

若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究

入矢 桂史郎¹・平本昌生²・服部達也²・梅原秀哲³

¹ 正会員 名古屋工業大学大学院工学研究科博士課程後期社会開発工学専攻

² 学生員 名古屋工業大学大学院工学研究科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工学研究科教授 都市循環システム工学専攻

(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

本論文は、若材齢コンクリートの温度応力によるひび割れ防止に関する研究の一環として、この応力に大きな影響を与える若材齢コンクリートの圧縮クリープ挙動について実験的研究を行ったものである。若材齢のクリープに特有の要因は、載荷材齢・載荷応力の影響を強く受けること、および温度依存性が大きいこと等である。本研究では、これらをパラメータとして室内クリープ実験を行い、その結果を整理し、考察を加えた。その結果、若材齢のクリープひずみにおいては、応力強度比の影響を強く受けること、その影響は載荷材齢よりも大きいこと、さらに養生中や載荷期間中の温度の影響を受けるが有効材齢の関数として考慮できることを指摘した。

Key Words: early age, creep, creep strain, specific creep, rheology model, creep model, thermal stress due to hydration

1. はじめに

コンクリートの水和熱による温度応力は、コンクリートがまだ強度発現途上にある若材齢時に応力を生じさせ、ひび割れを発生させるもので、そのひび割れが部材の中央部から発生し、貫通ひび割れとなるために、鉄筋の腐食、エフロレッセンスの発生などコンクリートの耐久性を低下させる原因となる。また、近年、コンクリートに水密性や気密性などの強度以外の機能を期待して設計される場合があり¹⁾、これらの要求を満足するためには、少なくとも貫通ひび割れはほぼ完全に防止しなければならない。今後このような要求はますます大きなものになり、コンクリートに強度以外の機能を要求されると予想される。温度応力の発生メカニズムについては、様々な研究が続けられているが、その発生原因是、材料・設計・施工といった構造物の建設工程のすべてに及んでいるために、効果的なひび割れ対策の検討はかなり複雑なものとなる²⁾。

温度応力ひび割れ対策は、一般に温度応力解析の結果に基づいて計画される²⁾。従って、構造物の要求仕様に応じて、温度応力ひび割れをほぼ完全に防止したいとする

ならば、かなり精度の良い温度応力解析とその結果を保証できるひび割れの防止対策が必要である。

一方、温度応力予測手法の現状についてみると、解析により求めた温度ひび割れ指数とひび割れ発生確率図によつて実用的に温度ひび割れを制御する手法は、コンクリート標準示方書に記載されているが、ひび割れを防止して水密性・気密性を保証するためには、ひび割れの位置や幅・深さ等を予測する必要があり、解析精度をさらに向上させなければならない。温度応力の予測に誤差を生じさせる原因には解析手法による誤差があるが、若材齢の物性値、特に若材齢のクリープ挙動の評価が十分になされていないことが挙げられる³⁾。

クリープに関する研究は、これまでにもいくつか発表されているが、そのほとんどが水和がある程度進行し、定常となった材齢 28 日以降のものについてであり、水和が進行過程にありコンクリートの物性が変化する状態でのクリープ挙動についての研究は少ないのが現状である。その中で、これまでに報告された若材齢クリープに関する主な知見は以下の通りである。

P. Laplamte は、1 軸応力モデル (a global uniaxial mechanical behavior model of hardening concrete) を

用いさらに、養生中及び載荷中の温度の影響を等価水和期間(equivalent periods of hydration)を導入することにより、若材齢のクリープ係数をモデル化した⁴⁾。また、Royは、応力載荷時のコンクリート強度を考慮したモデルを提案した⁵⁾。さらに、I.Guenotらは、CEB-91モデルと上記のLaplanteおよびRoyのモデルを用いて温度応力を模擬した温度応力状態のクリープ試験結果と比較し、3つのいずれのモデルも温度応力解析の実用上適用が可能であると報告した⁶⁾。岩城らは、0.5日～2日の載荷材齢での若材齢コンクリートのクリープ試験を行い、若材齢のクリープに与える温度の影響を有効材齢で表わすことができると報告した。また、単位有効材齢毎のクリープ係数は、載荷材齢が大きくなるほど減少し、若材齢のクリープ係数は、CEB-78コードに比べかなり大きいことを示した⁷⁾。大下らは、コンクリートの細孔構造に着目した微視的なモデルを用いて、間隙水圧の上昇と間隙水の移動によってクリープが生じるとしたクリープモデルを提案した⁸⁾。森本らは、若材齢の圧縮クリープ試験を行い、圧縮クリープひずみは載荷材齢とともに小さくなること、また引張クリープ試験の結果と比較し、引張クリープひずみより3～4倍大きいことを示した⁹⁾。

筆者らもまた、これまでに温度応力の予測精度を向上するための研究として、若材齢のクリープ挙動を取り上げ研究を行い、載荷応力とクリープひずみが比例関係にある低応力強度比の領域において、4あるいは5要素のレオロジーモデルを用いて圧縮・引張のクリープ挙動をモデル化できることを示した^{10), 11), 12), 13)}。また、上記の低応力強度比では変化応力に対して重ね合わせ則を用いてクリープ挙動を表現できることを示した^{10), 13)}。

以上のように、温度応力解析に適用できるモデルはいくつか提案されているものの、若材齢コンクリートに影響が大きいと思われる応力強度比や配合さらに温度など、影響要因を総合的に評価したクリープモデルは、これまで発表されていない。

本研究では、荷重が載荷される材齢が、1日から5日までの若材齢コンクリートに着目し、圧縮クリープに影響する要因を明らかにした上で、その影響について実験的に研究した。実験の後に、実験結果を定量的に評価し、その影響を総合的に考慮した若材齢のクリープモデルを構築するとともに、温度応力による応力の発生を模擬した応力状態に対する適用性について検討した。なお、温度応力は、材齢によって変化し、圧縮応力と引張応力が作用するのが一般的であり、クリープ挙動に関してはこの両方の応力に対して検討する必要がある。本論文は、まず若材齢の圧縮クリープ挙動について取りまとめ、幅広く適用できるクリープモデルを構築することとした。今後、同様な方法で、引張クリープについても研究する方針である。

2. 温度応力解析における若材齢クリープの影響評価の現状と問題点

(1) 有効弹性係数法(土木学会コンクリート標準示方書による方法)

コンクリート標準示方書(以下RC示方書と称す。)の施工編の15章マスコンクリートでは、温度応力解析に用いる弾性係数は、若材齢のクリープやリラクゼーションを考慮した有効弹性係数とするように規定している。RC示方書には式(1)に示す有効弹性係数式が規定されている。この式は、ACI207委員会報告にある有効弹性係数の考え方を基本として、若材齢のクリープの影響を有効弹性係数の低減という形で評価した式である。

$$E_e(t) = \phi(t) \cdot 4700 \cdot \sqrt{f_c'(t)} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

式中の低減係数は次のように示されている。

材齢 3日まで $\phi(t) = 0.73$

材齢 5日以降 $\phi(t) = 1.0$

材齢 3日から5日までは直線補間

$f_c'(t)$: 材齢 t日における圧縮強度 (N/mm²)

この式では、コンクリートのもつ静弹性係数を5日までの若材齢の期間は、クリープによる応力緩和を考慮して、 $\phi(t)$ だけ低減するよう規定しているものである。

しかし、筆者らの研究によれば⁹⁾、マスコンクリート温度応力の現場計測データから逆算して求めた有効弹性係数は、式(1)の値よりさらに小さく、 $\phi(t)$ として、0.5から0.6程度であった。また、上記方法では、載荷材齢が5日以降の応力に対しては、有効弹性係数を低減しないために若材齢のクリープの影響は考慮しないことになっているが、この期間のクリープの影響が大きければ実際と差異が生じる可能性がある。

(2) 基本クリープ関数による重ね合わせ法

(初期ひずみ法による方法)

