鋼橋（斜橋）の疲労き裂調査に関する手引き

令和 7 年 3 月

新都市社会技術融合創造研究会

鋼橋の点検並びに損傷の調査手法の高度化に関する研究プロジェクト

目　次

1. 本手引きの目的と範囲.....1
1.1 目的.....1
1.2 範囲.....2
2. 斜橋に関する実態調査結果.....3
3. 斜橋の構造的特徴.....6
3.1 格子形状.....6
3.2 対傾構構造と主桁取り合い構造.....8
3.2.1 対傾構構造.....8
3.2.2 対傾構と主桁の取り合い構造.....11
3.3 応力・変形挙動.....14
4. 斜橋の疲労損傷事例.....17
4.1 一般.....17
4.2 端横桁取付け部.....18
4.3 支承部.....21
4.4 中間横桁および中間対傾構取付け部.....24
4.5 その他の部位.....27
5. 疲労き裂調査方法.....30
5.1 一般.....30
5.2 目視点検.....31
5.3 非破壊検査.....34
5.3.1 検査手法.....34
5.3.2 磁気探傷試験.....35
5.3.3 渦電流探傷試験.....41
6. 疲労き裂対策.....45
6.1 対象とする疲労き裂.....45
6.2 事後保全対策.....47
6.3 予防保全対策.....49

（付録）

付録-1 大型試験体の疲労試験（疲労き裂の再現）
付録-2 実物大試験体に対する非破壊試験（ET）
付録-3 実橋に対する非破壊試験（F 橋）
付録-4 実橋のひずみ計測（L 橋）

1. 本手引きの目的と範囲

1.1 目的

疲労損傷が生じやすいと言われている斜角の小さい鋼道路橋を対象として、それらの構造特性や疲労き裂に関する調査方法を具体的に提示し、適切な非破壊検査による疲労き裂の早期発見とそれらの疲労損傷に対する事後保全対策や予防保全対策を提案することにより、斜角の小さい鋼道路橋の疲労耐久性を向上させることを目的とする。

【解説】

鋼橋のメンテナンスにおいて、各構造部材に発生する疲労き裂の発生をいかに早く、効率的に発見できるかは重要である。特に交差条件などによって斜角が小さくなる場合には、主桁・横桁・対傾構に発生する変形モードが複雑となり、それらの疲労き裂調査においては、対象とする斜橋の構造特性をよく理解したうえで取り組まなければならない。疲労き裂の調査は、基本的には橋梁定期点検要領（令和 6 年 7 月、国土交通省道路局国道技術課）に従って行われるが、斜角が小さい橋に関する調査方法は特に規定されていないため、この手引きでは、特に斜角が小さい鋼道路橋を対象として、疲労き裂の調査方法について具体的に示すこととした。

令和 4 年度、新都市社会技術融合創造研究会の研究プロジェクト「鋼橋の点検並びに損傷の調査手法の高度化に関する研究」でフィールドとして提供された橋梁が、斜角 30°で支承部や端補剛材等に疲労損傷が生じていた[1]。斜角が小さい橋はねじりによる応力や変形等も加わり、経年に伴う床版や支承等の損傷、端横桁等での疲労き裂の発生が懸念されるため、以前から斜角が著しく小さい橋は好ましくないと考えられてきた[2]。しかしながら、跨線橋や渡河橋等、交差条件により避けられない場合もあり、現実には相当数の斜橋が供用されているものと推定されるがその実態は明らかではない。また、新設橋についても、ある程度の斜角が避けられないケースも想定される。

斜角が小さい橋梁に対して、疲労き裂が生じやすい部位が分かればメリハリのある効率的な点検が可能となり、き裂の早期発見につながってその結果比較的簡易な補修対策で安全性を確保できる場合が多い。また、斜角が小さい橋梁の場合には、特に桁端部周辺などの狭隘な個所では近接目視による点検等も困難な場合が多い。そのような場所でのき裂調査や非破壊検査などの具体的な方法を示すことにより、点検精度の向上に寄与することができる。

また、き裂が生じやすい部位に予防保全対策を施すことにより、疲労耐久性の向上を図ることが可能となる。新設橋に対しても、き裂が生じやすい部位に対して構造の改良を行うことにより、必要な疲労耐久性を確保することが可能となる。鋼橋については、疲労損傷が生じた場合でも、損傷部の局部的な補修・補強によって橋梁全体の長寿命化が可能であるため、適切な疲労対策を講じることが重要である。

本手引きでは、供用中の斜角が小さい鋼橋に対する実態調査結果等から、斜橋特有の構造特性や疲労損傷事例を分析し、また実橋や実物大試験体を用いて非破壊検査方法を検討し、さらに発見された疲労き裂に対する事後保全対策とき裂が生じやすい部位に対する予防保全対策を提案することにより、斜角が小さい鋼橋の疲労耐久性向上を目的とするものである。

1.2 範囲

斜角が 60°未満の鋼橋のうち、主として桁橋を対象とする。

【解説】

近畿地整直轄の約 5,000 橋の道路橋のうち、斜角が 60°未満の橋は約 400 橋存在し、橋長 15m 以上の約 200 橋の大半は鋼橋であることが判明している[3]。本手引きでは、これらの中でほとんどを占める桁橋形式の橋梁を対象とする。なお、本手引きでは、斜角が 60°未満の橋梁を斜橋と称する。

参考文献

[1] Ichinose, H. Luiza、髙橋秀爾、石川敏之、坂野昌弘：斜角 30°を有する鋼道路橋に生じた疲労損傷と変形挙動、鋼構造年次論文報告集、第 31 巻、pp.154-159、2023.11.

[2] 鋼道路橋設計便覧、日本道路協会、1979.2.

[3] 坂野昌弘、川上修、廣瀬彰則、折口清秀、佐治嘉朗：斜角の小さい道路橋の疲労損傷に関する実態調査、鋼構造年次論文報告集、第 32 巻、pp.141-147、2024.11.

2. 斜橋に関する実態調査結果

近畿地方整備局直轄の道路橋 5,050 橋の内、斜角が 60°未満の橋梁は 400 橋（7.9%）あり、橋長 15m 以上の大半は鋼橋である。

【解説】

斜角が小さい橋梁は、挙動の複雑さから耐久性に問題があるため、出来るだけ避けるべきであると考えられているが、それらの損傷状況や構造特性に関する実態調査はこれまで報告されていない。それらの実態を明らかにすることは、既設橋の維持管理のみならず、新設橋の設計に関しても有用な知見となることが期待される。

以上のような背景から、令和 5 年度はプロジェクトのテーマに「斜橋に関する実態調査」を追加し、斜角の小さい橋梁の疲労耐久性の向上を目的として、疲労損傷と構造特性に関する調査を行った結果、以下のような成果が得られた[1]。

(1) 近畿地方整備局直轄の道路橋 5,050 橋の内、斜角が 60°未満は 400 橋（7.9%）、45°未満は 132 橋、30°未満は 21 橋、25°未満は 7 橋（最小 20°が 2 橋）であり、橋長 15m 以上 193 橋の内 71%の 137 橋が鋼橋であることが判明した（**図 2.1** 参照）。

(2) 斜角が 30°未満で比較的資料が揃っている 5 橋を対象として、疲労損傷と構造特性について点検データなどから調査を行った結果、溶接構造の 3 橋の内、1960 年代に完成した 2 橋では、経年が 40 年程度で中間対傾構下弦材溶接部にき裂発生が報告されている（**表 2.1** 参照）。この原因は、直交格子構造の対傾構の両端部で生じる主桁のたわみ差の影響を設計時に考慮せず、対傾構弦材とガセットを疲労強度が低い重ね継手で溶接接合としたためと考えられる。なお、もう 1 橋については、中間橋脚上で斜角が 28°であるが、ねじり剛性が高い箱桁であり、経年が 19 年と短いことから、特に損傷は報告されていない。

(3) リベット構造の 2 橋については、経年が 70 年以上であるが、疲労損傷は報告されていない。リベット構造の場合には、リベット継手の疲労強度が溶接継手と比べて高いことと、溶接構造と比べて剛性が高いため主桁のたわみが小さいことなどが考えられる。

3 章以降では、斜角が 30°以上の橋梁を対象に令和 6 年度に実施した調査結果も加えて記述する。

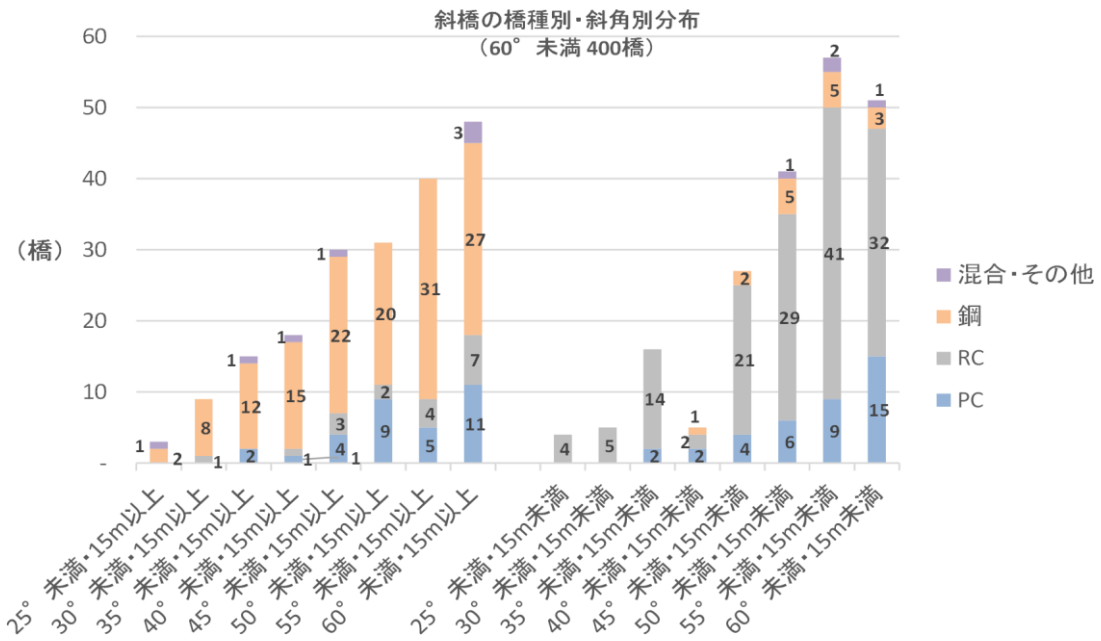


図2.1 近畿地方整備局直轄国道の斜角60° 未満の橋梁の橋種別・斜角別分布

表2.1 斜角 30° 未満の 5 橋の詳細

橋梁名	橋梁形式	橋長(m)	支間長(m)	斜角	格子形式	完成年	経年	交通量(昼間 12h) 台	交通量(昼間 12h) 大型車混入率(%)	構造	現場継手	適用示方書	点検結果・損傷概要等	斜橋特筆事項
R 橋	鋼単純 合成鈑桁橋 (下り線)	29.9	28.4	25°	直交	1963 (S38)	61	27,233	19.5	溶接構造	リベット	昭和 31 年 鋼道路橋設計示方書	S56 床版縦桁補強(中間対傾構上弦材撤去) 対傾構ガセット部破断3か所(2010)補修済み 床版 C1 あり	中間対傾構下弦材ガセット部の損傷発生
T 橋	鋼単純鈑桁橋 (上り線) ※合成・非合成の別不明	18.5	16.5	21°	直交	1950 (S25)	74	27,233	19.5	リベット構造	リベット	昭和 31 年 鋼道路橋設計示方書 (昭和 14 鋼示が正と思われる)	S52 床版縦桁補強(中間対傾構上弦材撤去)	R 橋より 10 年前でリベット構造である。対傾構の損傷発生はなし。
O 橋	鋼 2 径間連続 非合成箱桁橋	98.5	47.7 + 48.6	A1 53° P1 28° A2 45°	直交	2005 (H17)	19	15,510	14	溶接構造	HTB	平成 14 年 道路橋示方書	健全度 I (2019)	特になし
KA 橋	鋼 2 径間連続 非合成鈑桁橋	48.6	24.175 ×2	20°	直交	1931 (S6)	83	19,721	14.3	リベット構造	リベット	大正 15 年 道路構造に関する細則案	1978 頃グレーチング床版に取り替え 塩害による腐食が著しい。 2017 歩道拡幅に伴う桁補強、腐食部当て板補強。	斜橋特有の損傷は特になし。
K 橋	鋼単純非合成 鈑桁橋	40.8	39	25°	直交	1967 (S42)	57	5,166	3.5	溶接構造	リベット	昭和 39 年 鋼道路橋設計示方書	塩害による腐食が著しい。 1997 塗り替え塗装。 2000 床版上面増し厚。 対傾構下弦材に疲労き裂(2009) ⇒2018 年補修 補修後健全度 I	端横桁がラーメン構造である。 対傾構の疲労損傷詳細が不明
L 橋 文献[1]	鋼単純非合成 鈑桁橋	18.1	17.8	30°	斜交	1961 (S36)	63	39,895	23.3	溶接構造	リベット	昭和 31 年 鋼道路橋設計示方書	支点上及び近傍の垂直補剛材上端に疲労き裂が多数発生	斜角が小さいが斜交格子である特殊な斜橋である。

参考文献

[1] 坂野昌弘、川上修、廣瀬彰則、折口清秀、佐治嘉朗：斜角の小さい道路橋の疲労損傷に関する実態調査、鋼構造年次論文報告集、第 32 巻、pp.141-147、2024.11.

3. 斜橋の構造的特徴

3.1 格子形状

斜橋の格子形状には、中間対傾構や横桁を、斜角に合わせて斜めに組む斜交格子形式と主桁に直角に組む直交格子形式がある。斜角が小さい斜橋では直交格子形式が一般的である。それぞれの格子形式には力学的特性、構造的特性があり、それに配慮して調査を行う必要がある。

【解説】

主桁と横桁、対傾構の組み方、すなわち格子形状は斜角の大きさによって、**図 3.1** のように 2 通りの方法が鋼道路橋設計便覧等[1-3]に示されており、標準となっている。

本手引きでは、斜角の小さい斜橋を主として対象としており、その場合、(b)の直交格子形式が多い。直交格子形式では、斜交格子形式より横桁や中間対傾構による荷重分配効果が大きい[1]。一方、**図 3.2** に示すように、横桁、中間対傾構の主桁取付位置でたわみ差が生じる。特に、断面 A の G3 - G2 間対傾構のように、支点近傍に取り付けられる中間対傾構ではたわみ差が比較的大きくなる。活荷重によるたわみ差は繰り返し作用し、取付部のガセット、特に支点側に疲労き裂が発生している事例がある。

斜橋の格子形状の図は、鋼道路橋設計便覧、日本道路協会、2020.9参照

図3.1　斜橋の格子形状[2]

直交格子におけるたわみ差の概要は 鋼道路橋設計便覧、日本道路協会、2020.9参照

図3.2　直交格子におけるたわみ差の概要[2]

R 橋は 1963 年完成の支間 28.4m の単純合成鈑桁で､斜角は 25° と非常に小さい斜橋である。**図 3.3** に示すように、中間対傾構の主桁取り合い位置での両側の主桁のたわみ差が原因と考えられる疲労き裂が生じている[4]。

支間長約 17m、幅員約 25m、斜角約 30° の L 橋では、本来は直交格子とするべきところであるが、斜角が非常に小さく、桁長に比べて幅員が広く、主桁本数が 16 本もあり、組み方が煩雑になることから、斜交格子が採用されていると思われる（**図 3.4**）。この橋については支点上垂直補剛材の上端部に疲労き裂が生じており、試験車両を用いた動的計測を実施している[5]。3.3 節に計測された動的挙動について記述する。

同様の事例の場合は、特に主桁端部の垂直補剛材上端の疲労き裂に注意が必要である。

斜橋の反力分布は、**図 3.5** のようになる[2]。鈍角側の主桁が大きく、鋭角側の主桁が小さくなるが、斜角 30 度程度でも鋭角側の外桁においても負反力までは生じないようである。

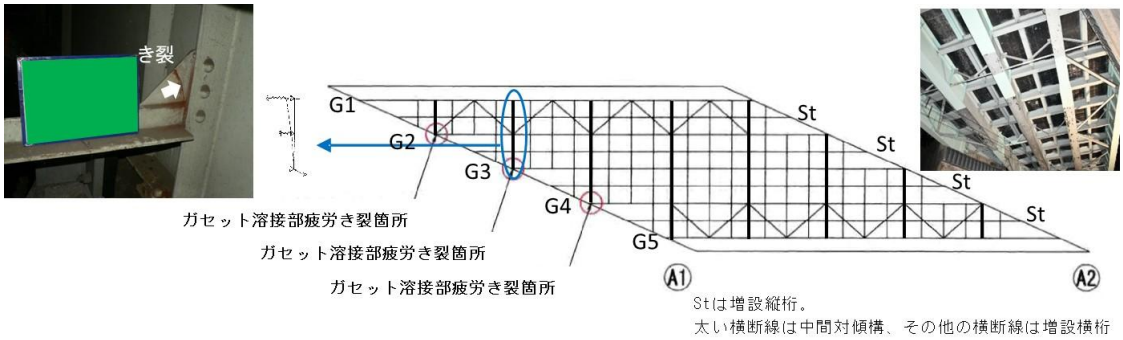


図3.3 R橋の中間対傾構の疲労き裂の概要

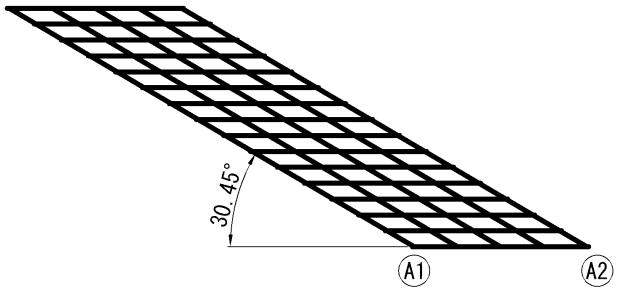


図3.4　L橋の格子形状

斜橋の反力分布は、鋼道路橋設計便覧、日本道路協会、2020.9.参照

↑

図3.5　斜橋の反力分布[2]

3.2 対傾構構造と主桁取り合い構造

3.2.1 対傾構構造

斜橋の中間対傾構や端対傾構構造には、主桁高さ、主桁間隔、連結方法（リベットか高力ボルトかもしくは併用か、溶接を使用しているか否か）によって様々な構造が用いられている。調査に当たっては、対傾構構造に配慮する必要がある。

【解説】

標準的なトラス形式の中間対傾構の構造を**図 3.6** に、端対傾構の構造を**図 3.7** に示す[1-3]。また、桁高が低い場合などでトラス形式ではなく、充腹横桁構造としている場合や、単に溝形鋼を使用している場合もある（**図 3.8**、**写真 3.1**）。その場合、端対傾構などにニーブレースを設けた充腹タイプの対傾構構造とする場合があり、その標準的な構造を**図 3.9** に示す[3]。ニーブレースにはフランジを設けている場合と設けない場合がある。また、ニーブレースの腹板を、充腹横桁部腹板と１枚構造としている場合と、横桁下フランジにすみ肉溶接で取り付けている場合がある。横桁腹板とニーブレース腹板を１枚構造とした場合は、横桁下フランジを腹板に差し込む構造とする場合（**写真 3.2**）と下フランジを曲げフランジとしている場合（**写真 3.3**）とがある。

なお、**写真 3.3** では、垂直補剛材の上端部の疲労き裂に対する補強がみられるが、こちらは**図 3.3** の事例とは逆にたわみの大きい側に疲労き裂が発生しており、床版たわみによる主桁上フランジの首振りが原因と考えられる。

図 3.6～**図 3.9** の構造は溶接構造であるが、昭和 30 年代以前の橋梁ではまだ溶接が使用されておらず、リベット構造である。昭和 39 年版の鋼道路橋設計示方書[6]では、リベット構造を主として扱っているが、そこでは**図 3.10** の対傾構構造が示されており、同様の構造が採用されている橋梁が多い。**写真 3.4** はその事例であるが、上弦材は縦桁増設の際に撤去されている例である。このタイプの対傾構の斜材は、引張り材のみで設計している場合があり、小さな断面のアングル材の斜材が使われている場合がある。なお、リベット構造でも、**図 3.6** の標準構造の事例もある（**写真 3.5**）。

なお、端対傾構で充腹横桁構造を使用して、幅の広いマンホール（開口部）を設け、**図 3.9** のニーブレース構造を模した構造としている特殊な事例もある（**写真 3.6**）。

鋼橋構造詳細の手引き 日本橋梁建設協会、1983.3参照	鋼橋構造詳細の手引き 日本橋梁建設協会、1983.3参照
図3.6 中間対傾構標準構造[3]	図3.7 端対傾構標準構造[3]

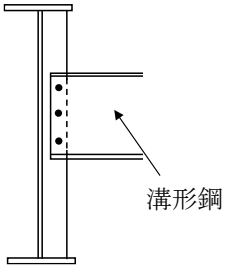


図3.8 溝形鋼による対傾構

鋼橋構造詳細の手引き
日本橋梁建設協会、1983.3参照

図3.9 端対傾構ニーブレース構造[3]

鋼道路橋設計示方書、日本道路協会、1964.6.参照

図3.10 リベット構造対傾構例[6]

写真3.1 溝形鋼の中間対傾構

写真3.2 ニーブレース差込みフランジ構造

写真3.3 ニーブレース曲げフランジ構造

写真3.4 リベット対傾構（図 3.10 タイプ）

写真3.5　リベット対傾構（図 3.6 タイプ）

写真3.6　端対傾構の特殊な構造事例

3.2.2 対傾構と主桁の取り合い構造

3.1 **節**に示したように斜橋の格子形式には２通りの方法があり、対傾構と主桁の取り合いはその形式によって異なる。特に、斜角の小さい斜橋では、端対傾構と主桁の取り合い構造には特徴的な構造があり、調査に当たっては、配慮する必要がある。

【解説】

対傾構を取り付ける主桁の垂直補剛材の取り付け方式についても、斜橋の場合、格子の形式、斜角によって構造が異なっている。斜交格子の場合、**図** 3.11 の(a)のように、垂直補剛材も斜角をつけて取り付ける場合が多いが、斜角が 45°程度の比較的小さい斜交格子の場合は、(b)のように垂直補剛材は直角に取付、対傾構のガセットを曲げる構造としている場合もある。

ガセットを曲げる構造の場合、小さな曲線半径で曲げ加工されるため、じん性が低下し、弱点となりやすい。この箇所に応力集中が生じ、疲労き裂が発生している事例について文献[7]で報告されており、注意が必要である。斜角が小さい場合は直交格子となるが、端対傾構は**図** 3.11(b)の構造となり、曲げ角度も大きくなるため特に注意が必要となる（**写真** 3.7 参照）。

斜角が小さい場合は、直交格子構造となるが、鈍角側外桁端部では、対傾構と隣接中間対傾構が**図** 3.12(a)のように１点に集中しないように、**図** 3.12(b)のような構造が推奨されている[3]。しかし、実際には**図** 3.12(a)の構造事例も多くみられる。この構造の場合、端対傾構と中間対傾構のガセットを重ねて接合する**図** 3.13 のような構造と、角材を設けて対処している**図** 3.14 のような構造を使用する事例がある[8]。このような角材を使用することでガセットは曲げる必要はなくなるが、垂直補剛材と角材が片側からしか溶接ができないため、裏当て材などを使用する場合もあるが、溶接品質に問題があり、弱点となる。**図** 3.13 の構造の事例の写真を**写真** 3.8 に示す。**図** 3.14 の構造の事例の写真を**写真** 3.8 に示す。ただし、**写真** 3.8 の事例は**図** 3.14 の中間対傾構が設置されていない事例である。

鋼橋構造詳細の手引き、日本橋梁建設協会、1983.3.参照

(a)　　(b)

図3.11 斜交格子の場合の対傾構の取付方法[3]

