

解析モデルの検証

I. 解析モデルの検証

1. 解析モデル概要

1-1. 全体解析（梁要素）モデル

各部材を梁要素とした橋梁全体系の解析モデル。

解析モデル図を図-1.1に、モデル化条件を表-1.1に、それぞれ示す。

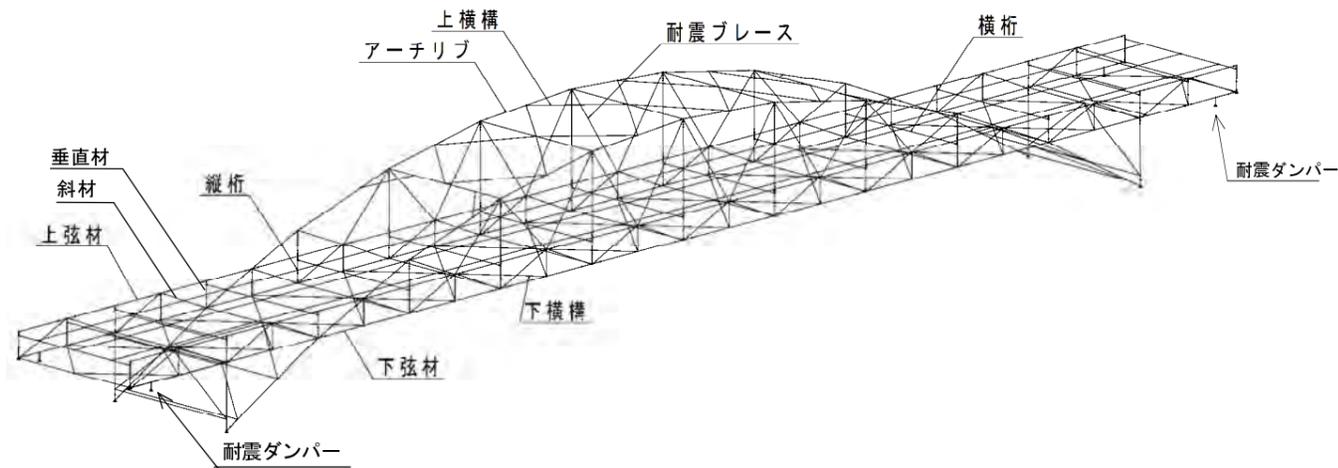


図-1.1 全体解析（梁要素）モデル 概要図

表-1.1 モデル化条件

モデル	項目	条件
全体解析 (梁要素) モデル	要素	梁要素
	部材結合条件	主構, 縦桁, 横桁, アーチ支柱: 剛結合 ※主構・・・アーチリブ, 吊材, 耐震ブレース, 上下弦材, 垂直材, 斜材 上横構, 下横構: ピン結合 (ガセットプレートによる接合部をピンでモデル化)
	床版のモデル化条件	縦桁・横桁に床版の影響を付加してモデル化 縦桁: 合成断面としてモデル化, 床版の質量を縦桁に付加 横桁: 合成断面としてモデル化
	支持条件	供用時 端支点: (橋軸方向) 可動, (橋軸直角・鉛直方向) 固定 アーチ支柱部: (橋軸方向) ピン, (橋軸直角・鉛直方向) 固定 耐震時 端支点: 耐震ダンパー (橋軸方向) 固定
局部解析 (シェル要素) モデル	要素	シェル要素 (1次四辺形シェル要素, 1次三角形シェル要素)
	梁要素との接合条件	仮想剛要素を用いて断面保持の仮定を満足するよう, 断面節点と梁要素端節点を結合

1-2. 全体解析（梁要素+シェル要素）モデル

亀裂発生箇所である格点部の局部挙動・応力状態（二次応力）を確認するために、シェル要素により部材形状まで反映した格点の立体モデル（シェルモデル）を作成した。

シェルモデルを全体解析（梁要素）モデルに組み込み、全体解析（梁要素+シェル要素）モデルとした。解析モデルを図-1.2に、シェル要素モデルのモデル化条件を表-1.1に、それぞれ示す。

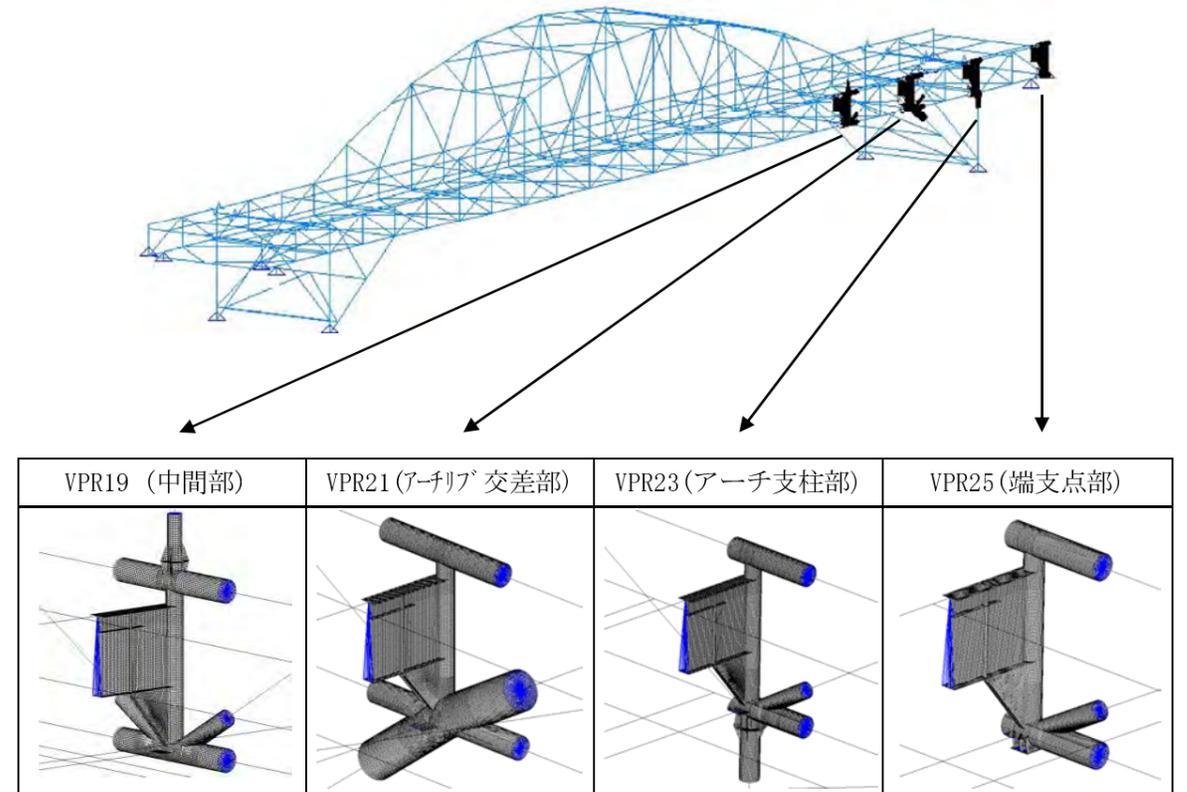


図-1.2 全体解析（梁要素+シェル要素）モデル 概要図

2. 検証方針

解析結果と载荷試験結果との比較により、解析モデルの検証を行う。

载荷ケースは、単独片側走行のケースと2台並列のケースのうち、ねじり挙動も含めて解析モデルの検証ができる単独片側走行のケースを検証ケースとする。単独片側走行の载荷ケースは、歩道が無く、車道がより橋梁中心から偏心しているR側载荷の方がねじり変形が大きいため、R側载荷を検証ケースとする。

载荷ケースはVP1~VP25の各格点载荷とし、図-2.1に载荷モデルの概要を示す。荷重車の車両総重量は20tである。

検証項目を表-2.1に、各検証項目の検証位置を図-2.2~図-2.4に示す。

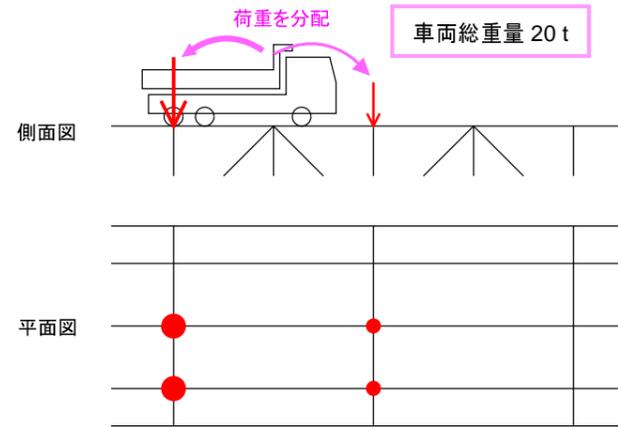


図-2.1 载荷モデル（単独右側走行）

表-2.1 解析モデル検証項目

検証項目		検証位置（格点）	備考
種別	計測内容		
変位	主構のたわみ	VPR13 下弦材	アーチ径間 1/2 点
		VPR17 下弦材	アーチ径間 1/4 点
		VPR24 下弦材	側径間 1/2 点
	主構-床版間の相対変位	VPR17	各横桁位置での橋軸方向の相対変位で比較
		VPR19	
		VPR21	
VPR23			
応力	格点部応力	VPR19	着目点の変形で比較
		VPR21	
		VPR23	
	横桁・ニーブレースフランジの応力（コバ面）	VPR19	シェル要素によるモデル化格点
		VPR21	
		VPR23	
		VPR25	

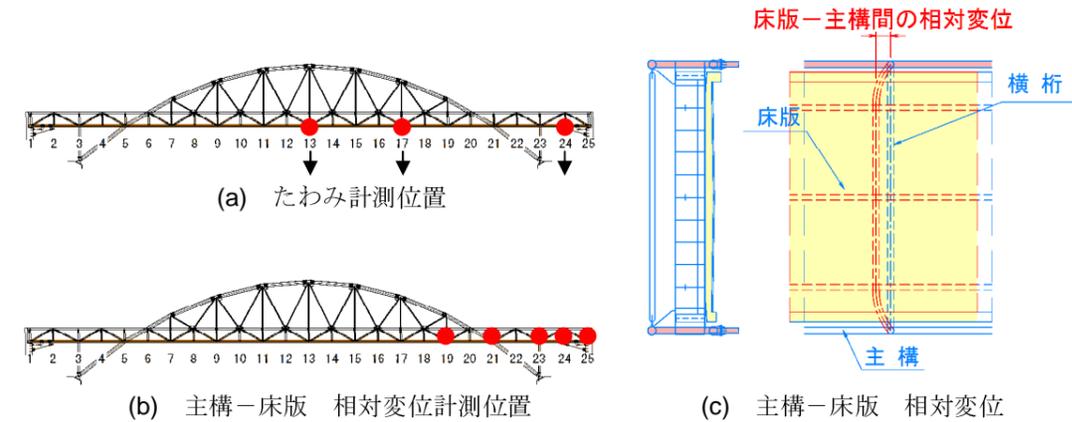


図-2.2 変位検証位置

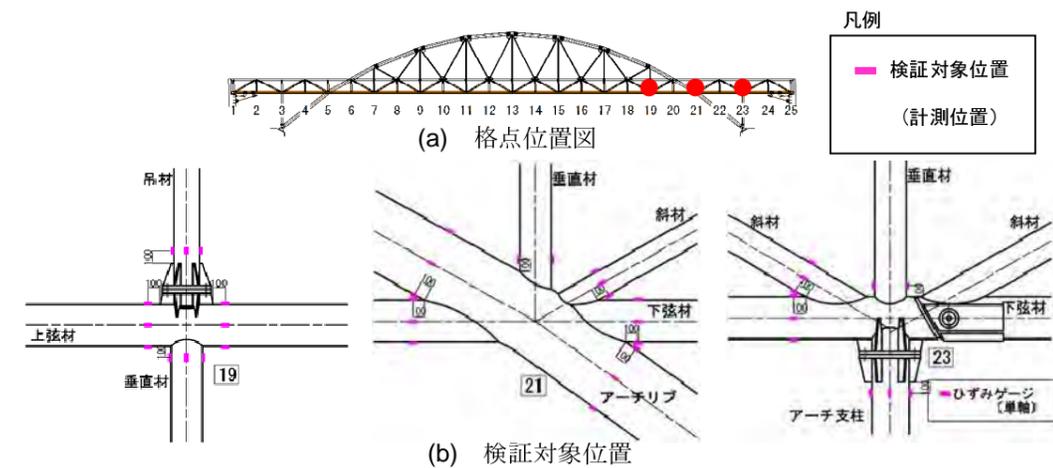


図-2.3 格点部応力検証位置

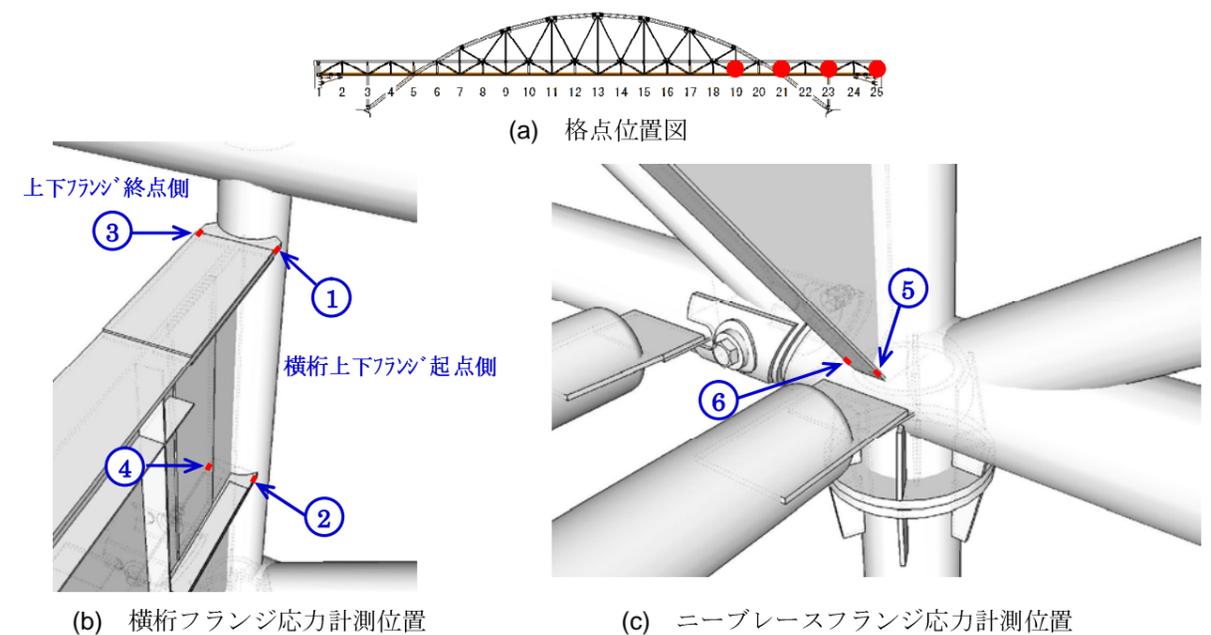


図-2.4 局部応力検証位置

3. 検証結果

3-1. 主構の鉛直たわみによる検証

アーチ径間の 1/2 点、1/4 点および側径間の 1/2 点の下弦材たわみ波形について、載荷試験結果と解析結果を比較した結果を図-3.1 に示す。

ピーク載荷位置：VP17 [計測と解析は一致]

たわみ量：14%解析の方が大きい [計測と解析は概ね一致]

たわみ波形：[計測と解析は概ね一致]

※計測したたわみが最大となるアーチ径間 1/4 点にて検証

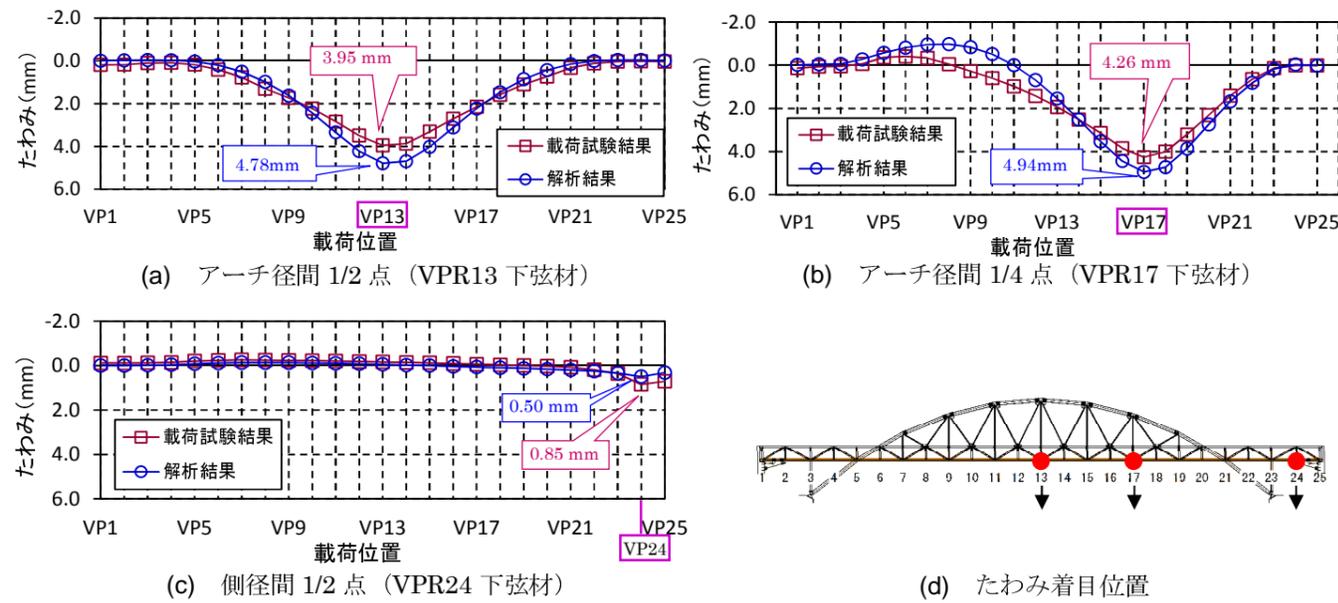


図-3.1 下弦材の鉛直たわみ波形

[総括]

ピーク載荷位置、たわみ量、たわみ波形を検証した結果、計測と解析が一致、又は概ね一致し、実橋を再現できていると評価。

3-2. 主構一床版間の相対変位による検証

各横桁位置における、主構一床版間の相対変位波形を図-3.2 に示す。

ピーク載荷位置：VP20 [計測と解析は一致]

相対変位量：19%解析の方が小さい [計測と解析は概ね一致]

相対変位波形：[計測と解析は概ね一致]

※計測した相対変位量が最大となる VP19 にて検証

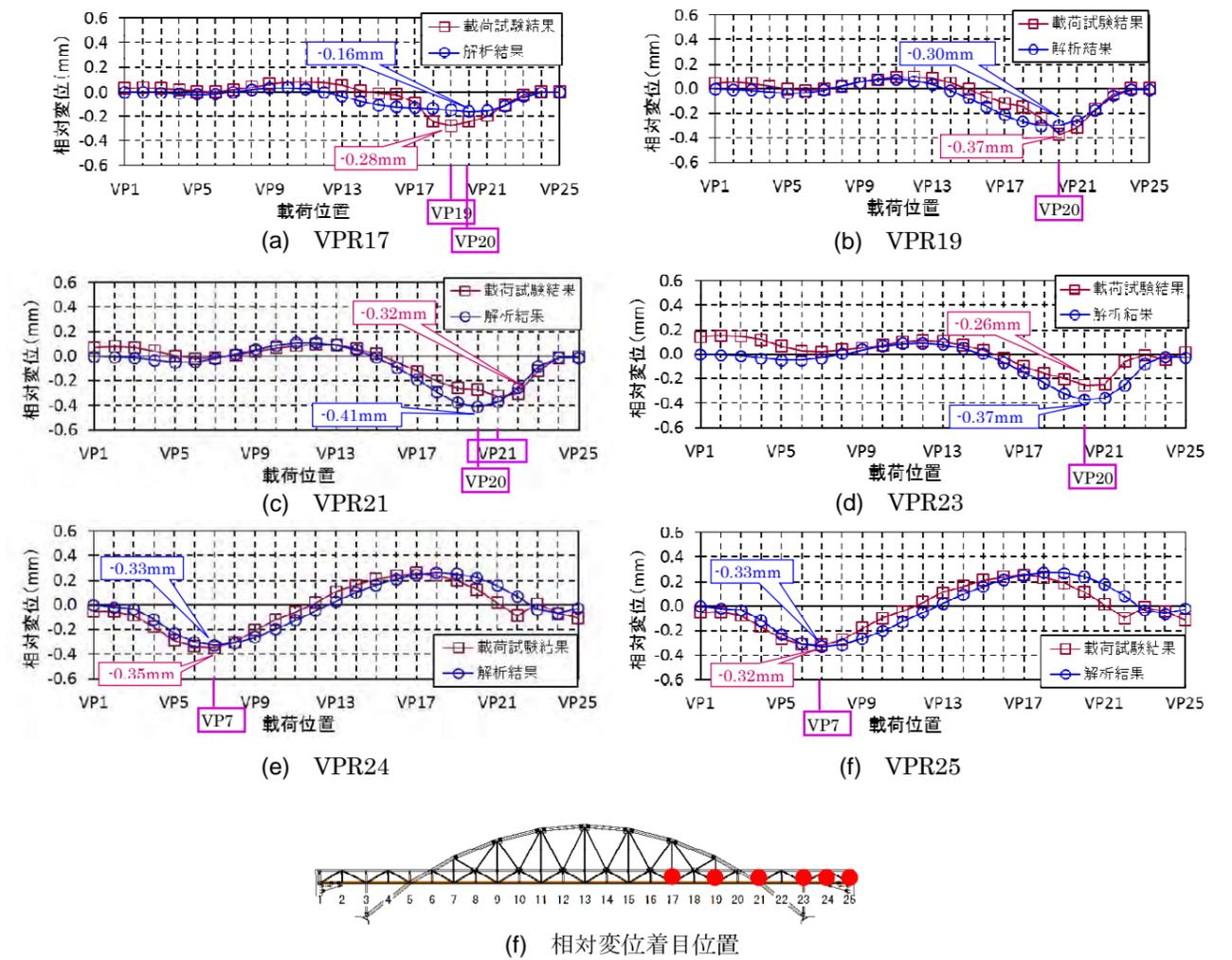


図-3.2 主構一床版間の相対変位波形

[総括]

