

(4) 矩形柱二層式ラーメン橋脚の場合

1) 概要

二層式ラーメン橋脚の中間はりの隅角部では、上層の構造の影響も受けるため、1層の橋脚とは隅角部の応力性状が異なる。ここでは、図-3.3.49 に示す矩形柱二層式ラーメン橋脚を対象に検討を行った。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、図中に示すように上層と下層のはりの中央にそれぞれ集中荷重で 3400kN を載荷した。部材の断面諸元を表-3.3.22 に示す。

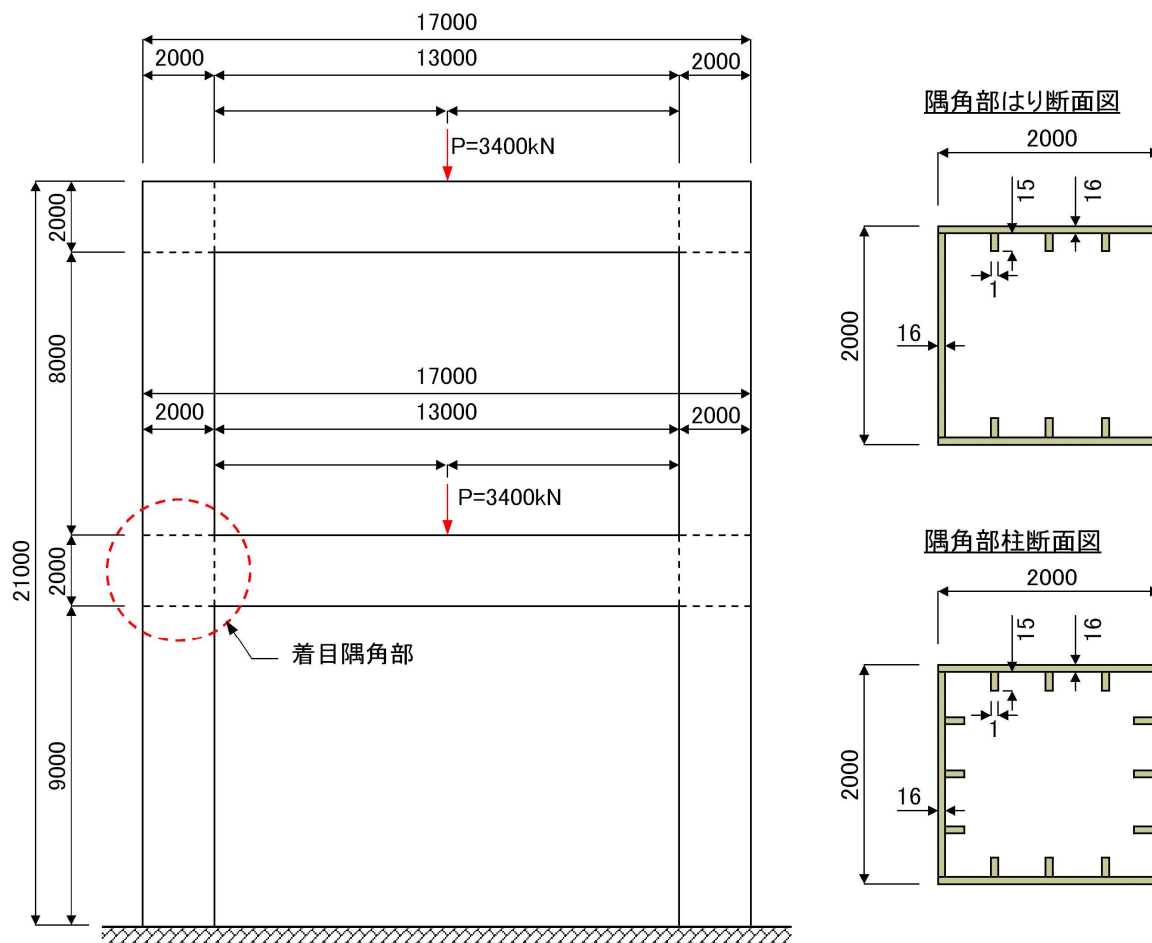


図-3.3.49 検討対象橋脚

表-3.3.22 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		
上層はり	隅角部	2000	16	2000	16	150	14	1.41E-01	9.72E-02
	一般部	2000	16	2000	16	150	14	1.41E-01	9.72E-02
下層はり	隅角部	2000	16	2000	16	150	14	1.41E-01	9.72E-02
	一般部	2000	16	2000	16	150	14	1.41E-01	9.72E-02
上柱	隅角部	2000	16	2000	16	150	14	1.53E-01	9.93E-02
	一般部	2000	16	2000	16	150	14	1.53E-01	9.93E-02
下柱	隅角部	2000	16	2000	16	150	14	1.53E-01	9.93E-02
	一般部	2000	16	2000	16	150	14	1.53E-01	9.93E-02

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-3.3.50 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。

