

連続合成鋼 2 主桁橋 PC 床版の乾燥収縮・クリープによる経時変化

Time-Dependent Creep and Shrinkage Behavior of A Continuous Composite Two Main Girders Bridge

数藤久幸*, 若林保美**, 岩田節雄***, 松野 進****, 安田和宏****, 松井繁之*****

Hisayuki SUDO, Yasumi WAKABAYASHI, Setsuo IWATA, Susumu MATSUNO, Kazuhiro YASUDA and Shigeyuki MATSUI

*工修 日立造船(株) 鉄構・建機事業本部 橋梁設計部 (〒559-8559 大阪市住之江区南港北 1-7-89)

** 日立造船(株) 鉄構・建機事業本部 橋梁設計部 (〒559-8559 大阪市住之江区南港北 1-7-89)

***工博 日立造船(株) 技術研究所 鉄構・建機技術研究センター (〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11)

****工修 日立造船(株) 技術研究所 鉄構・建機技術研究センター (〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11)

*****工博 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Recently, rational composite bridges consisting of two main girders are apt to be adopted for the highway bridges in order to reduce construction costs. To decrease the negative moment at the intermediate support, prestressing the slab in longitudinal direction is required, such as “Tendon system” in lateral direction and “Jack up down system” in longitudinal direction. But, there is no design data for prestress loss in the prestressed deck slab due to creep and shrinkage.

In this paper, the authors carried out half sized model indoors tests for one year and FEM analysis to investigate the prestress loss of the cast in place type prestressed concrete slab. It was clarified that the prestress loss in longitudinal direction was about 40% and FEM creep analysis was available to investigate the three dimensional time dependent creep and shrinkage behavior of a PC deck slab.

Key word: creep and shrinkage, composite two main girder, prestressed concrete slab, FEM analysis

1. はじめに

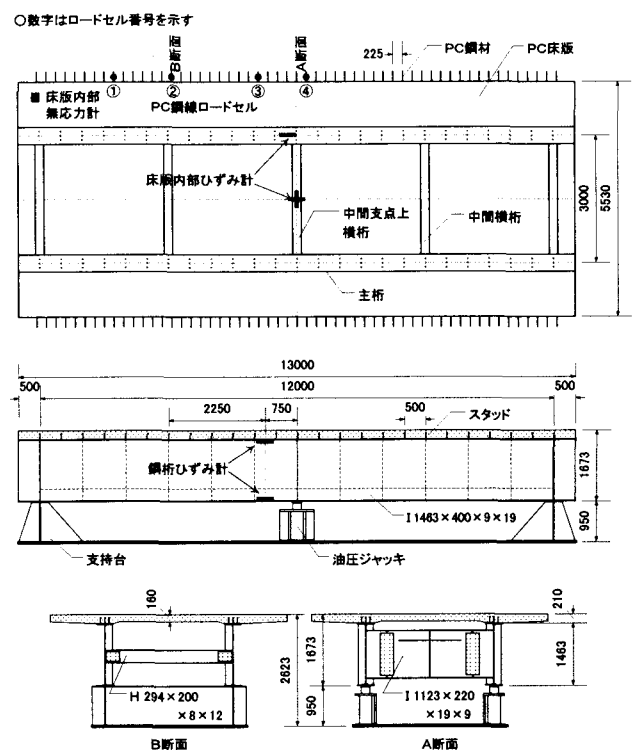
最近、合理化された橋梁形式として現場打ち PC 床版を有する連続合成鋼 2 主桁橋が建設されてきている。その特徴として、床版に 2 方向のプレストレスを導入することが挙げられる。一つは、床版支間の増大に対応するための橋軸直角方向への PC 鋼材によるプレストレス導入であり、もう一つは中間支点部の負曲げモーメントに対応するためのジャッキアップダウンによる橋軸方向へのプレストレス導入である。

プレストレスがコンクリートの乾燥収縮及びクリープによって経時的にどの程度減少するかについては多くの研究が行われている¹⁾。しかし、現在のところ、この連続合成鋼 2 主桁橋の PC 床版のプレストレス損失について計測された例は非常に少ない。また、計測された場合でも気象条件による乱れが大きいため有効なデータになり難く、この種の床版の設計法を検証するためのデータの蓄積が望まれている。

