

論文 若材齢のクリープがコンクリートの引張破壊に与える影響に関する検討

根木崇文^{*1} 入矢桂史郎^{*1} 梅原秀哲^{*2}

要旨: 若材齢時に生じるクリープがコンクリートの引張破壊に及ぼす影響について実験的研究を行った。その結果、クリープひずみの大きさは引張強度に影響を与えないことがわかった。また、ひび割れ抵抗性を検討するため、静的引張ひずみ能力という指標を用い、クリープひずみがある状態で破壊までのひずみ能力について検討した。また、高応力強度比下で重ね合わせ法により、応力変動下のクリープひずみの評価かできるかどうかを確認するために、温度応力状態を模擬した応力下での試験を行い、重ね合わせ法の適用性について検討した。

キーワード: 若材齢, クリープひずみ, 引張クリープ, 重ね合わせ法, 温度応力

1. はじめに

温度応力に起因する温度ひび割れは、部材を貫通する場合が多く、構造物の外観に影響を与えるだけでなく、耐久性を著しく低下させる。温度ひび割れを制御するには温度応力を低減する対策を講じる必要がある。温度ひび割れ対策は、一般には温度応力解析に基づいて計画される。温度応力解析には若材齢コンクリートの正確な物性値の把握が必要である。しかし、クリープの影響については定量的評価が十分になされておらず、正確に温度応力を予測することを複雑にしているのが現状である。

コンクリートのクリープ挙動については古くから多くの研究がなされているが、そのほとんどがプレストレストコンクリートのリラクセーションや構造物の不静定力算定を目的としているため、材齢 28 日以降に荷重が載荷される場合を対象としている。従って、若材齢コンクリートのクリープ挙動の定量化については多くの研究がなされていない状況にある。

筆者らは、温度応力の予測精度の向上に資するために、若材齢コンクリートを対象にクリープ実験に基づいたクリープ挙動の定量的評価を行ってきた^{1), 2)}。温度応力に対するクリープの取り扱い方法は、変化する応力であることを考慮して重ね合わせ法による取り扱いが広く用い

られているが、高応力強度比になると非回復性のクリープひずみが増加し、応力強度比に依存して非線形性を示すため、クリープひずみを重ね合わせ法で取り扱った場合、高応力強度比の下では、クリープの影響を過少評価する可能性がある¹⁾。

本研究では、高応力強度比下でのクリープひずみの評価方法を検討するために、

- ① クリープひずみが引張破壊(ひび割れ)に与える影響
 - ② 変化する応力状態での重ね合わせ法の適用性
- の2点について実験的研究を行った。

2. 配合

本研究で使用した材料は、普通ポルトランドセメント、山砂(豊田市田村山産, $\gamma=2.55$, F.M=2.82)、砕石(春日井市外之原産, $\gamma=2.65$, F.M=6.67)で、使用したコンクリートの目標強度は 30N/mm^2 程度(28 日圧縮強度)の A E コンクリートとした。表 1 に示方配合を示す。

表 1 コンクリートの配合

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

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

*2 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

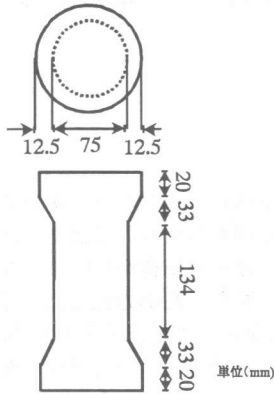


図1 供試体の断面図と平面図

3. 試験方法

(1) 供試体の作製方法

クリープ試験には、中心部分が $\phi 7.5 \times 13.4$ cmのドックボーン型供試体を用いた。図1に供試体の断面図と平面図を示す。クリープひずみと供試体温度を測定するために、供試体内部に埋め込み型ひずみ計と熱電対を設置した。载荷中は温度、湿度を制御したが、水分蒸発による乾燥収縮を防ぐために、供試体側面をアルミテープで被覆し、水分蒸発を防止した。試験は、引張载荷のみのものと先行圧縮力を受ける引張载荷のものと2種類行った。養生は、ともに打設後は温度 20°C 、湿度60%の恒温室内に24時間静置した後、温度 30°C で所定材齢まで湿潤養生槽内に静置した。

