

アルカリシリカ反応に配慮した

ラック LAC脱塩工法の開発

技術本部 技術部

青山敏幸

技術本部 技術部 (現(株)ニューテック康和) 大村信暁

技術本部 技術部

白水祐一

東京土木支店 土木工事部

深川直利

概要: 脱塩工法は、通電によりコンクリート中の塩化物イオンを低減させるとともに、アルカリを鋼材周辺に集積させることで腐食環境の改善を図るが、アルカリシリカ反応が懸念される構造物に本工法を適用する場合には、アルカリの集積によりコンクリートの膨張を促進する可能性があるため、特別な配慮が必要となる。本稿では、アルカリシリカ反応の可能性がある構造物に対しても対応が可能な、新しい LAC 脱塩工法を開発し、施工対象橋梁を模擬した実物大試験を行い、鉄筋への電流分布、脱塩の効果、アルカリの集積状況、陽極モールド間の脱塩効果等について検討を行った。

Key Words: 脱塩工法, 線状陽極方式, アルカリシリカ反応

1. はじめに

線状陽極方式の脱塩工法¹⁾ (以下, LAC 脱塩工法と称す) は、コンクリートの表面に線状タイプの陽極モールドを仮設陽極として設置し、仮設陽極と直流電源装置の (+) 側, 内部鉄筋と直流電源装置の (-) 側を接続し、直流電流を流すことによりコンクリート中の塩化物イオンを電気化学的に抽出する。通電後は塩化物イオンが低減し、鋼材周辺にはアルカリが集積することで鋼材近傍の pH 値が上昇し、コンクリートが本来持っている鋼材を保護する特性を回復させて、コンクリート中の鋼材腐食の発生と進行を抑制する。

LAC 脱塩工法は、

- 1) 線状方式の陽極モールドを使用するため、コンクリート内部の鋼材量や配筋の状況に応じた最適な陽極配置が可能である。
- 2) 各陽極モールド単位の通電量の計測が可能であるため、詳細な通電管理が可能である。
- 3) 工場製作された陽極モールドを使用するため、現場施工の省力化が可能である。

等の特長を有しており、2023 年度に発注された神奈川県のパシフィック沿岸に位置する自動車専用道路での施工を実施する。

しかし、今回の施工箇所に隣接する橋梁では、過年度に他の方式による脱塩工法実施後に、コンクリートにひび割れ等の変状が発生した²⁾。この理由は、脱塩工法の実施時に電解質溶液に炭酸カリウム (K_2CO_3) 溶液を使用したことによるコンクリートかぶり部への多量のアルカリ集積によりアルカリシリカ反応 (以下, ASR と称す) が促進され、膨張ひび割れが生じた可能性が高いとされている。



青山敏幸



大村信暁



白水祐一



深川直利

このような状況を踏まえ、今回の施工箇所では、

- 1) ASRの膨張を抑制する、あるいは促進させない電解質溶液として炭酸リチウム (Li_2CO_3) 溶液の使用
- 2) コンクリート断面内における電流分布の均一性を保つことができる電解質溶液の供給方法や保湿方法、通電回路分けの実施

