

# 若材齢コンクリートの引張クリープに関する研究

入矢桂史郎<sup>1</sup>・根木崇文<sup>2</sup>・服部達也<sup>2</sup>・梅原秀哲<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 名古屋工業大学大学院博士課程後期 社会開発工学専攻  
(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

<sup>2</sup>学生会員 名古屋工業大学大学院博士課程前期 社会開発工学専攻

<sup>3</sup>正会員 Ph. D. 名古屋工業大学大学院 教授 都市循環システム専攻

本論文は、若材齢コンクリートの引張クリープ試験を行なって、応力強度比・載荷材齢・養生および載荷温度の影響について定式化し、それを温度応力状態のクリープ試験結果と比較することにより、その適用性について検討したものである。影響要因を分析した結果、応力強度比の影響は大きく、その関係は指数関数で近似されることがわかった。載荷材齢の影響は、材齢1日においては見られるが、それ以降は大きな影響が見られなかった。温度の影響に関して、高温状態で載荷した場合、クリープが大きくなることがわかった。ここでは、活性化エネルギーを83.7kJ/molとシアレニウスの式を用いて材齢と温度の関数として定式化した。実験結果をまとめてクリープ式を構築し、温度・応力を変化させた状態での実験値と比較した結果、重ね合わせ法を用いることで概ね実験値をシミュレートできた。

*Key Words* : tensile creep, early age, thermal stress, stress strength ratio, equivalent hydration periods

## 1. まえがき

セメントの水和熱によるコンクリート構造物の温度応力ひび割れ低減を目的として、計画・設計・施工に至る建設の過程において温度応力を正確に予測し、効果的な対策を施すための研究が進められている。その中で温度応力を設計段階で予測し、適切な対策を講じてひび割れを制御することは重要である。ひび割れ予測には、精度良い温度応力解析が必要となるが、筆者らは、この目的に資するために、温度応力予測に誤差を生じる原因の1つである若材齢コンクリートのクリープに着目して、温度応力解析に適用できる若材齢コンクリートのクリープモデルの研究を進めてきた<sup>1) 2) 3)</sup>。

水和熱に起因する温度応力ひび割れの中で耐久性上大きな影響を及ぼすものは、外部拘束によるひび割れである。その典型的な応力発生パターンは、材齢初期すなわち温度上昇過程で圧縮応力が作用し、その後温度降下に伴って引張応力に転じ、最終的には引張応力によってひび割れに至るというものである。従って、温度応力に反映できるクリープモデルの研究を行うには、圧縮クリープ・除荷過程のクリープ・引張クリープといった温度応力の発生状態に対応したクリープ研究を行わなければならない。また、応力の発生する材齢がセメントの水和反応と関連しているために、若材齢コンクリートを対象と

しなければならない。さらに、セメントが水和過程にあることを考慮すると載荷応力や温度の影響が長期材齢のクリープに比べて大きくなると考えられ、載荷材齢・温度・応力強度比などの影響に着目した研究が必要となる。筆者らはこれまでに、この若材齢コンクリートのクリープについて、圧縮クリープに関する研究<sup>1)</sup>、除荷過程のクリープに関する研究<sup>2)</sup>など上記のパラメータを考慮した研究を行い、クリープモデルを構築し、そのモデルを用いて温度応力を精度良く推定できることを報告した。また、引張クリープと圧縮クリープを同一条件で比較して、その発生メカニズムの違いについても報告した<sup>3)</sup>。

本論文では、温度応力予測に資するための若材齢コンクリートのクリープに関する研究として引張クリープに着目し、載荷応力の影響、養生および載荷温度の影響について実験的に考察した。また、ひび割れの発生に対するクリープの影響を知るために、クリープひずみが引張破壊に与える影響などについても実験を行い、考察を加えた。以上の結果をまとめて、温度応力解析に適用可能な引張クリープモデルを構築し、温度応力を模擬した変動する応力状態の実験結果と比較し考察した。

## 2. 引張クリープに関する既往の研究

引張クリープは、コンクリートのひび割れ発生に大きく影響する重要な要因であるにもかかわらず、実験の困難さや計測技術の点からあまり研究がなされていなかった。しかし、近年技術の進歩に伴って、少しずつ研究成果が報告されている。ここでは、引張クリープについての研究の現状を把握するために、文献調査を行って引張クリープに影響を与える要因別に既往の研究成果をまとめた。

クリープの大部分がセメントペースト部分において生じることは、圧縮クリープ研究で明らかであるが<sup>1)</sup>、セメントペースト量が引張クリープに与える影響に関しては、P.L.Domonneによれば、水セメント比が一定の場合、ペースト量が多くなるほどクリープひずみは大きくなると指摘した。しかし、水セメント比の影響は圧縮クリープにおいて水セメント比が大きくなるとクリープが大きくなる割合に比較して小さいとしている<sup>4)</sup>。また、筆者らの研究においても、モルタルと粗骨材容積を変化させた引張クリープ試験の結果、同一の条件では引張クリープひずみはペースト量にほぼ比例するという結果を得ている<sup>3)</sup>。また、引張クリープは粗骨材クリープの影響を強く受けることも報告している<sup>3)</sup>。骨材の種類の影響に関しては、西林らは、軽量コンクリートと普通コンクリートにおいて引張クリープ試験を行い、軽量コンクリートの引張クリープひずみが普通コンクリートに比較して載荷材齢 28 日で約 2.4 倍になると報告した<sup>5)</sup>。これらから、引張クリープは骨材の種類や量の影響を受けると考えられる。クリープの発生機構上重要なセメントペーストの細部構造を支配する水セメント比の影響に関して、P.L.Domonne の実験によれば、水セメント比が大きくなるほど引張クリープひずみは大きくなると報告している<sup>4)</sup>。また、El.Baroudy の実験結果も同様な傾向を示しており、水セメント比は引張クリープに影響を与え、圧縮クリープ同様に水セメント比が大きくなるとクリープは大きくなると考えられる<sup>6)</sup>。水セメント比はセメント水和組織中の細孔構造に影響を与えるため、引張クリープに与える影響は大きいと考えられるが、細孔構造がどのように引張クリープに影響するかという引張クリープの発生機構については明確にされていない。次に、載荷材齢の影響として、人工軽量コンクリートを対象とした柿崎らの実験結果によれば、載荷材齢 7 日の引張クリープひずみは、載荷材齢 28 日、91 日の引張クリープひずみに比較して、それぞれ 6~10%、7~11%、大きいと報告されている<sup>7)</sup>。また、西林らによっても、載荷材齢 7 日の軽量および普通コンクリートの引張クリープは、載荷材齢 28 日に比べてかなり大きいことが示されている<sup>5)</sup>。以上から載荷材齢が大きくなると、引張クリープ

