

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360169

研究課題名(和文) 高品質フライアッシュを活用したPC橋梁・PCa製品の高耐久化への技術開発

研究課題名(英文) Development of Technology for Highly Durable PC Bridges and PCa Products using High-quality Fly Ashes

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) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：北陸地方では、塩害やASRによるコンクリート構造物の劣化が顕在化しており、新しく建設する社会インフラである橋梁やトンネルには高い耐久性が求められている。一方、同地方では、近年、フライアッシュの品質管理の手法が確立され、フライアッシュを使用したコンクリートは塩害やASRに対する抵抗性が優れていることが判明した。この成果より、実際のPC橋梁やプレキャスト製品(PC杭、PC電柱)におけるフライアッシュコンクリートの実用化が成功した。

研究成果の概要(英文)：In the Hokuriku district, a higher durability performance of infrastructures such as bridges and tunnels, which are newly constructed, is now required because the deterioration of concrete structures due to chloride attack and/or ASR becomes very severe and significant. On the other hand, in this district, at present, the production and quality control system of high-quality fly ashes is established, and the fly ash concrete is very superior to the durability against chloride attack and ASR. Based on the results of research work, the practical use of fly ash concrete for PC bridges and PCa products such as piles and concrete poles has been successfully carried out.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：分級フライアッシュ PC橋梁 PCa製品 塩分浸透抵抗性 ASR抑制効果 ポゾラン反応 地産地消 産学官連携

1. 研究開始当初の背景

(1) PC 橋梁・PCa 製品の ASR 及び塩害による劣化の実態と対策の検討課題

海岸付近にある PC 橋梁の塩害劣化に関しては、東北地方や北陸地方での調査が多数報告されており、道路橋示方書によって新設橋梁に対する厳しい塩害対策が実施されている。それに対して、PC 橋梁の新たな課題として、プレテンション及びポストテンション方式の PC 橋梁の ASR による劣化対策を提起してきた。PC 橋梁の ASR による劣化問題を考える際には、高強度コンクリートを使用することから、コンクリート中での水分やアルカリの移動度の減少による抑制効果と、単位セメント量の増大（アルカリの増大）による促進効果の両者があることを理解することが重要である。平成 24 年に開催された ICAAR の国際会議でわが国の PC 橋梁の ASR 事例を報告した。一方、プレテンション方式の PC 橋梁や PCa 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、ASR とともに遅延型エトリンナイト膨張 (DEF) による劣化の危険性が高まることが指摘されている。さらに、北陸地方、東北地方などの積雪寒冷地では、凍結防止剤 (NaCl) の散布による塩害と ASR、凍害との複合的な劣化現象が発生している。実際に、北陸地方では、プレテンション方式の PC 橋梁や PCa 製品での ASR 劣化が相次いで発見されており、それらの実態の把握と新たな ASR 対策の確立が強く望まれている。さらに、PC 橋梁や PCa 製品の高耐久化は、国や県、市町村などで実施している「橋梁の長寿命化修繕計画の策定」における重要な課題の 1 つでもある。研究代表者は、国土交通省北陸地方整備局の「橋梁ドクター」、「道路防災ドクター」であり、北陸地方の橋梁の調査・診断業務に長年にわたり携わっている。実際に調査する中で、それらの高耐久化と品質保証を目指した技術開発が必要であるとの考えにいたった。

(2) フライアッシュの PC 橋梁・PCa 製品への活用と北陸地方からの情報発信の意義

コンクリートのグリーン購入制度の普及により、高炉セメント B 種の使用量は 25% 程度まで増加してきている。しかし、高炉セメント B 種は、首都圏近郊や大阪、名古屋、北九州などにその生産が限られており、日本海側の地域ではまったく生産されていない。このような実状を考えると、日本海側の地域では、資源の有効利用の観点から、石炭火力発電所から産出するフライアッシュのコンクリートへの活用に積極的に取り組むべきであると考えている。この際に、「地産地消」と「環境負荷の低減」が重要なキーワードになる。まさに今、東北大震災による原子力発電所の運転停止の影響で、この地域の石炭火力発電所がフル操業を続けており、新たなフライアッシュの用途開発がより切実なものになっている。一方、フライアッシュセメン

