

# 論文 中間スラブの局所的なかぶり不足を検知可能な計測方法の検討

土橋 亮太\*1・小林 史\*2・堂内 悠吾\*2・仁平 達也\*3

**要旨：**中間スラブの局所的なかぶり不足を検知可能な計測方法を検討するため、実構造物の調査結果を踏まえたモンテカルロシミュレーションによりかぶりを設定し、計測方法を検討した。その検討結果を用い、実構造物においてかぶり計測を行い、計測方法の妥当性について検証した。これにより、離散的に線路方向、線路直角方向ともに一定の間隔で計測する点計測では、局所的なかぶり不足を検知することが困難であり、計測鉄筋の直行方向において、連続的に計測対象鉄筋を計測する必要があることがわかった。実構造物の検証により、測定鉄筋方向の計測間隔は、曲げ上げ鉄筋位置を考慮した1m間隔程度が有効であることがわかった。

**キーワード：**非破壊検査, 鉄筋のかぶり, 施工誤差, モンテカルロシミュレーション, 実構造物, 計測方法

## 1. はじめに

鉄道 RC 構造物の部材や面ごとに、かぶりの施工誤差の発生要因について既往の研究<sup>1)~3)</sup>で検討されている。このうち、一般的な鉄道 RC 構造物であるラーメン高架橋において、図-1 に示す中間スラブ下面は、柱や片持ちスラブに比べてかぶりの施工誤差が少ない傾向であるが、スペーサー数の不足や施工時の鉄筋がスペーサーから脱落した場合に、かぶり不足（かぶりが小さい箇所）に陥る可能性がある。これらを踏まえ、鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）<sup>4)</sup>（以下、RC 標準）では、実構造物の調査結果を基に、スペーサーを 1m<sup>2</sup>あたり 4 個、すなわち 50cm 間隔の千鳥配置が提案されている。このスペーサー配置を満足することを前提に、中間スラブ下面では 5mm の施工誤差を踏まえた設計かぶりを設定している。

一方、実構造物における中間スラブ下面の鋼材腐食に伴うはく落は、図-2 に示す通り部材全体に均一に発生するものではなく、局所的なかぶり不足箇所において発生するケースが多いことから、これを予め把握することは、維持管理上有効であると考えられる。

そこで、本論文では、RC ラーメン高架橋中間スラブ下面を対象とし、局所的に発生したかぶり不足を検知するためのかぶり計測方法について検討した。具体的には、

まず、実構造物の調査結果を踏まえたモンテカルロシミュレーションにより、かぶりのばらつきや、施工時のスペーサーの設置不良・脱落を考慮したかぶり分布を設定し、そのかぶり分布に対し局所的なかぶり不足箇所を検知するための計測方法について検討した。次に、シミュレーションの検討結果に基づいて、実構造物のかぶり計測を行い、その妥当性の確認を行った。

## 2. モンテカルロシミュレーションにより設定したかぶり分布を用いた計測方法の検討

### 2.1 検討した中間スラブの形状

RC ラーメン高架橋の照査例<sup>5)</sup>を参考に、線路方向 8m、線路直角方向 4m の中間スラブ下面を検討対象に設定した。最外縁の鉄筋は D19、線路直角方向に 125mm 間隔に配置されており、最外縁の鉄筋の設計かぶりは 30mm である。

### 2.2 鉄筋かぶりの設定方法

既往の実構造物のかぶり調査<sup>2)</sup>により、スペーサーがかぶりの施工誤差に影響を与えることが大きいと考えられる。本検討では、局所的なかぶり不足はスペーサーからの鉄筋の脱落やスペーサー自体の転倒等により発生するものと仮定した。

かぶりのばらつきについては、既往の研究<sup>6)</sup>と同様に

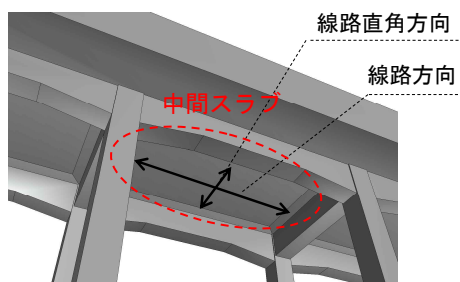


図-1 RC ラーメン高架橋中間スラブ



図-2 中間スラブにおけるはく落事例

\*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造 (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 (正会員)