そこで、本研究では、気象条件の影響をなるべく受けないように屋内実験場において中間支点部近傍を取り出した 1/2 縮尺模型を用い、床版に PC 鋼材及びジャッキアップダウンによる 2 方向プレストレスを導入し、乾燥収縮・クリープの経時挙動及びプレストレス損失について 1 年間にわたって長期計測を行った。また、供試体全体の FEM クリープ解析を実施し、試験結果との比較を行ない、残存プレストレスの検討を行った。

2. 供試体及び計測方法

供試体は、図一 1 に示すように中央部に中間支点を含む標準的な連続合成鋼 2 主桁橋の 1/2 縮尺模型である。



図一 実験供試体

1/2 模型ではコンクリート断面が小さいため実物大に比べて乾燥収縮、クリープが大きくなる傾向にあるが、道路橋示方書によるとその影響は10%程度であるので実橋の状態をほぼ再現できるものと考えられる。

床版コンクリートの設計基準強度は 40N/mm^2 とし、早強セメント及びひび割れ防止材として膨張材を使用した。表-1にコンクリートの強度特性を示す。

表-1 コンクリートの強度特性

特性	3日	1週	4週
圧縮強度 σ_c (N/mm^2)	47.2	53.6	56.5
ヤング率 E (N/mm^2)	250	285	300
ポアソン比 ν	0.23	0.24	0.25

橋軸直角方向のプレストレス導入は、材令6日目に12.7φのPC鋼線(SWPR7B)でCCL工法²⁾により行った。PC鋼線1本当たりの設計緊張力は導入直後で112kNである。橋軸方向のプレストレスは、材令14日目に供試体の中間支点をジャッキダウンすることによって行った。

床版内部のひずみ及び温度は、図-1中に示すように中間支点位置の主桁上及び床版支間中央に埋め込み型ひずみゲージを配置して計測した。また、供試体端部の橋軸直角方向プレストレスが導入されていない無応力状態に近い部分に埋め込み型ひずみゲージを配置して乾燥収縮ひずみを計測した。床版及び実験場内の湿度は、湿度計を設置して計測した。

鋼桁のひずみ及び温度は、中間支点部の上フランジ、ウェブ及び下フランジにひずみゲージ及び熱電対を貼付して計測した。

PC鋼材の緊張力は、図中の○印を付した4ヶ所の定着部にロードセルを取り付けて計測した。

計測は、鋼桁のジャッキアップからコンクリート打設、ジャッキダウン及びその後の1年間について計測を一定時間ごとに行った。

また、供試体とは別に幅500mm、長さ3400mm、床版厚160mmに2本のPC鋼材によるプレストレスを導入したものとプレストレスしないものの合計2体のダミー床版についても同様に長期計測を行った。なお、内部の鉄筋は、床版と同一にした。

3. 計測結果

3.1 橋軸直角方向のPC鋼材緊張力の経時変化

PC鋼材緊張力の経時変化を図-2に示す。図のように、緊張力は最初の30日間に大きく減少する。道路橋示方書³⁾に従って乾燥収縮、クリープ及びPC鋼材のリラクゼーション率を5%として緊張力の減少を計算した結果、減少割合は計測値の平均値の方が若干小さくなっている。

計算値では、90日以後の変化が非常に少なくなっている。一方、計測値は90日以後も低下傾向を示していたが、300日後あたりから減少量が少なくなっている。緊張力の最終値は計算値を下回る可能性は少なく、計算値の最終値である97kNに近づいていくものと考えられる。

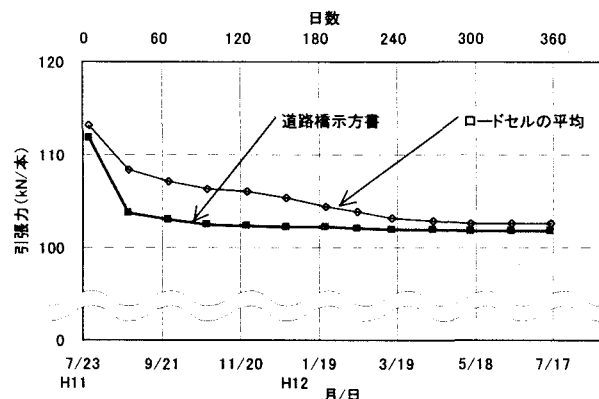


図-2 PC鋼材の緊張力の経時変化

3.2 床版コンクリートのひずみの経時変化

床版コンクリート内部のひずみの材令2日からの経時変化を図-3に示す。また、図-4に実験場内の温度及び湿度変化を示す。なお、データの採取時間は、温度変化が最も安定している午前3時とした。

