

PC グラウトの充填度評価と再注入に関する基礎的研究

株式会社安部日鋼工業	正会員	竹内 祐樹
国土交通省国土技術政策総合研究所	正会員	中村 英佑
独立行政法人土木研究所	正会員	渡辺 博志
独立行政法人土木研究所		木村 嘉富

(Abstract)

This paper aims to evaluate inspection techniques of the grouting condition in lateral tendon ducts on existing prestressed concrete bridges and a re-grouting method for voids in those ducts. Prestressed concrete specimens which had poorly grouted tendon ducts were used to assess the reliability of the non-destructive techniques and the re-grouting method. The experimental results showed the elastic wave velocity was a good indicator to estimate the grouting condition and the X-ray transmission method was useful to distinguish between fully and poorly grouted tendon ducts visually. Additionally, the re-grouting method by drilling a circular vent and placing a re-grouting device with a nosepiece was applicable for re-grouting voids in those ducts.

Key words : Grout, Tendons, Non-destructive testing, re-grouting

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋(以下、PC 橋)のグラウトは、部材コンクリートと PC 鋼材の一体化を確保し、PC 鋼材を腐食から守るため、シース内に密実に充填する必要がある。シース内にグラウトの未充填部が残されている場合には、PC 鋼材の腐食、破断、突出につながる恐れがあるため、PC 橋の耐荷性能の低下だけでなく第三者被害を引き起こす可能性もある。特に PC 鋼棒は PC 鋼より線に比べて破断時の突出の可能性が高いとされており、既設 PC 橋を安全に供用していくためには、グラウトの充填度を適切に検査し、必要に応じてグラウトを再注入する方法を確立することが重要である。

本研究では、既設 PC 橋に使用されている PC 鋼棒を対象として、グラウトの充填度を確認するための非破壊検査手法の精度とグラウトの未充填部への再注人工法の適用性について検討した。非破壊検査手法としては、従来から検討が行われ、実施工での採用例もある衝撃弾性波法と X 線透過法に着目し、種々の条件を変化させたグラウト充填度の異なるはり供試体を用いて適用精度を検証した。また、未充填部へのグラウト再注入を行い、再注人工法の適用性についても併せて検証した。

2. 実験概要

2.1 供試体形状

供試体形状を図-1に示す。供試体は、けた長10m、けた高1mのもの2体である。PC 鋼材には PC 鋼棒 (SBPR930/1080, 26mm) を使用し、シースには鋼製のスパイラルシース (35mm) を使用した。プレストレスは PC 鋼棒の初期引張応力度が 780N/mm^2 となるように導入し、PC 鋼棒の定着部はコンクリートで保護せずに露出させたままとした。グラウトの充填度は 10% (鋼棒 C)、20% (鋼棒 B)、50% (鋼棒 D)、100% (鋼棒 A) の 4 水準とし、10、50%については軸方向片側の端部のみ、20%については軸方向両側の端部を 10% ずつ充填した。この充填度は、シース内の空隙に対するグラウト注入量で規定したものであり、PC 鋼棒がグラウトで覆われた長さや面積を示すものではない。グラウトは、シース径と PC 鋼棒径から所定の充填度と

