

# 論文 持続荷重下におけるRC曲げ部材の時間依存変形に関する研究

本庄 謙太<sup>\*1</sup>・糸山 豊<sup>\*2</sup>・上原 匠<sup>\*3</sup>・梅原 秀哲<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究では、鉄筋コンクリート（以後 RC と略記）部材の時間依存変形特性を把握するため、曲げ荷重を持続荷重した RC 部材について実験を行った。また、載荷荷重を変化させることにより持続荷重履歴を受けた RC 部材の時間依存変形についても考察を行った。その結果、RC 部材の変形は湿度の低い環境下において増大しており、乾燥条件が RC 部材の変形に及ぼす影響が確認されたが、鉄筋量による明確な影響は見られなかった。持続荷重履歴を受けた部材の時間依存変形は、履歴を受けない部材に比べ変化は小さかった。

**キーワード**：RC 部材, 持続荷重, 乾燥収縮, クリープ, 付着

## 1. はじめに

コンクリート構造物の長期変形挙動を正確に把握することは、その使用性、機能性の維持とともに、耐久性の向上にも繋がる。社会構造の変遷により、設計の合理化や構造物の長期にわたる品質保証がより一層求められる昨今、橋梁の床版スラブやシェル構造物などの長期変形量を予測することは、耐用年数を勘案する上で使用限界状態の検討を行う際に重要である。

持続荷重状態における RC 部材の変形は、短期変形が生じた後、コンクリートのクリープ、乾燥収縮、鉄筋とコンクリートの付着応力の緩和等に起因する長期変形が付加される<sup>1)</sup>。現在の土木学会コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>においては、曲げひびわれによる剛性低下の影響を有効断面二次モーメントとして定式化した Branson の提案式をもとに、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響を組み込んだ式が採用されている。この式に、付着応力の経時的な減少に起因する有効曲げ剛性の低下が内包されている。

佐藤ら<sup>3)</sup>は、付着応力の経時変化について付着応力-すべり量関係として定式化を試みている。鉄筋とコンクリートの付着作用によるひび割れ間での引張部コンクリートの応力負担

(tension stiffening)を適切に評価することは RC 部材の長期変形挙動を正確に予測することに繋がる。

そこで本研究では、ひび割れを有する RC 曲げ部材の持続荷重試験を行い、その変形挙動と付着特性の変化について検討を行った。また示方書式では、持続荷重作用時において荷重が変動する場合の剛性の変化については適応が困難であるため、変動荷重作用時における変形挙動についても試験を行い、示方書式との比較を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 配合および使用材料

表-1に本研究で用いたコンクリートの示方配合を示す。水セメント比 53.1%，単位水量

表-1 示方配合表

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |
|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|
|         |         | W                        | C   | S   | G   |
| 53.1    | 45.8    | 176                      | 332 | 768 | 989 |

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻 (正会員)

\*2 名古屋工業大学助手 工学部社会開発工学科 修(工) (正会員)

\*3 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 工博 (正会員)

\*4 名古屋工業大学大学院教授 工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

表-2 試験シリーズおよび作用曲げモーメント

| 試験ケース | シリーズ  | 鉄筋量 (mm <sup>2</sup> ) | 載荷時割裂引張強度 (MPa) | 載荷時弾性係数 (Mpa) | 曲げモーメント × 10 <sup>6</sup> (N・mm) |                        |                   | M/Mcr |
|-------|-------|------------------------|-----------------|---------------|----------------------------------|------------------------|-------------------|-------|
|       |       |                        |                 |               | 作用値 M                            | ひび割れ発生 M <sub>cr</sub> | 終局 M <sub>u</sub> |       |
| A     | D16-2 | 397.2                  | 2.86            | 31981         | 4.45<br>6.30*                    | 3.10                   | 16.03             | 1.44  |
|       | D16-4 | 794.4                  |                 |               |                                  | 3.33                   |                   | 28.98 |
| B     | D10-2 | 142.7                  | 3.06            | 31255         | 4.62                             | 2.96                   | 6.10              | 1.34  |
|       | D16-6 | 1191.6                 |                 |               |                                  | 3.56                   |                   | 37.89 |

