

論文 床版に膨張コンクリートを用いた鋼合成桁の膨張性状

水上 達也^{*1}・辻 幸和^{*2}・萩原 淳弘^{*3}

要旨：床版に膨張コンクリートを用いた鋼合成桁において、床版の断面寸法を一定として、鋼桁の曲げ剛性を変化させた場合と、鋼桁の曲げ剛性を一定にして、床版の断面寸法を変化させた場合のそれぞれ鋼合成桁の膨張性状を把握するため、実験を行って検討した結果を報告する。鋼桁の曲げ剛性を大きくすると、クリープや弾性ひずみの影響が現れ、仕事量一定則に基づく推定精度が若干低下した。しかし、床版の断面寸法を変化させた場合は、仕事量一定則に基づく推定精度はいずれも良好であった。このことから、仕事量一定則に基づきひずみを推定する場合、鋼桁と床版の相対関係が重要であることを確認した。

キーワード：膨張コンクリート、鋼合成桁、仕事量一定則、FRP

1. はじめに

鋼合成桁床版道路橋は、鋼桁の上にコンクリートを打ち込んで一体化させた合成構造の道路橋であり、コンクリート橋に比べて自重が軽く、施工が比較的容易であることから、広く一般的に用いられている道路橋である。しかし、鋼合成桁床版道路橋の鉄筋コンクリート床版では、硬化乾燥収縮が鋼桁によって拘束されることで、ひび割れや剥離などの破損が起こってしまう。そこで、鋼合成桁の力学的性状を向上させるために、床版に膨張コンクリートを用いる試みがなされている。膨張コンクリートを用いることで、収縮を低減させ、さらにケミカルプレストレスを導入することにより力学的性能を改善できることが知られている¹⁾。

補強材として広く一般的に使用されている鉄筋の腐食は、コンクリート構造物の耐久性や耐力の低下につながる。耐腐食性に優れる補強材としてグリッドタイプの連続繊維補強材(FRP)がある。しかし、FRPは格子交差部でコンクリートとの付着をとっているため、異形鉄筋に比べて付着性能は劣ることが知られている。膨張コンクリートを床版に適用した鋼合成桁では、補強材による拘束と鋼桁による拘束の2つの作用が、膨張性状に大きな影響を及ぼすことが知られている²⁾。既往の研究では、床版の補強材にFRPを使用した場合、鉄筋と比べ拘束する程度は減少するが、鋼合成桁により十分な拘束効果があるとされている³⁾。

また、近年の鋼合成桁道路橋においては、鋼桁を高くすることにより鋼桁自体の本数を減らすといった、合理的な設計の少主桁構造へと転換されてきている。しかし、鋼桁を高くすることで、主桁1本あたりの曲げ剛性が大きくなる。既往の研究より、鋼桁の曲げ剛性を変化させ、膨張コンクリートが拘束体に対してなす仕事量が拘束の

程度にかかわらず一定であるとの仮定に基づいたケミカルプレストレスの膨張ひずみや、ケミカルプレストレスの推定を行う場合、鋼桁の曲げ剛性と床版の断面寸法の相対関係が重要であるといった報告がなされている^{1)~3)}。しかし、床版の断面寸法が異なる場合に、鋼桁による拘束作用が鋼合成桁床版の膨張性状に及ぼす影響についてはほとんど報告されていない。

本研究では、床版の断面寸法を変化させながらも、補強材による拘束材比を一定とした場合に、床版の断面寸法が鋼合成桁の膨張性状に及ぼす影響を把握し、仕事量一定則に基づく膨張ひずみの推定方法の適用可能な範囲を検討することを目的とした。また、鋼桁の曲げ剛性を変化させた場合の鋼合成桁の結果と比較することで、鋼合成桁の膨張性状に及ぼす、床版の断面寸法と鋼桁の曲げ剛性の相対関係について検討した結果についても報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体

実験は、2シリーズに分けて行った。シリーズ1では、鋼桁上に幅300mm、厚さ100mm、長さが1220mmのFRPで補強した床版に、膨張コンクリートを打ち込んで、鋼合成桁を作製した。そして、鋼桁は高さが200mm、300mm、400mmの3種類とした。

上フランジ上にはずれ止め対策として、高さが80mmでφ13mmのスタッドジベルを60mmピッチで配置した。床版の補強材には、SD345のD10の断面積×降伏強度にほぼ等しい断面積×引張強度をもつ格子間隔が150mmの格子状FRPを2段に配置した。

