

鋼連続合成2主I桁橋におけるプレストレス導入効果の確認実験

Experimental Study on Effect of the Prestress in Continuous Composite Two I-Girder Bridges

大山 理*, 坂本純男**, 中野幹一郎***, 入部孝夫****, 安川義行*****, 稲葉尚文*****

Osamu Ohyama, Sumio Sakamoto, Kanichiro Nakano, Takao Irube, Yoshiuki Yasukawa, Naofumi Inaba

* 工博, 片山ストラテック(株) 技術本部橋梁設計部技術課 (〒551-0021 大阪府大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

** 片山ストラテック(株) 技術本部橋梁設計部設計二課長 (〒551-0021 大阪府大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

*** (株)東京鐵骨橋梁 技術本部技術開発部技術開発課 (〒108-0023 東京都港区芝浦 4-18-32)

**** (株)東京鐵骨橋梁 生産本部設計部生産設計課長 (〒302-0038 茨城県取手市下高井 1020 番地)

***** 日本道路公団関西支社 建設第二部 構造技術課課長代理 (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20)

***** 日本道路公団関西支社 建設第二部 構造技術課 (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20)

The prestressing method by using a jack-up-down in the steel-concrete continuous composite girder bridge has advantages in points of efficiency, workability and so on. However, the time-dependent behavior of this type of the bridges is not yet clarified perfectly.

The purpose of this study is to evaluate effects due to creep and drying shrinkage behavior in steel-concrete continuous composite girder bridge.

Key Words: continuous composite girder bridge, jack-up-down method, creep, drying shrinkage

キーワード: 連続合成桁橋, ジャッキアップダウン工法, クリープ, 乾燥収縮

1. はじめに

近年のわが国において, 経済性や施工性を追及した橋梁形式として PC 床版連続合成 2 主桁橋が注目されており, 日本道路公団関西支社内の大津呂川橋, 中谷川橋もその一つである。このような連続合成桁橋の場合, 中間支点部では負曲げモーメントが作用するため, コンクリート床版には引張力が作用し, 場合によっては有害なひび割れ発生の原因となる。そのため, この引張応力をコントロールする方策として, コンクリート床版にプレストレスを導入する工法が有効と考えられており, 両橋では, 中間支点部をジャッキアップダウンさせることにより, 橋軸方向にプレストレスを導入する工法を採用している¹⁾。

しかしながら, ジャッキダウン直後のプレストレス導入効果ならびに鋼・コンクリート複合橋梁固有の問題であるコンクリートのクリープおよび乾燥収縮に伴う経時挙動の影響が無視できないにもかかわらず, 正確に評価できていないのが実情であり, 解明する必要がある。なぜなら, 経時挙動現象は, 耐荷力などの終局限界状態での照査には何ら影響を及ぼさないが, コンクリート床版のひび割れ発生の有無, コンクリート床版と鋼桁との過大なズレおよび桁のたわみなどの使用限界状態を照査する際には, 著しい影響を与えるので, 検討が必要不可欠であると言える。

そこで, 両橋において, ジャッキダウン直後のプレストレス導入効果ならびに経時挙動の影響を把握するために, コンクリート打設直後からインターバル計測を行った。さ

らに, 供試体を製作し, クリープ係数, 最終乾燥収縮量など, 合成桁橋を設計する際に必要な基礎データの収集も併せて行った。

本文では, まず, クリープおよび乾燥収縮解析法の基礎について述べる。つぎに, それぞれの橋梁で行ったクリープ係数, 最終乾燥収縮量などの諸係数を把握するための基礎実験の結果, そして最後に, 実橋における測定値と解析値の比較・検討結果について報告する。なお, 解析値は, 床版ブロックごとの材齢の差異を考慮できるプログラムを作成し, そのプログラムを実行することにより得られた結果である。また, クリープ係数, 乾燥収縮量など解析を行う際の諸係数は, 基礎実験から得られた値を用いている。

2. クリープおよび乾燥収縮解析法

2.1 概説

本章では, コンクリートの材齢差の影響をも考慮できるクリープおよび乾燥収縮解析法, 応力-ひずみ関係式ならびに断面力の変化量算定式について述べる²⁾。

2.2 クリープ解析法

コンクリートのクリープ現象とは, コンクリートに一定の荷重を持続して作用させた時に生じる経時的な変形である。両橋の場合, 後死荷重の他にジャッキアップダウンによりプレストレスが導入されているため, 構造物に作用する持続荷重の割合が大きくなり, クリープの影響は無視

