



鋼橋の疲労亀裂に対する最適メンテナンスサイクルの構築に向けた診断および補修技術に関する研究

溝上, 善昭

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2018-03-25

(Date of Publication)

2019-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7192号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007192>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

(論文題目)

鋼橋の疲労亀裂に対する
最適メンテナンスサイクルの構築に向けた
診断および補修技術に関する研究

2018年1月

神戸大学大学院工学研究科

(氏名) 溝上 善昭

目次

第1章 緒言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 維持管理.....	4
1.3 鋼床版の構造と特徴.....	5
1.4 鋼床版の疲労亀裂と点検の現状.....	7
1.5 Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂補修法の既往の研究.....	10
1.6 研究目的.....	11
1.7 本論文の構成.....	15
第2章 本研究に関わる赤外線工学の基礎事項.....	19
2.1 赤外線の基礎知識.....	20
2.2 赤外線サーモグラフィ.....	24
2.3 熱弾性応力測定.....	26
2.4 赤外線応力測定の問題点.....	30
2.5 結言.....	34
第3章 赤外線サーモグラフィを用いたビード貫通亀裂検出法の開発.....	36
3.1 緒言.....	37
3.2 調査橋梁の諸元および実験方法.....	39
3.3 基礎実験.....	40
3.4 亀裂検出性能の確認実験.....	44
3.5 未検査橋梁での計測.....	47
3.6 計測時期の検討.....	51
3.7 ビード亀裂以外の温度ギャップ法による亀裂検出性の検討.....	54
3.8 結言.....	62
第4章 Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂の発生・進展特性.....	64
4.1 緒言.....	65
4.2 調査橋梁と亀裂の現状.....	65
4.3 亀裂進展調査.....	66
4.4 溶接脚長調査.....	67
4.5 結言.....	69

第5章 Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂の下面補修法の開発.....	71
5.1 緒言.....	72
5.2 実験方法.....	73
5.3 試験結果 (No.1 試験体)	83
5.4 試験結果 (No.2 試験体)	85
5.5 疲労亀裂の発生進展挙動に関する考察.....	96
5.6 実橋への適用.....	98
5.6 結言.....	100
第6章 温度ギャップ法を用いたビード貫通亀裂検出の 実用化システムの開発	104
6.1 緒言.....	105
6.2 検出原理.....	105
6.3 亀裂と亀裂以外の温度分布特性.....	106
6.4 温度画像のノイズ改善.....	107
6.5 亀裂検出アルゴリズム.....	109
6.6 亀裂検出実用化システム.....	113
6.7 結言.....	119
第7章 温度ギャップ法によるビード内在亀裂の検出性に関する研究.....	122
7.1 緒言.....	123
7.2 平板試験片による内在亀裂検出実験.....	123
7.3 実橋における内在亀裂状態の確認.....	129
7.3 結言.....	132
第8章 赤外線サーモグラフィを用いた疲労亀裂補修効果の検証.....	134
8.1 緒言.....	135
8.2 対象橋梁と疲労亀裂の状況.....	135
8.3 補修設計.....	137
8.4 本研究で検討した補修方法.....	139
8.5 各補修方法における補修効果の確認実験.....	142
8.6 熱弾性応力測定からの亀裂進展性評価.....	148
8.7 結言.....	151

第9章 結言.....	154
9.1 ビード亀裂に関するメンテナンスサイクル.....	154
9.2 赤外線サーモグラフィを用いた疲労亀裂補修効果の検証.....	157
9.3 まとめ.....	158
付録1. 発表論文リスト.....	159
◆ 学位論文に関する論文.....	159
◆ 学位論文に関するもの以外の発表論文.....	162
付録2. 出願した特許.....	165
◆ 学位論文に関連する特許.....	165
◆ その他の出願した特許.....	165
付録3. 受賞歴.....	166
謝 辞.....	167

第 1 章 緒言

1.1 研究背景 [1-1]~[1-9]

鋼橋をはじめとする鋼構造のメンテナンスを将来にわたって最適に実施するために重要な要素となるのが、『防食』と『疲労』である。防食は、鋼構造物が設置される腐食環境に見合った塗装や金属溶射などの防錆対策について、建設段階から実施される。鋼構造物の管理段階において、塗膜劣化や表面腐食などの劣化状況が部材表面に顕著に現れるため、防食の必要性は多くの技術者にも馴染みが深く、理解されている事象である。また、塗り替え塗装は、数年に一度の一定間隔で繰り返し実施されることが多く、鋼構造物を腐食環境から守る防食については、広く社会にも認識されている。一方、疲労は、鋼構造物の完成後、例えば鋼橋においては大型車や列車などの走行による荷重負荷が繰り返し鋼構造物に作用することで、金属材料中に亀裂が発生し、負荷の繰り返しとともに亀裂が進展し、やがて破損に至る現象である。つまり疲労は、鋼構造物が使用される環境になって、初めて発生や進展がみられる事象である。鋼構造物に対し、金属疲労に配慮したメンテナンスを実施するには、管理する鋼構造物が建設された当時の技術基準を熟知したうえで、類似構造物での先行している疲労損傷の事象を把握し、管理下にある鋼構造物の状況に見合った適切な対応が必要となる。そのため、管理する技術者にとっては、馴染みが薄く、厄介な現象と捉えられがちと思われる。

鋼道路橋において我が国で疲労設計が初めて導入されたのは、2002(平成 14)年である。これは、我が国の道路整備が本格的にはじまった 1954(昭和 29)年の第 1 次道路整備五箇年計画から数えて約 50 年を経過した段階であり、その間には、道路交通の急激な伸長による道路網の整備に対応して、鋼道路橋も数多く建設されてきた。また、我が国は、島国であることから、本州と九州の関門海峡にまたがる関門橋や、本州と四国を結ぶ本州四国連絡橋などの長大橋も建設されてきた。長大橋の建設においては、その死荷重を軽減する目的で、鋼構造による橋梁が数多く建設されている。また、都市部においては、急激な交通量の増加に対応するため、都市高速が整備されたが、施工的な制約が多いことから、設計の自由度が高く、架設工期が短い鋼道路橋が数多く建設されている。しかしながら、現在、供用されている殆どの鋼道路橋は、疲労設計の導入前に供用された鋼構造物であるため、重交通路線を中心に疲労亀裂の問題が顕在化してきている。そのため、発生した疲労亀裂に対して補修が軽微ですむ早期に発見し、対策を行うことが必要となっている。また、供用中の鋼構造物に対しては、最新の技術基準や施工技術など長寿命化に繋がる対策や知見を熟知し、管理下にある鋼構造物に対し、予防的な措置などによるメンテナンス最適化なども視野に入れ、最適なライフサイクルコストで管理することが重要となる。また、国外

においても疲労亀裂に関する以下のような問題が提起され対策の研究がなされている。
 J.W.Fisher らは、日本をはじめ、ヨーロッパ、オーストラリアにおいても鋼床版に発生している疲労亀裂の原因究明と対策について示している[1-7]。C.R.Hendy らは、英国のセバーン吊橋において実施してきた、鋼床版の疲労亀裂によるデッキプレートの補強対策について示している[1-8]。G.Tecchio らは、自動車荷重による鋼床版の疲労亀裂の原因究明と、ひずみゲージによるモニタリングによる監視を行っていることを報告している[1-9]。

公共構造物の維持管理に着目すると、国土交通白書では「我が国では、1964年の東京オリンピック以降に整備された首都高速1号線等、高度成長期以降に整備した社会インフラが今後一斉に老朽化し、今後20年間で、建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる見込みである。」(表1.1)とされている。

表 1.1 建設後 50 年以上経過する社会資本の割合

	2013年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋	約 18%	約 43%	約 67%
トンネル	約 20%	約 34%	約 50%
河川管理施設(水門等)	約 25%	約 43%	約 64%
下水道管きよ	約 2%	約 9%	約 24%
港湾岸壁	約 8%	約 32%	約 58%

このような状況のなか、2012(平成24)年12月の中央自動車道笹子トンネル上り線で天井版が落下し、9人の尊い命が犠牲となった事故が発生した。この事故は、社会的に大きな衝撃を与えた。その後、社会資本整備審議会道路分科会の「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言 (I.最後の警告-今すぐ本格的なメンテナンスにかじを切れ)」を踏まえ、国土交通省では、老朽化するインフラを戦略的に維持管理・更新するため、2013年を“社会資本メンテナンス元年”と位置づけ、インフラ長寿命化計画(行動計画)が策定された。この行動計画では、道路の老朽化対策の本格実施に向けて「メンテナンスサイクルの構築」、 「トータルコストの縮減・平準化」、 「地方公共団体等への支援」に重点的に取り組むとされている。

一方、我が国の社会・経済構造は、世界に先駆けて急速な「人口減少・超高齢化社会」を迎えている中で様々な課題が表面化してきている。2014年5月、日本創生会議・人口減少問題検討分科会(座長：増田寛也氏)においては、「若年女性(20～39歳)が2040年までに50%以上減少する市町村が896(全体の49.8%)にのぼると推計され、これらの市町村は、

将来的には消滅する恐れが高い。」が公表され、日本全国で大きな反響を呼んだ。国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口」によると、我が国の人口は、2008年にピークを迎え、2048年には1億人を割ると予測されている。また、高齢化も2060年には、65歳以上の人口が5人中2人となる39.9%と予測されている。我が国の人口減少・超高齢化社会にともない、今後、急激に社会保障関連費用の増加が見込まれる。

老朽化する社会資本に対し、急激な社会保障関連費用の増加が見込まれる中、我々公共構造物を維持管理する研究者に対し求められることは、メンテナンス費用のトータルコスト削減への取り組みを強化することであろう。そのためには、点検、診断、補修のそれぞれの維持管理サイクルの段階において研究開発を進め、老朽化する社会資本に対し、最適な保全を実施する必要性に迫られている。点検では、異常が軽微な状況で早期に発見する研究開発、および遠隔・非破壊で異常をスクリーニングする研究開発が望まれている。診断では、正確な原因調査・分析、構造物に求められる必要な機能を確保する最適な補修方法の選定、および補修箇所の追跡調査による持続効果の評価など診断技術の高度化が望まれている。補修では、より効果的・効率的な補修方法の開発が望まれている。これらの技術開発を進めることは、鋼道路橋などの走行安全性や構造物の耐荷力に悪影響となる変状を軽微な段階で発見し、適切な診断が実施可能となり、最適な補修の実施とその効果検証を実施することにより、社会から求められているメンテナンスサイクルの最適化が可能になるものと著者は考えている。

冒頭に述べたように、鋼構造物のメンテナンスを行う中で重要な点は、『防食』と『疲労』である。とりわけ著者は、これまで鋼橋の疲労に関して、赤外線サーモグラフィを用いた点検・診断技術や、鋼床版に発生する疲労亀裂に対する新たな補修技術などの研究開発に取り組んできた。疲労に関しては、大型車や列車の繰り返し载荷によって損傷が蓄積されるため、構造物の供用年数の増加に伴い損傷が顕在化してくる恐れが高いと考えている。また、疲労亀裂の発見が遅れるなど損傷を見逃すと、通行車両の制限や通行止め、落橋など重篤な状況に陥ることも懸念される。つまり、疲労亀裂は、早期に発見し、補修が軽微な亀裂が小さい段階での適切な対処が重要と考えている。しかしながら、疲労亀裂を発見するためには、目視によるところが大きく、効率的かつ効果的な非破壊検査手法は未だ確立されていない状況にある。また、補修においても亀裂発生部位によっては、通行止めを含めた交通規制などを実施し補修しなければならないことも多く、社会的影響が大きくなることがある。つまり、疲労に関しては、維持管理サイクルを行う上で、様々な研究開発を進める余地があり、その効果は大きいと考えている。

我が国では、橋梁をはじめとした社会資本の急速な老朽化や、人口減少・超高齢化社会の到来による社会保障関連費用の増加などの情勢を踏まえると、増大する社会資本の維持管理費用を抑制する技術開発が急務である。著者がこれまで取り組んできた鋼橋の疲労に

関しても、「点検」「診断」「補修」のメンテナンスサイクルにおけるライフサイクルコスト最適化を目指した技術開発が必要である。本研究では、このような背景のもと、鋼橋の疲労亀裂に対する最適メンテナンスサイクルの構築に向けた診断および補修技術に関する研究開発の内容について述べる。

1.2 維持管理

維持管理の基本は、橋などの構造物やその部材の機能劣化に対し、安全性を確保する事である。そのためには、機能不全を起こす安全限界よりレベルが高い維持管理限界を設け、そのレベルを下回らないように管理する必要がある。維持管理限界は、構造物の特性、例えば道路橋では、高速道路、幹線道路、一般道路、生活道路といった役割や、交通量などに応じて適切に定めることが必要である。機能と経年の模式図を、図 1.1 に示す。構造物が完成し供用されたのちは、年数の増加とともに機能が低下する。維持管理では、まずは点検や診断により構造物が保持している機能を把握する。次に維持管理限界に近い場合は、対象となる構造物に対し当初の機能と同等レベル以下で回復する補修、または当初の機能より高いレベルまで回復させる補強などの措置が必要となる。点検、診断および措置（補修／補強）は、構造物を維持管理する上で重要な要素であり、建設時の情報と合わせ記録することが必要である。維持管理のメンテナンスサイクルを、図 1.2 に示す。維持管理では、点検→診断→措置(補修／補強)→記録のメンテナンスサイクルを確立させ、実行することが求められている。

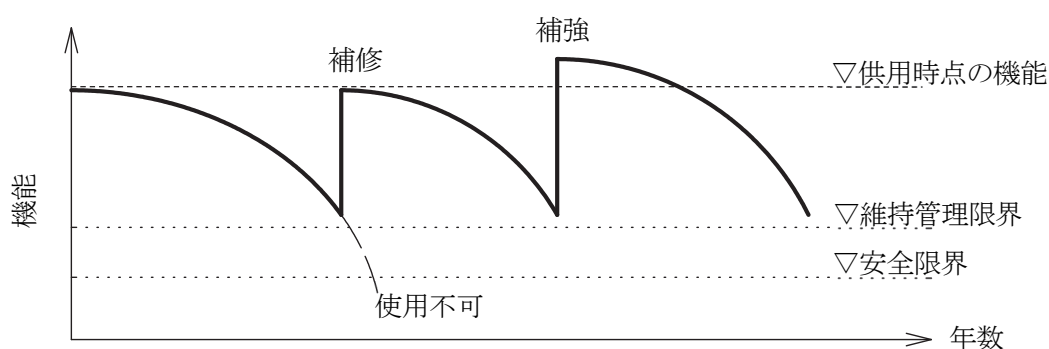


図 1.1 構造物の機能劣化と回復の模式図



図 1.2 維持管理のメンテナンスサイクル

1.3 鋼床版の構造と特徴 [1-10], [1-11]

鋼道路橋の床版は、鉄筋コンクリートまたはプレストレストコンクリートを用いたコンクリート系床版、鋼・コンクリート合成床版、および鋼床版に大別される。

鋼床版の構造を示す模式図を、図 1.1 に示す。鋼床版は、車両の荷重を直接支持するデッキプレートを縦リブとこれに直交する横リブによって支持し、荷重を主桁に伝達する構造である。また、デッキプレートは、床版の一部を構成する部材であるとともに、主桁の上フランジとしての機能も有しており、構造的に2つの機能を兼ねる効率的な構造である。

デッキプレートには、12mm以上の鋼板が用いられる。デッキプレートは、上面に60～80mmの舗装を介して輪荷重を直接支持する。縦リブは、橋軸方向に配置される補剛リブであり、その形状によって開断面リブと閉断面リブに大別される。主な縦リブ形状を、図 1.2 に示す。開断面リブは鋼板を用いた平リブと球平型鋼を用いたバルブリブが多く用いられている。閉断面リブは、逆台形のUリブ（トラフリブとも呼ばれる）が主流である。

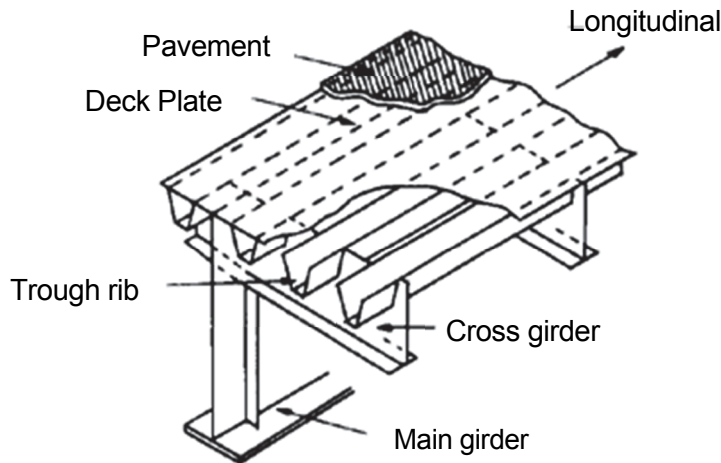


図 1.1 鋼床版構造（閉断面リブを用いた場合） [1-10]

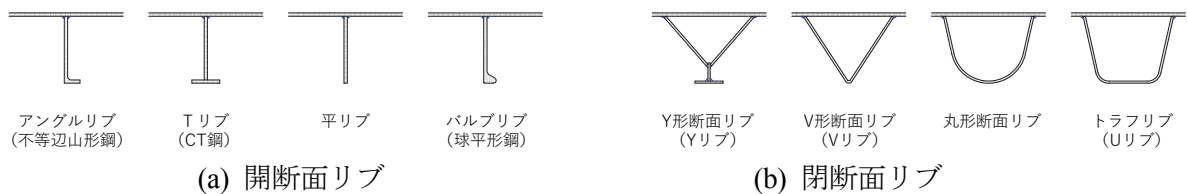


図 1.2 主な縦リブ形状

鋼床版の特徴は、①軽量、②短い架設工期、③設計の自由度が高いということである。個々の特徴について、以下に説明する。

(1) 軽量

鋼床版は、薄い鋼板を溶接によって組み立てた構造であることから、コンクリート系床版や合成床版と比べて軽量という特徴がある。そのため、下部工への負担軽減を図る必要がある軟弱地盤地域の橋梁や、死荷重の軽減が求められる吊橋などの長大橋では、非常に多く適用されている。

(2) 短い架設工期

鋼床版は、橋梁架設後のコンクリート工事もないため架設工期が短い。また、軽量であることから様々な架設工法に対しても幅広く適用可能であり、架設地点直下の交通規制や、様々な架設条件の制約がある場合にも鋼床版は有利である。

