

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-22-0065_改0
提出年月日	2021年2月25日

## VI-5-58 計算機プログラム（解析コード）の概要

- ・ APOLLO Analyzer

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. 解析手法.....	4
3.1 一般事項.....	4
3.2 解析コードの特徴.....	4
3.3 解析理論.....	5
3.4 解析フローチャート.....	6
3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation) .....	7

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 Analyzer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. 2. 81. 0. 0
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. 2. 81. 0. 0

2. 解析コードの概要

項目	コード名
項目	APOLLO Analyzer
使用目的	鋼部材の2次元骨組構造解析（断面力算出）
開発機関	株式会社横河技術情報
開発時期	1998年
使用したバージョン	ver. 2.81.0.0
コードの概要	<p>APOLLO Analyzer（以下「本解析コード」という。）は、骨組みで構成された任意の構造に対して任意の荷重を載荷し断面力及び変位を算出する汎用計算機プログラムである。適用モデル（主には要素で構成）に対して、静的解析、動的解析の機能を有している。</p> <p>橋梁だけでなく様々な土木構造物の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証(Verification)】</b></p> <p>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>・単純はりモデルに対して本解析コードを用いて算出した断面力及び変位が、構造力学公式集を用いて算出した断面力及び変位と一致することを確認している。</li> <li>・格子モデルに対して、本解析コードで算出した断面力及び変位が、日本原子力発電株式会社東海第二発電所の防潮堤（鋼製防護壁）の3次元骨組みモデルにて使用実績のあるTDAPⅢ（ver3.08）で同様のモデルを解析した際に算出される断面力及び変位と一致す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></p> <p>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. 解析手法

#### 3.1 一般事項

APOLLO Analyzer は、任意の骨組み構造に対して構造解析を行うプログラムである。

#### 3.2 解析コードの特徴

APOLLO Analyzer の主な特徴を以下に示す。

モデル定義から解析実行まで、すべて操作はウィンドウ上にモデルを確認しながら行うことができる。また、ウィンドウ表示したモデル図・変位図・断面力図はDXF形式の他、ビットマップ形式でも保存でき、ワープロ文書に貼り付ける等、後編集が可能である。

##### ・モデルの定義

解析モデルを、構造節点・構造要素にて定義する。座標を入力し、モデルを定義すると、ウィンドウ上にモデルが描画され、描画されたモデルの任意の節点・要素をマウスでクリックすると節点番号・要素番号が表示される等、モデルのエラーチェックを視覚的に行うことが可能である。

##### ・荷重の定義

本システムでは固定荷重、影響線荷重、活荷重荷重を1つのモデルで複数定義することができる。影響線荷重、活荷重荷重を行なう場合、あらかじめ横断線の定義を行う。入力画面で荷重を入力し、載荷する荷重データをマウスでクリックすると、ウィンドウ上でモデルに載荷する荷重を視覚的に確認することができる。また、これらの荷重を基本ケースとして容易に組合せ編集を行なうことができる。

##### ・解析結果の出力・図化

解析結果として以下の3つを出力することができる。

##### a) 変形図・断面力図

変形図、断面力図は定義した荷重毎、成分毎に出力することが可能である。構造要素の定義で、要素ブロックを定義してあれば、特定のブロックのみの変形・断面力を表示させることもできる。

##### b) 主桁変位・断面力グラフ

主桁の変位と断面力を複数の荷重ケース、複数の成分について重ね書きして出力することができる。

##### c) 解析結果リスト

解析結果を成果品として保存することができる。保存するデータの種類として、テキストデータ (CSV形式・TXT形式) , RTF形式データ (MS-WORD) , XLS形式データ (MS-EXCEL) の選択をすることができ、必要な形式にデータ保存することができる。

### 3.3 解析理論

APOLLO Analyzer は構造解析システムとして変位法を用いている。

変位法とは、

- ① 構造物に外力が働いた場合に生じる変位を求める。
- ② ①で求めた変位を用いて断面力を算出する。

外力と変位の関係式

$$\{F\} = [K] \times \{U\}$$

$\{F\}$  : 外力ベクトル (荷重ベクトル),  $[K]$  : 全体剛性マトリックス,  $\{U\}$  : 変位ベクトル

外力と全体剛性マトリックスの逆行列から変位ベクトルを求める。

$$\{U\} = [K]^{-1} \times \{F\}$$

$[K]^{-1}$  :  $[K]$  の逆行列

求めた変位ベクトルから要素座標系の変位ベクトルを求め、要素座標系の変位ベクトルと要素剛性マトリックスから断面力を求める。

$$\{f_e\} = [k_e] \times \{u_e\}$$

$\{f_e\}$  : 要素断面力ベクトル,  $[k_e]$  : 要素剛性マトリックス,  $\{u_e\}$  : 要素座標系での変位ベクトル

### 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。

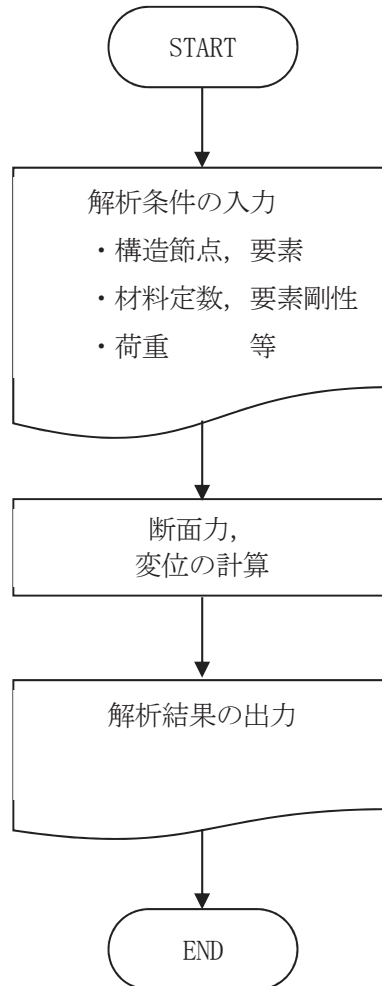


図3-1 解析フローチャート



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

#### (1) 単純梁モデルに対する比較検証

以下に示す断面諸元を持つ単純梁において図3-2に示すような荷重がそれぞれ作用した場合の支間中央部の断面力 (M, S) 及び変位 ( $\delta$ ) について図3-3及び図3-4に示す構造力学公式集を用いて算出し、プログラムの出力結果と比較する。

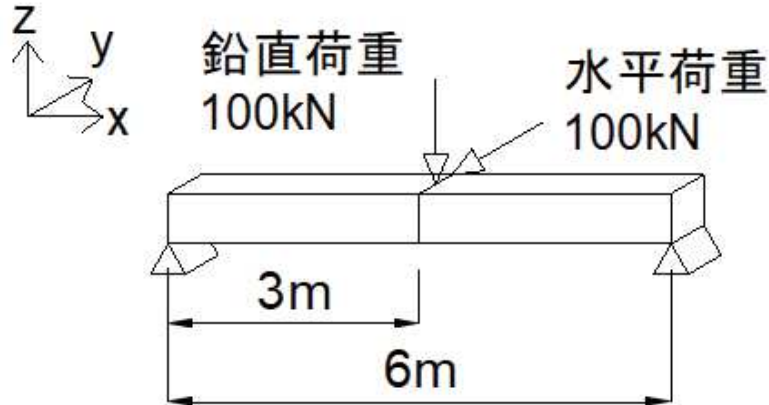


図 3-2 単純梁モデル

表3-1 単純梁の構造諸元

項目	諸元値
支間長 (= l)	6 (m)
ヤング率 (=E)	200000000 (kN/m <sup>2</sup> )
断面剛性 (=I <sub>y</sub> )	0.0002 (m <sup>4</sup> )
断面剛性 (=I <sub>z</sub> )	0.00007 (m <sup>4</sup> )
作用荷重 (=P)	100 (kN)

