

## 論文 光ファイバーセンサーを用いた PC グラウトの新しい充填管理手法

勝木 太<sup>\*1</sup>

要旨：本研究では，PC グラウトの水和熱によって生じるシース管の温度上昇を利用し，シース管表面に巻きつけた光ファイバーによって PC グラウトの充填度で異なると予測されるシース管表面の温度上昇の違いをモニタリングできるか実験的に確認した。なお，実験で使用した温度測定器は光ファイバーに生じる温度分布を連続的に計測できるものである。実験は，シース管径，充填度，かぶりおよびシース管の材質をパラメータにして行った。実験の結果，温度上昇位置と充填度の違いによるシース管表面の温度差を分布型光ファイバーセンサーによってモニタリングできることが分かった。

キーワード：PC グラウト，光ファイバー，ラマン散乱，水和熱，充填管理，モニタリング

## 1. はじめに

PC グラウトは，ポストテンション方式のプレストレストコンクリート（以下 PC）構造物において，シース管内の PC 鋼材と部材コンクリートに付着を与え両者を一体化させると共に，PC 鋼材を腐食から保護するという極めて重要な役割を担っており，その品質や施工の良否により PC 構造物の耐久性に大きな影響を与えるものである。これらの目的を達成させるためには，シース管内にグラウトを完全に充填させることが必要であるが，近年，PC グラウトの充填不良に起因した既存構造物の劣化事例が報告されている<sup>1), 2)</sup>。そのため，確実に充填することが可能な PC グラウトの品質ならびに施工方法の研究開発が望まれている。また，シース管内での PC グラウトの閉塞やグラウト忘れなどが原因と考えられる充填不良箇所<sup>2)</sup>が見つかっていることから，既存・新設を問わず PC グラウトの充填状況を把握できる非破壊的な検査手法が必要不可欠になっている。そこで本研究では，新設構造物における PC グラウトの充填状況を，充填度によって異なると予想される PC グラウトの水和熱によるシース管表面の発熱量を感知し，その充填度を評価できるか実験的に検討した。本研究の温度計測には分布型光ファイバーセンサー

を用いるが，この方法は以前田中ら<sup>3)</sup>によって提案され，確認実験が行われているが，充填度の違いによるシース管表面の明確な温度差を検知するまでには至っていない。本実験では，以前よりも精度の高い温度測定器を使用すること，また光ファイバーをシース管外周に巻きつけ測定器の温度分解能距離を十分確保することなどの工夫を行った。

## 2. 分布型光ファイバーセンサーによる温度計測システム

## 2.1 計測システム

図 - 1 に分布型光ファイバーセンサーによる温度計測システムを示すが，その構成はコントローラ（パソコン），温度測定器（本体），光ファイバー（GI 型マルチモード）からなる。コントローラは本体を制御して測定データを処理する。温度測定器はコントローラから制御され，測定を実行する。光ファイバーは温度の検出器として機能する。

## 2.2 温度測定器

今回使用した温度測定器は，光ファイバーに入射される光パルスの発光時刻と後方散乱光として戻ってくるラマン散乱光の受光時刻からその散乱光の発生位置を特定することができる。

\*1 芝浦工業大学 工学部建設系土木工学科助教授 工博（正会員）

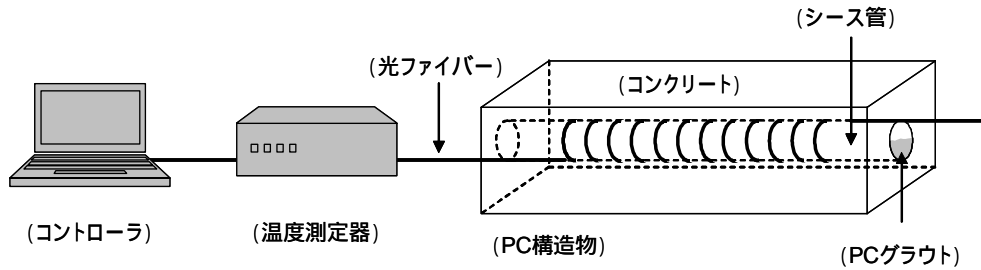


図 - 1 分布型光ファイバーセンサーによるシース管表面温度の計測構成

また、ラマン散乱光のうちのストークス光とアンチストークス光の強度比から温度を測定する。したがって、本器は光ファイバーに生じる温度分布を計測することができる。なお、本器の測定精度は0.3で、本器に表示される1測点の温度は約5.5mの光ファイバーに生じた温度の平均値である（温度の分解能距離が約5.5m）。

