

論文 コンクリートの乾燥収縮率早期推定方法の提案とその適用性に関する検討

小澤 貴史^{*1}・西田 朗^{*2}・橋田 浩^{*3}

要旨：乾燥収縮率の短期間の実測データに加え，乾燥収縮の進行速度を考慮することで，コンクリートの乾燥収縮率を早期に精度良く推定する方法について実験的検討を行い，その適用性を検証した。この結果，使用材料および調合条件と乾燥収縮の進行速度との関係を定量化することにより，任意の期間における乾燥収縮率を短期データを用いて推定する方法を提案した。提案した早期推定方法の適用性をレディーミクストコンクリート 47 工場，64 調合を対象として検証した結果，乾燥期間 4 週までの測定データを用いることで，26 週乾燥収縮率を $\pm 1.0 \times 10^{-4}$ 程度の誤差で推定できることを確認した。

キーワード：乾燥収縮， 調合， 材料， 推定， 短期データ

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れを抑制・制御する合理的な方法の確立が強く求められている。躯体コンクリートに発生する乾燥収縮ひび割れを制御するためには，使用するコンクリートの乾燥収縮率を把握することが重要である。

乾燥収縮率を把握する一般的な方法として JIS A 1129 の長さ変化試験があるが，この方法は通常 6 ヶ月間という多大な時間と労力を要する。しかしながら，一般的なコンクリート工事において，半年以上前にコンクリートの品質を確認することは難しい。一方で，国内の実験データに基づく乾燥収縮の予測式や短期データに基づく予測方法が提案されているが¹⁾，これらでは，使用材料や調合条件が乾燥収縮の進行速度に及ぼす影響は考慮されていない。

本研究では，こうした背景のもと，短期間の乾燥収縮率の実測データに加え，使用材料や調合条件が乾燥収縮の進行速度に及ぼす影響を考慮することで，早期に精度良く長期の乾燥収縮率を推定する方法について実験的検討を行い，

その適用性をレディーミクストコンクリート 47 工場，64 調合を対象として検証した。

2. 乾燥収縮率早期推定方法の方針

コンクリートの乾燥収縮率の経時変化を表わす式は様々提案されているが^{1, 2)}，本研究では，式の簡便性および適合性を重視し，アルムダイヒールによる ACI 修正式³⁾，ならびに土木学会高強度式⁴⁾と同様の形式である式(1)を用いて検討した。

$$S_t = \left(\frac{t}{Ns + t} \right) \cdot S_{\infty} \quad (1)$$

S_t : 乾燥期間 t 日における乾燥収縮率
 S_{∞} : 乾燥収縮率の最終値
 Ns : S_{∞} の 1/2 に達する乾燥期間 (日)
 t : 乾燥期間 (日)

式(1)は，収縮進行項と乾燥収縮の最終値 S_{∞} との積形で表現されており，乾燥収縮率の進行速度を表わす係数 Ns を別途定めることが出来れば，乾燥収縮率の最終値 S_{∞} は，短期の測定データを基に求めることが可能である。すなわち，任意乾燥期間 t 日における乾燥収縮率 S_t を推定可能

*1 清水建設 (株) 技術研究所 研究員 工修 (正会員)

*2 清水建設 (株) 技術研究所 主任研究員 工修 (正会員)

*3 清水建設 (株) 技術研究所 上席研究員 工博 (正会員)

と考えられる。そこで、Ns と各種要因との関係を実験的に検討することとした。ここでは、乾燥期間 26 週における長期の乾燥収縮率を、乾燥期間 4 週までの短期の実測データを用いて推定する方法について検討を行った。

3. 実験概要

3.1 コンクリートの調合条件

本実験では、コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす要因として、(1) 単位水量および水セメント比、(2) 骨材の種類・品質、(3) セメントの種類、(4) 膨張材使用の有無、の 4 種類を取り上げ、実験シリーズを構成した。使用材料を表-1、調合条件を表-2 に示す。4 シリーズ計 49 調合に、再確認のための 4 調合を加え、計 53 調合とした。コンクリートの調合は、主に水セメント比 53.0%、43.0% の 2 水準、単位水量は使用材料ならびに目標スランプ 15、18 あるいは 21cm に応じて、160~195kg/m³ の範囲とした。空気量は 4.5±1.5% を目標に調整した。

