

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

橋の健全性を診断する

現在供用されている鉄道橋は、100,000橋以上あり、古いものは建設後70年～100年が経過しています。安全な列車運行を確保するためには、これらすべての橋りょうを適切に維持管理していく必要があります。今後、鉄道橋の経年がさらに進んでいく一方で、維持管理を担当する技術者は減少傾向にあり、これらの橋りょうを適切に維持管理していくことは重要な課題になっています。鉄道橋の維持管理基準の変遷や検査体系について概説した後、コンクリート橋や鋼橋の維持管理を効果的に実施していくために今後の活用が期待される調査方法や、モニタリング技術を紹介します。



岡本 大
Masaru Okamoto
構造物技術研究部
鋼・複合構造研究室
室長
【専門分野】コンクリート構造



池田 学
Manabu Ikeda
前 構造物技術研究部
鋼・複合構造研究室
室長
【専門分野】鋼構造、複合構造

はじめに

現在、供用されている鉄道橋は100,000橋以上あります。図1は、鉄道橋と道路橋の建設年代分布を比較したものです。これらの多くは、明治から昭和初期および高度経済成長期に建設されたもので、道路や港湾など他の社会基盤施設に比べて経年化が進んでいる傾向にあります。戦前に造られたものについては、70年～100年が経過しており、現在の設計で考慮している一般的な供用期間100年に到達する橋りょうもでてきています。そのため、鉄道橋に対して継続的な保守管理に取り組んできていますが、経年劣化が著しく進んだ構造物については、これまでの対応で対処できない事例も増えつつあります。そのため、維持管理を担当する技術者が減少する中で、これらの橋りょうを適切に維持管理していくことは、鉄道の安全運行にとって重要な課題になっています。

ここでは、鉄道橋の維持管理基準の変遷や検査体系について概説した後、鉄道橋の維持管理を効果的に実施していくために活用が期待される技術を紹介します。

鉄道橋の維持管理方法の変遷

国鉄では、戦後間もないころから維持管理に関する取り組みが実施されてきました。戦災により図面などの資料が焼失していたため、まずはこれら基礎資料の再整備が進められました。そして、昭和31年に「建造物保守心得(案)」と「建造物の検査及び措置要領」が作成され、維持管理ための体制が作られました。その後、昭和49年には、保守に関する技術基準である「土木建造物取替の考え方」(取替標準)が作成され、検査や変状原因の究明、健全度の判定、措置といった建造物の補修の流れが体系立てて整理されました。そして、昭和62年に、「建造物保守管理の標準」として改訂され、新たな知見の導入、判定事例やチェックリストが追加されました。

平成11年に、山陽新幹線でトンネル覆工コンクリートはく落事故が発生し、高架橋からもコンクリート片がはく落する事態が生じ、構造物の劣化が社会問題となりました。これを契機として、維持管理に関する技術基準の検討作業が進められ、平成19年に国土交通省鉄道局より、「鉄道構造物等維

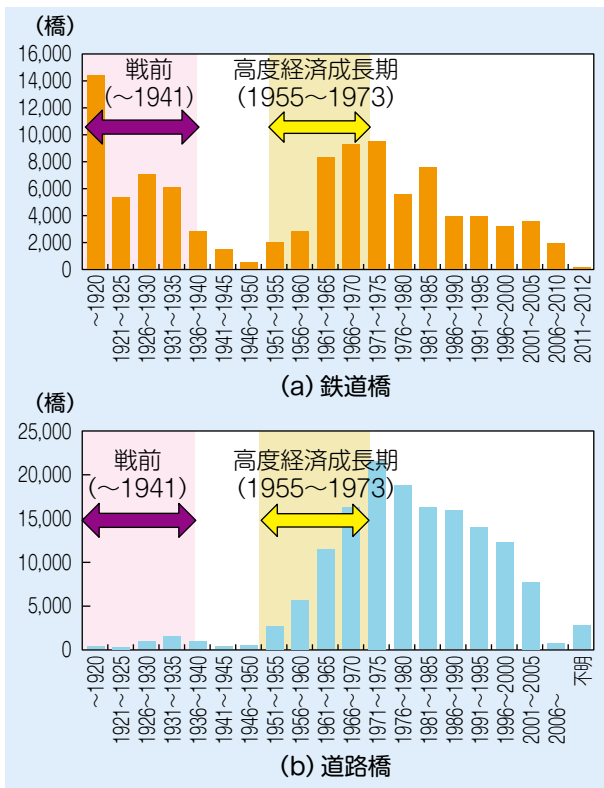


図1 橋りょうの建設年度の分布(2012年 国交省調べ)

