

解析結果 (案)

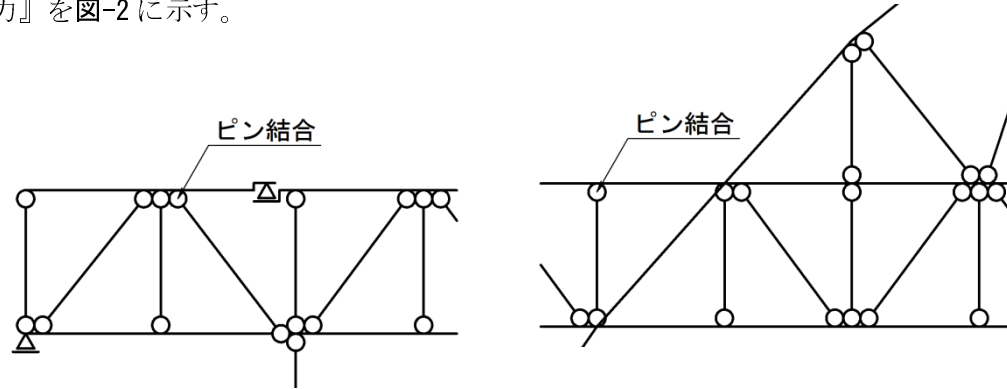
参考資料2 解析結果（案）

1. 全体解析（梁要素）の解析結果

(1) 载荷試験結果を踏まえた解析モデルの検証

载荷試験と同じ条件にて主要部材の応力を解析モデル（剛結合 or ピン結合）で再現して実橋の応力により近いモデルの検証を行う。なお、ピン結合とした部材は、図-1 に示す通り、垂直材、斜材、吊材を対象としている。

『計測した主要部材の応力』と『同じ载荷条件にて解析モデル（剛結合 or ピン結合）で再現した主要部材の応力』を図-2 に示す。



注) 部材が同断面で連続しているアーチリブ、補剛桁の上下弦材は、ピン結合モデルにおいても剛結合とする。また、剛度の低いガセットプレートにより接続しているアーチリブと上横構、下横構、支柱対傾構は、ピン結合モデルおよび剛結合モデル共にピン結合とする。

図-1 解析モデル（ピン結合）

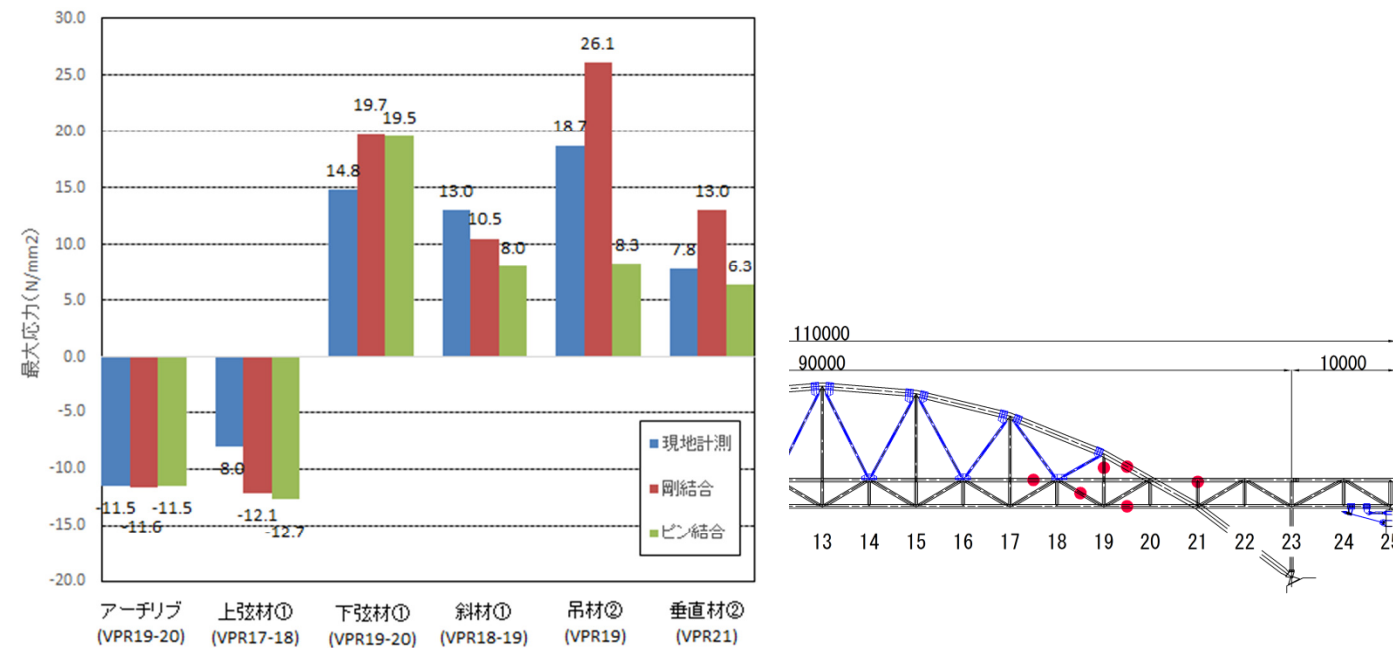


図-2 主要部材の最大応力（現地計測、剛結合、ピン結合）[並列载荷]

■ 解析結果の特徴と傾向

<アーチリブ、上弦材、下弦材>

- ・結合条件が剛結合とピン結合の応力差は殆どない。また、現地計測結果は、どの部材も解析結果以下となっている。

<吊材、垂直材>

- ・結合条件がピン結合より剛結合の応力が大きくなっている。
- ・現地計測結果がピン結合と剛結合の解析結果の中間の値となっている。

<斜材>

- ・結合条件がピン結合より剛結合の応力が大きくなっている。
- ・解析よりも現地計測結果が大きくなっている（現地計測/剛結合=124%）。

以上より、剛結合モデルの方がピン結合モデルより大きいか、または同等程度の応力を示す結果となる。応力が実測と同程度であることより、格点部結合条件（剛結）、床版・2次部材の剛性寄与度、支承部の拘束条件等、モデル化の妥当性がある程度確認できたと考え、剛結合モデルを用いて解析を行うものとする。

(2) 梁要素を用いた構造解析 (応力計算)

各部材の最大応力度および応力範囲を図-3に、接合部に亀裂が発生している横桁、垂直材、下弦材の全部材の最大応力度と応力範囲を図-4に示す。また、横桁、垂直材の荷重載荷位置と応力度の変化を図-5に、横桁の面外応力が最大となる荷重載荷位置での変形図を図-6に示す。

■ 解析結果の特徴と傾向

- ・建設時と現況時では大半が建設時の方が最大応力および応力範囲共に大きくなっている。
- ・亀裂発生部材では、現況時で横桁の面外方向の応力範囲が 86.9N/mm^2 、最大応力度が 48.3N/mm^2 と最も大きくなっている (図-3, VPL24)。(横桁の面外方向は、設計計算では考慮されていない二次応力である)
- ・亀裂未発生部材では、現況時で吊材の面内方向の応力範囲が 77.5N/mm^2 、最大応力度が 60.0N/mm^2 と最も大きくなっている (図-3, VPR19)。
- ・亀裂発生部材間では、横桁の面外応力が卓越しており、端部ほど大きくなる傾向がある (図-4)。これは、横桁と垂直材との接合部の亀裂の発生位置と傾向が近似している。
- ・横桁の面外方向応力が大きくなる端部の VPR25 では VP7, VP18 (アーチ支間の 1/4 点付近) に載荷した場合に大きな応力が発生している。その他の格点である VPR13 では VP6, VP7, VPR17 では VP8, VP15, VPR21 では VP6, VP15 に載荷した時に面外応力が大きくなるが最大応力は VPR25 と比べて小さくなっている (図-5)。
- ・横桁の面外方向応力の応力が最大となっている荷重状態では、主構と床板・床組との橋軸方向の相対変位が大きくなっている (図-6)。