構造力学公式集により算出した断面力及び変位

荷重, たわみ曲線, せん断力図, 曲げモーメント図	反力 $R_A, R_B$ , せん断力 $Q$	曲げモーメント $M$
<p>1)</p>	$R_A = R_B = \frac{P}{2}$ $Q_1 = \frac{P}{2}$ $Q_2 = -\frac{P}{2}$	$M_1 = \frac{P}{2} x$ $M_2 = \frac{P}{2} x'$ $M_{max} = \frac{Pl}{4}, \left[ x = \frac{l}{2} \right]$

図3-3 せん断・曲げ算出式 (構造力学公式集P. 134より引用)

た わ み $w$	た わ み 角 $\theta$	支点たわみ角 $\theta_A, \theta_B$
$w_1 = \frac{Pl^3}{48EI} \left\{ 3\frac{x}{l} - 4\left(\frac{x}{l}\right)^3 \right\}$ $w_2 = \frac{Pl^3}{48EI} \left\{ 3\frac{x'}{l} - 4\left(\frac{x'}{l}\right)^3 \right\}$ $w_{\max} = \frac{Pl^3}{48EI}, \left[ x = \frac{l}{2} \right]$	$\theta_1 = -\frac{Pl^2}{16EI} \left\{ 1 - 4\left(\frac{x}{l}\right)^2 \right\}$ $\theta_2 = \frac{Pl^2}{16EI} \left\{ 1 - 4\left(\frac{x'}{l}\right)^2 \right\}$	$\theta_A = -\frac{Pl^2}{16EI}$ $\theta_B = -\theta_A$

図3-4 たわみ算出式 (構造力学公式集P. 135より引用)

(a) 水平荷重に対して

$$\begin{aligned}
 M &= P \times l / 4 \\
 &= 100 \times 6 / 4 \\
 &= 150 \text{ (kNm)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S &= P / 2 \\
 &= 100 / 2 \\
 &= \pm 50 \text{ (kN)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta &= P \times l^3 / (48 \times E \times I_z) \\
 &= 100 \times 6^3 / (48 \times 200000000 \times 0.00007) \\
 &= 0.03214 \dots \text{ (m)} \approx 32.14 \text{ (mm)}
 \end{aligned}$$

(b) 鉛直荷重に対して

$$\begin{aligned}
 M &= P \times l / 4 \\
 &= 100 \times 6 / 4 \\
 &= 150 \text{ (kNm)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S &= P / 2 \\
 &= 100 / 2 \\
 &= \pm 50 \text{ (kN)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta &= P \times l^3 / (48 \times E \times I_y) \\
 &= 100 \times 6^3 / (48 \times 200000000 \times 0.0002) \\
 &= 0.01125 \text{ (m)} = 11.25 \text{ (mm)}
 \end{aligned}$$

APOLLO Analyzerにより算出した断面力及び変位

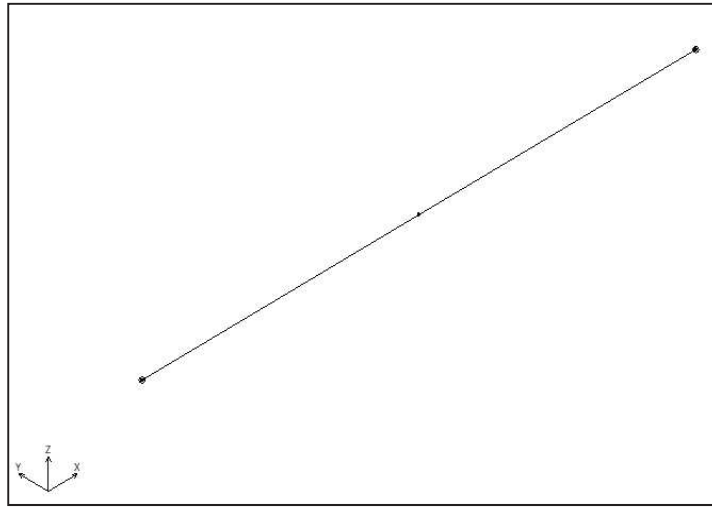


図3-5 単純梁 解析モデル

(a) 水平荷重載荷

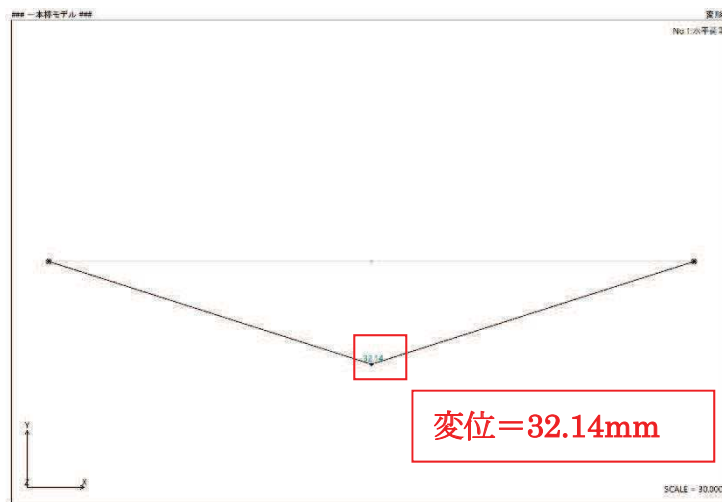


図3-6 APOLLO Analyzer解析結果(変位/水平荷重)

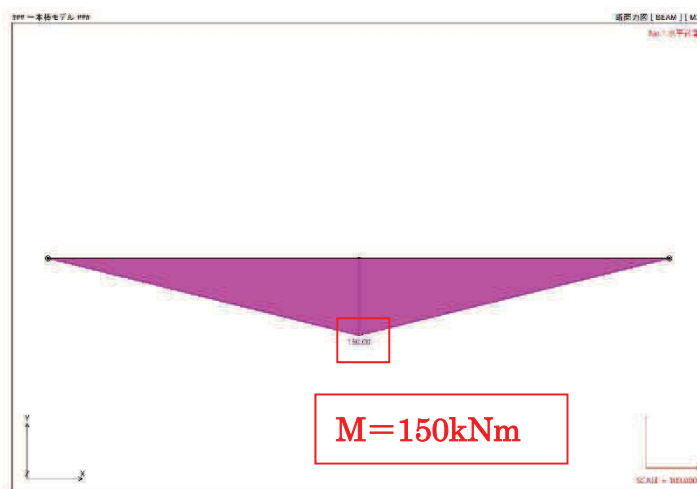


図3-7 APOLLO Analyzer解析結果(曲げモーメント/水平荷重)

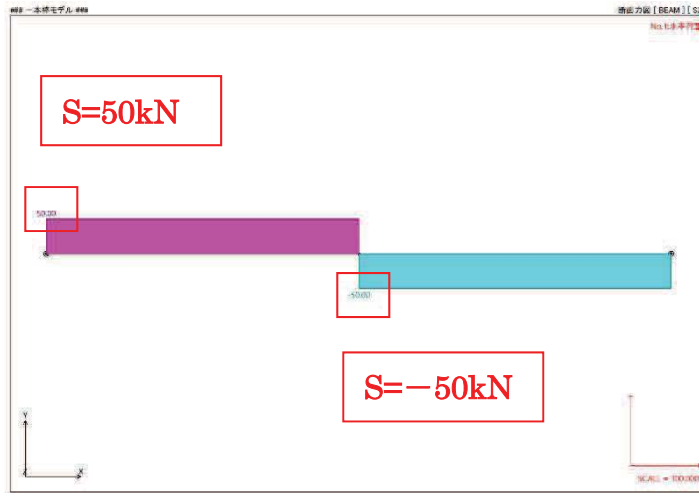


図3-8 APOLLO Analyzer解析結果(せん断力/水平荷重)