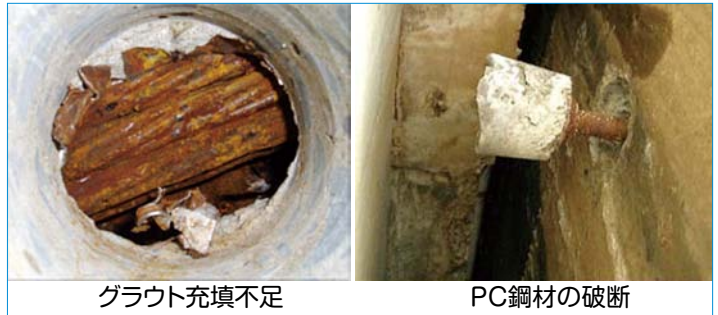


図2 グラウト充填不良とPC鋼材の破断事例



図3 実物大PC桁の載荷試験

持管理標準」(以下、維持管理標準)が通達され、現在にいたっています。

維持管理標準における検査体系

現行の維持管理標準では、鉄道橋を維持管理するための検査を、全般検査、個別検査、随時検査の3つに分類しています。初回検査は、新設構造物や改築・取り替えを行った構造物の初期状態を把握するための検査です。全般検査は、主に変状の有無やその進行性などを把握することを目的として、約2年の周期で実施される検査です。個別検査は、全般検査や随時検査で発見された変状に対して、精度の高い健全度判定を行うとともに、変状原因の推定や今後の変状の予測などを行うことを目的とした検査です。また、随時検査は、地震や大雨などにより、変状の発生もしくはそのおそれのある構造物を抽出することを目的とした検査です。今回は、これらの検査のうち、主として橋りょうの個別検査で今後の活用が期待される、調査・モニタリング技術を紹介します。

コンクリート橋の調査技術

コンクリート橋は、古くは明治時代から建設されています。明治末期から昭和20年代後半までは鉄筋コンクリート(RC)橋が主流でした。昭和28年に本格的なプレストレストコンクリート(PC)構造(☞参照)の橋りょうが建設されて以降、RC橋に比べてスパンの比較的大きなPC橋が多く建設されるようになりました。

PC橋は、ひび割れを防止できる構造であり、当初は耐久性に優れた構造形式であると考えられていましたが、経年化が進んだ橋りょうも増加し、RC橋には見られない変状が確認されるようになりました。その一つに、**図2**に示すように、グラウト(☞参照)

☞ プレストレストコンクリート(PC)構造

あらかじめ圧縮応力をコンクリートに導入すること(プレストレス)で、列車などの荷重が作用した場合でも、コンクリート部材に引張応力やひび割れが生じることを防止する構造です。一般には、圧縮応力の導入は、高強度の鋼材であるPC鋼材を用いて行われます。

充填不足によりPC鋼材が腐食し、破断するという現象があげられ、近年、問題となっています。

PC鋼材の破断が生じた場合には、プレストレスが減少し、ひび割れなどの損傷が生じることが考えられ、最悪の場合には、列車荷重などが作用したときにPC桁が落橋してしまう恐れもあります。そのため、鉄道総研では、**図3**に示すような実大のPC桁を製作、載荷実験を実施し、PC鋼材の破断が桁の損傷状況に及ぼす影響に関する研究を実施しました¹⁾。実験では、桁に配置した複数のPC鋼材を、**図3**に示

☞ グラウト

PC構造では、コンクリートを打ち込む前に、あらかじめPC鋼材を挿入するためのダクト(シース管)を設置し、コンクリートが硬化後にPC鋼材を挿入、プレストレスを導入(緊張)する方法があります。緊張後、コンクリートとPC鋼材を一体化させるとともにPC鋼材を腐食から守るために「グラウト」と呼ばれるセメント系の材料をシース管内に充填します。

