

論文 コンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす拘束率の影響に関する研究

濱永 康仁*1・佐藤 嘉昭*2・上田 賢司*3・大谷 俊浩*4

要旨: 本研究では、試験期間中の拘束率を一定に保つことのできる収縮ひび割れ試験装置を用い、コンクリートに生じる拘束応力やひずみとひび割れ発生との関係を明らかにし、コンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生条件を確立することを最終目的としている。本論文はその一連の研究の一部であり、拘束率や乾燥開始材齢およびコンクリートの調合を変化させた条件下における乾燥収縮ひび割れ特性について考察を加えた。

キーワード: 収縮ひび割れ試験, 拘束率, 拘束応力, 拘束引張ひずみ, 引張強度試験

1. はじめに

コンクリート構造物の収縮ひび割れは、構造物の美観を損ねるだけでなく、耐久性を大きく低下させる原因である。コンクリート構造物の収縮ひび割れについては古くから取り組まれているが、数多くの影響要因が複雑に絡み合うため、そのひび割れ発生メカニズムや発生条件などは、未だ解決されていない。しかしながら、近年のコンクリート構造物に対する耐久性意識の向上やコンクリート構造物の性能設計への取り組みなど、収縮ひび割れメカニズムの解明や発生条件の確立が重要な課題となっている。

しかしながら、これまで行われているコンクリートの収縮ひび割れに関する実験データを整理した既往の研究¹⁾²⁾によれば、現状では統一的なひび割れ発生条件の確立は困難であることが示されている。従来の収縮ひび割れ試験 (JIS A 1151) ではコンクリートのひび割れ抵抗性を比較するための試験方法が規定されており、コンクリートの種類の影響を把握する場合などの比較実験には適しているが、ひび割れ発生条件を具体的に検討する場合は拘束率を一定に保つことのできるなど拘束率を自由に設定できる装置が必要となる。このことから、筆者らは拘束率を一定に保つことができ、かつ供試体に負荷さ

れる応力を直接測定できる収縮ひび割れ試験装置³⁾を開発した。

本論文では、開発した収縮ひび割れ試験装置を用いて、乾燥収縮ひび割れ発生条件を確立するための基礎データとして、試験期間中拘束率を一定に保った場合において収縮ひび割れに及ぼす拘束率、乾燥開始材齢および調合の影響を明らかにすることとした。

2. 実験

2.1 実験計画

実験項目を**表-1**、実験条件を**表-2**に示す。実験はシリーズIおよびIIからなっており、両シリーズともレディーミクストコンクリートを使用した。シリーズIで使用したコンクリートは呼び強度24で、拘束率を100%および80%で

表-1 実験項目

実験内容	供試体寸法 (mm)	供試体数 (体)	
		シリーズI	シリーズII
乾燥収縮ひび割れ	JIS A 1151 に準ずる	3	2
		3	
自由収縮ひずみ		3	
直接引張強度	100×100×600	3	
圧縮強度	φ100×200	3	

表-2 実験条件

シリーズ	呼び強度	乾燥開始材齢 (日)	拘束率 (%)
I	24	3, 7, 28	100, 80
II	24, 30, 36	7	100, 80, 60

*1 大分大学大学院 工学研究科環境工学専攻 工修 (正会員)

*2 大分大学 工学部福祉環境工学科 建築コース 教授 工博 (正会員)

*3 (株) さとうベネック 建設本部技術部 博士 (工学) (正会員)

*4 大分大学 工学部福祉環境工学科 建築コース 助手 博士 (工学) (正会員)

一定とした場合の乾燥開始材齢の影響を把握するために、それぞれの乾燥開始材齢を 3, 7, 28 日とした。シリーズ II では拘束率および調合の影響を把握するために乾燥開始材齢は 7 日で統一し、拘束率を 100%, 80% および 60% の 3 条件とし、それぞれ呼び強度 24, 30 および 36 の 3 種類のコンクリートで実験を行った。なお、拘束率とは、同一条件で乾燥したコンクリート供試体の自由収縮ひずみを拘束する割合である。拘束率 100% とは、自由収縮ひずみに関係なく拘束コンクリートのひずみを実験開始から変化しないように制御する、いわゆる完全拘束状態を意味する。実験に使用したコンクリートの調合および使用材料を表-3 に示す。