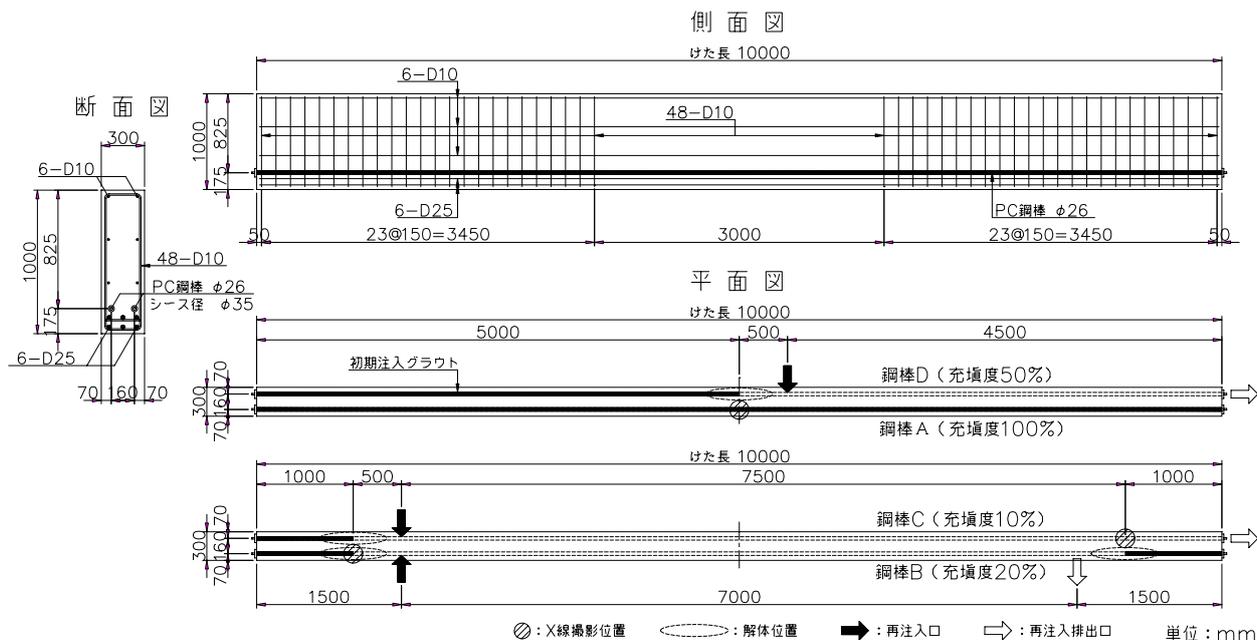


図 - 1 供試体形状

するための注入量を事前に算定し、グラウト流量計により注入量を管理しながら注入した。

コンクリートとグラウトの配合を表 - 1, 2 に示す。グラウトは、セメント系ノンブリーディングタイプの低粘性型グラウトを使用した。グラウトの材料試験結果を表 - 3 に示す。本実験では、最初に充填度を調整して注入したグラウト (以下, 初期注入グラウト) と後述する未充填部に再注入したグラウト (以下, 再注入グラウト) を判別するため、再注入グラウトにセメント質量に対して 1% の着色用顔料を混入して着色した。材料試験結果は所定の基準値¹⁾を満足し、着色用顔料の混入が再注入グラウトの物性に与えた影響はほとんど無かったと考えられる。

2. 2 衝撃弾性波法による検査方法

衝撃弾性波法による検査方法の概略を図 - 2 に示す。測定は、PC 鋼棒を直径 15mm の鋼玉で軸方向に直接打撃し、両端部の定着版に設置した 140kHz 共振型の AE センサ - を用いて弾性波の入出力波形を記録して行った。出力波は入力波と比較して伝播距離が長く、減衰して波形の振幅が小さくなると考えられたため、増幅器を用いて利得を 20dB (10 倍) とした波形を取得した。増幅器と波形収録装置は約 20m の BNC ケ - プルを用いて接続した。入出力波形の記録は、波形収録装置により測定開始から 120ms 経過時まで 0.01ms に 1 点の間隔で計 12,001 点について行った。ここでは、入力波の振幅の立ち上がり時に閾値 (トリガ -) を設け、入力波の振幅が閾値を超える前の 6ms (記録時間の 5%)、超えた後の 114ms (記録時間の 95%) の波形を記録した。

既往研究では、弾性波伝播速度に着目することでグラウトの充填度を概ね評価できるとする報告が多い。しかしながら、残存プレストレス量やシ - ス内の空隙への水の進入、部材長さなどが弾性波伝播速度に及ぼ

表 - 1 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
43	44	160	372	780	1001	1.67

最大粗骨材寸法 20mm, スランプ 9cm, 空気量 4.0%, 中庸熱セメント使用, 材齢 28 日の圧縮強度 48.7N/mm²

表 - 2 グラウト配合

W/C (%)	使用量 (C × %)	単位量 (kg/m ³)		
		W	C	混和剤
45	1.0	587	1305	13.05

普通ポルトランドセメント使用, 混和剤はセメント質量の 1% を添加

表 - 3 グラウトの材料試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	温度 ()	流下時間 (秒)	塩化物含有量 (kg/m ³)
初期注入	34.4	28.2	7.0	0.015
再注入	38.9	28.8	6.7	0.011

