

4.3 フィレット構造

4.3.1 一定せん断流パネル解析による評価

(1) 概要

隅角部のフランジ端部には、構造的にせん断遅れによる応力集中を生じ、この部位では変動応力振幅も相対的に大きくなる。近年報告されている隅角部の亀裂損傷においても、板組や溶接などの構造上の要因により疲労耐久性が一般部に比べて劣る隅角部のフランジ端部に発生する相対的に大きな変動応力振幅が関係しているものと考えられている。そのため、隅角部フランジ端部に発生する応力集中を低減させることが、隅角部の疲労耐久性の向上に有効な方法と考えられ、その1つとして、図-4.3.1 に示すようにフィレット構造を採用することが効果的であることされている。

本節では、近年疲労耐久性改善の観点から多く用いられているフィレット構造の形状をモデル化し、その有無や形状が隅角部の応力性状に及ぼす影響の評価に、一定せん断流パネル解析手法を用いる方法について検討するとともに、フィレット構造による疲労耐久性向上効果について検証する。

(2) 検討対象および方法

1) 検討対象

対象とした橋脚構造は、矩形柱門型ラーメン橋脚および円形柱門型ラーメン橋脚とし、圧縮側となる梁の下フランジと柱の交差部に設けるフィレット構造に着目した。

検証では一定せん断流パネル解析および FEM 解析を用い、フィレット構造の有無による解析結果を相対比較することにより行った。応力検証は、前章と同様に隅角部の3方向の応力に着目し、隅角部の端より柱またははりのフランジ上で交線部から 50mm 離れた位置で応力評価を行った。

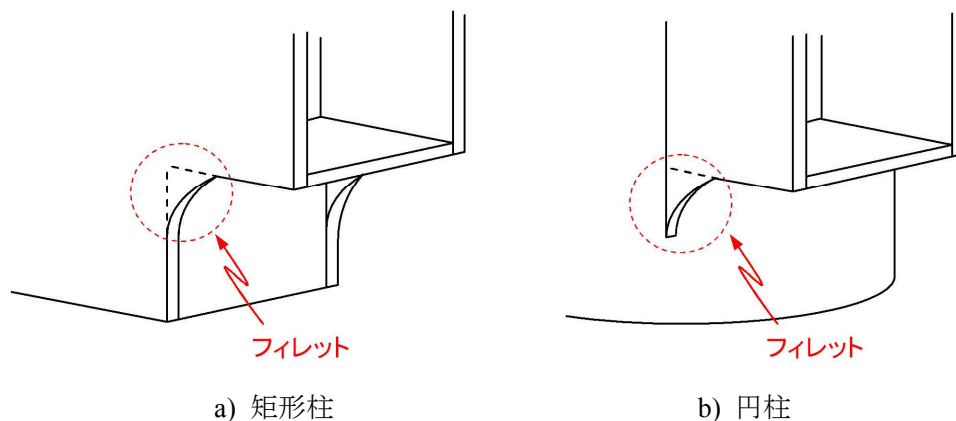


図-4.3.1 フィレット構造例図

2) フィレット構造の設定

フィレット構造は、既往の研究結果などから通常、直線とそれを挟む2つの円弧(R)で構成されるが、一定せん断流パネル解析では曲線の詳細な再現は困難であることから、既往文献を参考に図-4.2.2 に示すように直線的なフィレット構造で設定した。一方、比較に用いる FEM 解析ではフィレット構造部を忠実に再現したモデルと直線フィレット構造としたモデルの両方で解析を行い、フィレット構造部のモデル化における円弧(R)の再現の必要性についても検討を行った。

フィレット構造部の寸法は、既往の文献を参考に、フィレット構造を設けない場合に対してコーナー部の応力集中が約 50%緩和されることを目標に、はり高さ (D) とフィレット構造突出長 (W) の比 (W/D) を、矩形柱隅角部では 10%以上、円形柱隅角部では 20%以上となるように設定した。

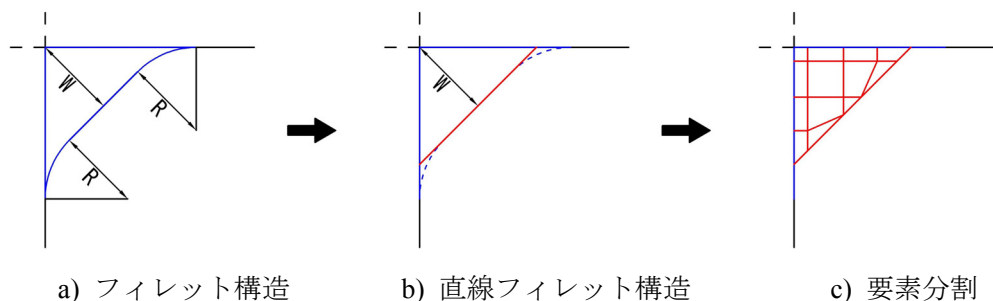


図-4.3.2 フィレット構造のモデル化

3) フィレット構造のモデル化

フィレット構造を一定せん断パネル要素によりモデル化を行う場合、曲線を廃して直線で形状を近似しても図-4.3.3 に示すような三角形域ができる。しかし、一定せん断流パネル解析では三角形要素を定義できないため、このような個所をはり要素 (①, ②, ③) とパネル要素を組み合わせてモデル化する。なお、各はり要素の部材剛度は、以下に示すように分担幅を定義して設定を行った。

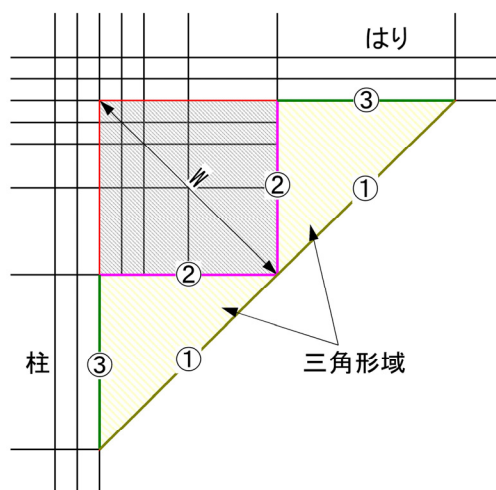


図-4.3.3 フィレット構造の要素分割法

① 部材①のモデル化

図-4.3.4 に示すような赤斜線部と青斜線部を考え、この斜線部の合計面積が部材①方向の面積と等価になる幅をはり要素の分担幅と考え、部材の剛度を算出した。

分担幅 : $(A_1 + A_2) / L$

フィレット構造板厚 : t

→ 断面積 : $(A_1 + A_2) / L \times t$

断面 2 次モーメント : $(A_1 + A_2) / L \times t^3 / 12$

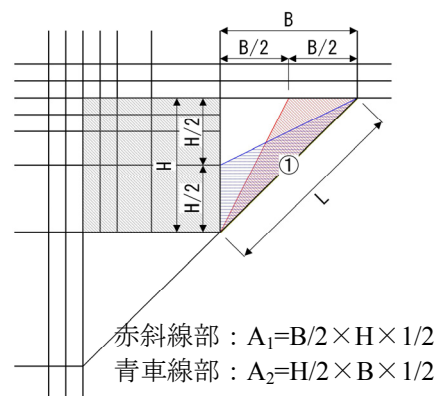


図-4.3.4 部材①のモデル化

② 部材②のモデル化

図-4.3.5 に示すような赤斜線部を考え、この斜線部の面積が部材②方向の面積と等価になる幅をはり要素の分担幅と考え、部材の剛度を算出した。

分担幅： $(B_1/2+B_2)/2$

フィレット構造板厚： t

→ 断面積： $(B_1/2+B_2)/2 \times t$

断面 2 次モーメント： $(B_1/2+B_2)/2 \times t^3/12$

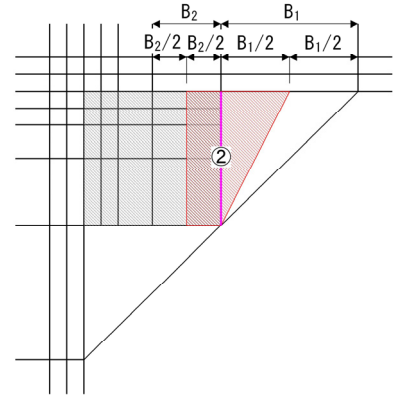


図-4.3.5 部材②モデル化

③ 部材③のモデル化

図-4.3.6 に示すような赤斜線部を考え、この斜線部の面積が部材③方向の面積と等価になる幅をはり要素の分担幅と考え、部材の剛度を算出した。

分担幅： $(H_1/2+H_2)/2$

フィレット構造板厚： t

→ 断面積： $(H_1/2+H_2)/2 \times t$

断面 2 次モーメント： $(H_1/2+H_2)/2 \times t^3/12$

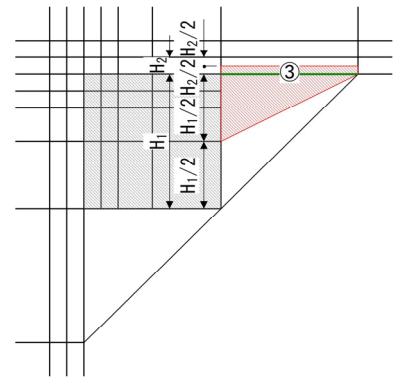


図-4.3.6 部材③のモデル化

4) 検証方法

フィレット構造の設置による影響は、フィレット構造の有無により隅角部に発生する応力および応力性状を相対比較することにより行った。なお、発生応力の評価は、図-4.3.7 に示すように、はり下フランジ、柱フランジおよび面外方向（柱ダイヤフラム）の隅角部直近の応力が急変する個所を避けた隅角部コーナー部および溶接線から 50mm 離れた位置で行った。また、一定せん断流パネル解析に合わせて FEM 解析も実施することによりフィレット構造が設置された場合の検証を行った。

