

(41) 合成床版の乾燥収縮挙動に関する実験的研究

山本 将士¹・今川 雄亮²・大山 理³

¹正会員 修士(工学) 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1-3-7)

E-mail: masashi_yamamoto@j-fab.co.jp

²正会員 博士(工学) 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

³正会員 博士(工学) 大阪工業大学教授 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: osamu.oyama@oit.ac.jp

合成床版は高耐久性床版として積極的に採用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、十分に解明されたとは言いがたいのが現状である。そこで、本稿では合成床版に対する乾燥収縮挙動に着目した数値解析を鉄筋コンクリート床版との相対比較により行った。また、合成床版の底鋼板による拘束が乾燥収縮挙動に及ぼす影響を把握するために乾燥収縮実験を行った。両者の値を比較したところ、鉄筋コンクリート床版で用いられるコンクリート断面を一樣に収縮させた解析モデルでは、コンクリート下部で両者の値が一致しないことがわかった。そこで、コンクリート下部は底鋼板で覆われていることから、上部と下部の収縮量が異なる解析モデルを提案し、両者の値を比較した結果、鋼材比でコンクリートの収縮量を変化させた場合に最も実験値に近づく傾向を示す結果が得られた。

Key Words: steel-concrete composite slab, shrinkage, bottom steel plate, analysis model

1. はじめに

近年、合理化橋梁の普及に伴い、鋼コンクリート合成床版(以下、合成床版)の適用が増加している。合成床版は、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となる。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¹⁾。

しかし、合成床版が適用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、十分に解明されたとは言いがたいのが現状である²⁾。経時挙動のひとつである乾燥収縮の影響は、合成桁の設計において、コンクリート系床版は、道路橋示方書・同解説^{3) 4)}に記載される規定値を用いることとなっている。しかし、この規定値は、鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)やプレストレストコンクリート床版(以下、PC床版)に対して定められたものであり、合成床版に対して検討した事例は少ない。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、乾燥収縮の影響が大きくなることが予想される。一方で、合成床版では、乾燥収縮によるひび割

れに配慮し、膨張材の使用が原則⁵⁾とされているが、詳細な検討はなされていない。

そこで本論文では、合成床版およびRC床版の乾燥収縮による経時挙動に着目した数値計算を床版単体モデルで行い、その影響評価を行う。また、数値計算結果の確認する1つとして、底鋼板の有無が乾燥収縮挙動に及ぼす影響を把握するために行った床版単体の実験より得られた結果について報告する。さらに、両者の結果を踏まえて、コンクリートの収縮量を考慮した解析モデルの提案を行う。

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・鋼部材編⁴⁾には、これらの影響やコンクリー

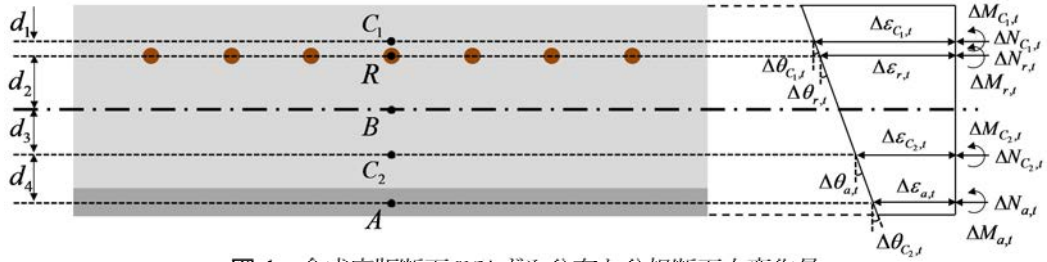


図-1 合成床版断面のひずみ分布と分担断面力変化量

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 200×10^{-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

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⁶⁾。

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

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. 乾燥収縮解

乾燥収縮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。また、算定式を誘導するにあたっては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、鉄筋ならびに底鋼板は完全合成されている。

合成床版断面において、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。なお、図中の A 、 I ならびに E は、各部材の断面積、断面2次モーメントならびにヤング係数を示す。前述した通り、合成桁橋の乾燥収縮解析は、鉄筋の拘束効果を考慮した乾燥収縮量を用いて行われている。そこで、本解析は、鋼材の拘束度合を把握するため、コンクリート(C)、鉄筋(R)、底鋼板(A)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。なお、コンクリート(C)は、後述するが、コンクリートの収縮量が断面に対して一定ではない可能性も想定し、コンクリート断面分割位置(B)において断面の上部 C_1 と下

部 C_2 で断面力を分割するモデルとする。

任意時刻 t における断面力のつり合い条件式は、式(2)で表される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{C_1,t} + \Delta N_{r,t} + \Delta N_{C_2,t} + \Delta N_{a,t} &= 0 \\ \Delta N_{C_1,t} (d_1 + d_2) + \Delta M_{C_1,t} + \Delta N_{r,t} d_2 \\ + \Delta M_{r,t} - \Delta N_{C_2,t} d_3 + \Delta M_{C_2,t} \\ - \Delta N_{a,t} (d_3 + d_4) + \Delta M_{a,t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、

- $\Delta N_{C_1,t}, \Delta M_{C_1,t}$: 任意時刻 t における乾燥収縮に伴うコンクリート上部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
- $\Delta N_{C_2,t}, \Delta M_{C_2,t}$: 任意時刻 t における乾燥収縮に伴うコンクリート下部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
- $\Delta N_{r,t}, \Delta M_{r,t}$: 任意時刻 t における乾燥収縮に伴う鉄筋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
- $\Delta N_{a,t}, \Delta M_{a,t}$: 任意時刻 t における乾燥収縮に伴う底鋼板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

