

論文 初期高温履歴を受けた超高強度コンクリートの圧縮クリープ性状

片寄 哲務^{*1}・横須賀誠一^{*2}・西田 浩和^{*3}・佐々木 仁^{*4}

要旨: 超高層建築物の下層階柱を想定した超高強度コンクリートの圧縮クリープ性状を把握するため、実大柱模擬部材と同様の水和発熱による初期高温履歴を与えた試験体の載荷実験を行った。その結果、コンクリートが初期高温履歴を受けると、それを受けない場合に比べ圧縮クリープひずみが小さいことが分かった。その要因として、初期高温履歴を受けたことにより、載荷開始以前の材齢初期に水和反応およびポズラン反応が加速し、内部の水分消費と高強度化・緻密化が加速され、載荷開始以降の水分の移動・発散が減少したことによるものと推測された。

キーワード: 圧縮クリープ, 超高強度コンクリート, 初期高温履歴

1. はじめに

超高層建築物の下層階柱には高軸力が作用する。近年はより高層化・柱断面縮小化を目指して、設計基準強度が 130N/mm^2 を超える超高強度コンクリートを下層階柱に採用する建築物も出現するようになった¹⁾。しかし、高軸力が長期的に作用した場合の超高強度コンクリートにおける圧縮クリープ性状については未だ不明な部分が多く、特に実大柱部材特有の水和発熱による初期高温履歴の影響については明確にされていない。圧縮クリープ性状は構造設計上重要な指標であるため、より実現象を反映した性状把握が重要である。

以上から、本論文では実大柱部材を想定し、初期高温履歴を受けた超高強度コンクリートの圧縮クリープ性状の把握を目的とした。実大柱部材と $\phi 100\text{mm} \times \text{H}200\text{mm}$ の試験体では内部温度履歴が大きく異なることに着目し、試験体に実大柱模擬部材と同様の水和発熱による初期高温履歴を与えることで実大柱部材と同じ条件を再現して載荷実験を行った。載荷開始から約 1.5 年(600 日)までの圧縮クリープ性状について、予測式による推定値との比較検討に加え、筆者らが既に発表したデータ²⁾を用いて、初期高温履歴が圧縮クリープ性状

に与える影響について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの調査

表-1 にコンクリートの調査を示す。載荷開始時の目標圧縮強度を 100N/mm^2 級と 150N/mm^2 級の 2 水準とし、水結合材比をそれぞれ 25%, 15% とした。結合材はシリカフェーム混入セメント(シリカフェーム混入率 10%)を使用した。コンクリートは実機プラントで練り混ぜ、トラックアジテータで試験体の打設現場まで約 80 分掛けて輸送し、荷卸し時のフレッシュ性状試験を実施し、屋内にてコンクリートを打設した。

2.2 養生方法

実大柱部材中心の水和発熱による温度履歴を再現するために、構造体温度追従養生(以下、追従養生と表記)を行った。図-1 に追従養生装置の概要、図-2 に追従養生における温度測定結果を示す。追従養生は、クリープひずみ測定用試験体と同時に

表-1 コンクリートの調査

調査記号	目標強度(N/mm ²)	水結合材比(%)	単位量(kg/m ³)				混和剤使用量(B [*] ×%)
			水	結合材	細骨材	粗骨材	
SFC15	150	15	150	1000	488	837	1.8
SFC25	100	25	160	640	764	837	0.9

※ B: 単位結合材量(kg/m³)

- *1 ㈱フジタ 技術センター 研究員 工修 (正会員)
- *2 ㈱フジタ 建築本部 エグゼクティブコンサルタント (正会員)
- *3 ㈱フジタ 技術センター 主任研究員 工修 (正会員)
- *4 ㈱フジタ 技術センター 主席コンサルタント 博士(工学) (正会員)

作製した実大柱模擬部材(1000mm×1000mm×1000mm, 無筋, 上下断熱材被覆)の中心部温度と同一の温度履歴を与えた水槽内で材齢 7 日まで行った。図-2 から実大柱模擬部材の中心部の温度履歴に, 追隨養生槽内の試験体中心部温度がよく追隨していることが分かる。