(3) 設計の自由度が高い

鋼床版は、デッキプレートの主桁の上フランジとして設計することから、コンクリート系床版と比較し構造高さを抑えることが可能である。また、複雑な道路線形への適用性も高く、曲率半径の小さい曲線橋やジャンクション橋、不規則な支間割となることしない高架橋での採用事例は多い。

日本国内の高速道路における鋼床版面積を、表 1.2 に示す。

表 1.2 高速道路の鋼床版の施工実績

会社名等	①鋼床版面積 ^{※1} (閉断面タイプ)	割合	②管理延長 ^{※2}	①/②
阪神高速	917,000 m ²	32%	254.8 km	3,599 m ² /km
首都高速	573,791 m ²	20%	301.3 km	1,904 m ² /km
NEXCO	491,376 m ²	17%	8,989 km	55 m ² /km
本四高速	466,397 m ²	16%	172.9 km	2,697 m ² /km
名古屋高速	241,800 m ²	8%	81.2 km	2,978 m ² /km
福岡北九州高速	156,880 m ²	5%	107 km	1,466 m ² /km
広島高速	48,800 m ²	2%	22.1 km	2,208 m ² /km
合計	2,896,044 m ²	100%		

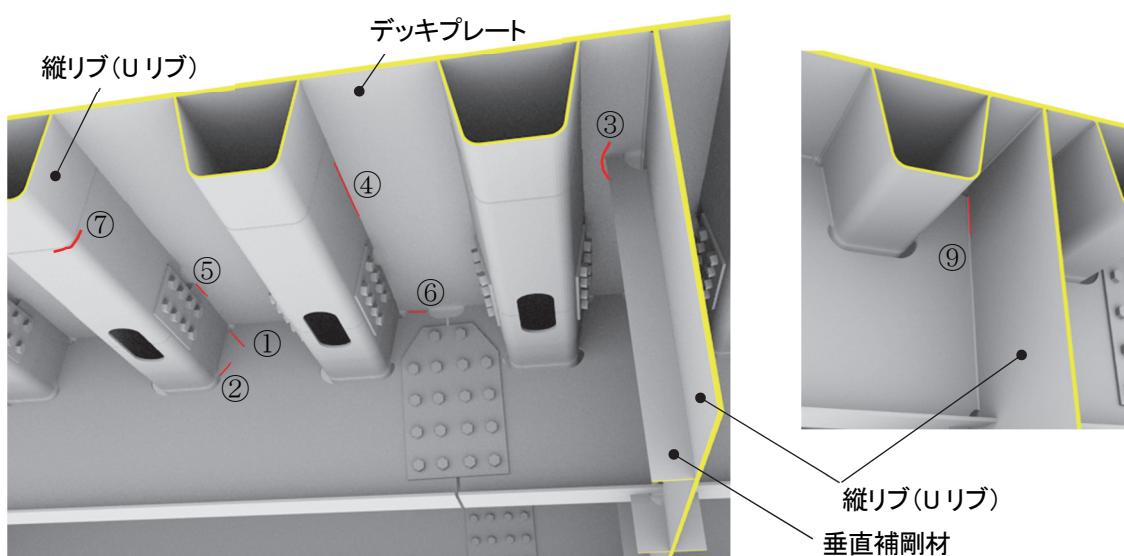
※1：土木学会：鋼床版の疲労(2010年改訂版) [1-11]

※2：各高速道路会社の平成 25 事業年度計画および各道路公社ホームページ

1.4 鋼床版の疲労亀裂と点検の現状 [1-3],[1-7]~[1-9],[1-11]~[1-12]

(1) 疲労亀裂の現状

鋼床版は、軽量で架設工期が短く、設計の自由度が高いことから、吊橋などの長大橋や架設時の制約が厳しい都市高速等で多く採用されている。重交通路線となる国内の代表的な2つの都市内高速道路において発見された閉断面タイプの鋼床版の疲労損傷は、約7000件となっている。損傷マップを図1.3に、損傷タイプ別の構成比率を図1.4に、それぞれ示す。閉断面鋼床版では、②~④の損傷タイプが多く、全体の約9割の件数を占めている。以下に②~④の損傷の詳細と要因について述べる。



(a) 閉断面鋼床版の損傷位置

Type	亀裂発生部位
①	縦リブ-横リブ 溶接部(スカラップ部)
②	縦リブ-横リブ 溶接部(スリット部)
③	デッキプレート-垂直補剛材 溶接部
④	デッキプレート-縦リブ 溶接部
⑤	縦リブ現場継手部 スカラップ部 溶接部
⑥	デッキプレート-横リブ 溶接部
⑦	縦リブ-縦リブ 突合せ溶接部
⑧	縦リブ-端ダイヤフラム 溶接部
⑨	横リブ-主桁ウェブ 溶接部

(b) 損傷タイプ別の発生部位

図 1.3 閉断面鋼床版の損傷マップ

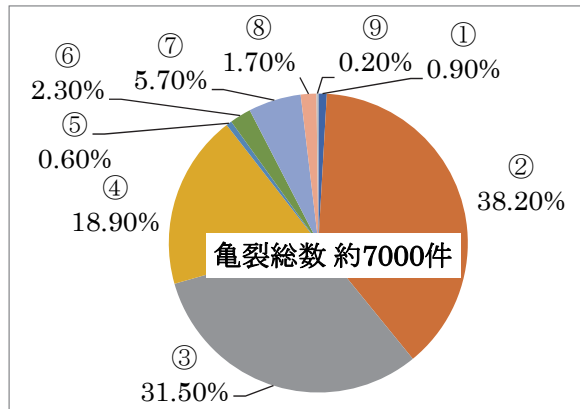


図 1.4 損傷タイプの構成比率

1) 縦リブ-横リブ 溶接部(Type①, ②)

縦リブ-横リブ溶接部に発生する損傷詳細図を、図 1.5 に示す。リブの交差部では、縦リブを貫通させるため、横リブ側にスカラップとスリットを設ける。そのため、横リブと縦リブとは縦リブ両ウェブへ横リブを密着させ、すみ肉溶接にて接合させている。

これらの形状から、スカラップ部やスリット部は応力集中が高くなる部位となり、かつ、材片の密着精度、狭隘なスカラップ部やスリット部でのまわし溶接など製作難易度が高く品質確保が難しい。そのため、まわし溶接止端部から亀裂の発生している事例が多い。また、本タイプの亀裂は、大型車輪直下に発見されることが多い。

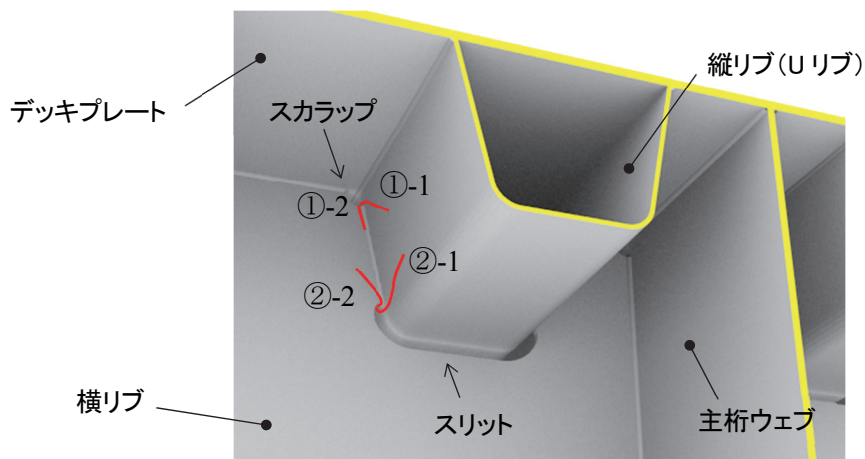


図 1.5 縦リブ-横リブ 溶接部の損傷タイプ(①, ②)

2) デッキプレート-垂直補剛材 溶接部(Type③)

デッキプレート-垂直補剛材溶接部に発生する損傷詳細図を、図 1.6 に示す。垂直補剛材上端の溶接部直上または近傍を大型車輪が通過することによって、デッキプレートが面外変形し、まわし溶接止端部に板曲げによる応力集中が発生することが原因の一つとされている。

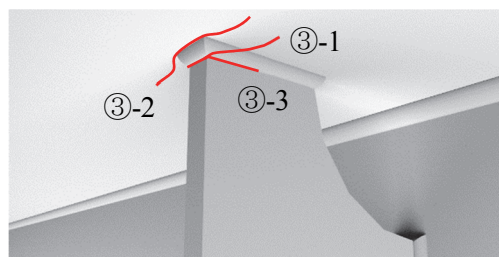


図 1.6 デッキプレート-垂直補剛材 溶接部の損傷タイプ(③)

3) デッキプレート-縦リブ溶接部(Type④)

デッキプレート-縦リブ溶接部に発生する損傷詳細図を、図 1.7 に示す。縦リブは閉断面であるため、通常、デッキプレートへの溶接はリブ外面からの片側すみ肉溶接となる。縦リブは 6mm のケースが多く、自然開先での溶接が一般的であったことから、ルート部を有したままとなっている。ルート部のデッキ側と縦リブ側のコーナー部には、大型車輪が直上または近傍を通過すると高い応力が発生することが数値解析によって確かめられている[1-18], [1-19]。これらを起点とし溶接ビード側に進展する「ビード亀裂」とデッキ側に進展する「デッキ亀裂」がある。また、ビード亀裂とデッキ亀裂は、ルート部から亀裂が進展することから貫通するまで発見は難しく、②や③の亀裂と比較し早期検出の難易度が高い。

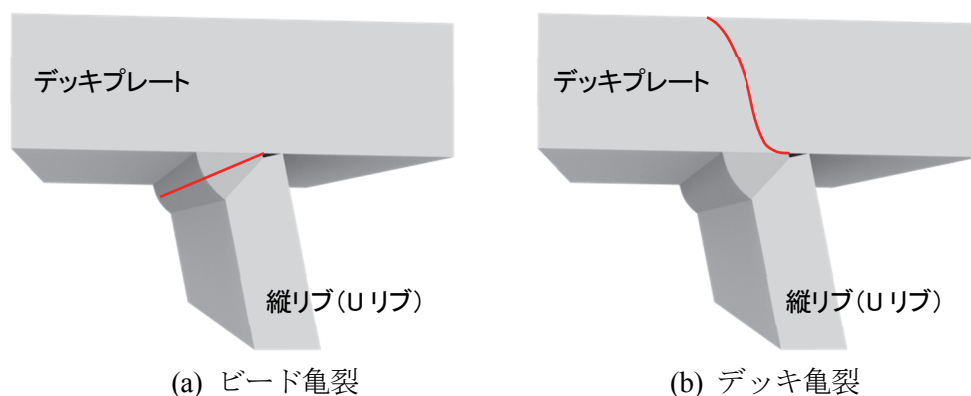


図 1.7 デッキプレート-縦リブ 溶接部の損傷タイプ(④)

(2) 疲労点検の現状

現在鋼床版に対して一般に実施されている、目視による疲労点検の流れを、図 1.8 に示す。疲労亀裂を検出するための点検は、目視点検が一般的である。目視点検では、溶接継手部の塗膜割れや錆汁等の発生を捉え、輪荷重位置や類似構造物の疲労亀裂発生状況などを参考に疲労損傷の疑いがあるかを判定し、その後非破壊検査による探傷により疲労亀裂が存在するか否かを確認する。非破壊検査による探傷は、塗膜除去を必要とすることが多く、近接作業用の足場設置・撤去が必要になるケースが多い。このため、検査効率が悪く、塗膜割れや錆汁の発生段階での発見では、亀裂長さが数十 cm に達しているケースも見受けられる[1-3],[1-11],[1-12]。

疲労損傷は、亀裂が短い段階の早期に発見することが重要となるが、目視点検では亀裂が短い段階での検出性に対して、磁気(磁粉)探傷や超音波探傷などの非破壊検査では、塗装を剥ぐ必要があることから、近接する足場が必要なケースが多く、全数検査するには作業性や経済性にそれぞれ課題がある。

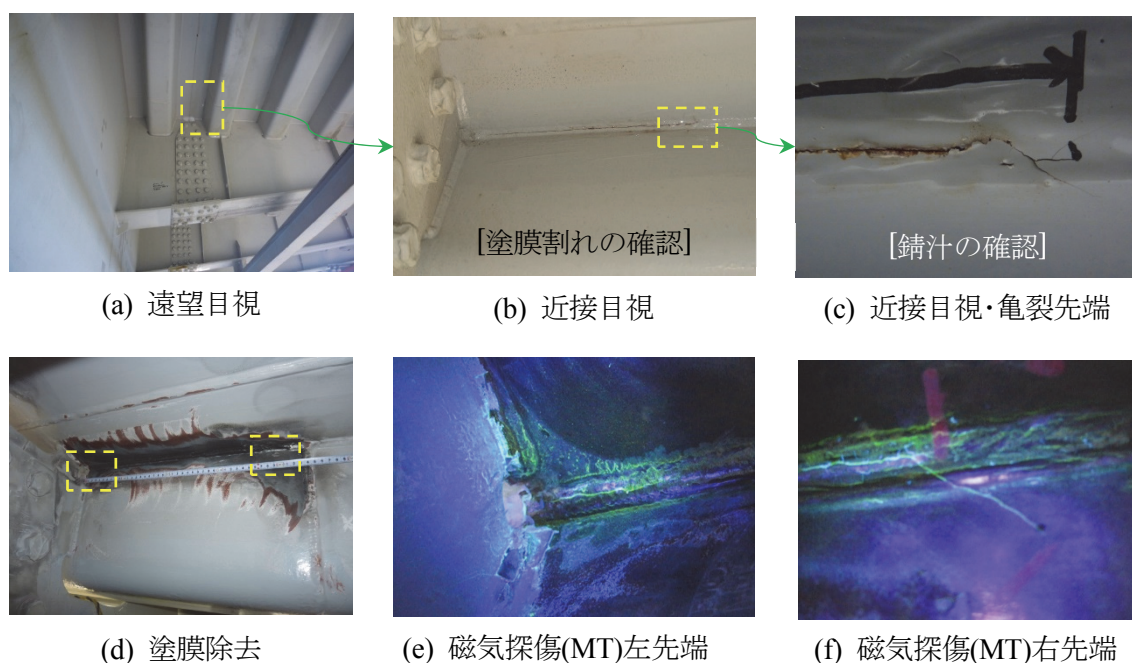


図 1.8 疲労点検による亀裂発見までの手順

1.5 U リブ鋼床版ビード貫通亀裂補修法の既往の研究

U リブ鋼床版におけるビード貫通亀裂の発生数は、多い。ビード貫通亀裂の既往補修法は、次のような補修法が開発され施工されている。田畑らは、鋼床版上面の舗装を剥ぎ取

り、亀裂が発生した溶接に代わり、デッキ上面から高力ボルトを落とし込んで当て板やUリブ交換による補修を行っている[1-3], [1-20]. 川上らは、溶接部に発生した亀裂を除去し、下面からの再溶接を行う補修を行っている[1-13]. 青木らは、亀裂が発生した溶接に代わり、下面からデッキプレートへのスタッドボルトを溶着し、当て板による補修を行っている[1-14]~[1-17]. いずれの工法も、現状では、それぞれに以下のような課題がある。

デッキ上面から高力ボルトを落とし込んで当て板やUリブ交換による補修では、舗装を切削するため交通規制が伴う。そのため、重交通路線や代替路線の無い海峡部長大橋では社会的影響が大きい。また、部分的な舗装の切削と復旧は、舗装目地による防水性能低下による雨水の浸入による、デッキプレート上面の腐食も懸念される。

一方、溶接部に発生した亀裂を除去し、下面からの再溶接を行う補修では、溶接姿勢が上向きになるため品質の確保が難しい。また、溶接施工時に通行止めができない場合には、大型車両の通行に伴う桁の振動を抑えることができないため、溶接品質の低下が懸念される。更に、ビード貫通亀裂はルート部を起点とした亀裂であるものの、ルート側のUリブ内面からの溶接は困難であり、通常はUリブ外面からのみの溶接とするため完全溶け込みにできず、ルート部に不溶着部が残る。つまり再溶接による補修では、溶接品質の確保が難しく、ルート部からの亀裂が再発する懸念が残る。川上らの研究では、補修溶接のサイズが小さい場合にはビード亀裂が再発し、逆に大きい場合にはデッキ亀裂が発生しやすいことを報告している[1-13].

