

診断と補修・補強の最新技術

— PC 鉄道橋における現状と課題 —

谷村 幸裕*

戦後から現在に至るまでの間、スパンの比較的大きい鉄道橋には、主にプレストレストコンクリート（PC）構造が採用されており、多数のPC桁が建設されてきた。PC構造は、導入初期には耐久性が高く維持管理を必要としないと考えられてきたが、建設より長期間経過した構造物が増加するとともに、一部の構造物で変状の発生がみられるようになり、適切な診断や補修、補強技術が必要とされるようになってきた。本稿では、PC鉄道橋の建設と維持管理の歴史と現状を概説し、PC構造特有の劣化問題としてグラウト不良に起因する劣化を対象とし、グラウト不良やPC鋼材の腐食に伴う診断ならびに補修、補強技術の現状と課題について述べる。

キーワード：維持管理，グラウト不良，腐食，非破壊検査，補修，補強

1. はじめに

これまで、プレストレストコンクリート（PC）構造は鉄道橋梁に多く用いられてきており、比較的スパンの大きい桁等に適用されている。導入初期には、PC構造は耐久性が高く維持管理を必要としないとされてきたが、建設より長期間経過した構造物が増加するとともに、変状の発生が懸念されるようになってきている。本稿では、PC鉄道橋における診断と補修、補強に関し、PC構造特有の維持管理上の問題であるグラウト不良に起因する劣化を中心に最近の状況について述べる。

2. PC 鉄道橋の現状

2.1 PC 鉄道橋建設の歴史^{1)~4)}

PC鉄道橋建設の研究は戦前より始められてきたが、最初の本格的なPC桁は、昭和29年に建設された国鉄信楽線（現、信楽高原鉄道）第一大戸川橋梁である。本橋梁は、建設後も種々の調査が実施されているが、現在でも健全な状態を維持していることが確認されている⁵⁾。

昭和30年代以降、日本は高度経済成長期となり、各地で鉄道の建設、改良が行われ、多数のPC桁が建設された。新幹線の建設においては、鉄桁の列車走行に伴う騒音が大きな社会問題となり、昭和40年代に建設された山陽新幹線以降は、ほとんどの長大橋はPC構造となった。

2.2 PC 鉄道橋の変状と対策

PC鉄道橋の建設が進められるとともに、変状を生じる事例が報告されるようになってきた。1970年頃より、4本の主桁を並列したスパン30mのPC桁において、建設後5年余り経過して横締めPC鋼棒が破断して突出するなど⁶⁾、グラウト不良に伴うPC鋼材の腐食が問題となった。その後も、撤去したPC下路桁の解体調査により鉛直PC鋼棒のグラウトの不完全な状況とそれに伴うPC鋼棒の腐食破断、主ケーブル定着部でのグラウトの不完全な状況が発見された²⁾。さらには鋼棒破断によりかぶりコンクリートと鋼棒が地表に落下するという事象も生じている⁷⁾。そして、最近でも横締めPC鋼材の突出が各地で報告されているほか、主鋼材が破断する事例も報告されている⁸⁾。この対策として、新たに建設されるPC桁に、鉛直PC鋼棒や主ケーブルの上縁定着を用いない設計にしたり、グラウトにはノンブリーディングタイプのグラウトを用いるなどの対策がとられた。また、既設のPC桁についても、種々の対策が実施されるようになってきている。

一方、グラウト不良以外を原因とする変状としては、アルカリ骨材反応によるひび割れを生じた事例^{9)~11)}や、桁が反り上がった事例⁷⁾、海岸近くに位置する橋梁で塩害による損傷を受け、電気防食により対策された事例^{12)~16)}が報告されている。

このように、PC鉄道橋の維持管理で問題になるケースはさまざまであるが、このうち、PC構造特有であるグラウト不良に起因する課題に関する対策技術について、以下に詳述する。

3. PC 鋼材のグラウト不良、破断の診断

3.1 PC グラウト充填状況の調査

PCグラウトは、ノンブリーディングタイプ以外の材料ではシース内に空隙が残りやすいことが知られるようになり、最近ではノンブリーディングタイプのグラウトが使用されるようになってきている。しかし、1984年に国鉄の施工基準が改訂されるまで、ブリーディング率5%まで許



