

# 恒久対策の方針

### Ⅲ. 恒久対策検討

#### 1. 恒久対策基本方針

恒久対策の検討フローを図-1.1 に示す。

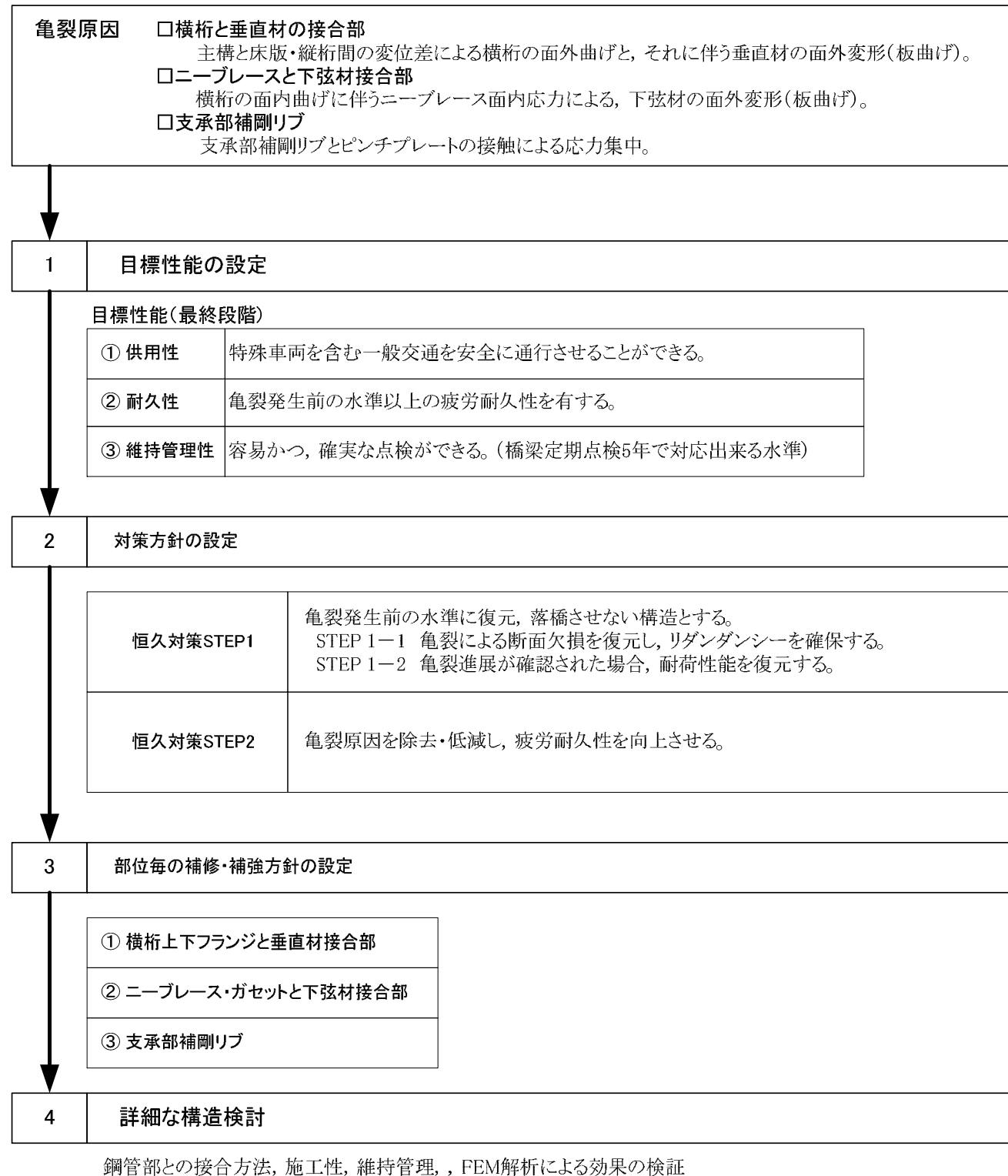


図-1.1 恒久対策検討フロー

#### 1-1. 目標性能の設定

恒久対策後の目標性能を次のように設定する。

- ① 供用性 特殊車両を含む一般交通を安全に通行させることができる。
- ② 耐久性 亀裂発生前の水準以上の疲労耐久性を有する。
- ③ 維持管理性 容易かつ、確実に定期点検ができる。(橋梁定期点検 5 年で対応出来る水準)

#### 1-2. 対策方針の設定

##### (1) 対策 STEP 毎の対策方針

恒久対策は、STEP1 と STEP2 の 2 段階に分けて考える。

##### 1) 恒久対策 STEP1

###### 対策方針

橋梁の性能(耐荷性能, 耐久性能)を亀裂発生前の水準に復元し、落橋させない構造とする。

###### 対策工の計画方針

- ・対策工と監視の組み合わせで安全性を確保する。
- ・元の構造系を変えない。
- ・現況に対する当面の対策(STEP1-1)と、その対策後に亀裂進展が確認された場合に行う対策(STEP1-2)に分けて計画する。

STEP1	STEP1-1	亀裂による断面欠損を復元し、リダンダンシーを確保する。
	STEP1-2	亀裂進展が確認された場合、耐荷性能を復元する。

###### 恒久対策 STEP1 の目標性能

- ① 供用性……………一般交通を安全に通行させることができる。
- ② 耐久性……………亀裂発生前の水準と同等の疲労耐久性を有する。
- ③ 維持管理性………定期的に亀裂が観察できる。

##### 2) 恒久対策 STEP2

###### 対策方針

亀裂原因を除去・低減し、疲労耐久性を向上させる。

###### 対策工の計画方針

- ・亀裂原因毎に、原因を除去・低減できる構造とする。
- ・活荷重に対する応力が増加せず、疲労耐久性が向上する構造とする。

###### 恒久対策 STEP2 の目標性能

- ① 供用性……………特殊車両を含む一般交通に対して耐荷力を有する。  
※耐震性能：H24 道示レベルの耐震性能を確認
- ② 耐久性……………亀裂発生前の水準と比較して、疲労耐久性が向上している。
- ③ 維持管理性………容易かつ、確実に定期点検ができる。(橋梁定期点検 5 年で対応出来る水準)

## 2. 恒久対策 STEP1

### 2-1. 対策実施フロー

恒久対策 STEP1 の対策実施シナリオを図-2.1 のフロー図に示す。

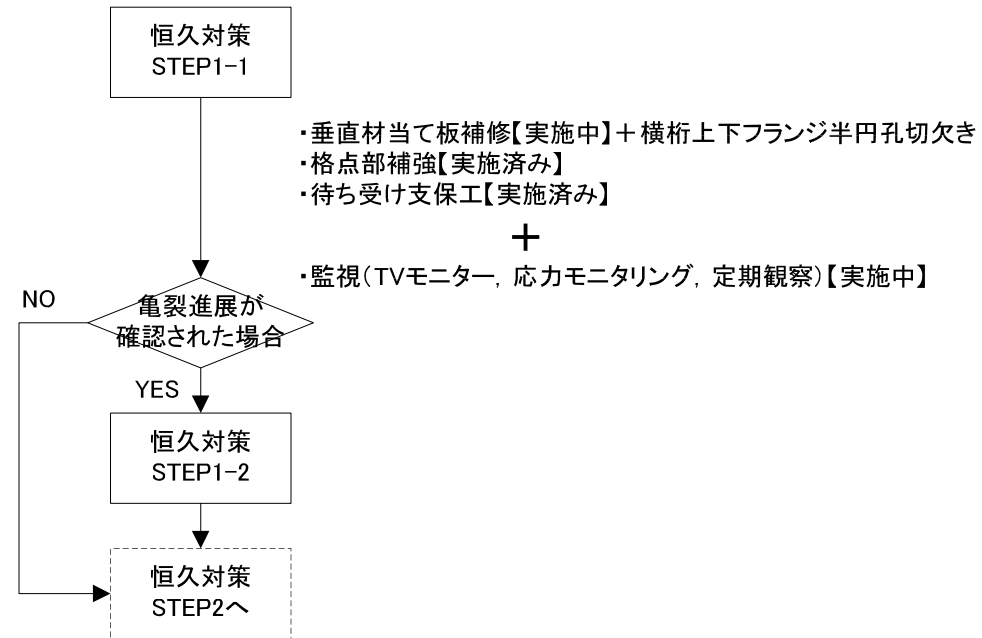


図-2.1 恒久対策 STEP1 フロー図

### 2-2. 恒久対策 STEP1-1

#### 2-2-1. 対策方針

恒久対策 STEP1-1 の対策項目は次のとおりとする。対策位置図を図-2.2 に示す。

断面欠損部位の復元 : 亀裂への当て板補修, 横桁上下フランジ半円孔切欠き(構造ディテールの改良)

リダンダンシーの確保 : 亀裂への当て板補修(バイパス部材として機能), 待ち受け工, 格点部補強

監視 : TVモニター, 応力モニタリング, 定期観察

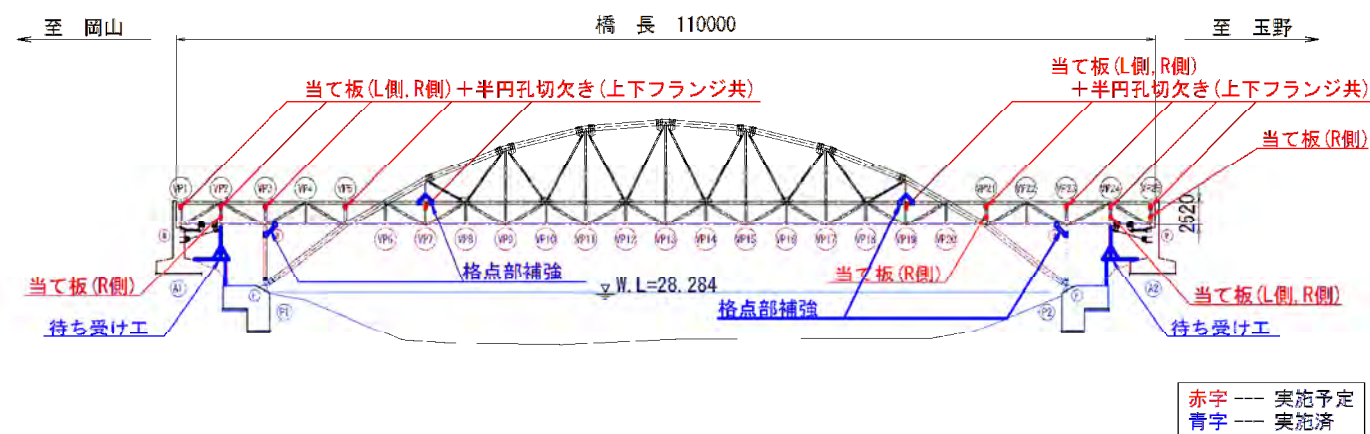


図-2.2 恒久対策 STEP1 位置図

#### 2-2-2. 待ち受け工【実施済み】

万が一亀裂が大きく進展した場合でも、走行車両に重大な影響を与えないようにするため、待ち受け工を設置。(写真-2.1)。



(a) 下弦材を支持する待ち受け工



(b) 端横桁を支持する待ち受け工

写真-2.1 待ち受け工

#### 2-2-3. 格点部補強【実施済み】

解析により高い局部応力が発生すると推定された8つの格点(VP19及びVP23並びにVP7及びVP3, 上下線)に対して、当該格点が万が一にも機能不全に至ることの無いよう吊材と上弦材, アーチ支柱と下弦材の接合部を鋼材で局所暫定的に補強(写真-2.2)。



(a) アーチ支柱と下弦材接合部の格点部補強



(b) 端部吊材と上弦材接合部の格点部補強

写真-2.2 格点部補強



2-2-4. 垂直材当て板補修

(1) 基本方針

横桁上下フランジと垂直材接合部では、図-2.3 に示すような亀裂の進展が想定されるが、このような場合でも部材が破断することのないよう、垂直材の断面欠損分の力を伝達するバイパス部材として、当て板を設置し、リダンダンシーを確保する。



(a) 上フランジ上面 (b) 上フランジ下面  
図-2.3 横桁上フランジ接合部で想定される亀裂の進展

(2) 設置位置

垂直材当て板の設置位置は、表-2.1、図-2.4 に示す亀裂の発生箇所（SH, 切削除去を含む）とする。

表-2.1 亀裂発生箇所一覧表

位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
①、③ VPL																									
VPR																									
②、④ VPL																									
VPR																									
⑤、⑥ VPL																									
VPR																									
⑦、⑧ VPL																									
VPR																									

: 未対策亀裂箇所  
 : 亀裂削り取りにて消去箇所【応急対策】  
 : ストップホール実施箇所【応急対策】

※VPR25は下記の3パターンの亀裂が発生  
 ⑤ 回し溶接部...亀裂が母材まで進展しストップホール実施  
 垂直材と下弦材の接合部...切削により亀裂除去  
 ⑥ 回し溶接部...亀裂未対策(ビードに沿った亀裂)

... 垂直材当て板設置範囲

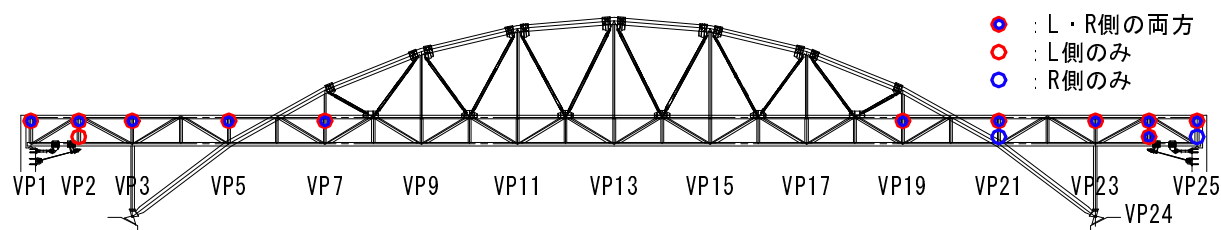


図-2.4 当て板補修箇所

(3) 構造概要

当て板の基本構造は図-2.5 とし、亀裂の形状に応じて図-2.6 に示す 3 種類を設置する。

- ・横桁上フランジより上部の当て板に観察孔を設置するタイプ (A1)
- ・横桁上フランジより上部の当て板に切欠きを設置するタイプ (A2)
- ・横桁下フランジ部に設置するタイプ (B)

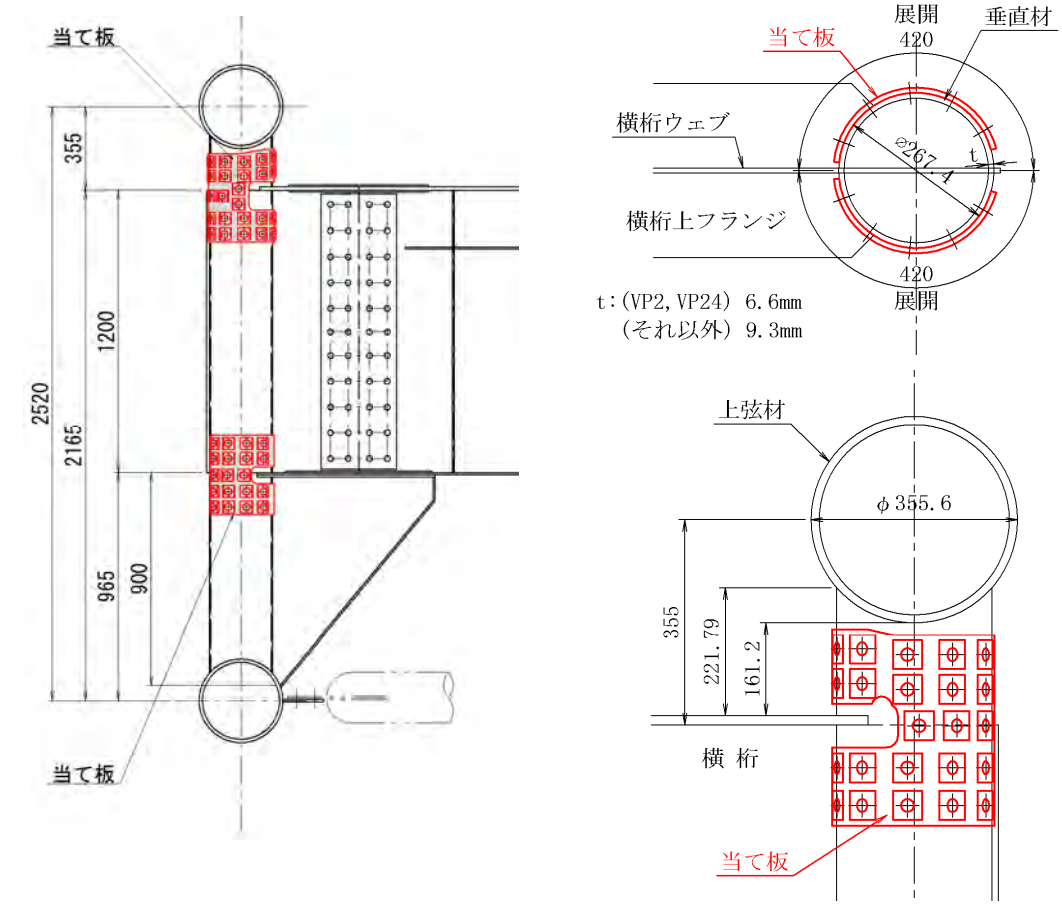


図-2.5 当て板基本構造

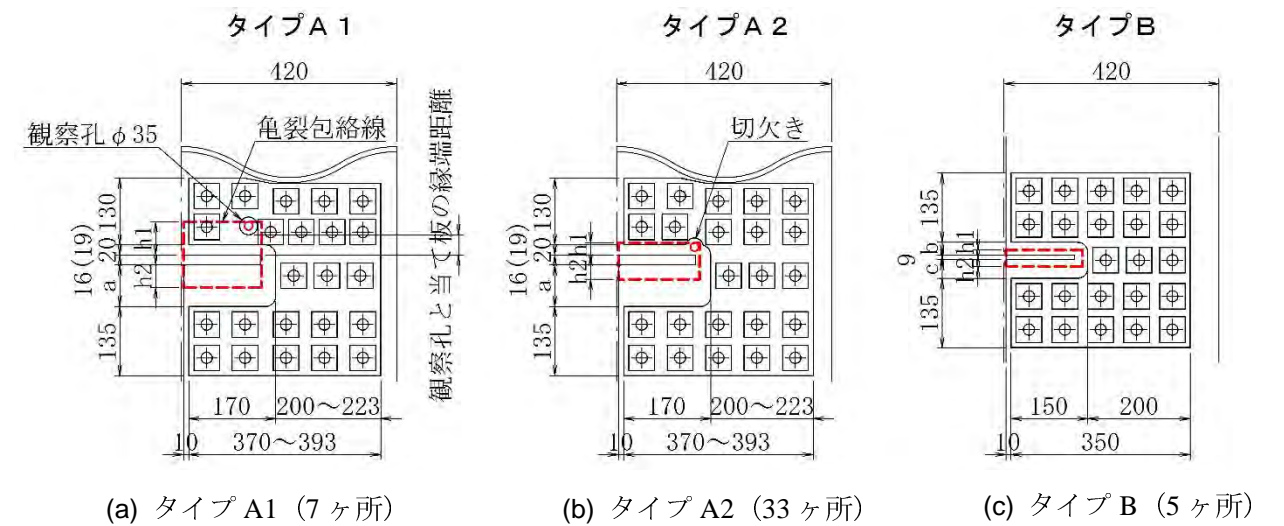


図-2.6 当て板形状

## 2-2-5. 横桁上下フランジ半円孔切欠き

### (1) 概要

横桁上下フランジと垂直材接合部について、応力集中を低減させるため、構造ディテールの改良案として、横桁フランジ端部（垂直材との接合部の近傍）に半円孔を設置することを考える。

