

# コンクリートの引張クリープに関する研究

西林新蔵\*・木山英郎\*・阪田憲次\*\*・井上正一\*・北村安朗\*

(1976年5月31日受理)

## A Study on the Tensile Creep of Concrete

By

Shinzo NISHIBAYASHI\*, Hideo KIYAMA\*, Kenji SAKATA\*\* and  
Shoichi INOUE\*, Yasuo KITAMURA\*

(Received, 31st of May, 1976)

Creep in tension is of interest in estimating the possibility of cracking due to shrinkage or thermal stresses, in calculation of tensile stresses in prestressed concrete beams, and in the design of water-retaining structures. The behavior in tension is also relevant in evaluating various hypotheses of the mechanism of creep.

In order to evaluate quantitatively the characteristics of creep, it is necessary to examine experimentally the creep under different stress state, that is, compressive, tensile, flexural and multiaxial stresses and alternating loading, moreover to consider theoretically the mechanism of creep.

A series of studies have been planned to clarify the behaviours of concrete creep. The present paper describes experimental results and investigations on the creep behavior of concrete subjected to high tensile sustained stress. It includes a statistic treatment being tried to analyze the tensile creep limit (critical stress-strength ratio) and the time to tensile creep rupture occurring (time failure).

### 1 ま え が き

一定持続応力下におけるコンクリートは時間とともにひずみが増加し、またこの状態で応力を除去すると時間とともにひずみはある程度まで回復する。このようにコンクリートに生ずるひずみは、外荷重による瞬間的な弾性ひずみ、乾燥収縮およびクリープによるひずみの和で表わされる。

コンクリートのクリープおよび乾燥収縮は、構造部材を考える場合、その力学的挙動に対してかなり大きな影響をおよぼし、例えば PS コンクリートにおいてはク

リープおよび乾燥収縮によってプレストレスが減退し、実際の設計においては有効プレストレスが問題となる。その他に、構部部材の変形量、不静定構造物に生ずる不静定力、合成断面のはりにおけるクリープ・収縮差応力等にもかなりの影響が現われることが認められている。このようにコンクリートのクリープは構造物の力学的性質に種々の影響を与えるので、この種の塑性変形特性を十分に把握しておくことは、構造物を設計する上で極めて重要なことである。

つぎに引張応力下におけるクリープに限定して考えて

\* 土木工学科 Department of Civil Engineering

\*\* 岡山大学 Okayama University

みると、引張クリープは部材のたわみやひびわれなどの構造物の耐力と密接な関係があるにもかかわらず、その現象の把握が極めて困難であることの原因から、圧縮クリープに関する研究に比べると実験例はるかに少なく、これがまたクリープのメカニズムを解明する上での妨げともなっているといえるのである。しかもコンクリート部材の設計における引張クリープの評価は、Davis-Grauvilleの法則、すなわち“持続応力がクリープ限を越えるような高応力でない限り、コンクリートのクリープひずみは応力に比例し、圧縮に対しても引張に対しても比例定数は相等しい。”をそのまま適用しているのが現状である。

## 2 引張持続応力下におけるクリープ

引張応力下におけるクリープ（以下単に引張クリープという）は、乾燥収縮や温度応力によるひびわれの発生を予想したり、PSコンクリートはりの引張応力の計算さらには貯水槽のように交番応力が作用する構造物の設計において重要であるばかりでなく、引張クリープの挙動の把握はクリープのメカニズムを解明するためにも極めて有力な手段になるとされている。

コンクリート供試体に純軸引張力を作用させることは非常に困難であり（従って、コンクリートの引張強度は割裂試験値で評価されている）、しかもコンクリートの引張強度が極めて低いので、引張クリープにおいては持続荷重（応力）を小さく抑える必要があり、そのために測定される変形（ひずみ）が小さく、ひずみを正確に測定することが困難となる。さらに、載荷中コンクリートが乾燥するとクリープひずみの数倍にも達する乾燥収縮ひずみが同時に生じ、クリープひずみの値に大きな誤差を生ずる結果にもなる。

Glanville & Thomas<sup>1)</sup>は、持続応力の大きさが等しければ、たとえ載荷中に湿度条件が変わっても、引張クリープと圧縮クリープの大きさが等しく、さらに U.S. Bureau of Reclamation<sup>2)</sup>のマスコンクリートに対する試験においても、終局引張強度の $\frac{1}{3}$ 以下の応力であれば両者はほぼ等しいことを確めている。Davis<sup>3)</sup>は、載荷初期における引張クリープ速度は同一応力下の圧縮の場合よりも大きい、約1ヶ月の載荷後には引張クリープ速度がかなり減小することを確め、このことから長期における引張クリープは圧縮クリープよりも小さくなると予想している。一方、Illston<sup>4)</sup>は、初期の引張クリープ速度は圧縮よりもかなり大きいこと、さらに引張