つぎに、コンクリート上部の図心位置 C_1 、コンクリート下部の図心位置 C_2 、鉄筋の図心位置 R ならびに底鋼板の図心位置 A における任意時刻 t の乾燥収縮ひずみの変化量 $\Delta \varepsilon_{C_1,t}, \Delta \varepsilon_{C_2,t}, \Delta \varepsilon_{r,t}$ ならびに $\Delta \varepsilon_{a,t}$ は、式(1)より、それぞれ次式で表すことができる。

$$\Delta \varepsilon_{C_1,t} = \frac{\Delta N_{C_1,t}}{E_{C_1} A_{C_1}} \left(1 + \frac{1}{2} \varphi_{sh,t} \right) + \varepsilon_{sh,t} \quad (3)$$

$$\Delta \varepsilon_{r,t} = \frac{\Delta N_{r,t}}{E_r A_r} \quad (4)$$

$$\Delta \varepsilon_{C_2,t} = \frac{\Delta N_{C_2,t}}{E_{C_2} A_{C_2}} \left(1 + \frac{1}{2} \varphi_{sh,t} \right) + k \varepsilon_{sh,t} \quad (5)$$

$$\Delta \varepsilon_{a,t} = \frac{\Delta N_{a,t}}{E_a A_a} \quad (6)$$

また、各部材における曲率は次式で表現できる。

$$\Delta \theta_{C_1,t} = \frac{\Delta M_{C_1,t}}{E_{C_1} I_{C_1}} \left(1 + \frac{1}{2} \varphi_{sh,t} \right) \quad (7)$$

$$\Delta \theta_{r,t} = \frac{\Delta M_{r,t}}{E_r I_r} \quad (8)$$

$$\Delta \theta_{C_2,t} = \frac{\Delta M_{C_2,t}}{E_{C_2} I_{C_2}} \left(1 + \frac{1}{2} \varphi_{sh,t} \right) \quad (9)$$

$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{\Delta M_{a,t}}{E_a I_a} \quad (10)$$

コンクリート断面分割位置(B)における任意時刻 t の乾燥収縮に伴うひずみをコンクリート上部および鉄筋断面の変化量および曲率で表すと次式が得られる。

$$\Delta \varepsilon_{B,t} = \Delta \varepsilon_{C_1,t} - \Delta \theta_{C_1,t} \times (d_1 + d_2) \quad (11)$$

$$\Delta \varepsilon_{B,t} = \Delta \varepsilon_{r,t} - \Delta \theta_{r,t} \times d_2 \quad (12)$$

式(2)～式(12)より、8つの未知量(分担断面力の変化量)に関する連立方程式が得られる。これらを解くことにより、乾燥収縮によって発生する各部材の分担断面力の変化量を求めることができる。

最後に、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。

$$\Delta \sigma_{cu} = \frac{\Delta N_{c,t}^{sh}}{A_c} + \frac{\Delta M_{c,t}^{sh}}{I_c} z_{cu} \quad (13)$$

ここで、式中の z_{cu} は、コンクリートの図心軸から床版上縁までの距離を表している。また、断面に対して収縮は一定として C_1 と C_2 は同じ値の場合を示す。

4. 数値解析結果と考察

(1) 解析条件

RC床版と合成床版の断面形状を図-2 および図-3 にそれぞれ示す。合成床版はRC床版と異なりコンクリート下面に底鋼板があるため、各断面の乾燥収縮に伴う変化応力度を比較検討することで、拘束度合いを確認する。表-1 に解析条件を示す。ここで、現行の道路橋示方書・同解説II：鋼橋・鋼部材編において、最終乾燥収縮

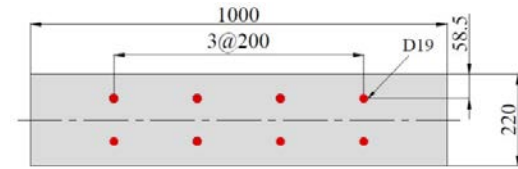


図-2 RC床版断面(単位: mm)

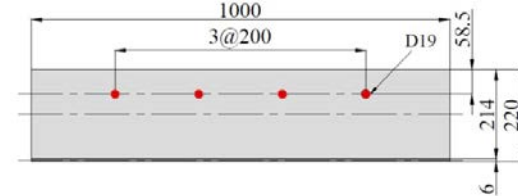


図-3 合成床版断面(単位: mm)

表-1 解析条件

項 目	数 値
最終クリープ係数 $\varphi_{sh,\infty}$	4.0
最終乾燥収縮量 $\varepsilon_{sh,\infty}$	800×10^{-6}
コンクリートのヤング係数 E_c (N/mm ²)	3.0×10^4
鉄筋のヤング係数 E_r (N/mm ²)	2.0×10^5
底鋼板のヤング係数 E_a (N/mm ²)	2.0×10^5
コンクリートの設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	30
コンクリートの引張強度 f_{ct} (N/mm ²)	2.2

表-2 乾燥収縮に伴う変化応力度

RC 床版断面		
部 材		変化応力度(N/mm ²)
コンクリート	上縁	-1.4
	下縁	-1.4
合成床版断面		
部 材		変化応力度(N/mm ²)
コンクリート	上縁	1.1
	下縁	-5.4

