

# (33) 鋼コンクリート合成床版を有する 連続合成桁橋の経時挙動に関する解析的研究

平松 唯<sup>1</sup>・山本 将士<sup>2</sup>・今川 雄亮<sup>3</sup>・大山 理<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 大阪工業大学大学院 工学研究科都市デザイン工学専攻 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)  
E-mail:m1m16108@st.oit.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工修 日本ファブテック株式会社 橋梁設計部 (〒550-0001 大阪市西区土佐堀1丁目3番7号)  
E-mail:masashi\_yamamoto@j-fab.co.jp

<sup>3</sup>正会員 工博 大阪工業大学特任講師 工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)  
E-mail: yusuke.imagawa@oit.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 工博 大阪工業大学教授 都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)  
E-mail: osamu.oyama@oit.ac.jp

近年、合理化橋梁の普及に伴い、工期短縮・コスト削減を目指した複合構造の研究・開発が行われている。その一つとして、鋼コンクリート合成床版は、床版の床材に鋼板を使用し、ずれ止めにより底鋼板とコンクリートを一体化させた構造で、疲労耐久性が高く、主桁間隔の長支間化が可能となるなどの利点を有している。しかし、従来のコンクリート床版と比べて鋼材量が多くなるため、鋼材の拘束によるコンクリートのクリープや乾燥収縮に起因するひび割れの発生が懸念される。さらに、連続桁橋では中間支点付近に発生する負曲げモーメントの影響についても考慮する必要がある。そこで、本文は、PC床版および合成床版を有する鋼2径間連続合成桁橋の乾燥収縮およびクリープによる経時挙動に着目し、その影響評価を解析的に比較・検討した結果について報告する。

**Key Words :** *shrinkage, creep, steel-concrete composite slab, continuous composite girder bridges*

## 1. はじめに

近年、合理化、工期短縮およびコスト削減を目指した複合・合成構造の研究・開発が積極的に行われている<sup>1)</sup>。

鋼とコンクリートを用いた合成構造である合成桁橋は、床版と鋼桁を適切なずれ止めによって、両者が一体となって働くように設計された橋梁形式である。

また、鋼桁と一体となる床版として、最近では、鋼コンクリート合成床版(以下、合成床版と略記)の適用が増加している。合成床版とは、床版の床材に鋼板を使用し、ずれ止めを用いて鋼板とコンクリートを一体化させた構造であり、床版に作用する引張力を底鋼板が受け持つため、床版厚を薄くすることが可能である。また、疲労耐久性については概ね立証されており、高耐久性床版として位置づけられ、主桁間隔の長支間化が可能な構造である<sup>2)</sup>。

しかし、合成床版は注目されてから日が浅いため、合成構造固有の問題である経時挙動については、未だ解明されていない点があるのが現状である<sup>3)</sup>。経時挙動のひ

とつである乾燥収縮の影響は、現在、合成桁に合成床版を適用した場合の設計において、道路橋示方書・同解説 II : 鋼橋編<sup>4)</sup>に記載される鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版と略記)やプレストレストコンクリート床版(以下、PC床版と略記)として規定されている値を用いている。しかし、合成床版は底鋼板やリブ等の補剛材により、RC床版やPC床版と比べて鋼材量が多くなるため、鋼材の拘束により、乾燥収縮の影響も異なることが予想される。また、乾燥収縮だけでなく、同じく経時挙動のひとつであるクリープに起因するコンクリートのひび割れの発生が懸念される。さらに、近年、適応の増えている連続合成桁橋に合成床版を採用する場合には、経時挙動の影響に加えて、中間支点付近に発生する負曲げモーメントの影響についても考慮する必要がある。

そこで、本文は、合成床版および比較のためにPC床版を有する鋼2径間連続合成桁橋の乾燥収縮およびクリープによる経時挙動に着目し、各部材に発生する断面力の変化量算定式を誘導するとともに、数値計算を行い、その影響評価を行った結果について報告する。

## 2. 乾燥収縮解析法

### (1) コンクリートの乾燥収縮現象

乾燥収縮とは、コンクリートが時間の経過とともに硬化するのに伴って、コンクリート中の水分が失われ、収縮が生じる現象である。コンクリートの乾燥収縮量は、コンクリートの配合、構造部材の形状、寸法ならびに部材周辺の温度、湿度などの影響を大きく受ける。したがって、乾燥収縮量の決定に際しては、これらの影響を考慮しなければならない。また、道路橋示方書・同解説II：鋼橋編<sup>4)</sup>には、これらの影響やコンクリート中に配置される鉄筋の拘束効果も考慮した乾燥収縮量の設計用値 $200 \times 10^6$ が示されている。

### (2) 乾燥収縮に伴うコンクリートの応力ひずみ関係式

コンクリートの乾燥収縮によるひずみ進行は、指数関数により精度よく近似できることが明らかにされている。これを踏まえ、解析の基礎となる乾燥収縮に伴うコンクリートの応力ひずみ関係式を導くと式(1)が得られる<sup>5)</sup>。

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

ここに、

- $\Delta \varepsilon_{sh,t}$  : 乾燥収縮によるひずみの変化量
- $\Delta \sigma_t$  : 乾燥収縮による応力の変動量
- $\varphi_{sh,t}$  : 時刻  $t$  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
- $E_c$  : コンクリートのヤング係数

## 3. クリープ解析法

### (1) コンクリートのクリープ現象

クリープとは、一定の荷重を持続载荷した場合、時間の経過とともにひずみが進行する現象である。コンクリートのクリープひずみは、回復性のある遅れ弾性クリープひずみと非回復性のフロークリープひずみの2成分から構成されているが、現行の道路橋示方書・同解説II：鋼橋編において回復クリープは考慮されていない<sup>6)</sup>。

