

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

入矢 桂史郎¹・服部 達也²・根木 崇文²・梅原 秀哲³

¹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)

²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

³正会員 Ph.D. 名古屋工業大学大学院 教授 都市循環システム工学専攻

若材齢コンクリートのクリープ挙動に関する研究のうち、除荷後のクリープ挙動のモデル化について研究した。モデル化の方法として、①除荷後の回復ひずみ関数を構築する方法 ②クリープ関数を基に重ね合わせ法を適用する方法などがあるが、この両者について実験値と比較して、その適応性を検討した。クリープ試験より、除荷後の回復ひずみは、除荷時の応力強度比に依存していることが明らかになったので、除荷時の応力強度比に着目した回復ひずみ関数を構築した。その関数を段階的に応力が減少する条件下のクリープ試験結果と比較した結果、良く一致することを確認した。一方、重ね合わせ法に関しては、圧縮応力載荷後の除荷過程を引張応力の増加と考えると実験値とよく一致するが、圧縮クリープ関数を用いた場合でも適用は可能である。

Key Words : early age, creep, thermal stress due to hydration heat, unloading process, compressive creep, tensile creep, stress strength ratio

1. まえがき

セメントの水和熱に起因する温度ひび割れは、外部からの拘束を受けた場合、躯体を貫通するひび割れとなりやすく、コンクリート構造物の耐久性において問題となる。また、この応力が内部拘束のみで生じた場合にも、発生時期が若材齢であることからひびわれ幅が大きいものになりやすい。温度応力は、セメントの硬化過程で発生するものであり、材料の物性変化に加えて構造形式や施工方法、さらに環境条件が複雑に絡み合って発生するために、正確な予測を困難にしている。土木学会コンクリート標準示方書（以下 RC 示方書と称す）においても解析手法を定義し、その方法に基づいて解析した温度ひび割れ指数と、実際の構造物におけるひび割れの関係をひび割れ発生確率の形で求め、ひび割れ指数の大きさとひび割れ制御のレベルを決める方法を採用している。

温度ひび割れ対策には、多くの費用がかかることから、コストパフォーマンスを上げる観点からも、正確な温度応力の予測方法が望まれるところである。温度応力予測の精度に影響を及ぼす要因の中で、影響が大きいことから現在研究が続けられているものに、①若材齢のク

ープ②自己収縮③非線形解析手法④ひび割れ発生の評価方法などが挙げられる。このうち若材齢のクリープについては、クリープひずみ量が大きいことと、材齢の進行にともなって値が大きく変化することから、解析結果すなわちひび割れの発生予測に与える影響が大きいと思われる。また、温度応力では、発生応力が経時的に圧縮応力から引張応力に変化し、最終的には引張応力によりひび割れが発生する過程をたどることから、圧縮応力の増加過程のみならず、圧縮応力の減少過程や引張応力増加過程におけるクリープ挙動も考慮しなければならない。

本研究の目的とする温度応力予測に反映させるための若材齢コンクリートのクリープ研究における特徴は、以下のとおりである。

- ① 応力の載荷時期が水和の進行過程で物性変化が著しい遷移領域にあること。
- ② 応力の大きさが時系列的に変化すること。
- ③ 応力の方向が圧縮から引張に材齢とともに変化する事。
- ④ 環境温度が変化し、コンクリートの物性がその影響を受けること。

筆者らは、平成元年よりこの若材齢コンクリートの研

究を始め、若材齢の圧縮クリープおよび引張クリープに対して上記の①、②に着目して研究を進めてきた^{1), 2), 3)}。①および②の載荷材齢の影響や応力変化に対しては、圧縮クリープの応力増加過程を対象に、クリープひずみを重ね合わせ法でモデル化する実験的検討を行い、重ね合わせ法が適用可能であることを報告した⁴⁾。

また、引張クリープについて研究を進める過程で、③の圧縮クリープと引張クリープの違いが明確になったので、両者の挙動が異なる原因についての研究も行い、粗骨材の材質によるクリープ挙動の違いの影響が大きいことを指摘した⁵⁾。しかし、応力が変化する場合のクリープひずみの取り扱い方法については、応力増加過程についてのみの検討であり、応力が減少していく過程については、重ね合わせ法の適用も含めて検討されていなかった。

本論文は、温度応力を対象とした若材齢コンクリートのクリープに関する研究の一部として、圧縮応力下で、圧縮応力が減少し引張応力に移る過程を除荷過程と定義し、この過程でのクリープの取り扱い方法について、以下の2つの方法で検討し、除荷過程を評価するモデルを提案するものである。

- ① クリープ試験により除荷過程に着目したクリープ関数（以下回復ひずみ関数と称す）を構築する方法
- ② 過去に構築した圧縮・引張のクリープ関数を基に重ね合わせ法を適用する方法

2. 除荷過程におけるクリープ挙動のモデル化の方法

(1) 回復ひずみ関数を構築する方法

除荷過程の回復ひずみ関数を構築する方法として、圧縮クリープ試験において除荷後のひずみを測定し、定式化した。

圧縮クリープ試験における除荷後の回復ひずみは、圧縮応力状態で、圧縮から引張へ連続的に変化する応力下では、応力が減少したことにより生じるクリープひずみと同じ現象と考えることができる。従って、回復ひずみに対して構築した回復ひずみ関数は、本論文で着目した除荷過程のクリープひずみを求めることに適用が可能である。

ここでは、水分を逸散させない状態での圧縮クリープ試験（基本クリープ試験）を応力強度比と載荷材齢に着目して実施し、除荷後の回復ひずみを測定することにより、回復ひずみ関数を構築することを試みた。各要因の影響を定量化して、回復ひずみ関数を構築した後、温度応力状態を模擬したクリープ試験の結果と比較して適用性を検討した。