(b) 鉛直荷重載荷

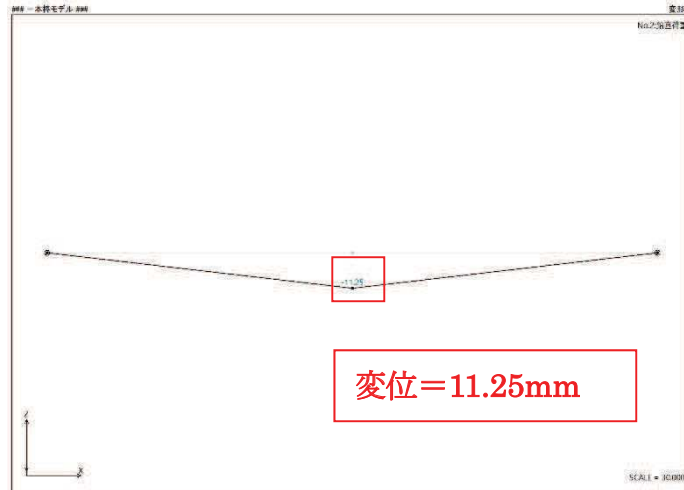


図3-9 APOLLO Analyzer解析結果(変位/鉛直荷重)

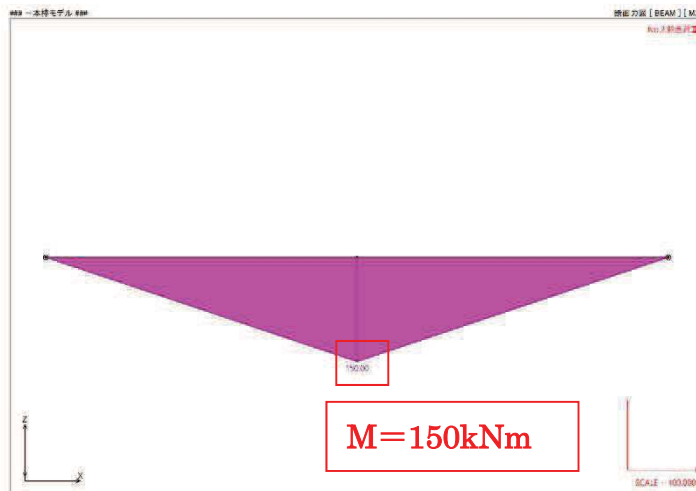


図3-10 APOLLO Analyzer解析結果(曲げモーメント/鉛直荷重)

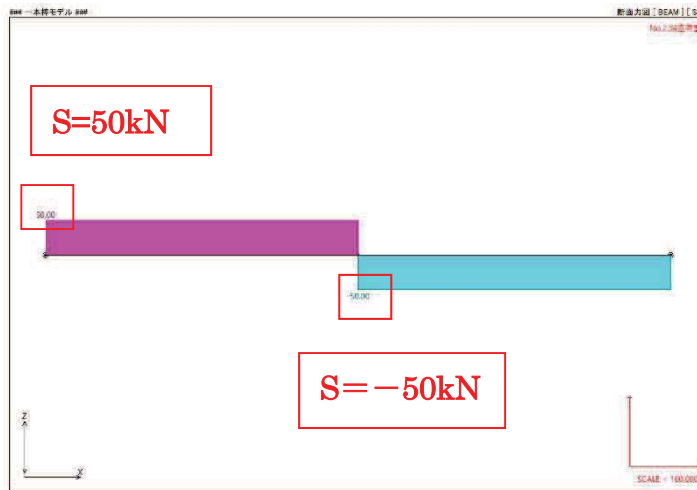


図3-11 APOLLO Analyzer解析結果(せん断力/鉛直荷重)

表3-2 計算例と解析結果の比較

		構造力学公式集	APOLLO Analyzer	比率
水平荷重	$\delta$ (mm)	32.14	32.14	100%
	M (kNm)	150	150	100%
	S (kN)	50	50	100%
鉛直荷重	$\delta$ (mm)	11.25	11.25	100%
	M (kNm)	150	150	100%
	S (kN)	50	50	100%

構造力学公式集を用いた計算結果とAPOLLO Analyzerの出力結果が一致していることを確認しており、断面力及び変位の算出が正しく実行できていることが確認できる。

(2) 格子モデルに対する比較検証

図3-12に示す格子モデルに図3-13及び図3-14に示す荷重がそれぞれ作用した場合の断面力 (M, S, N) 及び変位 ( $\delta$ ) をTDAPⅢとAPOLLO Analyzerで算出し比較する。