追隨養生槽内の試験体は材齢 7 日で脱型し, 実大柱部材の中央部と端部の乾燥環境を想定して, 載荷開始材齢である材齢 28 日まで温度 20℃, 湿度 60%の恒温恒湿室内にてそれぞれ封かん(外気に触れない中央部を想定), および気乾養生(外気に触れる端部を想定)を行った。

2.3 試験体

表-2 に試験体一覧を示す。追隨養生槽は各調査で 1 つとし, 圧縮強度試験用供試体, および無載荷の自由収縮ひずみ(以下, 収縮ひずみと表記)測定用試験体もクリープひずみ測定用試験体と同様の養生とした。追隨養生槽の大きさから収納できる試験体数に限りがあるため, 材齢 91 日以降の圧縮強度試験用供試体を 2 個とした。

2.4 載荷方法

図-3 にクリープ試験装置を示す。載荷試験は温度 20℃, 湿度 60%の恒温恒湿室内にて行った。クリープひずみ測定用試験体はφ100mm×H200mmの円柱供試体 3 個を鉛直に積み重ねて, 載荷直前まで封かん養生を行った試験体はアルミ製テープを巻きつけ密封した状態, 気乾養生を行った試験体は素地のままの状態に載荷した。試験体の偏心の有無は JIS 原案「コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案)」に従い左右のダイヤルゲージにより確認した。載荷応力は, 材齢 28 日に, クリープひずみ測定用試験体と同一の養生を行った圧縮強度試験用供試体を用いて JIS A 1108 に従って求めた圧縮強度の 30%とした。載荷中は手動で油圧調整することにより載荷応力を±2%以内に保持した。クリープひずみは, 試験体外側面の図-4 に示す位置にひずみゲージを貼付けて, 載荷方向と載荷直交方向を測定し, 積み重ねた 3 個の平均値を用いた。収縮ひずみもクリープひずみと同じ位置にひずみゲージを貼付け, 載荷開始材齢である材齢 28 日を

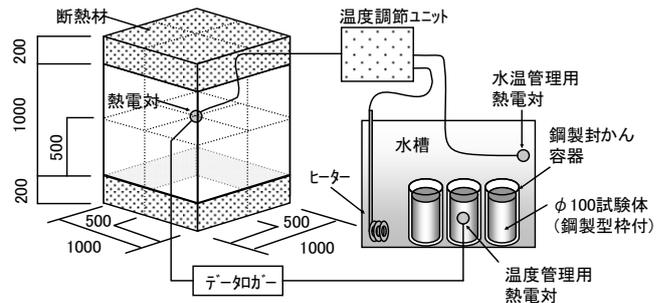


図-1 構造体温度追隨養生装置

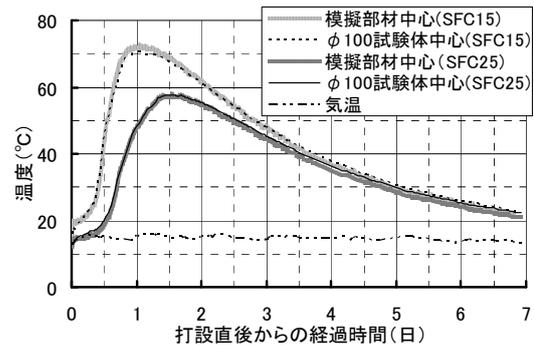


図-2 追隨養生における温度測定結果

表-2 試験体一覧

調査記号	養生方法	試験体個数								
		圧縮強度試験				クリープ試験	収縮ひずみ測定	質量減少率測定	養生槽内試験体温度測定	
		7D	28D	91D	1Y					除荷時
SFC15	追隨+封かん	-	3	2	2	2	3	3	3	1
	追隨+気乾	-	3	2	2	2	3	3	3	-
	標準	3	3	3	3	3	-	-	-	-
SFC25	追隨+封かん	-	3	2	2	2	3	3	3	1
	追隨+気乾	-	3	2	2	2	3	3	3	-
	標準	3	3	3	3	3	-	-	-	-

