

# 論文 乾燥指標体を用いたコンクリートの強制乾燥収縮試験の検討

長谷川 拓哉<sup>\*1</sup>・千歩 修<sup>\*2</sup>

**要旨：**本研究は、コンクリートの標準的な乾燥収縮率の早期判定、または長期材齢コンクリートの標準的な乾燥収縮率の推定手法として、80℃強制乾燥による乾燥収縮促進試験を対象とし、各種乾燥条件の影響を明らかにするとともに、乾燥程度の目安となる乾燥指標体の検討を行った。また、検討した方法に基づき、各種長期材齢コンクリートの標準乾燥収縮率の推定を行った。その結果、強制乾燥収縮試験では、正確な温度管理が必要であること、乾燥指標体とコンクリートの強制乾燥収縮率とは相関があり、乾燥指標体の質量に基づく補正により乾燥程度の異なるコンクリートの乾燥収縮率の比較が可能となること、などの知見を得た。  
**キーワード：**乾燥収縮率、強制乾燥収縮試験、乾燥指標体、長期材齢コンクリート

## 1. はじめに

2009年のJASS5改定などを背景として、構造物に使用するコンクリートの乾燥収縮率を把握することが従来以上に求められている。一般にコンクリートの乾燥収縮は、材齢7日より、20℃、60%R.H.に6ヶ月静置した後の長さ変化率（以下「標準乾燥収縮率」）で評価されるが、これは測定するのに6ヶ月という長期間を要するという問題があり、早期判定方法が求められている。また、既存構造物の調査・診断の観点から、長期材齢コンクリートの標準乾燥収縮率の推定方法が求められている。標準乾燥収縮率の早期判定方法として、いくつかの方法<sup>1)~3)</sup>が提案されているが、足立ら<sup>3)</sup>は、梶田らの方法<sup>2)</sup>を発展させ、標準乾燥収縮率の推定方法として、図-1に示す80℃強制乾燥による乾燥収縮促進試験（以下「強制乾燥収縮試験」）を用いた方法の提案をしている。この方法は、早期判定方法とともに、長期材齢コンクリートの標準乾燥収縮率の推定にも適用できると考えられる。しかし、試験条件によって「強制乾燥収縮率」（材齢7日もしくは水中浸漬7日後、80℃に設定した乾燥器に7日間静置した後の長さ変化率）にばらつきを生じる等の問題がある。各種乾燥条件がどのような影響を与えているかは明らかではないのが現状である。また、精度向上の方法として、乾燥の指標となる材料（以下「乾燥指標体」）を用いることで乾燥程度を把握することが考えられる。

本報告では、普通強度コンクリートを対象として、各種乾燥条件が強制乾燥収縮試験に及ぼす影響を明らかとし、乾燥指標体を用いた強制乾燥収縮試験の検討を行うとともに、検討した方法に基づき、各種長期材齢コンクリートの標準乾燥収縮率の推定を行った結果を報告するものである。

## 2. 実験の概要

### 2.1 乾燥指標体を用いた強制乾燥収縮試験の提案（シリーズ1）

実験概要を表-1（上欄）に示す。本実験は、乾燥器の違い、乾燥器内に占める試験体の容積比、試験体を配置した乾燥器内の位置による影響を検討するとともに、乾燥指標体として、JIS R 5201のセメントの強さ試験に用いられる標準砂を使用したモルタルの適用性について検討を行うものである。使用したコンクリートの調合及び基礎性状を表-2に、モルタルの調合及び基礎性状を表-3に示す。コンクリートおよびモルタルは、打設後1日