トの利用は 2% とかなり限定的である。この理由は明確であり、フライアッシュの品質が、石炭の種類やボイラーの形式、燃焼温度などの影響により、同一の石炭火力発電所からでも大きくばらつくことにあった。コンクリート製造者からは、「暴れるフライアッシュ」として敬遠されてきた。この問題を解決するために、産官学連携による「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）」を平成 23 年 1 月に発足させた。本委員会では、北陸地方でのコンクリートへのフライアッシュセメントの標準化（汎用化）と供給体制の確保を諮るために、生コン工場での実機試験での確認や JIS 認証の取得がなされている。

(1)、(2) の経緯を踏まえて、北陸地方が抱える PC 橋梁・PCa 製品での ASR 及び塩害による早期劣化の問題解決とこの地域で産出するフライアッシュの活用を目指して、大学研究者と企業の事業者との連携による「高品質フライアッシュを活用した PC 橋梁・PCa 製品の高耐久化への技術開発」の課題を申請した背景がある。

2. 研究の目的

北陸地方では、海岸付近にある PC 橋梁の塩害による劣化とともに、新たな課題として、プレテンション及びポストテンション方式の PC 橋梁の ASR による劣化が提起されている。北陸地方の PC 橋梁の調査・診断業務に長年にわたり携わってきた経験より、それらの高耐久化と品質保証を目指した技術開発が必要である。また、日本海側の地域では、資源の有効利用の観点から、石炭火力発電所から産出するフライアッシュのコンクリートへの活用に積極的に取り組むべきである。東北大震災による原子力発電所の運転停止の影響で、北陸地域の石炭火力発電所がフル操業を続けており、新たなフライアッシュの用途開発がより切実なものになっている。一方、フライアッシュのコンクリートへの利用はかなり限定的であるが、この理由はフライアッシュの品質が、石炭の種類やボイラーの形式、燃焼温度などの影響により、同一の石炭火力発電所からでも大きくばらつくことにあった。この問題を解決するために、産官学連携による「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）」が発足し、北陸地方でのコンクリートへのフライアッシュセメントの標準化（汎用化）と供給体制の確保を諮るために、積極的な普及活動が続けられている。

以上の経緯と最近の研究成果を踏まえて、本研究では、北陸地方が抱える PC 橋梁・PCa 製品での ASR 及び塩害による早期劣化の問題解決とこの地域で産出するフライアッシュの活用を目指して、研究課題「高品質フライアッシュを活用した PC 橋梁・PCa 製品の高耐

久化への技術開発」の課題に産学官が連携し、取り組むことにした。

3. 研究の方法

北陸地方で産出する分級フライアッシュ（七尾大田火力発電所（石川県）と敦賀火力発電所）は、毎月実施してきた品質試験よりその物理的・化学的性質が安定なものであることが確認され、北陸地方の公共工事にて幅広い分野で使用されるようになってきている。このため、フライアッシュコンクリートの JIS 認証工場も富山県で 17 工場、石川県で 7 工場、福井県で 7 工場とここ 2、3 年で急速に増えてきた。屋内試験や実機試験により、分級フライアッシュコンクリートの工学的諸性質を明らかにするとともに、実際の PC 桁や PCa 製品の開発における課題を解決するようにしてきた。その過程において、分級フライアッシュを使用したプレテンション方式の PC 桁や PC 杭、PCa 電柱などはコンクリートの配合や養生方法が定まり、実用化の目処が立ってきたので、次の段階ではポストテンション方式の PC 桁やセグメント方式の PC 橋梁への適用を目指して、それらのコンクリートの配合や施工に関する技術資料を集積する。その一方で、ASR や塩害に関連したコンクリートの耐久性能を確認するには、長期間にわたる屋内外での追跡調査が必要であるため、分級フライアッシュを使用した PC 桁や PCa 製品の長期的な耐久性能の確認試験を平成 25 年度より継続し、分級フライアッシュコンクリートの ASR 及び塩分浸透・鋼材腐食の抑制効果を長期にわたり調べる。また、この長期耐久性能の確認試験は少なくとも 10 年間は必要であるので、平成 27 年 3 月での本課題の終了後も計測を継続する予定である。これまでの研究成果は、金沢大学 SIP のホームページに公開するとともに、これまで得られた研究成果のデータベースがコンクリート技術者に広く活用できるように努める。

4. 研究成果

平成 24 年度から 26 年度に実施した研究成果は、以下の 7 つに項目に大別できる。

(1) 分級フライアッシュの製造技術の確立とその品質保証

石川県の七尾大田火力発電所と福井県の敦賀火力発電所よりそれぞれ年間約 3 万トンの分級フライアッシュが製造（全体の発生量の約 10%）できる体制が整い、分級フライアッシュの物理的性質（平均粒径：7 μm）や化学成分・鉱物組成（シリカ質ガラス成分：70% 以上）の特徴、そのポゾラン反応性とコンクリートの工学的諸性質（ワーカビリティ、強度発現性）の改善効果との関係を明らかにした。また、北陸地方における汎用セメントとして、分級フライアッシュの置換率 15% が最適

