

論文 膨張コンクリートを用いた鋼合成桁における床版の膨張性状

福田 直*¹・辻 幸和*²・半井 健一郎*³・水上 達也*⁴

要旨：本研究では、拘束材比が小さい床版に膨張コンクリートを用いた鋼合成桁の膨張性状についての実験結果を報告している。鋼桁軸方向に生じる膨張ひずみは、床版の断面高さが低く、床版上縁まで鋼桁により十分な拘束を受けることで、仕事量一定則の仮定に基づく膨張ひずみの推定精度は高かった。また、床版幅方向に生じる膨張ひずみは、鋼桁上のフランジ上面における付着力の違いにより変化した。また、低拘束材比である床版幅方向の膨張ひずみについては、修正仕事量の概念を用いることで、仕事量一定則の仮定に基づく推定値よりも推定精度が向上することが認められた。

キーワード：鋼合成桁床版、格子状 FRP、鋼桁軸方向膨張ひずみ、床版幅方向膨張ひずみ、修正仕事量

1. はじめに

床版に膨張コンクリートを用いた鋼合成桁においては、鋼桁軸方向に生じる膨張ひずみと床版幅方向に生じる膨張ひずみの双方を検討することが重要である。このうち、鋼桁軸方向に生じる膨張ひずみは、仕事量一定則の仮定に基づいて推定できることが報告されている¹⁾。既往の研究では、鋼桁の曲げ剛性を変化させた鋼合成桁床版について、鋼桁軸方向に生じる膨張ひずみは、床版の断面寸法と補強材の配置方法および鋼桁の曲げ剛性を考慮して、仕事量一定則の仮定に基づく方法で、推定できることが報告されている。ここで、仕事量一定則の仮定とは、単位体積当たりの膨張コンクリートの配合および養生方法が同一であれば、拘束の程度に関わらず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、としたものである。

床版幅方向に生じる膨張ひずみは、膨張コンクリートと補強材の付着が十分であれば、それに直角な方向である鋼桁軸方向の膨張ひずみとは独立に、仕事量一定則の仮定に基づき推定できることが報告されている¹⁾。しかしながら、鋼桁のフランジ幅や床版の断面形状寸法の違いによる床版幅方向の膨張性状についての検討は報告されていない。

また、仕事量一定則の仮定は、低拘束材比の領域において、その推定精度が低下してしまう。そのために、修正仕事量の概念に基づく推定方法が提案されている^{2),3)}。

本研究では、鋼桁の形状寸法を変化させた鋼合成桁床版における鋼桁軸方向およびそれに直角な床版幅方向の膨張ひずみについて報告する。また、ヤング係数が小さいガラス繊維の格子状 FRP を用いて低拘束材比である床版幅方向における膨張性状を修正仕事量の概念を用いて検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体

長さが 1220mm の H 形鋼のフランジ上に、膨張コンクリートを使用した床版を打ち込み、鋼合成桁供試体を作製した。H 形鋼の高さは、400mm, 300mm, 200mm の 3 種類とした。床版は幅が 450mm の一定とし、高さを 300mm, 200mm, 100mm の 3 種類とした。比較のため、床版のみの供試体も作製した。鋼合成桁供試体の諸元を表-1 に示す。以後、供試体名を鋼桁の高さが大きい方から A, B, C シリーズ、床版のみの供試体を D シリーズと称す。図-1 に鋼合成桁供試体の形状寸法の一例およびワイヤストレーンゲージの貼付位置を、図-2 に鋼合成桁供試体の断面形状寸法を示す。

鋼桁の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、また鋼桁と床版の一体性を確保するため、両端面に高さが 100mm のみぞ形鋼を溶接により配置した。床版の補強材には、SD345 の D10 と D13 に相当するガラス繊維の格子状 FRP(GFRP)を使用した。それらの格子間隔は 50mm と 150mm のものを用いた。床版下縁から 100mm までは、格子間隔が 150mm の格子状 FRP を使用し、下段と上段ともに G10 とした。床版下縁から 100mm 以上では、格子間隔が 50mm の格子状 FRP を使用し、下から G10, G13 を交互に配置した。なお、D シリーズに関しては、全て格子間隔が 100mm の格子状 FRP(GFRP)を用いた。