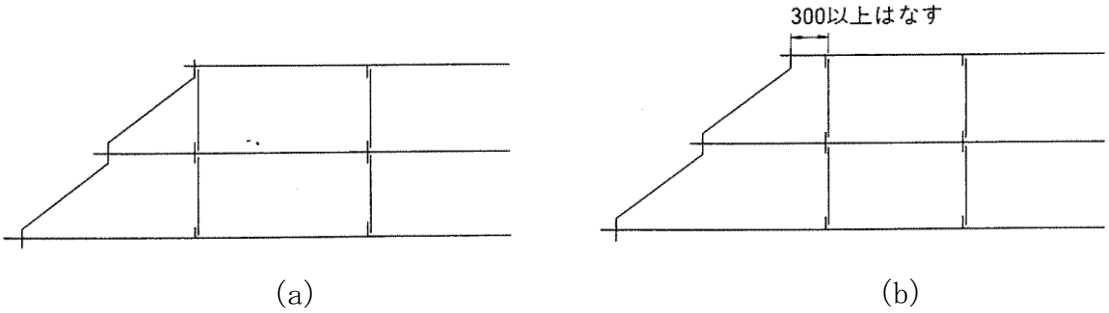


図3.12　直交格子の端部の組み方[4]

写真3.7　端対傾構の角度の大きな曲げ加工の例

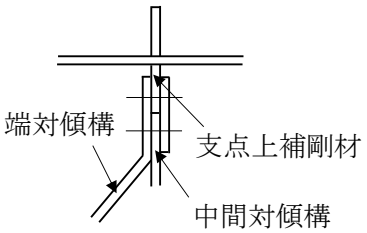


図3.13 対傾構ガセットの重ね構造 [8]

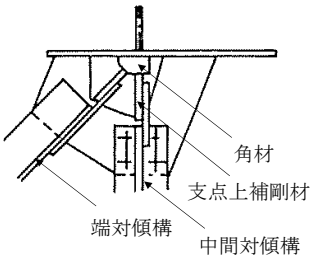


図3.14 角材を用いた取り合い構造[8]

次にガセットと対傾構下弦材の溶接構造についてみてみると、文献 3 では**図 3.15**(a)が標準であるが、(b)のような構造も見られる。(a)では、下弦材をガセット板に取り付けるすみ肉溶接が重ね継手なので H 等級、下弦材の裏側に回し溶接を行った場合には H‘等級となり、疲労強度が著しく低い継手形式となる。(赤丸箇所)。(b)では、下弦材の下フランジ端部とガセットの溶接の回し部（赤丸）と、下弦材ウェブとガセット板の突合せ溶接部（赤楕円）があり、下フランジ端部（打ち切り部）では大きな応力集中が生じ、突合せ継手部では不溶着部や溶接端部が疲労上の弱点となる。いずれの箇所からも疲労き裂の発生事例が報告されている[9]。

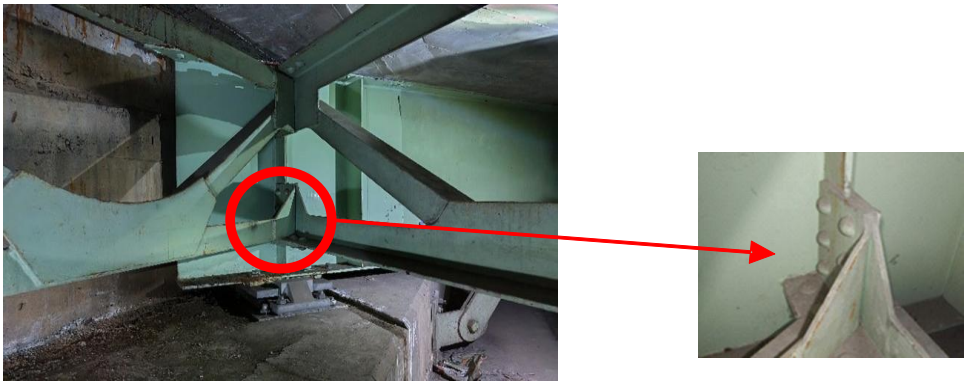


写真3.8　**図 3.13** 構造の例

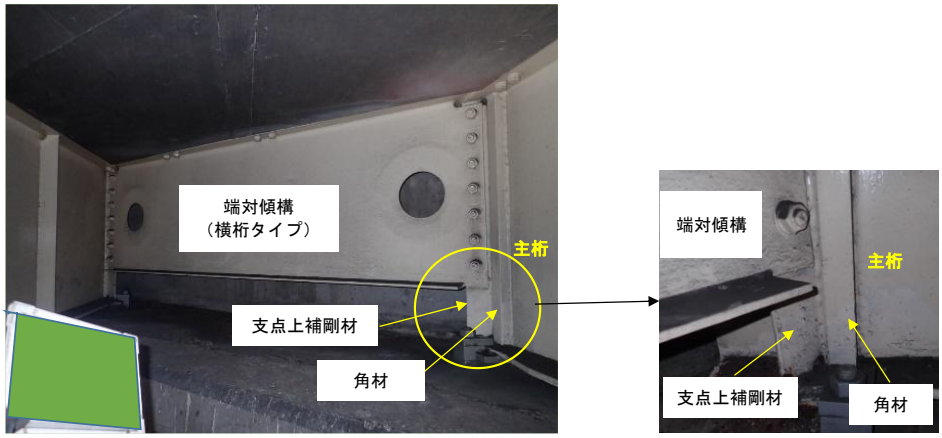
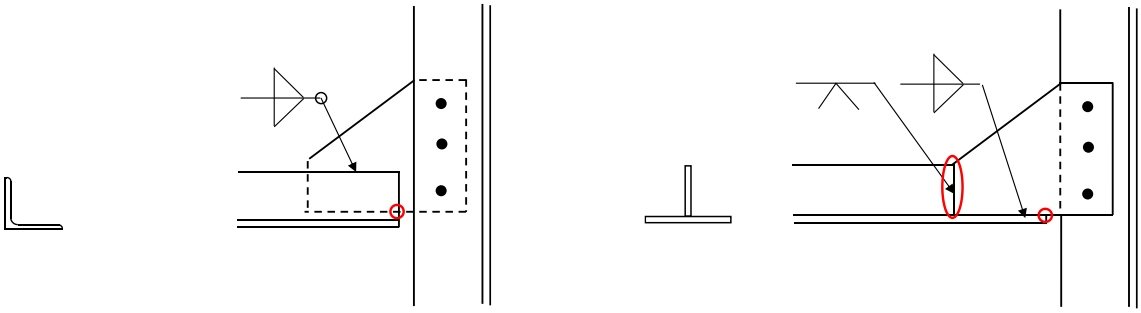


写真3.9　**図 3.14 図 3.13** 構造の例



(a)　　(b)

図3.15　対傾構ガセットと下弦材の溶接構造[9]

3.3 応力・変形挙動

実橋での試験車両を用いた応力測定により、斜橋の主桁端部付近では以下のような挙動が確認されている。

(1) 大きなき裂が確認されている端補剛材上端部では、主桁と端横桁の角度が鋭角側で引張、鈍角側で圧縮の応力が生じている。

(2) 比較的小さいき裂が確認されている支点直近の鈍角側の中間補剛材上端部では、端補剛材の半分程度の大きさの圧縮応力が生じていた。

(3) 端補剛材も中間補剛材も、主桁の鈍角側を車輪が走行する際に大きな応力が生じていることから、鈍角側の床版のたわみが疲労損傷に影響していることが推察される。

【解説】

疲労き裂が検出された橋梁の実働応力性状を把握し、橋梁全体の変形挙動と疲労損傷の関係について明らかにすることを目的として実橋で応力測定を実施した事例[5]がある。

事例の対象橋梁は、**図 3.16** に示すとおり、橋長 18.100m、支間長 17.880m、幅員 25.350m（3 車線）で斜角 30°の RC 床版単純鋼桁橋である。対象橋梁は、1961 年に竣工し、2020 年の点検調査で**図 3.17** に示す端補剛材と支点直近の中間補剛材の上端部で疲労き裂が検出された。測定点として、**図 3.17** に示すように大型車交通量が多い G11～G14 の A2 側の端補剛材と中間補剛材の上端部（①～⑧）が選定された。

図 3.16 に示す第 2 および第 3 走行車線に試験車を走行させ動的載荷試験を行った。中間補剛材①以外の計測値は、全て第 3 車線走行時の方が第 2 車線よりも大きく、主桁の鈍角側に荷重が載る方が疲労に厳しくなっている。第 3 走行車線走行時の応力波形を**図 3.18** に示す。同図より以下のことがわかる。

1) 大きなき裂が確認されている端補剛材上端部では、主桁と端横桁の角度が鋭角側の⑤で引張、鈍角側の②と⑥で圧縮の応力が生じており、鋭角側が破断しているのは引張応力の影響と考えられる。なお、鋭角側を車両が走行する⑦と⑧では、ほとんど応力が生じていない。

2) 比較的小さいき裂が確認されている支点直近の中間補剛材上端部においても、端補剛材と同様に、鈍角側の①と④では圧縮応力、鋭角側の③では引張応力が生じている。ただし、それぞれの大きさは端補剛材の半分程度であり、き裂の大小と発生応力の傾向が一致している。

3) 端補剛材も中間補剛材も、主桁の鈍角側を車輪が走行する際に大きな応力が生じていることから、鈍角側の床版のたわみが疲労損傷に影響していることが推察される。また、端補剛材、中間補剛材ともに、鈍角側の圧縮側では車輪ごとのピークが現れているが、鋭角側の引張側では明瞭ではなく、床版全体のたわみ変形の影響が大きいことを示している。

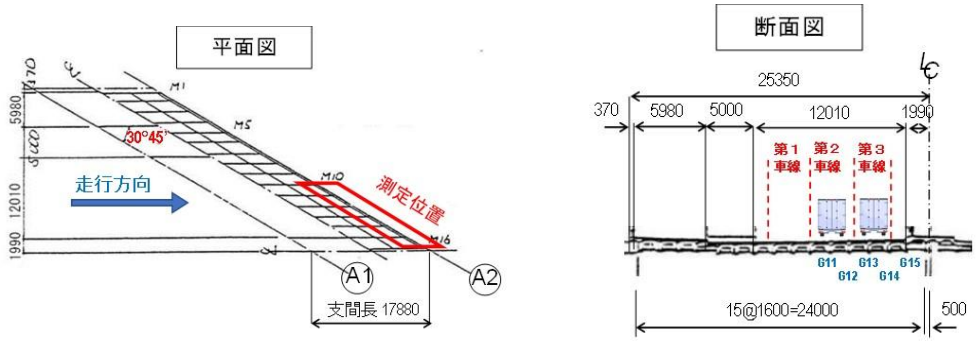


図3.16　斜角30°を有する斜橋の応力測定の事例[5]

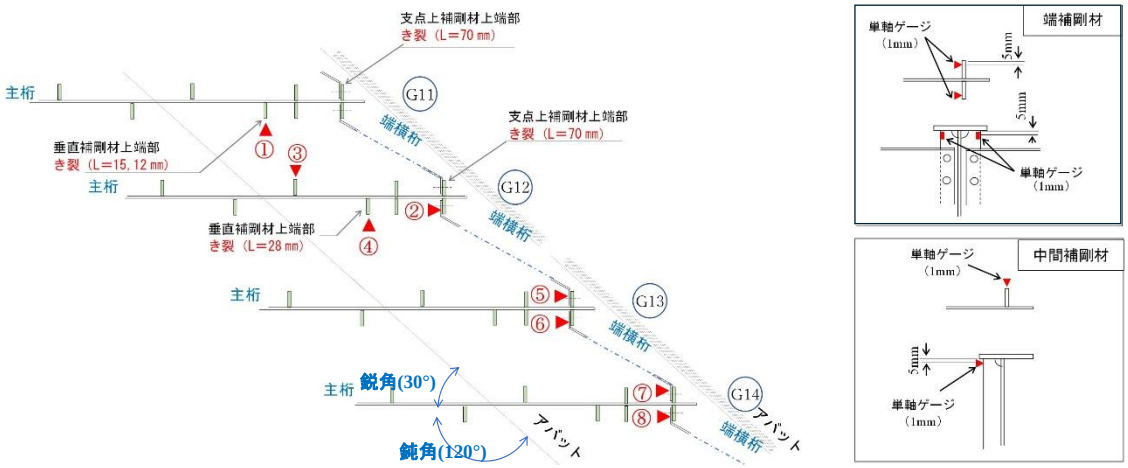


図3.17　測定点および疲労き裂検出箇所[5]

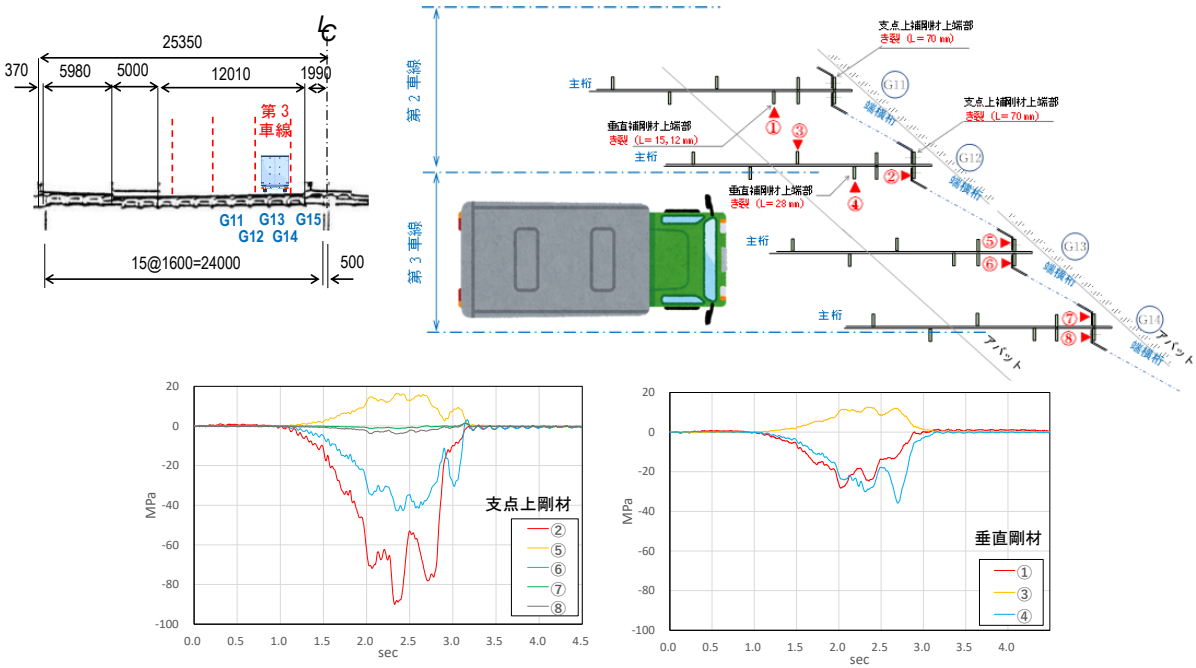


図3.18　試験車両通過時（第3走行車線）の応力波形[5]

参考文献

[1] 鋼道路橋設計便覧、日本道路協会、1979.2.

[2] 鋼道路橋設計便覧、日本道路協会、2020.9.

[3] 鋼橋構造詳細の手引き、日本橋梁建設協会、1983.3.

[4] 小西日出幸、川上修、廣瀬彰則、折口清秀、佐治嘉朗、坂野昌弘：斜角の小さい道路橋に関する実態調査、土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会 CS3-21、2023.9.

[5] Ichinose, H. Luiza、髙橋秀爾、石川敏之、坂野昌弘：斜角 30°を有する鋼道路橋に生じた疲労損傷と変形挙動、鋼構造年次論文報告集、第 31 巻、pp.154-159、2023.11.

[6] 鋼道路橋設計示方書、日本道路協会、1964.6.

[7] 実務者のための鋼橋疲労対策技術資料、国土交通省道路局国道・防災課監修、鋼橋疲労対策技術検討会編、2012.3.

[8] 武部一雄、谷口正、村瀬勝英：斜橋構造特性についての考察、日本橋梁技報、1988.

[9] 寺田博昌、松本好生、岩崎雅紀、江口宏、佐々木保隆：斜角を有する合成桁橋の損傷調査.および補修、補強方法の検討―対傾構の疲労破断について―、横河橋梁技報 NO.16、1987.1.

4. 斜橋の疲労損傷事例

4.1 一般

斜角が小さい橋梁では以下のような部位で疲労損傷が発生している。

(1)　端横桁取付け部

(2)　支承部

(3)　中間横桁および中間対傾構

(4)　その他の部位

【解説】

斜角の小さい橋梁で発生している疲労損傷（き裂）は、本研究において収集した橋梁定期点検結果等を調査して部位ごとに整理した結果、(1)　端横桁取付け部、(2) 支承部、(3) 中間横桁および中間対傾構で発生していることが判明した。ここでは収集した事例を損傷発生部位ごとに示す。また、(1) ～ (3) 以外の留意すべき疲労損傷等について (4) その他の部位に示した。

なお、ここで示したき裂パターンは橋梁定期点検要領に示されている「付録-3 損傷程度の評価要領」のうち、「鋼部材の損傷②亀裂」に記載されているパターン番号とした[1]。

4.2 端横桁取付け部

端横桁周りでは、以下の疲労損傷事例がある。
（１）　端横桁端部の下フランジ打ち切り部
（２）　端補剛材上端溶接部

【解説】

斜橋の端横桁取付け部に疲労損傷が発生した事例を示す。斜橋の端横桁は主桁との取合い形状が複雑になっている場合が多く、また、その構造は橋それぞれに相違している。そのため点検などにおいて疲労損傷発生位置を予測する際には本手引きの事例にのみ着目するのではなく、対象橋梁の構造をよく理解することが肝要となる。

(1) 端横桁端部の下フランジ打ち切り部

斜角に伴う面外変形および下縁引張力が繰り返し作用する箇所であることに加えて、フランジを打ち切ったことによる断面の急変、および、桁端部の漏水により端横桁下フランジ打ち切り部近傍のウェブ折り曲げ部が腐食して局部的に断面減少している。そのため、横桁下フランジ打ち切り部の溶接止端部に応力集中により発生したき裂が横桁のウェブに進展したものと見受けられる。

それらの事例を事例 1、2 に示す。これらのき裂は、落橋につながるような危険なき裂ではなく、ある程度進展した後で停留する場合が多い。このような場合には、き裂先端にストップホールを設けることが恒久対策となる。

事例 1

き裂パターン：C22
主桁支点補剛材に端横桁がリベット止めされている。
疲労き裂は端横桁鋭角側のウェブと下フランジのすみ肉溶接部（ウェブ折り曲げ部）で発生している。

事例 2

き裂パターン：C22
主桁支点補剛材に端横桁ウェブがリベット止めされている。
疲労き裂は端横桁鋭角側の折り曲げウェブと下フランジのすみ肉溶接部（ウェブ折り曲げ部）で発生している。

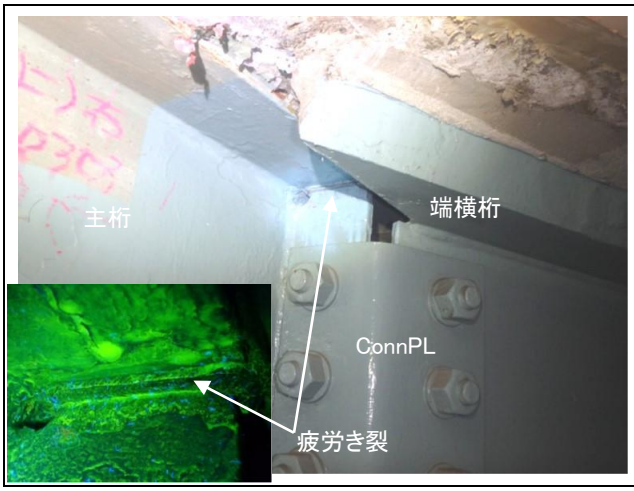
(2) 端補剛材上端溶接部

床版の輪荷重たわみによる主桁の回転を端横桁が拘束することにより、端横桁が取り付いた垂直補剛材上端部に応力が集中し、それに加えて端横桁の斜めからの拘束による補剛材上端部の面外曲げが生じて疲労き裂が生じ、補剛材上端部が破断した事例がある。疲労き裂は補剛材上端部すみ肉溶接の止端とルートの両方から発生する場合がある。

それらの事例を事例 3、4 に示す。補剛材の上端部が破断しても橋が落ちることはないが、放置すると主桁の上フランジとウェブの溶接部にき裂が生じ、主桁ウェブに進展する可能性があるので、補剛材上端部と主桁上フランジをアングル材で固定するのが良い[2-4]。

事例 3

き裂パターン：A111
主桁支点補剛材に端横桁折り曲げウェブがリベット止めされている。
疲労き裂は鈍角側主桁支点補剛材と主桁上フランジとのすみ肉溶接部で発生している。



事例 4

き裂パターン：A111
主桁支点補剛材に端横桁(取替済み)がコネクションプレートを介して HTB 止めされている。
疲労き裂は鈍角側主桁支点補剛材と主桁上フランジとのすみ肉溶接部で発生している。

4.3 支承部

支承部では、以下の疲労損傷事例がある。

(1)　ソールプレート前面溶接部

(2)　端補剛材下端溶接部

【解説】

斜橋の支承部（支点部）に疲労損傷が発生した事例を示す。端横桁と同様に支点部近傍の構造は橋それぞれで相違しており、各橋の構造をよく理解する必要がある。

(1) ソールプレート前面溶接部

斜橋に限らず、摩耗や腐食により支承の回転や移動機能が制限される場合には、ソールプレート前面溶接部に応力集中が生じ、疲労き裂が発生する場合がある。斜橋の場合には、それらに加えて、橋梁全体にねじれが生じるため、支承部付近の下フランジで断面変化部であるソールプレート前面溶接部にねじれによる応力集中が重なり、疲労き裂が発生する場合がある。それらの事例を事例 5、6 に示す。

すみ肉溶接部に生じたき裂は、止端き裂かルートき裂かにかかわらず主桁下フランジを貫通、破断して主桁ウェブに進展し、ウェブを破断させる可能性があるため、早期発見と早期の対策が必要である[5]。

事例 5

き裂パターン：E1

主桁下フランジにソールプレートが全周すみ肉溶接されている。また、端横桁は斜配置された支点補剛材にボルト止めされている。

疲労き裂はソールプレートと主桁下フランジとの支間側すみ肉溶接部から発生してウェブに伸びている。

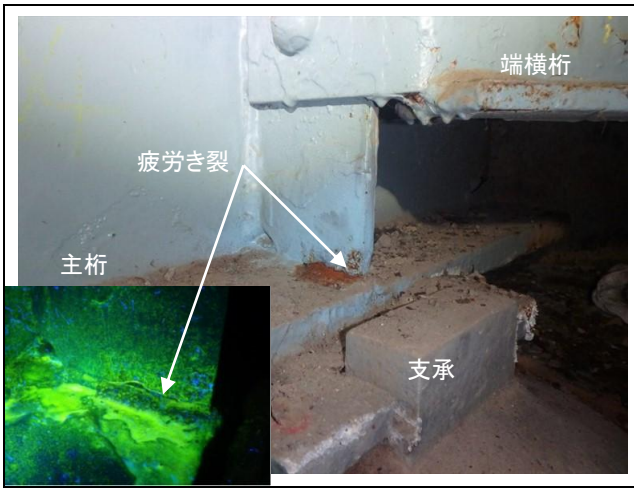
事例 6

き裂パターン：E1
き裂発生の疑わしい箇所であるソールプレート周辺の主桁下フランジに錆が見受けられる。
このような場合は簡易に清掃等を行い表面の状況を観察することでき裂発生を見落とすリスクの軽減につながる。

(2) 端補剛材下端溶接部

支点上の端補剛材下端は完全溶け込み溶接が標準であるが、古い橋ではすみ肉溶接の場合があり、その場合にはルート部や止端部からき裂が発生し、溶接部を破断させて主桁に進展する場合がある。それらの事例を事例 7、8 に示す。

