

◇論文◇

コンクリートの収縮特性に及ぼす
相対湿度および乾燥開始材齢の影響評価Influence of Relative Humidity and Curing Period on
Drying Shrinkage Property of Concrete大野拓也*, 三谷裕二**,
丸山一平***OHNO, Takuya*; MITANI, Yuji**;
MARUYAMA, Ippei***

要 旨

本検討では、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、相対湿度が12, 33, 59, 85%環境下における乾燥収縮特性を直径100mm、高さ200mmの円柱供試体から厚さ10mmに切り出した円盤状のコンクリート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、セメント種類や乾燥開始材齢にかかわらず、乾燥収縮ひずみは相対湿度が低いほど大きくなること、相対湿度の低い領域において、セメント種類による乾燥収縮ひずみの差が顕著になること、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ること、などが明らかとなった。また、乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係は、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, セメント種類, 質量減少率

*中央研究所 企画管理部 コンクリートソリューションチーム

Concrete Solution Team, Planning & Administration Department, Central Research Laboratory

**太平洋シンガポール Taiheiyō Singapore Pte. Ltd.

***名古屋大学大学院 環境学研究科 教授 Prof., Dr.Eng. Graduate School of Environment Studies, Nagoya University

ABSTRACT

In order to improve the prediction accuracy of shrinkage cracking of concrete, it is needed to understand drying shrinkage properties under different relative humidity, in consideration of void structure and internal moisture conditions which affect hydration reactions. In this study, 100 mm diameter by 200 mm high cylinders of concrete were prepared using ordinary Portland cement, moderate heat Portland cement or blast furnace slag cement type B, and 10 mm thick disk-shaped specimens were cut out of them for experimental measurement of drying shrinkage properties under different relative humidity of 12, 33, 59 and 85% and for different curing periods. The results showed that the lower the relative humidity, the larger the drying shrinkage strain was irrespective of the cement type or the curing period, that the difference between the cement types in drying shrinkage strain was more significant in lower relative humidity ranges, and that the relationship between maximum drying shrinkage strain and curing period varied depending on the cement type. It was also found that the relationship between drying shrinkage strain and relative humidity could be evaluated with a unique regression curve. The regression equation based on the present experimental results showed a tendency to be closer to the curve for a 100 × 100 × 400 mm specimen when the curing period was longer.

Keywords : *Drying shrinkage, Relative humidity, Curing period, Types of cement, Mass decrease rate*

1. はじめに

コンクリート構造物の高耐久化志向の高まりやセメント、混和材、骨材などコンクリート材料および配(調)合の多様化の観点から、収縮ひび割れ制御への要求が益々高まっている。近年では数値解析技術の進歩と相まって、コンクリートの乾燥収縮が既設の部材や地盤、内部鉄筋などに拘束されて生じる外部拘束応力だけではなく、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¹⁾²⁾。

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。コンクリートの乾燥収縮特性に関しては、これまでに膨大な実験データが蓄積されているものの、そのほとんどが相対湿度60%、乾燥開始材齢7日の条件下におけるものであり、異なる相対湿度や乾燥開始材齢での検討事例は少ないのが実状である。

そこで本研究では、直径100mm、厚さ10mmの小型供試体を用いて、種々の相対湿度下におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみを把握し、相対湿度および乾燥開始材齢が乾燥収縮特性を及ぼす影響を評価した。

2. 試験概要

2.1 使用材料および配(調)合

Table 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、中庸熱ポルトランドセメント、高炉セメントB種を用いた。Table 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減水剤の使用量は単位セメント量×0.25%(一定)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。

2.2 乾燥収縮ひずみの測定方法

本研究では、短期間で乾燥収縮ひずみ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(Fig. 1)。コンクリートの練混ぜは、20℃ R. H. 80%の室内で行い、

Table 1 Materials (使用材料)

Materials	Symbol	Type / Characteristics
Cement	NC	Ordinary Portland cement / density: 3.16 g/cm ³ , SSA*: 3220 cm ² /g
	MC	Moderate heat Portland cement / density: 3.21 g/cm ³ , SSA*: 3230 cm ² /g
	BB	Blast furnace slag cement class B/ density: 3.04 g/cm ³ , SSA*: 3770 cm ² /g
Fine aggregate	S	Pit sand / density**: 2.58 g/cm ³ , absorption: 1.85 %
Coarse aggregate	G	Crushed sand stone (maximum size:20mm) / density**: 2.64g/cm ³ , absorption: 0.58%
Chemical admixture	AD	Air entraining and water reducing agent / Lignin sulfonic acid based
	AE	Air entraining agent

