

### 3.4 一定せん断流パネル解析による隅角部設計手法の検討

#### 3.4.1 概要

代表的な鋼製橋脚隅角部の疲労耐久性の検討において、一定せん断流パネル解析を用いることで、FEM 解析による場合に比べて、解析モデルが大幅に簡素化されるにもかかわらずせん断遅れの影響を含む隅角部の応力状態が高い精度で把握可能であることがわかった。また、FEM 解析に対して一定せん断流パネル解析の利点としては、格子解析モデルであることから板厚設定などの耐荷力設計で用いられる設計断面力の算出から疲労耐久性の検討で必要となる局部応力や応力分布の算出までを一連の計算が同じ解析で対応できるため設計作業も大幅に効率化できる可能性がある。

ただし、FEM 解析と比べると、補剛材のモデル化が省略され外板と一体で評価されるなど、構造部材のモデル化が精緻でないこともあり、モデル化のレベルや着目する部位によっては実際の発生応力との乖離が大きくなる場合がある。

それらを踏まえて、ここでは一定せん断流パネル解析を鋼製橋脚隅角部の疲労耐久性の検討に用いる観点からモデル化の方法や応力算出結果の評価における留意点などの解析手法について検討を行う。

#### 3.4.2 応力評価の位置

薄肉集成構造であり構造的にせん断遅れの影響が強く現れる鋼製橋脚隅角部では、離散的に応力などが算出される解析モデルでは、応力評価にあたって着目部位によっては要素サイズとの関係で適切な位置で行わないと計算精度が著しく低下する可能性がある。隅角部付近では板曲げ応力の影響などにより応力の乱れが顕著に現われることや、コーナーの極近傍では溶接線形状や溶け込み状況、スカラップ形状などモデルとの乖離の影響もあり、実発生応力と計算応力の乖離が比較的大きくなることはある程度避けられないことなどから、一般には隅角部端部から柱またははりのフランジ上で交差部から 50mm 程度離れた位置で応力評価などが行われている。

ここでは、上記溶接線交差部から 50mm 離れた位置に着目して一定せん断流パネル解析による応力評価方法について検討した。図-3.4.1 にモデルの概要と応力評価位置となる溶接線交差部から 50mm の位置を示す。なお、はり・柱フランジ交差部溶接線位置が 0mm 位置である。

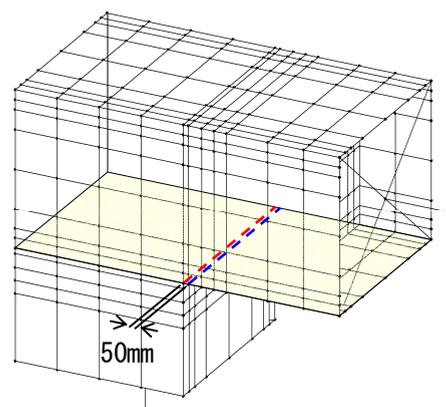
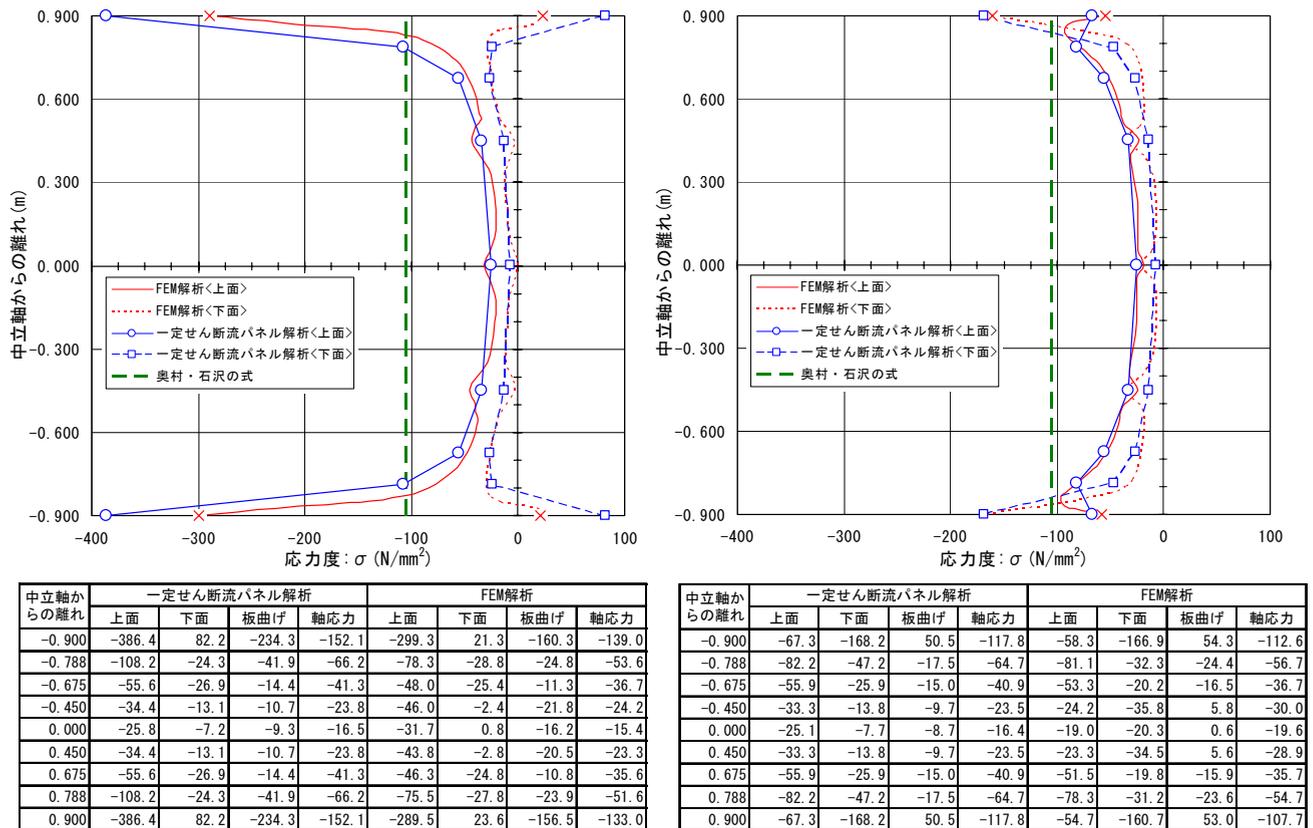


図-3.4.1 応力評価位置

図-3.4.2 に 0mm 位置と 50mm 位置の応力算出結果を示す。50mm 位置では、一定せん断流パネル解析と FEM 解析の結果では最端部を除くと概ね一致しており、一定せん断流パネル解析の場合にも従来 FEM 解析で隅角部の応力評価を行う場合と同様に、交差部の溶接線より 50mm 離れた位置で評価を行うことで FEM 解析による場合と同程度精度で軸方向応力については評価できる。

また、図-3.4.3 は、FEM 解析によるはり下フランジにおける隅角部近傍の応力を示したものである。な

お、本ケースでは 50mm 位置で応力を評価する場合に、FEM 解析では、評価位置と交差部溶接線の間要素が 2 つ設けられているが、一定せん断流パネル解析では図 3.4.1 に示すように 50mm 位置と交差部溶接線の間には 1 パネル分の要素が設けられているだけである。



a) 0mm 位置

b) 50mm 位置

図-3.4.2 位置における応力比較

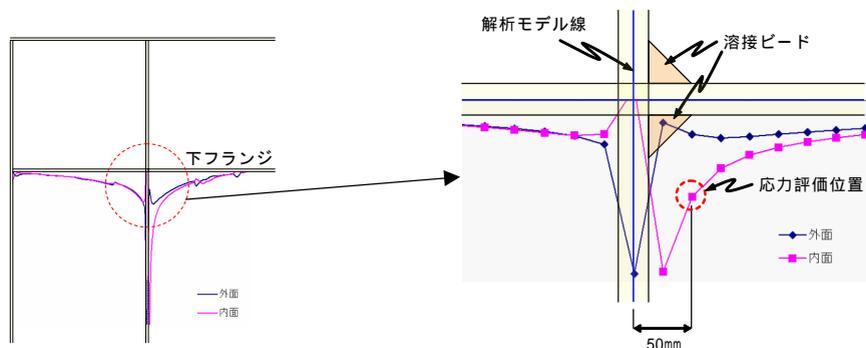


図-3.4.3 隅角部近傍の応力

### 3.4.3 板曲げ応力の評価

#### (1) 概要

鋼製橋脚隅角部の FEM 解析結果や実際の応力計測結果から、隅角部フランジにはせん断遅れによる応力集中の他に、断面変形により生じる応力（以下、「板曲げ応力」という）が大きくなることが判明している。このフランジの板曲げ応力は、一般には具体的に設計計算で考慮はされていないが、疲労耐久性に影響を及ぼす要因の一つと考えられる。このフランジの板曲げ応力は一定せん断流パネル解析においても求めることが可能であるが、これまでの解析では FEM 解析結果に比べ小さい値を示すことがあった。

ここでは、一定せん断流パネル解析においてフランジの板曲げ応力を精度良く解析するために、隅角部近傍の要素分割に着目し検討を行った。

#### (2) 平面モデルによる検討

ここでは、隅角部付根からはり部分を想定した片持ちはりにより検討を行った。一定せん断流パネル解析には図-3.4.4 に示すようにフランジ全体の曲げ剛性を腹板位置に集中させた平面モデルを用いた。