解析モデルの構造諸元を表3-3、境界条件を表3-4に示す。

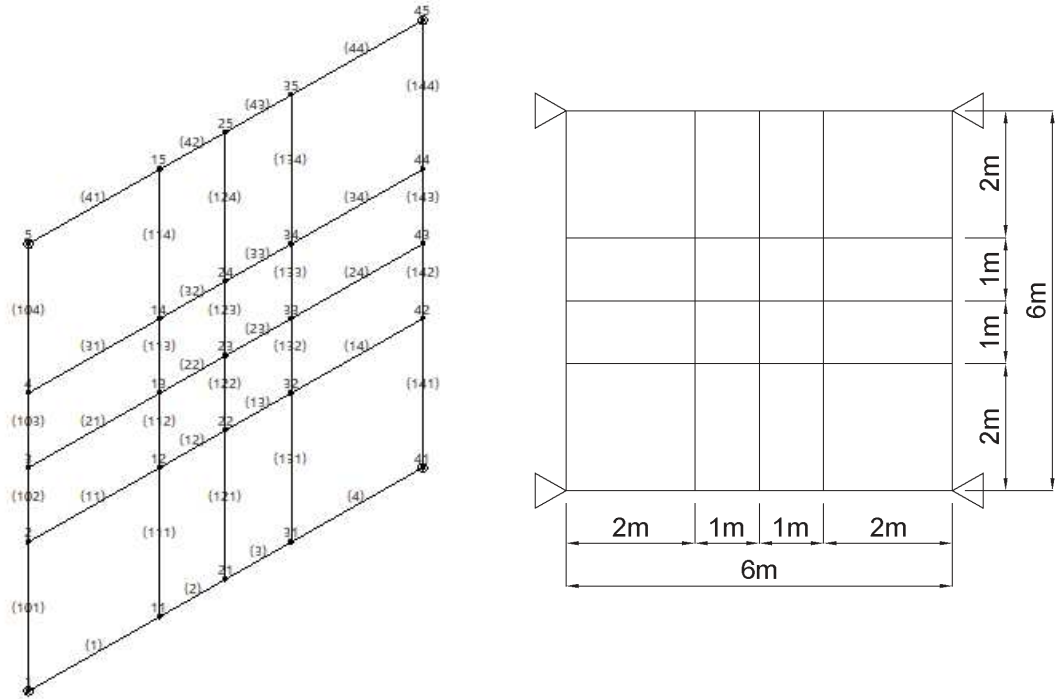


図3-12 比較検証モデル

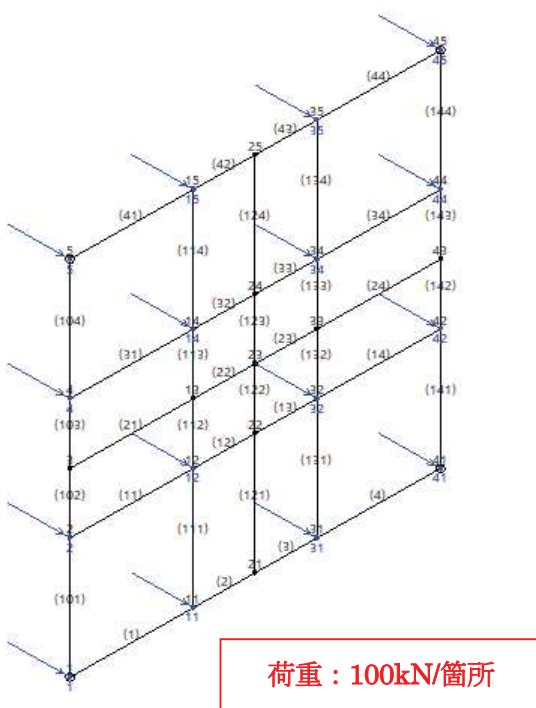


図3-13 水平荷重載荷

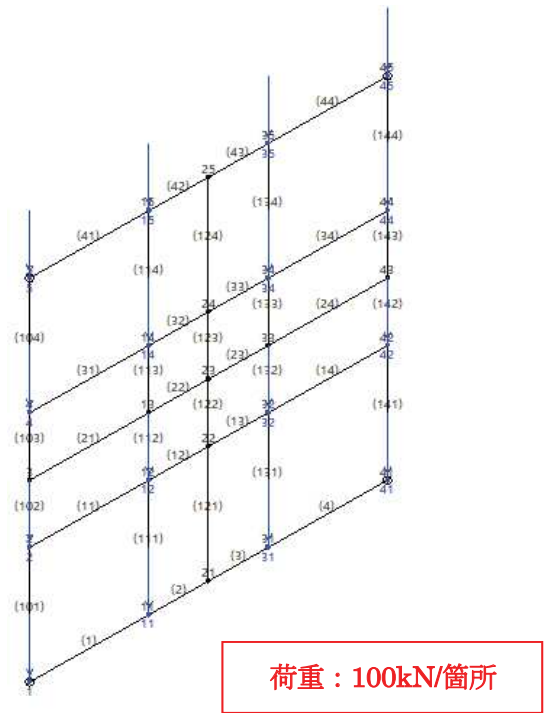


図3-14 鉛直荷重載荷

表3-3 解析モデル 構造諸元

項目		諸元値
支間長 (縦部材)		6 (m)
支間長 (横部材)		6 (m)
ヤング率 (=E)		200000000 (kN/m <sup>2</sup> )
断面剛性 (=I <sub>y</sub> =I <sub>z</sub> )	縦部材	0.0002 (m <sup>4</sup> )
	横部材	0.0002 (m <sup>4</sup> )
作用荷重 (=P)		100 (kN/箇所)

表3-4 解析モデル 境界条件

	x 方向	y 方向	z 方向
変形	拘束	拘束	拘束
回転	自由	自由	自由

TDAPIII により算出した断面力及び変位  
 (a) 水平荷重載荷

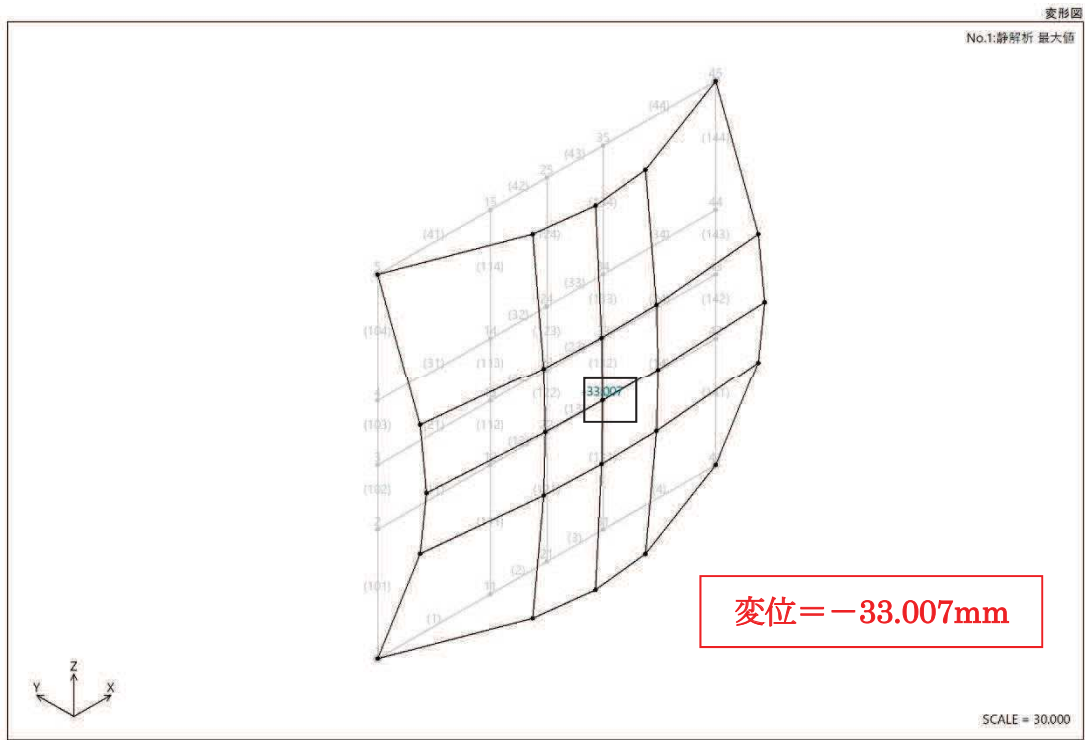


図3-15 TDAPIII 解析結果(変位/水平荷重)

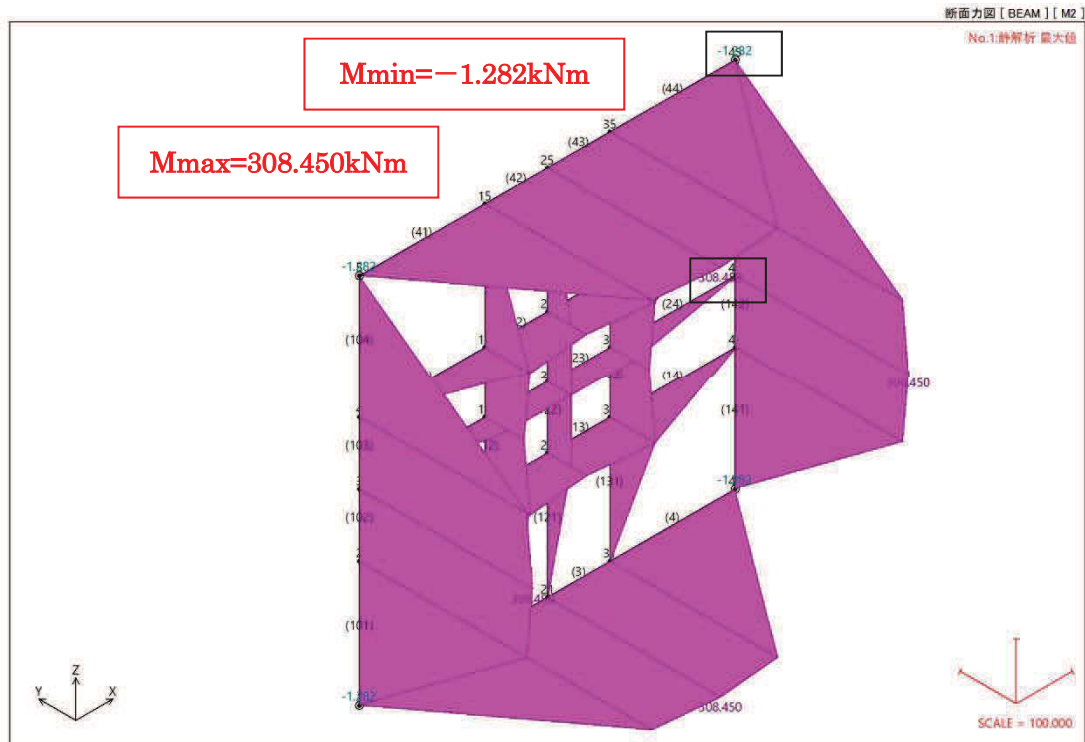


図3-16 TDAPIII 解析結果(曲げモーメント/水平荷重)