することができない重要な性質の 1 つであると考えられる。

ここで、材齢 $t = t_1$ でコンクリートに荷重を載荷した場合の任意材齢 $t (t \geq t_1)$ におけるクリープ係数の値は、これまでの数多くの実験³⁾より、式(1)に示すとおり、指数関数により精度良く近似できることが明らかにされている。

$$\varphi(t-t_1) = \varphi(\infty) \{1 - e^{-k_1(t-t_1)}\} \quad (1)$$

ここに、 $\varphi(t-t_1)$: 任意材齢 t におけるクリープ係数

$\varphi(\infty)$: クリープ係数の最終値

k_1 : クリープ係数の進行を表す無次元係数

つぎに、載荷材齢 t_1 から任意材齢 t までのコンクリートのクリープ解析の基本式(応力-ひずみ関係式)は、つぎのとおりとなる。

$$\Delta \varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} \varphi(t-t_1) + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} (1+\eta) \quad (2)$$

ここに、 $\Delta \varepsilon_{t-t_1}$: 載荷材齢 t_1 から任意材齢 t に至るまでに变化するクリープによるひずみの变化量

E_b : コンクリートのヤング係数

σ_{t_1} : 載荷材齢 t_1 におけるコンクリート床版の応力度

$\Delta \sigma_{t-t_1}$: 載荷材齢 t_1 から任意材齢 t に至るまでに变化するコンクリート床版の応力度

$$\eta = \frac{1}{2} \varphi(t-t_1) \quad (3)$$

2.3 乾燥収縮解析法

コンクリートの乾燥収縮現象は、コンクリート中にある硬化したセメントペースト成分が乾燥し、収縮変形することである。この現象は、進行過程においてコンクリート外部と内部とに大きな差が生じると、ひび割れの発生や部材の変形、プレストレスの損失などの影響を与えるので、クリープ現象同様、その経時的な性状や変化、最終値などを明らかにする必要がある。

ここで、コンクリートの乾燥収縮ひずみの進行は、クリープ同様、指数関数により近似できることが明らかにされている³⁾。したがって、任意材齢 t における乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_{sh}(t)$ は、次式のように表すことができる。

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh}(\infty) (1 - e^{-k_2 t}) \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t)$: 任意材齢 t までの乾燥収縮ひずみ

$\varepsilon_{sh}(\infty)$: 乾燥収縮ひずみの最終値

k_2 : 乾燥収縮ひずみの進行を表す無次元係数

また、乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\varphi_{sh}(t)$ は、現時点でも不明な部分が多いが、一般に、乾燥収縮の進行と同じ経路をたどるという仮定²⁾が用いられている。その仮定を用いると、任意材齢 t における乾燥収縮に伴うクリープ係数は次式のように表される。

$$\varphi_{sh}(t) = \varphi_{sh}(\infty) (1 - e^{-k_2 t}) \quad (5)$$

ここに、 $\varphi_{sh}(t)$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴うクリープ係数

$\varphi_{sh}(\infty)$: 乾燥収縮に伴うクリープ係数の最終値

したがって、乾燥収縮の解析に用いられるコンクリートの応力-ひずみ関係式は、次式のように表される。

$$\Delta \varepsilon_{sh}(t) = \frac{\Delta \sigma_t}{E_b} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \varphi_{sh}(t) \right\} + \varepsilon_{sh}(\infty) \frac{\varphi_{sh}(t)}{\varphi_{sh}(\infty)} \quad (6)$$

2.4 断面力の変化量算定式

つぎに、クリープおよび乾燥収縮によりコンクリート床版および鋼桁に発生する断面力の変化量算定式を、分担断面力法を用いて誘導した⁴⁾。ここでは、一例として、乾燥収縮解の要点のみを示す。

任意材齢 t における断面力のつり合い条件式は、次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{b,t} + \Delta N_{s,t} &= 0 \\ \Delta M_{s,t} + \Delta M_{b,t} - \Delta N_{s,t} a &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに、 $\Delta N_{b,t}$, $\Delta M_{b,t}$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴うコンクリート床版の分担軸方向力および曲げモーメントの変化量