(2) 载荷方法

養生後には、湿度98%に制御した恒温恒湿槽を有するてこ式引張クリープ試験機を用いて、応力を载荷した。引張クリープ試験機は図2に示すように、中心に軸力を作用させることにより引張応力を作用することができるものである。応力载荷の方法は図3に示す治具を供試体の両端に装着し、鉛直方向に応力を加えた。また、自己収縮等のクリープ以外のひずみは、同一環境内に静置した無载荷供試体により測定したひずみを载荷供試体のひずみから差し引いて補正した。クリープ試験終了後に破壊への影響を調べるために、荷重を増加させコンクリートを引

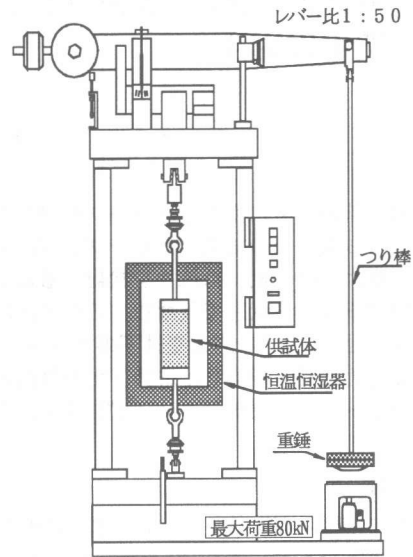


図2 引張クリープ試験機

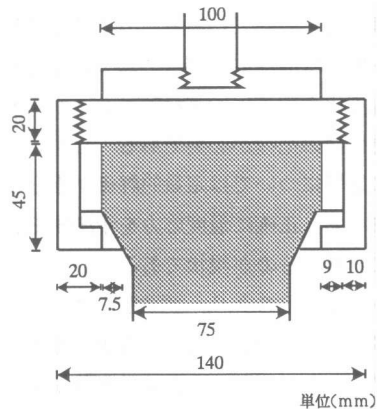


図3 载荷に使用した治具

張破壊させた。载荷中温度は、引張载荷のみのものは 30°C 一定、先行圧縮力を受けるものは、温度応力に対応して温度変化させた。

(3) 実験ケース

実験ケースを表2に示す。クリープの影響が大きく見られる若材齢時に着目し、载荷パターンは図4に示す2種類とした。No.1~12は単純引張载荷(type A)で、No.13, 14は温度応力状態を模擬した応力载荷(type B)である。また、高応力強度比下でのクリープひずみの評価方法を検討するために、応力強度比(=载荷応力/強度)は10%~70%の範囲とした。No.13, 14

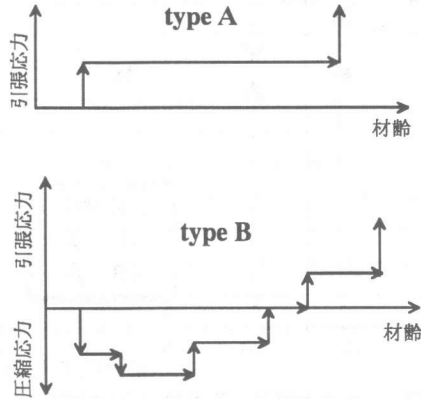


図4 載荷パターン
表2 実験ケース

No.	載荷材齢 (日)	載荷期間 (日)	応力強度比 (%)	先行圧縮力 (N/mm ²)	載荷方法 type AorB
1	1	24	10	0.0	A
2	1	5	20	0.0	A
3	1	5	40	0.0	A
4	1	23	60	0.0	A
5	1	5	70	0.0	A
6	3	5	20	0.0	A
7	3	5	40	0.0	A
8	3	28	50	0.0	A
9	5	5	40	0.0	A
10	5	5	40	0.0	A
11	5	5	50	0.0	A
12	7	5	40	0.0	A
13	7	4	68	1.0	B
14	11	6	59	1.0	B