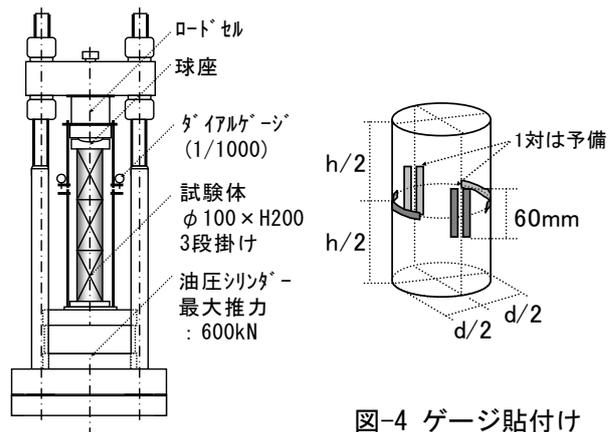


図-3 クリープ試験装置

図-4 ゲージ貼付け位置

表-3 フレッシュ性状試験結果 (荷卸し時)

調査記号	スランプフロー (cm)	50cm フロー到達時間(秒)	空気量(%)	コンクリート温度 (°C)	気温 (°C)	凝結時間	
						始発	終結
SFC15	目標値 70±10	12.6	目標値 2.0	18.5	14.4	8時間 19分	9時間 41分
	測定値 71.0		測定値 1.5				
SFC25	目標値 65±10	8.0	目標値 2.0	13.8	12.2	13時間 24分	14時間 46分
	測定値 72.5		測定値 1.4				

起点としてひずみの増加量を測定した。ひずみは試験体 3 個の平均値を用いた。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状試験結果

表-3 に荷卸し時のフレッシュ性状試験結果を示す。スランブフロー試験は JIS A 1150, 空気量試験は JIS A 1128 に準じた。SFC25 においてスランブフローがやや大きめであったが、分離傾向は見られず、所要の品質を満足した。凝結試験は JIS A 1147 に準じて、温度 20°C, 湿度 60% の恒温恒湿室内にて行った。SFC25 の凝結始発時間は SFC15 より約 5 時間遅かった。

3.1 圧縮強度およびヤング係数

図-5, 図-6 に圧縮強度およびヤング係数(圧縮強度の 1/3 応力時のセカントモデュラス)の試験結果をそれぞれ示す。追従養生を行った供試体の圧縮強度は、標準養生を行った場合に比べて SFC15, SFC25 共に長期的な強度増進が小さかった。ヤング係数においては、追従養生を行った供試体の方が標準養生を行った場合と比べて若干発現が早かった。また、追従養生を行った供試体の圧縮強度とヤング係数において、封かん養生と気乾養生による顕著な差は見られなかった。

3.2 載荷応力と載荷時弾性ひずみ

表-4 に載荷応力と載荷時弾性ひずみを示す。載荷時圧縮強度は目標強度に達し、載荷応力と載荷時弾性ひずみの関係は供試体の圧縮強度試験時における応力ひずみ関係とほぼ同様であった。載荷時においては、SFC15, SFC25 共に載荷応力と載荷時弾性ひずみとの関係には養生の違いによる顕著な差は見られなかった。

3.3 圧縮クリープひずみの経時変化

(1) 算出方法

クリープひずみ(ϵ_{ct}), クリープ係数(ϕ_{ct})はそれぞれ式(1), (2)で算出した。クリープひずみは重ね合わせの法則が成立すると仮定し、クリープ試験体で実測された全ひずみから載荷時弾性ひずみと収縮試験体で実測された収縮ひずみを差し引いた値と定義した。載荷直交方向も同様の方法で算出

