

第 4 章

乾燥収縮ひび割れ試験

4.1 はじめに

本研究では、収縮ひび割れを解明するためには、拘束率を一定に保った条件で実験を行い、その結果について評価を行うことが必要であると考え、第3章において拘束率を任意に設定でき、かつ、ひずみや荷重により制御可能な収縮ひび割れ試験装置の開発を行った。そこで、本章では、開発した収縮ひび割れ試験装置を用い、乾燥収縮ひび割れ実験を行った。

コンクリート構造物の収縮ひび割れに影響を及ぼす要因として、表-4.1.1 のように示される。コンクリート部材における乾燥収縮ひび割れの発生には、コンクリートの材料特性だけでなく、部材寸法・形状・拘束条件、環境条件が影響する。コンクリートの材料特性とは、単位収縮の程度を表す収縮特性だけでなく、変更特性やひび割れ発生条件が含まれる。これらの材料特性に影響を及ぼす因子として、以下のものが考えられる。

- ①コンクリートの使用材料・調合の違いによる影響
- ②コンクリート中のセメントの水和反応の進行に伴うコンクリートの物性の変化
- ③乾燥の程度
- ④外部拘束の程度
- ⑤コンクリート表面近傍における不均一な水分分布に起因した乾燥収縮の内部拘束の影響

①は、乾燥収縮ひび割れ特性に限らず、コンクリートのあらゆる材料特性に共通する問題であり、必ず解決しなければならない問題である。ここでは、数種類の呼び強度が異なるコンクリートを使用して実験を行うこととした。

②は、乾燥の開始が水和進行過程に行われた場合には、乾燥収縮ひずみが拘束されることによる応力の導入と水和の進行によるコンクリートの剛性と強度の発現が並行することになる。しかし、コンクリートの水和度を実験的に決定することは難しく、様々な仮定を設けて間接的に求めなければならないことや、水和度の影響についてのみ検討するためには、水和の進行の影響がない長期材齢において実験を行い、その条件下で収縮ひび割れ特性を明らかにし、その後水和の影響について考慮する手段をとる必要があるが、そのためには3年以上の長期期間が必要である。そこで、本研究では、水和の進行については無視することとした。

③の乾燥の程度の影響については、異なる乾燥開始材齢において実験を行い、その影響を考慮することとした。

④の外部拘束の程度の影響については、異なる拘束率において実験を行い、その影響を考慮することとした。

⑤の内部拘束の影響については、実験において内部拘束のみ取り上げることは非常に困難であるため本実験では内部拘束の影響について検討を行っていない。

このように本章では、第3章で開発した試験装置を用いてコンクリートの調合、乾燥開始材齢および拘束率の異なる条件下で乾燥収縮ひび割れ実験を行い、コンクリートの応力やひずみを測定し、これらの実験結果について検討を行った。

表-4.1.1 ひび割れ発生要因

ひび割れの原因		ひび割れの特徴	発生時期		
			初期	中期	長期
材料・調合による要因	単位水量の多い軟練コンクリートの採用	コンクリートの沈み・ブリーディングを伴い、打ち込み後1~2時間で鉄筋の上部や壁と床の境目などに断続的に発生	○		
	自己収縮	骨材周りから放射状の細かいひび割れが発生し、網目状の微細ひび割れを形成	○		
	乾燥収縮	2~3ヶ月してから発生し、次第に成長、開口部柱・梁に囲まれた隅部には斜めに、細い床・壁・梁などにはほぼ等間隔に垂直に発生		○	○
施工における要因	急速な打込速度	型枠の動いた方向に平行し、部分的に発生あるいはコンクリートの沈み・ブリーディングを伴い、打ち込み後1~2時間で鉄筋の上部や壁と床の境目などに断続的に発生	○		
	初期の急速な乾燥(日照・風・湿度不足)	打ち込み直後の急激な乾燥に伴って、表面の各部分にひび割れが不規則に発生	○	○	
	ポンプ圧送によるセメント量・水量の増量	コンクリートの沈み・ブリーディングを伴い、打ち込み後1~2時間で鉄筋の上部や壁と床の境目などに断続的に発生、また、2~3ヶ月してから発生し、次第に成長、開口部柱・梁に囲まれた隅部には斜めに、細い床・壁・梁などにはほぼ等間隔に垂直に発生		○	
	不均一な打込・豆板* 施工時荷重*	各種ひび割れの起点となりやすい		○	
	(凝結硬貨中のコンクリートへの振動・衝撃あるいは若材齢時のコンクリートへの重量物の設置・運搬など)	位置・パターン・大きさなどは状況に応じて変化		○	
	型枠の早期除去	位置・パターン・大きさなどは状況に応じて変化、また、その後に急激な乾燥状態に曝されると2~3ヶ月してから発生し、次第に成長、開口部柱・梁に囲まれた隅部には斜めに、細い床・壁・梁などにはほぼ等間隔に垂直に発生ひび割れが早期に発生することが多い		○	
	配筋位置の移動、かぶり厚さ不足*	床スラブでは周辺に沿ってサークル状に発生、配筋・配管の表面に沿って発生			○
コールドジョイント*	コンクリートの打継ぎ箇所やコールドジョイントがひび割れとなる			○	
構造における要因	細部設計の不備	局部に比較的大きなひび割れが集中的に発生			○
	断面・鉄筋量不足	梁や床の引張側に主筋方向と直角にひび割れが発生、また、床やひさしなどは垂れ下がる部材軸と直感に発生			○
環境における要因	環境温度の変化	2~3ヶ月してから発生し、次第に成長、開口部柱・梁に囲まれた隅部には斜めに、細い床・壁・梁などにはほぼ等間隔に垂直に発生、または発生したひび割れは温度・湿度変化に応じて変動			○
	コンクリート部材両面の温度・湿度差	低温側または低湿側の表面に曲がる方向と直角に発生			○

4.2 実験計画

本章ではコンクリートの収縮ひび割れに影響を及ぼす要因の中で、①拘束率、②乾燥開始材齢、③水セメント比(調合)、を実験要因として表-4.2.1 に示すような3つの実験を計画した。シリーズIでは拘束率の違いによる影響を検討するため、乾燥開始材齢を7日とし、拘束率を100、60および40%の3条件として実験を行った。シリーズIIでは乾燥開始材齢の影響について把握するために、乾燥開始材齢を3、7および28日の3条件、拘束率を100および80%の2条件として実験を行った。シリーズIIIでは調合の影響を把握するために乾燥開始材齢を7日とし、調合を呼び強度24、30および36の3条件、拘束率を100、80および60%の3条件として実験を行った。各シリーズにおける乾燥収縮ひび割れ試験条件を表-4.2.2 に示す。また、実験に用いたコンクリートはすべてレディーミクストコンクリートであり、使用したコンクリートの調合を表-4.2.3 に、使用材料を表-4.2.4 に示す。

表-4.2.1 実験項目

実験内容	供試体寸法 (mm)	供試体数 (体)		試験材齢 (日)
乾燥収縮ひび割れ試験	JIS A 1151 に準ずる	シリーズI	2	表-4.2.2 に示す
		シリーズII	3	
		シリーズIII	2	
自由収縮ひずみ		3		
直接引張強度試験	100×100×600	3		7, 28
圧縮強度試験	φ100×200	3		7, 28

表-4.2.2 乾燥収縮ひび割れ試験条件

シリーズ	呼び強度	乾燥開始材齢(日)	拘束率(%)
I	24	7	100, 60, 40
II	24	3, 7, 28	100, 80
III	24, 30, 36	7	100, 80, 60

表-4.2.3 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	54.9	47.7	184	336	818	461	461	3.36
II	24	53.5	46.7	183	342	806	660	282	3.42
III	24	54.9	47.7	184	336	818	461	461	3.36
	30	47.6	45.7	185	389	764	466	466	3.89
	36	42.1	43.5	188	447	702	469	469	4.47

表-4.2.4 使用材料

	使用材料	
C:セメント	I, II, III	普通ポルトランドセメント:密度 3.16g/cm ³
S:細骨材	I	山砂:表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.57%
	II	山砂:表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.80%
	III(24・30)	山砂:表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.58%
	III(36)	山砂:表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.49%
G1:粗骨材	I	碎石:表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.59%
	II	砂利:表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.86%
	III(24・36)	碎石:表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.57%
	III(30)	碎石:表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.55%
G2:粗骨材	I	碎石:表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 1.23%
	II	碎石:表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 1.02%
	III(24・36)	碎石:表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 1.16%
	III(30)	碎石:表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 1.29%
Ad:混和剤	I, II, III	AE 減水剤標準形 I 種

コンクリートの打設では、打設量が多いことから棒状の振動バイブレータを使用し、迅速かつ十分な打ち込みができるように注意を払って行った。打設後 4 時間程度でブリーディングがおさまってから表面を平滑にし、乾燥を防ぐため湿布で覆い、実験室内に放置した。供試体は全て材齢 1 日で脱型した。なお、乾燥収縮ひび割れ供試体および直接引張供試体は第 2 章で示しているように供試体の固定は、端部に多数のボルトを埋め込む方法としているため、それを一体化するために端部に鋼板を取り付けているがこの鋼板を取り外し、養生中にボルトがさびないようにするためにビニールテープでシールした。全ての供試体は所定の材齢まで標準水中養生(温度 20±1°C)とした。

4.3 実験方法

4.3.1 強度試験

圧縮強度試験は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用い、万能試験機(2000kN)において材齢 7 および 28 日において行った。なお、同時にコンプレッソメータ(CM10-B, (株)東京測器研究所)を用いて、縦方向ひずみ 2 箇所、横方向ひずみ 1 箇所を測定した。得られた実験データを用いて圧縮「応力-ひずみ」曲線を示し、強度の 1/3 の点における割線ヤング係数を求めた。

4.3.2 直接引張強度試験

引張強度試験は、 $100 \times 100 \times 600\text{mm}$ の角柱供試体を用い、第 2 章で示した開発した収縮ひび割れ試験装置においてひび割れ試験開始時および材齢 28 日で測定を行った。ひずみの測定には、**図-4.3.1** に示す長さ 60mm、直径 4mm の小型埋込みゲージを埋込んで測定した。得られた実験データを用いて引張「応力-ひずみ」曲線を示し、強度の 1/2 の点における割線ヤング係数を求めた。

4.3.3 乾燥収縮ひび割れ試験

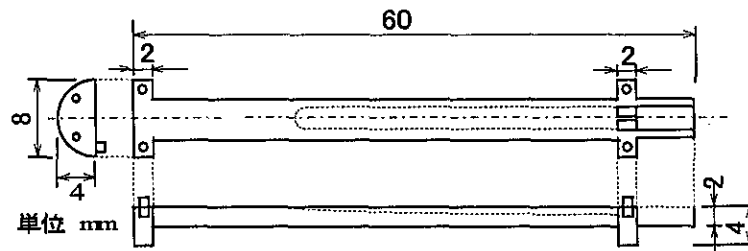


図-4.3.1 小型埋込みゲージの形状および寸法

乾燥収縮ひび割れ試験は、JIS A1151 と同じ形状の供試体を用い、第 2 章で述べたひずみ制御型の収縮ひび割れ試験装置を用いた。ひずみの測定には、直接引張強度試験と同様に**図-4.3.1** に示す小型埋込ゲージを用いた。

ひずみ制御のための自由収縮ひずみの測定は拘束コンクリートと同形状の供試体を用い、ひずみの許容誤差は $\pm 3 \times 10^{-6}$ に設定し、制御は 4 分間隔で行い、10 分間隔で計測した。

4.4 実験結果

4.4.1 フレッシュ性状

実験に使用したコンクリートのフレッシュ性状を表-4.4.1 に示す。No.①～⑥のコンクリートは全て打設時が異なっている。これによると、目標スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲内に全て収まっているが、スランプは $16.0 \sim 20.5\text{cm}$ 、空気量 $4.1 \sim 5.8\%$ と大きくばらついている。

表-4.4.1 使用したコンクリートのフレッシュ性状

No.	シリーズ	使用した コンクリート	拘束率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	コンクリート 温度 (°C)
①	I	24-18-20N	100, 60, 40	19.0	5.8	2.28	25.0
②	II	24-18-20N	100	17.0	4.8	2.28	30.0
③		24-18-20N	80	20.0	3.8	2.28	28.0
④	III	24-18-20N	100, 80, 60	16.0	4.5	2.26	32.0
⑤		30-18-20N		20.5	4.1	2.28	27.0
⑥		36-18-20N		16.0	5.9	2.27	26.0

4.4.2 強度試験結果

表-4.4.2 に引張強度試験および圧縮強度試験結果を示す。図-4.4.1 に直接引張強度試験の「応力-ひずみ」曲線を示す。図中には各シリーズおよび材齢7日、28日よりそれぞれ1体ずつの測定結果を示している。これによると、材齢28日より材齢7日の「応力-ひずみ」曲線傾きが緩やかであることが分かるが、これはヤング係数の差によるものである。また、それぞれグラフの端点で破断していることを示しているが、引張強度が異なるにもかかわらず、破断時のひずみがほぼ同程度となっている結果も見られる。

表-4.4.2 強度試験結果

No.	シリーズ	W/C (%)	引張強度試験				圧縮強度試験			
			引張強度 (N/mm ²)		ヤング係数 ($\times 10^4\text{N/mm}^2$)		圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 ($\times 10^4\text{N/mm}^2$)	
			材齢 7日	材齢 28日	材齢 7日	材齢 28日	材齢 7日	材齢 28日	材齢 7日	材齢 28日
①	I	54.9	2.41	3.24	2.42	2.70	18.7	26.9	2.23	2.67
②	II	53.5	2.66	3.32	2.63	2.83	—	30.2	—	2.57
③		53.5	2.72	3.15	2.48	2.93	—	32.9	—	2.60
④	III	54.9	2.57	3.01	2.36	2.55	21.4	35.1	2.50	2.70
⑤		47.6	2.95	3.58	2.45	2.64	29.8	37.7	2.38	2.59
⑥		42.1	3.12	3.60	2.43	2.78	34.5	37.4	2.41	2.93