に対応すべく新たな LAC 脱塩工法を開発し、実物大試験を行った。本稿では、これらの結果についての報告を行う。

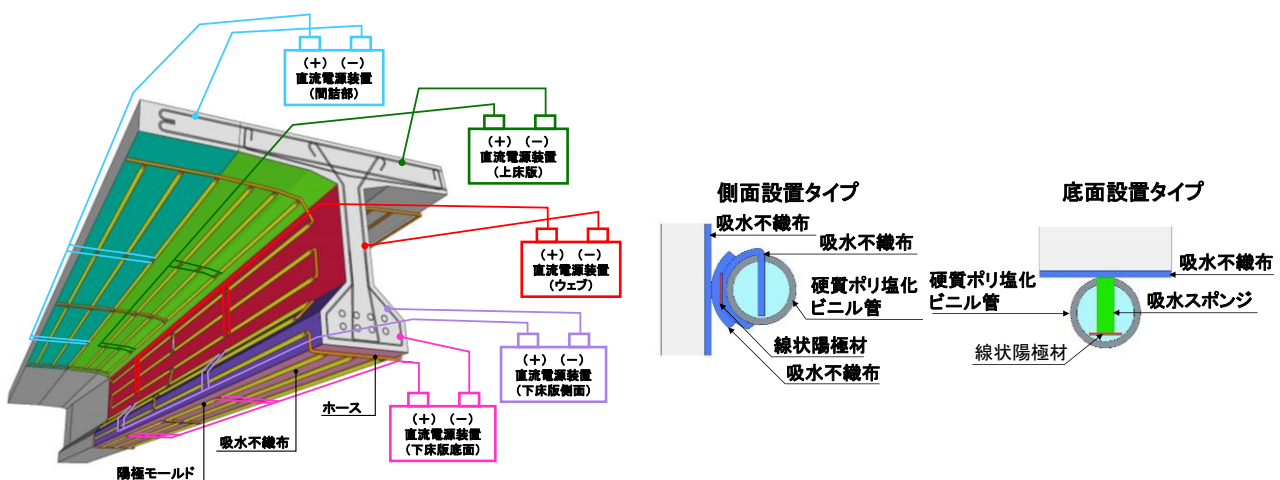
2. 新しい LAC 脱塩工法の開発コンセプト

新たな LAC 脱塩工法を開発するにあたり、1 章で述べた LAC 脱塩工法の特長を含め、表-1 に示す内容についての検討事項に対して対策を実施する。新しい LAC 脱塩工法の概要を図-1 に示す。

コンクリート表面に設置する仮設陽極は、吸水不織布、陽極モールド、ビニールシートの構成とする。吸水不織布は、電解質溶液を保持し、コンクリート表面を常時湿潤化することを目的とする。陽極モールドは、硬質ポリ塩化ビニル管内に線状陽極材と吸水不織布または吸水スポンジを配置し、工場でユニット化したものであり、電解質溶液を内部に貯留し、毛細管現象の原理を利用して溶液を供給する。陽極モールド設置後には、電解質溶液の散逸防止を目的に、側面にはビニールシートを、上面にはポリカーボネート波板をコンクリート面に設置する。構造物の下面には、電解質溶液を溜めた容器を設置し、水中ポンプにより上面に電解質溶液を供給し、陽極モールド間をホースで接続することで、陽極モールドおよび吸水不織布に循環散水を行いながら通電を行う。

表-1 対象工事に対しての LAC 脱塩工法の実施事項

検討事項	検討事項に対しての対策
部位ごとの鋼材量に応じて、適切に電流密度を設定できること	下フランジ底面、下フランジ側面、ウェブで回路分けを行う。
ASRの原因となるアルカリの供給を低減すること	電解質溶液として炭酸リチウム溶液を使用し、ASRを助長する恐れのあるアルカリの供給を低減させる。
電解質溶液の保水性能を向上させる構造とすること	陽極モールド構造の改良と循環散水の適用 陽極モールドは、電解質容器循環時には電解質溶液を貯留し、循環停止後は毛細管現象により陽極モールド内から吸水不織布へ電解質溶液を供給する構造とする。
現場における生産性向上	工場で製作した陽極モールドを使用する。



a) LAC 脱塩工法の全体概要

b) 陽極モールドの概要

図-1 新しい LAC 脱塩工法の概要

3. 実物大試験の概要

3.1 コンクリートの配合

試験体に用いるコンクリートの配合を表-2に示す。コンクリート強度は、施工を行う橋梁（以下、対象橋梁と称す）の建設時の設計基準強度を参考に 40N/mm^2 以上を目標とし、セメント量についても対象橋梁の配合推定値を参考に同重量に設定した。全塩化物イオン量については、コンクリートの練混ぜ水にあらかじめ NaCl を混入することで、実構造物と同じ含有量を再現した。実構造物ではコンクリート表面から深部に向かって塩化物イオン濃度が減少するが、試験体製作時にその濃度勾配を正確に再現することは困難であることから、対象橋梁のコンクリート表面 $0\sim 20\text{mm}$ における全塩化物イオン量が最大で 10.93kg/m^3 であることを考慮し、混入する塩化物イオン量は実施工時に安全側の評価ができる 11.0kg/m^3 とした。全アルカリ量は、対象橋梁の $0\text{-}20, 20\text{-}40, 40\text{-}60\text{mm}$ 位置の平均値が 8.55kg/m^3 に対して、試験体の $0\text{-}20, 20\text{-}40, 40\text{-}60\text{mm}$ 位置の平均値は 10.99kg/m^3 であり、アルカリ量に対しても通電後のアルカリ集積の影響をより厳しく評価している。

