

論文 鉄筋コンクリートラーメンの時間依存挙動に関する研究

石田博樹*¹ 遠藤孝夫*² 重野龍勇*³ 尾坂芳夫*⁴

要旨：鉄筋コンクリート（以下RCと略記）ラーメン構造に実験的に温度応力を発生させ、乾燥収縮とクリープによる部材の断面力やひずみの変化を計測できる新しく考案した実験法により温度応力の緩和現象を明らかにするとともに、温度変化を受けるRCラーメン構造の乾燥収縮・クリープ解析法を検討し、このRC構造の時間依存挙動を予測できることを確認した。

キーワード：RCラーメン、乾燥収縮、クリープ、温度応力

1. はじめに

RCラーメン高架橋のような不静定ラーメン構造に、温度変化や乾燥収縮などの時間に依存する体積変化が生ずると、不静定応力である温度応力や乾燥収縮応力が発生する。また、これらの応力は持続応力であるからコンクリートのクリープの影響を受けて徐々にその絶対値が減少するものと考えられている。

これらの挙動はきわめて複雑であるため、温度応力や乾燥収縮およびクリープなどそれぞれ一つまたは二つの現象に焦点を絞った研究は従来多く実施されてきた。しかし、温度応力・乾燥収縮およびクリープの全てを研究対象にした場合の、部材断面力の緩和を明らかにした実験例等は数少ない。

そこで本論文では、RCラーメン構造に実験的に温度応力を発生させ、乾燥収縮とクリープによるRC部材の断面力の変化やひずみの変化を計測できる新しく考案した実験法とRC部材の挙動を予測する解析法について記述する。

2. 実験方法

2. 1 実験原理

図-1 (a) に示すように不静定ラーメン供試体Aが部材間にある温度差をうけると、このラーメンのモーメント、せん断力、軸力は図-1 (a-1)、(a-2)、(a-3) に示すようになる。一方、図-1 (b) に示すような静定ラーメン供試体Bに外力Pが作用するとモーメント、せん断力、軸力は図-1 (b-1)、(b-2)、(b-3) に示すようになる。この図から、供試体A、B二つのラーメン各部材の断面力は相似であることがわかる。このことから供試体Aと同じ環境条件に置いた供試体Bに外力Pを作用させることによって、BにおいてもAと同じ応力、ひずみ状態を実現できる。従って、供試体AとBが同じひずみ状態になるように、Bに適当な外力Pを作用させ、そのPを測定すれば、Aに働く温度等の応力はPから計算できることになる。