また、亀裂が発生した溶接に代わり、下面からデッキプレートへのスタッドボルトを溶着し、当て板による補修では、スタッドボルトの溶接が上向き施工になるため、溶接の品質確保が難しいことが想定される。その上、活荷重による応力変化が大きいデッキプレートへスタッド溶接することから、溶接部からデッキへ進展する亀裂の発生が懸念される。

上述以外にも、いくつかの補修方法が開発され施工されているが、下面からのみで施工でき、効果的な補修方法がないことが課題であった。

1.6 研究目的

Uリブにより補剛された鋼床版において、デッキプレート-Uリブ間の溶接部のルート部から溶接ビード表面に進展するビード貫通亀裂は非常に多い。一方、これまで、疲労亀裂の点検、診断、措置（補修／補強）のメンテナンスサイクルの各段階で様々な課題があることを述べてきた。

まず、疲労亀裂の点検は、一般的に目視点検であるため、塗膜割れ、特に塗装割れ部から滲み出した錆汁を検知し疲労亀裂として疑う。その後、塗膜割れ部の構造詳細や車線配置から大型車の輪荷重位置などを特定し、疲労損傷の疑いが高ければ磁気(磁粉)探傷や超音波探傷による非破壊検査を行って、疲労亀裂を特定する必要があった。また、目視点検では、点検員の経験や能力に頼るため必ずしも同じ点検品質が保たれるわけではない。さらには、錆汁発生段階で検出される亀裂は、長さが数十 cm に達していることも多く、早期検出とはいえる状況ではない。また、非破壊検査による亀裂検出は、塗装を剥ぐ必要があることから、近接用の足場が必要であることが多く経済性に劣る。疲労亀裂の早期発見のためには検出性、効率性が高い検出法の開発が課題である。

次に、ビード貫通亀裂の進展特性では、亀裂の進展速度、軽微な補修で済む限界長さなど不明な点が多い。また、ビード貫通亀裂の発生しやすさなどの指標として、溶接の溶け込み量が影響するとの報告はあるものの[1-13]、外観上から判定できるものは見当たらない。つまり、疲労亀裂の点検が必要な区間や頻度を明確に決める根拠となる研究もなく課題である。

さらに、ビード貫通亀裂の補修方法では、重交通路線や海峡を跨ぐ長大橋などでは規制が不要な補修工法が社会的に要請されるが、既存工法ではデッキプレートの上にある舗装を剥ぐため規制を必要とする工法や、再溶接などの再亀裂発生が懸念される工法しかなく、下面からのみで施工可能かつ効果的な工法の開発が課題となっている。

このような現状の課題に対し、著者は、Uリブ鋼床版に発生するビード進展型の疲労亀裂に対し、疲労亀裂の検出、疲労亀裂の進展性評価、疲労損傷個所の補修といった、鋼構造物の経年劣化の各段階でのニーズからくる必要な研究・技術開発を進め、最適メンテナンスサイクルの構築に向けた検討を行った。まず、疲労亀裂の検出に関しては、遠隔・非接触で非破壊検査が可能な、赤外線サーモグラフィの特徴を活かし、移動しながら撮影するのみで亀裂検出する検査法について、撮影機種が必要とする性能や撮影方法、検査するための環境条件などの研究から効率的な実用化システム開発までを行った。また、デッキプレート-Uリブ溶接部のルート部からビード表面に進展するビード亀裂が、ビード表面到達前の内在状態において、赤外線サーモグラフィによる亀裂検出が可能であるかについても研究を進めてきた。次に、疲労亀裂発生のしやすさの評価に関しては、溶接サイズを計測することで、亀裂部と健全部の溶接脚長の違いからビード貫通亀裂の発生のしやすさを明らかにしてきた。また、疲労亀裂の進展性の評価に関しては、発生している亀裂のビード表面長さを継続的に計測することにより亀裂進展速度や亀裂が長くなった場合の特性を把握し、最適な点検間隔と軽微な補修と言える限界長さなどを明らかにしてきた。さらに疲労亀裂の補修に関しては、建築分野でφ8~12のサイズでよく使用されていた片面施工可能な TRS (Thread Rolling Screw) のφ16が開発されたことから、当て板補修法に取り入

れることにより鋼床版の下面からのみで補修可能な工法を開発した。研究では、この TRSφ16 を用いた新しい工法について、その性能を確認するための実物大の疲労試験および施工試験を実施し、新しい補修方法として開発を行った。

研究では、ビード貫通亀裂以外に関する疲労亀裂に対しても、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力計測の特徴を活かした研究を実施した。実施した研究は、縦桁と横桁の交差部の垂直補剛材上縁端部に発生する疲労亀裂に対する補修効果の検証である。補修効果の検証に赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力計測を用いる場合は、一般的に実施されるひずみゲージによる応力測定と比べ、撮影する視野範囲で温度を計測し応力に換算することから、応力を面的にとらえることが可能であるという特徴を有する。一方、疲労亀裂の補修では、応力集中箇所の緩和や、疲労等級が高い部位へ応力集中箇所を移す対策などがとられることが多いため、その効果確認では、ひずみゲージ計測では不足することがある。そのため、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力計測を用いることにより、疲労亀裂の補修に対し、ひずみゲージによる応力計測より効果的に検証ができる可能性を探る研究を行った。

研究目的である鋼構造物の最適メンテナンスサイクルを目指した各研究開発の項目と概要を以下に示す。

- (1) 赤外線サーモグラフィを用いたビード貫通亀裂の検出法の開発
- (2) U リブ鋼床版ビード貫通亀裂の発生・進展特性
- (3) U リブ鋼床版ビード貫通亀裂の下面補修法の開発
- (4) 温度ギャップ法を用いたビード貫通亀裂検出の実用化システムの開発
- (5) 温度ギャップ法によるビード内在亀裂の検出性に関する研究
- (6) 赤外線サーモグラフィを用いた疲労亀裂補修効果の検証

(1)の亀裂検出法の開発に関しては、従来実施されている目視点検での検出性や非破壊検査の効率性について、それぞれ信頼度や検査速度の課題に対し改善を目指した研究である。

(3)の下面補修法の開発に関しては、既存工法では交通規制が不要で効果的な手法が開発されていないことから、下面からのみで交通規制を必要としない工法を開発し、その性能や施工性について実験等を通じ研究した。

また、(1)～(5)は、U リブ鋼床版に発生するビード亀裂に対し、亀裂検出から補修までのメンテナンスサイクルの全てを網羅した研究である。これらは、2002年制定の鋼道路橋疲労設計指針までに建設された多くのU リブ鋼床版において、各道路管理者が共通して抱え

る課題であり、開発した内容が最適メンテナンスサイクルの構築に役立つ研究と考えている。

また、(6)の赤外線サーモグラフィを用いた疲労亀裂補修効果の検証では、従来のひずみゲージによる点での効果検証から、面的な応力の可視化により、補修効果の検証に非常に役立つ手法の提案であると考えている。

疲労のメンテナンスサイクルに対する、各研究テーマの位置づけを図 1.9 に示す。

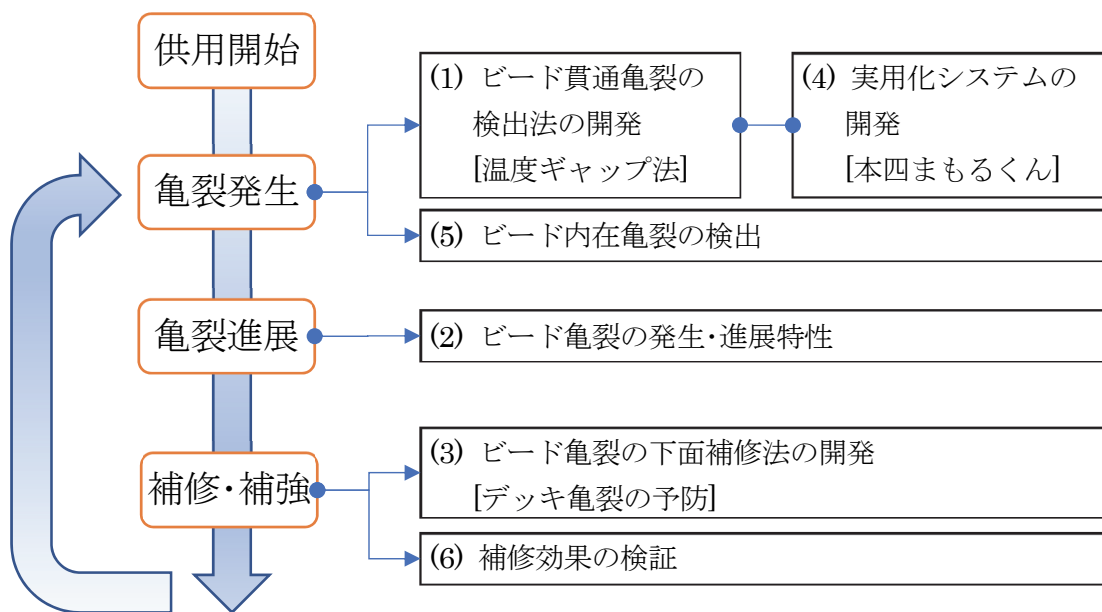


図 1.9 疲労のメンテナンスサイクルと各研究の位置づけ

1.7 本論文の構成

本論文は、鋼構造物とりわけUリブ鋼床版のビード亀裂に対する検出法の開発と下面からのみで施工可能な補修法の開発を中心とした研究内容である。また、ビード亀裂の最適メンテナンスサイクルの構築に向け、亀裂貫通以前の早期に検出する手法の確立に向けた基礎的研究や、亀裂進展特性の把握を目指した研究なども併せて実施している。さらに補修効果の検証については、従来のひずみゲージによる点での応力計測から、赤外線を用いることにより面的な応力分布計測による新たな補修効果検証手法としての可能性を示す研究についても実施している。これらの研究の多くで赤外線サーモグラフィ計測装置を用いているため、赤外線に関する基礎的事項についても述べる。以下に各章の概要を示す。

第1章では、研究背景および本研究の必要性について論じた。Uリブ鋼床版の疲労亀裂の現状、点検や非破壊検査を用いた検出法の課題、既存補修法の課題などから問題点を提起した。その上で、鋼構造物の最適メンテナンスサイクルの構築に向けた、次章以降の研究内容の位置づけを示し、その必要性について述べた。

第2章では、赤外線に関する基礎知識、赤外線サーモグラフィの基礎知識、および赤外線サーモグラフィによる変動温度計測から変動応力へ変換する熱弾性効果について述べる。

第3章では、実橋でのビード貫通亀裂を実験素材とし、赤外線サーモグラフィを用いた亀裂検出法の開発に向けた基礎実験、検出性能の確認実験、有効性確認のための未検査橋梁での実証実験、計測時期を検討するための年間を通じた温度計測などの研究について述べる。

第4章では、ビード貫通亀裂の進展速度、溶接形状からの発生特性などを調査し、ビード亀裂の進展特性に関する研究について述べる。

第5章では、ビード亀裂の下面からのみで補修可能な手法について、実物大による疲労試験、施工試験から試験施工を行い、開発した下面補修法について述べる。また、デッキプレートとUリブの溶接部の溶け込みの違いによるデッキ亀裂とビード亀裂の発生特性についても述べる。

第6章では、第2章で開発した赤外線サーモグラフィを用いたビード貫通亀裂の検出法について、亀裂検出自動化に向けたアルゴリズムの開発と装置開発を行った内容について述べる。

第7章では、ビード貫通亀裂の貫通前の状態（ビード内在亀裂）についての赤外線サーモグラフィを用いた実験的研究について述べる。

第8章では、ウェブギャップ版に発生する亀裂に対し、補修前後で赤外線サーモグラフィにより熱弾性応力測定を実施し、効果的な検証手法の研究について述べる。

第9章では、鋼構造物の最適メンテナンスサイクルの構築を目指した診断および補修技術に関して、本研究において明らかとなった知見についてまとめ、本研究を総括する。

<p>概論</p>	<p>第1章:序論</p> <p>第2章:赤外線工学</p>	
<p>メンテナンス サイクル</p> <pre> graph TD A[メンテナンス サイクル] --> B[亀裂発生] B --> C[亀裂進展] C --> D[補修・補強] D --> A </pre>	<p style="text-align: right;">ビード亀裂</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>第3章:温度ギャップ法 各種実験を通じ、検出法の確立を目指した取り組み</p> <p>第6章:実用化システムの開発 各種実験を通じ、検出法の確立を目指した取り組み</p> <p>第7章:ビード内在亀裂の検出性 実験室での基礎的研究と実橋亀裂の3次元性の現状</p> <p>第4章:亀裂の発生・進展特性 溶接サイズからの亀裂発生傾向、亀裂進展観測からの特性把握</p> <p>第5章:下面補修法の開発 実物大の疲労試験と施工試験・試験施工</p> </div> <p>第8章:補修効果の検証 熱弾性応力測定を用いた実橋亀裂に対する補修効果検証</p>	
<p>結論</p>	<p>第9章:結言</p>	

第1章 参考文献

- [1-1] 国土交通省：国土交通白書，平成28年度
- [1-2] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成24年3月
- [1-3] 阪神高速道路：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策，平成24年3月
- [1-4] 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012年改訂版
- [1-5] Jaen-Paul Lebet, Manfred A. Hirt(著)，山田健太郎(訳)：鋼橋，鹿島出版会，2016.6.
- [1-6] 酒井達雄：最新金属疲労の基本と仕組み，秀和システム，2011.6.
- [1-7] J.W. Fisher & S. Roy , Durability of steel orthotropic bridge decks, 8th IABMAS 2014, July 7-11 2014, Shanghai, China
- [1-8] C.R. Hendy, C. Mundell & D. Bishop, Management of the Severn Bridge Suspension Bridge, 8th IABMAS 2014, July 7-11 2014, Shanghai, China
- [1-9] G. Tecchio, M. Caldon, F.P. Marchesini, M.A. Zanini, M. Donà, C. Pellegrino & C. Modena, Fatigue cracks in orthotropic plates – A case study, 8th IABMAS 2014, July 7-11 2014, Shanghai, China
- [1-10] 本州四国連絡橋公団：鋼床版設計要領，1983.10.
- [1-11] 土木学会：鋼床版の疲労，2010年改訂版
- [1-12] 平林泰明，牛越裕幸，木ノ本剛：首都高速道路における鋼床版損傷，鋼構造と橋に関するシンポジウム報告集，Vol.10, pp.39-53, 2007.8
- [1-13] 川上順子，高田佳彦，坂野昌弘：鋼床版の疲労損傷に対する溶接を用いた補修補強工法に関する検討，鋼構造年次論文報告集，第15巻，pp.371-376，2007.11.
- [1-14] 田畑晶子，青木康素，小野秀一，山口隆司：Uリブ鋼床版のスタッドボルトを用いた補強方法の提案，土木学会第69回年次学術講演会，I-466，2014.9.
- [1-15] 青木康素，田畑晶子，小野秀一，渡辺真至，馬場敏，山口隆司：スタッドボルトを用いて当て板したUリブ鋼床版の載荷試験，土木学会第69回年次学術講演会，I-467，2014.9.
- [1-16] 中井勉，田畑晶子，小野秀一，山口隆司：スタッドボルトを用いて当て板したUリブ鋼床版の実物大試験体による静的載荷試験，土木学会第70回年次学術講演会，I-385，2015.9.

- [1-17] 小野秀一, 渡辺真至, 田畑晶子, 中井勉, 山口隆司, 儀賀大己: スタッドボルトを用いて当て板した U リブ鋼床版の輪荷重疲労試験, 土木学会第 70 回年次学術講演会, I-386, 2015.9.
- [1-18] 三木千壽, 菅沼久忠, 富澤雅幸, 町田文孝: 鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷, 土木学会論文集 No.780/I-70, pp.57-69, 2005.1.
- [1-19] 有馬敬育, 村越潤: 鋼床版縦リブ溶接ルート部応力に着目した FEM 解析, 土木学会第 59 回年次学術講演会, I-545, pp.1087-1088, 2004.9.
- [1-20] 田畑晶子, 木代穰, 西岡勉, 藤林美早: 鋼床版 U リブ溶接部貫通き裂の損傷要因と対策, 土木学会第 61 回年次学術講演会, I-547, pp.1091-1092, 2006.9.

第2章 本研究に関わる赤外線工学の基礎事項

赤外線は、可視光の赤色より長波長側に位置する電磁波である。そのため、人は物体が放射している赤外線を目で見ることが不可能である。赤外線サーモグラフィは、物体表面から放射されている赤外線の強度を計測し、その分布を温度に換算して可視化する装置である。第3、6～9章の研究では、温度を非破壊、非接触で捉えることが出来ることに着目し、コンパクトな計測装置で遠隔・移動しながら温度分布を計測する手法や、熱弾性効果に基づく温度応力測定による疲労亀裂に対する補修効果確認の適用への有効性評価等を実施した。

本章では、本研究で行った赤外線サーモグラフィ計測に関わる、赤外線工学の基本的事項、赤外線サーモグラフィの基礎、および赤外線サーモグラフィを用いた非破壊検査手法について説明する。

2.1 赤外線の基本知識 [2-1]~[2-4]

(1) 赤外線の発見

赤外線は、英国の天文家ハーシェル（Herschel）によって 1800 年に発見された[2-1]。ハーシェルは、スリットを通した太陽光線をプリズムにより分光し、可視光の領域で生じる「虹」の各色に水銀温度計を置くことにより、各色における光のエネルギー吸収による温度上昇の計測を行った（図 2.1）。その結果、紫色から赤色へ行くほど温度上昇が大きくなること、さらに赤色の部の外側の目に見えない部分に更に大きな温度上昇を起こさせる放射光が存在する事を発見したのである。ただし、当時は「見えない光」と呼ばれ、「赤外線 infrared」という言葉は、赤外線が可視光より長い波長をもつ電磁波であることが分かってきた 1880 年以降となる。

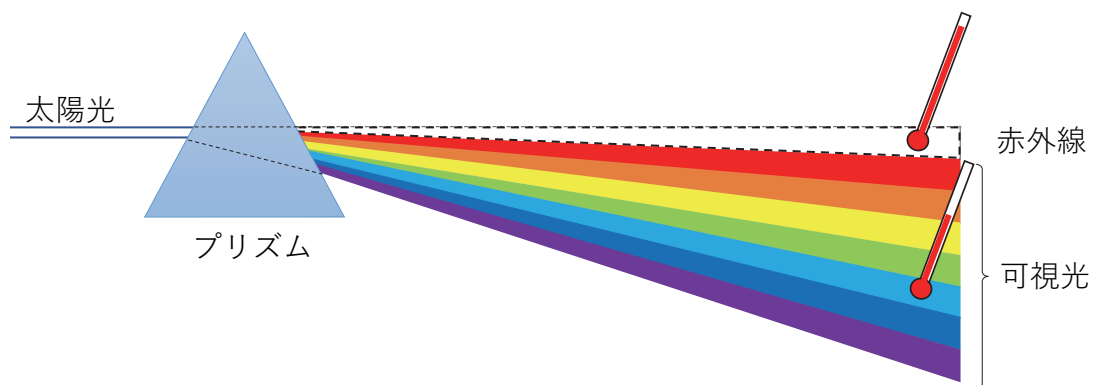


図 2.1 ハーシェルの実験[2-2]

(2) 赤外線の放射

絶対零度(-273℃)より高い温度をもつ全ての物体は、物体の性質及び温度のみで決まる強度の赤外線を放射している。これは物体の温度に起因する分子や原子の運動によって引き起こされる現象である。物体に触れずに温度を測ることができる赤外線サーモグラフィ装置は、対象物から放射されている赤外線を検出し、これを後述するプランクの法則に基づくステファン・ボルツマンの式に従って温度値に換算したうえで、その分布を計測している。

赤外線は、X線、可視光などと同様に電磁波の一種であることが知られている。各種電磁波と波長の関係を示した図 2.2 では、赤外線は可視光とマイクロ波の間に位置する。ま

