

論文の内容の要旨

論文題目

マイクロ波加熱技術を利用した骨材回収型完全リサイクルコンクリート技術に関する研究

辻埜 真人

近年の環境問題に対する意識は非常に高く、全産業廃棄物排出量の約 2 割を占め、今後も増加が予測されている建設業界が担う役割は非常に大きい。中でも、特にコンクリート廃棄物に対する関心は高く、路盤材利用によって再資源化率は極めて高くなっているが、道路建設の減少や戦後の高度経済成長期に多量に建設され、ストックされてきた構造物から発生するコンクリート塊の増加、最終処分場の逼迫という将来のコンクリート廃棄物問題を鑑みると、現在、路盤材として利用されているコンクリート塊をコンクリート用骨材として再利用する必要性に迫られている。このような状況のもと、再生骨材が普及に向け JIS 化されるなど、コンクリートを取り巻くリサイクルシステムは大きく前進しつつあるが、現在の加熱すりもみ式再生処理などの高度処理技術を要する逆工程には、エネルギーやコストの削減、微粉末の処理など課題が多いことが示されている。従って、コンクリートの打ち込み当初から骨材リサイクルが可能な解体分離を念頭においたリサイクルシステムを構築するための技術が求められている。

研究背景からコンクリート用骨材のリサイクルには逆工程の省力化が極めて重要である。また、コンクリートの性能改善によって超寿命化が図れ、環境負荷低減につながることから、骨材回収性能を向上させつつ、コンクリートの性能改善をも可能とする技術の確立を目的として検討を行った。

まず、骨材分離を念頭においた技術を利用し、低エネルギーによる骨材リサイクルの検討を行った。この技術は、骨材表面に撥水作用などを有する改質処理剤を施工し、コンクリートの打ち込み時から、骨材とセメントマトリクスとの付着強度を低減することで、骨材の容易なリサイクルを実現するものである。さらに、骨材表面に被膜を形成することから、骨材の吸水率低減効果をもたらし、コンクリートの性能改善を図るものである。この技術を利用し、広範囲なコンクリートの材料試験および構造試験を実施し、実構造物への利用可能性を言及した。

次に、前述した技術は、骨材分離を念頭においた技術であることから、力学性能の改善を図ることは困難である。そこで、力学性能をも改善でき、骨材回収性能を有する技術の検討を行った。

提案技術は高い誘電率を有する改質材料を骨材表面に塗布し、この部分をマイクロ波によって選択的に加熱・脆弱化させ、低エネルギーで高品質な骨材を回収し、骨材の完全リサイクル化を実現するものである。この技術は、マイクロ波加熱による瞬間的な骨材表面の強度低下であることから、解体前の構造物の運用時には、強度低下する可能性が小さい。さらに改質材料の種類によっては、遷移体の改善を行うことも可能となり、コンクリートの強度増進および耐久性の改善が実現し、建築物の延命化といった根本的な環境負荷低減につながるものである。

まず、骨材分離技術を利用した結果、簡易な散水方法での塗布でも再生粗骨材の吸水率を低減することが可能であると示された。そしてこれらの骨材を利用したコンクリートのフレッシュ特性は、処理を施していない水準と同程度であることが明らかになった。次に、コンクリートの硬化特性において、水セメント比が 60%程度であれば強度低下がなく、中性化抵抗性能が改善され、剥離率も改善したことから骨材回収を念頭においた構造用コンクリート骨材としての利用可能性を示した。一方シラン系は、

50%以上の剥離効果が見られ高度処理を行うことなく、回収率を高めることができるが、強度低下が著しく、構造物への適用は困難であると結論付けられた。

構造物用コンクリート骨材としての利用可能性を示した油脂系表面改質処理骨材を利用した曲げ部材の検討を行った。その結果、ひび割れに対する性能は若干低下するが、最大ひび割れ幅が 0.3mm 以下であることから、本研究と同程度の鉄筋径を用いた場合には大きな問題になるとは考えにくく、ひび割れ追従性の良い仕上材との併用により、構造物部材への実用に十分耐えうると結論付けられた。また、油脂系表面改質処理骨材を用いた RC 梁の曲げ耐力は、普通粗骨材コンクリートとほぼ同等の性能を示し、コンクリートの圧縮縁ひずみを 3500μ と仮定することで終局耐力を予測できることが明らかになった。以上の結果から、油脂系表面改質処理を施した骨材は構造物材料として十分利用可能であることが示された。

