

鋼板ウェブを有するプレストレスト コンクリート箱けた橋の断面変形計算

野田行衛¹・大槌邦夫²

¹正会員 工博 川田建設(株)開発部 部長 (〒114-8505 東京都北区滝野川 6-3-1)

²正会員 川田建設(株)工事本部長 (〒114-8505 東京都北区滝野川 6-3-1)

プレストレストコンクリート箱けた橋のウェブに鋼板を用いた場合、従来の PC 箱けたに比較して断面の剛性が大きく低下する。このため、適切に中間横桁を配置して断面形状を保持する必要がある。本論文では、鋼板のウェブを有するコンクリート橋に偏心荷重が作用した場合の断面変形に関する基本式を折板理論に基づいて導いた。また、導いた式による計算例を示し、波形鋼板ウェブ PC 箱けたの場合の簡易計算方法を提案した。

Key Words : prestressed concrete bridge with corrugated steel web, sectional deformation, cross beam, foldet plate,

1. はじめに

近年、従来のプレストレストコンクリート箱けた橋（以下 PC 箱けた橋）の軽量化を図るために、ウェブに波形鋼板を用いた複合形式の橋梁（以下波形鋼板ウェブ PC 橋）が建設されている。本形式の橋梁は、従来のコンクリートウェブを鋼板に置き換えることにより全重量の約 20~30 パーセントの軽量化が可能となり、経済的にも有利となりうる。これらはすでに支保工施工¹⁾、押し出し工法²⁾および片持ち張出し工法³⁾による施工実績があり、設計施工法も徐々に定着しつつある。

ところで、波形鋼板を用いた場合、横断面のラーメン剛性やウェブの軸方向剛性がきわめて小さくなることから、従来の PC 橋に比較して全体の剛性が低下する。このため、従来の PC 箱けた橋ではほとんど問題とならなかった偏心荷重作用時の断面変形による付加的な応力の影響は無視することはできず、これに対して適切な横けた配置間隔を決定しなければならない。

断面変形の問題は、文献⁴⁾に示したように弾性支承上のはりの問題に置き換えることができ、箱けた橋における換算断面二次モーメントとラーメン剛性は、弾性支承上のはりモデルにおける断面二次モーメントとバネ定数に置き換えて解析される。

これにより、主けたウェブ相互のたわみ差によって生ずる軸方向断面力と横断面変形が求められる。

中間横けたは、断面形状を保持するためのものであり、配置間隔は断面変形から発生する応力を考慮して決められる。これらの発生応力の大きさは、箱けたの軸方向と横方向の剛性および横けたの剛性などが関係する。

波形鋼板ウェブ PC 橋の横けたは、一般にコンクリート製のマッシュな隔壁を使用する例が多く、配置位置においては断面変形を完全に拘束するものとする、弾性支承上のはりモデルにおいては剛な支点到に置き換えて解析することができる。一方、鋼製の対傾構を短い間隔で配置する場合などでは、部材に応じたバネ定数を計算する必要がある⁹⁾。このため、横けた構造を分類して検討する必要があるが、構造や配置間隔の検討については、紙面の都合上、別の機会に報告する予定である。

著者は、以前にコンクリート製のウェブを有する PC 箱けた橋の中間横けたを省略した場合の設計法の提案^{4), 5), 6)}をしたが、ここでの基本式は箱断面がすべて同一のコンクリートからなることが前提条件であり、ウェブのみを鋼製に置き換え、しかもウェブの軸方向剛性が変化する場合の断面変形に適用することはできない。

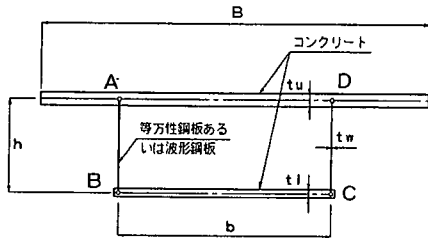


図-1 断面寸法

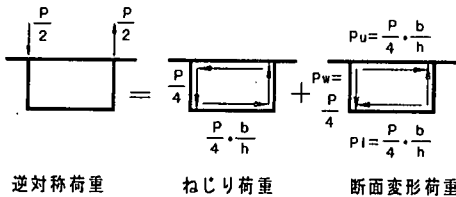


図-2 荷重の分解

一方、波形鋼板ウェブ PC 箱けた橋のねじりと断面変形に関する論文は文献^{7),8)}があり、Vlasov の理論を用いた計算方法が示されているが、Vlasov の理論そのものが一般化座標法¹⁰⁾を基本にしており、軸方向のそりによるバイモーメントを扱うために概念や計算方法が複雑である。