量は 200×10^{-6} と規定されている⁴⁾。そこで、乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\varphi_{sh,\infty} = 4.0$ 、鉄筋比 $p = 2\%$ とすると、プレーンコンクリートの最終乾燥収縮量は、 400×10^{-6} 程度になると推定されている⁷⁾。しかし、コンクリート標準示方書では、最終乾燥収縮量として、 1200×10^{-6} 程度と大きな値が想定されている。そこで、本解析では、プレーンコンクリートにおける最終乾燥収縮量として、 800×10^{-6} を用いることとする⁸⁾。

(2) 解析結果および考察

(a) 乾燥収縮に伴う変化応力度

分担断面力の変化量を求め、各断面の乾燥収縮に伴う変化応力度の最終値を算出した結果を表-2 に示す。なお、同表はコンクリート断面に着目し、正は圧縮応力、負は引張応力を示す。RC床版断面は、コンクリートの上縁および下縁ともに 1.4 N/mm^2 の引張応力が作用する。一方、合成床版断面は、コンクリート上縁では 1.1 N/mm^2 の圧縮応力が作用し、下縁ではRC床版の約4

倍の 5.4N/mm^2 の引張応力が生じていることが確認できる。これは、合成床版断面では、コンクリート下面に底鋼板があるため、乾燥収縮に伴う拘束が大きいことが考えられる。本解析では、コンクリートの乾燥収縮による影響のみを考慮した結果ではあるが、引張応力 (5.4N/mm^2) は引張強度 (2.2N/mm^2) を超える値を示しており、コンクリートにひび割れが生じる要因となる可能性があることがわかる。

(b) パラメータ解析

対象床版の乾燥収縮に伴う挙動を把握するために、底鋼板厚および最終乾燥収縮量をパラメータとした解析を行う。一般的に合成床版で用いられる底鋼板厚 6mm 、 8mm ならびに 9mm をパラメータとした場合の変化応力度の結果を図-4 に示す。底鋼板厚を厚くするとコンクリート下縁で引張応力が増加し、コンクリート上縁は圧縮応力が増加する傾向が確認できる。底鋼板厚 1mm あたりの変化応力度は、コンクリート上縁、下縁でそれぞれ 0.1N/mm^2 、 0.2N/mm^2 となっており、鋼材量が影響していることがわかる。

プレーンコンクリートにおける自由乾燥収縮量を参考に最終乾燥収縮量 $200 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ をパラメータとした場合の変化応力度の結果を図-5 に示す。変化応力度と最終乾燥収縮量は比例関係が成立していることがわかる。本解析での最終乾燥収縮量は 800×10^{-6} を用いているが、合成床版断面におけるコンクリート下縁以外は、最終乾燥収縮量 200×10^{-6} あたり 0.3N/mm^2 の緩やかな変化を示している。一方、合成床版断面におけるコンクリート下縁の応力変化は最終乾燥収縮量 200×10^{-6} あたり 1.4N/mm^2 の変化が生じており、最終乾燥収縮量の影響が大きいことが確認できる。合成床版では膨張材の使用が原則となっており、一般的には膨張ひずみの適用範囲は 150×10^{-6} 以上、 250×10^{-6} 以下と定められている。

