

論文 高強度コンクリートを用いた CFT の圧縮クリープ特性

熊谷 仁志*1・菊地 俊文*2

要旨：設計基準強度 60～120N/mm² の高強度コンクリートを使用した無筋コンクリートおよび CFT 試験体を作製し、約 1 年間の圧縮クリープ試験を行って、コンクリートおよび鋼管のひずみ挙動を確認した。CFT の圧縮クリープひずみは、充填コンクリートが密閉されていること、ならびに鋼管へ軸力が移動することにより、無筋コンクリートに比べて小さくなることが確認された。CFT の圧縮クリープ挙動については、鋼材や自己収縮の影響を考慮したレオロジーモデルで評価可能であり、その基となる密閉条件における高強度コンクリートの圧縮クリープ試験データの蓄積が重要である。

キーワード：CFT, 高強度コンクリート, 圧縮クリープ, 自己収縮ひずみ

1. はじめに

最近、建物高さ 300m 級の超高層建物に、コンクリート充填鋼管構造（以下、CFT とする）が採用されるようになり、設計基準強度（以下、 F_c とする）60～120 N/mm² の高強度コンクリートが充填コンクリートとして使用されている。CFT は鉄筋コンクリート構造と比較して、コンクリートが密閉条件にあること、鋼材量が多いことから、合成部材としてのクリープ係数が小さいと考えられ、国内の建築分野ではクリープの影響は考慮されていない。土木分野においては、いくつかの研究が行われているが、通常は鉄筋コンクリート構造やプレストレスト鉄筋コンクリート構造のクリープ係数が準用されている状況である。

一方で中国などの海外では、超高層建物や長大スパンのアーチ橋に積極的に CFT が採用され、CFT に関する各種クリープ試験が実施されており、クリープを考慮した設計や施工管理が行われている^{2),3)}。

本論文では、今後のさらなる超高層化や長大スパン化を見据え、CFT の圧縮クリープ特性を定量的に把握する目的で、60～120 N/mm² の高強度コンクリートを用いた CFT の圧縮クリープ試験を実施した。その結果を用いて、無筋コンクリートと CFT の圧縮クリープ特性との比較や、レオロジーモデルを用いた解析による評価を行う。

2. 試験体および試験方法

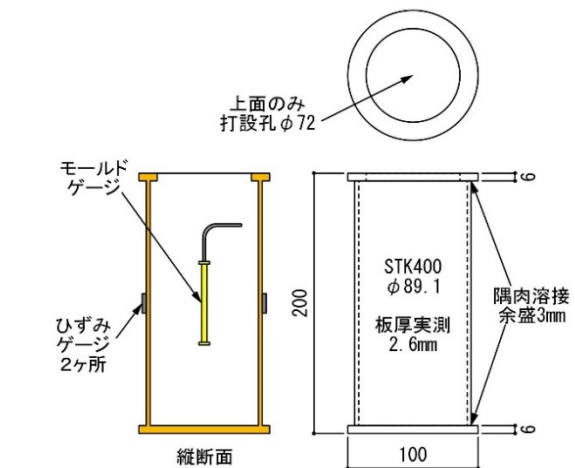
試験体の一覧と使用した材料の力学的特性を表-1 に示す。表中には試験に用いた試験体の個数を記している。使用したコンクリートは、 $F_c=60\text{N/mm}^2$ と 120N/mm^2 の 2 種類である。無筋コンクリートについては、自己収縮試験を除き、直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体を使用し、アンシール条件とシール条件の 2 種類とした。打設翌日に脱型し、材齢 7 日まで 20℃標準水中養生を行

った後、アンシール試験体は脱型したままで、シール試験体はアルミテープを用いて密封して、温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60\pm 5\%$ の恒温恒湿室内にて養生した。

表-1 試験体および使用材料

呼び名	試験条件	クリープ試験		湿度計測	自己収縮	コンクリート		鋼管
		載荷	無載荷			圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²	
Fc60	アンシール	3体	3体	1体	—	79.4	40,500	—
	シール	3体	3体	1体	2体	79.1	41,500	—
	CFT	3体	1体	1体	—	—	—	366
Fc120	アンシール	3体	3体	1体	—	154.0	43,000	—
	シール	3体	3体	1体	2体	154.0	42,700	—
	CFT	3体	1体	1体	—	—	—	399

