

論文 実 RC 構造物の鉛直部材を対象としたかぶりの推定手法

松下 将士*1・轟 俊太郎*1・田所 敏弥*2・石田 哲也*3

要旨: 鉛直部材であるボックスカルバートの側壁, ラーメン高架橋の柱を対象としてかぶりの計測を行い, 鉄筋の形状を把握し, 限定された計測点でのかぶりから, 部材全体のかぶりを推定する手法について検討を行った。その結果, 最外縁の数本の鉄筋を選定し, ある特定の点で計測したかぶりから部材全体のかぶりを推定する手法により, ボックスカルバートの側壁の場合, 配筋等の諸元が本対象と同様で, 高さ 1.35m 幅 8m 程度の範囲であれば, 側壁全体のかぶりの傾向を捉えることができる。同様に, ラーメン高架橋の柱の場合, 上下端で柱の帯鉄筋のかぶりを計測すれば, 柱全体のかぶりを精度良く推定することができる。

キーワード: 実構造物, 鉛直部材, かぶり, 推定法, 鉄筋

1. はじめに

かぶりは, 鉄筋表面からコンクリート表面までのコンクリートの厚さであり, かぶり部分のコンクリートの品質と共に, 腐食因子の浸入程度を左右し, 腐食因子から鉄筋を保護する機能を有する。また, 腐食膨張圧によるかぶりコンクリートの変状の発生に対して, 力学的に抵抗する機能を有する。したがって, かぶりは, 鉄筋腐食やそれによる変状の発生と進行に影響を与えるため, 鉄筋腐食による劣化予測を行う上で, 非常に重要なファクターである¹⁾。ただし, 構造物中のかぶりは, 必ずしも配筋図通りではなく, 同じ鉄筋の軸方向であっても施工誤差を有し, 同一のかぶりでないことが明らかである²⁾。そのため, 鉄筋腐食による劣化を精度良く予測するには, 可能な限り詳細にかぶりを計測する必要がある。しかしながら, 外観からの目視では, かぶりが確認できないことが維持管理上のネックとなっている。

かぶりの計測方法には, 一般的に, 電磁誘導法等を用いて非破壊で計測する方法および鉄筋のはつり出しから直接的にかぶりを計測する方法等がある。電磁誘導法は, 比較的容易に精度良くかぶりを計測することが可能であるが, 点に近い計測であり, 膨大な構造物・部材中の全てのかぶりを計測することは容易ではない。

そこで, 広範囲のかぶりを自動で取得する技術の向上の他, 限定された計測点で得たかぶりから, 可能な限り精度良く構造物・部材全体のかぶりを推定する技術が必要である。これは, 既設構造物の劣化予測の他, 施工管理方法や設計へのフィードバックとしての情報, 新設構造物の初期データとしてのかぶりの計測点を決めることにおいても有益であると考えられる。

本研究では, 鉛直部材であるボックスカルバートの側壁の内空面, ラーメン高架橋の柱を対象としてかぶりの

計測を行い, コンクリート中の軸方向鉄筋および配力鉄筋から構成される立体的な形状(以下, 鉄筋の形状)を把握し, ある特定の計測点でのかぶりから, 部材全体のかぶりの推定手法について検討を行った。

2. かぶり計測の概要

2.1 計測対象構造物・部材の概要

表-1 に, 計測対象とする構造物の諸元を示す。計測対象とする構造物・部材は, ボックスカルバートの側壁およびラーメン高架橋の柱である。

かぶりの施工誤差は, 部材間の鉄筋の取り合いおよびスペーサーやセパレータなどの配置, 側圧など鉄筋に生じる作用に関わるコンクリートの打込み方法(打ち上がり速度, 打込み高さ, 打ち継ぎ目位置を含む打込み手順など)や締め固め方法, 打込み時の温度, コンクリートの実配合, 部材寸法および鉄筋配置や量, 部材の傾斜などの要因から生じると考えられる。

ところで, 代表的な鉄道の鉄筋コンクリート構造物として, ラーメン高架橋や RC・PC 桁, 橋脚, ボックスカルバートなどが挙げられるが, これらを構成する部材として, 柱や梁, スラブ, 高欄, 側壁などがある。かぶりの施工誤差やそのばらつきの大小を考えると, 柱のような鉛直を軸とする部材(鉛直部材)の方が, 梁やスラブのような水平を軸とする部材(水平部材)と比べ, 施工誤差のばらつきが大きい²⁾。これは, 梁やスラブなどの側面は柱や高欄, 側壁と比べ, 寸法が小さく, 下面はスペーサーや段取り鉄筋が配置されていればかぶりがある程度一定に管理されることなどが理由であると考えられる。以上のことから, 本研究では, 施工誤差のばらつきが比較的大きいと考えられる鉛直部材を対象とした。

