

鋼橋桁端部の腐食に対する補強法に関する研究

研究予算：運営交付金
研究期間：平 18～平 20
担当チーム：橋梁構造研究グループ
研究担当者：村越 潤，田中 良樹

【要旨】

本研究では、著しく腐食した鋼部材の当て板補強方法及び鋼橋桁端部に腐食が見られた際の補修・補強方法の判定方法について検討を行った。平成 20 年度は、桁端部に腐食を模擬した断面欠損を有する鋼桁供試体を用いて静的曲げ載荷試験、疲労試験及び水平交番載荷試験を実施した。また、ウェブの断面欠損に対して高力ボルトと接着剤を用いた当て板補強を行い、桁の曲げ疲労試験及び水平交番載荷試験における補強効果を確認した。これらの結果を踏まえて、腐食による局所的な断面欠損に対する簡易当て板補強方法を提案するとともに、鋼橋桁端部に腐食が見られた際の補修・補強工法の選定方法について試案を示した。

キーワード：腐食，修復，ボルト接合，接着剤，応力集中，疲労，地震，繰返し載荷

1. まえがき

鋼道路橋に見られる主要な劣化現象として、鋼部材の腐食が挙げられる。鋼部材の腐食は、鋼道路橋の主な架替え理由の 1 つにも挙げられており¹⁾、長期にわたって維持管理していくためには、定期的な塗替えに加えて、腐食原因除去などの腐食環境の改善と、腐食により断面欠損が生じた部位への適切な補修、補強が重要である。特に、橋桁端部は、狭隘なため湿気がこもりやすい上に、場合により塩分を含む水が伸縮装置から漏水すること等により、腐食しやすい部位である²⁾(図-1)。このため、桁端部の断面欠損やウェブ等に孔が開く状況に至る事例も見られる^{3,4)}(図-2)。また、桁端部の著しい腐食を放置した場合にさまざまな二次的損傷が懸念される(写真-1、図-3)。通常、腐食が見られた場合はさびを除去して再塗装を行うのであるが、桁端部の断面欠損が常時及び地震時の挙動に及ぼす影響は明確でないため、腐食発見時の適切な対処が明確でなく、断面欠損を伴う著しい腐食の場合、断面の補修・補強の要否判定方法が決まっていないために、対応が遅れて腐食をさらに進行される要因になる可能性があると考えられる。

以上を踏まえて、本研究では、a)著しく腐食した鋼部材の当て板補強方法^{3,5)}、b)鋼橋桁端部に腐食が見られた際の補修・補強方法の判定方法及びc)桁端部の腐食環境改善方法について検討^{6,7)}を行った(このうちa),c)は前年度に報告した)。本文では、平成 20 年度に、模擬断面欠損を有する 2 体の鋼桁供試体を用いて、静的載荷試験、疲労試験及び水平交番載荷試験を行った



写真-1 鋼橋桁端部の腐食と震災の事例
*) 震災前に、支承付近の鋼桁に、腐食による著しい断面欠損が発生していた。

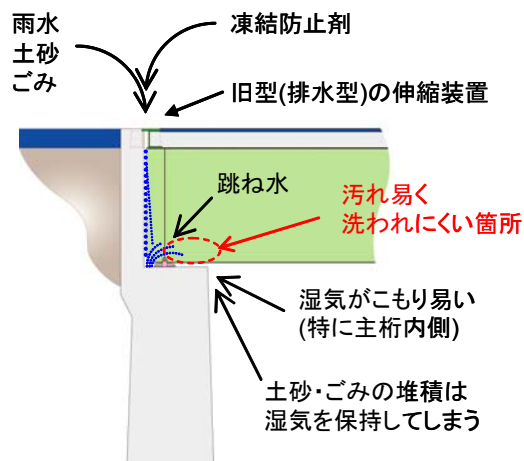


図-1 桁端部の腐食環境

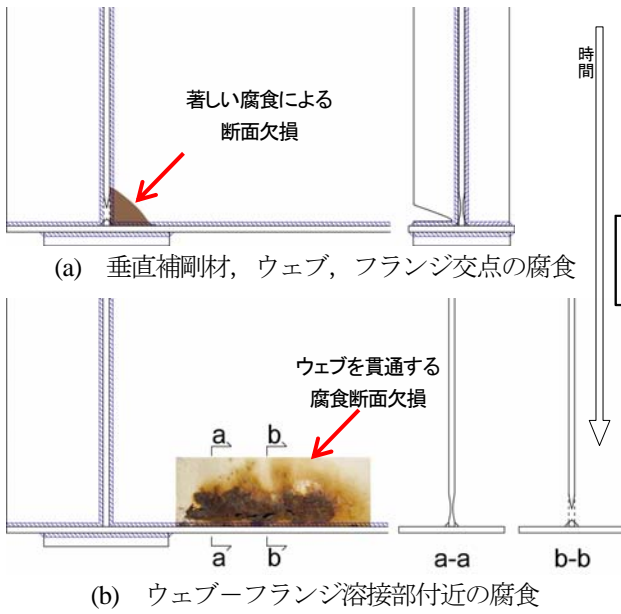


図-2 桁端部の腐食パターン例

結果を示すとともに、それらの結果を踏まえて、腐食による局所的な断面欠損に対する簡易当て板補強方法、及び鋼橋桁端部に腐食が見られた際の補修・補強工法の選定方法を示す。

2. 桁端部周辺の腐食パターンと補強方法

プレートガーダー橋では、桁端部に腐食が見られることが多いが、図-2に示すように、その桁端部の中でも貫通孔を伴うような著しい断面欠損はさらに局所に集中する場合がある。伸縮装置からの漏水は垂直補剛材よりもパラペット側で見られるが、雨量が多いときなどは落下した水が橋台上で跳ねて、垂直補剛材を超えた範囲に飛散する(図-1)。こうした箇所では、常時洗い流されることが少ないために、土砂や塩分が蓄積され、局所的でより厳しい腐食が生じることがある。

図-2(a)のような支点上のウェブ、下フランジ、垂直補剛材の交差点付近の断面欠損は、当て板補強をしても部材交換と同様に主桁のジャッキアップが必要であること、補修・補強後の交差点の防食が難しいことから、結果的に部材交換を選定する可能性が高い。一方、図-2(b)のように、支承から少し離れたところで局所的に断面欠損が見られる箇所では、当て板補強で対処できる可能性がある。

3. 桁端部周辺の断面欠損の影響

3.1 模擬断面欠損を有する鋼桁の荷重試験の概要

(1) 供試体

図-4に鋼桁供試体 Beam1, Beam2 それぞれの形状寸

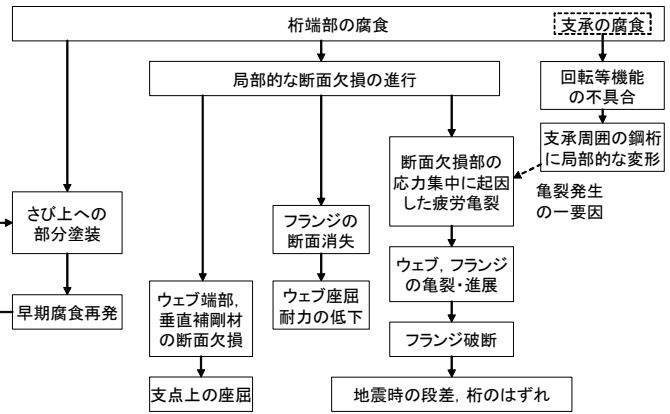
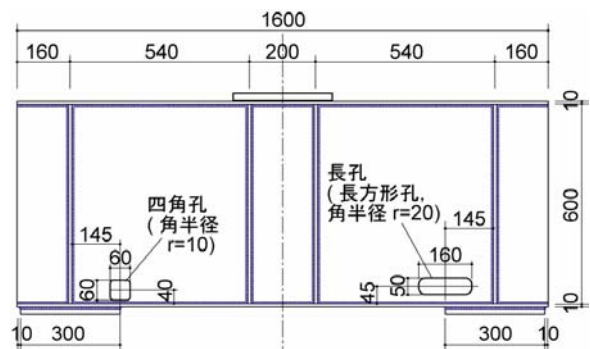
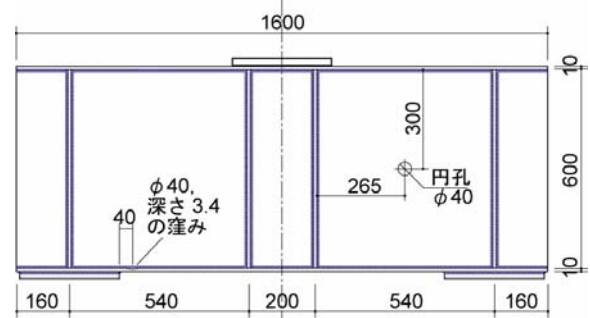


図-3 桁端部腐食の二次的損傷(想定される損傷)



(a) Beam1



(b) Beam2

断面:2-F1 300×10, 1-web 600×10, 材質:SS400

図-4 供試体の形状寸法

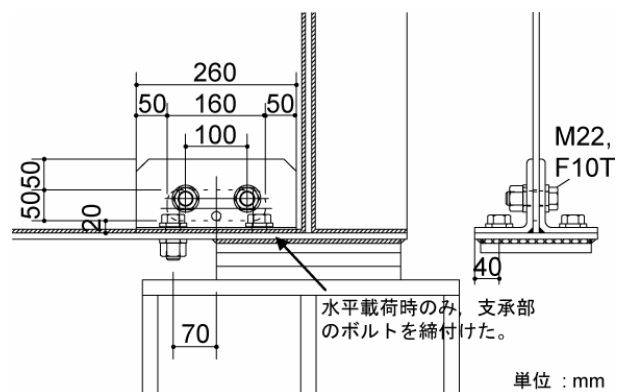
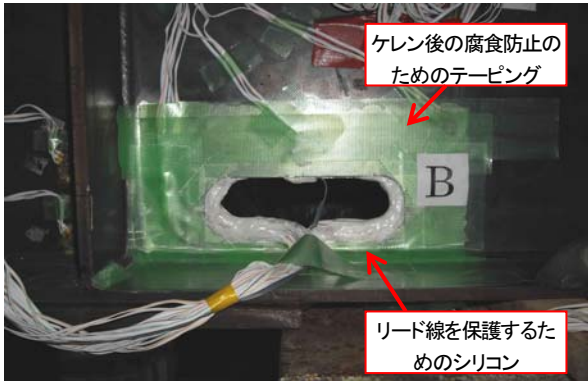


図-5 Beam1 長孔のL型当て板補強

表-1 主な鋼材の諸元

部材	鋼種	板厚 mm	降伏点* N/mm ²	引張強さ N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	当て板接合面の 処理方法と表面粗さ Rz (μm) **
桁***	SS400	9.6	312	445	210	グラインダ, 10
円孔当て板	SS400	9	309	456	—	ブラスト, 50
L型当て板****	SS400	9	330	472	—	ブラスト, 50

*) 桁のデータは試験片3体の平均値(上降伏点), その他はミルシートによる
 **) Rz: 最大高さ粗さ(JIS B 0601), ブラストはグリットブラスト
) ソールプレートを除く *) L150×100×9



