

論文 自然治癒したコンクリート電柱のひび割れの治癒機構

樋口 隆行*1・江口 政孝*2・吉田 晴亮*3・細田 暁*4

要旨：自然治癒が見られるコンクリート電柱を分析し治癒機構を整理した。電柱表面のひび割れには炭酸カルシウムの1種カルサイトが見られ、その析出形態から電柱内部に溜まった水が、ひび割れを経由して電柱表面に流れ出ていることが推察された。電柱内部のひび割れにはカルサイトとエトリンガイトが析出し、ひび割れ幅が 200 μm 程度では完全に治癒していないが、50~100 μm 未満では閉塞が見られた。析出物は主にセメントペースト相とひび割れの界面に存在し、骨材とひび割れの界面にはあまり見られなかった。針状結晶のエトリンガイトは炭酸カルシウムの析出を促し、通水に伴う目詰まりも助長することが示唆された。

キーワード：コンクリート電柱, 自然治癒, 炭酸カルシウム, エトリンガイト

1. はじめに

コンクリート電柱は、電力インフラ網の構築に欠かせない重要な部材である。近年、コンクリート電柱の劣化状況が詳細に調査され、縦ひび割れ、網目状ひび割れ、表面剥離、断面欠損などの凍害や塩害などに起因したコンクリート電柱の劣化現象が明らかとなっている^{1), 2)}。一方、ひび割れが生じたにも関わらず自然治癒し、その後の劣化進展が抑制されたコンクリート電柱も報告されている。この自然治癒現象は、最近研究が進んでいる自己治癒コンクリート³⁾に包含され、コンクリート電柱の長寿命化や維持管理費用の削減に有効と考えられる。本研究では、今後のコンクリート電柱の自己治癒機能の高度化に役立てるため、ひび割れが自然治癒したコンクリート電柱を分析し、析出物の種類、形態、分布状況からひび割れの治癒機構を整理することを目的とする。

2. 研究概要

2.1 分析対象としたコンクリート電柱

図-1、図-2に本研究で分析対象としたコンクリート電柱の概要を示す。水セメント比 35%、設計基準強度 60N/mm²のコンクリートを、遠心成型と蒸気養生を施して製造され、コンクリート内部には緊張材、非緊張材、らせん筋が配置され、ひび割れ発生を抑制するため緊張材のプレテンションによるプレストレスが導入されている。コンクリート電柱は、頂部から地際に向かって太くなり、頂部は直径 19cm、地際は直径 35.7cm である。今回は、滋賀県愛知郡愛荘町蚊野の凍害環境で 34 年間供用されたコンクリート電柱を分析対象とし、製造時の型枠の合わせ目を起点として生じた縦ひび割れに析出物が見られる部分を、図-3に示すように直径 10cm、厚さ 8cm でコアリングして分析を行った。コアを採取した