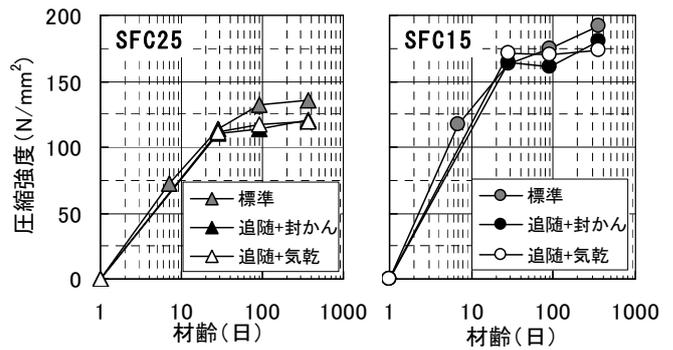


図-5 圧縮強度試験結果

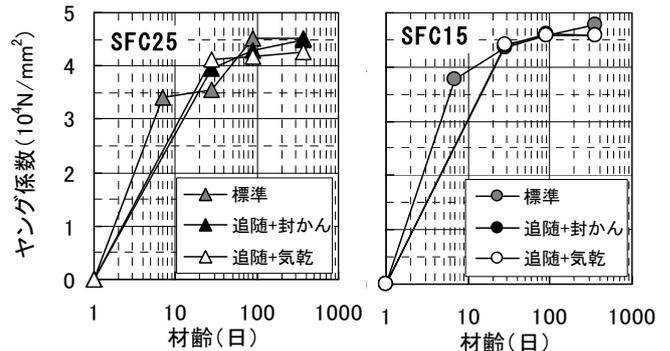


図-6 ヤング係数試験結果

表-4 載荷応力および載荷時弾性ひずみ

調合記号	養生方法	材齢28日 圧縮強度 (N/mm ²)	載荷応力 (N/mm ²) ($\sigma_{28} \times 0.3$)	載荷時弾 性ひずみ (μ)	載荷応力/載荷 時弾性ひずみ (10 ⁴ N/mm ²)	圧縮試験時 ヤング係数 (10 ⁴ N/mm ²)※
SFC 15	追従+封かん	165	49.5	1160	4.267	4.386
	追従+気乾	172	51.5	1206	4.270	4.400
SFC 25	追従+封かん	110	33.0	837	3.943	3.953
	追従+気乾	112	33.5	840	3.988	4.117

※1/3 σ_g 時のセカントモデュラス

した。ひずみは収縮(圧縮)方向を正として示す。

$$\epsilon_{ct} = \epsilon_t - (\epsilon_{et} + \epsilon_{sh}) \quad (1)$$

$$\phi_{ct} = \epsilon_{ct} / \epsilon_{et} \quad (2)$$

ϵ_t : 載荷時間 t 日における全ひずみ (μ) * クリープ試験体の測定値

ϵ_{et} : 載荷時弾性ひずみ (μ) * 載荷完了時の測定値

ϵ_{sh} : 載荷開始から材齢 t 日までの収縮ひずみの増分 (μ)

(2) 載荷方向の経時変化

図-7~10 に全ひずみ, 収縮ひずみ, クリープひずみおよびクリープ係数の経時変化をそれぞれ示す。図中の値が階段状になっていることは載荷応力調整の影響である。全ひずみは養生方法によらず, SFC15 の方が SFC25 より大きい。収縮ひずみ, クリープひずみおよびクリープ係数は SFC25 の気乾状態で載荷した試験体が最も大きく, 載荷時間 600 日でそれぞれ約 170 μ , 約 500 μ および約 0.6 であった。また, SFC15 は SFC25 に比べて, クリープひずみ, クリープ係数における養生の違いによる差が小さい結果となった。図-11 に質量減少率

