

現行のロボット技術等による橋梁点検を支援するための インフラ構造の検討

林 利行・大石龍太郎・吉田好孝・安井成豊

1. はじめに

国民の安全・安心な生活を確保するためには、老朽化するインフラの確実なメンテナンスが必要である。一方、将来に向け、少子高齢化などによる建設産業における労働力不足や技術者不足等の懸念が有り、これらを解決するため、ロボット技術のインフラメンテナンスへの活用が望まれる。

そこで、(国研)土木研究所では、(一財)橋梁調査会、(一社)日本建設機械施工協会と共同で、ロボット技術の開発・普及レベルを踏まえ、従来の管理基準や手法を前提に、ロボット技術による「橋梁メンテナンスの支援・効率化」の早期実現を図るための研究に取り組んでいる。

本報においては、橋梁点検において活用が見込まれるロボット技術に関する調査と、それらロボット技術の橋梁メンテナンスへの導入を支援するため、現行のロボット技術では点検することが困難な箇所を解消するための橋梁構造の対策について検討した結果について報告する。

2. ロボット技術の調査・整理

2.1 ロボット技術の基本要件等調査・整理

ロボット技術ごとに移動・検査のための主要な技術(要素技術)や手法等が異なり、インフラにおける点検可能な部位・項目が異なる。そこで、本研究では、国が管理する橋梁の定期点検を対象に、活用実績のある、または、活用が見込まれるロボット技術について、土木研究所が委員として

参加する「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会 橋梁維持管理部会：次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 橋梁維持管理技術の現場検証・評価」(以下「橋梁現場検証」という。)において評価されたロボット技術を対象に調査・整理を行った。

国が管理する橋梁定期点検においては「損傷状況を把握するための近接目視等の実施」、「対策区分の判定」、「健全性の診断」を行う。そして記録を残すにあたっては、対策区分の判定や健全性の診断結果を残すことに加えて、近接目視にて得た情報を損傷図、並びに、要素と呼ばれる単位で写真や観察された損傷の種類、また、その程度を客観指標にしたがって分類した結果(「損傷程度の評価」と呼ばれる)を残す。

これに対し、ロボット技術を活用し、これらを支援するための一連のプロセスについて整理すると、(a)「移動」(飛行など)(b)「外観情報の取得」(写真撮影など)(c)「記録作成」(損傷判定ソフトウェアなどによる損傷解析など)である。(a)、(b)、(c)に活用される技術を整理したところ、(a)移動については、4つの形式(飛行型、車両型、ポール型、懸架型)に分類される。また、(b)「外観情報の取得」については、カメラにより画像(動画・静止画)を取得する形式であった(21技術中20技術)。代表例を以下に示す(表-1)。

表-1 橋梁現場検証に参加したロボット技術例

(a)移動	(b)外観情報の取得	(c)記録作成
飛行型A	最大画素数(静止画)：4,240万画素 (SONY α 7R II)	オルソ作成 (自社開発) 画像からひびわれ幅と長さを解析 (自社開発)
車両型B	最大画素数(静止画)：2,000万画素 (SONY FDR-AX100) 最大画素数(動画)：1,420万画素 (SONY FDR-AX100)	オルソ画像合成 (Kuraves-Th) 抽出 (Kuraves-Th)、作図 (V-nas) クラックスケール (Φ150mm) を装備、幅0.1mm~1.0mmのクラックをモニター計測
ポール型C	最大画素数(静止画)：92万画素 (自社開発) 最大画素数(動画)：92万画素 (自社開発)	画面上にクラックスケールを表示し計測を行う。 20m先の0.2mm幅のひびわれを視認可能 (自社開発)
懸架型D	最大画素数(静止画)：1,630万画素×2 (ステレオ撮影) (Fujifilm X-T1) 最大画素数(動画)：207万画素 30frame/sec (フルHD) (Fujifilm X-T1)	ステレオカメラによる正対化補正+合成 (自社開発) ひびわれ解析：画像からひびわれ幅と長さを自動解析 (自社開発) 損傷計測：ステレオカメラによる3D測距 (自社開発)

