

外的に線拘束されたコンクリートの 乾燥収縮ひびわれに関する基礎的研究*

SHRINKAGE CRACKING OF CONCRETE SUBJECT
TO THE EXTERNAL UNIAXIAL RESTRAINT

牧角 龍憲**・太田 俊昭***

By Tatsunori MAKIZUMI and Toshiaki OHTA

A series of drying shrinkage tests of the concrete members that are restrained externally by steel bars or channels has been carried out systematically to investigate the influence of degree of restraint, mix proportion of concrete, size of the cross section, moist curing time and additional bars on the shrinkage cracking.

In addition, an analytical method to estimate the shrinkage stress as well as the cracking time is presented herein.

The good agreement between the estimated values and measured ones is obtained.

Keywords : concrete, drying shrinkage, cracking

1. まえがき

乾燥収縮は、コンクリートの硬化後に生ずる不可避の現象であり、外的拘束下にあるときは、その弊害として乾燥収縮ひびわれを生ずる。このひびわれは、美観を損なうのみならず、場合によっては、コンクリート構造物の耐久性と機能性を低下させる原因となる。

このため、外的拘束下にあるコンクリートの乾燥収縮ひびわれに影響する要因の分析とその発生過程を的確に解明することが、合理的なひびわれ制御対策を講じるうえできわめて重要となる。

この分野に関する既往の研究は数多い¹⁾が、それらは主としてコンクリートの材料、配合の影響を定性的に明らかにしたもの²⁾であるか、あるいは施工面における経験的な知見に基づくもの^{3), 4)}であり、実設計に必要な定量的数値解析法に関する研究は数少なく、合理的なひびわれ制御の対策指針もしくはその判断基準はいまだ確立されていないのが現状である。

これは、外的拘束下にあるコンクリートの乾燥収縮挙動やクリープ挙動が、その拘束条件、品質、部材寸法など種々の要因によって多様に変化するため、その発生ひびみや応力の経時変化の定量的把握がきわめて困難となることによるものである。

そこで、本研究では、一方向に一様な外的拘束（線拘束）を与える実験装置を用いて、拘束度、配合、部材寸法、養生日数さらには用心鉄筋などの要因を網羅した、一連の乾燥収縮ひびわれ実験を行い、ひびわれの性状に及ぼす各要因の影響ならびにひびわれ発生時の応力限界値等について体系的な検討を試みるとともに、コンクリートの物性の経時変化を適正に考慮した、汎用性のある収縮応力解析法を提案し、推定値と測定値との比較により、本法の妥当性を明らかにしている。また、本研究ではコンクリート断面を貫通するひびわれを対象として検討を行っている。

2. 実験概要

拘束度、配合、部材厚さ、養生日数および用心鉄筋の影響を調べる一連の実験を行ったが、以下ではそれぞれの実験を、簡単に実験 A, B, C, D および実験 E とよぶことにする。ここで拘束度とは、コンクリートの乾燥収縮ひびみが拘束される割合で、拘束度 100% および

* 本報告の内容の一部は、セメント技術年報 37 (昭和 58 年 12 月) より第 6 回コンクリート工学年次講演会講演論文集 (昭和 59 年 6 月) に発表。

** 正会員 工博 九州大学助手 工学部土木工学科
(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

*** 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木工学科 (同上)

0% は、それぞれ収縮が完全に拘束される状態および無拘束で自由に収縮できる状態を表わす。

(1) 乾燥収縮拘束装置

乾燥収縮ひずみを拘束してひびわれを発生させる方法として、Fig. 1 に示す拘束装置を実験に用いた。本装置は、拘束材端部に格子状にした横筋 (D 10) を溶接し、その端部を直接コンクリート中に埋め込んでいるため、力の伝達が円滑となるほか、確実な定着が期待でき、コンクリートの収縮方向と拘束方向がほぼ同一線上でかつ外的に拘束することが可能であり、しかも拘束鉄筋の径により拘束度を 30% 前後から 70% 程度まで変化させることができる。さらに、ひびわれ発生に至るまでのコンクリートのひずみや拘束材の応力の測定ならびにひびわれの観察が容易に行えるものである。また、拘束材に座屈や湾曲が生じないように供試体の長さを定めている。ただし、実験 C では、コンクリート断面の厚さを 30 cm まで変化させるため、前述の条件を満たす検討がなされている JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひびわれ試験方法（案）」⁵⁾に準じて、各厚さとも同程度の拘束度となるような軽構形鋼を拘束材とした。

さて、コンクリート供試体の形状は端部を幅広にし、実験 B および C では、厚さ方向の 4 側面にワックスを 2~3 層塗布して乾燥を防ぐことにより 2 面乾燥とし、実験 E では、用心鉄筋として一般に使用されている異形棒鋼 D10 2 本を、被拘束部コンクリート全長にわたって、断面内の対称位置に埋設した。

各供試体の、被拘束部のコンクリート断面の厚さ、乾燥にさらされる表面積 (cm^2) と体積 (cm^3) の比 S/V 、

拘束鉄筋あるいは軽構形鋼の寸法および拘束材とコンクリートの断面積比 A_R/A_C を Table 1 に示す。Table 1 の拘束材の寸法は、被拘束部の両側に対称に配置した各拘束材寸法を表わし、E 2 および E 4 供試体ではコンクリート中に埋設した用心鉄筋の数と径を加えている。

(2) 試験条件および測定方法

セメントは普通ポルトランドセメント（比重 3.17）、細骨材は海砂（比重 2.59）、粗骨材は最大寸法 20 mm の角閃岩碎石（比重 2.97）あるいは玄武岩碎石（比重

Table 1 Condition of test specimens.