\*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造 博士 (工学) (正会員)

モンテカルロシミュレーションを用い、かぶりを設定した。具体的には、図-3 に示すスペーサーの設置位置をかぶりの制御点（以下、CP）とし、CP のみに乱数を発生させ、その値と標準偏差をパラメータとした累積度数分布を用いることで CP のそれぞれのかぶりの値を設定した。スペーサーの配置については、RC 標準にて推奨されている 1m<sup>2</sup> 当たり 4 個、50cm 間隔の千鳥配置を基にスペーサーの配置を決め、検討を実施した。

局所的なかぶり不足位置は、スペーサーの設置不良率としてパラメータにて考慮することとした。これは、モンテカルロシミュレーションの乱数設定とは別に、スペーサー位置の一定箇所で開催不良が発生するものとし、その箇所のかぶりを 10mm として設定した。これは、前述した既往の調査<sup>2)</sup>により、設計かぶりよりも 10mm 以上かぶりが小さい箇所があり、その最小値は平均値の -20mm 程度であったこと、設計かぶりが 2.1 に示すように 30mm であることを踏まえて設定した。

かぶりの設定にモンテカルロシミュレーションを用いることで、複数の疑似的なかぶり分布を作成することができ、そのかぶり分布に対して仮定の計測をすることで、計測方法の検証を行った。なお、CP 間のかぶりについては、直線補完により設定した。これらの条件を用い、1000 回のモンテカルロシミュレーションを実施した。

### 2.3 検討パラメータおよび設定したかぶり分布

本検討では、表-1 に示す 3 ケースについて検討した。Case1 は RC 標準改定前に施工された構造物の既往の調査結果<sup>2)</sup>を基に、かぶりが正規分布に従うものとし、標準偏差 ( $\sigma$ ) を 5mm とした。Case2 は、RC 標準に示されたかぶりの施工誤差や、実際の施工要領で許容する施工誤差を踏まえ、 $\sigma$  を 1.67mm とした。これは、3 $\sigma$  が

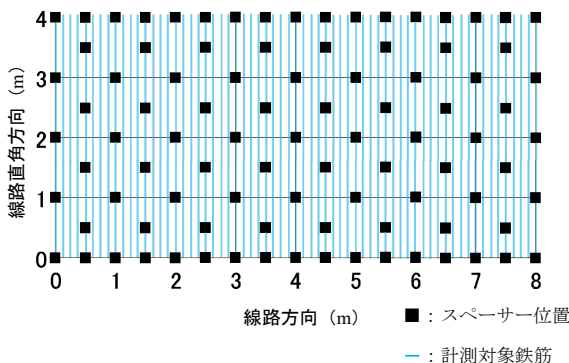


図-3 スペーサー配置図

表-1 検討パラメータ

Case	かぶりの平均値 (mm)	かぶりの標準偏差 (mm)	スペーサー設置不良率 (%)
Case1	30	5.00	0
Case2	30	1.67	0
Case3	30	2.50	10

5mm となるように設定した値であり、設計標準に示された施工誤差を逸脱しない確率が 99.9% 程度となる。Case3 は、スペーサーの設置不良率を 10% とし、標準偏差を 2.5mm とした。スペーサーの設置不良率は、既往の調査結果において設計かぶりよりも 10mm 以上かぶりが小さい箇所が 10% 程度存在すること、標準偏差は Case1 の正規分布より上述した 10% を除いた場合、標準偏差が 2.5mm となることから、これらの値をパラメータとして用いた。

図-4 にシミュレーションにより設定したかぶり分布を示す。かぶりは 10mm~45mm 程度に収まり、スペーサーの設置不良などにより発生する、局所的にかぶりが小さい箇所を再現することができた。かぶりの標準偏差やスペーサーの脱落率をパラメータとし、全 3 ケース実施した中で、最もかぶりにばらつきがあるのは Case3 であった。Case3 は、スペーサーの設置不良が検討したスラブ面で 10 箇所程度発生しているものである。そこで、局所的なかぶり不足を検知するための計測方法については、Case3 を基に検討することとした。