しゅん功年は, いずれも高度経済成長期にあたる 1970

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 副主任研究員 修士(工学) (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 GL 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

年代である。セパレータは、配置されていたが、外観からはスペーサーが配置されていたかどうかは不明である。当時の土木工事標準示方書³⁾には、モルタル塊を配置しなければならないとの記述があるが、かぶり不足によるかぶりコンクリートの剥落等が散見されたことから、スペーサーが配置されていない可能性がある。なお、両構造物において、施工管理会社は、同一である。

これらの構造物の設計・施工情報として、一般図や配筋図、図面に記載される荷重や許容応力度などの設計条件およびコンクリートの示方配合表はあるが、設計計算書や設計・施工で適用された示方書および施工記録等は不明である。表-2に、図面に記載されるコンクリートの示方配合表を示す。混和剤などの配合やスランプおよび空気量などは不明である。

2.2 計測対象部位・鉄筋とかぶりの計測範囲

(1) ボックスカルバートの側壁

図-1(a)に、ボックスカルバートの断面寸法と配筋図、かぶりの計測範囲を示す。かぶりの計測部位は、側壁の両内空面である。なお、本対象は、人道ボックスカルバートであり、図面から、内空高さ（上床版下面から下床版上面までの距離）は2600mm、内空幅（側壁の内空面端距離）は2000mmである。また、側壁の厚さは300mmである。

かぶり計測の対象とした鉄筋は、側壁の内空面の軸方向鉄筋および配力鉄筋である。軸方向鉄筋および配力鉄筋共にD16である。かぶりの計測範囲は、高さが下床版下面（図-1(a)中の座標軸z）から750mm～2100mm（ハンチ下端の配力鉄筋位置）、幅が斜めに配置された軸方向鉄筋が重なる鉄筋を除く範囲を基本とした。なお、計測は、足場等を用いずに、地表面から行った。計測範囲における鉄筋の間隔は、軸方向鉄筋が300mm、配力鉄筋が500mmである。軸方向鉄筋が配力鉄筋よりもコンクリート表面側に配置されている。設計かぶりは、軸方向鉄筋が60mm、配力鉄筋が76mmである。せん断補強鉄筋は、組立て鉄筋程度であり、φ9で水平600mm、鉛直500mmの間隔で軸方向鉄筋と配力鉄筋の交点に設置されている。

(3) ラーメン高架橋の柱

図-1(b)に、柱の断面寸法と配筋図、かぶりの計測範囲を示す。同一ラーメン高架橋の柱4本を対象として、柱4面で高さ方向に帯鉄筋のかぶりを計測した。高さ方向の計測範囲は、縦梁ハンチ下面（図-1(b)中の座標軸z）から400mm～6100mm程度である。計測は、足場を用いて行った。鉄筋の呼び名は、帯鉄筋がD13である。帯鉄筋の間隔は、柱上下端から柱幅の2倍にあたる区間では150mm、それ以外の区間では300mmである。設計かぶりは、帯鉄筋が32.5mm、軸方向鉄筋が45.5mmである。

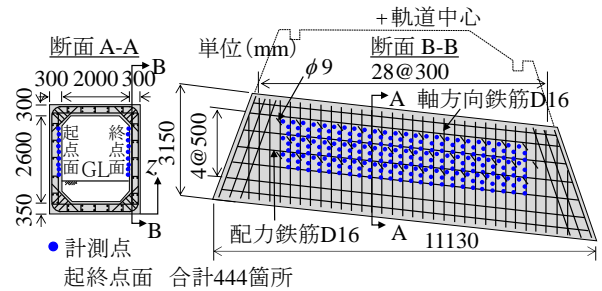
表-1 調査対象の諸元

構造物	略記	部材	しゅん功年
ボックスカルバート	A	側壁	1972年
ラーメン高架橋	B	柱	1973年

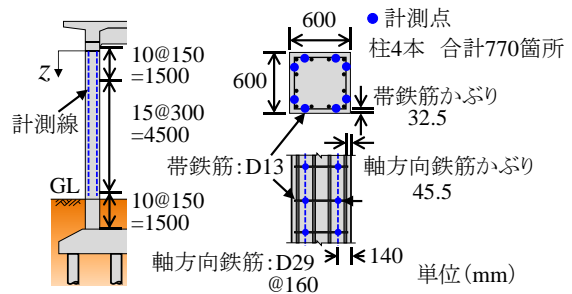
表-2 図面に記載されるコンクリートの示方配合表

略記	W/C %	セメント kg/m ³	砂 kg/m ³	砂利 kg/m ³	単位水量 kg/m ³
A	59	292	828	1159	172
B	55	※	※	※	※