* 1 木更津工業高等専門学校教授 環境都市工学科、工博（正会員）

* 2 東北学院大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

* 3 福島県県南建設事務所道路課係長、工修

* 4 東北学院大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

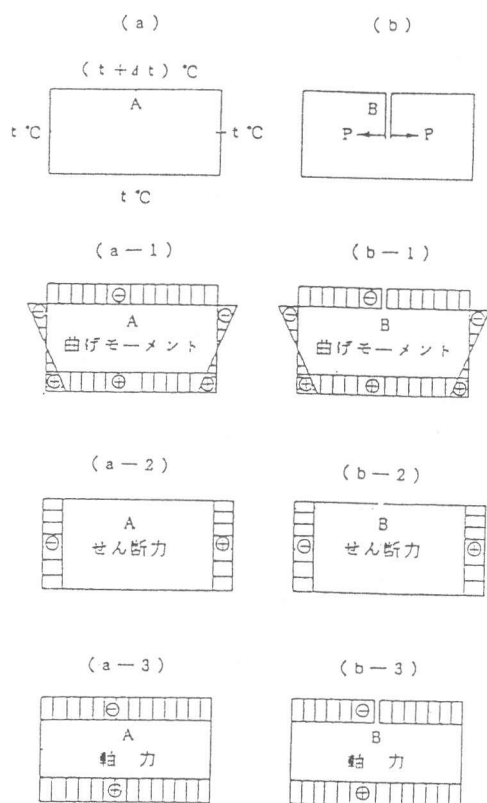


図-1 実験原理説明図

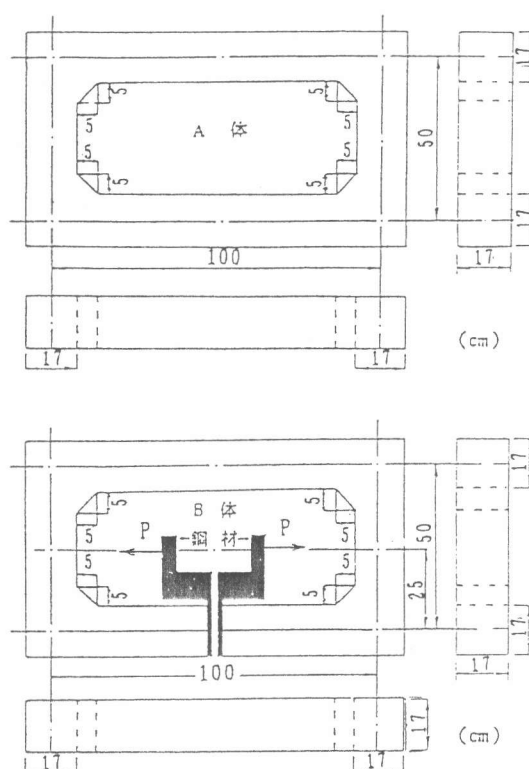


図-2 供試体の形状寸法

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (g/m³)
15	8	—	52	43.8	170	327	778	1040	820

2. 2 供試体

供試体の作製に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、粗骨材には玄武岩質碎石を、また細骨材には川砂利を使用した。

鉄筋はSD35の異形鉄筋で、軸方向主鉄筋および用心鉄筋にはD-13を、組立鉄筋にはD-6を使用した。軸方向鉄筋の鉄筋比は1.75%とした。供試体は、図-2に示すような形状寸法のRC不静定ラーメン構造(供試体A)と、不静定ラーメン構造の一部を切断し静定構造とし、その位置に載荷装置を取り付けたラーメン構造(供試体B)である。外力Pは、ロードセルに取付けた載荷ナットを回転させることにより作用させる。また、ラーメン供試体と同じコンクリートを用いてクリープと乾燥収縮を求めるための供試体も同時に作製した。

2. 3 実験装置と計測方法

ラーメン供試体の部材間に周期的な温度差を与えるために、二つのラーメン供試体の対応する

一部材と他の三部材とを断熱材で制作した別々の恒温室の中に設置し、二つの恒温室の温度をそれぞれ独立して管理できるようにし、室温を変化させることにより温度差を与えた。乾燥収縮およびクリープ供試体は高温室内に設置し、ラーメン供試体の高温部と同じ温度変化を与えた。コンクリート部材の温度の経時変化は、銅コンスタンタン熱電対温度計を用いて測定した。

供試体には、図-3に示すようにA体、B体の対応する位置にそれぞれA、BとC、Dの2個ずつの鉄筋計を、また、A体のG、Hの2ヶ所に埋め込み式ひずみ計を設置し、供試体各部のひずみを測定した。

供試体A、Bに温度差を与え、供試体AとBのひずみが等しくなるように、供試体Bの荷重を制御した。この荷重が供試体Aの内力に等しいとして温度および乾燥収縮応力を測定した。

乾燥収縮供試体及びクリープ供試体には、部材の中央に埋め込み式ひずみ計を設置した。

2. 4 実験手順

材令14日目に供試体の部材間に温度差を与えた。温度差は、各室とも1時間に5℃ずつ変化させ、次の2時間はその温度を保つという方法を繰り返し、高温室を20℃から35℃まで、低温室を20℃から5℃まで変化させた。高温室35℃、低温室5℃の状態を15日間保ち、16日目には同様の方法で両室とも20℃まで変化させ温度差を開放し、その後15日間その状態を保持した。これを1サイクルとして、3サイクル繰り返して実験した。

