

## 鋼製橋脚隅角部における一定せん断流パネルを用いた解析法の検討

Examination of analytical method using "the constant shear flow panels" for the beam-to-column connections of steel piers

木内 耕治\*, 玉越 隆史\*\*, 石尾 真理\*\*\*

Koji Kiuchi, Takashi Tamakoshi, Mari Ishio

- \* 国土交通省国土技術政策総合研究所, 道路研究部道路構造物管理研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)  
 \*\* 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所, 道路研究部道路構造物管理研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)  
 \*\*\* 国土交通省国土技術政策総合研究所, 道路研究部道路構造物管理研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

In recent years, the crack damage with which fatigue is considered to be the cause by beam-to-column connection of steel pier was checked, and taking the influence of fatigue into consideration was specified to the design. However, there is not a rule of concrete design technique in beam-to-column connection of steel pier and the present conditions grasp a stress property by an experiment and FEM analysis and fatigue durability is secured. This study proposes the constant shear flow panel analysis as the practical analysis technique in a fatigue design of beam-to-column connection of steel pier. In this study, compared test calculation results in various beam-to-column connections of this analysis by FEM analysis, and confirmed plasticity of this analysis by comparison with stress measurements in established structures. As a result of examination, this analysis technique was modeling more temporarily than FEM analysis and confirmed what evaluation of stress in the beam-to-column connection could do with precision to be higher than a constant standard.

*Key Words: beam-to-column connection, constant shear flow panel, fatigue design*

キーワード: 鋼製橋脚隅角部, 一定せん断流パネル, 疲労設計

## 1. はじめに

近年, 鋼道路橋においては, 主げたおよび主げたへの部材の取付け部や鋼製橋脚隅角部(以下, 隅角部)などの様々な部材, 部位で自動車荷重が原因と考えられる鋼材の疲労損傷の発生が報告されている。現在までの厳しい重交通の実態を考慮すると, 将来の疲労損傷の拡大も懸念されることから, 平成13年12月に改訂された「橋・高架の道路等に関する技術基準」(以下, 道路橋示方書<sup>1)</sup>)においては鋼橋編で鋼橋の設計では疲労の影響を考慮することが明確に規定された。そして道路橋に対する具体的な疲労設計手法が「鋼道路橋の疲労設計指針<sup>2)</sup>」としてまとめられて出版された。現在, 新設の鋼道路橋は原則としてこれを参考に疲労設計が行われている。

隅角部においては疲労が原因とされる亀裂損傷が見られて以来, その原因究明などの研究が多方面で行われ, 隅角部コーナーに発生する応力集中とその応力集中箇所の溶接欠陥が主な原因であるとされている<sup>3)7)</sup>。そのため設計や製作段階で良好な溶接品質を確保するために製作方法や検査手法などが各方面より示されている<sup>8)9)</sup>。

一方, 隅角部のように部材が複雑に構成され, かつ応力性状が複雑となる鋼部材では, 疲労設計に用いる設計応力の算出が困難であるだけでなく, 着目部位の発生応力を把握してそれをそのまま適用できる継手強度等級など疲労耐久性照査基準に対する知見が十分でなく一定の概念による照査が困難となっているのが現状である。そのため, 実設計では供試体による疲労試験や部分的に詳細な有限要素法解析(以下, FEM解析)による応力性状の把握が行われる場合がある一方で, 耐荷力設計での発生応力より概略的な推定に基づく構造的工夫のみで設計される場合もあり, 照査基準に差異を生む可能性のある状態とである。また, 疲労試験や詳細なFEM解析は, 最終的な構造が決定した段階では有効な手段となるが, 試行錯誤を重ねる設計段階でFEM解析などを適用することは解析モデルの再構築などにかかる労力が大きく非効率で不経済な面が課題となる。

このような状況を踏まえ, 隅角部の疲労設計にあたって, 設計段階であることと詳細なモデルによる解析によっても実構造物の厳密な応力の把握には溶接形状や残留応力など様々な要因から自ずと限界があることに着目し,

設計段階として発生応力の推定が経済的かつ一定の精度で可能となる手法の一つとして一定せん断流パネルを用いた解析手法（以下、一定せん断流パネル解析）の適用性について検討を行った。隅角部における一定せん断流パネル解析の検討は、参考文献 13 にて矩形柱門型ラーメン橋脚隅角部を対象として行われ、FEM 解析に比べ簡素なモデル化で FEM 解析と同等の精度で局所的な応力などを算出することが確認されている。

本研究では、一定せん断流パネル解析の隅角部における適用範囲の拡充を目的に矩形柱門型ラーメン橋脚以外の隅角部における試算検討を行い、さらにこの解析手法の実構造物における再現性を確認するために既設橋脚隅角部の応力計測との比較検証を行い、この解析手法の隅角部の設計における適用性の検証を行ったものである。

## 2. 一定せん断流パネル解析の試算検討

参考文献 13 では矩形柱門型ラーメン橋脚隅角部を対象に一定せん断流パネル解析の試算検討が行われ、下記事項が確認されている。

- ・ FEM 解析に比べ簡素なモデル化で局所的な応力など含めて FEM 解析と同等の解析結果を得ることができる。
- ・ 疲労耐久性の向上策として検討されるフィレットの効果を FEM 解析と同等に評価ができる。

本研究では、矩形柱門型ラーメン橋脚隅角部以外の一般的な隅角部を有する橋脚である二層式ラーメン橋脚、逆L型橋脚および円形柱門型ラーメン橋脚において同様の検討を行った。なお、ここでは円形柱門型ラーメン橋脚隅角部について報告する。

### 2.1 一定せん断流パネル解析の概要

隅角部のような薄板構造ではせん断変形の影響が大きく初等はり理論により得られる応力と異なり、精度良く応力を算出するためにはこの影響を考慮する必要がある。そのため、従来よりせん断遅れの影響を考慮した奥村・石沢による計算法（奥村・石沢の方法）<sup>10</sup>を用いて断面の基本諸元を決定する手法が用いられてきた。しか

し、奥村・石沢の方法では実際に発生する応力集中を十分に評価できないことが指摘されている<sup>5</sup>。隅角部のような複雑な構造における疲労耐久性の評価では、支配的となる局所的な応力性状などを精度良く評価することが重要となる。

一定せん断流パネル解析では、一定せん断流パネル要素と呼ぶせん断応力のみ抵抗する板要素とその外周に曲げにともなう垂直応力のみを負担するはり要素から構成される要素を用いてモデル化し解析を行う手法である<sup>12)13)</sup>。図-1 に板要素とはり要素の間の内力分布の関係を示す。FEM 解析では、一定ひずみ要素を用いているために要素内の応力は一定となることから、せん断変形の影響などを考慮して精度よく応力を算出するために要素分割を細かくすることで対応している。一方で、一定せん断流パネル解析は、要素内で応力が線形に変化するために少ない要素分割でも比較的精度よくせん断変形の影響などを考慮し応力を算出できる。また、縁部材に板の曲げ剛性を考慮し板曲げ変形の影響も考慮できる。