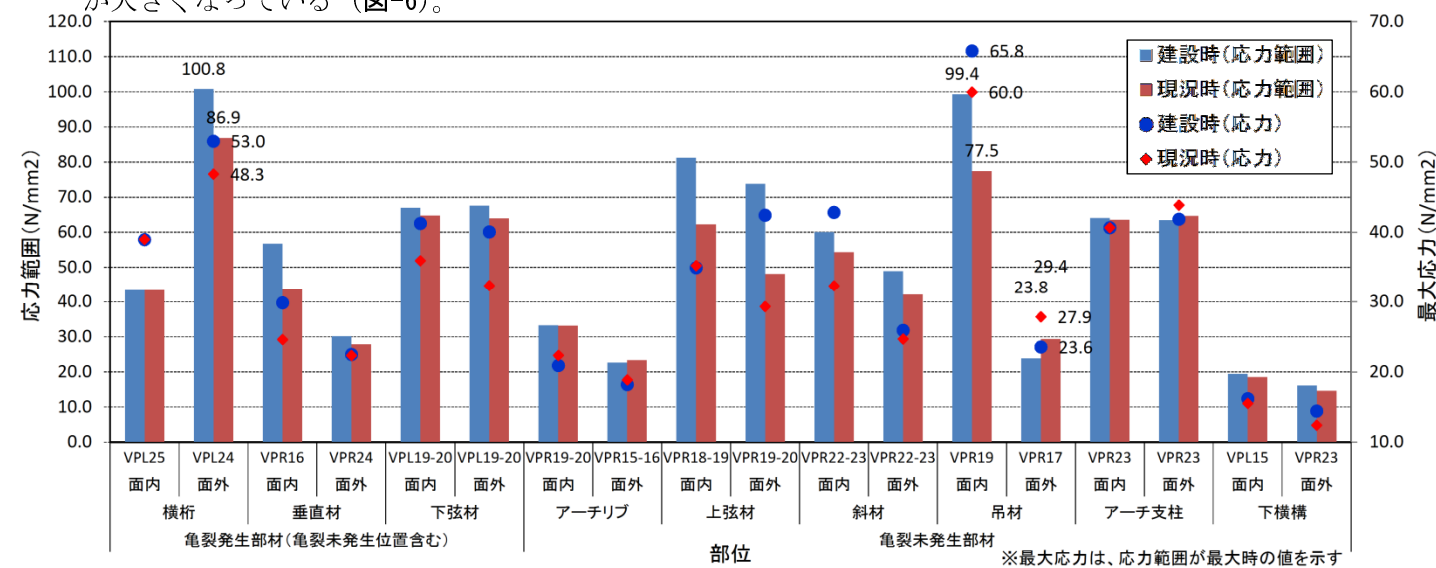


図-3 応力範囲および最大応力 (建設時および現況時)

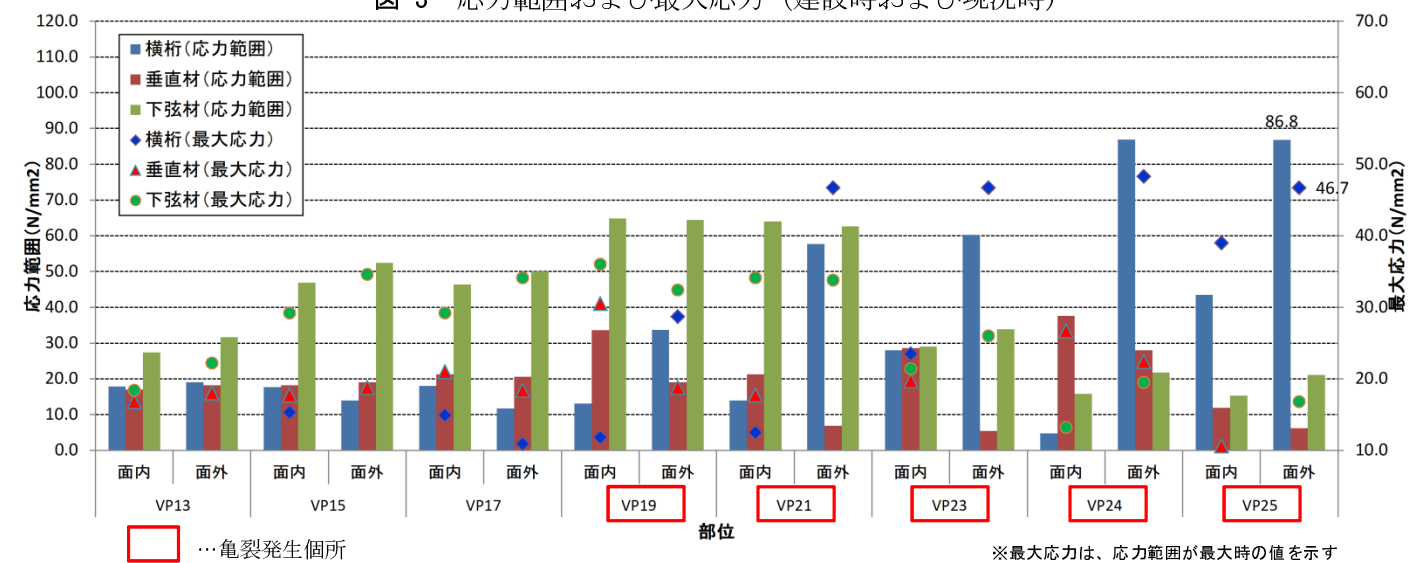


図-4 横桁、垂直材、下弦材の応力範囲および最大応力 (現況時)

