

コンクリートの乾燥収縮率の早期推定方法に関する研究

小澤 貴史 西田 朗 橋田 浩
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Early Evaluation Method for Drying Shrinkage of Concrete

by Takashi Ozawa, Akira Nishida and Hiroshi Hashida

Abstract

Drying shrinkage was studied using concrete specimens with different types of cements and aggregates, some water-cement ratios and unit water contents. In the experiments, length change of concrete, density, water absorption and pore volume of the aggregates were measured. From the experiments, the following conclusions were derived: 1. Drying shrinkage of concrete was much influenced by kinds of aggregates. 2. An estimation method for long-term drying shrinkage of concrete could be proposed, using the drying shrinkage of concrete up to the age of 28 days and the constant determined by types of cements and coarse aggregates, oven-dry density of coarse aggregate and water-cement ratio. 3. The proposed method can provide long-term drying shrinkage of concrete with a high degree of accuracy.

概 要

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 $\pm 1.27 \times 10^{-4}$ 程度の誤差で推定できることを確認した。

§ 1 . はじめに

鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れは、構造物の外観に損傷を与えると共に、耐久性を大きく損なわせる原因となる。収縮ひび割れの問題は、古くからあって未だに解決されていない技術的な課題の一つであり、また、2000年に「住宅の品質確保の促進等に関する法律」が施行されたことから、コンクリート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^{1,2)}。

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。コンクリートの乾燥収縮率を把握する方法にはJIS A 1129の長さ変化試験があるが、この方法は通常6カ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近年提案されているが^{3,4,5,6)}、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。また、JASS5では、乾燥収縮を低減するための対策として、単位水量をできるだけ小さくするよう規定している⁷⁾が、その低減効果は定量的に十分把握できていないのが現状である³⁾。

本研究では、こうした背景のもと、コンクリートの乾燥収縮によるひび割れを抑制する対策の一つとして、乾燥収縮率低減に有効な使用材料・調合を明らかにするとともに、長期の乾燥収縮率を短期間で精度良く推定する方法について検討を行った。乾燥収縮率の推定方法に関しては、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、乾燥期間6カ月(26週)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 . 実験の概要

2 . 1 実験シリーズ

コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす要因として、単位水量および水セメント比などの調合条件、骨材の種類・品質、セメントの種類・銘柄、ならびに膨張材使用の有無などの使用材料を取り上げ、以下に示す実験シリーズごとに、各要因がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響について検討を行った。

- シリーズ1：単位水量および水セメント比
- シリーズ2：粗・細骨材の種類および品質
- シリーズ3：セメントの種類および銘柄
- シリーズ4：膨張材使用の有無

2 . 2 使用材料

使用材料を表 - 1、コンクリートの調合を表 - 2 に示す。シリーズ1では、セメントは普通ポルトランドセメント(N1)、粗骨材は首都圏のレディーミクストコンクリート工場で一般的に使用される硬質砂岩砕石(GA)と石灰岩砕石(LA)の2種類、細骨材は山砂(MA)とし、混和剤はAE減水剤(AD1)と高性能AE減水剤(AD2)を使用した。これらを本実験の基本材料とし、シリーズ2では、岩種、産地ならびに品質の異なる骨材を選別し、粗骨材5種類、細骨材7種類を使用した。シリーズ3では、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銘柄のセメントを使用した。シリーズ4では、普通ポルトランドセメント(N1)、石灰岩砕石(LC)、石灰岩砕砂(LA)の組み合わせに、混和材として収縮低減を目的に膨張材を使用した。

調合数は、4シリーズ計49調合に、再確認のために

表 - 1 使用材料

材料	種類	内容	
セメント	普通	N1	A社製, 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3280cm ² /g
		N2	B社製, 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3300cm ² /g
		N3	C社製, 密度:3.15g/cm ³ , 比表面積:3330cm ² /g
	中庸熱	M1	A社製, 密度:3.21g/cm ³ , 比表面積:3110cm ² /g
		M2	B社製, 密度:3.21g/cm ³ , 比表面積:3160cm ² /g
		M3	C社製, 密度:3.21g/cm ³ , 比表面積:3220cm ² /g
高炉B種	BB	A社製, 密度:3.04g/cm ³ , 比表面積:3890cm ² /g	
粗骨材	硬質砂岩砕石	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%
	石灰岩砕石	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%
	安山岩砕石	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

シリーズ1のスランブ18cmの4調合を加え、計53調合とした。調合は、水セメント比53.0%では単位水量175kg/m³、水セメント比43.0%では単位水量180kg/m³の調合で、練り上がり20~30分後のスランブが18cm程度となるように粗骨材かさ容積ならびに混和剤添加量を定めた。AE減水剤(AD1)を使用して単位水量を減じたケースではスランブ15cm程度、増やしたケースではスランブ21cm程度、また、高性能AE減水剤(AD2)を使用したケースではスランブ18cm程度を想定し、調合を定めた。シリーズ2では、単位水量を

表 - 2 コンクリートの調合概要

実験シリーズ (主検討内容)	使用材料					W/C (%)	目標 スランブ (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	-							
							15	0.60	160	372	-							
							18	0.56	180	419	-							
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	GA				18	0.58	165	311	-							
							15	0.62	150	283	-							
							18	0.56	175	330	-							
		MB, CA+MA, CB+MA, LB+MA, LB+MB, RS+MA	GA				18	0.56	185	349	-							
		AN					175	330	-									
									AD2				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				