位置は、電柱の最下端から 3.7m で、供用時には地面から 1.7m の高さであった。

2.2 分析方法と分析用試験片の前処理

(1) 粉末 X 線回折

コンクリート電柱表面の析出物、内部のひび割れに析出した物質をそれぞれスパチュラーで分取してメノウ乳鉢で粉碎し、粉末 X 線回折装置で分析した。

(2) 走査型電子顕微鏡観察

析出物の形態を SEM で観察した。

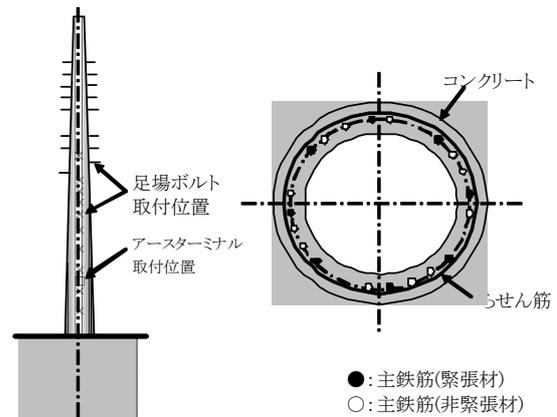


図-1 電柱形状と断面（断面図は地際部）



図-2 電柱写真



図-3 コアリング試験体

*1 電気化学工業（株）青海工場 無機材料研究部 前任研究員（正会員）

*2 電気化学工業（株）青海工場 分析解析室

*3 （株）日本ネットワークサポート 営業本部 開発部

*4 横浜国立大学大学院 環境情報研究院 准教授（正会員）

(3) EPMA

電柱内部のひび割れおよび析出物の分布を確認するため、EPMAによる元素マッピングを行った。コアリングした円柱試験体を、図-4に示すようにPC鋼材と垂直に厚さ10mmで切断してエポキシ樹脂で包埋し、分析面を耐水研磨紙#240~1200とダイヤモンドペースト(3 μ mと1 μ m)で研磨し、カーボンで蒸着処理した。析出物が多く見られた図-4の領域Aを中心にEPMAで分析を行った。EPMAの照射ビーム径は5 μ mでSi, Ca, Al, Fe, C, O, Sの元素濃度と反射電子像を分析した。また、炭酸カルシウム、エトリンガイトの分布を明確にするためRGB法による画像解析を検討した。RGB法とは、図-5に示すように例えば炭酸カルシウム(CaCO₃)の場合、構成元素であるCa, C, Oを赤色、緑色、青色で濃度表示して重ね書きし、3成分を特定の割合で含有する部分を色の三原色を利用して白く表示させる手法である。

3. 分析結果

3.1 表面の析出物

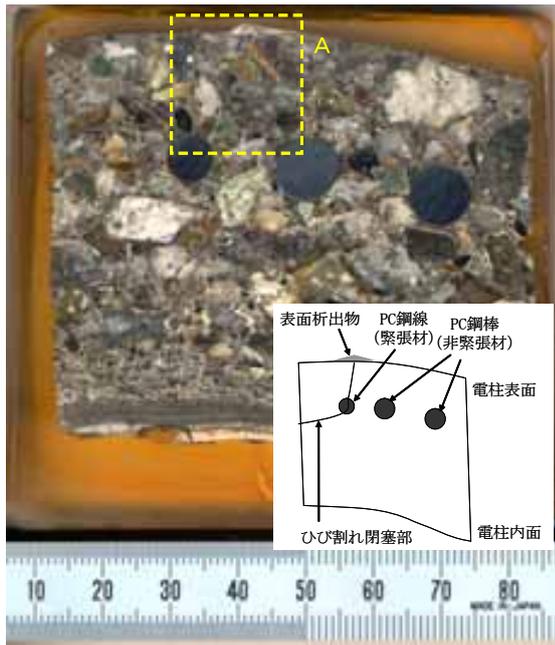


図-4 EPMA 分析用試験片と観察視野

図-6に表面析出物の粉末X線回折測定結果を示す。析出物は炭酸カルシウムの1種カルサイトであった。図-7に表面析出物の反射電子像を示す。カルサイトはコンクリート電柱の最表面から外側に向かいヒダ状に生長している。コアを採取した位置は、地面から1.7mの高さであり、コアを採取した上下の部分でも治癒が生じていた。電柱内部に溜まった水が、ひび割れを経由して電柱表面に流れ出す間にCaイオンが溶け込み、電柱表面で空気中の二酸化炭素と反応してカルサイトに变化したと考えられる。また図-5より、カルサイトはひび割れ閉塞部以外ではあまり見られず、ひび割れの無い健全部では電柱表面からの中性化がほとんど進行していないことが分かる。

