

鋼桁橋床版の乾燥収縮応力に対するずれ止め剛性の効果

Effects of flexibility of shear connectors for tensile stress owing to shrinkage at concrete deck slabs
in steel plate girder bridges

武藤和好*, 平城弘一**, 松井繁之***, 石崎 茂****

Kazuyoshi Muto, Hirokazu Hiragi, Shigeyuki Matsui, Shigeru Ishizaki

* (株) 酒井鉄工所 橋梁設計部 橋梁設計課 課長補佐 (〒590-0831 大阪府堺市出島西町 3-1)

** 工博, 摂南大学助教授, 工学部土木工学科 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8)

*** 工博, 大阪大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**** (株) 酒井鉄工所 橋梁設計部長 (〒590-0831 大阪府堺市出島西町 3-1)

It is effective to connect concrete deck slabs and steel girders flexibly, to prevent cracks of slabs by tensile stress owing to shrinkage and temperature. In this paper, the distributions of stress due to shrinkage are shown in various arrangements of shear connectors with FEM analysis on simple girder bridge models. Then the relationship between the ratio of reduction of tensile stress and flexibility of shear connectors are discussed. It is suggested that the relationships are expressible with hyperbolas form the results of method of least squares. Furthermore, the increase of tensile stress in transverse direction with restraining the deck by the end floor systems is mentioned.

Key Words: shrinkage by drying, tensile stress, flexible stud

キーワード: 乾燥収縮, 引張応力, 柔スタッド

1. まえがき

我が国では, コンクリート床版が主桁の一部として挙動することを期待するかどうかという設計計算の条件の下に, 合成桁・非合成桁という構造区分が用いられている。そして, 床版と鋼桁をつなぐ連結材には, この構造区分に応じてスタッドジベルとスラブアンカーが使い分けられることが多い。

非合成桁に頻用されるスラブアンカーは, 床版と鋼桁の相対位置の確保のみを期待して配置されるが, 実際には, 鋼桁の曲げ変形に伴う水平せん断力を床版に伝達しており, 非合成桁であっても合成桁に近い挙動を呈することが分かっている。スラブアンカーのずれ止め作用は, 床版コンクリート打設後の死荷重および活荷重載荷時の主桁変形によって発現するだけでなく, 鋼桁と共同で床版コンクリートの自己変形を拘束する効果も有している。その代表例が, 乾燥収縮によるひずみを拘束し, 若材齢コンクリートに引張応力を発生させる現象である。

乾燥収縮による初期ひび割れが存在すると, 輪荷重の繰返し作用に対する RC 床版の疲労耐久性の損失が促進される¹⁾。また, 床版内部の鋼材の腐食問題に対しても, 初期ひび割れの存在は好ましくない。一般的な合成桁の床版コンクリートでは, 主桁作用による応力の影響

を考慮に入れて, 通常は 30N/mm^2 以上の設計基準強度が設定される。一方, 非合成桁の場合には, 床版としての機能を満たすことを主目的として, 設計基準強度は合成桁の場合の 80% 程度である 24N/mm^2 以上とされ, かつ設計計算の段階で乾燥収縮に対する適切な配慮がなされないため, 床版の耐久性に及ぼす影響が懸念される。

非合成桁の乾燥収縮ひびわれを防止するためには, 従来の剛なスラブアンカーの代わりに, 柔な連結材を適用

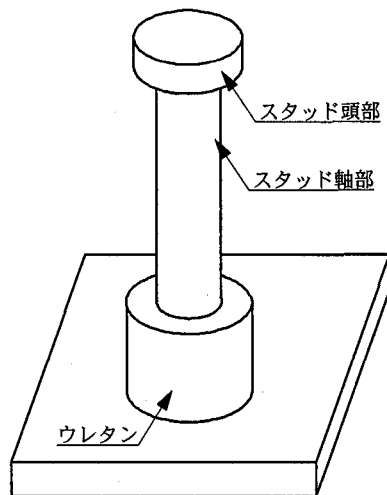


図1 柔スタッド (ウレタン付きスタッド)

することが有効である。著者らは、床版を鋼桁に柔軟につなぐ連結材として、通常の頭付きスタッドの根元部に、緩衝材として発泡ウレタンを巻き付けた「柔スタッド」を図1のように考案したが²⁾、これを非合成桁に適用することを提案する。

これまでの研究¹⁾⁴⁾では、柔スタッドを用いた押抜き試験体、はり試験体および床版試験体に対する各種実験より、ずれ特性、静的強度および疲労強度を確認し、基本性状の検証を行った。本研究では、床版と鋼1桁1本、床版と鋼1桁2本および床組部材からなる2種類の構造モデルに対して線形FEM解析を行い、乾燥収縮ひずみによって発生する床版内部の引張応力を計算した結果を報告する。これは、自由収縮ひずみの床版厚方向分布形状を考慮に入れ、かつ、ずれ止めの剛性と配置間隔を変化させた計算であり、完全合成の結果と柔スタッドを使用した弾性合成の結果を比較し、乾燥収縮応力がどの程度低減されるかを考察した。さらに、端支点上の横桁やブラケットが床版を直接拘束するか否かによる、橋軸直角方向応力の状況の相違も示す。

2. 乾燥収縮応力解析の手法

2.1 解析方法

(1) 解析の手順

本研究では、床版コンクリートのヤング係数が、材齢に応じて逐次変化することを考慮に入れて、コンクリート打設直後から長期材齢までの間を幾つかの材齢ステップに分割し、各材齢ステップに発生した応力の増分を累計していく計算方法を採用した。すなわち、着目した各材齢ステップでヤング係数を一定として、その材齢ステップに生じた自由収縮ひずみの増分を用いて床版応力の増分を算出する。そして、この応力の増分を打設直後から累計し、ある材齢までに累計された応力値をその材齢における乾燥収縮応力として扱うものである。コンクリートの乾燥収縮によって床版内部に発生する自由収縮ひずみは、次項(2)で述べる方法で計算し、この計算値から着目材齢ステップのひずみの増分を算出した。

床版と鋼桁1本からなるモデル（以下、「モデルA」という）において、橋軸方向の床版内部応力を求める解析手順は図2のとおりである⁴⁾。系1のように節点を拘束した床版のみのモデルに対して、自由収縮ひずみの増分に等しい反対符号の強制変位を作用させ、節点応力と節点反力を算出する。このときの強制変位量は、支間中央の横断面内を対称面とし、この対称面から着目節点までの橋軸方向距離にひずみの増分を掛け合わせた値である。そして、系1で求めた節点反力を系2に示すような床版と鋼桁からなるモデルに載荷して、床版の節点応力を算出する。この2つの系における応力を重ね合わせることで、鋼桁による拘束効果を考慮に入れた床