圧縮強度は材齢 7 日 (衝撃弾性波法の測定日) の結果

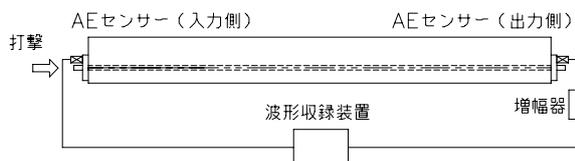


図 - 2 衝撃弾性波法による検査方法の概略

す影響については必ずしも明らかにされていない。このため本実験では、グラウトの充填度が異なる場合に加えて、プレストレスの導入量が異なる場合、シ - ス内の空隙に水を入れた場合、PC 鋼棒の長さが異なる場合の弾性波伝播速度を比較した。また、後述する未充填部へのグラウト再注入を行った後も弾性波伝播速度を測定し、グラウト再注入が測定結果に及ぼす影響についても検討した。

本実験では鋼玉を手動で打撃して弾性波を入力したため、測定を5回ずつ行うことにより結果のばらつきの有無を確認した。なお、測定者が異なることで測定誤差が生じる可能性があるが、本実験では2名の測定者(技術者A,B)による測定を行ったところ、測定者の違いが結果に与えた影響はほとんどなかった。

2.3 X線透過法による検査方法

X線透過法による検査方法の概略を図-3に示す。本実験で使用した供試体では、下縁にPC鋼棒を並列に配置していたため、供試体真横からの撮影では撮影対象としているPC鋼棒ともう一方のPC鋼棒が重なりグラウトの充填度を検査することが困難となる可能性があった。本実験では、X線発生装置を約20~30度傾け、斜め方向からX線を透過させて撮影を行った。また、斜め方向から撮影することでコンクリート中の透過距離が300mmを超えたため、撮影に用いるX線フィルムは、画像のデジタル処理が可能なイメージングプレートを使用した。

2.4 グラウト再注入の方法

衝撃弾性波法とX線透過法による測定を行った後、未充填部へのグラウト再注入を行った。再注入作業に必要な注入・排出口については、図-1に示すように、鋼棒Bでは注入口と排出口を、鋼棒Cと鋼棒Dでは注入口をかぶりコンクリートおよびシ - スを削孔して設けた。保護コンクリートを設置していなかったため、これら以外の注入・排出口は、PC鋼棒の定着版にあらかじめ設けていたグラウト孔を使用した。

実施工における削孔処理では削孔時にPC鋼材に損傷を与えることを避けるためウォータージェット工法を採用することが推奨されているが²⁾、本実験ではコンクリートドリルを用いて簡易に削孔を行った。ただし、PC鋼棒に損傷を与えないよう、ドリルの先端が金属と接触した際に電源供給を自動的に遮断する機能を有する電工ドラムを使用した。コンクリートドリルがシ - スに達した後は、タガネやマイナスドライバ - 等を用いてシ - スを破り、30mm程度までシ - スの削孔径を拡大した。また、注入・排出口でエア - 漏れがある場合やシ - ス内部に残留水が停滞している場合には適切にグラウトを再注入できない可能性があるため、エア - コンプレッサ - を用いて注入口から排出口への通気確認を行い、数分間通気することにより残留水を強制的に除去した。なお、削孔位置からの再注入の際には図-4に示す再注入用治具を供試体側面に設置した。グラウト漏れを防ぐため、プレート背面にはシルスポンジを貼付し、注入圧に耐え得る構造とした。

再注入後、グラウトが適切にシ - ス内の空隙に充填されたかどうかを確認するため、供試体を解体して再注入を行ったPC鋼棒をシ - スごと切り出し、グラウトの充填状況を目視観察した。目視観察の結果、初期注入グラウトには供試体軸方向に400mm程度の先流れが生じていたことを確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 衝撃弾性波法によるグラウト充填度評価