ピーク載荷位置、相対変位量、相対変位波形を検証した結果、計測と解析が一致、又は概ね一致し、実橋を再現できていると評価。

3-3. 格点毎の応力による検証

3-3-1. VPR19

(1) 格点部応力

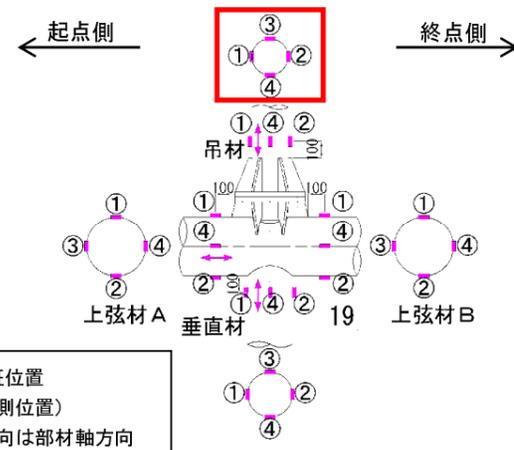
1) 吊材応力の検証

a) 検証位置①、②

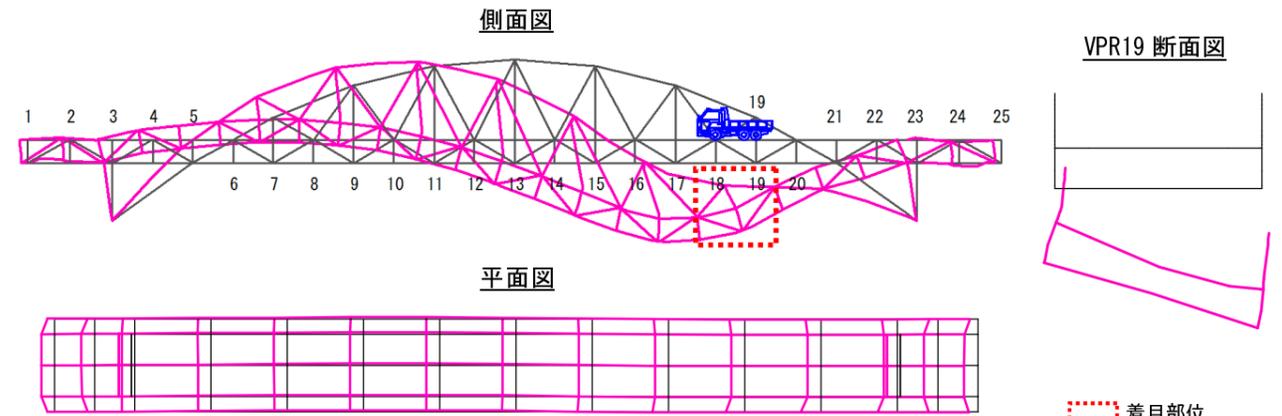
ピーク荷重位置：VP19 [計測と解析は概ね一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

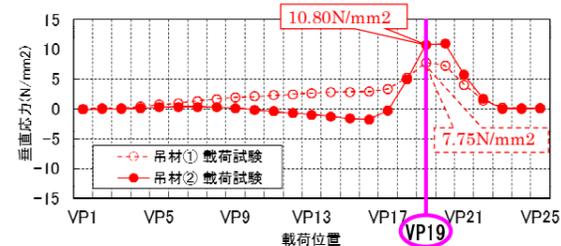
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



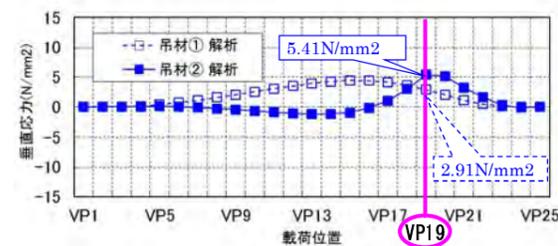
(a) VPR19 検証対象位置図



(f) 全体系梁モデル変形図



(b) 载荷試験結果 (1, 2) 応力波形



(c) 解析結果 (1, 2) 応力波形

b) 検証位置③、④

ピーク荷重位置：VP19 [計測と解析は一致]

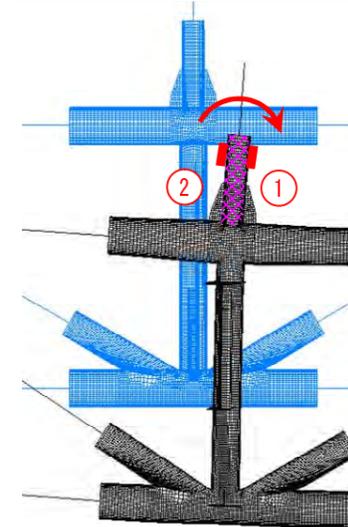
変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は概ね一致]

応力波形：計測では面外応力が卓越しているが、解析では大きな面外応力は発生していない

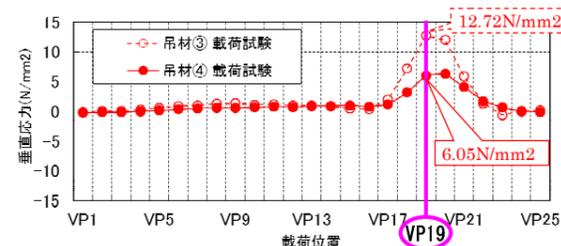
[計測と解析は一致しない]

■VP19 荷重時の格点部変形図

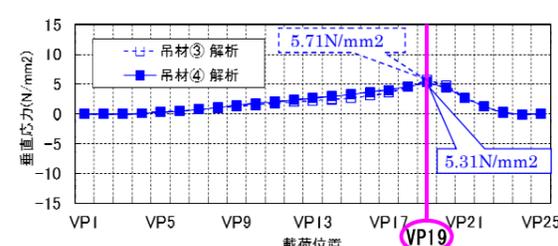
側面図 (主構内側から見た図)



(g) 格点部シェルモデル変形図



(d) 载荷試験結果 (3, 4) 応力波形



(e) 解析結果 (3, 4) 応力波形

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	7.75 N/mm ² (引張)	曲げ
	②	10.80 N/mm ² (引張)	
解析	①	2.91 N/mm ² (引張)	曲げ
	②	5.41 N/mm ² (引張)	

⇒曲げ変形の向きが一致

主構面外応力

計測	③	12.72 N/mm ² (引張)	曲げ
	④	6.05 N/mm ² (引張)	
解析	③	5.71 N/mm ² (引張)	軸変形
	④	5.31 N/mm ² (引張)	

⇒計測では③→④の曲げが生じているが、解析ではほとんど出ていない。

(h) VPR19 吊材変形の検証

図-3.3 VPR19 吊材応力の検証

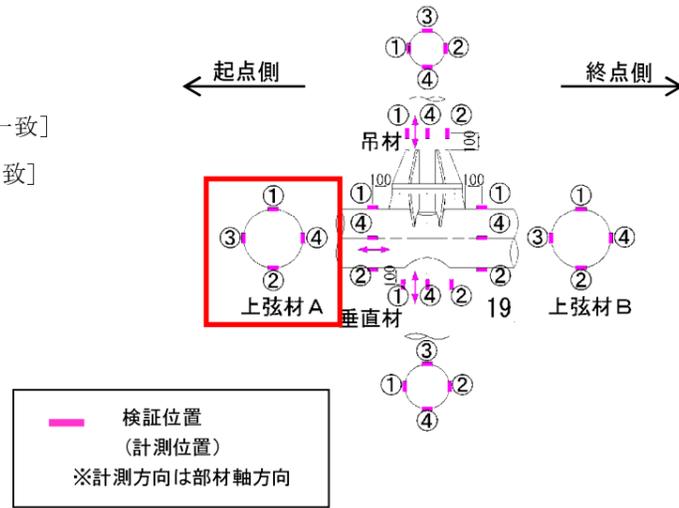
2) 上弦材（起点側）応力の検証

a) 検証位置①、②

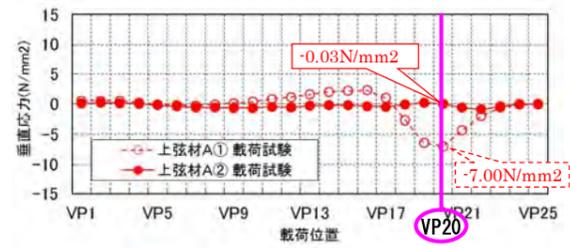
ピーク荷重位置：VP20 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

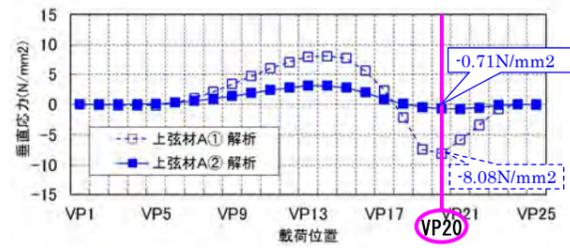
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(a) VPR19 検証対象位置図



(b) 荷重試験結果 (①, ②) 応力波形



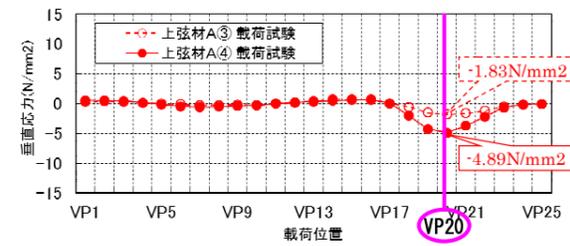
(c) 解析結果 (①, ②) 応力波形

b) 検証位置③、④

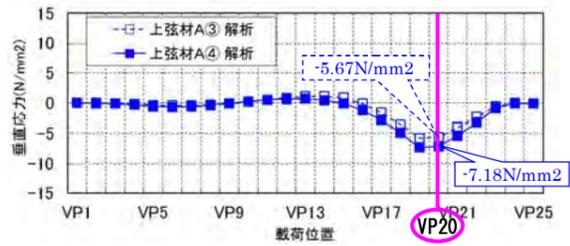
ピーク荷重位置：VP20 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

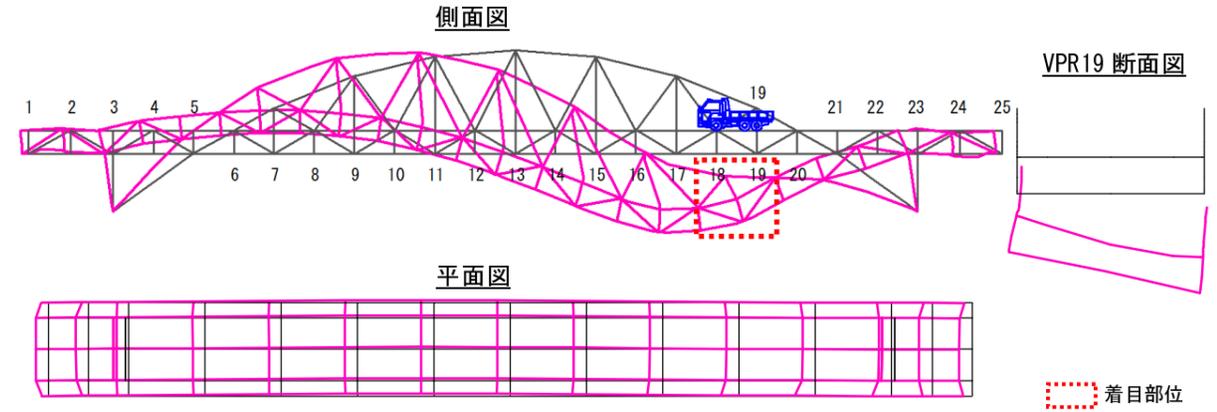
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(d) 荷重試験結果 (③, ④) 応力波形

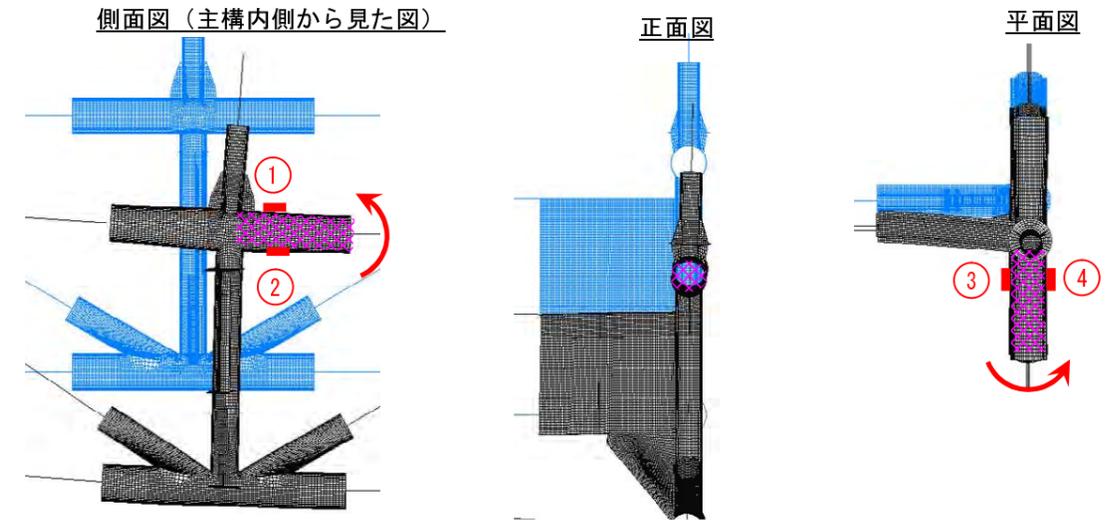


(e) 解析結果 (③, ④) 応力波形



(f) 全体系梁モデル変形図

■VP20 荷重時の格点部変形図



(g) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	-7.00 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	②	-0.03 N/mm ² (圧縮)	
解析	①	-8.08 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	②	-0.71 N/mm ² (圧縮)	

⇒曲げ変形の向きが一致

主構面外応力

計測	③	-1.83 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	④	-4.89 N/mm ² (圧縮)	
解析	③	-5.67 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	④	-7.18 N/mm ² (圧縮)	

⇒曲げ変形の向きが一致

(h) VPR19 上弦材（起点側）変形の検証

図-3.4 VPR19 上弦材（起点側）応力の検証

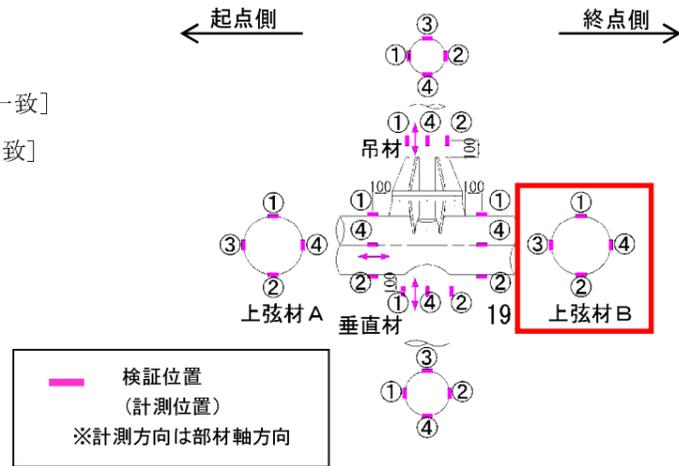
3) 上弦材（終点側）応力の検証

a) 検証位置①、②

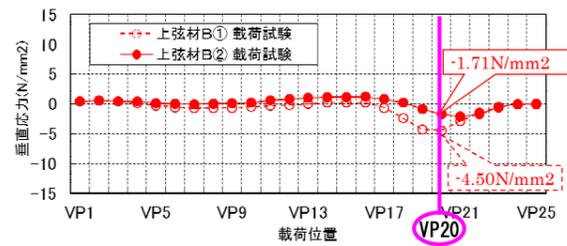
ピーク荷重位置：VP20 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

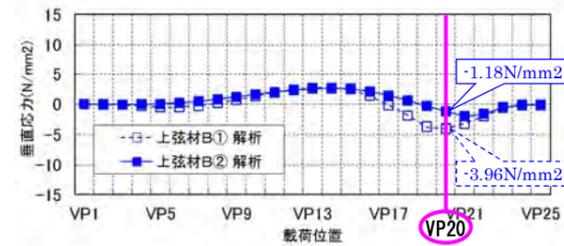
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(a) VPR19 検証対象位置図



(b) 荷重試験結果 (①, ②) 応力波形



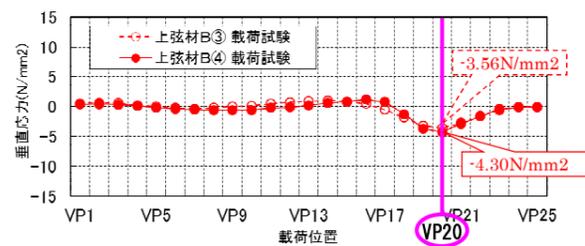
(c) 解析結果 (①, ②) 応力波形

b) 検証位置③、④

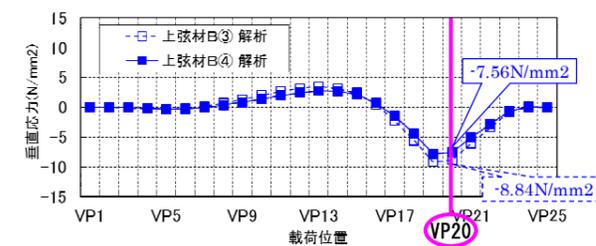
ピーク荷重位置：VP20 [計測と解析は一致]

変形の向き：軸変形 [計測と解析は一致]

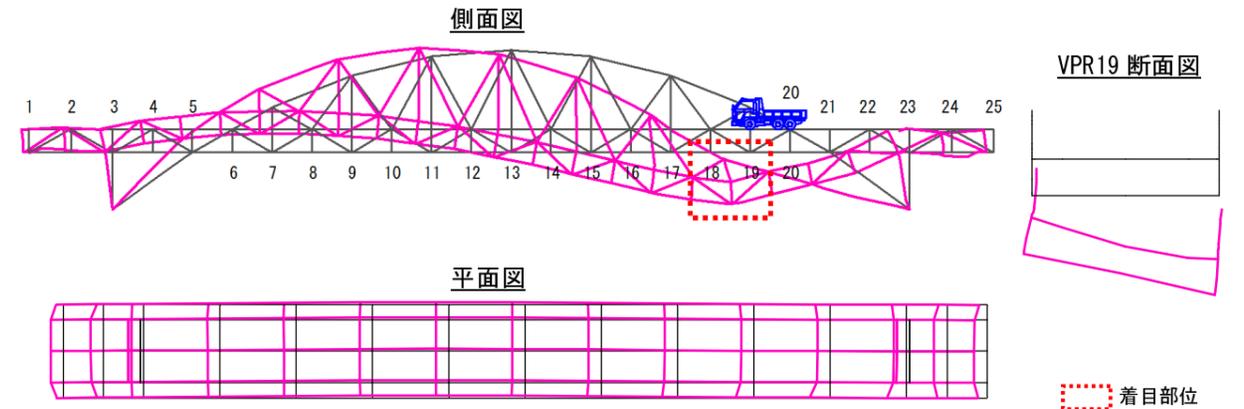
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(d) 荷重試験結果 (③, ④) 応力波形

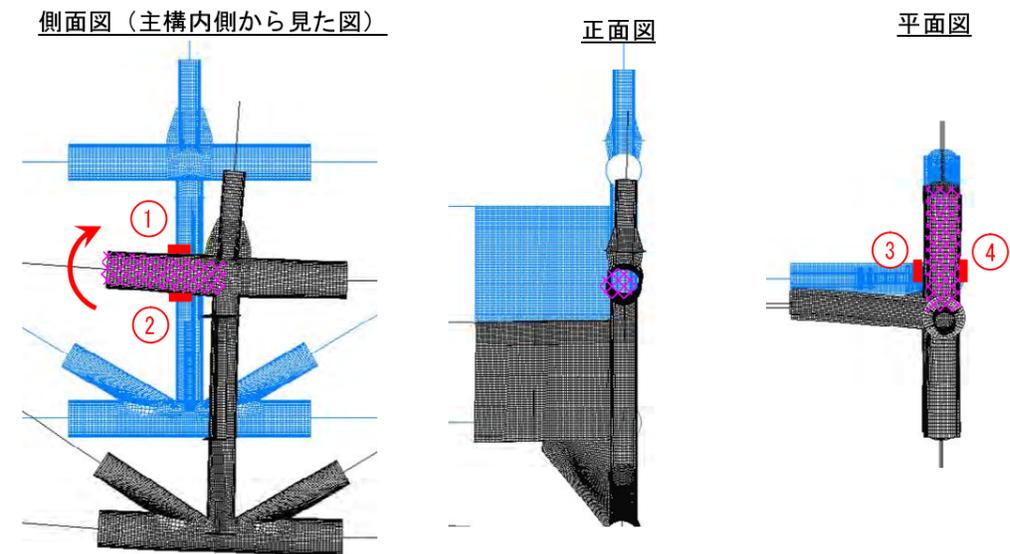


(e) 解析結果 (③, ④) 応力波形



(f) 全体系梁モデル変形図

■VP20 荷重時の格点部変形図



(g) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計	①	-4.50 N/mm ² (圧縮)	曲げ
測	②	-1.71 N/mm ² (圧縮)	曲げ
解	①	-3.96 N/mm ² (圧縮)	曲げ
析	②	-1.18 N/mm ² (圧縮)	曲げ

⇒曲げ変形の向きが一致

主構面外応力

計	③	-3.56 N/mm ² (圧縮)	軸変形
測	④	-4.30 N/mm ² (圧縮)	軸変形
解	③	-8.84 N/mm ² (圧縮)	軸変形
析	④	-7.56 N/mm ² (圧縮)	軸変形

⇒曲げ変形の傾向 (曲げ応力は微小) が一致

(h) VPR19 上弦材 (終点側) 変形の検証

図-3.5 VPR19 上弦材 (終点側) 応力の検証

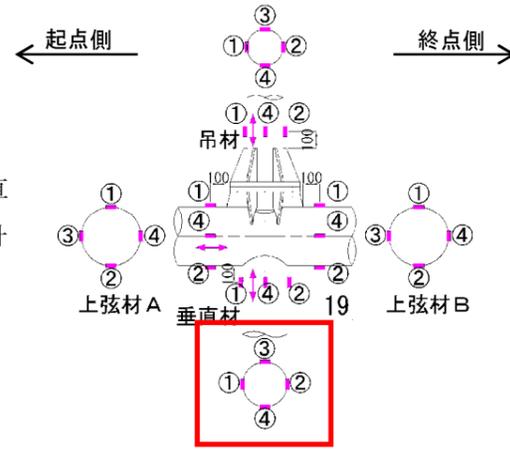
4) 垂直材応力の検証

a) 検証位置①、②

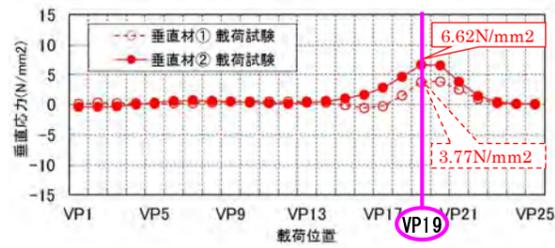
ピーク荷重位置：VP19 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

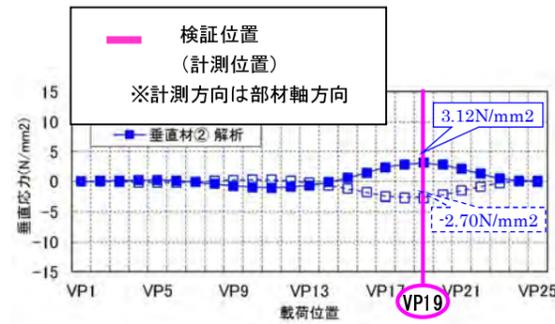
応力波形：計測と解析の曲げの作用方向は一致しているが、垂直材①の応力が VP15~VP23 で正負反転している。[計測と解析は一致しない]