### 2.2 対象橋脚概要

鋼製橋脚で矩形柱と並んで多く使用される円形柱は、はりと柱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-2 に示す円形柱の門型ラーメン構造とし、はりウェブが柱を貫通しておらず、柱が天板まで通っている橋脚を対象とした。また、はり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、検討にあたって隅角部の材質を SM490Y とし、既往の設計事例<sup>3</sup>や解析結果の比較し易さを考慮して断面に発生する応力が 100~200N/mm<sup>2</sup> なるように調整し、はり中央部に集中荷重で 8000kN を載荷した。

### 2.3 検証方法

検証方法は、参考文献 13 と同様に隅角部に発生する応力を図-3 に示すように、①はり方向、②柱方向、③面外方向の3つの方向に分けて FEM 解析結果と比較することにより行った。また、図-3 に示すように応力評

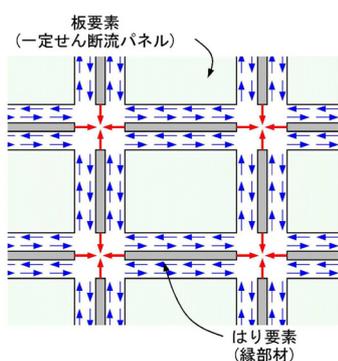


図-1 内力分布図

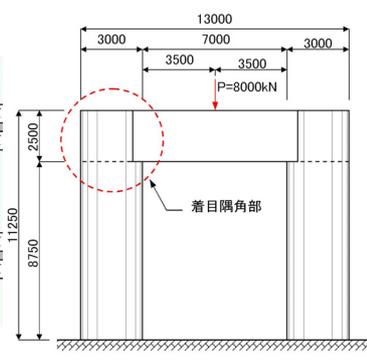


図-2 検討対象橋脚概要図

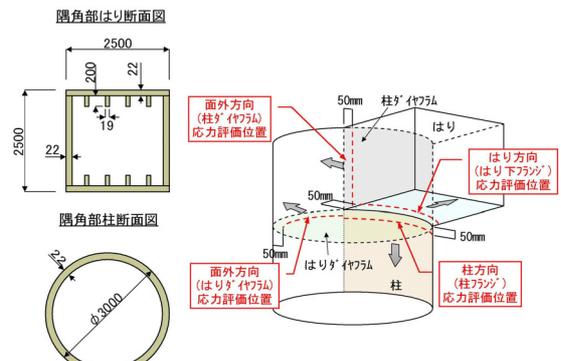


図-3 応力検証位置

値位置は、隅角部付近では板曲げの影響などにより応力の乱れが顕著に現われることを考慮し、参考文献 13 と同様に隅角部の端より柱またははりのフランジ上で 50mm 離れた位置で行った。なお、面外方向においては、隅角部に設置した柱またははりのダイヤフラムとウェブの接続する個所の橋脚面外方向の応力にて比較を行った。

## 2.4 モデル化

図-4 に解析対象とした橋脚の一定せん断流パネル解析モデル図を示す。一定せん断流パネル解析モデルは着目した隅角部およびその周辺部を一定せん断流パネル要素によりモデル化を行い、その他の部位ははり要素によりモデル化して一定せん断流パネル要素モデル部と仮想剛部材により結合した。具体的な一定せん断流パネル要素によるモデル化の方法は、参考文献 13 を参考に各部位は板厚と同厚の一定せん断流パネル要素に置き換え、縁部材はフランジおよびウェブの分担幅分の板の断面積、面外断面 2 次モーメントを考慮し、はりフランジのリブは縁部材にその剛性を付加して考慮した。なお、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とした。解析モデルは総節点数 1581、はり要素数 3223、一定せん断流パネル要素数 1554 である。

また、FEM 解析モデル化は、着目した隅角部およびその周辺部の全ての鋼板をシェル要素によりモデル化し、その他の部位は一定せん断流パネルと同様にはり要素によりモデル化してシェル要素モデル部と仮想剛部材にて結合した。なお、応力集中が予測される箇所は参考文献 14 を参考に最小要素サイズ 25mm と密に要素分割した。解析モデルは総節点数 73144、総要素数 74201 である。

## 2.5 試算結果

円形柱門型ラーメン橋脚における各々の解析手法による解析結果を、図-3 に示した検証位置で比較した結果を以下に示す。

### (1) はり方向および柱方向

図-5, 6 および表-1, 2 に各解析手法によるはり下フランジおよび柱方向の応力算出結果を示す。各解析結果とも隅角部コーナー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、隅角部コーナーの発生応力が他の 2 手法に比べて小さな値を示した。一方、一定せん断流パネル解析は、FEM 解析と比べてはり下フランジの隅角部コーナーで発生応力が 20% 程度大きな値を示し、この差は参考文献 13 においてもみられるがそれよりやや大きくなっている。ただし、はり下フランジ中央付近や

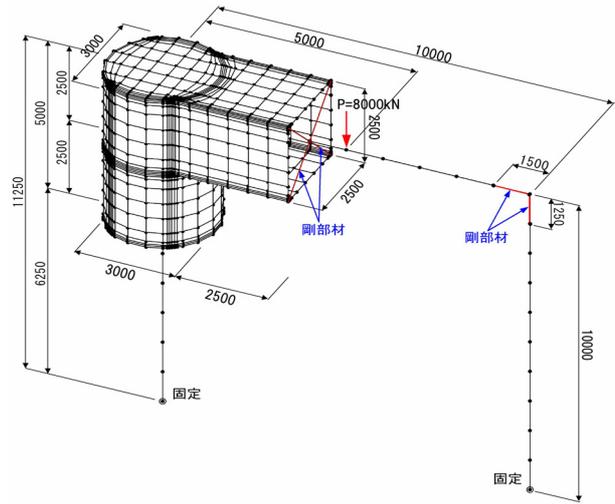


図-4 一定せん断流パネル解析モデル図

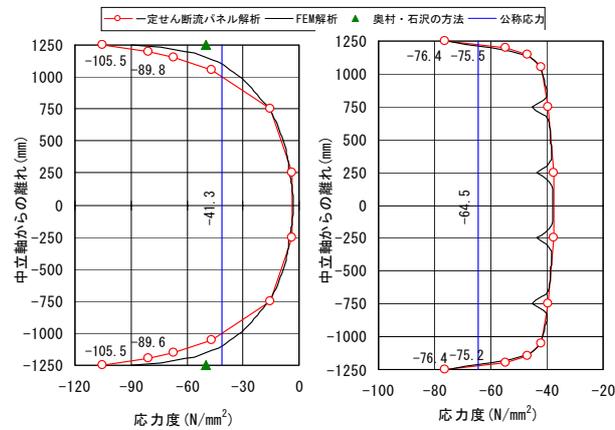


図-5 はり下フランジ平均  
応力分布比較図

図-6 柱フランジ平均  
応力分布比較図

表-1 はり下フランジ応力比較表

中立軸からの離れ mm	一定せん断流パネル解析			FEM解析				①/②
	垂直応力		①平均 応力 N/mm <sup>2</sup>	垂直応力		②平均 応力 N/mm <sup>2</sup>		
	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>			
-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	

