

ハプ工業大学。正員 庄谷征美
同 上 正員 杉田修一

1. 緒論

コンクリートの乾燥収縮予測法について、我国独自の提案は少なく、設計には Rüsch らの提案式等が多く実用に供されているのが現状であろう。しかしながら、Rüsch らの式を含め提案式の多くはその適合度の上から必ずしも満足の中の結果を与えないとの報告もあり、さらに精度の良い予測式の開発が重要と思われる。

本研究は、以上の点を踏まえ、内的および外的な要因の収縮に及ぼす影響を広い範囲に検討した結果を基礎として、重回帰分析手法を用いて得た一収縮予測法の提示を試みたものである。

2. 予測手法の基礎的検討

予測式は一般に次式のように表現できる。 S_d と収縮進行項、 S_{∞} と終局あるいは基本収縮量、(C.F.) と補正項として

$$S = S_d \cdot S_{\infty} \cdot (C.F.) \quad (1)$$

S_d としては ACI 式では Ross の双曲線形(係数式(2))、Bajant 式では拡散型手法依存性を有する平方根双曲線形を採用し、Rüsch らの式では寸法、湿度等と考慮し図表と利用し求めている。表-1 は上記各式による予測計算に必要な基礎データ項目を示したものである。

表-1: 各種予測式に必要なデータ項目

項 目	(1) Rüsch	(2) ACI	(3) BAJANT	(4) 参 考 本予測
(1) 環境湿度	S_d, S_{∞}	S_{∞}	S_{∞}	S_d, S_{∞}
(2) 部材寸法、形状	S_d	S_{∞}	(形状) S_d	S_d
(3) 湿度養生期間 (有効湿度)	(S_d)	湿度養生 ($S_{\infty} : 1 \sim 7$ 日)	$S_d (S_{\infty})$	S_d
(4) 28 日圧縮率	-	-	S_{∞}	-
(5) コンクリートの コンピレクステンション	S_{∞}	S_{∞}	-	-
(6) 湿度	(S_d)	-	S_d	-
(7) セメント量	-	S_{∞}	S_d	S_{∞}, S_d
(8) 水セメント比	-	-	S_d	(S_d)
(9) 砂セメント比	-	-	S_d	-
(10) 骨材セメント比	-	-	S_{∞}	-
(11) 骨粗率比	-	S_{∞}	S_{∞}	-
(12) 空気量	-	S_{∞}	-	-
(13) 鉄筋比	-	-	-	-
予測式の特性	(1) 湿度の影響 の二重評価	(1) Ross 式による 湿度養生期間 数表示 (2) 湿度養生の 場合を考慮	(1) 平方根双曲 線式による収 縮表示 (2) 湿度養生 の拡散型手法 依存性 (3) 湿度効果に 対する活性化 エネルギー一 般	(1) 降雨補正 (2) セメント 補正 (3) 風速補正 可

で、Bajant 式では極めて多くの要因を考慮する点に特徴がある。著者の実験値を用いた検討では ACI 式は収縮進行に寸法の影響が考慮されていない欠点を有し、Rüsch らの式は基本収縮量に問題がある。Bajant 式は式が複雑で平方根双曲線の進行、 S_{∞} 値への配合要因の取り入れ方法などに若干の問題を有するようであるが、適合性には比較的良好に面がある。

本研究では基礎検討として次の Ross 式定数に代ぼす内的、外的要因の影響を多くの実験データを用い調べてみた。

$$S = t / (N_{SR} + t) \cdot S_{OR} \quad (2)$$

上式中の N_{SR} と S_{OR} は最小二乗法で求めたが、これらより得られた結論は次のようである。(i) S_{OR} には骨材種類、配合(単位水量 W 、単位セメント量 C 等)、相対湿度(乾燥条件)が大きく関連する。骨材の影響は著者既提案の促進試験法により補正可能と考えられ、配合の影響は W および C 量の線形式で表示可能である。相対湿度補正 γ_H (50% R.H. F1) および降雨補正 γ_R (避降雨条件1) は次式のようになる。

$\gamma_H = 0.087(100 - H)^{0.63} - (3)$, $\gamma_R = 0.65(A/\alpha)^{-0.13} - (4)$ (ii) N_{SR} には材料的要因の影響は比較的少ない。特記すべき影響因子は配合(C 量および W/C)、寸法比(乾燥面積・体積比 A/α)、湿度養生期間で、風作用および温度などである。この内、湿度補正 γ_{NH} (50% R.H. F1) および風速補正 γ_{NV} ($V = 0$ % F1) は、 $\gamma_{NH} = 4.40(100 - H)^{-0.38} - (5)$, $\gamma_{NV} = (V/60 + 1)^{-0.019} \cdots [W \leq 55\%] \text{ or } (V/60 + 1)^{-0.023} \cdots [W > 55\%] - (6)$ などと与えられる。温度は活性化エネルギー概念が有効と思われるが、以下の解析には考慮していない。