(a) VPR19 検証対象位置図



(b) 荷重試験結果 (①, ②) 応力波形



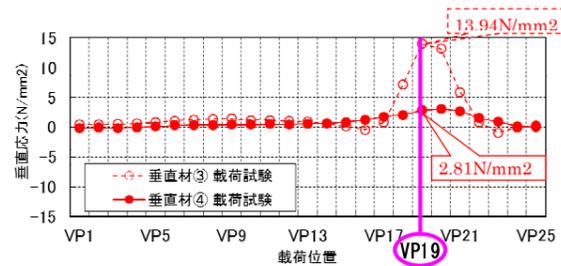
(c) 解析結果 (①, ②) 応力波形

b) 検証位置③、④

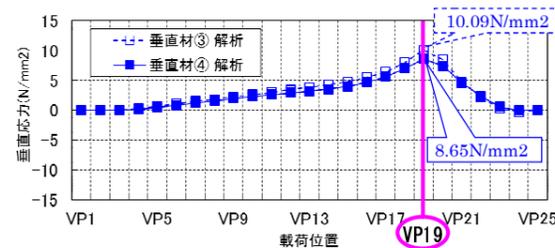
ピーク荷重位置：VP19 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は概ね一致]

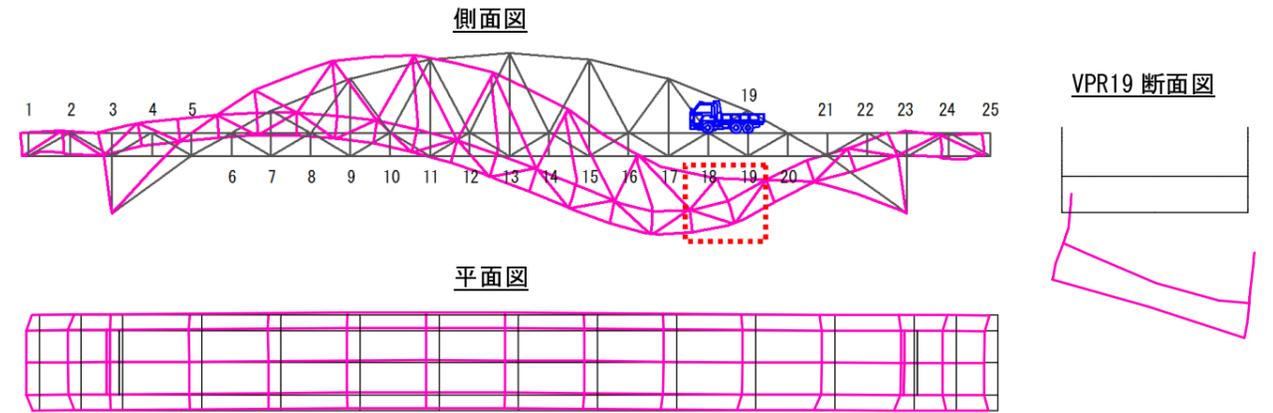
応力波形：計測では面外応力が卓越しているが、解析では大きな面外応力は発生していない [計測と解析は一致しない]



(d) 荷重試験結果 (③, ④) 応力波形

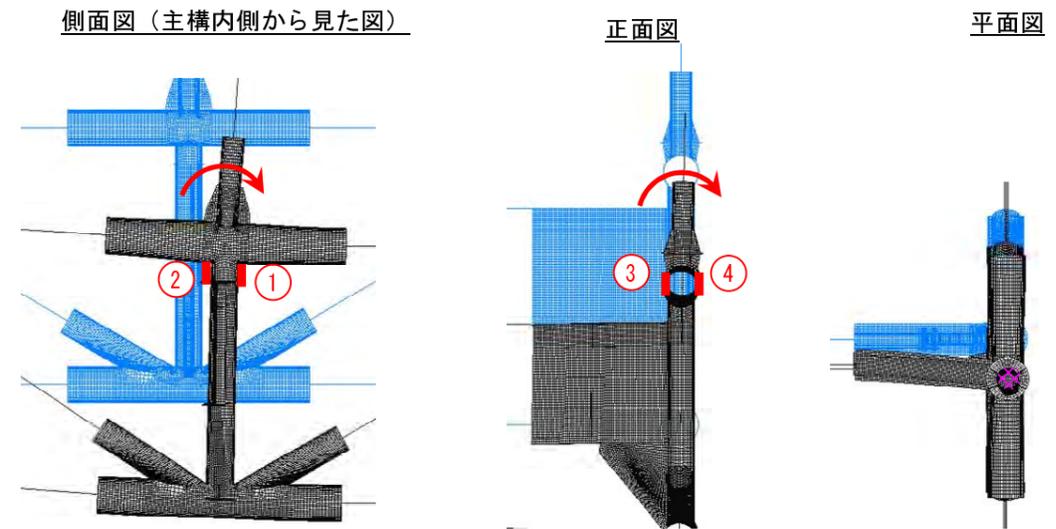


(e) 解析結果 (③, ④) 応力波形



(f) 全体系梁モデル変形図

■VP19 荷重時の格点部変形図



(g) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	3.77 N/mm ² (引張)	曲げ
解析	②	6.62 N/mm ² (引張)	
計測	③	-2.70 N/mm ² (圧縮)	曲げ
解析	④	3.12 N/mm ² (引張)	

⇒曲げ方向は一致している。

主構面外応力

計測	③	13.94 N/mm ² (引張)	曲げ
解析	④	2.81 N/mm ² (引張)	
計測	③	10.09 N/mm ² (引張)	軸変形
解析	④	8.65 N/mm ² (引張)	

⇒変形挙動は一致しない。

(h) VPR19 垂直材変形の検証

図-3.6 VPR19 垂直材応力の検証

(2) 横桁フランジの応力

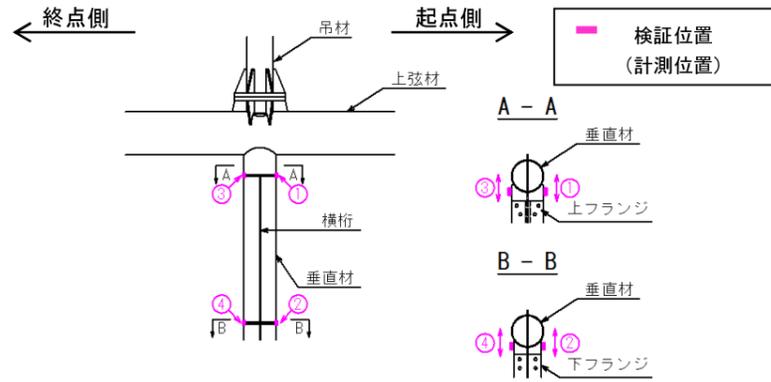
a) 検証位置①③、②④

ピーク荷重位置： VP18(下フランジ) [計測と解析は一致しない]

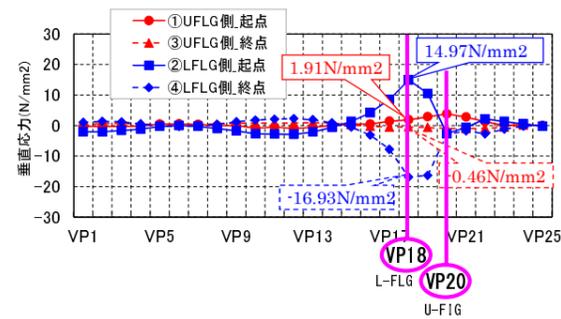
VP20(上フランジ) [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

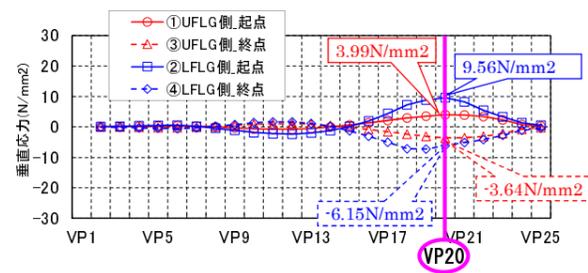
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



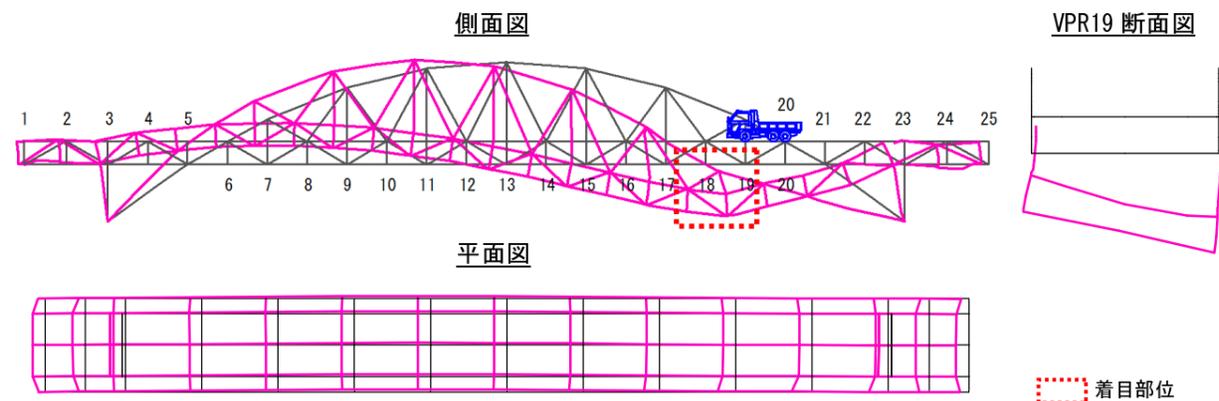
(a) VPR19 検証対象位置図



(b) 荷重試験結果応力波形



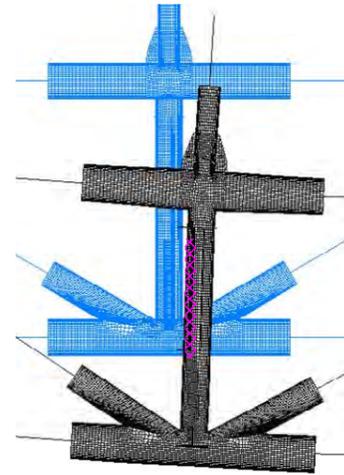
(c) 解析結果応力波形



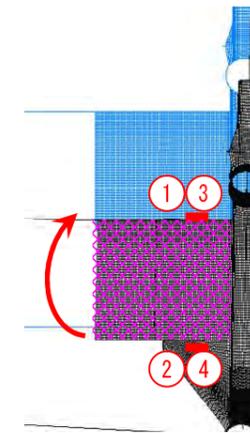
(d) 全体系梁モデル変形図

■VP20 荷重時の格点部変形図

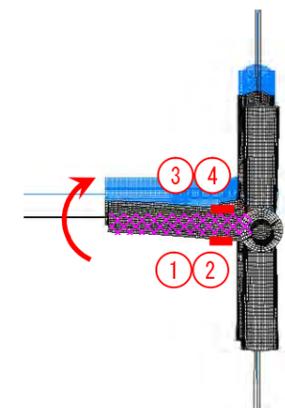
側面図 (主構内側から見た図)



正面図



平面図



(e) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	1.91 N/mm ² (引張)	曲げ
	②	14.97 N/mm ² (引張)	
解析	①	3.99 N/mm ² (引張)	曲げ
	②	9.56 N/mm ² (引張)	

主構面外応力

計測	③	-0.46 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	④	-16.93 N/mm ² (圧縮)	
解析	③	-3.64 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	④	-6.15 N/mm ² (圧縮)	

⇒面内曲げ変形の向きが一致。

主構面外応力

計測	①	1.91 N/mm ² (引張)	曲げ
	③	-0.46 N/mm ² (圧縮)	
解析	①	3.99 N/mm ² (引張)	曲げ
	③	-3.64 N/mm ² (圧縮)	

主構面内応力

計測	②	14.97 N/mm ² (引張)	曲げ
	④	-16.93 N/mm ² (圧縮)	
解析	②	9.56 N/mm ² (引張)	曲げ
	④	-6.15 N/mm ² (圧縮)	

⇒面外曲げ変形の向きが一致。

(f) VPR19 横桁フランジ変形の検証

図-3.7 VPR19 横桁フランジ応力の検証

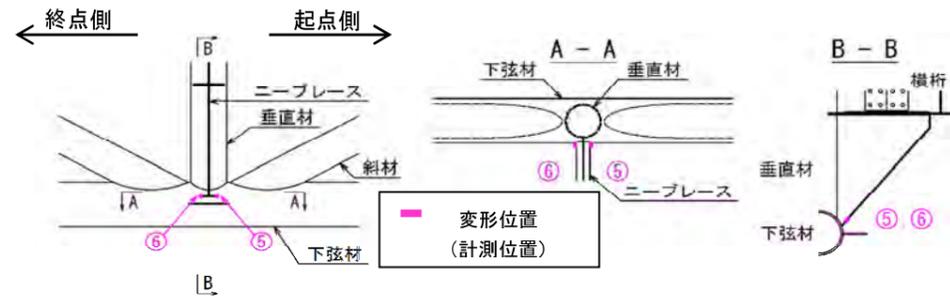
(3) ニーブレスフランジの応力

a) 検証位置⑤⑥

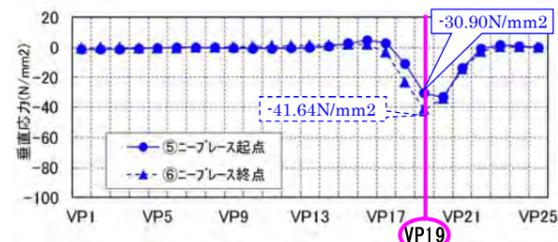
ピーク荷重位置：VP19 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

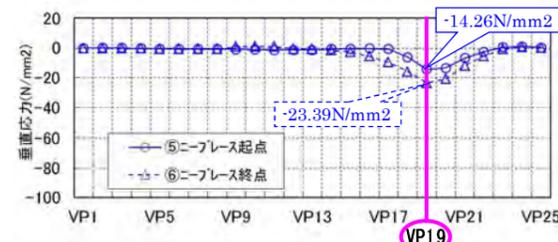
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(a) VPR19 検証対象位置図

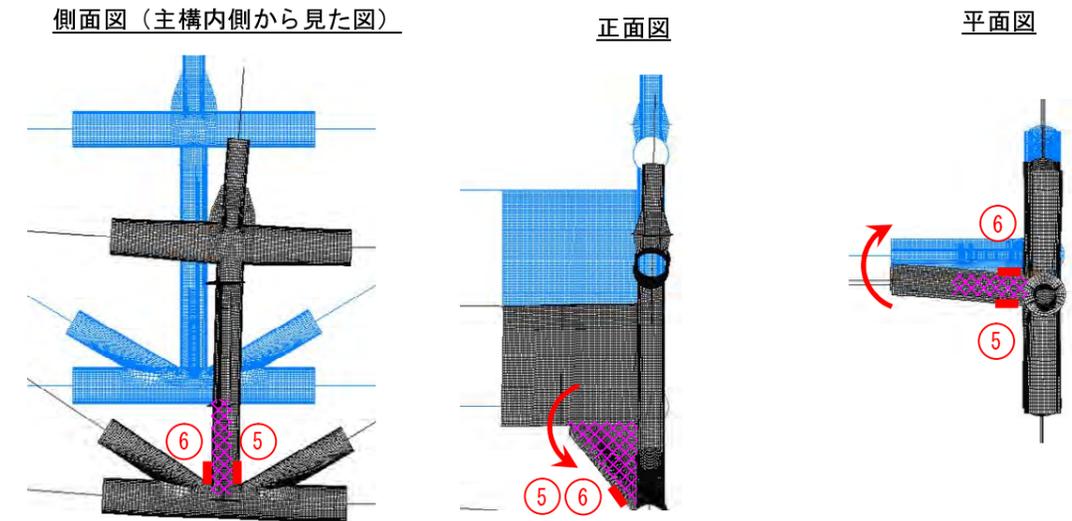


(b) 荷重試験結果応力波形



(c) 解析結果応力波形

■VP19 荷重時の格点部変形図



(e) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

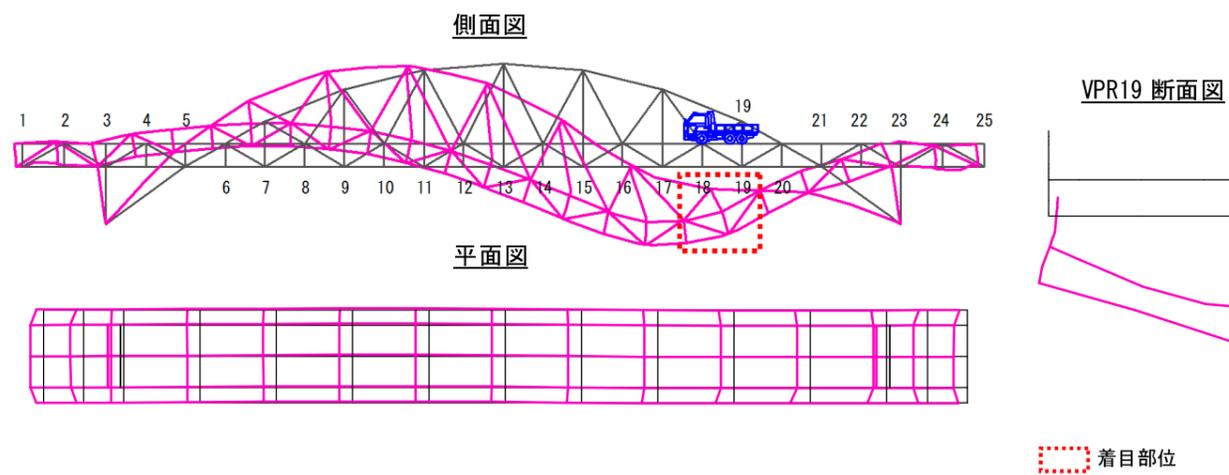
主構面内・面外応力

計	⑤	-30.90 N/mm ² (圧縮)	曲げ
測	⑥	-41.64 N/mm ² (圧縮)	
解	⑤	-14.26 N/mm ² (圧縮)	曲げ
析	⑥	-23.39 N/mm ² (圧縮)	

⇒ニーブレスに面内圧縮応力が作用するとともに、面外曲げ変形が生じ、曲げ変形の向きが計測と解析で一致。

(f) VPR19 横桁フランジ変形の検証

図-3.8 VPR19 ニーブレスフランジ応力の検証 (続き)



(d) 全体系梁モデル変形図

(4) VPR19 の評価

[総括]

ピーク荷重位置、変形の向き、応力波形の挙動を検証した結果、以下に示す部位以外は、計測と解析が一致、又は概ね一致し、概ね実橋の格点の挙動を再現できている。

- ・吊材③④において、計測では面外応力が卓越しているが、解析では大きな面外応力は発生していない。
- ・垂直材①②において、応力が正負反転している箇所がある。
- ・垂直材③④において、計測では面外応力が卓越しているが、解析では大きな面外応力は発生していない。

図-3.8 VPR19 ニーブレスフランジ応力の検証

3-3-2. VPR21

(1) 格点部応力

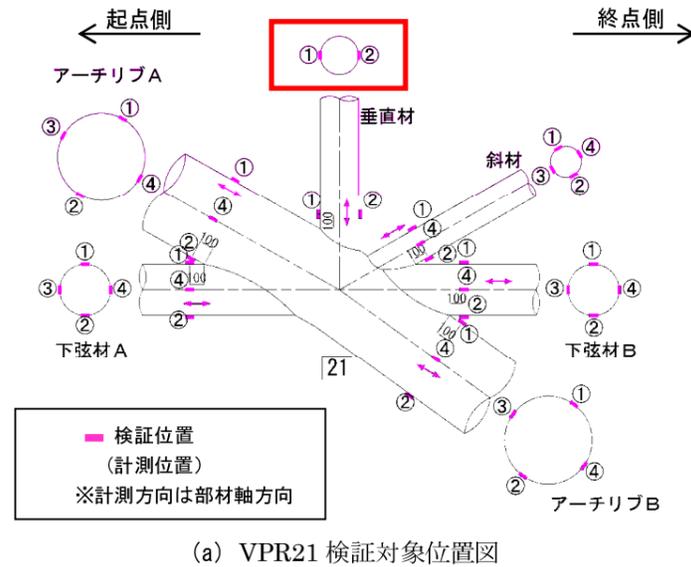
1) 垂直材応力の検証

a) 検証位置①、②

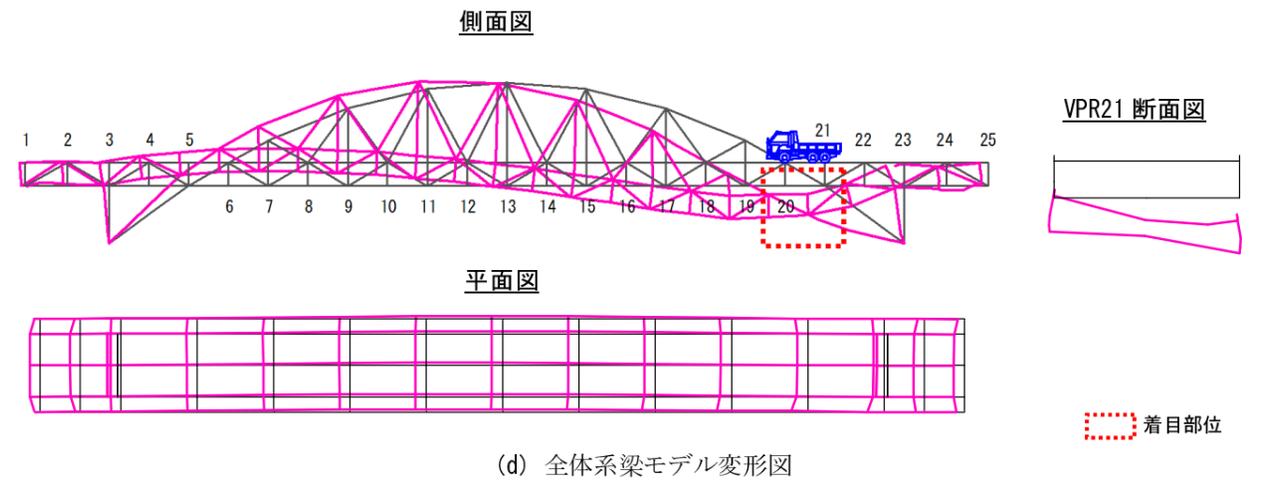
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

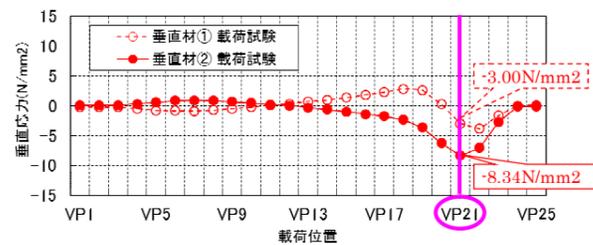
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



