

論文 コンクリートの圧縮・引張応力領域におけるクリープ挙動の相違に関する実験的研究

阿部 哲雄*1・下村 匠*2

要旨: 精度良く引張クリープ試験を実施可能な持続引張載荷試験装置を用いて、引張クリープに及ぼす載荷応力の大きさ、応力の変動、乾燥の影響について、圧縮クリープと比較しながら検討した。その結果、乾燥、非乾燥どちらの場合においても、同一応力では引張クリープの方が圧縮クリープよりも大きい傾向にあった。また、引張クリープは応力に対する明確な線形関係は見られなかったが、圧縮クリープを含めた載荷応力のスケールで考えれば、引張クリープは圧縮クリープの延長線上で扱って差し支えないことが明らかとなった。さらに、線形重ね合わせ則では変動応力下の引張クリープを正確に表現できないことが分かった。

キーワード: 圧縮クリープ, 引張クリープ, 線形クリープ, 重ね合わせ則

1. はじめに

コンクリートの圧縮クリープに関する研究は古くから数多く行われてきた。その結果、応力レベルが小さい範囲では圧縮クリープは応力に対して線形な現象として取り扱えること、変動応力下のクリープ挙動は重ね合わせの原理に基づいて概ね評価できること、乾燥によりクリープが増加すること、などの基本的性質が明らかにされ、それらが構造物の設計に反映されている。

一方、収縮による応力の導入やひび割れの発生を予測する場合に必要なのは実際には引張クリープである。また、プレストレストコンクリート構造物のコンクリートに発生する応力度は圧縮から引張までの広い範囲にわたる。しかしながら、引張クリープを直接対象とした研究事例は少なく、引張クリープは圧縮クリープと同じ性質を仮定して取り扱われることが多い。そこで本研究では、引張クリープの基本的性質を圧縮と対比しつつ実験的に検討することを目的とする。

数少ない引張クリープに関する研究を概観すれば、国内では温度応力解析を念頭においた若材齢コンクリートを対象とした入舩ら¹⁾の研究が挙げられる。系統的な実験を行い圧縮クリープと対比させながら、引張クリープに及ぼす種々の因子の影響を検討している。また、海外における研究の一例としては、引張クリープに及ぼす応力レベル、セメントペースト量、載荷時材齢、繊維混入量といった主要な因子の影響度を調べた、Bissonnetteら²⁾の研究がある。各種因子の影響度を明らかにするとともに、実験結果に基づき引張クリープのメカニズムについて考察している。しかしながら、既往の研究における引張クリープの性質の解釈は各研究者によって相違し、統一した見解が得られていないのが現状である³⁾。さらに、既往の研究の多くは、非乾燥条件下における一定応

力下の引張クリープの検討がほとんどであり、乾燥条件下や変動応力下における引張クリープについては未解明である。

コンクリートに純引張応力を持続的に作用させ、乾燥条件と載荷条件を制御しながら精度の良いデータを取得するのは容易ではない。著者らは既往の研究⁴⁾において、安定して精度良く引張クリープ試験を実施可能な持続引張載荷試験装置を開発した。本研究では、本試験装置を圧縮領域にも適用可能なように改良し、これを一部に用いて引張クリープに及ぼす載荷応力の大きさ、応力の変動、乾燥の影響を試験し、圧縮クリープとの相違について検討を行う。

2. 実験概要

2.1 実験シリーズ

実験シリーズは表-1に示すように、応力領域、乾燥条件をパラメータとして、CS, CD, TS, TD, RS, RDの6シリーズに大別される。なお、表-1の応力強度比は、クリープ試験の直前に実施した圧縮強度試験から得られた圧縮強度または圧縮強度から推定した引張強度を