実験場内の湿度は、冬季で50%、梅雨期で80%、夏季で約65%と変化するが、供試体内部の湿度は、打設直後は約95%であるが、6カ月後には約80%になり、その後ほぼ一定している。

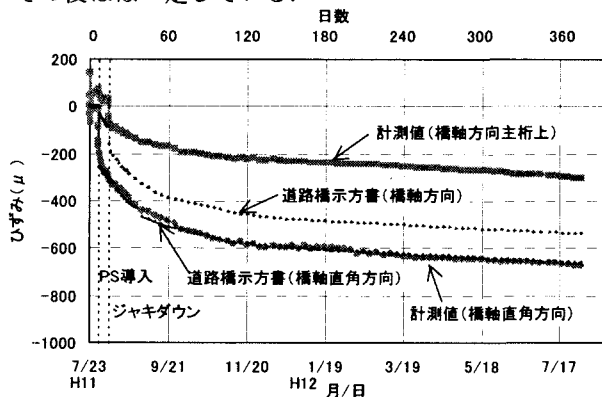


図-3 床版内部のコンクリートひずみの経時変化

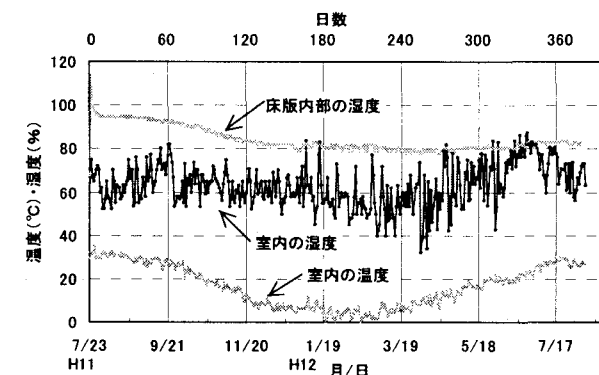


図-4 供試体周囲の温度及び湿度の経時変化

プレストレスの導入量は、橋軸直角方向に 3.2 N/mm²、橋軸方向には主桁上で 2.55 N/mm²であった。

ひずみの変化は、導入初期に大きく時間の経過とともに減少率は低下するが、240 日後からやや減少率が大きくなる傾向が見られる。これは、3 月以降に気温が上昇したためコンクリートの乾燥収縮及びクリープが増進されたものと考えられる。また、1 年後においても減少率は小さくなったもののひずみの経時変化に収束する傾向が見られない。

図中に道路橋示方書に規定されるひずみ量の変化を材令条件 3 日として、また気温及び湿度の計測値を式中に算入して計算した結果を示す。この計算値と計測値を比較した結果、橋軸直角方向のひずみの経時変化は計算値とほぼ一致したが、橋軸方向のひずみの経時変化は計算値の約 1/2 となった。この理由として次の 3 点が考えられる。

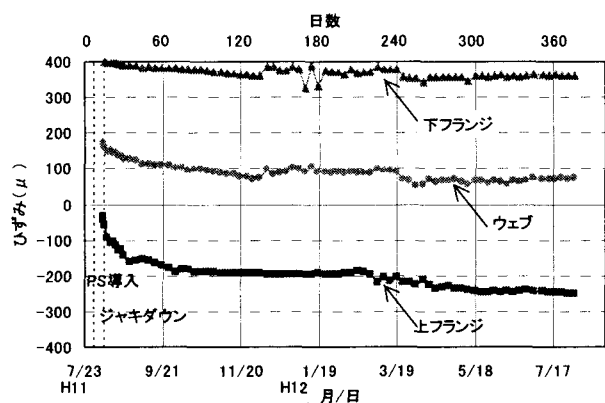
- (1) 橋軸直角方向プレストレス導入時の材令が、橋軸方向の場合よりも 8 日早い。
- (2) 橋軸直角方向の単位断面積当たりのプレストレス量が橋軸方向のそれよりも大きく、ポアソン効果による正の橋軸方向応力が影響した。
- (3) 橋軸方向では主桁との合成による拘束度が大きい。

