

## 若材齢鉄筋コンクリートはり部材の曲げ挙動特性に関する実験的研究

中部大学  
中部大学 正会員 博(工)

○波多野 純基  
伊藤 睦

Abstract : The time-dependent concrete constitutive model with solidification concept is under development to predict the thermal cracking of mass concrete structures and the drying shrinkage cracking. In this study, loading tests of RC beam failing in flexural at early ages were carried out under several loading conditions in order to obtain the experimental data for verifying this constitutive model. The flexural capacity of RC beams with damages introducing at early ages is almost same in spite of loading histories. The moment-curvature relation shows the slip occurrence between early age concrete and steel. It is observed that short-term creep deflection is constant or returned when the humidity decrease suddenly.

Key words : RC beam , Early age concrete , Flexural capacity

### 1. はじめに

著者らはこれまで、初期応力解析と耐荷力解析とを有機的に連成して解くことができる解析手法の開発<sup>1)</sup>を進めている。ここでは、Solidification concept<sup>1), 2)</sup>を、既往の硬化したコンクリート構成モデルである格子等価連続体モデル<sup>3)</sup>に導入することで、コンクリート打込み後から硬化に至るまでの挙動を統一的に表現可能とする構成則の開発を進めている。構築した解析手法を、載荷材齢や載荷履歴を変数とした Ishikawa らによる一軸試験結果<sup>2)</sup>や、国枝らによる曲げ試験結果<sup>4)</sup>に適用した結果、本解析手法は、妥当な精度で実験挙動を再現できることを確認した。しかしながら、これらの実験はいずれもコンクリート単体の実験であり、鉄筋コンクリート部材レベルの実験に適用していないのが現状である。また、これらの実験では、材齢初期に荷重載荷することで損傷を導入した後、荷重を除去して養生を行っていることから、養生期間中の外力(応力)作用が、材齢経過後のコンクリート挙動に及ぼす影響に関する知見が得られていない。

そこで本研究では、開発を進める解析手法の妥当性の検証に資するために、載荷材齢と載荷履歴を変数とした曲げ破壊する RC はり部材の載荷実験を行った。実際には、部材が材齢極初期に荷重作用を受けることは想定し難いが、実験室レベルでの温度応力や乾燥収縮に関する実験を通じて構成則の検証を行うための実験データを得ることは困難であるので、外力として荷重を作用させている。本実験では、コンクリートの圧縮挙動が、はりの挙動に大きく影響するように、等曲げ区間内の圧縮鉄筋を除去したはり部材を用いて、コンクリートが材齢極初期に損傷を受けた後、および持続荷重作用を受けた後の材齢経過後の挙動に及ぼす影響を探る実験を通じて、載荷材齢と載荷履歴が、曲げ耐力、コンクリートと鉄筋間の付着挙動および外環境の変化が持続荷重載荷を受けるはりのクリープ挙動に与える影響について実験データを得ることを目的とした。

### 2. 実験概要

図-1に試験体の諸元を示す。曲げ破壊するように、十分なスターラップを配置している。本実験では、等曲げ区間の圧縮を受けるコンクリートの挙動が、はりの荷重-変位関係に影響を及ぼすように、等曲げ区間内の圧縮鉄筋を除去している。軸方向鉄筋にはD13を使用し、引張試験の結果、使用した

表-1 実験要因

| 試験体 No | 載荷材齢 |      | 養生                                |
|--------|------|------|-----------------------------------|
|        | 初回載荷 | 2次載荷 |                                   |
| I-2    | 2日   | -    | 恒温・恒湿室<br>養生<br>温度:20°C<br>湿度:80% |
| I-4    | 4日   | -    |                                   |
| I-28   | 28日  | -    |                                   |
| I-2・28 | 2日   | 28日  |                                   |
| I-4・28 | 4日   | 28日  |                                   |
| II-3   | 3日   | -    | 実験室内<br>気中養生                      |
| II-7   | 7日   | -    |                                   |
| II-2・3 | 2日   | 3日   |                                   |
| II-2-3 | 2日   | 3日   |                                   |
| II-3・7 | 3日   | 7日   |                                   |
| II-3-7 | 3日   | 7日   |                                   |