表-1 実験パラメータ

実験シリーズ	試験体名	応力領域	乾燥条件 (S:シール D:ドライ)	初期載荷(一定応力)		載荷に含まれる操作 (載荷経路:図-1参照)			配合	
				載荷応力 (MPa)	応力 強度比(%)	一定 載荷	応力 増加	除荷		載荷パ ターン
CS	CS 2.0 a	圧縮	非乾燥(S)	-2.0	4.8	○	-	○	a	1
	CS 4.0 a			-4.0	9.6					
	CS 8.0 a			-8.0	19.2					
	CS 8.0 b			-8.0	13.8					
CD	CD 2.0 a		乾燥(D)	-2.0	4.8	○	-	○	a	1
	CD 4.0 a			-4.0	9.6					
	CD 8.0 a			-8.0	19.2					
	CD 8.0 b			-8.0	15.0					
TS	TS 0.5 c	引張	非乾燥(S)	0.5	14.5	○	○	○	c	2
	TS 1.0 c			1.0	29.0					
	TS 1.5 c			1.5	43.5					
TD	TD 0.5 c		乾燥(D)	0.5	15.3					
	TD 1.0 c			1.0	30.6					
	TD 1.5 c			1.5	45.9					
RS	RS 2.0 d	反転	非乾燥(S)	-2.0	3.3	○	-	-	d	
RD	RD 2.0 d		乾燥(D)	-2.0	3.3					

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設専攻 (学生会員)

*2 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 教授 博(工) (正会員)

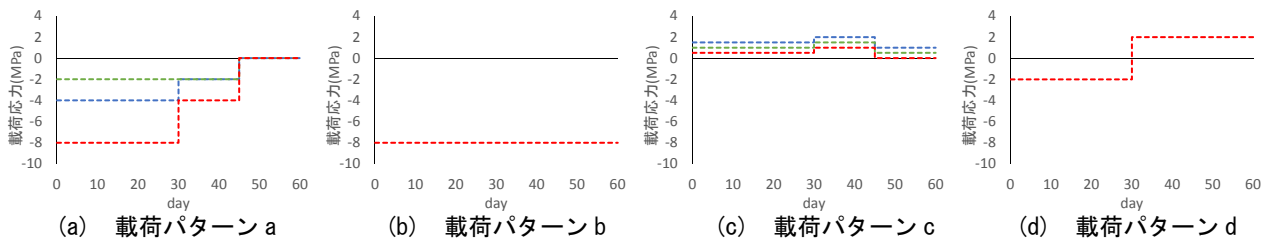


図-1 荷重経路図

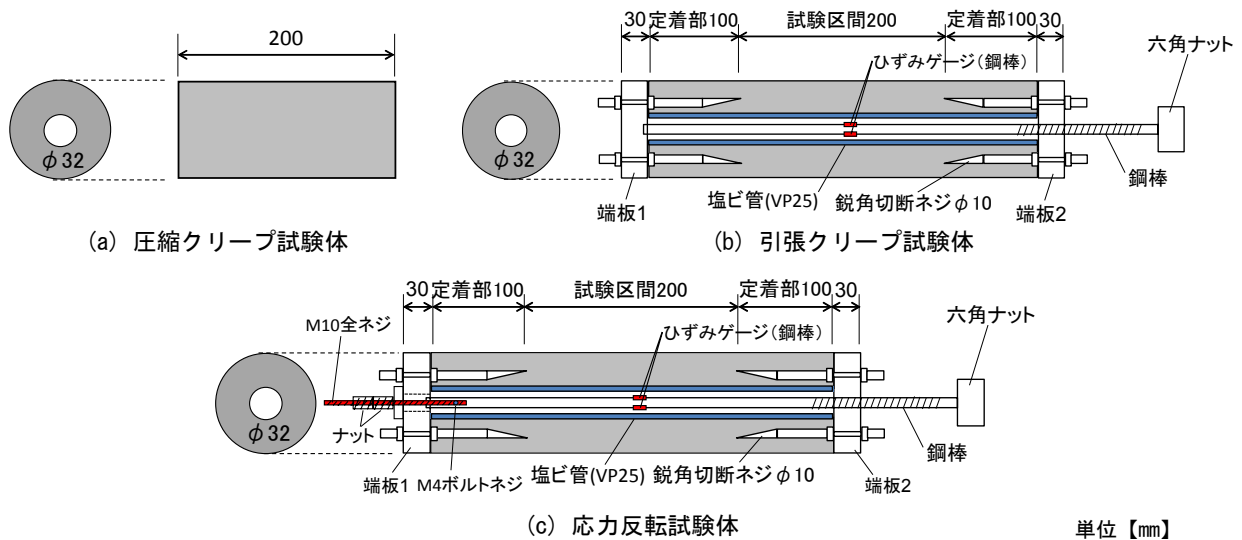


図-2 試験体概要図

表-2 コンクリートの配合

(a) 配合 1

W/C	s/a	air	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
50	50	5	170	340	888	891	C×0.5%