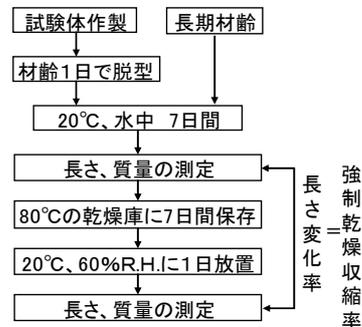


図-1 強制乾燥収縮試験のフロー

表-1 実験の概要

シリーズ	目的	検討事項
1	乾燥指標体を用いた強制乾燥収縮試験方法の提案	<ul style="list-style-type: none"> <li>各種乾燥条件が試験結果に及ぼす影響</li> <li>基準となる乾燥指標体の検討</li> </ul>
2	長期材齢コンクリートの標準乾燥収縮率の推定	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾燥指標体を用いた各種長期材齢コンクリートの強制乾燥収縮試験</li> </ul>

\*1 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門 准教授 博士（工学）（正会員）

\*2 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門 教授 工学博士（正会員）

で脱型し、1週間 20℃水中養生を行った後、図-1 に示す通りに強制乾燥収縮試験を行った。使用した乾燥器の概要を表-4 に示す。乾燥器は、メーカー・容量の異なる3種類の定温乾燥器を用いた。試験体は、コンクリート、温度測定用としてコンクリート試験体の表層から 50mm の位置に熱電対を設置したもの、および乾燥指標体の3種類を図-2 に示す通りに配置した。温度は、25 分間隔で自動計測を行った。なお、乾燥器の条件を 80±2℃、恒温室の条件を 20℃・60%R.H.とした。

## 2.2 長期材齢コンクリートの標準乾燥収縮率の推定 (シリーズ 2)

実験概要を表-1 (下欄) に、使用した長期材齢コンクリートの概要を表-5 に示す。本実験は、長期材齢コンクリートを対象として、シリーズ 1 で検討した試験を行い、標準乾燥収縮率の推定を行うものである。長期材齢コンクリートは、W/C55%, 単位水量 185kg/m<sup>3</sup> (一部, 200, 170kg/m<sup>3</sup>) であり、粗骨材・混和剤を変えて作製したものである。標準乾燥収縮率を測定後、引き続き 20℃・60%R.H.の条件で静置しており、365 週が経過した時点で図-1 に示す通りに強制乾燥収縮試験に供した。強制乾燥収縮試験には表-4 中の乾燥器 C を用い、シリーズ 1 で作製した乾燥指標体 (材齢 12・14 週) を図-2 中③の条件と同様に各段に 1 本ずつ入れて測定している。なお、同一条件で作製された一部の試験体について割裂し、フェノールフタレイン法により中性化深さを測定している。

表-2 使用したコンクリートの調合および基礎性状

W/C (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積 (ℓ/m <sup>3</sup> )			質量 (kg/m <sup>3</sup> )			スラブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
			セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材			
55	49.3	185	106	345	354	336	921	938	18.0	1.8	34.7

セメント: 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm<sup>3</sup>)、粗骨材: 常盤産砕石 (密度 2.65g/cm<sup>3</sup>)、細骨材: (密度 2.58g/cm<sup>3</sup>)

表-3 乾燥指標体 (標準砂モルタル) の調合および基礎性状

W/C (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	質量 (kg/m <sup>3</sup> )		フロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		セメント	細骨材			
50	251	503	1517	160×165	3.0	23.2

セメント: 表-2と同じ 細骨材: 標準砂 (表乾密度 2.61g/cm<sup>3</sup>)

表-4 使用した乾燥器の概要

記号	容量 (ℓ)	段数	最大温度 (℃)	送風機の有無
A	90	3	200	なし
B	150	3		あり
C	220	4		あり

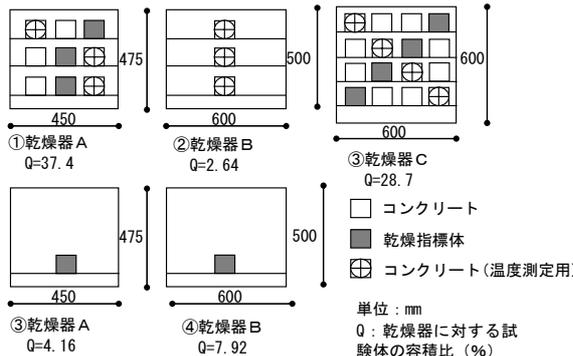


図-2 試験体の配置 (シリーズ 1)

