

(12) 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基礎的研究

建設省土木研究所
同
同

○田中 良樹
河野 広隆
正会員 鈴木 雅博

1. まえがき

プレストレストコンクリート(PC)のグラウト工の施工不良は、未充填部において空隙水の凍結によるコンクリートのひび割れやPC鋼材の腐食などを引き、PCの耐久性を著しく損なう原因となる。実際にこうした事例は国の内外で報告されており¹⁾²⁾、最近は従来より充填性に優れたグラウト材料について研究され、改善されつつある³⁾⁴⁾。一方、グラウト充填性の確認方法は、X線透過法、打音振動法、赤外線法などの方法が取り上げられているが⁴⁾⁵⁾、まだ十分に実務に反映されていないのが現状である。近年の構造物の性能規定化の動きと相まって、より適切な品質管理手法が要求される中で、PCのグラウト工についても施工時、竣工時のより適切な施工管理手法、品質検査手法の確立が重要な課題となっている。

これらを踏まえ、目視では確認不可能なシース(グラウト孔)内のグラウト注入状況を把握する方法として、光ファイバー温度センサー(OT)を利用したグラウト管理法を考案した。本グラウト管理法は、シースに温度監視用の光ファイバーを装着しておき、グラウト注入時のグラウト材と周囲のコンクリートとの温度差を測定することによって、グラウト注入状況を把握しようとするものである。OTは直径0.9mmの光ファイバー1本で数kmにわたって任意の位置の温度を精度よく計測できるのが特徴であり、これと同等のことを、点でしか計測できない熱電対(φ3mm程度)で行うことは相当な数を埋め込むことになり現実的でない。光ファイバーを用いたグラウト状況の把握手法は他にも考案されているが⁶⁾、温度センサーとして用いる方法はこれまで見られない。今回、本グラウト管理法の基礎的検討の一つとして、グラウト注入時のシース内温度を把握するため、OT及び熱電対を埋め込んだコンクリート供試体を用いてグラウト充填試験を実施したので、その結果について報告する。

2. 供試体と計測方法

図-1に供試体の形状寸法を示す。コンクリート内部にシースを埋め込むとともに、シースの中心に緊張材を想定した棒材を挿入した。表-1に供試体の種類を示す。供試体は、シース、棒材の材質をパラメータとして4種類のもの各1体ずつ用意した。PC構造物では、一般に鋼製のシース、緊張材が用いられるが、ここでは鋼材の熱伝導がグラウト欠陥部の検出に及ぼす影響を見るため、熱伝導率の

表-1 供試体の種類、名称と数量

シース材		
緊張材(棒材)*	鋼製シース	透明シース
鋼棒	SS(1体)	PS(1体)
塩ビ管	SV(1体)	PV(1体)

*)本試験では張力はいれない。

表-2 シース、棒材の寸法、材質 (単位:mm)

		規格値	実測値
鋼製シース	板厚	0.32	—
	内径	φ65	—
	外径	φ65.64	φ65.82
	材質	STCC相当(JIS G3141)	—
透明シース	肉厚	4	—
	内径	φ68	φ68.0
	外径	φ76	φ76.0
	材質	硬質塩化ビニール樹脂	—
鋼棒	径	φ65	φ65.8
	材質	SS400	—
塩ビ管	肉厚	3.5	—
	内径	—	φ31.0
	外径	φ38	φ38.1
	材質	VP(JIS K6742)	—

