

## 論文の内容の要旨

### 論文題目 コンクリートの構成材料に基づく乾燥収縮予測方法に関する研究

氏名 中山 英明

社会的要求となっているコンクリート構造物の長寿命化を実現するためには、ひび割れの抑制が重要となる。ひび割れの要因は様々であるが、特に乾燥収縮ひび割れに対しては、乾燥収縮ひずみを制御することが重要となる。コンクリートの乾燥収縮ひずみを評価する場合、環境条件や部材寸法が異なる実構造物では難しいので、JISに拠り、コンクリートの設計用値としての乾燥収縮ひずみを測定することとなる。しかし、測定期間や費用面の課題から、レディーミクストコンクリート工場(以下生コン工場)において、自社製品の乾燥収縮ひずみを定期的に評価することは容易ではない。コンクリートの使用者が要求性能として乾燥収縮ひずみ規定しても、データを提示できるほど十分に整備されていないのが実情である。このため、乾燥収縮ひび割れ抑制対策として、コンクリートに使用する粗骨材を、コンクリートの乾燥収縮ひずみが小さいといわれる石灰石骨材に限定するケースも発生している。しかし、骨材岩種を限定することは資源の有効利用や経済性を考慮すると合理的ではない。コンクリートの生産者はできるだけ現地で入手可能な材料を用いて、適切なコストおよび品質のコンクリートを製造し、コンクリートの使用者はこれらのコンクリートを適切に使用していくことが求められる。そのためには生コン工場で、できるだけ簡易かつ迅速な方法を用いて乾燥収縮ひずみを評価し、これを品質情報としてユーザーに対して示すことが求められる。

コンクリートを構成する材料を見た場合、我が国では良質な骨材が枯渇し、新たな骨材資源の採掘が困難になっており、将来的に低品質の骨材を使用せざるを得なくなる可能性が懸念される。近年、骨材自体の収縮特性がコンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼすことが明らかになっているが、骨材の変更あるいは品質の変動に応じてコンクリートの乾燥収縮ひずみを評価するのは物理的に困難である。また、我が国のセメント産業は、静脈産業として、石炭灰を始めとした各種産業副産物・廃棄物を原燃料に積極的に使用せざるを得ず、その結果、諸外国と比べるとセメントの間隙相が高い仕様となっている。ただし、これらが収縮特性に及ぼす影響は不明な部分が多く、データが十分とは言い難い。

生コン工場において、調合毎の乾燥収縮ひずみのデータを蓄積しておくことが望ましいが、実際に対応することは不可能である。このため、コンクリートを構成する材料の物性や調合条件から乾燥収縮ひずみを予測する技術ができれば、事前にコンクリートの品質情報として提供することができる。また調合計画段階でコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定できるため、骨材のスクリーニングや調合を最適化することで乾燥収縮ひずみの小さいコンクリートを製造できる可能性がある。

コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響要因として使用材料、調合条件、設計・施工条件

および供用後の環境条件等が挙げられる。このうち、コンクリートの生産者が評価する乾燥収縮ひずみは、使用材料および調合条件から求まるポテンシャルとしての乾燥収縮ひずみである。そこで本研究では、コンクリートを構成する骨材およびセメント硬化体の物性値を取得し、これらを用いてコンクリートの乾燥収縮ひずみを高精度に予測する方法を提案することを目的とする。本論文は7章で構成され、各章の概要および得られた知見は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景、目的および論文の構成について論じた。

第2章では、コンクリートの乾燥収縮に関して既往文献を調査し、現行の予測技術の現状を取り纏めるとともに、実測データを元に、各予測方法の精度を確認した。結果、材料物性値を考慮できない予測式の精度は低く、予測精度を高めるには、材料物性値を高精度に取得する必要があることが分かった。また、JISに拠るコンクリートの乾燥収縮ひずみを考える場合、乾燥6ヶ月の含水率(または相対湿度)とその含水率(または相対湿度)に応じた粗骨材およびセメント硬化体の収縮ひずみが分かれば、さらに予測精度を高められる可能性があると考えられる。そこで、本研究で提案する予測方法は以下の考え方に基づくものとした。

- ①実構造物を想定した温度変化や乾湿繰返し条件を考慮せず、コンクリートのポテンシャルとしての乾燥収縮ひずみを予測する。
- ②コンクリートを構成する骨材およびセメントに着目し、コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす材料特性値であるヤング係数および収縮ひずみを考慮できるようにする。
- ③乾燥6ヶ月のコンクリートの含水率分布を数値解析により評価する。
- ④含水率とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係を実験に拠らず入手し、これをパラメータとして与えることで、乾燥収縮ひずみを予測できる方法を提案する。
- ⑤実用性を考慮し、これらの数値計算には汎用的なプログラムを適用する。