シリーズ2では、長さが1220mmの鋼桁上に、高さおよび幅を変化させた3種類のFRPで補強した床版に、膨

*1 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (正会員)

*2 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻教授 工学博士(正会員)

*3 栃木県庁 県土整備部 (正会員)

表-1 鋼合成桁供試体の諸元

シリーズ	供試体名	断面寸法		補強材	
		床版寸法: hxb (mm)	鋼桁寸法: hxbxt ₁ xt ₂ (mm)		
1	A1-2		100x300	200x100x5.5x8	FRP 断面積: 47.1mm ² E: 149kN/mm ²
	A1-3		100x300	300x150x6.5x9	
	A1-4		100x300	400x200x8x13	
2	A2-3		100x300	300x150x6.5x9	FRP 断面積: 81.4mm ² E: 148kN/mm ²
	B2-3		150x300		
	C2-3		100x450		

張コンクリートを打ち込んで、鋼合成桁供試体を作製した。鋼桁はすべて高さが 300mm のものを使用した。

上フランジ上に、高さが 80mm であるφ13mm のスタッドジベルを 60mm ピッチで配置した。さらにシリーズ 2 では、端面から 70mm の位置に高さが 100mm のみぞ形鋼を溶接により配置した。床版の補強材としては、SD345 の D13 に相当する格子間隔 150mm の格子状 FRP を配置した。

またシリーズ 1, 2 ともに、比較のため幅が 300mm、高さが 100mm の断面の床版のみの供試体も作製した。それぞれの供試体を A1, A2 と称す。鋼合成桁供試体の種類を表-1 に示す。

供試体は打込み終了後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで湿布養生を行った。鋼合成桁供試体の形状寸法を図-1 および図-2 に示す。

膨張コンクリートの配合は、W/B を 50%, s/a を 45.5%, 目標スランプを 8cm, 目標空気量を 4.0% とした。膨張材はエトリンガイト・石灰複合系の低添加型を用い、単位膨張材量を 40kg/m³ に採り、セメントと置換した。膨張コンクリートの配合を表-2 に示す。なお、粗骨材の最大寸法は 20mm である。

2.2 膨張・収縮ひずみの測定

鋼合成桁供試体の各方向に生じる膨張・収縮ひずみを測定した。床版の補強材である格子状 FRP および鋼桁に、それぞれゲージ長が 6mm のワイヤストレインゲージを貼付した。そして、コンクリートの打込み終了直後から材齢 7 日まで、2 時間毎に測定を行なった。

鋼合成桁供試体に使用した膨張コンクリートを用いて、JISA6202 附属書(2)の A 法に記されている、A 法一軸拘束供試体を 3 体作製した。鋼合成桁供試体と同様に、打込み終了後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで湿布養生を実施した。

3. 基準膨張ひずみ

材齢 7 日までの A 法一軸拘束供試体に生じた膨張ひずみの経時変化を図-3 に示す。シリーズ 1, 2 のいずれも、湿布養生を行った 3 体の平均値である。

表-2 コンクリートの配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	EX	S	G
50	45.5	155	270	40	856	1140

B=C+EX

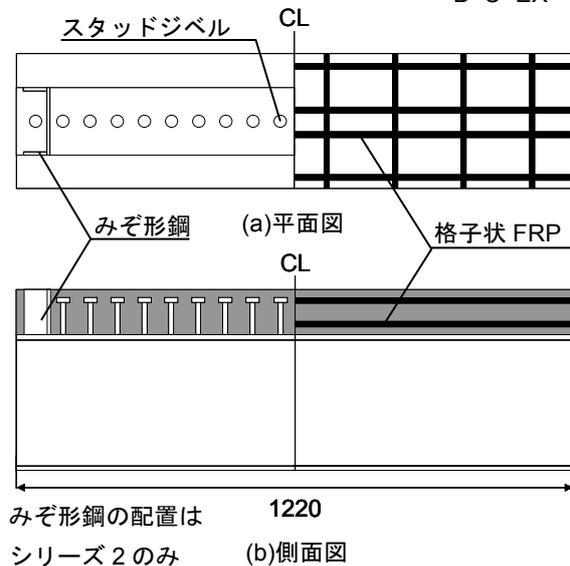


図-1 鋼合成桁供試体の形状寸法 (mm)