本研究では、低拘束材比領域について検討するため、床版幅方向のヤング係数を考慮した等価拘束比 p_e を 0.7% より小さくなるように、格子状 FRP を床版内に配置した。なお等価拘束比 p_e は、拘束鋼材比 $p_s = A_s/A_c$ にヤング係数を考慮した $p_s E_p/E_s$ (E_p は FRP の、 E_s は鋼材のそれぞれのヤング係数) で表

*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 博士前期課程 (正会員)

*2 前橋工科大学 学長 工学博士 (正会員)

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

*4 東海旅客鉄道株式会社 建設工事部 (正会員)

表-1 鋼合成桁供試体の諸元

供試体名	断面寸法		H形鋼寸法: $h_k \times b_k \times t_1 \times t_2$ (mm)	床版幅方向の 等価拘束比(%)	
	床版寸法: $h_s \times b_s$ (mm)				
A100	b_s : 床版幅 h_s : 床版高さ	100 × 450	h_k : 鋼桁高さ b_k : フランジ幅	0.19	
A200		200 × 450		400 × 200 × 8 × 13	0.37
A300		300 × 450		300 × 150 × 6.5 × 9	0.42
B100	$b_s = 450$ mm h_s	100 × 450		0.19	
B300		300 × 450		0.42	
C100		100 × 450		200 × 100 × 8	0.19
C300		300 × 450		0.42	
D100		100 × 450		0.29	
D300		300 × 450	床版のみ	0.29	

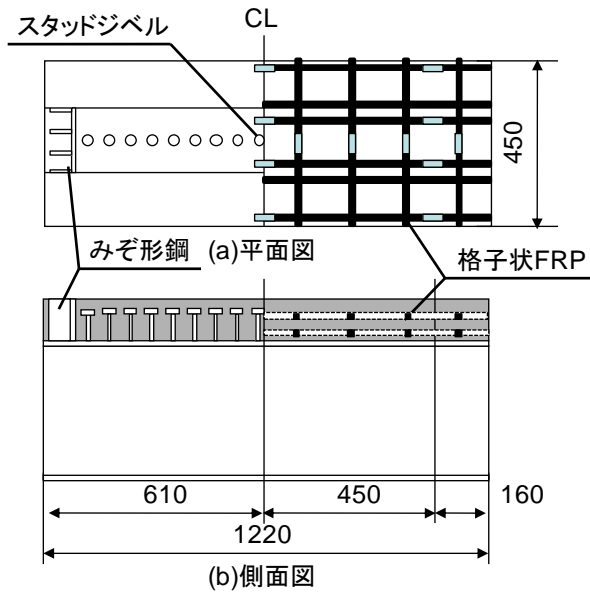


図-1 鋼合成桁供試体の形状寸法の例 (A100, B100, C100)およびケージ貼付位置

表-2 格子状FRPの物性値

	断面積 (mm ²)	引張耐力 (kN/本)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
FRP(G10)	76.0	57.8	760.5	29.4
FRP(G13)	126.6	96	758.3	29.4

表-3 膨張コンクリートの配合

W/B(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	Ex	S	G	AE
50	46	184	328	40	824	1022	0.92

