

### 3.3.3 解析検討

#### (1) 矩形柱門型ラーメン橋脚

##### 1) 検討概要

ここでは、図-3.3.3 に示すような一般的な矩形柱門型ラーメン橋脚を対象とし、図中に示す隅角部に着目し行った。検討では隅角部の材質を SM490Y とし、断面に発生する応力がおよそ  $100\sim 200\text{N/mm}^2$  となるように載荷重を調整した結果、図中に示すようにはり中央部に集中荷重で  $4096\text{kN}$  を載荷した。部材の断面諸元を表-3.3.1 に示す。

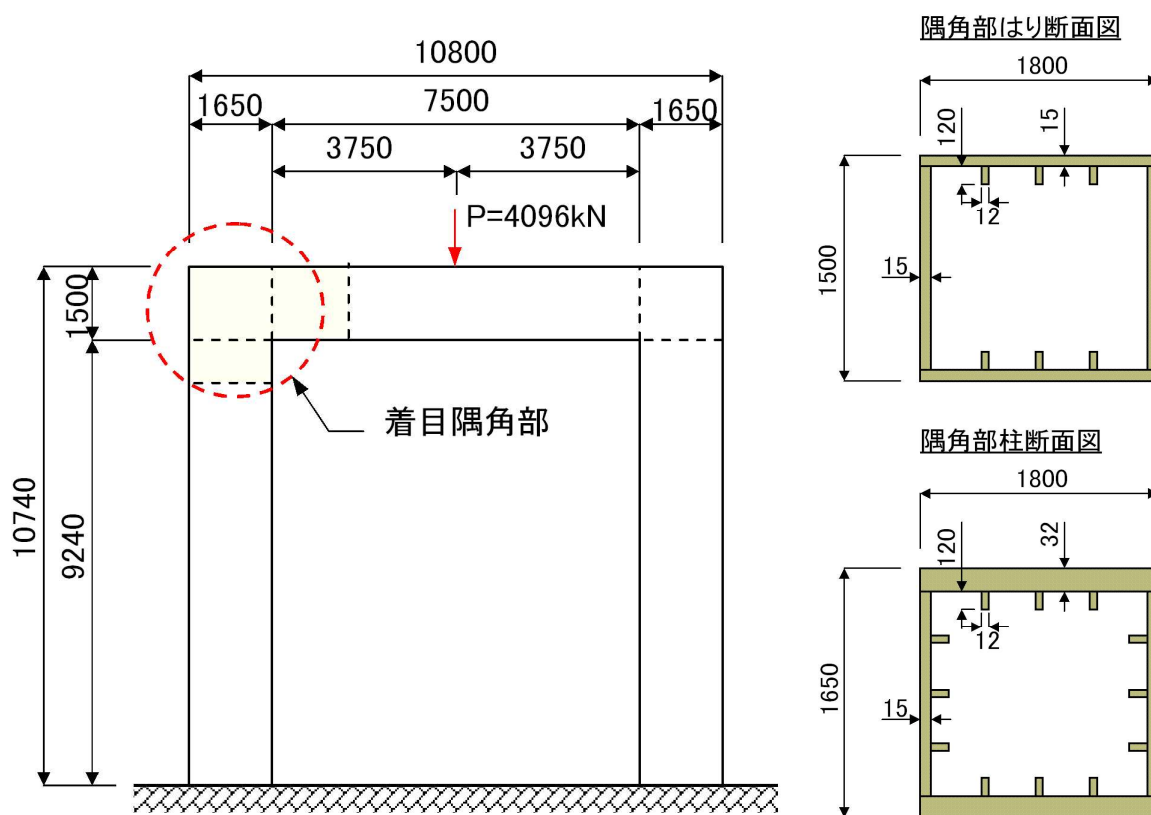


図-3.3.3 検討対象橋脚

表-3.3.1 部材断面諸元

部材	断面形状	フランジ		ウェブ		リブ		面積 A m <sup>2</sup>	断面2次 モーメント I m <sup>4</sup>
		幅 mm	厚 mm	幅 mm	厚 mm	幅 mm	厚 mm		
はり	隅角部	1800	15	1500	15	120	12	1.08E-01	4.35E-02
	一般部	1800	13	1500	12	120	12	9.14E-02	3.77E-02
柱	隅角部	1800	32	1650	15	120	12	1.82E-01	9.88E-02
	一般部	1800	25	1650	15	120	12	1.57E-01	8.04E-02