(a) 長孔



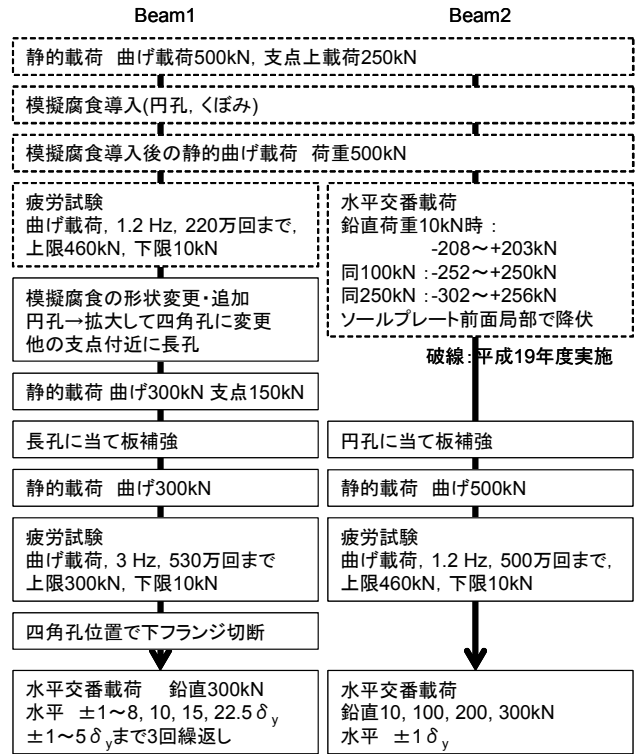
(b) 四角孔

写真-2 人工断面欠損

表-2 接着剤の仕様

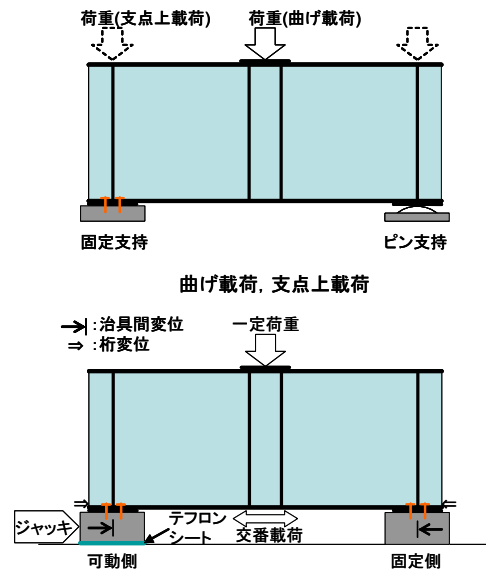
主剤	エポキシ樹脂
硬化剤	変形脂肪族ポリアミン
配合比	主剤:硬化剤=7:3
添加材	繊維, 骨材 (質量比は, 樹脂:添加材=1:2)
可使用時間	90分/10℃
硬化時間	24時間/5℃
強度性能(10℃) 7日養生/1日養生	引張強さ: 27.5/15.4 N/mm ²
	引張せん断強度: 14.3/12.7 N/mm ²
	圧縮降伏強さ: 79.5/36.8 N/mm ²
	圧縮弾性係数: 56.9/8.6 kN/mm ²
線収縮率/体積収縮率	0.06 / 0.18 %
熱膨張係数	3.22 × 10 ⁻⁵ (20~50℃)

注) 数値は, メーカーのカタログ値

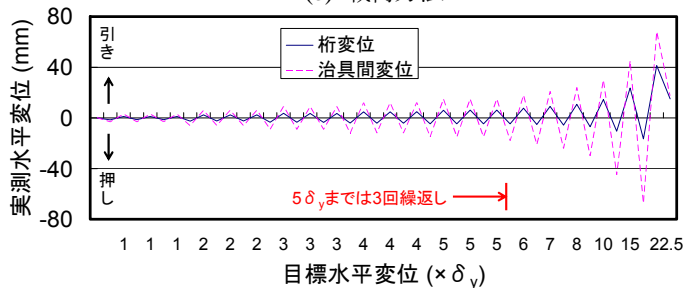


δ_y: 鋼桁支付近で降伏する程度の支承治具間変位(3mm)

(a) 試験フロー



水平交番荷重 (b) 荷重方法



(c) Beam1 の水平変位パターン

図-6 荷重試験方法の概要

法を示す。Beam1 には、図-2(b)のような橋軸方向に長い貫通孔が実橋で見られることから、それを模擬した長孔をソールプレート前面直上に設けた(写真-2(a))。また、この腐食を当て板で補強するため、図-5、写真-3(a)のような山形鋼を加工したL型の当て板を用意した(詳細後述)。Beam1 の一方の支承付近には、 $\phi 40\text{mm}$ の円孔を開けていたが、疲労亀裂発生を促進させるため、角に丸み(半径 10mm)のある四角孔(60mm \times 60mm)に変更した(図-4(a)、写真-2(b))。

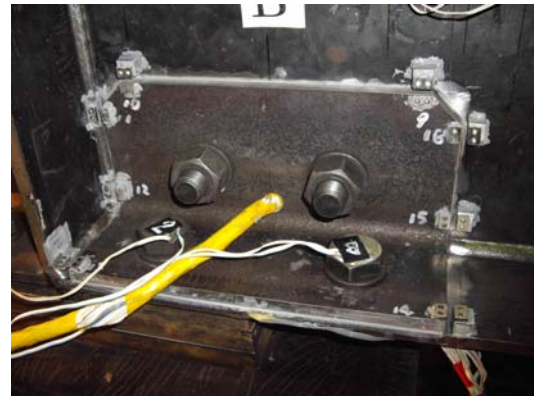
当て板は、接合面に接着剤を塗布するとともに、高力ボルトを用いて固定した。表-1 に主要な鋼材の諸元を示す。また、表-2 に使用した接着剤の主な仕様を示す。なお、長孔、四角孔は機械加工によった。

(2) 試験方法

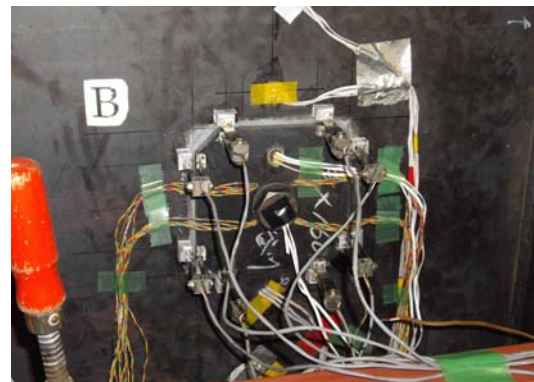
図-6 に、载荷試験のフローと载荷方法の概要を示す。Beam1 は上記のとおり模擬腐食を設けた上で、静的载荷試験を行った後、長孔のみL型当て板補強を施して、再度静的载荷試験を行った。静的载荷は、長孔付近の応力集中が厳しくなったため、荷重を 300kN までとした。支承条件として、静的载荷における長孔付近の支持は、固定支持(支持台にボルトで固定して回転を拘束、以下同様)とピン支持の 2 種類とした。また、支点付近の応力分布と曲げの影響を分離するため、各曲げ载荷後、支点上 1 点に曲げ载荷時の 1/2 の荷重を载荷した。その後、曲げによる疲労試験を実施した。疲労試験の支承条件は、両端ともに固定支持とした。疲労試験は 530 万回まで実施したが、下フランジが破断するまでには至らなかったため、四角孔直下、ソールプレート前面から約 9mm の位置で、下フランジとウェブをグラインダで切断した後に(写真-4)、水平交番载荷試験を実施した(写真-5、载荷前の切断面間距離は 2mm 程度)。前年度の Beam2 の载荷試験結果を参考に、鋼桁の支承付近に降伏が生じる程度の支持台治具間変位 3mm を δ_y として、水平ジャッキの制御を行った。ただし、試験後確認したところ、供試体両端間の水平変位と δ_y は大きく異なっていた(図-6(c))。水平交番载荷中は、鉛直荷重を 300kN 一定とした。

Beam2 は、前年度に設けた円孔($\phi 40\text{mm}$)に高力ボルト 1 本と接着剤を用いて当て板補強を行った後(写真-3(b))、静的载荷試験、疲労試験(Beam2 は、図-6(b)のとおり、片側のみ固定支持)及び水平交番载荷試験(支承付近が部分的に降伏する程度まで载荷)を実施した。Beam2 の水平交番载荷では、鉛直荷重を変化させた(図-6(a))。

静的载荷試験、水平交番载荷試験では、ひずみ、変



(a) 長孔へのL型当て板



(b) 円孔への当て板

写真-3 人工断面欠損の簡易当て板補強



写真-4 フランジ切断

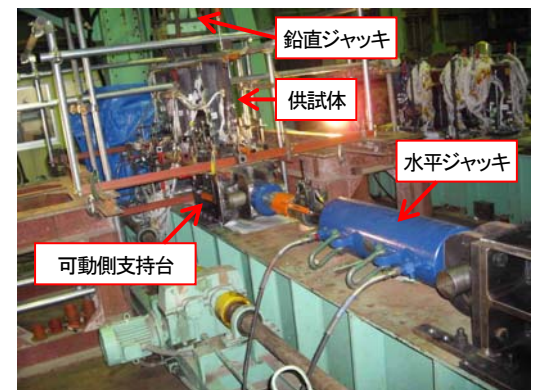


写真-5 水平载荷試験

位を静的に測定した。疲労試験中は主要箇所 16 点のひずみ，変位に限定して動的に監視を行った。また，疲労試験中，目視により亀裂の発生進展を監視するとともに，適宜磁粉探傷法によって亀裂の確認を行った。

3.2 疲労に及ぼす影響

(1) 断面欠損部のひずみ分布

図-7に，ウェブのソールプレート直上に設けた四角孔縁のひずみ分布を示す。図中の τ と矢印は荷重中のせん断応力の方向を示す。各点のひずみは四角孔の形状に添って法線方向にプロットしており，内側が引張側(+側)として表記している。また，図中，記号を変えて，曲げ荷重時及び支点上荷重時の値を示す。支点付近の支圧の影響のないウェブ一般部に断面欠損がある場合には，四角孔の対角線に対称にひずみが生じる傾向にある^{8),9)}。支点付近においても，圧縮，引張の傾向(図-7の第1, 3象限で引張ひずみ，第2, 4象限で圧縮ひずみ)は概ね同様であったが，値は非対称であり，同図の第4象限の圧縮ひずみが著しく大きい傾向が見られた。

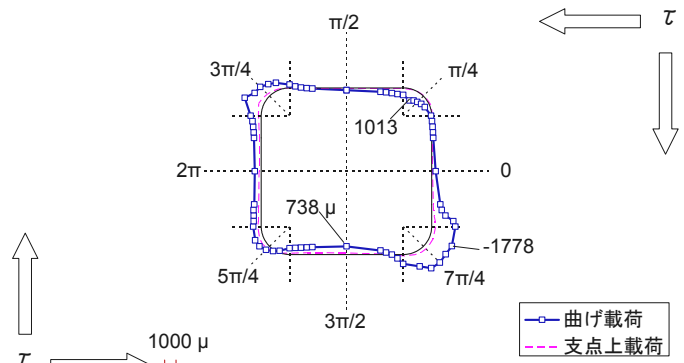


図-7 四角孔縁のひずみ分布(固定支持, 300kN)

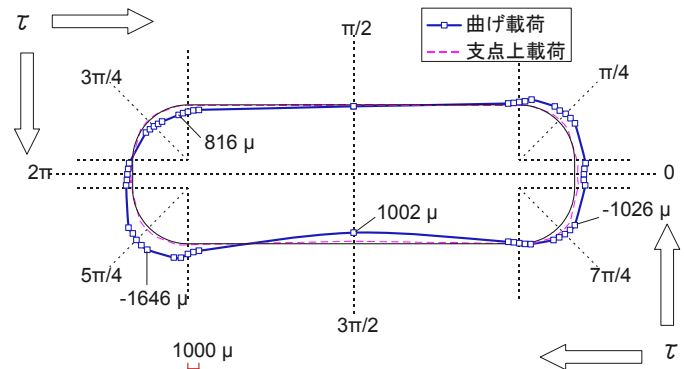


図-8 長孔縁のひずみ分布(固定支持, 300kN)

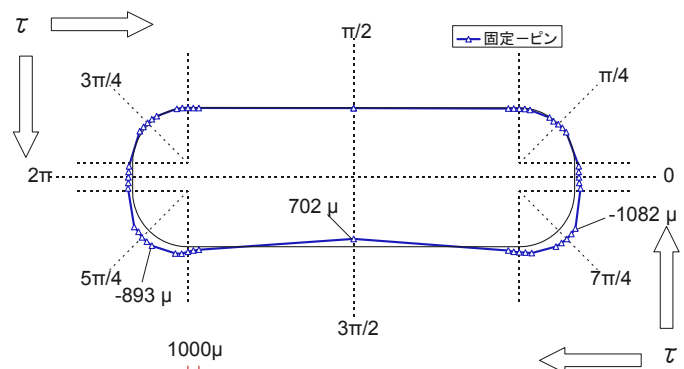


図-9 長孔縁の固定支持の影響 (固定支持のひずみからピン支持のひずみを減じた値, いずれも 300kN 時)