185kg/m³以下とするため、必要に応じて細骨材2種類を容積比5:5で混合使用した。細骨材率は44.3～51.3% (平均値47.8%) となった。空気量は4.5 ± 1.5% を目標に調整した。

2.3 実験方法

実験は、清水建設技術研究所の実験棟内で行った。容量55リットルのパン型ミキサを用いて製造したコンクリートのフレッシュ性状を確認した後、以下の測定を行った。

2.3.1 乾燥収縮率

各シリーズの全調合を対象として、100 × 100 × 400 mmの供試体を用い、材齢7日まで標準養生を行った後、20 ± 3、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、測定は乾燥材齢1、2、3、4、6、8、13、20、26週を原則として行った。本測定に基づいて乾燥収縮率を算出した。

2.3.2 骨材の細孔量

シリーズ2において使用した骨材を対象に、細孔直径0.003 μm～500 μmの範囲で測定可能な水銀圧入式ポロシメータを用いて、粗骨材および細骨材の細孔量を測定した。粗骨材は、3～5mm角程度に粉碎した試料の中から、なるべく扁平でないものを選別した。測定回数は原則として各2回とした。

§ 3. 実験結果および考察

乾燥収縮率の測定結果の一例として、粗骨材が硬質砂岩 (GA) と石灰岩 (LA) の2種類、セメント種類が普通セメント (N) と高炉セメントB種 (BB) の2種類を組み合わせた、水セメント比43.0あるいは55.0%の5調合の測定結果を図-1に示す。使用材料ならびに調合条件によって、乾燥収縮率および収縮の進行速度が異なった。収縮の進行速度に関しては4章での検討対象とし、本章では、乾燥期間26週における乾燥収縮率について検討を行った。

図-2に乾燥期間26週における乾燥収縮率の分布を示す。乾燥収縮率は、3.96～7.68 × 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、JASS5で目標品質の目安としている8.0 × 10⁻⁴以下の乾燥収縮率となった。

3.1 単位水量・水セメント比の影響 (シリーズ1)

図-3に水セメント比ならびに単位水量を変化させた場合の乾燥期間26週における乾燥収縮率を示す。

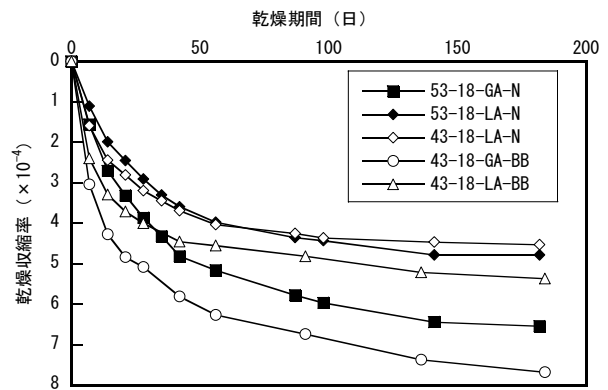


図-1 乾燥収縮率の測定結果の一例

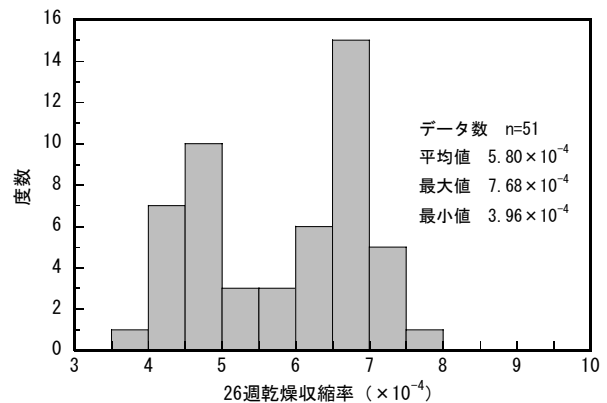


図-2 乾燥収縮率の分布

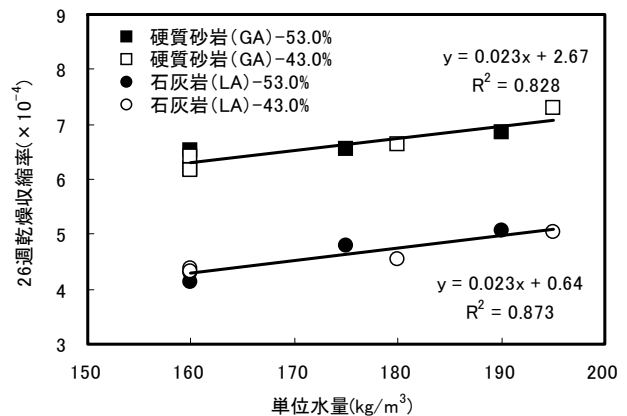


図-3 単位水量と乾燥収縮率の関係

水セメント比が乾燥収縮率に及ぼす影響は認められなかったが、いずれの水セメント比、骨材種類でも単位水量を低減すると乾燥収縮率が減少する傾向が認められた。単位水量の低減が乾燥収縮率の減少に及ぼす効果は、単位水量10kg/m³当たり0.23 × 10⁻⁴程度と小さかった。一方、骨材種類による乾燥収縮率の差は大きく、石灰岩碎石を粗骨材に用いたコンクリートの乾燥収縮率は、硬質砂岩を用いたものに比べて2 × 10⁻⁴程度小さかった。

