

論文の内容の要旨

論文題名 無機系材料の造粒および骨材界面への選択的配置によるひび割れ自己治癒技術の開発

氏 名 小 出 貴 夫

本研究では、セメントに代表される無機系材料の水和反応、膨張作用等に着目し、コンクリートにひび割れが生じた後、水が供給された際に、そのひび割れをコンクリート自らが治癒できる機能をコンクリートに付与する技術の開発を目的とした。ひび割れの自己治癒技術として、無機系材料の造粒（混和材化技術）および無機系材料の骨材界面への選択的配置手法（連続製造技術）を開発し、その自己治癒性能を検討した。

ひび割れを自己治癒させるためには、コンクリート硬化体中に未反応の無機系材料を意図的に残存（偏在）させることが有効であると考え、微粉末材料の造粒および骨材表面へのコーティングを検討した。その結果、膨潤性粘土鉱物等を含む高吸水性のひび割れ自己治癒材料を造粒技術により細骨材サイズの造粒物に加工することで、コンクリートに細骨材置換で混和した際のハンドリングを改善した。また、無機系材料の骨材界面への選択的配置として、細骨材および粗骨材の表面に種々のセメント系材料を含むコーティングを施すことで、骨材界面を効率よく自己治癒させる可能性を見出した。さらに、この無機系材料の骨材界面への選択的配置手法をレディーミクストコンクリート製造プロセスに組み込み、廉価な自己治癒コンクリートの連続製造を可能とする要素技術を開発した。以下に本研究の構成および概要をまとめる。

第1章では、序論として、本研究の背景および目的について述べ、本研究の構成を概説した。そして技術的課題を抽出し、課題設定を行った。

第2章では、モルタルおよびコンクリートのひび割れ自己治癒に関する既往研究を調査し、本研究における研究の位置づけについて記述した。また、既存の膨潤性粘土鉱物等を含む自己治癒材料は、優れたひび割れ自己治癒性能を有するが、高吸水性の微粉末材料であるため、コンクリートに混和した際に流動性を大幅に低下させる課題が明らかとなった。この課題に対して、第4章にて造粒技術を用いて改善を行った。

第3章では、本研究に使用する造粒技術およびコーティング技術に関する既往研究を調査した。その結果、粉体の造粒およびコーティングに際し、粉体のキャラクタリゼーションを考慮して、バインダの添加量、装置の選択等の適切な条件設定を行う必要があることを示した。また、本研究で適用を想定しているコンクリート用途では、実用上許容されるコストの上限が存在するため、製薬あるいは食品分野で使用されている高度な造粒技術、コーティング技術、マイクロカプセル化技術は、コスト的に適用困難であると判断した。そのため、第4章および第6章で使用する造粒技術としては、比較的簡易な装置を使用し、

かつ低コストで造粒物を製造できる可能性のある攪拌造粒，転動造粒を採用することとした。さらに第 6 章および第 7 章で使用するコーティング技術は，特殊な装置を使用せず，一般的なコンクリートミキサを用いた混練により，骨材に対するコーティングを行うこととした。

第 4 章では，攪拌造粒および転動造粒を用いて，高吸水性の粘土鉱物を含む無機系材料（微粉末材料）を細骨材と同等の粒度分布を有する造粒物に加工した。そして，この造粒物を細骨材置換で $40\sim 50\text{kg/m}^3$ 混和した $W/C=50\%$ 前後のコンクリートをレディーミキストコンクリート工場で 3 シーズンに渡って実機製造し，造粒物の混和によってコンクリートのフレッシュ性状を改善可能であることを確認した。さらに 3 シーズンに渡って実機製造したコンクリートを用いて桁形 RC 試験体（コンクリート量 0.5m^3 ）を打設し，屋外暴露環境下で，ひび割れが自己治癒することを確認した。

第 5 章では，コンクリート硬化体中に未反応の粗大な水硬性材料を意図的に残存させることにより，ひび割れの自己治癒性能を付与する技術として，潜在水硬性を有する高炉スラグ細骨材および刺激剤を用いたモルタルおよびコンクリートの物性を検討した。

JIS A 5011-1 に規定された高炉スラグ細骨材は，アルカリ骨材反応性の心配がなく，塩化物等の有害な成分を含まない細骨材であるが，吸水性の乏しいガラス質で角ばった粒子を多く含むため，モルタルおよびコンクリートの細骨材として 100% 使用すると，流動性が大幅に低下し，ブリーディングが増大するという性質を有する。

本検討では，粒径 2.5mm の高炉スラグ細骨材（BFS2.5）を使用した。 $W/C=50\%$ のモルタルにおいて，細骨材全量を高炉スラグ細骨材とし，刺激剤として，水酸化カルシウム，無水石膏，転炉スラグ，硫酸アルミニウム等を併用した試験を行った。その結果，高炉スラグ細骨材のみ使用した場合は，天然骨材（陸砂）を用いた場合よりブリーディングが多く，流動性および圧縮強度が大幅に低かった。一方，刺激剤として水酸化カルシウム，無水石膏を高炉スラグ細骨材の $7.5\text{vol}\%$ 置換したモルタルは，高炉スラグ細骨材のみを用いた場合より圧縮強度が改善された。そして，円柱供試体を用いた通水試験により，高炉スラグ細骨材を用いた場合，ひび割れが自己治癒することを確認した。