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験 1

実験 1 では、シース管に取り付けた光ファイバーによって、充填度の異なる PC グラウトの発熱量の違いを感知できるか確認した。図 - 2 に試験体の概要を示すが、グラウトの発熱履歴が端部の影響を受けないように光ファイバーを試験体中央のシース管に集中的に巻きつけた。充填度のパラメータは、100%と50%（発泡スチロールによる人工空隙）の2水準とした。また実験には径100mmの鋼製シース管を使用した。なお、コンクリートのかぶり厚さの違いがシース管表面の温度上昇にどの程度影響を与えるのか確認

するために、かぶり厚さを50, 100, 150mmと変化させた試験体を製作した。

#### 3.2 実験 2

実験 2 では、1本のシース管内に充填度の異なる部分が連続して存在する場合、その境界部の温度履歴がどのような影響を受けるのか確認した。図 - 3 に試験体の概要を示すが、2.0mの試験体中に100%および50%の充填部を設け、それぞれの充填部の中央とその境界部のシース管表面に光ファイバーを集中的に巻きつけた。なお、シース管には径50mmのものを使用し、実験1の結果と比較した。また実験では、シース管の材質が温度履歴にどのような影響を与えるか確認するために、鋼製シースと透明シース（ビニールタイプ）の2種類のシース管を用いた。

実験 1 および実験 2 では、表 - 1 に示す PC グラウトを使用し、グラウト注入後40時間までの温度履歴を光ファイバーと熱電対で計測した。なお、図 - 4 に今回使用した PC グラウトの断熱温度上昇試験結果を示す。断熱状態でのグラウトの温度上昇は14.5時間後に105.2℃まで達した。