本論文は、最終的には波形鋼板ウェブを有する PC 箱けた橋の断面変形により生じる応力を、簡単な方法で求めることが目的である。この際、断面変形概念や計算過程を分かりやすくするために、はじめに剛性が様な等方性鋼板をウェブに有する PC 箱けたの断面変形について基本式と応力算定式を導き、次に、波形鋼板ウェブの軸方向剛性を評価する式を用いて、波形鋼板ウェブ PC 箱けた橋の断面変形の基本式を提案した。また、これらの計算例として波形鋼板を用いた場合と等方性の鋼板を用いた場合の断面変形によるコンクリート上床版の応力値の比較を示し、さらに、ウェブの軸方向の剛性を無視した場合の計算式も示した。

2. 断面変形の概要

ここで対象とするのは、上下フランジがコンクリート、ウェブが鋼製からなる一軸対称の長方形箱断面を有する PC けたとし、断面寸法は図-1 に示す。

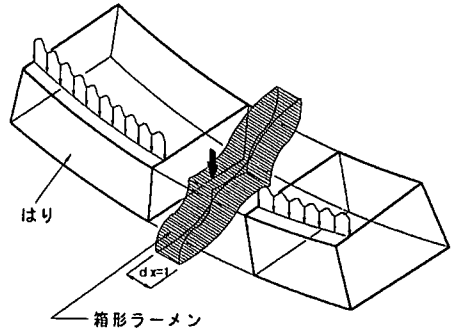


図-3 はり作用とラーメン作用

表-1 箱桁の断面変形理論と弾性支承上のはりの理論の比較

箱桁の断面変形の理論	弾性支承上のはりの理論
断面変形荷重 P_w, P_u, P_l	鉛直荷重 $P(x)$
はりの断面力 $M_{o,w}, M_{o,u}$ $Q_{o,w}, Q_{o,u}$	はりの断面力 M, Q
換算断面二次モーメント $I_{w,i}, I_{u,i}, I_{l,i}$	はりの断面二次モーメント I
ラーメン剛性 K_w, K_u, K_l	バネ定数 C
剛な横桁	剛支承
弾性横桁	弾性バネ支承

逆対称荷重が作用すると箱けたにはねじりと断面変形が同時に生じ、図-2 に示すように断面変形を生じさせる荷重を断面変形荷重として分解することができる。ただし、この場合曲げねじりにより生じる断面変形の荷重成分があるが、鋼製ウェブの PC 箱けたの場合においてもこれらの影響は局部的であることから無視するものとする。

断面変形は、ねじりによるせん断流の差により左右ウェブにたわみ差が生じ、断面には軸方向と横方向の曲げモーメントが発生する。断面変形の計算は、前述したように弾性支承上のはりに荷重が載荷した状態と等価となり、それぞれ対応する物理量を表-1 に示す。

断面変形の計算では、図-3 に示すように橋軸方向（はり作用）と橋軸直角方向（ラーメン作用）に分けて力学モデルを考え、橋軸方向に対しては、各接

3. ウェブに等方性鋼板を有する PC 箱けた

(1) 換算 (仮想) 断面二次モーメント

箱断面を構成する各部材に作用する断面変形は箱断面を構成する部材を折板として扱うことから、各部材の曲げモーメント(M), 軸力(N), せん断力(Q)は、釣り合いから次のようになる (図-4)。

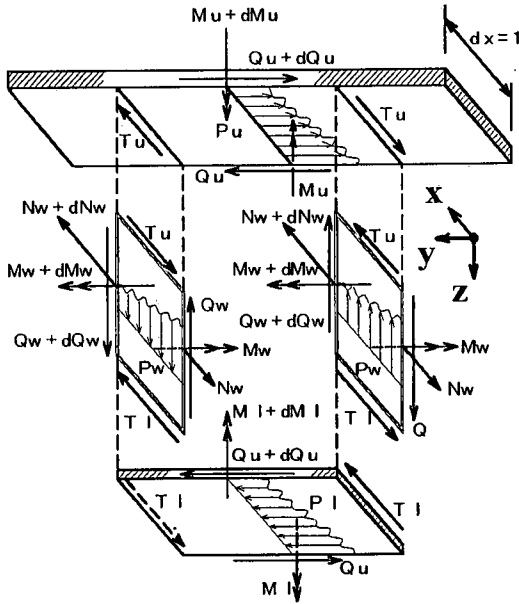


図-4 各部材の軸方向釣り合い

合面はヒンジ接合と仮定し、箱を構成する4枚の板をそれぞれ独立したはりとして扱う。

各部材の単位長さあたりの釣り合いを考えると、図-4に示すように4つの接合面には軸方向のせん断力(Tu, Tl)が作用するため、はりには断面変形荷重による曲げモーメント(Mo)とこのせん断力による曲げモーメントが生じる。また、ウェブには接合面のせん断力の差による軸力が生じ、軸方向の応力はこれら断面力からの垂直応力の和として与えられる。さらに、この垂直応力の和をあらたに1つの曲げ応力とすると、見かけの中立軸を得ることができる。この見かけの中立軸に関する断面二次モーメントが換算(仮想)断面二次モーメントであり、接合面における軸方向ひずみがお互いに等しいという条件から求めることができる。