版内部応力の増分を求める。

床版と鋼桁2本および床組部材からなるモデル（以下、「モデルB」という）において内部応力を求める解析は、自由収縮ひずみの増分に相当する温度荷重を載荷し、発生応力の累計を乾燥収縮応力として扱うものである。いま、材料の線膨張係数を α_t とし、式(1)から算出される温度ひずみ ε_t を乾燥収縮ひずみ ε_s と等価に扱うもので、線膨張係数を材齢に無関係な一定値に設定し、自由ひずみの増分に相当する温度荷重 ΔT を載荷することにより、ある材齢ステップにおける乾燥収縮応力の増分を直接的に求める方法である。

$$\varepsilon_t = \alpha_t \cdot \Delta T \quad \cdots (1)$$

モデルAの解析では、橋軸方向のみの変形と応力を検討対象としているが、モデルBでは、橋軸方向と橋軸直角方向の2方向の変形と応力を同時に扱うため、このような温度応力解析を用いた。なお、モデルBの解析に先立って、モデルAに対して温度応力解析を実施し、図2に示した方法と同じ結果が得られることをあらかじめ確認した。

(2) 自由収縮ひずみの計算

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート表面における蒸気の逸散に伴い、内部から外部に水分が移動するという生成機構からなる。Pickettは、コンクリート中の水分の蒸気圧が含水量に比例し、かつ、浸透性が含水量に無関係であるとして、コンクリート中の水分の移動現象を拡散方程式で表現できるという仮定の下で、式(2)を導

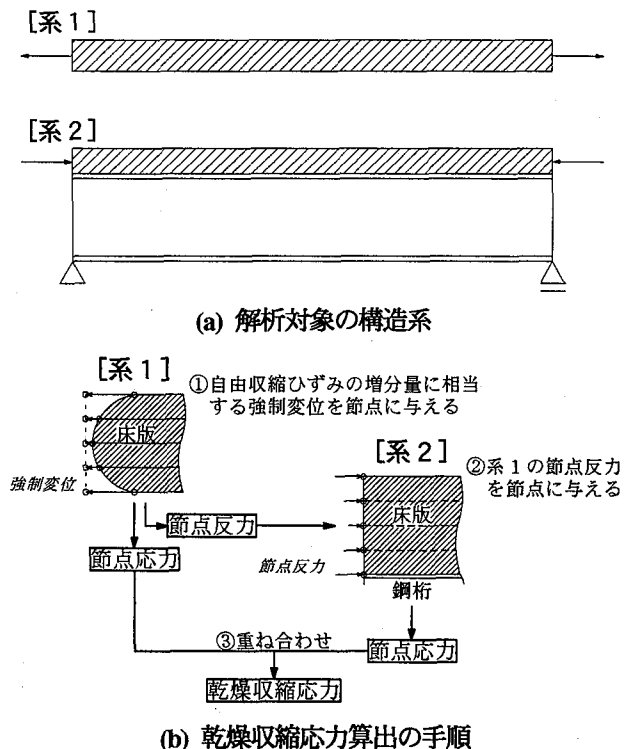


図2 橋軸方向に着目する乾燥収縮応力解析の手順

入している⁹⁾。そして、境界において熱伝導における Newton の輻射の法則と同様な扱いにより、境界値問題として式(2)を解き、応力とひずみの関係が線形関係にあるとしてコンクリートの内部応力を求める方法を提案している。

$$k \frac{\partial^2 \varepsilon_s}{\partial z^2} = \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} \quad \cdots \cdots (2)$$

$$k \left[\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right]_b = f \{ (\varepsilon_s)_\infty - (\varepsilon_s)_b \} \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、 ε_s ：自由収縮ひずみ、 k ：見かけの拡散係数 (cm^2/day)、 f ：表面係数 (cm/day)、 z ：床版の厚さ方向の座標 (cm)、 t ：時間 (day)、 $(\varepsilon_s)_\infty$ ：環境条件を考慮した自由収縮ひずみの最終値、そして、添字 b は表面を示す。

若材齢のコンクリートでは、床版の厚さ方向に自由ひずみが一様とはならないので、本研究においても、自由収縮ひずみ分布を求めるための基礎方程式と床版表面の境界条件は、式(2)および(3)を用いた⁹⁾。これらの式を床版の厚さ方向の座標 z と時間 t に関する差分方程式に置き換えて、床版内部のひずみ分布を経時的に算出し、FEM 解析の荷重 (強制変位量あるいは温度荷重) に用いた。

2.2 解析対象とする構造モデル

(1) モデル A

図 3 に示すような、20cm 厚の床版とウェブ高 2300mm の鋼 I 桁からなる単純桁で、鋼桁は支間長 40m の単純桁としての断面性能を有する一定断面である。解析の都合上、対象モデルは 20m とし、橋軸方向に 8 等分する要素分割とした⁹⁾。

(2) モデル B

図 4 に示すような、床版厚 31cm、ウェブ高 2800mm の鋼 I 桁からなり、支間長 40m の単純非合成桁として仮定した鋼桁断面で、橋軸方向に 20 等分する要素分割とし

た。また、このモデルには、床組部材として、高さ 600mm の H 形鋼による中間横桁を 10m 間隔で配置し、端支点には、ウェブ高 1200mm の端横桁およびブラケットを配置した。

このモデルでは、端横桁やブラケットの上面と床版下面で節点変位を一致させることにより、床組部材による床版の拘束を再現する場合と、拘束しない場合の 2 種類の条件を設定した。この条件が、橋軸直角方向の応力度に及ぼす影響を検討した。

2.3 解析パラメータ

(1) 自由収縮ひずみ

本研究では、既往の研究⁹⁾において普通の状態として用いられている、 $k=0.3$ 、 $f=0.1$ 、 $(\varepsilon_s)_\infty=430 \times 10^{-6}$ という条件を設定し、差分計算に用いる時間ステップを 0.1 日とした。

(2) ばね定数

床版と鋼桁の接合面は 2 重節点とし、3 方向のばね要素を挿入して連結した。水平方向のばね定数を変化させることによってスタッドの剛性を調節し、“完全合成の状態”と床版と鋼桁の間にずれが生じる“弾性合成の状態”を表現した。

弾性合成の場合のスタッドは、ずれ特性および疲労強度が最も良好であったウレタン高さ 3cm を想定して、押抜き試験結果²⁾から得られた 1133kN/cm/本をスタッドの剛性として用い、この値を解析ケースのずれ止め間隔とモデルの要素分割に応じて水平方向の節点ばね定数に換算した。完全合成の場合は節点間を剛結 ($1 \times 10^6 \text{kN/cm/本}$) とし、鉛直方向のばね定数は、合成の度合いにかかわらず剛結とした。

本研究では、スタッドの剛性と配置間隔が及ぼす影響

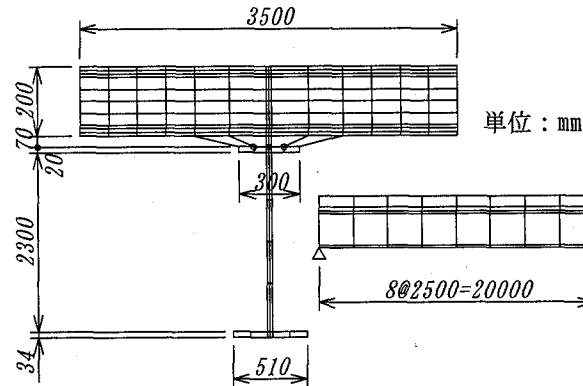


図 3 有限要素解析の要素分割 (モデル A)

