

鋼橋の疲労亀裂調査の効率化 に関する研究プロジェクト (研究概要)

平成28年11月22日

関西大学 坂野 昌弘

鋼橋の疲労亀裂調査の効率化に関する研究

プロジェクトリーダー 坂野 昌弘 関西大学教授

■研究の背景と目的

疲労亀裂対策は発見された亀裂の状況に応じて講じられることから、**疲労亀裂に対しては全数調査が原則**である。しかしながら、調査箇所数が膨大な場合には全数調査に時間がかかることから、現実的には何らかの方法で**優先順位付け**を行い、**効率化**をはかる必要がある。

本研究では、荷重条件や各部位の応力の状況、FCM等の部材の種類、構造詳細、材料特性等に着目して**優先順位付け**を行い、**効率化**をはかるとともに、同時に**高い信頼性**も確保できるような**疲労亀裂調査方法**を提案し、さらに**予防保全も含めた補修方法**も提案する。

■研究の内容

1. 疲労亀裂調査手法の現状把握と課題抽出

対象橋梁に対して**現地調査**を行い、疲労亀裂等に関して**現状**を把握し**課題**を抽出する。

2. 疲労亀裂調査のスクリーニング方法の検討

荷重条件や各部位の応力状況、FCM等の部材の種類や構造詳細、材料特性等に着目し、解析や実験により、調査個所の**優先順位付け**を行う。また、提案する優先順位付けの**妥当性**を実橋での亀裂調査や応力計測等によって**検証**する。

3. 疲労亀裂調査後の補修方法の検討

亀裂発見後の**応急対策**と**恒久対策**、亀裂発生が予想される部位に対する**予防保全**等を含めた補修方法を解析や実験を行って検討する。また、提案する補修方法の**妥当性**を実橋での応力計測等により**検証**する。

4. 効率的な疲労亀裂調査方法等の取りまとめ

上記の検討結果を取りまとめ、**効率的で信頼性の高い疲労亀裂調査方法と補修方法**を提案する。

鋼橋の疲労亀裂調査の効率化に関する研究

■研究期間:平成25年度～平成27年度

| 年 度 | 研 究 内 容 |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 平成25年度 | <p>○疲労亀裂調査手法の現状把握と課題抽出：対象橋梁に対して現地調査を行い、疲労亀裂等に関して現状を把握し課題を抽出する。</p> <p>○疲労亀裂調査のスクリーニング方法の検討：荷重条件や各部位の応力状況、FCM等の部材の種類や構造詳細、材料特性等に着目し、解析や実験により調査個所の優先順位付けを行う。</p> |
| 平成26年度 | <p>○疲労亀裂調査のスクリーニング方法の検証：提案する優先順位付けの妥当性を解析や実験、実橋での亀裂調査や応力計測等によって検証する。</p> <p>○疲労亀裂調査後の補修方法の検討：亀裂発見後の応急対策と恒久対策、亀裂発生が予想される部位に対する予防保全対策等を含めた補修方法を解析や実験により検討する。</p> |
| 平成27年度 | <p>○疲労亀裂調査後の補修方法の検証：提案する補修方法の妥当性を解析や疲労実験、実橋での応力計測等によって検証する。</p> <p>○効率的な疲労亀裂調査方法等の取りまとめ：上記の検討結果を取りまとめ、効率的で信頼性の高い疲労亀裂調査方法と予防保全も含めた補修方法を提案する。</p> |

■参加予定メンバー(体制)

産： 橋梁調査会、日本非破壊検査工業会、建設コンサルタンツ協会、日本橋梁建設協会、
阪神高速道路、本州四国連絡高速道路、西日本高速道路

学： 関西大学、京都大学、東京大学

平成25年度の研究成果

下記の内、③の橋梁を研究対象とした

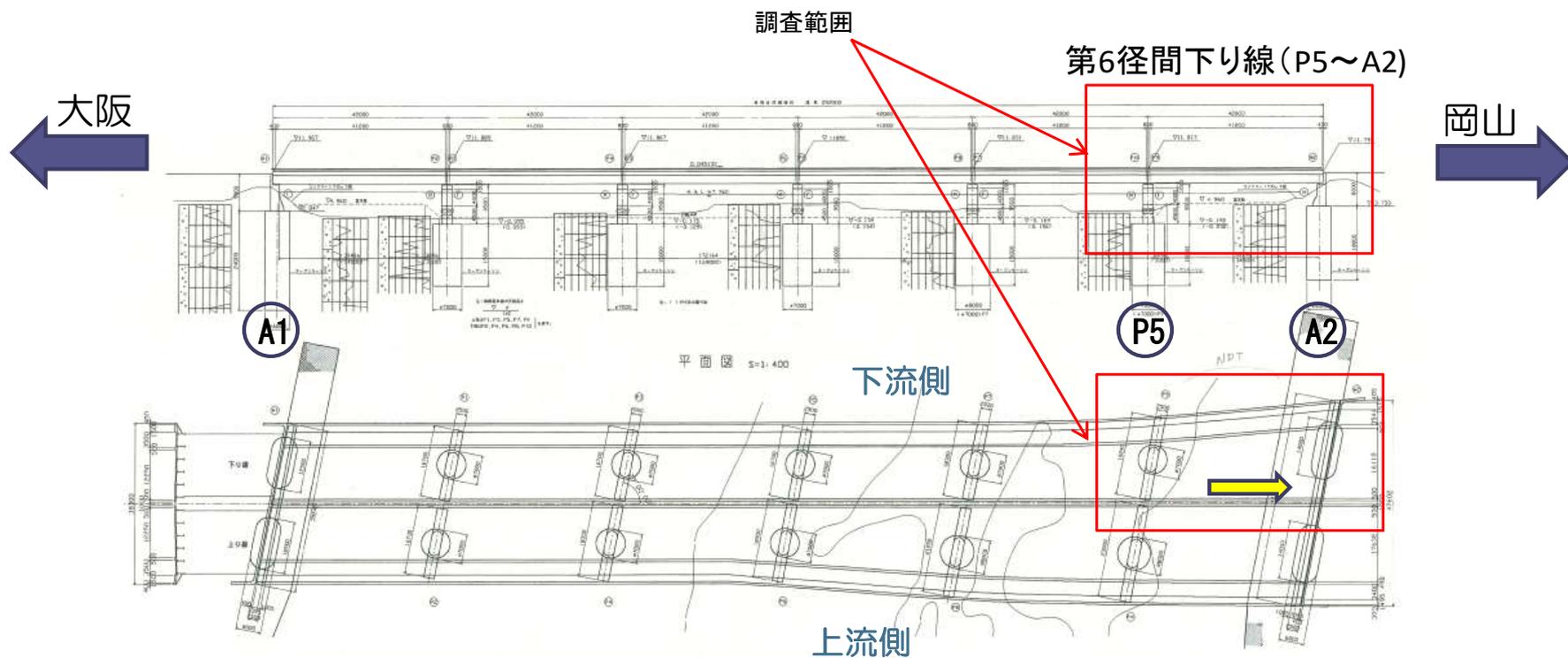
- ① 淀川大橋(単純鋼トラス橋6連、単純鋼非合成鈹桁橋24連、1926年供用開始、88歳)
 - ・トラス橋横桁端部の予防保全
 - ・鋼桁部の調査
- ② 木津川大橋(3径間連続鋼合成鈹桁橋3連、1966年供用、48歳)
 - ・塗膜割れ(約1000か所)
- ③ 姫路大橋(単純鋼合成鈹桁橋6連、1972年竣工、42歳)
 - ・塗膜割れ(約4000か所)