一方、橋軸直角方向に対しては、断面が変形することにより箱形ラーメンが断面変形荷重を一部負担する。図-6に示すように、その負担する力(断面変形荷重とは逆方向に作用するせん断力)は、部材のたわみに比例するもので、その比例定数がラーメン剛性である。したがって、ラーメン剛性は、部材に作用するせん断力とたわみの関係から求められる。

なお、橋軸方向のはりモデルと橋軸直角方向のラーメンモデルにおける同一点のたわみは、連続条件を満足することからお互いに等しいのは当然である。

$$\begin{aligned} \text{ウェブ} \quad M_w &= M_{0,w} - h(T_u + T_l)/2 \\ N_w &= T_u - T_l \\ Q_w &= Q_{0,w} \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \text{上床版} \quad M_u &= M_{0,u} + T_u b \\ N_u &= 0 \\ Q_u &= Q_{0,u} \end{aligned} \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} \text{下床版} \quad M_l &= M_{0,l} + T_l b \\ N_l &= 0 \\ Q_l &= Q_{0,l} \end{aligned} \quad (3c)$$

ここで、 $M_{0,w}, M_{0,u}, M_{0,l}$ = ウェブ、上下床版の断面変形荷重による曲げモーメント。

T_u, T_l = 上下縁接合面のせん断力

次に、 $\sigma_w, \sigma_u, \sigma_l$ をウェブ、上下床版の縁応力とすると各接合面のひずみ $\varepsilon_w, \varepsilon_u, \varepsilon_l$ は次式で与えられる。

$$\varepsilon_{w,A} = \frac{\sigma_{w,A}}{E_s} = \frac{N_w}{E_s A_w} + \frac{M_w}{E_s I_w} \cdot \frac{h}{2} \quad (4a)$$

$$\varepsilon_{w,B} = \frac{\sigma_{w,B}}{E_s} = \frac{N_w}{E_s A_w} - \frac{M_w}{E_s I_w} \cdot \frac{h}{2} \quad (4b)$$

$$\varepsilon_{u,A} = \frac{\sigma_{u,A}}{E_c} = \frac{N_u}{E_c A_u} + \frac{M_u}{E_c I_u} \cdot \frac{b}{2} \quad (4c)$$

$$\varepsilon_{l,B} = \frac{\sigma_{l,B}}{E_c} = \frac{N_l}{E_c A_l} - \frac{M_l}{E_c I_l} \cdot \frac{b}{2} \quad (4d)$$

ここで、 E_c : コンクリート弾性係数

E_s : 鋼材弾性係数

ここで、 A は断面積、 I は断面二次モーメントをあらわし、したがって、

$$\begin{aligned} \text{ウェブ} \quad A_w &= t_w h & I_w &= t_w h^3 / 12 \\ \text{上床版} \quad A_u &= t_u B & I_u &= t_u B^3 / 12 \\ \text{下床版} \quad A_l &= t_l b & I_l &= t_l b^3 / 12 \end{aligned} \quad (4e)$$

となる。

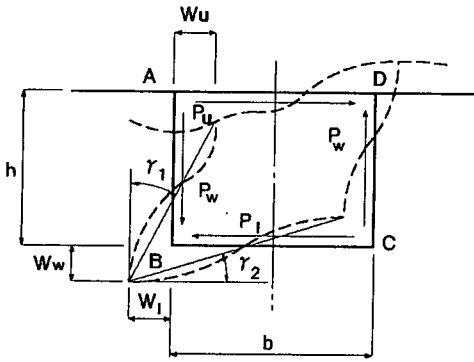


図-5 剛接合断面変形

また、各部材に作用する断面変形荷重と軸方向曲げモーメントの関係は次のよう与えられ、上下床版とウェブの曲げモーメントの比率は、 b/h に等しくなる。

$$\frac{M_{0,u}}{M_{0,w}} = \frac{M_{0,l}}{M_{0,w}} = \frac{P_u}{P_w} = \frac{P_l}{P_w} = \frac{b}{h} \quad (5)$$

各接合面においては連続条件からひずみは等しく、以下の関係が成り立つ。

$$\varepsilon_{w,A} = \varepsilon_{u,A} \quad (\text{A点において}) \quad (6a)$$

$$\varepsilon_{w,B} = \varepsilon_{l,B} \quad (\text{B点において}) \quad (6b)$$

式(4a)~(4d)、式(5)と式(6a)、(6b)の条件を利用して式を整理すると、せん断力 T_u 、 T_l と曲げモーメントと $M_{0,w}$ の関係がえられる。

$$T_u = C_u \frac{M_{0,w}}{h} \quad T_l = C_l \frac{M_{0,w}}{h} \quad (7a, b)$$

ここで

$$C_u = \frac{c_1 b_2 - c_2 b_1}{a_1 b_2 - b_1 a_2} \quad C_l = \frac{c_1 a_2 - c_2 a_1}{b_1 a_2 - b_2 a_1} \quad (8a, b)$$