上記の有効弹性係数法は、複雑なクリープ挙動に対し取り扱いが簡単なために、実際の設計や施工計画などの実用的な分野において広く用いられているが、載荷期間の影響が考慮されていないために、全体を有効弹性係数という1つの指標でとらえており、応力の変化などには厳密に対応できない。温度応力など変化する応力に対してできるだけ正確に予測評価したい場合に、クリープひずみと載荷材齢・載荷期間等の影響する要因との関係を表わすクリープ関数を求め、それを用いて変化する応力に対するクリープ挙動を評価する必要がある。このような物性も応力も変化するような応力状態に対しては、重ね合わせ則を適用すると、比較的簡単に解析できる。CEB/FIP-70, 78, 90MODELでは、基本クリープ関数を定

表-1 若材齢クリープに影響する要因

要因レベル1	要因レベル2	要因レベル3	要因レベル4
セメントペースト 組織	水和の進行	材料依存	セメントの種類
		温度依存	養生温度 載荷中の温度
		時間依存	載荷材齢
	セメント硬化体 細孔構造	総細孔量	空気量 水セメント比
		組織と細孔の変形	載荷中の温度 載荷期間
外力	載荷応力度	組織と細孔の変形	応力強度比

義して、クリープの重ね合わせを行って変化応力に対応するように示されており⁹、温度応力の研究者の間でもクリープの考慮については重ね合わせ則を適用してクリープの影響を研究している例が多い⁹。例えば岩城らは、打ち継ぎを有するモデル壁体の温度応力計測結果と室内実験から得られたクリープ係数とを比較して、クリープの重ね合わせを行うことで変化する応力に対処可能であると報告している⁹。一方、阪田らは、長期材齢を経たコンクリートのクリープに関する論文の中で、クリープひずみは載荷応力の影響を強く受け非線形な挙動を示すので、基本的に重ね合わせ則は適用できないと指摘しており¹⁰、予測精度を向上させたクリープモデルを確立するためにには、その適用性については検討する必要がある。

(3) 若材齢コンクリートにおけるクリープの研究課題

若材齢コンクリートのクリープの研究、特に温度応力予測に反映させるためには、若材齢コンクリートのクリープ実験を行って、載荷材齢の影響、応力強度比(載荷応力 / 強度)の影響、養生温度の影響、試験温度の影響などの若材齢に特徴的な課題について定量的に評価し、温度応力解析に適用できるクリープモデルを構築する必要がある。本研究では、温度応力に対するクリープの考え方として上記の初期ひずみ法に適用可能なクリープモデルを構築し、重ね合わせ則についても検証した。

3. 若材齢クリープに影響する要因

若材齢コンクリートに影響を与える要因は、載荷材齢やコンクリートの配合などの他に、養生温度や応力強度比などあるが、これらはお互いに関連を及ぼしながらクリープ挙動に影響を与えており、この要因の関連性を検討し実験計画を作成することとした。若材齢クリープに影響すると考えられる要因をまとめたものを表-1に示す。例えば、水セメント比はクリープに影響を与えるが、水セメント比が直接影響を与えているのは、細孔構造で在

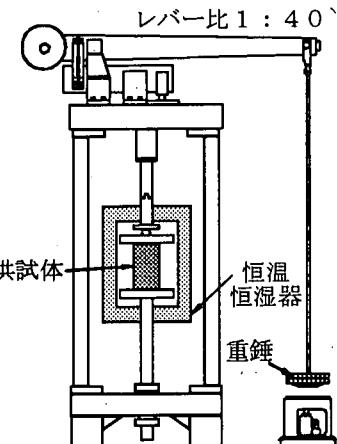


図-1 クリープ試験機

あり、さらに細孔構造はセメントペーストの組織として存している。このように考えると、要因レベル4の段階での影響因子はいくつもある様に見えるが、基になっているのは、クリープするものであるセメントペーストの部分とクリープを生じさせる荷重(応力)の部分であることがわかる。クリープを細孔構造など微視的にとらえた研究は少ないが、要因を考えていくと細孔構造に起因すると見られるものは多く、クリープ挙動に与える影響は大きいものと予測される。クリープ試験中の細孔構造や水和したセメント組織の変化について直接的に測定する方法が見いだせなかつたので、本研究では、この要因表に基づき要因レベル4を実験パラメータとして、実験を進め、その影響を評価することとした。ただし、セメントの種類については、低発熱セメント等多種に渡るため本研究では除外した。

4. クリープ実験の方法

(1) クリープ試験機

本研究で使用したクリープ試験機は、てこ比1:40の二重てこ式クリープ試験機であり、最大荷重は50kNである。使用する供試体は、Φ10cm×h20cmの円柱供試体とした。この試験機には、恒温・恒温のボックスを取り付けることにより、任意の湿度・温度の条件でクリープ実験を行うことができる。本実験では、試験時の温度をパラメータとして20°Cを基本とする所定値に設定し、湿度は100%で制御した状態でクリープ試験を行った。クリープ試験機の概要を図-1に示す。

(2) コンクリートの材料および配合

実験に使用したコンクリートは、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/mm² 程

表-2 使用材料

使用材料名	種類/产地	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-3 コンクリートの配合

配合目標密度 (N/mm ³)	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
A 40	8.0	4.0	45.0	44.6	172	382	762	983 1.444
			55.0	44.6	172	313	787	1015 1.188
			55.0	44.6	172	285	804	1036 1.004
			55.0	100.0	275	501	1221	0 1.904
			55.0	33.5	155	282	611	1267 1.188

度を目標とし、水セメント比55%のものを基本配合とした。ただし、水セメント比の影響について検討するために、3種類の水セメント比の異なる配合を選定した。また、細骨材率の影響を検討するために、モルタルおよび2種類の細骨材率を設定した。コンクリートに使用した材料について表-2に示す。使用材料のうち、セメントは、普通ポルトランドセメントとし、骨材は、名古屋地区の生コンクリートに使用されているものを使用した。コンクリートの配合を表-3に示す。

(3) 試験条件とクリープひずみの測定方法

コンクリートは20°Cで打設し、打設後直ちに所定の温度に制御された恒温室に静置した。24時間後に恒温室中で脱型し、表面を厚さ1mmのアルミ箔で覆った後、試験材齢まで恒温室の中で所定の温度で養生した。養生室の湿度は100%とした。供試体のひずみの測定は、埋込み型のコンクリートひずみ計(T社製若材齢対応型)により行った。供試体の表面は、アルミ箔によりシールしたままとし、恒温・恒湿ボックス内の湿度は100%に制御したが、自己収縮等のクリープ以外の収縮量を補正するために、同一条件で作製した無載荷の供試体をボックス内に静置してこれらのひずみを測定し、補正することとした。

(4) クリープひずみの変化とクリープの評価指標

クリープ試験における荷重を載荷した材齢(以下載荷材齢と称す)は、材齢1日から5日までとし、荷重の載荷期間(以下載荷期間と称す)は原則として5日間とした。標準的な載荷形式とそれに伴うひずみの発生パターンを対比させて図-2に示す。クリープひずみの計測は、除荷後3日まで行った。クリープ試験より得られたひずみから、無載荷供試体のひずみを引いたものをクリープ試験によるひずみとし、載荷あるいは除荷直後の弾性変形によって生じるひずみ(以下弾性ひずみと称す)以外