3.2 試験水準

試験水準を表-3に示す。今回の試験では、コンクリート表面積あたりの電流密度と、通電時に使用する電解質溶液を試験水準とした。実構造物では、対象とする部位の鋼材量に応じてコンクリート表面積あたりの電流密度を使い分けることを想定し、今回の試験でも 1.0A/m^2 、 0.8A/m^2 の2種類を設定した。電解質溶液は、ASRの膨張抑制効果が期待できる炭酸リチウムと比較用にこれまでに使用している炭酸カリウムを用いて、合計3体に対しての試験を実施した。

3.3 試験体の形状・寸法

試験体の形状・寸法を図-2に示す。試験体は、対象橋梁の上部工形式であるPCT桁の下フランジおよびウェブを再現した。今回の試験では、各部位の鉄筋に流入する電流量を測定するために、図-2の配筋図に示す軸方向鉄筋（鉄筋3～鉄筋14）は、他の鉄筋との絶縁処理を行い独立した状態とした。ウェブの最上縁の軸方向鉄筋（鉄筋1,2）は、各スターラップと導通をとる構造とした。なお、導通の

表-2 コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法 mm	スランプ cm	空気量 %	W/C %	S/a %	単位重量(kg/m^3)						
					W	C	S	G	Cl	減水剤	AE剤
20	18.0 $\pm$ 2.5	4.5 $\pm$ 1.5	43.1	48.0	155	361	862	1036	11	2.17	0.054

表-3 試験水準

試験体No.	電流密度 (A/m^2)	電解質溶液
No.1	1.0	炭酸リチウム溶液
No.2	0.8	同 上
No.3	1.0	炭酸カリウム溶液

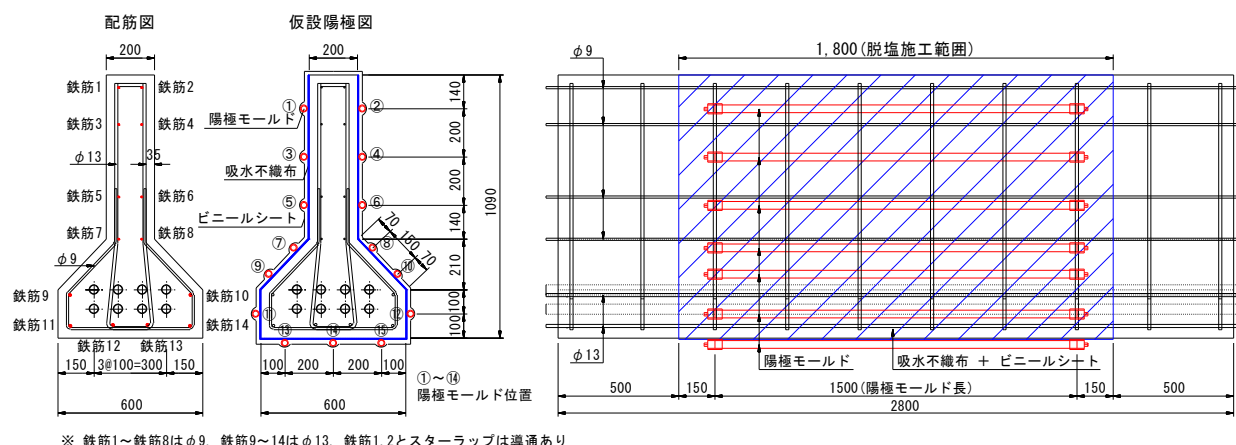


図-2 試験体の形状・寸法

有無により鉄筋表面積あたりの電流量（以下、鉄筋電流密度）に生じる差は 3%程度で、脱塩に与える影響が軽微であることを、別途 FEM 解析により確認している。解析方法は、コンクリートと鉄筋をモデル化し、軸方向鉄筋と直角方向鉄筋の鉄筋間の導通の有無により、増減する電流を比較する方法を用いた。

3.4 仮設陽極

仮設陽極は図-1 に示す構造とし、吸水不織布は試験体の中央部 1.8m の範囲のコンクリート表面に設置した。陽極モールドは、吸水不織布の上に $L=1.5\text{m}$ の製品を図-2 に示すように 150～200mm の間隔で、合計で 15 本配置し、陽極モールド設置後には、吸水不織布の乾燥防止と溶液の飛散防止を目的に、ビニールシートを脱塩施工範囲全体に設置した。