さらに、 $n = E_s/E_c$ とすると、

$$\begin{aligned} a_1 &= 4I_u I_u + nI_u A_w b^2 & a_2 &= nI_w I_l b^2 + I_u I_l h^2 \\ b_1 &= -4I_u I_l - nI_u A_w b^2 & b_2 &= nI_u I_w b^2 + I_u I_l h^2 \\ c_1 &= -n(I_l - I_u) A_w b^2 & c_2 &= 2I_u I_l h^2 - nI_u I_l b^2 - nI_u I_w b^2 \end{aligned} \quad (9)$$

である。

式(7a,b)を式(4a)に代入し、ウェブ上下縁の応力を求めると次のようになる。

$$\sigma_{w,A} = J_u \frac{M_{0,w}}{I_w} \cdot \frac{h}{2} \quad \sigma_{w,B} = J_l \frac{M_{0,w}}{I_w} \cdot \frac{h}{2} \quad (10a, b)$$

ここで、

$$J_u = \frac{(4I_w + A_w h^2) C_u + (A_w h^2 - 4I_w) C_l - 2A_w h^2}{2A_w h^2} \quad (11a)$$

$$J_l = \frac{(4I_w - A_w h^2) C_u - (4I_w + A_w h^2) C_l + 2A_w h^2}{2A_w h^2} \quad (11b)$$

上式をさらに簡単にまとめると次式のようになり、従来の曲げ理論と同様の式であらわされる。

$$\sigma_{w,A} = \frac{M_{0,w}}{I_{wi}} e_u \quad \sigma_{w,B} = \frac{M_{0,w}}{I_{wi}} e_l \quad (12a, b)$$

ここで、

$$I_{wi} = \frac{2I_w}{J_u + J_l} \quad (13)$$

同様な方法でコンクリート上下フランジの換算断面二次モーメント I_{ui}, I_{li} を求め、A点とB点の軸方向応力は次式のようになる。

$$\sigma_{u,A} = \frac{M_{0,u}}{I_{ui}} \cdot \frac{b}{2} \quad \sigma_{l,B} = \frac{M_{0,l}}{I_{li}} \cdot \frac{b}{2} \quad (14a, b)$$

ただし、

$$I_{ui} = \frac{I_u}{C_u + 1} \quad I_{li} = \frac{I_l}{C_l + 1} \quad (15a, b)$$

である。

(2) ラーメン剛性

ラーメン剛性 K は、図-5 に示すように各部材に作用する部材力の方向のたわみ W が1のときに生じる部材力の大きさを求めれば得られ、弾性支承上のはりにおけるバネ定数をあらわす。

各節点の横曲げモーメントと変形との関係は、節点の回転角を ψ 、部材の回転角を Ψ とすると、たわみ角公式から次のようになる。

$$M_{AB} = k_1 (2\varphi_A + \varphi_B - 3\Psi_{AB}) \quad (16a)$$

$$M_{BA} = k_1 (\varphi_A + 2\varphi_B - 3\Psi_{AB}) \quad (16b)$$

$$M_{AD} = k_2 (2\varphi_A + \varphi_D - 3\Psi_{AD}) \quad (16c)$$

$$M_{DA} = k_2 (\varphi_A + 2\varphi_D - 3\Psi_{AD}) \quad (16d)$$

$$M_{BC} = k_3 (2\varphi_B + \varphi_C - 3\Psi_{AD}) \quad (16e)$$

$$M_{CB} = k_3 (\varphi_B + 2\varphi_C - 3\Psi_{AD}) \quad (16f)$$

ただし、 $k_1 = 2E_s \bar{I}_w / h$ 、 $k_2 = 2E_c \bar{I}_u / b$ 、 $k_3 = 2E_c \bar{I}_l / b$ 、 $\bar{I}_w, \bar{I}_u, \bar{I}_l$ はそれぞれウェブ、上下床版の横方向の断面二次モーメント (m^4/m) をあらわす。