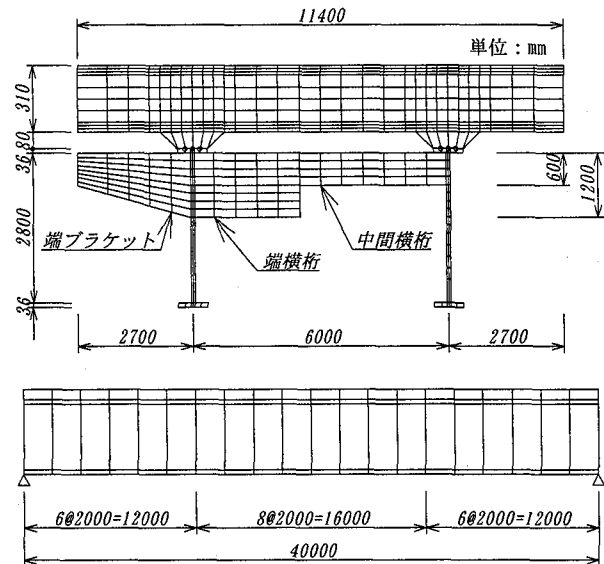


図 4 有限要素解析の要素分割 (モデル B)

を把握するために、

- ①完全合成の場合
- ②柔スタッドを最密の10cm間隔で配置する場合
- ③同じく、床版厚の3倍程度の間隔で配置する場合
- ④同じく、スラブアンカーと同様に100cm間隔で配置する場合

の各ケースについて解析した。モデルBに対しては、参考として、⑤柔スタッドを200cm間隔で配置する場合も計算した。各解析ケースにおけるスタッド間隔と水平方向の節点ばね定数を表1に示す。

(3) コンクリートの材料特性

RC床版の乾燥収縮問題では、若材齢期でのコンクリート強度（圧縮および引張）とヤング係数が及ぼす影響が大きく、これらの経時変化を考慮に入れた検討が重要である。床版コンクリートは、21℃養生で28日強度が29.4N/mm²（300kgf/cm²）のものを想定し、28日までの材齢に応じた圧縮強度の変化を考慮に入れ⁸⁾、28日以降は一定とした。

ヤング係数は、文献8)に記載の式(4)に圧縮強度を代入して算定し、コンクリート強度と同様に材齢に応じて変化させた。なお、コンクリート標準示方書⁹⁾に記載の式(5)を用いて算出した引張強度も、前記2つの特性値と併せて表2に示す。

$$E_c = 4817 \cdot f_c'^{1/2} \quad \cdots \cdots (4)$$

$$f_t = 0.23 \cdot f_c'^{2/3} \quad \cdots \cdots (5)$$

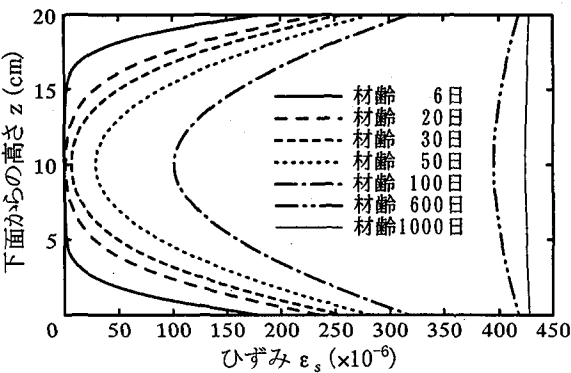
ここで、 f_c' 、 f_t 、 E_c ：それぞれ、コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、引張強度(N/mm²)、ヤング係数(N/mm²)。

(4) 温度応力解析における線膨張係数

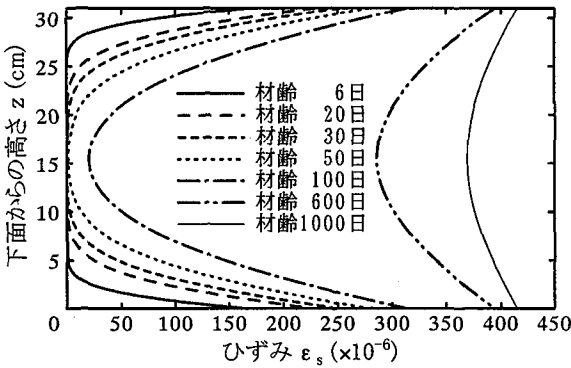
コンクリートの内部応力を厳密に算出し、ひび割れ発生危険性を詳細に検討するためには、クリープの影響や鉄筋の拘束効果を定量的に取り入れた解析が必要であ

る。本研究では、ずれ止めの剛性の違いが乾燥収縮応力に及ぼす影響を検討することが主目的であるため、節点ばね定数をパラメトリックに変化させた解析を行い、クリープの影響および鉄筋の拘束効果は考慮しなかった。

しかしながら、2方向の変形と応力を同時に扱うモデルBの解析では、橋軸方向応力 σ_x と橋軸直角方向応力 σ_y とが、ポアソン比の影響を相互に及ぼし合うことになる。このとき、床版内部の鉄筋による拘束効果には異方向性が想定されるため、これを考慮した結果となるよう、モデルBの温度応力解析時の線膨張係数を橋軸方向と橋



(a) 床版厚20cm (モデルA)



(b) 床版厚31cm (モデルB)

図5 自由収縮ひずみの床版厚方向分布

表1 節点のばね定数

解析 ケース	モデルA		モデルB	
	スタッド 間隔	節点ばね 定数(kN/cm)	スタッド 間隔	節点ばね 定数(kN/cm)
②	@10cm	28325	@10cm	22660
③	@50cm	5665	@100cm	2266
④	@100cm	2832.5		
⑤	—	—	@200cm	1133

表2 コンクリートの材料特性値

材齢 (day)	f_c' (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
6	16.8	1.51	1.97x10 ⁴
10	21.3	1.77	2.22x10 ⁴
20	26.9	2.07	2.45x10 ⁴
30以降	29.4	2.19	2.61x10 ⁴

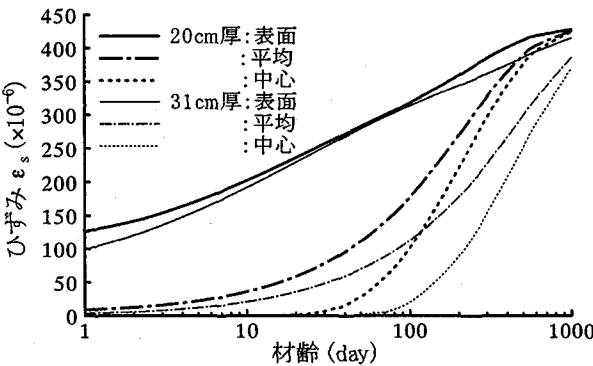


図6 自由収縮ひずみの経時変化

軸直角方向で異なる値とした。

一般に、橋軸方向は床版の配力鉄筋方向に、橋軸直角方向は主鉄筋方向に一致する。床版の単位幅あたりの配力鉄筋の断面積は、主鉄筋のその約 80%であるので、自由収縮ひずみを鉄筋が拘束する効果が、鉄筋断面積の比率と近似的に等しいとみなし、橋軸方向と橋軸直角方向の線膨張係数の比率を 1 : 0.8 とした。

