

### (3) 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断面構成比の影響

Influence of Cross-Sectional Parameter on Time-Dependent Behavior  
in Steel-Concrete Double Composite Continuous Box Girder Bridge

大山 理\*      栗田 章光\*\*      渡辺 晃\*\*\*

Osamu OHYAMA, Akimitsu KURITA and Hiroshi Watanabe

\* 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)

\*\*\* 川田工業(株) 橋梁事業部 (〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11)

Recently, in Japan, the steel-concrete composite bridges aiming at the reducing construction cost and period and so on are adopting widely. On the other hand, in European countries, a new type of the composite bridges was developed and constructed for the same purpose in Japan. For instance, the steel-concrete double composite continuous box girder bridge, which has two concrete slabs at upper and lower surfaces of the steel box girder, is one of its examples. The lower concrete slab exists only in the region of the intermediate supports. One of the advantages by adopting this structural system is the increasing of the flexural rigidity of the steel box girder. However, the time-dependent behavior of this type of bridges are not yet clarified perfectly. This paper, therefore, deals with the influence of the cross-section parameter to the time-dependent behavior in steel-concrete double composite continuous box girder bridges.

*KeyWords* : shrinkage, creep, double composite girder, cross-sectional parameter

#### 1. はじめに

近年、わが国において、建設費縮減のための省力化・合理化および工期短縮・維持管理の簡略化などを目的とした新形式の鋼・コンクリート複合橋梁の開発・研究が積極的に行われ、現在建設中の第二東名・名神高速道路などで採用されている。一方、ヨーロッパ諸国においては、かなり以前より、わが国と同様の目的で、鋼・コンクリート複合橋梁の開発・研究が行われており、その一例として、1980年代後半にドイツで発展し、比較的長支間の連続桁橋梁に採用されている、鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋<sup>1)</sup>が挙げられる。

本橋梁形式は、図-1にも例示するように、連続桁橋梁において、中間支点領域のみ鋼箱桁内の底部にもコンクリート床版を配置することにより、中間支点領域の桁の剛性を合理的に増加させ、桁高を低くおさえられるなどの特長を有する。このような観点から、経済性や走行性、耐震性の面から、連続合成桁橋が採用される気運にある現在のわが国において、本橋梁形式も比較設計の対象となる構造形式の1つであると考えられる。

ここで、鋼・コンクリート複合橋梁の設計にあたっては、荷重や内および外ケーブルにより導入されるプレストレスなどの外力の作用による応力や変形を評価するだけでなく、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を考慮し、その挙動を正確に予測する必要がある。そこで、筆者らは、鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋を対象に、クリープおよび乾燥収縮に関する種々の検討を行っている<sup>2)</sup>。

本研究では、経時挙動評価に及ぼす種々のパラメータのうち、最も影響が大きいと考えられる断面構成比<sup>3),4)</sup>に着目した場合の挙動を解明することを目的とした。ここで、断面構成比とは、合成桁断面に占める鋼桁断面の割合であり、次式で定義されるものである(記号の説明については、図-4参照)。