※平均応力 = ((内側垂直応力) + [外側垂直応力]) / 2

表-2 柱フランジ応力比較表

中立軸からの離れ mm	一定せん断流パネル解析			FEM解析				①/②
	垂直応力		①平均 応力 N/mm <sup>2</sup>	垂直応力		②平均 応力 N/mm <sup>2</sup>		
	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>			
-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	

※平均応力 = ((内側垂直応力) + [外側垂直応力]) / 2

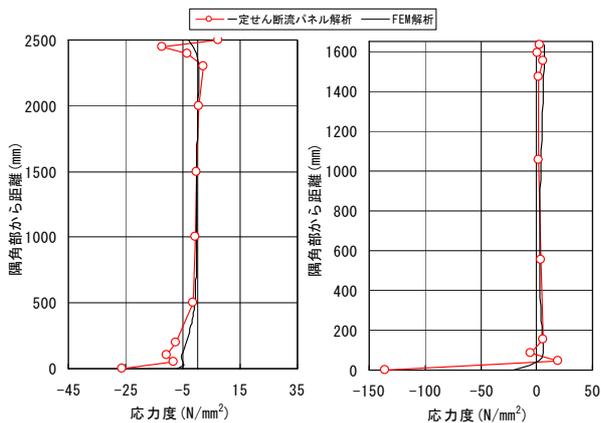


図-7 柱ダイヤフラム平均 応力分布比較図

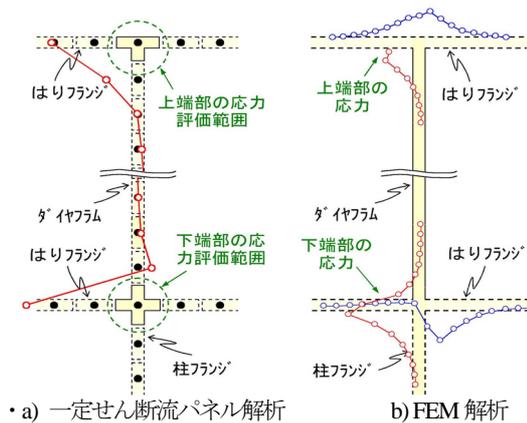


図-9 応力集計方法図

柱フランジではほぼ同等の値を示しており、フランジ全体の応力性状で捉えると要素分割が粗いにもかかわらず比較的精度よく FEM 解析と整合性がとれていると思われる。なお、FEM 解析結果にみられる柱フランジ中央付近のグラフの凹凸は、(3)項にて記載するがはり下フランジに配置されたリブの影響であると考えられる。

## (2) 面外方向

図-7, 8 に柱ダイヤフラムおよびはりダイヤフラムにおける面外方向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比較的整合がとれており、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、(3)項にて記載するが FEM 解析とのモデル化の違いや応力解析結果の出力方法の違いが要因と考えられる。

## (3) 解析結果の違いについて

一定せん断流パネル解析は、FEM 解析に対して総要素数で 1/15 程度以下とかなり簡素な解析モデルであるのでモデル化の作業や計算量が大幅に減少するにもかかわらず、設計で必要となる隅角部を構成する板交差部の溶接線の応力分布は FEM 解析に近い精度で算出できることが分かった。ただし、図-6 の中間部や図-5, 図-7, 8 の端部などの細かな応力性状の違いがみられる。以下に、この要因と対処方法について述べる。

### ① 中間部における応力性状の違い

図-6 にみられる中間部の応力性状の違いは、はりフランジに配置されたリブと柱の結合位置で発生しており、リブのモデル化の違いが要因と考えられる。FEM 解析ではリブも含めてシェル要素によりモデル化しているが、一定せん断流パネル解析ではリブ自体はモデル化せずその剛性のみ考慮している違いがある。そのためリブによる柱方向への拘束効果が差異を生じさせたと考えられる。したがって、各解析でリブのモデル化を合わせるこ

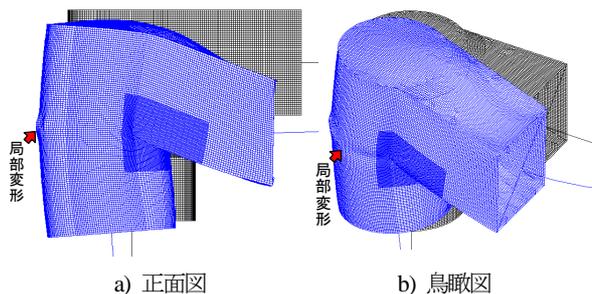


図-10 変形図 (FEM 解析)

とで、この差異は小さくなると考えられる。

### ② 端部の応力性状の違い

図-5 や図-7, 8 に見られる端部の応力性状の違いは、応力を抽出時の集計方法の違いと要素分割の違いが要因として考えられる。図-9 に示すように、一定せん断流パネル解析では縁部材ごとに応力を集計するために端部でははりフランジ部の応力を含んだ値を出力しており、FEM 解析ではダイヤフラムのみを出力していることが解析結果に差異を生じさせたと考えられる。また、図-10 に FEM 解析による変形図を示すように、はり下フランジ高さ付近で柱が局所的な変形が生じているのが分かるが、要素分割が粗い一定せん断流パネル解析ではこの局所的な変形を捉えられていないと考えられる。したがって、FEM 解析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要素サイズを FEM 解析と同程度として解析を行うことでこの差異は小さくなると考えられる。

## 2.6 フィレット構造の疲労耐久性向上効果の検証

### (1) 検討概要

本検討では、疲労耐久性向上の効果が確認されているフィレット構造を設置した隅角部における一定せん断流パネル解析の適用性について検討を行った。検証方法は前節と同様に FEM 解析と相対比較し、またフィレット構造の低減効果の確認を行った。対象とした隅角部は前節の検討に用いた隅角部として、図-11 に示すフィレッ

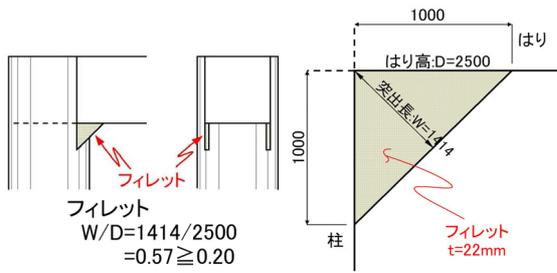


図-11 フィレット構造概要図

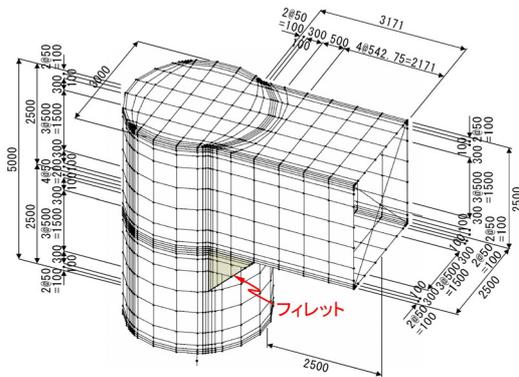


図-12 一定せん断流パネル解析モデル図

ト構造を設置した場合とした。フィレット構造は、参考文献8などを参考にW/Dが20%以上となる形状を設定し、構造寸法は隅角部から1000mmの位置とした。なお、フィレット板厚ははりウェブと同じ板厚22mmである。

