論文　粗骨材の乾燥収縮挙動に及ぼす相対湿度の影響に関する研究

泉田　裕介[*1]・大野　吉昭[*2]・桝田　佳寛[*3]

要旨：鉄筋コンクリート構造物に生じる乾燥収縮は，マトリックスの収縮を骨材が抵抗する機構であり，乾燥収縮を低減させるためには，静弾性係数の大きい骨材を用いる等の対策が必要となる。しかし，骨材自体が乾燥収縮する場合には，コンクリートの乾燥収縮に抵抗する骨材の性能が低下すると考えられる。本研究では，骨材に着目し，相対湿度が骨材の乾燥収縮に及ぼす影響について，乾燥収縮，静弾性係数，含水率，吸水方法を基に実験的検証を行い，粗骨材の乾燥収縮特性について明らかにした。

キーワード：骨材の乾燥収縮，相対湿度，静弾性係数，含水状態

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に生じるひび割れの原因の一つにコンクリートの乾燥収縮がある。コンクリートを，粗骨材およびモルタルマトリックスからなる二相系の複合材料として扱った場合，コンクリートの乾燥収縮は，粗骨材の乾燥収縮とモルタルマトリックスの乾燥収縮および各々の容積比ならびに静弾性係数比などの定数で表される [1)]。粗骨材の岩種が同一の場合，単位水量や単位セメント量などの調合の異なるコンクリート間の乾燥収縮ひずみや静弾性係数の差は比較的小さく，粗骨材が異なる場合の乾燥収縮ひずみや静弾性係数の差が大きいことが報告されている [2)]。骨材は，岩種や産地により乾燥収縮に対する性質が異なり，既往の研究 [3) 4) 5)]では，粗骨材自体の吸水・乾燥に伴う挙動について報告されているが，相対湿度による影響についての検討はしていない。骨材が収縮した場合，マトリックスの収縮に対する抵抗性が小さくなるため，骨材の収縮を評価することが重要となる。

そこで，本研究では，骨材の乾燥収縮に着目し，コンクリート中での相対湿度についてはまだ十分明らかにされていないので，相対湿度を変化させた場合の骨材の乾燥収縮および静弾性係数の実験を行い，骨材の乾燥収縮について実験的に評価し，粗骨材の種類，環境条件などにより粗骨材の乾燥収縮挙動がどのように変化するのかを検討することとした。

2. 実験概要

2.1 供試体および前処理方法

供試体は，骨材の原石から採取したコア供試体であり，種類および物性を**表-1** に示す。コア供試体の寸法は，静弾性係数試験用の供試体がφ60×120mm，乾燥収縮試験用の供試体がφ60×150mm とし，数量は実験条件ごとに3 個とした。供試体の初期状態を一定にするために，コア採取後の供試体を 20℃の水中に 7 日間浸漬させ十分に吸水させたものを基準とした。なお，コア採取後に封かん状態にしたものおよび水中に 1 日浸漬させたものを比較のために準備した。

表-1　使用材料の種類と物性

記号	岩種	産地	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)
Sk	硬質砂岩	茨城県桜川市産	2.63	0.23
O	硬質砂岩	東京都青梅市産	2.61	0.26
Sm	石灰石	岩手県住田町産	2.68	0.10

2.2 静弾性係数の実験方法

骨材の静弾性係数試験は，相対湿度が 60%，温度 20℃の恒温恒湿槽内に 28 日間保管した後に測定した。測定方法は，ワイヤーストレインゲージ(ゲージ長 30mm)を供試体の相対する両面に貼付け，JIS A1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して，供試体に 100kN まで荷重を載荷して応力ひずみ関係を求め，静弾性係数を算定した。