た、利用方法の違いから近赤外線、中赤外線、遠赤外線に区分されている。放出される電磁波のエネルギーは物体の絶対温度および放射物性により決まる。

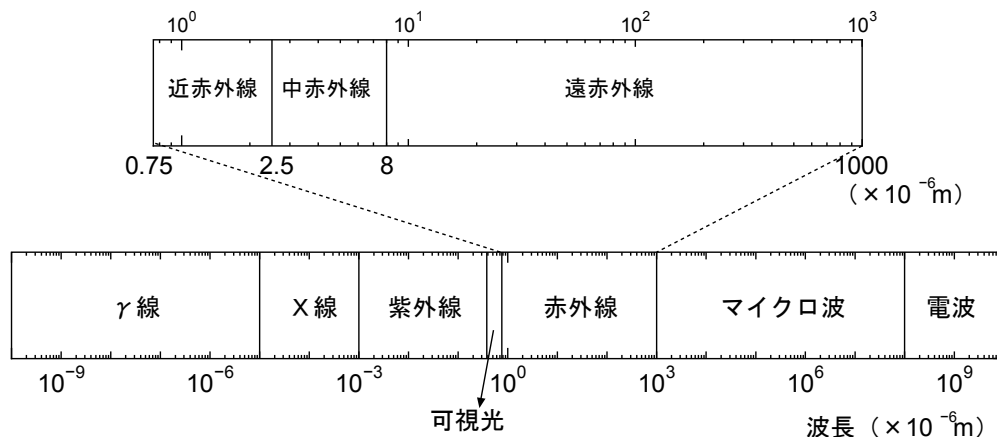


図 2.2 電磁波と赤外線の波長領域

ここで赤外線放射エネルギーについて考える。黒体とは入射したすべてのエネルギーを吸収し、物体表面から最大の赤外線エネルギーを放射する理想的な放射体である。しかしながら、現実には完全な黒体は存在せず、物体の放射エネルギーは黒体のそれに比べて小さい。黒体の赤外線放射量に対する、物体の赤外線放射量の比率は、放射率 ε で表されている。

赤外線放射量はプランクの法則、およびこれに基づくステファン・ボルツマンの式により表される。プランクの法則によれば、単位面積(1cm^2)、単位波長($1\mu\text{m}$)あたりの黒体放射強度 $W_\lambda[\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}]$ は次式のようにになる。

$$\begin{aligned}
 W_\lambda &= \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{ch}{\lambda kT}\right) - 1 \right\}} \\
 &= \frac{c_1}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right\}} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

ただし、 h はプランク定数であり、その値は $h=6.6261 \times 10^{-34}[\text{W} \cdot \text{s}]$ である。 c は真空中の光の速度[m/s]、 $\lambda[\mu\text{m}]$ は放射赤外線の波長、 $T[\text{K}]$ は放射体の絶対温度である。 k はボルツマン定数であり、その値は $k=1.3807 \times 10^{-23}[\text{W} \cdot \text{s}/\text{K}]$ である。 c_1 は第一放射定数、 c_2 は第二放射定数であり、その値はそれぞれ $c_1=3.718 \times 10^4[\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}^4]$ 、 $c_2=1.4388 \times 10^4[\mu\text{m} \cdot \text{K}]$ である。黒

体の全放射量を算出するためには、式(2.1)の W_λ を波長 λ に関して 0 から無限大まで積分すればよく、結果は次式のようなステファン・ボルツマンの式となる。

$$W = \left(\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \right) T^4$$

$$= \sigma T^4 \quad (2.2)$$

ここに、 σ はステファン・ボルツマン定数で、その値は $\sigma = 5.6705 \times 10^{-12} [\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4]$ である。式(2.2)より、放射赤外線強度は、放射体の絶対温度の 4 乗に比例することがわかる。

黒体以外の物体表面の放射については、全波長域で放射率が一定な灰色体に対しては、式(2.2)に灰色体の放射率 ε をかけることにより、物体からの赤外線放射量を計算することができる。

(3) 放射、反射、透過、吸収の関係

物体に赤外線エネルギー W が入射すると、その一部は物体表面で反射され、一部は物体に吸収され、残りのエネルギーは物体を透過する。反射、吸収および透過の比率をそれぞれ ρ 、 α 、 τ とすると、これらの間には次式で表されるエネルギー保存則が成立する。

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.3)$$

一般に赤外線は、不透明の液体や固体においては、表面のごく薄い数マイクロメートル [μm] の層でそのすべてが吸収され、透過しない。したがって $\tau = 0$ となり、

$$\rho + \alpha = 1 \quad (2.4)$$

が成立する。また、物体の放射率 ε は、その物体の吸収率 α に等しく、

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.5)$$

となる。これをキルヒホッフの法則という。また、式(2.4)、(2.5)より次式が得られる。

$$\rho + \varepsilon = 1 \quad (2.6)$$

したがって、物体の放射率 ε を大きくすると、反射率 ρ を小さくすることができる。これにより、周囲からの赤外線エネルギーの反射の影響を軽減することができ、良好な温度計測が可能となる。これについては、次項で詳しく説明する。

(4) 実際に計測される温度値

前述のように完全な黒体は存在せず、放射率 ε は必ず $0 < \varepsilon < 1$ の値をとる。温度測定を目的としたサーモグラフィ装置では放射率 ε が 1 であると見なされる黒体炉に対して正しい温度指示するように較正されている。したがって、放射率 ε の測定対象物の温度指示値は正しい値 T からずれた値 T' を示すことになる。図 2.3 に示すように装置の検出器には測定対象物からの赤外線放射に、測定対象物表面で反射した周囲物体からの赤外線放射が加算

されて入射されることになり，装置に実際に入射する赤外線エネルギー $R(T')$ は次式で表される。

$$R(T') = \varepsilon R(T) + \varepsilon_a (1 - \varepsilon) R(T_a) \quad (2.7)$$

ここで， T' は見かけの温度指示値， T は測定対象物の真温度， T_a は環境反射源温度， ε_a は環境反射源の放射率である。使用する光学系と検出器で異なるが， $R(T)$ は近似的に k を定数として

$$R(T) = kT^n \quad (2.8)$$

と表すことができる。ここで n は検出波長域および温度 T で決まる定数である。

式(2.7)から分かるように，真の温度 T を知るためには計測値である見かけの温度指示値 T' に加え，測定対象物の放射率 ε ，環境反射源温度 T_a ，環境反射源の放射率 ε_a が必要である。実際には環境反射源の温度や放射率を知ることは困難であり，測定対象物の真の温度の計測は容易ではない。したがって，できるだけ放射率が 1 に近い状態で計測する工夫が必要である。通常は，疑似黒体化塗料を被測定物の表面に塗布することにより，表面の放射率を均一にするとともに，物体表面の放射率を黒体に近づけている。

赤外線センサを用いた赤外線放射量の測定を大気中で行うときには，赤外線の計測を妨げる原因になるものとして，大気中の二酸化炭素と水蒸気がある。図 2.4 に近赤外線から遠赤外線までの大気の赤外線透過率を示す⁽¹²⁾。二酸化炭素と水蒸気は，特定の波長領域の赤外線を吸収する。大気の赤外線吸収特性としては，波長 2–3 μm ，3–4 μm ，4.5–5 μm および 8–14 μm の領域には，大気の窓と呼ばれる高い透過率を有する波長域が存在する。赤外線計測を行う際には，大気の窓の波長領域を用いて，赤外線計測に適した波長領域の赤外線を検出できる赤外線素子を利用する。

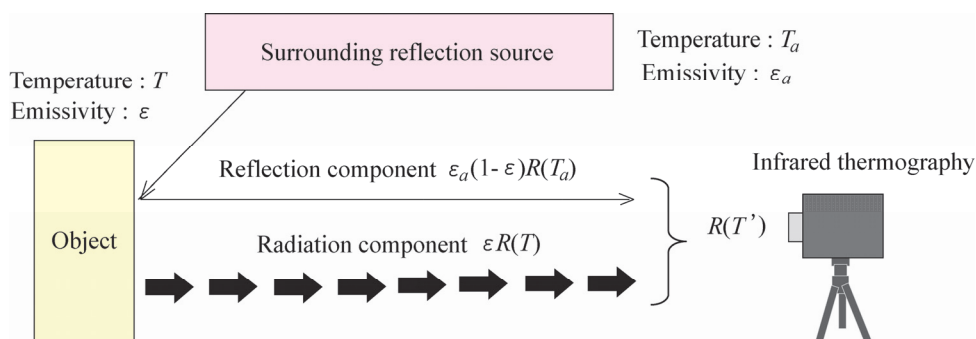


図 2.3 赤外線サーモグラフィによる対象物の赤外線の測定

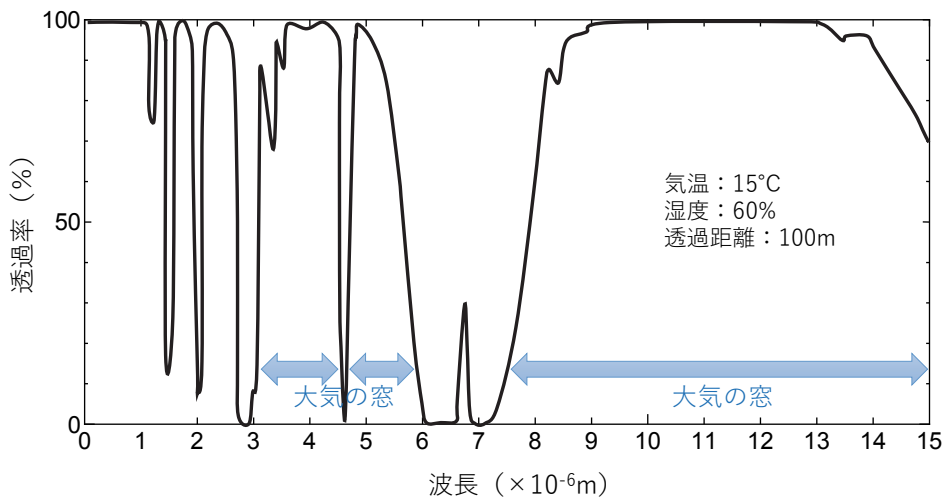


図 2.4 大気の透過率

2.2 赤外線サーモグラフィ

(1) 赤外線サーモグラフィに使用される赤外線センサ [2-5]~[2-6]

赤外線サーモグラフィは、物体表面から放射される赤外線エネルギー分布を赤外線センサにより測定し、これを温度分布に換算・画像化して表示する装置である。赤外線センサには、赤外線の電磁波エネルギーによる物性変化を利用する熱型センサと、赤外線を光子としてとらえ光電効果を利用する量子型センサの2種類がある。量子型センサには主として半導体を用いられる。半導体センサは、熱型センサに比べて応答が速く高感度である。熱型赤外線サーモグラフィは、センサ自体がもともと低価格であり、また量子型と異なり冷却器とそのための電源が不要なため小型、軽量かつ低価格であるという特徴を持つ。そのため、熱型赤外線サーモグラフィは非破壊検査技術を普及させる原動力となっている。現在、量子型と熱型赤外線サーモグラフィについては、それぞれの特徴と用途に応じた使い分けがなされている。

1) 量子型センサ

量子型センサの特徴としては、応答速度が速い、温度分解能が高い、検出波長帯に周波数依存性が高いなどがある。量子型センサは、赤外線検出素子自身の温度による赤外線放射をノイズとして測定してしまうため、近赤外線を除いては赤外線センサを液体窒素温度まで冷却して使用する。量子型センサを測定原理で分類すると、光伝導型と光起電力型がある。光伝導型センサは、光の照射により抵抗値が変化する薄膜抵抗体を利用し、薄膜抵抗体の両端に電極を設け外部から電界をかけることによって赤外線を検出する。このとき

赤外線が光子としてとらえられ、その光子のエネルギーが薄膜抵抗体に吸収されることにより電子や正孔が生成され、薄膜抵抗体の伝導度が変化する。その変化は赤外線の量に比例するため、得られた信号電流が赤外線強度として検出される。光起電力型センサでは、光電池の構造をもち、PN 接合ダイオードに赤外線エネルギーが入射されると、PN 接合ダイオードに光起電力が発生する。この発生した光起電力を赤外線強度値として検出することにより、赤外線の計測を行う。

2) 熱型センサ

熱型センサの特徴としては、検出素子の波長選択性がなく、低価格であるが、量子型センサに比べ感度が低く、応答速度が遅いなどがある。熱型センサは、赤外線を受光すると検出素子自体の温度が上昇する。その温度上昇による効果でセンサの素子特性（抵抗、容量、起電力、体積、自発分極）が変化し電気信号に変換する。よく使用される熱型センサを測定原理で分類すると導電型（ボロメータ）、起電力型（熱電対、サーモパイル（熱電堆））、焦電型がある。導電型（ボロメータ）は赤外線が受光部に当たると、センサが加熱され温度上昇により抵抗値が変化するが、その変化量を電気信号出力として取り出し、熱画像に変換する。起電力型は、熱電能の異なる2種類の金属を接合して、その接合点に赤外照射により温度上昇させると一定方向に電流が流れ、熱起電力が生じる（熱電対）。これを多数直列に並べて薄膜化したものがサーモパイルである。サーモパイルの熱起電力を電気信号として取り出し、熱画像に変換する。焦電センサは、誘電体が赤外線を受光することにより温度上昇が起こり、自発分極作用によって電荷が発生する焦電効果により、発生した電荷を電圧または電流として取り出すセンサである。焦電効果は、温度変化が生じたときにだけ分極が発生し、温度が一定になると中和され分極が消えてしまう。そのため、温度変化のない物体を計測するときには、センサの前に入射光を断続する装置が必要となる。

最近では、赤外線センサの集積化により、単一あるいは少数の赤外線検出素子を使用し、鏡を動かす走査光学系により二次元画像を構成する機械走査型赤外線サーモグラフィから、2次元赤外線アレイセンサを搭載した機種へと変遷している。これにより、赤外線サーモグラフィの性能は、赤外線計測分解能、精度、安定性、計測速度、画素数、あるいは小型・軽量化等、すべての面において向上してきた。これらの赤外線センサを用いることにより、微小な温度変化を高速かつ高分解能・高精度に計測することが可能になり、熱弾性効果による微小な温度変動を検出できる赤外線カメラが開発されてきた。

(2) 赤外線サーモグラフィの仕様

本研究で試用した赤外線サーモグラフィは、量子型を2機種、熱型を4機種使用した。量子型のセンサは、光起電力型アレイセンサの InSb(Indium Antimonide)センサを搭載した

赤外線サーモグラフィである。熱型のセンサは、導電型（マイクロボロメータ）を搭載した赤外線サーモグラフィである。使用した機種の主たる仕様を、表 2.1 に示す。

表 2.1 量子型赤外線サーモグラフィの仕様

機種	検出器の種類	検出器画素数	測定波長帯	温度分解能	フレームレート
SC7500	InSb アレイセンサ	320 x 256	1.5 – 5.1 μm	0.025 K	383 frames/s
SC7200	InSb アレイセンサ	320 x 256	1.5 – 5.1 μm	0.025 K	178 frames/s
Phoenix	InSb アレイセンサ	320 x 256	1.5 – 5.0 μm	0.025 K	113 frames/s
H2640	マイクロボロメータ	640 x 480	8 – 13 μm	0.060 K	30 frames/s
R300	マイクロボロメータ	320 x 240	8 – 13 μm	0.030 K	60 frames/s
Tau 2	マイクロボロメータ	640 x 512	7.5 – 13.5 μm	0.050 K	30 frames/s

2.3 熱弾性応力測定

(1) 熱弾性効果

気体を断熱膨張させるとその温度は下降し、断熱圧縮すればその温度は上昇することはよく知られている。固体の場合にも弾性範囲内で応力を急激に作用させ、変形が断熱的に行われる場合には、同様の温度変化が見られる。すなわち、固体に引張応力が作用すればその応力変動に比例した温度降下が、逆に圧縮応力が作用すればその応力変動に比例した温度上昇が生じる。この現象は熱弾性効果 (thermoelastic effect) と呼ばれ、その発見は 1830 年の Weber による鋼線を用いた実験にさかのぼる。その後 1853 年に可逆的熱弾性効果の理論が Kelvin [2-6], [2-7] によって定式化され、熱弾性効果に基づく応力測定技術の基礎となっている。

Kelvin の理論によれば、熱弾性効果による温度変動 ΔT は、等方均質な線形弾性体に対して次式で与えられる。

$$\Delta T = \frac{T}{\rho C_\varepsilon} \sum_{i,j} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} \Delta \varepsilon_{ij} + \frac{Q}{\rho C_\varepsilon} \quad (2.9)$$

この式で、 T は絶対温度、 ρ は密度、 C_ε は定ひずみの比熱、 σ_{ij} は応力テンソル、 ε_{ij} はひずみテンソル、 Q は外部からの熱量である。弾性範囲内で周期的変動荷重を与える時は断熱状態であるため、上式において

$$Q = 0 \quad (2.10)$$

となるので、熱弾性効果における応力とひずみの関係から ΔT は、次式のようになる。

$$\Delta T = -kT\Delta\sigma \quad (2.11)$$

ただし、 $\Delta\sigma$ は主応力和の変化量である。 k は熱弾性係数であり、材料の定圧比熱 C_p 、線膨張係数 α および密度 ρ を用いて、次式で与えられる。

$$k = \frac{\alpha}{\rho C_p} \quad (2.12)$$

これらの式を変形すると、主応力和の変化量 $\Delta\sigma$ は次式のようにになる。

$$\Delta\sigma = -\frac{\Delta T}{kT} \quad (2.13)$$

したがって、作用応力の変動に伴う熱弾性効果により物体に生じる温度変化 ΔT を、赤外線サーモグラフィを用いて計測することにより、主応力和の変動 $\Delta\sigma$ を計測できる。赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性効果に基づく応力計測は、非破壊検査技術の一つの手法として、産業界をはじめとし様々な分野への応用が進展している[2-9]～[2-12]。

(2) 赤外線応力測定装置

前項では、応力の変動に伴い発生する熱弾性温度変動 ΔT を計測することにより、主応力和の変化 $\Delta\sigma$ が求められることを示した。しかしながら、熱弾性温度変動は極めて小さく、そのオーダーは mK 単位である。たとえば、主応力和の変動 $\Delta\sigma$ を 10[MPa]とした場合、温度変動 ΔT の値は室温において軟鋼では約 0.01[K]、アルミニウムの場合約 0.026[K]である。これに対して、赤外線サーモグラフィによる温度測定におけるノイズ等価温度差 (NETD 値)は、最新の赤外線センサを搭載したサーモグラフィを用いた場合でも、0.020[K]程度の値である。したがって、赤外線センサで測定された信号をそのまま温度に換算しただけでは、応力測定に十分な分解能および精度を得ることができない。