## 2) 解析モデル

以下に、各解析に用いた解析モデルの概要を示す。

### ① 奥村・石沢の方法

図-3.3.4 に対象橋脚の奥村・石沢の方法に用いた解析モデル図を示す。なお、解析モデルの構築は以下の要領で行った。

- ・ はりおよび柱は全てはり要素でモデル化する（縦リブも考慮）。
- ・ 隅角部領域に剛部材を設定する。
- ・ 平面モデルとする。（面外は考慮しない）

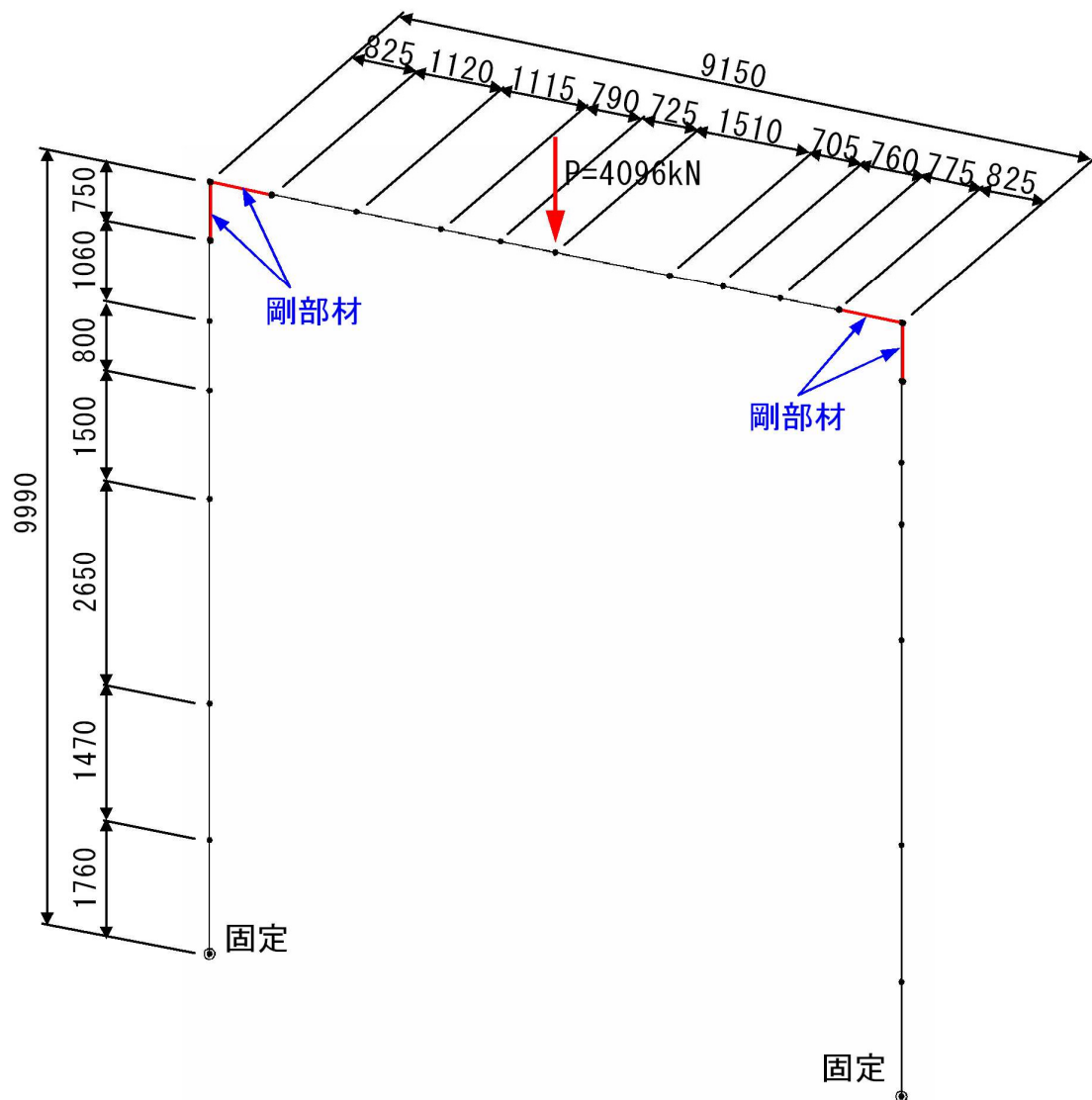


図-3.3.4 奥村・石沢の方法のモデル図

## ② 一定せん断流パネル解析

図-3.3.5 および図-3.3.6 に一定せん断流パネル解析に用いた解析モデルの概要および解析モデル図を示す。なお、解析モデルの構築は以下の要領で行った。

- ・ 着目する隅角部のフランジ，ウェブおよびダイヤフラムを一定せん断流パネル要素でモデル化する。  
（フランジ，ウェブは、板厚  $t_f$  と  $t_w$  の一定せん断流パネル要素に置き換える。（①，②））
- ・ 一定せん断流パネル要素の縁部材は、その分担幅分の板の断面積と曲げ剛性を断面剛性として考慮する。（縁部材③は、フランジ及びウェブの分担幅分の断面積，面外断面 2 次モーメントを考慮する。）  
（縁部材④は、フランジの分担幅分の断面積，面外断面 2 次モーメントを考慮する。）  
（縁部材⑤は、ウェブの分担幅分の断面積，面外断面 2 次モーメントを考慮する。）
- ・ はりおよび柱の縦リブについては対応するパネル要素のモデル化に含めて考慮する。  
（リブに関しては、縁部材に断面積、面外断面 2 次モーメントとして考慮する。）
- ・ 要素分割は、ウェブ、フランジとも縦リブ数程度を基本とし、隅角部付近のみ 50mm と細分化する。
- ・ ダイヤフラムのマンホールは無視する。
- ・ 隅角部から離れた一般部ははり要素よりモデル化し、一定せん断流パネル要素モデル部と仮想剛部材で接合する。

