

論文 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

足立 裕介^{*1}・千歩 修^{*2}・長谷川 拓哉^{*3}

要旨：硬化コンクリートの高温(80℃)での強制乾燥時の収縮率は、コンクリートの乾燥収縮率とよい相関性を示す。ここでは、この関係を利用し、既存建築物の室内部分から試験体を切り出し、水中浸漬・強制乾燥を行い、このときの強制乾燥時の収縮率から乾燥収縮率を推定する方法を提案した。さらに、この方法を実用化するため、各種粗骨材・混和材料を用い、調合を変えたコンクリートについて強制乾燥開始材齢等を変えて強制乾燥収縮率を求め、標準的な試験で行った乾燥収縮率と比較し、測定結果におよぼす影響を検討した。

キーワード：乾燥収縮，促進試験，質量変化率

1. はじめに

既存建築物調査等において使用されているコンクリートの乾燥収縮率が問題となることがあり¹⁾，調査箇所のコンクリートの乾燥収縮率の推定方法として，設計図書の調合等から，推定式を用いて推定する方法²⁾があるが，十分な情報を得ることができない場合が多い。また，ひび割れ幅の積算値と部材寸法から乾燥収縮や温度収縮を推定する方法³⁾もある。しかしながら，どちらも有効な推定方法とはなっていない。著者らの研究⁴⁾では，硬化したコンクリートに促進試験(強制乾燥または水中浸漬)を行い，そのときの長さ変化率がそのコンクリートの乾燥収縮率とよい相関性を示すこと，さらに，この長さ変化率は試験前の材齢の影響を受けると考えられることを報告している。材齢の影響等が明確となれば，既存建築物等から切り出した試験体を用い，強制乾燥または水中浸漬を行うことによりコンクリートの乾燥収縮率の推定が可能となるものと考えられる。

本研究は，既存建築物からコンクリート試験体を切り出し，強制乾燥を行うことにより乾燥収縮率を推定する方法を想定し，影響要因の検討を行ったものである。参考文献⁴⁾の研究を展

させ，さらに屋内放置を継続し，この後水中浸漬および強制乾燥(80℃)を行い，この間の長さ変化率・質量変化率の測定および測定結果におよぼす影響要因を検討した。

2. 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(案)の提案

図 - 1 は，ここで行った実験の概念図(一例)である。コンクリートは，脱型後1週間水中養生を行い，その後乾燥期間26週間，温度20℃，相対湿度60%に放置し，乾燥収縮率(以下，標準乾燥収縮率とよぶ)を測定し，その後，屋内(実

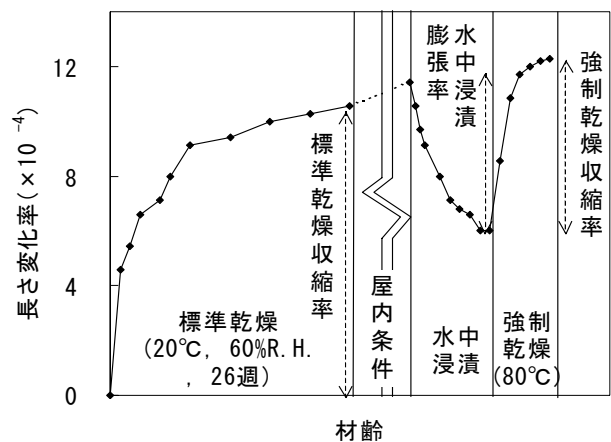


図 - 1 実験の概念図(一例)

*1 北海道大学 工学研究科空間性能システム専攻 工修 (正会員)

*2 北海道大学 工学研究科空間性能システム専攻 教授 工博 (正会員)

*3 北海道大学 工学研究科空間性能システム専攻 助教授 博(工) (正会員)