### 2.4 かぶり計測方法の検討および計測結果の検証

#### (1) 計測方法

本検討では、かぶり計測機器を用いて点で計測する方

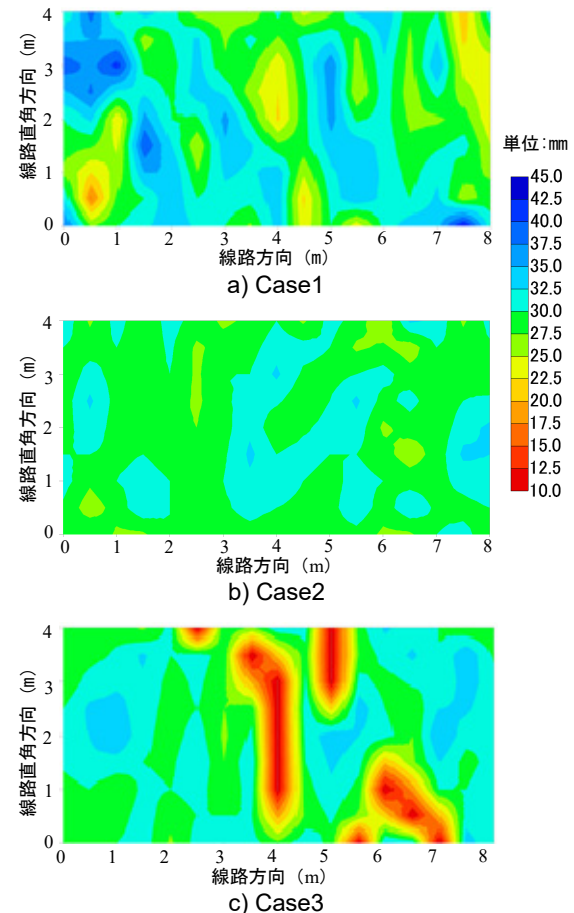


図-4 設定したかぶり分布図の例

法（点計測）と、線上に計測する方法（線計測）の合計6ケースにて計測した。図-5にかぶり計測方法を示す。点計測は、離散的に線路方向、線路直角方向ともに一定の間隔で計測する方法である。例えば、図-5のa)では、15点のかぶり計測を実施することになる。線計測は、RCラーメン高架橋の中間スラブ下面に設置された線路直角方向の計測対象鉄筋を、線路方向に直線的に計測機器を動かして、交差する鉄筋をすべて計測することを想定した。

## (2) 計測結果

図-6に図-4のc)に対して、前述した計測方法で得られたかぶり分布図を示す。図-6の計測1では、かぶり分布が図-4のc)と大きく異なり、局所的なかぶり不足の検知は困難であることが分かる。また、点計測の計測2や計測3、線計測の線路直角方向の計測間隔がスパーサーの間隔程度である1mを超えた計測4の場合、局所的なかぶり不足の検知が困難であることが分かった。一方計測5は図-4のCase3と概ね同様のかぶり分布となり、局所的なかぶり不足の箇所を捉えていることが分かった。以上の検討結果より、計測5の直角方向1mピッチの線