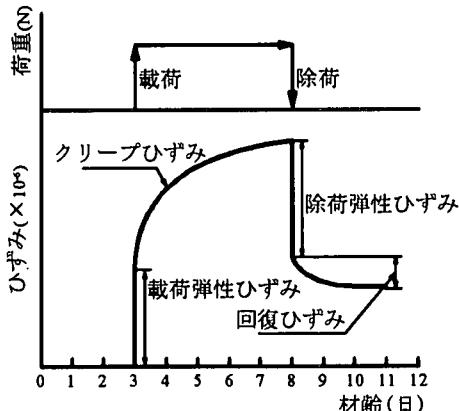


図-2 ひずみ発生パターン

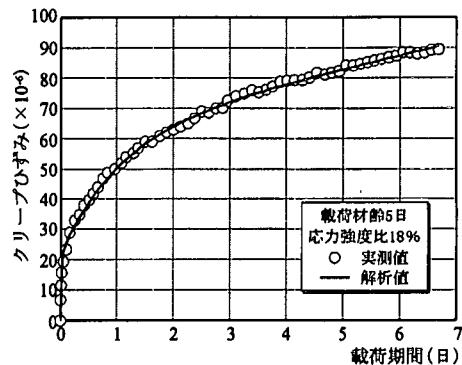


図-3 載荷中のクリープひずみの変化

のものをクリープひずみと称することとした。また、除荷後に回復するひずみを回復ひずみと称することとした。

若材齢のクリープの場合、クリープひずみは長期にわたって増加するが、実験の都合上いずれかの材齢で除荷しなければならない。載荷材齢5日におけるクリープひずみと載荷期間の関係を図-3に示す。またこれまで提案したVoigtの5要素でモデル化した時の解析値もあわせて示す¹¹⁾。ひずみの変化が定常になるのは4~5日であるので、各要因の影響度分析については載荷期間を5日とし、その時点で発生しているクリープひずみを用いることとした。実際の温度応力は5日を超えて作用するが、5日間後の解析値と実測値を比較してみると、解析値は載荷期間5日を超えて実測値と良い対応をしており、モデル上からもこの関数型を使用する限り、5日間で載荷を止めても影響は少ないと判断した。以上から本研究では、載荷期間5日間のクリープひずみの値を最終クリープひずみと称すこととした。クリープの評価指標としては、クリープひずみ以外にSPECIFIC CREEP、およびクリープ係数を用いた。SPECIFIC CREEP、およびクリープ係数は次式を用いるものとした。

表-4 実験ケース一覧

ケース No.	W/C (%)	s/a (%)	S/S (%)	載荷材齢 (日)	温度 (°C)		載荷期間 (日)	試験 目的
					養生中	載荷中		
1	55	44.6	20	3	20	20	5	基本
2	55	100	2.5	3	20	20	5	応力強度比
3	55	100	4.4	3	20	20	5	応力強度比
4	55	100	20	3	20	20	5	応力強度比
5	55	100	29	3	20	20	7	応力強度比
6	55	100	49	3	20	20	7	応力強度比
7	55	100	55	3	20	20	7	応力強度比
8	55	100	60	3	20	20	7	応力強度比
9	55	44.6	7	1	20	20	5	応力強度比
10	55	44.6	14	1	20	20	5	応力強度比
11	55	44.6	18	1	20	20	5	応力強度比
12	55	44.6	35	1	20	20	5	応力強度比
13	55	44.6	10	3	20	20	5	応力強度比
14	55	44.6	17	3	20	20	5	応力強度比
15	55	44.6	21	3	20	20	5	応力強度比
16	55	44.6	29	3	20	20	7	応力強度比
17	55	44.6	36	3	20	20	5	応力強度比
18	55	44.6	38	3	20	20	5	応力強度比
19	55	44.6	46	3	20	20	5	応力強度比
20	55	44.6	49	3	20	20	7	応力強度比
21	55	44.6	70	3	20	20	5	応力強度比
22	55	44.6	18	5	20	20	7	応力強度比
23	55	44.6	32	5	20	20	7	応力強度比
24	55	44.6	38	5	20	20	7	応力強度比
25	55	44.6	52	5	20	20	7	応力強度比
26	55	44.6	70	5	20	20	5	応力強度比
27	45	44.6	15	1	20	40	5	W/C
28	55	44.6	30	1	20	40	5	W/C
29	65	44.6	34	1	20	40	5	W/C
30	55	100	20	3	30	30	5	s/a
31	55	44.6	20	3	30	30	5	s/a
32	55	33.45	20	3	30	30	5	s/a
33	55	44.60	20	1	20	20	5	養生温度
34	55	44.60	20	1	30	20	5	養生温度
35	55	44.60	20	1	40	20	5	養生温度
36	55	44.60	20	3	20	20	5	養生温度
37	55	44.60	20	3	30	20	5	養生温度
38	55	44.60	20	3	40	20	5	養生温度
39	55	44.6	17	1	20	40	5	載荷温度
40	55	44.6	14	1	20	20	5	載荷温度
41	55	44.6	28	1	20	60	5	載荷温度
42	55	44.6	14	3	20	40	6	載荷温度
43	55	44.6	4	3	30	30	5	載荷温度

$$J = \varepsilon_c / \sigma \quad (2)$$

J : SPECIFIC CREEP ($\times 10^6 / \text{N/mm}^2$)

ε_c : クリープひずみ ($\times 10^9$)

σ : 載荷応力 (N/mm^2)

$$\Phi = \varepsilon_c / \varepsilon_e \quad (3)$$

Φ : クリープ係数

ε_e : 弹性ひずみ ($\times 10^9$)

載荷応力は、載荷したおもりによる荷重を供試体断面積で除した値とし、弾性ひずみは、荷重を載荷した直後のひずみ計の読み値とした。

(5) 実験ケース

クリープ試験の試験ケースについて、その条件をまとめ表-4に示す。

クリープ挙動に及ぼす載荷応力の影響については、載荷応力が大きくなるにしたがって、クリープひずみが増加するが、一般には、コンクリートにおいて「強度の1/3程度までは、載荷応力の増加に比例してクリープひずみ

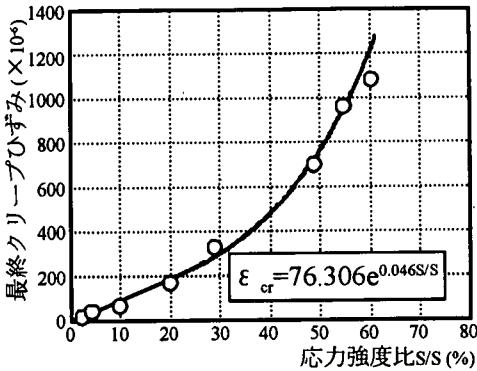


図-4 応力強度比の影響

(モルタル, 載荷材齢3日)

が増加する」というGLANVILLEの法則や「クリープ係数の様な弾性ひずみとクリープひずみの比で整理するとその影響を無次元化できる」など言われており、実用的には応力強度比の影響を無視している場合が多い。しかし、若材齢における上記の法則の成立については全く検証がなされていないため、ここでは実験により確認することとした。載荷応力の影響については、まず、コンクリートと同一配合で粗骨材のみ取り除いたモルタルにおいて、応力強度比を2.5%~60%に変化させた実験を行い、クリープに与える応力強度比の影響について実験を行った。

また、配合の影響を検討するために、水セメント比(45%, 55%, 65%)を変え、粗骨材量の影響を検討するために細骨材率(100%, 44.5%, 33.5%)を変化させた。

温度条件の影響を検討するために、載荷前の温度(20°C, 30°C, 40°C)と載荷材齢(1日, 3日, 5日)を変化させた。さらに、載荷前の養生条件は同一で、載荷中の温度(30°C, 40°C, 60°C)を変化させたものについても検討した。

5. クリープ実験に基づいた影響要因分析

(1) 応力強度比の影響

a) モルタルにおける応力強度比の影響

モルタルにおける載荷材齢3日の最終クリープひずみ・最終SPECIFIC CREEP・最終クリープ係数と応力強度比(S/Sと略記する)の関係について、図-4~6に示す。最終クリープひずみと応力強度比の関係は、応力強度比20%までは直線で、それ以上は指數関数の式の形でうまく表現されることがわかった。また、モルタルにおける最終SPECIFIC CREEPは、低応力強度比では応力強度比の影響を受けないが、20%を超えると応力強度比に比例して増加することがわかった。すなわち、モルタルでは、ペースト部分が多いために、応力強度比の影響が大きいものと推測される。また、最終クリープ係数で整理すると、

