

[4] 短期試験によるコンクリート長期収縮量の推定について

正会員 ○庄谷征美 (秋田工業高等専門学校)

正会員 徳田 弘 (秋田大学鉱山学部)

1. まえがき

コンクリートの乾燥収縮は、その原因が内部水分の逸散にあることはいうまでもないが、配合や環境条件などの内的小および外的な多くの要因が複雑に影響しあい進行するために、これを正しく評価することは非常に困難である。特に、昨今の骨材事情の悪化に伴う骨材品質の低下の様相等を考えると、コンクリート部材の設計にあたり収縮を特に考慮する必要の有る場合には、実際に使われるコンクリートについての試験を行い評価することが不可欠となろう。しかし、収縮試験には相当の期間を要し、それに付随する経済性の問題、さらに評価にあたりこれら期間、費用にみあう精度が期待できるか、などの点を考慮すれば、試験期間を短縮して推定する方向が望ましいと思われ、また実用上有益であろうと考えられる。

1, 2)

著者らは、以上の観点にたつて、促進試験を含め2, 3の方法を既に検討、報告してきたが、本論文では、配合、骨材種類、養生期間および寸法などの異なる総計284種類の試料について、最大3年まで実施した室内収縮試験の結果を基として、短期試験による長期収縮の推定方法について考察した結果を報告したい。

2. 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、川砂SA(比重2.54, 吸水率3.10%), 天然砂SB(2.56, 吸水率2.57), 浜砂SC(比重2.54, 吸水率2.38%), 豊浦標準砂STおよび人工軽量砂SLAを用いた。粗骨材は比重2.58および2.61の川砂利RA, RB, 比重2.60, 2.63および2.58の碎石CA, CB, CCおよび非造粒型LA, LB, および造粒型LC, LDを用いた。その他標準砂モルタルで作製したモデル粗骨材およびガラスビーズGB等も一部の実験に用いた。なお、軽量骨材は1日吸水の状態で使用した。

使用した配合は、水セメント比25~75%の範囲で変化させたセメントペースト、モルタルおよび最大寸法10mm~40mmまでのコンクリートで、配合総計は142種類となっている。表-1には、配合条件および試験条件について詳細を示した。試験データの総数は、養生条件、寸法など異なる条件の組み合わせで284となった。その内2年乾燥までのデータ数は192, 3年乾

表-1 使用配合および試験条件

Kind of Specimen	Type of Aggregate	Water Cement Ratio (%)	Slump (Flow)	Num. of Data	Duration of Wet Curing (days)	Size of Specimen (cm)	Duration of Drying
Paste	—	30-60	—	4	7, 28	4×4×16	Two Years
Normal Mortar	SA	40-70	(130-260)	7	3, 7	4×4×16 10×10×40	Three Years One Year
	SB	35-75	(180)	5	7	4×4×16	One Year
	SC	40-60	(140-255)	6	3, 7	10×10×40	Two Years
	ST	30-70	—	13	7, 28	4×4×16	Two Years
Light-Weight Mortar	5mm LA	40-60	(140-245)	4	3, 7	10×10×40	One Year
	10mmRA	50	—	2	7	4×4×16	Three Years
River Gravel	15mmRA	40-70	8	5	3, 7	4×4×16 10×10×40	Two Years One Year
Concrete	20mmRB	35-75	10	5	7	10×10×40	One Year
Crushed Stone Concrete	25mmRA	30-70	2.5-12	16	3, 7, 28	10×10×40 One Face Drying	Two Years Three Years Two Years
	10mmCA	50	—	2	7	4×4×16	Three Years
Other Types of Concrete	15mmCB	25-54	0-22	22	7, 28	10×10×40	Three Years
	25mmCC	40-70	2.5-15	14	7, 28	10×10×40	Two Years
Light-Weight Concrete	10mmGB etc	50	—	12	7	4×4×16	Two Years
	10mm LA, LB, LC, LD	50	—	8	3, 7	4×4×16	Three Years
Light-Weight Concrete	15mmLA	38-70	5-16	13	3, 7	10×10×40	One Year Two Years

練りませにはモルタルミキサ, 可傾式ミキサおよび強制練りミキサを用い、材令1日で脱型、以後試験開始材令まで標準水中養生を行った。供試体寸法は4×4×16cmおよび10×10×40cmの2種とし、同一配合、同一条件の試験には2~3本の供試体を用いた。