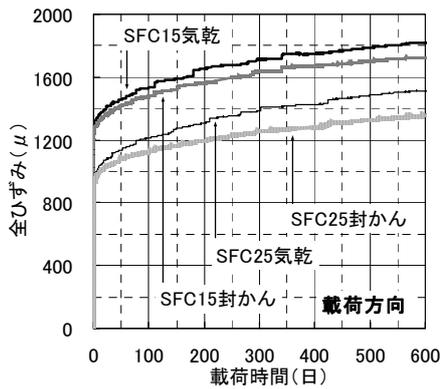


図-7 全ひずみの経時変化

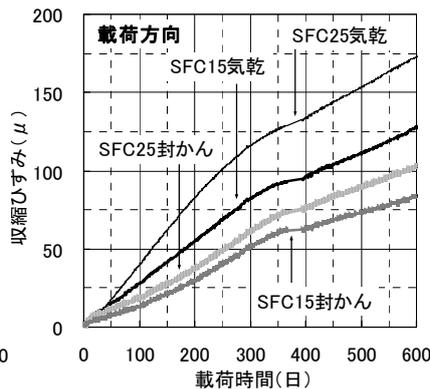


図-8 収縮ひずみの経時変化

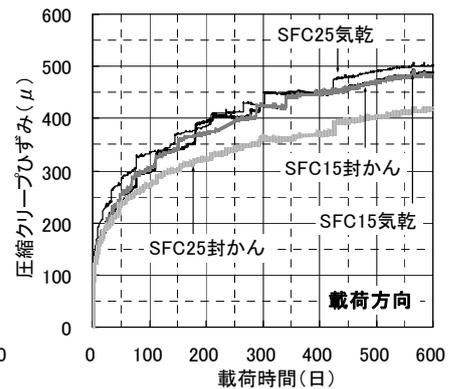


図-9 クリープひずみの経時変化

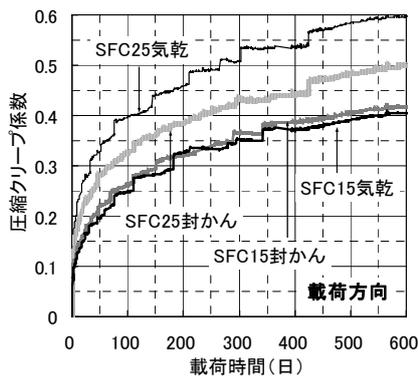


図-10 クリープ係数の経時変化

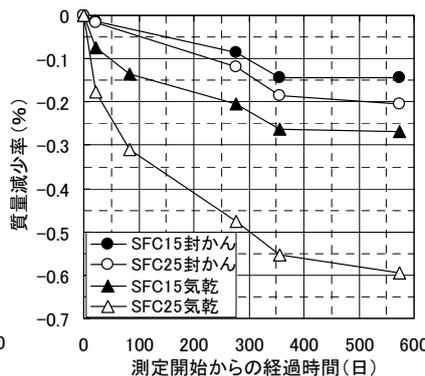


図-11 質量減少率の経時変化

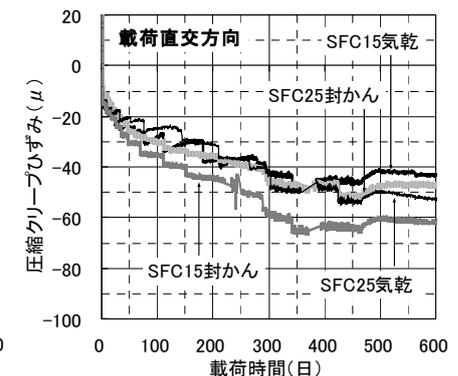


図-12 垂直方向のクリープひずみの経時変化

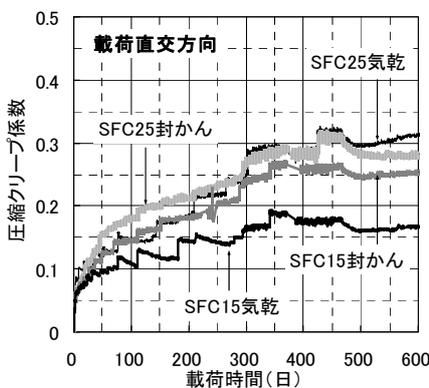


図-13 垂直方向のクリープ係数の経時変化

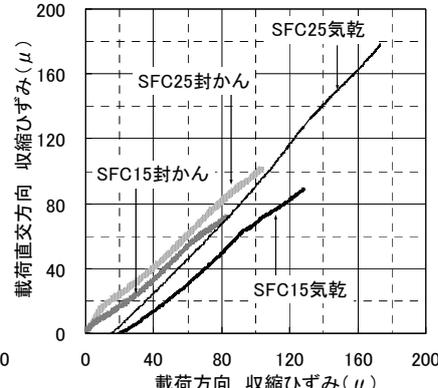


図-14 収縮ひずみにおける荷重方向と垂直方向の関係

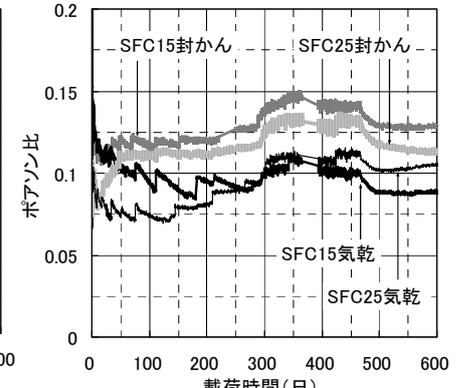


図-15 クリープポアソン比の経時変化

の経時変化を示す。追従養生を行った円柱供試体 ($\phi 100 \text{ mm} \times H200\text{mm}$) を温度 20°C 、湿度 60% の恒温恒湿室内に封かんおよび気乾養生し、材齢 7 日からの質量変化を測定した。SFC15 は SFC25 に比べて養生の違いによる質量減少率の差が小さいことから、SFC15 は SFC25 より養生の影響を受けにくいと推測され、これはクリープひずみの測定結果と対応している。つまり、コンクリートの圧縮強度が 150N/mm^2 級の実大柱部材は、 100N/mm^2 級と比較して、柱端部は乾燥による影響が小さいと考えられる。

(3) 垂直方向の経時変化