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 シリーズ 1

図-3 に強制乾燥収縮試験の結果 (図-2 の条件①~③) を示す。なお、図中では乾燥器各段におけるコンクリート試験体の強制乾燥収縮率の平均値を示している。乾燥器 A を用いた条件①の結果以外は、比較的安定した結果が得られた。ここで、試験開始から 48 時間までの試験体内部の温度変化を図-4 に示す。これより、乾燥器 A では、試験初期に一定の温度となっておらず、この影響が強制乾燥収縮率に影響を及ぼしたものと考えられる。また、乾燥器 A では上下段で温度差が生じていた。乾燥器 A は送風機がないものであり、乾燥器内の空気が循環しにくかったことが一因と考えられる。図-3 より、温度が適切に管理された送風機のある乾燥器の場合、試験体の乾燥器内の位置による明確な違いは認められなかった。また、図-5 に乾燥器内に占める試験体の容積比と強制乾燥収縮率の関係を示す。試験初期に一定の温度とならなかった乾燥器 A の結果を除くと、容積比による影響は明確には見られなかった。これらの結果より、乾燥器内の温度が適切に制御された条件であれば、試験体の位置、容積比による差は無視できると考えられる。

ここで、各条件のコンクリートおよび乾燥指標体の強制乾燥収縮率のばらつきを表-6 に示す。いずれの条件でも、個々の試験体における強制乾燥収縮率の最大と最小の差は 100μ 以上あり、本試験方法ではわずかな条件の違いで値が変動することが考えられる。このため、本試験法では、同一条件の試験体の数を増やして評価を行う

表-5 長期材齢コンクリートの概要 (シリーズ 2)

調合番号	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	質量 (kg/m <sup>3</sup> )			スラブ (cm)	空気量 (%)	標準乾燥収縮率 (×10 <sup>-4</sup> )
			セメント	細骨材	粗骨材			
TK-A	49.3	185	336	952	919	17.5	2.6	7.24
TK-B	49.3	185	336	952	919	15.6	2.9	6.19
TK-N-170	50.1	170	309	952	983	3.0	2.6	8.57
TK-N-185	49.3	185	336	952	919	15.0	2.0	8.57
TK-N-200	40.0	200	364	952	859	21.1	1.3	8.29
TK-(A+C)	49.3	185	336	952	919	16.7	2.3	6.76
KB-A	49.3	185	336	952	919	19.5	2.2	6.67
KB-C	49.3	185	336	952	919	20.0	2.0	7.81
KB-N	49.3	185	336	952	919	19.5	1.7	8.19
KB-(A+C)	49.3	185	336	952	919	20.0	2.5	6.19
OU-A	49.3	185	336	952	919	14.8	1.9	6.57
OU-B	49.3	185	336	952	919	16.0	2.1	5.33

細骨材: 勇弘産陸砂 (密度 2.63g/cm<sup>3</sup>)

※セメント比はいずれも 55%

粗骨材: TK: 常盤産砕石 (密度 2.60g/cm<sup>3</sup>)、KB: 礫石産砕石 (密度 2.49g/cm<sup>3</sup>)、OU: 青梅産砕石 (密度 2.64g/cm<sup>3</sup>)

混和剤の種類: A: B は乾燥収縮低減剤、C は膨張材、N は使用なしを示す

ことが必要と考えられる。また、変動係数で比較すると、乾燥器Aの結果は、他の乾燥器の結果に比べて二倍近い値を示しており、前述の通り、試験初期で所定の温度とならなかったことと、乾燥器内の温度が不均一だったことなどが要因と考えられる。これらの結果から、強制乾燥収縮試験により信頼性の高い標準乾燥収縮率の推定値を得るためには、乾燥器内の温度が均一となる乾燥器を用い、温度管理を正確に行うとともに、複数の試験体により評価を行うことが重要と考えられる。

