

論文 電磁誘導によるPC構造物におけるグラウト充填性状評価システムに及ぼす鉄筋格子の影響に関する研究

曹 一鳴*1・大下 英吉*2・林 詳悟*3・福岡 養祐*4

要旨：著者らは電磁誘導と赤外線との併用により、PC構造物におけるシース管内部のグラウト充填性状を評価するシステムの開発に着手している。これは、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に伝搬する熱を赤外線サーモグラフィで測定するものである。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特性によりシース管内部への熱拡散を抑制するため、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、シース管とコンクリート表面の間に鉄筋格子が配筋されている場合におけるコンクリート表面温度への影響を検討した。

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

我が国では、1960年代の高度経済成長期に社会資本が集中的に整備され、これらは建設後、既に30～50年の期間が経過していることから、急速に老朽化が進行していると予想されている。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、適切な維持管理が行われていない。特に、多くの橋梁に用いられるPC構造物は、プレストレスを加えているPC鋼材を用いることで、引張力に弱いコンクリートの構造性能を向上させたものであるが、PC鋼材の腐食による構造性能および耐久性能の低下が大きな問題となっている。

ポストテンション方式によって施工されたPC構造物における鋼製シース管内のグラウトには、コンクリートとPC鋼材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がある。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が腐食し、最終的には破断することで構造物の崩壊を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構造物の安全性を確保し、適切な維持管理による長期延命化を図ることが非常に重要であり、PC構造物におけるグラウトの充填性状を正確かつ非破壊で把握可能とするシステムを開発することが急務となっている。

著者らは、既往の研究であるRC構造物の劣化性状評価システム^{1)~5)}をPC構造物に拡張することで、シース管内のグラウト充填性状を評価できるシステム(以下、本システムと称す)を構築している。

そこで本研究では、上述の手法を、シース管とコンクリート表面の間に鉄筋が格子状に配筋された状態の試験

体に適用し、PC構造物のグラウト充填性状評価に関する新たな非破壊検査手法を提案するものである。

2. システム概要

本システムは、電磁誘導でPC構造物内部のシース管を非破壊・非接触で強制加熱し、シース管からコンクリート表面に伝導する熱に起因したコンクリート表面の温度性状を赤外線サーモグラフィにより測定するものである(図1)。

電磁誘導によりシース管に蓄積された熱量は、図2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される。グラウトの未充填領域の熱的物性に着目すると、未充填領域は断熱材の効果を有しているためシース管内部への熱拡散を抑制する。そのためコンクリート表面へ拡散する熱量が大きくなるため、コンクリート表面温度上昇量は大きくなる。すなわち、シース管内にグラウト未充填領域が存在する場合、コンクリートの表面温度は、グラウトが完全に充填されている場合と比較すると高くなる。この温度の差異からグラウトの充填性状を評価する。

3. グラウト充填度とコンクリート表面温度の関係

既往の研究では、図3に示すようなシース管とコンクリートの間に鉄筋が配筋されていない場合において、最高温度上昇率の増加に伴って、グラウト充填率がほぼ線形的に低下していることが確認された(図4)。ここで、最高温度上昇率とは、健全時の温度上昇量(3.9℃)によりそれぞれの試験体における最高温度上昇量を無次元化したものである。

また、図5に示すようなシース管とコンクリート表面

*1 中央大学理工学研究科都市環境学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 中央大学理工学研究科都市環境学専攻 教授 (正会員)

