

6章 供試体を用いたクリープ載荷試験による検証

6.1 概要

PC構造物は、コンクリートと鋼材との複合材料で構築されており、持続荷重による時間依存性挙動は、鉄筋の拘束の影響を受けることが多くの研究により明らかにされている。一方、H24 道路橋示方書¹⁾では、乾燥収縮による不静定力を算出する場合に、鉄筋比によって2種類の乾燥収縮度を用いることとしているが、クリープに対しては鉄筋比の影響を考慮しないものとしている。

近年、耐震設計法の改定、コンクリートの高強度化による部材断面の縮小、PRC構造の採用などにより、以前と比較して断面内に配置される鉄筋量が多くなる傾向にある。鉄筋比が大きい場合には、クリープ・乾燥収縮による変形を鉄筋が拘束することにより、無視できない影響が生じる可能性が考えられる。

そこで、鉄筋比がクリープ特性に与える影響を検討するため、持続荷重の大きさ、軸方向鉄筋量、横方向鉄筋量等をパラメータとした供試体のクリープについての長期計測を行った。この計測結果を、既往の道路橋示方書やコンクリート標準示方書などの予測式と比較し、予測式の適合性を検証する。

道路橋示方書では、昭和 53 年から変更されていないが、コンクリート標準示方書は、平成 3 年までは道路橋示方書と同様であったが、平成 8 年と平成 24 年に大きく改訂され、表 6.2.2 のように配合条件やヤング係数等を考慮するようになった。

平成 24 年道路橋示方書¹⁾、平成 8 年制定コンクリート標準示方書⁴⁾、欧米の基準 (EN1992⁶⁾、AASHTO2012⁷⁾) で、クリープ係数を算出する際に使用するパラメータが異なる。今回の実験のパラメータは、表 6.2.3 に示すとおりである。

表 6.2.3 クリープ係数の算出に用いるパラメータ

| パラメータ | | 基準 | | | | | 今回の実験 (シリーズ I) | 備考 |
|-------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------------------|-----------------|
| | | 日本 | | | 欧州 | 米国 | | |
| | | 道示 H24 | コン示 H8 | コン示 H24 | EN 1992 | AAS HTO | | |
| 材齢 | 載荷材齢 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 5 日 | |
| | 乾燥開始材齢 | | ○ | | | | 3 日 | |
| 環境 | コンクリート温度 | ○ | ○ | ○ | ○ | | 17°C | |
| | 相対湿度 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 58% | |
| 配合 | セメント種類 | ○ | | | ○ | | 早強 | |
| | 単位セメント量 | | ○ | ○ | | | 393kg/m ³ | |
| | 単位水量 | | ○ | ○ | | | 157kg/m ³ | |
| | W/C | | ○ | ○ | | | 40% | |
| 物性 | 圧縮強度 | | | | | ○ | 40.6N/mm ² | 載荷時 |
| | | | | | ○ | | 48.8N/mm ² | 材齢 28 日 |
| | ヤング係数 | | ○ | ○ | | | 23.5kN/mm ² | 載荷時 |
| 部材 | 仮想部材厚 | ○ | | | | | 390mm | $\lambda = 2.6$ |
| | | | | | ○ | | 300mm | $k = 2$ |
| | | | | | | ○ | 150mm | $k = 1$ |
| | 体積表面積比 | | ○ | | | | 150mm | $k = 1$ |

表 6.2.3 の条件で算出したクリープ係数を表 6.2.4 と図 6.2.1 に示す。

1 年後のクリープ係数は、道示(H24)の値が最も大きく、コン示(H8)の 2.2 倍 (=2.11 / 0.95) である。また、コン示(H8)では 5 年以降のクリープ係数が一定値 (=1.01) に収束しており、他基準に比べて最も収束が早く、また最終のクリープ係数が小さい。

表 6.2.4 クリープ係数

| 载荷後日数 | 7 日 (1 週) | 14 日 (2 週) | 28 日 (4 週) | 90 日 (3 ヶ月) | 180 日 (半年) | 365 日 (1 年) | 1825 日 (5 年) | 3650 日 (10 年) |
|----------|--------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|
| 道示 (H24) | 0.45 | 0.63 | 0.90 | 1.42 | 1.74 | 2.11 | 2.71 | 2.95 |
| コン示(H8) | 0.24 | 0.33 | 0.46 | 0.71 | 0.85 | 0.95 | 1.01 | 1.01 |
| EN1992 | 0.52 | 0.63 | 0.77 | 1.07 | 1.28 | 1.49 | 1.85 | 1.93 |
| AASHTO | 0.31 | 0.43 | 0.59 | 0.91 | 1.05 | 1.15 | 1.24 | 1.25 |

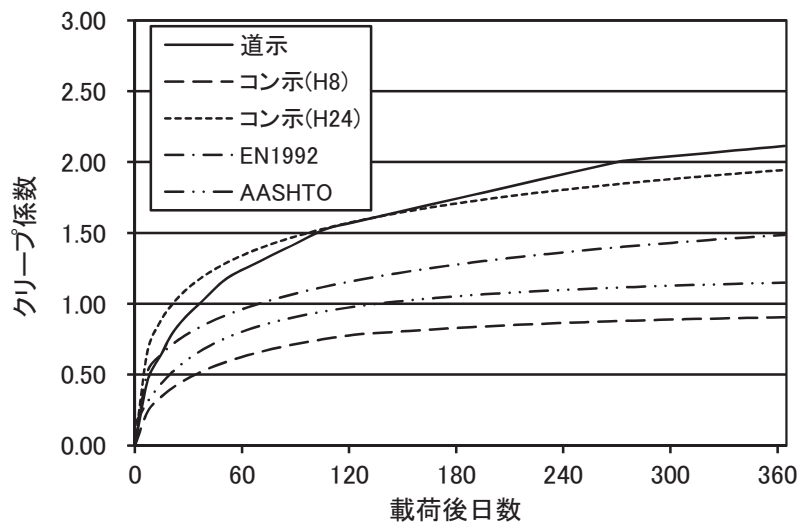


図 6.2.1 クリープ係数の経時変化

(2) 供試体のタイプ

供試体は、版厚300mmの床版を切り出した状態を想定して、形状寸法を、**図6.2.2**に示すように、断面寸法が280mm×300mmで、長さが2.50mの梁部材とした。

供試体の境界条件は、両側の定着小口（280×300mm）および左右の側面（2500×300mm）を「アルミテープ」を貼り付けることで封かん状態とし、上下面のみを乾燥面とした。この状態の仮想部材厚： h_{th} （道路橋示方書で湿度70%（ $\lambda=3$ ）の場合）は450mm（ $= (280 \times 300) / (2 \times 280) \times \lambda$ ）であり、実橋の仮想部材厚と同程度である。

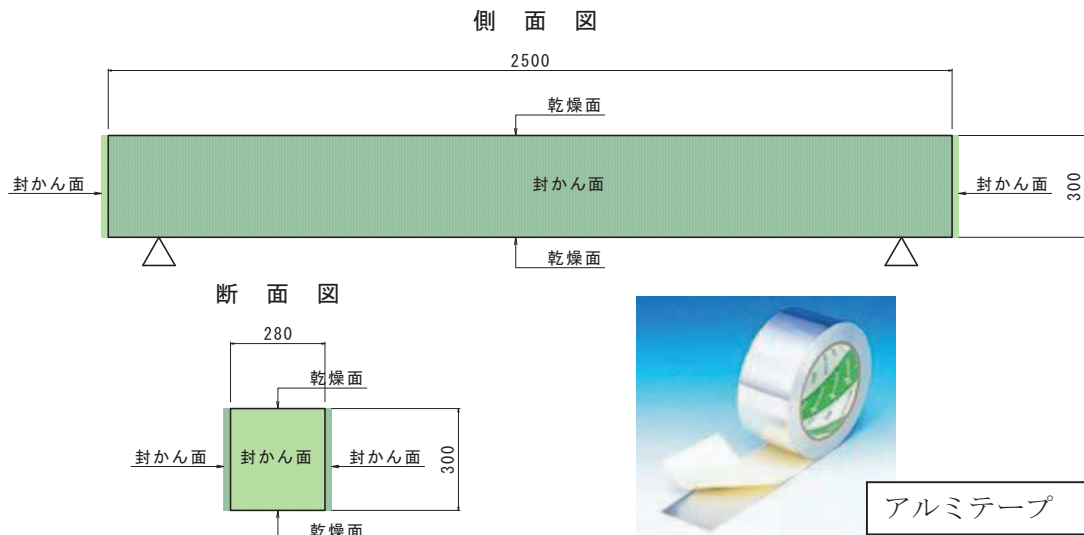


図6.2.2 供試体の形状寸法と環境条件

供試体の配筋要領は**図6.2.3**のとおりで、軸方向鉄筋・横方向鉄筋・緊張力をパラメータとして、**表6.2.5**のように、シリーズIで7タイプ、シリーズIIで8タイプの供試体を各1体ずつ製作した。なお、シリーズIは平成23年度に行った試験、シリーズIIは平成24年に行った試験で、コンクリート配合と打設時期が異なるので、同一供試体（H23-3とH24-5）を製作して両者を比較することで、コンクリート配合等の差異が計測結果に及ぼす影響の程度も検証した。

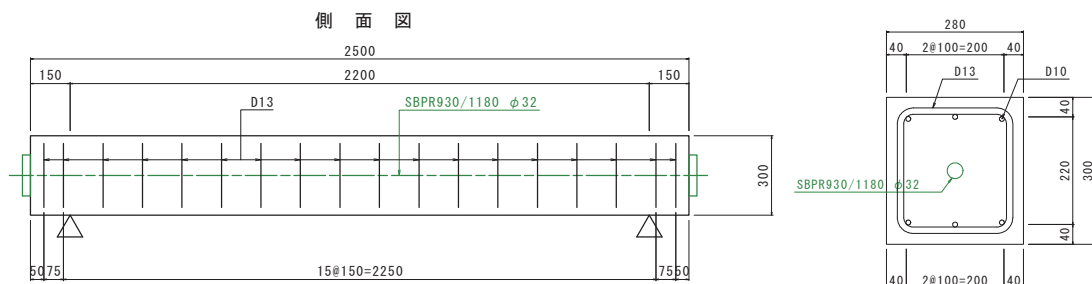


図6.2.3 供試体の配筋要領

なお、緊張材には、SBPR930/1180 φ32 のPC鋼棒を用い、長期間の計測中に緊張力がロスした場合には再緊張を行って、導入応力が一定になるようにした。

軸方向および横方向の配筋量は、実橋に配置される最大および最小に近い状態を想定して設定した。また、緊張力は、コンクリート応力度が許容応力度（設計基準強度40N/mm²の許容値：14.0N/mm²）の1/2程度になるように設定した。

表 6.2.5 供試体のタイプ

| シリーズ | タイプ | 緊張力 | | | 軸方向鉄筋 | | | 横方向鉄筋 | | | |
|------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| | | ① (大) | ② (中) | ③ (無) | ① (多) | ② (少) | ③ (無) | ① (多) | ② (少) | ③ (無) | |
| シリーズ I | H23-1 | ○ | | | | ○ | | | ○ | | 基本 |
| | H23-2 | | ○ | | | ○ | | | ○ | | 張力 1/2 |
| | H23-3 | ○ | | | ○ | | | | ○ | | 軸筋多 |
| | H23-4 | ○ | | | ◎ | | | | ○ | | 軸筋非対称 |
| | H23-5 | ○ | | | | ○ | | ○ | | | 帯筋多 |
| | H23-6 | ○ | | | ○ | | | ○ | | | 軸筋多・帯筋多 |
| | H23-7 | | | ○ | | ○ | | | ○ | | 基本 [乾燥収縮] |
| シリーズ II | H24-1 | ◎ | | | | ○ | | | ○ | | 偏心緊張 |
| | H24-2 | ◎ | | | ○ | | | | ○ | | 偏心緊張・軸筋多 |
| | H24-3 | ○ | | | | ○ | | | ○ | | 基本 ⇔H23-1 |
| | H24-4 | | | ○ | | ○ | | | ○ | | 基本 [乾燥収縮] |
| | H24-5 | ○ | | | ○ | | | | ○ | | 軸筋多 ⇔H23-3 |
| | H24-6 | | | ○ | ○ | | | | ○ | | 軸筋多[乾燥収縮] |
| | H24-7 | ○ | | | | | ○ | | | ○ | 無筋 |
| | H24-8 | | | ○ | | | ○ | | | ○ | 無筋 [乾燥収縮] |