(b) 配合 2

W/C	s/a	air	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
40	47	5	174	434	800	890	C×0.55%

用いて求めている。CS, CD シリーズは圧縮クリープの実験シリーズであり、初期荷重応力を 2MPa, 4MPa, 8MPa の 3 水準としている。TS, TD シリーズは引張クリープの応力に対する線形性、重ね合わせ則の成立の可否および乾燥の影響について検討するものである。初期荷重応力は、既往の多くの研究では圧縮クリープにおいて応力強度比が約 40%以下の範囲でクリープの線形性が成り立つとされていることを参考に、引張強度に対する応力強度比が約 15%の 0.5MPa, 約 30%の 1.0MPa, 約 45%の 1.5MPa の 3 水準とした。RS, RD シリーズは、圧縮応力から引張応力に反転する荷重パターンである。

それぞれの詳細な荷重経路は図-1 に示す。荷重応力経路は基本的に初期荷重期間を 30 日、応力を変化させた後の期間を 15 日としている。

実験は、恒温恒湿室(室温 20±1℃, 相対湿度 50±5%)で実施した。非乾燥試験体の封緘処理はポリエチレン袋を試験体に二重に巻きつけ端部をテープで厳重に固定することによって行った。同様の封緘処理を施した無荷重

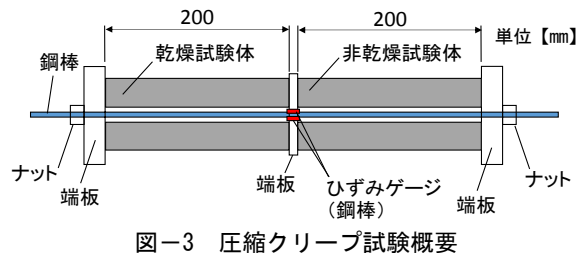


図-3 圧縮クリープ試験概要

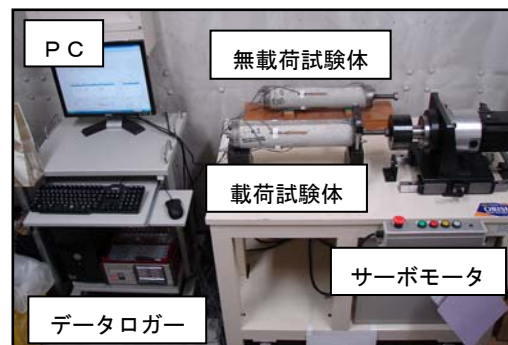


写真-1 持続引張荷重試験装置

試験体の自由収縮ひずみを測定することによって乾燥が防がれていることを確認している。乾燥試験体に関しては、それぞれのシリーズ毎に荷重試験体と同様の試験体形状をした無荷重試験体を作製し、荷重試験体と同一の乾燥開始材齢、乾燥条件の下、自由収縮ひずみを測定し、試験体の有効ひずみの算出に用いた。

2.2 試験体

図-2 に試験体概要を示す。(a) 圧縮クリープ試験体、(b) 引張クリープ試験体、(c) 応力反転試験体ともに試

験区間は外径 100mm, 内径 32mm, 長さ 200mm の中空円筒で共通である。

図-2 (a) の圧縮クリープ試験体は試験体全体が試験区間である。図-2 (b) の引張クリープ試験体⁴⁾は試験区間の両端から 100mm ずつの区間は定着区間であり直径 10mm の先端を鋭角に切断したボルトを 4 本ずつ埋め込んである。中空円筒の中心の鋼棒の圧縮力の反力により、端板を介してコンクリートに引張応力が導入される仕組みである。図-2 (c) の応力反転試験体は、引張クリープ試験体の端板 1 と鋼棒を接合し圧縮力と引張力の両方が伝達できるように改良を施したものである。なお、試験体数は各ケースにつき 1 体である。

コンクリートの配合は表-2 に示す通りである。セメントは普通ボルトランドセメントを使用した。CS, CD シリーズの一部では水セメント比 50% (配合 1), TS, TD, RS, RD シリーズでは、引張応力による試験体の破

