コンクリートのクリープ破壊に関する研究*

西林 新 蔵** 阪 田 憲 次***

A Study on Creep Rupture of Concrete

by

Shinzo NISHIBAYASHI

(Faculty of Engineering, Tottori University, Tottori)

and Kenji SAKATA

(School of Engineering, Okayama University, Okayama)

Most of the studies on creep of concrete have dealt with the deformation under lower sustained stress, but not with the rupture or the deformation under higher sustained stress. In this study, the creep rupture tests were performed on the normal and lightweight concretes.

The results obtained can be summarized as follows:

The phenomenon of creep rupture can be divided into three parts, transient creep, steady state creep and accelerating creep, and the relationship between the rate of steady state creep and the time to failure can be shown by an exponential function.

On the assumption that the time to failure takes place in a stochastic process, its fluctuation was discussed. The statistical analysis of the test results shows that the probability of survival at the same stress level is represented by a logarithmic normal distribution.

The creep limits of the normal and lightweight concretes are determinend, respectively, as 84.5% and 83.8% of the static strength, by the Probit analysis method.

(Received May 3, 1977)

1 緒 言

静的破壊強度付近の高持続応力下において起る破壊をクリープ破壊といい、コンクリートにおいてもこの種の破壊現象が認められている。このような現象は、繰返し荷重下における破壊と同様、一種の疲労によるコンクリートの破壊と理解できる。

低持続応力下におけるコンクリートのクリープについては、従来より内外の数多くの研究者によって種々の面より検討されているが、それらは変形の問題が主で、破壊現象は問題にならなかった。また、内部機構の面から考えても、低持続応力下におけるクリープと高持続応力下におけるそれとは同一に論じることとはできないと考えられる。すなわち、静的破壊強度の80～90%程度の高持続応力を受けるコンクリートは、すでになんらかの形で内部破壊が始まっていると考えられる。したがって、この種高持続応力を受けるコンクリートのクリープの問題を論じる場合には、変形特性の

みならず、材料の破壊特性との関連において論じなければならない。

コンクリートのクリープ破壊に関する従来の研究は極めて少く、わが国においては、堀¹⁾、桜井²⁾、徳光³⁾らおよび小柳⁴⁾らの研究があるのみである。

それらの研究によれば、破壊に要する時間（寿命）の測定値は、同一の応力下においても、著しくばらつくのが普通である。このような現象は、ガラスや金属材料等の比較的均質な材料においても認められるが⁴⁾、コンクリートのような複合材料においては、その材料特性も複雑であり、測定値のばらつきは避けられないものであると思われる。すなわち、コンクリートのクリープ破壊現象のように、現象の時間的な推移が確率的であるような問題は、一種の確率過程の問題として取扱うべきであると考えられる。

本研究は、破壊の面からみたコンクリートのクリープ特性を把握することを主眼とし、普通および軽量コンクリートの高持続応力下における圧縮クリープ試験を行うものである。また、コンクリートのクリープ破壊現象を確率過程の問題として考え、結果を取扱う際

* 原稿受理 昭和52年3月3日

** 正 会 員 鳥取大学工学部 鳥取市湖山町

*** 正 会 員 岡山大学工学部 岡山市津島中

Table I. The mix proportions of concretes.

Specimen		W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S/a (%)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Pozz. No. 8
Normal concrete		43.0	340	150	43.0	808	1082	C×0.25%
Lightweight concrete	L	50.5	350	175	41.5	525	536	
	M	44.9	350	154	39.5	575	646	
	U	45.1	350	158	37.0	472	668	

には確率統計的な手法を用いるとともに、材料特性との関連において破壊の機構についても考察する。さらに持続荷重に対するコンクリートの耐久限度（クリープ限）、クリープ破壊に及ぼす骨材種別の影響についても検討する。

2 実験概要

2・1 使用材料と供試体

〔実験に使用したセメントは、普通ポルトランドセメント（大阪社製）、骨材は天然骨材（碎石、川砂）、造粒型人工軽量骨材ライオナイト（大阪社製）、非造粒型人工軽量骨材メサライト（三井社製）および宇部軽骨（宇部社製）の4種類である。

コンクリートの配合を Table I に示す。配合は目標スランプを 5 ± 1 cm、目標強度 (σ_{28}) を 360 kg/cm² として決定した。

コンクリートの練混ぜは4切可傾式ミキサを用いて行い、締固めは棒突き法によった。供試体は打設後24時間型わく内におき、脱型後はただちに水中に入れ、約6週間の標準水中養生を行った。強度が充分発現した後、供試体を水中より取出し、その後は試験日まで恒温恒湿室（20℃±2 deg., 80~90% R. H.）に保存した。なお供試体はすべて $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体である。

2・2 実験方法

クリープ試験に先立ち、コンクリートの静的強度および静弾性係数を求めた。コンクリートの打設は同一種類のコンクリートにつき数回に分けて行っているため、静的強度は各打設日ごとに3本の供試体を用いて求めた。Table II には、数回に分けて行った静的強

Table II. Strengths and elastic moduli.