図-8に，ウェブの長孔縁のひずみ分布を図-7と同様に示す。長孔の場合も傾向は四角孔と類似しており，支間中央側の下フランジに近い箇所(図-8は図-7とせん断応力方向が逆のため第3象限)で圧縮ひずみが大きかった。図-7, 図-8ともに，固定支持のときの四角孔，長孔それぞれの結果を示しており，ソールプレート前面直上($3\pi/2$ の位置)にも比較的大きい引張ひずみが生じていた。一般的にせん断応力作用下では，この位置に応力集中による大きいひずみは生じない⁹⁾。図-9に，長孔の縁ひずみについて，固定支持のときのひずみからピン支持のときのひずみを減じた結果(以下，固定-ピンの結果という)を示す。ピン支持の場合，ソールプレート前面での下フランジの拘束がないため，せん断応力の影響が支配的であった。一方，固定-ピンの結果は，概ね左右対称のひずみ分布を示しており，かつ下フランジに近い第3, 4象限で圧縮， $3\pi/2$ の位置で引張が生じていた。図-10に示すように，長孔の下部分が逆T断面，両端固定のはりとなり，固定支持におけるソールプレート前面直上に強制変位(0.03mm,あるいは仮想の荷重 20kN, いずれもひずみから推定)が負荷された状態に類似していたものと考えられる。

(2) 縁ひずみと疲労寿命

一様なせん断応力を受ける板の四角孔周囲の最大ひずみは図-11に示す理論解で表わされる⁸⁾。著者らはこ

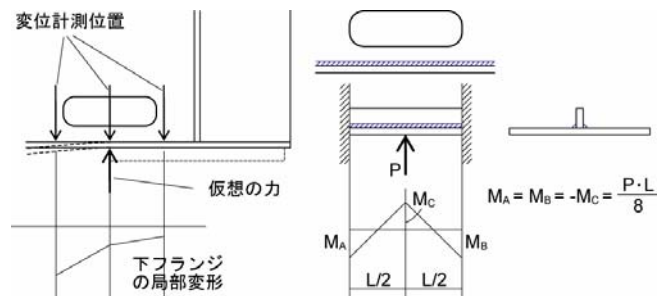


図-10 ソールプレート溶接部付近のフランジ鉛直変位

これまで鋼床版の横リブスリット(横リブの切欠き部)の応力集中に対しても、四角孔の理論解を適用できることを示した¹⁰⁾。この方法によって、荷重 300kN 時の長孔のひずみ最大値を計算すると±1030 μ であるのに対して、ピン支持の場合の実験値は912 μ (計算値に対して0.88)、-942 μ (同0.92)であった。

固定支持におけるソールプレート上の圧縮応力が作用する範囲のウェブでは、長孔縁のせん断によるひずみを小さくする傾向にあった。支点付近での影響としては図-10 に示した固定支持によるソールプレート前面の下からの突き上げの影響を付加して考慮する必要がある。

Beam1 の疲労試験では、335 万回で四角孔の下側圧縮縁(図-7, $7\pi/4$ の位置、ひずみ範囲 2400 μ)に亀裂が見られた。繰返し荷重によって作用する切欠縁のひずみを上記の方法によって簡易に推定して、図-12(a)に示す既往の S-N 線¹⁰⁾を用いて、この亀裂の疲労寿命を推定したが、四角孔の圧縮縁に発生した亀裂の発生は推定値よりもかなり寿命が長い結果となった。図-12(a)の S-N 線は、自動プラズマガス切断の結果によるものであるが、四角孔の曲線部はドリルによる機械加工としたため、切断面の仕上げが自動ガス切断に比べて著しく改善されたことが原因として考えられる。図-12(b)に、著者らが別途実施した機械加工による円孔を有する軸圧縮疲労試験の結果を示す。Beam1 の亀裂発生時の繰返し数は、これらの結果と概ね同程度であった。Frost-Leffler は、さまざまな加工方法、形状寸法の四角孔を有する鋼桁の疲労試験を実施しており¹¹⁾、その結果においても切断面の処理の影響が図-12 と同様の傾向であった。また、図-11 のひずみ推定方法を用いて、Frost-Leffler のガス切断の結果を S-N 図に整理した結果、図-12(a)の結果と概ね一致する傾向が認められた。

(3) 桁端部周囲のひずみ分布

鋼桁端部の応力状態を把握するための一つとして、図-13 に、支点上の垂直補剛材とウェブに生じていた垂直応力の分布を示す。ウェブの結果については、複数の断面で分布を測定したので、桁端部からの距離 x ごとに記号を変えて示す。いずれも曲げ荷重で 500kN 載荷時の結果であり、固定支持の場合とピン支持の場合の両方について示す。なお、図中に示した設計値は、支点上の垂直補剛材とウェブ(有効幅をウェブ板厚の 24 倍とした)からなる十字断面の柱部材を想定して、平均的に作用する垂直応力を下端に示し、高さに応じて直線的に低減したものである(三角分布)。また、計算値は、基礎岩盤で用いられている半無限の弾性体に

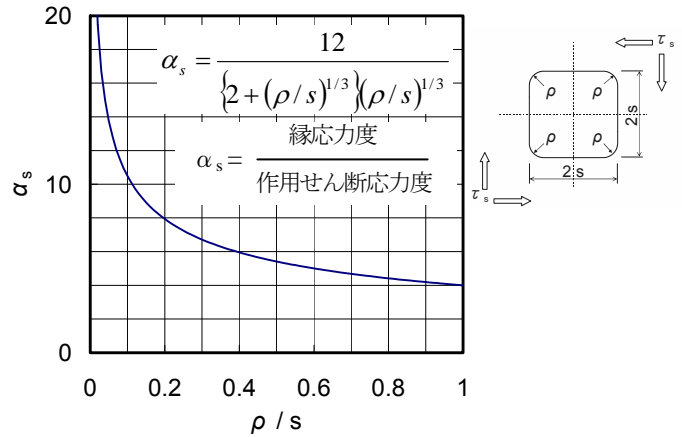
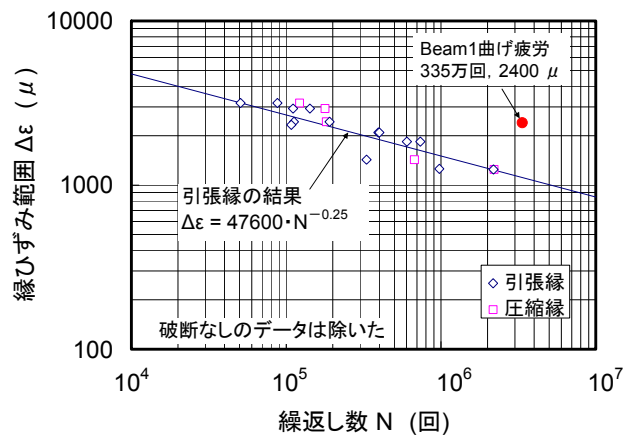
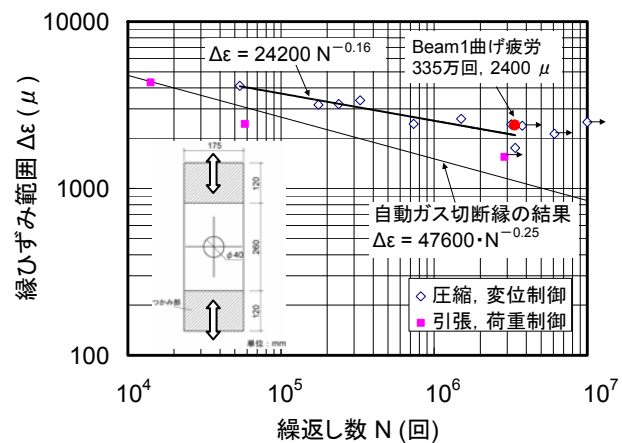


図-11 せん断を受ける四角孔縁のひずみ^{9),10)}



(a) 自動ガス切断縁の S-N 線¹⁰⁾



(b) 機械加工縁の S-N 線

図-12 ウェブ切欠縁の S-N 図

集中荷重が作用した場合の Boussinesq の解¹²⁾を用いて推定した結果である。

固定支持の結果について見ると、ウェブの測定結果は下フランジ近傍(高さ 100mm 程度の範囲)の急激な増加を除くと、三角分布でも比較的よく一致していた。しかし、計算値(垂直補剛材断面を無視)は下フランジ付近の急激な変化も含めて実験値(支点上ではあるが

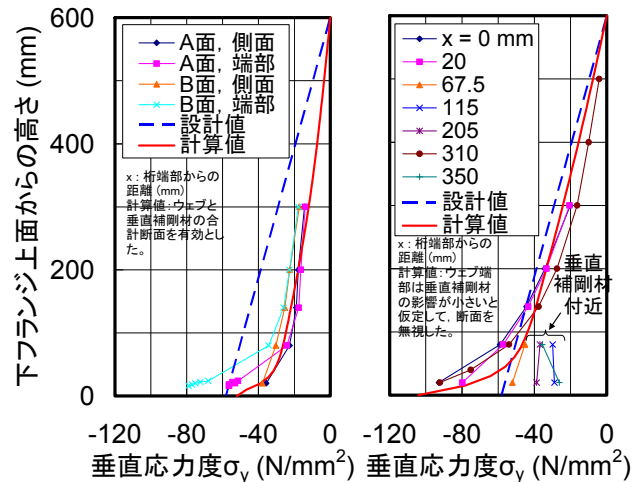
垂直補剛材から離れた位置での結果)と概ね一致した。垂直補剛材に近い箇所の応力分布はこれらの結果よりも小さい傾向にあり、垂直補剛材により応力が分担されたことによるものと考えられる。垂直補剛材の結果を見ると、ウェブ有効断面と垂直補剛材の合計断面により算定した計算値と分布、値ともによく一致した。

ピン支持のウェブの結果は、ピンの接点付近($x=120, 180\text{mm}$ 、計算ではソールプレートの $1/2$ と仮定した)と、それ以外の範囲 ($x=15, 285\text{mm}$)で分布が大きく異なるが、計算値による分布はこれらの傾向をよく表していることがわかる。垂直補剛材の結果は、A面とB面で値が異なり、偏心がかかっていたと考えられるが、それらの平均値は計算値と概ね一致する傾向にある。

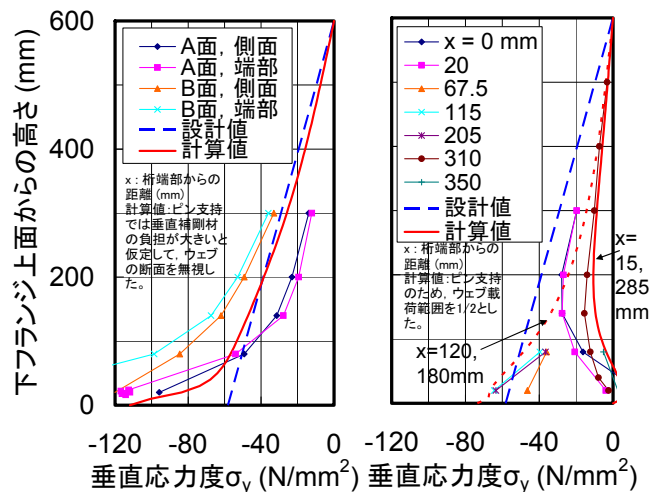
プレートガーダーのソールプレート溶接部から疲労亀裂が生じる事例が報告されており、その一要因として支承の回転機能が低下して、下フランジを局部的に拘束することが挙げられている¹³⁾。図-14に、ソールプレート前面溶接止端付近における下フランジ下面の桁軸方向ひずみ分布を示す。図中には、Beam1の各条件下における結果を記号を変えて示す。ピン支持の場合には、止端付近に引張ひずみが生じているが、その値は固定支持の圧縮ひずみに比べて小さい傾向にある。一方、固定支持の場合、従来から知られているように止端部に圧縮ひずみが作用しており、分布を測定した範囲では、ウェブに円孔を設けた状態で止端部の圧縮ひずみが最も大きかった。その後、円孔から四角孔に変更したときには分布を測定していないが、止端部付近のひずみは円孔のときよりも増加する傾向が見られた。これらの結果から、止端部直上に断面欠損があると、断面欠損が大きいほど止端部のひずみが増加する傾向があることがわかる。しかし、疲労試験では、円孔や四角孔のある Beam1 にソールプレート止端部の疲労亀裂が見られず、ウェブ断面欠損がなかった Beam2 の方で、繰返し約 73 万回でソールプレートのルート部に疲労亀裂が見られた。