図-12 に垂直方向のクリープひずみ、図-13 に垂直方向のクリープ係数の経時変化を示す。垂直方向のクリープひずみは膨張(引張)方向に荷重方向の約 $1/10$ 程度であった。また、SFC15、SFC25 共に養生の違いによる顕著な差は見られなかった。垂直方向のクリープ係数は、荷重方向のクリープ係数の約 $1/2$ 前後の値となった。

図-14 に収縮ひずみにおける荷重方向と垂直方向の関係を示す。荷重方向と垂直方向がほぼ直線的な比例関係にあり、垂直方向と載

荷方向の収縮ひずみはほぼ同程度であった。また、気乾養生を行った SFC15 と SFC25 が原点から始まっていないのは、荷重直交方向の収縮ひずみが増加せず、荷重方向の収縮ひずみのみが増加したことを示している。

図-15 にクリープひずみ測定試験体におけるクリープポアソン比(ν)の経時変化を示す。クリープポアソン比は式(3)で求めた。

$$\nu = -\left(\frac{\epsilon_{ctH}}{\epsilon_{ctV}}\right) \quad (3)$$

ϵ_{ctH} : 荷重直交方向におけるクリープひずみ (μ)

ϵ_{ctV} : 荷重方向におけるクリープひずみ (μ)

クリープポアソン比は SFC15, SFC25 共に封かん養生は 0.12 前後、気乾養生は 0.09 前後で推移した。

4. 初期高温履歴の影響

4.1 既往のクリープひずみ予測式

ここでは、クリープひずみに与える初期高温履歴の影響を検討するために、既往の予測式として CEB-FIP Model Code 1990³⁾(以下、MC90 式と表記)、MC90 修正式⁴⁾を採用上げた。ただし、MC90 式は、本実験の圧縮強度が適用範囲外であるが、そのまま用いた。また、MC90 修正式は、小室ら⁴⁾が終局クリープ係数に及ぼすコンクリートの圧縮強度の影響係数を修正した式である。以下、初期高温履歴の影響について、実験値と推定値を比較して検討する。