* Yukihiko TANIMURA

鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室長

容されており、この時期に建設された PC 桁には、きちんと施工されていてもグラウト充てん不良が生じている可能性がある。グラウト充てん不良は、外観では判別がつかないため、表面より削孔して調査する必要がある（写真 - 1）。しかし、削孔調査は、構造物に損傷を与えるため、X線透過法、インパクトエコー法、広帯域超音波法などの非破壊調査法が提案されており、適用性について検討が進められている。



写真 - 1 削孔調査で確認されたグラウト充てん不良例

X線透過法は、対象物に一定時間放射線（X線）を照射し、フィルムを感光させることで空洞の有無を判定する方法である。PC 桁に適用した場合、部材厚 300～400 mm 程度で、シースの重複がなければ、可搬型の X線撮影装置により精度の高い調査が可能になるが、一般的な PC 桁では部材厚が大きいため判定が困難である。また、放射線を使用するため放射線管理区域を設定し、立ち入り禁止とする必要があるなどの課題があり、現場で適用するに至っていない。

インパクトエコー法は、コンクリート表面に加速度センサーを設置し、その近傍を鋼球で打撃し、反射波を受信することで、弾性波の反射深さを測定し、シース内部の空洞の有無を判定する方法である。しかし、鉄筋からの反射波とシースからの反射波が重なるなど、種々の攪乱要因によって判定精度が低下する場合があります、現場で適用するに至っていない。

広帯域超音波法は、一対の発信と受信探触子を調査対象シースに沿ってコンクリート表面に配置し、探触子を移動させながら測定を行い、シース付近の鉄筋の存在、コンクリートの不均一性等により生じる反射波が受信波に重畳する影響を極力取り除くため、得られた複数の測定波を時系列上で加算平均した波を受信波とし、グラウト充てんの程度によりシース反射波の卓越振動数が異なる現象を利用して判定する方法である。しかし、判定方法の客観性に課題があり、現場で適用するには判定基準を明らかにする必要ある。

このように、非破壊の方法のみでグラウト不良を十分調査できる状況になく、実構造物への適用には解決しなければならない課題が多く残されている。しかし、削孔調査のみに依存して多数の PC 桁を調査することは困難であり、実用的かつ精度の高い調査法を確立していく必要がある。

3.2 PC 鋼材破断の検知

グラウト不良の調査は前述のとおり、簡易かつ精度のよい調査法がないうえ、PC 桁は横桁の交差部や複数の PC 鋼材が交差する部分などは調査が困難であり、すべての PC 桁のすべての部分でグラウトの充てんを確認することは事実上不可能である。したがって、PC 鋼材の腐食による破断を完全に防止することは難しいが、PC 桁には多数の PC 鋼材が配置されており、数本の破断で構造物の安全性に影響することはないものと考えられる。そこで、鋼材破断を前提として、構造物の安全性に影響が生じない段階で検知して、補強等の有効な対策を講じることを考えておくことも重要であると考えられる。

PC 主鋼材が破断して生じると考えられる現象としては、コンクリートのひずみの変化、たわみの増加、固有振動数の変化、ひび割れの発生等が考えられる。しかし、鋼材破断量の比較的小さい時期には、これらの変化が小さく、検知困難であることが考えられ、実用的にはひび割れの発生やそれ以降の状態変化を検知することが有効と考えられる。しかし、ひび割れ発生時にはある程度の PC 鋼材が破断しているものと考えられ、破断の進行によっては安全性に影響する可能性があるため、できるかぎり早期にひび割れの発生を検知する必要がある。また、長期のモニタリングとなるため、低コストかつ耐久性の高い方法を用いる必要があり、今後の技術開発が期待される。

3.3 鋼材破断した PC 桁の残存耐力評価

PC 鋼材が破断しても、破断量が比較的小さい段階では安全性に影響が少ないものと考えられるが、適切に維持管理するためには、鋼材破断後の PC 桁の残存耐力を適切に評価する必要がある。また、グラウト不良を生じやすい位置は桁端部に多く、鋼材の破断により桁端部のプレストレスが消失しても、スパン中央部では残存していることも考えられ、このような場合の PC 桁の挙動を把握し、合理的な維持管理を実施する必要がある。