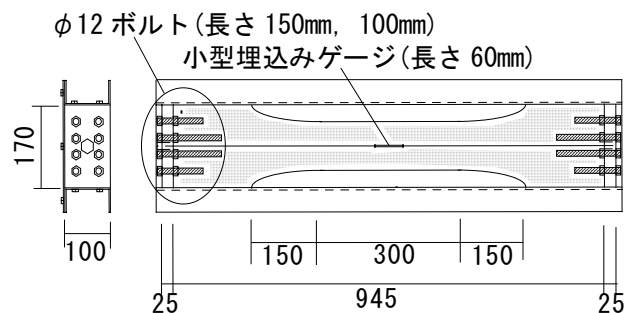
2.2 実験方法

実験に使用した供試体は打設後 2 時間程度で表面を平滑にした後、表面を湿布およびビニールシートで覆い打設後 1 日で脱型した。脱型後、所定の材齢まで標準水中養生とした。実験は恒温恒湿室内（温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ ）で行った。乾燥収縮ひび割れ試験は、筆者らが開発したひび割れ試験装置³⁾を使用した。この装置は設定した拘束率を試験期間中正確に制御し、ロードセルにより供試体の荷重を直接測定することができる。直接引張強度試験も同じ装置を用い、ひび割れ試験を開始する直前に行った。乾燥収縮ひび割れ試験および直接引張強度試験においては供試体内部中央に長さ 60mm の小型埋込みゲージを埋設してひずみの測定を行った。乾燥収縮ひび割れ試験および直接引張強度試験の供試体および型枠を図-1 に示す。この両者は供試体を精巧に作製できるかどうかを実験結果を左右することになるので、型枠の組み

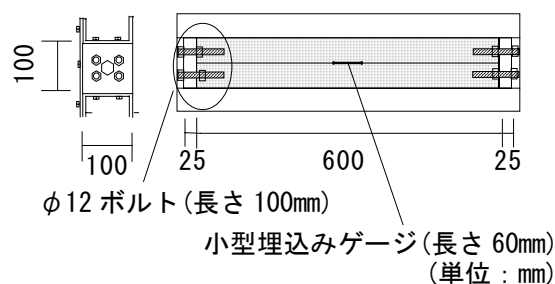
表-3 コンクリートの調合

シリーズ	呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)					
				W	C	S	G1	G2	Ad
I	24	53.5	46.7	183	342	806	660	282	3.42
	24	54.9	47.7	184	336	818	461	461	3.36
	30	47.6	45.7	185	389	764	466	466	3.89
II	36	42.1	43.5	188	447	702	469	469	4.47

W; 水, C; 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3), s/a; 細骨材率, Ad; 混和剤(AE 減水剤標準形 I 種) [シリーズ I]
S; 細骨材(山砂: 表乾密度 2.60g/cm^3 , 吸水率 2.80%, 粗粒率 2.65), G1; 粗骨材(砂利: 表乾密度 2.66g/cm^3 , 吸水率 0.86%, 実積率 58.0%), G2; 粗骨材(碎石: 表乾密度 2.66g/cm^3 , 吸水率 1.02%, 実積率 58.0%), [シリーズ II]
S; 細骨材(山砂: 表乾密度 2.58g/cm^3 , 吸水率 2.80%, 粗粒率 2.65), G1; 粗骨材(砂利: 表乾密度 2.65g/cm^3 , 吸水率 0.86%, 実積率 60.0%), G2; 粗骨材(碎石: 表乾密度 2.65g/cm^3 , 吸水率 1.02%, 実積率 59.0%),



(a) 収縮ひび割れ試験用



(b) 静的直接引張強度試験用

図-1 供試体および型枠

立て時には供試体の軸心が断面中央に位置するように特別な治具³⁾を用いた。このことにより、乾燥収縮ひび割れ試験および引張強度試験においてほぼ中央部でひび割れが発生する結果が得られた。圧縮強度試験は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用い、JIS A 1108 に準じて行った。