### (2) クリープに伴うコンクリートの応力ひずみ関係式

より厳密なクリープ解析を行うために、非回復性および回復性クリープの影響について考慮したコンクリートの応力ひずみ関係式の誘導を行った。以下に、クリープに伴うコンクリートの応力ひずみ関係式を示す<sup>6)</sup>。

$$\Delta \varepsilon_{c,t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_c} \varphi_{t-t_1} + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_c} (1 + \eta) \quad (2)$$

ここに、

- $\Delta \varepsilon_{c,t-t_1}$  : 載荷材齢  $t_1$  から任意時刻  $t$  に至るまでのコンクリートのクリープに伴うひずみの変化量
- $\sigma_{t_1}$  : 載荷材齢  $t_1$  における一定の持続応力
- $\Delta \sigma_{t-t_1}$  : 載荷材齢  $t_1$  の直後から連続的に減少する変動応力
- $\varphi_{t-t_1}$  : 載荷材齢  $t_1$  から任意時刻  $t$  に至るまでのクリープ係数

ここで、 $\eta$  は回復クリープを考慮した場合の係数であり、次式のようにおく。

$$\eta = \frac{1}{2} \varphi_{t-t_1} + \frac{\varphi_{d,\infty}}{\varphi_{t-t_1}} \left[ \frac{1}{2} \varphi_{d,\infty} \left\{ 1 - e^{-2k_3(t-t_1)} - 2k_3(t-t_1)e^{-k_3(t-t_1)} \right\} + \varphi_{f,\infty} \left\{ \frac{k_3}{k_3 - k_4} \left( e^{-k_3(t-t_1) - k_4 t} - e^{-k_4 t} \right) + \frac{k_3}{k_3 + k_4} \left( e^{-k_4 t} - e^{-k_3(t-t_1) - k_4 t} \right) \right\} \right] \quad (3)$$

ここに、

- $\varphi_{d,\infty}$  : 遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数の最終値
- $\varphi_{f,\infty}$  : フロークリープひずみに対するクリープ係数の最終値
- $k_3, k_4$  : 遅れ弾性ひずみとフロークリープひずみに対するクリープ係数の進行を表す無次元係数

また、回復クリープを考慮しない場合には、 $\eta$  は次式のようになる。

$$\eta = \frac{1}{2} \varphi_{t-t_1} \quad (4)$$

## 4. 乾燥収縮およびクリープ解

乾燥収縮およびクリープによって各部材に発生する断面力の変化量算定式の誘導を行う。ここでは、コンクリート床版( $C$ )、鉄筋( $R$ )、底鋼板( $A$ )ならびに鋼桁( $S$ )の各部材に作用する軸方向力( $N$ )と曲げモーメント( $M$ )とに分けて解析を行う分担断面力法を用いる。

