

論文 コンクリート電柱の塩害劣化メカニズムの解明と長寿命化手法の基礎的検討

橋本 達朗*1, 細田 暁*2, 吉田 晴亮*3, 江口 政孝*4

要旨: 塩害単独環境下におけるコンクリート電柱の劣化メカニズムを, 実際の塩害環境で供用されていた電柱から採取したコアを活用して明らかにした。型枠合わせ目部の弱点部から塩化物イオンが侵入する場合や, かぶりが小さい箇所が型枠合わせ目部に近い場合の連鎖的な劣化機構が明らかになった。新造電柱を長寿命化する手法として, けい酸塩系表面含浸材を用いた手法について検討し, 型枠合わせ目部に含浸材を塗布することにより, 透気抵抗性が大幅に向上することを示した。

キーワード: コンクリート電柱, 塩害, 型枠合わせ目部, EPMA, けい酸塩系表面含浸材

1. はじめに

凍害, 塩害, およびそれらの複合劣化環境において供用されるコンクリート電柱においてひび割れやかぶりコンクリートの剥離といった劣化が確認されている。

電力ネットワークを支える電柱は日本全国で供用されており, その数は2000万本を超えるとされている。今後, 供用50年を超える電柱が激増する中で適切に更新を含めた維持管理をしていく必要があり, そのためにも劣化メカニズムを明らかにすることが重要である。凍害, 凍害・塩害による複合劣化環境におけるコンクリート電柱の劣化メカニズムについての研究は行われているが¹⁾, 塩害単独環境下におけるコンクリート電柱の劣化メカニズムの解明は十分になされていない。本研究では, 塩害単独環境下での劣化メカニズムの解明に取り組み, その結果に基づいて長寿命化手法についての基礎的検討を行った。

本研究では, 既往の調査結果^{1) 2)}や, 実際の塩害環境で劣化した電柱を撤去して切断した試験体に対する簡易分析などから, 外部からの塩分の侵入と鋼材腐食発生に関する複数のメカニズムの仮説を立て, 検証を行う。和歌山県沿岸部の塩害単独環境で供用され腐食による剥離等の劣化が生じたPC, RCそれぞれ1本ずつのコンクリート電柱から試験体を採取し, 塩分の濃度を推定する簡易的な手法により塩分の浸透メカニズムを推察しEPMA分析により検証を行う。

さらに, 塩害環境下における耐久性の向上を目的として, 型枠合わせ目部周囲の弱点部にけい酸塩系表面含浸材を塗布することによる長寿命化手法の基礎的検討として, 室内透気試験を用いて効果の分析を行う。

2. 既往の調査, 研究

2.1 型枠合わせ目部の劣化

塩害環境下でのコンクリートの剥離および鋼材露出等の劣化のほとんどは, 型枠合わせ目部付近に発生することが確認されている¹⁾。

コンクリート電柱は製造時に2枚の半円形の型枠を組み合わせ内部にコンクリートを打込み, 遠心締め固め成型により製造される。遠心締め固め成型時に型枠合わせ目からモルタルが流出する場合があります。その場合, 型枠合わせ目部には, モルタル分が集中したり, 骨材がかみ合うことによる小さな充填不良などの欠陥が生じると思われる(図-1)。また, 製造時に弱点となる場合のある型枠合わせ目部では, 経年により水酸化カルシウムの溶脱が顕著になる場合があります。本研究ではこれを型枠合わせ目部の劣化と定義している。

コンクリート電柱では, この型枠合わせ目部の劣化が弱点となりやすく, 鋼材の腐食や縦ひび割れに至る事例が多い。上田ら³⁾も同様の事を指摘しており, 既往の調査においても, この型枠合わせ目部の劣化を起因とした縦ひび割れは多く見られた。

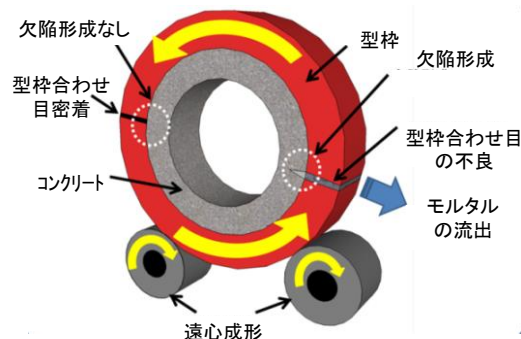


図-1 型枠合わせ目部の欠陥の形成

*1(株)国際建設技術研究所 技術部 工修 (正会員)

