

(5)熱プレストレス工法を適用した連続合成桁橋のクリープおよび乾燥収縮挙動に関する研究

石丸元洋¹・沼田 克²・大山 理³・栗田章光⁴

¹正会員 ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) (〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島5-4-20)

E-mail : ishimaru@jrnc.co.jp

²正会員 (株)神戸製鋼所 (〒657-0845 兵庫県神戸市灘区岩屋中町4-2-7)

E-mail : numata.katsu@kobelco.com

³正会員 大阪工業大学 都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)

E-mail : ohyama@civil.oit.ac.jp

⁴正会員 大阪工業大学 都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)

E-mail : kurita@civil.oit.ac.jp

連続合成桁橋では、中間支点上のコンクリート床版の耐久性向上を目指して、内・外ケーブル工法、あるいはジャッキアップ・ダウン工法を適用してプレストレスの導入が行われる。それらの工法には一長一短がある。そこで、新しいプレストレスの導入工法として、予め熱プレストレス用鋼材(以下、補強材と呼ぶ)を加熱することにより熱ひずみを発生させ、その状態で補強材を鋼桁へ定着し、自然冷却により温度差応力を用いてプレストレスを導入する熱プレストレス工法が考案された。本文では、熱プレストレス工法を実橋へ適用することを目的とし、2径間連続合成桁橋を対象に、プレストレスの追加導入による効果も含めた経時挙動の影響を評価するために行った解析結果について報告する。

Key Words : *thermal prestressing, creep, shrinkage, additional prestressing*

1. はじめに

近年、わが国の経済状況の悪化に伴う公共事業の縮減および徹底したコスト削減政策により、合理化・省力化を図り、工期の短縮が可能な新技術や新形式の複合構造に関する研究開発が盛んに行われている。中でも連続合成桁橋では、中間支点上のコンクリート床版の耐久性向上を目的として、プレストレスを導入することが計画される。そのような背景のもと、新しいプレストレス導入工法として、予め補強材を加熱することにより熱ひずみを発生させ、その状態で補強材を鋼桁へ定着し、自然冷却により鋼桁との温度差がなくなった段階で、温度差応力によりプレストレスを導入する熱プレストレス工法¹⁾が提案された。

そこで、本文では、まず、比較的大型の実験供試体を製作し、本工法を適用することで所定のプレストレスが導入できることを確認する。つぎに、実橋への適用を想定し、2径間連続合成桁橋を対象に、経時挙動の影響を評価するために行った数値計算結果について報告する²⁾。

2. 熱プレストレス工法の原理

熱プレストレス工法は、温度差応力度を利用したもので、フックの法則と温度差による熱ひずみから導入力を求めることができる。フックの法則を式(1)、温度差による熱ひずみ ε_t を式(2)にそれぞれ示す。

$$\varepsilon_s = \sigma E \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \alpha t \quad (2)$$

ここで、
 E : 鋼材のヤング係数 (N/mm²)
 α : 線膨張係数 (1/°C)
 t : 相対温度差 (°C)