①非破壊検査手法のレビューを行って
今回適用な可能な手法を絞り込み、
現地での疲労亀裂調査方法を決定した。

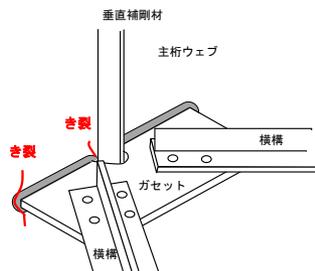
10種類→2種類(ETとMT)

②現地調査を行って、
10パターンの塗膜割れに対して、
優先度の高い2パターンを選定した。

4. 調査範囲

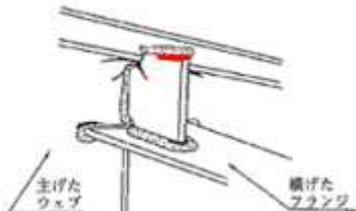


パターン①

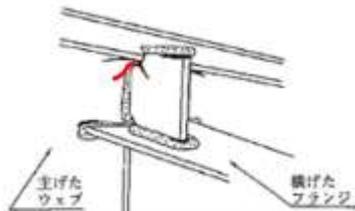


横構取りけガセット溶接部

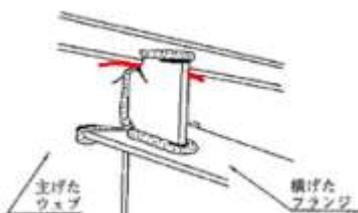
パターン④

垂直補剛材と
主桁上フランジ溶接部

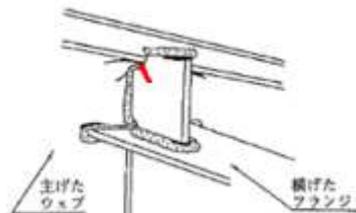
パターン⑤

垂直補剛材と
ウェブ溶接部

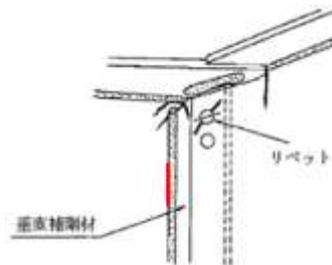
パターン⑥

主桁上フランジと
ウェブ溶接部

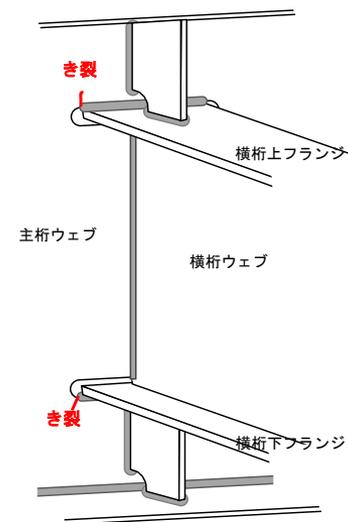
パターン⑦

垂直補剛材
スカラップ部(母材)

パターン⑧

垂直補剛材と
主桁ウェブ溶接部

パターン⑩



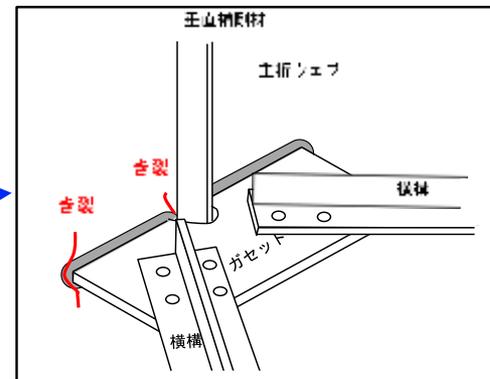
主桁貫通構造溶接部

 H26年度調査対象

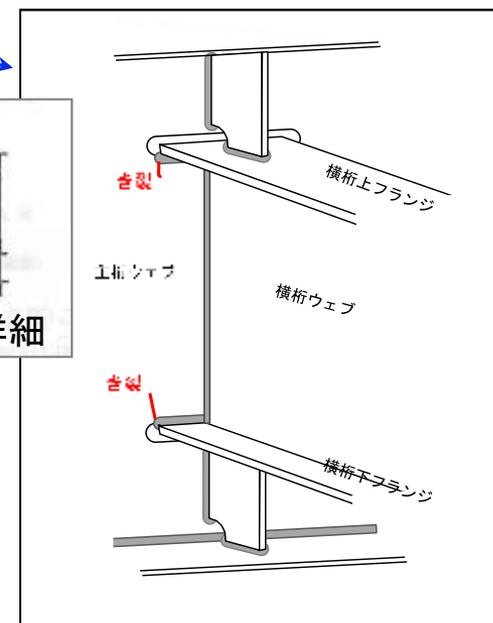
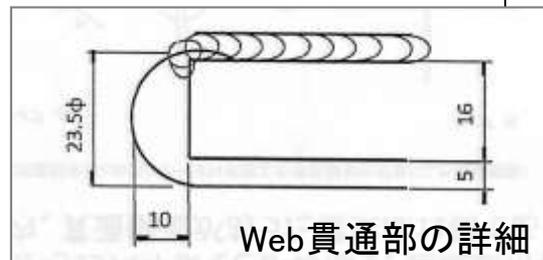
調査対象の損傷パターン

損傷パターン別に分類した塗膜割れ (対象橋梁全箇所数)

| 損傷パターン | 下り線 | 上り線 | 合計 |
|--------|------|------|------|
| パターン① | 345 | 212 | 557 |
| パターン④ | 631 | 560 | 1191 |
| パターン⑤ | 214 | 208 | 422 |
| パターン⑥ | 123 | 118 | 241 |
| パターン⑦ | 304 | 274 | 578 |
| パターン⑧ | 92 | 68 | 160 |
| パターン⑩ | 456 | 421 | 877 |
| 合計 | 2165 | 1861 | 4026 |



