

# 線状陽極を用いた脱塩工法の電流分布に関する検討

技術本部	技術部	メンテナンス技術グループ	青山 敏幸
技術本部	技術部	メンテナンス技術グループ	Rahmita Sari RAFDINAL
技術本部	技術部	メンテナンス技術グループ	深川 直利
技術本部	技術部		白水 祐一

**概要：**線状陽極材を用いた脱塩工法について、陽極モールド、保水スポンジのユニット間のあき、および陽極モールドの設置間隔が鉄筋の電流分布に及ぼす影響について検討することを目的として、実験およびFEM解析を実施した。その結果、陽極モールドのあきは200mm程度以下、保水スポンジのあきは100mm程度以下、陽極モールドの設置間隔は300mm程度以内とすれば、概ね鉄筋に均等な電流が流せるものと考えられた。

**Key Words：**塩害、脱塩工法、線状陽極材、電流分布

## 1. はじめに

脱塩工法は、コンクリート構造物の表面に電解質溶液と陽極材からなる陽極システムを設置し、陽極とコンクリート中の鉄筋との間に直流電流を一定期間流し、電気泳動の原理でコンクリート中の塩化物イオンをコンクリート外に抽出する工法である<sup>1)</sup>。一般的には、面状陽極をコンクリート表面に設置し、セルロースファイバーを吹き付けた後にアルカリ電解質を散布し、コンクリート表面積あたり約1A/m<sup>2</sup>で8週間程度の通電を行う。一方報告書<sup>2)</sup>では、最も補修効果を得ることが求められる鉄筋近傍の位置に着目すると、適用する部位の鉄筋量によって電流密度の条件が異なること、脱塩効果は、電流密度の大小に大きく影響を受けるので、鉄筋近傍の電流密度に着目して、電流密度を設定する必要があると述べている。

著者らは上記を鑑み、コンクリート構造物の部位の鉄筋量に応じて陽極モールドの設置本数を変化させることが可能な線状陽極材を用いた新しい脱塩工法を開発した。本稿では、線状陽極材を用いた脱塩工法に用いる、陽極モールドおよび保水スポンジの配置が鉄筋の電流分布に及ぼす影響について、実験およびFEM解析により検討した結果を報告する。

## 2. 線状陽極材を用いた脱塩工法の概要

線状陽極材を用いた脱塩工法の概要を写真-1に示す。本工法は、線状陽極、アルカリ性バックフィル、イオン交換膜および樹脂容器から構成される陽極モールドを、保水スポンジを介してコンクリート表面に設置した後に、水道水を散布して通電するものである。陽極モールド、保水スポンジは、鉄筋への均一な電流分布および施工性等を考慮し、1ユニットの長さは約1mとしている。その際、ユニット間にはあきが生じるため、陽極モールドおよび保水スポンジのユニット間のあきの影響を把握する必要がある。また、陽極モールド



青山敏幸



Rahmita Sari RAFDINAL



深川直利



白水祐一

ドの設置間隔が、鉄筋への電流分布に及ぼす影響を把握する必要がある。今回は、上記の事項について、実験およびFEM解析により検討した。

### 3. 実験による検討

#### 3.1 実験の概要

##### 3.1.1 コンクリート試験体

試験体に用いたコンクリートの配合を表-1に、試験体の形状・寸法を図-1にそれぞれ示す。

コンクリートの配合はW/C=40%とした。試験体の寸法は、1500mm×2850mm×200mmとし、スターラップ鉄筋を想定した短手方向にはD13の鉄筋(S1~S19)を150mmピッチで、軸方向鉄筋を想定した長手方向にはD16の鉄筋(C1~C20)を75mmピッチで配置した。コンクリートのかぶりは30mmとし、各々の鉄筋は独立した状態とし、端部にはリード線を接続することで、各鉄筋に流れる電流が測定できるような構造とする。

##### 3.1.2 陽極システム

陽極モールドの構成材料である線状陽極は、幅15mmの高純度チタンに酸化貴金属皮膜を施したものを、アルカリ性バックフィル材は、ベントナイトに炭酸カリウムを添加したものを、イオン交換膜は、厚さ0.21mmの高強度耐アルカリ性陽イオン交換膜を、樹脂容器は幅40mm、高さ20mmのものを使用した。陽極モールドの長さは、950mmとした。保水スポンジは、幅300mm、長さ約1400mm、厚さ10mmのセルローススポンジを2枚使用した。