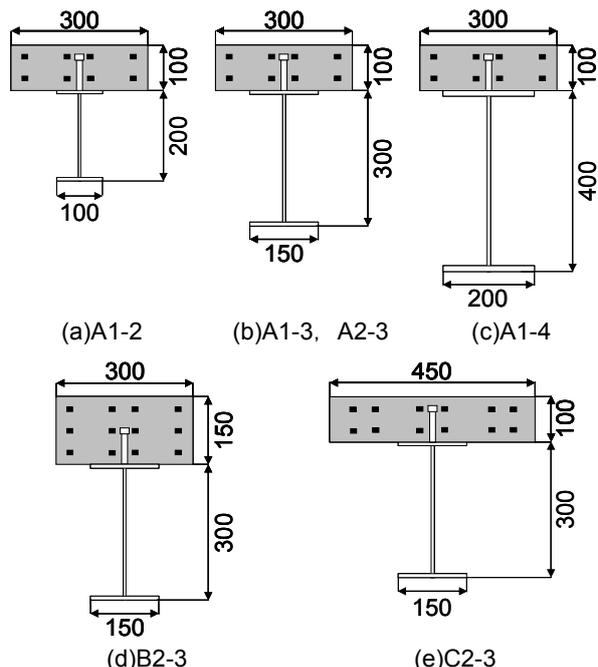


図-2 鋼合成桁供試体の断面寸法 (mm)

シリーズ1, 2の膨張ひずみの値は同程度となった。また、どちらも材齢3日程度まではひずみの増加が大きく、その後の増加割合は小さくなっていき、収束へと向かっている。そして、材齢7日で600 μ 程度の一軸拘束膨張ひずみを生じた。

4. 鋼桁軸方向ひずみの高さ方向の分布

シリーズ1の材齢7日における鋼合成桁に生じた鋼桁軸方向ひずみの実測値の高さ方向への分布を、図-4に示す。また、式(1)で表される仕事量一定則の概念に基づいて、図-3に示した湿布養生を行ったA法一軸拘束供試体の基準膨張ひずみより、鋼合成桁供試体の断面に生じる膨張・収縮ひずみの推定値についても、図-4に示す。

$$U = \frac{1}{2} \cdot E \cdot p \cdot \varepsilon_x^2 \quad (1)$$

$$p = \frac{A_y}{A_c} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 U :単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束に対してなす仕事量、 E :鋼材のヤング係数(=200kN/mm²)、 p :拘束鋼材比(=0.96%)、 ε_x :膨張ひずみ、 A_c :コンクリートの断面積、 A_y :鋼材の断面積

仕事量一定則の概念に基づく推定をするにあたり、①断面内のひずみは直線分布である、②単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束に対してなす仕事量は一定である、との仮定を置き、断面に生じた膨張・収縮ひずみの算定を行った。

シリーズ1の中央断面において、A1-2では床版と鋼桁の界面でのひずみが連続的になっており、直線分布していることが認められる。しかしながら、鋼桁の高い供試体A1-3、A1-4では、床版と鋼桁の境界面で若干のずれが生じている。これは、鋼桁が高くなり、その曲げ剛性が大きくなるに従って、床版と鋼桁の一体性が低下したことが原因であると考えられる。鋼桁の曲げ剛性が大き