験室内)に放置し,ある時間経過後に水中浸漬・強制乾燥(80)を行ったものである。なお,強制乾燥の温度は既往の文献⁴⁾を参考にして決定した。屋内放置等の条件は,実際の建築物の屋内の条件に近いものと考えられ,ここでのデータの範囲から,以下のように実建築物のコンクリートの標準乾燥収縮率の評価方法を提案する。

- 1) 建築物の室内部分から試験体を切り出す。
- 2) 試験体の水中浸漬・強制乾燥を行い,長さ変化率(以下,強制乾燥収縮率とよぶ)を測定する。
- 3) 材齢等の影響を考慮した強制乾燥収縮率 - 標準乾燥収縮率の関係式を求めておき,これを用いて標準乾燥収縮率を推定する。

なお,屋外の部材から試験体を切り出すことも考えられるが,今回は屋外の条件のデータがないため,ここでは,屋内に限定することとする。また,標準乾燥収縮率の評価の方法は水中浸漬と強制乾燥の2種類があるが,切り出した試験体の含水状態が一定でないと考えられるため,ここでは,含水率を安定させるために水中浸漬を行い,その後に80 の強制乾燥を行う方法を検討することとする。

強制乾燥収縮率とは,水中浸漬後を基準として80 で乾燥後の長さ変化率である。なお,強制乾燥直後の長さ変化率は温度膨張の影響が入っているので,24時間,温度20 ,相対湿度60%の条件で静置後に測定を行った値を強制乾燥収縮率とする。

また,今回の検討では,実際に構造物から切り出した試験体を使用していないため,ひびわれ・切断面の影響などについては,今後の課題としたい。

3. 実験計画

表 - 1 に実験概要を示す。本実験は各種のコ

表 - 1 実験概要

シリーズ	試験前の試験体の状態			試験手順	
	水中養生	標準乾燥	屋内放置	水中浸漬	強制乾燥*
1	1週	26週	17週	1週	1週
2	1週	-	-	-	1週
3	1週	26週	178週	4週	4週

* 強制乾燥: 80℃乾燥器(シリカゲル使用)
強制乾燥の後, 温度膨張補正のために
24時間20℃, 60%R. H. に静置
(各シリーズ)の強制乾燥開始材齢は,
(1):44週、(2):1週、(3):205週となる。

表 - 2 コンクリートの種類

種類	単位 水量 (kg/m ³)	粗骨材 絶対 容積 (ℓ/m ³)	調 合 記 号	粗骨材の種類									
				T1	S	KG	KB	T2	OU	MB	YN	HM	KZ
普通 コンク リート	185	354	N	○	○	○	○	□*	□	□	□	□	□
		419	Vs	—	—	—	—	□	—	—	—	—	—
		289	Vb	—	—	—	—	□	—	—	—	—	—
	200	354	200	○	○	—	—	□	—	—	—	—	—
	170	354	170	○	○	—	—	□	—	—	—	—	—
収縮低 減剤系	185	354	A	○	○	○	○	□	□	□	□	□	□
			B	○	—	—	—	□	□	—	—	—	—
			S0	—	—	—	—	□	—	—	—	—	—
			D	○	—	—	—	□	□	—	—	—	—
			E	—	—	—	—	□	—	—	—	—	—
膨張材 系	185	354	C	○	○	○	○	□	□	□	□	□	
			P	—	—	—	—	□	—	—	—	—	—
併用系	185	354	A+C	○	○	○	○	□	—	—	—	—	—

* シリーズ3の試験体なし
○: シリーズ1, □: シリーズ2, 3

表 - 3 粗骨材の基礎性状

記号	種類	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
T1	常盤産碎石	2.60	2.66	2.42
S	上磯産碎石	2.69	2.71	0.44
KG	硬石山産碎石1	2.52	2.60	2.88
KB	硬石山産碎石2	2.49	2.57	3.31
T2	常盤産碎石	2.63	2.69	2.24
OU	青梅産碎石	2.64	2.66	0.66
MB	門別産川砂利	2.67	2.69	0.75
YN	由仁産山砂利	2.57	2.64	2.42
HM	原町産碎石	2.69	2.70	0.61
KZ	葛産碎石	2.73	2.74	0.63