3.3 鋼桁のひずみの経時変化

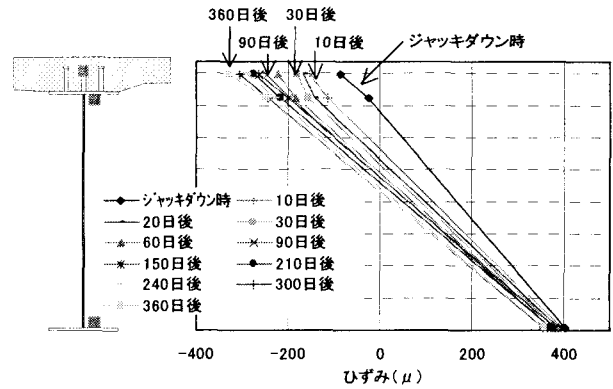
図一5にジャッキダウンからの鋼桁のひずみの経時変化を、図一6に床版内部と鋼桁のひずみ分布の経時変化を示す。

ジャッキダウン時のひずみ分布は、ほぼ直線状になっていて合成桁として一体化していることが分かるが、1 年後でもほぼ直線状を示して合成桁としての合成度が確保されていることが分かる。

ひずみ分布の勾配は、プレストレス導入から 30 日まで変化が大きくその後の変化は少ない。この勾配の変化とともに合成桁の中立軸は、下方に移動している。これはコンクリートの乾燥収縮・クリープによって床版の圧縮ひずみ量が増大したためである。



図一5 鋼桁のひずみの経時変化



図一6 ジャッキダウン後の鋼桁・床版のひずみ分布

4. 橋軸方向残存プレストレス

4.1 残存プレストレスの推定フロー

床版に導入された橋軸方向プレストレス量は経時的に減少していく。しかし、床版の応力度を直接計測することが出来ないため、図一7の算定フローに示すように、埋込型ひずみゲージのひずみ量を乾燥収縮とクリープのひずみ量に分割し、それぞれのひずみ量を道路橋示方書合成桁(Ⅱ. 9)の計算式に代入して残存プレストレスを推定することにした。

ここで、不静定モーメント ΔM は、模型が 2 径間連続合成桁となるので、中間支点位置のジャッキダウン時の変位を用いて計算するもので、クリープによって増加していく。

なお、床版のコンクリート部では、次式を用いた。

$$\Delta \sigma_c = \frac{1}{n} \left(\frac{P_\varphi}{A_{v1}} + \frac{M_\varphi y_{v1}}{I_{v1}} \right) - E_{c1} \frac{\sigma_{c,0}}{E_c} \varphi_1 + \frac{\Delta M y_{v1}}{n_1 I_{v1}} \quad \dots (1)$$

鋼桁部では、次式を用いた。

$$\Delta \sigma_s = \frac{P_v}{A_{v1}} + \frac{M_\varphi y_{v1}}{I_{v1}} + \frac{\Delta M y_{v1}}{I_{v1}} \quad \dots (2)$$

ここで、記号は同示方書参照 1)

不静定モーメント ΔM は、文献⁴⁾に示される 2 径間連続合成桁の断面力の解析例(3)の式から応力変化量 $\Delta \sigma$ を求めた。

$$\Delta X = \frac{3 E_c A_c a_c \delta}{\ell^3} \left(d_c + \frac{r_c^2}{a_c} \right) \frac{2 \varphi_{c,\infty}}{2 + \varphi_{c,\infty}} \quad \dots (3)$$

$$\Delta M = - \frac{\Delta X}{2} \ell \quad \dots (4)$$

$$\Delta \sigma_{cm,c} = \frac{1}{n} \left(\frac{P_\varphi}{A_{v,c}} + \frac{M_\varphi z_{cm,c}}{I_{v,c}} \right) - E_{c,c} \frac{\sigma_{c,0}}{E_c} \varphi_{c,\infty} + \frac{\Delta M}{n \cdot I_{v,c}} z_{cm,c} \quad \dots (5)$$