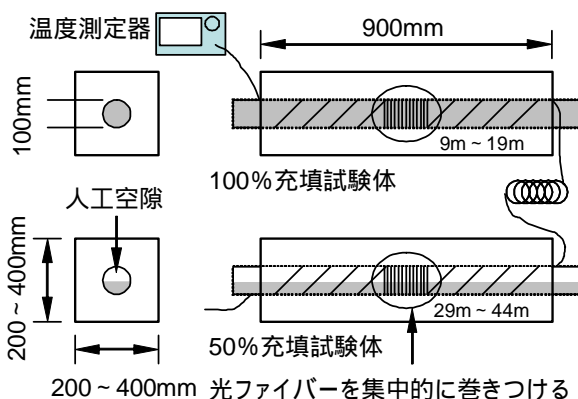


図 - 2 試験体の概要（実験 1）

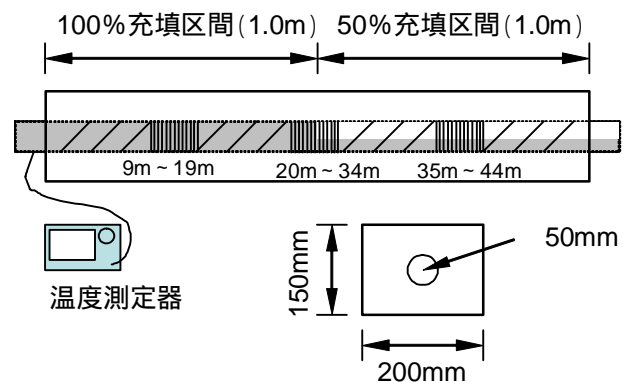


図 - 3 試験体概要（実験 2）

表 - 1 PC グラウトの配合と使用材料

W/C (%)	混和剤添加率 (C×%)
40	1.0
セメント：普通ポルトランドセメント	
混和剤：ノンブリーディング型グラウト用	

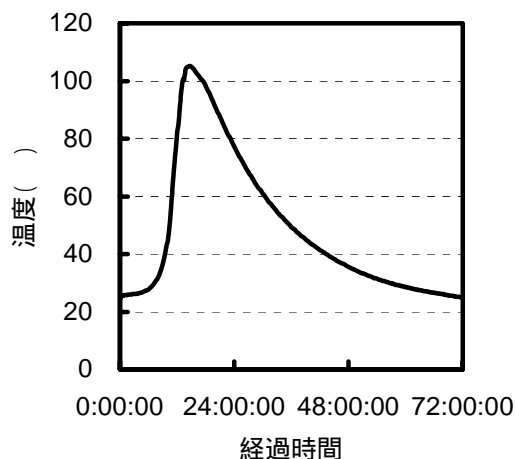


図 - 4 断熱温度上昇試験結果

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 実験 1

一例ではあるが、図 - 5 にかぶり厚さ 50mm の試験体で計測されたグラウト注入後 2 時間経過以降の増加温度分布を示す。なお、温度測定器の温度分解能距離約 5.5m を考慮し、100% 充填されたシース管に 9m ~ 19m 区間の光ファイバーを、50% 充填されたシース管には 29m ~ 44m 区間の光ファイバーを集中的に巻きつけてある。

図より、光ファイバーを集中的に巻きつけた区間の温度が PC グラウトの水和熱によって時間とともに上昇していることが分かる。また、100% 充填された箇所と 50% 充填された箇所には明らかな温度差が生じており、未充填部の位

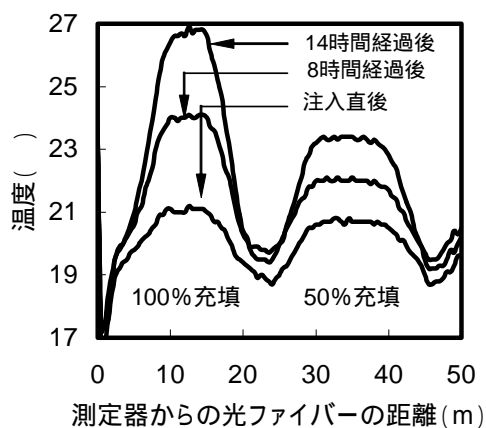


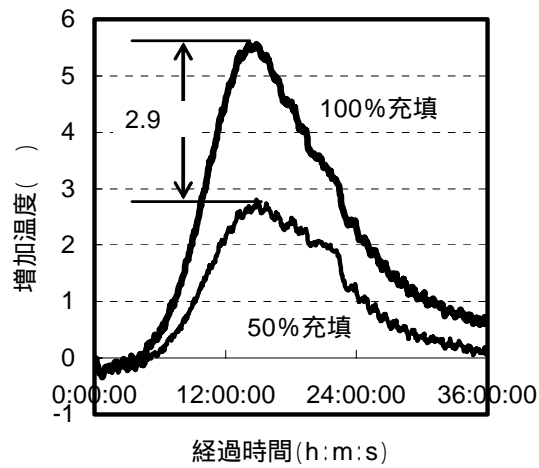
図 - 5 増加温度分布履歴の一例

置を把握することができる。

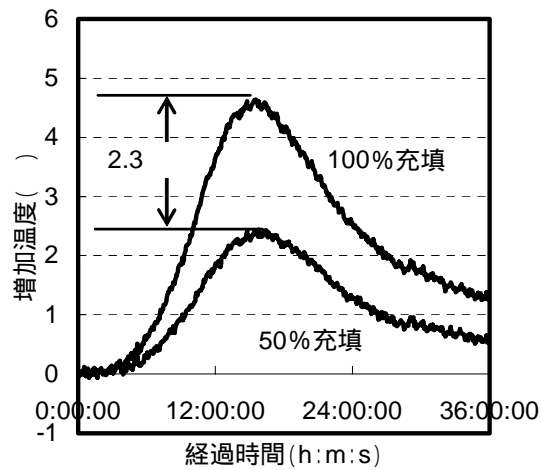
図 - 6 に増加温度の履歴を、図 - 7 に 100% 充填部と 50% 充填部で計測された増加温度の最大値をかぶり厚さごとに整理したものを示す。なお図 - 7 には汎用 2 次元温度解析プログラムを用いて解析した結果も併せて示した。図 - 8 には代表的な解析モデルの概略も示す。図より、かぶり厚さが大きくなるにつれて最大温度は低下することが分かる。これは熱吸収源であるシース管周りのコンクリートのボリュームが増加したためと考えられる。また、温度解析と実験値