3. 解析結果

3.1 自由収縮ひずみの経時変化

図 5 は、床版厚 20cm のモデル A および床版厚 31cm のモデル B における自由収縮ひずみの床版厚方向分布の経時変化である。拡散係数、表面係数、そして、表面ひずみの最終値をどのように設定するかによって、ひずみの分布形状は本図と種々異なる結果になるが、概して、打設後 30 日未満の若材齢期には、床版表面と版厚中心付近ではひずみ量に大きな違いが現れることが分かる。

図 6 は、床版表面および床版厚中心における収縮ひずみの経時変化を、横軸に時間をとって表したものであり、断面内の平均ひずみも併記した。床版表面のひずみが片対数グラフでほぼ直線であるのに対し、床版厚中心のひずみは若材齢ではほとんど増加しないことが分かる。

なお、合成桁を設計するための乾燥収縮ひずみは、クリープの効果も考慮に入れて 200×10^{-6} と道路橋示方書に規定されているが、断面に生じる平均ひずみがこの規定値に等しくなるのは、モデル A で約 120 日、モデル B で約 240 日である。

3.2 乾燥収縮応力の発生状況

(1) 床版厚方向の分布

図 7 および図 8 は、支点部・鋼桁直上位置での σ_x および σ_y の床版厚方向の分布である。モデル A およびモデル B とともに、橋軸方向応力度 σ_x の分布形状は、材齢やずれ止めの剛性に関係なくほぼ相似形となっており、床版下面付近が最大応力位置となっている。また、図 7(b) と(c) との比較から、モデル B において、床組部材による拘束の有無が σ_x に及ぼす影響が僅かであるこ

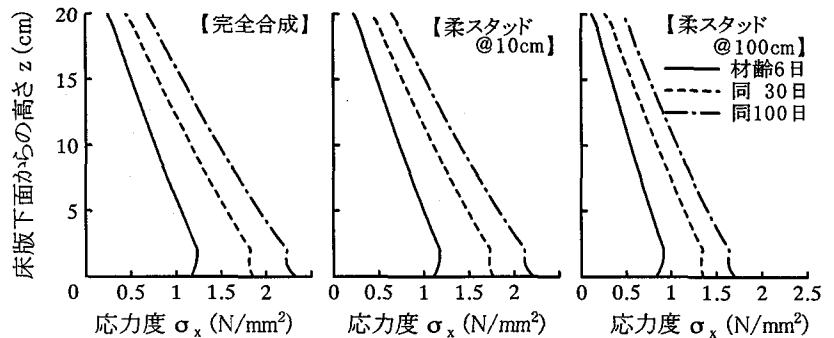
とが分かる。

図 8(a) と(b) を比べれば、床組部材の拘束が、橋軸直角方向応力度 σ_y に及ぼす影響が顕著であるといえる。また、図 8(a) の 3 つのグラフがほぼ同一であることから、支点上の σ_y に対するずれ止め剛性の影響は小さく、床組部材による拘束の有無が支配的であるといえる。

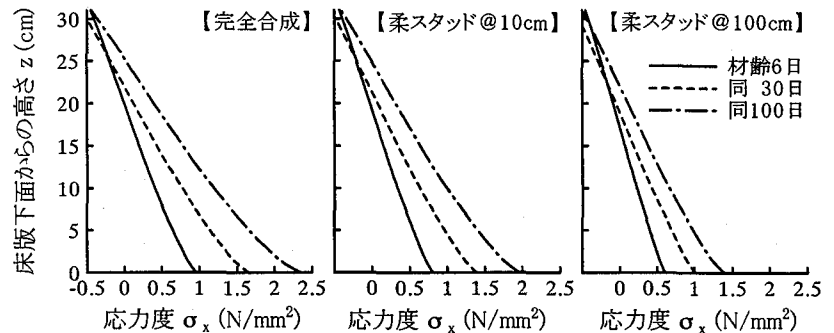
(2) 橋軸方向の分布

図 9 および図 10 は、材齢 30 日での鋼桁直上位置における床版下面応力度の橋軸方向分布である。図 9 と図 10 から、柔スタッドを用いれば、主桁の全長にわたって床版の引張応力を低減できることが分かる。

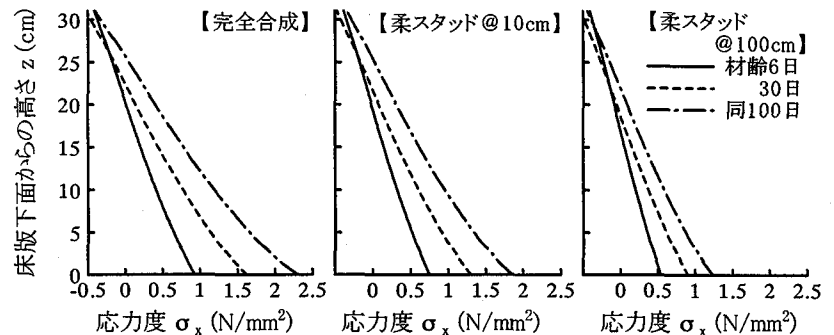
図 9(b) では、支点からの距離 x が 400cm の位置を境界にして、応力分布曲線の傾きが大きく変化している。これは、合成桁のずれ止めの設計に用いる乾燥収縮および温度差によるせん断力が、支点から支間長 (40m) の 1/10



(a) モデル A



(b) モデル B (床組部材の拘束あり)



(c) モデル B (床組部材の拘束なし)

図 7 橋軸方向応力度 σ_x の床版厚方向分布

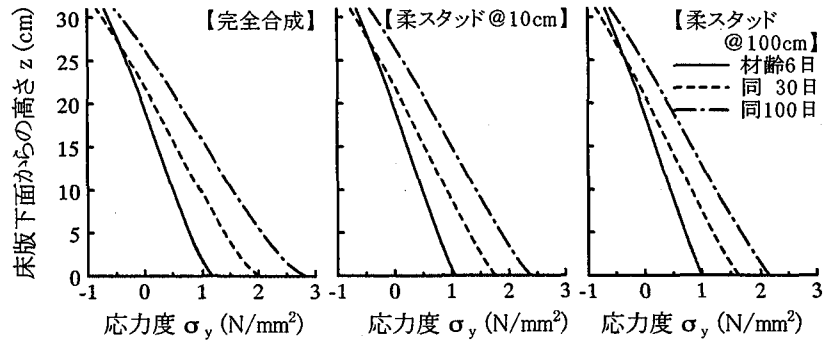
の範囲で三角形分布するという計算上の仮定と同じ傾向であり、鋼桁による床版の拘束が端部で急増することを示している。材齢30日以降のグラフは割愛するが、このような分布性状は同様である。

モデルBの結果から、柔スタッドを100cm間隔とした場合と200cm間隔とした場合では、両ケースの応力度にほとんど差がないこともわかる。したがって、柔スタッドを200cm程度以上で配置しても、100cm間隔で配置した場合の乾燥収縮応力との間に際だった違いは現れないと考えられる。