仮設陽極を設置した後に、試験体の下に電解質溶液を入れた容器を設置し、その中に水中ポンプを設置する。水中ポンプとウェブの一番上に設置した陽極モールド 2 本をホースで接続するとともに、それぞれの陽極モールドをホースにて直列で接続することで、陽極モールドおよび吸水不織布に循環散水を行う。溶液の循環は、通電開始時は 10 分/回（5 分散水、5 分停止）とし、その後は 20 分（5 分散水、15 分停止）で実施した。

通電試験の状況を写真-1 に示す。通電は、実構造物にて実施する方法と同様に、図-1 に示すようにウェブ、下フランジ側面、下フランジ底面に回路分けを行った。実施工では、PC 鋼材の水素脆化の影響を考慮して間欠通電（1 週間のうち 5 日間の通電、2 日間の通電停止）を行うが、今回の試験では各部位の鉄筋への電流分配状況と脱塩の効果および鉄筋近傍へのアルカリ集積状況について評価することを主目的とするため、連続的に通電を行った。なお、脱塩工法を行う場合の通電は、一般的にコンクリート表面積あたりで $1\sim 2\text{A/m}^2$ 、通電期間を 8 週間程度とされているが、今回はコンクリートに混入した塩化物イオン量が約 11kg/m^3 と多く、56 日の通電では脱塩目標となる鉄筋位置近傍の塩化物イオン量が 2.5kg/m^3 以上であったため、84 日まで通電を延長した。

3.5 計測項目

通電中は、通電電圧、軸方向鉄筋、シースに流れる電流量、塩化物イオン分析およびアルカリ分析を行った。通電電圧、軸方向鉄筋に流れる電流量はデータロガーを用いて連続的に測定を行った。

塩化物イオン分析、全アルカリ分析用の試料採取位置を図-3 に示す。試料は、ウェブ、下フランジ側面、下フランジ底面の軸方向鉄筋近傍の位置をマーキングした後に、ドリル法により深さ 0～20mm、20～40mm、40～60mm 位置にて採取し、分析を行った。

4. 試験結果と考察

4.1 通電電圧

各試験体の通電期間中の各回路（下フランジ底面、下フランジ側面、ウェブ）の直流電源装置に負荷される通電電圧の測定結果を図-4 に示す。

全ての試験体において、通電期間中の通電電圧の著しい上昇は生じなかった。また、通電期間全体を通して、土木学会³⁾で記載されている人体に対して安全な値とされる 40V よりも小さい電圧で通電が行えた。今



写真-1 試験の状況

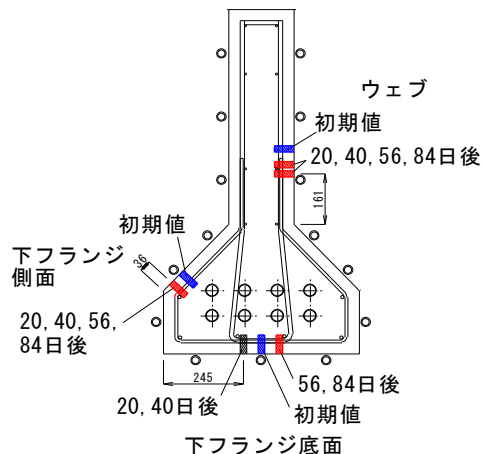


図-3 試料採取位置

回は、コンクリートの打設から通電開始までの期間が短かったこと、コンクリートに多くの塩化物イオンを混入していることからコンクリートの導電性が高かったこと等が要因と考えられる。

同一電流密度で電解質溶液を変化させた No.1 と No.3 試験体を比較した場合、炭酸リチウム溶液を用いた No.1 試験体は、炭酸カリウム溶液を用いた No.3 試験体に比べて通電期間全体を通して通電電圧が大きくなる傾向にある。この理由は、電解質溶液の比抵抗が、炭酸リチウム溶液が炭酸カリウム溶液に比べて大きいことが考えられる。