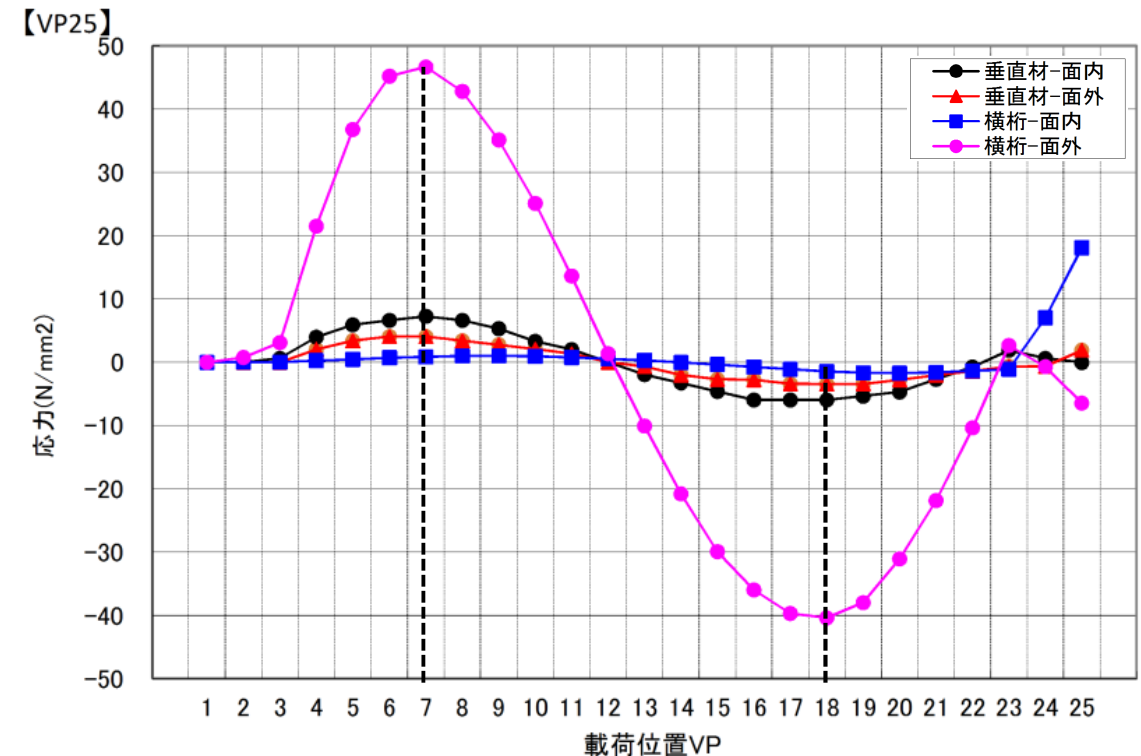


図-5 活荷重による垂直材側と横桁側の応力変化

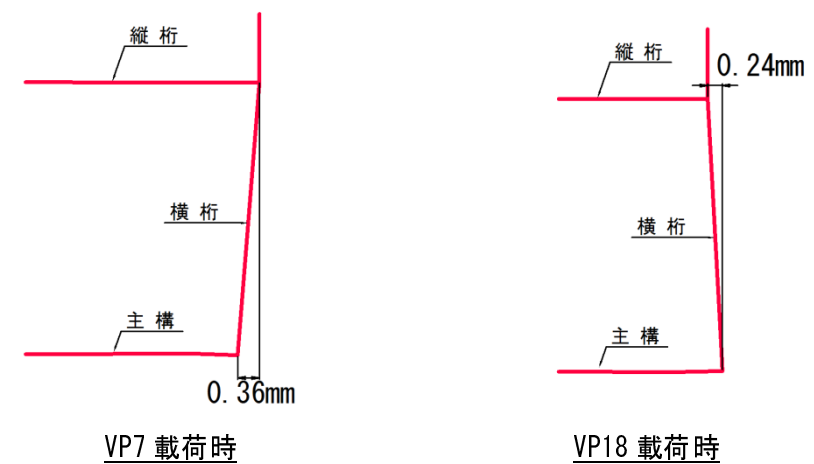
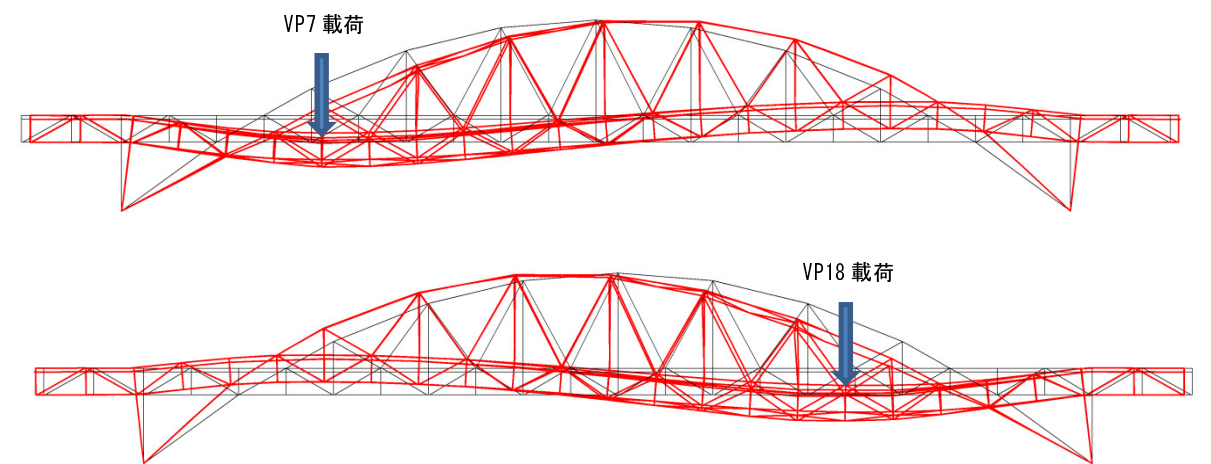


図-6 変形図 (VP25)

(3) 応力度による疲労照査

解析結果の応力範囲を用いて、亀裂が生じている垂直材と横桁の接合部の疲労照査を行う。照査は、道路橋示方書 (H24) に準ずるものとし、その手順を図-7に示す。解析モデルは、耐震補強前後の2モデルを使用し、竣工～耐震補強までの41年間と耐震補強～現在までの7年間の合計48年間で評価を行うものとした。その照査結果を垂直材面内方向は表-1、下弦材面内方向は表-2、横桁面外方向は表-3に示す。

■ 大型車交通量

図-8に示す大型車交通量から、耐震補強前を2,000台/日(昭和58年の値)、耐震補強後を714台/日(平成22年)を使用する。

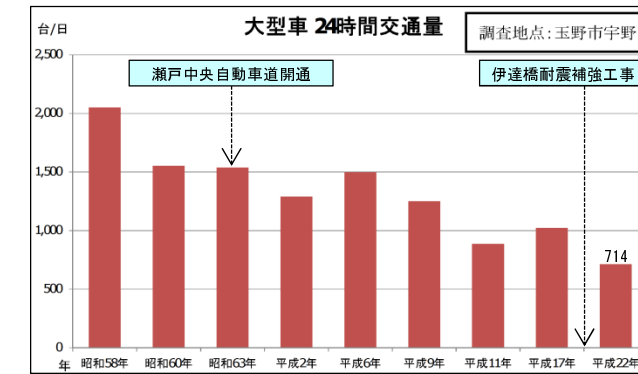


図-8 大型車交通量の推移

■ 継手の強度等級

継手部の疲労強度は、着目する応力方向と継手の形状から、図-9に示す強度等級とする。なお、横桁フランジの応力に着目した疲労強度においては、『すみ肉溶接による荷重伝達型 T 字溶接継手』の規定がないため、これと同様に荷重伝達型である『すみ肉溶接による荷重伝達型十字溶接継手 (止端非仕上げ)』が F 等級であることを参考に、安全側の設定として 2 ランク下の H 等級とした。