応力による瞬間弾性ひずみと除荷時の回復ひずみは、同一圧縮応力の場合よりも大きいことに注目している。

Mamillan<sup>5)</sup>は、比クリープ（単位応力当りのクリープ）で引張と圧縮を比較し、R.H.50%におけるニートセメントペーストの引張比クリープは、圧縮のその約5倍にも達すると報告し、応力～強度比（持続応力と終局強度との比、応力比）が0.5までは、持続応力と引張クリープひずみとは比例関係にあることを明らかにしている。

なお、圧縮クリープにおける比例限界は、応力比でほぼ0.6であることが多くの研究者によって確められているので、応力比の観点からのみクリープを考えれば、引張と圧縮との間には本質的な差異はないものと判断できる。

環境湿度条件が引張クリープにおよぼす影響については、Glanville<sup>1)</sup>、Davis<sup>3)</sup>、Illston<sup>4)</sup>らは、湿度が低くなっても実際には引張クリープにほとんど影響をおよぼさないとの見解を表明しているのに対し、Ruez<sup>6)</sup>は引張クリープにおいても圧縮クリープの場合と同様に湿度が低下するとクリープひずみが著しく増大するとし、さらに Gvozdev<sup>7)</sup>は定性的には両者は全く同じであるが、定量的にはかなり異なる筈であると述べている。

つぎに Wajda & Holloway<sup>8)</sup>は、配合比=1:6:1、 $w/c=0.55$ のコンクリートを材令28日まで水中養生した後、応力比=0.33の持続応を与えて温度29°Cの空气中に放置した場合の引張クリープは、載荷後60日で $40 \times 10^{-6}$ に達するが、その後のクリープの増加は非常に僅かであると報告している。また、L' Hermite<sup>9)</sup>は、16kg/cm<sup>2</sup>（応力比：0.46）および26kg/cm<sup>2</sup>（0.75）の持続応力載荷後3日における引張クリープひずみは、それぞれ $9 \times 10^{-6}$ 、 $30 \times 10^{-6}$ であったと報告している。

西林<sup>10)</sup>は、人工軽量骨材コンクリートのクリープを対象とした一連の研究の中で引張クリープについても言及している。それによると、軽量コンクリートの引張クリープは普通コンクリートのそれよりもかなり大きく、載荷開始材令によっても若干異なるが、前者は後者の1.8～2.5倍にも達する。また、環境条件（湿度）の引張クリープにおよぼす影響は、圧縮クリープの場合と同様に軽量コンクリートの方が大きく現われるが圧縮の場合ほど著しくないと考えられるとしている。

以上、引張クリープに関する研究の概要について述べたが、これら研究のほとんどは、実験上最も重要な引張クリープ試験装置や使用したコンクリートの配合につい

て詳しく言及されていない。従って、引張クリープの挙動をさらに詳しく究明するためには、コンクリートの配合はもち論のこと、応力比(応力~強度比)、載荷時材令、載荷期間、環境湿度条件などの要因を種々組み合わせた広範囲でかつ系統的な研究を行なう必要があると考えられる。また、ひびわれに対する抵抗性を評価するためには、高引張持続応力下における引張クリープの挙動、いい換えると引張クリープ限の確認が重要であり、さらに環境湿度条件の引張クリープにおよぼす影響の詳細な検討は、クリープのメカニズムを解明するための極めて有力な手段になりうるものと考えられる。

応力分布を考えれば、曲げの引張縁に生ずるクリープと引張クリープとは本質的に同じの筈であるが、実際には両者はかなり相違するとの研究結果が多い。

U.S. Army Engineering<sup>11)</sup>の試験結果によると、純引張クリープは曲げ供試体の引張縁に生ずるクリープよりも小さいことを明らかにし、さらにLe Camus<sup>12)</sup>は引張縁と圧縮縁に生ずるクリープを比較し、両者の乾燥収縮を補正したクリープは同じであるが、持続応力載荷後1ヶ月で引張縁のクリープ速度はほとんど0になると報告している。Davis<sup>3)</sup>の研究は、引張縁のクリープは圧縮縁のそれよりもやや大きく、さらに両縁のクリープにおよぼす湿度の影響は異なり、乾燥による圧縮縁クリープの増加は引張縁のその約3倍にも達するとしている。また、Oberti<sup>13)</sup>は、載荷による変形と全変形との比は載荷期間が増加するにつれて減少し、7日で5.6、28日で4.7、4ヶ月で4.0になると報告している。一方、西林<sup>10)</sup>は、曲げクリープの大きさは、コンクリートの種類、環境条件、載荷時材令などによって異なり、軽量コンクリートにおいては載荷時材令や環境条件にかかわらず引張側クリープの方が大きく現われる。この傾向は普通コンクリートの若材令載荷の場合にも認められるが、28日載荷では両クリープ間にほとんど差が認められない。また、軽量コンクリートのクリープは、圧縮縁、引張縁、載荷時材令のいずれの場合においても普通コンクリートよりも大きいと報告している。なお、これらの原因としては、骨材の吸水を含めたコンクリート中の水分は軽量コンクリートの方が大きく、クリープのメカニズムを解明する際に有力な手がかりとなっている Seepage 効果が、軽量コンクリートと普通コンクリート、はりの圧縮側と引張側、持続応力載荷時材令などによってそれぞれ異なることが考えられると報告している。