※ 図面に記載なし



(a) ボックスカルバート



(b) ラーメン高架橋の柱

図-1 かぶり調査対象の寸法・配筋概要

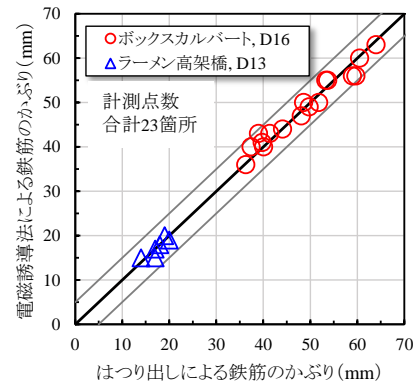


図-2 電磁誘導法とはつり出しによるかぶりの比較

2.3 かぶりの計測方法および計測点

かぶりは、基本的に渦流式の電磁誘導法を用いて計測した。ただし、かぶりコンクリートが剥落している箇所は、ノギスを用いてかぶりを計測した。

図-1(a)に、ボックスカルバートの側壁の内空面における計測点を示す。電磁誘導法を用いた計測において、軸方向鉄筋と配力鉄筋などの交差部やその近傍でかぶりを計測すると、計測値に計測対象以外の鉄筋の影響が含まれるため、配筋に応じて補正する必要がある²⁾。そのため、交差部を避けた箇所を計測点とした。図-1(b)に、

ラーメン高架橋の柱における計測点を示す。同じく、軸方向鉄筋の影響を受けない、柱 4 面で各面左右端から 140mm の 2 測線で帯鉄筋 1 本毎にかぶりを計測した。

図-2 に、電磁誘導法とはつり出しによるかぶりの比較を示す。なお、対象とする各鉄筋をはつり出してノギスによりかぶりを計測した。本計測で用いた電磁誘導法は、 $\pm 5\text{mm}$ 以内の精度でかぶりを計測可能である。

2.4 かぶりの施工誤差

図-3 に、かぶりの施工誤差を示す。施工誤差とは、計測かぶりから設計かぶりを引いた値である。ボックスカルバートの側壁におけるかぶりの施工誤差は、平均で軸方向鉄筋が -13.2mm 、配力鉄筋が -16.2mm であり、かぶり不足が生じている。ラーメン高架橋の柱における、かぶりの施工誤差は、平均で 0.09mm であり、設計かぶりに比較的近い。ただし、芯ずれや回転²⁾により、標準偏差は、ボックスカルバートと比較して大きい。

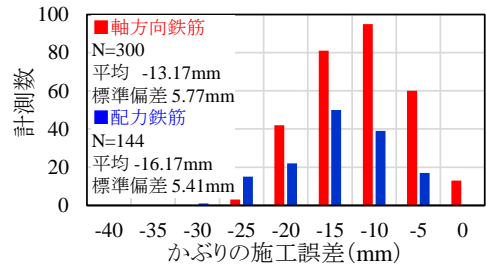
いずれもかぶり不足が生じており、変動係数もスペーサーを配置した場合²⁾と比べ大きい。そのため、本研究で対象とした構造物は、スペーサーの配置など現行の施工細目⁴⁾を満足していない可能性がある。一般的には、施工不良として扱われるが、高度経済成長期に主に建設された構造物の多くが同一の状況にあり、このような構造物に対しても維持管理していかなければならないのが現状である。本研究では、これらの現状を考慮すると共に、施工誤差が大きい構造物を対象とすることで、より困難な条件でかぶりの推定法を提案することとした。