## (2) モデル化

各解析とも前節と同じ解析モデルにフィレット構造部のモデル化を加えて作成した。図-12に一定せん断流パネル解析モデル図を示す。ここで、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-13 a)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、この三角形域でははり要素①、②、③とパネル要素を組み合わせるモデル化した。なお、各はり要素の部材剛度は、図-13 b)~d)に示すハッチング部分の分担幅を定義して設定を行った。

## (3) 検討結果

図-14~図-16に前節と同様の検証方法による解析結果を示す。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%程度に低減されている。応力分布からも隅角部コーナー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、参考文献13と同様にフィレット構造の設置による隅角部コーナーの応力低減効果は、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。また、面外方向の応力は、フィレット構造を設置

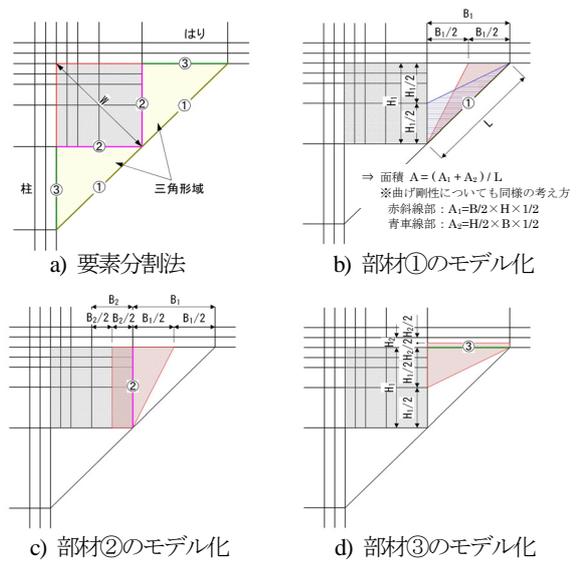


図-13 フィレットのモデル化

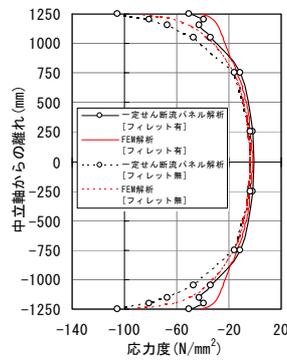


図-14 はりフランジ平均応力分布比較図

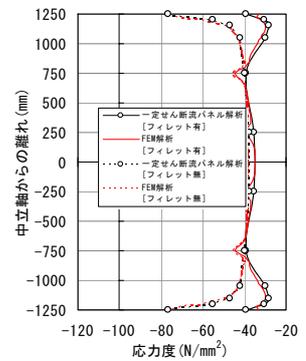


図-15 柱フランジ平均応力分布比較図

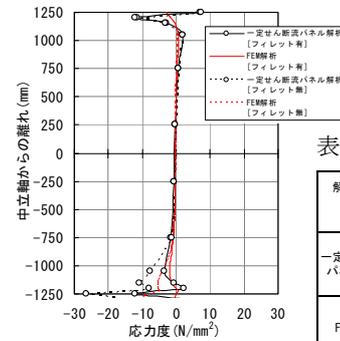


図-16 柱ダイヤフラム平均応力分布比較図

表-3 フィレット構造の効果

解析手法	フィレット有無	公称応力 ( $\sigma_0$ ) N/mm <sup>2</sup>	最大応力 ( $\sigma_{max}$ ) N/mm <sup>2</sup>	比率 $\sigma_{max}/\sigma_0$
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(%)
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)

した場合にはより下フランジ側で解析結果に差が生じているが、前節と同様な原因に加えてフィレット構造端部が急激な応力変化点になっており、要素分割の粗い一定せん断流パネル解析ではこの応力変化を捉えきれていないことが考えられる。したがって、フィレット構造端部の要素分割を細分化することで対処できると考えられる。なお、現時点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、フィレット構造の応力を正確に捉えるにはフィレット構造のモデル化の細分化するなどの工夫が必要と考えられる。

## 2.7 試算結果のまとめ

一定せん断流パネル解析の適用性を FEM 解析との比較により検証を行った結果、参考文献 13 を含めて FEM 解析結果と比べるとやや大きな応力値を示す点もあるが、FEM 解析に比べ簡素なモデル化であるにも関わらず、せん断遅れや板曲げ変形の影響の確認もでき、全体の応力性状に関しては十分に FEM 解析と整合性がとれていると考えられる。また、隅角部コーナー部に生じる応力集中の軽減に有効とされるフィレット構造の低減効果も FEM 解析と近い精度で評価が行えると思われる。ただし、解析手法に応じて応力評価方法やモデル化の違いが一見されることもあるので、解析手法の特性を十分に踏まえて行う必要がある。

なお、本報告では記載を省略したが、逆 L 型橋脚や二層式ラーメン橋脚の隅角部においても同様の解析結果や傾向が得られており、一般的な形式の鋼製橋脚隅角部の設計に有効な解析手法と考えられる。

## 3. 実構造物における一定せん断流パネル解析の適用性の検証

### 3.1 検証概要

一定せん断流パネル解析は、試算検討より一般的な形式の鋼製橋脚隅角部において、FEM 解析とほぼ同等の精度で応力などの算出が行えることが確認された。しかし、試算検討は FEM 解析を正值としたもので、実構造物における再現性の良否は不明である。そこで、この解析手法の実構造物における再現性を確認するために、既設構造物において計測された応力などと比較検証を行った。

対象とした実構造物は、参考文献 13 を含めて今までに試算検討された鋼製橋脚隅角部の形式から矩形柱および円形柱の隅角部を有する上部構造と剛結されていない橋脚を選定して行った。検証方法は、一定せん断流パネル解析により得られた応力や応力性状などを実構造物において計測された応力や FEM 解析結果と相対的に比較することで行った。

### 3.2 矩形柱隅角部における検証

#### (1) 橋脚概要

対象橋脚は、図-17、18 に示すように本線部に上下線一体の合成単純 I 桁橋、本線の左右に合成単純 I 桁のランプ橋を支持する変形した矩形柱門型ラーメン構造である。ランプ橋は張出しはりにより支持されており、検証にあたっては張出しはりが長い (8.00m) オンランプ側の隅角部を検討対象とした。なお、図-19 に隅角部におけるはりおよび柱の断面図を示す。

#### (2) 応力計測

応力計測は、図-20 に示すようにオンランプ橋を車

両が走行することにより生じる隅角部の応力分布を確認することを目的として行われ、走行中の車両のうち応力頻度計測期間内で最大総重量を有すると思われる一般車両において動的計測が実施された。そのため、計測車両の重量や諸元などは不明である。応力計測箇所は、隅角部近傍の応力性状に着目して、図-21 に示す鋼板外面 (橋脚外面) 位置にひずみゲージを用いて行われた。

