

## (18) 箱形桁ウェブの張出し施工時 斜め引張応力に関する一考察

東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 ○ 津吉 毅  
 同 上 同 上 大庭 光商  
 同 上 東京工事事務所 正会員 石橋 忠良

### 1. はじめに

近年、PC斜張橋などの長大橋梁の主桁に、斜めウェブを有する桁高の低い箱形桁が用いられることが多い。これらの橋梁は、ワーゲンをを用いた張出し施工されることが一般的であり、その施工中には、ウェブに比較的大きな斜め引張応力が発生する。

本文では、張出し施工を行った箱形桁の施工時斜め引張応力について、FEM解析結果および、実橋における測定結果について若干の考察を加えたので報告するものである。

### 2. 対象橋梁

今回対象とした橋梁の、一般部における断面図を図-1に示す。張出しは、4フレームの重量約300(t)の大型ワーゲンをを用いて行われ、ワーゲン重量および打設コンクリート重量は、ワーゲンのメインジャッキおよび反力ジャッキを介して、4つのウェブに伝播される。施工は、横桁のあるブロックとないブロックを交互に打設し、1ブロック長は5.0mである。解析および、測定の対象とした施工ステップを図-2に示す。

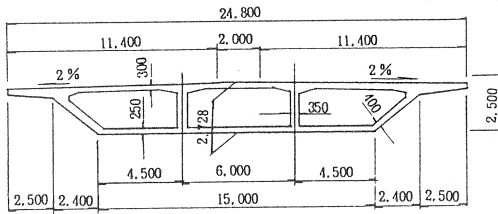


図-1 主桁断面図

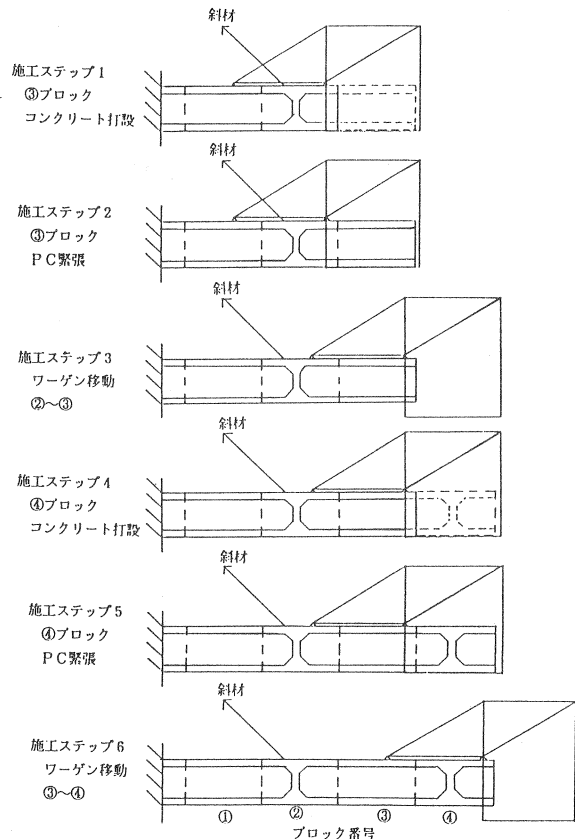


図-2 施工ステップ

### 3. FEM解析結果

図-2に示したうち、施工ステップ4、および施工ステップ6についてFEM解析を行い、主応力を算定した。解析モデルを図-3に示す。

荷重は、コンクリート自重の他、ワーゲン自重、橋軸方向プレストレスを考慮し、実際にはウェブに鉛直配置したせん断鋼棒によるプレストレスは考慮していない。橋軸方向プレストレスは、鋼材配置位置に辺荷重として載荷し(図-4)、ワーゲン自重は、内、外ウェブで均等に分担させ集中荷重として載荷した(図-5)。

解析の結果、発生する主応力は、施工ステップ4の状態で最大であり、外ウェブについては、集中荷重による曲げの影響をうけ、内面と外面で応力状態が大きく異なる結果となった。