##### 3.1.3 通電方法

通電方法を写真-2および図-2にそれぞれ示す。

本試験では、ユニット間に生じるあきの影響を把握するため、陽極モールドのあきと、保水スポンジのあきを実験要因とした。

陽極モールドのあきの影響は、図-2の左側に示すように、保水スポンジのあきは設けず、陽極モールドのあきを50,200,300,400,500mmとした。

保水スポンジのあきの影響は、図-2の右側に示すように、保水スポンジおよび陽極モールドのあきを0,100,200,300mmとした。なお保水スポンジのあきが0mmの場合は陽極モールドのあきは50mm、保水スポンジのあきが100mmの場合は、陽極モールドのあきを100mmと200mmの2種類に設定した。保水スポンジのあきが200,300mmのケースは、陽極モールドのあきも同一とした。

今回の実験では、スターラップ鉄筋はS1~S19の上面の鉄筋を全て接続し、軸方向鉄筋は、C1~C14までの上面の鉄筋を接続し、各鉄筋に流入する電流を測定した。その際の通電量は0.2A/本とした。コンクリートの比抵抗は約10~12kΩ・cm、保水スポンジの比抵抗は飽和状態で約0.3 kΩ・cm、半乾燥状態で約0.7 kΩ・

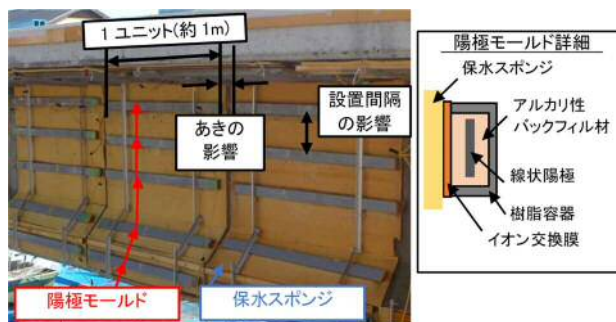


写真-1 線状陽極材を用いた脱塩工法の概要

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
40	43.6	170	425	745	991

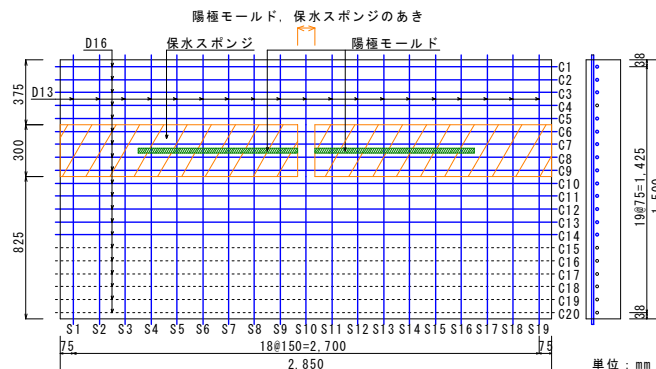


図-1 試験体の形状・寸法



写真-2 通電方法

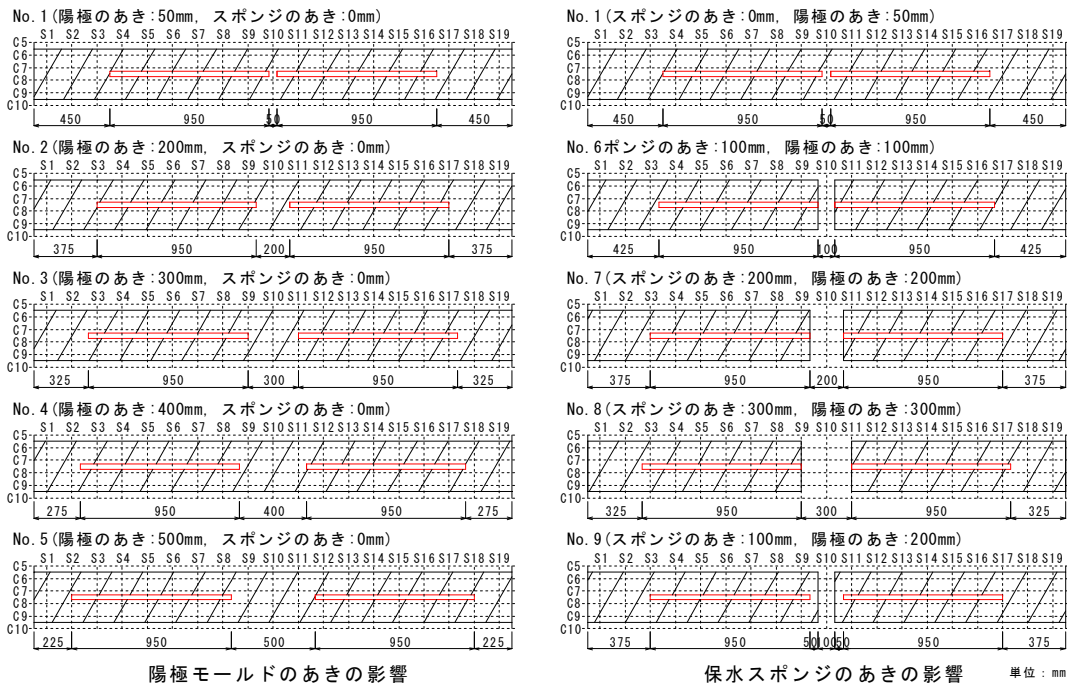


図-2 通電の方法

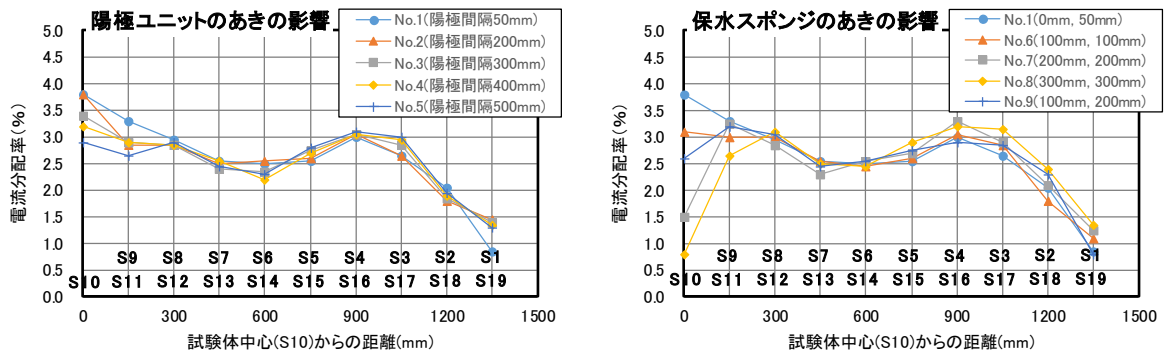


図-3 スターラップ鉄筋(S1~S19)に流入する電流分配率の測定結果