したがって、応力によるひずみ ε_s と熱ひずみ ε_t はひずみの適合条件より両者が等しくなるので、温度差応力度 σ_t は式(3)のように表せる。

$$\sigma_t = E \alpha t \quad (3)$$

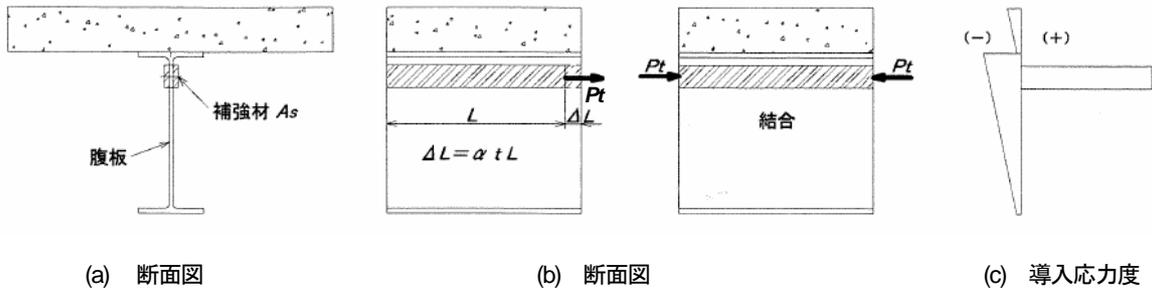


図-1 熱プレストレス工法の概念

この温度差応力度 σ_t に補強部材の断面積を乗じることで、温度差による部材力 P_t が求められる。図-1 に熱プレストレス工法の概念を示す。

3. プレストレス導入実験

(1) 実験供試体

合成桁に対する熱プレストレスの導入効果の確認およびクリープ、乾燥収縮挙動の影響を評価するために、図-2 に示す等2径間連続合成桁を製作した。ここで、同図に示す V_1 は中間支点部の中立軸位置を、 V_2 は径間部の中立軸位置をそれぞれ示している。

(2) プレストレス導入方法

熱プレストレス用鋼材の配置は、図-2 に示すように、死荷重による曲げモーメントに対応させ、正曲げ区間(径間部)では、中立軸より下側、一方、負曲げ区間(中間支点部)では中立軸より上側に配置する。これにより、中間支点部では正曲げ、径間部では負曲げモーメントに対応することができる。

熱プレストレス導入量は、コンクリートスラブ桁の自重とプレストレスの荷重組合せにおける床版応力度が 2.0N/mm^2 の圧縮応力状態となることを目標とし、補強材加熱温度は径間部で 35°C 、中間支点部で 60°C とした。ここで、熱プレストレス工法による応力導入は、ひずみ制御に基づく補強部材の温度伸び量の管理で行う。したがって、写真-1 に示すように温度伸び量の管理には変



写真-1 熱プレストレス導入状況

位計を使用した。なお、相対温度差に対応する補強材伸び量は側径間部で 1.15mm 、中間支点部で 1.66mm となるようにした。

つぎに、実験手順を以下に示す。

- i) 予め補強材の片端を高力ボルトにより固定する。
- ii) 両側面の補強材を同時に加熱する。
- iii) 両側面の補強材が目標値とする伸びに達した時、もう片端の高力ボルトを締める。
- iv) その後、補強材の温度が常温に戻った状態で、残りのボルト締めを行う。

なお、導入順序は両側径間部(A および C 断面部)に導入した後、中間支点部(B 断面部)の導入を行う。

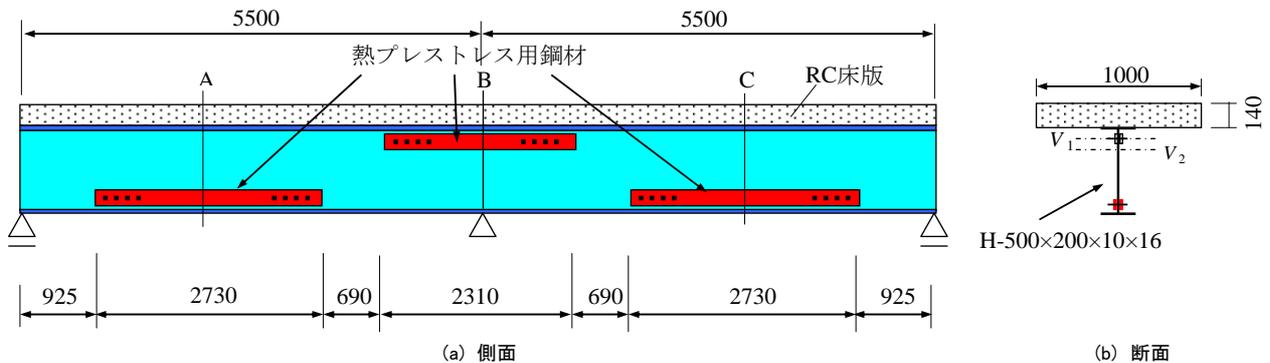


図-2 等2径間連続合成桁の模型 (寸法単位: mm)