No.	Concrete Thick- ness, cm	Surface volume ratio, 1/cm	Size of restraint steel, mm	A_R/A_C	Moist curing time, day	W/C %	Water content, kg/m ³	
A1	10	0.333	φ13	.0177				
A2			φ16	.0268				
A3			φ19	.0378	2	50	166	
A4			φ22	.0507				
A5			φ25	.0655				
B1	10	0.2	φ28	.0493	7	40	170	
B2								
B3					7	50		
B4								
C1	30	0.067	4.0x300x50	.1031				
C2	25	0.08	4.0x250x50	.1078				
C3	20	0.1	4.0x200x50	.1147	7	50	165	
C4	15	0.133	3.2x150x50	.1022				
C5	10	0.2	3.2x100x50	.1213				
D1	10	0.333	φ22	.0507	2			
D2					3			
D3					7			
D4					14			
D5					28			
E1	10	0.333	φ19	.0378				
E2			+ 2-D19	.0473	2	50	162	
E3			φ22	.0507				
E4			+ 2-D19	.0602				

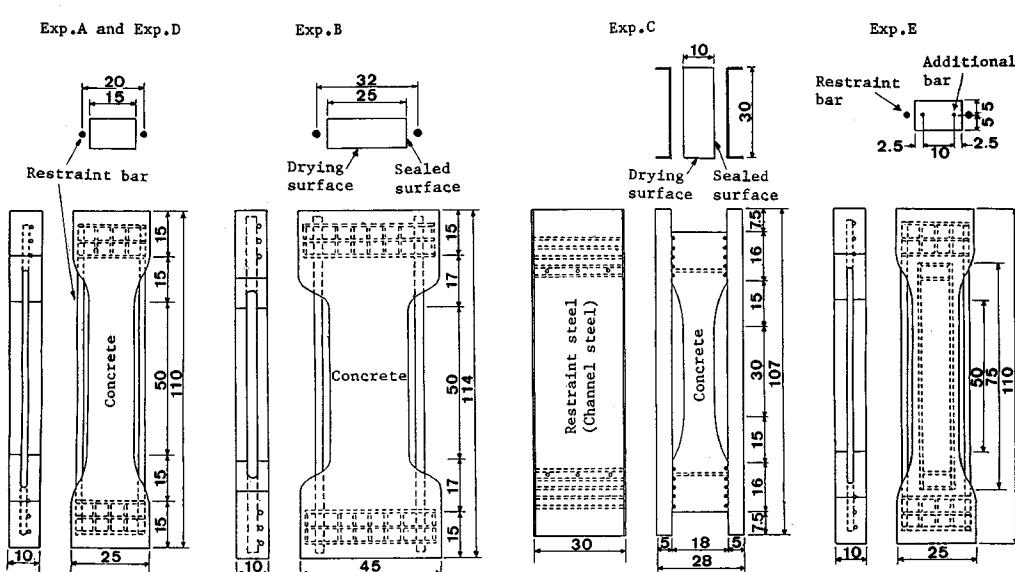


Fig. 1 Test apparatus to restrain the drying shrinkage of concrete, size in cm.

2.80 実験 A のみ) を使用した。コンクリートの水セメント比 W/C、単位水量は Table 1 に示すとおりである。

供試体は、Table 1 に示す所定の養生日数まで湿潤養生を行い、その後温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内に搬入して測定を開始した。拘束材のひずみは、抵抗線ひずみゲージを用いて、コンクリートの表面ひずみは、抵抗線ひずみゲージあるいはコンタクトゲージを、断面中心のひずみは、埋込型ひずみゲージを用いて、それぞれ測定した。また、コンクリートの自由収縮ひずみは拘束供試体と同じ表面積体積比の角柱供試体を用いて測定した。ひびわれの発生は目視で観察するとともに拘束材のひずみ変化で確認し、断面を貫通するひびわれが生じた時点（拘束材ひずみがほぼ 0 になる）をひびわれ発生日数とした。また、実験 C では、ひびわれ発生後に拘束材をガス切断して、側面の貫通状況を確認した。

3. 乾燥収縮ひびわれ性状に及ぼす諸要因の影響

実験を行った供試体には、いずれも断面を貫通するひびわれが発生した。また、実験 A および実験 D の供試体のうち数体は、表面の一部にひびわれが発生してから数日後に貫通ひびわれが発生したが、他はすべてほぼ瞬間的（1 日以内）に貫通ひびわれが発生した。Table 2 にひびわれ発生日数（乾燥開始後の日数）を示すが、同一条件下で複数の供試体を用いた実験についてはそれぞれの日数を示す。ひびわれは 20~30 日前後に多く発生しているが、拘束度や部材寸法によっては 2~4 か月を経て発生しており、ひびわれ性状を把握するに妥当な範囲にわたっていると考えられる。

Table 2 Drying time when shrinkage cracking through the cross section occurs.

Specimen No.	A1	A2	A3	A4	A5
Cracking time, day	131	67	27	25	18
Specimen No.	B1	B2	B3	B4	
Cracking time, day	22, 38	17, 29	22, 26	14, 21	
Specimen No.	C1	C2	C3	C4	C5
Cracking time, day	45, 48	27, 28	22, 23	20, 25	12, 17
Specimen No.	D1	D2	D3	D4	D5
Cracking time, day	18, 21	20, 28	19, 33	16, 26	23, 31
Specimen No.	E1	E2	E3	E4	
Cracking time, day	68	43, 46	18, 39	16, 26	36, 41

(1) 拘束度の影響

Fig. 2 に、実験 A における拘束鉄筋の収縮ひずみとコンクリートの自由収縮ひずみ ϵ_s の経時変化を示す。このとき、拘束供試体におけるコンクリートの収縮ひずみと拘束鉄筋のそれとはほぼ同じ値を示し、ひびわれ発生直前まで連動して変形することを確認している⁶⁾。他の実験においても同様であり、以後の検討では、拘束材の収縮ひずみを拘束供試体の収縮ひずみとみなし、拘束収縮ひずみ ϵ_s とよぶことにする。

図にみられるように、拘束鉄筋径が大きくなるほど拘

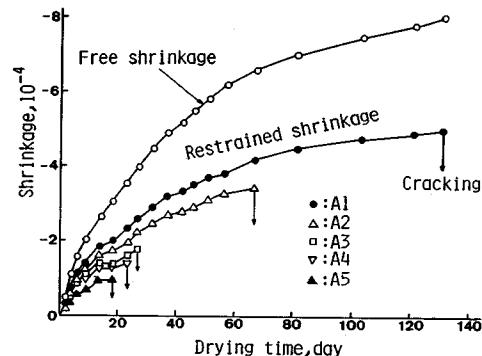


Fig. 2 Change of restrained shrinkage and free shrinkage versus drying time, Exp. A.

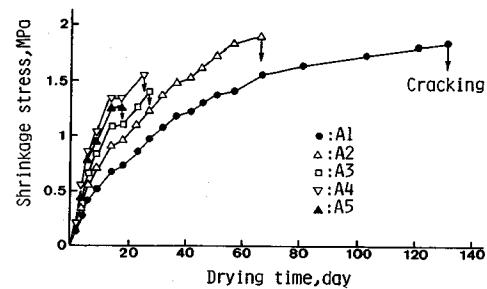


Fig. 3 Change of shrinkage stress versus drying time, Exp. A.

