

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-22-0066_改0
提出年月日	2021年2月25日

VI-5-59 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・ APOLLO SuperDesigner Section

2021年2月

東北電力株式会社

## 目 次

1. はじめに.....	1
1.1 使用状況一覧.....	2
2. 解析コードの概要.....	3
3. APOLLO SuperDesigner Section の解析手法について.....	4
3.1 一般事項.....	4
3.2 解析コードの特徴.....	4
3.3 解析手法.....	5
3.4 解析フローチャート.....	8
3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation) .....	9

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）APOLLO SuperDesigner Sectionについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-10-2-3-2	杭基礎構造防潮壁 鋼製遮水壁（鋼桁）の耐震性についての計算書	ver. 10. 39. 0. 1
VI-3-別添 3-2-2-2	杭基礎構造防潮壁 鋼製遮水壁（鋼桁）の強度計算書	ver. 10. 39. 0. 1

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 APOLLO SuperDesigner Section
使用目的	鋼部材の断面諸量及び応力算出
開発機関	株式会社横河技術情報
開発時期	1996 年
使用したバージョン	ver. 10. 39. 0. 1
コードの概要	APOLLO SuperDesigner Section (以下「本解析コード」という。)は、曲げねじり理論によって算出した断面諸量を用いて、垂直応力度・せん断応力度・ねじり応力度を算出し、各種適用許容応力度を用いて照査を行う計算機プログラムである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証(Verification)】</b> 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードを用いて算出した断面諸量及び応力が、構造力学公式集によって算出した断面諸量及び道路橋示方書によって算出した応力と一致していることを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b> 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本工事計画に本解析コードを使用することの妥当性は、前述の検証の中で確認している。</li> <li>・本工事計画における構造に適用する要素、応力解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li> </ul>

### 3. APOLLO SuperDesigner Section の解析手法について

#### 3.1 一般事項

本解析コードは、曲げねじり理論によって算出した断面諸量を用いて、垂直応力度・せん断応力度・ねじり応力度を算出し、各種適用許容応力度を用いて照査を行うプログラムである。

#### 3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

##### 断面形状

- ・基本断面形状は、RC 箱桁、鋼床版箱桁、鋼床版 I 桁に対応しているが、追加プログラムとして梯形断面等の任意断面の適用が可能。
- ・鋼床版のデッキプレートは重ね継ぎ手にも対応している。
- ・鋼床版の左右張り出し部と上フランジで材質、板厚を各々指定可能。
- ・鋼床版の縦リブは任意の位置に複数種類の断面の設定が可能。

##### 断面力

- ・3成分断面力、6成分断面力に対応している。
- ・鋼床版については架設系、完成系に対応している。

##### 計算方法その他

- ・せん断流理論を用いたせん断力の計算において、トラフリブは等価なプレートに換算して算出する。
- ・トラフリブが有効幅内かの判断は、トラフリブの中心位置が有効幅内に入っているかで判断する。
- ・板厚が 40 mm を超える場合には、以下の 2 通りの許容応力度算出方法が選択可能である。
  - ①道路橋示方書どおりの許容応力度を使用する。
  - ②40 mm 以下の板厚と同様の許容応力度算出式を使用する。(H 仕様)
- ・部材の寸法の押さえとして、板厚の逃げ方向を以下の 3 種類から選択が可能。
  - ①中心押さえ
  - ②部材の定義した方向の左側押さえ
  - ③部材の定義した方向の右側押さえ
- ・縦リブ断面として①板リブ、②バルブプレート、③トラフリブの 3 種類が選択可能。

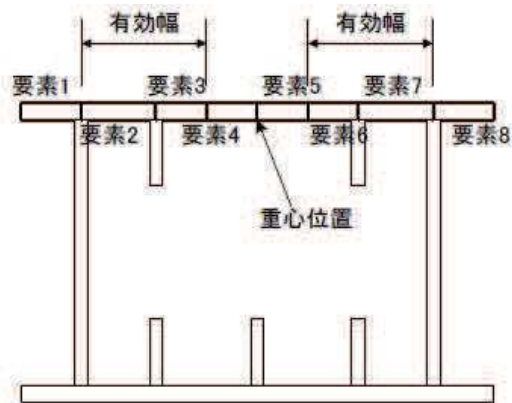
### 3.3 解析手法

#### 3.3.1 断面諸量の計算方法

小松氏の「曲げねじり理論」により算出する。

1つの部材（フランジや腹板）を、意味がある点（腹板取り付け点、重心位置、有効幅位置等）で分割したものを「要素」とし、計算は1要素毎に計算し、その合計で求める。

上フランジの要素分割例



#### (1) 断面積及び重心位置

$$\Sigma A = \Sigma B_j \times T_j \quad \text{ここに } j: \text{各要素番号 } B: \text{幅 } T: \text{厚さ}$$