乾燥収縮試験は、20℃, 50% R.H.の恒温恒湿室内で実施した。一部飽和溶液の蒸気圧を利用してデシケータ内で66%および79% R.H.の条件における3年までの試験も行った。ひずみ測定はコンタクトゲージを用いて行い、4×4×16cmで100mm, 10×10×40cmでは200mmを各々検長とした。ゲージポイントとして、真鑄製の表面貼

りつけタイプおよび埋め込みタイプのチップを併用した。なお、重量測定も併行して行ったが、本解析の為には重量データを用いていない。

3. 解析手法およびデータの検定

収縮試験により得られた7日, 30日, 45日, 60日, 100日, 1年, 2年および3年収縮量を用いて, 次の諸式による検討を試みた。a~eを回帰の係数, S_T を基本乾燥日数Tにおける収縮量としある日数での収縮 S_t を

$$\text{直線回帰式} : S_t = a + b \cdot S_T \quad \text{---(1)}$$

$$\text{''} : S_t = c \cdot S_T \quad \text{---(2)}$$

$$\text{べき回帰式} : S_t = d \cdot S_T^e \quad \text{---(3)}$$

と表わす。また、回帰の精度の尺度として、Nevilleらの定義した「Error Coefficient」Mおよび、回帰による推定値と実測値との比を変量として算出した変動係数Vを用いた。これらは次のように表わされる。

$$\text{Error Coefficient} : M = \sqrt{\frac{\sum (S_{ti} - S_{mi})^2}{N}} / \bar{S}_m \times 100 (\%) \quad \text{---(4)}$$

$$\text{変動係数} : V = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N}} / \bar{X} \times 100 (\%) \quad \text{---(5)}$$

ここで、 S_{ti}, S_{mi} はそれぞれ推定および実測収縮量であり、 $X_i = S_{ti}/S_{mi}$ で \bar{S}_m は S_{mi} の、 \bar{X} は X_i の平均を表わす。(4)式よりMは一種の変動係数とみなせる事がわかる。(5)式の適用にあたり X_i は正規分布すると仮定したが、2, 3の例について確率紙による概算法で検討した所ほぼ正規性が満足される結果を得た。

本研究では、広範囲な条件下の収縮データを解析するので、試料種別, 寸法, 水セメント比など、一般に収縮に強く関連すると考えられる要因の影響を検討しておく必要がある。これには、データを特定の要因ごとにくつかの水準に分類しその水準ごとにグループ化が可能かどうかで判別する分析手法が良いと思われるが、ここでは、全データを直線回帰式(1)で処理して得られた回帰係数 a_0 および b_0 を母回帰係数として、各要因の水準ごとに求めた標本回帰係数a, bとデータ数Nから次式でF値を計算して、 $F(2, N-2; \alpha) = F_0$ となる F_0 の値より検定することにした。⁴⁾

$$F = \frac{\sum \{(a-a_0) + (b-b_0)S_{ri}\}^2}{\sum (S_{ti} - a - b S_{ri})^2 / (N-2)} \quad \text{---(6)}$$

今、30日収縮量 S_{30} および100日収縮量 S_{100} から1年収縮量 S_{1Y} を推定する場合について得られた結果を表-2に示す。なお、相対湿度については、便宜的に3水準の合計を母集団とみなし検定した。

表の結果より、ペーストを除く試料種別, 養生期間および水セメント比の影響は、考慮に入れる必要はないと思われる。また、スランブ別では軟練り以外は問題は少ないと判断され、供試体寸法では寸法効果により乾燥の進行程度が異なるためか多少の差が認められるようであり、相対湿度別では