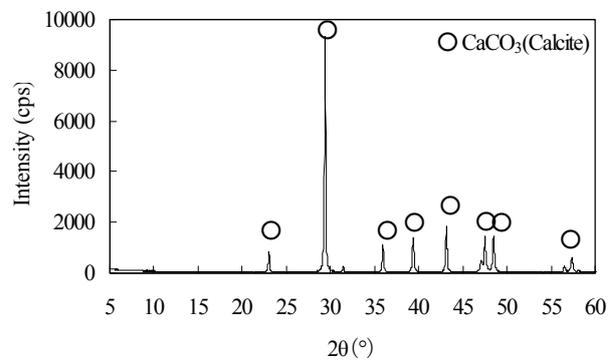


図-6 表面析出物の粉末X線回折測定結果

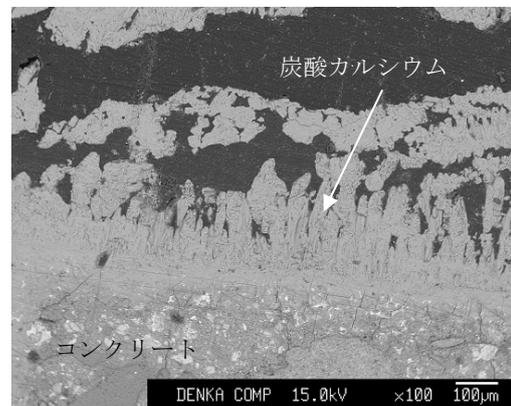


図-7 電柱表面に析出したカルサイトの反射電子像

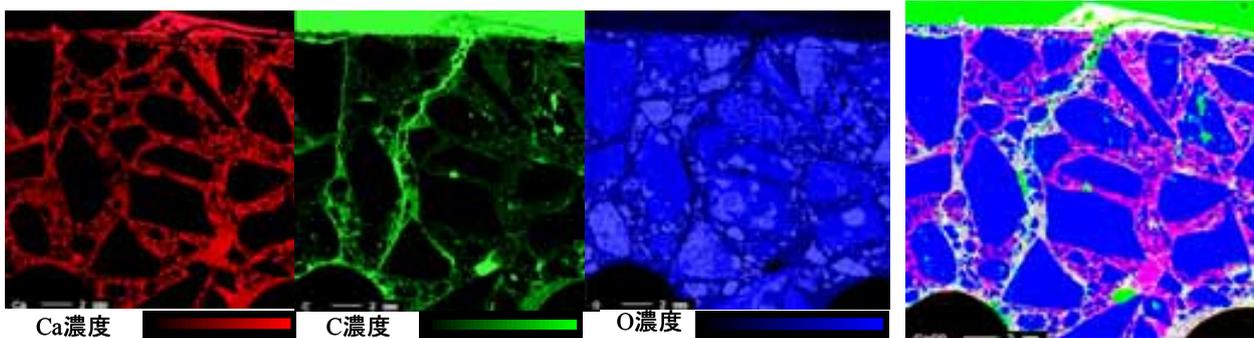


図-5 RGB法による炭酸カルシウム析出領域の確認

白い部分がCaCO₃

3.2 ひび割れ閉塞部

図-8に示すように電柱を割ってひび割れ閉塞部を露出させ、白色析出物を粉末X線回折で分析した。結果を図-9に示す。表面析出物で確認されたカルサイトに加え、エトリンガイトが検出された。図-10にSEM像を示す。長さ50~100 μm 程度の針状結晶と微細な粒子が確認できる。それぞれエトリンガイト、カルサイトと考えられ、エトリンガイトの針状結晶は方向性を持って析出しているように見受けられる。ひび割れを流れる水は図-7より、電柱内面から電柱表面に向かって流れたと想定されるが、電柱内面にはペースト相が多く存在するため、硫酸イオンなどのエトリンガイトを構成する成分が水に溶け込み、乾湿による濃度変化や温度変化などを駆動力として、水の流れに沿う形でエトリンガイトが徐々に析出したと考えられる。エトリンガイトは結合水量が多く占有体積が大きいこと、ひび割れの閉塞に効果的と考えられ、針状結晶はひび割れ内部での通水に伴う目詰まりを促すとともに、比表面積が大きいことから炭酸カルシウムの析出サイトとして機能したと考えられる。