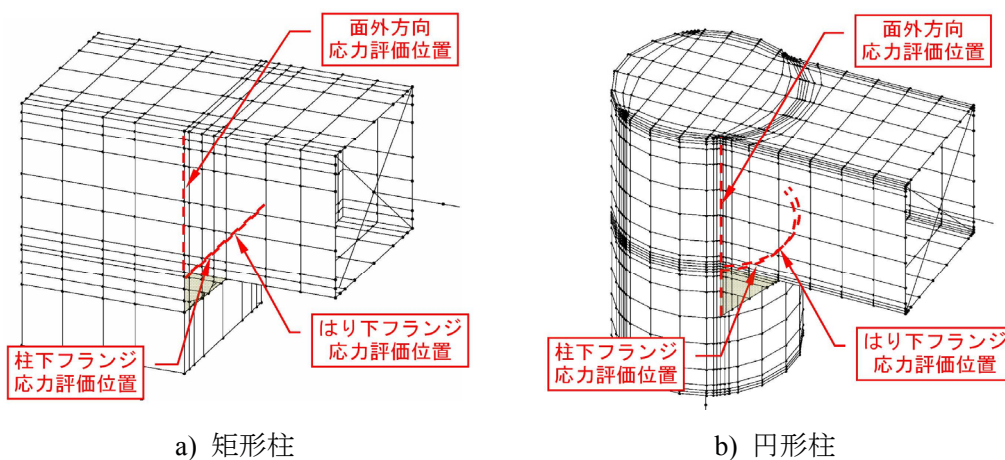


図-4.3.7 応力評価位置

(3) 矩形柱門型ラーメン橋脚

1) 対象橋脚

対象とした橋脚は、3.3 節で行った矩形柱門型ラーメン橋脚にフィレット構造を設置した図-4.3.8 に示す橋脚構造とした。なお、載荷荷重や断面諸元は、フィレット構造を設置しない条件で設定し、3.3 節に記載される条件で決定した。したがって、載荷荷重は、隅角部の使用材質を SM490Y 材として、断面に発生する応力がおよそ $100\sim 200\text{N/mm}^2$ となるように調整し、はり中央に集中荷重で 4096kN を載荷する。また、図-4.3.9 に示すようにフィレット構造は、W/D が 10%以上となる $W=300\text{mm}$ と設定した。

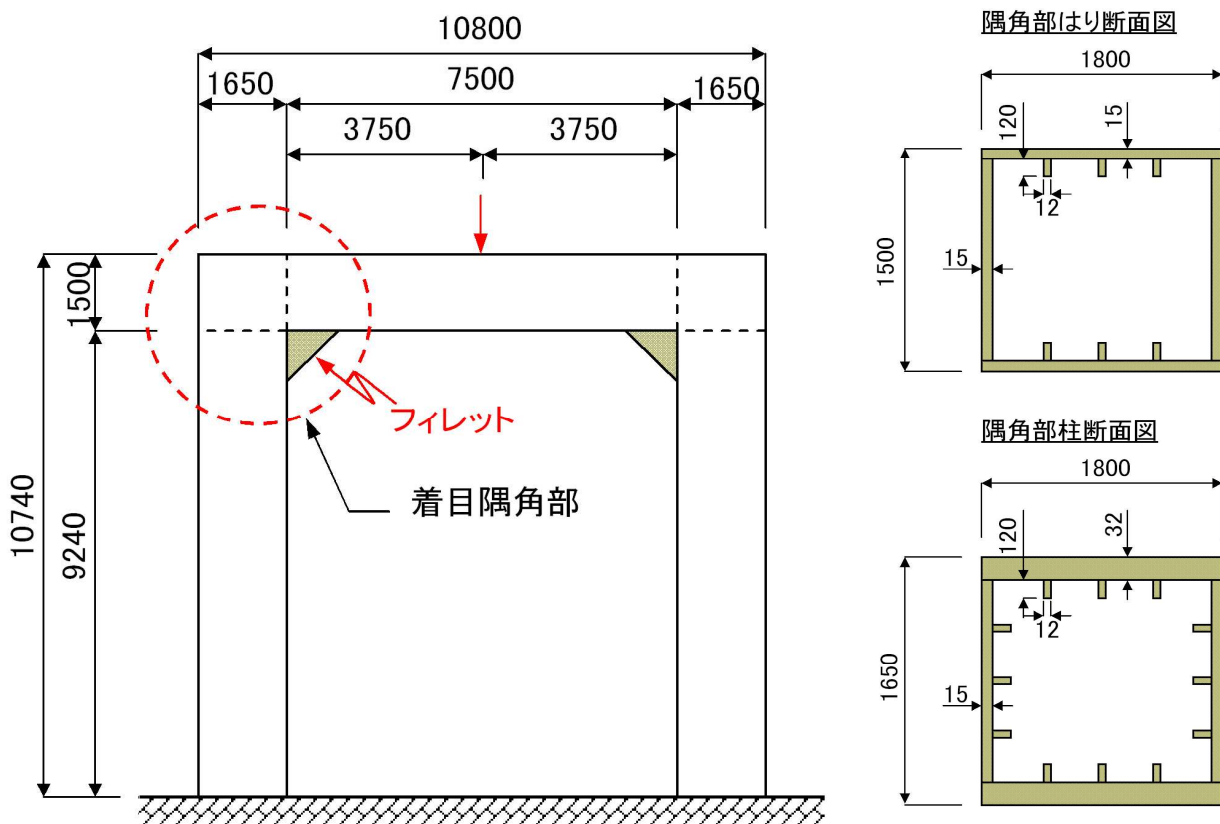


図-4.3.8 検討対象橋脚

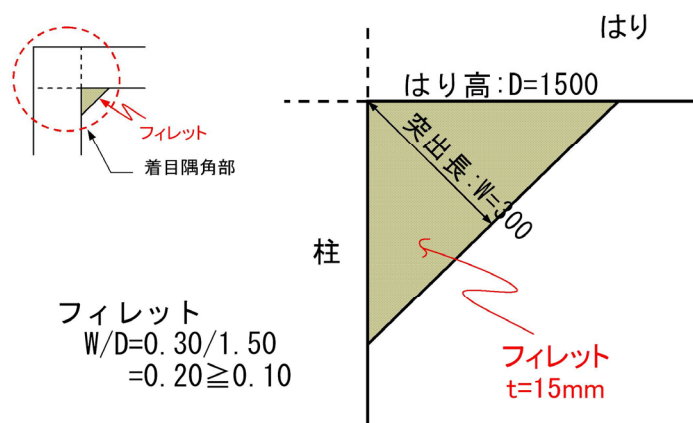
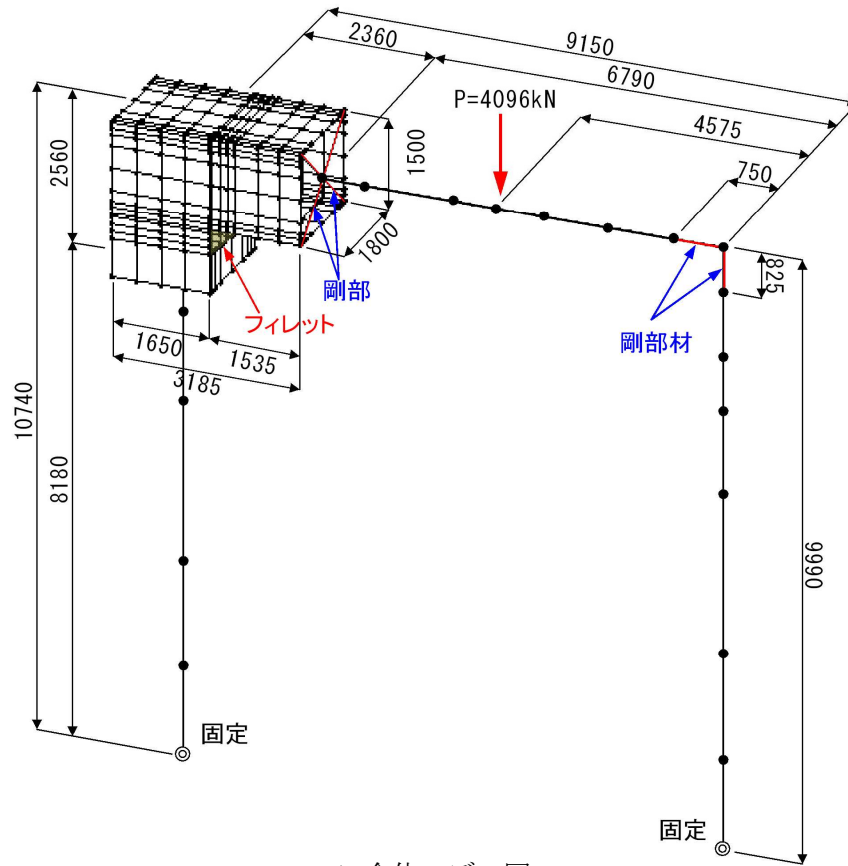