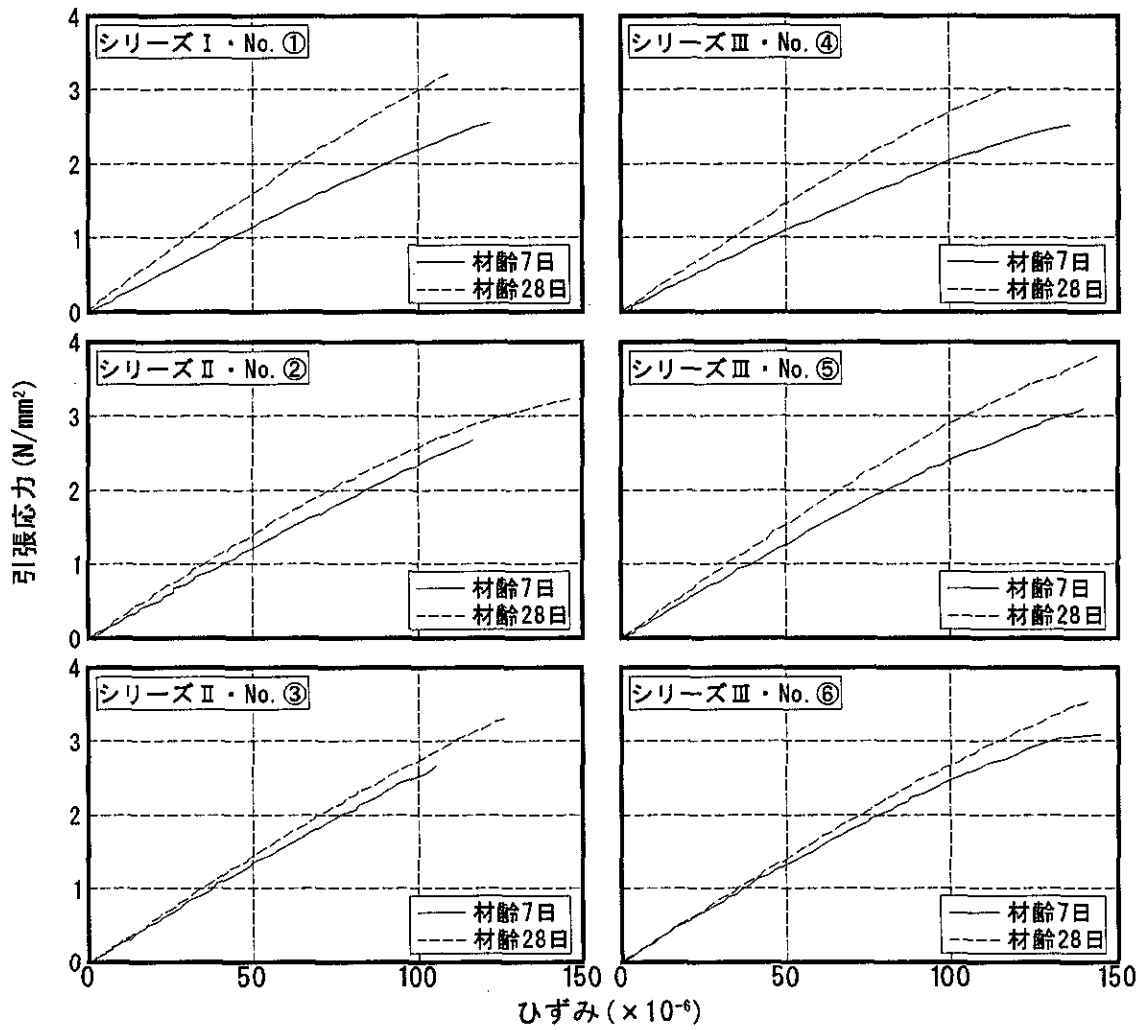


図-4.4.1 引張強度試験における「応力-ひずみ」曲線の一例

図-4.4.2 に直接引張強度および圧縮強度と水セメント比の関係、図-4.4.3 に引張ヤング係数および圧縮ヤング係数と水セメント比の関係を示す。これによると、直接引張強度および圧縮強度ともに水セメント比の増加とともに強度が低下する傾向は示しているが、材齢28日の圧縮強度を見てみると、水セメント比55%において大幅にばらついている。これはシリーズIIにおいて、材齢28日では呼び強度や水セメント比が異なるにもかかわらず各種強度が同程度となっているためである。

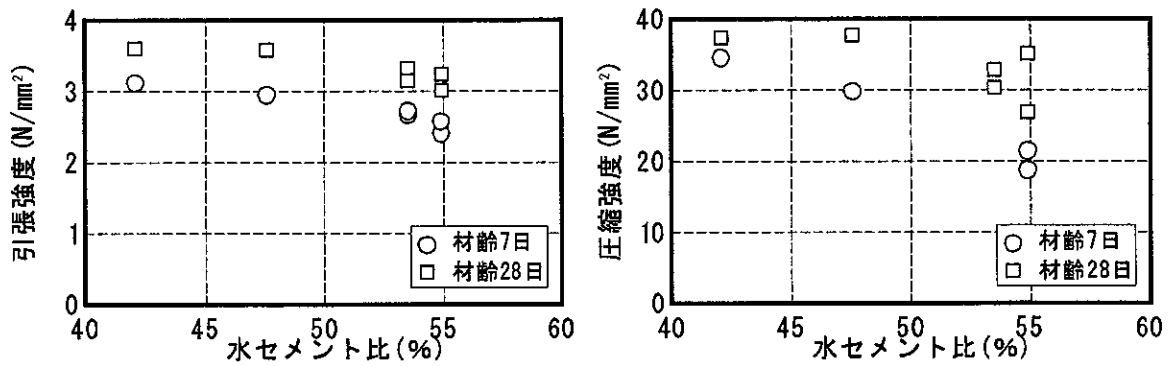


図-4.4.2 引張強度および圧縮強度と水セメント比の関係

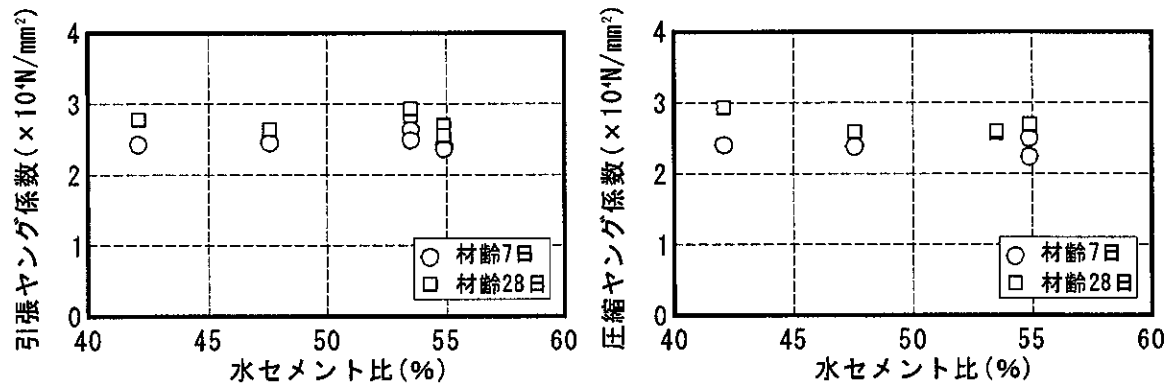


図-4.4.3 引張ヤング係数および圧縮ヤング係数と水セメント比の関係

そこで、材齢 28 日の圧縮強度から生コン工場における配合強度算出式を用いて水セメント比を逆算することとした。表-4.4.3 に算出した水セメント比を示すが、調査上の水セメント比とは大きく異なる結果となっている。そこで、本研究では配合強度算定式より算出した水セメント比を、使用したコンクリートの水セメント比として検討を行うこととした。

表-4.4.3 水セメント比の算出

No.	シリーズ	調査上の 水セメント比 (%)	圧縮強度(F_c) (N/mm^2)	計算式	算出した 水セメント比 (%)
①	I	54.9	26.9	$26.28/(F_c+18.62) \times 100$	57.7
②	II	53.5	30.2	$26.30/(F_c+18.20) \times 100$	54.3
③		53.5	32.9	$26.30/(F_c+18.20) \times 100$	51.5
④	III	54.9	35.1	$26.28/(F_c+18.62) \times 100$	48.9
⑤		47.6	37.7	$26.28/(F_c+18.62) \times 100$	46.7
⑥		42.1	37.4	$26.28/(F_c+18.62) \times 100$	46.9

4.4.3 自由収縮ひずみ

図-4.4.4 に各シリーズにおける材齢 7 日より測定した自由収縮ひずみの経時変化を示す。図に示す測定結果は供試体 3 体の平均値であり、10 日までの測定結果を示している。図より、水セメント比が小さいほど乾燥開始直後の収縮量が大きくなっていることが分かる。また、シリーズⅢにおいては算出した水セメント比が同程度であり、自由収縮ひずみの経時変化は同様な挙動を示している。

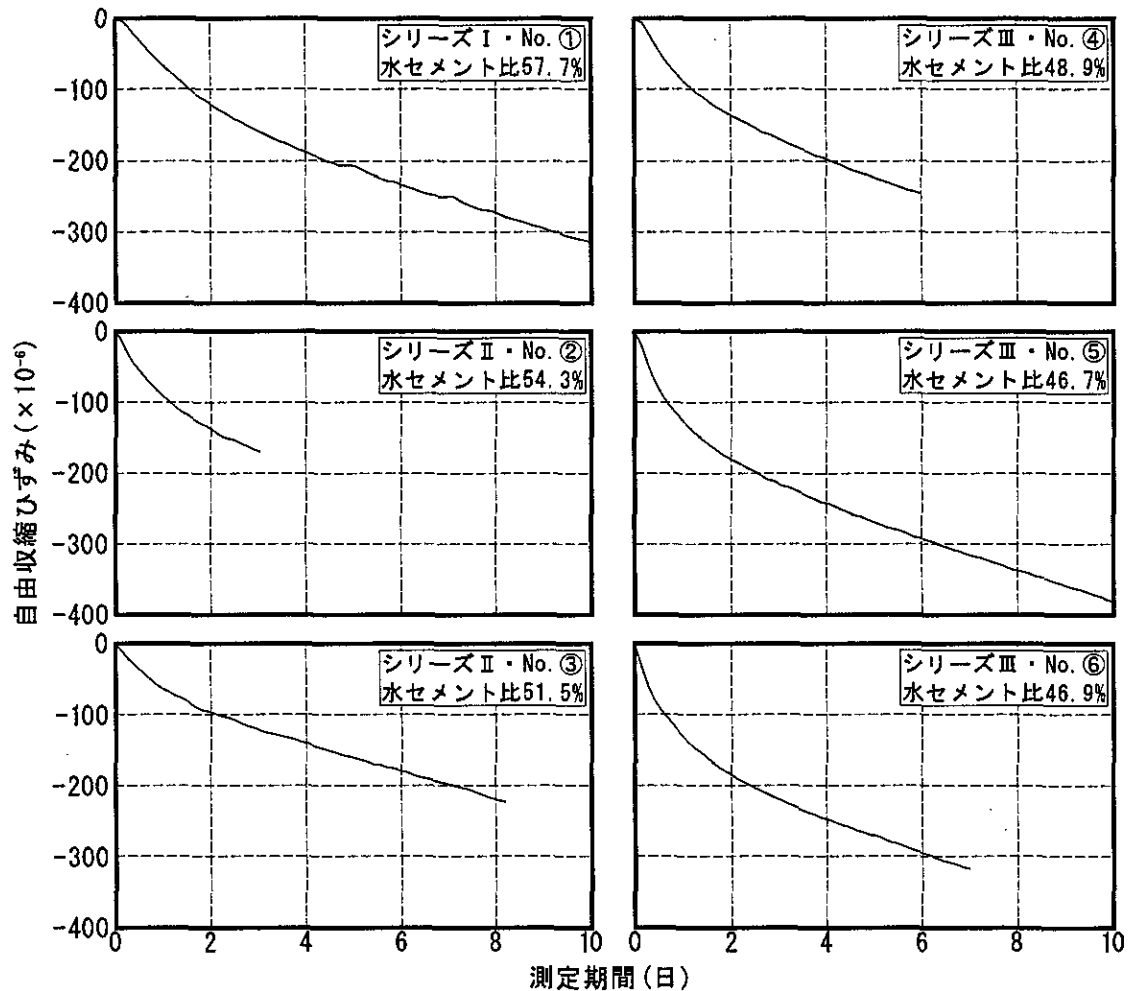


図-4.4.4 自由収縮ひずみの経時変化

4.4.4 乾燥収縮ひび割れ試験

第3章において、本論文で使用した試験装置は拘束供試体のひずみおよび応力を測定することができることを示した。しかしながら、コンクリートの乾燥収縮について論じる際にはすべての実験において正確にひずみが測定されていることを確認する必要がある。そこで、測定された実験データを示し、正確に測定および制御が行われているかどうかを確認することとした。

(a) 拘束ひずみ

図-4.4.5 にシリーズ I における拘束ひずみの経時変化を示す。図中には自由収縮ひずみの経時変化も示している。図中の▲印で貫通ひび割れが発生したことを示しているが、拘束率40%の条件下では測定期間56日においてもひび割れが発生しなかった。拘束率100%では拘束ひずみはひび割れ発生までほぼ0に保たれている。他の拘束率では、拘束ひずみは自由収縮ひずみに対してそれぞれ設定した値を示している。以降に示すすべての実験結果について、設定した拘束率に従って拘束ひずみを制御することができているかどうかは (b)拘束率の項で検討する。

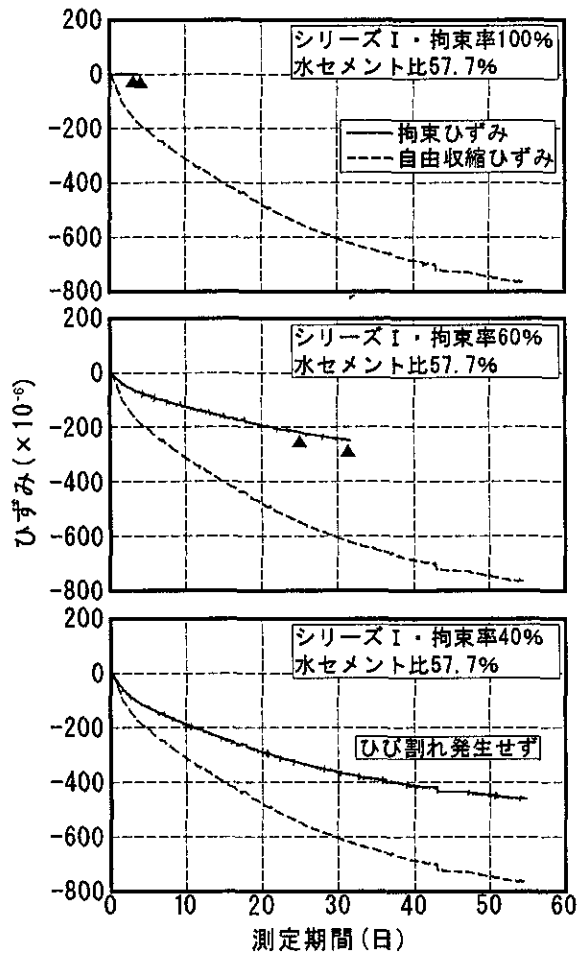


図-4.4.5 拘束ひずみの経時変化(シリーズ I)

図-4.4.6 にシリーズⅡにおける拘束ひずみの経時変化を示す。拘束率 100%であるため、拘束ひずみはひび割れ発生までほぼ 0 に保たれている。拘束率の違いによらず測定期間中にすべての供試体に貫通ひび割れが発生した。ひび割れ発生期間を見てみると、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は速くなっているが、拘束率 80%では、拘束率 100%の測定結果とは逆に、乾燥開始材齢が遅くなるほどひび割れの発生は遅くなっている。自由収縮ひずみを見てみると、乾燥開始材齢が遅いほうが測定開始直後の収縮量が大きいことが分かる。

