

論文の内容の要旨

副産細粒を用いた高強度コンクリートの収縮低減特性に関する研究

林 昇俊

近年、建設廃棄物の減量化とリサイクルの必要性が顕著になっている。建設廃棄物の中でもコンクリート塊は、高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物がすでに解体され始めていることから、今後排出量が急速に増大するものと考えられて来た。したがって十数年前からコンクリート塊中の骨材の再利用方案は活発に研究されて、もう製品化段階(再生骨材)になっている。また再生骨材生産工程において不可避に発生する副産細粒と微粉はその大半が路盤材として再利用されて来たが、道路設備が進んだ都心部においては新規の需要が少なくなっていることから路盤材以外新たな用途開拓が必要になった。これによってヨーロッパを含めた日本、韓国等各国では骨材を除いた副産物の有効利用のため研究を進行していたが、明確なリサイクル手法が提示されず、まだ検討段階を越えられない状況である。一方、コンクリートは化学収縮、自己収縮の作用で硬化時から収縮が発生する。化学収縮はセメントと水分の化学反応による生成された化合物の容積が反応前の容積に比べて減少する現象であり、自己収縮はセメントの水和反応時内部の一時的な自己乾燥現象で物理的に収縮される現象である。このように化学収縮及び自己収縮はセメント水和反応と共に発生するのに比べて乾燥収縮はコンクリート表面からの水分蒸発による物理的収縮現象である。これらのコンクリートの収縮現象は特に高強度コンクリートのように水結合材比が小さくて単位結合材量が多い場合では水和反応に必要な水不足によって水和反応が止まって、自己収縮が増大される傾向を現れている。これは高強度コンクリートが設計基準強度に至らない問題になり、場合によっては自己収縮だけでひび割れが発生するのも報告されている。なお、最近の高い吸水率を持つ多孔性の軽量骨材の特性を用いたコンクリートの収縮低減効果に関する研究が注目を浴びている。特に、シリカヒュームを添加した低水結合材比の高強度コンクリートで 10~20%の範囲の大きな吸水率を持つのは、軽量骨材を事前に吸水して適用する場合には、軽量骨材は、水分の貯蔵倉庫のような役割を行って、水和に必要な水分を供給して水分の外部への移動、あるいは内部の消費に伴う水分損失を償って高強度コンクリートの収縮の発生を抑制する効果があることが発見されたことがある。Bentz らは飽和した軽量杯骨材の内部養生効果によるセメントペーストの体積変化に関する研究を行っており、Bentur らは、拘束条件下での高強度軽量骨材コンクリートの自己収縮低減効果に関する実験的研究を実施した (Bentz ら, 1999; Bentur ら, 2001)。Lura ら, Zhotovsky らは、軽量骨材、事前の吸収程度を変数とし、セメントペースト、モルタル、コンクリートの自己収縮低減効果と骨材界面の遷移帯での内部養生効果を実験で証明した (Lura ら, 2003, 2004, 2006; Zhotovsky ら, 2004)。以外にも Gesolglu ら, 環境負荷そ

の軽減、軽量骨材のフライアッシュの軽量骨材を用いたコンクリートの収縮低減効果に関する研究を実施した (Gesoglu ら, 2006)。しかし、現在までに発表された研究は、コンクリートの上に事前に吸水された軽量骨材の適用時の収縮低減効果に関する実験的研究にとどまっており、軽量骨材、事前に吸水することがコンクリートの収縮に及ぼす影響を定量的に究明するために、軽量骨材、事前に吸収水によるコンクリート内部の水分の移動特性、水分分布と収縮との関係らに関する研究は不足な状態である (Bazant ら, 1971; Sakata, 1983; Xi ら, 1993a, 1993b; Xin ら, 1995; Kim 等, 1999 ; Ayano ら, 2002)。したがって本研究では、吸水率が高い粉末の場合、粒子性状によって保水性を持つと予想されることから、副産細粒及び微粉の保水性能を用いて高強度コンクリートの収縮低減効果を考察する。

一方、高強度コンクリートにおける収縮変形は、低い水セメント比に起因するもので、水和反応に要求される水をどれだけよく供給するのが重要である。一方、一般的に再生粗骨材プロセスの中で副次的に生産される副産細粒は、粒子の大きさと骨材と硬化ペースト部の割合のばらつきが非常に多いため、水分の主供給源として期待される多孔性の硬化ペースト組織の制御が可能なモデルの副産細粒があるべきである。したがって、本研究では、モデル副産細粒に基づいて、粒子のサイズと物性が異なるそれぞれのレベルによって副産細粒自体の物性と水分供給能力、水分の供給に応じて周辺の水和反応性状変化の考察結果から、副産細粒を用いた高強度コンクリートの収縮低減予測モデルを構築し、実際の収縮ひずみや弾性係数などの物性を検討とともに、予測式の妥当性を評価しようとする。