*2 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院 准教授 博(工学) (正会員)

*3(株)日本ネットワークサポート 営業本部開発部 部長代理 (正会員)

*4 電気化学工業(株) 青海工場無機材料研究部

2.2 コンクリート電柱に生じる塩害劣化

既往の調査結果¹⁾より、塩害単独環境で劣化が生じる箇所は多くの場合において型枠合わせ目部で生じていることが報告されている(図-2)。吉田らの報告では縦ひび割れの発生箇所の80%が型枠合わせ目部を起点としていた²⁾。上田ら³⁾は型枠合わせ目部の欠陥がCI浸透に及ぼす影響を調べるため、予め隙間を設けた型枠を使用して作製した供試体を用いてCI浸漬試験を行った。浸漬試験より、欠陥箇所からCIが浸透することが明らかになり、型枠合わせ目部以外からのCI浸透は僅かであることが確認された。

しかし、図-3に示すように、型枠合わせ目部から50mm程度離れた隣の箇所においても縦ひび割れ等の劣化が生じることが確認されており、CIの浸透と型枠合わせ目部の劣化には強い関係があると思われるが、型枠合わせ目部から離れた位置での劣化メカニズムを解明する必要がある。

2.3 分析を行った電柱の概要

本研究では、和歌山県内の海岸から約50mの位置で56年間供用されたRC電柱と、同じく和歌山県内の海岸から約20mの位置で15年程度供用されたPC電柱を使用した。

それぞれの供用時の状況を図-4に示す。主な劣化状況を図-5に示す。RC電柱は海側の面の型枠合わせ目部に沿って鋼材腐食が生じているのが確認でき、既往の知見と同様の劣化を示した。さらに型枠合わせ目部に沿って溶脱が生じているのが確認できた(図-6)。また、PC電柱においては、海側の面において地際部から約150mm程度上の高さから約6mの広い範囲で、腐食剥離が生じているのが確認できた。また、どちらの電柱においても腐食の激しい海側の面において、地際部より150~200mm上の高さから激しく腐食が生じていた(図-7)。

また、供試体として切り出したPC電柱の断面を確認したところ、腐食部鉄筋部の最小かぶりが8mmであった(図-8)。



図-2 塩害環境における鋼材腐食事例

3. かぶりの測定

3.1 測定対象と方法

劣化したPC電柱では、剥離箇所においてかぶりが薄い箇所が確認されたので、かぶりの分布を把握することを目的として、2本の電柱においてかぶりを測定した。

劣化が生じたPC電柱では、腐食した緊張筋と非緊張筋それぞれ1本ずつについてかぶりを計測した。新造電柱においては、1本の緊張筋と3本の非緊張筋についてか

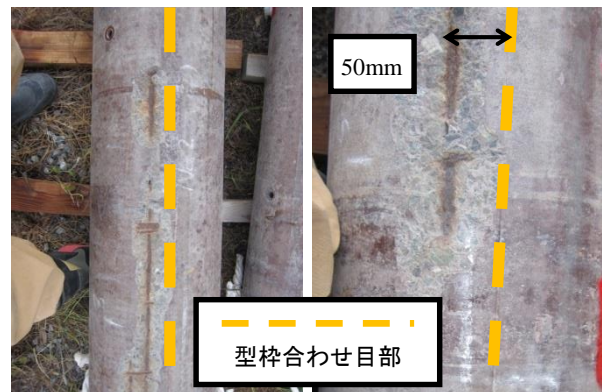


図-3 型枠合わせ目部以外の腐食箇所(PC電柱)