一般に赤外線サーモグラフィを用いた応力測定においては、図 2.5 に示すように、被測定物への負荷荷重として繰返し変動荷重を与え、荷重信号に同期して変動する温度変動だけをロックインアンプと同様の相関信号処理により赤外線センサの出力から抽出し、さらにこれを荷重サイクルごとに積算し平均化することにより、高分解能かつ高精度な温度計測を行っている。現在、この種の装置として市販されている機種はいくつかあり、搭載されている赤外線センサ、画像構成方法、相関信号処理法など、各装置でそれぞれの特徴がある。熱弾性温度変動の計測に関しては、いずれも温度分解能 0.001[K]、軟鋼の応力測定における分解能として約 1[MPa]程度を達成している。

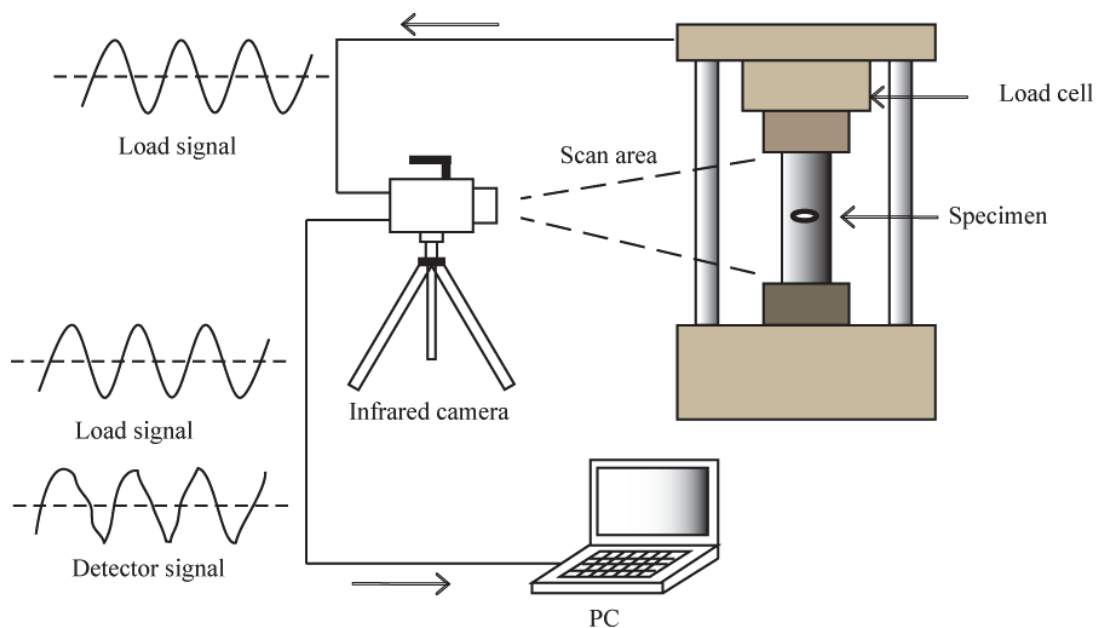


図 2.5 熱弾性応力測定システム

(3) 相関信号処理

前述したように、熱弾性温度変動は極めて微小であるため、赤外線サーモグラフィによりその温度変動を計測することが困難となる場合がある。そこで、測定対象物の赤外線応力変動と応力変動同期する参照信号との相関信号処理を行うロックイン赤外線サーモグラフィが開発されてきた。ロックイン処理のための参照信号を外部入力する手法およびその装置を、本論文では従来型ロックイン処理および従来型ロックインサーモグラフィと呼ぶことにする。本節では、まず従来型ロックイン赤外線サーモグラフィで用いられている相関信号処理法について述べる。

前項の図 2.5 に示したように、赤外線サーモグラフィによって時系列の赤外線強度分布データ、および繰返し負荷荷重に関する参照信号が計測される。ここで、参照信号はひずみゲージやロードセルなどから取得され、物体に負荷されている周期的変動荷重と同じ周波数を持ったアナログ電気信号である。入力された参照信号は、PC でのポスト処理によって、同じ周波数を持つ \sin 波および \cos 波のデジタルデータ $\text{Sin}(t)$ および $\text{Cos}(t)$ が生成される。

その後、赤外線計測で得られたあるピクセルの時系列赤外線強度データに関するデジタル信号 $I(t)$ と参照信号である $\text{Sin}(t)$ および $\text{Cos}(t)$ の間で、次式の演算処理が行われる。

$$\Delta V_{\text{Sin}} = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N V(t) \cdot \text{Sin}(t) \quad (2.14)$$

$$\Delta V_{\text{Cos}} = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N V(t) \cdot \text{Cos}(t) \quad (2.15)$$

ただし、 ΔV_{Sin} は参照信号に同期する赤外線強度の変動振幅を表し、 ΔV_{Cos} は参照信号と 90 度位相がずれた cos 波に同期する赤外線強度の変動振幅を表す。 N は信号処理における取り込みフレーム数である。 また、式(2.14)および式(2.15)から分かるように、本手法では、得られた赤外線計測データと相似波形である sin 波および cos 波を用いて積算することにより、高精度な変動振幅を求めているため、荷重変動波形は正弦波に限られる。

熱弾性温度変動が、荷重変動の位相と完全に一致している場合には、 ΔV_{Cos} は 0 となる。熱拡散などの影響により、熱弾性温度変動が、荷重変動の位相からずれる場合には、 ΔV_{Cos} の成分が現れる。この場合には、次式により温度変動の振幅の絶対値 ΔV および位相遅れ α を求めることができる。

$$\Delta V = \sqrt{\Delta V_{\text{Sin}}^2 + \Delta V_{\text{Cos}}^2} \quad (2.16)$$

$$\tan \alpha = -\frac{\Delta V_{\text{Cos}}}{\Delta V_{\text{Sin}}} \quad (2.17)$$

この信号処理が、計測される赤外線画像の全画素にわたって行われ、 ΔV_{Sin} 、 ΔV_{Cos} 、 ΔV および α の分布画像が、赤外線応力測定結果として画像表示される。このような時系列画像データの信号処理により、結果的に高周波のランダムノイズが軽減されるため、赤外線温度計測の分解能は **mK** オーダーにまで改善され、熱弾性効果による微小な温度変動計測が可能になる。

従来法におけるロックイン処理での外部参照信号の使用は、実験室での計測には有効であったが、実構造物への熱弾性応力測定法の適用においては以下の問題があった。まず、遠隔から大型鋼構造物の応力集中部や亀裂の検出を行う場合には、ロックイン計測に必要な参照信号を引出すことが不可能な場合が多く、仮に参照信号を引き出せたとしても、遠隔非接触測定が可能な赤外線サーモグラフィの利点を活かすことができない。また、従来型のロックイン処理は、実構造物で想定される実働荷重下の不規則に変動する荷重に対応できるものではなかった。

そこで、外部参照信号を必要としない自己相関ロックイン法が、阪上らにより開発された[2-14]。自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィでは、赤外線計測画像内の一部領域の温度変動データから参照信号を自己生成し、すべての領域の温度変動データとロックイン

相関処理を行う。これにより、外部からの参照信号が不要で、任意負荷に対応した遠隔からのロックイン計測が可能となる。

ここで部材に任意荷重が作用していると仮定し、その間の熱弾性温度変動エリアを赤外線サーモグラフィにより連続撮影を行う場合を考える。フレーム番号 n に対する、ある選択領域における応力に比例して変化する赤外線強度値 f_n を参照信号とし、これを用いて視野内のある点での赤外線強度値 y_n の近似値 Y_n を次のように表すことができる。

$$Y_n = a + bf_n \quad (2.18)$$

ここで、 a および b は近似式の係数である。 Y_n と y_n の差の二乗和 Δ^2 を求める。

$$\Delta^2 = \sum_{n=1}^N (y_n - Y_n)^2 \quad (2.19)$$

Δ^2 の値が最小であれば、 Y_n は y_n の近似であるといえる。 Δ^2 を b で偏微分し、その値を 0 にするという条件から、係数 b の値を以下のように求めることができる。

$$b = \frac{\begin{vmatrix} N & \sum y_n \\ \sum f_n & \sum y_n f_n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \sum f_n \\ \sum f_n & \sum (f_n)^2 \end{vmatrix}} = \frac{N \sum y_n f_n - \sum y_n \sum f_n}{N \sum (f_n)^2 - (\sum f_n)^2} \quad (2.20)$$

ここで係数 b は、画像内で自己生成した、応力変動に関する参照信号 f_n に対する相対的な比を表している。したがって係数 b を計測された全画素にわたって求めることにより、参照信号取得点に対する相対応力分布を求めることができる。

2.4 赤外線応力測定の問題点

(1) 赤外線強度から応力値への較正

赤外線サーモグラフィにより計測される物理量は、応力そのものではなく、熱弾性効果による測定物表面の温度変化量に起因する赤外線放射エネルギーの変化量である。したがって、主応力の変化量 $\Delta\sigma$ を定量的に求めるためには、計測された赤外線放射エネルギーの変化量と $\Delta\sigma$ の間の較正関係を求めておくことが必要である。この較正方法には、一般に次の二つの方法が用いられている。

一つ目の方法は、被測定物と同じ材料の試験片を用意し、試験片にとり付けたひずみゲージから求められる応力値をもとに、赤外線放射エネルギーの変化量と主応力の変化量

$\Delta\sigma$ の較正関係を得る手法である。この手法では、材料ごとに較正実験を行わなければならないが、赤外線強度値から温度値への較正は必要としない。

もう一つの方法は、材料の熱弾性係数が既知であるとして、式(2.13)を用いて温度変化量を主応力和の変化量 $\Delta\sigma$ に変換する手法である。この手法では、材料ごとの較正実験を行う必要はないが、温度が既知な基準熱源（黒体炉）を用いた温度較正実験により、赤外線強度値と温度の関係性を求めておく必要がある。

(2) エッジ効果

赤外線応力計測を行う際には、変動荷重負荷時の変位に注意が必要である。被測定物の剛体変位あるいは変形が大きい場合には、各画素は被測定物の異なる場所の熱弾性温度変動を計測することになる。また、被測定物が変動荷重により、図 2.6(a)の状態から図 2.6(b)の状態に変位している場合を考えると、赤外線サーモグラフィの計測画素の中には、画素(B, 2), (C, 2), (B, 4), および(C, 4)のように、変位により被測定物表面の赤外線放射量と背景放射との差を計測してしまうものが生じ、輪郭部分では大きな測定誤差が生じる。これは、エッジ効果と呼ばれている。拡大光学系を用いて、小さな領域の応力分布を計測する際には、このエッジ効果の影響はより大きくなる。

実験室レベルの計測では、負荷荷重を小さくすることにより変位による計測誤差を軽減することが可能であるが、実構造物ではやむをえず変位が発生してしまう場合も多い。このような場合には、変位による計測位置のずれを何らかの手段で補正する必要がある。補正方法には、被測定物の変位に対して計測視野を追従させるような光学的補正手法、および計測後の画像データをもとに画像処理法により画像内の変位を補正する手法がある。

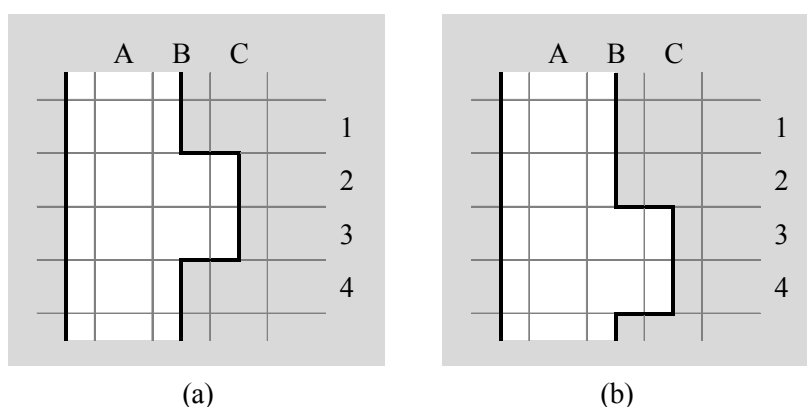


図 2.6 変位による計測位置のずれイメージ図

(3) 位置補正によるエッジ効果の低減

本研究では、位置補正法のひとつである SSD-2 次元パラボラフィッティングを用いて画像内の変位を補正することによるエッジ効果の低減を行った。SSD-2 次元パラボラフィッティングによる位置補正は、画像内の変位が剛体移動のみであることを仮定した処理方法である。繰返し荷重下における試験片に対して、赤外線計測で得られた時系列画像内における変位は、主に繰返し荷重試験機による剛体移動が支配的であるため、SSD-2 次元パラボラフィッティングは本実験に適した位置補正法であると考えられる。以下に本手法について説明する。

SSD-2 次元パラボラフィッティングは、ピクセル精度の変位計測のために行うパターンマッチングによって、ピクセル間隔で離散的に得られた差の 2 乗和 SSD (Square Sum of Differences) を放物線にあてはめることにより、参照画像に対する被補正画像の変位をサブピクセルレベルで推定する手法である。参照画像と被補正画像の各画素の輝度値をそれぞれ $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$ とし、その間の変位 (dx, dy) に対する SSD を次式で定義する。

$$D(dx, dy) = \sum_{x, y \in W} (I_1(x, y) - I_2(x + dx, y + dy))^2 \quad (2.21)$$

ここで W は SSD を計算する注目領域 (subset) を表している。次に、 $D(dx, dy)$ を最小とする $(dx, dy) = (i, j)$ (整数値) を求め、さらにその (i, j) と隣接した各 4 点における SSD, すなわち $D(i-1, j)$, $D(i, j-1)$, $D(i+1, j)$, $D(i, j+1)$ を求める。図 2.7 に示すように (i, j) の近傍では $D(dx, dy)$ の分布が二次方程式 $D_p(dx, dy)$ で仮定できるものとするれば、 $D_p(dx, dy)$ を最小とする (dx, dy) を変位の推定値とすることができる。ここで、 $D_p(dx, dy)$ は以下のように示されるものとする。

$$\begin{aligned} D_p(dx, dy) &= a_0 dx^2 + a_1 dx + a_2 dy^2 + a_3 dy + a_4 \\ &= a_0 \left(dx + \frac{a_1}{a_0} \right)^2 + a_2 \left(dy + \frac{a_3}{a_2} \right)^2 + c \end{aligned} \quad (2.22)$$

c c : constant

ここで $D(i, j)$, $D(i-1, j)$, $D(i, j-1)$, $D(i+1, j)$, $D(i, j+1)$ を次式に代入し、係数 $a_k (k=0, 1, 2, 3, 4)$ を算出する。

$$S \cdot A = D \quad (2.23)$$

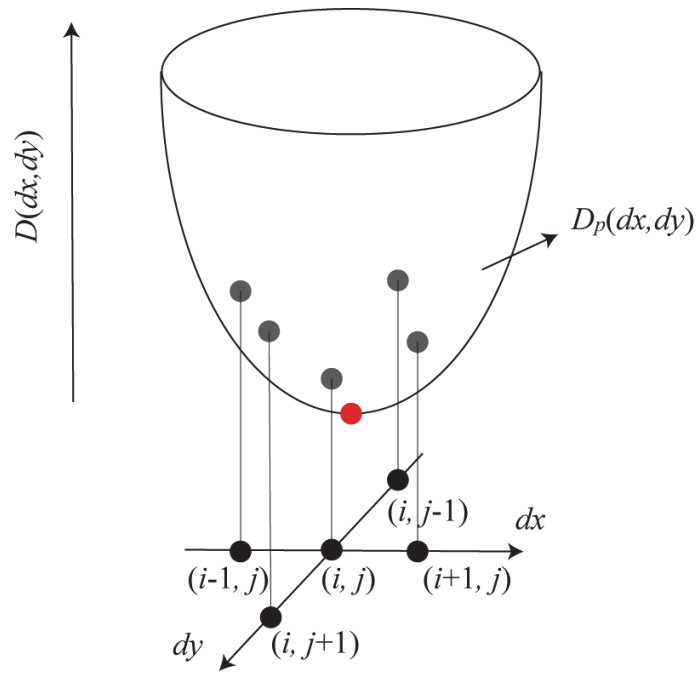


図 2.7 SSD-2 次元パラボラフィッティング

ただし,

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} (i-1)^2 & j^2 & (i-1) & j & 1 \\ i^2 & (i-1)^2 & i & (i-1) & 1 \\ (i+1)^2 & j^2 & (i+1) & j & 1 \\ i^2 & (i+1)^2 & i & (i+1) & 1 \\ i^2 & j^2 & i & j & 1 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} D(i-1, j) \\ D(i, j-1) \\ D(i+1, j) \\ D(i, j+1) \\ D(i, j) \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

である。上記のプロセスにより、式(2.19)をもとに移動推定量

$$\begin{pmatrix} -\frac{a_1}{a_0}, \frac{a_3}{a_2} \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

を求めることができる。これを、フレーム毎に計算することにより、基準画像に対する各画像の変位量を求めることができ、それを補正することでエッジ効果の低減を行うことができる。

2.5 結言

本章では、赤外線の基本事項、赤外線サーモグラフィの基礎、および赤外線応力測定法について述べた。また、赤外線応力計測における高精度化のための、位置補正によるエッジ効果低減方法について述べた。

第2章 参考文献

- [2-1] William Herschel, Investigation of the powers of the prismatic colours to heat and illuminate objects. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, p.255-326, 1800
- [2-2] <http://www.mod.go.jp/nda/obaradai/boudaitimes/btms200809/ogasawara/oga200809.htm>
- [2-3] 久野治義, 赤外線工学, コロナ社, 1994.
- [2-4] 赤外線技術協会編: 赤外線工学—基礎と応用—, オーム社, 1991.
- [2-5] 日本非破壊検査協会: 赤外線サーモグラフィ試験 II 2012, 2012.11.
- [2-6] 非破壊評価特別研究委員会: 赤外線サーモグラフィによる設備診断非破壊評価ハンドブック, 非破壊検査協会, 2003.
- [2-7] W.Thomson (Lord Kelvin) : On the Dynamical Theory of Heat, Tans. Roy. Soc. Vol.20, pp.261-283, 1853.
- [2-8] W.Thomson (Lord Kelvin) : On the Thermoelastic, thermomagnetic Pyroelectric Properties of matter, Phil. Mag. , Vol.5, pp.4-27, 1878.
- [2-9] Greene RJ, Patterson EA, Rowlands RE. Thermoelastic stress analysis. In: Springer handbook of experimental solid mechanics. LLC New York: Springer Science + Business Media; 2008. p. 743–67.
- [2-10] Dulieu-Barton JM, Stanley P. Development and applications of thermoelastic stress analysis. J. Strain Anal Eng Des 1998;33:93–104.
- [2-11] Dulieu-Barton JM. Introduction to thermoelastic stress analysis. Strain 1999;35:35–9.
- [2-12] Pitarresi G, Patterson EA. A review of the general theory of thermoelastic stress analysis. J. Strain Anal Eng Des 2003;38:405–17.
- [2-13] Dulieu-Barton, J. M. and Stanley, P. (1998) Development and applications of thermoelastic stress analysis. J. Strain Analysis Eng. Des., 33(2), 93–104.
- [2-14] 阪上隆英, 西村隆, 久保司郎, ほか: 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔非破壊検査技術の開発 (第1報 溶接試験片を用いた基礎的検討), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.72, No.724, pp.1860-1867, 2006.