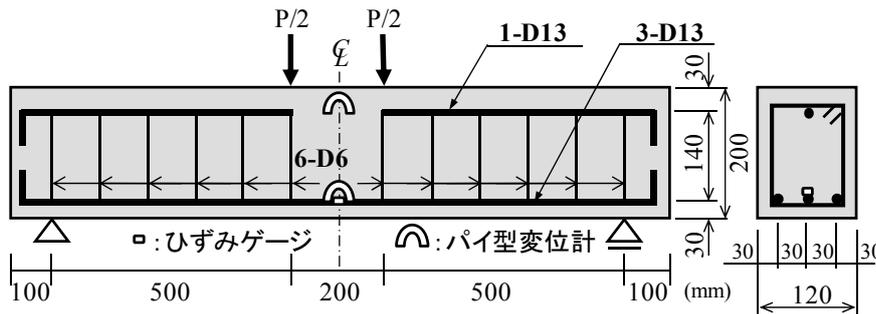


図-1 試験体諸元

表-2 コンクリートの配合

| W/C | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |
|-----|--------------------------|-----|-----|-----|
|     | W                        | C   | S   | G   |
| 55  | 170                      | 309 | 820 | 895 |

鉄筋の降伏強度は423N/mm<sup>2</sup>であり、ヤング係数はおおよそ200kN/mm<sup>2</sup>であった。試験体中央断面の曲率を評価するために、引張鉄筋にひずみゲージを貼付するとともに、図に示すように、鉄筋配置位置と同じ断面高さのコンクリート表面に、計測区間50mmのパイ型変位計を取り付こと、コンクリートの変形を計測した。

本研究では、載荷材齢と載荷履歴がはり部材の挙動に及ぼす影響を検討するために、表-1に示す載荷実験を行った。シリーズIでは、材齢2日、4日および28日の初回載荷にて破壊させる載荷する実験を通じて、載荷材齢がはりの挙動に及ぼす影響を探ることを目的とした。また、材齢2日および材齢4日で、引張鉄筋が降伏するまで荷重載荷を行った後に荷重を除去し、材齢28日で2次載荷実験を行うことで、材齢極初期の載荷（損傷）が、硬化後の挙動に及ぼす影響を探ることを目的とした。ここで、表中の例えば、I-2・28の「・」は、荷重を除去して材齢28日まで養生することを意味している。シリーズIIでは、材齢3日および7日の初回載荷にて破壊させる載荷実験と共に、II-2・3およびII-3・7の載荷実験に加えて、材齢2日に鉄筋降伏まで荷重載荷した後、わずかに荷重を除荷した荷重載荷状態のまま養生し、再度3日でpush overする載荷実験II-2-3および同様のII-3-7の載荷実験を通じて、硬化過程中に作用している応力が、時間経過後のはりの挙動に及ぼす影響を探ることを目的とした。ここで、表中の「-」は、養生中に持続荷重を作用させていることを意味する。

各シリーズの試験体を、それぞれ同一のコンクリートで作製し、材齢1日で脱型をしたのち、圧縮試験用のテストピースと共に、シリーズIでは、試験時以外は室温20°C、湿度80%の恒温・恒湿室にて養生し、シリーズIIでは、荷重載荷中の試験体と養生条件を同一とするために、実験室内にて気中養生した。なお、シリーズIIでは、持続荷重作用を受けるはりの挙動に外環境が及ぼす影響を評価するために、実験室内の気温と相対湿度の計測を行った。コンクリートの作製には、普通ポルトランドセメントと最大骨材寸法15mmの粗骨材を使用し、材齢28日での圧縮強度が30N/mm<sup>2</sup>となるように、表-2に示す配合を使用した。別途実施した圧縮試験により得られた各材齢の応力-ひずみ関係を図-2に示す。材齢の経過とともに、初期剛性および圧縮強度が増加するとともに、軟化勾配が急勾配となる一方で、圧縮強度時のひずみは、材齢によらずほぼ2000μであった。表-3に、圧縮試験により得られた各材齢の圧縮強度の平均値と、平面保持、完全付着の仮定および等価応力ブロックを使用して算出した釣合い鉄筋比を示す。この結果、実断面の引張鉄筋比は、1.86%であることから、シリーズIの材齢2日、シリーズIIの材齢2日および3日では、やや過鉄筋ぎみの配筋量となる結果となった。

### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重-変位関係

表-3  $f'_c$  と釣合い鉄筋比

| 試験体 No | $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 釣合い鉄筋比 %  |
|--------|-----------------------------|-----------|
| I-2    | 15.1                        | 1.69      |
| I-4    | 21.0                        | 2.35      |
| I-28   | 34.6                        | 3.86      |
| I-2・28 | 15.1-34.6                   | 1.69-3.86 |
| I-4・28 | 21.0-34.6                   | 2.35-3.86 |
| II-3   | 14.1                        | 1.02      |
| II-7   | 24.1                        | 2.69      |
| II-2・3 | 9.1-14.1                    | 1.02-1.58 |
| II-2・3 | 9.1-14.1                    | 1.02-1.58 |
| II-3・7 | 14.1-24.1                   | 1.58-2.69 |
| II-3・7 | 14.1-24.1                   | 1.58-2.69 |

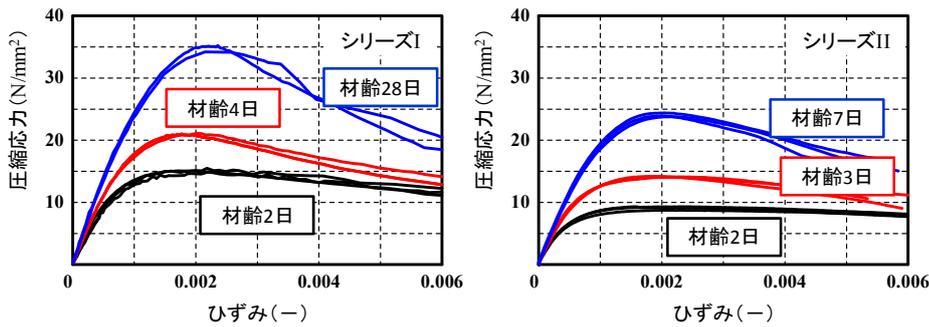


図-2 各材齢の圧縮応力-ひずみ関係

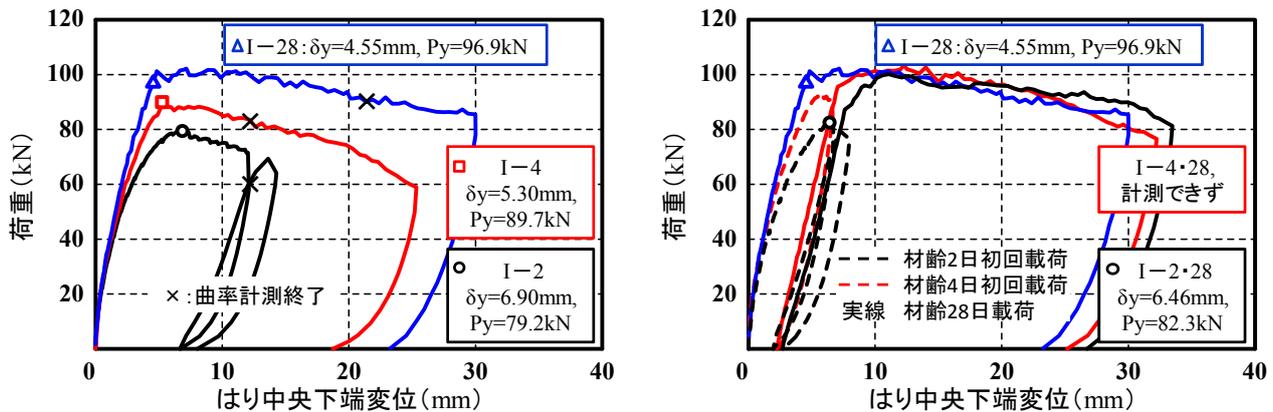


図-3 荷重-変位関係 (シリーズ I)

図-3に、シリーズIの荷重-変位関係を示す。ここで、変位は、スパン中央断面下端で計測したたわみから両支点上面で計測された沈下量の平均値を差し引いた値である。また、図-3左中の×印は、コンクリートの圧壊などにより、取り付けたパイ型変位計が外れた荷重変位点である。