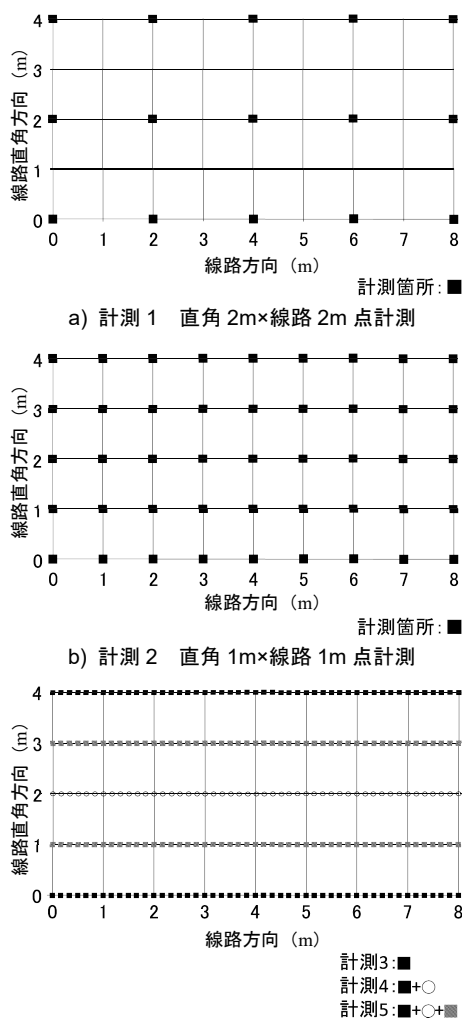


図-5 かぶり計測方法

計測が良いと考えられる。

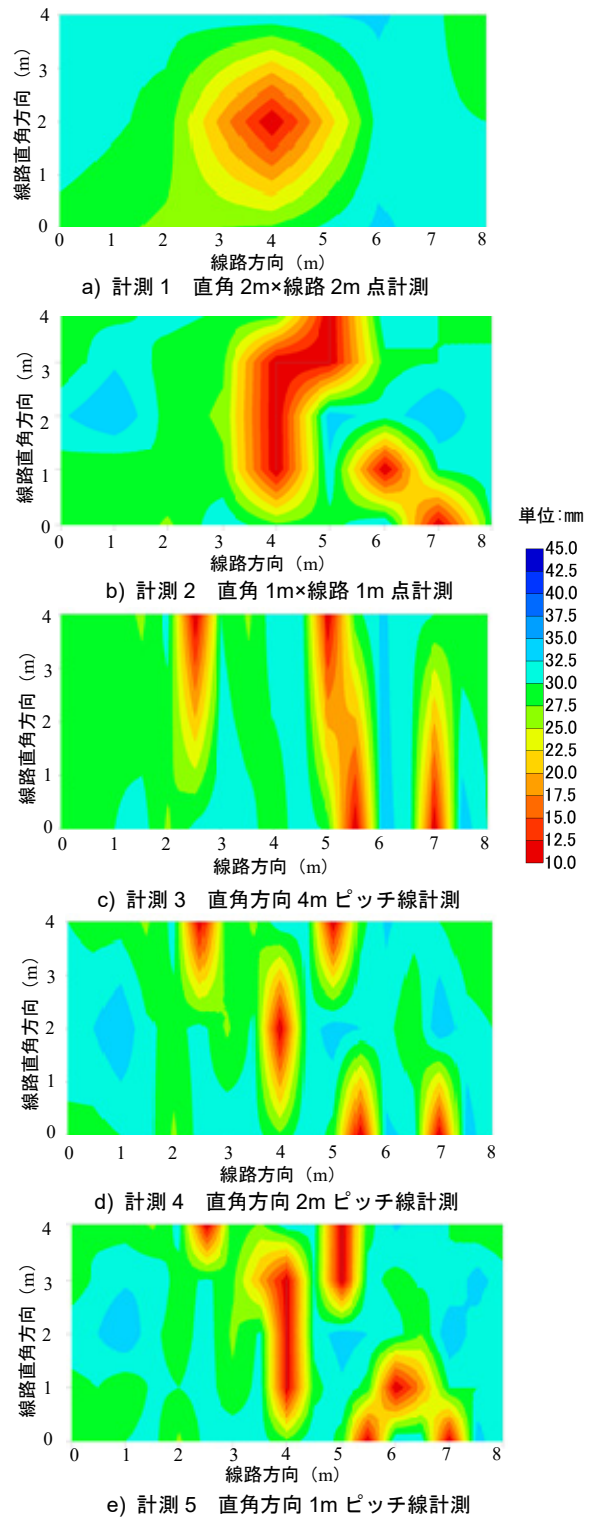


図-6 Case3計測方法別かぶり分布図の例

表-2 計測方法別標準偏差 (シミュレーション)

計測ケース	計測ピッチ	標準偏差 (mm)		
		Case1	Case2	Case3
計測1	直角2.0m×線路2.0m点計測	4.08	1.37	5.04
計測2	直角1.0m×線路1.0m点計測	2.89	0.97	3.62
計測3	直角方向4.0m線計測	3.96	1.34	4.98
計測4	直角方向2.0m線計測	2.96	1.00	3.70
計測5	直角方向1.0m線計測	1.32	0.44	1.64