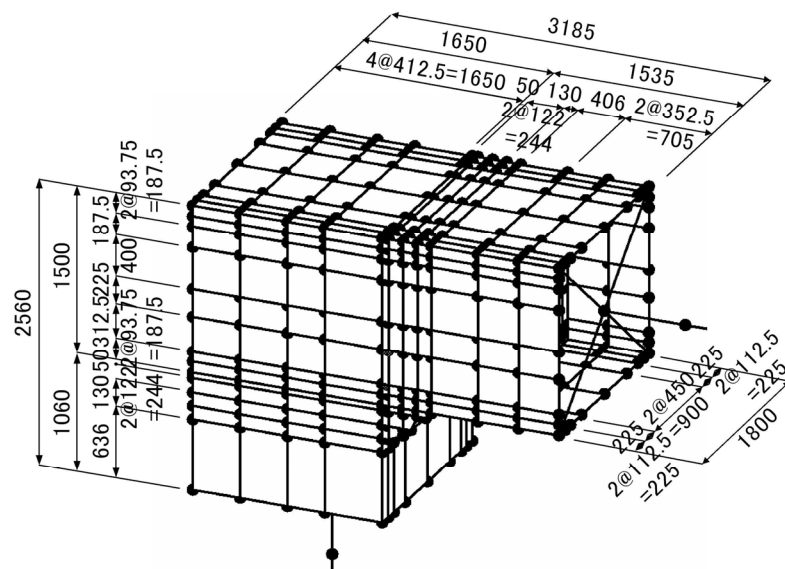
図-4.3.9 フィレット構造

2) 解析モデル

図-4.3.10 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 (400mm) 以下とした。また、フィレット構造を設置しない場合の一定せん断流パネル解析モデルは 3.3 節で使用した解析モデルとし、ここでは記載を省略する。



a) 全体モデル図



b) 隅角部詳細モデル図

図-4.3.10 一定せん断流パネル解析モデル図

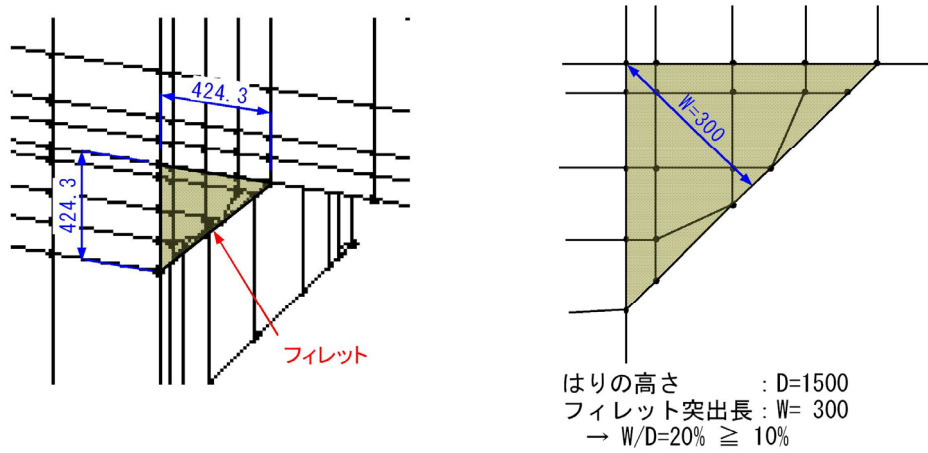


図-4.3.11 フィレット構造のモデル図

また、図-4.3.12 に比較に用いた 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個所は密な要素分割（最小要素サイズ：25mm）とした。また、フィレット構造を設置しない場合の FEM 解析モデルは 3.3 節で使用した解析モデルとし、ここでは記載を省略する。

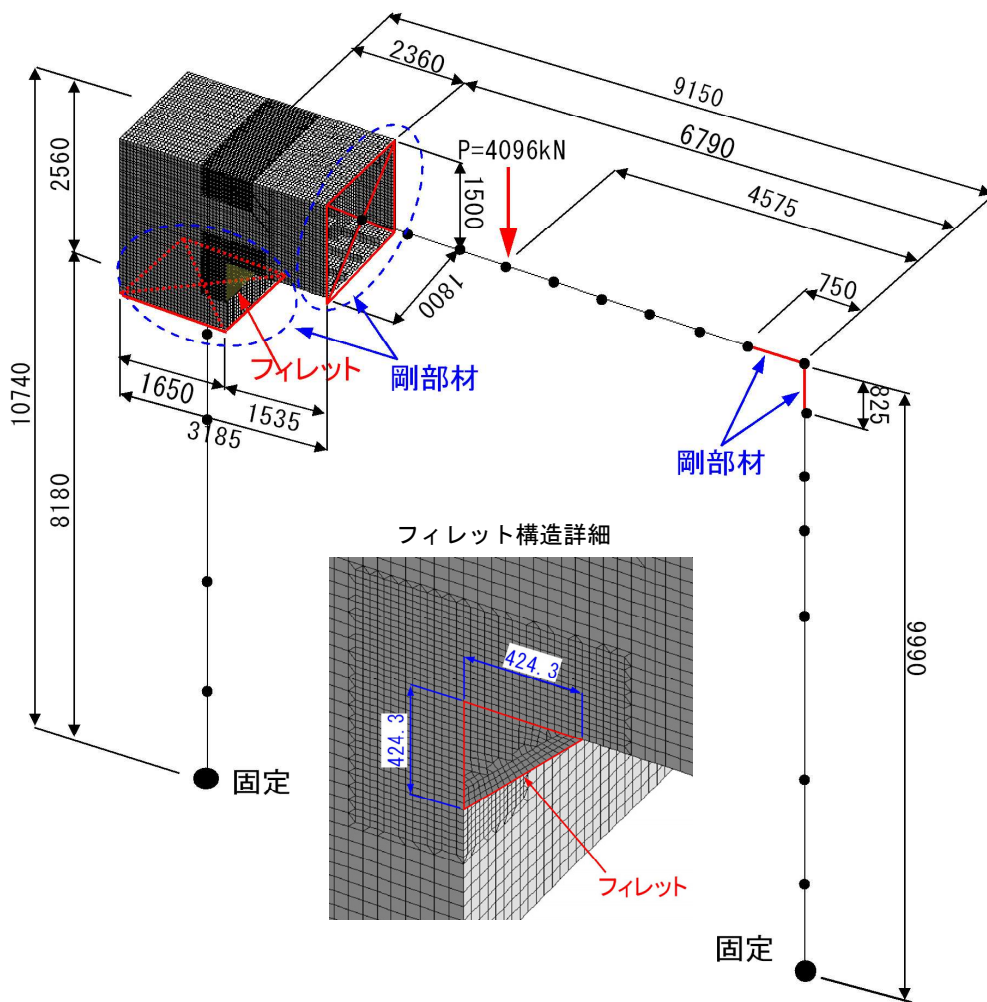


図-4.3.12 FEM 解析モデル図

3) 解析結果

表-4.3.1～表-4.3.3 および図-4.3.13～図-4.3.15 に各方向別の軸応力度および軸応力分布図を示す。解析結果は、フィレット構造の有無や解析手法による違いがわかるように合わせて記載した。

表-4.3.1 はり下フランジ軸応力

中立軸からの離れ mm	一定せん断流パネル解析		FEM解析	
	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²
-900	-117.76	-37.76	-115.18	-42.41
-788	-64.71	-32.81	-56.69	-29.67
-675	-40.89	-27.27	-36.75	-25.41
-450	-23.53	-18.59	-29.01	-23.26
0	-16.43	-13.79	-18.18	-15.30
450	-23.53	-18.59	-27.87	-22.46
675	-40.89	-27.27	-35.68	-24.59
788	-64.71	-32.81	-54.73	-28.47
900	-117.76	-37.76	-110.34	-40.38