図-6 にコンクリートと乾燥指標体の強制乾燥収縮率の関係を示す。両者には一定の相関がみられる。これより、乾燥指標体は、乾燥程度の指標にできると考えられる。図-7 に材齢による乾燥指標体の質量変化率と強制乾燥収縮率との関係を示す。両者は良好な相関を示しているが、材齢によって異なっていることがわかる。これは水和の影響等が考えられ、材齢1週の結果より一定の値を引いて補正すると、材齢12(14)週の結果と同一直線となる。このことから補正を行うことで材齢によらず乾燥指標体を用いることができると考えられる。

温度の影響などでばらついたコンクリートの強制乾

燥収縮率を、乾燥指標体の強制乾燥収縮率または質量変化率を用いて補正をすることとした。図-6、図-7 の関係より、コンクリートの強制乾燥収縮率または質量変化率は、同じ乾燥器の同じ段にある乾燥指標体の強制乾燥収縮率または質量変化率と比例関係にあるとし、補正後の強制乾燥収縮率の平均値が補正前と同じになるように補正を行った。図-8 に補正前後による強制乾燥収縮率を、図-9 に変動係数を示す。強制乾燥収縮率で補正した場合、補正前よりもばらつきが大きくなった。これは表-6 に示す通り、乾燥指標体としたモルタルの強制乾燥収縮率のばらつきが大きかったためと考えられる。一方、質量変化率で補正すると、補正前よりも全体の変動係数が小さくなった。これから、乾燥指標体としてモルタルを用いる場合は質量変化による補正がよいと考えられる。

以上の結果から、乾燥指標体を用いることにより、乾燥条件が異なる強制乾燥収縮率でも比較が可能となると考えられる。しかし、乾燥指標体自体のばらつきがあり、特に今回乾燥指標体に用いたモルタルはコンクリートよりもばらつきが大きくなる傾向があることから、今後、適切な乾燥指標体の材料および扱い方について検討

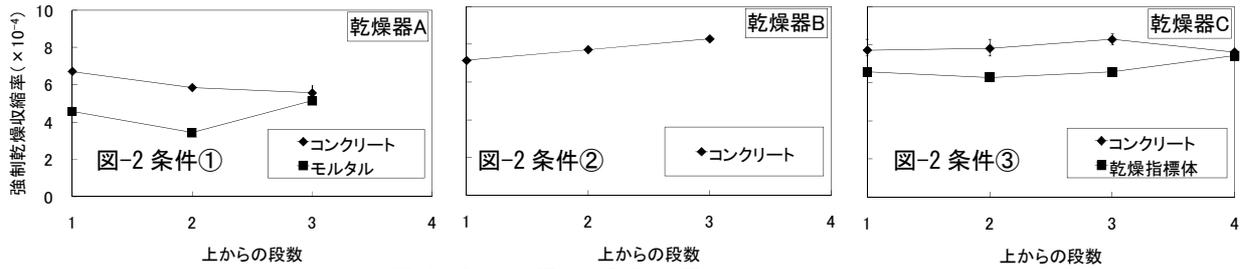


図-3 強制乾燥収縮試験結果 (シリーズ1)