損傷パターン①



損傷パターン⑩

対象径間 (第6径間) 調査箇所数

| 損傷パターン | | 塗膜割れ 有り | 塗膜割れ 無し | 合計 |
|--------|-------|------------|------------|-----|
| 上下線合計 | パターン① | 80 | 0 | 80 |
| | パターン⑩ | 131 | 18 | 149 |
| 合計 | | 211 | 18 | 229 |

③渦流探傷法（ET）で亀裂調査を行い、後に実施した磁粉探傷法（MT）の結果と比較して的中率や見逃し率、空振り率について詳細に検討した。

④ETとMTの実際の作業日数から、ETでスクリーニングを行った場合の作業日数の短縮化について検討した。

⑤**疲労実験**を行い、**横桁貫通構造の疲労挙動**について詳細に検討し、**他の亀裂パターンとの違い**を明らかにした。

⑥**拡張有限要素法 (XFEM)**による**亀裂進展シミュレーション**を行い、**疲労亀裂の進展挙動や進展寿命が予測可能**であることを示した。

平成26年度の研究成果

- 貫通構造（H'等級）の実態調査
- 非破壊検査による点検の効率化
- 疲労試験による事後&予防保全対策の検証
- XFEMによる疲労破壊シミュレーション

貫通構造(H'等級)の実態調査

直轄**107**橋について調査中。

自治体では**624**橋で横桁貫通の可能性あり。

(大型車交通量 \geq 2,000台/日)

以上、近畿管内！ →全国では10倍？**数千橋**??

非破壊検査による点検の効率化

- ①⑩以外の亀裂パターンを対象にETとMTを実施済み。比較検討中。
- 今年から赤外線による遠隔検査にトライ。

疲労試験による事後 & 予防保全 対策の検証

- 事後保全：亀裂の削除 & 整形、ストップホール、当て板
 - 予防保全：溶接止端仕上げ、当て板
- ⇒ 点検のみの効率化が目的ではない！

平成27年度の研究成果

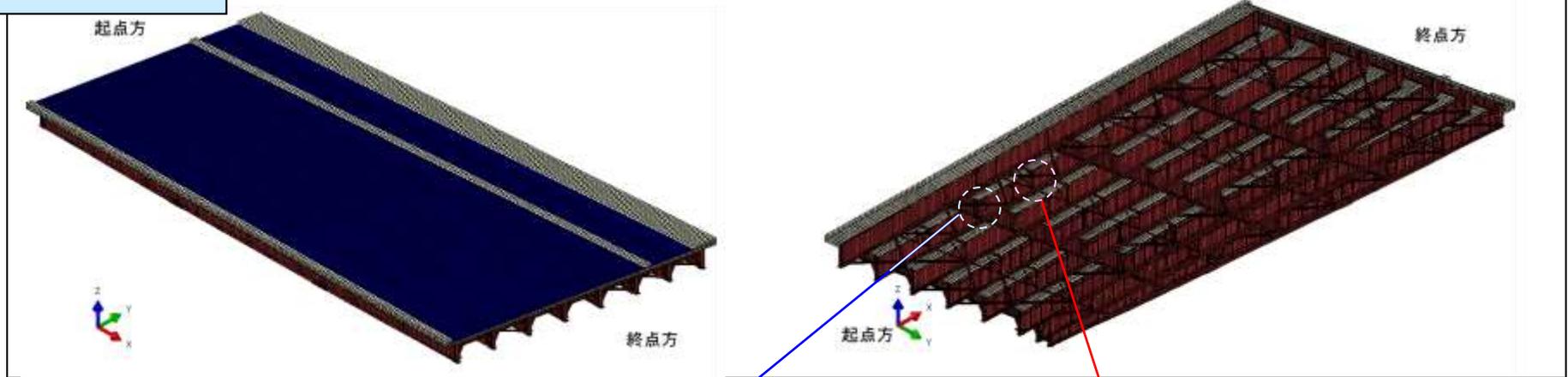
- (1) **解析**による対策効果の検討
- (2) **実験**による対策効果の検討
- (3) **現地計測**による対策効果の検討
- (4) **効率的な疲労亀裂調査方法等の
取りまとめ**

(1) 解析による対策効果の検討

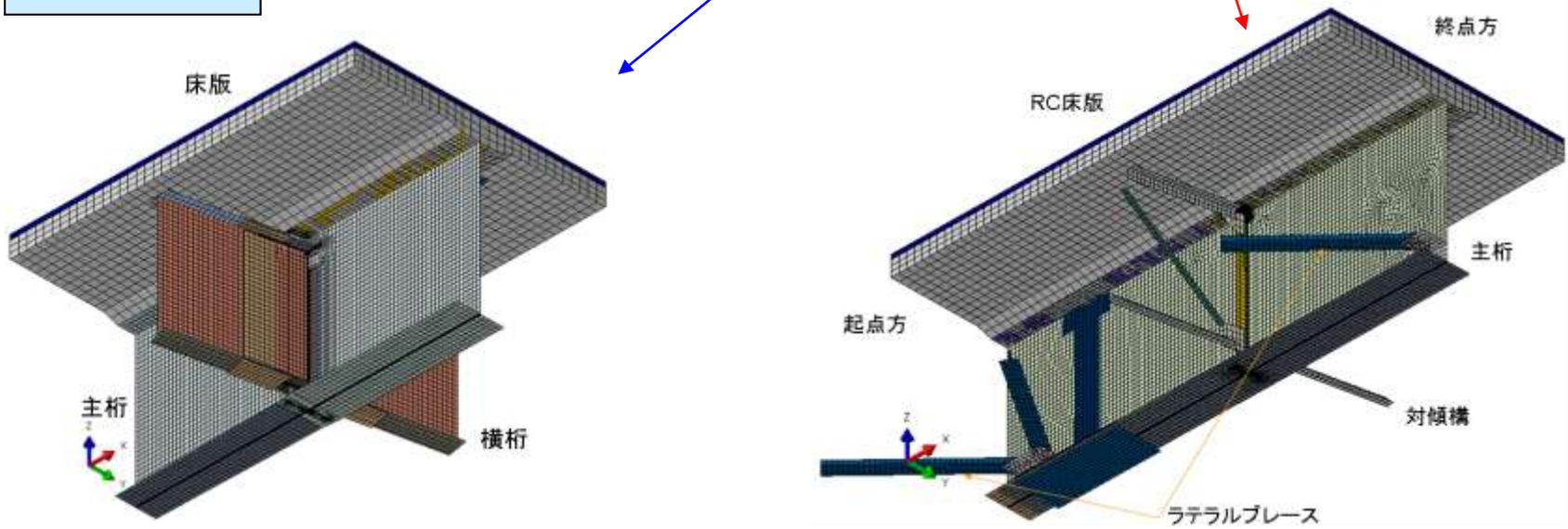
- 実橋を対象とし、1径間分の全体モデルを作成して、FEMによる応力解析とXFEMによる亀裂進展解析を行った。
- その結果、FEM解析により、分配横桁下フランジ貫通部では、ビード切削により溶接止端部の応力集中が消滅し、母材部の公称応力程度となること、
- 分配横桁上部のウェブギャップ部と対傾構取付け垂直補剛材上端部では、当て板やアングル材が主桁の上フランジと密着することにより、ウェブギャップ板上端と垂直補剛材上端の応力集中が、対策前の6割～7割まで低減できることが予測できた²⁾。

