

非破壊検査を用いたPCグラウトの点検と補修

望月 秀次*1・本間 淳史*2・上東 泰*3

1. はじめに

PC鋼材は、プレストレストコンクリート部材にプレストレスを与え構造物の耐荷力を確保するための重要な緊張材料であり、設計上必要とされる強度を有するだけでなく、長期間にわたり所定の品質を満足するものでなければならない。

PC鋼材の耐久性に大きく影響する要因の一つが腐食対策である。プレテンション方式の場合、PC鋼材はコンクリート中に直に埋め込まれているため一般的に良好な環境で鋼材が保護されているが、一方、ポストテンション方式の場合には、シースを介してコンクリート中に設置されるため空隙が生じる。その空隙（ダクト）を充填しPC鋼材を保護するとともに部材コンクリートと一体化させるものがPCグラウトである。「道路橋示方書・同解説」¹⁾によれば、「グラウトは、PC鋼材を腐食から保護し、PC鋼材と部材コンクリートの間の一体性が確保できるものでなければならない」と条文に記しており、PC構造物の耐久性を確保するために必要なグラウトの重要性を示している。

グラウト材料としては従来からセメントミルクが用いられており、PC鋼材の緊張および定着作業が完了したのち、ポンプ圧送により注入される。一見、単純と思われるグラウト作業であるが、実態としては緊張作業の完了したPC鋼材とシースの狭小な空隙を数m~数十mにわたり片押しで注入しなければならず、しかもシース

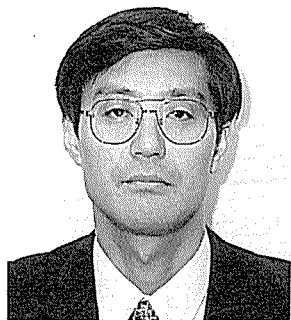
は曲線配置されていることが多く、PC鋼材の場合には途中にカップラーも存在しているなど、その注入作業における施工管理はかなり難しいものとなっている。またそのうえコンクリート中に埋め込まれているため、充填状況を確認できないという問題もある。

PCグラウトの充填不足が生じた場合、雨水等の浸入によりPC鋼材が腐食して耐久性を損なうのはもちろんのこと、腐食が進行してPC鋼材が破断した場合には構造物そのものの耐荷力が低下するという問題がある。実際に近年、国内外においてグラウト不良が原因と思われる道路橋のトラブルが報告されており、グラウトの重要性が再認識されているところである。

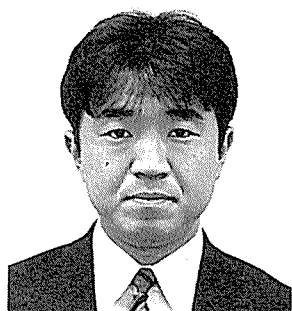
このような状況を踏まえ、日本道路公団（以下、JH）において、現在供用されている道路橋のグラウト充填状況を点検し、グラウト不良が生じている箇所については適切な対策を講じることが急務となっている。

PCグラウトの充填状況を確認するためには、部材およびシースを削孔して確認することが確実であるが、作業が難しいうえ、グラウトが健全な状態で充填されている構造物に対してはかえって損傷を与えることになる。そのため簡易な方法で精度よく充填状況を点検できる手法の確立が課題となっている。

本文では、JHにおいてこれまで研究してきたPCグラウト充填状況の非破壊検査方法についてその概要を記すとともに、PCグラウトの点検方法および補修方法の基本的考え方について述べる。



*1 Hidetsugu MOCHIZUKI
JH 日本道路公団
技術部構造技術課 課長代理



*2 Atsushi HONMA
JH 日本道路公団
技術部構造技術課



*3 Yasushi KAMIHIGASHI
JH 日本道路公団
保全交通部保全企画課

2. 非破壊検査法の種類

コンクリート構造物の非破壊検査方法については、近年、数多くの手法が開発または検討されており、目視や写真撮影による簡易な方法から、超音波や放射線（X線）を用いた科学的な手法によるものまで種々存在している。また、コンクリートの圧縮強度測定に用いられる引抜き法等の局部破壊試験も、非破壊検査法の一つと考えられる。