4.2 測定値と推定値の比較

図-16 に測定されたクリープひずみと各予測式による推定値の比較、および既往の実験データ²⁾を併せて示す。なお、本実験結果と既往の実験データと比較は 4.3 節で述べる。予測式は乾燥によるクリープひずみを含めた値を推定することから、比較は気乾養生を行った試験体の実験値を用いて行った。MC90 式による推定値(□印)は SFC15, SFC25 共に実験値(太実線)より過大となり、荷重時間 600 日で実験値は推定値より 60%前後小さい値となっている。また、MC90 修正式(△印)と比較すると、実験値(太実線)は荷重時間 600 日で推定値より約 35%小さかった。そこで、小室らの方法⁴⁾に習い、追随養生を行っていない封かん養生の供試

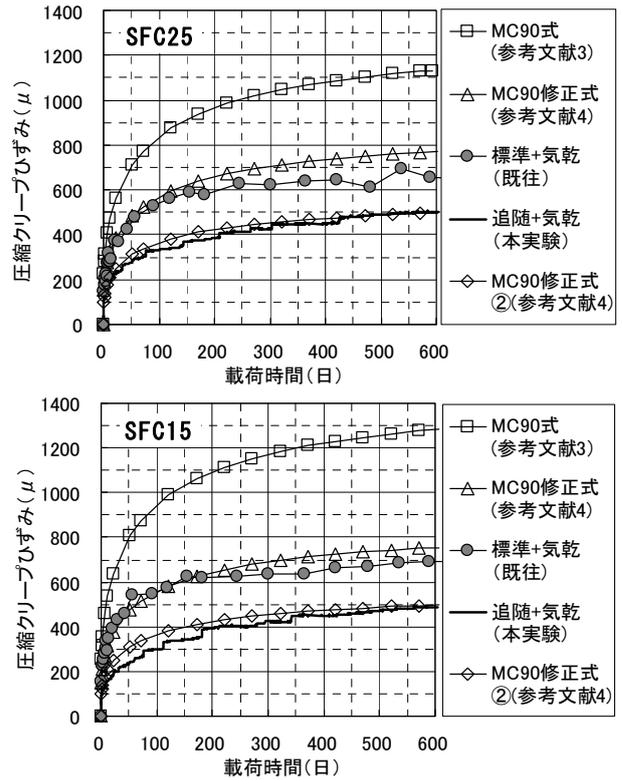


図-16 クリープひずみの実験値と推定値の比較

体の圧縮強度が、追随養生を行った場合の材齢 28 日における圧縮強度とほぼ同等となる材齢を荷重開始材齢と

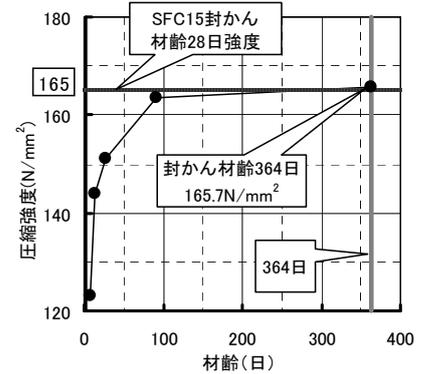


図-17 仮定荷重開始材齢算定

して推定値を求め直すことにした。筆者らが行った実験データを調べた結果、本実験の SFC15 と調合、温度環境などの試験条件に近い追随養生を行っていない封かん養生の圧縮強度(実験値)が、本実験における追随養生と封かん養生を行った SFC15 の材齢 28 日における圧縮強度と材齢 364 日でほぼ同等であったため(図-17 参照)、荷重開始材齢を 364 日と仮定して MC90 修正式で推定値を算定した。その結果、荷重開始材齢を 364 日に補正して求めた推定値(◇印)は実験値(太実線)とほぼ対応し、実験値は予測式を用いて概ね評価することができた。今後、温度履歴の影響と荷重開始材齢の補正との明確な関係について検討が必要と考えられる。

4.3 既往の実験データとの比較

既往の実験データ(●印)は、JIS 原案「コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案)」に準じて、気乾養生についてのみ実施したものである。本実験データとの比較は気乾養生試験体の実験結果を用いた。本実験結果は既往の実験結果と比較して、載荷時弾性ひずみに大きな差は見られなかったが、クリープひずみは載荷時間 600 日で約 30%小さかった。既往の実験と本実験における大きな違いは材齢 7 日までの初期高温履歴の有無であることから、コンクリートが初期高温履歴を受けると圧縮クリープひずみが小さくなることが分かった。