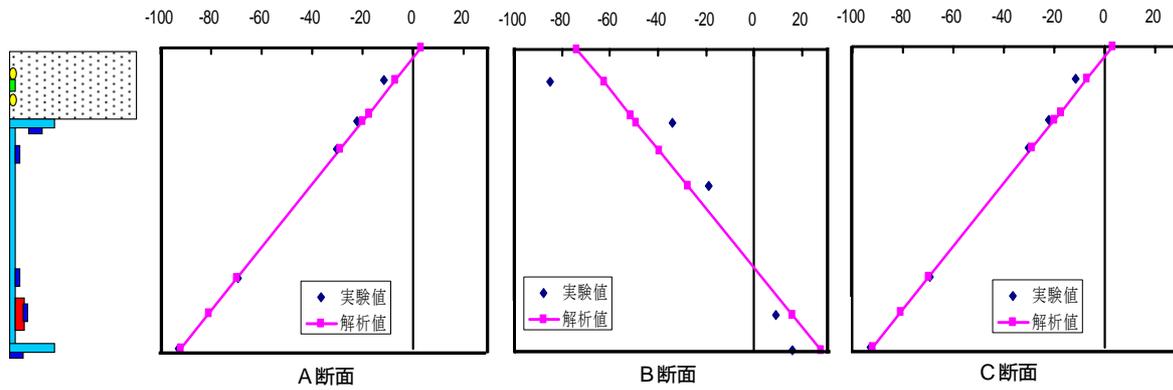


図-3 合成桁のプレストレスによる発生ひずみ

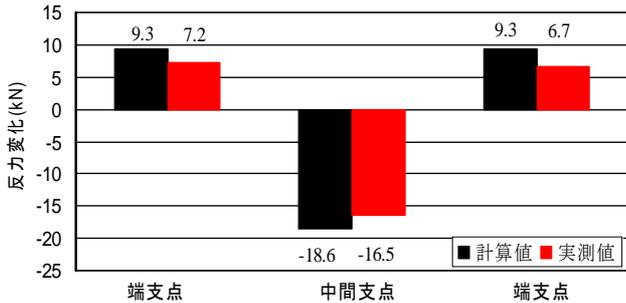


図-4 プレストレスによる反力変化

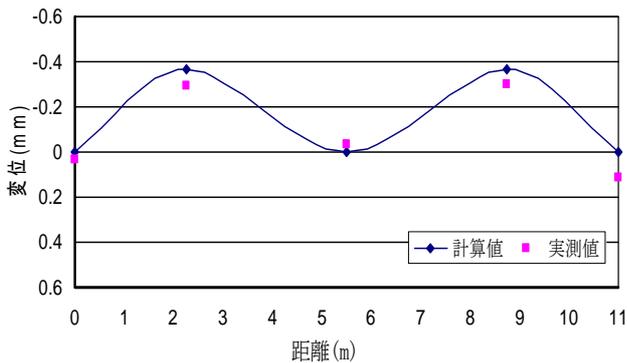


図-5 プレストレスによるたわみ

(3) プレストレスの導入結果

プレストレスの導入目標である補強材の伸び量は、先に述べたとおり、中間支点部、支間部でそれぞれ1.66mm、1.15mmに設定した。これに対し、実測値は中間支点部で1.56mm、支間部で1.11~1.14mmとなり各断面とも目標とする伸び量が得られた。また、ガスバーナーによる加熱時間は補強材1箇所当たり、10分~20分程度で施工することができた。

つぎに、プレストレス導入後の桁が常温に戻った状態で計測した各断面のプレストレスによるひずみ分布、支点反力の変化およびたわみの結果を、図-3~図-5に示す。

図-3より、プレストレスによるひずみの結果は、各断面とも導入プレストレスに対して解析値と実験値は概ね一致していることが確認できた。

また、図-4および図-5に示すプレストレスによる反力変化およびたわみについては、解析値と実験値に若干の

誤差が生じた。これは、端支점에プレストレス導入後の負反力対策として、付加反力を導入していたが、養生中に何らかの外力が作用し、わずかな支点移動が生じていたため、たわみ変化を生じるとともに反力変化の合計値が0にならない結果となったと考えられる。したがって、反力値およびたわみの誤差は多少あるが、目標どおりのプレストレス力が導入できた。