2.2 ロボット技術の橋梁定期点検への適用条件等の調査・整理

定期点検において、橋梁の外観の情報は、ひびわれ図や写真とともに、要素毎、損傷種類毎に評価する。これらの記録は橋梁の状態を示す最も基礎的なデータとして蓄積され、維持・補修などの計画の検討などに利用される。そのため、対策区分の判定や健全性の診断とは異なり、損傷程度の評価は定められた客観的判断基準にしたがって主観を交えずに行うことが求められている。

本研究では、「橋梁定期点検要領」（平成26年6月 国土交通省 道路局 国道・防災課）付録-1「損傷評価基準」に従って「損傷程度の評価」を行うことや同付録-3の記載要領に従い「損傷図」「損傷写真」の作成・整理を行うことを支援するために活用が期待されているロボット等新技术を対象に、橋梁定期点検への適用可否を整理した（橋梁現場検証）。(a)「移動」は、必要な情報を取得できる位置に接近する性能として、移動可能な広さ、動きの安定性、操作性、効率などを「足場を必要とする部位を足場なしで点検可能（アクセス性）」、「強風、太陽光、照明などの影響を受け難い」、「他の多くの現場において効果を発揮できる」等の評価項目に基づき評価した。その結果、これらロボット技術では、概ね実現されているレベルにあることが確認された。

次に、(b)「外観情報の取得」は、鮮明な画像の取得や損傷を見分けるデータを採取する性能であり、応募技術により品質に差がみられたが、幾つかの技術については点検情報の取得に実用的なレベルであることが確認された（表-2）。

なお、表中の検証項目①~⑩については以下の通り（次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会 橋梁維持管理部会：次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 橋梁維持管理技術の現場検証・評価の結果、2016）。

表-2 ロボット技術の橋梁現場検証結果例

ロボット技術名称	検証項目(※)									
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
飛行型A	△	○	○	○	△	○	○	◎	○	○
車両型B	○	◎	◎	◎	○	○	○	○	◎	○
ボール型C	○	◎	◎	×	◎	○	○	◎	○	○
懸架型D	-	-	◎	-	△	○	-	△	△	○

判定凡例 ◎：良好、○：可、△：課題が残る、×：不可

- ①点検調書作成支援：損傷図（調書その5）
- ②点検調書作成支援：損傷写真（調書その6）
- ③足場を必要とする部位を足場なしで点検可能（アクセス性）
- ④現場での点検作業結果の記録、整理作業、調書作成の費用や手間を削減できる
- ⑤現場での安全確保
- ⑥強風、太陽光、照明などの影響を受け難い
- ⑦損傷状況の把握、評価がより効率的あるいは正確になる
- ⑧現場への搬入、設置及び撤去が容易なこと
- ⑨他の多くの現場において効果を発揮できる（汎用性）
- ⑩性能保証範囲が明確であり、かつそれを客観的に示すことが可能

これらロボット技術を橋梁点検に活用するため、「外観情報の取得」に対する障害を排除した橋梁構造について本研究において検証した。以下で報告する。

3. ロボット技術による橋梁点検

3.1 橋梁における点検困難箇所

橋梁の管理者（調査対象：国土交通省、内閣府 沖縄総合事務局、地方公共団体（4都県）、本州 四国連絡高速道路株式会社）や点検員を対象に、点検を行うことが困難な箇所（以下「点検困難箇所」という。）についてアンケート調査を行った。調査結果から、代表的な事例として116件を抽出・分析・整理したところ、点検困難箇所として、「支障物により近接目視が困難」（35件）、「上部工形式の特性により近接困難」（23件）、「点検箇所の空間が狭い」（19件）、「(B2)橋台や橋脚が高く、橋面または地上からの近接困難」（16件）、「点検時間の制約有り」（13件）、「その他」（12件）などが挙げられた（図-1）。

以下では、これら点検困難箇所のうち、点検員・ロボット技術共通の課題である「支障物により近接目視が困難」を解決するための検討を行っ

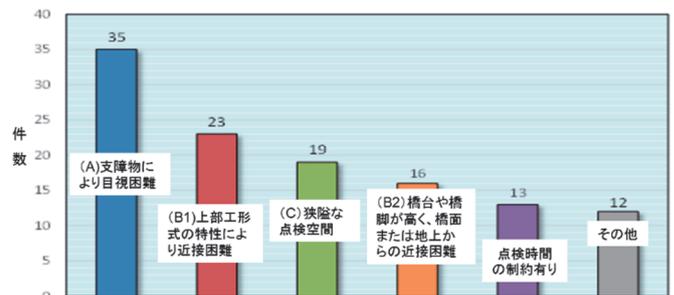


図-1 橋梁における点検困難箇所

た結果について報告する。

3.2 添架物設置方法

3.2.1 添架物設置における課題

道路には、水道、ガス、通信など社会の基盤となる様々な設備が占有されている。これら占有物件は道路橋においても添架されており（以下「添架物」という。）、桁間に設置することで、点検時に以下のような障害が見られる。

