

## PC電柱の縦ひび割れの発生原因の調査とそのASR抑制対策

北電技術コンサルタント(株) 博(工) ○橋本 徹  
 北陸電力(株) 修(工) 古田 勝  
 日本海コンクリート工業(株) 金井 滋  
 金沢大学 正会員 工博 鳥居 和之

Abstract : Prestressed concrete (PC) poles, which are now composed of one of important infrastructures, are manufactured in the process of production by the centrifugal molding. They are shaped in hollow circular cylinder concrete in form. Recently, it was found out that there were some vertical cracks on the surfaces of concrete poles (high-strength type) within 10 years after installation. So in this study, we have investigated whether or not the vertical crack was caused by ASR itself, and the flexural strength capacity of concrete poles has been sufficient still. And it has been clarified by both the ASTM C 1260 test and the Concrete Prism Test that the replacement of 15% by classified fine fly ashes in OPC is effective for the mitigation on ASR.

Key words : Prestressed concrete pole, Vertical crack, ASR, Classified fine fly ash

## 1. はじめに

重要な社会インフラの一つである電柱は、遠心成形により製造された中空円筒状のPCa製品である。北陸地方においては、1973年以降、鉄筋コンクリート製のRC電柱から高耐久で水密性に優れたプレストレストコンクリート製のPC電柱に切り替わり今日にいたっている。近年、このPC電柱のなかでも高強度を必要とする耐張型のPC電柱において、施設後10年程度の早期に特徴的な縦ひび割れが確認された。縦ひび割れの特徴としては、最大ひび割れ幅は0.2mm～数mm程度で、いずれも電柱の地際付近から上方向にひび割れが進行し、円周上の対角線方向に対となって縦ひび割れが発生していることが多いことである。写真-1 および写真-2 に耐張型のPC電柱に発生した縦ひび割れの例を示す。一方、北陸地方では塩害やアルカリシリカ反応(ASR)が発生したコンクリート構造物が多数存在し、この地域特性を踏まえた劣化抑制対策として、北陸地方のコンクリートへの分級フライアッシュの有効利用が期待されている<sup>1)~3)</sup>。

そこで本研究では、この縦ひび割れの発生原因とPC電柱の曲げ耐力の調査を行うとともに、そのASR抑制対策として、分級フライアッシュの有効活用の検討を実施した。

## 2. 調査内容

## 2.1 PC電柱の配合と製造工程

表-1 に縦ひび割れが確認された耐張型のPC電柱の現在のコンクリートの配合(縦ひび割れ発生電柱の配合とは異なる)を示す。使用材料として、セメントはT社製の普通ポ



写真-1 PC電柱の全景



写真-2 PC電柱の縦ひび割れの例

ルトランドセメント (密度: 3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3,350cm<sup>2</sup>/g), 粗骨材は富山県黒部川産の河川砂利 (最大骨材寸法: 20mm, 密度: 2.70g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 1.21%, 化学法 (JIS A 1145) の判定: 「無害」, Sc:23 mmol/l, Rc:26mmol/l), 細骨材は富山県神通川産の陸砂 (密度: 2.60g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 1.87%, 化学法 (JIS A 1145) の判定: 「無害」, Sc:29mmol/l, Rc:51mmol/l), 混和材は TM 社製の高強度混和材 (密度: 2.95g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 5,440cm<sup>2</sup>/g, 主要成分: CaO 40~55%, SO<sub>3</sub> 30~40%), 化学混和剤は K 社製の高性能減水剤を使用している。また, PC 電柱は富山県内の PCa 製品工場で製造されており, その製造方法は遠心成形用の鋼製型枠にコンクリートを投入し, 遠心力成形機により所定の条件で遠心力を加える。その後, 常圧蒸気養生 (前養生を 2~4 時間後, 昇温速度 20°C/時間で 70°Cまで温度を上昇させ, 最高温度 70°Cを 4 時間保持) を実施し, 管理材齢まで屋外で自然養生している。

表-1 PC電柱のコンクリート配合 (呼び強度 80Nクラス)