注) 表内 \*印は載荷91日で荷重を変化させた後の値を示す。

176kg/m<sup>3</sup>, 細骨材率 45.8%の AE コンクリートである。目標スランプ 10±1cm, 目標空気量 4.5 ± 1.0%となるように混和剤を適宜使用した。使用材料は、普通ポルトランドセメント, 山砂(豊田産, 表乾密度=2.49g/cm<sup>3</sup>, F.M.=2.81), 碎石(瀬戸産, G<sub>max</sub>=20mm, 表乾密度=2.71g/cm<sup>3</sup>, F.M.=6.78)である。

## 2.2 試験条件

表-2に本研究の持続載荷試験における試験シリーズおよび作用曲げモーメントを示す。鉄筋量が RC 部材の時間依存変形に及ぼす影響を考察するために、鉄筋量の異なる4シリーズを設定した。各シリーズの作用曲げモーメントはひび割れ発生以後の RC 曲げ部材の時間依存変形について考察を行うため、ひびわれ発生曲げモーメントの約 1.3~1.6 倍に設定した。ひび割れ発生曲げモーメントは、ひび割れは引張部コンクリート応力がコンクリート引張強度に等しいときに生じるとし、平面保持の仮定とモーメントのつりあいにより求めた。試験体は 28 日間湿潤養生を行った後、乾燥状態において載荷を行った。載荷期間は試験ケース A においては 91 日間、試験ケース B では 63 日間とした。また、試験ケース A では、載荷 91 日目に作用曲げモーメントを変化させ、載荷履歴を受けた RC 部材の時間依存変形についての考察を行った。表-3に今回の試験で用いた鉄筋および鋼材の基本的性質を示す。なお、実験は環境温度の変化による影響を排除するため、室温 20±2℃, 湿度約 80%の恒温室内で行った。

表-3 鉄筋および緊張材の基本的性質

| 呼び名  | 公称直径 (mm) | 公称断面積 (mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数 (MPa) | 降伏点強度 (MPa) |
|------|-----------|--------------------------|------------|-------------|
| D10  | 9.53      | 71.3                     | 186400     | 353.3       |
| D16  | 15.9      | 198.6                    | 170600     | 353.5       |
| 緊張材1 | 9.2       | 66.5                     | 211000     | —           |
| 緊張材2 | 19.0      | 283.5                    | 153400     | —           |
| PC鋼棒 | 9.2       | 66.5                     | 199100     | —           |

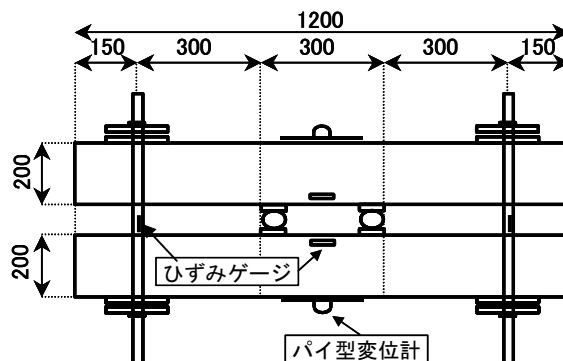


図-1 持続載荷試験状況

## 2.3 持続載荷試験

本試験で用いた持続載荷用試験体の寸法は幅 150mm, 高さ 200mm, 部材長 1200mm である。載荷試験中のせん断破壊を防止するためピッチ 75mm

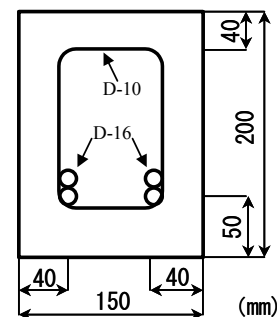


図-2 試験体断面の一例 (シリーズ D16-4)