cmであった。コンクリート比抵抗は4プローブ法にて、保水スポンジの比抵抗は、土木学会規準の四電極法に準拠する方法<sup>3)</sup>にて測定した。

### 3.2 実験結果と考察

#### 3.2.1 陽極モールド、保水スポンジのあきの影響

スターラップ鉄筋(S1~S19)の電流分配率の結果を図-3に示す。ここに、電流分配率は、S1~S19およびC1~C14それぞれの鉄筋に流れる電流量を、総電流量で除したものを%で表示した。図-3の横軸は、ユニット間のあきに位置する鉄筋に該当するスターラップ鉄筋S10の位置を基準とした場合の距離を示す。またS10から同一距離の鉄筋であるS9とS11、S8とS12等は、それぞれの電流分配率の平均値として図中にプロットした。

図-3の左側に示す陽極モールドのあきが電流分配率に及ぼす影響の結果から、S10の電流分配率は、陽極モールドのあきが広がるにしたがい、その値は低下する傾向にあるものの、陽極モールドのあきが50mmの場合に3.8%、あきが200mmの場合も3.8%、あきが300mmの場合に3.4%、あきが500mmの場合でも2.9%であり、陽極モールドの設置範囲内にあるS3~S17の電流分配率と大きな差は認められない。

一方、図-3の右側に示す保水スポンジのあきが電流分配率に及ぼす影響の結果から、S10の電流分配率は、保水スポンジのあきが広がるにしたがいその値は低下した。保水スポンジのあきが100mmの場合のS10のその値は3.1%であり、S3~S17の電流分配率と同等程度であるが、保水スポンジのあきが200mmの場合は、S10のその値が1.5%程度と、保水スポンジのあきが0mmの値に対して半分以下の値に低下した。また、保水

スポンジのあきを100mmとした場合、陽極モールドのあきが100mmのその値は3.1%，200mmの場合のその値が2.6%であり、陽極モールドのあきが広がるとS10の電流分配率は低下するものの、どちらも陽極モールドの設置範囲内にあるS3～S17の電流分配率と大きな差は認められない。