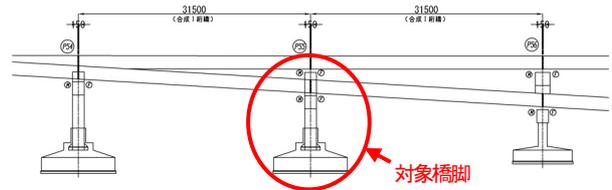


図-17 橋梁一般図

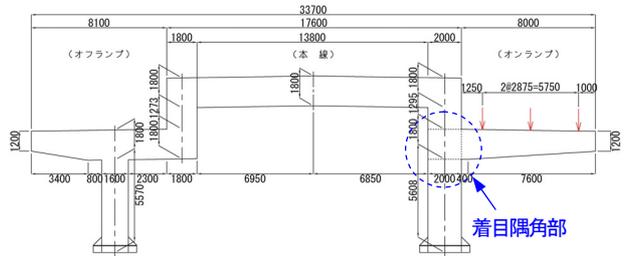


図-18 対象橋脚概要図

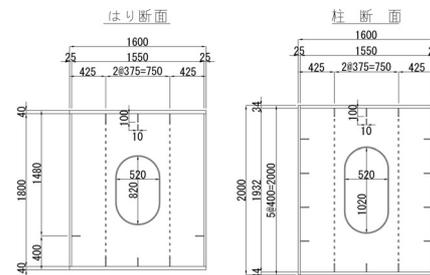


図-19 隅角部断面図

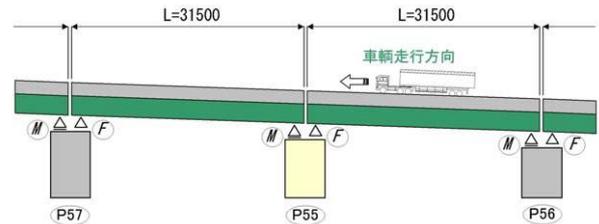


図-20 計測概要図

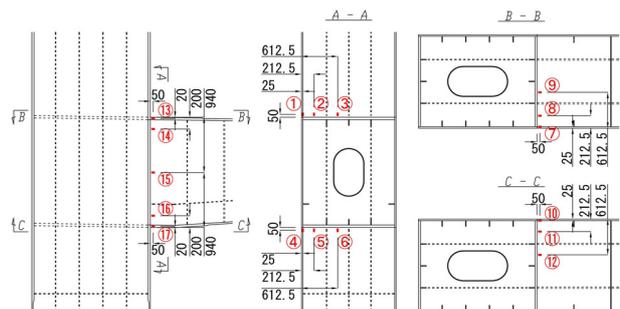


図-21 応力計測位置図

### (3) 解析モデル

図-22 に対象橋脚の一定せん断流パネル解析モデル図を示す。一定せん断流パネル解析モデルの構築は、前章と同様に着目した隅角部およびその周辺部を一定せん断流パネル要素によりモデル化し、その他の部位をはり要素によりモデル化して一定せん断流パネル要素モデル部と仮想剛部材により結合した。とくに応力集中が想定される隅角部コーナーは要素サイズを50mmと細分化した。また、一定せん断流パネル要素は、前章と同様に各部材を同厚の一定せん断流パネルに置き換え、縁部材の剛性にはフランジまたはウェブの分担幅分の板の断面積、面外断面2次モーメント、さらにリブの剛性を考慮した。解析モデルは総節点数4064、はり要素数12429、一定せん断流パネル要素数4188である。

図-23 に対象橋脚のFEM解析モデル図を示す。FEM解析モデルは、一定せん断流パネル解析と同じ範囲として、着目した隅角部およびその周辺部の全ての鋼板をシェル要素よりモデル化し、その他の部位ははり要素によりモデル化してシェル要素モデル部と仮想剛部材により結合した。とくに応力集中が想定される隅角部コーナーは要素サイズを25mmと細分化した。解析モデルは総節点数22729、総要素数20883となり、一定せん断流パネル解析の総要素数(はり要素+一定せん断流パネル要素数)に対して1.3倍程度の総要素数となっている。

荷荷条件は、応力計測では(2)項に示したように走行中の一般車両から選定して計測を行っており計測時の車両条件が不明であることから、解析では張出しはり支承位置にB活荷重(G1, G3:545.7kN, G2:792.0kN)を設定して荷荷し、本線やオフランプ側における荷荷は無視をした。なお、各解析とも橋脚下端部を固定支持とした。

### (4) 検討結果

ひずみゲージ貼付位置とした板外面における計測値および解析値を表-4に示し、図-25~図-27に各部材の応力分布図を示す。また、図中に示す一般車は、72時間応力頻度計測での最大応力値を示したものである。

解析結果は、測定時の荷荷条件との違いもあるが測定値のほぼ4~5倍程度を示し、隅角部コーナー部ではせん断遅れによる応力集中も認められ、全体的な応力性状は比較的整合性があると思われる。なお、隅角部コーナーにおいて、各解析結果に若干乖離が見られるが、この要因としては、図-24に示されるようにフランジでは局部的な変形が生じており、要素分割が粗い一定せん断流パネル解析ではこの局部的な変形の影響を十分に捉えられていないと考えられる。これは、前節の試算検討でも認められており、板の内外面の表面応力に差が生じていることが要因であり、要素分割数を増やすことでその差異が小さくなることが確認されている。ただし、同様の要素分割でも応力の評価しやすい板中心応力(平均応力)

では十分に整合性があることが確認されており、表-5および図-28, 29に各解析の平均応力結果を示すが、ゲージ位置(外面)での応力比較に比べその差異が小さくなり近似した解析結果であることが分かる。

以上の結果から、隅角部における全体的な応力性状が測定結果と解析結果で近似しており、線形解析であることから荷荷条件の整合させることで発生応力も十分に捉えられ、一定せん断流パネル解析においても実構造物の応力性状を十分に再現できると考えられる。