$\Delta N_{s,t}$, $\Delta M_{s,t}$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴う鋼桁の分担軸方向力および曲げモーメントの変化量

a : 鋼桁の図心軸からコンクリート床版の図心軸までの距離

さらに、任意材齢 t における変位の適合条件式は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \text{ひずみ} : \Delta \varepsilon_{b,t} &= \Delta \varepsilon_{s,t} \\ \text{曲率} : \Delta \theta_{b,t} &= \Delta \theta_{s,t} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに、 $\Delta \varepsilon_{b,t}$, $\Delta \varepsilon_{s,t}$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴う

コンクリート床版および鋼桁の
ひずみの変化量
 $\Delta \theta_{b,t}, \Delta \theta_{s,t}$: 任意材齢 t までの乾燥収縮に伴う
コンクリート床版および鋼桁の
曲率の変化量

以上より、乾燥収縮に伴う分担断面力の変化量は、式(7)および式(8)を解くことにより算出される⁴⁾。分担断面力の変化量が求まると、各部材の変化応力度、さらに式(6)を用いて、各部材のひずみの変化量が算出される。なお、クリープによるコンクリート床版および鋼桁の分担断面力の変化量も同様の方法で算出することができる。

3. クリープおよび乾燥収縮の諸係数に関する基礎実験

3.1 概説

コンクリートの経時挙動を精度良く評価するために、その基礎データとなるクリープ係数、乾燥収縮ひずみの最終値、進行過程を表す係数の値などが必要となる。

そこで、本章では、大津呂川橋、中谷川橋それぞれのコンクリート床版と同寸法(厚み)、同設計基準強度($f_{ck}=40\text{N/mm}^2$)の供試体を製作し、同様の環境条件とするため、現地において実施した基礎実験の概要、ならびにその結果について述べる。

3.2 大津呂川橋

まず、図-1に供試体の形状の一例、表-1にその種類を示す。プレストレスは、本橋の設計プレストレスと同等の圧縮応力(3.7N/mm^2)を、コンクリート打設後3日目に、3本のPC鋼棒を用いて供試体に与えた。その際の緊張力はPC鋼棒1本あたり630kNであった。コンクリートの材齢28日における圧縮強度は、強度試験の結果 43.5N/mm^2 であった。

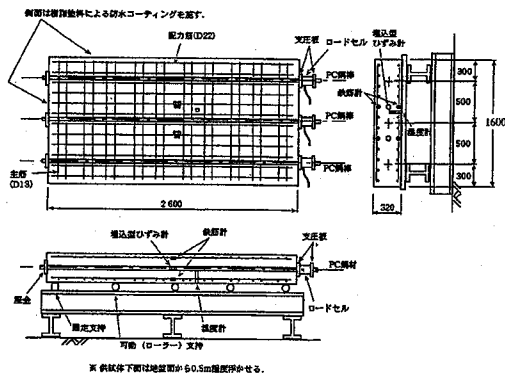


図-1 大津呂川橋の供試体形状図 [寸法単位:mm]
(主鉄筋、配力鉄筋間隔は125mm)