2.3 乾燥収縮の実験方法

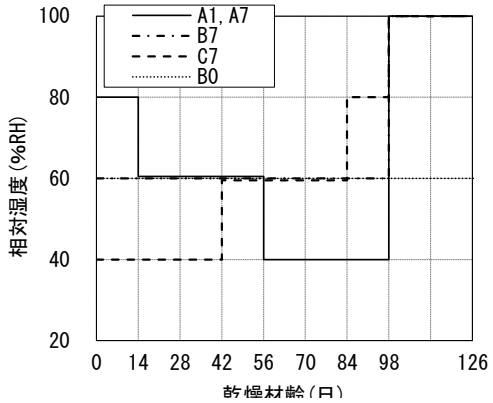
乾燥収縮の測定は，JIS A 1129-2:2010「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法－第 2 部：コンタクトゲージ方法」に示される方法に準じた。ゲージプラグは相対する両面に貼り，その平均値を用いて乾燥収縮ひずみを算出した。標点距離は約 100mm であり供試体は，乾燥条件は，相対湿度 40,60,80,100%であり，恒温恒湿室または恒温恒湿槽に静置し，これらを**表-2** および**図-1** に示す組み合わせの日数で乾燥させた。コア採取および水中浸漬直後の標点間距離を基準と定め，測定は，長さ変化(精度 0.001mm)および質量測定(精度 0.01g)について行い，

*1 一般財団法人　建材試験センター　(正会員)
*2 一般財団法人　ベターリビング　つくば建築試験研究センター　博士(工学)　(正会員)
*3 宇都宮大学工学研究科　教授　工博　(正会員)

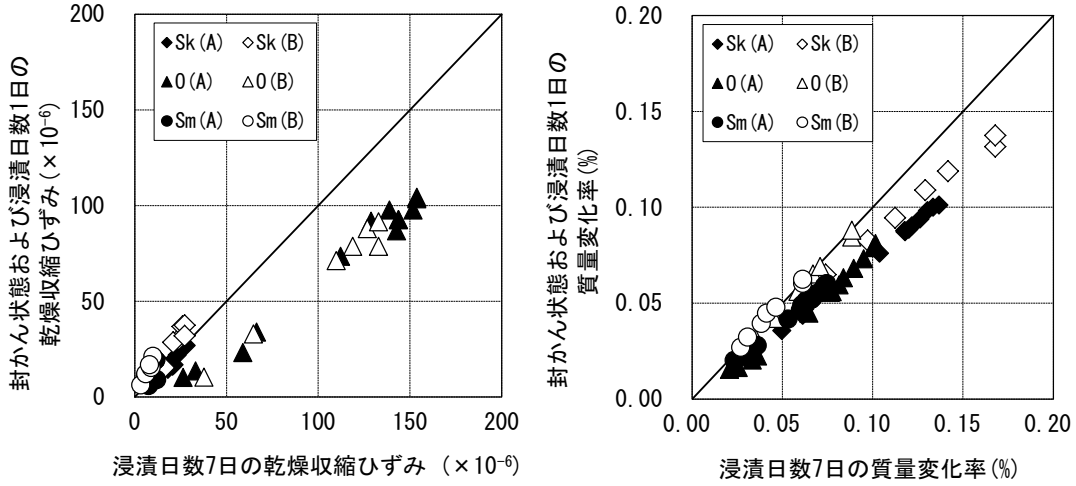
表-2　乾燥条件の組合せ

記号	浸漬日数(日)	相対湿度(%)および乾燥日数			
A7	7	80 (14)	60 (42)	40 (42)	100(28)
B7	7	60 (98)			100(28)
C7	7	40 (42)	60 (42)	80 (14)	100(28)
A1	1	80 (14)	60 (42)	40 (42)	100(28)
B0	0	60 (98)			

※( )内は乾燥日数



図－1　環境条件の組合せ



図－2　浸漬日数が乾燥収縮挙動に及ぼす影響

収縮ひずみはほかの骨材に比べて大きかったために浸漬日数の影響が見られたものと考えられる。

原則として行った。また，恒温恒湿室は，湿度が 20.0±2.0℃，相対湿度が 60±3%であった。

3 実験結果および考察

3.1 静弾性係数試験結果

粗骨材の静弾性係数試験結果を**表-3** に示す。一般にコンクリートの試験の場合での環境条件である温度 20℃相対湿度 60%で粗骨材を保管した場合，静弾性係数は石灰石 Sm＞硬質砂岩 O＞硬質砂岩 Sk の順に大きくなっていることがわかった。