緊張力（コンクリート応力度（正が圧縮））

- ①：569kN（=6.9N/mm²） (◎は偏心 50mm=13.8~0.0N/mm²)
 ②：285kN（=3.4N/mm²）
 ③：緊張力なし

応力度は、コンクリートの純断面積を用いて算出

$$\sigma_c = P/A_c$$

$$A_c = 280 \times 300 - \pi/4 \times 40^2 = 82,740\text{mm}^2$$

軸方向鉄筋（上筋・下筋）

- ①：D19×5本（=3.4%） (◎は下段 D10×3本の非対称配置)
 ②：D10×3本（=0.5%）
 ③：配筋なし

横方向鉄筋

- ①：D16ctc75（=1.9%）
 ②：D13ctc150（=0.6%）
 ③：配筋なし

(3) 計測項目

供試体の計測項目は、表 6.2.6 のとおりとした。なお、各センサの取付け箇所は図 6.2.6 を参照のこと。

表 6.2.6 供試体の計測項目と頻度

| 計測項目 | | センサ | 計測頻度 | 備考 |
|---------------|----|---------|--------------------------|----|
| ひび割れ発生状況 | | (目視) | 30日まで：2回/週 30日以降：2回/月 | |
| 変位 | | 変位計 | 自動記録（1時間毎） | |
| P C 緊張力 | 鋼材 | ひずみゲージ | 〃 | |
| | 定着 | 荷重計 | 〃 | |
| コンクリート ひずみ | 表面 | 表面ゲージ | 〃 | |
| | 内部 | モールドゲージ | 〃 | |
| 鉄筋ひずみ | | ひずみゲージ | 〃 | |
| コンクリート温度 | | 熱電対 | 〃 | |
| 気象 | 気温 | 温湿度計 | 〃 | |
| | 湿度 | | 〃 | |

また、使用したコンクリート材料に関して、表 6.2.7 の試験を行った。

表 6.2.7 材料試験の試験項目と頻度

| 試験項目 | 試験体 | 試験頻度 | 備考 |
|--------|----------|---------------------------|-----------|
| 圧縮強度 | φ100×200 | 打設後 3日・7日・ 14日・28日・91日 | |
| 引張強度 | | | |
| ヤング係数 | | | |
| 圧縮クリープ | φ100×200 | 自動記録（1時間毎） | JIS 原案 |
| 乾燥収縮 | □100×400 | 24時間・7日・4週・8週・3月 | JIS A1129 |

6.2.2 供試体の製作

(1) 使用材料

コンクリート・鉄筋・P C鋼材は、以下の材料を使用した。

- a) コンクリート：設計基準強度 40N/mm²
 - ・セメント：早強ポルトランドセメント
 - ・粗骨材：最大寸法 15mm
 - ・細骨材：陸砂

※使用する骨材は、「アルカリ骨材反応抑制対策について」（平成 14 年 7 月 国土交通省）に適合するものとする

- b) 鉄筋：SD345 (JIS G3112) D10～D19
- c) P C鋼材：P C鋼棒(JIS G3109) SBPR930/1180 φ32
- d) シース：スパイラルシース (#1040) φ40

(2) コンクリート配合

コンクリートの配合は、シリーズ I とシリーズ II で表 6.2.8 のとおり。

表 6.2.8 コンクリート配合

| | 粗骨材 最大寸法 (mm) | スラング (cm) | 空気量 (%) | 水セメント比 (%) | 粗骨材率 (%) |
|---------|---------------------|--------------|------------|---------------|-------------|
| シリーズ I | 15 | 8.0 | 4.5 | 40 | 44.6 |
| シリーズ II | 15 | 8.0 | 4.5 | 43 | 50.0 |

| | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|---------|--------------------------|------|-----|-----|---------------|------|------|
| | 水 | セメント | 粗骨材 | 細骨材 | 高性能 AE 減水剤 | 減水剤 | AE 剤 |
| シリーズ I | 157 | 393 | 780 | 996 | 3.14 | — | — |
| シリーズ II | 157 | 365 | 890 | 921 | — | 3.10 | 3.65 |

(3) 供試体の種類

供試体の種類は、シリーズ I が図 6.2.4 に示す 7 タイプ、シリーズ II が図 6.2.5 に示す 8 タイプとした。

供試体の種類 (シリーズ I)

| CASE | 着目 | 緊張力 (応力度) | 鉄筋配置 | 鉄筋比 (ρ_s) |
|-------|---------------------|----------------------------------|--|----------------------|
| H23-1 | 基本ケース | 569kN (6.9N/mm ²) | 軸筋上段: D10×3本 軸筋下段: D10×3本 横筋 : D13ctc150 | 0.5% 0.5% 0.6% |
| H23-2 | 持続荷重の大きさの影響 | 285kN (3.4N/mm ²) | 軸筋上段: D10×3本 軸筋下段: D10×3本 横筋 : D13ctc150 | 0.5% 0.5% 0.6% |
| H23-3 | 軸方向鉄筋の影響 | 569kN (6.9N/mm ²) | 軸筋上段: D19×5本 軸筋下段: D19×5本 横筋 : D13ctc150 | 3.4% 3.4% 0.6% |
| H23-4 | 軸方向鉄筋偏心配置の影響 | 569kN (6.9N/mm ²) | 軸筋上段: D19×5本 軸筋下段: D10×3本 横筋 : D13ctc150 | 3.4% 0.5% 0.6% |
| H23-5 | 横方向鉄筋の影響 | 569kN (6.9N/mm ²) | 軸筋上段: D10×3本 軸筋下段: D10×3本 横筋 : D16ctc75 | 0.5% 0.5% 1.9% |
| H23-6 | 軸方向鉄筋・ 横方向鉄筋の影響 | 569kN (6.9N/mm ²) | 軸筋上段: D19×5本 軸筋下段: D19×5本 横筋 : D16ctc75 | 3.4% 3.4% 1.9% |
| H23-7 | 基本ケース (プレストレス無し) | 0kN (0N/mm ²) | 軸筋上段: D10×3本 軸筋下段: D10×3本 横筋 : D13ctc150 | 0.5% 0.5% 0.6% |

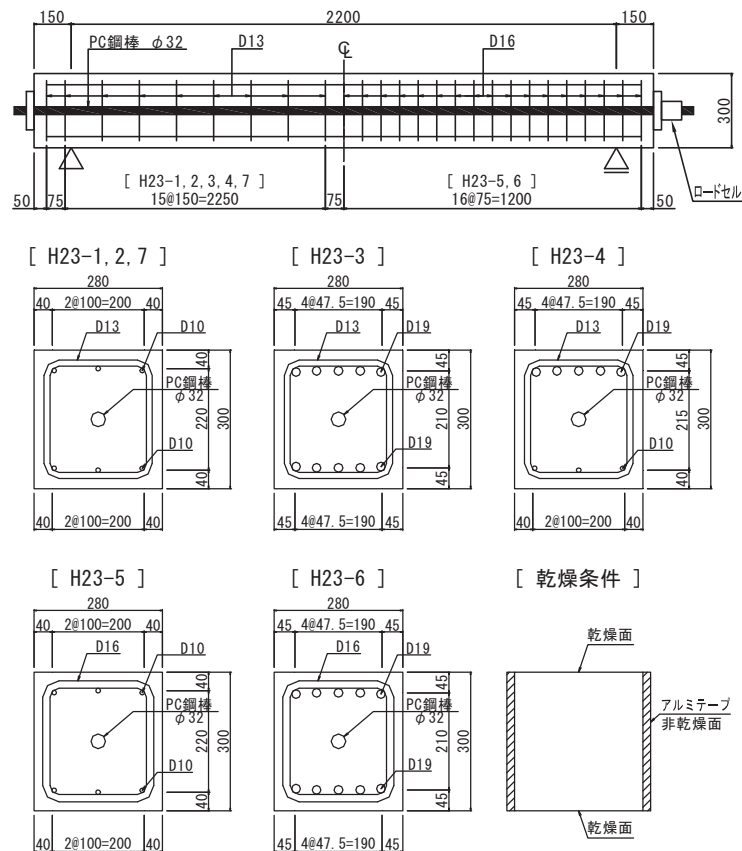


図 6.2.4 供試体の種類 (シリーズ I)

供試体の種類（シリーズⅡ）

| CASE | 着目 | 緊張力 (応力度) | 鉄筋配置 | 鉄筋比 (ρ_s) |
|-------|--------------------|---|--|----------------------|
| H24-1 | PC 鋼材偏心 軸筋基本ケース | 569kN (上縁:0.0N/mm ² 下縁:13.8N/mm ²) | 軸筋上段:D10×3本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D13ctc150 | 0.5% 0.5% 0.6% |
| H24-2 | PC 鋼材偏心 軸筋大 | 569kN (上縁:0.0N/mm ² 下縁:13.8N/mm ²) | 軸筋上段:D19×5本 軸筋下段:D19×5本 横筋 : D13ctc150 | 3.4% 3.4% 0.6% |
| H24-3 | 基本ケース | 569kN (6.9N/mm ²) | 軸筋上段:D10×3本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D13ctc150 | 0.5% 0.5% 0.6% |
| H24-4 | 基本ケース (プレ無し) | 0kN (0N/mm ²) | 軸筋上段:D10×3本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D13ctc150 | 0.5% 0.5% 0.6% |
| H24-5 | 軸筋大 | 569kN (6.9N/mm ²) | 軸筋上段:D19×5本 軸筋下段:D19×5本 横筋 : D13ctc150 | 3.4% 3.4% 0.6% |
| H24-6 | 軸筋大 (プレ無し) | 0kN (0N/mm ²) | 軸筋上段:D19×5本 軸筋下段:D19×5本 横筋 : D13ctc150 | 3.4% 3.4% 0.6% |
| H24-7 | 無筋 | 569kN (6.9N/mm ²) | 軸筋上段: - 軸筋下段: - 横筋 : - | 0.0% 0.0% 0.0% |
| H24-8 | 無筋 (プレ無し) | 0kN (0N/mm ²) | 軸筋上段: - 軸筋下段: - 横筋 : - | 0.0% 0.0% 0.0% |