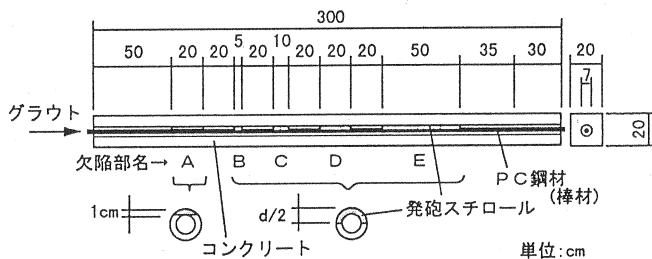


図-1 供試体の形状寸法

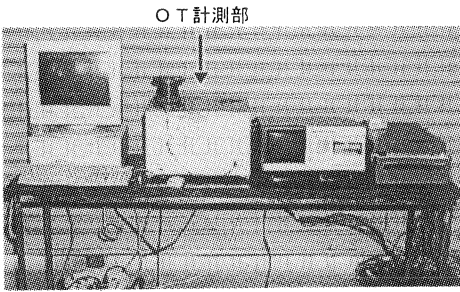


写真-1 光ファイバー温度センサー計測部

さい塩化ビニール材のものも用意した。表-2に使用した棒材の寸法、材質を示す。また、シース内には、グラウト欠陥部を人工的につくるため、発泡スチロールを取り付けた(以下、発泡スチロールの部分グラウト欠陥部という)。参考として、表-3に主な材料の熱伝導率を示す。コンクリートは、生コン(40-8-25N)を用いて、グラウト時にコンクリート部の水和熱の影響が出ないようにグラウト試験の14日前に打設した。

表-4に光ファイバーの諸元を示す。OTのセンサー部にあたる光ファイバーは、鋼製シースの凹凸に沿わせて28mmピッチでシースに巻き付けた。巻き付けの理由は、今回用いたOTの最小距離分解能が0.8m(カタログデータでは1m)であることからシース軸に平行に取り付けては小さいグラウト欠陥部の判別が困難であるためである。このため、OTによる計測結果は断面の平均温度を捉えることとなる。透明シースは凹凸がないが、比較のため、巻き付け間隔は鋼製シースと同様とした。

OT計測部について、写真-1に外観を、表-5に仕様を示す。光ファイバーに光を入射すると、光ファイバー中でラマン散乱光が発生し、そのうちの一部は後方散乱光として入射口に戻ってくる。後方散乱光が戻ってくるまでの遅延時間より位置を把握でき、後方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が温度に依存していることを利用して、光ファイバーの任意の位置の温度を把握することができる⁴⁾。

なお、OTとは別に、シース内の温度変化を把握するための熱電対と、グラウト注入中の位置確認のためのショートセンサー(グラウトに接触すると短絡する)を、いずれもシースに細孔を開けてシース内2~3mmの位置に取り付けた。

3. グラウト

表-6にグラウト材料の配合を示す。シース内の温度変化を明確にするため、予め材料温度を調整して、練り上がり温度を40℃以上とするようにした。供試体は20℃程

表-3 主な熱伝導率(W/mK)⁷⁾

空気	0.0265
ポリスチレン	0.12
ポリ塩化ビニル	0.16
水	0.612
コンクリート	1.8
炭素鋼	50

注)温度300K、圧力1bar

表-4 光ファイバーの諸元

規格	GI型(50/125μm)	
コア径	φ50μm	
クラッド外径	φ125μm	
一次被覆	外径φ0.4mm	シリコン
二次被覆	外径φ0.9mm	ナイロン

表-5 OT本体の主な性能(カタログデータ)

測定温度範囲	測定できる温度範囲	-170~300℃	
温度精度	真の温度と測定値との誤差	±1℃	
温度分解能	測定値のばらつき	±1℃	±3℃
応答距離	1点の測定値はある一定区間のファイバの平均温度を示す。その区間の長さ	3m	1m
距離分解能	測定値の距離間隔	1m	
最小加熱長	正しい温度を得るために加熱しなければならない最低限のファイバの長さ	4m	2.5m
測定時間	所要測定時間	10sec	
測定可能距離	測定できる最も長い光ファイバの長さ	4km	