*3 西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社 上席主査

*4 第一高周波工業(株) 技術部

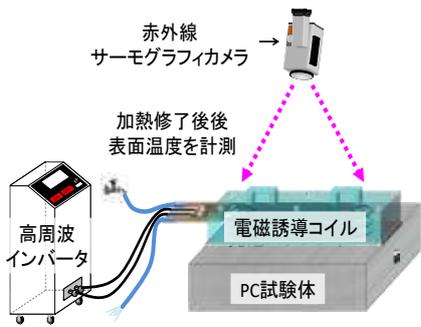


図1 本システム適用方法

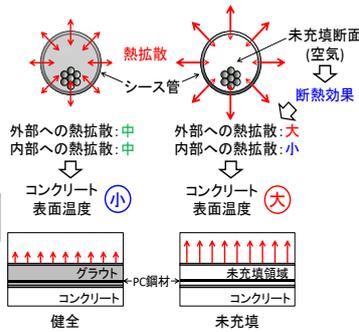


図2 熱源からの熱拡散

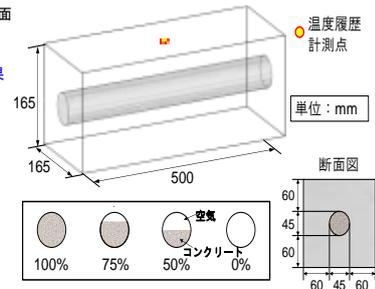


図3 試験体概要

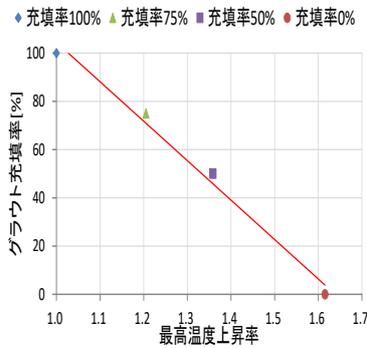


図4 グラウト充填率と最高温度上昇率の相関性

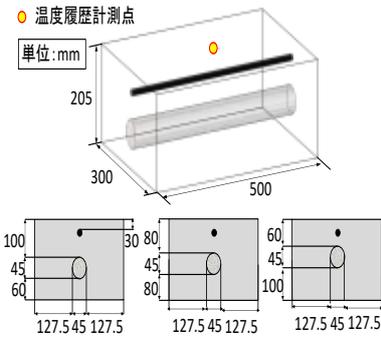


図5 試験体概要(鉄筋あり)

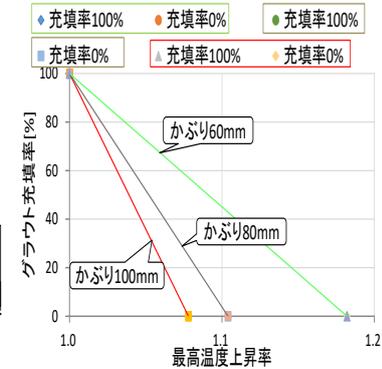


図6 グラウト充填率と最高温度上昇率の相関性(シース管かぶり)

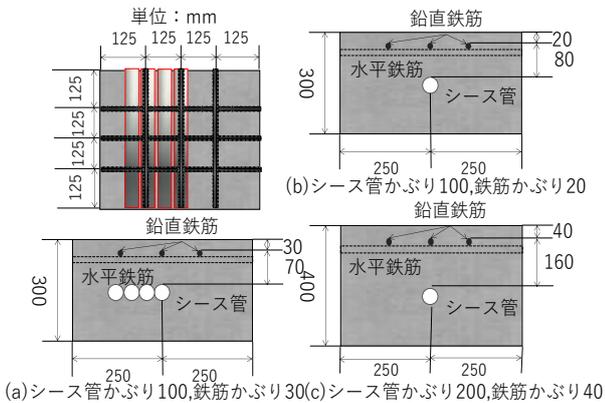


図7 試験体概要(鉄筋格子)