クリープ挙動のモデル化の観点からは、除荷過程についても、圧縮応力状態と引張応力状態の両方の回復ひずみ関数について考慮すべきであるが、温度応力において

は、圧縮応力から引張応力への変化が重要であることから、ここでは、圧縮応力載荷試験における除荷過程を中心に検討を行うこととした。

(2) クリープひずみの重ね合わせによる方法

時系列的に変化する応力に対して、従来から用いられてきた方法が重ね合わせ法である。これは、CEB—FIP1970⁶⁾や岩城らの提案⁷⁾に見られる方法である。水和熱による温度応力の解析では、弾性係数の変化やモデルの変化を考慮する場合と同様に、変化応力状態のクリープを考慮する場合にもよく用いられる方法である。

この方法は、変化する応力を微小期間での増分応力に分割して考え、その増分応力に対するクリープひずみを算出し、一度載荷された応力は永久に作用し続けることを前提に、着目した時間に作用している応力によるクリープをすべて重ね合わせてクリープひずみとする方法である。従って、除荷される場合は、逆方向の応力を重ね合わせることになる。

若材齢のクリープひずみは、応力強度比の影響を受けるため³⁾、載荷応力を増分法でとらえるこの方法では、全応力に対する応力強度比の影響を考慮できない。従って、厳密には重ね合わせ法では、クリープ挙動をシミュレートすることはできない。しかし、応力が増加し続ける状態（以下増分系の応力状態と称す）にこの手法を適用して実験値と比較した場合、かなりよい精度で適合することを確認した^{1), 4)}。重ね合わせ法は温度応力解析においては、上記のほかにも構造物の構築順序を考慮する場合にも用いられており、クリープに対してもこの方法が適用できることが確認されれば、解析手法はかなり簡単になる。解析手法の簡易化の点からは、重ね合わせ法は効果的な方法である。

そこで本研究では、除荷過程において重ね合わせ法が実用的に適用可能かどうかについて検討した。クリープひずみへの重ね合わせ法の適用に関する概念を図-1に示す。また、図中の任意の時間 t におけるクリープひずみは、重ね合わせ法により次式であらわされる。

$$\varepsilon_{\alpha}(t) = \sum_{j=0}^t \Delta \varepsilon_j(t-j) \quad (1)$$

$\varepsilon_{\alpha}(t)$: 材齢 t 日におけるクリープひずみ
 $\Delta \varepsilon_j(t-j)$: 材齢 j 日の応力増分に対するクリープひずみ

圧縮応力載荷状態の除荷過程に重ね合わせ法を適用する場合は、引張応力によるクリープひずみを重ね合わせることになる。従来は、引張クリープの挙動が十分に把握されていなかったために、圧縮クリープと引張クリープは同じ挙動と考へて、除荷過程にも圧縮クリープひずみを重ね合わせてきた。しかし、既往の研究成果からコンクリートでは、同一応力下の圧縮クリープひずみと引張クリープひずみは大きさが異なり、引張クリープひず

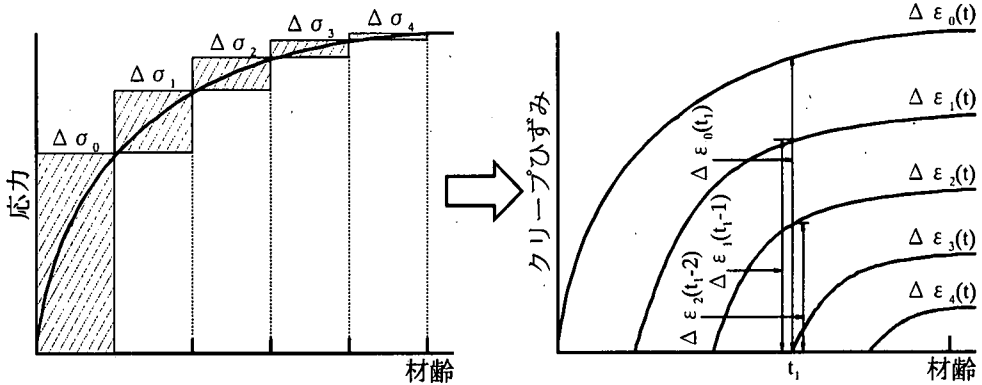


図-1 クリープひずみに対する重ね合わせ法の適用の概念

みのほうが小さいことが明らかになった³⁾。圧縮クリープ後の除荷過程に対しては、重ね合わせ理論に忠実に従えば、除荷応力に相当する引張クリープひずみを重ね合わせるべきである。しかし、コンクリートでは、圧縮強度は引張強度の約 10 倍もあり、引張クリープひずみについても引張強度以上のものは存在しない。従って、引張応力が載荷したとして除荷過程を考慮するには限界がある。仮に圧縮クリープひずみを用いれば、強度上の制限はなく適用できるが、重ね合わせ法の理論上矛盾が生じる。

ここでは、除荷過程に重ね合わせ法を適用する場合について、過去に圧縮クリープ試験および引張クリープ試験に基づいて求めたクリープ関数を用いて、新たに行なった圧縮応力を対象とした除荷過程の実験値と比較することによって、圧縮または引張のいずれのクリープ関数による重ね合わせか除荷過程を良くシミュレートできるかについて検討を加えた。

3. クリープ試験による回復ひずみの定式化

(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、材齢 28 日の圧縮強度 35N/mm² 程度を目標とした。水セメント比は 55% でスランプは 8cm とした。コンクリートに使用した材料と配合を表-1 および表-2 に示す。

使用したコンクリートの物性値として圧縮強度、圧縮静弾性係数、引張強度について以下に示す。

$$f_c(M) = 8.401 \cdot \ln(M) - 44.771 \quad (2)$$

$$f_t(M) = 0.494 \cdot \ln(M) - 2.048 \quad (3)$$

$$E'_c(M) = (0.512 \cdot \ln(M) - 1.326) \cdot 10^4 \quad (4)$$

$f_c(M)$: 圧縮強度(N/mm²)

$f_t(M)$: 引張強度(N/mm²)

$E'_c(M)$: 圧縮静弾性係数(N/mm²)

M: マチュリティ(°C・時間)

$$M = \sum (T+10) \Delta t \quad (5)$$

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 コンクリートの配合

目標強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
35	8	4	55	45	172	313	787	1015	1.004