束収縮ひずみは小さくなり、ひびわれが早く発生することがわかる。自由収縮ひずみと拘束収縮ひずみの差が拘束引張ひずみ ϵ_R であり、同一日数において、この拘束引張ひずみが大きいほどひびわれが早く発生することになる。

一方、コンクリートに生じる拘束引張応力を収縮応力とよぶことにし、 σ_{ct} で表わすとすれば、力のつり合い条件から σ_{ct} は、拘束材の弾性係数を E_R として、次の式より求められる（符号は、引張を正とする）。

$$\sigma_{ct} = -\epsilon_s E_R A_R / A_c \quad (1)$$

Fig. 3 に収縮応力の経時変化を示すが、拘束引張ひずみと同様に、拘束鉄筋径が大きいほど収縮応力は大きくなっています。拘束度によってひずみおよび応力とも顕著に変化することがわかる。ここで、各乾燥日数における拘束度は

$$R = \epsilon_R / \epsilon_s \quad (2)$$

で表わされる。この拘束度と収縮応力の関係を Fig. 4 に示すが、いずれの乾燥日数においても、収縮応力は拘束度にほぼ比例して増加していることがわかる。

また、もしコンクリートの引張クリープひずみがクリープ破壊時近傍にみられるように加速度的に急増するならば、それに伴って拘束収縮ひずみは急減し、すなわち収縮応力が顕著に緩和されると考えられるが、Fig. 3 にみられるようにひびわれが発生するまで収縮応力は確

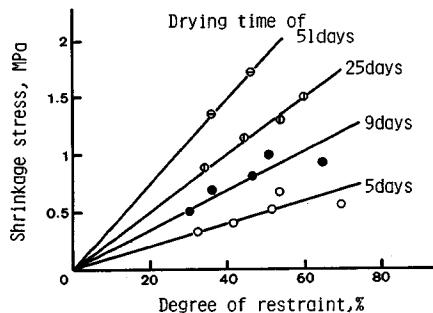


Fig. 4 Relationship between degree of restraint and shrinkage stress, Exp. A.

実に増加しており、過大なクリープによる顕著な応力緩和は認められなかった。これらのことから、適切にクリープを考慮することにより、収縮応力の評価は、拘束度の影響を加味した準弾性的な取り扱いが可能であると考えられる。

(2) 配合の影響

配合が乾燥収縮ひびわれに及ぼす影響に関しては、富配合ほどひびわれが早く発生しやすいとする報告^{7), 8)}や、反対に W/C の増加がひびわれを助長する報告⁹⁾、あるいは鉄筋コンクリートの実用範囲内ではセメント量および水量の影響は少ないとした報告¹⁰⁾があり、研究者によって異なる結論が示されている。また、本実験においても、配合を変化させた実験 B のひびわれ発生日数は、ばらつきはあるもののほぼ同じ日数となっており、 W/C あるいは単位水量による一定の傾向は認められなかった。

このようにひびわれ傾向が一定でない原因として、配合により変化するコンクリートの物性、ひびわれに影響する程度の差異が考えられる。すなわち、弾性係数が

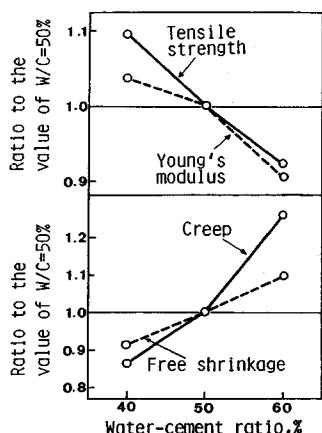


Fig. 5 Variations of concrete properties with water-cement ratio, Exp. B. Creep is calculated by Sakata's predict equation¹¹⁾.

大きいほど、同じ拘束度下において生じる収縮応力は大きくなり、ひびわれ発生を助長するが、同時に引張強度は増加して、ひびわれ発生を抑制する効果が大きくなるため、それらの影響程度によってひびわれ傾向が異なることになる。また、自由収縮ひずみが小さいほど、収縮応力は小さくなるが、同時にクリープひずみも小さくなるため、収縮応力を緩和する効果が小さくなることも、同様にひびわれ傾向に影響すると考えられる。

Fig. 5 に、材令 28 日（乾燥日数 21 日）におけるそれぞれの値の $W/C = 50\%$ の値に対する比率を示す。クリープひずみについては、各要因の影響を簡単な関数式で表現した阪田の予測式¹¹⁾に、本実験条件を代入して求めた値を用いている。図にみられるように、 $W/C = 40\%$ および 60% のいずれにおいても、ひびわれに対して相反する影響を及ぼす強度と弾性係数、あるいは自由収縮ひずみとクリープひずみは、ほぼ同程度の比率で変化している。すなわち、これら 4 つの性質のひびわれに寄与する効果が互いに相殺しあうために、ひびわれ発生日数の顕著な差が生じなかつたものと考えられる。

したがって、乾燥収縮ひびわれに及ぼす配合の影響を定量的に把握するためには、自由収縮ひずみのほかに、配合により変化する強度、弾性係数およびクリープ等のコンクリートの諸物性を、適切に考慮した収縮応力解析を行う必要があるといえる。

(3) 部材寸法の影響

コンクリートの乾燥収縮は、主に表面からの水分逸散に起因して生じるため、部材厚さの増加によってその表面積体積比 S/V が減少すると、収縮ひずみは顕著に減少する¹²⁾。このため、部材寸法は乾燥収縮ひびわれにも影響すると考えられるが、実際にひびわれを発生させて検討した研究は皆無に近く、その影響についていまだ不明な点が多い。

実験 C では、部材厚さを 10 cm から 30 cm まで変えることにより、 S/V を 0.2~0.067 まで変化させて拘束

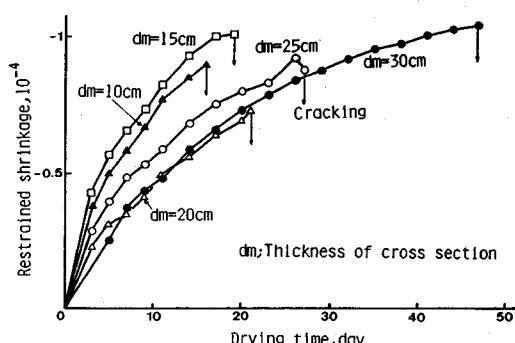


Fig. 6 Change of restrained shrinkage versus drying time, Exp. C.