(1)添架物と主桁の間隔が狭く、高所作業車などのバケットを桁間に入れることができない(※) (図-2)

※添架物の支持部材の間隔が狭い場合は、添架物と主桁の間隔が広くても高所作業車などのバケットを桁間に入れることができない

(2)添架物を桁間全面に設置し桁間が全く見えなくなる等死角が発生する (図-3)

添架物の設置に関しては、東北地方整備局が作成した「道路橋計画設計資料」(平成17年5月) (以下「東北地整設計資料」という。)や一部の地方公共団体が作成した手引きなどがある。東北地整設計資料においては、(2)のような課題への対応策として、添架物の配置や参考例が規定されているが、(1)のような課題には必ずしも対応していない。

3.2.2 ロボット技術による点検を可能にする添架物設置方法の検討

(1) 高所作業車

ロボット技術を活用し点検を行うために必要な空間を確保するために必要な添架物設置方法について検討した。

添架物と主桁の間に高所作業車などのバケットを入れることが可能であることに加え、点検上、死角が発生しないよう、点検員が活動するための空間を確保する必要がある。例えば、検査路を設ける場合の横桁貫通孔寸法を参考とした場合、点

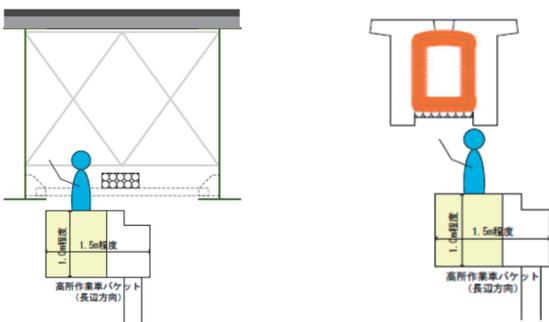


図-2 添架物と主桁の間隔が狭い 図-3 添架物を桁間全面に配置

検員の上半身を入れることができる幅として、500mm程度確保することが必要である。この場合、画像撮影を行なう場合は、添架物と主桁の間から撮影装置を桁間に送り込むことを想定する。

なお、このような状況で点検作業を行う場合、添架物や主桁と高所作業車などのバケットに人間が挟まれる危険性があるため、十分に注意を払う必要が有る。

(2) 飛行型点検装置を活用した橋梁点検

飛行型ロボットが桁下にアクセスする場合、風速や構造形状による影響を受けるが、橋梁現場検証では、概ね橋梁本体より1~3m程度の距離を保つことが可能であった。そのため、桁下2mから飛行型点検装置などを用いて床版の撮影を行なう場合を想定し、撮影範囲のシミュレーションを行った。

カメラ装置：35mm換算、焦点距離25mmレンズ
 撮影位置：主桁と添架物の間隔中央。
 撮影距離：主桁下フランジから2.0m
 橋梁構造（鈑桁）：主桁間隔2.60m、
 添架物：直径100mmの管10本からなり、全体で200mm（幅）×500mm（高さ）