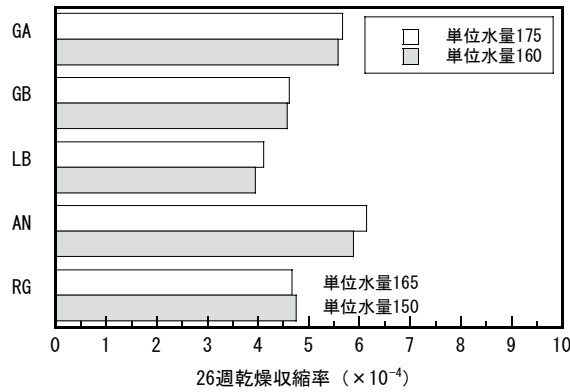


図 - 4 粗骨材種類の影響 (細骨材 : MA)

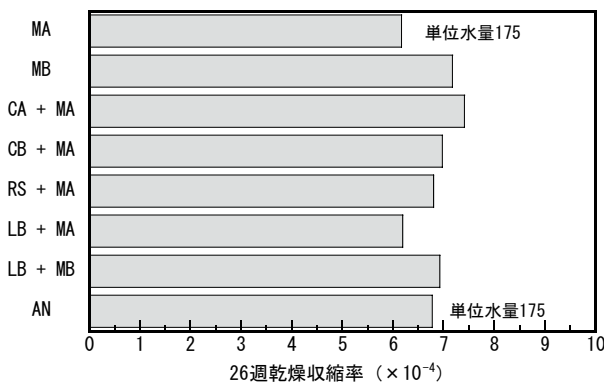


図 - 5 細骨材種類の影響 (粗骨材 : GA、単位水量 185kg/m³)

3. 2 骨材種類・品質の影響 (シリーズ2)

図 - 4 に粗骨材種類を変化させた場合の乾燥期間26週における乾燥収縮率を示す。乾燥収縮率は、粗骨材の岩種や産地によって大きく異なり、石灰岩砕石 (LB) を用いた調合が $3.96 \sim 4.12 \times 10^{-4}$ で最小となり、安山岩砕石 (AN) を用いた調合が $5.89 \sim 6.14 \times 10^{-4}$ で最大となった。シリーズ1で得られた結果と同様に粗骨材種類による乾燥収縮率の差は大きく、粗骨材種類が及ぼす影響は 2×10^{-4} 程度認められた。

図 - 5 に細骨材種類を変化させた場合の乾燥期間26週における乾燥収縮率を示す。山砂 (MA) 単独あるいは石灰岩砕砂 (LB) に山砂 (MA) を混合使用した調合が 6.17×10^{-4} 、 6.20×10^{-4} で最も小さく、硬質砂岩砕砂 (CA) を山砂 (MA) と混合使用した調合が 7.41×10^{-4} で最も大きかった。細骨材種類による乾燥収縮率の差は最大で 1.2×10^{-4} 程度認められたが、粗骨材種類が及ぼす影響に比べると小さかった。

使用した骨材の種類・組み合わせと品質を表 - 3 に、絶対乾密度、吸水率、微粒分量、ならびに細孔量などコンクリートの乾燥収縮率に影響を及ぼすと考えられる骨材品質と、その骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮率の関係を図 - 6 に示す。粗骨材の吸水率な

表 - 3 使用した骨材の種類・組合せと品質

骨材種類・組合せ	表乾密度 (g/cm ³)	絶対乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	細孔量 (mm ³ /g)			
					細孔半径 100-1000nm	細孔半径 30nm以下	細孔半径 15nm以下	
粗骨材	GA	2.71	2.70	0.69	-	1.20	0.25	0.20
	GB	2.65	2.63	0.62	-	0.85	0.30	0.15
	LA	2.71	2.70	0.26	-	1.30	0.10	0.00
	LB	2.73	2.71	0.72	-	3.85	0.45	0.20
	AN	2.62	2.55	2.64	-	1.80	5.60	4.40
	RG	2.65	2.62	0.86	-	1.95	1.00	0.65
細骨材	MA	2.61	2.57	1.32	0.73	3.00	5.60	5.10
	MB	2.58	2.54	1.78	0.55	8.70	6.20	4.40
	CA+MA	2.65	2.61	1.26	1.83	2.75	3.00	2.60
	CB+MA	2.62	2.58	1.26	2.26	3.75	2.90	2.55
	RS+MA	2.59	2.56	1.30	0.54	2.55	2.85	2.55
	LB+MA	2.65	2.62	1.23	2.42	3.10	3.00	2.60
	LB+MB	2.64	2.61	1.46	2.33	5.95	3.30	2.25
	AN	2.61	2.54	2.83	3.46	3.40	4.00	3.00