4. プレストレス導入後の経時変化

(1) 実験概要

プレストレスを導入した合成桁のクリープおよび乾燥収縮の影響を把握するために、その基礎データとなるクリープおよび乾燥収縮の最終値ならびにそれらの進行過程を表す係数が必要となる。

そこで、実験桁のRC床版と同じ条件で製作したクリープ用および乾燥収縮用の供試体を製作し、基礎データを得た後、それらを解析に適用した。

(2) クリープ・乾燥収縮の計測結果

まず、熱電対から得られる温度測定値によって、温度補正を行った後の供試体のひずみを図-6に示す

つぎに、2体の供試体から得られたひずみの進行を指数関数で近似した結果を図-7および図-8に示す³⁾。

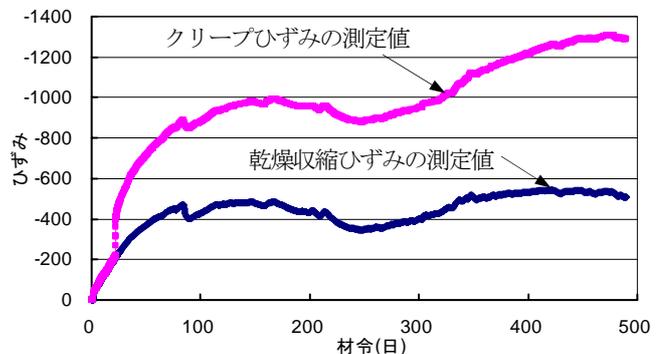


図-6 クリープおよび乾燥収縮の測定結果

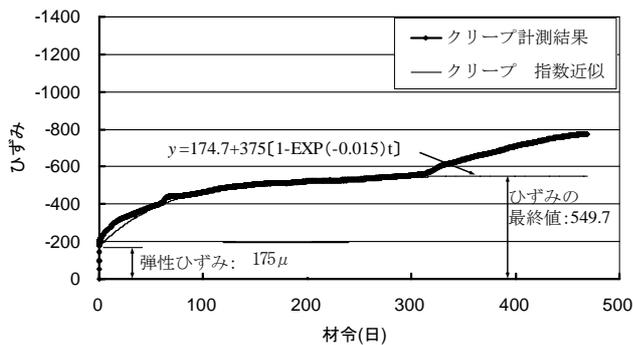


図-7 クリープひずみの指数近似

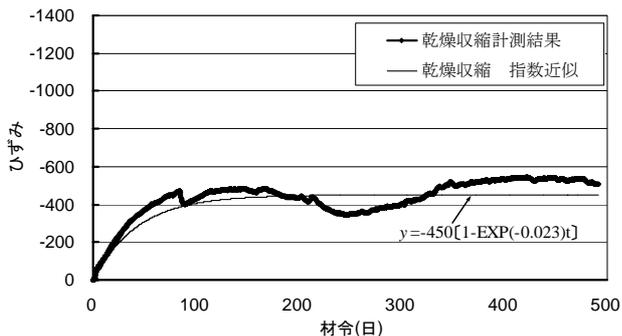


図-8 乾燥収縮ひずみの指数近似

図-7 より、プレストレス導入時における弾性ひずみは 175μ であった。また、ひずみの最終値は、供試体の保管状況に不備があったため、300 日までのデータで検討することにした。その結果、クリープ係数は 2.15 となった。また、乾燥収縮においても、クリープと同様に 300 日までのデータで検討した結果、最終乾燥収縮量は 450μ となった。設計での最終収縮量は、 200μ とされているが、今回の供試体では 2 倍以上の収縮量となった。これは、通常、2% 程度である鉄筋量が、本試験では 1% 程度しか配置されていなかったことが要因として考えられる。このため、合成桁には、過大な引張応力が作用しひび割れが生じていた。また、実験室の温度変化は年間を通して $12^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 、湿度変化は $60 \sim 80\%$ であった。