を行ったが、Fig. 6 に示すように、いずれの場合も、拘束収縮ひずみが確実に増加してひびわれが発生した。

この部材厚さの影響を検討するにあたっては、乾燥表面と中心部のひずみの差による内部拘束の影響を考慮する必要があるが、本実験で用いたいずれの供試体においても、断面を貫通するひびわれが発生する直前まで、拘束材のひずみ変化および目視観察のいずれにおいても表面ひびわれの発生は確認されなかったこと、コンクリート断面の平均ひずみと拘束材のひずみがほぼ同じ値で確実に増加すること、ひびわれが発生した時点での側面のひびわれ幅は場所によらずほぼ一定であったこと等から、部材厚さ 30 cm 程度までは、内部拘束の影響に比べて、外部拘束の方が卓越すると考えられ、外部拘束による性状のみについて検討した。

ひびわれ発生日数は、Fig. 6 に示すように、部材厚さが大きくなるほど遅くなる傾向がみられるものの、部材厚さが 10 cm から 25 cm に増加してもその差は 10 日前後であった。部材厚さの増加に伴って、自由収縮ひずみがかなり減少するにもかかわらず、ひびわれ発生日数にあまり差がみられなかった原因として、クリープの影響が考えられる。すなわち、自由収縮ひずみとクリープひずみはほぼ線形関係にあり¹³⁾、Fig. 7 に示すように、 S/V の減少に伴う自由収縮ひずみの低減は、同時にクリープひずみも低減させるため、クリープによって収縮応力が緩和される効果が少なくなることに起因すると考えられる（クリープ係数は、部材寸法の影響を単独の関数で表示した ACI-209 委員会の予測式¹⁴⁾から算定した）。

したがって、部材寸法の影響を検討する場合、自由収

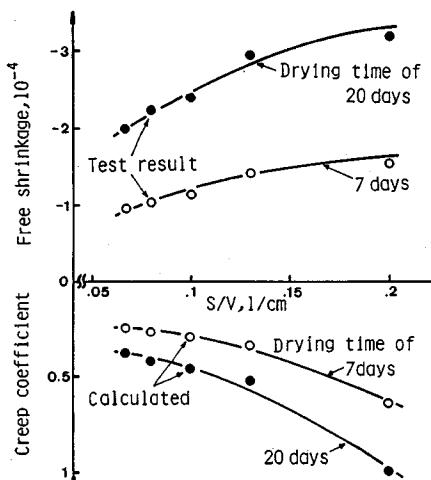


Fig. 7 Variations of free shrinkage and creep coefficient with surface-volume ratio, Exp. C. Creep coefficient is calculated by ACI-209 committee's predict equation¹⁴⁾.

縮ひずみの増減のみならず、クリープひずみの増減についても適切に評価した解析を行う必要があるといえる。

(4) 養生日数の影響

養生日数が長くなれば、乾燥開始時における弾性係数および乾燥収縮ひずみ速度は増大し、それに伴って収縮応力が大きくなるため、長期間の養生はひびわれ発生を助長するとされている¹⁵⁾。しかしながら、実際にひびわれを発生させてその影響を検討した既往の研究では、養生日数が長いほどひびわれが早く発生する傾向^{16), 17)}と、反対に発生しにくくなる傾向^{18), 19)}のいずれも報告されており、一定した傾向は明らかにされていない。

Fig. 8 に、養生日数を変化させた実験 D における収縮応力の経時変化を示す。前述のように、養生日数が長いほど、乾燥開始時における収縮応力の立ち上がりは大きくなっているが、ひびわれは、いずれも乾燥開始後 20 ~ 30 日で発生しており、養生日数による顕著な差は認められないことがわかる。

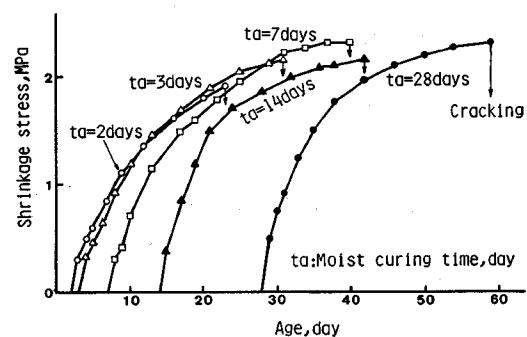


Fig. 8 Change of shrinkage stress versus age, Exp. D.

このように、養生日数によるひびわれ傾向が一定でない原因として、時間に伴って変化する収縮ひずみ速度の差異が考えられる。各乾燥日数における自由収縮ひずみのひずみ速度は、Fig. 9 に示すように、乾燥 1 日目は明らかに養生日数に比例して大きくなっているが、数日後にはその関係が逆転しており、ひびわれが発生するまで

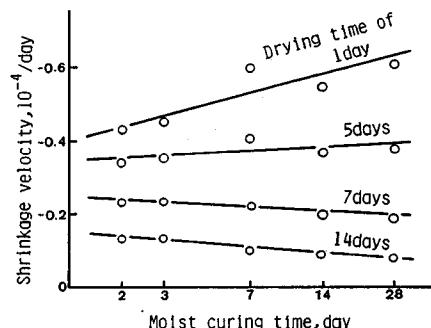


Fig. 9 Variations of free shrinkage velocity with moist curing time and drying time, Exp. D.

の期間の大半において、養生日数が長いほど収縮ひずみ速度が小さくなる傾向が認められる。すなわち、初期に比較的大きな収縮応力が生じるとしても、以後の収縮ひずみ速度が小さければ応力増分が小さくなること、ならびに初期の応力の大きさに応じてクリープひずみも大きくなり、ひずみ速度が小さな時点での応力緩和が大きくなることなどが、ひびわれ性状に影響すると考えられ、その傾向は Fig. 8 にも示されている。

これらのことから、乾燥収縮ひびわれの性状を検討する場合、乾燥開始時における弾性係数および収縮ひずみ速度に加えて、それ以降の収縮ひずみ速度の変動も考慮した解析を行う必要があると考えられる。

(5) 用心鉄筋の影響²⁰⁾

Fig. 10 に、実験 E の拘束鉄筋 $\phi 22$ の場合について、用心鉄筋を有する供試体（有筋供試体）と用心鉄筋を有しない供試体（無筋供試体）の拘束収縮ひずみの経時変化を示す。有筋供試体は、無筋供試体に比べて同じく早い時期にひびわれが発生し、また拘束収縮ひずみも無筋供試体のそれに比べて小さく、拘束度が大きくなっていることが示されており、用心鉄筋はひびわれ発生の防止に何ら効果的な役割を果たさないといえる。しかしながら、ひびわれ発生後の拘束収縮ひずみには用心鉄筋の有無による顕著な差がみられ、無筋供試体では 0 付近まで急減しているのに対して、有筋供試体ではわずかしか減少していないことから、拘束が開放されていない、すなわち、拘束により生じた引張力を鉄筋が負担していると考えられ、用心鉄筋は、ひびわれ発生後の性状に明らかに影響するといえる。

