

論文 相対湿度および乾燥開始材齢がコンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす影響

大野 拓也*1・三谷 裕二*2・丸山 一平*3

要旨: 本研究では普通セメント, 中庸熟セメント, 高炉セメント B 種を用いたコンクリートを対象に, 異なる相対湿度下における乾燥収縮ひずみを直径 100mm, 厚さ 10mm に切り出した円盤状の供試体を用いて実験的に把握し, 乾燥収縮特性に及ぼす乾燥開始材齢および相対湿度の影響を評価した。その結果, 乾燥収縮ひずみは相対湿度が低いほど大きく, 相対湿度の低い領域では, 乾燥開始材齢によって各種セメントの大小関係が異なった。また, 乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係は, 概ね一義的な回帰曲線で評価できる可能性があり, 本実験結果に基づく回帰式は, 乾燥開始材齢が遅くなるほど 100×100×400mm 供試体を用いた場合の曲線に近くなる傾向を示した。

キーワード: 乾燥収縮, 相対湿度, 乾燥開始材齢, 質量減少率, セメント種類

1. はじめに

コンクリート構造物の高耐久化の観点から, 収縮ひび割れ制御の要求が高まっており, 土木学会¹⁾や建築学会²⁾の規準, 指針では, コンクリートの乾燥収縮量に規定値が設けられている。

一方, より合理的な収縮ひび割れ制御を行うために, 相対湿度とコンクリートの乾燥収縮特性の関係を明確に把握し, ひび割れを精度良く予測する検討が進められている。近年では, コンクリート部材の収縮が既設の部材や内部鉄筋などに拘束されることで生じる外部拘束応力だけでなく, 乾燥に伴うコンクリート部材内の湿度移動および相対湿度分布を考慮し, 表層部と内部の乾燥収縮ひずみ差によって生じる内部拘束応力を含めた形で, 部材の応力分布を解析的に評価する方法が提案されている^{3), 4)}。この種の解析精度を高めるためには, コンクリートが任意の相対湿度になった時点における水和の進行程度, すなわち, コンクリート内部の空隙構造や水分状態などを考慮した形で, 各相対湿度下での乾燥収縮特性を明らかにすることが重要である。しかしながら, 乾燥収縮に関する既往の実験データのほとんどが乾燥開始材齢 7 日, 相対湿度 60% の条件下におけるものであり, 異なる乾燥開始材齢, 相対湿度下での事例は少ないのが現状である。

本研究では, 普通セメント, 中庸熟セメント, 高炉セメント B 種を用いたコンクリートについて, 異なる相対湿度下における乾燥収縮ひずみを直径 100mm, 厚さ 10mm に切り出した円盤状の供試体を用いて実験的に把握し, 乾燥収縮特性に及ぼす相対湿度および乾燥開始材齢の影響を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配(調)合

表-1に使用材料を示す。セメントには, 普通ポルトランドセメント, 中庸熟ポルトランドセメント, 高炉セメントB種を用いた。表-2にコンクリートの配(調)合を示す。水セメント比は50%, 細骨材率は45%, AE減水剤の使用量は一定(単位セメント量×0.25%)とし, コンクリートのスランプおよび空気量がそれぞれ15±2.5cm, 4.5±1.5%の範囲内になるように単位水量および空気量調整剤の添加量を変化させた。

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	NC	普通ポルトランドセメント/ 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3220cm ² /g
	MC	中庸熟ポルトランドセメント/ 密度:3.21g/cm ³ , 比表面積:3230cm ² /g
	BB	高炉セメント B 種/ 密度:3.04g/cm ³ , 比表面積:3770cm ² /g
細骨材	S	静岡県掛川市産山砂/ 表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.85%
粗骨材	G	茨城県桜川市産碎石(碎石 2005)/ 表乾密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:0.58%
混和剤	AD	AE 減水剤/リグニンスルホン酸系
	AE	空気量調整剤

表-2 コンクリートの配(調)合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	NC	MC	BB	S	G
N	50	45.0	169	338	-	-	788	984
M			168	-	336	-	792	989
BB			166	-	-	332	789	985

