

[46] 収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮およびひびわれに関する実験研究

正会員 ○富田 六郎 (日本セメント中央研究所)
 後藤 孝治 (日本セメント中央研究所)
 酒井 公式 (三洋化成工業第三研究部)
 茂庭 孝司 (日本セメント中央研究所)

1. まえがき

コンクリートの乾燥収縮を毛細管中の水が逸散するときに発生する毛細管張力によるものと推論した報告はいくつかみられ¹⁾、その他にも乾燥収縮機構を説明する理論が種々報告されてきた。しかし、中高湿度域においては毛細管張力説が収縮機構を説明しやすく、有力な説といわれている^{2,3)}。毛細管張力には水が逸散する空隙の半径および水の表面張力が関与し、前者は理論上外気の湿度条件とバランスした値となる。すなわち、この説明によれば、相対湿度が高く、また毛細管中の水の表面張力が小さくなるに従って乾燥収縮が小さくなるといえる。

本報告は、骨材品質の低下および施工性に関連したワーカビリティの確保によってもたらされる単位水量の増大等が引き起す収縮ひびわれの問題に対処することを目的に行われた一連の研究の一部であり、セメントの溶液中で水の表面張力を大巾に低減する特殊な界面活性剤(収縮低減剤と称する)をモルタルおよびコンクリートに混和することによって、主として乾燥収縮に及ぼす影響を検討したものである。

2. モルタルにおける乾燥収縮試験

2.1 使用材料 試験に用いた界面活性剤は非イオン系の特殊なもので、主成分は低級アルコールのアルキレンオキシド付加物である。一般式はRO-(AO)_n-Hで表わされ、Rはアルキル基、Aはアルキレン基である。本試験では炭素数がそれぞれ1~4および2~3のものを、nが平均で2~6の値のものを使用した。

セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は豊浦標準砂を使用した。

2.2 試験方法 各種の界面活性剤を用いたときの表面張力は以下の手順で測定した。セメント1に対しイオン交換水0.6、界面活性剤を純分で0.02の割合で混合する。この溶液を2時間30分静置してから汙過した汙液について、ウィルヘルミー式表面張力計で測定した。乾燥収縮を測定するモルタルは水セメント比65%、砂・セメント比2.0で、界面活性剤は水の一部を置き換えてセメントに対し重量で2%を使用した。練りまぜ、成形はJISに従って行い、脱型後材令1週迄湿空養生をしたのち20℃、60%RHの条件下で収縮試験を行った。測定はダイヤルゲージ法によった。

表-1 表面張力およびモルタルの乾燥収縮

2.3 試験結果および考察 汙液の表面張力および乾燥収縮の結果を表-1に示した。表中には界面活性剤を用いない基準モルタルの結果と、基準モルタルに対する乾燥収縮の比率も示した。

表面張力と材令13週における乾燥収縮の関係を図-1に示した。同一の系統に属する界面活性剤では、表面張力の低下性能に応じて乾燥収縮をほぼ直線的に低減でき、表面張力が30dyn/cm程度になると基準モルタルに対して約40%の収縮低減を計れることがわかった。以上のモルタルにおける基礎的な試験によって、乾燥収縮を毛細管張力で説明した理論に妥当性のあることが推察できた。

No	表面張力 (dyn/cm)	乾燥収縮 (×10 ⁻⁴)		収縮比 (%)	
		A W	1.3W	A W	1.3W
1	44.2	9.3	13.0	6.7	8.0
2	32.9	8.2	10.8	5.9	6.6
3	40.3	9.9	12.7	7.1	7.8
4	43.8	11.4	14.2	8.2	8.7
5	42.4	10.4	13.0	7.5	8.0
6	40.3	9.9	12.2	7.1	7.5
7	39.6	11.0	13.7	7.9	8.4
8	36.5	9.2	12.1	6.6	7.4
9	32.5	8.9	11.1	6.4	6.8
10	36.9	10.6	13.5	7.6	8.3
11	34.7	9.2	11.7	6.6	7.2
12	29.1	8.6	10.8	6.2	6.6
基準	71.4	13.9	16.3	10.0	10.0

3 コンクリートにおける収縮低減剤の効果

3.1 使用材料 コンクリート試験には、2章で用いたうち、1種の界面活性剤を使用した。セメントは普通ポルランドセメントおよび高炉セメントを、膨張材はCSA系のものを、細骨材は川砂と山砂の混合物（比重2.61、吸水率250%、FM2.71）を、粗骨材は碎石（最大寸法20mm、比重2.64、吸水率0.74%、FM6.82）を使用した。なお、減水剤、AE剤は用いなかった。

