

(2) 円形柱門型ラーメン橋脚

1) 概要

円形断面柱は、はりとの接合線が曲線となり矩形柱に比べ隅角部の応力性状を精度よく把握することが難しい構造である。ここでは図-3.3.19 に示すような門型ラーメン構造とし、はりが柱に突き当てられた形式とした。すなわち、はりのウェブは柱を貫通しておらず、柱が天板まで通っている。また、はりの下フランジ高さの柱内部に円形の柱ダイヤフラムがある。なお、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およそ $100\sim200\text{N/mm}^2$ 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 8000kN を載荷した。部材の断面諸元を表-3.3.8 に示す。

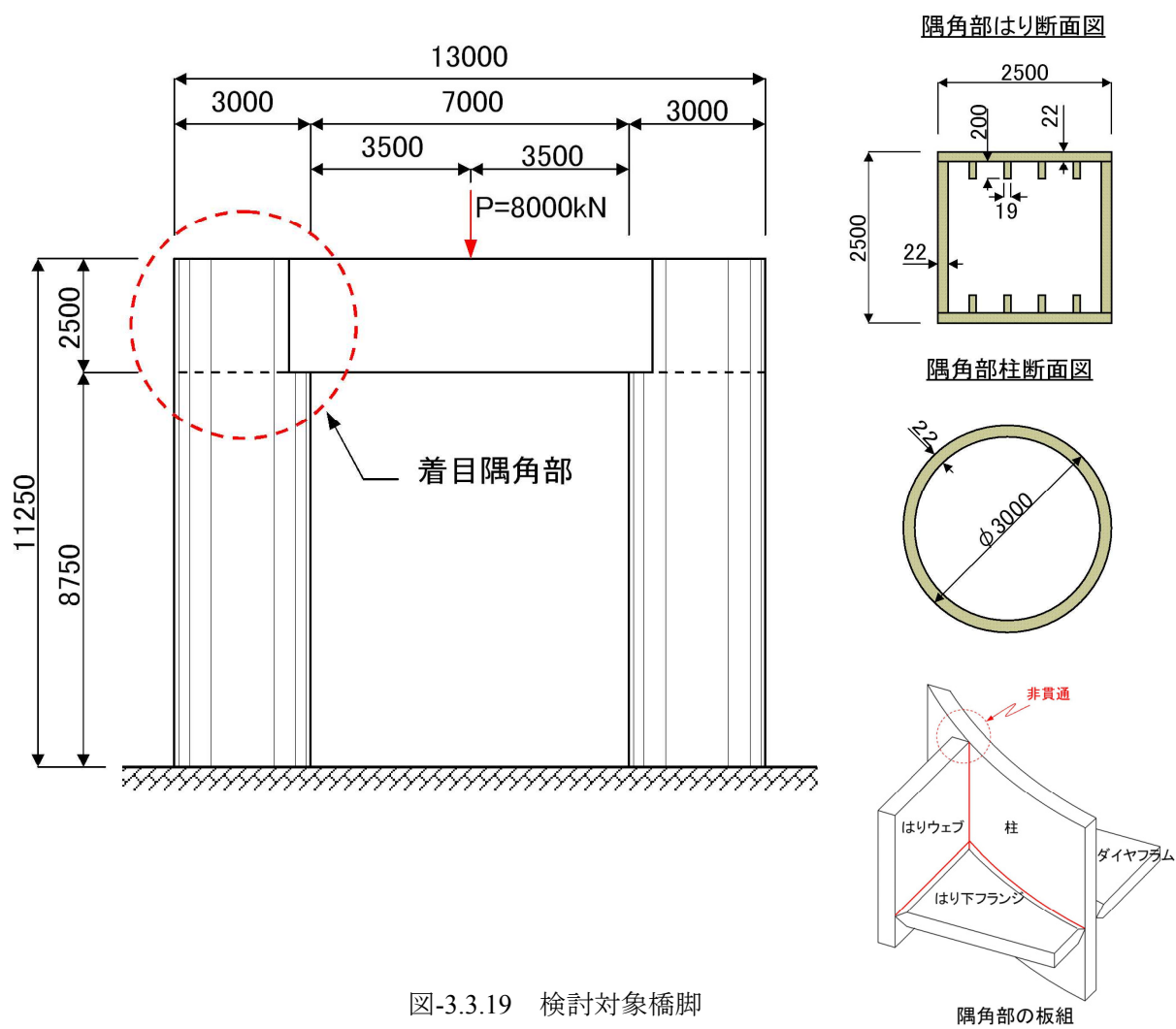


図-3.3.19 検討対象橋脚

表-3.3.8 部材断面諸値一覧

部材		断面形状	フランジ		ウェブ		リブ		面積 A m ²	断面2次 モーメント I m ⁴
			幅 mm	厚 mm	幅 mm	厚 mm	幅 mm	厚 mm		
はり	隅角部	矩形	2500	22	2500	22	200	19	2.50E-01	2.73E-01
	一般部	矩形	2500	22	2500	22	200	19	2.50E-01	2.73E-01
柱	隅角部	円形	3000	22	-	-	-	-	7.07E+00	3.98E+00
	一般部	円形	3000	22	-	-	-	-	7.07E+00	3.98E+00

