

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04437

研究課題名(和文)養生温度がフライアッシュを混合したコンクリートの強度発現に及ぼす影響

研究課題名(英文)Effect of Curing Temperature on Expression of Compressive Strength of Mixed with Fly Ash

研究代表者

小山田 英弘 (Koyamada, Hidehiro)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号：80233625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：実大柱を模擬した試験体を用いて、フライアッシュをコンクリートに混合する有効性を確認するため、フライアッシュを内割調査した場合を比較し、コンクリート温度、強度発現性状に及ぼす影響について、実験を行った。フライアッシュを使用したコンクリートは、最高温度が低く、温度上昇量も低い傾向にあり、中央部と端部の温度差が小さいという結果を得た。フライアッシュを内割使用した場合は、暑中期においては構造体強度補正值の低減が可能であることを確認した。温度応力は、最高温度までは中央部は圧縮側、端部は引張側に増加し、それ以降は逆の応力側へと移行し、温度応力による影響が、圧縮強度に現れている示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、申請者らが本研究に着手する前に実施した、実験の計画および結果も含めて、実験での設定条件を決定し、データを蓄積することで、実験および評価の信頼性を高めること、本研究で取り組み始めた、解析のための情報量を増やすことに重点をおいて計画した。2018年度、2019年度の実験で、実験方法や設定条件など、調査や運搬時間といった設定条件に関しては、十分な結果を得た。温度応力解析は、温度分布、温度履歴、圧縮強度が、解析によるはずみ推定値との関係が認められた。結果は、前述した本研究の着手以前に行った実験結果と考察結果まで含めて検証した。信頼度を高める良好な成果、当初の予定以上の成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：In order to confirm the effectiveness of mixing fly ash with concrete using a test piece simulating a full-scale pillar, we compared the case where fly ash was internally divided and experimented on the effects on concrete temperature and strength development properties. The results showed that the maximum temperature of concrete using fly ash was low, the amount of temperature rise tended to be low, and the temperature difference between the central part and the end part was small. It was confirmed that the structure strength correction value can be reduced in the mid-summer period when fly ash is used internally. The temperature stress increased to the compression side at the center and to the tension side at the ends up to the maximum temperature, and then shifted to the opposite stress side, suggesting that the effect of temperature stress appears on the compressive strength.

研究分野：建築材料学および建築施工学

キーワード：暑中コンクリート フライアッシュ 混合割合 内部温度分布 温度応力解析

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策としての CO₂ 排出量の削減が、国内外共通の課題となって久しいが、この課題に対処すべく、2007 年の経済白書で「低炭素社会」という具体像が掲げられ、排出量削減や吸収量増加を目的とした研究や活動が以前より活発化してきている。

建築材料科学の対象は、選択肢という点では、炭素を固定化する木材の利用拡大、環境負荷の小さい材料の利用、長寿命化に寄与する高耐久材料の開発、製造という点では、CO₂ 排出量の多いセメント使用量の削減があり、関連する研究報告が近年多くみられる。

また、東日本大震災以降、電力供給に占める石炭火力の割合が増大し、排出量が増えた産業廃棄物ともなるフライアッシュの利用は、これまで以上に社会的要請が高い。一方で、住宅性能表示制度において、劣化対策等級 3 を得るには、水セメント比 50%が上限であるため、仮に単位水量 175kg/m³としてもセメント量は 350kg/m³となり、使用量が増加する要因が固定化されているケースもある。温暖化傾向が続く中で、暑中コンクリートの強度発現、強度増進や耐久性に対する課題は多く、実用性の高い対策は急務で、強度・耐久性を確保しつつ環境負荷低減に寄与するコンクリートの一般化の必要性・重要性は高い。これら課題に対して、多くの研究業績が蓄積されているものの、特に建築では、実構造物にフライアッシュを混合、あるいは、フライアッシュセメントを使用するという事例は少なく、この理由の一つとして、フライアッシュを混合する効果の信頼性と理解が十分でないことが挙げられる。