3.2 試験方法 練りませには容量50Lの強制練りミキサを用い、成形等はJISに従って行った。強度試験は $\phi 10 \times 20$ cmの供試体を使用し、標準養生を行った。乾燥収縮供試体は $10 \times 10 \times 40$ cmで、材令1週迄水中養生したのち20℃、60%RHの雰囲気中で試験を行った。測定には、区間25cmのホイットモアひずみ計を用いた。

ひびわれ試験用供試体は図-2に概略を示すもので、 $10 \times 8 \times 40$ cmの供試体の中央20cmに断面減少部を設け、断面中央に配した異形鉄筋で収縮を拘束してひびわれを誘発した。養生は乾燥収縮の場合と同一にし、乾燥雰囲気として60%RHの他に30%RHの条件を加えた。鉄筋径は前者が25mm、後者が19mmとした。供試体数は1条件3本とし、乾燥開始後初めてひびわれが発生する日数を求めた。

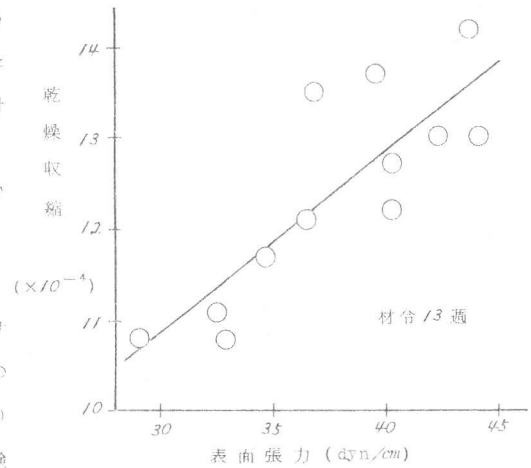


図-1 表面張力と乾燥収縮の関係

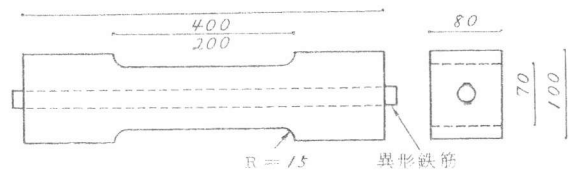


図-2 ひびわれ試験用供試体

3.3 試験の要因と水準 コンクリートの配合に関する試験要因と水準は表-2に示すものとした。収縮低減剤量を4水準、他の3要因を2水準として $L_{16}(2^{13})$ 直交配列表に割り付けた。交互作用としては収縮低減剤量、水セメント比および膨張材量の3要因間のものを考慮することとした。割り付けた列番は表-3に示す通りである。

コンクリートの単位結合材量は350 kgと固定し、膨張材はセメントの内割で使用し、収縮低減剤は単位水量の一部とみなして配合設計を行った。各要因を組み合わせたコンクリートの示方配合は表-4に示した。

表-2 試験の要因と水準

記号	要因	水準
A	収縮低減剤量	0, 2, 4, 6 (%)
B	水セメント比	3.0, 6.0 (%)
C	膨張材量	0, 3.5 (kg/m ³)
D	セメントの種類	普通, 高炉B

表-3 割り付け表

列番	割付した要因	
	主効果	交互作用
1	B	
2	A'	
3		A' × B
4	A''	
5		A'' × B
6	A'''	
7		A''' × B
8	C	
9		B × C
10		A × C
11	D	
12		A' × C
13		
14		A'' × C
15		