(a) RC電柱 (b) PC電柱

図-4 供用時の状況

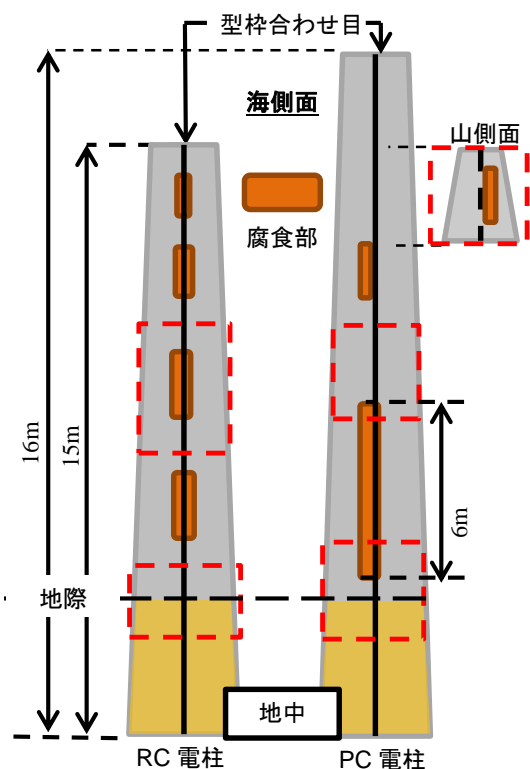


図-5 RC、PC電柱の腐食概略図

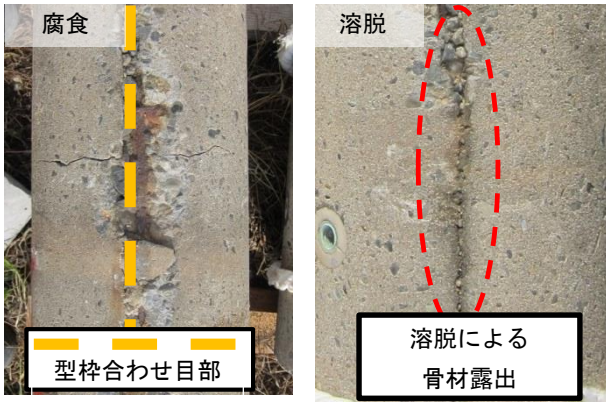


図-6 型枠合わせ目部の腐食，溶脱状況（RC 電柱）

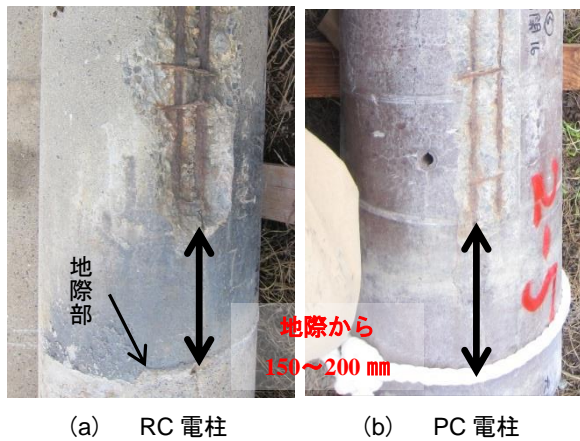


図-7 地際部における腐食状況

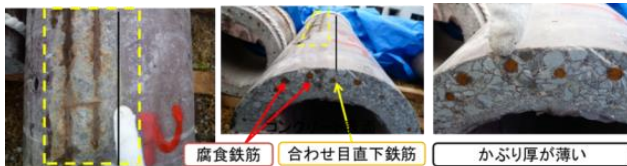


図-8 腐食部のかぶり薄い箇所(PC 電柱)

ぶりを計測し，非緊張筋のデータ数を増やした。

かぶりの測定には，非破壊試験である電磁誘導式のかぶり測定器を使用した。2本の電柱の軸方向に配置された鋼材のかぶりを先端から基部にかけて計測した。

3.2 測定結果および考察

測定結果を表-1 に示す。コンクリート電柱のかぶりを 15mm 以上，10mm 以上 15mm 未満，10mm 未満の割合で示した。なお，10mm 未満に該当する最小値は，劣化した PC 電柱で 8mm，新造電柱で 9mm であった。

劣化した PC 電柱においては腐食部付近で測定した。新造電柱は 1 本のみでの計測結果ではあるが，非緊張筋の測定箇所の 60% 近くで 15mm に満たないかぶり薄い箇所が形成されていたことが確認された。