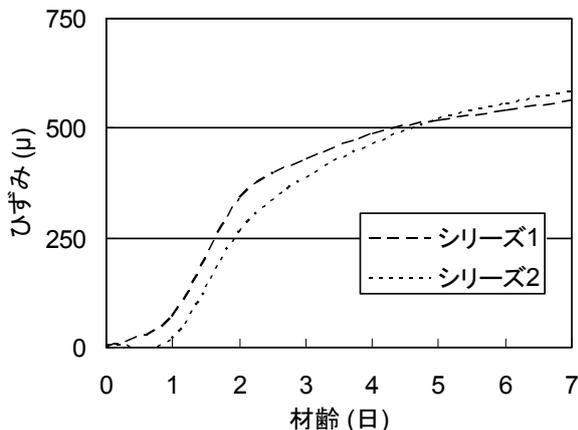


図-3 ひずみの経時変化

い場合、所定の長さの鋼桁と床版との一体性を確保するためには、ずれ止めを施すことが必要である。

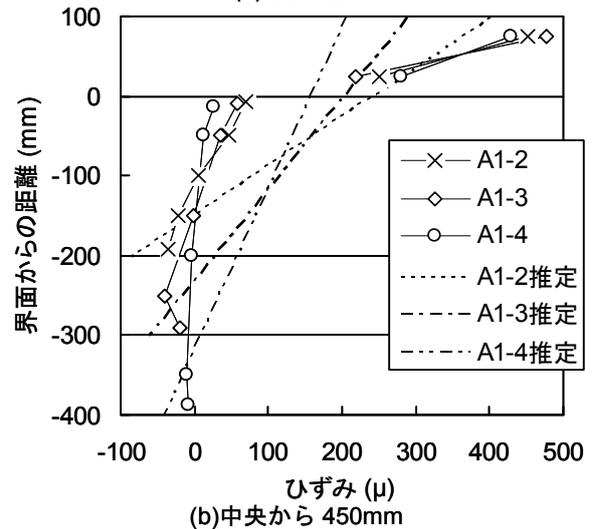
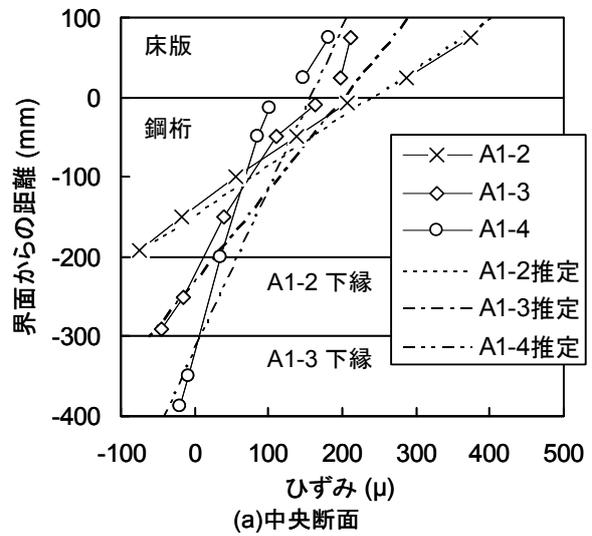


図-4 シリーズ1の鋼桁軸方向ひずみの高さ分布 (材齢7日)

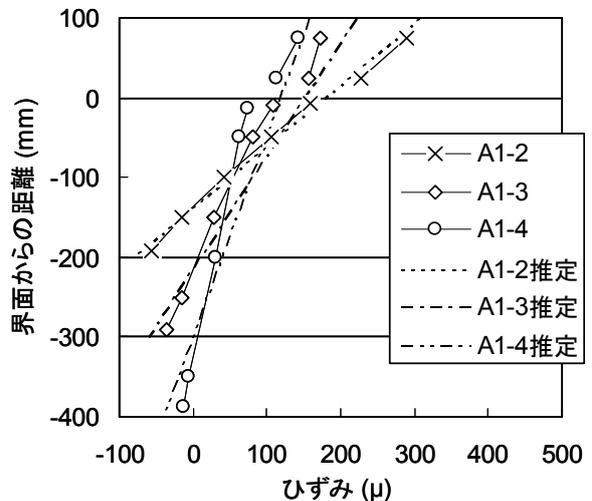


図-5 シリーズ1の中央断面における鋼桁軸方向ひずみの高さ分布(材齢3日)

基準膨張ひずみから推定したひずみ分布と実測値のひずみ分布を比較すると、A1-2ではほぼ一致していることが認められる。しかしながら、A1-3、A1-4のように鋼桁の曲げ剛性を大きくした鋼合成桁では、推定ひずみより実測ひずみが若干小さくなっている。これは、一体性が低下したことも原因と考えられるが、鋼桁の曲げ剛性が大きくなったことも原因と思われる。鋼桁の曲げ剛性が大きくなることで、鋼桁が膨張コンクリートを拘束する程度も大きくなり、それに伴い導入されるケミカルプレストレスも増加する。そのため、ケミカルプレストレスによって生じるクリープと弾性圧縮ひずみの影響が大きくなり、実測した膨張ひずみがこのクリープと弾性圧縮ひずみの分だけ小さく測定されたためと思われる。一軸拘束器具の拘束鋼材比を大きくすると、拘束によって生じるクリープや弾性圧縮ひずみが原因となり、求められる仕事量が小さく算定されることが知られている。つまり、鋼桁の曲げ剛性を大きくするに従い、鋼桁による拘束力が強くなり、それに伴い生じるクリープや弾性圧縮ひずみの影響が無視できなくなり、測定される膨張ひずみが小さくなったため、実測値が推定値を若干下回ったと考えられる⁴⁾。