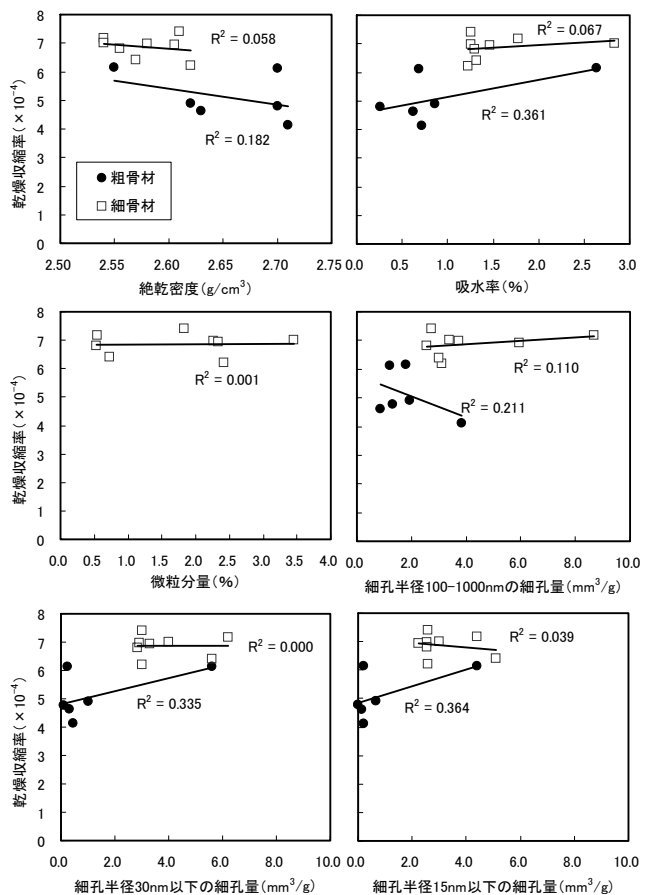


図 - 6 骨材品質と乾燥収縮率の関係

らびに細孔半径 15nm 以下の細孔量において乾燥収縮率との間に $R^2=0.36$ 程度の弱い相関が見られるものの、これらを含めた骨材品質と乾燥収縮率の関係は明確ではなく、骨材品質から乾燥収縮率の程度を予測するのは難しいと推察される。

以上のことから、乾燥収縮率には、絶対乾密度、吸水率、細孔径分布、ならびに微粒分量などの骨材品質よりはむしろ、骨材の岩種、特に粗骨材の岩種の影響が大きいことが分かった。

3.3 セメント種類・銘柄の影響 (シリーズ3)

セメント種類を変化させたコンクリートの乾燥期間26週における乾燥収縮率を図-7に示す。いずれの骨材種類、単位水量においても、普通ポルトランドセメント(N) > 中庸熱ポルトランドセメント(M) < 高炉セメントB種(BB)の順に乾燥収縮率が大きくなった。普通ポルトランドセメントの乾燥収縮率に比べて、中庸熱ポルトランドセメントは2~3%程度、高炉セメントB種は6~16%程度大きかった。一方、セメント製造メーカーによる乾燥収縮率の違いは、図-8に示すように 0.35×10^{-4} 以下(5%以下)と小さく、銘柄による差異は明確ではなかった。

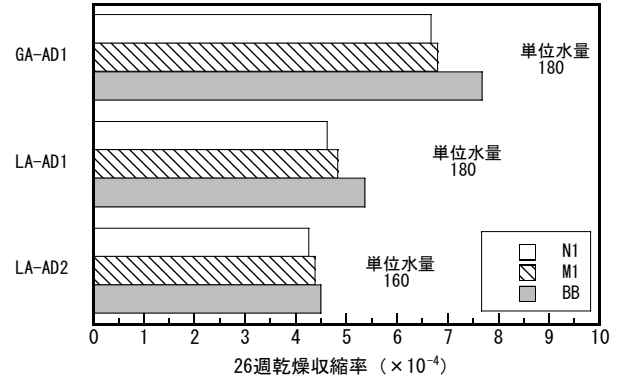


図-7 セメント種類の影響

3.4 膨張材の影響 (シリーズ4)

膨張材の使用有無が乾燥収縮率に及ぼす影響を図-9に示す。膨張材を混入することにより、26週乾燥収縮率は 0.80×10^{-4} 、比率にして20%程度乾燥収縮率が小さくなった。

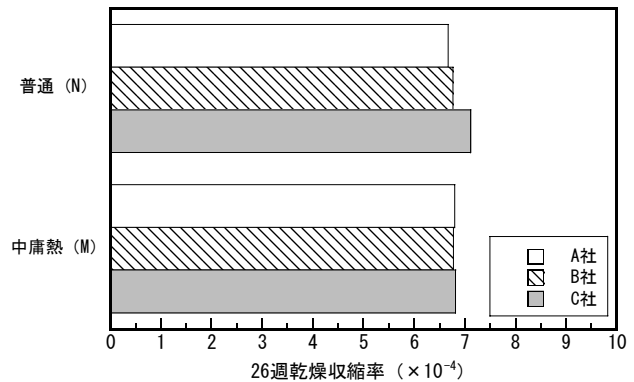


図-8 セメント製造メーカー(銘柄)の影響

§4. 乾燥収縮の早期推定方法に関する検討

4.1 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特性を表す式は様々提案されているが^{3, 8)}、その多くは、収縮進行項(次式第1項)と乾燥収縮の最終値との積形で表現されており、 S_t を任意乾燥期間 t 日における乾燥収縮率として次のように表される⁹⁾。

$$S_t = \left(\frac{t^p}{N_s + t^p} \right)^q \cdot S_\infty \quad (1)$$

右辺の収縮進行項において、 $p=1$ 、 $q=0.5$ であればCEB-FIP-1990式¹⁰⁾、 $p=1$ 、 $q=1$ ならばACI-209式¹¹⁾、アルムダイヒールによるACI修正式¹²⁾、ならびに土木学会高強度式¹³⁾と同様の形式になる。CEB-FIP-1990式は初期の収縮進行の適合性に問題点が指摘されている⁹⁾こと、ならびに式の簡便性を重視して、本研究では、 $p=q=1$ とした式(2)を用いて検討した。