FEM解析モデル

全橋モデル



部分モデル

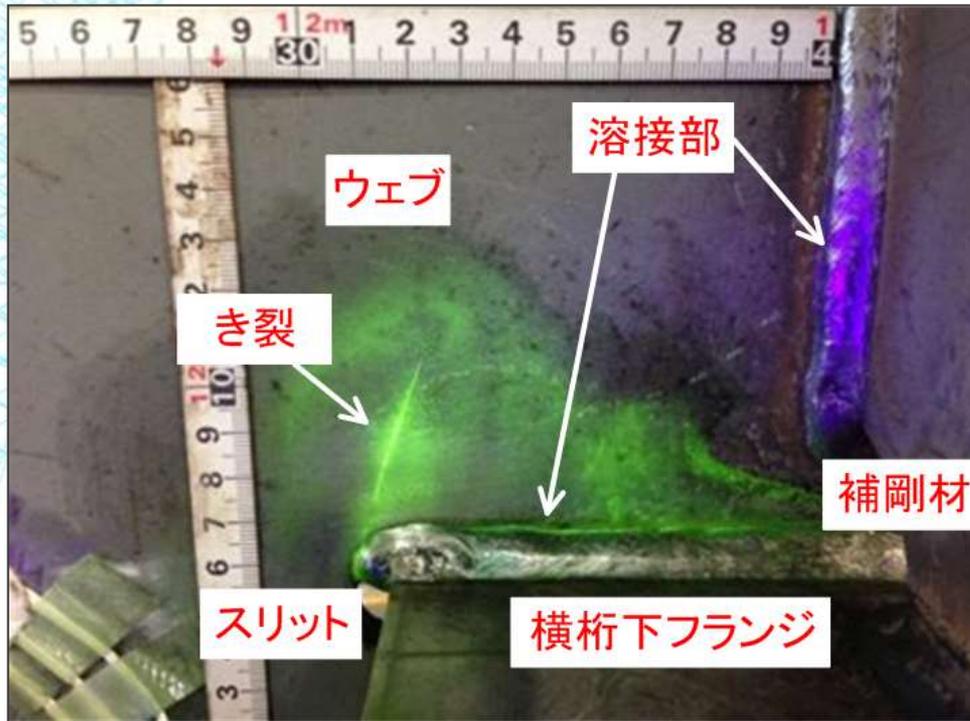


XFEM解析により、

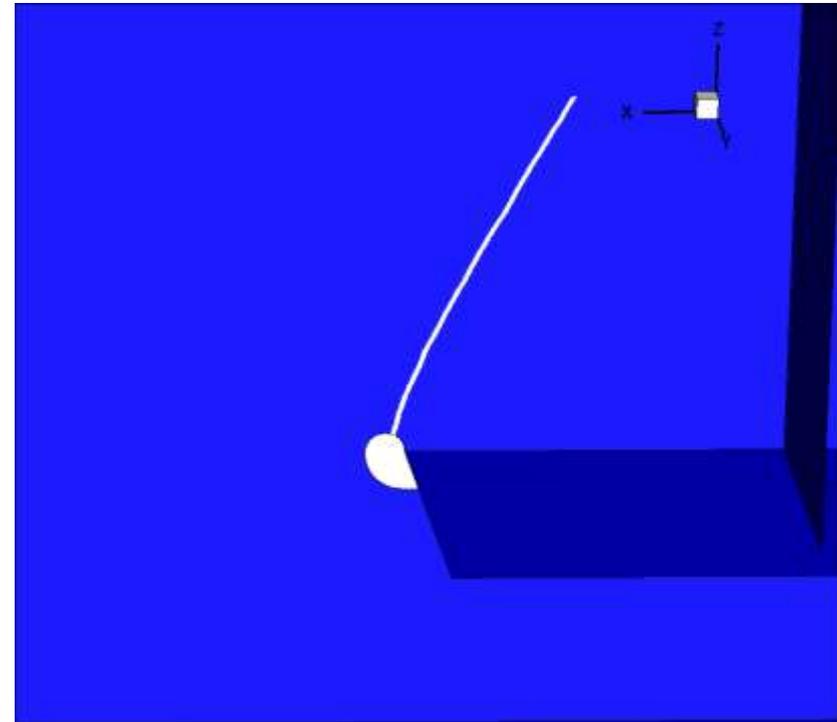
- 横桁下フランジ貫通部ではビード切削後は導入した初期亀裂が進展しないこと、
- またウェブギャップ部では当て板対策後は対策前の100倍以上の疲労寿命となることを予測できた。

疲労亀裂進展挙動の再現解析

- 亀裂進展経路



実験結果



解析結果

定性的に良好な一致（定量的な評価は実験完了後）

(2) 実験による対策効果の検討

- 前年度までの検討^{3),4)}で、横桁貫通部に対しては、止端仕上げや大型の当て板により、ある程度の予防保全効果が確認されたが、亀裂の発生を完全に防止することはできず、また、仕上げ形状の管理や大型当て板取り付けの施工性等に課題があることから、より簡易で効果的なビード切削と小型アンクル材による予防保全対策について検討を行った。
- その結果、横桁下フランジと主桁ウェブの間のすみ肉溶接に対して、ビード全長の1/4程度以上を切削し、切削端部を仕上げた小型アンクル材を取り付けることにより、疲労亀裂の発生が完全に防止できることが検証された⁵⁾。

