

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 30 日現在

機関番号：56401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420447

研究課題名(和文)フライアッシュを細骨材に一部置換したコンクリートの耐久性向上と疲労特性の解明

研究課題名(英文) Durability and Fatigue Strength of the Concrete Using Fly Ash as Fine Aggregate Replenishing Material

研究代表者

横井 克則 (YOKOI, Katsunori)

高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・教授

研究者番号：80240183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：2011年の東日本大震災以降、わが国では全国的に石炭火力発電所の稼働率が高まっており、それによって副産されるフライアッシュ(石炭灰)の量が増加している。一方、コンクリートの70%をしめる骨材に代わる代替材の安定確保が課題となっている。本研究では、JIS規格品のフライアッシュである種、種及び副産量の多い非JISのフライアッシュを細骨材に用いたコンクリートの強度特性、耐久性および疲労特性の比較・検討を行った。

その結果、容積で10%細骨材補充材として使用したコンクリートは、フライアッシュを用いないコンクリートよりも大きな圧縮強度と同等の耐久性を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：The amount of fly ash, byproduct of coal combustion, has been growing with the increasing use of the coal-fired power plants since the Great East Japan earthquake in 2011. On the other hand, since collecting natural fine aggregate, such as river sand and sea sand, for concrete is restricted, scientists and researchers have tried to find alternative fine aggregate. This research aims to utilize fly ash as fine aggregate for concrete. In this study, I examined strength and durability of the concrete which used JIS ash and non-JIS ash as Fine aggregate replenishing material.

As a result, the concrete which used fly ash for at the capacity as 10% fine aggregate replenishing material was able to get bigger compressive strength and equal durability than concrete without the fly ash.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート フライアッシュ 細骨材補充材 圧縮強度 耐久性 疲労特性

1. 研究開始当初の背景

我が国では、火力発電及び原子力発電が重要な電源に位置づけられている。特に、火力発電は全体の電源の約半分を占めている。その火力発電の中でも、石炭火力発電は運転時に石炭灰が副産される。この石炭灰は、セメントの原料やコンクリート用混和材であるフライアッシュとして主に有効利用されている。フライアッシュはコンクリートに混入することで、フライアッシュの主成分である二酸化けい素とセメント及び水が反応することにより、ポゾラン反応が起こる。これまで、フライアッシュをコンクリートの混和材として使用する場合、一般的にセメントの一部に置換して使用されてきた。この場合、ポゾラン反応の効果により長期強度の増進や乾燥収縮の低減といった長所を有するが、短期強度の低下及び中性化の増大といった欠点も有する。

このような中で、2011年3月11日の東日本大震災後の大津波による原発事故の影響で、安全性・信頼性の観点から原子力発電所は休止傾向となった。このため、原子力発電の代わりとして化石燃料による火力発電の運転が活発になった。これに伴い、石炭火力発電所から発生する石炭灰は2011年度で約1,000万ton発生すると推定されていたが、今後さらに増加することが予測された。このため、石炭灰の一種であるフライアッシュのさらなる有効利用及び多量消費が急務となった。

一方で、四国地域のコンクリート用細骨材を取り巻く状況は、資源の枯渇化、環境保全による採取制限区域の拡大及び上質な骨材の相対的減少による全体的な品質の低下等、深刻な状態にある。特に、近畿以西の西日本で多く使用されている海砂に関しては、自然環境の保全、漁業資源の保護の観点から瀬戸内海での採取規制が強化され、徳島県や広島県で採取が禁止されている。平成15年には岡山県、平成17年には香川県、さらに平成18年には愛媛県で全面禁止され、海砂に代わる細骨材の安定確保が緊急の課題となっていた。

申請者は、今後大量発生が見込まれるフライアッシュの有効利用、及びフライアッシュコンクリートの欠点改善及び海砂を代表とした天然骨材の代替材としての利用を目的として、フライアッシュを細骨材の一部として利用するための研究を継続的に実施してきた。その結果、フライアッシュのセメント置換に用いた時の欠点であった、初期強度の確保やコンクリートの中性化の改善に対する効果を確認することができた。しかし、一般的なコンクリートに比べて粉体量が増加することによる空気量確保の困難性や、モルタルの粘性が大きくなることから、各種耐久性能の確保や構造部材として用いる場合の疲労特性など、さらなる調査検討が必要なこととも明らかになってきたため、本研究内で