曲げによって生ずる引張縁のクリープは、純引張ク

リプ現象の究明やクリープのメカニズムの解明にとって大いに参考になるが、引張縁(側)クリープの解析に当ってはひずみ勾配や両クリープの違いによる中立軸の移動なども考慮する必要があると考えられる。

### 3 クリープ破壊

一般にコンクリートのクリープ破壊特性は、金属材料と同様の傾向を示し、時間の経過とともに遷移クリープ、定常クリープ、加速クリープの三段階を経て破壊に至ることが知られている。<sup>14)15)</sup>

これら三段階のうち、遷移クリープは時間的に最も大きい部分を占めており、曲線の形状は低持続応力状態のクリープ曲線に類似し、かつ同一測定条件のもとではかなり一致したものとなる。定常クリープにおけるクリープ速度は一定かつ最小で、クリープ量も他の遷移、加速クリープ部に比してかなり小さく、場合によってはほとんど観測できないこともある。阪田<sup>16)</sup>は、定常クリープ速度と破壊までの時間とは密接な関係があり、定常クリープ速度が大きくなるに従って破壊までの時間が短くなると報告している。

加速クリープはクリープ破壊曲線の最終段階に現われ、クリープ速度が一定かつ最小値から次第に増加して破壊に至る。この加速クリープは、同一測定条件のもとでも個々の供試体によって著しく異なるので、これを系統的に取扱うことは極めて困難である。また、加速クリープの挙動は、使用する材料、とくに骨材の種類によって著しく異なり、阪田<sup>16)</sup>は、普通コンクリートの加速クリープひずみは軽量コンクリートのそれに比して著しく大きく現われるとしている。

上で述べた研究は全て圧縮応力下におけるもので、引張クリープ破壊についての研究は非常に少なく、次に紹介する AI-Kubaisy & A.G. Young<sup>17)</sup>の研究の他には二、三を数えるに過ぎない。彼等は、引張クリープの破壊時間と応力比との間には相関関係が存在し、引張クリープ破壊は滑らかでかつ球形に近い骨材近傍に存在する潜在的なボンドクラックによるよりも、セメントマトリックス中のひびわれの成長に支配されるとしている。

### 4 試験概要

#### (1) 研究目的

本研究は、コンクリートのクリープに関する一連の研究プロジェクトのうち、引張持続応力下におけるクリープ、とくにクリープ破壊を起すような高応力下における

クリープ現象を把握するために計画した。さらに本研究においては、引張クリープひずみの絶対値を単純に比較することよりもむしろ、引張応力下におけるクリープ限の有無、クリープ破壊を生ずるまでに経過した時間のばらつきを統計的に処理する方法、クリープ破壊におよぼす骨材種類の影響などを考察することを主目的としている。

(2) 使用材料およびコンクリートの配合

試験に使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、骨材は普通骨材（碎石および海砂）および非造粒型人工軽量骨材（ウベライト）である。配合設計条件は、普通コンクリートにおいては、28日目標強度：360kg/cm<sup>2</sup>、単位セメント量：350kg/m<sup>3</sup>、スランプ：5±1cmとし、軽量コンクリートにおいては単位セメント量とスランプ値を普通コンクリートと同じを選んで、Table-Iに示すように配合を決定した。

Table I The mix proportions of concrete

Kinds of concrete	Slump (cm)	W/C (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	s/a (%)	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	Admixture (P <sub>z</sub> -8)
Normal-weight	5.0±1	43	350	150	43	808	1082	C×0.25%
Light-weight	5.0±1	44	350	154	47	572	642	C×0.25%

(3) 供試体

供試体は、コンクリート打設後24時間恒温恒湿室内に放置した後脱枠し、以後材令28日まで標準水中養生を施した。クリープ試験用供試体は、材令28日に供試体の両端約7mmをダイヤモンドカッターで切断し（供試体寸法：φ100×186mm）、以後試験を開始するまで実験室内において気中養生を施した。なお、クリープ試験に先だて行なった引張強度試験ならびに材令28日、3ヶ月および6ヶ月における強度試験にはφ10×20cmの標準供試体を用いた。

(4) 試験方法

試作した引張クリープ試験装置を Fig. 1 に示す。本試験装置は、著者の一人がかかって樹脂の引張試験装置として考案したものをコンクリート用に改良したものである。コンクリート供試体はエポキシ樹脂（アラルダイト）を用いて鋼製載荷板に接着し、つぎに供試体の縦方向対角線上に2枚の電気抵抗抗線ひずみ計を貼布し、荷重時