半円孔は、図-2.7 に示す形状とする。亀裂が発生している格点を対象として、上下フランジとも半円孔を設置する。

※横桁フランジと垂直材接合部の亀裂は上フランジのみに発生している格点が多いが、上フランジのみに半円孔を設置すると下フランジ側の応力負担が増加する懸念がある。

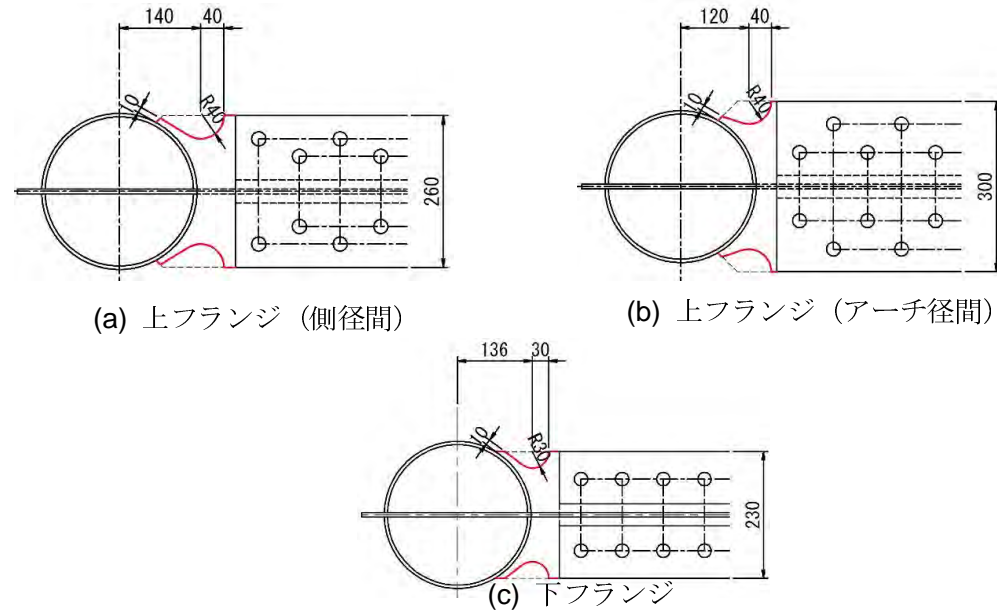


図-2.7 横桁上下フランジ半円孔設置形状

### ■半円孔の形状の考え方

半円孔の形状は、研究機関においても様々な検討がなされており、既往文献にその代表例が示されている（図-参 2.1）。本橋では代表例を踏まえて、半円孔は、溶接ビードを削らないように垂直材と横桁との離隔を 10 mm，半径を可能な限り大きくすることを基本とした。

#### 鋼橋の疲労対策技術，土木学会，2013（抜粋）

半円孔の円孔径を大きくすれば溶接部の応力低減効果が高いが、円孔壁の応力が増加することが分かっている。（中略）なお、阪神高速道路では、半円孔上端とデッキプレート下面との離隔は 20mm 程度を標準とし、半円孔の半径は垂直補剛材幅の 3/4 程度を原則としている。

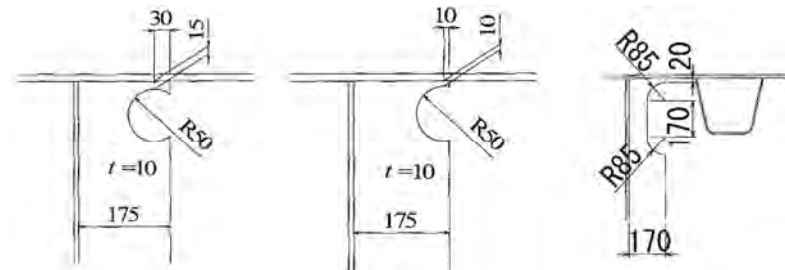


図-参 2.1 半円孔設置形状の例

### (2) 応力低減の効果

横桁上下フランジへの半円孔の設置効果を確認するため、T 荷重移動荷による横桁フランジと垂直材接合部の応力波形を整理する。

#### 1) 解析条件

解析モデル：全体解析（梁要素+シェル要素）モデル

i) 格点部補強+当て板設置モデル（半円孔設置前）

ii) 格点部補強+当て板設置モデル（半円孔設置後）

荷重条件：T 荷重，VP1～VP25 移動荷 ※応力波形を確認するため T 荷重を各格点に荷重

応力抽出位置：横桁上下フランジと垂直材接合部

#### 2) 解析結果

半円孔設置前後の横桁上フランジと垂直材接合部の応力波形を図-2.8 に示す。図-2.8 より、半円孔の設置により、応力振幅が 50%程度低減されることが解る。

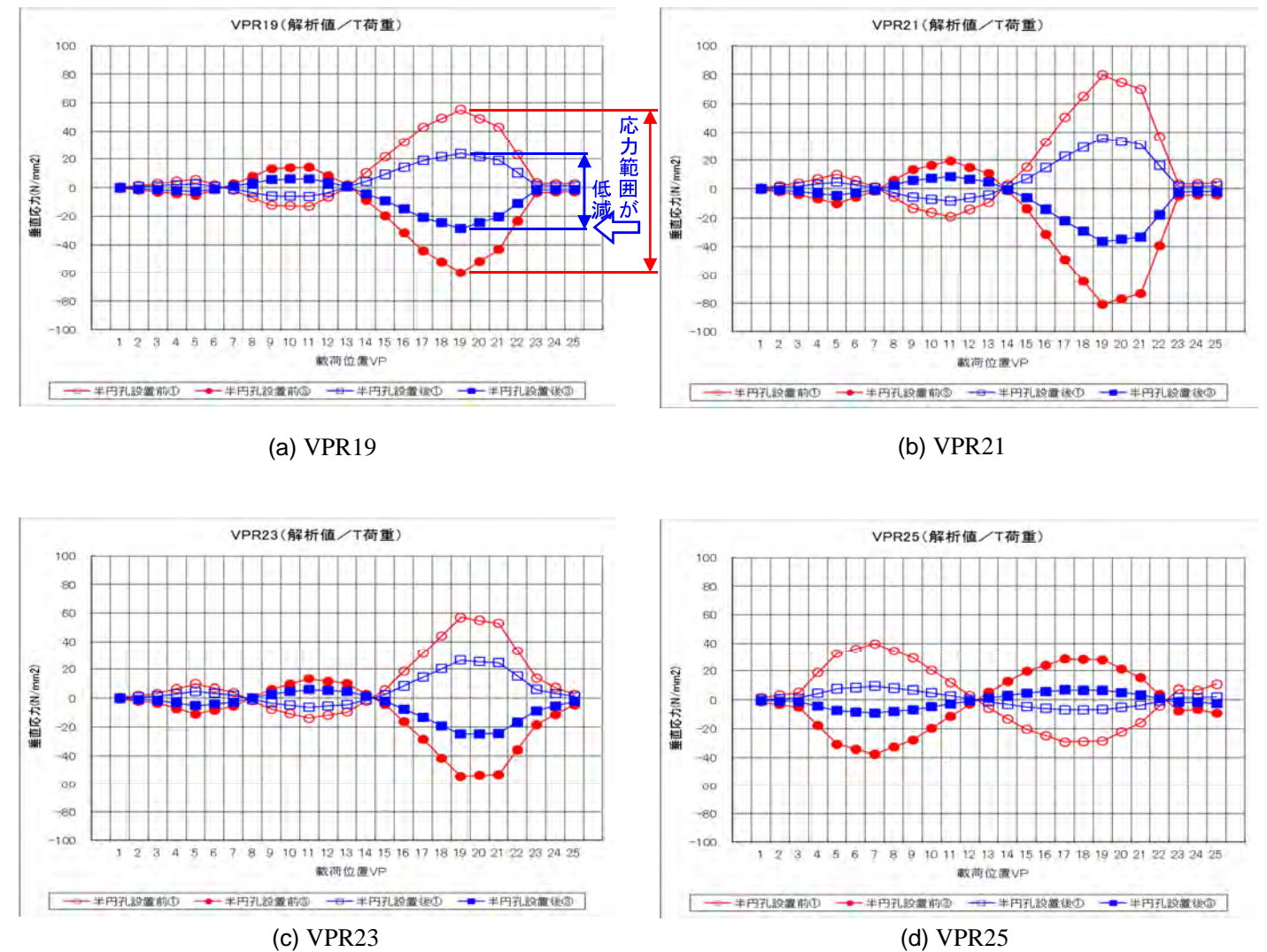


図-2.8 半円孔設置前後の応力波形（横桁上フランジと垂直材接合部）



(3) 部材応力の確認

半円孔設置後の構造について、活荷重に対する応力状態を確認する。

1) 解析条件

解析モデル : 全体解析 (梁要素+シェル要素) モデル

- i) 格点部補強+当て板設置モデル (半円孔設置前)
- ii) 格点部補強+当て板設置モデル (半円孔設置後)

荷重条件 : i) 死荷重+B 活荷重 (L 荷重)・・・道路橋示方書による設計荷重  
 ii) 死荷重+T 荷重・・・25 t 車相当の荷重

2) 解析結果

解析結果を表-2.2, 表-2.3, 上フランジ側の応力状態を図-2.9, 図-2.10 に示す。半円孔の設置により、横桁上下フランジと垂直材接合部の応力は、B 活荷重 (L 荷重) に対しては降伏を超えるものの、T 荷重 (25t 車相当) に対して降伏応力以下となり、半円孔設置前から大幅に改善される。

表-2.2 上フランジ接合部応力照査結果

荷重条件	フランジ接合部応力		許容応力度	降伏応力度
	半円孔設置前	半円孔設置後		
死荷重+B 活荷重 (L 荷重)	496 N/mm <sup>2</sup>	245 N/mm <sup>2</sup>	140 N/mm <sup>2</sup>	235 N/mm <sup>2</sup>
死荷重+T 荷重	299 N/mm <sup>2</sup>	148 N/mm <sup>2</sup>		

材料：垂直材 STK400 相当 (SM400), 板厚 9.3 mm

表-2.3 下フランジ接合部応力照査結果

荷重条件	フランジ接合部応力		許容応力度	降伏応力度
	半円孔設置前	半円孔設置後		
死荷重+B 活荷重 (L 荷重)	211 N/mm <sup>2</sup>	101 N/mm <sup>2</sup>	140 N/mm <sup>2</sup>	235 N/mm <sup>2</sup>
死荷重+T 荷重	128 N/mm <sup>2</sup>	63 N/mm <sup>2</sup>		

材料：垂直材 STK400 相当 (SM400), 板厚 9.3 mm

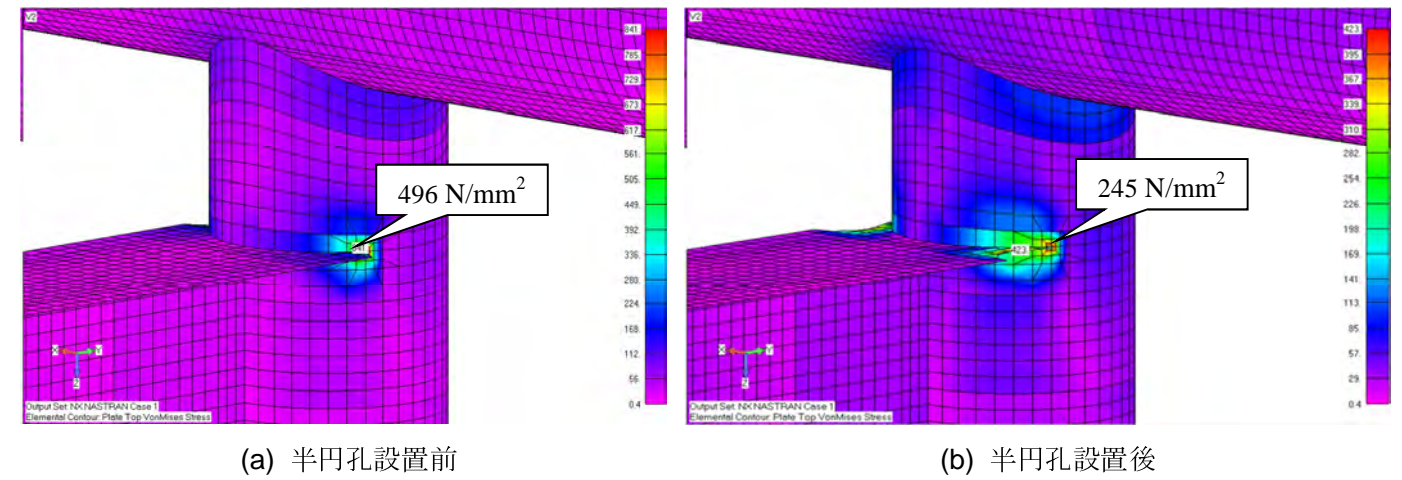


図-2.9 死荷重+B 活荷重 (L 荷重)

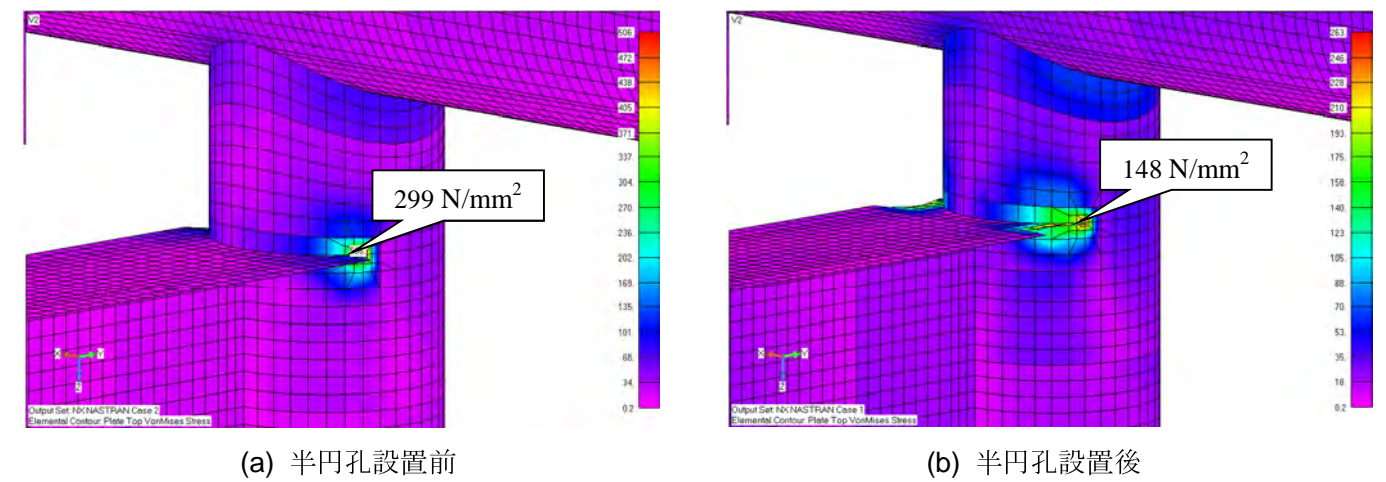


図-2.10 死荷重+T 荷重

#### (4) 疲労照査

半円孔設置後の構造について疲労照査を行う。現在から竣工後 100 年までの 52 年間について、半円孔を設置しない場合と半円孔を設置する場合それぞれの累積損傷度を比較し、疲労耐久性を確認する。

##### 1) 疲労照査条件

解析モデル：全体解析（梁要素＋シェル要素）モデル，格点補強＋当て板設置モデル（半円孔設置後）

荷重条件：T 荷重，VP1～VP25 移動荷重

照査期間：52 年（現在～竣工後 100 年）

照査応力：ホットスポット的応力

照査位置：横桁上下フランジと垂直材接合部の応力集中箇所（フランジ回し溶接部）

##### 2) 疲労照査結果

疲労照査結果を表-2.4、表-2.5 に示す。フランジに半円孔を設置することで、フランジ側の垂直材の応力範囲は大幅に減少し、上フランジ側では 52 年間での累積疲労損傷度は 8 割以上低減、下フランジ側では一定振幅応力打ち切り限界以下まで応力範囲が減少する。

表-2.4 疲労照査結果（VPR21 上フランジ），F 等級（一定振幅応力打ち切り限界  $\Delta \sigma_{ce}=46 \text{ N/mm}^2$ ）

	照査期間 Y (年)	応力範囲 $\Delta \sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	累積損傷度 D
当て板	52	94.8	8.38
当て板＋半円孔切欠き	52	48.0 (0.51)	1.09 (0.13)

( ) 内は、当て板を1.0とした場合の比率を示す

表-2.5 疲労照査結果（VPR21 下フランジ），F 等級（一定振幅応力打ち切り限界  $\Delta \sigma_{ce}=46 \text{ N/mm}^2$ ）

	照査期間 Y (年)	応力範囲 $\Delta \sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	累積損傷度 D
当て板	52	36.4	0.47
当て板＋半円孔切欠き	52	13.90 (0.38)	- (-)

( ) 内は、当て板を1.0とした場合の比率を示す

#### (5) 評価

横桁上下フランジへの半円孔の設置により、活荷重による応力範囲を 50%程度に低減できる。これにより、上フランジについては竣工後 100 年までの累積損傷度を 8 割以上低減でき、下フランジについては応力範囲を打ち切り限界以下まで低減でき、疲労耐久性の大幅な向上が期待できる。

部材応力については、半円孔設置前から大幅に改善され、T 荷重（25t 車相当）に対して応力集中部においても降伏を超過する応力は生じない。

以上より、横桁上下フランジへの半円孔の設置により目標性能を満足させることができる。

2-3. 恒久対策 STEP1-2

2-3-1. 対策方針

- 亀裂進展時に実施する対策である、恒久対策 STEP1-2 の対策項目は次のとおりとする。
- 耐荷性能の復元 : 亀裂進展位置に応じた対策工 (当て板, 増桁, 待ち受け工等の追加設置)
  - 橋梁への負荷軽減 : 通行規制
  - 監視 : TV モニター, 応力モニタリング, 高頻度の定期観察

2-3-2. 対策工の計画方針

恒久対策 STEP1-1 を実施後, 継続監視をする中で亀裂の進展が確認された場合の対応として, 亀裂箇所毎に対策工を抽出する (図-2.11)。

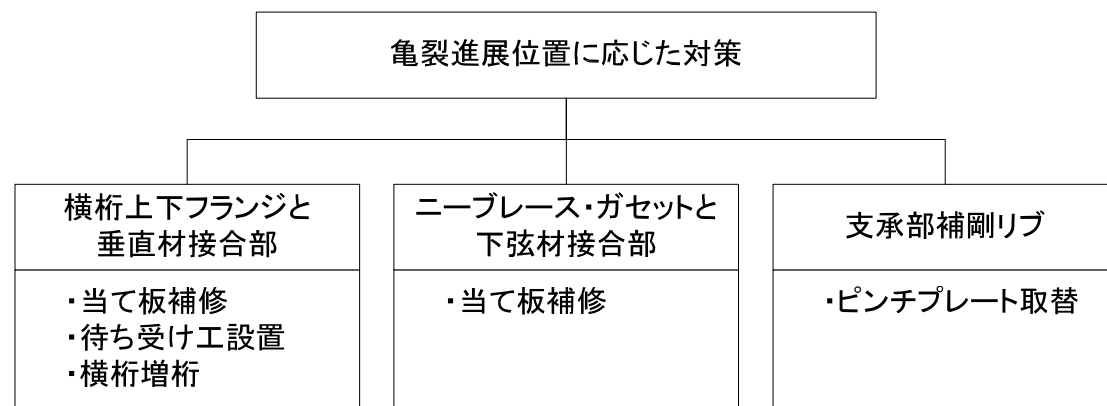
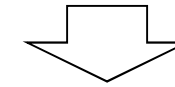


