

山陽新幹線における PC 桁の維持管理の取組み

前田 友章*1・湯浅 康史*2・坂岡 和寛*3・野村 倫一*4

わが国の社会インフラとして重要な役割を担ってきた山陽新幹線は、1975年に全線開業し40年以上が経過している。山陽新幹線の中長スパンの橋梁は、新幹線騒音の低減を目的として約1200連のPC桁が採用されており、一部のPC桁ではひび割れや漏水、グラウト充填不足、主ケーブルの腐食や横締めPC鋼棒の破断などの変状が確認され、各種対策を講じてきている。また、今後長期にわたってPC桁を安全に供用するため、近年、グラウト充填不足箇所を特定する非破壊検査方法である広帯域超音波法の適用性に関する検討や、PC桁に外ケーブルを設置してモニタリングしながら、健全性低下時には速やかに安全性を回復する維持管理方式（外ケーブル張力モニタリング方式）の検討、橋梁ごとにこれまでの調査・補修履歴を取りまとめたPCカルテの作成と活用に関する検討など、PC桁の予防維持管理に向けた取組みを進めている。

本稿では、山陽新幹線におけるPC桁の概要を説明するとともに、PC鋼材の維持管理上の問題点と課題、予防維持管理に向けた主な取組みについて報告する。

キーワード：鉄道PC桁、予防維持管理、外ケーブル、モニタリング

1. はじめに^{1~4)}

山陽新幹線は、1972年に新大阪～岡山間約161km（以下、岡山以东と表記）、1975年に岡山～博多間約390km（以下、岡山以西と表記）が開業した。40周年を迎えた2015年3月までに延べ24億人のお客様にご利用いただき、山陽新幹線が西日本エリアの大動脈として、国土や経済の発展、文化の交流に果たしてきた役割は大きい。

山陽新幹線は高度経済成長期の最中に建設され、名神高速道路などの社会インフラが大量に建設された時期に重なる。このことから、労働力の慢性的な不足、建設資材の高騰、オイルショックによる材料の不足、厳しい工期など、さまざまな厳しい制約のなかで、当時の日本国有鉄道の総力を集結して建設された。

PC桁においては、PC鋼材の付着と防食の役割を担っているPCグラウトの充填不足や横締めPC鋼棒の破断突出など、PC桁に特有の事象がこれまでに発生しており、各種対策を講じている。また、長期にわたってPC桁を健全に供用していくために、予防維持管理に向けた取組みを

始めたところである。

本稿は、山陽新幹線のPC桁の概要、これまで実施してきた維持管理の取組み、実橋に適用した予防維持管理に向けた新たな取組みについて報告する。

2. 山陽新幹線のPC桁の概要^{1~4)}

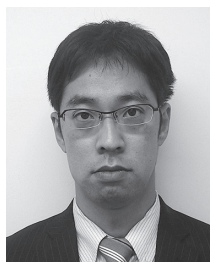
山陽新幹線の中長スパンの橋梁には、騒音防止に配慮してPC桁が多く採用されており、全長約551kmのうち25.3km、約1200連のPC桁が供用されている。構造形式ごとのPC桁の連数を図-1に示す。単純PCI形桁が約1000連で約80%と多数を占め、単純PC箱形桁が約150連で約10%を占めている。なお、少数ではあるが、河川などの長スパンの橋梁にフレシネー工法やディビダーク工法、レオンハルト工法を用いた連続PC箱形桁や、桁下空頭に制限がある箇所に用いられたPC下路桁、新幹線の橋梁として初めて採用されたPCトラス桁も供用されている。