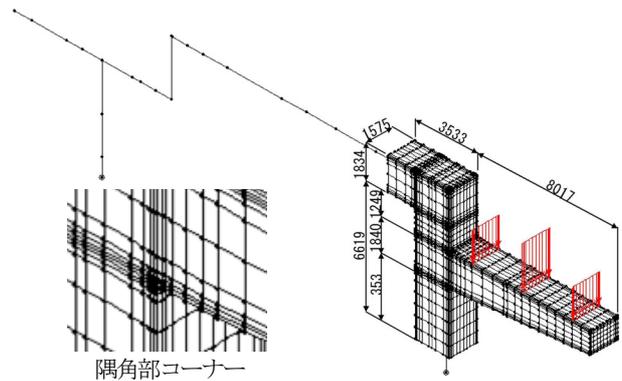


図-22 一定せん断流パネル解析モデル図

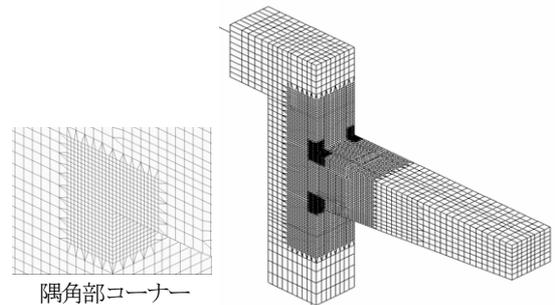


図-23 FEM解析モデル図

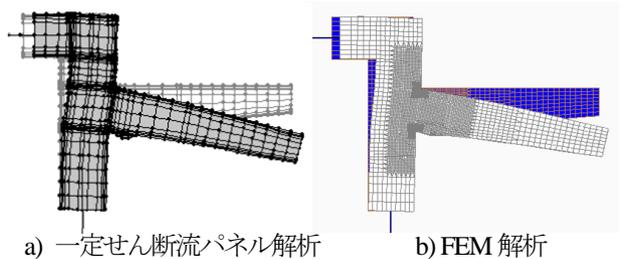


図-24 変形図(変形倍率:100倍)

表-4 各部材応力比較一覧表

部材	ゲージ番号	位置 mm	①測定値 N/mm <sup>2</sup>	②FEM N/mm <sup>2</sup>	③せん断比 N/mm <sup>2</sup>	比率 (②/①)	比率 (③/①)
柱フランジ	①	775.0	17.50	80.55	67.72	4.60	3.87
	②	587.5	12.30	46.96	44.18	3.82	3.59
	③	187.5	6.40	25.33	20.55	3.96	3.21
	④	775.0	-25.20	-141.82	-100.66	5.63	3.99
	⑤	587.5	-22.10	-90.93	-74.31	4.11	3.36
	⑥	187.5	-17.80	-59.48	-58.04	3.34	3.26
はりフランジ	⑦	775.0	28.30	126.47	103.89	4.47	3.67
	⑧	587.5	17.20	80.50	70.44	4.68	4.10
	⑨	187.5	9.20	47.40	46.25	5.15	5.03
	⑩	775.0	-30.30	-142.34	-117.60	4.70	3.88
	⑪	587.5	-25.80	-100.08	-96.65	3.88	3.75
	⑫	187.5	-21.50	-70.03	-89.73	3.26	4.17
はりウェブ	⑬	940.0	25.40	87.59	77.17	3.45	3.04
	⑭	740.0	10.40	60.88	53.66	5.85	5.16
	⑮	-740.0	-9.30	-55.05	-41.59	5.92	4.47
	⑯	-940.0	-32.00	-90.70	-80.54	2.83	2.52

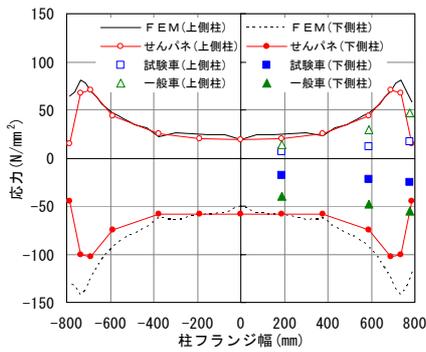


図-25 柱フランジ応力分布比較図

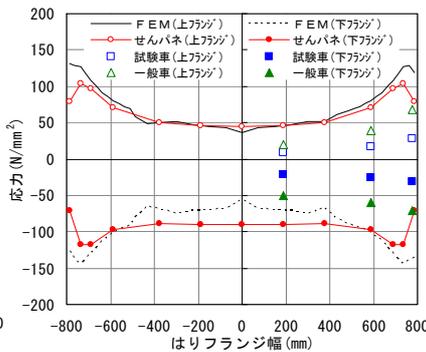


図-26 はりフランジ応力分布比較図

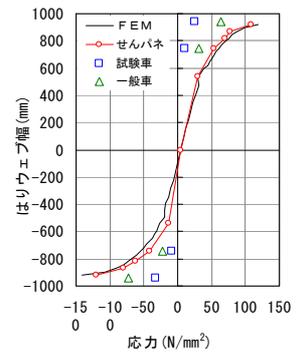


図-27 はりウェブ応力分布比較図

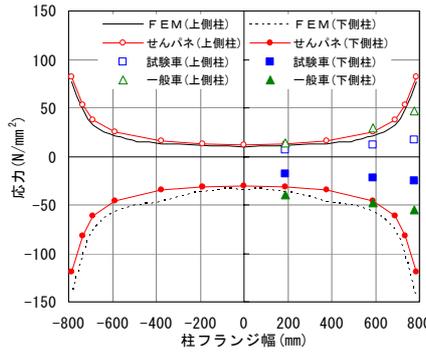


図-28 柱フランジ軸力分布比較図

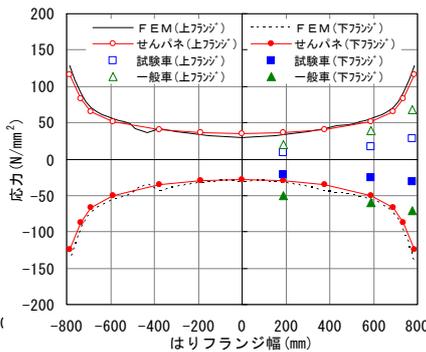


図-29 はりフランジ軸力分布比較図

表-5 各部材軸力比較一覧表

部材	ゲージ番号	位置 mm	①測定値 N/mm²	②FEM N/mm²	③せん断 N/mm²	比率 (②/①)	比率 (③/①)
柱フランジ	①	775.0	17.50	80.55	67.72	4.60	3.87
	②	587.5	12.30	46.96	44.18	3.82	3.59
	③	187.5	6.40	25.33	20.55	3.96	3.21
	④	775.0	-25.20	-141.82	-100.66	5.63	3.99
	⑤	587.5	-22.10	-90.93	-74.31	4.11	3.36
	⑥	187.5	-17.80	-59.48	-58.04	3.34	3.26
はりフランジ	⑦	775.0	28.30	126.47	103.89	4.47	3.67
	⑧	587.5	17.20	80.50	70.44	4.68	4.10
	⑨	187.5	9.20	47.40	46.25	5.15	5.03
	⑩	775.0	-30.30	-142.34	-117.60	4.70	3.88
	⑪	587.5	-25.80	-100.08	-96.65	3.88	3.75
	⑫	187.5	-21.50	-70.03	-69.73	3.26	4.17
はりウェブ	⑬	940.0	25.40	87.59	77.17	3.45	3.04
	⑭	740.0	10.40	60.88	53.66	5.85	5.16
	⑮	-740.0	-9.30	-55.05	-41.59	5.92	4.47
	⑯	-940.0	-32.00	-90.70	-80.54	2.83	2.52