以上、あきに位置する鉄筋への電流分布を考慮した場合、保水スポンジのあきは100mm程度以下、陽極モールドのあきは200mm程度以下とすることが良いものと考えられる。

### 3.2.2 陽極モールドの設置間隔の影響

測定対象の軸方向鉄筋(C1～C14)の位置図を図-4に、電流分配率の結果を図-5にそれぞれ示す。図-5の横軸は、陽極モールド中心の位置を基準とした場合の距離を示す。

図-5に示す結果から、陽極モールドと平行に配置される鉄筋では、陽極モールドのあき、保水スポンジのあきによらず、各鉄筋の電流分配率は同様な結果となった。また、全てのケースにおいて、陽極モールドから37.5mmの鉄筋C7,C8の電流分配率が約12%，陽極モールドから112.5mmの鉄筋C6,C9のその値が約8%，陽極モールドから187.5mmの位置の鉄筋C5,C10のその値が約4%で、線形に低下する傾向にある。この値をもとに、C7,C8の電流分配率の半分程度となる箇所は、陽極モールドから150mm程度であるものと考えられる。

実際には複数の陽極モールドが配置され、陽極モールド間には2本の陽極モールドから電流が流れるものと考えられる。今回の実験では、保水スポンジの幅が300mmと限定されていたが、実際には全面に保水スポンジが設置されるため、今回の実験よりは電流の広がりの方が良くなるものと推定される。これらを考慮すると、陽極モールドの設置間隔が300mm程度以内であれば、陽極モールド間の鉄筋にも概ね均等な電流が流入されるものと考えられた。

## 4. FEM 解析による検討

### 4.1 解析の概要

#### 4.1.1 解析プログラム

本章では、線状陽極材による脱塩工法の電流分布を解析的に明らかにすることを目的に、ポストテンション方式によるPC桁を模擬した試験体<sup>4)</sup>のうち、ウェブの一部を取り出したモデルを作成し、電流電位分布のFEM解析を行った。解析は、電流・電位分布を導体の定常電流場の問題として解く市販の有限要素プログラム<sup>5)</sup>を用いた。本プログラムの基礎方程式はラプラス方程式である。

#### 4.1.2 解析モデルと解析ケース

解析モデルを図-6に、解析ケースと入力条件を表-2にそれぞれ示す。解析モデルは、ウェブの部位の半分を切り出した形で、奥行き200mmを切断したものとした。陽極モールドは、保水スポンジの上に設置されるが、今回は、解析モデルを簡素化するために、コンクリート表面から10mmの位置の保水スポンジの中に陽極材が埋設されるものとしてもモデル化した。コンクリート、保水スポンジはソリッド要素、鉄筋、陽極材はプレート要素とした。

解析はCase1～Case3に分けて実施した。Case1は、陽極モールドの設置間隔の実験で実施したように、1本の陽極モールド(A2)からの電流分布を把握することを目的として、スターラップのみが配置された状態で、

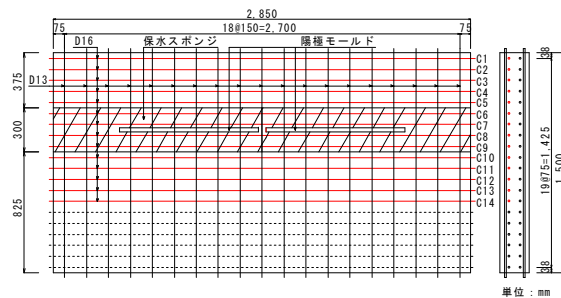


図-4 対象の軸方向鉄筋の位置図

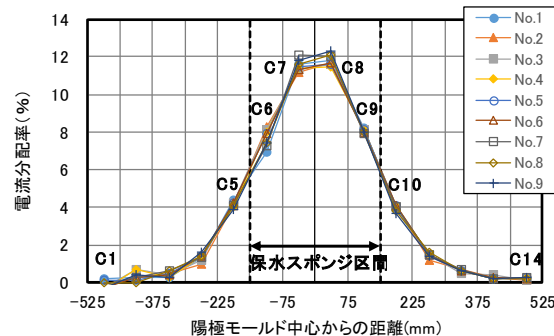


図-5 軸方向鉄筋(C1～C14)に流入する電流分配率の測定結果

保水スポンジの比抵抗をパラメータとした。比抵抗は、実験で測定した値を参考に、0.1, 0.5, 1, 10kΩ・cmを設定した。Case2は、PC桁の試験体<sup>4)</sup>と同様に、複数の陽極モールド(A1～A3)を設置した際の電流分布を把握することを目的とした。Case3は、PC桁の試験体に最も近い条件となるスターラップに加え、軸方向鉄筋を配置した際の電流分布を把握することを目的とした。