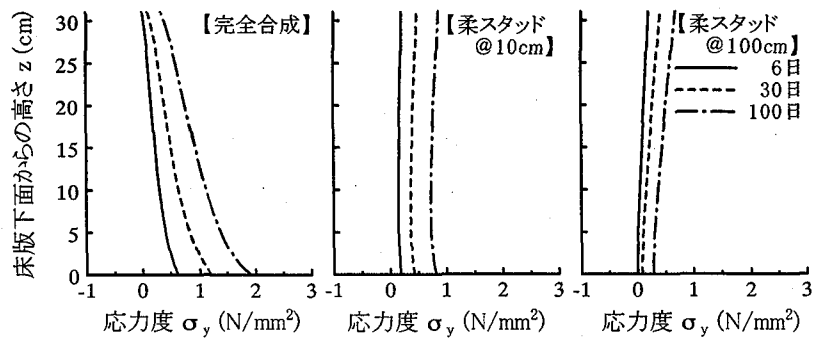
図10は σ_y の分布である。図10(a)と(b)では、支間中央付近において同程度の引張応力が発生しているが、支点付近では分布性状が大きく異なる。床組部材で拘束された図10(a)では支点で応力度はピークとなるが、図10(b)では支点で応力度が一定または減少している。これは、床組部材で拘束しないとき、この部位で σ_x が最大値になり、そのポアソン比の圧縮応力が橋軸直角方向に発生するためと考えられる。

なお、完全合成の状態から弾性合成の状態への移行として、柔スタッドを10cm間隔で配置すると σ_y が大幅に減

少することと、柔スタッド間隔を10cmより大きくしても σ_y の有意な差が現れないことも重要である。

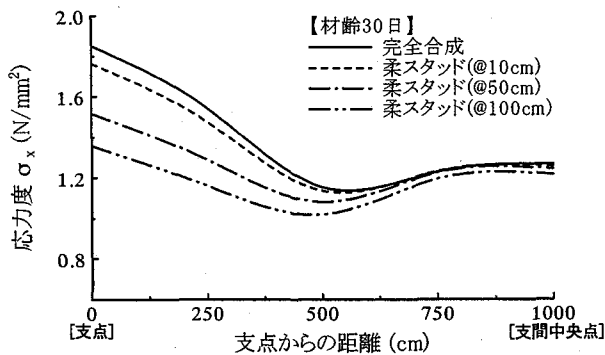


(a) 床組部材の拘束あり

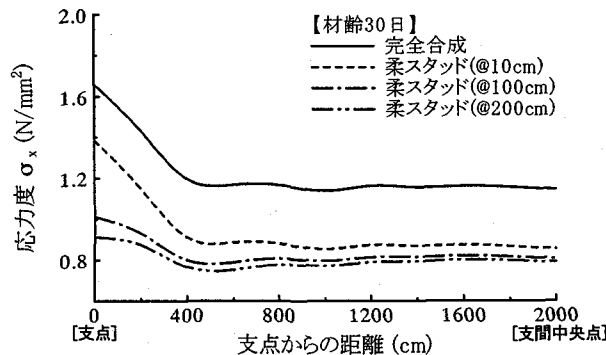


(b) 床組部材の拘束なし

図8 橋軸直角方向応力度 σ_y の床版厚方向分布(モデルB)

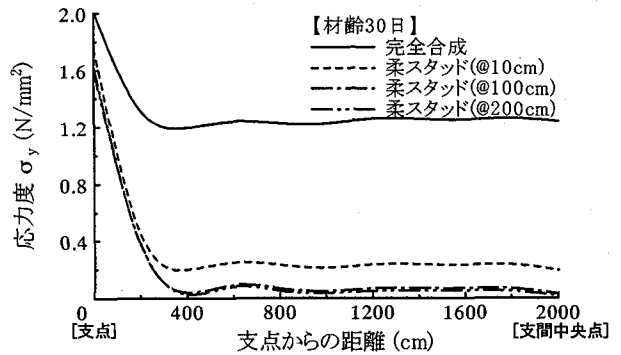


(a) モデルA

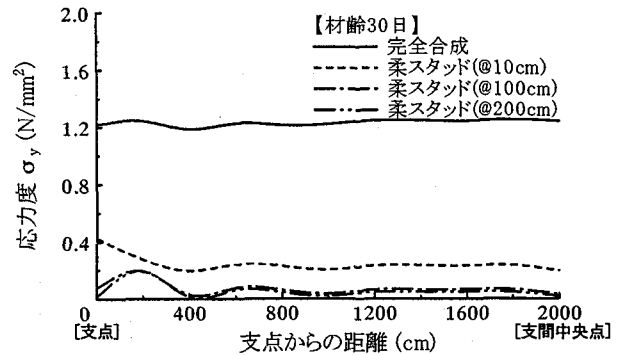


(b) モデルB

図9 橋軸方向応力度 σ_x の橋軸方向分布



(a) 床組部材の拘束あり



(b) 床組部材の拘束なし

図10 橋軸直角方向応力度 σ_y の橋軸方向分布(モデルB)

(3) 橋軸直角方向の分布

図 11 および図 12 は、支点上の床版下面応力度の橋軸直角方向分布であり、橋軸直角方向に橋梁全体を表現したモデル B に関する結果である。

図 11 より、ずれ止めの剛性を低減すれば、鋼桁周辺の床版応力の分布が滑らかになり、引張応力度のピーク値も 65% 程度に減少することが分かる。この性状は、柔スタッドをずれ止めに適用するときに見られる大きな特徴である。

図 12(a)からは、 σ_y はやはり鋼桁直上で最大引張となることが分かるが、床版先端部、すなわち、ブラケット先端部でも応力度が大きくなっていることが重要である。

これは、ブラケットと床版が合成断面として挙動するが、ブラケット先端では鋼断面が小さいことから、床版との合成断面と見なした場合の中立軸位置がかなり上方になるために、床版下面における応力の曲げ成分も引張状態になったためと考えられる。

図 12(b)では、2 本の主桁のフランジで挟まれた範囲の床版において引張応力が発生している。これより、ブラケットや端横桁が床版の変形を直接に拘束していなくても、端横桁が主桁の橋軸直角方向の相対変位を妨げ、これがずれ止めを介して床版自体の収縮を拘束するために、引張応力が生じるという機構が説明できる。