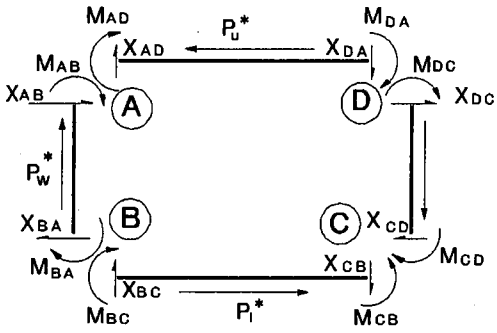


図-6 横曲げモーメントとせん断力

ここで、

$$\Psi_{AB} = \gamma_1, \quad -\Psi_{AD} = \gamma_2$$

$$\text{変形角 } \gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (17)$$

とする。

ラーメン各部材に作用するせん断力の釣り合いからウェブが負担する力を P_w^* 、上床版のそれを P_u^* とすると、図-6 から次のような関係が成り立つ。

$$P_w^* = X_{AD} + X_{BC} = -\frac{2}{b}(M_{AD} + M_{BC}) \quad (18a)$$

$$P_u^* = X_{AB} + X_{DC} = -\frac{2}{h}(M_{AB} + M_{DC}) \quad (18b)$$

また、節点には外力としてのモーメントは作用していないことから、

$$M_{AB} + M_{AD} = 0, \quad M_{BA} + M_{BC} = 0 \quad (19a, b)$$

が成り立つ。

式(19)に式(16)を代入し、一軸対称断面であることを考慮すると、節点回転角 φ_A と φ_B は次式で与えられる。

$$\varphi_A = \frac{\{3k_1(2k_1+3k_3)-3k_1^2\}\Psi_{AB} + \{3k_2(2k_1+3k_3)-3k_1k_3\}\Psi_{AD}}{(2k_1+3k_3)(2k_1+3k_2)-k_1^2} \quad (20a)$$

$$\varphi_B = \frac{\{3k_1(2k_1+3k_2)-3k_1^2\}\Psi_{AB} + \{3k_3(2k_1+3k_2)-3k_1k_2\}\Psi_{AD}}{(2k_1+3k_3)(2k_1+3k_2)-k_1^2} \quad (20b)$$

次に、式(20)を式(16)に代入して、さらに式(17)の関係をを用いると、横曲げモーメントと変形角との関係は最終的に次式で与えられる。

$$M_{AB} = K_A \gamma \quad (21a)$$

$$M_{BA} = K_B \gamma \quad (21b)$$

ここで、

$$K_A = \frac{9k_1k_2(k_1+3k_3)}{(2k_1+3k_2)(2k_1+3k_3)-k_1^2} \quad (22a)$$

$$K_B = \frac{9k_1k_3(k_1+3k_2)}{(2k_1+3k_2)(2k_1+3k_3)-k_1^2} \quad (22b)$$

一方、図-5を参照すると部材の変形角 γ とたわみの関係は次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{W_u + W_l}{h} + \frac{W_w}{b/2} = 4 \frac{W_w}{b} \quad (23)$$

ここで、 W_u 、 W_l 、 W_w はそれぞれ上下床版およびウェブのたわみをあらわす。

式(18a,b)と式(21a,b)および式(23)の関係から、次式が成り立つ。

$$P_w^* = \frac{2}{b}(K_A + K_B)\gamma = K_w W_w \quad (24)$$

したがって、ウェブに関するラーメン剛性 K_w は、

$$K_w = \frac{8}{b^2}(K_A + K_B) \quad (25a)$$

となる。

また、上下床版についても同様にラーメン剛性を求めることができ、次のようになる。

$$K_u = \frac{8}{b^2} \cdot \frac{I_w}{I_u} (K_A + K_B) \quad (25b)$$

$$K_l = \frac{8}{b^2} \cdot \frac{I_w}{I_l} (K_A + K_B) \quad (25c)$$

(3) 断面力の計算

箱けたの断面変形に関する基本式は、弾性支承上のはりの式と等価な式で表され^{4), 5)}、それぞれの部材について求めることができる。鋼板のウェブおよび上下床版に関する断面変形の式を示すと次のようになる。

$$E_s I_w W_w^{IV} + K_w W_w = P_w \quad (\text{ウェブ}) \quad (26a)$$

$$E_c I_u W_u^{IV} + K_u W_u = P_u \quad (\text{上床版}) \quad (26b)$$

$$E_c I_l W_l^{IV} + K_l W_l = P_l \quad (\text{下床版}) \quad (26c)$$

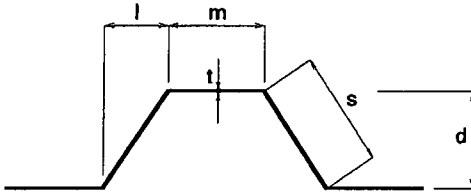


図-7 波形形状寸法

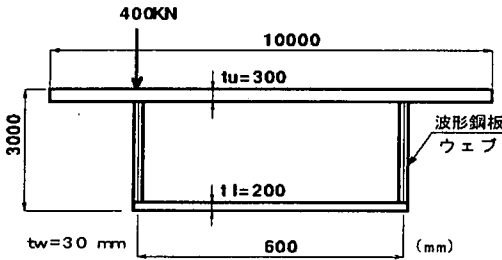


図-8 計算モデル

ここで、 $W_w^{IV}, W_u^{IV}, W_l^{IV}$: ウェブ, 上床版, 下床版のたわみの4階微分をあらわす。

式(26a,b,c)の第1項は、外力に対してウェブが軸方向のはりとして抵抗し、第2項は、箱形ラーメンとして抵抗することを意味しており、この場合、断面変形荷重をそれぞれが負担する割合は、横方向剛性と軸方向剛性の比率から決まり、特性値 λ とスパン長 L に依存する。