第3章では、コンクリートの構成材料である骨材について、コンクリートの乾燥収縮ひずみに影響を及ぼす物性値であるヤング係数と収縮ひずみの評価を試みた。粗骨材のヤング係数には、超音波パルス法にて求めた粗骨材粒子の動ヤング係数で評価する方法を提案できた。またこの方法で産地および岩種の異なる24種類の粗骨材の動ヤング係数を測定した結果、64~107GPaとなり、同一岩種でも産地により異なることが明らかとなった。細骨材のヤング係数は、細骨材体積比を変えたレジンモルタルのヤング係数をHashin-Hansenの複合式(Hansen, 1965)にて回帰する方法で算出できることを明らかにした。この方法にて求めた10種類の細骨材のヤング係数は46~89GPaとなり、粗骨材に比べ範囲は小さかった。次に、ひずみゲージにて粗骨材粒子の収縮ひずみを測定した。結果、粗骨材の収縮ひずみの平均値は $10\sim 450\times 10^{-6}$ の範囲となり産地や岩種で一律に評価できないこと、3方向のひずみを測定することで結晶方向の異方性の影響をキャンセルできるが、試料間のばらつきが大きく、骨材の代表値としてのひずみの評価は難しいことがうかがえた。また、粉末X線回折および偏光顕微鏡観察の結果、石灰石を除く粗骨材のうち、ひずみが大きい粗骨材には粘土鉱物が同定された。既往の研究(Igarashiら, 2015)を参考に、粗骨材の各種物性と収縮ひずみの関係の評価した結果、安山岩を除く粗骨材の収縮ひずみと105~600℃の強熱減量(ig. loss600)または105~1000℃の強熱減量(ig. loss1000)には比較的高い相関が

認められ、強熱減量から粗骨材の収縮ひずみを評価できる可能性が示された。一方、粗骨材の収縮ひずみと気乾含水率、吸湿率、BET 比表面積および細孔径分布には高い相関は認められなかった。

第4章では、4種類のポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いて、W/C=55～45%のセメント硬化体のヤング係数と収縮ひずみを評価した。静的試験により各種セメント硬化体のヤング係数を測定した結果、従来と同様に、ヤング係数をセメント水比の関数で評価できることが示され、セメント種類毎に定式化した。また乾燥に伴うセメント硬化体の剛性の変化を超音波パルス法にて評価した。セメント硬化体の動ヤング係数、動ポアソン比および体積弾性率は乾燥1週後で若干変化するが、それ以降はいずれも一定に推移することから、乾燥収縮予測に用いるセメント硬化体のヤング係数には乾燥開始前の測定値を用いることとした。

次に、9×40×160mmの供試体を用いてセメント硬化体の収縮ひずみを定量的に評価した。結果、セメント種類でみると、収縮ひずみは低熱ポルトランドセメント(L)が最も大きく、次いで高炉セメントB種(BB)、中庸熱ポルトランドセメント(M)の順となり、普通ポルトランドセメント(N)および早強ポルトランドセメント(H)は他のセメントに比べ小さくなることが分かった。またLは、養生期間が28日の場合で収縮ひずみが最大となり、他のセメントと異なる傾向を示した。乾燥過程の強熱減量、CH量およびBET比表面積を測定したところ、養生期間が7日の場合、乾燥過程でも水和が進行し、特に強度発現の遅いMおよびLではその傾向が顕著であった。乾燥過程の水和の進行が収縮ひずみに何らかの影響を及ぼすことが示唆されたが、本検討の範囲ではその理由について明らかにできなかった。