図-2.11 対策工の抽出

2-3-3. 横桁上下フランジと垂直材接合の亀裂進展に対する対応案

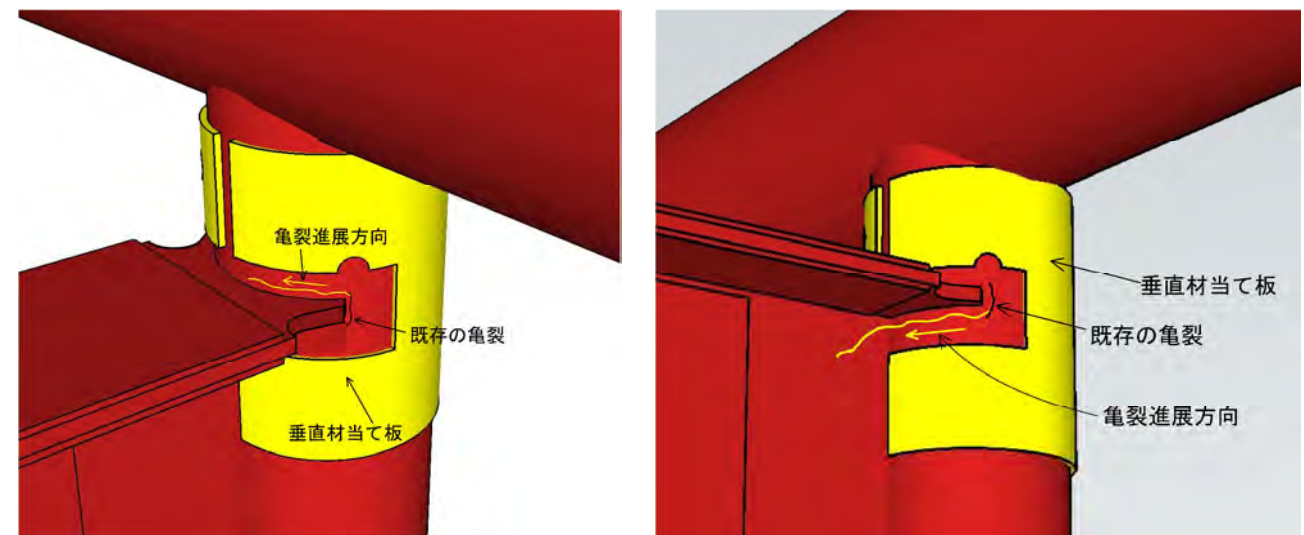
(1) 想定される亀裂の進展

横桁フランジと垂直材接合部に想定される亀裂進展方向を図-2.12 に示す。横桁と垂直材の接合部では下フランジ側接合部に対して上フランジ側接合部の応力範囲が3倍以上大きく (表-2.4, 表-2.5, p6), 上フランジ側の亀裂の方が進展する可能性が高い。進展方向は, 横桁フランジ両端の溶接ビードに沿って進展していくことが想定される。



対策案として次の3案を計画する

- 対策案1 : 亀裂の進展した横桁に隣接する格点, またはその近くに横桁を増桁。  
活荷重分担を低減。
- 対策案2 : ウェブに進展した亀裂に対して当て板を設置。
- 対策案3 : 亀裂の進展した横桁を支持する待ち受け工を設置。



(a) 上フランジ上面

(b) 上フランジ下面

図-2.12 横桁フランジと垂直材接合部に想定される亀裂進展方向



(2) 横桁増桁案

1) アーチ径間の横桁

アーチ径間は、奇数格点に横桁が設置されている。亀裂の進展により横桁の機能が低下した場合には、隣接する偶数格点に横桁を増設する。

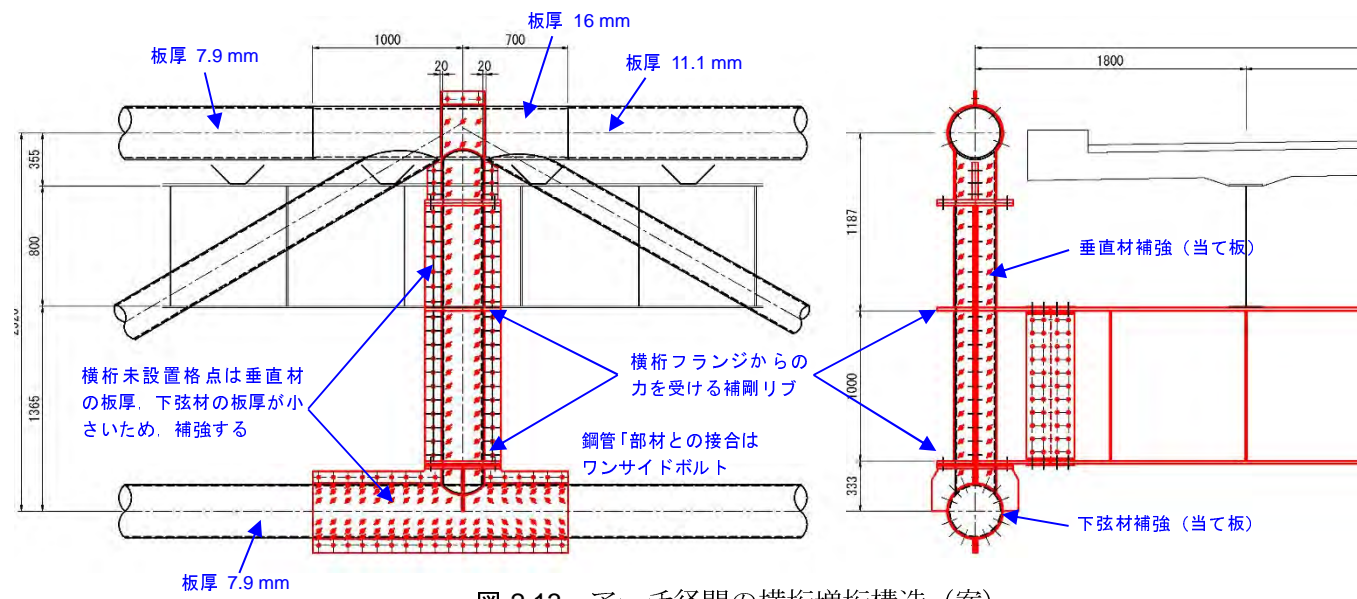


図-2.13 アーチ径間の横桁増桁構造 (案)

<設置位置 (例)>

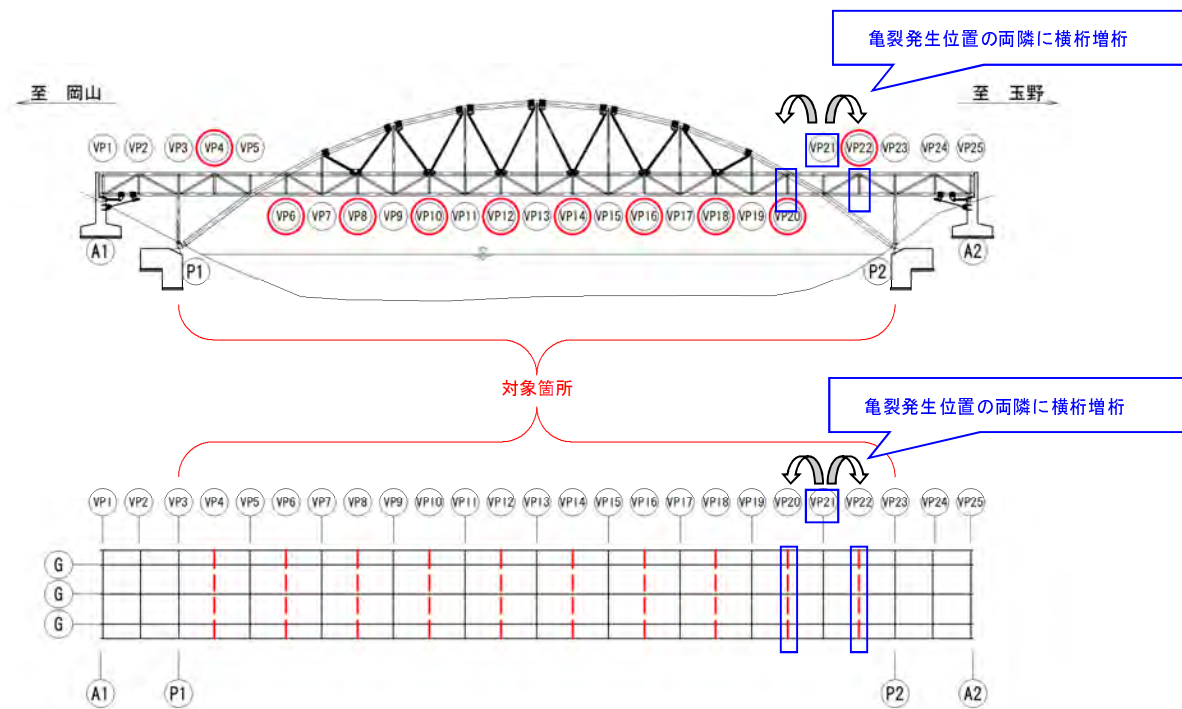


図-2.14 VP21 で亀裂進展が確認された場合の横桁増桁位置

2) 側径間の横桁

側径間は、全ての格点に横桁が設置されている。よって、亀裂の進展により横桁の機能が低下した場合には、端部格点近傍に垂直材を新たに設け、横桁を増桁する。

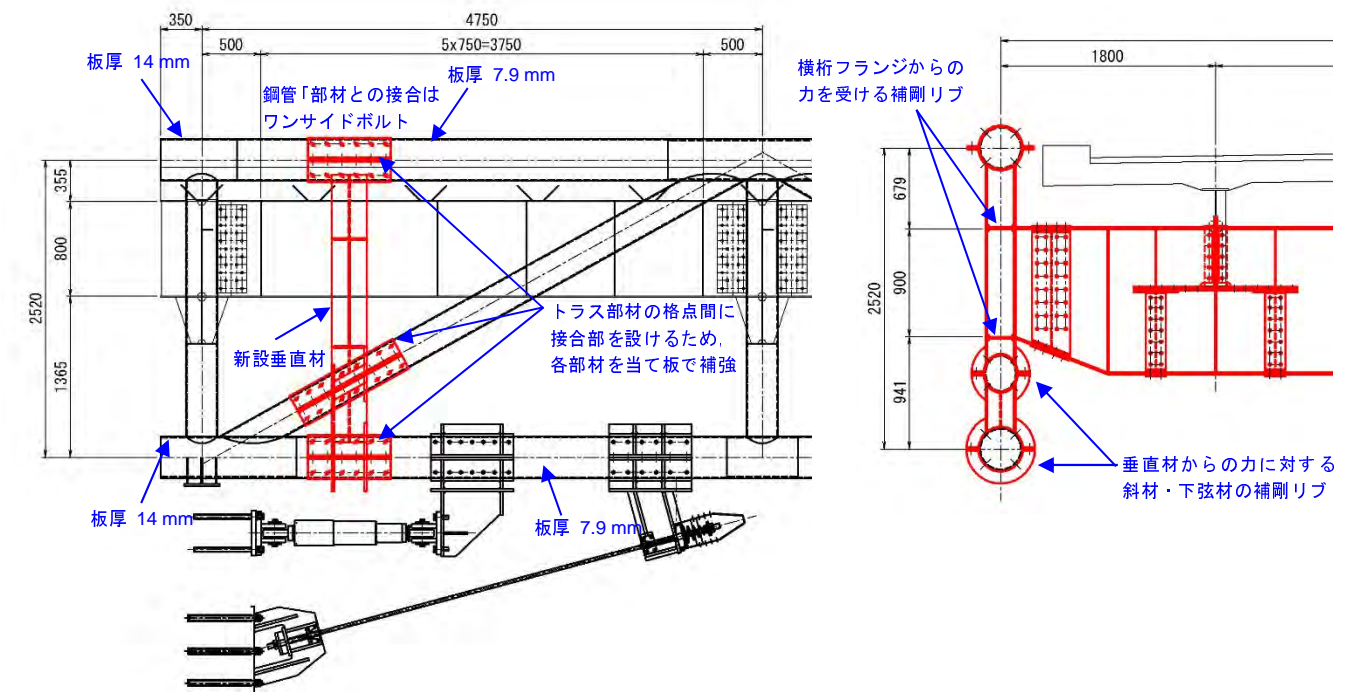


図-2.15 側径間の横桁増桁構造 (案)

<設置位置 (例)>

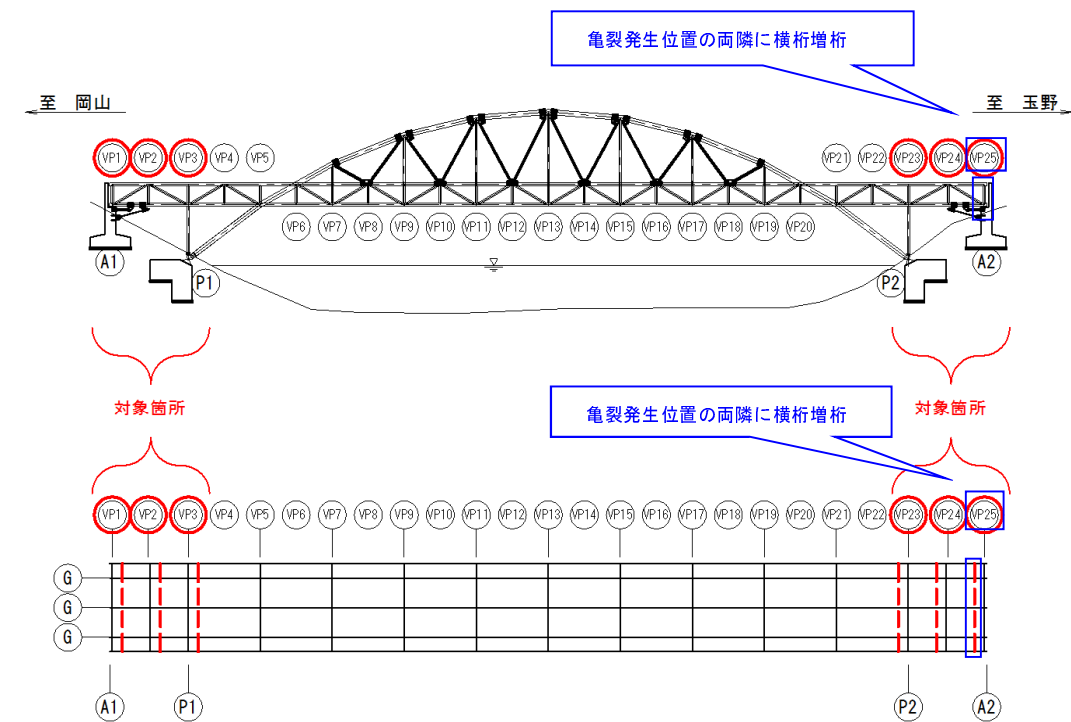


図-2.16 VP25 で亀裂進展が確認された場合の横桁増桁位置

(3) 横桁ウェブ当て板補修案

横桁ウェブまで亀裂が進展した場合、それ以上の進展を防ぎ、横桁の機能の損失を防止するために、亀裂先端にストップホール設置後、横桁ウェブに当て板を設置する（図-2.17）。

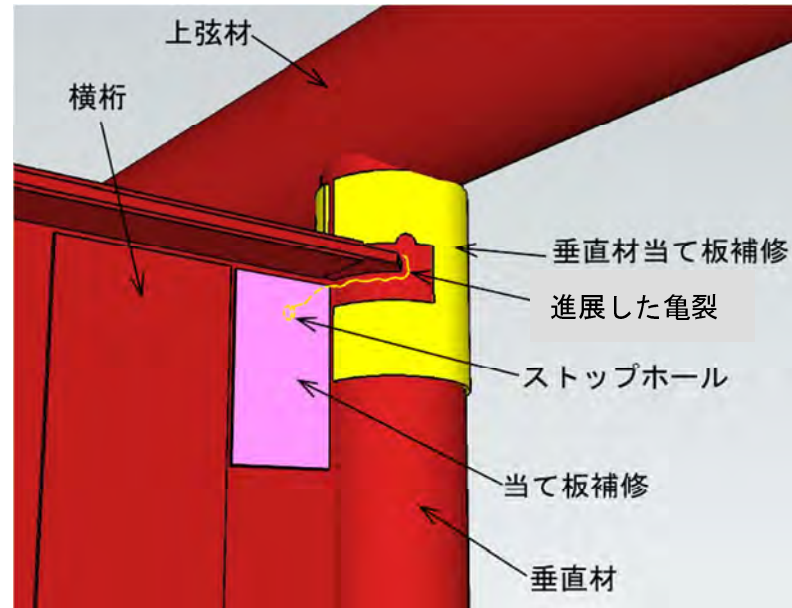


図-2.17 横桁ウェブへの当て板設置案

(4) 待ち受け工設置案

亀裂進展の確認された横桁に対して待ち受け工を設置する。

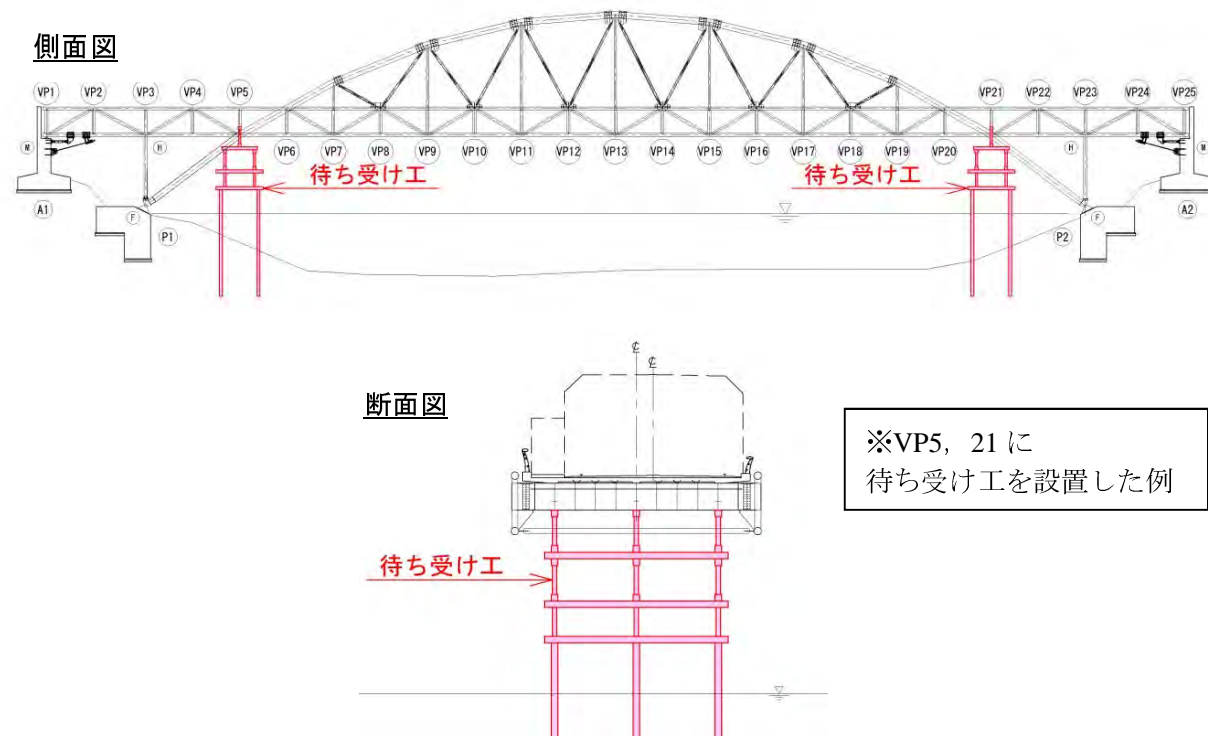


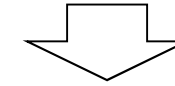
図-2.18 待ち受け工設置案

2-3-4. ニーブレース・ガセットと下弦材接合部の亀裂進展に対する対応案

(1) 想定される亀裂の進展

ニーブレース下面の亀裂は、溶接ビードに沿ってフランジ溶接部全周に進展することが想定される（図-2.19(a)）。この場合、ニーブレースのフランジ下端がフリーになり、荷重伝達機能が損なわれる。