ひずみは小さくなる傾向があると考えられる。ただし、筆者らの研究の中で、載荷材齢 3 日~7 日の範囲において、引張クリープひずみは載荷材齢に大きくは依存せず、載荷時の応力強度比に大きく依存するというような結果もある<sup>7)</sup>。応力強度比を一定で試験すると、載荷材齢が大きくなることに伴う強度の増加の影響が小さくなる傾向がある<sup>8)</sup>。これは、ペーストの組織が強固になることに伴ってクリープひずみも減少するが、応力強度比を一定としているために強度の増加に伴って載荷応力も増加し、クリープひずみも増加することにより、クリープひずみが載荷材齢とともに小さくなる現象が相殺されるものと考えられる。筆者らは、組織が強固になっていない若材齢コンクリートでは、圧縮クリープにおいては、応力強度比の影響を強く受けることを示したが<sup>1)</sup>、引張クリープにおける応力強度比の影響について A.Gutsch らは、各種セメントに対して、養生温度を変化させた条件で引張物性試験と引張クリープ試験を実施した結果、引張クリープは水和度と強い相関関係にあるが、載荷時の応力強度比には依存しないとしている。また、載荷中の水和の影響はないとしている<sup>9)</sup>。Hobbs らも、収縮拘束状態で実施した乾燥クリープ試験の結果、乾燥引張クリープは、応力強度比の影響を受けないことを報告している<sup>10)</sup>。しかし、D.J.Cook は、応力強度比が 25~67% の範囲で引張クリープひずみは、応力強度比に比例している<sup>11)</sup>。さらに、Neville らは、長期材齢コンクリートを対象に応力強度比を変化させた引張クリープ試験を行い、応力強度比 50%程度までの範囲でクリープひずみは応力強度比に比例するがそれを超えると急激にひずみが大きくなることを示した<sup>12)</sup>。Hauggaard らも若材齢コンクリートを対象として、応力強度比に関して引張クリープ試験を行った結果、応力強度比が 60%までは、クリープひずみが応力強度比に比例することを示した<sup>13)</sup>。クリープの発生機構の研究を進める上で、除荷後の挙動の評価は重要であるが、引張載荷除荷後のクリープひずみの回復挙動として、Morin らは、普通コンクリートと軽量コンクリートを用いて行った引張クリープ試験の結果、引張クリープひずみは、除荷後も回復しないことを報告した<sup>14)</sup>。筆者らの研究では、除荷後の引張クリープひずみは回復するがその値は小さく、また応力強度比の依存性も小さいと報告した<sup>3)</sup>。また、クリープによる拘束応力の減少効果について、森本らは、若材齢コンクリートの圧縮・引張応力のレラクセーションに関して、拘束状態で実施したレラクセーション試験の結果から、圧縮・引張のレラクセーション値は、応力強度比に比例していることを報告した。クリープ破壊については、クリープがひび割れに与える影響を評価するために重要であるが、柿崎の実験では、人工軽量コンクリートに対して応力強度比が 80%の場合、2 時間で引張クリープ破壊を

表-1 使用材料

使用材料名	種類/産地	比重・粒度
セメント	普通ポルトランドセメント	比重: 3.14
細骨材	豊田市産山砂	比重: 2.56 粗粒率: 2.82
粗骨材	春日井産碎石	比重: 2.66 粗粒率: 6.76
混和剤	AE減水剤 AE助剤	比重: 1.10

表-2 配合表

Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	AD
8.0	4.0	55	44.6	172	313	787	1015	1.16

起こしたと報告している<sup>9)</sup>。また、M.A.Al-kubaisyらは、長期材齢のコンクリートに対して応力強度比60%~95%の範囲でクリープ試験を行い、応力強度比70%以上でクリープ破壊を起こすと報告している<sup>16)</sup>。

以上から、引張クリープについて研究は進められており、実験結果も蓄積されつつあるが、本論文で対象とする若材齢コンクリートに関しては、定量的な評価を行うための研究数も少ないことがわかった。したがって、ここでは、若材齢の引張クリープに大きく影響を与える載荷材齢、応力強度比、養生温度、載荷温度などに着目し、クリープ試験を行って各種要因が引張クリープに与える影響を定量的に評価して引張クリープモデルの構築を行うこととした。

### 3. 引張クリープ実験

#### (1) 使用材料と配合

実験に使用したコンクリートの配合は、一般の鉄筋コンクリートに使用しているものを選定し、圧縮強度30N/mm<sup>2</sup>程度を目標として、水セメント比を55%、細骨材率を44.6%として単位量を定めた。使用材料は、名古屋地区で実際に生コンクリートとして使用している材料を用いた。使用材料を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。

#### (2) 供試体作成および載荷条件

コンクリートは20℃に制御された恒温室で混練し、モールドに詰めた後、24時間20℃で静置した。24時間後に脱型した後、コンクリートからの水分の逸散を防ぐ目的で、供試体の表面をアルミニウム薄膜で被覆して、室温30℃、湿度98%の養生室で載荷材齢(1~7日)ま

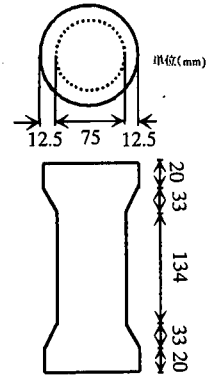


図-1 ドックボーン型供試体断面と平面図

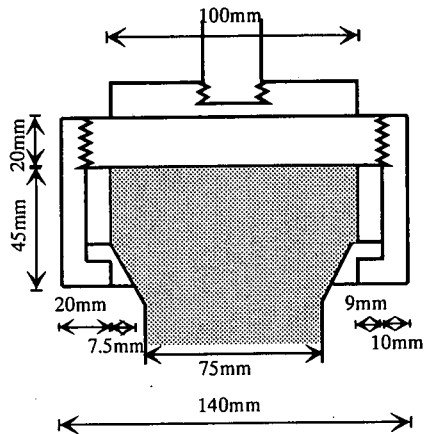


図-2 ドックボーン型載荷治具

で養生を行った。本クリープ試験機に装着された恒温恒湿槽は外気温以上でのみ温度制御が可能であったので実験期間が夏期にも及ぶことを考慮して基本温度を30℃に設定した。ただし、養生温度や載荷時の温度の影響を評価する実験ケースにおいては、養生温度・載荷温度ともに30℃~50℃間で変化させた。載荷は、恒温恒湿槽を有するてこ式クリープ試験機を用いて<sup>1)</sup>、恒温室の温度を30℃かつ湿度98%に制御して試験を行った。しかし、乾燥収縮や自己収縮などクリープ以外の収縮が生じるためにそれらを補正する目的で、全く同一条件で製作養生された無載荷供試体を恒温恒湿槽に静置して、ひずみを測定した。クリープひずみは、載荷供試体で測定されたひずみから無載荷供試体のひずみを差し引くことによって算出した。応力強度比を設定するために、載荷直前に載荷供試体と同一の養生を行った供試体の割裂引張試験を実施して引張強度を求めた。載荷応力の値を求めた強度で除して応力強度比とした。

引張試験結果を整理して、式(1)に示す引張強度と材齢の関係性を求めた。

$$f_t(M) = 0.49 \ln(M) - 2.05 \quad (1)$$

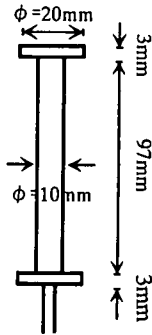


図-3 改良型ひずみ計

### (3) 載荷方法

引張クリープ試験の載荷方法は、供試体の上下部にボルトを埋め込み、ボルトにて引張治具を供試体に接続する方法とした<sup>2)</sup>。クリープ試験機はてこ式で、直接引張軸力を載荷できるが、クリープ変形に伴って生じるこの支点のずれにより曲げモーメントが生じる。本試験機はこの支点のずれを自動補正し、供試体に曲げモーメントを作用させないように自動支点移動装置を備えた構造となっている<sup>2)</sup>。材齢1日と応力強度比が60%を超える実験条件においては、このボルト埋め込み型の載荷方法ではボルト部先端から破断が生じるおそれがあるので、この実験ケースに対しては、図-1に示すドッグボーン(Dog Bone)型の供試体に変更して試験を行った。図-2にドッグボーン型供試体の載荷治具の構造を示す。

### (4) ひずみの測定方法

ひずみの測定は、若材齢対応の埋め込み型コンクリートひずみ計を使用した。ただし、ドッグボーン供試体では、測定部分の直径が75mmと小さいので、ひずみ計を改良して長さは同一で径の小さいひずみ計を製作して使用した。図-3に改良型のひずみ計の概略を示す。採用にあたっては、ドッグボーン型の供試体で測定したクリープひずみとボルト埋め込み型の供試体で測定したクリープひずみの両者を同一条件で比較して、供試体の形状や測定方法の違いによってクリープひずみに差が生じないことを確認した。

若材齢の載荷では、水和の程度のばらつきによって、強度やクリープ性状もばらつくことが予想されるが、ここでは、少なくとも2本の供試体により試験を行なうこととし、両者に大きな差がないことを確かめて次のケースの実験に進むこととした。