Fig. 11 にひびわれ幅の経時変化を示すが、用心鉄筋の有無による顕著な差異が認められ、有筋供試体のひびわれ幅は、無筋供試体のそれに比べてかなり小さく、日数の経過に伴う増加もわずかであり、用心鉄筋の配置がひびわれ幅の制御に対して十分有効であることがわかる。

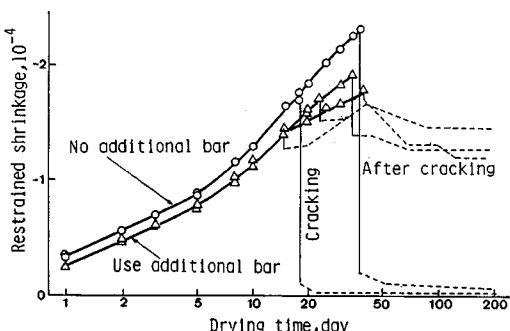


Fig. 10 Change of restrained shrinkage versus drying time, Exp. E.

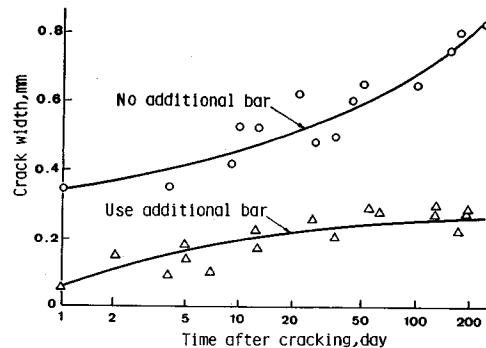


Fig. 11 Difference of crack width according to the use of additional bar, Exp. E.

したがって、鉄筋コンクリート部材における鉄筋は、ひびわれ発生以前においては拘束材とみなして解析を行い、発生後では引張力に対する補強材として解析するのが妥当であると考えられる。

4. 乾燥収縮ひびわれの発生条件

これまでに報告されているコンクリートの乾燥収縮ひびわれが発生する条件としては、

- ① 自由収縮ひずみがひびわれ限界値を越える²¹⁾,
- ② 拘束引張ひずみが伸び能力を越える^{22), 23)},
- ③ 収縮応力が引張強度を越える^{24), 25)},

の 3 説があるが、いずれも限られた条件内の実験結果から導かれたものであり、いまだ明確な結論とするに至っていない。そこで、ここでは新たに行った本実験結果を用いて、ひびわれ発生の条件について多面的な考察検討を行うものとする。

まず、自由収縮ひずみと乾燥収縮ひびわれの関係については、前章で、他の種々要因もひびわれ性状に顕著に影響するため、自由収縮ひずみだけで検討するのは適切

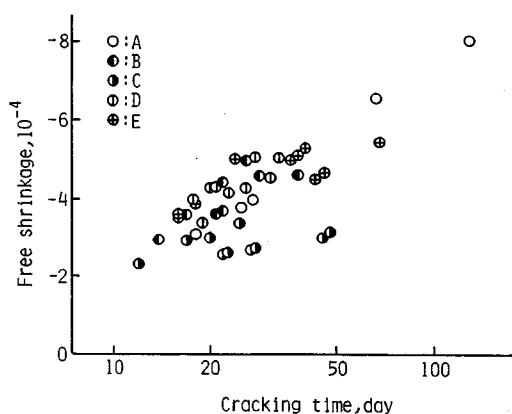


Fig. 12 Amount of free shrinkage at the time when shrinkage cracking occurs.

でないことを述べた。ひびわれ発生時の自由収縮ひずみについても、Fig. 12 に示すように、その値は 3×10^{-4} 以下から 8×10^{-4} まで大きくばらつき、また、ひびわれ発生日数が同じ場合でも約 $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ のばらつきがみられ、ひびわれ限界値の存在あるいは時間との有意な相関性は認められない。このことからも、自由収縮ひずみの値だけでひびわれ発生を判断するのは適切でないと考えられる。

次に、ひびわれ発生時の拘束引張ひずみの値は、コンクリートの伸び能力に関係し、しかも収縮応力を長時間受けた後のひずみであるため、時間あるいはクリープの影響を考慮した伸び能力に関係するとされている。この伸び能力について、Thomas¹⁰⁾、仕入²²⁾、柿崎²³⁾および波木¹⁸⁾らはそれぞれ、 $2.5 \sim 3.5 \times 10^{-4}$ 、 $3 \sim 4 \times 10^{-4}$ 、 $3 \sim 5 \times 10^{-4}$ および $3.2 \sim 4.5 \times 10^{-4}$ の値を報告している。

しかしながら、ひびわれ発生時の拘束引張ひずみは、Fig.13に示すように、ひびわれ限界値あるいは時間との有意な相関性が認められないとともに、 $1 \sim 3.5 \times 10^{-4}$ の範囲内にばらつき、ほとんどが前述の伸び能力以下の値となっている。

これは、前述の伸び能力が、一定応力下の引張クリープ試験の破壊時に得られた値であるのに対して、ひびわれ発生時の拘束引張ひずみは、乾燥収縮ひずみの増加と付加的なクリープの影響により、時間的に変動する応力下の値であり、破壊に至るまでの応力状態およびクリープの影響程度が異なるために、差異が生じたと考えられる。また、コンクリートの伸び能力として、変動応力下の終局引張ひずみ、あるいはひびわれ近傍の局所的な引張ひずみを適用するのはかなり難しく、したがって、伸び能力によって乾燥収縮ひびわれ発生を検討することは実用的でないように思われる。

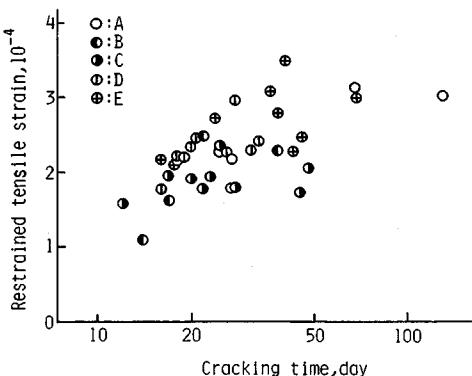


Fig. 13 Amount of restrained tensile strain at the time when shrinkage cracking occurs.