図-5には、材齢3日における中央断面の鋼桁軸方向ひずみの高さ分布を示す。材齢3日においても、材齢7日ほど顕著ではないが、ひずみ分布に及ぼす鋼桁高さの影響、および鋼桁の拘束が大きくなることで、ケミカルプレストレスが増加し、それにともないクリープと弾性圧縮ひずみが大きくなったため、実測値が推定値より小さくなっていることが認められる。

図-4(b)の中央断面から鋼桁軸方向に450mmの断面では、全ての供試体において鋼桁と床版の境界面で大きなずれが生じている。これは鋼桁軸方向の端面付近では、鋼桁と床版の一体性を保つことができなかったため、床版だけが膨張してしまった。そのため、基準膨張ひずみからの推定したひずみ分布と実測値のひずみ分布が大きくずれてしまった。鋼桁端面の膨張性状を検討する際、鋼桁端面の一体性を確保するために、端面にみぞ形鋼などを配置するなどの、ずれ止め対策をより強固なものにする必要がある。

シリーズ2の材齢7日における鋼桁軸方向ひずみの高さ方向への分布の実測値と推定値を、図-6に示す。

中央断面においては、材齢3日と7日のいずれも、鋼桁と床版の境界面でずれは認められず、ひずみは高さ方向にほぼ直線分布している。つまり中央断面では床版の形状寸法を変化させても、鋼桁と床版の一体性が保たれていることが認められる。シリーズ1のA1-3とA1-4では鋼桁と床版の界面でずれが生じていたことから、シリーズ2ではみぞ形鋼を端部に配置したことで、鋼桁と床

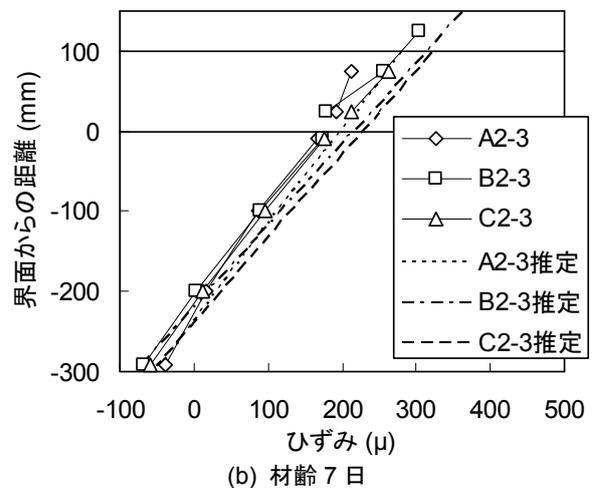
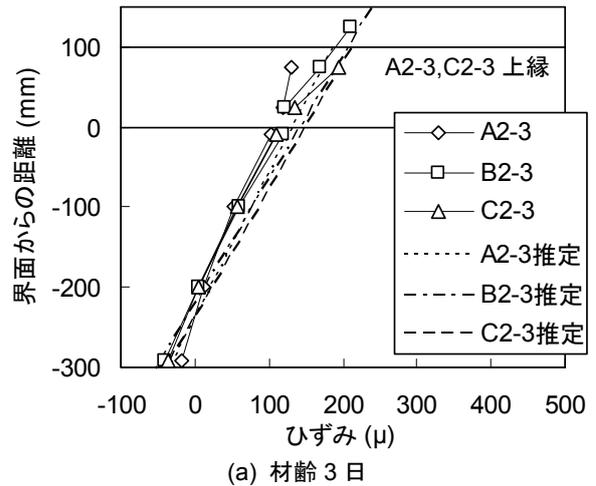


図-6 シリーズ2の鋼桁軸方向ひずみの高さ分布 (中央断面)