解明することとした。

2. 研究の目的

(1) フライアッシュを多量に用いると粉体量の増加や、フライアッシュの未燃カーボンの影響を受けてコンクリート中の空気量の調整が困難になることで、AE剤の過剰使用が必要になったり、フライアッシュ用といった特殊混和剤が必要になったりする。しかし、フライアッシュはその粒径が球形であることからフレッシュコンクリートの流動性が向上することもあり、エントレインドエアの確保だけのためにAE剤を過剰に使用することには使用者としては抵抗が残る。コンクリート中の空気量が低下すると凍結融解抵抗性の低下が考えられるが、フライアッシュを混入したコンクリートは緻密になることで細孔容積も小さくなり、自由水の凍結による水圧の増加も小さくなることで、凍結融解抵抗性に与える影響は小さいと推定する。このため、細骨材置換材として大量に用いるフライアッシュ混入コンクリートで凍結融解抵抗性が確保できる最低ラインの空気量を明らかにする。

(2) 四国内ではコンクリート用粗骨材に砂岩系砕石が多く用いられている。この中には、硬化後のコンクリートの乾燥収縮が土木学会や建築学会で示されている収縮ひずみの限度を超えるケースが比較的多く見られる。フライアッシュの利用は、乾燥収縮の低減効果がある可能性があることがこれまでの研究成果から明らかになったが定量化までは至っていない。このため、フライアッシュの使用量と乾燥収縮低減との相関関係について明らかにする。また、中性化についても、フライアッシュをセメント置換した場合と細骨材置換した場合とでその進行が異なると考えられ、普通コンクリートとの比較検討を実施する。

(3) フライアッシュコンクリートの利用拡大を図るためには、床版などの疲労特性の把握も必要である。空気中及び水中環境における疲労強度試験を実施することにより、S-N曲線を求め、フライアッシュコンクリートの設計疲労強度式を算定する。

3. 研究の方法

上述した目的の項目ごとに研究の方法を以下に示す。

(1) セメントは普通及び高炉を使用した。骨材には高知県産の骨材を用い、細骨材に石灰石砕砂及び除塩海砂、粗骨材には石灰石砕石1505及び2010を使用した。フライアッシュ(FA)はJIS規格を満足しているFA種及びFA種を海砂の補充材として使用した。配合名のNは普通、BBは高炉セメントの使用を示し、はFA種、はFA種の使用を示し、計6配合作製し試験を行った。各配合は混和

材料を調整することにより、空気量が 2.5～3.5%の範囲内になるように設定した。供試体は所定の材齢に達するまで標準養生を行い、各試験は JIS に規定されている方法に準じて実施した。硬化コンクリート試験として、圧縮強度試験、長さ変化試験、促進中性化試験及び凍結融解試験 A 法を実施した。

(2) セメントは、普通セメントおよび高炉セメント B 種の 2 種類を使用した。細骨材には硬質砂岩砕砂、粗骨材には硬質砂岩砕石を使用し、フライアッシュは JIS 規格品の 種および 種に加えて、本研究では非 JIS 灰にも注目して産地が異なる FA-S および FA-T を使用した。フライアッシュは容積で 10% 細骨材補充材として混入した。これら計 10 配合の供試体を用いて強度特性および耐久性を確認するため、以下の試験を行った。フレッシュコンクリートの試験としてスランプ試験 (JIS A 1101)、空気量試験 (JIS A 1128) を行った後、標準養生を行い、硬化コンクリートの試験として圧縮強度試験 (JIS A 1108)、凍結融解試験 (JIS A 1148)、長さ変化試験 (JIS A 1129)、促進中性化試験 (JIS A 1153) を所定の材齢で実施した。

(3) 上記(1)、(2)で作製した試験体において疲労試験を行った。まず、圧縮強度試験を行い疲労試験で作用させる正弦波荷重の上限値と下限値を決定するための基準強度とした。疲労試験を行うに当たり、振動数を 10Hz、目標サイクル数を 200 万回に設定して実施した。

4. 研究成果

上述した目的の項目ごとに研究成果を以下に示す。

(1) 凍結融解試験の結果を図 1 に示す。N は 30 サイクル時から相対動弾性係数の低下が顕著となった一方で、フライアッシュ (FA) を混和した N- は 150 サイクル時で 30% 程度まで低下し、N- は 180 サイクル時で相対動弾性係数が 60% を下回った。この結果は FA を混和することで材料の分散性が向上し、連行される空気が微細になったためと考えられ、空気量が十分確保できない場合も FA を使用した配合では耐凍害性が向上する可能性があるといえる。しかし、N- に比べ N- が劣化した原因については N- は N- に比べ空気量が少なかったためと考えられる。また、高炉セメントの配合は普通セメントの配合に比べ耐凍害性は向上した。本研究で得られた成果をまとめると次の通りである。