注記) コンクリートの圧縮強度と弾性係数は載荷時(材齢28日)の値
コンクリートの弾性係数は圧縮強度の1/3応力時刻線剛性
鋼管の降伏強度は0.2%オフセット耐力(JIS Z2241/12B号引張試験)



試験体内部 端面研磨 湿度センサ埋込

図-1 CFT 試験体

*1 清水建設（株）技術研究所 主席研究員 博士（工学）（フェロー会員）

*2 清水建設（株）技術研究所 工修（正会員）

CFT 試験体は 図-1 に示すように、外径 89.1mm、板厚実測 2.6mm の鋼管上下に厚さ 6mm の鋼板を溶接したものである。径厚比は約 34 であり、一般的な超高層建物の CFT 柱鋼管の径厚比（幅厚比）20～40 に対して平均的な値となっている。上面に打設孔を設けて、充填コンクリートを打ち込んでいる。コンクリートは 図-1 下中央の写真に示すように、上面鋼板よりも数 mm 盛り上げて打設し、研磨仕上げを行っている。研磨後に上面をアルミテープで密封し、温度 20±2℃、相対湿度 60±5% の恒温恒湿室内にて養生した。

使用したコンクリートの計画調合を表-2 に、鋼管から採取した試験片の引張試験結果例を図-2 に示す。

表-2 コンクリートの計画調合

呼び名	W/C (%)	目標 スランプ 70- (mm)	目標 空気量 (%)	単位量(kg/m ³)								
				W	C1	C2	S1	S2	S3	G1	G2	G3
Fc60	34.3	600±50	3.0±1.0	170	496	—	337	506	—	438	438	—
Fc120	17.2	650±50	2.0以下	160	—	931	435	—	305	—	—	840

C1：中庸熱ポルトランドセメント C2：シリカフェームプレミックスセメント(SFPC)
S1：千葉県君津市産陸砂 S2：栃木県佐野市産石灰岩砕砂 S3：山梨県大月市産安山岩砕砂
G1：栃木県佐野市産石灰岩砕石 G2：埼玉県秩父郡横瀬産石灰岩砕石
G3：山梨県大月市産安山岩砕石（砕石はいずれも2005）
Fc60混和剤：高性能AE減水剤標準型Ⅰ種
Fc120混和剤：超高強度コンクリート用高性能減水剤

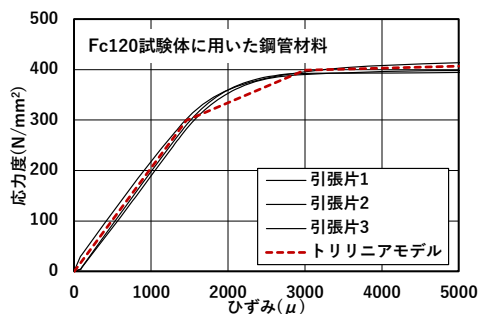


図-2 鋼管から採取した試験片の応力度・ひずみ関係

圧縮クリープ試験は JISA1157「コンクリートの圧縮クリープ試験方法」に準拠して実施した。クリープ試験体を縦に 3 個重ねて、材齢 28 日に圧縮軸力を荷重し、そこから 1 年間荷重を一定に保持した (Fc60 は荷重継続中)。荷重時には上下面のアルミテープを除去している。荷重軸力はアンシール試験体とシール試験体では表-1 に示す圧縮強度の 1/3 の圧縮応力度となる荷重とした。CFT 試験体については、充填コンクリートの圧縮応力度がシール試験体と同等となるように式(1)に示す軸力 P を荷重した。試験期間中は荷重変動がこの目標荷重の±2%以内に収まるように、油圧ジャッキを制御している。

$$P = (E_c A_c + E_s A_s) \frac{\sigma_o}{E_c} \quad (1)$$

ここで E_c は表-1 に示すシール試験体のコンクリートの弾性係数、 E_s は鋼管の弾性係数 205,000N/mm²、 A_c はコンクリートの断面積、 A_s は鋼管の断面積、 σ_o はシール試