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

- 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
- N_s : S の1/2に達する乾燥期間(日)
- t : 乾燥期間(日)

式(2)において、乾燥収縮率の進行速度を表す係数 N_s 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

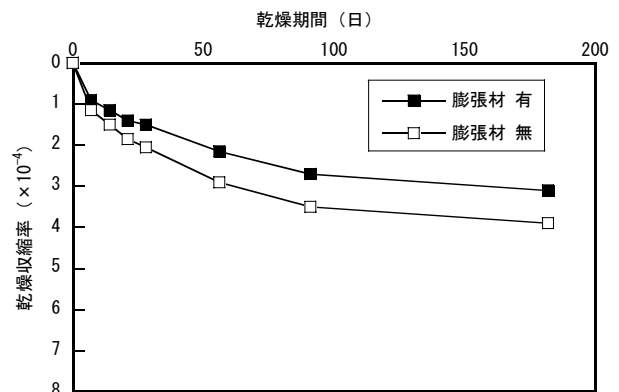


図-9 膨張材の使用有無の影響

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 を推定可能と考えられる。そこで、 N_s と各種要因との関係を実験的に検討することとした。

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(2)を用いて調査ごとに回帰し、係数 N_s を調査条件ごとに算出した。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-10に示す。全調査条件に対して、決定係数は $R^2=0.973 \sim 0.999$ (平均値0.994)であり、いずれの調査においても、乾燥期間の全期間において式

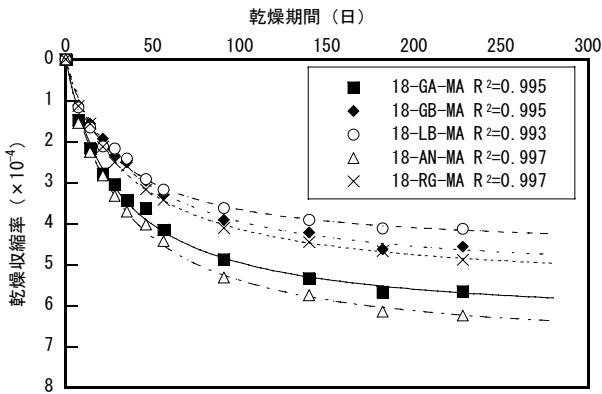


図 - 10 長さ変化試験結果の回帰例

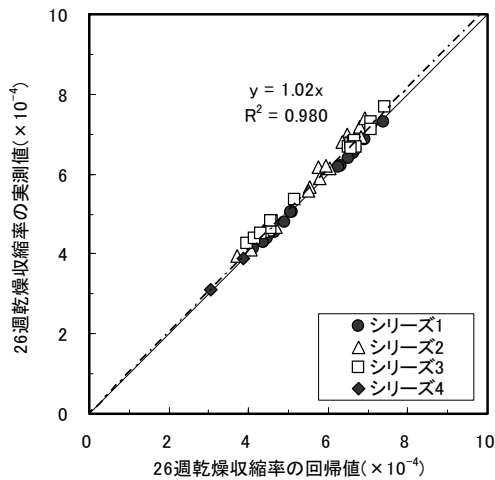


図 - 11 乾燥収縮率の回帰値と実測値の関係

(2)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 - 11 に示すように、決定係数は $R^2=0.980$ であり、精度良く表せた。

測定データの回帰式から求まる係数 N_s の分布を図 - 12 に示す。乾燥収縮の進行速度を表す係数 N_s に影響を及ぼす要因としては、供試体の寸法や形状のみが考慮されているケースが多いが^{3, 8, 12)}、同一形状・寸法の供試体を用いた本実験において、係数 N_s は10.0 ~ 36.8 (平均値24.1) と幅広い値を示した。このため、使用材料や調合条件が N_s に影響を及ぼすと仮定した上で、これらが N_s に及ぼす影響を定量的に評価することとした。

4.3 係数 N_s と調合・使用材料との関係

4.3.1 N_s と調合条件の関係

図 - 13 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、水セメント比ごとに示す。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