※円形断面は、フランジ欄に直径および板厚を示す

2) 解析モデル

以下に、各々の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-3.3.20 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。モデル化の詳細の基本的な考え方は、3.3 節にて行った矩形柱門型ラーメン橋脚と同様であり、橋脚部材を全てはり要素によりモデル化した。また、モデルは平面モデルとした。

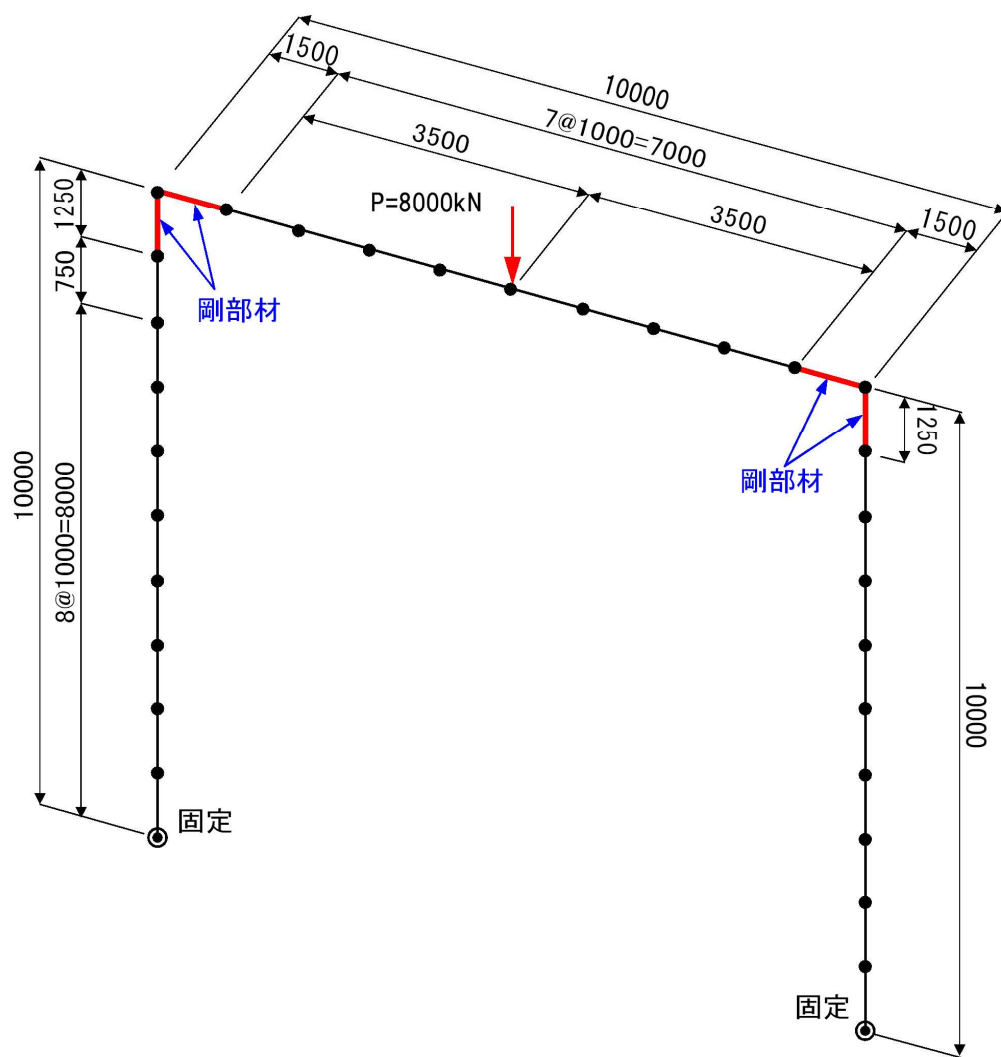
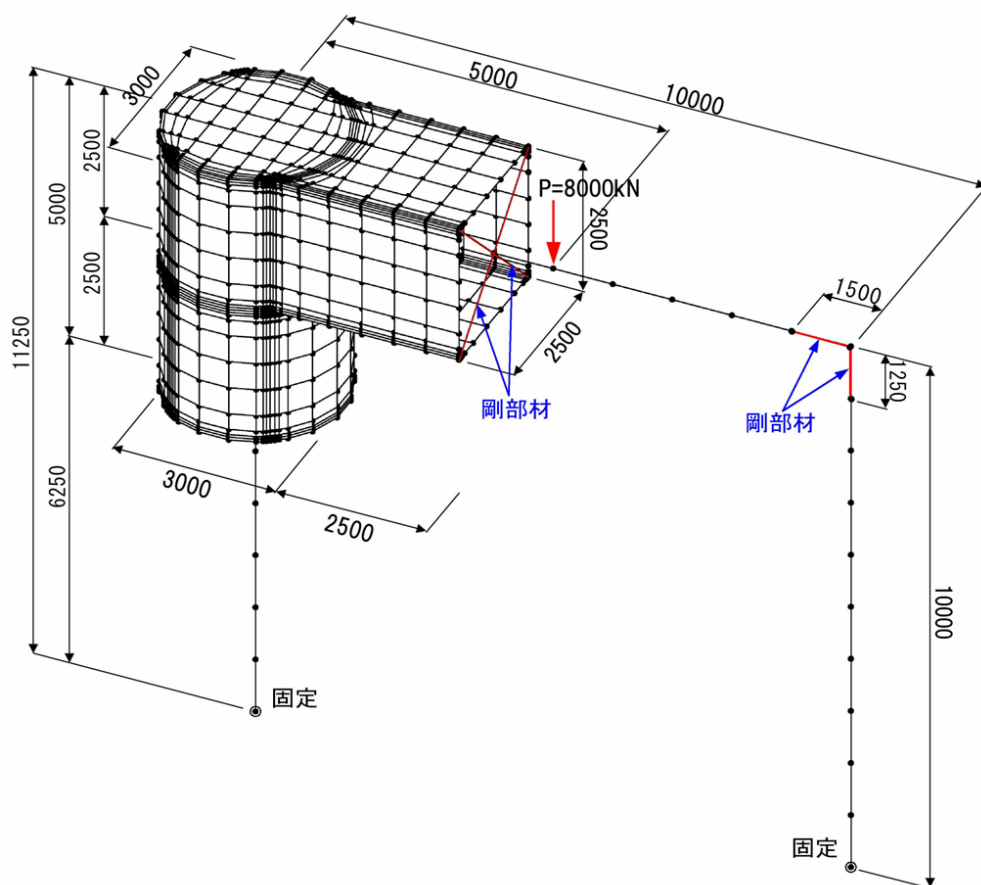