表-2 にシミュレーションにより設定したかぶり分布に対し、それぞれの計測方法により得られた標準偏差を示す。本値は、計測したかぶりの値から、設定したかぶり値を控除した標準偏差であり、かぶり計測の差分の傾向を示すものである。かぶり計測方法による精度の目標値として、実構造物の施工誤差 5mm 以下であることを確認することとした。図-7 に示した通り、RC ラーメン高架橋の中間スラブのかぶりを 30~40mm とした場合、計測誤差が±0~3mm 程度であることが明らかになっている。そのため、計測方法による誤差が 2mm 以下となれば、施工誤差で規定しているかぶり 5mm と同程度となり、高い精度を確保できているものと考えた。表-3 に図-7 で使用した計測機器の概要を示す。表-2 に示した標準偏差より、計測方法による標準偏差は 0.5mm~5mm 程度であり、計測方法の誤差を 2mm 以下に抑えるためには、最も標準偏差が小さい計測 5 の方法が挙げられる。前述した通り、新設構造物の施工によるかぶりのばらつきが表-1 に示す解析パラメータの Case2 程度とすれば、計測 5 の標準偏差は 0.5mm 程度であり、2σ においても 1.0mm 以下となるため、計測機器と計測方法の誤差を合わせたとしても 5mm 以下とすることが可能であると考える。

### 3. 実構造物による検証

#### 3.1 対象構造物および計測方法

2 章の検討結果を踏まえ、実構造物においてかぶりの計測を行った。対象構造物は、図-8 に示す供用約 35 年の 3 径間 RC ラーメン高架橋の中間スラブ下面を選定した。図-9 に、中間スラブの概略寸法と配筋図、かぶりの計測範囲を示す。対象である中間スラブの寸法は、線路方向 6.3m、線路直角方向 3.3m、計測対象鉄筋は線路直角方向に 125mm 間隔で配置された D19 の主鉄筋、設計かぶりは 30.5mm である。実構造物は、シミュレーションにて想定した部材寸法に比べ、線路方向 2m、線路直角方向 1m 小さい部材である。また、計測対象の鉄筋は、直線の鉄筋と曲げ上げ鉄筋を用いている。計測ラインについては、2 章のシミュレーション結果を踏まえ、部材全体のかぶりを把握できると考えられる 1m 程度の計測間隔、および鉄筋の曲げ上げ箇所を考慮して設定した。具体的には、曲げ上げのない鉄筋については計測範囲内の端部で 2 箇所、曲げ上げのある鉄筋については、曲げ上げ箇所よりも内側の 2 箇所計測することとした。つまり、合計 4 ラインで計測した。なお、スラブ端部に設置されているハンチ部については、計測範囲から除いた。

かぶりの計測は、電磁誘導法（渦流式）により行った（図-10）。既往の研究<sup>2)</sup>により直行鉄筋上を計測した場合、計測による誤差が大きくなるため、この鉄筋を避け

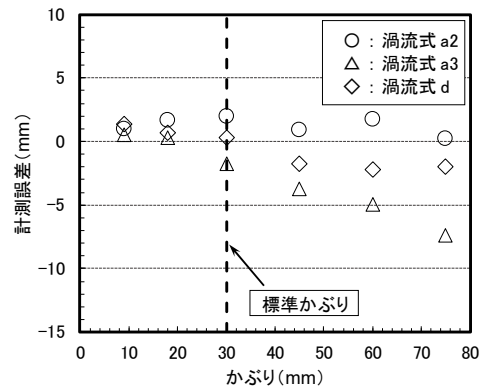


図-7 中間スラブかぶり計測結果<sup>7)</sup>

表-3 計測機器の概要

メーカー	A社		D社
機種名	a2タイプ	a3タイプ	d
測定原理	渦流式	渦流式	渦流式
探触子寸法(mm)	約109×54×29	約150×55×44	約110×45×25