ンクリートを用いた3つのシリーズからなる。シリーズ2は1週間の水中養生後(材齢1週)から80 の強制乾燥を行ったものであり,シリーズ1および3は温度20 ,相対湿度60%の条件で乾燥収縮試験26週を終了後,表に示す促進試験前の材齢まで実験室内に放置してから水中浸漬・強制乾燥を開始したものである。促進試験開始の材齢は,それぞれ1週,44週および205週となる。各シリーズの水中浸漬・強制乾燥の期間は異なり,表中に示したとおりである。

本実験における測定項目は長さ変化および質量変化であり,長さ変化はJIS A 1129-3(ダイ

ヤルゲージ法)に準じて測定を行った。

表 - 2 にコンクリートの種類を示す。ここでは、粗骨材の種類，単位水量，粗骨材絶対容積および混和材料(収縮低減剤，膨張材および両者の併用)を変えたものであり，シリーズ1とそれ以外のシリーズでは異なる種別の粗骨材を用いている。

粗骨材の基礎性状を表 - 3 に，収縮低減剤および膨張材の種類と使用方法を表 - 4 に，コンクリートの調合を表 - 5 に示す。粗骨材は吸水率の異なるように選定したものであり，その範囲は0.44%～3.31%となっている。なお，T1とT2は同産地の粗骨材で実験室への搬入時期が異なっているため，吸水率，密度が異なる値となっているが，基本的には同じ骨材と考えることとする。これらを同一とみなすときはT1とT2をまとめてTと表記する。収縮低減剤及び膨張材の使用量はメーカー推奨使用量またはその2倍とした。なお，セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材は勇払産陸砂(絶乾密度2.63g/cm³・吸水率1.64%)を使用した。調合はT1-Nのスランプが18cmになるように試し練りで決定した。また，各粗骨材や混和材料を用いる場合は調合の絶対容積をT1-Nに合わせたものとした。

4. 実験結果及び考察

4.1 強制乾燥収縮率と標準乾燥収縮率の関係

図 - 2 に，強制乾燥収縮率と標準乾燥収縮率の関係を示す。このグラフ上の直線は，シリーズ

表 - 4 混和材料の種類及び使用方法

記号	種類	密度 (g/cm ³)	使用方法
A	収縮低減剤(低分子量エチレンオキサイドとプロピレンオキサイドの共重合体)	1.07	セメントの質量の2%を水と置換
B			セメントの質量の4%を水と置換
S0			粗骨材に含浸
D	収縮低減剤(低級アルコールのアルキレンオキシド付加物)	1.03	6kg/m ³ を水と置換
E*			12kg/m ³ を水と置換
C	膨張材 (エトリンガイト系)	2.93	30kg/m ³ をセメントと置換
P	膨張材 (同上高性能型)	3.29	20kg/m ³ をセメントと置換
A+C	AとCの使用方法で併用		

* メーカー推奨の2倍の使用量である。

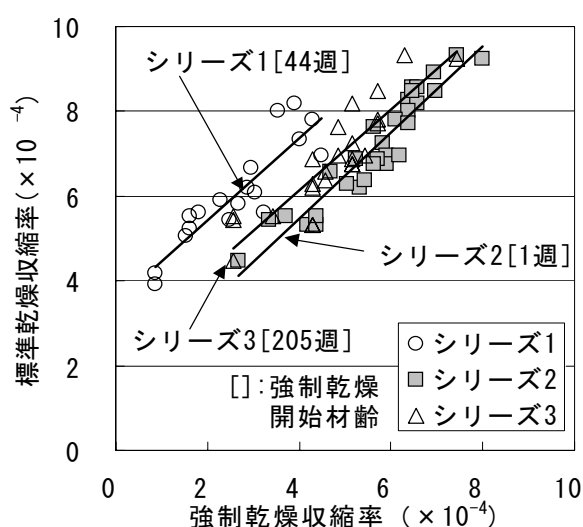


図 - 2 強制乾燥収縮率と標準乾燥収縮率の関係(促進試験前の材齢の影響)

