

内・外ケーブルを有する鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋のクリープおよび乾燥収縮に関する解析的研究

Analysis for Creep and Shrinkage Behaviors of Steel-Concrete
Double Composite Continuous Box Girder Bridges
with External and Internal Prestressing Cable

大山 理* 栗田 章光** 瀬野 靖久*** 富田 耕司****
Osamu OHYAMA, Akimitsu KURITA, Yasuhisa SENO and Kouji TOMITA

*工修 大阪工業大学大学院 博士後期課程 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)
**工博 大阪工業大学工学部土木工学科 教授 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)
***工修 修成建設専門学校 土木工学科 (〒555-0032 大阪市西淀川区大和田5-19-30)
****工修 日本構研情報(株) (〒541-0051 大阪市中央区備後町1-5-2 KDD 備後ビル)

During past two decades, in European countries, a new type of continuous composite box girder bridges was developed and constructed. The structural system is the steel-concrete double composite continuous box girder bridge which has two concrete slabs at upper and lower surfaces of the steel box girder. The lower concrete slab exists only in the region of the intermediate supports. This bridge has the advantage of reduction of stiffener in the steel box girder. However, the time-dependent behavior of this type of bridge with external and internal prestressing cable are not yet clarified perfectly. This paper, therefore, deals with the creep and shrinkage behaviors in steel-concrete double composite continuous box girder bridges with external and internal prestressing cable.

KeyWords : shrinkage, creep, double composite girder, external and internal prestressing cable

1. はじめに

近年、ヨーロッパ諸国において、斬新なデザインや新しい合成構造形式の橋梁が活発に採用されている。その一例として、鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋^{1),2)}が挙げられる。この橋梁は、図-1に例示するように、連続合成箱桁橋の中間支点領域のみ鋼箱桁下フランジ上面にもコンクリート床版を配置し、この領域においてのみ鋼箱桁の上下にコンクリート床版を有する特殊な構造形式であり、下フランジの局部座屈防止や桁全体の剛性を高めるという点に大いに寄与しているのが特長である。しかし、未解明な点が数多くあるのも実状である。例えば、1987年に供用を開始したドイツ・WasserburgのInn橋は、クリープおよび乾燥収縮により、中央径間部が15cmも垂れ下がるという現象が生じている³⁾。

そこで本研究では、鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋を対象に、プレストレスト工法として、内ケーブル方式と、省力化による工費の削減ならびに維持管理費の軽減が可能で、かつ、既往の研究・実験⁴⁾より、クリープおよび乾燥収縮に伴う緊張力の変化量が僅かであるな

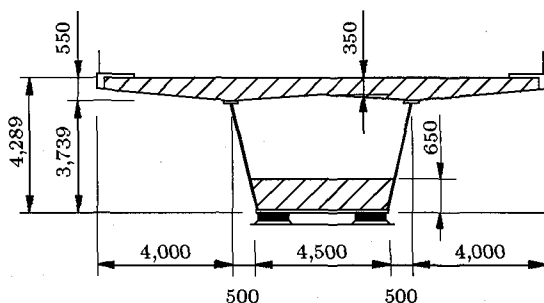


図-1 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の断面例
(ドイツ・Inn 橋, 寸法単位: mm)

ど、その有用性が確認されている外ケーブル方式とを併用した場合のクリープおよび乾燥収縮に伴う経時挙動を解明することを目的とした。

本文では、まず、鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の概要・特長について説明する。次に、クリープおよび乾燥収縮解析法の基本式について述べる。そして、外ケーブルを有する合成桁における断面および部材に関するクリープおよび乾燥収縮解析法を示すとともに、実橋

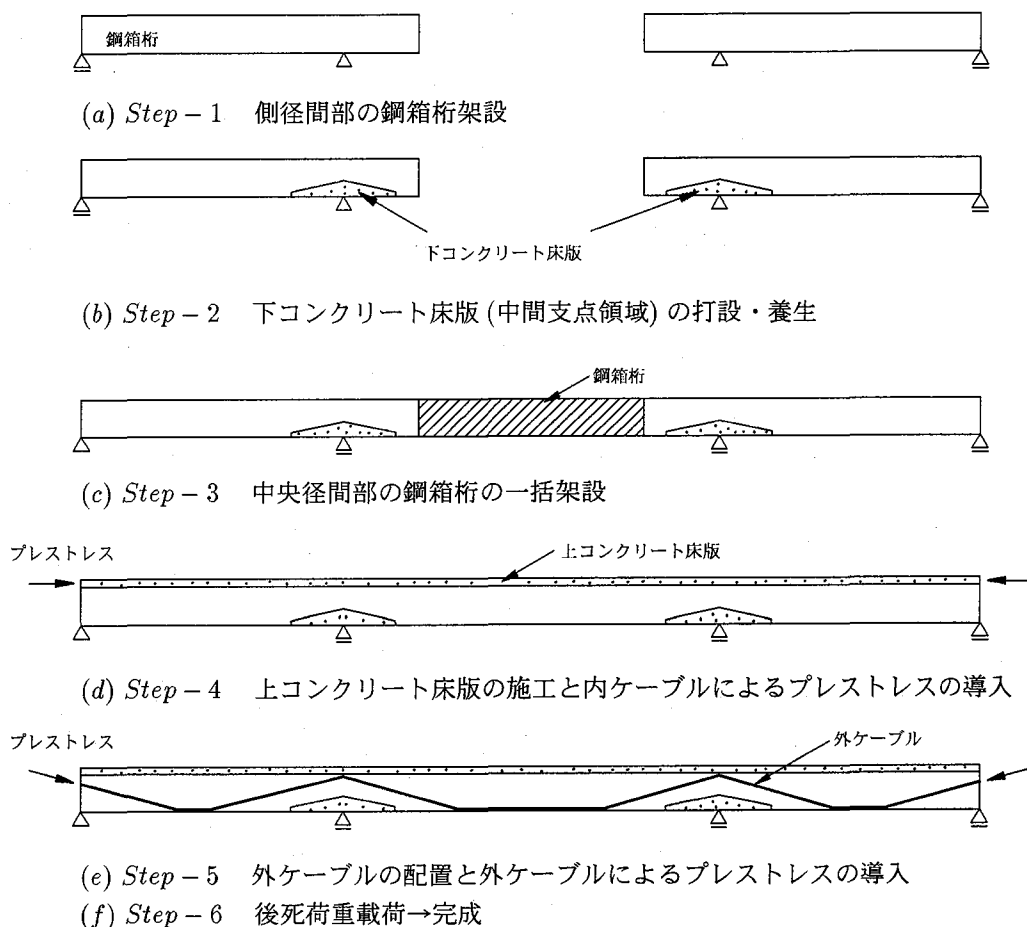


図-2 内・外ケーブルを有する鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の施工手順の一例

(スパン割:50+80+50m)を想定した3径間連続箱桁橋に本解析法を適用して数値計算を行う。最後に、総括と今後の検討事項について述べる。

以下、本文では、鋼桁上フランジに一体化されているコンクリート床版のことを「上コンクリート床版」、そして鋼桁下フランジに配置されるものを「下コンクリート床版」と呼ぶことにする。