コンクリート比抵抗は、今回の実験およびPC桁を模擬した試験体<sup>4)</sup>の値を参考に、全ての解析ケースで10kΩ・cmとした。鉄筋および陽極材の分極抵抗は、その値を変化させても電流分布に及ぼす影響は小さかったため、全ての解析ケースで1kΩ・cm<sup>2</sup>とした。電流量は、陽極材を3本配置したときにコンクリート表面積あたりの電流密度が1A/m<sup>2</sup>となるように、0.053A/本で設定した。

4.2 解析結果と考察

Case1の条件にて通電を行った際の電流分配率の結果を図-7に示す。ここで電流分配率は、陽極近傍の鉄筋電流密度の最大値を100%とした際の、各場所における鉄筋電流密度の比率とした。

図-7に示す結果から、保水スポンジの比抵抗が小さいほど、陽極モールドから離れても電流が広がる傾向にあることがわかる。

図-5に示す軸方向鉄筋に流入する電流分配率の実験結果と比較すると、保水スポンジの比抵抗が0.5, 1.0kΩ・cmで設定したケースにおいて、同様の傾向を示す結果となった。FEM解析から同定した保水スポンジの比抵抗は、四電極法に準拠する方法による測定値よりは若干大きいですが、概ね一致した。

複数の陽極材を配置したCase2の鉄筋電流密度の結果を図-8に示す。図中の横軸は、ウェブの下側を起点とした距離を示す。また図中の点線は、陽極材A1,A2,A3の位置を示す。

Case1の結果と同様に、保水スポンジの比抵抗が小さいほど電流分布が良い傾向にある。また今回の実験で想定された保水スポンジの比抵抗の最大値となる1.0kΩ・cmを設定した場合でも、陽極間の鉄筋電流密度は90%程度以上の値であることから、線状陽極を用いた場合でも、陽極ユニットを適切に配置することで電流分布

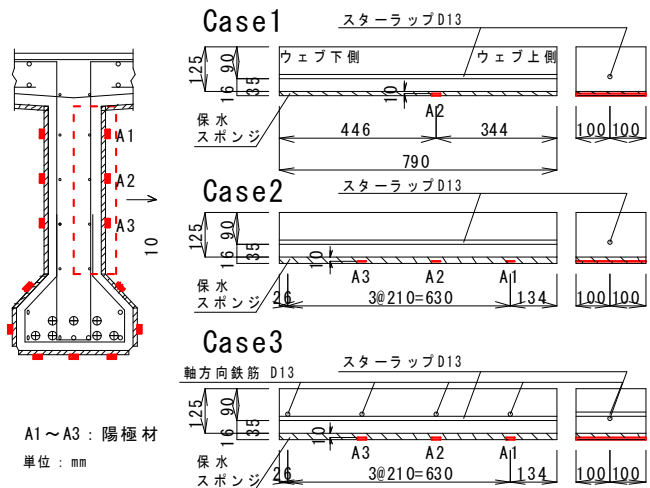


図-6 FEM 解析モデル

表-2 解析ケースと入力条件

解析ケース	保水スポンジ比抵抗 (kΩ・cm)	鉄筋		陽極本数 (本)
		スターラップ	軸方向鉄筋	
Case1	0.1, 0.5, 1, 10	有	無	1
Case2	0.1, 0.5, 1, 10	有	無	3
Case3	1	有	有	3

