

鉄道構造物の劣化予測とメンテナンス技術の革新

公益財団法人鉄道総合技術研究所 研究開発推進部 主管研究員
佐藤 勉



1. はじめに

安全で安定した鉄道輸送を提供するため、多数の構造物のメンテナンスを継続的かつ的確に実施することが求められている。また、建設後長期間経過した構造物が増加していることを考慮すると、予防保全に基づくメンテナンスの重要性はますます高くなるとともに、メンテナンスの効率化への期待も大きい。そこで、最近の構造物メンテナンス技術として、状態監視や診断技術とその利用方法、劣化や変状の予測技術、構造物の長寿命化や高度利用を図るための低コストなりニューアル技術について紹介する。さらに、検査画像の取得や記録方法、データベースの活用など、今後の構造物メンテナンスの研究開発の取組みについて述べる。

2. 鉄道構造物に関するメンテナンスの現状と課題

鉄道の安全・安定輸送に対する要求の高度化、技術断層への対応など、鉄道を取り巻く社会環境の変化を見据え、より安全に構造物を維持していくため、戦略的にメンテナンスを実施することが求められている。そのためには、近年進歩の著しい情報通信技術 (ICT)

等を活用した状態監視、劣化予測技術の高度化、構造物のリニューアル技術の革新などが求められている¹⁾。

鉄道構造物のストック量は、トンネルが約4700本、橋りょうが約10万橋（橋長1m以上）に及び、建設からの経過年数は平均で約60年となっている。道路など他の社会基盤施設が約30年であることと比較すると、鉄道構造物の経年が進んでいる²⁾。鉄道構造物の建設数量としては、戦前と高度経済成長期に2つのピークがあり、1つ目のピークである戦前に造られたものについては、100年といった当初の設計耐用年数を超えているものもある。このような構造物の全面的取替えには多大なコストが必要となる。一方、長い年月を経たものでも健全な状態にあるものから各種の変状が生じているものなど、個々の構造物で健全性が異なっているため、効率的で的確な検査技術や低コストなりニューアル技術が求められていると言える。

鉄道総研では、経年の進んだ構造物を安全かつ効率的に維持するための研究開発として、図1に示す3項目に重点を置いて取り組んでいる。以下、各項目の主な研究開発例を紹介する。

3. 構造物の状態監視、診断技術

鉄道総研では、構造物の状態変化を中長期に渡って継続的に監視するため、センサの耐久性向上および更新作業の容易化を図るとともに、保守情報ネットワーク設計方法を検討してきた³⁾⁴⁾。また、構造物の新たな診断技術の開発にも取り組んでいる。

以下、無線センサネットワークを含めた橋りょうやトンネルの状態監視の開発事例、鉄道において施工延長の多い土留め壁の新たな健全度診断方法などの開発状況について紹介する。