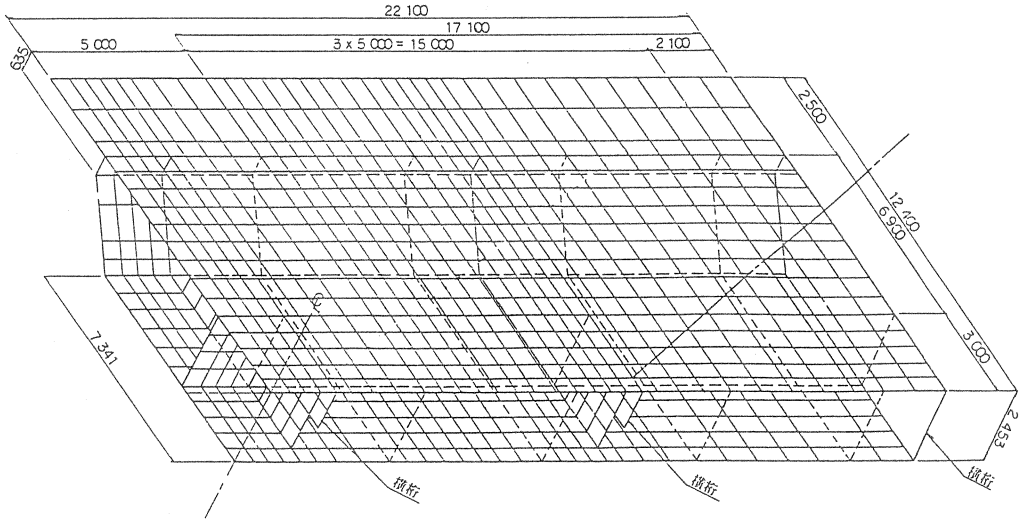


図-3 FEM解析モデル

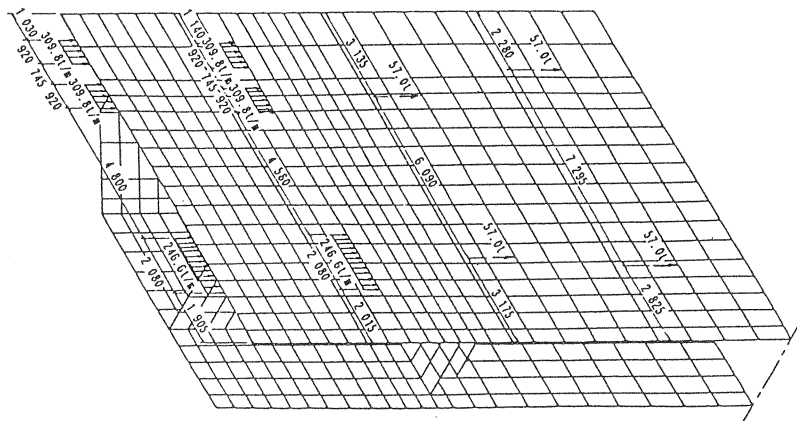


図-4 橋軸方向プレストレス

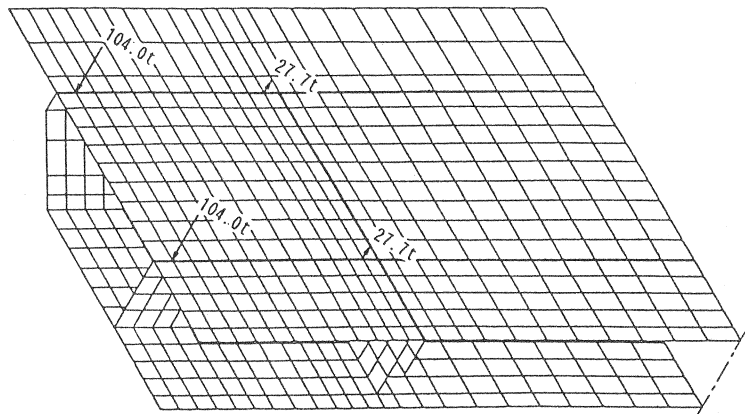


図-5 ワーゲン荷重

内ウェブ要素中心、および外ウェブ内側、および外側の解析結果を図-6に示す。内ウェブでは、ブロック③付け根付近に39(kgf/cm<sup>2</sup>)と、比較的大きな斜め引張応力度が発生し、これは外ウェブ内面のブロック付け根に発生した33(kgf/cm<sup>2</sup>)に比べ若干大きめの数値であった。なお、外ウェブには、ブロック先端外面に53(kgf/cm<sup>2</sup>)と、大きな曲げ引張応力度の発生が認められた。