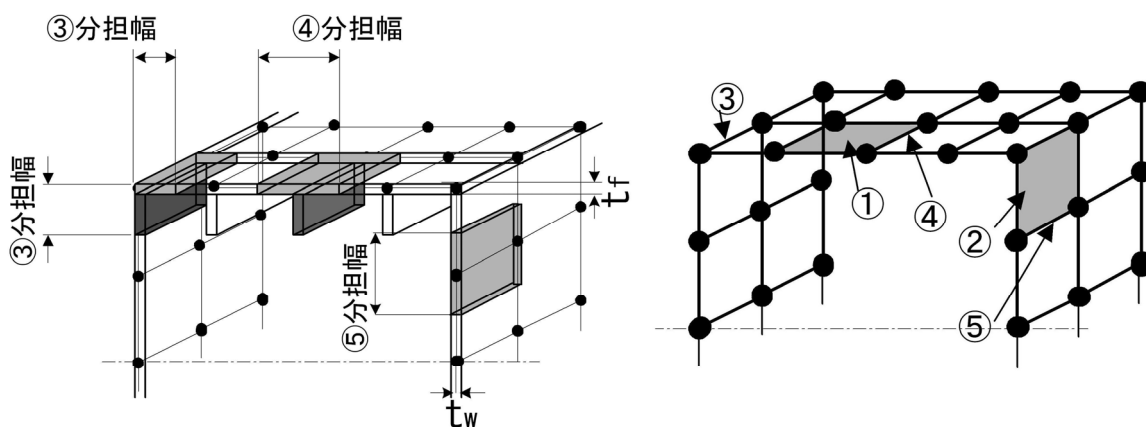


図-3.3.5 一定せん断流パネル要素のモデル化の方法



### ③ FEM 解析

図-3.3.7 に対象橋脚の FEM 解析モデル図を示す。なお、解析モデルの構築は以下の要領で行った。

- ・ 着目する隅角部のフランジ、ウェブ、縦リブおよびダイヤフラムはシェル要素によりモデル化する。
- ・ 応力集中が予測される部位は密な要素に分割する。(既往の研究報告などにより最小要素サイズは 25mm とした)
- ・ 隅角部以外の一般部のはりおよび柱は、はり要素にモデル化し隅角部とは仮想剛部材にて接合する。