表-6 グラウト材料の配合

W/C (%)	単位水量 W(kg/m ³)	単位セメント量 C(kg/m ³)	混和剤*(kg/m ³)
40	558	1396	14

*)グラウト用ノブリーディング・増粘型混和剤を使用

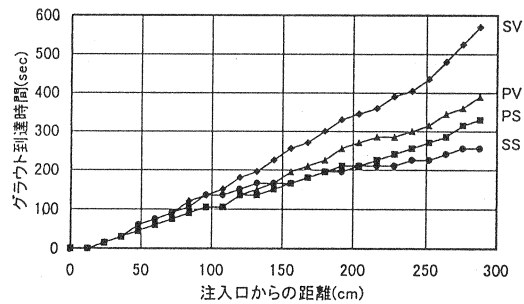


図-2 グラウト充填状況

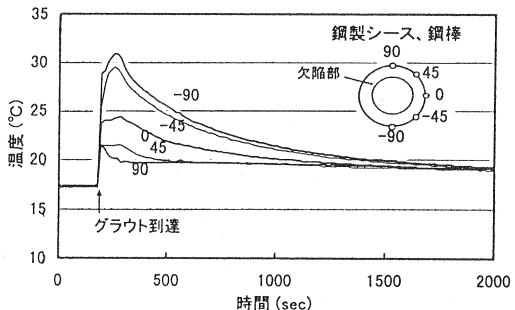


図-3 グラウト欠陥部周辺の温度変化 (SS、欠陥部Dの例)

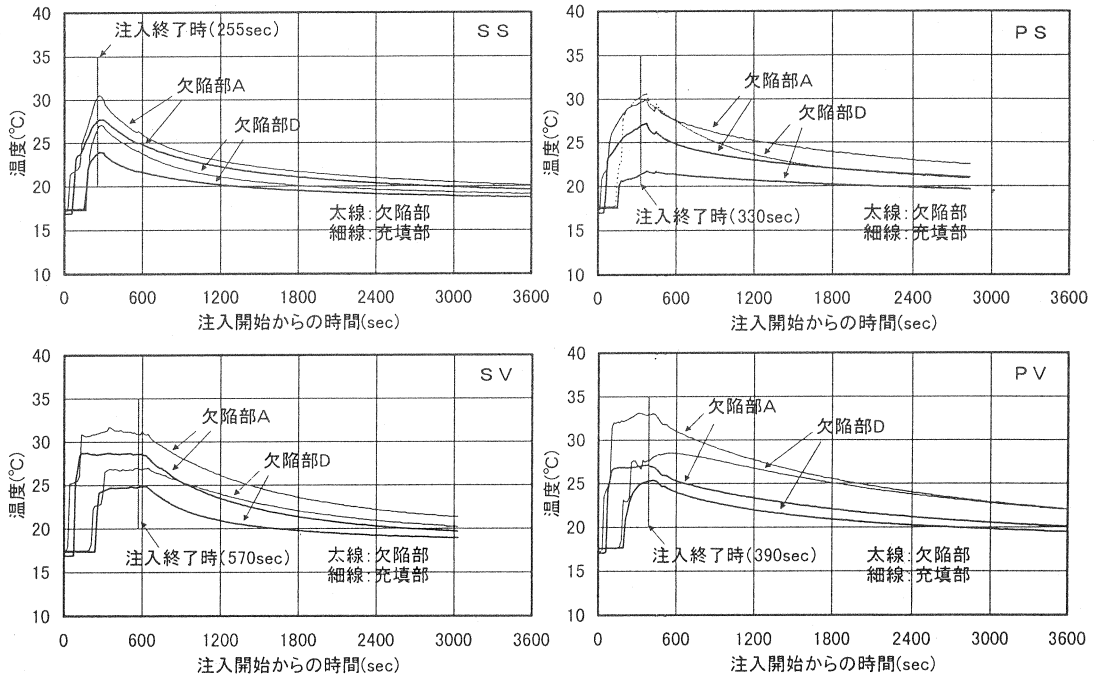


図-4 熱電対によるグラウト欠陥部と充填部の温度比較

度に調整された室内で養生しておき、その場でグラウト注入を行った。図-2にショートセンサーにより把握したグラウト充填状況を示す。手動注入装置を用いて行い、シース内グラウト注入速度は30~50cm/min程度であった。グラウト注入は排出口にグラウト材が見えた時点で終了した。

