

(8) Xトラスを有する波形鋼板ウェブPC橋の力学的特性に関する研究

ドーピー建設工業(株) 東京支店 設計課 正会員 ○ 安森 浩  
 ドーピー建設工業(株) 本社 技術センター 正会員 蛸名 貴之  
 ドーピー建設工業(株) 本社 技術センター 正会員 上平 謙二  
 大阪市立大学 工学部 土木工学科 園田恵一郎

1. はじめに

波形鋼板ウェブPC箱桁橋のねじり剛性の向上, 自重の軽減, コスト縮減, 景観性の向上等を考慮して, ウェブに波形鋼板を有し, 箱桁断面の張出し床版受けにプレキャストのX形トラス部材(以下Xトラスという)をストラットとして配置する構造を提案する。これにより上床版の横方向曲げモーメントバランスがよくなるばかりか, コアボックスを絞って下床版自重を軽減でき, さらに, 景観性も向上する。

本研究は, このXトラスを有する波形鋼板ウェブPC箱桁構造の曲げ特性, せん断特性およびねじり特性を把握することを目的に, シェル要素とバー要素からなる立体FEM解析を実施した。さらに, 本提案構造と通常のPC箱桁構造との試設計を行い, 本構造の優位性を確認した。

2. 解析対象構造

解析の対象とした構造は, 図-1 に示すように, 中規模径間を有する連続桁の支点部から外ケーブル偏向部までとし, その区間を片持ち構造としたモデル化を行った。片持ち構造の張り出し長は, 波形鋼板の形状を考慮し,  $L=15.600\text{m}$ とした。また, 断面形状は図-2 に示すように上床版幅を  $9.20\text{m}$ , 下床版幅を  $3.70\text{m}$ , 上床版コンクリートの部材厚を  $28\text{cm}$ , 下床版コンクリートの部材厚を  $23\text{cm}$ , 波形鋼板厚さを  $8\text{mm}$ , Xトラスの部材形状を  $150 \times 150\text{mm}$ の角部材と仮定した。

なお, Xトラスの交角については, 図-1 に示すように事前解析を実施しXトラス部材が, はりとしての曲げ挙動に影響を及ぼさない角度を見つけ, それを  $60^\circ$  とした。

解析に用いた上, 下床版コンクリート, 波形鋼板およびXトラスの材料の特性を表-1 に, また, 波形鋼板の形状を図-3 に示す。

3. 解析方法

3.1 解析モデル

解析モデルは, 図-4 に示すように, 上, 下床版コンクリート, 波形鋼板をシェル要素, Xトラスをバー

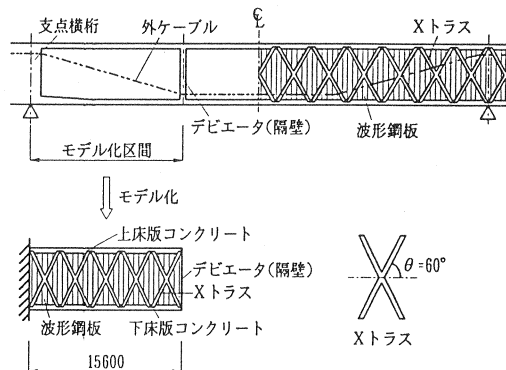


図-1 解析対象構造

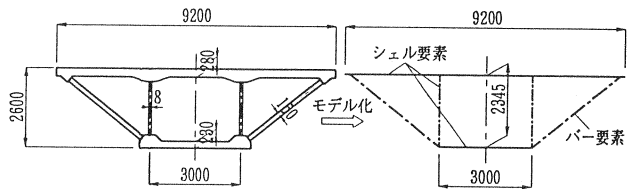


図-2 断面形状図

表-1 材料特性値

材 料	弾性係数 $E(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	ポアソン比
コンクリート	$3.1 \times 10^5$	0.167
波形鋼板	$2.1 \times 10^6$	0.300
Xトラス	$3.8 \times 10^5$	0.167