の数値は、引張応力載荷してからの値であり、応力強度比は破壊に至る直前までに載荷した全応力に対するものとした。

4. 引張強度に与えるクリープの影響

ここでは、引張破壊の指標として引張強度に着目し検討を行った。クリープにより、引張強度がどのような影響を受けるかについて、引張載荷のみのシリーズである No.1~No.12 について検討した。

図5に載荷供試体と無載荷供試体の引張強度試験結果を示す。ここで、引張強度とはクリープ試験機により軸引張力で破壊した時の値である。図より、若材齢時に載荷されたもののうち、試験材齢が14日以前のものについては、無載荷のものに比べ、強度の増進が認められる。また、載荷されたものの強度は、引張強度試験時の材齢に影響されず、ほぼ一定である。さらに、

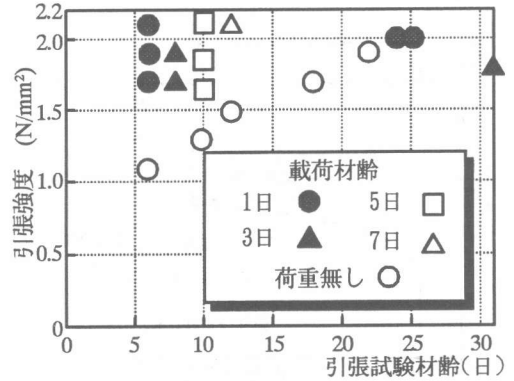


図5 引張強度結果

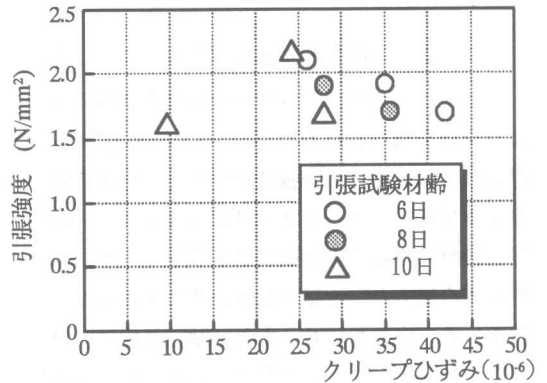


図6 クリープひずみの影響

載荷後の引張強度はほぼ安定した状態の引張強度である材齢20日のものとほぼ一致している。

図6にクリープひずみが引張強度に与える影響を示す。図より、引張強度の平均は約1.8N/mm²であるが、全体的にみると、クリープひずみが大きくなっても引張強度は大きく変わらないといえる。従って、荷重を載荷すると強度が増加するが、クリープひずみの大小は今回の応力強度比10%~70%の範囲では引張強度に影響を与えないといえる。

5. クリープがひずみ能力に与える影響

次に荷重載荷の影響が引張破壊ひずみ（以下破壊ひずみと称す）に与える影響について検討した。一般にクリープひずみはコンクリートの伸び能力すなわち破壊ひずみに影響を与えないとして、温度応力の検討ではクリープひずみ分の応力緩和を見込んでいる。

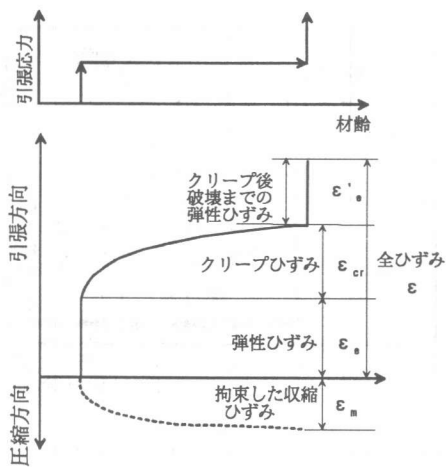


図7 ひずみの発生パターン

ここでは、クリープひずみが破壊ひずみに与える影響を調べるために、クリープ試験終了後、静的に荷重を増加し引張破壊させて、その時のひずみを測定した。クリープがコンクリートのひび割れに与える影響を検討する上で、引張弾性ひずみ能力という指標を用いることにした。以下にその定義を示す。また、試験過程におけるひずみ発生パターンを図7に示す。ひずみの符号は、伸びを正とした。