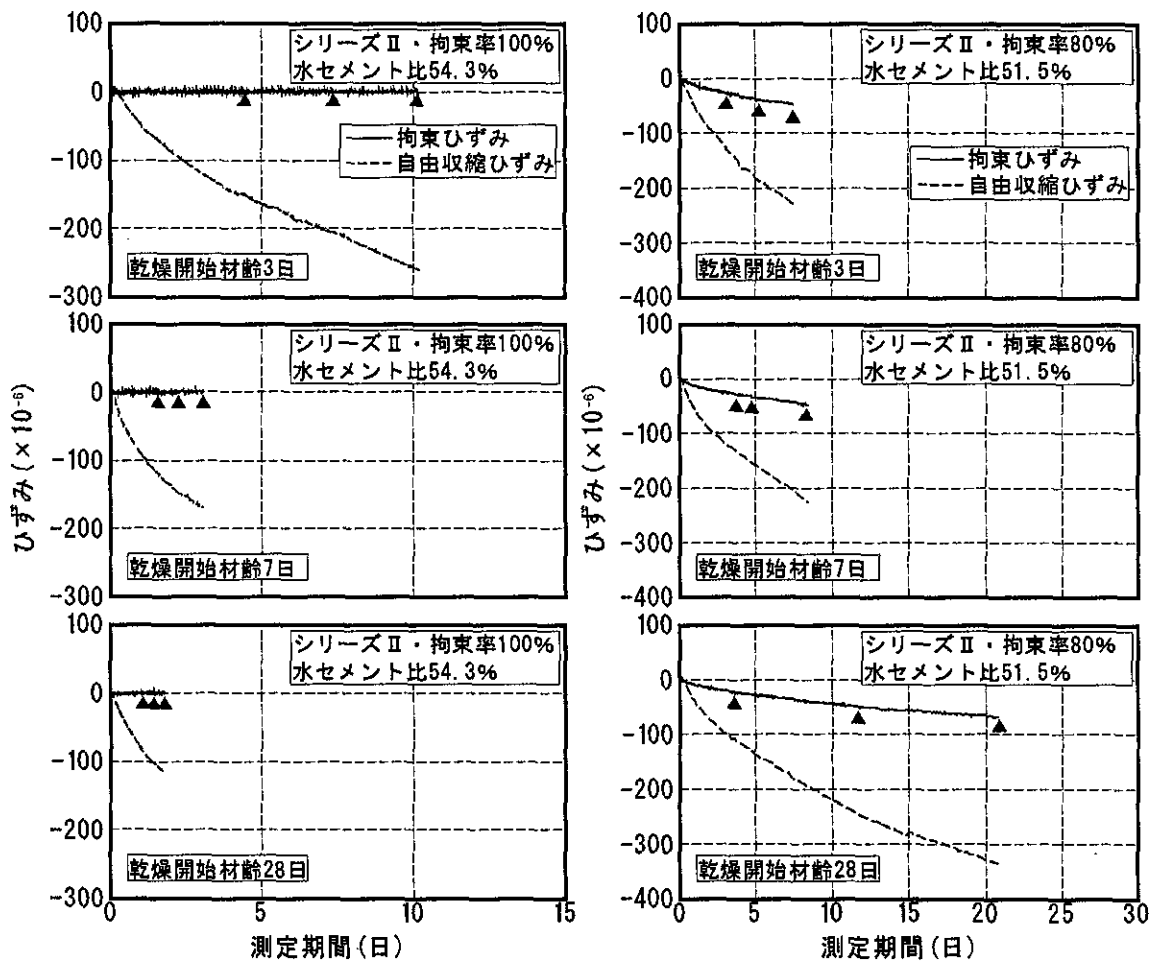


図-4.4.6 拘束ひずみの経時変化(シリーズⅡ・拘束率 100%)

図-4.4.7 にシリーズⅢ・水セメント比 48.9%の条件下における拘束ひずみの経時変化を示す。ひび割れ発生期間を見てみると、拘束率 100%が低くなるほどひび割れの発生は遅くなる傾向が見られるが、拘束率 80%の 1 体が拘束率 60%よりもひび割れの発生が遅くなっている。これは、供試体自体の収縮量の違いによる影響や、クリープの影響などが複雑に絡み合っているからであると考えられる。図-4.4.8 にシリーズⅢ・水セメント比 46.7%の条件下における拘束ひずみの経時変化を示す。図中の▲印でひび割れが発生したことを示しているが、拘束率 60%において供試体 1 体に測定期間中にはひび割れが発生しなかった。ひび割れ発生期間については、拘束率が低くなるほどひび割れの発生は遅くなっている。

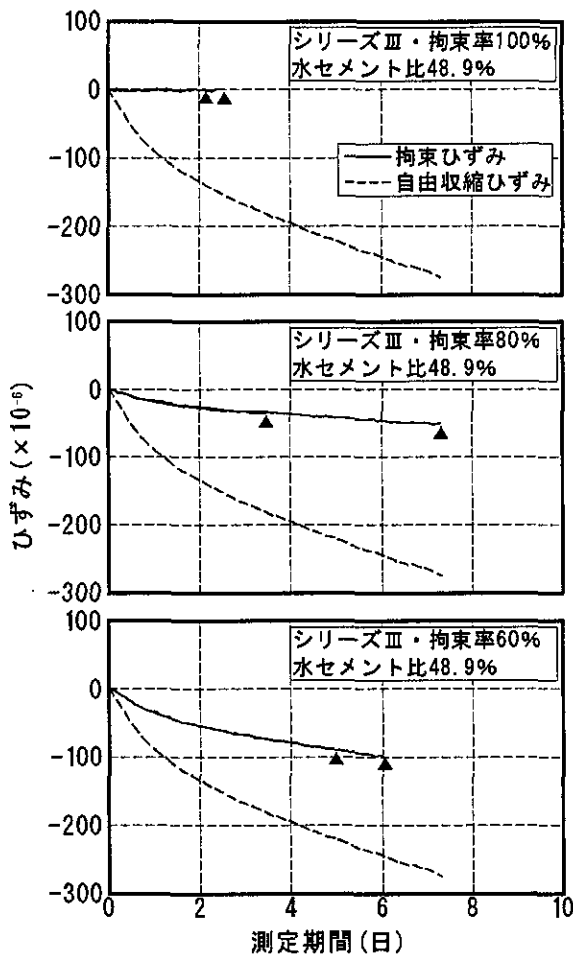


図-4.4.7 拘束ひずみの経時変化
(シリーズⅢ・水セメント比 48.9%)

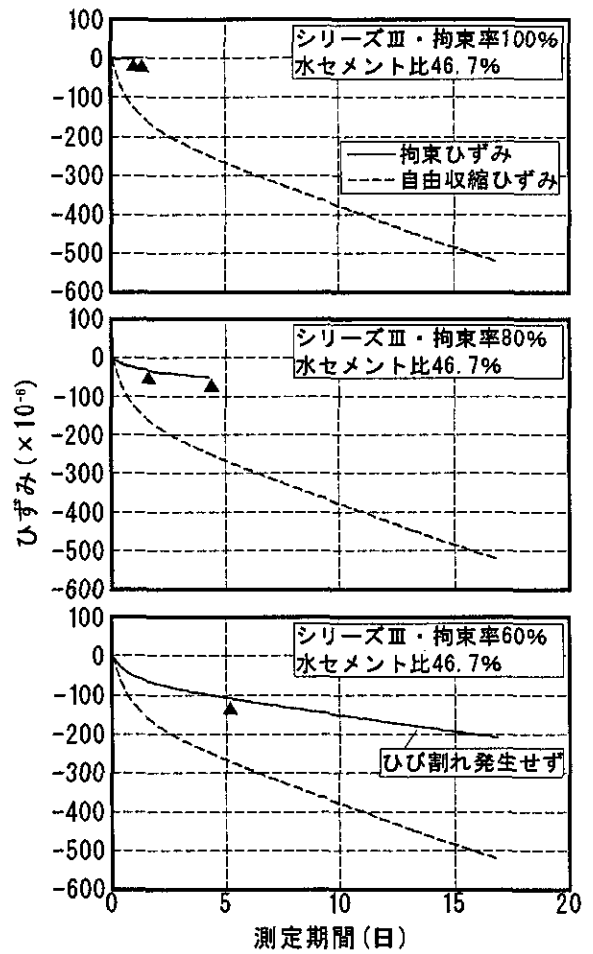


図-4.4.8 拘束ひずみの経時変化
(シリーズⅢ・水セメント比 46.7%)

図-4.4.9 にシリーズⅢ・水セメント比 46.9%の条件下における拘束ひずみの経時変化を示す。図中の▲印で貫通ひび割れが発生したことを示しているが、拘束率 100%では、供試体 2 体にほぼ同時にひび割れが発生している。

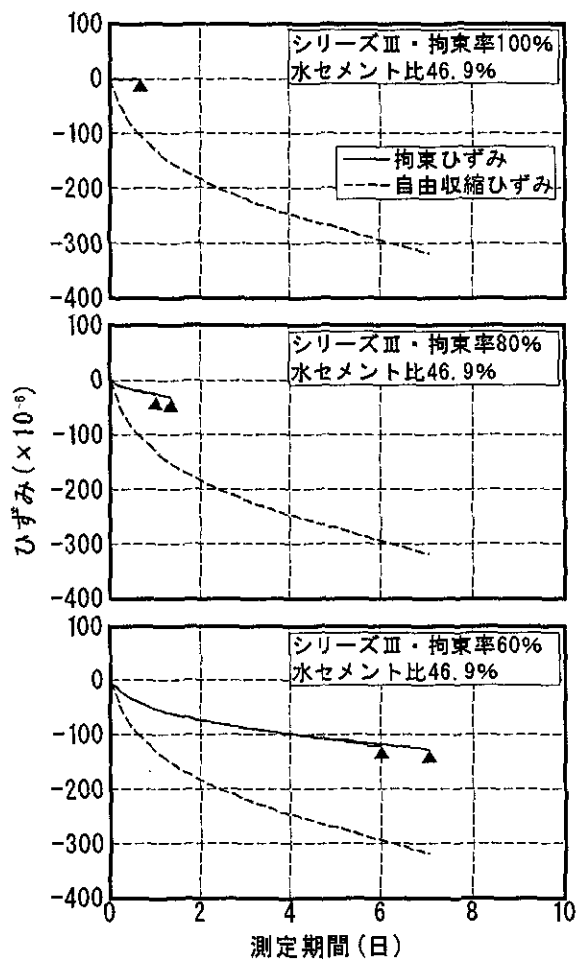


図-4.4.9 拘束ひずみの経時変化(シリーズⅢ・水セメント比 46.9%)

(b)拘束率

本研究では、第1章で述べたように拘束率を自由収縮ひずみに対する拘束引張ひずみの比(百分率)と定義しており、算出式を式(4.4.1)に示す。

$$\lambda(t-t_0) = \frac{\varepsilon_f(t-t_0) - \varepsilon_{rt}(t-t_0)}{\varepsilon_f(t-t_0)} \quad (\%) \quad (4.4.1)$$

ここに、 $\lambda(t-t_0)$: 乾燥期間 $(t-t_0)$ 日における拘束率(%)

$\varepsilon_f(t-t_0)$: 乾燥期間 $(t-t_0)$ 日における自由収縮ひずみ

$\varepsilon_{rt}(t-t_0)$: 乾燥期間 $(t-t_0)$ 日における拘束によって生じたひずみ(拘束ひずみ)

また、**図-4.4.10**に拘束されたコンクリートの模式図を示す。自由収縮ひずみから拘束されたことによって生じるひずみ(拘束ひずみ)を差し引いたものが拘束引張ひずみであり、自由収縮ひずみに対する拘束引張ひずみの増分の比である拘束率は、自由収縮ひずみに拘束率を乗じることにより応力を生じさせる拘束ひずみ変化を得ることができる。

そこで、**(a)拘束ひずみ**項において示した自由収縮ひずみと拘束ひずみの関係より式(4.4.1)を用いて拘束率を算出した。

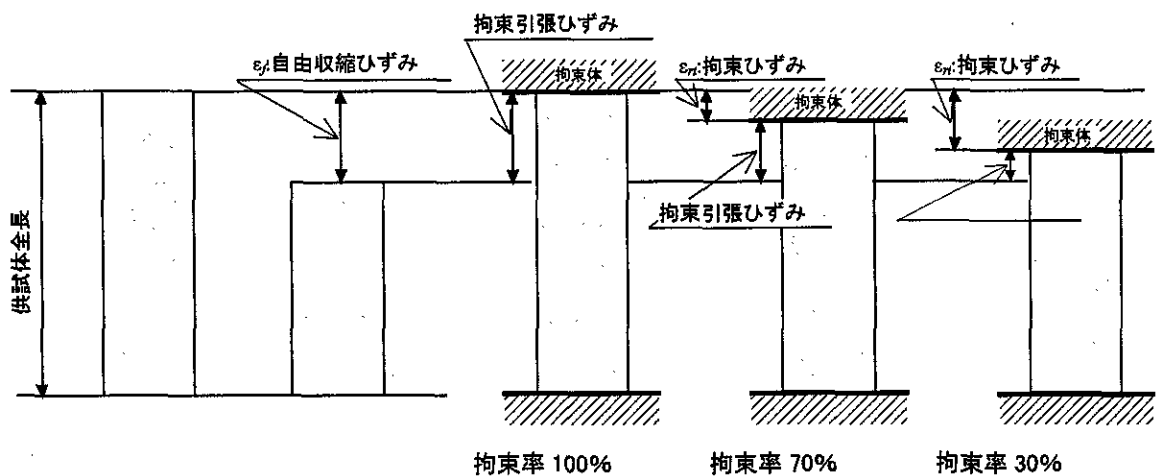


図-4.4.10 コンクリートの拘束状態の模式図

図-4.4.12 にシリーズ I の拘束率の経時変化を示す。設定した拘束率の違いによらず測定開始直後はばらつきがあるが、その後は設定した拘束率を安定して保持できていることが分かる。測定開始直後は、自由収縮ひずみに収縮量が非常に小さいため、このようにばらつきが大きい結果となると考えられる。

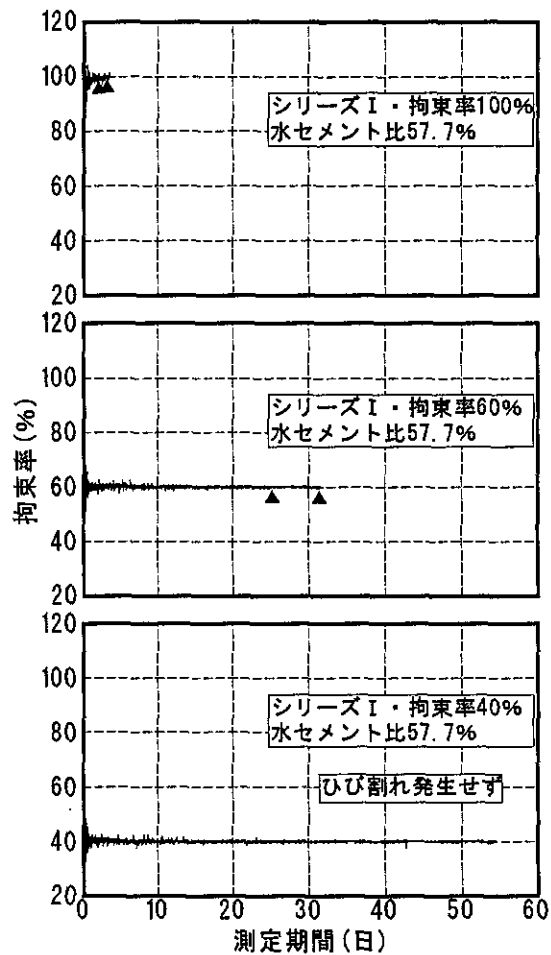


図-4.4.12 拘束率の経時変化(シリーズ I)

図-4.4.13 にシリーズⅡにおける拘束率の経時変化を示す。乾燥開始材齢および拘束率の違いによらず設定した拘束率を安定して保持できていることが分かる。しかしながら、いずれの拘束率においても乾燥開始材齢が早いほど測定開始直後のばらつきが大きくなる傾向を示している。若材齢のコンクリートにおいては、コンクリート内部の水和反応が激しくそのため硬化性状が不安定な状態である。そこにさらに乾燥を受けることの影響が加味されるため、乾燥開始直後の自由収縮ひずみや拘束コンクリートのひずみは試験状況や乾燥状況の影響を受けやすく不安定になりやすい。この影響により乾燥開始材齢が早いほど拘束率のばらつきが大きくなるものと考えられる。このように若材齢での乾燥収縮性状はひび割れ発生にも影響を与えると考えられ、この時期の収縮性状については今後も深く検討を続ける必要がある。