また、山陽新幹線ではPC桁を大量に用いることから、設計・施工の効率化を図るため、使用頻度の高い桁形式に対して設計の標準化（以下、標準設計という）が行われた。



*1 Tomoaki MAEDA

西日本旅客鉄道(株)
構造技術室 主席



*2 Koji YUASA

西日本旅客鉄道(株)
新幹線鉄道事業本部 係長



*3 Kazuhiro SAKAOKA

西日本旅客鉄道(株)
構造技術室 主席



*4 Norikazu NOMURA

西日本旅客鉄道(株)
構造技術室 担当課長

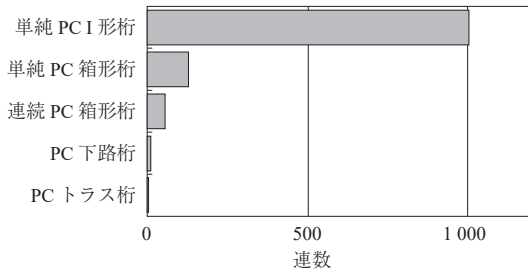


図 - 1 構造形式ごとの PC 桁の連数

標準設計は、I 形、箱形断面の単純ポストテンション方式 PC 桁を対象として、軌道形式（バラスト軌道、スラブ軌道）、スパン、桁高に応じて行われている。なお、標準設計の適用にあたっては、架設地点のスパン長や空頭高さなどを考慮し、標準設計の中から選定する形で行われ、全 PC 桁のうち約 550 連で標準設計が用いられている。なお、標準設計によらず個別に設計した PC 桁には、工期の制約により急速施工が必要となりプレテンション方式を採用したものや、建設当時の技術開発成果を踏まえて、設計基準強度 600 kgf/cm² の高強度コンクリートが用いられた PCI 形桁などがある。標準設計の PC 桁に関して、設計・施工上の特徴を以下に述べる。

- ・設計では、コンクリートに引張応力を生じさせない、フルプレストレスの考え方を採用している。
- ・主桁の主ケーブルの定着にはフレシネー工法を用い、PC 鋼線 (12φ5～12φ8)、PC 鋼より線 (12T12.4～12T15.2) を使用している。また、床版および横桁の横締めにはねじ式定着による PC 鋼棒 (φ24～φ30) を用いている。
- ・主ケーブルの一部は、経済性を考慮して主桁上縁に定着する構造を採用している。
- ・主桁コンクリートの設計基準強度は 400～450 kgf/cm²、水セメント比は 33～39% としている。
- ・コンクリートの骨材は川砂の入手が困難となり、一部で海砂を使用している。海砂の使用にあたっては、塩分含有量を 0.01% 以下に除塩するよう指導している。
- ・PC グラウトは、ブリーディングを許容し、混和剤として減水剤とアルミニウム粉末 (Al / C : 0.007%) を使用したセメント系材料を用いている。

3. PC 鋼材の変状

3.1 PC グラウト充填不足と主ケーブルの腐食

山陽新幹線の PC 桁では、一部主ケーブルに沿ったひび割れなどの変状が確認され、PC グラウト充填不足がその原因の一つと考えられたことから、PC グラウト充填状況の調査と再注入を行い、PC 鋼材の防食機能の向上に努めている。

調査および記録が整理されている PC 桁、主ケーブルのグラウト充填状態と PC 鋼材の腐食状態について述べる。調査では、図 - 2 に示すように PC グラウト充填不足が生じやすい主ケーブルの端部付近を対象に削孔を行い、PC グラウトの充填状態や主ケーブルの腐食程度を目視およびファイバースコープで確認している。

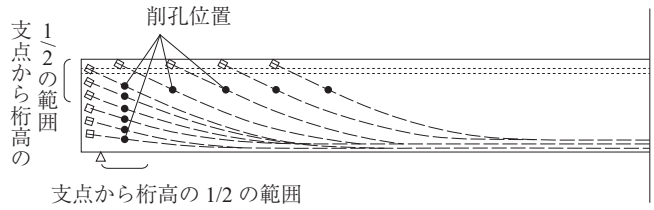


図 - 2 PC グラウトの標準的な調査位置

PC グラウトの未充填が認められた調査孔の割合は約 2 割あり、削孔位置にグラウトがまったくない調査孔も一定割合認められた。充填不足が生じた理由については、旧国鉄での研究事例⁵⁾ やプレストレストコンクリート技術協会（現、プレストレストコンクリート工学会）で検討された事例⁶⁾ に示されるように、PC グラウトの沈下やブリーディングなどの材料面、PC グラウトの先流れ現象などや PC グラウト排出口の不適切な設置などの設計・施工面における不備が複合的に起因して発生したものと考えられる。また、PC グラウト未充填長さは、スパンの 2 割未満のものが多数で、未充填範囲はシースの曲げ上げ部付近に留まっているものと考えられる。

PC 鋼材の腐食状況について、腐食度を表 - 1 のように区分し⁷⁾、PC グラウト充填状態ごとの PC 鋼材腐食度の割合を図 - 3 に示す。PC グラウトが完全に充填されていればおおむね腐食は生じておらず、グラウト充填状態が不良であるほど腐食割合が増加する傾向であった。なお、腐食度 0、I は調査孔の約 98% を占め、山陽新幹線の主ケーブルは腐食が軽微であるといえる。これは、山陽新幹線が内陸に位置し、凍結防止材を散布しないため、塩化物イオンの供給がほとんどないことに起因するものと推察される。一方で、PC グラウトが全くない状態において、腐食が著しい腐食度 III に分類される箇所も一部で確認されてお