1,2および3のデータを各シリーズごとに直線回帰したものである。これより，各シリーズごとにみると，強制乾燥収縮率と標準乾燥収縮率はよ

表 - 5 調合表

粗骨材 記号	記号*1	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶体容積(l/m ³)			絶体質量(kg/m ³)		
					セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材
T1	T1-N	55	49	185	106	345	354	336	923	942
T2	T2-Vs		40	185	106	279	419	336	746	1127
T2	T2-Vb		59	185	106	410	289	336	1093	777
T1	T1-200		48	200	115	345	354	364	860	942
T1	T1-170		51	170	98	345	354	309	987	942

その他の粗骨材や混和材料を用いる場合の絶対容積はT1-Nに合わせた。

*1 粗骨材記号+調合記号で記号を表現することとする。

い相関性を示すことがわかる。また、各直線はほぼ平行であり、シリーズ1(試験開始材齢:44週)の直線が一番左にあり、そこから、X座標で1程度右側にシリーズ3(試験開始材齢:205週)の直線、さらに右側にシリーズ2(試験開始材齢:1週)の直線がある。材齢が大きくなると水和等が進み、コンクリートが安定することを考えると、試験開始材齢が大きくなるほどデータが左にシフトするものと考えられるが、シリーズ1とシリーズ3は逆の関係となっている。この原因として、各シリーズで使用した乾燥器や乾燥期間が異なっているため、試験体の乾燥状態が異なることが考えられる。

4.2 粗骨材種別・混和材料の影響

図-3に標準乾燥収縮率および強制乾燥収縮率について混和材料未使用のものと使用したものの関係を示す。A(収縮低減剤)を用いると、標準乾燥収縮率が小さくなる効果があるが、強制乾燥収縮率でもやや小さな値となっており、強制乾燥で収縮低減剤の効果を評価できるものと考えられる。また、C(膨張材)は標準乾燥収縮率に影響がない結果となっているが、強制乾燥収縮率はやや大きな値となっている。強制乾燥前の水中浸漬により膨張材を使用したコンクリートは膨張し、その膨張分だけ強制乾燥収縮率が大きくなっているものと考えられる。

4.3 水中浸漬・強制乾燥中の質量変化率と長さ変化率の関係

(1) 水中浸漬期間中の質量変化率と長さ変化率の関係

図-4にT-Aにおけるシリーズ1と3の水中浸漬期間の質量変化率と長さ変化率の関係を示す。水中浸漬期間は、シリーズ1で7日であり、シリーズ3で28日である。シリーズ3をみると、7日以降質量はほとんど変化しておらず、7日以降の長さ変化率も小さい。これより、水中浸漬を行う場合7日間で吸水が安定すると考えられ、ここで提案する試験方法の水中浸漬期間を7日間とする。