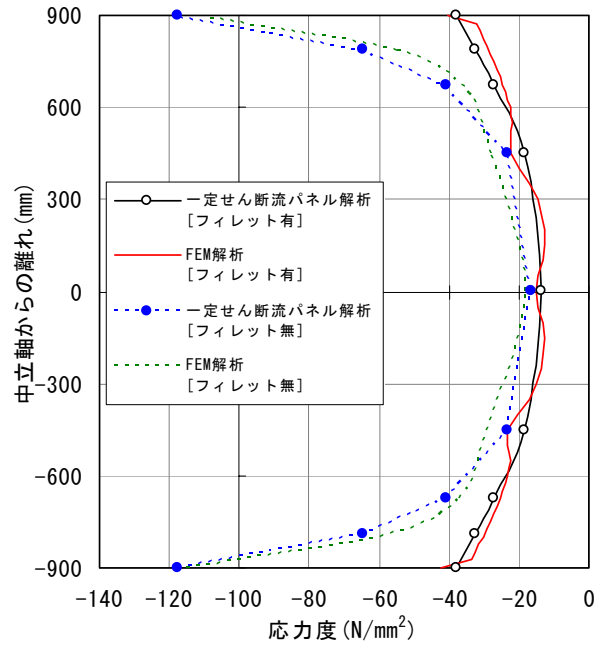


図-4.3.13 はり下フランジ軸応力

表-4.3.2 柱フランジ軸応力

中立軸からの離れ mm	一定せん断流パネル解析		FEM解析	
	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²
-900	-79.06	-40.58	-91.33	-43.54
-788	-53.22	-37.00	-50.68	-33.42
-675	-41.36	-33.55	-38.49	-30.95
-450	-31.52	-28.38	-32.14	-28.61
0	-26.44	-24.66	-21.60	-19.80
450	-31.52	-28.38	-31.41	-27.98
675	-41.36	-33.55	-38.03	-30.65
788	-53.22	-37.00	-50.16	-33.28
900	-79.06	-40.58	-90.35	-43.44

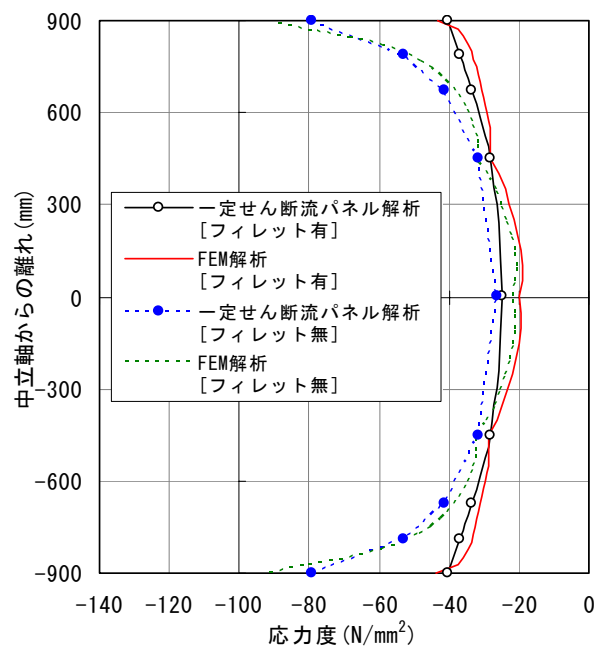


図-4.3.14 柱フランジ軸応力

表-4.3.3 面外方向（柱ダイヤフラム）軸応力

中立軸からの 離れ mm	一定せん断流パネル解析		FEM解析	
	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²
750	4.60	3.94	-0.12	-0.38
656	-0.05	-0.19	0.54	0.36
563	0.67	0.49	0.77	0.60
250	0.35	0.22	0.35	0.22
0	0.14	0.03	0.16	0.01
-250	0.13	-0.16	0.08	-0.17
-563	0.11	-0.29	-0.04	-0.22
-700	-2.69	-0.35	-2.72	-0.04
-750	-10.47	-0.30	-11.81	-0.02

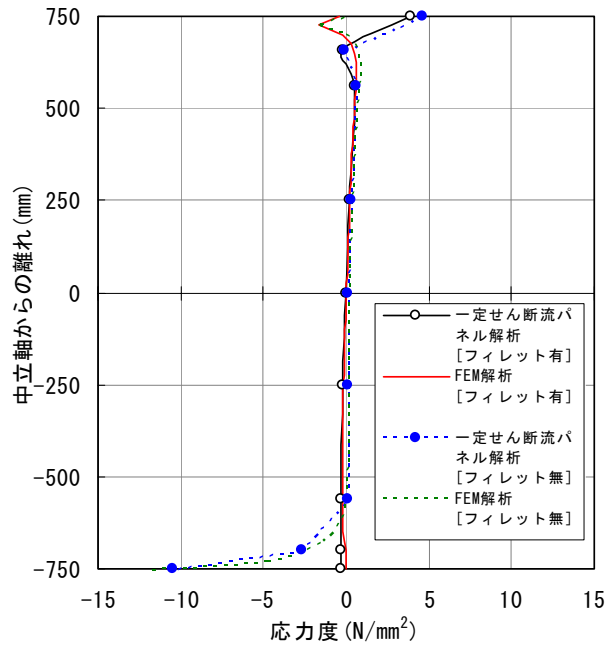


図-4.3.15 面外方向（柱ダイヤフラム）軸応力

4) 考察

解析結果より、はり下フランジおよび柱フランジの応力は各ケースともフランジ端部で最大応力度を示し、フィレット構造の設置によりその大きさは50%程度以下に低減されている。応力分布からも隅角部コーナー部に生じるせん断遅れ現象による集中応力が低減されていることがわかる。また、フィレット構造の設置による効果については、一定せん断流パネル解析でもFEM解析による場合と概ね同じ程度の精度で評価できるものと考えられる。

面外方向の応力は、フィレット構造を設置した場合に一定せん断流パネル解析とFEM解析で端部付近に若干変化がみられる。この要因としては、3.4節にて記載したように、応力算出方法の違いによる影響が考えられる。

(4) 円形柱門型ラーメン橋脚の場合

1) 対象橋脚

対象とした橋脚は、3.4.4 項にて用いた橋脚と同一のものを用い、フィレット構造は W/D が 20%以上となるように設定した。フィレット構造の板厚ははりウェブと同板厚とし、フィレット構造サイズは前章解析モデルで節点を設けている隅角部から 1000mm の位置とした。図-4.3.16 に対象橋脚の概要を示す。

なお、載荷荷重や断面諸元は、フィレット構造を設置しない条件で設定し、3.4.4 項に記載される条件で決定した。したがって、載荷荷重は、隅角部の使用材質を SM490Y 材として、断面に発生する応力がおおよそ $100\sim 200\text{N/mm}^2$ となるように調整し、はり中央に集中荷重で 4096kN を載荷する。また、図-4.3.17 に示すようにフィレット構造は、W/D が 10%以上となる $W=300\text{mm}$ と設定した。