乾燥収縮およびクリープによって各部材に作用する断面力の変化量算定式を誘導するにあたって、以下の仮定を設ける。

1. 平面保持の仮定が成立する。
2. コンクリート床版、鉄筋、底鋼板ならびに鋼桁は完全合成されている。

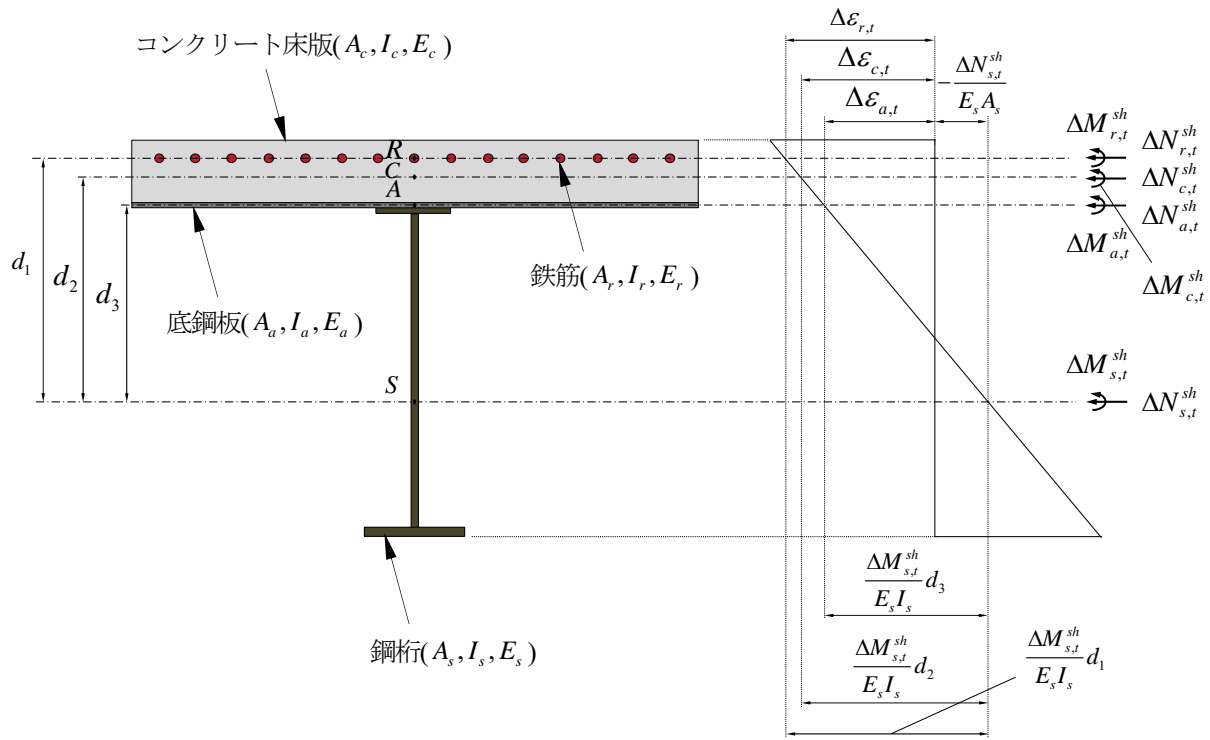


図-1 乾燥収縮に伴う合成床版を有する合成桁断面のひずみ分布および分担断面力変化量<sup>7)</sup>

一例として、合成床版を有する合成桁断面において乾燥収縮によって生じるひずみ分布と分担断面力変化量を図-1に示す<sup>7)</sup>。

任意時刻 $t$ における断面力のつり合い条件式は、

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{c,t}^{sh} + \Delta N_{r,t}^{sh} + \Delta N_{a,t}^{sh} + \Delta N_{s,t}^{sh} &= 0 \\ \Delta N_{c,t}^{sh} \cdot d_2 + \Delta M_{c,t}^{sh} + \Delta N_{r,t}^{sh} \cdot d_1 + \Delta M_{r,t}^{sh} \\ + \Delta N_{a,t}^{sh} \cdot d_3 + \Delta M_{a,t}^{sh} + \Delta M_{s,t}^{sh} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となる。ここに、

$\Delta N_{c,t}^{sh}, \Delta M_{c,t}^{sh}$  : 任意時刻 $t$ におけるコンクリート床版の分担軸方向力の変化量および分担曲げモーメントの変化量

$\Delta N_{r,t}^{sh}, \Delta M_{r,t}^{sh}$  : 任意時刻 $t$ における鉄筋の分担軸方向力および分担曲げモーメントの変化量

$\Delta N_{a,t}^{sh}, \Delta M_{a,t}^{sh}$  : 任意時刻 $t$ における底鋼板の分担軸方向力および分担曲げモーメントの変化量

$\Delta N_{s,t}^{sh}, \Delta M_{s,t}^{sh}$  : 任意時刻 $t$ における鋼桁の分担軸方向力および分担曲げモーメントの変化量

つぎに、コンクリート床版の図心位置 $C$ 、鉄筋の図心位置 $R$ ならびに底鋼板の図心位置 $A$ における乾燥収縮ひずみの変化量 $\Delta \varepsilon_{c,t}$ 、 $\Delta \varepsilon_{r,t}$ および $\Delta \varepsilon_{a,t}$ は、式(1)より、それぞれ次式で表すことができる。

$$\Delta \varepsilon_{c,t} = \left( 1 + \frac{1}{2} \varphi_{sh,t} \right) \frac{\Delta N_{c,t}^{sh}}{E_c A_c} + \varepsilon_{sh,t} \quad (6)$$

$$\Delta \varepsilon_{r,t} = \frac{\Delta N_{r,t}^{sh}}{E_r A_r} \quad (7)$$

$$\Delta \varepsilon_{a,t} = \frac{\Delta N_{a,t}^{sh}}{E_a A_a} \quad (8)$$

一方、コンクリート床版の図心位置 $C$ 、鉄筋の図心位置 $R$ ならびに底鋼板の図心位置 $A$ における乾燥収縮ひずみの変化量 $\Delta \varepsilon_{c,t}$ 、 $\Delta \varepsilon_{r,t}$ および $\Delta \varepsilon_{a,t}$ を、鋼桁の分担断面力 $\Delta N_{s,t}^{sh}$ および $\Delta M_{s,t}^{sh}$ を用いて表すと、それぞれ次式のようになる。

$$\Delta \varepsilon_{c,t} = \frac{\Delta N_{s,t}^{sh}}{E_s A_s} + \frac{\Delta M_{s,t}^{sh}}{E_s I_s} d_2 \quad (9)$$

$$\Delta \varepsilon_{r,t} = \frac{\Delta N_{s,t}^{sh}}{E_s A_s} + \frac{\Delta M_{s,t}^{sh}}{E_s I_s} d_1 \quad (10)$$

$$\Delta \varepsilon_{a,t} = \frac{\Delta N_{s,t}^{sh}}{E_s A_s} + \frac{\Delta M_{s,t}^{sh}}{E_s I_s} d_3 \quad (11)$$

また、コンクリート床版、鉄筋、底鋼板ならびに鋼桁の曲率変化はそれぞれ次のように求められる。

$$\Delta \theta_{c,t} = \left( 1 + \frac{1}{2} \varphi_{sh,t} \right) \frac{\Delta M_{c,t}^{sh}}{E_c I_c} \quad (12)$$