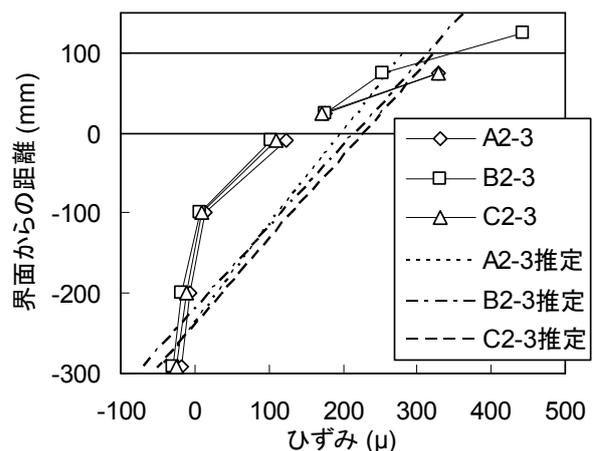
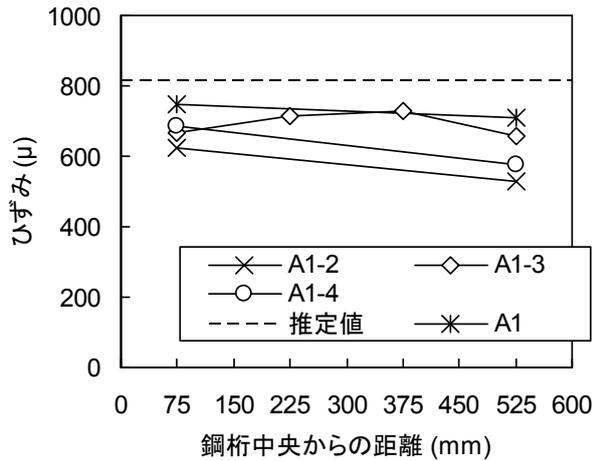


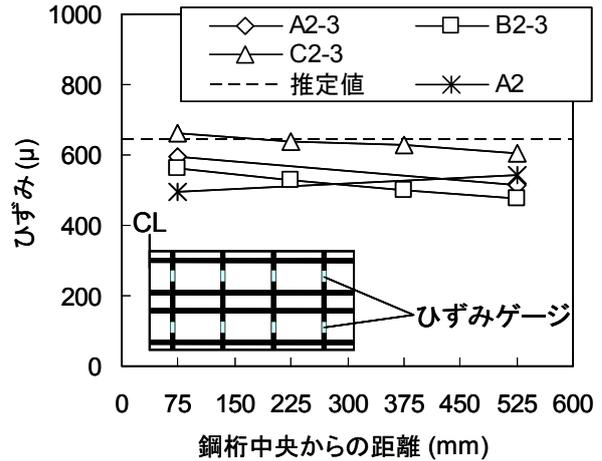
図-7 シリーズ2の鋼桁軸方向ひずみの高さ分布 (中央から450mmの断面)

版の一体性が改善されたためである。

基準膨張ひずみからの推定ひずみ分布と実測値のひずみ分布を比較すると、すべての供試体で推定ひずみより実測ひずみが若干小さくなっている。また、供試体間での推定精度に大きな差はみられず、A1-3と比較しても推



(a)シリーズ 1



(b)シリーズ 2

図-8 幅方向ひずみの軸方向分布

定精度は良好となっており、基準膨張ひずみから仕事量一定則の概念を用いて、十分に推定できると考えられる。これは、シリーズ 1 と同様に、ケミカルプレストレスにより生じるクリープや弾性圧縮ひずみにより実測される膨張ひずみは小さくなったものの、一体性が改善されたことで、推定ひずみと同程度の膨張ひずみが鋼合成床版に生じたためだと考えられる。このことから、一体性を十分に確保することができれば、鋼合成桁の膨張性状は仕事量一定則の概念に基づき推定可能である。また、床版の断面寸法が鋼合成桁の膨張性状に及ぼす影響は、鋼桁の曲げ剛性が及ぼす影響に比べてかなり小さくなっている。

シリーズ 2 の中央断面から鋼桁軸方向に 450mm の断面での鋼桁軸方向ひずみの高さ分布を、図-7 に示す。すべての供試体において、鋼桁と床版の境界面におけるずれは認められない。これは、端部にみぞ形鋼を配置したことで、鋼桁と床版の一体性が確保されたためである。しかし、実測値のひずみ分布は直線分布していない。そして、最上段の補強材の膨張ひずみは基準膨張ひずみからの推定値より大きく、そのほかの測定位置では、推定値のひずみを下回っている。膨張コンクリートを使用した鋼合成桁床版において、端面付近の膨張性状を基準膨張ひずみより推定するには、鋼桁方向の一体性を確保するといった対策だけでなく、床版厚さ方向の膨張を制御するなどの検討が必要だと考えられる。

