

1. まえがき

昨今、極めて優れた減水効果と有する高性能減水剤の開発にとともに、これを活用してコンクリート部材の高強度化と比較的に果たせるようになり、PC構造物などに一部利用され始めている。

高性能減水剤を用いた低水セメント比、高配合コンクリートに関しては、その諸性質について種々の貴重な報告がなされているが、コンクリート固有の体積変化に関連した乾燥収縮、フリーズおよび熱的特性などについての研究は数少ない現状にあり、今後の高強度構造物の合理的設計等に資するにはこれらについてさらに多くのデータの集積が必要と思われる。

本研究は以上の観点から、低水セメント比、高配合コンクリートの乾燥収縮、重量変化特性と明らかにするために、2, 3の検討を行ったもので、高性能減水剤添加の影響、配合率に力学的特性との関連性などにつき実験的な把握を試みた。また、乾燥による水分の透散が拡散理論に従うとして、コンクリート内部の水分移動をとりえ低水セメント比域におけるその特性と明らかにし、加えて収縮応力発現についても推察を試みた。

2. 実験および手法

(1) 材料および配合：セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。骨材は、細骨材として雄物川産河原石(比重2.54, 吸水率3.10%)、粗骨材は安山岩系砕石(最大寸法15mm, 比重2.63, 吸水率2.53%)および玉川産川砂利(最大寸法25mm, 比重2.58, 吸水率2.65%)を用いた。使用した高性能減水剤は、2社のP, K2種類である。

表-1: 用いた配合

使用した配合は表-1に示すように2つのシリーズに分かれており、シリーズIは学会の規格(案)等を参考に単位セメント量 450 kg/m^3 、目標スラング 8 cm 、最大寸法25mmの川砂利コンクリートで、プレーンおよびAEの他に高性能減水剤P, Kと減水率2, 8, 13, 20%程度となるよう調整し用いた計10種の配合とした。シリーズIIでは、単位水量を160~230 kg/m^3 、単位セメント量を350~750 kg/m^3 の間で変化させた最大寸法15mmの砕石コンクリートを用い、プレーンおよび減水剤P4.5%添加コンクリートの2種類、計22種の配合とした。

(1) シリーズI

AE制ゲージ

type of mix	max. size mm	sl. cm	air %	w/c %	Unit content kg/m^3				Admixture	σ_7 kg/cm^2	σ_{28}
					W	C	S	G			
N	25	9.0	1.5	37.8	170	450	597	1110	—	297	433
P1	"	10.0	1.5	34.9	157	450	600	1138	P2.3 %	380	461
P2	"	9.0	1.5	32.7	147	450	602	1161	P3.4 %	402	534
P3	"	7.0	1.2	29.7	133	450	605	1194	P4.5 %	444	614
K1	"	8.5	1.5	34.9	157	450	600	1138	K0.7 %	374	459
K2	"	10.5	2.0	32.7	147	450	602	1161	K1.0 %	432	574
K3	"	6.0	2.0	29.7	133	450	605	1194	K1.5 %	468	603
AE	25	6.0	4.1	35.6	160	450	512	1133	AE 0.05%	345	431
AE P2	"	10.0	3.6	31.6	142	450	526	1166	AE+P3.4%	418	511
AE K2	"	9.0	3.8	31.6	142	450	526	1166	AE+K1.0%	387	490

(2) 供試体および測定方法：コンクリートの練り混ぜには強制攪拌型ミキサーを用い、収縮試験用供試体は $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の角柱を用いた。締固めには内部振動機を用い、材令1日で脱型、以後標準水中養生を施した。試験開始材令は7日および28日とした。

収縮および重量変化試験は 20°C 、50% R.H.の恒温恒湿室内で実施した。収縮測定用標点には、供試体場水後直ちに高分子系瞬間接着剤で固定し、基準測定後さらにアラールタイトを十分に接着させた。収縮

(2) シリーズII

N: 普通コンクリート

P: P4.5%添加コンクリート

Max. size 15 mm	C \ W	C kg/m^3				
		350	450	550	650	750
160 kg/m^3	N1	N4	P1	P5	—	—
175	N2	N5	P2	P6	P9	—
190	N3	N6	P3	P7	P10	P13
210	—	N7	P4	P8	P11	P14
230	—	—	—	—	P12	P15