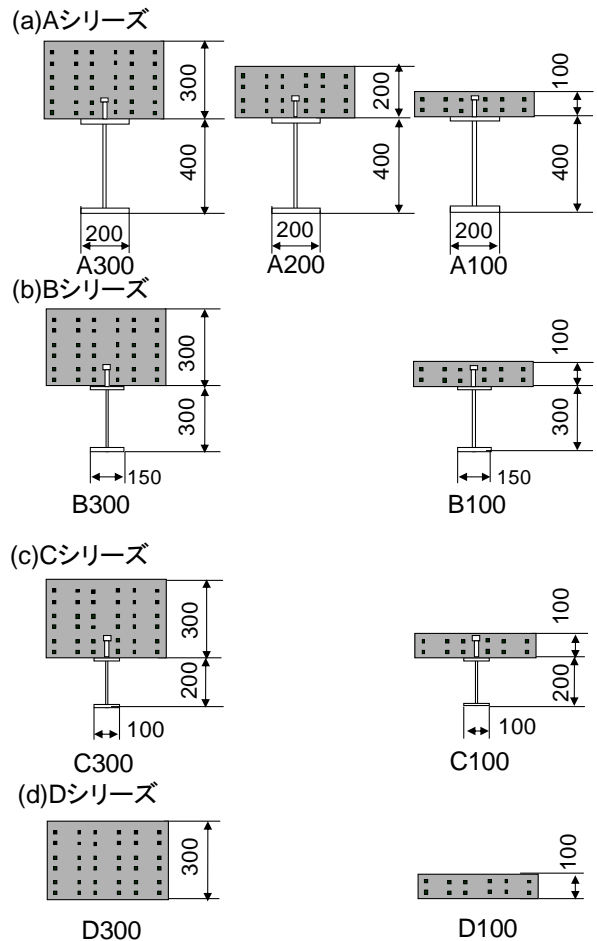


図-2 鋼合成桁供試体の断面形状寸法(mm)

わされる。格子状FRPの物性値を表-2に示す。

2.2 配合

膨張コンクリートの配合は、W/Bを50%、s/aを46%、目標スランプを12cm、空気量を4.0%とした。膨張材にはエトリンガイト・石灰複合系の低添加型を用い、単位膨張材量で40kg/m³をセメントと置換した。その配合を表-3に示す。なお、粗骨材の最大寸法は20mmである。

2.3 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。鋼桁および補強材である格子状FRPに、それぞれゲージ長が6mmのワイヤストレーンゲージを貼付した。そして、膨張コンクリートの打込み終了後から材齢7日まで、2時間毎に測定を行った。

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)に記載されている、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日まで湿布養生を行った。

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。いずれのシリーズにおいても湿布養生を行った3体の平均値である。なお、A~Cシリーズの膨張ひずみの最終値に大きな差はなくほぼ同程度となり、Dシリーズを除き、材齢7日で430 μ 程度の一軸拘束膨張ひずみを生じた。

A, Bシリーズでは、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り、収束へと向かっている。それに対して、C, Dシリーズでは膨張ひずみの発生、そして収束へと向かっていく材齢が遅い。これは、C, Dシリーズにおける供試体の養生温度が他のシリーズと比較して約5 $^{\circ}$ C低かったためと考えられる³⁾。

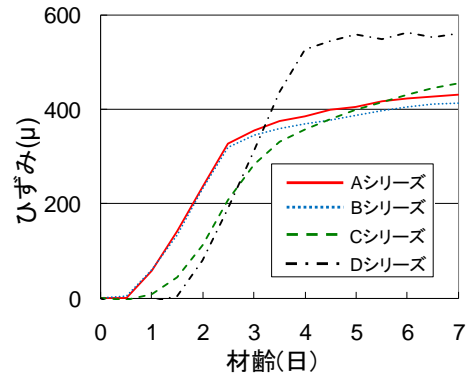


図-3 ひずみの経時変化

4. 鋼桁軸方向の膨張ひずみの高さ方向分布

材齢7日における鋼合成桁の中央断面に生じた軸方向ひずみを、高さ方向へ分布させたものを図-4に示す。なお、1断面4箇所貼付したワイヤストレインゲージの平均値で示している。また、式(1)で表わされる仕事量一定則の仮定に基づいて、図-3に示したA法一軸拘束供試体の基準膨張ひずみ ϵ_s より断面に生じる膨張・収縮ひずみを推定した値についても、図-4に示す。

$$U = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{cps} \cdot \epsilon_s = \frac{1}{2} p_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s^2 \quad (1)$$

$$p_s = \frac{A_s}{A_c} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 U ：単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束体に対してなす仕事量(N/mm²)、 σ_{cps} ：基準ケミカルプレストレス(N/mm²)、 p_s ：拘束鋼材比(=0.95%)、 ϵ_s ：基準膨張ひずみ、 A_c ：コンクリートの断面積(mm²)、 A_s ：拘束鋼材の断面積(mm²)、 E_s ：拘束鋼材のヤング係数(N/mm²)

仕事量一定則の仮定に基づく推定を行うにあたり、①断面内のひずみは直線分布すること、②単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束体になす仕事量は一定であることとの仮定を置き、断面に生じた膨張・収縮ひずみの推定を行った。

4.1 中央断面における高さ方向分布

中央断面に生じたひずみにおいて、鋼桁の曲げ剛性および床版の断面形状寸法によらず、鋼桁と床版の界面でのひずみに大きなずれは認められなかった。つまり端面にみぞ形鋼を配置したことで、鋼桁と床版の一体性が保たれたことになる。