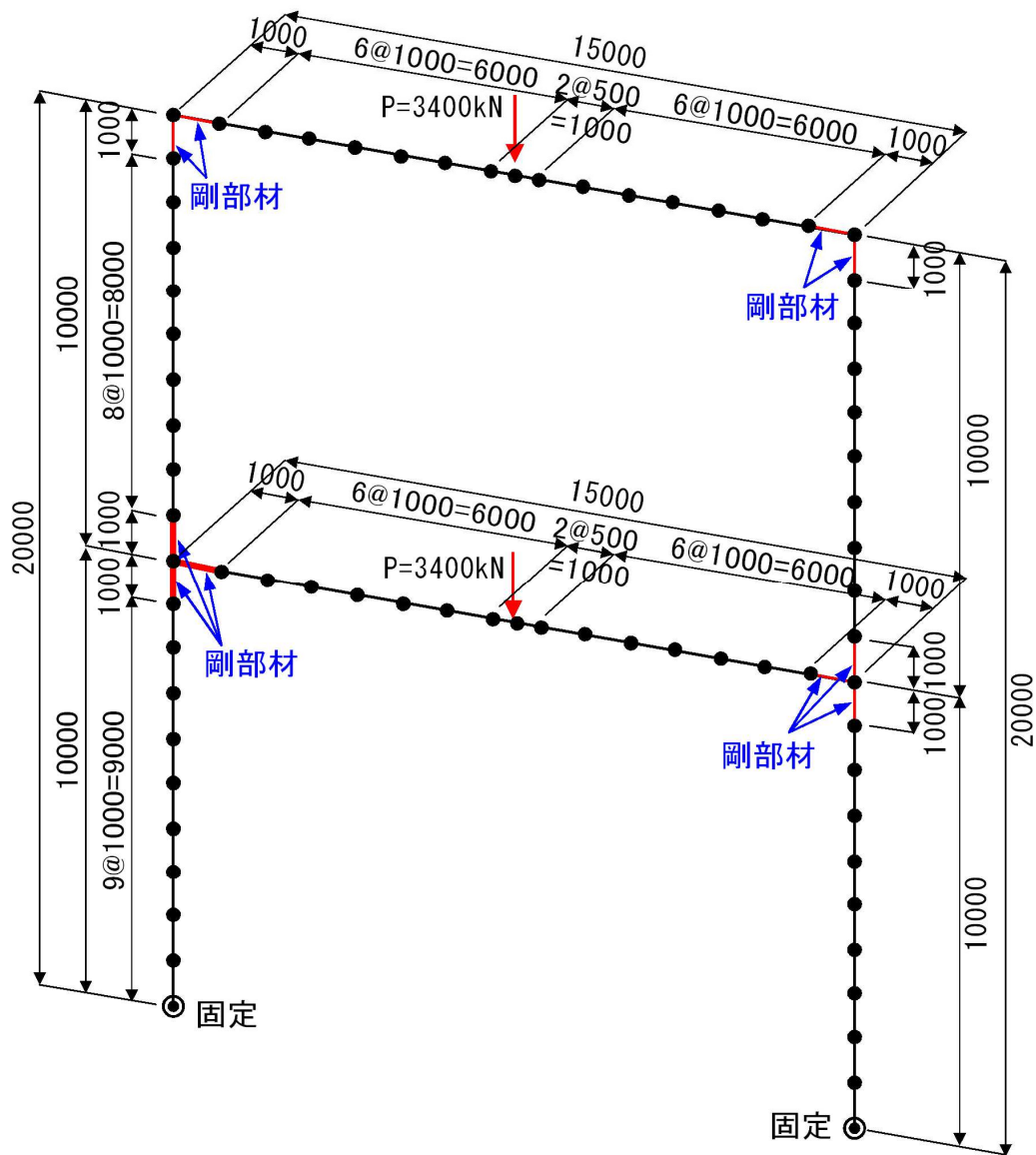
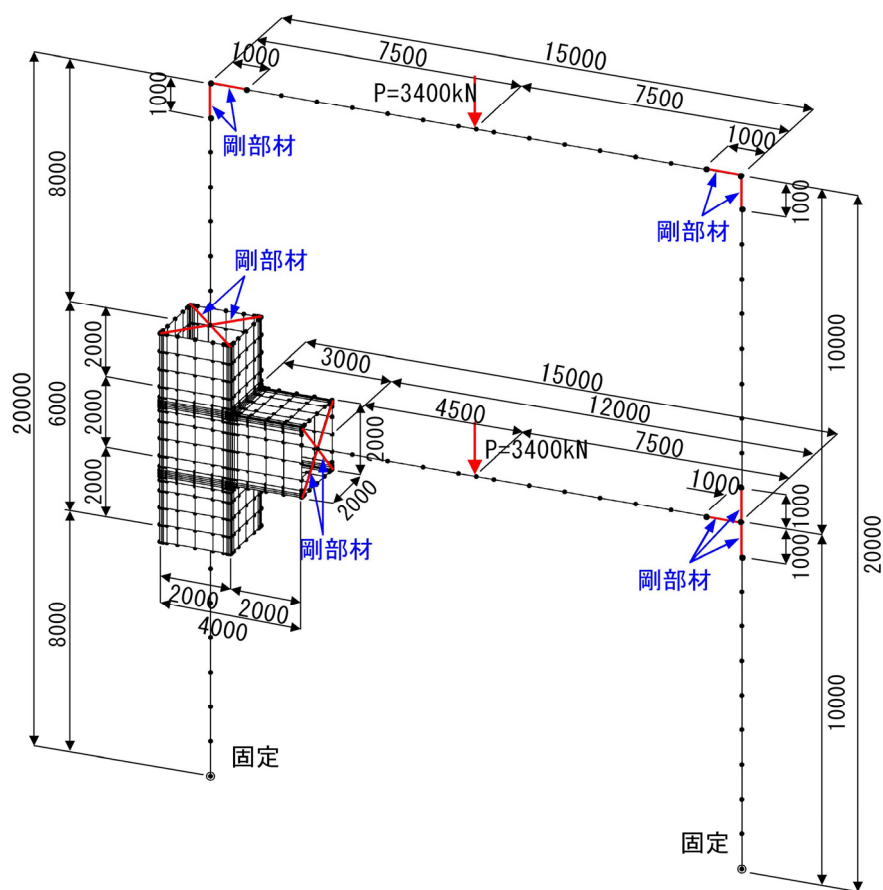