曲率がある場合、

$$A'_j = A_j / \rho_j \quad \text{ここに } \rho_j: \text{各要素の中心点より平面曲率中心までの距離}$$

重心位置（曲率がある場合）

$$R_0 = \Sigma A_j / \Sigma A'_j$$

$$X_c = R_0 - R$$

$$Y_c = (\Sigma (A'_j \times Y'_j)) \times R_0 / \Sigma A_j$$

ここに  $Y'_j$ : 基準軸から各要素の中心までの距離（Y方向の距離）

#### (2) 剛度

$$I_x = R_0 \times \Sigma [(I_x'_j + A_j \times Y_j^2) / \rho_j]$$

$$I_y = R_0 \times \Sigma [(I_y'_j + A_j \times X_j^2) / \rho_j]$$

$$I_{xy} = R_0 \times \Sigma [(I_{xy}'_j + A_j \times Y_j \times X_j) / \rho_j]$$

ここに  $I_x', I_y', I_{xy}'$ : 要素自身の断面二次モーメントと相乗モーメント

$X_j, Y_j$ : 要素の重心位置座標

$I_{xy}$  は相乗曲げモーメントを考慮する場合にのみ有効となる。

(3) ねじり関数, ねじり抵抗

1室の場合

・ねじり関数

$$q_k = 1/R_0 \times \Sigma [(X_e \times Y_s - X_s \times Y_e) j / \rho_j^2] / \Sigma [B_j / (\rho_j^3 \times T_j)]$$

ここに  $\Sigma$  : 閉断面を構成する要素の総和

$R_0$  : 重心位置曲率半径

$\rho_j$  : 要素の重心位置の曲率半径

$(X_s \times Y_s), (X_e \times Y_e)$  : 要素の終始点座標

$B_j$  : 要素の長さ

$T_j$  : 要素の板厚

・ねじり抵抗

$$J = R_0^2 \times q_k \times \Sigma [(X_e \times Y_s - X_s \times Y_e) j / \rho_j^2] + \Sigma B_j \times T_j / 3$$

閉断面区間

開断面区間

3.3.2 応力度の計算方法

(1) 垂直応力度

軸力  $N$  による応力度

$$\sigma_n = (R / \rho) \times (N / A)$$

面内曲げモーメント  $M_x$  による応力度

$$\sigma_{mx} = (R_i / \rho) \times (I_{y_i} \times y_i - I_{xy_i} \times x_i) \times M_x / (I_{x_i} \times I_{y_i} - I_{xy_i}^2)$$

面外曲げモーメント  $M_y$  による応力度

$$\sigma_{my} = (R_o / \rho) \times (I_{x_o} \times x_o - I_{xy_o} \times y_o) \times M_y / (I_{x_o} \times I_{y_o} - I_{xy_o}^2)$$

ここに,  $\rho$  : 照査位置の曲率半径

	総断面	面内有効断面	面外有効断面
重心位置 (x 軸)	$x_c$	$x_{c_i}$	$x_{c_o}$
重心位置 (y 軸)	$y_c$	$y_{c_i}$	$y_{c_o}$
重心位置から照査位置までの距離	$x$	$x_i$	$x_o$
	$y$	$y_i$	$y_o$
重心位置の曲率半径	$R$	$R_i$	$R_o$
断面積	$A$	$A_i$	$A_o$
x 軸回りの断面二次モーメント	$I_x$	$I_{x_i}$	$I_{x_o}$
y 軸回りの断面二次モーメント	$I_y$	$I_{y_i}$	$I_{y_o}$
相乗モーメント	$I_{xy}$	$I_{xy_i}$	$I_{xy_o}$
ねじり定数	$J$	---	---