セメントは、普通ポルトランドセメントと中庸熱ポルトランドセメントを各 3 銘柄と、高炉セメント B 種 1 銘柄の計 7 種類を使用した。骨材は岩種、産地ならびに品質の異なるものを選別し、粗骨材 7 種類、細骨材 8 種類を適宜組み合わせ使用した。

表-1 使用材料

材料	種類	内容
セメント	普通	N1 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3280cm ² /g
		N2 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3300cm ² /g
		N3 密度:3.15g/cm ³ , 比表面積:3330cm ² /g
	中庸熱	M1 密度:3.21g/cm ³ , 比表面積:3110cm ² /g
		M2 密度:3.21g/cm ³ , 比表面積:3160cm ² /g
		M3 密度:3.21g/cm ³ , 比表面積:3220cm ² /g
高炉B種	BB 密度:3.04g/cm ³ , 比表面積:3890cm ² /g	
粗骨材	硬質砂岩碎石	GA 表乾密度:2.71g/cm ³ , 吸水率:0.69%, 実績率:61.0%
		GB 表乾密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:0.62%, 実績率:59.7%
	石灰岩碎石	LA 表乾密度:2.71g/cm ³ , 吸水率:0.26%, 実績率:62.2%
		LB 表乾密度:2.73g/cm ³ , 吸水率:0.72%, 実績率:60.3%
		LC 表乾密度:2.71g/cm ³ , 吸水率:0.52%, 実績率:61.6%
	安山岩碎石	AN 表乾密度:2.62g/cm ³ , 吸水率:2.64%, 実績率:61.3%
川砂利	RG 表乾密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:0.86%, 実績率:64.3%	
細骨材	山砂	MA 表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:1.32%, 粗粒率:2.80
		MB 表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.78%, 粗粒率:2.40
	硬質砂岩砕砂	CA 表乾密度:2.68g/cm ³ , 吸水率:1.19%, 粗粒率:2.78
		CB 表乾密度:2.62g/cm ³ , 吸水率:1.19%, 粗粒率:2.79
	石灰岩砕砂	LA 表乾密度:2.60g/cm ³ , 吸水率:1.54%, 粗粒率:3.26
		LB 表乾密度:2.70g/cm ³ , 吸水率:1.14%, 粗粒率:2.69
	安山岩砕砂	AN 表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:2.83%, 粗粒率:2.49
	川砂	RS 表乾密度:2.57g/cm ³ , 吸水率:1.28%, 粗粒率:2.59
混和剤	AE減水剤	AD1 標準形, 密度:1.060 ~ 1.070g/cm ³
	高性能AE減水剤	AD2 標準形, 密度:1.040 ~ 1.060g/cm ³
混和材	膨張材	EX 密度:3.08g/cm ³

3.2 長さ変化試験

100×100×400mmの試験体を用い材齢 7 日まで標準養生を行った後、20±3°C、R.H.60±5%の恒温恒湿室に移設し、JIS A 1129-2 に準拠して長さ変化を測定した。ゲージプラグは供試体の両側面に標点間距離 300mm で貼り付け、測定は、乾燥期間 1, 2, 3, 4, 6, 8, 13, 20, 26 週で行った。本試験の測定に基づいて乾燥収縮率を算出した。

表-2 コンクリートの調合

実験シリーズ (主検討内容)	使用材料					W/C (%)	目標 スランプ ^a (cm)	単位粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)			調合数						
	セメント	細骨材	粗骨材	混和材	混和剤				W	C	EX							
シリーズ 1 (W/C, 単位水量)	N1	MA	GA, LA	-	AD1	53.0	15	0.60	160	302	-	16						
							18	0.56	175	330	-							
							21	0.52	190	358	-							
							AD2	18	0.58	160	302		-					
							AD1	15	0.60	160	372		-					
							AD2	18	0.58	160	372		-					
シリーズ 2 (骨材種類・品質)	N1	MA	GA, GB, LB, AN	-	AD1	53.0	18	0.56	175	330	-	18						
			RG				15	0.60	160	302	-							
		MA, MB, CA+MA, CB+MA, LB+MA, LB+MB, RS+MA, AN	GA				18	0.58	165	311	-							
							15	0.62	150	283	-							
							175	330	-									
							AD2	18	0.56	185	349		-					
							175	330	-									
							AD1	175	330	-								
		シリーズ 3 (セメント種類)	N1, N2, N3 M1, M2, M3, BB				MA	GA	-	AD1	43.0		18	0.56	180	419	-	13
			LA															
シリーズ 4 (膨張材)	N1	LA	LC	-	AD1	53.2	18	0.56	170	320	-	2						
				EX						300	20							
(追加・再確認)	N1	MA	GA, LA	-	AD1	53.0	18	0.56	175	330	-	4						
													43.0	180	419	-		