表-4 コンクリートの示方配合および試験結果一覧

系	W/C (%)	S/a (%)	[C] E (kg/m ³)	[D] エメント	[A] 剤 (%)	中位量 (kg/m ³)						SI (cm)	Air (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		引張強度 (kgf/cm ²)		乾燥収縮 (×10 ⁻⁴)			ひびわれ発生日 (日)	
						C	E	W	S	G	A			7D	28D	7D	28D	4W	20W	30W	60%RH	30%RH
1			0	普通	0	350	0	175	773	1078	0	5.0	1.8	3.34	471	30.6	33.8	1.77	3.07	3.66	6	4
2			35	高炉	0	315	35	175	770	1076	0	4.0	1.6	2.49	422	25.7	37.0	5.03	7.63	8.59	8	6
3			0	普通	2	350	0	168	773	1078	7	5.0	2.5	2.81	416	27.2	37.8	3.25	6.19	7.15	17	7
4			35	高炉	2	315	35	168	767	1072	7	5.0	2.5	2.28	406	24.6	33.1	4.07	6.55	7.57	13*	10
5			0	高炉	4	350	0	161	767	1072	14	4.5	2.0	2.01	363	20.9	33.4	3.28	6.23	7.21	10	6
6			35	普通	4	315	35	161	770	1076	14	6.6	2.2	2.54	349	24.3	30.3	2.41	4.21	5.39	62*	13
7			0	高炉	6	350	0	154	767	1072	21	3.0	2.3	1.74	339	19.5	29.8	2.85	5.53	6.50	15	13
8			35	普通	6	315	35	154	770	1076	21	6.0	1.9	2.13	307	21.1	28.4	2.07	3.47	4.33	90**	35**
9			0	高炉	0	350	0	210	937	808	0	13.0	1.8	15.6	316	17.4	31.8	4.93	8.98	10.47	4	3
10			35	普通	0	315	35	210	942	811	0	18.5	1.9	2.23	324	21.7	31.5	11.3	8.00	9.33	14	3
11			0	高炉	2	350	0	203	937	808	7	17.0	3.0	14.4	292	17.6	28.2	4.27	8.15	9.67	7	3
12			35	普通	2	315	35	203	942	811	7	20.5	2.7	18.8	293	19.0	29.0	3.99	6.56	7.89	27	10
13			0	普通	4	350	0	196	942	812	14	17.0	3.5	18.5	284	18.4	25.3	21.8	7.17	8.35	22	10
14			35	高炉	4	315	35	196	942	811	14	16.5	3.1	14.4	284	17.8	28.0	3.35	6.47	7.81	26	13
15			0	普通	6	350	0	189	942	812	21	18.5	3.3	15.7	265	18.2	26.5	2.91	5.47	6.47	70	25
16			35	高炉	6	315	35	189	937	808	21	17.0	3.1	14.1	268	18.2	26.9	3.11	5.96	7.23	28	12

各水準 A₁=0 A₂=2 A₃=4 A₄=6 B₁=3.0 B₂=6.0 C₁=0 C₂=3.5 D₁=普通 D₂=高炉B

* 2個の平均値 ** 仮定値

3.4 試験結果 16種のコンクリートについてランダムな順序で試験を行った。これら結果は表-4にとりまとめて示した。ひびわれ試験においては、 ρ 8のすべての供試体と ρ 4.6の一部でひびわれが発生しなかったため、欠測値として適宜な処理を行った。各特性値について分散分析を行い、代表的な結果を表-5に示した。解析にあたって、不偏分散の小さい要因は誤差にプールし、危険率1%で検定を行った。表中には寄与率も併記した。

表-5 分散分析結果

要因	自由度	フレッシュコンクリートの性質				圧縮強度				引張強度				乾燥収縮				ひびわれ発生			
		スランブ		空気量		7日		28日		7日		28日		20週		39週		60%RH		30%RH	
		Fo	ρ	Fo	ρ	Fo	ρ	Fo	ρ	Fo	ρ	Fo	ρ	Fo	ρ	Fo	ρ	Fo	ρ	Fo	ρ
A	3	2.62	0.6	2.40*	4.24	9.70*	1.97	7.07*	3.01	1.93*	2.26	8.80*	3.46	4.28*	6.38	1.26*	5.87	9.26*	3.20	7.39*	5.25
B	1	7.87*	9.39	5.81*	3.50	6.44*	4.80	4.17*	5.99	1.35*	5.52	2.46*	4.00	2.59*	1.26	1.46*	2.28				
C	1	8.76	0.9					6.47	0.8					1.84*	8.8	4.86*	7.5	1.26*	1.50		
D	1	2.16	2.5			2.87*	2.10			2.72*	1.08			1.51*	7.1	5.68*	8.7	1.26*	1.50	5.58*	1.11
A×B	3	1.98	0.4	8.24*	1.33			1.41*	5.7			5.28	5.3								
B×C	1							1.02	1.3									1.34*	1.85		