$$\lambda_w L = \sqrt[4]{\frac{K_w}{E_s J_{wi}}} L \quad (27a)$$

$$\lambda_u L = \sqrt[4]{\frac{K_u}{E_c J_{ui}}} L \quad (27b)$$

$$\lambda_l L = \sqrt[4]{\frac{K_l}{E_c J_{li}}} L \quad (27c)$$

ただし、 L はスパン長とする。

4. 波形鋼板ウェブPC箱けた

(1) 計算方法

波形鋼板は、鋼板に波を形成することにより異方向性を有する板となり、面内および面外に対してそれぞれの方向により剛性が異なる。

波形鋼板の軸方向弾性係数は、波形を形成することにより大幅に低下し、見かけの弾性係数は一般に次式で与えられる¹⁾。

$$E_{si} = \alpha (t/d)^2 E_s \quad (28)$$

ただし、 α : 波形形状係数、 t : 板厚、 d : 波高さ
これにより、波形鋼板とコンクリートとの弾性係数比を決めることができる。

すなわち、

$$n_{si} = \frac{E_{si}}{E_c} \quad (29)$$

となる。

したがって、波形鋼板ウェブ箱けたにおける換算断面二次モーメントは、式(29)を式(8a,b)に代入して C_u と C_l を計算し、式(11a,b)から J_u と J_l を求め、さらにそれらを式(13)と式(15a,b)に代入することにより、それぞれの換算断面二次モーメントがえられる。

また、ラーメン剛性 K は、式(22a,b)の k_1 において波形の面外曲げ剛性を用いることにより求められる。なお、図-7に示す台形波形鋼板の場合、波形形状係数と面外の断面二次モーメント \bar{I}_w は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{m+l}{3m+s} \quad (29)$$

$$\bar{I}_w = \frac{td^2}{6} (3m+d^2+l^2) \quad (30)$$

最終的には、ここで得られた換算断面二次モーメントとラーメン剛性を用いた弾性支承上のはりモデルに断面変形荷重を載荷した場合の断面力を求め、式(12a,b)と式(14a,b)から軸方向応力が計算できる。

5. 計算例

本理論を用いて波形鋼板ウェブPC箱けた橋の計算例を示す。計算モデルは、図-8に示すようにスパン20m、桁高3mの単純箱けたとし、端部には剛な端横桁があるものとする。すなわち軸方向のそりを完全に拘束するものとする。上床版コンクリート厚は30cm、下床版コンクリート厚は20cm、ウェブの板厚は3cmとし、ウェブが波形鋼板と等方性鋼板の2ケースについて計算する。なお、それぞれ板厚は全断面で一定とし、波形形状は図-9に示す。

荷重は、スパン中央に偏心集中荷重400kNを載荷し、その場合に生じる軸方向応力を求める。断面定数および特性値の計算結果を表-2に示す。

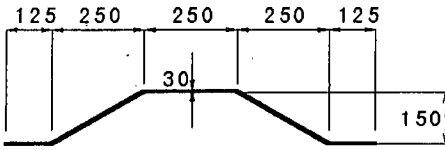


図-9 波形形状 (mm)