$$\alpha_i = \frac{A_s I_s}{A_{vi} I_{vi}} \quad (i = U, L, D) \quad (1)$$

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・特長について説明し、現在、ドイツにおいて

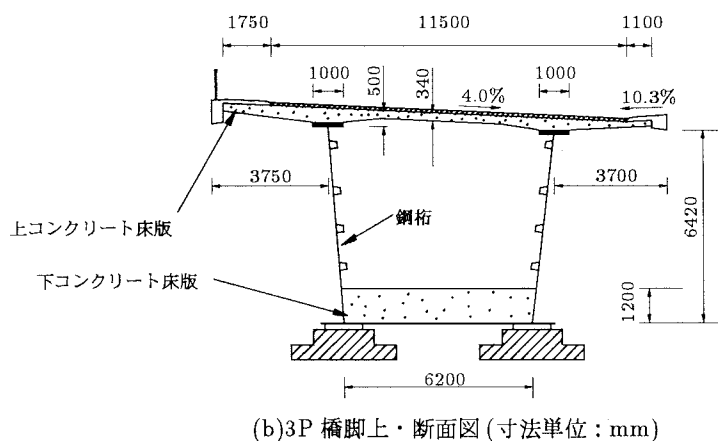
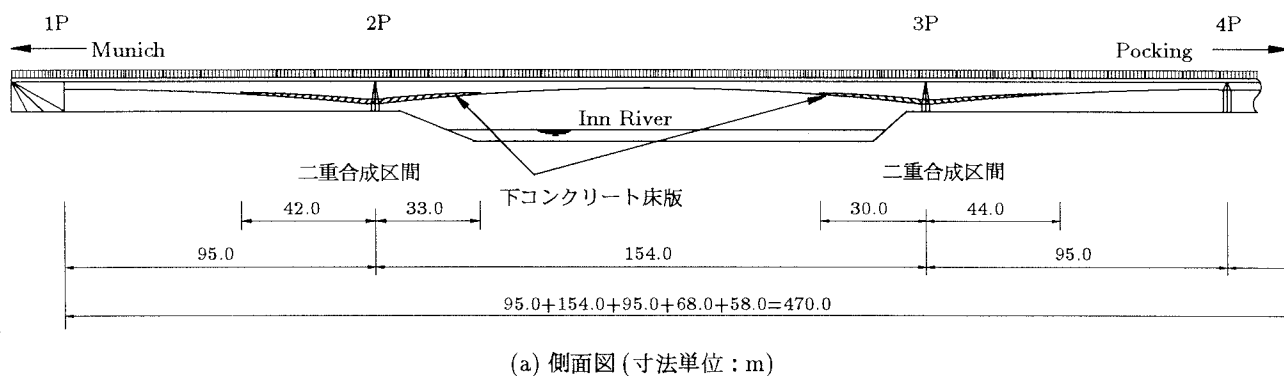


図-1 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋 (ドイツ・Inn 橋)

建設中の橋梁について紹介する。次に、クリープおよび乾燥収縮解析法の基礎について述べ、そして、3つの断面を対象に、経時挙動評価に及ぼす断面構成比の影響評価を行うための数値計算を行う。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

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合理的な考えに端を発している。ここで、本橋梁形式の施工事例として、ドイツ・Neuötting のイン (Inn) 川に現在建設中 (2000 年 12 月供用開始予定) の橋梁について紹介する。図-1 に本橋梁の側面図の一部と、3P 橋脚上の主桁横断面を示す。イン川兩岸、2P 橋脚上においては左右 75.0m、3P 橋脚上においては左右 74.0m の長さにわたって二重合成構造が採用されている。両橋脚上での下コンクリート床版の厚さは 120cm であり、その端部での厚さは 40cm となっている。

本橋以外の施工事例としては、ドイツのエルベ川を渡るトルガウ (Torgau) 橋 (53.0+106.0+65.0=224.0m)、わが国では、北海道横断自動車道・千歳ジャンクション C ランプ橋 (44.2+48.0+62.5+41.7=196.4m) などがある。このような合成方式を採用することにより、中間支点領域の桁の剛性を合理的に増すことが可能になるとともに、以下のような特長が挙げられる。

- 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、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効果も発揮する。

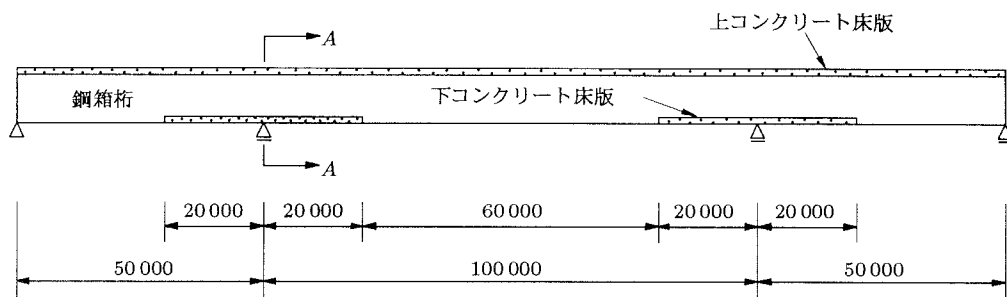


図-2 側面図 (寸法単位: mm)