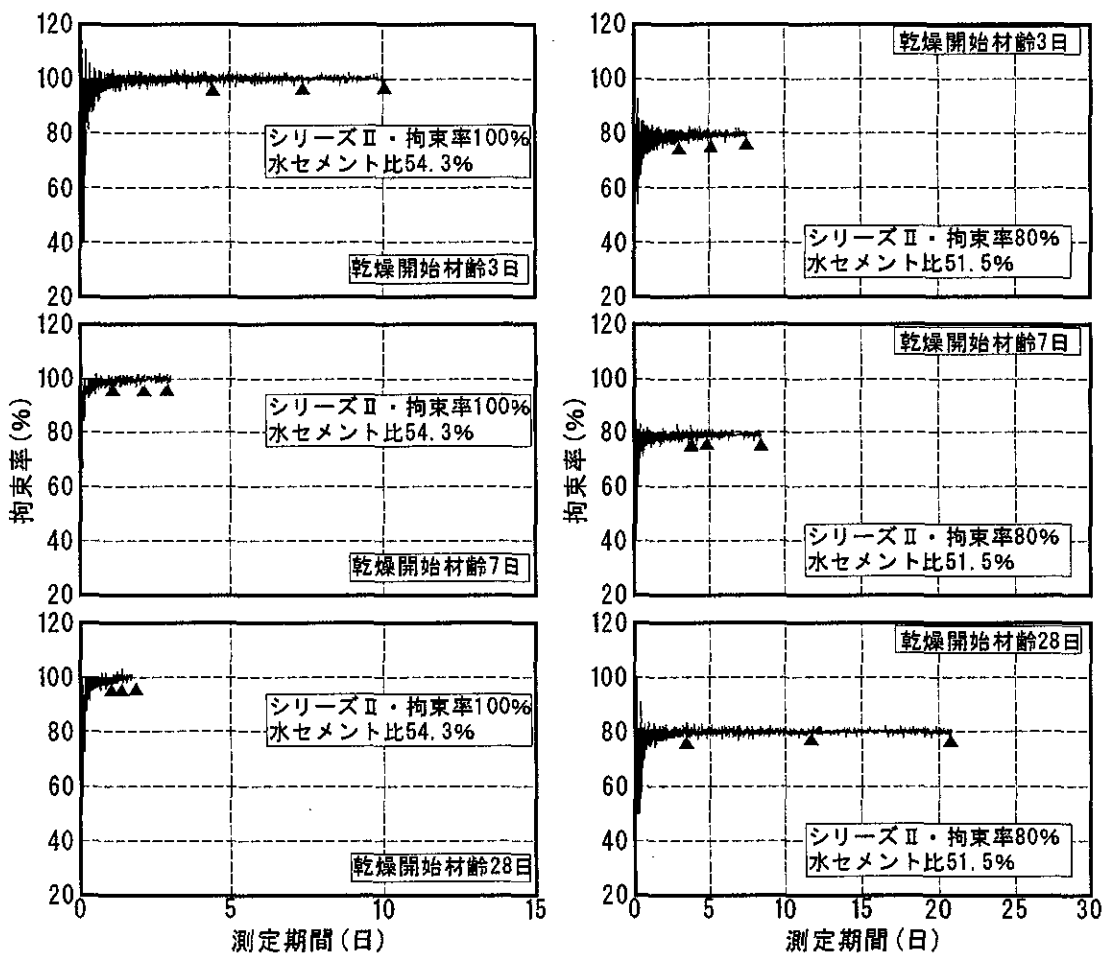


図-4.4.13 拘束率の経時変化(シリーズⅡ)

図-4.4.14～図-4.4.16 にシリーズⅢの拘束率の経時変化を示す。水セメント比および拘束率の違いによらず、設定した拘束率で制御できている。しかしながら、水セメント比 48.9%(図-4.4.14)の測定開始直後のばらつきが大きく、拘束率 80%が特に大きい。

このように測定開始直後 0.5 日程度まではいずれのシリーズにおいても拘束率のばらつきが生じている。これは、上述したように測定開始直後の基準ひずみ(自由収縮ひずみ)が非常に小さいために、試験中の乾燥状況や試験状況の影響を受けやすい。とくに、試験装置が恒温恒湿室内の出入り口付近にあるため、実験者の出入りによる環境状態の変化を受けやすいものと思われる。このような状況を出来るだけ避けるように注意しながら実験を行うことが重要であると考えられる。

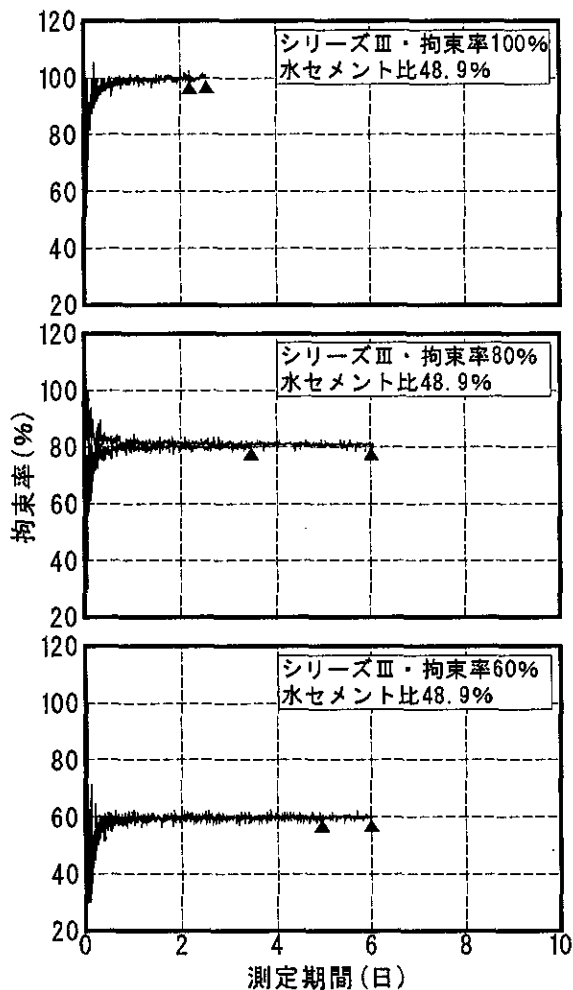


図-4.4.14 拘束率の経時変化
(シリーズⅢ・水セメント比 48.9%)

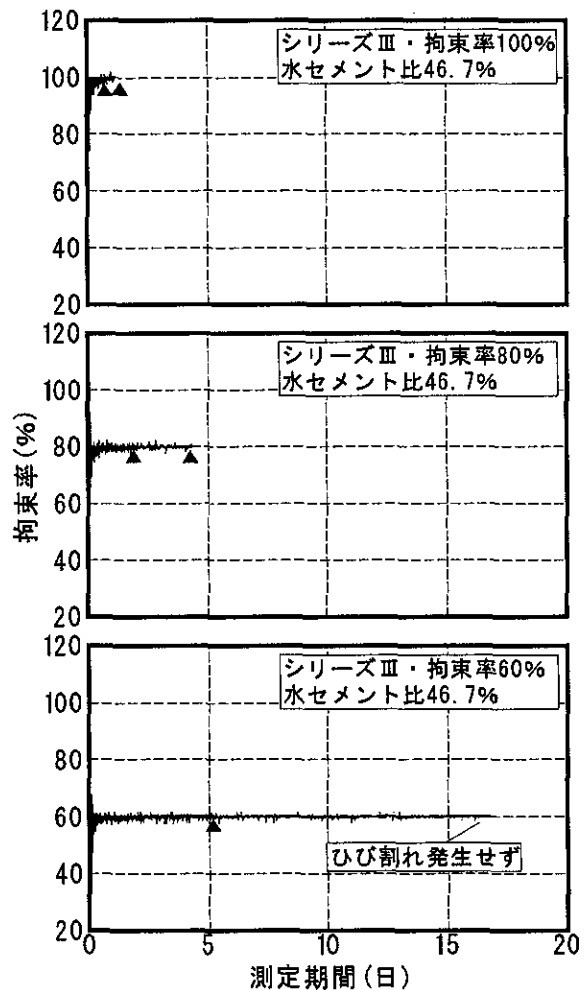


図-4.4.15 拘束率の経時変化
(シリーズⅢ・水セメント比 46.7%)

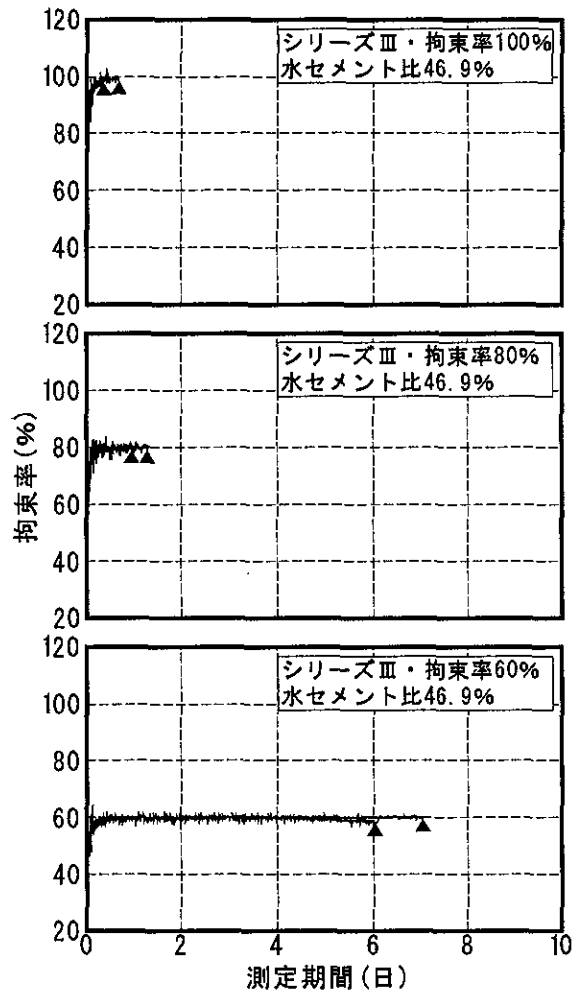


図-4.4.16 拘束率の経時変化(シリーズⅢ・水セメント比 46.9%)

(c)拘束応力

図-4.4.17 にシリーズ I における拘束応力の経時変化を示す。それぞれグラフの端点でひび割れが発生したことを示しているが、前述したように拘束率 40%の条件下では測定期間中にひび割れが発生しなかった。図より、拘束率が大きいほど拘束応力の上昇は早くなっていることが分かる。拘束率 40%の条件下では、拘束応力が 1.2~1.4N/mm² に達した後に横ばいとなる結果となった。

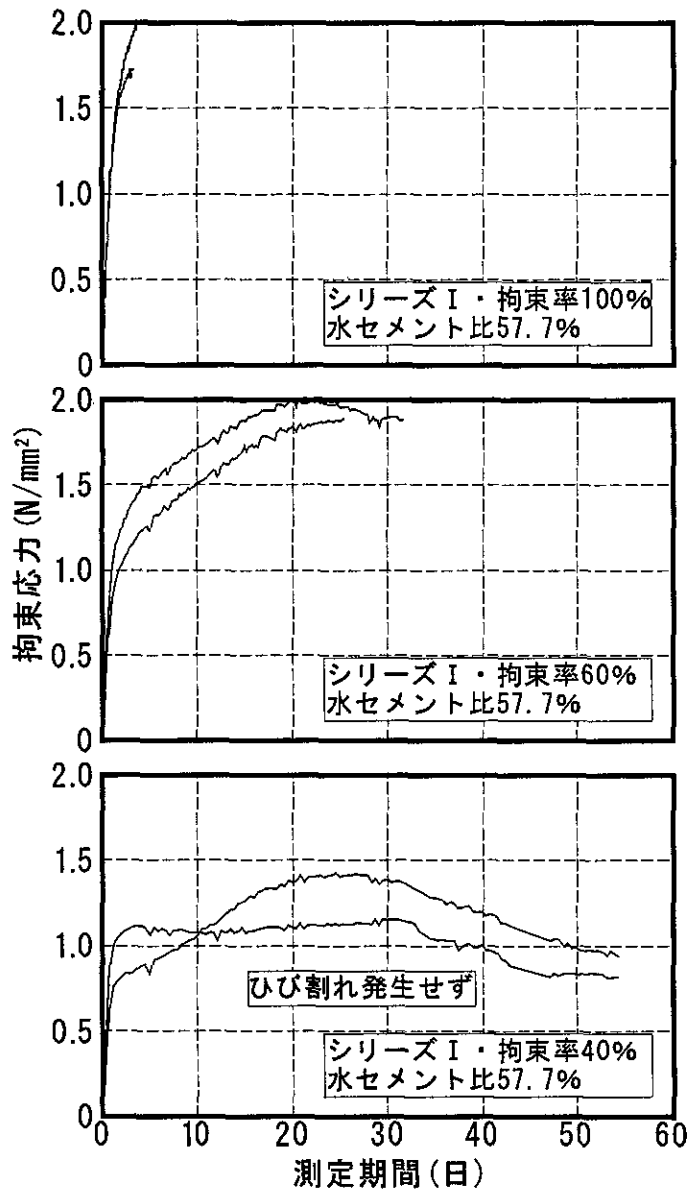


図-4.4.17 拘束応力の経時変化(シリーズ I)

図-4.4.18 にシリーズⅡ・拘束率 100%の条件下での拘束応力の経時変化を示す。図より、乾燥開始材齢が遅くなるほど拘束応力の上昇は早くなることが分かる。これは、図-4.4.6 に示したように、乾燥開始材齢が遅いほど乾燥開始直後の収縮量が大きいいため、拘束率が同条件の場合、拘束供試体を引張る量も増加するからである。

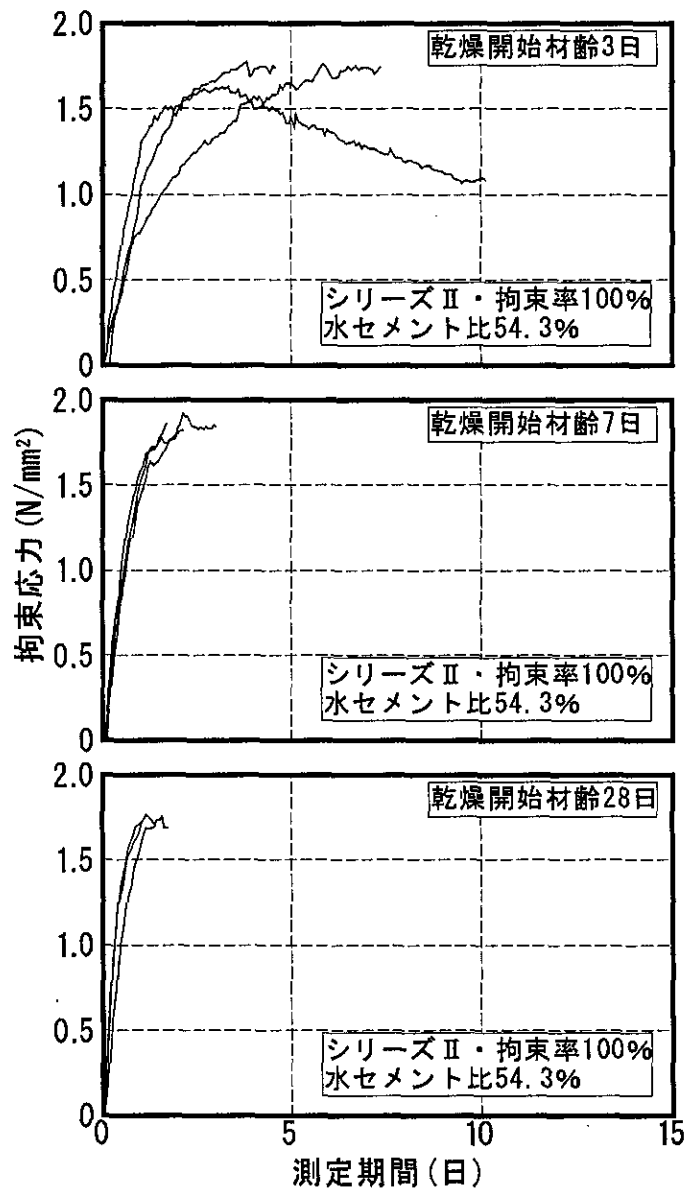


図-4.4.18 拘束応力の経時変化(シリーズⅡ・拘束率 100%)