2. 対象橋梁の概要

図-2に、内・外ケーブルを有する鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の施工手順の一例を示す。

前述したように、本形式の橋梁は、鋼桁の圧縮フランジをコンクリートで補剛するという極めて素直な考えに端を発している。ここで、本橋梁形式の特長をまとめると、次のような項目が挙げられる。

- 中間支点領域の鋼桁圧縮フランジの設計が容易になるとともに、補剛リブを少なくし、かつ、溶接延長を短くできるなど、工場での作業工数を少なくすることができる。

- 中央径間部の鋼箱桁を大ブロックで一括架設することが可能になり、工期短縮を図ることができる。
- 桁全体の剛性が高まるため、桁高を低く押さえることが可能になる。

また、マイン橋(ドイツ・スパン割:83.2+208.0+83.2m・1993年完成)のように、鉄道橋に本橋梁形式を採用した場合、騒音および振動の低下にもつながるというプラスアルファの効果も発揮する。

しかし、箱桁下フランジ上に打設するコンクリートの収縮とそれに伴うひび割れ、経時挙動の正確な予測などのような課題も残されている。

3. 経時挙動解析法

3.1 概説

本章では、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮現象ならびに解析法(応力-ひずみ関係式)について説明する。なお、クリープ解析においては、コンクリートの回復クリープの影響を、乾燥収縮解析においては、鋼桁

による自由収縮の拘束を考慮した応力-ひずみ関係式を用いた。

3.2 クリープ解析法

今、時刻 t_1 で応力 σ_{t_1} が作用し、その後、時間の経過とともに応力が漸減する場合、任意時刻 t におけるコンクリートの応力-ひずみ関係式は、次式で表すことができる^{5),6)}。

$$\Delta \varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_c} [\phi_d(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_c} (1 + \eta) \quad (1)$$

ここに、

$\Delta \varepsilon_{t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでのコンクリートのひずみ変化量

σ_{t_1} : 時刻 t_1 におけるコンクリートの応力度

E_c : コンクリートのヤング係数 (一定と仮定)

ϕ_d : 遅れ弾性クリープ係数

ϕ_f : フロークリープ係数

$\Delta \sigma_{t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでのコンクリートの応力変化量

η : コンクリートの応力緩和を考慮したクリープ係数

ここで、クリープ係数の進行を、実験結果^{6),7)}などに基づき、指数関数で表されるものと仮定すると、 η は次式で表される。

$$\eta = \frac{1}{2} \phi(t-t_1) + \frac{\phi_{d\infty}}{\phi(t-t_1)} \left[\frac{1}{2} \phi_{d\infty} \{1 - e^{-2k_1(t-t_1)} - 2k_1(t-t_1)e^{-k_1(t-t_1)}\} + \phi_{f\infty} \left\{ \frac{k_1}{k_1 - k_2} (e^{-k_1(t-t_1)-k_2t_1} - e^{-k_2t}) + \frac{k_1}{k_1 + k_2} (e^{-k_2t_1} - e^{-k_1(t-t_1)-k_2t}) \right\} \right] \quad (2)$$

ここに、

$\phi_{d\infty}$: 遅れ弾性クリープ係数の最終値

$\phi_{f\infty}$: フロークリープ係数の最終値

k_1, k_2 : 遅れ弾性およびフロークリープ係数の進行を表す無次元係数

3.3 乾燥収縮解析法

任意時刻 t におけるコンクリートの乾燥収縮による応力-ひずみ関係は、次式で表すことができる⁶⁾。

$$\Delta \varepsilon_{s,t} = \frac{\Delta \sigma_t}{E_c} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \phi_s(t) \right\} + \varepsilon_{s,\infty} \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} \quad (3)$$

ここに、

$\Delta \varepsilon_{s,t}$: 時刻 $t = 0$ から t までに至る間のコンクリートのひずみ変化量

$\Delta \sigma_t$: 時刻 $t = 0$ から t までに至る間のコンクリートの応力変化量

$\varepsilon_{s,\infty}$: 乾燥収縮ひずみの最終値

$\phi_s(t)$: 時刻 t におけるコンクリートの乾燥収縮に伴うクリープ係数

$\phi_s(\infty)$: 時刻 $t = \infty$ におけるコンクリートの乾燥収縮に伴うクリープ係数

3.4 クリープおよび乾燥収縮解

次に、クリープおよび乾燥収縮によって各部材に発生する断面力の変化量を求める算定式を、上・下コンクリート床版 (B_1, B_2) と鋼桁 (S) とのそれぞれ個別に作用する軸方向力 (N) と曲げモーメント (M) とに分けて解析する分担断面力法を用いて誘導する。ここで、本橋梁形式のように、架設が進むに従って構造系が変化していく場合、各架設段階におけるクリープおよび乾燥収縮の影響を評価しなければならない。

図-3 に一例として、時刻 t において、上・下コンクリート床版の乾燥収縮によって生じる鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋のひずみ分布と分担断面力の変化量を示す。

上・下コンクリート床版に乾燥収縮変形が生じ、時刻 t で図-3 の実線のひずみ分布となり、そのときの分担断面力の変化量を、それぞれ $\Delta N_{b_1,t}, \Delta M_{b_1,t}, \Delta N_{b_2,t}, \Delta M_{b_2,t}, \Delta N_{s,t}, \Delta M_{s,t-t_1}$ 、内ケーブルの張力変化量を $\Delta P_{p,t}$ とする。これらの分担断面力の変化量は、時刻 t における断面力のつり合い条件および上・下コンクリート床版と鋼桁とのひずみならびに曲率の適合条件を用いて求められる^{8),9)}。