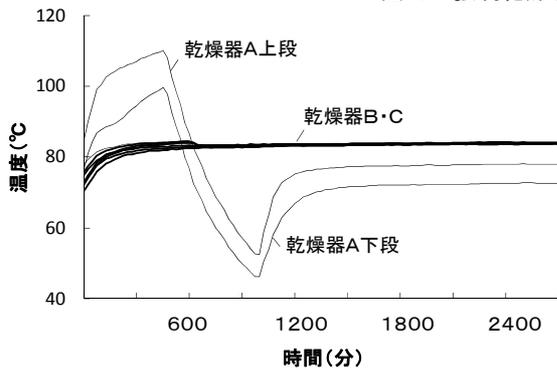


図-4 試験開始から48時間までの試験体温度

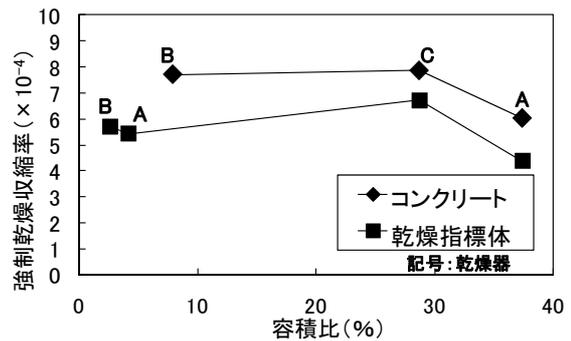


図-5 乾燥器に対する試験体の容積比と強制乾燥収縮率

表-6 コンクリートおよび乾燥指標体の強制乾燥収縮率の変動

種類	乾燥器	試験体本数	強制乾燥収縮率 (x 10 <sup>-4</sup> )			標準偏差 (x 10 <sup>-4</sup> )	変動係数
			平均値	最小値	最大値		
コンクリート	A	6	6.0	5.1	7.1	0.66	0.11
	B	3	7.7	7.1	8.3	0.57	0.07
	C	12	7.9	7.4	8.6	0.41	0.05
	全体	21	7.3	5.1	8.6	0.96	0.13
乾燥指標体	A	3	6.7	6.3	7.4	0.49	0.07
	C	4	7.7	7.1	8.3	0.57	0.07
	全体	9	5.7	3.4	7.4	1.21	0.21

する必要がありと考えられる。

### 3.2 シリーズ 2

図-10 に長期材齢コンクリートの強制乾燥収縮率と標準乾燥収縮率との関係を示す。図より、標準乾燥収縮率と強制乾燥収縮率との間には良好な相関が得られることが確認できる。

ここで、強制乾燥収縮率より長期材齢コンクリートの標準乾燥収縮率の推定を行う式として、足立ら<sup>3)</sup>によって(1)式が提案されている。

$$\varepsilon = \varepsilon_{80} + 0.17 \ln(A) + 1.40 \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon$  : 標準乾燥収縮率 ( $\times 10^{-4}$ )

$\varepsilon_{80}$  : 強制乾燥収縮率 ( $\times 10^{-4}$ )

A : 試験体の材齢 (週)

図-11 に(1)式から求められる標準乾燥収縮率と実測の標準乾燥収縮率を示す。乾燥指標体の質量変化率に基づき強制乾燥収縮率を補正すると、補正前より相関係数がわずかながら向上した。しかし、(1)式で推定した標準乾燥収縮率は、実際の値よりも大きく評価している。ここで、一部の試験体 (TK-A, KB-A, OU-A) について中性化深さを測定すると、いずれも表層から 10mm 程度の中性化が進行していた。このことから、炭酸化収縮が要因の一つと考えられる。

図-12 に既往の実験結果<sup>3)</sup>を含め、強制乾燥収縮率と標準乾燥収縮率との関係を示す。材齢によって、結果にばらつきが見られる。ここで、(1)式中  $0.17 \ln(A) = a(x)$  ( $x : \ln(A)$ ) とおき、材齢ごとの  $a(x)$  を求めた。材齢と  $a(x)$  の関係を図-13 に示す。これによれば、初期材齢では  $a(x)$  は大きくなるが、ある時期にピークがあり、その後小さくなっていくと考えられる。これは、初期材齢では水和の影響により強制乾燥収縮率が小さくなる傾向にあるが、経年後、炭酸化収縮などの影響を受け、強制乾燥収縮率が大きくなるのが要因として考えられる。以上の結果から、 $a(x)$  は、ある時期にピークをもつ二次曲線で表せると仮定し、最小自乗法により(2)式を得、(2)式より(1)式を修正して(3)式を得た。

$$a(x) = -0.3595x^2 + 2.0348x \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{80} - 0.36 \ln(A)(\ln(A) - 5.66) + 1.4 \quad (3)$$