3. コンクリート中の鉄筋の形状

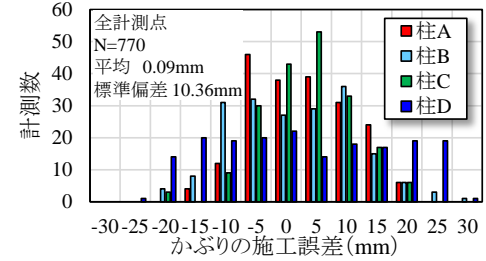
(1) ボックスカルバートの側壁

図-4 に、計測したかぶりに基づくコンクリート中の鉄筋の形状を示す。軸方向鉄筋、配力鉄筋が独立に形状を成すわけではなく、両鉄筋が一体となり、曲面を成している。軸方向鉄筋の形状であるが、かぶりが $30\text{mm} \sim 60\text{mm}$ 程度で傾斜やたわみを持つ形状となっている。これは、鉄筋据付け当初の傾き、コンクリートの側圧や鉄筋の自重等によって生じるものと考えられる。図-5 に、配力鉄筋の形状と軸方向鉄筋のかぶりに軸方向鉄筋の径 16mm を加えた形状を示す。配力鉄筋の形状と軸方向鉄筋のかぶりに軸方向鉄筋の径を加えた形状はほぼ同様な傾向にあることから、軸方向鉄筋と配力鉄筋は一体となっていると考えられる。また、はつり出しを行い鉄筋の結束状況を確認したが、配力鉄筋と軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋は鉄線により結束されていた。配力鉄筋と軸方向鉄筋が結束され、曲面を形成することは、後述の鉄筋形状の推定においての特徴であり、限定された計測点からかぶりを推定する上で重要な事項である。

図-6 に、配力鉄筋のかぶりと軸方向鉄筋のかぶりに



(a) 側壁の軸方向鉄筋と配力鉄筋



(b) 柱の帯鉄筋

図-3 かぶりの施工誤差

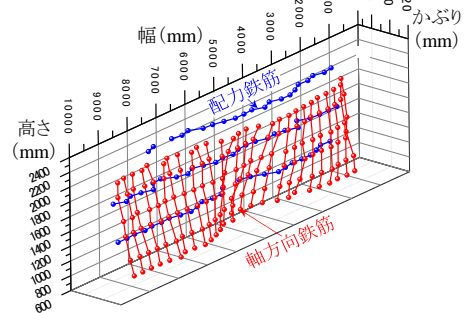


図-4 側壁の鉄筋形状(起点面)

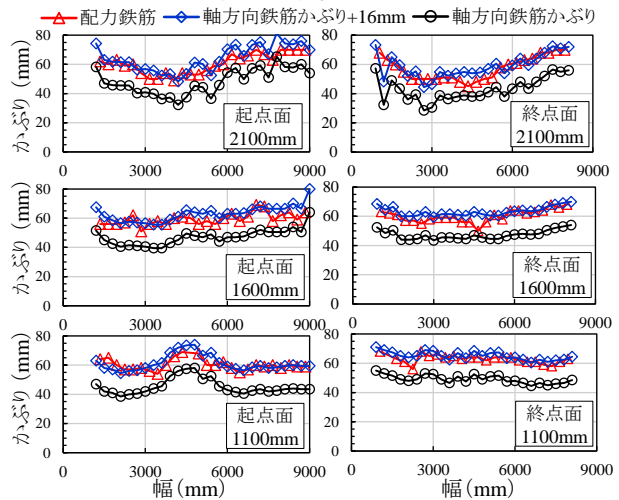


図-5 軸方向鉄筋の形状から推定した配力鉄筋の形状

軸方向鉄筋の径を加えた値の比較を示す。 $\pm 10\text{mm}$ 程度の誤差で、軸方向鉄筋のかぶりに軸方向鉄筋の径を加えた値から、配力鉄筋のかぶりを推定可能である。誤差が生じる原因は、鉄筋の重ね継手などが考えられる。鉄筋の重ね継手がある場合、電磁誘導法を用いると、実際よりもかぶりが小さく計測される²⁾。そのため、図面で確認できる場合には、鉄筋の重ね継手部での計測は避けるのがよいが、本対象の図面には鉄筋の重ね継手部の記載はなかったため、ここでは、誤差として扱うこととした。

(2) ラーメン高架橋の柱

図-7 に、計測したかぶりに基づくコンクリート中の鉄筋の形状を示す。なお、柱4面柱左右端140mmで計測した帯鉄筋のかぶりから、同じ面で計測した2点を線形で結び、帯鉄筋の形状としている。なお、同じ面で計測した2点間距離は、柱幅が600mmとすると、320mmであり、その間に軸方向鉄筋が配置されているため、鉄筋の変形は少ないものとし線形補間とした。また、軸方向鉄筋と帯鉄筋は、ボックスカルバートと同様に、鉄線により結束されていた。そこで、図-7 に、併せて、軸方向鉄筋位置での帯鉄筋のかぶりに帯鉄筋の径13mmを加えて、軸方向鉄筋のかぶりとし、帯鉄筋間の軸方向鉄筋のかぶりは線形として、軸方向鉄筋の形状とした。