表 - 1 PC 鋼材表面の腐食状況に関する判断基準

判定	概要
III	表面に凹凸が確認できるもの 層状の腐食生成物が表面全体に存在するもの
II	表面に凹凸が確認できるもの 層状の腐食生成物が存在するもの
I	表面全体に錆は生じているものの、層状の錆は発生しておらず、かつ表面に凹凸が確認されていないもの
0	表面に錆がほとんど発生していない状況、もしくは点錆程度の錆が生じている状況

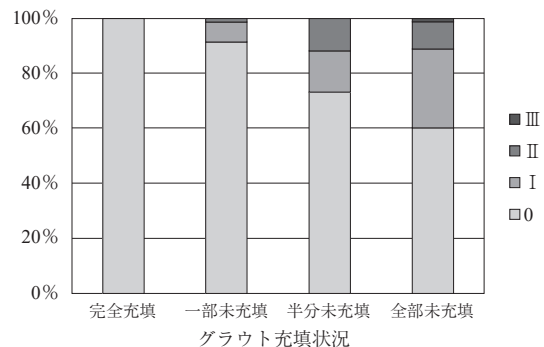


図 - 3 グラウト充填状況と鋼材腐食度の相関

り、PC グラウト未充填部の対策の重要性を示唆するものと考えられる。

3.2 横締め PC 鋼棒の破断

山陽新幹線の PC 桁では、写真 - 1 に示すように床版や横桁に配置されている横締め PC 鋼棒が、突然破断して突出する事象が確認されるようになった。このような事象が生じた PC 桁での詳細調査では⁸⁾、横締め PC 鋼棒 67 本中、約 70% にあたる 48 本で PC グラウト充填不足が確認されており、PC グラウト充填不足に伴う PC 鋼棒の腐食に起因するものと推定されている。

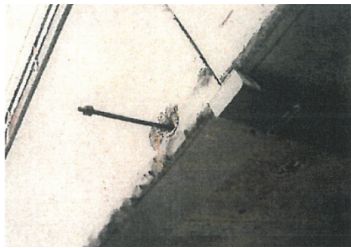


写真 - 1 PC 鋼棒の破断事例

4. これまでに実施してきた維持管理の取組み

山陽新幹線の PC 桁を今後も長期にわたって健全に供用していくにあたっては、PC グラウト充填不足に伴う PC 鋼材の腐食対策がもっとも重要であると考えられる。また、主ケーブルの腐食に伴う破断を想定して、適切に対応できる維持管理手法が求められる。

4.1 PC グラウト充填不足に対する取組み

PC グラウトの充填不足が確認された場合の取組みとしては、PC グラウトの再注入を行っている。基本的には、足場などがある PC グラウト充填状況の調査時にあわせて実施し、図 - 4 のように一つの再注入孔から注入ホースと排気ホースを設置し、自然流下方式によりセメント系材料を再注入し、PC 鋼材の防食機能の向上に努めている。

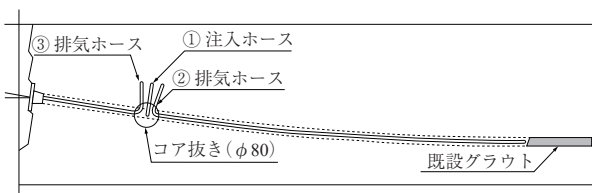


図 - 4 PC グラウト再注入工法

4.2 横締め PC 鋼棒破断に対する取組み

横締め PC 鋼棒が破断して突出する場合には、定着部の跡埋めコンクリートが飛散し第三者に被害を与える可能性があるため、飛散防止対策を実施している。対策の検討にあたっては、種々の仕様で対策を行った 51 体の供試体を用いて PC 鋼棒を破断させ、飛散防止の機能と PC 鋼棒の破断突出を目視確認できる機能の両方を満足したケースとして図 - 5 に示す工法を採用した⁹⁾。また、PC 鋼棒が破断した箇所は、破断時の反力が小さい PC 鋼より線に取替えて、グラウトを再充填し、機能の回復を図っている。