(1) 橋りょうの状態監視

経年した構造物の経時変化や周辺条件の変化をとら

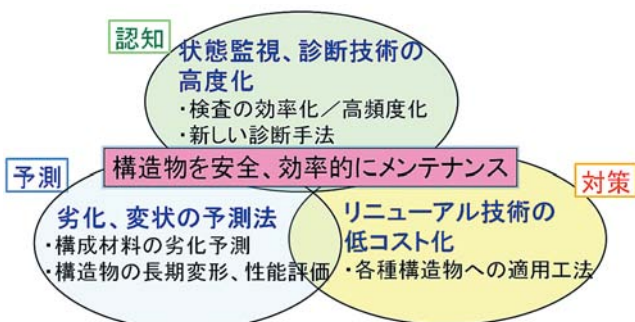


図1 鉄道構造物メンテナンスに関する研究開発項目

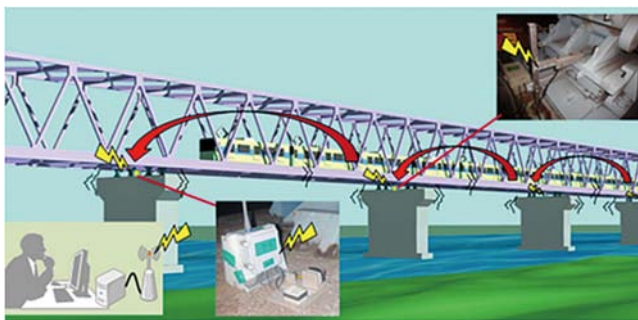


図2 橋りょうの状態監視システム

えるための状態監視システムの構築を行っている。具体的には、長大鋼橋を対象として、支承変位、橋脚の傾斜角や固有振動数など、健全度の判断に有用なデータを取得する橋りょうモニタリングシステムを開発している。計測用センサは、省電力なMEMS（微小電気機械システム）技術を用いて、列車振動検知機能、固有振動数算出機能などを有する加速度センサや傾斜センサ等を開発した。さらに、圧電素子により列車走行時の桁の振動を電気に変えて蓄電することで、各種センサの電源を確保するシステムを開発した。これまで、センサや無線ネットワークを実橋りょうで試用し、長期的に安定して計測できることを検証している（図2）⁵⁾。

また、この研究では、センサデータの収集・伝送のための保守情報ネットワーク設計の最適化を図るとともに、センサの更新を柔軟に対応可能なセンサ管理手法、中長期にわたる継続性のあるデータ管理を実現するデータアーカイブ技術も開発している⁶⁾⁷⁾。

(2) 山岳トンネルの状態監視

山岳トンネルにおける覆工コンクリートのひび割れ等の監視方法として、無線センサを用いたトンネル状態監視システムを開発した（図3）⁸⁾。本システムは、ひび割れ幅計や変位計などと接続した子機から、収録装置と接続した親機まで、無線を用いて5～10分間隔で計測データを伝送し、単三形のリチウム電池で駆

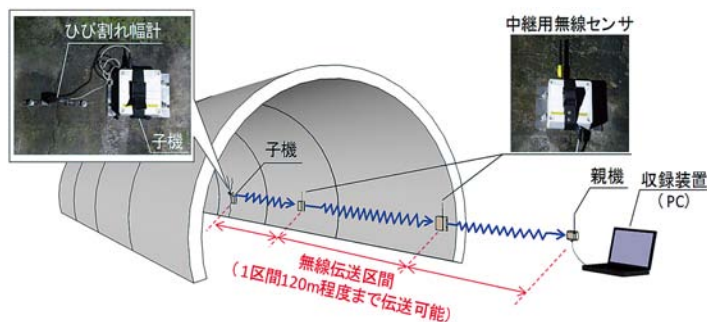


図3 トンネルの状態監視システム

動できるようにしている。なお、データを伝送する時間以外はスリープさせることにより省電力化を図った。

(3) 土留め壁の健全度診断

従来、土留め壁の健全度診断は目視が主体であり、定量的な診断法は確立されていなかった。そこで、土留め壁の健全度の定量的な評価法を構築するため、小型起振器と加速度センサ等を用いて、現地試験と模型実験を実施し、健全度と振動特性に相関性があることを確認した。評価指標として、土留め壁に対する応答振動のスペクトル面積の大きさで健全度を評価する方法を提案した。この技術は、土留め壁の健全度の定量的な評価や、目視では確認できない裏込めの緩みや空洞などの変状の把握に活用できる。また、トンネル路盤の健全度診断法への利用として、地山からの湧水等によって生じた路盤コンクリート下の空洞を診断することも可能である。

4. 構造物の劣化・変状予測技術

劣化・変状予測技術は、構造物のメンテナンス方法、補修補強の実施時期の検討、またライフサイクルコスト評価や優先順位の設定などに、大いに役立つ技術といえる。劣化・変状には数々の事象があるが、ここではコンクリート構造物の鉄筋腐食、山岳トンネルの変状および鋼橋の疲労寿命の予測技術について紹介する。

(1) コンクリート構造物の劣化予測

コンクリート構造物の劣化のうち耐荷性能にも影響を与える鉄筋腐食に関しては、供試体による長期暴露試験や経年した実構造物の調査データなどから、塩害や中性化による鉄筋腐食の開始時期、腐食ひび割れの発生時期をある程度推定できる劣化予測モデルが既に提案されている⁹⁾（図4）。提案されている劣化予測法は実用的な方法であるが、複雑な環境要因や腐食ひび