W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				高性能減水剤	
		水 (W)	結合材 (P)		粗骨材 (G)		
(%)	(%)		セメント (C)	高強度混和材		(P×%)	
30.5	41	160	525	25	705	1011	1.1

また, PC 電柱は富山県内の PCa 製品工場で製造されており, その製造方法は遠心成形用の鋼製型枠にコンクリートを投入し, 遠心力成形機により所定の条件で遠心力を加える。その後, 常圧蒸気養生 (前養生を 2~4 時間後, 昇温速度 20°C/時間で 70°Cまで温度を上昇させ, 最高温度 70°Cを 4 時間保持) を実施し, 管理材齢まで屋外で自然養生している。

2.2 縦ひび割れの発生原因とPC電柱の耐荷力の調査

図-1に耐張型のPC電柱に発生した縦ひび割れの発生原因とその耐荷力の調査フローを示す。図より, 想定される縦ひび割れの発生原因としては, 縦ひび割れの外観調査や使用骨材などの履歴調査から, コンクリート内部の材料の物理・化学的な劣化に起因する反応であるアルカリシリカ反応 (ASR) とエトリンタイトの遅延生成反応 (DEF), および, PC電柱の縦方向に配置されたPC鋼線の腐食を誘発する中性化と塩害が考えられた。そこで, 縦ひび割れにより劣化したPC電柱から採取したコンクリート断片を用いて, ゲルフルオレッセンス法によるASRゲルの簡易判定試験<sup>4)</sup>, 偏光顕微鏡によるコンクリート薄片 (厚さ: 20 μm, 25×25mm) の観察<sup>5)</sup>, フェノールフタレイン溶液の塗布による中性化深さ測定, 塩化物イオン濃度測定 (表面からの深度: 0~20mm, 20~40mm, 40~60mm) による縦ひび割れの発生原因の調査を実施した。また, 縦ひび割れが発生したPC電柱の耐荷力を調査するため, 現地より撤去し, 縦ひび割れ幅の相違する電柱2本を用いて曲げ試験を実施し, JIS A 5373の推奨仕様を満足するかどうかを確認した。なお, 曲げ試験は圧縮破壊が卓越することから縦ひび割れを圧縮側に配置した。

2.3 分級フライアッシュによるPCコンクリートのASR抑制効果の検照

ASTM C 1260による促進モルタルバー試験 (促進条件: 80°C, 1N NaOH溶液浸漬, 判定基準: 材齢14日間での膨張率が0.1%未満の場合「無害」, 0.1~0.2%の場合「不明確」, 0.2%以上の場合「有害」) および促進コンクリートプリズム試験 (促進条件: 所定の格納容器内で60°Cの湿気養生, コンクリート中の総アルカリ量が5.5kg/m<sup>3</sup>となるようにアルカリ (NaOH溶液) を添加, 判定基準: 最終膨張率が0.04%以下の場合「Not reactive」, 0.04%~0.12%以下の場合「Moderately reactive」, 0.12~0.24%以下の場合「Highly reactive」, 0.24%を超える場合「Very highly reactive」)<sup>6),7)</sup>により, 分級フライアッシュによるPC電柱のコンクリートのASR抑制効果を確認した。