柱は、軸方向鉄筋が帯鉄筋により囲われ、各鉄筋間で生じる拘束力が大きいと、軸方向鉄筋は、せん断補強鉄筋が比較的少ない本対象のボックスカルバートと比べると、初期の据付け誤差の影響を受けて変形するが、コンクリートの側圧等による変形は少ないと考えられる。断面図から鉄筋かごが歪み、回転しているのがわかる。

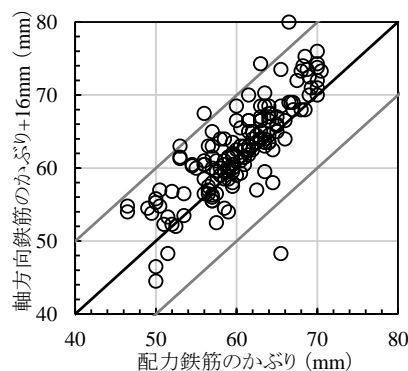


図-6 軸方向鉄筋と配力鉄筋のかぶりの関係

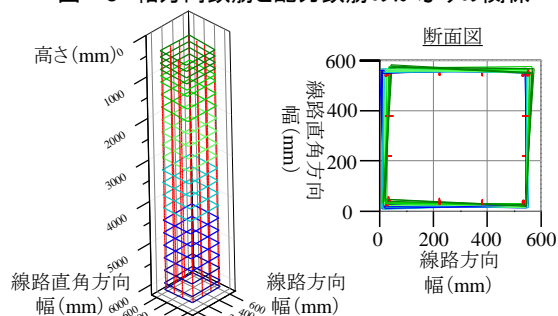


図-7 柱の鉄筋形状(柱D)

4. 鉄筋1本毎のかぶりの推定手法の検討

(1) ボックスカルバートの側壁

図-8 に、側壁の軸方向鉄筋を対象とした計測点毎のかぶりの推定誤差を示す。ここで示す推定誤差は、平均偏差である。軸方向鉄筋の最上端と最下端およびその中間の3点または最上端と最下端の2点で計測された値を用いて、全ての計測点のかぶりの推定を行った。推定に用いる計測数が3点の場合、2次補間式、および図-2に示す計測誤差を平均することを意図した1次式による最小二乗法を用いてかぶりを推定した。推定に用いる計測数が2点の場合、1次補間式によりかぶりを推定した。

上中下3点で2次補間多項式を用いた場合が最も推定誤差が小さく、平均0.7mmであった。計測数2点で1次式による最小二乗法を用いた場合においても平均1.4mmと、図-2に示す計測誤差±5mm以内であり、十分な精度でかぶりを推定できる。

なお、形状予測において、可能な限り広い範囲で多数計測し、内挿するほど精度が良いのは数学的に明らかであり、本調査では、計測者の手が届く範囲に計測点があることから、推定に用いる計測点は最上端および最下端とし、推定に用いる計測数は可能な限り少なく鉄筋1本に付き2点または3点とした。

図-9 に、側壁の配力鉄筋を対象とした計測点毎のかぶりの推定誤差を示す。ここで示す推定誤差も、図-8と同様に平均偏差である。なお、配力鉄筋の左右端とその中間の3点または左右端の2点で計測された値を用いて、全ての計測点のかぶりの推定を行った。推定式は軸方向

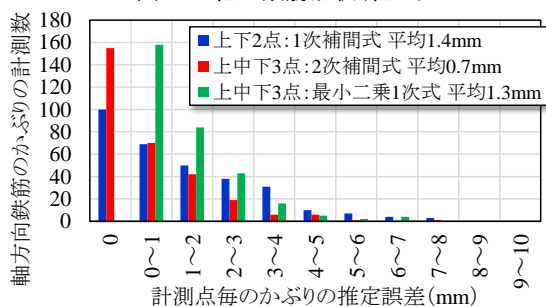


図-8 かぶりの推定誤差(側壁の軸方向鉄筋)