$$\text{引張弾性ひずみ能力} = \epsilon_e + \epsilon'_e - \epsilon_m$$

ε_e: 弾性ひずみ

ε'_e: クリープ後弾性破壊までの弾性ひずみ

ε_m: 拘束した収縮ひずみ

拘束した収縮ひずみはクリープ試験での無荷荷供試体のひずみを使用した。

荷重応力が引張強度にどのような影響を及ぼすか調べるために、引張強度比という指標を用

$$\text{引張強度比} = \frac{\text{荷重供試体の引張強度}}{\text{無荷荷供試体の引張強度}}$$

いることにした。定義は以下に示す。

無荷重データが無い材齢に対しては、無荷重の引張強度データから近似式より推測をした。

図8に応力強度比と引張強度比の関係を示す。

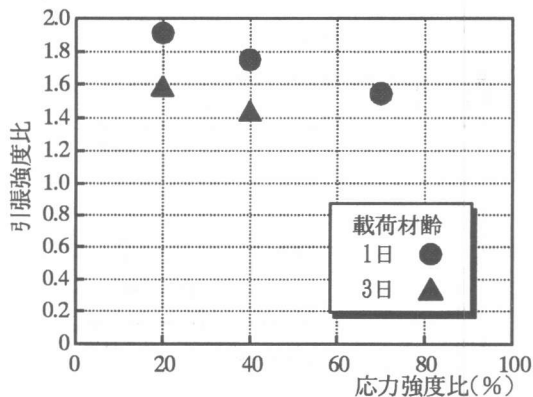


図8 応力強度比と引張強度比の関係

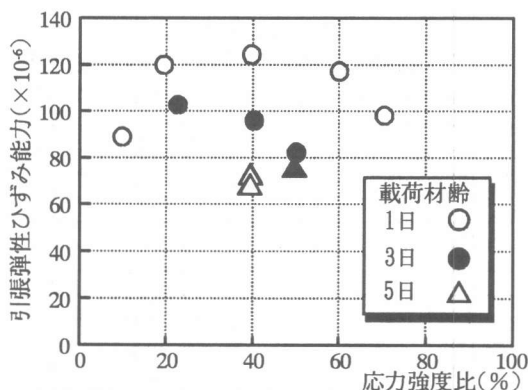


図9 応力強度比と引張弾性ひずみ能力の関係

図5において、若材齢時において荷重応力の影響が大きいことが確認されたため、使用データは、荷重材齢1, 3日とし、No2,3,5~7とした。

図より、荷重材齢1, 3日ともに応力強度比が大きくなると、引張強度比が減少している。また、1日の方が3日より引張強度比が大きくなっている。このことより、荷重する応力により引張強度の伸びが影響を受けており、応力強度比が大きくなると引張強度比は低下するといえる。また、データが少ないが荷重材齢が大きくなると荷重応力による引張強度の伸びが小さくなるのがわかる。

図9に応力強度比と引張弾性ひずみ能力の関係を示す。図より、70%までの範囲では、応力強度比が大きくなると若干引張弾性ひずみ能力が低下するが、あまり大きな影響はみられない。