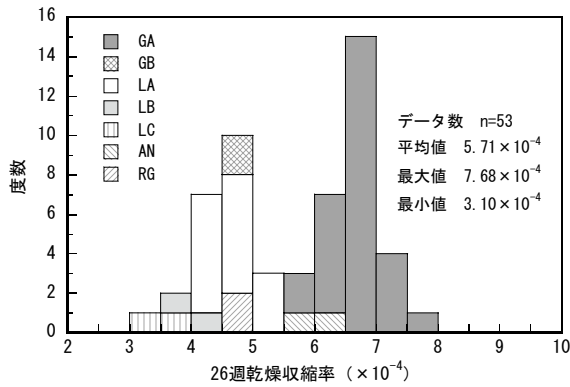


図-1 乾燥収縮率の分布

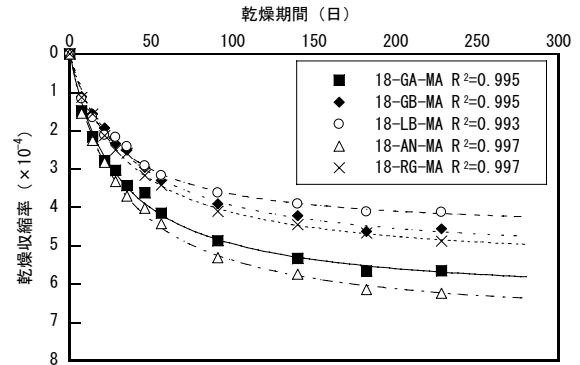


図-2 長さ変化試験結果の回帰例

4. 検討結果と推定方法の提案

4.1 26 週乾燥収縮率の測定結果

図-1 に乾燥期間 26 週における乾燥収縮率の分布を粗骨材銘柄毎に整理して示す。乾燥収縮率は $3.10 \sim 7.68 \times 10^{-4}$ と幅広い分布を示したが、全てのコンクリートにおいて、JASS5⁵⁾で目標品質としている 8.0×10^{-4} 以下の乾燥収縮率となった。乾燥収縮率には、粗骨材の岩種の影響が大きかった。

4.2 係数 N_s と回帰式の適合性

全期間の乾燥収縮率の測定データを式(1)を用いて調合毎に回帰し、係数 N_s を調合条件毎に算出した。回帰結果の例を測定データならびに決定係数 R^2 と併せて図-2 に示す。全調合条件に対して、決定係数は $R^2=0.973 \sim 0.999$ (平均値 0.994) であり、いずれの調合においても、乾燥期間の全期間において式(1)で精度良く近似できた。乾燥期間 26 週における乾燥収縮率の回帰による値と実測値の関係は、図-3 に示すように、決定係数は $R^2=0.980$ であり、精度良く表わせた。

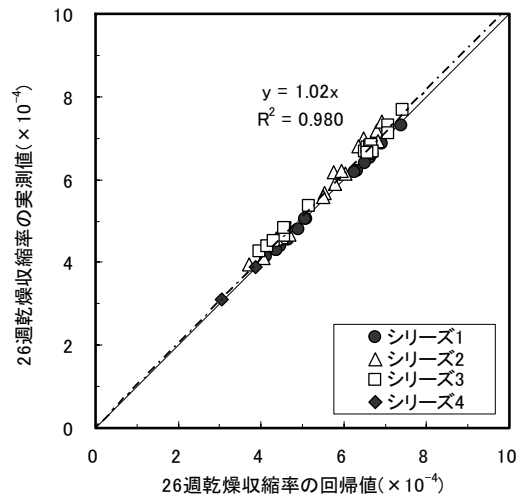


図-3 乾燥収縮率の回帰値と実測値の関係

係数 N_s の分布を図-4 に示す。乾燥収縮の進行速度を表す N_s は、部材寸法・形状の影響のみを受けるとされているが^{1, 3)}、使用材料や調合条件によって大きく異なる値を示した。