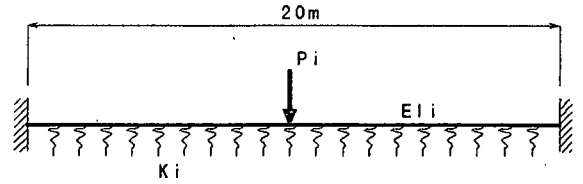


図-10 弾性支承上はりモデル

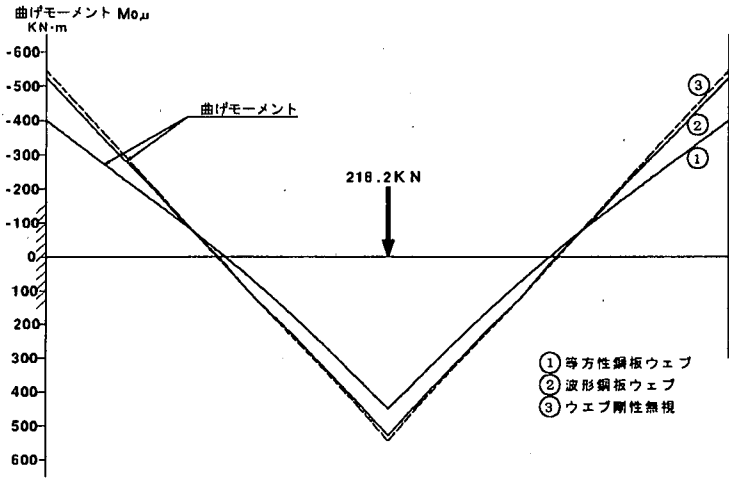


図-11 上床版の曲げモーメント

表-2 断面定数と特性値の計算結果

項目	波形鋼板ウェブ	等方性鋼板ウェブ
上下床版断面変形荷重 $P_{u,l}$	218.2	kN
ウェブ断面変形荷重 P_w	100.0	kN
上下床版弾性係数 E_c	$3.0 \cdot 10^7$	kN/m ²
ウェブ弾性係数 E_s	$2.1 \cdot 10^8$	kN/m ²
ウェブ見かけの弾性係数 E_{si}	$4.03 \cdot 10^7$	kN/m ²
上床版換算断面二次モーメント I_{ui}	12.488	m ⁴
下床版換算断面二次モーメント I_{li}	1.804	m ⁴
ウェブ換算断面二次モーメント I_{wi}	34.500	m ⁴
上床版ラーメン剛性 K_u	3388.447	kN/m/m
下床版ラーメン剛性 K_l	489.589	kN/m/m
ウェブラーメン剛性 K_w	9360.788	kN/m/m
上床版特性値 λ_u	0.0388	1/m
下床版特性値 λ_l	0.0388	1/m
ウェブ特性値 λ_w	0.0238	1/m

断面変形による断面力 $M_{0,u}$, $M_{0,l}$ および $M_{0,w}$ は、図-10 に示す弾性支承上のはりとして求められ、換算断面二次モーメント EI_i を有するはりがラーメン剛性 K_i を有するバネ支承で支えられているモデルに断面変形荷重 P_i を載荷したときの曲げモーメントを計算する。図-11 は、上床版の曲げモーメント分布の結果を示すが、①は等方性板ウェブ、②は波形鋼板ウェブ、③はウェブの剛性を無視した場合である（下床版も同じ曲げモーメント分布となる）。

この結果から、①の等方性鋼板の場合は軸方向剛性があり、ウェブのはり作用があるため上床版の曲げモーメントは小さくなること、また②と③は差がないことから、波形鋼板の場合は軸方向の剛性はほとんど無いことが分かる。

これらの曲げモーメントによる応力は式 (12) ~ 式 (15) を用いて計算でき、表-3 に荷重載荷位置の節点 A~D の応力値の計算結果を示し、荷重載荷位置の断面内の応力分布を図-12 に示す。

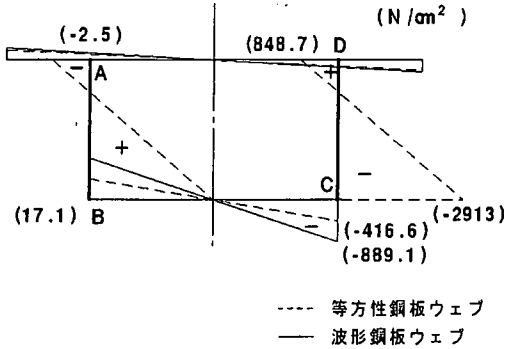


図-12 軸方向応力分布

このことから、波形鋼板に発生する応力はきわめて小さいこと、軸方向剛性が減少すると上床版よりも下床版に負担が増大することがわかる。

6. 波形鋼板ウェブの実用計算法

波形鋼板を有する箱けたの場合、上述したように軸方向剛性がきわめて小さくなり、5章の計算例では等方性鋼材弾性係数の1/52まで低下する。

計算例の波形ウェブを有する箱けたの場合には軸方向剛性を無視しても差し支えない。これにより、式(8a.b)において $C_u=C_l=1$ となり、上下床版の換算断面二次モーメントは次のようになる。

$$I_{ui} = I_u / 2 \quad (31a)$$

$$I_{li} = I_l / 2 \quad (31b)$$

さらに、上下床版に関するラーメン剛性も小さいことから無視すると、単なるはりとして断面力を求めることができ、断面変形による軸方向応力をきわめて簡単に計算することができる。

すなわち、計算例に示したように上床版の半分の断面二次モーメントを有するはりに断面変形荷重が作用したモデルから断面力を求め、曲げ理論から応力の計算を行えばよいことがわかる。

7. まとめ

鋼板ウェブを有するPC箱けた橋の断面変形計算法についてまとめると次のようになる。

(1) 従来の同一材料からなる箱けた橋の理論を拡張して、鋼板ウェブを有するPC箱けた橋の断面

表-3 軸方向応力度の比較 (N/cm²)