3. 試験結果と考察

3.1 ASRゲルの簡易判定試験

写真-3 にゲルフルオレッセンス法によるASRゲルの判定結果を示す。写真より, PC電柱断面の内側 (中空断面) において, 一部の細

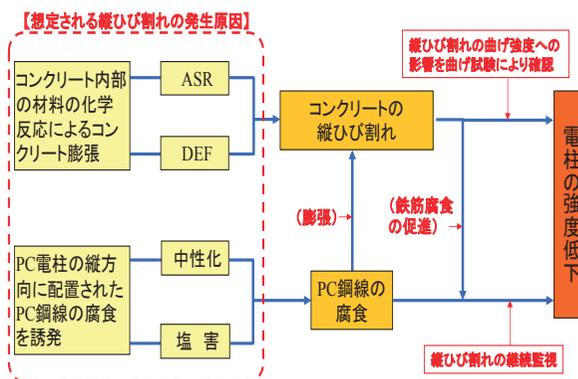


図-1 縦ひび割れの発生原因の調査フロー

骨材の岩種 (主に安山岩) が激しくASRを発生していることが判明した。

### 3.2 偏光顕微鏡によるコンクリート薄片の観察

写真-4 にゲルフルオレッセンス法で強い反応を示した細骨材周辺のコンクリート薄片観察結果を2例示す。多数のコンクリート薄片観察の結果、細骨材は流紋岩質溶結凝灰岩、花崗岩質岩、安山岩、砂岩、頁岩、チャートなどからなり、上段の写真に示すように、細骨材に含まれる安山岩や流紋岩質溶結凝灰岩が顕著にASRを発生しており、細骨材から進展した膨張ひび割れが多数観察された。これに対し、DEFの可能性を示唆するようなセメントペースト部でのエトリンガイトの生成による膨張ひび割れは確認されなかった。ただし、下段の写真に示すように、細骨材に含まれる安山岩から生じた膨張ひび割れ内部のASRゲルが、エトリンガイトの針状結晶に置き換わっている箇所も観察された。これは、Shayan et al.<sup>8),9)</sup>の研究によれば、まずASRによる膨張ひび割れが一次的に発生し、その後ASRゲルの移動や水による溶出(溶解)によりできた空間に、二次的にエトリンガイトが生成したものであると考えられた。このような生成過程によるエトリンガイトは非膨張性と判断される。

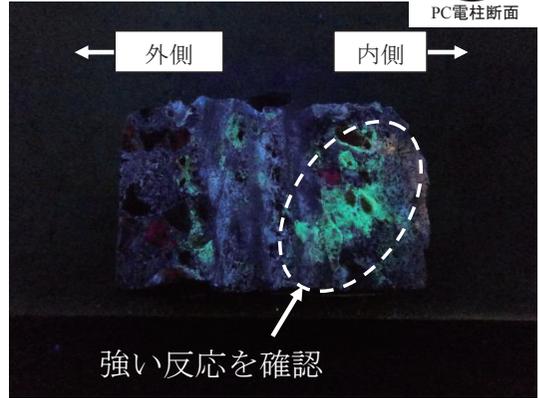
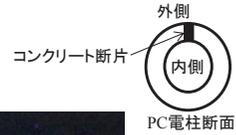


写真-3 ゲルフルオレッセンス法の観察結果

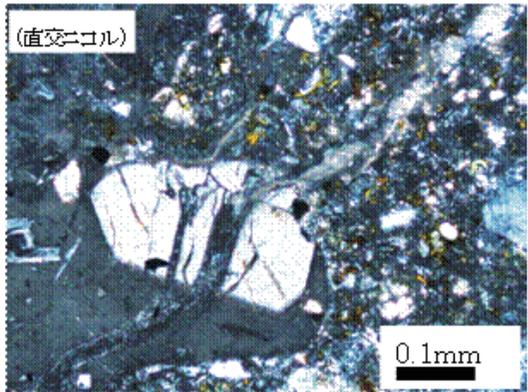
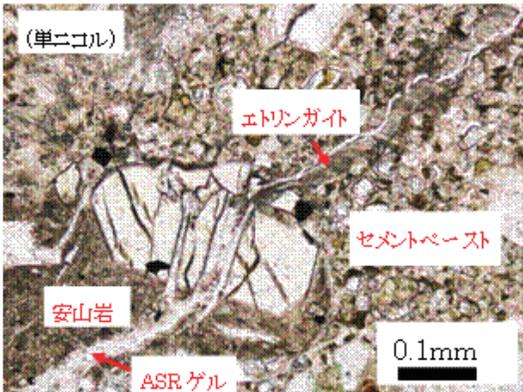
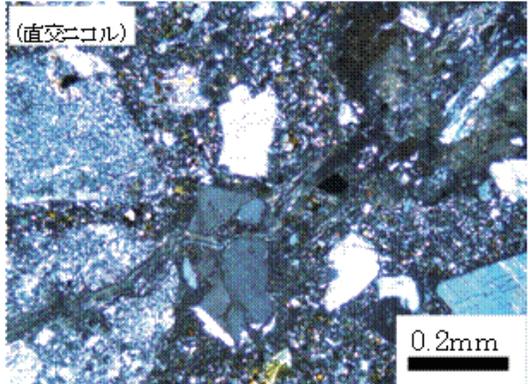
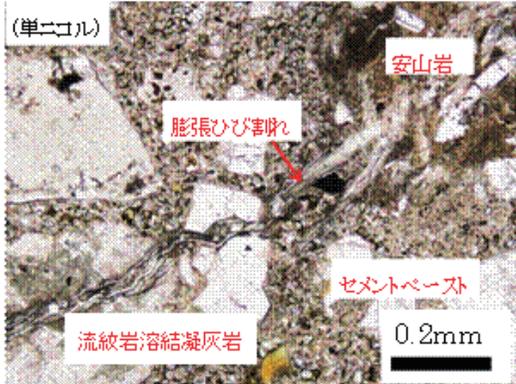