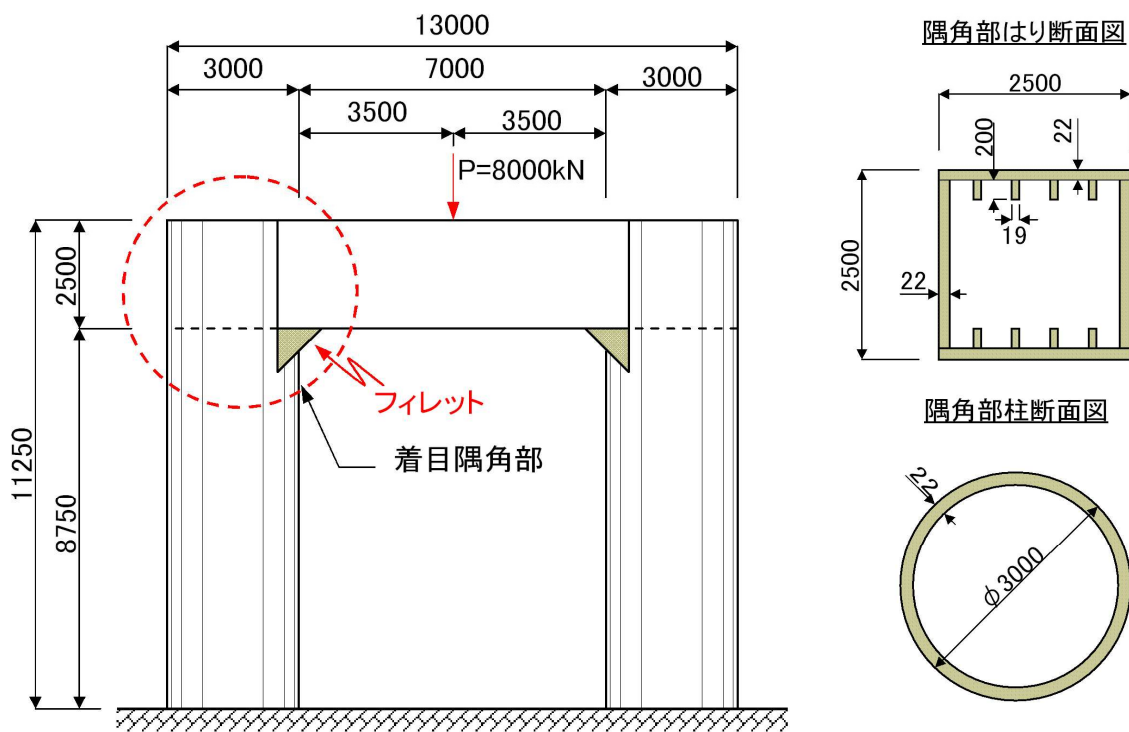


図-4.3.16 検討対象橋脚

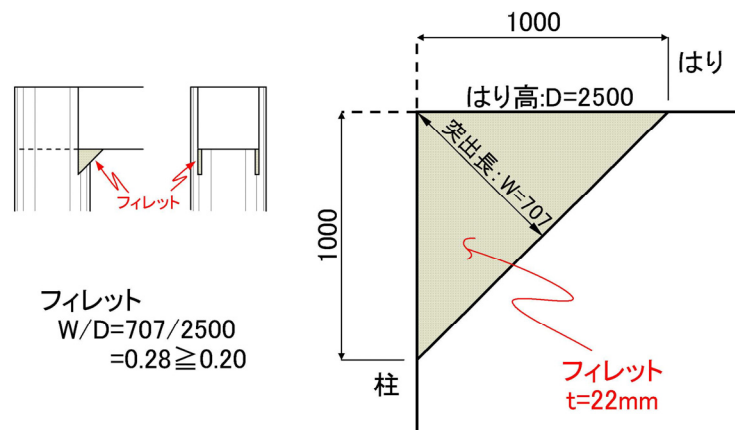
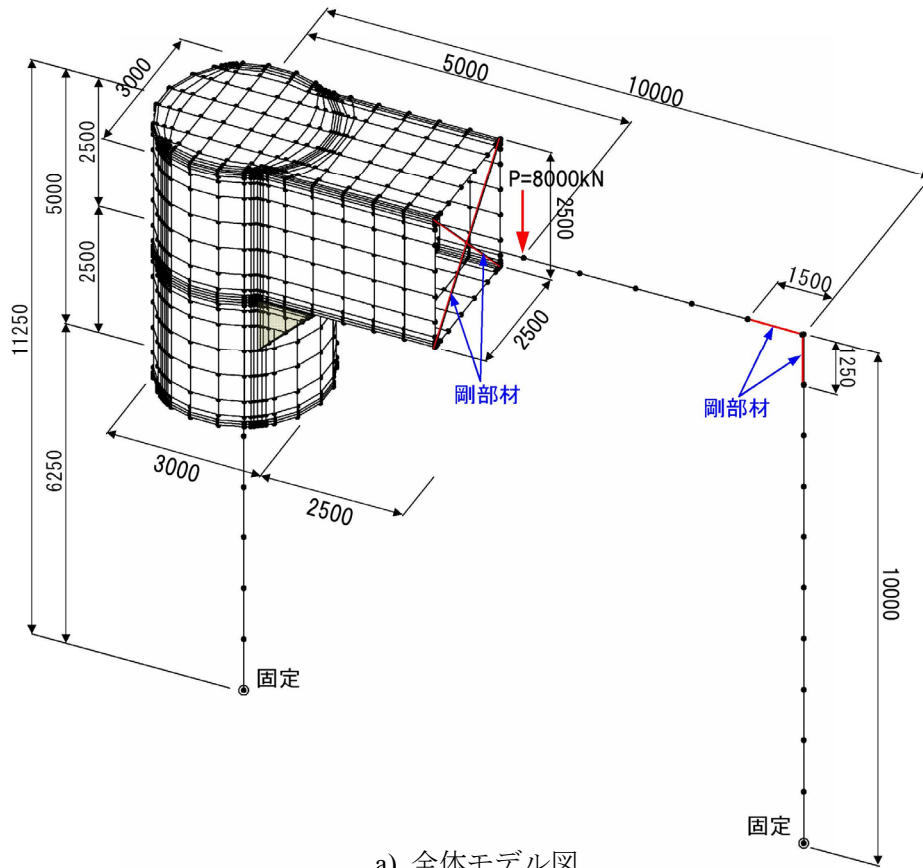


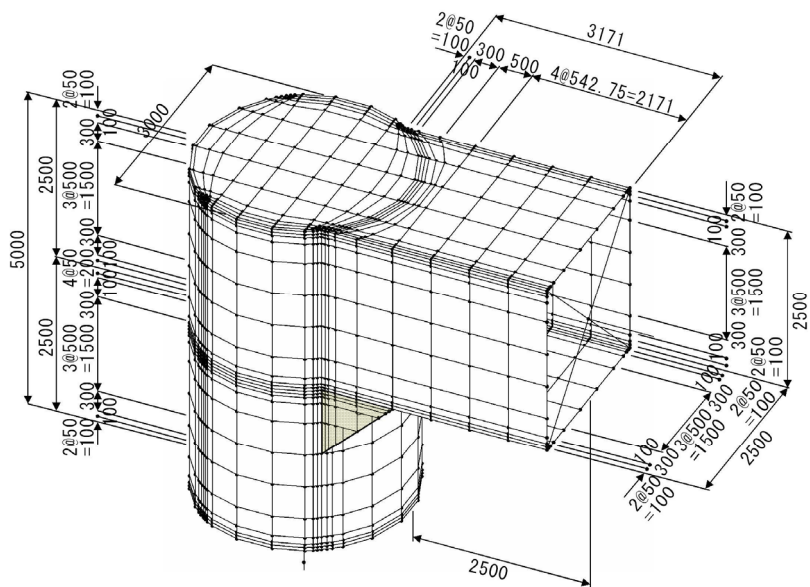
図-4.3.17 フィレット構造

2) 解析モデル

図-4.3.18 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 (400mm) 以下とした。また、フィレット構造を設置しない場合の一定せん断流パネル解析モデルは 3.3 節で使用した解析モデルとし、ここでは記載を省略する。



a) 全体モデル図



b) 隅角部詳細モデル図

図-4.3.18 一定せん断流パネル解析モデル図

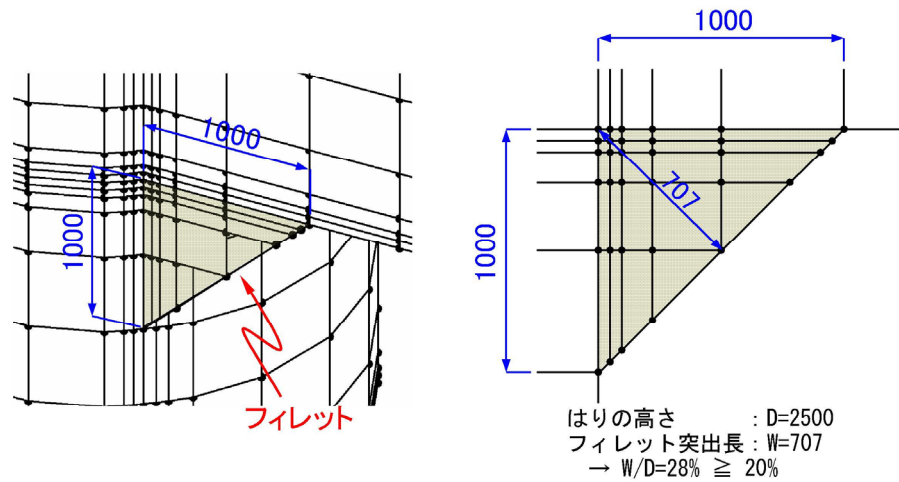


図-4.3.19 フィレット構造部のモデル図

また、図-4.3.20 に比較に用いた 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個所は密な要素分割（最小要素サイズ：25mm）とした。また、フィレット構造を設置しない場合の FEM 解析モデルは 3.3 節で使用した解析モデルとし、ここでは記載を省略する。

