

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06163

研究課題名(和文) PCa電柱に発生した縦ひび割れの原因解明とその防止技術の開発

研究課題名(英文) Occurrence of Vertical Cracks in Precast Electrical Poles and Its Development
Research of Preventive Measures

研究代表者

鳥居 和之(Torii, Kazuyuki)

金沢大学・環境デザイン学系・教授

研究者番号：50115250

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート電柱や枕木などのコンクリート製品では、蒸気養生やオートクレーブ養生を実施しており、アルカリシリカ反応(ASR)とともに遅延型エトリンガイト生成(DEF)によるひび割れ発生の危険性が高まることが知られている。
そこで本研究では、北陸地方で製造されたコンクリート電柱のASRおよびDEFによる劣化現象の実態調査結果に基づき、コンクリート製品工場でのフライアッシュコンクリートによる防止対策と標準化を目指すことにした。

研究成果の概要(英文)：In the electrical concrete poles and concrete railway sleepers, which the steam curing or autoclaved curing have been normally conducted in the process of production, the deterioration due to Alkali-silica Reaction (ASR) and/or Delayed Ettringite Formation (DEF) may be occurred, which leading to a serious cracking of precast concrete products. Therefore, in the research work of this study, firstly, the actual deterioration cases due to ASR and/or DEF in electrical concrete poles were collected all over the Hokuriku district. Based on the results of this survey, both the effective use of fly ash concretes in the mitigating ASR and/or DEF and the standardization of fly ash concretes in all precast concrete factories of electrical concrete poles were successfully proposed.

研究分野：土木工学

キーワード：ASR DEF フライアッシュ PCa電柱 防止技術

1. 研究開始当初の背景

枕木などのコンクリート製品 (PCa・PC製品) では、蒸気養生やオートクレープ養生を実施しており、コンクリートの配合と使用・環境条件により、アルカリシリカ反応 (ASR) とともに遅延型エトリンガイト生成 (DEF) によるひび割れ発生危険性が高まることが知られている。近年、東南アジアやインドなどの諸国では、ASR と DEF による複合劣化事例が 2, 3 報告されている。また、北陸地方や東北地方、北海道などの積雪寒冷地では、凍結防止剤 (NaCl) の散布下での塩害と ASR、凍害との複合的な劣化現象も発生しており、それらの効果的かつ合理的な対策の提案も強く求められている。さらに、北陸地方では、コンクリートポールやプレキャスト製品などにおいて ASR と DEF による複合的な劣化がすでに確認されており、それらの劣化現象の実態把握と経済的な抑制対策の確立が強く望まれている。その一方で、北陸地方では、フライアッシュの原料炭の選別とその分級化により、ポゾラン反応性が良好で、かつ微細な粒径 (平均粒径: 7 ミクロン) をもつフライアッシュ (分級フライアッシュと呼称) の供給体制 (北陸地方の 2 つの石炭火力発電所より年 6 万トン生産) が地域全体で整備されてきた。そこで本研究では、北陸地方で製造されたコンクリートポールやプレキャスト製品の ASR および DEF による劣化現象の実態調査結果に基づき、コンクリート製品工場でのフライアッシュコンクリートの標準使用を目指すことにした。さらに、北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの使用を拡大するために、PCa・PC 製品における ASR および DEF による複合的な劣化現象のメカニズムを解明し、フライアッシュの標準使用による抑制対策を提案することにした。

2. 研究の目的

北陸地方で多く発見されている PCa 電柱の縦ひび割れの原因究明とその問題解決を目指して、まず PCa 電柱から採取したコアの薄片観察やコンクリートの工学的性質の調査を実施し、ASR 単独による劣化か、ASR と DEF との複合的な劣化であるかを明らかにする。次に、近年、北陸地方で利用が可能になった分級フライアッシュによる PCa 電柱の縦ひび割れの防止技術についてコンクリートの配合や養生方法を具体的に提案する。本研究課題は、北陸地方のコンクリートの高耐久化を目指した研究課題である「北陸地方でのフライアッシュコンクリートの利用を標準化 (汎用化) する施策」の一環であり、「地産地消の促進」と「環境負荷の低減」を目的にしている。さらに、最近の調査では、PCa 電柱の縦ひび割れの発生は他の地域でも相次いで発見されており、国内外の同様な劣化事例への対応策の情報発信をも意図している。

3. 研究の方法

PCa 電柱に発生した縦ひび割れの実態調査

北陸地方の PCa 電柱の予備調査より、設計基準強度 (65N/mm²) を高めた耐圧柱にて縦ひび割れが多く発生していることが明らかになっている。この工場製作のものは、主に富山県の川砂、川砂利が使用されており、供用後 10 年程度のものに顕著な縦ひび割れが発生している。このため、製造会社と管理会社と共同で、PCa 電柱の使用骨材の種類 (岩石・鉱物学的検討) やコンクリートの配合 (使用セメントのアルカリ及び石膏量、単位セメント量、増強剤の有無)、蒸気養生条件 (温度と保持時間) との関係性を調査する。