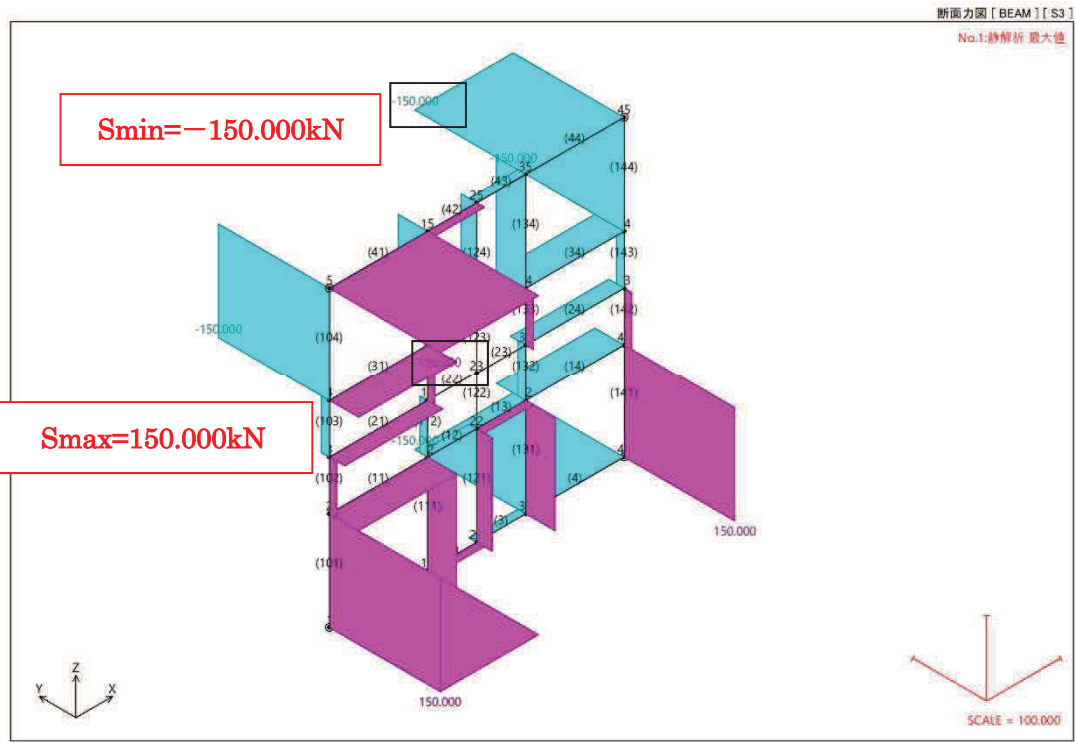


図3-17 TDAPIII 解析結果(せん断力/水平荷重)

(b) 鉛直荷重載荷

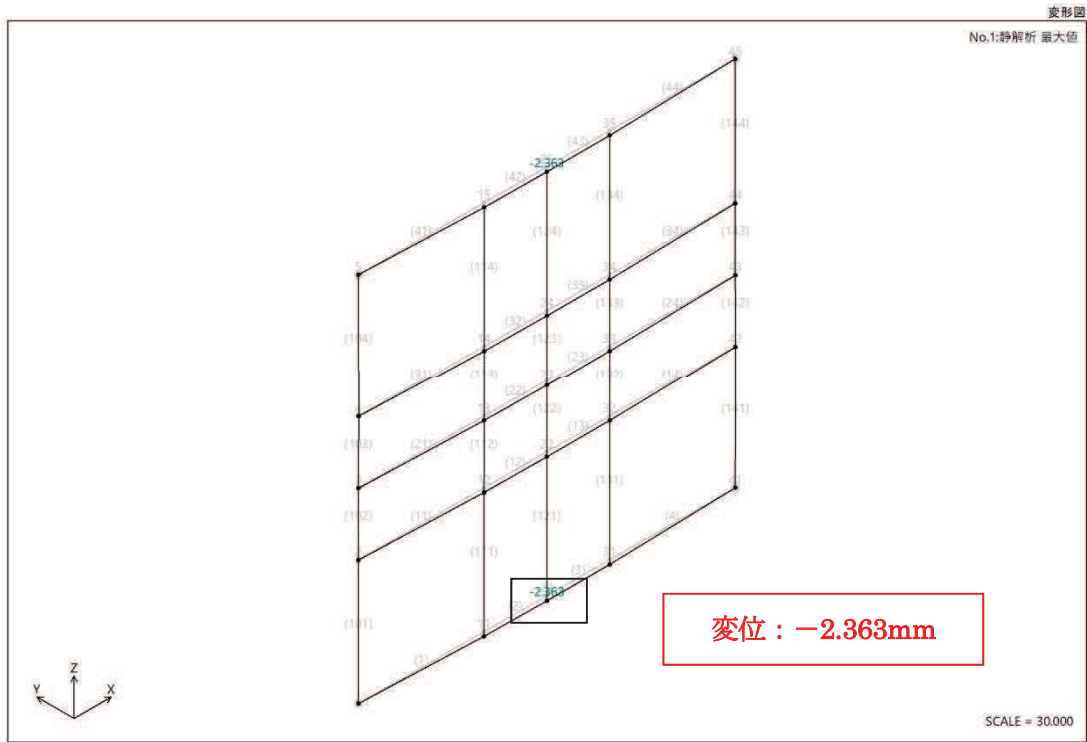


図3-18 TDAPIII 解析結果(変位/鉛直荷重)

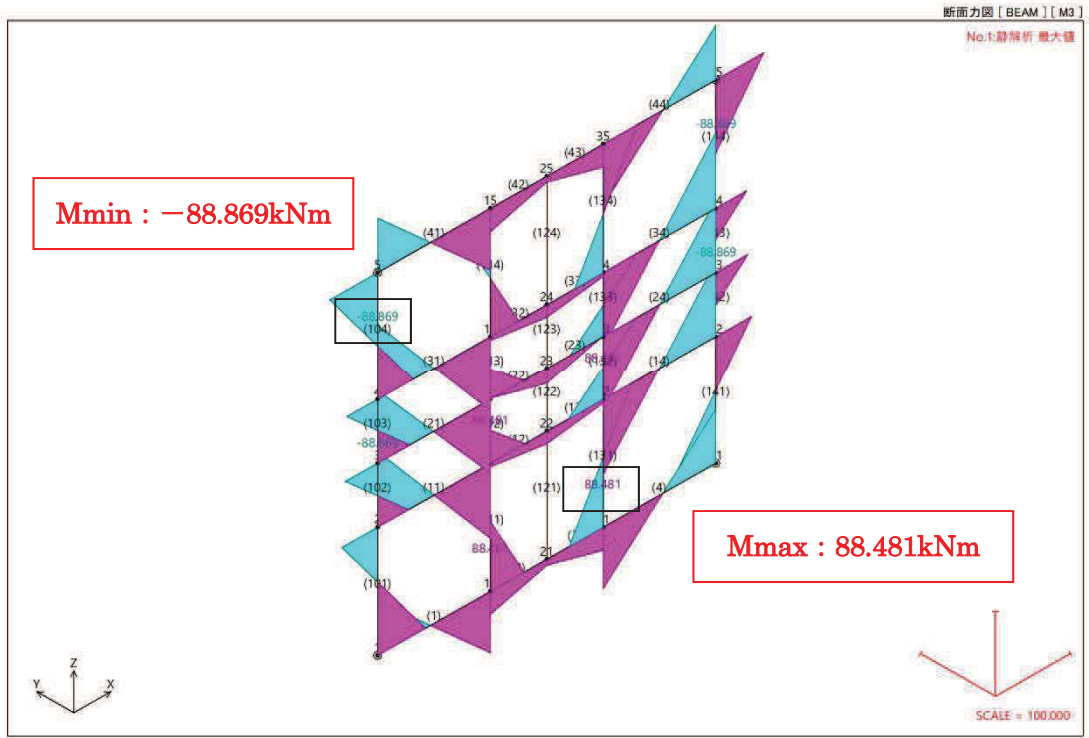


図3-19 TDAPIII 解析結果(曲げモーメント／鉛直荷重)