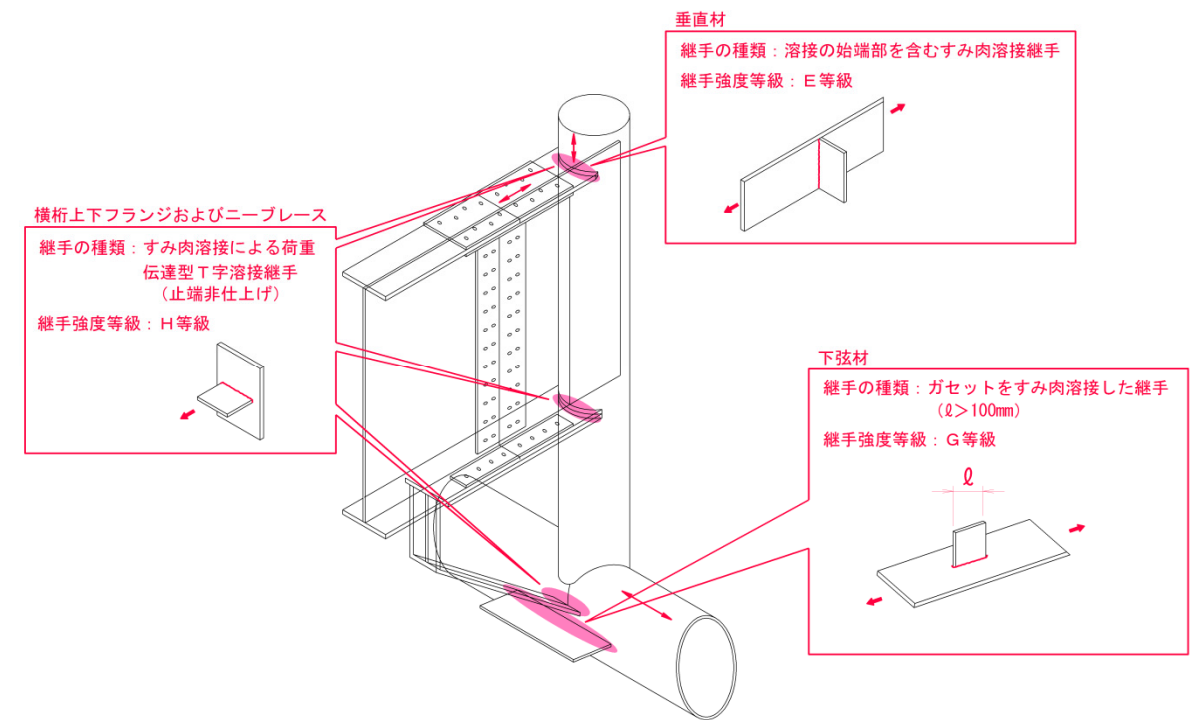


図-9 継手の疲労強度等級

■ 照査結果の特徴と傾向

- ・垂直材の応力に着目した疲労照査結果では、全ての部材の応力範囲が一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界よりも小さくなり、疲労照査を行う必要がない結果であった (表-1)。
- ・下弦材の応力に着目した疲労照査結果では、一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界を超える応力範囲となる部材もあるが、累積損傷度 $D \leq 1.00$ となり疲労破壊に達しない結果であった (表-2)。
- ・横桁フランジの応力に着目した疲労照査結果では、端部から 4 番目までの横桁において、累積損傷度 $D > 1.00$ となり疲労破壊に達する結果であった (表-3)。
- ・横桁フランジの応力に着目した疲労照査結果は、実際の亀裂状況と端部から 5 番目 (VP7、19) を除いて一致している (表-3)。(累積損傷度の大きい端部の横桁位置から疲労亀裂が発生するが、亀裂が発生すると応力が再分配されるので、亀裂を考慮していない解析結果と実構造では差異が生じる)

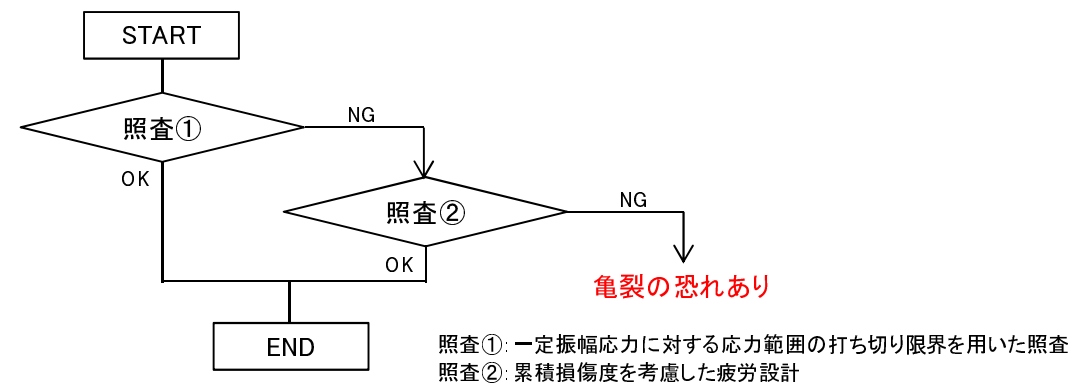


図-7 応力度による疲労照査フロー

表-1 照査①結果一覧表 (垂直材面内方向)

大型車交通量 (台/日・車線)	期間 Y (年)	格点番号	疲労照査結果														
			1 (25)	2 (24)	3 (23)	4 (22)	5 (21)	6 (20)	7 (19)	8 (18)	9 (17)	10 (16)	11 (15)	12 (14)	13		
1000	41年	VPL	応力範囲	12.30	25.26	34.71	36.27	22.98	22.77	32.73	30.36	14.17	39.63	12.81	42.90	15.57	
			打ち切り限界	許容値	80.60	62.00	80.60	62.57	80.60	62.00	62.00	77.71	62.00	63.41	62.00	62.00	62.00
			判定	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
		VPR	応力範囲	11.43	36.33	38.04	38.10	24.81	31.59	39.72	41.85	17.85	51.90	15.27	56.82	18.54	
			打ち切り限界	許容値	80.60	62.00	80.60	62.00	80.60	62.00	62.00	73.79	62.00	63.03	62.00	62.00	62.00
			判定	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
357	48年	VPL	応力範囲	11.07	23.97	25.38	33.54	22.17	18.45	17.82	27.15	15.96	32.37	15.42	32.25	13.65	
			打ち切り限界	許容値	80.60	62.00	80.60	62.89	80.60	80.60	62.00	80.60	62.00	63.89	62.00	62.00	62.00
			判定	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
		VPR	応力範囲	11.40	34.05	28.62	36.24	24.06	25.53	24.36	37.18	18.63	43.71	18.87	42.72	16.95	
			打ち切り限界	許容値	80.60	62.00	80.60	62.00	80.60	62.00	62.00	72.70	62.00	62.40	62.00	62.00	62.00
			判定	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

現在亀裂が生じている箇所

※ 応力範囲 > 打ち切り限界 となる場合は亀裂の恐れなし

表-2 照査②結果一覧表（下弦材面内方向）

大型車交通量 (台/日・車線)	期間Y (年)	疲労照査結果	格点番号													
			1 (25)	2 (24)	3 (23)	4 (22)	5 (21)	6 (20)	7 (19)	8 (18)	9 (17)	10 (16)	11 (15)	12 (14)	13	
1000	41年	VPL	累積損傷度D1			0.13		0.70		0.29		0.37		0.27		0.08
			判定(Da<1.0)			OK		OK		OK		OK		OK		OK
		VPR	累積損傷度D1			0.10		0.66		0.18		0.21		0.14		
			判定(Da<1.0)			OK		OK		OK		OK		OK		OK
357	48年	VPL	累積損傷度D2			0.01		0.05		0.01		0.01		0.01		
			累計(D1+D2)			0.14		0.75		0.30		0.38		0.27		0.08
			判定(Da<1.0)			OK		OK		OK		OK		OK		OK
		VPR	累積損傷度D2			0.01		0.05		0.01		0.01		0.01		0.01
			累計(D1+D2)			0.11		0.70		0.19		0.22		0.15		0.01
			判定(Da<1.0)			OK		OK		OK		OK		OK		OK