であるとした、コンクリートの標準的な配合を提示した。

(2) 分級フライアッシュを使用したコンクリートの塩分浸透抑制効果および ASR 抑制効果

分級フライアッシュを使用したコンクリートは、ポゾラン反応が早期に進行し、緻密な内部組織が形成されるので、コンクリートの塩分浸透性や ASR に対する抵抗性が大きく向上できることを明らかにした。

(3) 分級フライアッシュを使用したコンクリートのひび割れ抵抗性

分級フライアッシュを使用したコンクリートは、セメントに対する置換率に比例して水和熱が減少するとともに、初期強度の発現が高炉セメントを使用したコンクリートなどと比較して良好であるので、マスコンクリートの温度応力や乾燥収縮によるひび割れ発生の危険性を大きく改善できることを明らかにした。

(4) 分級フライアッシュのプレストレストコンクリート（PC 桁）への適用性

実際の PC 桁の載荷試験を実施した結果より、分級フライアッシュを添加した PC 桁はプレストレス損失量、曲げ耐力および荷重分散性において従来の早強セメント単味のものと同色がないことを確認した。また、ASR の発生は分級フライアッシュ 15% にて完全に抑制できることも明らかにした。

(5) 分級フライアッシュコンクリートの標準化（汎用化）のための検討と普及活動

七尾大田火力並びに敦賀火力から産出する分級フライアッシュの品質確保と地域における供給体制が平成 26 年度中に整い、富山、石川、福井 3 県での生コン工場の JIS 認証取得が 40% にまで向上した。また、生コン工場や製品工場での利用のための講習会を平成 26 年 4 月に七尾市で、平成 26 年 8 月に福井市でそれぞれ実施した。

(6) 分級フライアッシュ含有 PC 桁の製造と施工

わが国最初の分級フライアッシュ含有プレテンション式 PC 橋（宮坂橋、石川県輪島・穴水道路、平成 26 年 9 月架設）の製造と施工に関して、分級フライアッシュ含有 PC 桁の工学的諸性質を屋内実験にて確認するとともに、実橋に使用する PC 桁の載荷試験を公開試験として平成 26 年 9 月に実施した。分級フライアッシュ含有 PC 桁は耐久性（塩害や ASR に対する抵抗性）が優れているとともに、耐荷性や変形性能もまったく問題がないことを確認した。なお、宮坂橋に使用した PC 桁と同一のモデル試験体を石川県の海岸部と金沢大学構内に暴露して、塩分環境下での鋼材腐食をモニタリングしている。

(7) 分級フライアッシュコンクリートの PC 杭や PCa 電柱への適用性

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 杭や 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。平成27年度からのPC桁やPCa電柱の実用化のための基礎的なデータが集積できた。

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18件)

1. 分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度改善メカニズムに関する一考察, 橋本徹, 白根勇二, 高橋晴香, 鳥居和之, 材料, Vol.63, No.10, 8 pages (2014) 査読有

2. タイ国の高速道路で発見された熱帯地方のASR実態, 広野真一, 安藤陽子, 山田一夫, 鳥居和之, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1084-1089, (2014) 査読有

3. 分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度発現の改善効果, 白根勇二, 橋本徹, 高橋晴香, 鳥居和之, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.195-200, (2014) 査読有

4. 北陸地方の代表的骨材に対するフライアッシュと高炉スラグ微粉末のASR抑制効果の比較, 中島隆甫, 山戸博晃, 久司成利, 鳥居和之, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1090-1095, (2014) 査読有

5.A Development of Environmentally-Friendly and Highly-Durable Concrete Using Classified Fly Ash, Hashimoto, T., Kubo, T., Sannoh, C., Torii, K., Proceedings of Concrete Innovation Conference CIC2014, CD-R12 pages, (2014) 査読有

6. 今, 何故, 北陸地方でフライアッシュコンクリートなのか, 鳥居和之, 橋本徹, セメント・コンクリート, No.810, pp.18-23, (2014) 査読有

7. The Mitigating Effect of ASR Expansion in PC Girder and PCa Product by Using High-quality Fly Ash, Irfan Prasetia, Torii, K., Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, CD-R 10pages (2013) 査読有