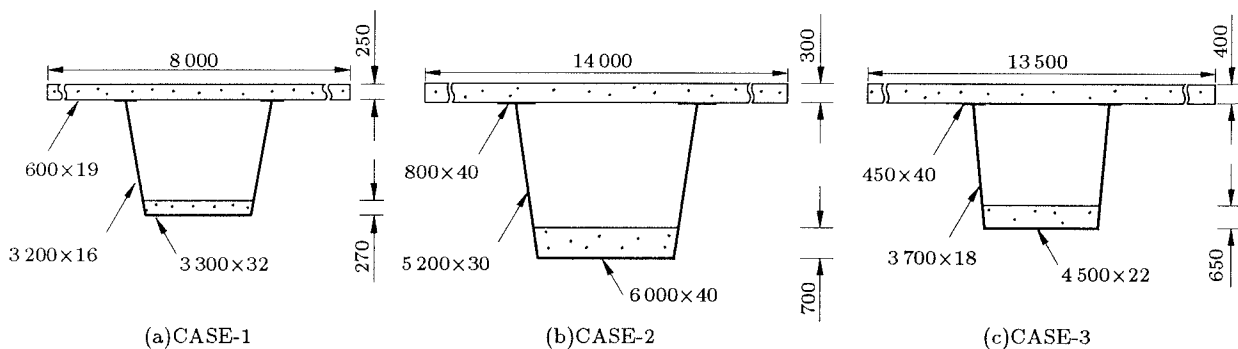


図-3 3種類の合成桁の横断面形状<sup>7)</sup> <断面 A-A> (寸法単位: mm)

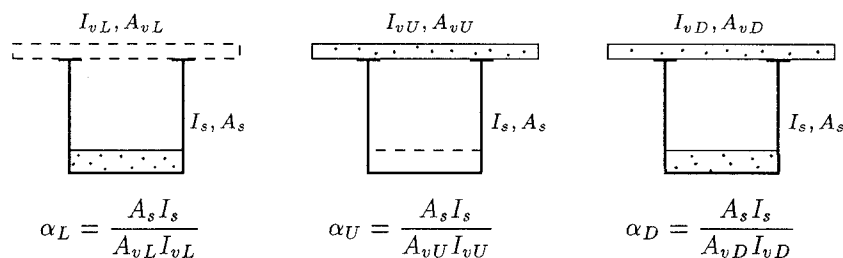


図-4 断面構成比に関するパラメータの定義

### 3. 経時挙動解析法

コンクリートのクリープひずみは、回復性のあるクリープひずみ (遅れ弾性クリープひずみ) と非回復性のクリープひずみ (フロークリープひずみ) との2成分で構成されると考えるのが、今日のクリープに関する一般的な知見である。したがって、本解析における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も考慮した応力ひずみ関係式を用いた<sup>3)</sup>。乾燥収縮解析においては、鋼桁による自由収縮の拘束作用を考慮した応力ひずみ関係式を用いた<sup>3), 5)</sup>。次に、クリープならびに乾燥収縮によって、上・下コンクリート床版、鋼桁に発生する断面力の変化量を、力のつり合い条件および変位 (ひずみ・曲率) の適合条件を用いて誘導した<sup>6)</sup>。

### 4. 解析条件

解析モデルの側面図を図-2に、断面構成比パラメータの計算に用いた3種類の合成桁断面 (断面 A-A) の形状寸法を図-3に示す。ここで、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は、一定として取り扱った。

次に、図-4に示す3ケースを断面構成比パラメータとして抽出し、検討を行うこととする。なお、各断面構成比パラメータ値は、表-1のとおりである。

表-1 断面構成比パラメータ値 (上・下コンクリート床版のヤング係数は一定、ヤング係数比  $n=7.0$ )

|                           | CASE-1 | CASE-2 | CASE-3 |
|---------------------------|--------|--------|--------|
| 下コンクリート床版・鋼桁 $\alpha_L$   | 0.514  | 0.356  | 0.286  |
| 上コンクリート床版・鋼桁 $\alpha_U$   | 0.147  | 0.198  | 0.079  |
| 上・下コンクリート床版・鋼桁 $\alpha_D$ | 0.077  | 0.072  | 0.023  |

表-2 断面構成比パラメータ値 (CASE-2・下コンクリート床版厚のみを変化させた場合)

|                           | 30cm  | 50cm  | 70cm  | 90cm  | 110cm |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 下コンクリート床版・鋼桁 $\alpha_L$   | 0.542 | 0.427 | 0.356 | 0.308 | 0.272 |
| 上コンクリート床版・鋼桁 $\alpha_U$   | 0.198 | 0.198 | 0.198 | 0.198 | 0.198 |
| 上・下コンクリート床版・鋼桁 $\alpha_D$ | 0.109 | 0.086 | 0.072 | 0.062 | 0.055 |