### (5) 実験ケース

実験ケースを表-3に示す。ケース1~17は応力強度比(S/Sと略記する)の影響を検討したもので、ケース18~26までは載荷材齢3日における養生温度と載荷温度

表-3 試験ケース

ケース	載荷材齢(日)	応力強度比(%)	養生温度(℃)	載荷温度(℃)
1	1	10	30	30
2	1	20	30	30
3	1	40	30	30
4	1	60	30	30
5	1	70	30	30
6	3	20	30	30
7	3	40	30	30
8	3	50	30	30
9	3	60	30	30
10	3	70	30	30
11	5	20	30	30
12	5	40	30	30
13	5	50	30	30
14	5	60	30	30
15	5	70	30	30
16	7	20	30	30
17	7	40	30	30
18	14	40	30	30
19	3	40	30	30
20	3	40	30	40
21	3	40	30	50
22	3	40	40	30
23	3	40	40	40
24	3	40	40	50
25	3	40	50	30
26	3	40	50	40
27	3	40	50	50
28	5	40	30	30
29	5	40	30	40
30	5	40	30	50
31	5	40	40	30
32	5	40	40	40
33	5	40	40	50
34	5	40	50	30
35	5	40	50	40
36	5	40	50	50

の影響を検討したもので、ケース27~35までは載荷材齢5日における養生温度と載荷温度の影響を検討したものである。すべてのケースともに測定期間は原則5日間とした。

## 4. 実験結果と考察

### (1) 載荷期間の影響

載荷材齢3日で応力強度比が50%の条件で載荷した場合のクリープひずみと載荷期間の関係を図-4に示す。クリープひずみは、載荷後3日程度までは急激に進行するが、その後ひずみの増加は安定し、5日以降はほぼ定常的な増加となる。従って、若材齢のクリープに各要因が影響を与える範囲は、5日間の急激な変化の部分であると考え、要因の影響度を分析するためのクリープひずみとしては、載荷期間5日間の値を用いることとした。本研究では、要因分析に関する実験の載荷期間を5日としたことから、載荷期間5日の値を最終クリープひずみと称することとした。また、5日以降のクリープの増加については、クリープモデルの中で考慮することとした。

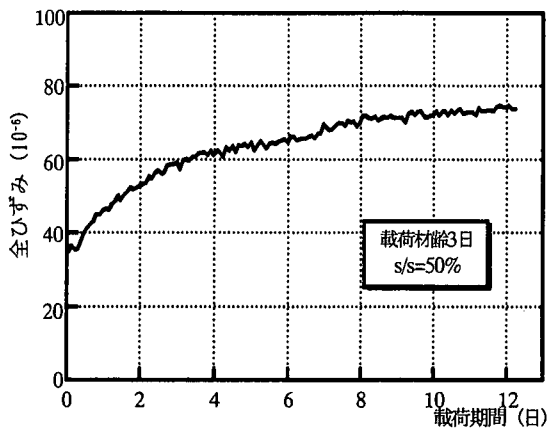


図-4 クリープひずみの変化  
(載荷材齢3日 応力強度比50%)

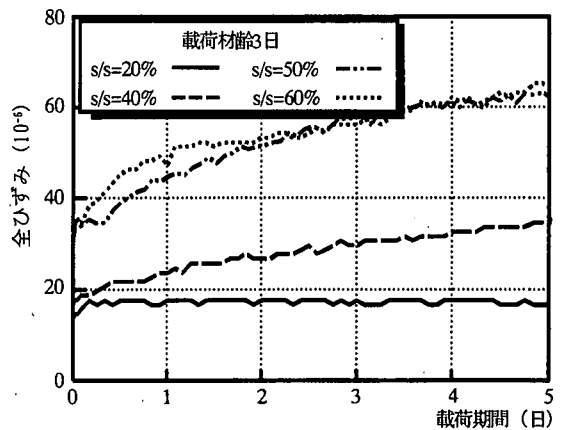


図-6 応力強度比と引張クリープひずみ  
(載荷材齢3日)

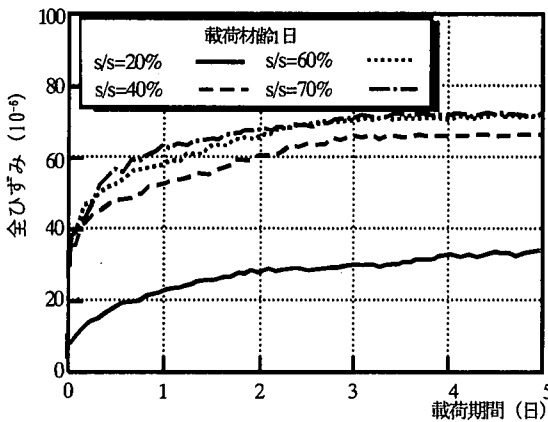


図-5 応力強度比と引張クリープひずみ  
(載荷材齢1日)

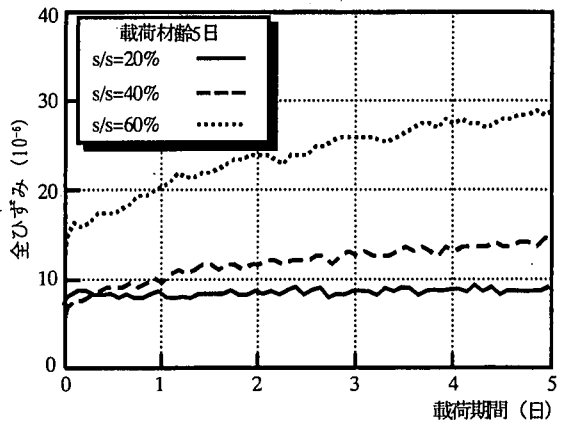


図-7 応力強度比と引張クリープひずみ  
(載荷材齢5日)

## (2) 応力強度比の影響

載荷材齢 1 日, 3 日, 5 日の引張クリープ試験における応力強度比と全ひずみの関係を図-5~7 に示す。若材齢に載荷したものほど, また応力強度比が大きいものほど, 載荷直後のクリープひずみの増加が大きいことがわかる。次に, 各載荷材齢での応力強度比と最終クリープひずみの関係をまとめて図-8 に示す。いずれの載荷材齢ともに, 応力強度比と載荷期間 5 日の最終クリープひずみは, 応力強度比 40%以下でも原点を通る直線関係は認められない。載荷材齢 1 日では, 他の載荷材齢に比べて低応力強度比でのクリープひずみの値が大きく, 応力強度比の影響はそれほど顕著ではない。また, 載荷材齢 3, 5, 7 日では, 応力強度比が 40%を超えるあたりからクリープひずみが増加する傾向が認められた。

この実験範囲では, 最終クリープひずみは, 載荷材齢 1 日を除いて応力強度比の影響を強く受ける結果となった。また図-8 より, 応力強度比の影響と載荷材齢の影

響を比べると, 引張クリープひずみは載荷材齢が大きくなるにともなって減少するが, 載荷材齢 1 日以外はほぼ同等ともみなせる。また, 図-8 より, 応力強度比が大きくなるにつれて載荷材齢による影響が小さくなっていることもわかる。載荷材齢 3 日以上で載荷材齢の影響が小さいことに関しては, 載荷材齢が大きくなると強度が増加するために, 応力強度比を一定とすると載荷応力が大きくなる。一方, 水和が進行しセメントペーストの骨格が堅固になってクリープが減少するが, その効果がほぼ同じで, お互いが相殺されたことによるものと考えられる。この推論を裏付けるものとして, 各載荷材齢ごとの載荷応力の大きさと最終クリープひずみの関係を図-9 に示す。同一応力を載荷した場合では, 載荷材齢が大きくなるにつれて最終クリープひずみは小さくなっていることがわかる。以上から, 水和の進行にともなって引張クリープが減少する要因と引張強度が上昇する要因は同じで, セメントペーストの骨格が堅固になることに起