(3) 実験桁へ適用した結果

供試体より得られたクリープ係数および最終乾燥収縮量を用いて、合成桁の長期測定結果と解析値の比較・検討を行った。中間支点上でのひずみの結果を表-1 に示す。表-1 より、変化ひずみの解析値と実測値を比較すると、実測値の 80% 程度に相当することがわかった。また、クリープならびに乾燥収縮の変化応力の合計値は、コンクリート床版上縁で $4.9\text{N}/\text{mm}^2$ (引張応力) となり、プレストレスにより導入した圧縮応力 $2.5\text{N}/\text{mm}^2$ の 2 倍程度となることがわかった。

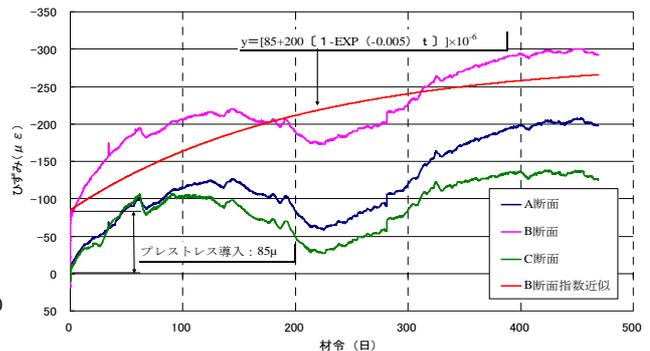


図-9 合成桁の経時変化

表-1 中間支点上での床版ひずみの解析値と計測値

解析値		計測値
クリープひずみ	乾燥収縮ひずみ	
71	116	223
187		

5. 実橋モデルによる数値計算

(1) 対象橋梁の概要

対象橋梁は、図-10 および図-11 に示すようにウェブ高 2750mm、幅員 11340mm、床版厚 320mm、アスファルト舗装厚 80mm、支間長 40m の 2 径間連続合成 2 主 I 桁橋である。クリープおよび乾燥収縮解析における諸係数ならびにひずみの進行は道路橋示方書・同解説⁴⁾に準拠する。

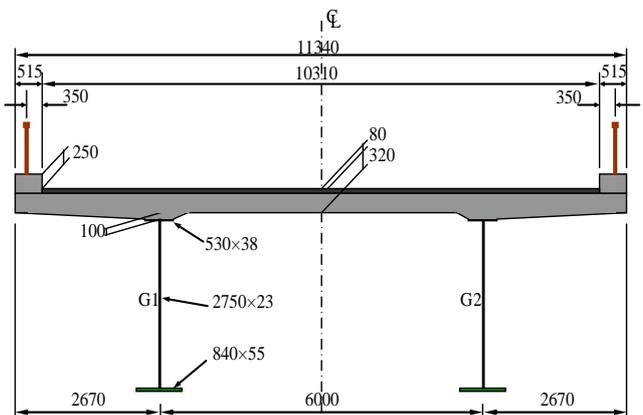


図-10 対象橋梁の断面 (単位: mm)

(2) 熱プレストレス導入要領

補強材の配置は、実験と同様に、径間部では中立軸より下側に、中間支点部では中立軸より上側に配置する。つぎに、導入プレストレスは、表-2 に示す床版の設計ランクより決定する⁵⁾。本研究では、追加導入を行わない場合はランク D、再導入を行う場合は応力改善が期待できることから、ランク C を目指すことにする。