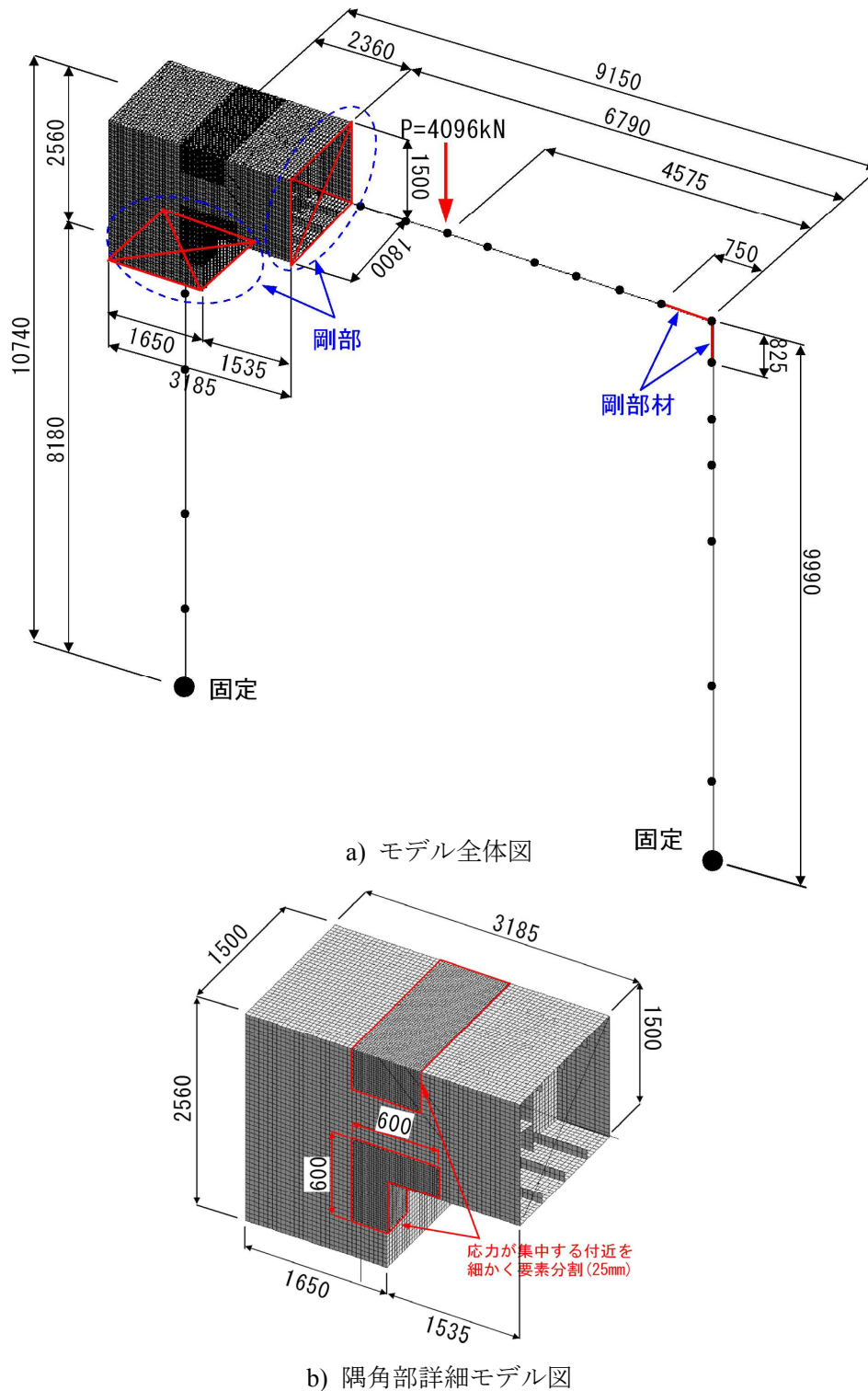


図-3.3.7 FEM 解析モデル図

### 3) 解析結果

矩形柱門型ラーメン橋脚における各々の解析による解析結果を、検証方向とした図-3.3.2 に示す3つ(はり, 柱, 面外)の方向・位置で応力比較を行った。以下に、その応力方向別に結果を示す。また、参考として図-3.3.15~図-3.3.18 に FEM 解析で得られた変形図および応力図を示す。

#### ① はり方向

図-3.3.8, 表-3.3.2 に各解析手法によるはり下フランジの応力算出結果を示す。各解析結果とも隅角部コーナー部付近でせん断遅れ現象などによる応力集中がみられる。さらに、一定せん断流パネル解析および FEM 解析では、フランジ内・外面の垂直応力から大きな板曲げ応力が発生しているのがわかる。隅角部コーナー部の発生応力は、FEM 解析と比較して奥村・石沢の方法で 20%程度小さく、一定せん断流パネル解析で 5%程度大きく、奥村・石沢の方法が他の解析手法との乖離が大きい。

また、フランジ全体の応力性状は、FEM 解析と比較して一定せん断流パネル解析では全体的に 10%程度の差に収まっており、フランジ全体の応力性状で捉えると十分に整合性がとれている。ただし、フランジ中央の数カ所で局部的に応力差異が生じている。これはリブのモデル化による影響と考えられるが、具体的には次節にて説明をする。

表-3.3.2 はり下フランジ応力比較

中立軸からの離れ mm	一定せん断流パネル解析		軸応力 N/mm <sup>2</sup>	FEM解析		軸応力 N/mm <sup>2</sup>	軸応力比
	垂直応力度			垂直応力度			
	内側 N/mm <sup>2</sup>	外側 N/mm <sup>2</sup>		内側 N/mm <sup>2</sup>	外側 N/mm <sup>2</sup>		
-900	-67.28	-168.23	-117.76	-58.26	-166.89	-112.58	1.05
-788	-82.20	-47.21	-64.71	-81.09	-32.30	-56.69	1.14
-675	-55.89	-25.90	-40.89	-53.25	-20.24	-36.75	1.11
-450	-33.26	-13.80	-23.53	-24.22	-35.81	-30.01	0.78
0	-25.13	-7.72	-16.43	-19.03	-20.27	-19.65	0.84
450	-33.26	-13.80	-23.53	-23.28	-34.54	-28.91	0.81
675	-55.89	-25.90	-40.89	-51.53	-19.83	-35.68	1.15
788	-82.20	-47.21	-64.71	-78.28	-31.17	-54.73	1.18
900	-67.28	-168.23	-117.76	-54.74	-160.72	-107.73	1.09

$$\text{軸応力} = ([\text{内側垂直応力度}] + [\text{外側垂直応力度}]) / 2$$

$$\text{軸応力比} = [\text{一定せん断流パネル解析軸応力}] / [\text{FEM解析軸応力}]$$

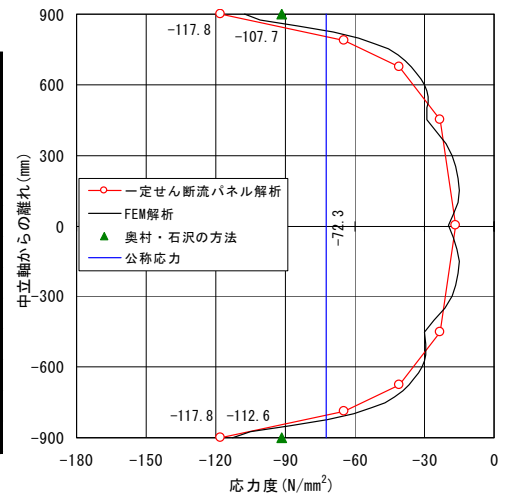


図-3.3.8 はり下フランジ軸応力分布比較

表-3.3.3 はり下フランジ最大応力比較

解析手法	公称応力 $\sigma_r$ N/mm <sup>2</sup>	軸応力度	
		最大応力 $\sigma_{max}$ N/mm <sup>2</sup>	応力比 $\sigma_{max} / \sigma_r$
奥村・石沢の方法	-72.30	-91.48	1.27
一定せん断流パネル解析		-117.76	1.63
FEM解析		-112.58	1.56