(2) せん断応力度

$$\tau = S_x \times qb / T_j$$

(3) ねじり応力度

$$\tau = T \times (J_1 / J) / (2 \times F \times T_j) \text{ 閉断面}$$

$$\tau = 3 \times T \times (J_2 / J) / (B_j \times T_j) \text{ 開断面}$$

### 3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-1 に示す。

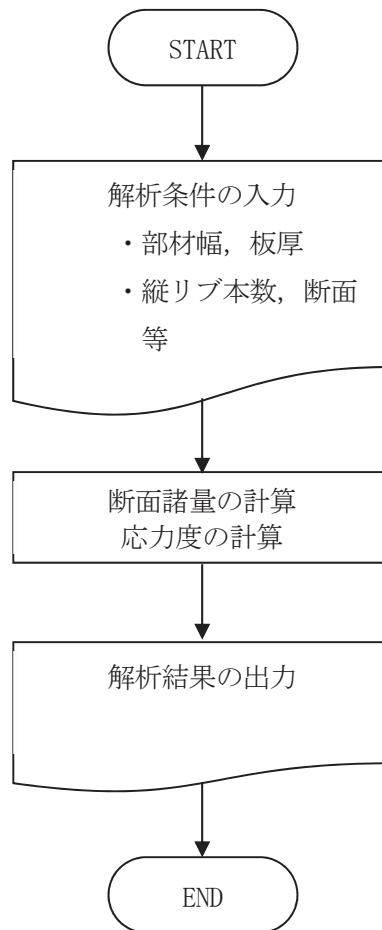


図 3-1 解析フローチャート

### 3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

#### (1) 構造力学公式集により算出したねじり剛性と Section の出力結果による比較検証

図 3-2 に示す断面において構造力学公式集によりねじり剛性を算出し、プログラムの出力結果と比較する。

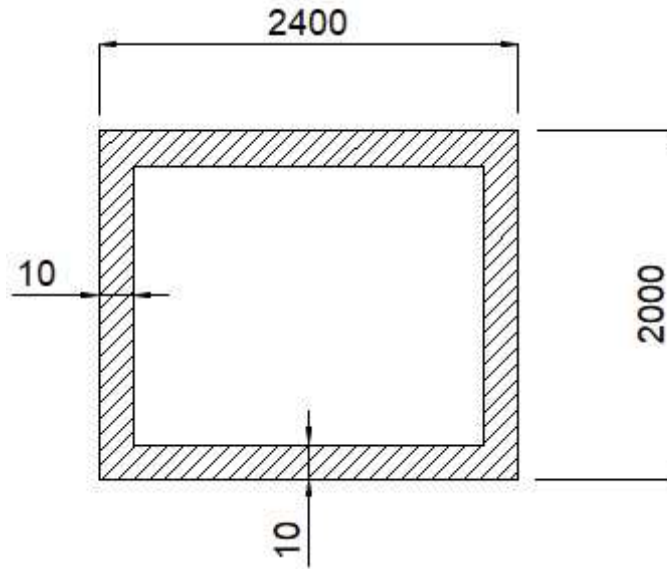


図 3-2 ねじり剛性検討断面

構造力学公式集により算出したねじり剛性

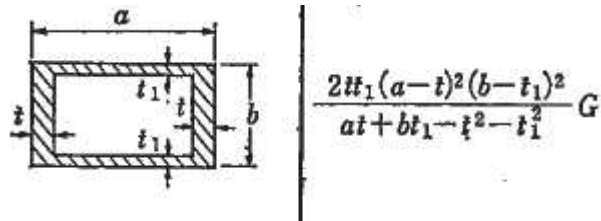


図 3-3 ねじり剛性 算出式 (構造力学公式集 P. 46 より引用)

$a = 2400 \text{ (mm)}$  ,  $b = 2000 \text{ (mm)}$  ,  $t_1 = 10 \text{ (mm)}$  ,  $t = 10 \text{ (mm)}$  より,

$$\begin{aligned}
 J &= \{2 \times 10 \times 10 \times (2400 - 10)^2 \times (2000 - 10)^2\} / (2400 \times 10 + 2000 \times 10 - 10^2 - 10^2) \\
 &= 103289895936 \text{ (mm}^4\text{)} \\
 &= 10328990 \text{ (cm}^4\text{)}
 \end{aligned}$$