* Specific surface area measured by Braine's Method

** Saturated surface-dry condition

Table 2 Mix proportion of concrete (コンクリートの配(調)合)

Symbol	W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)					AD (C×%)	
			W	C			S		G
				NC	MC	BB			
N	50	45.0	169	338	-	-	788	984	0.25
M			168	-	336	-	792	989	
BB			166	-	-	332	789	985	

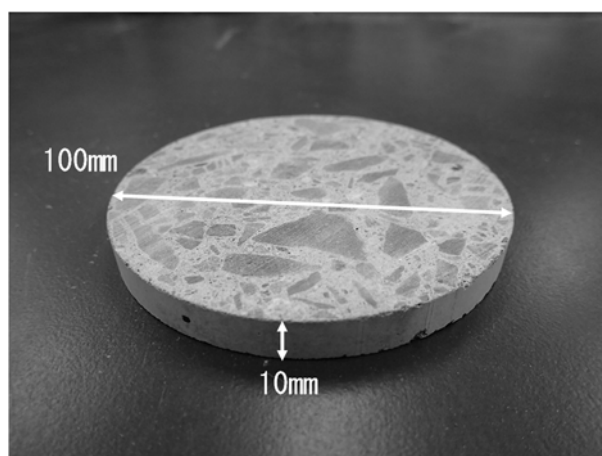


Fig. 1 Disk specimen of concrete (コンクリートの円盤供試体)

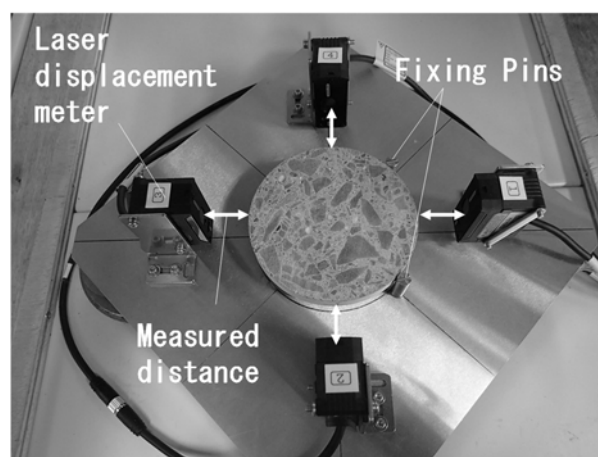


Fig. 2 Measuring method of drying shrinkage strain (乾燥収縮ひずみの測定方法)

φ100×200mmの円柱供試体を作製後、20℃封緘養生した。材齢7, 28, 91日まで封緘養生した後に、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。切り出した円盤供試体は、直ちに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Fig. 2に示すレーザー変位計(精度:

0.001mm)を用い、最初の測定時に、円盤供試体を固定ピンに押しあ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。円盤供試体の質量、長さを測定した後、相対湿度12, 33, 59, 85%(以下, R.H. 12, 33, 59, 85%)に調湿した20℃のデシケータ内に3枚ずつ保管した。R.H. 12, 33, 59, 85%の調整にはそれぞれLiCl, MgCl₂, NaBr, KClの飽和塩水