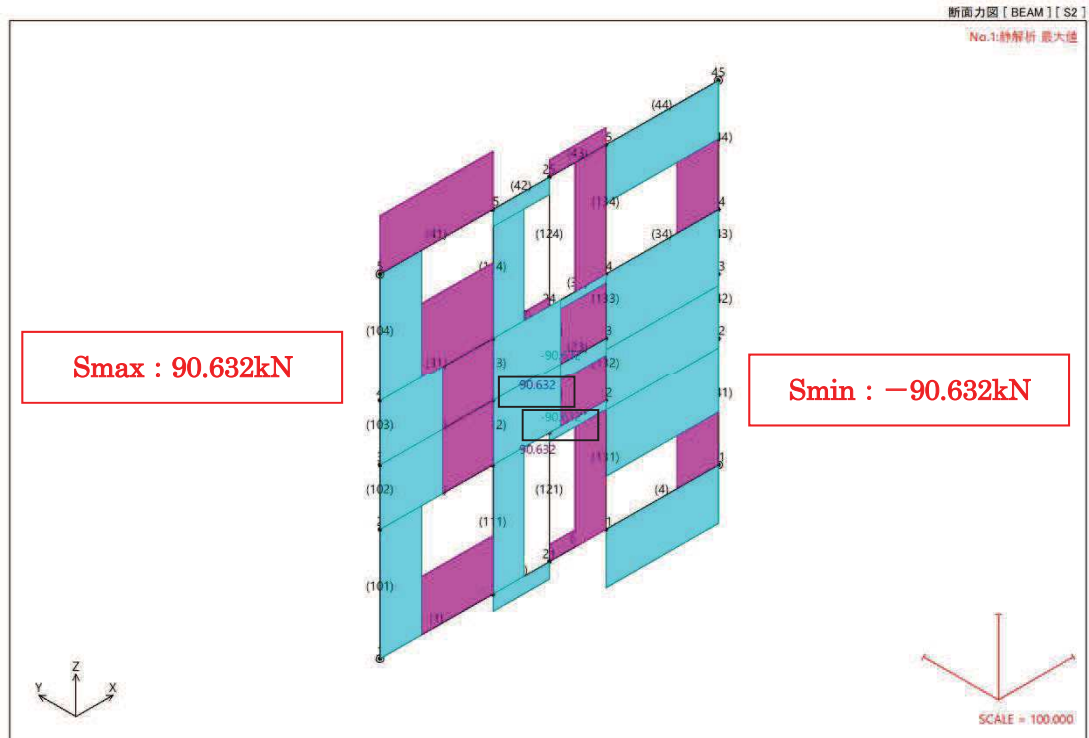


図3-20 TDAPIII 解析結果(せん断力／鉛直荷重)

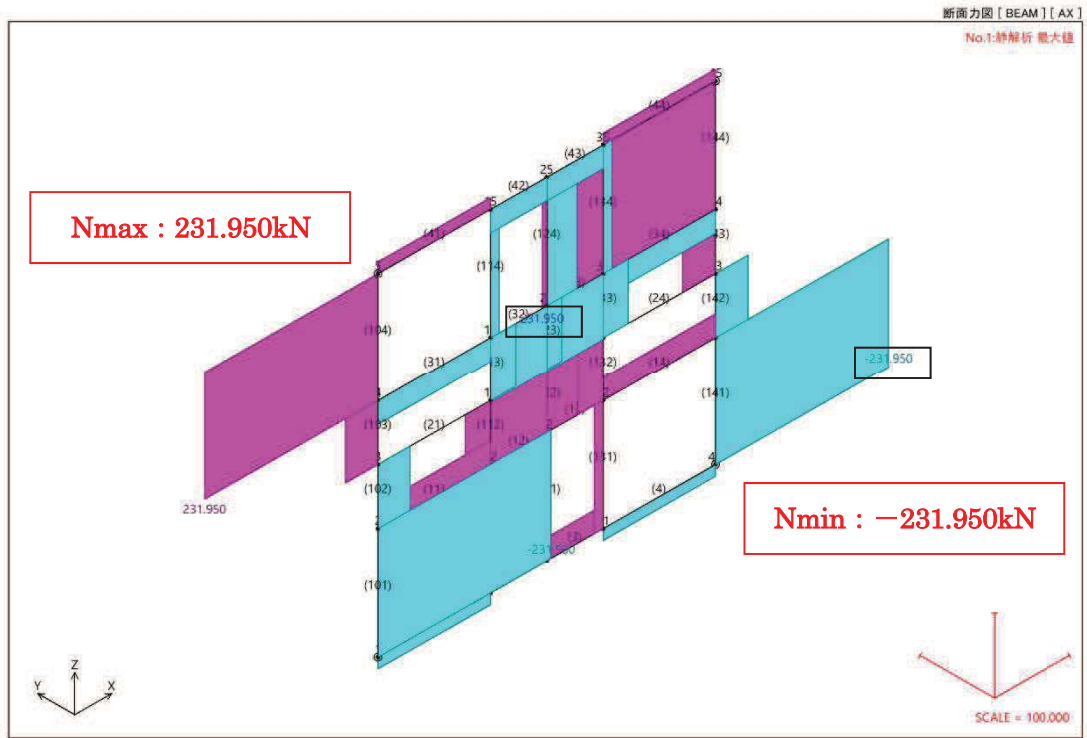


図3-21 TDAPIII 解析結果(軸力/鉛直荷重)

APOLLO Analyzerにより算出した断面力及び変位

(a) 水平荷重時

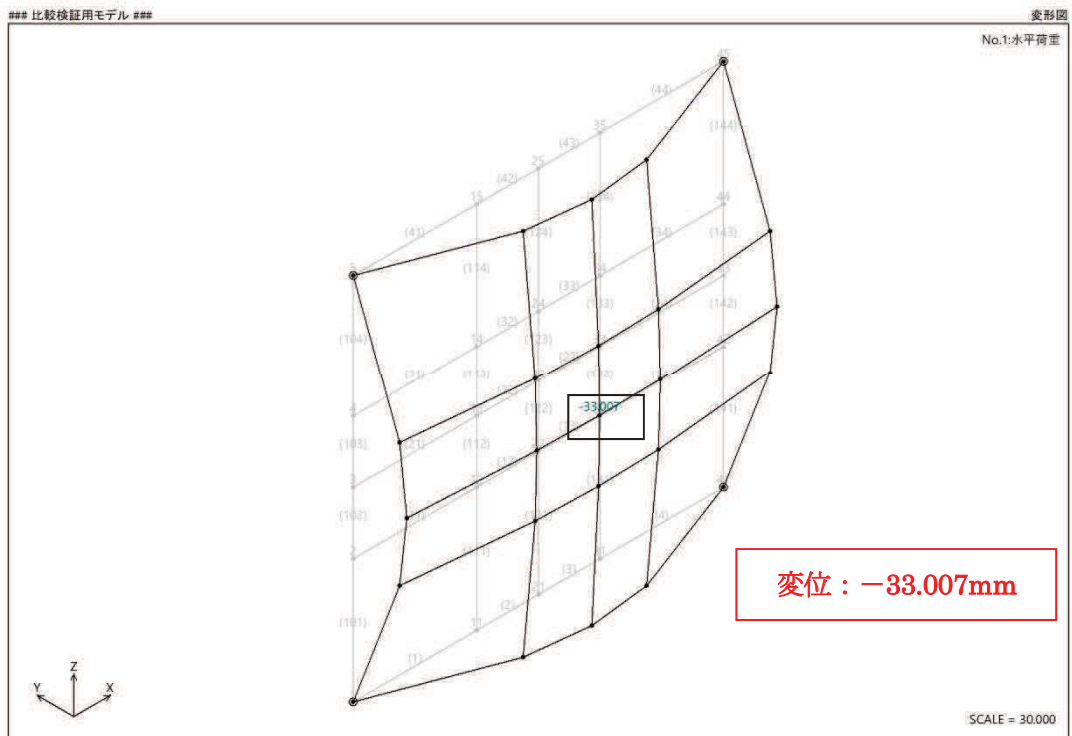


図3-22 APOLLO Analyzer 解析結果(変位/水平荷重)