これらの方法はそれぞれ検査対象や精度に違いがあるため、目的や作業性などに応じて使い分ける必要がある。特にPC橋のグラウト充填状況の確認方法について

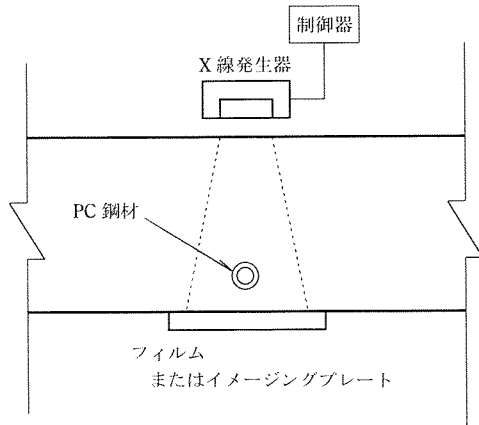


図-1 X線透過法概要図

は、これまでにいくつかの研究報告²⁾がなされているものの、まだ確立されたものはなく、対象とする構造部位（床版、主桁、横桁等）や部材の断面形状および部材厚さに応じて検討を必要とする。また高速道路橋の場合には、車両を通行させながらの点検が多く、さらに点検箇所の膨大さから考えて、作業性や費用についても考慮しなければならない。

ここではPCグラウトの充填状況の確認方法として有効と考えられるいくつかの非破壊検査方法を列挙し、それぞれの概要や特徴について述べる。

(1) X線透過法

X線透過法は、X線が物質を透過する場合、その物質の種類や厚さ等によって透過後のX線の強さが変化する性質を利用して画像を撮影する方法であり、コンクリート構造物の非破壊検査方法として、配筋状態や豆板の状況などを点検するためによく用いられている方法である。

画像の撮影方法としては、部材を透過したX線を直接、工業用フィルムに撮影する方法（以下、「X線フィルム法」という）が一般的に行われており、グラウトの充填状況は撮影された画像のコントラストの違いによって識別される。

X線フィルム法により撮影された画像の例を写真-1および2に示す。これによれば、グラウトが充填されて

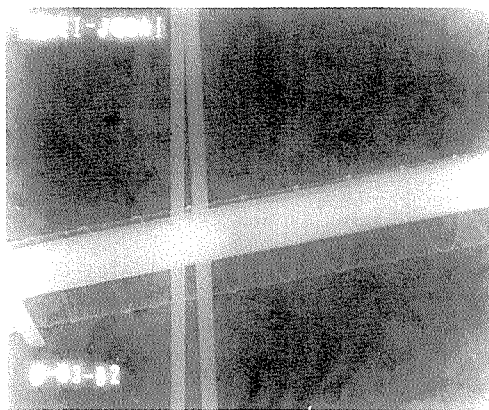


写真-1 PCグラウトが充填されている例 (X線透過法)

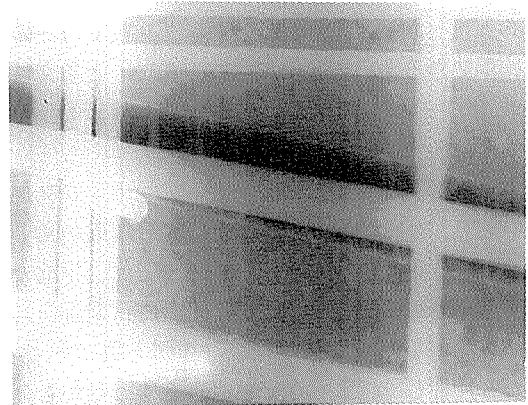
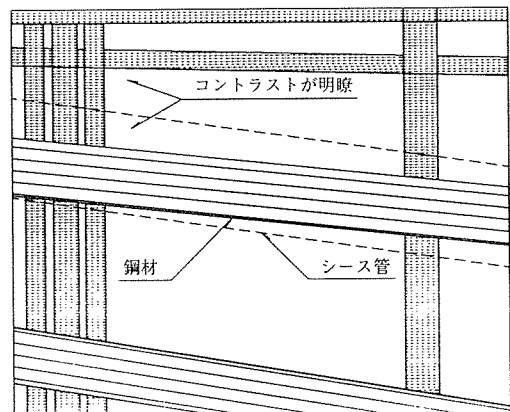
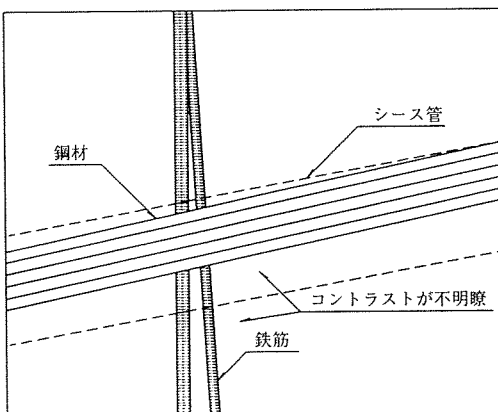