表1 供試体の種類

タイプ	コンクリートの種類	プレストレスの有無
1	膨張コンクリート	なし
2	膨張コンクリート	あり

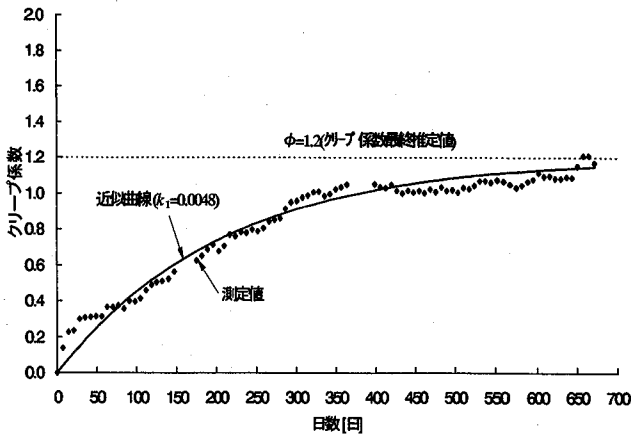


図-2 大津呂川橋の材齢-クリープ係数関係

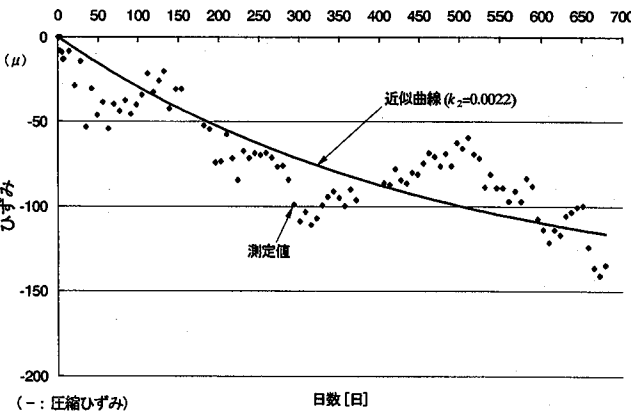


図-3 大津呂川橋の材齢-乾燥収縮ひずみ関係

結果として、打設直後からの材齢とクリープ係数の関係を図-2、材齢と乾燥収縮ひずみの関係を図-3にそれぞれ示す。ここで、クリープ係数は、温度補正後のタイプ1およびタイプ2両者のひずみを差し引くことによって得られるクリープひずみを初期弾性ひずみで除することによって算出される。一方、乾燥収縮ひずみは、タイプ1の温度補正後の測定結果である。

図-2より、クリープ係数の最終値は1.2程度に収束すると考えられ、現行の設計⁵⁾に用いている2.0よりも小さくとなると考えられる。図-3より、測定値にばらつきがあるものの、解析上、最終乾燥収縮量を 15×10^{-5} と設定する妥当性が見出された。

3.3 中谷川橋

図-4に中谷川橋の供試体の形状、表-2にその種類を示す。本橋では、大津呂川橋と同様、本橋の設計プレストレスと同等の圧縮応力(4.7N/mm^2)を、コンクリート打設後3日目に、3本のPC鋼棒を用いて供試体に与えた。その際の緊張力はPC鋼棒1本あたり470kNであった。コンクリートの材齢28日における圧縮強度は、強度試験の結果 49.8N/mm^2 であった。