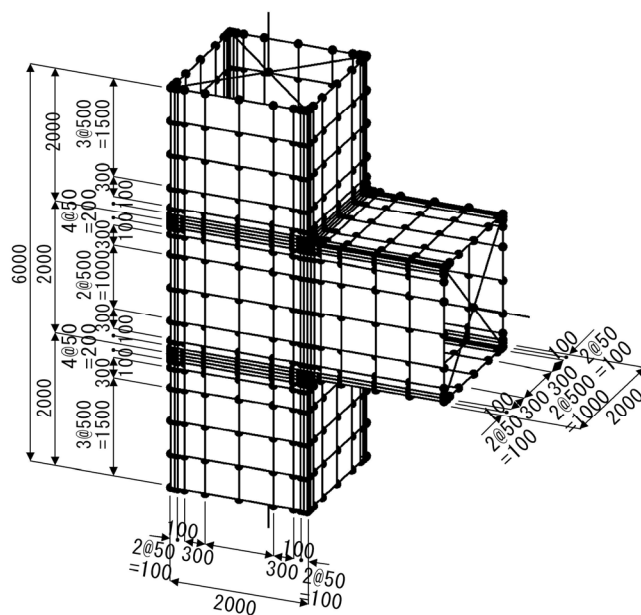
図-3.3.50 奥村・石沢の方法のモデル図

② 一定せん断流パネル解析

図-3.3.51 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

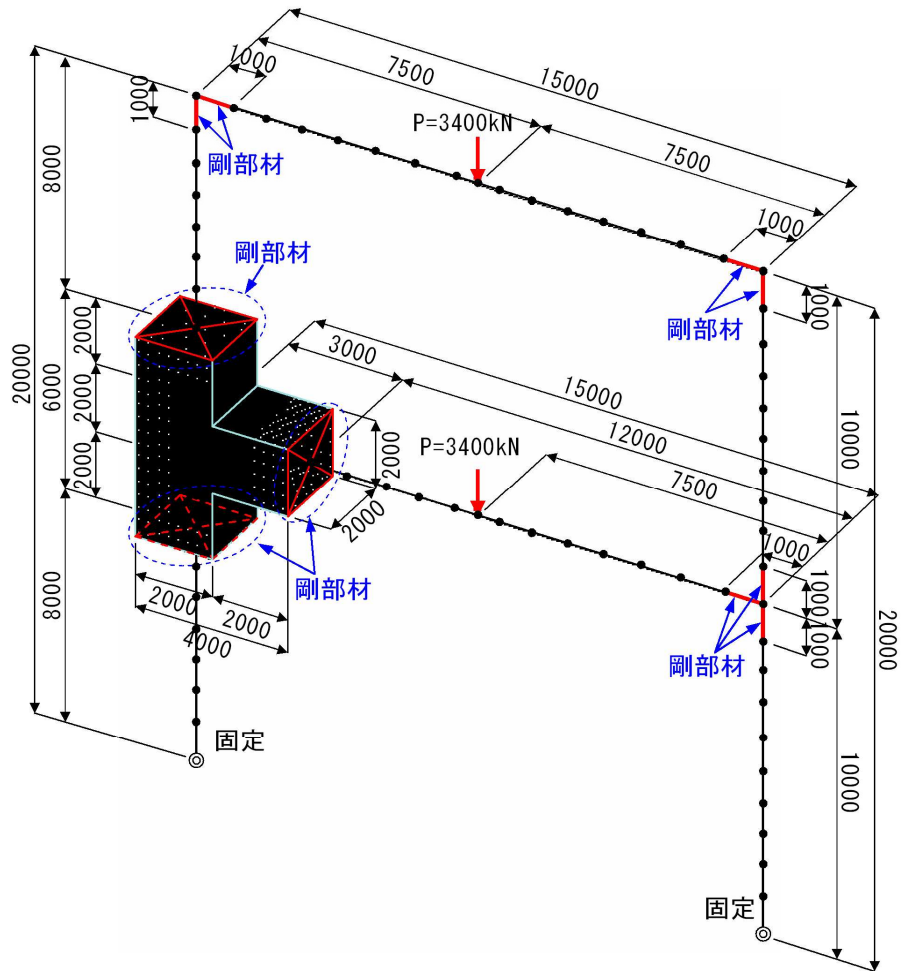


b) 隅角部詳細モデル図

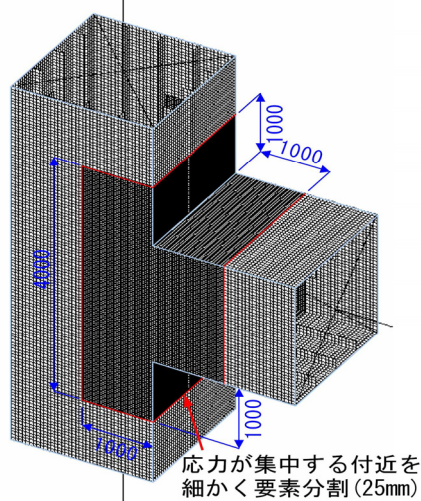
図-3.3.51 一定せん断流パネル解析モデル図

③ FEM 解析

図-3.3.52 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。



a) モデル全体図



b) 隅角部詳細モデル図

図-3.3.52 FEM 解析モデル図

3) 解析結果

矩形柱 2 層式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-3.3.65~図-3.3.69 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

(a) はり上フランジ

図-3.3.53, 表-3.3.23 に各解析手法によるはり上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、奥村・石沢の方法では他の 2 手法との乖離が大きく、かなり小さな値を示す。一方、一定せん断流パネル解析においては、FEM 解析と比較して全体的に 10%程度差に収まっており、フランジ全体の応力性状も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。

表-3.3.23 はり上フランジ応力比較

中立軸からの離れ mm	一定せん断流パネル解析		軸応力	FEM解析		軸応力	軸応力比
	垂直応力度			垂直応力度			
	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²		内側 N/mm ²	外側 N/mm ²		
-1000	74.07	165.39	119.73	109.10	124.00	116.55	1.03
-950	89.58	83.58	86.58	102.70	80.11	91.41	0.95
-900	82.32	49.76	66.04	86.47	52.62	69.55	0.95
-800	57.26	39.37	48.31	63.08	40.58	51.83	0.93
-500	34.31	26.53	30.42	36.70	36.09	36.40	0.84
0	27.07	21.16	24.11	29.57	27.97	28.77	0.84
500	34.31	26.53	30.42	36.70	36.09	36.40	0.84
800	57.26	39.37	48.31	63.08	40.58	51.83	0.93
900	82.32	49.76	66.04	86.47	52.62	69.55	0.95
950	89.58	83.58	86.58	102.70	80.11	91.41	0.95
1000	74.07	165.39	119.73	109.10	124.00	116.55	1.03