2. 研究の目的

フライアッシュや高炉スラグなどの副産粉体を混合したコンクリートに関連する研究は、地球温暖化がクローズアップされる以前からも数多く行われており、強度、耐久性の両面から良質なコンクリートを提供できることを示した報告は多く、指針類も整備されている。しかしながら現状では、混合セメントや混和材料の使用量は必ずしも多くない。

この遠因として、建築工事においては、建築物の引き渡しまでの時間的制約から、普通コンクリート以外は、例えば初期強度が十分ではないというような解釈が、発注者や設計者の間で払拭されていないことがあると考えている。

強度増大への寄与を期待してフライアッシュを混合する場合、ポゾラン活性によるところが大きく、ポゾラン反応に関して文献調査を行ったところ数百件の報告があった。これらの多くが現象解明を目的とし、温度、水分、水酸化カルシウム量が大きく関わるといった知見が得られており、強度増大のための基礎的なメカニズムは解明されている。一方で、申請者らの行った過去の研究結果（1例のみ）のように、実構造物の水和発熱や養生温度（温度環境）といった、高温によりポゾラン反応が打設後初期から生じる可能性の検討や養生期間中の温度変化を対象とした検討、つまり設計や製造段階で使用を決定するに至る、実用性という観点で直接手がかりとなる体系的な研究報告は殆ど無い。

よって、本研究で目指す、打設直後にはセメントの水和発熱で高温になる影響、長期には外気温に追従するコンクリート温度を検討し、実構造物の再現実験を実大試験体で確認すること、そのメカニズムを明らかにすることは、信頼性と実用性の高い結果を示すもので、プラントでの調合設計や二次製品の製造管理に反映できる。このことは、学術的成果に留まらず、実用性という点で、フライアッシュの拡大、高品質コンクリートの供給、ひいては環境負荷低減に貢献すると考えている。

3. 研究の方法

本研究では、代表者と分担者が以下の 2 つの課題を分担実施し、結果を整理する。

- ・養生温度と強度発現性状の関係
- ・品質の異なるフライアッシュの影響

3. 1 養生温度と強度性状の関係

(1) 主な実験項目

- ・実大試験体による内部温度分布
- ・調合別の強度、細孔空隙分布

(2) 実験・評価方法

本研究のポイントとなるポゾラン反応に影響する要因は、図 1 に示すように、混合量、成分、水分供給、温度等があり、組み合わせは無数にある。したように、コンクリートの水和熱によってポゾラン反応が促進されることを確認、併せて内部の高温の影響を検討する。実大試験体は、一般的な中高層鉄筋コンクリート造の柱断面に相当する 1m×1m×1m の試験体で行う。申請期間中、暑中期に 1 回/年、標準期に 1 回/年、それぞれ 2 回行う。申請者の行った実験では、中心部と表面で温度差が約 40℃（普通コンクリートの最高温度は 80℃）あった。

この結果を参考に、試験体の中心から表面まで、10cm 間隔で温度分布を計測、温度分布から温度応力を解析する。温度応力解析は、暑中期の強度発現への悪影響となる原因をも検討対象とする。また、コアを採取し、細孔空隙を分析する。フライアッシュを混合した試験体からは、ポ

ゾラン反応の反応率を分析する。

調合は、出荷量の多い強度帯の普通コンクリート、フライアッシュセメント A 種と同等量のフライアッシュを混合した 2 種類とする。ポゾラン反応に関しては、より詳細に評価するため、例えば、混合量を変化させた場合、温度履歴の異なる場合を過去の実験、並びに文献を参考に、温度パターンに設定した恒温装置で、モルタル試験体を作成、養生し、強度、細孔空隙構造、反応率などを測定する。