まず、図-5に材齢とクリープ係数の変化を示す。クリープ係数は、プレストレス導入時期で急な進行を表したが、

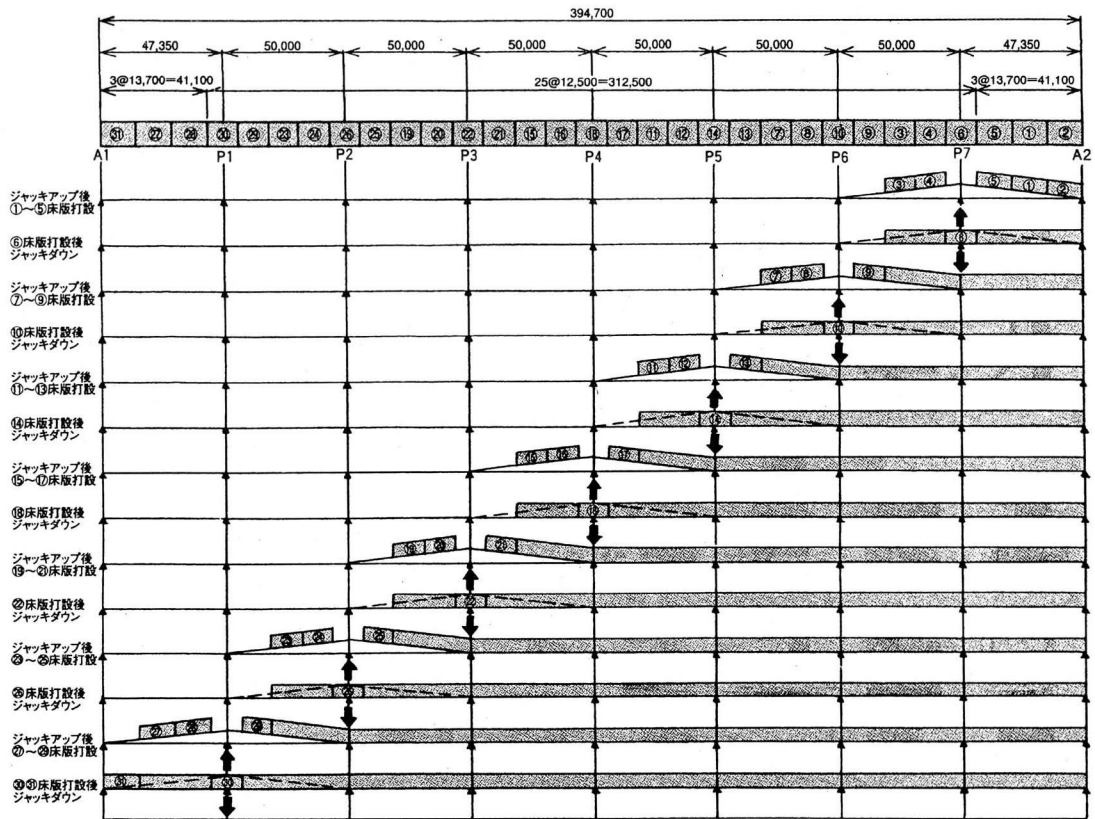


図-8 逐次ジャッキアップダウンステップ

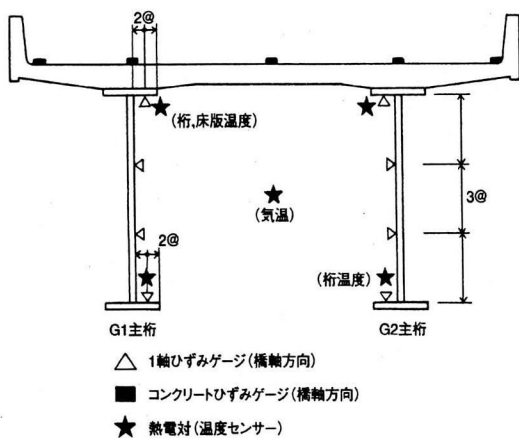


図-9 主桁測定点配置

いる。表4および表5より、ひずみの測定値と設計値は、若干の差異は見られるものの、コンクリート床版において、測定値は設計値より5%以上下回らなかったもので、一致していると考えられる。したがって、ジャッキアップダウン工法が、PC鋼材やケーブルなどを用いてプレストレスを導入するのと同様に、確実にプレストレスを与えることができることを確認した。

つぎに、ジャッキダウン後のP4およびP5支点上のコンクリート床版内部のひずみ測定値と解析値の比較結果を図-10、図-11にそれぞれ示す。図-10および図-11より、P4支点上でジャッキダウン後350日以降に若干の差異が

表-4 P4断面ジャッキダウン直後

	測定値 (=①)	設計値 (=②)	比率 (=①/②)
コンクリート床版 (中央)	-101.2 μ	-86.7 μ	1.167
鋼桁 下フランジ	399.0 μ	362.8 μ	1.100

表-5 P5断面ジャッキダウン直後

	測定値 (=①)	設計値 (=②)	比率 (=①/②)
コンクリート床版 (中央)	-85.8 μ	-89.6 μ	0.958
鋼桁 下フランジ	367.5 μ	360.2 μ	1.020

(それぞれ、計測値は、G1およびG2桁上の平均)

見られるが、解析値と測定値は比較的良好に一致していると考えられる。

以上の結果に基づき、P4支点上およびP5支点上のコンクリート床版上縁に作用する応力度を算定し、その結果を図-12および図-13にそれぞれ示す。図-12および図-13より、舗装等の後死荷重載荷後(1.0N/mm²(引張応力)、現時点においては未舗装)も、コンクリート床版上縁には、約1.0N/mm²の圧縮応力が作用していると考えられる。なお、当初設計においては、クリープおよび乾燥収縮終了時、P4支点上およびP5支点上のコンクリート床版上縁にはそれ

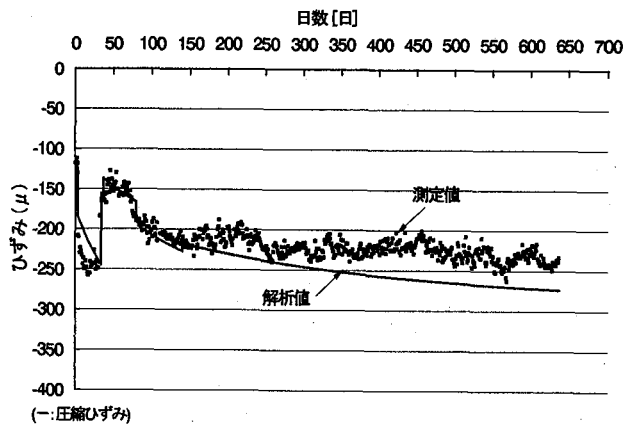


図-10 床版内部のひずみ測定値および解析値 (P4 支点上)