なお、腹板面に本来あるはずの一定せん断流パネル要素が存在しないため、図-3.4.4(b) に示すフランジ面の要素パネルの各縁部材にその影響が評価できるように剛性を付与している。具体的には、図-3.5.4 に示される一定せん断流パネル解析モデル図における縁部材①に断面方向の腹板の板厚分 ( $t_f=30\text{mm}$ ) の曲げ剛性を付与したはり要素（ビーム）によりモデル化を行った。その他の一定せん断流パネル要素の縁部材②、③は棒要素（トラス）によりモデル化し分担幅分の板断面積が付与している。

また、図-3.4.4(b) の左端は隅角部付根部に対応しており、この部分のフランジ縁部材の曲げモーメントにより板曲げ応力を評価している。

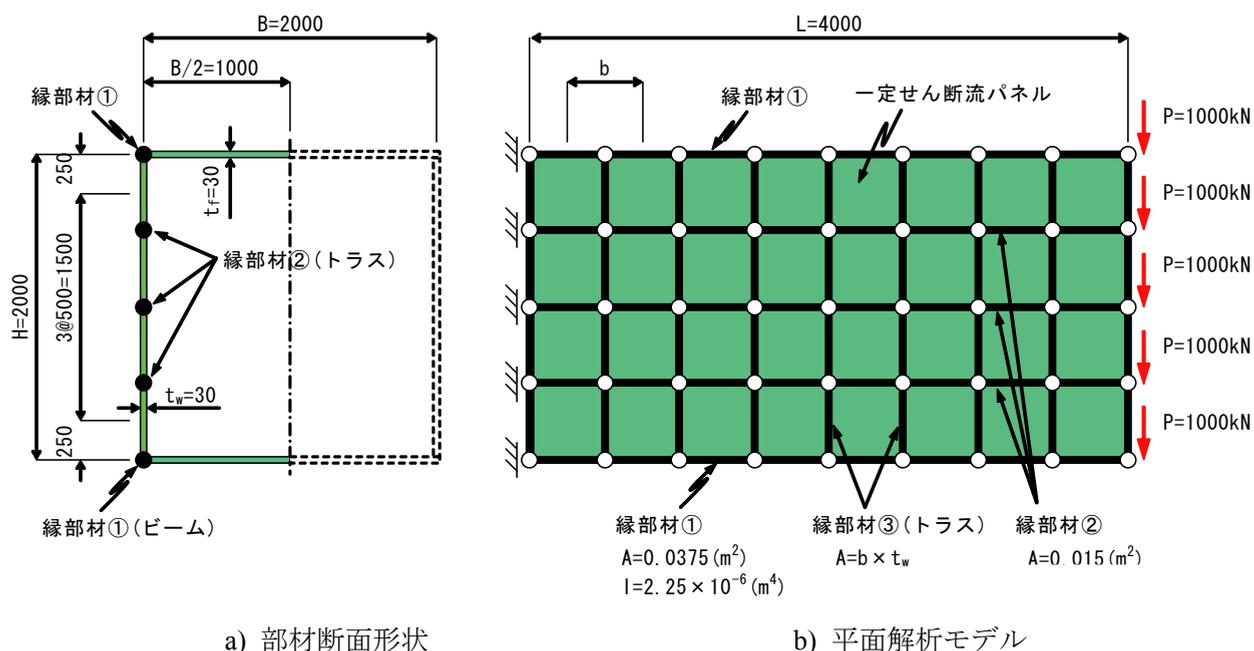


図-3.4.4 片持ちはりの一定せん断流パネル解析モデル図

図-3.4.4 に示すモデルについて、支点近傍の要素分割を変化させて解析を行った。図-3.4.5 は縁部材の曲げモーメントを示しており、支点近傍の要素分割を細分化すると支点部の曲げモーメントの値が大きくなるのがわかる。また、表-3.4.1 にフランジの軸力による生じる応力と曲げモーメントによる生じる応力を示した。

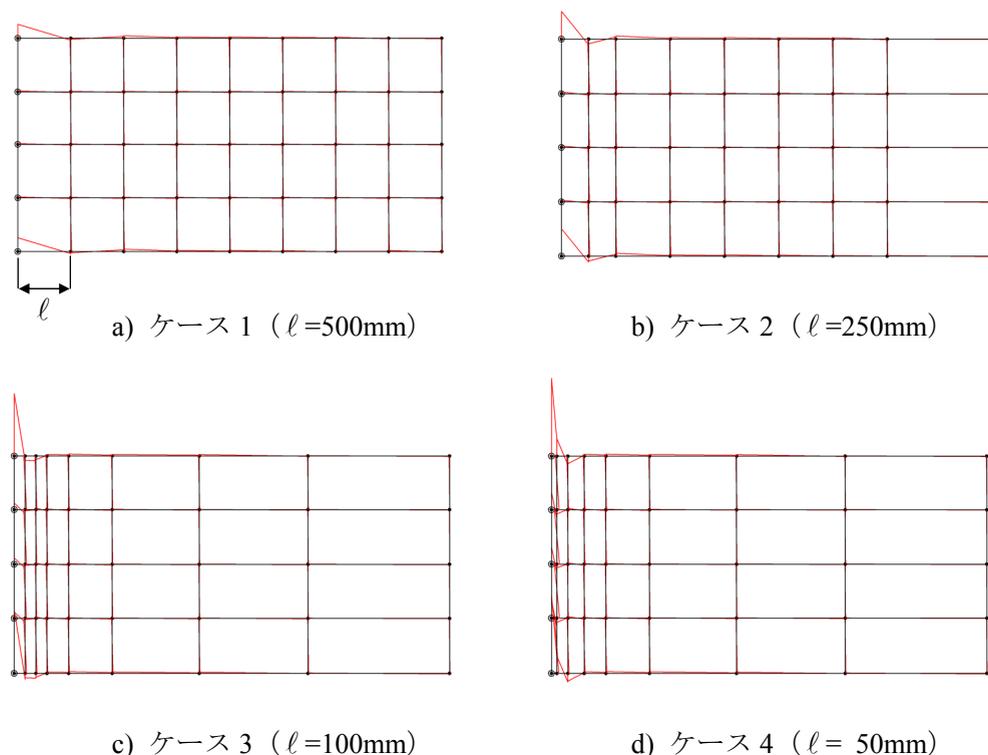


図-3.4.5 要素分割を変化させた縁部材の曲げモーメント図

表-3.4.1 要素分割を変化させた時のフランジ応力

ケース No	要素分割長 $l$ mm	フランジ縁部材断面力		腹板縁部材 軸力 $P_v$ kN	フランジ応力	
		軸力 $N$ kN	曲げ $M$ kNm		垂直応力 $\sigma_N$ N/mm <sup>2</sup>	板曲げ応力 $\sigma_M$ N/mm <sup>2</sup>
1	500	9205	3.62	9.81	245	±24
2	250	9203	7.02	40.93	245	±47
3	100	9197	16.00	173.76	245	±107
4	50	9195	19.68	249.83	245	±131

### (3) 立体モデルでの検討

前節で、平面モデルにより要素分割と板曲げ応力の評価精度の関係について検討したが、平面モデルではフランジ幅方向のせん断遅れや応力集中を適切に評価できていない。そこで、同じ諸元の片持ちはりを立て体モデル化し同様の検討を行った。

解析モデルは、図-3.4.6 に示す 3次元の一定せん断流パネル解析モデルで、中心線で分割した 1/2 モデルとした。板厚はすべて 30mm とし、図-3.4.4 に示した平面モデルと同一である。要素分割は前項の検討結果を参考に、支点付近の要素サイズを部材軸方向長さで 50mm とした。