さらに $W/C=50\%$ のコンクリート試験では，細骨材全量を高炉スラグ細骨材とし，刺激剤として水酸化カルシウムを 50kg/m^3 およびブリーディング低減用に高炉スラグ細骨材の微粒分 50kg/m^3 を併用した結果，フレッシュ性状に問題のないコンクリートが得られることを確認した。また，第 4 章と同様の桁形 RC 試験体を打設し，屋外通水試験により，長期間に渡ってひび割れが自己治癒することを確認した。既往研究より，高炉水砕スラグの粒子の水和反応層の厚さは，材齢が 80 年経過しても数十 μm 程度にとどまると報告されていることから，本検討のコンクリートは，未反応の高炉スラグ細骨材が多量に残存するため，刺激剤となる水酸化カルシウム等が存在すれば，かなりの長期材齢を経ても，ひび割れ自己治癒能力を維持できると考えた。

第 6 章では，ひび割れの自己治癒に資する無機系材料を細骨材の界面に選択的に配置す

る試みⅠとして、セメント系材料をコーティングした細骨材を作製し、このコーティング細骨材およびこれを細骨材置換で混和したモルタルの物性について検討した。

モルタルあるいはコンクリート硬化体のひび割れは、ペーストと骨材の界面を通過する場合が多いと考えられる。また骨材界面は、遷移帯やブリーディング由来の空隙が存在するため、コンクリートの水密性を確保する上での弱点となっていると考えられる。そこで、ひび割れ自己治癒性能向上のため、骨材の界面に自己治癒に資する無機系材料（未水和のセメント系材料、膨張材等）を選択的に配置することにより、骨材界面を効率よく自己治癒させることを目的として、モルタルにおいてコーティング細骨材の検討を行った。

その結果、細骨材の表面に未水和セメントあるいはセメント水和物をコーティングすることで、効果的にひび割れを治癒させうることを確認した。特にアルミナセメント+水酸化カルシウムからなるコーティング A と、早強ポルトランドセメントおよび無水石膏からなるコーティング B を併用した場合は、通水試験において初期漏水量が早く減少した。通水試験後のひび割れに生じた白色析出物は、XRD、SEM-EDS の分析によりエトリンガイトおよび hidroゲルネットを含有していることが明らかとなり、これらが、ひび割れの自己治癒に寄与している可能性があると考えられた。コーティングの材料構成および混合比率を最適化することで、ひび割れ部におけるエトリンガイト生成量を増やし、ひび割れ自己治癒性能を向上させる可能性が示唆された。

第 7 章では、ひび割れの自己治癒に資する無機系材料を粗骨材の界面に選択的に配置する試みⅡとして、パン型ミキサを用いてセメント系材料をコーティングした粗骨材を作製し、そのコーティング粗骨材を用いたコンクリートの物性について検討した。さらに、レディーミクストコンクリート工場における自己治癒コンクリートの連続製造を想定し、製造プロセスに粗骨材のコーティング工程を組み込んだ自己治癒コンクリートの製造方法に関する技術を検討した。その結果、粗骨材の表面に未水和セメントあるいはセメント水和物を選択的に配置することで、ひび割れを自己治癒させうることを確認した。

また、この無機系材料の選択的配置手法（コーティング技術）をレディーミクストコンクリート製造プロセスに組み込み、廉価な自己治癒コンクリートの製造可能とする要素技術を開発するべく検討を行なった結果、レディーミクストコンクリート工場の常備する設備および材料を活用するプロセスを開発した。

すなわちこのプロセスは、第 1 工程として、増粘剤および硬化促進剤の作用を利用してコーティング粗骨材を生コン工場の二軸強制ミキサで製造し、アジテータ車に排出した後、アジテータ車のドラム内にストックしている間にコーティングを硬化させる。続く第 2 工程において、遅延剤入りモルタルを製造する。この際、第 1 工程のコーティング粗骨材に用いた増粘剤および硬化促進剤の影響を低減するため、モルタルに高性能 AE 減水剤および凝結遅延剤を適切に添加することで、コンクリート化した際の流動性低下を防ぐ。最後の第 3 工程でアジテータ車をミキサとして利用し、両者を一体化してコンクリートとする方法である。本検討では、レディーミクストコンクリート工場を模擬し、容量 0.1m^3 の二軸

強制ミキサおよび容量 1m³ の小型アジテータを用いて実証実験を行なって要素技術を開発した。そして、この連続プロセスにより製造したコンクリートがある程度の自己治癒能力を有することを確認した。

第 8 章では、以上の検討をまとめ、本研究の結論を示した。