図-4.4.19 にシリーズⅡ・拘束率 80%の条件下での拘束応力の経時変化を示す。図より、乾燥開始材齢が早いほうが、若干ではあるが拘束応力の上昇は早くなることが分かる。乾燥開始材齢が拘束応力に与える影響は図-4.4.18に示した結果とは逆の傾向であるが、これは、図-4.4.7に示したように、この調合のコンクリートでは乾燥開始材齢が遅いほど乾燥開始直後の収縮量が小さいためであると考えられ、乾燥収縮量がコンクリート供試体の拘束応力の変動に大きな影響をおよぼしていることが明らかである。

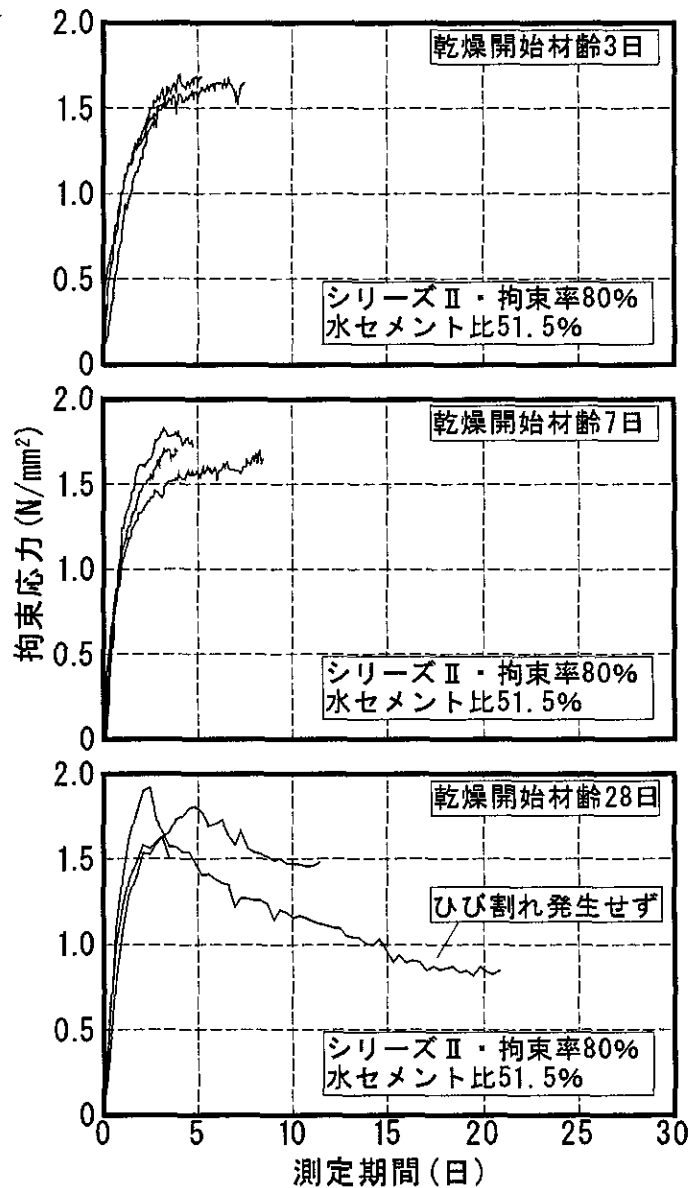


図-4.4.19 拘束応力の経時変化(シリーズⅡ・拘束率 80%)

図-4.4.20 にシリーズⅢ・水セメント比 48.9%の条件下での拘束応力の経時変化を示す。拘束率が高いほど拘束応力の上昇が早くなっている。拘束率 80%および 60%では測定開始後 1 日程度から拘束応力の上昇はそれ以前と比べて緩やかになっているが、図-4.4.4 より、同時期から自由収縮ひずみの変化も緩やかになっているためであると考えられる。

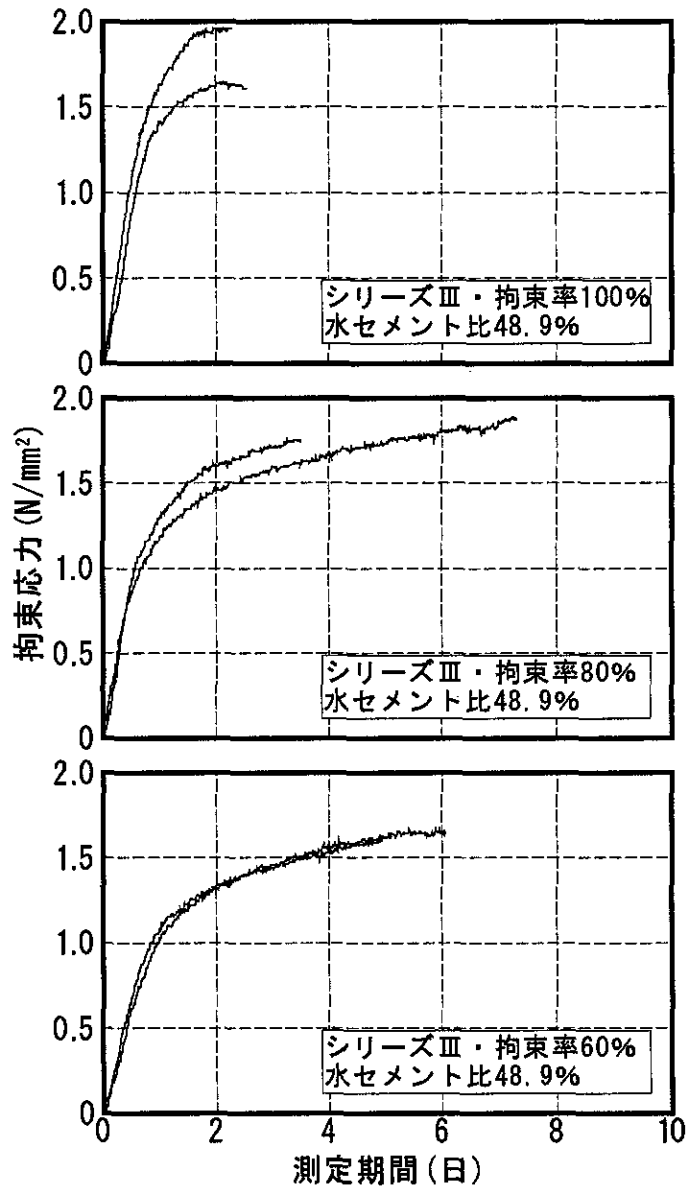


図-4.4.20 拘束応力の経時変化(シリーズⅢ・水セメント比 48.9%)

図-4.4.21 にシリーズⅢ・水セメント比 46.7%の条件下での拘束応力の経時変化を示す。図-4.4.20と同様に拘束率 80%および 60%の条件下では、自由収縮ひずみの変化量が緩やかになる測定開始後1日程度から拘束応力の上昇も緩やかになっている。拘束率100%では、ひび割れ発生直前に拘束応力の上昇の傾きは若干緩やかになるが、それまでは変化していない。

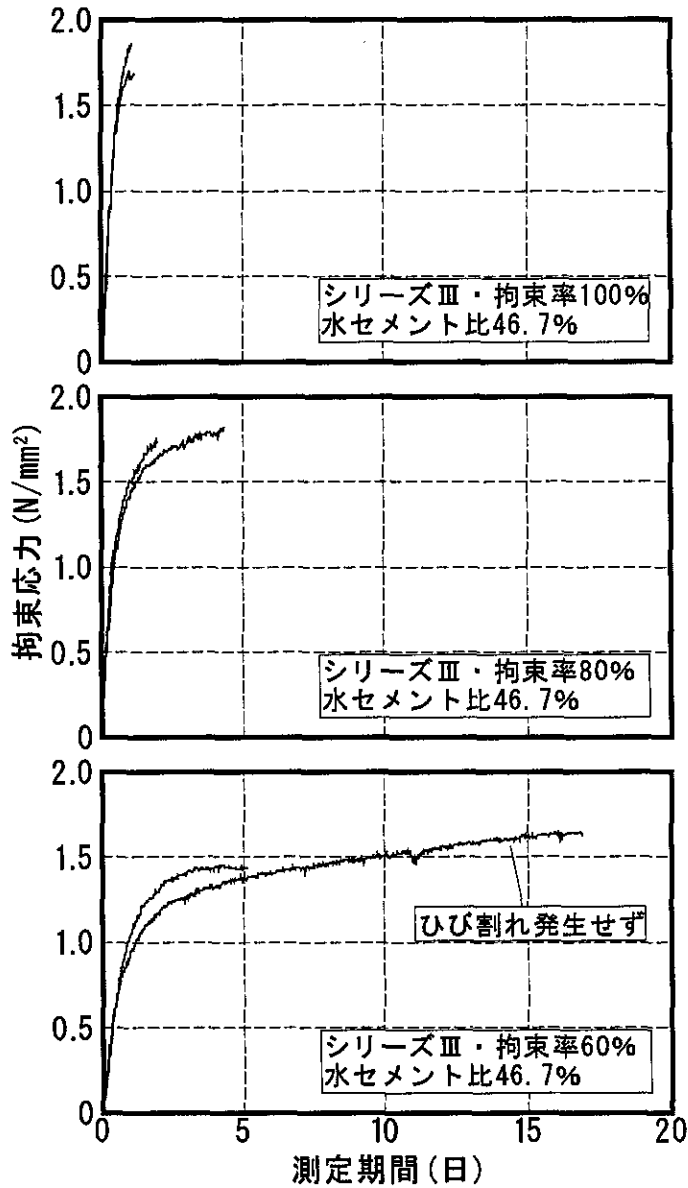


図-4.4.21 拘束応力の経時変化(シリーズⅢ・水セメント比 46.7%)

図-4.4.22 にシリーズⅢ・水セメント比 46.9%の条件下での拘束応力の経時変化を示す。拘束率 60%の供試体 1 体において、拘束応力が 1.1N/mm^2 程度に達した後に低下している。これは、クリープによる応力緩和の影響であると考えられるが、他のシリーズにおいてもいくつか同様な例が見られる。この拘束応力が減少する現象については、(e)「拘束応力-拘束引張ひずみ」曲線項で検討する。

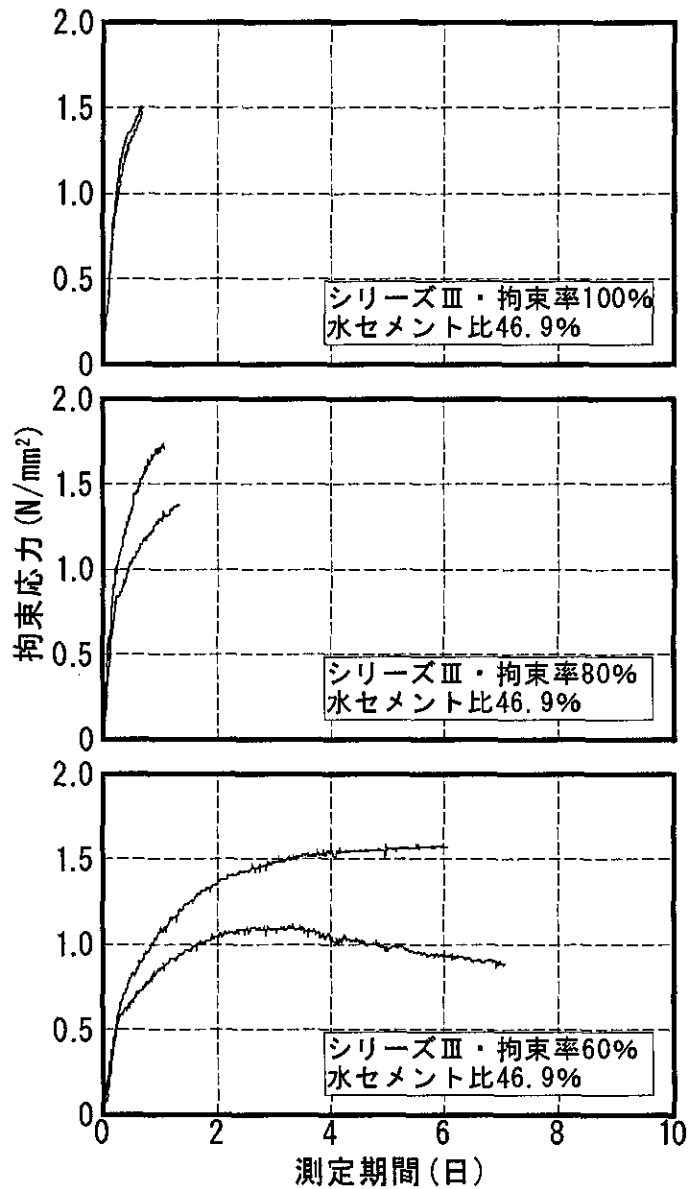


図-4.4.22 拘束応力の経時変化(シリーズⅢ・水セメント比 46.9%)

(d)拘束引張ひずみ

本論文では、自由収縮ひずみと拘束ひずみの差を拘束引張ひずみと定義している。拘束引張ひずみと拘束応力の関係は拘束を受けるコンクリートの引張変形特性であるため、この挙動を正確に測定し、把握することは重要である。

図-4.4.23 にシリーズ I の拘束引張ひずみの経時変化を示す。測定開始直後より、拘束引張ひずみは拘束率が高いほど急激に上昇しており、拘束率 100%と 60%ではその差は顕著である。拘束率 40%の条件下では拘束率 60%よりも緩やかな曲線を描いている。

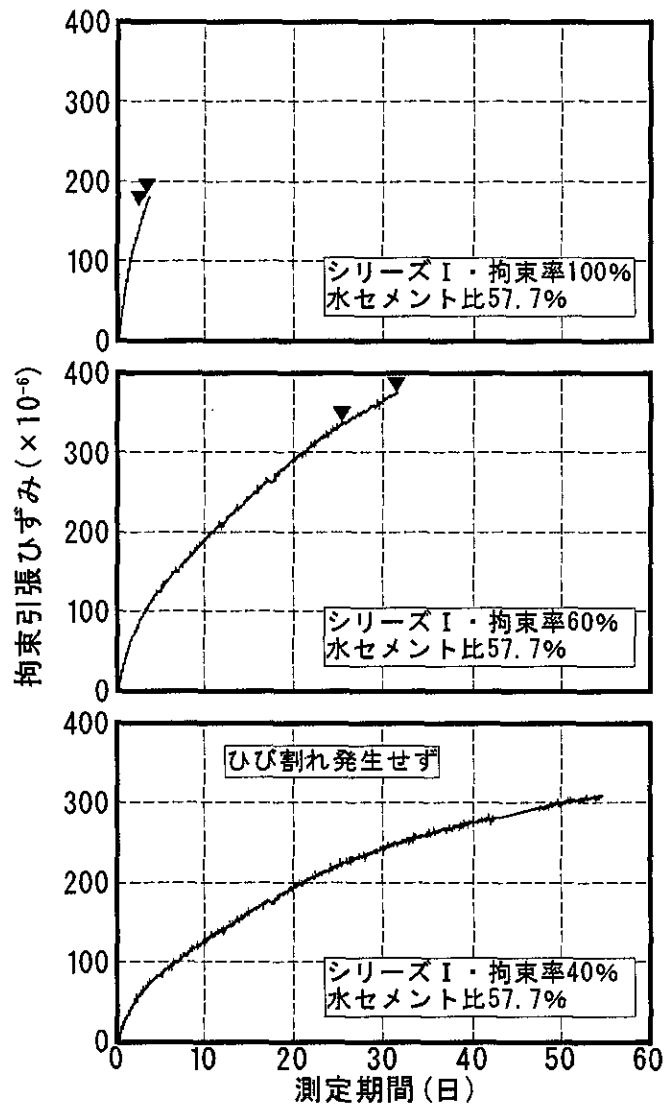


図-4.4.23 拘束引張ひずみの経時変化(シリーズ I)