1) *1 太平洋セメント(株)中央研究所 工修 (正会員)
 2) *2 TAIHEIYO SINGAPORE PTE.LTD. 工修 (正会員)
 3) *3 名古屋大学 大学院環境学研究科 教授・博士(工学)(正会員)

2.2 作製供試体および測定方法

図-1に、乾燥収縮の測定方法を示す。本試験では、短期間で乾燥収縮がほぼ一定となるように直径100mm、厚さ10mmの円盤状のコンクリート供試体を用いた。コンクリートの練混ぜは、20℃・R.H.80%の室内で行い、φ100×200mmの円柱供試体を作製後、20℃・封緘養生した。所定の材齢で脱型後、湿式のダイヤモンドカッターを用い、厚さ10±0.5mmの精度で円柱供試体の中央部付近より3枚切り出した。円盤供試体を切り出した後、直ちに供試体表面の水を拭き取り、20℃・R.H.60%の室内にて質量を測定した。長さの測定には図-1のように設置された4つのレーザー変位計(精度:0.001mm)を用い、最初の測定時に、円盤供試体をピンに押し当てた状態でレーザーの照射位置に印を付け、測定点を定めた。

り、材齢91日ではBBが若干高い結果であった。

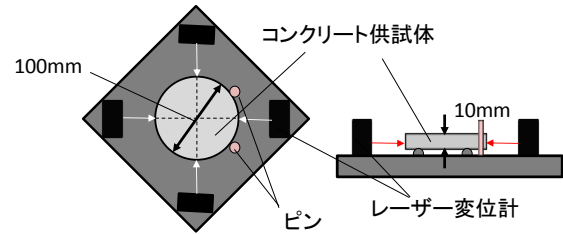


図-1 乾燥収縮の測定方法

表-3 乾燥開始材齢および乾燥条件

乾燥開始材齢(日)	7, 28, 91
乾燥条件(R.H.%)	12, 33, 59, 85

表-4 飽和塩水溶液の試薬

相対湿度(R.H.%)	12	33	59	85
試薬の種類	LiCl	MgCl ₂	NaBr	KCl

表-3に乾燥開始材齢(脱型材齢)および乾燥条件を示す。乾燥開始材齢は7, 28, 91日の3水準とした。乾燥条件は表-4に示す飽和塩水溶液を用いて相対湿度12, 33, 59, 85%(以下, R.H.12, 33, 59, 85%)の4水準とし、各相対湿度に調湿した20℃のデシケータ内で円盤供試体を保管した。デシケータ側面の数箇所に給排気用のホースを設置し、吸气用と排気用のホース接合部に小型のファンを設置することにより、デシケータ内の空気をゆっくりと循環させた。静電容量型の温湿度センサ(精度:±1.5%)を用いて測定した結果、保管位置によらず温度および湿度がほぼ均一かつ一定であることを確認した。供試体は所定の材齢で取り出し、質量および長さを測定後、直ちに同湿度下のデシケータに戻し、乾燥期間182日まで測定した。円盤供試体の長さには直交する2本の直径方向の長さの平均値を用い、乾燥開始後の長さ変化率を乾燥収縮ひずみとした。なお、円盤供試体の長さ変化率は、直径100mm、厚さ10mmのインバー鋼(熱膨張係数:0.5×10⁻⁶/℃)との長さの差より算出した。

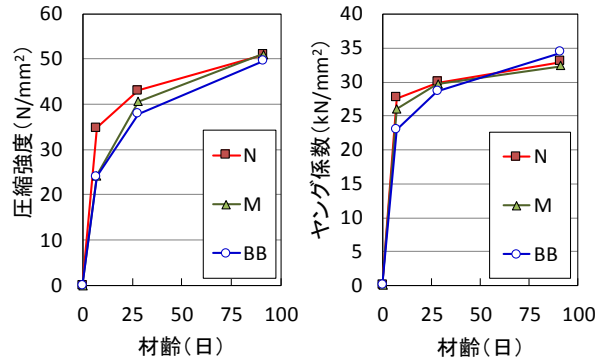


図-2 強度特性

また、φ100×200mmの円柱供試体を用いて、材齢7, 28, 91日における圧縮強度(JIS A 1108)およびヤング係数(JIS A 1108)を測定した。供試体は20℃・封緘養生とし、本数は各材齢で3本とした。

