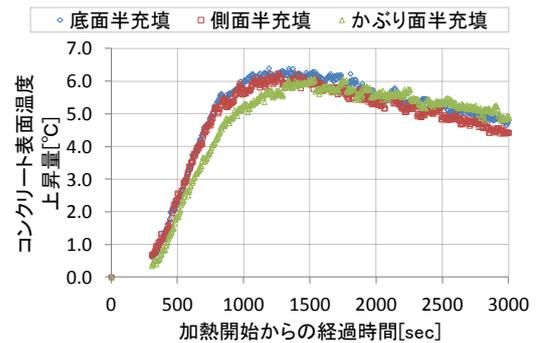


図-17 未充填位置の異なるコンクリート
表面の温度履歴

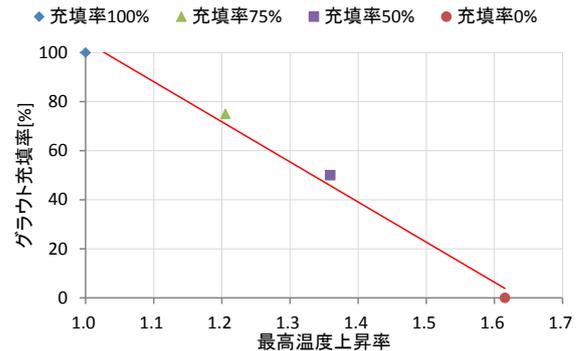


図-18 グラウト充填率と温度上昇率の相関性

上昇量の差異に着目し、健全試験体と温度履歴を比較することによってグラウトの充填不良の評価を可能とした。

(2) 本システムは、かぶり100mmまでに位置するシース管に対して適用可能である。加熱時間を延長させることにより深いかぶりに対する空洞の存在の評価を可能とした。

謝辞：本研究は西日本高速道路エンジニアリング四国(株)ならびに第一高周波工業(株)との共同研究であり、関係各位に感謝の意をここに表す。

参考文献

- 1) 大下英吉, 堀江宏明, 長坂慎吾, 谷口修, 吉川信二郎: 電磁誘導加熱によるコンクリート表面温度性状に基づいたRC構造物の鉄筋腐食性状に関する非破壊検査手法, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.1, pp.76-92, 2009
- 2) 谷口修, 重松文治, 堀江宏明, 大下英吉: 電磁誘導加熱を利用したコンクリート表面の温度性状に基づくRC構造物の空洞検出システムの開発に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.173-185, 2008.2
- 3) 長田文博, 山田裕一, 虫明成生, 赤松幸生: 熱画像による鉄道高架橋コンクリートの剥離診断手法の開発, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.121-133, 2004.5