マイクロ波加熱を利用した技術においては、まずマイクロ波の概要および特徴を示し、コンクリート分野へのマイクロ波加熱の利用状況を精査した。そして、マイクロ波加熱技術を利用したコンクリートのリサイクルが、他のリサイクル手法に対して、低エネルギーであることを証明し、今後の技術開発の基本を組み上げた。

マイクロ波を利用した誘電材料の加熱試験の結果、現在では、酸化鉄 (FeO) が昇温特性や含有物質および物量に対する問題もなく、最も利用可能性が高いと判断された。

次に選定した誘電材料である酸化鉄を骨材へ施工するためのバインダーの選定を行った。マイクロ波を利用した本技術では、構造物の運用時には、骨材と誘電材料を含む改質材（以下、誘電体被覆改質材）そして誘電体被覆改質材とモルタルマトリクスが強固に付着している必要がある。そこで各種のバインダーについて検討を行い、骨材への施工を試みた。その際に求められる要求は、下記の5点であると考えられる。

- ① 骨材への施工の容易さ
- ② 誘電材料が均一に施工できていること
もしくは、誘電材料がバインダーに均一に分散可能であること
- ③ 利用するバインダーがコンクリート（強アルカリ）中で安定していること
- ④ マイクロ波加熱によって短時間で 300°C 程度までの昇温効果が得られること
- ⑤ 骨材と誘電体被覆改質材そして誘電体被覆改質材とモルタルマトリクスがコンクリートの強度低下を生じさせない強固な付着力を有していること

①および②に関しては、実施工の上で判断し、③については、フレッシュモルタル中への投入を行うことで評価した。そして④に関しては、マイクロ波加熱試験を行うことによる昇温特性の評価を行った。最後に⑤については、コンクリートの練混ぜ試験を行い、最終的に圧縮強度における強度によって評価を行った。

その結果、①および②に関しては、スプレー状および低粘度バインダーであれば、大きな問題がないことが示された。誘電材料の選定に当たって最も困難であるのは③である。バインダーとして、有機材料を用いた場合には、コンクリートの強アルカリ環境下で安定している低粘度材料は少なく、現時点では低粘度エポキシのみであった。④に関しては、酸化鉄エポキシ比が 2.86 程度であれば、全くコーティングを施さない骨材と比較し、3 倍程度の昇温特性を有しており、目標とする加熱温度 300°C に達するには 60 秒程度の加熱でよいことが示された。⑤については、エポキシ-酸化鉄骨材に適量の反応性物質（シリカフェーム）をコーティングすることで誘電体被覆改質材とモルタルマトリクスが強固に付着することが示された。さらに、普通コンクリートに比べても強度が高いことから、骨材と誘電体被覆改質材の付着強度も十分有していることが明らかになった。以上の結果、誘電材料である酸化鉄を骨材へ施工するためのバインダーは、低粘度エポキシであると結論付けられた。

最後に、選定した誘電体被覆改質処理材を利用し、力学性能および骨材回収性能の相反する性能を両立し、マイクロ波加熱技術を利用した骨材回収型完全リサイクルコンクリートの実現を目指した。

まず、十分な力学性能を有するために誘電体被覆改質材に必要なシリカフェーム量は、10～20%程度であり、この範囲であれば、同調合における普通コンクリートに比べ1.2倍以上の強度発現が可能であることを明らかにした。

そして力学性能に改善効果が見られた水準においてマイクロ波加熱を利用した骨材回収性能に関する実験を行った。その結果、十分な摩砕効果を有していない試験機を用いたにもかかわらず、ペースト付着率は極めて小さく、原骨材回収率が90%を超える水準となった。さらに、加熱すりもみ技術を想定した水準と比較してもペースト付着率、原骨材回収率ともに劇的に向上することが明らかになった。

以上の結果から、力学性能および骨材回収性能の相反する性能を両立し、マイクロ波加熱技術を利用した骨材回収型完全リサイクルコンクリートを実現した。