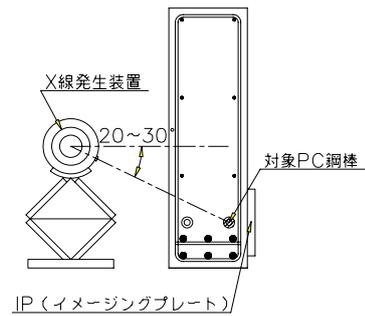


図-3 X線撮透過法による検査方法の概略
X線発生装置は管電圧290kVの低エネルギータイプのものを使用した。
露光時間は約40分とした。
X線撮影中の放射線量は専用のサーベイメーターを用いて管理し、管理区域は5mとした。

図-3 X線撮透過法による検査方法の概略

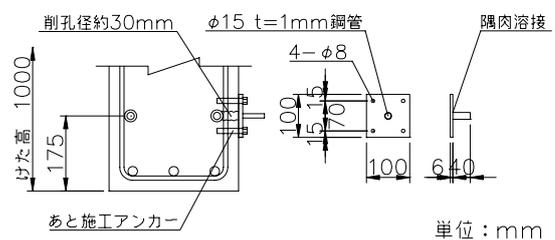


図-4 再注入用治具および設置図

グラウト充填度が異なる場合の弾性波伝播速度を図-5に示す。以下では、2名の技術者による5回の測定結果を併せて示す。なお、弾性波伝播速度は、伝播距離(PC鋼棒長 10m)を伝播時間(入力波の立ち上がりから出力波の立ち上がりまでの時間)で除して求めた。未充填部を有するPC鋼棒ではグラウト充填度が高いほど伝播速度が遅くなる傾向にあった。グラウトが部分的にでも充填されていればこの拘束によりPC鋼棒を伝わる弾性波が減衰するため、全く充填されていない場合と比べて弾性波の伝播する速度が遅くなったためと考えられる。

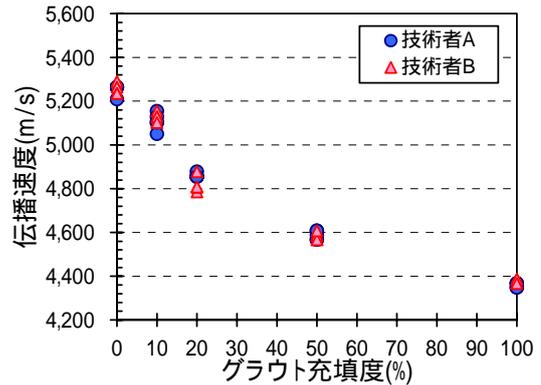


図-5 グラウト充填度と弾性波伝播速度

プレストレスの導入量が異なる場合の弾性波伝播速度を図-6に示す。ここでは、グラウトを全く充填していない状態の鋼棒Dを対象として、初期引張応力度の780N/mm²を100%として、プレストレスの導入量をα(プレストレス導入前:手締めのみ)、25, 50, 75%とした場合の測定を行った。測定者の違いにかかわらず、弾性波伝播速度はプレストレスを導入することで50~100m/sほど低下した。プレストレスの導入による弾性波伝播速度の低下は既往研究^{3), 4)}においても確認されており、本実験においても同様の傾向が得られたと考えられる。ただし、プレストレス導入量の違いによる影響はグラウト充填度の違いによる影響ほど大きくないため、PC鋼棒の残留プレストレス量の違いのみにより誤った判定を下す可能性は低いと考えられる。