さらに、垂直材と下弦材の接合部まで亀裂が進展する場合（図 2.19(b)），垂直材と下弦材の結合が不安定となり、破断に至れば橋面に段差が生じることが想定される。

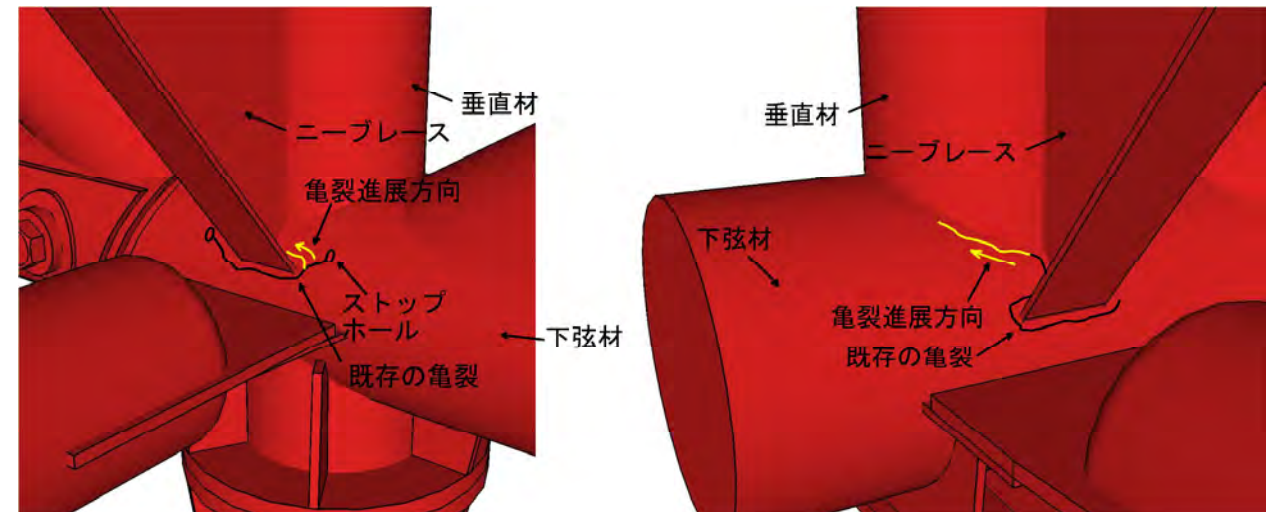


対策案として次の3案を計画する

対策案1：進展した亀裂に対して当て板を設置。この際、恒久対策 STEP2 も見据えた当て板構造とする。

対策案2：亀裂進展位置の直上にある横桁に隣接する格点，またはその近くに横桁を増桁。活荷重分担を低減。（前項の横桁フランジ接合部の亀裂進展に対する対策案1と共通。）

対策案3：亀裂の進展した横桁を支持する待ち受け工を設置。



(a) VPR23 の例

(b) VPR25 の例

図-2.19 ニーブレースフランジ接合部に想定される亀裂進展方向



(2) 下弦材当て板補修案

1) 概要

進展した亀裂に対して断面欠損の復元を目的として当て板を設置する。設置する当て板は、恒久対策 STEP2 の実施も見据えて、手戻りのない構造となるよう考慮する。

2) 計画方針

- ・対象箇所は、亀裂発生箇所 (VP1, 3, 23, 25) とする (図-2.20)。
- ・恒久対策 STEP2 の構造を考慮し、当て板には恒久対策 STEP2 の構造と接合するガゼットを設置した形状とする (図-2.21)。

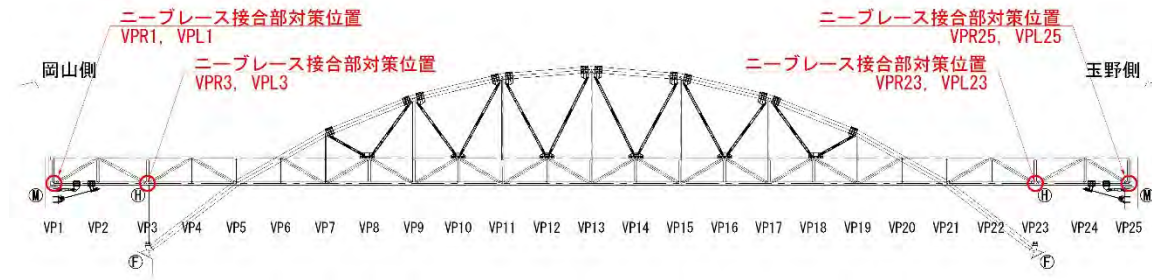
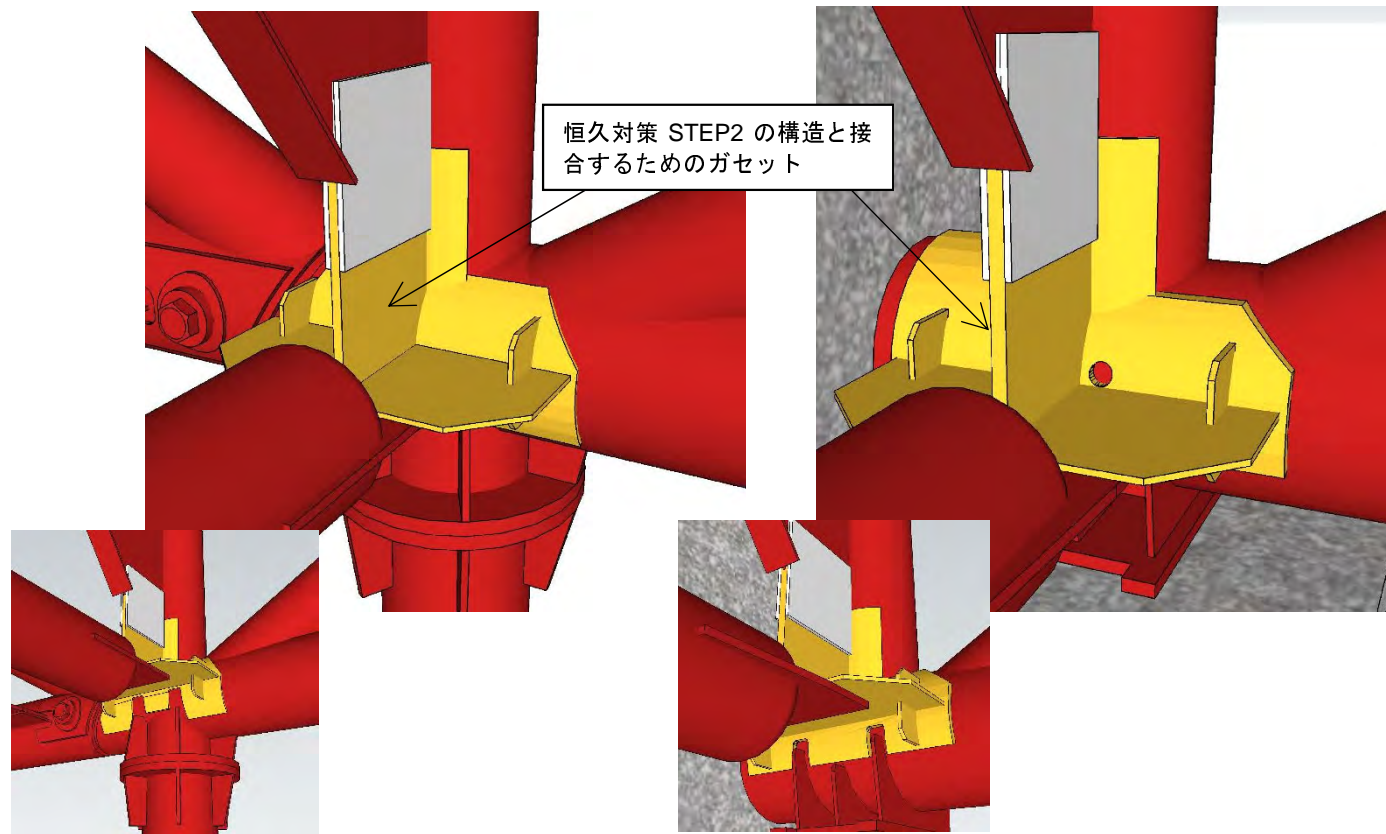


図-2.20 下弦材当て板補修位置



(a) VP3, VP23

(b) VP1, VP25

図-2.21 下弦材当て板構造

3) 当て板の細部形状について

下弦材の当て板補修にあたっては、下弦材の面外変形 (板曲げ) を抑制することを目的に、下弦材の管断面を補剛する構造となるよう配慮する。

③ 下横構ガゼット拡大案 (図-2.22)

下横構のガゼットを拡大することにより、下弦材に作用する応力を分散させる。

④ 当て板+リブ構造案 (図-2.23)

当て板にリブを設けて剛性を高め、下弦材の面外変形が生じにくい構造に改良する。

⑤ 当て板の増厚

当て板を増し厚することで剛性を高めて、下弦材の面外変形が生じにくい構造に改良する。

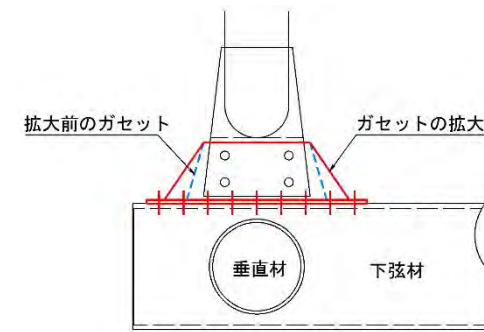


図-2.22 下横構ガゼット拡大案

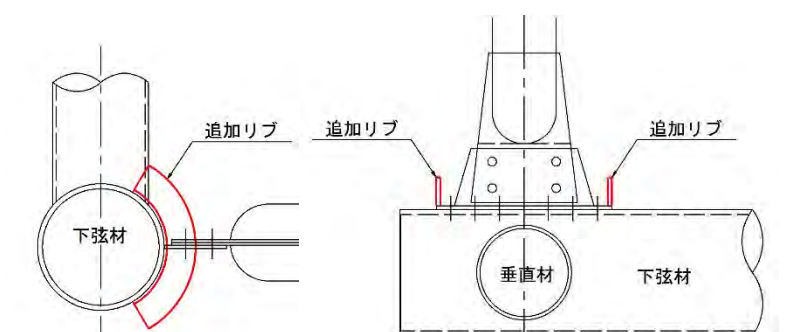


図-2.23 当て板+リブ構造案

(3) 横桁増桁案

(横桁の増桁構造は「2-3-3. 横桁上下フランジと垂直材接合の亀裂進展に対する対応案」(2) に同じ。)

(4) 待ち受け工設置案

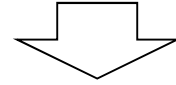
(待ち受け工の構造は「2-3-3. 横桁上下フランジと垂直材接合の亀裂進展に対する対応案」(4) に同じ。)



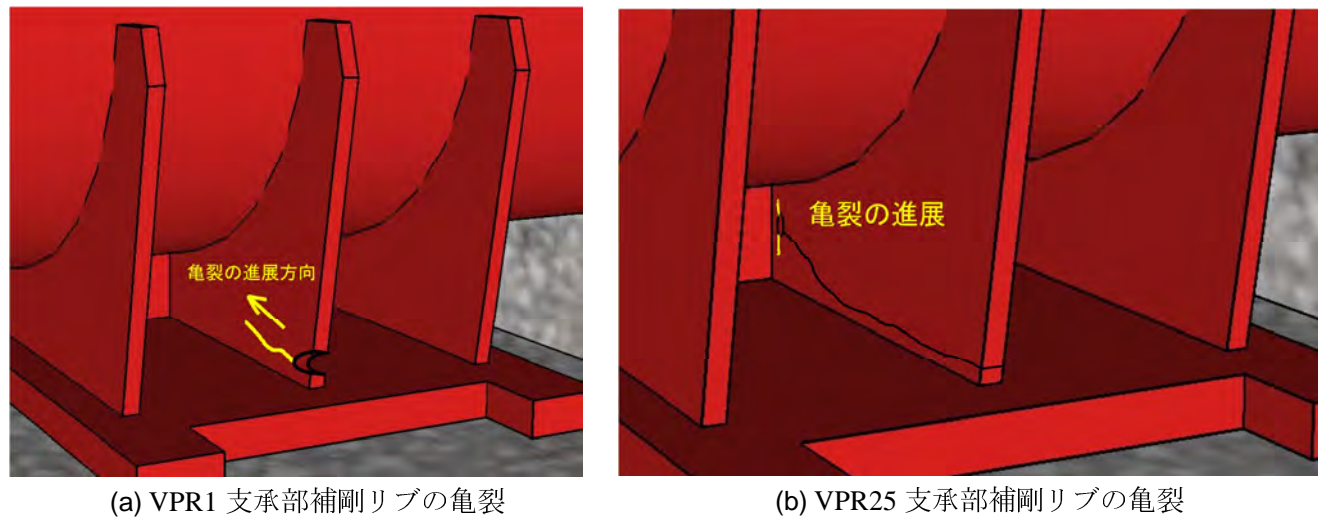
## 2-3-5. 支承補剛リブの亀裂進展に対する対応案

### (1) 想定される亀裂の進展

支承部補剛リブの亀裂は、中央の補剛リブのソールプレートとの溶接止端部から生じている。VPR1 は亀裂が短く切削により除去されているが、図-2.24(a)に示すように切削部から新たな亀裂が発生する可能性がある。VPR25 は図-2.24(b)に示すように下弦材との接合部付近まで亀裂が伸びており、先端にストップホールが設置されているが、応力集中により新たな亀裂が発生する可能性がある。



対策案：支承部補剛リブの亀裂は、ピンチプレートと補剛リブの接触に起因しているため、亀裂の進展を防止するために、接触を解消する形のピンチプレートに取替える。



(a) VPR1 支承部補剛リブの亀裂

(b) VPR25 支承部補剛リブの亀裂

図-2.24 支承部補剛リブに想定される亀裂進展方向

### (2) 支承部ピンチプレートの取替

支承部補剛リブとの接触を解消する形のピンチプレートに取替える。

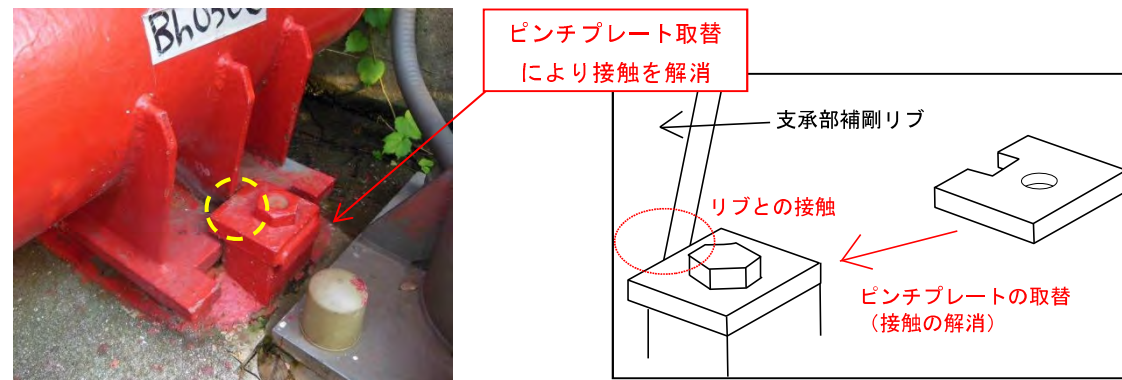


図-2.25 ピンチプレートの取替（リブとの接触の解消）概要図

### 3. 恒久対策 STEP2

#### 3-1. 対策方針

恒久対策 STEP2 では、亀裂原因を除去・低減し、疲労耐久性を向上させることにより、最終的な目標性能（供用性、耐久性、維持管理性）を満足させることを目的とする。恒久対策 STEP2 の目標性能を下記に再掲する。

- ① 供用性 ……特殊車両を含む一般交通に対して耐荷力を有する。  
※耐震性能：H24 道示レベルの耐震性能を確認
- ② 耐久性 ……亀裂発生前の水準と比較して、疲労耐久性が向上している。
- ③ 維持管理性 …容易かつ、確実に定期点検ができる。（橋梁定期点検 5 年で対応出来る水準）