シリーズIで、荷重材齢を変化させた図-3左の荷重-変位関係から、材齢の経過による初期剛性の変化は見られないが、材齢の経過に伴い圧縮強度およびヤング係数が増加することで、最大荷重が増加し、引張鉄筋降伏時の変位が小さくなる傾向が得られた。なお、表-3に示すように、材齢2日では、やや過鉄筋断面となるが、実験においては引張鉄筋の降伏が確認された。これは、実際の鉄筋比が1.86%と、材齢2日での釣合い鉄筋比1.69%と大きく変わらないこと、また、図-2左に示すように、材齢2日での圧縮応力-ひずみ関係の軟化勾配が非常に緩やかであることから、圧縮力を負担できるコンクリート領域が大きくなったためと考えられる。

図-3右に、I-2・28、I-4・28およびI-28の荷重-変位関係を示す。前者2つは、それぞれ材齢2日および4日に引張鉄筋降伏まで初回載荷実施後に荷重を除去し、恒温・恒湿室内で材齢28日まで養生した後、材齢28日に二次載荷を実施した際の荷重-変位関係である。初回載荷時の荷重-変位関係を破線で示し、材齢28日での荷重-変位関係を実線で示している。材齢2日、4日の初回載荷では、引張鉄筋降伏程度までしか荷重を載荷していないが、これらの材齢では、圧縮縁のコンクリートには2000 $\mu$ 程度のひずみが生じていると推測される。しかしながら、図から分かるように、材齢28日での荷重-変位関係はいずれもほぼ同等である。この結果、材齢極初期の部材内のコンクリートに、その材齢での圧縮強度付近まで圧縮応力が作用したとしても、硬化後のコンクリート強度にほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

図-4に、シリーズIIの荷重-変位関係を示す。左右の図は、それぞれ、材齢2日から3日に実施した

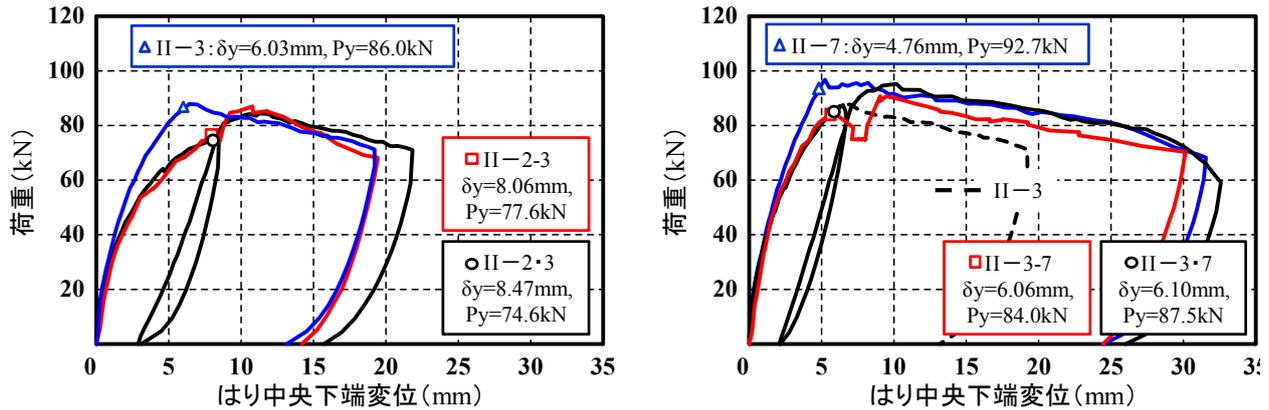


図-4 荷重-変位関係 (シリーズ II)

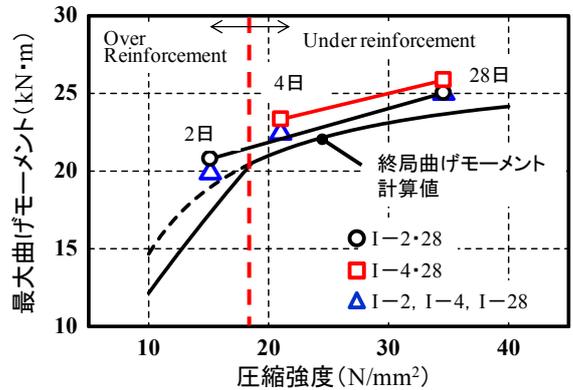
結果および材齢3日から7日に実施した結果である。図より、持続荷重を作用させることにより、クリープ変形が進行するものの、材齢経過後の荷重-変位関係については、II-3-7においてわずかに荷重-変位曲線が他の実験結果を下回るものの、ほぼ同等な結果となった。なお、材齢経過後に耐力が上昇する理由は、断面内のモーメントアーム長が長くなることによるものと考えられる。