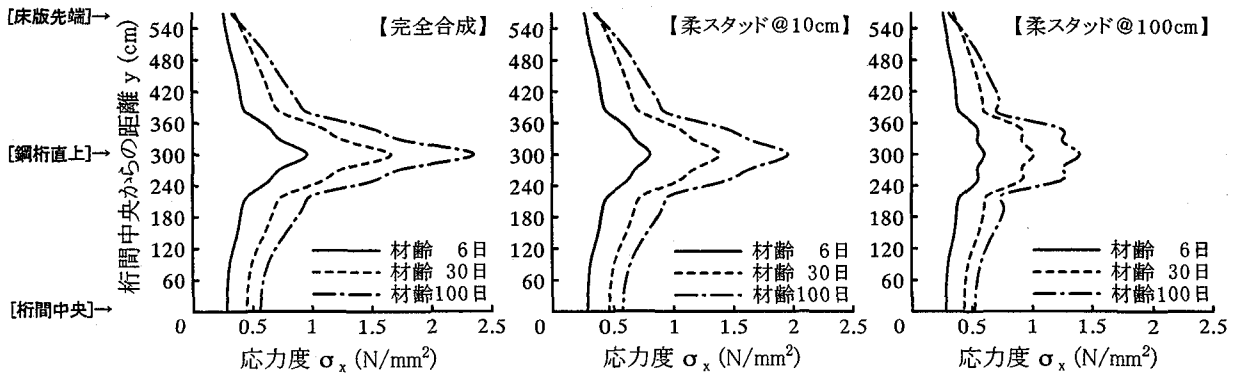
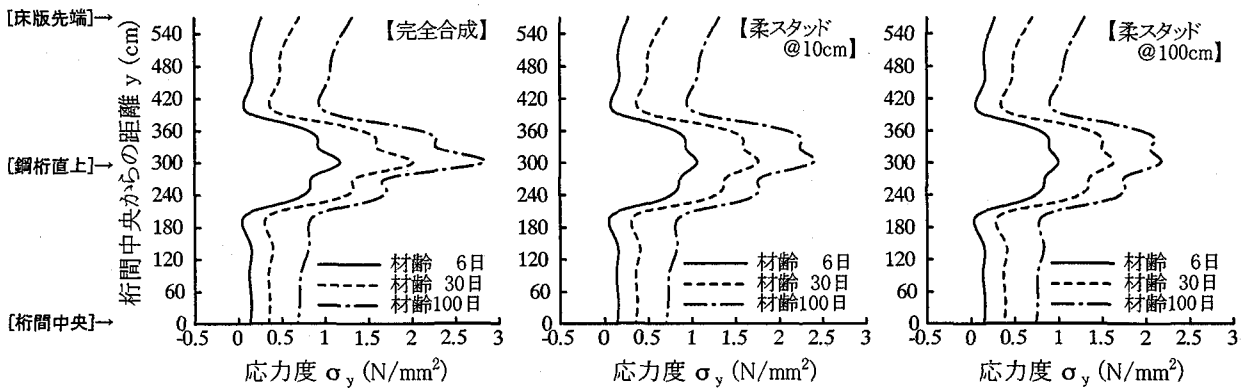
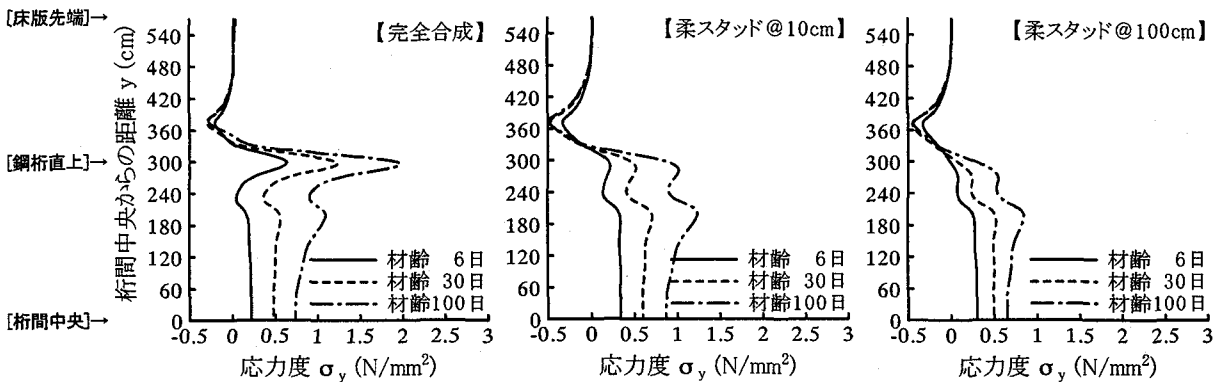


図 11 橋軸方向応力度 σ_x の橋軸直角方向分布 (モデル B)



(a) 床組部材の拘束あり



(b) 床組部材の拘束なし

図 12 橋軸直角方向応力度 σ_y の橋軸直角方向分布 (モデル B)

(4) 最大引張応力の経時変化

図13は床組部材の拘束を考慮したモデルBに関して、支点部・鋼桁直上位置における床版下面応力度の経時変化を示している。完全合成の場合の σ_x は材齢2ヶ月程度でコンクリートの引張強度に近い値となっている。一方、 σ_y は材齢1ヶ月程度で引張強度と同程度となっており、床組と床版が剛結された場合は、橋軸方向応力度と同様に、橋軸直角方向応力度にも注意を要するといえる。なお、ずれ止めを柔にすることによる応力低減の効果は、これらの図からも明確である。

4. 柔スタッドによる応力低減の効果

4.1 最大応力度の低減状況

表3には、最大引張応力度の発生する部位である、支点部の鋼桁直上位置における床版下面の応力度を列記したものである。応力度の値とともに、構造モデルと材齢ごとに、完全合成の場合の引張応力度に対する発生応力度の比率も併記した。この表より、構造モデルと床組部材による拘束条件が同じであれば、ずれ止めの配置の変化に応じて引張応力が減少する度合いは、材齢に無関係なようである。また、スラブアンカーと同程度の100cm間隔で柔スタッドを配置すると、モデルAでは75%程度、モデルBでは60%程度まで橋軸方向の引張応力度が低減できる。モデルAとモデルBとで橋軸方向応力度の低減の度合いが異なるのは、構造諸元が異なるためである。

完全合成から弾性合成への移行による橋軸直角方向応力度 σ_y の低減の度合いは、橋軸方向応力度 σ_x のそれと同程度である。しかし、柔スタッドの間隔が大きくなっても引張応力度の低減の度合いはあまり変化しない。これは、橋軸直角方向応力のうち、ずれ止めの水平方向剛性の効果が弾性合成化によって緩和されても、複数主桁と床組構造が床版の変形を拘束する分の効果はそれほど減少しないためであると考えられる。

4.2 引張応力低減の定式化

実橋の設計において、橋軸方向の乾燥収縮応力の低減を図るためにずれ止めの剛性を逐次変化させ、数多くの構造解析を行うことは煩雑である。そのため、ずれ止めの剛性の変化が引張応力度の比率に及ぼす効果の定式化を試みる。

引張応力度が最大となる支点部・鋼桁直上位置の床版下面応力度に着目し、式

(6)のように R_t および R_c を定義する。

$$\left. \begin{aligned} R_t &= \sigma_x / \sigma_{t0} \\ R_c &= 1/C \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

ここで、 σ_{t0} :完全合成の場合の橋軸方向応力度(N/mm²)、 σ_x : σ_{t0} と同じ構造モデルおよび材齢における弾性合成の場合の橋軸方向応力度(N/mm²)、 C :橋軸方向単位長さあたりのずれ止めのばね定数(kN/mm²)。

いま、 C の逆数である R_c が大きいほどずれが生じやすいので、これを「ずれパラメータ」、 R_t を「引張応力比」と呼ぶことにする。本研究の解析モデルでは、柔スタッドが橋軸直角方向に3本並んでいるので、例えば、スラ