(4) 桁端部の応力状態と断面欠損の影響

図-15にプレートガーダー桁端部の応力状態の概念図を示す。また、以上の試験結果を踏まえて、図-16に断面欠損位置の分類とそれに応じて考慮する応力状態を示す。図-16(a)のように断面欠損がソールプレート上にある場合は、支点反力による垂直応力に対する断面欠損部の応力集中を考慮する必要がある。また、図-16(c)のように、断面欠損がソールプレートから離れた箇所にある場合は、主桁のせん断応力に対する断面欠損部の応力集中を考慮する必要がある。図-16(b)のよう



(a) 固定支持 (左：垂直補剛材，右：ウェブ)



(b) ピン支持 (左：垂直補剛材，右：ウェブ)

図-13 支点上の垂直応力度分布(500kN 荷重時)

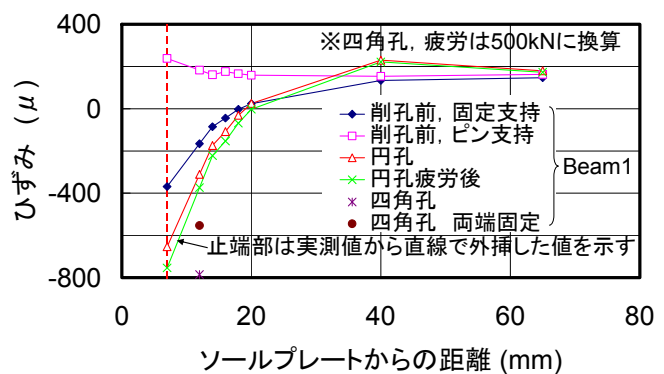


図-14 ソールプレート始端部のひずみ

に、ソールプレート前面の直上に断面欠損が位置する場合は支点反力による垂直応力と曲げに伴うせん断応力が作用する場合の応力集中を考慮するが、今回の試験の範囲では、この場合の垂直応力の影響は比較的軽微であった。特に、支承の回転機能が低下している場

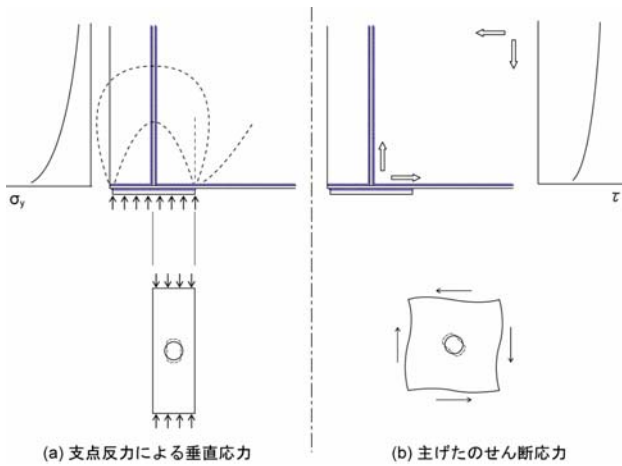
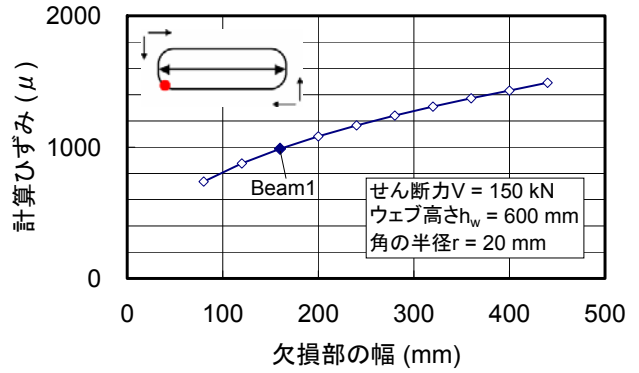
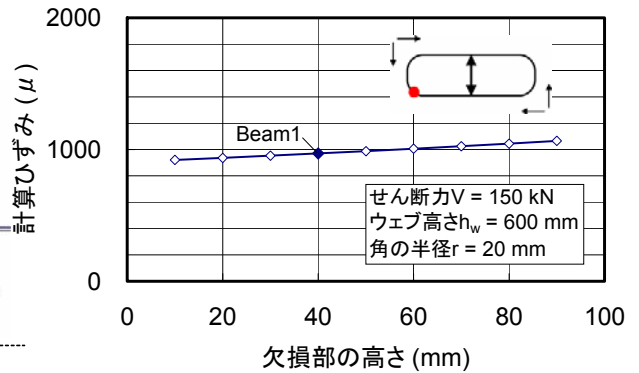


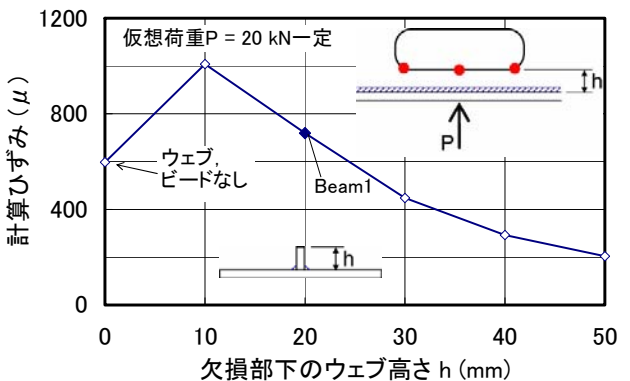
図-15 プレートガーダー桁端部の応力状態



(a) 長孔の幅の影響



(b) 長孔の高さの影響



(c) 長孔の欠損部下のウェブ高さの影響

図-17 長孔縁の最大ひずみに及ぼす断面欠損の位置と形状の影響

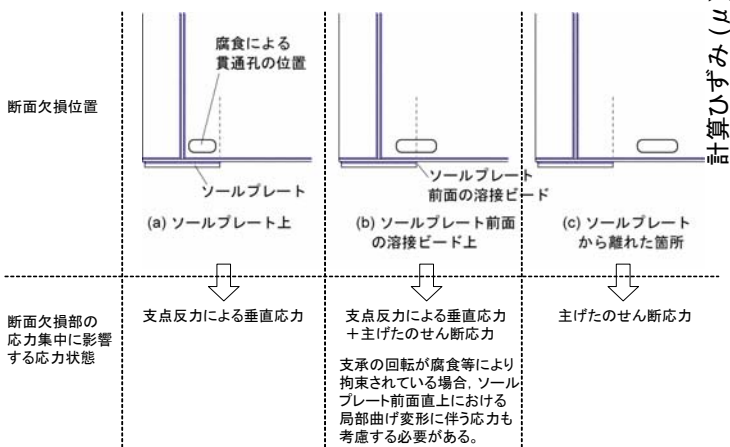


図-16 断面欠損位置の分類と考慮する応力状態

合は、ソールプレート前面の位置での下フランジの突上げによる断面欠損部の応力集中の影響が大きく、曲げによるせん断応力に対する応力集中の位置が重なっていたので(図-8 では $5\pi/4$ 付近)、これらのひずみの合計を考慮する必要があると考えられる。

試験では、長孔の幅、高さの影響や下フランジからの距離の影響は、Beam1 の1 ケースに限られていたが、図-10, 11 の概念を踏まえて、長孔の応力集中に及ぼすそれらの影響を試算した。長孔の幅は図-11 に示した ρ/s が変化することから、せん断による応力集中の程度に影響を及ぼす。図-17(a)に、長孔の幅の影響を示す。長孔の角の半径 ρ は Beam1 の長孔と同様に 20mm 一定とした。このため、幅が増加するほど ρ/s が小さくなり、長孔の角に生じる応力集中は厳しくなる。一方、長孔の高さは、平均せん断応力度に影響する。図-17(b)に長孔の高さの影響を示す。桁高は Beam1 と同様に 600mm 一定とした。桁高に対して長孔の高さは小さいため、高さが Beam1 の長孔の高さの 2 倍になったとし

てもひずみの増加割合は軽微である。

長孔下縁から下フランジ上面までの距離は、せん断による応力集中への影響はほとんどないと考えられるが、図-10 に示した下フランジ突上げの影響がある場合には、長孔の高さ方向の位置の影響が大きい。図-17(c)に長孔の欠損部下のウェブ高さの影響を示す。ここでは、図-10 と同様に、ソールプレート前面が長孔の幅の中央に位置する場合について示す。また、対象とした縁ひずみはソールプレート前面直上の長孔縁で

の値である(下フランジの局所的な曲げ引張を受ける箇所)。欠損部下のウェブは、下フランジの突上げによる局所的な曲げに対して補剛材として効果的に機能することから、欠損部下のウェブ高さは突上げによる曲げ引張に大きく影響する。この試算条件の範囲では、欠損部下のウェブ高さが Beam1 の 20mm から±10mm 変化しただけで、2 倍以上のひずみ差が生じることがわかる。なお、長孔の幅は、この突上げによる応力集中にもある程度影響するが、既設の単純プレートガーダー橋のソールプレートの大きさを考慮すると、長孔の幅に関して Beam1 よりも厳しくなるケースは少ないと考えられる。

(5) 断面欠損部の形状、縁の処理

腐食による断面欠損の形状や縁は、図-2(b)に例示したように、形状が複雑で、縁は尖っているなど、Beam1 の模擬腐食の場合と大きく異なる。このため、腐食したままの断面欠損は、ごく局所の応力集中が高く、疲労に対して好ましくない状況にあることが多いと考えられる。このことから、当て板補強を行う前に、断面欠損部の形状や縁を、Beam1 の長孔などのように、できるだけ応力集中が小さくなるように加工しておく方がよい。せん断を受ける無限板において断面欠損部の応力集中を最低限に抑えるには円形($\rho/s = 1$)が最も有利であるが、桁端部の腐食パターンでは長孔にせざるを得ない場合が多いと考えられる。その場合においても、長孔の角の半径をできるだけ大きく取るように(図-11 より $\rho/s > 0.2$ を目安)、形状に配慮する必要がある。また、形状加工に際して、熱の影響と縁の仕上げの粗さの点で疲労耐久性上避けるべきであり、機械加工とすることが好ましい。少なくとも応力集中が生じ易い角の丸みは、Beam1 と同様にコアドリルなどを用いて削削する方法がよい。

3.3 地震時の挙動

(1) 断面欠損やフランジ破断がないときの挙動

図-18 に、Beam2 の水平交番載荷試験における荷重-変位図を示す。水平交番載荷中の鉛直荷重が大きいほど降伏が見られ始める水平荷重が大きい傾向が見られた。降伏箇所は図-19 に示すようにソールプレートの前面付近及びウェブ端面付近であった。これは供試体に固定された支持台が水平交番載荷に伴い回転するのに応じて、その周囲に局部的に支圧応力やフランジの局所的な曲げが生じたことによると考えられる。また、鉛直荷重はこの支持台の回転をある程度抑制する