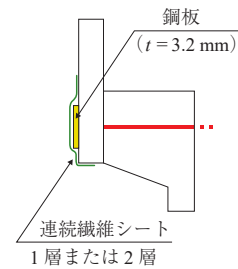


図 - 5 突出防止対策

5. 予防維持管理に向けた新たな取組み

5.1 主ケーブルの破断に対する取組み

一般的に PC グラウト充填不足部での主ケーブルの腐食や破断は、腐食生成物による膨張圧がコンクリートに作用しにくいことから、外観変状に現れにくい。また、主ケーブルの破断が進行して、列車荷重によって PC 桁下面に曲げひび割れが発生しても、列車通過後は曲げひび割れが閉じてしまい、目視により曲げひび割れを把握するのは困難である。このことから、目視検査以外の方法で PC 桁全体の健全性の低下を検知し、主ケーブルが破断しても、供用制限を生じさせない対策の開発が必要であると考えた。そこで主ケーブルの破断が進行した場合に、PC 桁としての耐荷性能の低下を検知し、検知後には速やかに耐荷性能を回復する手法として、外ケーブル張力モニタリング方式を開発し、2018 年 4 月から運用を開始している (写真 - 2)。

外ケーブル張力モニタリング方式 (図 - 6) は、既設 PC 桁に補強兼モニタリング用の外ケーブルをあらかじめ設置し、その外ケーブルの張力をモニタリングすることによって PC 桁の耐荷性能の低下を検知するものである。

モニタリングの原理を図 - 7 に示す。PC 桁の内ケーブルの破断が進行してプレストレスが減少し、主桁に曲げひび割れが発生する段階になると、主桁の剛性が低下して列車通過時のたわみおよび外ケーブル張力が増加する。PC 桁の耐荷性能低下を検知するためのモニタリングは、列車



写真 - 2 設置状況

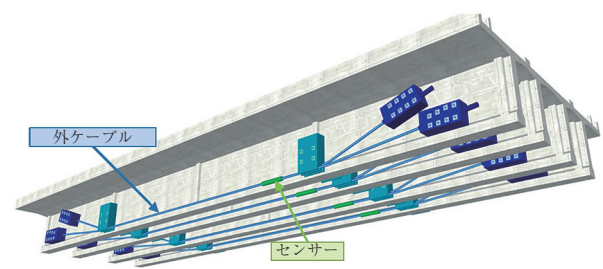


図 - 6 外ケーブル張力モニタリング方式

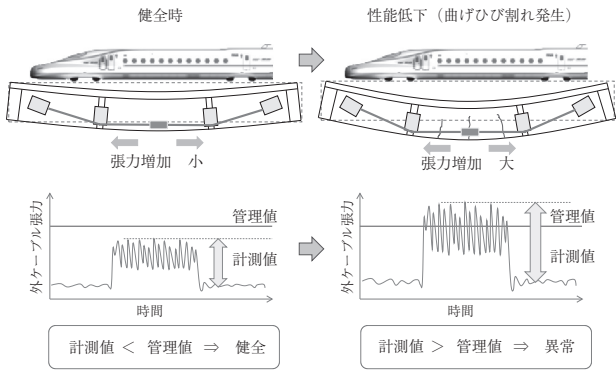


図 - 7 モニタリングの原理

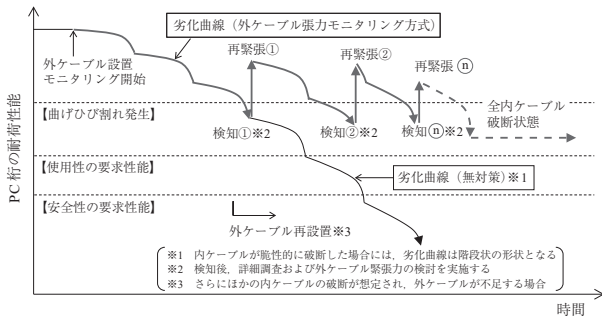


図 - 8 維持管理の概念図

荷重載荷時の外ケーブル張力の増加量を経時的に計測し、この変化を捉えることでPC桁の耐荷性能の低下を検知しようとするものであり、その判定は計測値とあらかじめ設定した管理値とを比較して行う。

そして、耐荷性能の低下が検知された場合には、外ケーブルを再緊張することによりプレストレスを追加導入し、直ちに性能を回復する。外ケーブル張力モニタリング方式は、この耐荷性能低下の「検知」と外ケーブルの再緊張による性能の「回復」を繰り返しながら、内ケーブルの破断が進行した場合にも橋梁の要求性能を満足させて、列車を安全に走行させ、安定輸送を実現させることを意図した維持管理方式である。外ケーブル張力モニタリング方式による維持管理の概念図を図 - 8 に示す。