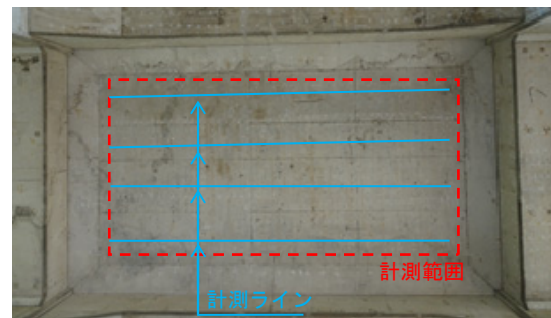


図-8 対象構造物（中間スラブ）

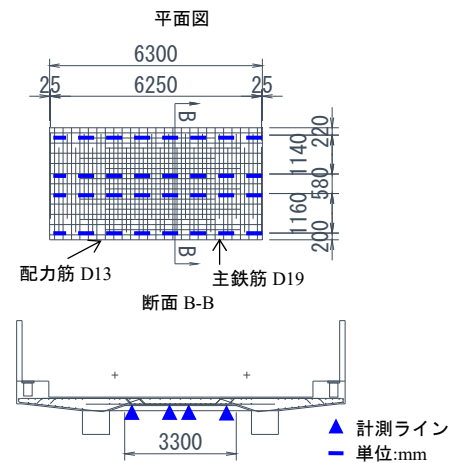


図-9 かぶり調査対象の配筋概要

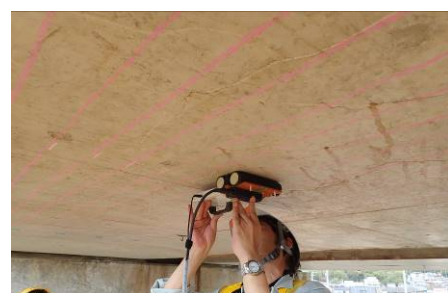


図-10 電磁誘導法を用いた計測

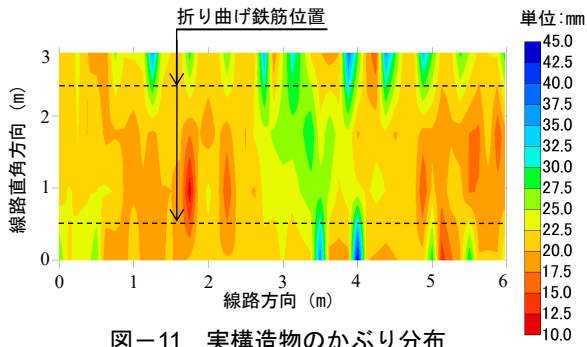


図-11 実構造物のかぶり分布

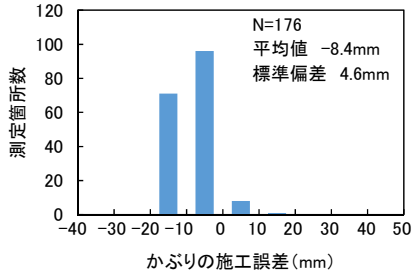


図-12 施工誤差の分布

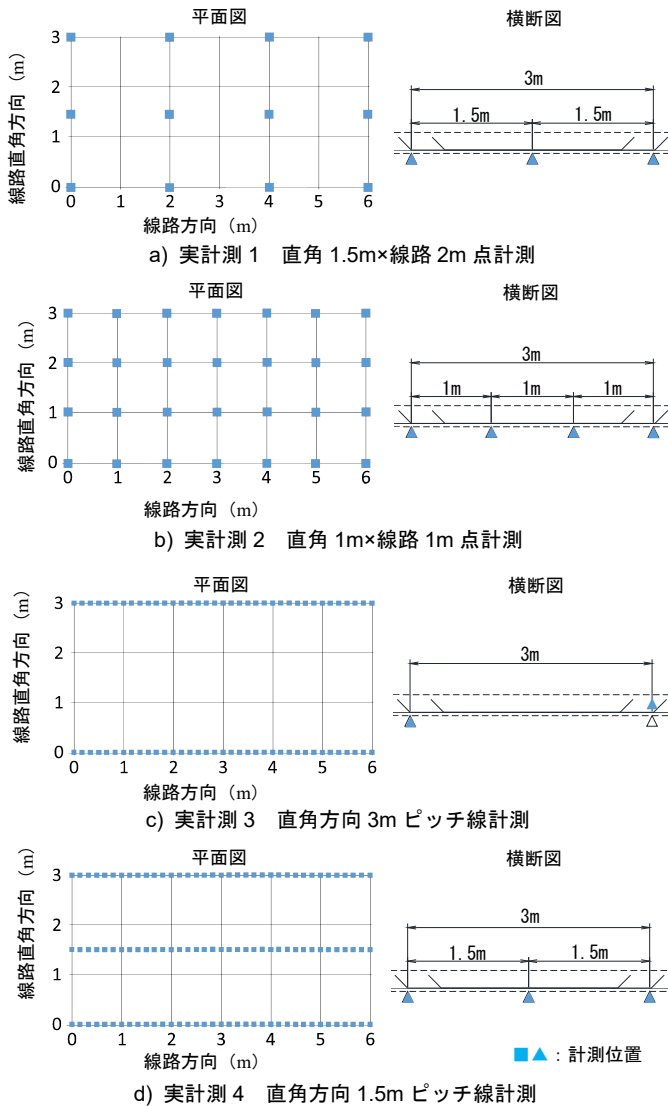
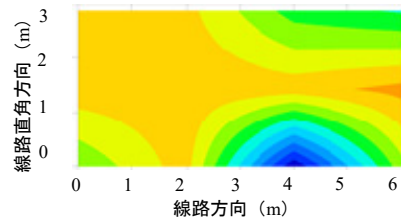


図-13 かぶり計測方法

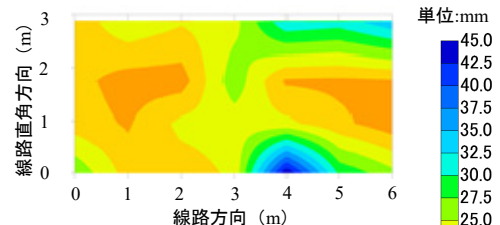
た位置で計測を実施した。なお、本研究に用いた電磁誘導法は、かぶり 30mm 以下程度の場合、計測による誤差はほとんど生じないことが既往の研究<sup>7)</sup>により明らかになっている(図-7の渦流式d)。

### 3.2 実構造物のかぶり分布

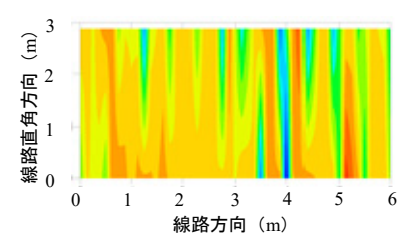