### 3.3 円形柱隅角部における検証

#### (1) 橋脚概要

対象橋脚は、図-30、31 に示すように橋長 135.350m の鉸桁と箱桁からなる 3 連の鋼単純桁橋の起点側中間掛違い部に位置し、斜角を有して配置されている。橋脚形式は、円柱に矩形はりが接合された T 型構造であり、はりフランジ幅と円柱直径が等しい特異な構造形式を有しており、はりウェブは内面側に設置された三角形の鋼板を介して円柱に接合されている。なお、図-31 に隅角部におけるはりおよび柱の断面図を示す。

#### (2) 応力計測

応力計測は、車両が走行することで生じる隅角部の応力および応力変動を確認することを目的として行なわれ、2 台の試験車両（総重量 20.5t）を用いて実施された。応力計測は、試験車両が走行速度 40km/h で、図-32 に示すように合流車線の中央を 1 台目と 2 台目が 5.0m 離れて連行した場合とした。応力計測位置は、隅角部近傍の応力性状に着目し、図-33 に示す位置にひずみゲージを用いて計測を行った。なお、本計測ではスカーラップ施工検討の一環として行われたため、はりウェブには想定したスカーラップ周辺部の応力状態が分かるようにひずみゲージが貼付されている。

#### (3) 解析モデル

図-34 に対象橋脚の一定せん断流パネル解析モデル

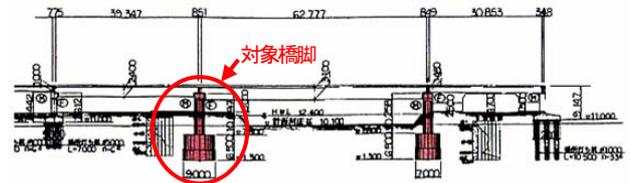


図-30 橋梁一般図

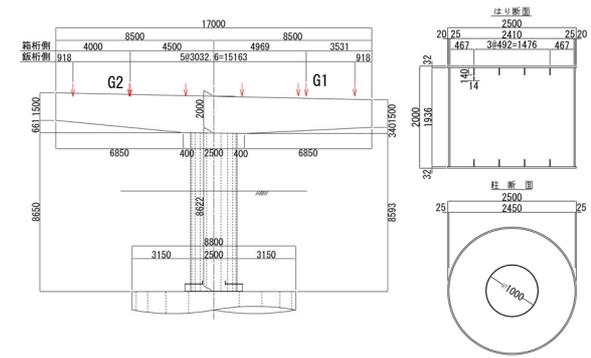


図-31 対象橋脚概要図

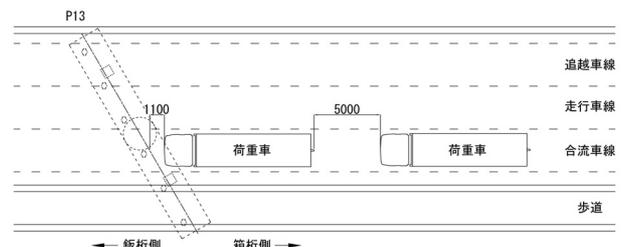
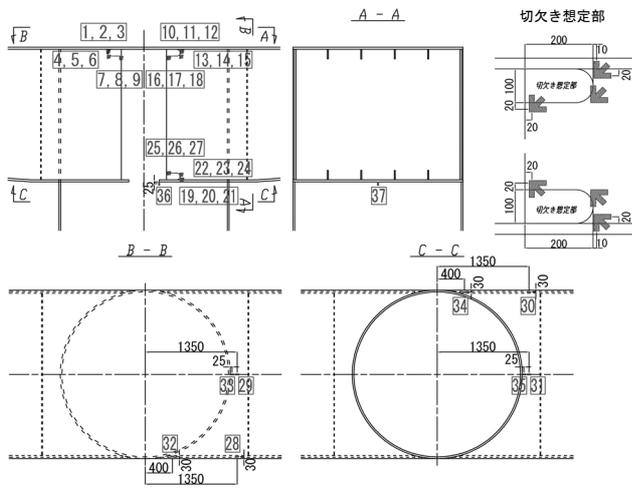


図-32 計測概要図

図を示す。基本的なモデル化の方法は前章と同様に行なった。解析モデルは柱下端のみはり要素として、その他部材を一定せん断流パネル要素によりモデル化し、一定せん断流パネル要素とはり要素は仮想剛部材により結合した。とくに応力集中が想定される隅角部コーナーは要素サイズを50mmと細分化した。なお、解析モデルは総節点数4181、はり要素数12861、一定せん断流パネル要素数4324である。

図-35に対象橋脚のFEM解析モデル図を示す。FEM解析モデルは、基本的に全ての鋼板をシェル要素よりモデル化したが、円柱とはりウェブ接合部が複雑な構造のために図-36に示すようにソリッド要素によりモデル化して円柱とはりウェブに接する箇所では仮想剛部材を用いて接合した。また、応力集中が想定される隅角部コーナーはソリッド要素サイズを6mmと細分化した。なお、解析モデルは総節点数161948個、総要素数174180個である。

荷重条件は、図-32に示したように合流車線を2台の試験車両が5.5mの間隔で連行し、対象橋脚から1.1m離れた位置に先頭試験車両が到達した時に箱桁側G1支承位置の反力(P=149.0kN)を荷重した。なお、各解析とも橋脚下端部で固定支持とした。



※三軸ゲージ番号は左から水平,垂直,斜めの順に示す

図-33 応力計測位置図

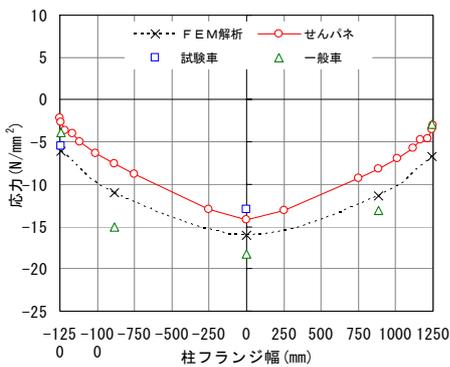


図-36 柱フランジ応力分布比較図

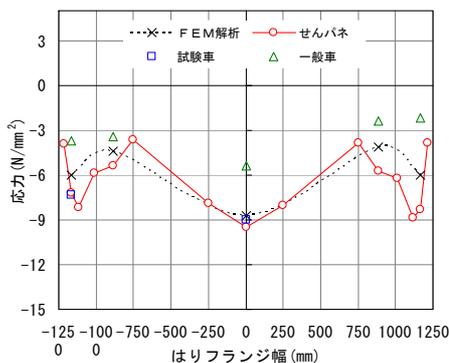


図-37 はりフランジ応力分布比較図

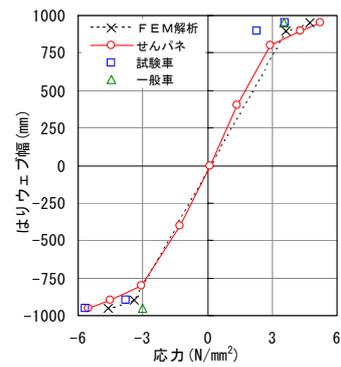


図-38 はりウェブ応力分布比較図

#### (4) 検討結果

表-6 にゲージ位置における計測値および解析値を示し、図-36～図-38 に各部材の応力分布を示す。各解析結果は、測定値に対して全体的に20%程度以内の差であり比較的精度良く再現しており、はりウェブ上部部に多少大きな差異も見られるが、はり下フランジなどに比べて発生応力が小さく応力値の違いほど重要でないと思われる。また、柱端部における一定せん断流パネル解析結果が測定値やFEM解析結果に対してかなり小さな値