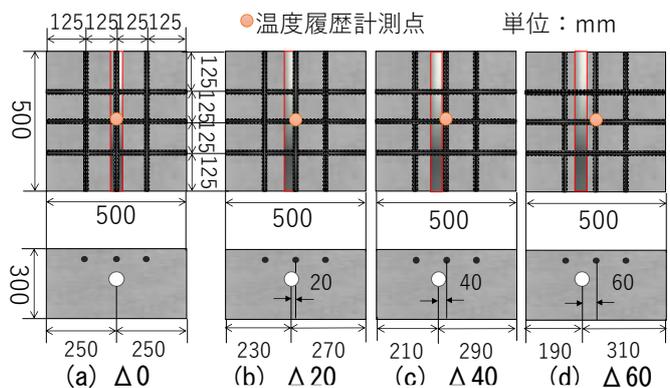


図8 シース管と鉄筋の相対位置

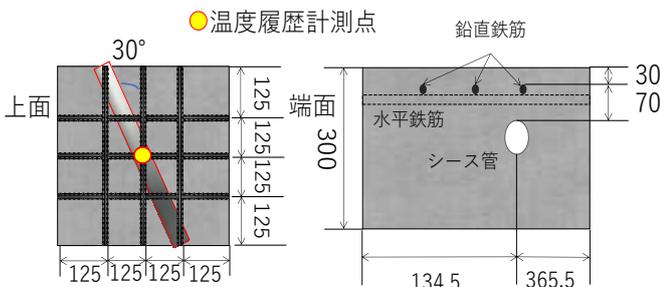


図9 シース管の斜め配置

の間に鉄筋が一本配筋された場合においても、グラウト充填率とコンクリート表面の最高温度上昇率の関係は、シース管のみの試験体とほぼ同様な傾向であると確認できた(図6)。また、かぶりが深いほど最高温度上昇率が低下することも確認された。

一般に、実PC構造物では、シース管とコンクリート表面の間には鉄筋が格子状に配筋されることが多い。すなわち、本手法の実用化に際しては、そのような配筋状態に対しても、適用可能性の有無の確認ならびに問題等の抽出を行わなければならないことになる。このようなことから次章では、鉄筋が格子状に配筋された状態に対して、鉄筋かぶり、シース管かぶりおよびシース管の位置がコンクリート表面温度へ及ぼす影響を検討した。

4. 鉄筋が格子状に配筋された試験体への適用性

4.1 実験概要

試験体の寸法は、図7に示すように500mm×500mm×300mmおよび500mm×500mm×400mmである。コンクリート表面とシース管の間に鉄筋格子が配筋されて

表 1 試験体名称

試験体名称	鉄筋かぶり (mm)	シース管かぶり (mm)	シース管相対位置 (mm)	シース管と鉄筋の相対位置 (°)	グラウト充填率 (%)		
T20S100 Δ 0N0G0	20	100	0	0	0		
T20S100 Δ 0N0G100					100		
T30S100 Δ 0N0G0	30		20		0	0	
T30S100 Δ 0N0G100						100	
T30S100 Δ 20N0G0			40			40	0
T30S100 Δ 20GNOG100							100
T30S100 Δ 40N0G0						60	0
T30S100 Δ 40N0G100							100
T30S100 Δ 60N0G0							0
T30S100 Δ 60N0G100							100
T40S100 Δ 0N0G0	40	200	0	0			
T40S100 Δ 0N0G100				100			
T40S200 Δ 0N0G0		30		100	0		
T40S200 Δ 0N0G100					100		
T30S100 Δ 0N30G0	30	100	30	0			
T30S100 Δ 0N30G100				100			

おり、鉛直鉄筋のかぶりは 20mm, 30mm および 40mm とし、直径 45mm のシース管をかぶり 100mm および 200mm の位置に設置した。シース管の配置位置は図 8 に示すように、Δ0 が鉄筋直下であり、Δ20、Δ40、Δ60 が水平に 20mm ずつずらした位置である。