※公称応力～はり理論や骨組解析などによって求められる断面力に基づく応力(参考文献1より)

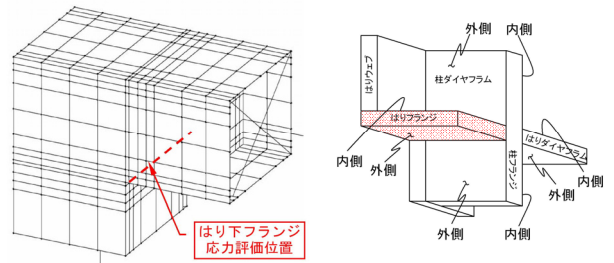


図-3.3.9 応力評価位置

## ② 柱方向

図-3.3.10、表-3.3.4 に各解析手法による柱フランジの応力算出結果を示す。各解析ともはり下フランジと同様な応力性状を示し、隅角部コーナー部付近でせん断遅れ現象や板曲げ応力による応力集中がみられる。隅角部コーナー部の発生応力は FEM 解析が最も大きく、FEM 解析に対して奥村・石沢の方法や一定せん断流パネル解析では 15~20%程度小さい値を示した。一方、フランジ全体の応力性状としては、一定せん断流パネル解析は FEM 解析と比較して隅角部コーナー部で小さいが、フランジ中央で 20%程度大きく、フランジ全体の応力性状で捉えると十分に整合性がとれている。

表-3.3.4 柱フランジ応力比較

中立軸からの離れ mm	一定せん断流パネル解析		軸応力 N/mm <sup>2</sup>	FEM解析		軸応力 N/mm <sup>2</sup>	軸応力比
	垂直応力度			垂直応力度			
	内側 N/mm <sup>2</sup>	外側 N/mm <sup>2</sup>		内側 N/mm <sup>2</sup>	外側 N/mm <sup>2</sup>		
-900	-55.14	-102.99	-79.06	-66.92	-115.74	-91.33	0.87
-788	-59.63	-46.81	-53.22	-69.33	-32.04	-50.68	1.05
-675	-46.90	-35.81	-41.36	-52.59	-24.39	-38.49	1.07
-450	-34.46	-28.59	-31.52	-35.12	-29.16	-32.14	0.98
0	-28.81	-24.07	-26.44	-26.17	-17.03	-21.60	1.22
450	-34.46	-28.59	-31.52	-34.21	-28.62	-31.41	1.00
675	-46.90	-35.81	-41.36	-51.68	-24.38	-38.03	1.09
788	-59.63	-46.81	-53.22	-68.26	-32.07	-50.16	1.06
900	-55.14	-102.99	-79.06	-66.73	-113.97	-90.35	0.88

$$\text{軸応力} = ([\text{内側垂直応力度}] + [\text{外側垂直応力度}]) / 2$$

$$\text{軸応力比} = [\text{一定せん断流パネル解析軸応力}] / [\text{FEM解析軸応力}]$$

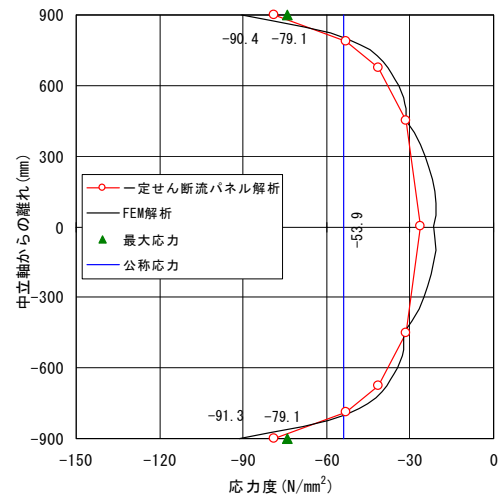


図-3.3.10 柱フランジ軸応力分布比較

表-3.3.5 柱フランジ最大応力比較

解析手法	公称応力 $\sigma_r$ N/mm <sup>2</sup>	軸応力度	
		最大応力 $\sigma_{max}$ N/mm <sup>2</sup>	応力比 $\sigma_{max} / \sigma_r$
奥村・石沢の方法	-53.93	-74.24	1.38
一定せん断流パネル解析		-79.06	1.47
FEM解析		-91.33	1.69