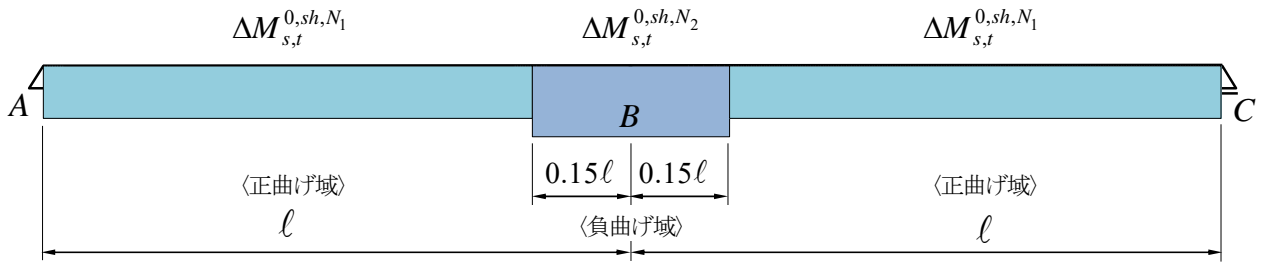


図-2 乾燥収縮に伴う不静定力を算出するための荷重載荷図<sup>8)</sup>

$$\Delta\theta_{r,t} = \frac{\Delta M_{r,t}^{sh}}{E_r I_r} \quad (13)$$

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\Delta M_{a,t}^{sh}}{E_a I_a} \quad (14)$$

$$\Delta\theta_{s,t} = \frac{\Delta M_{s,t}^{sh}}{E_s I_s} \quad (15)$$

式(5)-式(15)より、8つの未知量(断面力の変化量)に関する連立方程式が得られる。これを解くことにより、乾燥収縮によって発生する各部材の分担断面力変化量を求めることができる。

つづいて、算出された分担断面力の変化量を用いて乾燥収縮に伴う変化応力度を算出する。一例として、コンクリート床版上縁における乾燥収縮に伴う変化応力度 $\Delta\sigma_{cu}$ は、次式で算出することができる。

$$\sigma_{cu} = \frac{\Delta N_{c,t}^{sh}}{A_c} + \frac{\Delta M_{c,t}^{sh}}{I_c} Z_{cu} \quad (16)$$

ここで、式中の $A_c$ 、 $I_c$ 、 $Z_{cu}$ は、それぞれ、コンクリート床版の断面積、コンクリート床版の断面2次モーメント、コンクリート床版の図心軸から床版上縁までの距離を表す。

なお、クリープについても、乾燥収縮と同様の手順により各部材に発生する分担断面力の変化量算定式の誘導を行い、その値を用いて、クリープに伴う各部材の変化応力度を求めることができる。

## 5. 乾燥収縮・クリープ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

対象とする連続桁橋では、乾燥収縮およびクリープによって梁全体に発生する内部応力を中間支点が拘束することにより、拘束力が発生する。この拘束力を不静定力と呼び、連続桁橋における乾燥収縮およびクリープによる挙動を考える際には、この影響を考慮しなければならない。したがって、本解析では、以下の2段階に分け

て分担断面力の変化量を算出し、最終的に両者を足し合わせて評価することにする。

- 1) 静定基本系における分担断面力の変化量
- 2) 不静定力の変化に伴う分担断面力の変化量

ここでも、一例として乾燥収縮に着目し、まず、前章で述べた方法により、静定基本系における乾燥収縮による分担断面力を算定する。

つぎに、乾燥収縮による構造全体系の変化量を算定する。本解析は、鋼桁に着目し、分担断面力の変化量を荷重項とみなし(図-2参照)、再度、構造系全体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、鋼桁に関する剛性を用いる。ここで、対象橋梁は2径間連続合成桁橋であるため、正曲げ域および負曲げ域が存在する。負曲げ域は、実際の橋梁設計を参考に、各側径間に0.15を乗じた長さをとしている(図-2参照)。また、同図より、 $\Delta M_{s,t}^{0,sh,N_1}$  および  $\Delta M_{s,t}^{0,sh,N_2}$  は、それぞれ、静定基本系における正曲げ域の乾燥収縮に伴う鋼桁の分担曲げモーメントおよび負曲げ域の乾燥収縮に伴う鋼桁の分担曲げモーメントを示している。

最終的に、前述したように、算出した静定基本系に対する変化量と不静定系に対する変化量を足し合わせることによって、乾燥収縮による分担断面力の総変化量を算出することができる。また、双方足し合わせたものを全体系とする。

なお、クリープについても同様の手法を用いて分担断面力の変化量を算出するが、負曲げ域において、クリープの影響は無視することとする。

## 6. 数値計算結果と考察

### (1) 解析条件

解析モデルは、支間長104.5mの鋼2径間連続合成桁橋である。照査断面は、図-3に示すように後死荷重載荷時の最大曲げモーメント発生位置とし、支点A側から順に、断面①および断面②とする。一例として、各照査断面に