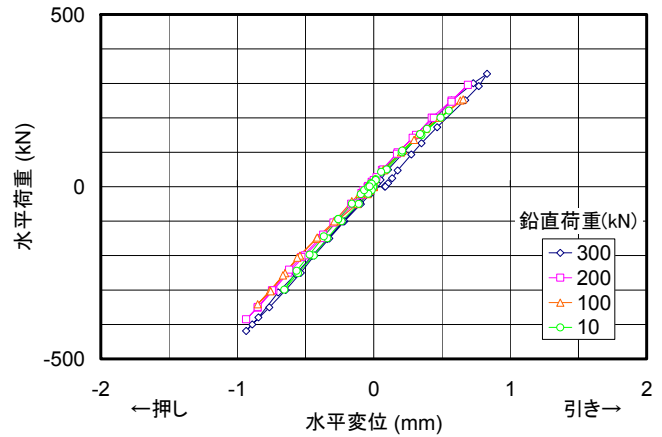


図-18 Beam2 の水平荷重-変位図

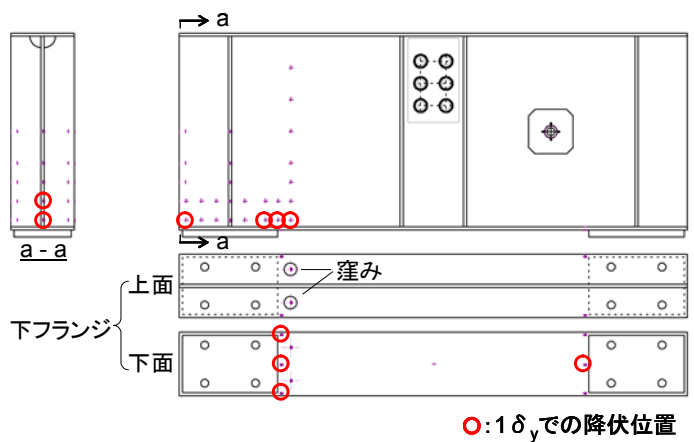


図-19 Beam2 の水平交番載荷試験における降伏位置

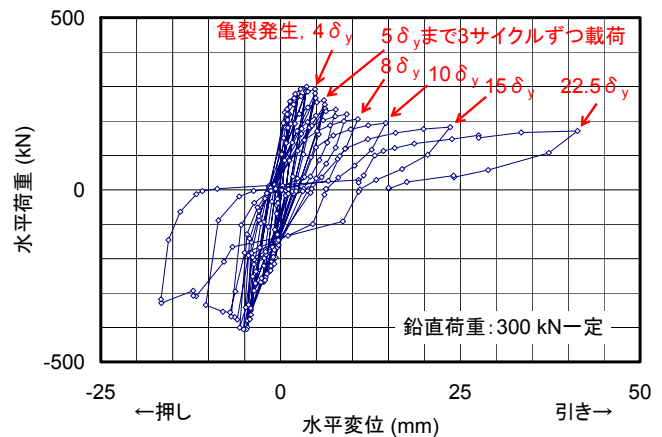


図-20 Beam1 の水平荷重-変位図

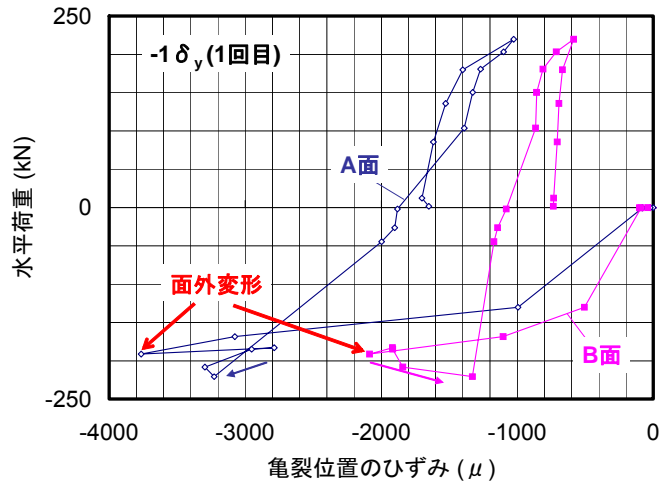
ため、降伏が始まる水平荷重に変化が見られたと考えられる。

(2) ウェブ断面欠損と下フランジ破断の影響

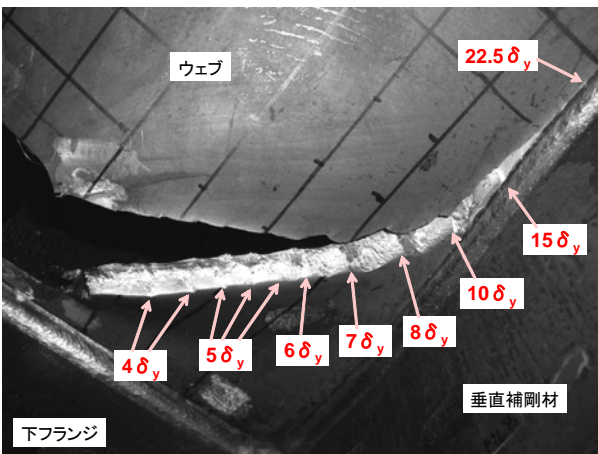
図-20 に、四角孔の位置で下フランジを切断した Beam1 の水平交番載荷試験における荷重-変位図を示す。Beam1 の水平交番載荷試験は、鉛直荷重を 300kN



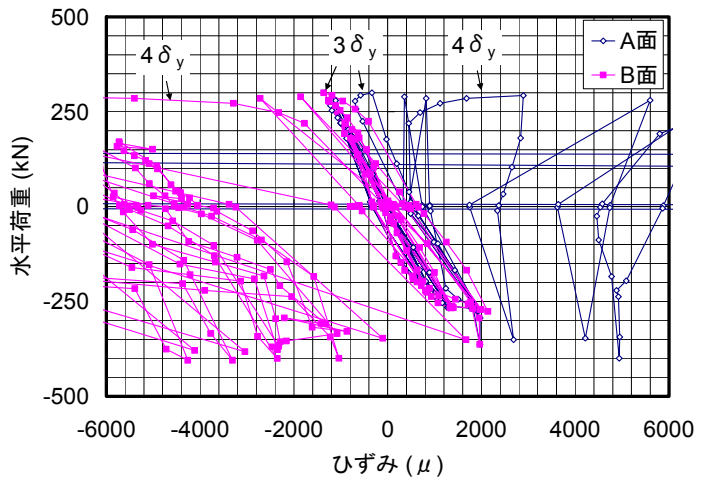
(a) 破断箇所付近 (A 面)



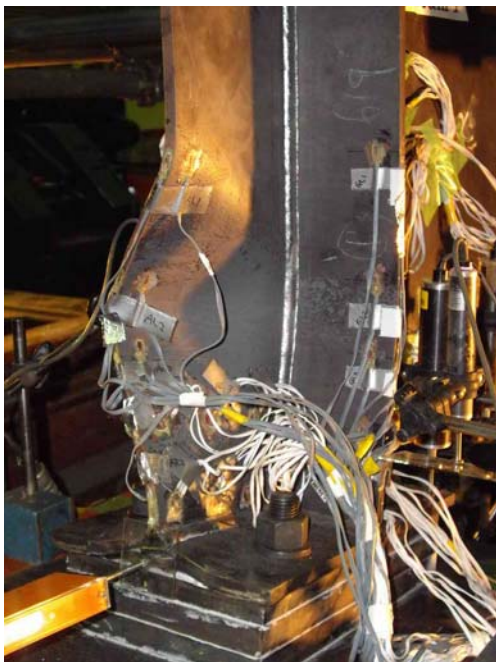
(a) 亀裂位置付近の面外ひずみ



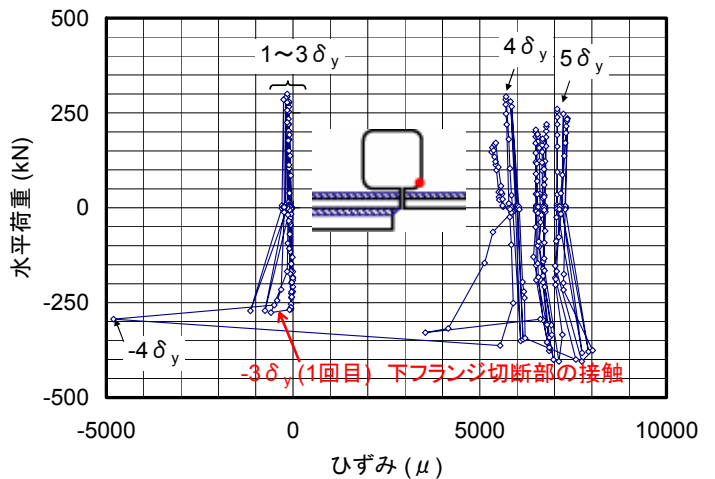
(b) 破断面 (B 面)



(b) ウェブ端部の面外ひずみ(高さ方向中央)



(c) 桁端部の座屈, 除荷時 (A 面)



(c) 切断位置付近の四角孔縁ひずみ

写真-6 水平交番載荷試験における破壊状況 (Beam1)

図-21 水平交番載荷試験におけるひずみ(Beam1)

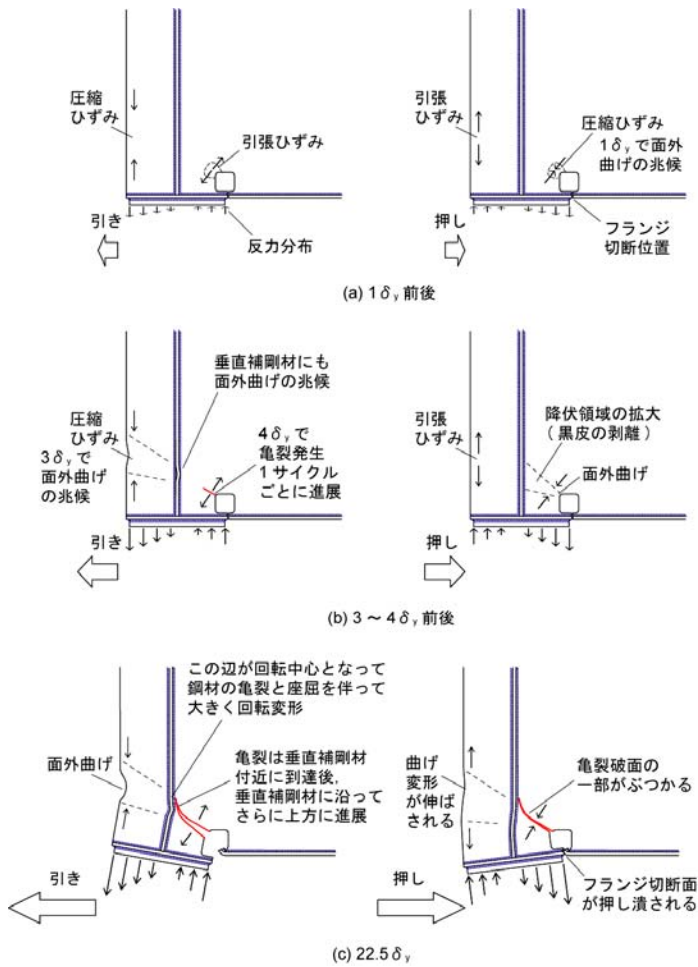


図-22 水平荷重試験における破壊過程

一定とし、Beam2の結果を参考に、降伏開始時の治具間変位 $\delta_y (= 3 \text{ mm})$ 、供試体の水平変位は図-6に示したを繰り返しの目安として、 $\pm 22.5 \delta_y$ まで荷重を行った。水平荷重は押し(側)から始め、引張側荷重は $3 \delta_y$ でピークとなった。圧縮側荷重は $-3 \delta_y$ まで引張側とほぼ対称的であったが、その後引張側に比べて荷重が大きく増加する傾向が見られた。水平変位は、四角孔の破断が生じてから引き側の増分が大きくなった。

写真-6にBeam1の水平交番荷重による桁端部の破壊状況を示す。写真-6(a)は、四角孔と下フランジ切断に起因して、四角孔の上縁支点側からウェブの破断が生じ、水平交番荷重の繰り返しとともに大きく進展した。写真-6(b)は、同写真(a)の裏側から撮影したものである。亀裂は $4 \delta_y$ から見られ、変位の増加がなくても荷重を繰り返すごとに同程度の長さで進展していた($5 \delta_y$ までは3回ずつ繰り返した)。写真-6(c)は、水平交番荷重終了時の桁端部の変形状況を示す。引き側の荷重の際に、ウェブ端部の座屈が顕著に見られ、押し側の荷重である程度元にもどったが、ウェブの亀裂進展とともに、

ウェブ端部の残留変形も大きくなった。

図-21(a)に、亀裂発生位置付近(四角孔亀裂発生位置から斜め上方に約20mm)におけるウェブ両面の荷重-ひずみ図を示す。この図より、 $-1 \delta_y$ (最初の水平押し)の段階から、既に四角孔の角付近で面外変形が生じ始めていたことがわかる。

図-21(b)に、ウェブ端部の高さ方向中央(下フランジ上面から300mm)の位置におけるウェブ両面のひずみを示す。ウェブ端部の面外変形は、 $3 \delta_y$ から生じていたことがわかる。ウェブの亀裂が見られた $4 \delta_y$ 以降は水平荷重によって面外変形が急激に増加していたことが、この図から認められる。

図-21(c)に、下フランジの切断位置付近の四角孔縁ひずみを示す。押し側の荷重ピークは、 $-4 \delta_y$ 以降も増加する傾向が見られたが、これは押し側の荷重によって、下フランジの切断面がぶつかるようになったことと関係していたと考えられる。同図によれば、 $-3 \delta_y$ (1回目)の目標変位に近いところで既に下フランジの接触が始まっていたが、荷重を増加させるほどの押し変位でなかったようである。 $-4 \delta_y$ (1回目)では、切断箇所近傍の四角孔縁ひずみが急激に増加して降伏するとともに、その後の変化に影響を及ぼす残留ひずみをもたらした。