既往の研究-2

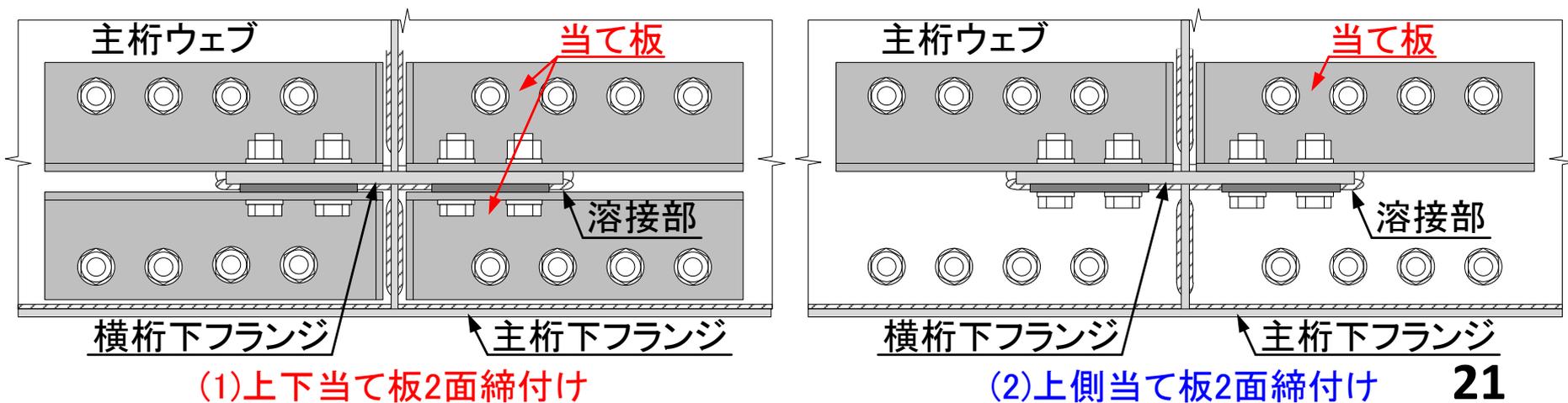
下側溶接タイプの方が危険⇒優先的に対策方法を検討

吉田他:2015(土木学会関西支部)