垂直補剛材の上端部と異なり、支点上補剛材の下端部には大きな支点反力が作用し、また主桁との間にスカーラップを設けないため、疲労き裂が主桁ウェブに進展しやすく、進展した場合には、主桁の耐荷力を大きく損なう恐れがあるため、主桁に進展する前に、き裂の除去やストップホール、当て板による補強などの対策を講じる必要がある。



事例 7

き裂パターン：A211
主桁支点補剛材に端横桁折り曲げウェブがリベット止めされている。
疲労き裂は鈍角側主桁支点補剛材と主桁下フランジとのすみ肉溶接部で発生している。

事例 8

き裂パターン：A231

主桁支点補剛材に端横桁折り曲げウェブがリベット止めされており、補修工事中でリベットは撤去され補強材の孔明工が施工されている。

疲労き裂は鈍角側主桁支点補剛材と主桁下フランジとのすみ肉溶接部で発生している。

4.4 中間横桁および中間対傾構取付け部

中間横桁および中間対傾構の取付け部では、以下の疲労損傷事例がある。

（1）　中間対傾構下弦材と主桁側ガセットとの溶接部

（2）　中間横桁，中間対傾構取付け補剛材上端溶接部

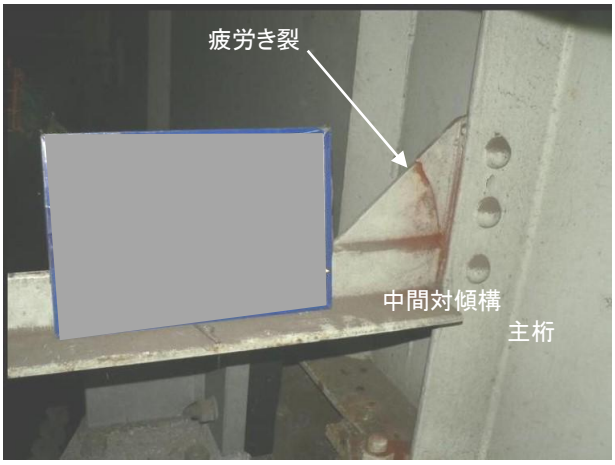
【解説】

斜橋の中間横桁および中間対傾構に疲労損傷が発生した事例を示す。格子組みは斜格子と直交格子とがあるが、直交格子の場合に疲労損傷が発生している。これらの疲労損傷は斜橋に限った現象ではないが、斜橋特有の全体的なねじれ変形が影響していると考えられる。

(1) 中間対傾構下弦材と主桁側ガセットとの溶接部

支点部付近に配置された中間対傾構には、両側の主桁のたわみ差によるせん断変形が繰り返し発生する。そのため、対傾構下弦材と主桁の取付け部には繰返し力が作用するが、下弦材と主桁側のガセットをすみ肉溶接による重ね継手とした場合には、疲労強度等級が H 等級以下と極めて低い継手であることから疲労き裂が発生する場合がある。重ね継手のすみ肉溶接部から発生したき裂は、溶接線に沿って進展した後にガセット母材に進展し、破断させる。それらの事例を事例 9、10 に示す。

ガセットが破断しても落橋することはないが、下弦材が落下する可能性もあるので、高力ボルトと当て板で添接しておくのが良い。

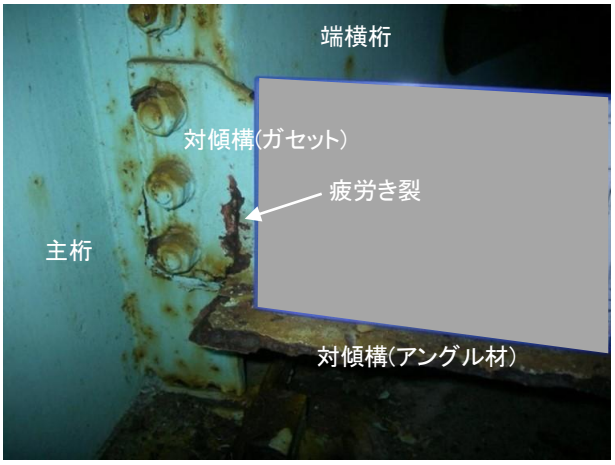


事例 9

き裂パターン：I2

直交格子に配置された中間対傾構が支点補剛材にリベット接合されており、アングル材とガセットが重ね溶接されている。

疲労き裂はアングル材とガセットとのすみ肉溶接部から発生してガセットに伸びている。



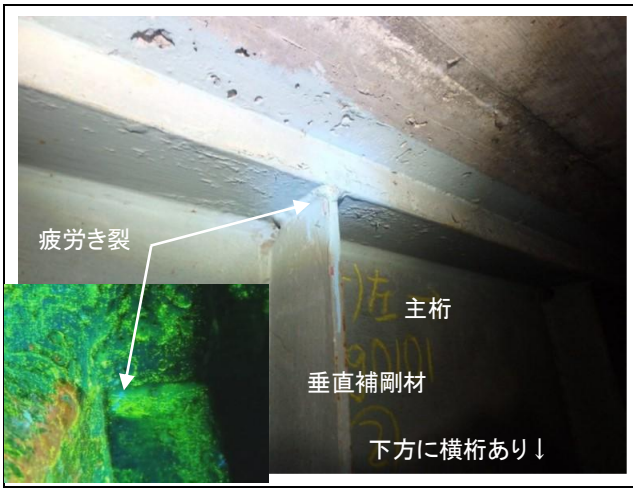
事例 10

き裂パターン：I2
主桁支点補剛材に端横桁と対傾構がHTB で共締めされており、対傾構アングル材とガセットプレートは溶接されている。
疲労き裂はガセットプレートとアングル材との重ね溶接部で発生している。

(2) 中間横桁、中間対傾構取付け補剛材上端溶接部

直橋では床版の輪荷重たわみによる主桁の回転を中間横桁や対傾構が拘束することにより、それらが取り付いた中間補剛材上端溶接部に応力集中が生じ、ルートギャップなどから疲労き裂が発生する場合があるが、斜橋の場合には、それらに加えて、主桁間のたわみ差の影響も考えられる。それらの事例を事例 11、12 に示す。

これらのき裂で直ちに落橋することはないが、補剛材上端部が破断すると、主桁の上フランジとウェブの溶接部にき裂が生じ、ウェブ内を斜め下方に進展する可能性があるため、き裂の除去やアングル材による補強などの対策を早期に講じるほうがよい。



事例 11

き裂パターン：A111
斜交格子に配置された中間横桁折り曲げウェブが垂直補剛材にリベット接合されており、垂直補剛材と主桁上フランジは溶接されている。
疲労き裂は垂直補剛材と主桁上フランジとのすみ肉溶接部で発生している。

事例 12

き裂パターン：A111

直交格子に配置された中間対傾構(増設横桁配置のため上弦材は切断済み)が垂直補剛材にリベット接合されており、垂直補剛材と主桁上フランジは溶接されている。

疲労き裂は垂直補剛材と主桁上フランジとのすみ肉溶接部で発生している。

4.5 その他の部位

前述の事例に含まれない疲労損傷事例として以下がある。

(1)　中間補剛材上端溶接部のき裂削除痕

(2)　縦桁端部の下フランジ打ち切り部

(3)　端補剛材と横構ガセットの溶接部

(4)　主桁下フランンのカバープレート端溶接部

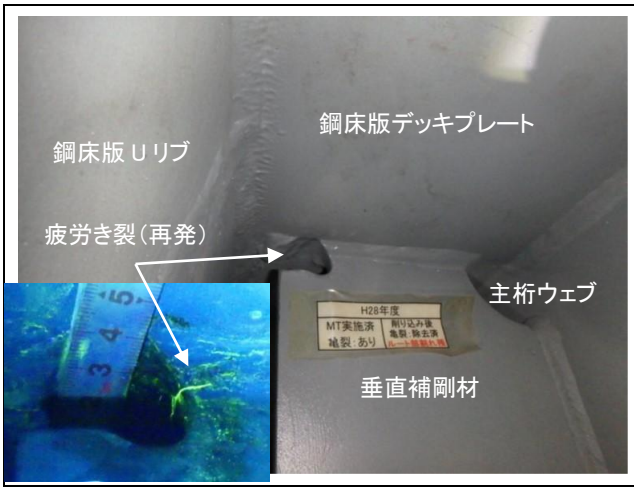
【解説】

斜橋調査の中で見受けられた前述以外の疲労損傷事例を示す。

(1) 中間補剛材上端溶接部のき裂削除痕

当該部の最初のき裂発生要因は 4.4(2)にて記載のとおりである。本事例は一度き裂を削り込みにて除去したにも関わらず比較的早い時期にき裂が再発している。その要因のひとつには削り込み形状が考えられる。き裂の削り込み除去については狙いが二つある。一つはき裂の除去により再発までの時間を稼ぐこと、変位の拘束で生じたき裂の場合にはこれだけで恒久対策となる場合がある。二つ目は、削り込みにより変形しやすい構造詳細とし、応力集中を緩和することである。

横桁端部のように変形の拘束で生じたき裂の場合には、変形しやすくすることで恒久対策となることがあるが、作用応力が大きい場合には当て板等で補強する必要がある場合も考えられる。この事例の場合には、鋼床版で荷重も厳しそうなので、アングル材を用いた補強を施す方が安全策と考えられる[2-4]。



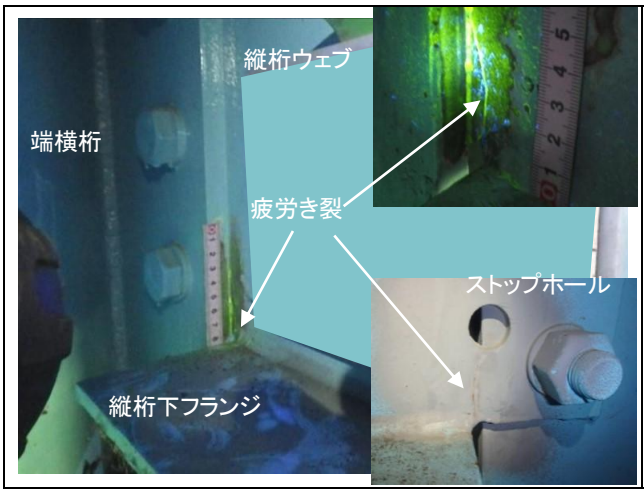
事例 13

き裂パターン：A111

鋼床版箱桁斜橋の支間部垂直補剛材においてき裂削り込み処置されていたが次回点検時に処置済み箇所で再度き裂が発生していた。

(2) 縦桁端部の下フランジ打ち切り部

当該部は 4.2(1)にて記した要因によりき裂が発生している箇所となる。ここではき裂先端にストップホールが設けられている。ストップホールは通常 TCB または HTB にて締め付けることでストップホールの応力集中を緩和することがき裂進展の抑止対策として有効であるが、当該部のようにき裂発生により応力集中が緩和される場合には、ストップホールのみでも恒久対策となる場合がある。なお、縦桁が輪荷重を支持する場合には、ウェブを破断させる恐れがあるので、ストップホールに加えて当て板による補強が必要である。



事例 14

き裂パターン：K2

4 径間連続 RC 床版非合成箱桁斜橋で 2 箱桁に 5 本の縦桁が配置されている。当該部は斜配置された端横桁仕口材(垂直補剛材)と縦桁ウェブ（折り曲げなし）がボルト止めされている。

疲労き裂は縦桁ウェブと下フランジのすみ肉溶接部で発生している。

ストップホール（SH）施工後はき裂の再発は見られない。

(3) 端補剛材と横構ガセットの溶接部

当該箇所は事例説明のように錆汁が不自然な箇所を境に顕著にみられる状況である。そのような場合には錆汁がどこから発生しているのかを確認する必要がある。特に、垂直補剛材が貫通するガセットのスカーラップ部では、垂直補剛材と主桁ウェブの溶接と、ガセットとウェブの溶接が重なり、溶接割れや疲労き裂が生じる場合があり[6]、注意を要する。

事例 15

き裂パターン：－

あまり錆汁が見られない部位である支点補剛材に錆汁が見受けられる。

ガセットプレートより下側でのみ顕著な錆汁が見られる。ガセットプレートと支点補剛材の取合い構造は不明であるが、き裂を予見する場合、錆汁の発生源を観察することも重要となる。

(4) 主桁下フランンのカバープレート端溶接部

主桁下フランジのカバープレート端部に生じる疲労き裂については、下フランジを破断させ、落橋に繋がる非常に危険なき裂である。米国や豪州では落橋に至った事例がある[7]。塗膜割れについては早急に MT を行い、き裂が認められない場合でも、予防保全対策として溶接部の止端仕上げを行い、疲労強度等級を上げておくことが望ましい。

事例 16

き裂パターン：F1

斜橋のバチ桁にカバープレートが配置されており、橋軸直角方向すみ肉溶接止端部で塗膜割れと錆が見受けられる。

当該箇所で下フランジ側にき裂が発生した場合に主桁が破断する懸念があるため、塗膜割れの性状をみてき裂の有無を判断できない場合は、MT により き裂の有無を確認しておくのがよい。

参考文献

[1] 国土交通省 道路局 国道・技術課：橋梁定期点検要領、2024.7.

[2] 坂本千洋、小西日出幸、奥村信太郎、坂野昌弘：U リブ鋼床版垂直補剛材上端部に対する下面からの疲労対策、鋼構造年次論文報告集、第 27 巻、pp.815-823、2019.11.

[3] 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、鋼構造年次論文報告集、第 24 巻、pp.693-700, 2016.11.

[4] 坂本千洋、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に関する実験的検討、鋼構造論文集、第 25 巻、第 100 号、pp.1-14、2018.12.

[5] 国土交通省道路局国道・防災課監修、鋼橋疲労対策技術検討会編：実務者のための鋼橋疲労対策技術資料、2012.3.

[6] John W. Fisher, Eric J. Kaufmann, William Wright, Zuhan Xi, Hernando Tjiang, Bala Sivakumar and William Edberg：Hoan Bridge Forensic Investigation on Failure Analysis Report, June 2001,

[7] John W.Fisher：Fatigue and Fracture in Steel Bridges, Case Studies, John Wiley & Sons, Inc., 1984.

5. 疲労き裂調査方法

5.1 一般

斜橋には、本手引き（案）第 3 章の構造的特徴および第 4 章の疲労損傷事例に示すような疲労き裂が発生し易い箇所がある。それぞれの橋の構造的特徴とき裂が生じやすい箇所を十分に理解した上で調査を行う必要がある。また、桁端部で主桁と横桁の角度が鋭角となるような狭あい部では、特に調査方法に工夫を要する場合がある。

【解説】

疲労き裂の調査は、原則として近接目視を基本とする「橋梁定期点検要領」（国土交通省、令和 6 年 7 月）[1]に従い実施する。溶接部等の応力集中部では塗膜割れ下に疲労き裂が存在する可能性が高いと考えられており、「橋梁定期点検要領」では近接目視点検の一項目として塗膜割れの調査がある。疲労き裂調査の一般的な流れとして、現在、近接目視点検時に発見された塗膜割れは原則すべてが磁気探傷試験（MT）対象となっている。

本手引き（案）第 3 章の構造的特徴および第 4 章の事例に示すように疲労き裂が発生し易い箇所の多くが狭隘部に位置し、これら箇所については、目視点検および非破壊検査（磁気探傷試験）の際に注意が必要となる。特に斜角が小さい場合には、桁端部の主桁横桁の取合い部および支承部（ソールプレート、支点上補剛材の溶接部）、垂直補剛材の上下端部、中間対傾構と主桁の取り合い部などの調査には、鏡や内視鏡などの小道具や小型の検査器具を用いる等の工夫が必要である。本章では、**図 5.1** に示すように橋台上で特に狭隘な主桁と端横桁の取り合い部を対象とする。

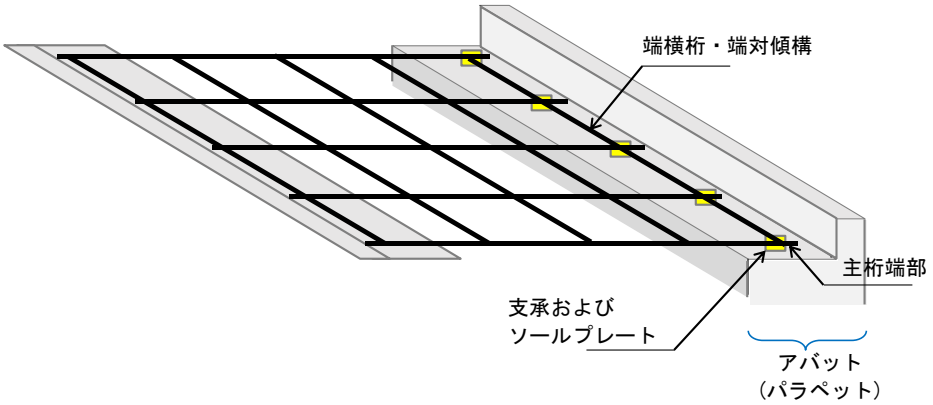


図5.1　斜橋の疲労き裂調査（注意箇所）

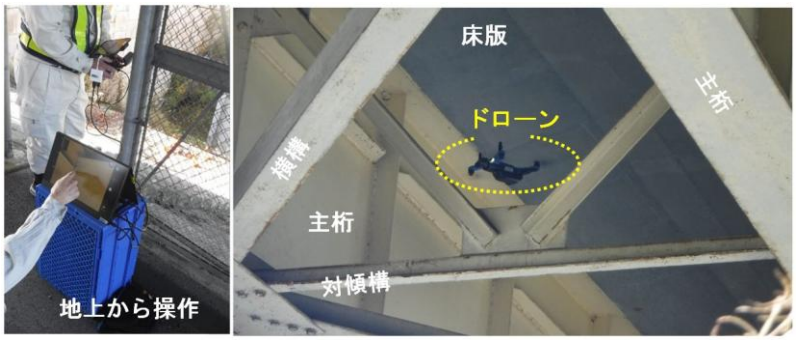
5.2 目視点検

目視点検の一項目として、塗膜割れの調査がある。斜橋では、疲労き裂が発生し易い箇所の多くが桁端部等の狭隘部に位置し、目視点検の実施が困難な箇所が直橋に比べて多いため、鏡や内視鏡などの道具を用いるなどの工夫が必要となる。

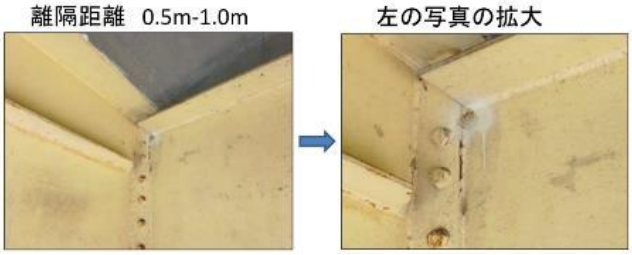
【解説】

目視点検は、「橋梁定期点検要領」（国土交通省、令和 6 年 7 月）[1]に従い実施され、その一項目として塗膜割れの調査を実施する。斜橋の場合、本手引き（案）第 3 章の構造的特徴および第 4 章の事例に示すように疲労き裂が発生し易い箇所の多くが狭隘部に位置し、目視点検の実施が困難な箇所が直橋に比べて多い。

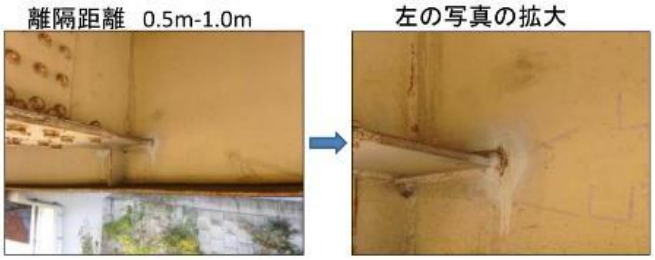
高橋脚などで桁下からの接近が困難な場合には、ドローンによる点検も試みられている。



(1) ドローンを用いた点検の状況



(2) ドローンによる撮影の事例（垂直補剛材上端部）

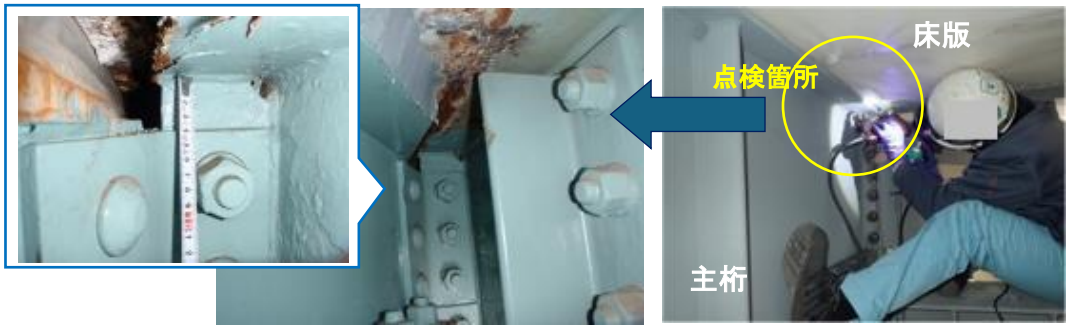


(3) ドローンによる撮影の事例（主桁・横桁部取合い部）

図5.2 ドローンによる溶接部の塗膜割れ検出の例

一般的な上路桁の場合には、**図 5.2** に示すように主桁下部の溶接部等に対しては塗膜割れの確認が可能であり、床版に近い桁上部では下側からは可能であるが横桁や対傾構取付け部に対して上側からの観察は難しく、そのような場合には、橋梁点検車などによる近接目視が必要となる。ただし、そのような場合であっても、落橋につながるような主桁下フランジ周りの重大な損傷の見逃しを防ぐという観点からは、ドローンによるモニタリングも有効と考えられる。

図 5.3 に桁端部の主桁・横桁取合い部のおよび支承部のソールプレート付近の状況を示す。

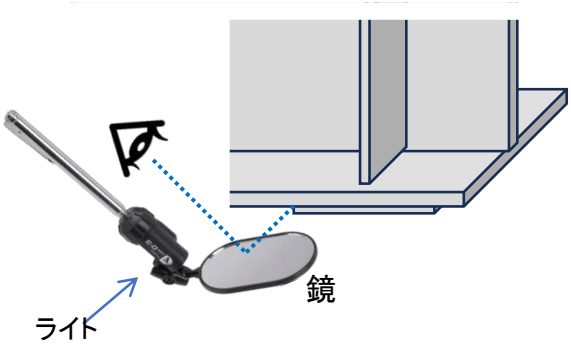


(1) 桁端部　主桁横桁取合い部

(2) 支承およびソールプレート

図5.3　目視点検困難箇所の例

近接目視点検は、点検員が調査箇所に接近し、「目視」（肉眼）で損傷を確認することを原則としているが、桁端部（特に鋭角側）、ソールプレートを含む支承部、横桁と主桁の取り合い部などの狭隘部については、肉眼で直接点検を行うことが困難な位置がある。これら箇所に対しては、**図 5.4** に示すような鏡やカメラのズーム機能、内視鏡、小型のカメラなどを用いて、間接的に損傷状況を確認する方法がある。



(1) 点検鏡

(2) 内視鏡

(3) 小型カメラ

図5.4　目視点検困難箇所での間接的な目視点検方法の例

5.3 非破壊検査

5.3.1 検査手法

近接目視点検によって発見された疲労き裂の可能性のある塗膜割れに対しては，原則的に全数非破壊検査を実施する。

【解説】

溶接部等の応力集中部では塗膜割れの下に疲労き裂が存在する可能性が高いため、そのような個所で見つかった塗膜割れに対しては原則的に全て非破壊検査を行う必要がある。道路橋示方書（鋼橋・鋼部材編）[3]では、非破壊試験の品質を確保するため、それぞれの非破壊検査試験の種類に対応した JIS Z 2305:2013（非破壊検査技術者の資格及び認証）[2]に規定されているレベル 2 以上の資格を有するものが行うとしている。