表 - 2 注入実験時の温度環境

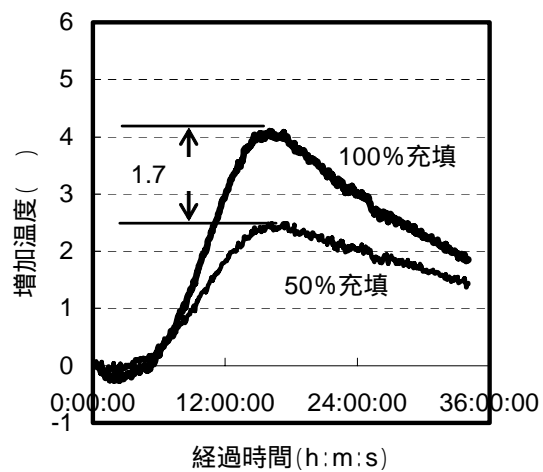
かぶり厚さ	外気温度	グラウトの打込み温度	グラウト打込み前のシース管表面温度	
			100% 充填	50% 充填
50mm	19.4	21.3	100% 充填	20.5
			50% 充填	20.3
100mm	20.3	20.7	100% 充填	20.6
			50% 充填	20.5
150mm	20.9	21.5	100% 充填	20.1
			50% 充填	20.0



(a) かぶり厚さ = 50mm



(b) かぶり厚さ = 100mm



(c) かぶり厚さ = 150mm

図 - 6 各充填位置に巻きつけられた光ファイバーにより計測された温度の増加履歴

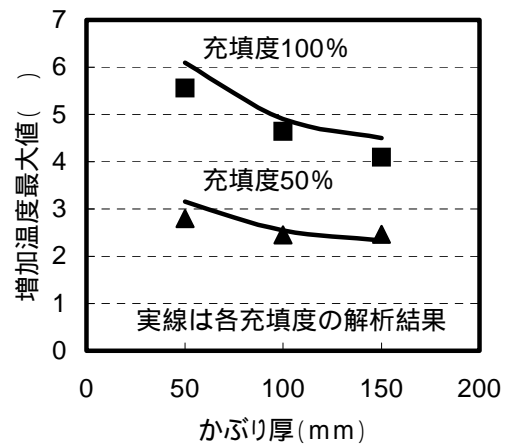
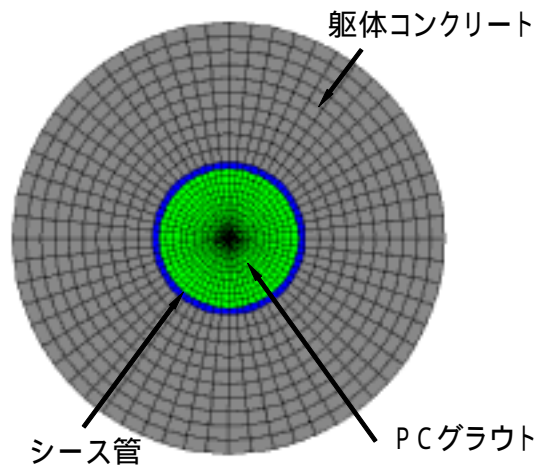
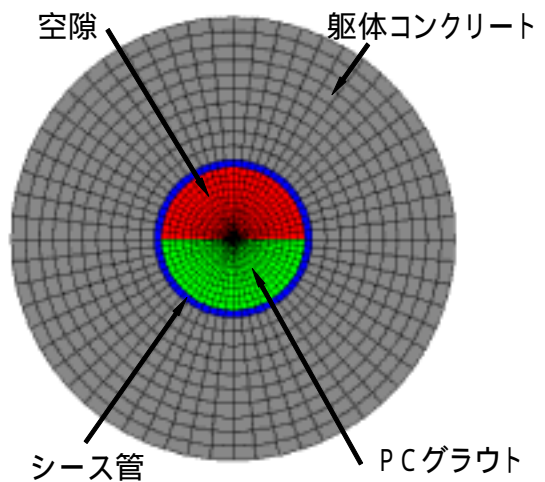