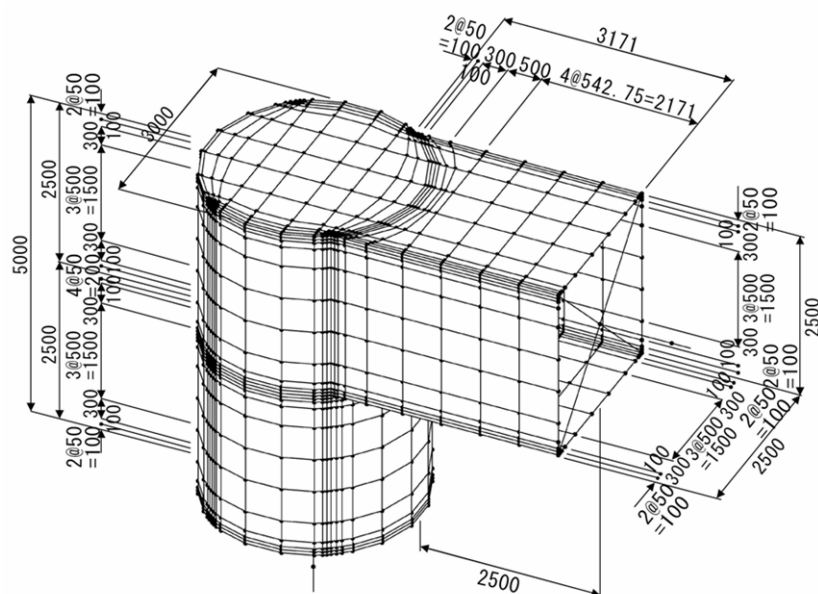
図-3.3.20 奥村・石沢の方法のモデル図

② 一定せん断流パネル解析

図-3.3.21 に対象橋脚の一定せん断流パネル解析モデル図を示す。モデル化の詳細の基本的な考え方は、3.3 節にて行った矩形柱門型ラーメン橋脚と同様である。また、一定せん断流パネル要素サイズは、隅角部付近で最小 50mm 間隔とし、最大要素サイズは縦リブ間隔（500mm）以下とした。また、一般部のはりおよび柱はり要素によりモデル化し、一定せん断流パネル要素モデルとは仮想剛部材にて接合する。



a) モデル全体図



b) 隅角部詳細モデル図

図-3.3.21 一定せん断流パネル解析モデル図

③ FEM 解析

図-3.3.22 に対象橋脚の FEM 解析モデル図を示す。モデル化の詳細の基本的な考え方は、3.3 節にて行った矩形柱門型ラーメン橋脚と同様である。着目した隅角部をシェル要素によりモデル化し、応力集中が予測される箇所は密な要素分割（最小要素サイズ：25mm）とした。また、一般部のはりおよび柱はり要素によりモデル化し、シェル要素モデルとは仮想剛部材にて接合する。