以上の結果を踏まえて、図-22に、Beam1の水平交番荷重試験における桁端部の変形と亀裂の過程を模式的にまとめて示した。Beam1では四角孔と下フランジ切断の後に水平荷重を行ったが、桁端部の破壊状況は、写真-1に示した事例とよく一致していた。写真-1に示した箇所はその後部材交換され、取り除かれたことから、その下フランジ破面の片側を入手してさらに観察を行った。その結果、破断面付近は腐食による著しい

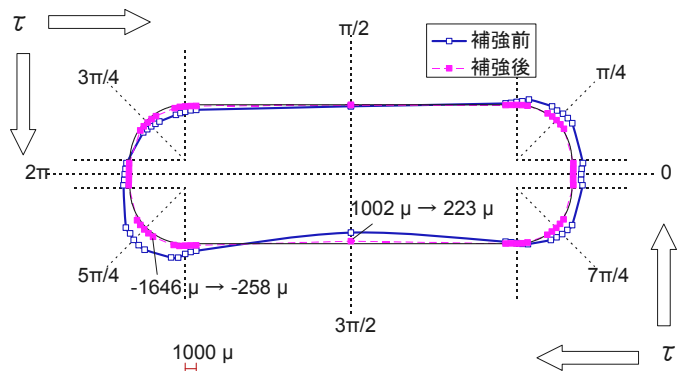


図-23 L型当て板補強前後の長孔縁のひずみ (Beam1, 固定支持, 300kN 荷重時)

断面欠損が見られた。これらの点から、この橋では、腐食による著しい断面欠損(その断面欠損による応力集中に起因したウェブ、下フランジの疲労亀裂が震災前にある程度生じていた可能性も考えられるが明確でない)が生じていたため、地震による水平変位によって、図-22 に示した Beam1 の破壊過程とほぼ同様に、写真-1 のような破壊に至ったと推察される。

なお、Beam1 の押し変位のときに下フランジのぶつかりによって、下フランジ(支間中央側)の切断面先端が上に反り上がっていたが、これと同様の傾向が写真-1 の事例でも見られた。

4. 桁端部腐食による断面欠損部の補強

4.1 L型鋼を用いた簡易当て板補強の検討

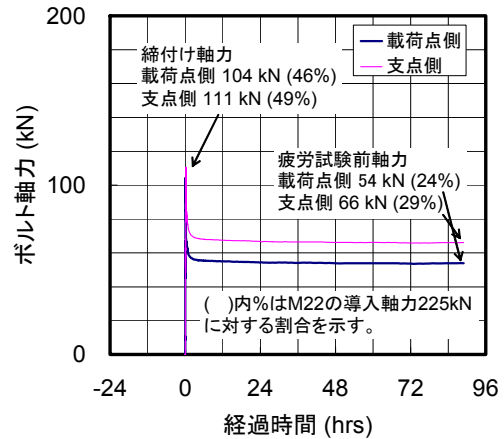
(1) 静的載荷試験

図-23 に、Beam1 の長孔に、L 型当て板補強(図-5、写真-3(a))を施した前後の静的載荷試験における、長孔縁のひずみ分布を示す。補強前は、図-8 で示したとおり、曲げに伴うせん断応力による応力集中と、下フランジ突上げによる局部的な変形が発生していたが、L 型当て板補強によって縁ひずみの値が著しく低下した。Beam1 の長孔の下のウェブ高さが 20mm 程度であったため、ウェブのみでは補強効果が期待できなかったため、L 型の当て板を用いて下フランジにもボルト固定することとした。その結果、せん断応力による応力集中が改善されるだけでなく、下フランジの剛性が大きくなり、下フランジの突上げによる局部変形が大きく抑制された。

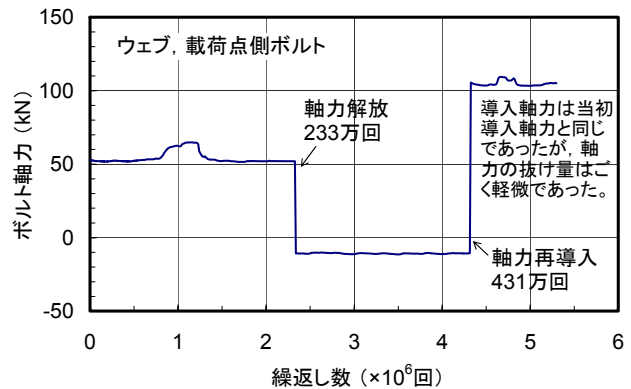
(2) 疲労試験

Beam1 の長孔に L 型当て板補強を施した状態で、疲労試験を行った。高力ボルト及び接着剤それぞれの効果を確認するため、疲労試験の途中で、高力ボルトを緩めて疲労試験を継続した後、再び同じ軸力に締め直してさらに疲労試験を継続した。ボルト軸力の締付け管理及び経時変化の測定は、ボルト頭部に二軸ひずみゲージを貼り付ける方法により行った³⁾。

図-24 にウェブの高力ボルトを例として、補強時初期のボルト軸力の経時変化と、疲労試験中のボルト軸力の変化を示す。補強時初期のボルト軸力は、前年度までの検討でも見られたとおり^{3), 5)}、接着剤(樹脂厚約 1mm、接着から 24 時間後に締付け)のクリープの影響が大きく、締付け後 1~2 時間で締付け時の目標値(設計締付け軸力の 50%)の半分程度まで低下した。締付け後 1 日以降は、ボルト軸力の低下は軽微であった。疲労試験開始後約 200 万回までボルト軸力の顕著な変化



(a) 締付け後の経時変化



(b) 疲労試験中の変化

図-24 L型当て板補強、ウェブ高力ボルトの軸力

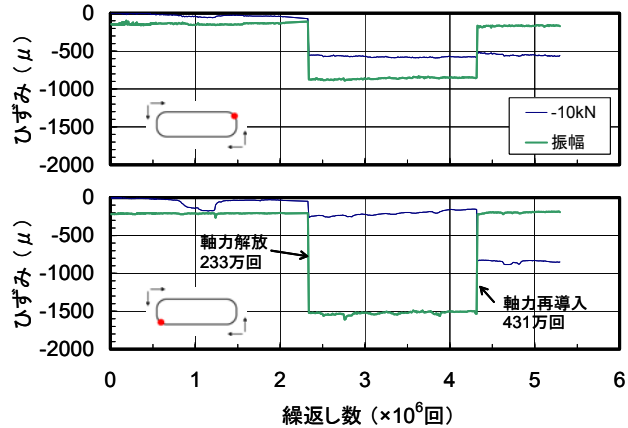


図-25 疲労試験中の長孔縁のひずみ

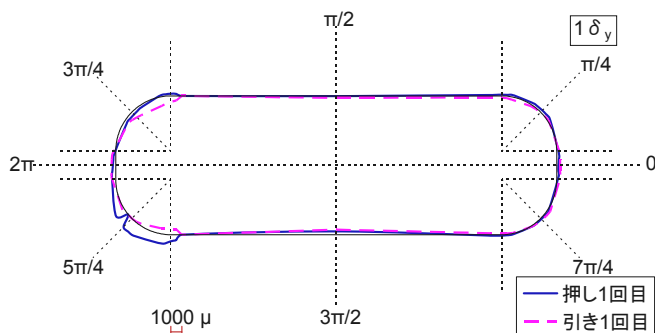
は見られなかった。繰返し載荷に伴うボルト軸力の変化はごく軽微であった。疲労試験中に一旦軸力を開放した後、再び軸力を導入するため、当初の目標軸力を導入したところ、補強時初期に見られたクリープによる顕著な軸力低下は見られず、結果として、疲労試験当初の軸力よりも高い値での締付け状態で疲労試験を継続することとなった。

図-25 に、疲労試験中(上限荷重 300kN、下限荷重

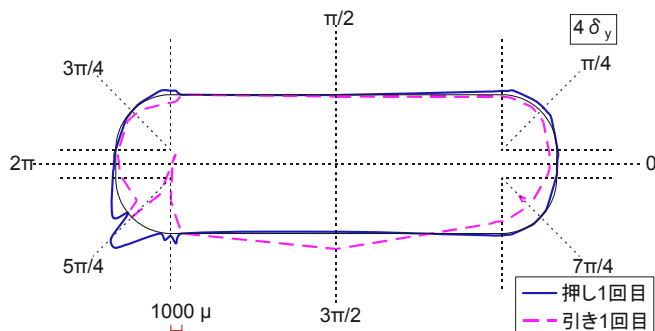
10kN)における長孔縁ひずみの経時変化を示す。高力ボルトの軸力を開放するまでは、長孔縁のひずみ振幅は 200μ 程度であり、補強の効果が疲労試験中も持続していたことがわかる。ボルト軸力の開放とともに、ひずみ範囲はそれぞれ 900μ 、 1500μ 程度まで急激に増加した。また、ボルト軸力を再導入すると、ひずみ振幅はボルト軸力開放前と同程度まで低下した。ボルト軸力の開放に伴うひずみ振幅の増加から、接着剤の完全な剥離が生じたことも考えられたが、ボルト軸力の再導入によるひずみ振幅の改善は、接着剤の部分的な剥離の可能性もあることを示唆しており、本試験の範囲では、ボルト軸力と接着剤それぞれの効果は明確にできなかった。

(3) 水平交番载荷試験

水平交番载荷の場合、支点のボルト固定を確実にするため、L型当て板の部分も高力ボルトで締め付けた(図-5)。水平交番载荷中は、当て板補強部に外見上の目立った変状は見られなかった。図-26に、 $\pm 1\delta_y$ 及び $\pm 4\delta_y$ それぞれのときの長孔縁のひずみ分布を示す。 $-1\delta_y$ (押し)の段階で、長孔縁に 1000μ を超える高いひずみが発生した。 $4\delta_y$ (引き)では、下フランジの面外変形(曲げ载荷時の下からの突上げと逆方向の変形)が顕著に見られた。引き側の水平载荷によって、可動側



(a) $\pm 1\delta_y$ 時



(b) $\pm 4\delta_y$ 時

図-26 水平载荷試験中の長孔のひずみ

支点の支持台の回転が大きくなり、長孔の範囲で下フランジが下に凸となる方向に局部面外曲げが生じたためと考えられる。その後、水平変位の増加に伴って長孔縁ひずみも増加した。

写真-7に、水平交番载荷試験後に当て板を撤去したときの長孔の写真を示す。 $\pm 22.5\delta_y$ までの水平交番载荷によって、長孔縁のひずみは広範囲に降伏していたが、外見上はほとんど変形が認められなかった。

写真-8に、当て板撤去後におけるウェブ側接合面の状況を示す。ボルトを除去した後も当て板は素手で容易に外せなかったが、工具でボルト孔をこじることによって容易に外せた。接着剤はいずれの面も、当て板側にほとんど付着しており、鋼桁側の接着剤はほとんど剥離した。鋼桁側はハンドグラインダによる接合面仕上げで表面粗さが $10\mu\text{m}$ 程度であり、当て板側のグリットブラスト面(表面粗さ $50\mu\text{m}$ 程度)に比べて付着が弱かった可能性がある。接着剤に茶色の模様が残されていたことから、疲労または水平交番载荷において、繰返し载荷により鋼桁との間に微細なずれを伴う摩擦が生じていた可能性がある。



写真-7 水平交番载荷試験後の長孔の状況



写真-8 長孔L型当て板の試験後接合面(ウェブ側)

(4) 長孔のL型当て板補強の効果

L型当て板補強は、従来の当て板補強と異なり、腐食による断面欠損(貫通孔)を利用して、最低限の切削により、かつ接着剤を併用して少数のボルト本数で固定する、簡易な補強方法として考案した。静的载荷及び繰返し曲げ载荷に対しては、1例ではあるが十分な補強効果が得られることが確認できた。水平交番载荷の下では長孔縁が広範囲に降伏したが、試験後に当て板を外して長孔を観察した状態を踏まえると、写真-6と同様の水平荷重あるいは写真-1と同等の地震を受ける場合においても、特段に大きな損傷が生じることが確認できた。