次に、ひびわれ発生時の収縮応力を、引張強度（割裂引張強度） E_s と比較して Fig. 14 に示す。いずれの場合

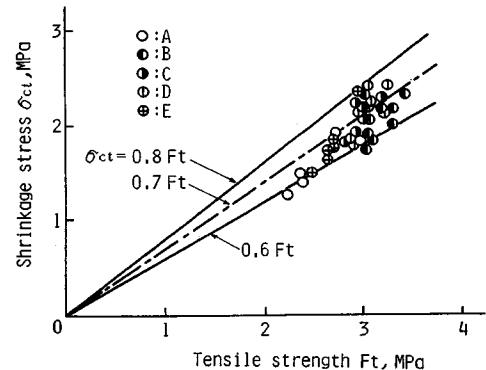


Fig. 14 Relationship between tensile strength and shrinkage stress at the time when shrinkage cracking occurs.

も引張強度よりかなり小さな値となっているものの、その相関性は高く、各要因あるいはひびわれ発生日数によらず引張強度のほぼ0.6~0.8倍の値を示している。同様の傾向は、鈴木²⁶⁾および飛坂¹⁹⁾の実験においても得られている。このことから、前述の③の条件を用いることは、ひびわれ発生を判断する際、危険側になると考えられる。

ところで、この収縮応力は、短時間強度試験下の応力速度に比較してきわめて遅い速度で増加し、かつ引張クリープの影響を受けることになる。したがって、強度に及ぼす荷重速度ならびに荷重履歴の影響²⁷⁾を考慮すれば、限界応力が短時間載荷試験で得られる引張強度より低下するのは当然であると考えられる。また、強度やひずみのばらつき、あるいは各要因による拘束性状の差異を考慮すれば、Fig. 14 にみられる相関性はきわめて高いものであることが考えられる。

そこで、割裂引張強度を F_t として、Fig. 14 に一点鎖線で示す関係式。

を、乾燥収縮ひびわれ発生条件として提案する。

5. 収縮応力解析および乾燥収縮ひびわれの予測

前章までに、コンクリートの自由収縮ひずみのみならず、弾性係数、引張強度およびクリープひずみ等の力学的特性を適切に考慮すれば、乾燥収縮ひびわれに及ぼす諸要因の影響を、定量的に評価した応力解析が行い得ることを示唆した。また、ひびわれ発生を論じるには、収縮応力と引張強度の比率を用いるのが適当であることも述べた。そこで、以下に収縮応力解析法²⁸⁾を示し、かつひびわれ発生を式(3)によって予測することの妥当性について検討してみる。

コンクリートの諸物性は、時間とともに変化し、またその変化する速度も拘束収縮性状に影響する。これらの

影響を適切に考慮して応力解析を行うには、適当な時間間隔 Δt 間で生じる応力増分を求め、これを段階的に数値積分する必要がある。Neville²⁹⁾は、この応力増分が、時間間隔 Δt の中間で集中して生じると仮定することにより、時間 t_i における応力増分および弾性係数を、それぞれ $\Delta\sigma_i$ および $E_{c,i}$ とし、さらに時間 t_i で載荷された持続荷重による時間 t_i ($t_i \geq t_j$) までのクリープ係数を $\phi_{i,j}$ として、時間 t_i におけるひずみ ε_i を次式で与えている（符号は引張を正とする）。

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^i \frac{\Delta\sigma_j}{E_{c,j}} (1 + \phi_{i,j}) \quad (4)$$

著者らは、上式における ε_i は拘束引張ひずみ $\varepsilon_{R,i}$ ($= \varepsilon_{s,i} - \varepsilon_{f,i}$) に相等しく、また、収縮応力 $\sigma_{ct,i}$ と拘束収縮ひずみ $\varepsilon_{s,i}$ との間に式（1）の関係が成立するとして、Neville の方法を拡張した次式により収縮応力の解析を行った。

$$\sigma_{ct,i} = \frac{-\sigma_{ct,i-1}K_{i,i} + \varepsilon_{f,i} + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\sigma_{ct,j}K_{i,j}}{\frac{1}{E_{c,i}} \left(1 - \frac{1}{a_i}\right) - K_{i,i}} \quad (5)$$

$$\Delta\sigma_{ct,j} = \sigma_{ct,j} - \sigma_{ct,j-1}$$

$$K_{i,i} = (1 + \phi_{i,i-1/2}) / E_{c,i-1/2}$$

$$a_i = \frac{1}{1 + E_{c,i}A_c/E_R A_R}$$

$$E_{c,i-1/2} = E_{c,28} (f(t'_i) + f(t'_{i-1})) / 2$$

$$f(t') = \begin{cases} \sqrt{0.67 \log(t')} + 0.0304 & t' \leq 28 \\ \sqrt{t'/(7.49 + 0.73 t')} & t' \geq 28 \end{cases}$$

ここに、 a_i ：弾性材 (E_R, A_R) で拘束されたコンクリートの剛性材分担率、 $E_{c,28}$ ：材令 28 日における弾性係数、 t' ：材令 (日)

自由収縮ひずみ $\varepsilon_{f,i}$ は、定数 a, b を最小二乗法により求めた、次の実験回帰式により算定した。

Table 3 Experimental constants used to estimate shrinkage stresses and cracking time.

No.	Young's modulus, Ec, 28 10^4 MPa	Tensile strength, Ft, 28 MPa	Constants of eq.(6)	
			a	b
A1-A5	2.43	2.29	4.11	0.093
B1	2.96	2.94	3.17	0.128
B2	2.57	2.69	2.34	0.136
B3	2.62	2.48	2.36	0.116
B4	2.91	2.75	2.99	0.126
C1			7.42	0.207
C2			6.30	0.187
C3	2.75	2.70	5.21	0.170
C4			4.46	0.149
C5			3.71	0.135
D1			2.03	0.133
D2			1.92	0.132
D3	2.79	3.14	1.32	0.159
D4			1.43	0.179
D5			1.23	0.188
E1, E2	2.77	2.88	3.11	0.142
E3, E4	2.84	2.86	2.47	0.124

$$\varepsilon_{f,i} = -t_i / (a + bt_i) \quad (\times 10^{-4}) \quad (6)$$

これらの式に用いた実験定数を Table 3 に示すが、実験 C の自由収縮ひずみには、表面と断面中心で測定した値の平均を用いている。また、クリープ係数 $\phi_{i,j}$ は、配合、部材寸法、環境湿度および載荷時材令などクリープに影響する主要な因子を取り入れ、かつ電算機が利用しやすい簡便な形の関数式で提案されている、阪田の予測式¹¹⁾を用いて算定した。