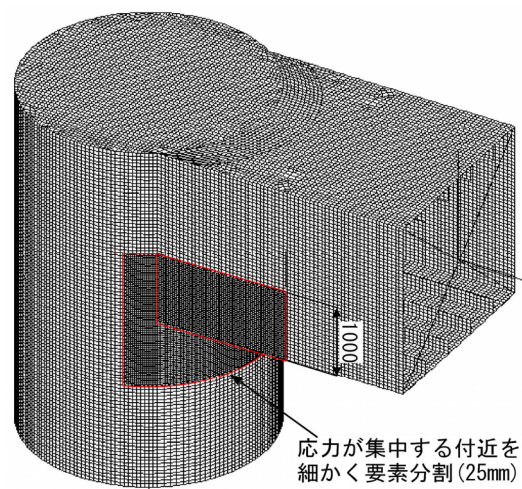
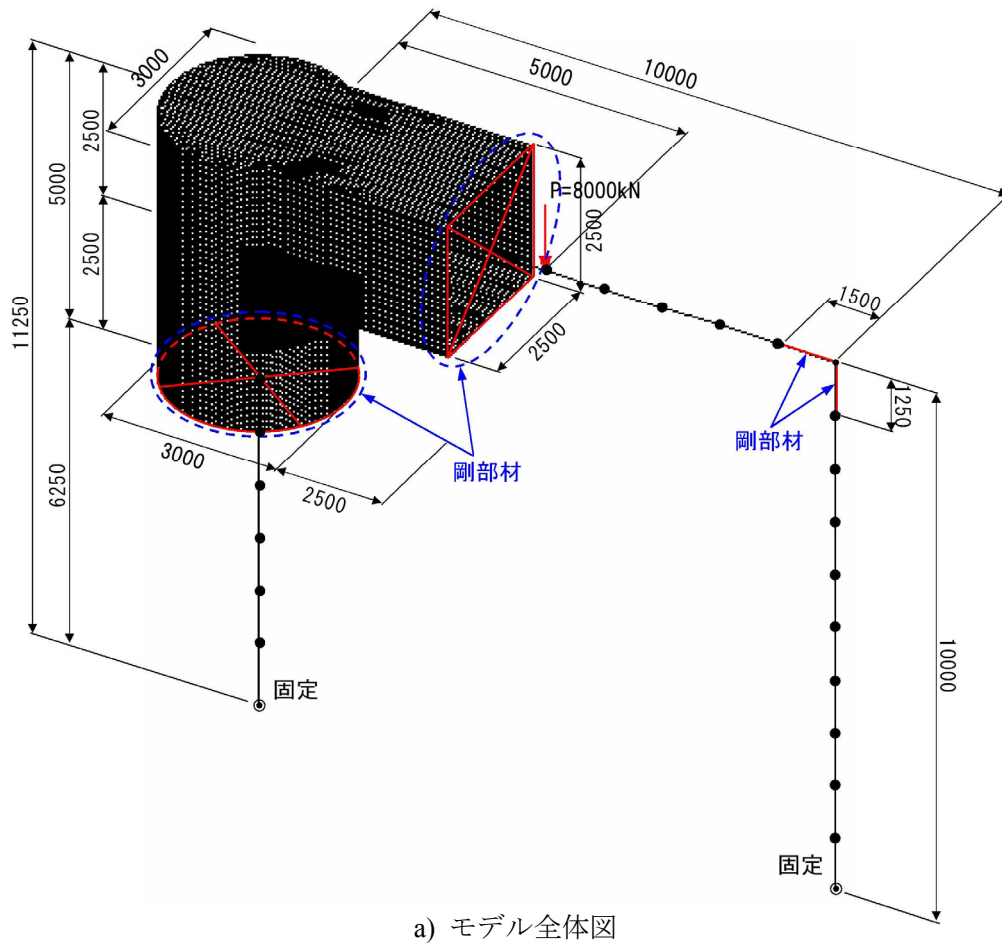


図-3.3.22 FEM 解析モデル図

3) 解析結果

円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-3.3.30～図-3.3.33 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-3.3.23、表-3.3.9 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。また、奥村・石沢の方法では、隅角部コーナー部の発生応力が他の 2 手法との乖離が大きくかなり小さな値を示した。一方、一定せん断流パネル解析では、FEM 解析と比較して隅角部コーナー部の発生応力が 20%程度大きく、フランジ中央部ではほぼ同等の値を示す。隅角部コーナー部の発生応力の乖離は、前節の検討でもみられたが円形柱では差異がやや拡大している。ただし、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-3.3.9 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			FEM解析			軸応力比
	垂直応力度		軸応力	垂直応力度		軸応力	
	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²		内側 N/mm ²	外側 N/mm ²		
-1250	-58.95	-152.08	-105.52	-96.36	-82.76	-89.56	1.18
-1200	-87.70	-73.48	-80.59	-85.28	-36.99	-61.14	1.32
-1150	-100.13	-34.23	-67.18	-74.21	-25.05	-49.63	1.35
-1050	-61.24	-32.70	-46.97	-55.62	-17.88	-36.75	1.28
-750	-23.57	-7.29	-15.43	-17.88	-13.61	-15.75	0.98
-250	-10.47	2.91	-3.78	-5.37	-4.65	-5.01	0.75
250	-10.48	2.90	-3.79	-5.37	-4.64	-5.01	0.76
750	-23.58	-7.30	-15.44	-17.92	-13.64	-15.78	0.98
1050	-61.24	-32.70	-46.97	-55.62	-17.88	-36.75	1.28
1150	-100.13	-34.23	-67.18	-74.23	-25.06	-49.65	1.35
1200	-87.70	-73.48	-80.59	-85.33	-37.04	-61.19	1.32
1250	-58.95	-152.08	-105.52	-96.64	-83.04	-89.84	1.17

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]

