

[41] 拘束を受けたコンクリートの乾燥収縮に関する研究

正会員 ○ 牧角 龍憲 (九州大学工学部)

正会員 徳光 善治 (")

1 まえがき

コンクリートの乾燥収縮によるひびわれは、コンクリート構造物のいたる所に発生し、その美観を損なうとともに、屋根スラブの漏水防止や水槽などの壁構造物においては、技術者の頭を悩ませる問題でもある。このひびわれは自己ひずみひびわれであるため、拘束の程度によりその性状が異なるが、ひびわれの制御を行なうためには、拘束の程度やひびわれ発生限界を定性的かつ定量的にとらえる必要がある。コンクリートの収縮ひずみが拘束される場合は、部材内に用いられている鉄筋による内部拘束（付着拘束）と別の構造部材による外部拘束（機械的拘束）があるが、本研究ではこれ二通りの拘束下におけるコンクリートの挙動を調べ、その拘束程度やひびわれ発生時の応力およびひずみについて検討したものである。なお、本研究は、建築用高スラブコンクリートではなく、土木用低スラブコンクリートで実験を行なった。

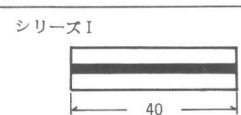
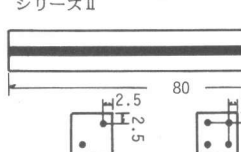
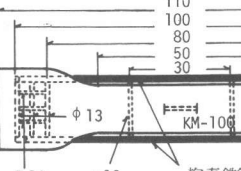
2 実験の概要

実験は3シリーズについて実施した。実験IとIIでは内部拘束を行ない、付着拘束における定着長さの影響を考慮して、実験Iでは10×10×40cm角柱供試体を、実験IIでは10×10×80cm角柱供試体を用い、それぞれ断面中央に異形鉄筋を鉄筋径(D10~D22)を変えて埋設した。また実験IIでは、D10の本数を2本と4本とした場合も行なった。実験IIIでは外部拘束を行ない、端部をコンクリート中に埋設し、横筋で定着させた2本の丸鋼を鉄筋径(φ13~φ25)を変えて用いた。各シリーズの供試体断面および使用鉄筋を表一に示す。

コンクリートは、W/C=50%、スランプ5±1cmとし、その配合および使用材料を表二に示す。(測定室の都合上、各シリーズの実施は異なる期間となったため配合、材料に差異がある。)

供試体は、打設後標準養生(20±1℃, 95%RH)を行ない、24時間後に脱型し、材令2日で恒温恒湿室に移して測定を開始した。測定はシリーズIではダイヤルゲージ法(測長40cm)で、シリーズIIでは供試体側面両側にとりつけた鋼棒と1/1000%ダイヤルゲージ(測長50cm)で、シリーズIIIでは供試体中央に埋設したKM-100で行なった。シリーズIIIでは、拘束鉄筋ひずみもストレインゲージFLA-6を用いて

表一 供試体断面と鉄筋比

供試体断面寸法 (cm)	鉄筋径	鉄筋比 (%)	記号
	0	0	I-0
	D13	1.27	I-1
	D16	1.99	I-2
	D19	2.87	I-3
	D22	3.87	I-4
	0	0	II-0
	D10	0.71	II-1
	D13	1.27	II-2
	D16	1.99	II-3
	D22	3.87	II-4
	0	0	III-0
	φ13	1.77	III-1
	φ16	2.68	III-2
	φ19	3.78	III-3
	φ22	5.07	III-4
	φ25	6.54	III-5