図-11 に実構造物の計測結果から得られるかぶり分布を、図-12 に施工誤差の分布を示す。図-11 に示す通り、かぶりは 10mm~45mm 程度であり、線路直角方向にかぶりが増えていることを確認した。計測したかぶりの平均値は 22.1mm, 最小値 10.6mm, 最大値 44.6mm, 標準偏差 4.6mm であった。かぶりの平均値は設計かぶり比べて小さい傾向であったが、表-1 の Case1 に示す既往の調査結果<sup>2)</sup>の標準偏差と同程度となった。また、曲げ上げ鉄筋位置付近で分布の傾向が大きく変化することは無かった。



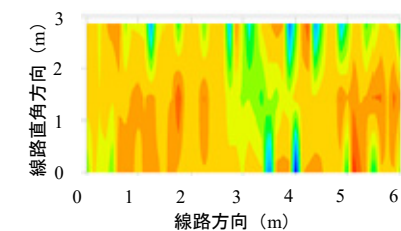
a) 実計測1 直角 1.5m×線路2m 点計測



b) 実計測2 直角 1m×線路 1m 点計測



c) 実計測3 直角方向 3m ピッチ線計測



d) 実計測4 直角方向 1.5m ピッチ線計測

図-14 計測方法別かぶり分布図

### 3.3 かぶり計測方法による計測結果の検証

#### (1) 計測方法

シミュレーションのかぶり分布の計測と同様に、点で計測する方法と、線上に計測する方法により合計4ケースで検討した。図-13にかぶり計測箇所を示す。2章の計測間隔と必ずしも同一ではないが、実計測1は図-6のa)、実計測2は図-6のb)、実計測3は図-6のc)、実計測4は図-6のd)を想定するものである。