でスターラップを配置した。持続荷重試験は図-1に示すように2体の試験体を抱き合わせるように配置し、スパン 900mm, せん断スパン 300mm の2点荷重とした。荷重荷重は緊張材を緊張することにより与えた。作用曲げモーメントは緊張材のひずみを計測し、表-2で示した値でほぼ一定となるように適宜再緊張することによって制御を行った。図-2に試験体の断面の一例を示す。鉄筋ひずみの計測には貼り付け型ひずみゲージ(ゲージ長 5mm)を用い、梁長の中央位置のリブ部を平滑加工し貼付した。ひずみゲージはコーティング材により防水加工を施した。なお、比較的大きな距離における平均的ひずみを計測するため、ビニルテープにより約 5cm の区間付着が無い状態にした。引張部コンクリートひずみの計測には曲げひび割れ発生以降の RC 部材の変形挙動を考察するため、標点距離内のコンクリートにひびわれが生じた後もひずみの計測が可能であるパイ型変位計(標点距離 200mm)を用いた。圧縮側コンクリートひずみは貼り付け型ひずみゲージ(ゲージ長 60mm)を用い、圧縮縁より 25mm の位置で計測をおこなった。また、試験期間中の乾燥収縮の影響を考慮するために持続荷重用試験体と同一バッチから無荷重用試験体を作成し、同一環境条件のもと持続荷重用試験体と同位置でひずみの計測を行った。

### 3. 試験結果

#### 3.1 乾燥収縮ひずみ

図-3に無荷重用試験体より測定した乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥収縮は全断面にわたり一様に生じるものと仮定し、計測したひずみデータの平均値を乾燥収縮ひずみとした。試験ケース A において荷重 30 日目から 70 日まで緩やかな膨張が見られるが、これは恒温室内の空調設備により湿度が約 60% から約 90% にまで上昇したため、試験体が膨潤したものと考えられる。本研究では、乾燥収縮に起因するひずみの増減を排除した変形挙動を考察するため、