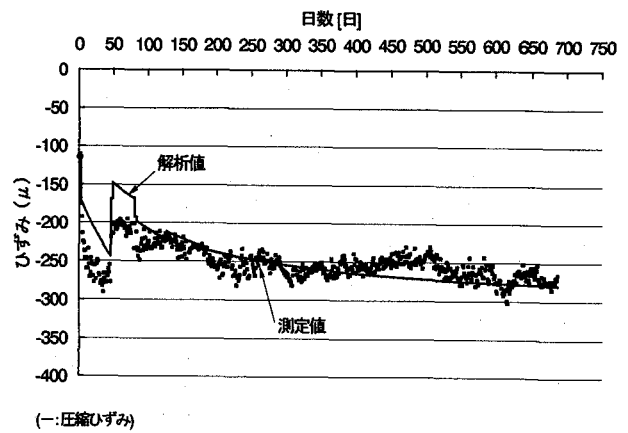


図-11 床版内部のひずみ測定値および解析値 (P5 支点上)

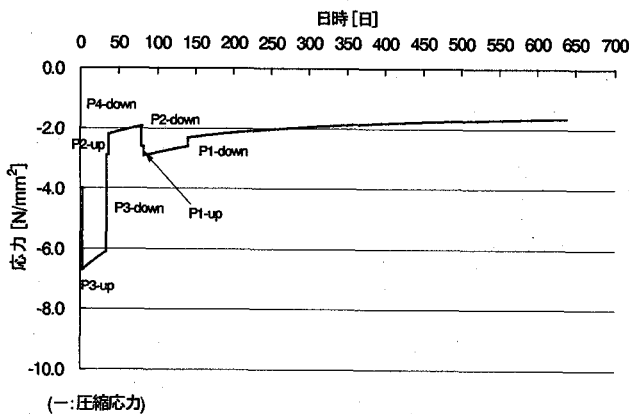


図-12 コンクリート床版上縁応力分布 (P4 支点上)

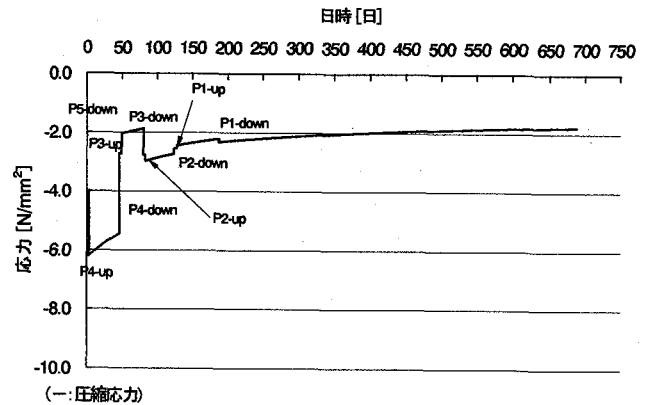


図-13 コンクリート床版上縁応力分布 (P5 支点上)

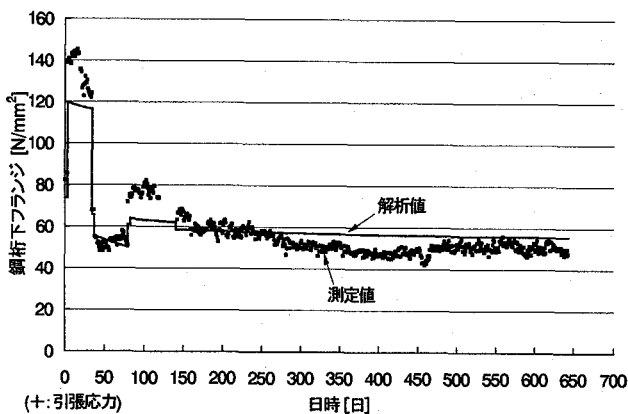


図-14 鋼桁下フランジ応力分布 (P4 支点上)