写真-4 コンクリート薄片の観察結果 (ASRゲルが観察された細骨材周辺の観察)

### 3.3 中性化深さ測定

PC電柱の頂部付近、地際付近、地中部の各断面での中性化深さはいずれも1mm程度で、中性化が縦ひび割れの主要な発生原因ではないと考えられた。

### 3.4 塩化物イオン濃度測定

図-2 に塩化物イオン濃度測定の試験結果を示す。図より、当該PC電柱（海岸より1.2km地点）の塩化物イオン量は、劣化部、健全部ともに、最大でも0.5kg/m<sup>3</sup>程度であり、鋼材が腐食を開始するとされている塩化物イオン量1.2 kg/m<sup>3</sup>を大きく下回っており、塩害が縦ひび割れの主要な発生原因ではないと考えられた。

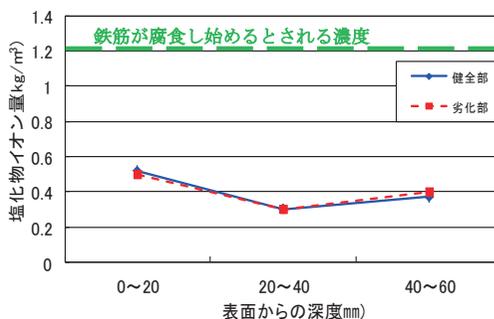


図-2 塩化物イオン濃度測定の試験結果

### 3.5 PC電柱部材の曲げ試験

図-3 にPC電柱の曲げ試験の試験装置概要図を、表-2 に縦ひび割れを発生したPC電柱の曲げ試験結果を、図-4 にNo. 1のPC電柱の頂部における荷重とたわみの関係を示す。なお、曲げ試験に用いたPC電柱の載荷前の縦ひび割れ幅は最大10mmと1mm、長さはいずれも地際から3m程度、深さは構造上確認できなかった。縦ひび割れが発生したPC電柱の曲げ耐力は、JIS A 5373に示されているポール1種の推奨仕様である「破壊荷重は設計荷重の2倍以上」および「設計荷重時に幅0.25mmを超えるひび割れが発生しなく、荷重除荷時に幅0.05mmを超えるひび割れが残留しない」という基準に対し、破壊荷重の設計荷重に対する安全率2.56、2.67、設計荷重時のひび割れ幅が0.08mm、0.06mm、荷重除荷時のひび割れ幅は0.05mm以下であった。また、破壊モードは通常どおりの圧縮破壊であった。したがって、基準を満足しており、縦ひび割れによるPC電柱の耐力および曲げ剛性の低下はほとんどないものと考えられた。今後、PC電柱の維持管理においては、PC鋼材の腐食防止、すなわち腐食因子（水、塩化物）の浸透を抑制する対策が早期に求められた。