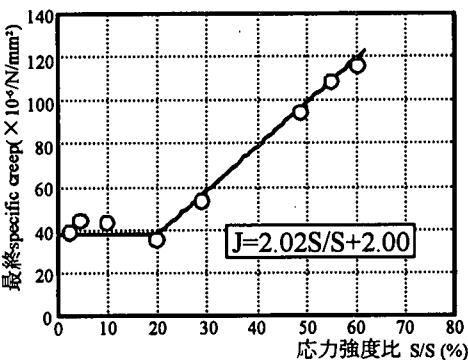


図-5 応力強度比の影響
(モルタル, 載荷材齢3日)

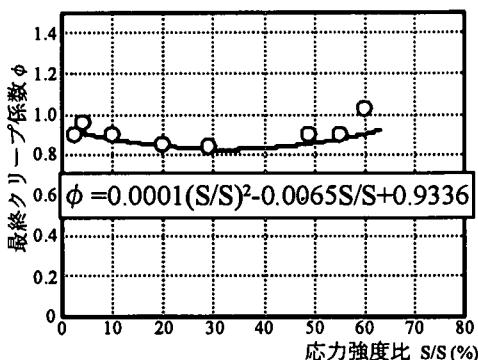


図-6 応力強度比の影響
(モルタル, 載荷材齢3日)

ほぼ直線状になるが、低応力強度比と高応力強度比の部分において若干クリープ係数が大きくなる傾向が見られる。これは、低応力強度比では、弾性ひずみの割合がクリープひずみに比べて小さいためにクリープ係数としては大きくなること、また高応力強度比では、クリープひずみが大きくなるために、クリープ係数が大きくなる傾向にあることによるものと考えられる。クリープひずみ・SPECIFIC CREEP・クリープ係数はそれぞれ応力強度比の影響を受けるが、比較的その影響が小さいのは、関係が2次式であらわされるクリープ係数であると言える。

以上から、モルタルのクリープ特性は、応力強度比に依存していることが確認できた。このことは、クリープひずみと応力強度比に線形の関係が成立せず、クリープを取り扱う際に、SPECIFIC CREEPやクリープ係数を使用しても載荷応力の影響を排除できないことを意味しており、広くクリープ挙動を定式化するためには、直接ひずみを算出できるクリープひずみを用いた定式化が効果的であることを示している。ここではクリープひずみと応力強度比の関係の定式化を試みた。本実験から得られた水セメント比55%のモルタルにおける載荷材齢3日の最終クリープひずみと応力強度比の関係を式(4)に示す。

$$\varepsilon_{cr}(S/S) = 76.306 e^{0.046S/S} \quad (4)$$

$\varepsilon_{cr}(S/S)$: 最終クリープひずみ ($\times 10^4$)

S/S : 応力強度比 (%)

b) コンクリートにおける応力強度比の影響

水セメント比55%のコンクリートにおいて載荷材齢1日、3日、5日における応力強度比と最終クリープひずみ・最終SPECIFIC CREEP・最終クリープ係数との関係について実験結果を図-7～15に示す。最終クリープひずみと応力強度比の関係を見ると、モルタルで得られた結果と同様に指数関数の関係が認められた。同一応力強度比で載荷材齢ごとに見ると、材齢1日～3日までは、載荷材齢が大きくなるほどクリープひずみが大きくなる傾向を示すが、載荷材齢3日と5日ではその差が縮まっている。これは、載荷材齢が増加すると圧縮強度も増加するため、同一応力強度比とすると載荷応力は後者の方が大きくなることによる。しかし、同一応力のクリープひずみは、載荷材齢が大きくなるほど減少するので、結果的に同一応力強度比であらわすと載荷材齢の影響が現れにくくなるものと考えられる。このことから、クリープひずみにおいて、材齢1日程度の若材齢では、載荷材齢の影響が現れるが、載荷材齢3日以降においては、載荷材齢にあまり影響されないで応力強度比の関数として評価できることがわかった。このことは、モデルを作る際に、クリープひずみを用いれば載荷材齢の影響を小さくできることを意味しており、指標としてのクリープひずみを用いることの優位性を示している。

最終SPECIFIC CREEPと応力強度比の関係を見ると、応力強度比50%程度までは最終SPECIFIC CREEPがほぼ一定の関係を示したが、それ以上の応力強度比では、最終SPECIFIC CREEPが急増する結果となった。その増加する大きさは、載荷材齢が大きくなると少なくなる傾向を示した。最終クリープ係数については、若干の影響は認められるが顕著ではない。

コンクリートでは、モルタルに比べて、低応力強度比の広い範囲でクリープひずみと応力強度比に比例関係が認められる理由として、コンクリートでは、クリープをほとんど生じない骨材の割合が65%近くを占めており、クリープひずみそのものも小さいことから、50%程度までの低応力強度比の範囲では、見かけ上、応力強度比の影響が現われにくいものと推察される。また、載荷材齢1日、応力強度比50%以上でSPECIFIC CREEPが急増することに関しては、材齢1日程度ではセメントマトリックスの結合力が弱いために、高応力強度比になるとマイクロクラックが深く進行し、それに伴うクリープひずみの進行が著しいことによるものと推測される。この現象を載荷材齢との関係で見てみると、材齢1日で載荷されたもの

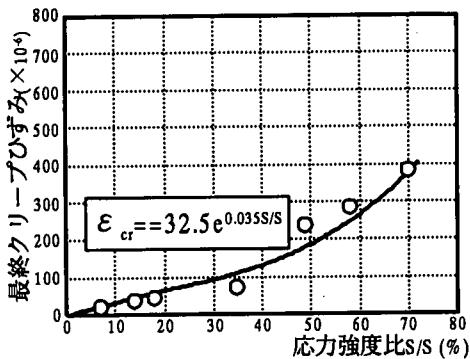


図-7 応力強度比の影響
(コンクリート, 載荷材齢1日)

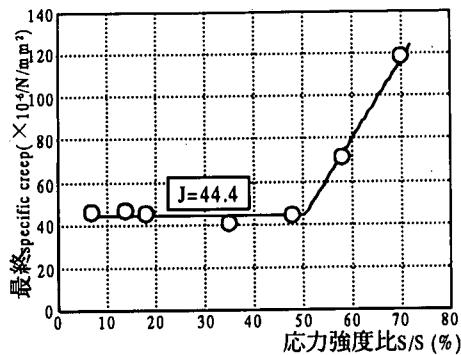


図-8 応力強度比の影響
(コンクリート, 載荷材齢1日)

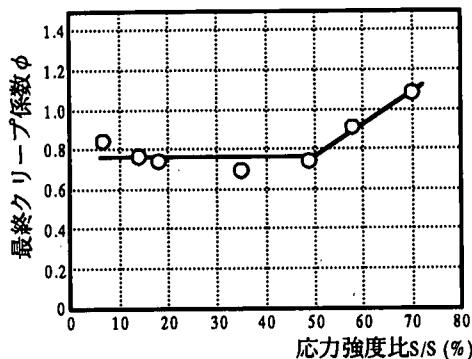


図-9 応力強度比の影響
(コンクリート, 載荷材齢1日)

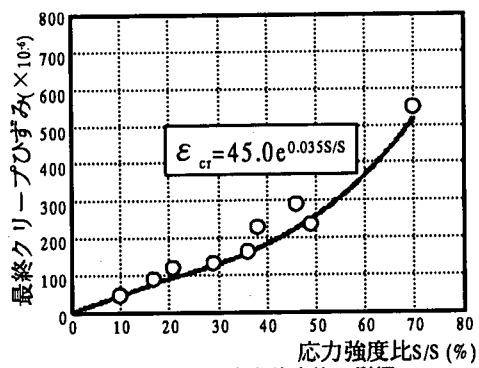


図-10 応力強度比の影響
(コンクリート, 載荷材齢3日)