着目応力	波形鋼板ウェブ	等方性鋼板ウェブ
σ_{Au}	-128.5	-121.2
σ_{Aw}	-2.5	-848.7
σ_{Bw}	17.1	2913.0
σ_{Bl}	889.1	416.6

* σ_{Au} , σ_{Bl} はA点とB点の床版コンクリート応力
 σ_{Aw} , σ_{Bw} はA点とB点のウェブ鋼板応力
 +は引張応力, -は圧縮応力

変形による応力を求める式を導いた。同一材料からなる箱けた橋の場合には、ウェブに関する断面変形に着目すればすべての断面力や応力は自動的に求められた。

本論文においては、ウェブ鋼板の軸方向剛性の変化に応じた各部材の応力変化が検討でき、特にウェブの軸方向剛性を無視した場合の簡易式を求めるために上下床版の断面変形に関する式を導いた。

(2) 鋼板ウェブ箱けた橋の断面変形によるウェブと上下床版接合部の軸方向応力は、お互いの弾性係数の違いにより不連続になるが、波形鋼板の場合きわめて小さい値となり、ほぼ無視することができる。

(3) 波形鋼板の剛性を無視した場合は、実際の上床版部材の半分の断面二次モーメントを有するはりに断面変形荷重が作用したモデルで近似的に軸方向応力を求めることができる。

参考文献

- 1) 近藤昌泰, 清水洋一, 大浦隆, 服部政昭: 波形鋼板ウェブを有するPC橋(新開橋), プレストレストコンクリート, Vol.37, No.2, pp.69-78, Mar.1995.
- 2) 石黒亙, 村田嘉宏, 須合孝雄: 松の木7号橋(銀山御幸橋)の設計と施工, プレストレストコンクリート, Vol.38, No.5, pp.5-14, 1996.
- 3) 水口和之, 芦塚憲一郎, 古田公夫, 大浦隆, 滝憲司, 加藤卓也: 本谷橋の設計と施工, 橋梁と基礎, Vol.32, No.9, pp.2-10, 1998.
- 4) 野田行衛, 出光隆: 中間横桁のないプレストレストコンクリート1室箱桁橋の設計法に関する研究, 土木学会論文集 No.514/V-27, pp.85-95, 1995.5.
- 5) 野田行衛: 1室PC箱桁橋の中間横桁について, プレストレストコンクリート, Vol.33, No.1, pp.62-72, 1991.
- 6) 野田行衛: コンクリート箱桁橋の断面変形実用計算法について, プレストレストコンクリート, Vol.34, No.3, pp.64-72, 1992.
- 7) 依田照彦, 生田芳子: 波形鋼板ウェブを用いた合成PC箱桁のねじりと断面変形, 構造工学論文集 Vol.40A 1994.3.

- 8) 依田照彦, 大浦隆: 波形鋼板ウェブを用いた合成 PC 箱桁のねじり特性について, 構造工学論文集, Vol.39A 1993.3.
- 9) 坂井藤一, 長井正嗣: 鋼箱桁橋の中間ダイヤフラム設計法に関する一試案, 土木学会論文報告集, No.261, pp.21-34, 1977.5.
- 10) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会: 波形鋼板ウェブ PC 橋計画マニュアル (案), 1998.12.
- 11) Menn, K.: Stahlbetonbrücken, SpringerVerlag, pp.214-228, 1986.
- 12) Mrotzek, M.: Berechnung von Hohlkastenträger ohne Quershotte, *Beton und Stahlbetonbau*, Heft9, pp.281-285, 1970.
- 13) Lindlar, H. K.: Zur Profilverformung einzelliger Kastenträger, Dissertation, Darmstadt 1984.
- 14) Lindner, J. and Aschinger, R.: Zur Torsionssteifigkeit von Trapezstegträgern, *Stahlbau*, 59, Heft4, pp.113-120, 1990.
- 15) Lipták, L.: Zur Drillsteifigkeit von Trapezstegträgern, *Bauingenieur* 69, pp.123-127, 1994.
- 16) 平嶋政治, 臼木恒夫: 任意四角形箱桁のせん断変形を考慮した断面変形理論, 土木学会論文報告集, 第 271 号, pp.1-12, 1978.3.

(1999.2.17 受付)

A CALCULATION OF SECTIONAL DEFORMATION FOR PC BOX GIRDER BRIDGE WITH STEEL WEB

Yukie NODA and Kunio OHTOI

The stiffness of PC box girder bridge with steel web reduces as compared with the stiffness of normal PC box girder bridge with concrete web. Therefore, beam section must be reinforced by cross beams in order to maintain sectional form. This paper shows a calculation method for sectional deformation of box girder with steel web. This method is based on foldet plate theory. An definite example is shown due to examine a behaviour of box girder with corrugated steel web.

Finally the symplified calculation method for corrugated steel web is proposed.