※コンクリート比抵抗 10kΩ・cm 一定とする。  
 ※鉄筋、陽極材の分極抵抗 1kΩ・cm<sup>2</sup> とする。

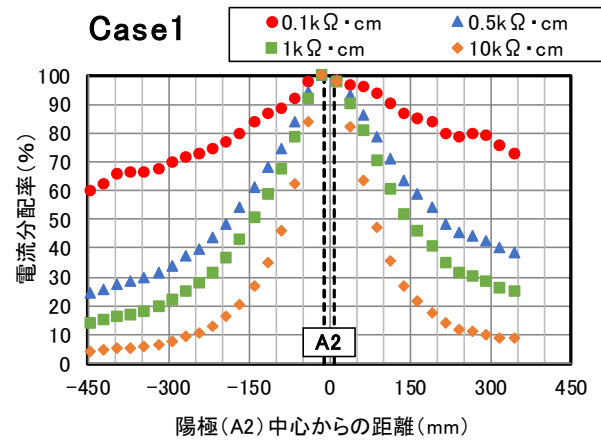


図-7 Case1 通電での電流分配率の結果

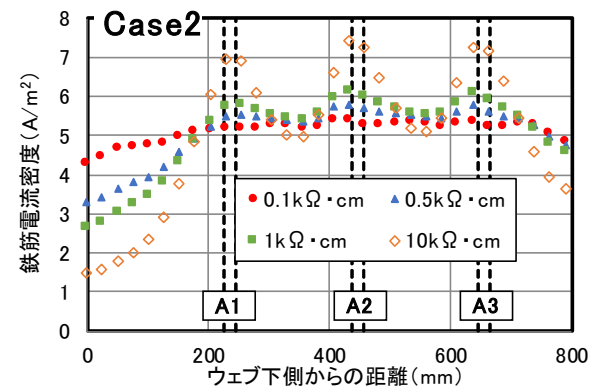


図-8 Case2 の鉄筋電流密度の結果

に問題はないものと推察された。一方、保水スポンジの比抵抗をコンクリートと同程度の比抵抗である $10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ に設定した場合には、陽極直上と陽極間で鉄筋電流密度にばらつきが生じる傾向にあった。

Case3の鉄筋電流密度の結果を図-9に示す。本ケースも保水スポンジの比抵抗を $1.0\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ に設定し、スターラップと軸方向鉄筋に流れる電流分布を算出したが、解析の結果から、スターラップよりも遠い位置にある軸方向鉄筋にも、スターラップと同等程度の電流が流れており、電流分布に問題がないものと推定された。

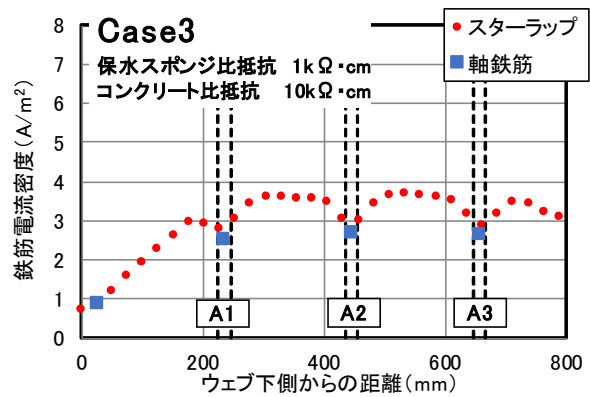


図-9 Case3の鉄筋電流密度の結果

## 5. まとめ

線状陽極材を用いた脱塩工法について、陽極モールド、保水スポンジのユニット間のあき、および陽極モールドの設置間隔が鉄筋の電流分布に及ぼす影響について検討することを目的として、実験およびFEM解析を実施した。以下に、本実験および本解析の範囲で得られた結果を示す。

- 1) 陽極モールドおよび保水スポンジのあきに関する実験の結果から、あきに位置する鉄筋への電流分布を考慮した場合、陽極モールドのあきは $200\text{mm}$ 程度以下、保水スポンジのあきは $100\text{mm}$ 程度以下とすることが良いものと考えられた。
- 2) 陽極モールドの設置間隔に関する実験の結果から、陽極モールドの設置間隔を $300\text{mm}$ 程度以内とすれば、陽極モールド間の鉄筋にも概ね均等な電流が流れるものと考えられた。
- 3) FEM解析の結果から、保水スポンジの比抵抗が小さいほど電流の広がりが良いこと、電流分配率の実験値をもとに同定した保水スポンジの比抵抗は、四電極法に準拠する方法による測定値と概ね一致したこと、この値を用いてPC桁のウェブを模擬したモデルの解析を行った結果、電流分布に問題がないものと推定された。

## 参考文献

- 1) 土木学会, 電気化学的防食工法 設計施工指針(案), コンクリートライブラリー107, 2002.
- 2) 独立行政法人土木研究所, 塩害を受けたコンクリート構造物の脱塩工法に関する共同研究報告書, 共同研究報告書 整理番号第382号, 平成20年3月
- 3) 土木学会規準「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)」JSCE-K 562-2008
- 4) 深川直利, 青山敏幸, 大橋岳: 線状陽極を用いた新しい脱塩工法に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第19巻(投稿中)
- 5) 青山敏幸, 関博, 福手勤: PC桁への電気防食適用に伴うPC鋼材および陽極の特性変化に関する実験的研究, 土木学会論文集E Vol.65 No.4, pp.589-606, 2009.12.