量は $1/1000$ mm 精度のコンタクトゲージを用い長さ 200 mm として測定を行った。重量変化は 1g 感量, 10kg 秤量、台秤と使用して測定した。シリーズ I, II では 10×20 cm および 7.5×15 cm の試体による圧縮強度試験と併行して行っており、またシリーズ II では材料 28 日における $1/3$ 割線弾性係数の測定を行った。乾燥収縮試験および重量変化試験は一部を除いて現在も継続中であり、シリーズ I では乾燥 350 日、シリーズ II では養生期間 7 日の場合 250 日、28 日養生の場合は 450 日までのデータに基づき解析を行った。

(3) 結果の整理: シリーズ I, II とともに得られた収縮～時間曲線と式で近似させた結果を整理した。

$$S = \frac{t}{a+bt} \quad (1)$$

a, b は定数で a/b は収縮量 S が最終値 S_{∞} の半分になる日数 N とする、 $1/b$ は最終値 S_{∞} とすることになる。計算は最小二乗法による。

3. 実験結果および考察

(1) 減水剤添加の及ぼす影響: 表-2 は、シリーズ I の収縮および重量減少率の試験結果を乾燥日数に対応して示したものである。

表より、高性能減水剤 P, K を添加したコンクリートの乾燥収縮は添加量および養生期間の影響を受けると認められる。

図-1 には、同材料におけるプレーンコンクリートの収縮量に対する減水剤コンクリートの収縮割合 S/S_p と減水剤添加量の関係と乾燥日数をパラメータとして示したが、供試材料 7 日の場合乾燥初期でのプレーンに対する収縮増大傾向が大きいこと、減水剤種類別では P 使用では収縮の若干の増加傾向はあるが添加量の多少による明瞭な傾向はみられないに対し、K 使用では増大傾向は著しいが添加量の増加に逆比例的に収縮は減少し S/S_p が 1 を下回るような結果を示すことなどが認められる。さらに乾燥が進めば増加率は減少し最終的にはプレーンと同様になると考えられる。供試材料 28 日の場合は、ほぼプレーンコンクリートの値と同等かそれ以下となり、添加の影響は少なくなっている。