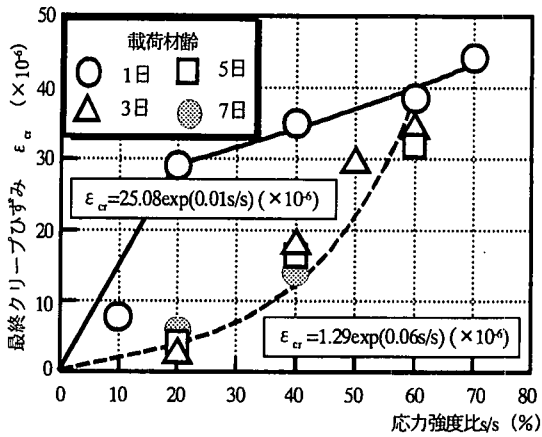


図-8 応力強度比と最終クリープひずみの関係

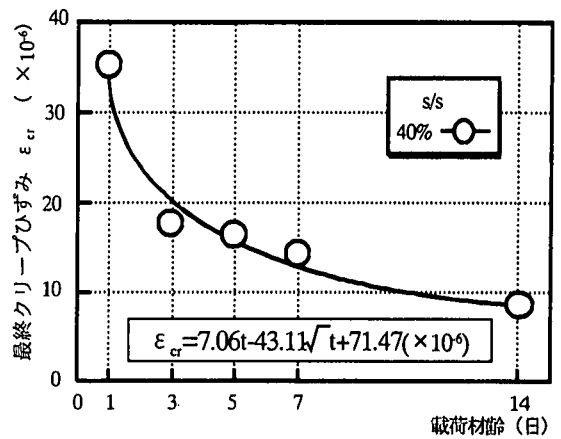


図-10 載荷材齢と最終クリープひずみの関係

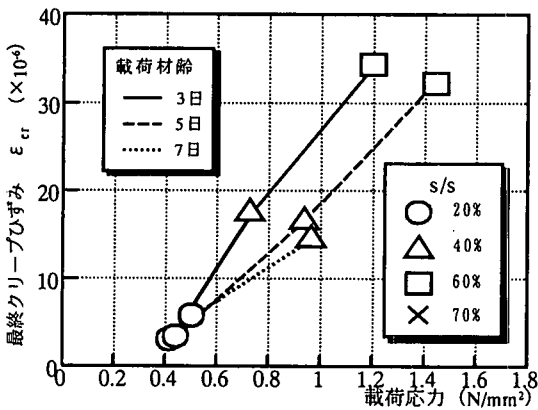


図-9 載荷応力と最終クリープひずみの関係

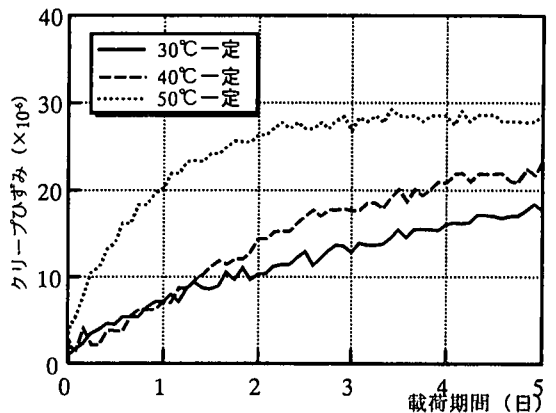


図-11 一定温度の影響 (載荷材齢 3日)

因すると考えられる。

応力強度比が60%以上では、載荷材齢の影響が少なくなるが、これは、60%以上の高い応力強度比では、クリープ破壊に対する限界のクリープひずみに近づいてきているものと思われ、材齢による影響よりも限界ひずみのほうが顕著に表れているものと推察される。従ってこの領域では、長期にわたって載荷するとクリープ破壊に至ったのではないかとと思われる。なお、後章で述べるが、応力強度比70%~80%においては、載荷後、1日以内にクリープ破壊したことからその可能性が考えられる。載荷材齢1日においては、応力強度比の影響が他の材齢より小さく最終クリープひずみが大きくなっている。これまで長期材齢のコンクリートのクリープでは、間隙中の水分移動によりクリープが生じるといわれているが、この現象は長期材齢のものに比べ応力強度比に依存しないでより大きなクリープひずみが生じる結果となっており、セメントペーストの骨格が弱いために、低応力強度比でも微細ひび割れなどの欠陥部ができやすく、それに伴ってクリープひずみが大きくなったものと推察される。

載荷材齢1日に関しては、クリープの発生メカニズムがその後の載荷材齢とは若干異なっているものと思われる。

### (3) 載荷材齢の影響

養生温度30°Cにおいて、載荷期間5日間の最終クリープひずみと載荷材齢の関係を応力強度比40%のケースについてまとめて図-10に示す。載荷材齢が大きくなるに従い、最終クリープひずみは減少するが、応力強度比が40%では、載荷材齢1日から3日の変化が大きくそれ以降は緩やかにほぼ直線的に減少している。載荷材齢3日以降で大きな変化が認められないのは、応力強度比を一定としていることによるものと考えられる。すなわち、載荷材齢3日以降では、材齢の経過とともにクリープは減少するが、強度が増大するために載荷応力が大きくなり、クリープの低減する割合が小さくなるものと考えられる。載荷材齢の影響については、後の養生温度の影響と合わせて考察する。

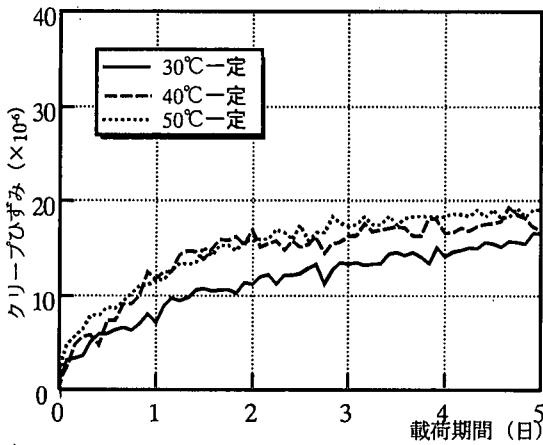


図-12 一定温度の影響 (載荷材齢 5 日)

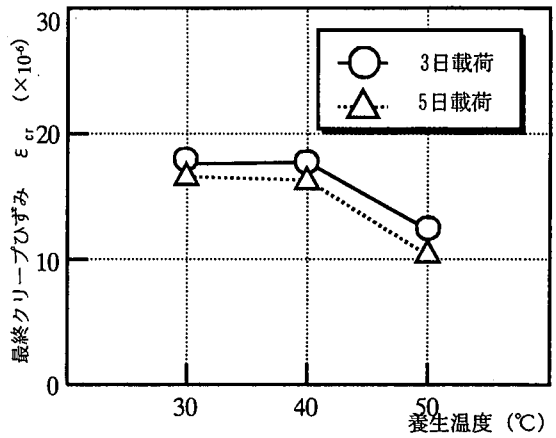


図-13 養生温度の影響

#### (4) 温度の影響

##### a) 一定温度の場合

温度の影響を評価するために養生温度および載荷温度を同一かつ一定として、30℃、40℃、50℃の温度条件のもとで引張クリープ試験を行った。なお、載荷材齢は3日および5日とし、応力強度比は40%とした。この場合、養生温度が異なっているために載荷時の強度はすべて異なっており、応力強度比を40%で一定としたことから載荷応力の大きさはすべて異なっている。載荷中のクリープひずみの変化を、図-11~12に示す。載荷材齢3日の場合、温度が高くなるにつれて載荷中のクリープひずみの伸びが大きくなっており、引張クリープは載荷中の温度の影響によって励起されることがわかる。また、載荷材齢5日では、温度が高い方がクリープひずみは大きくなっているが、その影響は載荷材齢3日のものに比べて小さい。養生温度も載荷温度も一定の条件下では、クリープは温度によって影響を受けるがその程度は若材齢ほど大きいといえる。

ここで示したケースでは温度一定としたが、温度の影響には養生中の温度と載荷中の温度の2つが影響すると考えられる。一般的に考えれば、養生中の温度が高いと水和が進行し、載荷材齢が大きいことと同じ影響が見られるであろうし、載荷中の温度が高ければ、クリープの原因である内部の間隙水の粘性を低下させるのでクリープは大きくなるであろうと考えられる<sup>1)</sup>。以下に、載荷中の温度を一定とし養生温度を変化させたケースと養生温度を一定とし載荷中の温度を変化させたケースについてクリープ試験を行い、結果をまとめた。

##### b) 養生温度の影響

載荷温度 30℃一定で養生温度を変化させた試験結果として、養生温度と最終クリープひずみの関係を図-13に示す。載荷材齢3日、5日ともに養生期間が短いことにより、30℃養生と40℃養生の差が明確には現れてい