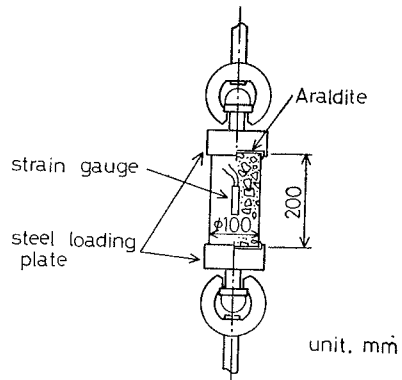


Fig. 1 Apparatus for the tensile creep of concrete

に検出したひずみを動ひずみ計で増幅して XY レコーダーに自記させた。引張持続応力の大きさは静的引張強度の75~95%とし、REH型電子管平衡式万能試験機の定荷重装置を用いて持続荷重した。さらに、XYレコーダーに記録されたひずみ~時間曲線を観察し、そのひずみが時間的に一定値に収れんしたものについては、以後応力を持続させても破壊に至らないものとみなして実験を打切った。

5 試験結果とその考察

コンクリートの各材令における強度と弾性係数を Table-II に、また引張クリープ試験結果を Table-III に示す。

(1) クリープ破壊時間の確率的処理法

コンクリートのクリープ破壊時間は、疲労寿命（疲労破壊に達するまでの繰返し回数）と同様に、応力比（応力~強度比）が同一であっても、かなりのばらつきを呈することが従来の研究においても指摘されている通りで

Table II Strengths and elastic moduli

Kinds of concrete	28 days		3 months		6 months	
	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_c$ ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_t$ ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_c$ ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )
Normal-weight	424 (17.3)	3.2 (0.08)	35.0 (0.67)	3.6 (0.45)	453 (4.2)	3.2 (0.06)
Light-weight	237 (21.5)	1.4 (0.04)	29.3 (0.43)	1.4 (0.07)	264 (7.3)	1.3 (0.05)

( ) ; Standard deviation

ある。このばらつきの原因としては、個々の供試体の静的強度のばらつきによるばかりでなく、コンクリートのクリープ破壊の本質的な特性の現われであるとも考えられる。

このような試験結果のばらつきの処理法について以下簡単に述べることにする。

一般に、試験値の観測度数を正規分布に当てはめることができるのは、その度数分布が対称な場合に限られるが、クリープ破壊時間や疲労における繰返し回数のように非対称分布を呈することも多い。しかし、このような場合でも、変数を対数目盛に、度数を普通目盛にとってプロットすると対称分布（対数正規分布）に近づくことが知られている。すなわち、期待累加相対密度を縦軸に対数目盛を横軸にとった対数正規確率紙上では直線になる。

クリープ試験において、一定持続応力載荷開始から破壊までの時間 ( $T$ ) を確率変数にとって、クリープ破壊を一種の確率過程と考えれば、以下のような確率論的取扱いが可能である。

いま、 $m(t)$  を任意の時刻  $t$  において単位時間に破壊が発生する確率と定義し、破壊発生確率密度関数を次式のように表わす。

$$q(t) = P(t < T \leq t + dt). \quad (1)$$

$q(t)$  の累積分布関数を

$$Q(t) = P(T \leq t) \quad (2)$$

とおけば、分布関数

$$P(t) = 1 - Q(t) = P(T > t) \quad (3)$$

は、時刻  $t$  まで破壊が発生しない生存確率を表わすことになる。従って、

$$Q(t) = \int_0^t q(t) dt, \quad Q(0) = 0$$

$$P(t) = 1 - Q(t) = \int_t^\infty q(t) dt, \quad P(0) = 1. \quad (4)$$

さて、時刻  $t$  まで破壊が発生せずにつぎの  $dt$  内にはじめて破壊が発生する確率を、 $Pm(t)dt$  と表わし、Eqs.

(1), (2), (3)を用いて整理すると、

$$Pm(t)dt = -dP = q(t)dt, \quad (5)$$

従って、

$$m(t) = -d(\log P)/dt, \quad (6)$$

となる。

いま、供試体総数を  $N$  とし、時刻  $t$  までに破壊しない供試体数を  $n(t)$  とすれば、 $P(t) = n(t)/N$  で与えられる。そこで、 $\log P = \log n(t)/N$  を時間  $t$  に対してプロットし、その勾配を異符号にしたものが  $m(t)$  を表わすことになる。 $m(t)$  が  $t$  にかかわらず一定であれば、 $P = e^{-m(t)t}$  で表わされ、

$$q(t) dt = -dP = m(t)e^{-m(t)t} dt \quad (7)$$

となるので、破壊発生の平均時間  $T$  は、

$$T = \int_0^\infty t dP = \int_0^\infty tm(t) \exp[-m(t)t] dt = \frac{1}{m(t)} \quad (8)$$