(2) 強制乾燥期間中の質量変化率と長さ変化率の関係

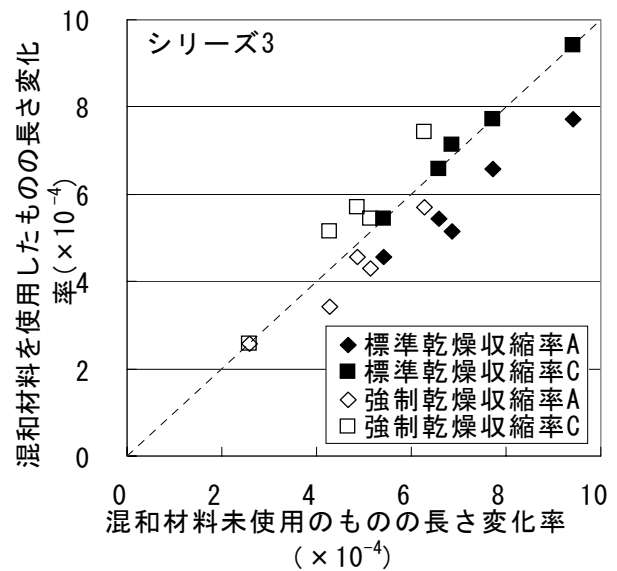


図-3 混和材料による標準乾燥収縮率と強制乾燥収縮率の変化

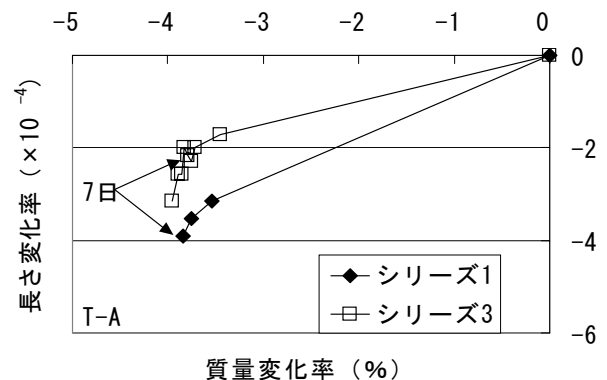


図-4 水中浸漬期間における質量変化率と長さ変化率の関係

図-5に強制乾燥期間中の質量変化率と長さ変化率の関係を示す。なお、シリーズ1および3では強制乾燥期間中の長さ変化率と質量変化率を測定したが、シリーズ2では、途中のデータを測定していないため、強制乾燥1週のデータのみを示している。また、試験体温度が高い状態で長さ変化を測定したデータは、強制乾燥終了後に温度膨張を補正した。これよりシリーズ1およびシリーズ3のデータをみると、質量変化率3%程度まではほとんど長さが変わらず、質量だけが減少していき、その後は質量変化に比例して長さが変化していく傾向がみられる。また、シリーズ1とシリーズ3はほぼ同様の曲線と考えられ、シリーズ2およびシリーズ3の質量変化率が6%弱であることを考えると、シリーズ1では乾燥が不

十分であったことが考えられる。このことから、シリーズ1もシリーズ2の質量変化率まで乾燥すると仮定し、質量変化率-長さ変化率関係の後半の直線部分を延長し、シリーズ1の長さ変化率の補正值とした。

なお、シリーズ2の乾燥期間7日とシリーズ3の乾燥期間28日の質量変化率を比較すると、ほぼ同等の値を示している。シリーズ1では乾燥器に試験体が密に入りすぎたこと、乾燥期間7日の間に2度の測定を行っていることから十分に乾燥が進まなかったと思われる。シリーズ2では同じ乾燥期間7日であるが、十分乾燥が進んでいることから、乾燥は乾燥期間で判断するよりも、試験体の含水状態で判断することがよいと思われる。

粗骨材Tを用いた場合の促進試験前の材齢と強制乾燥収縮率について補正前を図-6、補正後を図-7に示す。単位水量や混和材料の種別によって傾向が異なるものもあるが、データのばらつきと考えられる。なお、補正を実測値から求めることができた調合(T-A, T-B, T-C, T-D, T-A+C, T-170, T-200)の補正值とそれらのシリーズ1の強制乾燥7日のデータの長さ変化率の差をとり、その差の平均値(T-Cは除く)をシリーズ1の強制乾燥7日のデータに足すことですべての調合の補正值を求めた。

図-7から多少のばらつきは見られるものの、混和材料が異なっても促進試験前の材齢が大きくなるに従って強制乾燥収縮率は小さくなる傾向を示していることがわかる。また、粗骨材種別を変化させた場合も同様の傾向が見られた。