図 - 7 最大増加温度とかぶり厚さの関係



(a) 充填度 100%のケース



(b) 充填度 50%のケース

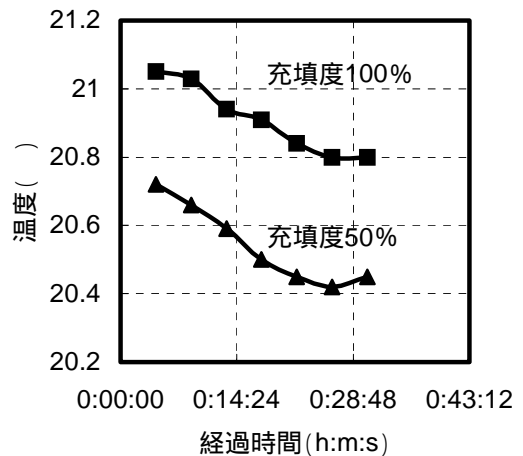
図 - 8 2次元解析モデル

はほぼ同じ傾向を示すことがわかる。すなわち、使用するグラウトの種類や打ち込み温度、外気およびシース管の配置位置を考慮した事前解析によってあらかじめ未充填部の温度上昇を把握し、実測値との比較によってその位置を検知できることになる。

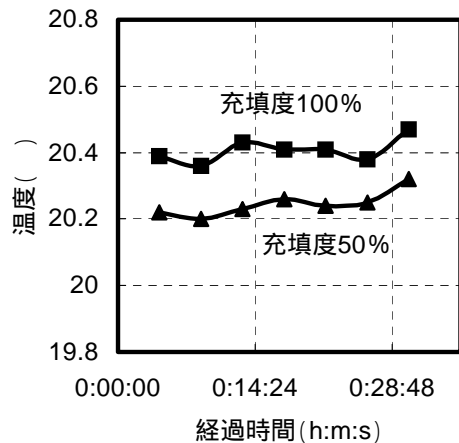
次にグラウトの再注入可能な時間内に未充填部を検知できるか検討することにする。図 - 9 にグラウト注入直後から約 30 分経過するまでの温度履歴を示す。また表 - 2 にグラウトの打ち込み温度と打ち込み前のシース管表面の温度をまとめた。今回の実験の範囲内に限ってではあるが、打ち込み直後には 100%と 50%の充填部との間には約 0.5~1 の温度差が生じている。温度測定器の精度を考慮しても打ち込み直後から明らかに両者の間には温度差が生じていることがわかる。ただし、この温度差は、グラウトの打ち込み温度、外気およびシース管径によって影響を受けるため、実験パラメータを増やすなどして再確認する必要がある。

#### 4.2 実験 2

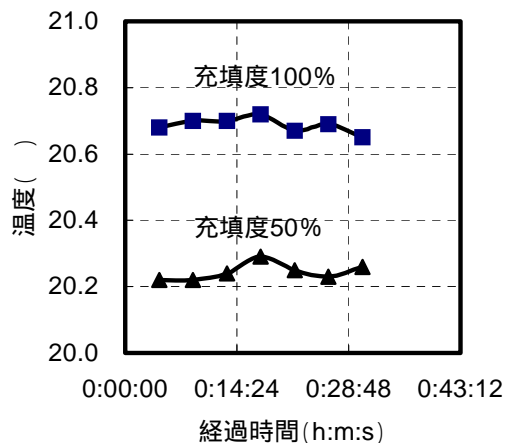
図 - 10 に鋼製および透明シース管を用いて 13 時間後に計測されたシース管表面の増加温度の分布を示す。図より、両者のシース管とも、はじめに 100%充填部の影響を受けて温度増加が大きくなり、続いて 100%充填部と 50%充填部の両方の影響を受けた温度が検知され、徐々に 50%充填部の影響を受け温度増加が小さくなる傾向を示している。そこで、図 11 に各充填部のシース管に集中的に巻きつけた光ファイバーから得られる最大温度上昇時の増加温度と充填度との関係を示す。なお図中の充填度 75%とは、100%充填部と 50%充填部の境界のシース管に集中的に巻きつけた光ファイバーから得られた増加温度である。図より、両者のシース管とも充填度の違いによる温度差を検知できていること、また熱伝導率の低い透明シース管の方が管表面の温度上昇が大きく、充填度の違いによる温度差も大きいことが確認できた。