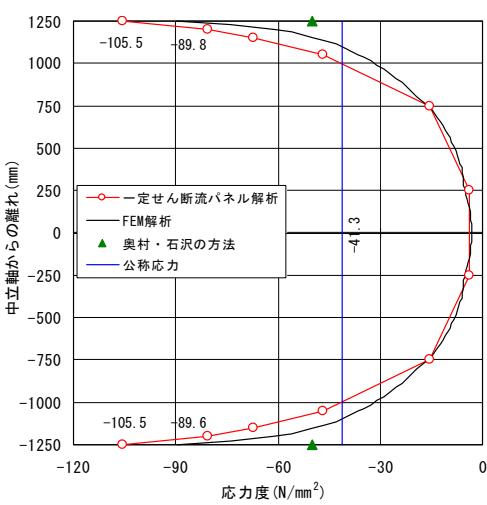


図-3.3.23 はり下フランジ軸応力分布比較

表-3.3.10 はり下フランジ最大応力比較

解析手法	公称応力 σ_r N/mm ²	軸応力度	
		最大応力 σ_{max} N/mm ²	応力比 σ_{max}/σ_r
奥村・石沢の方法	-41.30	-50.08	1.21
一定せん断流パネル解析		-105.52	2.56
FEM解析		-89.56	2.17

※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）

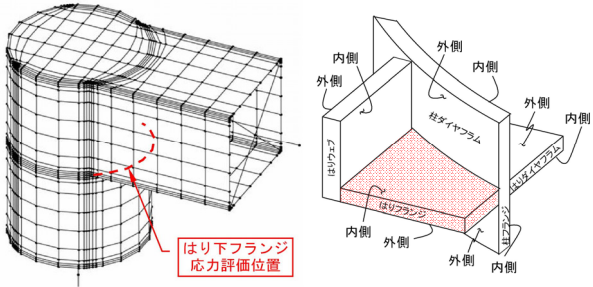


図-3.3.24 応力評価位置

② 柱方向

図-3.3.25、表-3.3.11 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。一定せん断流パネル解析と FEM 解析を比較すると、隅角部コーナー部の発生応力はほぼ同じ値を示し、フランジ全体の応力性状も全体的に 5%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。なお、フランジ中央の数カ所で局部的に応力差異が生じてはいるが、これは前節と同様にリブのモデル化による影響と考えられる。また、奥村・石沢の方法には円形柱における具体的な算出方法が記載されていないので、ここでは公称応力を記載している。

表-3.3.11 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			FEM解析			軸応力比
	垂直応力度		軸応力	垂直応力度		軸応力	
	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²		内側 N/mm ²	外側 N/mm ²		
-1250	-68.55	-84.32	-76.43	-96.88	-53.49	-75.19	1.02
-1200	-68.89	-40.90	-54.89	-94.14	-24.87	-59.51	0.92
-1150	-58.46	-35.38	-46.92	-82.84	-14.19	-48.52	0.97
-1050	-56.29	-27.96	-42.13	-72.37	-12.96	-42.67	0.99
-750	-60.40	-18.77	-39.59	-75.59	-15.14	-45.37	0.87
-250	-61.67	-13.69	-37.68	-77.16	-9.80	-43.48	0.87
250	-61.67	-13.69	-37.68	-77.16	-9.83	-43.49	0.87
750	-60.40	-18.77	-39.59	-75.60	-15.15	-45.38	0.87
1050	-56.29	-27.96	-42.13	-72.38	-13.01	-42.70	0.99
1150	-58.46	-35.38	-46.92	-82.93	-14.29	-48.61	0.97
1200	-68.89	-40.90	-54.89	-94.34	-25.09	-59.72	0.92
1250	-68.55	-84.32	-76.43	-97.23	-53.83	-75.53	1.01

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]

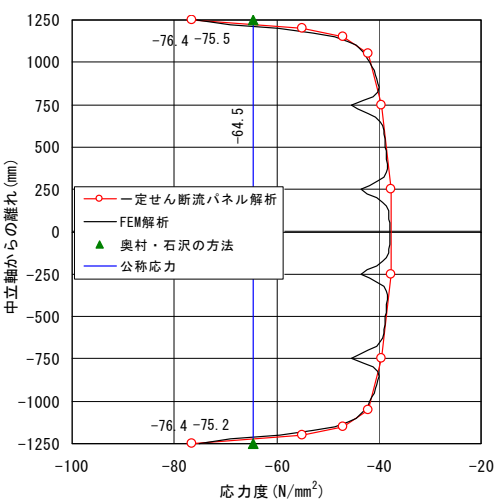


図-3.3.25 柱フランジ軸応力分布比較

表-3.3.12 柱フランジ最大応力比較

解析手法	公称応力 σ_r N/mm ²	軸応力度	
		最大応力 σ_{max} N/mm ²	応力比 σ_{max}/σ_r
奥村・石沢の方法	-64.46	-64.46	1.00
一定せん断流パネル解析		-76.43	1.19
FEM解析		-75.19	1.17