ない。50℃で養生したものは明確に最終クリープひずみが小さくなった。また、すべての養生温度ともに載荷材齢5日については、3日と比べクリープひずみがやや小さくなっている。応力強度比40%一定で実施したこの実験では、養生温度が高温となることおよび養生期間が長くなることによって、クリープが小さくなる傾向が認められた。養生温度が引張クリープに与える影響を評価するために、Bazant らが25℃に対して求めた等価水和期間<sup>17)</sup>を本実験の基準温度30℃に置き換えて整理した。また、一般的に使用されている有効材齢を用いた場合についても整理した。等価水和期間と有効材齢は、次式で表わされる。

$$t_{eq} = \sum \left\{ \exp \left[ 4000 \left( \frac{1}{273 + T_0} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \right\} \Delta t \quad (2)$$

$t_{eq}$ : 等価水和期間

$t$ : 載荷期間

$T_0$ : 基準温度(℃)

$T$ : 載荷温度(℃)

$$t_{eff} = \frac{\sum (T + 10) \Delta t}{30} \quad (3)$$

$t_{eff}$ : 有効材齢

載荷温度 30℃のケースについて、等価水和期間および有効材齢と最終クリープひずみの関係を図-14~15に示す。どちらの式ともに良い一致を示すが、近似曲線に対する相関係数を算出すると等価水和期間を用いると0.911、有効材齢を用いると0.810となり等価水和期間のほうがより良く一致している。載荷温度の影響の考慮もあり、ここでは等価水和期間を用いることとした。

この等価水和期間の式は、引張強度の発現において養

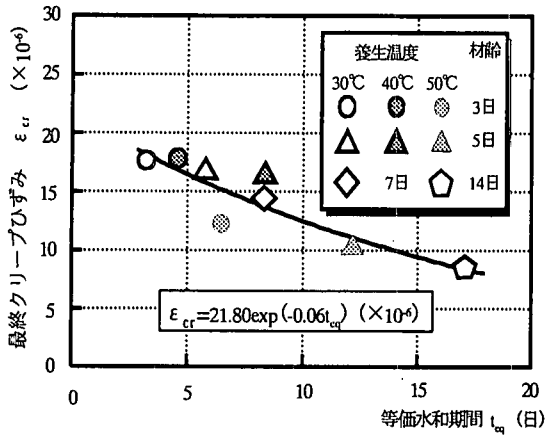


図-14 養生温度期間の影響

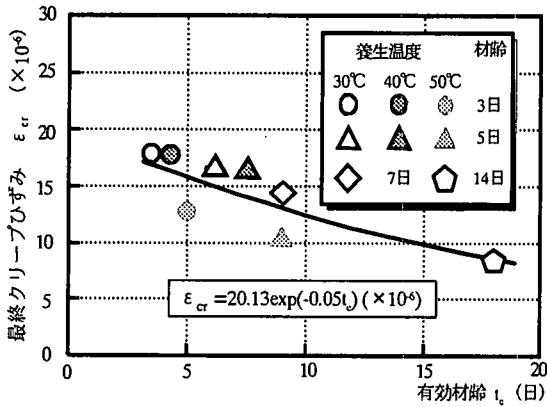


図-15 有効材齢の影響

生温度の影響を考慮する際にも適用できるとされており<sup>10)</sup>、引張クリープに与える養生温度および載荷材齢の影響は、機構的に見ても強度発現に与えるそれらの影響と同じものと推定される。

載荷材齢と養生温度の影響は、図-10 に示した 30°C の養生条件で求めた関係と 30°C を基準とした等価水和期間を用いて、式(4)のようにならわされる。

$$\epsilon_{cr}(t_{eq}) = 1.55t_{eq} - 13.07\sqrt{t_{eq}} + 35.42 \quad (4)$$

### c) 載荷中の温度の影響

応力強度比を 40%一定の条件で、載荷材齢 3 日と 5 日に関して養生条件を一定とし、載荷温度を 30°C~50°C の範囲で変化させたクリープ試験において、クリープひずみと載荷期間の関係を求めた。試験結果を図-16 ~17 に示す。載荷中の温度が高いほどクリープひずみが大きいことがわかる。コンクリートのクリープがレオロジー理論で表わされ、間隙水の粘性の変化によってクリープが励起されるとすれば、養生温度が一定の場合における載荷温度の影響は、アレニウスの式で表わされるとい

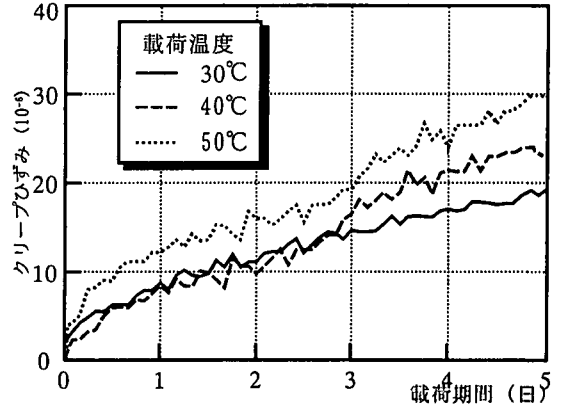


図-16 載荷温度の影響  
(載荷材齢 3 日 養生温度 30°C)

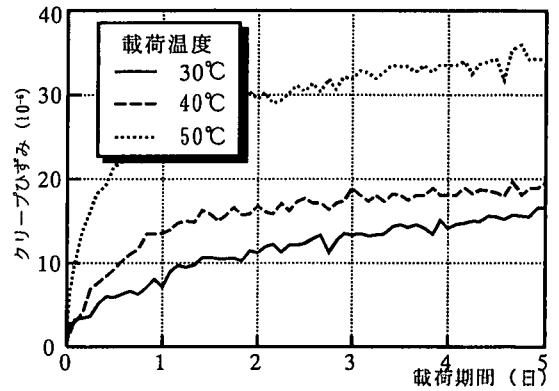


図-17 載荷温度の影響  
(載荷材齢 5 日 養生温度 30°C)

れている<sup>10)</sup>。ここではアレニウスの式に基づき活性化エネルギーを算出することを試み、温度の影響と載荷期間の影響を同時に考慮する方法について検討することとした。アレニウスの式は以下のとおりである。

$$k = \exp\left(\frac{\Delta U}{R}(273 + T)\right) \quad (5)$$

k : クリープひずみ速度

$\Delta U$  : 温度による活性化エネルギー変化量 (J/mol)

R : 気体定数 (8.315 J/mol/°K)

式(5)を時間で積分することによってクリープひずみが得られる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{cr}(t_{eq}) &= F \left( \int k dt \right) \\ &= F \left\{ \exp\left(\frac{-\Delta U}{R}(273 + T)\right) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$



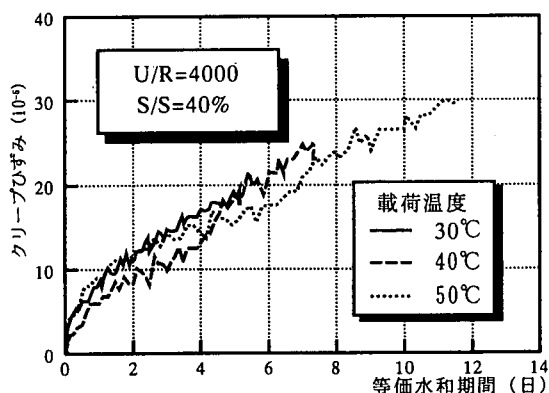


図-18 載荷温度の影響  
(載荷材齢3日 養生温度30℃)

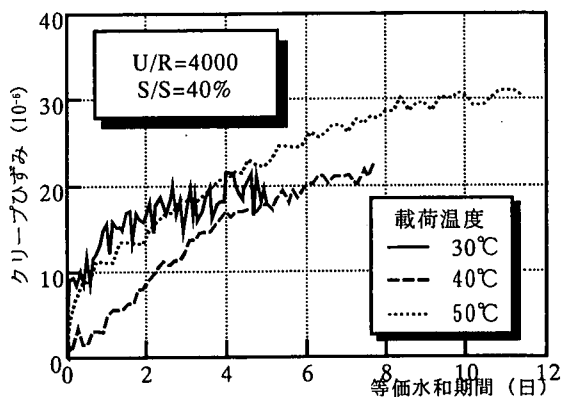


図-20 載荷温度の影響  
(載荷材齢3日 養生温度40℃)