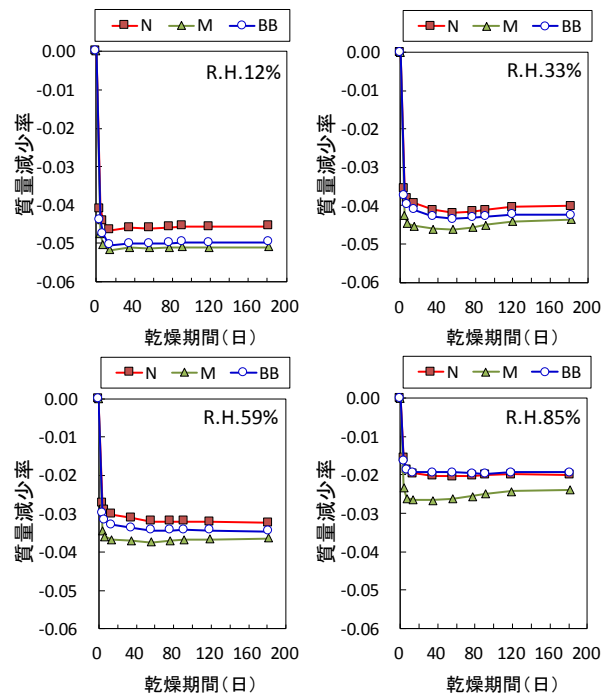


図-3 質量減少率(乾燥開始材齢7日)

3. 実験結果

3.1 強度特性

図-2に20℃封緘養生下における圧縮強度およびヤング係数を示す。材齢28日までの圧縮強度はNが最も高く、材齢7日ではMおよびBBより40%程度、材齢28日ではBBより15%程度、Mより10%程度高かったものの、材齢91日の圧縮強度はすべて同程度であった。一方、ヤング係数は材齢28日ですべて同等とな

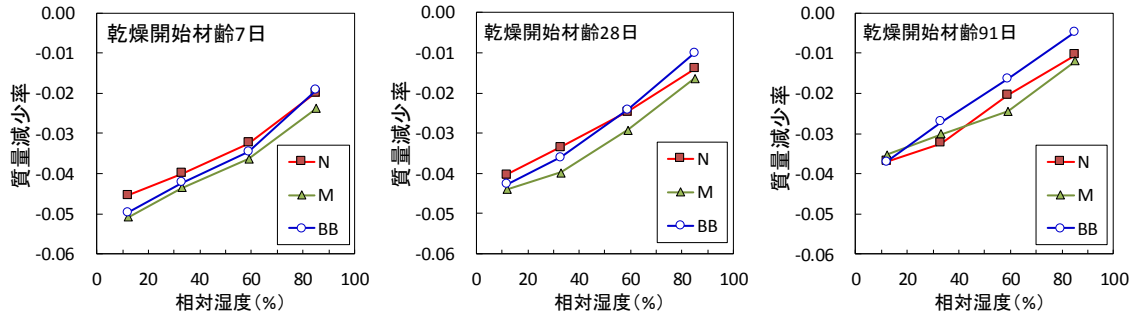


図-4 質量減少率と相対湿度の関係(乾燥期間 182 日)

3.2 質量減少率

図-3 に乾燥開始材齢 7 日の各相対湿度下における質量減少率と乾燥期間の関係を示す。ここでの質量減少率は、各乾燥期間での質量と乾燥開始前の質量との差を乾燥開始前の質量で除すことで算出した。なお、各相対湿度下における質量減少率は供試体 3 枚の平均値を用いた。

乾燥開始材齢 7 日の質量減少率は、相対湿度によらず概ね乾燥 14 日~21 日で平衡に達していたが、M は R.H.33, 59, 85%の環境下において、乾燥期間 56 日から 120 日にかけてわずか(最大で 0.2%程度)に増加する傾向を示した。この要因は明確ではないが、乾燥中の水和の進行⁵⁾や中性化⁶⁾などによるものと考えられる。また、乾燥開始材齢 28, 91 日における質量減少率が平衡に達する期間は、乾燥開始材齢が遅いほど長くなり、乾燥開始材齢 28, 91 日でそれぞれ乾燥 28 日, 56 日程度であった。