表-4 コンクリートの物性

シリーズ	拘束率 (%)	使用したコンクリート	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/l)	温度 ($^\circ\text{C}$)	圧縮強度(N/mm ²)	
							材齢 7 日	材齢 28 日
I	100	24-18-20N	17.0	4.8	2.28	30.0	—	30.2
	80	24-18-20N	20.0	3.8	2.28	28.0	—	32.9
II	100, 80, 60	24-18-20N	16.0	4.5	2.26	32.0	21.4	35.1
		30-18-20N	20.5	4.1	2.28	27.0	29.8	37.7
		36-18-20N	16.0	5.9	2.27	26.0	34.5	37.4

3. 実験結果

3.1 コンクリートの物性

実験で使用したコンクリートの物性を表-4に示す。圧縮強度試験の結果は材齢7および28日に行った供試体3体の平均値である。材齢28日では調合によらず圧縮強度がほぼ同程度となっているがその原因は不明であり、今後長期材齢において実験を実施し検討を行う予定である。

3.2 乾燥収縮ひび割れ試験

表-5に乾燥収縮ひび割れ試験結果の一覧を示す。表中には、ひび割れ発生時の測定結果と最大拘束応力を示している。以下では実験結果について考察を加える。

(1) ひずみの制御

図-2にひび割れが発生するまでのひび割れ供試体のひずみ(拘束ひずみ)ならびに自由収縮ひずみの経時変化の一例を示す。図はシリーズ

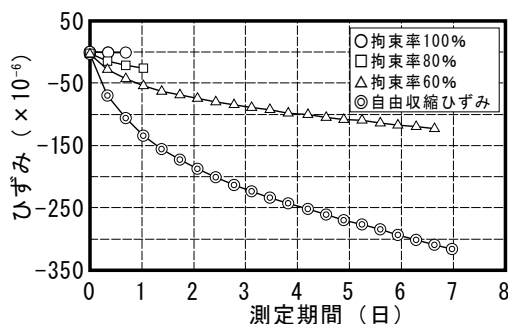


図-2 拘束ひずみの経時変化 (シリーズII・呼び強度36)

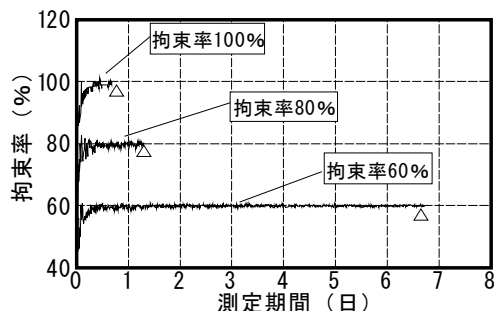


図-3 拘束率の経時変化 (シリーズII・呼び強度36)