5章では、骨材、セメント種類、W/Cおよび養生期間の異なる各種コンクリートの乾燥に伴う水分移動を評価し、相対含水率をポテンシャルとした水分拡散係数および平衡含水率を実験的に得た。またこれらの物性値をパラメータとして、汎用的な伝熱解析ソフトを用いた数値解析により含水率分布の予測を試みた。結果、一面乾燥供試体の含水率分布から求めた水分拡散係数はW/Cが高いほど、養生期間が短いほど、強度発現の遅いセメントほど大きくなることが示されたが、硬質砂岩碎石と石灰岩碎石では大差なかった。また、コンクリートの水分拡散係数とセメント硬化体の細孔径分布から求めた閾細孔径には高い相関が認められ、空隙構造から水分拡散係数を評価できる可能性が示された。得られた水分拡散係数および平衡含水率をパラメータとし、これに境界条件として表面係数の代わりに仮想空間厚さを与える手法で水分移動解析を行った。結果、調合条件に関わらず仮想空間厚さを一定とすることで、一面乾燥および六面乾燥を受けるコンクリートの含水率分布の推移を概ね再現できることが明らかとなった。ただし、強度発現の遅いセメントの場合、養生7日では、乾燥初期の実測値との誤差が大きくなり、特にLは含水率分布の実験値を再現できなかった。乾燥過程で水和の進行を受ける場合、水分拡散係数も変化するため、乾燥期間に関わらず一定の拡散係数を用いる本手法において、Lを用いたコンクリートへの適用は困難と考えられた。

6章では、乾燥収縮ひずみの予測方法を提案することを目的として、解析に必要なパラメータである相対含水率と収縮ひずみの関係(収縮係数)を入手する方法を検討し、得られたパラメータを用いて収縮ひずみの解析を行った。また、収縮係数に影響を及ぼす材料物

性値の感度解析を行った。さらに、本研究で得た材料物性値を適用した既存の予測式と本方法の予測精度を比較検証した。まず、3章および4章で求めた骨材およびセメント硬化体の収縮ひずみを相対湿度の関数で評価し、これと各材料のヤング係数を用いて、複合式に適用することで相対湿度と収縮ひずみの関係を得た。ただし複合式で算出した相対湿度60%における乾燥収縮ひずみ( $\epsilon_{60}$ )は、JISによる実測値を回帰して求めた乾燥収縮ひずみの最終値( $\epsilon_{\infty}$ )よりも大きくなった。この理由として、セメント硬化体の収縮ひずみを過大に評価した可能性があること、クリープおよび遷移帯の影響が含まれているためと考えられた。そこで、 $\epsilon_{\infty}$ と $\epsilon_{60}$ の比( $\epsilon_{\infty}/\epsilon_{60}$ )を補正係数とし、これを $\epsilon_{60}$ に乗じて低減させることにより、上記の要因を考慮させることとした。さらに、相対湿度と相対含水率の関係から、相対湿度と収縮ひずみの関係を相対含水率と収縮ひずみの関係に変換して収縮係数を得た。得られた収縮係数を用いて、W/C=55%のコンクリートを対象に、乾燥収縮ひずみの解析を行った。結果、養生7日の場合、Hおよび石灰石骨材を用いたケースで実測値との差は若干大きくなったが、他のセメントでは乾燥6ヶ月のひずみを概ね再現できることが示された。

次に粗骨材種類のみ異なる23調合で、粗骨材の収縮ひずみのばらつきの影響を評価した。結果、収縮ひずみに最小値を用いた場合は10%程度過小評価するが、平均値および最大値では実測値に対していずれも $\pm 5\%$ 以内となった。ただし、粘土鉱物を含む一部の粗骨材を用いた場合、収縮ひずみの最大値を用いても予測値が著しく過小に評価された。収縮ひずみの大きい粘土鉱物を含む粗骨材では試料数をさらに増やして収縮ひずみの代表性を高める必要が考えられる。その他の骨材では粗骨材の収縮ひずみの平均値を用いて問題ないと判断された。また、細骨材の収縮ひずみが予測値に及ぼす影響は粗骨材ほど大きくはないが、無視できないことが明らかとなった。このため、母岩または同碎石の収縮ひずみを代用できる砕砂を除く天然骨材の場合、何らかの物性値等から収縮ひずみを推定することが必要と考えられた。一方、骨材のヤング係数が乾燥収縮ひずみの予測値に及ぼす影響は低く、実測に拠らない場合は、骨材のヤング係数には本研究の範囲で得られた実験値に基づき、粗骨材は75GPaを、細骨材は65GPaを適用することとした。

最後に、W/C=55%で使用材料の異なる33調合のコンクリートにおいて、本予測方法と3章および4章で求めたセメントおよび骨材の物性値を入力した場合の2012年土木学会式および複合予測式の予測精度を比較した。結果、本予測方法は、複合予測式に比べて相対誤差およびばらつきは小さくなることが、また2012年土木学会式に比べて相対誤差は大きくなるが、ばらつきは小さくなり、予測精度が高まることが示された。

7章では本研究の成果を取り纏めるとともに、本予測技術を実用化するための具体的な方策についてその考え方を示した。