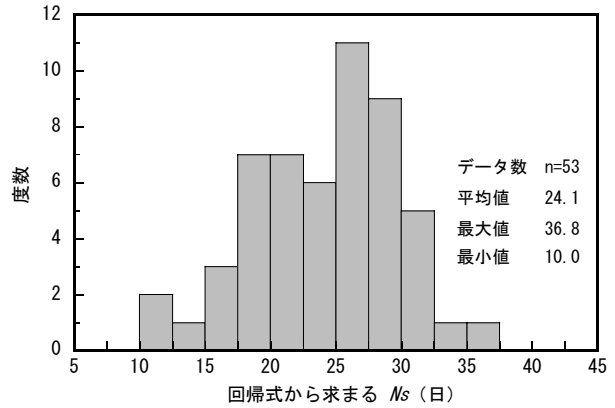


図 - 12 N_s の分布

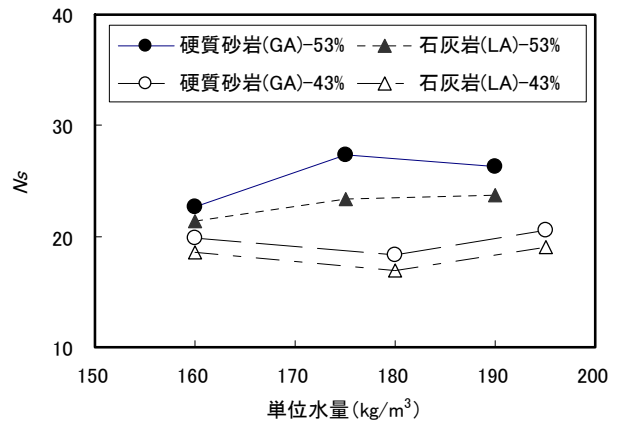


図 - 13 単位水量と N_s の関係

表 - 4 W/Cならびに粗骨材種類と N_s

	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			

らびに骨材種類による影響を整理した結果を表 - 4 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 N_s が23%小さくなった。両者の関係が直線で表せると仮定すると、水セメント比が10%小さくなると N_s 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 N_s が9%程小さくなった。

4.3.2 N_s と骨材品質の関係

図 - 14、表 - 5 に各骨材品質と N_s との関係を示す。 N_s に最も寄与率の高い骨材品質は、粗骨材の絶対乾密度であり、決定係数は $R^2=0.68$ であった。粗骨材の絶対乾密度と N_s の関係は負の相関関係にあり、絶対乾密度が大きくなると N_s が小さくなった。これは絶対乾密度が小さいほど乾燥収縮が徐々に長期間に亘って進行することを示している。図 - 14 に示す回帰式を用い、絶

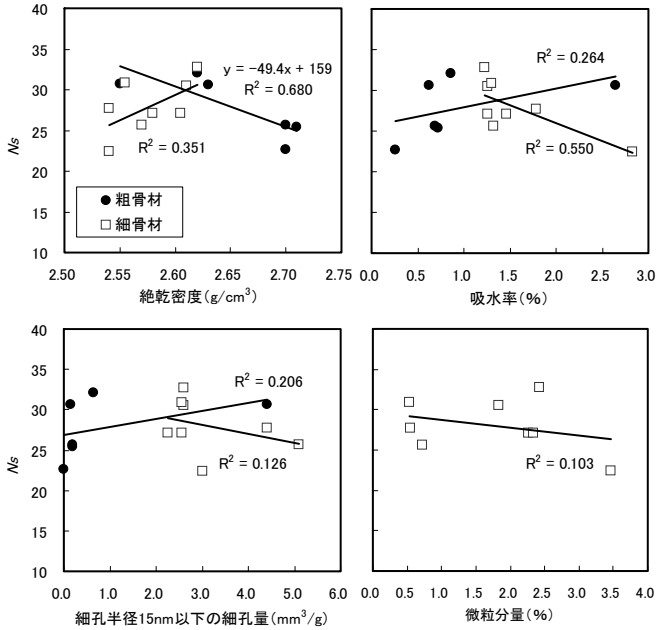


図 - 14 骨材品質とNsの関係

乾密度が2.70g/cm³の硬質砂岩砕石(GA)を使用した調査のNs=25.6を基準として、絶対乾密度の影響を検討した結果を表 - 6 に示す。粗骨材の絶対乾密度が0.10g/cm³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、両骨材ともに絶対乾密度が2.70g/cm³と同じ値であるため絶対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。

4.3.3 Nsとセメント種類の関係

表 - 7 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査に比べて、中庸熱ポルトランドセメントを用いた調査ではNsが26%大きく、高炉セメントB種を用いた調査では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査では乾燥収縮が徐々に進行し、高炉セメントB種を用いた調査では乾燥収縮が初期に急速に進行することを示しており、Nsによってセメント種類による乾燥収縮の進行速度の違いを評価できた。

4.3.4 Nsと膨張材有無の関係

表 - 8 に、シリーズ4における膨張材の有無とNsの関係を示す。膨張材を用いた調査では、膨張材を用いない調査に対してNsが12%大きくなった。これは、膨張材を用いた調査では、用いない調査よりも乾燥収縮が徐々に進行することを示している。

表 - 5 各骨材品質とNsの相関性 (単相関の決定係数)

	絶対乾密度	吸水率	細孔半径15nm以下の細孔量	微粒分量
粗骨材	0.680	0.264	0.206	-
細骨材	0.351	0.550	0.126	0.103

表 - 6 粗骨材の絶対乾密度がNsに及ぼす影響

骨材種類	絶対乾密度 (g/cm ³)	図11の帰帰式より求まるNs	絶対乾密度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 - 7 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 - 8 膨張材の有無と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

4.4 乾燥収縮率の早期推定方法の提案

4.4.1 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(3)で表すことができる。ここで、乾燥収縮の進行速度を表す係数を、使用材料と調合条件に対応させNsaとして式(4)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...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(4)で定めたNsa、最小二乗法により求めたS、ならびにt=182を式(3)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 - 15 に示す。

$$S_t = S_\infty \left(\frac{t}{Nsa + t} \right) \quad (3)$$

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)

$$Nsa = 25.6 \times P \times G \times G \times C \times C \quad (4)$$

$$P = 1 - 0.023 \times (53 - X), \quad X : W/C (\%)$$

$G = 1+2 \times (2.70-Dd)$, Dd : 絶乾密度 (g/cm^3)
 $G =$ 石灰岩:0.9、その他骨材:1.0
 $C = N:1.0$, $M:1.25$, $BB:0.6$
 $C =$ 膨張材無:1.0、膨張材有:1.1