で表わされる。

順序統計量の理論を適用すると、比較的少数の実験結果しか得られない場合であっても、次式から生存確率 ( $p$ ) を求めることができる。

$$p = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (9)$$

ここで、 $p$  は総数  $n$  個のクリープ破壊時間を小さい方から順に並べたときの  $r$  番目の期待値を表わす。

Table III Test results

Normal-weight concrete							Light-weight concrete						
$r$	$E$ ( $\times 10^5$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	$S$ (%)	$\epsilon_i$ $\times 10^{-6}$	$\epsilon_u$ $\times 10^{-6}$	$T$ (min)	$p$ (%)	$r$	$E$ ( $\times 10^5$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	$S$ (%)	$\epsilon_i$ $\times 10^{-3}$	$\epsilon_u$ $\times 10^{-6}$	$T$ (min)	$p$ (%)
1	2.31	95	142	4	0.10	80.0	10	2.87		102		$\infty$	16.7
2	2.48		132	$\infty$	0.25	60.0	11	2.71		108		$\infty$	8.3
3	2.52		130	10	0.67	40.0							
4	2.82		116	$\infty$	2.33	20.0							
1	2.45	90	127	3	0.17	87.5	1	2.61		106	7	2.50	93.3
2	2.35		132	$\infty$	0.33	75.0	2	2.61		106	18	5.67	86.7
3	3.11		100	1	0.50	62.5	3	2.82		98	$\infty$	20.33	80.0
4	2.96		105	$\infty$	1.67	50.0	4	2.82		98	26	42.33	73.3
5	2.96		105	$\infty$	1.83	37.5	5	2.76		100	17	50.00	66.7
6	2.61		119	23	18.00	25.0	6	2.61	80	106	31	77.33	60.0
7	2.93		106	6	35.67	12.5	7	2.68		103	$\infty$	$\infty$	53.3
						8	3.14	88		$\infty$	$\infty$	46.7	
						9	2.76	100		$\infty$	$\infty$	40.0	
						10	2.82	98		$\infty$	$\infty$	33.3	
						11	2.91	95		$\infty$	$\infty$	26.7	
						12	2.63	105		$\infty$	$\infty$	20.0	
1	2.76	85	106	5	0.33	91.7	13	2.45		113		$\infty$	13.3
2	2.62		112	15	0.67	83.3	14	2.45		113		$\infty$	6.7
3	2.62		112	17	2.33	75.0							
4	2.76		106	17	10.33	66.7							
5	2.93		100	10	18.17	58.3							
6	2.55		115	35	24.00	50.0							
7	2.29		108	$\infty$	43.50	41.7	1	2.72	75	95		$\infty$	80.0
8	2.62		112	32	48.00	33.3	2	2.87		90	$\infty$	$\infty$	60.0
9	2.79		105	23	116.00	25.0	3	2.46		105	$\infty$	$\infty$	40.0
						4	2.81	86		$\infty$	$\infty$	20.0	
1	1.13	95	246	$\infty$	0.10	85.1	3	1.06		219	$\infty$	7.42	82.3
2	1.26		220	$\infty$	0.33	71.4	4	1.30		180	—	25.00	76.5
3	1.29		216	14	0.92	57.1	5	1.37		170	58	67.00	70.6
4	1.18		235	73	3.17	42.9	6	1.36		172	$\infty$	126.00	64.7
5	1.46		190	9	5.00	28.6	7	1.36		172	$\infty$	164.00	58.8
6	1.33		209	$\infty$	5.83	14.3	8	1.28	80	182	59	195.0	52.9
1	1.30	90	202	22	0.67	90.9	9	1.45		161	67	200.0	47.1
2	1.31		200	$\infty$	1.33	81.8	10	1.37		170	$\infty$	$\infty$	41.2
3	1.47		178	28	1.50	72.7	11	1.40		167	$\infty$	$\infty$	35.3
4	1.29		204	28	2.58	63.6	12	1.49		156	$\infty$	$\infty$	29.4
5	1.46		180	6	4.67	54.5	13	1.42		164	$\infty$	$\infty$	23.5
6	1.27		206	$\infty$	8.83	45.5	14	1.34		174	$\infty$	$\infty$	17.6
7	1.23		214	$\infty$	13.08	36.4	15	1.27		183	$\infty$	$\infty$	11.8
8	1.34		196	64	23.00	27.3	16	1.39		168	$\infty$	$\infty$	5.9
9	1.34		196	$\infty$	64.00	18.2							
10	1.31		200	44	68.00	9.1							
1	1.32	85	188	$\infty$	0.41	90.0	1	1.40		156	$\infty$	4.17	92.3
2	1.07		232	$\infty$	2.17	80.0	2	1.34		163	$\infty$	22.33	84.6
3	1.30		192	32	2.83	70.0	3	1.17		188	70	145.50	76.9
4	1.27		196	60	7.67	60.0	4	1.47		149	$\infty$	$\infty$	69.2
5	1.10		224	92	14.33	50.0	5	1.58		139	$\infty$	$\infty$	61.5
6	1.24		200	59	23.00	40.0	6	1.34	75	164	$\infty$	$\infty$	53.8
7	1.13		220	35	40.00	30.0	7	1.24		176	$\infty$	$\infty$	46.2
8	1.27		196	64	68.00	20.0	8	1.29		170	$\infty$	$\infty$	38.5
9	1.33		187	$\infty$	$\infty$	10.0	9	1.32		166	$\infty$	$\infty$	30.8
						10	1.20	182		$\infty$	$\infty$	23.1	
						11	1.48	148		$\infty$	$\infty$	15.4	
						12	1.42	154		$\infty$	$\infty$	7.7	
1	1.40		166	$\infty$	1.67	94.1							
2	1.43		168	13	4.08	88.2							