ブリーディング等の影響により、シース内に部分的に空隙が生じ、この部分で PC 鋼材が腐食し破断した場合、破断箇所付近ではプレストレスが消失するが、グラウトの充てんされた範囲では鋼材との付着により、プレストレスが残存しているものと考えられる。ところで、プレテンション方式では PC 鋼材とコンクリートの付着によりプレストレスを導入しており、ポストテンション方式でグラウト不良により PC 鋼材が破断した場合にも同様の原理でプレストレスが残存するものと考えられるが、鋼材破断時に衝撃が加わる影響も考慮する必要がある。そこで、鋼材破断を模擬した実験（写真 - 2）が実施され、鋼材破断後の鋼材ひずみ分布の算定法が提案されている¹⁷⁾。また、鋼材破断した PC 梁の載荷実験が実施され、部材の残存耐力評価法が提案されている¹⁸⁾。さらに、実物大 PC 鉄道橋の模型を用いた載荷実験（写真 - 3）が実施され、鋼材破断時の挙動や破断後の残存耐力が明らかにされている¹⁹⁾。

このように、鋼材が破断した PC 鉄道橋の挙動を明らかにする取組みが進められてきており、この成果を活用して、構造物の安全性に影響する事態が生じる前に、適切な時期に適切な方法で措置を実施することができるよう、



写真 - 2 鋼材破断実験状況



写真 - 3 実物大 PC 鉄道橋模型の載荷実験状況

的確な調査、診断、モニタリングのための技術開発を進めていくことが期待されている。

4. グラウト不良 PC 桁の補修・補強

4.1 PC グラウト再注入²⁰⁾

PC 桁において、グラウト充てんが不十分である箇所が発見された場合には、グラウト再注入を実施している。グラウト再注入は、PC 鋼材の腐食進行防止等を目的としているが、建設後長期間経過している場合でも、PC 鋼材の腐食が軽微である場合は、グラウト再注入により PC 鋼材の腐食の進行防止が期待できる²¹⁾。

グラウト再注入は、図 - 1 に示す手順により実施される。まず、電磁波法により鋼材位置の探査を実施し、桁側面に再注入孔を削孔する。本削孔に先立ち、グラウトの充てん状況を確認するためφ30～35mmの径で電動コンクリートハンマードリル等を用いて先進削孔を実施する。グラウト充てん不良が確認された場合には、φ80mmの再注入孔をコアドリルにより本削孔する。削孔にあたっては PC 鋼材を損傷しないように細心の注意を払う必要があり、コアドリルによる削孔はシースの約10mm程度手前で中断し、以降はタガネ等による手はつりが望ましいとされている。

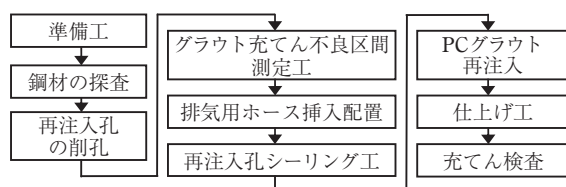


図 - 1 PC グラウト再注入フロー

グラウト再注入に先立ち、充てん不良区間を測定し、再注入すべき範囲を把握する。測定方法は、再注入孔から検測尺をシース内に挿入し、直接長さを測定する方法が用いられる(図 - 2)。