5. 鋼桁幅方向ひずみの軸方向分布

最上段の補強材に生じた幅方向ひずみの鋼桁軸方向への分布を、図-8 に示す。また、補強材の格子状 FRP に貼付したワイヤストレインゲージの位置を、(b)シリーズ 2 に示す。実測した膨張ひずみの値は、供試体断面に対し左右対称に貼付したワイヤストレインゲージの平均値

である。また、湿布養生を行った基準膨張ひずみから仕事量一定則の概念に基づき、拘束材が補強材のみとして推定した膨張ひずみの推定値も、併せて図-8 に示す。膨張ひずみを推定するにあたり、格子状 FRP のヤング係数を考慮するため、式(3)で表される等価鉄筋比を使用した⁵⁾。

$$p_e = p_r \cdot \frac{E_r}{E_s} = \frac{A_r}{A_c} \cdot \frac{E_r}{E_s} \quad (3)$$

ここに、 p_e : 等価鉄筋比、 p_r : 拘束鋼材比、 E_s : 鋼材のヤング係数、 E_r : 補強材のヤング係数(=148kN/mm²)、 A_c : コンクリートの断面積、 A_r : 補強材の断面積

シリーズ 1 では、すべての供試体において基準膨張ひずみからの推定値を実測値が下回った。また、床版のみの供試体 A1 と比較しても、それほど大きな差は認められないことから、鋼桁による拘束の影響は小さいと考えられる。

シリーズ 2 では、床版の幅が 300mm の A2-3、B2-3 と床版のみの A2 に生じたひずみは、すべて同程度で、推定値より小さくなったが、床版の幅が 450mm の C2-3 では、推定値と実測値に近い値となった。C2-3 では床版幅方向に長くしたことで、FRP とコンクリートの付着が増し、さらに床版幅方向における FRP の格子交差部の数も増えたため、付着が十分に得られたためである。しかし、その他の供試体では、床版の幅が 300mm と短く、さらに床版幅方向における FRP の格子交差部の数も C2-3 と比べ少なかったため、FRP との付着が十分に得られず、コンクリートだけが膨張した分が大きくなって、実測値が推定値を下回ったのだと考えられる。

付着が十分であったと考えられる C2-3 において、各断面におけるひずみに大きな変化はなく、鋼桁軸方向にほぼ一様に分布している。つまり、床版幅方向ひずみは鋼桁による拘束の影響をほとんど受けず、垂直の位置関係

である鋼桁軸方向ひずみと幅方向ひずみは互いに影響を及ぼすことなく、独立して生じるとみなしてよいと考えられる。

6. まとめ

床版に膨張コンクリートを用いた鋼合成桁の膨張性状を実験的に検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 鋼合成桁床版の膨張性状は、鋼桁の曲げ剛性の影響を大きく受けるが、床版の断面形状寸法が及ぼす影響は比較的小さい。また、鋼桁の高さが高くなると、鋼桁と床版との間にずれが生じることが認められた。
- (2) みぞ形鋼を端部に配置することで、鋼桁と床版の一体性は向上する。しかしながら、鋼桁軸方向端面ではひずみが高さ方向に直線分布せず、この現象の解明については今後検討したい。
- (3) 床版幅方向に生じるひずみは、鋼桁による拘束をほとんど受けないため、補強材との付着が十分であれば仕事量一定則の概念に基づいた推定方法から、鋼桁軸方向と独立に求めることが可能である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(基礎研究(B)、課題番号：

17360202、代表者：辻幸和、群馬大学教授)を受けて実施したものである。また、実施にあたっては、池田正志氏をはじめとする諸氏に多大なる支援を頂いた。ここに厚く御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 辻 幸和ほか：膨張コンクリートによる鋼合成桁床版に関する基礎研究，コンクリート工学，Vol.20，No.2，pp.73-87，1982
- 2) 辻 幸和ほか：格子状 FRP で補強したコンクリートはりの力学的性状とケミカルプレストレスによる改善効果，コンクリート工学論文集，Vol.2，No.1，pp.85-94，1991.1
- 3) 萩原 淳弘ほか：床版に膨張コンクリートを用いた鋼合成桁の膨張および曲げひび割れ性状，セメント技術大会講演要旨，pp.208-209，2007
- 4) 辻 幸和：ケミカルプレストレスおよび膨張分布の推定方法，コンクリート工学，Vol.19，No.6，pp.99-105，1981.6
- 5) 萩原 淳弘ほか：FRP を補強材に用いた CPC はりにおける仕事量一定則の適用性，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.513-518，2007