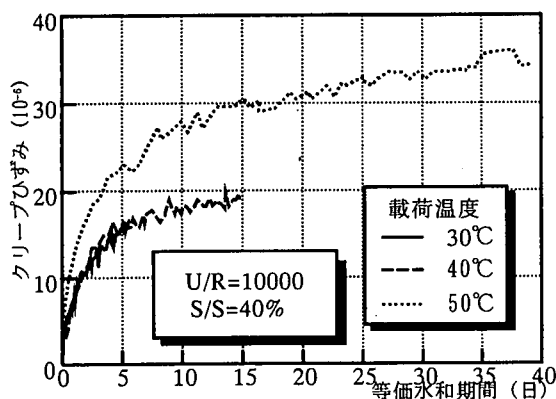


図-19 載荷温度の影響  
(載荷材齢5日 養生温度30℃)

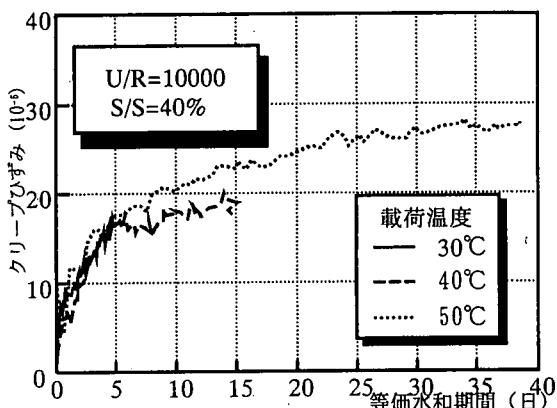


図-21 載荷温度の影響  
(載荷材齢5日 養生温度40℃)

本実験は 30℃を基本として構築しているために、30℃を基本温度として(6)を変換すると

$$t_{cq} = \sum \left\{ \exp \left[ \frac{-\Delta U}{R} \left( \frac{1}{273 + 30} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \right\} \Delta t \quad (7)$$

この式は、前述の等価水和期間(1)式と類似の式であり、式(1)の等価水和時間は、30℃を基準とし、 $\Delta U/R$ を4000としたことを意味している。ここでは、養生条件を一定とし載荷温度を変化させたケースにおいて、 $\Delta U/R$ をどの程度にすれば載荷温度と載荷期間の影響を同時に考慮できるかについて検討した。言い換えれば、若材齢の引張クリープにおいて、30℃から50℃までの活性化エネルギーを算定することで新たな修正等価水和期間を算出し、載荷温度と載荷期間の影響を考慮することを試みた。図-18～21に養生温度30℃と40℃の試験結果に対して、 $\Delta U/R$ を4000および10000として計算

した等価水和期間とクリープひずみの関係を示す。 $\Delta U/R$ の値を4000～15000まで変えて計算して比較検討した結果、3つの載荷温度の影響を完全に考慮できなかったが、最も良く合致する $\Delta U/R$ の値は、載荷材齢5日10000、載荷材齢3日で4000となった。これは載荷材齢3日の場合は、Bazantらの等価水和期間を適用できるが、載荷材齢が5日となると値が大きくなり、10000程度になることを示しているものと考えられる。活性化エネルギーに換算すると、材齢3日は33.5kJ/molで材齢5日は83.7kJ/molとなった。Wittmannらの研究<sup>20)</sup>によれば、圧縮クリープ試験から算出した活性化エネルギーは、20.9kJ/molであり、今回得られた数値は、それを上回るものである。

筆者らのこれまでの実験結果と比較すると、圧縮クリープでは、有効材齢あるいは等価水和期間で精度良く表わされたが、引張クリープでの載荷温度の影響は圧縮クリープにおける影響より大きく現れており、圧縮と引張で温度の影響の程度が違うものと推定される。また載

表-4 静的引張ひずみ能力

載荷材齢 (日)	載荷時間 (日)	応力強度比 (%)	弾性ひずみ ( $\mu$ )	クリープひずみ ( $\mu$ )	総ひずみ ( $\mu$ )	静的引張 ひずみ能力	無載荷状態での 収縮ひずみ( $\mu$ )
1	5	40.0	18	35	123	106	-36
1	5	70.0	28	42	122	92	-55
1	5	20.0	7	26	106	112	-39
3	5	20.0	24	28	120	108	-10

荷材齢が大きくなると活性化エネルギーが大きくなることに関しては、活性化エネルギーが高温度での水の移動によるクリープの励起を表わしているものとすれば、載荷材齢 1 日では水の移動の影響が少なく、内部欠陥等によるクリープの励起に依存する割合が大きいのことを意味しているものと推察される。活性化エネルギーを若材齢の引張クリープ試験より求めた例はなく、この数値が示す定量的意味についてここでは十分に解明できなかった。この点については、メカニズムの追求とも複合せせて今後の課題としたい。

(5) クリープひずみが破壊に与える影響

温度応力など拘束応力に対してひび割れの検討を行う場合は、クリープによる応力緩和を考慮してクリープひずみは、静的な破壊ひずみに影響を及ぼさないものとして検討を行っている。ここでは、クリープひずみが静的な破壊ひずみに与える影響を調べるために、クリープ試験が終了後、静的に荷重を増加させて引張破壊させた。破壊ひずみから弾性ひずみ、クリープひずみおよび無載荷供試体のひずみ(自己収縮等のクリープ以外の収縮ひずみの拘束分)を引いたものを静的引張ひずみ能力と定義した。応力強度比とクリープひずみおよび静的引張ひずみ能力を比較して表-4 に示す。また静的引張ひずみ能力と載荷した応力強度比の関係を図-22 に示す。応力強度比が静的引張ひずみ能力に与える影響を見ると、応力強度比 40%以下ではその影響がほとんど見られないが、70%では静的引張ひずみ能力が若干小さくなっているのがわかる。すなわち、これまでの温度応力解析では、クリープによるひずみ能力の低減は全く考慮していないが、本実験結果から、応力強度比が70%程度以上は応力強度比に応じてクリープひずみの影響を考えて、ひずみ能力の低減等を考慮しなければならないと思われる。なお、載荷材齢 1 日、応力強度比 80%と載荷材齢 5 日、応力強度比 80%は全荷重載荷した後、破壊した。試験機の不備から曲げモーメントが作用した可能性も否定できないが、80%以上でのクリープ破壊の可能性もあると思われる。

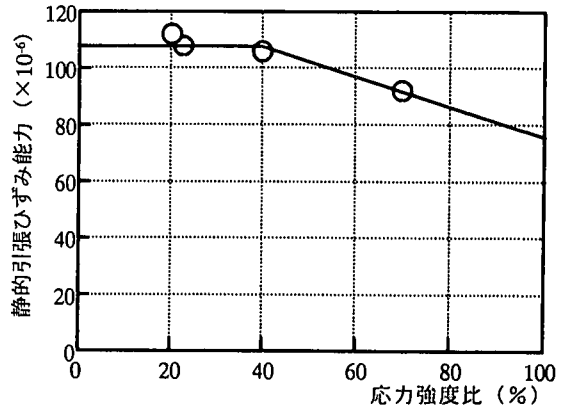


図-22 応力強度比と静的引張ひずみ能力

5. 引張クリープ式の提案

(1) 基本クリープ式

載荷材齢 3 日、養生温度 30℃、載荷温度 30℃、応力強度比 40%を基本条件として、このクリープひずみと載荷期間の関係を表わす基本クリープ関数を求めた。ここでは、圧縮クリープ関数と同様に<sup>1)</sup> Voigt 要素を 2 個を直列に結合し、それにさらに直列にダッシュポットを加えた 5 要素レオロジーモデルを用いた。実験結果から求めた基本クリープ式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \epsilon_{CR}(t) = & 13.13 (1 - \exp(-1.02t)) \\ & + 32.09(1 - \exp(-0.18t)) + 0.05t \quad (8) \\ t : & 30^\circ\text{C} \text{における載荷期間 (日)} \\ \epsilon_{CR}(t) : & \text{クリープひずみ} \end{aligned}$$