 現在亀裂が生じている箇所
 ※空欄は応力範囲が打ち切り限界を超えない箇所
 累積損傷度<1.0となる場合は亀裂の恐れなし

表-3 照査②結果一覧表（横桁面外方向）

大型車交通量 (台/日・車線)	期間Y (年)	疲労照査結果	格点番号													
			1 (25)	2 (24)	3 (23)	4 (22)	5 (21)	6 (20)	7 (19)	8 (18)	9 (17)	10 (16)	11 (15)	12 (14)	13	
1000	41年	VPL	累積損傷度D1	3.94	5.49	1.53		1.52		0.21				0.05		0.12
			判定(Da<1.0)	OUT	OUT	OUT		OUT		OK				OK		OK
		VPR	累積損傷度D1	3.30	4.43	2.65		2.93		0.46				0.24		0.66
			判定(Da<1.0)	OUT	OUT	OUT		OUT		OK				OK		OK
357	48年	VPL	累積損傷度D2	0.17	0.26	0.04		0.03		0.01						
			累計(D1+D2)	4.11	5.75	1.56		1.55		0.22				0.05		0.12
			判定(Da<1.0)	OUT	OUT	OUT		OUT		OK				OK		OK
		VPR	累積損傷度D2	0.16	0.23	0.06		0.05		0.01						
			累計(D1+D2)	3.46	4.66	2.71		2.99		0.47				0.24		0.66
			判定(Da<1.0)	OUT	OUT	OUT		OUT		OK				OK		OK

 現在亀裂が生じている箇所
 ※空欄は応力範囲が打ち切り限界を超えない箇所
 累積損傷度<1.0となる場合は亀裂の恐れなし

2. 全体解析（梁要素+シェル要素）の解析結果

(1) 梁要素+シェル要素を用いた構造解析（応力計算）

① 横桁フランジと垂直材の接合部

シェル要素でモデル化を行った横桁と垂直材の接合部の応力分布（フォンミーゼスの相当応力）を図-10に示す。また、荷重載荷位置と横桁と垂直材の接合部の応力度の変化を図-11に、主応力を図-12に示す。

■ 解析結果の特徴と傾向

- ・横桁フランジと垂直材の接合部の応力は、横桁フランジより垂直材側が大きくなっている。(図-10)
- ・横桁フランジと垂直材の接合部の垂直材側に点状の応力集中が生じている。(亀裂の発生箇所と一致している)(図-10)
- ・その応力集中の応力度は、床板に近い上フランジが大きく((VPR25③: 26N/mm²))、下フランジでは小さく(VPR25④: 2N/mm²)になっている。(図-10)
- ・横桁フランジの応力度は、梁要素を用いた構造解析から算出した応力度(VP25: 47N/mm²)に対して、上フランジ(VPR25: 26N/mm²)、下フランジ応力度(VPR25: 2N/mm²)と小さくなっている。(図-10)
- ・垂直材の応力は、鋼板表裏で符号が反転しており、板曲げが発生している。(図-11)
- ・垂直材の応力度の変化は、横桁フランジ応力度と同じ変化をしている。(図-11)
- ・横桁フランジと垂直材の接合部の垂直材側の主応力が亀裂の方向と一致している。(図-12)

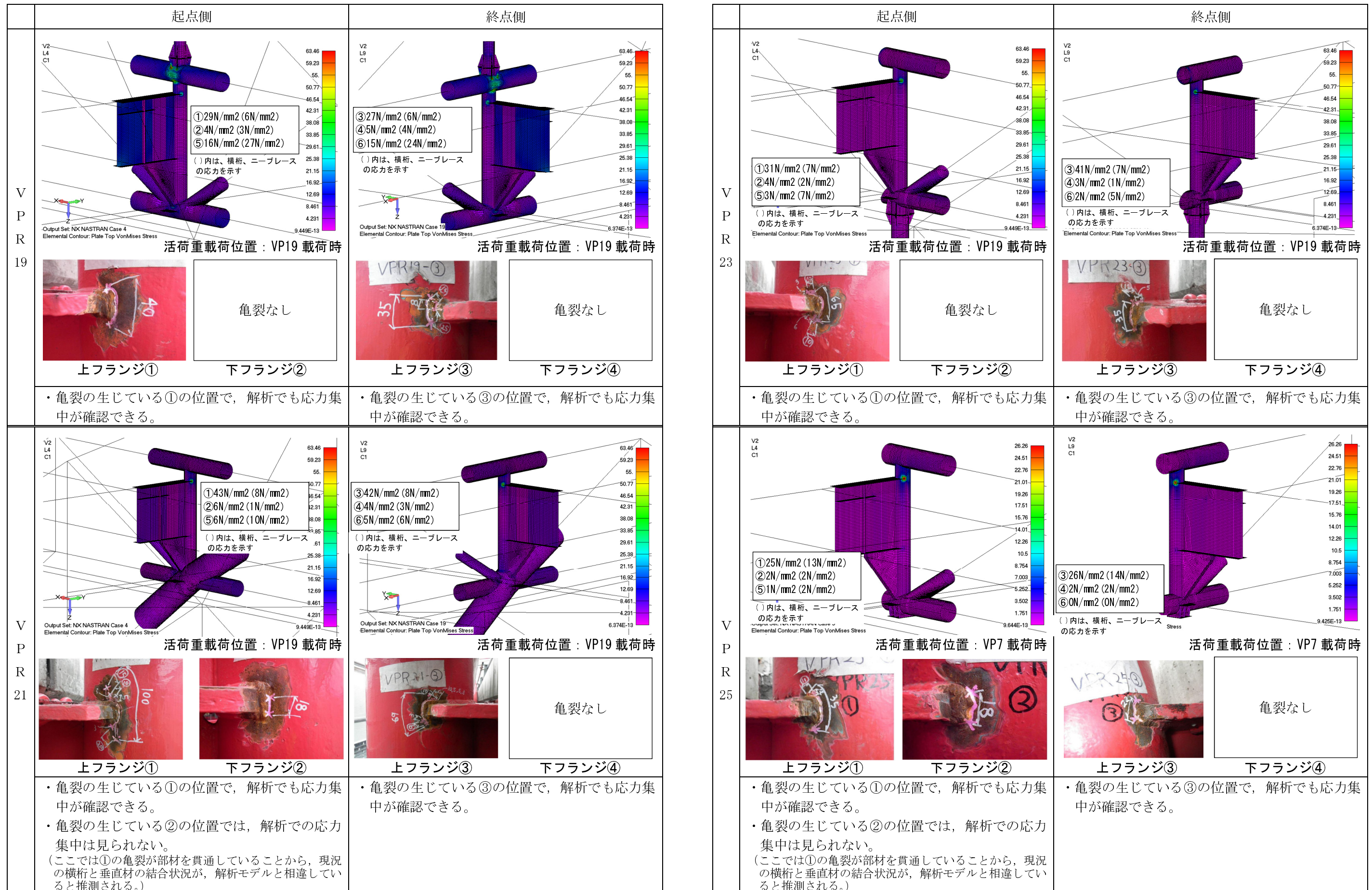


図-10 横桁上下フランジの応力分布 (フォンミーゼスの相当応力)