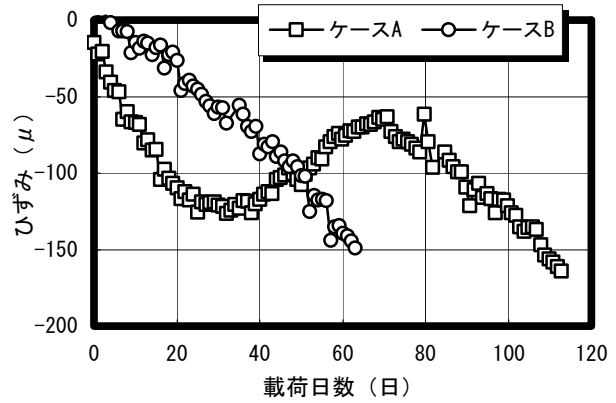


図-3 乾燥収縮ひずみ

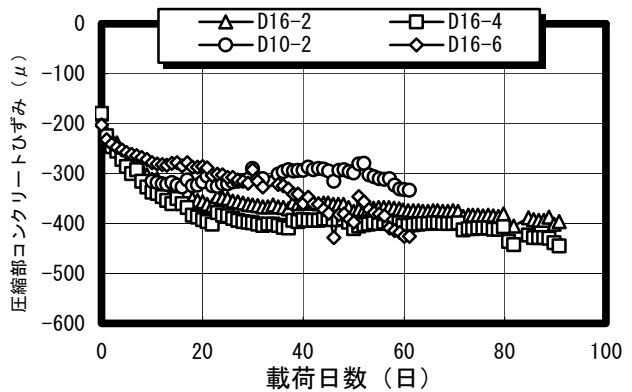


図-4 圧縮部コンクリートひずみ

計測された持続荷重試験体のひずみデータより無荷重用試験体で計測された乾燥収縮ひずみを差し引いた値を用いて検討を行った。

#### 3.2 持続荷重試験結果

図-4に圧縮部コンクリートひずみの経時変化を示す。なお、シリーズ D10-2 における圧縮部コンクリートひずみについては荷重 9 日目までゲージの不良によりデータの欠損が生じたが、前後のデータより大きな影響は無いと判断した。シリーズ D16-2, D16-4 における荷重 30 日目までの圧縮部コンクリートひずみの伸びは、シリーズ D10-2, D16-6 におけるひずみの伸びに比べて大きくなっている。これは、両試験ケースにおいて環境条件に違いがあり、試験ケース A における荷重約 30 日目までの実験室の湿度が試験ケース B に比べて低かったためと考えられる。圧縮部コンクリートにおける時間依存変形の要因の一つであるコンクリートのクリープにおいて、湿度がコンクリート中の水分の外部への逸散に影響し、湿度が低い場合は乾燥クリー

プが促進したものと推察される。

図-5に引張部コンクリートひずみの経時変化を示す。シリーズ D16-2, D16-4 では荷重後約 30 日まで緩やかに増加し、その後約 70 日目まで緩やかに減少している。また、シリーズ D10-2, D16-6 では荷重後ほぼ一定の割合でひずみが増加している。湿度の低い期間にはひずみは増加し、湿度の高い期間はひずみの増加が抑制されている傾向が見られた。シリーズ D16-6 では、荷重直後より引張部コンクリートひずみが急激に低下しているが、これはパイ型変位計の標点距離外における曲げひび割れが、時間の経過に伴い進展したためと推察される。

図-6に鉄筋ひずみの経時変化を示す。シリーズ D16-2, D16-4 では荷重後約 30 日まで緩やかに増加し、その後ほぼ一定値となっている。また、シリーズ D10-2, D16-6 では荷重後ほぼ一定の割合でひずみが増加している。引張部コンクリートひずみおよび鉄筋ひずみにおいても、圧縮部コンクリートひずみと同様に湿度の変化に伴って、コンクリートの乾燥クリープによる影響が見られる。

### 3. 3 曲率の経時変化

図-7に本試験から得られたひずみデータより算出した平均曲率の経時変化を示す。なお、平均曲率は式(1)から求めた。

$$\phi = \frac{\epsilon'_c + \epsilon_s}{l} \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon'_c$  : 圧縮部コンクリートひずみ、 $\epsilon_s$  : 鉄筋ひずみ、 $l$  : 圧縮部コンクリートひずみ計測位置から鉄筋までの距離である。シリーズ D16-2 については荷重約 30 日目までは曲率が緩やかに増加し、その後徐々に低下している。荷重 30 日目までの曲率の増加は乾燥収縮および乾燥クリープの進行により曲げ部材の変形が促進されたためと考えられる。また、30 日目以降における曲率の低下の要因として、湿度の上昇により試験体が膨潤し、鉄筋の拘束によって変形を抑制する方向に内力が作用したこと、湿度の上昇に伴い乾燥クリー