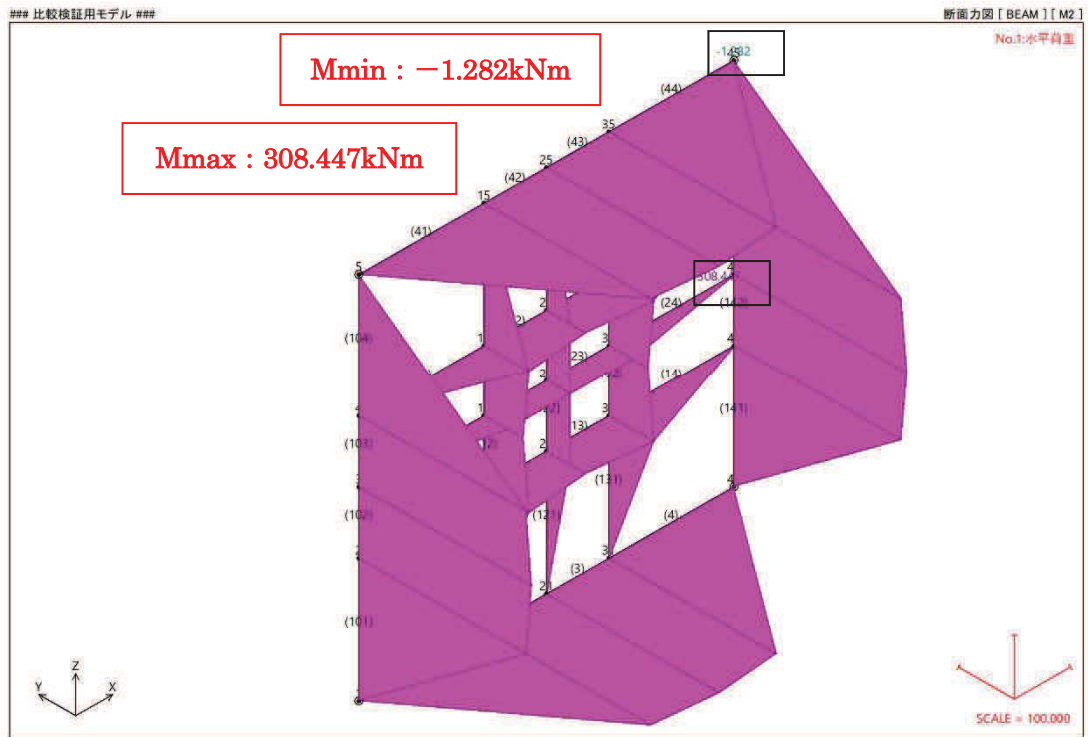


図3-23 APOLLO Analyzer 解析結果(曲げモーメント/水平荷重)

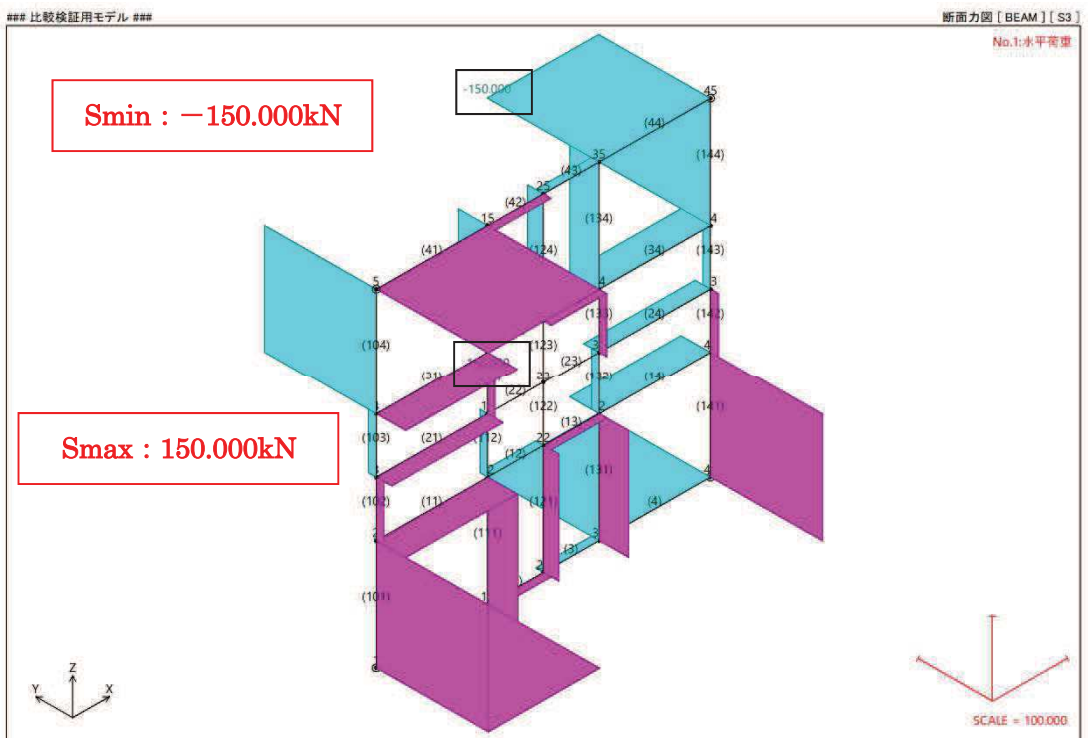


図3-24 APOLLO Analyzer 解析結果(せん断力/水平荷重)

(b) 鉛直荷重載荷時

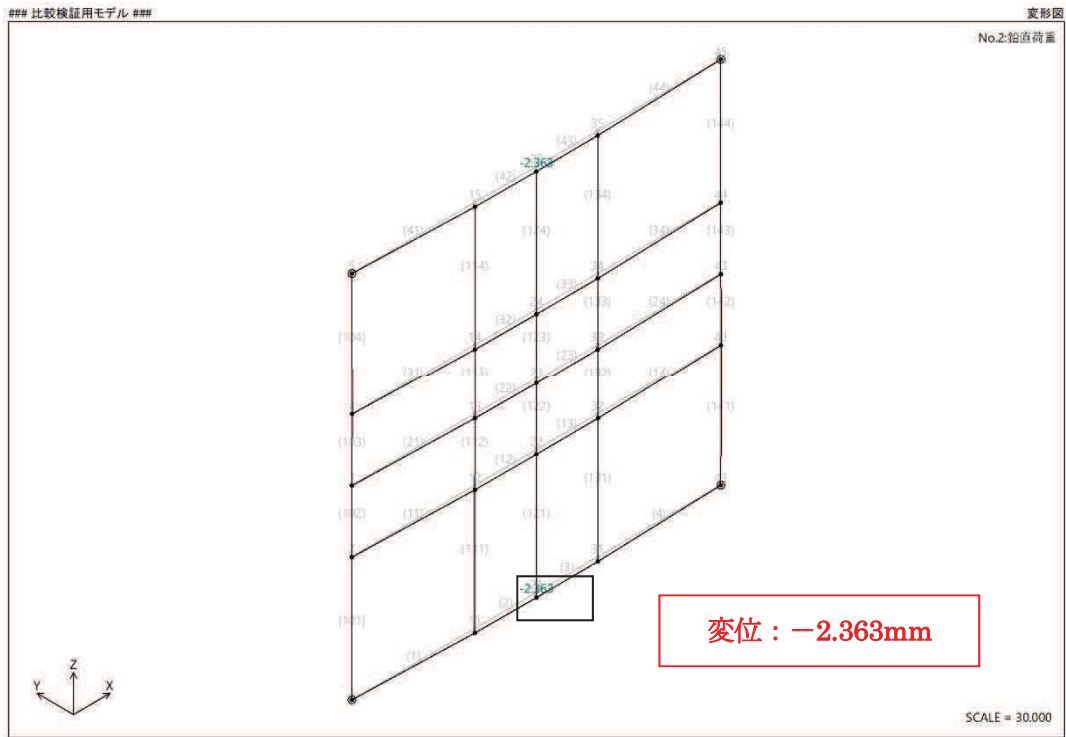


図3-25 APOLLO Analyzer 解析結果(変位/鉛直荷重)