これら原因としては、添加量の多少による水和の促進、遅延作用、水和ゲルの形態などが関連していると思われる。減水剤の物理化学的作用とあわせて今後の検討が必要である。

重量減少率は P, K どちらを用いた場合もほぼ添加量に逆比例して同程度低下する傾向にある。

以上より、高性能減水剤添加による収縮増大傾向を最小に抑えるには充分な養生が重要と思われる。

(2) 低水セメント比コンクリートの収縮、水分逸散特性

表-2: シリーズ I の収縮および重量減少率

		Shrinkage ($\times 10^{-4}$)						Loss of Weight (%)					
type	day	10	30	60	100	150	350	10	30	60	100	150	350
7 d	N	1.85	4.20	5.70	6.99	7.80	9.65	2.05	2.75	3.22	3.52	3.76	4.26
	P 1	2.12	4.40	6.21	7.31	7.93	9.75	1.53	2.09	2.49	2.71	2.85	3.29
	P 2	2.15	4.45	6.19	7.22	7.84	9.46	1.41	1.91	2.25	2.45	2.57	2.97
	P 3	2.42	4.75	6.55	7.63	8.45	9.81	1.37	1.85	2.16	2.36	2.48	2.84
	K 1	2.76	5.44	7.52	8.83	9.65	11.10	1.64	2.23	2.63	2.89	3.06	3.47
	K 2	2.86	5.45	7.41	8.67	9.55	10.65	1.59	2.10	2.47	2.68	2.85	3.20
	K 3	1.54	3.57	5.30	6.30	7.33	8.10	1.39	1.90	2.22	2.40	2.58	2.90
	A E	2.25	4.90	6.75	7.83	8.84	9.77	2.04	2.62	3.03	3.26	3.47	3.86
	AEP2	2.37	5.02	7.12	8.10	9.12	9.56	1.69	2.25	2.59	2.77	2.98	3.25
	AEK2	2.45	5.03	6.80	7.80	8.81	9.16	1.65	2.20	2.52	2.73	2.91	3.18
28 d	N	1.86	3.90	5.49	6.70	8.03	8.89	1.66	2.33	2.84	3.16	3.14	3.87
	P 1	1.48	3.60	5.55	6.71	8.02	8.59	1.35	1.95	2.34	2.55	2.79	3.12
	P 2	1.92	4.04	5.84	6.99	8.04	8.80	1.16	1.69	2.00	2.20	2.44	2.72
	P 3	1.75	3.80	5.70	6.67	7.82	8.29	1.21	1.69	1.99	2.17	2.37	2.66
	K 1	2.06	4.05	6.43	7.55	8.45	9.04	1.44	2.01	2.37	2.56	2.80	3.26
	K 2	1.57	3.55	5.57	6.65	7.57	8.01	1.34	1.88	2.20	2.39	2.60	2.92
	K 3	1.40	3.11	4.99	6.02	7.18	7.85	1.20	1.71	1.99	2.17	2.37	2.70
	A E	1.78	3.98	5.91	6.88	8.09	8.77	1.60	2.23	2.60	2.85	3.08	3.47
	AEP2	1.35	3.38	5.06	6.08	7.05	8.05	1.28	1.86	2.16	2.38	2.54	2.95
	AEK2	1.75	3.78	5.71	6.76	7.75	8.93	1.42	1.98	2.27	2.47	2.61	3.07

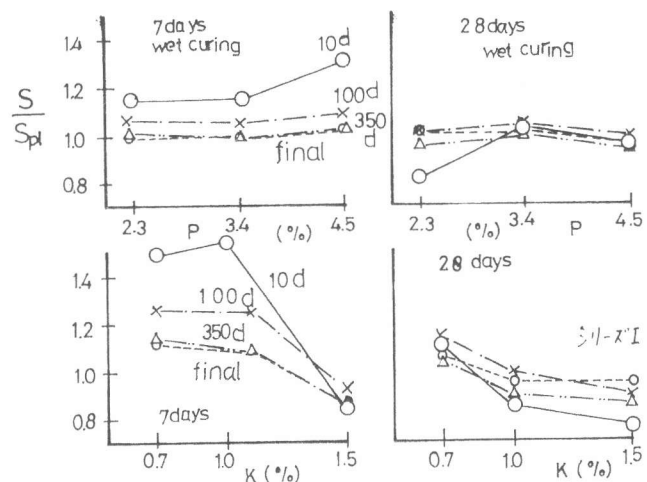


図-1: 減水剤添加量の収縮に及ぼす影響

シリーズIIの結果を(1)式より整理して表-3に示した。収縮の乾燥初期でのたつきは表中の $S_{w/2}$ に達する日数Nである程度判定できる。これによれば、セメント量一定では単位水量の少ないもの程Nは減少すること、単位水量一定であれば単位セメント量550 kg/m³程度でNは最大となり、それ以上セメント量が増加すれば却って減少傾向を示すことが理解できる。収縮～時間曲線の傾向ともあわせて考えると、セメント量によって水セメント比の低下により、乾燥初期での収縮増加率が著しくなる場合も考えられ注意を要する。収縮量、逸散水量は水セメント比の低下とともに減少する傾向にある。w/c=25%およびw/c 54%の本実験での最小、最大の水セメント比で比べると、収縮量は前者は後者の3/4弱、逸散水量は1/3程度となつていことがわかる。

図-2は、単位水量190 kg/m³、養生期間28日の場合の各水セメント比における収縮量s～逸散水量W'の関係を示したものである。これより、水セメント比が減少するほどs～W'関係の直線比傾度が急になる傾向があり、図中お示したようにその勾配も急になる傾向にある。ペースト濃度の違いによるゲル間隙、ポロシティー等の内部構造の相違に帰因すると考えられる。