(2) クリープ試験方法

クリープ試験には、てこ比 1:40 の二重てこ式で最大荷重 50kN のクリープ試験機を使用した^{1), 2)}。コンクリート供試体はΦ10cm×h20cm の円柱供試体とし、表面に薄膜アルミニウム箔を巻いた後、温度 30°C、湿度 98% で制御した恒温恒湿容器中でクリープ試験を行った。クリープひずみの測定には、若材齢コンクリート追随型の埋め込み型ひずみ計 (T 社製) を使用した。アルミニウム箔と恒温恒湿器で水分の逸散は極力防止したが、測定されたひずみに含まれるクリープひずみ以外の影響 (自己収縮など) については、無載荷供試体をクリープ試験体と全く同じ条件においてひずみを測定し、測定されたひずみを引き去ることによって補正した。圧縮クリープ試験におけるひずみ変化を模式化したものを図-2 に示す。図より載荷によって生じたひずみは保存されるとして、重ね合わせ法を適用すると次式が成立する。

載荷時弾性ひずみ+クリープひずみ=

$$\text{除荷時弾性ひずみ} + \text{回復ひずみ} + \text{永久ひずみ} \quad (6)$$

除荷後のひずみが定常に至る期間は、既往の研究より

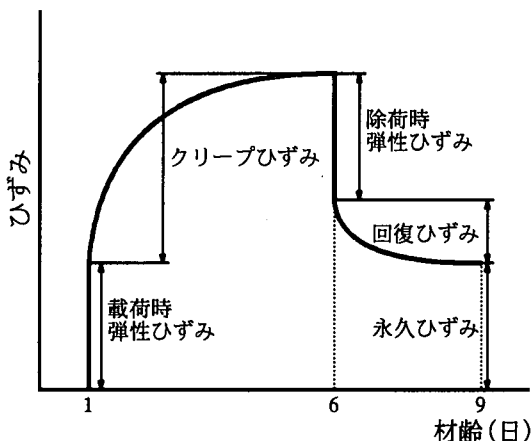


図-2 クリープひずみ測定値の代表例

3日程度⁹⁾とされているので、ここでは、除荷後3日の値をもって、それぞれ回復ひずみ、永久ひずみとした。なお、回復ひずみ関数が適応可能かどうかを評価するためのケースにおいて測定期間を8日間とした。

(3) 実験ケース

クリープ試験は、載荷材齢および載荷応力強度比をパラメータとして行った。載荷期間は5日とした。除荷クリープ試験を行った実験ケースを表-3に示す。載荷材齢は、1日、3日、5日とし、応力強度比は、最小7%、最大80%として圧縮・引張の25ケースについて除荷後のひずみを測定した。

応力強度比(以下S/Sと略記する)の算出は、クリープ試験供試体と全く同じ条件で養生した供試体をクリープ試験直前に強度試験を行い、載荷時の強度と載荷応力の比をとって応力強度比とした。また、除荷時に無載荷供試体を圧縮強度試験することにより除荷時の圧縮強度を測定した。

本試験で使用した恒温恒湿槽は、外気温以上でのみ温度・湿度制御が可能であったために、試験温度は30℃で行うこととした。養生温度については、コンクリート打設後24時間は20℃一定とし、その後、試験材齢まで30℃で養生した。クリープ試験時の供試体温度は、30℃とした。除荷過程における温度の影響については、圧縮クリープや引張クリープ同様に有効材齢や等価水和期間を用いて表わされるものと考えられるが¹⁰⁾、本論文ではそれについての系統的な要因分析を行っていないため、それについては今後の課題としたい。

(4) 実験結果

a) 圧縮クリープにおける回復ひずみと永久ひずみ

圧縮応力除荷後のクリープひずみの回復挙動に関する実験結果として、載荷材齢1日、3日、5日における応力強度比とクリープひずみ、回復ひずみ、永久ひずみの

表-3 除荷クリープ試験ケース

No.	載荷時 S/S (%)	載荷応力 (N/mm ²)	除荷時 S/S (%)	載荷材齢 (日)	載荷期間 (日)	除荷材齢 (日)	応力 方向
1	7.0	0.37	1.3	1	5	6	圧縮
2	14.2	0.74	2.6	1	5	6	
3	17.8	0.93	3.3	1	5	6	
4	34.5	1.80	6.4	1	5	6	
5	36.4	1.90	6.7	1	5	6	
6	49.0	3.28	11.7	1	5	6	
7	59.0	3.87	13.8	1	5	6	
8	10.4	1.64	5.5	3	5	8	
9	17.0	2.68	9.1	3	5	8	
10	21.1	3.33	11.2	3	5	8	
11	29.3	4.61	15.6	3	5	8	
12	38.0	5.98	20.2	3	5	8	
13	45.8	7.21	24.3	3	5	8	
14	49.2	7.74	26.1	3	5	8	
15	70.1	11.04	37.3	3	5	8	
16	17.9	3.44	11.2	5	5	10	
17	32.1	6.18	20.1	5	5	10	
18	38.1	7.34	23.8	5	5	10	
19	52.3	10.09	32.8	5	5	10	
20	70.0	13.42	43.6	5	5	10	
21	78.8	15.20	49.4	5	5	10	
22	39.9	0.71	27.5	3	5	8	引張
23	49.5	0.98	37.9	3	5	8	
24	20.3	0.46	17.3	5	5	10	
25	40.0	0.90	34.2	5	5	10	

関係を図-3~5に示す。

応力強度比が大きくなるにつれて、クリープひずみ・永久ひずみが大きくなるが、回復ひずみはそれほど大きくならないことがわかる。永久ひずみとクリープひずみは、応力強度比40%前後から増加率が増すのに対して、回復ひずみは、応力強度比50%程度まで応力強度比に伴って少し増加するものの、それを超えると減少する結果となっている。