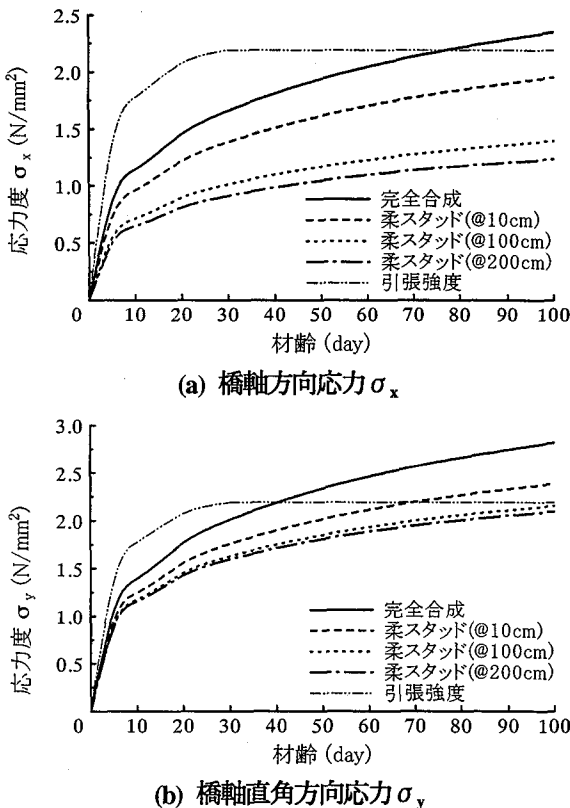


図13 床版下面応力度の経時変化
(モデルB:床組部材拘束あり・支点部)

表3 各ケースの最大引張応力度と完全合成の場合に対する比率

ずれ止めの配置	着目応力	橋軸方向 σ_x												橋軸直角方向 σ_y		
	構造	モデル A			モデル B											
					床組部材の拘束あり			床組部材の拘束なし			床組部材の拘束あり					
		材齢	6 日	30 日	100 日	6 日	30 日	100 日	6 日	30 日	100 日	6 日	30 日	100 日		
完全合成	応力度	1.17	1.85	2.33	0.96	1.66	2.35	0.93	1.62	2.31	1.17	2.01	2.82			
柔スタッド @10cm	応力度	1.11	1.77	2.22	0.81	1.39	1.96	0.75	1.30	1.85	1.06	1.76	2.39			
	比率	94.9	95.3	95.2	84.1	83.5	83.1	80.7	80.1	80.1	89.9	87.4	84.6			
柔スタッド @50cm	応力度	0.98	1.52	1.90	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
	比率	83.5	81.9	81.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
柔スタッド @100cm	応力度	0.83	1.36	1.70	0.60	1.01	1.40	0.54	0.90	1.25	1.00	1.63	2.16			
	比率	71.0	73.3	73.0	62.8	61.0	59.4	57.8	55.7	53.9	85.1	81.0	76.3			
柔スタッド @200cm	応力度	—	—	—	0.55	0.91	1.24	0.48	0.79	1.05	0.99	1.60	2.10			
	比率	—	—	—	57.3	55.0	52.6	51.5	48.4	45.3	84.0	79.5	74.3			
単位……応力度：N/mm ² ，比率：%																

ブアンカーと同程度の橋軸方向に100cm間隔で配置した場合には、スタッド1本あたりのばね定数1133kN/cmを用いて、 $R_c=1/(3 \times 113.3/1000)=2.942\text{mm}^2/\text{kN}$ となる。

完全合成の場合は $R_c=0$ かつ $R_t=1$ が、非合成の場合には $R_c=\infty$ かつ $R_t=0$ が理想的な境界条件であるので、 R_c と R_t の関係を、 $R_t=0$ を漸近線とする双曲線と仮定し、モデルAおよびモデルBにおける解析結果を用いて回帰計算を行った。式(7)のような一般形と、式(8)のような点(0,1)を通る2種類の双曲線に関して、FEM解析による応力度を適用した回帰分析を実施し、式中の係数 a および b を求めた結果が表4である。ただし、モデルBは、現実に近い状態である床組部材による拘束を考慮に入れた場合の結果である。また、表中の最下段の「全体」とは、モデルAあるいはモデルBに関する全てのデータを用いて最小2乗法を実施した結果である。データ全体に関する回帰式とFEM解析の各ケースの結果をプロットしたものが図14である。

$$R_t = \frac{a}{R_c + b} \quad \cdots(7)$$

$$R_t = \frac{a}{R_c + a} \quad \cdots(8)$$

図14(a)に示したモデルAは、橋軸方向のみの変形と応力に着目した解析であり、応力状態が比較的単純なために、計算結果が回帰式近傍に収束している。図14(b)のモデルBは、2方向の変形と応力を考慮した解析であるため、計算結果のデータのばらつく度合いが、モデルAに比べてやや大きい。ただし、図中の式(7)の曲線に着目すれば、プロットした解析結果と回帰曲線における引張応力比 R_t の差は5%程度にすぎず、引張応力度の大きさそのものも考慮すれば、誤差は僅かである。式(8)に関しても、大差はないものと見なせる。

図14(c)は床組部材による拘束の有無に着目して、回帰曲線を比較したものである。ずれパラメータ R_c が0に近づくとき床組部材による拘束の有無に関する差はほとんどなくなり、 R_c が4程度以上になれば、式(7)と(8)の別による R_t の差は僅少となる。

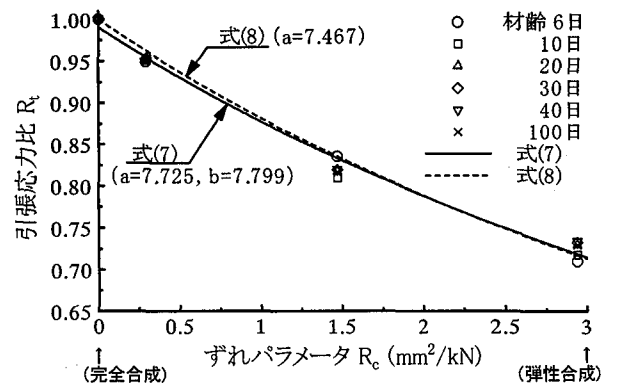
これらの図からも、本研究における構造モデルでは、柔スタッドを1列3本でスラブアンカーと同様の1m間隔で配置すれば、モデルBでは引張応力度を65%程度に低減できることが分かる。

非合成桁のスラブアンカーは完全合成に近い挙動を呈し、かつ、19φの柔スタッド2本とスラブアンカー1本のせん断耐力がほぼ等しいことが分かっている²⁾。そこで、スラブアンカーの代わりに柔スタッドを1列に2本配置する場合を試算すると、ずれパラメータは $R_c=4.413\text{mm}^2/\text{kN}$ となる。図14(b)あるいは表4の係数を用いて R_t を求めれば、引張応力度はスラブアンカーを用いる完全合成の値の約58%まで減少することになる。す

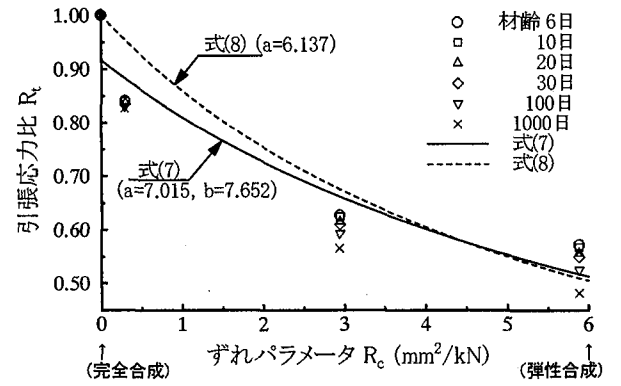
なわち、非合成桁のスラブアンカーを、せん断耐力がこれと等しく、かつ、スラブアンカーよりも疲労強度に優れた柔スタッド2本に置き換えれば、乾燥収縮応力のピーク値を40%以上緩和できると予想される。