式(4)は、普通ポルトランドセメント、絶乾密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$ 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 N_s の平均値25.6に、各要因が N_s に及ぼす影響を係数 P 、 G 、 G 、 C 、および C として乗じたものである。式(4)から求めた N_{sa} と実測データから算出した N_s の関係は図 - 16 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。

4.4.2 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、短期の測定データとして乾燥期間1週まで ($t=7$ 日) 2週まで ($t=7, 14$ 日) 3週まで ($t=7, 14, 21$ 日) 4週まで ($t=7, 14, 21, 28$ 日) の4パターンを比較して図 - 17 に示す。図には、95%信頼限界の近似式も併せて示す。早期推定の精度は、用いるデータの乾燥期間によって異なり、乾燥期間が長いほど推定精度は向上した。乾燥期間4週までの測定データを用いた場合には、決定係数 $R^2=0.920$ 、95%信頼区間 $\pm 0.71 \times 10^{-4}$ の精度で推定できた。

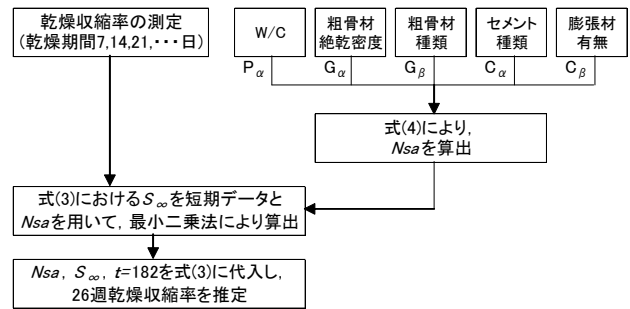


図 - 15 乾燥収縮率の早期推定の手順

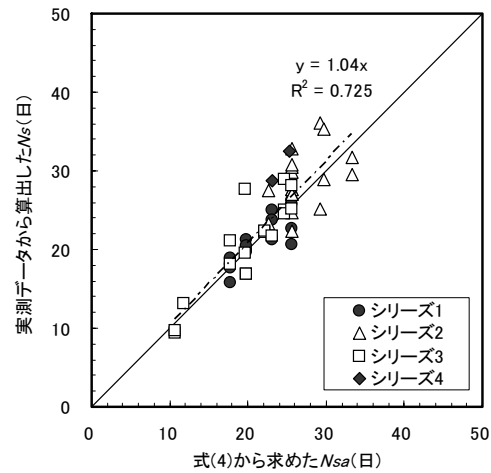


図 - 16 実測データから求めた N_s と式(4)から求めた N_{sa} との関係

§ 5 早期推定方法の検証

5.1 検証の目的と方法

前述した早期推定方法の推定精度は、本室内実験の検討結果のみを対象にしたものである。そのため、使用材料や調合条件が異なるコンクリートを対象とした場合の推定精度の検証を行うこと、ならびに、当社施工物件のコンクリート工事に使用を予定している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、の2点を目的として、表-9に示す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

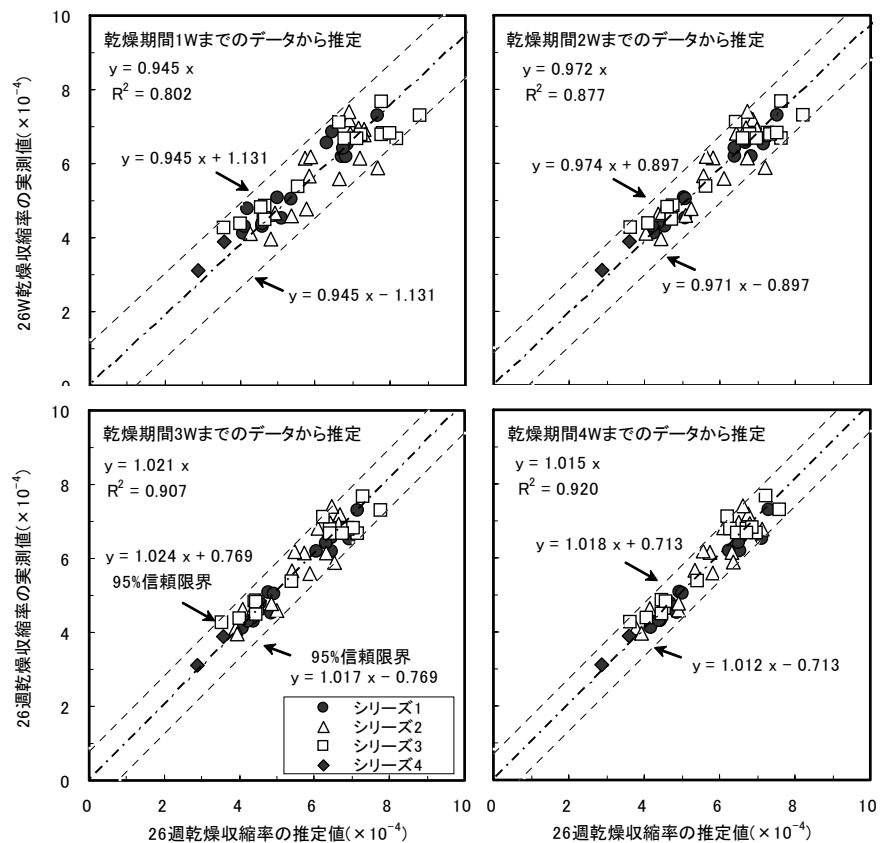


図 - 17 提案方法による乾燥収縮率の早期推定値と実測値の関係

表 - 9 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 - 10 26週乾燥収縮率試験結果の概要

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 中庸熱	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
			石灰岩G-M	6.76	1
その他	普通 中庸熱	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
			その他G-M	8.59	1
			全調査	2.75~11.24 (平均 6.28)	64