次に、実構造物では、図 9 に示すように、シース管が鉄筋に対して斜め方向に配置されているものも存在するため、そのような試験体に対して本手法を適用した。図 9 に示すように、シース管を鉄筋に対して 30° とした。また、グラウト充填率は 100% および 0% の 2 パラメータとし、試験体のパラメータを表 1 に示す。なお、表中に示す英字は、T (鉄筋のかぶり)、S (シース管のかぶり)、G (グラウト充填率)、Δ (シース管と鉄筋の相対位置)、N (シース管と鉄筋の相対位置) とする。例えば、鉄筋のかぶりが 30mm、シース管のかぶりが 100mm、グラウト充填率が 0%、シース管の位置が Δ0、シース管と鉄筋の相対位置が 30° の場合、試験体名称は T30S100 Δ 0N30G0 と表すこととする。コンクリートの表面温度は赤外線サーモグラフィにより測定した。なお、使用した赤外線サーモグラフィは FLIR 社製、型番が SC5000 で、観測範囲が -20~300°C、最小温度分解能が 0.02°C、測定波長が 2.5 μm~5.1 μm である。

4.2 鉛直配置されたシース管のグラウト充填性状

(1) 鉄筋かぶりによる影響

コンクリート表面の温度履歴を図 10 に示す。同図 (a), (b), (c), (d) はそれぞれ試験体 T20S100 Δ 0N0、T30S100 Δ 0N0、T40S100 Δ 0N0、T40S200 Δ 0N0 である。電磁誘導による加熱条件は、経験に基づき、T20S100 Δ 0N0、T30S100 Δ 0N0 の試験体においては出力 2.9kW-180 秒とし、T40S100 Δ 0N0 の試験体において 2.7kW-300 秒とし、T40S200 Δ 0N0 の試験体においては出力 2.7kW-900 秒とし

た。なお、全ての試験体に対して、加熱位置は鉛直鉄筋に沿って加熱することとした。

これらの図に示すように、コンクリート表面温度が上昇する過程 (0~250s) においては、グラウト充填率による差異は大きくなり、降下する過程 (250s~) では外気温の影響により、差異が小さくなっている。このことから、本研究では、温度上昇量のピーク (以下、最高温度上昇量と称する) 時に着目して議論することとする。なお、本実験で使用したサーモグラフィの温度分解能の仕様上、限界閾値は 0.1°C で十分である。

いずれの試験体においても、コンクリート表面温度上昇量はグラウト充填率が 0% の試験体の方が大きいことがわかる。しかし、鉄筋のかぶりが深くなるほど、グラウト充填率の差異による影響が小さくなる。

図 11 は鉄筋かぶりの違いによるグラウト充填率と最高温度上昇率の相関図であり、最高温度上昇率の増加に伴って、グラウト充填率が低下しているとわかる。また、鉄筋かぶりが深いほど、コンクリート表面温度上昇率が低下している。このことから、鉄筋の位置を考慮した最高温度上昇率を算出することで、かぶりに関わらず、グラウト充填率の評価が可能になることが考えられる。なおグラウト充填率と最高温度上昇率の関係を線形としているが、今後グラウト充填率を 50% および 75% として実験を行う必要がある。これらの図で示した実験結果を基準とし、実構造物で計測されたコンクリート表面温度上昇率の実測値と比較することで、シース管内部のグラウト充填性状を評価可能である。

以上のことから、鉄筋が格子状に配筋されている状態では、鉄筋かぶり 40mm においても本システム適用によりコンクリート表面温度上昇率を比較することで、シース管内部のグラウト充填性状を評価できると言える。

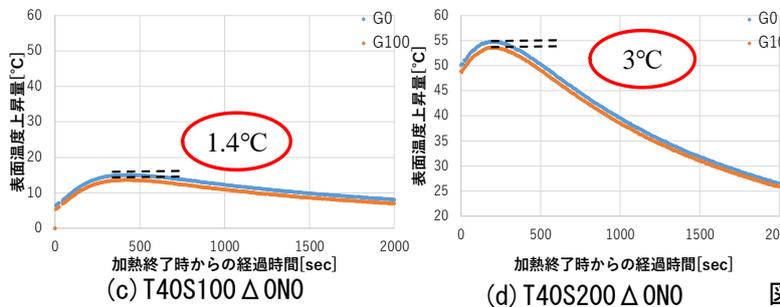
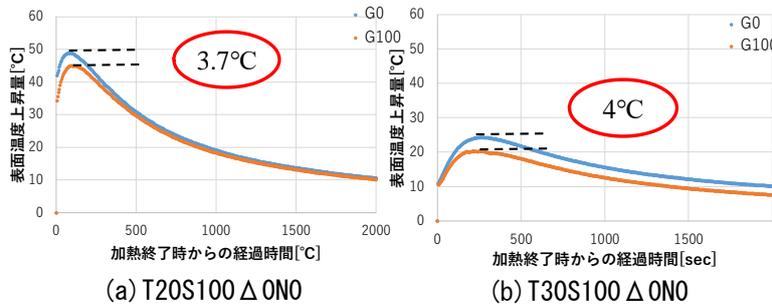