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

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

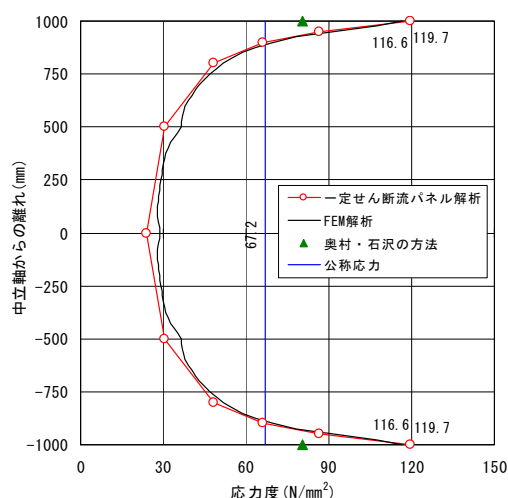


図-3.3.53 はり上フランジ軸応力分布比較

表-3.3.24 はり上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	67.16	80.55	1.20
一定せん断流パネル解析		119.73	1.78
FEM解析		116.55	1.74

※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)

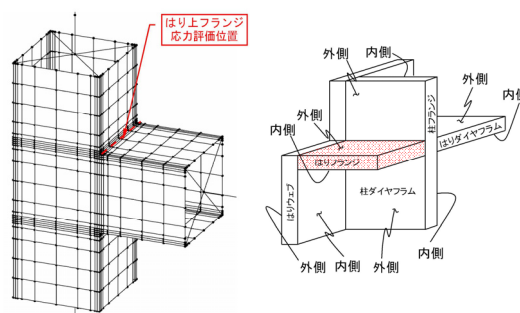


図-3.3.54 応力評価位置

(b) はり下フランジ

図-3.3.55, 表-3.3.25 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、一定せん断流パネル解析が最も大きく、奥村・石沢の方法で最も小さいが、その応力差は 5~10%程度と小さい。また、一定せん断流パネル解析においては、FEM 解析と比較して全体的に 5%程度の差に収まっており、フランジ全体の応力性状も十分に整合性がとれている。

表-3.3.25 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	FEM解析		軸応力	軸応力比
	垂直応力度			垂直応力度			
	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²	N/mm ²		
-1000	-45.65	-142.61	-94.13	-79.86	-98.82	-89.34	1.05
-950	-68.20	-66.82	-67.51	-79.91	-60.09	-70.00	0.96
-900	-66.14	-34.78	-50.46	-68.38	-35.99	-52.19	0.97
-800	-44.56	-26.97	-35.76	-48.62	-26.82	-37.72	0.95
-500	-24.84	-17.36	-21.10	-22.04	-25.99	-24.02	0.88
0	-18.76	-13.22	-15.99	-15.90	-19.14	-17.52	0.91
500	-24.84	-17.36	-21.10	-22.04	-25.99	-24.02	0.88
800	-44.56	-26.97	-35.76	-48.62	-26.82	-37.72	0.95
900	-66.14	-34.78	-50.46	-68.38	-35.99	-52.19	0.97
950	-68.20	-66.82	-67.51	-79.90	-60.10	-70.00	0.96
1000	-45.65	-142.61	-94.13	-79.86	-98.82	-89.34	1.05

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]

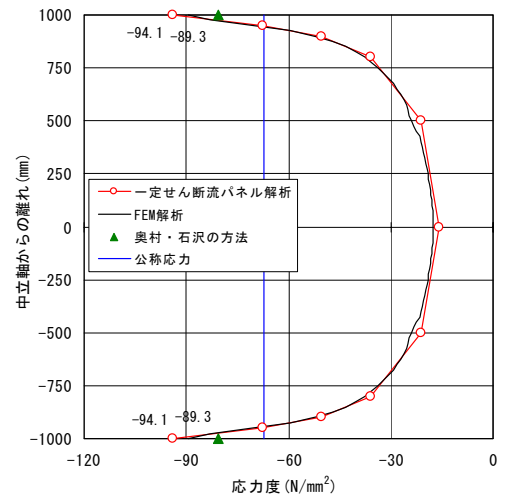


図-3.3.55 はり下フランジ軸応力分布比較

表-3.3.26 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	-67.16	-80.55	1.20
一定せん断流パネル解析		-94.13	1.40
FEM解析		-89.34	1.33

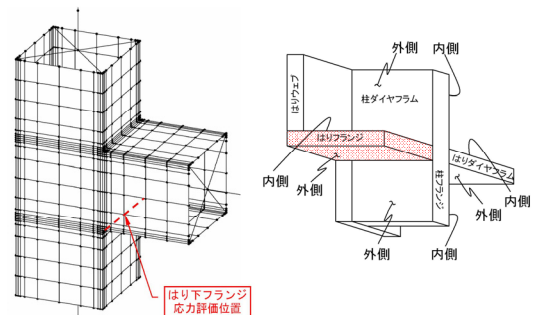


図-3.3.56 応力評価位置

② 柱方向

(a) 上柱フランジ

図-3.3.57, 表-3.3.27 に各解析手法による上柱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、一定せん断流パネル解析が最も大きく、奥村・石沢の方法で最も小さいが、その応力差は 5~10%程度と小さい。また、一定せん断流パネル解析においては、FEM 解析と比較して全体的に 5%程度の差に収まっており、フランジ全体の応力性状も十分に整合性がとれている。