Fig. 15 に、本実験で用いた 23 条件の供試体それぞれにおける収縮応力の実測値と、時間間隔を 3 日として算定した計算値を比較して示す。図にみられるように、計算値がやや大きくなっているものの各条件によるばらつきはなく、ほぼ妥当な値を推定しているといえる。

また、計算値の方が大きくなる傾向は、種々の条件あるいは応力の大きさによらないことから、クリープ係数の予測式に含まれていない要因、たとえば骨材やセメント等材料の性質、が影響したことによるものと考えられる。この材料の性質の差異は、クリープひずみと自由収縮ひずみがほぼ線形関係にあることから、自由収縮ひずみにも同程度に影響することが予想される。そこで、自

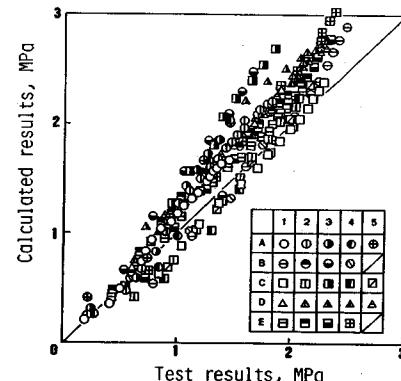


Fig. 15 Estimation of shrinkage stress.

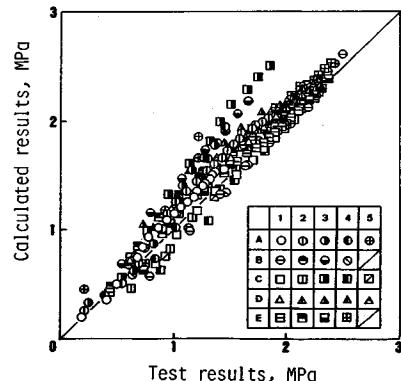


Fig. 16 Estimation of shrinkage stress with the modified creep prediction method.

由収縮ひずみの実験値と、阪田¹¹⁾が同様に提案している予測値との比率を各条件ごとに求め、その比率で補正したクリープ係数を用いて解析を行ったところ、Fig. 16 に示すように、ほとんどの場合において十分な精度の推定結果が得られた。

したがって、収縮応力のような漸増応力負荷条件下では、たとえ応力比が 0.4 以上高い応力を受ける場合であっても、ひびわれが発生する応力程度まではクリープひずみが応力に比例するとして、式(5)により十分的確に収縮応力を推定できるといえる。

次に、この手法を用いて算定した収縮応力が、式(3)の条件を満足する時点をひびわれ発生日数の予測値として求め、Fig. 17 に実験結果と比較して示す。このとき、強度変動の影響を考慮して、収縮応力と引張強度の比が 0.8 となる時点（予測範囲の上限）もあわせて示しているが、図中の破線は、収縮ひずみ速度やクリープの影響によって、応力比が 0.8 まで達しない結果が得られたものを表わしている。

図にみられるように、いずれの場合も実験値に近い値を予測していることが認められ、強度、クリープ予測式および各要因の影響度のばらつき等を考慮すれば、工学的に十分な精度でひびわれ発生日数を推定していると考えられ、式(3)のひびわれ発生条件、ならびに式(5)の収縮応力解析方法の妥当性が確認できる。

さて、実設計では、乾燥収縮ひびわれが発生するか否かを判断することがきわめて重要となるが、本解析方法は、その的確な予測に大いに寄与するものと思われる。

6. 結 論

外的に線拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひびわれ性状について、実際にひびわれを発生させた系統的な実験結果に基づき、種々要因の影響をコンクリートの諸物

性と関連づけて定量的に考察するとともに、ひびわれ発生の限界条件ならびに発生予測の解析方法を提案し、その妥当性の検討を行った。得られた成果を要約すれば、次のようにになる。

(1) 拘束度が 30~60% の範囲内において、収縮応力は、拘束度にはほぼ比例して増加する。これから、適切にクリープ特性を考慮することにより、収縮応力の評価は、拘束度の影響を加味した準弾塑性的な取り扱いが可能である。

(2) 乾燥収縮ひびわれには、自由収縮ひずみのほか、弾性係数、引張強度およびクリープひずみ等のコンクリートの諸物性も影響する。このため、配合のひびわれ性状に及ぼす影響については、これら 4 つの性質のひびわれに寄与する効果を組み合わせて論じる必要がある。

(3) 30 cm の厚さを有するコンクリートにおいても、乾燥収縮拘束により貫通ひびわれが発生する。また、部材厚さによるひびわれ発生日数の変化は、自由収縮ひずみの変化に比べてわずかである。これは、部材厚さの増加によって、自由収縮ひずみが減少すると同時に、クリープひずみも減少するため、クリープによる収縮応力の緩和が小さくなることに起因する。