図-4 に乾燥期間 182 日における質量減少率と相対湿度の関係を示す。いずれのセメントにおいてもほぼ直線的な関係を示し、質量減少率は相対湿度が低いほど大きい結果であった。セメント間で比較すると、乾燥開始材齢によらず、M の質量減少率は N, BB より総じて大きい傾向であった。これは、M の水和の進行速度が N と比較して遅く、細孔中に自由水が多く存在していたためと推察される。乾燥開始材齢で比較すると、いずれのセメントにおいても乾燥開始が遅いほど質量

減少率が小さくなった。これは封緘養生中に水和が進行し、内部の細孔中の自由水が少なくなったこと、および細孔構造の緻密化によって細孔中の水が移動および蒸発しにくくなったためと推察される⁷⁾。

3.3 乾燥収縮ひずみ

図-5 に乾燥開始材齢 7 日の乾燥収縮ひずみと乾燥期間の関係を示す。各相対湿度下における乾燥収縮ひずみは、質量減少率と同様に供試体 3 枚の平均値を用いており、その範囲は最大で±10%程度であった。これ

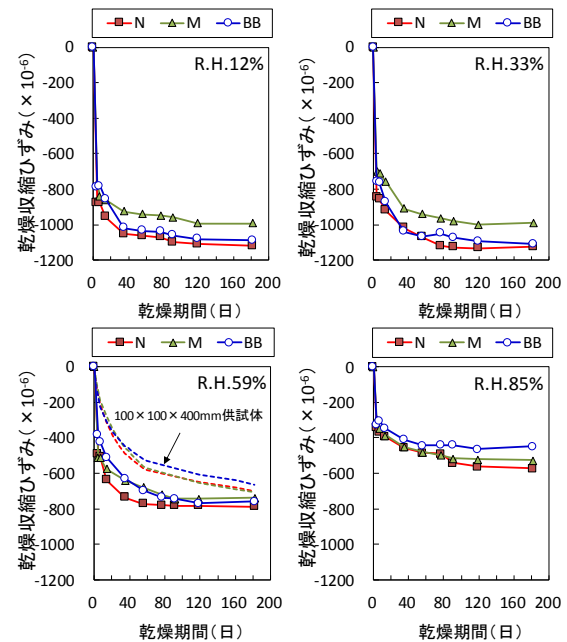


図-5 乾燥収縮ひずみ(乾燥開始材齢 7 日)

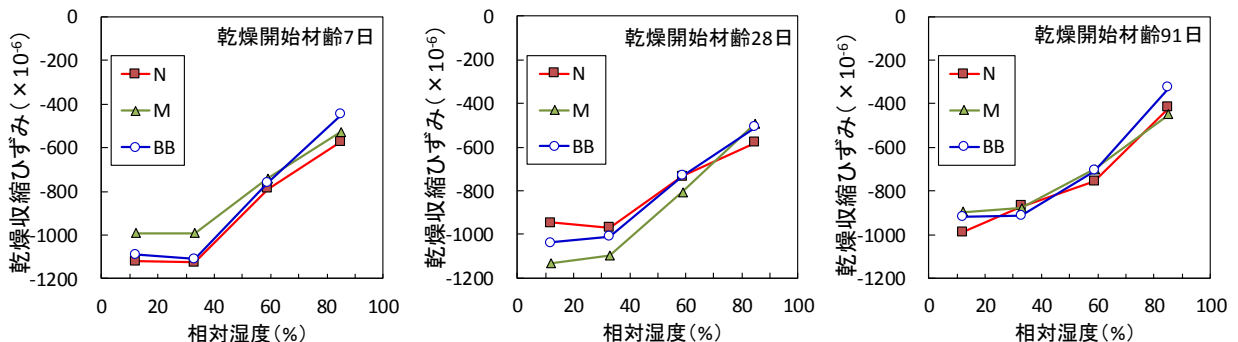


図-6 乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係(乾燥期間 182 日)