験体の荷重応力度である。

試験体の内部には 図-1 下左の写真に示すようにモールドひずみゲージ（東京測器研究所 PMFL-60）を埋め込んだ。アンシールおよびシール試験体の表面にはひずみゲージ（東京測器研究所 PL90-11）を、CFT 試験体の鋼管表面にはひずみゲージ（東京測器研究所 FLAB-5-11）を貼り付けた。これらのセンサを用いて荷重期間中の軸方向ひずみを計測すると同時に、同一条件下における無荷重試験体のひずみ計測も行っている。

試験体の乾燥状況がクリープに及ぼす影響を検討するため、山田らの研究⁴⁾を参考にして、無荷重試験体の一部にボタン電池型温湿度データロガー（商品名ハイグロクロン）を設置して、試験体内部の相対湿度の計測を行った。直径 25mm のドリルで試験体上面から深さ 50mm まで削削し、温湿度データロガーを設置した後、 図-1 下右の写真に示すように、孔を断熱材とエポキシ樹脂を用いて塞ぎ、上面をアルミテープで密封した。

自己収縮試験は、日本コンクリート工学会「超流動コンクリート研究委員会報告書」の試験方法に準拠して実施した。試験体は 100×100×400mm の直方体であり、中央に埋込みひずみ計（東京測器研究所 KM-100BT）を設置して、材齢 28 日まで自己収縮ひずみを計測した。

3. 試験結果

3.1 圧縮クリープ試験結果

ひずみ計測値時刻歴（オリジナルデータ）を図-3 に示す。荷重試験体と無荷重試験体の両方について、3 体

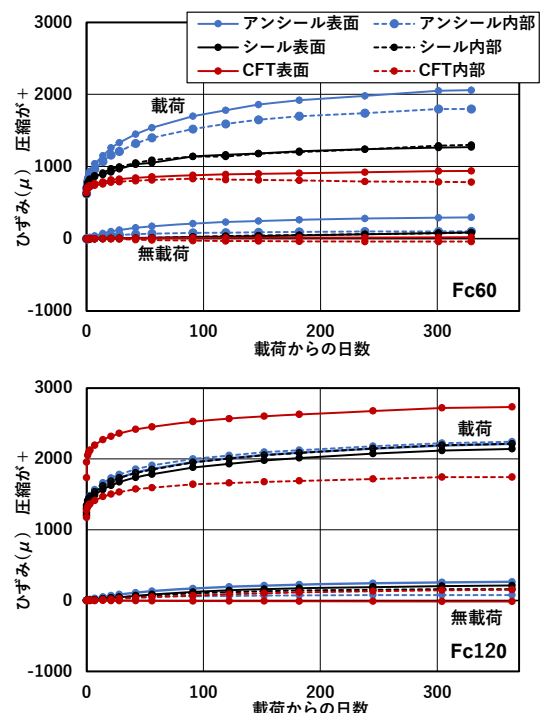


図-3 クリープ試験結果（オリジナルデータ）

の試験体の平均値（CFT 無載荷試験体は 1 体のみ）を示している。

載荷試験体のひずみから、載荷直後の弾性ひずみと無載荷試験体ひずみを差し引いて計算したクリープひずみの時刻歴を図-4 に示す。

Fc60 については、アンシール試験体、シール試験体、CFT 試験体の順にクリープひずみが小さくなっている。CFT 試験体においても時間経過とともに圧縮ひずみが増加する圧縮クリープが認められる。シール試験体のクリープひずみはアンシール試験体の約 50%であり、既往の研究⁹⁾と同様に、密閉されて乾燥しにくくなることで圧縮クリープが減少することが確認された。CFT 試験体のクリープひずみはアンシール試験体の約 20%であり、鋼管が存在することによってシール試験体よりもさらに圧縮クリープが減少している。クリープひずみについては試験体の表面と内部で、顕著な差は見られなかった。

Fc120 については、アンシール試験体とシール試験体のクリープひずみに Fc60 のような差がみられなかった。コンクリートの組織が緻密化することで、乾燥による影響（密閉による効果）を受けにくくなっていることが一因と考えられる⁹⁾。CFT 試験体については、Fc60 と同様に時間経過とともに圧縮ひずみが増加する圧縮クリープが認められる。試験体内部のクリープひずみはアンシール試験体の半分程度となっているものの、表面（鋼管）のひずみがアンシール試験体よりも大きくなっている。鋼管が降伏ひずみを超えたものと考えられ、3.4 節で検討することとする。