4.2 鉄筋積算電流密度

各試験体における鉄筋表面積あたりの積算電流密度（以下、積算電流密度と称す）の測定結果を図-5 に示す。積算電流密度は、鉄筋表面積あたりの電流密度に通電時間に乗じたものであり、この値が大きいほど、対象鉄筋に多くの電流が流れていることを意味する。鉄筋近傍における電流が過大になると、鉄筋表面で発生する水素ガスの圧力でコンクリートにひび割れが生じる等、不具合が生じる恐れがあり、これらの不具合を生じさせず、安全に通電できる電流密度の上限値として、鋼材表面積あたりの平均の電流密度を $5.0\text{A}/\text{m}^2$ 以下にすると良いとされている³⁾。本試験でも、通電期間中の軸方向鉄筋（鉄筋 3～鉄筋 14）の電流量の測定結果をもとに、通電 56 日および通電 84 日までの積算電流密度を算出した。図中には、鉄筋表面積あたり $5.0\text{A}/\text{m}^2$ の電流密度で、56 日（積算電流密度 $6720\text{A} \cdot \text{hr}/\text{m}^2$ ）、84 日（積算電流密度 $10,080\text{A} \cdot \text{hr}/\text{m}^2$ ）の通電を行った際の積算電流密度も示す。また試験体 No.1 の鉄筋 6、No.3 の鉄筋 10 は、鉄筋 1、2、スターラップと短絡している傾向を示したため、これらの鉄筋は参考値としてこれらの鉄筋に流れる電流量を鉄筋表面積で除した値を電流密度とし、積算電流密度を算出した。

図に示す結果から、通電 56 日、84 日においても、全ての試験体の全ての鉄筋で積算電流密度の上限値よりも値は小さく、安全に通電ができるものと考えられる。一方、ウェブ位置の鉄筋は、下フランジ側面、底面の鉄筋に比べて積算電流密度が大きい傾向にある。この理由としてウェブは、他の部位に比べてコンクリート表面積に対しての鋼材量が少ないためと考えられる。実施工においては、ウェブや上フランジのように、コンクリート表面積に対して鋼材量が少ない部位に対しては、コンクリート表面積あたり $0.8\text{A}/\text{m}^2$ に設定し、下フランジ側面、底面は、電流量をコンクリート表面積あたり $1.0\text{A}/\text{m}^2$ に設定して通電を行うことが妥当と判断した。

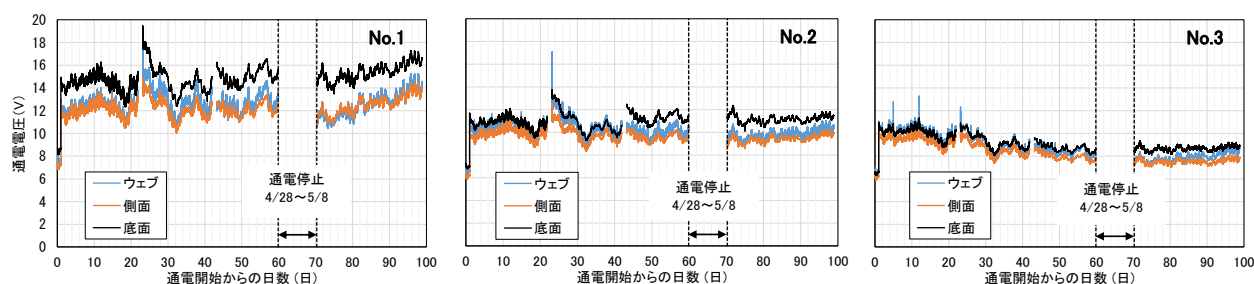


図-4 通電電圧の測定結果

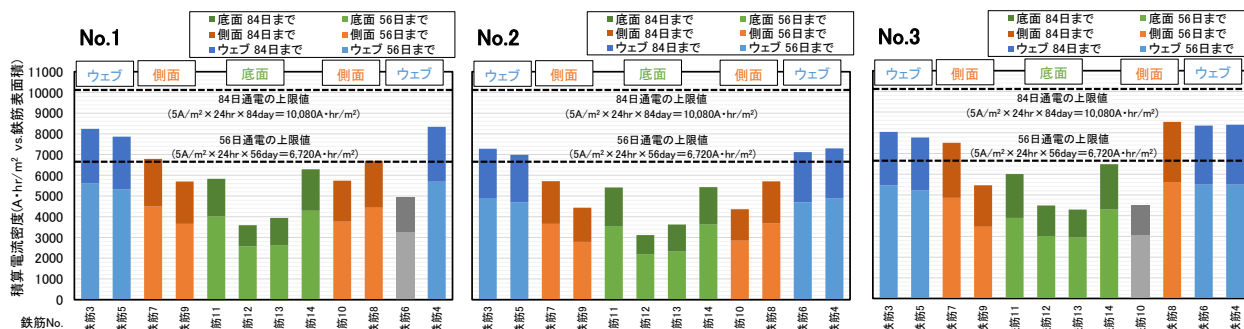


図-5 軸方向鉄筋の積算電流密度の測定結果

4.3 全塩化物イオン量および全アルカリ量

通電前、通電 56 日後および通電 84 日後の全塩化物イオン量の分析結果を図-6 に、通電前および通電 84 日後の全アルカリ量の分析結果を図-7 にそれぞれ示す。