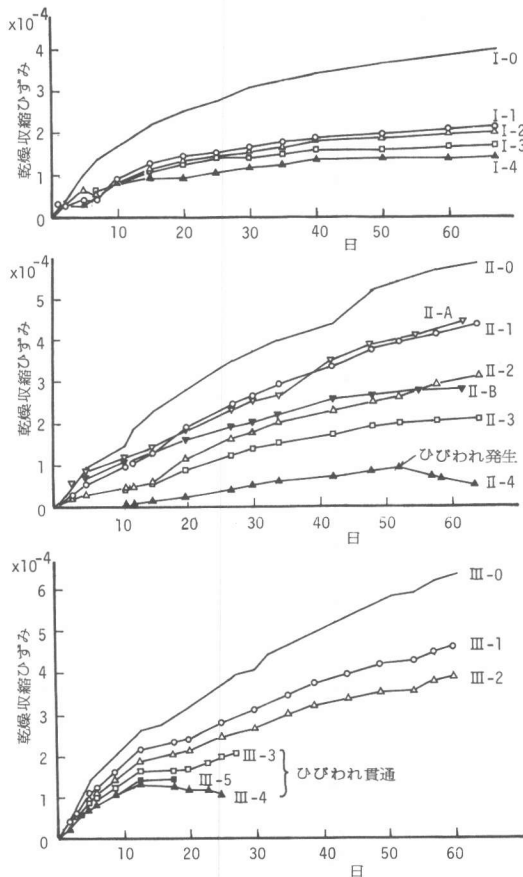
表二 コンクリートの配合および使用材料

No.	G. max (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				POZ.	slump cm	air (%)
				W	C	S	G			
I	20	50	40.4	176	352	746	1245	/	4.5	2.1
II	20	50	41	157	324	749	1166	No. 5L 3.21	6.0	4.2
III	20	50	41	166	332	743	1155	No. 70 830cc	5.6	2.9
セメント		細骨材			粗骨材					
		種別	比重	吸水量	F.M.	種別	比重	吸水量	F.M.	
I	普通ポルト	海砂	2.59	1.43	2.68	角セン岩砕石	2.93	0.99	6.60	
II	普通ポルト	海砂	2.59	1.25	2.79	角セン岩砕石	2.93	0.99	6.60	
III	普通ポルト	海砂	2.59	1.25	2.79	玄武岩砕石	2.80	1.69	6.86	