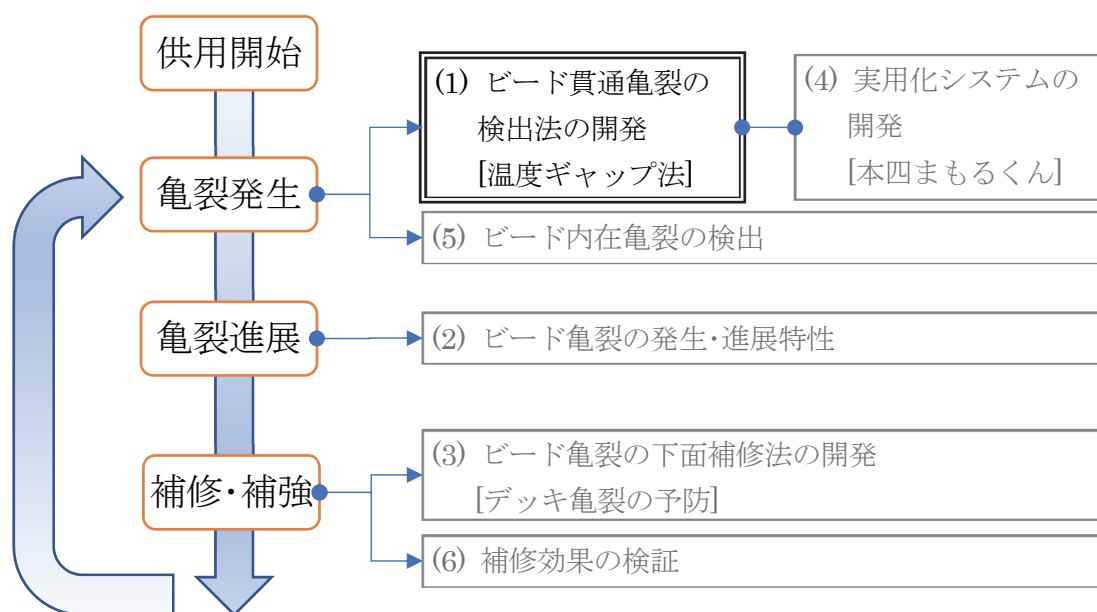
第3章

赤外線サーモグラフィを用いたビード貫通亀裂検出法の開発

Uリブにより補剛された鋼床版において、デッキプレート-Uリブ間の溶接部に発生する疲労亀裂が数多く検出されている。一般的な亀裂検出方法は、はじめに目視点検により塗膜割れ、特に塗装割れ部から滲み出した錆汁の検知を行う。次に、図面等により構造ディテールや輪荷重位置を確認し、疲労亀裂の可能性があれば非破壊検査による亀裂の確認を行う。非破壊検査を行う上では、塗膜を剥ぐ必要があることなどから近接用の足場等が必要なことが多い。更には、目視点検において塗膜割れや錆汁の発生段階で発見される亀裂は、長さが数十 cm に達するケースもある。疲労亀裂は、補修が軽微な短い段階での検出が望ましいものの、現状の点検手法では早期発見が難しい状況にある。

以上のような現状を踏まえ、本研究では、遠隔から非破壊かつ非接触で亀裂の検出が可能な検査法を、赤外線サーモグラフィを用いた温度分布計測技術に基づき開発した。本章では、新たな亀裂の検査法の開発のために実施した各種実験の内容と、結果から得られた計測装置に必要な性能、計測環境条件について述べる。

本章で述べるビード貫通亀裂の検出法の開発は、緒論で述べた疲労のメンテナンスサイクルにおける、下図の2重枠で示すところに位置づけられる。



3.1 緒言

近年、道路橋の鋼床版における疲労亀裂の発生・進展が数多く報告されている[3-1]～[3-3]。例えばデッキプレートに発生するタイプの亀裂では、最悪の場合、路面陥没を引き起こし、大事故につながる恐れがある。疲労亀裂は、早期に発見することが補修の軽減につながるが、現状の目視点検だけでは、亀裂の短い早期に発見することが難しい。疲労亀裂の発見を確実にするためには、図面から輪荷重位置の確認や詳細な構造ディテール等を評価したうえで、目視点検を実施する。目視点検では、塗膜割れや錆の発生を発見し、疲労亀裂が発生している疑いがあれば、亀裂の有無を磁気（磁粉）探傷や超音波探傷などで調査し、疲労亀裂を特定する必要がある。しかしながら、磁気探傷や超音波探傷などの検査は、塗膜の除去を必要とするため近接作業用の足場設置・撤去が必要になるケースが多い。このため検査効率は悪く、塗膜割れや錆汁の発生した段階では、すでに亀裂長さが数十 cm に達しているケースも見受けられる[3-4]、[3-5]。

一方で、Makita らは、デッキプレートと U リブ溶接部に対して、デッキ亀裂とビード亀裂の検出に対応したフェイズドアレイ超音波探傷法を用いた検査法の開発を進めている[3-6]。また、首都高速道路株式会社などでは、セミオートマチック超音波探傷装置 (SAUT) による亀裂検出も実施されている[3-7]。しかしながら、現状では、超音波探傷を用いた検査のスピードは遅く、近接するための足場が必要となるケースもあり、対象とする溶接線を検査するためのコスト的な課題が大きいと推察される。

本研究では、鋼床版に対する非破壊検査技術として、赤外線サーモグラフィを用いた温度分布計測に基づき、塗膜を除去することなく遠隔から非破壊で、高効率・高精度に疲労亀裂を検出できる新しい検査法を開発した。

開発した手法は、鋼床版の亀裂として発生数が多く報告されている、デッキプレートー U リブ溶接部に発生するビード貫通亀裂を対象としている。本亀裂検出法の原理を、図 3.1 に示す。路面が日射を受け、舗装が温められるとデッキプレートから U リブへと熱が伝わる。溶接部に亀裂が存在する場合は、亀裂部の微小な空隙により熱伝導が阻害され、亀裂部では健全部と比較し大きな温度差 (以下「温度ギャップ」と呼ぶことにする) が生じる。この温度ギャップを、赤外線サーモグラフィを用いて検出することにより、鋼製部材の亀裂を検出する。以下、本手法を「温度ギャップ法」と呼ぶ。

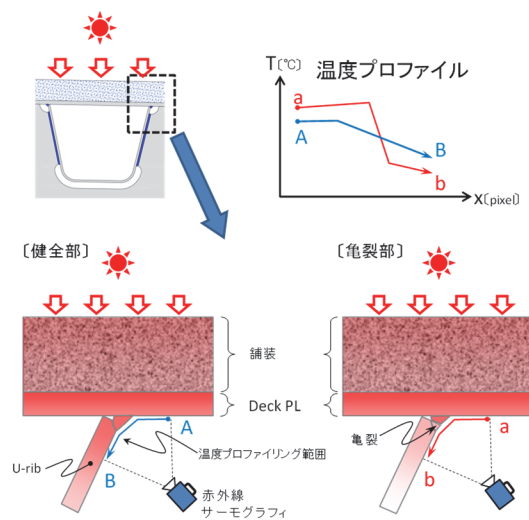


図 3.1 温度ギャップ法の原理

温度ギャップ法の開発は、疲労亀裂が発見されている鋼床版箱桁橋を調査対象橋梁として、いくつかの実験等を行った。各実験は、検出が可能な限界亀裂長さ、気温や日照などの環境条件、および検出計測装置の性能や撮影距離などの計測条件の各条件と亀裂検出性との関係を明らかにするために行った。以下に実施した実験とその目的を示す。

(1) 基礎実験

基礎実験は、温度ギャップ法による亀裂検出の可否と実用性を実橋で確認するため2ケースの実験を行った。一つ目のケースは、赤外線計測に最も理想的な環境となる条件で、亀裂長さが異なる3つ(42, 160 および 410mm)の既知亀裂を計測した。二つ目のケースは、長さ 228mm の既知亀裂に対し、実橋の点検時と同じ防食塗装がある状態で計測した。なお、実際の点検では、赤外線サーモグラフィを溶接線（橋軸）方向に動かしながら撮影することを想定しているため、二つ目のケースは、250mm/s の速度で移動させながら計測した。基礎実験は、これら二つのケースにより亀裂検出が可能かどうかを確認した。

(2) 亀裂検出性能の確認実験

亀裂長さ、計測時期（季節）、計測時刻、撮影解像度（1画素(px)当たりの撮影対象物の長さ：mm/px）が亀裂検出性に及ぼす影響を確認するため、防食塗装が施されている5つの既知亀裂に対し、温度ギャップ計測を行った。実験では、赤外線サーモグラフィを移動させながら計測し、亀裂検出に必要なデッキプレートとUリブの温度差、撮影解像度を確認した。

(3) 未検査橋梁での計測

ビード貫通亀裂の有無が不明な未検査橋梁で、温度ギャップ法を適用し、亀裂検出性能を確認した。（本計測を以下では「未検査橋梁での計測」と呼ぶ。）

(4) 計測時期の検討

鋼床版に温度センサーを設置し、年間を通じた温度観測を行い、日照時間や外気温、路温等を評価し、温度ギャップ法の適用可能な時期（季節）に関する検討を行った。

3.2 調査橋梁の諸元および実験方法

基礎実験、検出性能の確認実験および未検査橋梁での計測を行った橋梁は、図 3.2 に示す鋼床版箱桁橋である。実験では、張出床版部に設置されている自走式桁下面作業車（以下「作業車」という）に赤外線サーモグラフィを搭載し、走行車線の輪荷重直下のデッキプレート—Uリブ間の溶接線に対し、温度ギャップ計測を行った。

各実験・計測に用いた赤外線サーモグラフィを表 3.1 に示す。検出の可否と実用性を探る基礎実験では、高感度かつ応答速度が速い冷却型の InSb アレイセンサを搭載した赤外線サーモグラフィを使用した。後述のように、基礎実験における温度ギャップ計測の結果、導入のハードルが低い安価なマイクロボロメータ赤外線サーモグラフィでも、亀裂検出が可能であることが確認できた。このため、基礎実験の以降に行った、検出性能の確認実験および未検査橋梁での計測では、感度が低く応答速度が遅いが、冷却型より安価な熱型非冷却マイクロボロメータセンサを搭載した赤外線サーモグラフィを使用した。

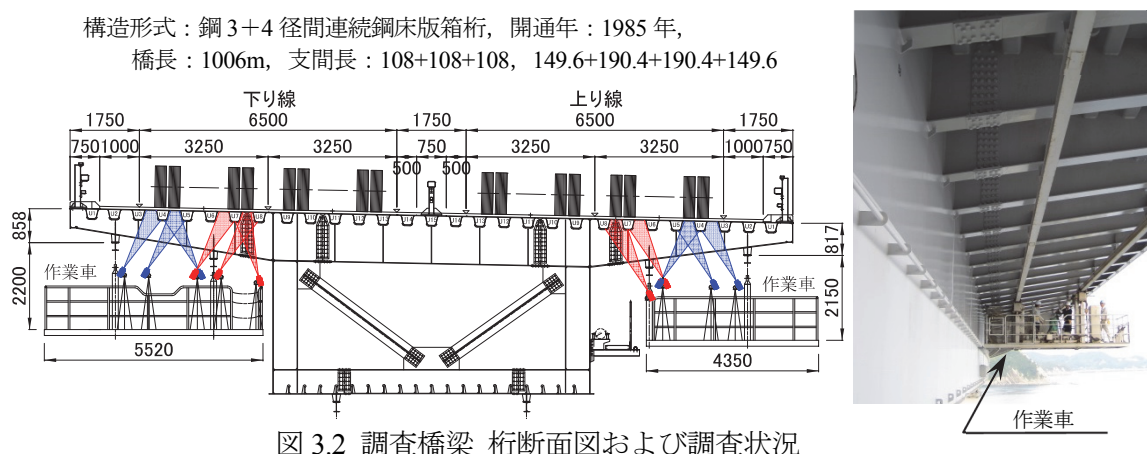


表 3.1 赤外線サーモグラフィの仕様

機種	検出器の種類	検出器画素数	測定波長帯	温度分解能	フレームレート
A	InSb アレイセンサ	320 x 240	2.5 - 5.1 μm	0.025 K	380 frames/s
B	マイクロボロメータ	640 x 480	8 - 13 μm	0.060 K	30 frames/s
C	マイクロボロメータ	320 x 240	8 - 13 μm	0.030 K	60 frames/s

3.3 基礎実験

温度ギャップ法による亀裂検出の可否と実用性を探るため、実橋で赤外線サーモグラフィによる計測を行い、亀裂を特定できる明確な温度分布データが得られるかどうかを調べるため基礎的な実験を行った。実験に使用した赤外線サーモグラフィは、InSb アレイセンサを搭載した機種である。

(1) 計測条件

実験は、赤外線計測に最も理想的なケース 1 と、実橋の点検時と同じ防食塗装があり、計測装置を移動しながらの条件となるケース 2 の試験を行った。各ケースの計測パラメータを表 3.2 に示す。

ケース 1 では、調査橋梁に発生している複数の亀裂を対象とし、計測部位には、赤外線放射率改善のための黒色塗料（放射率：0.98）[3-7]を薄く塗布した。また、赤外線サーモグラフィを静止状態として計測した。計測時期は、路温が比較的高くなる 9 月に行った。

ケース 2 では、228mm の亀裂に対し計測を行った。亀裂部は、防食塗膜が除去してあったため、点検時と同じ条件になるように防食塗装を施し、黒色塗料は塗布せずに計測を行った。また、計測は、図 3.2 に示す作業車に赤外線サーモグラフィを搭載し、作業車を移動しながら溶接ビードを連続的に測定した。計測時期（季節）は、路温があまり上昇しない 11 月に行った。

表 3.2 各ケースの計測パラメータ

パラメータ	亀裂長さ	計測部位の表面状態	装置の移動速度	計測時期
Case 1	42,160,410mm	鋼面へ黒色塗料（赤外線放射率改善）	静止	9 月
Case 2	228mm	実塗装	250mm/s	11 月

(2) 実験結果

各ケースの試験結果を図 3.3, 3.4 に、計測時の路温等の経時変化を図 3.5 に示す。これらより以下の事を確認した。

ケース 1：亀裂長さ 160, 410mm では、1健全部と2亀裂部に明確な温度勾配の違いがある。42mm の亀裂でも僅かの差であるが温度勾配の違いが確認できる。

ケース 2：鋼材表面に防食塗装（約 400 μ m）があっても、健全部と亀裂部に明確な温度勾配の違いがある。また、移動しながらでも、赤外線画像上のブレもなく亀裂部の温度差が明確に現れている。

基礎実験の結果、亀裂部における熱伝導障害による温度ギャップと、健全部の連続的な温度勾配の違いから亀裂の有無を検出可能であることが分かった。

亀裂長さが最も短いケース 1 の 42mm の亀裂の温度差は、140～155px 間の健全部で 0.2K、亀裂部で 0.4K であった。この温度差であれば、一般に非破壊検査に使用されているマイクロボロメータ赤外線カメラの温度分解能が 0.03～0.06K であることから、マイクロボロメータ赤外線サーモグラフィでも亀裂検出が十分可能である。

次に、マイクロボロメータ赤外線カメラを使用した移動計測の可否について検討する。ケース 2 の計測で設定した撮影移動速度（250mm/s）とフレームレート（30～60frames/s）をもとに、1frame あたりの移動距離を算出すると 4～8mm となる。その間の温度画像は、カメラの移動距離の分の温度が平均化されたものとなるが、実験での最小の亀裂長さが 42mm であるため、亀裂検出性に及ぼす温度画像の平均化の影響は小さいと想定される。また、撮影の移動方向は溶接線方向であり、亀裂も溶接線方向であるため、移動しながらの撮影でも、亀裂を挟んだデッキプレート側と U リブ側の画素間での温度の平均化は発生しない。そのため、亀裂を挟んだ画素間の温度差は、静止計測に近い温度画像や温度プロフィールが得られると想定される。移動しながらの計測による亀裂検出は、十分検出可能と判断できる。