8. The Effective Utilization of Classified Fine Fly Ashes for Production of Highly-Durable Concrete, Torii, K., Hashimoto, T., Kubo, T., Sannoh, C., Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, CD-R 10pages (2013) 査読有

9. The Suppressing Effect of Fly Ash on ASR under Outdoor Exposure Conditions at the Seashore, Sannoh, C., Hashimoto, T.,

Torii, K., Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, CD-R 10pages (2013) 査読有

10. ASTM C1260 によるフライアッシュ含有モルタルの安山岩に対するASR抑制効果の評価, 広野真一, 鳥居和之, 材料, Vol.62, No.8, pp.235-240 (2013) 査読有

11. 北陸産分級フライアッシュを用いたクリートの配合と強度, コンクリート工学年次論文集, 橋本徹, 参納千夏男, 江田明孝, 鳥居和之, Vol.35, No.1, pp.133-138, (2013) 査読有

12. 北陸産分級フライアッシュによるコンクリートの遮塩性向上効果に関する地域特性を踏まえた評価, コンクリート工学年次論文集, 宮里心一, 鳥居和之, 伊藤始, Vol.35, No.1, pp.163-168, (2013) 査読有

13. 分級フライアッシュを用いたコンクリートのPC桁への適用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 山村智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之, Vol.35, No.1, pp.181-186, (2013) 査読有

14. PC桁・PCa製品のASR抑制対策としての分級フライアッシュの効果, コンクリート工学年次論文集, 吉田匠吾, 板坂匠, Irfan PRASETIA, 鳥居和之, Vol.35, No.1, pp.985-990, (2013) 査読有

15. 富山市周辺の橋梁のASR劣化と骨材の岩石学的特徴に関する調査, 大代武志, 広野真一, 野村昌弘, 鳥居和之, Vol.35, No.1, pp.991-996, (2013) 査読有

16. 分級フライアッシュの添加によるPC桁のASR抑制対策, コンクリート工学年次論文集, 板坂匠, Irfan PRASETIA, 多田茂生, 鳥居和之, Vol.35, No.2, pp.439-444, (2013) 査読有

17. The Combined Deterioration of Prestressed concrete bridge Girders Caused by Alkali-Silica Reaction and Chloride Induced Steel Corrosion, Proceedings of the 7th International Structural Engineering and Construction Conference, Honolulu, Asada, M., Ishii, K., Torii, K., pp.479-484, (2013) 査読有

18. 北陸地方を代表する安山岩系骨材のアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる抑制機構, 広野真一, 鳥居和之, セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.249-255 (2013) 査読有

〔学会発表〕(計4件)

1. 北陸地方における塩害およびASRによる劣化コンクリート橋梁のメンテナンスマネジメント(金沢大学SIPキックオフシンポジウム, 金沢), 2014.12, 鳥居和之(招待講演)

2. 北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの普及と実績(日本コンクリート工学会FAサンドシンポジウム, 東京, 大阪), 2014.11, 鳥居和之(招待講演)

3. 北陸地方の塩害及び ASR による劣化事例から学ぶ社会インフラの長寿命化対策(平成 26 年度建設技術報告会, 富山), 2014.9, 鳥居和之 (招待講演)
4. 北陸地方におけるコンクリート橋の早期劣化対策 (塩害及び ASR) とモニタリング技術(次世代センサー総合シンポジウム, 東京), 2014.9, 鳥居和之 (招待講演)

〔図書〕(計 1 件)

1. 道路橋補修・補強事例集, 山崎淳監修, 鳥居和之他著, (株)オフィススペース, pp.165-172 (2013) 査読有

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: フライアッシュ高含有ポーラスコンクリート及びこれを用いた藻場造成方法
発明者: 三木理, 鳥居和之, 参納千夏男
権利者: 金沢大学
種類: 特許
番号: 特願 2014-148606
出願年月日: 2014.9.22
国内外の別: 国内

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

金沢大学 SIP <http://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
研究者番号: 50115250

(2) 研究分担者

榎谷浩 (MASUYA HIROSHI)
金沢大学・環境デザイン学系
研究者番号: 20157217

(3) 研究分担者

久保善司 (KUBO YOSHIMORI)
金沢大学・環境デザイン学系
研究者番号: 50324108

(4) 研究分担者

宮里心一 (MIYAZATO SHINICHI)
金沢工業大学・環境・建築学部
研究者番号: 60302949