ここで、 ΔX : 中間支点反力の変化量

他の記号は、文献 2) pp.74~76 参照

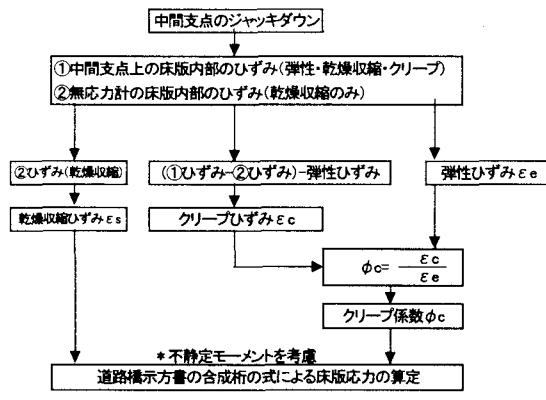


図-7 床版応力の算定フロー

乾燥収縮のひずみ量は、図-8 に示す無応力状態部分の埋込型ひずみゲージ（無応力計）から求めた。また、クリープ計算は、橋軸方向の床版のひずみ計測値から無応力計のひずみ量を差し引いたひずみ量をクリープひずみ量とし、その時点のジャッキダウン時のひずみ量を弾性ひずみ量としてクリープ係数に換算して行った。