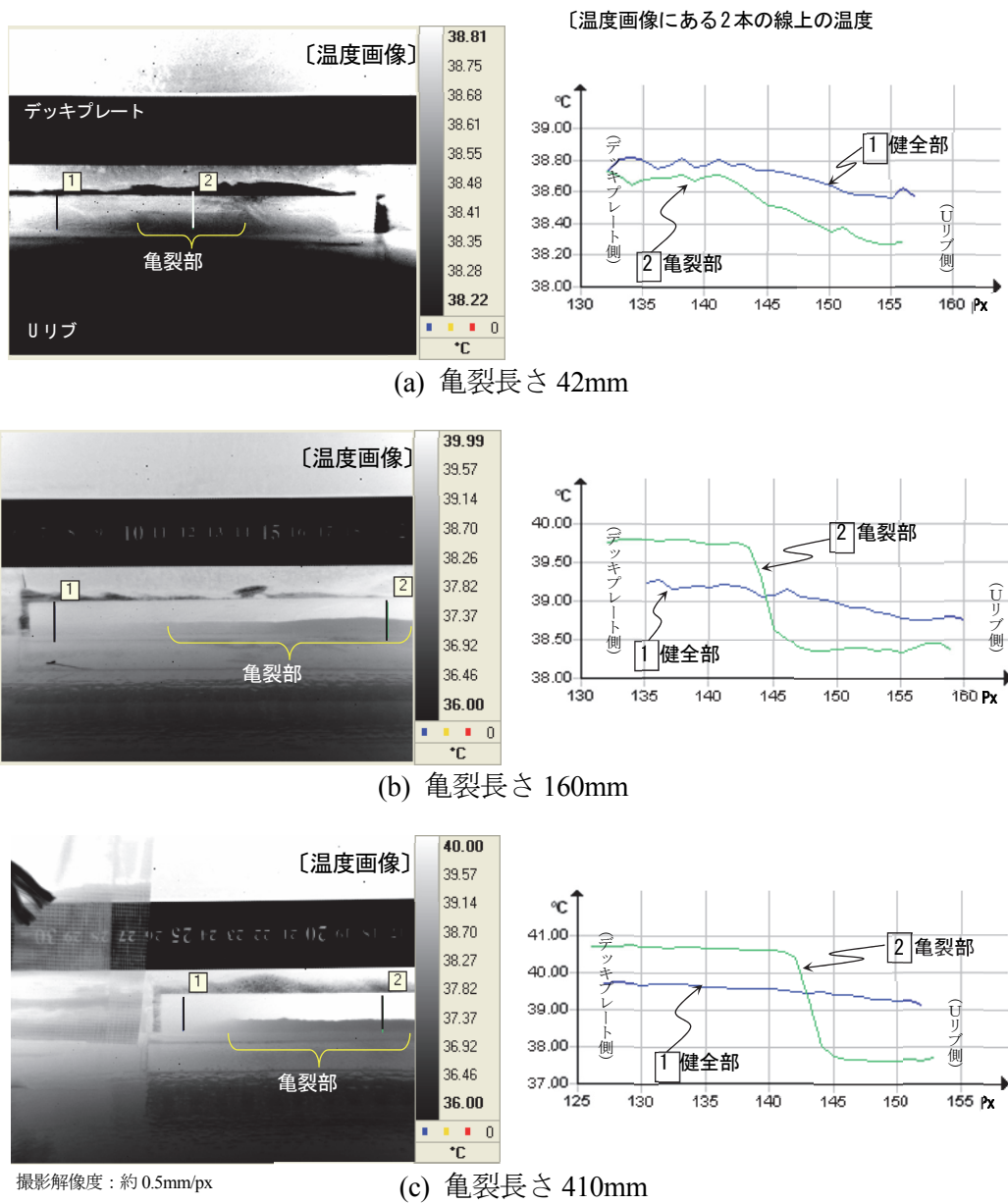
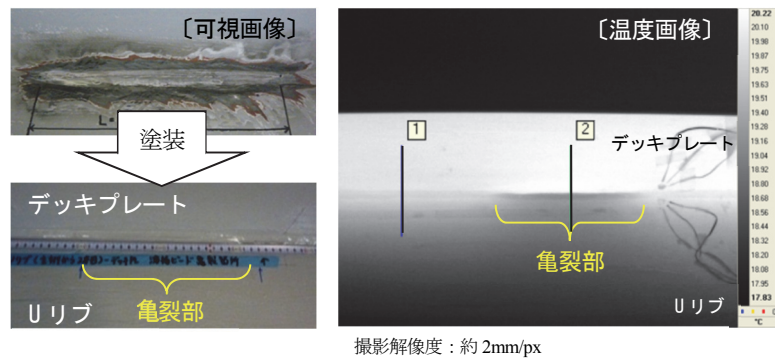


図 3.3 長さが異なる 3 つの亀裂の実験結果 (ケース 1)



〔温度画像にある2本の線上の温度グラフ〕

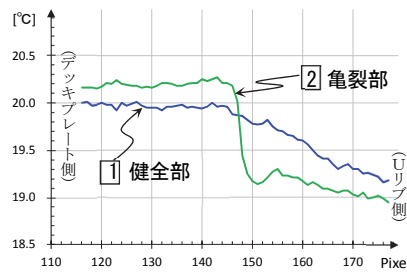


図 3.4 実塗装を施した長さ 228mm の亀裂の実験結果(ケース 2)

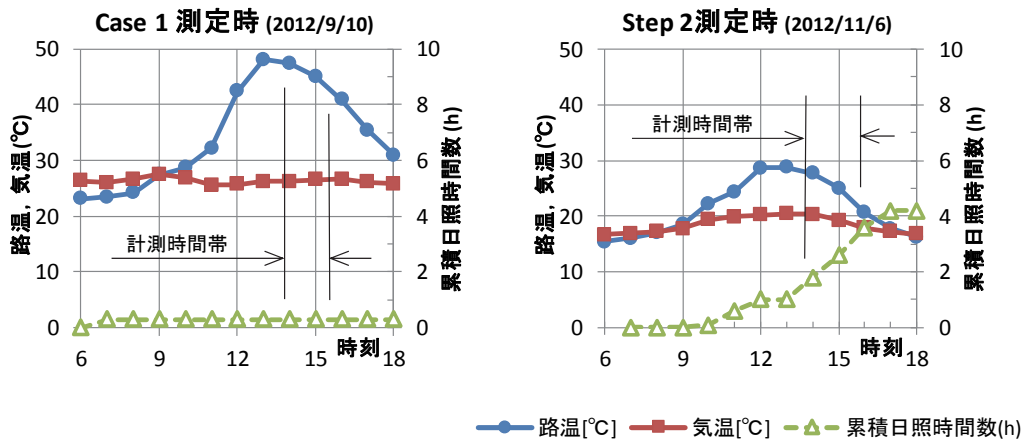


図 3.5 基礎実験時の気象条件

3.4 亀裂検出性能の確認実験

亀裂長さ，撮影解像度および計測時期・計測時刻が，亀裂の検出性能に及ぼす影響の検証を行った。

(1) 計測条件

計測に使用した赤外線サーモグラフィは，表 3.1 に示すマイクロボロメータ赤外線サーモグラフィの 2 機種である。計測方法は，作業車に赤外線サーモグラフィを搭載し，作業車を 250mm/s の速度で移動させながら，撮影速度 15frames/s で連続的に，既に長さが判明している亀裂の計測を行った。また，亀裂の上には，実橋と同じ防食塗装がある状態で計測を行っている。本計測では，亀裂検出に影響すると考えられる，亀裂長さ，撮影解像度のパラメータ毎に，計測時期（季節）・計測時刻を変えて計測を行った。計測した温度画像からの亀裂有無の判定は，得られた温度画像のコントラストの強弱を目視により判別することとした。

1) 亀裂長さ・撮影解像度

長さ 42～160 mm の 5 つの既に長さが判明している亀裂を計測対象とした。また，撮影距離と赤外線サーモグラフィのオプションレンズの組み合わせにより，撮影解像度を，1mm/px，2mm/px および 4mm/px の 4 種類に設定した。計測の際に設定した，各亀裂 No.，亀裂長さおよび撮影解像度の組み合わせを表 3.3 に示す。

表 3.3 計測する亀裂長さと撮影解像度

亀裂 No.	亀裂長さ	撮影解像度(mm/px)		
		1 mm/px	2 mm/px	4 mm/px
No.1	42 mm	○	○	—
No.2	160 mm	○	○	—
No.3	52 mm	○	○	—
No.4	60 mm	—	○	○
No.5	60 mm	—	○	○

○印：計測亀裂

2) 計測時期・計測時刻

計測時期（季節）は，夏（2013 年 9 月 11 日），秋（2013 年 11 月 6 日），冬（2014 年 2 月 4 日）の 3 つの時期に設定した。各日とも，10 時～16 時の間に複数回計測を実施した。

(2) 計測結果

計測結果の一例を図 3.6 に、計測時の気象条件を図 3.7 にそれぞれ示す。図 3.6 の温度画像および温度ラインプロファイルより、亀裂部において熱伝導の阻害による温度ギャップが現れていることがわかる。亀裂長さ、撮影解像度および計測時期・計測時刻を変えた計測結果に基づき、亀裂検出の可否について整理した結果を図 3.8 に示す。図の横軸は、デッキプレート—U リブ間の温度差（以下「 ΔT 」という。）を示している。 ΔT は、亀裂部近傍の健全部で、溶接ビード中心よりビード直交方向へそれぞれ 25mm の位置に存在する 2 点の間の温度差とした。

ΔT は、夏計測：0.9～2.5K、秋計測：0.3～1.0K、冬計測：0～0.6K と季節により大きく変化する。また、計測時刻は、正午から 14 時が大きく、10 時あるいは 16 時に近くなれば小さくなる。

亀裂長さの違いによる検出性能は、概ね亀裂長さが大きいほど亀裂検出性が高くなり、基礎実験と同様の結果となった。しかしながら、図 3.8(b) の同じ 60mm の亀裂長さである亀裂 No.4 および 5 に対しては、検出可能な ΔT が 1.8K と 0.5K と大きく異なる結果が得られている。この違いは、亀裂面の密着具合、あるいはビード貫通亀裂がルート部より発生し、3 次元的形状を有する[3-9]ことによる、ビード表面に現れていないルート側の亀裂進展具合が影響していると考えられる。疲労亀裂が 3 次元的形状を有する場合の亀裂検出性については、後の第 7 章において詳細に検討する。

撮影解像度と ΔT が検出性能に与える影響を、亀裂 No.1 (42mm) の場合を対象に比較する。撮影解像度を 1mm/px とした場合には、 ΔT が約 0.5K 以上あれば亀裂検出が概ね可能である（図 3.8(a)）。一方、撮影解像度を 2mm/px とした場合には、 ΔT が約 1.0K で概ね検出できたケースもあったが、 ΔT が約 1.5K と大きくても検出できないケースもあった（図 3.8(b)）。これは、亀裂幅が 1mm にも満たないため、撮影解像度が 2, 4mm/px と粗くなると、亀裂部の温度差が平均化され温度ギャップが小さくなり、亀裂検出性が悪くなったことが考えられる。

この結果、撮影解像度および ΔT は、温度ギャップ法による亀裂検出性に大きく影響を与えることがわかり、亀裂長さ 40mm 程度を想定した場合には、撮影解像度が 1mm/px 程度、かつ、 ΔT が 0.5K 以上必要（より確実な検出のためには 0.7K 以上が望ましい）と考えられる。

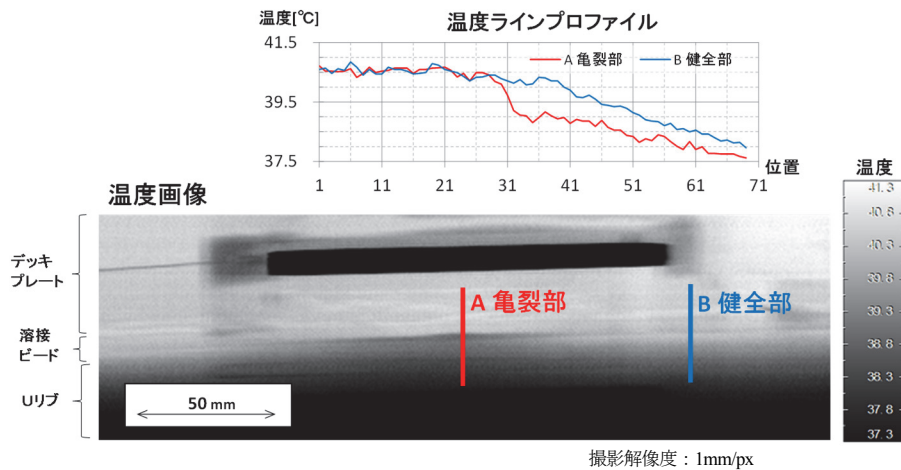


図 3.6 赤外線計測の一例(亀裂 No.2, 夏計測, 計測時刻: 正午)

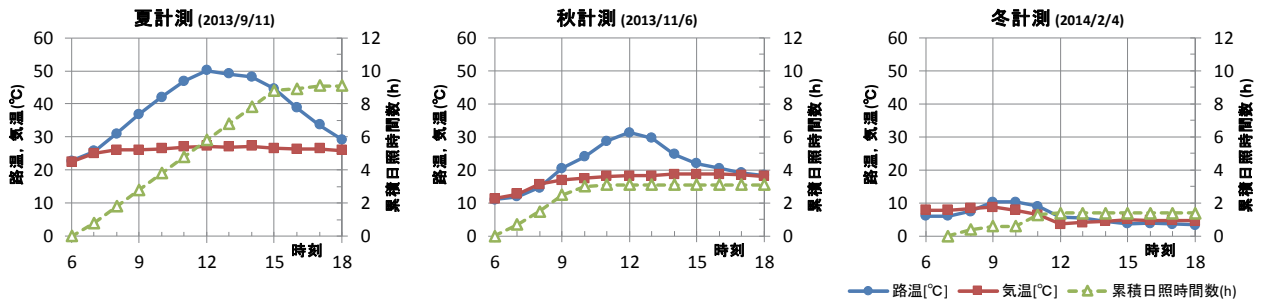


図 3.7 検出性能確認実験時の気象条件

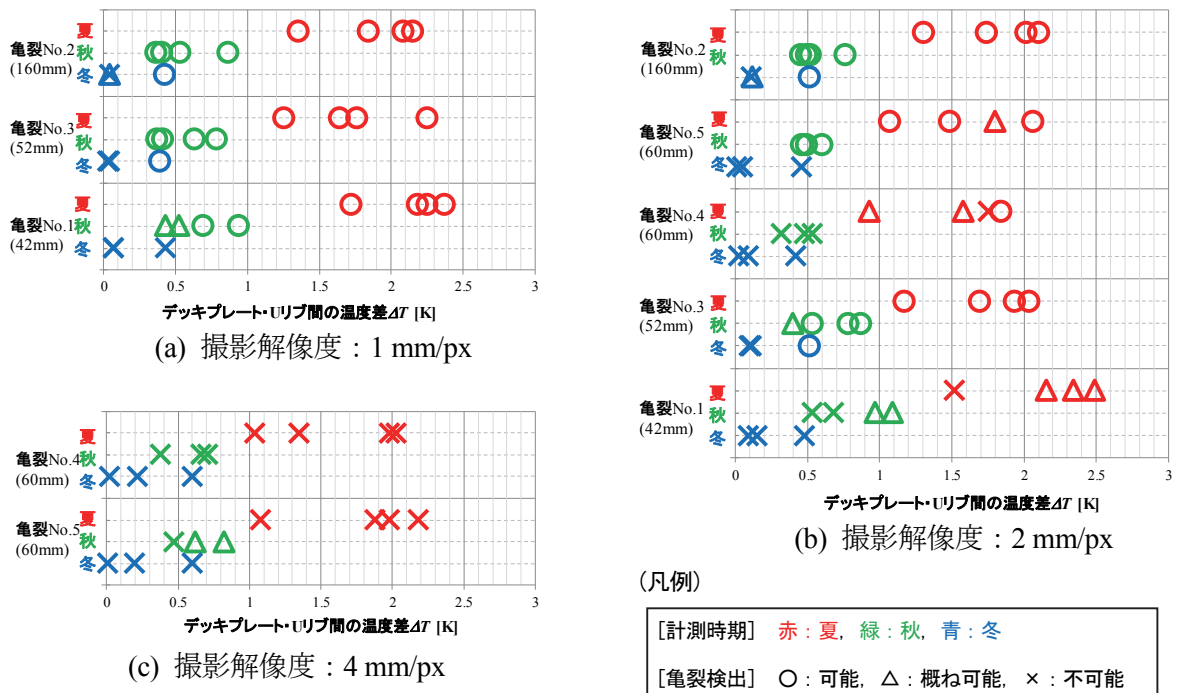


図 3.8 検出性能確認実験の結果

3.5 未検査橋梁での計測

未検査橋梁での計測は、亀裂が確認されていない未検査の橋梁の溶接線を計測することで、温度ギャップ法の有効性や効率性を確認する実験である。検査対象は、鋼床版の輪荷重直下となるビード貫通亀裂の有無が不明な溶接線とした。延べ約 10km の溶接線を 3 台の赤外線サーモグラフィを用い、11 月の 1.5 日間で計測を行った。計測時の路面温度等の気象状況を図 3.9 に示す。

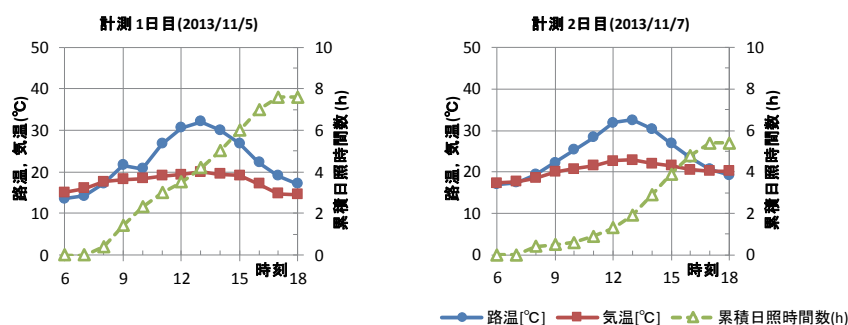


図 3.9 未検査橋梁での計測時の気象条件

(1) 計測条件

計測にはマイクロボロメータセンサを搭載した赤外線サーモグラフィを使用した。撮影解像度は、前述の実験において良好な亀裂検出性が認められた 1mm/px とした。計測においては、作業車に赤外線サーモグラフィを搭載し、作業車を 250mm/s の速度で移動させながら、デッキプレート-Uリブ間の溶接線を連続的に計測した。温度分布からの亀裂判定は、前節の場合と同様に、計測で得られた温度画像からの目視判別と温度プロファイルをもとに行った。また、判定によって亀裂が疑われた箇所は、後日、目視調査及び磁気(磁粉)探傷試験(以下「MT」という)によって亀裂有無の確認を行った。

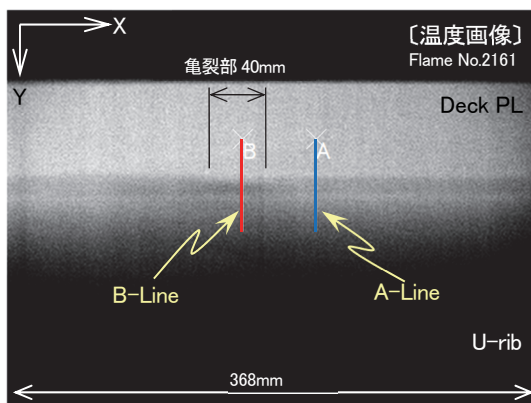
(2) 計測結果

未検査橋梁での計測で発見された亀裂長さ 40mm と 80mm の温度画像と温度プロファイルを図 3.10 に、MT による亀裂指示模様の写真を図 3.11 に、図 3.10 に示す亀裂部前後の温度画像を図 3.12 にそれぞれ示す。