以上より、合成床版における乾燥収縮においては、底

鋼板による影響および膨張材の使用効果も含めた最終乾燥収縮量の評価が重要になることが確認できる。

5. 床版の乾燥収縮試験

(1) 試験概要

合成床版の乾燥収縮挙動を解明する前段として、底鋼板の有無が乾燥収縮挙動に及ぼす影響を把握するために床版単体の乾燥収縮試験を行った。

対象とする構造は、4タイプとし、無筋コンクリートであるプレーン(Type-1)、RC床版ならびに合成床版の3

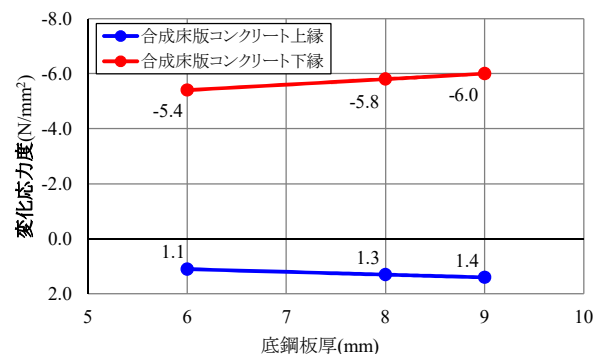


図-4 底鋼板厚－変化応力度の関係

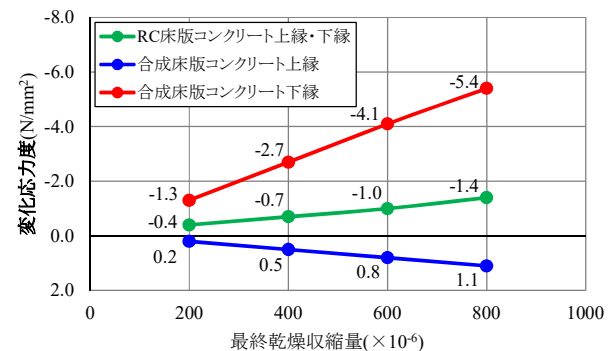


図-5 最終乾燥収縮量－変化応力度の関係

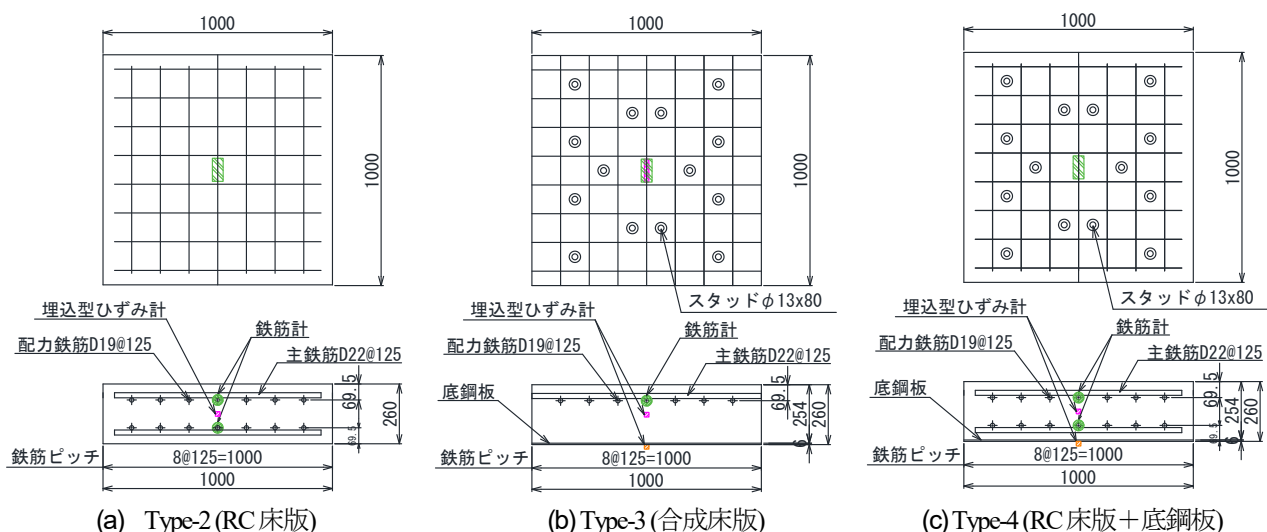


図-6 供試体概要

表-3 コンクリート配合

圧縮強度 (N/mm ²)	セメント	スランプ ^a (cm)	空気量 (%)	W/(C+E) (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材 混和剤 AE減水剤
30	N	8.0 ±2.5	4.5 ±1.5	46.5	44.3	164	353	-	777	1005 3.18

種類を製作した。Type-2、Type-3 および Type-4 の供試体概要を図-6(a)～(c)にそれぞれ示す。また、代表として Type-4 の供試体製作および設置状況を写真-1 および写真-2 にそれぞれ示す。

各供試体は、温度および湿度を一定に保つため、大阪工業大学八幡工学実験場・構造実験センターの地下室に設置し、形状は床版厚 260mm を有する 1.0m 角の版構造とした。Type-1 は無筋コンクリートであるプレーン、Type-2 は RC 床版とし、図-6(a)に示すように上段、下段ともに配力鉄筋：D19×125mm，主鉄筋：D22×125mm を配置した。Type-3 は合成床版とし、図-6(b)に示すように上段に配力鉄筋：D19×125mm，主鉄筋：D22×125mm を配置し、底鋼板厚は最小板厚の 6mm としている。また、頭付きスタッドにより底鋼板とコンクリートを合成させている。Type-4 は RC 床版+底鋼板とし、図-6(c)に示すように RC 床版に底鋼板を追加した構造とした。

各供試体は、写真-2 に示すように、実構造に即して、乾燥面を上面および下面のみとなるように、側面にアルミテープを貼付して乾燥防止対策を施している。また、床版支持は、既往の研究⁹⁾を参考に、摩擦の影響を極力軽減するため支持材の上にテフロン板を敷いている。

計測は、供試体中央にあたるコンクリート、鉄筋ならびに底鋼板下縁のひずみおよび温度とする。ひずみゲージは、ひずみと温度を同時に計測できるものとし、コンクリートおよび底鋼板には埋込み型ひずみ計(東京測器研究所製：KM-100BT)，鉄筋には鉄筋表面にひずみゲージが取り付けられた鉄筋計(東京測器研究所製：KSAT-19A)をそれぞれ用いた。なお、底鋼板への埋込み型ひずみ計は、下面に接着し保護カバーで覆っている。また、JIS A 1129 に準じた試験体(100×100×400mm)をプレーンとの比較用として 2 体製作し、試験体中央のコンクリートひずみと温度を計測する。ただし、JIS 規格に基づき製作した試験体は、試験体全面を乾燥面としている。

試験に用いたコンクリートの配合表を表-3 に示す。各供試体の配合は同じであり、底鋼板の影響にのみ着目するため、合成床版に膨張材を使用していない。なお、コンクリートの材料特性は、材齢 28 日における圧縮強度が 41.2 N/mm²，弾性係数が 3.2×10⁴ N/mm² となっている。