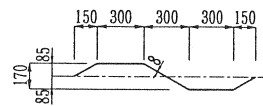


図-3 波形形状図

要素とする立体FEMモデルとした。特に波形鋼板の形状においては、波形鋼板の応力伝達を忠実に評価できる波形形状のモデル化を行い、また、片持ち先端部には外ケーブル偏向のためのデビエータを想定した剛性の高い隔壁を設けた。

### 3.2 荷重方法

荷重方法は、曲げ、せん断挙動の把握に関しては、片持ち先端の隔壁部の中心に集中荷重として鉛直に荷重し、ねじり挙動の把握に関しては片持ち先端の隔壁部の中心に集中トルクとして荷重した。この場合、鉛直荷重の荷重強度は、上、下床版コンクリートのみによる曲げ剛性を用いて、はり理論で計算した片持ち張出しの固定端の上縁側コンクリート床版応力度が、 $-5\text{kgf/cm}^2$ 程度の応力状態になるように  $P=20\text{tf}$  とし、集中トルクの荷重強度については、Xトラスを無視した上、下床版と波形鋼板で囲まれた断面をねじり抵抗断面として上平ら<sup>1)</sup>が提案した、ねじりせん断応力度の算定式を用い、部材厚の薄い下床版コンクリートのねじりせん断応力度が設計荷重作用時の許容値 ( $\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$  の場合、 $\tau_a=5.5\text{kgf/cm}^2$ ) 程度になるように  $M_t=150\text{tf}\cdot\text{m}$  とした。

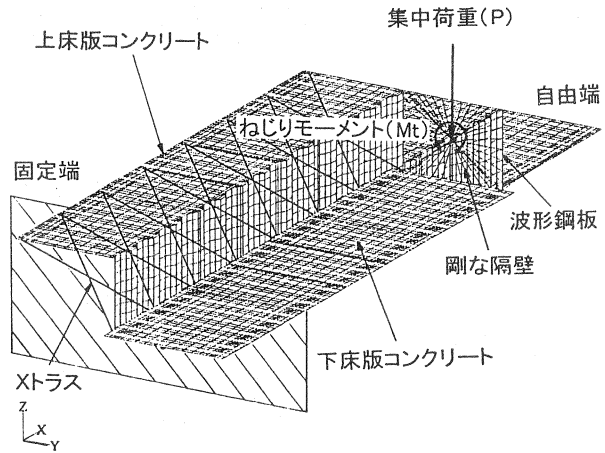


図-4 立体FEM解析モデル

### 4. 曲げ特性の検討

Xトラスを有する波形鋼板ウェブPC箱桁橋の曲げ特性を把握するために、FEM解析とはり理論による曲げ応力度の比較を行った。このとき、はり理論における曲げ剛性としてXトラスを無視し、上、下床版コンクリートのみを考慮した。

比較結果を図-5に示すが、コンクリート部材に生じる曲げ応力度分布については、FEM解析値とはり理論は非常に一致しており、曲げ剛性評価としては、上、下床版コンクリートのみを考慮すればよく、Xトラスの部材交角が $60^\circ$ の場合には、Xトラスが曲げ挙動に悪影響を及ぼさないことがわかった。