写真-2 PCグラウトが不良な例 (X線透過法)



いる場合はシースの空隙は周りのコンクリートと同様に白く写るが、充填されていない場合には X 線の透過が良好なため黒く（濃く）写っていることがわかる。

X 線フィルム法による画像は、透過する部材が厚い場合（最大で 30~40 cm 程度）には不鮮明になり識別が困難となる。それを超える場合の撮影方法として現在、コンピュータによる画像処理を用いた方法が開発されている。これは工業用フィルムの代わりにイメージング・プレート (IP) と呼ばれる版を配置し、撮影した画像をデジタル処理して充填状況を観察する方法（以下「X 線 IP 法」という）であり、この方法によれば、最大で 50 cm 程度までは識別可能となる（ちなみに γ 線を用いた場合の透過能力としては、フィルム法および IP 法においてそれぞれ 50 cm および 60 cm 程度と言われている）。

X 線透過法は、状況を画像で観察できるため精度の高い方法と考えられるが、フィルム法および IP 法のいずれの場合も、X 線発生器とフィルムまたは IP によって部材を挟む必要があるため、床版の横締め PC 鋼材の点検においては交通規制が必要となる。したがって通常は主桁や横桁の点検に用いることが適当と思われるが、その場合においても撮影できる部材厚に限界があるため、ウェブや中間横桁などの比較的薄い部材に限られると考えられる。また、X 線を扱うので安全管理が重要であり、各種の規制や資格等の法令に従い慎重に作業しなければならない。

なお最近では、X 線透過法のほかに、イメージ・インテンシファイア (II) と呼ばれる検出媒体を用いて連続的に X 線の透視像を判別し、ビデオに記録する方法（リアルタイム X 線透視法）も考案されているが、現時点では試作段階であり、X 線の透視能力や解像度等について検証を必要とする。

(2) 打音振動法

コンクリート構造物に超音波や衝撃波を与えて、構造物の状態や欠陥を判定する方法は良く用いられており、そのいくつかを以下に挙げる。

1) 打音法

ハンマー等で部材を打撃し、その打撃音の違いや

周波数によりコンクリートのジャンカや空洞、あるいは表面仕上げ材の剝離等を測定する方法であり、主に部材表面の点検に用いられる。

2) 衝撃弾性波法

打音法よりも大きな衝撃波（縦波）を与える方法であるため構造物ではあまり用いられないが、振幅が大きく波長も長い場合マスコンクリートには適する。厚さや内部欠陥の点検に用いるが、空隙等の位置を特定することは困難である。

3) 超音波法

構造物の非破壊検査法の代表的な手法の一つである。発信装置から超音波パルス（縦波、横波）を与え、受信されたパルスの伝播時間や速度、さらには受信波形の解析によって部材の均質性や内部欠陥を測定する。PC 桁などのグラウト充填状況を確認する方法として有効な方法と考えられるが、発信子および受信子で部材を挟む必要があるため、床版の横締め PC 鋼材などの調査に対しては適用が困難である。

4) AE 法

部材内部の微小破壊によって発生する弾性波（アコースティック・エミッション）をセンサーにより受信して測定する方法であり、載荷時におけるひび割れ発生モニターなどに用いられる。

これらの非破壊検査方法のうち、現在、JH が PC グラウト充填状況の有効な点検方法として検討している方法は、打音法に AE センサーを用いた方法である³⁾（以下「打音振動法」という）。これは PC 鋼材両端の定着具近傍に AE センサーを取り付け、片方の定着具近傍をハンマーで打撃し、その入力信号と出力信号を測定する方法である。図-3 に PC 鋼棒使用箇所において測定した、波形と周波数分布の例を示す。

ハンマーにより与えられた打撃波（縦波）は、PC 鋼材を伝播し、出力側の定着具で増幅されて受信される。この時、グラウトが充填されている場合には、振動エネルギーが部材に吸収されて減衰するため出力波は小さなものとなるが、グラウトが充填されていない場合には減衰が小さいために出力波も大きくなる。図-3 による