溶接継手の品質確認法としては、浸透探傷試験（PT）および磁気探傷試験（MT）が代表的であるが、試験の実施には塗膜の撤去が必要である。これらに対し、渦電流探傷試験（ET）は検査速度が速く、塗膜上から実施可能な検査法であるため塗膜の除去が不要となる。

ここでは、狭隘部への適用性を考慮して、非破壊検査手法の中で、表面き裂の検出に用いる磁気探傷試験（以降 MT）と渦電流探傷試験（以降 ET）について記述する。MT は塗膜の除去が必要であるが、ET は塗膜上から検査が可能なため塗膜除去は必要ない。なお、ET を用いる場合には、溶接部の形状の影響を受ける場合もあるため、対象とするき裂に対して MT と同程度の検出精度を有することを確認する必要がある。

5.3.2 磁気探傷試験

斜橋における磁気探傷試験方法および使用機器は、検査箇所の構造、検査条件などを考慮し、桁端部などの狭隘部では、小型の機器を用いる、磁石を出来るだけき裂と直交するようにあてるなど、工夫が必要である。 また、塗膜を除去する際に、狭隘なために電動工具が使えない場合には、ポータブル型のレーザーケレンや剥離剤等を使用することもできる。

【解説】

磁気探傷試験（旧磁粉探傷試験）は、JIS Z 2320-1～3(2017)「非破壊試験 – 磁粉探傷試験」[4]によるものとする。

斜橋の場合、検査箇所へのアクセスが困難になることが想定されるため、図面上の情報に加え具体的な位置状況を示す写真など、現地の事前情報が重要となる。検査に当たっては、検査対象箇所の構造ならびに検査箇所の環境条件などを総合的に考慮し、試験法および機器を選定する。

鋼橋の疲労き裂調査の場合、鋼材を磁化させる代表的な方法として、部材の一部または全体を、図 5.5 に示すように電気磁石の磁極間に置いて磁化させる極間法を用いる。磁粉については、暗所で柴外線を照射すると蛍光を発する蛍光磁粉を用いた湿式蛍光磁粉探傷を採用することが望ましい。なお、**図 5.5** に示すとおり、磁気探傷試験ではき裂の幅は実際のき裂幅より拡大されて表される。また、き裂の深さは磁気探傷試験では確認できない。

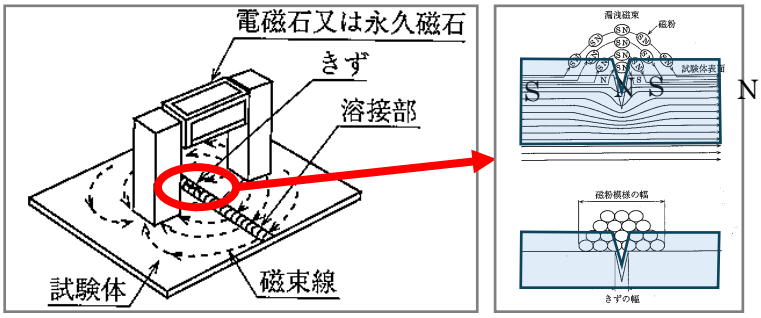


図5.5 磁気探傷試験（極間法）

磁気探傷試験の前処理として、試験範囲以上の領域に付着している汚れ、油、塗膜などの除去を行う必要がある。狭あい部で電動工具が使えない場合には、ポータブル型のレーザーケレンやペースト状の剥離剤を使用することも可能である。

図 5.6 にポータブル型レーザーケレン装置および作業の様子を示す。図中のレーザー装置の重量は 20kg 程度であり、人力で橋梁点検車などに積み込むことが可能である。1 箇所当たりの塗膜除去作業に要する時間は 1 分以内であり、塗膜や錆等は蒸発させてしまうので、廃棄物がほとんど生じないことも利点である。

図 5.7 には、ペースト状の剥離剤（MFP）の作業手順を示す。2 日間程度の養生時間が必要であるが、足場や点検車が使えないような箇所でも梯子等で容易にアクセスでき、特別な工具を必要としないことが利点である。

(1)　ポータブル型レーザーケレン装置

(2)　レーザーケレン作業中の状況

(3) ケレン完了

図5.6ポータブル型レーザー装置を用いたケレン

	1. MFP を塗布する	2. アルミ板＋磁石で押し付ける
塗布作業		
↓（3. 約 48h 放置する）		
	4. 皮スキで MFP と塗装を除去する	5. 剥離完了
剥離作業		

図5.7ペースト状の剥離剤を用いたケレン[9]

また、磁力線とき裂が直角になるときに検出能力が最も高くなるため、磁化は予測されるき裂の方向に対して出来るだけ直角になるように行うことが望ましい。

斜橋の場合、検査箇所が狭隘部に位置するなどの理由で必ずしも良好な試験条件が得られない場合が想定される。試験規格を満たさなくても、磁粉模様を簡易的に確認する方法として以下のような工夫が考えられる。

(a) 磁化：

- 狭隘部で標準のハンドマグナ（携帯用極間式磁粉探傷器）が使用できない場合は、磁化には小型ハンドマグナを使用、または、検査箇所の永久磁石を使用（表 5.1）。
- き裂のある面から磁化ができない場合には、裏側の面から磁化を行うこともできる場合がある。**図 5.8** に、主桁下面側のソールプレート前面溶接部のき裂に対して、下フランジ下の空間が小さく磁石が入らないため、下フランジ上面から磁化を行った事例を示す。磁化の効率的には最善ではないが、次善の策として行った例である。
- 部材の交差部等の狭隘部でも、き裂を跨いで磁力線とき裂が出来るだけ直角になるように工夫して磁化を行う（**図 5.9**）。

など

表5.1　ハンドマグナの種類（例）

標準		本体重量約 3.5kg 磁極内寸法 140mm
小型		本体重量約 1.0kg 磁極内寸法 75mm
		本体重量約 1.0kg 磁極内寸法 50mm

(1)下フランジ下面、ソールプレート前面から磁化（溶接線と斜角）　(2)下フランジ下面、ソールプレート前面から磁化（溶接線に直角）　(3)下フランジ上面から磁化（溶接線を跨いで）

図5.8　ソールプレート・下フランジ溶接部の磁化の工夫―ハンドマグナ使用（例）

図5.9　垂直補剛材上端部溶接部の磁化　(磁力線とき裂が出来るだけ直角に)

(b)磁粉模様の確認：

・肉眼で直接確認できない場合は、鏡や小型のカメラ、内視鏡などを用いて間接的に確認（**図 5.4**）

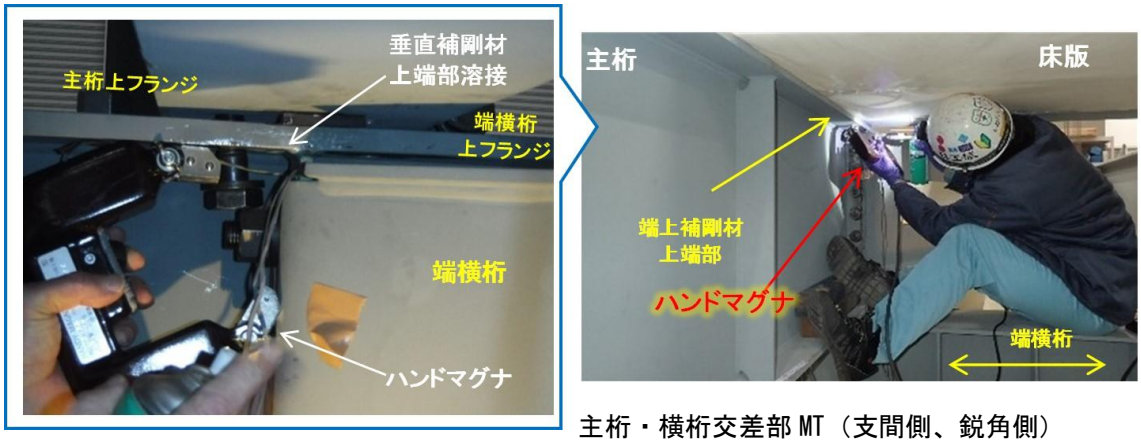
・規定のブラックライトの代わりに携帯型の LED UV ブラックライトを使用（**図 5.10**）

など

図5.10 携帯型 LED UVブラックライトの使用例

図 5.11 に斜橋（斜角：約 30°）の構造を再現した実物大の試験体における MT の作業状況を示す。桁高が低い場合には窮屈な姿勢となり、主桁と横桁の角度が鋭角側の方では更に作業空間が狭くなるため、用いる道具や方法に工夫が必要である。

同じ試験体を用いて行った疲労試験で再現したき裂を対象とした MT の結果の一例を**図 5.12** に示す。垂直補剛材上端部のすみ肉溶接の止端部に、数 mm 程度の長さの疲労き裂が複数確認できる。



主桁・横桁交差部 MT（支間側、鋭角側）

図5.11　斜橋での作業状況（MT、斜角：約30°）

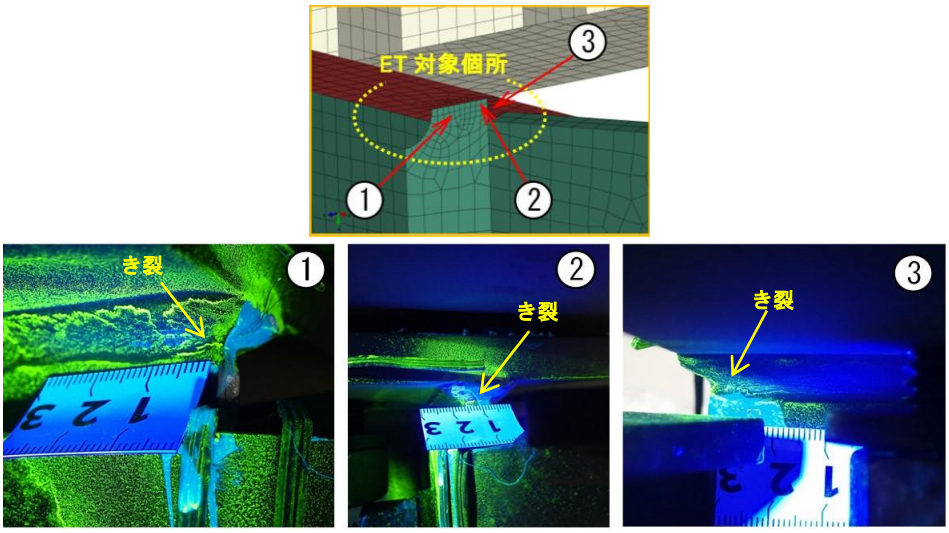


図5.12　斜橋（斜角：約30°）でのMT結果の一例

5.3.3 渦電流探傷試験

渦電流探傷試験（ET）は鋼部材におけるき裂の有無を、塗膜上からの確認が可能な試験方法である。試験方法および使用する機器は、桁端部などの狭隘部では小型のものを用いるなどの工夫が必要である。なお、ET を適用する場合には、対象とするき裂に対して MT と同程度の検出精度を有することを確認する必要がある。

【解説】

渦電流探傷試験（旧渦流探傷試験）は JIS Z 2316-1～JIS Z 2316-4 に従い実施する。現場での作業性を考慮し、渦電流探傷試験には、バッテリー式の携帯型探傷器を用いることもできる。なお、渦電流探傷試験は検査表面の状況に影響されるため、検査表面の腐食状況および塗膜の状況をその成分、などについても事前に把握しておく必要がある。

検査に当たっては、検査対象箇所の構造ならびに検査時間帯や検査箇所の環境条件などを総合的に考慮し、適切な感度で効率よく、安全に検査が実施できる試験法および機器を選定する。また、検査に用いるプローブは、検査箇所の条件を考慮し選定する。

斜橋の狭隘部の探傷には、検査部に届くような小型プローブが適していると考えられる（例えば、**表 5.2** に示す小型プローブ[6-8]）。プローブは高感度のものが適していると思われるが、プローブの感度が高くなるに従い、検査面の凹凸に敏感になるため、適切な S/N 比のものを選定する。

渦電流探傷試験は、試験プローブを試験体表面に接近させて試験を行う。前処理として、試験箇所に付着した金属粉、錆、油を除去する必要があるが、塗膜の除去は不要である。探傷方向は**図 5.13** に示すとおり、キズに平行、プローブは探傷面に直角とし走査する。

斜橋の場合、ノイズが発生し易い構造詳細が多く見られるため、プローブの選定、試験感度の設定、現地施工時のキャリブレーションなどは十分注意して行う。

図5.13 プローブの走査方向

表5.2 渦電流探傷試験　プローブの種類（例）

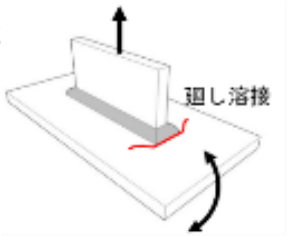
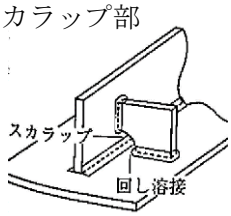
標準		一般溶接部
小型		垂直補剛材 回し溶接部 
		垂直補剛材　スカラップ部 回し溶接部 

図 5.14 には、**図 5.11** と同じ斜橋（斜角：約 30°）の構造を再現した実物大の試験体での作業状況を示す。非常に狭隘な場所であるため、プローブの走査が制限されるような状況である。

また、**図 5.15** では、**図 5.12** で示した MT 結果と同じき裂に対して実施した ET 試験結果（き裂長 6mm および 20mm）を示す。補剛材コバ面ではプローブを走査することができずき裂は検出できなかったが、長さ 20mm のき裂については補剛材の表裏で検出でき、6mm のき裂については補剛材の表裏面でも検出が困難であった。このように、溶接継手の形状やき裂長さによっては、ET での検出が困難な場合があるので、ET を用いる際には、MT との比較等により、検出精度について前もって確認することが必要である。

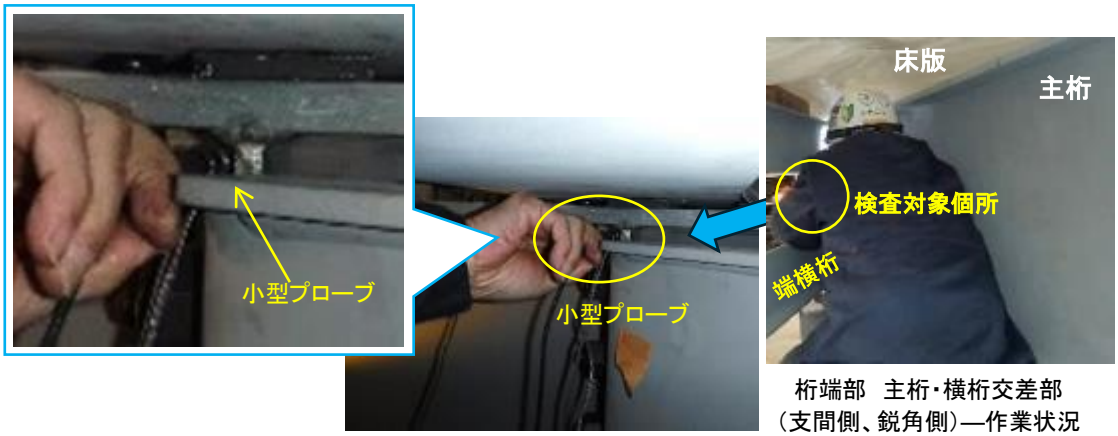
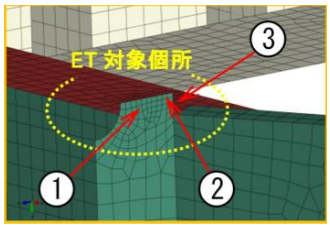
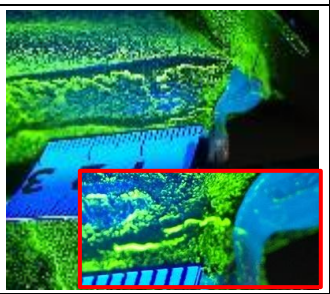
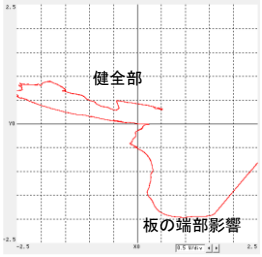


図5.14 斜橋での作業状況（ET、斜角：約30°）



(1) き裂長（6mm）

	①	②	③
MT			
ET	 ・き裂信号は弱く、不安定 ・き裂の有無の判別は困難	・回し溶接部でのプローブ走査不可	・き裂未検出

(2) き裂長（約 20mm）

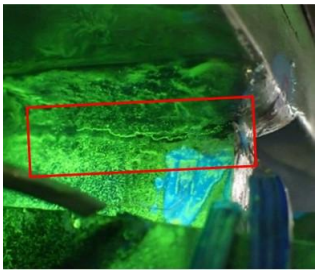
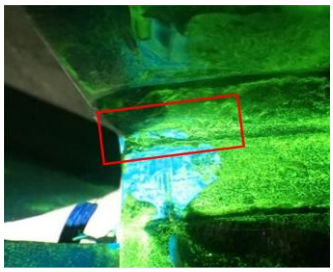
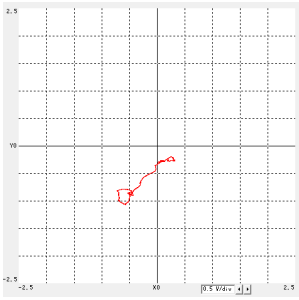
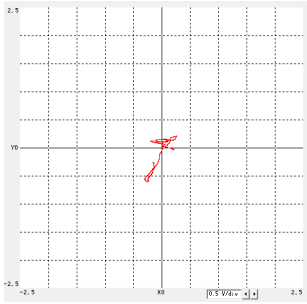
	①	②	③
MT			
ET	 ・き裂あり	・回し溶接部でのプローブ走査不可	 ・き裂あり

図5.15 斜橋（斜角：約30°）でのET結果の一例

参考文献

[1] 橋梁定期点検要領、国土交通省、2024.7.

[2] JIS Z 2305:2013（非破壊検査技術者の資格及び認証）

[3] 道路橋示方書、日本道路協会、2017.

[4] JIS Z 2320-1～3(2017)（非破壊試験 – 磁粉探傷試験）

[5] JIS Z 2316-1～4 (2014) （非破壊試験 –渦電流探傷試験）

[6] 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.

[7] 栗原友則、福島貴仁、野村益巳：渦流探傷試験を用いた鋼橋のき裂検出 効率化の検討、土木学会 69 回年次学術講演会、2014.9.

[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（その 2)、鋼構造年次論文報告集、第 23 巻、pp.356-363、2015.11.

[9] 廣瀬彰則、松川欣司、木村友昭、森俊彦、坂野昌弘：鋼橋の点検並びに損傷調査における剥離工法の適用性試験、土木学会第 79 回年次学術講演会、CS3-11 2024.9.

6. 疲労き裂対策

6.1 対象とする疲労き裂

4 章に示したように疲労き裂は上部工の種々の箇所で検出されている。それらのうち、本章では以下の疲労損傷を対象とする。

(1)　垂直補剛材上端部

(2)　対傾構下弦材と主桁ガセットとの溶接部

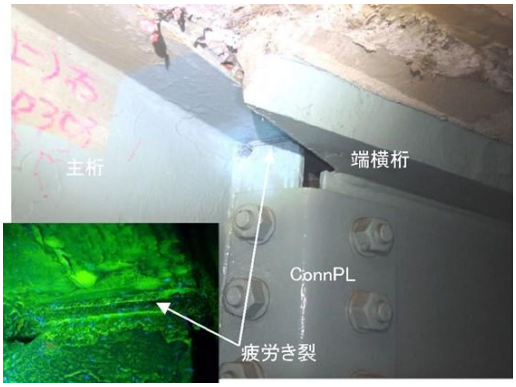
(3)　横桁端部のフランジ打ち切り部

【解説】

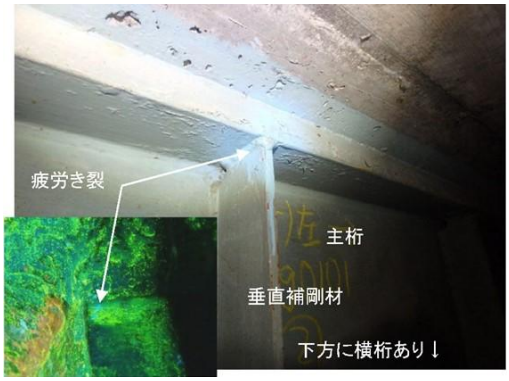
本章で対象とする斜橋における疲労損傷の事例写真を以下に示す。

(1) 垂直補剛材上端部

※端横桁が取り付く端補剛材上端溶接部の疲労損傷事例（ルートき裂）。

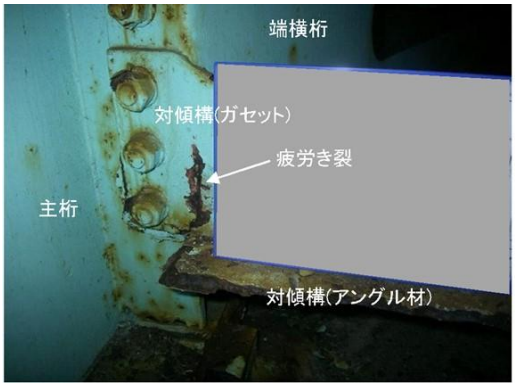


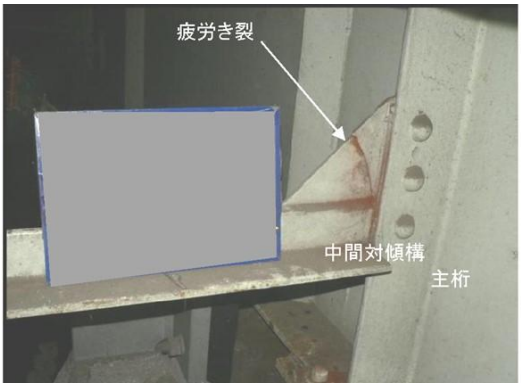
※横桁が取り付く中間補剛材上端溶接部の疲労損傷事例（止端き裂）。



(2) 対傾構下弦材と主桁側ガセットの重ね継手部

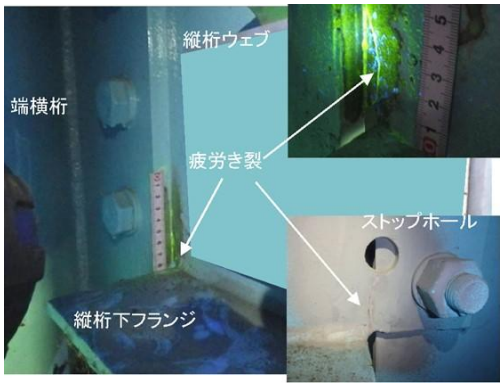
※対傾構下弦材とガセットの重ね継手のすみ肉溶接から生じた疲労き裂。





(3) 縦桁端部の下フランジ打ち切り部

※端横桁の垂直補剛材に高力ボルトで取り付けた縦桁下フランジ打ち切り部から腹板に進展した疲労き裂の写真。



6.2 事後保全対策

非破壊検査により 6.1 に示す部位に疲労き裂が確認された場合、以下の事後保全対策を行う。なお、ここに示す対策は斜橋以外でも適用できるものである。

(1) 溶接止端部に生じたき裂、あるいは長さが 2cm 程度までの比較的短いき裂に対しては、き裂の先端部からバーグラインダーを用いて深さ 2mm 程度まで削り込みを行い、磁気探傷試験（MT）によりき裂の消失を確認した場合には、削り込み痕を滑らかに仕上げる。

削り込みによってき裂が消失せずに短くなった場合には、更に削り込みを行い、き裂全体を除去する。削除後は磁気探傷試験（MT）を行い、き裂が残っていないことを確認した後、滑らかに仕上げる。いずれの場合にも、仕上げ後に補修塗装を行うものとする。

なお、ルート部等から生じた内部き裂の場合には、削り込みによってき裂が長くなるため別途対応を検討する。

(2) き裂長さが 3cm 程度より長いき裂に対しては、ドリルやバーグラインダーを用いてき裂の先端にストップホールを施工することで、き裂の進展を抑制する。施工後は、ストップホールの内面に対して磁気探傷試験（MT）を実施し、き裂が進展する方向の内面にき裂が残っていないことを確認しておくこと。