ここで、A~Cシリーズにおける鋼桁の曲げ剛性と床版の剛性の比を表-4に示している。鋼桁の高さが大きく、床版の高さが小さいほど剛性比は大きくなることが分かる。そのため今回得られた図-4の結果より、曲げ剛性の大きいAシリーズでは鋼桁部分での膨張ひずみがB, Cシリー

表-4 各供試体の剛性比

供試体名	鋼桁の曲げ	床版の剛性	剛性比
	剛性(kN \cdot m ²)	(kN \cdot m ²)	(鋼桁/コンクリート)
A100	47000	937.5	50.13
A200		7500	6.27
A300		25312.5	1.86
B100	14420	937.5	15.38
B300		25312.5	0.57
C100	3620	937.5	3.86
C300		25312.5	0.14

ズに比べ小さくなり、床版高さが小さいものほど床版部分での膨張ひずみの実測値が小さくなっている。

H形鋼の高さを200mmから400mmに変化させても、床版の高さを100mmとした全ての供試体で、ひずみがほぼ直線分布を示した。図-5(a)に示すように、床版の高さを100mmとした全ての供試体は、みぞ形鋼を配置したことで、床版上縁まで鋼桁による拘束が十分に作用している。つまり、中央断面ではH形鋼フランジ上面とコンクリートとの界面でずれがないため、膨張エネルギーの損失はなく鋼桁へと伝わっていると考えられる。このことから、H形鋼の高さを200mmとした供試体C100では、実測値と推定値に大きな差はなくほぼ一致していることが認められる。そして、供試体B100, A100と鋼桁の曲げ剛性が大きくなるに従い、実測値が推定値より少し小さくなっていることが認められる。これは、鋼桁の曲げ剛性が大きくなることでコンクリートに導入されたケミカルプレストレスが大きくなり、それによるクリープおよび弾性変形の圧縮ひずみが大きくなり、実測される膨張ひずみの値が小さくなったためである。

床版の高さを200mmとした供試体A200においても、ひずみはほぼ直線分布を示した。そして、供試体A100と比べ実測値と推定値が少し近い値となった。今回は断面の高さを2倍としたことで推定精度が向上した。このことから、鋼桁の曲げ剛性が大きい供試体において、床版の断面形状寸法が及ぼす影響は比較的小さいものの、床版の断面高さを2倍にすると膨張性状に少し違いが現れ、仕事量一定則の仮定に基づくケミカルプレストレインのひずみの