図-5に、載荷実験より得られた最大曲げモーメントと圧縮強度との関係を示す。なお、図には、平面保持、完全付着の仮定および等価応力ブロックを用いて算出した終局曲げモーメントの計算値を併せて示している。この結果、本実験結果は、計算値をわずかに上回っているが、ほぼ計算値と同等な曲げ耐力の結果となっている。また、シリーズI, IIとも、荷重履歴によらず、初回載荷時と2次載荷時の最大曲げモーメントの上昇割合はほぼ等しいことが確認できる。

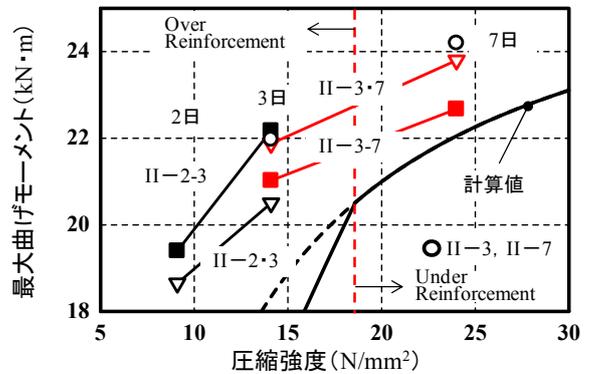
以上から、硬化過程中的コンクリートが、短期的、もしくは持続的に圧縮強度付近までの応力作用を受けたとしても、時間経過後（硬化後）の圧縮強度はほぼその材齢の圧縮強度と等しいものと考えられる。このため、持続的な応力が作用している硬化中のコンクリートの圧縮挙動のモデル化についても、Solidification conceptが適用可能と考えられる。

### 3.2 曲げモーメント-曲率関係

図-6に、I-2, 4, 28の載荷試験により得られた曲げモーメント-曲率関係を示す。なお、曲率の算出には平面保持の仮定を使用している。図には、曲率を圧縮引張ともパイ型変位計で計測されたコンクリート表面の変形で評価した場合を実線で示し、引張ひずみに



(a) シリーズ I



(b) シリーズ II

図-5 最大曲げモーメント-圧縮強度関係

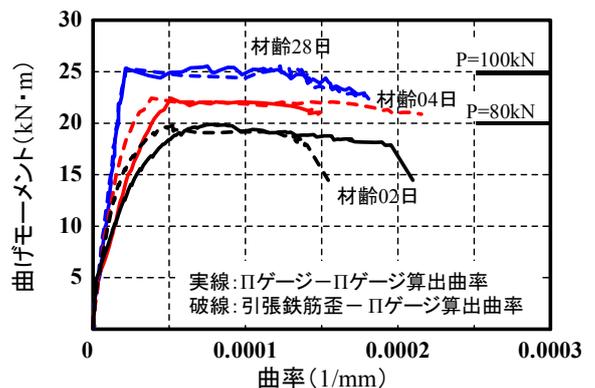


図-6 モーメント-曲率関係 (シリーズ I)

引張鉄筋ひずみを使用した場合を破線で示している。この結果、コンクリートと鉄筋のひずみ評価区間に違いはあるが、材齢28日では実線と破線の挙動がほぼ等しく、完全付着の仮定が成立しうる結果が得られた。他方、材齢2日および4日では、すべりが発生していると考えられる結果が得られた。実線と破線の差は、ひび割れ発生後に確認できる。図-3、図-4の荷重-変位関係において、載荷材齢が早いほど降伏変位が大きくなった理由には、以下が考えられる。コンクリートの圧縮強度が低いほど、圧縮縁から中立軸までの距離が長くなる一方で、鉄筋の降伏ひずみは材齢によらず一定値である。このため、若材齢時の鉄筋降伏時の断面曲率が大きくなることから、降伏変位もまた大きくなる。しかしながら、図-6より、若材齢時には、引張鉄筋配置位置のコンクリートの変形と引張鉄筋の変形に差異が確認できることから、すべりの発生が影響していることも考えられる。