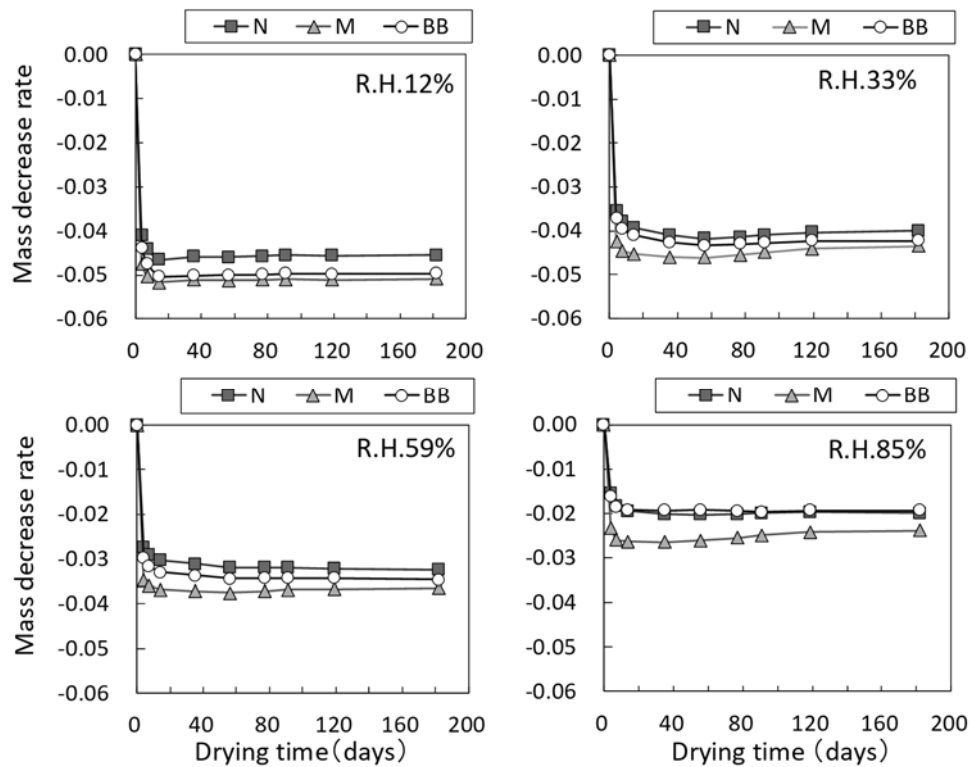


Fig. 3 Mass decrease rate (Seal curing period is 7days)
(乾燥開始材齢 7 日の質量減少率)

溶液を用いた。デシケータ側面に、吸気用と排気用のホースを設置し、両ホースの接合部に設置した小型ファンにより、デシケータ内の空気をゆっくりと循環させた。デシケータ内の相対湿度は、静電容量型の温湿度センサ(精度: $\pm 1.5\%$)を用いて計測しながら、所定の値を保持するように管理した。供試体は所定の材齢で取り出し、直ちに質量および長さを測定後、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 のインバー鋼製標準尺(熱膨張係数: $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)との長さの差より算出した。

3. 試験結果

3.1 質量減少率

Fig. 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。なお、質量減少率は、各乾燥期間の質量と乾燥開始時の質量と

の差を乾燥開始時の質量で除した値であり、Fig. 3 は 3 枚の円盤供試体の平均値を用いた。

乾燥開始材齢 7 日の質量減少率は、相対湿度によらずおおむね乾燥 14~21 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 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³⁾や中性化⁴⁾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, 56 日程度であった。

Fig. 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。セメント種類で比較すると、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

乾燥開始材齢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、細孔中の自由水が減少したこと、および細孔構造の緻密化によって細孔中の水が移動・逸散しにくくなったためと推察される³⁾。

3.2 乾燥収縮ひずみ

Fig. 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

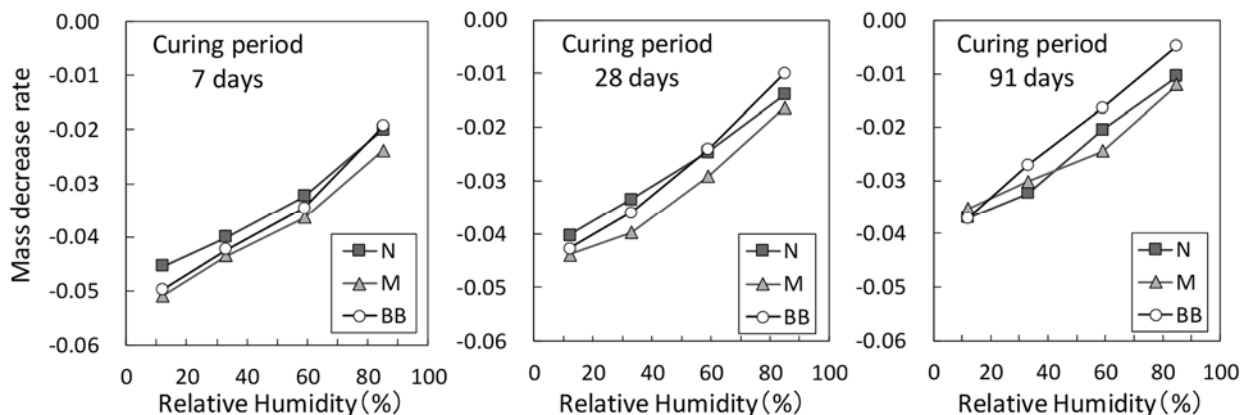


Fig. 4 Relationship between mass decrease rate and relative humidity as of 182 days (乾燥期間182日時点の質量減少率と相対湿度の関係)