APOLLO SuperDesigner Section 出力結果

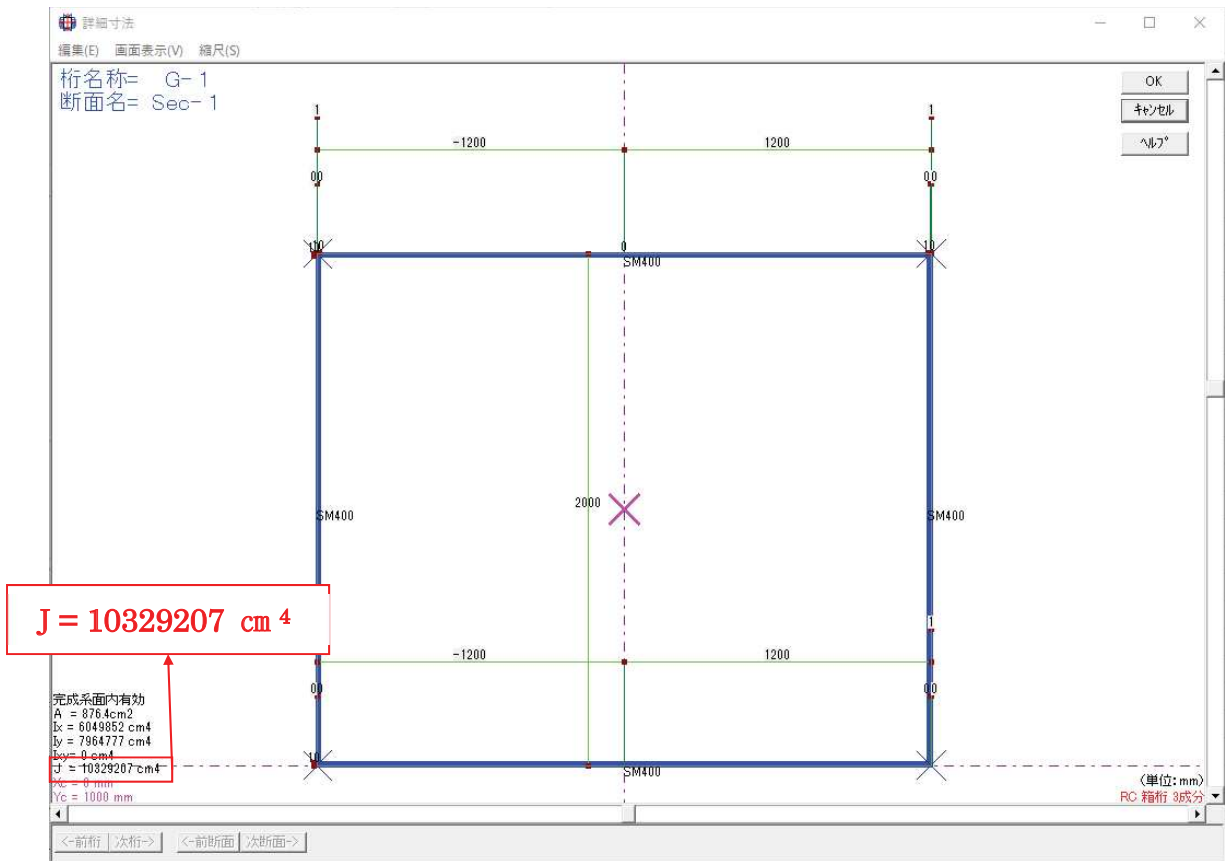


図 3-4 Section 算出結果 (ねじり剛性)

表 3-1 計算例と解析結果の比較

	計算例	解析結果	比率
	構造力学公式集	APOLLO SuperDesigner Section	
ねじれ剛性 J (cm <sup>4</sup> )	10328990	10329207	99.998%

構造力学公式集の計算結果と APOLLO SuperDesigner Section の出力結果が良く一致していることを確認しており、ねじれ剛性の算出が正しく実行できていることが確認できる。

(2) 構造力学公式集により算出した断面二次モーメント及び道路橋示方書により算出した応力と APOLLO SuperDesigner Section の出力結果による比較検証