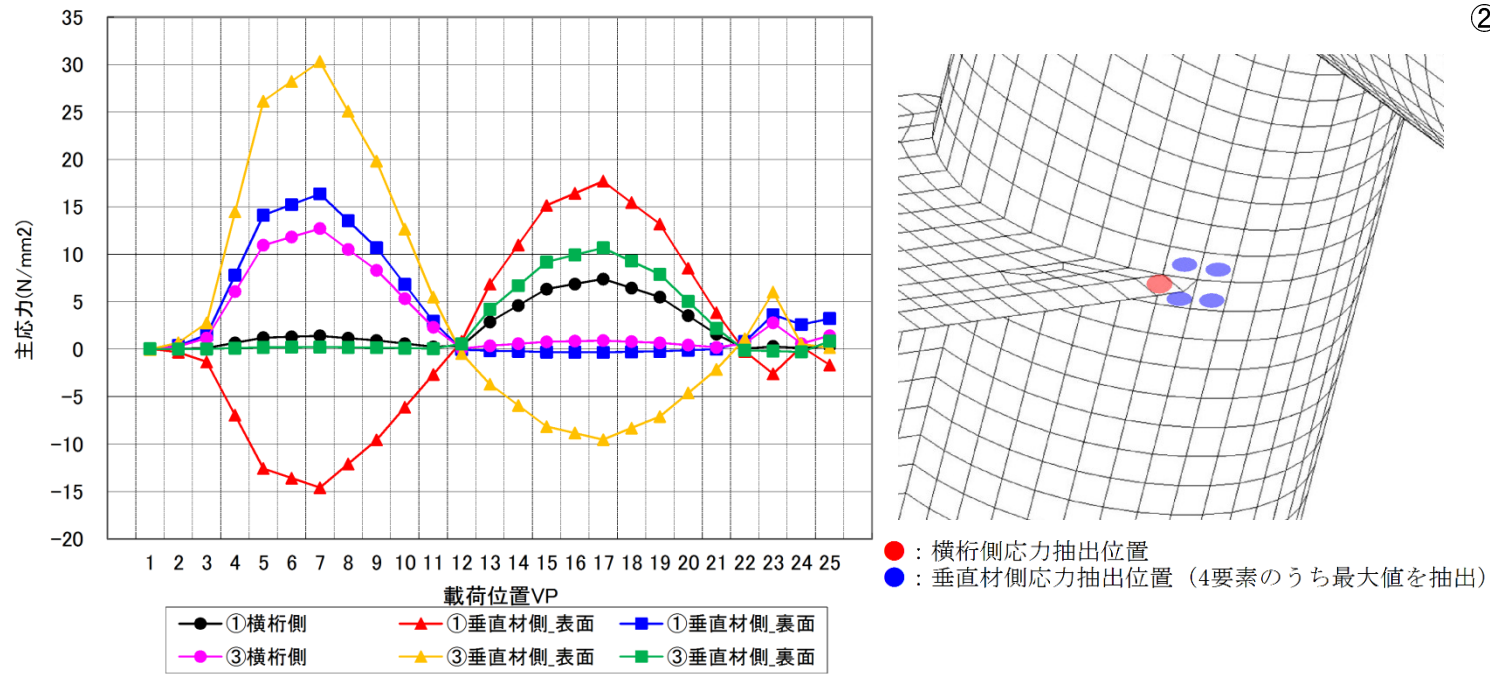


図-11 横桁と垂直材との接合部の応力変化 (VP25 主応力)

② ニーブレースおよびガセットと下弦材との接合部

シェル要素でモデル化を行ったニーブレースと下弦材の接合部の応力分布 (フォンミーゼスの相当応力) を図-13 に示す。また、荷重載荷位置とニーブレースと下弦材の接合部の応力度の変化を図-14 に、主応力を図-15 に示す。

■ 解析結果の特徴と傾向

- ・ ニーブレースと下弦材の接合部の下弦材側に線状の応力集中が生じている。(亀裂の発生箇所と一致している)
- ・ ニーブレースと下弦材の接合部の応力は、ニーブレースより下弦材側が大きくなっている。(図-13)
- ・ 下から荷重が作用する支点部 (VP1, VP25)、支柱部 (VP3, 23) の応力度が大きくなっている。(図-13)
- ・ 応力集中の応力度は、横桁直上に荷重載荷された時が最大となっている。(図-14)
- ・ 下弦材の応力は、鋼板表裏で符号が反転しており、板曲げが発生している。(図-14)
- ・ 下弦材の応力度の変化は、ニーブレース応力度と同じ変化をしている。(図-14)
- ・ ニーブレースと下弦材の接合部の下弦材側の主応力が亀裂の方向と一致している。(図-15)

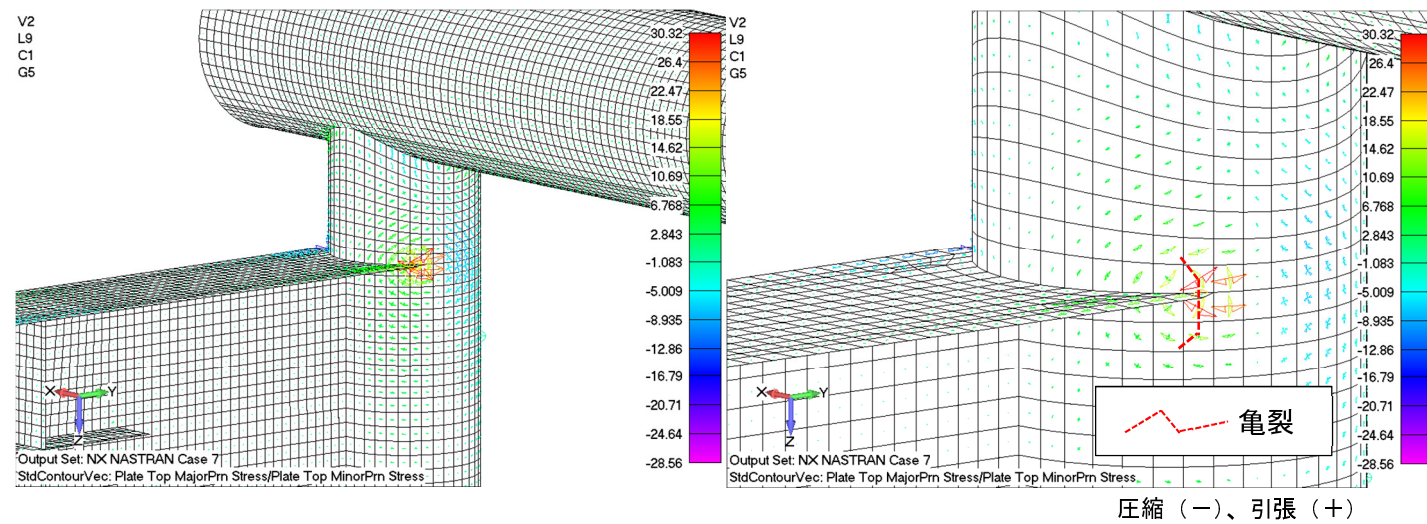


図-12 横桁上フランジと垂直材の接合部 (VP25 主応力)