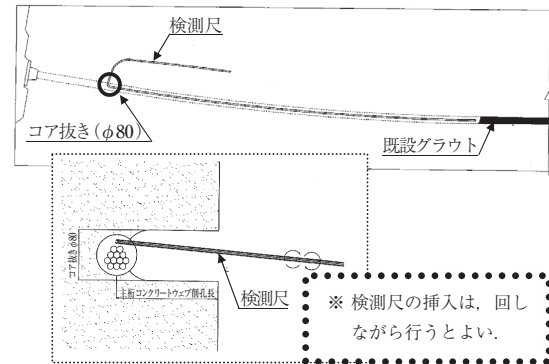
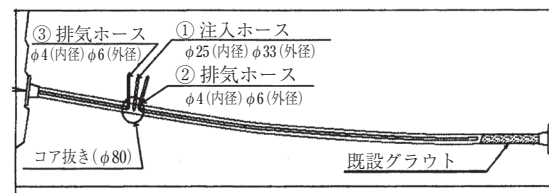
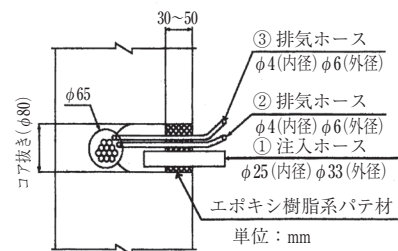


図 - 2 検測尺による測定概要²⁰⁾

再注入孔は、グラウト充てん不良部1区画につき1箇所とする。従来は2箇所削孔し、孔間の通気を確認した後に、グラウトを再注入する方法が用いられてきたが、孔間の通気を確認できない場合には通気を確認できるまで別の孔を削孔する必要がある、補修作業が煩雑になること、再注入により孔間には確実にグラウトが充てんされるが、孔間外の範囲においては不明であること等の課題があり、改善が図られたものである²²⁾。再注入孔には、排気用ホースをグラウト充てん不良区間の先端まで到達させるように挿入し、同じ孔に注入用ホースも配置する(図 - 3)。



(a) 側面図



(b) 注入孔部横断面図

図 - 3 排気用ホース、注入用ホースの配置例²²⁾

再注入に用いるグラウト材は、ノンブリーディングタイプとし、できるだけ粘性が低いタイプとするのがよいことが、試験により確認されている²²⁾。再注入作業はグラウトの可使用時間内に継続して行い、排気用ホースから排出される空気やグラウトの状態を確認し、再注入終了後、再注入

孔をポリマーセメント等で断面修復し、コンクリート表面を平滑に仕上げる。

グラウト再注入完了後、充てん状況の確認として、計画注入量と実際に注入されたグラウト量を比較して確認する。このほかに、非破壊調査を活用することも考えられるが、充てん不良の調査と同様に適用性に課題があり、完全に確認することは困難である。したがって、再注入作業の前に充てん不良区間を十分に調査して的確に把握し、適切な作業が実施されていることを適宜確認しておく必要がある。

4.2 PC 鋼棒突出防止工²⁰⁾

前述のとおり、PC グラウト充てん状況の調査は困難であり、鋼材が腐食により破断することも考慮しておかなければならない。PC 鋼棒が破断した場合、コンクリート片や鋼材の一部が落下する可能性があり、第三者災害を引き起こす可能性がある。そこで、横締め PC 鋼棒等を対象として、PC 鋼棒突出防止工が実施されている。

横締め PC 鋼棒突出防止工としては、PC 鋼棒定着部周辺のコンクリート表面を被覆する方法が用いられており、コンクリート表面を鋼板とステンレス鋼線製織金網または連続繊維シートで被覆する方法が用いられている (図 - 4)。

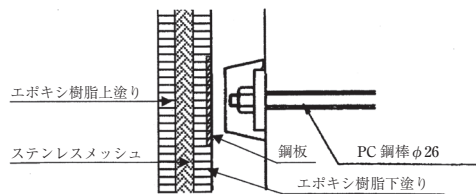


図 - 4 突出防止工の概要²²⁾

4.3 主桁の補強

主鋼材が破断すると、PC 桁の耐荷力に影響を及ぼす。多数の PC 鋼材が配置されている場合、数本の PC 鋼材が破断しても構造物の安全性に大きな影響はないと考えられるが、破断本数が増加すると耐荷力が低下し、安全性に影響することが懸念される。これまでのところ、国内の PC 鉄道橋で安全性への影響が懸念された事例はないが、将来に備えて技術開発を進めておく必要があると考えられる。このような場合には、主桁の補強が必要となるが、補強工法としては、外ケーブル工法や鋼板接着工法等が考えられる。