(3) さらに、ストップホールや削り込み痕から疲労き裂が再発する恐れがある場合や、き裂による断面欠損が大きい場合には、高力ボルトによる当て板補強を行う。

なお、垂直補剛材上端部のき裂に対してアングル材などの材片を主桁上フランジに取り付ける場合や、横桁と主桁の上フランジ同士を鋼板で連結する場合には、主桁上フランジ上の床版や舗装を傷めないように、主桁上フランジ側にはタッピング型のワンサイドボルト（TRS）を使用するのが望ましい。

【解説】

(1) 短いき裂に対してはき裂全体を除去し、長いき裂に対しては先端のストップホールにより、き裂の進展を防止することが事後対策の基本である。削り込みにはバーグラインダーを使用し、斜橋端部など狭い箇所でのストップホール施工にはドリルあるいはバーグラインダーを使用する[1]（写真 6.1、写真 6.2）。

き裂の先端から削り込みを行うと、表面き裂の場合にはき裂が短くなり、ルート等内部から発生したき裂の場合にはき裂が長くなる。き裂が短くなる場合にはき裂を除去できる可能性が高いが、き裂が長くなる場合にはき裂全体を除去することは困難なので削り込みは中止し、き裂の先端を推定してストップホールを設ける等、別途対応を検討する必要がある。

また、溶接止端部にアンダーカットが存在し、そこから生じた微少なき裂が磁気探傷試験（MT）の際に指示模様として現れる場合があり、長いき裂であっても、バーグラインダーで削り込みを行うことにより、それらを削除することができる。

なお、削り込みやストップホールによって表面のき裂を除去しても、鋼材内部にき裂が残っている可能性があるため、削り込み痕やストップホール内面にき裂が残っていないことを磁気探傷試験（MT）により確認しておくことが重要である。

写真6.1バーグラインダーによる削り込み

写真6.2小型の穿孔機による穿孔

(2) き裂が長い場合には、き裂先端にストップホールを設けてき裂の進展を抑制する。ドリルが使える場合には、M22 の高力ボルトが締め付けられるように径を 24.5mm とするのがよい。スペースがなくドリルが使えない場合には、バーグラインダーを用い、径 10mm 程度の貫通孔をあける。なお、いずれの場合にも、磁気探傷試験（MT）により孔内面にき裂が残っていないことを確認し、孔の縁は滑らかに仕上げること。

(3) ストップホールや削り込みの施工後、疲労き裂再発の可能性が高い場合や、き裂による断面欠損が大きい場合には、鋼板による当て板補強を施工する。当て板は高力ボルトで取り付けることを基本とする。

主桁上フランジ側への当て板の取付けでタッピング型のワンサイドボルト（TRS）を使用する際には、支圧接合であることに注意し、孔径や施工方法には、参考文献を参照すること[2-4]。

なお、定期点検時に、ストップホールや削り込み痕からのき裂の再発の有無を目視や磁気探傷試験（MT）で確認できるように、当て板には観察孔等を設けておくことが有効である。

6.3　予防保全対策

現状ではき裂が確認できないが、近接した同様の継手構造で既にき裂が発生しているなど、疲労き裂の発生が予想される場合には、疲労き裂発生防止を目的として以下の予防保全対策を講じることが望ましい。

(1) 中間対傾構下弦材と主桁垂直補剛材を接合するガセットとの間の重ね継手のすみ肉溶接部では、き裂発生予想位置の溶接部に対して止端仕上げを実施する。さらに、すみ肉溶接ルート部からのき裂発生を防止し、疲労耐久性を向上させるためには、下弦材とガセットを高力ボルトで締め付け、重ね継手部のすみ肉溶接をディスクグラインダーで削除することが望ましい。

(2) 横桁や対傾構が主桁に取り付いている垂直補剛材上端部では、溶接部の止端仕上げに加えて主桁上フランジとの溶接部近傍に半円切り欠きを設けたり、垂直補剛材と上フランジにアングル材を取り付けたりするなど、垂直補剛材と主桁上フランジの間のすみ肉溶接部に生じる応力集中を低減させる対策が有効である。

(3) 分配横桁端部の切り欠き部（フランジ打ち切り部）の応力集中に起因する疲労き裂に対しては、切り欠き半径を大きくすることで応力集中を軽減させるとともに、応力集中箇所を溶接止端から母材部に移行させることができる。また、事後保全対策と同様に、横桁と主桁の上フランジ同士を鋼板でボルト接合する方法により、当該部の応力集中を大幅に低減することが可能である。

(4) 疲労き裂のパターンのうち、溶接止端部から発生する表面き裂に対しては、すみ肉溶接ビードの止端仕上げ処理が有効であるが、ルート部から発生するき裂に対しては効果がないことに注意する必要がある。

【解説】

(1) 対傾構の下弦材と主桁側のガセットをすみ肉溶接の重ね継手で接合している場合には、溶接ビード止端部をなめらかな形状にするよう止端仕上げしておくことで、止端部の応力集中を低減でき、止端部からの表面き裂の発生が抑制される。また、止端仕上げにより、止端部にMT で確認できないような微少なき裂が生じている場合にも、それらを除去することができる。

さらに、重ね継手のすみ肉溶接を削除することで、ルートき裂を含めて疲労き裂の発生源を排除でき、高力ボルト接合に置き換えることで、疲労強度等級が格段に向上するため、条文の記述とした。なお、対傾構下弦材とガセットとの間に溶接による肌すきが危惧されるので、溶接ビード削除前に高力ボルトを仮締めし、ビード削除後に本締めを行うのがよい。

(2) 斜角が小さい鋼橋に限ったことではないが、横桁、対傾構取付部の垂直補剛材上端の主桁上フランジとのすみ肉溶接部に疲労き裂の発生が懸念される場合の予防保全対策として、半円

切り欠き工法が文献で紹介されている[5]。半円切り欠きを設けることで、活荷重による主桁上フランジの面外変形を拘束する垂直補剛材溶接部の応力集中が低減され、疲労損傷の発生が抑制される。また、6.2 の事後保全対策で述べたような主桁上フランジ側にタッピング型のワンサイドボルトを用いたアングル材による補強も有効である。

(3) 分配横桁（中間横桁）の切り欠き部（フランジ打ち切り部）では、フランジとウェブの間に 10R 程度の切り欠きを設けている橋梁が散見される。その切り欠き部の半径が小さいことによって疲労き裂が発生する場合がある。予防保全対策としては当該部位の半径を 20R 程度に大きくし、応力集中位置を溶接止端部から切欠き母材部に移動させることが有効である[6]。

また、横桁と主桁の上フランジが近接している場合には、横桁と主桁の上フランジ同士を鋼板で連結する対策が有効である[4]。ただし、この場合にも、6.2 で述べたように主桁上フランジ側は床版等を傷めないようにタッピング型のワンサイドボルトを使用するのが良い。

(4) 疲労き裂には、溶接止端部等から発生する表面き裂と、ルート部や内部きずから発生するルートき裂がある。止端部から発生するき裂の対策としては、止端仕上げの他にピーニング等もあるが、狭あい部での施工が困難で、品質の確保が難しい場合があるので注意を要する。

参考文献

[1] 坂本千洋、小西日出幸、奥村信太郎、坂野昌弘：U リブ鋼床版垂直補剛材上端部に対する下面からの疲労対策、鋼構造年次論文報告集、第 27 巻、pp.815-823、2019.11.

[2] 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、鋼構造年次論文報告集、第 24 巻、pp.693-700, 2016.11.

[3] 坂本千洋、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に関する実験的検討、鋼構造論文集、第 25 巻、第 100 号、pp.1-14、2018.12.

[4] 佐溝純一、伊須田遼、宮本慎也、松本健太郎、松尾 美輝：H型鋼桁橋主桁-横桁接合部補剛材上端の連結板による疲労対策、令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会、I-101、2024.9.

[5] 高田佳彦、川上順子、酒井優二、坂野昌弘：半円切欠きを用いた既設鋼床版橋主桁垂直補剛材上端溶接部の疲労対策、鋼構造論文集、第 16 巻、第 62 号、pp.35-46、2009.6.

[6] 河島信義、福田誠、森野真之、坂野昌弘：RC 床版鋼鈑桁橋分配横桁取合部の実橋応力測定及び疲労対策検討、鋼構造年次論文報告集、第 16 巻、pp.471-478、2008.11.

付 録

付録一覧

付録-1 大型試験体の疲労試験（疲労き裂の再現）
付録-2 実物大試験体に対する非破壊試験（ET）
付録-3 実橋に対する非破壊試験（F 橋）
付録-4 実橋のひずみ計測（L 橋）

付録-1 大型試験体の疲労試験（疲労き裂の再現）

1. はじめに

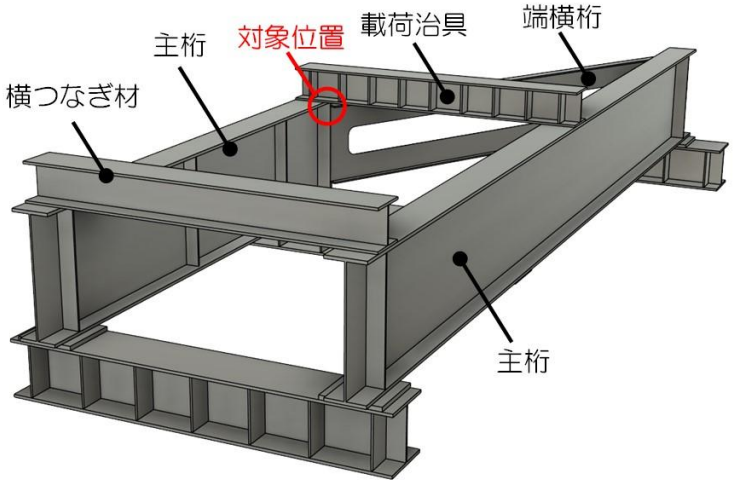
点検支援技術を含めた点検および調査技術の効率化と精度確保、ならびに点検および調査の適切な実施に資するための実際の構造ディテールを出来るだけ忠実に再現した実物大試験体を用いて疲労試験を行い、実橋で生じている疲労き裂の再現を試みた。

2. 疲労試験方法

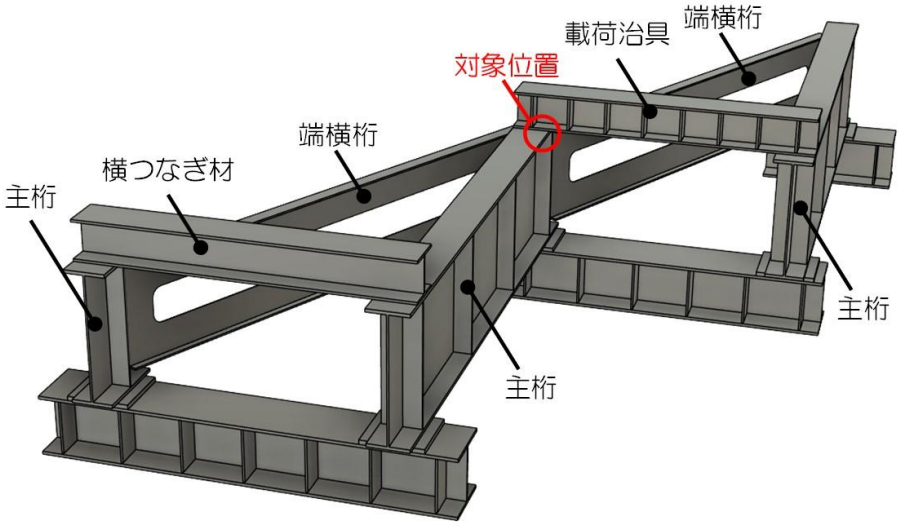
(1) 試験体

実際の構造ディテールを出来るだけ忠実に再現した実物大試験体 2 体の試験体を**付図 1.1** に示す。

試験体 A は 2 本の主桁、試験体 B は 3 本の主桁で構成されており、それぞれの主桁を端補剛材、床版を再現した載荷治具及び横つなぎ材により接合している（試験体の詳細は別紙の図面参照）。試験体のセットアップを**付図 1.2** に示す。なお、載荷治具と主桁は、実橋での RC 床版と主桁上フランジとの接合状況を考慮し、ボルトを締め付けずに孔に差し込んだ状態で接合している（**付図 1.3**）。



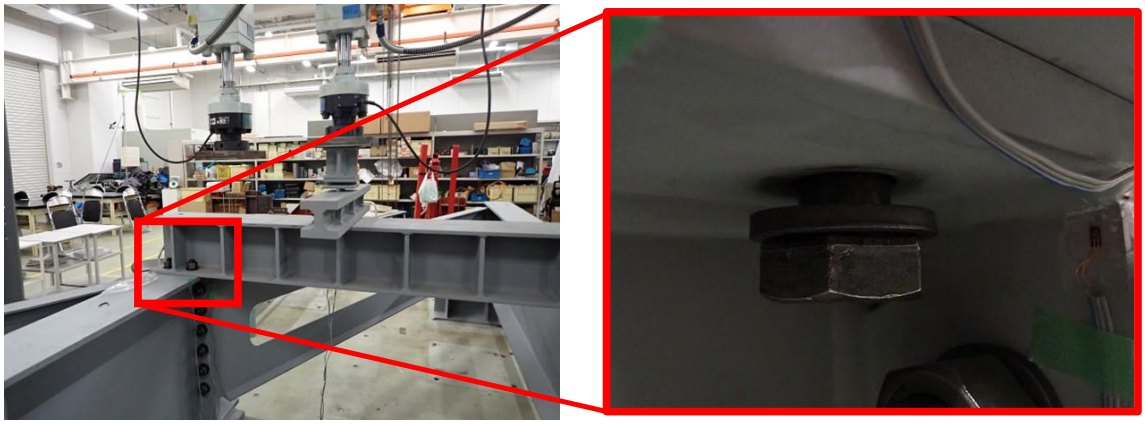
(a) 試験体 A



(b) 試験体 B

付図1.1　実物大試験体

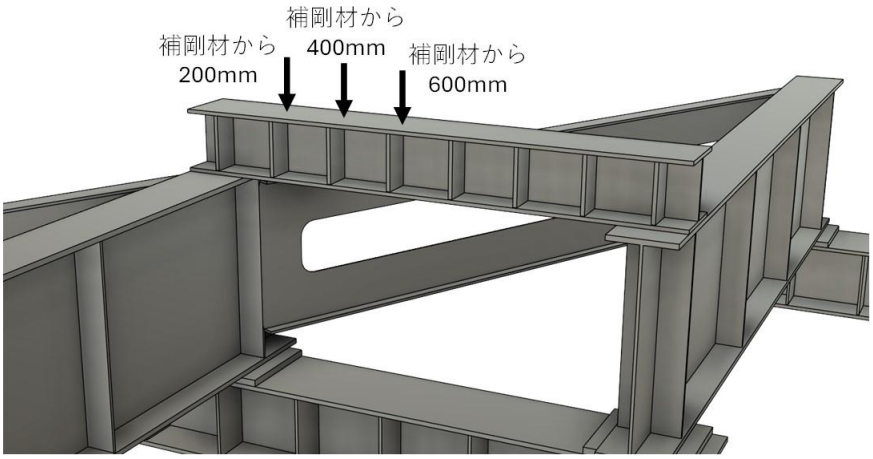
付図1.2　試験体セットアップ状況



付図1.3　主桁と載荷桁の接合状況

(2) 載荷方法

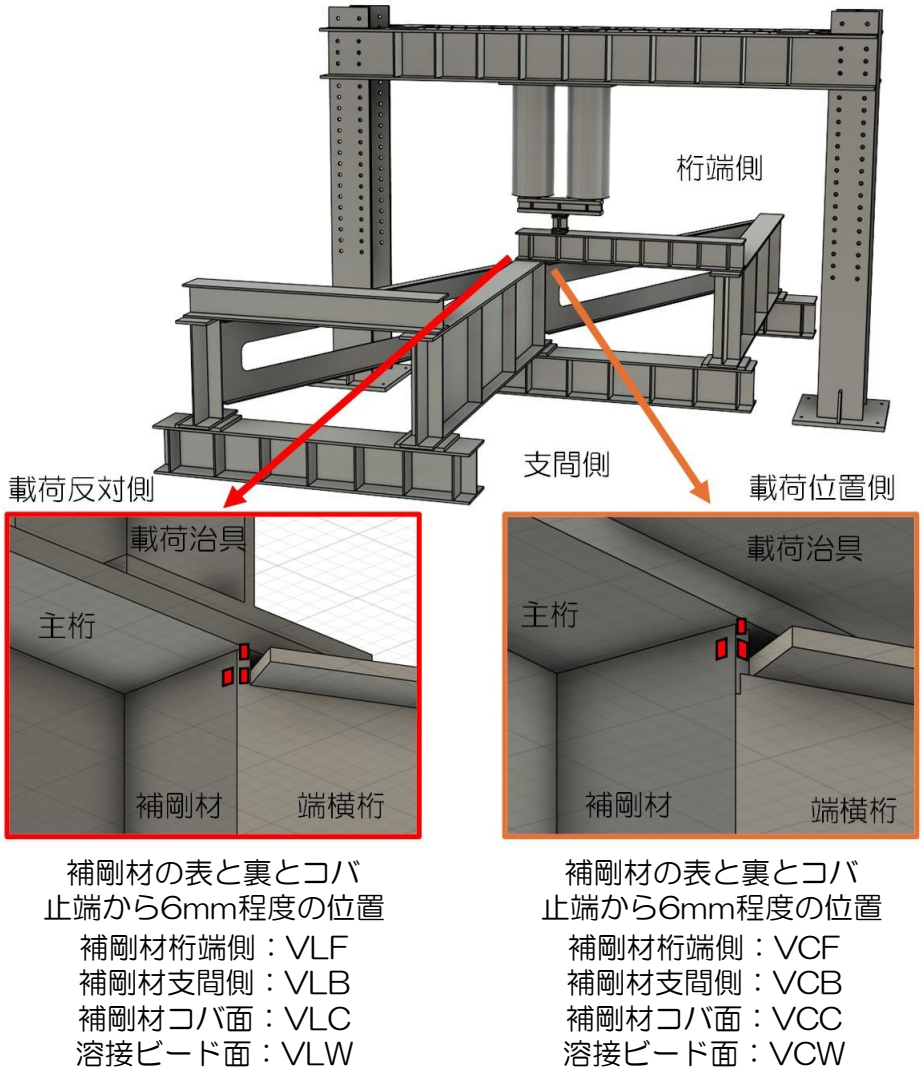
載荷治具のリブ位置に載荷を行った。対象位置の補剛材が最も厳しい応力状態となるように、対象補剛材から 200mm、400mm、600mm の位置（図**付図 1.4**）を載荷位置として静的載荷試験を行った後に、載荷位置を決定した。



付図1.4　載荷位置の検討

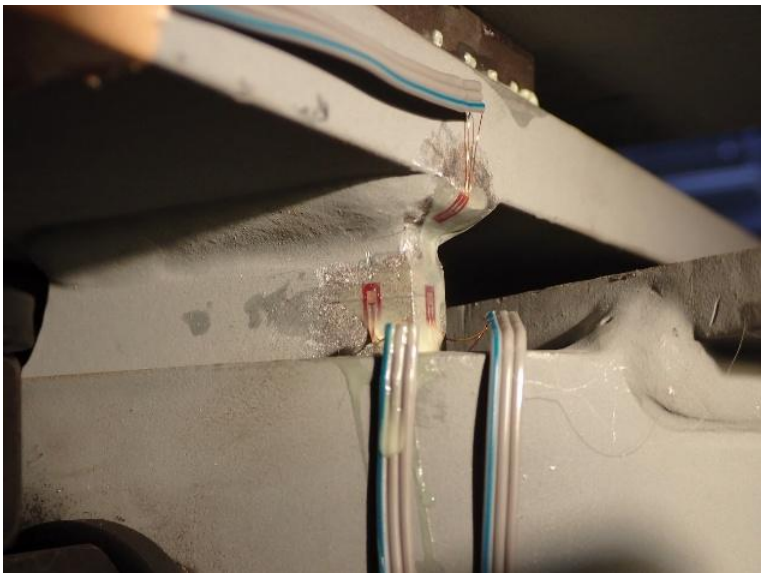
(3) ひずみ計測方法

ひずみゲージの設置位置を付図 1.5 に示す。対象位置の補剛材の載荷位置側と載荷反対側の補剛材の支間側、桁端側、板コバ面に溶接し端部から 6mm 程度の位置に鉛直方向にゲージ長 1mm の 1 軸ひずみゲージを設置した。また、ルートき裂発生を検知するために、ビード上にもひずみゲージを設置した。