撮影困難範囲はないが、添架物直上付近において十分な画像ラップを確保できない結果となった(図-4)。画像ラップ不足は、後の調書作成時の作業性の低下を招く。

そこで、添架物の設置位置を主桁下部まで下げたシミュレーションを行なったところ、ラップ範囲が拡大することがわかった(図-5)。

ロボット技術による点検を行う場合、桁下から飛行型ロボット技術を用いて画像撮影を行なうことを考慮すると、添架物の設置位置を極力下げることが望ましい。

3.3 構造検討（横構・対傾構）

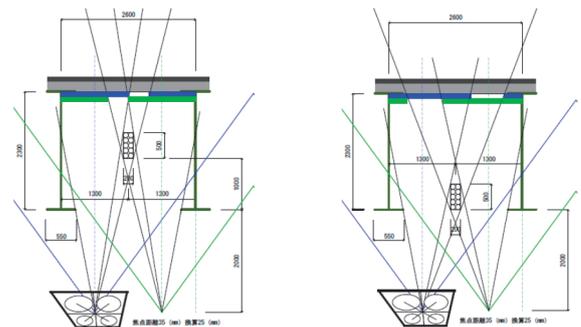


図-4 添架物を上方に配置 図-5 添架物を下方に配置

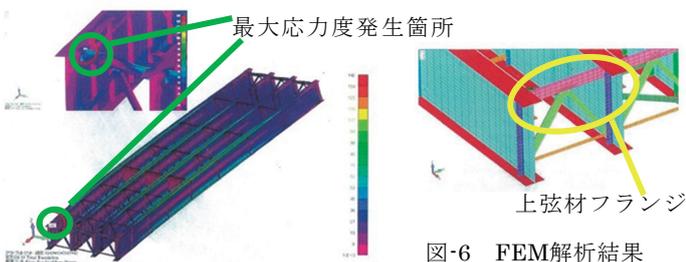
横構や対傾構は風や地震など橋梁に作用する水平荷重に抵抗し、それらの水平荷重を各主桁に伝達するとともに、橋梁の立体的な形状を保つ役割を有している。加えて、対傾構は鉛直荷重に対し、荷重を配分する効果がある。一方、下横構は、橋梁点検用車による桁下から桁間や床版へのアプローチ、対傾構は、桁間を縦断方向への移動時の支障となる。

そこで、構造に影響を与えない範囲で下横構や対傾構の本数や間隔の見直しを検討した。具体的には、横構がなく、対傾構の間隔を広げた数種の解析モデルを作成し、死荷重、活荷重、風荷重及び地震の影響について単独載荷または組合せ載荷を行い、各部の応力や変形を調査した。

なお、横構を設けない構造や対傾構の間隔を広げた構造が床版など他の部材に及ぼす影響などについて十分に検討が必要である。

対傾構間隔は変えず、下横構を設けない構造について、地震荷重時に許容応力度以上の応力集中が発生していた端対傾構の上弦材フランジ（図-6）の板厚を13mmから21mmに増厚することで、発生応力が許容応力度以下に収まることをFEM解析によって確認した。

また、中間対傾構のない構造について、FEM解析では鉛直荷重に対し数%程度の増加傾向が見られたが、荷重の組み合わせを考慮しても許容応力度を超過するレベルには至らないと判断される。



L1レベルの設計荷重に対しては、下横構のない構造としても補強範囲が比較的小さいことから、実現性は高いと思われる。

4. まとめ

本報では、橋梁点検に活用が見込まれる現行のロボット技術を対象に、橋梁点検における「点検困難箇所」のうち、特に管理者等から課題として挙げられた「支障物により近接目視が困難」を解決するために「添架物の設置方法」、橋梁構造のうち「横構・対傾構」の本数や間隔の見直しについて検討した結果について報告した。

本研究では、今回紹介した内容に加え、「点検困難箇所」として、既設橋梁を対象とした、桁端部の落橋防止構造対策などにも取り組んでいるところである。

引き続き、橋梁点検におけるロボット技術の導入を支援できるよう、ロボット技術の「移動」、「外観情報の取得」に加え「記録作成」における課題を明確にし、導入支援のための研究に取り組んでいく。

おわりに

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：国土交通省）によるものである。

参考文献

- 1) 次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 橋梁維持管理技術の現場検証・評価の結果、平成28年3月、次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会 橋梁維持管理部会 <https://www.e-robotech.info/>平成27年度現場検証技術db-1/平成27年度橋梁維持管理部会db/
- 2) 吉田好孝：道路橋点検に関するロボット導入開発の状況、J-BECレポート 2015、vol.11、pp7-11、2015.10
- 3) 橋梁定期点検要領、平成26年6月、国土交通省
- 4) 道路橋計画設計資料、平成17年5月、東北地方整備局

林 利行



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 主任研究員
Toshiyuki HAYASHI

大石龍太郎



前（一財）橋梁調査会常務理事（兼）企画部長、現 オリエンタル白石（株）取締役
Ryutaro OOISHI

吉田好孝



（一財）橋梁調査会企画部調査役
Yoshitaka YOSHIDA

安井成豊



（一社）日本建設機械施工協会研究第一部部長
Shigetoyo YASUI