回復ひずみがクリープひずみに占める割合(以下クリープ回復率と称す)と応力強度比の関係を図-6に示す。クリープ回復率は、載荷材齢が大きいほど、載荷応力強度比が小さいほど大きいという結果になっている。逆に永久ひずみは、載荷材齢が小さいほどおよび応力強度比が大きいほど大きいという結果となった。

b) 若材齢のクリープによる内部組織の変化

本実験では、クリープ試験後の供試体での内部組織までの観察を実施していないが、既往の知見や実験結果から得られたひずみの変化を基に若材齢コンクリートのクリープに伴う内部組織の変化について推定してみる。

クリープが生じる機構については、粘弾性説(Viscoelastic Theory)、滲出説(Seepage Theory)などがある¹¹⁾。粘弾性説は、クリープひずみは間隙水の移動により生じるとするもので、クリープひずみが荷重載荷直後より遅れて生じることや、除荷後のひずみの回復挙動を説明できるものである。一方、滲出説は、吸着水および

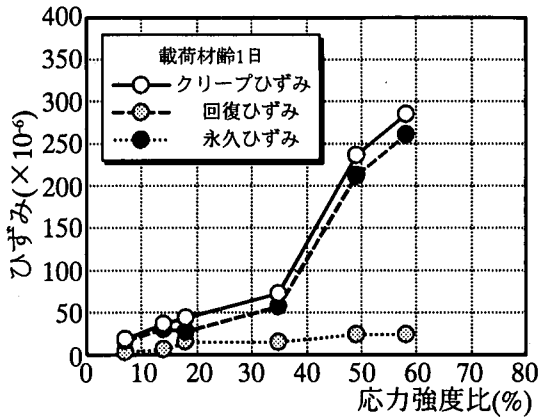


図-3 応力強度比と回復ひずみの関係

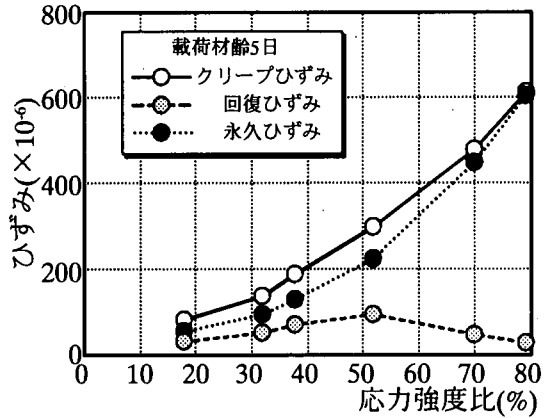


図-5 応力強度比と回復ひずみの関係

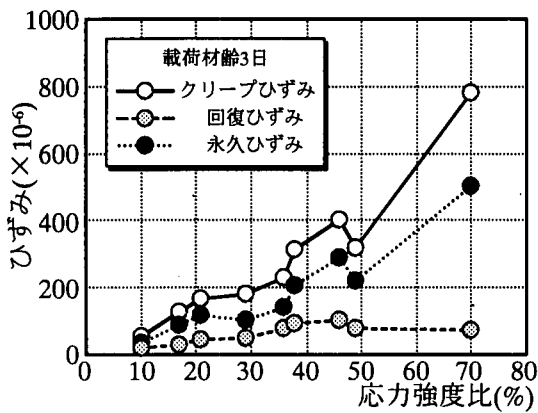


図-4 応力強度比と回復ひずみの関係

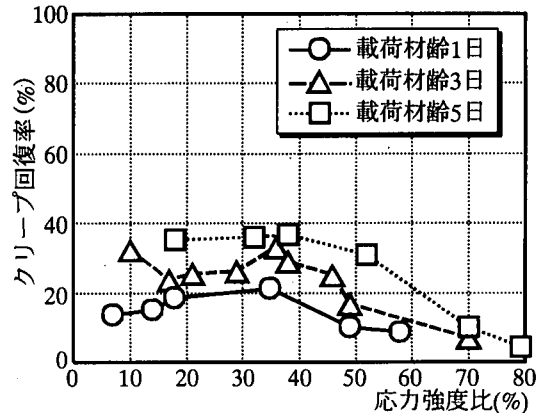


図-6 クリープ回復率と応力強度比の関係(圧縮)

びゲル粒子内の層間水の流動により、ゲル粒子間距離が近づきクリープが生じるとするもので、除荷後の粒子の移動は可逆的なものでないために、永久ひずみの発生機構を説明できる。また、付着水に覆われたゲル粒子の接点でのすべりも生じ、これも永久ひずみとなる⁸⁾。これに加えて、本研究で取り扱っているクリープ試験の対象が、若材齢と高応力強度比を含んでいるために、ペースト組織内に生じたマイクロクラックや粗骨材との界面での欠陥などもクリープに影響していると想定され、これらは可逆的な変形と考えられないので、永久ひずみとなるものと考えられる。

図-6では、クリープ回復率は応力強度比40%以下ではほぼ一定で、それを超えると減少している。この応力強度比は、圧縮クリープひずみが応力の大きさに比例して増加する限界とほぼ一致している⁴⁾。40%以下ではひずみの回復率がほぼ一定であり、クリープひずみも載荷応力に比例することから見て、内部欠陥による永久ひずみの発生というよりも、滲出説による永久ひずみの発生が支配的であろうと推定される。また、応力強度比40%以上の高応力強度比では、応力の上昇によりクリープひずみが急増することやクリープ回復率が低下することか

ら見て、ゲル水の移動による変形よりも、マイクロクラック等の欠陥部が発生しやすい状況にあり、この永久ひずみの増大は欠陥部の増大と関連が深いものと推定される。

若材齢載荷ほど回復率が小さいことに関しては、ペーストの骨格が十分堅固でなく、載荷によってマイクロクラックが発生しやすい状況と一致している。従って、若材齢時に応力が載荷された場合、長期材齢後に載荷されたものと比較して、マイクロクラックなどの内部欠陥による永久ひずみの割合が大きくなるといえる。回復ひずみが小さいことは、除荷過程の除荷応力に伴うクリープが少ないことを意味している。これは、温度応力のように圧縮から引張へと応力が変化する状態において、圧縮クリープ・引張クリープに加えて、除荷過程のクリープ挙動が重要なことを示している。

c) 引張クリープにおける回復ひずみ

引張クリープ試験におけるひずみ回復挙動について図-7に示す。使用したひずみ計の測定範囲は±5000μで測定精度は1μであったが、測定データが少ないこと、また、応力強度比が20%以下ではクリープひずみ量が小さく、その回復ひずみに関しても断定的なことは言えな