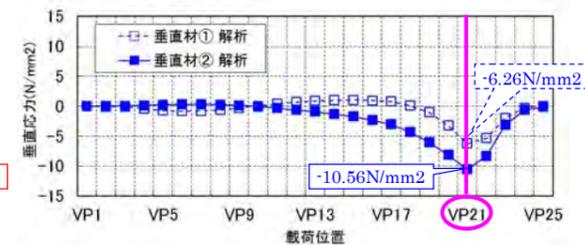
(a) VPR21 検証対象位置図



(d) 全体系梁モデル変形図

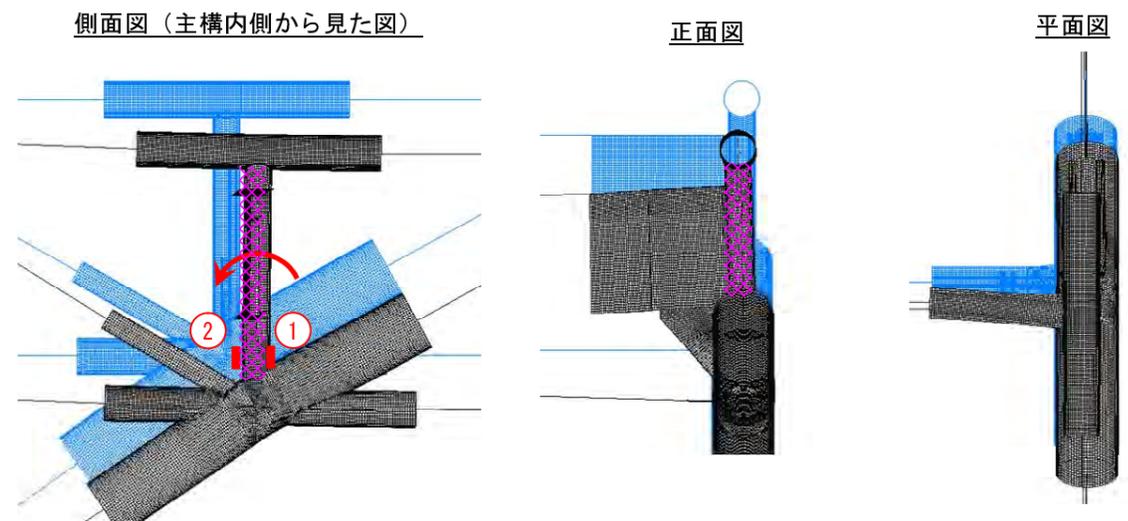


(b) 荷重試験結果 (1, 2) 応力波形



(c) 解析結果 (1, 2) 応力波形

■VP21 荷重時の格点部変形図



(e) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計	①	-3.00 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	②	-8.34 N/mm ² (圧縮)	
測	①	-6.26 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	②	-10.56 N/mm ² (圧縮)	

⇒曲げ変形の向きが一致

(f) VPR21 垂直材変形の検証

図-3.9 VPR21 垂直材応力の検証

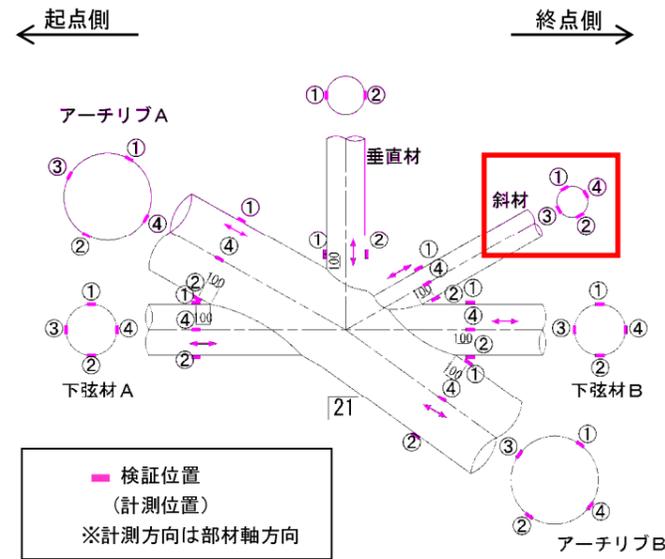
2) 斜材応力の検証

a) 検証位置①、②

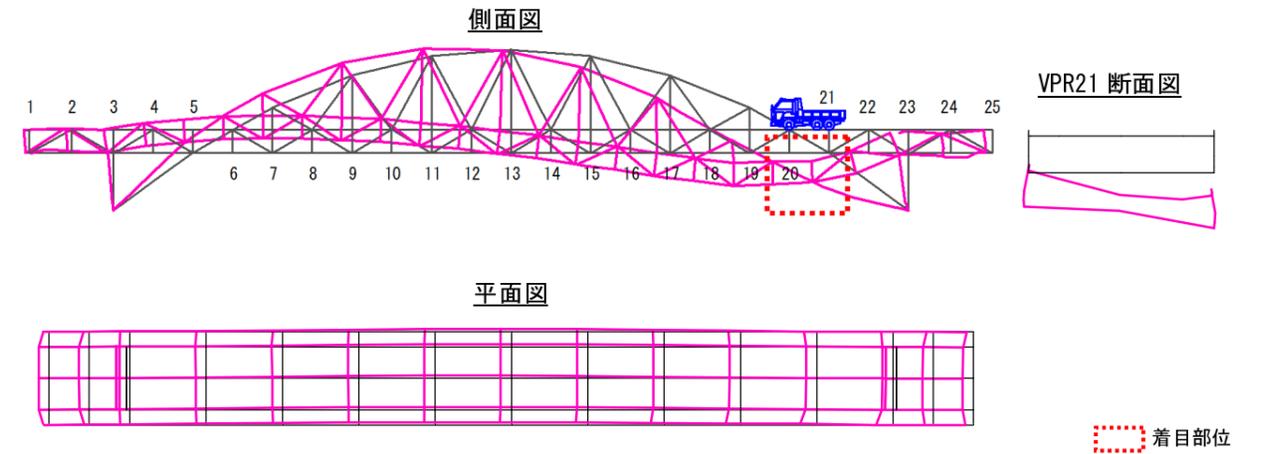
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

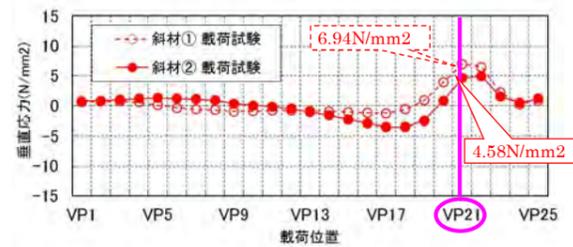
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



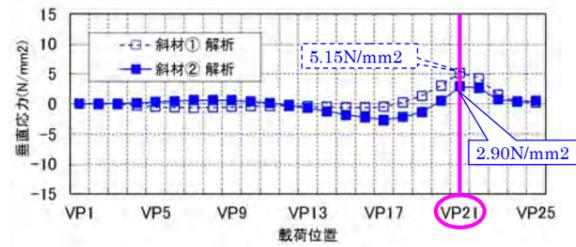
(a) VPR21 検証対象位置図



(f) 全体系梁モデル変形図

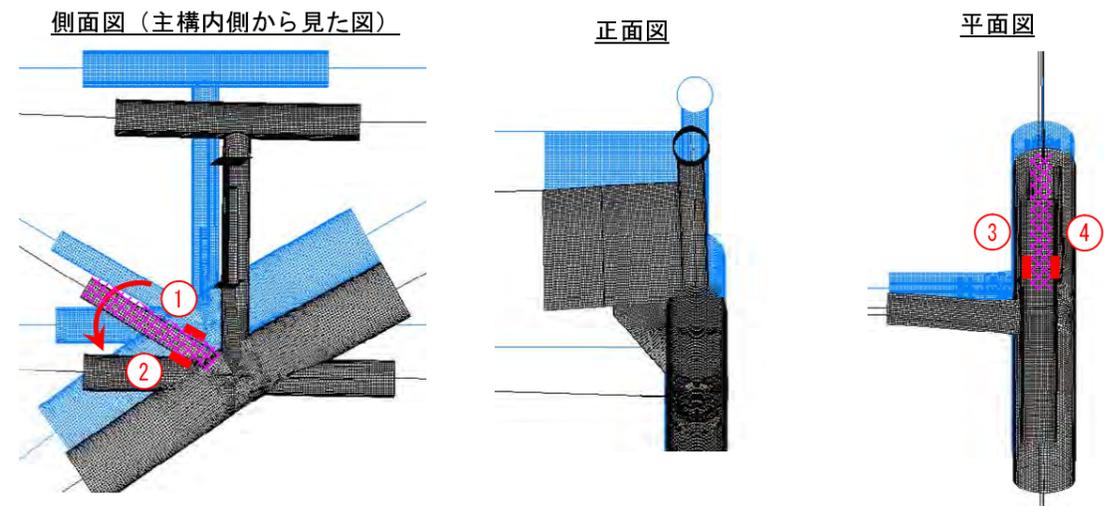


(b) 載荷試験結果 (1, 2) 応力波形



(c) 解析結果 (1, 2) 応力波形

■VP21 荷重時の格点部変形図



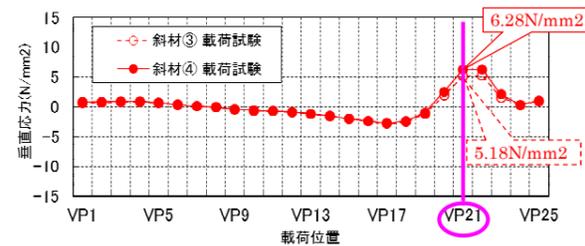
(g) 格点部シェルモデル変形図

b) 検証位置③、④

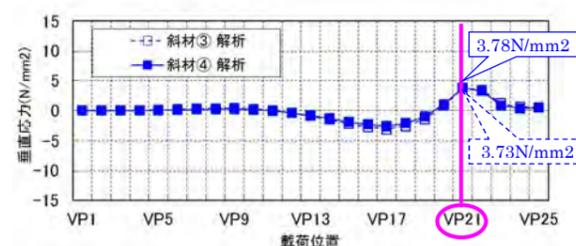
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：軸変形 [計測と解析は一致]

応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(d) 載荷試験結果 (3, 4) 応力波形



(e) 解析結果 (3, 4) 応力波形

■着目部材の変形の検証

主構面内応力	
計測	① 6.94 N/mm ² (引張)
	② 4.58 N/mm ² (引張)
解析	① 5.15 N/mm ² (引張)
	② 2.90 N/mm ² (引張)

⇒曲げ変形の向きが一致

主構面外応力	
計測	③ 5.18 N/mm ² (引張) 軸変形
	④ 6.28 N/mm ² (引張)
解析	③ 3.73 N/mm ² (引張) 軸変形
	④ 3.78 N/mm ² (引張)

⇒軸変形が一致

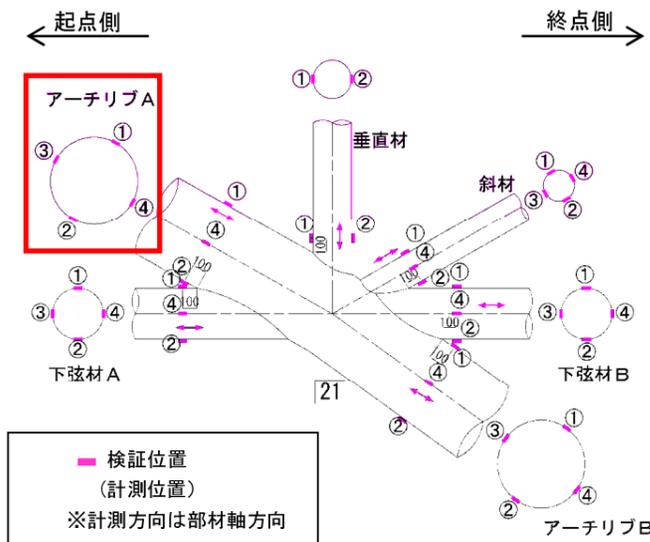
(h) VPR21 斜材変形の検証

図-3.10 VPR21 斜材応力の検証

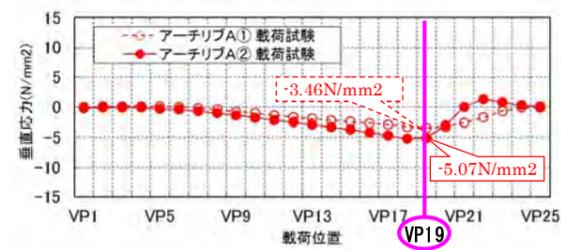
3) アーチリブ（起点側）応力の検証

a) 検証位置①、②

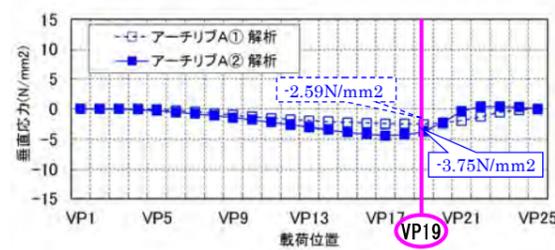
ピーク荷重位置：VP19 [計測と解析は一致]
 変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]
 応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(a) VPR21 検証対象位置図



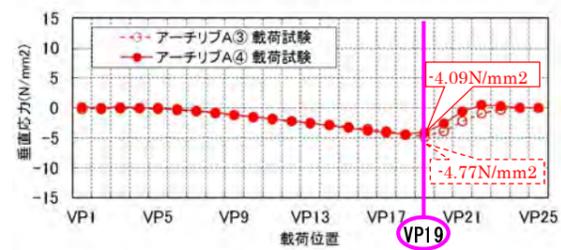
(b) 荷重試験結果 (①, ②) 応力波形



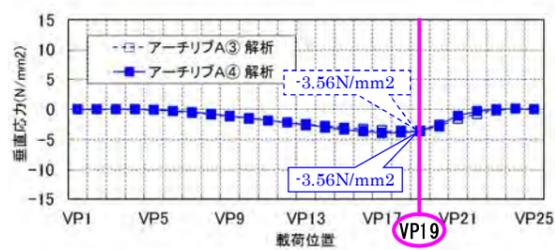
(c) 解析結果 (①, ②) 応力波形

b) 検証位置③、④

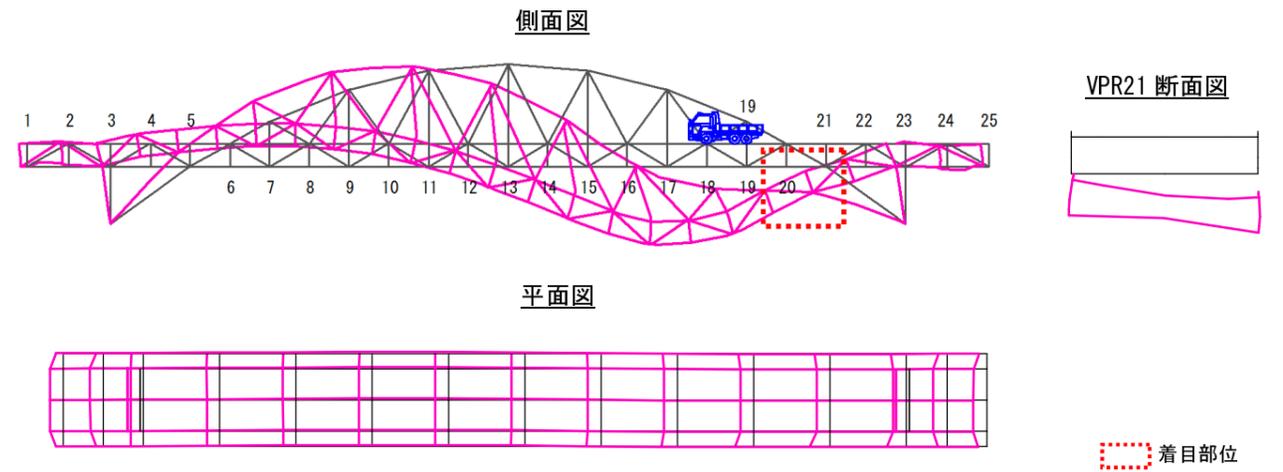
ピーク荷重位置：VP19 [計測と解析は一致]
 変形の向き：軸変形 [計測と解析は一致]
 応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(d) 荷重試験結果 (③, ④) 応力波形

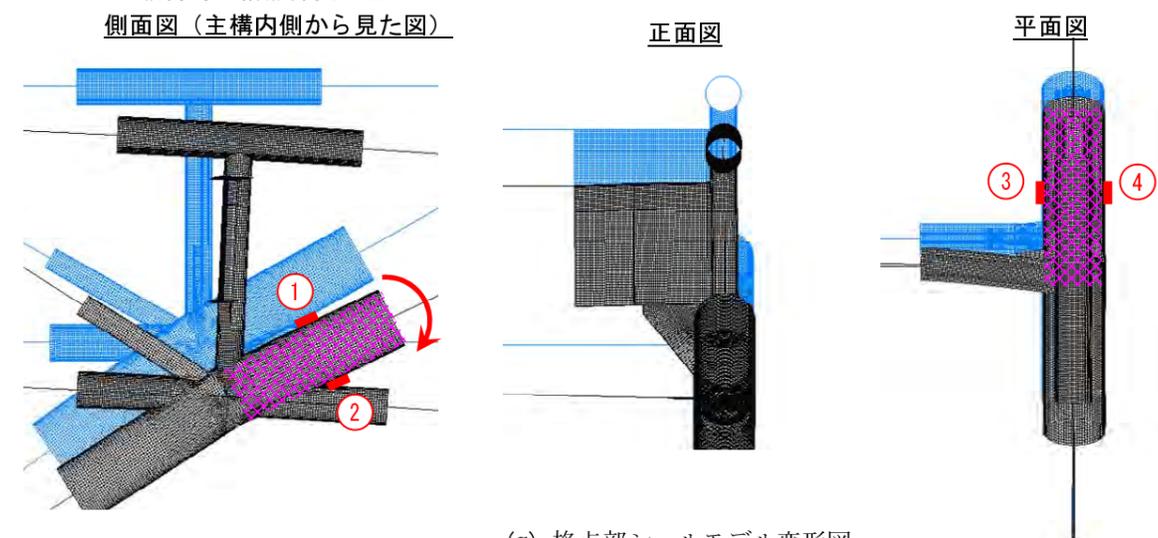


(e) 解析結果 (③, ④) 応力波形



(f) 全体系梁モデル変形図

■VP19 荷重時の格点部変形図



(g) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	-3.46 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	②	-5.07 N/mm ² (圧縮)	
解析	①	-2.59 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	②	-3.75 N/mm ² (圧縮)	

⇒曲げ変形の傾向が一致

主構面外応力

計測	③	-4.77 N/mm ² (圧縮)	軸変形
	④	-4.09 N/mm ² (圧縮)	
解析	③	-3.56 N/mm ² (圧縮)	軸変形
	④	-3.56 N/mm ² (圧縮)	

⇒軸変形が一致

(h) VPR21 アーチリブ（起点側）変形の検証

図-3.11 VPR21 アーチリブ（起点側）応力の検証

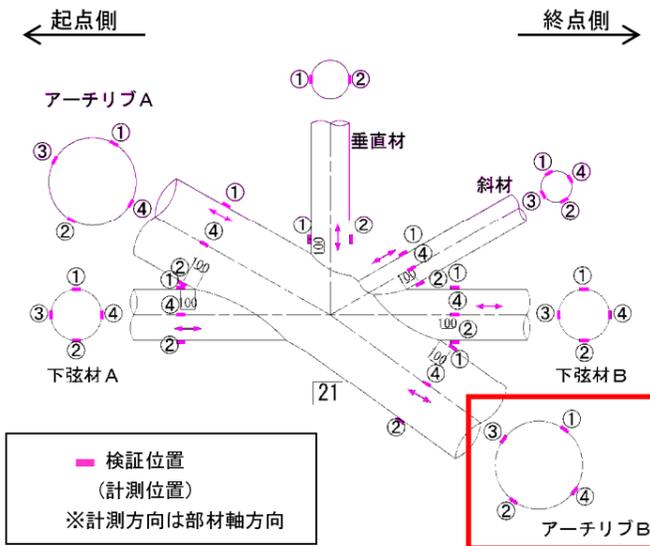
4) アーチリブ（終点側）応力の検証

a) 検証位置①、②

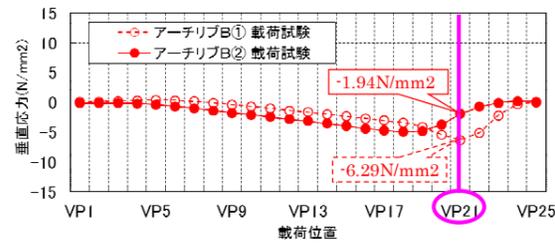
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

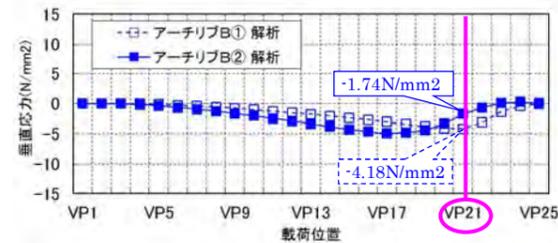
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(a) VPR21 検証対象位置図



(b) 载荷試験結果 (1, 2) 応力波形



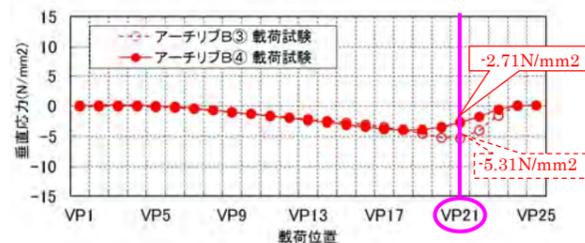
(c) 解析結果 (1, 2) 応力波形

b) 検証位置③、④

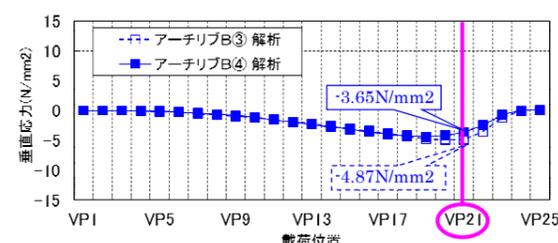
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