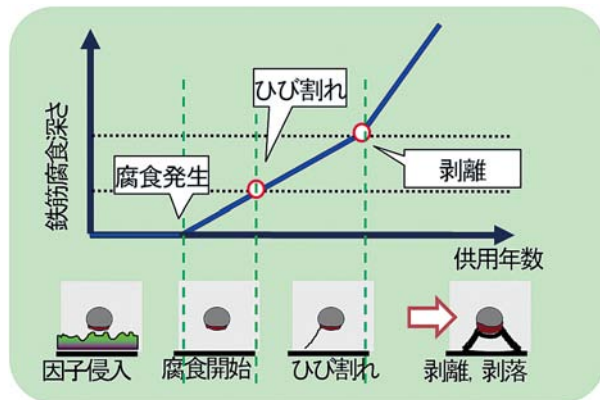


図4 鉄筋コンクリート構造物の劣化予測手法

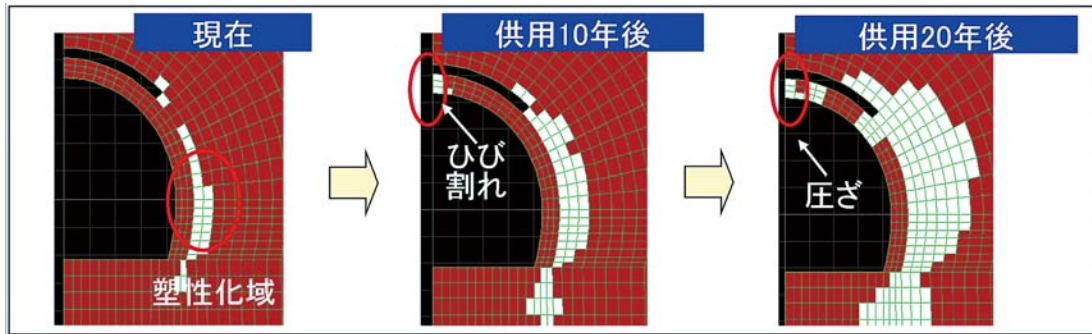


図5 山岳トンネルの長期変状予測シミュレーション

割れ発生以降の腐食速度など、研究すべき課題も残されている。今後、より高精度な劣化予測法を確立することで、構造物の余寿命判定、適切な補修時期などが定量的に予測できるものと考えられる。

(2) 山岳トンネルの変状予測

変状の生じた山岳トンネルにおいて、地質調査や現地計測によるデータを収集し、時間軸上の地山の劣化モデルを提案し、FEM解析による変位や変状の予測法を提案している。本予測法は実トンネルでの内空変位の変化や変状の発生状況を概ね再現できることを確認している。今後の取り組みとしては、各種トンネルに対してシミュレーションによる変状の再現、対策効果の予測と実測との検証や経済的な対策工選定法の提案などを行う予定である(図5)¹⁰⁾。

(3) 鋼橋の疲労寿命予測

鋼橋は、他の構造物に比べて経年した構造物の割合が高く、100年を超えて供用されているものも少なくない。疲労に対しては、累積疲労損傷度による余寿命評価法が提案され、メンテナンスの現場で活用されている。長期供用される鋼橋において、長寿命域の疲労予測シミュレーションの高精度化と、腐食やディテール(構造細目)の影響の定量評価などが今後必要になると考えられる。

5. 構造物のリニューアル技術

これまで経年劣化した構造物に対しては、検査による監視を行い、劣化や損傷が進む部材は補修による延命化措置を実施し、さらに劣化が進んだ場合には機能回復の観点から部分的補強や取り替えが行われてきた。鉄道総研でも、これらに対応するため橋りょうやトンネルなどを対象とした低コストな補修・補強方法やマニュアルの整備などを行ってきた。これに対して、既設構造物の機能や性能の大幅向上を目的としたリ

ニューアル技術の必要性が、今後一層高まると考えられる。このため、高架橋のスラブ・はり・基礎などの新たな補強技術、経年した鋼橋と橋台を構造変更し延命化を図る技術等を提案している。また駅部においては、地下空間や高架下空間の高度利用も視野に入れたりリニューアル技術の提案も行った。これらの研究開発の事例を以下に紹介する¹¹⁾。