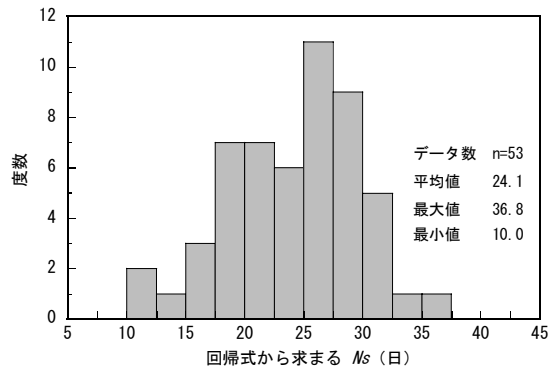


図-4 N_s の分布

4.3 係数 N_s と調合・使用材料との関係

(1) N_s と調合条件の関係

図-5 に同一調合条件下における N_s の平均値と単位水量との関係を骨材種類、水セメント比毎に示す。図に示すように、 N_s と単位水量との関係は明確でないものの、 N_s は水セメント比や

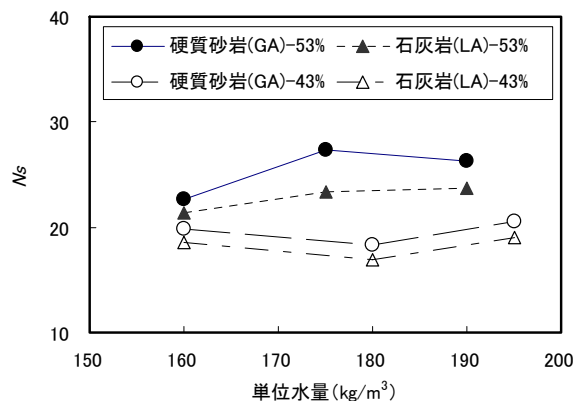


図-5 単位水量と N_s の関係

表-3 W/Cならびに粗骨材種類とNs

	硬質砂岩 (GA)	石灰岩 (LA)	硬質砂岩に対する比	
			(LA/GA)	平均
W/C 53%	25.6	22.6	0.88	0.91
W/C 43%	19.2	18.1	0.94	
W/C 53%に対する比 (43%/53%)	0.75	0.80	-	
平均	0.77			

骨材種類によって異なる傾向にあることが分かった。水セメント比ならびに粗骨材種類による影響を整理した結果を表-3に示す。水セメント比43.0%の調合では水セメント比53.0%の調合に比べてNsが23%小さくなった。両者の関係が直線で表わせると仮定すると、水セメント比が10%小さくなるとNsは23%小さくなると評価できる。また、硬質砂岩砕石(GA)に比べると石灰岩砕石(LA)ではNsが9%程小さくなった。

(2) Nsと骨材品質の関係

図-6に骨材の絶乾密度ならびに吸水率とNsとの関係を示す。決定係数が $R^2=0.68$ と最も大きかった粗骨材の絶乾密度とNsの関係は負の相関関係にあり、絶乾密度が大きくなるとNsが小さくなった。これは絶乾密度が小さいほど乾燥収縮が徐々に長期間に渡って進行することを示している。図-6に示す回帰式を用い、絶乾密度が 2.70g/cm^3 の硬質砂岩砕石(GA)を使用した調合のNs=25.6を基準として、絶乾密度の影響を試算した結果を表-4に示す。粗骨材の絶乾密度が 0.10g/cm^3 小さくなるとNsが約20%大きくなると評価できる。また、前述したように、硬質砂岩砕石(GA)に比べると石灰岩砕石(LA)ではNsが9%程小さくなった。これは、両骨材ともに絶乾密度が 2.70g/cm^3 と同じ値であるため絶乾密度では説明が出来ず、骨材種類の違いによるものと考えられる。