3. 解析および考察

解析には統計133組の R.H. 50% 下 2~3 年乾燥コンクリートデータ(川砂利、碎石、軽量骨材使用、 $W=133 \sim 324 \text{ kg/m}^3$, $C=239 \sim 750 \text{ kg/m}^3$, $A/\alpha=0.1 \sim 1.13$, $T=3 \sim 28$ 日)を用い、(2)式および次式(7)により整理を行った。

$$S = t^{0.6} / (N_{SB} + t^{0.6}) \cdot S_{MB} \quad (7)$$

上式はBransonらによるフリー-ブ表示式として知られる。(2)および(7)式の定数 N_{SR} , S_{MR} および N_{SB} , S_{MB} の各平均値49.9日, 11.4×10^{-4} および20.4日, 14.6×10^{-4} を用いて得た収縮~時間曲線のTroxellデ-タとの対比から, (2)式では乾燥後3~5年程度以下, (7)式ではそれ以降の収縮推定に有効であることが判明した。従って上記定数を各要因との関係で適切に評価できれば, 上2式を使い分けて予測が可能となると考えられる。

以上に立脚し, N_{SR} , S_{MR} および N_{SB} , S_{MB} を先の検討を基本に重回帰分析により定式化した。ここで, S_{MR} には W および C との線形回帰式, N_{SB} には W と WC の高相関を考慮して, C , W , T , A/V のべき乗積の回帰式を選択した。温度の影響は(3)および(5)式と補正項として使用した。その必要に応じて前掲の諸補正式を用いることができる。このようにして得られた関係式を表-2に示す。表中のべき指数値のうち, N_{SR} , N_{SB} 表示式のおよび A/V の指数は予備検討において得られた値と大差なく, ほぼ等しいと評価と考える。図-1および図-2には表中(8)式で得られた予測値 $\hat{S}_{MR}$, $\hat{N}_{SR}$ と実測値

表-2: 回帰式の算定結果

種別	項目	式形	R	M (※)	式番号
N=133 全データ	S_{MR}	$3.16 + 3.02 \times 10^{-4} W + 0.57 \times 10^{-4} C$	0.705	14.8	(8)
	NSR	$0.36 \cdot \tau^{0.44} \cdot W^{-0.01} \cdot C^{0.04} (A/V)^{-0.17}$	0.917	22.2	
	S_{MB}	$5.45 + 1.84 \times 10^{-4} W + 1.09 \times 10^{-4} C$	0.636	13.9	(9)
	NSB	$0.79 \cdot \tau^{0.44} \cdot W^{-0.01} \cdot C^{0.04} (A/V)^{-0.17}$	0.908	23.6	
N=74 普通コン	S_{MR}	$5.68 + 1.47 \times 10^{-4} W + 0.86 \times 10^{-4} C$	0.612	14.9	(10)
	NSR	$1.86 \cdot \tau^{0.44} \cdot W^{-0.01} \cdot C^{0.04} (A/V)^{-0.17}$	0.638	24.0	
	S_{MB}	$3.02 + 2.31 \times 10^{-4} W + 1.57 \times 10^{-4} C$	0.578	14.0	(11)
	NSB	$4.51 \cdot \tau^{0.44} \cdot W^{-0.01} \cdot C^{0.04} (A/V)^{-0.17}$	0.614	22.0	
N=31 流動型 高性能 減水	S_{MR}	$6.79 + 3.35 \times 10^{-4} W - 0.29 \times 10^{-4} C$	0.731	6.6	(12)
	NSR	$3.6 \times 10^{-4} \cdot \tau^{0.44} \cdot W^{0.01} \cdot C^{0.04} (A/V)^{-0.17}$	0.827	13.4	
	S_{MB}	$6.30 + 4.36 \times 10^{-4} W + 0.03 \times 10^{-4} C$	0.765	6.9	(13)
	NSB	$3.7 \times 10^{-4} \cdot \tau^{0.44} \cdot W^{0.01} \cdot C^{0.04} (A/V)^{-0.17}$	0.737	14.8	
N=28 軽量 コン	S_{MR}	$-3.18 + 3.73 \times 10^{-4} W + 1.44 \times 10^{-4} C$	0.974	8.3	(14)
	NSR	$1.15 \cdot \tau^{0.44} \cdot W^{-0.01} \cdot C^{0.04} (A/V)^{-0.17}$	0.847	19.5	
	S_{MB}	$-1.30 + 1.78 \times 10^{-4} W + 2.39 \times 10^{-4} C$	0.966	8.9	(15)
	NSE	$2.54 \cdot \tau^{0.44} \cdot W^{-0.01} \cdot C^{0.04} (A/V)^{-0.17}$	0.837	21.8	