(3) 強制乾燥収縮率の補正值を用いた試験開始材齢の影響の検討

(2)で求めた強制乾燥収縮率の補正值を用い、図-2の關係に重ね書きしたものを図-8に示す。なお、各シリーズの強制乾燥期間は、表-1に示した通りとなっている。この結果、どの直線もほぼ平行であり、強制乾燥収縮率と標準乾燥収縮率の關係は、促進試験前の材齢が大きいほどグラフが左にシフトするという傾向があるこ

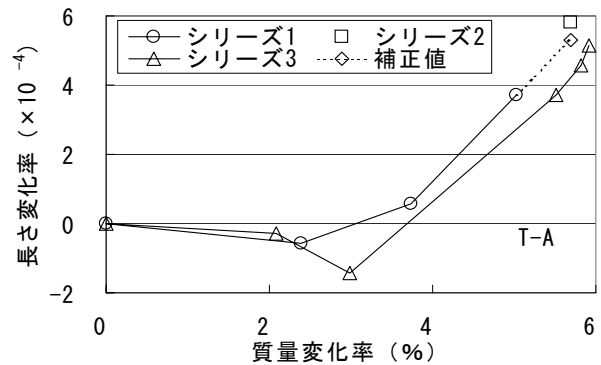


図-5 強制乾燥期間中の質量変化率と長さ変化率の關係(シリーズ1補正值の計算)

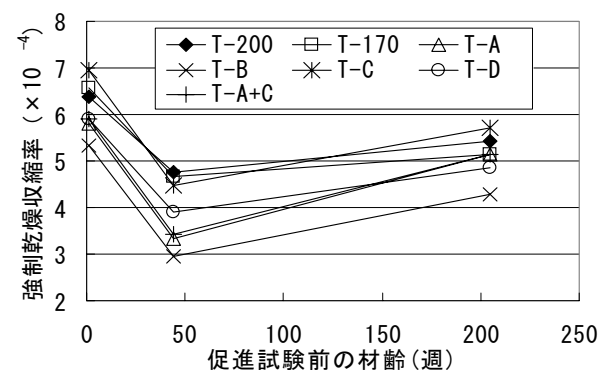


図-6 促進試験前の材齢と強制乾燥収縮率の關係(粗骨材:T)

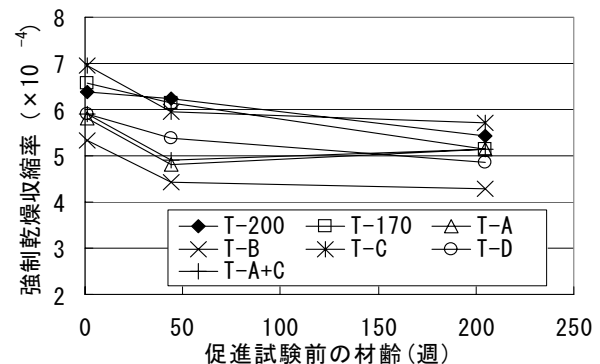


図-7 補正後の促進試験前の材齢と強制乾燥収縮率の關係(粗骨材:T)

とがわかる。

図-9に強制乾燥試験前の材齢と図-8の回帰直線の切片・傾きの關係を示す。これより、傾きはほとんど変化していないことから、変化しないもの(=1)とし、切片は図-9の關係を曲線で近似した式を用いて求めることができる。これらより、図-8の各直線は式(1)で表される。

$$Y = X + 0.172 \ln(x) + 1.407 \quad (1)$$

Y: 標準乾燥収縮率 ($\times 10^{-4}$)

X: 強制乾燥収縮率 ($\times 10^{-4}$)

x: 促進試験前の材齢(週)

傾きが1と考えると、各コンクリート種類の乾燥収縮率の差は、標準乾燥と強制乾燥では同じと考えることができる。これから乾燥収縮は乾燥の方法によらずコンクリート組織の影響が大きいと考えられる。