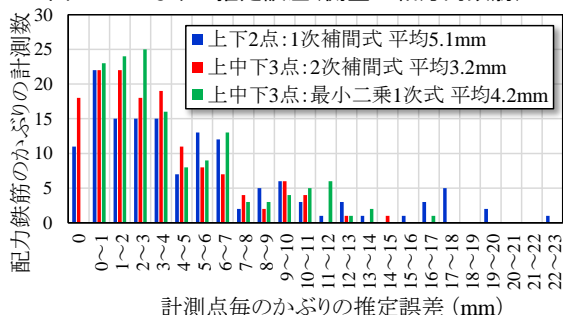


図-9 かぶりの推定誤差(側壁の配力鉄筋)

鉄筋の場合と同じである。平均値は全て同様であるが、2点で1次補間式を用いた場合には、最大で23mmの誤差が生じ、推定誤差のばらつきも他と比べ比較的大きい。3点で2次補間式または1次式による最小二乗法を用いた場合、推定誤差のばらつきも同程度であり、±10mm程度でかぶりを推定可能である。

配筋等の諸元が本対象と同様で、高さ1.5m幅8m程度のボックスカルバートの側壁のような鉛直面部材であれば、限られた計測点から本推定手法により、鉄筋のかぶりを精度良く推定できる可能性がある。

(2) ラーメン高架橋の柱

図-10に、柱の軸方向鉄筋を対象とした計測点毎のかぶりの推定誤差を示す。なお、柱四隅の軸方向鉄筋のかぶりを帯鉄筋位置で計測したものとし、その点を軸方向鉄筋の計測点とした。ここで示す推定誤差も平均偏差である。推定に用いる計測点は、ボックスカルバートの側壁と同じ、最上端および最下端とその中間の3点、最上端および最下端の2点とし、加えて、地表面から500mm、1000mm、1500mm程度の3点とした。柱の場合、最上端や柱高さの中間点での計測は、足場や高所作業車を用いて行うこととなるため、計測者の手が届く地表面から500mm～1500mm程度での計測から軸方向鉄筋のかぶりを推定することを試みた。この場合、計測誤差を平均化することを意図して1次式による最小二乗法を用いてかぶりを推定した。その他の推定式は、ボックスカルバートと同じである。

上中下3点で2次補間式を用いた場合が最も精度が良く、平均で3.7mmであり、15mm以内の精度でかぶりの推定が可能である。上下2点で1次補間式を用いた場合でも平均で4.8mmであり、15mm以内の精度でかぶりの推定が可能である。これは、柱は、軸方向鉄筋と帯鉄筋で鉄筋かごを成すため、拘束力が大きく、軸方向鉄筋はほぼ線形とみなせるためである。地表面付近3点で1次式による最小二乗法を用いた場合、誤差が大きい。これは、上端での柱のかぶりデータがない既設柱の場合には、軸方向鉄筋のかぶりを柱高さ方向にわたり、精度良く推定することは容易ではないが、初回検査や施工管理時に上下端で柱のかぶりを計測すれば、軸方向鉄筋のかぶりを柱高さ方向にわたり、精度良く推定できる可能性があることを示している。

5. 部材全体のかぶりの推定手法の提案

図-11に、提案した部材全体のかぶりの推定手法を示す。軸方向鉄筋および配力鉄筋または帯鉄筋が結束されている場合、図-6によれば、どちらか一方の鉄筋のかぶりを計測すれば、片方の鉄筋のかぶりが±10mmの誤差で推定することができる。また、両鉄筋が独立ではなく、一体となって鉄筋の形状を成す。これらの特徴を踏まえた推定手法である。

まず、最端部に配置される最外縁の鉄筋、ボックスカルバートであれば軸方向鉄筋、ラーメン高架橋であれば帯鉄筋のかぶりを4.の手法で計測し(図-11 Step1)、その形状を推定する(図-11 Step2)。次に、最外縁の鉄筋に結束された鉄筋、ボックスカルバートであれば配力鉄筋、ラーメン高架橋であれば軸方向鉄筋のかぶりを最外縁の鉄筋のかぶりから推定し、その形状を推定する(図-11 Step3)。最後に、最外縁の鉄筋に結束された鉄筋の形状から、計測対象以外の最外縁の鉄筋のかぶりを推定

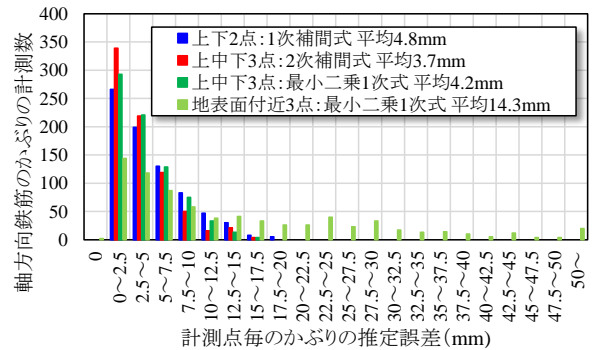


図-10 柱A～D4本のかぶりの推定誤差(軸方向鉄筋)

