

講演概要 ロボットを活用したコンクリート橋 鉄筋かぶり測定の効率化検討

古川 武英¹・栗林 健一¹・秋山 保行¹・栗原 陽一²・松橋 貫次²

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所
(〒331-8513埼玉県さいたま市北区日進町2丁目479番地) ¹E-mail: takehide-furukawa@jreast.co.jp

²株式会社オンガエンジニアリング
(〒822-1101福岡県田川郡福智町赤池474-117) ²E-mail: kurihara@onga-engi.com

2031 年度より東北新幹線（東京～盛岡間）および上越新幹線（大宮～新潟間）の土木構造物を対象に、大規模改修を実施する計画としており、鉄筋コンクリート橋については全延長に亘り、表面改修工を施工する方針としている。最適な表面改修工計画策定を目的とし、鉄筋コンクリート橋を対象に、かぶり、水掛かりおよび中性化深さと鉄筋腐食を起因とした変状との関係性について分析を実施した。その結果、鉄筋腐食を起因とした変状はかぶりと水掛かりに因るところが大きく、それらを基に、表面改修工の最適な計画策定が可能となった。

しかし、現在のかぶりを把握するのに人力による測定を実施しており、労力やコストが過大となっている。また、かぶり測定の対象箇所となる鉄筋コンクリート橋の部位や範囲が明確でないといった課題がある。

そこで、かぶり測定の機械化に向け市場調査によるロボットの比較を行い、壁面走行ロボットを活用したかぶり測定方法の機械化を検討した。また既往文献の確認や既測定データを用いた検討および実高架橋測定を実施し、効率的なかぶり測定方法を検討した結果、一定のコストダウン、効率化が見込める可能性が確認された。

Key Words : reinforced concrete bridge, concrete cover thickness, wall running robot, electromagnetic wave radar

1. 目的

2031 年度より東北新幹線（東京～盛岡間）および上越新幹線（大宮～新潟間）の土木構造物を対象に、大規模改修を実施する計画としており、鉄筋コンクリート橋については全延長に亘り、表面改修工を施工する方針としている。最適な表面改修工計画策定を目的とし、鉄筋コンクリート橋を対象に、かぶり、水掛かりおよび中性化深さと鉄筋腐食を起因とした変状との関係性について分析を実施した。その結果、鉄筋腐食を起因とした変状はかぶりと水掛かりに因るところが大きく、それらを基に、表面改修工の最適な計画策定が可能となった。

しかし、現在のかぶりを把握するのに人力による測定を実施しており、労力やコストが過大となっている。また、かぶり測定の対象箇所となる鉄筋コンクリート橋の

部位や範囲が明確でないといった課題がある。

そこで、かぶり測定の機械化に向け市場調査によるロボットの比較を行い、壁面走行ロボットを活用したかぶり測定方法の機械化を検討した。また既往文献の確認や既測定データを用いた検討および実高架橋測定を実施し、効率的なかぶり測定方法を検討した。

2. 既往文献等による調査

かぶり不足は以下の要因例のように設計、施工段階での原因が考えられる。

- ・鉄筋の自重によるたわみ
- ・コンクリートの打設圧により発生する鉄筋ずれ
- ・不適切なスペーサーの使用や設置

表-1 施工誤差が大きくなる傾向有の部位について

部位	原因
ラーメン高架橋柱側面	施工時に鉄筋と型枠の位置関係が全体的にずれるため
ラーメン高架橋上層梁側面	上層梁の鉄筋は柱の鉄筋と交差するため、柱の鉄筋の位置がずれるとそれに影響するため
ラーメン高架橋張出スラブ	片持ち形式であるため、部材の先端で鉄筋が垂れ下がり、かぶりが不足しやすいため

限定した測定点から可能な限り精度よく部材全体のかぶりを推定する方法を検討するため、市販図書調査、設計資料およびかぶりについて記載された論文からかぶり不足の要因を整理した。

(1) 市販図書、設計資料調査

調査資料は、対象区間における設計資料やコンクリートに関する市販図書を調査対象とした。調査の結果、市販図書からはかぶりの不足に関する原因や傾向は確認できなかった。また、設計資料からは対象区間におけるかぶり厚の規定について確認できたが、建設当時の施工方法またはかぶり保持の方法の記載は確認できなかった。

東北新幹線工事誌 上野・大宮間、東北新幹線工事誌 大宮・盛岡間および上越新幹線工事誌 大宮・新潟間より、かぶりの規定値ならびに、大宮を境として、大宮より北側は寒冷地用、大宮より南側は温暖地用のかぶりの適用基準が使用されていることを確認した。

(2) 論文調査

鉄道高架橋のかぶりについての記載のある論文の調査を実施した。調査の結果、日本コンクリート工学会が発行する「コンクリート工学年次論文集」より、「鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する調査研究」1)にて、かぶりの施工誤差の傾向が確認できた。なお、本論文は、2000年度に建設された鉄道 RC 高架橋（構造形式：RC ラーメン高架橋、RC スラブ桁、RCT 形桁）を対象に、かぶり厚の調査を行い、かぶりの施工誤差が生じる要因とその大きさについて検討したものである。