空気量を小さく設定した場合、強度は FA を使用した配合、特に FA 種を使用した配合で向上する。

耐久性は FA を使用することで長さ変化、耐凍害性が向上する。また、高炉セメントを使用することで中性化が進行するが、耐凍害性は普通セメントの配合より向上する。

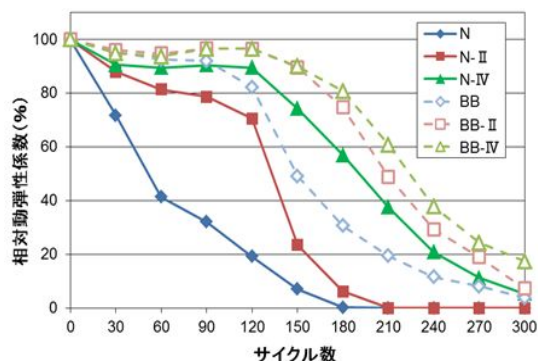


図 1 空気量を小さく設定した FA コンクリートの耐凍害性

(2) 強度試験及び耐久性試験の結果を表 1 にまとめ、この中で促進中性化試験と長さ変化試験結果について以下にまとめる。

表 1 F A コンクリートの強度と耐久性試験結果

配合名	スランプ値 [cm]	空気量 [%]	圧縮強度 [N/mm ²] (182日)	耐凍害性 [%] (300サイクル)	長さ変化 [$\times 10^{-4}$] (182日)	促進中性化深さ [mm] (28日)
N	6.0	5.5	40.8	85	1028	18.7
NFA-II	9.0	5.0	58.5	78	973	17.1
NFA-IV	8.5	4.5	53.0	82	1015	15.3
NFA-S	7.0	5.0	57.1	85	995	14.6
NFA-T	8.0	4.5	55.5	80	1016	15.0
BB	5.5	5.1	41.1	88	991	24.6
BBFA-II	7.0	3.5	54.3	80	964	20.4
BBFA-IV	10.0	3.5	51.6	85	978	22.0
BBFA-S	6.0	5.0	58.8	102	1031	18.5
BBFA-T	8.5	6.0	47.2	91	1112	25.5

促進中性化に関して、セメント別に見ると、普通セメントよりも高炉セメントの方が中性化深さは大きいという傾向が見られた。これは高炉セメントが普通セメントと高炉スラグ微粉末との混合セメントであり、もともとのアルカリ成分が少ないことと潜在水硬性によるものであると考えられる。また、BBFA-T の配合を除く JIS 灰および非 JIS 灰を細骨材補充材として用いた配合では、フライアッシュ無混入の配合に比べて中性化深さが小さくなった。これはフライアッシュが微細な球形粒子であるため、コンクリート内部が緻密化され外部からの CO₂ の侵入を抑制できたためであると考えられる。

長さ変化に関して、JIS 灰を細骨材補充材として用いた配合は無混入の配合に比べてわずかに乾燥収縮の抑制が見られた。また、フライアッシュ 種は 種よりも長さ変化率が小さく、この理由としては 種の方が粒子径は小さいためコンクリートがより緻密化したことが挙げられる。非 JIS 灰を使用した配合では BBFA-T の配合はほかの配合に比べて長さ変化率が大きいという結果となった。これは、フライアッシュに不定形粒子が含まれていることによってコンクリート内部の緻密化が小さく、コンクリート中の水分が逸散したためと考えられる。

将来の展望として、本研究の範囲内ではフライアッシュを容積で 10% 細骨材補充材として用いたコンクリートは、圧縮強度の増進および一定の耐久性の確保から土木工事お

よびコンクリート二次製品で適用できると考えられる。しかし、非JIS灰を細骨材補充材として用いたものはフライアッシュの産地等によってフライアッシュの成分品質が異なり、コンクリートの品質にばらつきを発生させるため、より多くのデータの蓄積によってコンクリート品質のばらつきを把握し、土木工事等への適用を検討していく必要がある。