	起点側	終点側		起点側	終点側														
V P R 19	<p>⑤16N/mm2 (26N/mm2) ⑦10N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 4 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP19 載荷時</p> <p>亀裂なし</p> <p>ニーブレース⑤、ガセット⑦</p>	<p>⑥15N/mm2 (24N/mm2) ⑧10N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 4 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP19 載荷時</p> <p>亀裂なし</p> <p>ニーブレース⑥、ガセット⑧</p>	<ul style="list-style-type: none"> ここでは亀裂は生じていない。 解析では、ニーブレースのフランジに沿って応力集中が見られるが、亀裂の生じているVPR23,25より応力の値は小さい 	<ul style="list-style-type: none"> ここでは亀裂は生じていない。 解析では、ニーブレースのフランジに沿って応力集中が見られるが、亀裂の生じているVPR23,25より応力の値は小さい 	V P R 23	<p>⑤12N/mm2 (40N/mm2) ⑦15N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 2 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP23 載荷時</p> <p>ニーブレース⑤、ガセット⑦ (VPR3)</p>	<p>⑥11N/mm2 (41N/mm2) ⑧15N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 2 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP23 載荷時</p> <p>ニーブレース⑥、ガセット⑧ (VPR3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂の生じているニーブレースフランジ、ガセットプレートに沿って、解析でも応力集中が見られる。 	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂の生じているニーブレースフランジ、ガセットプレートに沿って、解析でも応力集中が見られる。 	V P R 21	<p>⑤15N/mm2 (26N/mm2) ⑦9N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 1 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP21 載荷時</p> <p>亀裂なし</p> <p>ニーブレース⑤、ガセット⑦</p>	<p>⑥12N/mm2 (24N/mm2) ⑧9N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 1 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP21 載荷時</p> <p>亀裂なし</p> <p>ニーブレース⑥、ガセット⑧</p>	<ul style="list-style-type: none"> ここでは亀裂は生じていない。 解析では、ニーブレースのフランジに沿って応力集中が見られるが、亀裂の生じているVPR23,25より応力の値は小さい 	<ul style="list-style-type: none"> ここでは亀裂は生じていない。 解析では、ニーブレースのフランジに沿って応力集中が見られるが、亀裂の生じているVPR23,25より応力の値は小さい 	V P R 25	<p>⑤113N/mm2 (172N/mm2) ⑦50N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 3 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP25 載荷時</p> <p>ニーブレース⑤ ガセット⑦</p>	<p>⑥114N/mm2 (173N/mm2) ⑧51N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 3 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP25 載荷時</p> <p>ニーブレース⑥ ガセット⑧</p>	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂の生じているニーブレースフランジ、ガセットプレートに沿って、解析でも応力集中が見られる。 	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂の生じているニーブレースフランジ、ガセットプレートに沿って、解析でも応力集中が見られる。
V P R 21	<p>⑤15N/mm2 (26N/mm2) ⑦9N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 1 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP21 載荷時</p> <p>亀裂なし</p> <p>ニーブレース⑤、ガセット⑦</p>	<p>⑥12N/mm2 (24N/mm2) ⑧9N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 1 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP21 載荷時</p> <p>亀裂なし</p> <p>ニーブレース⑥、ガセット⑧</p>	<ul style="list-style-type: none"> ここでは亀裂は生じていない。 解析では、ニーブレースのフランジに沿って応力集中が見られるが、亀裂の生じているVPR23,25より応力の値は小さい 	<ul style="list-style-type: none"> ここでは亀裂は生じていない。 解析では、ニーブレースのフランジに沿って応力集中が見られるが、亀裂の生じているVPR23,25より応力の値は小さい 	V P R 25	<p>⑤113N/mm2 (172N/mm2) ⑦50N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 3 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP25 載荷時</p> <p>ニーブレース⑤ ガセット⑦</p>	<p>⑥114N/mm2 (173N/mm2) ⑧51N/mm2 ()内は、ニーブレースの応力を示す</p> <p>Output Set: NX NASTRAN Case 3 Elemental Contour: Plate Top VonMises Stress</p> <p>活荷重載荷位置：VP25 載荷時</p> <p>ニーブレース⑥ ガセット⑧</p>	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂の生じているニーブレースフランジ、ガセットプレートに沿って、解析でも応力集中が見られる。 	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂の生じているニーブレースフランジ、ガセットプレートに沿って、解析でも応力集中が見られる。 										

図-13 ニーブレースの応力分布 (フォンミーゼスの相当応力)

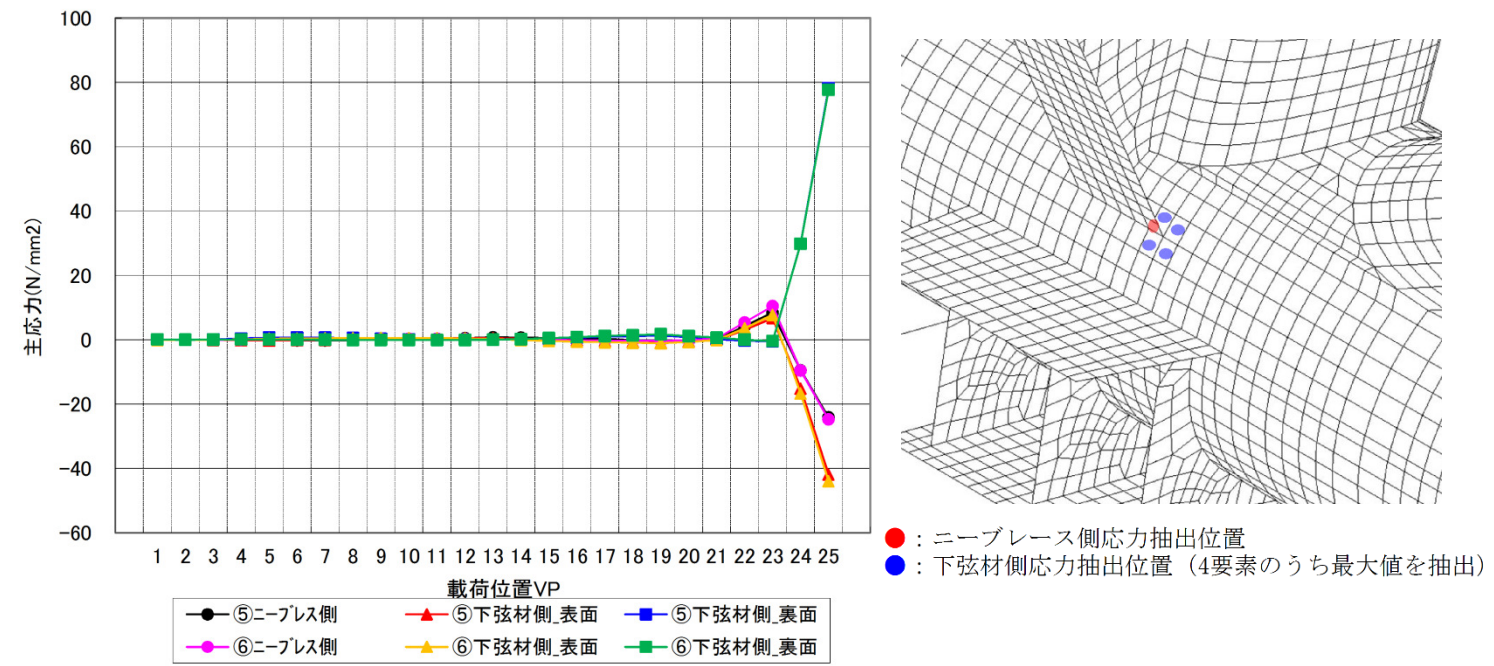


図-14 ニープレスと下弦材との接合部の応力変化 (VP25 主応力)

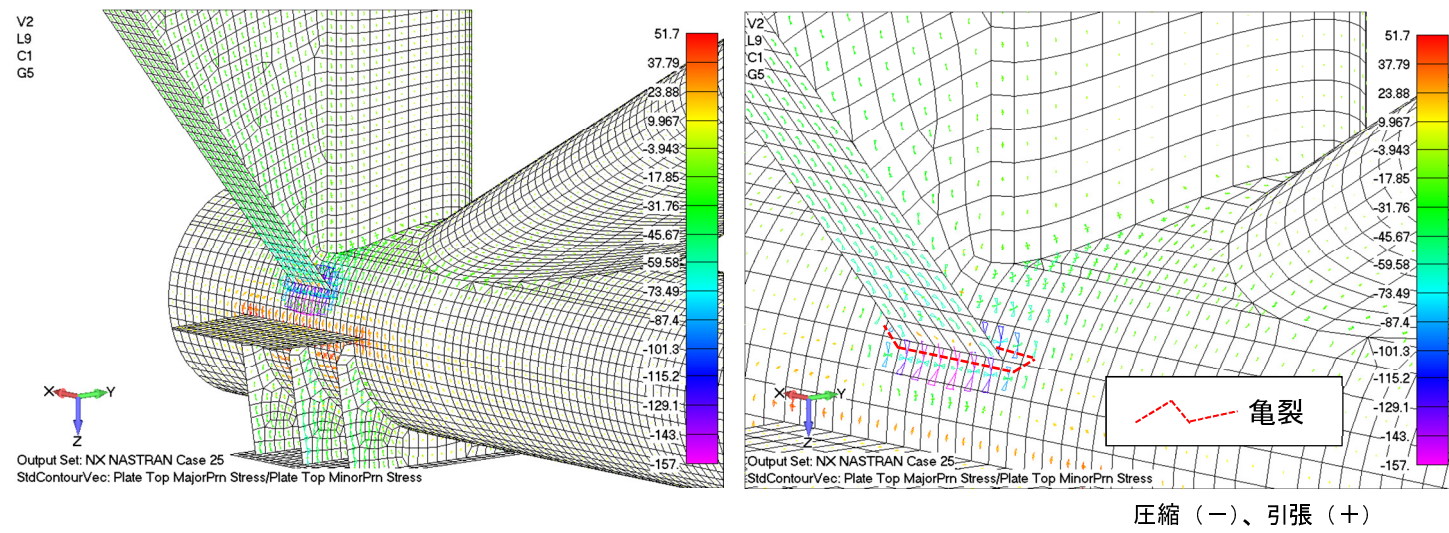


図-15 ニープレスと下弦材の接合部 (VP25 主応力)