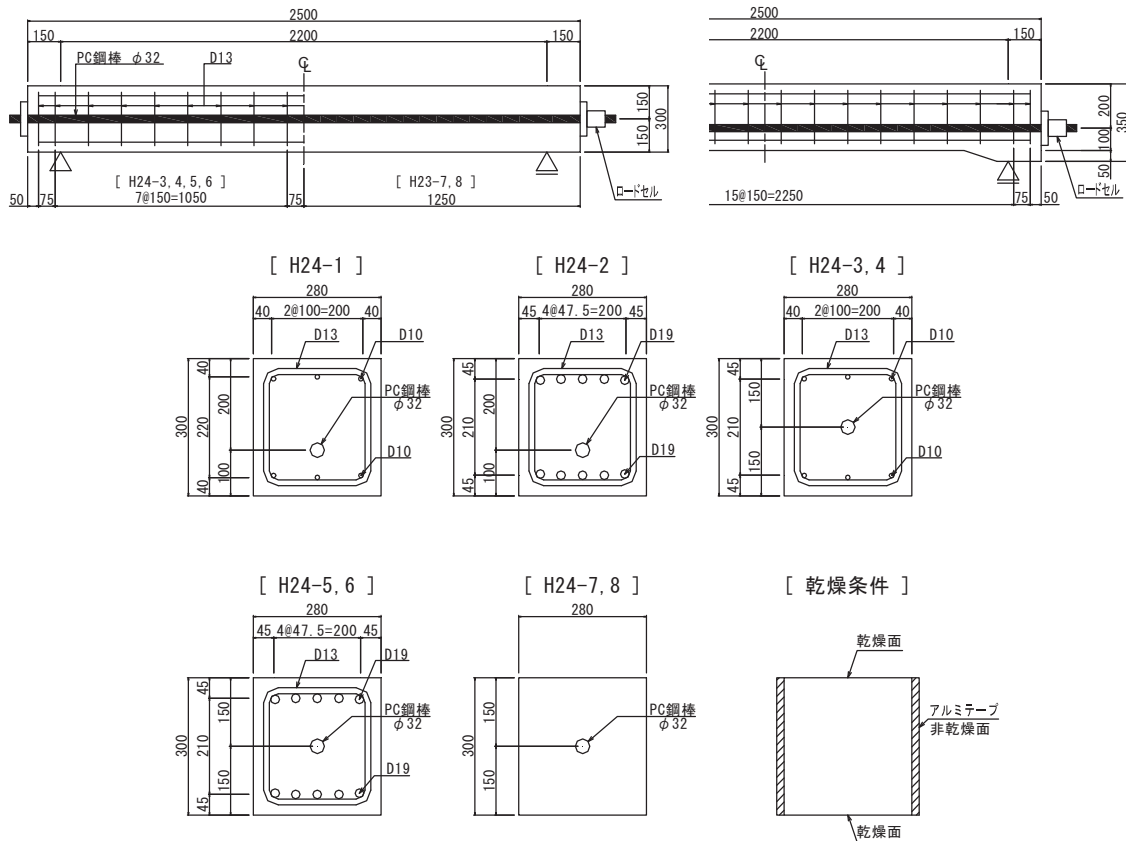


図 6.2.5 供試体の種類（シリーズⅡ）

(4) センサ取付け箇所

標準的な供試体のセンサ取付け箇所を、図 6.2.6 に示す。また、センサの取付け個数は、表 6.2.9 のとおり。

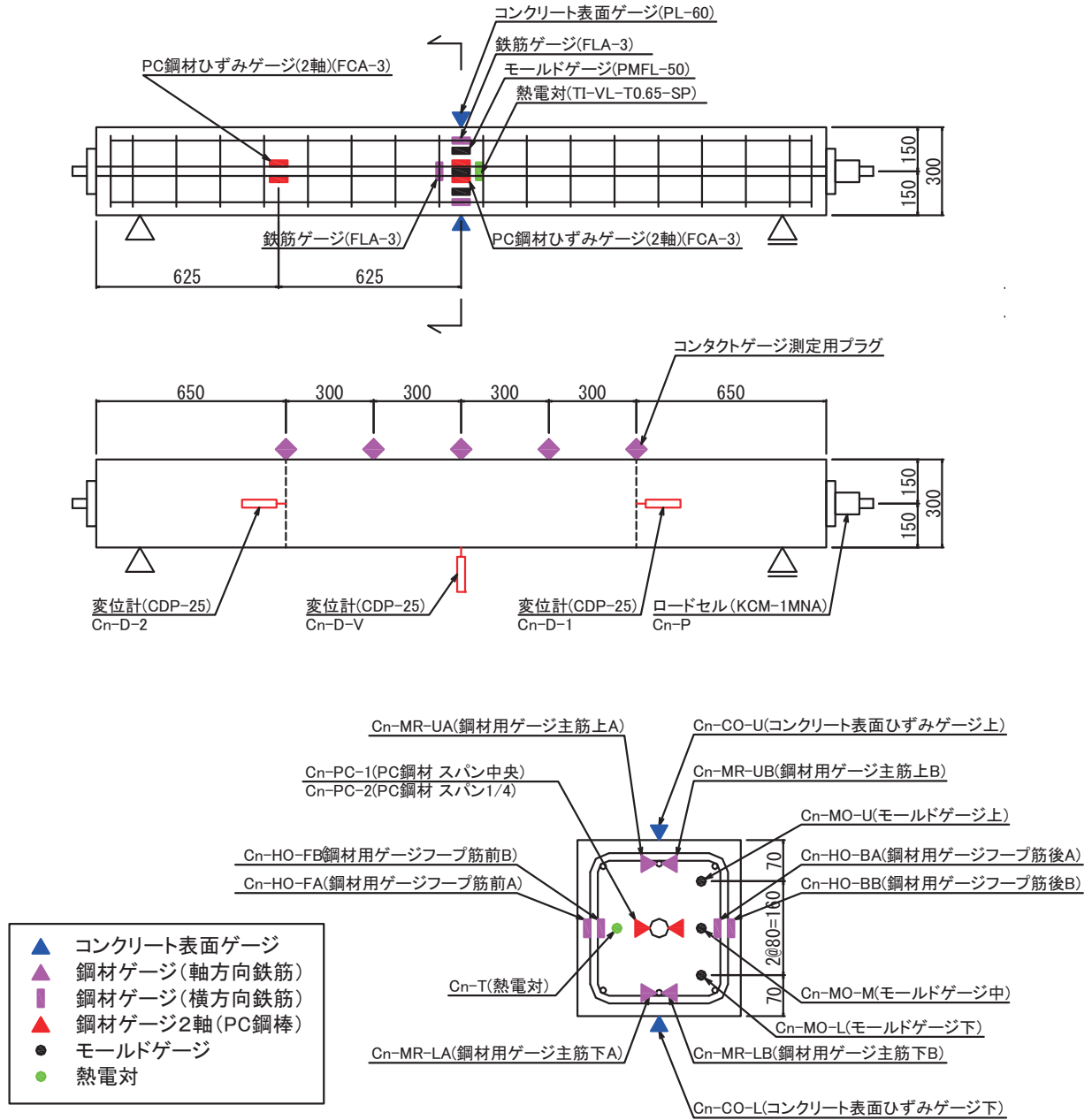


図 6.2.6 センサ取付け箇所 (標準的な供試体)

表 6.2.9 センサの取付け個数と接続チャンネル数（標準的な供試体）

| 計測項目 | | センサ | | 取付け 個数 | 接続 チャンネル | 備考 (ゲージ記号) |
|-----------|----|--------|----------|-----------|-------------|------------------------------|
| | | 種類 | 型名 | | | |
| 変位 | 水平 | 変位計 | CDP-25 | 2 | 2 | D-1,2 |
| | 鉛直 | | | 1 | 1 | D-V |
| PC | 鋼材 | ひずみゲージ | FLA-3 | 4 | 2 | PC-1,2 ※ ¹ |
| 緊張力 | 定着 | 荷重計 | KCM-1MNA | 1 | 1 | P ※ ¹ |
| コンクリート | 表面 | 表面ゲージ | PL-60 | 2 | 2 | CO-U,L |
| ひずみ | 内部 | モルトゲージ | PMFL-50 | 3 | 3 | MO-U,M,L |
| 鉄筋 ひずみ | 主筋 | ひずみゲージ | FLA-3 | 8 | 4 | MR-U1,U2,L1,L2※ ² |
| | 帯筋 | | | 8 | 4 | HO-F1,F2,B1,B2※ ² |
| コンクリート温度 | | 熱電対 | T-G | 1 | 1 | T |
| 合計 | | | | 22 | 16 | |

※¹ : H23-7,H24-4,6,8 の 4 体は接続なし

※² : H24-7,8 の 2 体は接続なし

6.2.3 試験の実施

(1) 試験工程

試験の実施は、シリーズⅠについては表 6.2.10 の工程、シリーズⅡについては表 6.2.11 の工程で行った。

シリーズⅠは、国総研実験棟でコンクリートを打設し、そのまま国総研実験棟で長期計測を行った。シリーズⅡは、別途他の工場でコンクリートを打設し、材齢 3 日のときに国総研実験棟に搬入・脱枠して長期計測を行った。

載荷後日数は、プレストレスを導入し、自重が作用し始めた材齢 5 日が 0 日である。

表 6.2.10 製作工程（シリーズⅠ）

| 材齢 | 載荷後 | 日付 | 作業内容 |
|--------|--------|-----------|------------------|
| 0 日 | — | H23.10/28 | コンクリート打設（国総研実験棟） |
| 3 日 | — | H23.10/31 | 脱枠・側面封かん |
| 5 日 | 0 日 | H23.11/02 | プレストレス導入 |
| 12 日 | 7 日 | H23.11/09 | 再緊張 |
| 33 日 | 28 日 | H23.11/30 | 再緊張 |
| 61 日 | 56 日 | H23.12/28 | 再緊張 |
| 118 日 | 113 日 | H24.02/23 | 再結線・再緊張 |
| 467 日 | 462 日 | H25.02/06 | 再緊張 |
| 2056 日 | 2051 日 | H29.06/14 | （本報告書での集計期間） |

表 6.2.11 製作工程（シリーズⅡ）

| 材齢 | 載荷後 | 日付 | 作業内容 |
|--------|--------|-----------|---------------------------------|
| 0 日 | — | H25.02/01 | コンクリート打設（いわき工場） |
| 3 日 | — | H25.02/04 | 運搬（いわき→つくば） 脱枠・側面封かん（国総研実験棟） |
| 5 日 | 0 日 | H25.02/06 | プレストレス導入 |
| 21 日 | 16 日 | H25.02/22 | 再緊張 |
| 61 日 | 56 日 | H25.04/03 | 再緊張 |
| 400 日 | 355 日 | H26.01/27 | 再緊張 |
| 641 日 | 636 日 | H26.11/04 | 再緊張 |
| 1594 日 | 1589 日 | H29.06/14 | （本報告書での集計期間） |

(2) 生コン性状

シリーズⅠとシリーズⅡで使用した生コンの性状は、表 6.2.12 のとおり。

表 6.2.12 生コン性状

| | 品質 | 試験結果 | | | |
|-------|----------|-------------------|------|--------------|-----|
| | | スランプ [°] | 空気量 | コンクリート 温度 | 外気温 |
| シリーズⅠ | 40-8-15H | 9.5cm | 5.3% | 22℃ | 13℃ |
| シリーズⅡ | 40-8-15H | 8.5cm | 4.0% | 13℃ | — |

(3) 実測緊張力

シリーズⅠとシリーズⅡでの緊張力の実測値は、表 6.2.13 のとおり。なお、シリーズⅡについては、载荷初期における緊張力調整の間隔を長くするため、設計値に対して3%程度大きめに引き越した。

表 6.2.13 実測緊張力

| | | | | | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| シリーズⅠ | H23-1 | H23-2 | H23-3 | H23-4 | H23-5 | H23-6 | H23-7 | | |
| | 目標(kN) | 569 | 285 | 569 | 569 | 569 | 569 | 0 | |
| | 実測(kN) | 567.0 | 292.3 | 576.5 | 570.7 | 581.1 | 573.3 | 0 | |
| | 割合 (%) | 99.6 | 102.6 | 101.3 | 100.3 | 102.1 | 100.8 | — | |
| シリーズⅡ | H24-1 | H24-2 | H24-3 | H24-4 | H24-5 | H24-6 | H24-7 | H24-8 | |
| | 目標(kN) | 569 | 569 | 569 | 0 | 569 | 0 | 569 | 0 |
| | 実測(kN) | 590.9 | 591.5 | 589.9 | 0 | 587.7 | 0 | 585.8 | 0 |
| | 割合 (%) | 103.8 | 104.0 | 103.7 | — | 103.3 | — | 103.0 | — |

6.3 計測結果

6.3.1 材料試験の試験結果

コンクリート材料の強度・ヤング係数を、表 6.3.1 に示す。

圧縮強度と引張強度は、図 6.3.1 に示すように、シリーズ I とシリーズ II で同じような強度発現であるが、シリーズ I のヤング係数は、図 6.3.2 に示すように圧縮強度に比べてやや小さい傾向である。

表 6.3.1 コンクリートの強度・ヤング係数

| 材齢 | | 3 日 | 5 日 | 7 日 | 14 日 | 28 日 | 56 日 | 91 日 |
|---------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| シリーズ I | 圧縮強度 (N/mm ²) | 33.7 | — | 40.6 | 44.1 | 48.8 | — | 56.7 |
| | 引張強度 (") | 2.38 | — | 3.28 | 3.27 | 2.96 | — | 4.21 |
| | ヤング係数(") | — | — | 2.351 | 2.465 | 2.472 | — | 2.762 |
| | | | | ×10 ⁴ | ×10 ⁴ | ×10 ⁴ | | ×10 ⁴ |
| シリーズ II | 圧縮強度 (N/mm ²) | 33.1 | 39.7 | 41.6 | 46.6 | 51.0 | 52.3 | 56.4 |
| | 引張強度 (") | 2.32 | 2.97 | 3.19 | 3.40 | 3.51 | 3.54 | 2.97 |
| | ヤング係数(") | 2.690 | 2.786 | 2.891 | 3.109 | 3.227 | 3.165 | 3.261 |
| | | ×10 ⁴ | ×10 ⁴ | ×10 ⁴ | ×10 ⁴ | ×10 ⁴ | ×10 ⁴ | ×10 ⁴ |

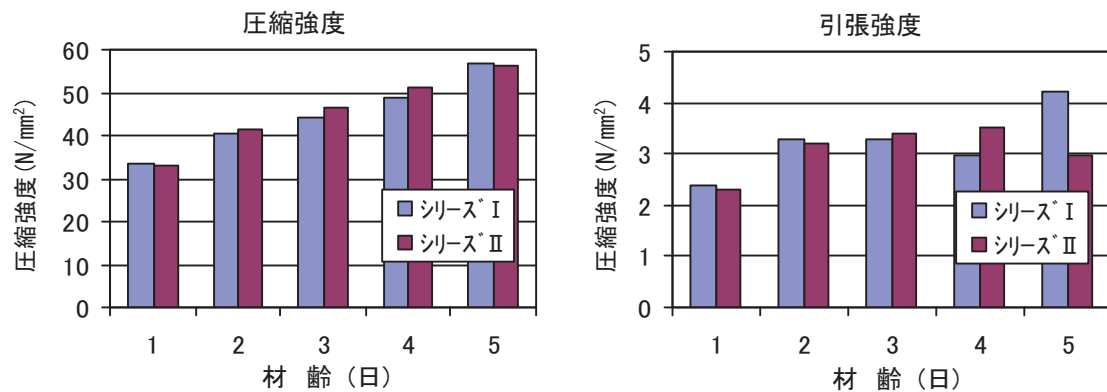


図 6.3.1 コンクリートの圧縮強度・引張強度

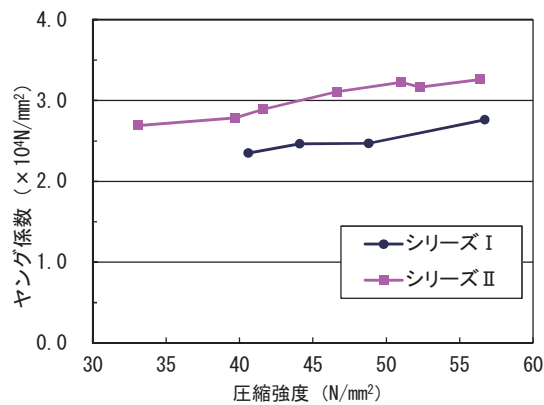


図 6.3.2 圧縮強度とヤング係数の関係

コンクリート材料の長さ変化率を、表 6.3.2 に示す。

シリーズⅡの長さ変化率は、図 6.3.3 に示すように、シリーズⅠに比べてやや小さい傾向である。

表 6.3.2 コンクリートの長さ変化率

| | 7 日 | 28 日 | 56 日 | 91 日 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| シリーズⅠ | 204×10^{-6} | 384×10^{-6} | 531×10^{-6} | 684×10^{-6} |
| シリーズⅡ | 94×10^{-6} | 294×10^{-6} | 337×10^{-6} | — |