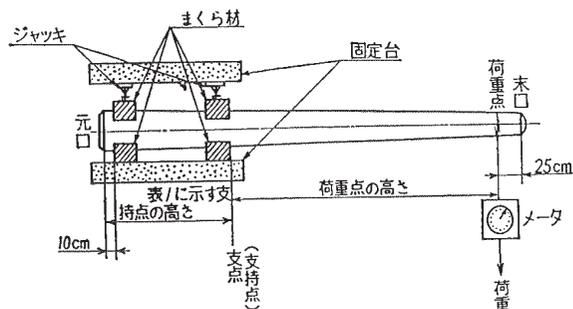


図-3 曲げ試験装置 (JIS A 5373) の概要図

表-2 PC電柱の曲げ試験結果

No.	最大ひび割れ幅	製造年	材齢	設計荷重 (A)	破壊荷重 (B)	安全率 (B/A)
1	10mm	1998年	16年	29.42kN	75.2kN	2.56
2	1mm	1999年	15年	29.42kN	78.5kN	2.67

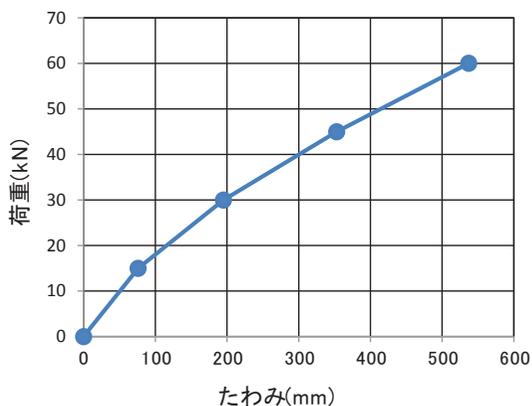


図-4 PC電柱の頂部における荷重-たわみ曲線 (No. 1のPC電柱の例)

### 3.6 分級フライアッシュによるPCコンクリートのASR抑制効果

ASTM C 1260 に準拠し、実際のコンクリートポール (CP) の使用骨材である神通川産 (2 か所) と黒部川産の骨材を用いて、分級フライアッシュ

ユ 15%を混和したものとししないものの計 6 ケースの促進モルタルバー試験を実施した。また、表-1 に示した現在の耐張型の PC 電柱の配合に分級フライアッシュ 15%を内割した配合により、実際の使用骨材である神通川産①の骨材を用いて、促進コンクリートプリズム試験を実施した。図-5 に促進モルタルバー試験結果を、図-6 に実配合による促進コンクリートプリズム試験結果をそれぞれ示す。図-5 より、分級フライアッシュを混和しないケースでは神通川産の骨材がいずれも「有害」、黒部川産の骨材が「不明確」の判定であったが、分級フライアッシュを 15%混和することにより、いずれの骨材においても「無害」の判定となり十分な ASR 抑制効果が確認された。また図-6 より、分級フライアッシュを使用した実配合において、分級フライアッシュを 15%混和することにより、「Very highly reactive」の判定であったものが、「Not reactive」の判定となり、実配合でも十分な ASR 抑制効果があることが確認された。

3.7 縦ひび割れの発生原因に関する考察

耐張型のPC電柱に発生した縦ひび割れの発生原因として、ASR、DEF、中性化、塩害の4つの原因が想定されたが、ゲルフルオレッセンス法によるASRゲル簡易判定試験結果から、PC電柱断面の内側において、一部の細骨材の岩種が激しくASRを発生していることが判明した。これに対し、細骨材周辺のコンクリート薄片観察結果から、細骨材から進展した膨張ひび割れが多数観察されたが、DEFの可能性を示唆するようなセメントペースト部でのエトリンガイトの生成による膨張ひび割れは確認されなかった。また、中性化深さ測定結果や塩化物イオン濃度測定結果では、いずれもPC鋼線の腐食が懸念される数値ではなかった。これらのことから、PC電柱断面の内側に多く含まれる細骨材にASRが発生し、断面方向の内側からの膨張により外縁部のコンクリートに大きな引張力が生じ、円周2方向に縦ひび割れが生じたものと推察された。また、特に地際部では降雨や日射の影響により、ASRの進行が他の部位よりも顕著であったと推察された。