Properties of concrete \ Specimen	Normal concrete	Lightweight concrete		
		L. C.	M. C.	U. C.
Compressive strength σ_{ul} (kg/cm ²)	453	389	420	329
Modulus of elasticity E ($\times 10^6$ kg/cm ²)	3.10	1.97	2.39	1.37
Poisson's ratio μ	0.17	0.20	0.15	0.17

L. C.; Lionite Concrete
M. C.; Mesalite Concrete
U. C.; Ube-keikotsu Concrete

度試験（材令は100日以上）の全体の平均値を示した。なお、クリープ試験の載荷重を決定する際には、Table II の値を用いずに、各打設日ごとの静的強度の平均値を用いた。

持続荷重の載荷は REH 型電子管平衡式万能試験機（島津社製）の定荷重装置により行った。ひずみの測定は、供試体の縦方向に2枚、横方向に2枚、合計4枚貼付けられたワイヤストレーンゲージ（測定長：67 mm、抵抗値：120 Ω ）をピックアップとし、ストレーンアンプ（新興通信社製）で増幅し、X-Yレコーダ（横河社製）により自記させた（Fig.1 参照）。

持続荷重の大きさは、静的強度の65~97%の範囲である。

Fig. 1. Apparatus for the creep rupture test.

以上のような手順でクリープ試験を行い、X-Yレコーダーで記録されるひずみ-時間曲線を観察し、ひずみ速度が一定値に収れんしたと考えられるものについては、それ以上荷重を持続してもクリープ破壊しないものと仮定して、実験を打ち切った。

3 実験結果と考察

3・1 コンクリートのクリープ破壊とその変形特性

Fig.2 およびクリープ破壊試験の結果を示す。なお、Fig.3 に示した軽量コンクリートの試験結果は、骨材の種類別に区別はせず、一括して示した。

Fig.4 にクリープ破壊曲線のうちの代表的なものを示す。なお、図には縦方向のクリープひずみのみを示しており、さらに90%などの数字は応力レベルを示すものである。図より明らかなように、コンクリートのクリープ破壊曲線は、金属材料や土質材料などと同様に、変形速度が時間とともに減少する遷移クリープ部分、変形速度が時間に無関係に一定かつ最小の定常クリープ部分および変形速度がしだいに増大してついに破壊にいたる加速クリープ部分の3段階に分けることができる。なお、実験に供した供試体のうち破壊した

Fig. 2. Stress vs. time to failure (Normal concrete).

Fig. 3. Stress vs. time to failure (Lightweight concrete).

Fig. 4. Creep rupture curves.

すべての供試体においてこのような区別ができたわけではなく、ゲージが不良でひずみの測定ができなかったもの、あるいはひずみの測定ができて各クリープ段階の区別が明確でなかったものもある。

各クリープ段階におけるクリープひずみの全クリープひずみに対する割合、ならびに、各クリープ段階に要する時間と破壊に要した時間との割合の全体の平均値を模式的に示したのが Fig. 5 である。Fig. 5 によれば、コンクリートのクリープ破壊における変形特性の全体的な傾向がある程度うかがわれる。

Fig. 5. Schematic illustrations of creep rupture curves.

まず縦方向のクリープひずみについては、普通および軽量コンクリートいずれの場合も、遷移クリープ部分がもっとも大きな割合を占めており、定常クリープ部分がもっとも少ない。一方、加速クリープは、普通コンクリートにおいては定常クリープよりも若干大きい、軽量コンクリートでは定常クリープとほぼ同一の割合となっている。

横方向のクリープひずみをみると、普通コンクリートの加速クリープがもっとも大きな割合を占めており、縦方向のひずみの場合とはかなり異っているが、軽量コンクリートの加速クリープの占める割合は、普通コンクリートのそれほど大きくはない。また、各クリープ段階に要する時間の割合をみても、普通コンクリートと軽量コンクリートとは、やや異なる点が認められる。

このような両者の変形破壊特性の相違をより明確にするため、Fig. 6 に各クリープ段階の始点および終点における横方向のひずみ（初期弾性ひずみとクリープひずみの和）と縦方向のひずみの比（ポアソン比とよぶ）を図示した。

Fig. 6. Poisson's ratio in the creep rupture test.

Fig.5 および 6 より, 両者の変形特性の相違は, 使用した粗骨材の特性の違いに起因するものとして, 次のように説明できる.