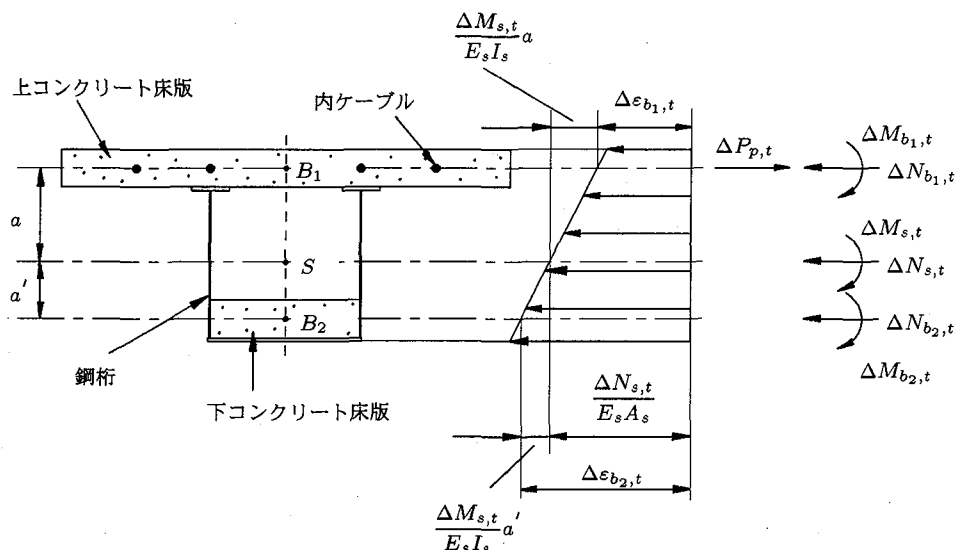


図-3 乾燥収縮に伴う合成桁のひずみ分布と分担断面力の変化量

なお、死荷重またはプレストレス力による持続曲げモーメントおよび持続軸方向力が作用した時のクリープ解についても、同様の手順で求めることができる^{8),9)}。

4. 外ケーブル部材の剛性マトリックス

4.1 概説

本章では、前章でのクリープおよび乾燥収縮解に基づいて、外ケーブルを有する連続合成桁橋のクリープおよび乾燥収縮解析法について示す。なお、解析手法としては、汎用性をもたせるため、剛性マトリックス法によって解析を行った。

4.2 偏心結合変換マトリックス

図-4 に外ケーブルが取り付けられた合成桁の一例を示す。

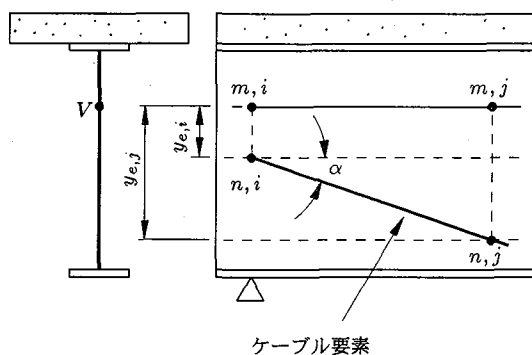


図-4 外ケーブルが取り付けられた合成桁

一般に桁要素の節点 m とケーブル要素の節点 n の間に無限大の剛度 ($EA = \infty, EI = \infty$) を持つ仮想部材を設けて解析を行うことができる。この方法は、従来の平面骨組みの構造解析プログラムでも計算が可能という利点がある。しかし、非現実的な剛度を持つ仮想部材の影響により、計算誤差が大きく出る可能性がある。そこで、本研究では、次に示す偏心結合変換マトリックスを用い、仮想部材を設けずに計算を行う^{4),10)}。

まず、外ケーブル要素の剛性方程式をたてると式 (4) のようになる。

$$\begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ M_i \\ X_j \\ Y_j \\ M_j \end{Bmatrix} = T_e^T \cdot R^T \cdot K \cdot R \cdot T_e \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \\ u_j \\ v_j \\ \theta_j \end{Bmatrix} + T_e^T \begin{Bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ M'_i \\ X'_j \\ Y'_j \\ M'_j \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 T_e は偏心結合変換マトリックス、 R は座標変換マトリックス、 K はケーブル要素の剛性マトリックスである。連続したケーブル要素をトラスモデルで置き換えると、 $R^T \cdot K \cdot R$ は、式 (5) で表される。また、偏心結合変換マトリックス T_e は、式 (6) で表される。

なお、 $\lambda = \cos \alpha, \mu = \sin \alpha$ である。

$$R^T \cdot K \cdot R = \frac{EA}{\ell} \begin{bmatrix} \lambda^2 & \lambda\mu & -\lambda^2 & -\lambda\mu \\ \lambda\mu & \mu^2 & -\lambda\mu & -\mu^2 \\ -\lambda^2 & -\lambda\mu & \lambda^2 & \lambda\mu \\ -\lambda\mu & -\mu^2 & \lambda\mu & \mu^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_e = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{e,i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -y_{e,j} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

以上より、周知の桁の剛性マトリックスを用いて構造全体系の解析を行うことができる。

4.3 クリープおよび乾燥収縮に対する荷重項および構造全体系における断面力の変化量

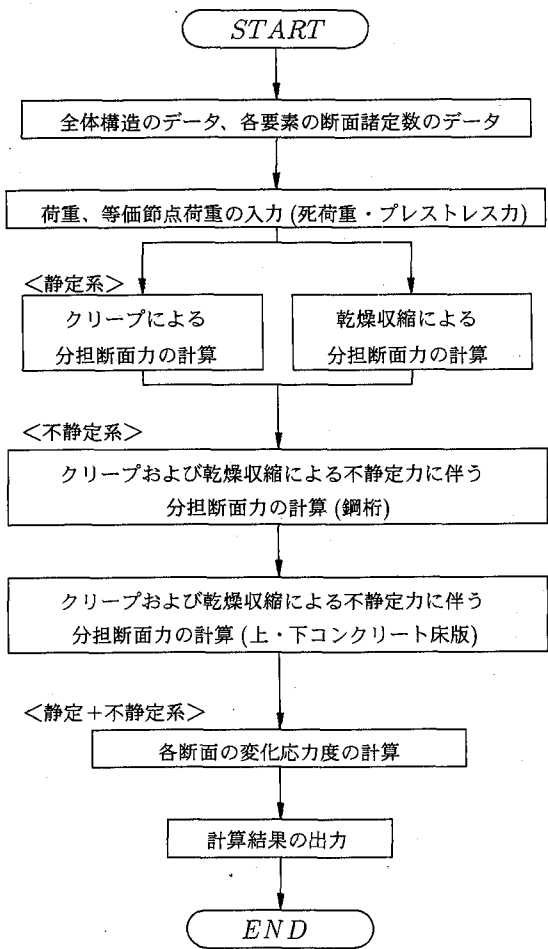


図-5 クリープおよび乾燥収縮に伴う変化応力度計算のフローチャート

図-5 に、剛性マトリックス法による合成桁のクリープおよび乾燥収縮に伴う変化応力度を計算するためのフローチャートを示す。

剛性マトリックス法により、クリープおよび乾燥収縮に伴う経時挙動解析を行う場合、まず、前節で述べた方法により、構造全体系の持続荷重による断面力、クリープおよび乾燥収縮による分担断面力を算定する。