(4) 養生日数がひびわれ性状に及ぼす影響を把握するには、乾燥開始時以降の収縮ひずみ速度の変化も十分考慮して、収縮応力解析を行う必要がある。

(5) コンクリート内の鉄筋は、ひびわれ発生以前においては拘束材とみなして、発生以後においては、引張力に対する補強材として解析するのが適当である。

(6) 乾燥収縮ひびわれ発生時における、自由収縮ひずみおよび拘束引張ひずみの値には、一定のひびわれ限界値、あるいは時間との有意な相関性が認められない。

(7) 乾燥収縮ひびわれ発生時において、収縮応力の引張強度に対する比は、ほぼ一定の範囲内にある。この

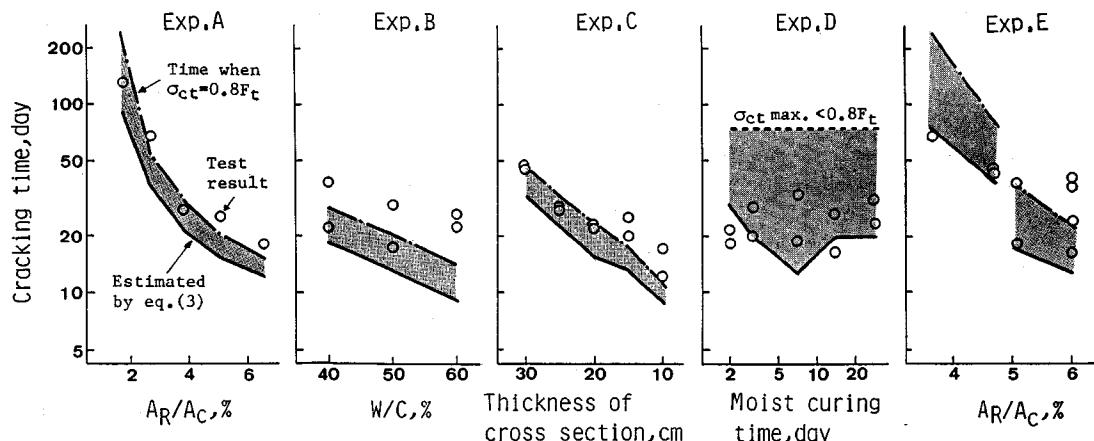


Fig. 17 Predictions of time when shrinkage cracking occurs.

ことから、式(3)を、線拘束状態下のひびわれ発生条件として提案する。

(8) 収縮応力のような漸増応力負荷条件下では、たとえ応力比が0.4以上の高い応力を受ける場合であっても、ひびわれが発生する応力程度までは、クリープひずみが応力に比例するとして、式(5)により十分的確に収縮応力を推定できる。

(9) 式(5)に基づく応力解析法と式(3)の発生条件により、工学的に十分な精度で、乾燥収縮ひびわれの発生を予測できる。

謝 辞：本研究を行うにあたって、元九州大学教授徳光善治先生より貴重なご助言を頂き、また、岡山大学助教授 阪田憲次先生より有益なご助言と貴重な資料のご援助を頂いた。ここに深く謝意を表し、厚く御礼申し上げます。

なお、本研究にあたっては、文部省科学研究費補助金を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) たとえば、日本セメント技術協会収縮委員会：セメントコンクリートの収縮に関する文献抄録集、収縮委員会報告H-9、1966年3月。および日本コンクリート工学協会ひびわれ調査委員会：コンクリートのひびわれ調査・補修指針、日本コンクリート工学協会、pp.233～248、1980.に、数多くの既往の研究が紹介されている。
- 2) 馬場明生：鉄筋コンクリート建物のひびわれと対策、井上書院、pp.37～74、1982。
- 3) 建築業協会：コンクリートのひびわれ防止対策、鹿島出版会、pp.9～24、1979。
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひびわれ対策（設計・施工）指針案・同解説、日本建築学会、pp.35～53、1978。
- 5) 仕入豊和・青柳征夫・川瀬清孝：コンクリートのひびわれ試験方法（案）—乾燥収縮ひびわれ・温度ひびわれ—、コンクリート工学、Vol.23、No.3、pp.40～51、March, 1985.
- 6) 牧角龍憲・徳光善治：コンクリートの乾燥収縮拘束とひびわれ発生に関する研究、セメント技術年報34、pp.222～225、1980年12月。
- 7) Carlson, R. W. : Attempts to Measure the Cracking Tendency of Concrete, Proc. of ACI, Vol. 36, pp. 533～540, June 1940.
- 8) 渡辺幸三郎ほか：モルタルのひびわれとクリープに関する一考察、セメント技術年報17、pp.155～159、1963。
- 9) 池永博威・大島久次：コンクリートの乾燥収縮に伴うひびわれ発生限界に対する水セメント比、使用単位セメント量に関する研究、日本建築学会論文報告集、No.217、pp.11～20、1974年3月。
- 10) Thomas, F. G. : Cracking in Reinforced Concrete, The Structural Engineer, pp.298～320, July 1936.
- 11) 阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測式の確立とその設計への適用に関する研究、昭和60年度科学研究費補助金研究成果報告書、1986年3月。
- 12) Hansen, T. C. and Mattock, A. H. : Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete, J. of ACI, Vol. 63, No. 2, pp. 267～290, Feb. 1966.
- 13) 村田二郎・岡田 清：フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ、山海堂、pp.143～145、1981。
- 14) ACI-209 Committee : Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI Manual of Concrete Practice Part 1, 1985.
- 15) 小阪義夫・森田司郎：鉄筋コンクリート構造、丸善、pp.227～229、1975。
- 16) 近藤 実：モルタルのひびわれ傾向における2,3の要因、セメント技術年報16、pp.200～205、1962。
- 17) 鈴木計夫ほか：碎石および人工軽量骨材コンクリートの乾燥収縮ひびわれ性状に関する研究、日本建築学会大会学術講演概要集、pp.49～50、1981。
- 18) 波木 守・大塩 明・木内 晃：コンクリートの引張変形の研究(第7報・完)、小野田研究報告、Vol. 16, No. 62, pp. 21～33, 1964.
- 19) 飛坂基夫：コンクリートの収縮応力とひびわれ、続コンクリートのひびわれ総合資料集、中部経営開発センター出版部、pp.189～201、1979。
- 20) 牧角龍憲・松下博通：コンクリートの収縮ひびわれ補強鉄筋量に関する研究、セメント技術年報37、pp.406～409、1983。
- 21) 大野和男：モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究、北海道大学工学部研究報告、No.9、pp.49～110、1953。
- 22) 仕入豊和：コンクリートのキレツに関する研究、日本建築学会関東支部学術研究発表会、pp.53～56、1961。
- 23) 柿崎正義：人工軽量骨材コンクリートの収縮ひびわれ発生に関する研究、セメントコンクリート、No.317、pp.17～26、1973。
- 24) Pickett, G. : Shrinkage Stresses in Concrete Part 2, Proc. of ACI, Vol. 42, pp. 361～393, 1946.
- 25) 佐治泰次・麻生 実：拘束状態にあるモルタルに生ずる乾燥収縮応力度についての実験的研究、日本建築学会論文報告集、No.101、pp.1～6、1964年8月。
- 26) 鈴木計夫ほか：コンクリートの乾燥収縮ひびわれに及ぼす単位水量および乾燥開始材令の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.491～492、1978年9月。
- 27) 清水昭之：コンクリートの引張クリープ、コンクリート工学、Vol. 21, No. 6, pp. 4～13, June 1983.
- 28) 徳光善治・牧角龍憲：乾燥収縮ひびわれを予測する収縮応力解析方法、第6回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp.429～433、1984。
- 29) Neville, A. M. : Creep of Concrete, Plain, Reinforced and Prestressed, North-Holland, pp. 453～463, 1970.

(1986.5.16・受付)