図-4.4.24 にシリーズⅡ・拘束率 100%の条件下における拘束引張ひずみの経時変化を示す。拘束率 100%であるため、拘束引張ひずみはほぼ自由収縮ひずみの値と同程度であり、乾燥開始材齢が遅くなるほど拘束引張ひずみの傾きは急になっている。

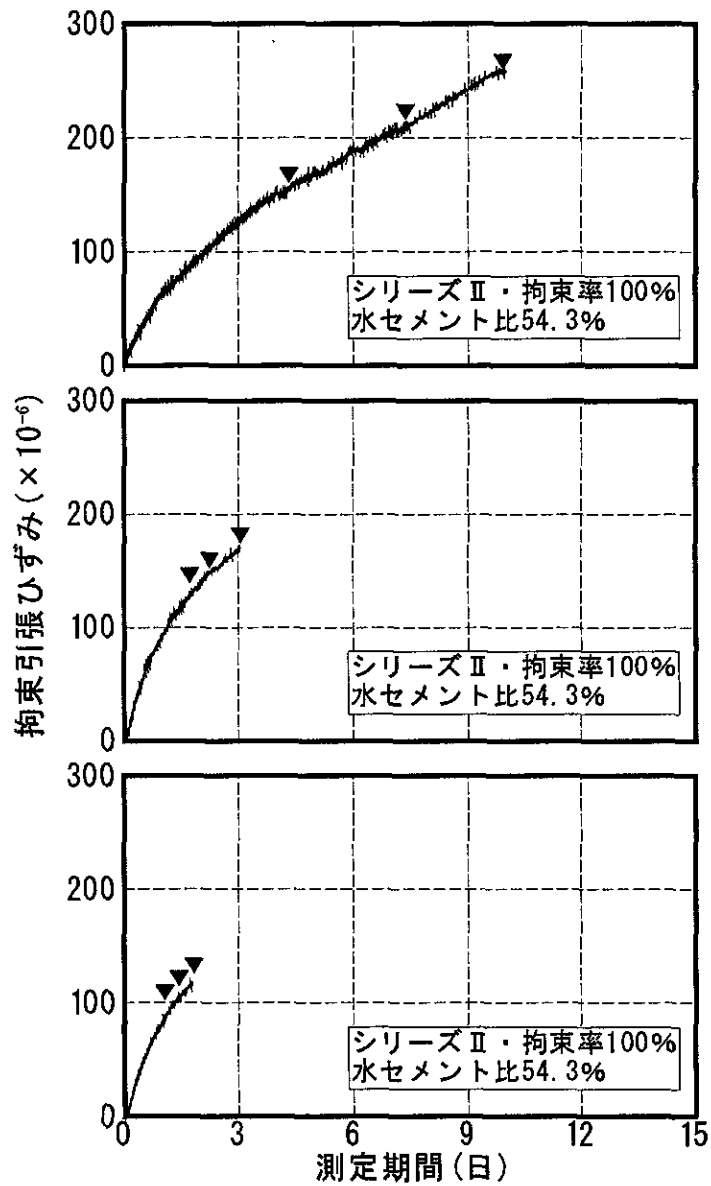


図-4.4.24 拘束引張ひずみの経時変化(シリーズⅡ・拘束率 100%)

図-4.4.25 にシリーズⅡ・拘束率 80%の条件下における拘束引張ひずみの経時変化を示す。図-4.4.24 の測定結果とは逆に乾燥開始材齢が遅くなるほど拘束引張ひずみの傾きは緩やかになっている。

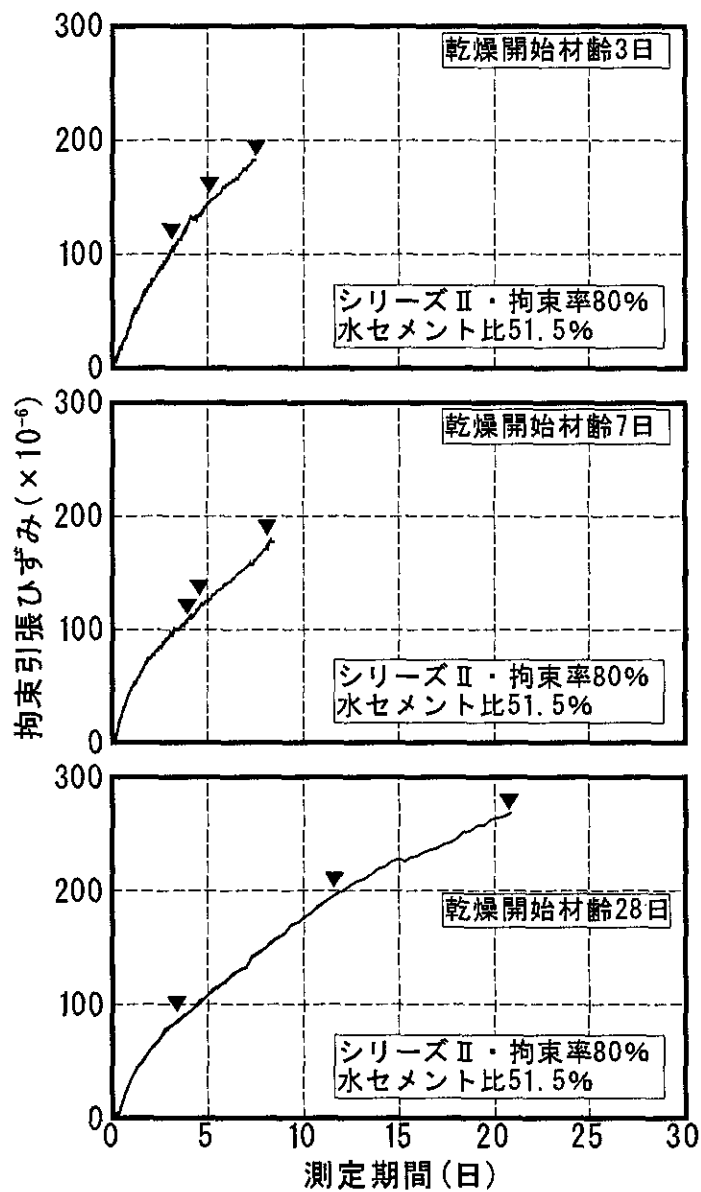


図-4.4.25 拘束引張ひずみの経時変化(シリーズⅡ・拘束率 80%)

図-4.4.26 にシリーズⅢ・水セメント比 48.9%の条件下における拘束引張ひずみの経時変化を示す。拘束率が高いほど拘束引張ひずみの傾きは急になっている。拘束率 80%および 60%では測定開始後 1 日程度から拘束引張ひずみの上昇はそれ以前と比べて緩やかになっているが、図-4.4.4 より、同時期から自由収縮ひずみの変化も緩やかになっているためであると考えられる。

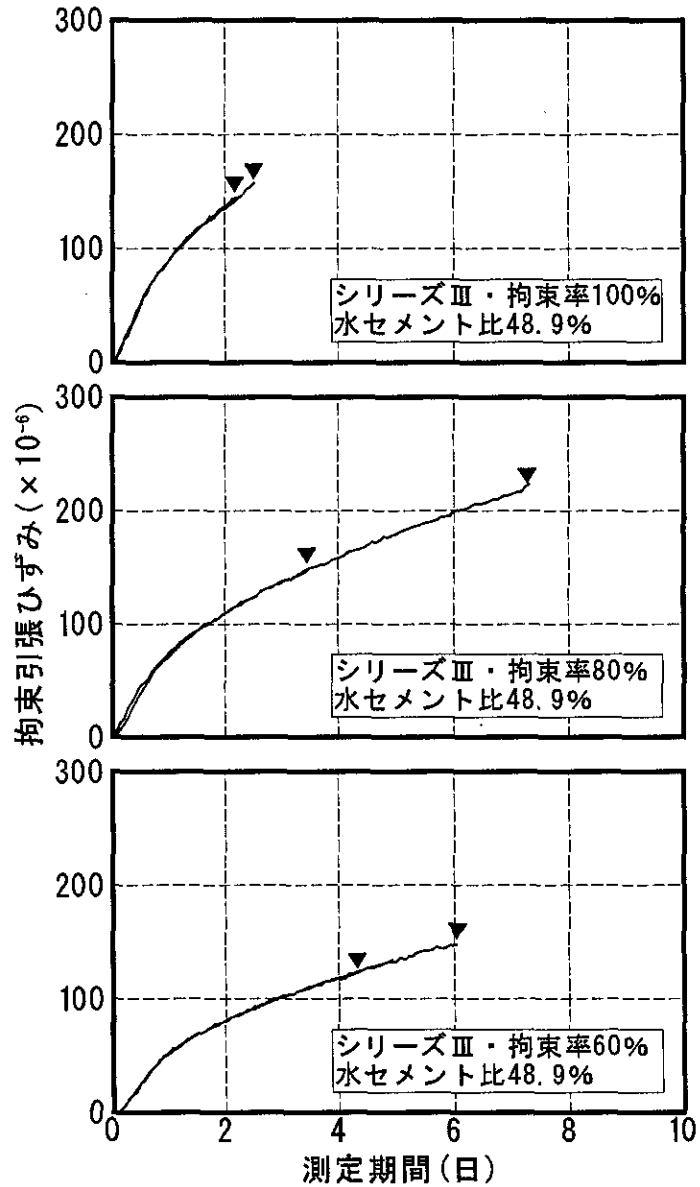


図-4.4.26 拘束引張ひずみの経時変化(シリーズⅢ・水セメント比 48.9%)

図-4.4.27 にシリーズⅢ・水セメント比 46.7%の条件下での拘束引張ひずみの経時変化を示す。に拘束率 80%および 60%の条件下では、自由収縮ひずみの変化量が緩やかになる測定開始後 1 日程度から拘束引張ひずみの上昇も緩やかになっている。

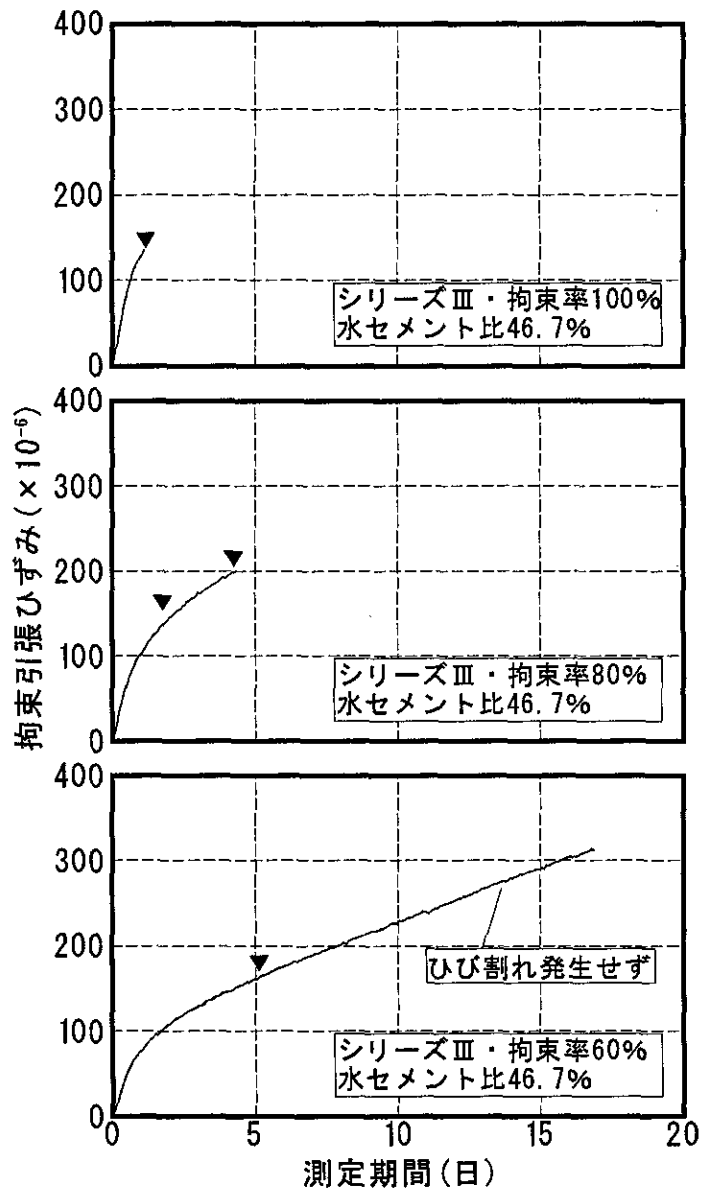


図-4.4.27 拘束引張ひずみの経時変化(シリーズⅢ・水セメント比 46.7%)

図-4.4.28 にシリーズⅢ・水セメント比 46.9%の条件下での拘束引張ひずみの経時変化を示す。拘束率が高いほど拘束引張ひずみの傾きは急になっている。これまでの測定結果と同様に、拘束率 80%および60%の条件下では、自由収縮ひずみの変化量が緩やかになる測定開始後 1 日程度から拘束引張ひずみの上昇も緩やかになっている。

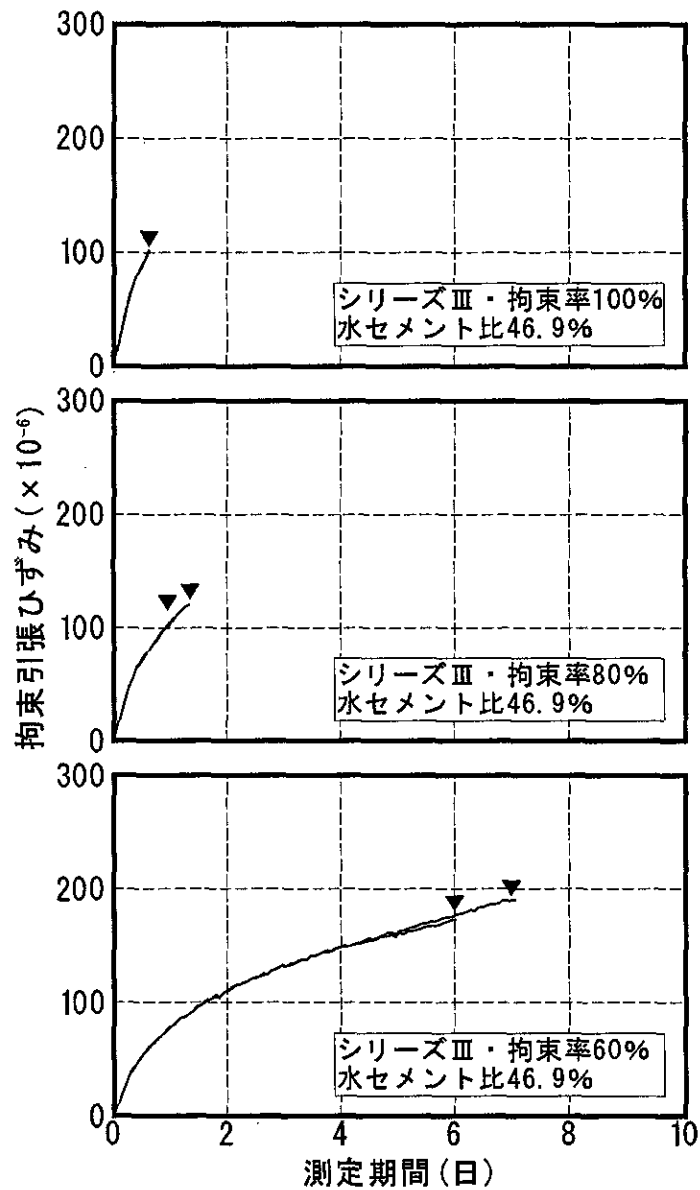


図-4.4.28 拘束引張ひずみの経時変化(シリーズⅢ・水セメント比 46.9%)