断を避けるために強度を高くすることを意図して、水セメント比 40%とした (配合 2)。打設した試験体は水分の散逸を防ぐため打設面を直ちにポリエチレンのフィルムで覆い、恒温恒湿室 (室温 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$, 相対湿度 $50 \pm 5\%$) にて試験開始時 (材齢 28 日) まで型枠内で養生を行った。

2.3 荷重方法

圧縮クリープ試験は図-3 に示すように、乾燥試験体と非乾燥試験体を直列に設置し、試験体の中心に通した鋼棒を、油圧ジャッキを用いて緊張しナットで定着することで試験体に圧縮応力を導入して行った。試験中の荷重応力の制御は鋼棒に貼り付けた 2 枚のひずみゲージの平均値をモニターし、荷重応力が減少したときには、所定の荷重応力となるように調整した。コンクリートひずみは、各試験体に 2 枚貼り付けたひずみゲージによって測定し、その平均値を採用した。

引張クリープ試験および応力反転を含む試験は、写真

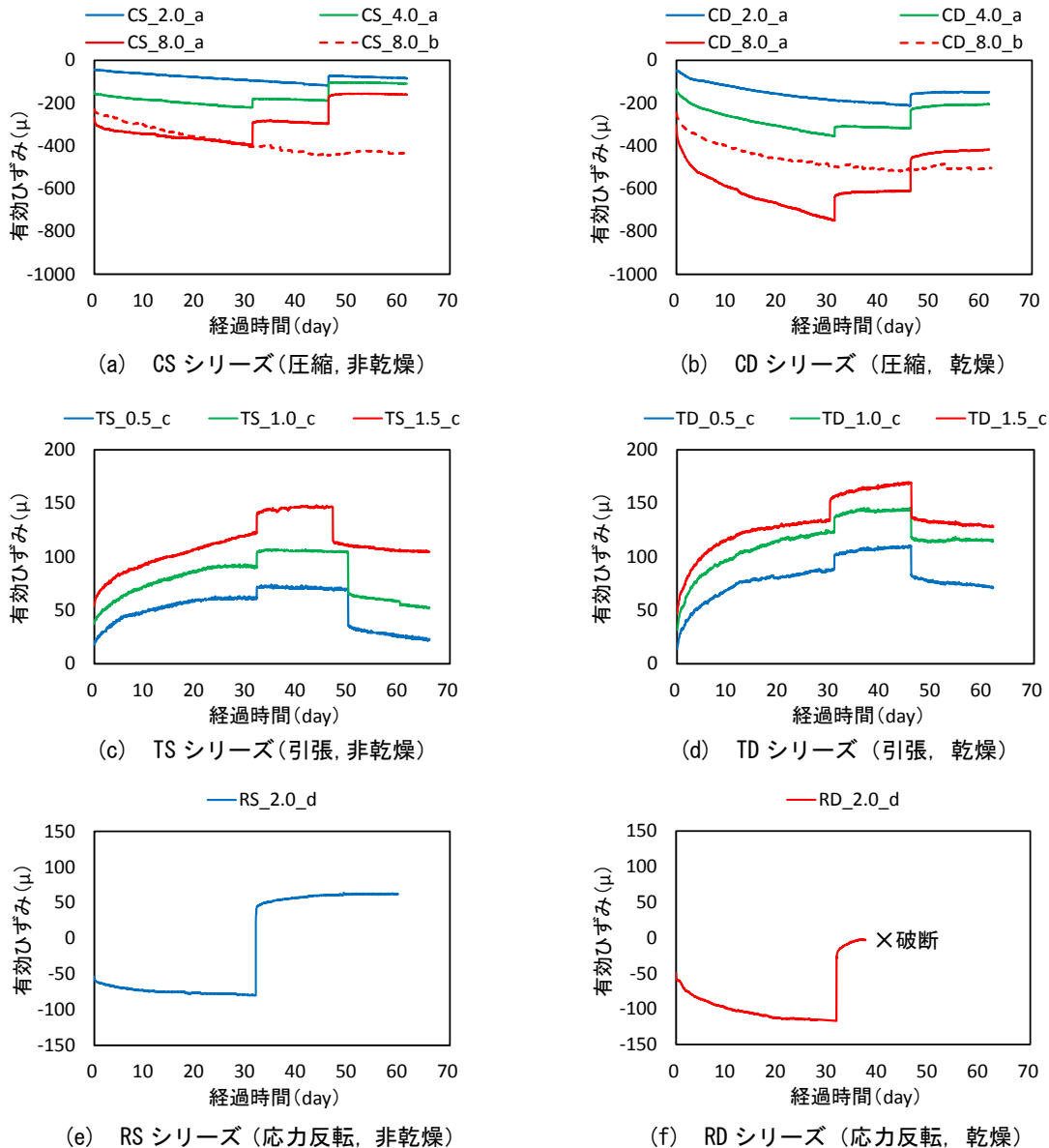


図-4 各シリーズにおける有効ひずみ

—1 に示す持続引張載荷試験装置⁴⁾を用いて行った。複数の試験体を並行して載荷する場合は、上記の装置を用いて載荷する試験体と同時に手で鋼棒を回転させて載荷する試験体を試験し、試験中は鋼棒のひずみをモニターして所定の載荷応力となるように調整した。コンクリートひずみは、各試験体に貼り付けた4枚のひずみゲージによって測定し、その平均値を採用した。

載荷時材齢0日、30日、45日において瞬間的に応力を載荷、除荷させる場合については、その応力調整作業を10分以内に完了させた。

3. 実験結果