(a) かぶり厚さ = 50mm

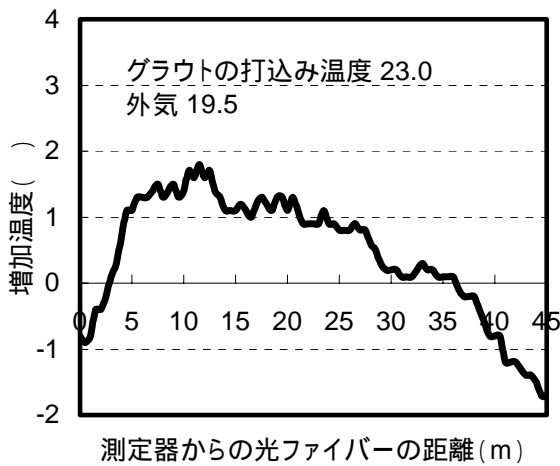


(b) かぶり厚さ = 100mm

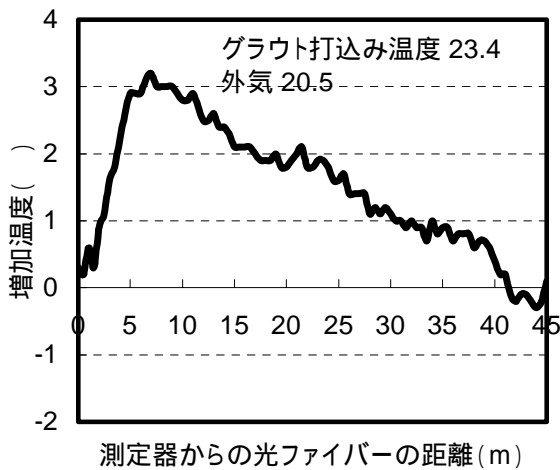


(c) かぶり厚さ = 150mm

図 - 9 グラウト打ち込み直後からのシース管表面温度履歴



(a) 鋼製シース管の温度分布 (13 時間後)



(b) 透明シース管の温度分布 (13 時間後)

図 - 10 各シース管の温度分布

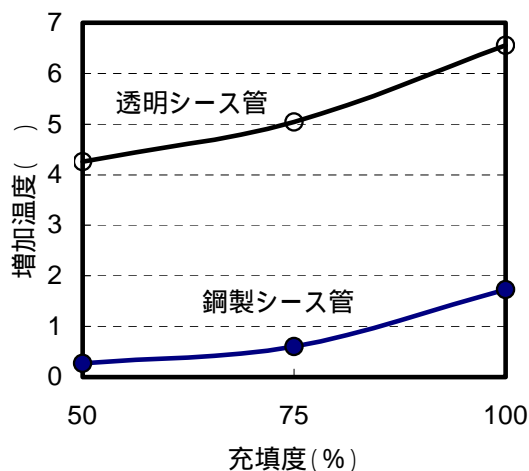


図 - 11 充填部の増加温度 (最大温度上昇時)

## 5. まとめ

- (1) PC グラウトの水和熱によるシース管表面の温度上昇および充填度の違いによる温度差とその発生位置を、温度計測用の分布型光ファイバーセンサーによって計測できると分かった。
- (2) PC グラウトの熱吸収源となるシース管周りのコンクリートボリュームによって温度上昇が異なり、その現象を分布型光ファイバーセンサーによってモニタリングできること、さらに充填度によって異なる温度差を解析で評価できると分かった。
- (3) 今回の実験の範囲内ではあるが、グラウト注入直後に生じる充填度の違いによる温度差を光ファイバーセンサーによって感知できると分かった。このことより、再注入可能な時間の範囲内に未充填部を検知できる可能性を示唆することができた。
- (4) シース管径が 50mm 程度であっても、PC グラウトの充填度による温度差を分布型光ファイバーセンサーにより計測できた。
- (5) 熱伝導性の低いシースのほうがその管内に温度がこもりやすく、充填度の違いによる温度差が大きいことが分かった。

以上のことから、分布型光ファイバーセンサーを用いて PC グラウトの充填管理を行える可能性が十分にあることが分かった。

## 参考文献

- 1) Schupack M : Durability Study of a 35-Year-Old Post-Tensioned Bridge, Concr. Int., Vol.16, No.2, pp.54-58, 1994.2
- 2) 石橋忠良 : メンテナンス PC 鉄道構造物の劣化事例と対策, プレストレストコンクリート, Vol.45, No.1, pp.72-75, 2003.1
- 3) 田中良樹ら : 光ファイバー温度センサーを用いた PC グラウト管理法に関する実験的研究, 第 8 回シンポジウム論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp.65-70, 1998.10