図 10 コンクリート表面温度履歴(かぶり)

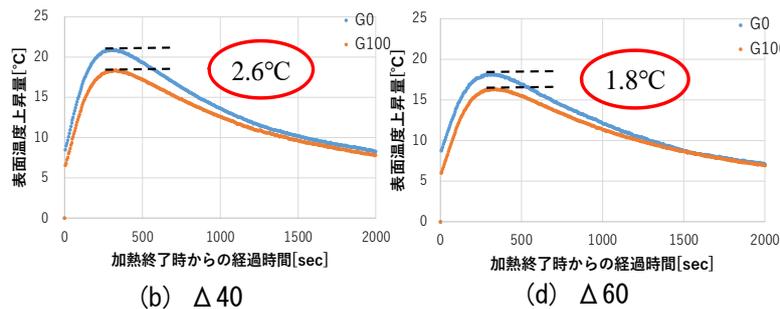
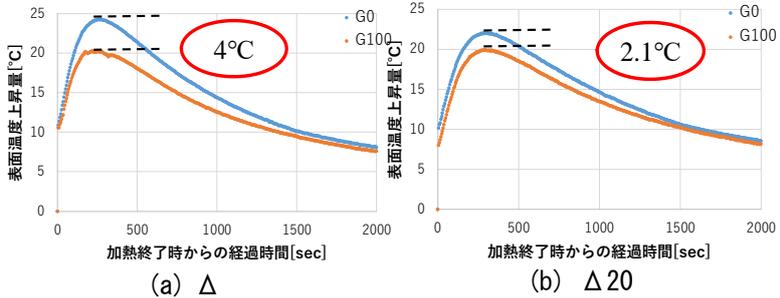


図 13 コンクリート表面温度履歴(シース管位置)

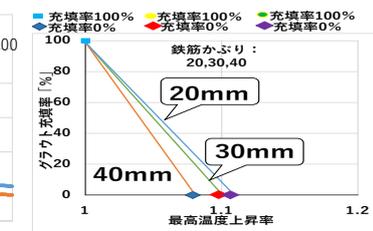


図 11 グラウト充填率と最高温度上昇率の相関性(鉄筋かぶり)

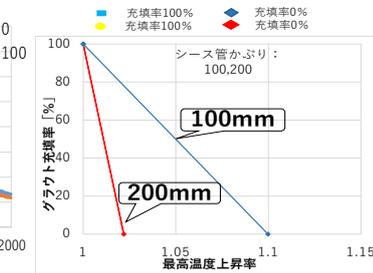


図 12 グラウト充填率と最高温度上昇率の相関性(シース管かぶり)