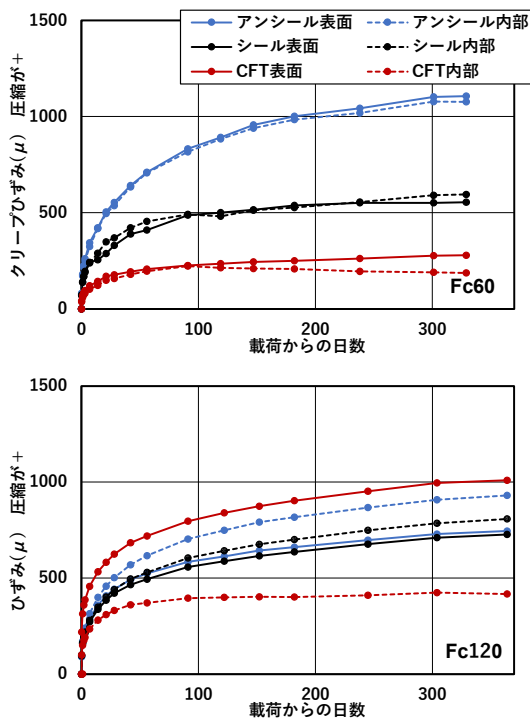


図-4 クリープ試験結果（クリープひずみ）

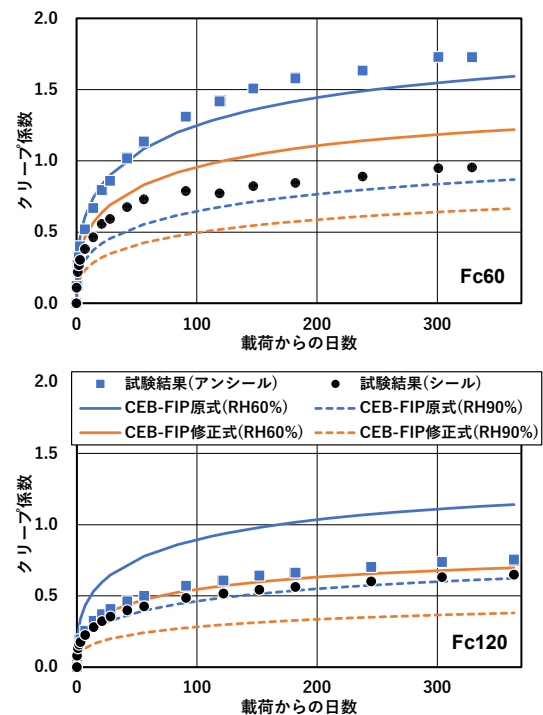


図-5 無筋コンクリート試験体のクリープ係数

図-5 は、アンシール試験体とシール試験体について図-4 に示したクリープひずみを載荷直後の弾性ひずみで除することによって求めたクリープ係数の時刻歴である。参考として式(2) に示す CEB-FIP モデルコード⁹⁾ で求めたクリープ係数も併せて示している。

$$\varphi_t = \varphi_{RH} \beta_f \beta_t \beta_c(t - t_0) \quad (2)$$

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0.46 (h/100)^{1/3}}$$

$$\beta_{f1} = \frac{5.3}{(f_{cm}/10)^{0.5}} \quad \beta_{f2} = \frac{8.2}{(f_{cm}/10)^{0.84}}$$

$$\beta_t = \frac{1}{0.1 + (t_0/1)^{0.2}}$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/1}{\beta_H + (t - t_0)/1} \right]^{0.3}$$

$$\beta_H = 150 \left[1 + \left(1.2 \frac{RH}{100} \right)^{18} \right] \frac{h}{100} + 250 \leq 1500$$

ここで RH は雰囲気相対湿度（単位%）、 h は仮想部材厚さ（単位 mm、直径 100mm 円柱では 50mm）、 f_{cm} は載荷時の圧縮強度（単位 N/mm^2 ）、 t_0 は載荷材令（今回は 28 日）である。 β_{f1} は CEB-FIP 原式におけるコンクリート強度補正係数、 β_{f2} は小室⁷⁾が高強度コンクリート用に修正を提案している強度補正係数である。