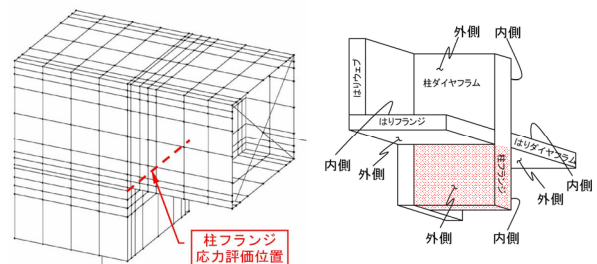
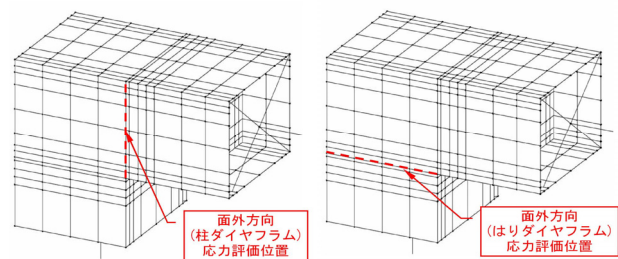


図-3.3.11 応力評価位置

## ③ 面外方向

面外方向は、図-3.3.12 に示すように柱ダイヤフラムおよびはりダイヤフラム位置で応力結果を示す。なお、奥村・石沢の方法では面外方向の解析が行えないことから、一定せん断流パネル解析と FEM 解析において比較を行った。



a) 柱ダイヤフラム      b) はりダイヤフラム

図-3.3.12 面外方向応力評価位置

(a) 柱ダイヤフラム

図-3.3.12, 表-3.3.6 に柱ダイヤフラムの応力算出結果を示す。柱ダイヤフラム全体の応力性状で捉えると十分整合がとれており、発生応力ははり下フランジなどに比べてかなり小さいので、応力値の違いはそれほど重要でないと思われる。ただし、ダイヤフラム端部で応力差異が若干生じている。これは、解析手法ごとのモデル化や応力出力方法の違いによる影響と考えられる。具体的には次節にて説明をする。

表-3.3.6 柱ダイヤフラム応力比較

隅角部から距離 mm	一定せん断流パネル解析		軸応力	FEM解析		軸応力	軸応力比
	垂直応力度			垂直応力度			
	内側 N/mm <sup>2</sup>	外側 N/mm <sup>2</sup>		内側 N/mm <sup>2</sup>	外側 N/mm <sup>2</sup>		
1500	4.64	4.56	4.60	-4.91	2.94	-0.98	-4.69
1406	-0.05	-0.06	-0.06	1.46	0.32	0.89	-0.06
1313	0.67	0.66	0.67	1.39	-0.01	0.69	0.96
1000	0.34	0.34	0.34	0.95	-0.41	0.27	1.28
750	0.14	0.14	0.14	0.58	-0.77	-0.10	-1.45
500	0.13	0.13	0.13	0.46	-0.82	-0.18	-0.72
188	0.11	0.10	0.11	0.63	-0.04	0.30	0.36
50	-2.68	-2.68	-2.68	-11.60	9.76	-0.92	2.91
0	-10.37	-10.48	-10.42	-29.83	14.70	-7.57	1.38

軸応力 = ([内側垂直応力度]+[外側垂直応力度])/2

軸応力比 = [一定せん断流パネル解析軸応力度]/[FEM解析軸応力度]

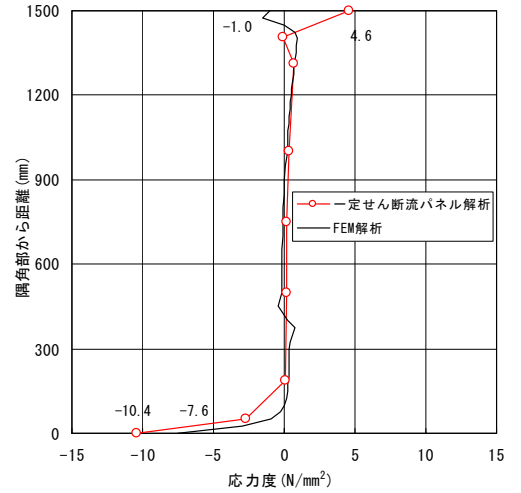


図-3.3.13 柱ダイヤフラム軸応力分布比較

(b) はりダイヤフラム

図-3.3.14, 表-3.3.7 にはりダイヤフラムの応力算出結果を示す。はりダイヤフラム全体の応力性状で捉えると十分整合がとれており、発生応力もかなり小さい。また、ダイヤフラムの端部や中央の応力差異は、前項と同様に解析手法のモデル化などの違いによる影響と考えられる。

表-3.3.7 はりダイヤフラム応力比較

隅角部から距離 mm	一定せん断流パネル解析		軸応力	FEM解析		軸応力	軸応力比
	垂直応力度			垂直応力度			
	内側 N/mm <sup>2</sup>	外側 N/mm <sup>2</sup>		内側 N/mm <sup>2</sup>	外側 N/mm <sup>2</sup>		
1650	-0.25	-0.21	-0.23	2.82	-14.90	-6.04	0.04
1238	0.02	0.00	0.01	-1.62	-1.03	-1.32	-0.01
825	0.14	0.13	0.13	-1.15	-1.95	-1.55	-0.09
413	0.33	0.48	0.40	-2.18	-0.94	-1.56	-0.26
50	-0.71	-0.42	-0.56	4.04	-1.99	1.02	-0.55
0	-10.37	-10.48	-10.42	-29.83	14.70	-7.57	1.38