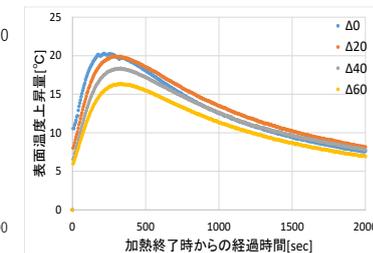


図 14 コンクリート表面温度上昇

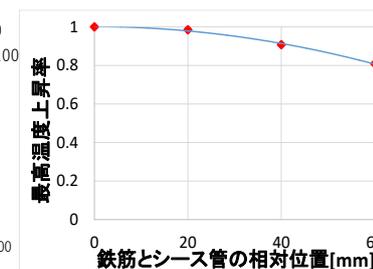


図 15 シース管の位置と温度上昇率の関係性

(2) シース管のかぶりによる影響

図 10(c), (d)から、シース管のかぶりに関わらずコンクリート表面温度上昇量はグラウト充填率が 0%の試験体の方が大きくなっていることが分かる。シース管のかぶりが深くなるほど、グラウト充填率の差異による影響が小さくなるため、加熱量を増加させる必要がある。これは、加熱エネルギーが距離の 2 乗に反比例するためであり、コイルからの距離が遠いほど、鉄筋とシース管が加熱されるエネルギーが少なくなり、コンクリート表面温度上昇量の差異が小さくなる。

図 12 はシース管かぶりによるグラウト充填率と最高温度上昇率の相関性であり、鉄筋が一本配筋されている

場合と同様に、シース管のかぶりが深いほど最高温度上昇率が低下しているとわかる。

以上のことから、鉄筋が格子状に配筋されている状態では、シース管かぶり 200mm においても本システム適用によりコンクリート表面温度上昇率の比較で、シース管内部のグラウト充填性状を評価できると言える。

(3) シース管位置による影響

図 13 は鉄筋とシース管の相対位置による違いであり、図(a)~(d)はそれぞれ図 8 に示した $\Delta 0 \sim \Delta 60$ である試験体 T30S100 $\Delta 0N0$, T30S100 $\Delta 20N0$, T30S100 $\Delta 40N0$, T30S100 $\Delta 60N0$ の結果である。加熱条件は、出力 2.9kW-180 秒加熱とした。

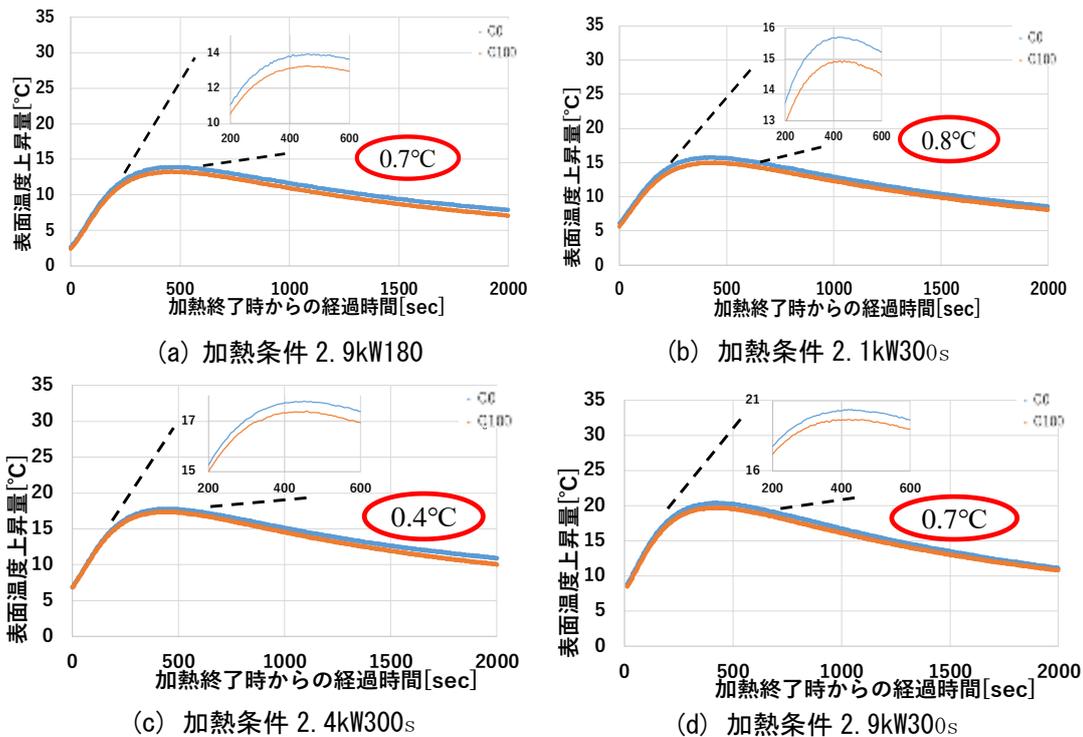


図 16 コンクリート表面温度履歴(シース管の斜め配置)