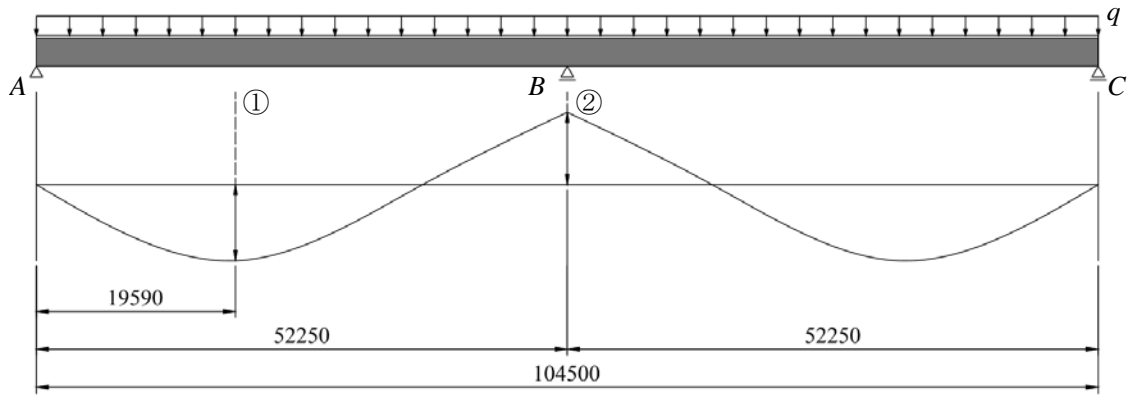
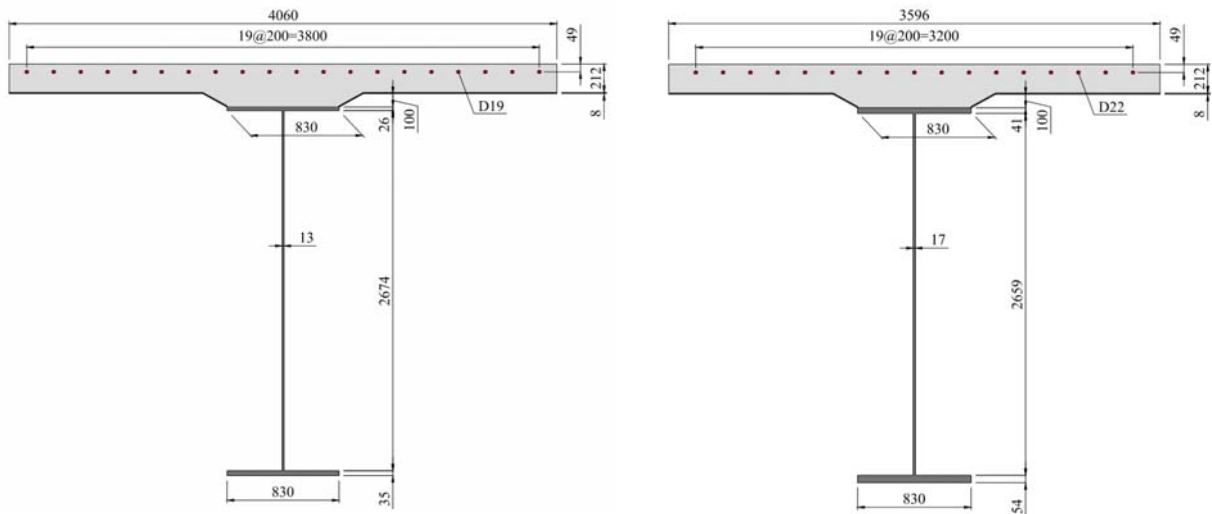


図-3 側面および照査断面(寸法単位: mm)



(a) 合成床版を有する合成桁 - 断面①

(b) 合成床版を有する合成桁 - 断面②

図-4 断面図(寸法単位: mm)

表-1 解析条件

項目		数値
乾燥収縮	最終クリープ係数 $\phi_{sh,\infty}$	4.0
	相対湿度 $RH$ (%)	60
	単位水量 $W$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	180
乾燥収縮ひずみの最終値 $\varepsilon_{sh,\infty}$	断面①	$508 \times 10^{-6}$
	断面②	$516 \times 10^{-6}$
クリープ	遅れ弾性クリープ係数 $\phi_{d,\infty}$	0.4
	フロークリープ係数 $\phi_{f,\infty}$	1.6
コンクリートのヤング係数 $E_c$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )		$3.0 \times 10^4$
鉄筋のヤング係数 $E_s$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )		$2.0 \times 10^5$
底鋼板のヤング係数 $E_a$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )		$2.0 \times 10^5$
鋼桁のヤング係数 $E_s$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )		$2.0 \times 10^5$
コンクリートの設計基準強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	$f_{cs}$ PC床版	40
	合成床版	30

おける合成床版を有する合成桁断面(以下, 合成床版断面と略記)をそれぞれ図-4に示す. なお, PC床版を有する合成桁断面(以下, PC床版断面と略記)の鋼桁寸法は, 各照査断面において合成床版断面と等しく, 床版厚は両断面ともに260mmとする. 鉄筋は, 照査断面①ではD19, 照査断面②ではD22を用い, 上段・下段ともに鉄筋の配置間隔は125mmとする.

つぎに, 表-1に解析条件を示す. ここで, 乾燥収縮ひずみの最終値は, 既往の研究成果<sup>9)</sup>より, 現行の道路橋示方書・同解説II: 鋼橋編<sup>4)</sup>に示されている数値 $200 \times 10^{-6}$ より, プレーンコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値が $400 \times 10^{-6}$ 程度になることが導かれている. しかし, 近年の研究成果ではその値が $400 \times 10^{-6}$ 以上を示すことが明らかとなっている<sup>9)</sup>. そこで, 本解析では, 式(17)を用いてコンクリートと大気との接触面積を考慮し<sup>10)</sup>, 対象断面ごとにプレーンコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値を算出した. ここでは, コンクリートの体積を $V$ とし, コンクリートが外気に接する表面積 $S$ として, 合成床版断面では床版上面のみ, PC床版断面では床版上面および下面を考慮している. なお, 乾燥収縮ひずみの最終値は断面において一定とする.