* 危険率1%で有意 ρ 寄与率(%) -- 不偏分散が小さいため誤差にプールした要因

3.5 結果の考察

(1) フレッシュコンクリート 単位結合材量を固定しているため、水セメント比10%の差いで単位水量に35kgの差がある。このため、スランブに対しては水セメント比の影響が非常に大きかった。また、セメントが有意で普通セメントの場合にスランブが約2cm大きい結果であったが、収縮低減剤とスランブの関係は、収縮低減剤が空気量に及ぼす影響と関連を示す程度で有意ではなかった。すなわち、水に置き換えて使用した収縮低減剤は水と同等のコンシステンシー向上の効果を与えると考えられた。

空気量については、収縮低減剤量、水セメント比、およびそれらの交互作用が有意であった。各水準での推定値は図-3に示すようで、水セメント比60%の場合に収縮低減剤量の増加により空気量が増す傾向がみられた。収縮低減剤を用いたことによる空気量の増加は平均1%程度で、使用量との関係は明確でなかった。

(2) 強度 強度に関しては、収縮低減剤量と水セメント比が有意であり、寄与率は前者が20~35%、後者が40~60%を占め、28日強度はこの2要因に支配されると考えられた。収縮低減剤1%の使用で平均的には強度が2~4%低下する。強度低下の理由には空気量の増加が考えられ、さらに有機質の混和剤を多量に用いたことに起因する凝結・硬化の遅延が考えられた。材令7日では2要因の他にセメントが有意で、高炉セメントを使用した場合に強度が低かった。交互作用が有意な材令28日圧縮強度の推定値は図-4のようで、水セメント比50%の場合収縮低減使用による強度減少量が大きかった。50%の場合には、空気量の増加が少ないことを考えるとこの理由は明確ではないが、単位水量が少なく収縮低減剤の水に対する濃度がより高くなっていることも原因の一つと考えられた。

(3) 乾燥収縮 乾燥収縮に対して4主効果がすべて有意であった。これら要因の効果は図-5に示す通りで、材令20週、39週の結果は同様の傾向を示した。 $(\times 10^{-4})$ 収縮低減剤を混和すると、使用量に比例して乾燥収縮を直線的に減少できることは明らかで、6%の使用によ

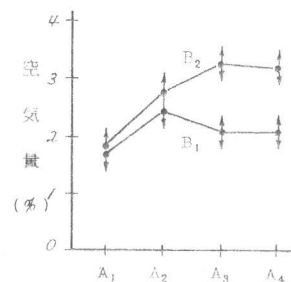


図-3 空気量の母平均と信頼限界

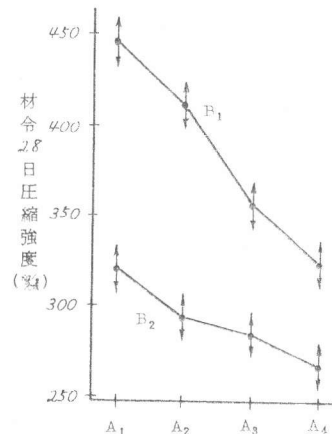


図-4 圧縮強度の母平均と信頼限界

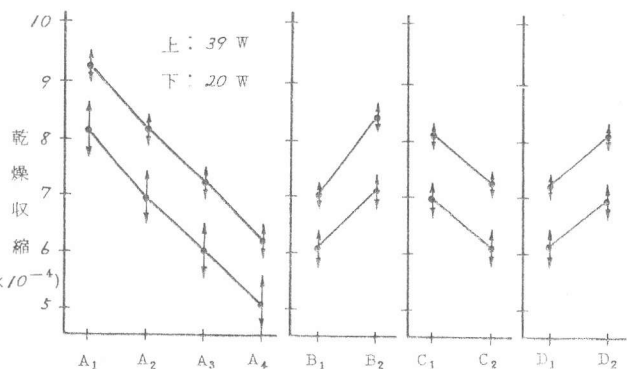


図-5 乾燥収縮の母平均と信頼限界

り乾燥収縮を 3×10^{-4} 以上低減した。また、収縮低減剤の寄与率は約60%であった。水セメント比については、単位水量が3.5kg異なることによる差が顕著で約 1×10^{-4} の違いが生じた。この効果は収縮低減剤2%の使用にほぼ匹敵するものであった。膨張材の使用は乾燥収縮を約 1×10^{-4} 減少し、高炉セメントは普通セメント比べ大きな収縮値を示した。本試験の結果から収縮低減剤と膨張材の組み合わせで乾燥収縮を推定すると、両者とも用いない基準コンクリートに対し材令20週の乾燥収縮は、収縮低減剤6%の使用により 3.1×10^{-4} (37%)低減でき、さらに膨張材を併用すると 3.8×10^{-4} (45%)低減できることが示された。

