

特集報文：道路構造物の強靱化に向けて

道路構造物の点検・監視の高度化と省力化に向けた取組み

餘久保 陽・白戸真大

1. はじめに

道路構造物の点検は、構造物を適切に管理するための基礎となる維持管理行為である。中でも、一旦変状が進展すると道路の構造や交通に多大な支障を及ぼすおそれがある本体構造物や大型の附属物については、法令にて、定期的に点検・診断を行い、次回の定期点検までの措置の方針を明らかにすることが求められている。一方、定期点検の質の確保・向上と作業の省力化に向けた課題として、以下が挙げられている¹⁾

- ①そもそも外観では見えない部位・変状がある。
- ②外観に変状が現れても、評価・考察が難しい部位・変状がある。
- ③構造物の全体をくまなく近接することを一律に求めるとき、部位によっては過剰となる場合があります。

道路橋を例にとれば、①の例としては、図-1に示すようなケーブル等被覆された構造、部材の埋込部、補修補強で隠された部位、基礎の安定などが挙げられる。②の例としては、図-2に示すような床版ひびわれやPC桁やセグメント桁の変色や漏水などが挙げられる。床版は、内部の劣化の状態によっては、下面のひびわれが顕著になる前に抜け落ちに至る場合もある。セグメント桁では、セグメント部に変形が集中し、必ずしも一般部のひびわれ等になって現れないことも考えられる。また、③の例としては、図-3に示すように、吊橋のハンガーケーブルに破断が発生しても、この橋では落橋には至らなかったことが挙げられる。逆に言えば、そのような橋が見分けられ、また、落橋さえしなければよいのであれば、ハンガーロープについては、破断の予兆に着目するよりも破断したことだけに着目することも考えられる。また、ボルト接合は、技術さえあれば、ボルト軸力をモニタリングしてしまう方が、ボルト全数を打音す

るよりも手間がかからず、かつ、診断の信頼性も向上するかもしれない。

これらの解決に多様な機器等を活用することについては、道路管理者、開発者からの期待も大きい。そこで、本稿では、主に道路橋の定期点検を例に、定期点検の質の向上や作業の省力化の両立を図るための国における取り組みや国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）の調査研究の方向性について概観する。



図-1 外観からは変状が把握しにくいものの例

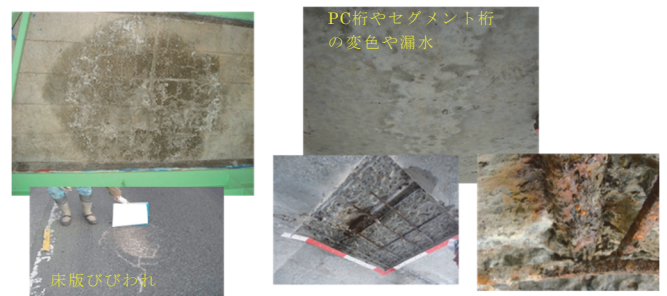


図-2 外観だけでは診断しにくい例



図-3 点検の省力化や信頼性向上の可能性がある部位の例

2. 個別の橋梁で点検方法を最適化するための方法論

診断結果が一定の品質水準を保てるように、様々な部位に様々な点検方法を自由に組み合わせることを一般的とするのであれば、どのような橋に対してでも統一的かつ客観的に組み合わせの考え方を説明できる方法論が求められる。したがって、何らかの規範を以て、診断結果の説明性を評価することが必要になる。ちょうど、道路橋の設計において、性能や構造信頼性は統一的な原則で評価される一方で、個々の橋では、様々な材料や部材配置が取り得るのと同じことである。

平成29年の道路橋示方書の改定では、性能や信頼性を拠り所として、設計から点検診断、修繕までを一つの体系に構築することを視野に入れて性能規定の方法が深化した。道路橋の要求性能と設計原則は以下の3項目からなっている。