※ S_{MR} , S_{MB} ($\times 10^{-4}$) NSR, NSB (日)
 $M = \sqrt{(St1 - St2) / n} / St2 - (16)$ St1: 実測値, St2: 予測値, St: 実測平均

の関係を一例として示した。 S_{MR} では普通コンクリートで, N_{SR} では180日程度以上で適合度がいく分低下する様相にあるが, ほぼ満足すべき結果と考えられる。

表-3は, 温度補正項 H , G_{max} を用いたNeville, Hobbsらの1~3年乾燥68デ-タ($A/V=0.13 \sim 1.13$, $H=50 \sim 65\%$, $WC=35 \sim 80\%$, $G_{max}=10 \sim 40$ mm, $T=1 \sim 112$ 日, 軽量含)および本検討に使用した133の基本デ-タに対して, (8)~(15)式とそれぞれ(2)および(7)式へ代入して求めた推定値の精度を検討した結果を示したものである。推定の精度「error coefficient」Mは, (8)および(9)式的全デ-タ式も, (10)~(15)式による試料種別分け式も大差ないことから, (8)式→(2)式および(9)式→(7)式と代入して得られる2式を予測式として提示できる。

表-4には, 本予測式とBajant式の精度の比較を普通コンクリートについて行った結果の一例を示した。本方法ではRoss式(12)式を用いた A/V , $M=14\%$ とBajant式29%に比べ相当に良い精度であって, 本方法の有用性を

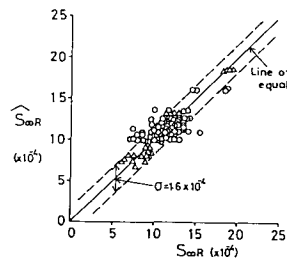


図-1: Ross定数 S_{MR} の推定

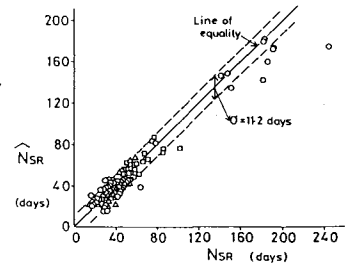


図-2: Ross定数 N_{SR} の推定

表-3: 予測式の精度の検討

項目	乾燥日数	試験件数	全データ		試験種別分け	
			$F_{(2)}$	$F_{(1)}$	$F_{(2)}$	$F_{(1)}$
普通乾燥デ-タ	7	68	50.8	47.3	57.8	48.7
	30	68	28.9	28.6	30.8	30.3
	46	68	26.2	26.5	26.9	27.7
	60	68	25.6	26.5	25.8	27.4
	100	68	24.4	25.2	23.9	25.7
Hobbs	365	68	24.9	22.8	23.6	22.8
	730	24	34.8	35.2	36.5	34.6
Nevilleら N=68	1095	18	22.0	21.9	21.4	22.6
全体		450	28.3	27.7	28.6	28.6
参考(本検討)	7	133	36.4	51.6	65.9	52.1
	30	133	21.5	20.2	27.3	18.3
	46	133	19.2	19.3	21.7	17.9
	60	133	18.9	19.8	18.8	17.5
	100	133	16.4	17.3	15.9	15.8
N=133	365	133	15.9	17.0	13.3	15.2
	730	133	16.0	18.0	12.7	16.2
	1095	111	15.2	17.3	11.7	15.0
全体		1042	19.8	19.8	17.8	17.9

表-4: Bajant式と本予測式の精度比較

項目	乾燥日数	試験件数	Ross式		Bajant式		本予測式	
			実測値 ($\times 10^{-4}$)	推定値 ($\times 10^{-4}$)	実測値 ($\times 10^{-4}$)	推定値 ($\times 10^{-4}$)	実測値 ($\times 10^{-4}$)	推定値 ($\times 10^{-4}$)
W/C	10	133	3.47	3.69	3.47	3.69	3.47	3.69
	30	133	4.01	4.17	4.01	4.17	4.01	4.17
	46	133	5.98	6.14	5.98	6.14	5.98	6.14
	60	133	7.05	7.21	7.05	7.21	7.05	7.21
	100	133	8.24	8.40	8.24	8.40	8.24	8.40
F	150	68	9.74	10.10	9.74	10.10	9.74	10.10
	365	24	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10
H	10	133	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
	30	133	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
	46	133	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
	60	133	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
	100	133	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
T	150	68	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
	365	24	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
A/V	10	133	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	30	133	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	46	133	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	60	133	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	100	133	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
M	150	68	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	365	24	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

* $A/V=0.45$ ** () $A/V=1.13$

4. まとめ

以上のように重回帰表示式を基本とした一予測式の提示がなされた。またある程度条件の相違による補正も可能である。今後は適用範囲の拡張のため検討をしたい。