表-3　粗骨材の静弾性係数

記号	静弾性係数(kN/mm^2)
Sk	66.7
O	71.9
Sm	74.2

3.2 浸漬日数が粗骨材の乾燥収縮挙動に及ぼす影響

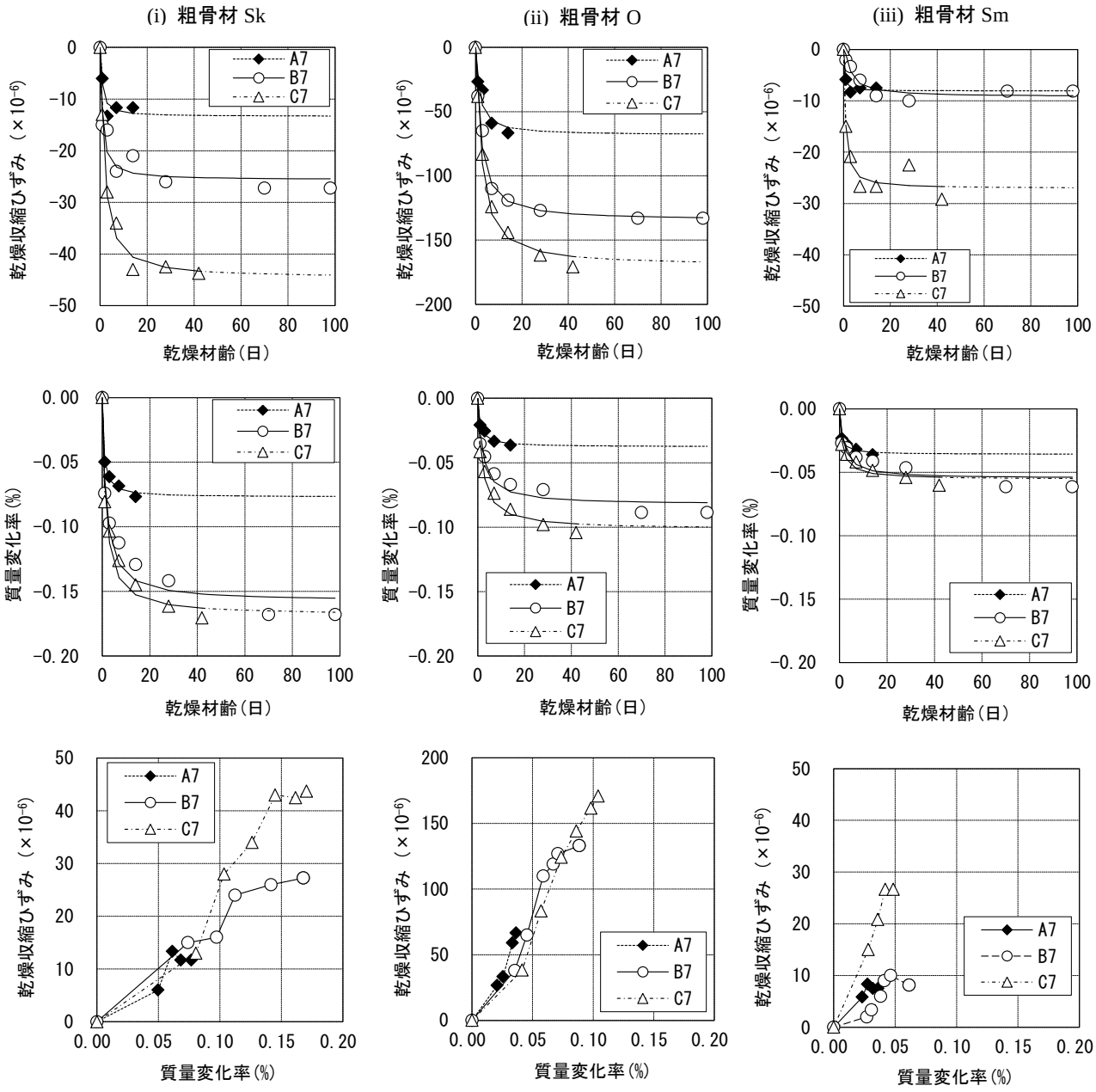
試験前の浸漬日数が粗骨材の乾燥収縮挙動に及ぼす影響について**図-2** に示す。浸漬日数が粗骨材の乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は，封かん状態および浸漬日数 1 日のどちらの場合でも Sk および Sm についてはその影響がほとんど見られなかった。これは，どちらの骨材も乾燥収縮ひずみが非常に小さいために大きな差が出なかったものと考えられる。一方，O の場合では浸漬日数が 7 日間の場合の方が乾燥収縮ひずみは大きくなった。O の乾燥収縮ひずみはほかの骨材に比べて大きかったために浸漬日数の影響が見られたものと考えられる。

