

審査の結果の要旨

氏名 王 眺
Wang Tiao

石炭火力発電所から排出される石炭灰は、コンクリート用混和材のフライアッシュとして、コンクリートダムなどの大型構造物に対して多くの利用実績がある。しかしながら、現在年間 900 万トン以上排出される石炭灰のうち、JIS規格に適合させて販売している JIS 灰は年間 30 万トン（全体の 3%）とわずかであり、これ以外の非 JIS 灰については、大半をセメント会社に処理費用を支払い、セメント原材料としている。福島第一原子力発電所の事故以降、原子力発電所の稼働率が下がるなか、今後、石炭火力発電所から排出される石炭灰の増加が見込まれること、またセメントクリンカー製造量の減少が見込まれることから、フライアッシュの有効利用を図ることが喫緊の課題となっている。しかしながら、フライアッシュは石炭の種類、燃焼方法、集塵方法などによって物理化学的性質が相違し、フライアッシュのポゾラン反応性が大きく異なることが、広く有効利用する点で妨げとなってきた。資源の有効活用、ポゾラン反応による耐久性向上、セメントクリンカー代替による CO₂ 排出低減など、フライアッシュ活用は多くの利点を有するが、有効活用に向けた技術開発が強く望まれる状況にある。

以上の背景のもと、本研究では、フライアッシュの物理化学キャラクターゼーションを様々な観点から実施し、従来の分析手法では十分に把握することが難しかったフライアッシュの反応性を表現する指標を捉えると共に、フライアッシュのポゾラン反応モデルそのものと、セメントクリンカーとの相互作用を考慮した複合水和発熱モデルの高度化を行った。主たる成果は以下に列挙される。

第一の成果として、フライアッシュの反応性を定量的に説明する物理化学手法の提案がある。XRF により同定される化学元素構成、XRD により得られる相組成、およびブレン空気透過試験による比表面積といった、従来の分析手法によるフライアッシュの物理化学試験では、異なるフライアッシュの反応性を的確に把握できないことを示したうえで、SEM-EDS による新たな分析手法を

提案している。すなわち、結晶質と非晶質が様々に混在するフライアッシュの反応性を同定するために、マッピングにより得られるカルシウム、シリカ、アルミニウム、および鉄の元素割合に応じて相組成を推定する新たな手法を開発した。クォーツ、マグネタイト、ムライトといった結晶質を多く含む反応性の乏しい相と、シリカおよびアルミニウムを多く含む非晶質の分類を試みるものである。温度二水準（20°C、60°C）のもとでアルカリ浸漬した後に、シリカの含有量が比較的高い非晶質相と、アルミニウム含有量の高い非晶質相それぞれに対しての溶解率を得ることで、非晶質相毎の反応性と温度依存性を明らかにしている。またその結果から、反応性を代表する簡易な指標として、非晶質相とムライトの質量比に着目し、フライアッシュ生成時の燃焼条件、冷却条件との関連を議論している。

第二の成果として、以上の緻密な分析に基づき、既存の複合水和発熱モデルの修正することで、モデルの精度向上と適用範囲の拡大を図っている点がある。まず、フライアッシュのポゾラン反応モデルの高度化をはかるために、従来フライアッシュを単一のモデルとして考えられてきたものを、シリカ主体の非晶質とアルミニウム含有量の多い非晶質相の二つを考慮することとし、異なる温度依存性を与えたモデルを提案した。またフライアッシュとセメントクリンカー、特にビーライトとの相互依存性を考慮するために、pHを変化させた系におけるカルシウムシリケート水和物（C-S-H）の形態変化に着目している。実験において、高いpHではC-S-Hが三次元的に生成される一方、低いpHにおいてセメント表面に二次元的にC-S-Hが析出されるために、水和反応速度が低下することを確認している。これらの実験事実に基づき、ビーライトとフライアッシュの相互作用を考慮するモデルを提案することで、20°Cおよび60°C環境における普通ポルトランドセメントとフライアッシュ混合の系、および低熱ポルトランドセメントとフライアッシュ混合の系において、ビーライトおよびフライアッシュの反応率と、残存する水酸化カルシウム量を精度よく追跡可能な事を確認した。

以上のように、本研究では、様々な品質および物理化学特性を有するフライアッシュの反応メカニズムを明らかにすると共に、既存の複合水和発熱モデルを修正することで、精度向上と適用範囲の拡大に成功した。また本研究の成果は、フライアッシュの有効活用の貢献につながる工学的価値を有している。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。