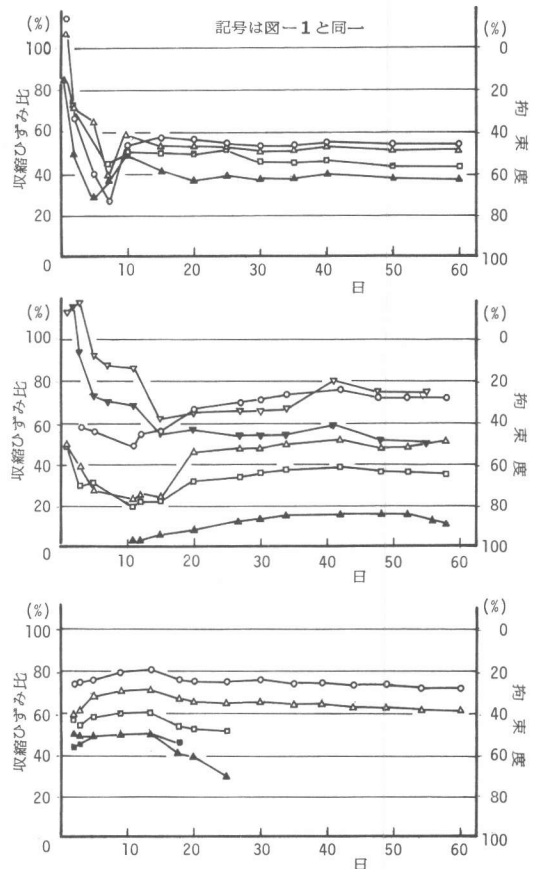
測定した。

3 実験結果

図一に各シリーズの経時乾燥収縮ひずみ曲線を示す。いずれの場合も拘束ひずみは無拘束の自由収縮ひずみより小さくなっているが、各シリーズ間ではその低減程度に差がみられ、内部拘束と外部拘束では内部拘束のほうが低減が顕著であり、同じ内部拘束でもシリーズIIはシリーズIよりもひずみ差が大きくなっている。この拘束によるひずみ低減程度、すなわち拘束度は鉄筋比および拘束方法により変化するが、自由収縮ひずみ ϵ_f に対する拘束されたコンクリートの収縮ひずみ ϵ_r との収縮ひずみ比の経時変化を示すと図二のようになる。図にみられるように、初期材令において ϵ_r/ϵ_f の変化は激しく、20日前後からほぼ一定になっている。この初期の変化はコンクリートの付着性状と密接な関係にあると考えられる。コンクリートの付着強度は、一般に材令3~4日で最大値に達するが、それは鉄筋周囲のコンクリートが硬化熱により早く硬化収縮して鉄筋をしめつけ、摩擦による付着抵抗を増すためであり、粘着力による付着力はこれより遅く7~14日で最大値に達するとされている。そのため、シリーズI, IIにおいては付着抵抗が増すに従って収縮ひずみがかかなり拘束されるが、その後クリープや収縮応力の増加により拘束が緩やかになると考えられる。また、ほぼ収縮ひずみ比が一定となつてから、シリーズIIでは鉄筋比によりかなりその大きさが異なるのに対し、シリーズIではD13~D19まではほぼ同じ収縮ひずみ比を示している。これは、内部拘束が鉄筋の付着による収縮拘束であるため、断面長さが定着長さの2倍に満たない時は、鉄筋がすべり、それにより拘束が緩和されるためと考えられる。このことから、鉄筋による内部拘束



図一 1 経時乾燥収縮ひずみ曲線



図一 2 収縮ひずみ比の変化

束を調べる場合、40 cm 以上のさらに長い寸法の供試体を使う必要がある。

次に図-3に、付着力が最大となる近傍の材令10日と各シリーズにおいて収縮ひずみ比がほぼ一定となる材令30日における収縮ひずみ比と鉄筋比の関係を示すが、同一鉄筋比でもかなりの差異があることがわかる。図中に示す曲線は式

$$\frac{\epsilon_r}{\epsilon_f} = \frac{1}{1 + np} \dots\dots (1)$$

n は弾性係数比

においてnを種々変化させたものであるが、シリーズIIIの外部拘束の場合は、n = 15 ~ 20の曲線にほぼ近いのに対し、シリーズIIの場合はn = 100前後の関係を示している。一般に収縮の計算で用いられる有効弾性係数比はn = 20 ~ 30であり、n = 100となる拘束は、単にひずみから

求めた力のつりあいだけでは説明できない。しかしながら、同じシリーズIIにおいて鉄筋本数を増した供試体II-A, Bの場合はn = 20 ~ 30に近い関係を示していることから、付着拘束機構の影響によりこの差が生じたと考えられる。

図-4は、外部拘束された供試体のコンクリートおよび鉄筋の収縮ひずみの経時変化曲線の一例を示すが、鉄筋ひずみがほぼ一定の割合でコンクリートひずみに追随していることがわかる。この傾向は測定開始時からどの供試体においても観察された。そこで、コンクリートの収縮ひずみと鉄筋の収縮ひずみの関係を図-5にプロットしたが、非常によい直線相関であり、内部拘束においてみられるような、初期材令においてコンクリートが鉄筋をつかむまでのずれやコンクリートひずみが $2 \sim 3 \times 10^{-4}$ 前後から相関が悪くなる傾向はみられなかった。すなわち、外部拘束の場合は、コンクリート断面に一樣に分布する収縮応力度が荷重として鉄筋(拘束部材)とコンクリートにかかるとみなしてよいであろう。