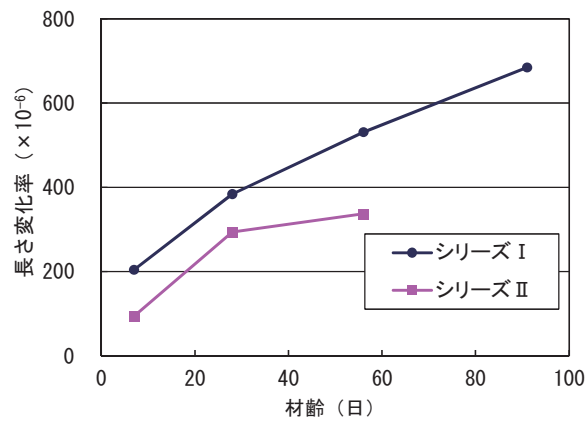


図 6.3.3 コンクリートの長さ変化率

鉄筋およびP C鋼材の降伏強度・ヤング係数を、表 6.3.3 に示す。

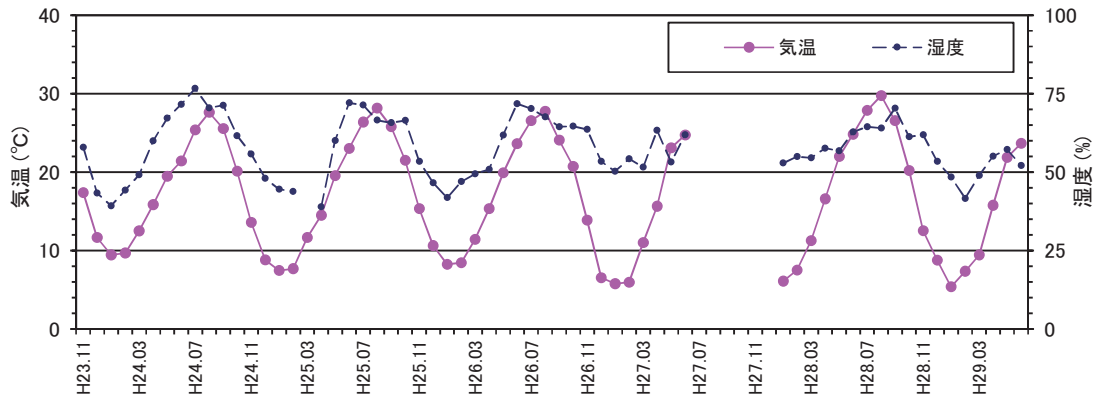
表 6.3.3 鉄筋およびP C鋼材の降伏強度・ヤング係数

| | | | シリーズⅠ | シリーズⅡ |
|-----------|----------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|
| 鉄筋 | SD345 D10 | 降伏強度 (N/mm ²) | 393.6 | 385.8 |
| | | ヤング係数 (N/mm ²) | 19.091×10^4 | 19.268×10^4 |
| | SD345 D13 | 降伏強度 (N/mm ²) | 373.3 | 382.9 |
| | | ヤング係数 (N/mm ²) | 18.467×10^4 | 19.087×10^4 |
| | SD345 D16 | 降伏強度 (N/mm ²) | 394.4 | — |
| | | ヤング係数 (N/mm ²) | 18.201×10^4 | — |
| SD345 D19 | 降伏強度 (N/mm ²) | 376.4 | 394.2 | |
| | ヤング係数 (N/mm ²) | 19.590×10^4 | 19.575×10^4 | |
| P C鋼材 | SBPR930/1080 φ 32 | 降伏強度 (N/mm ²) | 962 | 926 |
| | | ヤング係数 (N/mm ²) | 20.0×10^4 | 20.2×10^4 |

6.3.2 供試体の計測結果

(1) 環境データ

供試体保管場所の気温と湿度（月平均）の経時変化をプロットしたグラフが図 6.3.4 である。全期間の平均気温は 17℃、平均湿度は 58%である。



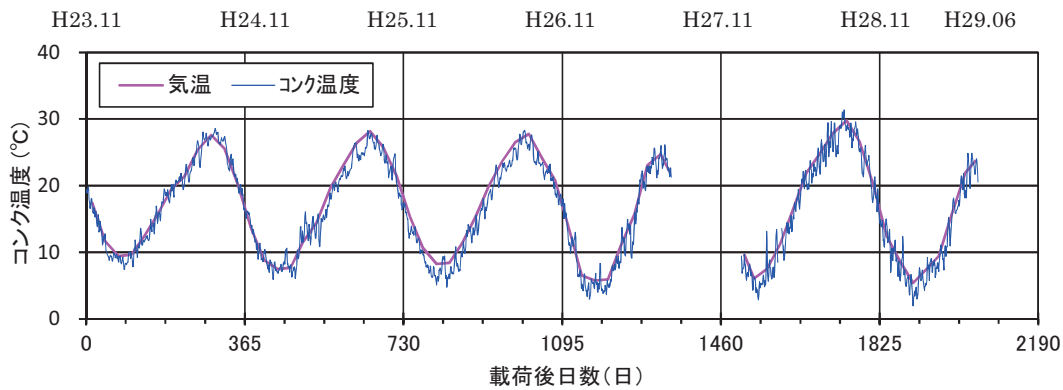
湿度は、H25.03/04～H25.04/08 の計測不備データを除外。

H27.07/11（1347日）～H27.12/17（1506日）は計測データなし。

図 6.3.4 気温と湿度（月平均）

(2) コンクリート温度

供試体（H23-1）のコンクリート温度と月平均気温の経時変化をプロットしたグラフが図 6.3.5 である。



H27.07/11（1347日）～H27.12/17（1506日）は計測データなし。

図 6.3.5 コンクリート温度（H23-1）

(3) 緊張力

供試体緊張力の測定値は、表 6.3.4 に示すとおりで、経時的にプロットしたグラフが図 6.3.6 である。なお、ここでは「有効張力=再緊張の増分を控除した緊張力」、「張力比=導入張力に対する有効張力の割合」とする。

表 6.3.4 供試体の緊張力

| 載荷後日数(日) (コンクリート材齢) | | 緊張後 (5) | 30 (35) | 90 (95) | 180 (185) | 365 (370) | 730 (735) | 1095 (1100) |
|------------------------|--------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| H23-1 | 緊張力 | 560 | 576 | 572 | 581 | 547 | 578 | 569 |
| | 有効張力 | 560 | 535 | 521 | 509 | 475 | 460 | 448 |
| 張力 100% | 張力比(%) | 100 | 96 | 93 | 91 | 85 | 82 | 80 |
| H23-2 | 緊張力 | 288 | 293 | 289 | 281 | 256 | 285 | 276 |
| | 有効張力 | 288 | 293 | 269 | 260 | 236 | 223 | 213 |
| 張力 50% | 張力比(%) | 100 | 96 | 93 | 90 | 82 | 77 | 74 |

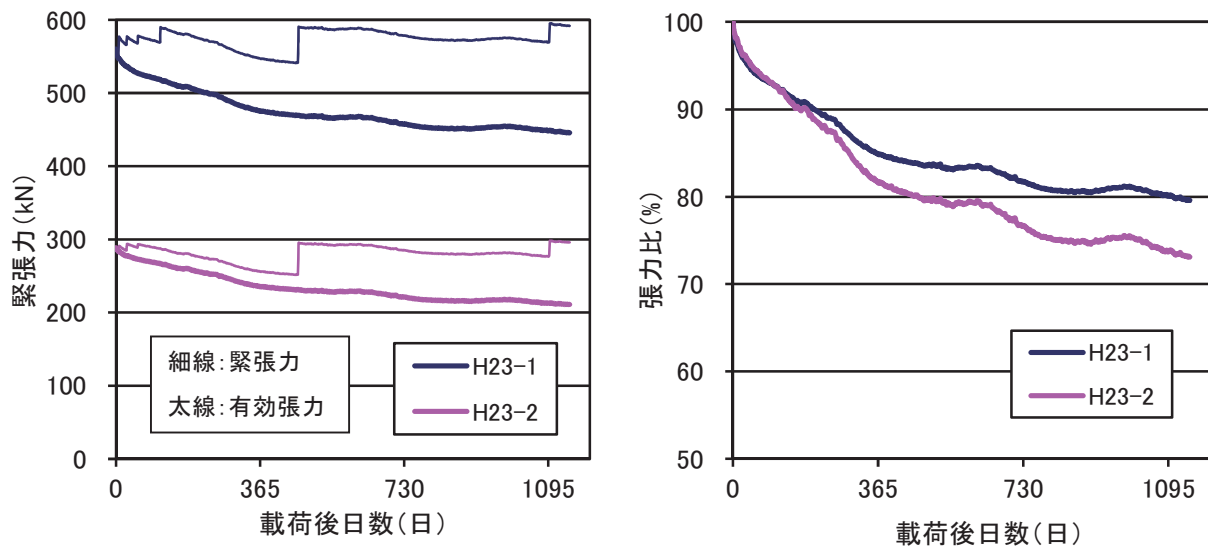


図 6.3.6 供試体の緊張力

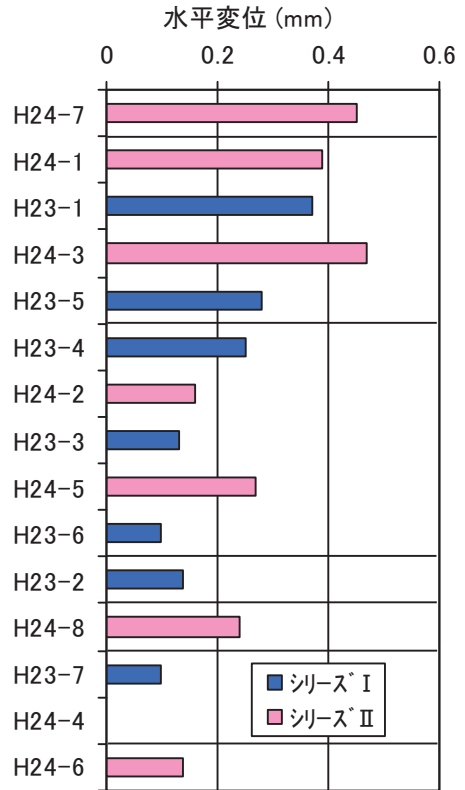
(4) 変位

載荷後 30 日の水平変位は、表 6.3.5 に示すとおりである。

水平変位が大きくなると考えられる条件（緊張力が大きく軸方向鉄筋が少ない）から順に並べているが、緊張力や配筋量が同一条件でも水平変位に差異がある。

表 6.3.5 供試体の水平変位（載荷後 30 日で、短縮を正）

| | 緊張力 | | | 軸方向鉄筋 | | | 水平変位 (mm) | 水平変位 (mm) |
|-------|-----|---|---|-------|---|---|--------------|-----------|
| | 大 | 中 | 無 | 無 | 少 | 多 | | |
| H24-7 | ○ | | | ○ | | | 0.45 | H24-7 |
| H24-1 | ◎ | | | | ○ | | 0.39 | H24-1 |
| H23-1 | ○ | | | | ○ | | 0.37 | H23-1 |
| H24-3 | ○ | | | | ○ | | 0.47 | H24-3 |
| H23-5 | ○ | | | | ○ | | 0.28 | H23-5 |
| H24-2 | ○ | | | | | ◎ | 0.16 | H23-4 |
| H23-4 | ◎ | | | | | ○ | 0.25 | H24-2 |
| H23-3 | ○ | | | | | ○ | 0.13 | H23-3 |
| H24-5 | ○ | | | | | ○ | 0.27 | H24-5 |
| H23-6 | ○ | | | | | ○ | 0.10 | H23-6 |
| H23-2 | | ○ | | | ○ | | 0.14 | H23-2 |
| H24-8 | | | ○ | ○ | | | 0.24 | H24-8 |
| H23-7 | | | ○ | | ○ | | 0.10 | H23-7 |
| H24-4 | | | ○ | | ○ | | 0.00 | H24-4 |
| H24-6 | | | ○ | | | ○ | 0.14 | H24-6 |