すなわち, 普通コンクリートでは, 粗骨材の強度が強いので, 時間の経過とともに生長するクラックが骨材をさけて伸展するため, 加速クリープ段階に要する時間が長くなり変形も大きくなる. 一方, 軽量コンクリートでは骨材自身の強度が弱いため, 骨材の存在によってクラックの伸展が妨げられることも少く, そのため, 加速クリープ段階におけるひずみも小さく, その時間も短くなると考えられる.

一般に, 低持続応力下のクリープ試験におけるポアソン比は, クリープ変形の進行にかかわらず, ほぼ一定ないしは若干減少するといわれており, Polivka の実験によれば, クリープ試験終了時のそれは, 0.15~0.17程度である. これは, 低湿度下, 低持続応力下のクリープの生成機構の一部がシーページ理論で説明されることから想像できることであり, クリープ変形とともに体積が減少することを示している. ところが高持続応力下のクリープ試験においては, 低持続応力下の場合のように体積は減少することではなく, むしろ増加する傾向にある. したがって, 高持続応力下におけるクリープ変形は, 持続荷重の載荷によってコンクリート内部に発生したマイクロクラックが時間と

Fig. 7. The rate of steady state creep vs. time to failure.

もに生長していくことによるものであり, 低持続応力下のクリープ変形とはその生成機構が異っている. さらに, 遷移クリープ段階においても, すでになんらかの形で破壊に結びつくような重大な損傷が始まっていると考えるべきであろう.

Fig.7 は, 普通コンクリートの縦方向の定常クリープ速度と破壊に要した時間との関係を示したものである. 図からも明らかなように, 両者の間にはほぼ指数関数的な関係がみられ, 定常クリープ速度が小さくなるほど破壊に要する時間は長くなる. すなわち, 定常クリープ速度がコンクリートのクリープ破壊に要する時間を決定する重要な要因であるといえる. 本研究においては, クリープひずみが一定値に収れんしたもの, 以後荷重を持続してもクリープ破壊しないものと仮定して実験を打ち切ったが, Fig.7 によりその仮定の妥当性が認められる. なお, 軽量コンクリートについても, ほぼ同様の傾向が認められる.

3.2 コンクリートのクリープ破壊の確率論的性質とクリープ限の決定

金属材料等のおくれ破壊の確率過程理論においては, 任意の時刻 T において破壊の発生する確率 (推移確率) $m(T)$ と時刻 T まで破壊が発生しない確率 (生存確率) $p(T)$ との間には, m を時間に無関係であると仮定すると, 次式のような関係が成立する.

$$\ln P(T) = -mT \quad (1)$$

なお, 順序統計量の理論により, $P(T)$ は一般に次式によって計算される.

$$P(T) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (2)$$

ただし, r は破壊に要した時間の小さいものからの序数であり, n は同一応力比における破壊した供試体の数である.

Fig.8 は, 本実験の結果より T 分後まで破壊しない確率を(2)式より求め, それを対数目盛に, T を普通目盛にとって図示したものである. ここでは結果の一部について示したが, 両者の関係はほぼ下に凸な曲線で表され, 推移確率が時間とともに低下し, (1)式

Fig. 8. Examples of P - T diagram.

に示したような関係は成立しない。

Fig. 9 は、各クリープ段階に要する時間の分布を示すものであり、Fig. 10 は、それを対数正規確率紙上にプロットしたものである。以上の図より、各クリープ段階は、時間とともに低下する推移確率を有する確率過程であり、任意の時刻に確率的につぎのクリープ段階および破壊へと移行すると考えられる。また、各クリープ段階に要した時間の分布は対数正規分布し、そのばらつきの程度も、クリープ段階の違いによる差異はない。

Fig. 9. Examples of P - T diagram.

Fig. 10. Examples of P - T diagram.

堀は、定常クリープ段階までは載荷重の大きさによって、そのひずみ量およびひずみ速度が一義的に定まり、加速クリープの現れ方が確率的であると述べているが、本研究の結果によれば、いずれのクリープ段階においても、その時間の分布は確率的であり、前述のごとく、¹各クリープ段階による差異は全く認められない。

Fig. 11 は、同一応力比における破壊に要した時間と生存確率との関係を対数正規確率紙上にプロットしたものの一例である。図から明かなように、両者の関係は直線で近似でき、同一応力比における破壊に要する時間は対数正規分布することがわかる。また、図上の直線と $P=50\%$ の横軸との交点が平均値を表すと考えられる。各応力比において同様の手法で破壊に要する時間の平均値を求め、それと応力比との関係を図示したのが、Fig. 12 である。これは、疲労試験における S - N 線図に相当するもので、最小二乗法によって求めた直線式は次のようになる。

Fig. 11. Examples of P - T diagram.

Fig. 12. S - T diagram for creep rupture.