既設 PCa 電柱の耐荷力に関する屋内試験

縦ひび割れの損傷度が相違する 3 体の PCa 電柱を抜き取り、JIS に準拠した片持ち梁としての曲げ載荷試験を実施し、耐荷力と使用性への影響を確認する。その後、縦ひび割れの大きさ (幅と長さ) と内部の PC 鋼材の腐食度との関係を明らかにするために、地際部から 20cm 間隔で中空円柱を切断し、中性化深さと塩分浸透性との関係を調査する。これらの調査により、PCa 部材の品質管理基準を作成する際に必要となる PCa 電柱の使用・環境条件 (塩分環境、凍結融解繰り返し) とその供用年数との関係を明確にできる。また、現在供用中である、比較的軽微なひび割れ幅 (0.5mm 程度) を有する PCa 電柱を対象にした簡易なひび割れ注入の方法を超寿命化対策として検討する。

PCa 電柱の縦ひび割れ発生原因の解明

PCa 電柱の中空断面の中心からコンクリート断片を採取し、薄片研磨試料 (厚さ 20 μm) を作製する。薄片研磨試料は、まず偏光顕微鏡観察 (単ニコル) により、a) 反応性岩種と反応性鉱物の同定、b) アルカリシリカ反応によるひび割れ損傷度、の観察調査を実施する。

PCa 電柱の ASR と DEF の防止対策の効果検証

北陸地方では、「地産地消」と「環境負荷低減」の観点より、分級フライアッシュの添加が ASR と DEF の防止対策としてもっとも経済的な対策であると断言できる。PCa 電柱のコンクリートでは、遠心成形による製造工程と蒸気養生による早期脱型などの特殊な要因が加わるために、分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合及び養生条件の最適化を事前に決定することが求められる。分級フライアッシュはポゾラン反応が早期に進行し、Ca/Si 比の小さい CSH を生成することにより、より少ない添加量で大きな ASR 抑制効果が得られることが最近の研究により分かっている。また、ポゾラン反応の過程で水酸化カルシウムを大きく低減できるので、DEF の発生を同時に抑制することも期待できる。分級フライアッシュによる ASR と DEF の抑制効果を確認するために、実際の PCa 電

柱の配合にて、早強ポルトランドセメントと分級フライアッシュを添加したものととの比較試験を促進コンクリートバー法 (RILEM AAR-4 法) により実施する。

PC 桁・PCa 製品の長期暴露試験の実施

分級フライアッシュを使用した PC 橋梁・PCa 製品を北陸地方の PC 橋梁会社及び PCa 製品会社で製作する。なお、分級フライアッシュは七尾太田火力発電所からのものと敦賀火力発電所からのものを地域に応じて使用する。また、北陸地方では、平成元年に実施された ASR 抑制対策以後も ASR が実際に発生していることを考慮して、PC 桁や PCa 部材を工場内と能登半島の海岸部に暴露し、長期的な耐久性 (ASR の発生と塩分浸透・鋼材腐食の抑制効果) を検証する。

PC 桁・PCa 試験体の長期暴露性状の追跡調査

ASR と DEF の発生抑制を確認するには、長期間にわたる追跡調査が必要である。ASR と DEF による膨張量の変化はコンタクトゲージによるコンクリートのひずみ計測、塩分浸透は定期的なコア採取による塩分分析、鋼材腐食は電気化学的計測 (自然電位、分極抵抗) によることにしている。これらの計測機器は金沢大学に準備されており、研究分担者や大学院生はそれらの測定技術を熟知している強みがある。

研究の総括及び広報

最終年度は、～ の研究成果を総合的に取りまとめる。北陸地方での PCa 電柱での ASR と DEF による早期劣化は、申請者への相談がすでに寄せられている、九州地方、東北地方、北海道地方などの他の地域でも共通の課題と捉えることができる。また、本研究課題にて得られた研究成果を広く活用できるように、研究報告書 (印刷本) を刊行するとともに、金沢大学のホームページにその成果を載せる。

国際協力と関連セミナーの開催

近年、タイやベトナム、インドネシアなどの東南アジアの諸国でも、ASR や DEF によるコンクリートの劣化事例が報告されてきている。現在、申請者は個人的なレベルで、タイやインドネシアの ASR や DEF の問題解決に助力してきた。さらに、金沢大学のスーパーグローバル化育成事業の一環で、東南アジアの諸国の研究者や技術者を金沢大学に申請期間中に適宜招聘するとともに、東南アジアの諸国との ASR や DEF の情報を共有することを目的とした国際セミナーを開催する。