3.3 EPMAによる試験体内部の元素分析

電柱内部のひび割れに析出した炭酸カルシウムやエトリンガイトの分布を確認するため、PC鋼線からコンクリート表面付近についてEPMAによる元素マッピング

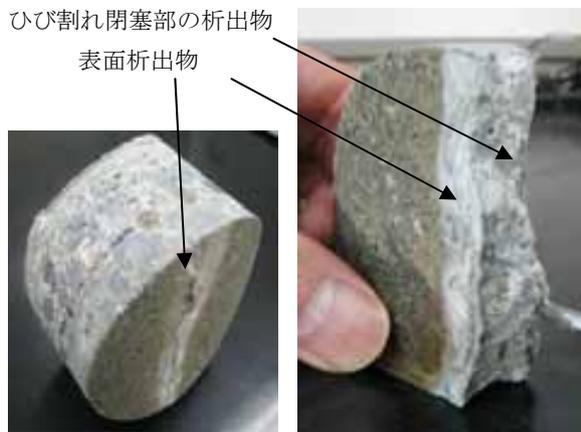


図-8 試験片の状態

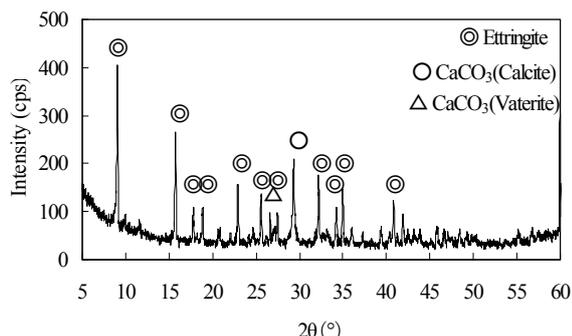


図-9 ひび割れ閉塞部の粉末X線回折

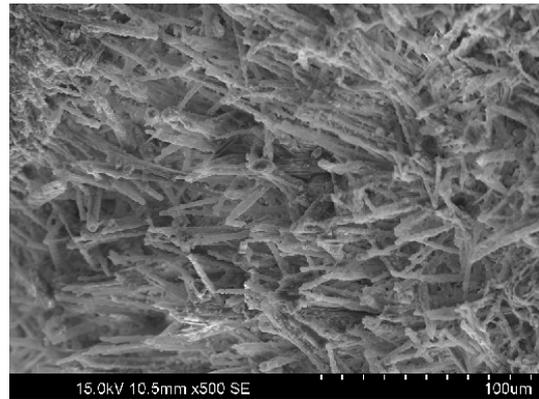


図-10 ひび割れ閉塞部のSEM像

を行った。結果を図-11に示す。Si濃度から骨材の分布が、Ca濃度からセメントペースト相の分布が確認できる。反射電子像(CP)に着目すると、PC鋼線からコンクリート表面に向かって黒い筋が伸びている。反射電子像は、密度が小さい部分を黒く、密度が大きい部分を白く写すため、黒い筋は密度の小さい、ひび割れに含浸した樹脂と考えられる。またCの分布に着目すると、PC鋼線からコンクリート表面に向かって濃度が高い部分が見られる。反射電子像と同様、ひび割れに含浸した樹脂、またはひび割れに析出した炭酸カルシウムであることが示唆される。そこで、炭酸カルシウム、エトリンガイトの分布を明確にするため、図-5で示したRGB法による画像解析を試みた。結果を図-12、図-13に示す。