外ケーブル工法は、消失したプレストレスを回復する効果的な補強工法であるが、部分的にプレストレスが減少した PC 桁に対し、過大な圧縮力が生じないように制御しながら補強レベルをいかに設定するかが課題になる。また、鋼板接着工法は、外ケーブル工法のように過大な補強によって負担が生じる懸念はないが、低下した耐荷力を補うためには多くの鋼材量を必要とするうえ、ひび割れが開口している場合はこれを改善することはできないため、別途対策が必要になる。

5. おわりに

一般に PC 鉄道橋の架替えは困難であり、現在供用され

ている PC 桁を今後とも使い続けられるように維持管理していく必要がある。PC グラウト不良などの困難な課題に対しては、今後とも多面的な技術開発を行い、供用が制限されるような重大な問題が生じないように適切に維持管理していくことが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本鉄道施設協会：鉄道施設技術発達誌，1994.1
- 2) 宮本征夫：プレストレストコンクリート鉄道橋の耐久性評価，東京大学学位論文，1999.3
- 3) 石橋忠良：鉄道における PC の歴史について，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.6，pp.39-42，2000.12
- 4) 石橋忠良：鉄道における PC 技術の発展，プレストレストコンクリート，Vol.46，No.2，pp.26-30，2004.3
- 5) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会（335 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ 80，2008.4
- 6) 田村章一：PC 橋梁における横締め工法の問題（I），構造物設計資料，No.31，pp.19-22，1972.9
- 7) 石橋忠良：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
- 8) 吉川正治，狩野周，松田芳範：PC 箱桁主鋼棒破断に関する調査および補修について，SED，No.31，pp.18-25，2008.11
- 9) 新津正義，遠藤和重：大北川橋りょう桁変状（アルカリ骨材反応）対策，日本鉄道施設協会誌，Vol.39，No.10，pp.62-64，2001.10
- 10) 松田芳範，廣瀬明：PC 下路桁の劣化調査と補修，日本鉄道施設協会誌，Vol.39，No.3，pp.41-43，2001.3
- 11) 加藤勝，宮島和彦，高橋秀夫，松田芳範：PC 桁の ASR によるひび割れ補修対策について，SED，No.33，pp.38-43，2010.1
- 12) 松田芳範，佐藤隆義，石橋忠良：葡萄川橋りょうの塩害対策について，SED，No.5，pp.24-29，1995.11
- 13) 天木儀一，高橋治一：葡萄川橋りょうにおける塩害変状の再補修，日本鉄道施設協会誌，Vol.34，No.10，pp.38-40，1996.10
- 14) 吉田昭二，鋪屋幸一，小林英雄，天木儀一，松田芳範：電気防食工法を採用した PC 桁の補修について，SED，No.12，pp.48-57，1999.5
- 15) 鋪屋幸一：塩害を受けた鉄道 PC 橋りょうの電気防食による補修，日本鉄道施設協会誌，Vol.39，No.1，pp.61-63，2001.1
- 16) 諸橋剛：塩害橋りょうの電気防食工法による補修と維持管理，日本鉄道施設協会誌，Vol.42，No.4，pp.53-55，2004.4
- 17) 田所敏弥，谷村幸裕，渡辺健，徳永光宏：グラウトと PC 鋼材の付着特性に着目した鋼材破断後のプレストレスの評価，第 19 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.209-212，2010.10.
- 18) 轟俊太郎，前田友章，谷村幸裕，岡山準也：PC 鋼材破断後の PC 梁の耐荷特性，第 19 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.43-48，2010.10.
- 19) 前田友章，轟俊太郎，田所敏弥，谷村幸裕：PC 主鋼材が破断した実大 PC 桁の静的載荷試験，土木学会第 65 回年次学術講演会，V-645，2010.9.
- 20) 鉄道総合技術研究所：PC グラウトの再注入等補修マニュアル（案），2002.8.
- 21) 近藤拓也，村田一郎，田中廣行，宮川豊章：腐食した PC 鋼材へのグラウト補修工に関する基礎的研究，第 19 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.205-208，2010.10.
- 22) 新田耕司，鳥取誠一，吉田幸司：PC グラウト充填不良に対する補修，鉄道総研報告，Vol.15，No.8，2001.8

【2010 年 12 月 14 日受付】