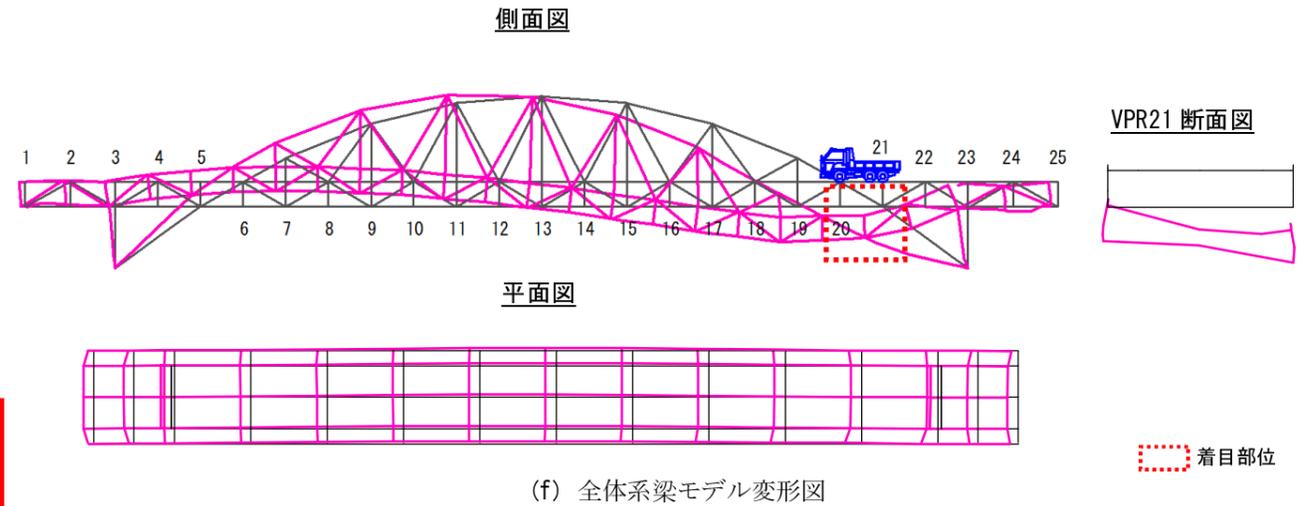
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(d) 载荷試験結果 (3, 4) 応力波形

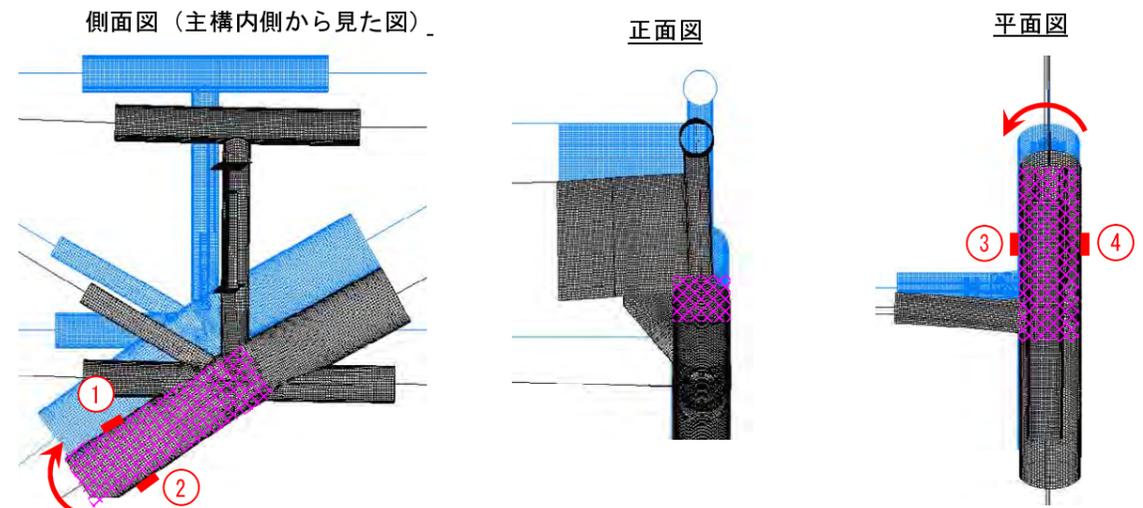


(e) 解析結果 (3, 4) 応力波形



(f) 全体系梁モデル変形図

■VP21 荷重時の格点部変形図



(g) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	-6.29 N/mm ² (圧縮)	曲げ
計測	②	-1.94 N/mm ² (圧縮)	曲げ
解析	①	-4.18 N/mm ² (圧縮)	曲げ
解析	②	-1.74 N/mm ² (圧縮)	曲げ

⇒曲げ変形の向きが一致

主構面外応力

計測	③	-5.31 N/mm ² (圧縮)	曲げ
計測	④	-2.71 N/mm ² (圧縮)	曲げ
解析	③	-4.87 N/mm ² (圧縮)	曲げ
解析	④	-3.65 N/mm ² (圧縮)	曲げ

⇒曲げ変形の向きが一致

(h) VPR21 アーチリブ（終点側）変形の検証

図-3.12 VPR21 アーチリブ（終点側）応力の検証

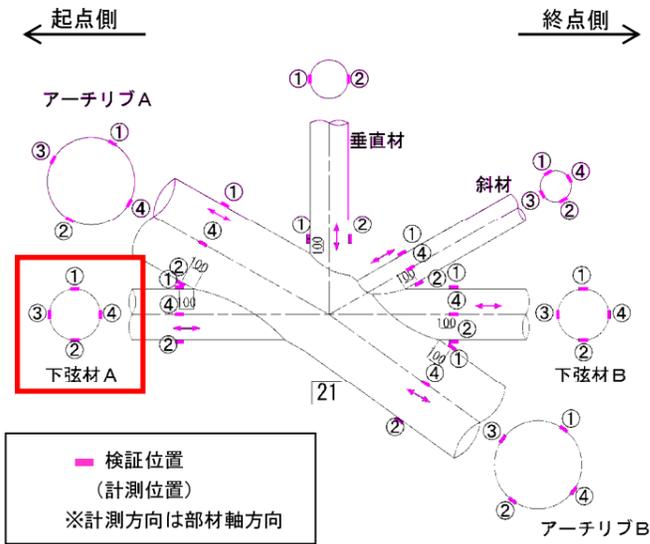
5) 下弦材（起点側）応力の検証

a) 検証位置①、②

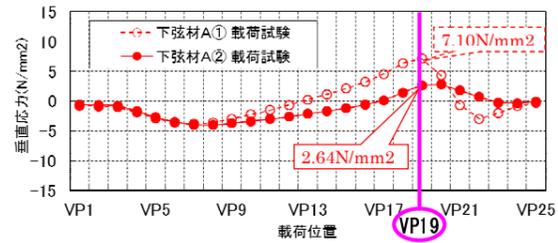
ピーク荷重位置：VP19 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

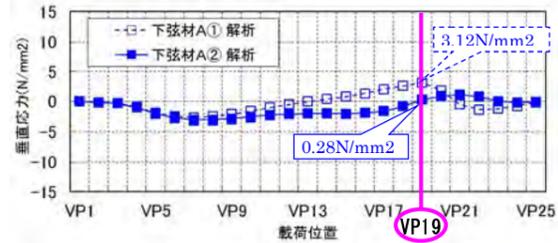
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(a) VPR21 検証対象位置図



(b) 荷重試験結果 (①, ②) 応力波形



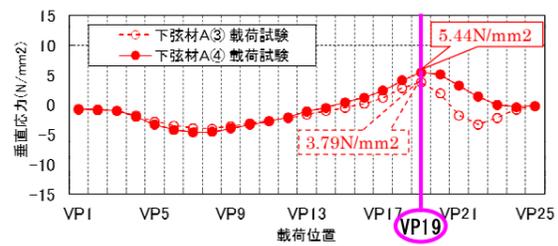
(c) 解析結果 (①, ②) 応力波形

b) 検証位置③、④

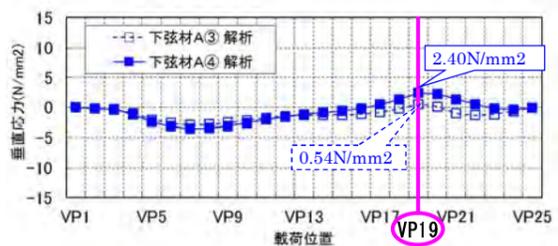
ピーク荷重位置：VP19 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

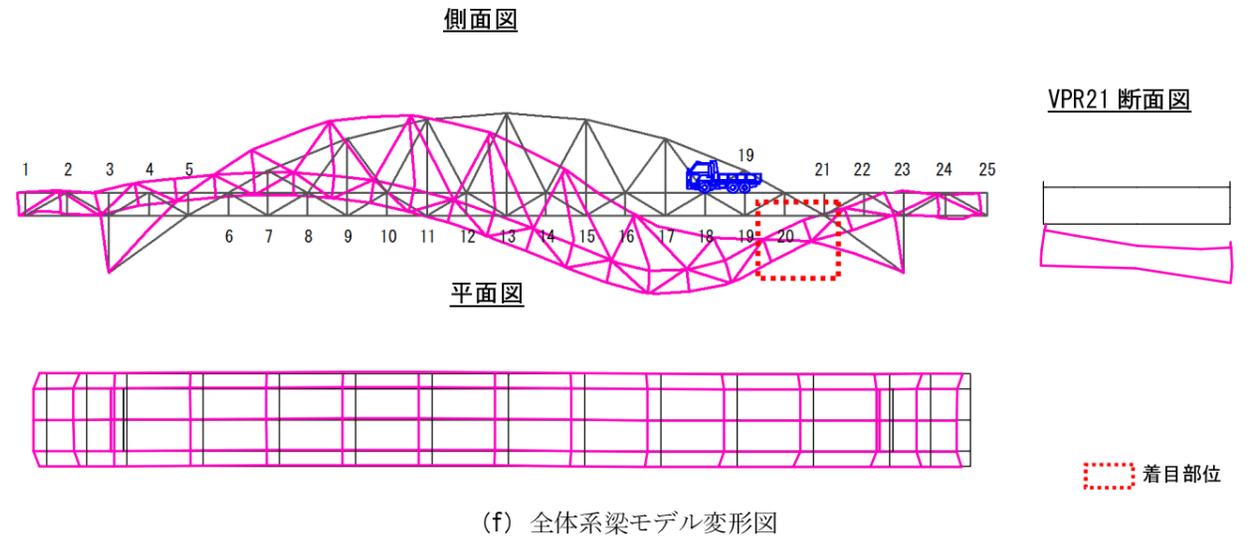
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(d) 荷重試験結果 (③, ④) 応力波形

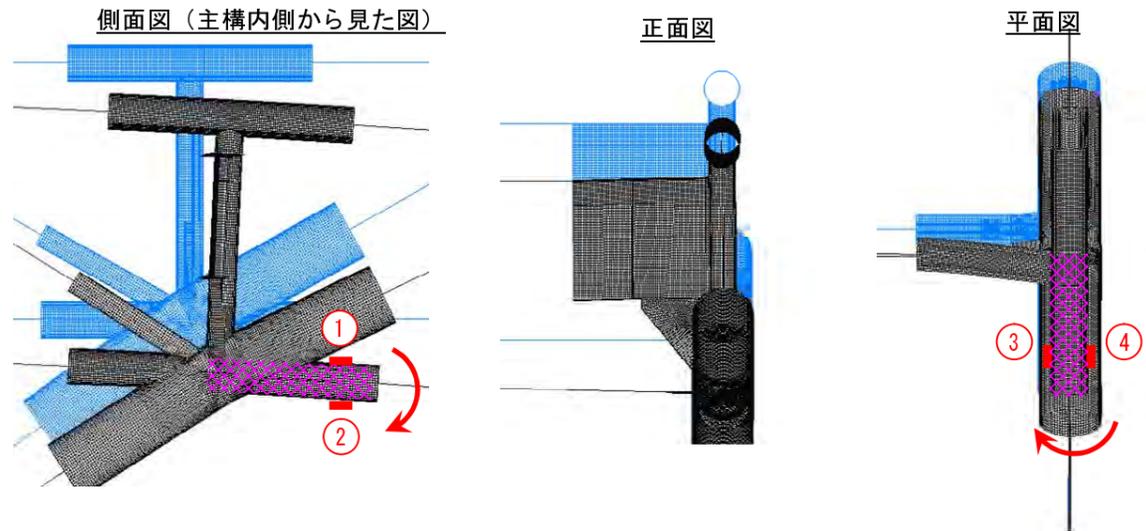


(e) 解析結果 (③, ④) 応力波形



(f) 全体系梁モデル変形図

■VP19 荷重時の格点部変形図



(g) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力		
計	①	7.10 N/mm ² (引張)
測	②	2.64 N/mm ² (引張)
解	①	3.12 N/mm ² (引張)
析	②	0.28 N/mm ² (引張)

⇒曲げ変形の向きが一致

主構面外応力		
計	③	3.79 N/mm ² (引張)
測	④	5.44 N/mm ² (引張)
解	③	0.54 N/mm ² (引張)
析	④	2.40 N/mm ² (引張)

⇒曲げ変形の向きが一致

(h) VPR21 下弦材（起点側）変形の検証

図-3.13 VPR21 下弦材（起点側）応力の検証

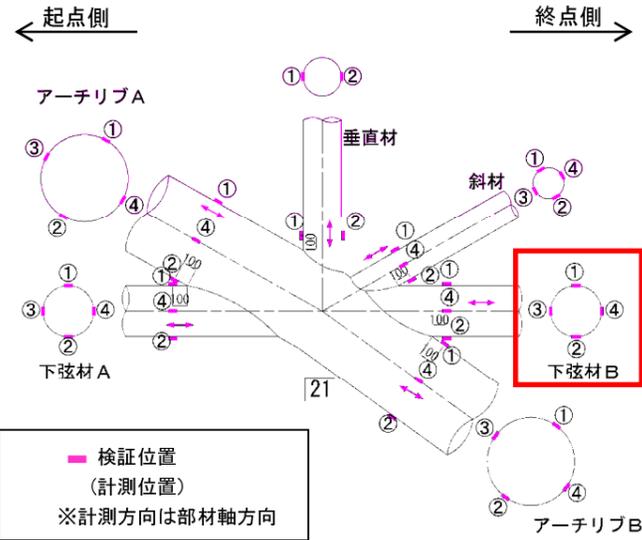
6) 下弦材（終点側）応力の検証

a) 検証位置①、②

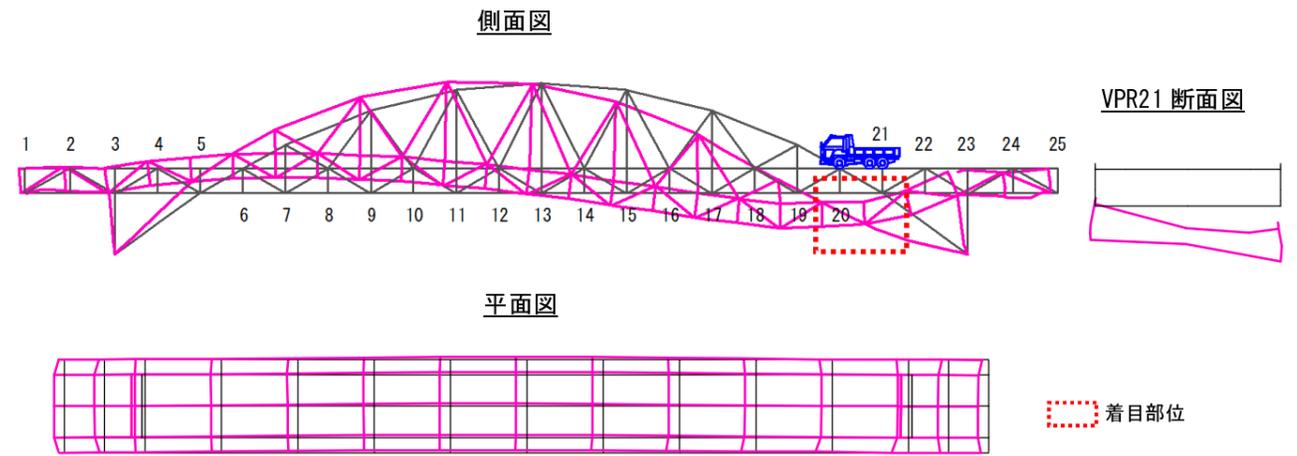
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

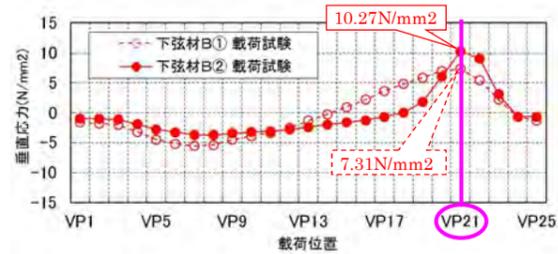
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



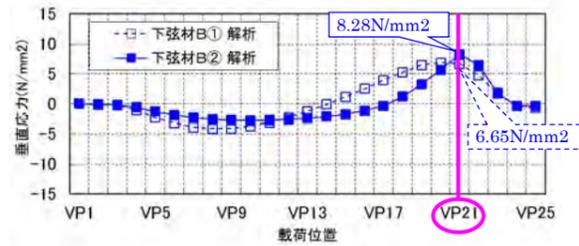
(a) VPR21 検証対象位置図



(f) 全体系梁モデル変形図



(b) 載荷試験結果 (①, ②) 応力波形



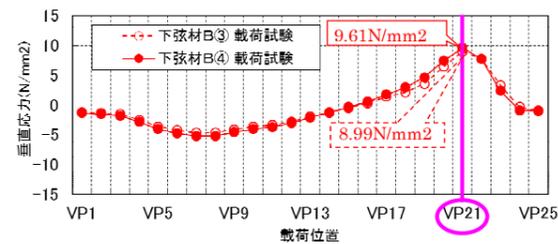
(c) 解析結果 (①, ②) 応力波形

b) 検証位置③、④

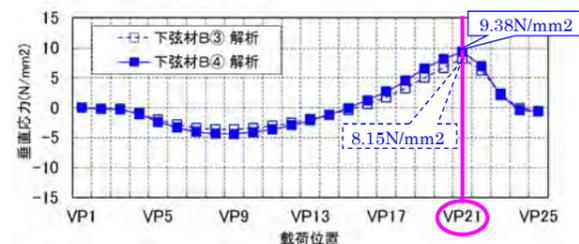
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：軸変形 [計測と解析は一致]

応力波形：[計測と解析は概ね一致]

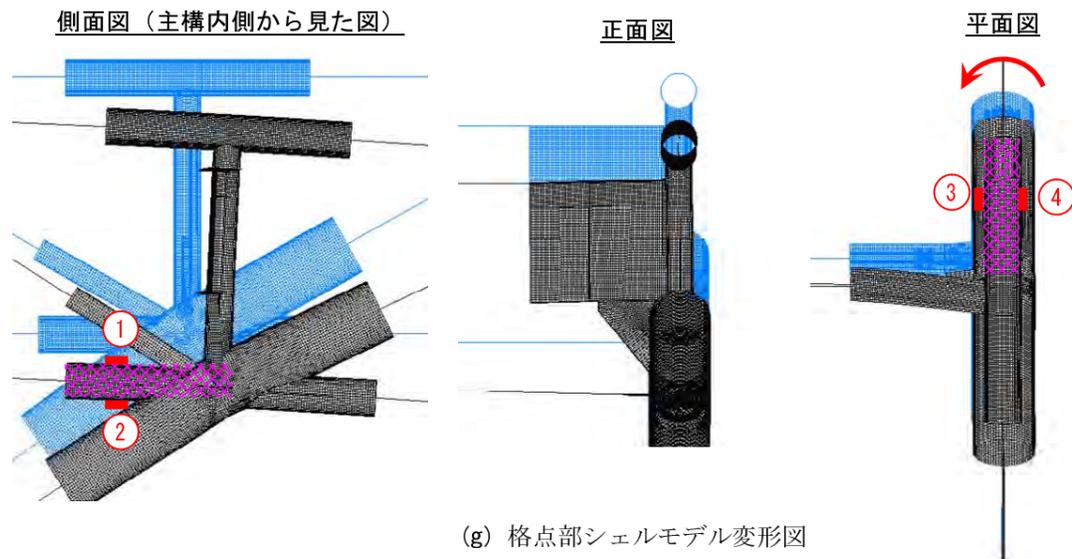


(d) 載荷試験結果 (③, ④) 応力波形



(e) 解析結果 (③, ④) 応力波形

■VP21 荷重時の格点部変形図



(g) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計	①	7.31 N/mm ² (引張)	曲げ
測	②	10.27 N/mm ² (引張)	
解	①	6.65 N/mm ² (引張)	曲げ
析	②	8.28 N/mm ² (引張)	

⇒曲げ変形の向きが一致

主構面外応力

計	③	8.99 N/mm ² (引張)	軸変形
測	④	9.61 N/mm ² (引張)	
解	③	8.15 N/mm ² (引張)	軸変形
析	④	9.38 N/mm ² (引張)	

⇒軸変形が一致

(h) VPR21 下弦材（終点側）変形の検証

図-3.14 VPR21 下弦材（終点側）応力の検証

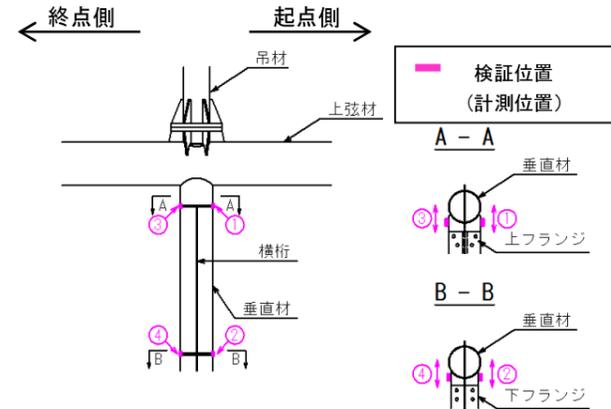
(2) 横桁フランジの応力

a) 検証位置①③、②④

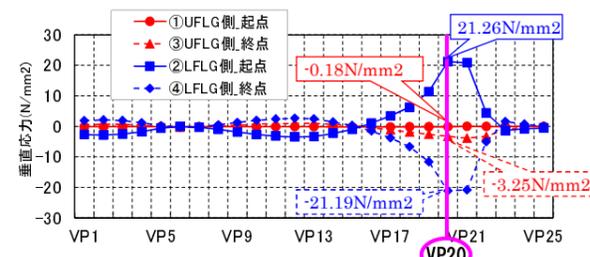
ピーク荷重位置：VP20 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

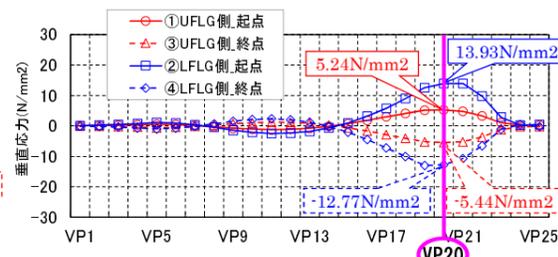
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(a) VPR21 検証対象位置図

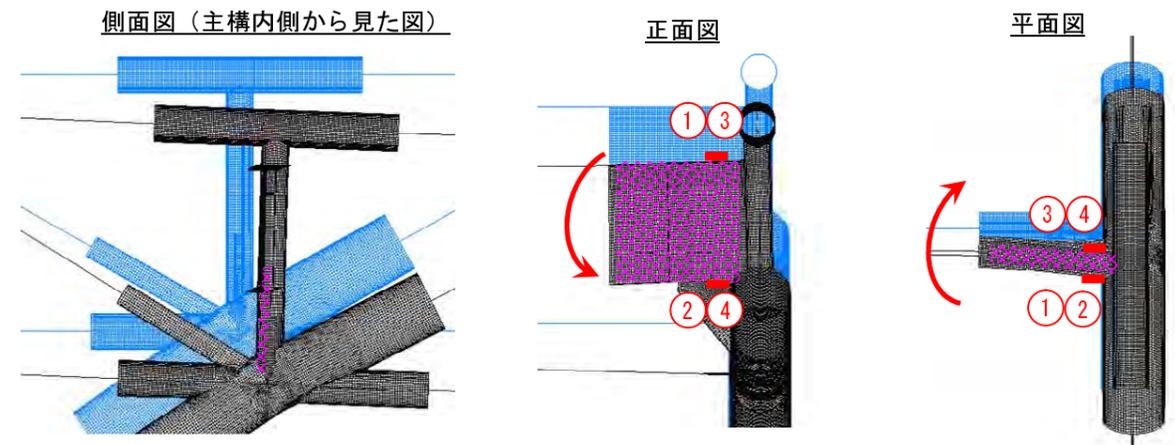


(b) 荷重試験結果応力波形



(c) 解析結果応力波形

■VP20 荷重時の格点部変形図



(e) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	-0.18 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	②	21.26 N/mm ² (引張)	
解析	①	5.24 N/mm ² (引張)	曲げ
	②	13.93 N/mm ² (引張)	