一方、載荷中の温度の影響に関する試験結果の考察として、引張クリープにおいては、載荷材齢 3 日の場合は Bazant らの提案する等価水和期間で良いが、5 日以降では、これより更に大きな係数を用いる必要があることを指摘した。本研究の対象とする温度応力においては、材齢によらず 1 つの水和期間式で考慮したいことおよび引張応力が発生するのは材齢 2 日～5 日程度になることが多いことから判断して、クリープの影響を若干大きく評価するが、ここでは以下に示す基準温度を 30℃とした修正等価水和期間を使用することとした。

$$t'_{eq} = \sum \left\{ \exp \left[ 10000 \left( \frac{1}{273 + 30} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \right\} \Delta t \quad (9)$$

$t'_{eq}$ :修正等価水和期間

修正等価水和期間を用いて基本クリープ式は次式で表わされる。

$$\varepsilon_{CR}(t'_{eq}) = 13.13(1 - \exp(-1.02 t'_{eq})) + 32.09(1 - \exp(-0.18 t'_{eq})) + 0.05 t'_{eq} \quad (10)$$

$t'_{eq}$  : 修正等価水和期間(日)

### (2) 載荷材齢の影響

載荷材齢がクリープひずみに与える影響については、載荷材齢を変化させた実験や養生温度を変えた実験より、養生温度の影響および載荷材齢の影響は、Bazant らの等価水和期間を用いて同時に表わされることが明らかになった。従って、ここでは、等価水和期間を用いて載荷材齢と養生温度の影響を考慮することとした。

載荷材齢と養生温度の影響は、式(3)であらわされるが、基本条件である載荷材齢 3 日を基準として基本クリープ関数に対する補正式を作ると式(12)のように表わされる。

載荷材齢 3 日を基準とすると、載荷材齢を補正する関数として次式が得られる。

$$F_L(t_{eq}) = 0.09t_{eq} - 0.75\sqrt{t_{eq}} + 2.03 \quad (11)$$

### (3) 応力強度比の影響

応力強度比の影響は、載荷材齢 1 日と載荷材齢 3 日以降で異なることがわかった。ここでは、載荷材齢 1 日を特殊な場合と考え、載荷材齢 1 日とそれ以外で補正関数を構築することとした。クリープひずみと応力強度比の関係は図-8 から、(11)式で表わされる。応力強度比 20% 以下では、既往の研究から<sup>20)</sup>、応力強度比と最終クリープひずみの間に線形関係が認められているのでここでは 20% のクリープひずみと原点を結ぶ直線で補完することとした。

$$\left. \begin{aligned} S/S \leq 20 \text{ の場合} \\ \varepsilon_{cr}(S/S) = 1.47S/S & \quad (t_{eq} \leq 1) \\ \varepsilon_{cr}(S/S) = 0.20S/S & \quad (t_{eq} \geq 1) \\ S/S \geq 20 \text{ の場合} \\ \varepsilon_{cr}(S/S) = 25.08 \exp(0.01S/S) & \quad (t_{eq} \leq 1) \\ \varepsilon_{cr}(S/S) = 1.28 \exp(0.06S/S) & \quad (t_{eq} \geq 1) \end{aligned} \right\} (12)$$

また、補正関数は応力強度比 40% を基準として、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} S/S \leq 20 \text{ の場合} \\ F_{s/s}(S/S) = 0.50S/S \\ S/S \geq 20 \text{ の場合} \\ F_{s/s,1}(S/S) = 0.73 \exp(0.008S/S) & \quad (t_{eq} \leq 1) \\ F_{s/s}(S/S) = 0.10 \exp(0.057S/S) & \quad (t_{eq} \geq 1) \end{aligned} \right\} (13)$$

### (4) 引張クリープ関数の提案

以上から、次の引張クリープ式を提案する。

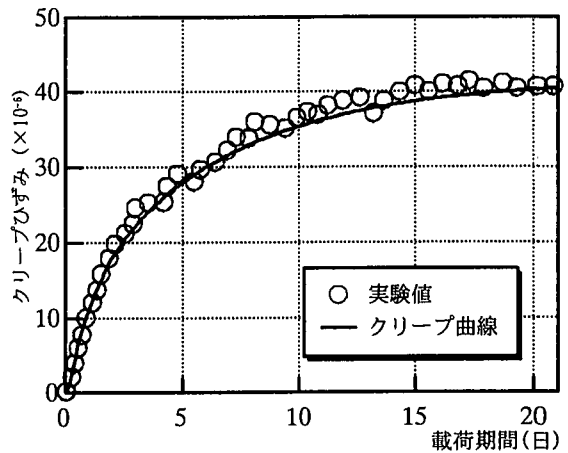


図-23 基本クリープ関数

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{CR}(t'_{eq}, t_{eq}, S/S) &= F_L(t_{eq}) \cdot F_{s/s}(S/S) \cdot \\ & \left[ 13.13(1 - \exp(-1.02 t'_{eq})) \right. \\ & \quad \left. + 32.09(1 - \exp(-0.18 t'_{eq})) \right. \\ & \quad \left. + 0.05 t'_{eq} \right] \\ t'_{eq} &= \sum \left\{ \exp \left[ 4000 \left( \frac{1}{273+30} - \frac{1}{273+T} \right) \right] \right\} \Delta t \\ t_{eq} &= \sum \left\{ \exp \left[ 10000 \left( \frac{1}{273+30} - \frac{1}{273+T} \right) \right] \right\} \Delta t \end{aligned} \right\} (14)$$

提案したクリープ関数を応力強度比 50%、養生温度 30℃、載荷温度 30℃ の場合の実験値と比較して図-23 に示す。載荷期間を 20 日としたこの試験結果に対して、クリープモデルより求めた解析値は良い一致を示している。

このことから、応力変化の期間が 20 日程度の温度応力解析に対して、基本クリープ式と重ね合わせ法の適用は可能であると考えられる。

## 6. 変動する温度・応力状態への適用性

### (1) 引張応力が増加する状態

養生温度 30℃ とし、載荷材齢 1 日とし載荷温度 30℃ の条件の下で、応力強度比を材齢の経過に合わせて 60% となるように変化させて、引張応力が増加する状態のクリープ試験を行った。載荷応力の変化とクリープひずみの変化について図-24 に示す。これに対して、提案した引張クリープ関数を適用し、重ね合わせ法適用することによって<sup>2)</sup>実測値と解析値を比較した。応力強度比の影響は増分応力を重ね合わせる方法では厳密に考慮できないが、応力強度比が 60% 程度では圧縮クリープ同様<sup>2)</sup>、重ね合わせ法を用いても両者は良く一致しており、実用上は重ね合わせ法が適用できると考えられる。応力強度