表-3 CASE-2 でのクリープによる変化応力度

| 下コンクリート<br>床版厚 | 下コンクリート床版<br>下縁 | 上コンクリート床版<br>上縁 |
|----------------|-----------------|-----------------|
| 30cm           | 0.43 (1.303)    | 0.65 (1.016)    |
| 50cm           | 0.38 (1.152)    | 0.65 (1.016)    |
| 70cm           | 0.33 (1.000)    | 0.64 (1.000)    |
| 90cm           | 0.30 (0.909)    | 0.62 (0.969)    |
| 110cm          | 0.27 (0.818)    | 0.61 (0.953)    |

(単位 :  $\text{N}/\text{mm}^2$ )

表-4 CASE-2 での乾燥収縮による変化応力度

| 下コンクリート<br>床版厚 | 下コンクリート床版<br>下縁 | 上コンクリート床版<br>上縁 |
|----------------|-----------------|-----------------|
| 30cm           | 1.16 (1.234)    | 1.58 (1.026)    |
| 50cm           | 1.04 (1.106)    | 1.56 (1.012)    |
| 70cm           | 0.94 (1.000)    | 1.54 (1.000)    |
| 90cm           | 0.86 (0.915)    | 1.51 (0.981)    |
| 110cm          | 0.79 (0.840)    | 1.48 (0.961)    |

(単位 :  $\text{N}/\text{mm}^2$ )

## 5. 数値計算結果と考察

まず、図-3 に示した 3 種類の断面のうち、CASE-2 に着目し、下コンクリート床版厚のみを 30cm から 110cm まで 20cm 間隔で変化させた場合のクリープおよび乾燥収縮に伴う変化応力度を時刻  $t = \infty$  について計算を行った。ただし、クリープ解析においては、上・下コンクリート床版に  $1\text{N}/\text{mm}^2$  の圧縮応力を導入するように定めた持続軸方向力  $P$  を時刻  $t_1=0$  において、上・下コンクリート床版に同時に作用させ、また、クリープ係数は、上・下コンクリート床版とも  $\phi = 2.0$  の値に固定した。一方、乾燥収縮解析においては、上・下コンクリート床版の最終乾燥収縮量を  $\varepsilon_{sh} = 20 \times 10^{-5}$ 、乾燥収縮に伴うクリープ係数  $\phi_{sh} = 4.0$ 、さらに、時刻  $t = 0$  において、同時に乾燥収縮が開始すると仮定して数値計算を行った。表-2 には、各下コンクリート床版厚に対する断面構成比の値を示す。

数値計算結果の一例として、CASE-2 の場合の中間支点部 (断面 A-A) の上コンクリート床版上縁ならびに下コンクリート床版下縁のクリープに伴う変化応力度の値を表-3 に、乾燥収縮に伴う変化応力度の値を表-4 にそれぞれ示す。応力度の符号については、+ は引張応力を表している。さらに、同表の ( ) 内には、下コンクリート床版厚 70cm を基準にした時の変化応力度比も示す。

表-3 および表-4 より、下コンクリート床版厚が増加するにつれて、下コンクリート床版に作用する引張応力の値は小さくなり、一方、上コンクリート床版に作用する引張応力の値は、ほとんど変化しないことがわかった。つまり、下コンクリート床版の変化応力度の値は、断面構成比  $\alpha_L$  の値が大きくなるのに伴って大きくなる傾向を示す。その理由としては、パラメータ  $\alpha$  の値が大きくなるほど、合成桁断面に占める鋼桁断面の割合が高くなることを意味しており、鋼桁の剛度が増すのに伴って、コンクリート床版のクリープ・乾燥収縮に対する拘束力が大きくなり、クリープ・乾燥収縮の影響がより顕著になるからである。したがって、上コンクリート床版の変化応力度の値に変化が見られないのは、断面構成比  $\alpha_U$  の値が変化しないからである。

次に、CASE-1~3 の断面を対象に、先程と同様の数値計算条件で検討を行った。その結果として、中間支点部の上コンクリート床版上縁ならびに下コンクリート床版下縁のクリープに伴う変化応力度と断面構成比パラメータ  $\alpha$  との関係を図-5 に、乾燥収縮に伴う変化応力度と断面構成比  $\alpha$  との関係を図-6 にそれぞれ示す。図-5 および図-6 より、先の計算結果と同様に、下コンクリート床版の変化応力度は、断面構成比  $\alpha_L$  の値が大きくなるのに伴って大きくなる。同様に、上コンクリート床版の変化