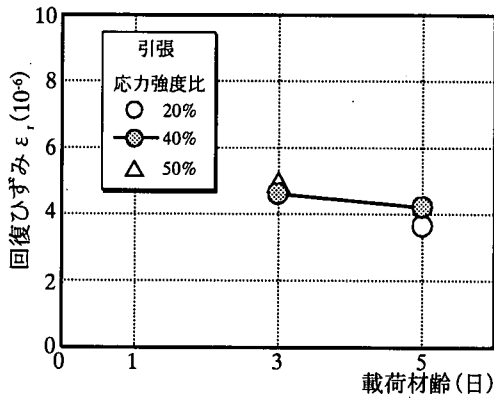


図-7 回復ひずみと载荷材齢の関係

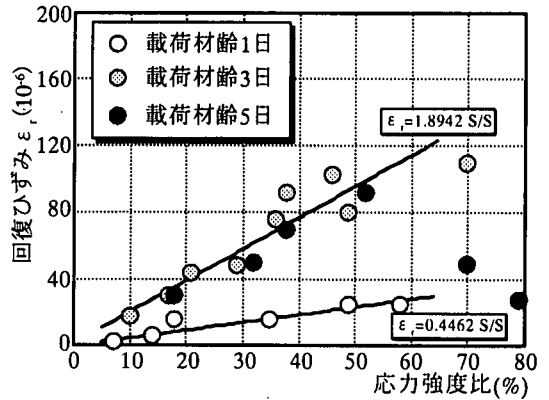


図-9 载荷時の応力強度比と回復ひずみの関係

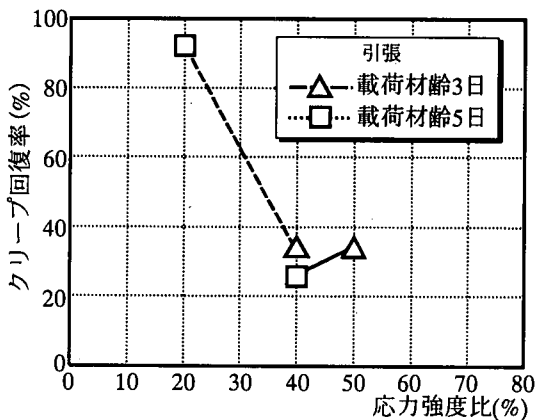


図-8 クリープ回復率と応力強度比の関係

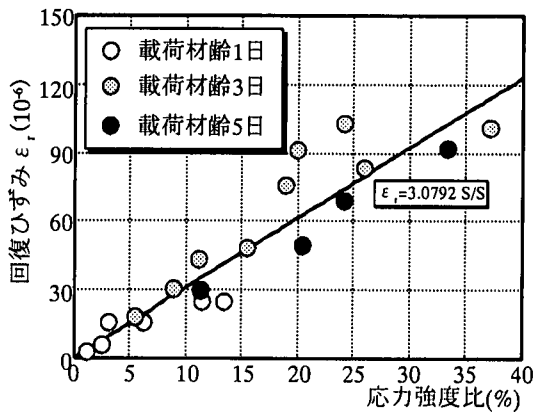


図-10 除荷時の応力強度比と回復ひずみの関係

い。ここでは、測定結果を紹介する目的で図-7 に示した。概略の傾向として回復ひずみの大きさは、载荷材齢や応力強度比にあまり依存せず、ほぼ一定となっている。図-8 に引張クリープ試験におけるクリープの回復率を示す。応力強度比が大きくなるにつれてクリープ回復率が小さくなる傾向が見られる。

d) 応力強度比と回復ひずみの関係

除荷時の回復ひずみを定式化するために、圧縮クリープ後の回復ひずみと载荷時および除荷時の応力強度比との関係を整理した。载荷時の応力強度比と回復ひずみの関係を図-9 に示す。载荷材齢が1日のものと载荷応力強度比が高いものについては、回復ひずみが小さく1つの関係であらわすことができない。一方、除荷時の応力強度比(=除荷応力/除荷時の圧縮強度)に着目してこの回復ひずみを整理したものを図-10 に示す。除荷時の応力強度比で整理した場合、载荷材齢・除荷材齢に関係なく1つの関係式で除荷後の回復ひずみを表わすことができた。すなわち、若材齢時では载荷中に強度が増進することにより、除荷時の挙動は载荷時の応力強度比よりも除荷が行われた時の応力強度比への依存度が高いことがわかる。この関係を用いれば、载荷材齢の影響を無視して、除荷時の応力強度比の影響のみを考慮し、除荷

時のひずみ回復挙動を定式化することができる。

なお、本実験では载荷期間を変化させていないために载荷期間の回復ひずみへの影響については考慮されていない。従って、载荷期間の影響については今後検討する必要がある。しかし、本研究の目的とする温度応力のような圧縮から引張へ応力が徐々に移行変わる状態を考えると、载荷材齢や载荷期間ではなく除荷材齢と除荷応力強度比に依存するという結果は適用性から見るときわめて容易に適用できるものである。ここでは実用性を優先させて、この結果を用いて、温度応力を模擬した応力状態にどの程度の精度を持って適用可能であるかについて検討することとした。

4. 除荷時の回復ひずみのモデル化

(1) 回復ひずみ関数の構築

载荷材齢3日、除荷時の応力強度比26%(ケースNo.12)を基本ケースとして、除荷時の基本回復ひずみ関数を構築した。本ケースは、全ケースの中で除荷時の応力強度比が中央値となるケースである。基本回復ひずみの関数形は、これまでのクリープ関数とは異なり、一定期間で収束することを考慮して、Vogit の4要素を用いたもの