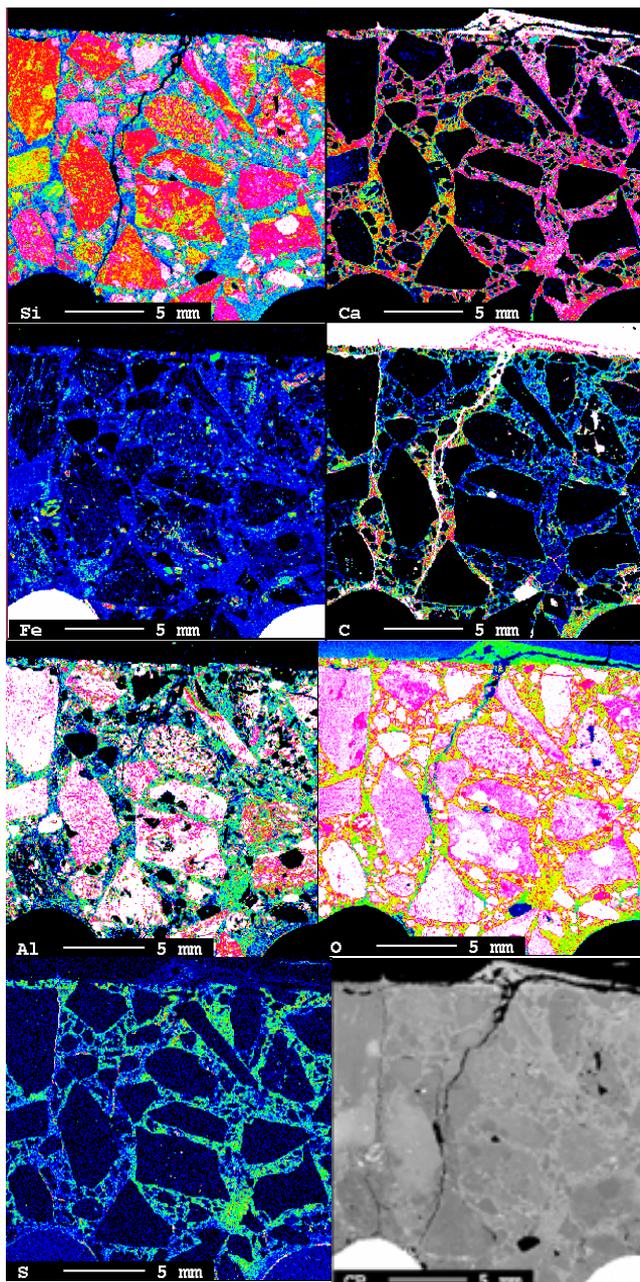
3.4 RGB処理による炭酸カルシウムの分布

図-12にRGB法で炭酸カルシウムを白く示す処理を行った結果を示す。(a)に着目すると、青色はCaやCが少ない骨材、緑色はCを主体とする樹脂、ピンク色はCaが多いがCが少ないセメントペースト相を示す。電柱表面の析出物に着目すると、図-6でカルサイトと確認された部分が白い領域として明瞭に確認できる。本手法が炭酸カルシウムの存在領域を明確にする手法として妥当であることを示している。表面の析出部からPC鋼線に至る部分に着目すると、緑色と灰色と白色が混在した領域が認められ、空隙の残存、Caの溶脱、炭酸カルシウムが混在していることが示唆される。

(b)は(a)の領域Aを拡大して解析した結果である。ひび割れの両端からひび割れに沿う形で炭酸カルシウムが厚さ50 μm 程度析出している。炭酸カルシウムは、セメントペースト相とひび割れの界面に多く析出し、骨材とひび割れの界面での析出は少ない。また樹脂の分布からひび割れが完全に閉塞していないことも分かる。析出物が生じる前のひび割れ幅は150~200 μm 程度と考えられるが、既往の研究でもひび割れ幅が50 μm 程度までは水和物や炭酸カルシウムの析出で閉塞しやすいが、

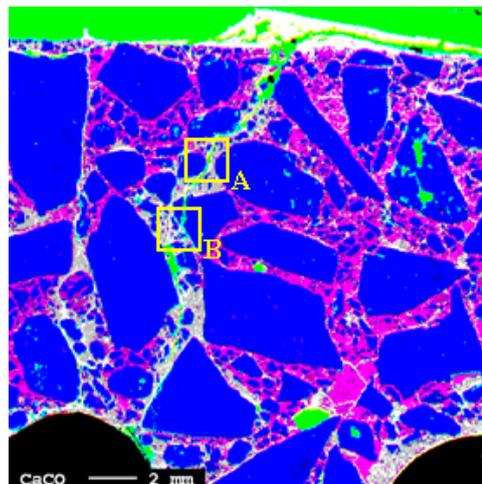
200 μm 程度までひび割れ幅が広がると治癒しにくいことが示されている。

(c) は (a) の領域 B を拡大して解析した結果である。中央にある幅 50~100 μm のひび割れは、ほぼ炭酸カルシウムで閉塞している。ひび割れ幅が狭かったこと、ペースト相に生じたひび割れであることが、閉塞した要因と考えられる。一方、図右上の骨材付近のひび割れは、樹脂の分布状態から残存していることが分かる。