は、各々の円盤供試体に含まれる粗骨材の比率が異なることが要因と考えられる。乾燥収縮ひずみは、相対湿度によらず概ね乾燥期間 56 日から 91 日程度でほぼ一定値となり、乾燥開始材齢 28, 91 日においても同様の期間で収束する挙動であった。R.H.59%には、本検討と同一配(調)合の R.H.60%環境下における乾燥収縮ひずみ(寸法：100×100×400mm, JIS A 1129 準拠)の結果を併記しているが、厚さ 10mm の円盤供試体は 100×100×400mm 供試体に比べ、短期間で乾燥収縮ひずみの終局値を評価できることがわかる。なお、乾燥期間 182 日における 100×100×400mm 供試体の乾燥収縮ひずみは、円盤供試体の乾燥収縮ひずみの終局値に対して N, M, BB でそれぞれ 0.89, 0.95, 0.87 となり、円盤供試体の乾燥収縮ひずみの 0.9 倍程度に相当していた。

図-6 に乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係を示す。乾燥収縮ひずみは、質量減少率と同様にいずれのセメントにおいても相対湿度が低いほど大きくなる傾向であったが、乾燥開始材齢によらず総じて R.H.12%と R.H.33%では大差なかった。過去の知見によると、セメントペーストは R.H.20%以下においてゲル空隙および層間中の水の移動によって乾燥収縮が増加すると報告されており⁸⁾、コンクリートを用いた本結果とは異なる傾向であった。これについては、脱型直後の急速な乾燥によってコンクリート表面

および骨材周辺等に微細ひび割れが発生し、収縮ひずみが緩和された可能性⁷⁾などが考えられるため、今後より詳細に検討していきたい。

R.H.59%環境下における乾燥収縮ひずみをセメント種類で比較すると、乾燥開始材齢 7 日では N, M, BB でそれぞれ -789×10^{-6} 、 -745×10^{-6} 、 -760×10^{-6} となり、明確な差は認められなかった。これは過去に報告されている R.H.60%環境下における乾燥収縮ひずみ(寸法：100×100×400mm, JIS A 1129 準拠)と同様の傾向⁶⁾であった。一方、R.H.12, 33%環境下で比較すると、乾燥開始材齢 7 日では N, BB が M より 10%程度大きくなったのに対し、乾燥開始材齢 28 日では M が N, BB より 10~15%大きく、乾燥開始材齢 91 日ではほぼ同程度となり、乾燥開始材齢によって各種セメントの大小関係は異なった。これらについては、各乾燥開始時の水和の進行度や乾燥収縮に及ぼす細孔構造などが関係していると考えられる。ここで N, M, BB における各材齢の圧縮強度の大小関係を見ると、材齢 7 日で $N > M \approx BB$ 、材齢 28 日で $N > M > BB$ となっており、乾燥収縮ひずみの大小関係と明確に対応していない傾向であった。一方、圧縮強度がほぼ同等となった材齢 91 日では、乾燥収縮ひずみもセメント種類によらず同程度となっており、乾燥開始時の強度レベルを同一として各種セメントの乾燥収縮ひずみを比較した既往の結果に対応していた⁶⁾。

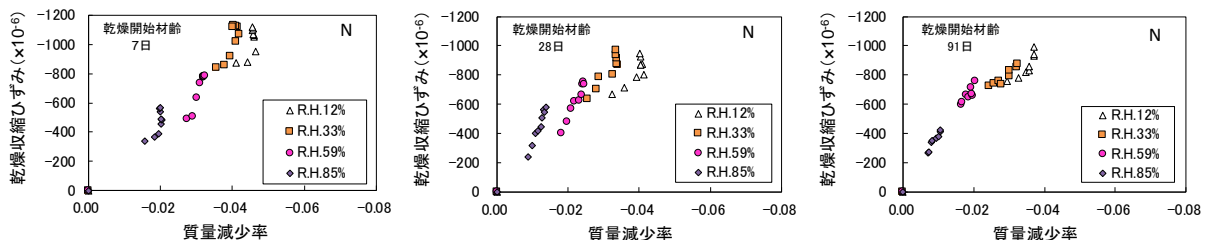


図-7 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係(普通セメント)