図10にクリープひずみが引張弾性ひずみ能力に与える影響を示す。クリープひずみが大き

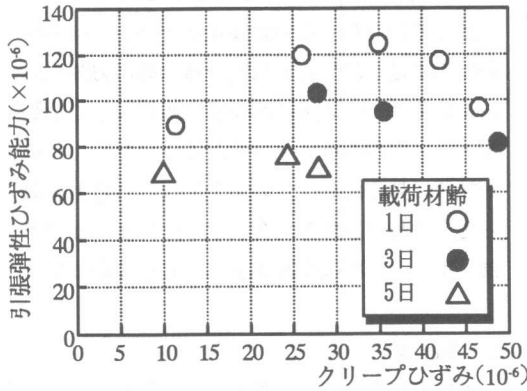


図 10 クリープひずみと引張弾性ひずみ能力の関係

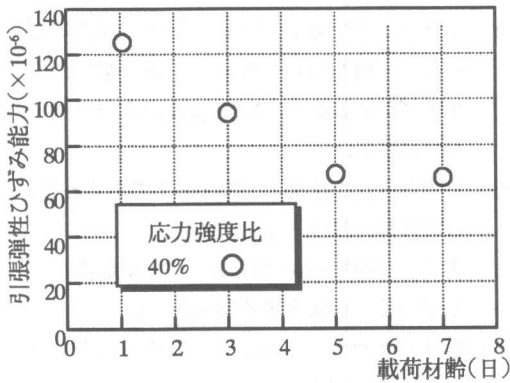


図 11 荷材齢と引張弾性ひずみ能力の関係

くなるとひずみ能力は低下することがわかる。しかし、荷材齢の影響の方が大きいように見える。全体的にみると、若材齢コンクリートほどクリープひずみの大きさが破壊に与える影響は大きい。

図 11 に応力強度比 40%のものについて、荷材齢と引張弾性ひずみ能力の関係を示す。図より、荷材齢が大きくなると引張弾性ひずみ能力が小さくなっている。また、荷材齢 5 日ではひずみ能力が材齢 1 日の約 50%まで減少しており、それ以降は 60×10^6 付近に収束する傾向が見られる。

これは、クリープによる水分移動や微細ひび割れの進行と水和の進展による鉱物の生成が同時に生じるため、若材齢ほど初期の欠陥部の修復程度が大きいことに起因するものではないかと思われる。

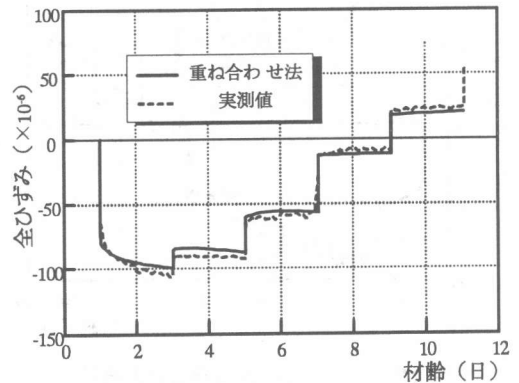
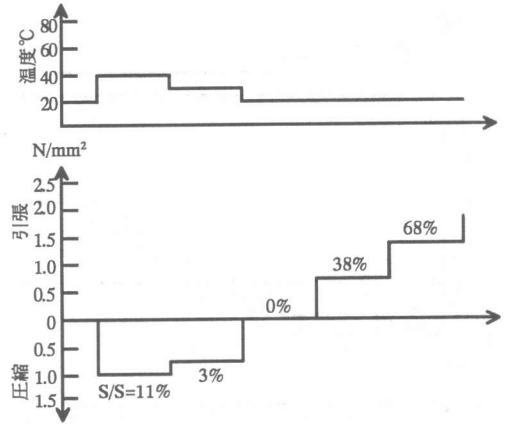


図 12 壁モデルの重ね合わせ法

6. 変化する応力状態での重ね合わせ法の適用性

温度応力を模擬して、高応力強度比下でかつ変化する応力状態でのクリープ試験を行った。ここでは、壁(急速昇温・急速降温)モデル、およびマット(急速昇温・緩速降温)モデルで生じる温度応力状態を想定し、温度・応力変化が異なる No.13, 14 の 2 ケースについて検討を行った。荷重応力は CP 法で概略の温度応力解析を実施し、応力値を決定した。温度の影響は、温度によってクリープひずみが増加することのみについて考慮した。温度が変化すると、自由膨張ひずみが生じるが、本実験では埋め込み型ひずみ計によってクリープひずみを測定しているため、その影響はひずみ計の線膨張係数とコンクリートの線膨張係数差を補正することによって測定値に含まれないようにした。また、本クリープ試験機は、この原理によって荷重載荷