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78 \left\{ 1 - \exp\left(\frac{RH}{100}\right) \right\} + 38 \log_e W - 5 \left\{ \log_e \left( \frac{V/S}{10} \right) \right\}^2 \quad (17)$$

表-2 照査断面①におけるクリープおよび乾燥収縮に伴う応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

〈照査断面①〉			PC床版						合成床版					
			クリープ			乾燥収縮			クリープ			乾燥収縮		
			静定	不静定	全体系	静定	不静定	全体系	静定	不静定	全体系	静定	不静定	全体系
コンクリート	上縁	$\sigma_{cu}$	0.5	0.1	0.6	2.4	0.7	3.1	0.6	0.1	0.7	3.0	0.5	3.5
	下縁	$\sigma_{cl}$	0.2	0.0	0.2	2.7	0.5	3.2	0.4	0.0	0.4	3.2	0.4	3.6
鉄筋	中央	$\sigma_r$	-7.9	0.6	-7.3	-53.3	12.4	-40.9	-6.4	0.5	-5.9	-41.4	9.4	-32.0
底鋼板	上縁	$\sigma_{au}$	-	-	-	-	-	-	-6.0	0.4	-5.6	-38.8	7.8	-31.0
	下縁	$\sigma_{al}$	-	-	-	-	-	-	-6.0	0.4	-5.6	-38.6	7.7	-30.9
鋼桁	上縁	$\sigma_{su}$	-7.2	0.5	-6.7	-48.3	9.4	-38.9	-5.7	0.4	-5.3	-36.9	6.7	-30.2
	下縁	$\sigma_{sl}$	1.7	-1.6	0.1	11.0	-26.0	-15.0	1.5	-1.3	0.2	9.5	-21.4	-11.9

表-3 照査断面②におけるクリープおよび乾燥収縮に伴う応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

〈照査断面②〉			PC床版						合成床版					
			クリープ			乾燥収縮			クリープ			乾燥収縮		
			静定	不静定	全体系	静定	不静定	全体系	静定	不静定	全体系	静定	不静定	全体系
コンクリート	上縁	$\sigma_{cu}$	-	0.1	0.1	3.0	1.6	4.6	-	0.1	0.1	3.4	1.2	4.6
	下縁	$\sigma_{cl}$	-	0.1	0.1	3.2	1.3	4.5	-	0.1	0.1	3.6	0.9	4.5
鉄筋	中央	$\sigma_r$	-	1.6	1.6	-44.1	30.2	-13.9	-	1.3	1.3	-35.6	23.0	-12.6
底鋼板	上縁	$\sigma_{au}$	-	-	-	-	-	-	-	1.1	1.1	-33.4	19.9	-13.5
	下縁	$\sigma_{al}$	-	-	-	-	-	-	-	1.1	1.1	-33.3	19.7	-13.6
鋼桁	上縁	$\sigma_{su}$	-	1.3	1.3	-40.1	24.3	-15.8	-	1.0	1.0	-31.9	17.7	-14.2
	下縁	$\sigma_{sl}$	-	-2.8	-2.8	8.2	-46.6	-38.4	-	-2.3	-2.3	7.1	-38.6	-31.5

表-4 照査断面①における後死荷重, クリープおよび乾燥収縮に伴う応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

〈照査断面①〉			PC床版				合成床版			
			後死荷重	クリープ	乾燥収縮	合計	後死荷重	クリープ	乾燥収縮	合計
コンクリート	上縁	$\sigma_{cu}$	-1.2	0.6	3.1	2.5	-1.2	0.7	3.5	3.0
	下縁	$\sigma_{cl}$	-0.8	0.2	3.2	2.6	-0.8	0.4	3.6	3.2
鉄筋	中央	$\sigma_r$	-7.0	-7.3	-40.9	-55.2	-7.0	-5.9	-32.0	-44.9
底鋼板	上縁	$\sigma_{au}$	-	-	-	-	-5.7	-5.6	-31.0	-42.3
	下縁	$\sigma_{al}$	-	-	-	-	-5.6	-5.6	-30.9	-42.1
鋼桁	上縁	$\sigma_{su}$	-4.2	-6.7	-38.9	-49.8	-4.4	-5.3	-30.2	-39.9
	下縁	$\sigma_{sl}$	27.8	0.1	-15.0	12.9	28.2	0.2	-11.9	16.5

表-5 照査断面②における後死荷重, クリープおよび乾燥収縮に伴う応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

〈照査断面②〉			PC床版				合成床版			
			後死荷重	クリープ	乾燥収縮	合計	後死荷重	クリープ	乾燥収縮	合計
コンクリート	上縁	$\sigma_{cu}$	2.5	0.1	4.6	7.2	2.7	0.1	4.6	7.4
	下縁	$\sigma_{cl}$	1.8	0.1	4.5	6.4	2.2	0.1	4.5	6.8
鉄筋	中央	$\sigma_r$	15.2	1.6	-13.9	2.9	17.2	1.3	-12.6	5.9
底鋼板	上縁	$\sigma_{au}$	-	-	-	-	15.2	1.1	-13.5	2.8
	下縁	$\sigma_{al}$	-	-	-	-	15.1	1.1	-13.6	2.6
鋼桁	上縁	$\sigma_{su}$	15.2	1.3	-15.8	0.7	13.1	1.0	-14.2	-0.1
	下縁	$\sigma_{sl}$	-40.3	-2.8	-38.4	-81.5	-38.9	-2.3	-31.5	-72.7

以上の解析条件を用いて、各断面における乾燥収縮およびクリープに伴う応力度を比較・検討することで、鋼材の拘束度合いを検証する。

## (2) 解析結果・考察

### a) 応力度

乾燥収縮およびクリープに伴う分担断面力の変化量を求め、照査断面①および照査断面②における応力度を算出した結果を、それぞれ、表-2および表-3に示す。また、各照査断面において後死荷重による応力度を求め、後死荷重、クリープならびに乾燥収縮に伴う応力度を算出した結果を、それぞれ、表-4および表-5に示す。なお、同