本論文で対象としている部材は、ラーメン高架橋の柱部材の側面、上層梁部材の下面および側面、床版下面、張出スラブの下面、スラブ桁の主桁下面、張出スラブ下面等である。対象部材についてかぶり厚の調査を行った結果、表 1 に示すようなかぶりの施工誤差の傾向が確認されている。

また、施工誤差を小さくする方法としてスペーサーの使用量が多くなるとかぶりの施工誤差が小さくなり、3 個/m²程度以上配置すると、施工誤差を一定以内に抑えることができる傾向が確認されている。

3. かぶり測定結果の整理

(1) 整理結果

実高架橋におけるかぶりの測定結果を構造物（高架橋）、部材、部位および測定面ごとに整理し、かぶりの測定値と規定値の比較および各部位におけるかぶりのばらつきを確認した主な傾向を以下に示す。

- ・縦梁と横梁の下面は、ほぼすべての部位において、かぶり測定値が規定値を下回っている。
- ・縦梁側面は、鉄筋が外側と内側のどちらかに偏る傾向を示す場合が多い。
- ・縦梁側面は概ね規定値を中心にばらついているが、傾向が明確ではない。
- ・横梁側面は、鉄筋が外側と内側のどちらかに偏る傾向を示す場合が多い。

(2) かぶり測定データの分析

かぶり測定データを用いて分析した結果、梁下面、縦梁側面でかぶり不足傾向が強く、測定が必須と分類された。しかし、本傾向は分析対象データが梁で変状が発生している部材を選定して測定したものが多かったことも要因の一つと考えられる。

4. 効率的なかぶり測定を目的とした測定・作業時間の計測と分析

ラーメン高架橋 3 径間を対象に測定を実施し、捕捉率および測定・作業時間計測・分析を実施した。鉄筋目視調査にて 15mm 以下で鉄筋腐食のグレードが上がっていたことから、閾値を 15mm 以下とし部位ごとに全測線で捕捉できた本数に対して、各測線でどの程度捕捉できたか（捕捉率）に着目して分析した。

捕捉率の分析結果および、現地調査における計測時間や作業内容などを踏まえ、測線数を変化させた場合の測定単価を算出した。

想定されるキロ程をもとに、各構造（1 層構造、2 層構造、RC 桁）が各延長で同一条件（桁下立入可・不可）だった場合の測定方法（人力・機械・測線）を変えた場合についての費用比率、所要日数比率を計算した。なお、RC 桁については、1 層構造と同様として、計算した。

今回測定したデータを用いた分析結果では、捕捉率を落とさずに効率的に測定する方法として、梁部材は全面測定、張出スラブ、床版は 2～3 測線程度とする方法が適当と考えられる。また、条件を同じとした場合に、全測線測定と測線数を効率化したものとを比較すると、効率的な測定方法ならびに機械化によって一定のコストダ

表-2 橋りょう用点検ロボット方式

方式	型式	主な測定対象と方法	備考(2018/10時点)
飛行方式	マルチコプタ型 (ドローン)	画像撮影による点検や、農薬散布など	多方面で実用化
壁面走行方式	真空吸着型	橋梁側面、下面の打音、レーダ、写真撮影など	開発段階
	磁力吸着型	画像検査・清掃など	実用化（※吸着面が磁性体であることが必要）
	プロペラ推力型	橋梁側面・下面のレーダ、写真撮影など	研究段階
延長方式	懸垂型	橋梁下面の画像撮影など	開発段階
	アーム型	橋梁側面の画像撮影など	フィールド試験段階

ウンが見込める可能性が確認された。今回は機械化の測定時間はあくまでも想定であるため、試験測定等を繰り返し、正確な効果を算出する。

5. 機械化に向けたロボットの比較検討

(1) 整理結果

実用中・研究段階も含めて、現在考えられる橋りょう用点検ロボット方式について市場調査を行い、それらを比較検討した。結果を表2に示す。延長方式は他の方式に比べ大型であり、機動性に劣るという性質を有する。この性質は橋りょうの柱間隔が長大でない鉄道の橋りょう点検には適していないため、延長方式を除外することとした。

(2) 橋りょう用点検ロボット運用上の課題

飛行方式と壁面走行方式のロボットの運用上の課題として、壁面走行方式は飛行方式に比べ測定面へのアクセスが不利である。しかし、この課題は、移動補助手段の開発を行う事で克服可能と考える。

一方、飛行方式における“航空局に対する飛行許可申請”は法規制のため、技術開発での解決は困難であり、実運用上の大きな課題となる。さらに、同一機能を持った機体を考えた場合、壁面走行方式は飛行方式に比べ操作が容易である。以上から、かぶり測定の機械化においては壁面走行方式（移動補助手段を含む）を選定した。

(3) 壁面走行方式の密着方法の検討

密着方法の種類と特徴は以下の通り示す。コンクリート橋の梁部材等でも走行可能であることを考慮し、高い走行安定性を誇る、真空吸着型を採用することとした。

- ・電磁吸着型：高い走行安定性を誇るが、走行面が磁性体であることが必要。
- ・真空吸着型：高い走行安定性を誇るが、走行面に高い平坦性が必要。機器寸法・重量が大きい。
- ・プロペラ推力型：他方式に比べ走行安定性が劣るが、不陸面の走行性能が高い。