4. 結果

4.1 熱電対による測定結果

図-3に熱電対によるグラウト欠陥部周辺の温度分布の一例(SS、注入口から約2mの位置)を示す。グラウト欠陥部のある上端付近(90, 45)では、欠陥のない部分(-45, -90)に比べて温度上昇が小さく、この例ではグラウト材到達直後には10℃程度の差が生じていた。

図-4に各供試体の欠陥部A、Dについて、欠陥部と充填部の温度比較を示す。ここでは、充填部の温度は便宜的に各グラウト欠陥部の前後の充填部上端1点の平均値(2点平均)とした。グラウト欠陥部の値は同一断面内での測定値から求めた平均値(8点平均、図-3参照)である。これらの図より、欠陥部と充填部の間に温度差があり、その温度差は注入後もある程度持続していることが分かる。

図-5に各供試体のシース内の温度分布を示す。図中の()内数字は注入開始後の経過時間を示す。図中に示した欠陥位置は、凸部がグラウト欠陥部の位置を表し、凸部の高さは欠陥の大きさを模式的に示した(図-1参照、以下同様)。また、図-6に各供試体のグラウト欠陥部と一般部の温度差の経時変化を示す。各供試体ともに、グラウト注入中は温度差の経時変化はランダムであり、注入終了後、比較的連続的な経時変化になる。平均的に見ると、PVは温度差が最も大きくかつ長く持続しており、SSは温度差が最も小さく、持続時間も短い。PSをPVと対比してみると、注入直後の温度差はPSの方が大きいにもかかわらず、温度差の減衰はPSの方が早い傾向にある。SSとSVの対比でも同様の傾向が見られており、これらは鋼棒の影響によるものと考えられる。PSとSS、PVとSVとを対比してみると、SS、SVの方が温度差が小さい傾向にある。鋼