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。

乾燥収縮の供試体は、コンクリート工事着工の1~2カ月程前に各レディーミクストコンクリート工場で室内試験練りを実施した際に採取し、清水建設技術研究所あるいは外部試験機関に移送した後、2.3.1と同様の方法で、乾燥期間1, 2, 3, 4, 8, 13, 26週において乾燥収縮率の測定を行った。

5.2 検証結果

乾燥期間26週における乾燥収縮率の試験結果の概要を表-10に、乾燥期間4週までの測定データを基に推定した26週乾燥収縮率と実測値との関係を図-18に示す。今回対象とした計64調査の測定結果から、(1)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り、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すこと、(2)一般に、乾燥収縮率を低減する効果があるとされ³⁾、本室内試験結果でも効果が確認出来ていた岩種である石灰岩砕石を使用した調査であっても、JASS5で目標品質の目安としている乾燥収縮率8 × 10⁻⁴を大きく上回るケースのあること、(3)提案した早期推定方法をレディーミクストコンクリートに適用した場合の精度は、決定係数R²=0.787、95%信頼区間± 1.27 × 10⁻⁴程度であること、が明らかとなった。

さらに、レディーミクストコンクリートの乾燥収縮率を乾燥開始後4週間で把握することが出来たため、使用骨材の見直し、膨張材の使用、レディーミクストコンクリート工場の選別あるいは適用部位の選定等による収縮ひび割れ対策を計画的に行うことが出来た。

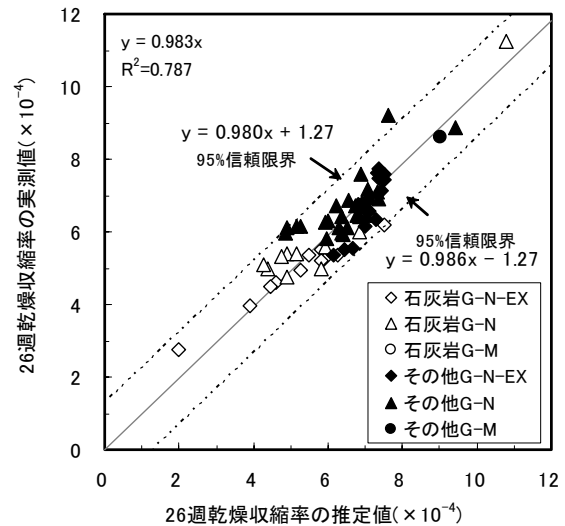


図 - 18 乾燥収縮率の早期推定値と実測値の関係 (レディーミクストコンクリート)

§ 6 . まとめ

本研究では、使用材料や調査条件がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を明らかにするとともに、短期間で精度良く長期の乾燥収縮率を推定する方法について検討を行った。本研究の検討範囲において得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 単位水量の低減が乾燥収縮率に及ぼす影響は小さく、単位水量 10kg/m³ 当たりで乾燥収縮率 0.23 × 10⁻⁴ 程度であった。一方、粗骨材種類による乾燥収縮率の差は 2 × 10⁻⁴ 程度と大きかった。
- (2) 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。
- (3) 乾燥収縮率はレディーミクストコンクリート工場により大きく異なり、2.75 ~ 11.24 × 10⁻⁴ と非常に幅広い分布を示すことを確認した。
- (4) 乾燥収縮の低減に効果があるとされる石灰岩砕石を使用した調査であっても、乾燥収縮率が 8 × 10⁻⁴ を大きく上回るケースのあることを確認した。
- (5) 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、26週乾燥収縮率を ± 1.27 × 10⁻⁴ 程度の誤差で推定できることを確認した。

今後は、今回得られた実験結果を利用して、乾燥収縮率をより小さくする材料・調査の選定方法を検討する予定である。

<参考文献>

- 1) 二村誠二：鉄筋コンクリート造建築物のひび割れ対策 - ひび割れ問題に対する相互理解に向けて - , 日本建築学会大会研究協議会資料(材料施工部門), pp.1-7, 2005.9
- 2) 三橋博三,佐藤嘉昭：収縮ひび割れの予測と制御の現状, コンクリート工学,Vol.43, No.5, pp.4-10, 2005.5
- 3) 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, pp.53-60,106-123,179-204,2006.1
- 4) 小島正朗,井上和政,三井健郎：コンクリートの乾燥収縮特性の早期判定法に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.601-602.2005.9
- 5) 佐藤嘉昭,清原千鶴,寺西浩司,今本啓一,三橋博三,岡田英敏：国内の実験データに基づいたコンクリートの時間依存性ひずみの予測式に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.597, pp.9-15, 2005.11
- 6) 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
- 7) 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, pp.213-216, 2003.1
- 8) 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 -, pp.14-33,2003.5
- 9) 庄谷征美,藤田嘉夫,徳田弘：コンクリートの乾燥収縮予測に関する基礎的検討,セメント技術年報,Vol.38, pp.401-404,1984
- 10) Thomas Telford,CEB-FIP Model Code 90,1990
- 11) ACI Committee 209,Predition of Creep,Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures,1982
- 12) 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
- 13) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編、2002.4