表-2 収縮データの回帰による検定

Factor	Level	Num. of Data	Coefficients of Regression		Variance	Estimated F. value	Remarks $F_0(\alpha=0.05, 0.01)$
			a_{30} b_{100}	b_{30} a_{100}			
Kind of Specimen	Paste	8	17.20	1.11	21.90		
			8.43	0.95	1.00		
	N.Mor.	68	5.24	1.14	6.55	3.16	(3.14)
	L.Mor.	48	4.12	1.11	8.41	0.59	(3.20)
	L.Con.		1.29	1.07	2.79	0.41	(5.10)
N.Con.	160	3.28	1.30	2.37	2.97	(3.06)	
Curing Time in Water (days)	3 days	66	3.80	1.21	6.00	0.36	(4.95)
	7 days	152	4.26	1.18	4.37	0.13	(3.06)
	28 days		1.36	1.08	1.12	0.65	(4.75)
Water Cement Ratio (%)	25~40	63	4.40	1.16	1.02	0.47	(3.15)
	40~50	71	4.29	1.32	6.66	4.03	(3.13)
Size of Specimen	4X4X16	104	3.10	1.23	4.24	5.80	(3.09)
	1 Six Face Drying	163	2.89	1.51	3.88	8.82	(4.79)
			0.40	1.21	1.28	8.11	(4.74)
Slump of Concrete (cm)	0~2.5	18	4.69	1.70	0.30	36.70	(4.74)
	2.5~5.0	16	3.79	1.08	0.11	219.94	(9.55)
	5.0~10.0		6.27	0.49	1.39	7.18	(3.63)
Relative Humidity (%) (Mortar)	50	17	4.60	0.55	0.96	6.70	(6.26)
			3.75	1.26	0.40	0.17	(3.74)
	5.0~10.0	52	2.60	0.91	0.20	1.85	(6.51)
	10.0~15.0	14	4.74	0.99	1.51	5.60	(3.18)
			2.81	0.59	0.62	3.92	(5.06)
15.0~22.0	24	4.76	1.03	2.37	0.20	(3.88)	
Total (Not Including Paste Data)	79	17	0.91	1.10	0.81	1.41	(6.93)
			2.36	1.82	2.56	12.30	(3.44)
			1.01	1.20	0.59	12.30	(5.72)
Total (Not Including Paste Data)	79	17	-1.45	1.54	2.13	9.63	(3.68)
			0.17	1.11	0.35	9.12	(6.36)
			2.56	1.97	3.84	5.08	(3.68)
Total (Not Including Paste Data)	79	17	-0.92	1.62	0.66	15.64	(6.36)
			0.24	2.19	0.77	8.08	(3.68)
			-0.05	0.95	0.21	9.99	(6.36)
Total (Not Including Paste Data)	276		4.22	1.17	4.40		
			1.58	1.06	1.38		

全水準について同程度の有為性を示した。しかしながら、検定のデータ数や、有為な差を示した水準であっても回帰にともなう分散値 σ^2 にそれほどの差はないことなどから、回帰分析において各要因の影響を特に考慮に入れる必要はないだろうと判断した。

4. 回帰分析による推定式の算定

解析にあたり、測定が1年までのデータはこれを除き、3年目測定値はその数が少ないことから、以下2年までの測定データ (N=192, ペースト除外) をもとに回帰分析を行った。図-1の(a)~(c)までにこの結果を示し、(d)は比較のため S_{2Y} と S_{3Y} の関係を示した。これより、推定の基本となる日数が増せば、データ間の相関および回帰式による推定の精度が向上することがわかる。これを詳しく調べるため、時間Tより S_{1Y} , S_{2Y} を推定する場合のMおよびVの変化を図-2に示した。MおよびVはともに片対数紙上でTの増加に伴いほぼ直線的に減少する傾向を示し、推定精度はべき回帰式より直線回帰式(1)の方が優れていることが認められる。今、Nevilleらが述べている許容限度