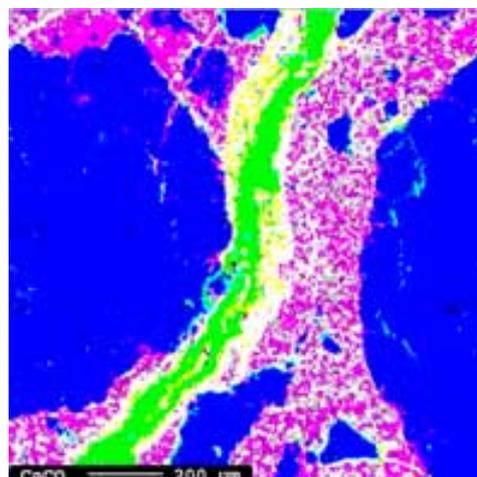


濃度低  濃度高
分析元素：Si, Ca, Al, Fe, C, O, S, CP (反射電子像)

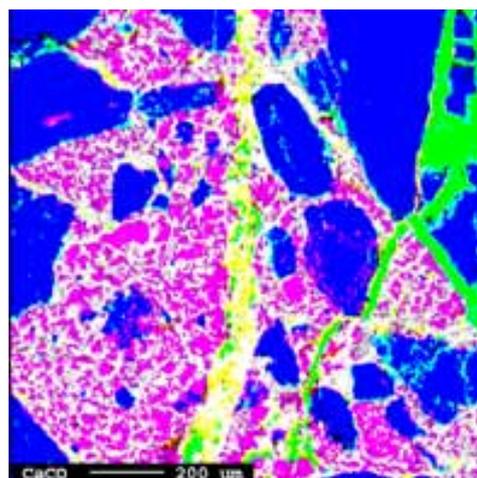
図-11 EPMA 分析結果



(a) PC 鋼線～電柱表面部分



(b) (a) の領域 A 拡大



(c) (a) の領域 B 拡大

Ca：赤，C：緑，O：青で元素濃度を表示し合成
白：Ca, C, O を含む炭酸カルシウム
ピンク色：Ca, O を含むペースト相
緑：C を主体とする樹脂
青：Ca, C が少なく O を含む骨材

図-12 RGB 法による炭酸カルシウムの分布

3.5 RGB法によるエトリンタイトの分布

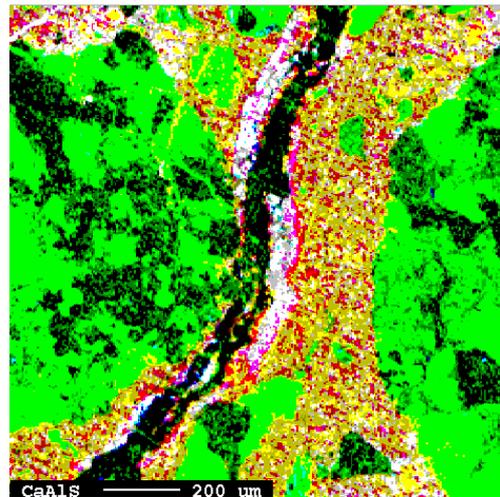
電柱内部のひび割れには、炭酸カルシウムの他にエトリンタイト($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)が多く確認されたことから、構成元素であるCa, Al, Sの濃度分布をそれぞれ赤色、緑色、青色で表示して重ね書きし、3成分を含有するエトリンタイトを白で表示させる方法でマッピングを試みた。結果を図-13に示す。図-13の(a), (b)は、図-12の領域A, 領域Bをエトリンタイトの観点から解析した結果である。図中の緑色はCaやSが少なくAlを含む骨材、黒色はCa, Al, Sを含まない樹脂、黄色はCaとAlを含むセメントペースト相、白い部分がエトリンタイトを示している。