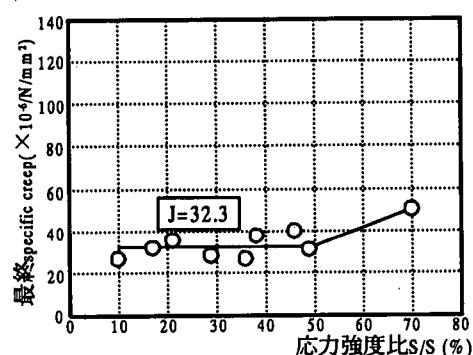


図-11 応力強度比の影響
(コンクリート, 載荷材齢3日)

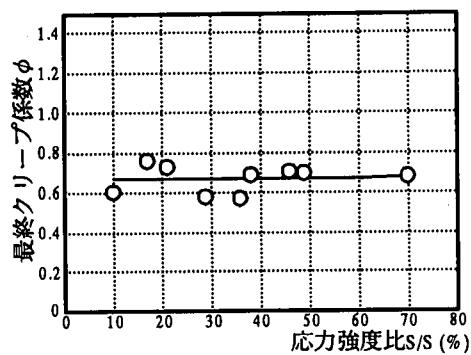


図-12 応力強度比の影響
(コンクリート, 載荷材齢3日)

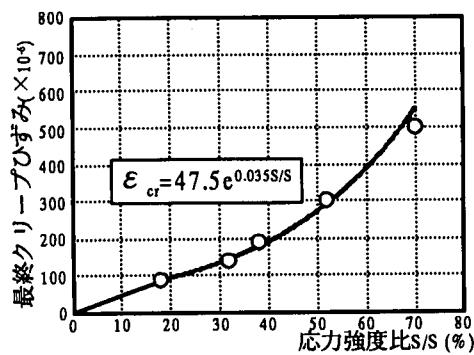


図-13 応力強度比の影響
(コンクリート, 載荷材齢5日)

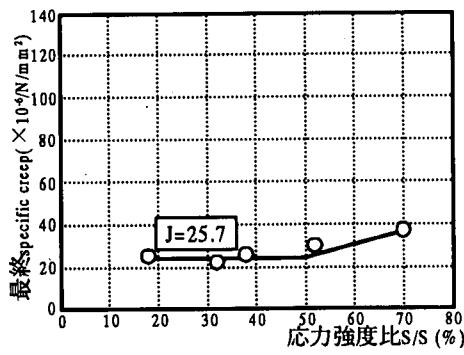


図-14 応力強度比の影響
(コンクリート, 載荷材齢5日)

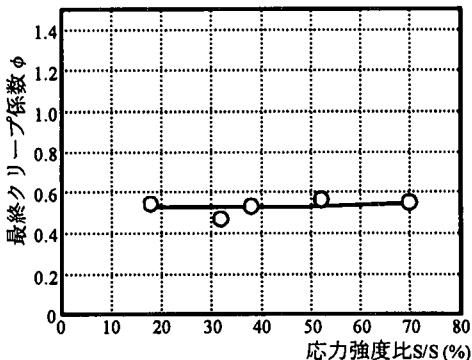


図-15 応力強度比の影響
(コンクリート、載荷材齢5日)

の方が3日や5日で載荷されたものよりも、応力強度比の影響を強く受けていることがわかる。

以上から、若材齢のクリープひずみは、応力強度比の影響を受けるが、コンクリートに対して実用上、GLANVILLEの法則は、ある応力強度比までは若材齢コンクリートに対しても成立するといえる。その適用範囲は一般に言われている強度の1/3よりも広く、圧縮強度の50%程度までは適用可能である。温度応力では、圧縮強度が載荷される割合は応力強度比に換算して50%以下と想定され、GLANVILLEの法則に基づいた線形クリープ式も適用可能といえる。本研究では、クリープをより厳密に評価するために、すべての応力強度比にわたって適用可能な定式化を試みることとし、最終クリープひずみを用いて非線形で定式化することとした。本実験から求めた水セメント比55%のコンクリートの最終クリープひずみと応力強度比の関係を式(5)に示す。関係式を作成する際に、応力強度比20%以上ではモルタルの結果に基づき、指數関数で表した。応力強度比20%以下では、既往の研究から、応力強度比と最終クリープひずみが比例することが確認されているので、原点を通る直線として表した¹¹⁾¹²⁾¹³⁾。

$$\epsilon_{cr}(S/S, \tau) = \begin{cases} A(\tau)S/S & (0 \leq S/S \leq 20) \\ B(\tau)e^{0.035S/S} & (20 \leq S/S) \end{cases} \quad (5)$$

S/S : 応力強度比 (%)

$\epsilon_{cr}(S/S, \tau)$: 最終クリープひずみ ($\times 10^6$)

τ : 載荷材齢 (日)

A(τ), B(τ) : 載荷材齢に影響される定数

$$\begin{aligned} A(\tau) &= 0.63(\tau - 1) + 3.27 & (1 \leq \tau \leq 3) \\ A(\tau) &= 0.125(\tau - 3) + 4.53 & (3 \leq \tau \leq 5) \\ A(\tau) &= 4.78 & (5 \leq \tau) \\ B(\tau) &= 6.25(\tau - 1) + 32.5 & (1 \leq \tau \leq 3) \\ B(\tau) &= 1.25(\tau - 3) + 45.0 & (3 \leq \tau \leq 5) \\ B(\tau) &= 47.5 & (5 \leq \tau) \end{aligned}$$

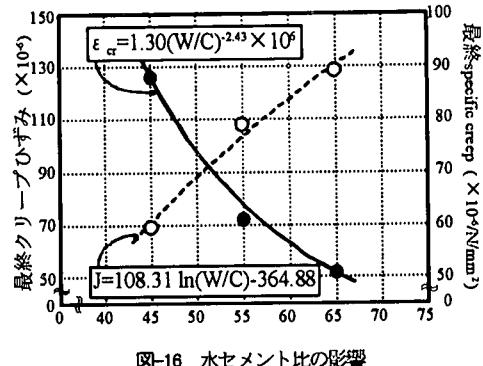


図-16 水セメント比の影響
(コンクリート、載荷材齢1日, S/S=20%)

(2) 配合の影響

a) 水セメント比の影響

表-3に示した水セメント比45%, 55%, 65%の配合について、載荷材齢1日、載荷期間中温度40°C、応力強度比20%での最終クリープひずみと水セメント比の関係を、図-16に示す。同一応力強度比において、最終クリープひずみは水セメント比が大きくなるほど減少した。なお、参考までに、そのときの最終SPECIFIC CREEPを示す。最終SPECIFIC CREEPは水セメント比が増加するに従って大きくなかった。単位応力当たりの指標で比べれば、クリープ量は水セメント比が小さくセメント硬化体の空隙率が小さい方が少ないという結果であった。一方、応力強度比を一定としたクリープひずみで比較すると、水セメント比を小さくすると圧縮強度が増大し載荷応力も増大するため、クリープひずみは増大する結果となった。実験より求めた最終クリープひずみ $\epsilon_{cr}(W/C)$ と水セメント比の関係を式(6)に示す。

$$\epsilon_{cr}(W/C) = 1.30(W/C)^{-2.43} \quad (6)$$

$\epsilon_{cr}(W/C)$: 最終クリープひずみ ($\times 10^6$)

W/C : 水セメント比 (%)

b) セメントペースト量の影響

骨材に比べペースト部分のクリープは数倍大きいと言われている。従ってコンクリートのクリープを支配しているものの1つにペースト量がある。ここでは、若材齢コンクリートのクリープに及ぼすペースト量の影響について、表-3に示した水セメント比55%モルタルペースト量401.8cm³/m³と細骨材率44.6%(ペースト量271.1cm³/m³)と33.5%(ペースト量244.2cm³/m³)の3種類のコンクリートについて応力強度比20%での実験結果を比較した。各ペースト量ごとのクリープひずみの変化を図-17に示す。また、最終クリープひずみとペースト量の関係を図-18に示す。これらの図より、最終クリープひずみ $\epsilon_{cr}(P)$ は、ペースト量の増大と密接な関係があり、次式で表されることがわ