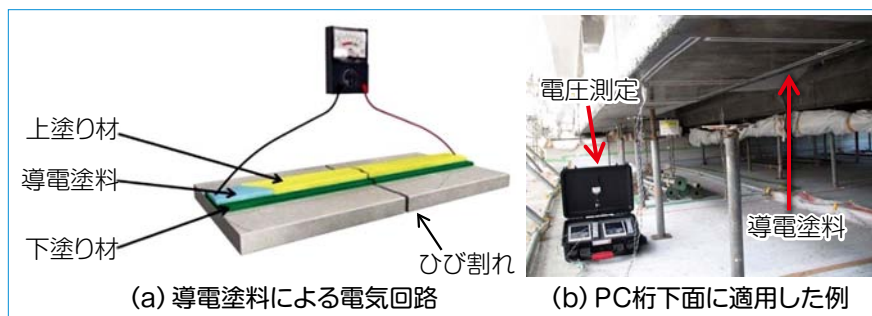


図4 導電塗料を用いたひび割れ検知

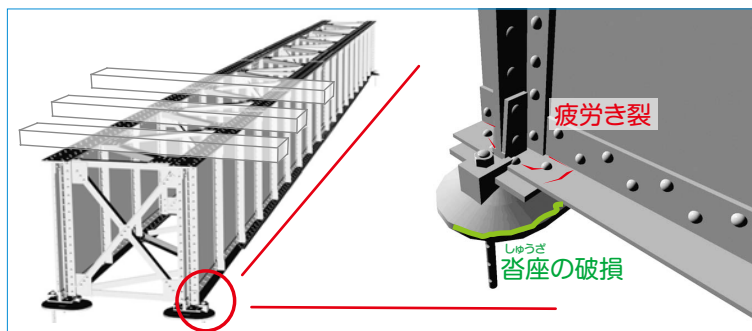


図5 支承および支承近傍の変状の例

すように1本ずつ切断し、破断本数と桁の損傷状況の関係について調査しました。

実験により、PC鋼材の破断の影響でプレストレスが減少するため、桁にひび割れが発生し、PC鋼材の破断本数が増加するにつれて、ひび割れの本数や幅が増加するなどの損傷が進行することがわかりました。そして、ある本数以上の破断を生じた時点で、耐力低下が生じることがわかりました。

このことにより、PC桁のひび割れを見つけることで、PC鋼材の破断を察知できる可能性があり、ひび割れの早期検知が、PC桁の損傷進展の抑止につながると考えられます。一方、PC桁は、もともとひび割れを防止できる構造であるため、PC鋼材の破断などによってひび割れが発生した場合でも、RC構造に比べてひび割れを確認することが困難です。そこで、図4に示すように、PC桁表面に導電性を有した塗料（導電塗料）によって電気回路を構成し、これがひび割れの発生

により切断されることで変状を検知するモニタリングシステムの開発を行いました²⁾。この方法は、これまでトンネルの覆工コンクリートのはく離、はく落などの検知に用いられてきた方法ですが、PC桁のひび割れ検知に活用するために、検知精度の向上方法について検討しました。その結果、従来は刷毛を用いて導電塗料を塗布していたものを、スプレーガンを用いて塗布することによって、0.3mm程度のひび割れまで検知可能となりました。

鋼橋の調査技術

鋼橋は、コンクリート橋よりも歴史は古く、明治初期から使用されています。現存する橋りょうの半数以上が供用50年を超え、供用100年を超える高齢化した橋も少なくありません。供用年数と変状の程度は必ずしも相関関係はありませんが、今後も鋼橋を継続して使用していくためには、健全性を的確に診断して、必要に応じて早期に対策していくことが重要です。

鋼橋の変状は、地震や水害などの異常時を除くと、腐食、疲労、そして支承の変状が多いです。いずれの変状も、外面に現れるものが多く、鋼橋の維持管理においては、まずは目視で変状の有無を確認することが第一です。しかしながら、目視のみでは限界があり、鋼橋の実状をより詳細に把握するためには、機器を用いて調査することが不可欠です。実際に、個別検査などにおいて、機器を用いた調査が行われています。ここでは、鋼橋の支承部の変状を例に、最近の研究成果を含めて調査技術を紹介します。

支承部の変状には、^{しゅうざ}沓座の破損、支承の可動不良などの支承本体に関わるものと、これによる支承近傍の桁の疲労き裂の発生があります(図5)。

疲労き裂は、進展すると部材破断につながる可能性もあり、早期に発見することが重要です。しかしながら、その長さが数mmレベルでは塗膜割れ(鋼材表面の塗装の割れ)と判別がしづらく、目視のみで検出することは困難な場合が多いです。このため、目視調査の結果、疲労き裂の発生が疑われる場合は、機器を用いてき裂の有無を調べます。このときに、磁粉探傷試験、渦流探傷試験、浸透探傷試験などの非破壊検査が行われます。これらは、表面のき裂の先端位置や長さの測定精度、内部のき裂の検出精度、塗膜の除去の要否、容易さなど一長一短があります。この中で、磁粉探傷試験(☞参照)は、表面のき裂の先端位置や長さの測定精度に優れ、表面き裂が疑われる場合に

☞ 磁粉探傷試験

鉄鋼材料などの強磁性体を磁化し、き裂部に生じた磁束による磁粉(強磁性体の磁粉)の付着を利用して、その付着状況から視覚的にき裂の有無やき裂長さを調べる試験です。

適した試験といえます。

疲労き裂の発生が懸念される場合、ひずみゲージを貼り付けて応力を確認することが行われます(図6(a))。測定された応力の大きさや繰り返し数などから、疲労き裂の発生の可能性を推定できます。

しかしながら、疲労き裂がいつ発生するかを予測することは容易ではありません。そこで、鉄道総研では、疲労き裂の発生を検知するシステムを開発しています。疲労き裂の検知として導電塗料を塗布し³⁾、鋼板に圧電素子を貼り付けて列車通過時の振動で発電し、計測結果の無線送信を行うシステムです。無線送信された結果は、橋りょう上を通過している列車で受信できます(図7(a))。