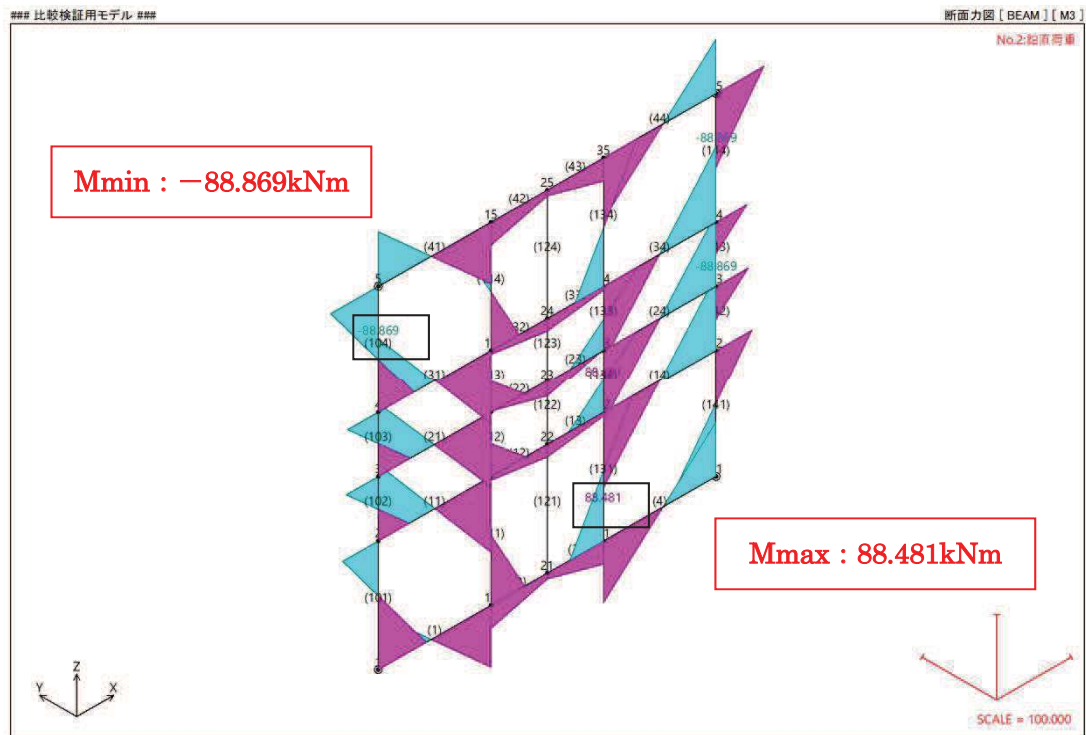


図3-26 APOLLO Analyzer 解析結果(曲げモーメント/鉛直荷重)

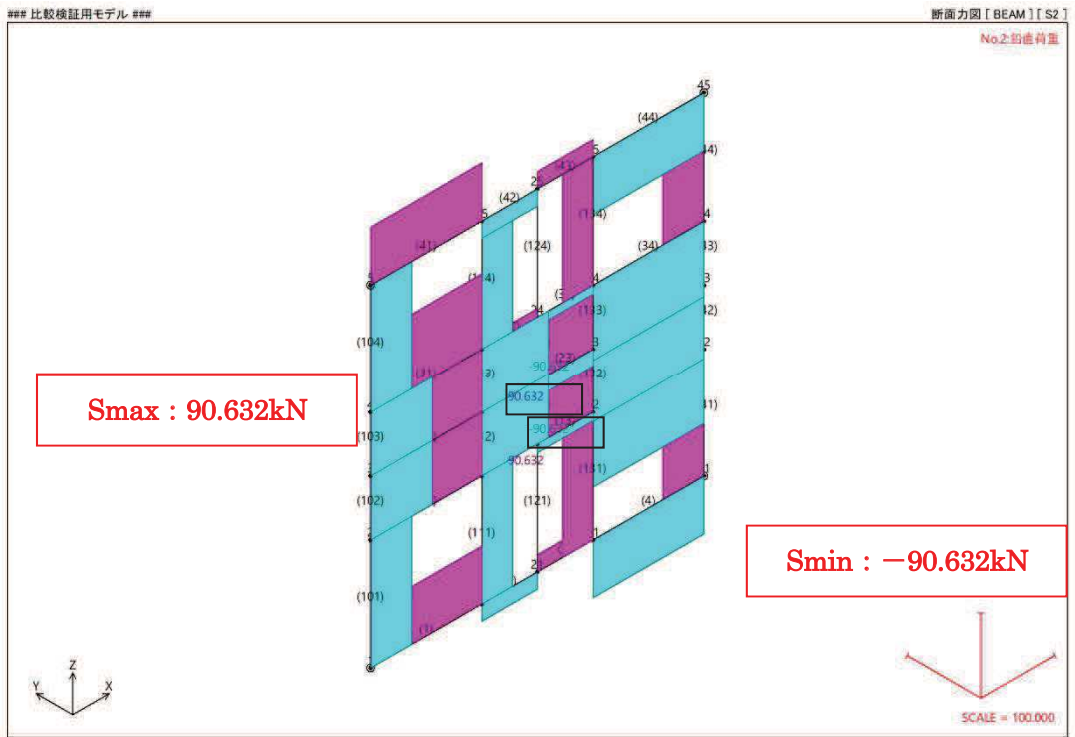


図3-27 APOLLO Analyzer 解析結果(せん断力／鉛直荷重)

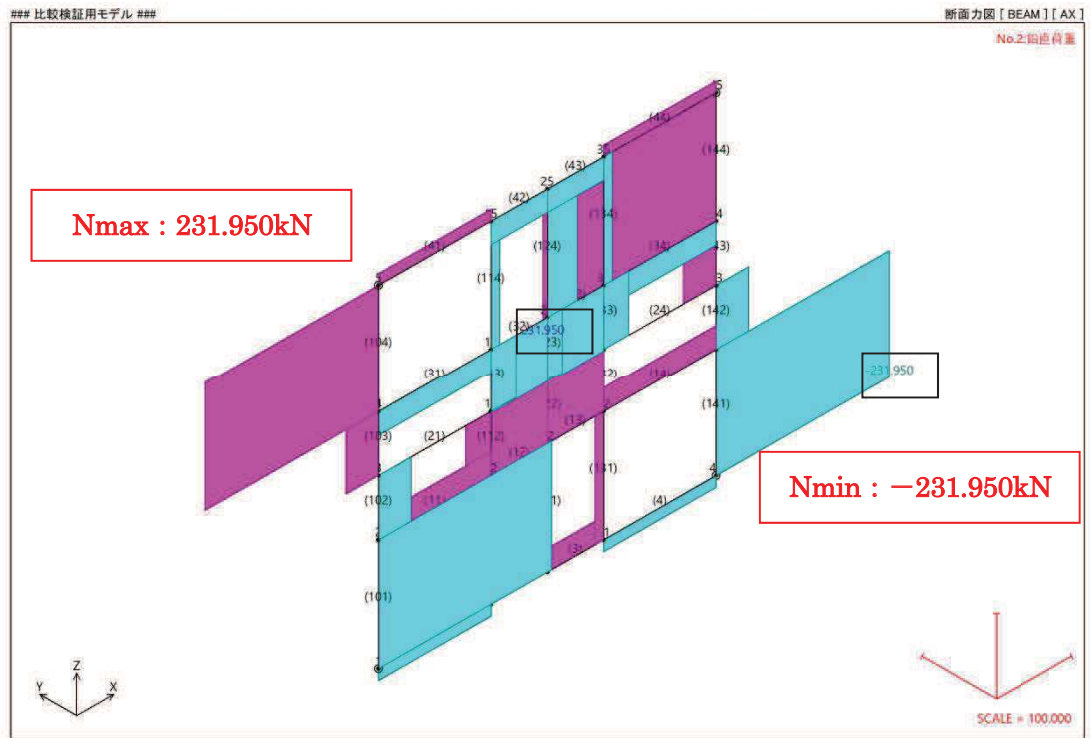


図3-28 APOLLO Analyzer 解析結果(軸力／鉛直荷重)

表3-5 TDAPⅢとAPOLLO Analyzerの解析結果の比較

		TDAP Ⅲ	APOLLO Analyzer	比率	
水平荷重	$\delta$ (mm)	-33.007	-33.007	100%	
	M (kNm)	Max	308.450	308.447	99.999%
		Min	-1.282	-1.282	100%
	S (kN)	Max	150.000	150.000	100%
		Min	-150.000	-150.000	100%
鉛直荷重	$\delta$ (mm)	-2.363	-2.363	100%	
	M (kNm)	Max	88.481	88.481	100%
		Min	-88.869	-88.869	100%
	S (kN)	Max	90.632	90.632	100%
		Min	-90.632	-90.632	100%
	N (kN)	Max	231.950	231.950	100%
		Min	-231.950	-231.950	100%

TDAPⅢとAPOLLO Analyzerの解析結果が良く一致していることを確認しており、断面力及び変位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APOLLO Analyzerによって算出した断面力及び変位を使用することは、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。

- ・検証内容のとおり、構造力学公式集によって算出した断面力及び変位との比較検証、TDAPⅢによって算出した断面力及び変位との比較検証を行っていることから、解析の目的に照らして使用することは妥当である。