また、既存の文献⁴⁾で述べているようにこの性質を利用することで若材齢時の強制乾燥データにより長期間の乾燥収縮ひずみを推定することも可能であると考えられる。

5. まとめ

ここでは、既存建築物の室内部分から試験体を切り出し、水中浸漬・強制乾燥を行い、このときの強制乾燥時の収縮率から乾燥収縮率を推定する方法を提案し、結果におよぼす影響要因の検討を行った。主要な結果を以下に示す。

- (1) 各種コンクリートについて同じ条件で求めた強制乾燥収縮率と標準的な試験方法で求めた乾燥収縮率はよい相関性を示し、両者の直線回帰式は勾配がほぼ1であり、条件が変わると平行移動する。
- (2) 水中浸漬による吸水と膨張は、浸漬期間7日程度で安定する。
- (3) 強制乾燥による長さ変化は、ある程度の質量減少後に収縮が開始され、この後は質量の減少に比例して収縮量が増大する傾向を示す。
- (4) 強制乾燥収縮率は、材齢および乾燥状態の影響を受け、同程度の乾燥状態となるように補正を行うと、材齢が大きくなるほど強制乾燥収縮率が小さくなる傾向がある。
- (5) 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として、今回の実験の範囲内で、以下の式を提案した。

$$Y = X + 0.172 \ln(x) + 1.407$$

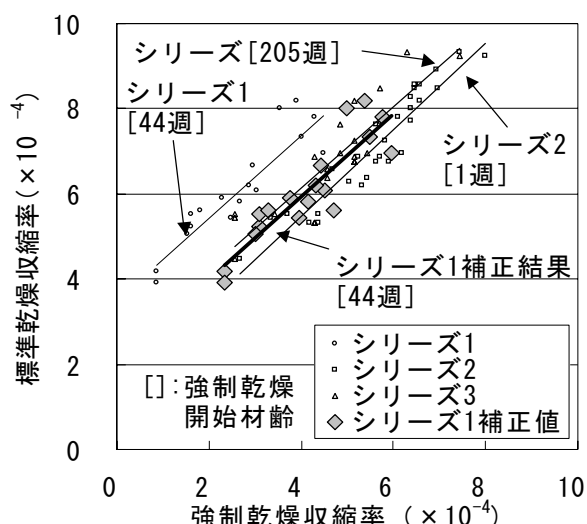


図 - 8 強制乾燥収縮率と標準乾燥収縮率の関係 (補正結果)

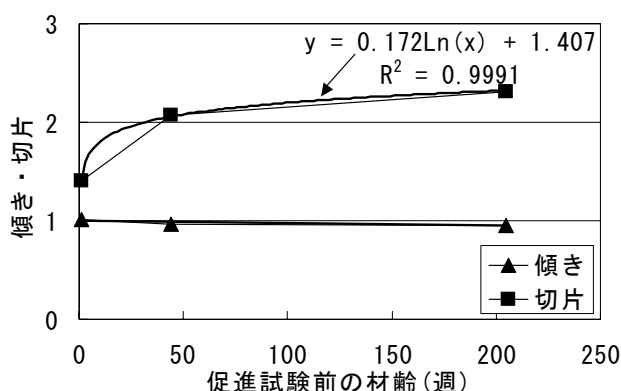


図 - 9 促進試験前の材齢と傾き・切片の関係

Y: 標準乾燥収縮率 ($\times 10^{-4}$)

X: 強制乾燥収縮率 ($\times 10^{-4}$)

x: 促進試験前の材齢(週)

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策(設計・施工)指針・同解説，1978
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ - メカニズムと対策技術の現状，pp24 ~ 25，2003
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひびわれ調査，補修・補強指針，pp246 ~ 247，1987
- 4) 藤本貴・千歩修・浜幸雄・友澤史紀：強制乾燥および水中浸漬によるコンクリートの乾燥収縮の評価方法の検討，セメント・コンクリート論文集，N0.56，pp204 - 209，2002