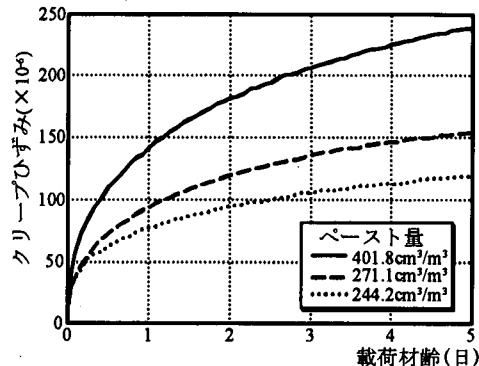


図-17 粗骨材の影響

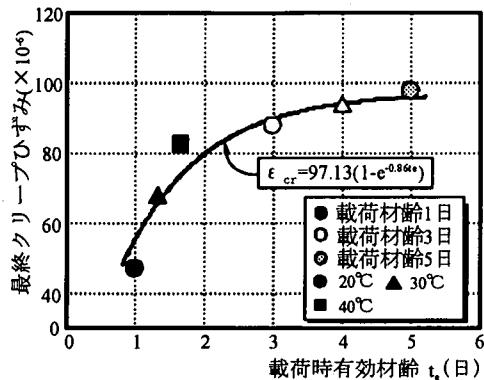


図-19 養生温度の影響

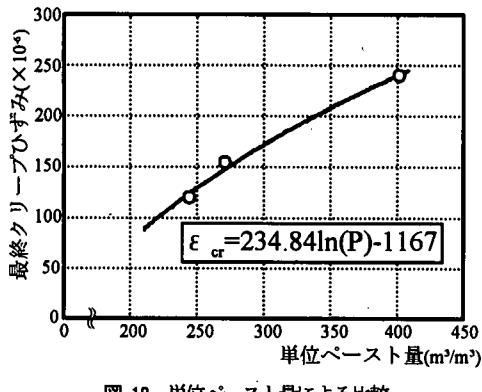


図-18 単位ペースト量による比較

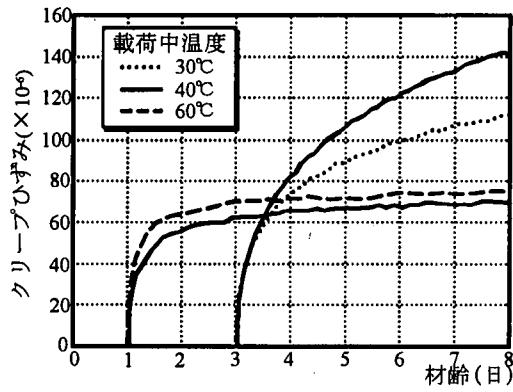


図-20 載荷温度の影響

かった。

$$\epsilon_{cr}(P) = 234.84 \ln(P) - 1167 \quad (7)$$

$\epsilon_{cr}(P)$: 最終クリープひずみ ($\times 10^6$)

P : 単位体積当たりのペースト量 (cm^3/m^3)

(3) 養生温度と載荷材齢による影響

水セメント比55%のコンクリートで、載荷材齢1日、3日、5日において、載荷までの養生温度を20°C、30°C、40°Cと変化させ、応力強度比20%，載荷温度20°C一定の条件で、養生温度と載荷材齢のクリープへの影響について調べた。長期材齢のコンクリートでは、積算温度あるいは有効材齢の関数として評価できると言われているが²⁾³⁾、若材齢についてもその評価が可能かどうか、式(8)に示す有効材齢を用いて評価した。

$$t_e = \int_0^t (T + 10) dt / 30 \quad (8)$$

t_e : 有効材齢 (日)

T : 温度 (°C)

t : 期間 (日)

最終クリープひずみと有効材齢の関係を図-19に示す。応力強度比の節で20°Cの条件での結果について述べたように、載荷材齢が大きくなるにしたがって、応力強度比が一定の条件では、載荷応力が大きくなるのでクリープひずみも大きくなる傾向にある。しかし、その傾向は、材齢3日以降少なくなり、ほとんど載荷材齢に依存しなくなる傾向にある。図-19から、温度履歴は全く異なるものの有効材齢で整理すると、クリープひずみと載荷材齢の間には、式(9)の関係が認められた。従って、載荷までの養生期間における温度の影響については、材齢1日から5日という若材齢期間においても有効材齢を用いて、異なる温度履歴の影響を一律に評価できることが確認できた。載荷時の有効材齢と最終クリープひずみ $\epsilon_{cr}(\tau_e)$ の関係を式(9)に示す。

$$\epsilon_{cr}(\tau_e) = 97.13(1 - e^{-0.86\tau_e}) \quad (9)$$

$\epsilon_{cr}(\tau_e)$: 最終クリープひずみ ($\times 10^6$)

τ_e : 載荷時の有効材齢 (日)

この結果より、クリープひずみに関する載荷材齢の影響については有効材齢で評価することとした。

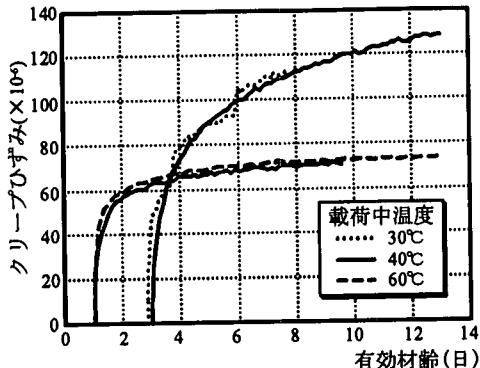


図-21 載荷温度の影響

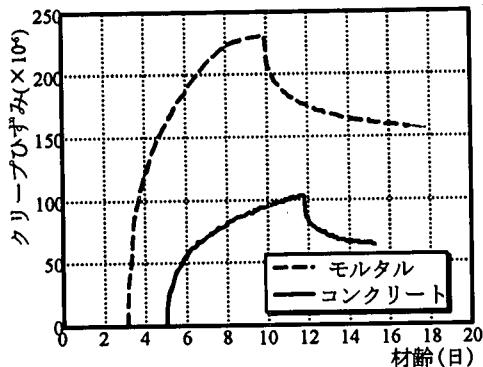


図-22 クリープひずみ挙動

(4) 載荷中の温度と載荷期間の影響

養生期間の温度条件が一定で、載荷中の温度条件を変化させて、載荷期間のクリープへの影響について調べた。図-20に各温度におけるクリープひずみの経時変化を示す。次に、図-21に載荷応力レベル20%における、載荷材齢1日と3日の載荷温度ごとのクリープひずみを上記の有効材齢を用いて整理したものを示す。載荷材齢1日、3日とともに、載荷中の温度が高いほどクリープひずみは増加する結果となり、30°C~60°Cでの範囲での各温度履歴で得られたクリープひずみと有効材齢を用いて整理すると良い一致を示した。従って、若材齢クリープにおける載荷中の温度の影響も有効材齢を用いて評価できることが確認できた。

6. 除荷後のクリープひずみの回復に関する検討

図-22に応力強度比20%における載荷材齢3日のモルタルと載荷材齢3日で基本配合を用いたコンクリートのクリープ試験結果のうちクリープひずみ（除荷後の弾性ひずみを含む）の変化を示す。