質量変化率に及ぼす浸漬日数の影響は，どの骨材の場合でも浸漬日数が 7 日間の場合の方が大きくなる傾向にあることがわかる。浸漬日数が長くなると十分に吸水が行われ，水分の逸散が多くなるものと考えられる。

以上の結果から，浸漬日数の違いが乾燥収縮ひずみの大きい粗骨材 O の乾燥収縮挙動に影響していることが認められる。しかし一般にコンクリートに用いられる粗骨材は表面乾燥飽水状態(表乾状態)のものであるので，初期条件を同様のものにするため以降では浸漬日数が 7 日間のものを基準として用いることとする。

3.3 湿度が一定の場合の乾燥収縮挙動

粗骨材の乾湿実験結果のうち，実験開始直後の湿度条件から湿度を変化させるまでの乾燥収縮挙動および乾燥収縮ひずみならびに質量変化率の結果を各々以下の式(1)および(2)によって回帰したものを**図-3** に，粗骨材 O



図－3　湿度が一定の場合の乾燥収縮挙動

の係数を**表-4**，**表-5** に示す。ここで，A7 は乾燥期間が短く測定点が 4 点であるが，他の条件と比較するために回帰曲線を示した。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \cdot \left(\frac{t}{\alpha + t}\right)^{\beta} \qquad (1)$$

$$W(t) = W_{\infty} \cdot \left(\frac{t}{\alpha_w + t}\right)^{\beta_w} \qquad (2)$$

ここに，$\varepsilon(t)$　：乾燥日数 t 日の収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

ε_{∞}　：最終乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

α，β　：乾燥収縮ひずみの進行度を表す係数

$W(t)$　：乾燥日数 t 日の質量変化率(%)

表-4　粗骨材 O の乾燥収縮ひずみ式の係数

	ε_{∞}	α	β
80%RH	-68	3.7×10^{-3}	338
60%RH	-135	3.7×10^{-3}	439
40%RH	-170	3.7×10^{-3}	512