ここに、 $x : \ln(A)$

図-14 に(3)式から求めた標準乾燥収縮率の推定値と標準乾燥収縮率との関係を示す。両者は良好な相関が確認できる。しかし、(3)式は本実験の範囲の中のみで成立する実験式であり、炭酸化収縮の進行などの影響により変化することが考えられる。今後、炭酸化収縮

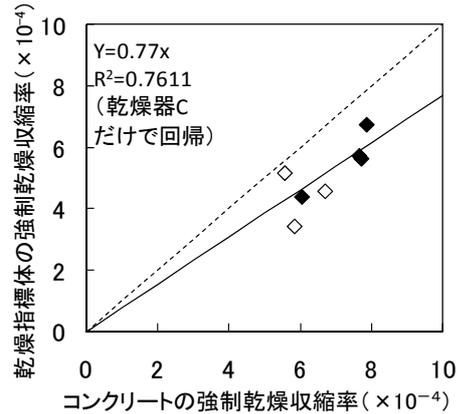


図-6 コンクリートと乾燥指標体の強制乾燥収縮率

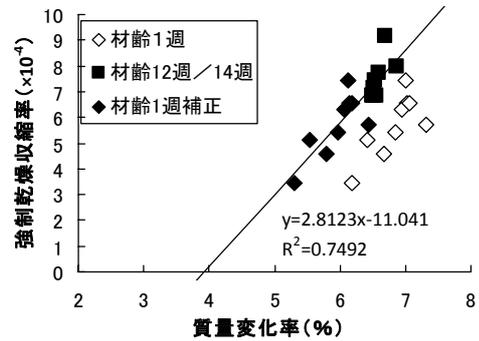


図-7 乾燥指標体の質量変化率と強制乾燥収縮率

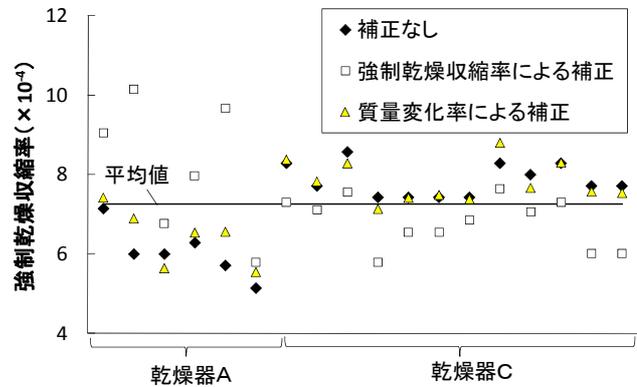


図-8 乾燥指標体により補正した強制乾燥収縮率

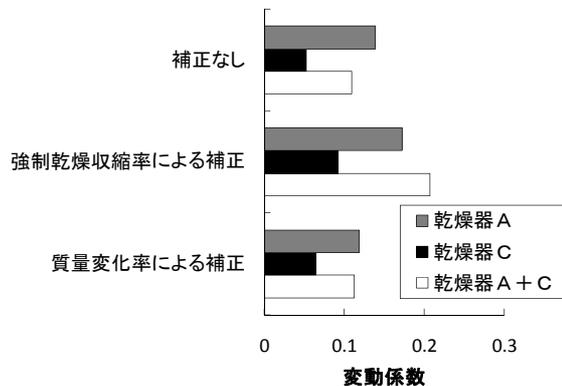


図-9 乾燥指標体により補正した強制乾燥収縮率の変動係数

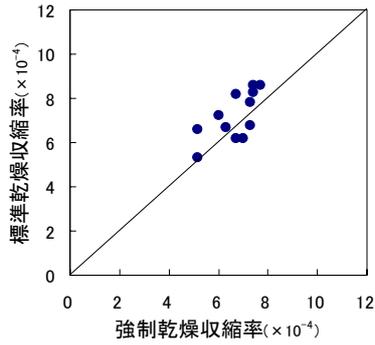


図-10 強制乾燥収縮率と標準乾燥収縮率の関係 (シリーズ2)