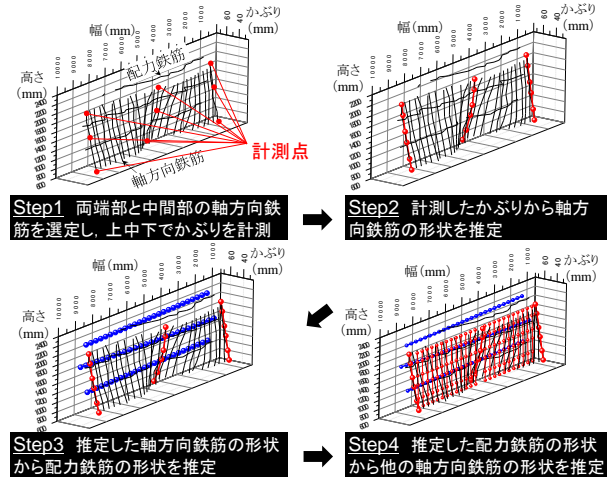


図-11 提案した部材全体のかぶりの推定手法

する手法である(図-11 Step4)。

図-12に、軸方向鉄筋をボックスカルバートの左右端で3本選定し、軸方向鉄筋1本につき、上中下3点計9点のかぶりを計測して推定したボックスカルバート全体の鉄筋形状を示す。なお、最外縁の鉄筋に結束された鉄筋の形状から、計測対象以外の最外縁の鉄筋のかぶりを推定する時(図-11 Step4)に、二次補間多項式を用いた場合を推定法1、最小二乗法を用いた場合を推定法2とした。また、図-13に、ボックスカルバート全体における計測点毎のかぶりの推定誤差を示す。終点面では、推定法1および推定法2のいずれも概ね10mm以下の推定誤差で、かぶりを推定することができる。一方で、起点面では、推定法1を用いた場合、推定誤差が大きく、最大で32.1mmであった。これは、配力鉄筋は、軸方向鉄筋の中間部に位置するため、推定した配力鉄筋の形状から軸方向鉄筋を推定する場合に、配力鉄筋よりも外側の軸方向鉄筋のかぶりは、二次補間多項式による外挿値となるため、誤差が大きくなる場合がある。推定法2は、上述の推定法1の問題は生じないが、最大で20.2mmの推定誤差がある。ただし、推定法2により、ボックスカルバート側壁全体のかぶりの傾向を捉えることができ、調査時の着目点を整理する上で重要な情報が得られる可能性がある。なお、推定法2を用いた場合、起点面と終点面を合わせた推定誤差の平均値は5.2mmである。