- ① 水準を制御したモデル副産細粒を製作し、高強度コンクリートにおける水分調節可能性を実証するための検討を行う。
- ② 高強度コンクリートにおける副産細骨材からの水分供給による周りのセメント硬化体の化学的組織変化を模擬的に把握し、モデル副産細粒と低水セメント比のセメント硬化体との間における水分挙動に基づいて副産細粒の自己収縮低減メカニズム解明する。
- ③ モデル副産細粒を混入した高強度モルタルの物理的特性分析と実際収縮特性を検証する。
- ④ ペースト部の水和反応による水分消費に伴って生じる水分濃度差の勾配を駆動力とする副産細粒からの水分移動をベースとしてモデル化させ、実測値との比較・分析を行って検証する。

第1章では、副産細粒を用いた高強度コンクリートの収縮低減特性に関する本研究の背景、目的、位置、および範囲、構成を論じる。

第2章では、副産細粒に関する理論的考察および自己収縮のメカニズムに関する既往研究の文献調査を行う。さらに本研究のモデルを水分拡散として理解するためコンクリートの分野の拡散に関する既往研究を調べる。

第 3 章では、高強度コンクリートにおいて、様々な粒形や粒度分布、骨材割合を持つ副産細粒の事前吸収水が高強度コンクリート内部の水和反応に与える影響を数値的に解析するために、拡散の観点から水分移動モデルを定義する。これをもとに収縮低減に影響を与える水分移動をモデル化した結果、水分のペースト方向の移動距離および濃度勾配の数値的解析と水和反応によって消費される水分量を定量的に計算できる式が得られた。

第 4 章では、モデル副産細粒の水分放出性状に関する研究として副産細粒に多量に含まれる多孔質構造で保水性を有する硬化ペーストが、水分供給源となり得ることを期待し、副産細粒の高強度コンクリートの収縮低減効果に関する研究を行った。副産細粒に混在している硬化ペースト部分の含水性能を考慮して高強度コンクリートにおける収縮低減の可能性を確認した。特に、未水和セメントに必要な反応水の供給量および供給速度に関しては、副産細粒のセメント系硬化体の割合と多孔質空隙構造に関係があるのを明らかにした。さらに板状ペーストの水準ごとの有効拡散係数と水分移動量の定量分析が可能になった。

第 5 章では、第 4 章で得られたモデル副産細粒の吸放湿性能に基づいて、再生細骨材を高強度コンクリート用細骨材として用いた場合における副産細粒からの水分供給によるセメント硬化体の化学的組織変化を模擬的に把握するために、モデル副産細粒と低水セメント比のセメント硬化体との間における水分挙動についての実験を行い、副産細粒の自己収縮低減メカニズム解明に資することとし、以下の結論が得られた。

- ▶副産細粒周りのセメントペーストの化学組成および空隙構造を測定した結果、副産細粒からの水分の供給による自己収縮低減効果の可能性を確認した。
- ▶副産細粒に付着しているペーストの量、厚さ、水セメント比によって水分供給能力に差が生じるため、自己収縮の低減を効果的に図るためには、対象とする高強度コンクリートの調合に最適な副産細粒を選定する必要がある。
- ▶実験値から得られる結合水比を実験パラメータとして利用し、細粒からペースト全体の水分濃度勾配と水分到達距離が解析可能になった。

第 6 章では、モデル副産細粒を混入したモルタルの物理的特性分析と実際収縮特性を検証するために、副産細粒の水セメント比、粒度分布、副産細粒に含まれている細骨材の割合による高強度ペーストでの物性変化および収縮ひずみ評価を行なった。

- ▶各水準における 7 日までの圧縮強度は、副産細粒の水セメント比が 30% の場合、若材齢 (1 日) において副産細粒の粒子が大きいほど、若干強度発現に有利なようであるが、時間の経過と共に副産細粒の粒子が小さいほど、徐々に高い強度を見せた。また、3 日材齢後、ペースト硬化体のレベルまで強度を発現する傾向を示した。一方、60% の場合は、30% に比べて 3 日材齢までの圧縮強度はやや低い傾向を示した。

- ▶自己収縮特性からの前水準の自己収縮ひずみ測定結果を示したものである。7日の測定値に基づいて、収縮ひずみが小さい順に水準が並べてある。測定試験体の水セメント比18%の場合は、細粒が混入されていないペーストと比べてみると、7日材齢において、最大で60%以上の自己収縮抑制効果を示した。また、水和反応に不足な水分を細粒の事前吸収水が供給する重要な証拠であり、これは前章で述べたのと同じ結論に達する
- ▶Paste-18に比べて全水準で自己収縮低減効果が確認できた。
- ▶材齢4日までの粒子が小さい方(60-0-S-18)が収縮を抑える効果が大きかったが、5日後には、粒子が大きい方(60-0-L-18)が優れているため、むしろ膨張する傾向まで示した。
- ▶細粒の水セメント比が高いほど収縮抑制に効果的であり、60-0-A-18は、粒度分布にほぼ比例して収縮する傾向を示した。
- ▶特に、30-0-A-18は、2日から抑制効果を顕著に見せた。
- ▶60-50-A-18は、初期材齢での収縮抑制効果が確認でき、1日以後はプレーン値とほぼ比例して収縮するのが分かる。
- ▶試験体の水セメント比が45%の場合は、ペーストのみの試験体は1日までに急激に膨張し、その後に収縮がますます進む傾向を見せたが、60-0-A-45は混入されたペースト細粒の影響で、スムーズに膨張し、再収縮する緩やかなカーブを見せるのが分かった。