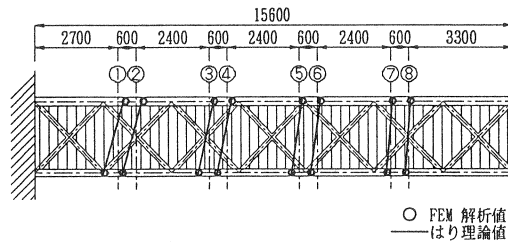


図-5 曲げ応力度の比較

### 5. せん断特性の検討

Xトラスを有する波形鋼板ウェブPC箱桁橋のせん断挙動を把握するため、波形鋼板が負担するせん断力の比較をFEM解析とはり理論により行った。この場

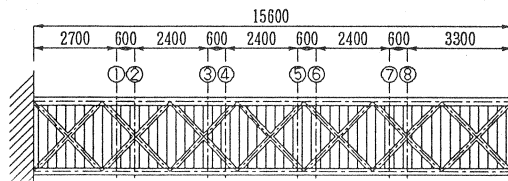
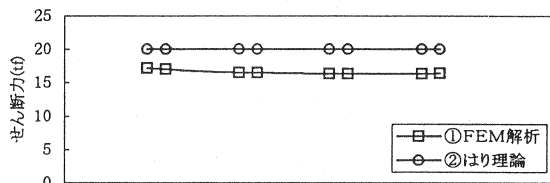


図-6 波形鋼板の負担するせん断力の比較

合、FEM解析におけるせん断力の抽出については、波形鋼板の高さ方向の各要素におけるせん断応力度を積分し、また、はり理論においては、作用せん断力すべてが波形鋼板で負担するとした。図-6に比較結果を示す。

この結果から波形鋼板で負担するせん断力は、FEM解析値がはり理論値よりも15%程度小さい値を示すことがわかった。これは、コンクリート床版が若干のせん断力を担ってはいらるものの、Xトラスが作用せん断力の15%程度を担うことを示している。このことから、Xトラスを有する波形鋼板ウェブPC箱桁橋では、せん断力の一部をXトラスが担うため、波形鋼板に作用するせん断力を低減することができる。しかしながら、Xトラス部材の設計には、この負担作用を考慮する必要がある。

6. ねじり特性の検討

6.1 ねじり定数

ねじり特性として単純ねじりを基本とし、Xトラスを有する波形鋼板ウェブPC箱桁橋のねじり角が部材の長さ方向に線形挙動にあるか検討した。図-7にねじり角の解析結果を示す。

図からわかるように、ねじり角は部材の長さ方向に、ほぼ直線的な分布を示しているため、単純ねじりの挙動と判断した。

次に、Xトラスを有する波形鋼板ウェブPC箱桁橋のねじり挙動の把握として、ねじりせん断応力度の分布をFEM解析から検討することとした。図-8にFEM解析値のねじりせん断応力度の分布を示す。このねじりせん断応力度の分布からコアボックスに作用しているねじりモーメントを求めると $M_t=92.7tf\cdot m$ となり全体の作用ねじりモーメント( $M_t=150.0tf\cdot m$ )に対して60%分をコアボックスで負担し、残りの40%をコアボックスを除くXトラスで囲まれた断面で負担していることがわかった。そこで、ねじり剛性の評価として単純ねじりの基本式より、ねじり定数 $J_t$ を評価する。単純ねじりの基本式を(1)式に示す。

$$M_t = G \cdot \Theta \cdot J_t \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $M_t$  : ねじりモーメント

$G$  : せん断弾性係数

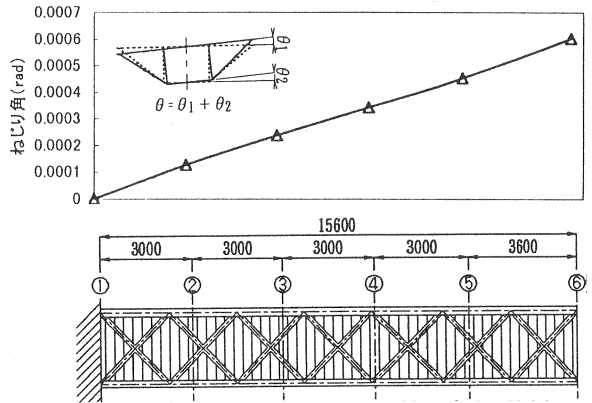
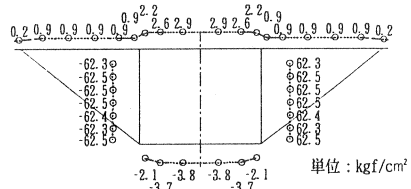
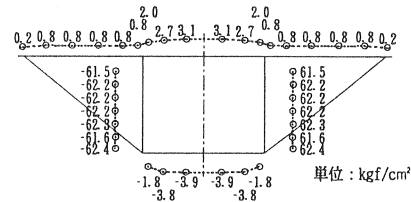