(2) 計測結果

各供試体における供試体中央の乾燥収縮ひずみを図-7



写真-1 Type-4 の供試体製作状況

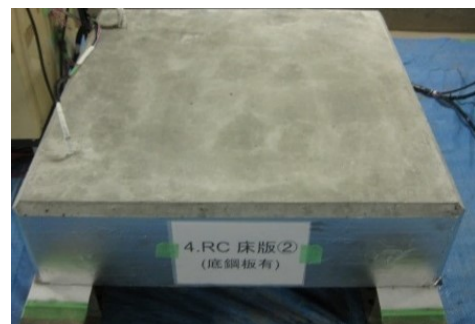


写真-2 Type-4 の供試体設置状況

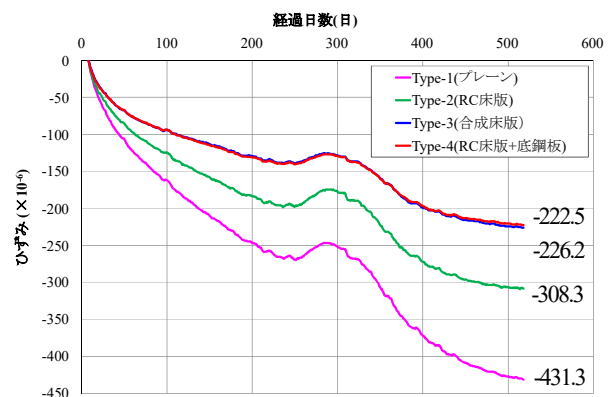


図-7 供試体中央の乾燥収縮ひずみ

に示す。なお、圧縮ひずみを負、引張ひずみを正としている。各供試体ともに時間の経過とともにひずみは大きくなり、プレーンであるType-1が431.3×10⁻⁶と最も大きくなっている。また、Type-2、Type-3の順にコンクリートに含まれる鋼材量が多いほどひずみは小さくなる傾向がみられたが、Type-3とType-4のひずみは概ね一致している。

518日経過時の乾燥収縮ひずみの最終値を表-4に示す。供試体中央における乾燥収縮ひずみの最終値は、プレーンコンクリートのType-1を基準とすると、Type-2では約

0.71倍、Type-3およびType-4では約0.52倍の値となっている。Type-2とType-4のひずみに着目すると、Type-4のコンクリートひずみはType-2の約0.72倍となっており、底鋼板による拘束が生じていることがわかる。

一方、Type-2の鉄筋ひずみを基準とすると、Type-4の鉄筋ひずみは、上段、下段鉄筋で、それぞれ、約0.86倍、約0.48倍となり、ひずみ量が異なっている。また、Type-3とType-4のコンクリートひずみに着目すると、概ね同じ値であり、下段鉄筋の影響がみられない。これは、底鋼板の拘束の影響が大きく、下段鉄筋への分担量が小さくなっていることや供試体が乾燥収縮によって断面に対して一様に収縮していない可能性も示唆される。

最後に、プレーンとの比較用として計測したJIS規格試験体(2体平均値)の乾燥収縮ひずみの最終値は 654.5×10^6 を示しており、Type-1に対しては約1.5倍の値を示している。これは、JIS規格試験体の形状と乾燥面の条件が相違していることが要因と考えられる。

(3) 数値解析との比較

(a) 数値解析概要

床版の乾燥収縮試験における結果と数値解析結果の比較を行う。解析に用いる対象構造は、Type-1を除く計3タイプとする。床版の乾燥収縮解析に用いる条件を表-5に示す。材齢 t (日)における乾燥収縮ひずみは、以下の式(14)に示す指数関数により近似できる⁶⁾。ここで、乾燥収縮ひずみの進行過程を表す無次元係数 k_1 は、Type-1のコンクリート打込みから518日経過時における乾燥収縮ひずみの値(431.3×10^6)を用いて、最小二乗法により算出する。

$$\varepsilon_{sh,t} = \varepsilon_{sh,\infty} (1 - e^{-k_1 t}) \quad (14)$$

得られた $k_1 = 4.45 \times 10^{-3}$ および材齢 $t = 518$ 日、Type-1における乾燥収縮ひずみの値 $\varepsilon_{sh,\infty} = 431.3 \times 10^6$ を式(14)に代入して算出した乾燥収縮ひずみの値を、Type-1の計測値とあわせて図-8に示す。

また、道路橋示方書・同解説Ⅱ：鋼橋・鋼部材編⁴⁾において、鋼桁とコンクリート床版の合成作用を考慮した設計を行う場合、乾燥縮に伴うクリープ係数 $\varphi_{sh,\infty}$ はクリープ係数の2.0に補正係数2を乗じ4.0としている。しかし、合成床版における底鋼板とコンクリートの合成作用が上述と異なることも想定され、その値についても確認する必要がある。そこで、乾燥収縮に伴うクリープ係数の最終値を $\varphi_{sh,\infty} = 2.0$ から6.0のパラメータとした解析により妥当性を検証する。

(b) 解析値と計測値の比較

Type-2, Type-3 ならびに Type-4 における解析値と計測

表-4 乾燥収縮ひずみの計測値(518日経過時)

	コンクリート (中央)	上段鉄筋	下段鉄筋	底鋼板
Type-1	-431.3 μ	—	—	—
Type-2	-308.3 μ	-306.2 μ	-249.9 μ	—
Type-3	-226.2 μ	-254.3 μ	—	94.6 μ
Type-4	-222.5 μ	-263.8 μ	-120.8 μ	19.1 μ
JIS試験体	-654.5 μ	(←JIS規格の試験体2体の平均値)		

表-5 解析条件

項 目	数 値
乾燥収縮ひずみの進行過程を表す無次元係数 k_1	4.45×10^{-3}
コンクリートのヤング係数 E_c (N/mm ²)	3.2×10^4
鋼材のヤング係数 E (N/mm ²)	2.0×10^5
任意材齢 t (日)	518
コンクリートの設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	41.2