(3) Nsとセメント種類の関係

表-5に、同一調合条件下におけるNsの平均値とセメント種類との関係、および、普通ポルトランドセメントのNsを基準としてセメント種類の影響を示す。普通ポルトランドセメントを用いた調合に比べて、中庸熱ポルトランドセメントを用いた調合ではNsが26%大きく、高炉セ

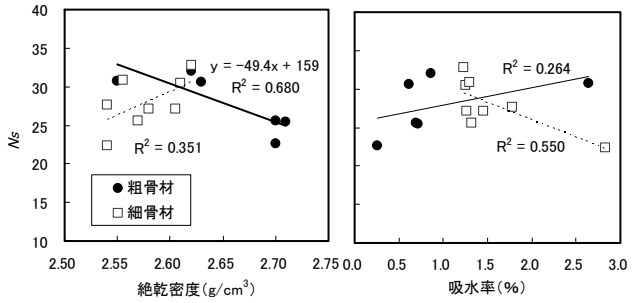


図-6 骨材品質とNsの関係

表-4 粗骨材の絶乾密度とNs

骨材種類	絶乾密度 (g/cm³)	図6の回帰式より求まるNs	絶乾密度 2.70g/cm^3 に対する比
粗骨材	2.70	25.6	1.00
	2.65	28.1	1.10
	2.60	30.6	1.19
	2.55	33.0	1.29
	2.50	35.5	1.39

表-5 セメント種類とNs

	普通 (N)	中庸熱 (M)	高炉B種 (BB)	Nに対する比	
				M	BB
硬質砂岩(GA)	20.3	26.1	13.2	1.29	0.65
石灰岩(LA)	18.1	22.3	9.5	1.23	0.53
	平均			1.26	0.59

表-6 膨張材使用の有無とNs

	膨張材(EX)の有無		無に対する比 (有/無)
	無	有	
シリーズ4	28.8	32.4	1.12

メントB種を用いた調合ではNsが41%小さくなった。これは、中庸熱ポルトランドセメントを用いた調合では乾燥収縮が徐々に進行し、高炉セメントB種を用いた調合では乾燥収縮が乾燥初期に急速に進行することを示しており、セメント種類による乾燥収縮の進行速度の違いをNsによって評価できた。

(4) Nsと膨張材有無の関係

表-6に、シリーズ4における膨張材使用の有無とNsの関係を示す。膨張材を用いた調合では、膨張材を用いない調合に対してNsが12%大きくなった。これは、膨張材を用いた調合では、用いない調合よりも乾燥収縮が徐々に進行することを示している。

4.4 乾燥収縮率の早期推定方法の提案

(1) 提案する早期推定方法

任意の乾燥期間t日におけるコンクリートの乾燥収縮率は式(2)で表わすことができる。ここ

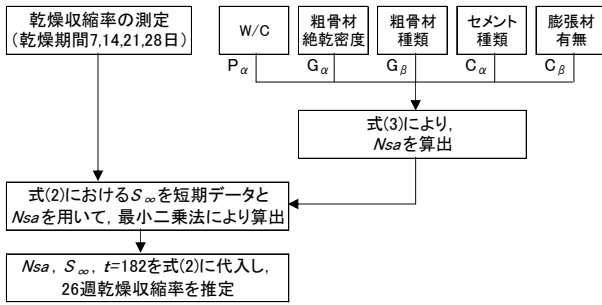


図-7 乾燥収縮率の早期推定の手順

で、乾燥収縮の進行速度を表わす係数を、使用材料と調合条件に対応させ Nsa として式 (3) で定めることとすると、乾燥収縮率の最終値 S_{∞} は、 Nsa と短期の測定データ ($t=7, 14, 21, 28$ 日) を利用して最小二乗法により求めることができる。したがって、乾燥期間 26 週 ($t=182$ 日) での乾燥収縮率は、式 (3) で定まる Nsa 、最小二乗法により求めた S_{∞} 、ならびに $t=182$ を式(2)に代入することで推定することができる。乾燥収縮率の早期推定手順を図-7 に示す。

$$S_t = S_{\infty} \left(\frac{t}{Nsa + t} \right) \quad (2)$$

S_t : 乾燥期間 t 日における乾燥収縮率

S_{∞} : 乾燥収縮率の最終値

Nsa : 乾燥収縮の進行速度を表す係数

t : 乾燥期間 (日)

$$Nsa = 25.6 \times P_{\alpha} \times G_{\alpha} \times G_{\beta} \times C_{\alpha} \times C_{\beta} \quad (3)$$