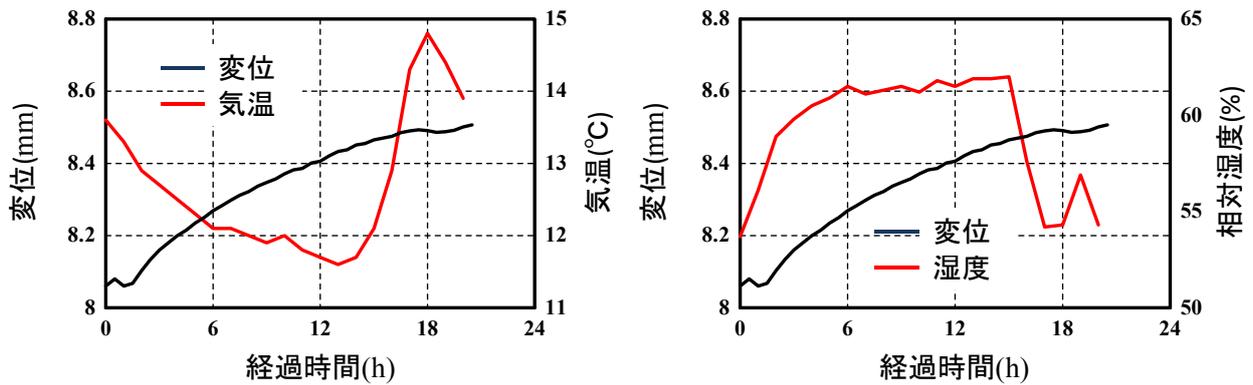


図-7 持続荷重載荷中の変形と外環境の関係 (II-2-3)

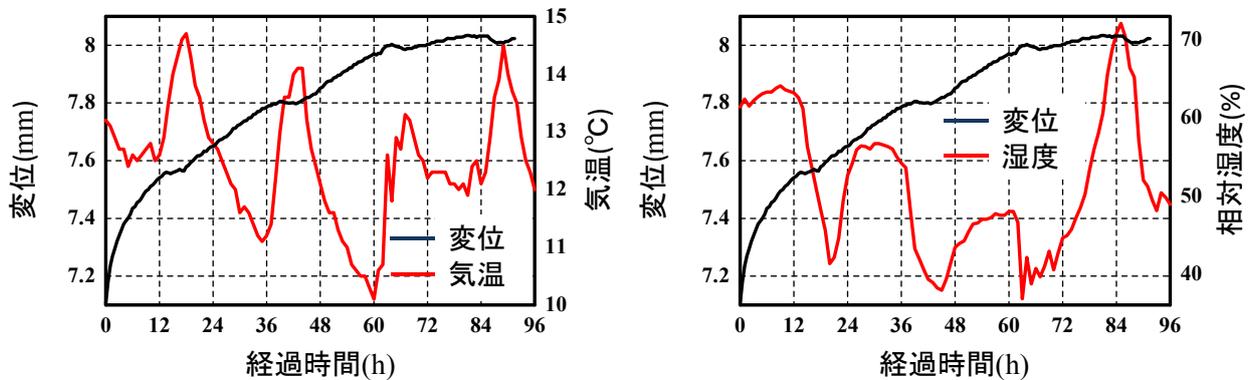


図-8 持続荷重載荷中の変形と外環境の関係 (II-3-7)