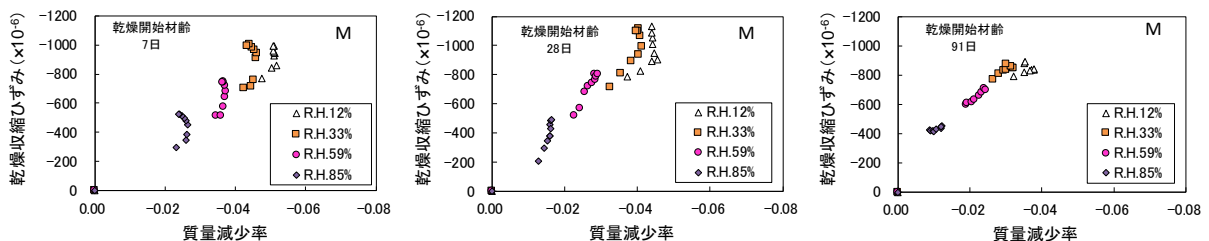


図-8 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係(中庸熱セメント)

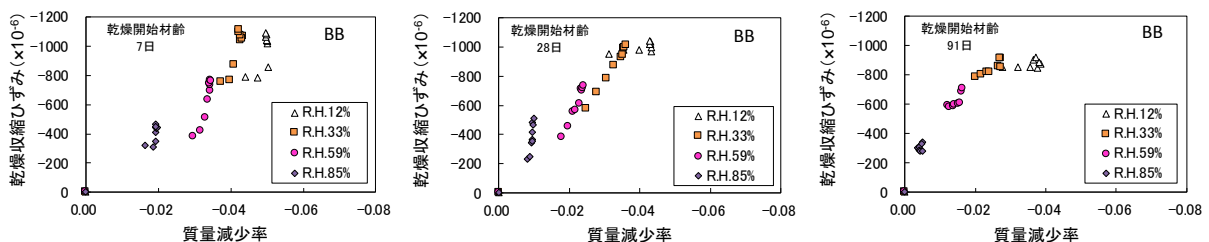


図-9 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係(高炉セメントB種)

乾燥開始材齢で比較すると、N の場合、R.H.59%環境下では、乾燥開始材齢 7, 28, 91 日でそれぞれ -789×10^{-6} 、 -733×10^{-6} 、 -757×10^{-6} となり、大きな差は認められなかった。100×100×400mm のコンクリート供試体を用いて乾燥開始材齢を 1~28 日まで変化させた既往の検討⁹⁾では、長期材齢における収縮ひずみに大きな差異は認められないことが確認されており、本検討と同様の傾向であった。一方 R.H.12, 33%環境下では、いずれのセメントにおいても乾燥開始材齢によって乾燥収縮ひずみが異なった。N および BB の乾燥収縮ひずみは、乾燥開始材齢 7 日が 28, 91 日より総じて 10%程度大きくなったのに対し、M は乾燥開始材齢 28 日が 7, 91 日より総じて大きく、セメント種類によって乾燥収縮ひずみが最大となる乾燥開始材齢が異なった。普通セメントおよび低熱セメントのペースト硬化体(厚さ 3mm)を用いて乾燥収縮ひずみを比較した既往の研究¹⁰⁾では、乾燥開始材齢 3~91 日、R.H.11~79%の範囲において、普通セメントおよび低熱セメントの両者とも相対湿度によらず、水和が進行するほど(乾燥開始材齢が遅いほど)乾燥収縮ひずみは大きくなり、収縮に影響を及ぼすとされる非晶質相(C-S-H)の量、拘束体として作用する未水和セメントおよび水酸化カルシウムの量が収縮と密接に関わっていると報告している。乾燥開始材齢が異なる場合の相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係については、乾燥収縮に大きい影響を及ぼす水和生成物の形態・量や細孔構造などの観点から、詳細な分析が必要である。

3.4 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

図-7~図-9 に N, M, BB の乾燥開始材齢 7, 28, 91 日における質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。いずれのセメント・乾燥開始材齢においても質量減少に伴って乾燥収縮ひずみが大きくなり、相対湿度の違いによらず概ね同一曲線状にプロットされる傾向が認められた。また、その傾向は乾燥開始材齢が遅い 91 日の場合で顕著であった。乾燥開始材齢 7, 28 日の高湿度領域において、ばらつきがやや大きかったのは、乾燥中の水和の進行、すなわち、乾燥中に水和生成物の形態・量や細孔構造が変化したことが要因と考えられる。