表-5 乾燥収縮ひび割れ試験結果の一覧

シリーズ	呼び強度	乾燥開始材齢(日)	拘束率(%)	ひび割れ発生時						最大拘束応力(N/mm ²)	平均値(N/mm ²)	
				ひび割れ発生期間(日)	平均値(日)	拘束ひずみ(×10 ⁻⁶)	拘束引張ひずみ(×10 ⁻⁶)	自由収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)	拘束応力(N/mm ²)			
I	24	3	100.7	4.6	7.4	1	156	-155	1.75	1.56	1.79	1.73
			99.5	7.5		-1	210	-211	1.74		1.77	
			99.2	10.2		-2	258	-260	1.18		1.64	
		7	100.8	1.8	2.4	1	131	-130	1.89	1.86	1.89	
			100.4	2.2		2	149	-147	1.82		1.82	
			100.6	3.1		1	172	-171	1.88		1.92	
	28	100.0	1.2	1.5	0	96	-96	1.80	1.73	1.80		
		100.1	1.4		1	104	-103	1.69		1.76		
		100.9	1.8		1	117	-116	1.69		1.76		
	24	3	80.1	5.2	5.3	-37	149	-186	1.68	1.60	1.73	1.65
			81.0	7.5		-46	210	-256	1.62		1.68	
			80.4	3.2		-26	107	-133	1.50		1.55	
7		80.0	4.8	5.7	-31	124	-155	1.72	1.69	1.84		
		81.0	8.4		-49	177	-226	1.64		1.70		
		78.9	4.0		-29	109	-138	1.72		1.72		
28		81.8	3.6	12.1	-20	90	-110	1.44	1.29	1.66	1.80	
		78.6	11.8		-53	195	-248	1.60		1.83		
		80.0	20.9		-67	268	-335	0.83		1.92		
II	24	-	100.0	2.3	2.5	0	145	-145	1.95	1.78	1.95	1.78
			100.6	2.6		1	156	-155	1.61		1.61	
			80.0	3.5		-37	148	-185	1.74		1.74	
		7	81.1	7.3	5.4	-52	222	-275	1.88	1.81	1.88	
			60.0	5.0		-89	133	-222	1.60		1.60	
			60.2	6.1		-99	150	-249	1.66		1.66	
	30	-	100.0	1.1	1.2	0	135	-135	1.86	1.82	1.86	1.82
			100.0	1.2		0	137	-137	1.78		1.78	
			79.8	2.0		-36	142	-178	1.75		1.75	
		7	80.2	4.4	3.2	-50	202	-252	1.86	1.81	1.86	
			60.2	5.2		-109	165	-274	1.51		1.51	
			-	-		-	-	-	-		1.51	1.64
	36	-	100.0	0.7	0.7	0	106	-106	1.49	1.48	1.49	1.48
			99.1	0.7		-1	105	-106	1.47		1.47	
			79.4	1.1		-28	108	-136	1.71		1.71	
		7	80.2	1.3	1.2	-30	121	-151	1.38	1.55	1.38	
			59.8	7.1		-128	191	-319	0.91		1.11	
			58.5	6.1		-123	173	-296	1.56		1.56	

IIにおける呼び強度 36 の測定結果である。

図-3に図-2より算出した拘束率の経時変化を示す。図中の△においてひび割れが発生したが、設定した拘束率を精度よく一定に制御できていることが分かる。測定開始直後はばらつきがあるが、これは自由収縮ひずみが小さいためであり、制御した拘束ひずみは設定したひずみの $\pm 2 \times 10^{-6}$ の範囲内に収まっている。

(2) 自由収縮ひずみ

図-4に自由収縮ひずみの経時変化を示す。自由収縮ひずみは乾燥収縮ひび割れ試験と同様に供試体内部中央に小型埋込みゲージを埋設し測定を行った。図中の曲線は供試体 3 体の平均値を示している。

(3) 「拘束応力-拘束引張ひずみ」曲線

図-5に実験結果より得られた「拘束応力-拘束引張ひずみ」曲線の一部を示す。図はシリーズ I の乾燥開始材齢 28 日・拘束率 80% の測定結

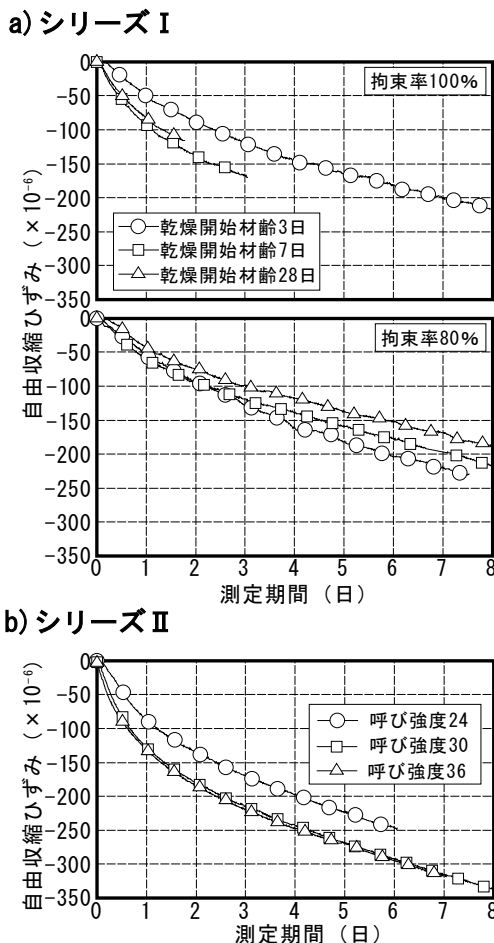


図-4 自由収縮ひずみの経時変化

果である。ひび割れは▼印で示している拘束応力が最大に達した時点ではなく、その後低下し△印で発生していることが分かる。

(4) ひび割れ発生期間

図-6にシリーズ I におけるひび割れ発生期間と乾燥開始材齢の関係を示す。拘束率 100% においては乾燥開始材齢が遅くなるほどひび割れの発生期間は短いですが、拘束率 80% では長くなり、拘束率によって異なる結果となった。