#### 3-2. 対策工の計画方針

恒久対策 STEP2 の対策工の構造は、下記の方針に基づき計画する。亀裂原因毎に原因を除去・低減できる構造とする。対策工の計画検討フローを図-3.1 に示す。

- ・亀裂原因毎に原因を除去・低減できる構造とする。
- ・活荷重に対する応力が増加せず、疲労耐久性が向上する構造とする。

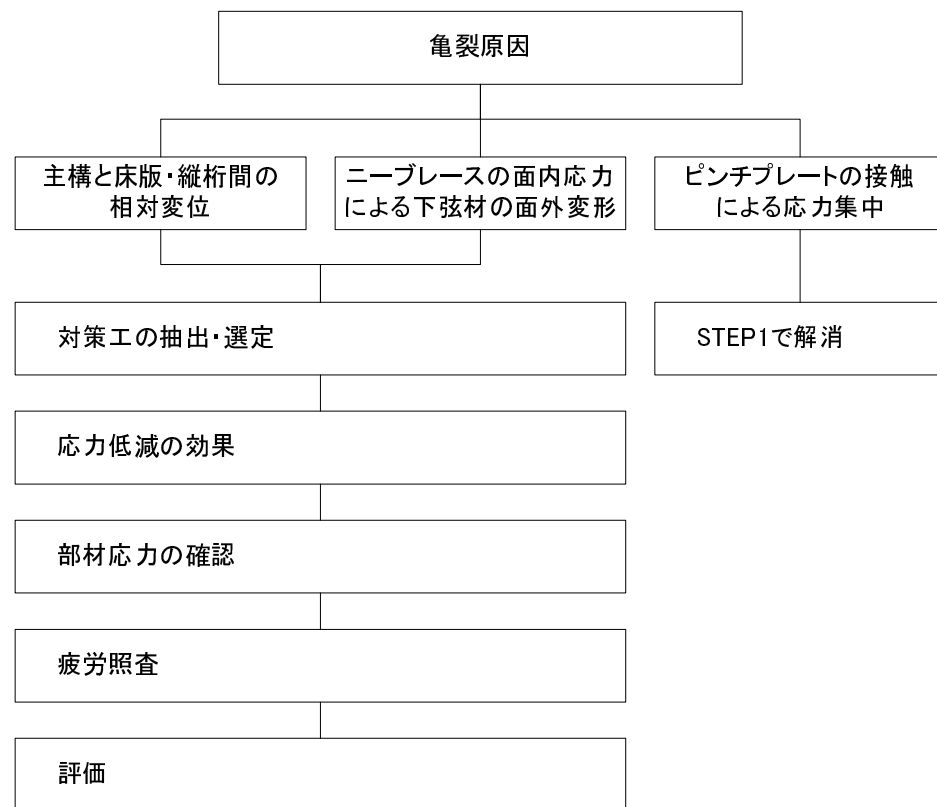


図-3.1 恒久対策 STEP2 対策工の検討フロー

#### 3-3. 横桁上下フランジと垂直材接合部の対策（STEP2）

##### 3-3-1. 対策工の抽出・選定

###### (1) 対策工の抽出

亀裂原因を抑制して亀裂箇所の応力集中を緩和し、疲労耐久性を向上させる対策を検討する。亀裂原因を踏まえて、考えられる対策案を図-3.2 のように整理する。

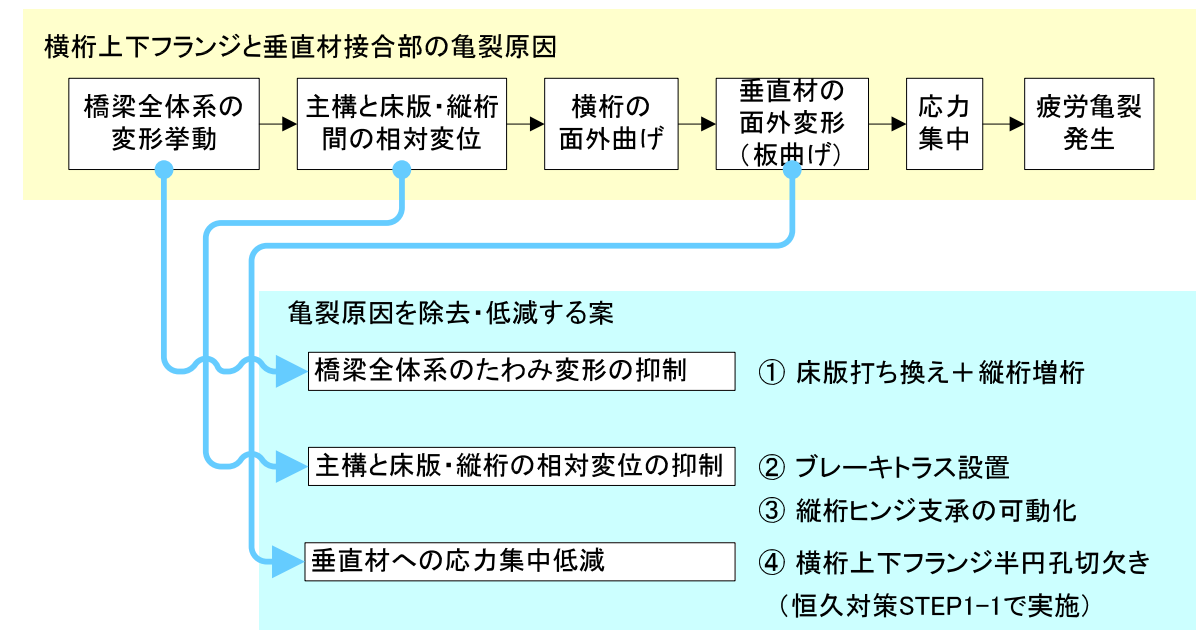


図-3.2 横桁上下フランジと垂直材接合部の亀裂原因と対策案の整理

(2) 対策工の概要

1) 橋梁全体系のたわみ変形の抑制

① 床版打ち換え+縦桁増桁 (図-3.3)

打換えにより床版を増厚するとともに、縦桁と床版を合成構造とすることにより上部構造の断面剛性を向上させ、橋梁全体の活荷重たわみを抑制することで、主構と床版・縦桁の軸方向変位差を縮小させる案。

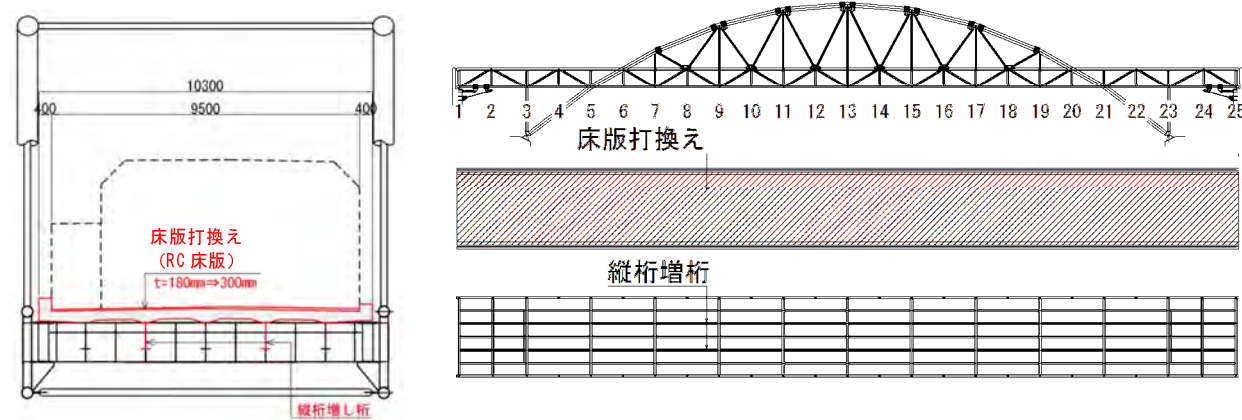


図-3.3 床版換え+縦桁増し桁

2) 主構と床版・縦桁の相対変位の抑制

② ブレーキトラス (図-3.4)

横桁と縦桁の間にブレース材を設置 (ブレーキトラス) し、主構と床版・縦桁の軸方向変位差を縮小させる案。

ブレース材を設置するためには、床版を一部撤去・復旧を行うか、あるいは床版の全面打ち換えに合わせて行う方法が考えられる。

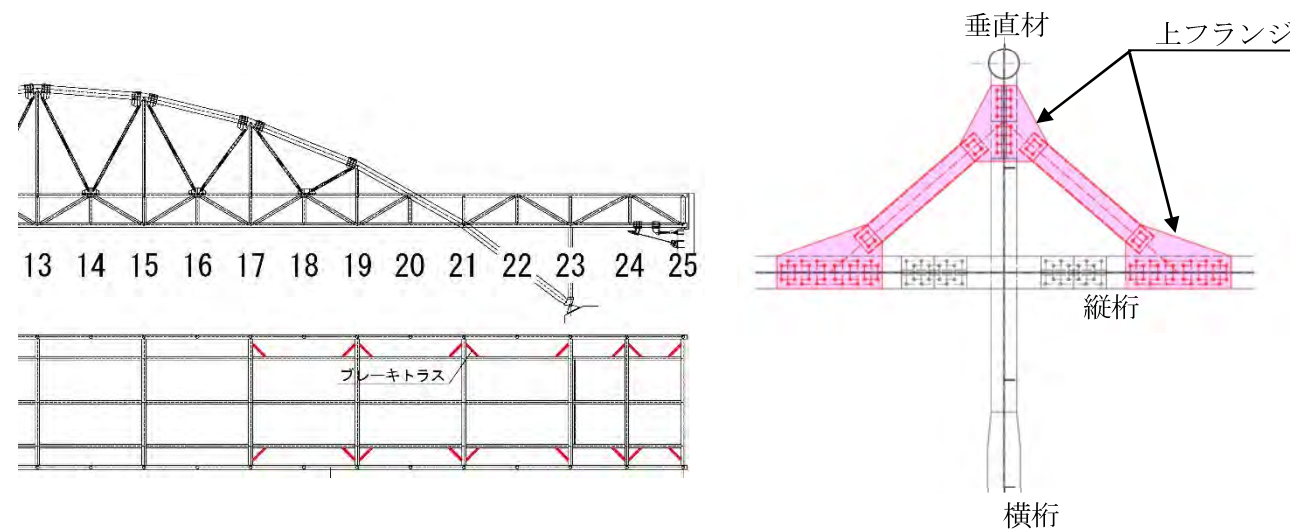


図-3.4 ブレーキトラス (横桁材と縦桁を連結)

③ 縦桁ヒンジ支承の可動化 (図-3.5)

ヒンジ部の縦桁のヒンジ支承を可動支承に変更することで、側径間部の主構と床版・縦桁の軸方向変位差を縮小させる案。

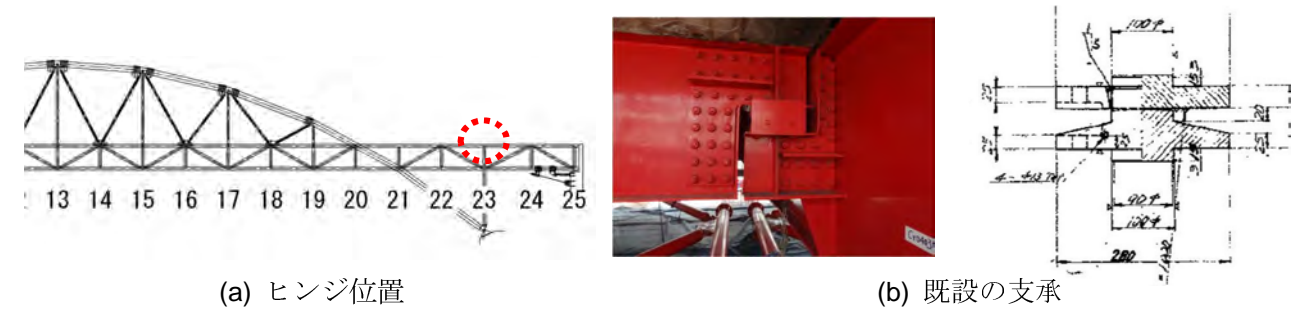


図-3.5 縦桁ヒンジ支承の交換

3) 垂直材への応力集中低減

④ 横桁上下フランジに半円孔切欠き (再掲、STEP1-1 で実施)

横桁上下フランジと垂直材接合部について、横桁上下フランジ端部 (垂直材との接合部の近傍) に半円孔を設置する案。

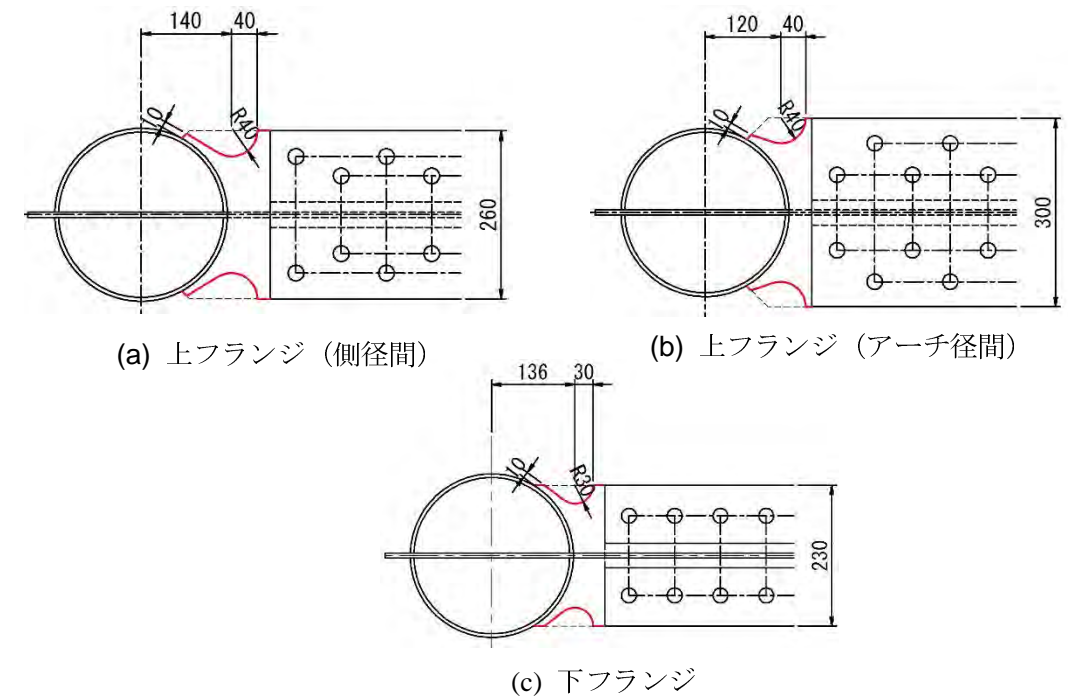


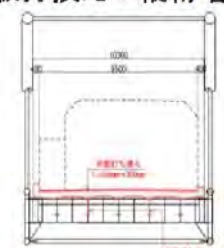

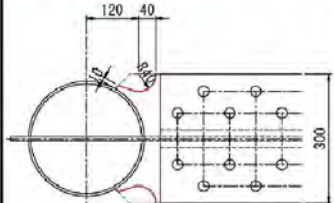
図-3.6 横桁上下フランジ半円孔切欠き案



(3) 比較検討案の選定

「(2) 対策工の概要」で示した対策案について、適用性を考慮し、詳細な検討を実施する比較検討案を表-3.1に示す。対策案①～③はたわみ変形や相対変位を抑制して横桁の面外曲げを抑えることを目的としていることから、各対策案について横桁の面外変形に着目し、横桁面外曲げ応力の応力範囲（T荷重移動荷重）を比較した（図-3-7）。検討案①～③の中では②ブレーキトラス案が最も応力範囲を低減することができるため、同案を比較検討案として選定する。

表-3.1 比較検討案の選定

検討案	評価	
橋梁全体系のたわみ変形の抑制		
1 床版打換え+縦桁増桁 	T荷重移動荷重に対する横桁面外曲げ応力の応力範囲を比較すると②ブレーキトラスより応力範囲は大きく、疲労亀裂が生じていない格点の応力範囲相当まで下げることが困難であるため、検討対象から除外する。	×
横桁の面外変形抑制		
2 ブレーキトラス	横桁面外曲げ応力の応力範囲を低減できる①～③の中では、最も低減効果が大きいため、検討案として選定する。	○
3 縦桁ヒンジ支承の可動化 	側径間は、T荷重移動荷重に対する横桁面外曲げ応力の応力範囲を疲労亀裂が生じていない格点の応力レベルまで下げることができる。ピン構造となっているゲルバー支承部を可動化することで側径間の床版・縦桁がアーチ径間に引き込まれる、又は押されることを解消する対策であるため、特に側径間に有効な案である。しかし、アーチ径間では応力範囲を十分低減できないことから検討対象から除外する。	×
垂直材への応力集中低減		
4 横桁への半円孔設置 	横桁フランジに半円孔を設置することにより、垂直材に伝わる横桁フランジの応力を低減する案であり、恒久対策STEP1-1で実施した案である。前節の検討結果より、垂直材の応力範囲を大幅に低減することができる。	恒久対策 STEP1-1 で実施

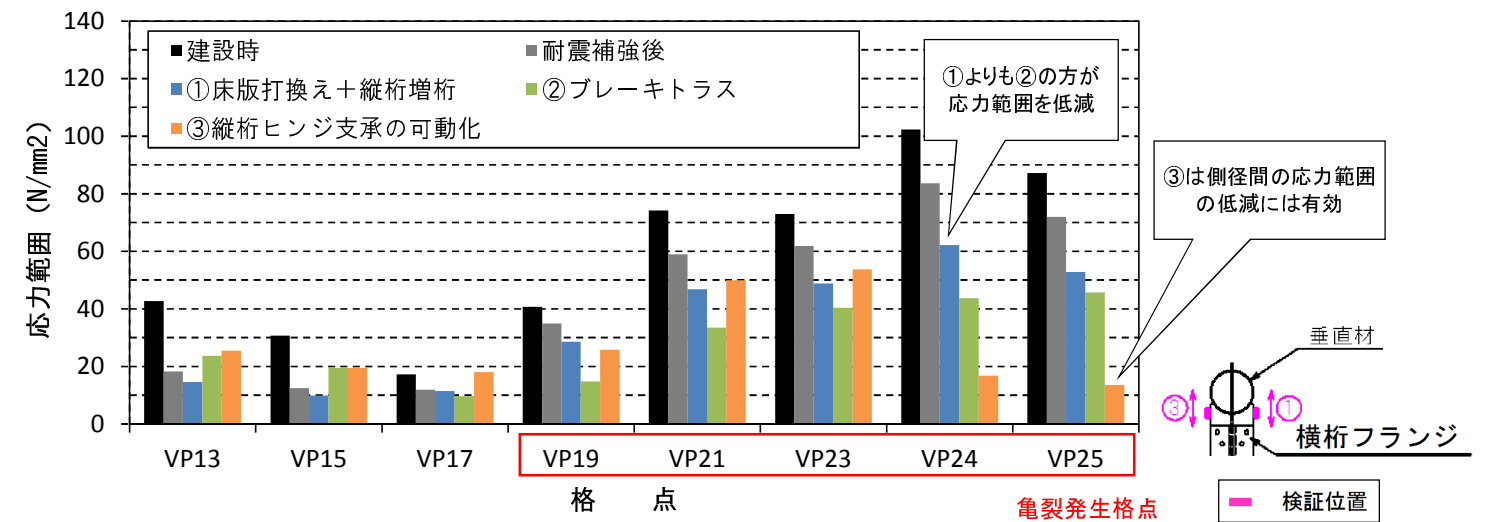


図-3.7 T荷重移動荷重による横桁面外曲げ応力の応力範囲

### 3-3-2. ブレーキトラス設置案の検討

#### (1) 概要

横桁と縦桁の間にブレース材を設置し、主構と床版・縦桁の軸方向変位差を縮小させる案(再掲, 図-3.8)。

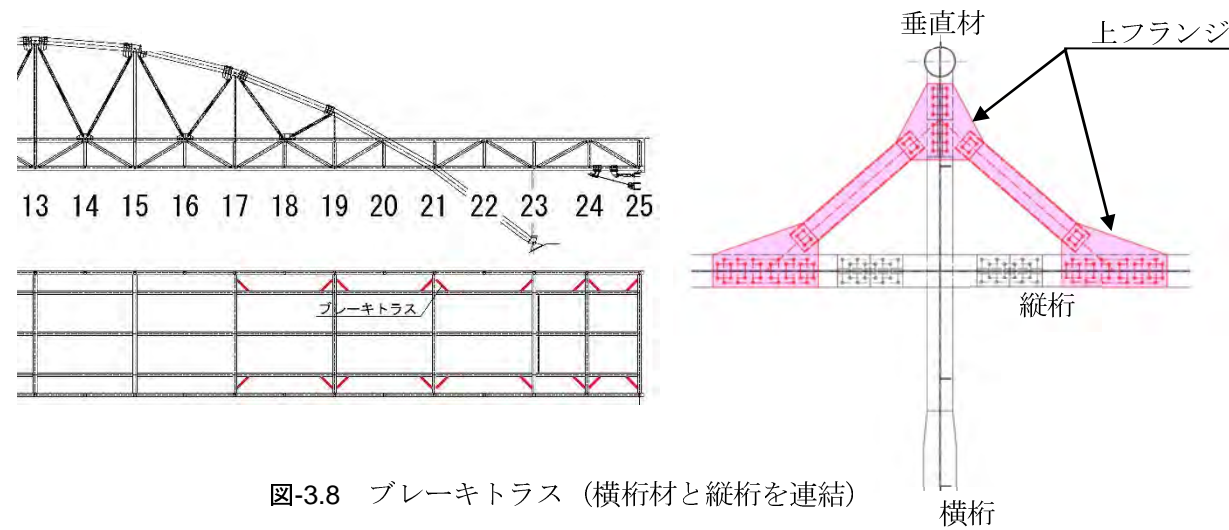


図-3.8 ブレーキトラス (横桁材と縦桁を連結)