4. 結論

本研究で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 耐張型のPC電柱に発生した縦ひび割れの発生原因として、ASR、DEF、中性化、塩害の4つの原因が想定されたが、諸試験の結果、PC電柱断面の内側に多く含まれる細骨材にASRが発生し、断面方向の内側からの膨張により外縁部のコンクリートに大きな引張力が生じ、縦ひび割れが生じたものと推察された。
- (2) 縦ひび割れが発生した耐張型のPC電柱を撤去し曲げ試験を実施したところ、JIS A 5373に示されているポール1種の推奨仕様を十分に満足しており、縦ひび割れによるPC電柱の耐力の低下はほとんどないものと考えられた。今後、重ね梁の検討なども実施していきたい。
- (3) 現在のPC電柱の配合に分級フライアッシュ15%を内割で混和することにより、ASR膨張が効果的に抑制されることを確認した。

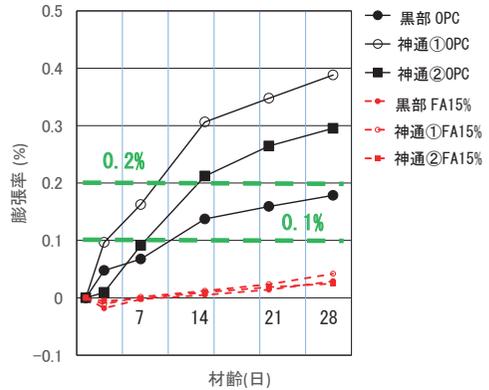


図-5 促進モルタルバー試験結果

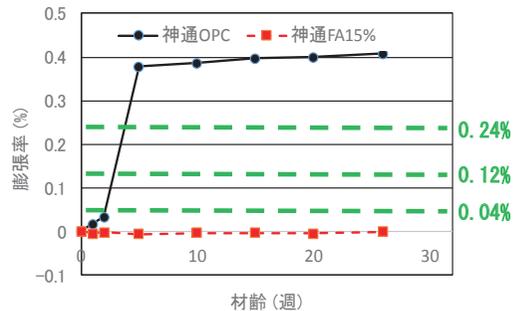


図-6 促進コンクリートプリズム試験結果

## 謝辞

本研究は、産学官連携による「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」(委員長 鳥居和之 金沢大学教授)の活動の一環として実施したものです。また、(株)太平洋コンサルタントの広野真一様には、偏光顕微鏡によるコンクリート薄片観察を実施いただきとともに、貴重なご指導・ご助言をいただきました。ここに、関係者各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 鳥居和之：フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化－北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信－、電力土木、No. 357、pp. 11-15(2012)
- 2) T. Hashimoto and K. Torii: The development of highly durable concrete using classified fine fly ash in Hokuriku District, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp. 312-321(2013)
- 3) 橋本徹：北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの性能評価と実用化に関する研究、金沢大学学位請求論文(2014)
- 4) 参納千夏男, 丸山達也, 山戸博晃, 鳥居和之：ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断手法の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol. 35、No. 1、pp. 133-138(2013)
- 5) 廣野真一：わが国の反応性骨材の地質学的な分布と岩石学的試験による骨材のアルカリシリカ反応性の判定に関する基礎的研究、金沢大学学位請求論文(2015)
- 6) 川端雄一郎, 山田一夫, 小川彰一, 佐川康貴：加速コンクリートプリズム試験を用いた ASR 膨張の簡易予測、セメント・コンクリート論文集、Vol. 67、pp. 449-455(2013)
- 7) ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会：ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書、(社)日本コンクリート工学会、pp. 70-78(2014)
- 8) A. Shayan and G.W. Quick: Relative importance of deleterious reactions in concrete formation of AAR products and ettringite, Adv. In Cement Research, Vol.4, No.16, pp. 149-157(1992)
- 9) A. Shayan and I. Ivanusec: An experimental verification of the association of alkali-aggregate reaction and delayed ettringite formation, Cement and Concrete Composites, Vol. 18, pp. 161-170(1996)