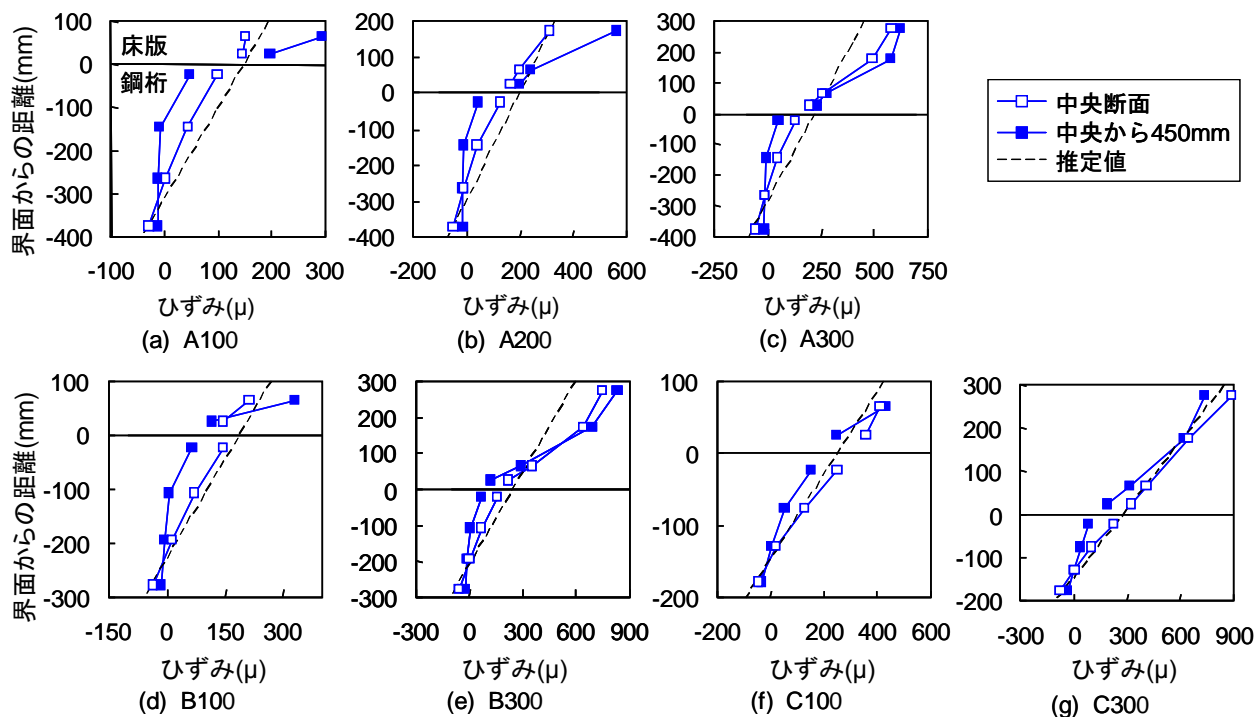


図-4 鋼桁軸方向ひずみの高さ分布

推定精度は少し向上したと考えられる。

供試体 C300 も、ひずみがほぼ直線分布を示し、ひずみの実測値と基準膨張ひずみからの推定値がほぼ一致した。一方、鋼桁の曲げ剛性を大きくした供試体 B300, A300 のひずみ分布は、H 形鋼部分においてひずみが直線分布しているが、鋼桁と床版の界面においてはひずみの傾きが変化している。さらに、床版内で膨張ひずみ分布が変化し、曲線のように分布していることが認められる。

床版に膨張コンクリートを用いた鋼合成桁は、下部だけが鋼桁により強い拘束力を受けている。図-5(b)に示すように、床版断面を高くすることで、床版と H 形鋼の界面では H 形鋼による拘束の影響を大きく受けるが、床版下縁から遠くなるほど H 形鋼による拘束の影響が小さくなり、ひずみが増加して、最終的に膨張ひずみは収束することが考えられる。また今回は、みぞ形鋼の高さが 100mm と低かったため、この影響が顕著になったと考えられる。つまり、床版の高さを 300mm とした供試体 A300, B300 は、みぞ形鋼を介しても H 形鋼による拘束の影響が床版上縁に近づくほど小さい状態で床版が膨張し、このようなひずみ分布になったと考えられる。また、H 形鋼の曲げ剛性が小さい供試体 C300 では、前述した通り、ひずみが直線分布となったことから、供試体 B300, A300 と鋼桁の曲げ剛性が大きくなるに従い、このような拘束の影響はより顕著となる。

以上のことから、鋼合成桁において床版断面が小さく床版上縁まで鋼桁による十分な拘束を受ける場合、鋼合成桁の中央断面に生じる軸方向ひずみは、仕事量一定則の仮定

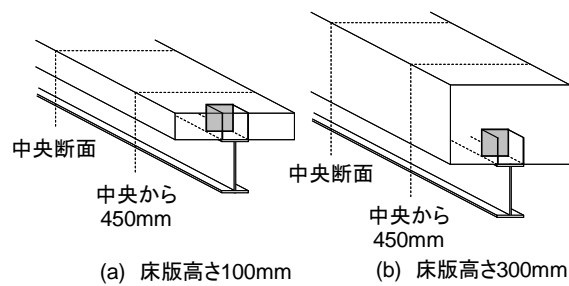


図-5 供試体の立体的形状寸法の例

に基づく推定方法により十分な精度で推定できる。しかし、鋼桁の曲げ剛性が大きいとクリープおよび弾性変形の影響により推定精度は少し低下する。そして、鋼合成桁において床版断面を高くし床版上縁まで鋼桁による拘束が十分でない場合、鋼合成桁の中央断面に生じる軸方向ひずみは、仕事量一定則の仮定からでは十分な精度で推定できない場合が生じることになる。しかし、鋼桁の曲げ剛性が小さい場合、ひずみは直線分布となり、仕事量一定則の仮定に基づき精度のよい膨張ひずみの推定ができる。