#### (2) 応力低減の効果

##### 1) 対策効果確認の方針

ブレーキトラス設置の効果を確認するため、T荷重移動荷による横桁フランジと垂直材接合部の応力波形を整理する。

##### 2) 解析条件

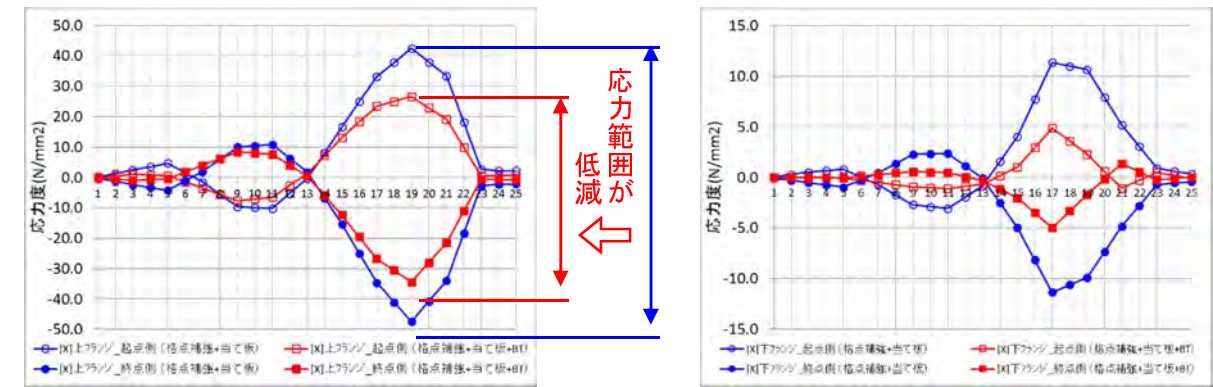
解析モデル：全体解析 (梁要素+シェル要素) モデル

荷重条件：T荷重、VP1~VP25移動荷 ※応力波形を確認するためT荷重を各格点に荷重

応力抽出位置：横桁上下フランジと垂直材接合部

##### 3) 解析結果 (効果の確認)

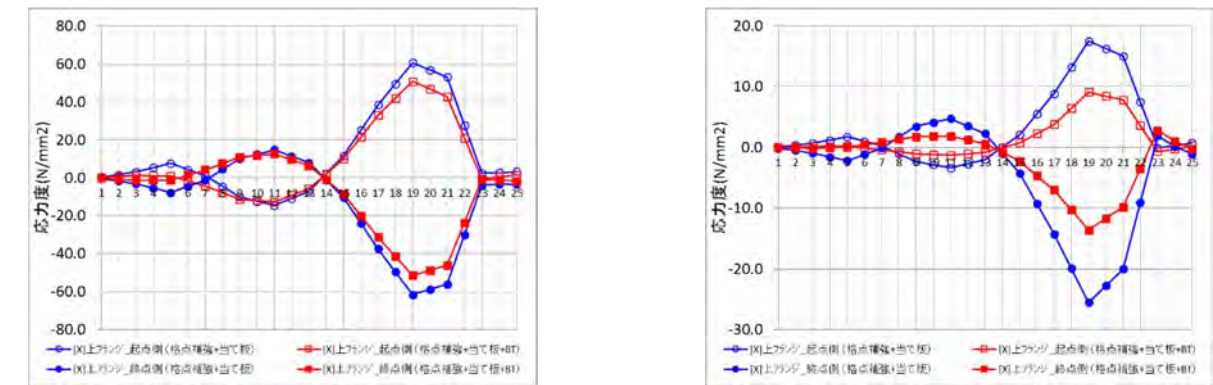
図-3.9~図-3.12に垂直材着目位置の応力波形を示す。ブレーキトラスの設置により、応力範囲が15%~50%程度低減されることが解る。



(a) 上フランジ

図-3.9 垂直材応力 (VPR19)

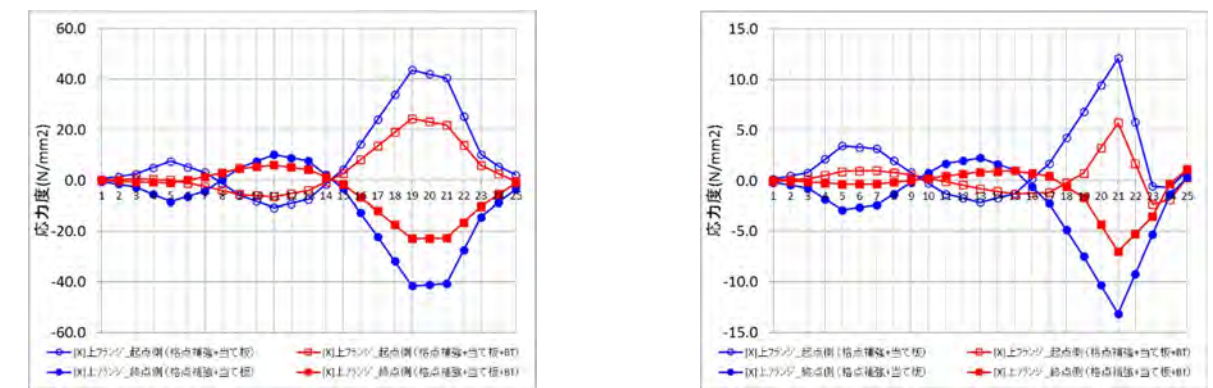
(b) 下フランジ



(a) 上フランジ

図-3.10 垂直材応力 (VPR21)

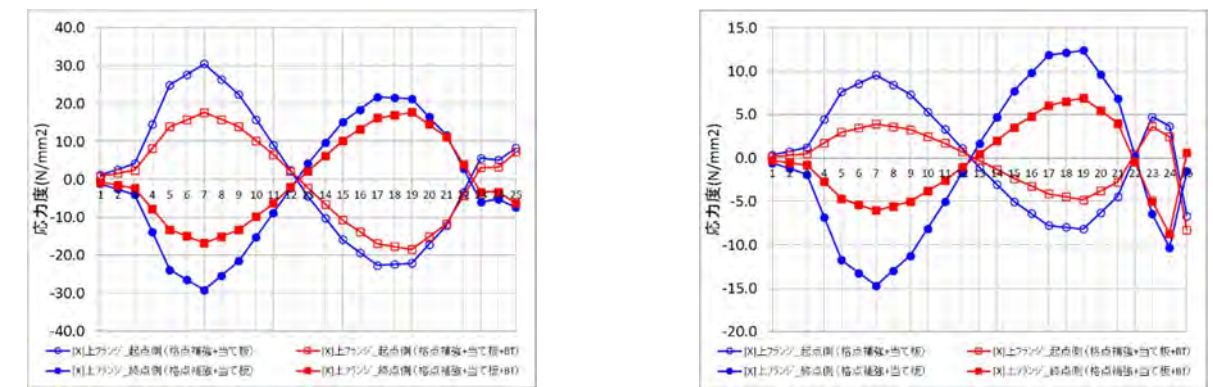
(b) 下フランジ



(a) 上フランジ

図-3.11 垂直材応力 (VPR23)

(b) 下フランジ



(a) 上フランジ

図-3.12 垂直材応力 (VPR25)

(b) 下フランジ



(3) 部材応力の確認

1) 全体系の部材公称応力

ブレイキトラスの設置により、橋梁全体の主構と床版・縦桁との間の相対変位を抑制することになるため、全体系への影響を部材公称応力で確認する。

a) 解析条件

解析モデル：全体解析（梁要素）モデル

- ・ 格点部補強，ブレイキトラス部材を梁要素で追加

荷重条件：死荷重+B 活荷重（L 荷重）影響線載荷

b) 解析結果

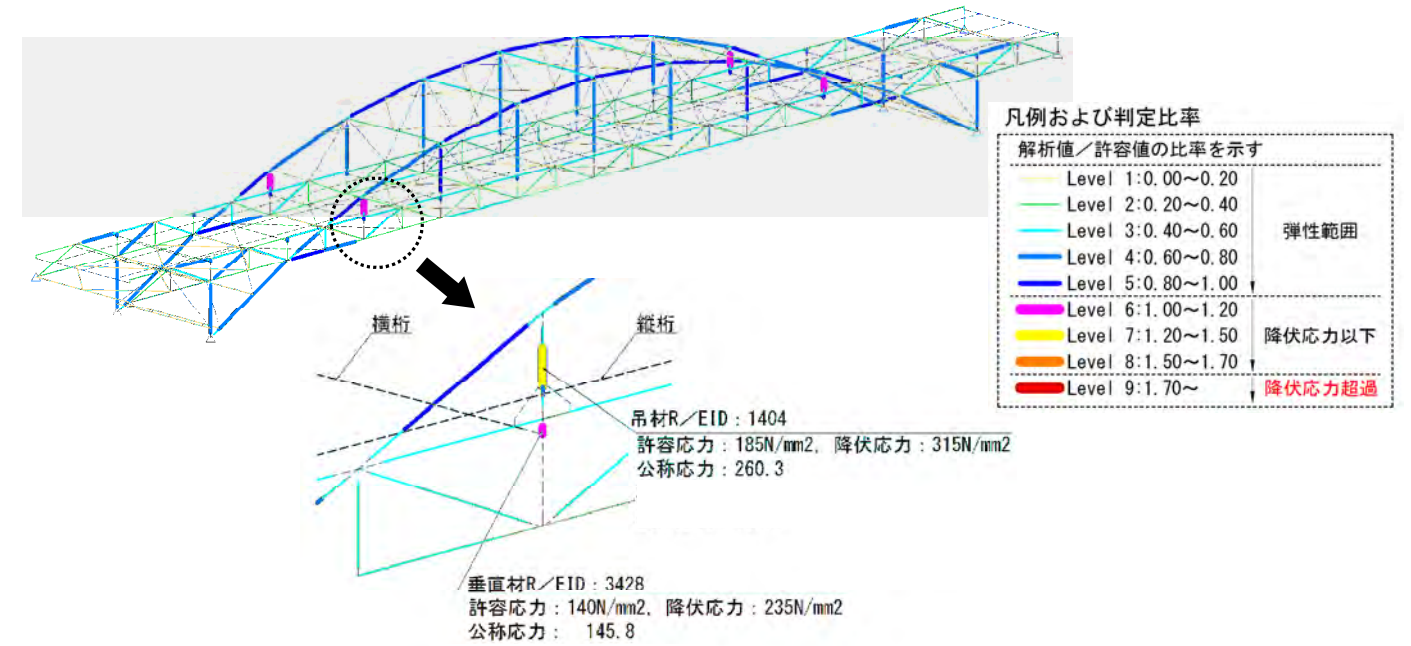
全体解析（梁要素）モデルに B 活荷重（L 荷重）を影響線載荷した結果を図-3.13、表-3.2 に示す。表-3.2 には、全体系の中で、特に負荷の高い VP7、VP19 の端部吊材および垂直材に着目し、ブレイキトラス設置前後の応力を比較して示した。

全体系の中で負荷の高い部材である端部吊材、垂直材の応力は、ブレイキトラスの設置により、より大きくなること解る。

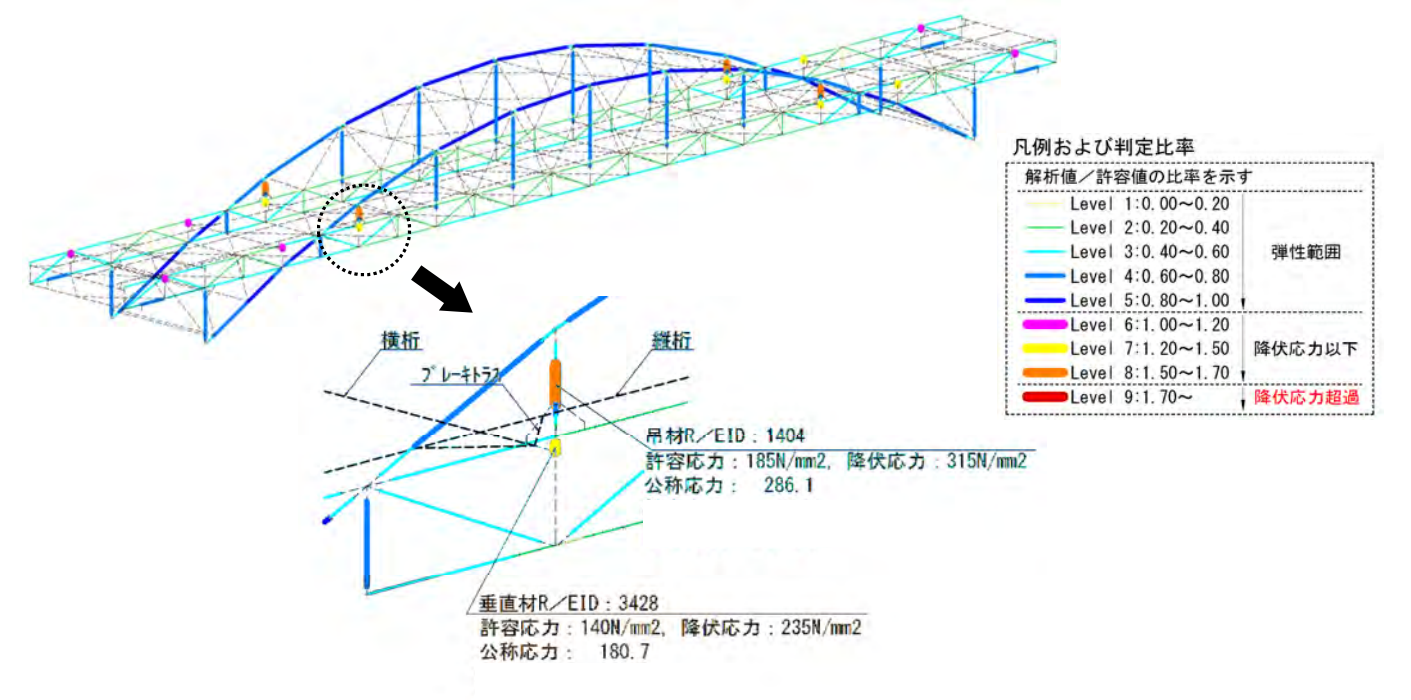
表-3.2 照査結果

部材	公称応力		許容応力度	降伏応力度
	ブレイキトラス設置前	ブレイキトラス設置後		
吊材	260 N/mm <sup>2</sup>	286 N/mm <sup>2</sup> (10%増)	185 N/mm <sup>2</sup>	315 N/mm <sup>2</sup>
垂直材	146 N/mm <sup>2</sup>	181 N/mm <sup>2</sup> (24%増)	140 N/mm <sup>2</sup>	235 N/mm <sup>2</sup>

材料：下弦材 STK490 相当 (SM490), 板厚 8.2 mm  
垂直材 STK400 相当 (SM400), 板厚 9.3 mm



(a) ブレイキトラス設置前（現況構造）



(b) ブレイキトラス設置後（対策後）

図-3.13 ブレイキトラス設置前後の部材公称応力分布の比較



## 2) 局部応力の確認（対策前後の比較）

ブレイキトラス設置後の構造について、「1) 全体系の部材公称応力」と同様に、活荷重による格点部の局部応力状態を確認する。まず、対策前後の応力状態を比較する。

### a) 解析条件

解析モデル：全体解析（梁要素+シェル要素）モデル

- ・格点部補強，ブレイキトラス部材を梁要素で追加
- ・当て板をシェル要素の板厚でモデル化
- ※横桁上下フランジの半円孔切欠きはモデル化していない

荷重条件：死荷重+T 荷重，横桁直上荷重（VP19 荷重）

※対策前後の応力状態の比較にあたっては，解析の便宜上，死荷重+T 荷重の荷重を用いた。

### b) 解析結果

全体解析（梁要素+シェル要素）モデルに死荷重+T 荷重（VP19 荷重）を荷重した時の，VPR19 の格点部応力状態を図-3.14 に示す。

図-3.14 より，ブレイキトラスの設置により横桁と垂直材接合部の応力分布は大きく変化することが解る。ブレイキトラス設置前は，「Ⅱ. 亀裂原因の推定」で整理したように，横桁フランジ両端付近に高い応力集中が生じる。ブレイキトラス設置後は，横桁フランジと垂直材接合部に沿って高い応力集中が生じ，特に横桁フランジ中央に高い応力が生じる。

応力の値で比較すると，亀裂発生位置である横桁フランジ両端の回し溶接部の応力は，ブレイキトラスの設置により， $168 \text{ N/mm}^2$  から  $101 \text{ N/mm}^2$  まで低減されている。

一方，横桁フランジ中央付近の応力で比較すると，ブレイキトラス設置前は  $30 \text{ N/mm}^2$  であるが，設置後は  $111 \text{ N/mm}^2$  まで増加する。

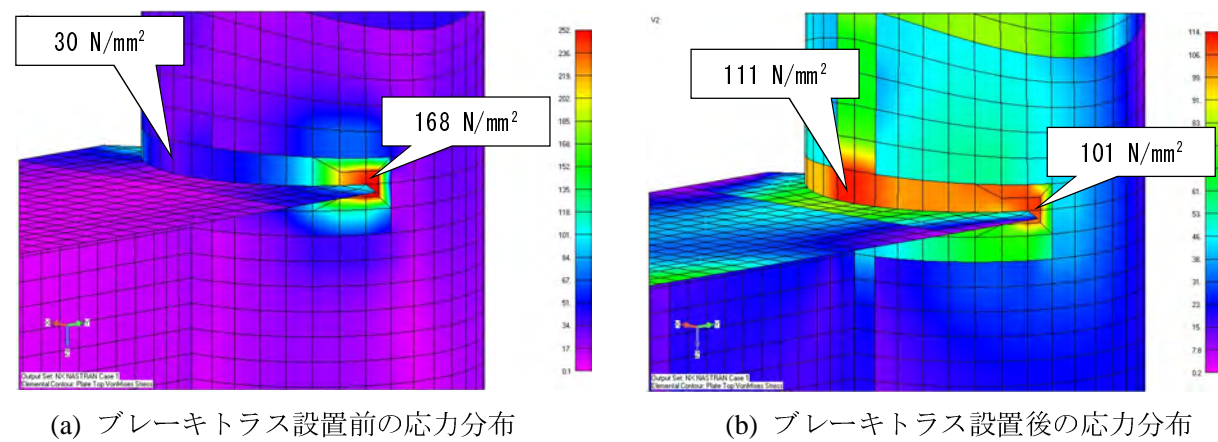


図-3.14 ブレイキトラス設置前後の応力比較（VPR19）

## 3) 局部応力の確認（B 活荷重照査）

B 活荷重によるブレイキトラス設置後の応力状態を確認する。

### a) 解析条件

解析モデル：全体解析（梁要素+シェル要素）モデル

- ・格点部補強，ブレイキトラス部材を梁要素で追加
- ・当て板をシェル要素の板厚でモデル化
- ※横桁上下フランジの半円孔切欠きはモデル化していない

荷重条件：死荷重+B 活荷重（L 荷重），影響線荷重

### b) 解析結果

全体解析（梁要素+シェル要素）モデルに B 活荷重（L 荷重）を影響線荷重した時の，VPR19 の格点部応力状態を図-3.15 に示す。

B 活荷重に対しては，横桁フランジ中央付近の応力は  $184 \text{ N/mm}^2$  となる。この時の横桁上フランジと垂直材接合部付近の主応力ベクトル図を図-3.15 (b) に示す。垂直材側の主応力方向は，フランジに対して  $45^\circ$  となっており，図中の矢印（ $\Rightarrow$ ）に示す向きにせん断力を受けていることが解る。（せん断力による応力状態については図-3.14(c) を参照。）