Remarks  $r$  : the order statistic  
 $E$  : modulus of elasticity at sustained loading  
 $\epsilon_i$  : initial strain  
 $\epsilon_u$  : ultimate tensile creep strain  
 $T$  : time to tensile creep rupture  
 $p$  : the probability of survival of each specimen

普通コンクリートおよび軽量コンクリートそれぞれの各応力比における順序統計量 ( $r$ ) および生存確率 ( $p$ ) の計算結果を Table-III に示す。また、各応力比における生存確率とクリープ破壊時間 ( $T$ ) との関係を図示すると Figs. 2, 3 のようになる。Figs. 2, 3 から、両者の

間には明確な直線関係が成立し、各応力比におけるクリープ破壊時間は対数正規分布に従うことがわかる。

そこで、各応力比における回帰直線

$$p = A \log t + B \tag{10}$$

の定数  $A, B$  を最小二乗法によって求め、さらに Eg. (10) において  $p=0.50$  を代入して平均クリープ破壊時間 ( $T$ ) を求めると、Table-IV に示すようになる。

(2) 引張応力下におけるクリープ限とクリープ破壊

クリープ限とは、持続応力の大きさとクリープひずみとが比例関係にある限度、すなわち載荷時間が無限であってもクリープ破壊を起さない最大の応力 (あるいは応力比) で定義される。また、クリープ限を越えるような応力を持続載荷すると、いつかは破壊に至るが、この現象をクリープ破壊という。

コンクリートは、金属材料と異なり、明確なクリープ限は存在しないが、静的強度の 60~80 % 以下の持続応力であればクリープ破壊を起さないとする説が一般的である。

一方、コンクリートの疲労強度を評価する場合には、金属材料で見られるような疲労限が存在しないので、 $S-N$  線図においてあらかじめ定めた繰返し回数 (通常は 200 万回) に対する応力比でもって時間強度を求め、これをコンクリートの疲労を表わす特性値としている。このようにして求めたコンクリートの圧縮疲労時間強度は、普通コンクリートで 65~70%、軽量コンクリートで 50~55% であるとされている。

クリープ試験においても同様の手法を採用することが考えられるが、この場合、時間強度を算定する際に基本となるクリープ破壊時間 ( $T$ ) をどの程度に採ればよいか問題になる。ここでは、応力比 ( $S$ ) と平均クリー

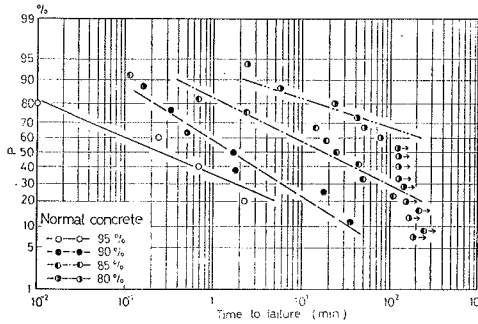


Fig. 2 Relationships between probability of survival ( $p$ ) and time to failure (Normal-weight concrete)

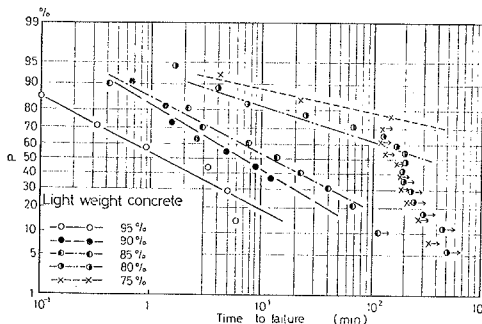


Fig. 3 Relationships between probability of survival ( $p$ ) and time to failure (Light-weight concrete)

Table IV Constants  $A$  and  $B$  in experimental formula  $q=A \log t+B$ , and average creep rupture time ( $T$ )

Kinds of concrete Stress level (%)	Normal-weight concrete			Light-weight concrete		
	$A$	$B$	$T$	$A$	$B$	$T$
95	-0.245	0.353	0.251	-0.364	0.527	1.186
90	-0.300	0.574	1.265	-0.388	0.820	6.680
85	-0.252	0.828	20.028	-0.326	0.845	11.436
80	-0.205	1.029	381.679	-0.195	1.005	389.105
75				-0.100	0.984	69181.310