図-7 ねじり角



(a) ②断面



(b) ④断面

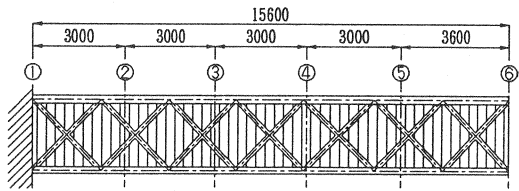


図-8 ねじりせん断応力度の分布

$\theta$  : ねじり率

$J_t$  : ねじり定数

ここで、コアボックスとなる波形鋼板で囲まれた断面(図-9 参照)として上平ら<sup>1)</sup>が提案した(2)式から、ねじり定数  $J_t$  を求めると  $J_t=1.8200m^4$  となる。このねじり定数  $J_t$  を用いて単純ねじりの基本式から作用ねじりモーメントを求めると  $M_t=93.1tf \cdot m$  となり、コアボックスのねじりせん断応力度から求めたねじりモーメント ( $M_t=92.7tf \cdot m$ ) と非常に良い一致を示した。そこで、(1)式から本構造のねじり率を用いて作用ねじりモーメント  $M_t=150.0tf \cdot m$  の時のねじり定数  $J_t$  を求めると  $J_t=2.9309m^4$  となる。このねじり定数  $J_t$  を通常の波形鋼板PC箱桁橋に換算すると、桁高を同じとすれば、波形鋼板中心間隔は  $b=4.300m$  程度となり、ほぼ一般的な波形鋼板PC箱桁橋の波形鋼板中心間隔と同等となる。

$$J_t = \frac{4A_m^2}{\frac{h}{n_s t_1 (1+\alpha)} + \frac{b}{t_2 (1-\alpha)} + \frac{h}{n_s t_3 (1+\alpha)} + \frac{b}{t_4 (1-\alpha)}} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $J_t$  : ねじり定数

$A_m$  : 上、下床版の床版中心高さ<sup>2)</sup>と波形鋼板の中心で囲まれた断面積 (=  $b \cdot h$ )

$b$  : 波形鋼板の中心間隔

$h$  : 上、下床版中心間隔

$t_1, t_3$  : 左、右の波形鋼板厚さ

$t_2, t_4$  : 上、下床版コンクリート厚さ

$\alpha$  : 修正係数 (=  $0.4 \cdot h / b - 0.06 \geq 0$ )

$n_s$  : せん断弾性係数比 (=  $G_s / G_c$ )

$G_s$  : 波形鋼板のせん断弾性係数

$G_c$  : コンクリートのせん断弾性係数

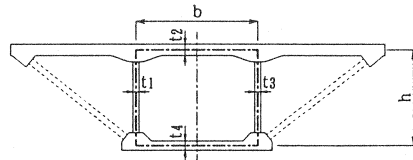


図-9 ねじり抵抗断面

6.2 ねじりせん断応力度

ねじりせん断応力度の設計手法を提案するにあたり、コアボックス内のねじりせん断応力度の比較をFEM解析と上平ら<sup>1)</sup>の提案式((3)式)において比較検討を行った。ここで、(3)式の計算に用いたねじりモーメント  $M_t$  は、「6.1ねじり定数」で求められた、波形鋼板で囲まれたコアボックスのみの断面に作用するねじりモーメント  $M_t=93.1tf \cdot m$  から求めた。比較結果を図-10に示す。

図からFEM解析値と(3)式から求められた値が非常に良い一致を示していることがわかる。

・コンクリートのねじりせん断応力度  $\tau_{tc} = \frac{M_t}{2 \cdot A_m \cdot t \cdot (1-\alpha)}$  .....