ウェブ、下フランジ側面、下フランジ底面のいずれの部材もコンクリート表面から鉄筋位置までの全塩化物イオン量が低減しており、脱塩の効果が確認できる。今回の実物大試験では、コンクリート全体に塩化物イオンを 11kg/m^3 混入しているため、56 日間の通電で脱塩目標となる鉄筋位置で 2.5kg/m^3 を下回ることができなかったが、通電を 84 日まで延長することで、全ての試験体の各測定位置において、脱塩目標となる 2.5kg/m^3 を下回ることができた。また脱塩の効果については、電解質溶液に炭酸カリウム溶液を用いた場合も、炭酸リチウム溶液を用いた場合も大きな違いがないことが確認できた。

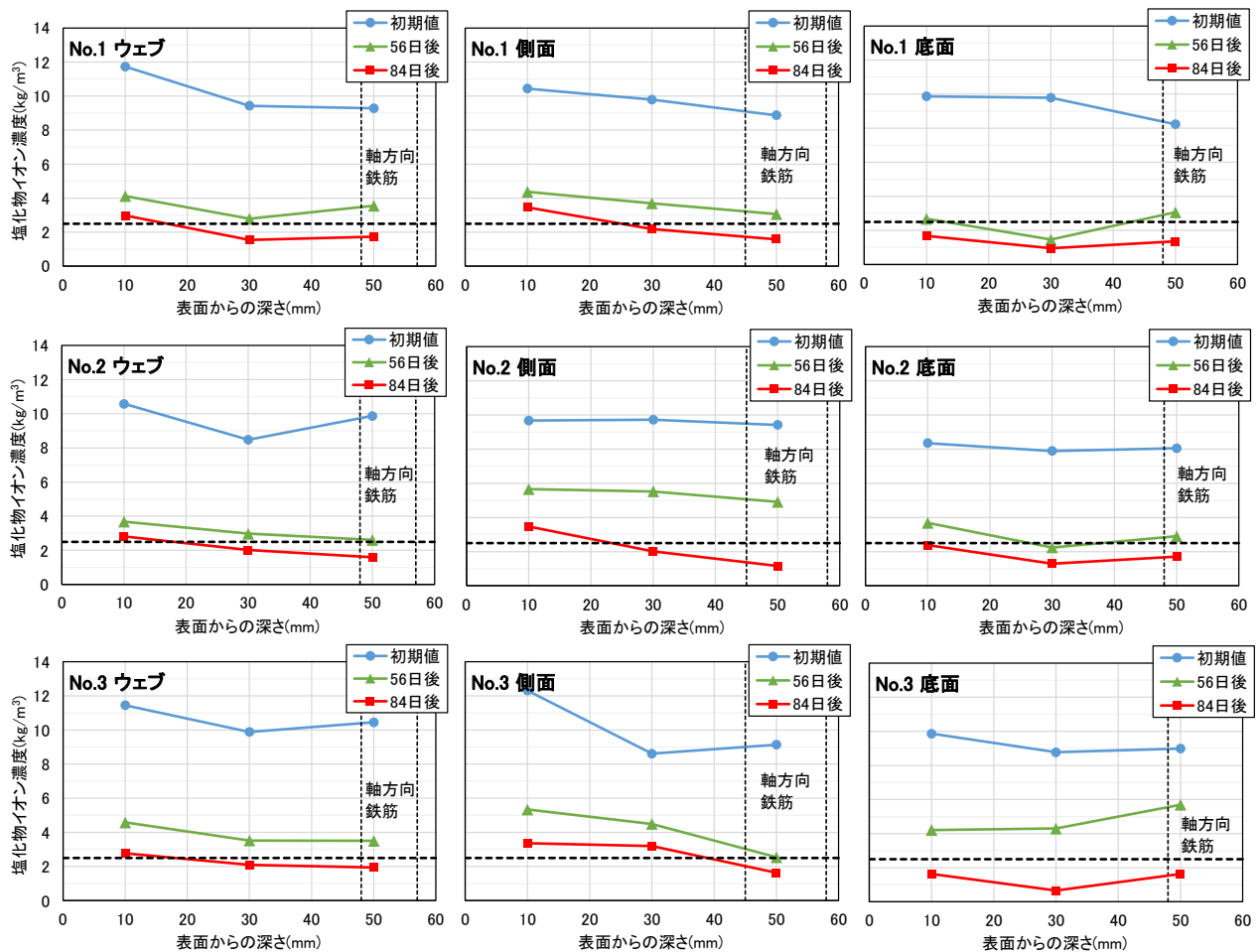


図-6 全塩化物イオン量の分析結果

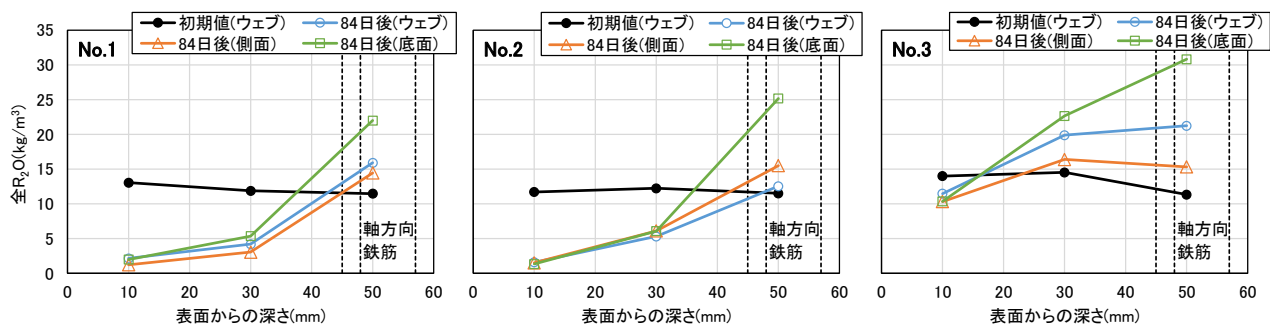


図-7 全アルカリ量の分析結果

次に、炭酸リチウム溶液を用いた試験体 No.1, No.2 と炭酸カリウム溶液を用いた No.3 を比較すると、炭酸リチウム溶液を使用した場合には、外部からのカリウムイオンの供給がなくなり、コンクリート表面付近の全アルカリ量が低減している。一方、軸方向鉄筋位置近傍の全アルカリ量は、全ての試験体において初期の値に比べて増加している傾向にあるが、炭酸リチウム溶液を用いた場合には、炭酸カリウム溶液を用いた場合に比べて全般的に全アルカリ量が小さい傾向にある。