図-4 に各シリーズにおける実験結果を示す。ひずみは有効ひずみを示している。有効ひずみは、非乾燥試験体では全ひずみに一致し、乾燥試験体は全ひずみから無載荷試験体の自由収縮を差し引いた値である。以下では、図-4 に示した有効ひずみから弾性ひずみを差し引いたクリープひずみにより種々の検討を行う。弾性ひずみは、所定の応力を載荷した瞬間に増加したひずみの計測値により同定している。

3.1 クリープひずみの応力に対する線形性の検討

図-5 に CS, CD シリーズの載荷応力を変動させた圧縮クリープ試験体(載荷パターン a)と TS, TD シリーズ(載荷パターン c)について、載荷日数30日におけるクリープひずみと載荷応力の関係を乾燥試験体、非乾燥試験体毎に示す。なお、圧縮クリープひずみと圧縮載荷応力は符号を反転して正の値として表示している。

まず、圧縮クリープひずみに着目すると、クリープひずみと載荷応力の関係の回帰直線が原点近くを通る傾向が認められ、従来の一般的な知見である応力強度比が小さい範囲におけるクリープひずみの応力に対する線形性が確認できる。

次に、引張クリープひずみに着目すると、非乾燥試験体の引張クリープひずみは載荷応力の増加に伴い直線的に増加する傾向が認められるが、原点近くを通る直線ではない。載荷応力が1.5MPaの乾燥試験体の引張クリープひずみは、他の試験体の傾向と異なった。本実験の範囲内では引張クリープひずみの応力に対する明確な関係は見られなかった。これらは、載荷応力が極めて小さいことによるクリープひずみの測定精度の低下や、乾燥収縮の程度が試験体ごとに異なることに起因するものと考えているが、明確な原因は明らかではない。

引張クリープひずみにのみ着目した場合、試験体のばらつきによって精度は悪くなり、一概に引張クリープひずみの線形性成立の可否について述べることはできない。ただし、引張クリープは載荷応力の絶対値が圧縮クリープに比べて小さい範囲での現象である。図-5 を概観す