表-5　粗骨材 O の質量変化率の式の係数

	W_{∞}	α_w	β_w
80%RH	-0.04	1.22	0.84
60%RH	-0.08	1.22	1.43
40%RH	-0.10	1.22	1.38

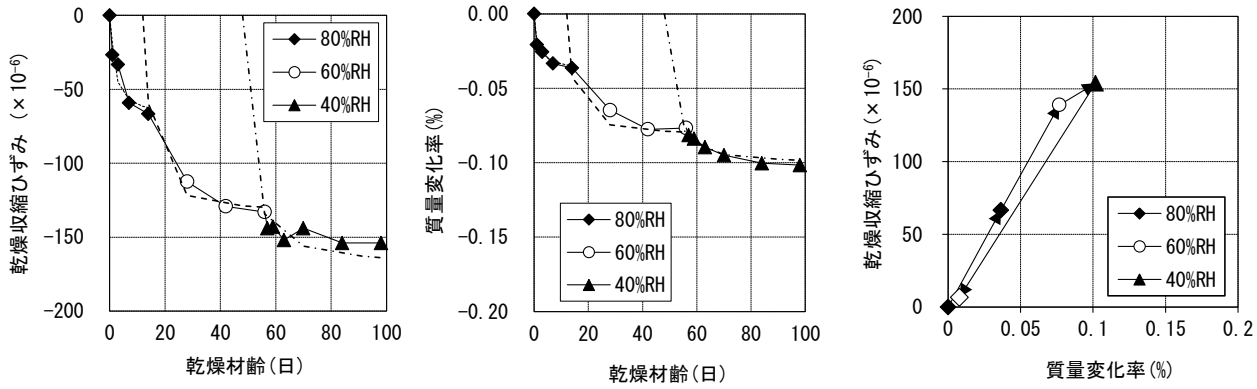


図-4　湿度を順次低下させた場合の乾燥収縮挙動

W_∞　　：最終質量変化率(%)

α_w，β_w ：質量変化の進行度を表す係数

乾燥収縮ひずみは，若干のばらつきが認められたが O が最も大きく，Sk, Sm は小さい傾向にあることがわかる。相対湿度による乾燥収縮ひずみは，Sk および O の場合は，相対湿度が低くなるほど大きくなる傾向が見られた。一方，Sm に関しては，相対湿度 80 および 60%では，乾燥収縮ひずみに大きな差は見られなかったが，相対湿度 40%の条件下では，乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向が見られた。また，静弾性係数の結果と比べると，Sm＞O＞Sk の順に静弾性係数は大きくなっており，粗骨材の乾燥収縮ひずみは必ずしも静弾性係数が大きいものが小さくなるとは言えないことがわかる。

質量変化率については，Sk の質量変化率が最も大きく，同じ硬質砂岩である O は小さいことがわかる。また，Sm の質量変化率は非常に小さく，相対湿度による影響もほとんどないことがわかる。Sk の含有する水分量は他よりも多いが乾燥収縮ひずみは小さい傾向にあるため，Sk は水分の逸散に伴う収縮応力が小さいことが考えられる。一方，O は質量変化率が小さく，乾燥収縮ひずみが大きいため同量の水分の逸散に伴う収縮応力が大きいことが考えられる。Sm は，質量変化率が小さく水分の逸散が少ない。また，乾燥収縮ひずみも小さいことがわかる。これらの原因として，岩石の細孔構造や結晶構造の違いが影響していると考えられるため，今後の検討課題である。

乾燥収縮ひずみに対する質量変化率をみると，O はどの湿度条件の場合でも質量変化率に対する乾燥収縮ひずみは概ね一定であり、質量が 0.10%減少すると乾燥収縮ひずみが 150×10^{-6} 程度生じることがわかる。Sk は相対湿度が 40%の時には，質量変化率に対する乾燥収縮ひずみが増加する傾向にあるが，相対湿度が 80 および 60%の場合には概ね一致する傾向にあり，質量が 0.10%減少したときに乾燥収縮ひずみが 20×10^{-6} 程度生じるということがわかる。Sm の場合も相対湿度が 40%の時には，質量変化率に対する乾燥収縮ひずみが増加する傾向にあるが，相対湿度が 80 および 60%RH の場合には概ね一致する傾向にある。また，Sm は質量が 0.05%減少した時に乾燥収縮ひずみが 10×10^{-6} 程度生じることがわかる。

表-6　平行移動後の乾燥開始材齢

変化	項目	t’
80%RH→60%RH	乾燥収縮ひずみ	12
80%RH→60%RH	質量変化率	12
60%RH→40%RH	乾燥収縮ひずみ	48
60%RH→40%RH	質量変化率	48

3.4 湿度を順次低下させた場合の乾燥収縮挙動

前述の結果から，相対湿度を変化させた時の乾燥収縮挙動について論じていくが，Sk および Sm は乾燥収縮ひずみが非常に小さく，正確に相対湿度の変化による影響を測定することが困難であったため，以降は乾燥収縮ひずみが大きい値を示した O についてのみ考察していくものとする。