表-3.3.27 上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	FEM解析		軸応力	軸応力比
	垂直応力度			垂直応力度			
	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²	N/mm ²		
-1000	29.31	137.68	83.49	64.04	84.92	74.48	1.12
-950	56.74	56.98	56.86	66.72	46.47	56.60	1.00
-900	55.47	22.39	38.93	56.04	22.42	39.23	0.99
-800	32.27	13.80	23.04	36.19	13.20	24.70	0.93
-500	10.45	2.96	6.70	8.35	12.73	10.54	0.64
0	3.67	-1.77	0.95	2.38	5.42	3.90	0.24
500	10.45	2.96	6.70	8.35	12.73	10.54	0.64
800	32.27	13.80	23.04	36.19	13.20	24.70	0.93
900	55.47	22.39	38.93	56.04	22.42	39.23	0.99
950	56.74	56.98	56.86	66.72	46.47	56.60	1.00
1000	29.31	137.68	83.49	64.04	84.92	74.48	1.12

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]

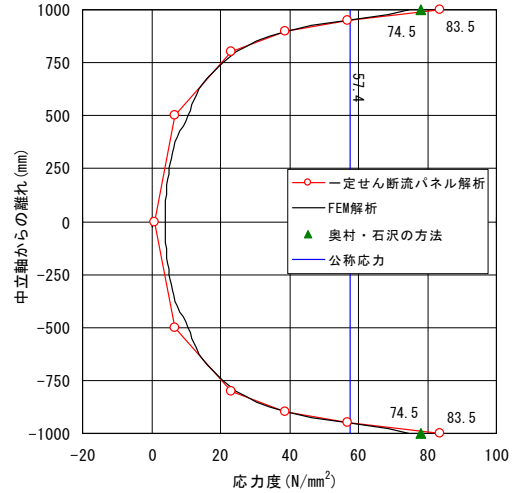


図-3.3.57 上柱フランジ軸応力分布比較

表-3.3.28 上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	57.43	78.16	1.36
一定せん断流パネル解析		83.49	1.45
FEM解析		74.48	1.30

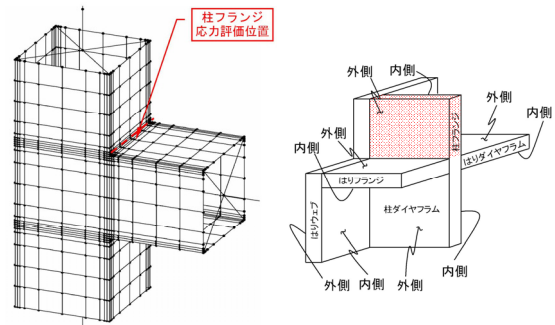


図-3.3.58 応力評価位置

(b) 下柱フランジ

図-3.3.59, 表-3.3.29 に各解析手法による下柱フランジの応力算出結果を示す。各解析ともや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も、はり下フランジと同様に奥村・石沢の方法では他の2手法との乖離が大きく、かなり小さな値を示す。一方、一定せん断流パネル解析においては、FEM解析と比較して全体的に5%程度の差に収まっており、フランジ全体の応力性状も十分に整合性がとれている。

表-3.3.29 下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	FEM解析		軸応力	軸応力比
	垂直応力度			垂直応力度			
	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²	N/mm ²		
-1000	-53.58	-145.52	-99.55	-85.83	-104.50	-95.17	1.05
-950	-73.14	-71.84	-72.49	-84.00	-65.61	-74.81	0.97
-900	-69.11	-41.14	-55.12	-71.41	-41.36	-56.39	0.98
-800	-47.93	-33.15	-40.54	-51.84	-31.82	-41.83	0.97
-500	-29.20	-23.72	-26.46	-26.10	-31.03	-28.57	0.93
0	-23.60	-19.79	-21.69	-20.23	-24.56	-22.40	0.97
500	-29.20	-23.72	-26.46	-26.10	-31.03	-28.57	0.93
800	-47.93	-33.15	-40.54	-51.85	-31.82	-41.84	0.97
900	-69.11	-41.14	-55.12	-71.41	-41.35	-56.38	0.98
950	-73.14	-71.84	-72.49	-84.00	-65.61	-74.81	0.97
1000	-53.58	-145.52	-99.55	-85.83	-104.50	-95.17	1.05

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]

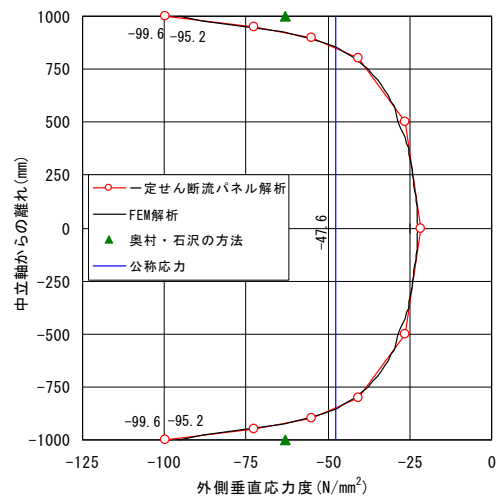


図-3.3.59 下柱フランジ軸応力分布比較

表-3.3.30 下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	-47.59	-62.97	1.32
一定せん断流パネル解析		-99.55	2.09
FEM解析		-95.17	2.00