4.2 接着剤のせん断疲労に関する検討

Beam1の疲労試験では、L型当て板をボルトと当て板を用いて、ウェブと下フランジの両方に固定したことから、ウェブのみに適用した接着剤のせん断疲労強度は明確でない。Beam2では、ウェブ中央にφ40の円孔を削孔したところへ、1本の高力ボルト(F10T, M22)と接着剤を用いて当て板補強を行い(写真-3(b))、その後曲げ疲労試験(上限荷重 460kN, 下限荷重 10kN, 繰返し数 500 万回)を行った。接着剤の塗布、ボルト締め付け等の施工方法は、長孔の場合と同様に行った。円孔の径が通常のボルト径(25mm)よりも大きく、当て板に過度の面外ひずみが生じることが考えられたので、導入ボルト軸力は設計値の50%とした。接着剤厚さは1mm程度であった。図-27に、Beam2の補強前後、疲労試験前後の円孔縁のひずみ分布を示す。補強前のひずみ分布は、理論値(±930μ)に対して、引張側は897μ(理論値に対して0.96)、圧縮側は-1011μ(同1.09)で、両者は概ねよく一致していた。当て板補強によって、縁孔縁ひずみは40~50%程度に低下した。疲労試

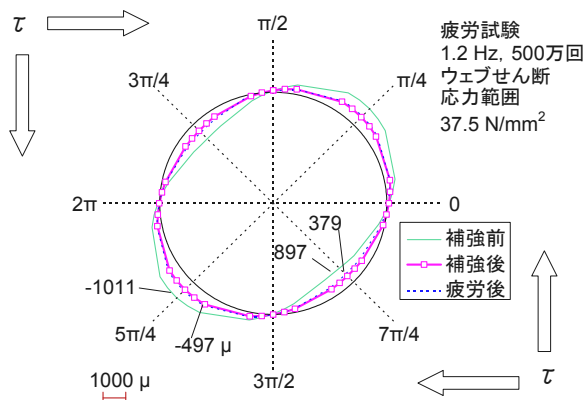


図-27 疲労試験前後のウェブ中央円孔のひずみ (Beam2)

験初期に周囲の接着剤に付着切れと思われるひび割れが見られたが、ひずみ分布は繰返し数 500 万回の後も変化は見られなかった。

支間 35m, 6 主桁, B 活荷重のプレートガーダーの例では、活荷重(L 荷重)によるせん断応力度で 34N/mm² である¹⁴⁾。Beam2 の疲労試験のせん断応力範囲は 37.5N/mm² であり、また実際に L 荷重レベルの繰返しが頻繁でないことを考慮すると、一般の道路橋に適用した場合にも同様の補強効果が得られるものと考えられる。

4.3 使用した接着剤の温度の影響に関する検討

樹脂は周囲の温度の影響を受けることから¹⁵⁾、本研究で用いたエポキシ樹脂接着剤を対象に、小型供試体(20×20×64, 厚さ 20mm の樹脂を厚さ 22mm, SS400 の鋼材ではさんだ供試体)を用いて、二面せん断試験を、試験時温度 20, 40, 60°C の下で行った。また、せん断試験の際に接合面に直角に軸力を導入した。図-28 に試験結果を示す。プロットしたデータはそれぞれ 1 体の結果である。接着剤と鋼材の境界面のせん断強度 v_u は、温度 60°C の中でも急激な低下は見られなかった。

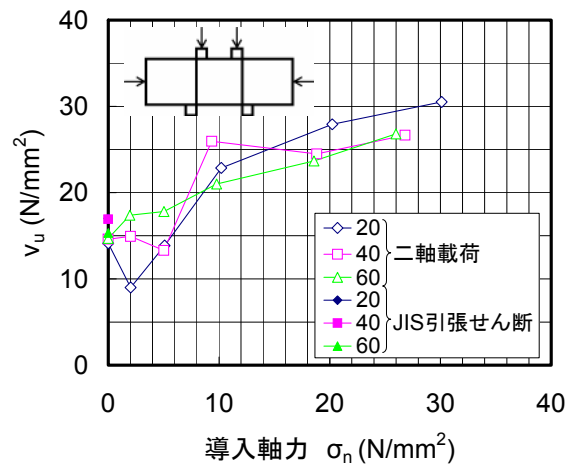


図-28 使用した接着剤のせん断強度に及ぼす試験時温度の影響

5. 腐食による板厚減少量の簡易推定に関する調査

塗装された鋼桁に外見上著しい腐食が見られる場合、こぶ状の層状剥離さび(こぶさび)を伴うことが多い。こぶさびが見られる箇所では概ねその外見上の腐食の程度と比例して、板厚も減少している傾向にあると考えられる。この点を定量的に把握するため、道路橋として使用され、撤去された鋼部材のうち、こぶさびが見られる箇所を計測するとともに、その部分のさびを

除去した後の残存板厚も計測した。計測はキャリパー(マイクロメータと同様の機器)等によった。図-29にそれらの相関を示す。データ数が限られていることもあってばらつきは大きいですが、概ね1:3の関係にあることがわかった。これに基づき、図-30に板厚減少量の簡易推定法を示す。

こぶさびは塗膜の劣化部などから塩化物などの腐食因子が浸入して、局部的に腐食が進行することにより生成されるものと考えられる。桁端部に限らず、塗装桁に著しい腐食が見られた場合、その程度に限らず補修、補強が必要であるが、その際に、当て板などで補強しておく必要がある範囲と再塗装とする範囲を決定する必要がある。この場合に、板厚減少量の推定精度が高い必要はなく、図-30に示す程度の外観観察により、こぶさび(あるいはこぶ状でない層状剥離さび)が見られる範囲と、それ以外のさびの範囲を決定できればよい。また、こぶさび以外のさびの場合には、板厚の減少はごく軽微であると考えられるので、再発錆防止のために、こぶさびとともに、さびをブラストでしっかり落として、断面欠損状況を確認した上で、再塗装とするのがよい。なお、さびの観察にあたっては、こぶさびの大部分が剥離している場合や、その剥離した上に塗装されている場合があり得るので注意が必要である。

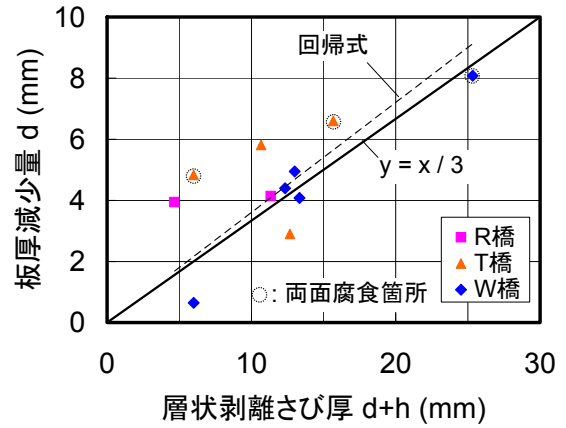


図-29 層状剥離さび厚と板厚減少量の関係

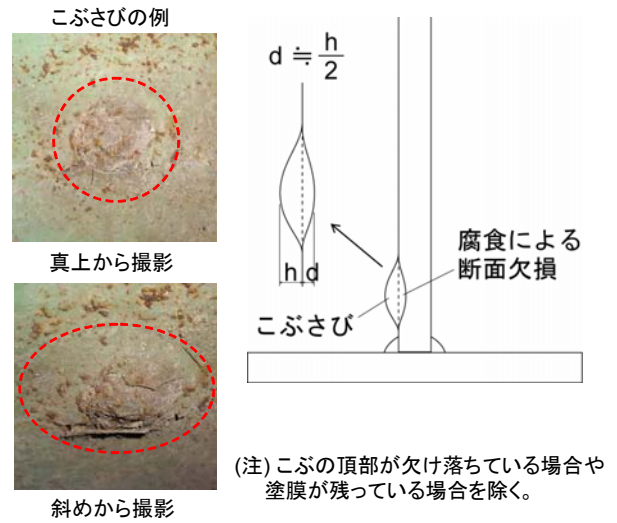


図-30 こぶさびの板厚減少量の簡易推定

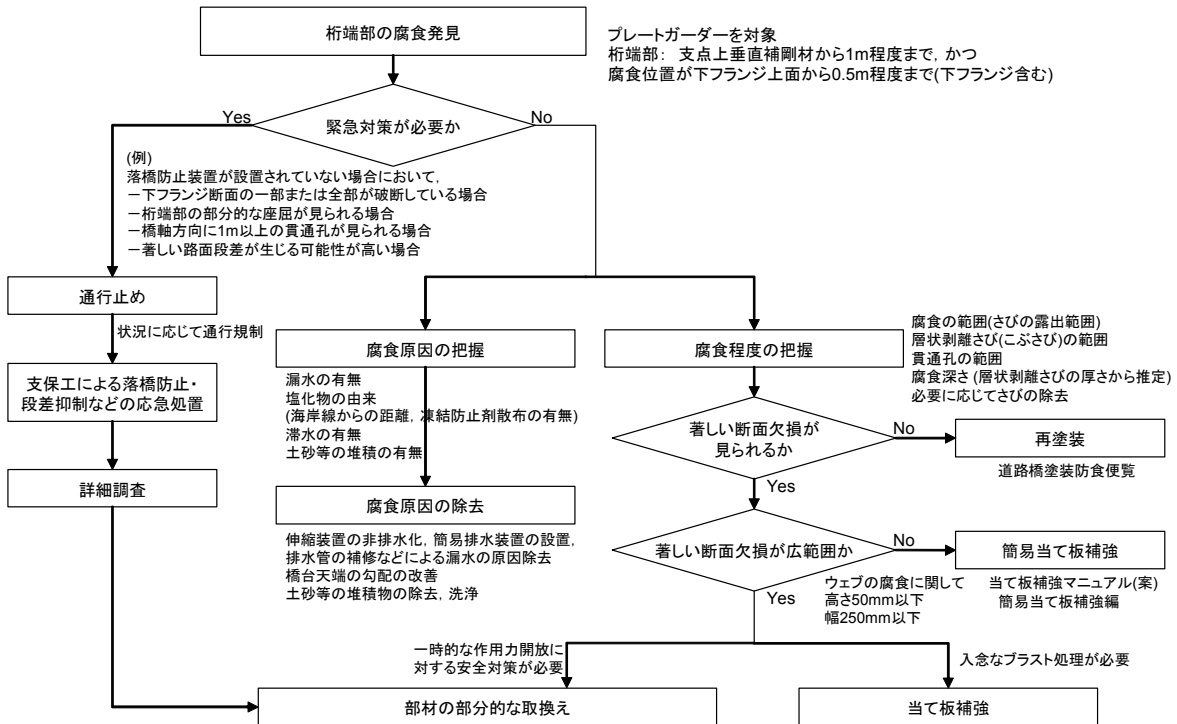


図-31 桁端部の腐食対策フロー(試案)