・波形鋼板のねじりせん断応力度  $\tau_{ts} = \frac{M_t}{2 \cdot A_m \cdot t \cdot (1+\alpha)}$  ..... (3)

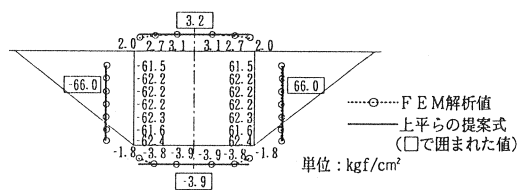
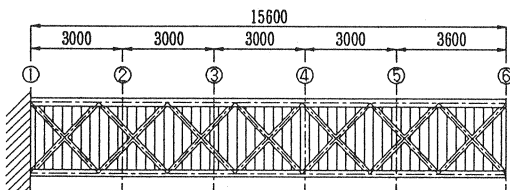
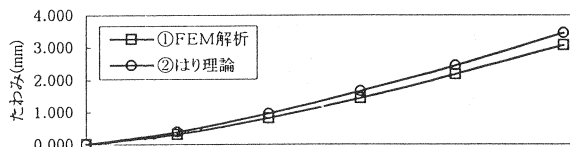


図-10 検討断面④におけるねじりせん断応力度の比較

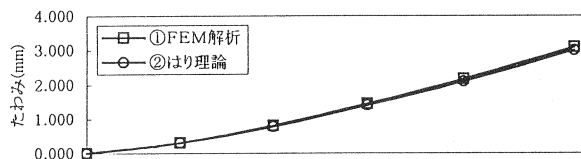
### 7. 変形に対する検討

Xトラスを有する波形鋼板ウェブPC橋における変形性能を把握するため、FEM解析とはり理論によるたわみの比較を行った。この時、はり理論の曲げ剛性としては、Xトラスを無視し、上、下床版コンクリートのみを考慮した。また、せん断剛性としては、上平ら<sup>1)</sup>の提案する波形鋼板の形状係数のみを考慮した。

検討結果を図-11の(a)に示す。図から両者の値には差が見られ、はり理論の値の方が大きくなっている。これは、「5. せん断特性の検討」のところでも、作用せん断力の15%分をXトラスが担うことから、波形鋼板のせん断剛性をその分担分高く評価し比較検討を行った。図-11の(b)に検討結果を示すが、両者の値は一致しており、はり理論で、本構造の変形を検討する場合、せん断剛性の評価として、波形鋼板のせん断剛性をXトラスのせん断力の分担分高く評価すればよいことがわかった。



(a) せん断剛性に波形鋼板の形状係数のみ考慮



(b) 波形鋼板のせん断剛性を高く評価

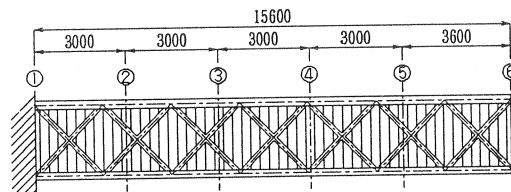


図-11 たわみの比較

### 8. 試設計による比較検討

全幅員9.2m、支間45mの単純桁による試設計の検討を行った。図-12に比較ケースの標準断面を示す。CASE-1としてXトラス併用波形鋼板ウェブPC箱桁、CASE-2として波形鋼板ウェブPC箱桁、CASE-3として一般的なPC箱桁とした。

比較検討を行うに当たり、以下の項目に留意した。

- ① 支間中央での曲げ応力レベルを同じとした。
- ② 桁高/支間比は一般的なPC箱桁橋の単純桁に適用している1/17とし、 $h=2.600\text{m}$ とした。
- ③ CASE-1およびCASE-2における外ケーブルが負担する荷重は、後死荷重(橋面工)および活荷重とした。