- 橋の耐荷性能：設計で参照とする期間（標準は100年とされている）に橋が置かれる状況に対して、落橋等の致命的な状態に対して常に安全な状態であること、及び、状況に応じて必要な橋の機能を満足する適切な状態にあることを、それぞれ所要の信頼性で実現できるように設計する。
- 橋の耐久性能：作用の経年の累積による材料の経年劣化が、橋の耐荷性能に影響を及ぼさないことが、橋の供用期間中確保されるように設計する。一般には、橋の耐荷性能の評価において見込む材料や有効断面について、目標とする期間においては、作用の累積による経年劣化に対しても想定どおりでありつづけられ、また、修繕行為を想定した時に、それが当該部材の維持管理条件に適合するように耐久性を確保する方法を選び、設計する。
- その他橋の使用目的から求められる性能～上記の橋の耐荷性能や橋の耐久性能以外の性能で、求める事項を検討し、適切に設計に反映する。例えば、橋面の通行に関わる不快・不安の排除、フェールセーフ機構の設置、道路橋下の空間を利用しているなどの道路橋からみて第三者被害への鋼材腐食片やコンクリート片の落下の防止などが挙げられる。

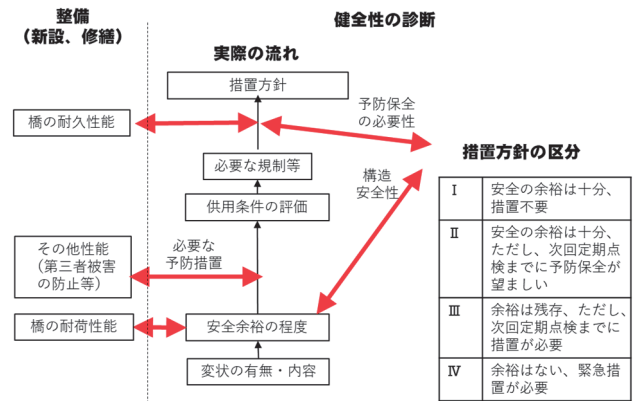


図-4 性能を介した設計基準と点検基準の関係づけ

これに対応するように、設計基準である道路橋示方書が要求する道路橋の性能と定期点検における健全性の診断で求める要求事項を関係づけたものを図-4に示す。このような“構造安全の観点”、“予防保全の観点”というそれぞれの観点からは、同じ部材でも懸念される変状の種類やそれを把握するために方法の適合性、求められる精度も変わり得る。

構造物の性能のうち、最も重要であるのは、構造の安全性であり、道路橋で言えば橋の耐荷性能にあたる。定期点検の技術的助言においても、定期点検の目的の一つとして、道路橋が、道路機能の長期間の不全、落橋やその他構造安全上の致命的な状態に至らないように、次回定期点検までを念頭に置いた措置の必要性について判断を行うために必要な技術的所見を得ることが挙げられている。そして、道路橋示方書では、橋の耐荷性能は、信頼性設計の考え方をを用いて定量的に定義されており、図-5に模式図を示すように、想定する期間中の外力の組み合わせ（結果として断面力として現れる）と構造が有する耐力等の抵抗との大小関係で評価される。換言すると、ある期間を想定した時に生じ得る外力の組み合わせと、構造や部材の可逆性の喪失や耐力に対する余裕との関係により、橋の耐荷性能は評価される。そこで、よりの確な診断のためにより多くの情報を活用できるのであれば、部材等の内部の材料等の状態などが分かるとよい。また、直接的にその情報を得ることで、橋の規模や情報の取得方法によっては、作業の省力化にもつながられる。

まとめると、今後の定期点検に係わる技術基準は、設計基準における橋の性能評価原則に調和さ

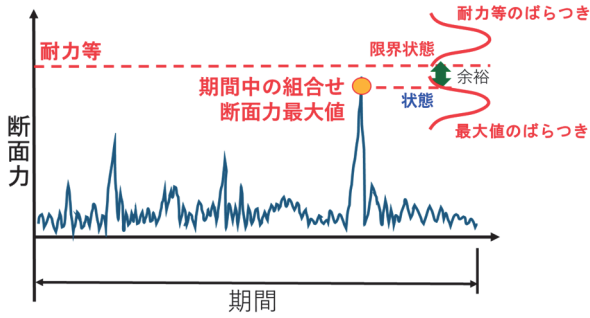


図-5 橋の耐荷性能の照査

せ、特に構造の安全性については、信頼性を確認、制御することを目的とすること、そして、その手段については、多様な技術を受け入れられるように進化させていくことという方法論が有効と考えられる。

第一段階：設計基準を性能規定化し、安全性の達成手段に自由度を導入。また、基準に示される標準的な達成手段に対して、同等の再現性が得られることを要求（平成14年の道路橋示方書で達成）