鋼材種類によってかぶりが異なる原因として，緊張筋はプレストレス導入のために緊張されるためたわみにくい，非緊張筋はスペーサ等による固定のみなので遠

心成形時の遠心力により外側にたわみやすくなることが考えられる。また，1m 程度ごとに型枠内に円形ドーナツ型のモルタルスペーサを配置するが，スペーサに設けられた鋼材を通す穴が鋼材径よりも若干大きいために，設置された非緊張材が遠心力により外側にたわむのではないかと考えられる。

表-1 かぶり分布調査結果

	測定対象	測定結果(%)		
		15mm 以上	15 未満 ~10mm	10mm 未満
PC 電柱	緊張筋	36	55	9
	非緊張筋	0	22	78
新造電柱	緊張筋	100	0	0
	非緊張筋	42	57	1

4. コンクリート電柱の塩害劣化メカニズムの仮説

塩害劣化を受けたコンクリート電柱の調査，観察等から，塩害劣化が生じるメカニズムを推察して仮説を形成した。以下に推察した劣化メカニズムを示す。5 章において，化学分析等を用いて仮説の検証を行った。

4.1 型枠合わせ目部の劣化による塩分の浸透

既往の調査研究よりコンクリート電柱に生じる塩害劣化はほとんどの場合に型枠合わせ目部であり，型枠合わせ目部の劣化が塩分浸透の主要原因であると考えている。

4.2 型枠合わせ目部の劣化とかぶり不足の連動による塩分の広範な浸透

製造時の型枠合わせ目部の不良に伴う周辺の表層品質が低下するイメージを図-9 に示す。型枠合わせ目からモルタルが流出する場合，流出分を補うようにモルタルが集まってきたり，補うモルタルが十分でないことにより，型枠合わせ目部の品質が低下すると考えられる。

さらに，型枠合わせ目部の品質が低い上に，粗骨材の寸法よりもかぶりが小さい箇所が近接する場合，図-10 に示す様にかぶりが薄くなることで鋼材直下に粗骨材が入ることができず，かぶり部にモルタルのみが存在

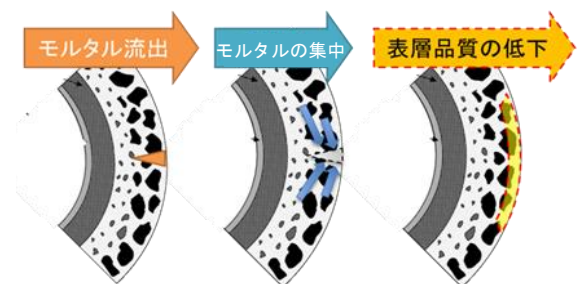


図-9 型枠合わせ目部からのモルタル流出による表層品質の低下イメージ

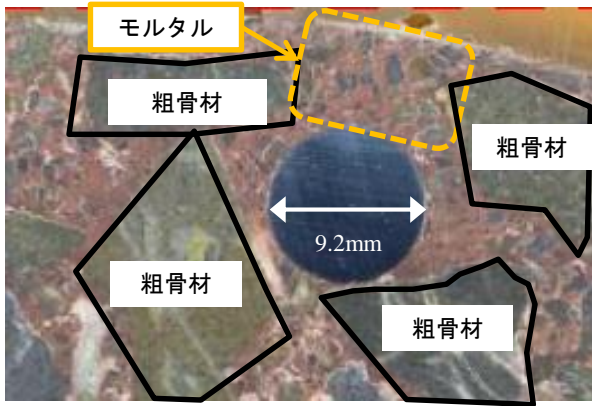


図-10 かぶり不足箇所の断面

する箇所が生じる。型枠合わせ目部からやや離れた箇所
で生じる鋼材腐食は、このような型枠合わせ目部の品質
不良とかぶり不足部の運動によって生じている可能性が
考えられる。

5. コンクリート電柱の塩害劣化メカニズムの解明

5.1 概要

4章で説明した劣化メカニズムの仮説を検証するため、
EPMA 分析により塩分の侵入経路を詳細に分析する。
EPMA 分析を行う箇所を選定するために、外観調査や塩
分量推定簡易試験、塩分滴定試験を行った。