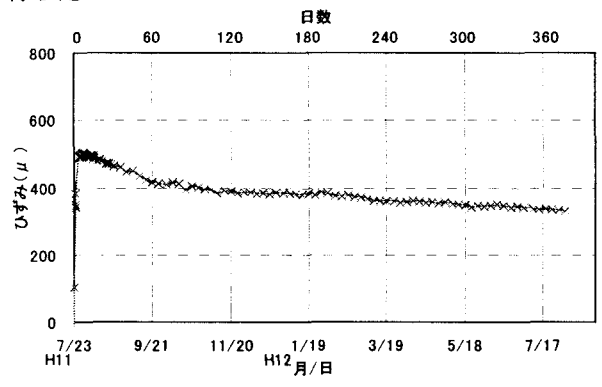


図-8 無応力計のひずみの経時変化

図-9 に乾燥収縮ひずみの計算値と計測値との比較を示す。また、図-10 にクリープ係数の計算値と計測値との比較を示す。

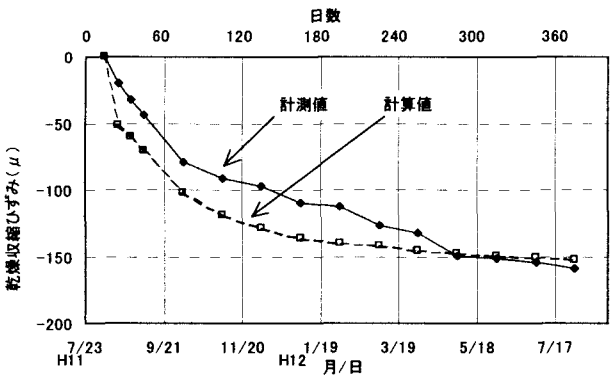


図-9 乾燥収縮ひずみの計算値と計測値との比較

(1)式による応力変化を図-11 に示すが、ジャッキダウン後1年では、道路橋示方書で計算される推定残存プレストレスの計算値は当初の 50%程度に減少する。

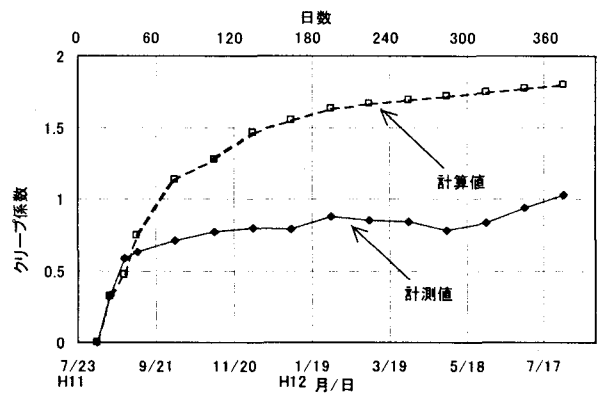


図-10 クリープ係数の計算値と計測値との比較

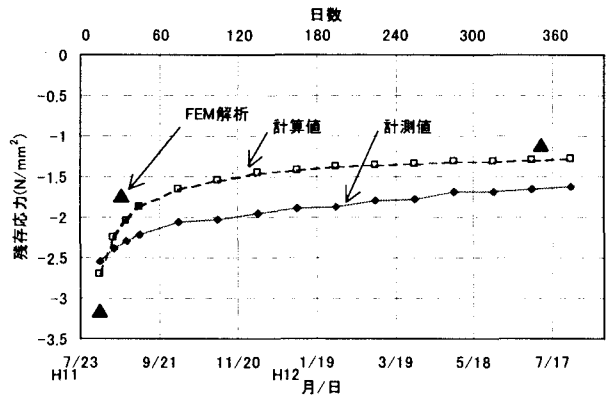


図-11 中間支点上床版内部の応力変化

一方、計測ひずみ量を道路橋示方書に代入した計測値では、当初の 60%程度に減少する結果となった。計測値と計算値とに若干の差が見られるが、210 日目からはその差が少なくなる傾向が見られるため、時間の経過とともに両者は一致すると推定される。また、この計測値は、文献⁵⁾に示される千鳥の沢川橋の解析値にほぼ一致している。

5. 床版のFEMクリープ解析

一般に、床版にはせん断遅れが生じるために、橋軸方向応力は一様ではない。そのため床版の正確なクリープ解析を行うために、床版の応力分布を考慮した3次元FEMクリープ解析を実施した。

クリープ則からクリープひずみ速度 $d\varepsilon/dt$ は次式で表される。

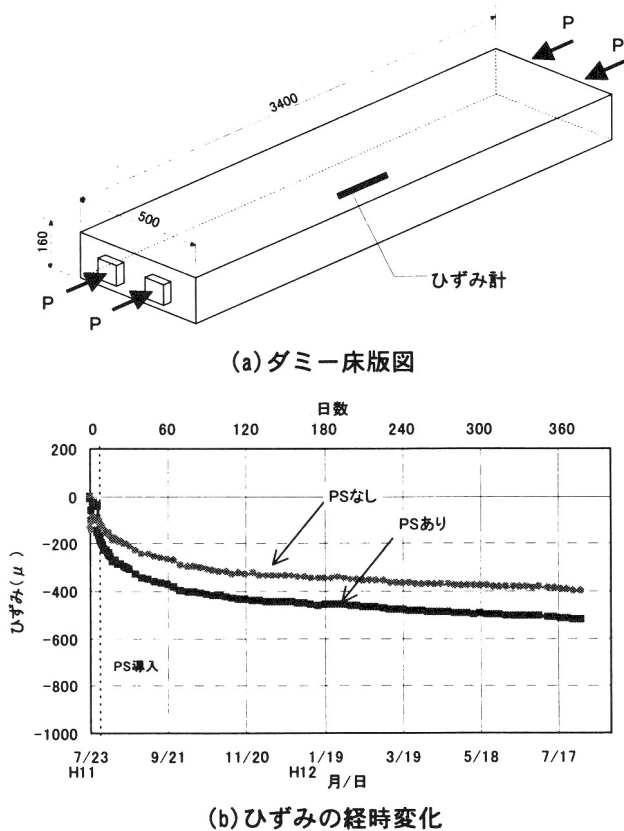
$$\dot{\varepsilon}^{cr} = Aq^n t^m \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 q : ミーゼスの相当応力、 t : 時間

図-12 にダミー床版に供試体と同一のプレストレスを導入した場合のクリープひずみの経時変化を示すが、この曲線に合うよう式中のパラメータを求めた。

$$A=5.2 \times 10^{-5}, \quad n=1.0, \quad m=-0.80$$

これからも分かるように、以上のパラメータにはコンクリートの弾性ひずみ、クリープひずみ、乾燥収縮ひずみなどの全てのひずみ成分が含まれている。



図一12 ダミー床版内部ひずみの経時変化

図一13に供試体のFEM解析モデルを示す。床版はソリッド要素4層、鋼桁をシェル要素及びスタッドをバー要素で分割した。スタッドの要素は、床版内部のソリッド要素の節点に結合し、床版と鋼桁とはスタッドを介してせん断結合されるようになっている。また、床版と鋼桁との間の Z 方向に関しては接触境界条件を用いて隙間が生じる場合には力が伝達されないようにした。