表 2 実験結果(G0)

	T30S100 Δ 0N30G0			
加熱条件(kw・s)	2.9kW,180s	2.1kW,300s	2.4kW,300s	2.9kW,300s
エネルギー(kJ)	522	630	720	870
最高温度上昇量(°C)	13.9	15.7	17.8	20.39
初期温度(°C)	8.3	10.9	9.1	6.38
最高温度上昇率	1.05	1.05	1.02	1.04

表 3 実験結果(G100)

	T30S100 Δ 0N30G100			
加熱条件(kw・s)	2.9kW,180s	2.1kW,300s	2.4kW,300s	2.9kW,300s
エネルギー(kJ)	522	630	720	870
最高温度上昇量(°C)	13.2	14.9	17.4	19.69
初期温度(°C)	6.1	11.8	11.1	7.03
g100とg0の最高温度上昇量の差(°C)	0.7	0.8	0.4	0.7

同図から、シース管の位置に関わらず、コンクリート表面温度上昇量はグラウト充填率 0%の試験体の方が大きくなっていることが分かる。

図 14 は、それぞれの試験体における充填率 100%の試験結果をまとめたものである。図 13 から、シース管の位置が鉛直鉄筋から離れるほどコンクリート表面温度上昇量が低下していることがわかる。鉄筋とシース管との相対位置と最高温度上昇率の関係を表わしたものが図 15 である。鉄筋とシース管との相対位置の増加に伴って、最高温度上昇率が減少することが分かる。

4.3 斜め配置されたシース管のグラウト充填性状

(1) コンクリート表面温度性状

図 16 は、シース管が鉛直鉄筋に対して斜め方向に配置された試験体 T30S100 Δ 0N30 におけるコンクリート表面温度履歴であり、各図(a)～(d)はそれぞれ加熱条件が

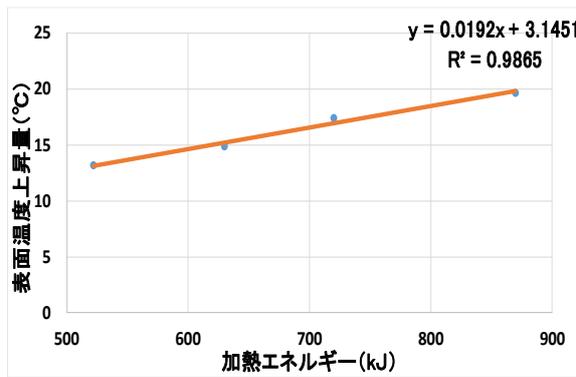
2.9kW-180 秒、2.1kW-300 秒、2.4kW-300 秒、2.9kW-300 秒である。

これらの図から、シース管が斜めに配置された場合、コンクリート表面温度上昇量の差異は、前節に示したシース管が鉛直配置された試験体に比べて小さくなることがわかる。これはシース管の位置による影響と同様に、シース管の位置が中心から遠ざかるほどコンクリート表面温度上昇量が低下しているためであると考えられる。

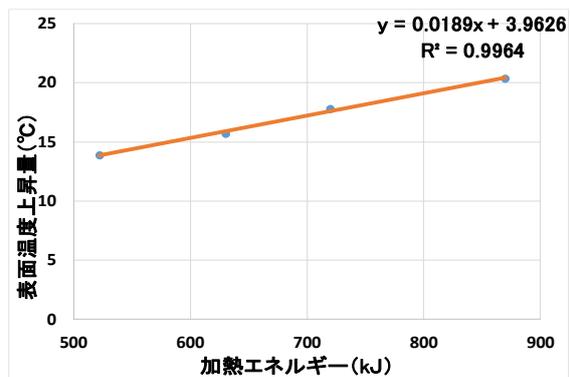
シース管が斜めに配置されている場合、温度上昇量の差異は小さくなるが、限界閾値である 0.1°C以上の差が確認できることから、グラウト充填率の評価は可能であると言える。