(4) かぶり測定機器の検討

コンクリート中の鉄筋かぶりを非破壊で測定する方法としては、「電磁誘導方式」と「電磁波レーダ方式」が存在する。非接触で連続した測定が可能であり、機器自体の重量が軽いことを条件とし、電磁波レーダ方式のかぶり測定機器を選定した。

- ・電磁誘導方式：コンクリート品質に測定精度が影響されにくい、かぶりが厚い場合は測定不可能
- ・電磁波レーダ方式：かぶりが厚い部分に関して測定が可能。コンクリート品質に測定精度が影響されやすい（表面が濡れている等）

6. 吸引型壁面走行ロボットの開発

株式会社オンガエンジニアリングと共同で吸引型壁面走行ロボットの開発を行った。

(1) 仕様

- ・吸着方式：高速ターボ排気方式
 - ・シール：12分割ブラシ做い方式
 - ・本体寸法：W400mm×D560mm×H220mm
 - ・総重量：17.38kg（電磁波レーダー含む）
 - ・給電方式：電源用ケーブルにより外部電源（3kVA 発電機）
 - ・走行安全装置：壁面等衝突防止および踏み外し防止として、赤外線距離センサを前方両端に配置。
 - ・吸着異常検知機能：吸引内の真空圧を圧力センサでリアルタイムにモニタリングを実施する。ロボットの吸引力の低下による剥離落下を防止する為、緊急停止する。後退を許可するか、不動とし降下対策に移行するかは現場作業者の判断とする。吸着安全域は緑色LED、吸着危険域は赤色LEDで操作者にアラームとして知らせる。
- ロボットの設計図を図1に示す。

(2) ロボットの検証

高架橋にて吸引型壁面走行ロボットの評価試験を行っ

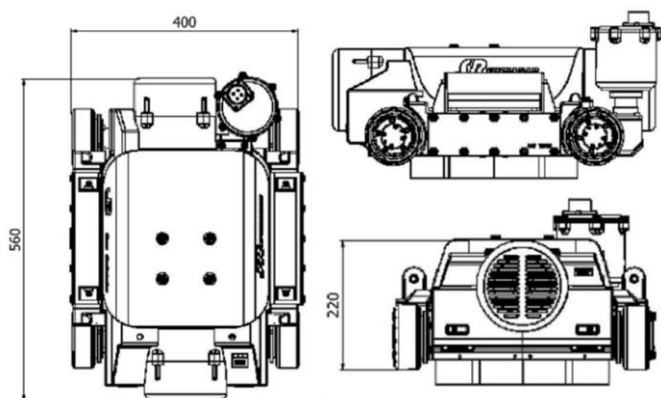


図-1 ロボット設計図



図-2 ロボット走行状況

た。(図2)結果は良好で、高架橋の側面および下面での走行に問題がないことを確認した。

位置把握の精度の確認と評価および、使用するカメラの選定を行った。

(3) ロボットの測定性能の評価

高架橋において、高所作業車を用いた人力での従来方法とロボットを使用した方法とでかぶり測定時間を計測した。両者を比較した結果、従来方法に比べてロボットの方が短時間で計測できるという結果となった。さらに、ロボットにおいては、アプローチツールを使用する時間割合が大きいため、本作業を効率化することで、更なる時間短縮につながると考える。また、今回は1径間毎に計測したが、張出スラブや長い径間の桁など、通して測定できる部位はより一層の効率化が図れると考えられる。

(4) 位置把握の検証

将来的に取得データの位置情報の一元的管理を目指している。高架橋下面などは衛星情報を用いた位置把握が難しいことから、カメラ映像による Visual SLAM 技術を活用した位置把握について検討を行い、高架橋での撮影を行った。撮影した動画により取得した座標データの位

7. まとめ

かぶり測定の従来方法は、高所作業車が配置でき、さらにアプローチができる区間でしか測定ができない。また狭隘部や高所では、高所作業車の移動・据え付けといった盛替えの回数が増える傾向にあり、作業性が著しく低下する。一方、ロボットはアプローチツール等によって測定対象部位に吸着させることができれば高架下の制約を受けずに測定することができる。今後は、ロボットの落下防止対策、耐久性について検討し、更なる効率化に向けてロボットの改良を進めていく。

参考文献

- 1) 「鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する調査研究」コンクリート工学年次論文集, Vol25, No.2, 2003

(Received April 2, 2021)

(Accepted June 4, 2021)

INVESTIGATION OF EFFICIENCY CONCRETE COVER THICKNESS MEASUREMENT USING ROBOTS

Takehide FURUKAWA, Kenichi KURIBAYASHI, Yasuyuki AKIYAMA
and Yoichi Kurihara, Kanji MATSUHASHI

We investigated mechanization of the concrete cover thickness measurement method. We measured thickness of covering concrete of reinforcing steel in railway bridge using a robot. From these results, it was confirmed that possibility to improve work efficiency.