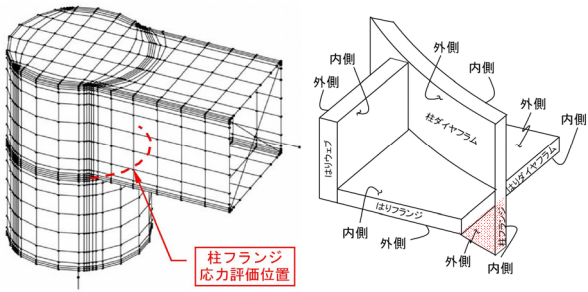
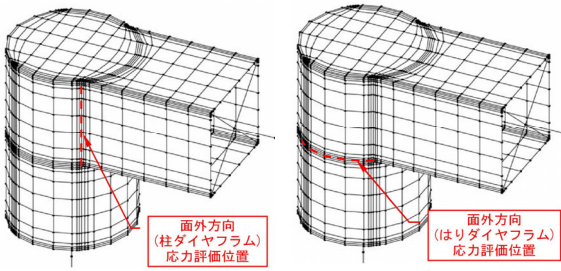


図-3.3.26 応力評価位置

③ 面外方向

面外方向は、図-3.3.27 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-3.3.27 面外方向応力評価位置

(a) 柱ダイヤフラム

図-3.3.28、表-3.3.13 に柱ダイヤフラムの応力算出結果を示す。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、発生応力自体もはり下フランジなどに比べてかなり小さく、応力値の違いはさほど重要でないと思われる。また、ダイヤフラム端部にみられる FEM 解析との応力の差異は、次項にて説明するが FEM 解析とのモデル化の違いと応力解析結果の出力方法の違いが要因と考えられる。

表-3.3.13 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			FEM解析			軸応力比
	垂直応力度		軸応力	垂直応力度		軸応力	
	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²		内側 N/mm ²	外側 N/mm ²		
2500	1.05	13.44	7.24	-4.39	-1.66	-3.02	-2.40
2450	-15.27	-9.16	-12.21	-2.13	-1.01	-1.57	7.80
2400	3.96	-10.42	-3.23	0.57	-1.23	-0.33	9.75
2300	13.70	-9.58	2.06	2.29	-1.10	0.59	3.48
2000	8.21	-6.85	0.68	1.62	-1.00	0.31	2.19
1500	1.94	-2.28	-0.17	0.40	-0.55	-0.08	2.22
1000	-3.31	2.35	-0.48	-0.75	0.56	-0.09	5.12
500	-14.67	11.93	-1.37	-3.45	1.75	-0.85	1.61
200	-28.44	13.38	-7.53	-6.04	-1.85	-3.95	1.91
100	-22.91	1.49	-10.71	-4.67	-5.84	-5.25	2.04
50	-2.95	-13.11	-8.03	-2.27	-7.73	-5.00	1.61
0	-12.47	-40.28	-26.38	-9.63	-4.52	-7.08	3.73

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]

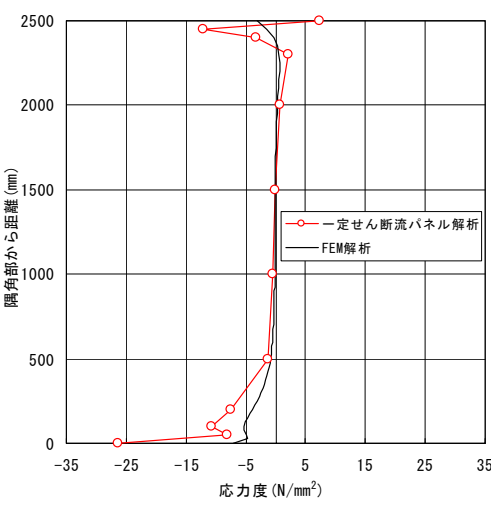


図-3.3.28 柱ダイヤフラム軸応力分布比較

(b) はりダイヤフラム

図-3.3.29、表-3.3.14 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、発生応力自体もはり下フランジなどに比べてかなり小さく、応力値の違いはさほど重要でないと思われる。また、ダイヤフラム端部に柱ダイヤフラムと同様の理由により、FEM 解析との乖離がみられる。

表-3.3.14 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			FEM解析			軸応力比
	垂直応力度		軸応力	垂直応力度		軸応力	
	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²		内側 N/mm ²	外側 N/mm ²		
1635	2.69	2.74	2.71	9.71	4.52	7.12	0.38
1595	0.24	0.45	0.34	9.40	4.33	6.86	0.05
1554	5.84	6.10	5.97	9.14	4.14	6.64	0.90
1471	1.59	1.45	1.52	8.68	3.67	6.17	0.25
1055	2.42	1.29	1.85	7.13	0.62	3.87	0.48
554	3.87	4.61	4.24	5.16	-0.02	2.57	1.65
154	8.72	3.80	6.26	14.42	-3.31	5.56	1.13
87	19.96	-31.07	-5.55	22.32	-10.21	6.06	-0.92
43	32.84	5.77	19.31	23.32	-20.50	1.41	13.69
0	-134.61	-137.02	-135.82	-4.02	-37.17	-20.60	6.59

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]