4.2 中央断面から離れた断面における高さ方向分布

中央から 450mm の断面に生じたひずみにおいて、中央断面と同様に、床版および鋼桁におけるそれぞれのひずみ分布から延長すると、鋼桁上縁と床版下縁のひずみにずれは生じていないと推測できる。これは鋼桁端面にみぞ形鋼を配置したことにより、端面付近においても鋼桁と床版の一体性が保たれたためである。

全ての供試体で鋼桁に生じたひずみは中央断面と比べ

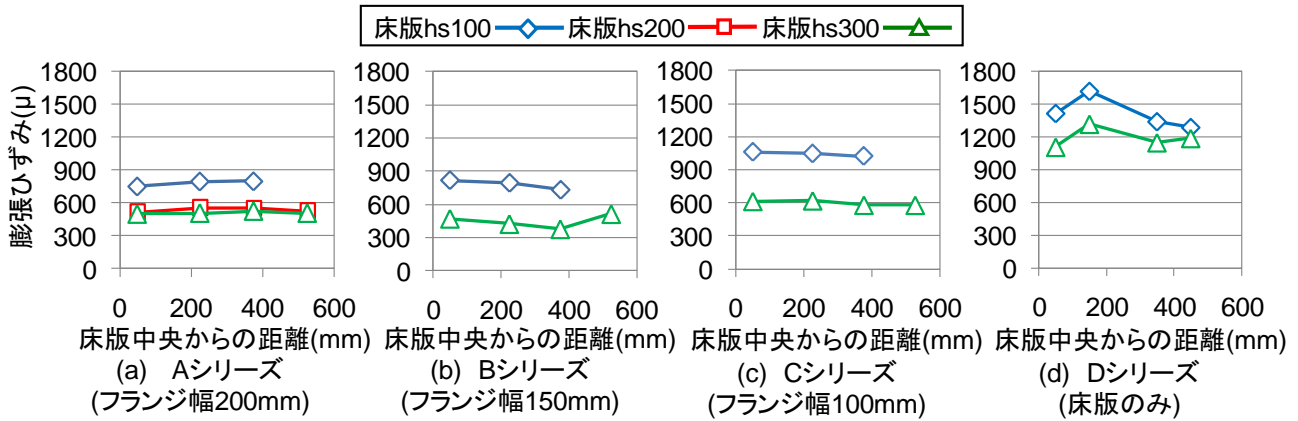


図-6 床版幅方向の軸方向の膨張ひずみ分布

少し小さく、実測値のひずみは直線分布しなかった。また、床版の高さを 100mm とした供試体では、床版に生じたひずみも含めて、軸方向ひずみの高さ方向の分布が中央断面とは大きく異なっていた。

床版高さが 300mm の供試体 C300 においてもひずみは直線分布しておらず、供試体 A300, B300 の端面付近の実測ひずみと同じようなひずみ分布となっていることが認められる。鋼桁端面から 70mm の位置にみぞ形鋼を配置したが、みぞ形鋼より端面のコンクリートを拘束することが難しい。また、端面ではみぞ形鋼より上側の膨張を拘束することも困難である。つまり、端面では中央断面に比べコンクリートが鋼桁による十分な拘束を受けていない部分が大きく、膨張エネルギーを損失していると考えられる。そのため、C300 においても端面では、鋼桁の曲げ剛性に対して床版の膨張力が小さくなり、床版だけが膨張した部分が多くなると考えられる。また、供試体 A300, B300 では中央断面と比べ鋼桁部分のひずみが小さいが、中央断面と端面側の膨張性状に大きな違いはなく、ほぼ同様の傾向を示した。端面付近の床版が持つ膨張力を鋼桁が十分に拘束する程度が中央断面より小さいため、鋼桁部分のひずみの値は小さくなったと考えられる。

以上のことから、端面付近の膨張性状は床版の高さが低い場合においても、ひずみが直線分布を示さないことが確認できた。また、みぞ形鋼より外側および上側の膨張コンクリートは鋼桁からの拘束の程度が小さいため、端面付近の膨張コンクリートは膨張エネルギーを損失することになる。そのため、鋼桁の曲げ剛性が小さい場合においても、床版だけが膨張してしまうこととなる。つまり、端面側の膨張はひずみが直線分布しないため、仕事量一定則の仮定に基づく膨張ひずみの推定精度の良い FEM による推定方法⁴⁾を今後検討していきたい。