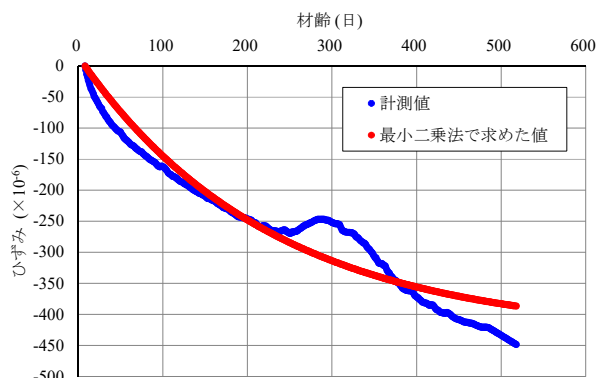


図-8 Type-1の乾燥収縮ひずみ

値を比較した乾燥収縮ひずみ分布を図-9、図-10 ならびに図-11 にそれぞれ示す。ここでは、引張方向ひずみを正、圧縮方向ひずみを負としている。また、縦軸は、床版下縁からの距離を示している。

図-9 より、RC 床版の上段鉄筋とコンクリートのひずみは解析値と計測値において $\varphi_{sh,\infty} = 4.0$ の場合に概ね一致している。一方、下段鉄筋は、計測値の方が2割程度小さい値を示している。

また、図-10 および図-11 より、底鋼板を有する Type-3 および Type-4 は、クリープ係数を $\varphi_{sh,\infty} = 6.0$ としても一致していない。また、底鋼板に近いほど解析値と計測値の差が広がる傾向にあることがわかる。特に、底鋼板は解析上では圧縮ひずみに対して、実際には引張ひずみが生じている。これは、解析では収縮量を断面一様としているが、供試体の上側と下側では収縮挙動が異なる可能性がある。つまり、底鋼板により、供試体底面が覆われているため、供試体下側ではコンクリート中の水分が逸散しづらく、供試体上側と比較して乾燥収縮量が小さ

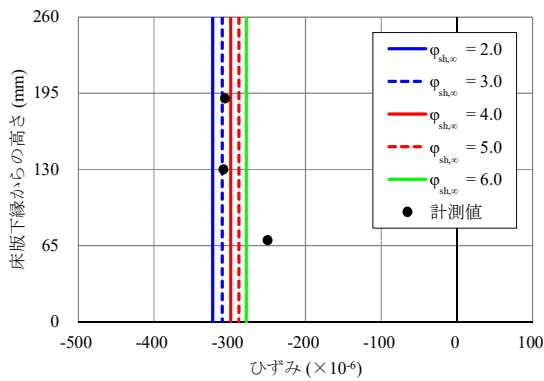


図-9 Type-2の乾燥収縮ひずみ分布

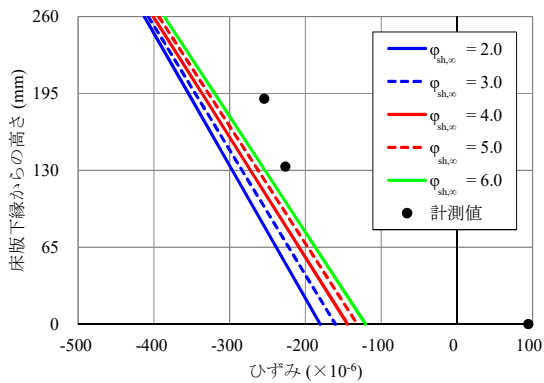


図-10 Type-3の乾燥収縮ひずみ分布

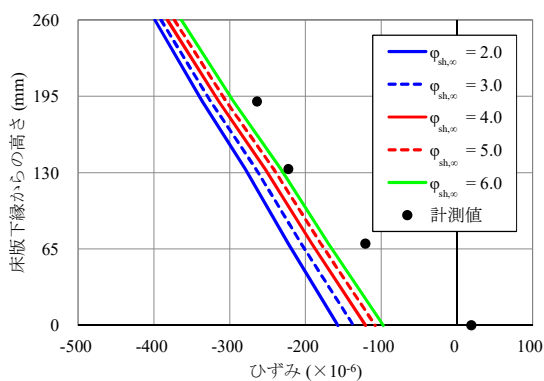
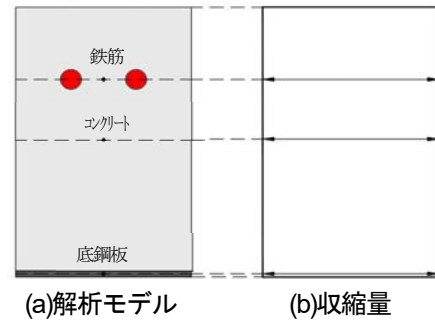


図-11 Type-4の乾燥収縮ひずみ分布

くなったことが想定される。そのため、今後、底鋼板に対する乾燥面の影響評価も検討する必要がある。

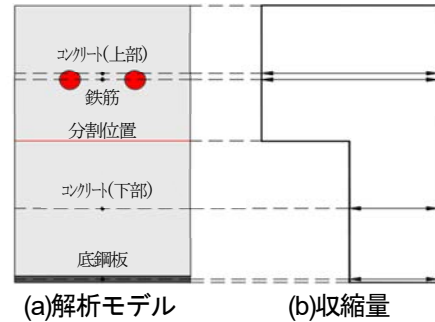
6. 数値解析モデルの提案

前項で述べた解析値と計測値の比較より、RC床版やPC床版で用いられるコンクリート断面を一律に収縮すると仮定したモデル(以下、従来モデル)では、コンクリート下部で両者の値が一致しない可能性がある。これは、床版下面が底鋼板で覆われており、底鋼板に近いコンクリート下部の収縮がコンクリート上部に比べて小さくな