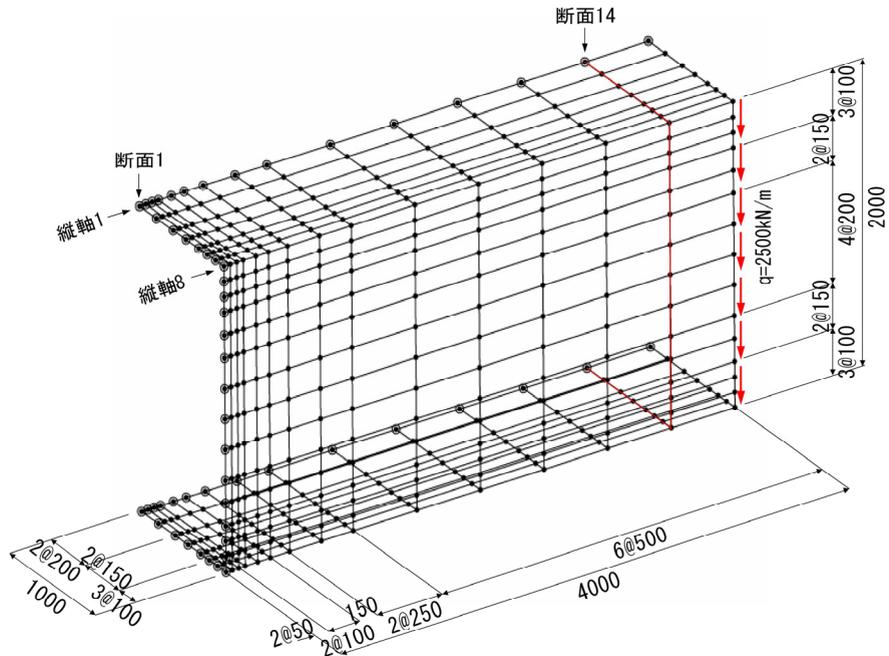
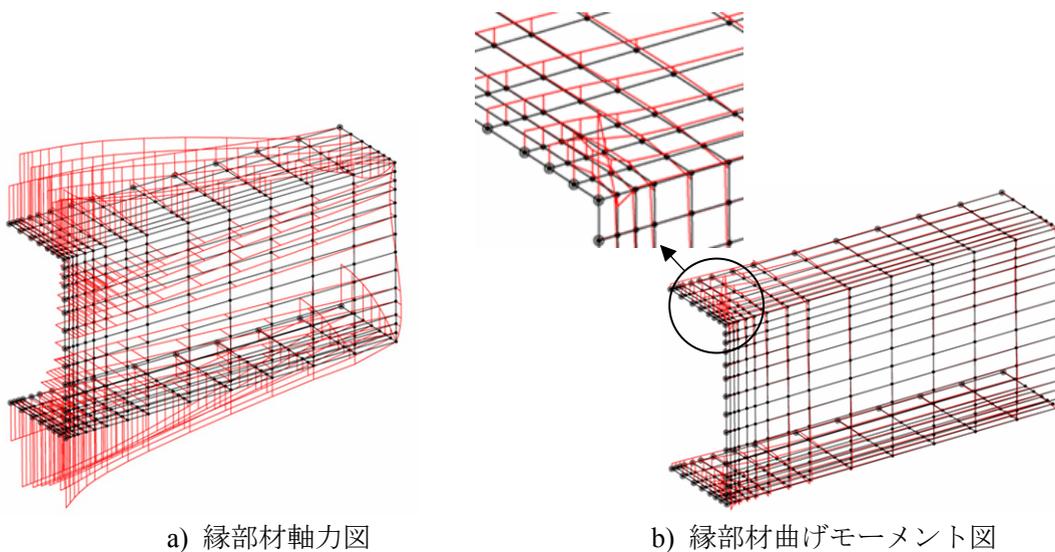


図-3.4.6 一定せん断流パネル板のモデル

図-3.4.7 に縁部材の断面力図を示す。軸力図は縁部材の断面積がそれぞれ異なるので垂直応力の値とは必ずしも対応していないが、垂直応力の分布状況の概要は把握できる。縁部材の曲げモーメントについては、支点付近のフランジに集中して発生している。これも板幅との関係で板曲げ応力とは対応していないが、フランジとウェブとのコーナー部で応力値が大きくなり、しかも複雑な分布をしていることがわかる。図-3.4.8 に応力値に変換したフランジの垂直応力分布図を示す。せん断遅れの影響で支点部のウェブコーナー部に大きな応力集中（最大応力は  $368\text{N/mm}^2$ ）が生じている。図-3.4.9 にフランジの曲げ応力分布図を示す。支点部の断面 1 のウェブコーナー部で最大曲げ応力  $\pm 214\text{N/mm}^2$  が生じるが、次の断面 2 では符号が逆転する。この曲げ応力の符号が逆転する挙動はウェブコーナー部だけに見られるもので、平面モデルの解析でも同様の挙動が生じている。支点部のウェブコーナー部では、せん断遅れによる応力集中と板曲げ応力が重なり合って作用するために、複雑で厳しい応力状態となることがわかる。



a) 縁部材軸力図

b) 縁部材曲げモーメント図

図-3.4.7 部材断面力図

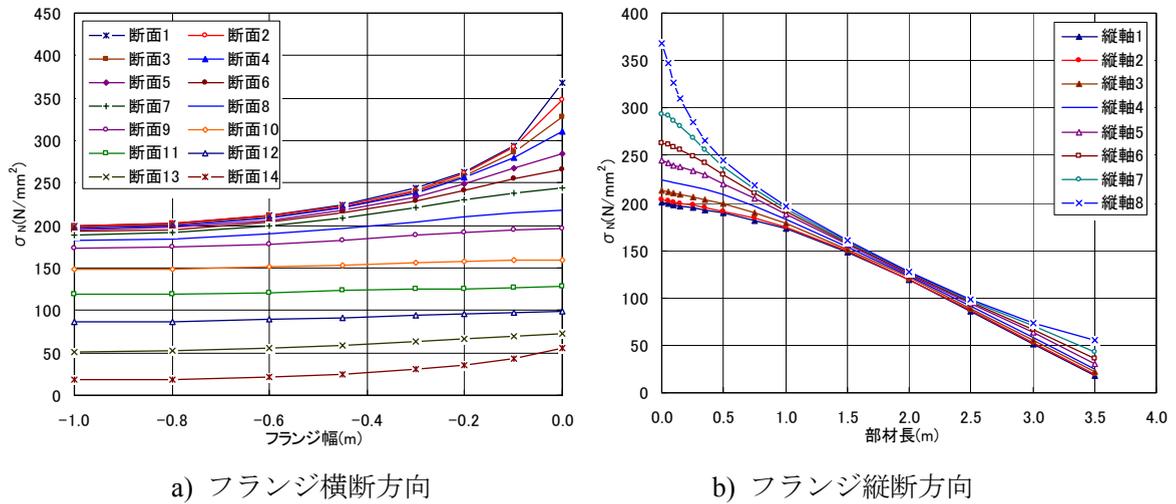


図-3.4.8 フランジの垂直応力分布図

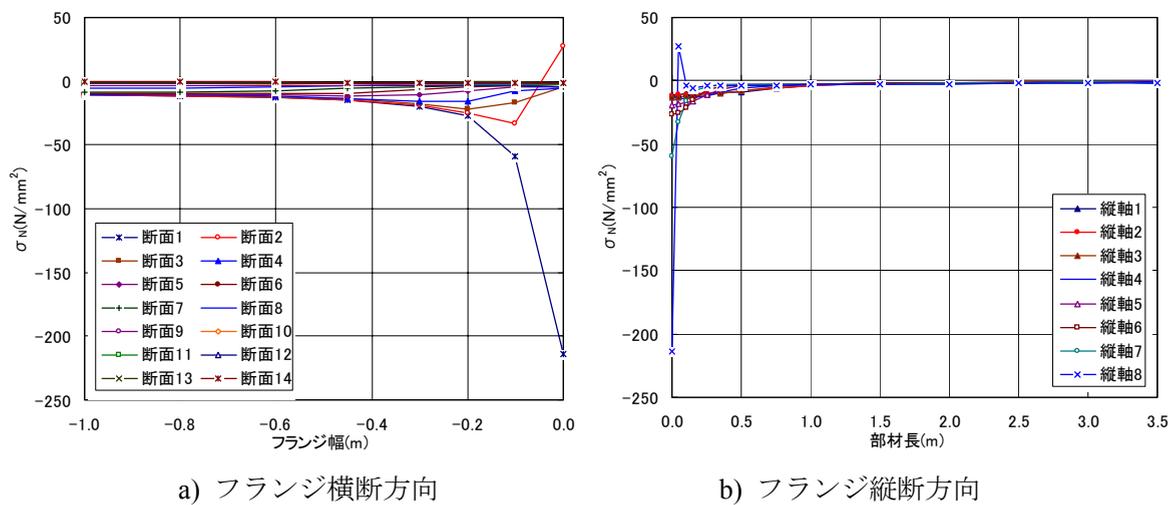


図-3.4.9 フランジの板曲げ応力分布図

#### (4) まとめ

隅角部付根からはり部分を想定した片持ちはり为例に、一定せん断流パネル解析モデルの要素分割と板曲げ応力の関係に着目して検討した結果、要素分割を細分化することで板曲げ応力がある程度精度良く算出することができると考えられる。ただし、板厚よりも細分化することは意味がないと考えられ、前節までの検討も加味すると最小要素サイズを50mmとすることで、FEM解析と十分整合が図れると考えられる。

### 3.4.4 面外方向応力の評価

#### (1) 概要

隅角部の面外方向の応力性状については、構造の角部分（辺位置）におけるモデル化手法の相違や応力などの算出手続きが異なることから、FEM 解析と一定せん断流パネル解析による結果において、ある程度の差異が生じざるを得ない場合があると考えられる。ここでは、面外方向応力の評価方法および評価にあたっての留意点について検討する。

#### (2) 解析条件

##### 1) 対象橋脚

ここでは、図-3.4.11 に示す矩形柱門型ラーメン橋脚における隅角部を対象に検討を行った。本検討では隅角部の使用材質を SM490Y 材として、隅角部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た結果、図中に示すようにはり中央部に集中荷重で  $20000\text{kN}$  を載荷した。また、部材の断面諸元を表-3.4.2 に示す。