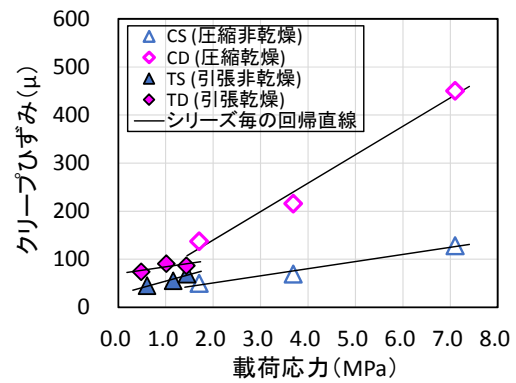


図-5 クリープひずみ(30日)と載荷応力の関係

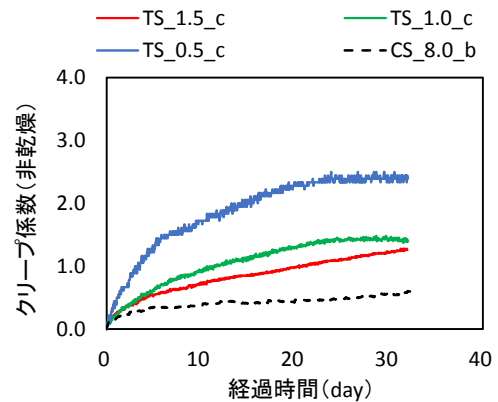


図-6 圧縮・引張クリープ係数の比較(非乾燥)

ると引張クリープひずみのデータは圧縮クリープひずみのデータのほぼ延長線上にあるとみなせる。したがって、圧縮クリープを含む載荷応力のスケールで考えれば、引張クリープひずみの線形クリープ則からの乖離は小さく、引張クリープひずみを圧縮クリープひずみと同じ法則で表現しても実質的に問題無いといえる。

3.2 圧縮・引張クリープ係数の大きさの違い

図-6 に非乾燥条件下における圧縮クリープ係数と引張クリープ係数の比較を示す。クリープ係数はクリープひずみを所定の初期載荷応力を載荷した瞬間に増加した弾性ひずみで除することにより算出した。TS_0.5_c 試験体が他の試験体と比べクリープ係数が大きくなっているが、これは3.1節で先述したように、載荷応力が極めて小さいことによるクリープひずみの測定精度の低下が原因と推察している。TS_1.0_c, TS_1.5_c 試験体のクリープ係数がほぼ一致しており、その値は圧縮クリープの代表的な結果である CS_8.0_b よりも大きい。既往の研究によると、非乾燥条件下では、長期材齢における引張クリープひずみは圧縮クリープひずみより大きくなる報告が多いようであり(例えば^{5),6)}28日間養生を行った後、引張クリープ試験を実施した本実験結果も既往の引張クリープ実験結果と整合性があるものと思われる。

図-6 より、従来用いられてきた圧縮と引張のクリープひずみの大きさは同じとする Davis-Granvill の法則は厳密には成立しないことが明らかとなった。収縮ひび割

れの予測等，引張応力が卓越する場合にはこのことを考慮する必要があるものと思われる。一方で，3.1 節で述べたように，引張クリープはそのひずみや応力の絶対値が圧縮クリープに比べて小さい範囲での現象であることから，圧縮応力が卓越する場合には両者を同じクリープ係数で扱っても，大きな問題とはならない。

3.3 重ね合わせ則に関する検討

図-4 (c) に示した非乾燥条件下における変動応力下での引張クリープに対して，重ね合わせ則の適用性を検討した。まず，一定応力下における引張クリープの経時変化より，図-7 に示した 5 要素レオロジーモデルを用いてクリープ関数を同定した。クリープ係数がある程度一致した TS_1.0_c および TS_1.5_c 試験体の単位クリープひずみの平均を回帰することによって，式(1)を得た。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sp_t}(t) = & 8.93[1 - \exp(-0.94t)] \\ & + 36.07[1 - \exp(-0.06t)] + 0.18t \quad (1) \end{aligned}$$

ここで， $\varepsilon_{sp_t}(t)$: 単位引張クリープ(μ /MPa), t : 時間 (day) である。

重ね合わせ則を用いてひずみの経時変化を計算した結果の一例 (TS_1.0_c 試験体) を図-8 (a) に示す。引張クリープひずみは，応力が増加した後，計算値と実験値との間で乖離が生じている。重ね合わせ則を仮定した方法では変動応力下のクリープひずみを正確に再現出来ないことがわかる。

次に図-4 (e) に示した非乾燥条件下における応力が圧縮から引張に反転した場合のクリープひずみについて重ね合わせ則の適用性を検討した。まず圧縮クリープ関数は RS_2.0_c 試験体の単位クリープひずみを 5 要素レオロジーモデルに対して回帰することにより，式(2)のように同定した。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sp_c}(t) = & 3.45[1 - \exp(-5.99t)] \\ & + 8.94[1 - \exp(-0.11t)] \quad (2) \end{aligned}$$