このとき、力のつりあいより、コンクリートに生じる引張応力度 σ_t は次式で求まる。

$$\sigma_t = p \cdot \epsilon_s \cdot E_s \dots\dots\dots (2)$$

図-6は、(2)式より求めた σ_t の経時変化曲線であるがいずれの供試体も同様の傾向で材令とともに引張応力度が増大しており、鉄筋比が大きいほど図-7に示すようにほぼ直線的に増加している。この引張応力が11~13 ㎍になったとき、いずれの供試体においても断面の一部にひびわれが発生しており、鉄筋比が小さい $\phi 13$, $\phi 16$ 供試体を除いて、ひびわれ発生後2~3 ㎍引張応力が増大して、断面を

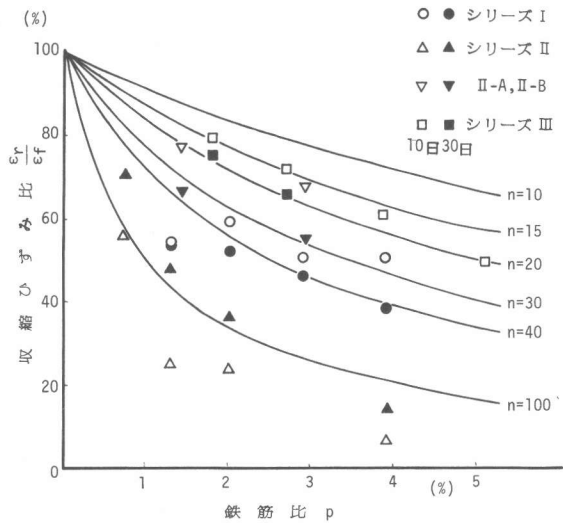


図-3 鉄筋比と収縮ひずみ比との関係

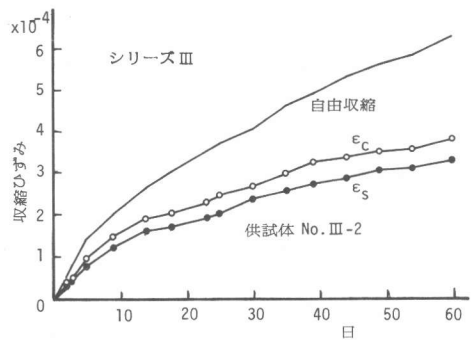


図-4 外部拘束供試体の経時収縮ひずみ曲線

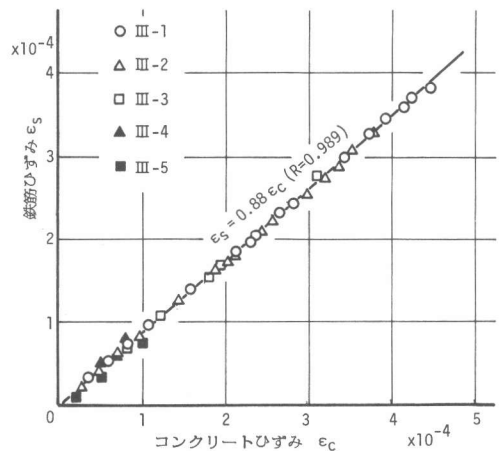


図-5 コンクリートひずみと鉄筋ひずみ

貫通するひびわれが生じている。このとき、図-6中に示す割裂試験による引張強度よりも、ひびわれ貫通時の引張応力度はかなり小さく、約1/2の値となっている。これは、拘束によりコンクリートには常に引張応力が加わっており、引張クリーブが生じるため、処女供試体の引張強度より低くなったものと考えられる。

このときのひびわれ発生日数は14~19日で、ひびわれ貫通日数は20~28日でかなり早い。かといって拘束度(1- ϵ_r/ϵ_f)が大きいかという点、 $\phi 22$ 供試体が50%、 $\phi 19$ 供試体が45%と、一般の構造物の拘束度に比べれば、普通以下である。また、拘束されたコンクリートひずみ、すなわち、コンクリートに生じた引張ひずみは、ひびわれ発生時で $\phi 25$ 供試体が 130×10^{-6} 、 $\phi 22$ 供試体が 175×10^{-6} 、 $\phi 19$ 供試体が 143×10^{-6} と一般にいわれる限界ひずみの 400×10^{-6} よりかなり小さな値となっている。