表において、正は引張応力、負は圧縮応力を示している。

同表より、照査断面①について、コンクリート上縁に着目すると、クリープ、乾燥収縮ともに、コンクリート上縁に作用する引張応力は合成床版断面の方が約1.1倍大きいことがわかる。これは、合成床版断面では底鋼板があることによって鋼材量が多くなり、それに伴い、鋼材による拘束度合いが大きくなったためであると考えられる。しかし、本解析では、リブ等の補剛材を考慮していないため、拘束度合いはさらに大きくなると想定される。また、両断面とも、クリープに伴う変化応力度が約16%、乾燥収縮に伴う変化応力度が約84%を占めており、乾燥収縮が支配的であることがわかった。加えて、両断面においてクリープ、乾燥収縮ともに、静定基本系が支

表-6 ひび割れ幅の算出にあたって用いた諸数値<sup>13)</sup>

	PC床版	合成床版
鋼材表面形状のひび割れ幅への影響を表す係数 $k_1$	1.0	1.0
コンクリート品質のひび割れ幅への影響を表す係数 $k_2$	0.95	1.00
引張鋼材あ段数の影響を表す係数 $k_3$	0.91	1.00
かぶり $c$ (mm)	49	49
鉄筋の中心間隔 $c_s$ (mm)	125	200
鉄筋径 $\phi$ (mm)	22	22
鉄筋の応力度 $\sigma_{se}$ (N/mm <sup>2</sup> )	15.2	17.2
引張鉄筋のヤング係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$2.0 \times 10^5$	$2.0 \times 10^5$
コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値 $\varepsilon'_{csd}$	$59 \times 10^{-6}$	$54 \times 10^{-6}$

配的となる。特に、不静定系におけるクリープに伴う応力については、 $0.1$  (N/mm<sup>2</sup>)以下であることから、不静定系の影響は小さい。

つぎに、照査断面②について詳しく見ると、クリープおよび乾燥収縮に伴いコンクリート上縁に作用する引張応力は、PC床版断面と合成床版断面において、差異が見られない。しかし、乾燥収縮については、静定基本系と不静定系がそれぞれ全体系に占める割合が異なっている。不静定系について見ると、合成床版断面では全体系の約25%、PC床版断面では約35%を占めており、PC床版断面の方が不静定系の影響が大きいことがわかった。

ここで、合成床版では膨張材の使用が原則とされているため<sup>11)</sup>、既往の研究結果<sup>12)</sup>より、膨張材の適用を考慮すると、乾燥収縮量が減少するため、コンクリートに作用する引張応力が低減されることを確認している。したがって、膨張材による乾燥収縮量の低減を考慮すると、乾燥収縮による影響が小さくなり、乾燥収縮に伴ってコンクリートに作用する引張応力の値は、同表に示す値より小さくなる。

#### b) ひび割れ幅の照査<sup>13)</sup>

表-5より、中間支点部である照査断面②において、両断面ともにコンクリートの引張強度(PC床版断面： $2.7$  N/mm<sup>2</sup>、合成床版断面： $2.2$  N/mm<sup>2</sup>)を超える引張応力がコンクリートに作用している。したがって、ひび割れ幅の照査を行う必要がある。ここで、ひび割れ幅の算出にあたって使用した諸数値を表-6に示す。なお、同表において  $\varepsilon'_{csd}$  の値は、クリープおよび乾燥収縮に伴う鉄筋の応力より算出している。

照査の結果、照査断面②において、PC床版断面では $0.033$ mm、合成床版断面では $0.048$ mmとなり、両断面ともひび割れ幅の限界値( $w_a = 0.196$ mm)よりも小さくなることが確認できた。したがって、照査断面②において、後死荷重、クリープならびに乾燥収縮作用時における使用性(ひび割れ幅)の照査を満足する結果となった。