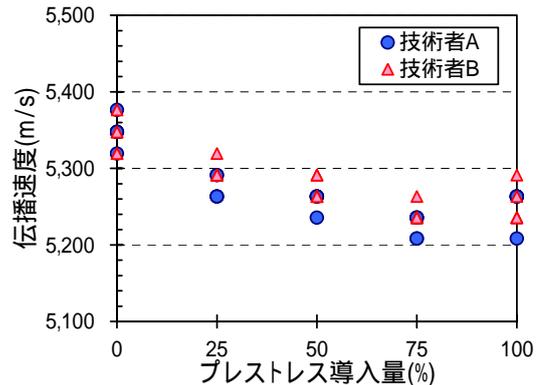


図-6 プレストレス導入量と弾性波伝播速度

シ-ス内の空隙に水を入れた場合の弾性波伝播速度を図-7に示す。ここでは、グラウトを全く充填していない状態の鋼棒Bを対象として、初期引張応力度780N/mm²のプレストレスを導入した状態で、水を入れていない場合(水充填度0%)、水でシ-ス内の空隙の半分を満たしている場合(水充填度50%)、水でシ-ス内の空隙の全てを満たしている場合(水充填度100%)の3ケースの測定を行った。いずれの場合においても、弾性波伝播速度は概ね等しくなったため、シ-ス内の空隙への水の浸入が弾性波伝播速度に及ぼす影響は小さいと考えられる。水にはグラウトのようにPC鋼棒を伝播する弾性波を減衰させるほどの拘束効果がなかったためと考えられる。

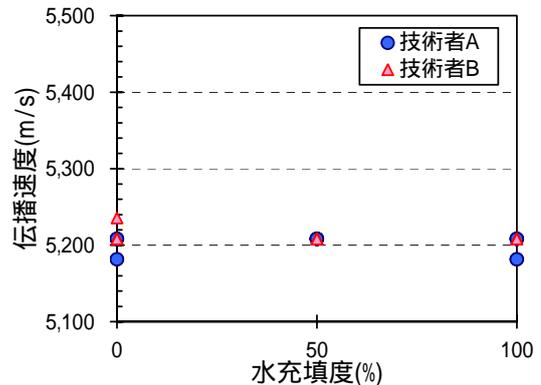


図-7 水の充填度と弾性波伝播速度

次に、検査対象のPC鋼棒の長さが異なる場合の弾性波伝播速度の測定結果を比較する。ここでは本実験で測定を行った供試体(大型供試体とする)と、これと同時に製作した小型供試体(3m×0.3m×0.3m, PC鋼棒径 17mm, シ-ス径 26mm)の測定結果を比較する。いずれも同じ配合のコンクリートを用いたものであり、鋼材比もほぼ等しい。各供試体で得られた弾性波伝播速度とグラウト充填度の関係を図-8に示す。どちらの供試体においてもグラウト充填度が高いほど弾性波伝

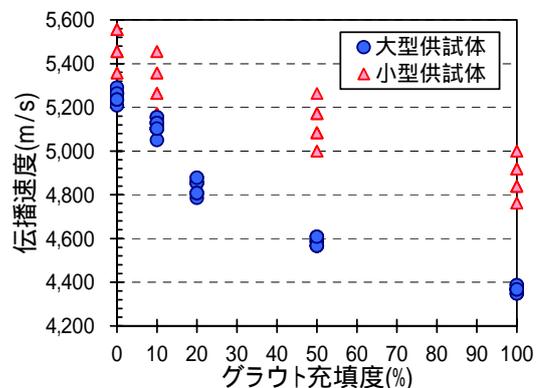


図-8 各供試体の弾性波伝播速度

播速度が遅くなり、この傾向は小型供試体よりも大型供試体で顕著である。既往の測定結果では、グラウトが完全に充填された状態での弾性波伝播速度は、6mの床版供試体⁵⁾で約4500m/s、18.3mのはり供試体⁴⁾で3700~3900m/sであった。測定対象となるPC鋼棒が長くなり弾性波の伝播経路が長くなるほど弾性波の減衰程度が大きくなったためと考えられる。また、大型供試体と比べて小型供試体では弾性波伝播速度のばらつきが大きくなった。これは、小型供試体のPC鋼棒の長さが大型供試体の3/10倍と小さく、出力波の立ち上がり時間の読み取りの差が弾性波伝播速度の大小に大きな影響を及ぼしたためと考えられる。本実験では、弾性波の計測を0.01ms間隔で行っており、出力波の到達時間は、グラウトが全く充填されていないPC鋼棒では、小型供試体で約0.55ms、大型供試体で約1.90msであった。出力波の立ち上がりが1計測点分(0.01ms)だけ異なった場合、弾性波伝播速度は小型供試体で約100m/s、大型供試体で約30m/sの差が生じるため、出力波の立ち上がり時間の読み取りの差の影響は小型供試体で大きくなる。以上のことを踏まえると、検査対象とするPC鋼棒の長さが異なるような場合には、計測間隔の設定に配慮するとともに、グラウト充填度に応じた弾性波伝播速度を一義的に決定することが困難となるため、特定の閾値を設けてグラウト充填度を判定するのではなく、対象となるPC鋼棒の弾性波伝播速度を複数回測定して相対比較することが必要である。