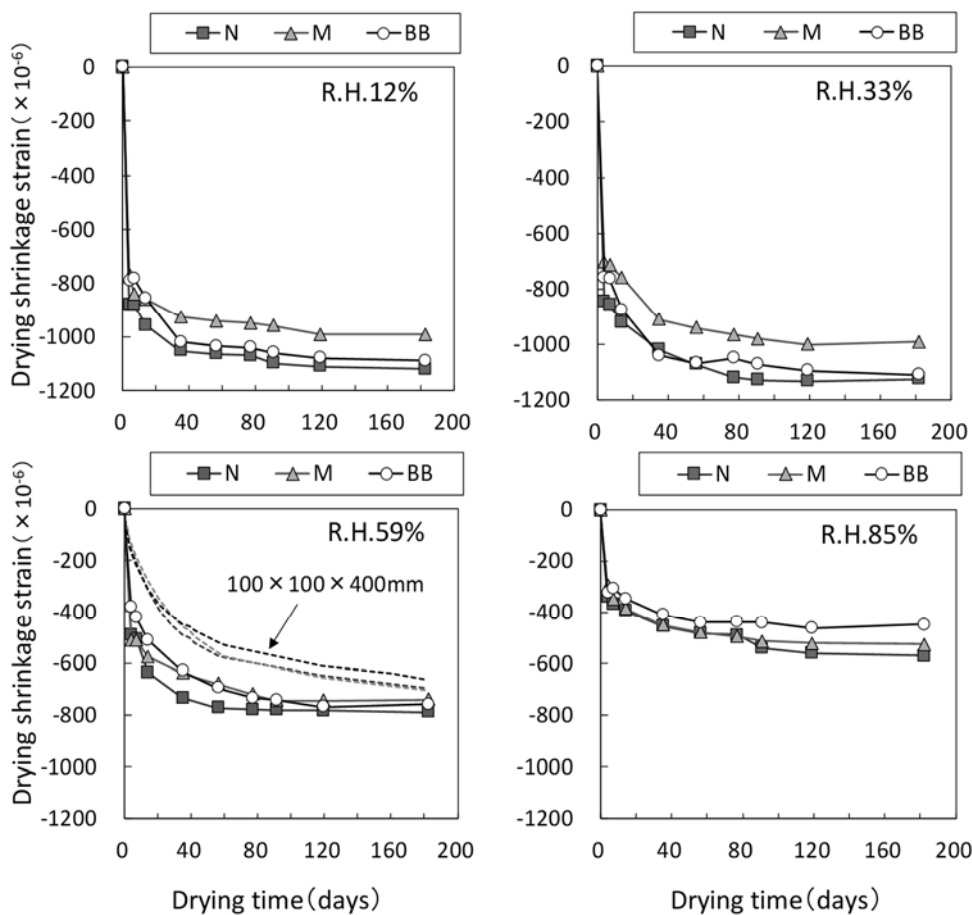


Fig. 5 Drying shrinkage strain (Seal curing period is 7days) (乾燥開始材齢7日の乾燥収縮ひずみ)

値を用いており, その範囲は最大で±10%以下であった. この誤差は, 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, 相対湿度によらずおおむね乾燥期間56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.

Fig. 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⁵⁾, 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⁶⁾などが考えられるため, 今後より詳細に検討する必要がある.

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でそれぞれ約 -790×10^{-6} , -750×10^{-6} , -60×10^{-6} となり, 明確な差は認められなかった. これはR. H. 60%環境下における乾燥収縮ひずみがセメント種類によらず同程度となる既往の結果⁴⁾と同様の傾向であった. 一方, R. H. 12, 33%環境下における乾燥収縮ひずみは, 乾燥開始材齢によって各種セメントの大小関係が異なり, 明確な傾向が見られなかった.

乾燥開始材齢で比較すると, Nの場合, R. H. 59%環境下の乾燥収縮ひずみは, 乾燥開始材齢28, 91日が7日よりわずかに小さくなる結果であったが, 乾燥開始材齢28と91日には明確な差が見られなかった. 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⁷⁾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, 本検討とおおむね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⁸⁾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