5.2 各種試験方法

以下に示す試験を実施した。

(1)塩分量推定簡易試験：

澤本ら⁴⁾によって提案された硬化コンクリート中の
塩分の浸透深さを簡易に測定する方法を参考に、コンク
リートの表層から深さ10mmまでドリルを用いて削粉粉
を採取し、0.1mol/lの硝酸銀溶液を混合し変色の具合
からおよその塩分濃度を推定する。コンクリート表面に付
着した塩分の影響を排除するためグラインダーを用いて
表層部の塩分を除去した後試料を採取した。

(2)EPMA 分析：

電柱から採取したコア供試体を切断した面に対して
EPMA分析を行い、塩分の侵入状況、Caの分布状況等を
面的に把握した。

5.3 結果および考察

(1)型枠合わせ目部を起点とする塩分の侵入

RC電柱の型枠合わせ目部では、溶脱によると思われ
る骨材の露出が見られた。この箇所が型枠合わせ目部の
不良箇所であり塩分浸透に対する弱点になると考え、溶
脱が生じたRC電柱の型枠合わせ目部において塩分量推
定簡易試験を実施し、EPMA分析を実施した。対象とし
た箇所はRC電柱の基部から6~7m位置の箇所型枠合
わせ目部において溶脱、鋼材腐食が生じている箇所である。
比較用として合わせ目から50mm離れた位置においても、

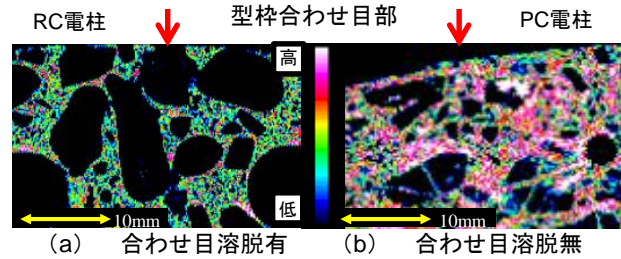


図-11 型枠合わせ目部周辺のCa濃度分布

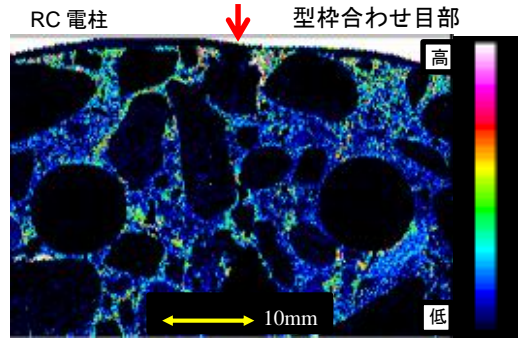


図-12 型枠合わせ目部周辺の塩分浸透状況

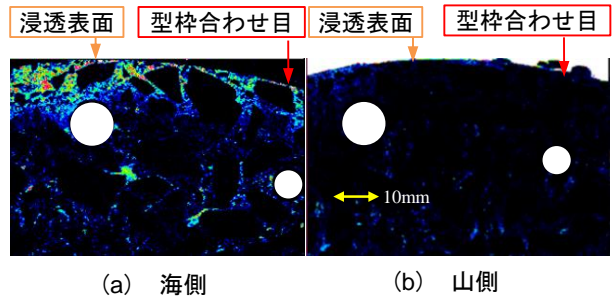


図-13 PC電柱のかぶりが薄い箇所周辺のCl⁻分布

簡易試験を実施した。

簡易試験結果を表-2に示す。溶脱の生じている型
枠合わせ目部における塩分の浸透が顕著であり、約1.0~
4.5kg/m³程度の塩分が侵入していることが推察された。

この位置におけるCa、Cl⁻のEPMA分析結果を示す(図
-11, 12)。Caの濃度に着目すると型枠合わせ目部に溶
脱の見られなかった箇所と比較して非常に低いことが確
認できる。また、Cl⁻は表面から浸透しているのが確認
でき、型枠合わせ目部において最も濃度が高い結果とな
った。