5. 床版幅方向の膨張ひずみの軸方向分布

材齢 7 日における鋼合成桁供試体の最上段の格子状 FRP

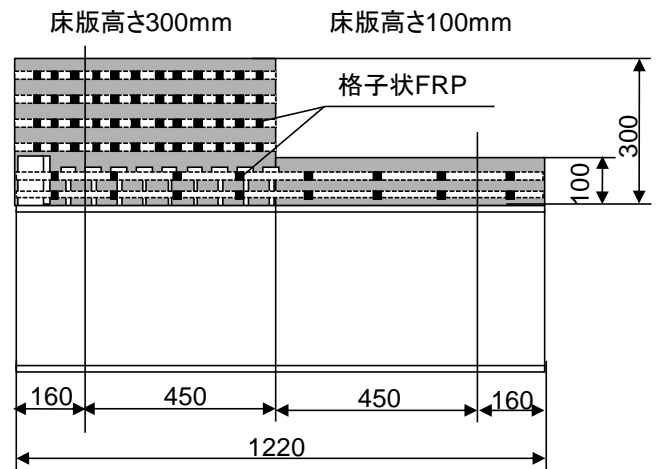


図-7 床版幅方向における鋼合成桁供試体の断面図

に生じた床版幅方向の膨張ひずみの軸方向分布を、H 形鋼のフランジ幅毎に図-6 に示す。また、図-7 に床版幅方向における鋼合成桁供試体の断面図を示す。図-6 の膨張ひずみは図中の ■印で示す最上段の格子状 FRP の上面と下面の床版幅方向に、図-1(a) に示したように貼付したワイヤストレインゲージで測定した値の平均値で示している。

全ての供試体で、鋼合成桁の軸方向の各位置における床版幅方向の膨張ひずみに大きな変化はなく、実測値は鋼合成桁軸方向にほぼ一様に分布している。このことから、鋼合成桁における軸方向の拘束は床版幅方向の膨張性状にはほとんど影響しないといえる。従って、床版幅方向に生じる膨張ひずみは、それに直角な鋼桁による軸方向の拘束をほとんど受けず、鋼桁軸方向の膨張ひずみと独立に生じると考えられる。

材齢 7 日における格子状 FRP に生じた床版幅方向の膨張ひずみの平均値を、床版高さ方向へ分布させたものについて、鋼桁のフランジ幅毎に図-8 に示す。また仕事量一定則の仮定に基づき推定した値と 6 章に述べる修正仕事量の概念に基づき推定した値(以下、それぞれ、 U_A 推定値と U_C 推定値と称す。)についても、同図に併せて示す。