予防保全対策として、スロット下側溶接タイプの横桁貫通構造に対する当て板による応力低減効果を確認

⇒上下当て板2面締付けで4割まで低減, 上側(スロット側)当て板2面締付けで5~6割まで低減

疲労実験で検証が必要

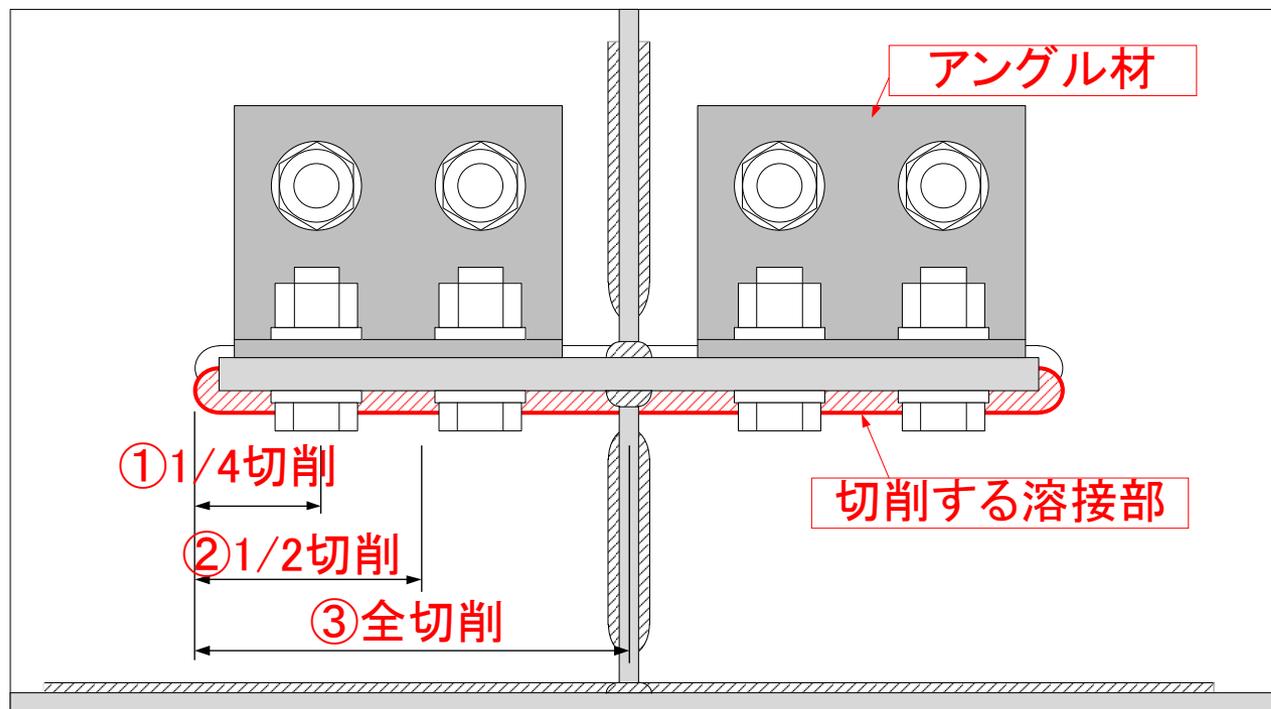


ビード切削方法

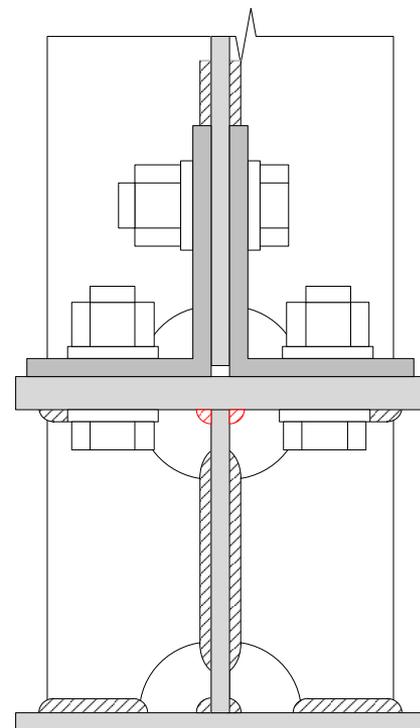
ビード切削 & アングル材

＋ 切削長さ

- ① 1/4 切削
- ② 1/2 切削
- ③ 全切削



(1) 貫通部側面図

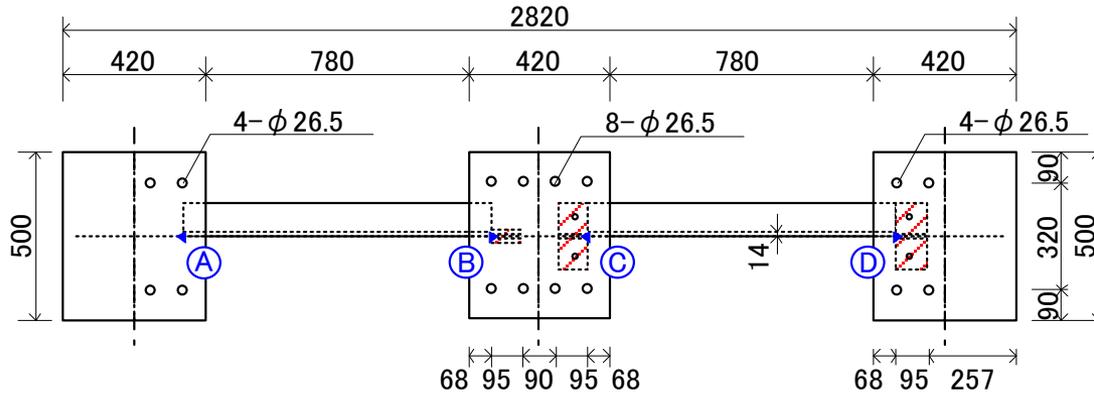


(2) 貫通部断面図

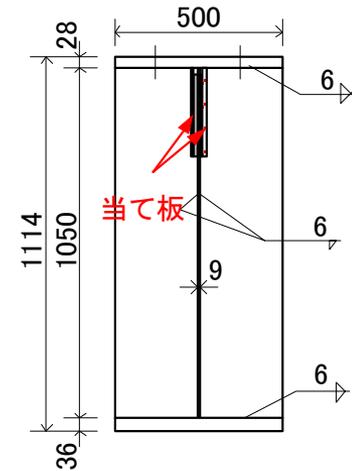
垂直補剛材上端とウェブギャップ部

- また、塗膜割れ発生箇所4000カ所の2/3を占める分配横桁上部のウェブギャップ部や対傾構取付け垂直補剛材上端部の疲労き裂に対して、ジャッキアップによる当て板補強と、タッピングボルトを用いたアンクル材補強の二つの工法の補強効果を検討した。
- その結果、両方の工法とも、亀裂発生部の局所的な応力集中を50～60%程度まで低減できることが明らかとなった⁶⁾。

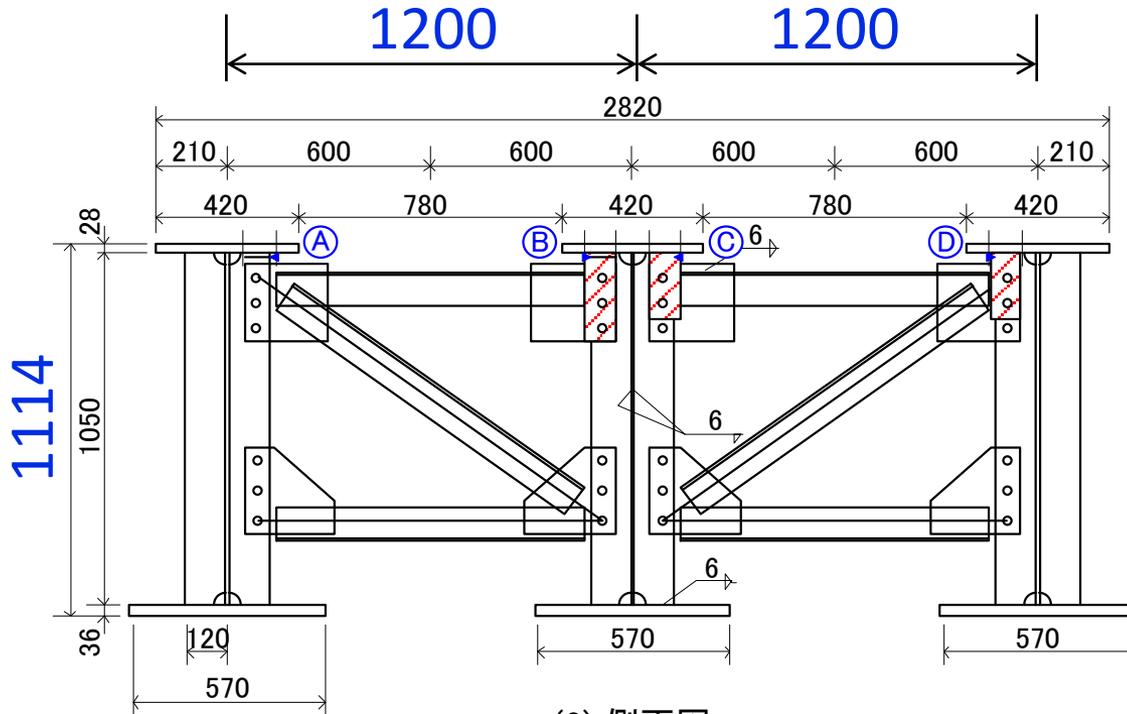
試験体の形状と寸法, ゲージ貼り付け位置



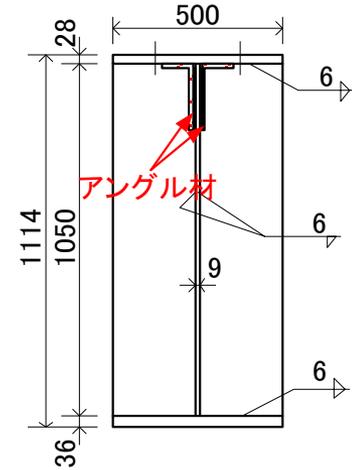
(1) 平面図



(3) 断面図 (試験部B)