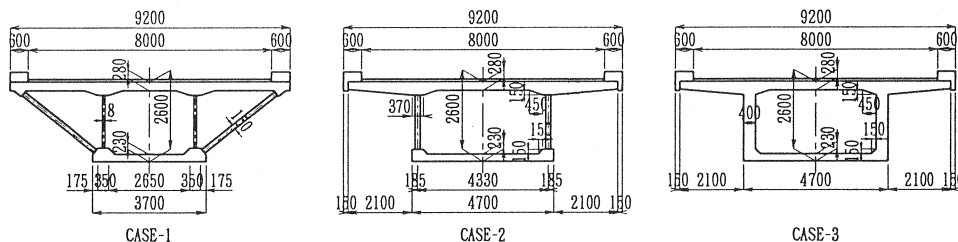


図-12 各ケースの標準断面

比較結果を表-2に示す。表から以下のことがわかる。

① 主桁自重に関しては、本構造形式であるCASE-1は、CASE-3に比べ20%の軽減が図れ、CASE-2においても若干の軽量化が図れた。また、PC鋼材に関しては、本構造形式であるCASE-1は、CASE-3に比べ20%の低減とな

表-2 試設計の比較結果

	主桁自重反力(tf)	鋼材重量(tf)
CASE-1	276.8(0.77)	9.3(0.77)
CASE-2	282.0(0.79)	9.8(0.81)
CASE-3	359.0(1.00)	12.1(1.00)

注) ( )内数値は比率を示す

り、CASE-2とは同程度となった。

②本構造形式であるCASE-1は、CASE-2およびCASE-3に比べて、床版の曲げモーメントバランスがよいことから、PC床版をRC床版とすることが可能となった。

③概算工事費の比較においては、CASE-2およびCASE-3よりも②のRC床版にしたことにより本構造形式であるCASE-1は、5%程度のコスト縮減が図れることがわかった。

## 9. まとめ

1) 本構造の曲げ応力度の計算に際しては、Xトラスの部材交角が $60^\circ$ であれば、Xトラスを無視し、上、下床版コンクリートのみを考慮したはり理論を用いて良いことがわかった。

2) 作用せん断力については、波形鋼板で85%、Xトラスで15%それぞれ担うことがわかり、はり理論で設計する場合の作用せん断力に対しては、波形鋼板に85%程度負担させて鋼板の設計をすればよい。

3) ねじり挙動については、作用ねじりモーメントに対し、コアボックスで60%、コアボックスを除く、Xトラスと上床版で40%程度を担っていることがわかり、下床版を絞り、Xトラスをストラットとして用いた本構造でも、ねじり抵抗性については、通常の波形鋼板ウェブPC箱桁断面と同程度確保できることがわかった。

4) 本構造のコアボックスに伝達されるねじりせん断応力度については、上平らの提案式<sup>1)</sup>で十分追跡できた。

5) 本構造のせん断変形については、波形鋼板のせん断剛性にXトラスのせん断分担分を高く評価すればよい。

6) 試設計による検討結果によれば、本構造形式は、一般的なPC箱桁よりも20%の軽量化が図れ、波形鋼板ウェブPC箱桁よりも若干の軽量化が図れることがわかった。また、床版の曲げモーメントバランスがよいことから、PC床版からRC床版とすることが可能となり、波形鋼板ウェブPC箱桁と概算工事費で比較した場合、5%程度のコスト縮減が図れることがわかった。

本構造の提案は、一つの断面形状の仮定より、その優位性が確認されたが橋梁の規模(連続桁等)においては、新たな検討が必要であると思われる。

## 参考文献

- 1) 上平謙二・立神久雄・本田秀行・園田恵一郎:「波形鋼板を有するPC箱桁橋のせん断およびねじり特性に関する研究」, プレストレストコンクリート, Vol40, No.3, pp16~25, 1998年5月