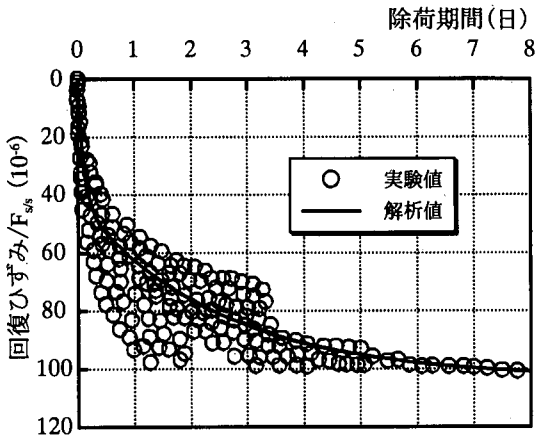


図-11 回復ひずみの実測値と解析値の比較

とした¹⁾。関数中の定数の設定方法は、クリープ試験における回復ひずみの測定結果に対して、最小二乗法で求めた。

除荷時の応力強度比の影響については、上記の条件に対して基本回復ひずみ関数を求めた後、補正関数として応力強度比の影響を算出し、外部関数として乗じることとした。補正関数の設定方法は、基本回復ひずみ関数が除荷応力強度比 26%として構築されているのでその時補正值が 1.0 となるように、図-10 より得られた関係式を補正した。以下に実験から求めた除荷時の基本回復ひずみ関数に応力強度比の影響を加えて構築した回復ひずみ関数を示す。

$$\varepsilon_r(t) = F_{ss} \{ 42.535(1 - \exp(-9.299t)) + 60.827(1 - \exp(-0.325t)) \} \quad (7)$$

ここに

$\varepsilon_r(t)$: 回復ひずみ (μ)

t : 除荷期間 (日)

F_{ss} : 除荷時の応力強度比補正関数

$$F_{ss} = 1/26.0(S/S) = 0.038(S/S) \quad (8)$$

回復ひずみ関数と除荷後の回復ひずみ実測値を除荷時の応力強度比の補正関数で除した値とを対比して、図-11 に示す。実測値はばらついてはいるが、回復ひずみ関数によって算出した値は、ほぼ実測値の中央に位置している。この結果から、この関数で除荷時の回復ひずみの変化をモデル化することが可能であると判断した。

(2) 重ねあわせ法の適用に関する検討

圧縮クリープ試験における除荷後の回復ひずみの変化を既往の圧縮クリープあるいは引張クリープ関数を用いた重ねあわせ法によって、評価できるかどうかについて検討した。クリープ関数としては、過去の実験から求めた圧縮クリープ関数および引張クリープ関数^{1), 2)}を用いた。

重ねあわせに用いたクリープ関数を以下に示す。

圧縮クリープ関数

$$\varepsilon_{cr}(t_e, S/S, \tau_e) = F_{ss}(S/S, \tau_e) \cdot F_L(\tau_e) \cdot \{ 28.502(1 - \exp(-206.08t_e)) + 47.442(1 - \exp(-1.747t_e)) + 2.0t_e \} \quad (9)$$

ε_{cr} : 圧縮クリープひずみ ($\times 10^{-6}$)

S/S: 応力強度比(%)

τ_e : 載荷材齢 (有効材齢) = $\sum((T+10) \Delta t)/30$

t_e : 載荷期間 (有効材齢) = $\sum((T+10) \Delta t)/30$

T: 載荷 (あるいは養生) 期間中の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

t: 載荷 (あるいは養生) 期間 (日)

$F_{ss}(S/S, \tau_e)$: 応力強度比に関する補正関数

$$F_{ss}(S/S, \tau_e) = C(\tau_e) S/S \quad (0 \leq S/S \leq 20)$$

$$F_{ss}(S/S, \tau_e) = D(\tau_e) \exp(0.035 S/S) \quad (20 \leq S/S)$$

$$C(\tau_e) = 0.007(\tau_e - 1) + 0.0036 \quad (1 \leq \tau_e \leq 3)$$

$$C(\tau_e) = 0.001(\tau_e - 3) + 0.05 \quad (3 \leq \tau_e \leq 5)$$

$$C(\tau_e) = 0.053 \quad (5 \leq \tau_e)$$

$$D(\tau_e) = 0.069(\tau_e - 1) + 0.359 \quad (1 \leq \tau_e \leq 3)$$

$$D(\tau_e) = 0.014(\tau_e - 3) + 0.499 \quad (3 \leq \tau_e \leq 5)$$

$$D(\tau_e) = 0.524 \quad (5 \leq \tau_e)$$

$$F_L(\tau_e) = 1.082(1 - \exp(-0.86\tau_e))$$

$F_L(\tau_e)$: 載荷材齢補正関数

引張クリープ関数

$$\varepsilon'_{cr} = F'_{ss}(S/S) \{ 1.335(1 - \exp(-26.271t)) + 5.003(1 - \exp(-1.153t)) + 2.364t \} \quad (10)$$

ε'_{cr} : 引張クリープひずみ (μ)

$F'_{ss}(S/S)$: 応力強度比に関する補正関数

$$F'_{ss}(S/S) = 0.0005(S/S)^2 + 0.0044S$$

ただし、上記引張クリープ関数は、 $3 \leq \tau_e$, $S/S \leq 60$ かつ温度条件 30°C のみ適用可能である。

上記の引張クリープ関数は、引張強度までしか定義されていないために引張強度を超える部分については、何らかの対応が必要である。ここでは、除荷応力が引張強度以上の場合と以下の場合に分けて検討した。

除荷応力が、引張強度より小さい場合の例として、材齢 1 日で載荷し 5 日後に除荷した実験結果と、除荷後の回復ひずみとして引張クリープ関数と圧縮クリープ関数を重ね合わせた解析結果を比較して、図-12 に示す。載荷中のクリープひずみ部分は通常の圧縮クリープ試験であるので、圧縮クリープ関数を用い、除荷後の回復ひずみについて圧縮クリープ関数を用いた場合と引張クリープ関数を用いた場合を比較した。なお、除荷時の応力強度比は、圧縮強度に対して 7%、引張強度に対して 82% である。実測値と解析値を比較すると、除荷後については、圧縮クリープ関数を重ね合わせた場合では回復ひずみを大きく評価しており、引張クリープ関数を重ね合わせた場合では、逆に回復ひずみを小さく評価している。全体として、引張クリープ関数を重ね合わせた場合が