通常のクリープ試験はアンシール条件で実施されるため、先ずアンシール試験体と CEB-FIP モデルコードのクリープ係数を比較する。Fc60 では CEB-FIP 原式のクリープ係数 (RH60%) とアンシール試験体の結果が概ね一致しており、CEB-FIP 修正式ではクリープ係数を過小

評価している。Fc120 ではこれとは傾向が異なり、CEB-FIP 修正式のクリープ係数 (RH60%) がアンシール試験体の結果と一致している。中国など海外では²⁾、密閉条件のクリープ係数は実用的に雰囲気相対湿度を 90% として推定できるとされており、Fc60 では CEB-FIP 原式のクリープ係数 (RH90%) とシール試験体の結果が概ね一致していることから、この方法にはある程度妥当性があるように見える。しかしながら、Fc120 については、前述のようにアンシール試験体とシール試験体のクリープ係数にほとんど差が無く、このような方法でクリープ係数を推定することは適切ではないと考えられる。

3.2 相対湿度計測結果

図-6 に試験体に埋め込んだ湿度センサによって計測された試験体内部の相対湿度の時刻歴を示す。Fc60 ではシール試験体と CFT 試験体は相対湿度 100% を保持している。アンシール試験体は時間経過に伴って相対湿度が低下し、1 年後には 70% 以下になっている。Fc120 では、いずれの試験体も初期には Fc60 よりも相対湿度が低く、時間経過に伴って緩やかに相対湿度が低下しており、その勾配は試験体による差が見られない。今回は初めての試みであるため定量的な評価は難しいが、シール試験体と CFT 試験体の相対湿度が同等に推移していることは確認できた。Fc120 については、Fc60 に比べて、アンシール試験体とシール試験体の相対湿度の差が少なく、前述のクリープ係数の差が少ないことと対応していると思われるが、今後の検討課題である。

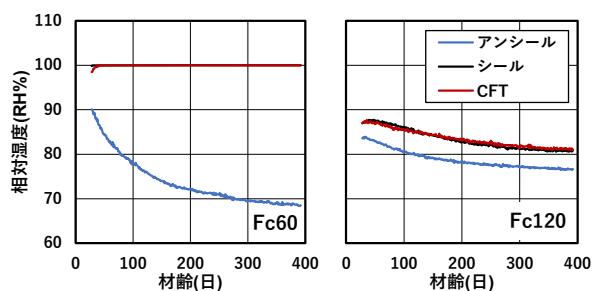


図-6 試験体内部の相対湿度

3.3 自己収縮試験結果

図-7 に自己収縮試験結果を示す。2 体の試験体の平均値を示している。筆者らは既往の研究で、シリカフェームセメントを使用した超高強度コンクリートでは、充填コンクリートの自己収縮が大きく、ダイアフラムとの間に隙間が生じた場合には、隙間が閉じるまで鋼管のみで軸力を負担することから、圧縮試験の荷重・変形関係にも若干影響が表れることを確認している⁸⁾。Fc60 では、自己収縮ひずみが 47μ と小さく、コンクリートと鋼管内面の付着によって負担できる応力度レベルであると考