粗骨材の乾燥収縮試験条件のうち，順次相対湿度を下げていった A7 の環境条件に関して，相対湿度が粗骨材の乾燥収縮挙動に及ぼす影響について**図-4** に示す。

相対湿度を途中で低下させた場合は，相対湿度が小さい場合の乾燥収縮ひずみの回帰線が湿度を低下させた時と同じ値の乾燥収縮率のところに平行移動し，そこからつながっていくものと考えられる。その場合は，乾燥収縮ひずみおよび質量変化率は，式(3)~(10)により計算される。式中で用いた湿度一定の場合の乾燥収縮ひずみ式および質量変化率の式の係数 ε_∞，α，β，W_∞，α_W, β_W については前述の**表-4** および**表-5** に示したものである。

$$\varepsilon_H(t)=\varepsilon_{\infty H}\cdot\left(\frac{t}{t+\alpha_H}\right)^{\beta_H} \tag{3}$$

$$\varepsilon_L(t)=\varepsilon_{\infty L}\cdot\left(\frac{t-t'}{(t-t')+\alpha_L}\right)^{\beta_L} \tag{4}$$

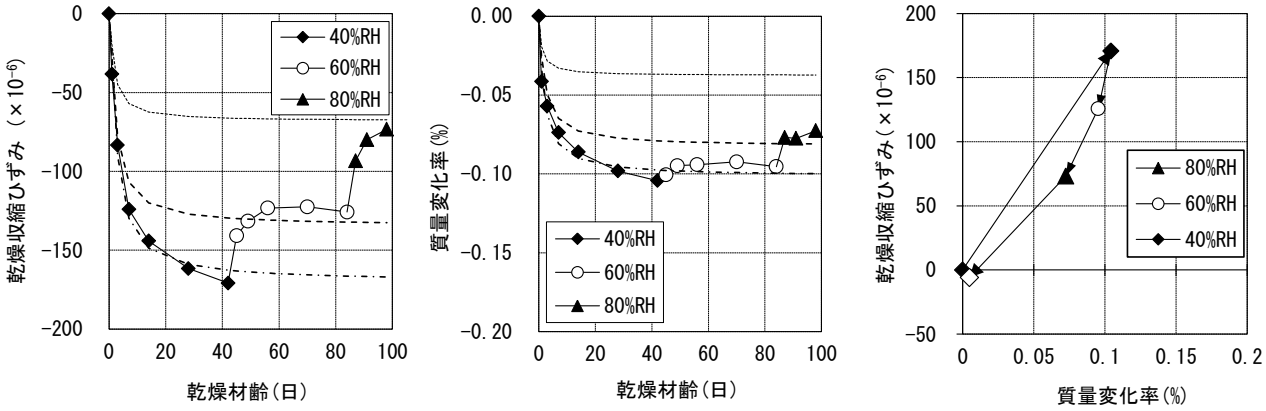


図-5　湿度を順次増加させた場合の乾燥収縮挙動

このとき，t=t_0 で高湿度から低湿度に変化するので，平行移動後の乾燥開始材齢を式(3)，(4)から求めると，以下の式(5)が導き出される。

$$t' = t_0 + \frac{e^* \times \alpha_L}{e^* - 1} \tag{5}$$

$$e^* = \frac{1}{\beta_L}\left(log\frac{\varepsilon_{\infty H}}{\varepsilon_{\infty L}} + \beta_H \cdot log\frac{t_0}{t_0 + \alpha_H}\right) \tag{6}$$

ここに，$\varepsilon_H(t)$：相対湿度が高いものの乾燥日数 t 日の乾燥収縮ひずみ(×10^{-6})

$\varepsilon_L(t)$：相対湿度が低いものの乾燥日数 t 日の乾燥収縮ひずみ(×10^{-6})

t'：平行移動後の乾燥開始材齢

t_0　：相対湿度を変化させた時の乾燥材齢

$\varepsilon_{\infty H}$，α_H，β_H：相対湿度が高いものの係数

$\varepsilon_{\infty L}$，α_L，β_L　：相対湿度が低いものの係数

同様に以下に質量変化率についての式を示す。

$$W_H(t) = W_{\infty H} \cdot \left(\frac{t}{t + \alpha_{wH}}\right)^{\beta_{WH}} \tag{7}$$

$$W_L(t) = W_{\infty L} \cdot \left(\frac{t - t'}{(t - t') + \alpha_{WL}}\right) \tag{8}$$