グラウトの未充填部への再注入が弾性波伝播速度に及ぼす影響を把握するため、再注入後の弾性波伝播速度を測定した結果を図-9に示す。再注入後の弾性波伝播速度は、いずれの場合においても当初からグラウトを完全に充填していたPC鋼棒と概ね同程度となった。再注入後に若干遅くなるようにもみられたが、出力波の立ち上がり時間の読み取りの差に起因するものではないかと考えられる。すなわち、未充填部への再注入が適切に実施されたか否かを確認する際にも弾性波伝播速度は有効な評価指標となり得ると考えられる。

3.2 X線透過法によるグラウト充填度評価

X線透過法による撮影結果を図-10に示す。ここでは、グラウトが完全に充填された鋼棒A、未充填部を有する鋼棒B、グラウトが全く充填されていない鋼棒Cの撮影結果を示す。これらの図において、シ-ス内で白い影になっている部分が充填部であり、黒い影になっている部分が未充填部である。グラウトが完全に充填されている鋼棒Aでは、鋼棒とシ-ス表面までの領域が上下とも白い影となっており、グラウトが確実に充填されていたことを確認できる。一方、未充填部を有する鋼棒Bでは、PC鋼棒と上側のシ-ス表面までの領域に黒い影が見られ、下側のシ-ス表面までの領域に白い影が見られたため、PC鋼棒の上側で未充填部の存在を確認できる。本実験では粘性の比較的低いグラウトを使用したため、充填部と未充填部の境界付近でグラウトの先流れが生じていたことを示していると考えられる。グラウトを充填していない鋼棒Cでは、鋼棒の上下両側のシ-スに黒い影が見られ、グラウトが全く充填されていないことを確認できる。