ここで、

$$P_{\alpha} = 1 - 0.023 \times (53 - X), \quad X : W/C (\%)$$

$$G_{\alpha} = 1 + 2 \times (2.70 - Dd), \quad Dd : \text{絶乾密度 (g/cm}^3\text{)}$$

$$G_{\beta} = \text{石灰岩} : 0.9, \text{ 其他骨材} : 1.0$$

$$C_{\alpha} = N : 1.0, M : 1.25, BB : 0.6$$

$$C_{\beta} = \text{膨張材無} : 1.0, \text{ 膨張材有} : 1.1$$

式(3)は、普通ポルトランドセメント、絶乾密度 2.70g/cm^3 の硬質砂岩砕石(GA)を使用した水セメント比 53.0%の調合の Ns の平均値 25.6 に、各要因が Ns に及ぼす影響を係数 $P_{\alpha}, G_{\alpha}, G_{\beta}, C_{\alpha}$ 、および C_{β} として乗じたものである。

式(3)から求めた Nsa と実測データから算出した Ns の関係は図-8 に示すように、ほぼ 1 対 1 で対応し、決定係数は $R^2=0.725$ であった。

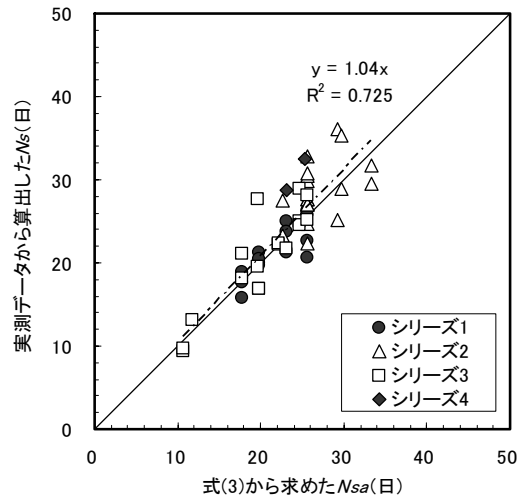


図-8 実測データから求めた Ns と式 (3) から求めた Nsa との関係

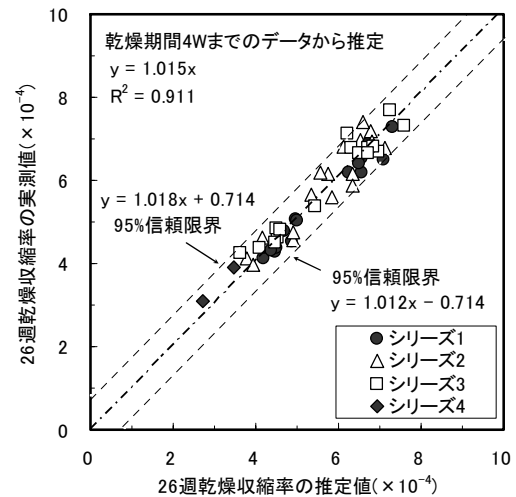


図-9 乾燥収縮率の早期推定値と実測値の関係 (室内実験コンクリート)

(2) 推定精度

乾燥期間 26 週における乾燥収縮率に関して、本研究で提案する早期推定方法による推定値と実測値の関係を図-9 に示す。図には、95%信頼限界の近似式も併せて示す。乾燥期間 26 週における乾燥収縮率は、決定係数 $R^2=0.911$ 、95%信頼区間 $\pm 0.71 \times 10^{-4}$ の精度で推定できた。

5. 早期推定方法の検証

前述した早期推定方法の推定精度の検証を、使用材料や調合条件が異なるコンクリートを対象として行うこと、ならびにレディーミクストコンクリートの乾燥収縮率を把握することを目