ここで， $\varepsilon_{sp_c}(t)$: 単位圧縮クリープ(μ /MPa)である。

重ね合わせ則を用いてひずみの経時変化を計算した結果を図-8 (b) に示す。図-8 (b) より，引張応力領域において多少の誤差はあるものの計算値は実験値の傾向と概ね一致している。3.2 節で明らかになったように同一応力レベルでは引張クリープひずみは圧縮クリープひずみよりも大きいので，圧縮から引張に反転した際には，大きなクリープひずみを生じるものと思われたが，実験結果はそのような傾向にはなく，圧縮クリープ関数を用いた重ね合わせ則で再現できた。ただしこれは応力反転後の引張クリープ挙動はバージン引張クリープの挙動と異

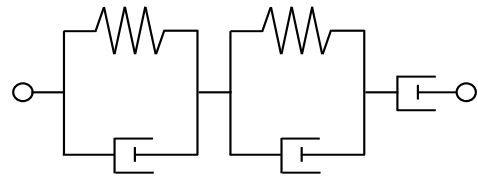


図-7 5要素レオロジーモデル

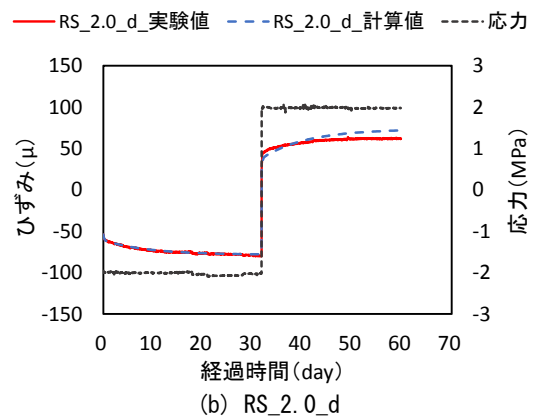
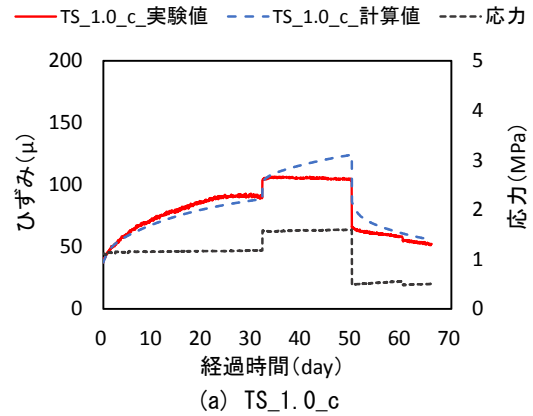


図-8 重ね合わせ則の適用結果 (非乾燥)

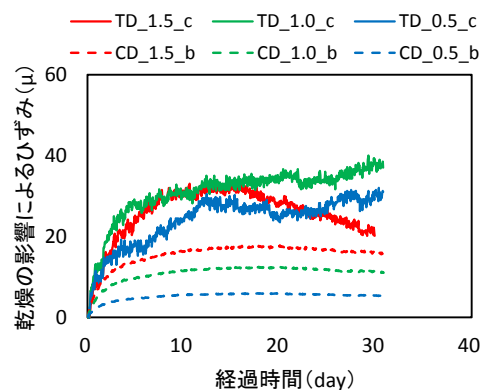


図-9 乾燥の影響によるひずみ

なるために，結果的に計算値と近くなったものと考察している。

3.4 クリープに及ぼす乾燥の影響

図-5 に示した TS, TD シリーズを比較すれば，同一応力レベルにおいて乾燥試験体の引張クリープひずみは非乾燥試験体のそれよりも大きく，圧縮クリープと同様に乾燥によってクリープひずみが増加することがわかる。乾燥によって増加したクリープひずみ (すなわち乾燥ク

クリープ)を抽出し、**図-9**に示す。算出にあたっては乾燥試験体のクリープひずみから非乾燥試験体のクリープひずみを差し引くことにより算出した。また、同図には線形クリープ則を仮定してCS_8.0_b試験体とCD_8.0_b試験体の結果より算出した乾燥によって増加した圧縮クリープひずみを併せて示す。引張応力下における乾燥によって増加したクリープひずみは応力レベルによって大きな差異は認められなかった。さらに、その大きさは圧縮クリープと比較して大きく、引張クリープの方が乾燥の影響を受けやすいことがわかった。