(2) コンクリート表面温度に及ぼす加熱エネルギーの影響

実構造物に本手法を適用する際、本実験の加熱条件と



充填率 100%



充填率 0%

図 17 加熱エネルギーと最高温度上昇量の関係図 (加熱条件)

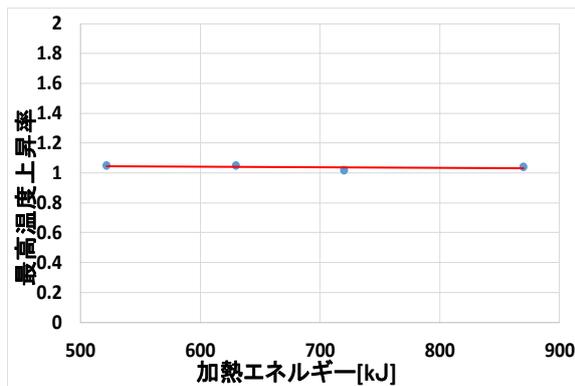


図 18 加熱エネルギーと最高温度上昇率の関

異なる場合がある。したがって、任意の加熱条件においても、グラウト充填性状を評価可能としておかなければならない。このことはすなわち、加熱エネルギーによる影響の検討に通ずる。

表 2 と表 3 は加熱条件によりそれぞれの実験結果をまとめたものである。これらの表から、加熱エネルギーの増加にしたがって、グラウト充填率によるコンクリート表面温度上昇量の差異が大きくなっているとわかる。

図 17 は加熱エネルギーと表面温度上昇率の関係図である。図 17 から、加熱エネルギーが大きいほど、コンクリート表面温度上昇量はほぼ線形に増加している。このことから、充填率に関わらず、加熱エネルギーの損失は生じず、表面温度が上昇していると言える。

図 18 は、加熱エネルギーと最高温度上昇率の関係を示したものである。加熱エネルギーを変化させても最高温度上昇率がほぼ一定値である。これは温度上昇率が加熱条件に関わらず、かぶりおよびシース管位置で決まっているためである。これらのことから、任意の加熱条件においても、グラウト充填性状を評価可能とした。

5. まとめ

以下に、本研究で得られた知見を示す。

(1) 鉄筋が格子状に配筋されている状態では、鉄筋かぶり 40mm においても本システム適用によりコンクリート表面温度上昇率を比較することで、シース管内部のグ

ラウト充填性状の評価を可能とした。

(2) 鉄筋が格子状に配筋されている状態では、シース管かぶり 200mm においても本システム適用によりコンク

(3) コンクリート表面温度上昇量の差異から、シース管内部のグラウト充填性状の評価を可能とした。

(4) シース管の位置についても、温度上昇率の違いを考慮し、鉄筋直下にあると補正することで適用可能になると考えられる。

(5) 任意の加熱条件においても、温度上昇率からグラウト充填率を評価することを可能とした。

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
- 2) 矢寄早織, 今井嵩弓, 大下英吉: コンクリートの表面温度性状に基づく鉄筋腐食の簡易診断手法に関する研究, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.411-416, 2012
- 3) 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,
- 4) 堀江宏明, 尾崎勝成, 谷口修, 大下英吉: 電磁誘導加熱によるコンクリート内部の鉄筋網の加熱性状評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第 29 巻, 2 号, pp.685-690, 2007.7
- 5) 根本早季, 今井嵩弓, 大下英吉, 林詳悟, 福岡養祐: 鉄筋腐食推定手法の剥離空洞存在領域への拡張, コンクリート年次論文集, 第 35 巻, No.1, pp.1825-1830, 2013