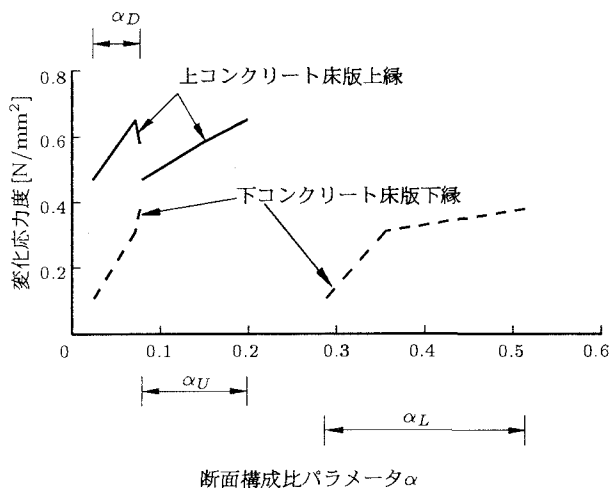


図-5 断面構成比の影響 (クリープ)

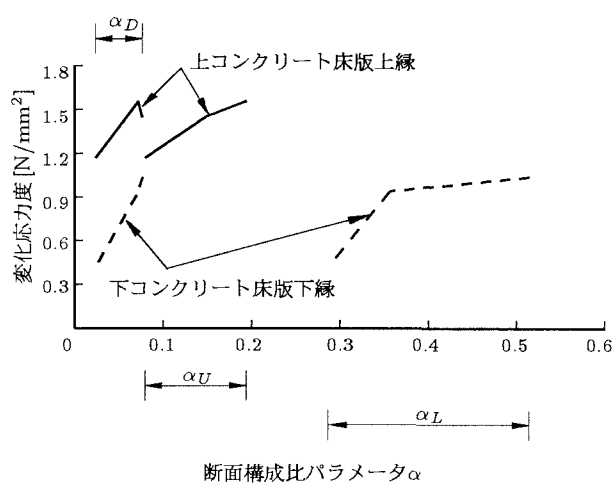


図-6 断面構成比の影響 (乾燥収縮)

表-4 乾燥収縮に伴うクリープ係数 ( $\phi_{sh}$ ) をパラメータとした場合の変化応力度 (単位:  $\text{N/mm}^2$ )

(a) 下コンクリート床版下縁

| 断面構成比 $\alpha_L$  | $\phi_{sh}$ | 静定系          | 不静定系          |
|-------------------|-------------|--------------|---------------|
| 0.286<br>(CASE-3) | 2.0         | 1.53 (1.237) | -1.33 (1.609) |
|                   | 3.0         | 1.37 (1.035) | -1.03 (1.244) |
|                   | 4.0         | 1.24 (1.000) | -0.83 (1.000) |
|                   | 5.0         | 1.13 (0.912) | -0.68 (0.826) |
|                   | 6.0         | 1.04 (0.791) | -0.58 (0.697) |
| 0.356<br>(CASE-2) | 2.0         | 1.72 (1.280) | -0.71 (1.750) |
|                   | 3.0         | 1.51 (1.123) | -0.53 (1.293) |
|                   | 4.0         | 1.35 (1.000) | -0.41 (1.000) |
|                   | 5.0         | 1.21 (0.901) | -0.33 (0.799) |
|                   | 6.0         | 1.10 (0.820) | -0.27 (0.655) |
| 0.514<br>(CASE-1) | 2.0         | 2.23 (1.354) | -1.07 (1.764) |
|                   | 3.0         | 1.89 (1.151) | -0.79 (1.298) |
|                   | 4.0         | 1.65 (1.000) | -0.61 (1.000) |
|                   | 5.0         | 1.45 (0.884) | -0.48 (0.796) |
|                   | 6.0         | 1.31 (0.791) | -0.40 (0.651) |

(b) 上コンクリート床版上縁

| 断面構成比 $\alpha_U$  | $\phi_{sh}$ | 静定系          | 不静定系         |
|-------------------|-------------|--------------|--------------|
| 0.079<br>(CASE-3) | 2.0         | 0.44 (1.074) | 1.09 (1.437) |
|                   | 3.0         | 0.43 (1.036) | 0.89 (1.180) |
|                   | 4.0         | 0.41 (1.000) | 0.76 (1.000) |
|                   | 5.0         | 0.40 (0.967) | 0.65 (0.840) |
|                   | 6.0         | 0.39 (0.936) | 0.57 (0.760) |
| 0.147<br>(CASE-1) | 2.0         | 0.79 (1.136) | 1.22 (1.526) |
|                   | 3.0         | 0.74 (1.063) | 0.97 (1.217) |
|                   | 4.0         | 0.70 (1.000) | 0.80 (1.000) |
|                   | 5.0         | 0.66 (0.944) | 0.67 (0.840) |
|                   | 6.0         | 0.62 (0.894) | 0.57 (0.717) |
| 0.198<br>(CASE-2) | 2.0         | 1.08 (1.187) | 1.03 (1.644) |
|                   | 3.0         | 0.99 (1.085) | 0.78 (1.257) |
|                   | 4.0         | 0.91 (1.000) | 0.62 (1.000) |
|                   | 5.0         | 0.85 (0.928) | 0.51 (0.818) |
|                   | 6.0         | 0.79 (0.865) | 0.43 (0.683) |