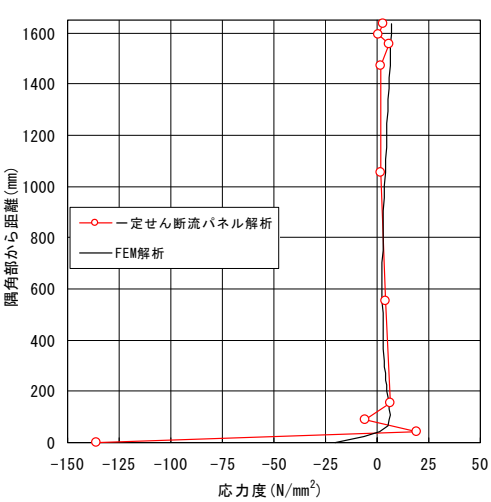


図-3.3.29 はりダイヤフラム軸応力分布比較

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。

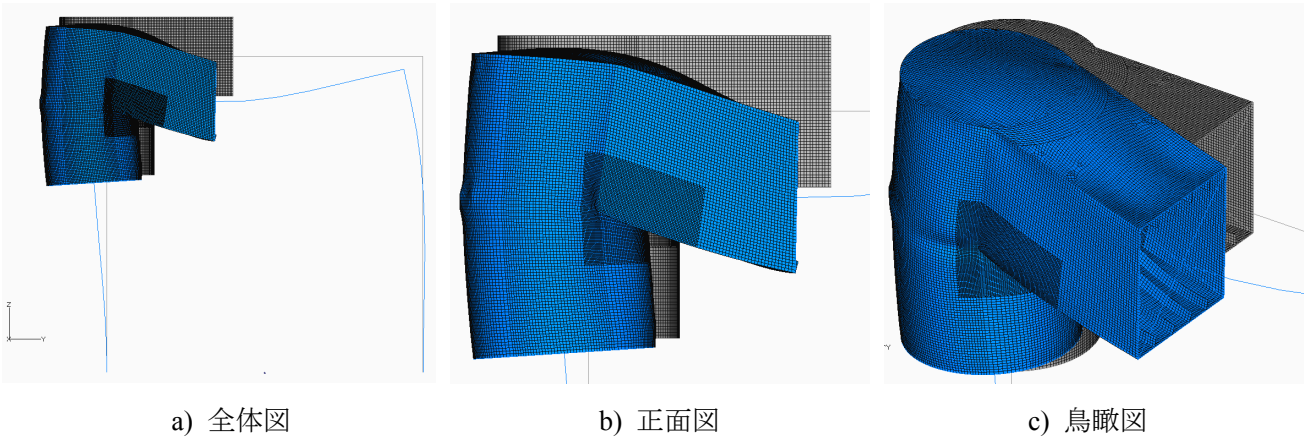


図-3.3.30 変形図

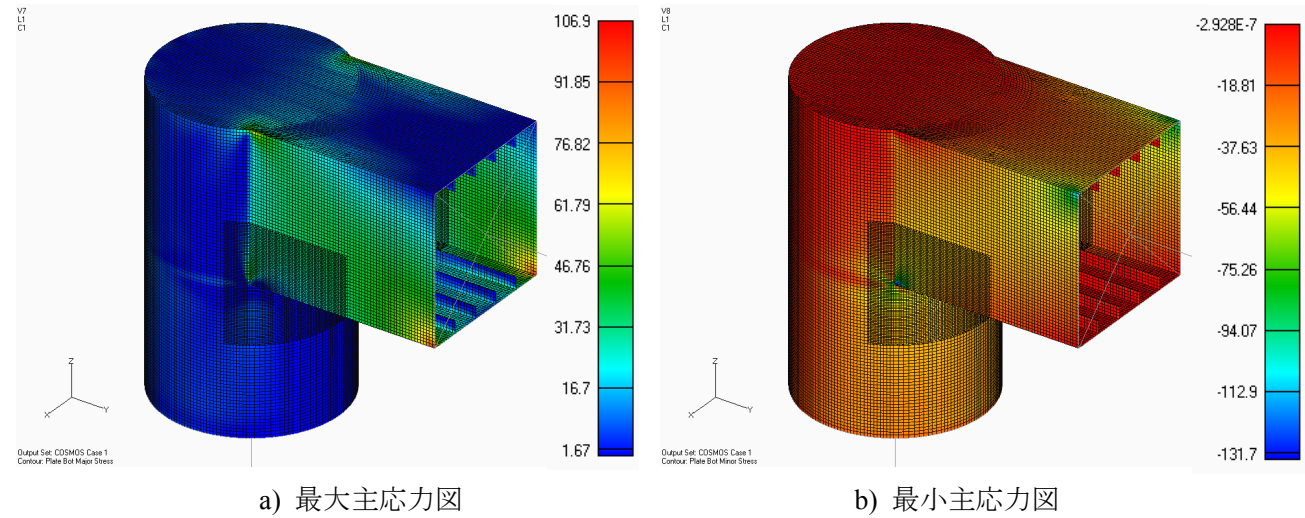


図-3.3.31 主応力図