表4 引張応力比算定式の係数

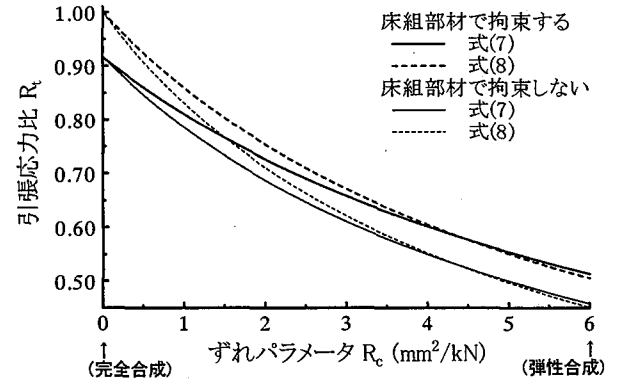
モデル A				モデル B (床組部材の拘束あり)			
材齢 (day)	係数(mm ² /kN)			材齢 (day)	係数(mm ² /kN)		
	式(7)		式(8)		式(7)		式(8)
	a	b	a		a	b	a
6	7.364	7.398	7.247	6	7.899	8.590	6.847
10	7.372	7.448	7.121	10	7.734	8.412	6.718
20	7.844	7.927	7.557	20	7.389	8.045	6.444
30	7.955	8.036	7.655	30	7.158	7.797	6.262
40	8.011	8.097	7.709	100	6.468	7.043	5.724
100	7.821	7.906	7.528	1000	5.377	5.831	4.867
全体	7.725	7.799	7.467	全体	7.015	7.652	6.137



(a) モデル A



(b) モデル B (床組部材の拘束あり)



(c) モデル B の 2 ケース比較

図14 引張応力比とずれパラメータの関係

なお、本研究で示した式(7)あるいは式(8)のような双曲線で R_t と R_c の関係が比較的精度良く表現できるので、ある構造モデルに関する解析結果が僅かであっても、そのデータから式(7)あるいは式(8)のような関係式を作成すれば、解析していないばね定数に関する最大引張応力度が推定可能であることも重要である。

5. 結論

本研究では、主桁1本のモデルと主桁2本と床組モデルからなる2種類の構造を対象とし、床版厚方向に乾燥収縮ひずみ分布の影響を考慮して、床版応力の数値計算を行った。この結果、以下のことが結論付けられる。

- 1) 床版コンクリートの乾燥収縮により、支点部の鋼桁直上に発生する引張応力分布形状は、コンクリートの材齢やずれ止めの剛性に関係なく相似形であり、床版下面でピーク値となる。
- 2) 端横桁およびブラケットによる床版の拘束効果は、橋軸直角方向応力度 σ_y に関して顕著であり、橋軸方向応力度 σ_x に対しては緩慢である。
- 3) 実橋スケールの解析より、合成桁ずれ止めの設計水平せん断力と同様に、床版コンクリートの引張応力度も、支点から支間長の1/10程度の領域で急増する。
- 4) ずれ止めに柔スタッドを用いれば、主桁の全長にわたり床版の引張応力を低減できる。特に、支点部以外の領域で、橋軸直角方向応力の低減に及ぼす影響が大きい。
- 5) 柔スタッドを100cm程度の間隔で配置すれば、乾燥収縮応力の低減の度合いは収束に近づく。
- 6) 柔スタッドをずれ止めに用いれば、鋼桁直上に集中する床版の引張応力を橋軸直角方向に分散させることが可能である。
- 7) 端横桁およびブラケットで床版を直接に拘束しなければ、橋軸直角方向の乾燥収縮応力 σ_y は、床組構造が主桁間の相対変位を拘束する影響によって、主桁間の領域に分布する。
- 8) 完全合成の引張応力度に対する弾性合成の引張応力度の比率(引張応力比)と、ずれ止めの橋軸方向単位長さあたりのばね定数の逆数(ずれパラメータ)との間には、双曲線の関係が成り立つ。
- 9) 本研究で用いた2主桁橋モデルの場合、柔スタッド2本を1m間隔で配置すれば、スラブアンカー等を用いた完全合成の場合に比べて、床版の引張応力度のピーク値を40%以上低減できる。

若材齢のコンクリート床版に引張応力が生じる原因には、乾燥収縮のほかにも水和熱、養生方法などの要因が挙げられる。そのうえ、橋梁の構造諸元(床版厚、鋼桁や床組の剛性)によっても、発生する床版応力の分布やピーク値は様々であるため、乾燥収縮応力抑制によるひ

び割れ防止効果を定量的に把握することは容易ではない。しかしながら、今日、床版の初期ひび割れ発生に及ぼす乾燥収縮の影響は大きいものとして広く認識されており、乾燥収縮応力の抑制が、橋梁の建設時において床版の耐久性を確保する効果は大きいものと考えられる。

特に現場打ちの場合、コンクリートは配合、打設および養生の各段階で入念な品質管理が要求される材料である。わずかな品質の変動によってひび割れという欠陥が発生しやすい弱点を、"ずれ止め剛性の調整"という構造的あるいは機械的な処置によって補完できることは、橋梁構造をより合理的あるいは経済的に建設するために、極めて有効な手段であると考えられる。

今後は、コンクリートの打設順序と材齢差を考慮した乾燥収縮ひずみと応力度の解析を進め、実橋での打設状態にさらに近いモデルにて検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 水元義久, 正田正一: RC床版破損問題とその対応策—コンクリートの乾燥収縮現象よりの検討—, 阪神高速道路公団技報, No.2, pp.140-153, 1982.
- 2) 平城弘一, 松井繁之, 武藤和好: 柔な合成作用に適するスタッドの開発, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1485-1496, 1998.
- 3) Muto K., Hiragi H. and Matsui S.: Development of Favourable Stud Shear Connectors for Flexible Composite Action, Proceedings of the 5th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Calgary, 1998.
- 4) 武藤和好, 平城弘一, 松井繁之, 石崎 茂: ウレタン付きスタッドの疲労強度と乾燥収縮応力低減効果, 第4回復合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.145-150, 1999.
- 5) Pikett G.: Shrinkage stress in concrete, Journal of ACI, Vol.17, No.3-4, 1946.
- 6) 島田 功, 田中昭博, 豊川 臣: 鋼合成桁床版の乾燥収縮応力の解析, 第16回(昭和58年度)業務研究発表会論集, 建設コンサルタンツ協会近畿支部, pp.25-32, 1983.
- 7) 阪田憲次, 蔵本 修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, No.316, pp.145-152, 1981.
- 8) 日本橋梁建設協会: 床版工事設計施工の手引き, 1990.
- 9) 土木学会: 平成8年制定 コンクリート標準示方書, 設計編, 1996.

(2001年9月14日受付)