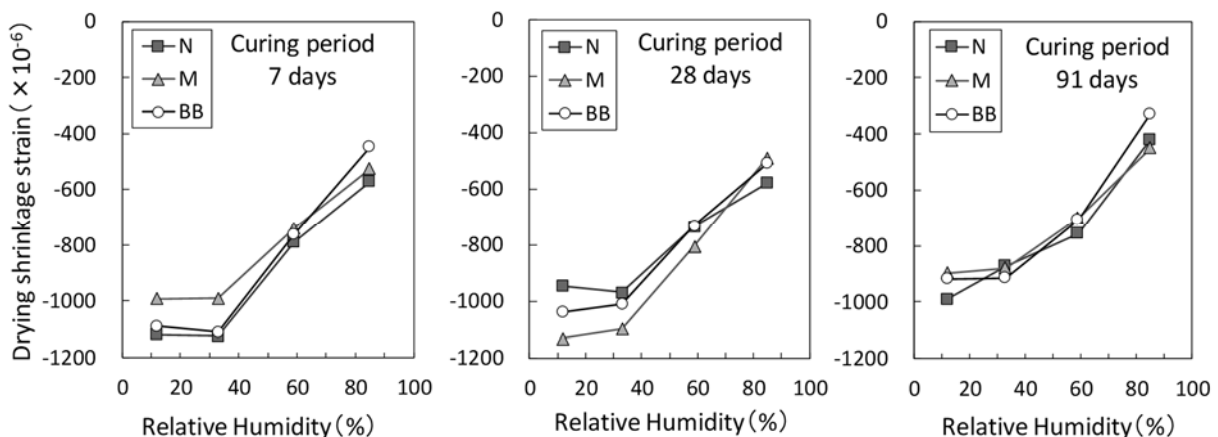


Fig. 6 Relationship between drying shrinkage strain and relative humidity as of 182 days (乾燥期間182日時点の乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係)

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。

3.3 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

Fig. 7に乾燥開始材齢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おおむね同一曲線状にプロットされる傾向が認められ、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。セメントペースト硬化体を用いて過去に相対湿度を変化させた研究⁹⁾では、質量減少と乾燥収縮ひずみの関係は、模式的にFig. 8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。Iは初期の蒸発可能な自由水の影響が大きく、勾配は小さいが、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徐々に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では、若干のばらつきがあるものの、質量減少と乾燥収縮の挙動がおおむね同様の領域に分けられる可能性が認められた。

3.4 R.H. 59%の乾燥収縮ひずみに対する比

Fig. 9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各相対湿度環境下の乾燥収縮ひずみの比(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、おおむ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、

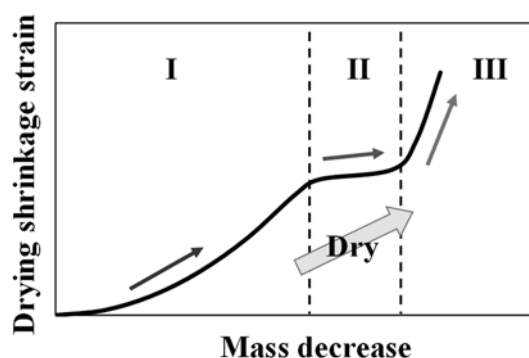


Fig. 8 Schematic figure of mass decrease and drying shrinkage strain (質量減少と乾燥収縮ひずみの模式図)

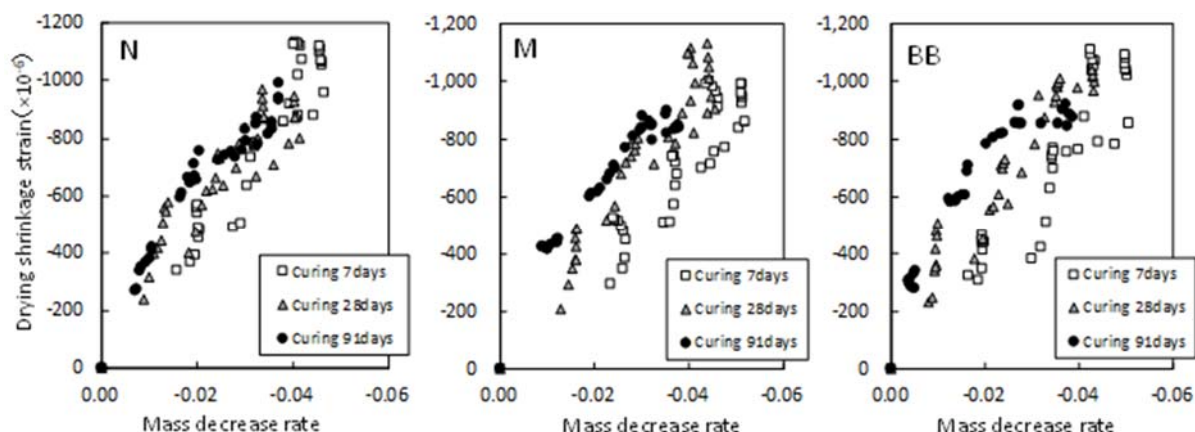


Fig. 7 Relationship between mass decrease rate and drying shrinkage strain each seal curing period (各乾燥開始材齢における質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係)