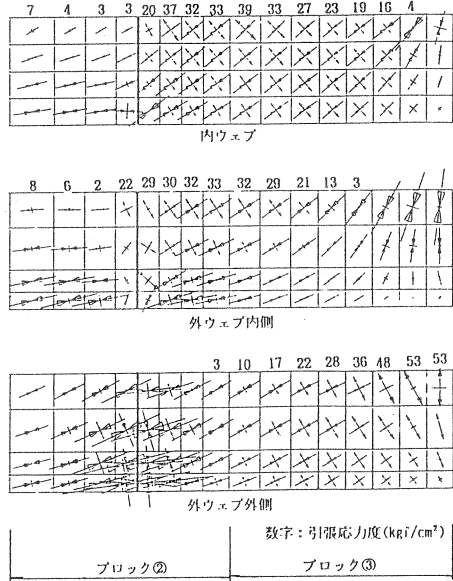


図-6 FEM解析結果

#### 4. 実橋における測定

##### 4-1. 測定位置

実橋においては、ブロックの③の内、外ウェブの図心位置表面にひずみゲージを3方向に張り付け、ひずみの経時変化を測定した。図-7に測定位置を示す。ひずみゲージの張り付けは、A工区においては、施工ステップ3の直前に、B工区においては施工ステップ2の直前に行った。A工区、B工区とも施工条件は、ほぼ同一であるが、施工季節が異なっているため、設計基準強度は、400(kgf/cm<sup>2</sup>)で同一であるが、コンクリートの配合が若干異なっており、さらにワーゲン重量が、B工区のほうが約1割程度大きく、細部の構造もかなり異なっている。

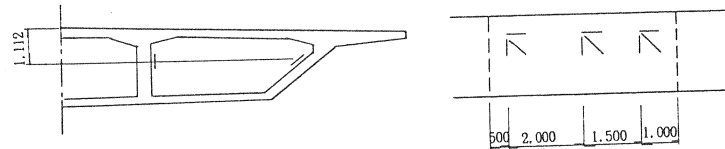


図-7 ひずみ計張り付け位置

##### 4-2. ひずみ増分の変化

図-8にA工区の、図-9にB工区の内ウェブおよび、外ウェブのブロック付け根に設置したひずみ計のPC緊張後(施工ステップ2)以後の主方向ひずみの経時変化を示す。

次ブロック打設までのひずみ増分は、A工区においては、外ウェブのほうがかなり大きくなっており、FEM解析の結果とかなり異なったものとなった。これは、ワーゲンの荷重分担が解析時に想定したように、内、外ウェブで均等ではなく、外側に多くの荷重がかかったことが主な原因であると思われる。このため、実際の施工時においても、施工中の斜めひびわれの発生を防止するためにウェブに鉛直配置したせん断鋼棒本数は、内ウェブでは必要がなかったのに対して、外ウェブで、ブロックあたり6本(φ32)必要であり、FEM解析の結果からは、斜めひびわれ対策