第二段階：安全性（耐荷性能）について、部分係数や限界状態を用いて、状況（外力）、抵抗（強度）のそれぞれで信頼性を定量的に評価できるように性能規定を深化（平成29年の道路橋示方書で達成）

第三段階：第二段階を、既設構造物の性能の診断に拡張し、状況と抵抗のそれぞれの信頼性を根拠として既設橋毎の性能を確認するための状態の把握方法は自由にカスタマイズ（これからの定期点検に係わる技術基準の目標）という流れで、設計から維持管理まで、性能を根拠とする基準体系に統合するという方法論である。現在の定期点検は、全ての橋、部材で同じ点検作業を最低限求めることで、定期点検制度の質を保つことにつなげているが、将来的には、全ての橋で必須である耐荷性能の水準が確保されることを診断にて求めるものの、点検方法は多様であることを前提にしていこうということになる。これができるれば、設計時点から又は修繕の時点から、定期点検の方法まで含めた設計も可能になるという効果も期待できる。

一方で、過去の定期点検結果と変状の画像等を機械学習させるなどで画像診断を行おうという方法論については、構造物の耐荷性能の信頼性を定

量的に評価することには直接関係しない。性能を根拠とする考え方では、変状の画像等が何らの検討を経ないまま最終的な診断結果になることは考え難いということになる。

3. 点検や診断に関わる多様な技術と道路橋示方書との整合性

3.1 点検支援技術のレベル分け

上記のような考え方で点検基準を作れば、診断結果を5年に一度決定するとしても、各部材の状態の把握は、例えば5年という診断の頻度を念頭に、組み合わせる点検方法の説明性が示せるようになる。図-6に示すように、診断の目的に応じて、耐荷、耐久、その他性能のそれぞれの観点で道路橋示方書と調和した診断ができるように、点検（状態の把握）を、適切な頻度と方法で行えばよいことになるし、点検の方法も、多様な機器等を組み合わせることが一般化してくると期待できる。

このような道路橋の性能を根拠とする新たな基準類の充実、今後の定期点検の支援技術の発展段階や技術開発目標の提示にも繋がる。図-7は、定期点検の技術水準の発展の今後の方向性に関して議論された社会資本整備審議会道路技術小委員会における資料²⁾から抜粋したものである。技術水準が発展しても、診断の責任を担う、知識と技能を有する者の判断は不可欠である。中でも図中オレンジで着色された部分が、特に人の知識と技能による部分である。LEVEL1が、点検方法として部材等で近接目視、打音・触診を行うことに相当する。そこから、知識と技能を有する者が診断を行うにあたって定量的な情報に基づく比率が上がっていくにつれ、LEVEL4までの各技術レベルに属する様々な機器等が組み合わせられて（図-7ではプラス記号が組み合わせを意味している）活

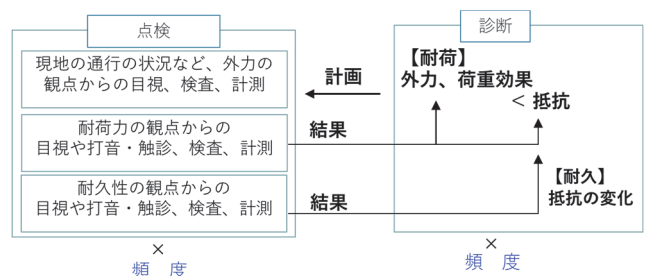


図-6 診断のための橋の性能の評価

用されていく様子を示している。橋の形式や規模も様々であるし、上部構造、下部構造、上下部接続部で構造の特徴も異なることから、どれか一つの技術レベルを全ての橋、構造に画一的に当てはめることは、逆に不合理になり、標準的には、様々な方法が組み合わせられることが妥当と考えられる。

LEVEL3や4のように、外力と抵抗の関係性を直接的に把握する技術も考えられる。図-1のケーブルの例でいえば、LEVEL3や4の技術であれば被覆の外観だけでなく、ケーブル断面積を非破壊検査で調べることもできるし、ケーブル断面構成やケーブルの安全率等も考えながら精度を考えて検査機器を選ぶことが考えられる。検査機器に求める精度も構造毎に、橋の耐荷性能に関して求められる信頼性に照らして、設定できるようになる。一方、構造の特徴や部材の種別によっては、LEVEL2の技術も期待される。例えば、図-3のように一部の部材が完全に能力を喪失したことだけを把握するような技術も考えられ、計測技術としても多様なものが考えられる。また、規模が大きな橋梁などでは、部材の役割も考えて、部材によっては破断等の大きな変状だけを捉えることな