主構面外応力

計測	①	-0.18 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	③	-3.25 N/mm ² (圧縮)	
解析	①	5.24 N/mm ² (引張)	曲げ
	③	-5.44 N/mm ² (圧縮)	

主構面内応力

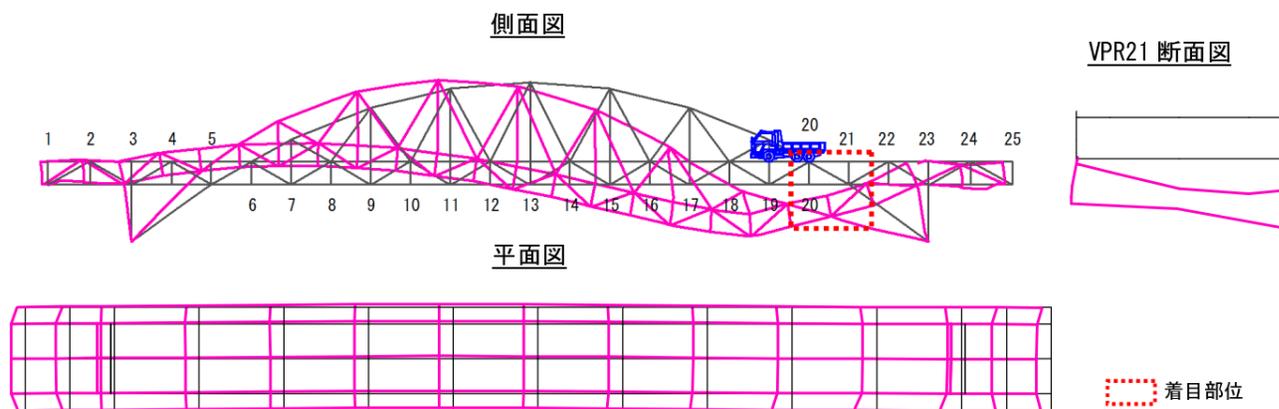
計測	③	-3.25 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	④	-21.19 N/mm ² (圧縮)	
解析	③	-5.44 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	④	-12.77 N/mm ² (圧縮)	

主構面外応力

計測	②	21.26 N/mm ² (引張)	曲げ
	④	-21.19 N/mm ² (圧縮)	
解析	②	13.93 N/mm ² (引張)	曲げ
	④	-12.79 N/mm ² (圧縮)	

⇒応力波形のピーク位置も計測と解析で一致

⇒計測と解析で変形が一致



(d) 全体系梁モデル変形図

(f) VPR21 横桁フランジ変形の検証

図-3.15 VPR21 横桁フランジ応力の検証

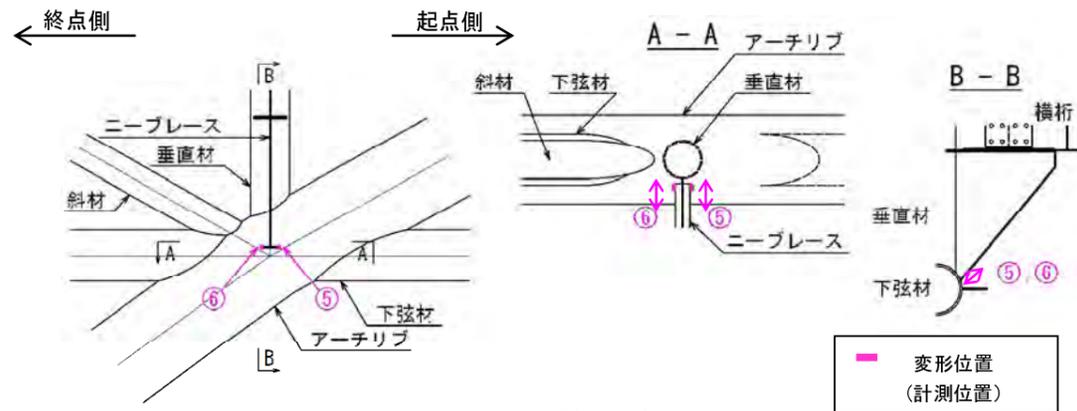
(3) ニーブレスフランジの応力

a) 検証位置⑤⑥

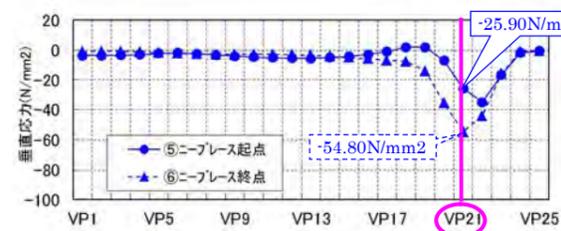
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

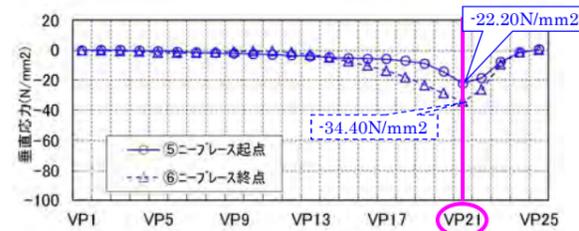
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



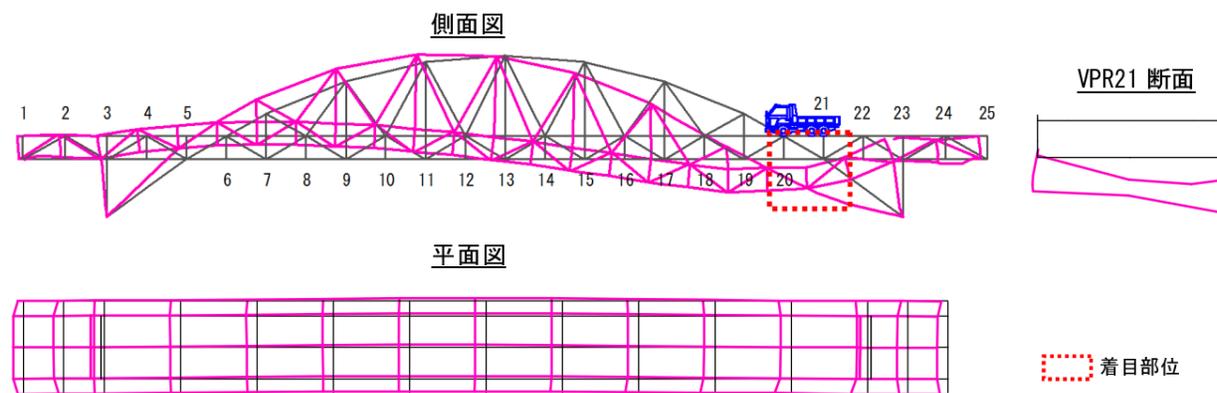
(a) VPR21 検証対象位置図



(b) 荷重試験結果応力波形



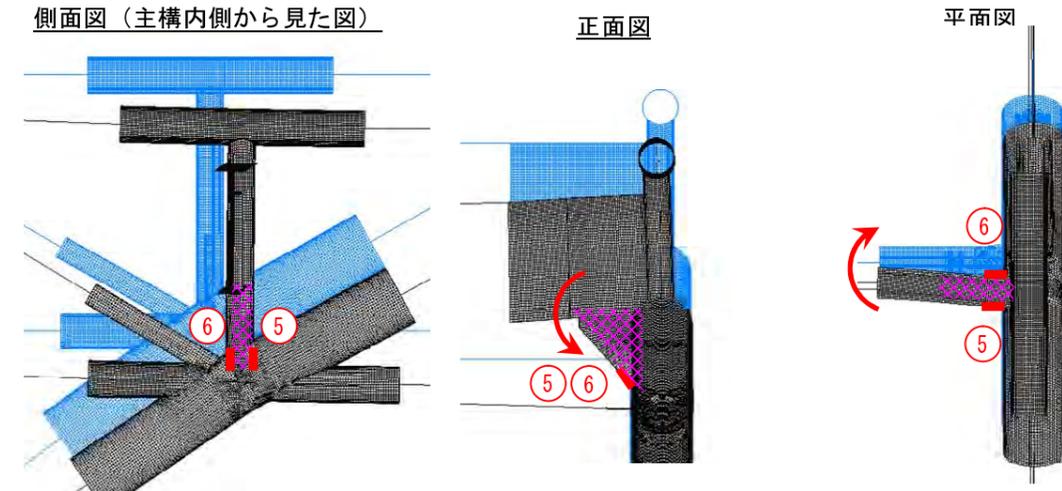
(c) 解析結果応力波形



(d) 全体系梁モデル変形図

図-3.16 VPR21 ニーブレスフランジ応力の検証

■VP21 荷重時の格点部変形図



(e) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内・面外応力

計	⑤	-25.90 N/mm ² (圧縮)	曲げ
測	⑥	-54.80 N/mm ² (圧縮)	曲げ
解	⑤	-22.20 N/mm ² (圧縮)	曲げ
析	⑥	-34.40 N/mm ² (圧縮)	曲げ

⇒ニーブレスに面内圧縮応力が作用するとともに、面外曲げ変形が生じ、曲げ変形の向きが一致。

(f) VPR21 ニーブレスフランジ変形の検証

図-3.16 VPR21 ニーブレスフランジ応力の検証 (続き)

(4) VPR21 の評価

[総括]

ピーク値、変形の向き、応力波形を検証した結果、全ての部材において計測と解析が一致、又は概ね一致し、実橋の格点の挙動を再現できていると評価。

3-3-3. VPR23

(1) 格点部応力

1) 垂直材応力

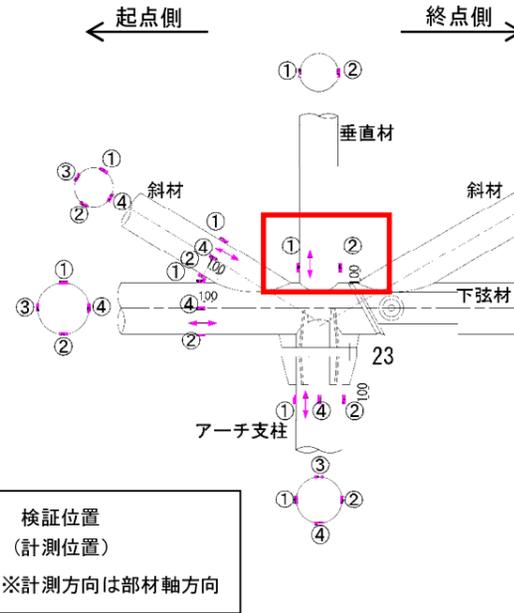
a) 検証位置①、②

ピーク荷重位置：VP23 [計測と解析は一致]

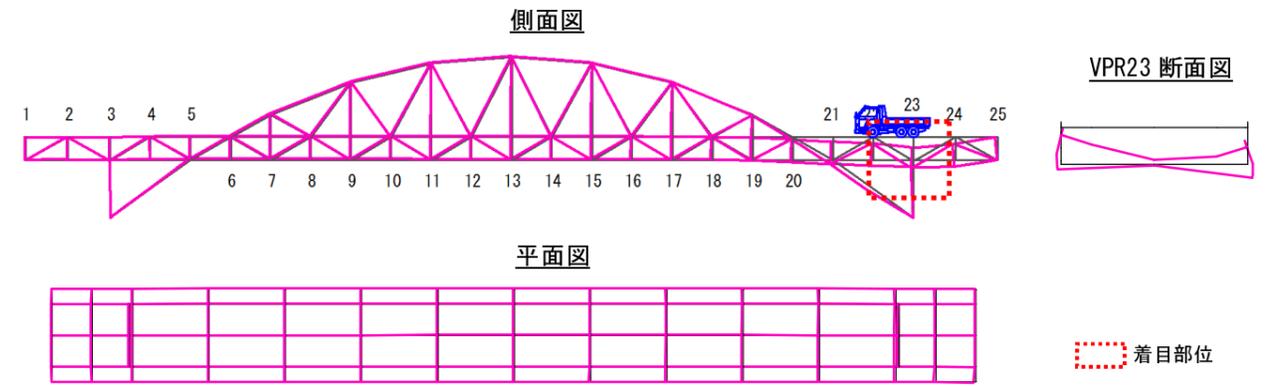
変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致しない]

応力波形：応力がピークとなる VP23 荷重時に応力の向きが計測と解析で異なる。

[計測と解析は一致しない]



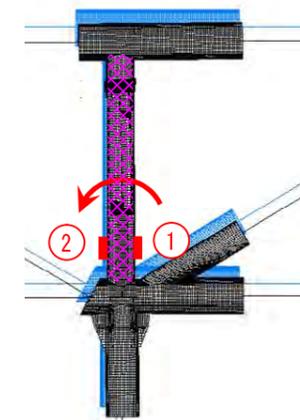
(a) VPR23 検証対象位置図



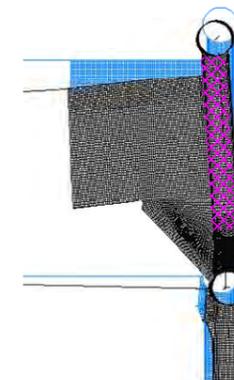
(d) 全体系梁モデル変形図

■VP23 荷重時の格点部変形図

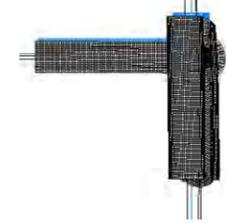
側面図 (主構内側から見た図)



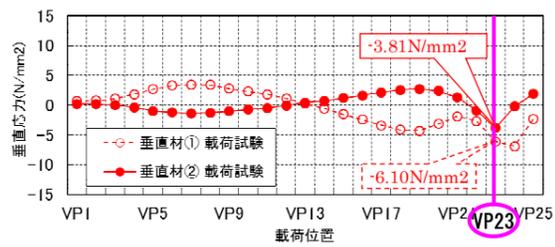
正面図



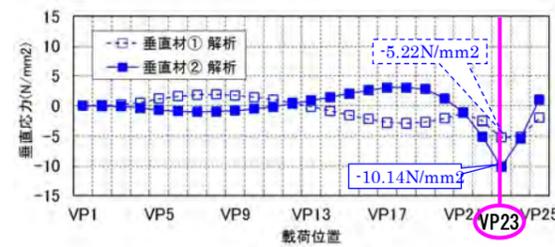
平面図



(e) 格点部シェルモデル変形図



(b) 荷重試験結果 (①, ②) 応力波形



(c) 解析結果 (①, ②) 応力波形

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	-6.10 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	②	-3.81 N/mm ² (圧縮)	
解析	①	-5.22 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	②	-10.14 N/mm ² (圧縮)	

⇒曲げ変形が逆向きになっている。

(f) VPR23 垂直材変形の検証

図-3.17 VPR23 垂直材応力の検証

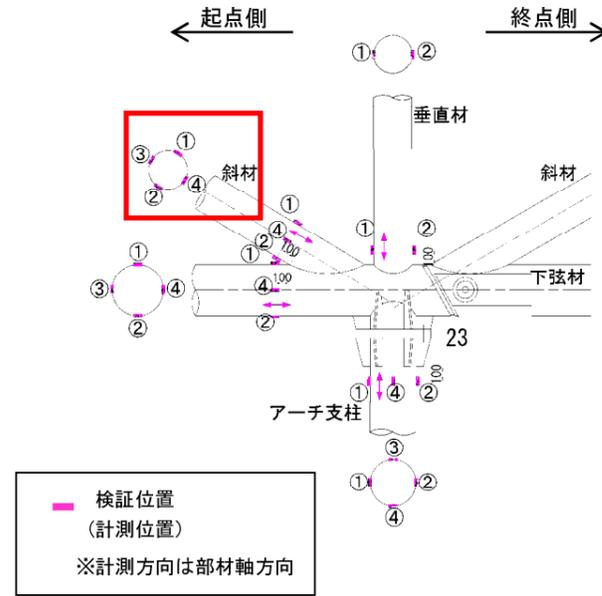
2) 斜材応力の検証

a) 検証位置①、②

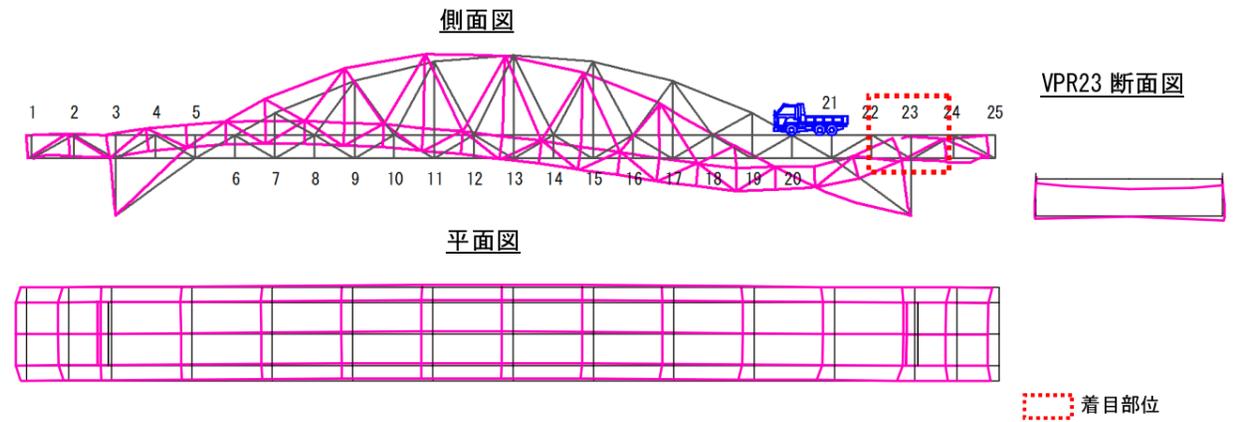
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

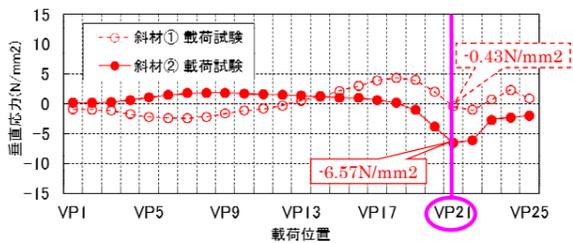
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



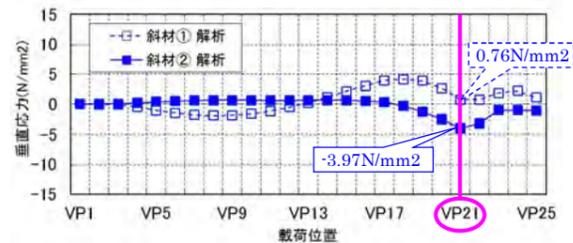
(a) VPR23 検証対象位置図



(f) 全体系梁モデル変形図



(b) 荷重試験結果 (①, ②) 応力波形



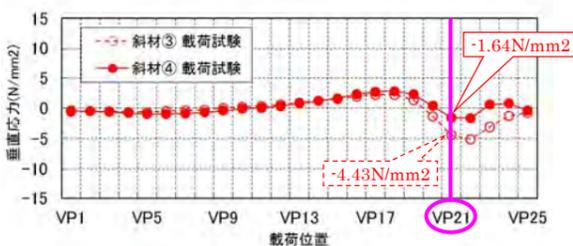
(c) 解析結果 (①, ②) 応力波形

b) 検証位置③、④

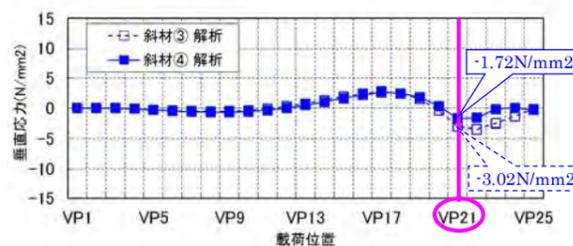
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(d) 荷重試験結果 (③, ④) 応力波形



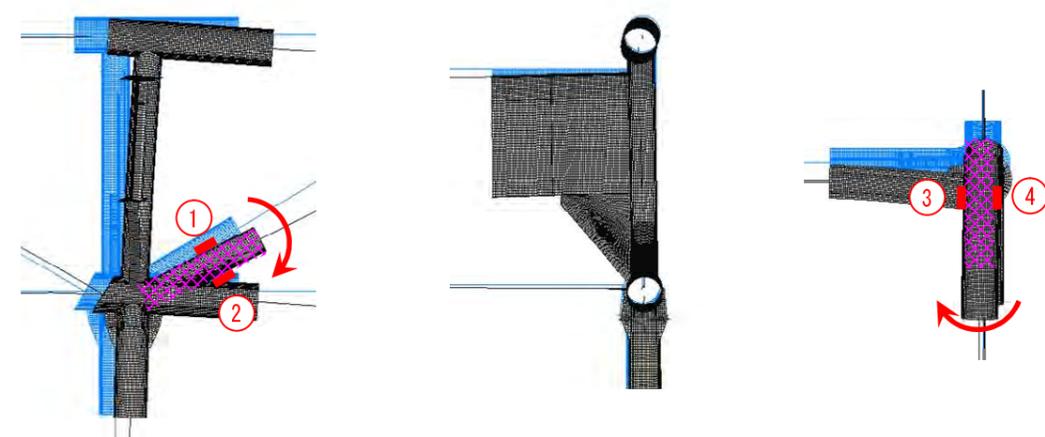
(e) 解析結果 (③, ④) 応力波形

■VP21 荷重時の格点部変形図

側面図 (主構内側から見た図)

正面図

平面図



(g) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	-0.43 N/mm ² (圧縮)	曲げ
計測	②	-6.57 N/mm ² (圧縮)	
解析	①	0.76 N/mm ² (引張)	曲げ
解析	②	-3.97 N/mm ² (圧縮)	

⇒曲げ変形の向きが一致

主構面外応力

計測	③	-4.43 N/mm ² (圧縮)	曲げ
計測	④	-1.64 N/mm ² (圧縮)	
解析	③	-3.02 N/mm ² (圧縮)	曲げ
解析	④	-1.72 N/mm ² (圧縮)	