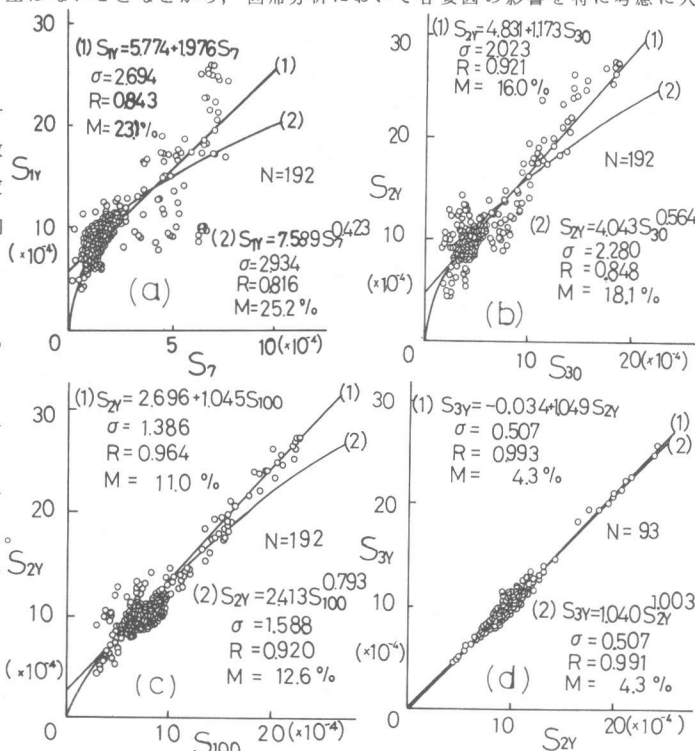


図-1 T日収縮量 S_T と1年, 2年および3年収縮量 S_{1Y} , S_{2Y} , S_{3Y} の関係

M = 15% を図上で追えば1年収縮推定には28日, 2年のそれは38日程度となる。変動係数VはMより多少大きい値となるが一応の限度として20%をとれば, 1年収縮では20日, 2年では30日程度となる。以上より, 本解析では推定に必要な基本日数Tを30日と定めて以下のように推定式を得た。

1年推定式: $S_{1Y} = 400 + 1.154 S_{30}$ (7)

2年推定式: $S_{2Y} = 4.83 + 1.173 S_{30}$ (8)

また, 基本収縮量が $2 \sim 3 \times 10^{-4}$ 程度以下と小さい場合には, 次のべき推定式,

$S_{1Y} = 3.51 S_{30}^{0.589}$ (9) および

$S_{2Y} = 4.62 S_{30}^{0.541}$ (10) 両式の使用が妥当である。表-3には, 上

式を用い推定する際の95%信頼限界および推定値の $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ および $\pm 30\%$ 以内に入る実測値の確率を求めた結果を示した。なお, 乾燥後2年以内での任意時間の収縮量を

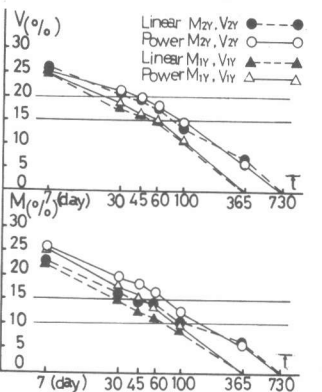


図-2 1年および2年収縮推定の精度

表-3 推定式の信頼限界および実測値が推定値の $\alpha\%$ 以内に入る確率

	95% Confidence Limit ($\times 10^{-4}$)	$\alpha =$	$\alpha =$	$\alpha =$
		$\pm 10\%$	$\pm 20\%$	$\pm 30\%$
Eq. 7	3.37	54.72	76.70	89.60
Eq. 8	3.96	54.20	72.90	87.00
Eq. 9	4.02	47.40	70.80	82.30
Eq. 10	4.47	44.80	69.80	84.90

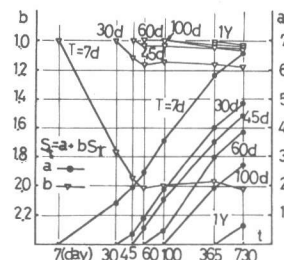


図-3 乾燥t日収縮量推定のためのa, b値

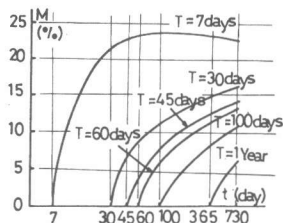


図-4 t日収縮推定の精度M

T日の乾燥収縮より推定する事も可能であり、図-3は直線式(1)を用いT日の収縮量からt日のそれを推定する場合のa, b値を、図-4には推定時のMの変化を表わし、推定の資料に供した。

5. 長期収縮量推定に関する考察

先に2年までの収縮推定式を導いたが、2年以上の長期収縮量の予測について考察を試みた。収縮の進行と乾燥日数tの関係を調べるため次の諸式で検討を行った。

$$\text{双曲線式 (Ross)} : S = \frac{t}{A+Bt} = \frac{t}{N_1+t} S_\infty \quad (11) \quad \text{べき曲線式 (Meyers)} : S = \frac{t^{0.6}}{C + Dt^{0.6}} = \frac{t^{0.6}}{N_2+t^{0.6}} S_\infty \quad (12)$$

$$\text{指数式} : S = S_\infty (1 - e^{-Et}) \quad (13)$$

上式でA, B, C, DおよびEは実験定数, $N_1 = A/B$, $N_2 = C/D$, S_∞ は最終収縮量で $1/B$, $1/D$ で与えられる。