鋼桁のフランジ幅が小さくなるほど、膨張ひずみの実測値は大きくなっている。このことから、フランジ幅の違いにより床

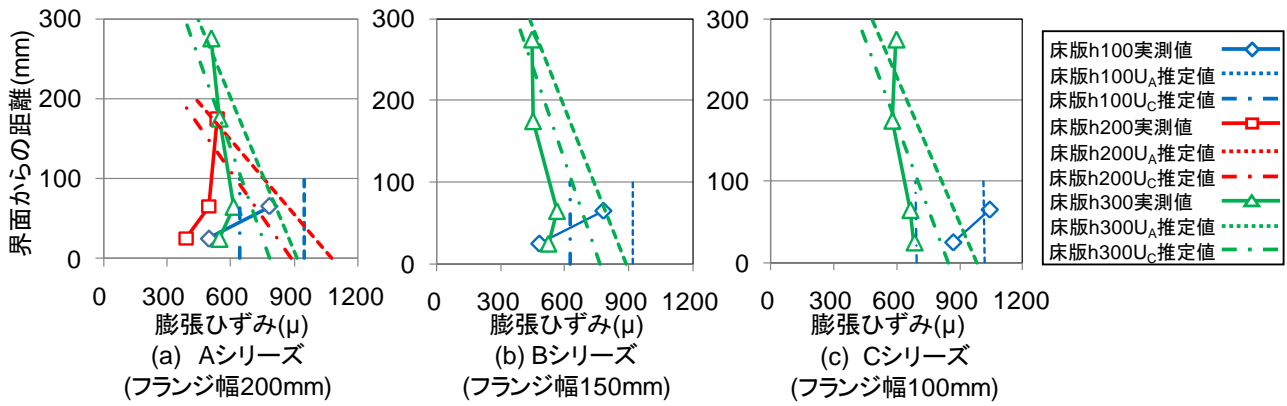


図-8 床版幅方向膨張ひずみの高さ方向への分布

版幅方向の拘束程度が異なるといえる。床版の高さが 100mm の供試体では、下段における実測値が上段に比べ小さくなっている。これは、H 形鋼による拘束が最下段の FRP、つまり H 形鋼と床版の界面付近ではとくに大きく影響していることが原因と考えられる。またフランジ幅が小さくなるとともに、実測値は高さ方向へ一様に分布する傾向が見られる。これは、フランジ幅が小さくなるに従い、H 形鋼の上フランジ上面の付着による床版幅方向の拘束程度が小さくなるのが原因と思われる。

全ての供試体で、高さ方向に勾配を示す膨張ひずみについて、 U_A 推定値よりも U_C 推定値の方が実測値に近いことが認められる。これは、全ての供試体で床版幅方向の等価拘束比 p_e を 0.7% より小さくしたことによる。拘束の程度が小さくなり、内部拘束の影響が無視できなくなったことによる。そのため、仕事量が低下したことが考えられる。

6. 低拘束材比における仕事量の低下

拘束鋼材比が 0.7% 以下になるといった低拘束材比領域では、膨張ひずみの発現がセメントの内部拘束の影響により大きく抑制され、膨張コンクリートが拘束に対してなす仕事量が低下し、仕事量一定則の仮定からの膨張ひずみの推定精度が低下する。そのため、修正仕事量という考え方を提案している^{2),3)}。

修正仕事量は、式(3)および式(4)で表すことができる。

$$U_C = \alpha \cdot U_A \quad \text{式(3)}$$

$$\alpha = (p_e / 0.7)^\beta \quad \text{式(4)}$$

ここに、 U_C : 修正仕事量(N/mm²)、 U_A : 仕事量(N/mm²)、 α : 修正係数、 p_e : 等価拘束比(%), β : 膨張能力によって決まる定数

修正係数を求めるために必要となる β は、膨張コンクリートの膨張能力によって定まる。そのため、養生方法、養生温度、水結合材比、単位膨張材量などの各種要因によって異なる。前章では、既往の研究において行われた実験より、得られた β の値は 0.6 として求めた³⁾。

7. 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) 鋼桁と床版の界面で膨張ひずみにずれが生じやすいが、みぞ形鋼を端部に配置することで、中央および端面において鋼桁と床版の一体性は向上する。
- (2) 鋼合成桁中央断面に生じるひずみは、床版断面が低く、床版上縁まで鋼桁により十分に拘束することが出来れば、仕事量一定則の仮定に基づき精度の良い膨張ひずみを推定できる。
- (3) 鋼合成桁床版の膨張性状は、鋼桁の曲げ剛性が大きく、クリープや弾性変形の影響が顕著に現れると、仕事量一定則の仮定に基づく膨張ひずみの推定精度は低下する。
- (4) 床版幅方向に生じる膨張ひずみは、鋼桁のフランジ幅が小さくなるほど、実測値は大きくなった。従って上フランジ上面の付着が床版幅方向の膨張を拘束すると考えられる。
- (5) 床版幅方向では全ての供試体で等価拘束比が 0.7% より小さいことから、仕事量一定則の仮定からの U_A 推定値よりも、修正仕事量の概念からの U_C 推定値に近い実測値が生じることが認められた。これは、内部拘束の影響が無視できなくなり、仕事量が低下したことが考えられる。

参考文献

- 1) 水上達也ほか: 床版に膨張コンクリートを用いた鋼合成桁の膨張性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No2, pp.511-516, 2009
- 2) 半井健一郎ほか: 拘束の小さい膨張コンクリートの仕事量一定則の適用方法, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp.189-196, 2008
- 3) 森田卓ほか: 低鉄筋比領域における膨張コンクリートがなす仕事量の再評価, 第 36 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, V-62, 2009
- 4) 栖原健太郎ほか: 構造拘束を受ける CPC 部位の応力解析に関する一考察, 第 64 回セメント技術大会講演集, pp.148-149, 2010