(a) ひずみゲージの設置状況と呼称

付図 1.5 ひずみゲージ設置状況



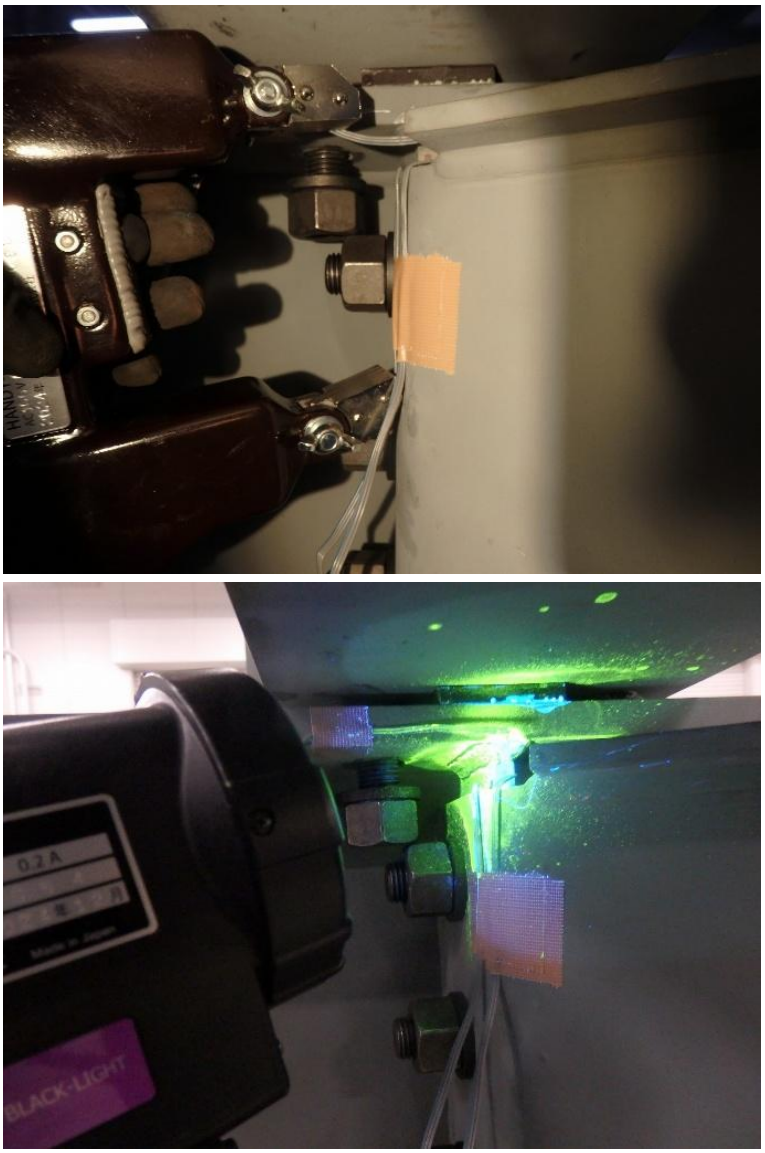
(b) ひずみゲージ設置状況（載荷位置側）

(c) ひずみゲージ設置状況（載荷反対側）

付図1.5　ひずみゲージ設置状況　（続き）

(4) き裂の検出方法

疲労試験中に定期的に磁気探傷試験を行い、疲労き裂の検出の検出を行った。探傷状況を付図 1.6 に示す。

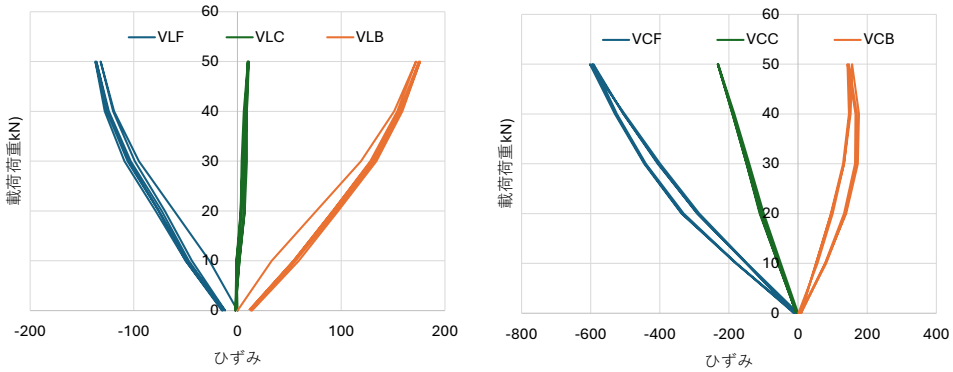


付図1.6　磁気探傷試験状況

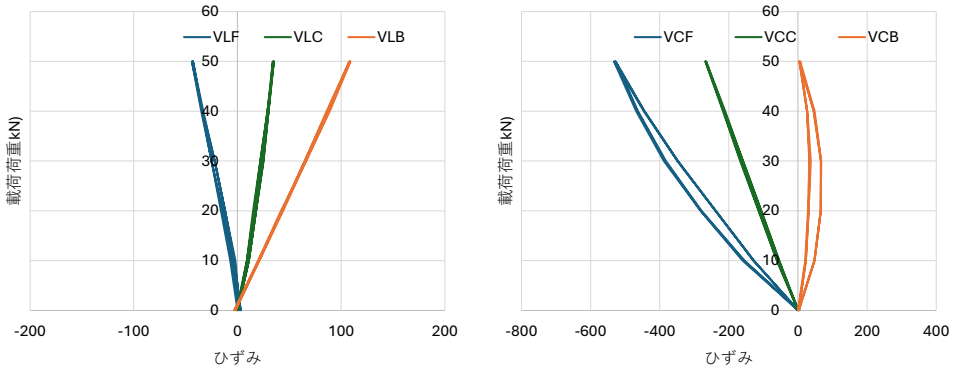
3. 静的載荷試験結果

(1) 載荷位置の影響

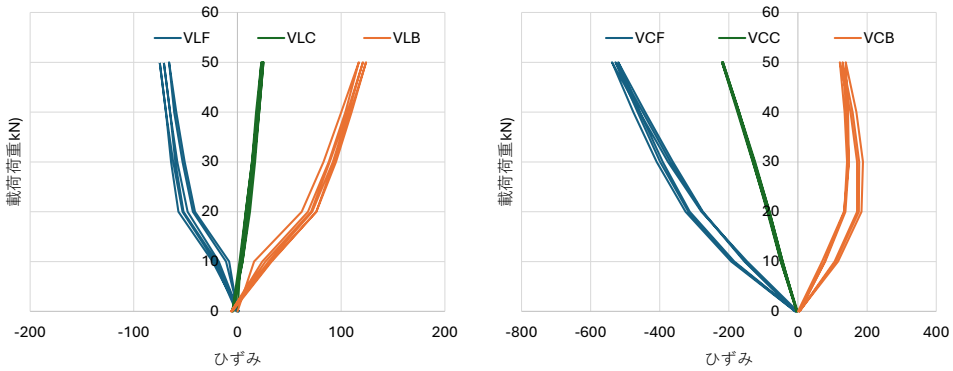
載荷位置によるひずみ応答の違いを付図 1. 7 に示す。いずれの載荷位置でも同様のひずみ応答を示しており、支間側は圧縮ひずみ、桁端側は引張ひずみを示す傾向がみられた。つまり、補剛材では、補剛材上端が支間側にたわむ様な面外変形が生じていると考えられる。また、載荷位置側のひずみ応答 VCF が大きく、載荷位置が補剛材から 200mm 位置で最も大きい結果となったことから、補剛材から 200mm 位置で載荷を行うこととした。



(a) 補剛材から 200mm



(b) 補剛材から 400mm

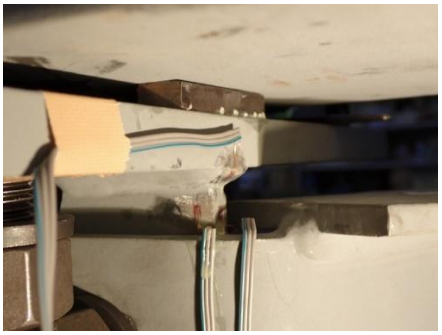


(c) 補剛材から 600mm

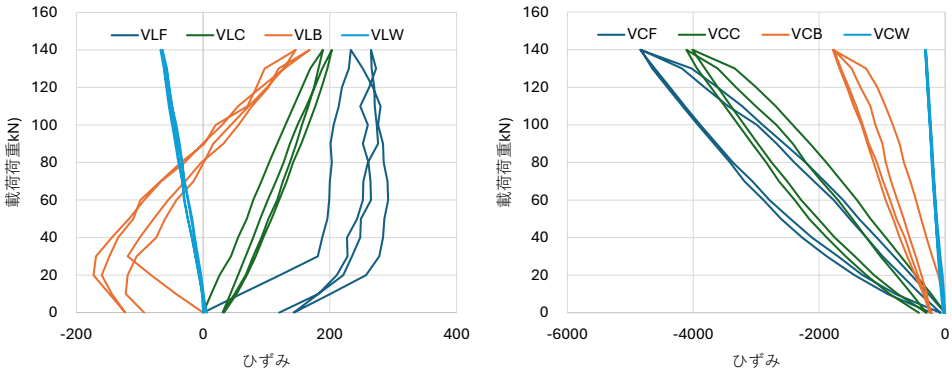
付図1. 7　載荷位置によるひずみ応答の比較

(2) 角鋼挿入後のひずみ応答

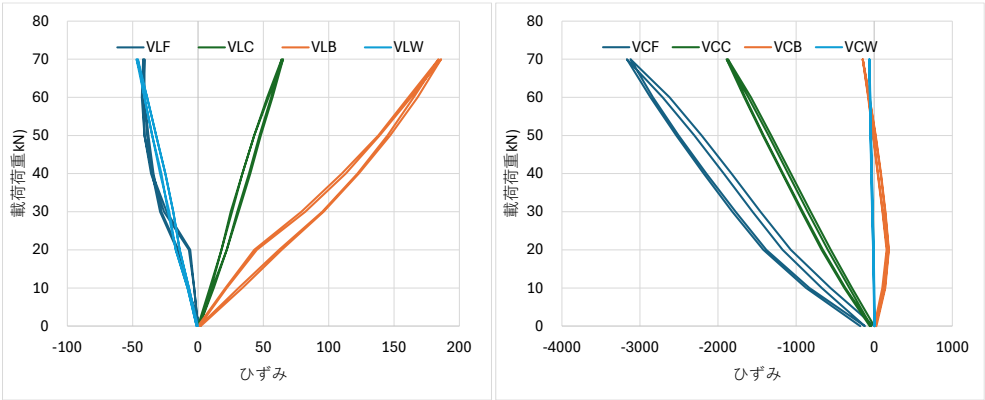
後述する疲労試験②及び③では、疲労き裂を確実に発生させるために、ひずみ応答が大きかった載荷位置側の補剛材コバ面直上の上フランジと載荷治具の間に角鋼を挿入した（**付図 1.8**）。挿入後のひずみ応答を**付図 1.9** に示す。載荷位置側の補剛材近傍でのひずみ応答が大きく、最も大きなひずみを示した VCF は、疲労試験②では－5000μ程度、疲労試験③では-3000μ程度のひずみが生じていた。また、前節でみられた VCB での引張ひずみはほとんど生じず、圧縮ひずみを示したが、VCF と比べると小さなひずみとなっていることから、補剛材上端が端横桁に押されて支間側にたわむような変形が生じていると考えられる。



付図1.8　載荷治具と上フランジの間の角鋼



i）疲労試験②



ii）疲労試験③

付図1.9　角鋼挿入後のひずみ応答

4. 疲労試験結果

疲労き裂が発生した試験体 B について報告する。試験体 B では、以下のように疲労試験を実施した。

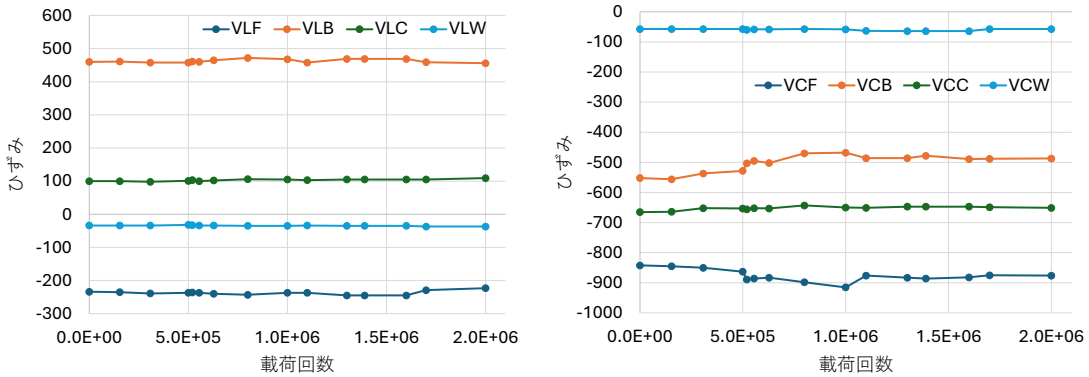
疲労試験①：載荷治具と上フランジの間に角鋼を挿入せずに疲労試験を行った。荷重範囲を 10kN～150kN、載荷周波数を 2-2.5Hz とし、載荷回数が 200 万回まで載荷を行った。

疲労試験②：載荷治具と上フランジの間に角鋼を挿入し、疲労試験を行った。荷重範囲を 10kN～150kN、載荷周波数を 2-2.5Hz とし、疲労き裂が大きく進展するまで載荷を継続し、き裂の進展状況を動画で記録した。

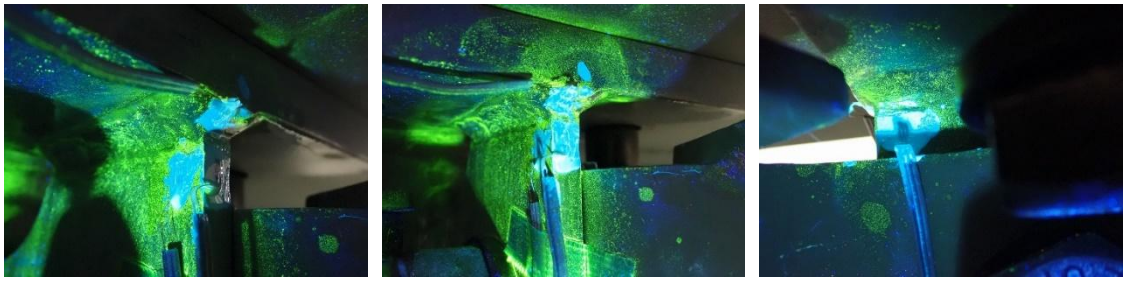
疲労試験③：疲労試験②終了後、主桁を入れ替え、載荷治具と上フランジの間に角鋼を挿入し、疲労試験を実施した。荷重範囲を 5kN～75kN とし、非破壊試験検証用の小さな疲労き裂が発生するまで載荷を行った。

4.1 疲労試験①

疲労試験開始後、定期的に静的載荷を行い、補剛材近傍のひずみ変化を確認したが、載荷回数 200 万回までに大きな変化は見られなかった（**付図 1.10**）。磁気探傷試験を実施したが、疑似模様は確認できなかったため（**付図 1.11**）、き裂発生はなしとして、疲労試験②を実施することとした。



付図1.10　疲労試験①での補剛材近傍のひずみ変化



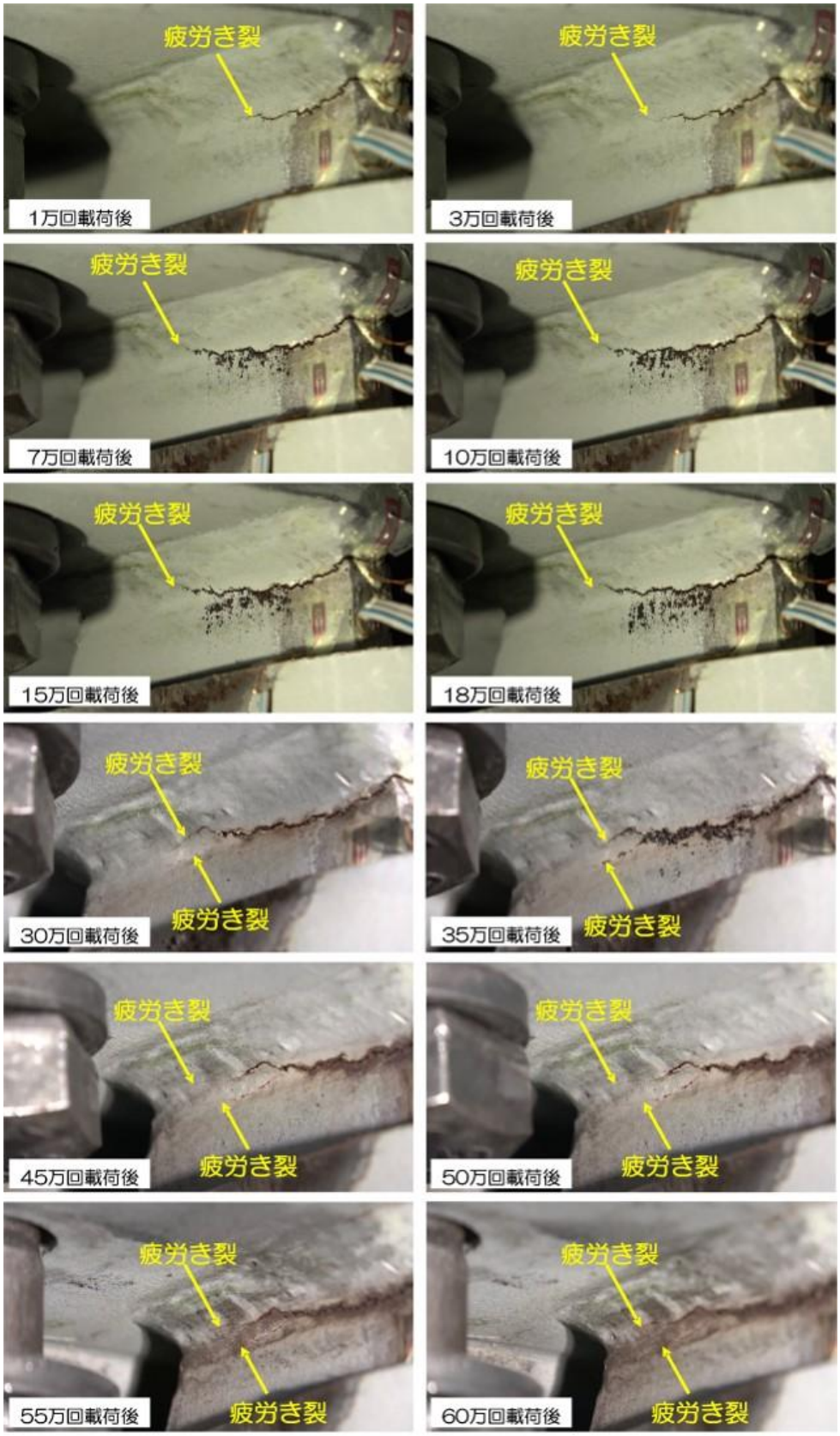
(a) 支間側　　(b) 板コバ　　(c) 桁端側

付図1.11　疲労試験①の磁粉探傷試験結果

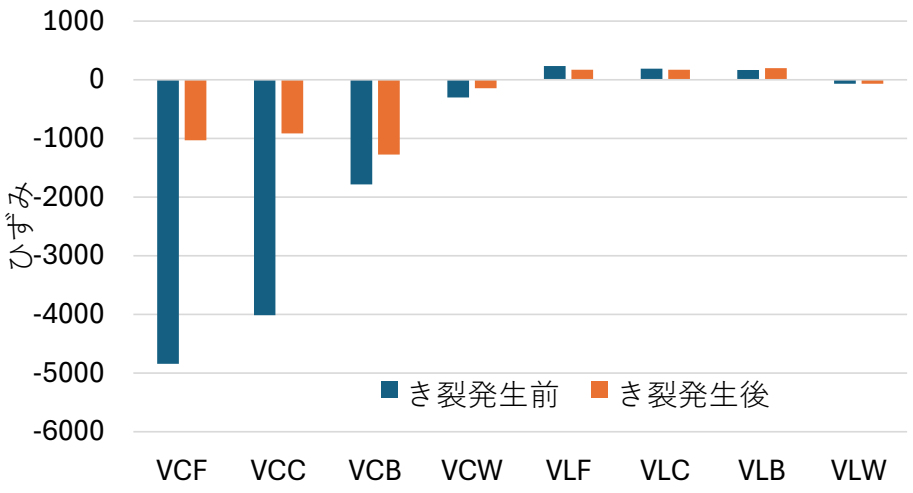
4.2 疲労試験②

疲労試験開始後、10,000 回載荷後に確認したところ、補剛材上端の縁部で、補剛材側の溶接止端部で疲労き裂の発生が確認された。その後、溶接止端部に沿って進展した後に、ルート部から発生したと推定されるき裂と溶接止端に沿って進展するき裂に分岐した。疲労き裂の発生・進展状況を**付図 1.12** に示す。なお、き裂の進展状況を動画データで別途提供している。

疲労き裂発生前後（疲労試験前及び 10,000 回載荷後）のひずみ応答の変化を**付図 1.13** に示す。き裂が発生した載荷位置側の補剛材では、き裂の発生によって応力が伝達されにくくなるため、全てのゲージ貼り付け位置でひずみ範囲が低下した。一方、き裂が生じなかった載荷反対側の補剛材では、ひずみ範囲に大きな変化は見られなかった。



付図1.12　疲労試験②の疲労き裂の発生・進展状況

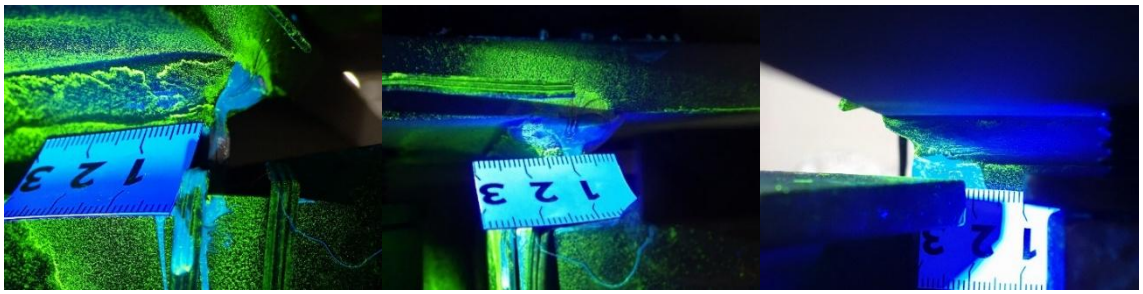


付図1.13　疲労試験②のき裂発生前後のひずみ応答の比較

4.3 疲労試験③

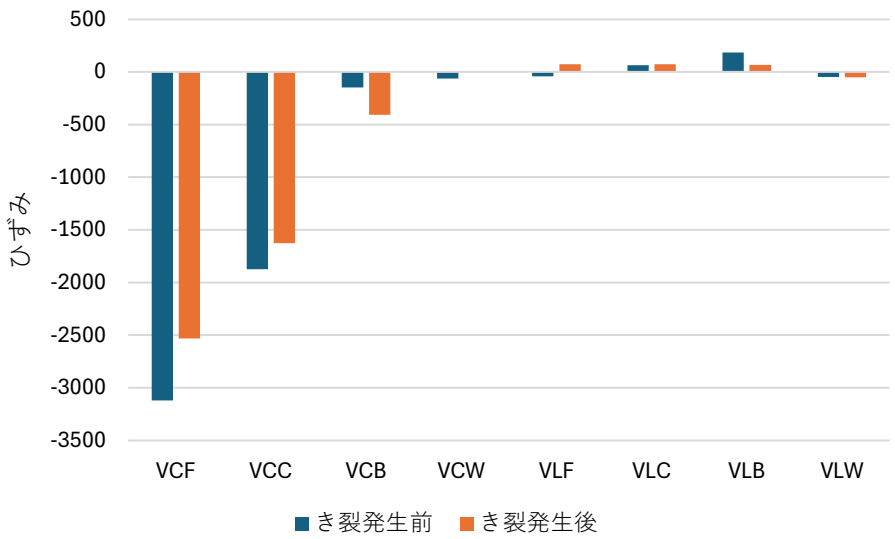
疲労試験開始後、10,000 回載荷後に疲労き裂を確認したところ、**付図 1.14** に示す疲労き裂の発生が確認された。載荷位置側の補剛材支間側と補剛材コバ面の溶接止端部にき裂が発生しており、き裂長さはいずれも 6mm 程度であった。なお、桁端側の補剛材溶接止端部では、き裂は見られなかった。

き裂発生前後のひずみ応答を比較した結果を**付図 1.15** に示す。疲労き裂が発生した載荷位置側の補剛材支間側とコバ面では、**付図 1.13** と同様にひずみ範囲は低下していた。一方、桁端側ではひずみ範囲が大きくなっており、支間側の補剛材で負担していた荷重が、疲労き裂の発生によって再配分されたためであると考えられる。



(a) 支間側　　(b) 板コバ　　(c) 桁端側

付図1.14　疲労試験③の疲労き裂の発生状況



付図1.15　疲労試験③のき裂発生前後のひずみ応答の比較

5. まとめ

本実験により以下のような結論が得られた。

(1) 載荷治具と主桁フランジの接合ボルトを緩め、載荷治具に載荷した結果、補剛材に近い位置に載荷する場合が対象補剛材に最も厳しい載荷条件であった。ひずみ応答から、補剛材上端が端横桁に押されて支間側にたわむ様な面外変形が生じていると考えられる。

(2) 疲労き裂は支間側の補剛材側の溶接止端部から発生した。その後、溶接止端部に沿って進展した後に、ルートから発生したと推定されるき裂と溶接止端に沿って進展するき裂に分岐した。

付録-2 実物大試験体に対する非破壊試験（ET）

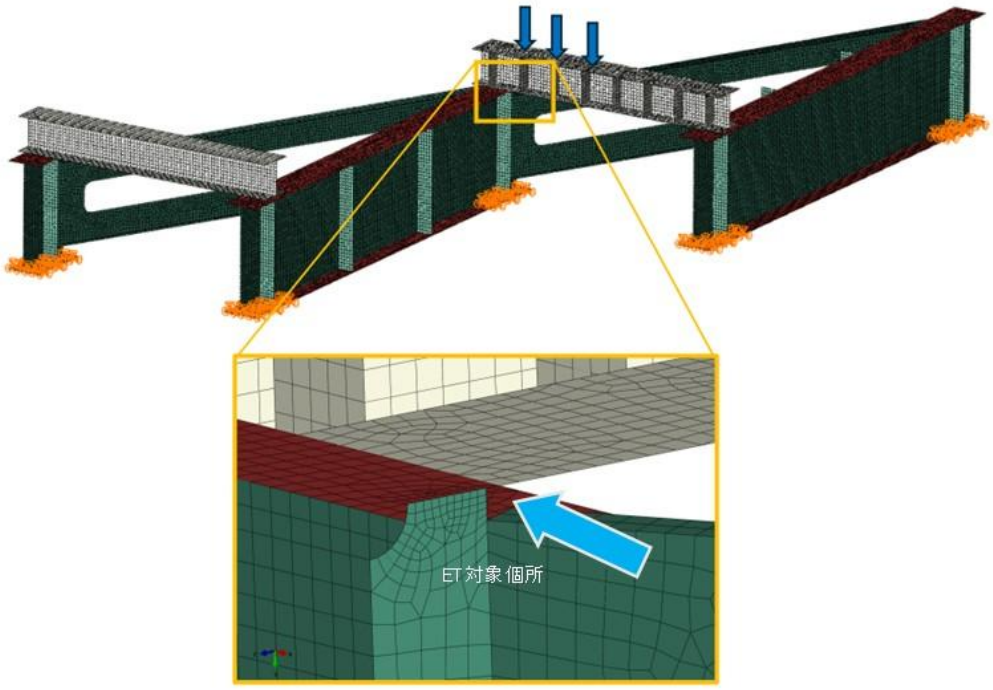
1. はじめに

本試験は、実橋で計測した応力の挙動を再現した疲労試験の実施の際に、試験体に発生した疲労き裂に対して非破壊検（渦電流探傷試験（ET））を実施し、その検査技術の適用性の検討を目的としている。