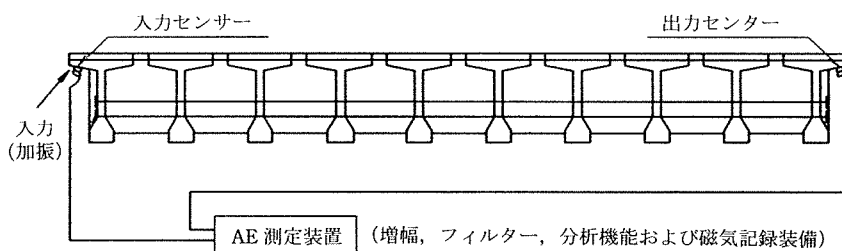
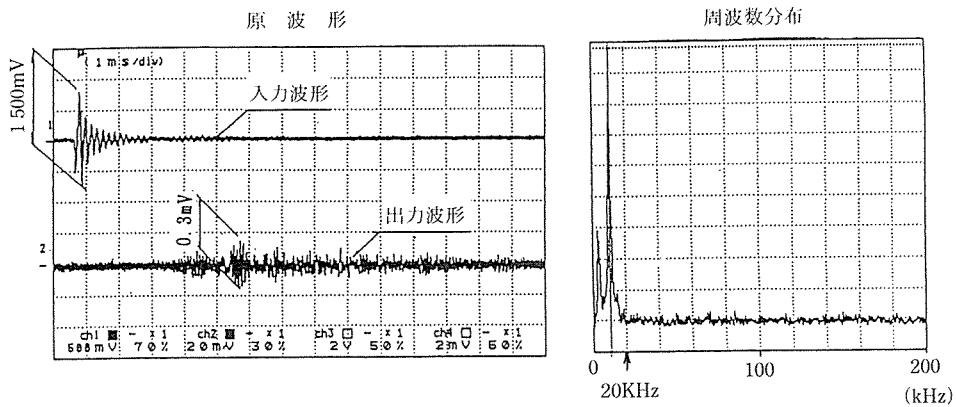
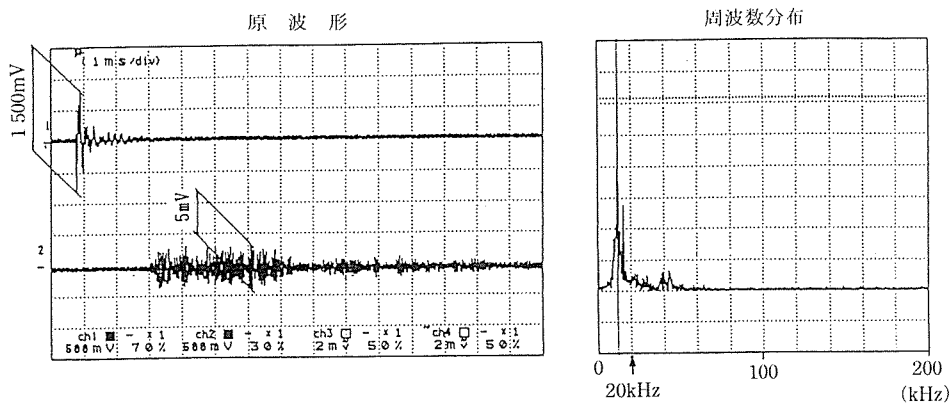


図-2 打音振動法概要図

グラウトが充填されている場合



グラウトが部分的に充填されている場合



グラウトが充填されていない場合

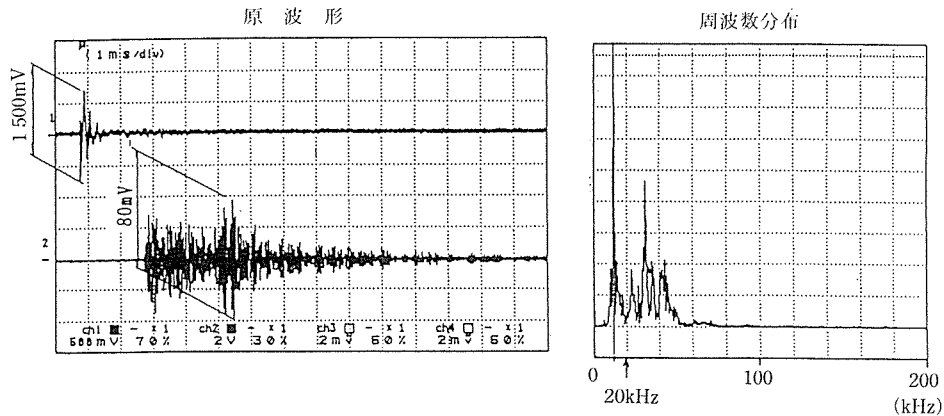


図-3 伝達波形解析結果例

と、出力波形の最大振幅において、グラウトが充填されている場合とされていない場合で30倍近くの差が出ており、部分的に充填されている場合にはその中間の大きさとなっていることがわかる。