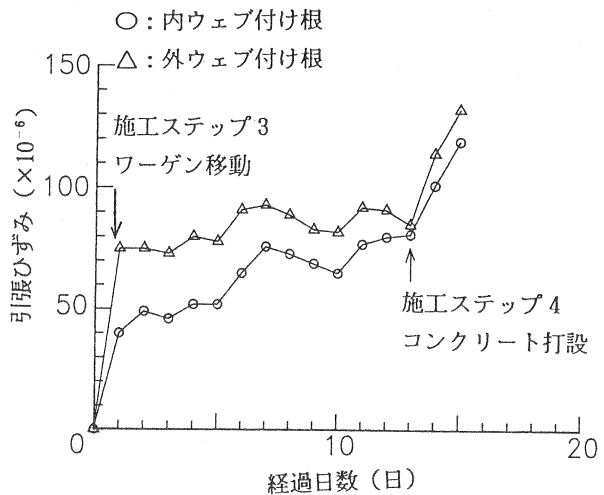


図-8 A工区斜め引張ひずみの経時変化

としては、内ウェブ中心の補強を考えていたが、これと大きくことなる結果となった。

一方、B工区においては、次ブロック打設時には、外側に設置したひずみ計がうまく機能せず、この時点でのひずみ増分の比較はできないが、ワーゲン移動後には、その増分は、内、外ウェブでほぼ均一であり、FEM解析の結果と定性的には同じ傾向であり、ワーゲンの荷重分担がほぼ同一であることが予想された。なお、B工区においては、斜めひびわれの発生を防止するために必要なせん断鋼棒本数は、内ウェブで7本、外ウェブで3本であった。

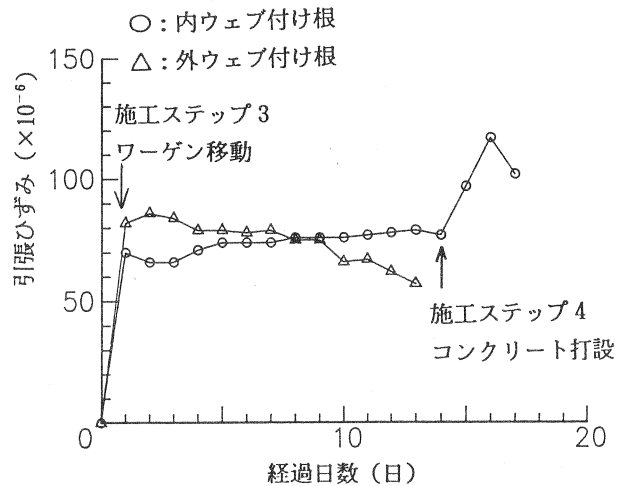


図-9 B工区斜め引張ひずみの経時変化

4-3. プレストレス導入によるひずみ変動

施工ステップ2直前にひずみ計を設置したB工区の測定結果を用いて、鉛直方向および、橋軸方向のプレストレス導入による、鉛直方向および橋軸方向のひずみ変動の実測値と計算値の比較を行った。表-1に、結果を示す。なお、計算に用いたコンクリートのヤング係数は、施工ステップ2においては、供試体による静弾性試験の結果 $E_c=29800(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ を用いた。この供試体は、水和熱による積算温度が、コンクリート打設後、その時点までの、ウェブに埋設した熱伝対の測定結果による積算温度と等しくなるように管理したものである。また、施工ステップ5においては、 $E_c=350000(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ とした。鉛直鋼棒については、ブロック付け根付近は、既設ブロックによる拘束のため、計算値よりもかなり小さい値となっているが、中央および先端については、比較的良く対応している。橋軸鋼棒緊張時には、緊張端からのプレストレスの分布を $33^\circ 33'$ として<sup>1)</sup>、ひずみ設置位置での有効本数を定めて計算した値である。施工ステップ2においては、実測値は、計算値の概ね5割程度であり、施工ステップ5においても実測値が計算値をやや下回った。これは、鋼材配置が、上床版に集中的に配置されていることが原因である、と思われる。

表-1 B工区での鋼棒緊張によるひずみ変動の実測値と計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

位置	橋軸方向		鉛直方向		計算式および計算条件		
	実測値	計算値	実測値	計算値			
施工ステップ2	内ウェブ	付け根	2.4	4.5	9.2	12.5	$\epsilon = P \cdot l / A \cdot E_c$ P: 一本あたりの鋼材の有効プレストレス力 (57l) l: 有効本数 施工ステップ2 付け根: 3.8本 中央: 2.0本 先端: 8本 施工ステップ5 いずれも3.8本 $A$ : 断面積 $16.332(\text{m}^2)$ $E_c$ : ヤング係数
		中央	1.6	2.3	10.4	10.3	
		先端	5	9	8.0	7.1	
	外ウェブ	付け根	2.0	4.5	6.9	11.6	
		中央	(ひずみ計無)				
		先端	5	9	4.1	4.6	
施工ステップ5	内ウェブ	付け根	3.2	3.8			$\epsilon = P / bw \cdot a / E_c$ P: 一本あたりの鋼材の有効プレストレス力 (57l) bw: ウェブ幅 a: 測定位置での鋼棒間隔 $E_c$ : ヤング係数
		中央	3.4	3.8			
		先端	3.0	3.8			
	外ウェブ	付け根	—				
		中央	(ひずみ計無)				
		先端	3.2	3.8			