表-7 レディーミクストコンクリートの概要

対象	地域	1都1府9県
	工場・調査数	47工場・64調査
調査	呼び強度	24~42 (平均 26.8)
	水セメント比(%)	39.3~59.5 (平均 54.3)
	単位水量(kg/m ³)	161~184 (平均 175.6)
使用材料	セメント	普通:5銘柄, 中庸熱:2銘柄
	粗骨材	石灰岩:8銘柄, その他:21銘柄 (絶乾密度 2.53~2.79g/cm ³)
	細骨材	42銘柄
	混和剤	AE減水剤:7銘柄 高性能AE減水剤:3銘柄
	混和材	膨張材 3銘柄

表-8 26週乾燥収縮率の試験結果概要

粗骨材	セメント	膨張材	調査種類	乾燥収縮率(×10 ⁻⁴)	調査数
石灰岩	普通	有	石灰岩G-N-EX	2.75~6.20 (平均 4.87)	11
		無	石灰岩G-N	4.75~11.24 (平均 5.88)	10
	中庸熱	無	石灰岩G-M	6.76	1
その他	普通	有	その他G-N-EX	5.35~7.75 (平均 6.72)	14
		無	その他G-N	5.81~9.22 (平均 6.67)	27
	中庸熱	有	その他G-M	8.59	1
		無	全調査	2.75~11.24 (平均 6.28)	64

的として、表-7に示すレディーミクストコンクリート 47 工場、計 64 調査を対象として乾燥収縮率を測定した。対象としたコンクリートは、一般的な建築のコンクリート工事に使用される普通コンクリートで、呼び強度 24~42、水セメント比は 39.3~59.5%の調査である。使用材料は、表に示すように様々な銘柄が組み合わされている。乾燥収縮率の測定は、3.2と同様の方法で、乾燥期間 1, 2, 3, 4, 8, 13, 26 週で行った。

乾燥期間 26 週における乾燥収縮率の試験結果を表-8に、乾燥収縮率の早期推定値と実測値の関係を図-10に示す。26 週乾燥収縮率は、2.75~11.24×10⁻⁴と非常に幅広い分布を示したが、概ね 1.0×10⁻⁴程度の誤差で推定できた。また、今回対象とした計 64 調査の測定結果から、レディーミクストコンクリート工場によって乾燥収縮率が大きく異なること、石灰岩砕石を使用した調査でも乾燥収縮率が 8×10⁻⁴を大きく上回るケースのあることが明らかとなったが、早期推定を行ったことで、これらを乾燥開始後 4 週間で把握することが出来た。

6. まとめ

本研究では、長期の乾燥収縮率を早期に推定する方法について検討を行った。本研究の範囲において得られた主な知見を以下に示す。

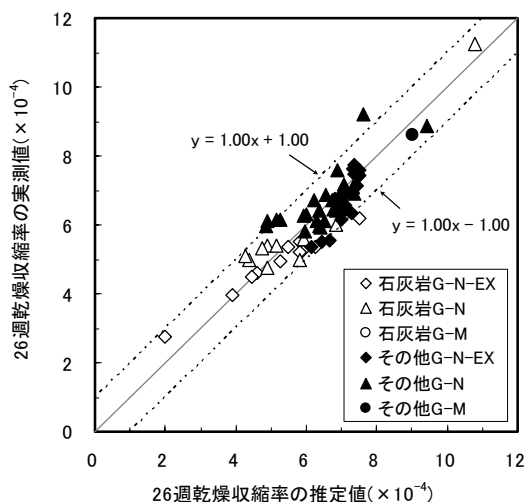


図-10 乾燥収縮率の早期推定値と実測値の関係 (レディーミクストコンクリート)

(1) 使用材料および調査条件と乾燥収縮の進行速度との関係を定量化することにより、任意の期間における乾燥収縮率を短期データを用いて推定する方法を提案した。

(2) レディーミクストコンクリート 47 工場、64 調査を対象に、提案した早期推定方法の推定精度を検証した結果、乾燥期間 4 週までの測定データを用いることで、26 週乾燥収縮率を±1.0×10⁻⁴程度の誤差で推定できることを確認した。

今後は、さらに精度の向上を図るため、データの蓄積を行い、詳細な検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.1
- 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, 2003.5
- 3) J.A. Almudiheem, and W. Hansen: Effect of Specimen Size and Shape on Drying Shrinkage of Concrete, ACI Materials Journal, Vol.84, No.2, pp.130-135, 1987
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002.4
- 5) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2003.1