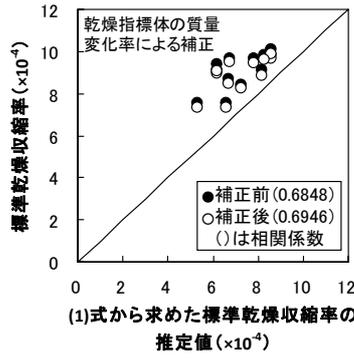


図-11 (1)式から求めた標準乾燥収縮率と実測の標準乾燥収縮率の関係

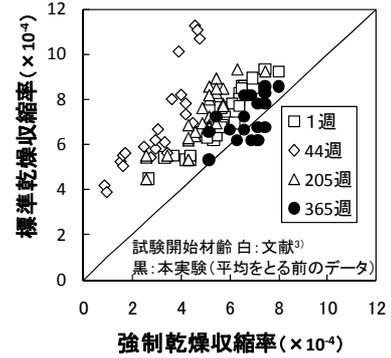


図-12 既往のデータ<sup>3)</sup>を含めた強制乾燥収縮率と標準乾燥収縮率の関係

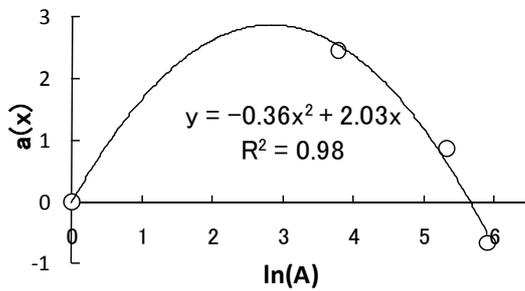


図-13 材齢と(1)式における材齢による補正 a (X) の関係

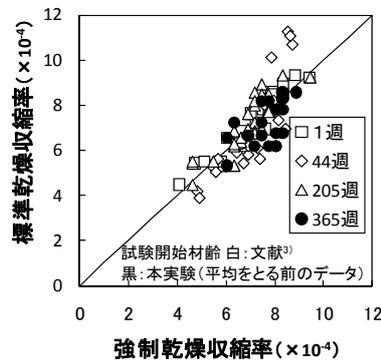


図-14 (3)式から求めた標準乾燥収縮率と標準乾燥収縮率

の影響を考慮した長期材齢コンクリートの標準乾燥収縮率の推定について検討を行っていく必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

普通強度コンクリートを対象として、乾燥程度の目安となる乾燥指標体を用いた強制乾燥収縮試験の検討を行うとともに、各種長期材齢コンクリートの標準乾燥収縮率の推定を行った結果、以下の知見を得た。

- 1)試験体の乾燥程度は、乾燥器の温度管理を正確に行えば、乾燥器内の容積、位置の影響は小さい。
- 2)コンクリートと乾燥指標体の強制乾燥収縮率には関係がある。
- 3)乾燥指標体の質量変化率を基準にすると、乾燥程度が異なるコンクリートの強制乾燥収縮率を精度よく補正することができる。
- 4)長期材齢コンクリートの強制乾燥収縮率は、試験体の材齢に影響を受ける。

#### 謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究(C) (強制乾燥による乾燥収縮ひずみに基づくコンクリート系建築物のひび割れ原因推定手法 課題番号：20560513, 代表：長谷川拓哉)の研究の一部として実施した。また、実験の実施にあたっては、本学卒論生 清水マリ子氏をはじめとして、本研究室の卒論生・大学院生各位の協力を得た。ここに記して心よりの謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 今本啓一, 石井寿美江, 閑田徹志, 百瀬晴基, 藤森啓祐: 短期データに基づくコンクリートの乾燥収縮ひずみ予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 NO.602, pp.15-20, 2006.4
- 2) 榊田佳寛, 仕入豊和: コンクリートの乾燥収縮の促進試験方法に関する一実験, 日本建築学会大会梗概集, pp.97-98, 1984.10
- 3) 足立祐介, 千歩修, 長谷川拓哉: 強制乾燥による長期材齢コンクリートの乾燥収縮率の評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集 Vol.28 No1, pp.503-508, 2006.7