渦電流探傷試験(ET)の対象個所は、**付図 2.1** に示す試験体の垂直補剛材上端部とする。疲労試験中に発生したき裂に対し、き裂発生直後に渦電流探傷試験を実施し、その後、き裂の進展状況に従い、所定の繰り返し回数毎に、渦電流探傷試験(ET)を用いて確認することにした。

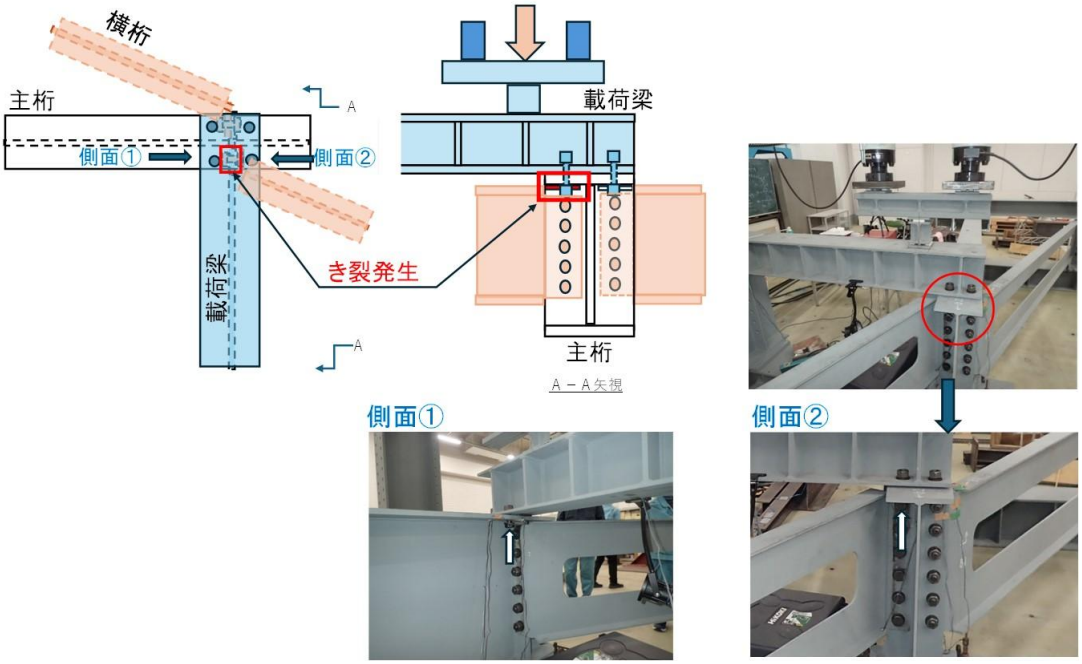
付図 2.1 に示す試験体の垂直補剛材上端部に対し**付図 2.2** に示す携帯式渦電流探傷装置 を使用し、渦電流探傷試験（ET）を実施した。

対象個所については、**付図 2.3** に示すとおり主桁・横桁取合い部の垂直補剛材上端部の側面①および側面②とした。



付図2.1　試験体および非破壊検査験対象箇所

付図2.2　携帯式渦電流探傷装置試験対

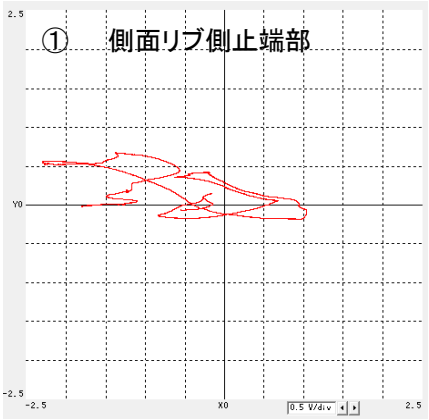


付図2.3　渦電流探傷試験（ET）対象箇所

2. 試験結果

渦電流探傷試験結果は、以下のとおりであった。

(1) ET 初期データ



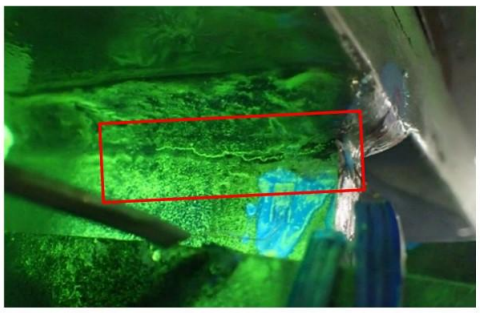
ET結果：き裂なし
（無欠陥状況代表波形）

付図2.4　渦電流探傷試験—ET 初期データ（き裂なし）

(2) 繰り返し回数　１万回　（き裂長：側面①で約 20mm）

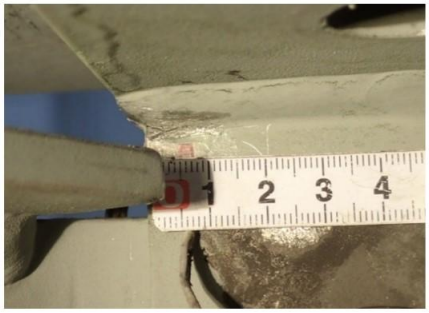
１万回時では、ET を行った結果、側面①および側面②のき裂はともに検出された。

目視結果

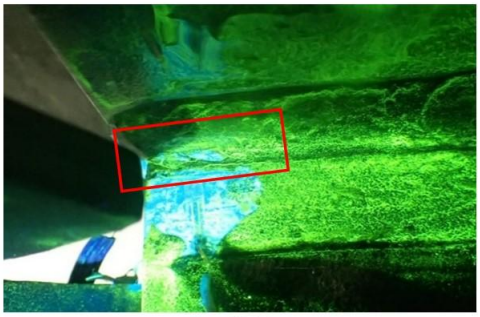


ＭＴ結果

補剛材・上フランジ溶接部の発生き裂：側面①



目視結果

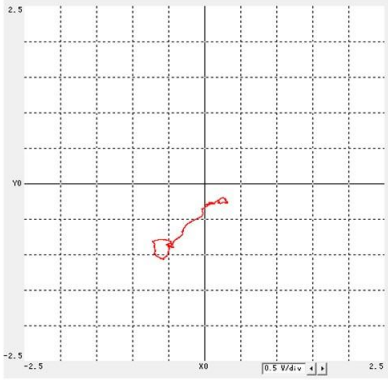


ＭＴ結果

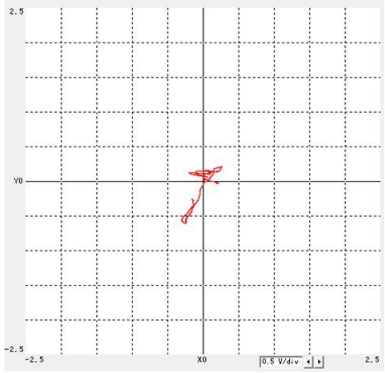
補剛材・上フランジ溶接部の発生き裂：側面②

ＥＴ結果

ＣＰ-６Ｂ：側面①　垂直補剛材側止端部



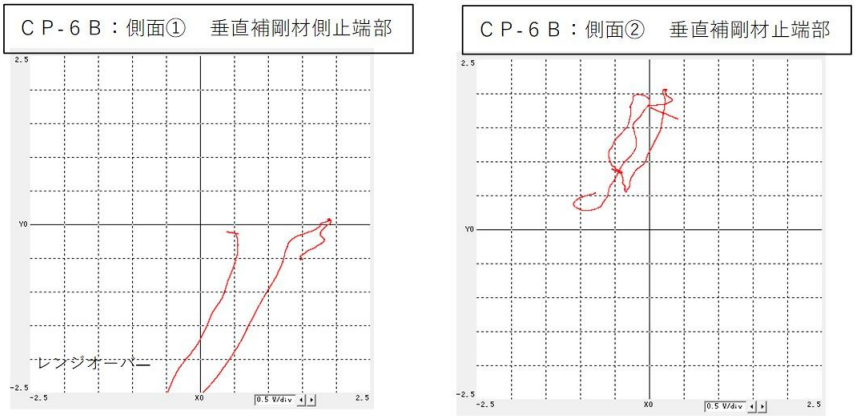
ＣＰ-６Ｂ：側面②　垂直補剛材側止端部



付図2.5　渦電流探傷試験―ET　１万回データ（き裂あり）

(3) 繰り返し回数　1 万回　→　50 万回　（き裂長：側面①で垂直補剛材幅のほぼ全長）

1 万回時のき裂の波形と比較すると、50 万回時の ET 信号（波形）は、き裂の進展（成長）に伴い強く（波形が大きい）なり、き裂の検出は比較的容易にできた。

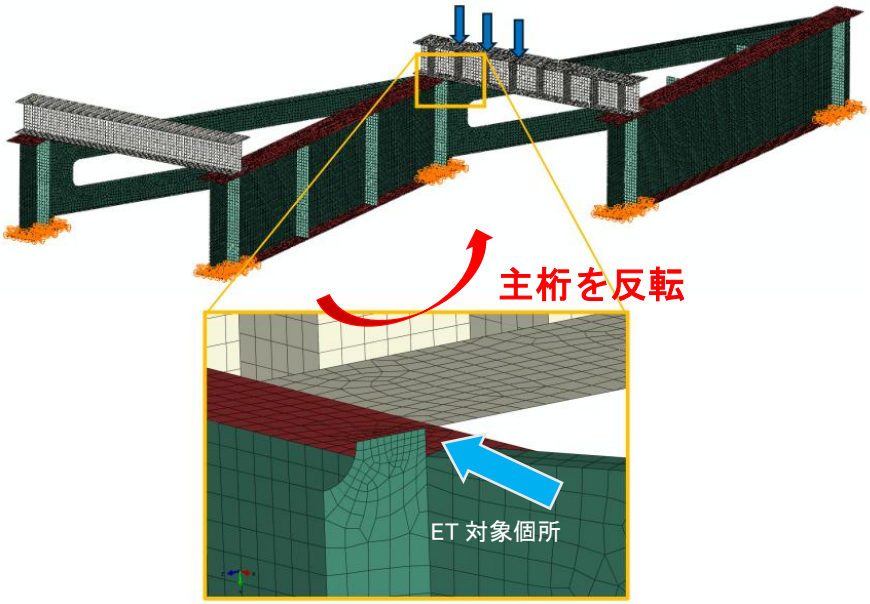


付図2.6　渦電流探傷試験―ET　50 万回データ（き裂あり）

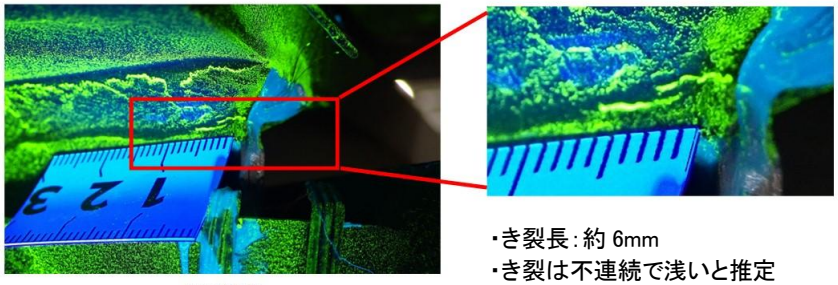
(4) 追加試験

試験の終了後、試験体の主桁を反転し（付図 2.7 参照）、無き裂状態で疲労試験を再開した。繰返し数 1 万回の時に、側面②のみにき裂が発生し、ET を行った。付図 2.8 に ET 結果を示す。

渦電流試験を行った結果、き裂が不連続であることに加え、き裂深さが浅いため、得られた ET 信号は弱くき裂の存在は疑わしいものの、垂直補剛材の端部の影響が大きいため、き裂の有無の判別は困難であった。



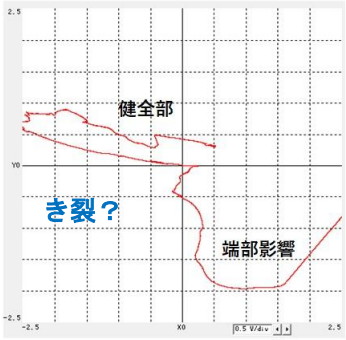
付図2.7　試験体および非破壊検査験対象箇所



・き裂長：約 6mm
・き裂は不連続で浅いと推定

ＭＴ結果

補剛材・上フランジ溶接部の発生き裂：側面②



付図2. 8 追加試験　ET 結果

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] L. H. Ichinose，髙橋秀爾，石川敏之，坂野昌弘：斜角 30°を有する鋼道路橋に生じた疲労損傷と変形挙動，鋼構造年次論文報告集，第 31 巻，pp.154-159，2023.

[4] Luiza H. Ichinose，髙橋秀爾，石川 敏之，坂野昌弘：連続合成桁横構取付けガセット溶接部の非破壊検査および応力計測，土木学会第 79 回年次学術講演会，CS3-10 2024.9.

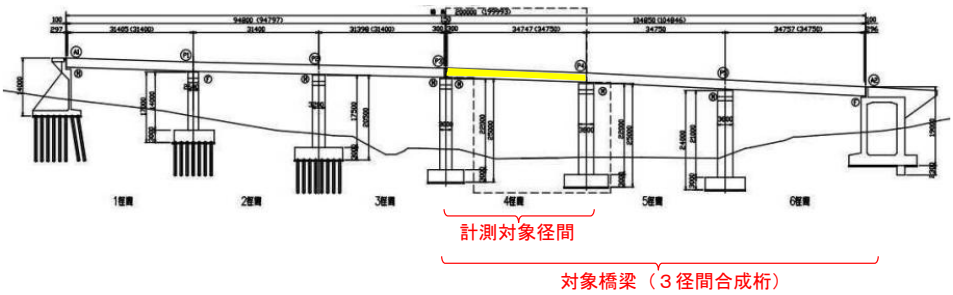
付録-3 実橋に対する非破壊試験（F 橋）

過年度の点検で主桁の横構取付ガセット溶接部に塗膜割れが検出された橋梁を対象として、塗膜割れの詳細調査の際に塗膜剥離が不要な渦電流探傷試験(ET)[1,2]を実施し、磁気探傷試験(MT)結果と比較することにより、探傷精度検証を行った[3]。

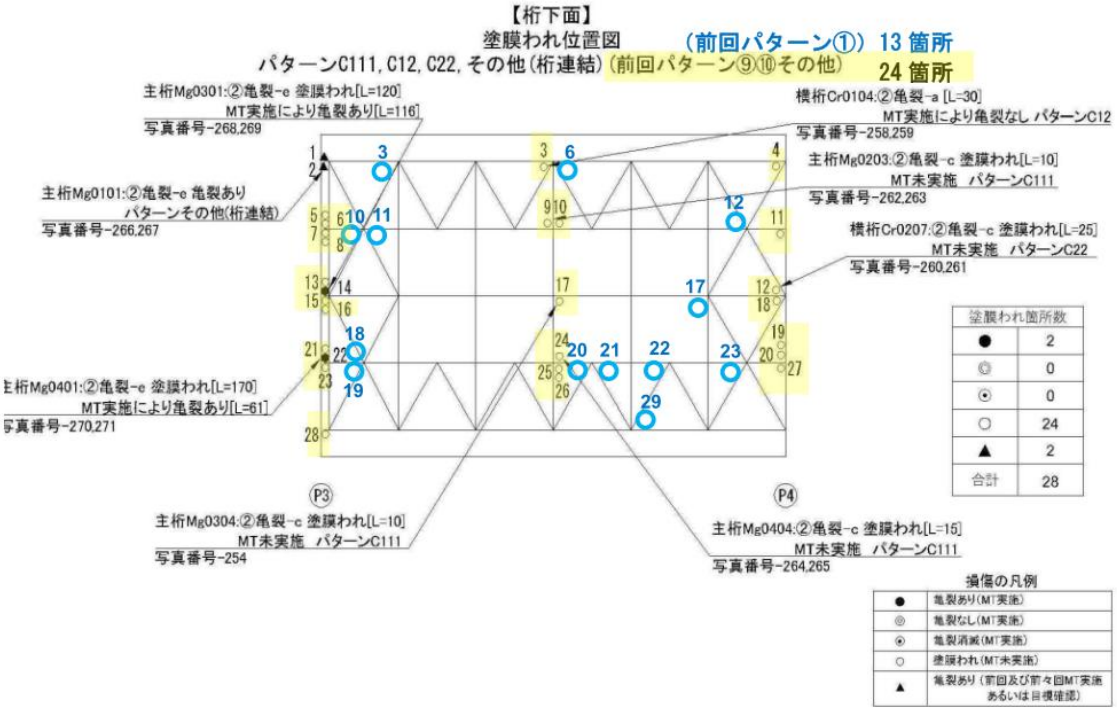
付図 3.1 に示す橋梁を対象とし、非破壊検査を行った。対象橋梁は、橋長 104.850m 幅員 12.500（2 車線）の 3 径間連続合成桁（34.747m + 34.750m + 34.757m）であり、1978 年に供用開始し(45 歳)、2015 年の調査では交通量が 23,032 台（大型混入率 20.4%）であった。

過年度の点検調査で塗膜割れが確認された箇所の内、横構取付けガセット溶接部（13 箇所）と桁端部溶接部（24 か所）の磁気探傷試験（MT）未実施個所を対象に ET を行い、その後に実施した MT の結果と比較検証を行った。塗膜割れが確認された合計 37 箇所（**付図 3.2**）で ET を行った結果を**付表 3.1** に示す。選定された 37 か所の内、表中に黄色で示す 5 か所で　MT が実施され、これらの箇所で ET と MT の結果が一致したことから、両者は同程度の精度であることが検証された。

選定された 37 か所の内、表中に黄色で示す 5 か所で　MT が実施され、これらの箇所で ET と MT の結果が一致したことから、両者は同程度の精度であることが検証された（**付図 3.3**、**付図 3.4**）。



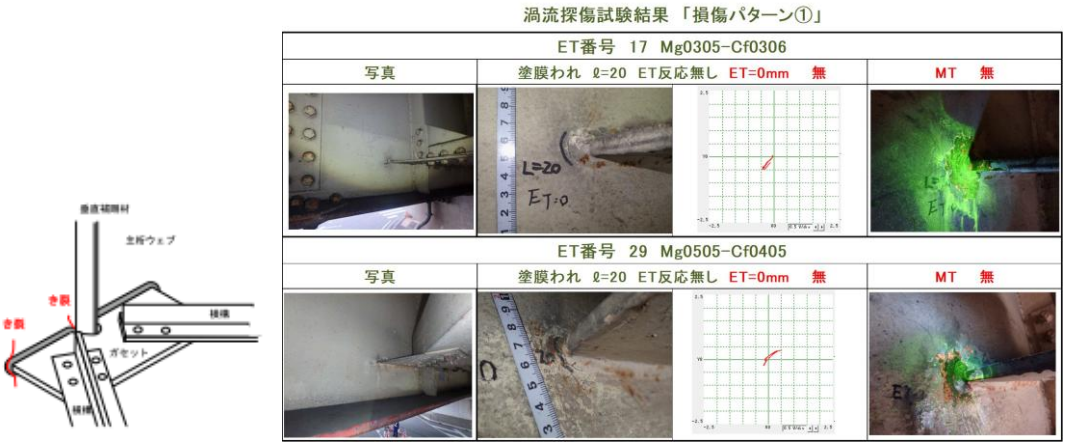
付図3.1 対象橋梁の概要



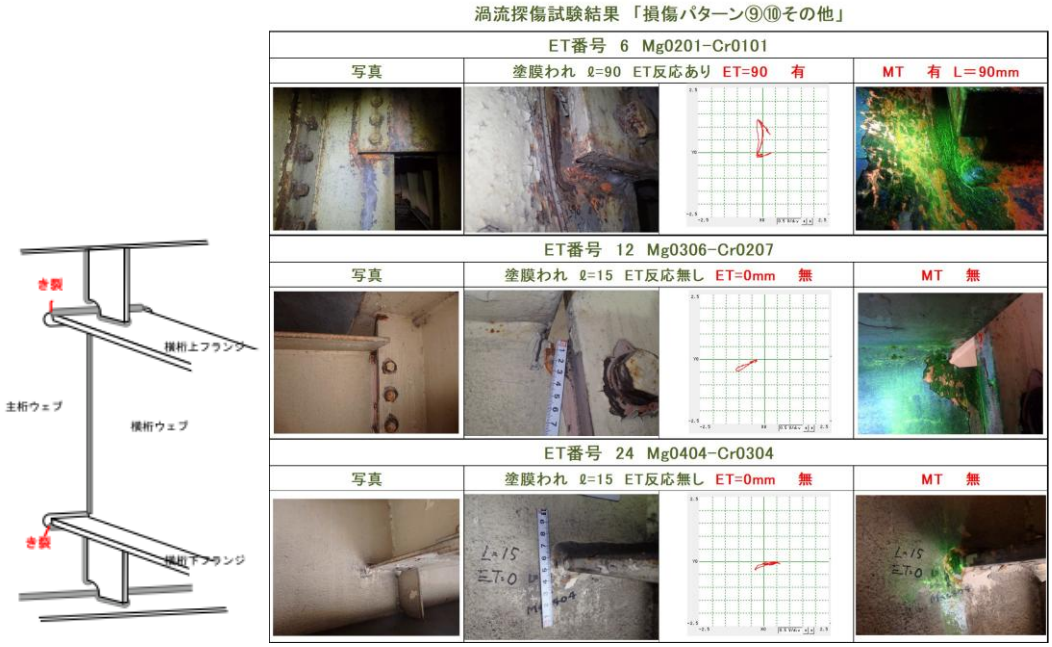
付図3.2 渦電流探傷試験箇所

付表3.1 渦電流探傷試験結果

パターン	No.	塗膜割れ (mm)	ET結果 反応の有無	ET結果 長さ (mm)	パターン	No.	塗膜割れ (mm)	ET結果 反応の有無	ET結果 長さ (mm)
横構取付けガセット	3	20	無	—	横桁その他	3	—	—	—
	6	15	無	—		4	20	無	—
	10	15	無	—		5	190	有	190
	11	30	無	—		6	90	有	90
	12	10	無	—		7	70	有	70
	17	20	無	—		8	55	無	—
	18	20	無	—		9	10	無	—
	19	25	無	—		10	30	無	—
	20	40	無	—		11	10	無	—
	21	30	無	—		12	25	無	—
	22	40	無	—		13	60	有	60
	23	20	無	—		15	80	有	80
	29	25	無	—		16	50	無	—
						17	15	無	—
						18	10	無	—
						19	10	無	—
						20	10	無	—
						21	60	有	60
						23	45/25	無/有	0/25
						24	15	無	—
						25	10	無	—
						26	10	無	—
						27	10	無	—
						28	65	無	—



付図3.3 渦電流探傷試験および磁気探傷試験結果（損傷パターン①）



付図3.4 渦電流探傷試験および磁気探傷試験結果（損傷パターン⑨、⑩その他）

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] Luiza H. Ichinose，髙橋秀爾，石川 敏之，坂野昌弘：連続合成桁横構取付けガセット溶接部の非破壊検査および応力計測，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，CS3-10 2024.9.