#### c) たわみ

クリープおよび乾燥収縮に伴うたわみを算出した結果を、それぞれ、図-5および図-6に示す。同図より、照査

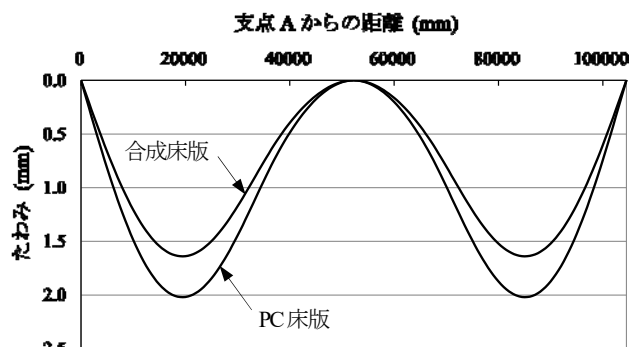


図-5 クリープに伴うたわみ

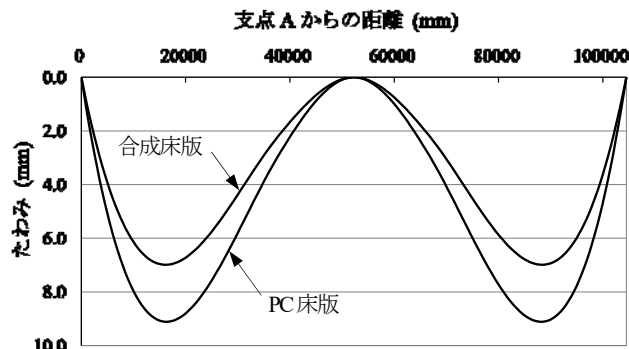


図-6 乾燥収縮に伴うたわみ

断面①において、PC床版断面のたわみは $11.0$ mmであり、その内訳は、クリープ、乾燥収縮によるたわみがそれぞれ、 $2.0$ mm、 $9.0$ mmであった。一方、合成床版断面におけるたわみは $8.5$ mmであり、同じくその内訳は、クリープ、乾燥収縮によるたわみがそれぞれ $1.6$ mm、 $6.9$ mmであった。また、両断面ともに乾燥収縮によるたわみが約80%を占めており、乾燥収縮がクリープよりも支配的であることがわかった。さらに、合成床版断面におけるたわみは、PC床版断面の約0.8倍である。ここで、曲率( $\Delta\theta$ )を用いてたわみを算出しており、曲率を算出するにあたって分担曲げモーメントの変化量( $\Delta M$ )を用いている(式(15)参照)。この値が合成床版断面では、底鋼板が抵抗断面として働くことで、PC床版断面よりも小さくなっている。したがって、合成床版断面ではたわみが抑えられたと考えられる。

## 7. 結論

本文は、鋼コンクリート合成床版を有する2径間連続合成桁橋を対象に、PC床版を有する連続合成桁橋との比較を行い、クリープおよび乾燥収縮に伴う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。

数値解析結果より得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 合成床版を有する連続合成桁では、底鋼板を有するため、PC床版を有する連続合成桁よりも、鋼材による拘束度合いが大きくなることがわかった。
- (2) 数値解析に用いた橋梁の場合、クリープよりも乾燥収縮による影響が大きくなることがわかった。また、静定系基本系が支配的であり、特に、クリープに関しては、不静定系の影響が限りなく小さくなることが確認できた。
- (3) 合成床版を有する連続合成桁の中間支点部において、後死荷重、クリープおよび乾燥収縮作用時に、コンクリートの引張強度を超える応力が作用するため注意が必要である。しかし、膨張材による乾燥収縮量の低減を考慮すると、乾燥収縮に伴う応力は減少する。
- (4) 乾燥収縮およびクリープに伴う変形は、合成床版を有する連続合成桁では、底鋼板が抵抗断面となることにより、PC床版を有する連続合成桁よりも小さくなることが確認できた。

今後の課題としては、まず、リブ等の補剛材の影響を考慮した、より実構造物に近いモデルにより、解析を行う必要がある。また、実験供試体による長期計測を行い、本解析手法の妥当性を検証するとともに、プレーンコンクリートの乾燥収縮ひずみのデータ取得を行う予定である。さらに、膨張材の適用効果についても、検証を行う必要がある。加えて、本研究では、乾燥収縮およびクリープに着目し解析を行った。今後は、温度変化に関する検討を実施し、本橋梁形式の経時挙動を総合的に評価す

る必要がある。

#### 参考文献

- 1) (社)日本橋梁建設協会：新しい鋼橋の誕生II，改訂版，pp.16-18，2004.12.
- 2) 鋼構造委員会，道路橋床版の合理化検討小委員会：道路橋床版の要求性能と維持管理技術，pp.218-219，(社)土木学会，2008.6.
- 3) 北野勇一，住友安子，中山良直，段下義典，橋吉宏：コンクリート系床版の乾燥収縮ひび割れ防止に関する検討，川田技報，Vol.32，2013.
- 4) (公社)日本道路協会：道路橋示方書(I共通編・II鋼橋編)・同解説，pp.35-36，p.324，丸善(株)，2012.3.
- 5) 園田恵一郎：構造シリーズ 9-A 鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(I)基礎編：理論編，pp.58-60，丸善(株)，1991.4.
- 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，大阪市立大学学位論文，1992.9.
- 7) 平松 唯，柳尾隆志，山本将士，大山 理：合成床版を有する合成桁橋の乾燥収縮挙動に関する解析的研究，平成 28 年度土木学会全国大会年次学術講演会講演概要集，Vol.71，cs03-0024，(社)土木学会，2016.9.
- 8) 「新しい鋼橋の設計」編集委員会：新しい鋼橋の設計，p.95，p.109，(株)山海堂，2002.12.
- 9) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 改定資料 基本原則編・設計編・施工編，pp.66-69，丸善(株)，2012.
- 10) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 改定資料 基本原則編・設計編・施工編，p.46，丸善(株)，2007.
- 11) (社)土木学会：複合構造シリーズ 07 鋼・コンクリート合成床版設計施工指針(案)，丸善(株)，2016.1.
- 12) 平松 唯，山本将士，大山 理：合成床版の乾燥収縮挙動に関する解析的研究，平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，vol.58，I-23，(社)土木学会，2016.6.
- 13) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，コンクリート委員会，コンクリート標準示方書改訂小委員会，pp.220-226，丸善(株)，2012.

## ANALYTICAL STUDY ON TIME-DEPENDENT BEHAVIOR OF CONTINUOUS COMPOSITE GIRDER BRIDGES WITH STEEL-CONCRETE COMPOSITE SLAB

Yui HIRAMATSU, Masashi YAMAMOTO, Yusuke IMAGAWA  
and Osamu OHYAMA

In recent years, a research and development of the steel-concrete composite structures aiming at shortening of construction period and cost reduction are being conducted. The composite slab using steel-plates for the flooring of the slab, has some advantages. For example, it has high fatigue durability. However, the time dependent behavior of the composite girder bridge with composite slab is not yet clarified perfectly. Therefore, in this study, we focused on the shrinkage and creep of a two span continuous composite girder bridge with PC slab and steel-concrete composite slab. As the results of analysis, the change of stresses due to creep and shrinkage are made clearly.