4-4. 主方向引張ひずみと斜めひびわれ発生との相関

張出し施工される桁においては、既設ブロックの外部拘束により、ウェブにコンクリートの水和熱に起因する引張応力が発生することが考えられるため、温度応力の予測を行った。図-10は、A工区内ウェブ付け根付近の温度変化の実測値と、計算値との対比である。計算は、図-11に示したウェブを壁部材として考えたモデルを用いた2次元FEM解析により、断熱温度上昇式を測定値にあうように変更して用いた。図-12には、内ウェブ付け根付近、ウェブ中心部に埋設した有効応力計の経時変化と、温度応力の計算値との比較

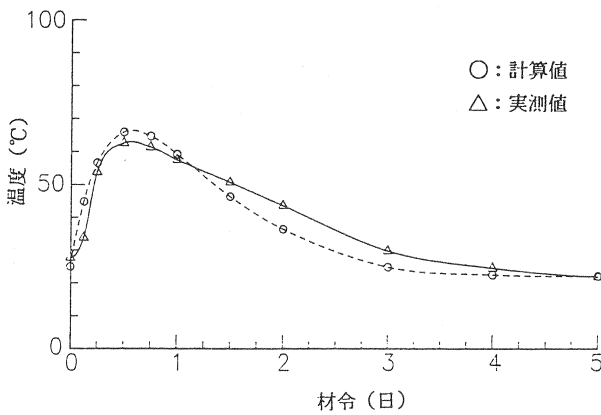


図-10 A工区内ウェブ付け根の温度変化

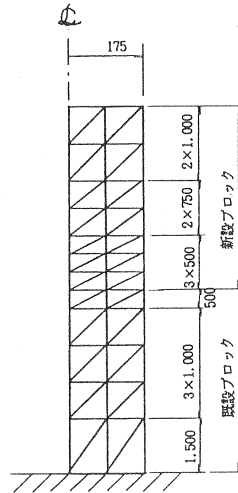


図-11 2次元FEM解析モデル

を示す。温度応力の計算には、温度変化としてFEMによる計算値を用い、JCI マスコンクリート温度応力研究委員会法(C.P.法)により行った。なお、コンクリートの各材令における弾性係数は、表-2に示した方法で算定した。材令2日目までは、温度応力は、比較的精度よく算定できている。この計算法を用いて、ひずみ計取り付け位置での引張ひずみを計算した結果、温度による残留引張ひずみは、ブロック中央付近で一番大きく、 $50 \times 10^{-6}$ 程度であり、主方向ひずみの絶対値を評価するうえでは、温度による残留ひずみを考慮することが必要であることが確認された。

表-3には、温度による残留ひずみを考慮して初期値を補正したうえでの、計測期間中に発生した斜め引張ひずみの最大値の実測値を示す。なお、A工区においては、ひずみ計設置が、PC緊張後であったため、B工区における表-1に示す測定結果を参考に、PC緊張によるひずみ変動を算出し、初期値を補正している。

斜め引張ひずみの最大値は、いずれも施工ステップ4の状態では出現しており、材令は、18日~25日である。計測を行ったA工区の外ウェブ付け根付近には、ひずみ計設置位置近傍に、施工ステップ4の状態、斜めひびわれが発生(図-13)したが、他の位置には、ひびわれは発生していない。

表-3には、コンクリートのヤング係数を $E_c=350000(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ として、ひずみを応力に変換した計算値と引張強度を付記した。引張強度は、式(1)により算定した。