次に、クリープおよび乾燥収縮による構造全体系の変化量を算定するため、鋼桁に着目して、各節点における鋼桁のクリープおよび乾燥収縮による分担断面力の変化量を荷重項とみなして、再び、構造全体系の解析を行うことにより、不静定系に対する断面力の変化量が得られる。ただし、この場合の計算に用いる剛性は、鋼桁に関する伸び剛性および曲げ剛性を用いねばならない。

最終的に、鋼桁のクリープおよび乾燥収縮による分担断面力の総変化量は、静定系に対する変化量と不静定系に対する変化量との和として与えられる。さらに、上・下コンクリート床版の分担断面力の変化量の総変化量は、内力のつり合い条件式ならびに変位（ひずみ・曲率）の適合条件式から得られた値に、静定系に対する変化量を加算することによって得られる。

5. 数値計算結果と考察

5.1 対象橋梁の概要

ここでは、内・外ケーブルを有する鋼・コンクリート二重合成（3 径間）連続箱桁橋を対象に数値計算を行い、クリープおよび乾燥収縮の特性を調べた。まず、対象とする橋梁の側面図を図-6 に、そして、中間支点の断面図（断面 A-A）を図-7 に示す。今回の解析において、下コンクリート床版は、通常の現場打ち床版を前提としたが、上コンクリート床版は、近年、省力化・工期短縮および施工性向上を目的として採用されているプレキャスト床版を用い、橋軸方向にはポストテンション方式によりプレストレスを導入する。プレストレス導入後、中間支点域の断面は鋼桁と上・下コンクリート床版、支間部は、鋼桁と上コンクリート床版から構成される合成断面となる¹¹⁾。そして、最終的に外ケーブルを配置し、橋軸方向にプレストレスを導入する。外ケーブルの配置形状は、図-6 のとおり、1 径間あたり 2 点で偏向させるクイーンポスト形式とし、中間支点部ではキングポスト形式とした。配置形状の決定は、既往の研究^{12),13)}に基づき、死荷重作用時に対して最適な配置とした。

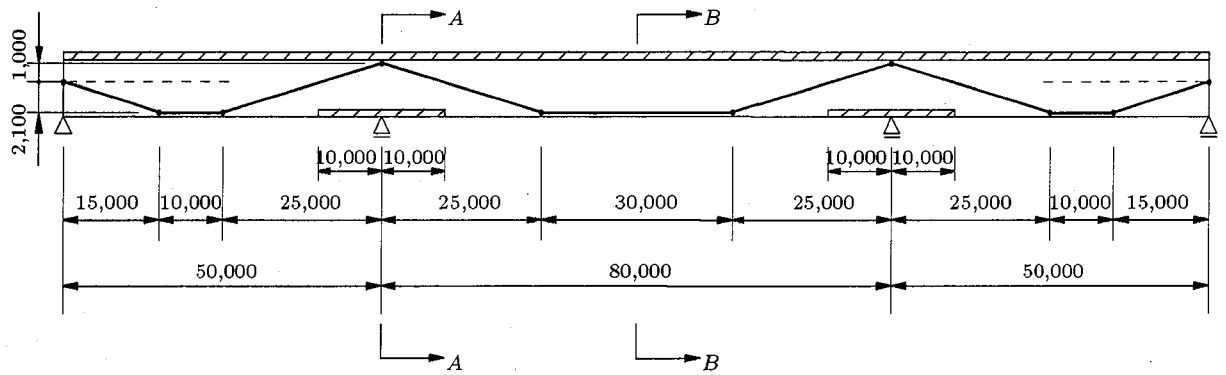


図-6 対象橋梁の側面図 (寸法単位 : mm)

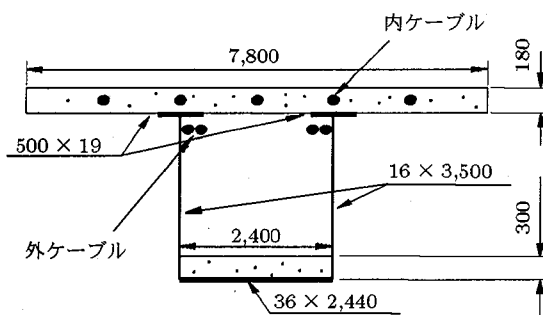


図-7 A-A 断面図 (寸法単位 : mm)

表-1 解析条件

鋼桁と上・下コンクリート床版とのヤング係数比		7.0
死荷重 (tf/m)	鋼桁	1.11
	上コンクリート床版	1.87
	下コンクリート床版	0.90
後死荷重 (tf/m)		1.26
内ケーブル緊張力 (tf)		700
外ケーブル緊張力 (tf)		400
遅れ弾性クリープ係数		0.4
フロークリープ係数		1.6
乾燥収縮に伴うクリープ係数		4.0
最終乾燥収縮量 (下コンクリート床版)		20×10^{-5}
(上コンクリート床版)		7×10^{-5}

下コンクリート床版の厚さは、実際に施工された橋梁においては、橋梁全体の中立軸の滑らかな連続性を確保するために、中間支点上で最大になり、スパン中央部に向かうに従って徐々に減少しているが、本解析での下コンクリート床版厚さは、簡略化のため一定 (=30cm) とした。また、鋼桁と上・下コンクリート床版との間に、ずれが生じない完全な合成作用を呈するものと仮定した。

次に、解析条件を表-1に示す。なお、内および外ケーブル緊張力は、桁全長において圧縮状態になるように予備計算を行い、その結果に基づいて決定した。また、乾燥収縮ひずみの最終値については、プレキャスト床版の製作ヤードや現場での仮置き期間があることを考慮すると、設計上、通常の現場打ち床版よりも、はるかに小さい乾燥収縮量を用いればよいことが実物大のプレキャスト床版を用いた実験によって確かめられている^{6),7),14)}。そこで、今回の解析において、上コンクリート床版(プレキャスト床版)の乾燥収縮の最終値は 7×10^{-5} とした。

以上の条件を用いて数値計算を行い、クリープおよび乾燥収縮終了時において、各部材にどのような影響を与えるかを検討した。以下にそれらの結果を示し、かつ考察を加えることにする。

5.2 数値計算結果

数値計算結果の一例として、まず、中間支点部(断面 A-A)に作用する荷重・プレストレスにより、上・下コンクリート床版、鋼桁の上縁および下縁に作用する応力度を、表-2に示す。応力度の符号については、+は圧縮応力度を、-は引張応力度をそれぞれ表している。