⇒曲げ変形の向きが一致

(h) VPR23 斜材変形の検証

図-3.18 VPR23 斜材応力の検証

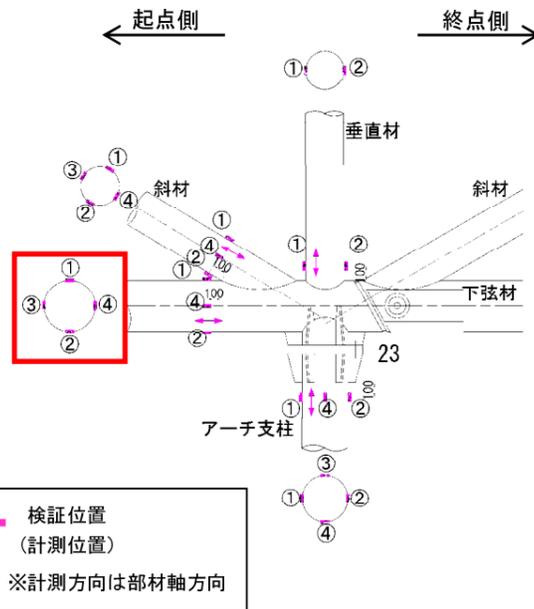
3) 下弦材応力の検証

a) 検証位置①、②

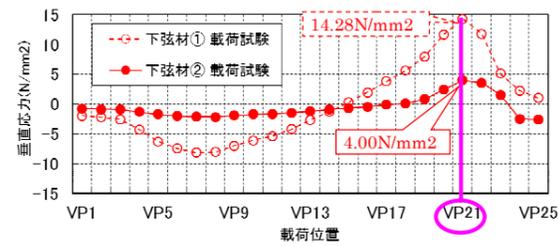
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

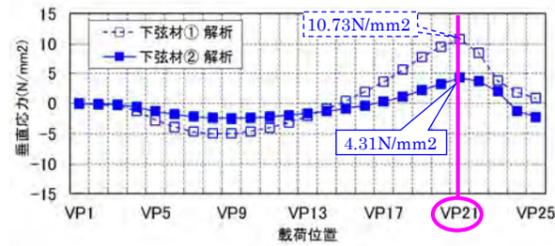
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(a) VPR23 検証対象位置図



(b) 载荷試験結果 (1, 2) 応力波形



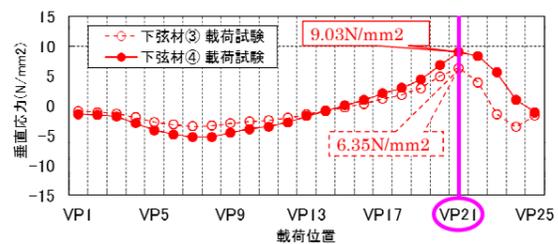
(c) 解析結果 (1, 2) 応力波形

b) 検証位置③、④

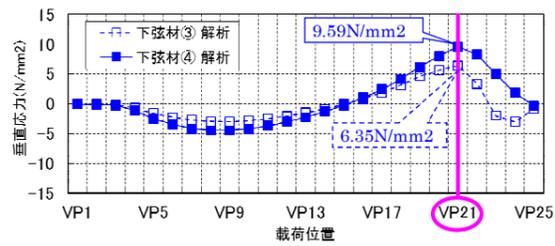
ピーク荷重位置：VP21 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

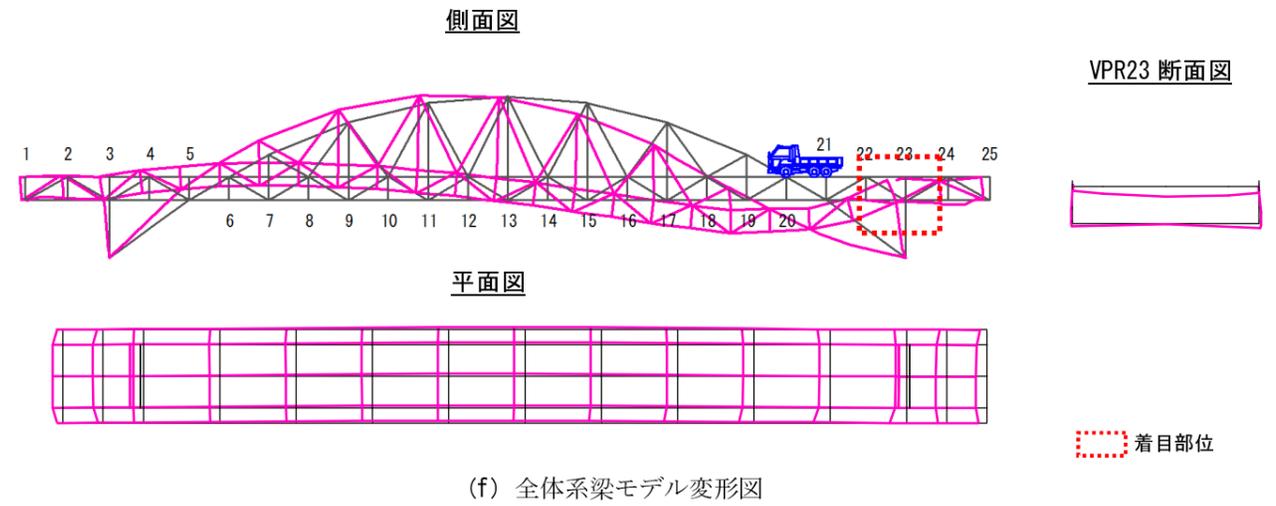
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(d) 载荷試験結果 (3, 4) 応力波形

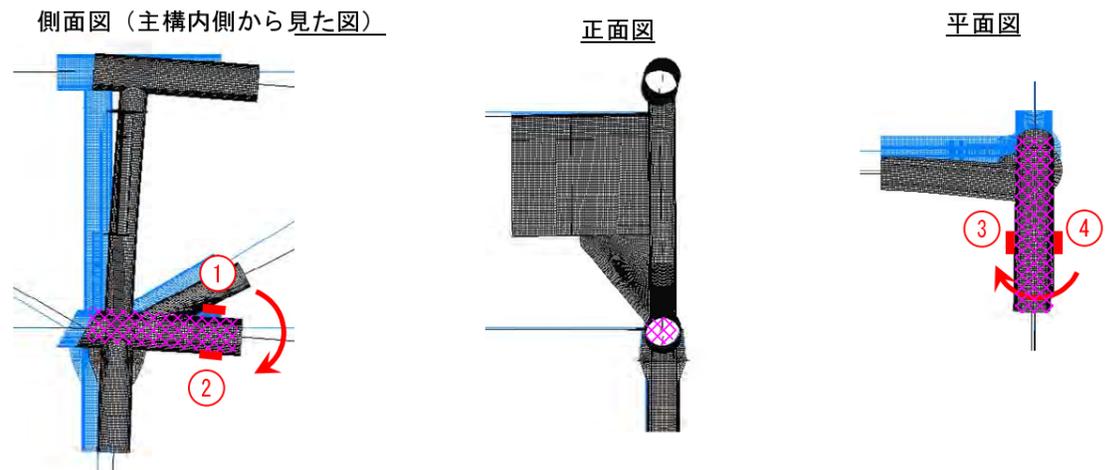


(e) 解析結果 (3, 4) 応力波形



(f) 全体系梁モデル変形図

■VP21 荷重時の格点部変形図



(g) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	14.28 N/mm ² (引張)	曲げ
	②	4.00 N/mm ² (引張)	
解析	①	10.73 N/mm ² (引張)	曲げ
	②	4.31 N/mm ² (引張)	

⇒曲げ変形の向きが一致

主構面外応力

計測	③	6.35 N/mm ² (引張)	曲げ
	④	9.03 N/mm ² (引張)	
解析	③	6.35 N/mm ² (引張)	曲げ
	④	9.59 N/mm ² (引張)	

⇒曲げ変形の向きが一致

(h) VPR23 下弦材変形の検証

図-3.19 VPR23 下弦材応力の検証

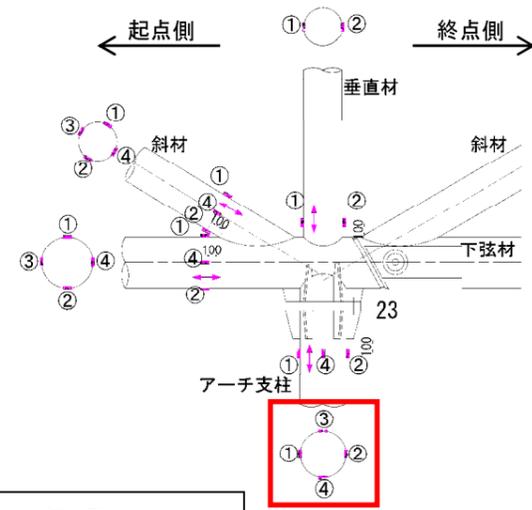
4) アーチ支柱応力の検証

a) 検証位置①、②

ピーク荷重位置：VP23 [計測と解析は一致]

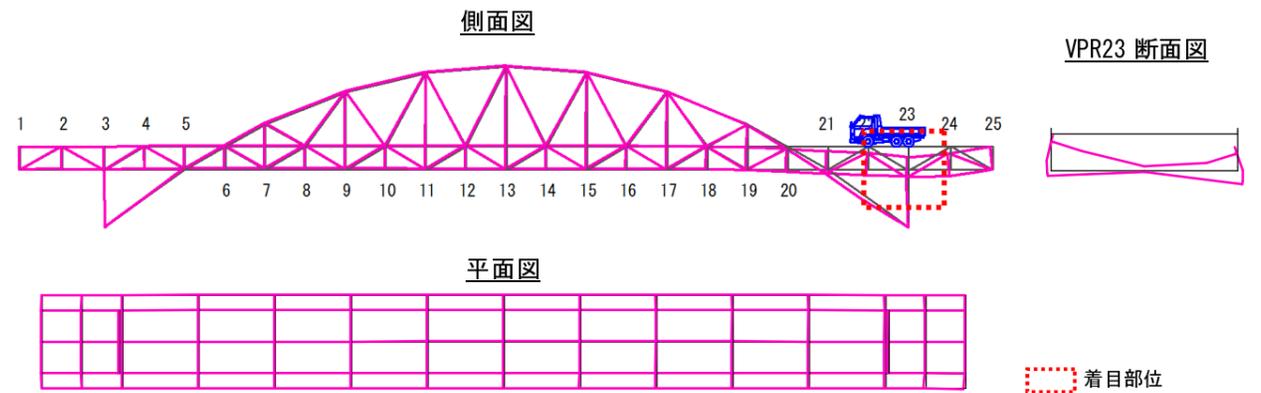
変形の向き：軸変形 [計測と解析は一致]

応力波形：[計測と解析は概ね一致]



— 検証位置
(計測位置)
※計測方向は部材軸方向

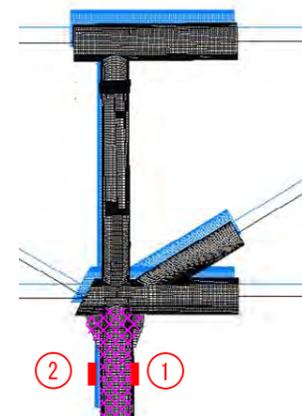
(a) VPR23 検証対象位置図



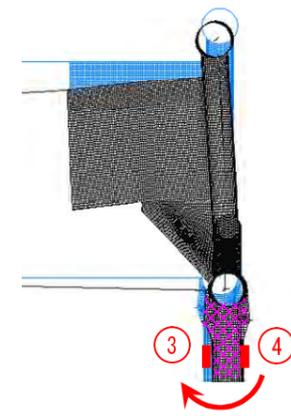
(f) 全体系梁モデル変形図

■VP23 荷重時の格点部変形図

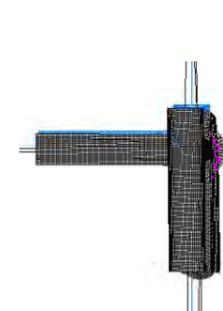
側面図 (主構内側から見た図)



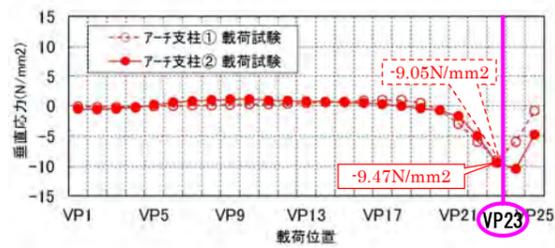
正面図



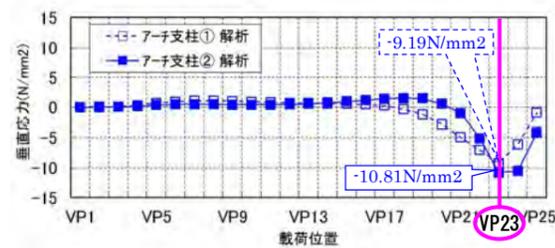
平面図



(g) 格点部シェルモデル変形図



(b) 荷重試験結果 (①, ②) 応力波形



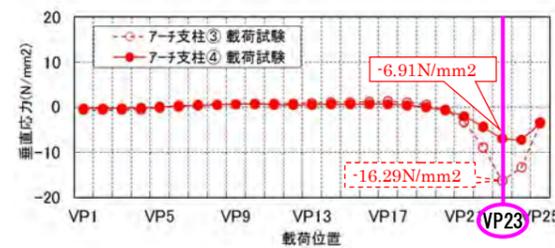
(c) 解析結果 (①, ②) 応力波形

b) 検証位置③、④

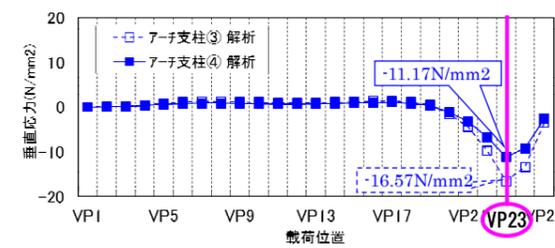
ピーク荷重位置：VP23 [計測と解析は一致]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(d) 荷重試験結果 (③, ④) 応力波形



(e) 解析結果 (③, ④) 応力波形

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	-9.05 N/mm ² (圧縮)	軸変形
	②	-9.47 N/mm ² (圧縮)	
解析	①	-9.19 N/mm ² (圧縮)	軸変形
	②	-10.81 N/mm ² (圧縮)	

⇒軸変形が一致

主構面外応力

計測	③	-16.29 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	④	-6.91 N/mm ² (圧縮)	
解析	③	-16.57 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	④	-11.17 N/mm ² (圧縮)	

⇒曲げ変形の向きが一致

(h) VPR23 アーチ支柱変形の検証

図-3.20 VPR23 アーチ支柱応力の検証

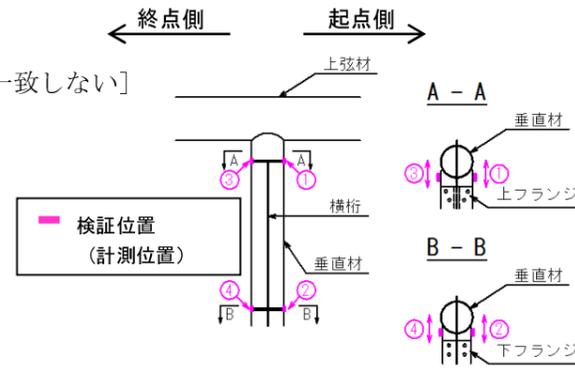
(2) 横桁フランジの応力

a) 検証位置①③、②④

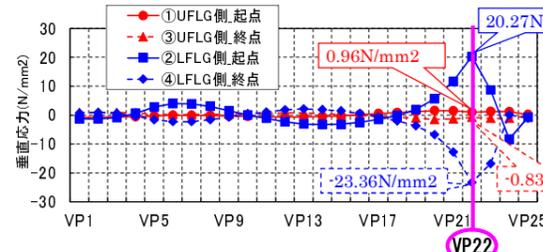
ピーク荷重位置：VP22, VP21 [計測と解析は一致しない]

変形の向き：曲げ変形 [計測と解析は一致]

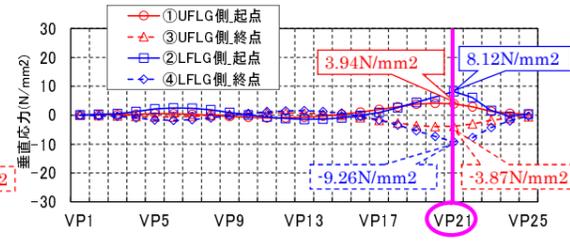
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(a) VPR23 検証対象位置図

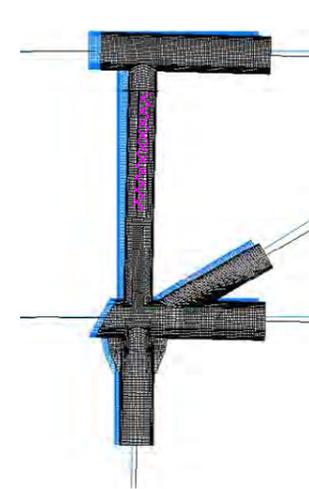


(b) 荷重試験結果応力波形

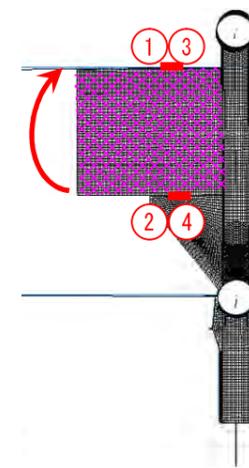


(c) 解析結果応力波形

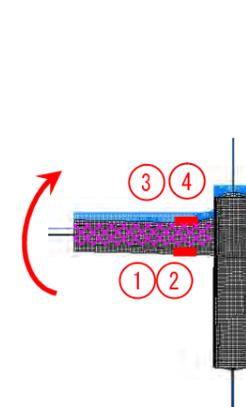
■VP21 荷重時の格点部変形図
側面図 (主構内側から見た図)



正面図



平面図



(e) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計測	①	0.96 N/mm ² (引張)	曲げ
	②	20.27 N/mm ² (引張)	
解析	①	3.94 N/mm ² (引張)	曲げ
	②	8.12 N/mm ² (引張)	

主構面内応力

計測	③	-0.83 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	④	-23.36 N/mm ² (圧縮)	
解析	③	-3.87 N/mm ² (圧縮)	曲げ
	④	-9.26 N/mm ² (圧縮)	

⇒面内曲げ変形の向きが一致。

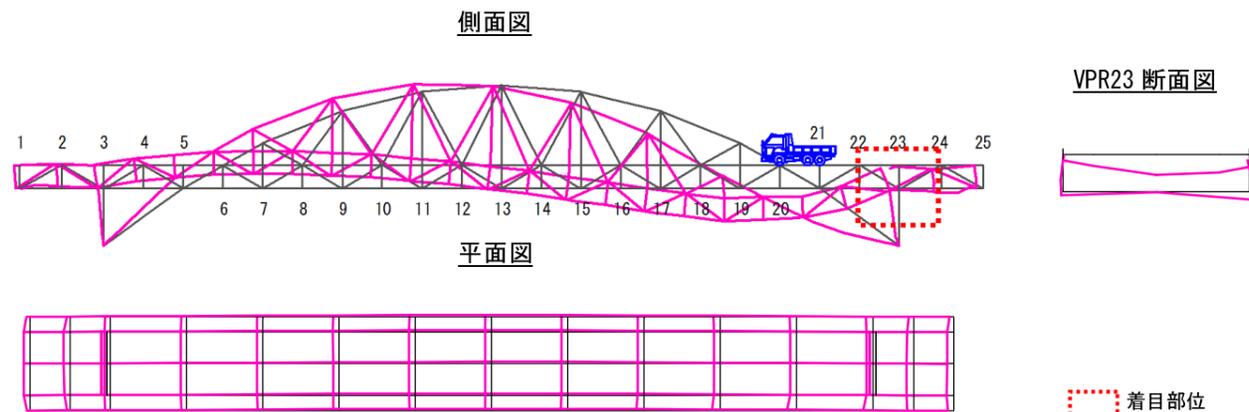
主構面外応力

計測	①	0.96 N/mm ² (引張)	曲げ
	③	-0.83 N/mm ² (圧縮)	
解析	①	3.94 N/mm ² (引張)	曲げ
	③	-3.87 N/mm ² (圧縮)	

主構面外応力

計測	②	20.27 N/mm ² (引張)	曲げ
	④	-23.36 N/mm ² (圧縮)	
解析	②	8.12 N/mm ² (引張)	曲げ
	④	-9.26 N/mm ² (圧縮)	

⇒面外曲げ変形の向きが一致。



(d) 全体系梁モデル変形図

(f) VPR23 横桁フランジ変形の検証

図-3.21 VPR23 横桁フランジ応力の検証

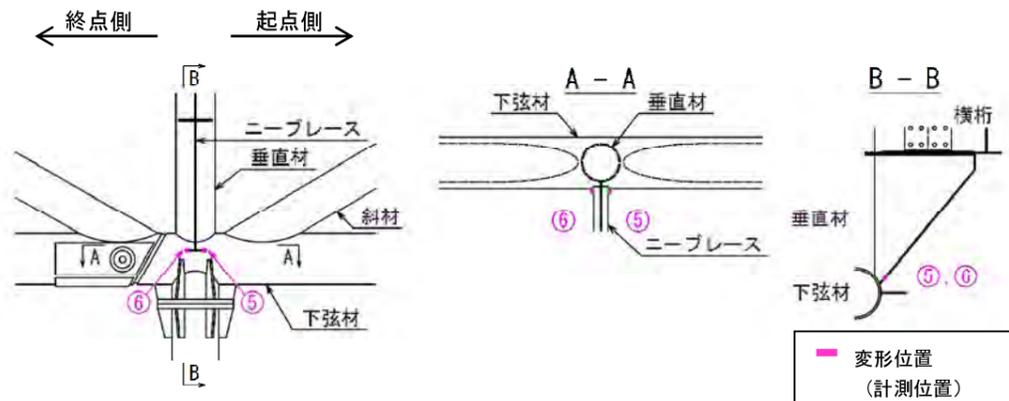
(3) ニーブレスフランジの応力

a) 検証位置⑤⑥

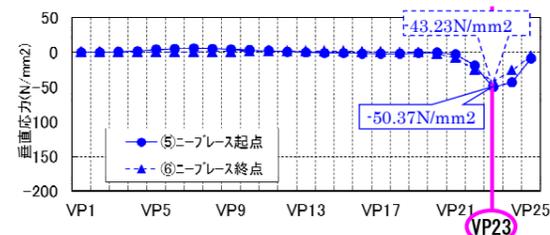
ピーク荷重位置：VP23 [計測と解析は一致]

変形の向き：軸変形 [計測と解析は一致]

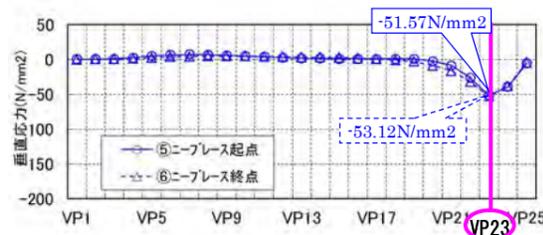
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