破壊時間 ( $\bar{T}$ ) との間には直線関係が成り立つことに着目して (Fig. 4), この直線関係を表わす式の定数を最小二乗法によって決定し, さらに, クリープ破壊と疲

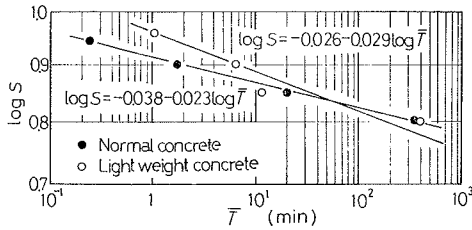


Fig. 4 S -  $\bar{T}$  lines

勞破壊との間には破壊機構の上で密接な関係が存在するとの考えのもとに  $\bar{T}$  にある数値を当てはめることにした。この数値を, 200万回の繰返し疲労時間強度 (ただし, 繰返し速度を約 300rpm とする) に相当する持続応力载荷期間に採って, これを約 7000 分として応力比 (S) を求めると, 普通, 軽量コンクリートに対しそれぞれ 77%と 74%になる。このことから, 疲労の場合と同様にクリープにおいても, その時間強度は軽量コンクリートの方が普通コンクリートよりもやや小さいことがわかる。なお, コンクリートの耐用年数を70年に定めてクリープ時間強度を求めると, 普通, 軽量コンクリートそれぞれに対し, 61.5%, 57.3%になる。

(3) 定常クリープ速度と破壊時間との関係

各種材料のクリープ破壊特性を表わす一因子として定常クリープ速度 (クリープ曲線の直線部の傾き) が採られている。例えば, 阪田<sup>16)</sup>らはコンクリートにおいて, 栗原<sup>19)</sup>は粘土において, いずれも定常クリープ速度とクリープ破壊時間との間には直線関係が成立し, 定常クリープ速度が小さくなればクリープ破壊時間が長くなることを明らかにしている。すなわち, 定常クリープ速度を正確に求めることができれば, クリープ破壊時間のある程度正しく評価できることを意味している。

このような観点に立って, 本試験で得られた結果 (Figs. 5, 6) を定常クリープ速度 ( $\dot{\epsilon}$ ) とクリープ破壊時間 (T) とを対数関係 ( $\log \dot{\epsilon} \sim \log T$ ) で整理し (Fig. 7), これを実験式で表わすと次のようになる。

普通コンクリート

$$\log \dot{\epsilon} = -0.81 \log T - 5.26$$

軽量コンクリート

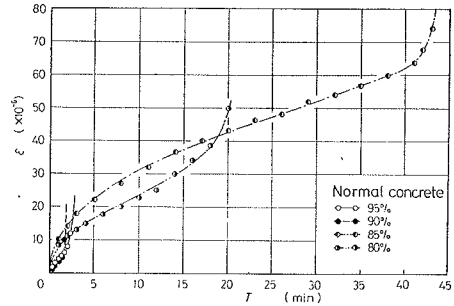


Fig. 5 Relationships between tensile creep strain ( $\epsilon$ ) and loading time of sustained stress (T) (Normal-weight concrete)

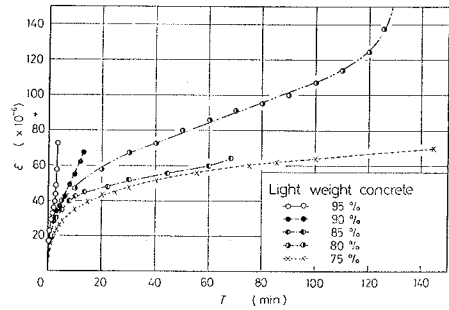


Fig. 6 Relationships between tensile creep strain ( $\epsilon$ ) and loading time of sustained stress (T) (Light-weight concrete)

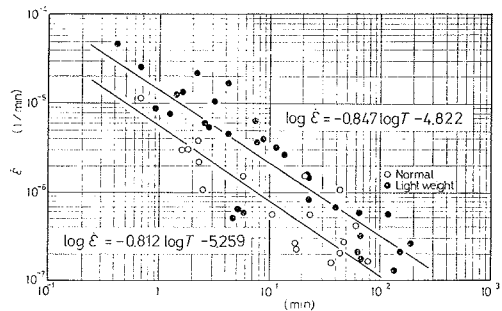


Fig. 7 Relationships between the rate of tensile creep strain ( $\dot{\epsilon}$ ) and time to failure (T)

$$\log \dot{\epsilon} = -0.85 \log T - 4.82$$

上式より, 同一ひずみ速度におけるクープ破壊時間は, 軽量コンクリートの方が普通コンクリートよりも大きいことがわかる。これは, クリープ破壊時における極



限ひずみは軽量コンクリートの方が大きいことに起因すると考えられる。

## 6 結 語

本研究は、高引張応力下におけるコンクリートの塑性の変形のうち、引張クリープ限、引張クリープ破壊に関する試験の結果を述べ、若干の考察を加えたものである。

本試験においては、骨材として普通骨材と人工軽量骨材を選んだが、配合は各骨材に対してそれぞれ一種類づつであり、また応力比の間隔も比較的大きく選んでいる。従って、引張クリープ現象を詳しく論ずるためには、種々のファクターを組み合わせた、さらに広範囲にわたる試験を行なわなければならないと考えられる。