このことをより詳細に調べるために、クリープひずみに与える乾燥の影響、初期高温履歴と収縮ひずみの関係について検討する。図-18 に本実験における気乾養生と封緘養生のクリープひずみの差の経時変化、図-19 に気乾養生における収縮ひずみの本実験結果と既往の実験データの比較を示す。

SFC15, SFC25 共にクリープひずみにおける気乾養生と封かん養生の差は 100μ 以下と小さく、本実験におけるクリープひずみは乾燥による影響をあまり受けていないことが分かる。また、図-19 より初期高温履歴を受けた場合(本実験)の収縮ひずみは、それを受けない場合(既往)の約 50%程度と小さくなっている。これらのことから、初期高温履歴を受けると初期材齢に水和反応とポズラン反応による水分消費が促進されると共に、ポズラン反応と収縮が促進されるため高強度化、緻密化が加速し、載荷開始以後における試験体外部への水分の発散や試験体内部における水分の移動が減少すると考えられる。このことは、既往の文献でもシリカフェームは初期高温履歴を受けるとポズラン反応が加速し、初期材齢における高強度化、緻密化をより促進することが報告されている⁵⁾。

一方、標準養生試験体より追従養生試験体の圧縮強度の長期的増進が小さかったこと(図-5 参照)、追従養生試験体のヤング係数の発現が早かったこと(図-6 参照)からも水和反応およびポズラン反応が加速していることが推測される。今後、温度履歴と部材内部における水分の状態とクリープ進行

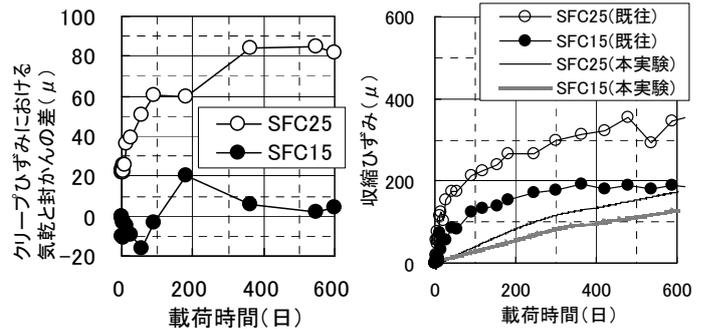


図-18 気乾養生と封かん養生のクリープひずみの差 図-19 収縮ひずみの比較

速度の関係について、さらに検討する余地がある。

5. まとめ

以上の実験結果より、初期高温履歴を受けると、それを受けない場合に比べてクリープひずみが小さくなることが分かった。その要因は、載荷開始以前の材齢初期に水和反応およびポズラン反応が加速したことにより内部の水分消費が促進されると共に、高強度化・緻密化が加速され、載荷開始以降の水分の移動・発散が減少したことによるものと推測された。

謝辞 本実験は、三井住友建設(株)、(株)フジタにより共同で行われたものです。関係諸氏には多大なるご協力、有益なご意見を頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 例えば黒岩秀介,河合邦彦,小田切智明,嵐山正樹: $F_c 130\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた超高層集合住宅の施工,コンクリート工学,vol.42,No.10,pp44-49,2004.10
- 2) 片寄哲務,西田浩和,寺岡勝: 超高強度コンクリートの圧縮クリープ性状,日本建築学会大会学術講演梗概集,A-1,pp391-392,2005.9
- 3) CEB-FIP Model Code 1990, Comité Euro-international du Béton,1990
- 4) 小室努,今井和正,是永健好,渡邊史夫: 超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の長期圧縮特性,日本建築学会構造系論文集,第 605 号,pp151-158,2006.7
- 5) 河上浩司,西本好克,梶田佳寛: 高強度コンクリートの圧縮強度発現と微細構造に関する実験研究,コンクリート工学年次論文集,vol.27,No.1,pp1075-1080,2005.6