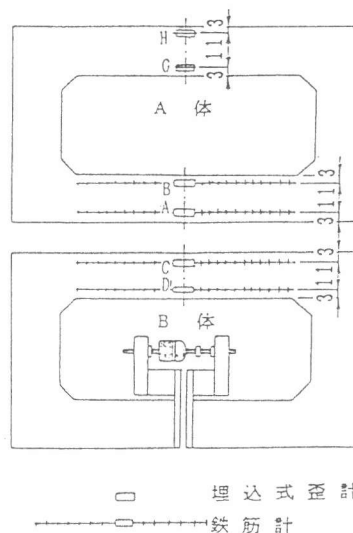


図-3 鉄筋計・歪計配置図

3. 実験結果

3. 1 乾燥収縮およびクリープ試験の結果

乾燥収縮供試体の実測によるひずみの経時変化を、温度変化による伸縮を補正すると図-4に示すような乾燥収縮曲線が得られる。図中の各予測値 [1] [2] [3] [4] と実測値はほぼ一致するが、温度変化や湿度の変化の影響を厳密に表現できるのはCEB/FIP90年式による乾燥収縮曲線であり、この曲線と実測値を比較すると大変よく一致する。

乾燥収縮試験供試体とクリープ試験供試体とのひずみの差を図-5に示す。このひずみは、弾性ひずみ+クリープひずみと考えられ、各サイクルにおいて荷重除去後2週間でひずみの回復がほとんど停止していることから、遅れ弾性変形は短期間のうちに起り2週間で大半が終了していると推定できる。そこでこのクリープひずみ曲線を用いて粘弾性モデルの遅延粘性係数、

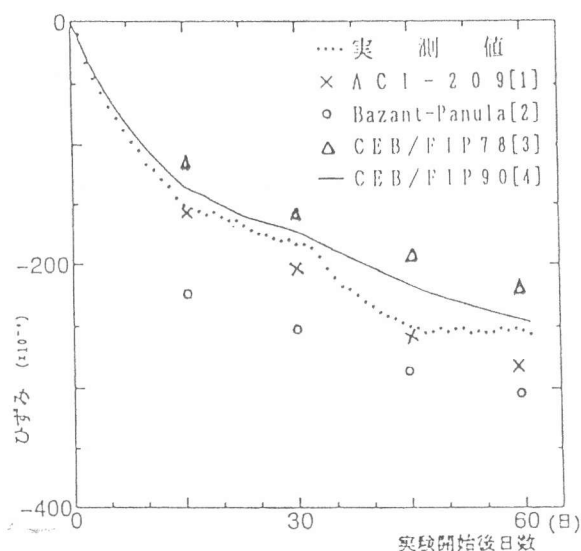


図-4 乾燥収縮ひずみの経時変化

緩和粘性係数等の係数を決定した。

3. 2 RCラーメン部材の温度応力緩和試験の結果

図-6にA体、B体の対応する鉄筋計から求めたひずみの経時変化を示す。この図からA体、B体のひずみ挙動はかなりよく一致していると思われる。

図-7に静定ラーメン供試体に加えた外力Pによる供試体の曲げモーメントの変化を示した。この値は前述の実験原理により不静定ラーメン供試体に生じる曲げモーメントにほぼ等しいので、この値を不静定ラーメン供試体の曲げモーメントとみなすことができる。

温度上昇過程では線膨張係数と温度変化の積に相当する弾性変形が生じるが、構造的拘束により温度応力が発生し、その応力が時間の経過とともに緩和されていく様子が明確に示されている。温度下降過程では負の曲げモーメントが発生し、その応力も時間の経過とともに緩和されているのが観察されている。また、温度負荷の2サイクル目以降では応力の緩和量が小さくなっていることが示された。