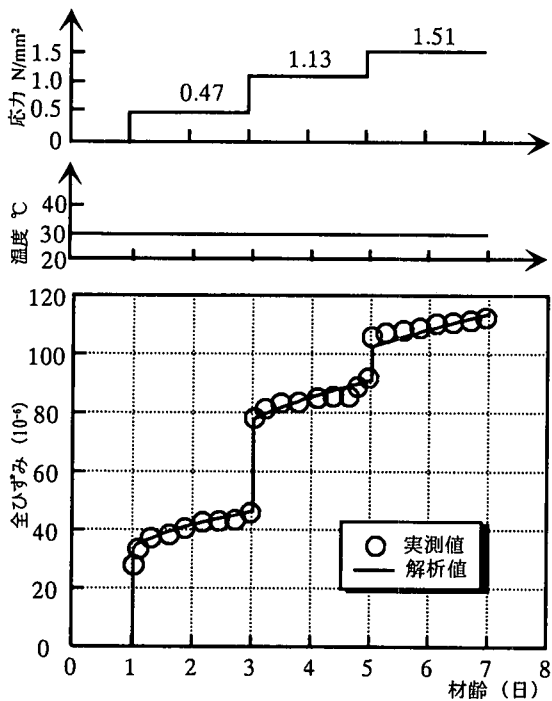


図-24 実測値と重ね合わせの比較

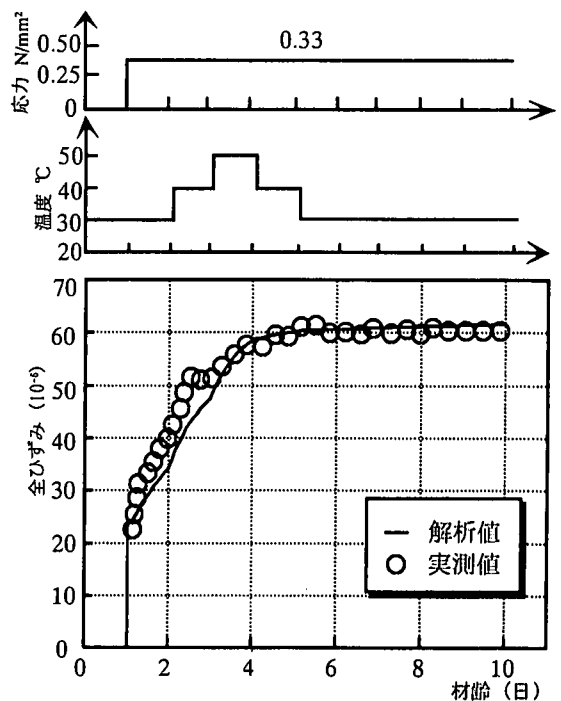


図-25 温度変化における適用

比が更に大きくなるとこの適応性は悪くなるものと思われる。

## (2) 温度が変化する状態

載荷応力を一定とし、載荷材齢 1 日、応力強度比 40% の応力載荷条件で載荷中の温度を変化させた場合について実測値と解析値を比較した。図-25 にその結果を示す。温度が上昇するとクリープが増加する傾向が見られるが、実測値と解析値はこの条件においても一致している。以上から、本クリープ関数を用いて重ね合わせ法を適用することにより温度が変化した場合の引張クリープひずみの変化を表現できるものと考えられる。

## 7. 結論

- 1) 載荷材齢 3 日~7 日において、引張クリープひずみに与える応力強度比の影響は大きい。応力強度比 20%~40% の低応力強度比においても、応力強度比とクリープひずみの間には線形性が認められない。また、60% 以上の高応力強度比になるとクリープひずみは急増した。
- 2) 載荷材齢 1 日における引張クリープひずみは、応力強度比 20%~40% の範囲において、載荷材齢 3 日~7 日のクリープひずみに比べて大きい。また、載荷材齢 1 日の応力強度比の影響は、載荷材齢 3~7 日に比較して小

- さい。載荷材齢 1 日では、低応力強度比においても微細ひび割れが発生しやすいために、クリープひずみが大きくなったものと推測される。
- 3) 若材齢の引張クリープにおいて、載荷材齢が大きくなると最終クリープひずみは小さくなるが、その影響は応力強度比の影響に比べ小さい。
- 4) 載荷材齢と養生温度の影響は、等価水和期間により同時に考慮できる。
- 5) 引張クリープにおける載荷中の温度の影響は、若材齢の圧縮クリープに比べて大きく等価水和期間を用いても十分評価できなかった。活性化エネルギーを 83.7kJ/mol とした修正等価水和期間を使用することにより載荷中の温度と期間の影響を考慮できることがわかった。
- 6) 応力強度比 20%~40% までは、クリープひずみは破壊ひずみにほとんど影響を与えない。しかし、応力強度比 70% になるとクリープ試験後の破壊に至るまでのひずみ能力の大きさが低下するなど影響が現れる。
- 7) Voigt とダッシュポットからなる 5 要素を用いたクリープ関数と重ね合わせ法の適用により、変動する応力・温度状態にも適用できるクリープモデルを構築できる。

活性化エネルギーとクリープのメカニズムの関係やクリープ破壊のメカニズムなどについては、今後のテーマとして研究を続けていく予定である。

## 参考文献

- 1) 入矢桂史郎, 平本昌生, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究, 土木学会論文集, V-40, pp.1~14, 1998.8.
- 2) 入矢桂史郎, 服部達也, 根本崇文, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの除荷過程におけるクリープ挙動のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, V-42, pp.165~174, 1999.2.
- 3) 入矢桂史郎, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープと引張クリープの比較に関する研究, 土木学会論文集, V-40, pp.105~117, 1998.8.
- 4) Domonne, P.L.: Uniaxial tensile creep and failure of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.26, No.88, pp.144~153, No.1974.
- 5) 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, pp.2~10, 1969.
- 6) Broudy, E.L.: The strength, shrinkage and creep of concrete as affecting the design of reinforced concrete structures containing liquid, Thesis of Ph.D., 1964.
- 7) 柿崎正義: 人工軽量コンクリートの収縮ひび割れ発生に関する研究(1), セメントコンクリート, No.316, pp.18~27, 1973.
- 8) 平本昌生, 入矢桂史郎, Guputa, S., 梅原秀哲: 若材齢コンクリートのクリープの材齢および載荷応力依存性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.775~780, 1997.
- 9) Gutsch, A. and Rostasy, F.S.: Young concrete under high tensile stress - creep, relaxation, and cracking, thermal cracking in concrete at early ages, Proceedings of the International RILEM Symposium, pp.111~118, 1994.
- 10) Hobbs, D.W.: Drying shrinkage of symmetrically reinforced concrete and some estimates of the creep of concrete in tension, Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete, 1982.
- 11) Cook, D.J.: Factors affecting the tensile creep of concrete, International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, Japan 1971.
- 12) Neville, A.M. and Brooks, W.H.: Creep of plain and structural concrete, Construction Press, 1983.
- 13) Hauggaard-Nielsen, A.B.: Mathematical modeling and experimental analysis of early age concrete, Ph.D. Thesis of Technical University of Denmark, 1997.
- 14) Morin, D. and Maso, J.C.: Fluage en traction des beton ordinaires et des beton legers, Materiaux et constructions, Vol.15, No.89.
- 15) Morimoto, H. and Koyanagi, Y.: Estimation of stress relaxation in Concrete at Early Ages, Thermal Cracking in Concrete at early ages, Proceedings of the International RILEM Symposium, pp.95~102, 1994.
- 16) Al-Kubaisy and Young, A.G.: Failure of concrete under sustained tension, Magazine of Concrete Research, Vol.27, No.92, pp.171~178, 1975.
- 17) Bazant, Z.P. and Panula, L.: Practical prediction of time dependent deformations of concrete. Part IV: Temperature effect on basic creep, Material and Structures, No.66, pp.171~178, 1978.11.
- 18) Brooks, J.J., Wainwright, P.J. and Al-Kaisi, A.F.: Compressive and tensile creep of heat cured ordinary Portland cement and slag cement concrete, Magazine of concrete research, No.154, pp.1~12, 1991.3.
- 19) 大岸佐吉, 和田光生, 岸谷孝一, 小坂義夫, 岡島達雄, 滝口克己: コンクリートの高温多軸クリープの研究, 日本建築学会論文報告集第285号, pp.1~10, 1977.11.
- 20) Straub, P. and Wittmann, F.H.: Activation energy and activation volume of creep of hardened cement paste, material science and Engineering, Vol.15, pp.227~230, 1974.
- 21) 後藤忠広, 上原匠, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートのクリープ挙動, コンクリート工学年次論文報告集 VOL. 17, No. 1, pp.1133~1138, 1995.

(1998. 7. 29 受付)

## STUDY ON THE TENSILE CREEP FOR EARLY AGE CONCRETE Keishiro IRIYA, Takafumi NEGI, Tatsuya HATTORI and Hidetaka UMEHARA

Effects of the stress-strength ratio, loaded age, and temperature in curing and loading on the tensile creep in early age concrete have been investigated in this study. The effect of the stress strength ratio was significant and its relationship with creep strain could be described by an exponential equation. The loaded age influenced only the results of loading at 1 day, but little effect was observed in other loaded ages. Although the effect of curing temperature and loading period could be assessed by equivalent periods of hydration, temperature effect during loading was much significant. Since activation energy was calculated 83.7 kJ/mol, modified equivalent periods of hydration based on the value as demonstrated was compared with experimental results. The creep model with Voigt rheological elements was presented and demonstrated to predict creep strain on varied loading pattern and temperature change.