次に図-3において出力波形の周波数分布を見るとより顕著な違いが見られている。グラウトが充填されている場合には10 kHz付近をピークに20 kHz以下に集中しているが、不足している場合には20 kHz以上の成分も若干見られる。さらに充填されていない場合には分布がかなりばらつき、ピークも30 kHz付近に現れている

ことがわかる。

打音振動法は簡易な方法で測定できるうえ、特に床版の横締めPC鋼材の点検においては、X線透過法と異なり交通規制を必要としないため、グラウトの充填状況を確認する方法としてかなり有効な方法であると考えられる。現在のところ、床版や横桁の横締めPC鋼棒においてかなり精度よく測定できているが、PC鋼線や鋼より線の測定を含め、主桁への適用についてはまだ実績がほとんどない。またグラウトが不十分な箇所の特定はできないため、再注入や補修を行う場合にはX線透過法

や削孔などの他の方法を併用する必要がある。その他にもカップラーの有無による違い、PC鋼材が破断している場合の出力信号の特徴、ハンマーによる打撃強さのばらつきなど、今後検討していく課題は少なくない。

(3) 赤外線法

赤外線法は、表面温度分布の差異によって構造物内の欠陥を調べる方法である。コンクリート表面の剝離や内部に空洞が生じている場合には表面の温度分布に影響を与えることから、赤外線センサーにより表面温度を検知し、その映像から視覚的に判定する方法であり、構造物より離れた位置から非接触で広範囲の計測が可能である。

PCグラウトの点検においては、シーす内に空隙が存在する場合に、それがコンクリート表面の局所的な温度変化となって現れる可能性が考えられるが、実際には空隙の位置や大きさ、あるいはコンクリート表面からの距離によっては判定が困難である。