除荷後の回復部分についてみると、モルタルはコンクリートに比べ緩やかに回復し、除荷後7日程度で定常に至

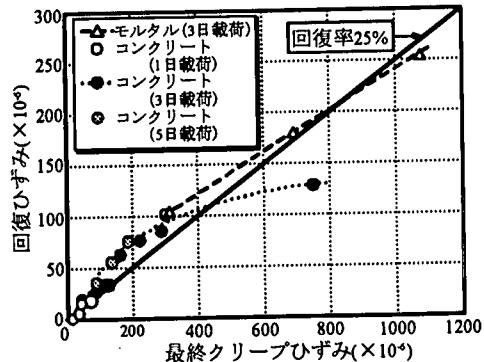


図-23 クリープひずみと回復ひずみの関係

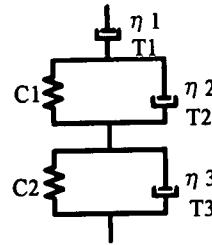


図-24 5要素モデル

った。しかしコンクリートでは、除荷後3日程度で定常に至った。ペースト量の違いが、回復クリープの持続する時間に影響を与えるものと考えられる。実験結果の中で、最終クリープひずみと回復ひずみの関係を図-23に示す。回復ひずみは、応力強度比によって影響を受け、低応力強度比では最終クリープひずみの25%付近にプロットされるが、高応力強度比になるとひずみの回復率が小さくなつた。この傾向は、載荷材齢やペースト量の違いによってあまり影響を受けなかつた。

7. 若材齢のクリープモデル

(1) クリープモデルの指標

筆者らは、これまでの研究の中で、SPECIFIC CREEPを使って、クリープ特性を検討し、評価してきた^{6) 7)}。

また、基本クリープ関数として、図-24に示すVoigtの5要素モデルがよく実験値と合致することを報告した。しかし、クリープひずみは、載荷される応力強度比に依存しており、SPECIFIC CREEP、クリープ係数のいずれを用いてもその影響を取り除くことができないことがわかつた。したがって、本研究では、直接クリープひずみを用いて、クリープモデルを構築することとした。

(2) 基本クリープ関数

クリープひずみと載荷期間の関係から、基本クリープ

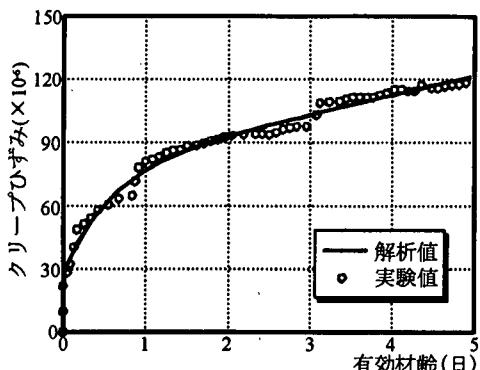


図-25 解析値と実験値の比較

関数を構築した。クリープひずみと載荷期間の関係も、SPECIFIC CREEPと載荷期間の関係もグラフ上の曲線の形はほぼ同じであるので、既往の研究^{[10][11][12][13]}に基づきVoigt関数を用いた5要素レオロジー・モデルを適用した。基本条件として、本研究の基本条件とした応力強度比20%、載荷材齢3日、水セメント比55%、細骨材率44.6%、養生時・載荷時ともに温度20°Cの結果を用いた。式(10)に設定した基本クリープ関数を示す。式中の各常数は、最小二乗法により設定した。また、実験結果と基本クリープ関数の関係を図-25に示す。

この結果、載荷期間5日にわたって基本関数と実験値は良い一致を示した。

$$\varepsilon_c(t_c) = \{28.502(1-e^{-206.08t_c}) + 47.442(1-e^{-1.747t_c}) + 9.144t_c\} \quad (10)$$

t_c : 輽荷期間 (有効材齢: 日)

(3) 各要因の補正関数の検討

a) 補正係数の設定方法

$$F_{ss}(S/S, \tau_c) = C(\tau_c)S/S \quad (0 \leq S/S \leq 20) \quad (11)$$

$$D(\tau_c)e^{0.035S/S} \quad (20 \leq S/S)$$

$$C(\tau_c), D(\tau_c) : \text{載荷時有効材齢に影響される定数}$$

$$C(\tau_c) = 0.007(\tau_c - 1) + 0.036 \quad (1 \leq \tau_c \leq 3)$$

$$C(\tau_c) = 0.001(\tau_c - 3) + 0.050 \quad (3 \leq \tau_c \leq 5)$$

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

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

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

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

クリープひずみと各要因の関係を基本条件のクリープひずみで除して補正関数を求めた。

b) 応力強度比

応力強度比に関しては、式(5)のうち、基本関数を構築

した載荷材齢3日、応力強度比20%を基準として、補正関数を設定した。式(11)に応力強度比に関する補正関数 F_{ss} を示す。

c) 水セメント比

同様な方法で、基本条件である水セメント55%に対する補正関数を算出した。式(12)に水セメント比に関する補正関数 F_{wc} を示す。

$$F_{wc}(W/C) = 1.69(W/C)^{-2.43} \quad (12)$$

d) セメントペースト量

同様な方法で、基本条件であるセメントペースト量27.1cm³/m³に対する補正関数を算出した。式(13)にセメントペースト量に関する補正関数 F_p を示す。

$$F_p(P) = 1.58 \ln(P) - 7.85 \quad (13)$$

e) 輽荷材齢に対する補正

載荷材齢3日を基本として、式(9)に基づき載荷材齢による補正関数を設定した。式(14)に補正関数 F_L を示す。

$$F_L(\tau_c) = 1.082(1-e^{-0.85\tau_c}) \quad (14)$$

(4) クリープ関数の提案

以上をまとめて、式(15)に示すVoigtの5要素モデルによるクリープモデルを提案する。

$$\varepsilon_c(t_c, S/S, W/C, P, \tau_c) = F_{ss}(S/S) \cdot F_{wc}(W/C) \cdot F_p(P) \cdot F_L(\tau_c) \cdot \{28.502(1-e^{-206.08t_c}) + 47.442(1-e^{-1.747t_c}) + 9.144t_c\} \quad (15)$$

8. 適用性の検討

(1) 検討方法

温度応力のように変化する応力状態への適用性の検討を行うために、式(15)を用いて計算された値と変化する応力状態での実験値の比較を行った。実験温度は、20°Cとした。本実験からクリープひずみは、応力強度比・載荷材齢・載荷期間の影響を受けることがわかったが、変化する応力に適用してクリープひずみを算出するには複雑な過程を考慮しなければならない。ここでは、理論的には完全でないが、実用的な精度を優先して、載荷されている応力強度比に着目した全応力法と載荷の過程に着目した重ね合わせ法、および載荷の過程と作用している応力強度比に着目した全応力重ね合わせ法の3種の方法について

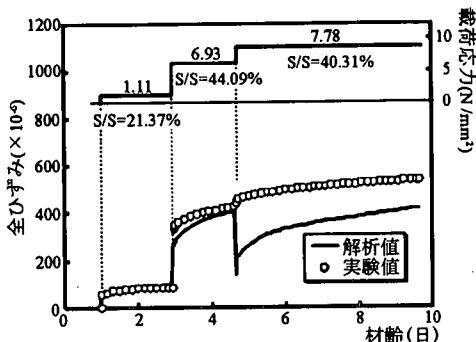


図-26 モデルの適用性の検討
(全応力法)

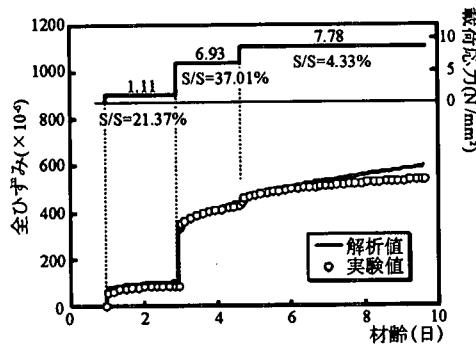


図-27 モデルの適用性の検討
(重ね合わせ法)