(4) ひびわれ発生日 乾燥収縮の進行を考慮すると、ひびわれ発生日が正規分布に従う特性値とは考えにくい、欠測値を仮定して分散分析を行った。相対湿度60%での要因効果は

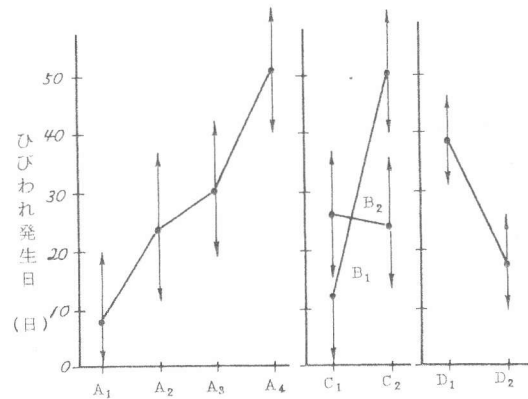


図-6 ひびわれ発生日 (60% RH) の母平均と信頼限界

図-6に示すように、収縮低減剤、膨張材およびセメントが有意であった。また、いずれも乾燥収縮を小さくする水準でひびわれ発生を抑制する効果を現わした。したがって乾燥収縮に対する寄与率が最も大きい収縮低減剤量がひびわれ発生日に対する寄与率が最大であった。一方、水セメント比に関しては、50%とすると乾燥収縮が減少し、かつ引張強度が大きくなるにもかかわらず、ひびわれを遅らせる効果がみられなかった。このことは、強度性状だけでなくコンクリートの弾塑性性状が収縮ひびわれに大きな影響を及ぼすことを示唆しているものと考えられた。ひびわれ発生に影響を及ぼす諸要因について詳細な検討は行えないが、収縮低減剤を用いて乾燥収縮を低減することが収縮ひびわれの減少あるいは防止の面で効果的に作用することが把握できた。

4. 結論

特殊な界面活性剤である収縮低減剤を用いて練りませ水の表面張力を低下させると、その効果に応じてモルタルの乾燥収縮を低減できることを実験的に証明し、乾燥収縮を毛細管張力理論で説明できる可能性を提示した。

また、1種類の収縮低減剤について行ったコンクリート試験の結果、収縮低減剤を用いると空気の流れおよび凝結・硬化の遅延による若干の強度が低下が派生するものの、使用量に比例して乾燥収縮を大巾に低減でき、このことによって収縮ひびわれ防止の面でも効果を発揮することが判明した。なお、コンクリートにおいて収縮低減剤を6%適用したときの諸物性への影響をまとめると、概略以下の通りであった。

- (1) 2~6%使用すると空気量は1%程度増加する。また、この程度は水セメント比によって異なる。
- (2) 圧縮強度、引張強度とも低下する傾向を示し、収縮低減剤を用いない基準コンクリートに対するその低下割合は、標準養生材令28日で収縮低減剤1%の使用につき2~4%である。強度低下の主因は空気量の増加、および凝結・硬化の遅延と考えられる。
- (3) 材令7日迄水中養生した後20℃60%RHの密閉気で乾燥したコンクリートの材令20~39週における乾燥収縮は、1%使用すると約 0.5×10^{-4} 減少し、6%の使用で基準コンクリートに対して 3×10^{-4} を超える収縮低減が計れる。また、膨張材の収縮低減効果も累加的に発揮され、収縮低減剤6%および膨張剤 3.5 kg/m^3 を併用すると、基準コンクリートに対し材令20週の乾燥収縮を45%低減できる。
- (4) 内部拘束小型供試体によるひびわれ発生試験では、乾燥収縮を低減した割合に比例してひびわれ発生を遅延させる効果を実証し、条件によってはひびわれを防止できる。

参考文献 1) 近藤 実 博士論文「硬化セメントペーストの物理的諸性質の研究」昭和34年
 2) 長瀬重義、米倉重樹夫「コンクリートの乾燥収縮およびクリープの機構に関する考察」コンクリート工学Vol. 20 巻12 昭和57年12月
 3) 岸谷孝一、馬場明生「建築材料の乾燥収縮機構」セメントコンクリート 第346 昭和50年12月
 4) 富田六郎、竹田邦夫、城所卓明「収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮性状」第37回セメント技術大会講演要旨 昭和58年
 5) 佐藤 健、後藤孝治、酒井公式「セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤の作用機構」同上