普通コンクリート : $S = -15.09 \log T + 108.4$ } (3)
 軽量コンクリート : $S = -6.79 \log T + 97.5$
 ここに、 S は応力比 (%), T は荷重持続時間 (min.) である。

コンクリートの耐久限度の有無については議論の分れるところであり、一般に、繰返し荷重に対する耐久限度（疲労限）は存在しないといわれている。⁸⁾ ところが、Fig. 2, 3 ならびに 7 からもうかがわれるように、持続荷重に対する耐久限度（クリープ限）は存在すると考えてよいようである。コンクリートのクリープ限は静的強度の 75~90% 程度であるとする報告もあるが、⁹⁾ それがいかなる方法によって決定されたものであるかは必ずしも明らかでない。

前述のごとく、同一の持続応力を受ける個々の供試体のクリープ限は一定ではなく、クリープ破壊するか否かは全く確率的なものであると考えられる。このような現象は殺虫剤の試験にその類似を求めることができる。すなわち、薬量と昆虫の死亡する数の割合を統計の問題とし、約 50% の昆虫が死亡するときの薬量を求める Probit Analysis の手法を本実験の結果に適用して、平均クリープ限を求める。

すなわち、適当に選んだ応力比の範囲における供試体の数と破壊しなかった供試体の数とその生存確率を求める。この生存確率と応力比との関係を正規確率紙上にプロットし、図上で得られる直線と確率 50% の横軸との交点における応力比が平均クリープ限である。

このようにして得られた平均クリープ限は、普通および軽量コンクリートで、それぞれ84.5%および83.8%となる。

ヨーロッパコンクリート委員会の「終局強度理論¹⁰⁾による鉄筋コンクリート設計施工基準」では、クリープ限として、載荷時の材令が28日のコンクリートで82%、材令1年のもので76%を与えており、本研究の結果とそれほど大差はない。

4 結 論

本研究の結果明らかになったことを列挙し、結論とする。

(1) コンクリートのクリープ破壊曲線は、金属材料のそれと同様、変形速度が時間とともに減少する遷移クリープ、変形速度が時間に無関係に一定かつ最小となる定常クリープ、および変形速度が次第に増大して破壊にいたる加速クリープの三つの部分からなる。

(2) 普通コンクリートと軽量コンクリートのクリープ破壊の様相は若干異り、各クリープ段階におけるひずみが全クリープひずみに占める割合や、各クリープ段階に要した時間の破壊に要した時間に対する割合もやや異なる。このような相違は、両者の材料特性の相違によるものと思われる。

(3) 高持続応力下における普通コンクリートのポアソン比は、低持続応力下のそれとはかなり異り、遷移クリープ段階においてもかなり大きな値を示し、すでに破壊に結びつくような重大な損傷が起っていると考えられる。なお、軽量コンクリートのポアソン比は、普通コンクリートのそれよりもかなり小さいが、ほぼ同様の傾向を示す。これは、低持続応力下のクリープと高持続応力下のクリープとの生成機構の相違を示唆するものであると考えられる。

(4) 定常クリープ速度と破壊に要する時間との間には、ほぼ指数関数的な関係があり、定常クリープ速度

が小さくなれば破壊までの時間は長くなる。

(5) 同一応力比における各クリープ段階に要する時間の分布は対数正規分布し、各クリープ段階による差は認められない。またこの場合の推移確率は、時間とともに低下し、遷移クリープ段階に要する時間の長いものは、その後のクリープ段階に要する時間も長くなり、破壊に要する時間も長くなる。

(6) 同一応力比における破壊に要する時間の分布は対数正規分布する。また、そのときの推移確率も時間とともに低下する傾向にある。

(7) 普通および軽量コンクリートのクリープ限は、それぞれ静的強度に対する割合で84.5%および83.8%であり、ほぼ同程度と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 堀 素夫, “セメントおよびコンクリートの破壊現象の確率論的研究”, 学位論文 (1956).
- 2) 桜井春輔, 土木学会論文報告集, Vol. 217 (1973).
- 3) 徳光善治, 江崎哲郎, 第31回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部 (1976).
- 4) 小柳 治, 阪田憲次, 柴田秀昭, 第17回日本材料学会年次学術講演会講演概要 (1968).
- 5) 横堀武夫, “材料強度学” (1955) 技報堂
- 6) 栗原則夫, 土木学会論文報告集, Vol. 202 (1972).
- 7) Neville, A. M., “Creep of Concrete: Plain, Reinforced and Prestressed”, p. 233 (1970) North-Holland Publishing Company
- 8) Murdock, J. W., T & A. M Report, No. 638 (1963).
- 9) 近藤泰夫, 坂 静雄監修, “コンクリート工学ハンドブック”, p. 372 (1965) 朝倉書店
- 10) ヨーロッパコンクリート委員会, “終局強度理論による鉄筋コンクリートの設計施工基準”, p. 68 (1966) 日本セメント協会