図 3-5 に示す断面において構造力学公式集により断面諸量及び道路橋示方書により応力を算出し、プログラムの出力結果と比較する。

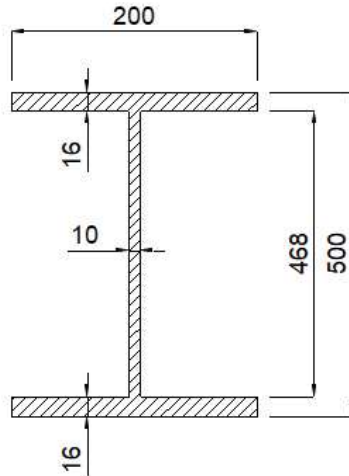


図 3-5 断面諸量・応力検討断面

構造力学公式集により算出した応力

・断面二次モーメントの算出

**2.1.2 断面二次モーメント，断面相乗モーメント，断面二次半径，断面係数**

図 2.1 において次式で与えられる量を，それぞれ  $y, z$  軸まわりの断面二次モーメントという。

$$I_{yy} = \int_A z^2 dA, \quad I_{zz} = \int_A y^2 dA \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

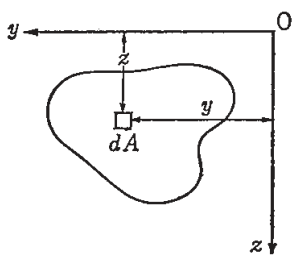


図 2.1 部材の断面

図 3-6 断面二次モーメント算出式（構造力学公式集 P. 43 より引用）

- ・垂直応力度，せん断応力度，合成応力度の算出

### 11.2.2 曲げモーメントによる垂直応力度

曲げモーメントによる垂直応力度は，式 (11.2.1) で算出する。ただし，引張フランジにボルトの孔がある場合には，式 (11.2.1) による引張フランジ応力度に (引張フランジ総断面積 / 引張フランジ純断面積) を乗じる。

$$\sigma_b = \frac{M}{I} y \quad \dots\dots\dots (11.2.1)$$

ここに， $\sigma_b$  : 曲げモーメントによる垂直応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$M$  : 曲げモーメント (N・mm)

$I$  : 総断面の中立軸のまわりの断面二次モーメント (mm<sup>4</sup>)

$y$  : 中立軸から着目点までの距離 (mm)

図 3-7 垂直応力度算出式 (道路橋示方書Ⅱ P. 304 より引用)

### 11.2.3 腹板の曲げに伴うせん断応力度

腹板の曲げに伴うせん断応力度は，式 (11.2.2) で算出してもよい。

$$\tau_b = \frac{S}{A_w} \quad \dots\dots\dots (11.2.2)$$

ここに， $\tau_b$  : 曲げに伴うせん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$S$  : 曲げに伴うせん断力 (N)

$A_w$  : 腹板の総断面積 (mm<sup>2</sup>)

図 3-8 せん断応力度算出式 (道路橋示方書Ⅱ P. 305 より引用)

### 11.2.5 合成応力度の照査

(1) 曲げモーメント及び曲げモーメントに伴うせん断力のみが作用する断面で，垂直応力度及び曲げに伴うせん断応力度がともに 3.2.1 に規定する許容応力度の 45% を超える場合は，曲げモーメント及び曲げに伴うせん断力がそれぞれ最大となる荷重状態について，式 (11.2.3) を満たさなければならない。

$$\left. \begin{aligned} & \left( \frac{\sigma_b}{\sigma_a} \right)^2 + \left( \frac{\tau_b}{\tau_a} \right)^2 \leq 1.2 \\ & \sigma_b \leq \sigma_a \\ & \tau_b \leq \tau_a \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (11.2.3)$$

図 3-9 合成応力度算出式 (道路橋示方書Ⅱ P. 307 より引用)

$$\begin{aligned}
M &= 50 \text{ kN} \cdot \text{m} \\
&= 50000000 \text{ N} \cdot \text{mm} \\
S &= 250 \text{ kN} \\
&= 250000 \text{ N}
\end{aligned}$$