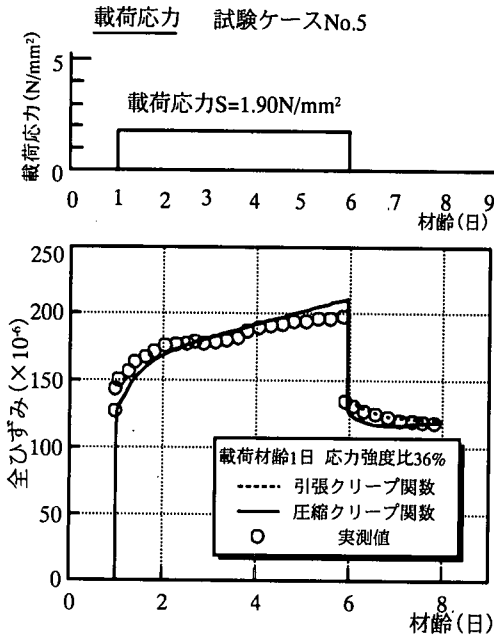


図-12 重ね合わせ法と実測値の比較
(除荷応力が引張強度以下の場合)

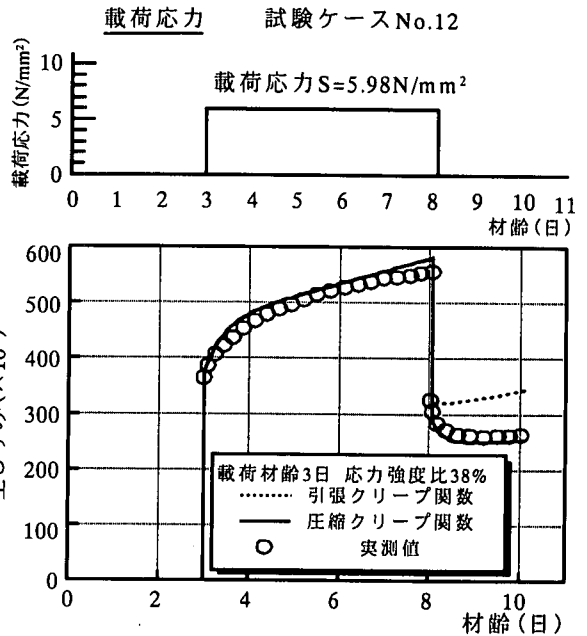


図-13 重ね合わせ法と実測値の比較
(除荷応力が引張強度以上の場合)

よく合致しているといえる。この結果は、圧縮クリープと引張クリープの挙動が異なるために、応力の減少状態を重ね合わせ法でモデル化するためには、逆向きの応力増分として重ね合わせる方法が実測値に近いことを示している。すなわち、圧縮クリープ後の除荷過程は、重ね合わせ法の理論どおり、引張クリープ関数を重ね合わせることで考慮できると考えられる。

次に除荷応力の大きさが引張強度を超える場合について検討した。この場合、上記の理論どおりに引張クリープを重ね合わせることができないので、次の2つの条件で重ね合わせ法を適用した。

- ①圧縮クリープ関数を用いる場合は、除荷応力強度比(除荷応力/除荷時の圧縮強度)を用いてクリープひずみを算出した。
- ②引張クリープ関数を用いる場合は、応力強度比を100%として、クリープひずみを算出した。

2つの関数を用いてクリープひずみを算出し、重ね合わせた結果を図-13に示す。実際の、除荷時の応力強度比は、圧縮強度に対して22%、引張強度に対して21%である。

除荷応力が引張強度より大きい場合には、引張クリープ関数を重ね合わせると、荷重によって生じている圧縮クリープひずみ増分よりも小さくなった。これは、引張クリープ関数中の応力強度比を100%としてクリープひずみを算出したことによるものと考えられる。引張クリープ関数を specific creep によって構築し、この specific creep に除荷応力を乗じてクリープひずみを求める方法も考えられるが、引張強度以上の引張クリープ関数を求

めること自体に物理的意味がないので適用しないこととした。

一方、圧縮クリープ関数によりクリープひずみを算出し、重ね合わせた場合は、図-12同様に回復ひずみを過大に評価するが、誤差はそれほど大きくなく、実用上は適用が可能であると思われる。

重ね合わせ法の適用結果として、除荷応力度が引張強度を超えない範囲において、圧縮クリープ試験後の除荷過程には、除荷応力相当の引張クリープひずみを重ね合わせることでモデル化できる。また、引張強度を超える範囲においては、精度よりも実用性を重視して広い範囲の適用性を考慮した場合、除荷応力に相当する圧縮クリープひずみを重ね合わせることが可能であることがわかった。

5. 変化する応力状態への適用

ここでは、除荷する応力の大きさを時間とともに順次変化させ、水和熱により発生する温度応力における温度上昇時から下降初期の状態を模擬した条件でクリープ試験を行い、回復ひずみ関数による方法と重ね合わせ法による方法との適用性を比較した。荷重の荷重パターンは、圧縮応力を2段階で増加させた後、3段階で減少させたものとした。荷重応力パターンを図-14に示す。

回復ひずみ関数は、圧縮～除荷の1段階荷重の結果を基に構築したもので、連続して除荷される場合などでは、1応力荷重ステップ分の除荷応力状態のみ適用できるものである。従って、回復ひずみ関数を適用する場合は、