図-7にシリーズ II におけるひび割れ発生期間と水セメント比の関係を示す。拘束率 100% および 80% においては水セメント比が大きくなるにつれてひび割れ発生期間が長くなっているが、拘束率 60% では短くなっている。

以上のようにひび割れ発生期間は、拘束率、

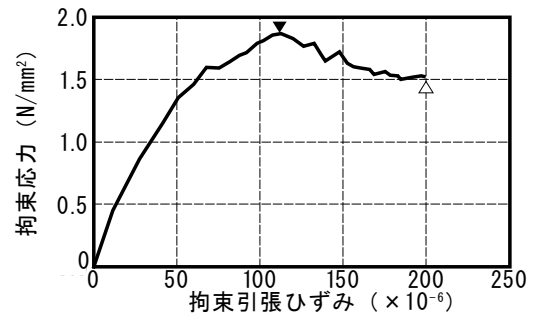


図-5 「拘束応力-拘束引張ひずみ」曲線の一部 (シリーズ I・乾燥開始材齢 7 日・拘束率 80%)

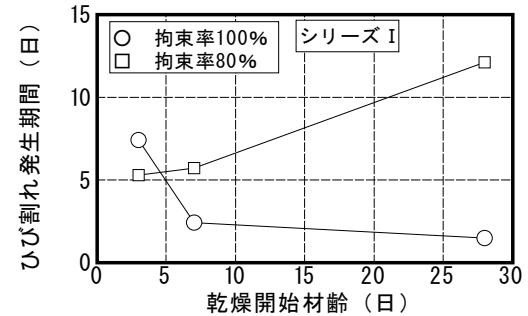


図-6 ひび割れ発生期間と乾燥開始材齢の関係

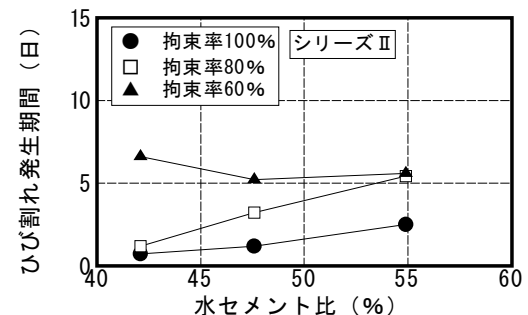


図-7 ひび割れ発生期間と水セメント比の関係

乾燥開始材齢および水セメント比と明確な関係が認められないことが明らかとなった。

4. 拘束率の影響

4.1 拘束引張ひずみ

図-8 にシリーズIIにおける水セメント比とひび割れ発生時の拘束引張ひずみの関係を示す。拘束率 60%は水セメント比が大きくなるにつれて拘束引張ひずみは小さくなっているが、拘束率 100%および拘束率 80%では大きくなっている。拘束引張ひずみはコンクリートの伸び能力を表しているため、拘束率よりもひび割れ発生期間の影響をより顕著に受けると考えられる。そこで、図-9 にひび割れ発生期間と拘束引張ひずみの関係を示す。ひび割れ発生期間と拘束引張ひずみにはばらつきはあるものの、相関関係が見られひび割れ発生期間が大きくなれば拘束引張ひずみも大きくなる結果となった。このことは、今後ひび割れ発生条件を把握するにあたって検討すべき項目の一つである。

4.2 強度比

今回の装置を用いて行った乾燥収縮ひび割れ試験は極めてゆっくり行う直接引張強度試験に相当することから、ひび割れ抵抗性の評価は「拘束応力-拘束引張ひずみ」曲線における拘束応力の最大値を用いた。

図-10 に最大拘束応力と乾燥開始材齢の関係を示す。図中には乾燥開始時の引張強度も示しており、3体の平均値を示している。最大拘束応力は拘束率や乾燥開始材齢が異なる場合においても大差なく、1.6~1.9N/mm²程度である。