3. 亀裂発生要因の特定

(1) 横桁上下フランジ①③、②④

横桁と垂直材との接合部に生じている亀裂の要因として、以下のことが考えられる。

- ・ 梁要素を用いた構造解析（応力計算）より、主構と床板・床組との間に橋軸方向に相対変位（荷重がアーチ支間の1/4付近に荷重された時に変位最大となる）が発生し、主構と縦桁を繋ぐ横桁に面外方向曲げが作用し二次応力が発生している。
- ・ 梁要素+シェル要素を用いた構造解析（応力計算）より、横桁フランジの応力によって、垂直材に板曲げが生じ、応力集中が発生している（図-16）。
- ・ 解析結果より算出した応力範囲を用いた応力度による疲労照査の結果（47年間の累積損傷度）と亀裂の箇所が一致する（表-3）。

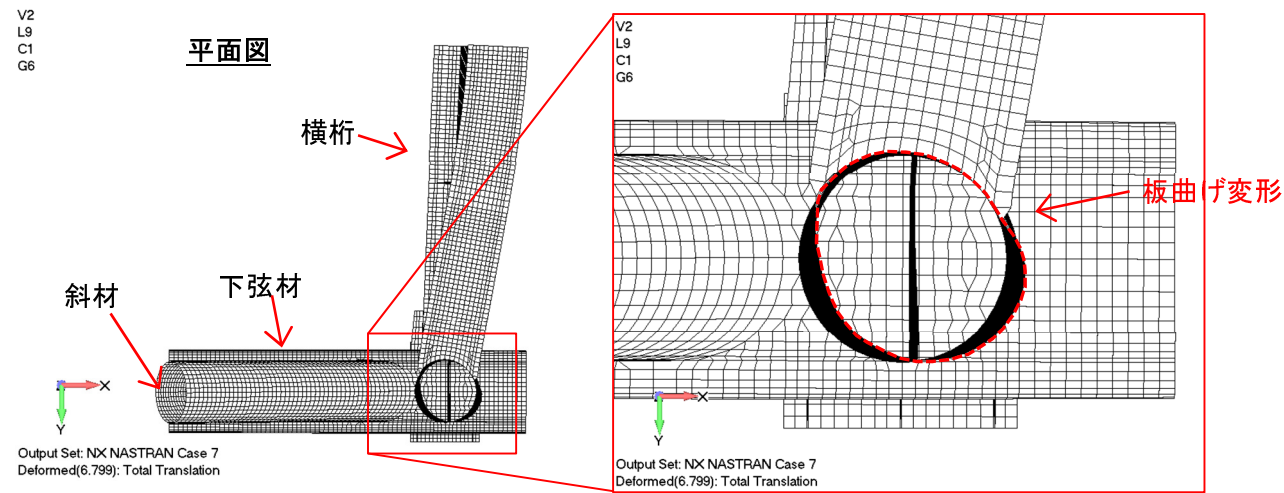


図-16 垂直材と横桁の接続部の変形図（上フランジ位置での垂直材の断面図）

(2) ニーブレス⑤⑥、ガセットプレート⑦⑧

ニーブレスおよび横構ガセットと下弦材との接合部に生じている亀裂の要因として、以下のことが考えられる。

- ・ 梁要素+シェル要素を用いた構造解析（応力計算）より、横桁フランジの応力（荷重が横桁直上に荷重された時が最大応力となる）によって、下弦材に板曲げが生じ、応力集中が発生している（図-17）。
- ・ 下弦材の下方から荷重を受ける構造で、リブが配置されていることによって、下弦材の変形可能な範囲が狭くなり、板曲げの曲率が大きくなった（図-17）。
- ・ 解析結果より算出した応力範囲を用いた応力度による疲労照査の結果（47年間の累積損傷度）と亀裂の箇所が一致する（表-4）。

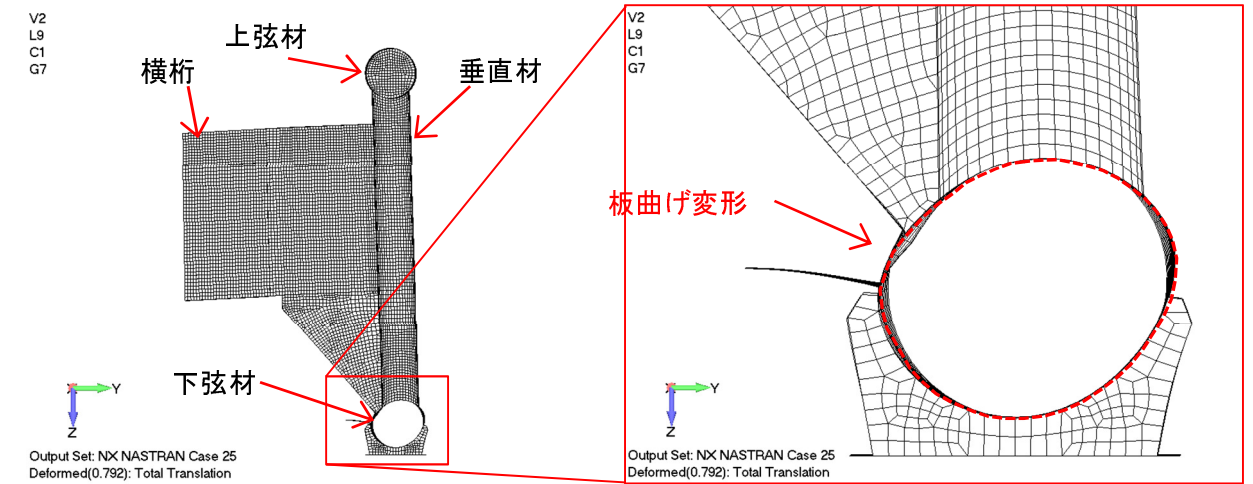


図-17 下弦材とニーブレスと接続部の変形図（ニーブレスウェブ位置での下弦材の断面図）

表-4 疲労照査結果（ニーブレス）

大型車交通量 (台/(日・車線))	期間 Y (年)	格点番号					
		25	23	21	19		
1000	41年	VPR	累積損傷度D1	2.23	0.88		
			判定 (Da<1.0)	OUT	OK		
357	48年	VPR	累積損傷度D2	0.15	0.06		
			累計 (D1+D2)	2.38	0.94		
			判定 (Da<1.0)	OUT	OK		

現在亀裂が生じている箇所

※空欄は応力範囲が打ち切り限界を超えない箇所
累積損傷度<1.0となる場合は亀裂の恐れなし