3. 2品質の異なるフライアッシュの影響

(1) 主な実験項目

- ・フレッシュに影響する要因の分析
- ・強度へ寄与度の検討

(2) 実験・評価方法

フライアッシュを混和材料として使用する場合、「フレッシュ性能の向上」、「長期強度増大」や「耐久性向上」への効果を期待する場合には、その効果の程度を明らかにし、使用量（調合計画）決定するための品質管理目標（基準）を示すことが必要である。フライアッシュは、石炭の産地、燃焼温度等によって、製品としての品質が異なることはすでに明らかになっているが、基本的には未燃炭素量の管理が標準的である。分担者の研究によれば、未燃炭素が同じであっても、上記の効果は同程度ではなく、未燃炭素以外の物性が影響すると予想される。但しこれまでの実験では、強度低下は確認されていない。

これらを明らかにするため、起源の異なるフライアッシュの未燃炭素量を揃えた材料を用意、フレッシュ性状への影響についてモルタル試験体を用いたフロー試験等で確認する。また、①と同じ条件で養生した後に、強度、活性度、ポゾラン反応の反応率、生成鉱物等の分析を行う。

これらの結果をもとに、強度への寄与度の範囲、つまり、実用上の管理基準として適当な JIS II 種相当の種々のフライアッシュでばらつく範囲を統計学的に整理し、製造管理、調合計画の基準を策定する。当初の 2 年間で各種要因別の実験と強度発現メカニズムに関する実験を行い、最終年度は、長期材齢における強度および硬化体組織を確認し、結果をとりまとめる。

4. 研究成果

本研究は、実大柱を模擬した試験体を用いて、暑中期に施工されるコンクリートの品質低下対策として、フライアッシュをコンクリートに混合することの有効性を把握・確認するため、普通ポルトランドセメント単味の場合と、フライアッシュを内割調合した場合を比較し、コンクリート温度、強度発現性状に及ぼす影響について、実験的に検討した。3 年間の当初予定は以下の通りで、2018 年度は、実大柱を模擬した試験体を用いて、セメントの水和に伴う温度分布を測定、温度解析により結果を分析・考察することとした。2019 年度は、信頼性を高めるため、2018 年度と同じ実験を繰り返し、新たに得られた知見に対して追加実験を行い前年度の結果の信頼性を高めることとした。2020 年度は、得られた実験データと温度応力解析の整合性を高め、信頼性の高い成果を得るための課題抽出と現象の解明を図ることとした。

実験および解析から、以下の知見を得ている。

- (1) フライアッシュを多く使用したコンクリートほど、最高温度が低く、温度上昇量も低い傾向にあり、かつ、フライアッシュを使用したコンクリートは中央部と端部の温度差が小さいという結果を得た。
- (2) 構造体強度補正值は、普通ポルトランドセメント単味の場合、端部が 1.4 N/mm^2 で、中央部が 1.2 N/mm^2 、フライアッシュを内割使用した場合は、全て 0 以下となり、有効性が見られた。管理用供試体の単味コンクリート 28 日の強度とフライアッシュ使用の 91 日強度を比較すると、置換率 20% のものは同等の強度であったため、暑中期においては構造体強度補正值の低減が可能であることを確認した。
- (3) 温度応力は、最高温度までは中央部は圧縮側、端部は引張側に増加し、それ以降は逆の応力側へと移行し、温度応力による影響が、圧縮強度に現れていると考えられた。また、強度発現が単味と同程度の 20 パーセントの混合で、温度応力は小さくなり、品質向上が示唆された。
- (4) フライアッシュの強度増大効果に、コンクリートの温度が刺激となっていることを数種類の温度下で試験体を養生し、強度試験、化学分析を中心に確認した。これは、上記(1)、(2)を裏付けるものとなっている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 入口花純, 小山田英弘, 高巢幸二, 陶山裕樹, 小山智幸	4. 巻 60号
2. 論文標題 暑中期に施工されるコンクリートに関する研究 温度応力解析による調合および打込み条件の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会研究報告 九州支部, 第60号 構造系, 2021年3月	6. 最初と最後の頁 189-192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 入口花純
2. 発表標題 暑中期に施工されるコンクリートに関する研究 温度応力解析による調合および打込み条件の影響
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告会, 九州大学 (web開催), 2021年3月
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	高巢 幸二 (Takasu Koji) (60336948)	北九州市立大学・国際環境工学部・教授 (27101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------