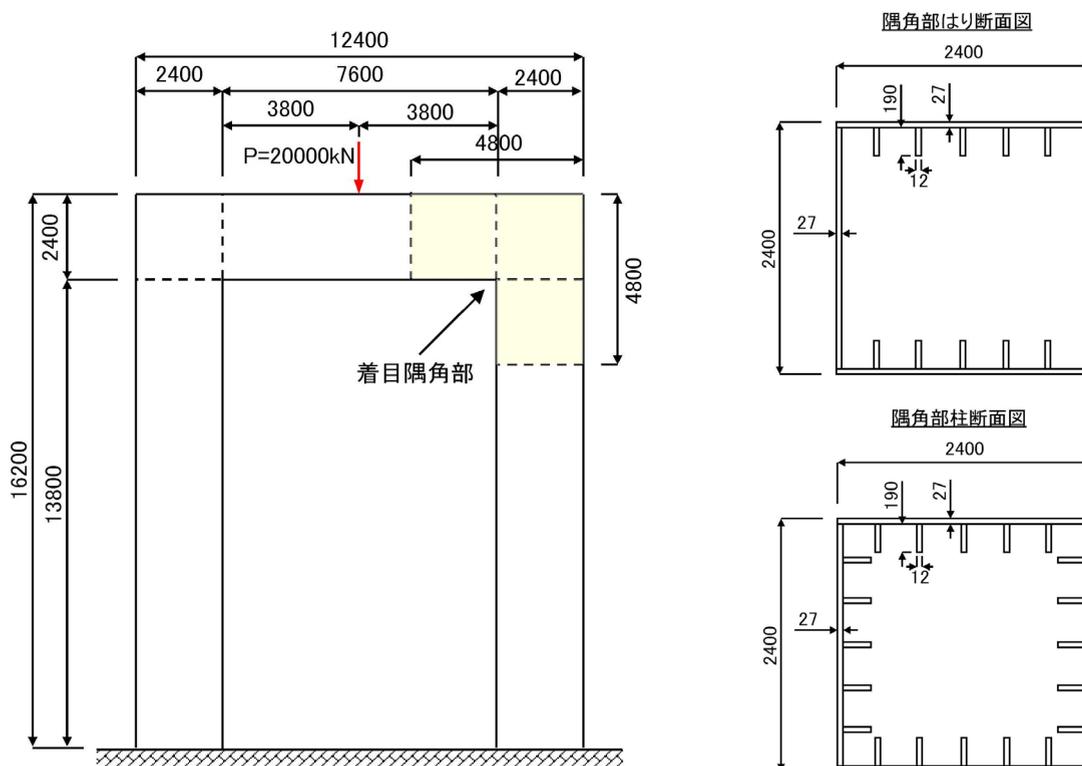


図-3.4.11 検討対象橋脚

表-3.4.2 部材断面諸元

		flg.Pl		Web.Pl		Rib.Pl		A m <sup>2</sup>	I m <sup>4</sup>
		mm	mm	mm	mm	mm	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	15	1650	15	120	12	1.21E-01	5.47E-02
	一般部	1800	25	1650	15	120	12	1.57E-01	8.04E-02

## 2) 解析モデル

着目した隅角部付近を図-3.4.12 に示すように一定せん断流パネル解析および FEM 解析によりモデル化を行なった。なお、両解析モデルとも、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、要素分割は、一定せん断流パネル要素サイズで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) 以下として、FEM 解析では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。なお、両解析モデルとも着目した隅角部以外のはり要素としてモデル化を行った。

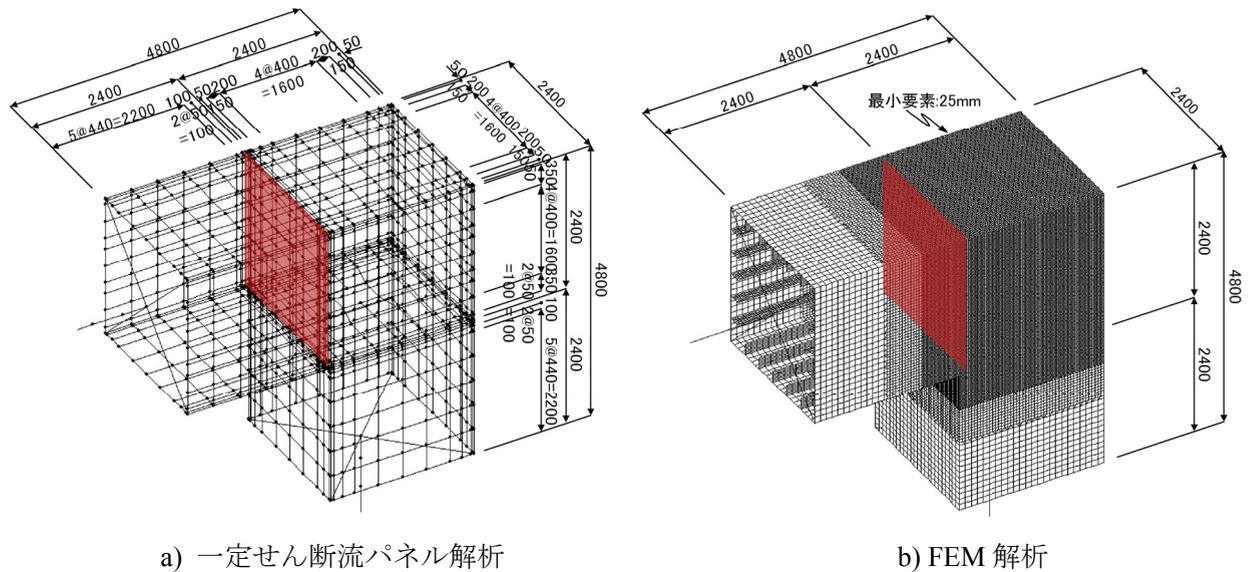


図-3.4.12 着目した隅角部の解析モデル図

## (3) 検証方法

検証にあたっては、図-3.4.13 に示すようダイヤフラム位置での応力に着目し、図中に示される方法によって各解析手法ごとに算出した。また、応力評価は、各解析結果を相対的に比較することで行った。

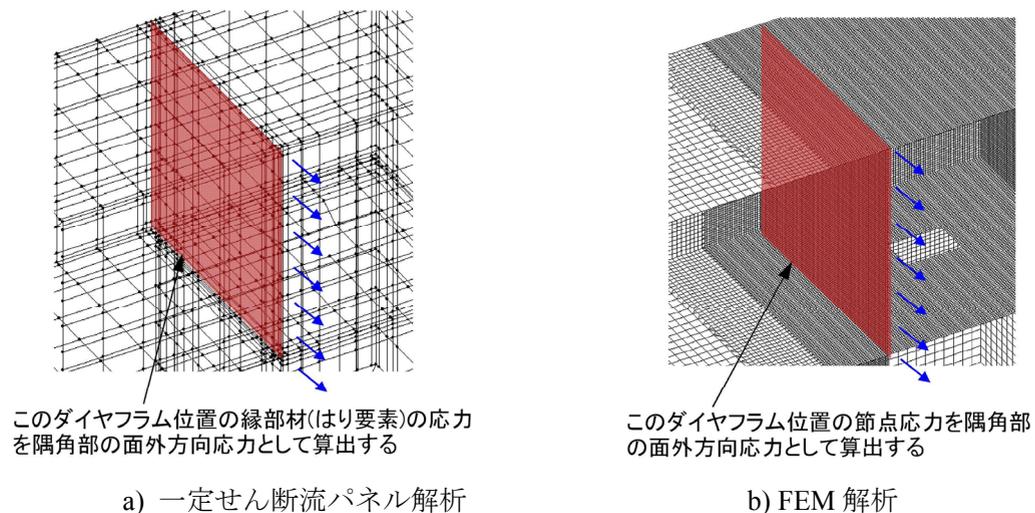


図-3.4.13 面外方向応力算出位置図

#### (4) 解析結果

図-3.4.14 に各解析結果の面外方向の応力分布図を示す。図からわかるように①～③個所において FEM 解析と一定せん断流パネル解析の結果に乖離がみられる。

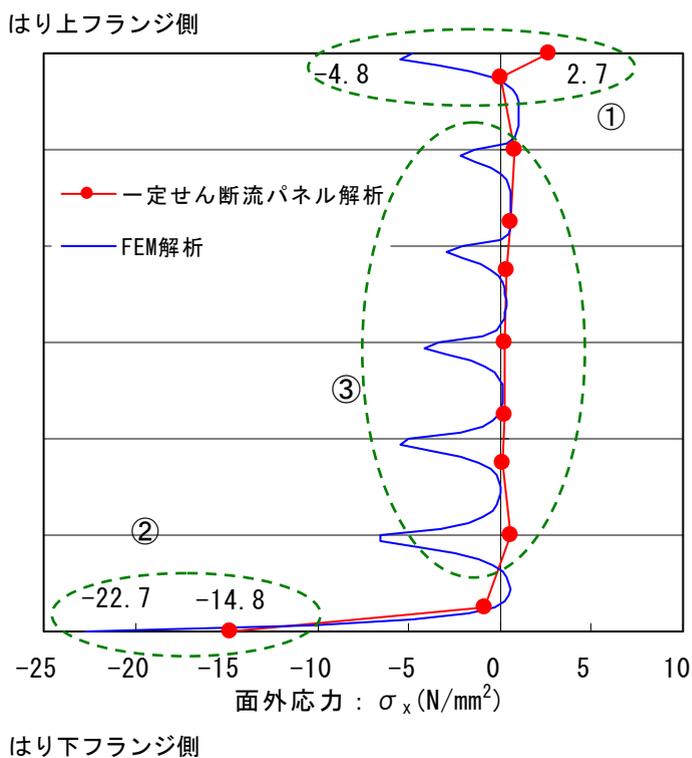


図-3.4.14 面外方向の応力分布図

表-3.4.3 上・下端部の面外方向の応力

	上端点 N/mm <sup>2</sup>	下端点 N/mm <sup>2</sup>
一定せん断流 パネル解析	2.68	-14.77
FEM解析	-4.80	-22.72