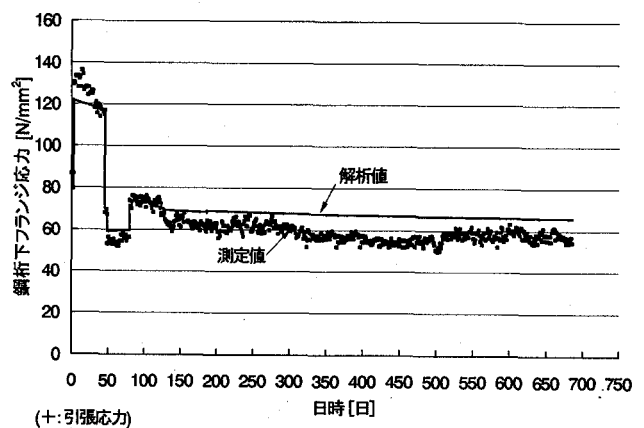


図-15 鋼桁下フランジ応力分布 (P5 支点上)

それぞれ 0.6N/mm^2 , 0.4N/mm^2 の圧縮応力が残存することになっていたが、本測定結果より、より有効なプレストレスが残存すると考えられる。最後に、P4 および P5 支点上の鋼桁下フランジの測定値および解析値を、それぞれ図-14 および図-15 に示す。図-14 および図-15 より、鋼桁下フランジにおいても、解析値と測定値はほぼ一致しており、解析の妥当性が検証された。

4.4 中谷川橋

本橋は地形および計測機器の設置条件により P2, P1 支点に着目し、床版内および鋼桁に計測機器を設置している。まず、P2 支点上、P1 支点上のジャッキダウン直後の測定値と設計値の比較結果を表-6 および表-7 にそれぞれ示す。表-6 および表-7 より、大津呂川橋同様、コンクリート床版において、ひずみの測定値は設計値以上の値を示しており、ジャッキアップダウン工法を用いて確実にプレストレスを与えることが可能であることを確認した。

表-6 P2断面ジャッキダウン直後

	計測値 (=①)	設計値 (=②)	比率 (=①/②)
コンクリート床版 (中央)	-160.0 μ	-138.1 μ	1.158
鋼桁 下フランジ	656.0 μ	434.4 μ	1.510

表-7 P1断面ジャッキダウン直後

	計測値 (=①)	設計値 (=②)	比率 (=①/②)
コンクリート床版 (中央)	-160.9 μ	-157.3 μ	1.023
鋼桁 下フランジ	440.8 μ	492.5 μ	0.895

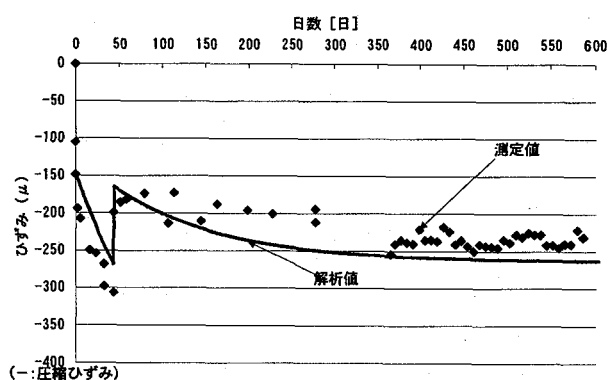


図-16 床版内部のひずみ測定値および解析値 (P2支点上)

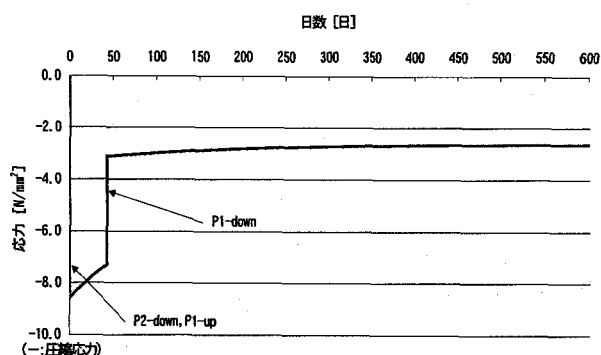


図-17 コンクリート床版上縁応力分布 (P2支点上)