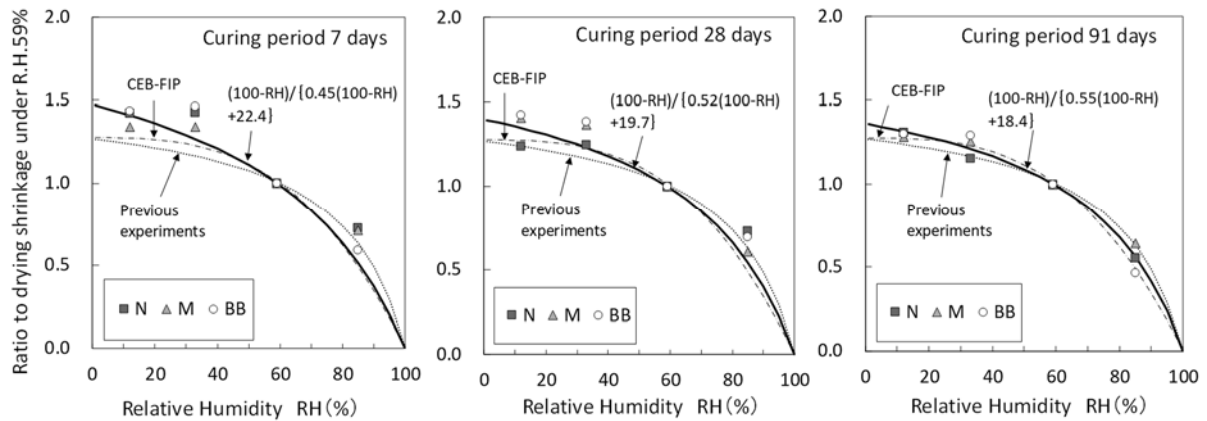


Fig. 9 Ratio to drying shrinkage strain under R.H.59%
(R. H. 59%環境下の乾燥収縮ひずみに対する比)

ならびに著者らの過去の実験結果(寸法: $100 \times 100 \times 400$ mm, 乾燥開始材齢7日)に基づく回帰式¹⁰⁾, CEB-FIP¹¹⁾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および既往の実験に基づく回帰式に近づく傾向を示した. 既往の実験で用いている $100 \times 100 \times 400$ mmのコンクリート供試体では, 乾燥期間182日以降も収縮が継続しており(Fig. 5, R. H. 59%), 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することがわかる. 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和が進行するため, 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と考えられる.

4. まとめ

本研究では普通セメント, 中庸熱セメント, 高炉セメントB種を用いたコンクリートについて, 種々の相対湿度下におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみを測定し, 相対湿度および乾燥開始材齢が乾燥収縮特性を及ぼす影響を評価した. 本研究で得られた知見を以下にまとめて示す.

- (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, 中庸熱セメントは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, いずれのセメントにおいても相対湿度12と33%では大差なかった. また, 相対湿度の低い領域での乾燥収縮ひずみは, 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種の大小関係が異なった.

- (3) 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.
- (4) 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おおむ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.
- (5) コンクリートの乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係は, おおむ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 $100 \times 100 \times 400$ mm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) 籠橋 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, 2002, 24(1), p. 441-446.
- 2) 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. 2012, p. 127-132.
- 3) 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. 1992, 439, p. 13-21.

- 4) 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(コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果)(コンクリート専門委員会報告, F-55(追補)). 2011, p. 21-43.
- 5) 日本コンクリート工学協会. 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・論文集. 2001, p. 16-23.
- 6) 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. 1989, 508, p. 18-25.
- 7) 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報告集. 1999, 21(2), p. 679-684.
- 8) 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. 2016, 38(1), p. 45-50(1003).
- 9) Will Hansen. Drying Shrinkage Mechanism in Portland Cement Paste. Journal of the American Ceramic Society. 1987, 70(5), p. 323-328.
- 10) 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. 2013, 35(1), p. 547-552(1087).
- 11) Comite Euro-International du Beton. CEB-FIP Model Code 1990 — Design Code. Thomas Telford. 1993, p. 57-58.