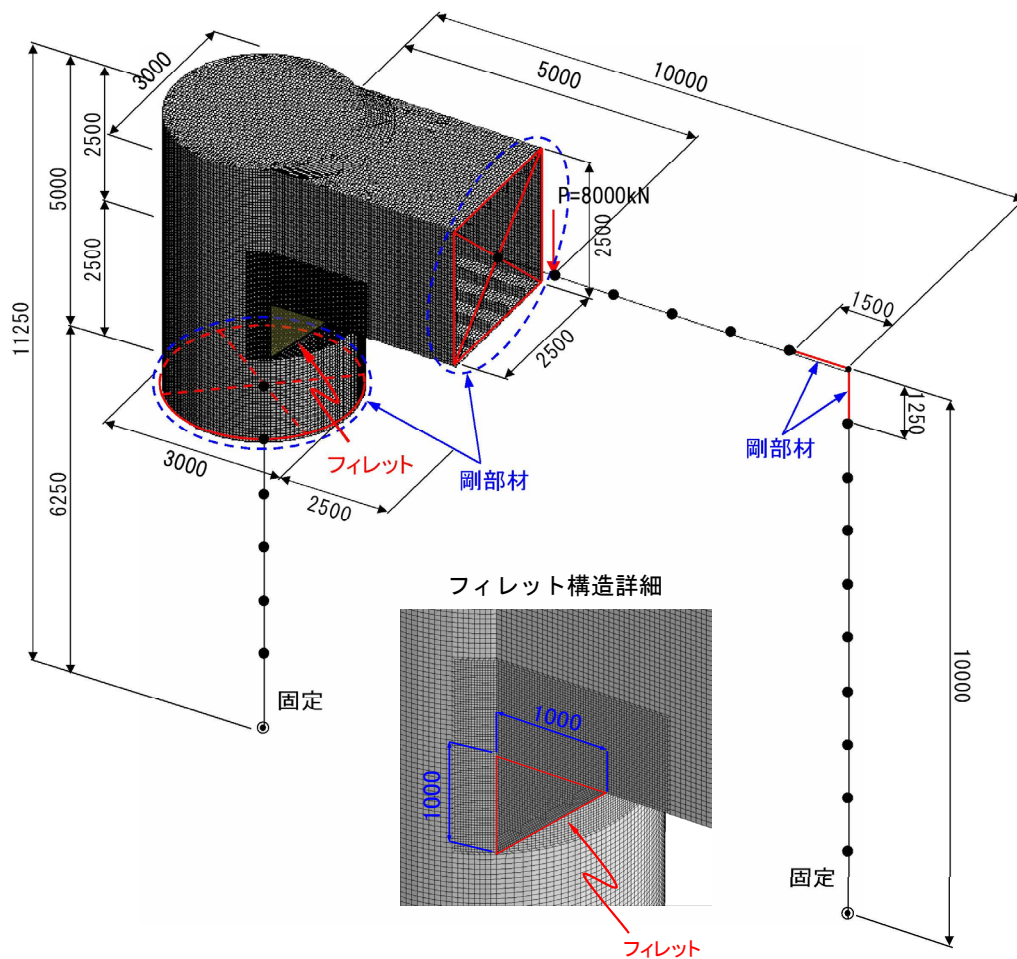


図-4.3.20 FEM 解析モデル図

3) 解析結果

表-4.3.4～表-4.3.6 および図-4.3.21～図-4.3.23 に各方向別の軸応力度および軸応力分布図を示す。解析結果は、フィレット構造の有無や解析手法による違いがわかるように合わせて記載した。

表-4.3.4 はり下フランジ軸応力

中立軸からの離れ mm	一定せん断流パネル解析		FEM解析	
	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²
-1250	-105.52	-50.14	-89.56	-41.32
-1200	-80.59	-39.39	-61.14	-31.85
-1150	-67.18	-42.24	-49.63	-28.59
-1050	-46.97	-34.05	-36.75	-24.60
-750	-15.43	-11.10	-15.75	-13.32
-250	-3.78	-1.51	-5.01	-3.79
250	-3.79	-1.52	-5.01	-3.79
750	-15.44	-11.11	-15.78	-13.35
1050	-46.97	-34.05	-36.75	-24.61
1150	-67.18	-42.24	-49.65	-28.59
1200	-80.59	-39.39	-61.19	-31.88
1250	-105.52	-50.14	-89.84	-41.44

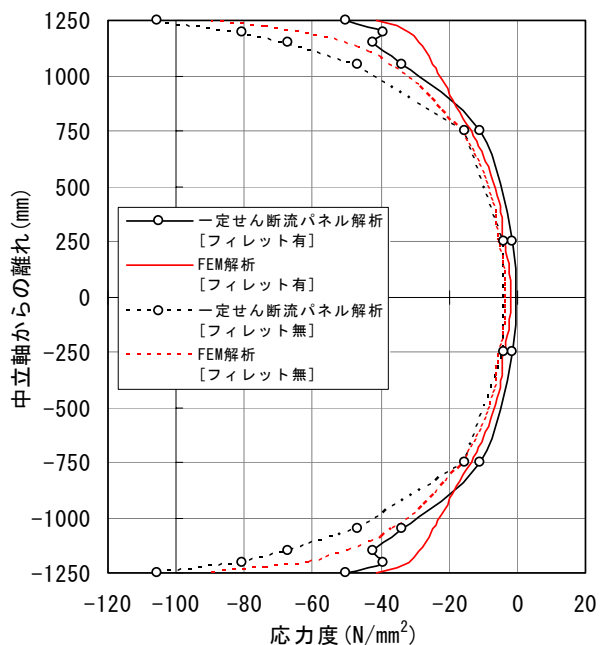


図-4.3.21 はり下フランジ軸応力

表-4.3.5 柱フランジ軸応力

中立軸からの離れ mm	一定せん断流パネル解析		FEM解析	
	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²
-1250	-76.43	-39.49	-75.19	-33.30
-1200	-54.89	-30.25	-59.51	-32.09
-1150	-46.92	-28.04	-48.52	-29.82
-1050	-42.13	-30.01	-42.67	-32.14
-750	-39.59	-39.03	-45.37	-44.85
-250	-37.68	-35.52	-43.48	-40.96
250	-37.68	-35.52	-43.49	-40.97
750	-39.59	-39.03	-45.38	-44.87
1050	-42.13	-30.01	-42.70	-32.14
1150	-46.92	-28.04	-48.61	-29.82
1200	-54.89	-30.25	-59.72	-32.09
1250	-76.43	-39.49	-75.53	-33.19

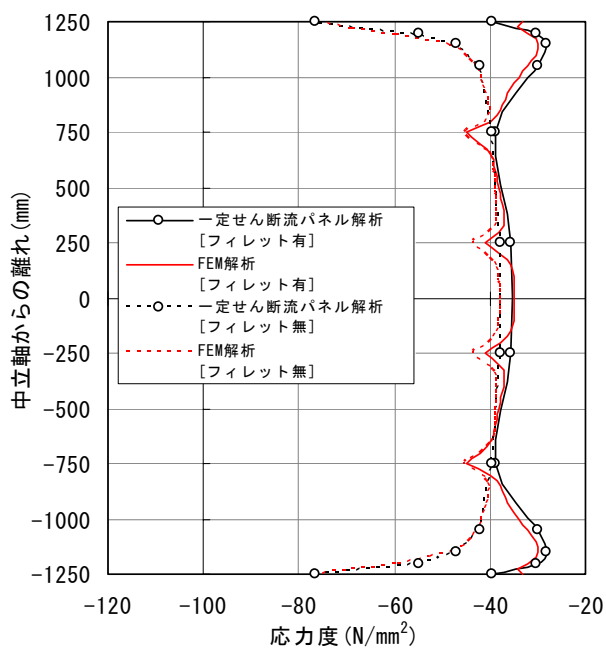


図-4.3.22 柱フランジ軸応力

表-4.3.6 面外方向（柱ダイヤフラム）軸応力

中立軸からの 離れ mm	一定せん断流パネル解析		FEM解析	
	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²	フィレット無 N/mm ²	フィレット有 N/mm ²
1250	7.24	6.86	-3.02	-2.78
1200	-12.21	-11.62	-1.57	-1.44
1150	-3.23	-3.03	-0.33	-0.29
1050	2.06	2.03	0.59	0.56
750	0.68	0.66	0.31	0.27
250	-0.17	-0.30	-0.08	-0.13
-250	-0.48	-0.76	-0.09	-0.24
-750	-1.37	-1.56	-0.85	-0.91
-1050	-7.53	-3.41	-3.95	-2.00
-1150	-10.71	-0.63	-5.25	-1.39
-1200	-8.03	2.27	-5.00	-0.05
-1250	-26.38	-12.09	-7.08	-0.04