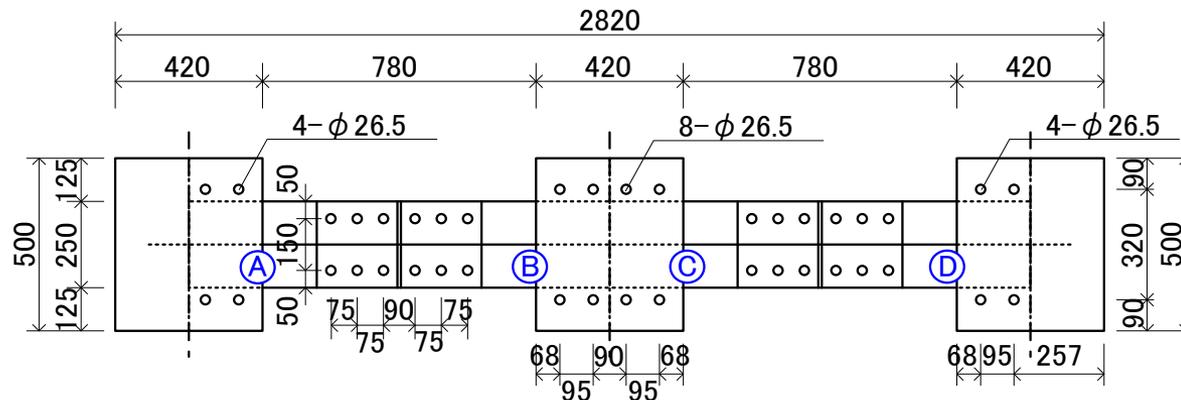


(2) 側面図

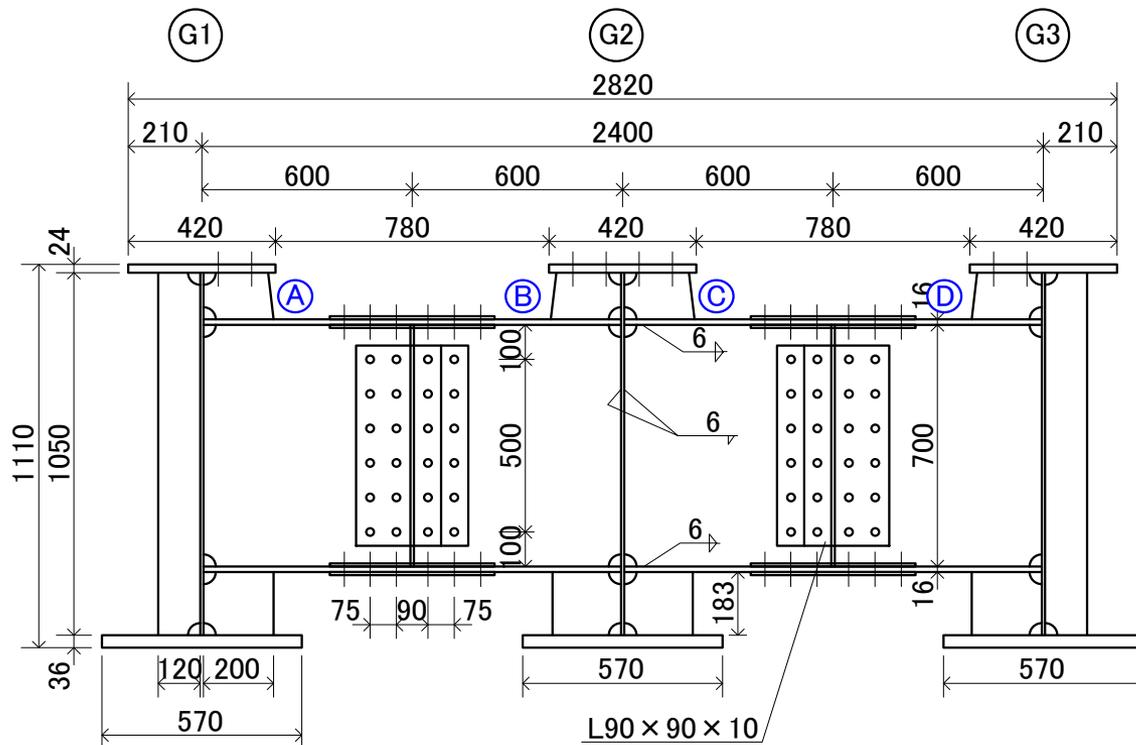


(4) 断面図 (試験部C, D)

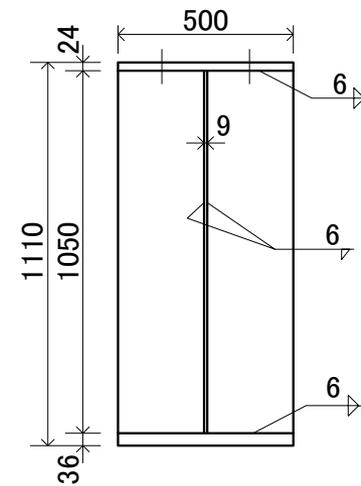
試験体の形状と寸法



(1) 平面図



(2) 断面図



(3) 側面図

(3) 現地計測による対策効果の検討

実橋の

横桁貫通部に対してビード切削と小型アングル材、

分配横桁上部のウェブギャップ部と対傾構取付け垂直補剛材上端部に対して

ジャッキアップによる当て板とタッピングボルトを用いたアングル材の予防保全対策を試行し、

その前後で72時間連続の応力計測を行って、

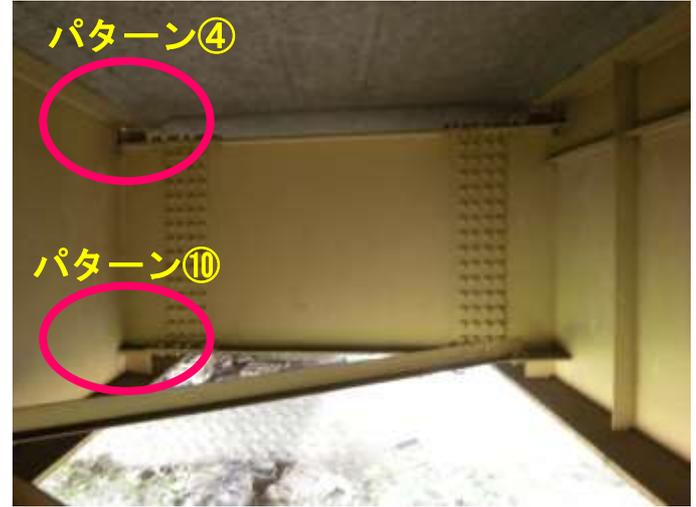
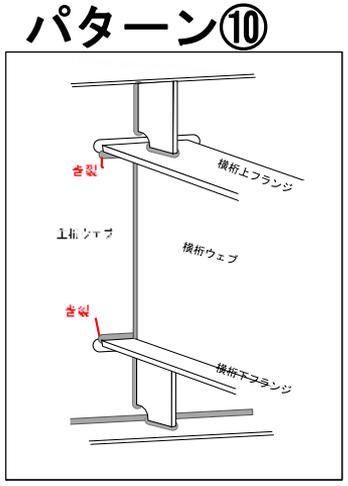
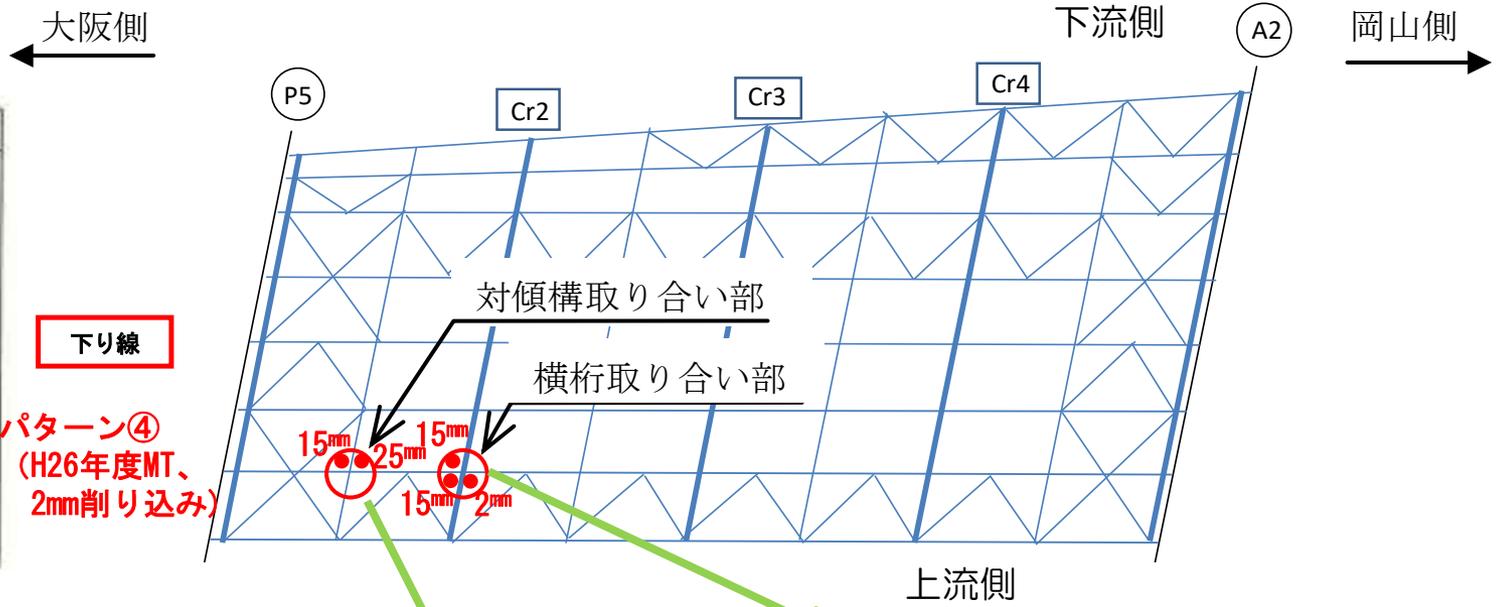
予防保全対策による応力低減効果と疲労寿命向上効果を検証した⁷⁾。