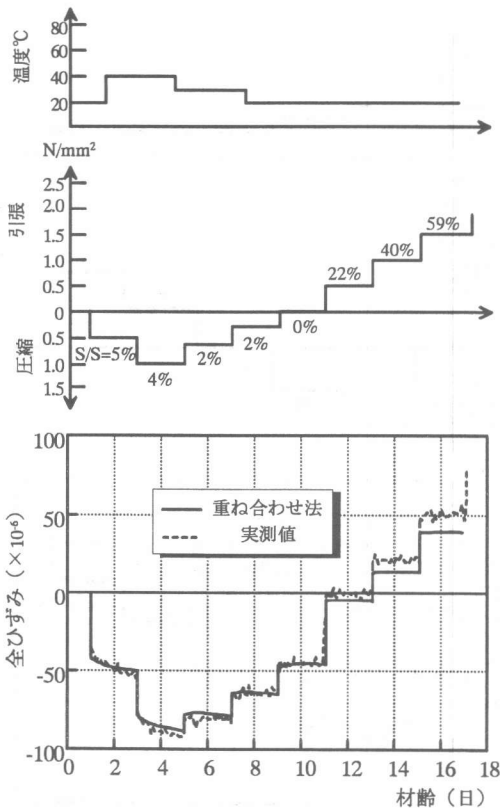


図 13 マットモデルの重ね合わせ法

をしているので、温度が変化しても応力一定である。温度変化と応力変化を図に示す。各応力強度比は、各応力変化材齢で、同じ温度、湿度状態で養生した供試体の引張強度試験を行ない決定した。

(1)重ね合わせ法

温度応力に対するクリープの取り扱い方法は、変化する応力であることを考慮して重ね合わせ法が広く用いられている。ここでは、これまでに構築したクリープモデルを用い³⁾、重ね合わせ法による解析値と、変動応力下のクリープ実験値を比較した。

(2)適用性の評価

図 12、図 13 に比較した結果を示す。これらの図より、壁モデルを想定した急速温度降下では、引張応力が荷重されてからよく一致しており、高応力強度比においても十分に応力増分による重ね合わせ法が適用できるといえる。マットモデルを想定した緩速温度降下では、引張応

力が荷重されてから応力強度比 22%ではよく一致しているが、応力強度比が 40%、59%の場合は実測値とは少し離れている。高応力強度比において約 $5 \sim 10 \times 10^{-6}$ 程度実測値より過小評価し、応力強度比が大きくなるにつれて、それが顕著に見られる。このように 10 日以上に渡って応力荷重される場合には、重ね合わせ法では、クリープを過少評価することがわかった。

7. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- 1) クリープひずみの大きさは引張強度にはほとんど影響しない。しかし、若材齢時にクリープが生じると、14 日強度以内では強度が増進する。
- 2) 応力強度比の影響は、70%以上であらわれ、ひずみ能力は低下する。
- 3) クリープひずみが 35×10^{-6} 以上になると、ひずみ能力が低下する傾向がある。
- 4) 荷重材齢が大きくなると、ひずみ能力が低下する傾向がある。
- 5) 重ね合わせ法において、壁モデルのような応力変化の速いものに対しては、応力増分法で破壊に至るまでの高応力強度比まで適用できる。
- 6) マットモデルのように 10 日以上に渡って応力荷重される場合については、重ね合わせ法では高応力強度比になるとクリープひずみを過少評価する。

参考文献

1) 入矢, 平本, 服部, 梅原: 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, 1998.8
 2) 服部, 入矢, 上原, 梅原: 若材齢コンクリートにおける引張クリープの温度依存性に関する研究, コンクリート工学年次報告論文集, Vol.20, No.1, pp.1133-1138, 1998.6
 3) 平本, 入矢, S.Gupta, 梅原: 若材齢コンクリートのクリープの材齢および荷重応力依存性, コンクリート工学年次報告論文集, Vol.19, No.1, pp.775-780, 1997.6