表-2 RC電柱における塩分量推定簡易試験結果

測定位置	塩分量(kg/m ³)
型枠合わせ目部	4.5~1.0
合わせ目部以外	1~0.5

(2) 型枠合わせ目部の劣化とかぶり不足の運動による 塩分の広範な浸透

今回分析を行った箇所を表-3に示す。海側、山側ど

ちらも非緊張筋においてかぶりが設計値 15mm に対して 8mm と薄くなっている。EPMA 分析の結果(図-13)より、海側の試料において型枠合わせ目部から非緊張筋にかけて表層部から塩分が侵入している結果となった。また、山側の試料に関してはかぶり不足部から塩分が侵入しているが塩分濃度が低く、型枠合わせ目部からの塩分の侵入はないという結果となった。

海側の分析結果を見ると、型枠合わせ目部の劣化とかぶり不足部の粗雑な組織とが連動して、広範囲に塩分が浸透した可能性が考えられる。すなわち、型枠合わせ目部が最初の主たる塩分の侵入経路ではあるが、塩分の侵入した範囲で Ca の溶脱が促進され、かぶり不足部のモルタルにもその影響が到達し、広範囲に塩分が浸透した可能性があると考えたのである。そのように考えないと、型枠合わせ目部から遠く離れた箇所のかぶり不足部ではほとんど鋼材腐食が生じないことの説明ができない。

非緊張筋でのかぶり不足は、2 箇所の型枠合わせ目部の近傍以外でも生じる。例えば、型枠合わせ目部から 90 度離れた位置などである。しかし、そのように型枠合わせ目部から遠く離れた位置での鋼材腐食は、塩害単独環境下ではほぼ皆無である。そのことから、上記で考察した型枠合わせ目部の劣化とモルタルの多いかぶり不足部連動によって、塩分が広範囲に浸透する可能性が高いと考えている。

山側の分析結果は、塩分供給量が少ない可能性もあるが、型枠合わせ目部からの侵入がないため、かぶり不足部の塩分浸透もわずかな領域に留まっている。

表-3 EPMA 分析箇所概要

PC 電柱	かぶり (非緊張筋)	位置 (先端部から)
海側	8mm	6m
山側	8mm	5m

6. けい酸塩系表面含浸材による型枠合わせ目部の品質向上の可能性

6.1 概要

コンクリート電柱における塩害劣化は、型枠合わせ目部の初期品質が低い場合に、溶脱による経年劣化が生じて、塩分侵入の起点となることで引き起こされることが分かった。本研究ではコンクリート表層を緻密化する効果のあるけい酸塩系表面含浸材を用いて、型枠合わせ目部の品質向上を試みる。

本研究で用いた今回使用した含浸材にはシリカ化合物と反応促進剤が含まれている。シリカ化合物と水酸化カルシウムが反応することでC-S-H系結晶を生成し、反応促進剤はコンクリート内部の未水和セメントと水の反

応を促進させることで水酸化カルシウム、C-S-H系結晶を生成する。その結果、コンクリートの表層を緻密化する特徴がある。塩害劣化の起点となりやすい型枠合わせ目部の不良箇所においては、製造時の型枠合わせ目部でのモルタルの流出に伴い、モルタルが集中することによって水酸化カルシウムが多く存在することが予想され、けい酸塩系表面含浸材による高い補修効果を期待できると考えた。

供試体には凍害・塩害の複合劣化を受けた経年 22 年の電柱から採取した型枠合わせ目部を含むコアと、比較対象として型枠合わせ目部を含まないコアを 1 体ずつ使用した。室内透気試験から式(1)を用いて透気係数を算出し、けい酸塩系表面含浸材の塗布前と塗布後の透気係数を比較した。計測は含浸材の塗布後 7, 14, 21, 28 日おきに行った。

$$K = \frac{2LP_2Q\mu}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

K:透気係数(m²) Q:透気量(m³/s)

L:供試体の厚さ(m) μ: 粘性係数 (N/m²・S)

A:透気面積(m²) P₂:大気圧(N/m²)

P₁:載荷圧力(N/m²)(ゲージ圧力と大気圧の和)