の断面力が断面に発生しているとして応力計算を行う。

$$\begin{aligned}
I &= 200 \times 500^3 / 12 - (200-10) \times (500-16 \times 2)^3 / 12 \\
&= 460365493.3 \text{ mm}^4 \\
&= 46037 \text{ cm}^4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A &= 200 \times 16 \times 2 + 468 \times 10 \\
&= 11080 \text{ mm}^2 \\
&= 110.8 \text{ cm}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_w &= 468 \times 10 \\
&= 4680 \text{ mm}^2 \\
&= 46.8 \text{ cm}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_u \text{ UFLG} &= -500 / 2 = -250 \text{ mm} , \quad y_l \text{ LFIG} = 500 / 2 = 250 \text{ mm} \\
y_u \text{ WEB} &= -500 / 2 + 16 = -234 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_u \text{ UFLG} &= 50000000 \times -250 / 460365493 = -27.15 \approx -27.2 \text{ N/mm}^2 \\
\sigma_l \text{ LFIG} &= 50000000 \times 250 / 460365493 = 27.15 \approx 27.2 \text{ N/mm}^2 \\
\sigma_u \text{ WEB} &= 50000000 \times -234 / 460365493 = -25.41 \approx -25.4 \text{ N/mm}^2 \\
\tau &= 250000 / 4680 = 53.41 \approx 53.4 \text{ N/mm}^2 \\
\kappa &= ( -25.4 / 140 )^2 + ( 53.4 / 80 )^2 = 0.478 \approx 0.48
\end{aligned}$$

APOLLO SuperDesigner Section 出力結果

桁名称= G-1  
断面名= Sec-1

完成断面内有効  
A = 110.8cm<sup>2</sup>  
I = 46037 cm<sup>4</sup>  
I<sub>y</sub> = 2187 cm<sup>4</sup>  
I<sub>z</sub> = 0 cm<sup>4</sup>  
J = 70 cm<sup>4</sup>  
X<sub>c</sub> = 0 mm  
Y<sub>c</sub> = 234 mm

※「ケース名」は半角で18文字まで

(単位:kN, kN・m)

桁名称	断面名	完成架設	番号	ケース名	N	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	S <sub>x</sub>	S <sub>y</sub>	T
G-1	Sec-1	完成	1	Case-1	0	50	0	0	250	0

応力度詳細

編集(E)

断面力ケースの選択  
 全ケース毎  
 最大ケース  
 σ最大ケース  
 τ最大ケース  
 合成最大ケース

応力度出力点の選択  
 1部材の最大点  
 節点+端点+重心  
 節点(両側)+端点+重心  
 全ての点

桁、断面指定  
桁断面番号 1 | 0

応力度の小数部表示桁数 1

表示 閉じる

桁名	断面名	部材名	ケース名	σ <sub>n</sub>	σ <sub>mx</sub>	Σσ	σ <sub>a</sub>	τ <sub>sy</sub>	τ <sub>a</sub>	合成
G-1	Sec-1	UFLG	---	0	-27.2	-27.2	140	0	80	0.04
		WEB	---	0	-25.4	-25.4	140	53.4	80	0.48
		LFLG	---	0	27.2	27.2	140	0	80	0.04

図 3-10 Section 算出結果 (断面諸量・応力)



表 3-2 計算例と解析結果の比較

		計算例	解析結果	比率
		構造力学公式集	APOLLO SuperDesigner Section	
断面諸量	断面二次モーメント $I$ (cm <sup>4</sup> )	46037	46037	100%
	断面積 $A$ (cm <sup>2</sup> )	110.8	110.8	100%
応力	垂直応力 $\sigma_u$ UFLG (N/mm <sup>2</sup> )	-27.2	-27.2	100%
	垂直応力 $\sigma_l$ LFLG (N/mm <sup>2</sup> )	27.2	27.2	100%
	垂直応力 $\sigma_u$ WEB (N/mm <sup>2</sup> )	-25.4	-25.4	100%
	せん断応力 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	53.4	53.4	100%
	合成応力度 $\kappa$	0.48	0.48	100%

構造力学公式集の計算結果と APOLLO SuperDesigner Section の出力結果が一致していることを確認しており、応力の算出が正しく実行できていることが確認できる。

(3) 使用内容に対する妥当性

鋼製遮水壁（鋼桁）の設計に本解析コードによって算出したねじれ剛性、断面二次モーメント及び応力を使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・ 検証の内容のとおり、構造力学公式集によって算出したねじれ剛性、断面二次モーメント及び道路橋示方書によって算出した応力と比較検証を行っていることから、解析の目的に照らして本工事計画の解析に使用することは妥当である。