乾燥条件下において、重ね合わせ則を適用することは乾燥の影響が顕著な荷重開始初期のクリープ式を変動応力分に対して重ね合わせることになるため正しくない。さらに、変動応力下の引張クリープは**3.3節**で述べたように過去の応力履歴の影響を受けることが推察される。したがって、乾燥条件下の変動応力が生じた引張クリープを計算するためには、乾燥の程度と過去の応力履歴の影響を考慮したクリープ式を重ね合わせる必要があるものと思われるが、これについては今後の課題としたい。

4. 引張クリープの機構に関する考察

4.1 引張クリープと圧縮クリープの違い

図-6に示したように引張クリープ係数は圧縮クリープ係数よりも大きい。これは、両者のクリープ発生機構が異なることが考えられる。クリープの発生機構に関する既往の主要な学説にはシーページ説、マイクロクラック説、遅延弾性説などがあるが、単独の説ではクリープ現象を説明出来ず、複数を組み合わせて説明されることも多い。このうちマイクロクラック説は、持続応力下においてペーストと骨材間の局所的なすべり破壊が起こり、その時間依存の変形をクリープと捉えるものである。圧縮応力下に比べ、引張応力下においては骨材とペースト界面のマイクロクラックの進展が顕著であると仮定すると、圧縮クリープ係数よりも引張クリープ係数の方が大きくなったことがマイクロクラック説で説明可能となる。マイクロクラック説によって説明されるクリープひずみは非回復性の塑性ひずみである。**図-4(c)**に示した引張クリープひずみの経時変化に着目すれば、除荷した後の回復クリープひずみはわずかであることから、マイクロクラックの進展が引張クリープひずみの発生機構に関係している可能性が示唆される。

4.2 乾燥条件下のクリープ発生機構

3.4節(図-9)で述べたように、乾燥条件下の引張クリープは圧縮クリープよりも乾燥の影響を受けやすい。**図-4(b)**および**図-4(d)**に示したCD、TDシリーズの実験結果に着目すれば、圧縮、引張とも除荷後にそれほど顕著な回復クリープが見られないことから、乾燥さ

せた場合のクリープひずみの大部分が非回復性の機構によって生じている可能性が考えられる。

5. 結論

本研究では乾燥、非乾燥条件下において荷重応力および荷重経路を実験変数とした引張クリープ試験を実施し、コンクリートの引張クリープ性状と圧縮クリープ性状との相違について比較検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 引張クリープは圧縮クリープほど応力に対する明確な線形関係は見られなかった。しかし、圧縮クリープと同一の荷重応力のスケールでプロットすると引張クリープは圧縮クリープの延長線上において概ね表現できることが確認された。
- (2) 非乾燥条件下において、引張クリープ係数は圧縮クリープ係数よりも大きい。
- (3) 線形重ね合わせ則は応力が変化した時の引張クリープ性状を正しく表現できない。
- (4) 引張クリープにおいても、圧縮クリープと同様に乾燥によってクリープひずみが増加する。乾燥によって増加したひずみを圧縮・引張の同一応力レベルで比較した場合、引張応力下の方がそのひずみは大きい。

参考文献

- 1) 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, No.559, pp.105-117, 1998
- 2) Benoit Bissonnette, et al.: Tensile Creep of Concrete: Study of Its Sensitivity to Basic Parameters, Materials Journal, Vol.104, Issue.4, pp.360-368, Jun.2007
- 3) Hilaire, A., et al.: Analysis of Concrete Creep in Compression, Tension and Bending: Numerical Modeling, Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete, pp.348-355, Sep.2013
- 4) 齋藤明幸, 下村匠, 田中泰司, 青木優介: 中空円筒供試体を用いたコンクリートの拘束収縮試験装置の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.667-672, 2009
- 5) J. M. Illston: The creep of concrete under uniaxial tension, Magazine of Concrete Research, Vol.17, Issue.51, pp.77-84, Jun.1965
- 6) 吉武勇, 浜田純夫, 中村秀明, 永井泉治: 水和反応を制御した若材齢コンクリートの圧縮・引張クリープ比較, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.263-268, 2000.2