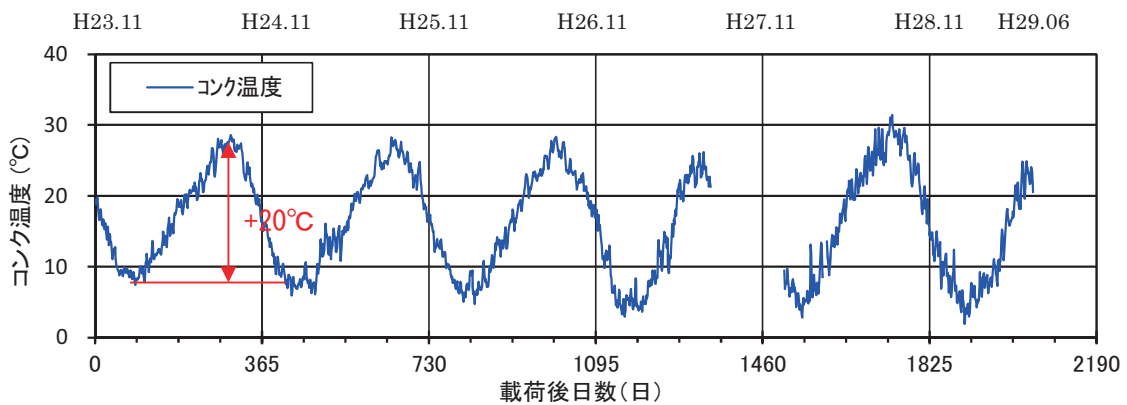


(5) コンクリート・鉄筋ひずみ

供試体緊張後のコンクリート内部ひずみ（上側・中央・下側の平均）と鉄筋ひずみ（上筋・下筋の平均）の計測値から、乾燥収縮用供試体の計測値を差し引いたひずみ（温度変化の影響も控除される）のグラフを次頁以降に示す。全体的な傾向は以下のとおり。

- ・コンクリートひずみは温度変化の影響が残留している。
- ・コンクリート内部ひずみよりも鉄筋ひずみの方がやや大きい。

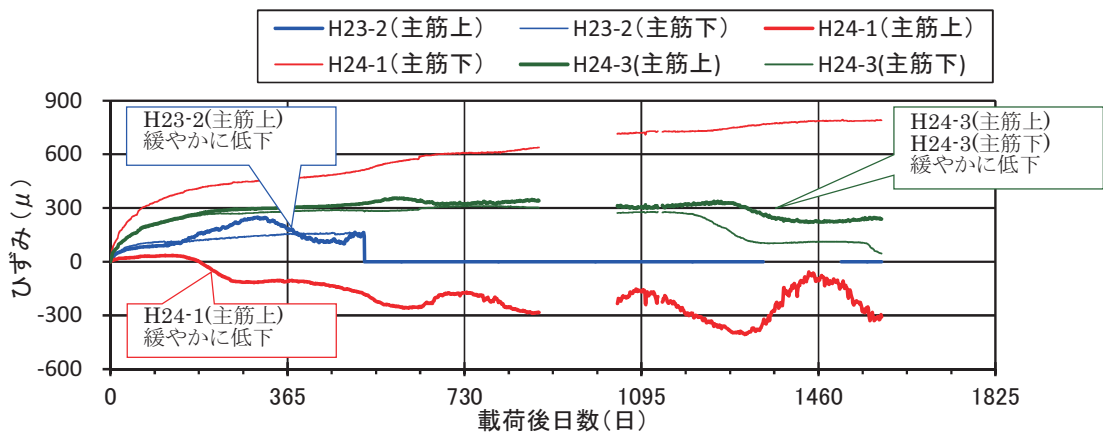
シリーズ I の供試体（H23-1）コンクリートの温度変化は、**図 6.3.7** に示すとおりで、夏期には冬期よりも約 20℃ の昇温がある。コンクリートひずみのグラフは、シリーズ I・II とともに夏期に下弛みしており、温度膨張を引張ひずみとして検知していると思われる。



H27.07/11 (1347 日) ~ H27.12/17 (1506 日) は計測データなし。

図 6.3.7 供試体の温度変化

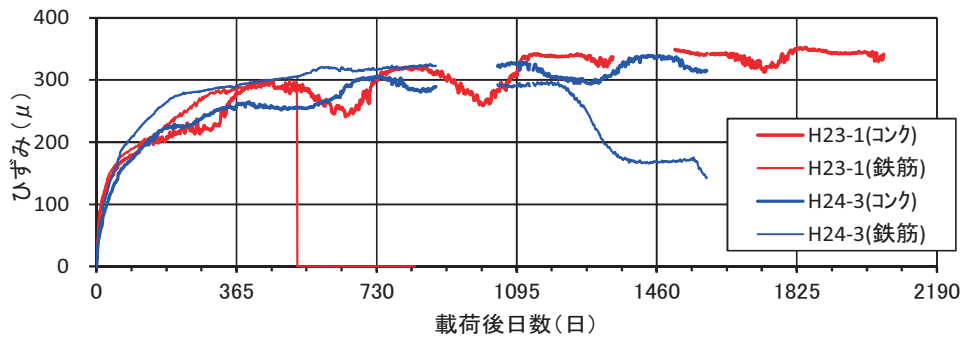
また、H23-2 の上側主筋、H24-1 の上側主筋、H24-3 の上側主筋及び下側主筋のデータについては、**図 6.3.8** に示すように、ひずみ挙動に異常が認められた。



H27.07/11 (1347 日) ~ H27.12/17 (1506 日) は計測データなし。

図 6.3.8 ひずみ挙動の比較

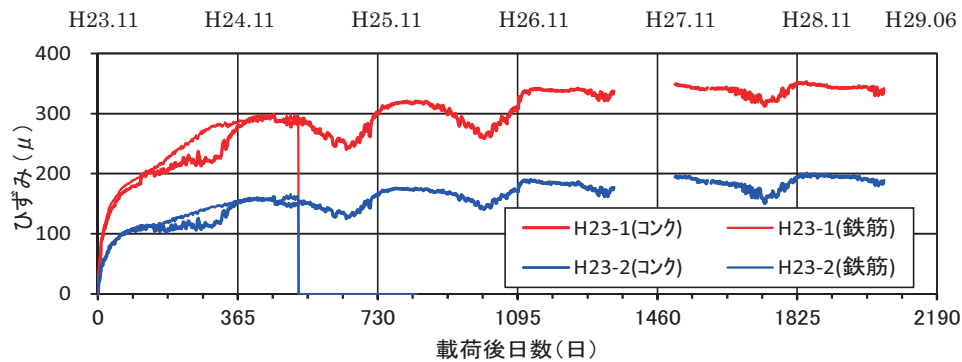
コンクリート配合の違い（H23-1：W/C=40%、H24-3：W/C=43%）を比較すると、図 6.3.9 のとおりで、発生するひずみ量はほぼ同程度である。



H27.07/11（1347日）～H27.12/17（1506日）は計測データなし。

図 6.3.9 乾燥収縮を控除したひずみ（配合の違い：H23-1・H24-3）

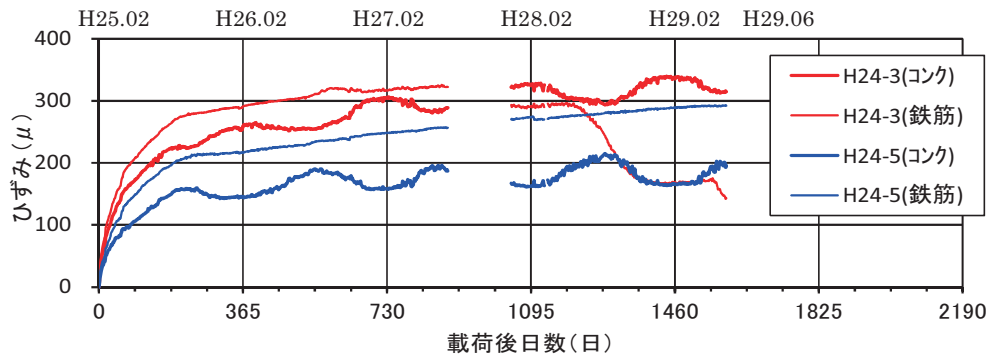
導入軸力の違い（H23-1：569kN、H23-2：285kN）を比較すると、図 6.3.10 のとおりで、発生するひずみ量は導入張力が大きい方（H23-1）が大きい。なお、H23-2 の鉄筋ひずみは、ひずみ挙動が異常（図 6.3.8 を参照）な主筋上のデータを除く。



H27.07/11（1347日）～H27.12/17（1506日）は計測データなし。

図 6.3.10 乾燥収縮を控除したひずみ（導入軸力の違い：H23-1・H23-2）

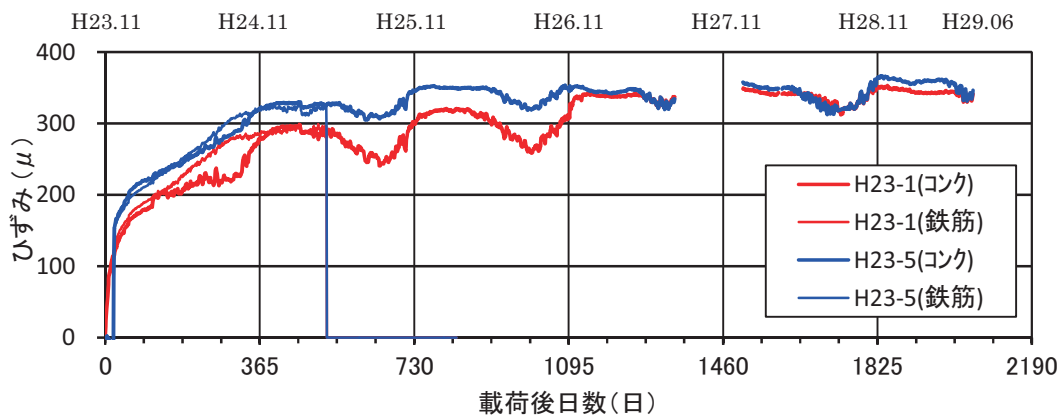
鉄筋配置（軸方向鉄筋量）の違い（H24-3：0.5%、H24-5：3.4%）を比較すると、図 6.3.11 のとおりで、発生するひずみ量は鉄筋量が少ない方（H24-3）が大きい。



H27.07/11（1347日）～H27.12/17（1506日）は計測データなし。

図 6.3.11 乾燥収縮を控除したひずみ（軸方向鉄筋量の違い：H24-3・H24-5）

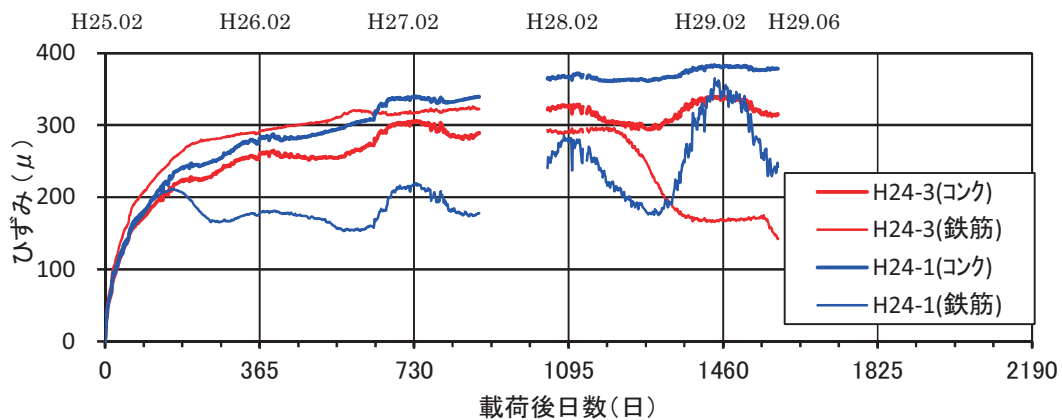
鉄筋配置（横方向鉄筋量）の違い（H23-1：0.6%、H23-5：1.9%）を比較すると、図 6.3.12 のとおりで、発生するひずみ量はほぼ同程度である。



H27.07/11（1347日）～H27.12/17（1506日）は計測データなし。

図 6.3.12 乾燥収縮を控除したひずみ（横方向鉄筋量の違い：H23-1・H23-5）

鋼材配置（偏心量）の違い（H24-3： $e=0$ 、H24-1： $e=H/6$ ）を比較すると、図 6.3.13 のとおりで、発生するひずみ量の平均はほぼ同程度である。なお、H24-1の鉄筋ひずみは、ひずみ挙動が異常（図 6.3.8 を参照）な主筋上のデータを含むため、180日頃からひずみが下弛みしている。



H27.07/11（1347日）～H27.12/17（1506日）は計測データなし。

図 6.3.13 乾燥収縮を控除したひずみ（鋼材偏心量の違い：H24-3・H24-1）

6.4 鉄筋配置量がプレストレスに与える影響

コンクリート断面に配置されている鉄筋量が多い場合、プレストレス導入時に鉄筋がコンクリートの変形を拘束することにより、プレストレスのロスに影響が生じることが予想される。

シリーズⅠの6供試体とシリーズⅡの5供試体について、コンクリートおよび鉄筋のひずみから算出した導入力の分担率(プレストレス有効率の実測値)を表6.4.1-1、表6.4.1-2に示す。なお、コンクリートへの導入力 P_c と鉄筋への導入力 P_s は、次式から算出した。また、配筋要領と各断面積は、次頁のとおり。

$$P_c = \varepsilon_c \times E_c \times A_c$$

ε_c : コンクリートひずみ (内部ひずみ・表面ひずみの全平均)