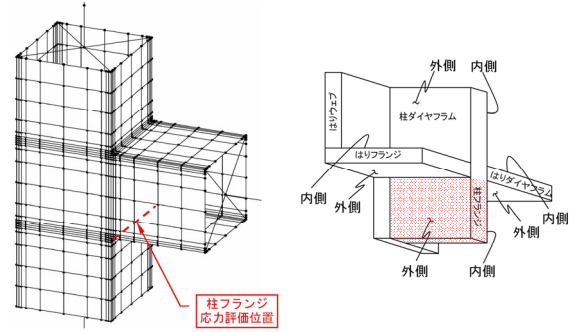


図-3.3.60 応力評価位置

③ 面外方向

面外方向は、図-3.3.61 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。

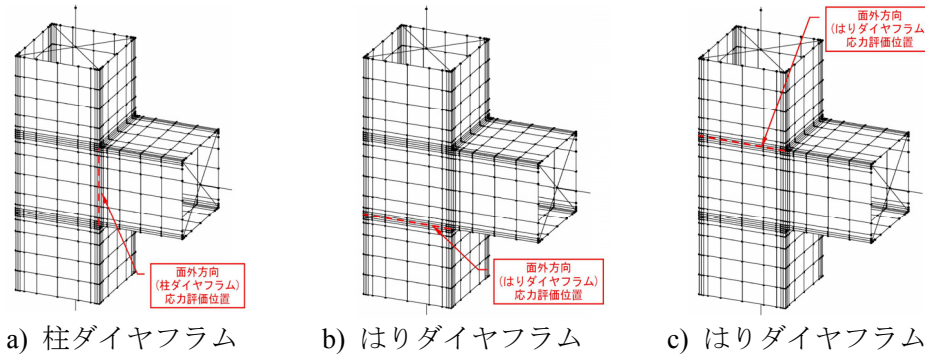


図-3.3.61 面外方向応力評価位置

(a) 柱ダイヤフラム

図-3.3.62、表-3.3.31 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、ダイヤフラム端部では他の橋脚形式の検討と同様の理由により、FEM 解析との応力の差が生じている。

表-3.3.31 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 N/mm ²	軸応力比
	垂直応力度			垂直応力度			
	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²	内側 N/mm ²	外側 N/mm ²			
2000	19.34	1.47	10.40	15.08	-0.55	7.27	1.43
1950	3.32	-1.12	1.10	1.89	-0.60	0.64	1.71
1900	-2.80	3.60	0.40	-2.74	2.18	-0.28	-1.42
1800	-2.68	2.38	-0.15	-3.43	2.83	-0.30	0.50
1500	-0.90	0.83	-0.03	-2.21	2.22	0.01	-6.17
1000	0.07	0.11	0.09	-0.94	1.12	0.09	0.97
500	1.05	-0.63	0.21	0.84	-0.50	0.17	1.29
200	2.86	-2.28	0.29	2.85	-1.97	0.44	0.66
100	2.64	-4.00	-0.68	2.43	-2.31	0.06	-12.01
50	-4.62	-1.13	-2.87	-2.77	-1.53	-2.15	1.34
0	-16.92	-2.52	-9.72	-17.50	-5.01	-11.26	0.86

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]

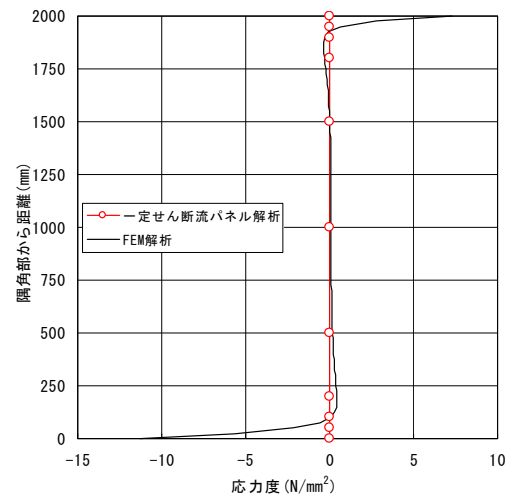


図-3.3.62 柱ダイヤフラム軸応力分布比較

(b) はりダイヤフラム

図-3.3.63, 表-3.3.32 にはり上ダイヤフラムの応力算出結果を示す。はり上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、他の橋脚形式の検討と同様に、ダイヤフラム端部やダイヤフラム中央の数カ所に FEM 解析と乖離がみられる。

表-3.3.32 はり上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		
2000	-5.58	-4.18	-4.88	9.42	9.37	9.40	-0.52
1950	3.75	4.00	3.87	4.67	3.97	4.32	0.90
1900	1.26	0.59	0.93	1.74	0.58	1.16	0.80
1800	0.30	-0.21	0.05	0.58	-0.63	-0.02	-2.00
1500	-0.02	-0.11	-0.06	4.05	4.02	4.04	-0.02
1000	-0.37	0.24	-0.06	4.36	4.54	4.45	-0.01
500	-1.30	1.04	-0.13	4.90	4.26	4.58	-0.03
200	-3.37	3.24	-0.07	-3.55	3.05	-0.25	0.26
100	-2.88	5.67	1.40	-2.90	4.17	0.64	2.19
50	6.37	3.70	5.03	3.89	4.63	4.26	1.18
0	17.42	3.39	10.40	22.22	10.86	16.54	0.63

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]

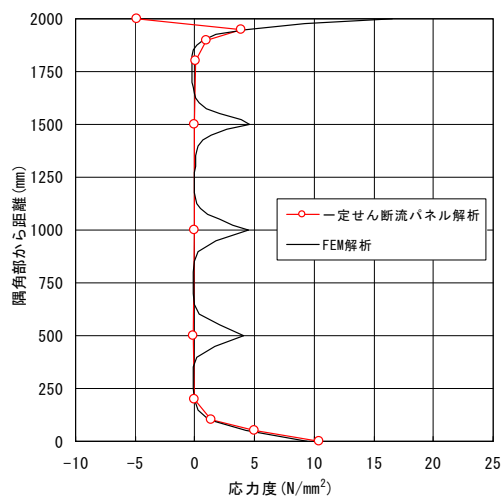


図-3.3.63 はり上ダイヤフラム軸応力分布比較

図-3.3.64, 表-3.3.33 にはり下ダイヤフラムの応力算出結果を示す。はり下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、他の橋脚形式の検討と同様に、ダイヤフラム中央の数カ所に FEM 解析と乖離がみられる。

表-3.3.33 はり下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		
2000	3.60	0.02	1.81	1.38	1.07	1.22	1.48
1950	1.68	0.97	1.32	0.73	1.73	1.23	1.07
1900	0.35	1.95	1.15	0.18	2.01	1.09	1.05
1800	0.21	1.43	0.82	-0.11	1.81	0.85	0.97
1500	0.24	0.60	0.42	1.19	1.59	1.39	0.30
1000	0.52	-0.03	0.24	0.56	-0.26	0.15	1.59
500	1.47	-0.93	0.27	-0.59	0.10	-0.25	-1.11
200	3.69	-3.06	0.32	3.92	-3.02	0.45	0.71
100	3.77	-4.86	-0.54	3.65	-3.40	0.13	-4.32
50	-4.30	-0.44	-2.37	-2.01	-1.64	-1.82	1.30
0	-18.65	-0.79	-9.72	-17.52	-3.64	-10.58	0.92