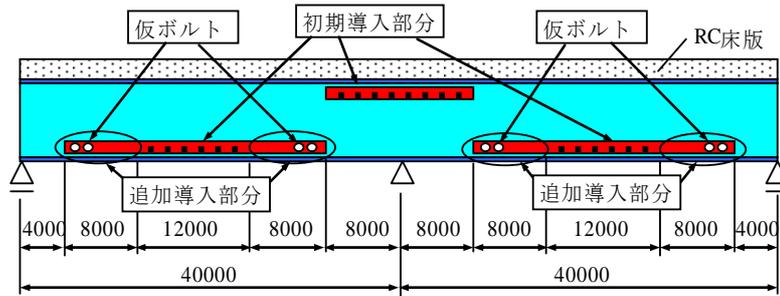


図-11 追加導入の提案モデル (単位: mm)

表-2 床版設計ランク

ランク	プレストレス	荷重						制限
		後死荷重 (D)	プレストレス (PS)	クリープ (CR)	乾燥収縮 (SH)	温度差 (T)	活荷重 (L)	
A	フルプレストレス							引張応力を許さない
B	パーシャルプレストレス	○	○	○	○	○	○	ひび割れを許さない
C		○	○	○	○	△	△	引張応力を許さない
D		○	○	○	○	△	△	ひび割れを許さない
E	プレストレスなし	○	-	○	○	○	○	ひび割れ幅制限

そこで、補強材の加熱温度は、径間部で 80°C 、中間支点部で 100°C とし、補強材の断面は厚さ 22mm 、幅 250mm と設定し、再導入を行う際の加熱温度も初期導入時と同じ温度で行うことにした。

さらに、乾燥収縮の影響を少なくするために、膨張コンクリートを適用することを考慮し、最終乾燥収縮量を通常的设计に用いる 20×10^{-5} の場合に加え、 10×10^{-5} および収縮量無しの3ケースでパラメータ解析を行う。

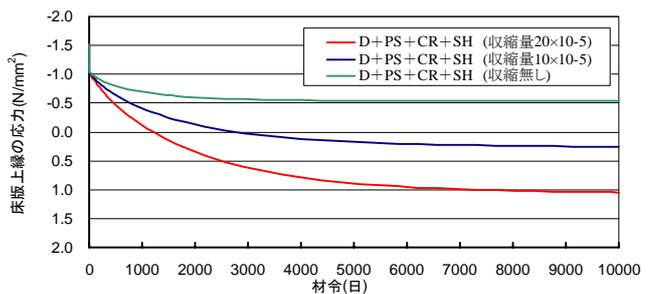
(3) プレストレスの追加導入方法

本工法は補強材のボルトを緩め、加熱することにより、プレストレスの再導入が可能となる。しかし、ボルトを緩めた際、初期に導入されたプレストレスが解放される。したがって、再導入によりコンクリート床版の応力を改善するためには、初期導入時よりも多くのプレストレス、つまり、初期導入時よりも補強材を加熱する温度を高くする必要がある。そこで、図-11 に示すように、初期のプレストレスは解放せずに、追加導入する方法を考案した。その工法は、導入プレストレス量を補強材の伸び量で管理することから、端部に補強材のボルトを仮止めした区間(再緊張部分)を設け、追加導入時にはその区間のみを加熱しプレストレスを導入するものである。

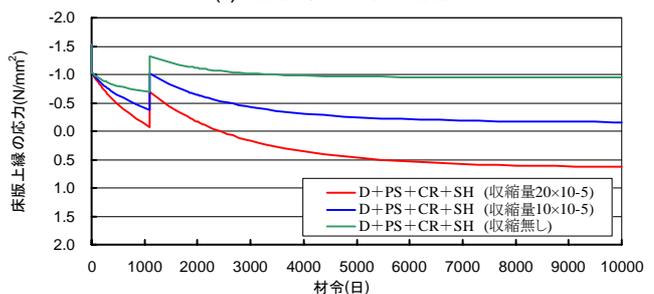
(4) 数値計算結果

最終乾燥収縮量をパラメータとして、本工法適用した際の中間支点上におけるコンクリート床版上縁の変化応力度を図-12 に示す。数値計算結果より、プレストレス初期導入時には 1.5N/mm^2 の圧縮応力が導入されるのに