つぎに、クリープおよび乾燥収縮終了時の中間支点部(断面 A-A)に作用する変化応力度の分布図を図-8に、変化応力度(静定系、不静定系および総計)を、表-3と表-4にそれぞれ示す。

図-8ならびに表-3、表-4より、当然のことながら、クリープおよび乾燥収縮により、上・下コンクリート床版が次第に引張応力度を受け、また、鋼桁部分が次第に圧縮応力度を受けるようになる。今回の数値計算条件では、クリープにより、平均で上コンクリート床版は、初期応力の約 38%、下コンクリート床版は約 43%の応力が損失する。一方、乾燥収縮により、上コンクリート床版には約 11kgf/cm²、そして、下コンクリート床版には約 28kgf/cm²の引張応力が生じることがわかった。また、鋼桁には、クリープにより初期応力の約 21%、乾燥収縮により 82kgf/cm²の圧縮応力度を受けることがわかった。

表-2 中間支点部 (断面 A-A) に作用する応力度 (kgf/cm²)

	下コンクリート 床版上縁	下コンクリート 床版下縁	上コンクリート 床版上縁	上コンクリート 床版下縁	鋼桁 上縁	鋼桁 下縁
応力状態 1	—	—	—	—	-80	51
応力状態 2	16.1	22.6	—	—	-374	163
応力状態 3	17.6	24.7	—	—	-409	179
応力状態 4	—	—	58.3	58.3	—	—
応力状態 5	-5.3	-8.3	29.1	27.3	191	-61
応力状態 6	10.5	12.6	-12.4	-11.2	-79	90
総 計	38.9	51.6	75.0	74.4	-751	422

- ここに、 応力状態 1：合成前死荷重による応力
応力状態 2：中央径間部鋼箱桁の架設による応力
応力状態 3：上コンクリート床版敷設による応力
応力状態 4：上コンクリート床版へのプレストレス導入による (鋼箱桁と合成前) 応力
応力状態 5：外ケーブル緊張による応力
応力状態 6：上コンクリート床版と鋼箱桁との合成後の後死荷重載荷による応力

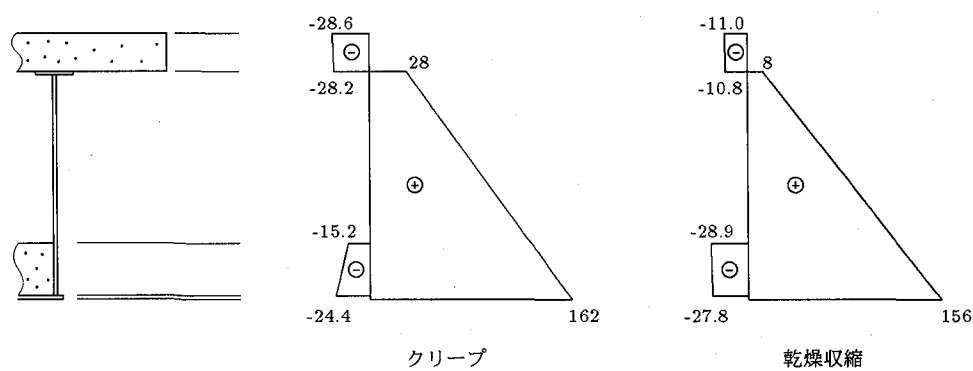


図-8 変化応力度の分布図 (kgf/cm²)

表-3 クリープによる変化応力度 (kgf/cm²)

	静定系	不静定系	総計
上コンクリート床版上縁	-12.1	-16.5	-28.6
上コンクリート床版下縁	-13.0	-15.2	-28.2
下コンクリート床版上縁	-20.3	5.1	-15.2
下コンクリート床版下縁	-30.9	6.5	-24.4
鋼桁上縁	161	-133	28
鋼桁下縁	77	85	162

表-4 乾燥収縮による変化応力度 (kgf/cm²)

	静定系	不静定系	総計
上コンクリート床版上縁	-6.0	-5.0	-11.0
上コンクリート床版下縁	-6.2	-4.6	-10.8
下コンクリート床版上縁	-31.2	2.3	-28.9
下コンクリート床版下縁	-30.7	2.9	-27.8
鋼桁上縁	56	-48	8
鋼桁下縁	126	30	156

表-5 には、中間支点部においてクリープおよび乾燥収縮によって発生する内・外ケーブルの張力変化量を示す。同表で、正の数値はケーブルに対して引張、つまりケーブル張力が増加することを示している。一方、負の値はケーブルに対して圧縮、つまりケーブル張力が減少することを示している。

表-5 外ケーブル張力の変化量 (tf)

	内ケーブル	外ケーブル
クリープ	-2.94	-0.142
乾燥収縮	-1.44	0.212

表-5 より、内・外ケーブルとも張力変化量は、緊張力に対して僅かであるという結果が得られた。

以上の結果より、中間支点部 (断面 A-A) に作用する初期応力度、クリープおよび乾燥収縮に伴う変化応力度、さらに、活荷重 (B 活荷重) による応力度をまとめて、

表-6 中間支点部 (断面 A-A) に作用する応力度 (kgf/cm²)

	下コンクリート 床版上縁	下コンクリート 床版下縁	上コンクリート 床版上縁	上コンクリート 床版下縁	鋼桁 上縁	鋼桁 下縁
初期応力	38.9	51.6	75.0	74.4	-751	421
クリープ	-15.2	-24.4	-28.6	-28.2	28	162
乾燥収縮	-28.9	-27.8	-11.0	-10.8	8	156
B 活荷重	16.4	19.6	-19.4	-17.5	-123	140
総計	11.2	19.0	16.0	17.9	-838	879

表-6 に示す。

表-6 より、クリープおよび乾燥収縮終了時で、中間支点部の上コンクリート床版には平均で約 17kgf/cm² の圧縮応力が残存することがわかった。したがって、主桁の断面力を算出する場合、中間支点領域の引張応力を受ける版においては、全断面有効として設計できる可能性が見い出された。

なお、中央径間部 (断面 B-B) のクリープおよび乾燥収縮終了時の応力照査も行い、上コンクリート床版には、圧縮応力が残存していることを確認した。

5.3 内・外ケーブル比および乾燥収縮の影響評価

本節では、内・外ケーブル導入プレストレス量および最終乾燥収縮量の 2 つのパラメータを選定して、鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の経時挙動に及ぼす影響評価を行った。