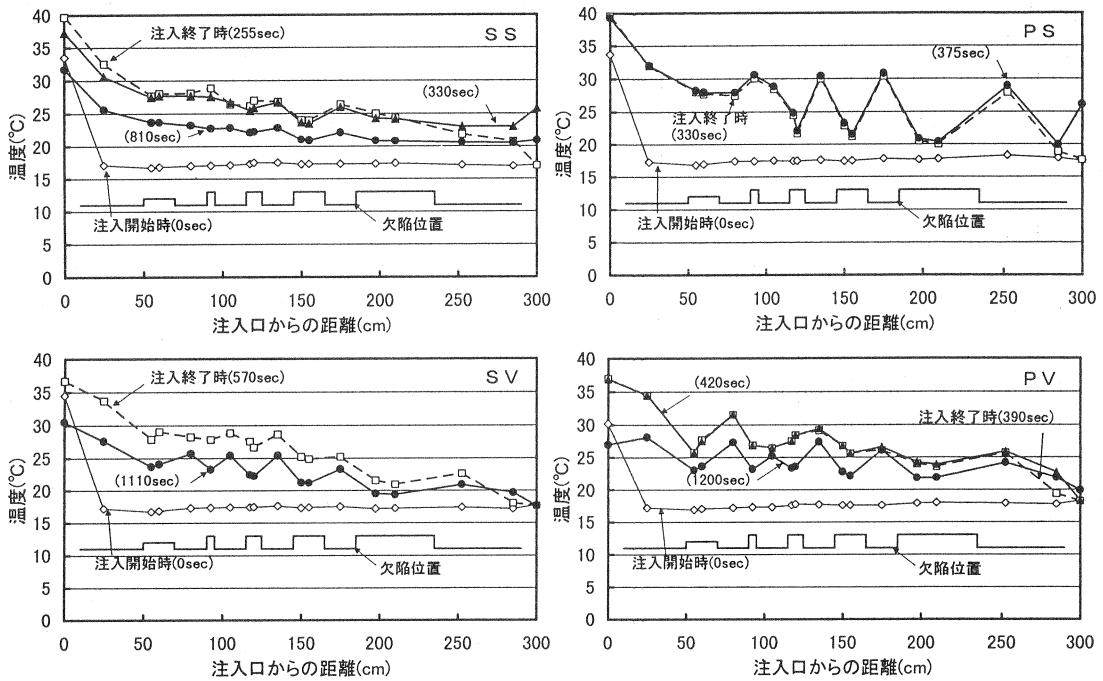


図-5 熱電対によるシース内温度分布

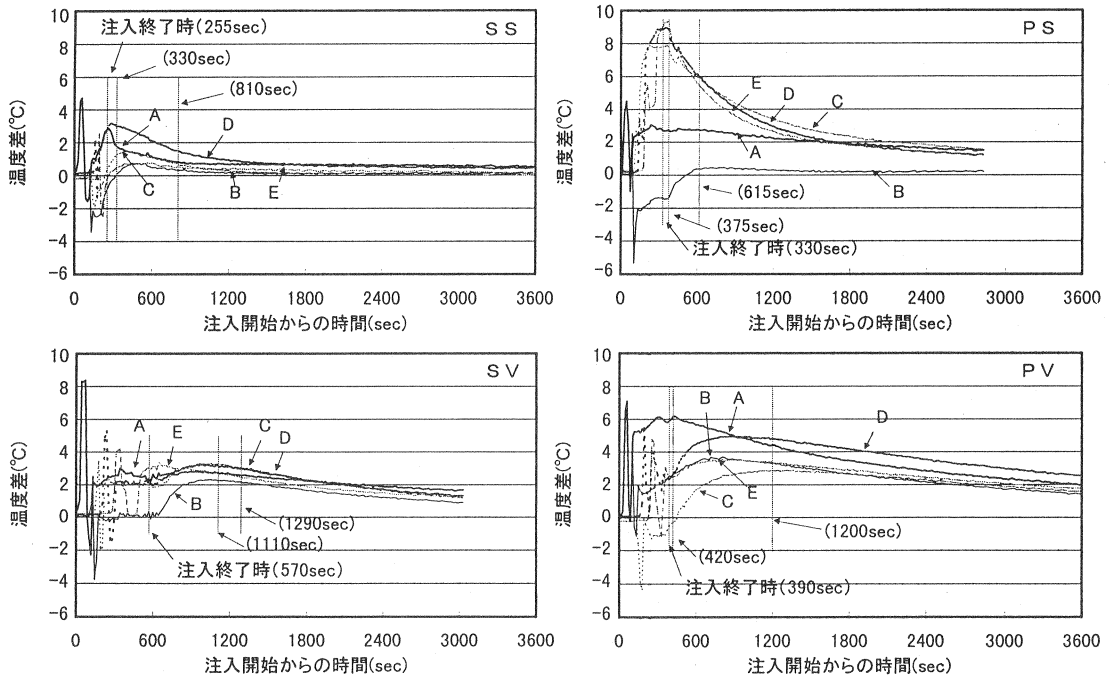


図-6 熱電対によるグラウト欠陥部と充填部の温度差

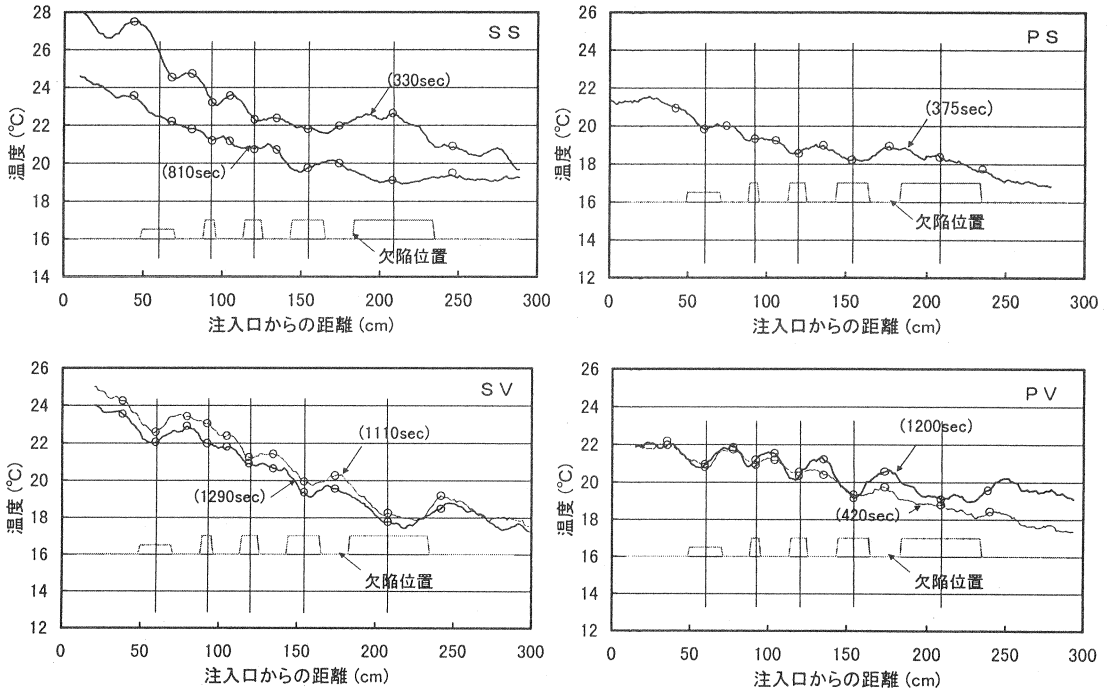