赤外線法を用いたPCグラウトの点検はまだ実績がなく、また気象条件や周辺環境の温度変化等の影響を受け

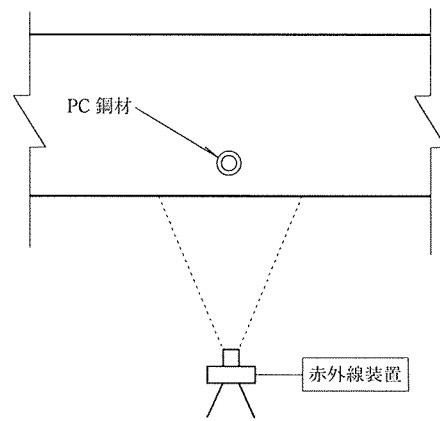


図-4 赤外線法概要図

やすいため今後研究していく必要があるが、当面、定着部の跡埋めモルタルの剝離や漏水の有無等、概略の点検手法としては有効であると考えられる。

3. 点検および調査の方法

PC構造物を健全な状態で維持管理していくためには、定期的な点検が重要である。点検によって現状を的

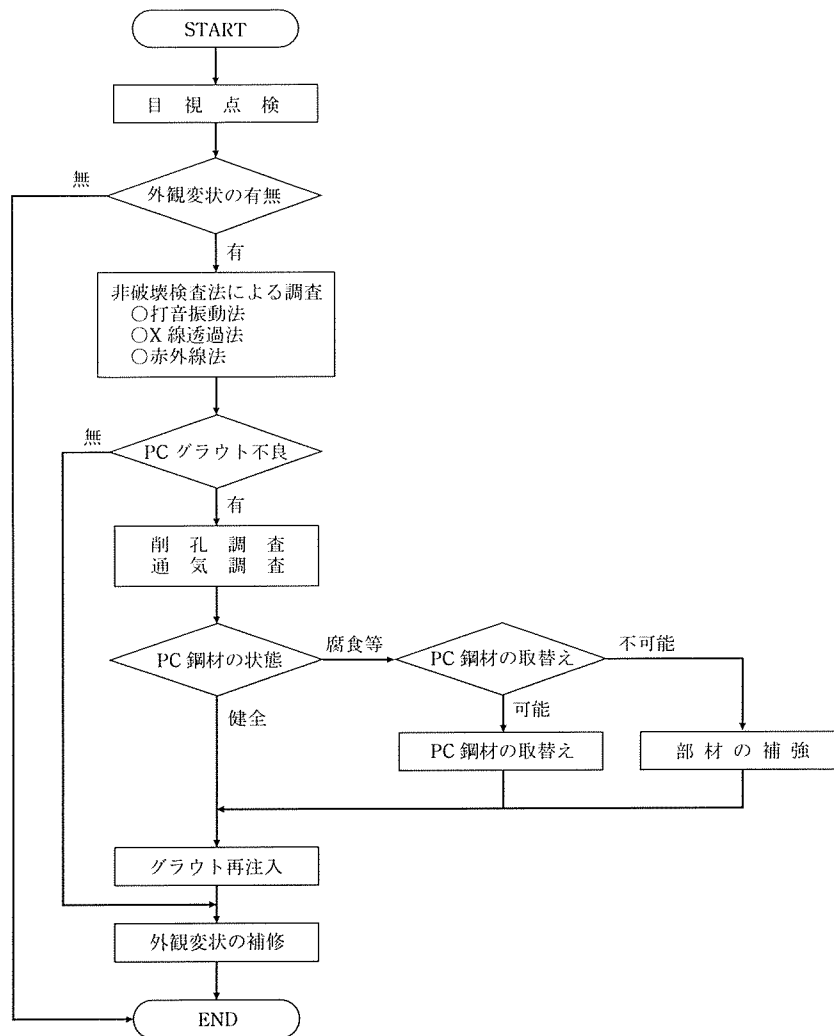


図-5 PC鋼材の点検・補修の流れ

確に把握し、構造物の安全性や使用性に影響を及ぼすと考えられる損傷や変状を早期に発見することにより、適切な措置を講じる必要がある。

前述のような非破壊検査法が確立されても、数多くのPC構造物に配置された無数のPC鋼材をすべて点検することは非常に困難であるため、定期的に効率よく点検していくことが必要となる。ここでは点検および調査方法に関するJHの基本的な考え方を述べる。

(1) 目視点検

PC構造物の点検方法の基本は、目視による観察である。構造物の外観を定期的に観察することにより、耐久性に有害な悪影響を及ぼすと考えられる損傷や外観変状を発見し、詳細調査の実施や補修の必要性を判断する。

外観変状の代表的なものは、特に定着部付近やT桁の間詰めなど後施工を行った箇所に現れやすい。当該箇所によく見られる変状は漏水や漏水痕、錆汁、遊離石灰であり、場合によっては被りコンクリートの剝離や浮きが生じていることもある。また主ケーブルに沿ってひび割れが発生し、そこから漏水痕や遊離石灰が見られることもあり、いずれの変状もグラウトの充填が不十分である可能性があるため、外観変状を発見した場合には詳細な調査が必要となる。

(2) 非破壊検査法による調査

外観変状が発見された構造物に対しては、PCグラウトの充填状況を確認する必要がある。

検査方法としては、ここでは「2. 非破壊検査法の種類」で述べたように、床版および横桁の横締めPC鋼材については打音振動法を用い、主桁のウェブについてはX線透過法を用いることを基本に考える。なお主桁のフランジについては部材が厚いためX線透過法による測定が難しいが、ケーブルの配置形状から考えて、下フランジで充填不足が生じている場合にはウェブにおいても充填不足が生じていると考えられるため、この段階では調査対象から省略してもよいであろう。

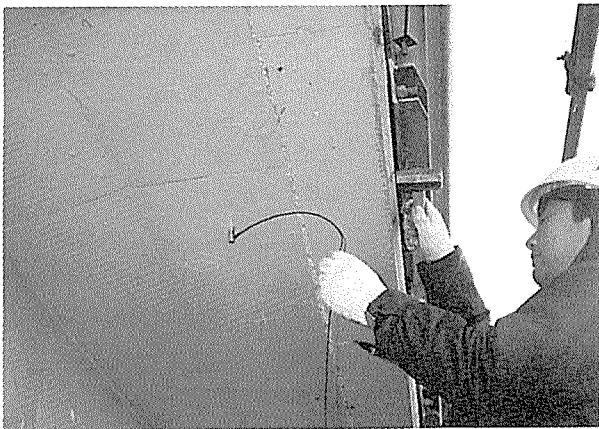


写真-3 打音振動法による床版横締めの調査



写真-4 X線透過法による主桁の調査

非破壊検査の実施にあたっては、効率よく調査を行うため、事前に設計図書を照査し、PC鋼材の配置状況やカップラーの有無など、グラウト不足の生じやすい箇所をチェックして計画的に調査する必要がある。また施工誤差などを考慮して、PC鋼材の位置出しが必要となるが、その場合にはレーダー法²⁾を用いるのがよい。

(3) 削孔調査

非破壊検査によりグラウトの充填不足が生じていると判断された場合、補修計画を含めて、空隙の生じている箇所および範囲を確認する必要がある。これは、それぞれの非破壊検査法の精度のほかに、打音振動法では空隙の生じている箇所および大きさがわからないこと、X線透過法では局部的にしかわからないことによる。したがってこの場合には、削孔により直接的に調査する必要がある。