(1) 内・外ケーブル比

本橋梁形式の場合、内・外ケーブル方式により導入されたプレストレスによるクリープの影響評価は、重要な検討項目の一つとして挙げられる。そこで、内および外ケーブル方式により導入するプレストレス量を 5 種類に変化させた場合のクリープに伴う変化応力度、変形計算を行った。プレストレス量は、中間支点部 (断面 A-A) の上コンクリート床版上縁に、前述の数値計算と同様に約 87.5kgf/cm² (表-2 の応力状態 4+5) の圧縮応力を導入することとした。表-7 に、内および外ケーブルそれぞれの緊張力と上コンクリート床版上縁への導入圧縮応力の比率を示す。

表-7 内および外ケーブルの緊張力とその導入応力比

	内ケーブル 緊張力 (tf)	外ケーブル 緊張力 (tf)	導入応力比 (内 : 外)
CASE-1	1050	0	1:0
CASE-2	700	400	2:1
CASE-3	525	600	1:1
CASE-4	350	800	1:2
CASE-5	0	1200	0:1

数値計算結果の一例として、まず、表-8 に、中間支点部 (断面 A-A) の上コンクリート床版上縁の変化応力度、図-9 にその応力変化率 (= 変化応力度 / 導入応力) を示す。

表-8 クリープによる上コンクリート床版の変化応力度 (kgf/cm²)

	内ケーブル分	外ケーブル分	総計
CASE-1	-36.1	—	-36.1
CASE-2	-24.1	-6.3	-30.4
CASE-3	-18.1	-9.4	-27.5
CASE-4	-12.0	-12.6	-24.6
CASE-5	—	-18.2	-18.2

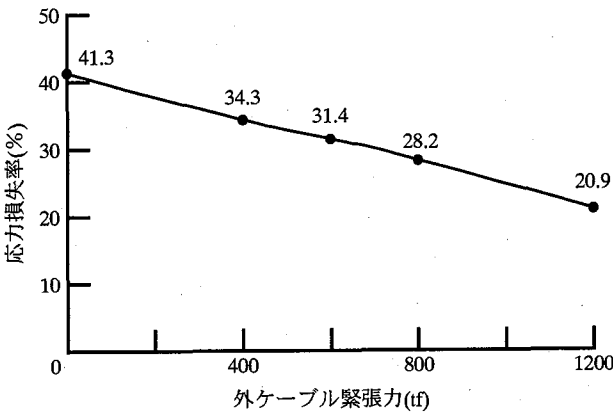


図-9 クリープによる上コンクリート床版の応力損失率 (%)

表-8 および図-9 より、内ケーブル方式のみでプレストレスを導入した場合のクリープによる応力損失率は 41% であるのに対して、外ケーブル方式のみの場合は 21% であり、外ケーブル方式により導入されるプレストレスの比率が大きくなるにつれて、クリープによる応力の損失量が小さくなることがわかった。

つぎに、図-10 に、CASE-1,3 および 5 のクリープによるたわみを示す。

図-10 より、外ケーブル方式により導入されるプレストレスの比率が大きくなるにつれて、中央径間部のたわみは増加し、一方、側径間部のたわみは減少する傾向を

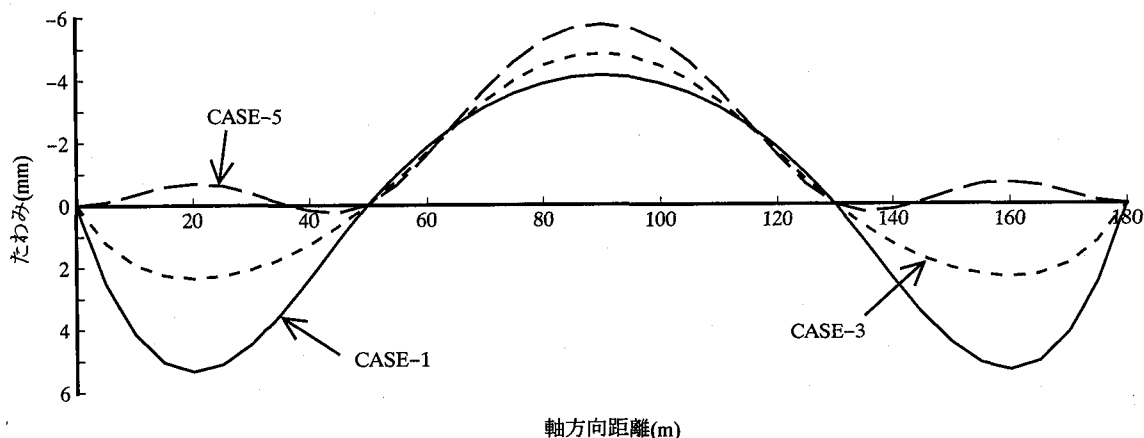


図-10 クリープによるたわみ図

表-9 上コンクリート床版の最終乾燥収縮量を変化させた場合の乾燥収縮による
中間支点部 (断面 A-A) の変化応力度 (kgf/cm²)

$\epsilon_{s,\infty}^u$	下コンクリート 床版上縁	下コンクリート 床版下縁	上コンクリート 床版上縁	上コンクリート 床版下縁	鋼桁 上縁	鋼桁 下縁
0	-31.7	-30.6	0.4	0.6	-1	123
5×10^{-5}	-29.7	-28.5	-7.7	-7.5	7	146
10×10^{-5}	-27.7	-26.4	-15.9	-15.6	15	167
15×10^{-5}	-25.6	-24.3	-24.0	-23.7	24	189

示すことがわかった。

なお、本橋梁形式は、中央径間部に対して側径間部が短いため、中央径間部と側径間部の死荷重にアンバランスが生じ、「死荷重+プレストレス (外ケーブル)」の載荷状態において、側径間部の上コンクリート床版に引張応力が生じる可能性がある。また、外ケーブル緊張力が大きくなると、定着部や偏向部での局所応力に対する詳細な検討を行う必要性もでてくる。そこで、本橋梁形式の場合、ある程度、内ケーブルによりプレストレスを導入する必要があると考えられる。

(2) 最終乾燥収縮量

プレキャスト床版を用いた合成桁橋では、通常の現場施工の床版よりも小さい乾燥収縮量を用いてもよいことが、実物大のプレキャスト床版を用いた実験によって確かめられている。しかし、その最終乾燥収縮量までは明確に規定されていない。そこで、最終乾燥収縮量の影響を調べるため、下コンクリート床版厚を 30cm、最終乾燥収縮量 $\epsilon_{s,\infty}^l$ を 20×10^{-5} の一定値に固定し、上コンクリート床版 (プレキャスト床版) の最終乾燥収縮量 $\epsilon_{s,\infty}^u$ を $0, 5 \times 10^{-5}, 10 \times 10^{-5}, 15 \times 10^{-5}$ の 4 種類に変化させた場合の乾燥収縮に伴う変化応力度、変形計算を行った。