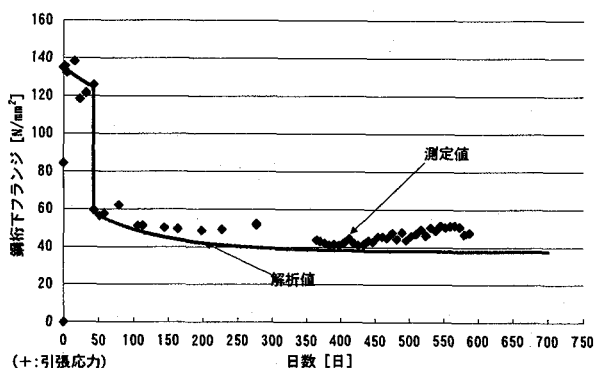


図-18 鋼桁下フランジ応力分布 (P2支点上)

つぎに、大津呂川橋と同様に、ジャッキダウン後の P2 支点上コンクリート床版内部のひずみ測定値と解析値の比較結果を図-16 に示す。図-16 より、P2 支点上でジャッキダウン後の初期の段階で若干の差異が見られるが、それ以降は、解析値と測定値はほぼ一致している。

中谷川橋での P2 支点上のコンクリート床版上縁応力を図-17 に示す。図-17 より、舗装等の後死荷重載荷後 (0.9N/mm²(引張応力)、現時点において未舗装)も、コンクリート床版上縁には、約 1.6N/mm²の圧縮応力が作用していると考えられる。なお、当初設計においては、P2 支点上のコンクリート床版上縁の残存圧縮応力は 1.3N/mm²としていたが、本計測結果より、より有効なプレストレスが残存すると考えられる。最後に、P2 支点上の鋼桁下フランジの測定値および解析値を図-18 に示す。図-18 より、鋼桁下フランジにおいても、解析値と測定値はほぼ一致しており、大津呂川橋同様、解析の妥当性が検証された。

5. まとめ

本文は、PC 床版連続合成 2 主桁橋として架設された大津呂川橋ならびに中谷川橋を対象に、ジャッキダウン直後のプレストレス導入効果ならびに経時挙動の影響を把握するという観点からとりまとめたものである。

測定実験および解析結果より、以下のような知見が得られた。

- 1) 基礎実験により、クリープ係数の最終値は、1.2 もしくは 1.3 程度となり、道路橋示方書・同解説で標準値として記載されている 2.0 と比較すると小さな値となっている。これは、コンクリート床版の強度が、40N/mm²と高強度で密実であるためと考えられる。また、最終乾燥収縮量は、15 もしくは 16×10⁻⁵と、道路橋示方書・同解説で標準値として記載されている 20×10⁻⁵よりも小さな値となる。したがって、膨張材による収縮量の低減効果が確認された。
- 2) ジャッキアップダウン工法によりコンクリート床版には、設計値どおりのプレストレスが導入されていることが確認された。
- 3) 基礎実験で得られたクリープ係数および乾燥収縮量からコンクリート床版の材齢を考慮した経時挙動解析と実橋の測定データを比較すると、差異は認められなかった。したがって、ジャッキアップダウンにより中間支点部に導入されたプレストレスは、クリープおよび乾燥収縮により低減されるが、現時点で 5 割から 6 割程度のプレストレスが残存し、後死荷重作用後も当初設計に比べて、より有効なプレストレスが作用していると考えられる。

なお、本計測は現在も実施中であり、さらに、クリープおよび乾燥収縮に関するデータの蓄積を図る予定である。

参考文献

- 1) 例えば, 宮内秀敏, 安川義行: PC 床版鋼連続 2 主 I 桁橋の施工, 橋梁と基礎 Vol.36 No.8, pp.85~87, (株)建設図書, 2002 年 8 月.
- 2) 土木学会: 構造工学シリーズ 9A 鋼・コンクリート複合構造の理論と設計 (1)基礎編: 理論編, pp.53~77, 丸善(株), 1999 年 4 月.
- 3) 中井 博, 栗田章光, L. 一ノ瀬伯子: 鋼・コンクリート合成構造物の応力・変形解析のためのクリープ係数と乾燥収縮量に関するデータベースの作成, 構造工学論文集 Vol.37A, pp.1397~1406, 1991 年 3 月.
- 4) NCB 研究会編: 新しい合成構造と橋, (株)山海堂, pp.101~109, 1996 年 2 月.
- 5) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I: 共通編, II: 鋼橋編, 丸善(株), 2002 年 3 月.

(2002年9月13日受付)