(b)収縮量

図-12 従来モデル(Type A)



(b)収縮量

図-13 提案モデル(Type B)

表-6 解析モデルの諸元

種別	解析モデル	コンクリート断面の分割位置
Type A	従来モデル	無し (断面方向収縮一定)
Type B-1	提案モデル	コンクリート厚の1/2 (上部1:下部1)
Type B-2		コンクリート厚さの上縁側から1/3 (上部1:下部2)

ることが推測される。

そこで、一検討として、コンクリートの収縮量が上部と下部で異なる解析モデルを提案し、解析値および計測値との比較検討を行う。

(1) 解析条件

図-12に示す従来モデルに対して、図-13に示すコンクリートの収縮量が上部と下部で異なる解析モデル(以下、提案モデル)を提案する。提案モデルの条件として、以下の仮定が成立するものとする。

- 1) 平面保持の仮定が成立する。
- 2) 収縮量の違いに伴い、コンクリート断面を上部と下部に2分割する。
- 3) 合成床版の下面は底鋼板に覆われているため、下部の収縮量が上部より小さいものとする。

解析モデルの諸元を表-6に示す。Type Aは従来モデル、Type B-1は収縮量が異なる位置をコンクリート厚さ(254mm)の1/2の位置にした提案モデルとする。一方、Type B-2は収縮において、上側鉄筋(D19)より底鋼板($t =$

6mm)の方が拘束の影響が大きいと仮定し、収縮量が異なる位置をコンクリート厚さの上縁側から 1/3 の位置にした提案モデルとする。Type B-1 および Type B-2 は、コンクリート上部よりも下部の収縮が小さくなると推測し、上部および下部における収縮量の比率をパラメータとして検討を行った。パラメータは、上側鉄筋と底鋼板の 1m 当たりの断面積比として 1/3 および 1/10、1/20 と比率を増加した場合について比較する。

(2) 解析結果および考察

解析値と計測値との比較を図-14 に示す。図中の提案モデル Type B-1 および Type B-2 は、コンクリート下部の収縮量を上部の 1/3 に減少した場合の値を示す。同図より、提案モデルは、従来モデルである Type A と比較すると、上側鉄筋とコンクリートの収縮ひずみが計測値と概ね一致することが確認できる。Type B-1 は、Type A と比べて床版上面の収縮ひずみは概ね同じ状態から、1.4 倍程度緩やかな傾きの分布を示しており、コンクリート下部に近づくにつれて減少する傾向となっている。一方、Type B-2 は、Type A と比べて床版上面のひずみが 0.8 倍、傾きが 1.1 倍程度緩やかな傾向を示しており、床版下面の収縮ひずみは Type B-1 と概ね一致するような分布となっている。

つぎに、提案モデル Type B-1 および Type B-2 のパラメータ解析結果を図-15 および図-16 にそれぞれ示す。両者ともにコンクリート下部の収縮量を低減させると底鋼板において解析値と計測値との差が小さくなっていることがわかる。しかし、Type B-2 は床版上面の収縮ひずみも相対的に小さくなっており、コンクリート断面の分割方法によって傾向が異なることが確認できる。また、コンクリート下部の収縮量を上部の 1/10 と 1/20 と低減を大きくした場合、顕著な変化はみられない。両者ともに床版下部の収縮量を上部の 1/3 とした場合に最も実験値に近づく傾向を示している。

以上の結果より、鋼材比率がコンクリートの収縮量と関係していることが推察される。つまり、RC 床版や PC 床版では上下鉄筋が均等に配置されているため断面方向の収縮は概ね一定に分布すると考えられるが、合成床版では底鋼板の占める割合が大きいため、下部の収縮ひずみが小さくなることが判断できる。

7. まとめ

本文は、RC 床版および合成床版を対象に、乾燥収縮現象に着目した数値解析により各種検討を行った。また、数値解析の結果より、底鋼板の影響を解明するために実床版単体の乾燥収縮試験を実施し、比較検討を行い、解

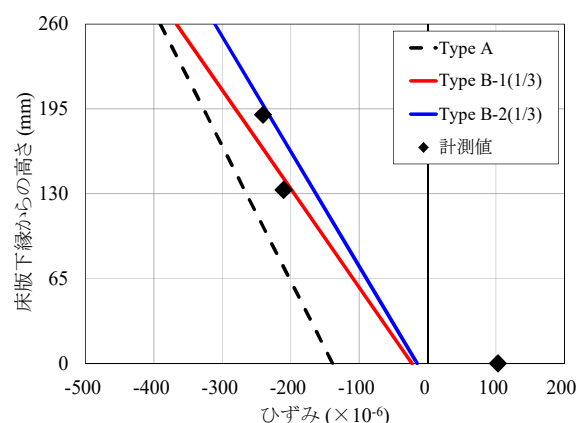


図-14 解析値および計測値の比較

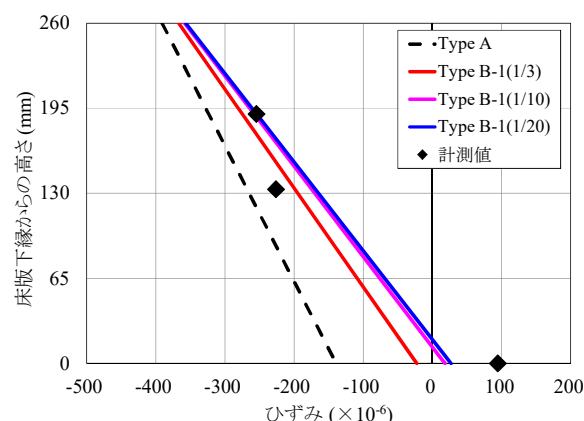


図-15 パラメータ解析結果(Type B-1)