#### (5) 考察

以下に、各解析結果における乖離の原因について分析を行う。

##### 1) ①・②の違いについて

図-3.4.15 に各解析手法ごとの面外方向の応力算出方法を示す。一定せん断流パネル解析の応力は、縁部材ごとに出力されるため、上・下端部ははりフランジの応力も含んだ値となる。FEM 解析はダイヤフラムの応力を出力してる。したがって、①および②の違いは、応力を抽出するときの集計方法の違いにより解析結果に差異が生じると考えられる。図-3.4.16 に示すように一定せん断流パネル解析では、縁部材の分担幅をもって応力評価が行われるために、FEM 解析における応力集計の方法と異なる。

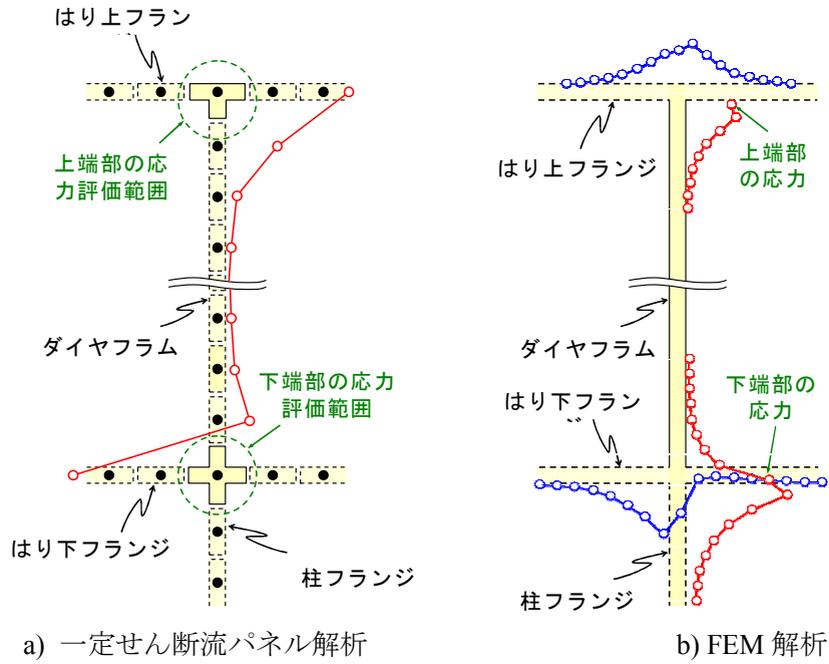


図-3.4.15 応力算出方法

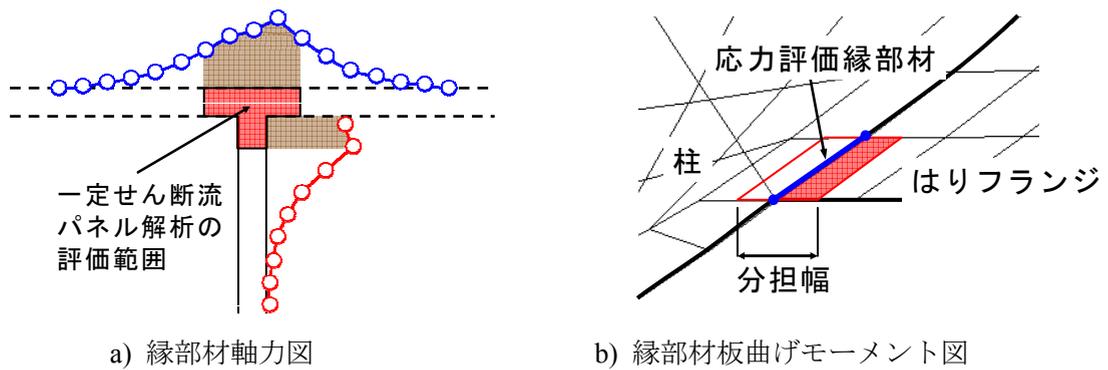


図-3.4.16 一定せん断流パネル解析における応力集計方法

ここで、上述した応力の集計方法に着目し下記の処理を行い、再度、FEM 解析を一定せん断流パネル解析の比較検証を行った。なお、解析モデル図については省略する。

- 1) 上・下端部の FEM 解析の結果を一定せん断流パネル解析の評価範囲で平均化し、一定せん断流パネル解析の応力との整合性を確認する。
- 2) 一定せん断流パネル解析の要素サイズを FEM 解析と同程度（最小寸法【端部】：25mm）として応力形状を確認する。

図-3.4.17 に各解析により求められた面外方向の応力分布図を示す。上端部の応力は、一定せん断流パネル解析における要素分割を細かくすることで、FEM 解析とほぼ同等の結果が得られることがわかる。また、下端部の応力は、端部から 2 点目と 3 点目の応力結果から線形に補間することで、FEM 解析とほぼ同等の結果が得られる。

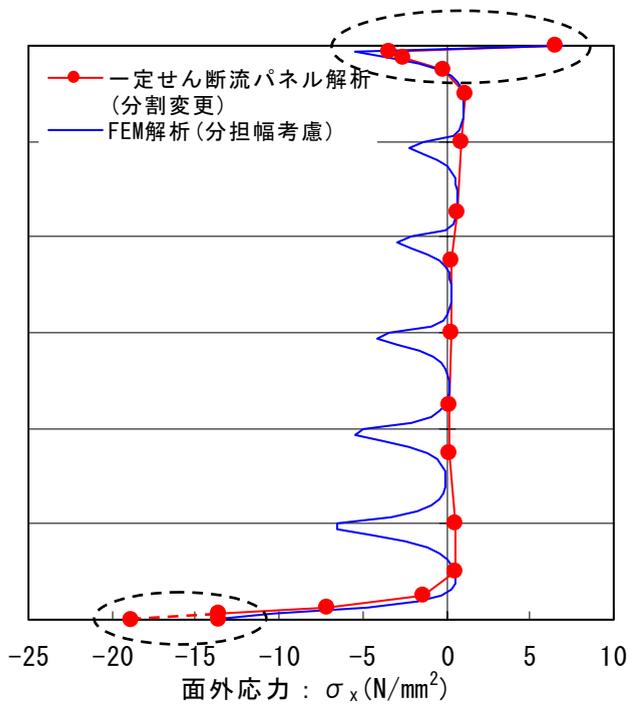


図-3.4.17 面外方向の応力分布図

表-3.4.4 上・下端部の面外方向の応力値

	上端点 N/mm <sup>2</sup>	下端点 N/mm <sup>2</sup>	下端点 (2・3点目補間) N/mm <sup>2</sup>
一定せん断流 パネル解析	6.49	-13.62	-19.97
FEM解析	6.96	-14.06	-----

## 2) ③の違いについて

③の違いはリブに位置で発生しており、一定せん断流パネル解析と FEM 解析ではリブのモデル化の方法が異なっている。FEM 解析では、構造形状に合わせてリブをシェル要素によりモデル化を行っているのに対して、一定せん断流パネル解析ではリブの剛性を縁部材の剛性に付加することでモデル化を行っている。ここでは、FEM 解析におけるリブのモデル化の方法を、一定せん断流パネル解析と同様にはり要素に変更した場合との比較により検証を行った。

図-3.4.18 にリブのモデル化の方法を変えた場合の FEM 解析結果を示す。リブをシェル要素からはり要素へ変更することで、リブの拘束効果が生じなくなりリブ位置での大きな応力は発生してないことがわかる。また、はり要素に変更した場合でも、上・下端部の応力値、応力形状はほぼ同じとなっている。

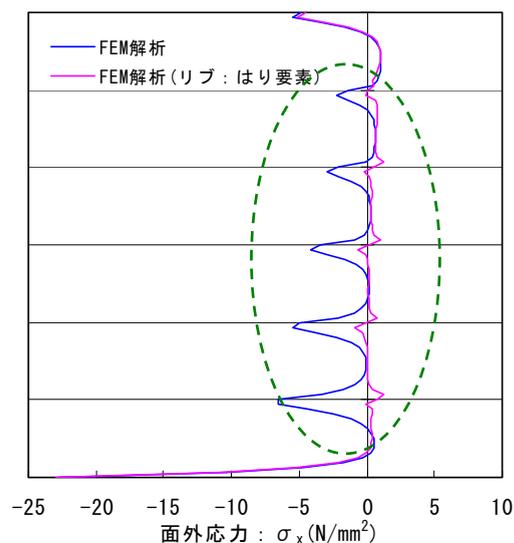


図-3.4.18 リブのモデル化の違いによる応力分布比較

## (6) まとめ

- ・ 応力の算出方法の違いはあるが、面外方向の応力についても一定せん断流パネル解析は FEM 解析と同等の結果を得ることができる。
- ・ 一定せん断流パネル解析の上・下端部の応力は、フランジの応力も含んだ値となっていることに注意する必要がある。また、端部の応力は端点より手前の応力を補間することで算出することができる。
- ・ 一定せん断流パネル解析において上・下端部の応力を適切に出力するには、端部をある程度細かな要素分割を行う必要がある。

## (7) <参考>隅角部に発生する面外方向応力と変形について

### 1) 概要

隅角部に鉛直荷重が載荷されることにより生じる面外方向の変形、応力の性状について FEM 解析を行いその傾向を明らかにする。検討対象は、矩形柱門型ラーメン橋脚および逆 L 型（片持ち）橋脚とした。

### 2) 解析条件

対象橋脚は、図-3.4.19 に示すように前項と同じ橋脚を対象とし、解析条件や解析モデルなども同じとした。ここでは、下フランジの応力が完全圧縮状態となる逆 L 型についても加えて検討を行った。逆 L 型橋脚は、図-3.4.19 に示すように門型ラーメン橋脚を荷重載荷位置で半分にした構造である。なお、図-3.4.20 に対象とした橋脚の FEM 解析モデル図を示す。