E_c : コンクリートのヤング係数 (表6.3.1の5日(7日)材齢)

A_c : コンクリートの純断面積 (シース孔・鉄筋分を控除)

$$P_s = \varepsilon_s \times E_s \times A_s$$

ε_s : 鉄筋ひずみ (上筋ひずみ・下筋ひずみ)

E_s : 鉄筋のヤング係数 (表6.3.3のとおり)

A_s : 鉄筋断面積

表 6.4.1-1 導入力と分担率 (シリーズⅠ)

| | | H23-1 | H23-2 | H23-3 | H23-4 | H23-5 | H23-6 |
|-------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 実測導入張力 (kN) | | 567.0 | 292.6 | 577.1 | 570.7 | 581.1 | 573.3 |
| コンクリート | ひずみ (μ) | 271.5 | 133.7 | 221.9 | 245.2 | 276.1 | 222.6 |
| | 導入力 (kN) | 525.4 | 133.7 | 221.9 | 245.2 | 276.1 | 222.6 |
| 鉄筋 | 上筋歪 (μ) | 296.7 | 138.1 | 230.0 | 215.2 | 273.8 | 225.7 |
| | 下筋歪 (μ) | 301.0 | 148.1 | 238.6 | 305.2 | 292.4 | 239.0 |
| | 導入力 (kN) | 24.4 | 11.7 | 131.5 | 72.9 | 23.1 | 130.4 |
| 分担率 (%) | | 96 | 96 | 76 | 87 | 96 | 76 |

表 6.4.1-2 導入力と分担率 (シリーズⅡ)

| | | H24-1 | H24-2 | H24-3 | H24-5 | H24-7 |
|-------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 実測導入張力 (kN) | | 590.9 | 591.5 | 589.9 | 587.7 | 585.8 |
| コンクリート | ひずみ (μ) | 238.6 | 197.0 | 219.4 | 189.2 | 220.8 |
| | 導入力 (kN) | 547.2 | 438.4 | 503.2 | 421.0 | 509.0 |
| 鉄筋 | 上筋歪 (μ) | 60.5 | 64.5 | 253.0 | 220.5 | 0.0 |
| | 下筋歪 (μ) | 434.5 | 316.5 | 246.0 | 217.5 | 0.0 |
| | 導入力 (kN) | 20.4 | 106.8 | 20.6 | 122.8 | 0.0 |
| 分担率 (%) | | 96 | 80 | 96 | 77 | 100 |

軸方向鉄筋を控除したコンクリートの純断面積 A_c を表 6.4.2 に示す。なお、鉄筋比および換算率（プレストレス有効率の計算値）は、次式によって算出した。

$$\text{鉄筋比} = A_s / A_{co}$$

$$\text{換算率} = A_c / (A_c + n \times A_s)$$

A_{co} : コンクリートの総断面積 (= $280 \times 300 = 84,000 \text{ mm}^2$)

A_c : コンクリートの純断面積 (シース孔・鉄筋分を控除)

$$A_{co} = 280 \times 300 - \pi / 4 \times 40^2 - A_s$$

n : 導入時のヤング係数比

$$n = E_s / E_c = (20.0 \times 10^4) / (2.47 \times 10^4) = 8.10$$

表 6.4.2 鉄筋比および換算比

| | | H23-1,2,5 H24-1,3 | H23-4 | H23-3,6 H24-2,5 | H24-7 |
|---------------------------|--------------|----------------------|--------|--------------------|--------|
| 配筋量 (本) | 上筋 | D10×3 | D19×5 | D19×5 | — |
| | 下筋 | D10×3 | D10×3 | D19×5 | — |
| 断面積 (mm ²) | コンクリート A_c | 82,315 | 81,097 | 79,878 | 82,743 |
| | 鉄筋 A_s | 428 | 1,646 | 2,865 | 0 |
| 鉄筋比 | (%) | 3.4 | 2.0 | 0.5 | 0.0 |
| 換算率 | (%) | 96 | 86 | 77 | 100 |

コンクリートひずみの実測値から算出したプレストレス有効率(表 6.4.1 の分担率)と、配置鉄筋量から計算したプレストレス有効率(表 6.4.2 の換算率)を比較すると、図 6.4.1 のとおりで、コンクリートに導入されるプレストレスは軸方向鉄筋比を用いて精度よく推定できた。

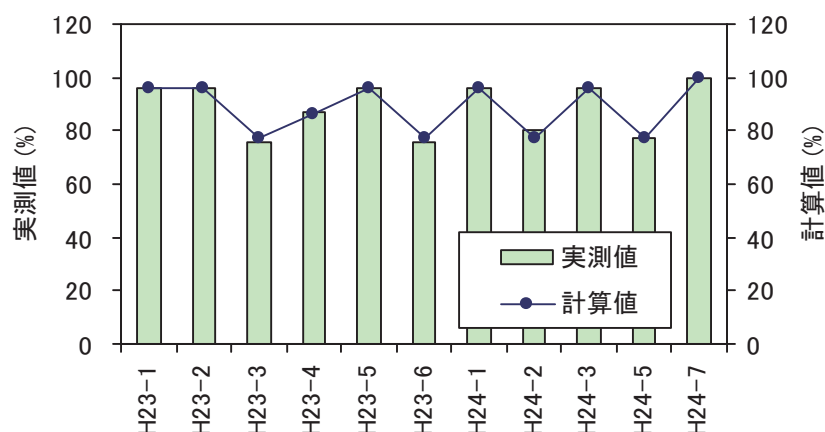


図 6.4.1 プレストレスの有効率

6.5 各要因がクリープに与える影響

乾燥収縮の影響を控除したクリープ係数 $\varphi_{c1}(t)$ を、以下の方法により算出する。なお、波線を付したひずみ・張力は測定データである。なお、ひずみとクリープ係数の経時変化のイメージは、図 6.5.1 のとおり。

- ・クリープ係数

$$\varphi_{c1}(t) = \int \{ \Delta \varepsilon_{c1}(t) / (\sigma_{cp}(t) / E_c) \} dt$$

$$= [\{ \varepsilon_{c1}(t) - \varepsilon_{c1}(t-1) \} / (\sigma_{cp}(t) / E_c)]$$

$\varepsilon_{c1}(t)$: コンクリート累加ひずみ (乾燥収縮を控除)

$\sigma_{cp}(t)$: コンクリート弾性応力

E_c : コンクリートヤング係数 (材齢 28 日)

[] は、 $dt=1 \sim t$ (日) までの載荷後日数間の 1 日毎の累加

- ・コンクリートひずみ (乾燥収縮分を控除)

$$\varepsilon_{c1}(t) = \varepsilon_{ct}(t) - \varepsilon_{cs}(t)$$

$\varepsilon_{ct}(t)$: コンクリート累加ひずみ (全ひずみ)

$\varepsilon_{cs}(t)$: " (乾燥収縮分)

累加ひずみは、再緊張時の弾性ひずみ (ε_1) を除外したひずみ

- ・コンクリート弾性応力 (着目ひずみ位置)

$$\sigma_{cp}(t) = P_t(t) / A_{cs} + P_t(t) \times e_{ps} / Z_{cs}$$

$P_t(t)$: 鋼材張力

e_{ps} : 鋼材偏心量 (換算断面)

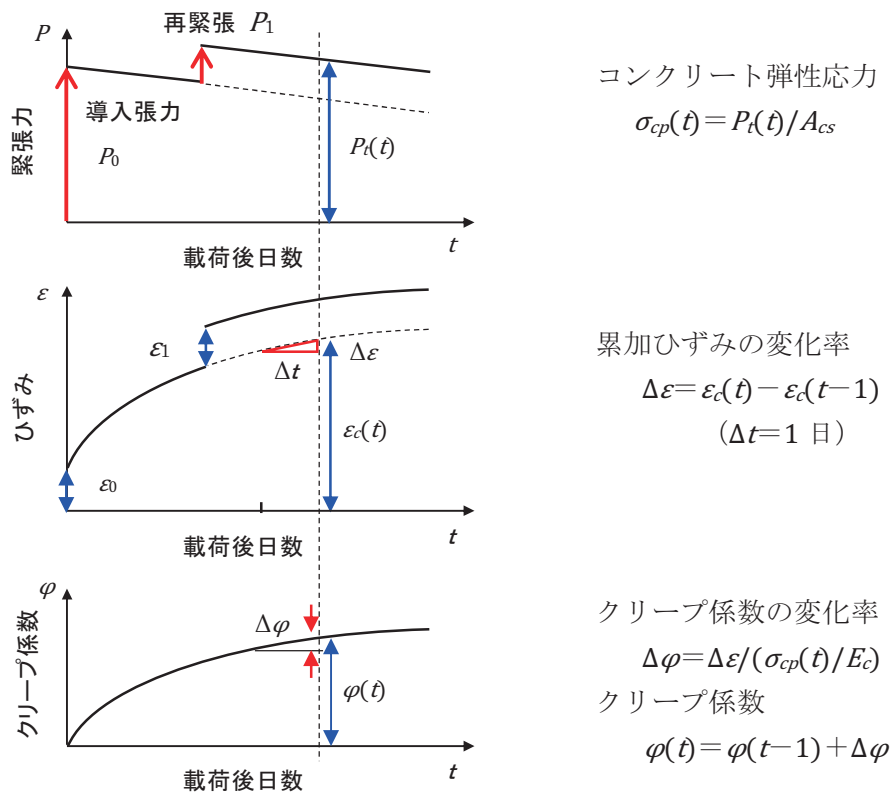


図 6.5.1 ひずみとクリープ係数の経時変化

6.5.1 コンクリート配合がクリープに与える影響

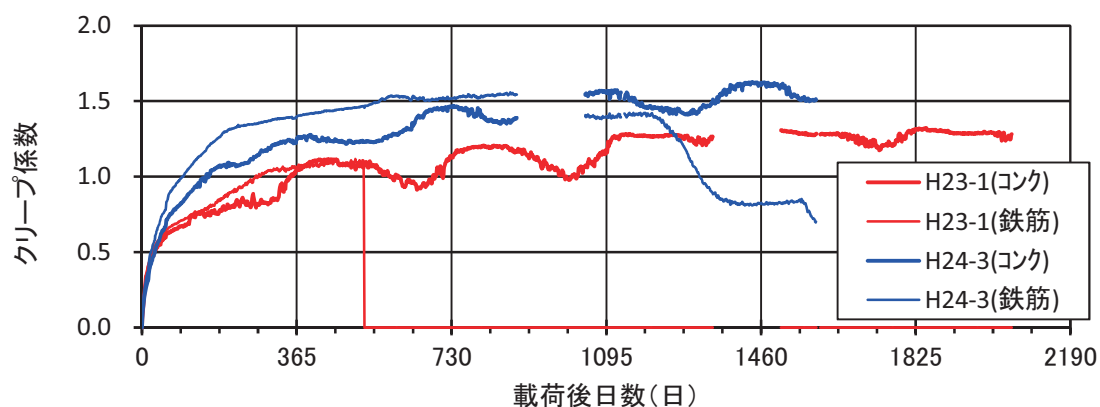
コンクリート配合の違いによって、クリープの進展に違いが生じるかを比較した。

シリーズ I とシリーズ II で同一配筋・緊張力である H23-1 (W/C=40%) と H24-3 (W/C=43%) で、計測されたコンクリート内部と鉄筋のひずみ値から、導入張力ゼロの供試体 (H23-7, H24-4) で計測された乾燥収縮ひずみを除去したクリープひずみを用いてクリープ係数を算出すると、表 6.5.1 に示すとおりで、経時的にプロットしたグラフが図 6.5.2 である。

鉄筋ひずみから算出したクリープ係数は 1 年後で 1.06 と 1.40 の乖離がある。ひずみ量は図 6.3.9 のようにほぼ同程度であるが、テストピースで計測したヤング係数を (H23-1 : $E_c=2.47 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、H24-3 : $E_c=3.23 \times 10^4 \text{N/mm}^2$) を用いてクリープ係数を算出しており、ヤング係数が同程度であれば算出されるクリープ係数は同程度となる。なお、6.3.1 に示したとおり、H23-1 (シリーズ I) のヤング係数は、圧縮強度に比べて小さい傾向 (通常の 3/4 程度) であり、クリープ係数の差はこのヤング係数の違いによるものである。ヤング係数の比とクリープ係数の比は 1.3 程度で、ヤング係数の違いによりクリープ係数に差はあるものの、365 日以降は、同程度の比率で推移している。このため、コンクリートの配合の違い (W/C の違い) による影響はわずかであるといえる。

表 6.5.1 クリープ係数の比較 (配合の違い : H23-1・H24-3)

| | | 緊張後 | 30 日 | 90 日 | 180 日 | 365 日 | 730 日 | 1095 日 |
|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| H23-1 | コンク内部 | 0.00 | 0.51 | 0.67 | 0.75 | 1.04 | 1.13 | 1.17 |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.54 | 0.71 | 0.85 | 1.06 | — | — |
| H24-3 | コンク内部 | 0.00 | 0.50 | 0.82 | 1.07 | 1.25 | 1.46 | 1.55 |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.58 | 0.98 | 1.26 | 1.40 | 1.52 | 1.40 |