図-11 に最大拘束応力と水セメント比の関係を示す。図中には、乾燥開始時の引張強度も示している。拘束率によらず水セメント比が大きくなるにつれて最大拘束応力も大きくなる傾向が見られるが、拘束率 60%においては他の拘束率よりもやや低い値を示した。

拘束応力に及ぼす拘束率の影響をさらに検討し、今後、ひび割れ発生条件を確立するために強度比というパラメータを用いて実験データを

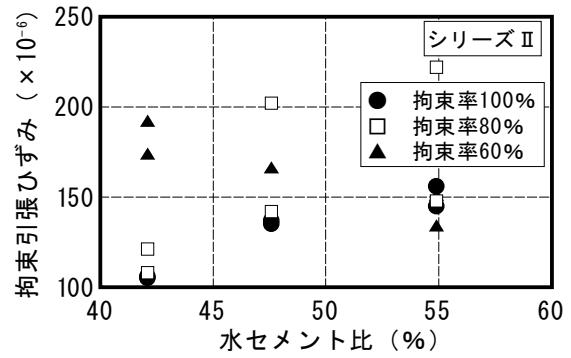


図-8 水セメント比とひび割れ発生時の拘束引張ひずみの関係

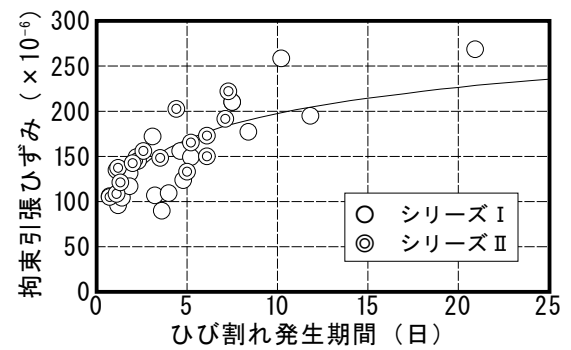


図-9 ひび割れ発生期間と拘束引張ひずみの関係

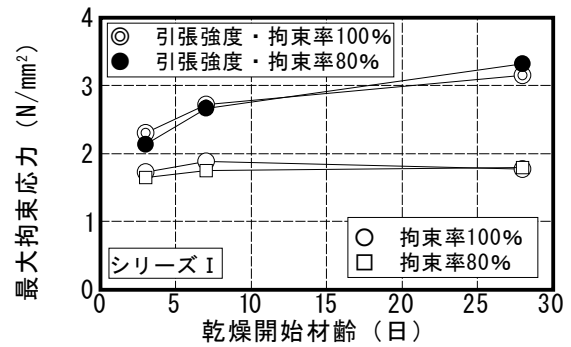


図-10 最大拘束応力と乾燥開始材齢の関係

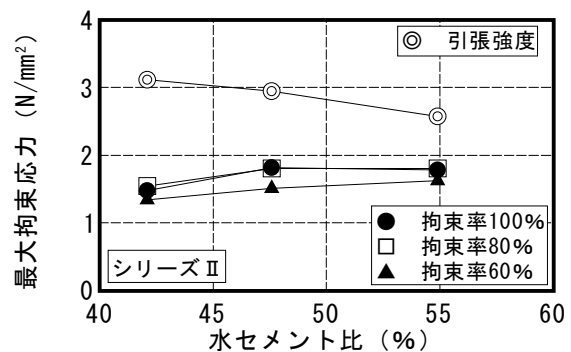


図-11 最大拘束応力と水セメント比の関係

整理した。ここで、強度比とは最大拘束応力を実験開始時の引張強度で除した値を意味する。引張強度に関しては最大拘束応力が発生した時点あるいはひび割れが発生した時点の引張強度を用いることも考えられるが、材料特性値という観点から、また、実験の困難さから判断して、実験開始時の引張強度を採用している。

図-12 にシリーズ I における強度比と乾燥開始材齢の関係を示す。拘束率によらず乾燥開始材齢が大きくなるほど強度比は低下している。これは、最大拘束応力が拘束率や乾燥開始材齢の影響をあまり受けないのに対し、引張強度は材齢の経過とともに大きくなるためである。