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]

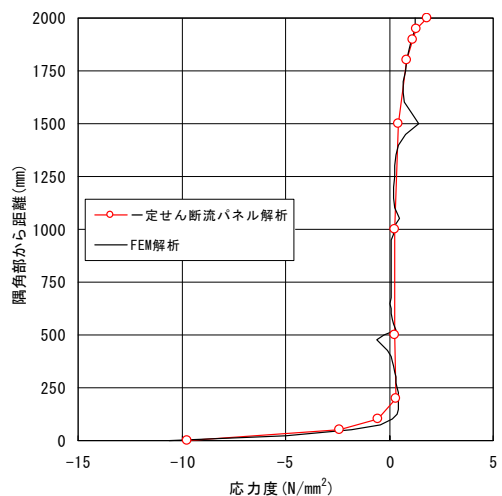


図-3.3.64 はり下ダイヤフラム軸応力分布比較

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。

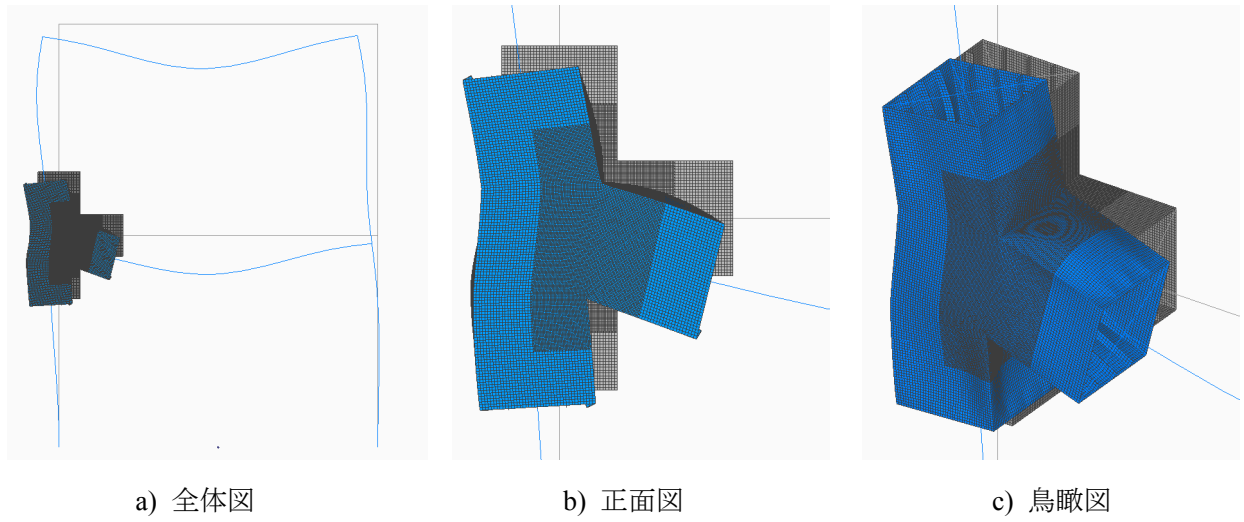


図-3.3.65 変形図

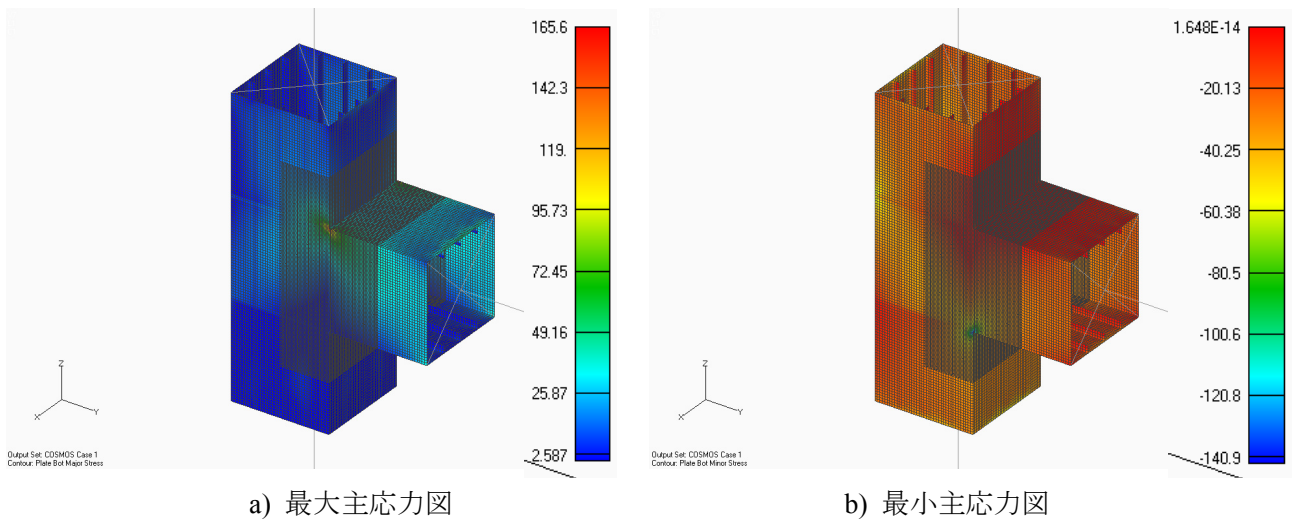