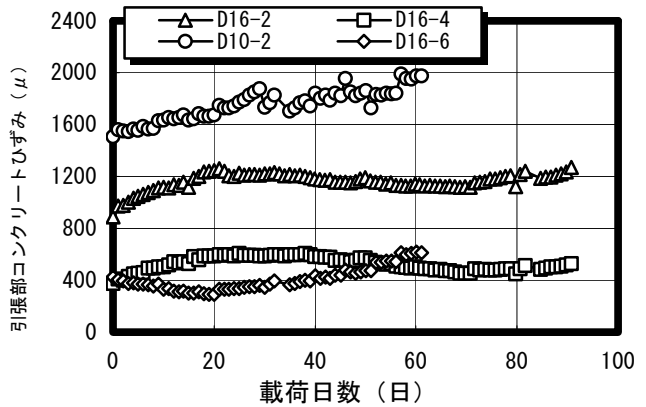


図-5 引張部コンクリートひずみ

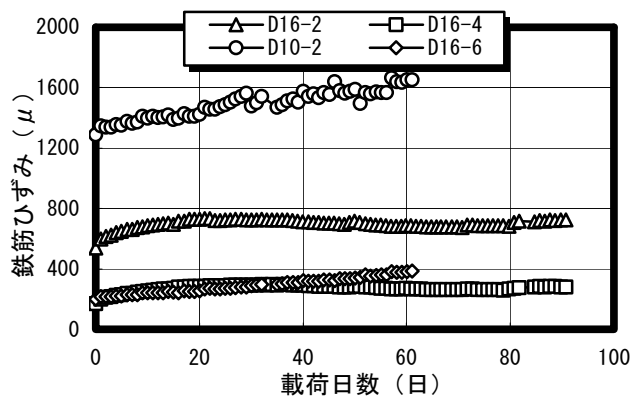


図-6 鉄筋ひずみ

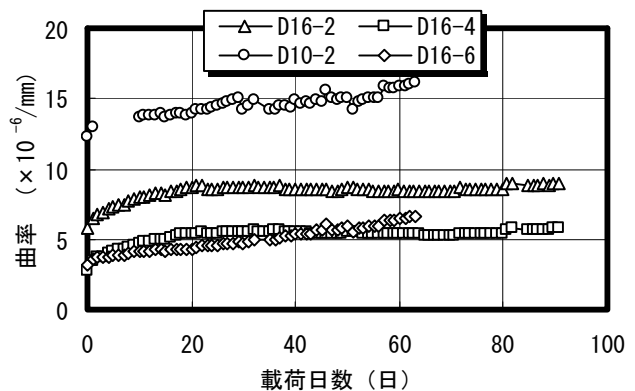


図-7 曲率の経時変化

プの影響が小さくなったことの二つが考えられる。シリーズ D16-6 において荷重初期からの曲率の値がシリーズ D16-4 と同様の大きさとなっているが、これは鉄筋量の多いシリーズでは図-2で示した鉄筋の配置により有効高さが減少し、上端の鉄筋では引張部コンクリートを有効に拘束できなかったためと推察される。

今回の実験では、曲率の経時変化から同一環

境条件下における試験シリーズにおいて、乾燥状態における RC 部材の曲率は時間の経過とともに増大していくことが確認された。しかし、鉄筋量の違いによる変形挙動の違いには明確な差異は認められなかった。

#### 4. 荷履歴を与えた RC 部材の変形

図-8 に試験ケース A において、荷重 91 日に締増しを行い、荷重を増加させたシリーズの曲率を示す。締め増しを行った後、両シリーズとも緩やかに曲率が大きくなっている。しかし、持続荷試験開始直後からの曲率の伸びに比べ小さくなっている。これは、圧縮側コンクリートのクリープの進行が荷直後に比べ緩やかであるためと考えられる。

図-9 では試験ケース A における曲率の経時変化と、限界状態設計法において本実験で設定した作用曲げモーメントを用いて計算した曲率の値の比較を行った。試験開始時における曲率は実験値に比べ計算値が若干大きな値をとっている。これに対し、締め増し時における曲率は計算値が大きく実験値を下回っている。このことは荷履歴を与えた RC 部材は、荷履歴を受けていない部材に比べ変形に対する剛性が低くなっていると考えられる。これは、初期の持続荷により部材に曲げひび割れが発生し、鉄筋とコンクリートの付着剛性の低下を招き部材の曲げ剛性を低下させたためと考えられる。

#### 5. 土木学会式との比較

図-10 では今回の実験から得られた曲率と、土木学会コンクリート標準示方書で採用されている有効曲げ剛性の推定式より求めた曲率の比較を行った。土木学会式では、長期変形におけるクリープ係数の増加の影響を有効弾性係数で、乾燥収縮の影響を部材内部に発生する見かけの曲げモーメントの形で定式化している。本研究では、計算に用いた乾燥収縮の最終値を実測値から推定し  $150\mu$  と設定した。また、クリープ係数の経時変化の推定には