乾燥開始材齢で比較すると、N, M, BB いずれのセメントにおいても乾燥開始材齢が遅くなるほどばらつきが小さくなり、より明瞭な曲線となった。過去にセメントペースト硬化体を用いて相対湿度を変化させた研究¹¹⁾では、質量減少と乾燥収縮ひずみの関係は、模式的に図-10 のような 3 つの領域に分けられることが報告されている。ここで I は、蒸発可能な自由水の影響が大きく、自由水が失われたあとは小さな細孔の自

由水の移動により勾配が大きくなる領域、II は毛細管の凝縮水がなくなり、毛細管壁の吸着水のみが失われることで勾配が小さくなる領域、III はゲル粒子間の引力により、再び勾配が大きくなる領域とされている。コンクリートを用いた本試験結果(図-7~図-9)においても、III の領域が明確に認められない水準がいくつ

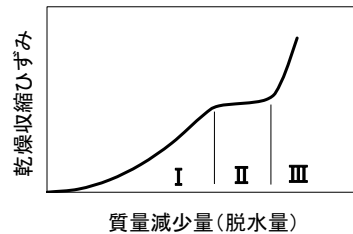


図-10 質量減少量と乾燥収縮ひずみの模式図¹¹⁾

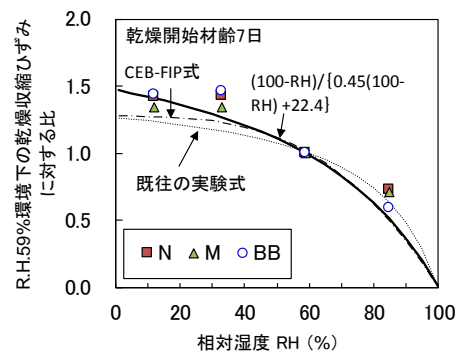


図-11 R. H. 59%環境下の乾燥収縮ひずみに対する比 (乾燥開始材齢 7 日)

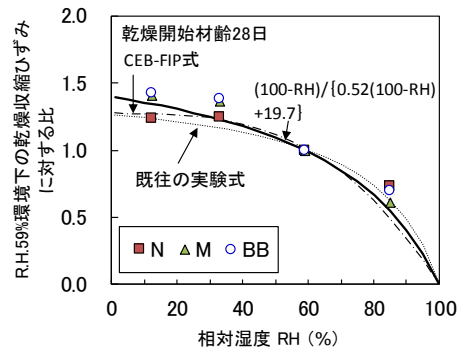


図-12 R. H. 59%環境下の乾燥収縮ひずみに対する比 (乾燥開始材齢 28 日)

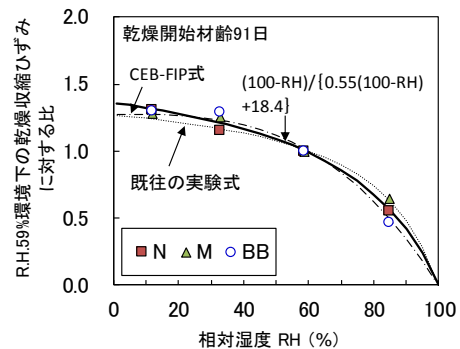


図-13 R. H. 59%環境下の乾燥収縮ひずみに対する比 (乾燥開始材齢 91 日)