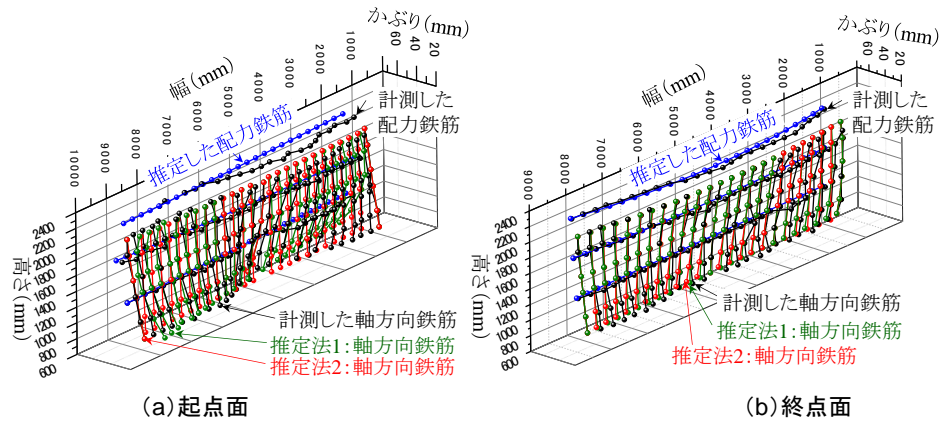


図-12 推定したボックスカルバート全体の鉄筋形状

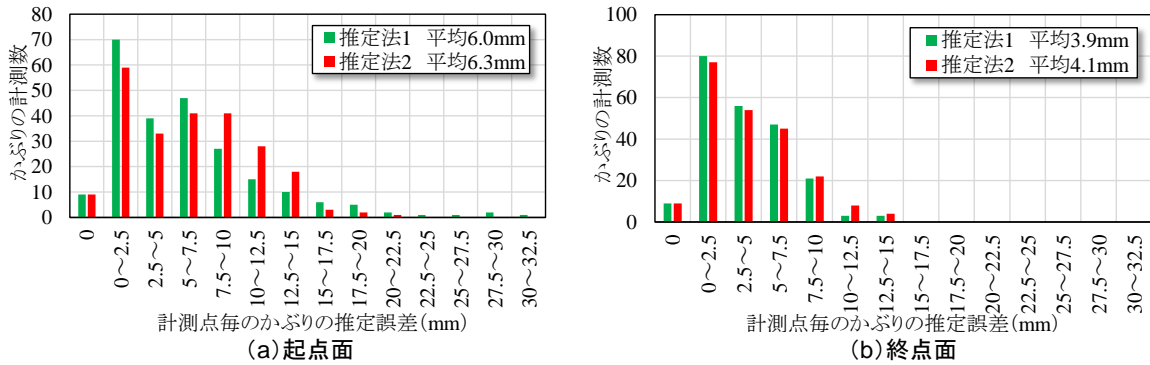


図-13 かぶりの推定誤差(ボックスカルバート全体)

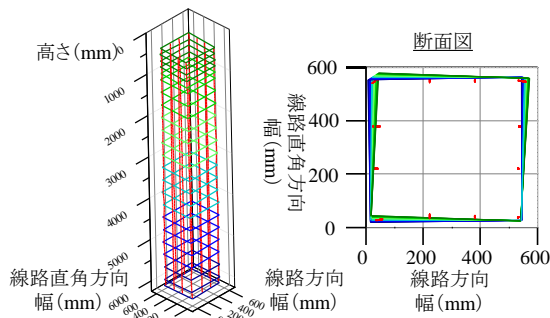


図-14 推定した柱全体の鉄筋形状(柱D)

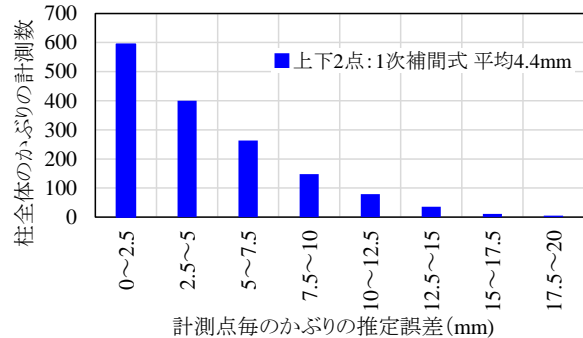


図-15 柱A~D4本全体のかぶりの推定誤差

図-14に、帯鉄筋のかぶりを柱の上下端各面2測線計16点で計測して、推定した柱全体の鉄筋形状を示す。また、図-15に、柱全体のかぶりの推定誤差を示す。推定した鉄筋形状は、図-7の鉄筋かごの芯ずれ、回転を捉えている。帯鉄筋のかぶりを柱の上下端各面2測線計16点で、推定誤差は平均4.4mmであり、15mm以内の誤差で柱全体のかぶりを推定可能である。

6. まとめ

- (1) 最外縁の数本の鉄筋を選定し、ある特定の点で計測したかぶりから部材全体のかぶりを推定する手法を提案した。
- (2) ボックスカルバートの側壁の場合、配筋等の諸元が本対象と同様で、高さ1.35m幅8m程度の範囲であれば、提案した推定手法により、側壁全体のかぶりの傾向を捉えることができる可能性がある。

- (3) ラーメン高架橋の柱の場合、上下端で柱の帯鉄筋のかぶりを計測すれば、提案した推定手法により、柱全体のかぶりを精度良く推定することができる可能性がある。

参考文献

- 1) 曾我部正道, 谷村幸裕, 松橋宏治, 宇野匡和: 鉄道高架橋のRC高欄の変状調査とその劣化予測, コンクリート工学, Vol.47, No.8, pp.16-24, 2009.8
- 2) 川村力, 谷村幸裕, 曾我部正道, 佐藤勉, 長谷川雅志: 実態調査に基づく鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する研究, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.253-266, 2004.8
- 3) 日本国有鉄道: 土木工事標準示方書, p.41, 1969
- 4) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, p.218, 2004.4