図-13の(a)より、ひび割れの両端からひび割れに沿う形でエトリンタイトが多く分布している。エトリンタイトは主にセメントペースト相とひび割れの界面に存在し、骨材とひび割れの界面にはあまり存在しない。エトリンタイトは、図-12の(b)で示した炭酸カルシウムの生成領域とほぼ同じ部分に存在しており、析出物にはエトリンタイトと炭酸カルシウムが共存していることが推察される。これは図-9で示したひび割れ析出物の粉末X線回折結果と一致する。

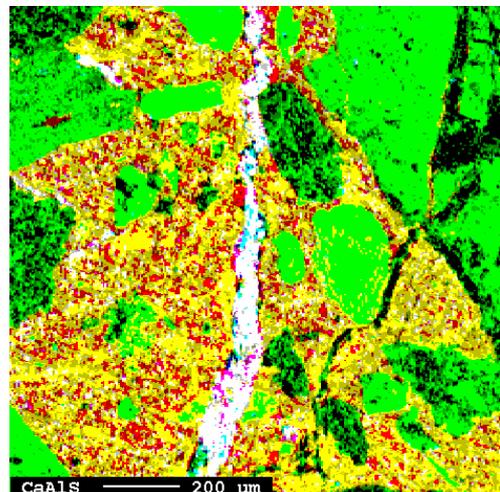
図-13の(b)より、中央にある幅50~100 μm のセメントペースト部に生じたひび割れにはエトリンタイトが多く分布し、ほぼ閉塞していることが分かる。一方、右上の骨材付近に見られるひび割れは残存している。図-11に示すように、エトリンタイトの構成成分であるCa, Al, Sはセメントペースト相に広く分布している。ひび割れがセメントペースト相に生じた場合、セメントペースト相はエトリンタイト成分の供給源になるとともに、セメントペースト中にもともと存在したエトリンタイトやモノサルフェートが、エトリンタイトの析出サイトとして機能したと考えられる。一方、骨材からはエトリンタイトの生成に必要な成分が供給されないこと、析出の核となるエトリンタイトやモノサルフェートが少ないことから、骨材付近のひび割れにはエトリンタイトの析出が見られなかったと考えられる。

3.6 内部鉄筋の状態

図-14に電柱内部のPC鋼線を露出させ鉄筋の状態を観察した写真を示す。若干の腐食が見られるものの浮き錆びなどの発生は見られなかった。電柱表面から鉄筋に向かって伸びていたひび割れが、炭酸カルシウムやエトリンタイトによって閉塞されたことにより、その後の中性化や腐食因子の侵入が抑制され、34年間供用後でも鉄筋の著しい腐食が見られなかったものと考えられるが、ひび割れの治癒と鋼材腐食の抑制に関しては更なる検討が必要である。



(a) 図-12の領域A



(b) 図-12の領域B

Ca : 赤, Al : 緑, S : 青で元素濃度を表示し合成
 白 : Ca, Al, Sを含むエトリンタイト
 緑 : Alを含む骨材
 黒 : Ca, Al, Sを含まない空隙
 黄 : Ca, Alを含むセメントペースト相

図-13 RGB法によるエトリンタイトの分布



図-14 PC鋼線の状況

4. 治癒機構の考察

電柱表面のひび割れには炭酸カルシウムが、電柱内部のひび割れには炭酸カルシウムとエトリンサイトが認められた。炭酸カルシウムの析出場所や形態から、水は電柱内部から電柱表面に向かってひび割れ内を流れ、その間にセメントペースト相から Ca 成分が供給され、空気中の二酸化炭素と反応して析出したと推察される。また電柱内部のひび割れにも炭酸カルシウムが見られた。コンクリート内を炭酸ガスが移動する現象は中性化として議論されるが、コンクリート電柱ではその速度や深さは決して大きくないものの、ひび割れが存在する場合はひび割れに沿う形で中性化が生じることが報告されている⁴⁾。本試験体でも同様の現象が生じたと考えられる。炭酸カルシウムはセメントペースト相とひび割れの界面に多く見られ、この近傍には Ca 濃度の低い領域が確認された。炭酸カルシウムの析出には、最適な pH や pH 変化が重要であることが報告されている^{5), 6)}。本試験体もセメントペースト相は Ca イオンの供給源になるとともに、Ca やアルカリ金属が溶脱したペースト相は pH が下がり、炭酸カルシウムが生成しやすい環境になったと考えられる。