6.2 結果および考察

型枠合わせ目部と合わせ目外において表面含浸材を

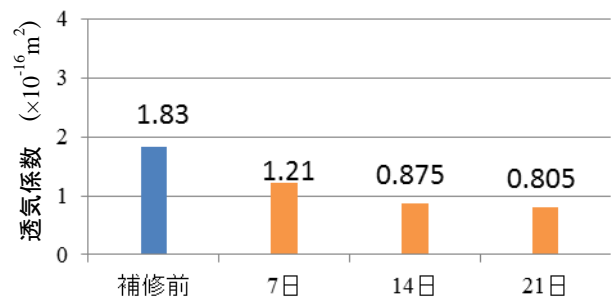
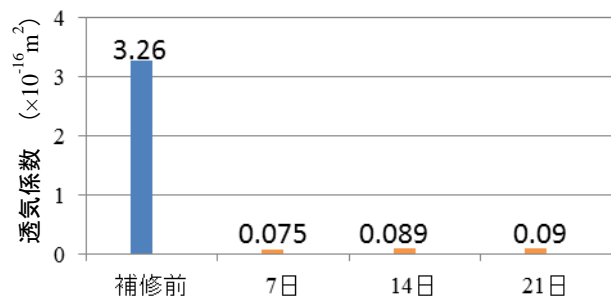


図-15 室内透気試験結果

塗布した前後における透気係数の回復傾向を図-15に示す。

塗布前の透気係数を比較すると型枠合わせ目部を含むコアの方が透気係数が大きい。塗布後には、型枠合わせ目部において透気係数が1/200まで大幅に低下しており表層部が緻密になっているのがわかる。これは型枠合わせ目部にある水酸化カルシウムと含浸材が反応したことに加え、型枠合わせ目部の低品質の周辺組織にけい酸塩系表面含浸材が十分に浸透してC-S-Hを形成する事により緻密性が大幅に向上したためではないかと考えられ、けい酸塩系表面含浸材は型枠合わせ目部の品質を向上させる高い効果を有する可能性が示唆された。本研究では、試験体の数も1つずつと少なく、品質向上効果を検証するための検討を重ねる必要がある。

7.まとめ

- (1) コンクリート電柱は製造時の遠心力成形の過程において、型枠内の鉄筋が外側へはらむことにより、かぶりがばらつく箇所が形成される場合があることが分かった。かぶりのばらつきが見られた鋼材は緊張筋よりも非緊張筋で多く見られた。
- (2) コンクリート電柱の型枠合わせ目部における塩害劣化は、型枠合わせ目部の初期品質が低い場合に、溶脱による経年劣化が生じ、塩分の侵入に対する抵抗性が低下することにより生じると考えられる。
- (3) 型枠合わせ目部以外の鋼材が腐食する原因として、かぶり不足部が、初期品質の低い型枠合わせ目部の近傍にあることで、塩分の侵入と溶脱の連鎖が広範囲に及ぶ

機構を示した。

- (4) コンクリート電柱の塩害単独環境での劣化を抑制し、長寿命化を達成する手法として、型枠合わせ目部の品質を向上させる手法を検討した。けい酸塩系表面含浸材を塗布した結果、型枠合わせ目部において透気係数が顕著に低下し非常に緻密になることが分かった。

参考文献

- 1) 渡辺優樹ほか：PC電柱に発生する縦ひび割れの発生・進展の機構についての考察，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文集報告集，第11巻，2011.10
- 2) 吉田晴亮：プレストレスとコンクリート電柱の劣化状況調査，コンクリート工学，Vol.45.No.8，p.75-78，2007)
- 3) 上田洋，工藤輝大，佐々木孝彦：コンクリート電柱の劣化診断と維持管理，鉄道総研報告，Vol.18.No.10，p3-8，2004
- 4) 澤本武博ほか：ドリル削孔粉と硝酸銀溶液を混合することによるコンクリートの塩分浸透深さの簡易測定方法に関する研究，(社)セメント協会，セメント・コンクリート論文集，No.64，pp.196-202，2011.2
- 5) 井元晴丈，蔵重勲，廣永道彦，横関康祐：塩化ナトリウム水溶液に浸漬させた普通ポルトランドセメント硬化体の溶脱挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，p 903-908，2007