(1) 鉄筋コンクリート高架橋

これまで経年劣化した鉄筋コンクリート高架橋に対しては、部分的な補修や補強が行われてきたが、再変状を生じる場合も見られる。劣化が進んだ高架橋への対策としては、従来の補強方法とは異なる抜本的なリニューアル化が求められる場合がある。そのため、既設の鉄筋コンクリート高架橋を対象に、既設部材とプレキャスト部材などの接合技術を用いたりリニューアル技術(図6)を開発するとともに設計施工法の提案を行った。これを実現するための要素技術としては、供用下での施工を前提としたスラブの補強、はりおよび基礎の補強方法がある。例えば、高架橋のスラブに対して、耐久性が高く引張強度や剛性の向上も期待で

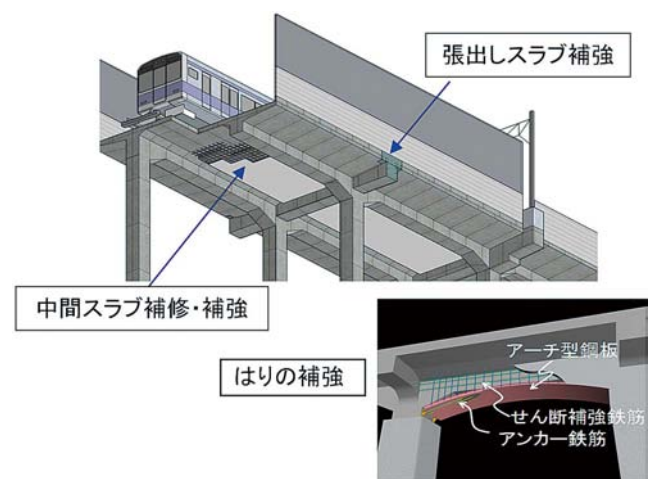


図6 鉄筋コンクリート高架橋のリニューアル技術

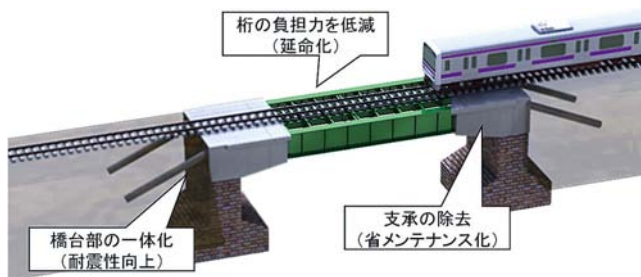


図7 鋼橋のリニューアル技術

きる超高強度繊維補強コンクリート (UFC) ボードをスラブ下面に設置し、無収縮モルタルを充填して一体化する補強工法である。UFC ボードは耐久性に優れ、薄肉軽量のため基礎への負担も少ない。また、従来の全断面修復工法に比べて大掛かりな足場を必要としないなどの特徴がある。また、騒音対策として防音壁の嵩上げなどを行う場合、張出しスラブの補強が必要となることがある。そのような場合、張出し部に小ばりを増設する低コストな補強工法等も提案した。

(2) 鋼橋

在来鉄道の鋼橋は、建設から70年以上経過したものも多く、今後も健全性を維持するため、低コストで効果的な延命化技術の開発が必要である。この方法として、仮線の構築や架け替えなどを行わず、営業線下で鋼桁と橋台、さらには背面盛土との一体化を図ることにより、鋼橋の再生と強化を図る工法の開発を行っている (図7)。鉄道総研では、鋼桁・橋台・盛土からなる実大規模の施工実験で、各種載荷試験や動態計測などを実施し、その有効性を確認した¹²⁾。そのほか、Iビーム橋りょうの支点部疲労き裂の対策工法として、Iビームの支点部をコンクリートで巻き立て補修する工法も開発している¹³⁾。

(3) 土構造物

鉄道路線延長の8割近くを占める土構造物に関しては、集中豪雨や地震時のり面崩壊などの防止技術が求められており、壊れにくくじん性を持つ土構造物にリニューアルするための工法を開発している。例えば、盛土中に地山補強材を挿入するとともに、高密度ポリエチレン製立体シート (ジオセル) でのり面を覆い盛土を補強する工法を開発した。また、崩壊防止ネットと地山補強材を用いて石積み壁を耐震補強する工法を開発しており、用地制約のある箇所でも地山補強材の打設角度を急勾配とすることで対策が可能である¹⁴⁾。