(a) VPR23 検証対象位置図



(b) 荷重試験結果応力波形



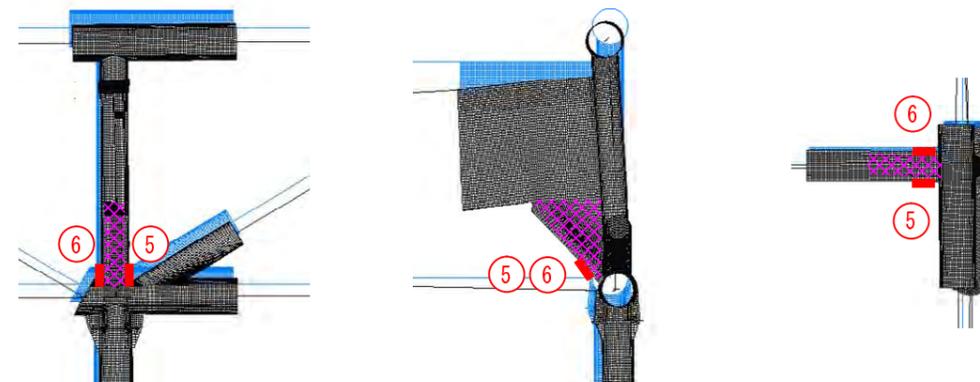
(c) 解析結果応力波形

■VP23 荷重時の格点部変形図

側面図 (主構内側から見た図)

正面図

平面図



(e) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内・面外応力

計	⑤	-50.37 N/mm ² (圧縮)	軸変形
測	⑥	-43.23 N/mm ² (圧縮)	
解	⑤	-51.57 N/mm ² (圧縮)	軸変形
析	⑥	-53.12 N/mm ² (圧縮)	

⇒軸変形が一致

(f) VPR23 ニーブレスフランジ変形の検証

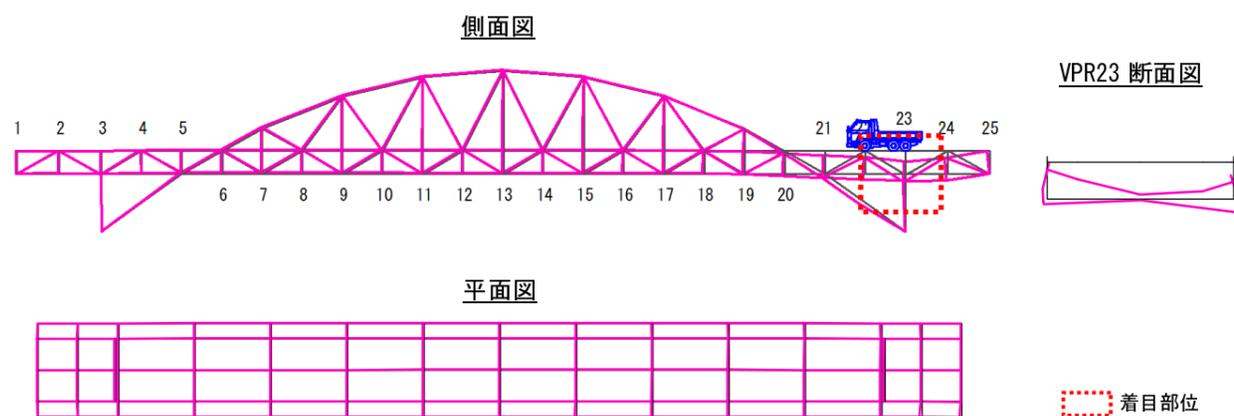
図-3.22 VPR23 ニーブレスフランジ応力の検証 (続き)

(4) VPR23 の評価

[総括]

ピーク荷重位置、変形の向き、応力波形を検証した結果、以下に示す部位以外は、計測と解析が一致、又は概ね一致し、概ね実橋の格点の挙動を再現できていると評価。

- ・垂直材①②において、応力がピークとなる荷重位置にて応力の向きが異なる。



(d) 全体系梁モデル変形図

図-3.22 VPR23 ニーブレスフランジ応力の検証

3-3-4. VPR25

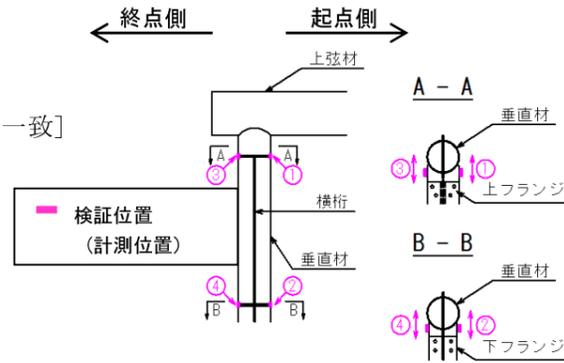
(1) 横桁フランジの応力

a) 検証位置①③、②④

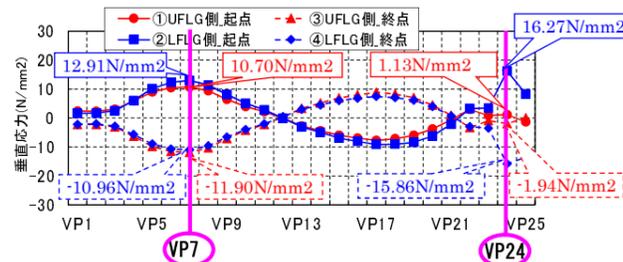
ピーク荷重位置：VP7、VP24 [計測と解析は一致]

変形の向き：軸変形 [計測と解析は一致]

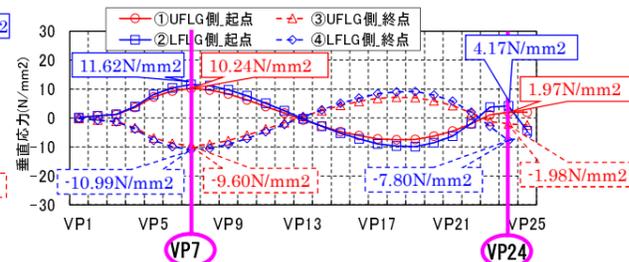
応力波形：[計測と解析は概ね一致]



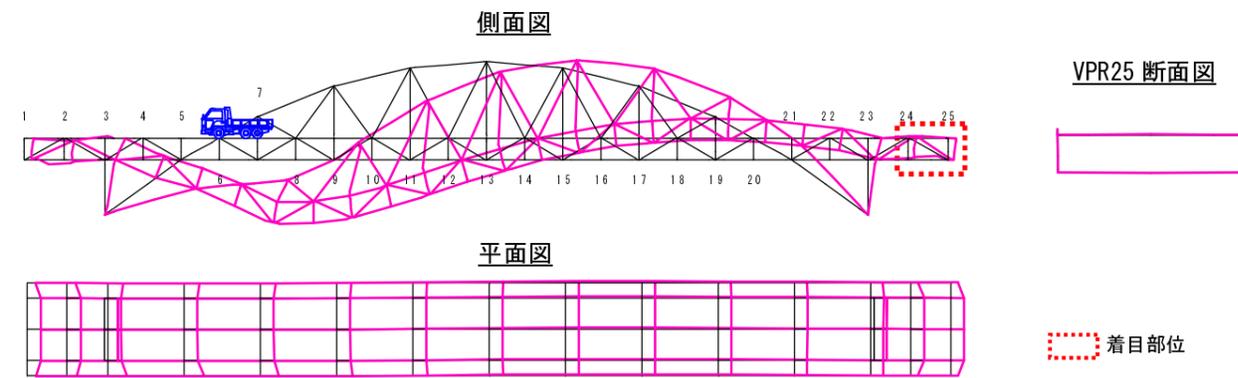
(a) VPR25 検証対象位置図



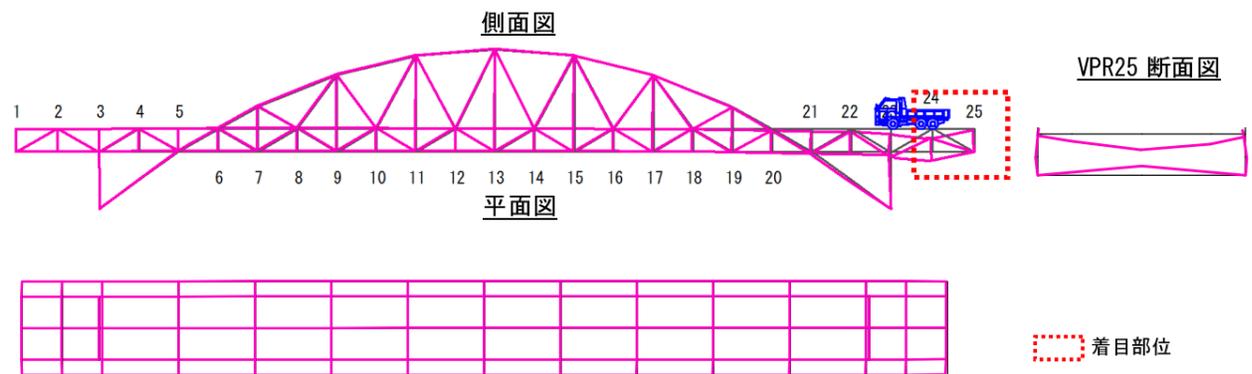
(b) 荷重試験結果応力波形



(c) 解析結果応力波形



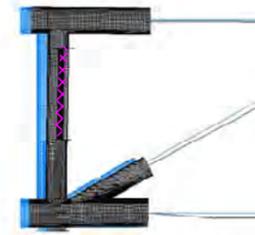
(d) 全体系梁モデル変形図 (VP7 荷重時)



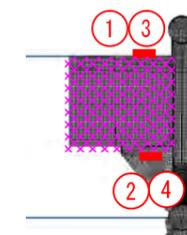
(e) 全体系梁モデル変形図 (VP24 荷重時)

■VP7 荷重時の格点部変形図

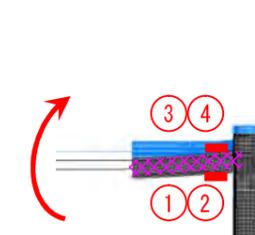
側面図 (主構内側から見た図)



正面図



平面図



(f) 格点部シェルモデル変形図 (VP7 荷重時)

■着目部材の変形の検証

主構面内応力

計	①	10.70 N/mm ² (引張)	軸変形
測	②	12.91 N/mm ² (引張)	
解	①	10.24 N/mm ² (引張)	軸変形
析	②	11.62 N/mm ² (引張)	

主構面内応力

計	③	-11.90 N/mm ² (圧縮)	軸変形
測	④	-10.96 N/mm ² (圧縮)	
解	③	-9.60 N/mm ² (圧縮)	軸変形
析	④	-10.99 N/mm ² (圧縮)	

⇒軸変形が一致。

主構面外応力

計	①	10.70 N/mm ² (引張)	曲げ
測	③	-11.90 N/mm ² (圧縮)	
解	①	10.24 N/mm ² (引張)	曲げ
析	③	-9.60 N/mm ² (圧縮)	

主構面外応力

計	②	12.91 N/mm ² (引張)	曲げ
測	④	-10.96 N/mm ² (圧縮)	
解	②	11.62 N/mm ² (引張)	曲げ
析	④	-10.99 N/mm ² (圧縮)	

⇒面外曲げ変形の向きが一致。

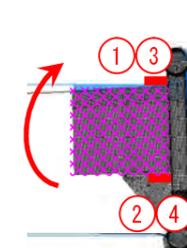
(g) VPR25 横桁フランジ変形の検証 (VP7 荷重時)

■VP24 荷重時の格点部変形図

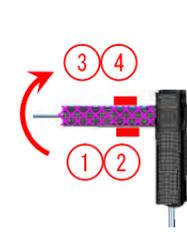
側面図 (主構内側から見た図)



正面図



平面図



(h) 格点部シェルモデル変形図 (VP24 荷重時)

主構面内応力

計	①	1.13 N/mm ² (引張)	曲げ
測	②	16.27 N/mm ² (引張)	
解	①	1.97 N/mm ² (引張)	曲げ
析	②	4.17 N/mm ² (引張)	

主構面内応力

計	③	-1.94 N/mm ² (圧縮)	曲げ
測	④	-15.86 N/mm ² (圧縮)	
解	③	-1.98 N/mm ² (圧縮)	曲げ
析	④	-7.80 N/mm ² (圧縮)	

⇒面内曲げ変形の向きが一致。

主構面外応力

計	①	1.13 N/mm ² (引張)	曲げ
測	③	-1.94 N/mm ² (圧縮)	
解	①	1.97 N/mm ² (引張)	曲げ
析	③	-1.98 N/mm ² (圧縮)	

主構面外応力

計	②	16.27 N/mm ² (引張)	曲げ
測	④	-15.86 N/mm ² (圧縮)	
解	②	4.17 N/mm ² (引張)	曲げ
析	④	-7.80 N/mm ² (圧縮)	

⇒面外曲げ変形の向きが一致。

(i) VPR25 横桁フランジ変形の検証 (VP24 荷重時)

図-3.23 VPR25 横桁フランジ応力の検証

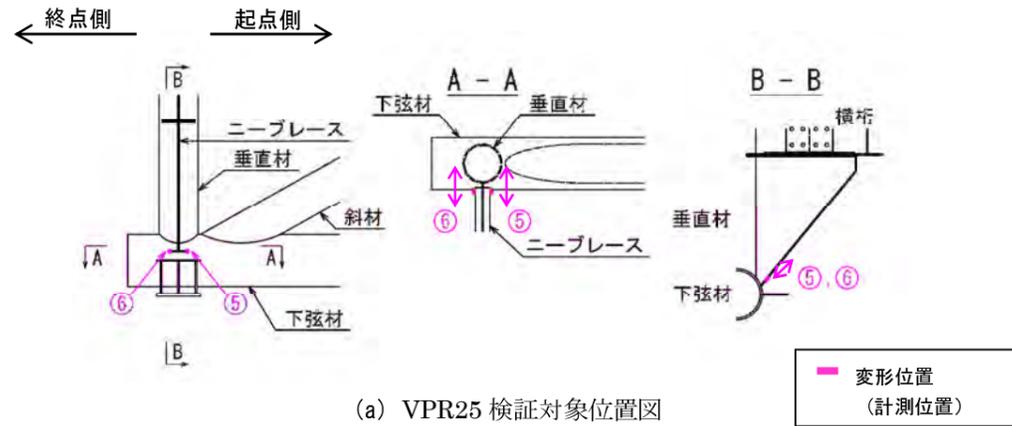
(2) ニーブレスフランジ応力

a) 検証位置⑤⑥

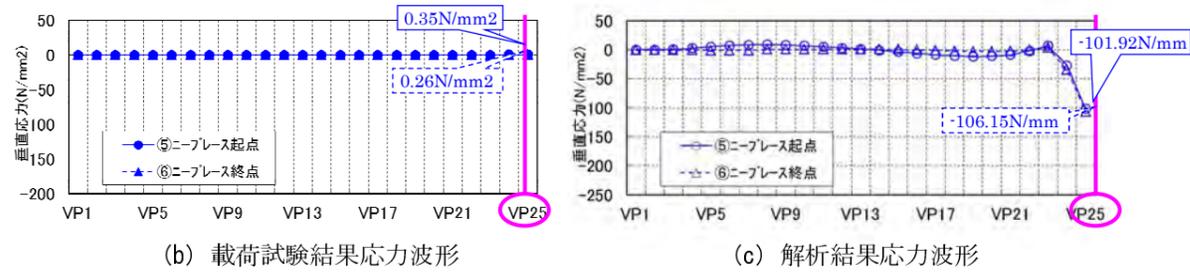
ピーク荷重位置：VP25（解析），ピークなし（計測）[計測と解析は一致しない]

変形の向き：軸変形（解析），変形なし（計測）[計測と解析は一致しない]

応力波形：[計測と解析は一致しない]

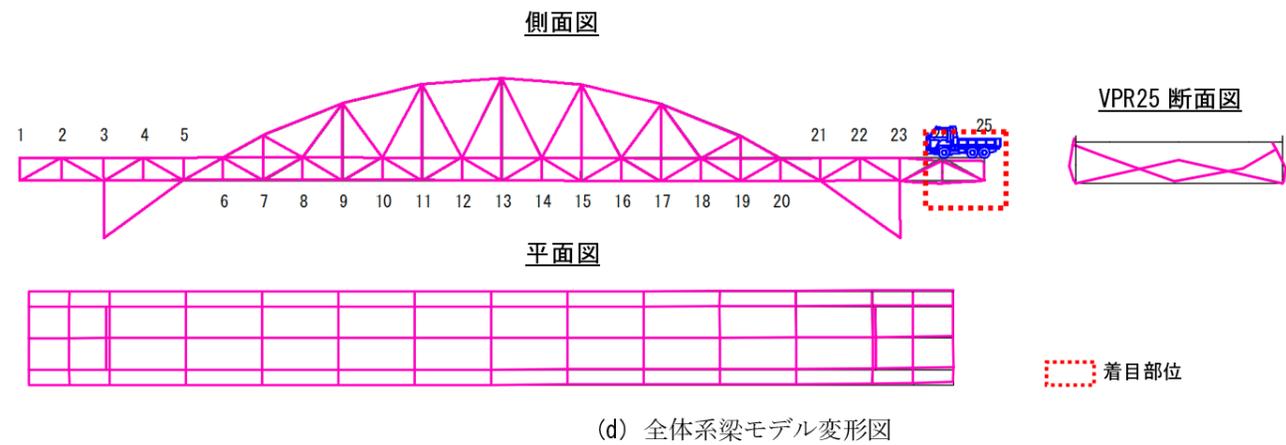


(a) VPR25 検証対象位置図



(b) 荷重試験結果応力波形

(c) 解析結果応力波形



(d) 全体系梁モデル変形図

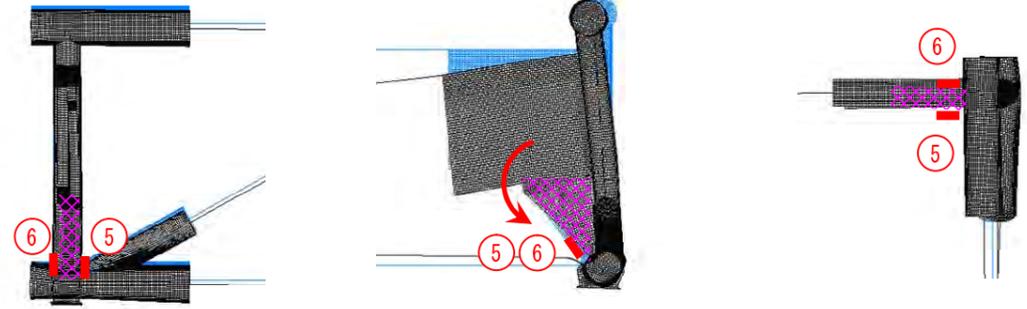
図-3.24 VPR25 ニーブレスフランジ応力の検証

■VPR25 荷重時の格点部変形図

側面図（主構内側から見た図）

正面図

平面図



(e) 格点部シェルモデル変形図

■着目部材の変形の検証

主構面内・面外応力

計	⑤	—	N/mm ² (引張)
測	⑥	—	N/mm ² (引張)
解	⑤	-101.92	N/mm ² (圧縮) 軸変形
析	⑥	-106.15	N/mm ² (圧縮)

⇒計測では、発生している亀裂により応力が解放されているため、微小な応力しか計測されていない。

(f) VPR25 ニーブレスフランジ変形の検証

図-3.24 VPR25 ニーブレスフランジ応力の検証（続き）

(3) VPR25 の評価

[総括]

ピーク荷重位置、変形の向き、応力波形を検証した結果、横桁においては計測と解析が一致、または概ね一致し、実況の横桁の挙動を再現できていると評価。

ニーブレスフランジにおいては、荷重試験結果では微小な応力しか計測されていないため、解析とは一致しない。VP25 荷重時の応力波形については、亀裂により応力が解放され計測されていないと想定され、このために解析と計測が一致していないと推定。



写真-3.1 VPR25 亀裂状況

4. 荷重試験による応力とFEM解析による応力について

(1) 荷重試験による応力とFEM解析による応力差の要因（推定）

次のような不確定要因が考えられ、計測と解析の応力に差が生じているものと考えられる。

- ・部材接合条件の実構造との相違（解析モデルは剛結としているが、実構造は完全な剛結合ではない）。
- ・支承条件，ゲルバーヒンジ部の実挙動と解析挙動との相違。
- ・床版の合成効果の差異，防護柵・舗装等考慮していない構造の影響。
- ・応力計測位置と，解析応力の抽出位置のずれ 他

参考として，応力計測位置と解析応力の抽出位置のずれによる応力の違いについて検討した結果を以下に示す。

[参考] 応力計測位置と解析応力抽出位置の相違による応力差の確認

荷重試験における応力計測位置と解析応力抽出位置が相違する場合の応力差を確認することを目的に，解析モデル上で，応力抽出位置をずらした場合の応力波形を比較した例を図-4.1に示す。

ここでは，シェルモデル上で3要素分（約60mm）応力抽出要素をずらし，応力波形を比較した。応力抽出位置をずらす前の応力波形を「解析（耐震補強時）」に，ずらした後の波形を「抽出位置変更」に示す。

図-4.1に示すように，応力抽出位置のずれに対しては，応力はほとんど変化しないことが解る。よって，応力差の要因として応力抽出位置のずれによる影響は小さいと思われる。

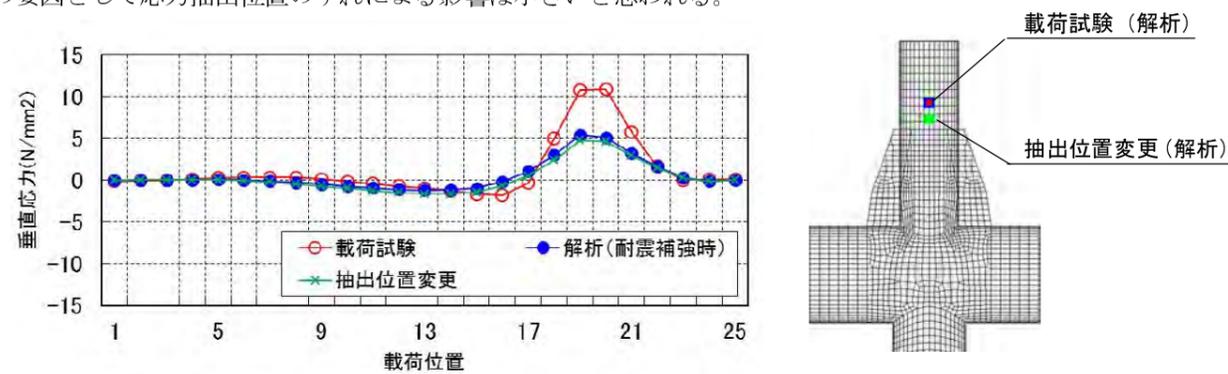


図-4.1 応力差の要因検討

5. 総括

主構の鉛直たわみ波形及び主構-床版間の相対変位波形を比較した結果，橋梁全体系の変形挙動について，たわみ量に差はあるものの，変形挙動の傾向は荷重試験結果を概ね再現できている。

格点部応力および横桁・ニープレースの応力波形を比較した結果，局部応力は荷重試験結果よりやや小さい値となっている。

各部材の変形挙動は，部材の変形の向き及び応力波形に一部差異がみられるが，概ね一致していると整理し，亀裂原因の推定及び恒久対策の検討に用いる解析モデルに適用することとした。