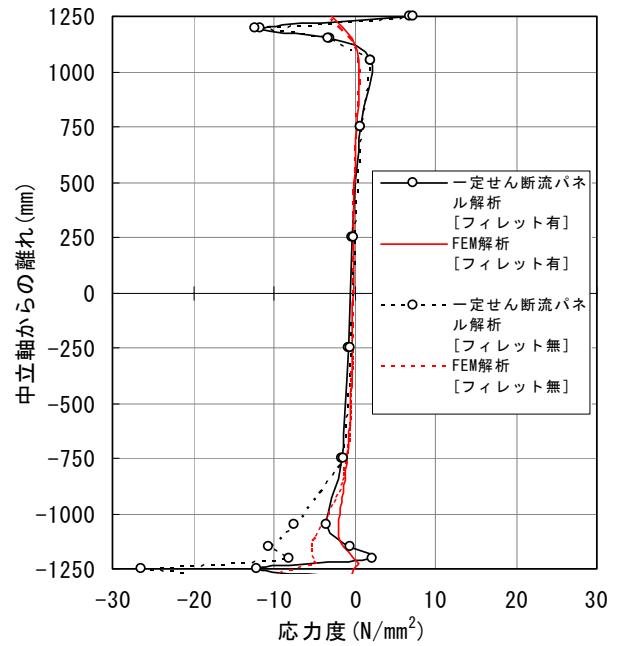


図-4.3.23 面外方向（柱ダイヤフラム）軸応力

4) 考察

解析結果より、はりフランジおよび柱フランジの応力は各ケースともフランジ端部で最大応力度を示し、フィレット構造の設置によりその大きさは50%程度に低減されている。応力分布からも隅角部コーナー部に生じるせん断遅れ現象による集中応力が低減されていることがわかる。また、矩形柱の隅角部と同様に、フィレット構造の設置による隅角部コーナー部の応力低減効果については、一定せん断流パネル解析でもFEM解析に近い精度で評価できることがわかる。

面外方向の応力は、フィレット構造を設置した場合に一定せん断流パネル解析とFEM解析で端部付近に若干変化がみられる。この要因の1つとしては、フィレット構造端部が急激な応力変化点になっているためと考えられる。一定せん断流パネル解析でこの応力変化を捉えるためには、フィレット構造端部をある程度小さな要素サイズでモデル化する必要があると考えられる。もう1つは、3.4節にて記載したように、応力算出方法の違いによる影響と考えられる。

(5) フィレット構造のモデル化と評価の方法

1) 検討概要

前項までの検討の結果より、疲労耐久性の向上という観点からはフィレット構造の設置による効果の評価において、一定せん断流パネル解析は FEM 解析と比較してほぼ同程度に評価が可能であるがわかった。しかし、前項の検討の中で、面外方向の解析結果において柱側フィレット端部の作用応力に違いがみられた。そこで、その原因と思われるフィレット構造への作用応力について、一定せん断流パネル解析におけるフィレット構造部の要素分割方法に着目し、FEM 解析との相対比較によりその原因の検討を行った。検証は、図-4.3.24 に示すはり要素に着目し、一定せん断流パネル解析および FEM 解析より算出される軸応力で評価を行う。

ここでは、検討対象をフィレット構造を設置した場合に、矩形柱門型ラーメン橋脚より解析結果の違いが大きかった円形柱門型ラーメン橋脚にフィレット設置した場合を対象とした。なお、検討対象橋脚は、(4) 項で使用した橋脚構造として解析条件などは(4) 項と同じである。

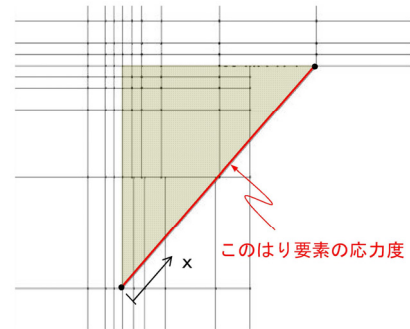


図-4.3.24 応力評価位置

2) フィレット構造のモデル化

前項までの結果で、フィレット構造端部の応力に一定せん断流パネル解析と FEM 解析で差異がみられたことから、ここではフィレット構造端部付近におけるフィレット構造モデルの要素分割に着目した。検討モデルは、(4) 項のモデル化を基本に、要素分割方法を変えたケースを加えた以下 3 ケースとした。なお、解析モデル図を図-4.3.25 に示す。

<モデルケース>

モデル 1： フィレット構造を正方形の一定せん断流パネル要素を 1 つ配置したモデル

モデル 2： フィレット構造と柱およびはりが取り付く位置に一定せん断流パネル要素を配置するとともに、フィレット構造端部の要素分割を細かく（最小サイズ：50mm）したモデル

モデル 3： モデル 2 の柱側のフィレット構造端部を柱方向に要素分割を細かくしたモデル

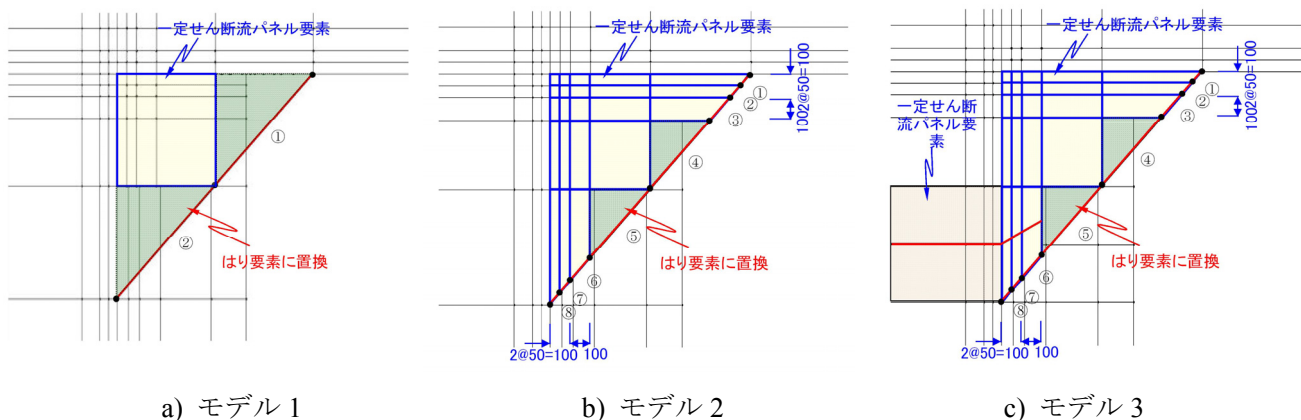


図-4.3.25 フィレット構造部のモデル図

3) 解析結果

図-4.3.26 に着目したはり要素における各モデルにおける軸応力分布図を示す。また、図-4.3.27 は FEM 解析によるフィレット構造部の最小主応力（圧縮）図である。

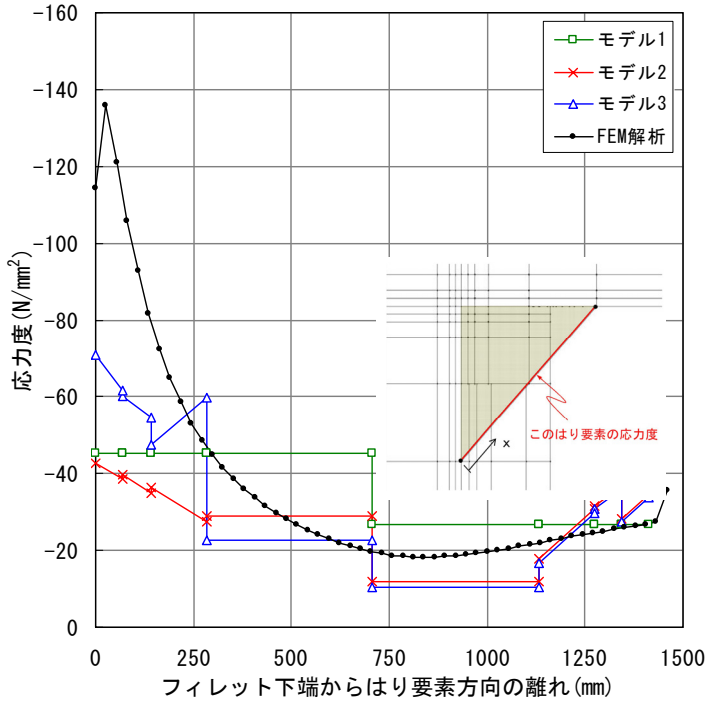
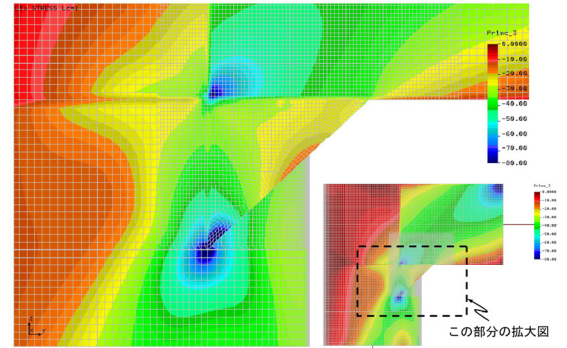
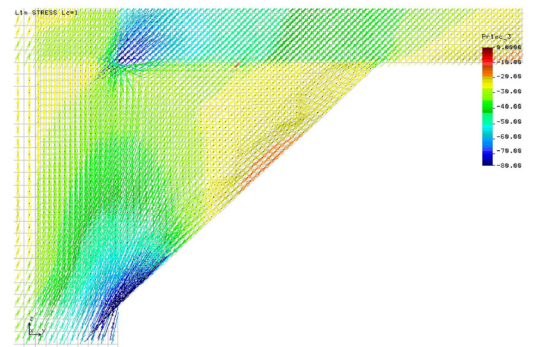