(3)配合要因と収縮の関係：収縮に及ぼす配合の影響を調べるため、図-3には28日養生の450日収縮量とセメント量の関係と単位水量、水セメント比をパラメーターとして示した。これより、同一単位水量でもセメント量の増加により収縮は逆比例的に減少し、同一水セメント比ではセメント量の減

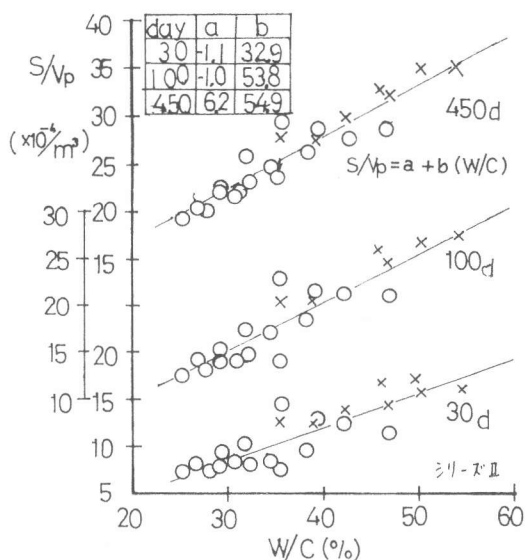


図-4：単位ペースト量当りの収縮量と水セメント比の関係

表-3：シリーズII収縮データの整理結果

Curing period	Kinds of mix	a	b	N (days)	S ₀₀ (10 ⁻⁴)	W ₀₀ (g)	W ₀₀ ' (%)
7 d (250 days drying)	N1	2.002	0.0865	23.1	11.6	383.6	4.0
	N2	1.999	0.0782	25.5	12.8	406.4	4.3
	N3	2.010	0.0758	26.5	13.2	451.1	4.9
	N6	2.307	0.0889	26.0	11.2	325.9	3.4
	N7	2.855	0.0801	35.6	12.5	381.0	4.0
	P1	2.001	0.0941	21.3	10.6	233.9	2.5
	P2	3.201	0.1028	31.3	9.7	263.3	2.7
	P3	2.820	0.1069	26.4	9.4	266.2	2.8
	P4	3.884	0.0914	42.5	10.9	311.9	3.3
	P5	2.830	0.1036	26.1	9.2	180.9	1.8
	P6	2.372	0.0960	24.7	10.4	201.4	2.1
	P7	3.340	0.0918	36.4	10.9	280.7	2.9
	P8	3.483	0.0856	40.7	11.7	289.7	3.0
	P9	3.134	0.1117	28.1	9.0	166.9	1.7
	P10	3.463	0.1037	33.4	9.7	191.1	1.9
28 d (450 days drying)	P11	2.971	0.1050	28.3	9.5	212.1	2.2
	P12	4.559	0.0924	49.4	10.8	265.1	2.8
	P13	2.867	0.1066	26.9	9.4	161.2	1.6
	P14	3.327	0.1031	32.3	9.7	193.4	2.0
	P15	2.714	0.0940	28.9	10.6	219.9	2.3
	N1	2.842	0.0984	28.9	10.2	400.2	4.1
	N2	3.203	0.0871	36.8	11.5	421.3	4.4
	N3	3.023	0.0813	37.2	12.3	492.4	5.3
	N4	4.224	0.1033	40.9	9.7	282.0	2.9
	N5	3.891	0.1009	38.6	9.9	297.7	3.0
	N6	3.390	0.0899	37.7	11.1	343.1	3.7
	N7	3.030	0.0771	39.3	13.0	415.5	4.4
	P1	3.404	0.0951	35.8	10.5	256.9	2.6
	P2	3.746	0.0956	39.2	10.5	289.5	3.0
	P3	3.469	0.0955	36.3	10.5	283.4	3.0
	P4	4.596	0.0861	53.4	11.6	344.9	3.7
	P5	5.531	0.1127	49.1	8.9	202.3	2.0
	P6	4.696	0.0958	49.0	10.4	222.9	2.3
	P7	5.090	0.0883	57.7	11.3	294.3	3.1
	P8	5.081	0.0892	57.0	11.2	305.9	3.3
	P9	5.246	0.1126	46.6	8.9	183.7	1.8
	P10	5.447	0.0994	54.8	10.1	219.8	2.2
	P11	5.287	0.0903	58.6	11.1	242.5	2.5
	P12	6.271	0.0813	77.2	12.3	284.9	3.0
	P13	5.428	0.1088	49.9	9.2	181.9	1.8
	P14	5.116	0.0995	51.4	10.1	207.3	2.1
	P15	4.556	0.0874	52.1	11.4	233.0	2.5