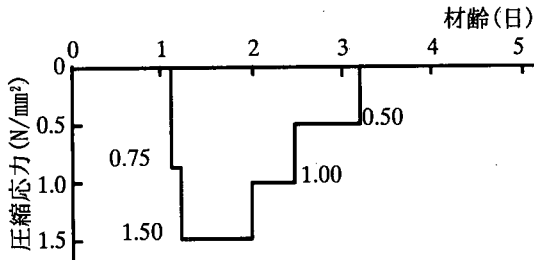


図-14 載荷応力パターン

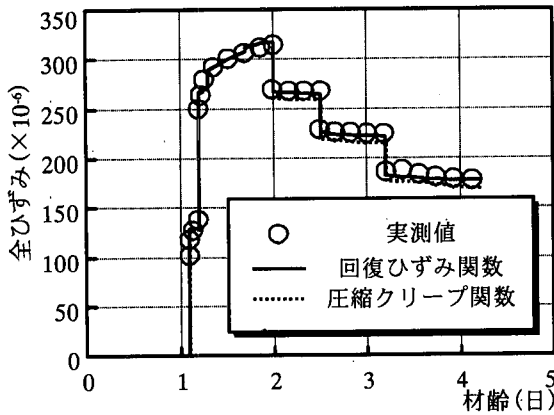


図-15 適用結果の比較

除荷が生じた時点での応力強度比に基づいて各ステップの回復ひずみを算出し、それぞれを加え合わせた。これは、1度載荷された応力は、永久に載荷され続けるとした重ね合わせ法とは考え方を異にするものである。なお、回復ひずみ関数を用いる場合であっても圧縮応力が増加する区間については、圧縮クリープ関数を用いた。

除荷部分に対して、重ね合わせ法を適用した場合と回復ひずみ関数を用いた場合および実験値の3つを比較して、図-15に示す。数ステップにわたって応力が変化する場合の除荷過程においても、回復ひずみ関数は良く実験値と合致している。一方、圧縮クリープ関数を用いた重ね合わせ法は、クリープを若干過大評価はするものの、クリープひずみの大きさと比較して誤差は小さく、比較的良い適応性を示していることがわかった。

実際の温度応力解析において、圧縮応力下での応力減少過程に適用する場合、回復ひずみ関数を適用することが最も適用性がよい。しかし、解析手法が有限要素法で、モデル剛性(弾性係数など)等の時間依存性をstep by stepの重ね合わせ法で考慮する方法を採用している場合などでは、実用上圧縮クリープ関数による重ね合わせ法でも除荷過程のクリープを考慮することが可能であるといえる。

6. まとめ

本研究で得られた成果をまとめると以下のようになる。

- 1) 圧縮クリープ試験後の永久ひずみは、載荷材齢が小さいほど、載荷応力強度比が大きいほど大きい。また、応力強度比を増加させると、永久ひずみが応力強度比で40%付近から増加する割合が増すが、回復ひずみはそれほど増加しない。上記の永久ひずみが増加する条件は、内部にマイクロクラック等の欠陥がしやすい条件と一致している。
- 2) 除荷後の回復ひずみは、除荷時の応力強度比を用いて表わされる。これを用いれば、載荷材齢の影響を無視することができ、クリープモデルを作成するのに効果的である。
- 3) 除荷後の回復ひずみは、Voigtモデルの4要素を用いて回復ひずみ関数として定式化できる。応力が変化する場合に対しても、除荷された応力に対する応力強度比を適用することによって、除荷過程のクリープ挙動をうまくシミュレートできる。ただし、載荷期間の影響について今後検討が必要である。
- 4) 除荷をモデル化する方法として、重ね合わせ法も適用が可能であるが、圧縮除荷過程などでは、引張強度以上の除荷応力に対しては、引張強度以上の引張クリープ関数が必要となり矛盾が生じる。その場合、実用性を優先させれば、除荷応力相当の圧縮クリープひずみの符号を反対にして重ね合わせることで大きな誤差は認められなかった。

謝辞：本研究は、文部省科学技術研究費(課題番号09650509)によって行われた研究を取りまとめたものである。ここに記して謝意を表す。

また、本研究を行うに当たって、御助言御指導いただいた名古屋工業大学社会開発工学科 吉田彌智教授ならびに上原匠助教授、大学院生として1部を担当してくれた平本昌生氏(現名古屋下水道局)に感謝申し上げます。

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, No. 599/V-40, pp.1-14, 1998.8.
- 2) 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, コンクリート工学論文報告集, VOL. 17, No. 1. 1133p, 1995.
- 3) 平本昌生, 入矢桂史郎, Gupta Spratic, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートのクリープの載荷応力依存性, コンクリート工学論文報告集, VOL. 19, No. 1, pp.775, 1997.
- 4) Iriya, K., Hiramoto, M., Hattori, T. and Umehara, H.: Creep Behavior for Early Aged Concrete, 1997, Proceedings of International Conference on Engineering Materials, 1997. 6. 8.
- 5) 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. 599/V-40, pp.105-117, 1998.8.
- 6) CEB-FIP, International Recommendation for the design and construction of concrete structure - Principles and recommendations Comite European du Beton - Federation Internationale de Precontrainte, FIP Sixth Congress, Prague, 1970: Published by Cement Association, London.
- 7) 岩城良, 夏目忠彦, 村山八州雄, 大貫博史: セメントの水和熱に起因する温度応力の解析手法に関する研究, 鹿島建設技術研究所報, 1975.
- 8) 岩崎訓明: コンクリートの特性, 共立出版, 1975. pp.117~122,
- 9) 服部達也, 入矢桂史郎, Gupta S., 梅原秀哲: 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論文報告集, Vol.20, No.2, pp.673, 1998.

(1998. 3. 30 受付)

STUDY ON CREEP BEHAVIOR IN THE UNLOADING PROCESS FOR EARLY AGED CONCRETE

Keishiro IRIYA, Tatsuya HATTORI, Takafumi NEGI and Hidetaka UMEHARA

The creep behavior during unloading process, including state of stress change from compression to tension, has been studied based on experimental results. It was noted that the influence of stress level, was simply modeled by stress level at unloaded age without influence of loaded age. The function on unloading process was developed and was demonstrated to be applicable for actual design. Super-positioning method using tensile creep as compensation of decreasing compressive stress can be applied. Since tensile creep model can't be defined beyond tensile strength, individual creep function for decreasing loaded stress was proposed. Furthermore compressive creep is also applicable for super-positioning method and the applied value existed in allowable range.