3.3 再注入工法の適用性

グラウト再注入を行うために削孔した際のPC鋼棒とシ-スの状況を図-11に示す。いずれの削孔位置に

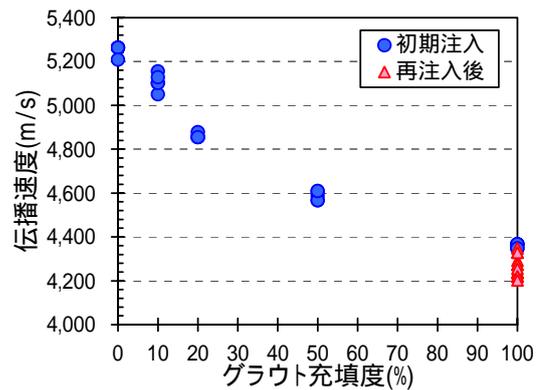


図-9 グラウト再注入後の弾性波伝播速度

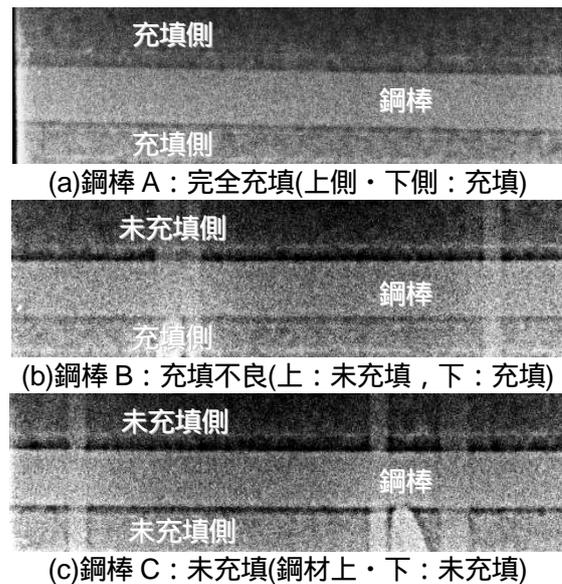


図-10 X線透過法による撮影結果

おいてもグラウトは充填されていなかった。また、グラウト再注入時の注入最大圧力は、鋼棒 C で 0.3MPa、鋼棒 B および鋼棒 D で 0.2MPa であり、初期注入時の注入最大圧力の 2～3 倍程度となったが、本実験に限って言えば、再注入を行ってもポンプの能力不足やホースの破断などの問題が生じる可能性は低いと考えられる。

再注入後のグラウト充填状況を図 - 12 に示す。充填部と未充填部の境界と想定される箇所を軸方向にコア抜きし、シ - スをグラウトごと軸方向に左右に二分割して PC 鋼棒を取り除いた状態を写真撮影した。赤色に着色したグラウトが未充填部に適切に再注入されていたことを確認できる。この結果は、いずれの再注入位置においても同様であった。本実験では、グラウトの充填不良を生じさせるために初期注入グラウトに低粘性グラウトを使用して初期注入グラウトの先流れを故意に生じさせたが、ここで製作した再注入グラウトは先流れした部分の空隙に対しても十分な再充填性を有していた。



図 - 11 削孔状況

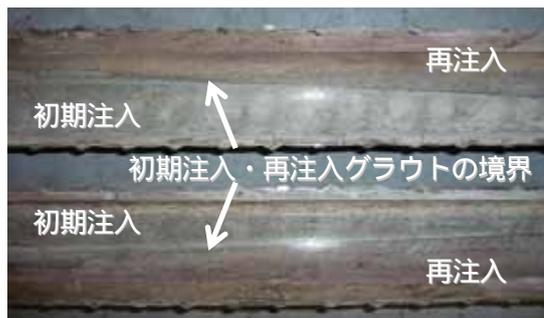


図 - 12 再注入後のグラウト充填状況

4. 結論

既設 PC 橋に使用されている PC 鋼棒を対象として、グラウト充填度の非破壊検査手法の精度と再注入工法の適用性について検討した。本研究の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 衝撃弾性波法による検査では、弾性波伝播速度を評価指標とすることでグラウト充填度を推定できた。プレストレス導入量とシ - ス内の空隙への水の浸入が弾性波伝播速度に及ぼす影響は比較的小さく、実用化にあたってはこれを無視できる可能性があると考えられた。ただし、弾性波の伝播特性は検査対象となる PC 鋼棒の長さの影響を受けるため、弾性波伝播速度に着目してグラウト充填度を推定する際には、弾性波計測の時間間隔に留意するとともに複数の PC 鋼棒の測定結果を相対比較する必要があると考えられた。
- 2) X 線透過法による検査では、グラウトの充填部と未充填部を視覚的に正確に把握できることを確認した。
- 3) 再注入工法を適用した後の PC 鋼棒をシ - スごと解体した結果、本実験で製作したグラウトの十分な再充填性を確認することができた。また、グラウトを再注入した後の PC 鋼棒の弾性波伝播速度は、グラウトが当初から完全に充填されている PC 鋼棒と同程度となった。グラウトの再注入が適切に実施されたか否かを判断する際にも、弾性波伝播速度は有効な評価指標となり得ると考えられた。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル，2006
- 2) 日本道路公団 試験研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 橋の耐久性能の向上技術に関する研究 共同研究報告書，2003
- 3) 山田和夫，黒野幸弘，中井裕司：PC 鋼棒中を伝播する弾性波の伝播特性に及ぼす緊張力の影響に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.534 - 539，1995
- 4) 葛目和宏，前野裕文，森下宣明，塚田卓，梅原秀哲：打音振動法による PC グラウト充填度評価について，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.6，pp.393 - 400，2006
- 5) 鎌田敏郎，浅野雅則，川嶋雅道，内田慎哉，六郷恵哲：弾性波による PC グラウト充填評価手法の実構造物への適用，土木学会論文集 E，Vol.62，No.3，pp.569 - 586，2006