表-3に、シリーズIIにおいてひびわれが発生した供試体の発生日数、そのときの拘束されたひずみおよび収縮ひずみから(2)式により求めた引張応力度の値をそれぞれ示すが、内部拘束の場合、発生日数が外部拘束に比べてかなり遅いこと、拘束ひずみ量がいずれもほぼ 400×10^{-6} であること、(2)式より換算した引張応力度は引張強度(表-4)に比べてかなり小さいことがわかる。なお、シリーズIにおいては、いずれの供試体にもひびわれは認められなかった。

このことから、拘束によりコンクリートに生ずる引張応力度は、内部拘束と外部拘束とは異なった加わり方をし、内部拘束では鉄筋の表面をピークとする応力勾配をもった応力分布で、引張クリーブひずみにより限界が定められると考えられ、外部拘束では、断面に様に分布する引張応力、いわば一軸引張強度試験におけるかなり遅い載荷速度と同じ状態になると考えられる。

したがって外部拘束による拘束程度をあらわすには力のつり合い式でよいが、内部拘束では、付着応力、その影響範囲、定着長さおよび初期材令における変化をさらに詳しく検討する必要がある。

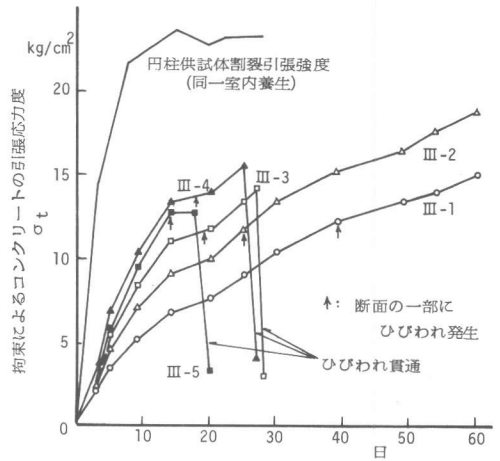


図-6 拘束によるコンクリートの引張応力 σ_t

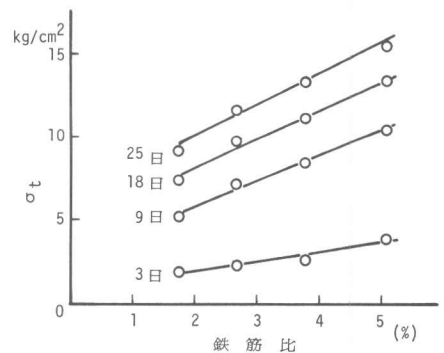


図-7 鉄筋比と σ_t との関係

表-3 ひびわれ発生日数およびひずみ

供試体 No.	鉄筋比 (%)	ひびわれ発生日数	収縮ひずみ $\epsilon_r \times 10^{-6}$	自由収縮ひずみ $\epsilon_f \times 10^{-6}$	収縮ひずみ比 ϵ_r/ϵ_f	拘束されたひずみ $\times 10^{-6}$	(2)式による引張応力度*
II-4	3.87	50	96	519	0.185	423	7.8
II-8	2.85	69	283	596	0.475	313	16.9
II-3	1.99	150	290	689	0.421	399	12.1
III-5	6.54	14	137	267	0.513	143	12.8
III-4	5.07	18	130	305	0.426	175	13.5
III-3	3.78	19	168	311	0.540	130	11.4

* kg/cm^2

表-4 強度試験結果

シリーズ	I		II		III*	
材令日	7	28	7	28	7	28
圧縮強度**	274	291	268	358	241	317
引張強度**	18.8	25.3	23.8	26.3	21.7	23.4
弾性係数***	/	2.93	2.93	3.50	2.74	2.48

* 収縮供試体と同一養生, 60%R.H., 20°C ** kg/cm^2 , *** $\times 10^5 \text{kg/cm}^2$