また、モニタリングにより耐荷性能の低下が検知された場合には、早急にその情報を伝達し、適切な対策を講じることが重要と考えられることから、計測管理システムを構築した。この計測管理システムでは、計測データが即時、無線通信によりべつの箇所に構築したサーバに送信され、サーバ内で計測データの蓄積、分析、評価が自動的に行われる。そして、異常を検知した場合には速やかに関係者に通知するシステムとなっている。また、サーバに格納された計測データは、インターネット回線を通じて、関係者がいつでも確認できるものとなっている。

5.2 PCカルテによる維持管理の取組み

PC桁では、これまでにさまざまな調査や修繕を実施し、維持管理上有用なデータを得ているものの、これらが必ずしも有効に活用できていない状況にあった。このため、これまでの検査・修繕の履歴を構造物ごとに再整理して、一元管理するツールとして、PCカルテの整備を進めている。

PCカルテの構成を表 - 2 に示す。PCカルテは、予防維持管理を念頭においた修繕検討や橋梁ごとの劣化状況のグレーディングの基礎資料として役立つほか、主ケーブルの状態（腐食やPCグラウトの充填状況）と外観状態との相関性の検討にも用いることとしている（図 - 9）。

表 - 2 PCカルテの構成

No.	項目	内容
1	桁諸元	PC桁の概要
2	通常全般検査履歴	検査結果概要を時系列で整理
3	特別全般検査履歴	検査結果概要を時系列で整理
4	変状展開図	特別全般検査および通常全般検査で得られた変状展開図
5	PCグラウト再注入・PC鋼材腐食に関する調査	PCグラウト再注入および調査実績を主桁ごとに整理
6	その他・検査補修実績	個別検査・役務調査・補修履歴を整理
7	相関図	No.4とNo.5を重ね合わせて、外観と内部の相関性を整理
8	維持管理方針	No.1～7を総括し、今後の維持管理に関する着眼点などを整理

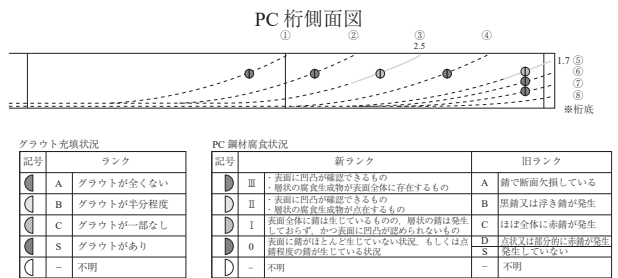


図 - 9 変状相関図 (例)

6. おわりに

山陽新幹線においては、主ケーブルの破断に至った事例は現在のところ確認できていないが、長期的な視野で俯瞰すると、主ケーブルの腐食や漏水により主ケーブルが破断に至る可能性は否定できない。今後、長期にわたって山陽新幹線を安全に供用していくために、必要な技術開発を継続して進めるとともに、各機関で行われている技術開発成果も取り入れながら、安全・安定輸送に資するよう十分な対策を講じて行きたい。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道大阪新幹線工事局：山陽新幹線新大阪岡山間建設工事誌，1972。
- 2) 日本国有鉄道大阪工事局：山陽新幹線工事誌 岡山・大門間，1975。
- 3) 日本国有鉄道広島新幹線工事局：山陽新幹線工事誌 大門・小瀬川間，1975。
- 4) 日本国有鉄道下関工事局：山陽新幹線工事誌 小瀬川・博多間，1976。
- 5) 石橋忠良，中原繁則，西山佳伸：PCグラウトの配合および注入方式に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.27, No.6, pp.58-69, 1985。
- 6) プレストレストコンクリート技術協会：PCグラウトの設計施工指針，2005。
- 7) 西日本旅客鉄道株式会社：PC構造物維持管理の手引き，2012。
- 8) 桜段 勇：PC鋼材の破断について，第15回建造物検査技術講演会記録，日本国有鉄道，pp.37-53, 1983。
- 9) 荒木弘祐，吉田経夫，三間谷将光：鋼製のPC横締め突出防止工の開発，日本鉄道施設協会誌，Vol.42, No.4, pp.302-304, 2004。

【2018年8月10日受付】