よって，ブレイキトラスの設置により，横桁の端部に，せん断力による新たな応力集中が生じたものと考えられる。

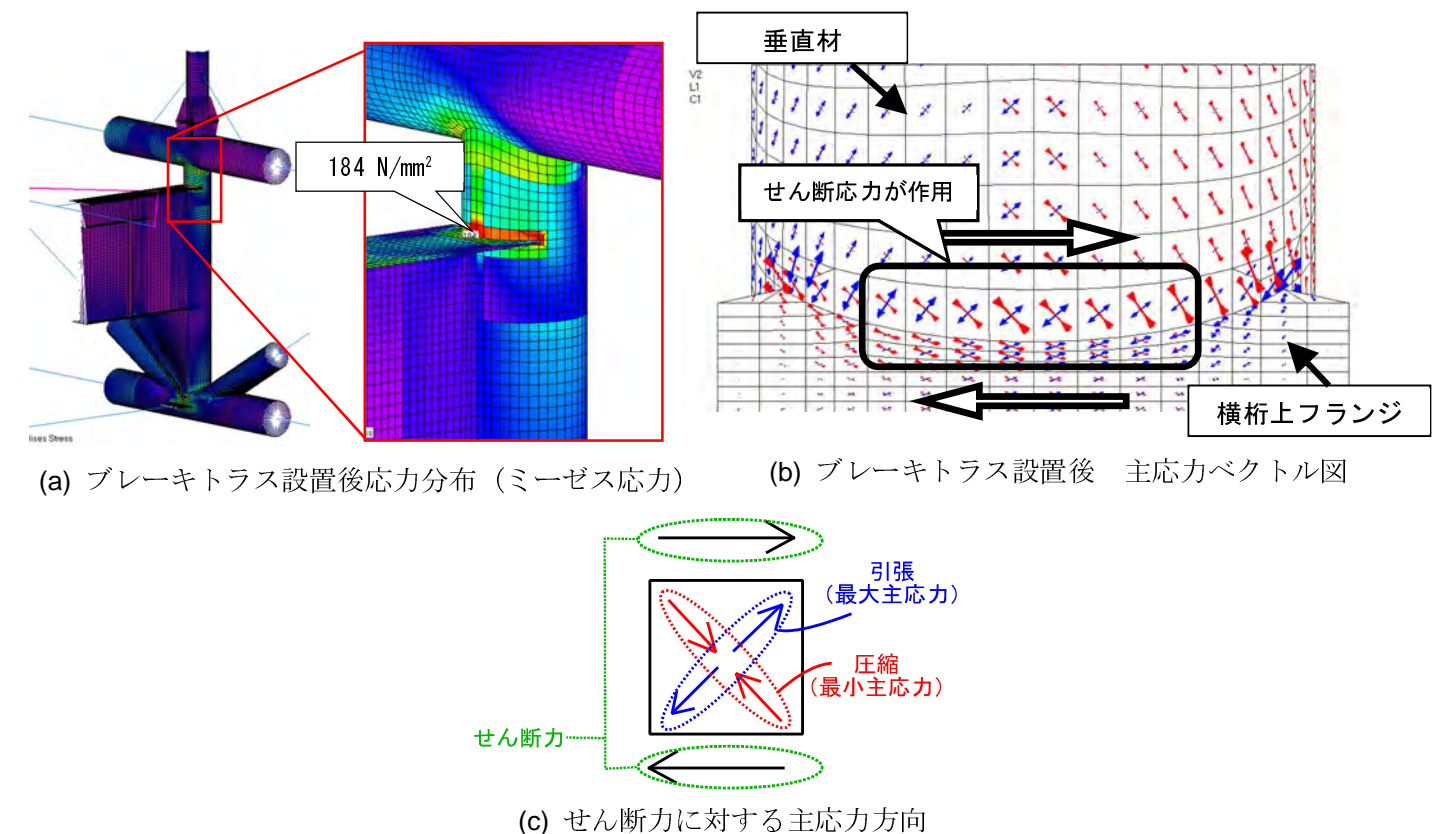


図-3.15 ブレイキトラス設置後の応力分布（VPR19）

#### (4) 疲労照査

ブレイキトラス設置後の構造について疲労照査を行う。

##### 1) 疲労照査条件

解析モデル：全体解析（梁要素＋シェル要素）モデル

- ・格点部補強，ブレイキトラス部材を梁要素で追加
- ・当て板をシェル要素の板厚でモデル化

※横桁上下フランジの半円孔切欠きはモデル化していない

荷重条件：T 荷重，VP1～VP25 移動荷重

照査期間：52 年間（現在～竣工後 100 年）

照査応力：ホットスポット的応力

照査位置：横桁上下フランジと垂直材接合部の応力集中箇所（回し溶接部），VPR19

##### 2) 疲労照査結果

疲労照査結果を表-3.3, 3.4 に示す。

当て板のみと当て板＋ブレイキトラス設置の結果を比較すると，現在から竣工後 100 年までの累積損傷度が低減されていることが解る。

表-3.3 疲労照査結果（上フランジ），F 等級（一定振幅応力打ち切り限界  $\Delta \sigma_{ce}=46 \text{ N/mm}^2$ ）

	照査期間 Y (年)	応力範囲 $\Delta \sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	累積損傷度 D
当て板	52	72.5	3.73
当て板＋ブレイキトラス	52	42.9 (0.59)	0.78 (0.21)

( ) 内は、当て板を1.0とした場合の比率を示す

表-3.4 疲労照査結果（下フランジ），F 等級（一定振幅応力打ち切り限界  $\Delta \sigma_{ce}=46 \text{ N/mm}^2$ ）

	照査期間 Y (年)	応力範囲 $\Delta \sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	累積損傷度 D
当て板	52	23.0	0.12
当て板＋ブレイキトラス	52	6.34 (0.28)	- (-)

( ) 内は、当て板を1.0とした場合の比率を示す

#### (5) 評価

##### 1) ブレイキトラス設置案の効果

ブレイキトラスを設置することで，亀裂発生位置である横桁上下フランジと垂直材接合部の応力範囲は 15%～50%程度低減することができ，一定の効果が認められる。

また，この応力範囲の低減により，竣工後 100 年までの累積損傷度が低減でき，疲労耐久性を向上させることができる。

##### 2) ブレイキトラス設置案の問題点

一方で，ブレイキトラスの設置は，全体系の応力分布に影響を与え，全体系の中で負荷の高い部材である端部吊材，垂直材の応力が増加する。

また，局部応力に着目すると，活荷重により横桁上フランジと垂直材の接合部に沿って，せん断力による新たな応力集中箇所が生じる。

##### 3) 評価

ブレイキトラス設置案は，横桁上下フランジと垂直材接合部の応力範囲を低減できるものの，橋梁を構成する部材の中には応力が高まるものや，新たな応力集中箇所が生じる可能性があるため，亀裂発生前の水準以上の疲労耐久性を有するかについて懸念がある。

#### 3-3-3. 横桁上下フランジと垂直材接合部の対策方針

横桁上下フランジと垂直材接合部については，恒久対策 STEP1-1 で実施する「横桁上下フランジの半円孔切欠き」により 25t 車に相当する T 荷重の走行に対しても横桁上下フランジと垂直材接合部の局部応力は降伏応力以下となり，疲労耐久性も向上することから，当面は恒久対策 STEP1 で監視を行い，恒久対策 STEP2 については，更に検討を進めることとする。

3-4. ニーブレース・ガセットと下弦材接合部の対策 (STEP2)

3-4-1. 対策工の抽出・選定

(1) 対策工の抽出

亀裂原因を抑制して亀裂箇所の応力集中を緩和し、疲労耐久性を向上させる対策を検討する。亀裂原因を踏まえて、考えられる対策案を図-3.16のように整理する。

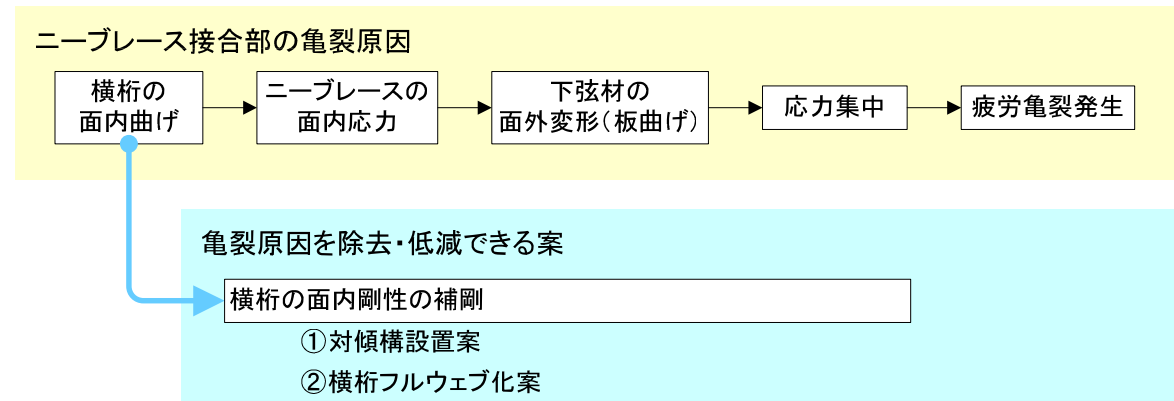


図-3.16 ニーブレース・ガセットと下弦材接合部の亀裂原因と対策案の整理

(2) 対策工の概要

1) 横桁の面内剛性の補剛

横桁の剛性を上げることで、ニーブレースの面内応力を低減させる。

① 対傾構設置案－横桁補剛 (図-3.17)

既設の横桁の下に、新たに対傾構を設置し、横桁の剛性を向上させる案。

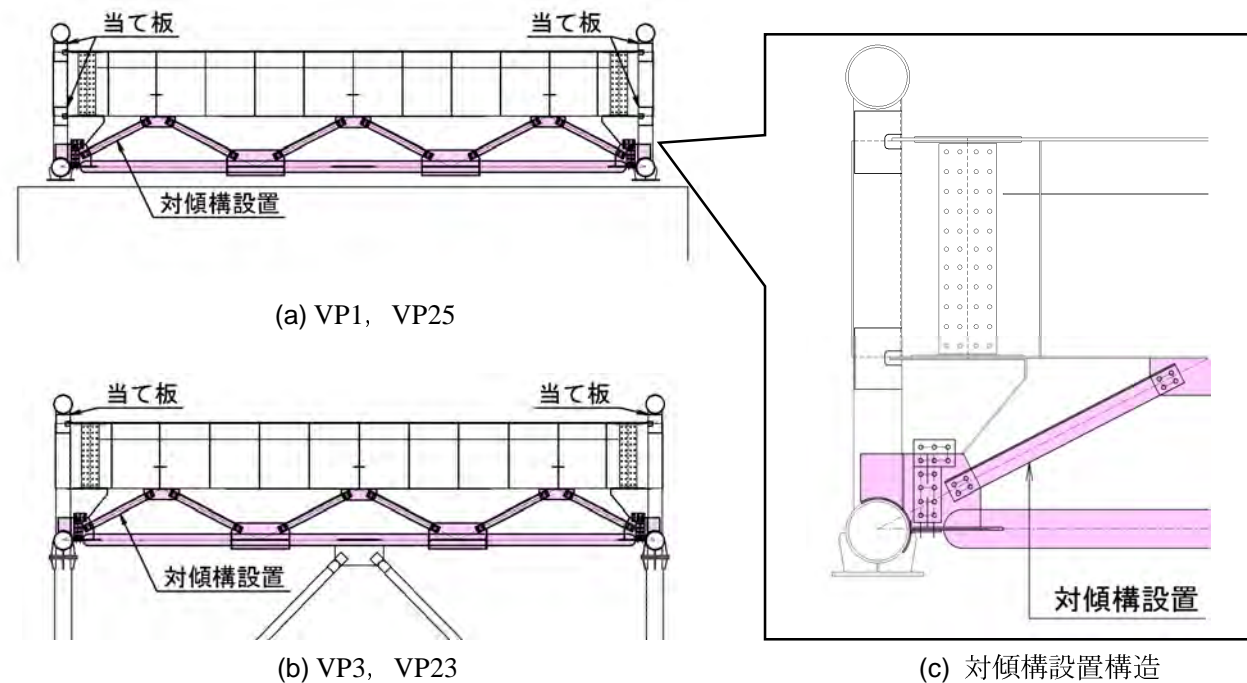


図-3.17 対傾構設置案

② 横桁フルウェブ化案 (図-3.18)

既設の横桁の下に、桁を追加し既設横桁と一体化 (フルウェブ化) させ剛性を向上させる案。

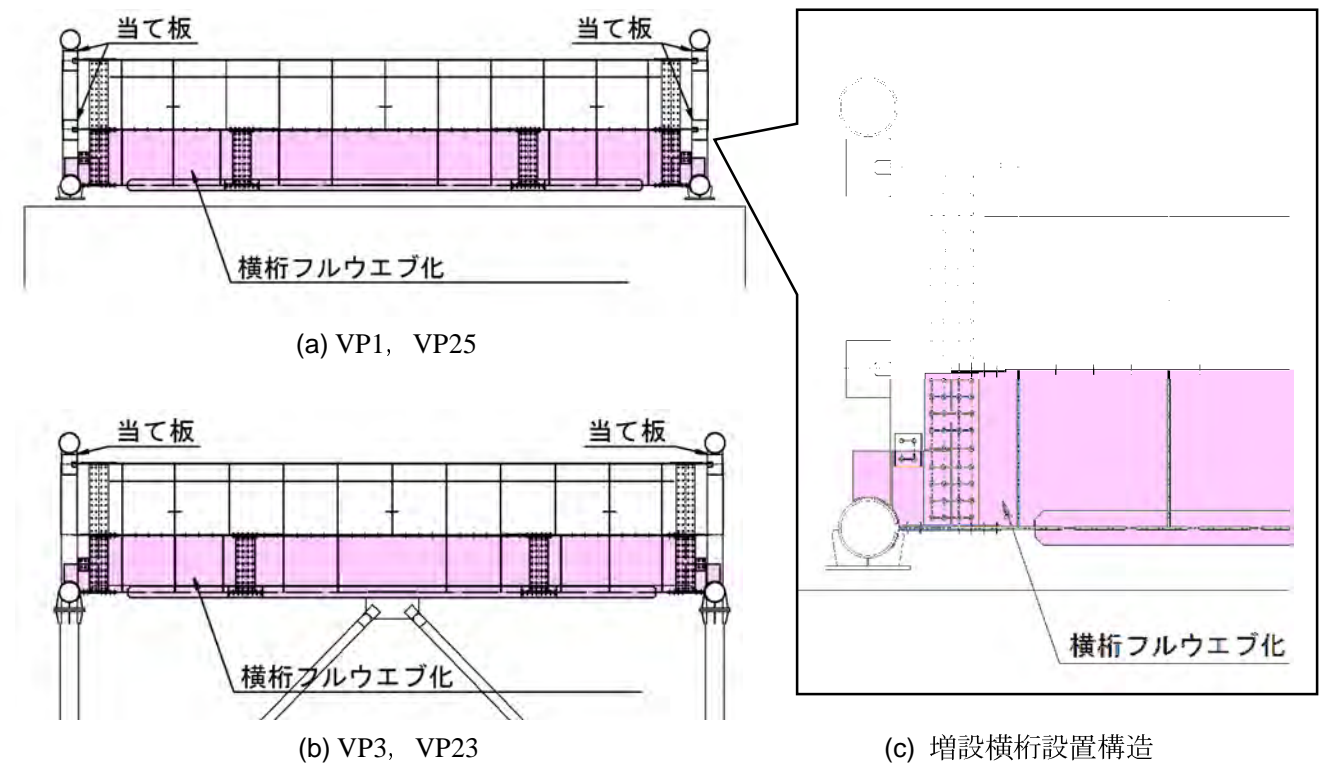


図-3.18 横桁フルウェブ化案

(3) 比較検討案の選定

「(2) 対策工の概要」で示した対策案について、適用性を考慮し、詳細な検討を実施する比較検討案を表-3.5に示す。

表-3.5 比較検討案の選定

	検討案		評価	
	VP1, 25	VP3, 23	VP1,25	VP3,23
横桁の面内剛性の補剛				
① 対傾構設置案			対傾構の設置により横桁の面内剛性を補剛し、ニーブレース・ガセットと下弦材接合部の応力を許容値以下に抑えることができる。よって、比較案として検討する。	○ ○
② 横桁フルウェブ化案			対傾構案と同様の効果が見込めるが、対傾構案より死荷重の増加が大きいため、適用性に劣る。	△ △