図-4.3.26 フィレット構造軸応力分布比較図



a) 応力コンター図



b) 応力ベクトル図

図-4.3.27 フィレット構造の最小主応力図

4) 考察

解析の結果より、モデル化の違いにより応力および応力性状に違いが生じており、FEM 解析の結果から柱側のフィレット構造端部で急激な応力変化が起こっていることがわかる。また、フィレット構造端部やその周辺の要素分割を細分化するにつれ、端部に生じる応力は大きくなる傾向ではあるが、本検討で最も要素を細分化したモデル 3 における結果でもまだ FEM 解析との乖離は大きい。しかし、フィレット構造の端部における要素分割を細分化することで FEM 解析と同等の応力が得られると考えられる。なお、モデル 3 における結果において、構造の部材⑤と⑥の間で突出した値を示しているのは、図-4.3.28 に示すように、中間節点部に一定せん断流パネル要素がないため、軸力に偏りが生じ部材⑥についてははり側節点のほうが高い応力になってしまったと考えられる。

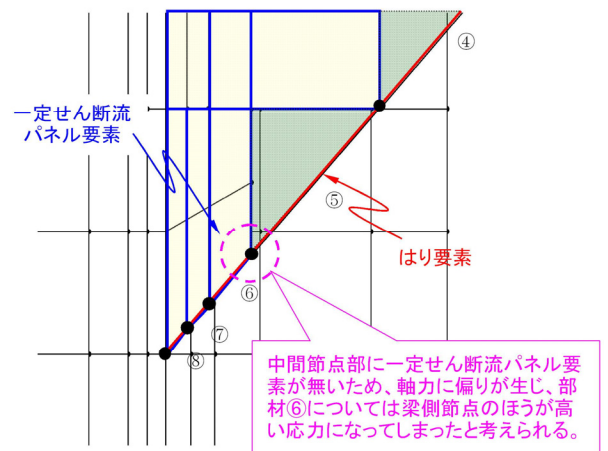


図-4.3.28 隣接要素種類の違いの影響

(6) フィレット構造端部の円弧部のモデル化

1) 検討概要

ここでは、フィレット構造をモデル化する上で、フィレット構造端部の円弧部のモデル化が及ぼす影響について FEM 解析により検証を行った。検証には、図-4.3.29 に示すフィレット構造端部の円弧部を無視した直線モデルと実構造を再現した円弧付きモデルにより解析を行い、隅角部（はり下フランジ）に生じる応力および応力性状を相対的に比較することにより行った。

なお、その他の検討に用いた条件などは、(3) 項と同じ条件とし、記載を省略する。

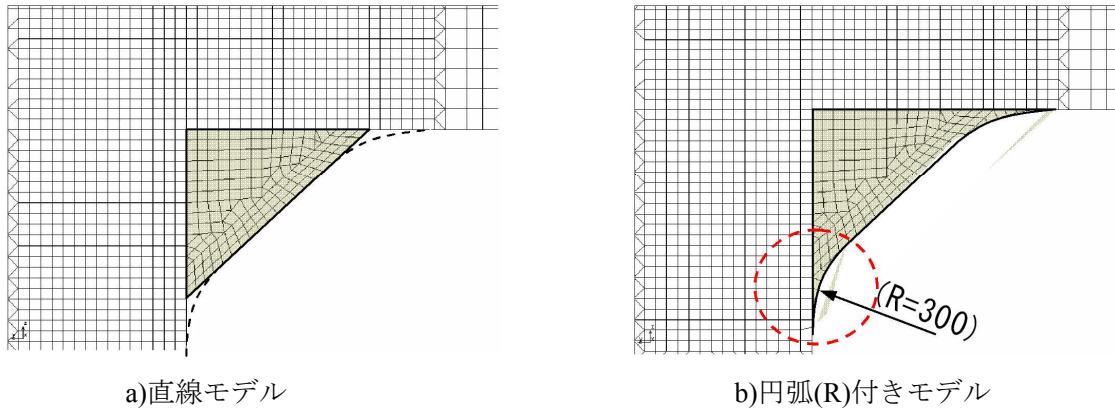


図-4.3.29 フィレット部の FEM 解析モデル図

2) 解析結果

図-4.3.31 にはり下フランジ応力状況を示す。この結果から、フィレット構造端部のモデル化の違いによる影響はみられない。したがって、フィレット構造端部の主応力の方向など評価や応力性状を把握するのでなければ、フィレット構造のモデル化には、端部の円弧形状を厳密にモデル化する必要はないと考えられる。

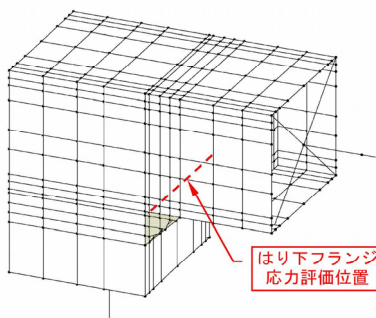


図-4.3.30 応力評価位置

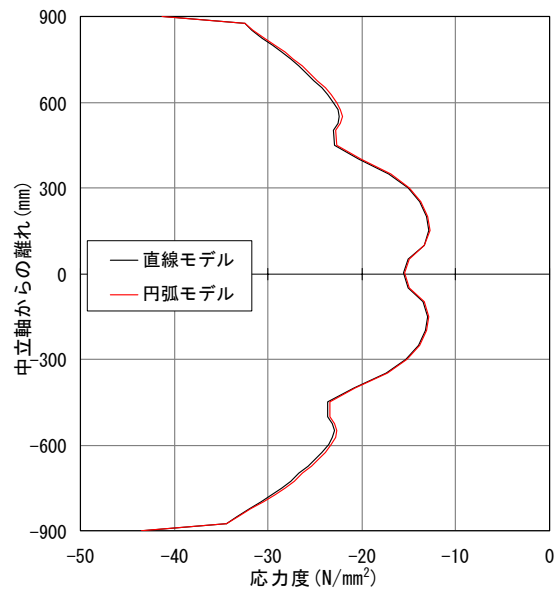


図-4.3.31 はり下フランジ軸応力分布

4.3.2 フィレット構造と疲労耐久性の関係

隅角部の疲労損傷の要因の1つは、隅角部のコーナー部に生じるせん断遅れ現象などによる大きな応力集中であり、この応力を低減することが疲労耐久性の向上につながる。表-4.3.7 に公称応力と最大応力の関係をまとめた。フィレット構造が無い場合では公称応力に対して1.8倍程度の最大応力が発生するのに対して、フィレット構造の設置により0.6倍程度と最大応力が低減される。したがって、フィレット構造は、隅角部コーナー部に生じるせん断遅れ現象などによる応力集中の低減効果に有効であり、疲労耐久性の向上に有意義な構造と考えられる。

表-4.3.7 公称応力と最大応力比較

a) 矩形柱

解析手法	フィレット 有無	公称応力 (フィレット無) σ_0 N/mm ²	最大応力 σ_{max} N/mm ²	比率 σ_{max}/σ_0
一定せん断流 パネル解析	無し	-72.30	-117.76	1.63
	有り	-72.30	-37.76	0.52
	低減率(%)		32.1	
FEM解析	無し	-72.30	-115.18	1.59
	有り	-72.30	-42.41	0.59
	低減率(%)		36.8	

b) 円形柱

解析手法	フィレット 有無	公称応力 (フィレット無) σ_0 N/mm ²	最大応力 σ_{max} N/mm ²	比率 σ_{max}/σ_0
一定せん断流 パネル解析	無し	-64.46	-105.52	1.64
	有り	-64.46	-50.14	0.78
	低減率(%)		47.5	
FEM解析	無し	-64.46	-89.56	1.39
	有り	-64.46	-41.32	0.64
	低減率(%)		46.1	

※低減率=(フィレット有最大応力)/(フィレット無最大応力)

4.3.3 まとめ

隅角部コーナー部に設けられるフィレット構造の設置が隅角部に及ぼす影響について、一定せん断流パネル解析より検討を行った。その結果、フィレット構造の設置は、隅角部コーナー部に生じる応力集中の軽減に有効であり、疲労耐久性の向上に有効であると考えられる。

また、フィレット構造を設置した場合であっても、一定せん断流パネル解析はFEM解析結果と十分に整合性がとられており、フィレット構造寸法と応力の軽減効果の検討なども一定せん断流パネル解析を使用することでFEM解析と同等の評価が行えると考えられる。ただし、一定せん断流パネル解析ではフィレット構造自体の応力を正確に捉えることはやや難しく、この応力を正確に捉えるにはフィレット構造やその取付付近のモデル化を細分化するなどの工夫が必要と考えられる。