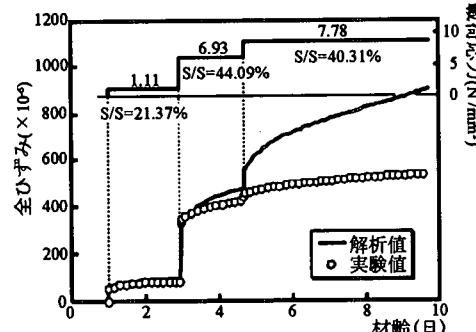


図-28 モデルの適用性の検討
(全応力重ね合わせ法)

て実測値と解析値を比較し、その精度を検討した。

(2) 全応力法

全応力法では、過去の載荷履歴を考慮せずに応力変化時の応力強度比のみでクリープひずみを評価するために、クリープひずみを過小評価する可能性がある。図-26に全応力法の解析結果と実験結果を示す。弾性係数が増加するために弹性ひずみが減少することもある、第3ステップのように応力変化が小さい場合には、ひずみを過小評価している。

(3) 重ね合わせ法

この方法では、重ね合わせ時に増分応力に対しての応力強度比しか考慮できないために、応力強度比の影響を過小評価する可能性がある。実験値と解析値の比較を図-27に示す。第2ステップで若干過小評価しているが全体としては良い一致を見ているといえる。第3ステップの応力変化量が小さいこともあるが、増分応力の応力強度比でクリープひずみを算出しても大きな誤差は生じていない。

(4) 全応力重ね合わせ法

この方法は、応力変化時の全応力の応力強度比で算出したクリープひずみを重ね合わせの法則に基づいて各応力ステップで重ね合わせるものである。この方法では、クリープひずみを過大評価する可能性がある。

図-28に実験値と解析値の比較を示す。第3ステップで大きなクリープひずみが発生して、過大評価する結果となった。

(5) 変化する応力への適用方法

以上の結果から、温度応力のような実構造物の応力を対象とした検討に適用するクリープ解析手法としては、理論的に完全ではないが、増分応力の応力強度比を用いた重ね合わせ方が最も実験値とよく合致する結果となつた。

9. 結論

本研究により若材齢の圧縮クリープ挙動に関して、次のことことが明らかになった。

- (1) 若材齢のクリープ挙動は、応力強度比の影響を強く受ける。クリープひずみと応力強度比の関係は、指数関数を用いてよく表現できる。
- (2) 若材齢のコンクリートでは、応力強度比 50%程度までは、クリープひずみと載荷応力の比例関係が成立する。しかし、それを超えると急激にクリープひずみは増大する。
- (3) 同一応力強度比において、載荷材齢が増加すると SPECIFIC CREEP やクリープ係数は減少する。一方、クリープひずみは、増大する。載荷材齢の影響は、載荷材齢が1日～3日において認められるが、3日以降は、影響が少くなり、応力強度比の影響が支配的になる。
- (4) 水セメント比40%～65%の範囲では、同一応力強度比において、水セメント比が大きくなると、クリープひずみは減少する。SPECIFIC CREEP やクリープ係数は増大する。
- (5) ペースト量が $250\text{cm}^3/\text{m}^3$ ～ $400\text{cm}^3/\text{m}^3$ の範囲では、ペー

- スト量がクリープに与える影響は大きい。単位ペースト容積を用いて評価すると、単位ペースト容積が大きいほどクリープひずみは大きいという関係が得られた。
- (6)若材齢コンクリートでは温度の影響を強く受ける。載荷中の温度が高いとクリープひずみは大きくなる。養生温度や載荷中の温度の影響については、有効材齢を用いて考慮できる。
- (7)回復ひずみは、載荷中の温度や期間とは直接関係せず、除荷前に生じていたクリープひずみの25%程度であった。また、定常に達する時間はモルタルの方がコンクリートより長い。
- (8)5要素レオロジーモデルを用いて、クリープひずみを指標として、若材齢の圧縮クリープ挙動をモデル化できる。各影響要因による補正関数を乗じることによって構築したクリープモデルで、クリープを予測できる。
- (9)上記の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、温度応力を模擬した応力状態のクリープ挙動をシミュレートできる。

参考文献

- 1) 入矢桂史郎、北村八郎、岡井大八、鎌田文男：PC LNG 貯槽用のコンクリートの材料配合選定に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 VOL.14.No1, 1992.
- 2) 土木学会制定：コンクリート標準示方書〔平成8年版〕施工編、15章マスコンクリート、pp128～146、1996。
- 3) 今枝靖典、糸日谷淑光、入矢桂史郎：高流動コンクリートの温度応力と有効弾性係数について、土木学会第49回年次学術講演会論文集第V部門、1994。
- 4) Laplante, P. : Propriétés mécaniques des béton durcissants analysé comparée des béton classiques et à très hautes performances. These de doctrat de l'ENPC, Paris 1993.
- 5) Le.Roy R : Travail du groupe AFREM(sous-groupe fluage) en cours, 1993.
- 6) Gaunot, I., Torrewinti,J.M, and Laplante, P. : Stress In Concrete At Early Ages: Comparison Of Different Creep Models, Thermal Cracking In Concrete at Early Age ; Proceeding of the International RILEM Symposium, Munich , 1994.
- 7) 岩城良、夏目忠彦、村山八洲雄、村田俊彦、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年報、1975。
- 8) Ohshita,H. and Tanabe,T.: The thermal Stress Behavior of concrete Based on the Micromechanical Approach ,Thermal Cracking in Concrete at Early Age ; Proceeding of the International RILEM Symposium, Munich.1994,
- 9) 森本博昭、岩本隆裕、栗原哲彦、小柳治：若材齢コンクリートの圧縮および引張クリープ特性：セメントコンクリート論文集 No.47, pp356-359, 1993.
- 10) Iriya,K, Hiramoto,M, Hattori,T Umehara,H Creep Behavior for Early Aged Concrete, 1997 International Symposium on Engineering Materials, OTTAWA 1997.
- 11) 梅原秀哲、北川善己、吉田弥智：マスコンクリートの温度応力へのクリープの影響に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 VOL.13-1, 845p, 1991.
- 12) 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, 1133p, 1995.
- 13) 野村幸弘、上原匠、梅原秀哲：クリープを考慮したマスコンクリートの温度応力に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, VOL.15, No.1, 1121p, 1993.
- 14) 阪田憲次、綾野克紀：コンクリートの非線形クリープ予測式の提案 土木学会論文集 No.451/V-17, pp179-188, 1992.8
- 15) Bazant, Z. P. and Panula, L. : Practical prediction of time-dependent deformation of concrete. PartVI : Temperature effect on basic creep , Mater Struct., 11, No. 66, pp.424-434,1978,
- 16) CEB-FIP. International recommendation for the design and construction of concrete structure — principles and recommendations Comité Européen du Béton — Federation Internationale de la Précontrainte , FIP Sixth Congress, Prague, 1970: published by the Cement and Concrete Association, London.

(1997. 1. 31 受付)

STUDY ON COMPRESSIVE CREEP IN CONCRETE AT EARLY AGE

Keishiro IRIYA,Masao HIRAMOTO,Tatsuya HATTORI and Hidetaka UMEHARA

An experimental study on creep behavior in concrete at early age, which much influenced to thermal stress due to hydration heat has been done as a part of the study on the thermal stress. The important factors on this creep behavior in concrete at early ages are loaded age, loaded stress level, and temperature effects so on comparing to matured concrete. Several creep tests with several parameters mentioned above have been done in the laboratory, and investigation has been done to the results. Quantitative assessment was carried out and useful formula was presented on each parameter. Following conclusion could be obtained. 1) The effect of stress level was much significant rather than loaded age. 2) Effective age could be applied for taking the influence of temperature during curing and loading into account. The creep model with 5 Vogit elements was applied for the experimental results, which was obtained by varied load creep experiment. Good fitting results was obtained between analysis and experimental results for varied loading state.