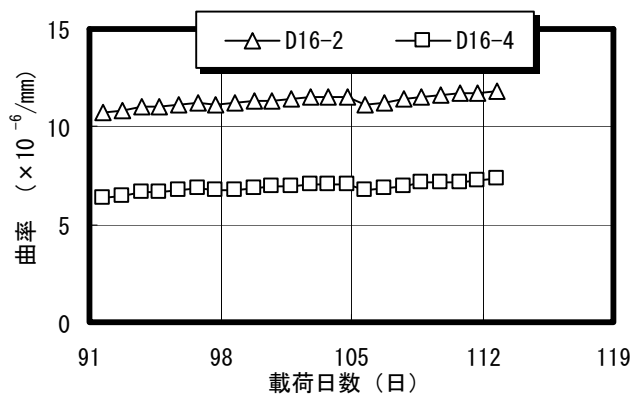


図-8 荷履歴を与えた部材の曲率

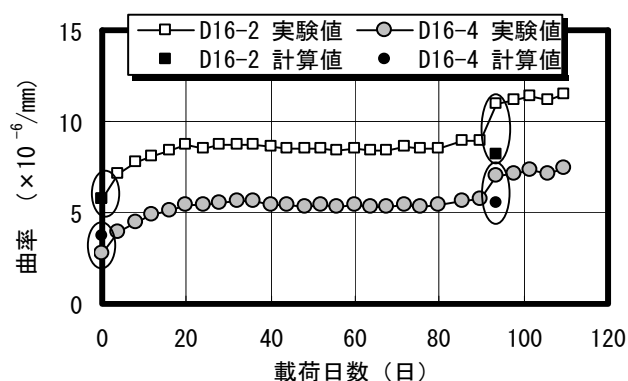
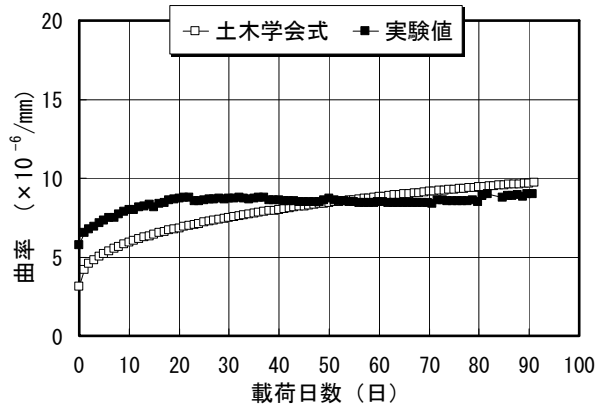
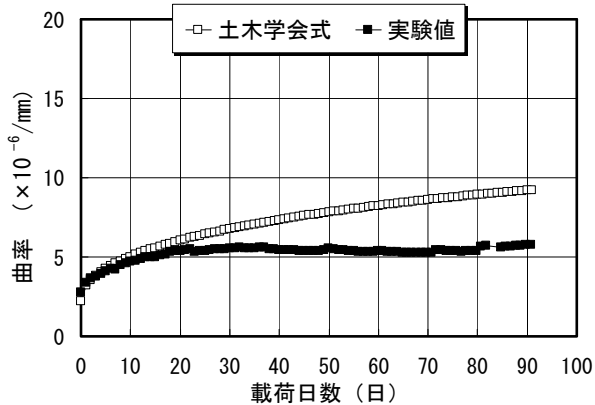


図-9 計算結果との比較 (曲率)