このとき，t=t_0 で高湿度から低湿度に変化するので，平行移動後の乾燥開始材齢を式(7)，(8)から求めると，以下の式(9)が導き出される。

$$t' = t_0 + \frac{{e_w}^* \times \alpha_{wL}}{e^* - 1} \tag{9}$$

$${e_w}^* = \frac{1}{\beta_{WL}}\left(log\frac{W_{\infty H}}{W_{\infty L}} + \beta_{WH} \cdot log\frac{t_0}{t_0 + \alpha_{WH}}\right) \tag{10}$$

ここに，$W_H(t)$：相対湿度が高いものの乾燥日数 t 日の質量変化率(%)

$W_L(t)$：相対湿度が低いものの乾燥日数 t 日の乾燥収縮ひずみ(%)

t'　：平行移動後の乾燥開始材齢

t_0　：相対湿度を変化させた時の乾燥材齢

$W_{\infty H}$，α_{WH}，β_{WH}：相対湿度が高いものの係数

$W_{\infty L}$，α_{WL}，β_{WL}　：相対湿度が低いものの係数

式(5), (9)によって得られた平行移動後の乾燥開始材齢を**表-6** に示す。また，**図-4** 中の破線は**図-3** に示した粗骨材 O の回帰曲線を t'日平行移動したものである。これより，粗骨材の乾燥収縮ひずみは，相対湿度を変化させると変化させた時点の乾燥収縮ひずみから変化後の相対湿度における乾燥収縮挙動を示すことがわかる。質量変化率に関しても同様の傾向が見られ，保管する相対湿度によってそれぞれの値は概ね一定の値に収束することがわかる。また，平行移動後の乾燥開始材齢は，相対湿度が同じであれば，乾燥収縮ひずみも質量変化率も同じであることがわかる。

3.5 湿度を順次増加させた場合の乾燥収縮挙動

粗骨材の乾湿試験のうち，順次相対湿度を上げていった C7 に関して相対湿度が粗骨材の乾燥収縮に及ぼす影響について**図-5** に示す。乾燥収縮ひずみに対する相対湿度を変化させた影響は，相対湿度を増加させると乾燥収縮ひずみが減少する傾向にあり，相対湿度の影響による供試体中の水分の変化により膨張する傾向にある。乾燥収縮ひずみは同じ種類の骨材を保管した環境条件下で生じる乾燥収縮ひずみと概ね同様の値に収束する傾向があることが認められる。

質量変化率に関しては，乾燥収縮ひずみ同様に相対湿度を変化させると質量が増大する傾向にあるが，乾燥収縮ひずみの場合ほど大きな変化は見られない。また，相対湿度を順次減少させた場合は，その時の環境条件下に保管した場合と同様の質量変化が見られたが，順次増加した場合は，そのような傾向は見られなかった。これにより，粗骨材の乾燥収縮ひずみは環境条件によって一定の値に収束するが，質量変化率は，相対湿度が増加してもあまり増加しないことがわかる。これは，低湿度の環境の時の乾燥により生じる収縮応力により細孔が収縮す

ることで，水分が吸着することのできる表面積が少なくなるのではないかと考えられる。また，乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係をみると相対湿度を順次減少させた場合と比べ，質量変化率に対する乾燥収縮ひずみの傾向が異なりヒステリシスを描くことが認められる。

3.6 相対湿度を 100%に戻した場合の乾燥収縮挙動

粗骨材の乾燥収縮試験後に相対湿度 100%の環境条件に戻した場合の乾燥収縮ひずみおよび質量変化率を**表-7**, **表-8** に示す。相対湿度 100%の条件で保管した場合，粗骨材 O の場合は A1 の条件を除いて概ね基長に合っていると考えられる。また，Sk と Sm は乾燥収縮ひずみが非常に小さく，最初に乾燥収縮ひずみを生じているところから試験を開始したのか，測定のばらつきの範囲であるのかの区別をつけることは困難であった。また，前養生での水中浸漬日数が 1 日の場合は，7 日の場合よりも基長に対する膨張量が大きくなる傾向にあることがわかった。これは，水中浸漬日数が短い時には供試体に十分吸水がされないために 7 日のものと比べて基長の時点ですでに収縮しているものと考えられる。