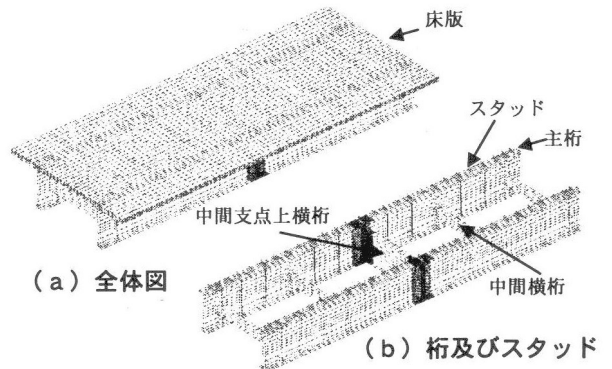
クリープ解析は、主として橋軸方向のプレストレスの変化を観察するためにジャッキダウン時の所定の強制変位のみを中間支点に与えて行った。

ソリッド要素のクリープ特性はダミー床版から得られたパラメータ値を用いた。

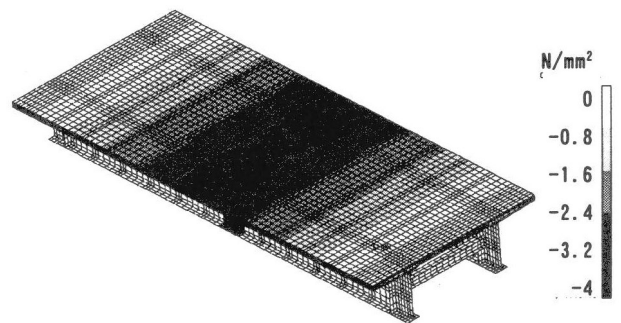
図一14(a)にジャッキダウンからの床版上面応力の経時変化毎の橋軸方向応力分布状態を示すようにジャッキダウン直後では、支間中央に所定の圧縮応力が発生している。しかし、中間支点上の主桁位置に最大応力が発生し、主桁支間中央では応力が低くなっているように導入される圧縮応力は、一様ではないことが分かる。従って、クリープひずみ量についても床版全体に一様ではなく、主桁支間中央の方が主桁上よりも小さいことが推定される。

図一14(b)にジャッキダウンから2週間経過後の床版の応力状態を示すが、クリープひずみの発生によって床版の応力が減少していく状況が現れている。

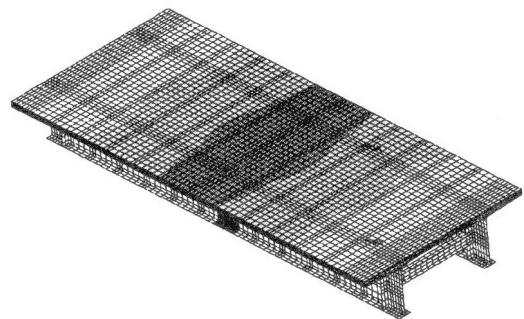
図一14(c)は、340日経過後の床版応力状態であるが、主桁上及び支間中央の応力もほぼ同様な応力状態になっている。また、床版中央の応力は、ほぼ当初の応力の半分程度に低下している。



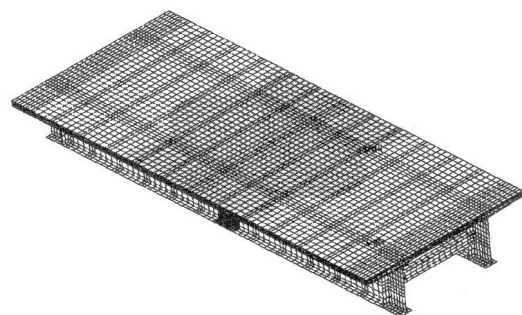
図一13 FEMクリープ解析モデル



(a) ジャッキダウン直後の床版応力状態



(b) 2週間後の床版の応力状態



(c) 340日後の床版上面の応力状態

図一14 クリープによる床版の応力変化

図-15(a)は、床版支間中央のひずみの経時変化を示したものであるが、実験結果に比べて若干ひずみの変化量が小さくなっている。一方、図 15(b)は床版の橋軸方向内部応力分布の変化を示したものであるが、時