付録-4 実橋のひずみ計測（L 橋）

1. はじめに

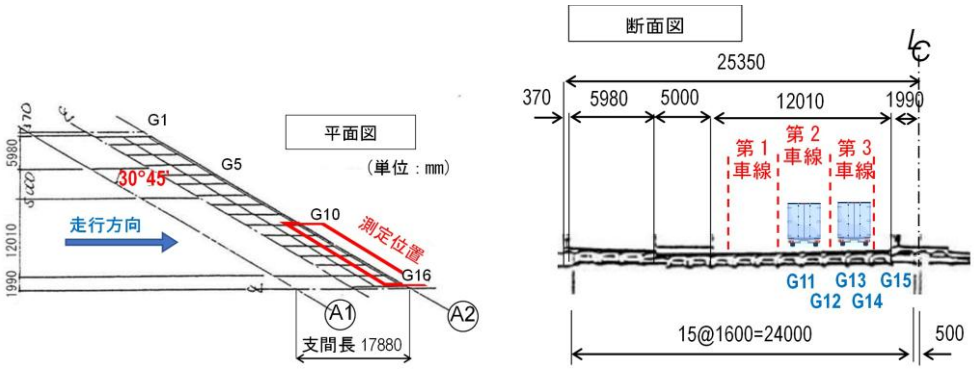
一般的に鉄道橋では線形上斜橋が多く用いられているが、道路橋では、挙動が複雑なこともあり、斜橋は避けられる場合が多い．本稿は、疲労き裂が検出された 30°の斜角を有する橋梁の実働応力性状を把握し、橋梁全体の変形挙動と疲労損傷の関係について明らかにすることを目的として動的載荷試験および応力頻度測定を行なった。

対象橋梁は、**付図 4.1** に示すとおり、橋長 18.100m、支間長 17.880m、幅員 25.350m（3 車線）で斜角 30°の RC 床版単純鋼桁橋である。1961 年に竣工し、2015 年の交通センサスでは、昼間の 12 時間の交通量は 40,811 台（大型混入率 41.2%）であった。重交通路線であり、夜間には、大型車は中央分離帯側の第 3 車線を走行するように規制されている

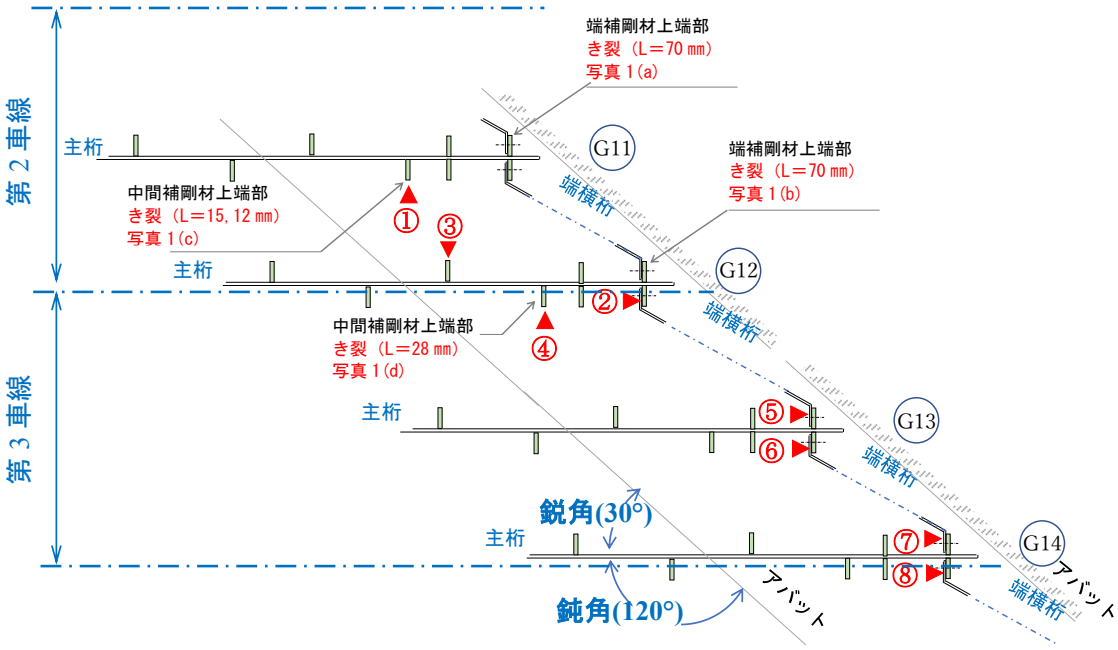
2020 年の点検調査で**付図 4.2** に示す端補剛材と支点直近の鈍角側の中間補剛材の上端部で疲労き裂が検出された。**付図 4.3**(a)～(d)にその一部を示す。

端補剛材の上端部については、G11 と G12 で鋭角側は破断しており、（補剛材幅 70mm）鈍角側にも数 10mm 程度のき裂が生じていた。中間補剛材の上端部については、 G11 と G12 で支点直近の鈍角側のみに、比較的短い 10～30mm 程度のき裂が生じていた。なお、この橋梁では、**付図 4.2** に示すように主桁の両面で中間補剛材の取り付け位置が異なっており、鈍角側の方が支点に近く、鋭角側は支点 から離れて交互に取り付けられている。端補剛材直近の両側の垂直補剛材は、支承補修時の仮受け用で、ボルト接合で取り付けてある。

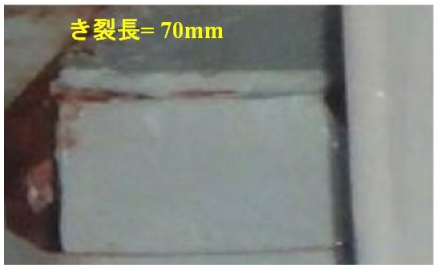
また、鋼材の腐食や床版の損傷については特に報告されていないが、支点部については補修を行っている。



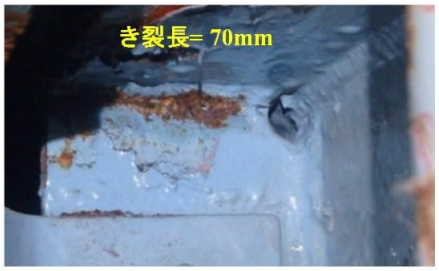
付図4.1　対象橋梁



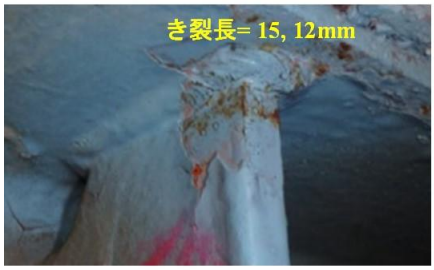
付図4.2　測定点および疲労き裂検出個所



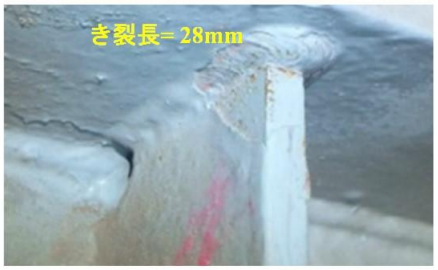
(a)　G11 端補剛材



(b)　G12 端補剛材



(c)　G11 中間補剛材



(d)　G12 中間補剛材

付図4.3　補剛材の疲労き裂損傷の状況

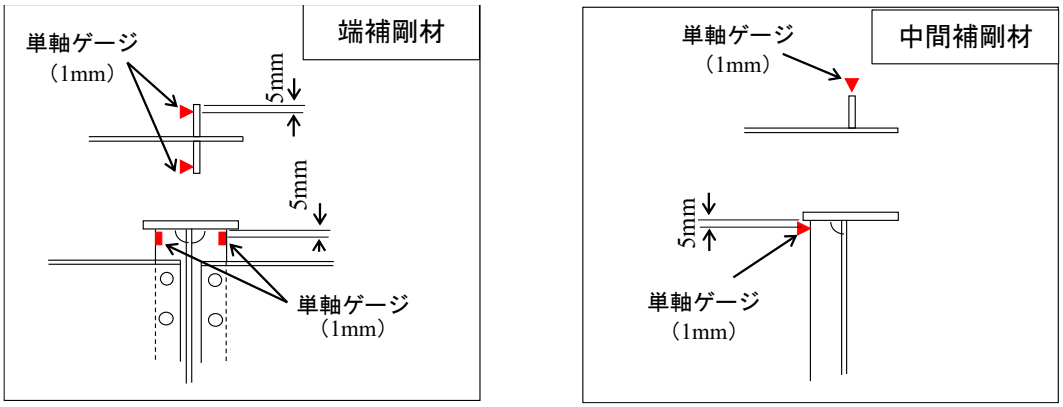
2. 応力計測

測定点は、**付図 4.2** に示すとおり、大型車交通量が多い中央分離帯側の G11～G14 の A2 側の端補剛材と支点直近の中間補剛材の上端部とした。ひずみゲージ（単軸 1mm）は、鉛直方向に溶接止端から 5mm 程度（狭隘で正確な位置に貼付するのが困難なため）離して貼り付けた。

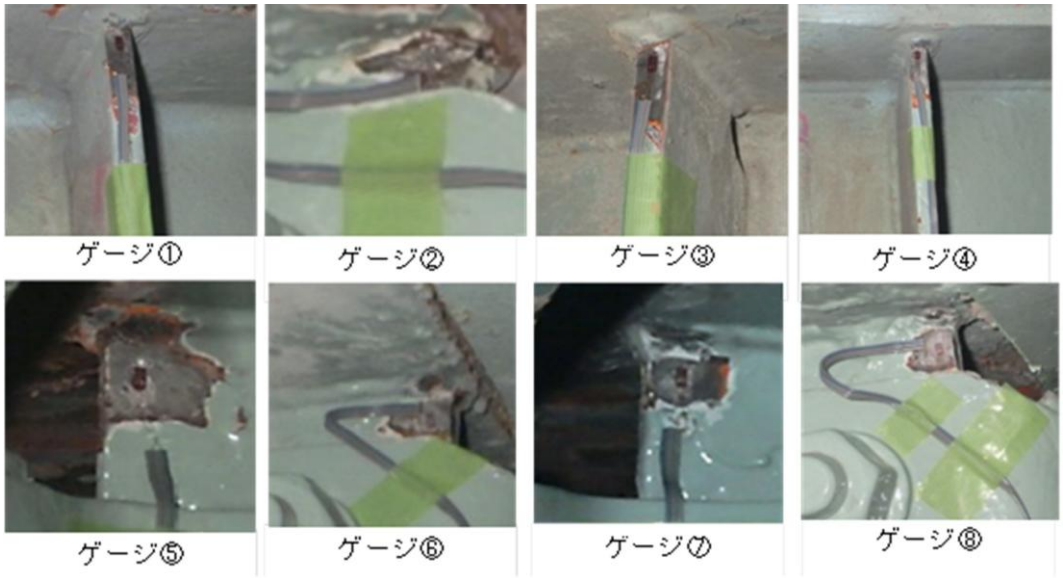
付図 4.4 に計測個所でのひずみゲージ貼付け位置を示し、**付図 4.5** にゲージ貼付け位置周辺の状況を示す。写真より、端補剛材および中間補剛材上端部の溶接ビードとひずみゲージの位置関係が確認できる。②のゲージ位置でも疲労き裂が生じているのが確認できる。

端補剛材については、予備計測で、上端部が破断している G11 と G12 の鋭角側および数 10mm のき裂が生じている G11 の鈍角側ではひずみが計測できなかったため（引張残留応力が解放されてき裂が開口していると推察される）、き裂が生じているものの最も大きいひずみが計測された鈍角側の 1 箇所（測定点②）と、鋭角側と鈍角側を比較するために、き裂が発生していない 4 箇所（測定点⑤、⑥、⑦、⑧）を選定した。中間補剛材については、微少なき裂が生じていたがひずみが計測された支点直近の鈍角側 2 箇所（測定点①、④）と、き裂が生じていない支点からやや離れた鋭角側の 1 箇所（測定点③）を選定した

試験車走行による動的載荷試験および供用荷重下での 72 時間連続の応力頻度測定を行った。動的載荷試験では、**付図 4.1** の断面図に示すように第 2 および第 3 走行車線をそれぞれ 2 回、約 40km/h の速度で走行させ、各測定点での応力測定[1]を行った。試験車には、**付図 4.6** に示す前軸 4.06t、後軸 8.44t、総重量 12.48t、軸距 4.6m の排水管清掃車を用いた。



付図4.4　ゲージ貼付け位置



付図4.5　ゲージ貼付け位置の状況

付図4.6　試験車両（排水管清掃車）

3. 動的載荷試験の結果

(1) 走行車線による違い

付表 4.1 に試験車両通過時に各測定点で発生した最大および最小応力を示す。G11 の①は第 2 車線、G12 の②、④と G13 の⑤、⑥は第 3 車線走行時に最大の応力値が生じており、走行位置の影響が現れている。また、G12 の③は、第 2 車線走行時には圧縮、第 3 車線走行時は引張と、走行車線により応力が交番している。すなわち、主桁の鈍角側を走行した場合には圧縮、鋭角側を走行した場合には引張の応力（ひずみ）が生じている。なお、G14 の⑦、⑧では、どちらの車線でもほとんど応力が生じていない。

(2) 鈍角側と鋭角側の違い

鋭角側が橋台上となる端補剛材では、鈍角側の②、⑥で圧縮応力が、鋭角側の⑤で引張応力が生じており、鈍角側を車輪が走行する際の床版のたわみ変形の影響を受けていることが推察される。中間補剛材では、支点に近い鈍角側の①、④で圧縮応力が、支点から離れた鋭角側の③では走行車線によって引張と圧縮の応力が交番している。

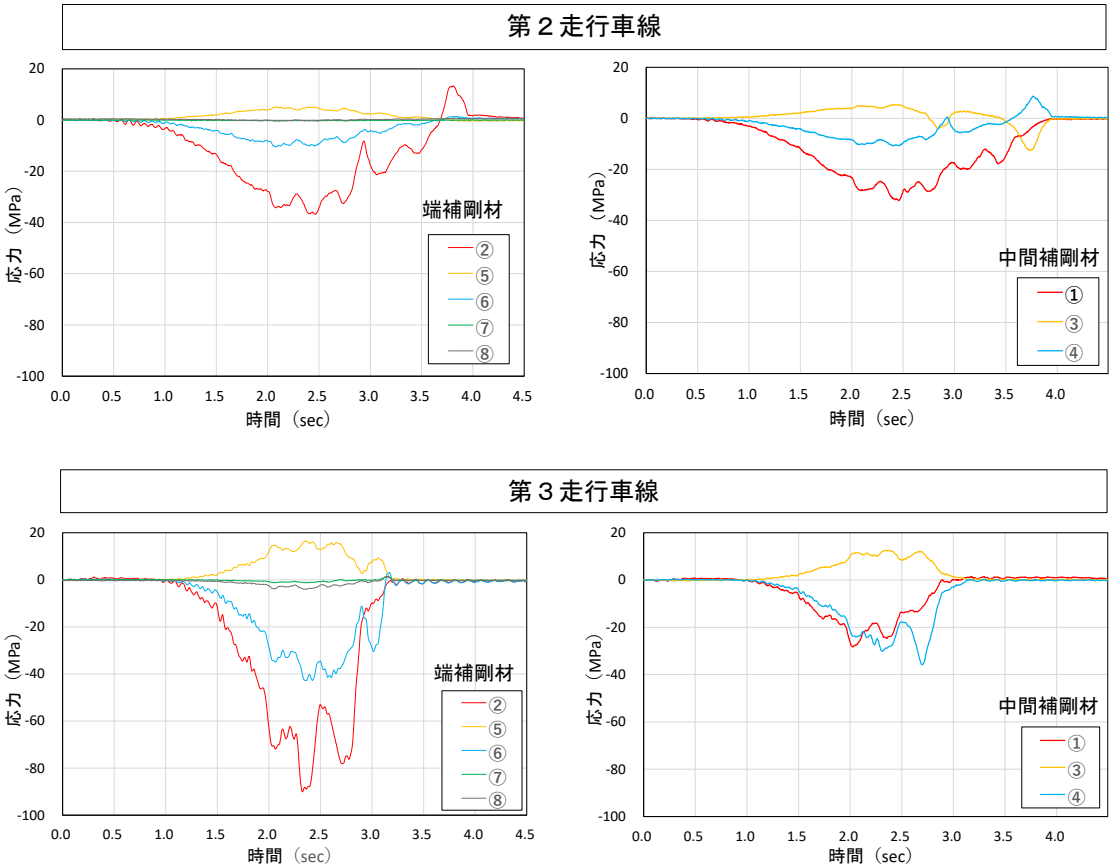
付表4.1　動的載荷試験（最大・最小応力度）

単位：MPa

測定点			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
第２車線	１回目	max	0.2	13.3	5.4	8.7	5.2	1.5	0.3	0.8
		min	-32.2	-36.9	-12.6	-10.8	-0.5	-10.5	-0.5	-0.5
	２回目	max	0.3	13.5	5.3	8.6	5.6	2.6	0.2	0.4
		min	-32.0	-38.1	-12.9	-11.1	-0.9	-11.5	-0.5	-1.3
第３車線	１回目	max	1.5	1.2	12.6	0.5	16.4	3.1	1.2	1.4
		min	-28.3	-90.1	-0.3	-35.8	-0.5	-42.8	-1.3	-4.0
	２回目	max	0.5	0.6	12.5	0.4	17.0	1.3	1.2	1.4
		min	-28.0	-89.5	-0.3	-34.2	-0.2	-43.6	-1.2	-3.2

(3) 応力波形に関する考察

付図 4.7 に試験車両が橋梁を通過した際の応力波形を示す。G11 の中間補剛材①以外の G12 と G13 の計測値は、全て第 3 車線走行時の方が第 2 車線よりも大きくなっており、主桁の鈍角側に荷重が載る方が疲労に厳しいことが分かる。また、端補剛材、中間補剛材ともに、鈍角側の圧縮側（②、⑥、④）では車輪ごとのピークが現れているが、鋭角側の引張側（⑤と③）では車輪ごとのピークは明瞭ではなく、車両全体で 1 回のピークが生じていることから、補剛材の直上付近だけではなく床版全体のたわみ変形の影響が大きいことが推察できる。



付図4.7　試験車両通過時の応力波形

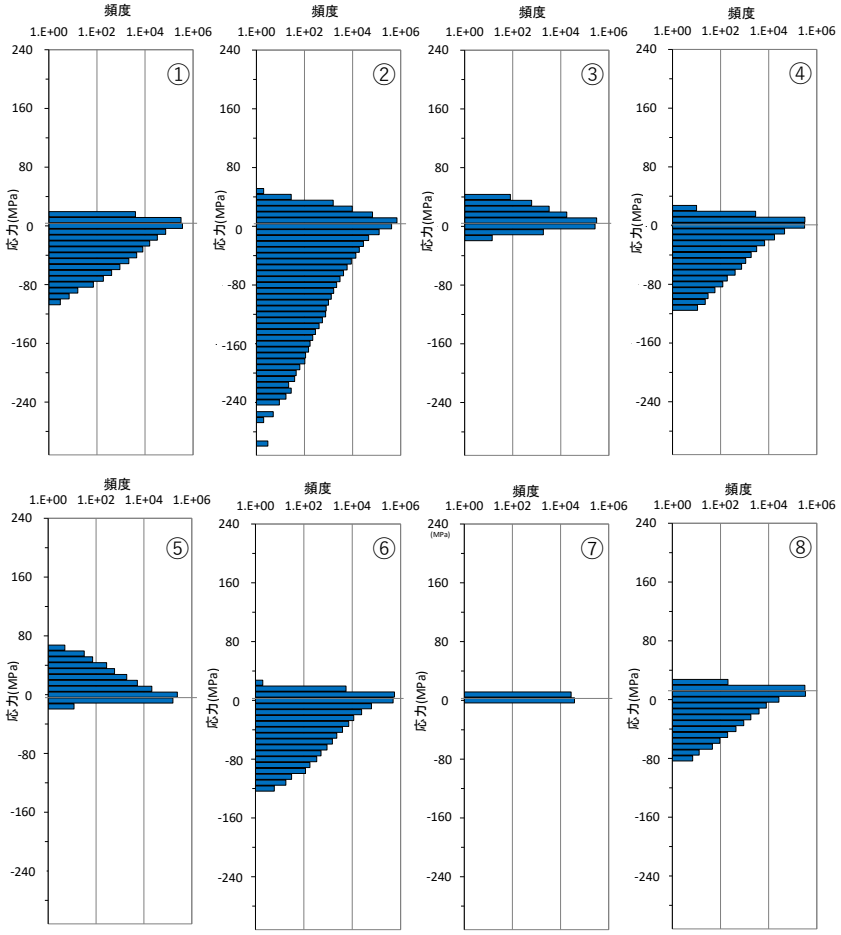
4. 応力頻度測定の結果

一般交通下で行った 72 時間の連続測定から得られた応力に対して、レインフロー法とピークバレー法による応力頻度解析を行った。**付表 4.2** にそれらの最大値と最小値を、図 6 にピークバレー法による頻度分布を示す。

全体的な傾向は動的載荷試験と同様に、鈍角側の中間補剛材①と④、および端補剛材②、⑥、⑧では圧縮側、鋭角側の端補剛材⑤では引張側、鋭角側の中間補剛材③では引張と圧縮の応力が生じており、引張側、圧縮側ともに発生応力の絶対値は大きくなっている。なお、⑧で-104MPa が計測されていることから、G14 の鈍角側にも車輪が走行していたことが分かる。

G14→G13→G12 の順に端補剛材の応力値が大きくなっており、端補剛材の上端部が破断しているＧ11、Ｇ12 の鋭角側と、き裂が大きいＧ11 の鈍角側では応力が計測できなかったが、それらの箇所では表 2 よりもさらに大きな応力が生じていた可能性が高い。

最大値は②の-304MPa で動的載荷時の-90MPa の 3.4 倍であることから試験車の最大軸重 8.44ton の 3.4 倍の軸重 29ton 程度の車両が走行していたことが推定される。



付図4.8 応力頻度分布（ピークバレー法）

付表4.2 応力頻度測定（72hr）最大応力範囲および最大・最小応力度

単位：MPa

測定点	レインフロー法 最大応力範囲	ピークバレー法 最大・最小応力度		対象部材
	⊿σmax	σmax	σmin	
①	136	16	-120	11-4 (中間補剛材)
②	352	48	-304	12-2 (端補剛材)
③	64	48	-24	12-3 (中間補剛材)
④	144	24	-128	12-4 (中間補剛材)
⑤	80	72	-16	13-1 (端補剛材)
⑥	168	24	-152	13-2 (端補剛材)
⑦	16	8	-8	14-1 (端補剛材)
⑧	120	16	-104	14-2 (端補剛材)

5. まとめ

(1) 大きなき裂が確認されている端補剛材上端部では、鋭角側で引張、鈍角側で圧縮の応力が生じており、鋭角側が破断しているのは引張応力の影響と考えられる。

(2) 比較的小さいき裂が確認されている支点直近の鈍角側の中間補剛材上端部では、端補剛材の半分程度の大きさの圧縮応力が生じていた。

(3) 端補剛材も中間補剛材も、主桁の鈍角側を車輪が走行する際に大きな応力が生じていることから、鈍角側に輪荷重が載荷される際に生じる床版のたわみが疲労損傷に影響していることが推察される。

本稿は、実際に供用中で疲労損傷が生じている斜角が厳しい橋梁の変形挙動に関する報文であり、同様な既設橋の維持管理にも、また、新設で斜橋を計画・設計する際にも有用と考えられる。

参考文献

[1] L. H. Ichinose，髙橋秀爾，石川敏之，坂野昌弘：斜角 30°を有する鋼道路橋に生じた疲労損傷と変形挙動，鋼構造年次論文報告集、第 31 巻、pp.154-159、2023.