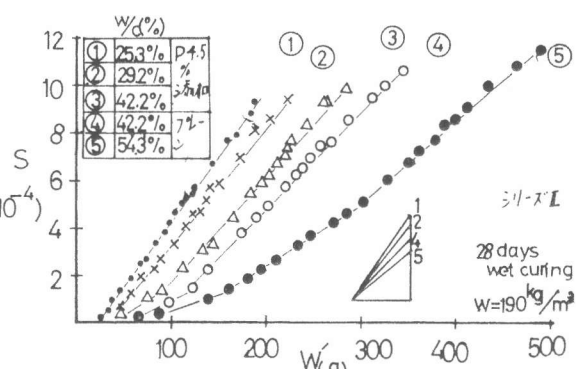


図-2：収縮量sと逸散水量W'の関係

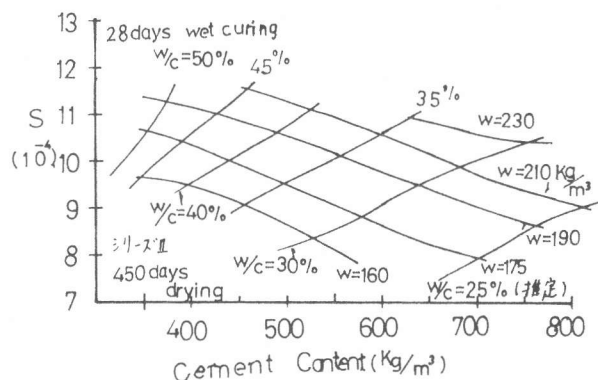


図-3：単位セメント量と乾燥収縮

少により同様に減少する。したが、収縮を支配する要因としてペースト濃度およびペースト量が考えられる。

上記より、セメント比とペースト濃度の尺度として収縮量とペースト量で除いた S/V_p との関係と求めたものが図-4で、乾燥が進むにつれ両者の間に明確な比例関係がみられるようになる。この関係を一次式で表せば

$$\frac{S}{V_p} = a + b(W/C) \quad (2)$$

(2)式で a は乾燥と進行にともないいく分増加するが非常に小さく、 $a \approx 0$ とすれば次式で $n=1$ とした場合に相当すると考えられる。

$$\text{Pickett 式: } S = S_{sp}(1-q)^n \quad (3)$$

Fulton³⁾ は米開拓局のデータに基づきペーストの収縮量を $S_{sp} = A \cdot (W/C)$ として (3) の Pickett 式中の n 値を評価し、セメント量が 400 kg/m^3 以上ではほぼ 1 に近い値を得ており、これは (2) 式が近似的に成立する根拠を与えるものと思われる。勿論、(3) 式中の n 値は骨材種類によって相当に変化することが予想される。(2) 式がすべての場合に適合する訳ではないが、本実験で養生期間 28 日の場合には乾燥 100 日以上で b はほぼ一定値の $55 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 程度となり a は一桁より小さい値を持つことがわかる。

(4) 収縮と力学的性質の関係: (2) 式からも明らかのように、収縮量は圧縮強度などの力学的性質と関連が予想される。図-5 は 28 日養生の場合の圧縮強度および 1/3 割線弾性係数と S/V_p との関係を示したが、米倉¹⁾ の報告にも同様の様に圧縮強度と収縮の指標として使用できる可能性が認められる。