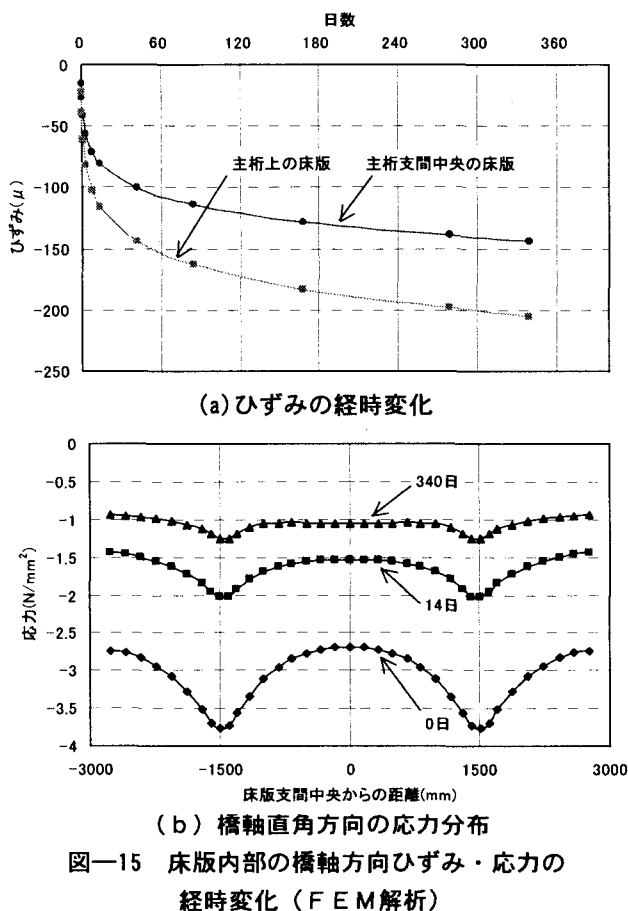


図-15 床版内部の橋軸方向ひずみ・応力の経時変化 (FEM解析)

間の経過とともに応力分布が変化していく様子が良く現れている。図-11 に示される応力と比較するために主桁中心に有効幅をとり平均応力を求めて、これを▲印で図-11 中に示したが、道路橋示方書から推定される内部応力と減少傾向がよく一致した。

6. まとめ

本研究では連続合成鋼 2 主桁橋の現場打ち PC 床版のプレストレスが乾燥収縮・クリープによってどの程度減少していくかを調べるために実橋の 1/2 モデルによる室内実験を行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

(1) ロードセルで計測された橋軸直角方向のプレストレス緊張力は、90 日以後も低下傾向を示していたが、300 日以後は低下傾向が減少し、しだいに道路橋示方書の計算値の最終値に近づくと考えられる。

(2) 橋軸直角方向の床版ひずみの変化量は、道路橋示方書に規定されるひずみの変化量にほぼ一致した。

(3) ジャッキダウンによる橋軸方向のひずみの変化は、道路橋示方書による計算値の約 1/2 であった。これは、PS 導入時の材令、橋軸直角方向の PS のポアソン効果、主桁の拘束効果などが影響していると考えられる。

(4) 残存プレストレス量は、初期プレストレス量に対して、道路橋示方書では 50% になるが、計測値をもとに求めた場合、約 60% に減少することが分かった。

(5) 橋軸方向にプレストレスが一樣でない床版を FEM 解析することによって床版の残存応力分布を推定できることがわかった。

7. おわりに

本研究では、乾燥収縮・クリープによるプレストレス損失を求めるために、室内実験を行ってデータを得ることはできたが、実橋の自然条件下を考えると、直接設計には導入できないため、自然外気中の条件下のものにフィードバックする必要がある。また、今後は 3 次元 FEM クリープ解析手法に回復クリープおよび気象条件などをパラメトリックに取り扱えるプログラムを開発していくこと及び実機試験のデータを整えていくことが必要であると考えている。

なお、中間支点上近傍の残存プレストレスを調査するため、コンクリート表面にひずみゲージを貼付し、その周りに溝を入れることによって開放されるひずみ量を計測する予定である。

謝 辞 残存プレストレスに関して大阪工業大学 栗田章光教授から貴重な助言を頂きましたことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 栗田章光：回復クリープの影響を考慮した鋼・コンクリート合成桁橋の経時挙動に関する研究，大阪市立大学・学位論文，1992
- 2) (株)シー・シー・エル・ジャパン：CCL シングルストランド工法・設計施工規準(1996)
- 3) 日本道路協会，道路橋示方書・同解説，共通編，鋼橋編，平成 8 年
- 4) 鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(1)基礎編：理論編，土木学会 構造工学シリーズ 9-A，1998
- 5) 西尾研二他：連続合成 2 主桁橋（千鳥の沢川橋）のクリープ，乾燥収縮に関する解析的研究，土木学会第 54 回年次学術講演会概要集，1999。