今回の実験では、炭酸リチウム溶液を用いた場合においても、鉄筋近傍の全アルカリ量が最大 25kg/m^3 程度となったが、試験体の通電前の全アルカリ量が実構造物に比べて平均で約 1.3 倍であること、通電期間を 84 日まで延長したこと等を考慮すると、今回開発した工法を用いることでアルカリ集積に対しても問題は無いものと考えられる。実橋梁の試験的に施工を実施した径間では、慎重に評価を行うため全アルカリ量も通電期間中（20, 40 日）に測定を行い、著しいアルカリ集積が生じていないかを確認しながら通電を行った。

4.4 陽極モールド間における脱塩状況

LAC 脱塩工法は、面状陽極を用いた脱塩工法とは異なり、陽極材をコンクリート全面に配置しないことから、陽極モールド間の脱塩状況を把握するため、No.1 試験体を対象に、陽極材間のスターラップ位置とスターラップ間の無筋位置において、全塩化物イオン量の分析を行った。試料採取位置を図-8 に、測定結果を図-9 にそれぞれ示す。

スターラップ位置では、0-20mm, 20-40mm, スターラップよりも奥の 40-60mm 全てにおいて塩化物イオン量は 2.5kg/m^3 以下であり、陽極直上と陽極材間での塩化物イオン量の差も小さいことから、線状配置の有効性を確認した。また、陽極材直下に鉄筋が存在しないスターラップ間の位置は、若干の塩化物イオンの低下が確認されるが、その脱塩効果は面状陽極方式による実験結果⁴⁾と同様に、その効果は深度が深くなるにつれて小さくなる傾向にある。