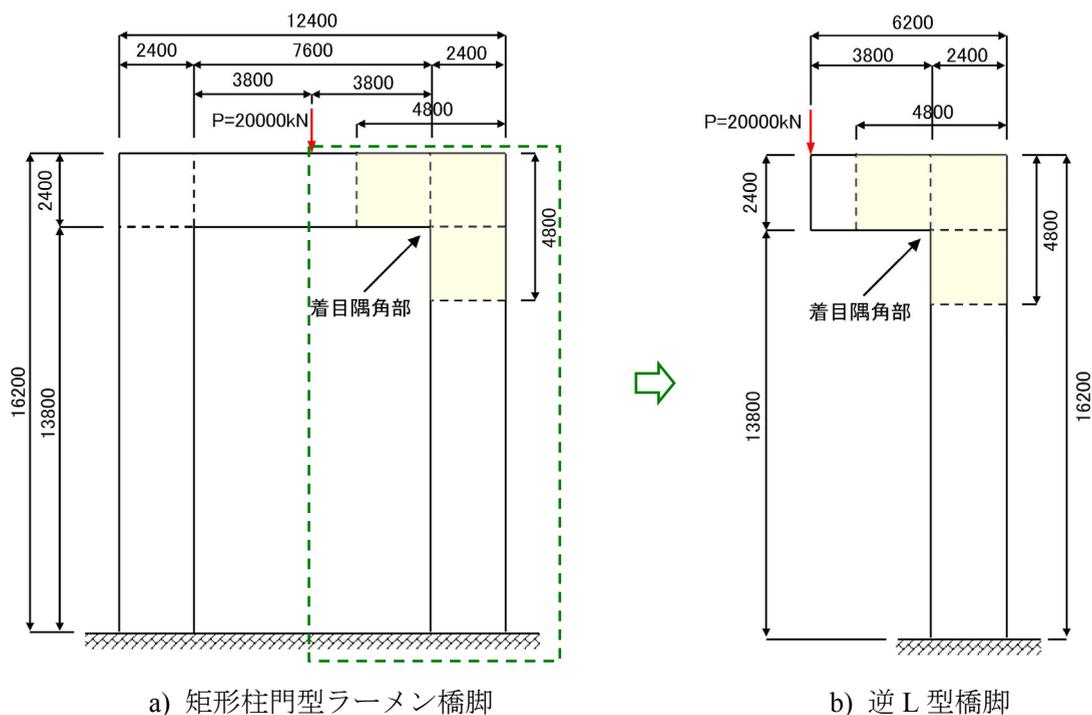


図-3.4.19 検討対象橋脚概要図

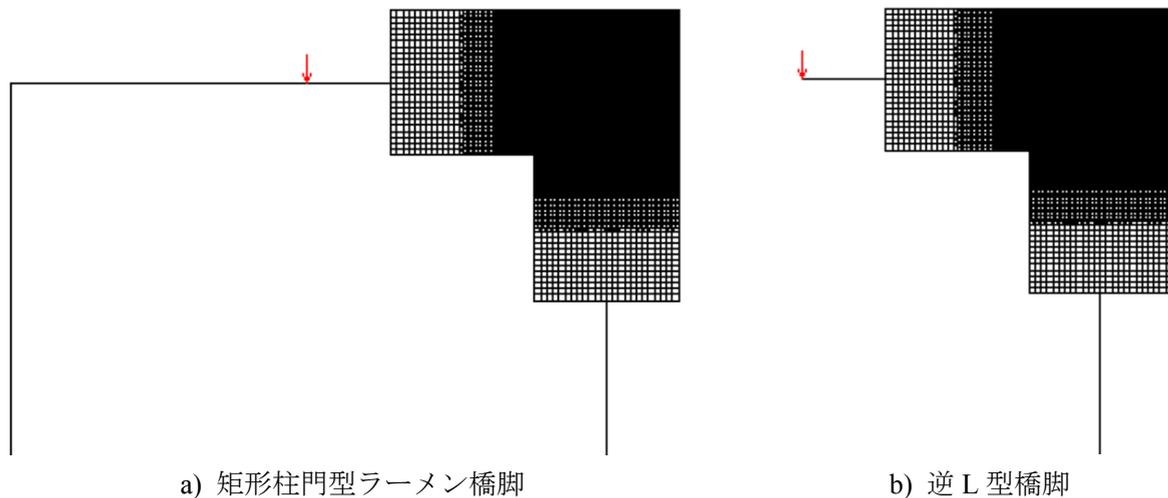


図-3.4.20 解析モデル図

### 3) 解析結果

各形式隅角部の FEM 解析で得られた変形図および応力図を図-3.4.21～図-3.4.33 に示す。

#### ① 鉛直方向の変形

鳥瞰および側面方向の鉛直方向変形コンター図を以下に示す。

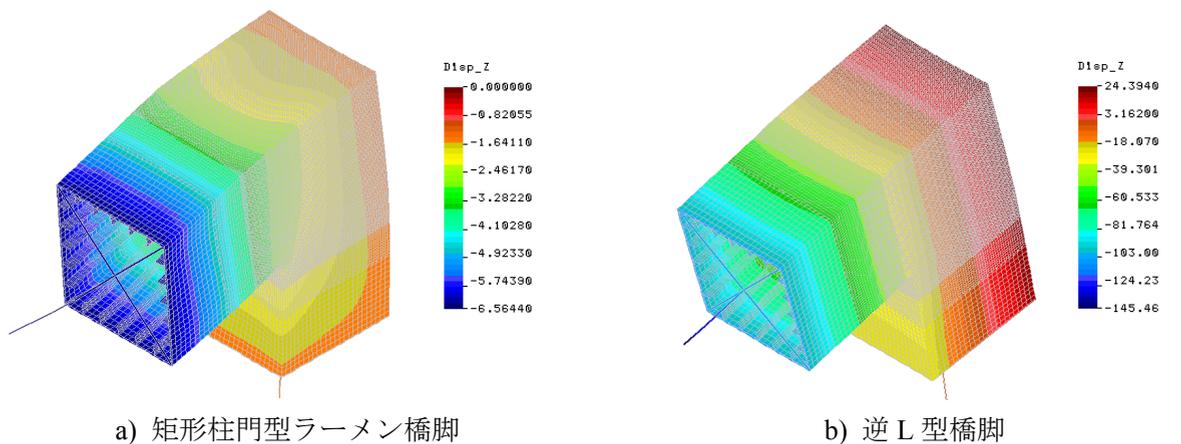


図-3.4.21 鉛直方向変形図（鳥瞰）

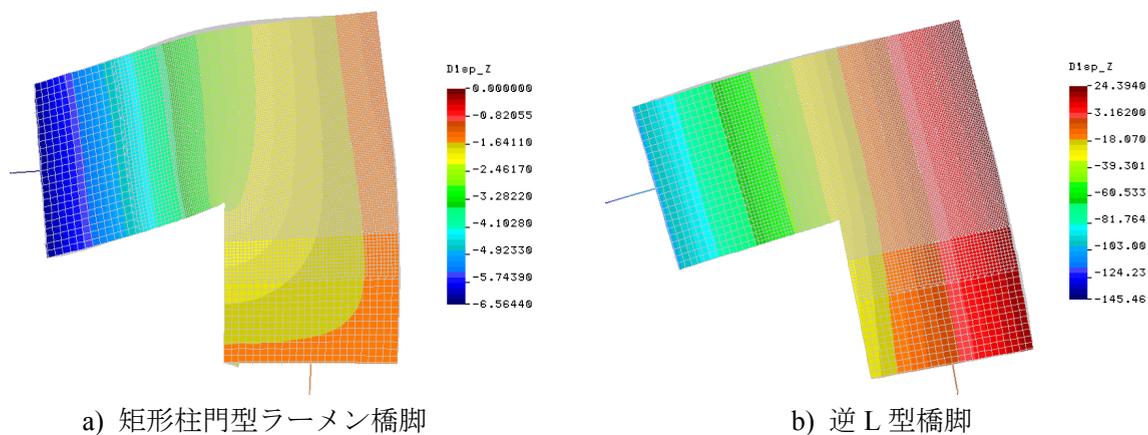


図-3.4.22 鉛直方向変形図（側面）

② 面外方向の変形

鳥瞰，側面，はり断面，はり下フランジおよび柱ダイヤフラム方向の面外方向変形コンター図を以下に示す。

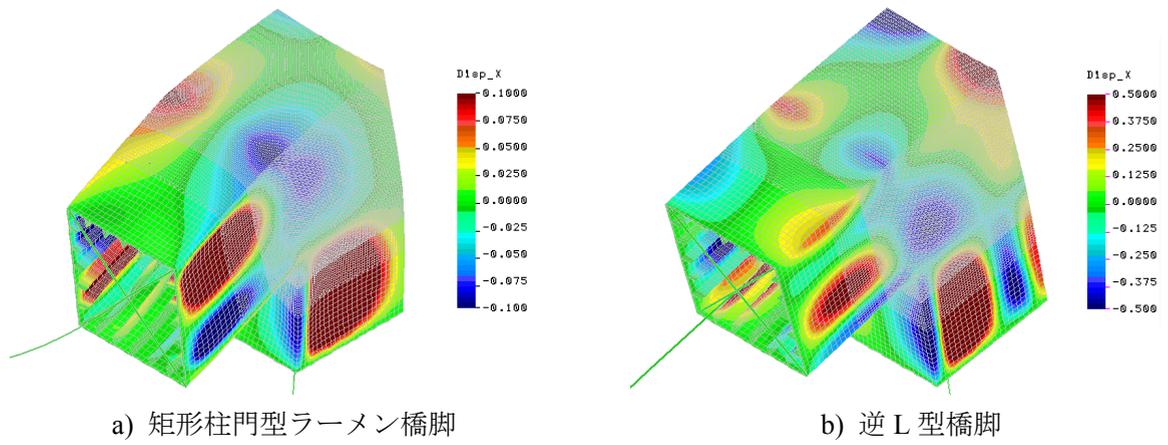


図-3.4.23 面外方向変形図（鳥瞰）

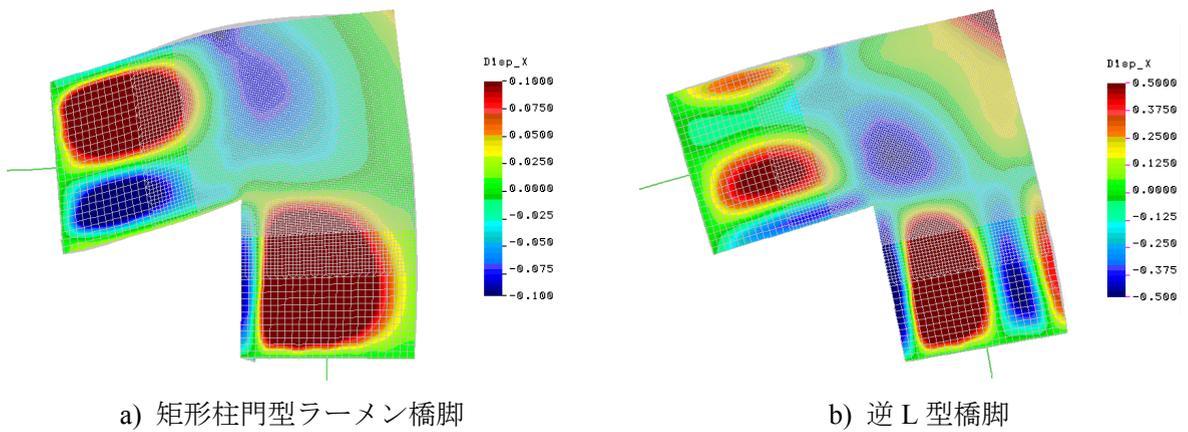


図-3.4.24 面外方向変形図（側面）

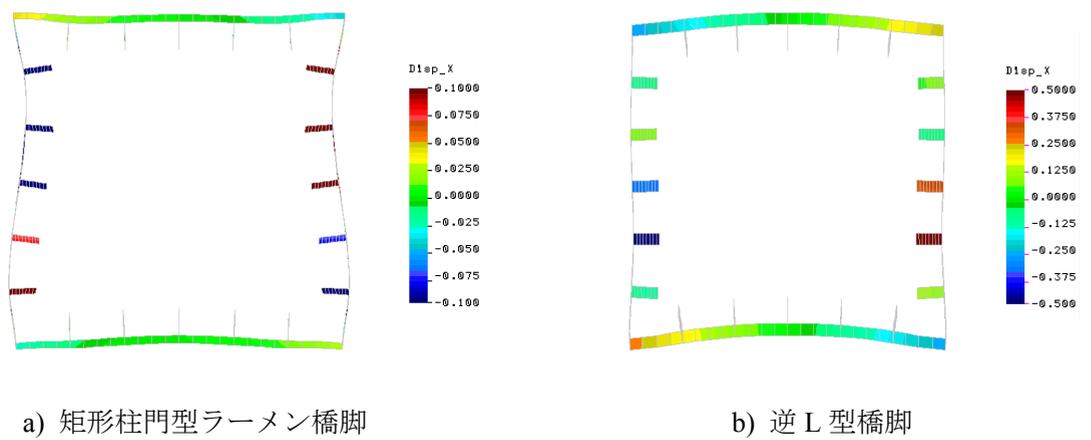