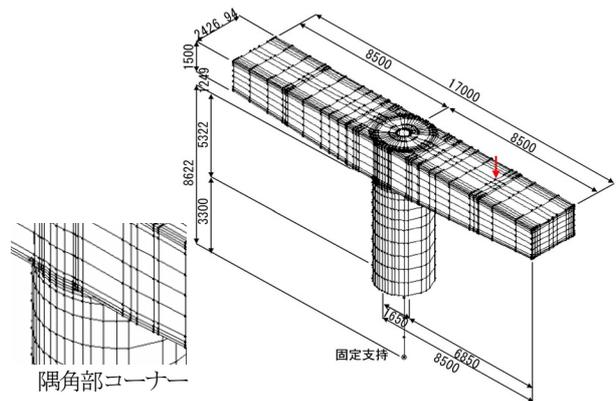


図-34 一定せん断流パネル解析モデル図

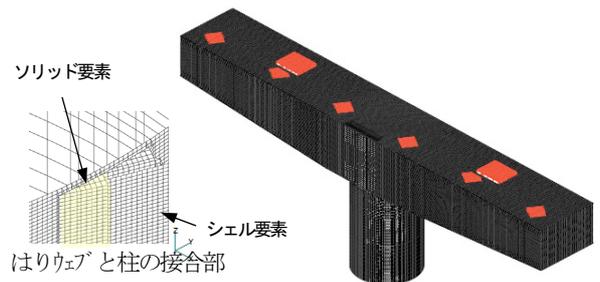


図-35 FEM解析モデル図

表-6 各部材応力比較一覧表

測定位置	測定番号	①測定値	②FEM	③せんハネ	比率	
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	(②/①)	(③/①)
はりウェブ上部	CH10	3.57	4.76	5.24	1.33	1.47
	CH13	2.31	3.65	4.30	1.58	1.86
	CH16	2.52	3.48	4.93	1.38	1.96
はりウェブ下部	CH19	-5.67	-4.59	-5.51	0.81	0.97
	CH22	-3.78	-3.40	-4.50	0.90	1.19
	CH25	-3.36	-3.31	-4.61	0.99	1.37
はり下フランジ	CH34	-7.35	-6.03	-7.19	0.82	0.98
	CH35	-9.03	-8.75	-9.48	0.97	1.05
円柱	CH36	-5.46	-6.03	-2.69	1.10	0.49
	CH37	-13.02	-16.05	-14.18	1.23	1.09

を示しているが、この要因は前章と同様に局所的な変形が正確に捉えられていないと考えられる。また、測定値と解析結果の差異としては、载荷条件の違いも考えられる。解析では载荷位置を試験車両の走行ラインや走行速度などより想定し静的载荷しているが、測定値は動的载荷結果であり载荷位置や衝撃の影響などが含まれるために微妙に解析との条件が異なっていることも考えられる。さらに载荷条件やモデル化の変更などによりモデル化の整合性を図ることも考えられるが、全体的な応力性状は比較的近似しており、一定せん断流パネル解析においても実構造物の応力性状を比較的精度良く再現できると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、実用的な鋼製橋脚隅角部の解析手法の構築を目指し、一般的な鋼製橋脚隅角部を対象に一定せん断流パネル解析の適用性を FEM 解析との試算検討や実構造物における応力計測との比較検証を行った。本研究で得られた事項を以下に示す。

- 一定せん断流パネル解析は、一般的な鋼製橋脚隅角部のはり方向、柱方向、面外方向の応力性状をせん断遅れや板曲げの影響などの局所的な応力を含めて FEM 解析より簡素なモデル化で比較的精度良く算出することができる。また、実構造物における応力性状なども比較的精度良く再現できる。ただし、要素分割が粗いために局所的な変形や応力が急変する箇所などでは解析精度が低下することもあり、要素分割の細分化などのモデル化の工夫が必要となる場合もある。
- 一定せん断流パネル解析は、疲労耐久性向上のために用いられるフィレット構造を設置した場合でも、その効果を比較的精度良く評価できる。ただし、フィレット構造自体の応力を精度良く捉えるにはモデル化の工夫などが必要である。

今後は、鋼製橋脚隅角部における一定せん断流パネル解析の適用性の拡充を目的に、上部構造と剛結された橋脚などのより複雑な構造形式において実構造物との検証を基本に行う予定である。なお、鋼製橋脚の隅角部の設計だけでなく鋼製橋脚の実用的な設計手法としての可能性もあると思われる。

謝辞：本研究を行うにあたり各種資料やデータの提供などご協力頂きました方々に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編Ⅱ鋼橋編，2002.3
- 2) (社) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3
- 3) 玉越隆史，中州啓太，石尾真理，水津紀陽，中谷昌一：道路橋の鋼製橋脚隅角部構造に関する資料，国土技術政策総合研究所資料，第 229 号，2005.1
- 4) 森河久，下里哲弘，三木千壽，市川篤司：箱断面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策，土木学会論文集，No.703/I-59，pp.117-183，2002.4
- 5) 三木千壽，市川篤司，坂本拓也，田辺篤史，時田英夫，下里哲弘：鋼製箱型断面ラーメン橋脚隅角部の疲労特性，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.361-371，2002.7
- 6) 三木千壽，平林泰明，時田英夫，小西拓洋，柳沼安俊：鋼製橋脚隅角部の板組構成と疲労き裂モード，土木学会論文集 No.745/I-65，pp.105-119，2003.10
- 7) 三木千壽，木下幸治，加藤雅之，佐々木栄一，下里哲弘，町田文孝：円形断面柱を有する鋼製橋脚隅角部の疲労強度とその向上法，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.97-111，2005.10
- 8) 首都高速道路公団：橋梁構造物設計要領，2003.5
- 9) (社) 日本橋梁建設協会：鋼製橋脚隅角部ブロックの製作管理標準，2005.1
- 10) 奥村敏恵，石沢成夫：薄板構造ラーメン隅角部の応力計算について，土木学会論文集，No.153，pp.1-18，1968.5
- 11) J.S.シェムニスキー（山田嘉昭，川井忠彦共訳）：マトリックス構造解析の基礎理論，培風館，1971
- 12) 関谷壮，斉藤屋：薄板構造力学，共立出版，1968
- 13) 大村武馬，下山田孝志，江川定利，玉越隆史：鋼製橋脚隅角部の解析手法の一提案，土木学会構造工学論文集，Vol.51A，2005.3
- 14) 首都高速道路公団保全施設部技術課：鋼製橋脚隅角部の補強設計施工要領（案），pp.20-31，平成 15 年 7 月

(2006 年 9 月 11 日受付)