(4) 開削トンネル

地下駅において、駅機能の複合化や混雑緩和などのため、地下空間を拡張することがある。この場合、地

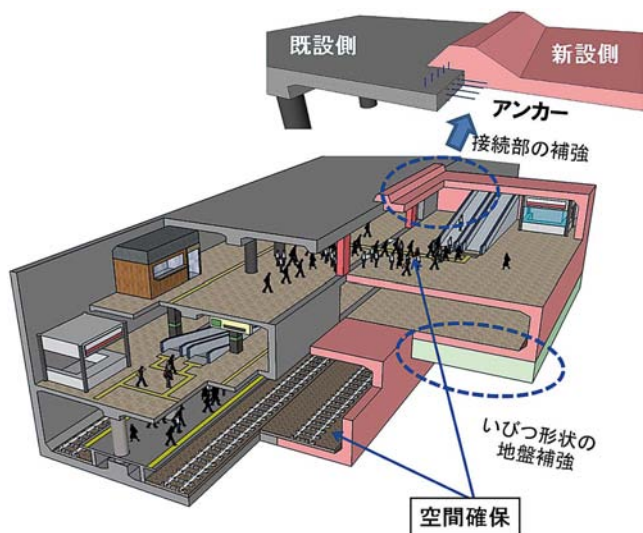


図8 地下駅のリニューアル技術

下空間の部分的な開口や拡幅の設計において、新設と既設の部材接続部の性能や、三次元挙動を考慮した設計法が示されていないという課題がある。そこで、拡幅規模や施工順序、既設部材の劣化状態を考慮した設計法を提案するとともに、効果的な接続構造や補強法についても提案した (図8)。接続部の構造は、逆ばりで既設躯体を抱き込み、十字配置のアンカーで接続する工法である。これは、線路方向に対しては逆ばりの効果で、線路横断方向に対しては新旧躯体が一体となって抵抗することで、従来工法では旅客流動阻害の原因となっていた新旧接続部の柱断面を縮小し、柱間隔も広げることができる¹⁵⁾。さらに接続部の漏水やひび割れ防止にも有効な工法である。

6. 構造物メンテナンス技術に関する今後の取組み

鉄道構造物のメンテナンスに関しては、今後も劣化変状予測技術の高精度化、目視検査の効率化、状態監視技術の高度化、リニューアル技術の低コスト化が求められる。鉄道総研では、現在以下のような課題に取り組んでいる。

劣化変状予測技術の高精度化に関しては、例えば複合する劣化要因や環境条件を考慮して、コンクリート構造物の初期ひび割れの発生やひび割れ部における鉄筋腐食膨張によるはく落などの劣化進行、性能低下を精度よく予測する手法の開発を実施している。また、コンクリートの表層品質を画像解析で評価する方法にも取り組んでいる。

構造物の目視検査の効率化に関して、現在の全般検

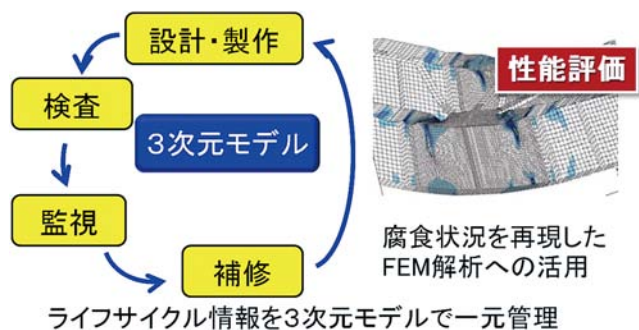


図9 CIMの活用

査は主に目視により実施されているため、客観的な記録を十分に残すことが難しいのが現状である。写真等による画像情報の記録も行われているが、データ整理に多大な労力を要している。画像情報を効率的に検査に活用するため、画像の取得、解析、伝送方法の開発を進めている。画像取得技術としては、広範囲に取得することや接近困難箇所の画像取得などを簡易に行うための技術開発を行っている。また、画像解析技術としては、取得した画像の統合、過去の記録との比較処理などの技術開発を進めている。さらに、メンテナンスの記録は、図面上に情報が残されていると理解しやすくなるため、CIM (Construction Information Modeling) を活用し、3次元CADをベースに構造物のライフサイクル情報を一元管理することで、記録を有効に活用し、構造物のメンテナンスをより効率的に行うことができると考えられる(図9)¹⁶⁾。