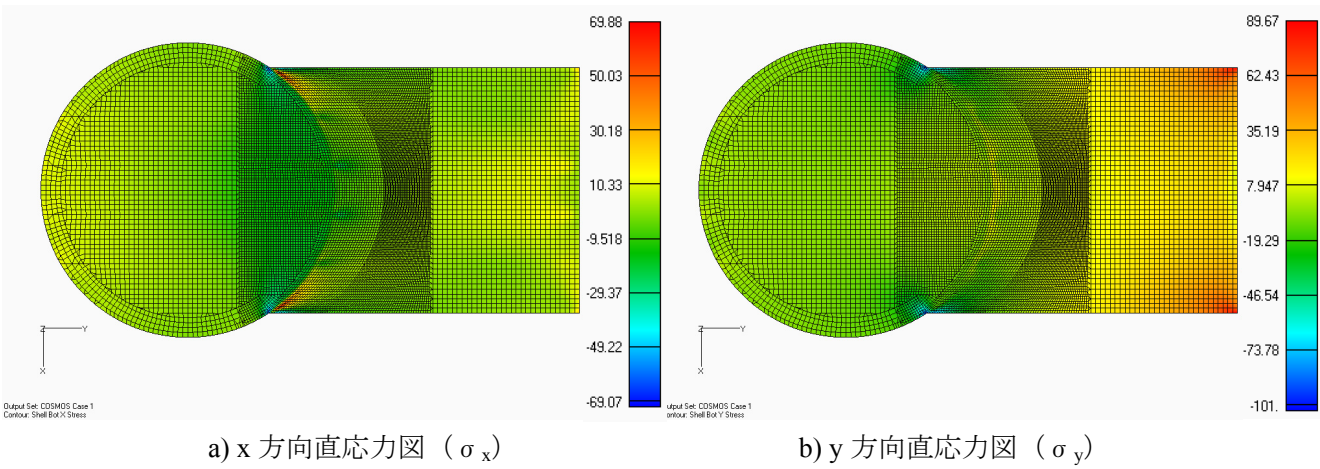
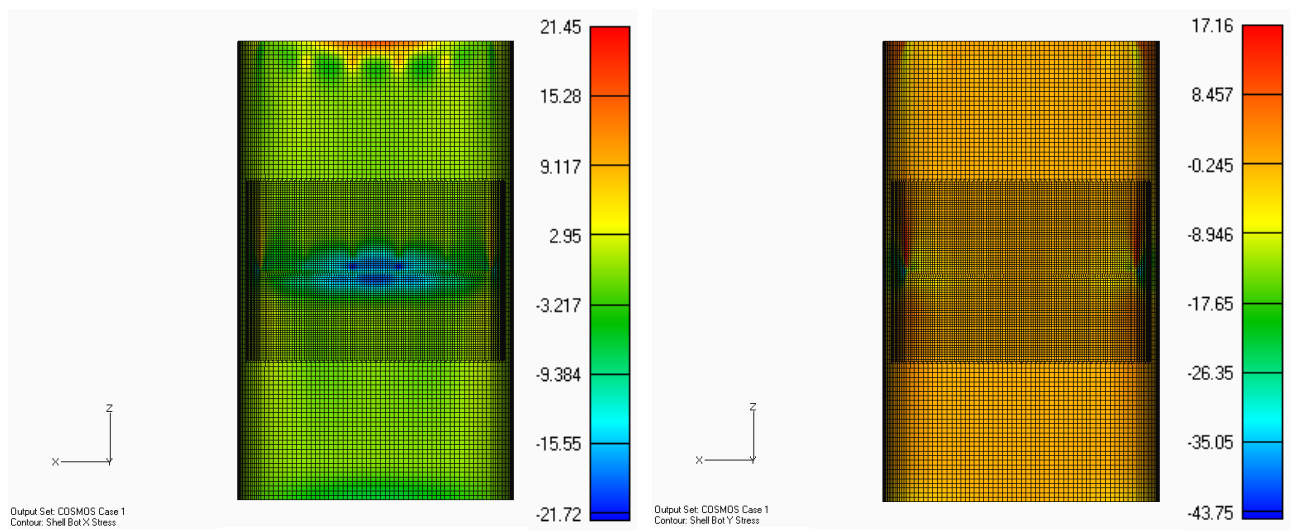
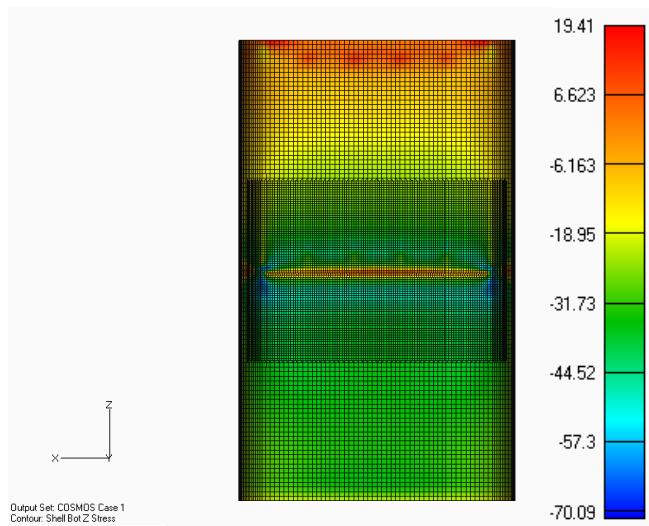


図-3.3.32 はり下フランジ直応力図



a) x 方向直応力図 (σ_x)

b) y 方向直応力図 (σ_y)



c) z 方向直応力図 (σ_z)

図-3.3.33 柱フランジ直応力図