軸応力 = ([内側垂直応力度]+[外側垂直応力度])/2

軸応力比 = [一定せん断流パネル解析軸応力度]/[FEM解析軸応力度]

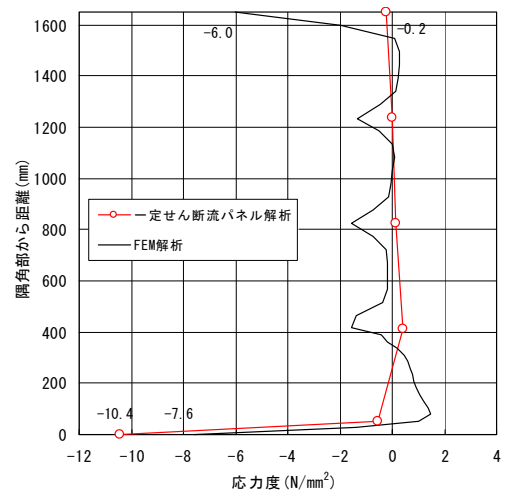


図-3.3.14 はりダイヤフラム軸応力分布比較



以下に、FEM 解析による変形図および各部材方向における応力分布図を示す。

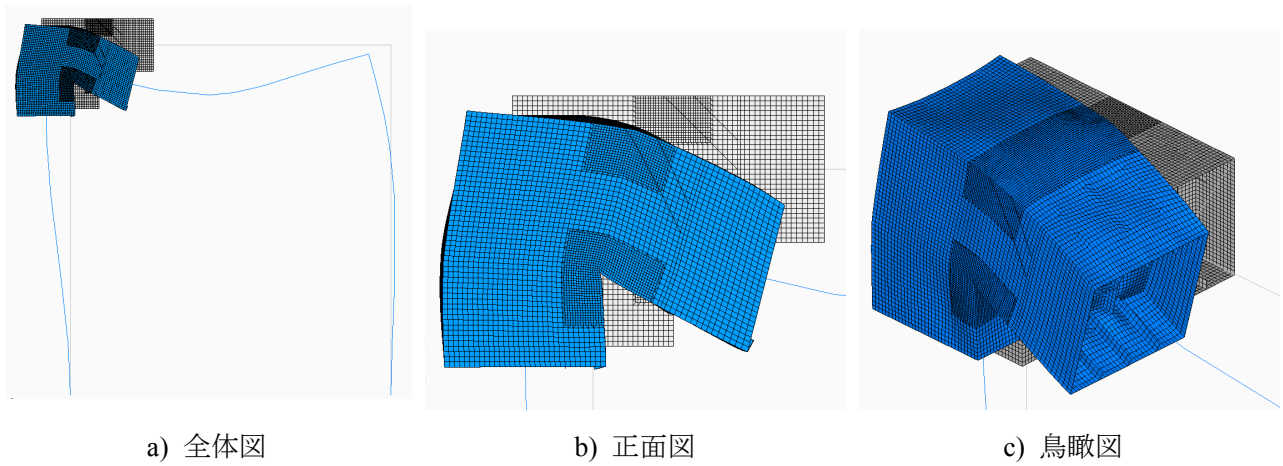


図-3.3.15 変形図