ども考えられる。また、それも直接捉えるか、破断したことで生じる他の部位の変位等を介して捉える手法もあり得る。

また、目視についても、方法の一つとして位置付けることが可能である。橋の性能に基づき診断を行うために、橋に作用する外力、荷重分担、強度、劣化に関係する経年の作用の累積の影響を把握する必要があるが、荷重効果として現れた残留変形の有無、部材間の一体性、部材断面の一体性や有効断面の減少の有無といった観点で外観からも類推できる範囲も大きい。

期待の大きいAI技術は、どこかのレベルに特定されることなく、あらゆるところで使われることになるだろう。図-7では、一番上から2行目にAIの活用として記載されている。最終的に法令が求める知識と技能を有する者が構造物全体の健全性を診断する、点検計画を作るにあたって、過去の損傷例・事故事例などの膨大な情報、点検結果のデータを参考にできるのは有効である。

3.2 個別技術のニーズ

図-8は、著者らが図-7を各レベルで、道路橋ではどのような情報を得るための技術にニーズがありそうか、整理したものである。縦軸は開発難易

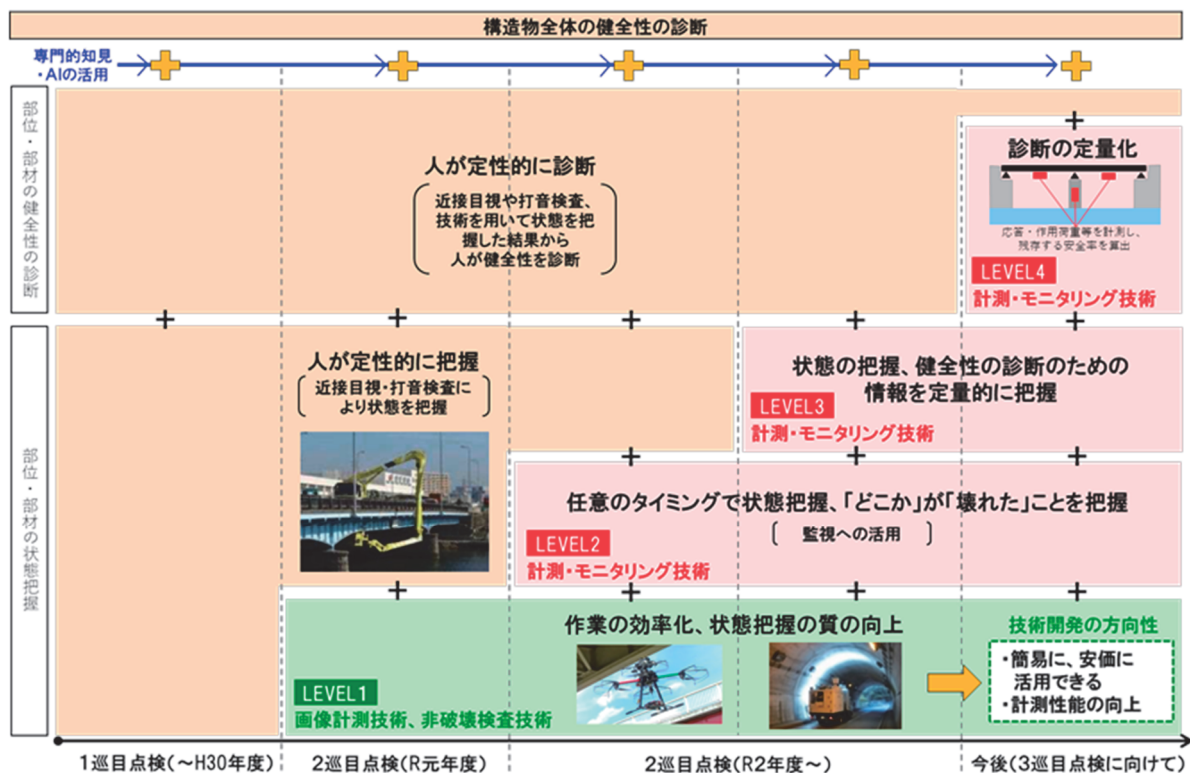


図-7 定期点検の技術水準の発展段階²⁾

度、又は、適用の難易度である。横軸は、性能に基づく診断を行うための情報としての定量化度合い、又は、価値の高さを示している。それぞれの技術は、対応する部材等が1対1の関係で単純に決まるわけではないし、それ単独だけで道路橋の診断に結びつくことはない。図-8では、得られた結果を他の情報とつきあわせて診断に結びつけていくために、知識と技能を有する者が全体を統合していくことが前提となっている。