対して、クリープに伴い 0.5N/mm^2 の引張応力が生じることがわかった。また、通常的设计に用いる最終乾燥収縮量 20×10^{-5} の場合、 1.6N/mm^2 の引張応力が生じる。ここで、追加導入を行わない場合(図-12(a))、床版の許容引張応力度 2.5N/mm^2 に対し、すべてのケースにおいてランク D を満足する結果が得られた。一方、追加導入を行った場合(図-12(b))、最終乾燥収縮量が 20×10^{-5} の場合、ランク C を満足することはできなかったが、最終乾燥収縮量が 10×10^{-5} の場合、ランク C を満足する結果が得られた。



(a) 追加導入無しの場合



(b) 追加導入有りの場合

図-12 中間支点上における床版上縁の変化応力度

6. まとめ

本文は、著者らが提案した熱プレストレス工法を連続合成桁橋に適用した際の長期性状を解明するという観点からとりまとめたものである。

まず、実験から得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 熱プレストレス工法を適用することで、コンクリート床版に所定のプレストレスが導入できることを確認した。
- (2) クリープおよび乾燥収縮に伴う経時挙動の影響評価において、解析値は、計測値の80%程度に相当することがわかった。また、クリープ、乾燥収縮に伴う変化応力度の合計値は、コンクリート床版上縁で 4.9N/mm^2 (引張応力) となり、プレストレスにより導入した圧縮応力 2.5N/mm^2 の2倍程度となることがわかった。

つぎに、数値解析結果より得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 熱プレストレス工法を用いて、対象橋梁の中間支点上のコンクリート床版上縁に、 1.5N/mm^2 の圧縮応力を導入した場合、クリープ、乾燥収縮により、それぞれ、 0.5N/mm^2 、 1.6N/mm^2 の引張応力が生じた。しかしながら、プレストレスの導入目標であるランク D を満足することができた。

- (2) 最終乾燥収縮量が 20×10^{-5} の場合、コンクリート床版上縁には、 1.6N/mm^2 の引張応力が生じ、クリープよりも乾燥収縮による影響が大きいことがわかった。さらに、最終乾燥収縮量をパラメータとした数値計算結果では、膨張コンクリートを用いることで乾燥収縮に伴う引張応力度を低減させることができるとともに、プレストレスの追加導入を併用することにより、更なる床版の応力を改善させることが可能となることが明らかになった。

【参考文献】

- 1) 例えば、沼田 克, 山田岳史, 栗田章光, 中井 博: 連続合成桁橋への熱プレストレス工法適用に関する実験的研究, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, I-514, 平成 17 年 9 月.
- 2) 石丸元洋: 熱プレストレス工法の連続合成桁橋への適用, 大阪工業大学修士論文, 2007 年 3 月.
- 3) 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, 大阪市立大学博士学位論文, 1992 年 9 月.
- 4) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I: 共通編, II: 鋼橋編, 平成 14 年 3 月.
- 5) 例えば, 中菌明広, 安川義行, 稲葉尚文, 橋 吉宏: PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法, 橋梁と基礎 2, pp.27~35, (株)建設図書, 平成 14 年 2 月.

STUDY ON CREEP AND SHRINKAGE BEHAVIOR IN STEEL-CONCRETE CONTINUOUS COMPOSITE GIRDER BRIDGE BY ADOPTING THERMAL PRESTRESSING METHOD

Motohiro ISHIMARU, Katsu NUMATA, Osamu OHYAMA, Akimitsu KURITA

In the region of the intermediate supports of the continuous composite girder bridge, the compressive stress is introduced into the concrete slab to improve the durability of the bridge. The normal prestressing method are jack-up-down method and internal or external cable method. Instead of these methods, the authors proposed the thermal prestressing method. However, the effect of creep and shrinkage by adopting the thermal prestressing method is not yet clarified perfectly. Therefore, to clarify the effects, this paper reports the test and analytical results used comparative large scale model of a two spans continuous composite girder bridge. Also design example including the additional prestressing is presented here in.