更に、乾燥収縮によるひび割れ防止策として、下コンクリート床版に無収縮コンクリートを用いた場合の影響をも調べるために、上コンクリート床版の最終乾燥収縮量 $\epsilon_{s,\infty}^u$ を 7×10^{-5} の一定値に固定し、下コンクリート床版の最終乾燥収縮量 $\epsilon_{s,\infty}^l$ を $0, 5 \times 10^{-5}, 10 \times 10^{-5}, 15 \times 10^{-5}$ の 4 種類に変化させた場合の乾燥収縮に伴う変化応力度、変形計算も同時に行った。

その数値計算結果の一例として、まず、上コンクリート床版の最終乾燥収縮量を変化させた場合の乾燥収縮による中間支点部 (断面 A-A) の変化応力度を表-9 に、たわみを図-11 に示す。

表-9 より、上コンクリート床版の最終乾燥収縮量が 0 から 15×10^{-5} に増加するにつれて、下コンクリート床版に作用する引張応力の値は徐々に小さくなり、一方、鋼桁に作用する圧縮応力の値は大きくなることがわかった。また、上コンクリート床版の変化応力度は、最終乾燥収縮量にほぼ比例して大きくなることもわかった。

図-11 より、たわみに関しては、上コンクリート床版の最終乾燥収縮量が 0 から 15×10^{-5} に増加するにつれて、側径間部のたわみは増加し、一方、中央径間部のたわみは減少する傾向を示すことがわかった。

つぎに、下コンクリート床版の最終乾燥収縮量を変化

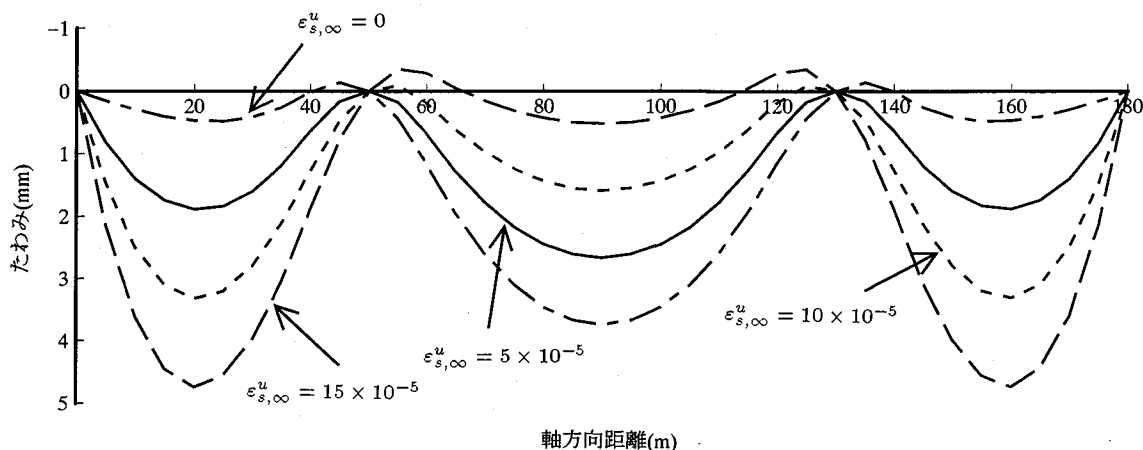


図-11 上コンクリート床版の最終乾燥収縮量を変化させた場合の乾燥収縮によるたわみ図

表-10 下コンクリート床版の最終乾燥収縮量を変化させた場合の乾燥収縮による
中間支点部 (断面 A-A) の変化応力度 (kgf/cm²)

$\epsilon_{s,\infty}^l$	下コンクリート 床版上縁	下コンクリート 床版下縁	上コンクリート 床版上縁	上コンクリート 床版下縁	鋼桁 上縁	鋼桁 下縁
0	2.8	2.9	-11.4	-11.3	12	30
5×10^{-5}	-5.1	-4.7	-11.3	-11.2	11	61
10×10^{-5}	-13.0	-12.4	-11.2	-11.0	11	92
15×10^{-5}	-21.0	-20.0	-11.1	-10.9	11	123

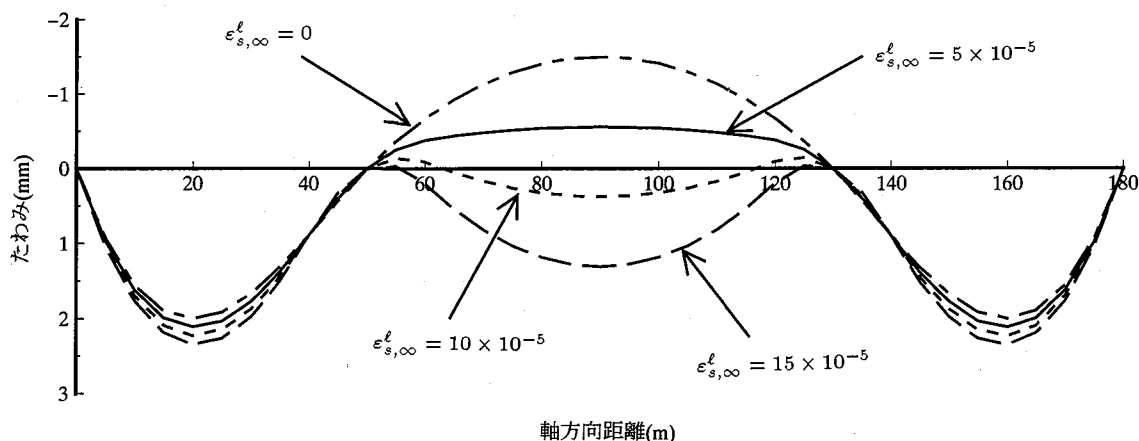


図-12 下コンクリート床版の最終乾燥収縮量を変化させた場合の乾燥収縮によるたわみ図

させた場合の乾燥収縮による中間支点部 (断面 A-A) の変化応力度を表-10 に、たわみを図-12 に示す。

表-10 より、下コンクリート床版の最終乾燥収縮量 $\epsilon_{s,\infty}^l$ が 15×10^{-5} から 0 に減少するにつれて、下コンクリート床版に作用する引張応力の値ならびに鋼桁下縁に作用する圧縮応力の値は小さくなることがわかった。一方、上コンクリート床版に作用する引張応力、鋼桁上縁に作用する圧縮応力の値はほとんど変化しないこともわかった。