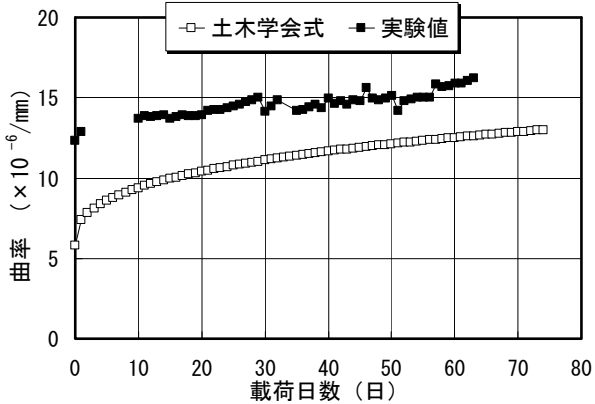
Muller-Kuttner のクリープ予測モデル<sup>4)</sup>を用い、クリープ係数の最終値を 1.83 と設定した。なお、計算に用いた温度は  $20^{\circ}\text{C}$  一定とし、湿度の変化は考慮していない。各シリーズで持続荷重荷直後の曲率は、土木学会式による計算結果に比べ実験値の方が大きな値を示している。シリーズ D16-4, D16-6 では土木学会式を用いた計算結果は実験値と比べて安全側の評価をしているのに対し、シリーズ D16-2, D10-2 では危険側の評価となっている。従って、土木学会式は鉄筋比がある程度大きい部材に対しては概ねよい予測となるが、鉄筋比が小さい場合は危険側に評価する傾向にあることが考えられる。今回の実験では湿度の制御が不十分であったため、精緻な評価を行うまでには至らなかったが、鉄筋比の小さい部材に対する時間依存変形への土木学会式の適用に対しては今後検討が必要である。



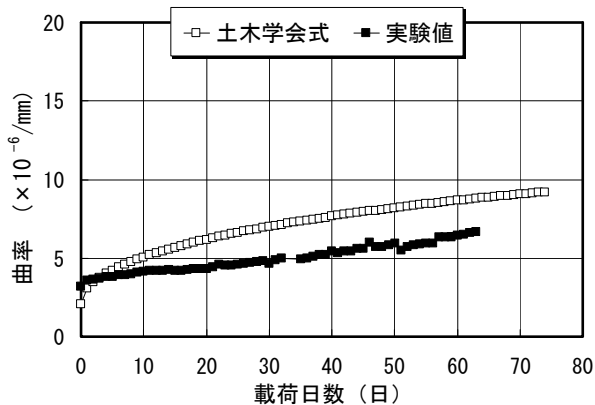
(a) シリーズ D16-2



(b) シリーズ D16-4



(c) シリーズ D10-2



(d) シリーズ D16-6

図-10 土木学会式との比較

## 6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 今回の実験では、鉄筋量の異なるシリーズにおいて環境条件が同一である場合、時間の経過に伴う曲率の変化に大きな違いはなく、鉄筋量の違いによらず、乾燥状態の下では時間の経過に伴い曲率が増大する傾向が見られた。
- (2) 持続荷重履歴を受けた RC 部材の曲げ変形について考察を行った結果、持続荷重履歴を受けた部材の時間依存変形挙動は持続荷重履歴を受けていない部材に比べて緩やかであることが示された。
- (3) 今回の実験では、持続荷重履歴を受けた RC 部材の短期変形は、限界状態設計法により求めた短期荷重による変形に比べ小さくなった。
- (4) 今回の実験から得られた曲率の経時変化と土木学会式を用いて求めた曲率の推移との比較を行った結果、土木学会式による計算値は、鉄筋比の小さな部材の時間依存変形について危険側の評価をする傾向にあり、今後検討する必要があるものと思われる。

## 参考文献

- 1) 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひび割れとたわみに関する研究の現状，土木学会論文集，No.384/V-7，pp.21-32，1987.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[2002年制定]構造性能照査編，2002
- 3) 佐藤良一：鉄筋コンクリート曲げ部材の長期変形挙動およびその解析法に関する研究，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.27-41，1999.11
- 4) H.S. Muller， C.H. Kuttner： Creep of high-performance Concrete-Characteristics and Code-Type Prediction Model, *4th International Symposium on Utilization of High-strength /High-performance Concrete, Paris*， pp.377-385， 1996.