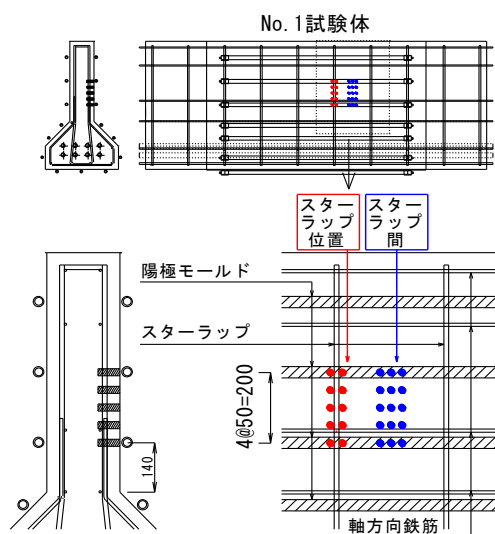


図-8 陽極材間の試料採取位置

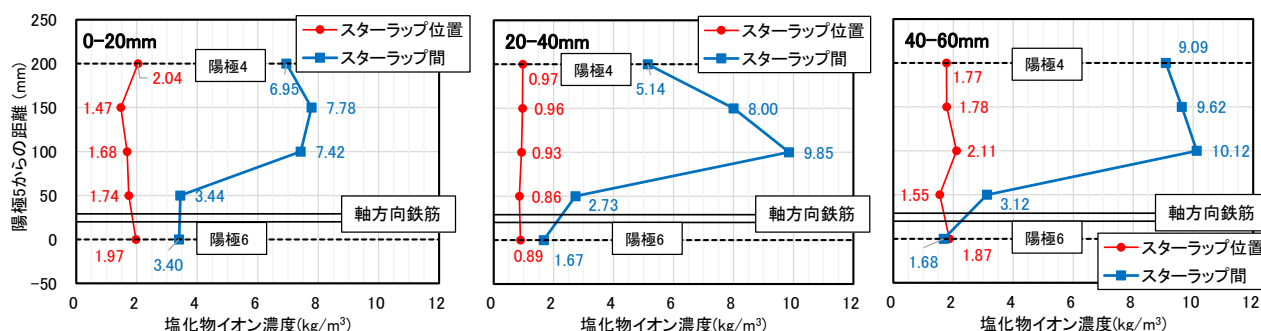


図-9 陽極材間における全塩化物イオン量の測定結果

5. まとめ

本試験では ASR が懸念される構造物に対しても対応が可能な新しい LAC 脱塩工法を開発し、実物大試験体を用いた通電試験を行い、コンクリート中の電流分布、脱塩の効果、アルカリの集積、陽極モールド間の脱塩効果について検討を行った。以下に、本試験で得られた知見を示す。

- 1) 陽極モールド構造および散水方法を改良した新しい LAC 脱塩工法を用いること、部位別に回路分けを行うことで、通電期間中は鉄筋への電流の供給のばらつきが抑制できる。

- 2) ウェブ, 下フランジ側面, 下フランジ底面の全ての部位に対して, 脱塩の効果が認められた. また, 電解質溶液に炭酸カリウム溶液を用いた場合も, 炭酸リチウム溶液を用いた場合も大きな違いは認められなかった.
- 3) 電解質溶液を炭酸リチウム溶液とすることで, 外部からのカリウムイオンの供給がなくなり, ASR の原因となるアルカリの供給が抑制された.
- 4) 陽極モールド間についても, 鉄筋が位置する箇所では塩化物イオンの低減が確認され, 陽極モールドが直上に配置されない位置においても脱塩の効果が認められた.

この結果を踏まえ, 実橋梁にも新しい LAC 脱塩工法による施工を試験的に実施し, 脱塩の効果および ASR による変状がないことを確認し, 無事に施工は完了した. 現在は他の径間についても本工法による施工を順次進めている.

謝辞

本試験の実施にあたっては, 本工事の発注者の中日本高速道路株式会社 東京支社 伊勢原保全・サービスセンターの関係者の皆様, 『東京支社管内 塩害を受けたコンクリート構造物の脱塩に関する技術検討会』(委員長: 宮川豊章 京都大学名誉教授) に関係する皆様にご指導と貴重なご意見をいただきました. ここに, 心より感謝申し上げます.

参考文献

- 1) 深川直利, 鴨谷知繁, 大橋岳: 線状陽極材を用いた新しい脱塩工法に関する実験的検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.29, pp.377-380, 2020.10
- 2) 佐藤健太, 山田広幸, 七澤章, 本田孝太郎, 上田隆雄: 脱塩工法で PC 桁に発生した変状の原因究明, 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 24 巻, pp.203-208, 2024.10
- 3) 電気化学的防食工法指針, 土木学会 コンクリートライブラリー157, pp.146, 2020 年 10 月
- 4) 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, 独立行政法人土木研究所共同研究報告書 第 382 号, 2008 年 3 月