4. 研究成果

2016 年度から 2018 年度における研究成果をまとめると以下のようなものである。

分級フライアッシュコンクリートの PC 桁や PCa 電柱への適用性

コンクリートポール (電柱) やプレキャスト枕木などの PCa・PC 製品では、蒸気養生やオートクレーブ養生を実施しており、コン

クリートの配合と使用・環境条件により、アルカリシリカ反応 (ASR) とともに遅延型エトリングイト生成 (DEF) によるひび割れ発生の危険性が高まることが知られている。近年、東南アジアやインドなどの諸国でも、ASR と DEF による複合劣化の事例が報告されている。さらに、北陸地方や東北地方、北海道などの積雪寒冷地では、凍結防止剤 (NaCl) の散布下での塩害と ASR、凍害との複合的な劣化現象も発生しており、それらの効果的かつ合理的な対策の提案も強く求められている。このため、分級フライアッシュコンクリートのさらなる用途拡大を目的にして、地元のコンクリート製品会社と共同して、PC 桁や PCa 電柱に使用した場合のコンクリートの配合 (水結合材比、フライアッシュ含有率 (内割りと外割り) と製造方法 (蒸気養生) について検討した。その結果、PC 桁や PCa 電柱の実用化のための基礎的なデータが集積した。

PC 桁や PCa 電柱における縦ひび割れの発生原因とその抑制対策

北陸地方では、コンクリートポールやプレキャスト製品などの PCa・PC 製品において ASR と DEF による複合的な劣化が確認されており、それらの劣化現象の実態把握と経済的な抑制対策の確立も強く望まれている。一方、北陸地方では、フライアッシュの原料炭の選別とその分級化により、ポゾラン反応性が良好で、かつ微細な粒径 (平均粒径: 7 ミクロン) をもつフライアッシュ (分級フライアッシュと呼称) の供給体制 (北陸地方の石炭火力発電所より年 6 万トン) が地域全体で整備されてきた。そこで本研究では、北陸地方で製造されたコンクリートポールやプレキャスト製品の ASR および DEF による劣化現象の実態調査結果に基づき、コンクリート製品工場でのフライアッシュコンクリートの標準的な使用を目指すことにした。さらに、北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの適用を拡大するために、PCa・PC 製品における ASR および DEF による複合的な劣化現象のメカニズムを解明し、フライアッシュの標準使用による抑制対策を提案した。

屋外暴露試験による検証と研究成果の国内外での公表

フライアッシュを使用したプレテンション式 PC 桁を対象にして、早強ポルトランドセメント単味と高品質フライアッシュ 15% 置換のものとの屋外での ASR による膨張性状を比較検討するとともに、ASR によるひび割れが PC 桁の耐荷性や使用性に及ぼす影響を載荷試験と解析により比較検討した。さらに、ASR が発生したプレキャスト PC 床版におけるひび割れの発生状況をコア採取および非破壊試験にて検証した。その結果、高品質なフライアッシュ 15% の置換により、ASR によるひび割れを長期にわたり効果的かつ確実に抑制できることを確認した。本研究の成果は、2017 年度に開催された ICCM (カナダ、モントリオール) および Concrete 2017 (オース

トラリア, アデレード) の両国際会議において発表するとともに, 2018 年度において学術雑誌 (コンクリート工学年次論文集および土木学会構造工学論文集) に投稿した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

Ha, Minh Tuan, Fukada, S., Torii, K., Effects of Fly Ash on Mechanical Properties of PC Girder Using Reactive Andesite Aggregates, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.15, 2017 年、579-594

Fukada, S., Ha, Minh Tuan, Torii, K., Tsuda, M., Ura, S., Sasarani, T., Long-term Monitoring for ASR-deteriorated PC Rigid-frame Bridge, Journal of Disaster Research, Vol.12, No.3, 2017 年、396-405

杉浦尚樹, 小林和弘, 深田宰史, 鳥居和之, プレストレストコンクリート桁に対するコアによる ASR 劣化度診断、コンクリート工学年次論文集、Vol.39, No.1, 2017 年、877-882

深田宰史, Ha Minh Tuan, 小林和弘, 鳥居和之, フライアッシュ混入が反応性骨材を用いた PC 桁の耐荷力性能に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.39, No.2, 2017 年、355-360

鳥居和之, 深田宰史, 浦修造, フライアッシュコンクリートを使用した高耐久プレキャスト PC 床版の開発と社会実装、プレレストレストコンクリート、Vol.59, No.2, 2017 年、96-103

[学会発表](計 4 件)

K.Torii, The ASR Cracking In Electrical Concrete Poles and its Mitigating Effects by Fine Fly Ash、The 10th ACI/RILEM International Conference on Cementitious Materials and Alternative Binders for Sustainable Concrete、2017 年

[図書](計 1 件)

鳥居和之、山田一夫他 17 名、森北出版、コンクリート診断学、2017 年、220

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等
<https://sip-hokuriku.com>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥居 和之 (TORII, Kazuyuki)
金沢大学・環境デザイン学系・教授
研究者番号：50115250

(2) 研究分担者

三原 守弘 (MIHARA, Morihiro)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター・研究副主幹
研究者番号：00421652

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()