4. 実験結果の考察

本章では、実験の結果をもとにこの試験法の妥当性を検討する。

図-1の実験原理に示したようにA供試体の部材間に温度差 Δt が生じた場合、この不静定ラーメン構造を構造力学的に解析して求めた曲げモーメント M_A と、静定構造であるB供試体に外力Pを作用させた場合の曲げモーメント M_B が等しくなるようにPの荷重を制御することにより、A、B供試体の断面力は近似し、A体の断面力が荷重計で示されるPにより計測できることが構造力学的に示された。

また、不静定RCラーメン試験体と静定ラーメン試験体に温度負荷を与えて温度応

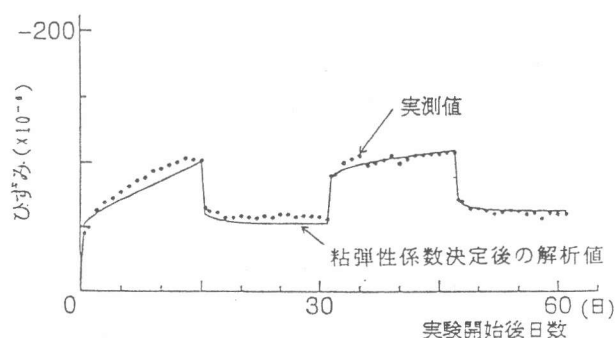


図-5 乾燥収縮歪とクリープ歪の差

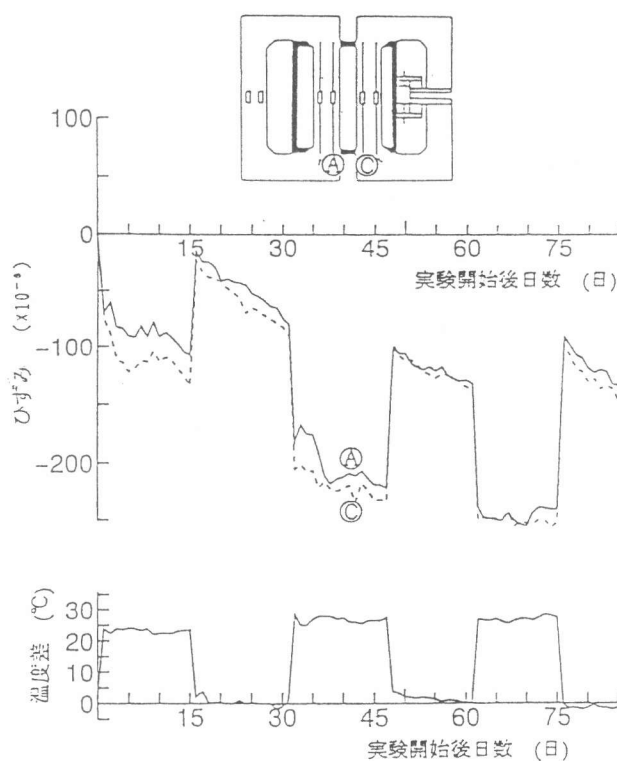


図-6 A供試体・B供試体の対応する点のひずみの経時化

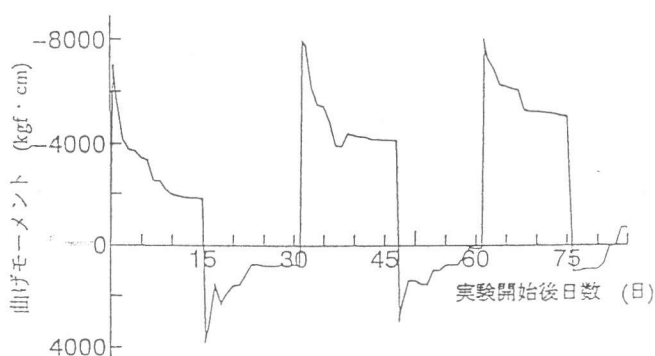


図-7 曲げモーメントの経時変化

力を発生させ、乾燥収縮やクリープに伴うひずみの変化を測定した結果、両試験体は同じ位置で同等のひずみ履歴を示すことが明らかにされた。これにともない、静定RCラーメン試験体に付加された荷重も不静定RCラーメン試験体の歪みから算出した曲げモーメントに合致していることが示された。したがって、ここで用いた手法により、RCラーメン構造に生じている温度応力が乾燥収縮やクリープの影響によって応力緩和される挙動が実験的に測定できることが明らかになった。