(e) 「拘束応力-拘束引張ひずみ」曲線

使用したひび割れ試験装置では拘束供試体のひずみと拘束応力の経時変化を測定することができる。両者の測定値から時間を消去すると「拘束応力-拘束引張ひずみ」曲線を描くことができる。ひび割れ発生条件を検討する場合、コンクリートの引張変形特性を示す「拘束応力-拘束引張ひずみ」関係を把握することは、非常に重要である。

そこで、図-4.4.29 に実験結果より得られた「拘束応力-拘束引張ひずみ」曲線を示す。それぞれグラフの端点でひび割れが発生していることを示しているが、ひび割れは拘束応力が最大に達した点ではなく、低下した後に発生している例があることが分かる。これは、クリープによる応力緩和の影響であると考えられる。シリーズIにおいては、拘束率100 および80%では、拘束応力の増加に伴い拘束引張ひずみの増加しひび割れが発生しているが、拘束率40%においては拘束応力 1.0N/mm^2 、拘束引張ひずみ 50×10^{-6} に達した後に拘束応力はほとんど進展せず、拘束引張ひずみのみが大きくなっており、拘束率は曲線の進展傾向に影響を及ぼしている。シリーズIIにおいては、拘束率によらず曲線の初期勾配が、乾燥開始材齢が早いものほど緩やかになっている。シリーズIIIにおいては、水セメント比が大きいほど曲線の初期勾配が小さくなる傾向を示している。

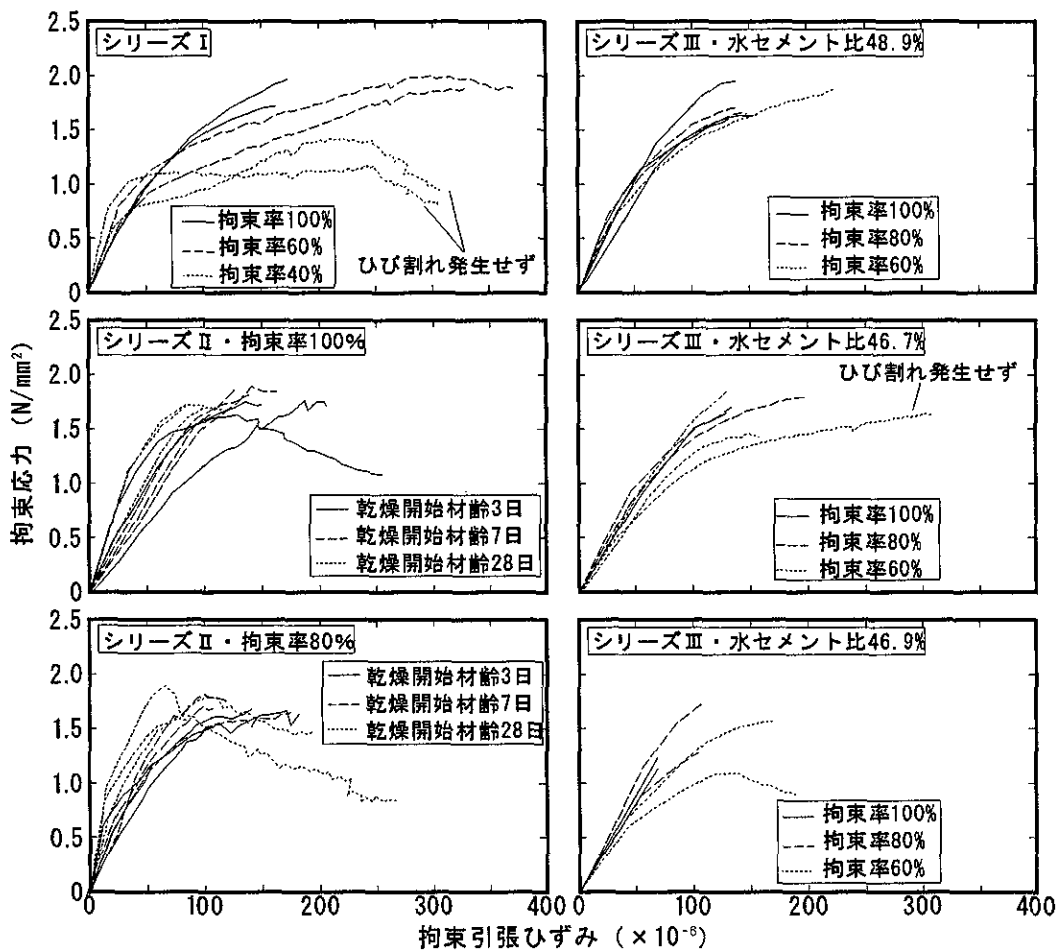


図-4.4.29 拘束応力と拘束引張ひずみの経時変化

(f)ひび割れ試験結果の検討

(1)ひび割れ試験の測定結果

シリーズIでは2体、シリーズIIIでは1体の供試体は測定期間中にはひび割れが発生しなかったが、その他の供試体は貫通ひび割れが発生した。そこで、ひび割れ発生時の「応力-ひずみ」曲線に着目し、表-4.4.5 にひび割れ発生時の応力とひずみに関する試験結果の一覧を示す。さらに、上記で述べたようにひび割れは拘束応力が最大に達した点ではなく、低下

表-4.4.5 乾燥収縮ひび割れ試験結果の一覧(ひび割れ発生時)

シリーズ	水セメント比 (%)	乾燥開始材齢 (日)	設定拘束率 (%)	ひび割れ発生時の測定結果									
				ひび割れ発生期間 (日)	平均値 (日)	拘束ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束引張ひずみ ($\times 10^{-6}$)	平均値 ($\times 10^{-6}$)	自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束応力 (N/mm ²)	平均値 (N/mm ²)		
I	57.7	7	100	3.3	3.5	0	166	173	-166	1.72	1.84		
				3.6		1	179		-178	1.95			
			60	31.7	28.6	-250	375	355	-625	1.87	1.88		
				25.5		-223	335		-558	1.88			
			40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
				—	—	—	—	—	—	—	—	—	
II	54.3	3	100	4.6	7.4	1	156	208	-155	1.75	1.56		
				7.5		-1	210		-211	1.74			
				10.2		-2	258		-260	1.18			
		7		1.8	2.4	1	131	151	-130	1.89	1.86		
				2.2		2	149		-147	1.82			
				3.1		1	172		-171	1.88			
				1.2		0	96		-96	1.80			
				1.4		1	104		-103	1.69			
				1.8		1	117		-116	1.69			
	28	5.2	5.3	-37	149	155	-186	1.68	1.60				
		7.5		-46	210		-256	1.62					
		3.2		-26	107		-133	1.50					
		4.8		-31	124		-155	1.72					
		8.4		-49	177		-226	1.64					
		4.0		-29	109		-138	1.72					
51.5	7	80	3.6	5.7	-20	90	137	-110	1.44	1.69			
			11.8		-53	195		-248	1.60				
			20.9		-67	268		-335	0.83				
			2.3		12.1	0		145	184		-145	1.95	1.29
			2.6			1		156			-155	1.61	
			3.5			-37		148			-185	1.74	
7.3	-52	222	-275	1.88									
5.0	-89	133	-222	1.60									
6.1	-99	150	-249	1.66									
III	48.9	7	100	2.5	0	145	151	-145	1.95	1.78			
					1	156		-155	1.61				
			80		3.5	5.4	-37	148	185	-185	1.74	1.81	
					7.3		-52	222		-275	1.88		
			60		5.0	5.6	-89	133	142	-222	1.60	1.63	
					6.1		-99	150		-249	1.66		
	46.7	7	100	1.2	0	135	136	-135	1.86	1.78			
					0	137		-137	1.68				
			80		2.0	3.2	-36	142	172	-178	1.75	1.79	
					4.4		-50	202		-252	1.82		
			60		5.2	5.2	-109	165	165	-274	1.43	1.43	
					—		—	—		—			
46.9	7	100	0.7	0	106	106	-106	1.49	1.48				
				-1	105		-106	1.47					
		80		1.1	1.2	-28	108	115	-136	1.71	1.55		
				1.3		-30	121		-151	1.38			
		60		7.1	6.6	-128	191	182	-319	0.91	1.24		
				6.1		-123	173		-296	1.56			

した後に発生しおり，乾燥収縮ひび割れを非常にゆっくりと引張った強度試験と考えると，**図-4.4.1**の静的直接引張強度試験と同様に捉えることができる。つまり，**図-4.4.29**で示されている最大拘束応力は，**表-4.4.2**に示す静的引張強度と同等にコンクリートの材料特性値との意味を表しているものと考えられる。そこで，最大拘束応力時に着目し，**表-4.4.6**に最大拘束応力時の応力とひずみに関する試験結果の一覧を示す。以下にこれらの測定結果について検討を行う。

表-4.4.6 最大拘束応力時の応力とひずみに関する試験結果の一覧

シリーズ	水セメント比 (%)	乾燥開始材齢 (日)	設定拘束率 (%)	最大拘束応力時の測定結果						
				測定期間 (日)	拘束ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束引張ひずみ ($\times 10^{-6}$)	平均値 ($\times 10^{-6}$)	自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束応力 (N/mm ²)	平均値 (N/mm ²)
I	57.7	7	100	3.2	0	166	171	-166	1.73	1.86
				3.6	1	176		-175	1.98	
			60	22.0	-201	308	320	-512	2.01	1.96
				25.0	-219	331		-550	1.90	
			40	24.7	-328	220	231	-548	1.43	1.30
				29.6	-361	242		-603	1.17	
II	54.3	3	100	3.9	0	143	156	-143	1.79	1.73
				6.9	0	204		-204	1.77	
				3.1	1	121		-122	1.64	
		7		1.8	0	130	138	-130	1.89	1.88
				2.1	0	140		-140	1.82	
				2.1	0	144		-144	1.92	
		28	1.2	0	96	100	-96	1.80	1.77	
			1.2	-1	93		-94	1.76		
			1.6	1	111		-112	1.76		
			4.0	-29	131		-160	1.73		
	51.5	3	80	6.4	-42	166	135	-208	1.68	1.65
				3.1	-25	107		-132	1.55	
				3.2	-25	100		-125	1.84	
				8.3	-44	179		-223	1.70	
7		3.9		-28	109	129	-137	1.72	1.75	
		3.3		-20	89		-109	1.66		
		4.9	-27	106	-133		1.83			
		2.4	-17	69	-86		1.92			
48.9	7	100	2.1	-1	138	141	-139	1.96	1.79	
			2.2	1	144		-145	1.61		
		80	3.4	-37	146	183	-183	1.75	1.82	
			7.2	-52	220		-272	1.89		
		60	4.9	-88	133	138	-221	1.61	1.64	
			5.4	-93	142		-235	1.66		
	46.7	7	100	1.1	0	133	131	-133	1.86	1.78
				1.0	2	129		-131	1.69	
			80	1.9	-35	141	172	-176	1.75	1.79
				4.3	-50	202		-252	1.82	
60			4.2	-98	148	227	-246	1.46	1.56	
			16.1	-200	306		-506	1.65		
46.9		100	0.7	0	104	105	-104	1.50	1.49	
			0.7	0	106		-106	1.47		
	80	1.1	-27	107	114	-134	1.74	1.56		
		1.3	-30	121		-151	1.38			
60	3.3	-91	136	154	-227	1.11	1.35			
	5.8	-119	172		-291	1.58				

(2)ひび割れ発生期間

図-4.4.32 にひび割れ発生期間と拘束率，乾燥開始材齢および水セメント比の関係を示す。図中のひび割れ発生期間の値は各実験結果の平均値である。ひび割れ発生期間と拘束率の関係においては，拘束率が高くなるほどひび割れ発生期間が短くなる傾向が見られる。ひび割れ発生期間と乾燥開始材齢においては，拘束率 100%では乾燥開始材齢が遅くなるほどひび割れの発生は早くなるが，拘束率 80%は逆の結果となった。ひび割れ発生期間と水セメント比の関係においては，水セメント比が大きくなるほどひび割れ発生は遅くなる傾向が見られ，拘束率 60%では顕著にその傾向が見られた。

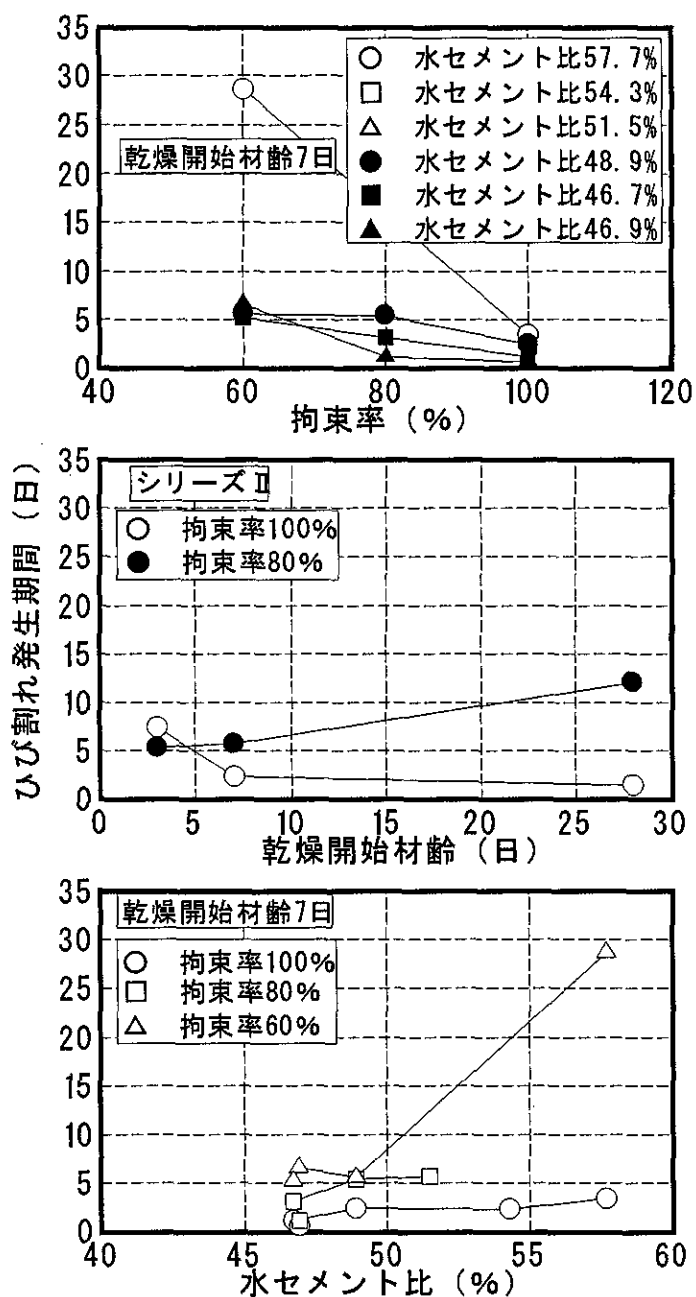


図-4.4.32 ひび割れ発生期間と各種要因の関係

(3)ひび割れ発生時の拘束応力

図-4.4.33 にひび割れ発生時の拘束応力と拘束率，乾燥開始材齢および水セメント比の関係を示す。図中のひび割れ発生時の拘束応力は各実験結果の平均値である。拘束応力と拘束率の関係では，拘束率が低くなると拘束応力も低くなる結果となった。これは，拘束率が低いほうがゆっくりとコンクリートを引張ることになり，クリープの影響が大きくなるからであると考えられる。拘束応力と乾燥開始材齢の関係では，若干ばらつきはあるが乾燥開始材齢によらず，拘束応力は1.5~2.0N/mm²の範囲内にある。拘束応力と水セメント比の関係では，水セメント比の影響は見られなかった。