H27.07/11 (1347 日) ~ H27.12/17 (1506 日) は計測データなし。

図 6.5.2 クリープ係数 (配合の違い : H23-1・H24-3)

6.5.2 導入軸力がクリープに与える影響

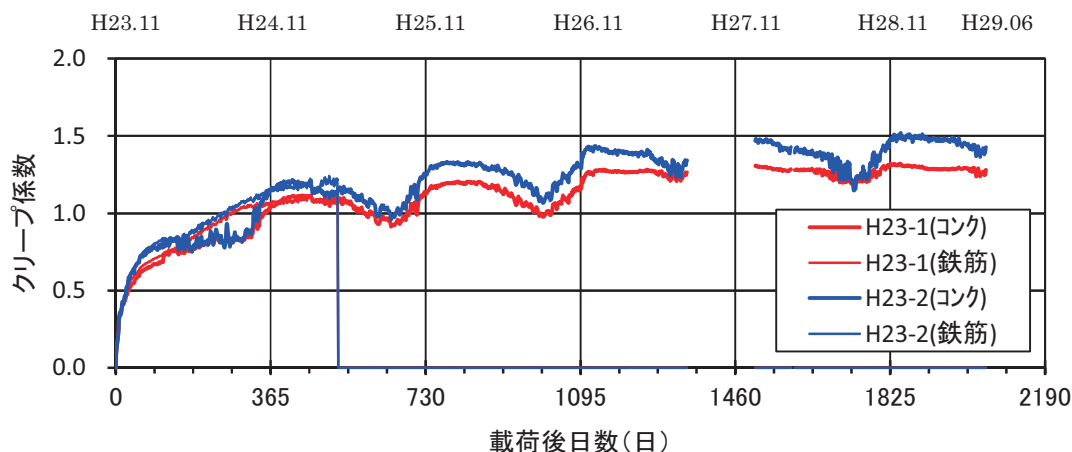
コンクリートに導入した軸力の違いによって、クリープの進展に違いが生じるかを比較した。

シリーズ I の H23-1 (軸力=569kN) と H23-2 (軸力=285kN) で計測された鉄筋とコンクリート内部のひずみ値から、無載荷供試体 (H23-7) で計測された乾燥収縮ひずみを除去したクリープひずみを用いてクリープ係数を算出すると、表 6.5.2 に示すとおりで、経時的にプロットしたグラフが図 6.5.3 である。

導入軸力がクリープ係数に与える影響はわずかであるといえる。

表 6.5.2 クリープ係数の比較 (導入軸力の違い : H23-1・H23-2)

| | | 緊張後 | 30日 | 90日 | 180日 | 365日 | 730日 | 1095日 | |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| H23-1 | コンク内部 | 0.00 | 0.51 | 0.67 | 0.75 | 1.04 | 1.13 | 1.17 | |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.54 | 0.71 | 0.85 | 1.06 | — | — | |
| H23-2 | コンク内部 | 0.00 | 0.59 | 0.78 | 0.75 | 1.15 | 1.25 | 1.30 | |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.58 | 0.80 | 0.89 | 1.16 | — | — | 下筋のみ |



H27.07/11 (1347日) ~ H27.12/17 (1506日) は計測データなし。

図 6.5.3 クリープ係数 (導入軸力の違い : H23-1・H23-2)

6.5.3 鉄筋配置（軸方向鉄筋）がクリープに与える影響

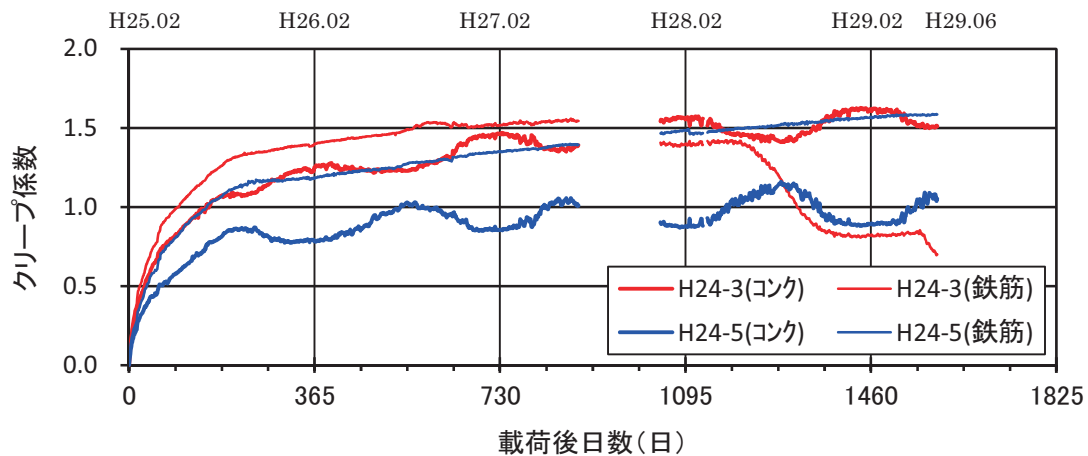
軸方向に配置する鉄筋量の違いによって、クリープの進展に違いが生じるかを比較した。

シリーズⅡの H24-3（軸筋=D10×6本）と H24-5（軸筋=D19×10本）で計測された鉄筋とコンクリート内部のひずみ値から、無載荷供試体（H24-4, H24-6）で計測された乾燥収縮ひずみを除去したクリープひずみを用いてクリープ係数を算出すると、表 6.5.3 に示すとおりで、経時的にプロットしたグラフが図 6.5.4 である。

軸方向鉄筋の配筋量が多いと、クリープ係数が小さくなる傾向があるといえる。

表 6.5.3 クリープ係数の比較（軸方向鉄筋量の違い：H24-3・H24-5）

| | | 緊張後 | 30日 | 90日 | 180日 | 365日 | 730日 | 1095日 |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| H24-3 | コンク内部 | 0.00 | 0.50 | 0.82 | 1.07 | 1.25 | 1.46 | 1.55 |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.58 | 0.98 | 1.26 | 1.40 | 1.52 | 1.40 |
| H24-5 | コンク内部 | 0.00 | 0.36 | 0.58 | 0.81 | 0.78 | 0.86 | 0.88 |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.46 | 0.80 | 1.06 | 1.18 | 1.35 | 1.48 |



H27.07/11（1347日）～H27.12/17（1506日）は計測データなし。

図 6.5.4 クリープ係数（軸方向鉄筋量の違い：H24-3・H24-5）

6.5.4 鉄筋配置（横方向鉄筋）がクリープに与える影響

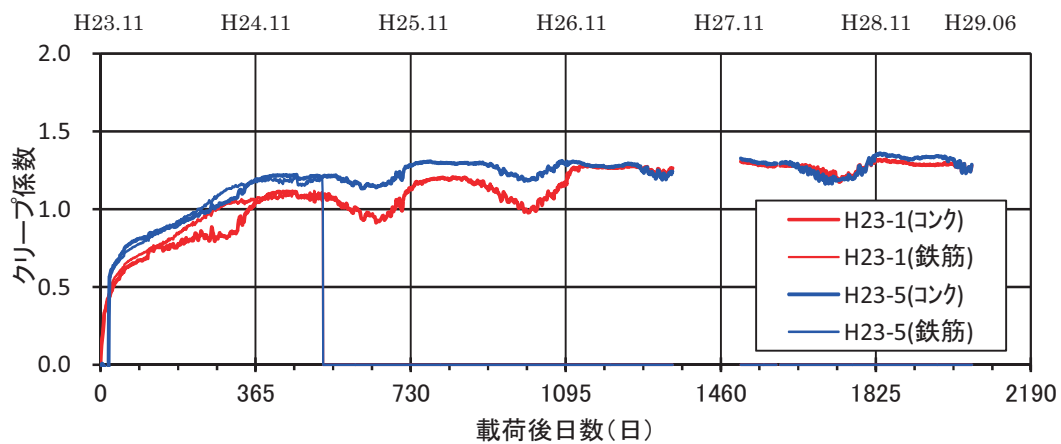
横方向に配置する鉄筋量の違いによって、クリープの進展に違いが生じるかを比較した。

シリーズ I の H23-1（横筋=D13ctc150）と H23-5（横筋=D16ctc75）で計測された鉄筋とコンクリート内部のひずみ値から、無載荷供試体（H23-7）で計測された乾燥収縮ひずみを除去したクリープひずみを用いてクリープ係数を算出すると、表 6.5.4 に示すとおりで、経時的にプロットしたグラフが図 6.5.5 である。

横方向鉄筋の配筋量がクリープ係数に与える影響はわずかであるといえる。

表 6.5.4 クリープ係数の比較（横方向鉄筋量の違い：H23-1・H23-5）

| | | 緊張後 | 30日 | 90日 | 180日 | 365日 | 730日 | 1095日 |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| H23-1 | コンク内部 | 0.00 | 0.51 | 0.67 | 0.75 | 1.04 | 1.14 | 1.17 |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.54 | 0.71 | 0.85 | 1.06 | — | — |
| H23-5 | コンク内部 | 0.00 | 0.64 | 0.81 | 0.89 | 1.19 | 1.29 | 1.29 |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.62 | 0.78 | 0.92 | 1.18 | — | — |



H27.07/11（1347日）～H27.12/17（1506日）は計測データなし。

図 6.5.5 クリープ係数（横方向鉄筋量の違い：H23-1・H23-5）

6.5.5 鋼材配置（偏心量）がクリープに与える影響

鋼材配置（偏心量）の違いによって、クリープの進展に違いが生じるかを比較した。

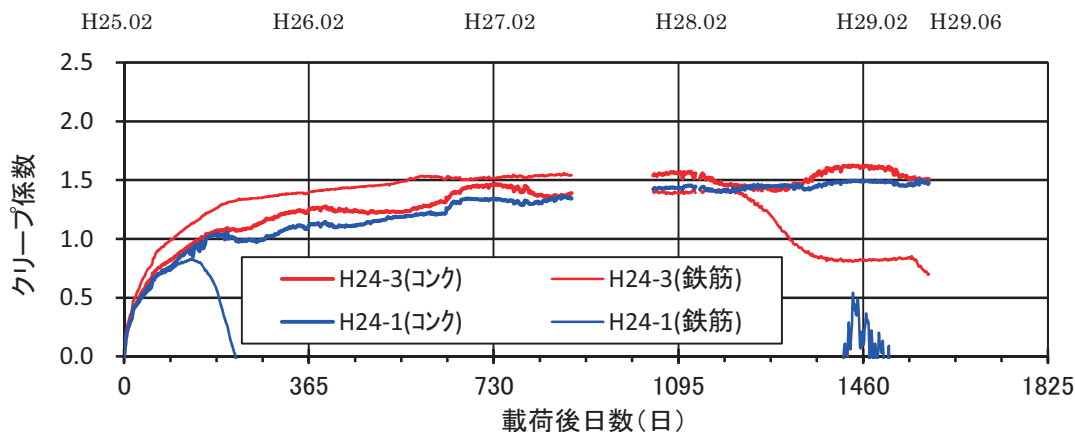
シリーズⅡの H24-3（偏心=0）と H24-1（偏心=H/6）で計測された鉄筋とコンクリート内部のひずみ値から、無載荷供試体（H24-4）で計測された乾燥収縮ひずみを除去したクリープひずみを用いてクリープ係数を算出すると、表 6.5.5 に示すとおりで、経時的にプロットしたグラフが図 6.5.6 である。

鋼材配置がクリープ係数に与える影響はわずかであるといえる。

表 6.5.5 クリープ係数の比較（鋼材偏心量の違い：H24-3・H24-1）

| | | 緊張後 | 30日 | 90日 | 180日 | 365日 | 730日 | 1095日 | 備考 |
|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|----|
| H24-3 | コンク内部 | 0.00 | 0.50 | 0.82 | 1.07 | 1.25 | 1.46 | 1.55 | |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.58 | 0.98 | 1.26 | 1.40 | 1.52 | 1.40 | ※ |
| H24-1 | コンク内部 | 0.00 | 0.47 | 0.76 | 1.04 | 1.12 | 1.34 | 1.43 | |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.46 | 0.73 | 0.60 | -0.39 | -0.77 | -0.56 | ※ |