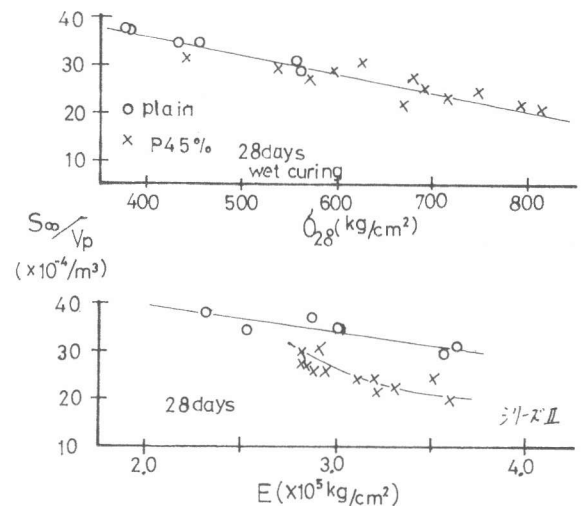


図-5: 圧縮強度および弾性係数と収縮の関係

4. 内部水分の挙動に関する考察

低水セメント比コンクリートの乾燥による水分移動の様相と調べるため、線形の拡散方程式が適用できるとして解析を試みた。拡散特性値の評価は実測の $W' \sim t$ 関係に合うような拡散係数 D 、表面係数 λ と日数を 3 段階に分け線形性を保つよう $10 < A = \frac{\lambda}{D} \cdot a < 80$ の範囲で近似的に求めたもので、これを用いて水分逸散の比率を計算し図示したのが図-6 である。これより低水セメント比では中心部の乾燥が相当に遅れ、内部の水分勾配が急になる点が注目される。次に、図-6 の結果と実測の $W' \sim t$ 関係とを用いた図中 O' 点の収縮応力を近似的に平面ひずみ問題として概算すると、 W/C 25% の場合も W/C 54% の場合も引張強度を上回る結果となったが、前者の方が応力と引張強度の差が大きく、より危険側かと考えられた。しかしながら乾燥後 450 日供試体の観察では前者の供試体では微細ひびわれが多数認められるに対し、前者の W/C 25% 供試体では目視できるひびわれは認められない。この点に関しては今後の詳細な検討にまかしたいと思う。

参考文献

1. 米倉, 長瀬: 土木学会第 32 回年講, 1977
2. 徳田, 川上, 加賀谷: 材料 26 巻 283 号, 1977
3. F.S. Fulton: Magazine of Concrete Research Vol. 13 No. 39, 1966

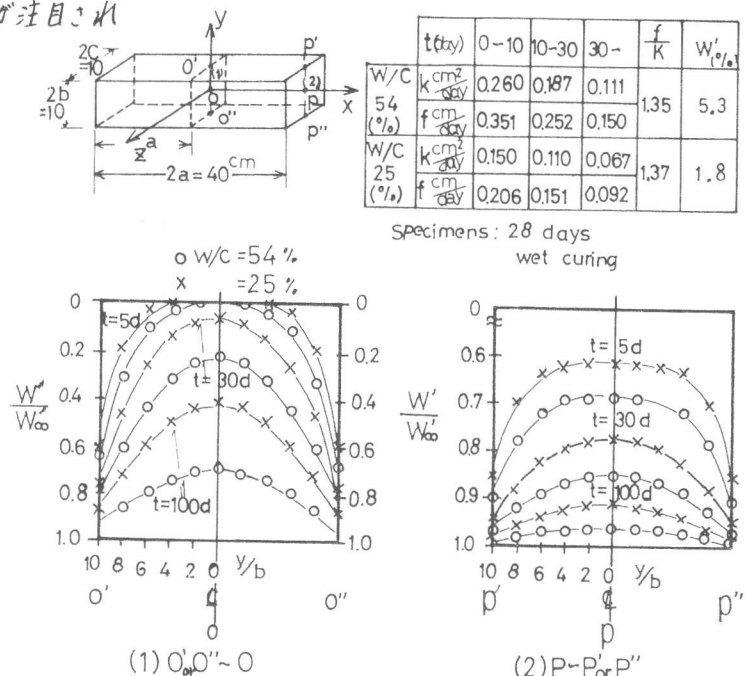


図-6: 低水セメント比コンクリートの内部水分の分布