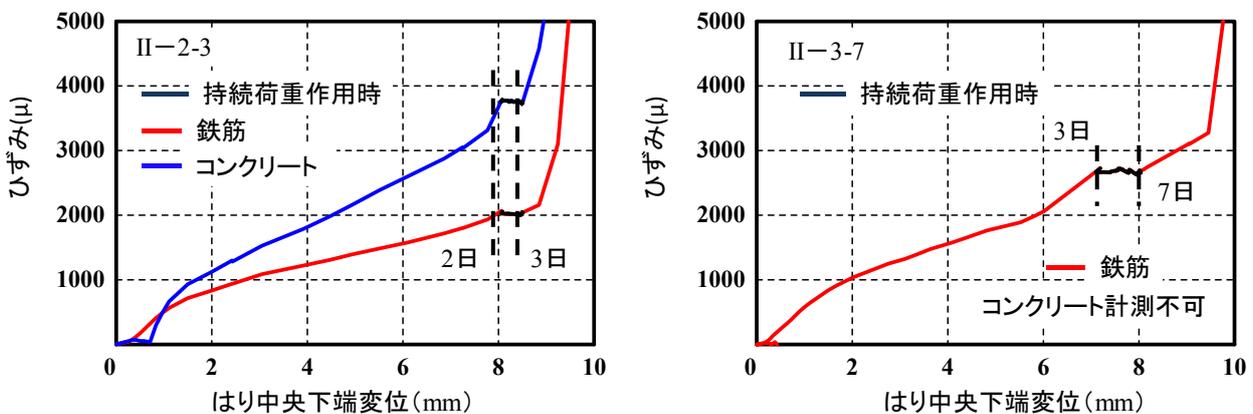


図-9 コンクリート・引張鉄筋ひずみ-変位関係

### 3.3 持続荷重作用中の変形挙動特性

図-7と図-8に、それぞれII-2-3およびII-3-7の持続荷重載荷中の変位、気温および相対湿度と経過時間との関係を示す。図より、気温が上昇し、相対湿度が急激に低下する際に、クリープ変形の進行が止まる、もしくはわずかに変形が回復する結果が得られた。これは、はり下端にはひび割れが存在していることから、下端部での乾燥収縮が他の部位と比較して大きくなることで、はり断面に負曲げが生じたためと考えられる。また、図-9に、コンクリート、引張鉄筋ひずみと変位との関係を示す。この結果、持続荷重載荷時には、スパン中央の鉄筋ひずみおよびコンクリート変形が変化していないことから、本研究で使用したはりの場合、持続荷重載荷中のクリープ変形は、せん断変形によるものと考えられる。なお、本実験では、各材齢の圧縮強度を使用した斜めひび割れ発生荷重時に、斜めひび割れの発生が確認されている。

## 4. おわりに

本研究では、コンクリートが硬化過程にある鉄筋コンクリートはり部材に対して、載荷材齢と載荷履歴を変化させた載荷実験を行うことにより、以下の結論を得た。

- ・硬化過程中的コンクリートが、その材齢の圧縮強度程度までの短期的および持続的応力作用を受けたとしても、材齢経過後の曲げ耐力は、初回載荷時の同一材齢時の曲げ耐力とほとんど差異がない。
- ・材齢初期のコンクリートは圧縮強度が低く、軟化勾配が緩やかであることから、計算上過鉄筋断面であっても引張鉄筋が降伏し、また、部材の降伏変位は、材齢初期の方が大きくなる結果が得られた。なお、材齢初期では、引張鉄筋配置位置のコンクリートと引張鉄筋の変形に差異が認められたことから、すべりの発生が影響していることも考察として考えられる。
- ・本実験では、持続荷重載荷中のクリープ変形は、せん断変形が支配的であった。また、気温が上昇し相対湿度が低下する際に、短期的に変形の進行が止まる、もしくは戻る結果が得られた。これは、ひび割れが多く存在する断面下端において乾燥収縮がより進行することで、断面に負曲げが生じたためと考えられる。

本研究では、外力作用により損傷を被った硬化過程にある RC はり部材が、その後の養生条件によりどのような挙動を示すかに関する実験データを得た。今後、この実験の数値解析を実施することで、開発を進める解析手法の妥当性および改善点を検討する予定である。

## 謝辞

本研究に科学研究費補助金（25820197）の助成を得た。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 伊藤 睦・石川靖晃・上田尚史・田辺忠顕：初期応力を考慮した RC 構造物の耐荷力解析手法の構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.19-24，2012.
- 2) Ishikawa, Y. et al.: Modeling of uni-axial constitutive law in early age concrete based on solidification concept, Proc. of Concreep7, pp.393-398, 2005.
- 3) 田辺忠顕ほか：初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム，技法堂出版，pp.201-314，2004.3
- 4) 国枝 稔ほか：若材齢コンクリートの硬化過程および載荷履歴を考慮したひび割れ構成則に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.63，No.1，pp.127-142，2007.2