質量変化率では，相対湿度 100％の環境条件に戻した場合は，質量変化率は概ね基準の値に戻る傾向にあることがわかった。また，乾燥収縮ひずみの場合と同様に浸漬日数が 1 日の場合では，基準の質量よりも増加する傾向がみられた。これより，骨材の場合は，相対湿度の影響による供試体中の水分の変化により収縮が生じるが，相対湿度 100%の条件下では膨張し，もとに戻ることがわかった。このため，コンクリートの乾燥収縮挙動は，マトリックス部分の乾燥収縮挙動が大きく寄与していることがわかった。

表-7　相対湿度 100%の場合の乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

記号	Sk	O	Sm
A7	20	-7	27
B7	12	16	20
C7	-1	6	-8
A1	18	66	38

表-8　相対湿度 100%の場合の質量変化率(%)

記号	Sk	O	Sm
A7	-0.02	-0.01	-0.01
B7	-0.02.	0	-0.01
C7	-0.01	0	0
A1	0.03	0.02	0

4.まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1)粗骨材の静弾性係数は，石灰石 Sm＞硬質砂岩 O＞硬質砂岩 Sk の順に大きくなる。

(2)粗骨材の乾燥収縮挙動は，同じ種類の岩石でも産地により，その物性が異なる。

(3)粗骨材の乾燥収縮ひずみは, 硬質砂岩 O＞硬質砂岩 Sk＞石灰石 Sm の順に大きくなる。

(4)粗骨材の乾燥による質量変化は, 硬質砂岩 Sk＞硬質砂岩 O＞石灰石 Sm の順に大きくなる。

(5)粗骨材 O の乾燥収縮において, 途中で相対湿度を変化させると，順次に相対湿度を減少させた場合は，乾燥収縮ひずみおよび質量変化率は，変化後の環境条件で乾燥させた場合と概ね同じ値に収束することが認められた。一方，順次に増加させた場合は，乾燥収縮ひずみに関しては，順次に減少させた場合と同様に変化後の環境条件に収束することが認められたが，質量変化率に関しては，若干の質量の増加が認められたが，ほとんど増加しなかった。これは，乾燥による水分の逸散による収縮応力が骨材中の細孔に生じ，水分が吸着する表面積が減少したためと考えられる。

(6)乾燥収縮試験後に相対湿度 100%の環境条件に戻した場合，乾燥収縮ひずみおよび質量変化率は増加し，基準としたものと同程度かそれよりも大きくなる傾向が認められた。また，浸漬日数が短い場合は，浸漬日数が長い場合よりも値が増加する傾向にある。

(7)今回は，乾燥収縮ひずみが比較的大きな値を示した青梅産硬質砂岩についてのみ検討を行った。乾燥収縮ひずみが小さいものは測定の限界に近かったため，他の骨材の検討は行えなかった。今後は，他の骨材でも同様の傾向が見られるのかの検討を行う必要がある。

参考文献

1)馬場明生：建築材料の乾燥収縮機構とその応用に関する研究，学位論文　(東京大学)，1975

2)大野吉昭：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の影響の評価と予測式の設定に関する研究，学位論文(宇都宮大学)，2012

3)後藤幸正他：乾湿に伴う骨材の体積変化，土木学会論文報告集，第 247 号，pp97～108，1976

4)真野孝次，中村則清：砕石の品質がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する実験的研究(その 1 原石コアの品質とコンクリートの乾燥収縮との関係)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.933-934, 2010.9

5)中村則清，真野孝次：砕石の品質がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する実験的研究(その 2 原石コアの品質とコンクリートの乾燥収縮との関係)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.935-936, 2010.9