一方、支承本体の状態を確認するため、変位を計測することが多く行われます。たとえば、^{しゅうざ}沓座が破損して列車通過時にあおりが生じているときにその変位量を計測します(図6(b))。

支承は、経時的な変化をとらえることも重要です。この理由は、この変化が見られると、支承部近傍の桁の応力状態が変わり、過大な負荷がかかるとき裂の発生などが生じる可能性があるからです。そこで、支承の変位を経時的に計測して、その変化をとらえられるシステムを開発しています⁴⁾。これは、列車通過時のみならず、温度変化による変位の変動も計測できます。長期計測の場合、問題になるのがバッテリーです。前述の列車通過時の鋼桁の振動発電を利用し、発電した電力を電気二重層キャパシターに充電することで、バッテリーレスで長期間計測が可能です(図7(b))。このシステムを用いて、振動発電で得られた電力のみで、橋りょうの支承変位を2年以上継続して測定できることを確認しています。

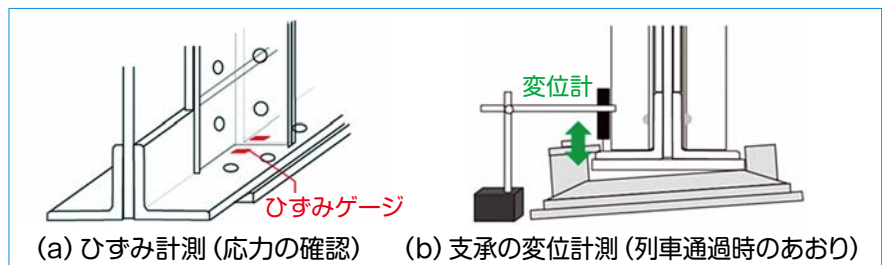
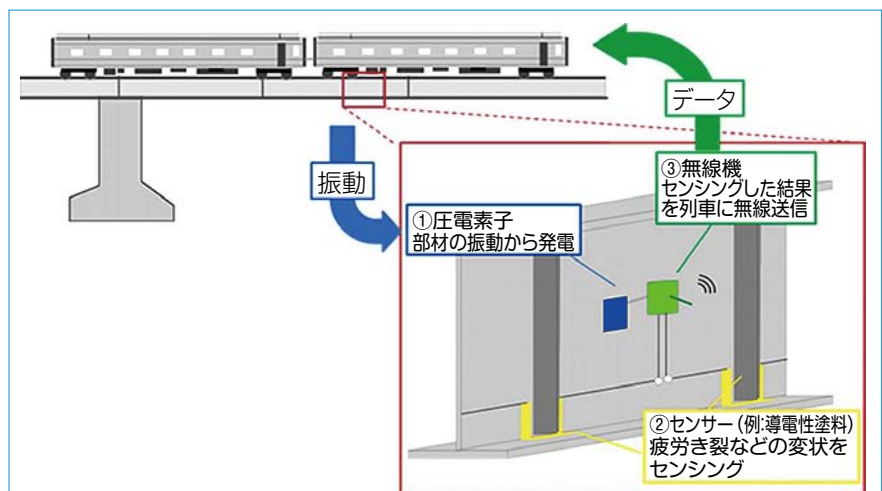


図6 支承の変状に対する計測の例



(a) 疲労き裂検知システムのイメージ



(b) 振動発電を用いた長期計測システムのイメージ

図7 鋼橋の振動発電を利用した計測技術の例

おわりに

ここでは、橋りょうの個別検査における機器を用いた調査技術について紹介しました。機器を用いた調査は、目視のみでは確認できない情報を得ることができ、橋の健全性を診断するうえで不可欠です。紙面の都合上、調査技術の一部のみの紹介となりましたが、維持管理に関する各種手引きなどがありますので、ぜひご活用ください。

なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。RRR

文献

- 1) 渡辺健, 田所敏弥, 谷村幸裕, 轟俊太郎, 前田友章, 徳永光宏: グラウト充填不良を有するPC桁の鋼材破断後の耐力評価法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.2, pp.11-16, 2011
- 2) 堀慎一, 渡辺健, 田所敏弥: PC橋りょうの内部を診断する, RRR, Vol.70, No.7, pp.20-23, 2013
- 3) 坂本達朗: 導電性塗料を用いて鋼構造物のき裂を検知する, RRR, Vol.70, No.5, pp.12-15, 2013
- 4) 阿部慶太, 吉田善紀, 仁平達也, 野末道子: 鉄道橋りょうの経年変化をモニタリングする, RRR, Vol.73, No.2, pp.8-11, 2016