(3) 本研究では、縦軸に上限応力比、横軸にくり返し回数 $\log_{10}N$ を示したフライアッシュコンクリートの S-N 曲線を作成した。作成した S-N 曲線の 1 つを図 2 に示す。阪田、J.C.Antrim らの気中での S-N 曲線、普通コンクリートの水中での S-N 曲線と本研究で作成した S-N 曲線と比較してみると、すべての配合で S-N 曲線が下方に位置しており、両氏の供試体および水中での普通コンクリートよりも疲労強度が小さいという結果となった。

次に、設計疲労強度の算出に用いられる定数 K についてまとめた一部が図 3 である。フライアッシュ無混入の供試体(N-C、BB-C、N-S、BB-S)を基準にして比較を行うと、高炉セメントにフライアッシュ種を混入させた配合以外では、目標値を下回る結果となった。つまり、高炉セメントにフライアッシュ種を混入させた配合以外では、上限応力比と下限応力比が同じ場合においても、普通コンクリートに比べて、くり返し回数が少ない段階で破壊するということが確認できた。

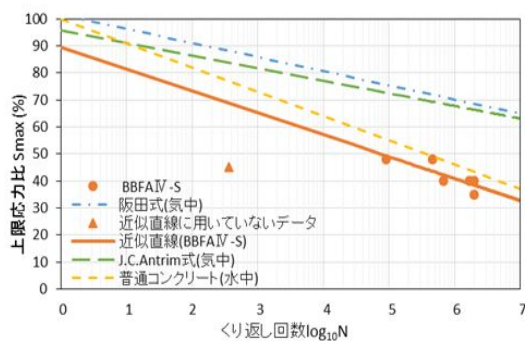


図 2 BBFA IV-S の S-N 曲線

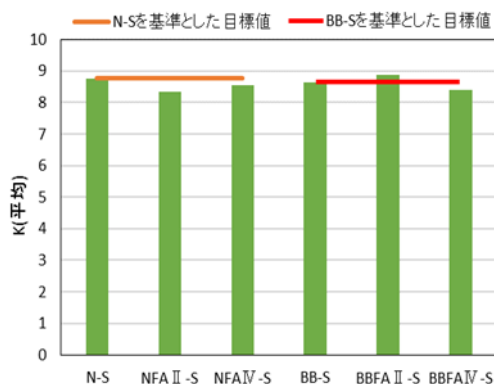


図 3 定数 K の比較

フライアッシュコンクリートにおいても、気中疲労強度に比べて水中疲労強度は著しく低下する。

圧縮強度が大きい配合ほど水中疲労強度が低下する傾向があるため、基準強度ごとに定数 K を変化させて定める必要がある。

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 1 件)

平田大希、橋本親典、横井克則、渡邊 健、多量のフライアッシュおよび高炉スラグ粗骨材の使用による程度処理再生粗骨材コンクリートの耐凍害性向上に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、No.1、2016、1785 - 1790

〔学会発表〕(計 6 件)

山本大貴、横井克則 他、水結合材比一定でフライアッシュの置換率が異なるコンクリートの特性、第 23 回土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集、平成 29 年 5 月 19 日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

田村大地、横井克則 他、フライアッシュを細骨材補充材として用いたコンクリートの水中疲労特性、第 23 回土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集、平成 29 年 5 月 19 日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

芝沙矢香、横井克則 他、フライアッシュ種・種を細骨材補充材として用いたコンクリートの耐久性、土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集、平成 28 年 9 月 7-9 日、東北大学(宮城県・仙台市)

福富隼人、横井克則 他、空気量を小さく設定したフライアッシュコンクリートの耐久性、土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集、平成 27 年 9 月 16-18 日、岡山大学(岡山県・岡山市)

芝沙矢香、横井克則 他、FA 種と種を細骨材補充材に使用したコンクリートの諸性状、第 21 回土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集、平成 27 年 5 月 23 日、香川大学(香川県・高松市)

福富隼人、横井克則 他、初期空気量の違いがコンクリートの耐凍害性に与える影響、第 20 回高専シンポジウム in 函館講演要旨集、平成 27 年 1 月 10 日、(北海道・函館市)

〔図書〕(計 1 件)

氏家 勲、上田隆雄、亀井洋介、横井克則 他、四国版フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針、土木学会四国支部、2016、150

〔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 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横井 克則 (YOKOI, Katsunori)
高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン
工学科・教授
研究者番号：80240183

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号：

(4) 研究協力者

福富 隼人 (FUKUTOMI, Hayato)
芝 沙也香 (SHIBA, Sayaka)
西村 風太 (NISHIMURA, Futa)
田村 大地 (TAMURA, Daichi)
山本 大貴 (YAMAMOTO, Daiki)