さらにまた、引張供試体の偏心の問題、供試体の形状の問題（供試体の中央部に破壊を起させるためには、中央部断面を縮小することが望ましい）、引張クリープ載荷装置の改善等の問題も残されている。

今後は、これらの課題を解決しつつ研究を継続して行き度いと考えている。

ここでは、本試験の範囲で明らかになった点を列挙し、結語にかえる。

- (1) 一定持続応力下におけるコンクリートの引張破壊時間はかなりのばらつきを示すが、これを確率論的手法を用いて処理すると、各応力比におけるクリープ破壊時間は対数正規分布に従うことがわかる。
- (2) 引張クリープにおいても明確なクリープ限は存在しないが、疲労時間強度に相当する時間クリープ限（応力比）を考えると、普通コンクリートで60~75%、軽量コンクリートで57~73%となり、普通コンクリートの時間クリープ限の方が軽量コンクリートのそれよりもやや大きい。
- (3) クリープ破壊時の極限ひずみは、応力比が小さくなるに従って増大する。
- (4) クリープ～時間曲線の過程で定常クリープを採り上げて、これとクリープ破壊時間との関係を考察すると、定常クリープ速度とクリープ破壊時間との間には逆比例関係が存在することがわかる。すなわち、定常クリープ速度を測定することによって、或程度の精度でもって破壊時間を推定することが可能であるといえる。

本研究を実施するにあたり、西木信博氏（現大和ハウスKK勤務）の協力に負う所が極めて大であり、ここに深

甚なる謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) Glanville, W.H. and Thomas, F.G., Studies in reinforced concrete-IV. Further investigations on creep or flow of concrete under load, London, Building Research Technical Paper No. 21, 1939
- 2) A ten-year study of creep properties of concrete, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Concrete Laboratory Report No. SP-38, 1953
- 3) Davis, R. E., Davis, H. E. and Brown, E. H., Plastic flow and volume changes of concrete, ASTM Proc, 37, 1937
- 4) Illston, J. M., The creep of concrete under uniaxial tension, Magazine of Concrete Research 17, No. 51, 1965
- 5) Mamillan, M., A study of the creep of concrete, RILEM Bulletin No. 3, 1959
- 6) Ruetz, W., A hypothesis for the creep of hardened cement paste and the influence of simultaneous shrinkage, Intern. Conf. on the Structure of Concrete, London, Cement and Concrete Association, 1968
- 7) Gvozdev, A. A., Creep of concrete, in : Mekhanika Tverdogo Tela, Moscow, 1966
- 8) Wajda, R. L. and Holloway, L., Creep behaviour of concrete in tension, Engineering 198, 1964
- 9) L' Hermite, R., Nouveaux résultats de recherches sur la déformation et la rupture du béton, Ann. Inst. Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, 28, 1965
- 10) 西林新蔵：人工軽量骨材コンクリートのクリープに関する研究，コンクリートジャーナル，Vol. 7, No. 1, 1969
- 11) Creep strain investigation of concrete and mortar beams subjected to sustained flexural and tensile loadings, U. S. Army Corps of Engineers, Ohio River Division Laboratories, Cincinnati, Ohio, Tech. Report No. 2-5, 1956
- 12) Le Camus, B., Recherches expérimentales sur

- la déformation du béton et du béton armé,  
part II : Déformations lentes, Inst. Technique  
du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris,  
1947
- 13) Oberti, G., Deformazioni anelastiche del cal-  
cestruzzo della Diga Oziglietta, *Giornale del  
Genio Civile*, 83, No.5, 1946
- 14) 堀素夫：セメントおよびコンクリートの破壊現象に  
関する確率論的研究，大阪大学学位論文，昭和36年
- 15) 桜井春輔：セメントモルタルのクリープ変形と破壊  
について，第27回土木学会年次学術講演会概要集第  
V部，昭和47年
- 16) 阪田憲次，西林新蔵：コンクリートのクリープ破壊  
に関する一考察，第29回土木学会年次学術講演会概  
要集，第V部，昭和49年
- 17) AI-Kubaisy M. A. and Young, A. G., Failure  
of concrete under sustained tension, *Magazine  
of Concrete Research*, 27, No. 92, 1975
- 18) 阪田憲次，木山英郎，西林新蔵，統計的処理による  
コンクリートの疲労寿命に関する研究 (A study  
on the fatigue life of concrete by statistic  
treatment) 土木学会論文報告集，No. 198, 1972  
(*Trans. of JSCE*, Vol 4, 1972)
- 19) 栗原則夫，粘土のクリープ破壊に関する実験的研  
究，土木学会論文報告集，No. 202, 1972