では、図-7ではLEVEL1に記載されている、画像計測技術のような外観の画像、形状を捉える技術についてニーズがないかという、そういう訳ではない。例えば、図-1の斜面上の基礎の変状の例は、LEVEL1の技術のニーズを示している。部材の変状であれば近接して詳細を確認することで遠望では分からない情報も得られるが、例えば基礎・地盤の安定問題については、局所よりも、全体的な地形や変位の変化を捉えることも重要と考えられる。つまり、画像解析、点群データ、リモートセンシング等の技術は、近づいてみるよりも、広域の情報が定性的な判断の信頼性を向上させるような基礎、斜面などへの適用を進めて行くことがニーズとして考えられる。

一方、画像認識によりひびわれ幅や腐食面積を把握することなどは、質の向上に結び付く論拠を

道路橋の性能の照査体系との関係で求めることは難しい。例えば、ひびわれ幅自体は幅という定量的な情報であるとは言っても、ひびわれには多くの原因が考えられるし、ひびわれ幅が橋の耐荷性能に直接結びつくものではない。以上のように考えると、道路管理者へのアンケートなどで支援技術のニーズを捉えるだけでなく、構造物の耐荷性能を評価するための原則から支援技術に求められるニーズを捉え直すことで、様々な技術の開発から普及につなげていくという考え方もあり得るだろう。

4. 実装に向けた最近の取組み

技術図書の充実と様々な機器等の利用・競争環境の整備に関連して、道路橋を例に、国総研、土木研究所（以下「土研」という。）の最近の取り組みの例を紹介する。

4.1 定期点検の方法を橋毎にカスタマイズするための方法論に関する研究

全ての橋、全ての部材ですべて同じ方法で状態を把握するのでなく、橋毎かつ部材毎に、取得すべき情報とその精度を計画し、橋毎に点検要領を作れるように基準類の充実を図りたい。そこで、国総研では、建設コンサルタンツ協会、地方公共団体（茨城県、京都府）、大学（大阪大学、京都