えられるため、このような影響は生じにくい。一方、Fc120 では自己収縮ひずみが 270μ と大きく、隙間が生じている可能性があると考えられる。

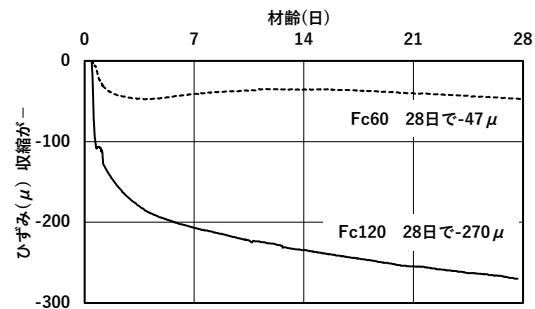


図-7 自己収縮試験結果

3.4 鋼管ひずみに関する検討

Fc120 を用いた CFT 試験体について、図-8 に所定軸力の 1/2 を載荷した時点のひずみ値、ならびに所定軸力載荷直後のひずみ値をプロットしている。併せて充填コンクリートの弾性剛性、鋼管の弾塑性モデル (図-2 の点線)、およびそれらを累加したグラフを示している。鋼管の弾塑性モデルの第 1 折れ点は弾性限界 (降伏強度の 75%)、第 2 折れ点は降伏強度時点 (0.2% オフセット耐力) を表している。この図において充填コンクリートのひずみ計測値、充填コンクリートの弾性剛性は 3.3 節の自己収縮ひずみ 270μ の分だけシフトしている。軸力 1/2 載荷時点では、計測値と想定した荷重・ひずみ関係 (累加) は一致している。軸力載荷完了時では、充填コンクリートのひずみは想定した荷重・ひずみ関係と一致しているが、鋼管のひずみはそれよりも大きくなっている。鋼管の弾塑性モデルの第 1 折れ点のひずみに達しており、鋼管が局部的に降伏したものと考えられる。当初の計画では軸力載荷完了時には弾性範囲内で、クリープによりひずみが増加する過程で降伏することを想定していたが、自己収縮ひずみの分だけ、早期に降伏したものと推定される。充填コンクリートと鋼管のひずみが一致しないのは、降伏がひずみゲージの周辺 (拘束が少ない中央部)

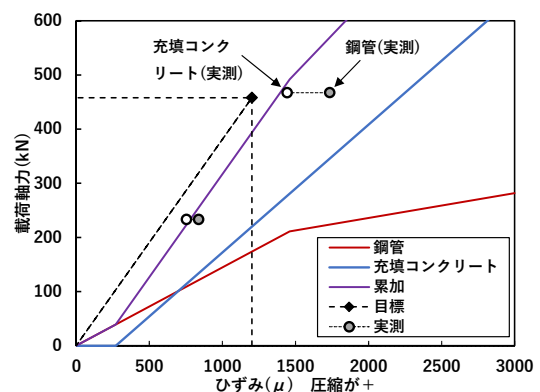


図-8 Fc120 を用いた CFT 試験体の荷重・ひずみ関係

で先行して発生しており、ゲージ長 5mm のひずみゲージによる計測値が鋼管全体の平均ひずみとは一致していないためと考えられる。

4. レオロジーモデルによる解析

CFT 試験体の圧縮クリープ挙動について、レオロジーモデルを用いたシミュレーションを行う。解析に用いたモデルを図-9 に示す。最初にシール試験体のクリープ試験結果（弾性+クリープひずみ）について、図-9 左のような Voigt モデルで回帰を行う。Voigt モデルはクリープ試験のように载荷応力度が一定である場合に定式化が容易であり、式(3)のように表すことができる。

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_1}}\right) + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_2}}\right) \quad (3)$$

ここで、 σ_0 はシール試験体の载荷応力度、 E_0 、 E_1 、 E_2 は図-9 に示すバネ弾性係数（単位は N/mm²）、 η_1 、 η_2 はダッシュポット（単位は N/mm²・day）であり、遅延時間 λ_1 、 λ_2 を用いて、 $\eta_1 = \lambda_1 E_1$ 、 $\eta_2 = \lambda_2 E_2$ のように求めることができる。 E_0 は表-1 に示す弾性係数と同一であり、 λ_1 、 λ_2 を既知とし、 E_1 、 E_2 を未定係数とすると、クリープ試験結果を最小二乗法で回帰することでこれらを容易に定めることができる。 λ_1 、 λ_2 は本来既知ではないが、その近傍の時刻をより精度良く近似できることが明らかであるため、解析で対象とする期間に合わせて指定できるほうが好都合である。本論文では1年間を対象としているので $\lambda_1 = 5$ 日、 $\lambda_2 = 100$ 日に設定している。

筆者らは既往の研究で鉄骨鉄筋コンクリート柱の長期圧縮試験や解析を実施している⁹⁾。そこでは超高層建物の長期変形解析に Voigt モデルを用いているが、このモデルは式(3)のような応力法で定式化されており、通常の FEM 解析ソフトウェアは変位法を基にしているため、そのまま用いることができない。そこで色部・赤城らが提案している方法で、変位法で対応できる Maxwell モデルに変換した¹⁰⁾。色部・赤城らは図-9 に示すような 5 要素モデルであれば、Voigt モデルを数学的に完全に等価