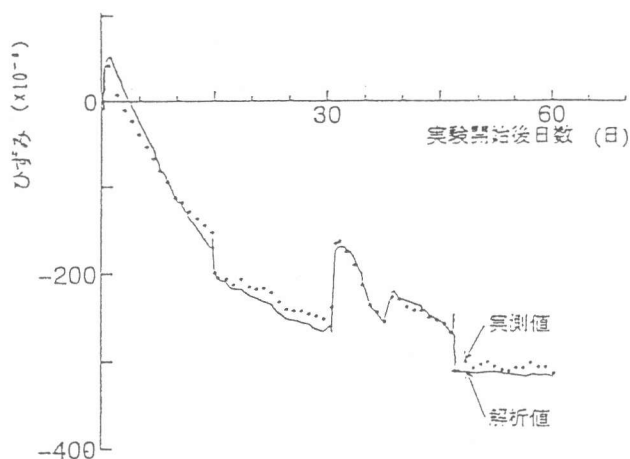


図-8 クリープ試験体のひずみの経時変化

5. 温度変化を受けるコンクリート部材の乾燥収縮・クリープ解析

2. で行ったRCラーメン構造の挙動を解析するため、コンクリートを粘弾性体と考え、粘弾性理論に基づく乾燥収縮・クリープ解析法を検討することにした。

この解析法は温度変化や乾燥収縮の効果を、線膨張係数を用いて体積変化に換算することにより温度荷重に変換するものである。また、コンクリートのクリープ現象を粘弾性4要素モデルで表現し、有限要素法により解析を行うものである。

5. 1 解析に用いる定数の決定

乾燥収縮試験の結果より、乾燥収縮量としてCEB/FIP90年式の値を使うこととした。

解析に必要な線膨張係数は、クリープ試験及びRCラーメン構造の試験において、温度変化時の全ひずみからCEB/FIP90年式で計算した乾燥収縮ひずみを差し引いたひずみを用いて、それぞれの試験体の線膨張係数を求めた。

クリープ試験供試体のひずみの経時変化図-5を用いて、Maxwellモデルのバネ定数、Voigtモデルの遅延粘性係数・遅延弾性係数を、ついでMaxwellモデルの粘性係数を求めた。