削孔調査では、目視観察によるほか、通気により空隙の有無や範囲を確認する。またCCDカメラやファイバースコープを用いてシース内部を観察し、PC鋼材の状態等を確認しておくことも必要である。

削孔調査を行う場合、削孔によりPC鋼材を傷つけることのないよう慎重に作業しなければならない。その時に問題となるのが、通常グラウトが不十分な場合はシースの上側に空隙ができるため、特に床版の横締めPC鋼



(a) PC鋼材が錆びている (b) PC鋼材に結露が付着している

写真-5 グラウト不良の例(ファイバースコープによる)

材などのように、下側からの削孔作業では空隙の有無が判断できないことである。また、シース内の PC 鋼材が偏心してシースと接触している場合にはグラウトの有無自体も判断できない可能性がある。したがって削孔調査にあたっては、部材に過度の損傷を与えない範囲で複数の削孔を行うことが望ましく、併せて通気調査を実施するなどして、入念に調査する必要がある。

4. 補修方法

(1) PC グラウトの再注入

非破壊検査および削孔調査の結果をもとに、グラウト未充填箇所にも再注入を行う。

この時に問題となることは、もともとシース内の空隙が狭くグラウトの注入作業が難しいが、再注入においては、グラウトが部分的に充填されてさらに空隙が狭くなっていることである。またシースが潰れていたり、あるいはグラウトが部分的に存在する場合等には、ところどころ空隙が閉塞していることも考えられるため、再注入作業はかなり慎重に行わなければならない。

現在、グラウトの充填性能を向上させるために、高性能減水型のグラウトやノンブリージングタイプのグラウトが開発されており、再注入にあたっては、これらのグラウト材料を用いて充填性を確保することが望ましいと考えられる⁴⁾。

(2) PC 鋼材の取替えまたは補強

詳細調査の結果によって、PC 鋼材が腐食していたり、あるいは破断している場合には PC 鋼材の取替えが必要になる。

PC 鋼材の取替え作業においては、定着部のはつり出し、緊張力の解放、鋼材および定着具の撤去、シース内の清掃等が必要になる。この場合、PC 鋼より線やカップラーのある PC 鋼棒の場合には撤去が困難ことが多い。したがってその場合には、耐荷力を照査し、別途適切な補強を行わなければならない。

補強方法としては、鋼板などを接着して補強する方法や外ケーブルにより補強する方法が考えられるが、近年の橋梁の老朽化対策、あるいは車両制限令の改正にともなう車両大型化対策などの事例を参考に、適切な工法を選定する必要がある。

(3) 変状の補修

PC グラウトの有無に関わらず、PC 構造物の耐久性に影響する変状については補修しておく必要がある。特に定着部付近の漏水や遊離石灰、あるいは跡埋めモルタルの剝離や浮きについては、PC 鋼材の腐食原因となるため十分に補修しておかなければならない。

補修方法については、漏水箇所等に対しては樹脂注入やパテ塗り、ライニング等の防水処理、定着部の跡埋め

モルタルの変状に対しては、はつり出し再施工など、それぞれの変状箇所や状況に応じて適切な処置方法を選定する。

5. 今後の課題

(1) 外観変状との相関について

これまでの研究により、PC グラウトの非破壊検査法として打音振動法や X 線透過法が有効であることが判断される。

しかしながら通常の点検管理においては、既設 PC 構造物の、しかも縦横に無数に配置された PC 鋼材のすべてを検査することは、かなりの労力を必要とするため困難である。したがって実際には外観変状の生じたものを中心に、非破壊検査法などの詳細調査を実施することが一般的になる。これは外観変状が生じる原因として、構造上の問題や環境条件等に影響されるため一概には判断できないが、一般的には施工の良否によるところが大きいことによる。したがって変状の生じた構造物のグラウト充填状況は特に注意しなければならない、また仮に充填されていたとしても水や塩分等の腐食因子が侵入している可能性があるため、詳細に調査しておく必要がある。

ただしこの場合に問題となるのは、外観変状とグラウト充填状況が必ずしも相関していないことである。実際に、グラウト不良の PC 構造物でも外観変状が現れない事例は少なくない。したがって外観変状の生じていないものであっても、同時期に施工された他の構造物等の状況をみながら、適宜検査を実施していく必要があると考える。

(2) 打音振動法の課題について

有効と考えられる非破壊検査法のうち、X 線透過法は実績もあり、充填状況を画像として観察できるため精度の高い方法であるが、通常の点検においては、簡易な測定装置で作業が容易に行え、かつ費用の安価な打音振動法を可能な限り活用することが望ましい。