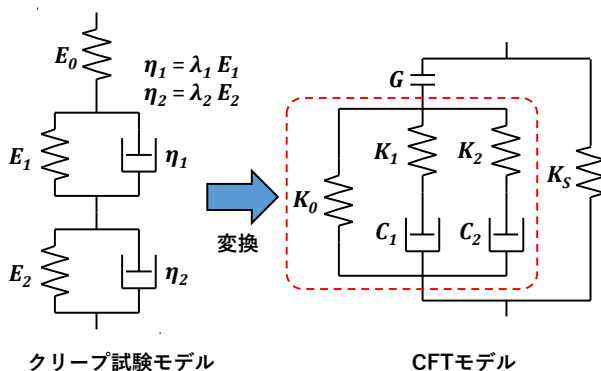


図-9 CFT 試験体の解析に用いたレオロジーモデル

な Maxwell モデルに変換できることを示しており、それを勘案して今回は 5 要素モデルとしている。CFT 試験体のモデルでは、これら Maxwell モデル 5 要素の係数に試験体断面積と長さを考慮して、それぞれバネ定数 K と減衰定数 C を計算している。コンクリート部分には直列でギャップ要素 G (Fc120 のみ) を接続して自己収縮による隙間を表し、並列で鋼管を表すバネ K_s を接続している。

図-10 にはシール試験体の試験結果と Maxwell モデルを示している。Maxwell モデルによって試験結果を精度良く回帰できていることがわかる。図-10 には CFT 試験体の試験結果と、Maxwell モデルを組み込んだ CFT モデルで解析した結果についても示している。レオロジーモデルを用いた解析によって、CFT の圧縮クリープ挙動を精度良く表現できることが明らかになった。

図-11 は Fc120 を用いた CFT 試験体の各バネ要素の軸力・変位関係である。鋼管を表すバネ K_s は図-2 に示したトリリニアモデル上の弾性限界付近から第 2 勾配上を推移している。コンクリートのバネ K_0 は弾性剛性上を推移し、 K_1 、 K_2 はそれぞれの遅延時間に応じて軸力が減少するため、コンクリート全体としては徐々に軸力が減少して変位が増加する圧縮クリープが表現されている。見方を変えるとコンクリートの軸力分担が減少し、その減少分は鋼管に移動していることになる。そこで鋼管ひずみから鋼管の負担軸力を計算し、载荷軸力で除して分担率として表したものが図-12 である。