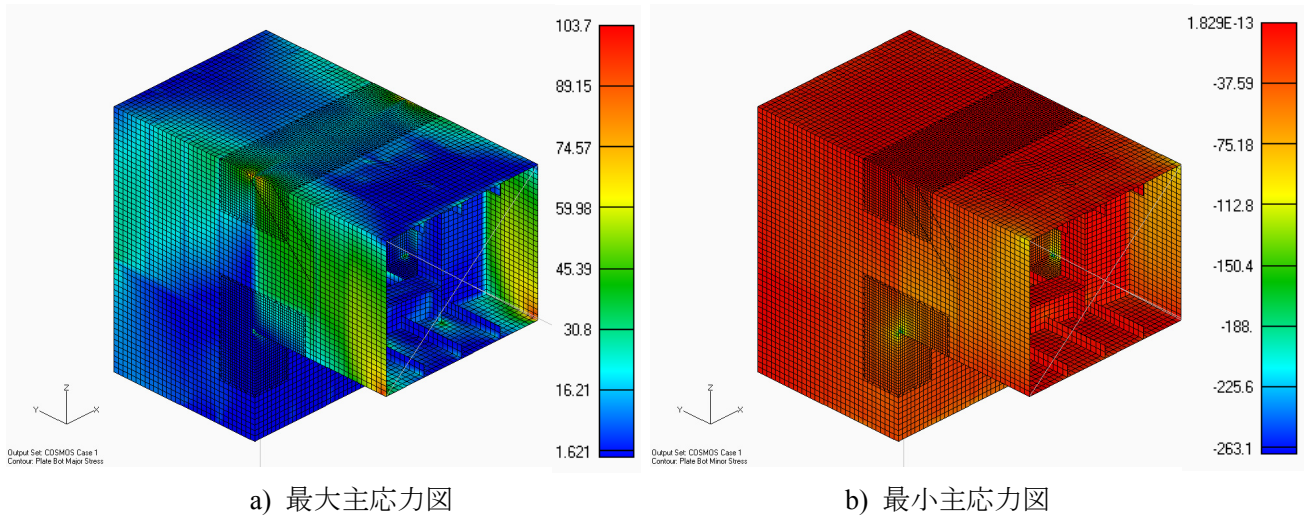


図-3.3.16 主応力図

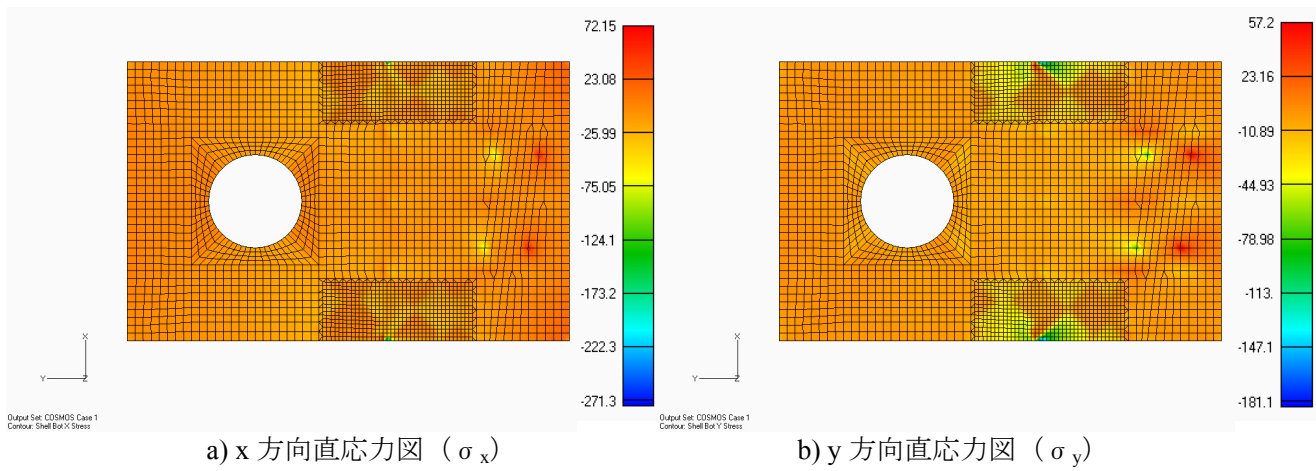
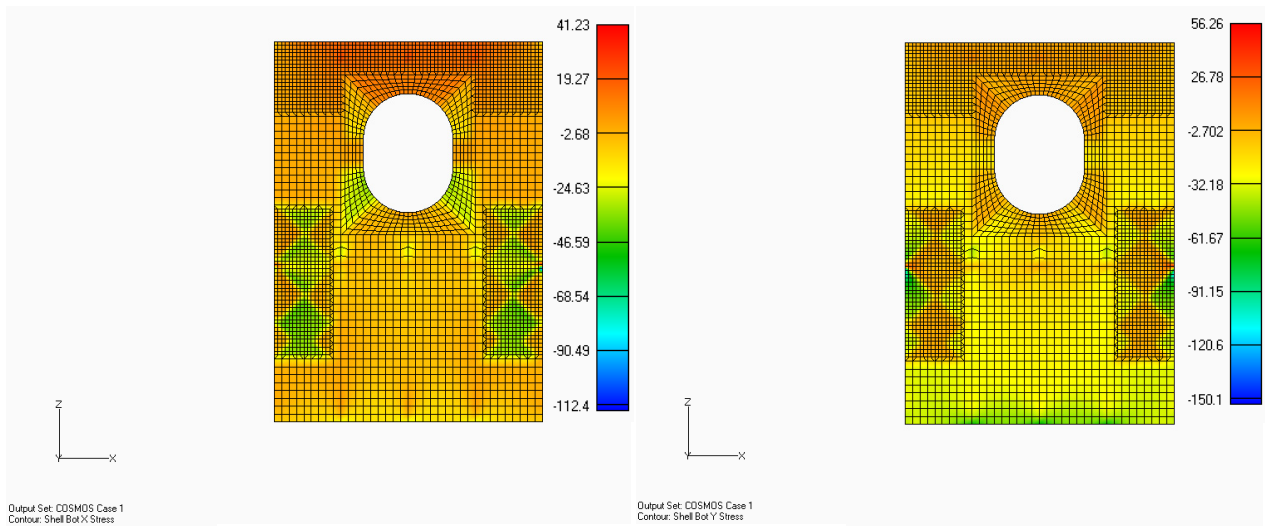


図-3.3.17 はり下フランジ直応力図



a) x 方向直応力図 ( $\sigma_x$ )

b) z 方向直応力図 ( $\sigma_z$ )

図-3.3.18 柱フランジ直応力図