打音振動法は、主に I 桁や T 桁の床版および横桁の横締め PC 鋼材の検査に適用しているが、今後、主桁への適用が一つの大きな課題となる。これは I 桁や T 桁だけでなく中空床版や箱桁等、他の構造形式も含めて検討していく課題であり、そのためには定着具（特にくさび式）も含めた PC 鋼線や PC 鋼より線の場合の測定精度について検証していくことが必要になる。定着部近傍からハンマーの打撃により入力された弾性波は、縦波として鋼材を伝播し、出力側の AE センサーで受信されるわけであるが、鋼線のように束になった鋼材、または鋼より線のように捻れた鋼材でもうまく弾性波が伝播されるのかどうか、あるいは定着具がプレート型ではなくコーンのような形状のものでも AE センサーがうまく

受信できるのか否かなどについて研究しなければならない。

また打音振動法による測定結果の分析は、2. (2) で述べたように、フーリエ変換による周波数解析を行うことで精度が向上するが、周波数解析は作業が大変であるため、すべてのデータを解析することは合理的とは言い難い。したがって X 線や削孔を用いた詳細調査の必要性については、出力信号の大きさである程度概略の判断ができるように、その基準や目安を整備する必要があると考えられる。

(3) PC グラウトの再注入における問題

PC グラウトの充填不足が生じている箇所には再注入を行うが、4. (1) で述べたように、実際の作業は困難が予想される。充填性能の改善策についてはグラウト材の改良等、別途検討するものとして、ここではグラウトの再注入におけるその他の問題点について述べる。

その一つは、シース内の洗浄である。PC 鋼材とグラウトの十分な付着を得るためには、シース内の汚れや PC 鋼材の錆等を洗浄により除去することが望ましいが、残留水の除去や排水の処理が難しいため、一概にシース内を洗浄することは問題があると考えられる。

もう一つの問題点は、充填状況の確認である。グラウトの再注入作業は、空隙が狭いことや削孔位置に制約があるため難しいことはこれまで述べたとおりであるが、さらに完全に充填されたか否かを判断する方法がないという問題がある。通常のグラウト作業であれば空隙量がわかっているので、その注入量（空袋検査）によってある程度の判断が可能であるが、再注入の場合には空隙の量が不明確であるためそれが難しい。また、打音振動法を用いることも考えられるが、グラウトが固まらない状態での検査については今後検証する必要がある。

PC グラウトの再注入の目的は、グラウトの充填不足を解消し、PC 鋼材を健全な状態で保護することにあるため、これらの問題点は非破壊検査法の確立と併せて早急に解決しなければならない課題である。

6. おわりに

本文では、既設 PC 構造物の点検管理方法について、現在までの JH における検査状況を述べた。

PC グラウトの充填状況の確認方法が確立されていない中で、膨大な数の PC 鋼材を効率よく合理的に点検し、適切に補修していくことの重要性和難しさは周知のとおりであり、その一つの手段として X 線透過法および打音振動法の有効性について記載したが、まだまだ検討すべき課題は多く、また充填不足が判明しても、その補修方法については慎重に検討していく必要がある。

しかしながら、PC グラウトに起因する PC 構造物の耐久性確保において、最も重要なことは工事段階、すなわち確実な施工にあることは言うまでもない。本文の冒頭で述べたように、PC グラウトの意義と重要性について再認識し、少なくとも人為的なミスは避けなければならない。またさらに現状における反省を踏まえて、既設 PC 構造物の維持管理手法の確立と同時に、新設構造物のグラウトの充填性能を改善する方策についても検討が必要な時期にきていると考えられる。その中には、PC グラウトの材料、設計、施工全般にわたる見直しだけでなく、ノングラウト PC 鋼材や新材料の採用など PC 鋼材の防食方法自体の見直しも含まれる。

これらの観点から、PC 構造物の耐久性向上のために JH として引き続き研究していく予定であり、その内容がまとまり次第、機会があれば報告したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅲ．コンクリート橋編、平成 6 年 2 月
- 2) 藤井、宮川：PC グラウト充填状況の非破壊探査法、土木学会論文集、第 402 号/V-10、1989 年 2 月
- 3) 魚本、首藤：AE 計測によるプレストレストコンクリートのシース内グラウト充填度判定方法、生産研究、39 巻 4 号、1987 年 4 月
- 4) 小林、宮川他：PC 構造物のグラウト不良とその補修のための後注入材料に関する実験、プレストレストコンクリート、Vol. 36, No. 3, 1994 年 5 月

【1995 年 8 月 30 日受付】