本データを上式に適用するにあたり、(イ)収縮量を直接上式で整理。(ロ)回帰式(2)で求めた回帰係数cを用い、対応する日数 t_1 , t_2 の組毎に上式を適用し適当な定数を求める。(ハ)回帰推定式の係数値を乾燥日数tの関数で与え長期推定式を導く、の3方法が考えられる。(イ)においては $S_\infty = \beta S_{2Y}$ として表わし、(ロ)では $t_2 = 2$ 年として $t_1 = 1$ 年の場合について得られた定数を採用した。

このようにして得られた算定式を表-4に示した。双曲線式、べき曲線式および指数式の3式を比較すると、双曲線式は長期収縮量を低く見積りすぎるの様であり、べき曲線式は、(16)および(17)式ともにほぼ同様の結果を

表-4 長期収縮推定式の検討

Item	a) Estimation from Shrinkage Data	b) Estimation from Regression Coefficients
Hyperbolic Eq. (Ross)	(14) $\frac{t}{31.8+t} \cdot 1.03S_{2Y}$	(15) $\frac{t}{57.8+t} \cdot 1.08S_{2Y}$
Power Curve (Meyers)	(16) $\frac{t^{0.6}}{10.5+t^{0.6}} \cdot 1.21S_{2Y}$	(17) $\frac{t^{0.6}}{9.40+t^{0.6}} \cdot 1.18S_{2Y}$
Exponential Curve	(18) $(1 - e^{-0.00311t}) \cdot 1.12S_{2Y}$	(19) $(1 - e^{-0.00271t}) \cdot 1.16S_{2Y}$
Regression Curve	(20) $S = (-5.54 + 1.591nt) + (1.079 + 0.0141nt) \cdot S_{30}$ $t \geq 45 \text{days}$	

示しており上記β値もほぼ予想される値に近いと判断される。指数式は中間に位置している。今、べき曲線式(16)、指数式(19)、および回帰係数を関数表示した式(20)の3式について、 $t \geq 2$ 年の適合性を検討するため、2年収縮量 S_{2Y} に対する収縮比を3年、5年、10年、および20年について求め、Troxellらの実測値と比較したものが表-5である。この結果より、指数式は時間の経過に伴う収縮進行が急速すぎることで、回帰推定式(20)は収縮進行を良く捉えているが絶対値の評価に問題を残し、今後の検討が必要である。Meyersによるべき曲線式はTroxellらのデータとの適合も良く、長期収縮評価に有用であろうと判断される。従って30日→2年→長期と一連の手順で予測が可能であると思われる。

表-5 長期収縮推定値と実測データとの比較

Item	S_{3Y}/S_2	S_{5Y}/S_{2Y}	S_{10Y}/S_{2Y}	S_{20Y}/S_{2Y}
Eq. (16)	1.04	1.08	1.12	1.15
Eq. (19)	1.10	1.15	1.16	1.16
Eq. (20)	1.05	1.12	1.21	1.30
Authors' Experiment	1.04	-	-	-
Measurement by Troxell	1.03	1.07	1.12	1.17

6. まとめ

短期試験による予測は、コンクリート品質の早期判定の見地からも、また、未使用骨材の受入れ可否の観点からも好ましいと考えられる。本論文では多数の実測収縮データを基に回帰分析を行い長期収縮の推定方法について考察を加えた。2年収縮量は式(8)を用いて30日収縮量より十分な精度で推定可能であること、さらに長期の収縮推定には式(16)が有用であること、推定に関し配合、材令、試料種別などの影響は特に考慮の必要のない事等が示された。最後に、本文で触れえなかった促進法による推定については機会を得て報告したいと考えている。

参考文献

- (1) 庄谷征美, 米谷 裕 「コンクリート乾燥収縮量の早期推定法に関する2,3の検討」, セメント技術年報 XXXIII, 1979, PP235~236
- (2) 庄谷征美, 「コンクリート乾燥収縮量の評価に関する基礎的一考察」, 第35回土木学会年次学術講演会講概, V, PP235~236
- (3) J. J. Brooks, A. M. Neville 「Estimating long-term creep and shrinkage from short-term test」, Magazine of Concrete Research, Vol 27, No.90 1975
- (4) 淡中忠郎 「統計学の理論と応用」, 養賢堂, PP97~98
- (5) G. E. Troxell etc 「Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete」, Proc. of A.S.T.M. Vol 58, PP1101~1120