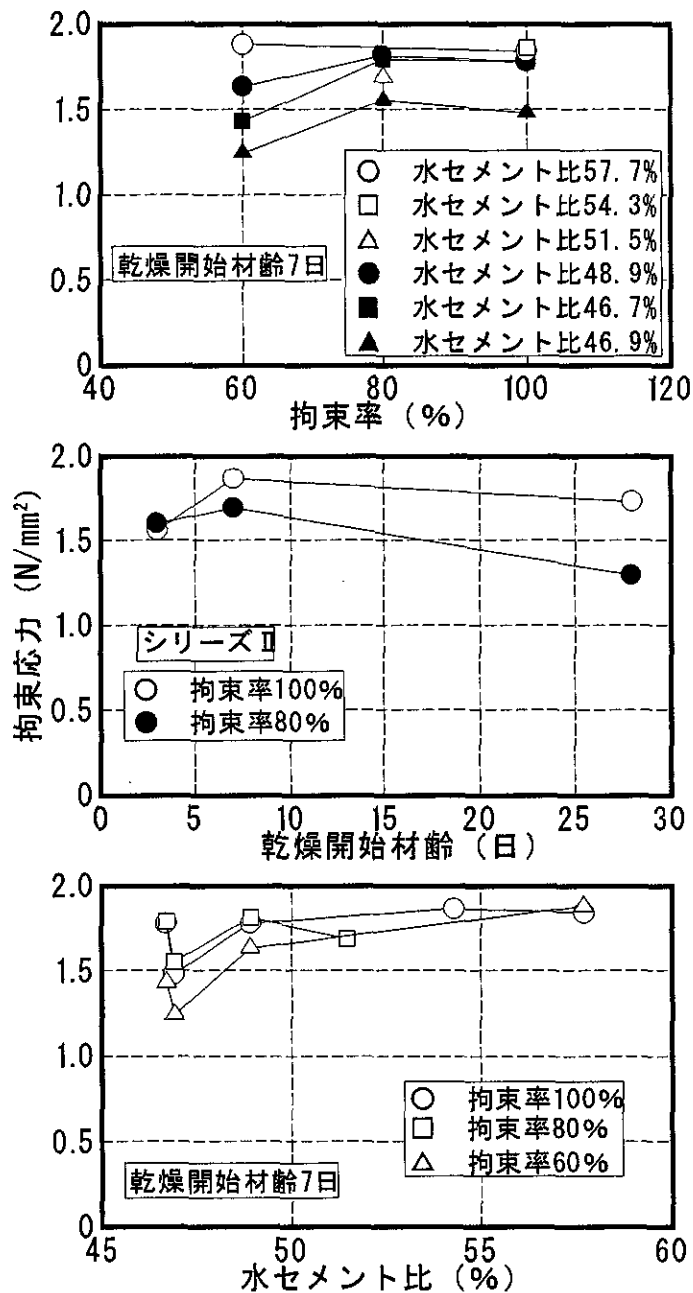


図-4.4.32 ひび割れ発生時の拘束応力と各種要因の関係

(4)最大拘束応力

図-4.4.33 に測定期間中の最大拘束応力と拘束率，乾燥開始材齢および水セメント比の関係を示す。図中の最大拘束応力は各実験結果の平均値である。最大拘束応力と拘束率の関係では，拘束率が低くなると最大拘束応力も低くなる結果となった。これは，拘束率が低いほうがゆっくりとコンクリートを引張ることになり，クリープの影響が大きくなるからであると考えられる。最大拘束応力と乾燥開始材齢の関係では，若干ばらつきはあるが乾燥開始材齢によらず，拘束応力は $1.6\sim 1.8\text{N/mm}^2$ の範囲内にある。最大拘束応力と水セメント比の関係では，水セメント比の影響は見られなかった。

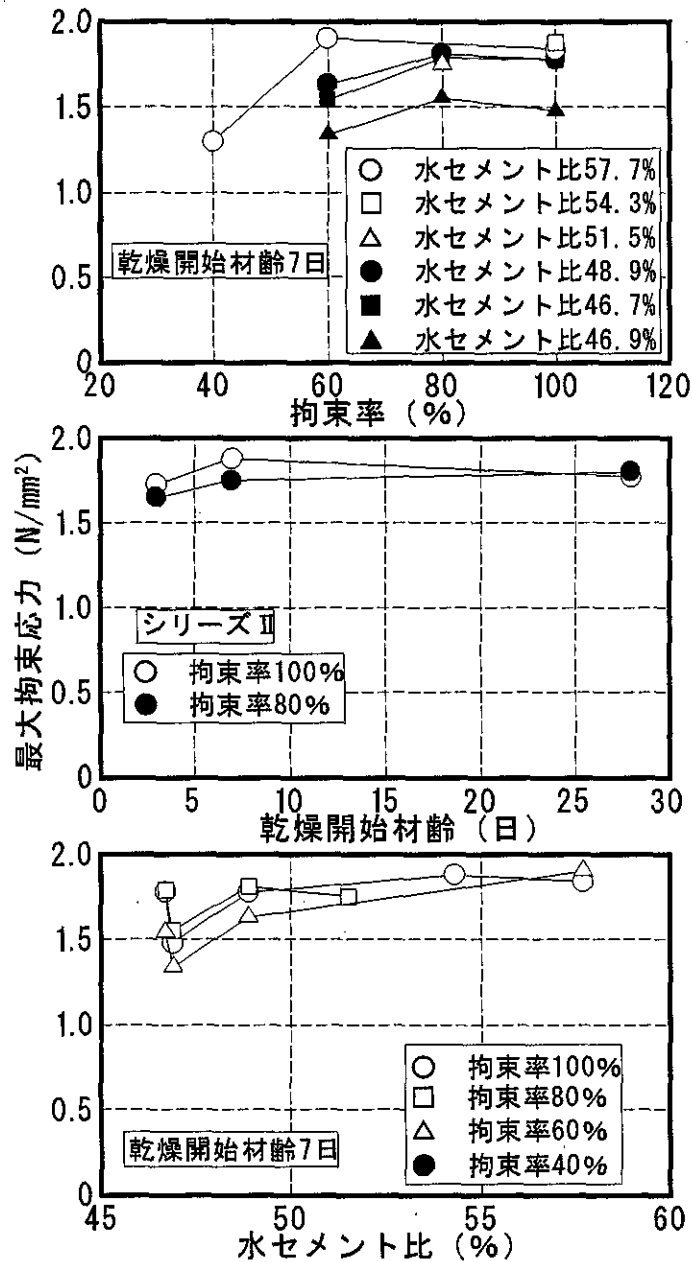


図-4.4.33 ひび割れ発生時の拘束応力と各種要因の関係

(5)ひび割れ発生時の拘束引張ひずみ

図-4.4.34 にひび割れ発生時の拘束引張ひずみと拘束率，乾燥開始材齢および水セメント比の関係を示す。図中のひび割れ発生時の拘束引張ひずみは各実験結果の平均値である。拘束引張ひずみと拘束率の関係では，拘束率が低いほうがひび割れ発生時の拘束引張ひずみも大きくなっている。拘束引張ひずみと乾燥開始材齢の関係では，拘束率 100%では乾燥開始材齢が遅くなるにつれてひび割れ発生時の拘束引張ひずみは小さくなっているが，拘束率 80%では逆の傾向を示している。拘束引張ひずみと水セメント比の関係では，水セメント比が大きくなるほどひび割れ発生時の拘束引張ひずみは大きくなる傾向が見られ，拘束率 60%では顕著にその傾向が見られた。

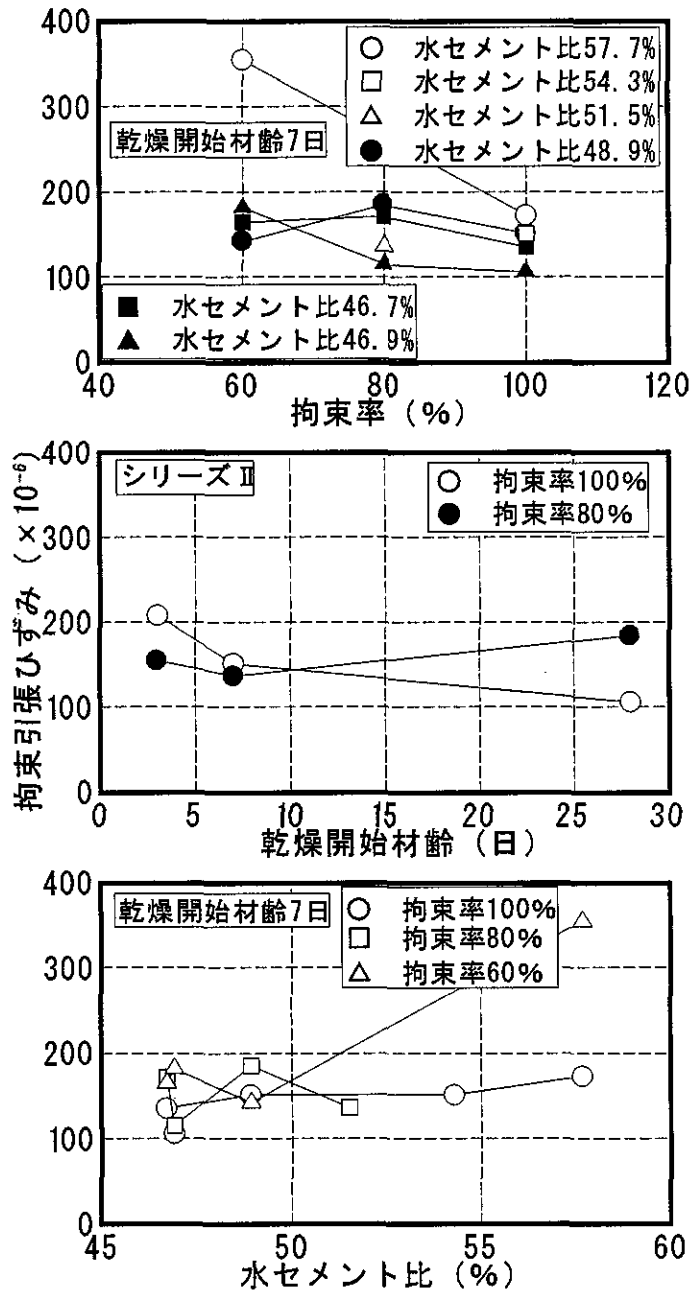


図-4.4.34 ひび割れ発生時の拘束引張ひずみと各種要因の関係

(6)最大拘束応力時の拘束引張ひずみ

図-4.4.35 に最大拘束応力時の拘束引張ひずみと拘束率，乾燥開始材齢および水セメント比の関係を示す。拘束率と最大拘束応力時の拘束引張ひずみでは，拘束率が高くなるほど最大拘束応力時の拘束引張ひずみは低くなる傾向が見られるが，水セメント比 57.7%では，拘束率 40%が拘束率 60%よりも低い値を示している。乾燥開始材齢と最大拘束応力時の拘束引張ひずみの関係では，拘束率によらず乾燥開始材齢が遅くなるほど最大拘束応力時の拘束引張ひずみは小さくなる傾向が見られる。水セメント比と最大拘束応力時の拘束引張ひずみの関係では，水セメント比の明確な影響は見られない。

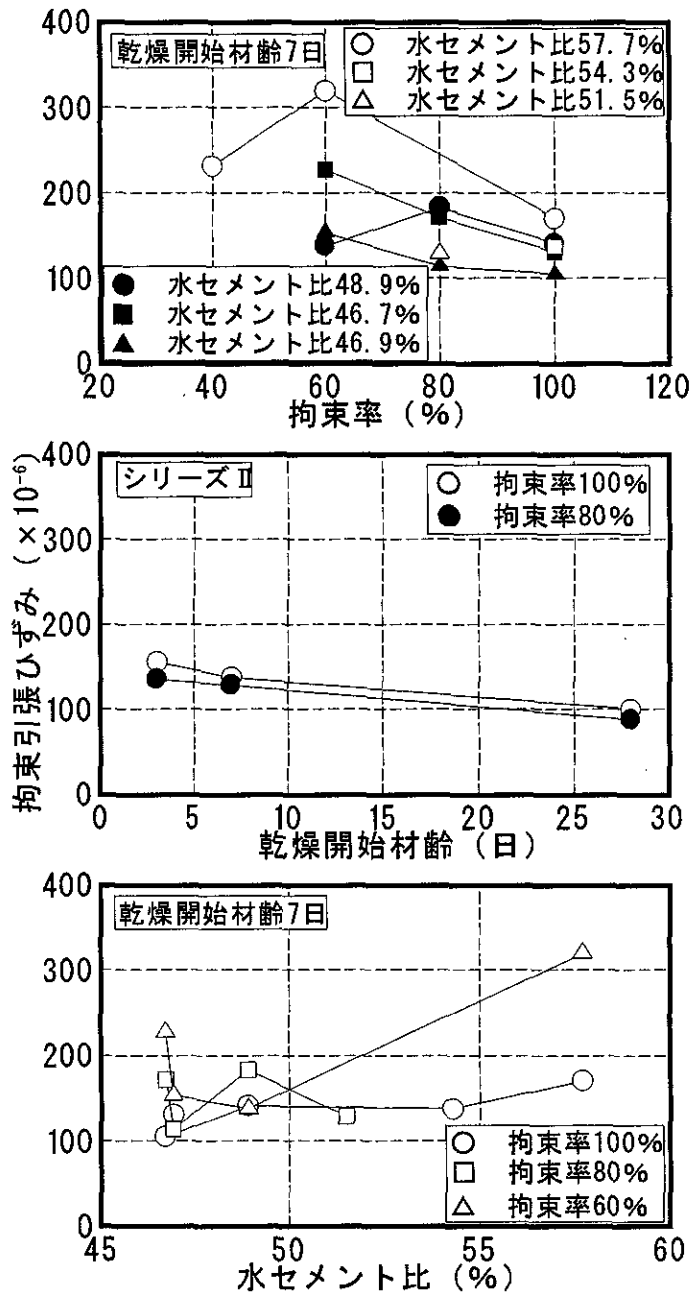


図-4.4.35 ひび割れ発生時の拘束引張ひずみと各種要因の関係

4.5 まとめ

本章では、第3章で開発した試験装置を用いて乾燥収縮ひび割れ試験を行った。コンクリートの収縮性状に影響を及ぼす要因として、拘束率、乾燥開始材齢、調合に着目し、これらの影響要因を考慮した乾燥収縮ひび割れ試験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1)拘束率が高くなるほど、また水セメント比が大きくなるほどひび割れ発生期間は短くなるが、乾燥開始材齢はひび割れ発生期間には影響をおよぼさない。
- 2)拘束率が低くなるほど、ひび割れ発生時の拘束応力は小さくなるが、水セメント比や乾燥開始材齢はひび割れ発生時の拘束応力に大きな影響をおよぼさない。
- 3)拘束率が低くなるほど最大拘束応力は小さくなるが、水セメント比や乾燥開始材齢は最大拘束応力に大きな影響をおよぼさない。
- 4)拘束率が低くなるほど、また水セメント比が大きくなるほどひび割れ発生時の拘束引張ひずみは大きくなるが、乾燥開始材齢は大きな影響をおよぼさない。
- 5)拘束率が低くなるほど最大拘束応力時の拘束引張ひずみは大きくなるが、拘束率60%と比較して拘束率40%では小さくなった。乾燥開始材齢が遅くなるほど最大拘束応力時の拘束引張ひずみは低くなるが、水セメント比は大きな影響をおよぼしていない。

以降は本章で得られた実験結果を元に、コンクリートの収縮ひび割れ発生条件について検討を行う。