5. 2 クリープ試験体の解析

5. 1で得られた値を用いて、温度変化を受けるクリープ試験体の解析を行った。この結果を図-8に示す。これより、ここで提案した解

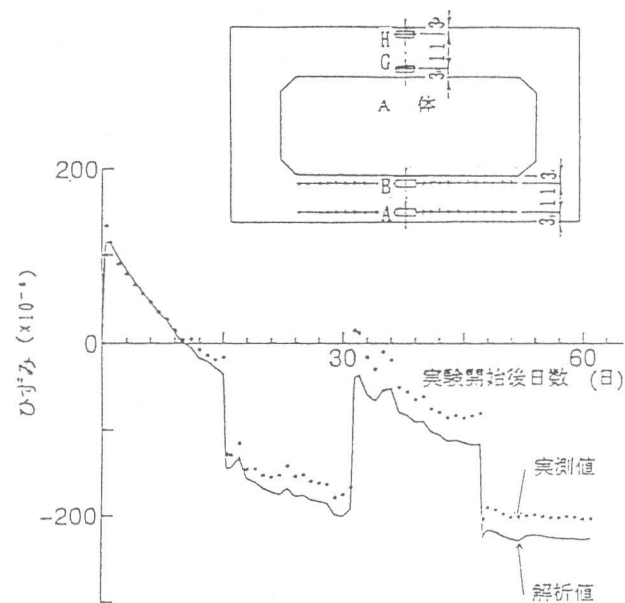


図-9 H点のひずみの経時変化

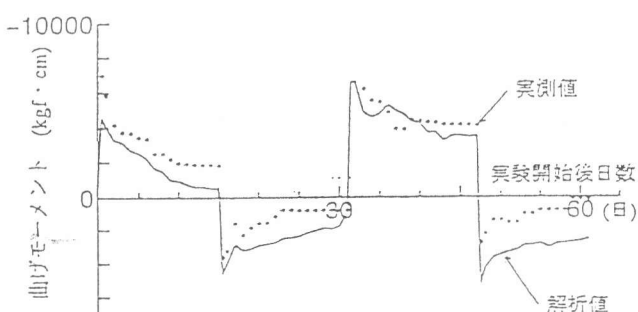


図-10 曲げモーメントの経時変化

析法により温度変化を受けるコンクリート棒部材の乾燥収縮・クリープ挙動が解析できることが示された。

5. 3 クリープと乾燥収縮を受けるラーメン構造の応力・ひずみ挙動の経時変化の解析

5. 1 で得られた値を用いて、クリープと乾燥収縮を受けるラーメン構造の応力・ひずみ挙動の経時変化の解析を行った。

解析で得られたA試験体のH点のひずみの経時変化を図-9に示す。図中の点は実測ひずみであり、実線は解析結果である。いずれの図でも解析結果は実ひずみの挙動をよく表現している。

つぎに、解析で得られたA試験体の曲げモーメントの経時変化を図-10に示す。図中の点は実測された曲げモーメントであり、実線は解析結果である。両者は、ひずみの経時変化と同様によく近似している。これらのことから、本研究で示した粘弾性モデルを用い、乾燥収縮量を温度変化に換算して解析する手法は、温度変化を受けるRCラーメン構造の乾燥収縮・クリープ挙動を十分な精度で予測できることが示された。

6. 結論

本論文で得られた主な結論は次の通りである。

1) 構造力学的な検討により、温度応力を受ける不静定RCラーメン構造の断面力分布と等価な断面力分布を持つ静的ラーメン構造を考案した。これにより、不静定RCラーメン構造に生じているある断面の断面力が静定ラーメン構造に付加した荷重計により測定できることが構造力学的に示された。

2) 不静定RCラーメン試験体と静定ラーメン試験体に温度負荷を与えて温度応力を発生させ、乾燥収縮やクリープに伴うひずみの変化を測定した結果、両試験体は同じ位置で同等のひずみ履歴を示すことが明らかにされた。したがって、ここで用いた手法により、RCラーメン構造に生じている温度応力が乾燥収縮やクリープの影響によって応力緩和される挙動が実験的に測定できることが明らかにされた。

3) コンクリート乾燥収縮量はCEB/FIP90年式と大変よく一致し、この提案式が実用上十分な精度をもっていることが確認できた。

4) 温度変化を受けるRCラーメン部材の時間依存挙動を解析するために、粘弾性理論に基づく乾燥収縮・クリープ解析法を開発した。この解析法を用いて、温度変化を受けるRCラーメン構造の乾燥収縮・クリープ解析を行った結果、実験値と解析値はよく近似することが示された。

参考文献

- 1) ACI Committee 209 : Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects on Concrete Structures, ACI-SP-76, 1982
- 2) Bazant, Z.P. and Panula, L. : Practical Prediction of Time-Dependent Deformations of Concrete, Materials and Structures, Part I and II, Vol. II, No. 65, pp. 307~328, Part III and IV, Vol. 11, No. 66, pp. 415~434, 1978
- 3) CEB-FIP : Model Code for Concrete Structures, Vol. II, International System of Unified Standard Codes of Practice for Structures, Comite Euro-International du Beton, 1978
- 4) CEB-FIP : Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton (Draft), 1990