Fc60 については試験結果と解析結果が一致しており、鋼管の軸力分担率は载荷直後の 39% から約 1 年後には

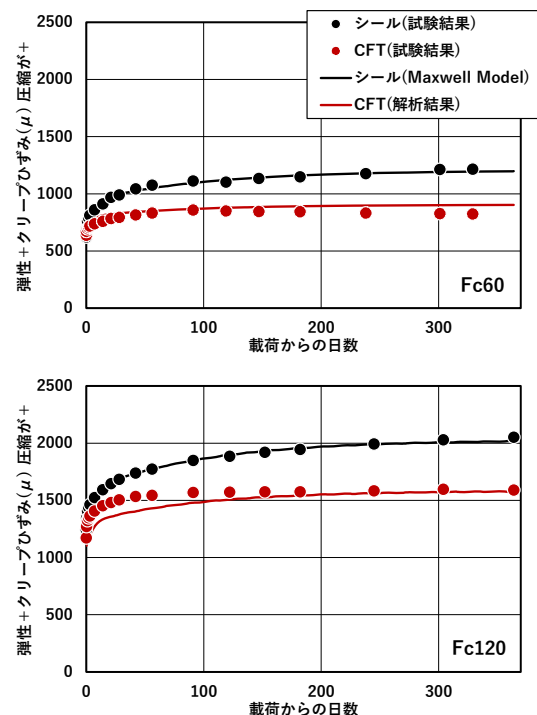


図-10 CFT 試験体の圧縮クリープ解析結果

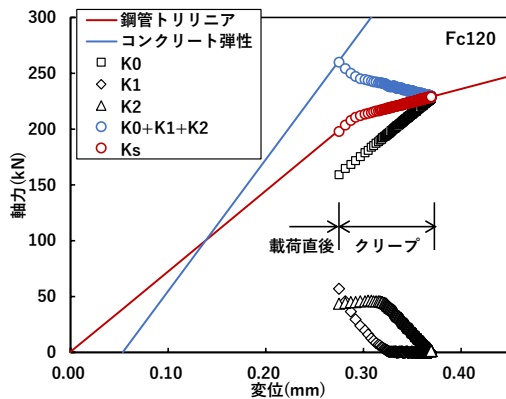


図-11 CFT 試験体（解析結果）の軸力・変位関係

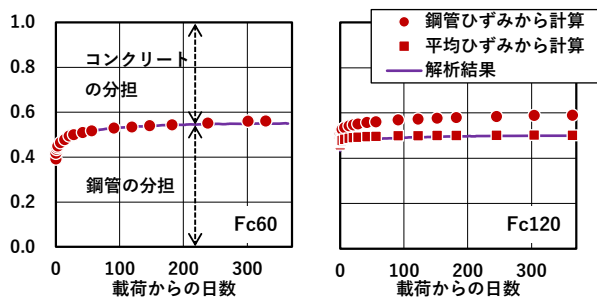


図-12 鋼管と充填コンクリートの軸力分担

55%に増加している。Fc120 については、前述のようにひずみゲージによる鋼管ひずみ計測値が大きめとなるため、それを用いると鋼管の軸力分担率が過大評価される。そこで、充填コンクリートのひずみ計測値に自己収縮ひずみを加味して平均ひずみ推定値を求め、それを用いて鋼管の軸力分担率を計算すると、試験結果と解析結果が一致している。鋼管の軸力分担率は載荷直後の 43%から 1 年後には 50%に増加している。Fc120 では鋼管が降伏して弾性剛性よりも剛性低下していることから、Fc60 に比べて軸力の変化量が少なくなっている。

圧縮クリープによる軸力の分担率の変化は、長期軸力比や径厚比（幅厚比）によっては無視できない可能性もあり、このようなレオロジーモデルを用いた評価方法は有用である。そのためにはシール試験体のクリープ試験データの蓄積が重要である。

5. まとめ

設計基準強度 60～120N/mm² の高強度コンクリートを使用した無筋コンクリートおよび CFT 試験体を作製し、約 1 年間の圧縮クリープ試験を行って、CFT の圧縮クリープ特性を検討した。その結果を以下に要約する。

- (1) 無筋コンクリートと比較するとクリープ係数は小さいものの、CFT には圧縮クリープが存在し、その影響で充填コンクリートの負担軸力の一部が鋼管へ移動する。

- (2) CFT の圧縮クリープ挙動を精度良く表現できるレオロジーモデルを提案することができた。解析には密閉（シール）条件でのクリープ試験結果が必要であり、通常（アンシール）条件でのクリープ試験結果や既往設計式では十分な評価ができない。

- (3) 自己収縮ひずみが、圧縮クリープ挙動や鋼管負担軸力の変化に影響を与える可能性がある。

謝辞

本論文の各種試験実施にあたり、株式会社太平洋コンサルタントに多大なるご協力いただきました。関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 矢木誠一郎ほか：コンクリート充填鋼管柱の強度および力学的特性に関する検討，第 4 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.111-116，1999
- 2) Baochun Chen et al.: Creep Prediction Models for Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges, Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol.22(7), 04017027, 2017
- 3) Fei Gao et al.: Structural deformation monitoring and numerical simulation of a supertall building during construction stage, Engineering Structures, Vol.209, 110033, 2020
- 4) 山田宗範，今本啓一，清原千鶴，野口貴文：実構造物におけるコンクリート内部の水分が鉄筋腐食に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.621-626，2018
- 5) 片寄哲務，横須賀誠一，西田浩和，佐々木仁：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.115-120，2007
- 6) The International Federation for Structural Concrete: CEB-FIP model code, 1990
- 7) 小室努：超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の圧縮特性に関する研究，京都大学学位論文，2007
- 8) 熊谷仁志，西田浩和，菊地俊文：超高強度コンクリートを用いた角形 CFT 柱の圧縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vo.45，No.2，pp.679-684，2023
- 9) 熊谷仁志，太田達見，池田竜介，中島秀雄：超高層 SRC チューブ架構の開発，日本建築学会技術報告集，第 9 号，pp.117-122，1999
- 10) 色部誠，赤木知之：Maxwell 材料における粘弾性定数の一決定法，土木学会論文報告集，第 213 号，pp.1-6，1973