3-4-2. 対傾構設置案の検討

(1) 概要

横桁の剛性を上げることで、亀裂の原因となるニーブレースの面内応力を低減させる案（再掲、図-3.19）。

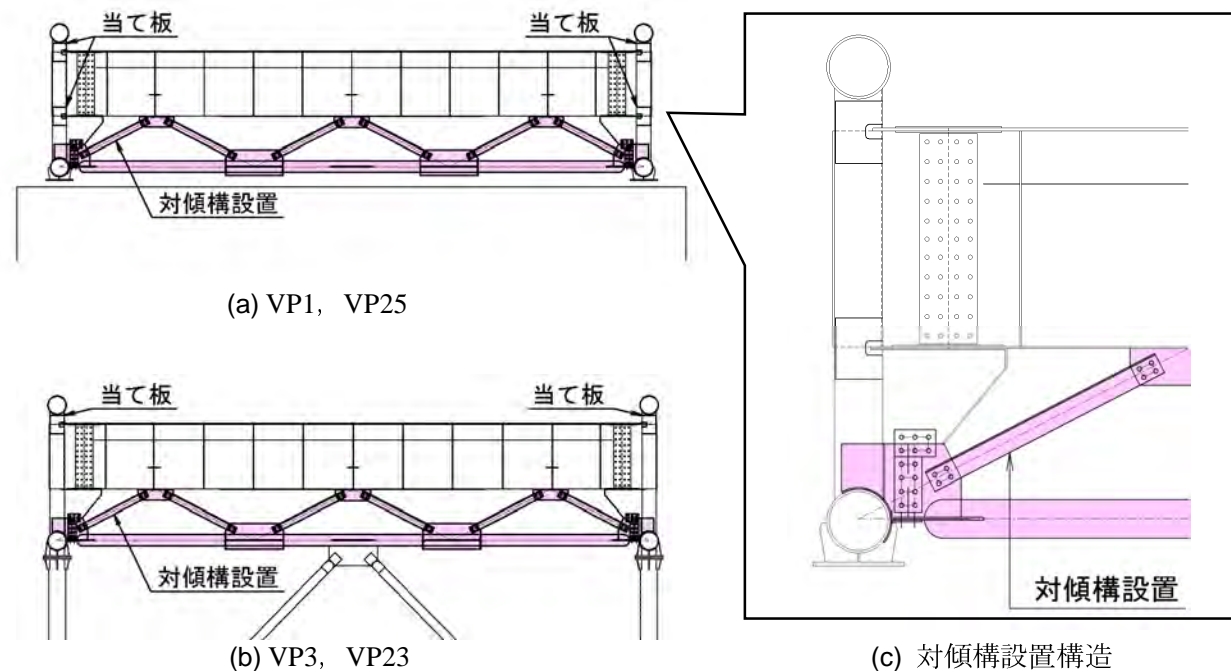


図-3.19 対傾構設置案

対傾構の設置にあたっては、主構と接続するガセットの構造を、恒久対策 STEP1-2 で実施する下弦材の当て板補修と一体で計画する。

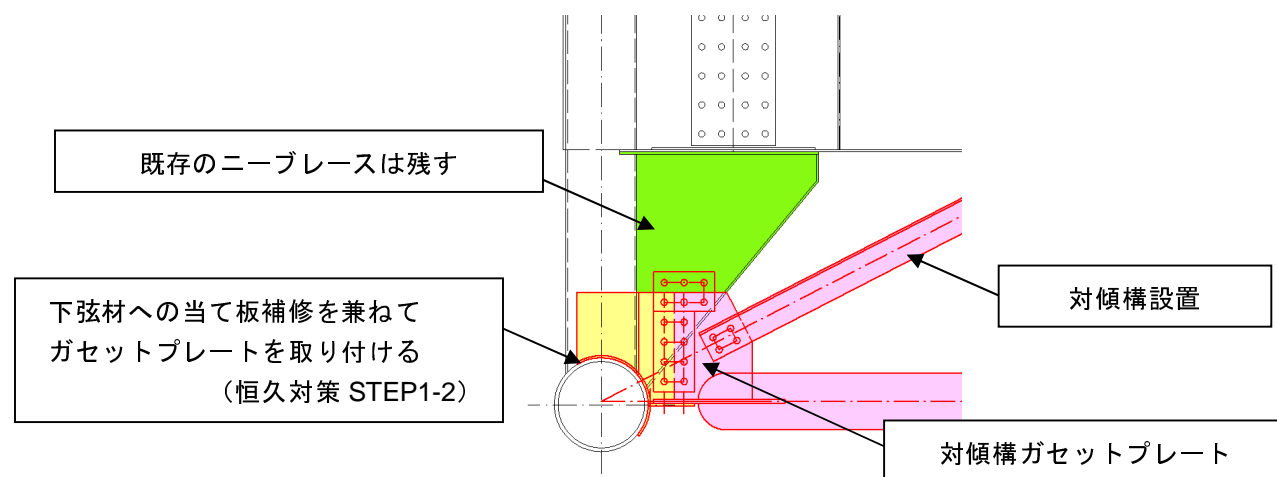


図-3.20 対傾構設置案の構造概要

(2) 応力低減の効果

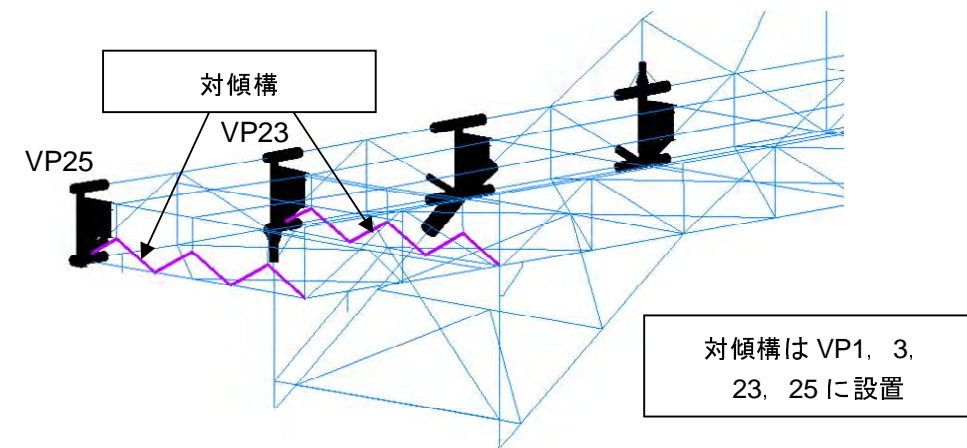
対傾構設置の効果を確認するため、T 荷重によるニーブレースと下弦材接合部の応力状態を比較する。対傾構の設置後は、ニーブレースと下弦材接合部の構造が変化し、設置前後で格点部の応力分布が変化するため、応力範囲ではなく、応力分布（局部応力）の比較により応力低減の効果を確認することとする。

1) 解析条件

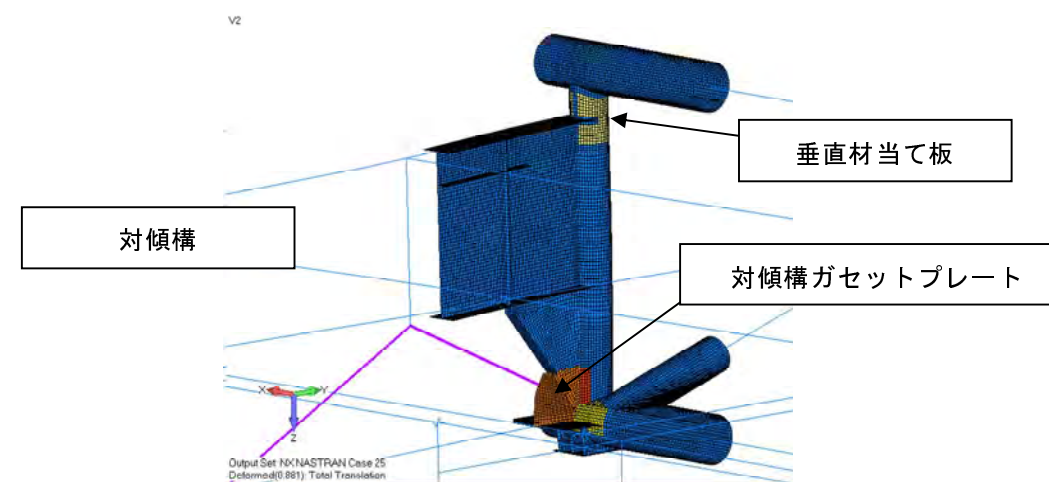
- 解析モデル：全体解析（梁要素+シェル要素）モデル
  - ・対傾構，格点部補強を梁要素でモデル化
  - ・対傾構ガセット，当て板補修をシェル要素の板厚でモデル化

荷重条件：T 荷重

载荷位置：格点直上（VP23，VP25）



(a) 対傾構梁要素モデル図

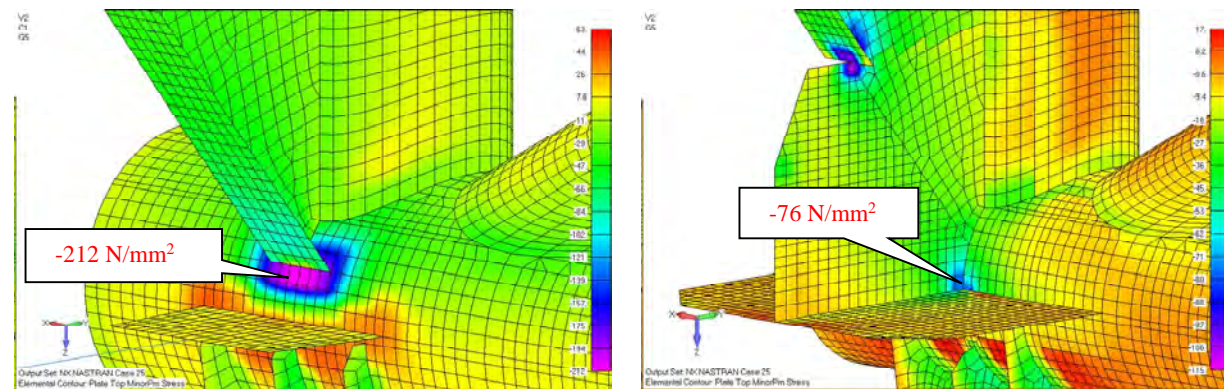


(b) VPR25 拡大図

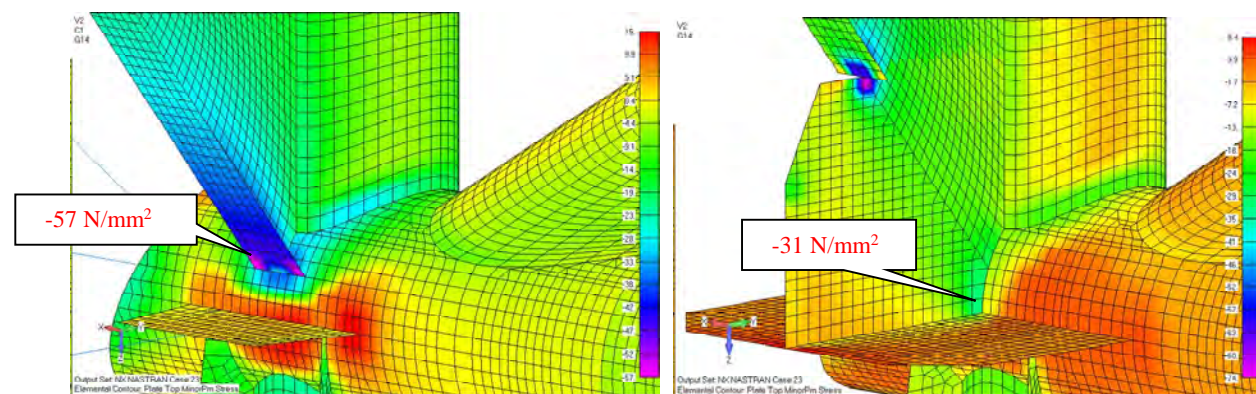
図-3.21 モデル図

## 2) 解析結果

解析結果を図-3.22、図-3.23 に示す。対傾構の設置により、亀裂発生部位の応力度が、設置前に比べ36%（VPR25）、54%（VPR23）と、大幅に低減されていることが解る。



(a) 対策工施工前 (b) 対策工施工後  
図-3.22 VPR25 対策前後の応力比較（最小主応力）



(a) 対策工施工前 (b) 対策工施工後  
図-3.23 VPR23 対策前後の応力比較（最小主応力）

## (3) 部材応力の確認

対傾構設置後の構造について、活荷重による局所の応力状態を確認する。

### 1) 解析条件

解析モデル：全体解析（梁要素＋シェル要素）モデル

- ・対傾構，格点部補強を梁要素でモデル化
- ・対傾構ガセット，当て板補修をシェル要素の板厚でモデル化

荷重条件：死荷重+B 活荷重（L 荷重），影響線荷重

### 2) 解析結果

解析結果を表-3.6、図-3.24 に示す。

対傾構ガセットプレートに比較的高い応力集中が生じているが、いずれも許容応力度（210 N/mm<sup>2</sup>，SM490Y）は満足している。ここで、ガセットプレートの板厚は、応力集中箇所の応力が許容値を満足するように設定した。各照査位置の最大応力を表-3.6 に示す。

※なお、図-3.23 では対傾構ガセットプレートと既設ニーブレースの接合部境界に応力集中が生じているが、これは解析モデル上、対傾構ガセットとニーブレースウェブが一枚になっているために生じる応力集中である。実際には、ここは添接部となるため、この応力集中は図-3.23 よりも小さいと考えられる。

表-3.6 活荷重（B 活荷重）に対する応力照査結果

部材	ガセットプレートの局部応力	許容応力度	降伏応力度
VP1, 25	198 N/mm <sup>2</sup>	210 N/mm <sup>2</sup>	355 N/mm <sup>2</sup>
VP3, 23	197 N/mm <sup>2</sup>	210 N/mm <sup>2</sup>	355 N/mm <sup>2</sup>

材料：VP1, 25 ガセット PL SM490Y，板厚 14 mm  
VP3, 23 ガセット PL SM490Y，板厚 20 mm

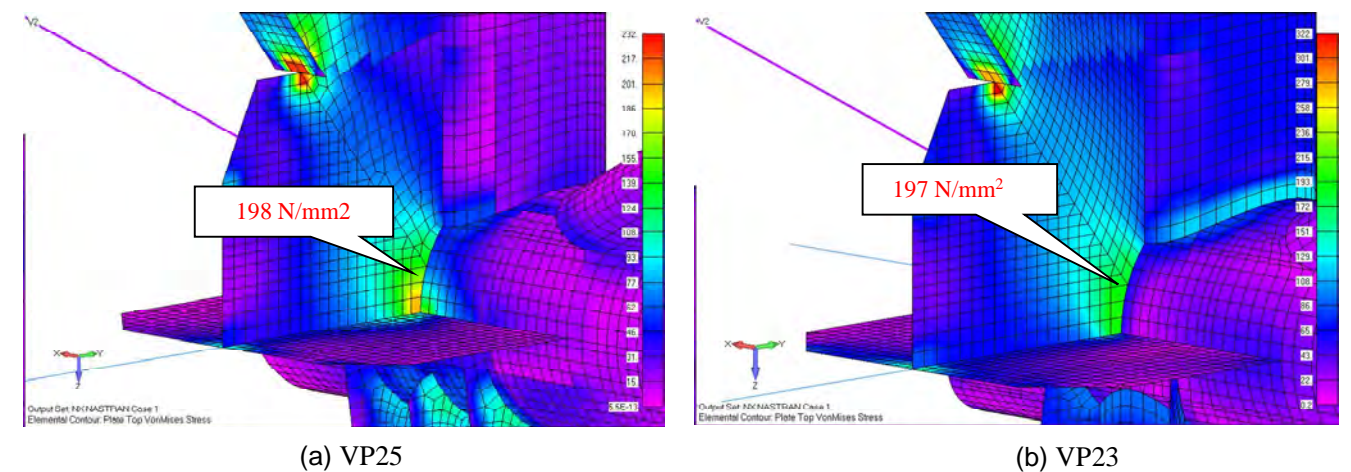


図-3.24 当て板＋ニーブレース改修後の応力照査



(4) 疲労耐久性の確認

対傾構設置後の構造について、疲労照査を行う。

1) 疲労照査条件

解析モデル：全体解析（梁要素+シェル要素）モデル

- ・対傾構，格点部補強を梁要素でモデル化
- ・対傾構ガセット，当て板補修をシェル要素の板厚でモデル化

荷重条件：T 荷重，VP1～VP25 移動载荷

照査期間：52 年（現在～竣工後 100 年）

照査応力：ホットスポット的応力

照査位置：活荷重に対する応力集中箇所（図-3.25），VPR25 および VPR23

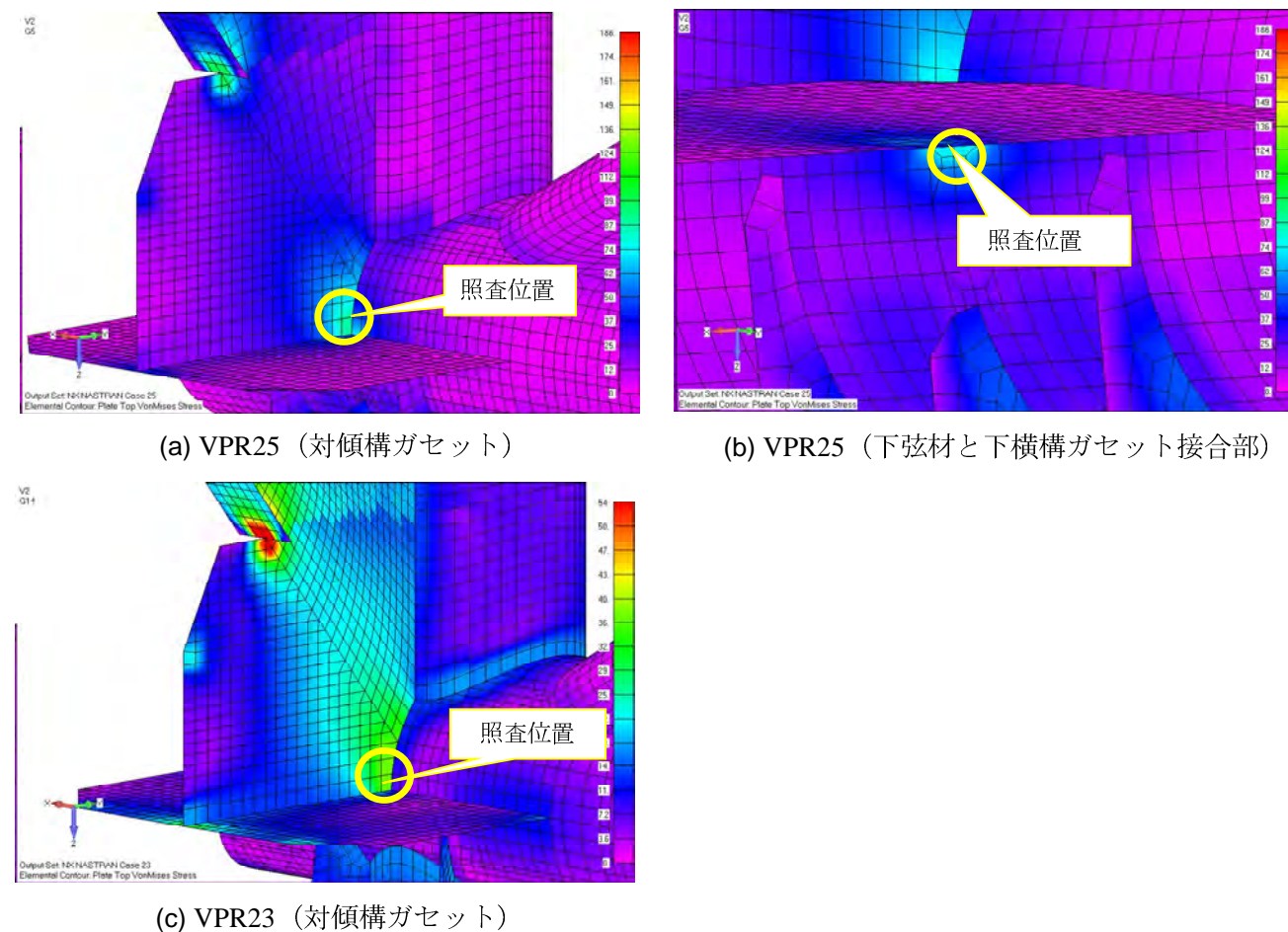


図-3.25 疲労照査の位置（T 荷重，格点直上载荷，ミーゼス応力）

2) 疲労照査結果

疲労照査結果を表-3.7，表-3.8 に示す。

対傾構ガセットプレートは新規に設置する部材であり，現在から竣工後 100 年までの 52 年間で累積損傷度は VP1, 25 で 0.18 と小さい。また，VP3, 23 では，応力範囲が打ち切り限界以下となる。

下横構ガセットプレートと下弦材接合部では，52 年間で累積損傷度は 0.05 と小さい。ただし，下横構ガセットプレートと下弦材接合部は支承部補剛リブの影響で，現況構造でも高い応力集中が生じていることから，3 枚の補剛リブのうち中央のリブは部分的に切断している。

表-3.7 対傾構ガセットの疲労照査結果，F 等級（一定振幅応力打ち切り限界  $\Delta \sigma_{ce}=46 \text{ N/mm}^2$ ）

	照査期間 Y (年)	応力範囲 $\Delta \sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	累積損傷度 D
VP1, 25	52	17.1	0.05
VP3, 23	52	12.0 (0.70)	- (-)

( ) 内は、当て板を1.0とした場合の比率を示す

表-3.8 下弦材と下横構ガセット接合部の疲労照査結果

F 等級（一定振幅応力打ち切り限界  $\Delta \sigma_{ce}=46 \text{ N/mm}^2$ ）

	照査期間 Y (年)	応力範囲 $\Delta \sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	累積損傷度 D
VP1, 25	52	26.1	0.18

( ) 内は、当て板を1.0とした場合の比率を示す

(5) 評価

対傾構の設置により，活荷重に対する応力集中を 5 割程度に低減でき，B 活荷重に対しても許容値を超えるような応力は生じない。

疲労耐久性については，対策後，現在から竣工後 100 年までの累積損傷度は 1.0 を下回る疲労照査結果となっており，新たな疲労亀裂発生の恐れは少ないと評価した。