図-12 より、たわみに関しては、下コンクリート床版

の最終乾燥収縮量が 15×10^{-5} から 0 に減少するにつれて、側径間部のたわみはほとんど変化しないのに対して、中央径間部のたわみは、そり上がる傾向を示すことがわかった。その要因としては、解析上、上・下コンクリート床版の乾燥収縮量に相当する軸力を、それぞれの床版の図心位置に作用させ、かつ、下コンクリート床版の最終乾燥収縮量が小さくなるにつれて上コンクリート床版に作用する軸力が徐々に大きくなるため、このような挙動を示していると考えられる。

以上の結果より、上コンクリート床版の最終乾燥収縮量が小さく、一方、下コンクリート床版の最終乾燥収縮量が大きい場合、中央径間部における乾燥収縮によるたわみは最大となり、今回の数値計算条件では、 $\varepsilon_{s,\infty}^d = 15 \times 10^{-5}$ 、 $\varepsilon_{s,\infty}^u = 0$ で約 4mm 程度になる。

また、この種の橋梁を設計する際、通常の合成桁橋よりも、より詳細に上・下コンクリート床版の最終乾燥収縮量の予測や評価を行う必要性があることがわかった。

6. 結論

本文は、近年、ドイツ・スイスなどのヨーロッパ諸国を中心に開発された鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋に内・外ケーブル方式を併用した場合のクリープおよび乾燥収縮に伴う経時挙動を解明するという観点からとりまとめたものである。

数値計算結果より、以下のような知見が得られた。

- (1) 今回の数値計算条件では、中間支点部において、クリープにより平均で上コンクリート床版は初期応力の約 38%、下コンクリート床版は約 43% の応力が損失する。一方、乾燥収縮により、上コンクリート床版には約 11 kgf/cm^2 、そして、下コンクリート床版は約 28 kgf/cm^2 の引張応力が生じることがわかった。
- (2) クリープおよび乾燥収縮によって発生する内・外ケーブルの張力変化量は、緊張力に対して僅かであり、経時挙動に伴う影響は、ほとんどないことがわかった。
- (3) クリープおよび乾燥収縮終了時で、活荷重作用下でも、中間支点部の上コンクリート床版には有用な圧縮応力が残存することがわかった。したがって、主桁の断面応力を算出する場合、中間支点領域の引張応力を受ける版においては、全断面有効として設計を行える可能性が見い出された。
- (4) 本橋梁形式に内ケーブル方式のみでプレストレスを導入した場合のクリープによる応力損失率は 41% であるのに対して、外ケーブル方式のみの場合は 21% であり、外ケーブル方式により導入されるプレストレスの比率が大きくなるにつれて、クリープによる応力の損失量が小さくなることがわかった。しかし、外ケーブル方式のみでプレストレスを導入すると、「死荷重+プレストレス (外ケーブル)」

の載荷状態において、側径間部の上コンクリート床版に引張応力が生じる可能性があるため、今回の数値計算結果より、本橋梁形式には、内・外ケーブル比で 1:1 もしくは 1:2 程度の割合でプレストレスを導入する必要があると考えられる。

- (5) 上・下コンクリート床版の最終乾燥収縮量を変化させて数値計算を行った結果、それぞれの最終乾燥収縮量を小さくすれば、床版に作用する引張応力の値は小さくなることがわかった。したがって、上コンクリート床版にプレキャスト床版を用い、下コンクリート床版に無収縮コンクリートを用いることで、有利な設計結果が得られる。しかし、乾燥収縮によるたわみ図より、鋼桁のキャンバー計算を行う際には、それぞれの床版の最終乾燥収縮量の予測を正確に行うなど、留意する必要があることもわかった。

今後の課題としては、内・外ケーブルを有する鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋を設計・施工するために、実際にクリープおよび乾燥収縮による経時挙動の測定実験を行って、解析値と実験値との比較・検討を行い、本研究での解析手法による実橋の経時挙動評価の妥当性の検証を行うとともに、実用的な設計手法を構築する予定である。また、近年、床版支間の拡大など、社会的要望の高い合理化を図った構造形式をも対象とした場合の検討も行う予定である。

参考文献

- 1) F.Nather: Stahlbrücken mit Doppelverbund, Bau intern, pp.238 ~ 245, 1994 年 12 月.
- 2) 栗田章光, 吉田順一郎, 大山 理: ヨーロッパにおける最近の鋼・コンクリート複合橋梁, 第 1 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.15 ~ 30, 1998 年 8 月.
- 3) F.Nather: Steel Bridges with Double Composite Action in Germany, 2nd Japanese-German Colloquium for Steel and Composite Bridges, XII-C-1 ~ XII-C-10, 1996 年 4 月.
- 4) 小坂 崇, 平野淳治, 栗田章光, 大山 理, 中條潤一: 外ケーブル方式多径間連続合成桁のクリープおよび乾燥収縮挙動に関する研究, 構造工学論文集 Vol.44A, pp.1587 ~ 1596, 1998 年 3 月.
- 5) 渡辺誠一, 六車 照: コンクリートのクリープひずみに関する一考察, 日本建築学会構造系論文報告集 第 402 号, pp.71 ~ 77, 1989 年 8 月.
- 6) 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.

- 7) 中井 博, 栗田章光, 亀井正博, 瀬野靖久: プレキャスト床版を用いた連続合成桁橋におけるクリープ・乾燥収縮性状の計測と解析, 土木学会論文集 No.453/VI-17, pp.117 ~ 124, 1992 年 9 月.
- 8) Y. Seno, K. Tomita, A. Kurita : Parametric Analysis on Creep and Shrinkage in Steel-Concrete Double Composite Continuous Box Girder Bridges, Proceeding of the 4th Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges, pp.557 ~ 569, December 1996.
- 9) 大山 理: 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の経時挙動に関する研究, 大阪工業大学修士学位論文, 1998 年 2 月.
- 10) 中井 博, 栗田章光, 富田耕司, 瀬野靖久: 外ケーブルを有する鋼・コンクリート合成桁橋のクリープ・乾燥収縮による影響評価, 鋼構造年次論文報告集, 1995 年.
- 11) 中井 博編: プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工, 森北出版, 1988 年 2 月.
- 12) 祖川武彦, 小坂 崇, 栗田章光, 瀬野靖久: 連続桁橋における外ケーブルの配置形状に関する研究, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集<第 I 部門>, 1995 年 10 月.
- 13) 大植康弘, 栗田章光, 大山 理: 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋における外ケーブルの配置形状に関する研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集<共通セッション>, pp.264 ~ 265, 1998 年 10 月.
- 14) 牛島祥貴: 外ケーブルを有する鋼コンクリート合成桁の経時挙動に関する研究, 大阪工業大学修士学位論文, 1994 年 2 月.

< 1998 年 9 月 18 日受付 >