図-7 OTによるシース内温度分布

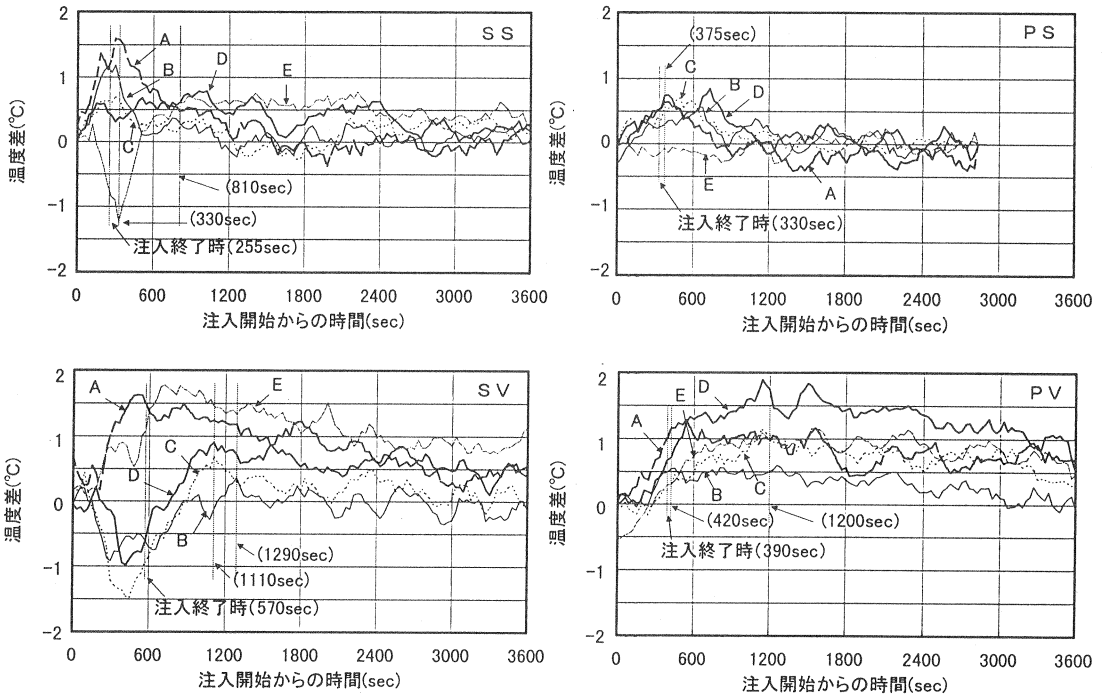


図-8 OTによるグラウト欠陥部と充填部の温度差

製シースの場合は、透明シースよりも熱伝導率が高いため、鋼製シースを介してグラウト欠陥部に熱が伝わり、グラウト欠陥部と充填部の差が比較的小さくなったものと考えられる。