図-13 に強度比と水セメント比の関係を示す。いずれの拘束率においても水セメント比の増加とともに強度比も大きくなり、拘束率 60%において他の拘束率よりも低い値を示している。

図-14 に強度比と拘束率の関係を示す。乾燥開始材齢や水セメント比が同一の場合の強度比は、拘束率 100%と 80%はほぼ同程度の値を示し、拘束率の影響が見られないが、拘束率 60%では強度比が低下する傾向が見える。これは、表-5 に示しているように拘束率 60%のひび割れ発生期間が長くなっているため、測定期間中の応力緩和などが強度比に影響を及ぼしているものと思われる。しかしながら、本実験では拘束率 60%までのデータしかないため、今後はより低い拘束率の実験を行い、検証を行う予定である。

5. まとめ

本論文では、測定期間中拘束率を一定に保つことが出来る収縮ひび割れ試験装置を用い、拘束率、乾燥開始材齢および調合が異なる場合の乾燥収縮ひび割れ実験を行い、ひび割れ発生条件の確立のための基礎データを収集した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1)ひび割れ発生期間は、拘束率、乾燥開始材齢および水セメント比には影響を受けない。
- 2)ひび割れ発生時の拘束引張ひずみは、拘束率の影響を受けずひび割れ発生期間と相関性が高

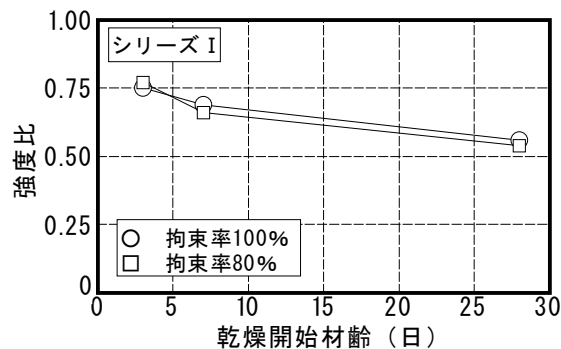


図-12 強度比と乾燥開始材齢の関係

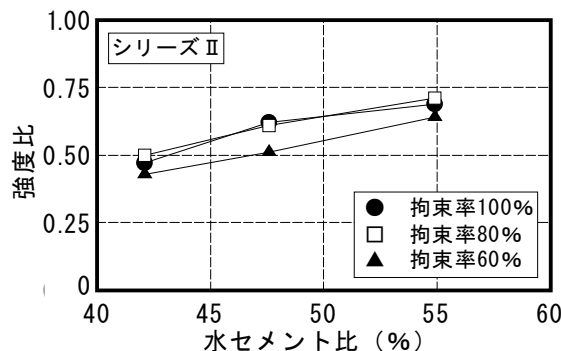


図-13 強度比と水セメント比の関係

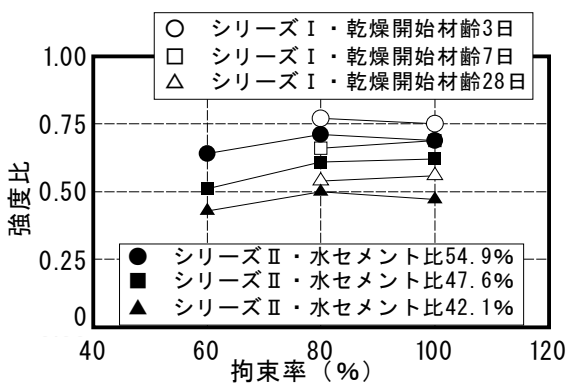


図-14 強度比と拘束率の関係

いことが確認できた。

- 3)強度比は拘束率が低くなるほど、また、乾燥開始材齢が遅くなるほど低下し、水セメント比が大きくなるほど大きくなる。

参考文献

- 1)日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム委員会報告書/論文集, JCI-C52, 2001
- 2)日本建築学会:鉄筋コンクリート増建築物の収縮ひび割れメカニズムと対策技術の現状一, 2003
- 3)濱永康仁ほか:ひずみ制御機能を備えた収縮ひび割れ試験装置の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.519-524, 2004