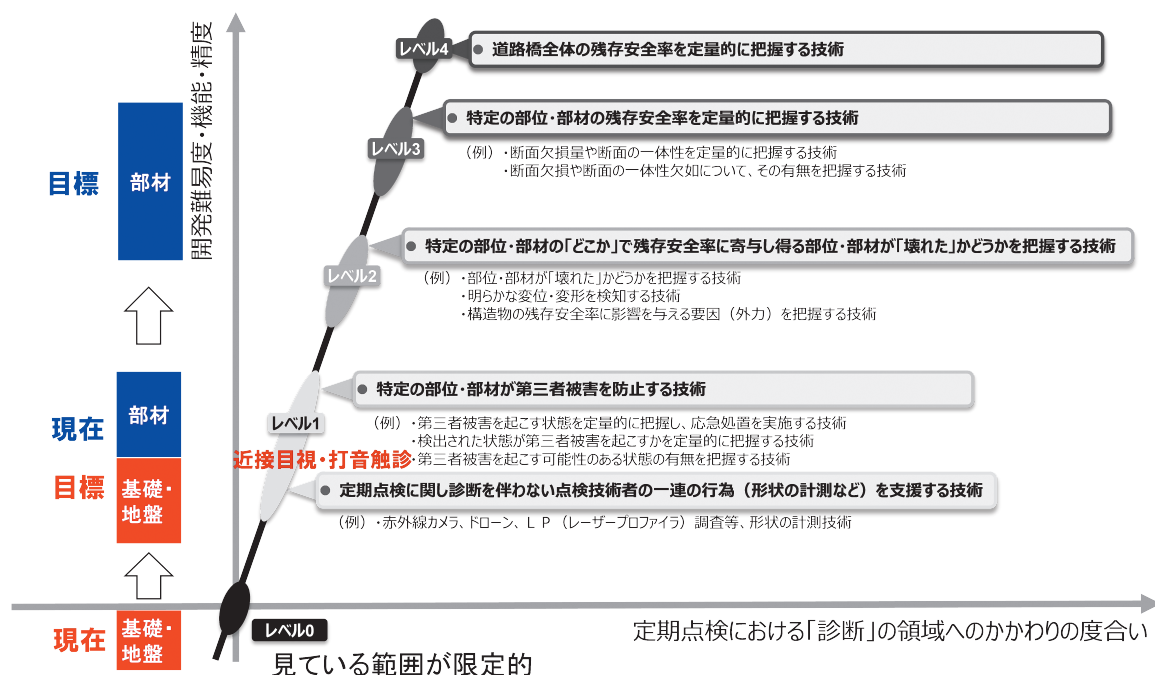


図-8 定期点検の技術水準に応じた要素技術の統合

大学)、本州四国連絡高速道路(株)、土研等と共同研究を実施しているところである。特殊橋、その他一般橋にわけて、さらに上部構造、下部構造、上下部接続部にわけ、また、部材種別毎に、過去の設計基準や施工方法のレビュー、非破壊検査やモニタリング事例のレビューなどを進めつつ、診断に必要な情報の項目や必要な精度などの整理し、技術図書の試案を作りつつある。

一方で、今後、大規模から小規模なものまで具体的な橋を対象に、図-7や図-8のようなレベル別の技術を試案に基づき適用することのシミュレーションや現場での試行を行い、作業時間・人員の縮減の効果を測ることも計画されている。

4.2 機器等の性能の評価

国土交通省道路局では、令和元年8月に新たな点検方法の実装の取り組みの一環として、点検方法の公募を行い、性能の評価・比較方法を検討した。様々な目的の技術について提案を受けつつも、特に、吊り材やPCケーブル、支承の機能障害、基礎の洗掘については直接異常を計測する技術をニーズとして示した。これらのニーズは、図-1～図-3及び図-7～図-8のような分析に一致するものである。その結果、ニーズ型の公募については20技術、合計で47技術の応募があった。

これらの技術について、どのような目的で、橋のどの断面で何を計測するのか、またその精度を考慮して計測結果をどのように活用するのかは、定期点検を統べる知識と技能を有する者が判断することになる。しかし、各開発者が各々で機器等としての仕様・能力の表示を行っており、機器等を選ぶ側は、そのままでは相互の性能を比較検討することが難しい。そこで、「点検支援技術性能カタログ(案)」³⁾として、各技術の特徴、原理、仕様などがまとめられた。国土交通省は、技術の特徴、性能を表す指標や諸元について、標準的に明示されるのがよいと考えられる項目や標示法を提案した。そして、各技術の開発者は、それに沿って担保している性能や、性能を発揮するための使用条件等を記載した。ここでいう性能を表す指標や諸元は、いわゆる計測条件や精度、動作環境等であり、機械としての性能を特徴付けるものである。国総研、土研が、これまでの研究^{例えば4)}

をもとに標示項目や標示法の整理に協力した。

従前からカタログに記載されている技術も含めて、現在、80もの点検支援技術が収録されるに至っている。

5. おわりに

構造物の老朽化、激甚災害、労働人口減少などの様々な問題があるなかで、様々な技術を組み合わせ、より適確かつ合理的に構造物の管理を行えるようにする手段への期待は大きい。そのためには、要求性能、信頼性を拠り所に道路構造物を管理できるよう、技術基準類の性能規定化が不可欠と考えられる。また、結果的には、このような方向性での検討は、道路利用者に対する道路の性能の説明性にもつながると考えられる。本稿が今後の様々な分野での点検、監視技術の開発において参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 第11回道路技術小委員会 配付資料
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001312713.pdf>
- 2) 第12回道路技術小委員会 配付資料
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001347236.pdf>
- 3) 点検支援技術性能カタログ(案)(令和2年6月 国土交通省)
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/>
- 4) 道路橋の点検効率化等への計測・非破壊検査技術の適用性に関する共同研究(I)、国土技術政策総合研究所資料、共同研究報告書、第981号、2017
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0981.htm>

餘久保 陽



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路構造物研
究部橋梁研究室 主任研
究官
YOKUBO Akira

白戸真大



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路構造物研
究部橋梁研究室長、博士
(工学)
Dr. SHIRATO Masahiro