4.2 OTによる測定結果

図-7に各供試体のOTによる温度分布を示す。また、図-8にOTによる各供試体のグラウト欠陥部と充填部の温度差の経時変化を示す。PVは、グラウト欠陥部で周囲の充填部よりも温度が低くなっており、グラウト欠陥部を比較的良好に検出している。一方、温度差が小さかったSSは、注入からの時間によってグラウト欠陥部を検出できる範囲が異なり、欠陥部の位置が明確でない。SVはグラウト欠陥部B(長さ5cmの欠陥)が明確でないが、他の欠陥部は検出している。PSはグラウト欠陥部を検出しているが比較的温度差が明確であったわりには、OTによるグラウト欠陥部はあまり明確でなかった。これは、熱電対がシースの内側に取り付けられているのでグラウトの温度を直接測定するのに対して、光ファイバーは肉圧4mmの透明シースの外側に巻き付けられているためにシースにある程度断熱され、熱が伝わり難かったことによると考えられる。

5. まとめ

(1) 熱電対の計測により、グラウト時におけるシース内のグラウト充填部、欠陥部の温度分布、温度変化を把握した。注入時のグラウト材の温度が注入前のシース内温度よりも高い場合に、グラウト欠陥部では周囲の充填部に比べて温度が低くなる。この温度差及び温度差の持続時間はシースの材質により異なる。鋼製シースを用いた場合は、鋼製シースを介してグラウト欠陥部までグラウト材の熱を伝達するために、透明シースに比べて温度差もその持続時間も短い。また、グラウト欠陥部の温度差の持続時間は、鋼棒の存在により短くなる傾向がある。

(2) これらの温度差をOTにより計測した結果、鋼製シースを用いた場合には、グラウト欠陥部が明確でなかった。これはもともと熱電対による測定においても温度差が小さかった上に、今回の場合OTは断面の平均で温度を捉えていたことが要因である。透明シースを用いた場合には、透明シースの断熱により熱電対による温度差ほど顕著ではなかったが、グラウト欠陥部をある程度検出できることが分かった。

6. あとがき

今後、グラウト材の初期温度を通常程度とした場合や、充填距離を実用的な長さ(少なくとも10m以上)とした場合について検討し、温度によりグラウト欠陥部を検出できる範囲を明確にする必要がある。また、計測精度の向上としては、光ファイバーの装着方法の改良、OTの距離分解能の改善が必要である。従来OTは、ライフラインの管理やビルの火災検知などに利用されており、グラウト欠陥部の検知のような比較的短い距離分解能は必要でなかったが、今回のような使用方法を理解していただき、今後距離分解能がより改善されることを期待する。

参考文献

- 1) 英PC橋のグラウト禁止、日本の技術者にも大きな波紋、日経コンストラクション、1993.3.12、pp.64~66
- 2) 佐々木慎一、堺孝司：グラウト不良により劣化したPC橋の調査と補修、コンクリート工学年次論文報告集、18-1、1996.1、pp.1089~1094
- 3) ノンブリーディンググラウトへの移行について、プレストレストコンクリート、40-3、1998.5、pp.71~75
- 4) 望月秀次、本間淳史、上東泰：PCグラウトの施工技術の現状と非破壊検査による点検、コンクリート工学、34-6、1996.6、pp.4~12
- 5) 坂田康徳、大津政康：超音波スペクトロスコーピー法によるポストテンションPC構造物のグラウト充填度評価について、セメント技術大会講演集、1993、pp.316~321
- 6) W.C.Michie et.al.: Distributed Water Ingress and Water Potential Measurements using Fibre Optics, Cement and Concrete Composites Vol.19, 1997, pp.35-44
- 7) 化学便覧基礎編、1984.6、pp. II-72~75
- 8) 小川勝徳ほか：光ファイバー温度レーダの開発、日立電線No.9、1990.1、pp.7~12