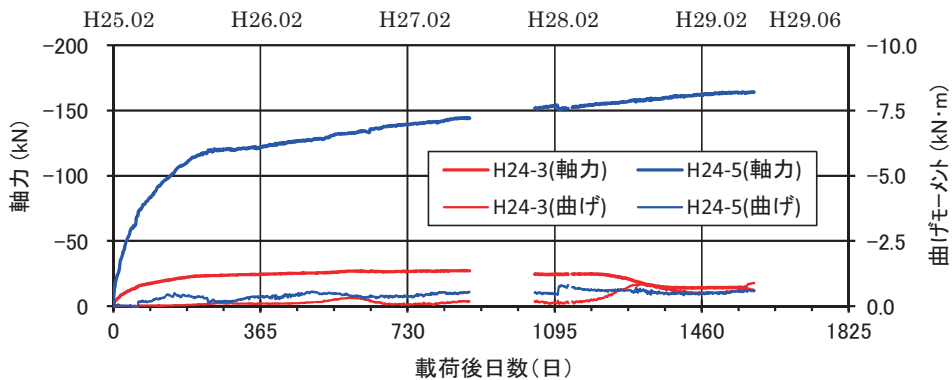
※鉄筋は、図 6.3.8 に示した異常値を含んだ集計



H27.07/11（1347日）～H27.12/17（1506日）は計測データなし。

図 6.5.6 クリープ係数（鋼材偏心量の違い：H24-3・H24-1）

H24-3 と H24-5 の鉄筋ひずみを用いて鉄筋拘束力（軸力N・曲げモーメントM）を算出すると、図 6.5.7 に示すとおり。



H27.07/11 (1347 日) ~ H27.12/17 (1506 日) は計測データなし。

図 6.5.7 鉄筋拘束力（鉄筋ひずみから算出）

配置鉄筋量から求めた鉄筋拘束による軸力を、クリープ係数を $\varphi=1.3$ （P C 鋼材が図心配置、鉄筋配置が中立軸対象、グラウト未充填なので P C 鋼材は無視）として算出する。

- 鋼材図心位置における持続荷重（緊張力 $P=569\text{kN}$ ）によるコンクリート応力度

$$A_{c+s} = 300 \times 280 - \pi/4 \times 40^2 + A_s \times (E_s/E_c - 1)$$

$$E_s = 20.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2, \quad E_c = 2.47 \times 10^4 \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{cp} = P/A_{c+s}$$

- クリープ（ $\varphi=1.3$ ）による鋼材応力度の減少量

$$\alpha = E_s/E_c \times A_s \times (1/A_{c+s} + e_p^2/I_{c+s})$$

$$\Delta\sigma_p = \{E_s/E_c \times \varphi \times \sigma_{cp} + E_s \times \varepsilon_s\} / \{1 + \alpha \times (1 + \varphi/2)\}$$

∴ 鋼材偏心量： $e_p=0$ ，乾燥収縮ひずみ： $\varepsilon_s=0$

- 鉄筋拘束による軸力

$$N = -A_s \times \Delta\sigma_p$$

H24-3（軸方向鉄筋=D10×6本）およびH24-5（軸方向鉄筋=D19×10本）の配置鉄筋量から算出した鉄筋拘束による軸力は、表 6.5.6 に示すとおりで、鉄筋ひずみから算出した鉄筋拘束による軸力と同程度である。

表 6.5.6 鉄筋拘束力（配置鉄筋量から算出）

| | H24-3 | H24-5 |
|---|--------|---------|
| 鉄筋断面積 A_s (mm ²) | 428 | 2,865 |
| コンクリートの換算断面積 A_{c+s} (mm ²) | 85,780 | 103,080 |
| 持続荷重による応力度 σ_{cp} (N/mm ²) | 6.63 | 5.52 |
| クリープによる鋼材応力減少 $\Delta\sigma_p$ (N/mm ²) | 65.5 | 42.4 |
| 配置鉄筋量から算出した軸力 N (kN) | -28.0 | -121.5 |
| 鉄筋ひずみから算出した軸力 N (kN) | -24.4 | -121.4 |

鉄筋拘束力を控除したひずみ ε を算出する。

- ・鉄筋拘束力によるコンクリート応力度 σ_{ci} (i : 断面高さ毎)

$$\sigma_{ci} = N/A_c + M/(I_c/Y_i)$$

A_c, I_c : 断面積, 断面 2 次モーメント

Y_i : 図心から応力着目位置までの高さ

- ・コンクリートひずみ ε_{ci} (i : 断面高さ毎)

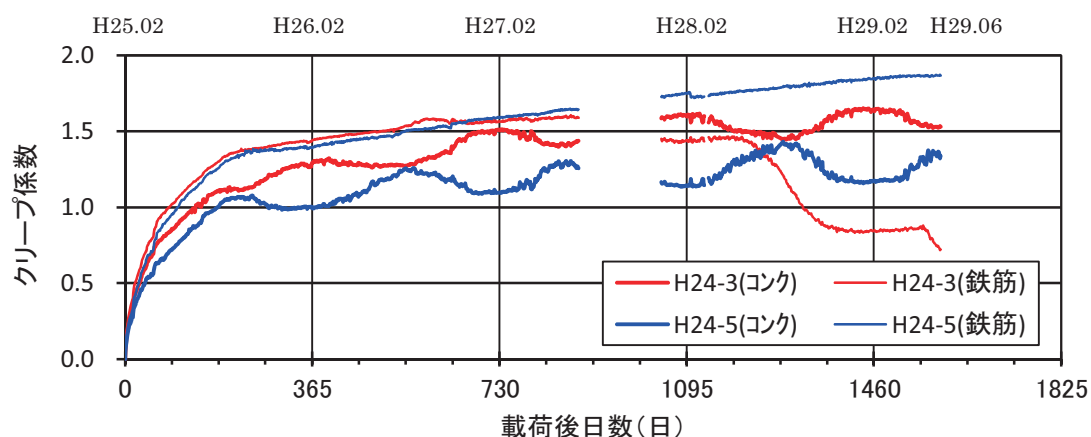
$$\varepsilon_{ci} = \sigma_{ci}/E_c$$

シリーズⅡの H24-3 (軸方向鉄筋=D10×6 本) と H24-5 (軸方向鉄筋=D19×10 本) で計測された鉄筋とコンクリート内部のひずみ値 (乾燥収縮ひずみを控除) から、前述した方法で算出した鉄筋拘束の影響によるひずみを差し引いて、クリープ係数を算出すると表 6.5.7 に示すとおりで、経時的にプロットしたグラフが図 6.5.8 である。

鉄筋拘束の影響を控除すると、H24-5 のコンクリートひずみから算出したクリープ係数がやや小さいが、その他のクリープ係数は、軸方向鉄筋の配筋量に関わらず同程度といえる。

表 6.5.7 クリープ係数の比較 (軸方向鉄筋量の違い: 鉄筋拘束を控除)

| | | 緊張後 | 30 日 | 90 日 | 180 日 | 365 日 | 730 日 | 1095 日 |
|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| H24-3 | コンク内部 | 0.00 | 0.52 | 0.85 | 1.11 | 1.29 | 1.51 | 1.60 |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.60 | 1.01 | 1.29 | 1.44 | 1.56 | 1.44 |
| H24-5 | コンク内部 | 0.00 | 0.46 | 0.72 | 1.00 | 0.99 | 1.10 | 1.14 |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.54 | 0.95 | 1.25 | 1.39 | 1.59 | 1.75 |



H27.07/11 (1347 日) ~ H27.12/17 (1506 日) は計測データなし。

図 6.5.8 クリープ係数 (軸方向鉄筋の違い: 鉄筋拘束力を控除)

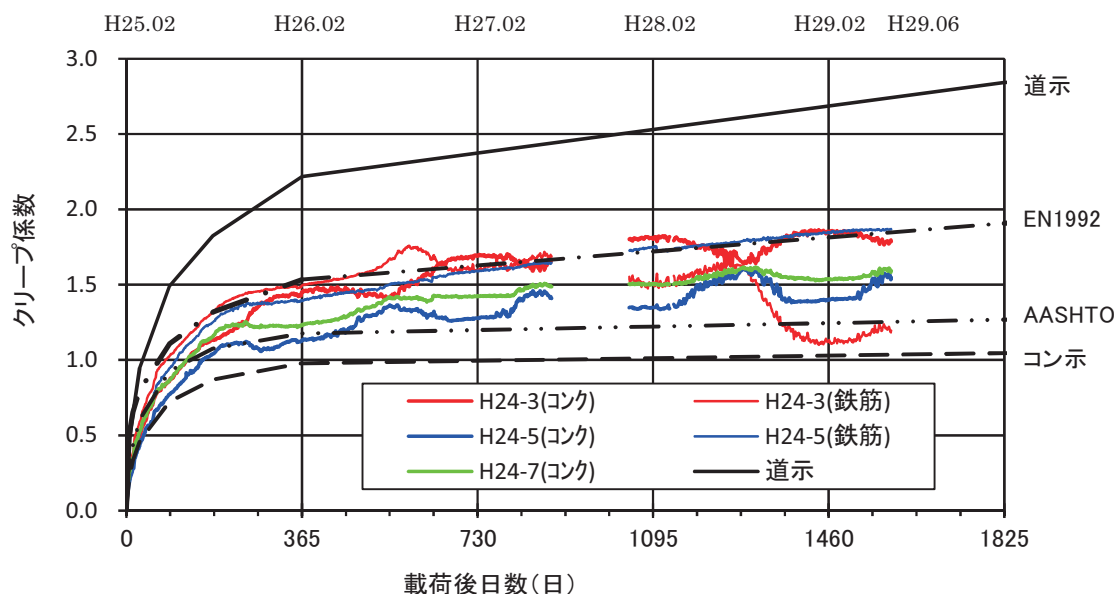
6.6 設計基準類クリープ予測式との比較

本実験で計測されたひずみには、乾燥収縮や鉄筋拘束の影響が含まれている。これらの影響を控除したクリープひずみから算出したクリープ係数は、表 6.6.1 に示すとおりで、経時的にプロットしたグラフが図 6.6.1 である。

軸方向鉄筋量 (H24-3 : 3.4%、H24-5 : 0.5%、H24-7 : 0.0%) の違いに関わらず、クリープ係数は、1 年後で 1.3 程度 [1.13~1.44] である。これは、道路橋示方書¹⁾ [2.11] の約 6 割、平成 8 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]⁴⁾ [0.95] の 1.3 倍程度で、欧米の EN1992⁶⁾ [1.49] や AASHTO⁷⁾ [1.15] に近い。

表 6.6.1 クリープ係数の算出 (乾燥収縮・鉄筋拘束を控除)

| | | 緊張後 | 30 日 | 90 日 | 180 日 | 365 日 | 730 日 | 1095 日 |
|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| H24-3 | コンク内部 | 0.00 | 0.52 | 0.88 | 1.21 | 1.44 | 1.69 | 1.80 |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.60 | 1.01 | 1.29 | 1.44 | 1.60 | 1.52 |
| H24-5 | コンク内部 | 0.00 | 0.46 | 0.77 | 1.04 | 1.13 | 1.28 | 1.35 |
| | 鉄筋 | 0.00 | 0.54 | 0.95 | 1.25 | 1.39 | 1.59 | 1.75 |
| H24-7 | コンク内部 | 0.00 | 0.54 | 0.87 | 1.16 | 1.23 | 1.42 | 1.50 |



H27.07/11 (1347 日) ~ H27.12/17 (1506 日) は計測データなし。

図 6.6.1 クリープ係数の比較

6.7 まとめ

クリープ載荷試験によって、以下の事項が判明した。

(1) 鉄筋拘束の影響について

- ・ コンクリートに生じるひずみは、軸方向鉄筋量が多いほど小さくなる傾向がある。
- ・ 緊張によってコンクリートに導入されるプレストレスは、軸方向鉄筋をコンクリート換算した鉄筋換算断面を用いることで一定程度の確からしさを推定できる。

コンクリートに生じるひずみは、軸方向鉄筋量の影響を受けることが実験により確認された。鉄筋の配筋量が多い場合、コンクリートのひずみに与える影響も大きくなるため、鉄筋がクリープや乾燥収縮、プレストレスを拘束する影響を考慮した設計を行わないと、コンクリートと鉄筋のひずみ差により生じる引張力やプレストレスを鉄筋が分担することによるプレストレスの導入効率の低下が無視できない程度まで大きくなり、実構造物に設計で想定している以上の引張応力度が生じる懸念がある。このため、応力度の算出に配筋量の影響を考慮することで、より設計精度の向上が可能になると考えられる。

(2) クリープ係数について

- ・ 鉄筋拘束の影響を控除したクリープ係数は、軸方向鉄筋量の違いに関わらずほぼ同じで、欧米基準のクリープ係数に近い値である。

各基準のクリープ予測式で算出した値を比較すると、道路橋示方書¹⁾のクリープ値は、平成8年制定コンクリート標準示方書[設計編]⁴⁾の2倍以上で、欧米基準は両者の中間である。道路橋示方書では、計算上、実際以上のクリープ係数を見込んでおり、緊張力のロスに関して安全側の設計がなされるようになっていると考えられる。

(1)(2)を踏まえ、次章では、従来の設計手法(クリープ係数=2.6、鉄筋拘束を無視)と実構造に近い状態(クリープ係数=1.3、鉄筋拘束を考慮)の設計結果を比較して、鉄筋拘束とクリープ係数の影響度を検証することとする。

【6章 参考文献】

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，2012年3月
- 2) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，1978年1月
- 3) 公益社団法人 土木学会：平成3年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，1991年
- 4) 公益社団法人 土木学会：平成8年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，1996年
- 5) 公益社団法人 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，2012年
- 6) COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION : Eurocode2:Design of concrete structures, 1992
- 7) American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS, 2012
- 8) 西澤紀昭・新井英雄・北国秀一・酒井秀昭：P R C 橋の設計，技報堂出版，pp. 65-74, 1993年