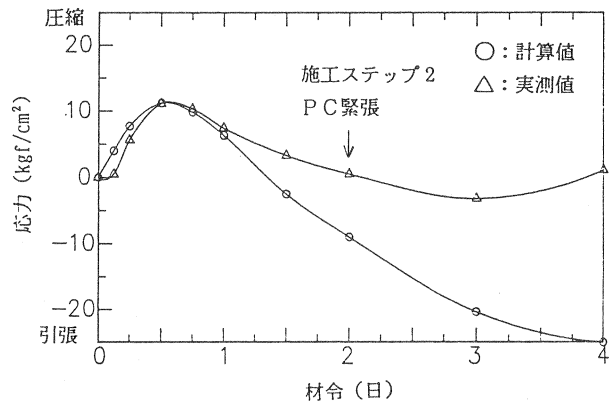


図-12 A工区内ウェブ付け根の応力変化

表-2 温度解析における計算条件

コンクリートの熱膨張係数(1/°C)	0.00001
コンクリートのヤング係数 $E_c$ (L) (kgf/cm <sup>2</sup> )	材令3日まで $E_c(L) = 1.1 \times 10^4 \cdot f_c(L)^{1/4}$ 材令3日以降 $E_c(L) = 1.5 \times 10^4 \cdot f_c(L)^{1/4}$
コンクリートの圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_c(L) = \{L/(4.5+0.95L)\} f_c(91)$

$$f_{tk} = 0.5 f'_{ck}{}^{2/3} \quad (1)$$

表-3 温度ひずみを考慮した施工時斜め引張ひずみの最大値  $\epsilon_s$

ここに、 $f_{tk}$ : 引張強度  
 $f'_{ck}$ : 圧縮強度

なお、圧縮強度は、供試体による28日強度試験結果(A工区498kgf/cm<sup>2</sup>、B工区525kgf/cm<sup>2</sup>)を用いた。斜め引張応力度と斜めひびわれの発生の相関については、ヤング係数の評価に問題が残り、さらに結果にばらつきがみられるものの、斜め引張応力が式(1)で算出した引張強度を越えなければ、ひびわれは発生しないようである。

位 置		$\epsilon_s$ (×10 <sup>-4</sup> )	$\epsilon_s$ (×10 <sup>-4</sup> )	$\sigma_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> )
A 工 区	内ウェブ	付け根	1.7	14.4	50.4
		中央	3.9	12.6	44.1
		先端	3.2	10.2	35.7
	外ウェブ	付け根	1.5	11.6	40.6
		先端	3.2	9.4	32.9
B 工 区	内ウェブ	付け根	2.9	9.1	32.9
		中央	6.4	13.9	48.7
		先端	6.1	7.9	27.7
	外ウェブ	先端	3.1	11.4	39.9
					32.5

$\epsilon_s$ : 温度の影響による残留引張ひずみの計算値  
 $\epsilon_s$ : 施工時斜め引張ひずみの最大値  
 $\sigma_s$ :  $\epsilon_s \cdot E_c$

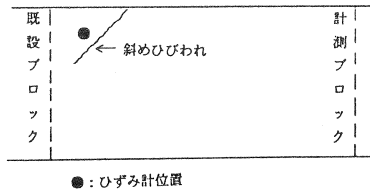


図-13 斜めひびわれの発生状況

5. まとめ

- (1) ワーゲンの荷重分担が、張出し施工中の多室の箱形桁ウェブの斜め引張応力度に与える影響はかなり大きい。したがって、施工中の斜め引張応力の検討を行う際には、ワーゲンの荷重分担を的確に評価しておく必要がある。
- (2) ウェブ鉛直方向鋼棒緊張によるひずみ増加は計算値とほぼ一致するが、ブロック付け根においては、既設ブロックの拘束を受けるため、その効が悪くなる。  
 橋軸方向鋼棒緊張によるひずみ増加は、今回の場合、鋼棒配置が上床版に集中し、ウェブには配置されていないため、ウェブ図心位置では、自ブロック緊張時には実測値は計算値の5割程度であり、次ブロック緊張時にもやや小さめの値であった。
- (3) 今回の計測だけからは、斜め引張応力度と斜めひびわれ発生との相関について、必ずしもその相関を明白にはできなかったが、発生する斜め引張応力度が、引張強度  $f_{tk}$  を越えなければ斜めひびわれは発生しないようである。

[参考文献]

- 1) コンクリート道路橋設計便覧 昭和60年10月 社団法人 日本道路協会