図-3.4.25 面外方向変形図（はり断面）

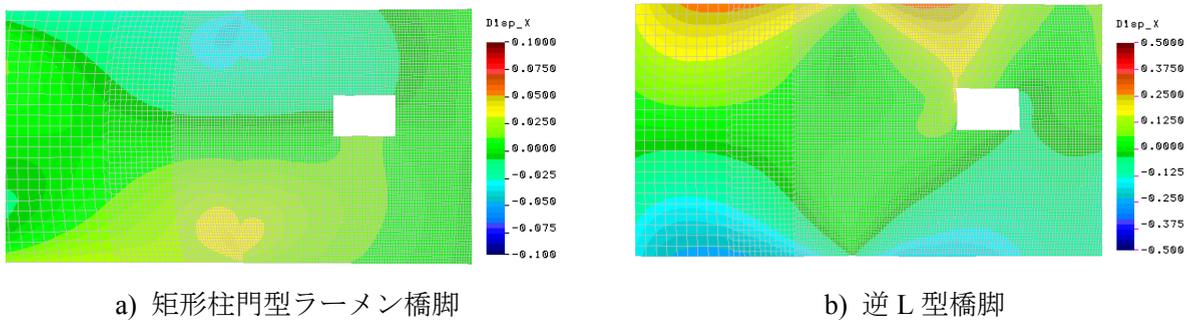


図-3.4.26 面外方向変形図（はり下フランジ）

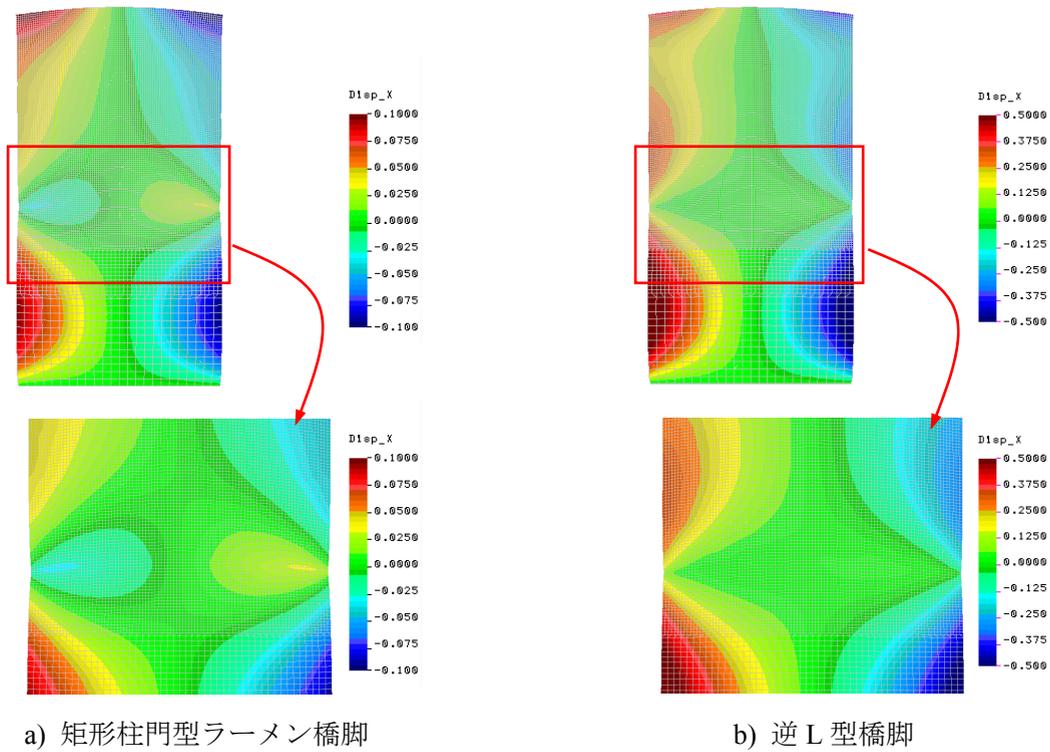


図-3.4.27 面外方向変形図（柱ダイヤフラム内側）

③ 面内方向の応力

鳥瞰， はり下フランジおよび柱ダイヤフラムの面内方向応力コンター図を以下に示す。

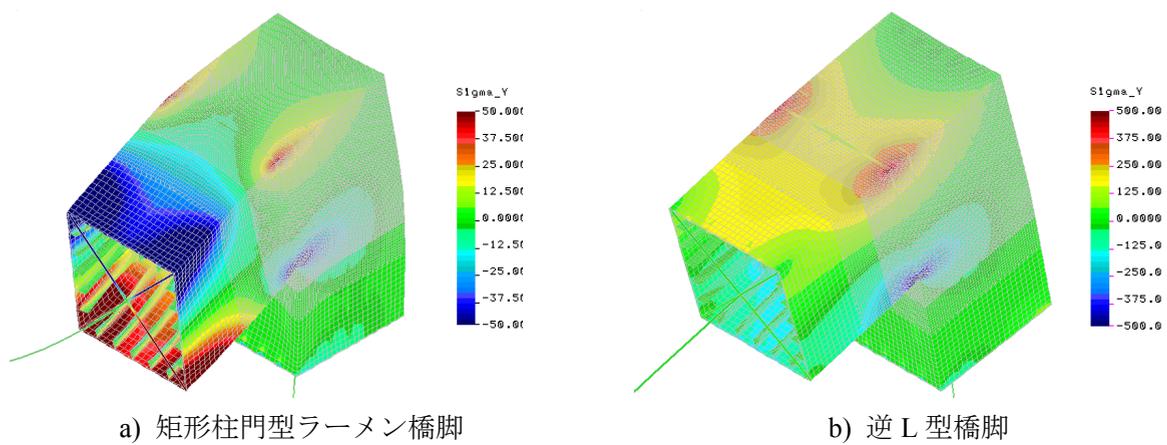
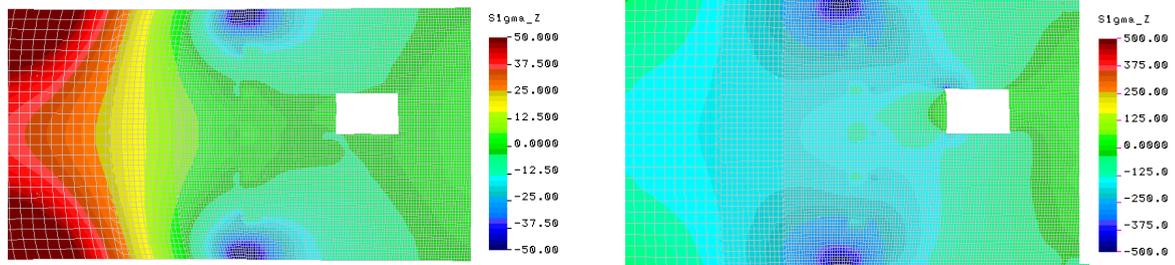


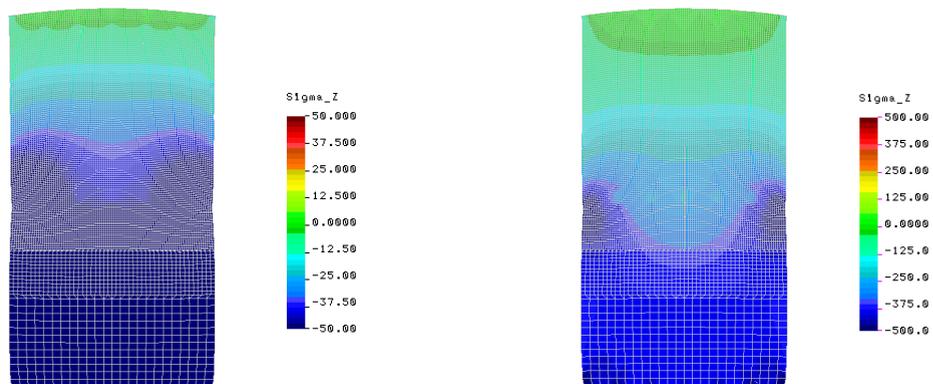
図-3.4.28 面内方向応力図（鳥瞰）



a) 矩形柱門型ラーメン橋脚

b) 逆L型橋脚

図-3.4.29 面内方向応力図 (はり下フランジ)



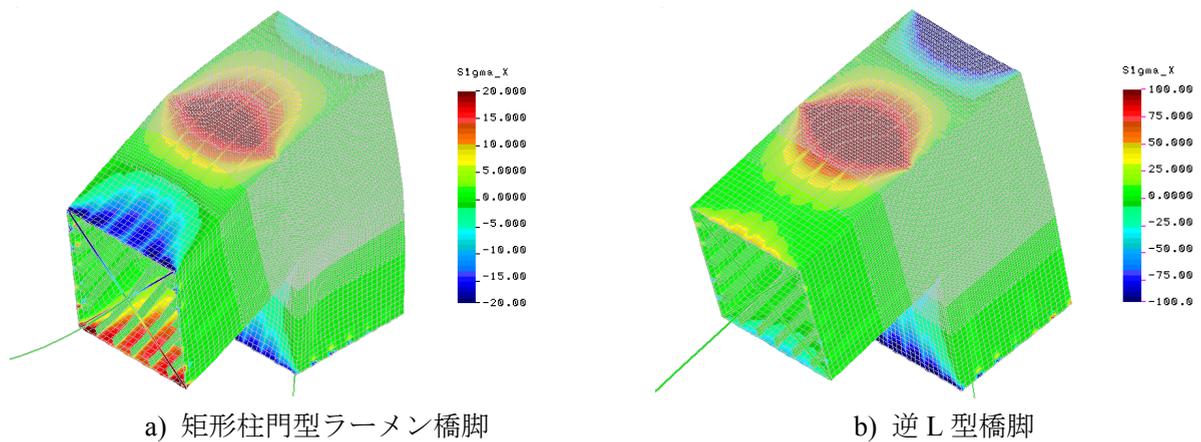
a) 矩形柱門型ラーメン橋脚

b) 逆L型橋脚

図-3.4.30 面内方向応力図 (柱ダイヤフラム内側)

#### ④ 面外方向の応力図

鳥瞰，はり下フランジおよび柱ダイヤフラムの面外方向応力コンター図を以下に示す。



a) 矩形柱門型ラーメン橋脚

b) 逆L型橋脚