その結果、

横桁貫通部については、ビード切削により溶接部の応力集中が消滅して、疲労寿命が数十倍以上向上し、

ウェブギャップ部と垂直補剛材上端部についても、応力集中が最大で6割程度低減でき、疲労寿命が数十倍向上する効果が検証できた。

5. 応力測定位置



※パターン⑩：計測箇所では、き裂なし (H25年度MT)

(4) 効率的な疲労亀裂調査方法等の取りまとめ

以上の検討結果より、

効率的で信頼性の高い疲労亀裂調査方法と補修方法を提案する。

1) 効率的で信頼性の高い疲労き裂調査方法

2) 合理的な補修方法

1) 効率的で信頼性の高い疲労き裂調査方法

- 塗膜割れに対して、
 - まず初めに、部材の重要度や亀裂であった場合の進展性に着目して優先順位をつけることができる。
 - 亀裂の進展性は、継手の疲労強度等級や作用応力、材料特性等を配慮してある程度推定可能である。
- 次に、非破壊検査手法のレビューを行って
10種類の非破壊検査手法から今回適用な可能な手法を絞り込み、
渦流探傷法ETと磁粉探傷法MTの二つに決定した。

- 磁粉探傷の前に渦流探傷法で亀裂調査を行い、亀裂有と判定された箇所について磁粉探傷法を適用することで、作業工程を短縮できる場合がある。
- ただし、亀裂の半数近くを見逃す可能性があることから、亀裂の重要性、進展性等に十分配慮する必要がある。
- なお、渦流探傷で亀裂有と判定される塗膜割れの個数が全体の半数以上である場合には、工程は短縮されないため、初めから磁粉探傷を行うほうがよい^{8),9)}。

2) 合理的な補修方法

- 横桁下フランジ貫通部
- 分配横桁・対傾構取合い部の垂直補剛材上端部

横桁下フランジ貫通部(事後保全)

亀裂発生後の事後保全については、

ストップホールがあげられる程度の長い亀裂に対しては、ストップホールと高力ボルトの締め付けで亀裂の進展を防止可能。

亀裂が長い場合や応力が大きい場合には、更に当て板等の対策が必要になる場合もある。

ストップホールがあげられないような短い亀裂に対しては、バーグラインダーによる削り込みで亀裂を削除し、削除痕を滑らかに整形することにより亀裂の再発を防止可能。応力が大きい場合には更に当て板等の対策が必要になる場合がある。

横桁下フランジ貫通部（**予防保全**）

亀裂が生じていない箇所に対する**予防保全**対策として、

応力条件が厳しくない場合には、**溶接部の止端仕上げ**が可能である。
ただし、仕上げ状態に対する**施工管理**が重要となる。

応力条件が厳しい場合には、
横桁下フランジと主桁ウェブの間の**ビードを切削し**、
切削したビードの分を**小型のアンクル材**で補強しておけばよい。

分配横桁・対傾構取合い部の垂直補剛材上端部

予防保全対策として、

アンガル材を主桁の上フランジ下面にタッピングボルトで密着させ、

ウェブギャップ板あるいは垂直補剛材に高力ボルトで固定する方法がよい。

事後保全対策として、

長い亀裂の場合には亀裂先端にストップホール、

亀裂が短い場合には亀裂を削り込みで除去した後で

上記のタッピングボルトとアンガル材を用いた補強を行えば良い。

参考文献

- 1) 坂野昌弘：鋼橋の疲労亀裂調査の効率化に関する研究プロジェクト，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，CS4-004，2015.9.
- 2) 田辺篤史，松本理佐，小山雅弘，坂野昌弘：主桁と分配横桁・対傾構との交差部の疲労対策による応力低減効果の解析的評価，土木学会第71回年次学術講演会，CS6-005，2016.9.
- 3) 吉田直人、坂野昌弘、小西日出幸、藤井隆：横桁貫通構造に対する当て板による予防保全対策効果の検討，平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会，I-36，2015.5.
- 4) 吉田直人、坂野昌弘、小西日出幸、藤井隆：横桁貫通構造の疲労損傷に対する予防保全対策効果の検討、土木学会第70回年次学術講演会、CS4-006，2015.9.

5) 吉田直人, 坂野昌弘, 小西日出幸, 小山雅弘: 横桁下フランジ貫通構造に対するビード切削による予防保全対策, 土木学会第71回年次学術講演会, CS6-002, 2016.9.

6) 坂本千洋, 岡田康暉, 坂野昌弘, 小西日出幸, 小山雅弘: 対傾構取付け垂直補剛材上端部の疲労対策効果に関する実験的検討, 土木学会第71回年次学術講演会, CS6-004, 2016.9.

7) Luiza H. Ichinose, 小山雅弘, 坂野昌弘: 応力頻度測定による分配横桁・対傾構取合い部の疲労対策効果の検証, 土木学会第71回年次学術講演会, CS6, 2016.9.

8) 一ノ瀬伯子ルイザ, 水江正弘, 坂野昌弘: 渦流探傷試験を用いた鋼橋の疲労き裂調査の効率化に関する検討、鋼構造年次論文報告集、第22巻、pp.825-832, 2014.11.

9) 一ノ瀬伯子ルイザ, 水江正弘, 坂野昌弘: 渦流探傷試験を用いた鋼橋の疲労き裂調査の効率化に関する検討(その2)、鋼構造年次論文報告集、第23巻、pp.356-363, 2015.11.