#### (2) 計測結果

図-14に計測方法別かぶり分布図を示す。点計測では、実計測1、2のかぶり分布の把握しかできず、図-11の実構造物のかぶり分布と大きく異なることから、実構造物の局所的なかぶりの傾向を把握することは困難であることが分かる。実計測3の線計測では、途中で折り曲げている鉄筋の場合、計測鉄筋の1点しか計測することができず、局所的なかぶりの傾向を把握することは困難である。実計測4は、鉄筋の曲げ上げを考慮した計測結果と概ね同様な結果となったが、図-11と比べ、かぶりの最小値が3mm程度大きくなっている。実計測4では、曲げ上げ鉄筋のかぶりを1点で把握することとなるため、局所的なかぶり不足を把握できない可能性がある。

表-4に実構造物のかぶり分布に対する計測に対し、それぞれの計測方法により得られた標準偏差一覧を示す。本標準偏差は、表-2と同様にかぶり計測の差分の標準偏差である。計測方法による標準偏差は、0.8~4.5mm程度である。点計測においては3mmと4.5mm程度であり、 $2\sigma$ を考慮すると5mm以上となることから、RC標準の施工誤差5mmより大きく、計測によるばらつきが大きいと考える。線計測の場合、端部のみの実計測3については標準偏差が3mm程度と大きいですが、端部と中間部を計測した実計測4は標準偏差が0.8mmと小さい。

以上より、中間スラブの局所的なかぶり不足を把握するためには、最外縁鉄筋である線路直角方向鉄筋のかぶり計測として、曲げ上げ位置とスパーサー位置の配置間隔を踏まえた計測をすることが有効であると考えられる。つまり、曲げ上げ位置よりも内側で2箇所、線路直角方向に1m間隔程度で線路方向に計測機器を移動させながら計測することで、局所的なかぶりを把握することが可能であると考えられる。

表-4 計測方法別標準偏差（実構造物）

計測ケース	計測ピッチ	標準偏差(mm)
計測1	直角1.5m×線路2.0m点計測	4.44
計測2	直角1.0m×線路1.0m点計測	2.99
計測3	直角方向3.0m線計測	2.97
計測4	直角方向1.5m線計測	0.84

### 4. まとめ

鉄道RCラーメン高架橋の中間スラブの局所的なかぶり不足を検知可能な計測方法を明らかにするため、モンテカルロシミュレーションにより設定したかぶり分布を用い、有効な非破壊検査機器の計測方法について検討した。この結果を踏まえ、6m×3m程度の実構造物のかぶり計測結果から計測方法の検証を行った。以下に、検討により得られた結果を記載する。

- (1) 離散的に線路方向、線路直角方向ともに一定の間隔で計測を実施する方法（点計測）では、局所的なかぶり不足を検知することが困難である。
- (2) 計測鉄筋直行方向に連続的に計測対象鉄筋を計測する方法（線計測）が局所的なかぶり不足を検知可能な方法として有効であることが分かった。計測間隔は、スパーサーの配置間隔を考慮し、1m程度が有効であると考えられる。
- (3) 実構造物による検証の結果、局所的なかぶり不足を把握するためには、鉄筋の曲げ上げ位置を予め把握した上で、1m間隔程度に線路方向に機器を移動させながら測定することが有効であると考えられる。

#### 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) 松下将士, 轟俊太郎, 田所敏弥, 石田哲也: 実RC構造物の鉛直部材を対象としたかぶりの推定手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1303-1307, 2018
- 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, 2004.4
- 5) (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 照査例 RCラーメン高架橋, 2005.3
- 6) 仁平達也, 松岡弘大, 曾我部正道, 岡本大: 導電塗料を用いた鉄道RC高架橋中間スラブの変状検知方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1417-1422, 2014
- 7) 木全伯光, 幸良淳志, 仁平達也, 田所敏弥: 各種鉄筋探査機による鉄道構造物のかぶり測定精度に関する検討, 土木学会第74回年次学術講演会公演概要集, V-560, 2019