図-3.4.31 面外方向応力図 (鳥瞰)

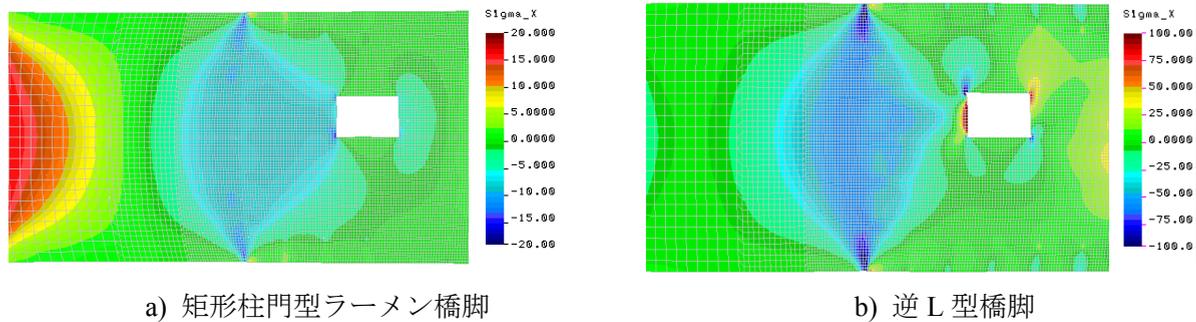


図-3.4.32 面外方向応力図（はり下フランジ）

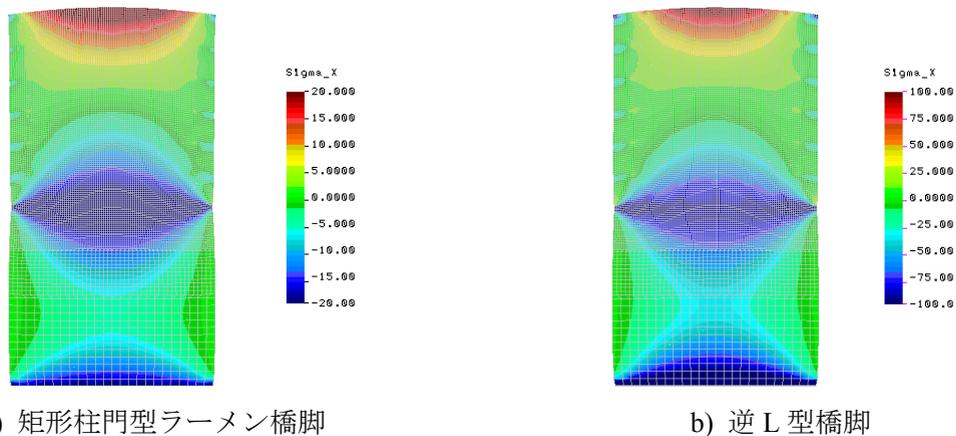


図-3.4.33 面外方向応力図（柱ダイヤフラム内側）

#### 4) 考察

FEM 解析の結果、鉛直荷重の荷重によってはり全体の曲げだけでなく、隅角部近傍で局部的にフランジ、ウェブが面外方向に変形する挙動が見られ、とくに隅角部コーナー部は面内力に加え面外の曲げ応力が同時作用する複雑な応力性状を示している。また、この面外の変形をダイヤフラムが拘束するために、ダイヤフラムの隅部（隅角部コーナー部）に面内方向に比べて小さいが応力集中が見られ、疲労耐久性に影響及ぼす要因の 1 とも考えられる。なお、この面外方向の変形は、矩形柱門型ラーメン橋脚モデルでははり下フランジの面内応力が引張となる影響で縮んでいるが、逆 L 型橋脚モデルでははり下フランジの面内応力が圧縮となるため逆に伸びている。これは、図-3.4.34 に示すように、面外方向の変形や応力はシェル要素のポアソン比の影響により発生していると考えられる。

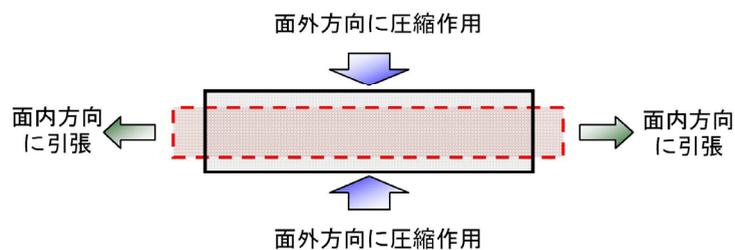


図-3.4.34 ポアソン比の影響図