構造物の高経年化を考えると、予防保全の観点に立ちライフサイクルコストが最小となるようなメンテナンス方法を選択していく必要がある。そのためには、構造物の劣化予測や劣化した構造物の性能評価技術を確立していくことが重要である。そうした技術を背景に状態基準保全を進めていくのがよいと考えられる。また、検査者の技術レベルの維持、補完のためのツール、例えば画像認識技術による劣化診断手法、目視検査では困難な部位に対して無人航空機などを活用した検査法、診断における人工知能の活用なども必要と考えられる。一方、不具合が生じて利用者の安全に関わらない構造物や部位については、事後保全によりコスト削減を図ることも考えられる。あわせて、PDCAサイクルにより維持管理計画の妥当性の検証を定期的に実施し、より戦略的なメンテナンス方法を確立していくことが重要であると考えられる。

既設構造物の対策技術に関しては、様々な構造形式に対応して、より低コストに寿命を延伸可能な補修補強リニューアル技術を多く開発する必要がある。開発

された多くの工法の中から、劣化予測・性能評価技術等を活用して、個々の構造物に最も適した工法を選定できるようにしていく必要がある。さらに、部材の劣化が生じて致命的な事象に至らない冗長性(リダンダンシー)を確保した補修補強設計がなされるようにしていくことも重要である。また、新設構造物に関しては、わずかな費用増で耐久性を大きく向上させる設計や技術が導入できる場合があり、そのような技術が積極的に採用されるように、ライフサイクルコスト評価の活用を進めることも必要である。

7. おわりに

鉄道構造物については、その高経年化を考えると、メンテナンスの重要性はますます高くなるとともに、一層の安全性向上とメンテナンスの効率化が求められている。鉄道総研では、今後も劣化予測技術の高精度化、目視検査の効率化、状態監視技術の高度化、リニューアル技術の低コスト化等に貢献する研究開発を進めていきたいと考えている。

なお、本稿で紹介した研究開発の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 高井秀之：経年劣化の評価と克服に向けたメンテナンス技術，第26回鉄道総研講演会，pp.9-17，2013.11
- 2) 館山勝：鉄道構造物の経年劣化克服に向けたリニューアル技術，第26回鉄道総研講演会，pp.49-56，2013.11
- 3) 佐藤勉，土屋隆司，館山勝：メンテナンスの革新，RRR，Vol.68，No.1，pp.22-25，2011.1
- 4) 平栗滋人：新しい状態監視保全技術，RRR，Vol.72，No.7，pp.32-35，2015
- 5) 名取努，阿部慶太，小湊祐輝，関口琢己，諸橋由治：模型実験および実フィールド計測による鉄道橋梁橋脚の状態監視手法に用いる健全度診断指標の適用性検討，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.19，pp.37-44，2015
- 6) 土屋隆司：鉄道における情報通信技術の活用とシミュレーション技術，鉄道総研報告，Vol.27，No.2，pp.1-4，2013
- 7) 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

- 8) 津野究, 蒲地秀矢, 中西祐介, 仲山貴司: 無線センサを活用したトンネル変状監視システムの開発, トンネル工学報告集, Vol.19, pp.245-249, 2009
- 9) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(コンクリート構造物), 2007.1
- 10) 野城一栄, 嶋本敬介, 小島芳之, 朝倉俊弘: 時間依存型地山劣化モデルによるトンネルの変状予測法の開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.10, pp.53-58, 2008
- 11) 谷村幸裕: 構造物のリニューアル技術の革新, RRR, Vol.72, No.7, pp.36-39, 2015
- 12) 神田政幸, 館山勝, 小林裕介, 杉本一郎: 構造変更による旧式鋼橋りょうのリニューアル, RRR, Vol.69, No.10, pp.4-7, 2012
- 13) 小林裕介, 福本守, 山下健二: Iビーム支点部疲労き裂の原因究明とコンクリート巻き立て工法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.10, pp.17-22, 2015
- 14) 中島進, 渡辺健治, 神田政幸, 藤原寅士良, 高崎秀明, 池本宏文: 崩壊防止ネットと地山補強材による既設石積み壁の補強方法の開発, 土木学会論文集, Vol.71, No.4, 2015
- 15) 仲山貴司, 焼田真司: 地下駅をリニューアルする, RRR, Vol.73, No.1, pp.20-23, 2016
- 16) 谷村幸裕: 構造物の状態監視ネットワークによる維持管理, 第28回鉄道総研講演会, pp.38-44, 2015.11