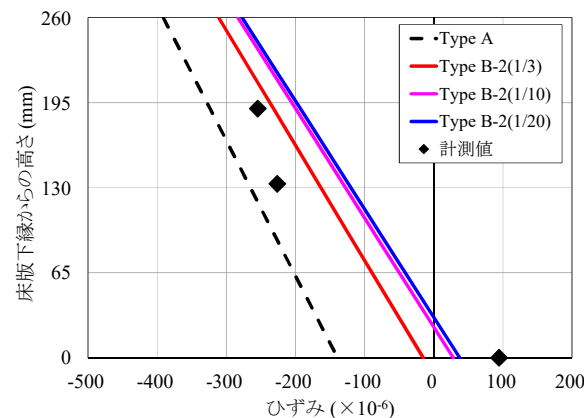


図-16 パラメータ解析結果(Type B-2)

析モデルの提案を行った。

上記の結果より得られた知見を以下に示す。

- 1) 数値解析結果より、合成床版断面は、RC 床版断面と比較してコンクリートの乾燥収縮に伴う拘束の影響が大きくなり、ひび割れ発生の要因となる可能性があることがわかった。また、合成床版断面のコンクリート下縁の応力は、最終乾燥収縮量が大きく影響することが確認できた。
- 2) RC 床版(Type-2)の乾燥収縮ひずみ分布より、解析値と計測値は、乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\varphi_{sh,\infty} = 4.0$ で概ね一致することが確認された。

- 3) Type-2とRC床版に底鋼板を有した構造(Type-4)の計測結果より、底鋼板の有無が乾燥収縮挙動に影響を及ぼしていることを確認した。
- 4) 合成床版(Type-3)およびType-4の乾燥収縮ひずみ分布より、底鋼板を呈することにより、実際の収縮は断面に一樣ではない可能性を示唆した。
- 5) 合成床版における乾燥収縮の影響を解明する一検討として解析モデルを提案し、妥当性を検証した。その結果、コンクリート断面を2分割し、鋼材比率でコンクリートの収縮量を変化させた場合に実験値に近づく傾向を示すことが明らかとなった。

8. 今後の課題

これまでに基礎的検討として、合成桁モデルの数値解析^{10, 11)}ならびに床版単体モデルの数値解析を行うとともに、床版単体モデルの供試体による長期計測を継続している。

合成床版の乾燥収縮挙動に及ぼす影響因子の1つとして挙げられる底鋼板の拘束度合いを、コンクリート断面を上下に2分割し、底鋼板とコンクリートの断面積比による検証を実施した。今回は、1タイプのモデルによる解析および検証となったが、底鋼板や鋼材量の影響を把握するために、底鋼板と上下鉄筋を有する供試体など他のタイプの解析モデルについても検証する必要がある。また、今後、膨張材の使用効果も含めた最終乾燥収縮量や乾燥収縮に伴うクリープ係数も含め、定量的に評価できる指標を構築していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 北野勇一，住友安子，中山良直，段下義典，橘 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.
- 3) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I：共通編，pp.114-115，丸善(株)，2017.11.
- 4) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II：鋼橋・鋼部材編，pp.382-383，丸善(株)，2017.11.
- 5) (公社)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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) (公社)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.65，丸善(株)，2012.
- 9) 村山隆之，吉崎信之，西川和廣，八部順一，橘 吉宏，大垣賀津雄，済藤英明：膨張コンクリートを用いた合成床版の乾燥収縮度確認試験，土木学会第 56 回年次学術講演会概要集，pp.464-465，(社)土木学会，2001.10.
- 10) 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，(公社)土木学会，2016.6.
- 11) 山本将士，今川雄亮，大山 理：合成床版を有する合成桁橋の経時挙動に関する基礎的研究，構造工学論文集 Vol.65A，pp.825-835，(公社)土木学会，2019.3.

(Received August 30, 2019)

EXPERIMENTAL STUDY ON SHRINKAGE BEHAVIOR OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE SLAB

Masashi YAMAMOTO, Yusuke IMAGAWA and Osamu OHYAMA

In this paper, the numerical analysis focusing on drying shrinkage behavior of the steel-concrete composite slab was examined by the relative comparison with the reinforced concrete slab. In addition, the shrinkage experiment was conducted to understand the effect of the restraint of the composite slab by the bottom steel plate on the shrinkage behavior. When comparing the values of both, it was found that in the analytical model in which the concrete cross section used in the reinforced concrete slab was uniformly shrunk, the values did not match at the bottom of the concrete. Because the lower part of the concrete is covered with a bottom steel plate, an analysis model with different upper and lower shrinkage was proposed, and the results were compared. The result showed the tendency to approach the experimental value most.