応力度も、断面構成比 $\alpha_U$ の値が大きくなるのに伴って大きくなる傾向を示すことがわかった。一方、図-5および図-6より、断面構成比 $\alpha_D$ の大きさに変化応力度を議論した場合、上コンクリート床版の応力評価の際に矛盾が生じることがわかる。

最後に、他のパラメータと断面構成比の関係を調べるために、一例として乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\phi_{sh}$ を挙げ、その値を2.0~6.0の範囲で5種類に変え、数値計算を行った。それらの数値計算結果の一例を表-4に示す。この表の中には、 $\phi_{sh}=4.0$ を基準にした時の変化応力度の比も( )内に示してある。

表-4より、乾燥収縮に伴うクリープ係数の値が大きくなると、変化応力度の値が小さくなることがわかった。こ

れは、クリープ係数の値が大きくなるのに伴って、乾燥収縮のクリープによる緩和作用が強くなるからである。また、上の傾向は、断面構成比 $\alpha$ の値が大きくなるほど、より顕著になることがわかった。さらに、不静定系におけるクリープ係数の影響は、静定系よりも大きくなり、この傾向は、断面構成比 $\alpha$ が大きくなるのに伴って、さらに顕著になっていることもわかった。

## 6. 結論

本文は、近年、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を対象に、経時挙動評価に及ぼす種々のパラメータのうち、最も影響が大きい

と考えられる断面構成比に着目した場合の挙動を説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) 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋でのクリープおよび乾燥収縮による応力変化を評価する際、上コンクリート床版の場合は、上コンクリート床版と鋼桁の断面構成比 $\alpha_U$ を、一方、下コンクリート床版の場合は、下コンクリート床版と鋼桁の断面構成比 $\alpha_L$ を用いることが合理的であることがわかった。
- (2) クリープおよび乾燥収縮に伴う下コンクリート床版の変化応力度は、断面構成比 $\alpha_L$ の値が大きくなるのに伴って大きくなり、一方、上コンクリート床版の変化応力度は、断面構成比 $\alpha_U$ の値が大きくなるのに伴って大きくなる傾向を示すことがわかった。この理由としては、パラメータ $\alpha$ の値が大きくなるほど、クリープ・乾燥収縮に対する鋼桁の拘束力が大きくなるからである。
- (3) 断面構成比パラメータ $\alpha$ の増大に伴う応力変化量の増加割合は、上コンクリート床版よりも下コンクリート床版の方が大きくなる。
- (4) 乾燥収縮に伴うクリープ係数の値が大きくなると、変化応力度の値が小さくなり、その傾向は、断面構成比 $\alpha$ の値が大きくなるほどより顕著になることがわかった。

したがって、本橋梁形式の断面決定を行う際には、合成桁断面に占める鋼桁断面の割合である断面構成比 $\alpha$ の値に留意する必要があることがわかった。

今後の課題としては、実験による理論の検証が挙げられる。そのため、現在、比較的大型の供試体を製作し、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いる。その実験値と解析値との比較・検討を行うことにより、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。

なお、本研究は、鋼材倶楽部・平成11年度土木鋼構造教育助成金から研究費の補助を受けて行われている。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 例えば, 大山 理, 栗田章光, 瀬野靖久, 富田耕司: 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, 構造工学論文集 Vol.45A, pp.1477 ~ 1488, 1999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・学位論文, 1992年9月.
- 4) 大山 理, 栗田章光: 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の経時挙動評価における断面構成比の影響, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, pp. 354~355, 1999年9月.
- 5) (社)土木学会: 構造工学シリーズ 9-A 鋼・コンクリート複合構造の理論と設計 (1) 基礎編: 理論編, 丸善(株), pp.53 ~ 77, 1999年4月.
- 6) 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.
- 7) 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.