図-3.3.66 主応力図

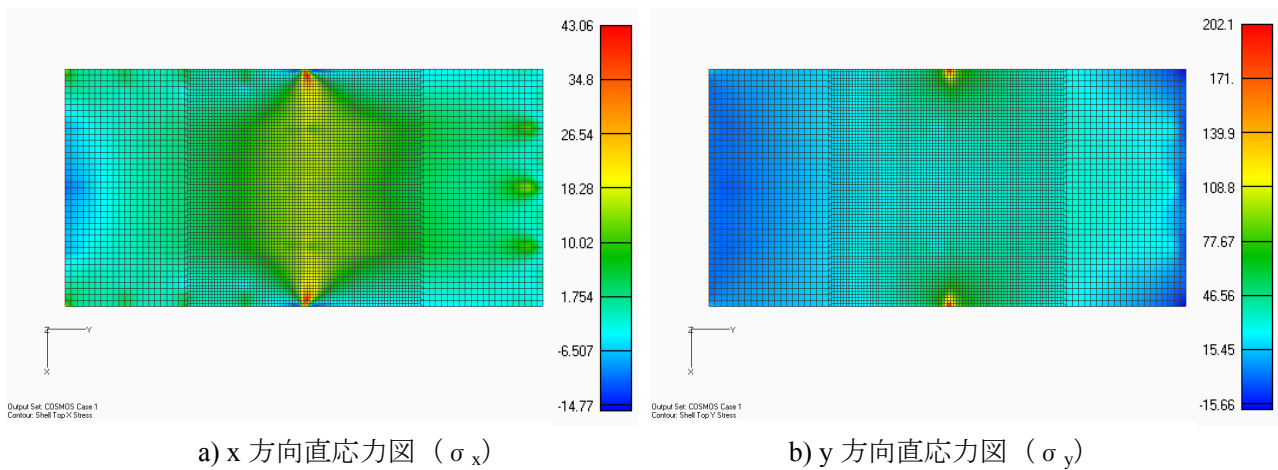
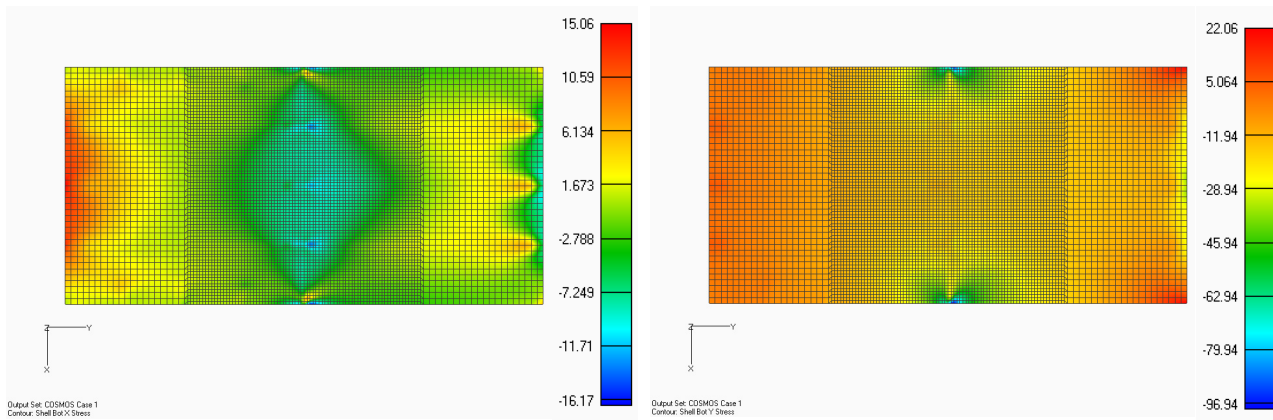


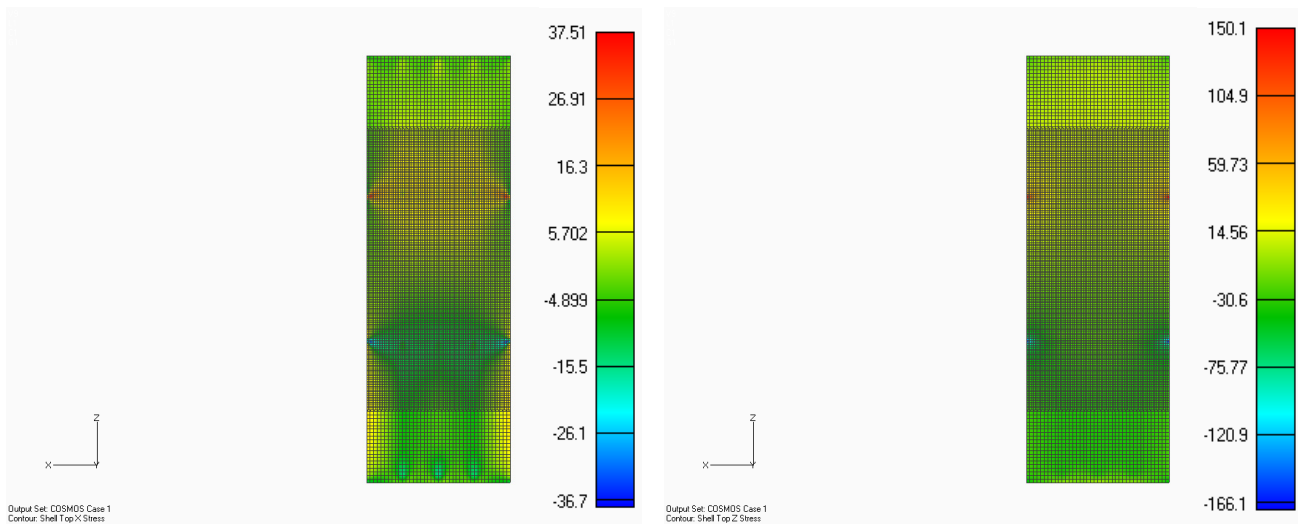
図-3.3.67 はり上フランジ直応力図



a) x 方向直応力図 (σ_x)

b) y 方向直応力図 (σ_y)

図-3.3.68 はり下フランジ直応力図



a) x 方向直応力図 (σ_x)

b) z 方向直応力図 (σ_z)

図-3.3.69 柱フランジ直応力図