またエトリンサイトもセメントペースト相とひび割れの界面に析出が多く見られた。エトリンサイトの成分である Ca イオン、アルミニウムイオン、硫酸イオンがセメントペースト相から供給され、長さ 50~100 μm の針状結晶へと成長したと思われる。またエトリンサイトの針状結晶とともに炭酸カルシウムと思われる微粒子が見られた。繊維を配合することでひび割れ部への炭酸カルシウムの析出物が促進されることが報告されている⁷⁾。エトリンサイトの針状結晶も炭酸カルシウムの析出サイトとして機能するとともに、ひび割れ内部での通水に伴う目詰まりをうながしたと考えられる。

コンクリート電柱は主に遠心力成型法によって製造される。粒径の大きなセメント粒子が電柱表面の近傍に集まり、長期材齢でも未水和物として残り、カルサイトやエトリンサイトの析出に寄与したことも推察される。一方、粒径の大きい骨材も電柱表面に集まりやすくなる。電柱にひび割れが生じた場合、骨材とセメントペースト相の界面にひび割れが生じる可能性が高く、電柱の自己治癒を考える上では骨材周辺のひび割れを充分考慮する必要があると考えられる。またひび割れ幅に着目すると、幅 200 μm 程度では完全に閉塞していない箇所もあり、ひび割れ幅の制御も治癒の観点で重要と考えられる。

5. まとめ

滋賀県愛知郡愛荘町蚊野の凍害環境で 34 年間供用され自然治癒したコンクリート電柱の地面から 1.7m の高

さから採取したコアを分析し、以下を確認した。

- (1) ひび割れは PC 鋼線と電柱表面をつなぐ形で生じ、ひび割れ幅 200 μm 程度の部分は完全に治癒していないが、ひび割れ幅 50~100 μm 未満では析出物によって閉塞した部分があることを確認した。
- (2) 電柱表面のひび割れには炭酸カルシウムの 1 種であるカルサイトが見られ、その析出形態から電柱内部に溜まった水がひび割れを経由して電柱表面に流れ出していることが推察された。
- (3) 電柱内部のひび割れには、カルサイトとエトリンサイトが析出し、これら析出物はセメントペースト相とひび割れの界面に主に生成し、骨材とひび割れの界面にはあまり見られなかった。
- (4) 電柱内部のひび割れに析出したエトリンサイトは針状結晶を呈し、近傍には炭酸カルシウムが見られた。針状結晶のエトリンサイトは炭酸カルシウムの析出サイトとして機能し、さらには通水に伴う目詰まりも助長することが示唆された。
- (5) ひび割れが生じた部分の鉄筋に著しい腐食は見られなかった。

謝辞：本研究の実施に際しご協力頂きました横浜国立大学大学院環境情報学府の青木勇人氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 吉田晴亮：プレストレスト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，pp.75-78，2007
- 2) 網干光雄，高橋国男：コンクリート柱劣化の実態調査とその補修方法について，電気鉄道，Vol.39，No.1，pp.13-16，1985
- 3) 日本コンクリート工学協会：セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会報告書，2009.3
- 4) 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.10，2004.10
- 5) Carola Edvardsen：Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete，ACI material Journal，Vol.96，No.4，pp.448-454，July./August.1999
- 6) Jochen Stark，Bernd Wicht：コンクリートの耐久性，社団法人セメント協会，pp.57-60，2009.3
- 7) Daisuke Homma，Hirozo Mihashi，Tomoya Nishiwaki：Self-healing Capability of fiber Reinforced Cementitious Composites，Journal of Advanced Concrete Technology，Vol.7，No.2，pp.217-228，June.2009