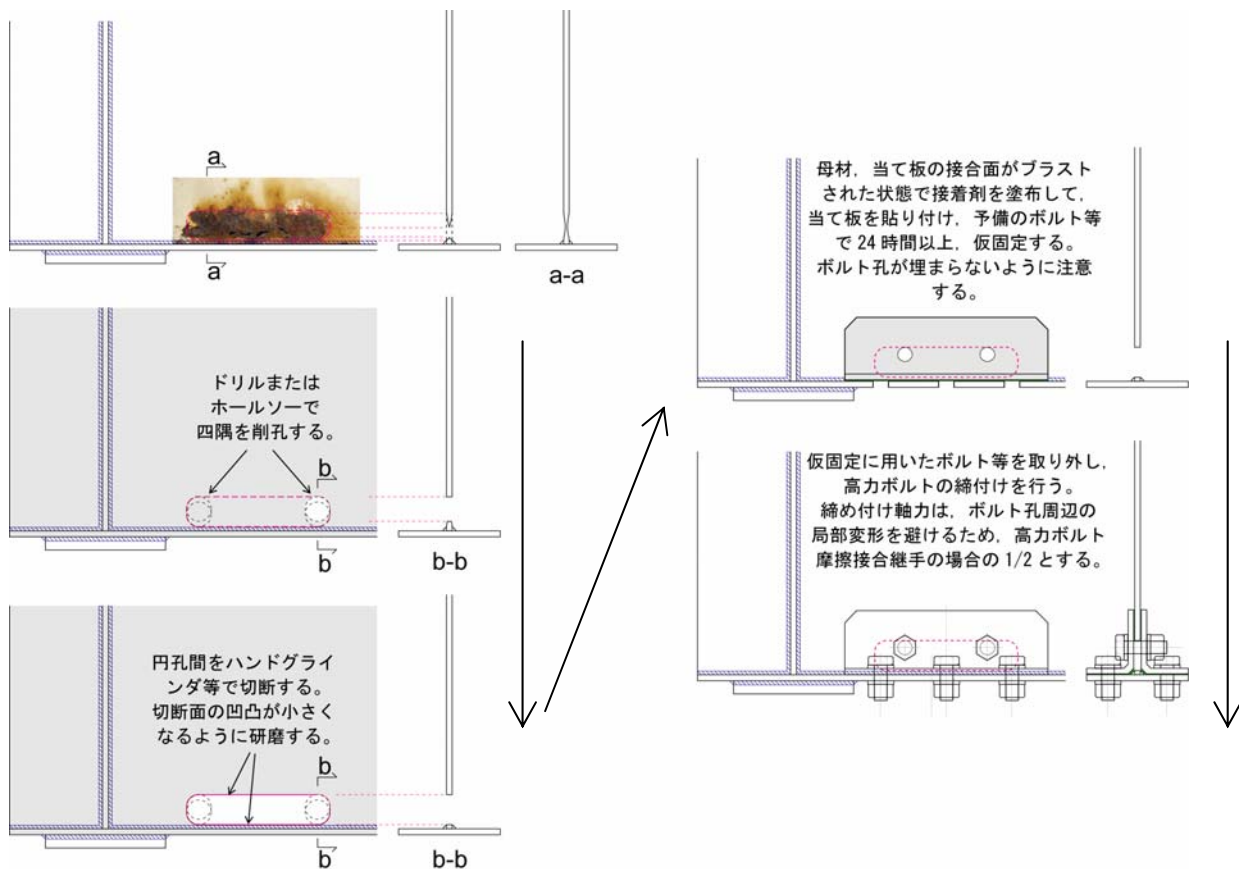
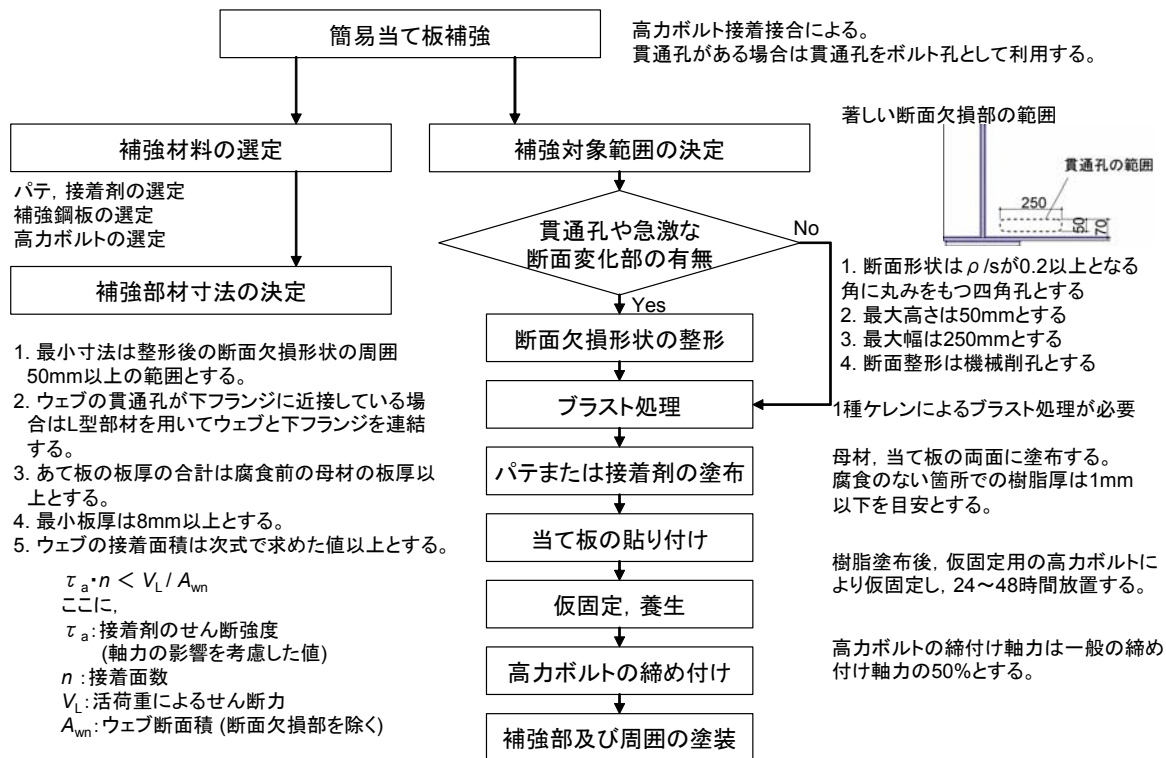


図-32 主桁のウェブとフランジ境界部付近における断面欠損部の簡易当て板補強の設計・施工フロー

6. 桁端部の腐食に対する対策選定

本研究のまとめとして、桁端部の腐食を発見した際の対策選定(試案)の全体像を示すため、図-31に、その目安を含めてフローの形で示す。

鋼桁の載荷試験結果より、桁端部に腐食による断面欠損が生じた場合の影響が概ね把握できたが、腐食の程度は試験の範囲を大きく超えている状況も想定して、通行止めなどの緊急対策の判定方法について、あらかじめ検討しておく必要がある。フローでは、一例を示した。

腐食が発見された場合、厳しい腐食が見られる範囲を目視調査により特定して、対策を選定する。またそれと並行作業として、腐食の原因を推定して、早期に原因除去の方法を検討する必要がある。対策工の実施までに時間がある場合は、簡易排水装置⁶⁾などを用いて応急的な原因除去を先行して実施することも検討する。このフローでは、主な補強方法として、当て板補強、部材交換の他に、簡易当て板補強も適用範囲を限定して示した。図-32に、簡易当て板補強の設計・施工フローを参考として示す。

7. まとめ

腐食を想定した模擬断面欠損を有する2体の鋼桁供試体を用いて、静的載荷試験、疲労試験及び水平交番載荷試験を実施した結果、以下のことがわかった。

- 1) 桁端部の応力状態の観点から断面欠損位置を分類して、断面欠損部に作用する応力集中の程度を推定する方法を示した。支承上から離れた一般部における四角孔や長孔の応力集中は、下フランジ近傍であっても既往のせん断応力下の応力集中の理論解を用いて概略推定できることを確認した。また、ウェブの断面欠損が支点直上にある場合は、曲げに伴うせん断に加えて、支点反力による垂直応力分布を考慮する必要があると予想していたが、今回の測定の範囲ではその程度は軽微であった。
- 2) 支承の回転機能が低下していて、かつソールプレート前面直上に断面欠損がある場合、断面欠損部のひずみを推定するときに、ソールプレート前面での下フランジの突上げに伴う局所的な曲げ変形が生じる。このことから、その変形によるひずみを、せん断によるひずみに加算する必要がある。
- 3) 断面欠損部の縁ひずみから、既往のS-N線を用いて疲労強度を推定する方法は、桁端部の断面欠損部にも適用できることを確認した。また、疲労の観点から、腐食による著しい断面欠損がある場合には、当て板等

の補強前に、応力集中をできるだけ軽減するように、断面欠損の形状と縁を加工する必要がある。形状は、せん断応力下では、円孔が最も有利であるが、桁端部の橋軸方向に細長い腐食に対しては、Beam1のような長孔に加工するのがよい。その際、角の半径 ρ と長孔の幅 $2b$ の比をできるだけ大きくした方がよく、少なくとも $\rho/s > 0.2$ となるように配慮する必要がある。

4) 供試体Beam1の桁端部における四角孔の位置で下フランジを切断した後、水平交番載荷試験を行った結果、断面欠損と下フランジ切断に起因して四角孔の角からウェブに亀裂が生じ、ウェブ端部や垂直補剛材に座屈が生じた。本文では、Beam1の水平交番載荷による破壊過程を模式図にして示した。Beam1の変形状況は、震災で見られた道路橋(写真-1)の桁端部の破壊状況と類似するところが多く、同橋の破壊過程を概ね再現できたものと考えられる。同橋では、震災以前に、腐食に起因した疲労亀裂(ソールプレート部の亀裂に類似)が発生し、下フランジの大部分または全部が破断していた可能性があったと推定される。

5) 桁端部に見られる腐食パターンに対して、腐食による貫通孔を利用して、接着剤と併用することによりボルト本数を少なくした、簡易な当て板補強方法を提案した。鋼桁の各載荷試験において補強部の挙動を確認した結果、その補強は静的載荷及び疲労試験に対して有効に機能することを確認した。また、水平交番載荷に対しては、補強していても長孔縁の広範囲に降伏が生じたが、著しい損傷が生じた桁端部(写真-1,6)に比較すると、補強の効果が十分にあったことがわかった。本文では、鋼桁の補強と前年度までの接着ボルト接合の経験を踏まえて、簡易当て板補強の設計・施工フロー(案)を示した。

6) 撤去された部材の腐食箇所の調査から、層状剥離さびと板厚減少量の概略の関係を把握した。さらにデータを充実させることで、こぶさびや層状剥離さびが見られる箇所の板厚減少量を簡易に推定できる可能性があることを示した。

7) 以上の結果を踏まえて、桁端部の腐食発見時における対策選定方法の試案を、簡易当て板補強も含めて、フローの形でまとめた。

8. あとがき

本文で示した簡易当て板補強及び対策選定方法(試案)は、今後、実際の現場で試行的に適用し、マニュアル作成に向けたフォローアップを行う必要がある。

謝辞

地方整備局の方々をはじめ、撤去部材の入手などで本研究にご協力をいただいた関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 西川和廣, 村越潤, 上仙靖, 福地友博, 中島浩之: 橋梁の架替に関する調査結果(III), 土木研究所資料第3512号, 1997.10.
- 2) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集 No.668, pp.299-311, 2001.1.
- 3) 村越潤, 田中良樹, 船木孝仁: 接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手に関する検討, 土研資料, 4091号, 2008.3.
- 4) 社会資本の管理技術の開発総合報告書, 国土交通省, 2008.12.
- 5) 村越潤, 田中良樹, 船木孝仁: 接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手の力学的挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, No.54A, pp.563-574, 2008.3.
- 6) 田中良樹, 村越潤: 簡易排水装置を用いた桁端部の腐食環境改善, 第27回日本道路会議, 2007.11.
- 7) 田中良樹, 村越潤: 道路橋桁端部における腐食環境の評価と改善方法に関する検討, 土木技術資料, Vol.50, pp.16-19, 2008.11.
- 8) 浅羽隆太郎: 孔ある薄板に於ける應力の分布, 九州帝国大学工学彙報第1巻, pp.217-228, 1926.
- 9) 西田正孝: 応力集中, 森北出版, 1967.9.
- 10) 藤原稔, 村越潤, 田中良樹: 鋼床版横リブのスリット周辺部の疲労強度, 構造工学論文集, No.37A, pp.1151-1162, 1991.3.
- 11) Frost, R.W. and Leffler, R.E.: Fatigue Tests of Beams with Rectangular Web Holes, ASCE, pp.509-527, Feb. 1981.
- 12) 岩石力学とその応用, 日本材料学会, 1966.
- 13) 西川和廣, 村越潤, 佐々木靖雄, 広瀬隆宏: 鋼桁支承ソールプレート溶接部の疲労に関する検討—損傷事例と補修・補強方法に関する調査結果一, 土木技術資料, vol.36, pp.60-67, 1994.1.
- 14) 山寺徳明ほか: 鋼桁橋の設計計算例, 山海堂, 1995.
- 15) 有原隆雄, 田中一實: 接着剤の構造物への適用に関する実験的研究, 横河橋梁技報 No.10, pp.33-40, 1980.11.

RESEARCH ON RETROFITTING FOR CORRODED STEEL GIRDERS AROUND EXPANSION JOINTS

Abstract :

In this research, a retrofitting method using cover plates fixed by bolted connection and adhesives, and a practical procedure for selecting efficient retrofitting methods were discussed. In FY2008, static and fatigue bending tests, and cyclic longitudinal loading tests using steel beams containing artificial structural deficiency were carried out. In addition, when the bolted cover plates with epoxy resin adhesives were applied to the deficiency in the beams, the cover plates indicated good performance to improve the static and fatigue behavior. Based on the results, the simple retrofitting method using the bolted-bonded cover plates was proposed. Additionally this research provided the tentative procedure for selecting the retrofitting methods.

Key words : corrosion, retrofitting, bolted connection, adhesive, stress concentration, fatigue, earthquake, cyclic loading