かあるものの、質量減少と乾燥収縮の挙動が概ね同様の領域に分けられる可能性が認められた。

3.5 R.H.59%に対する乾燥収縮ひずみの比

図-11～図-13に乾燥開始材齢7, 28, 91日における乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係について、R.H.59%環境下の乾燥収縮ひずみに対する比(R.H.59%のときに1.0)を示す。乾燥収縮ひずみの比と相対湿度の関係は、乾燥開始材齢、セメント種類によらず上に凸の傾向が認められ、概ね一義的な曲線で評価できる可能性がある。図中にはN, M, BBの実験結果に基づく回帰式、著者らの過去の実験結果(寸法: 100×100×400mm, 乾燥開始材齢7日)に基づく回帰式¹²⁾、CEB-FIP¹³⁾が提示している収縮予測式における相対湿度の影響を及ぼす項に基づく回帰式を併記している。低湿度領域において、各回帰式を比較すると、本実験結果に基づく回帰式は、乾燥開始材齢を7, 28, 91日と遅くするほどCEB-FIPおよび既往の実験式に近づく傾向を示した。これについては、既往の実験で用いている100×100×400mmのコンクリート供試体において、乾燥期間182日以降も収縮が継続していること(図-4, R.H.59%)からわかるとおり、供試体の中心部が所定の相対湿度になるまでには長期間を要している。したがって、乾燥開始材齢が7日であっても内部はゆっくりと乾燥し、その間は湿度を保持しながら水合が進行しているため、小型の円盤供試体を用いた本研究の乾燥開始材齢91日の結果と近くなった可能性が高いと考えられる。

4. まとめ

本研究では、直径100mm、厚さ10mmのコンクリート供試体を用いた試験方法により、乾燥開始材齢7日、28日、91日における種々の相対湿度下における収縮ひずみを測定し、乾燥収縮に及ぼす相対湿度の影響を比較・評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 質量減少率は、相対湿度が低いほど、乾燥開始材齢が早いほど明確に高かった。セメント種類で比較すると、中庸熱セメントが普通セメントおよび高炉セメントB種より総じて大きかった。
- (2) 乾燥収縮ひずみは、相対湿度が低いほど大きくなったが、相対湿度12%と33%では大差なかった。また相対湿度の低い領域では、乾燥開始材齢によって普通セメント、中庸熱セメントおよび高炉セメントB種の大小関係は異なった。
- (3) コンクリートの質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係は、相対湿度の違いによらず概ね同一曲線状にプロットされ、乾燥開始材齢が遅いほどそのばらつきは小さかった。
- (4) コンクリートの乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

は、概ね一義的な曲線で評価できる可能性がある。また、本実験結果に基づく回帰式は、乾燥開始材齢が遅くなるほど100×100×400mm供試体を用いた場合の曲線に近くなる傾向を示した。

参考文献

- 1) 土木学会:2007年制定コンクリート標準示方書[施工編], pp.201-204, 2008.3
- 2) 建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009, pp.9-14, 2009.2
- 3) 竈橋忍, 伊藤佑樹, 堀部謙, 森本博昭:コンクリートの乾燥収縮によるひずみと応力の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.441-446, 2002
- 4) 日本コンクリート工学会:コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査委員会報告書, pp.127-132, 2012.8
- 5) 永松静也, 佐藤嘉昭, 大常好範:セメント硬化体の乾燥の程度と乾燥収縮ひずみの関係—乾燥条件の影響, 日本建築学会構造系論文報告集, No.439, pp.13-21, 1992
- 6) セメント協会:各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究, コンクリート専門委員会報告 F55, pp.21-43, 2011.3
- 7) 後藤誠史, 小西正芳, 浅賀喜与志, 大門正機:セメント硬化体の乾燥収縮, セメント・コンクリート, No.508, pp.18-25, 1989
- 8) 日本コンクリート工学会:コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム委員会報告書, pp.16-23, 2001
- 9) 宮澤伸吾, 黒井登起雄, 北田悦子:高強度コンクリートの収縮性状に及ぼす乾燥の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.679-684, 1999
- 10) Tatsuya HAJI, Shu KOTERA, Ryo KURIHARA, Ippei MARUYAMA: Impact of Demolding Age and Mineral Composition of Cement on Drying Shrinkage of Cement Paste, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.45-50, 2016
- 11) Hansen, W: Drying Shrinkage Mechanism in Portland Cement Paste, J. Am. Ceram. Soc., Vol.70, No.5, pp.323-328, 1987
- 12) 三谷裕二, 石井祐輔, 谷村充:コンクリートの乾燥収縮に及ぼす相対湿度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.547-552, 2013
- 13) CEB-FIP: Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton, pp.57-58, 1990