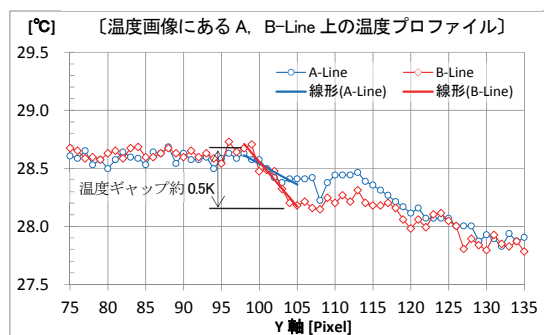
図 3.10(a)に示した 40mm の疲労亀裂は、静止画として切り出した温度画像では不明瞭で見落とす可能性が高いものの、温度画像を連続再生(動画)で見ると、亀裂部特有の温度分布(Uリブ側の低温部)が再生中に画面内を移動(図 3.12(a)では、Frame No.が進むにつれて亀裂部特有の低温部が右から左へ移動)していくため、亀裂の存在を認識できた。温度プロファイルにおける温度勾配(Y軸: 98-105px 間)は、健全部と亀裂部で異なり、亀

裂部に現れた温度ギャップは約 0.5K であった。また、本亀裂は、塗膜割れがないため目視調査では発見できない亀裂であった。

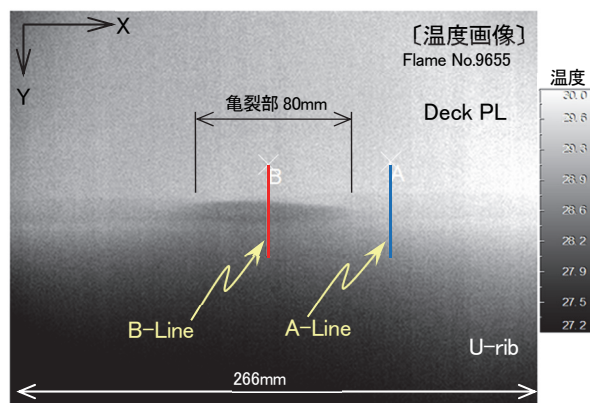
図 3.10(b)に示した 80mm の疲労亀裂の場合には、温度画像で明瞭に亀裂部のコントラストが現れている。温度プロファイル上の温度勾配 (Y 軸 : 109-119px 間) の違いも健全部と亀裂部で明確に現れ、亀裂部に現れた温度ギャップは約 0.9K であった。亀裂部は、塗膜割れが確認されたが、割れは約 30mm と短く、また割れ幅も小さく錆汁はみられなかった。さらに、数十 cm 離れた位置からの目視調査では塗膜割れが認められたものの、1~2m 程度以上離れると塗膜割れの検出が困難であった。また、図 3.10(a)に示した温度画像からは、亀裂は長さが 80mm で、途中で屈曲した表面形状を持っていることが判定・推察された。一方、MT による亀裂指示模様を図 3.11 に示すが、こちらも途中で屈曲しており図 3.10(b)からの判定結果と良く一致していた。



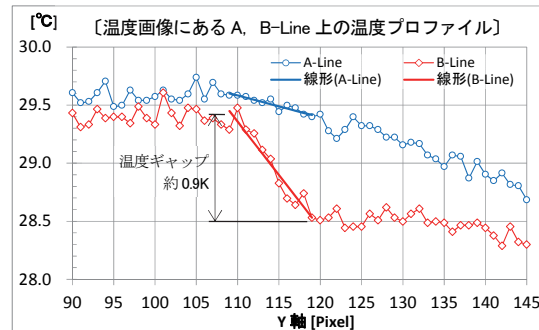
撮影解像度：1.15 mm/px



(a) 亀裂長さ 40mm の温度画像等

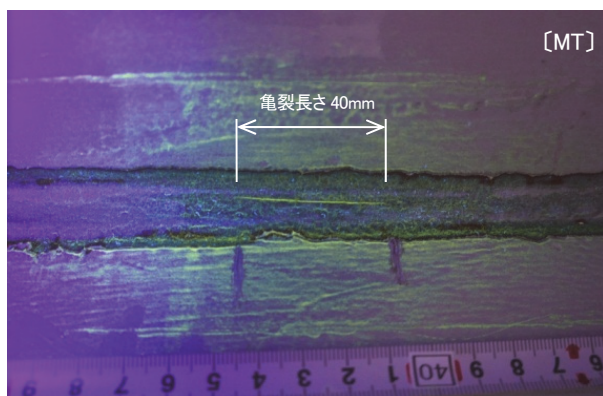


撮影解像度：0.83 mm/px

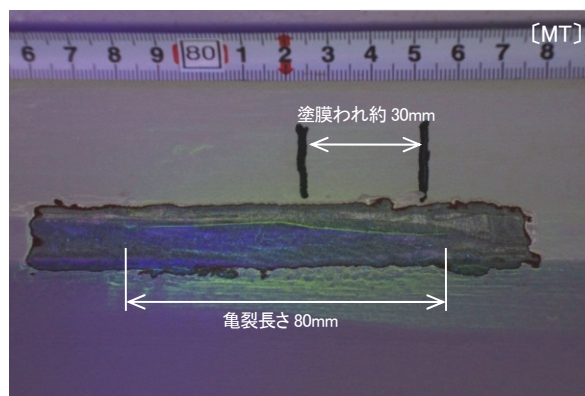


(b) 亀裂長さ 80mm の温度画像等

図 3.10 検出した亀裂の温度画像と温度プロファイル

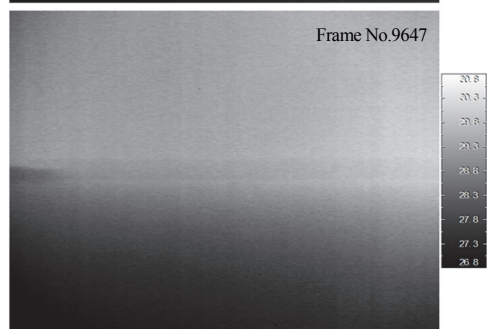
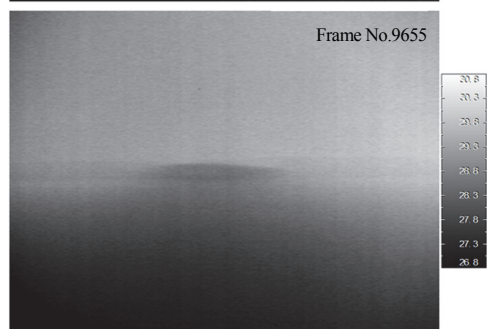
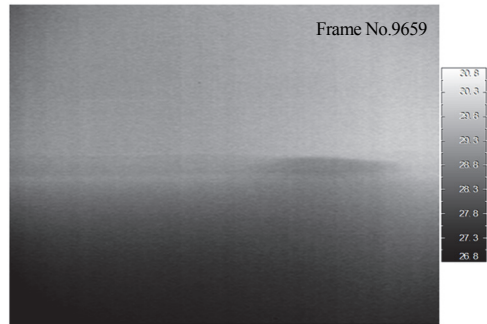
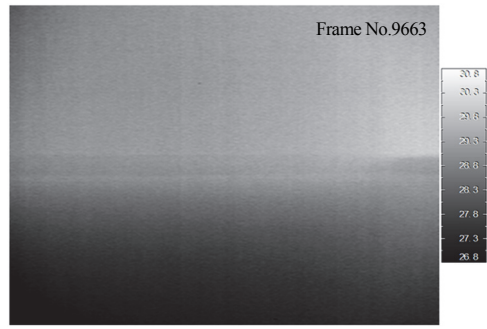
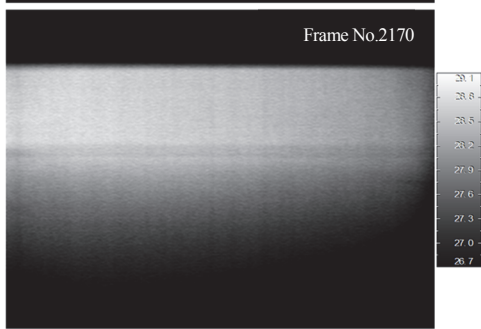
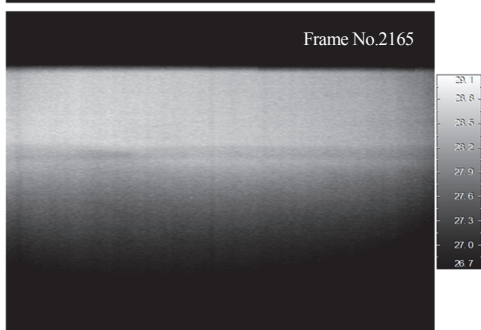
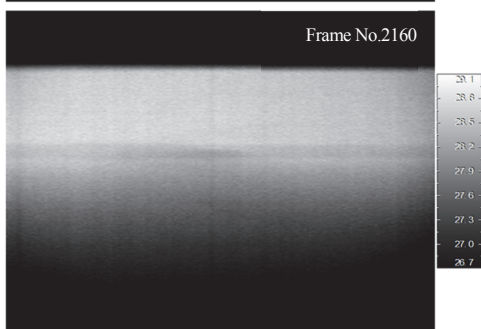
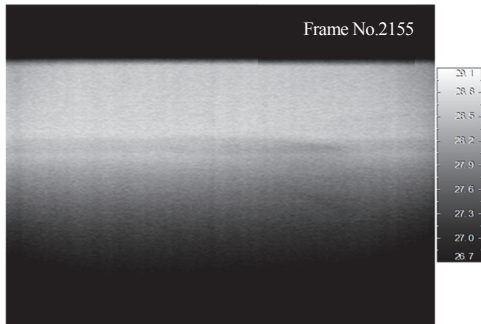
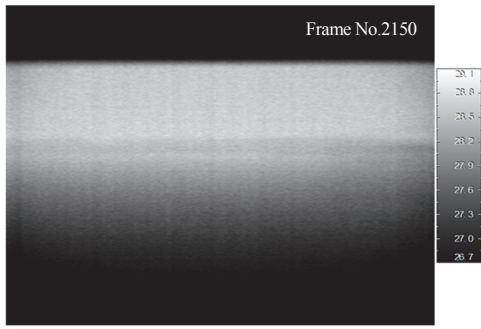


(a) 亀裂長さ 40mm の亀裂指示模様



(b) 亀裂長さ 80mm の亀裂指示模様

図 3.11 検出した亀裂の MT 結果



(a) 亀裂長さ 40mm の温度画像

(b) 亀裂長さ 80mm の温度画像

図 3.12 亀裂部前後の温度画像

3.6 計測時期の検討

温度ギャップ法の適用には、前節の実験によってデッキプレート—Uリブ間に温度差が生じなければ亀裂検出はできないことがわかった。このため、検査前に温度差が発生していることを確認することが必要となる。そこで、調査橋梁に隣接する橋梁の鋼床版において1年間の温度計測を行った。計測結果については、外気温や路温、太陽高度、日照などの環境と、鋼床版の温度分布の関係を整理し、温度ギャップ法適用に必要な計測条件について考察した。

(1) 鋼床版温度計測と参照した気象条件

鋼床版の温度計測を行った期間は、2013年6月18日から2014年6月25日までの約1年間である。鋼床版に設置した温度センサーは、記憶装置と電源が内蔵されたコンパクトなものを使用し、塗膜を剥がずに接着した。設置場所は、実験や計測を行った調査橋梁に隣接する海峡部吊橋の鋼床版である。計測間隔は、30min 又は 60min 分とした。温度センサー設置位置を図 3.13 に示す。

鋼床版の温度と相関すると考えられるパラメータとして、路温、気温、日照時間、および太陽高度のデータも収集し比較を行った。路温は、これまでの実験を行った調査橋梁に隣接する海峡部吊橋の中央径間中央の交通管理用の温度計のデータを、気温は、路温計測橋梁の直近に位置するインターチェンジに設置された温度計のデータを使用した。日照時間は、徳島地方気象台 過去観測データ[3-10]を、日の出・日の入り・太陽高度は、国立天文台 天文情報センター 暦計算室の公開データ[3-11]の「徳島」を使用した。

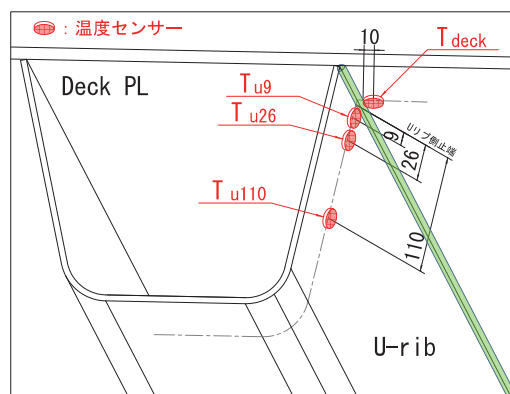


図 3.13 温度センサー設置位置

(2) 検討結果

路温、気温、鋼床版の計測温度などのデータは、日射の有無によって大きく影響を受けるため、日照時間 5h/日以上の日を抽出し、月別に平均した。5h/日以上としたのは、現場

適用するにあたって、20 日/月程度（梅雨時期や冬季を除き）の稼働率が確保できる時間数として設定した。表 3.4 に日照 5h/日以上の月別日数を示す。

表 3.4 日照 5h/日以上の月別日数(2009～2013 年平均)

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
日数	20.8	13.2	17.8	19.6	19.0	13.6	17.0	23.8	18.8	15.8	15.8	18.6

1) 鋼床版の温度分布と適用可能時期

デッキプレートとUリブ側溶接止端部からの各位置での月別日最大温度差の関係を図 3.14 に示す。溶接止端部からの距離と温度差は、相関があり線形的に変化している。また、月別に温度勾配が大きく異なる傾向を示した。

デッキプレートとUリブ側止端から 26mm の位置の、月別の日最大温度差 ($T_{deck} - T_{u26}$) を図 3.15 に示す。 $T_{deck} - T_{u26}$ は、 T_{u26} が ΔT のUリブ側計測位置（止端から 25mm）とほぼ同じであったこと、デッキプレートの温度は止端からの距離に関係なくほぼ一定であることから、 $T_{deck} - T_{u26}$ の温度差の傾向は ΔT と同等であると評価できる。

一方、前節において示した結果では、42mm の亀裂長さを検出する場合、デッキプレートとUリブの温度差 ΔT が 0.5K 以上必要で、0.7K 以上が望ましいとの結論を得ている。

これらより、温度ギャップ法の亀裂検出可能時期を評価すると、 $T_{deck} - T_{u26}$ が 0.5K 以上となる 3～10 月、より確実な検出が可能な計測を実施できる望ましい時期は、 $T_{deck} - T_{u26}$ が 0.7K 以上となる 3～9 月となる。なお、前節に示した未検査橋梁での計測においては、11 月に 40mm の亀裂検出が可能であった。しかしながら、この時には、朝夕にはデッキプレートとUリブの温度差が出にくい状況があったため、計測時間が昼間に制約された。よって、温度ギャップ法の適用時期として望ましい時期は、3～9 月の間であるといえる。

2) 鋼床版の温度差と気象条件

路温、気温、太陽高度の月別推移を図 3.16 に、鋼床版のデッキプレートとUリブの温度差 ($T_{deck} - T_{u26}$) との相関を図 3.17 にそれぞれ示す。温度ギャップ法の適用時期に影響する $T_{deck} - T_{u26}$ は、太陽高度との相関が高く、次いで路温、気温であった。他の地域で温度ギャップ法を適用する場合は、これらを参考に適用時期（季節）を設定する必要があると考えられる。

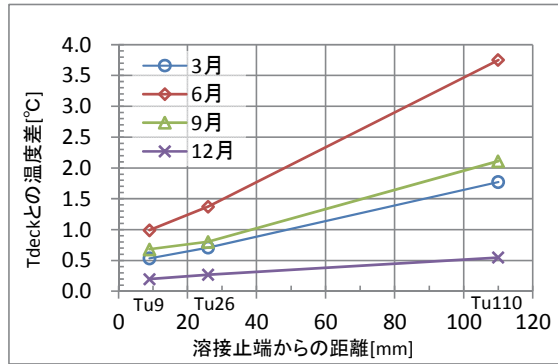


図 3.14 リブの温度勾配

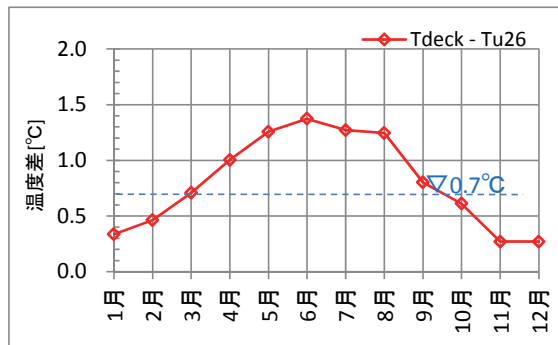


図 3.15 デッキプレートとUリブの温度差

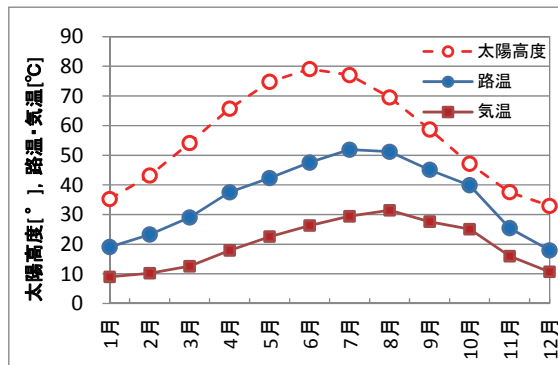


図 3.16 月別の太陽高度，路温，気温の推移

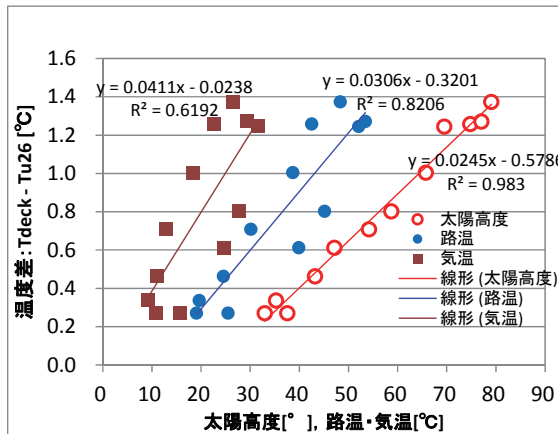


図 3.17 温度差との相関

3.7 ビード亀裂以外の温度ギャップ法による亀裂検出性の検討

前節までの温度ギャップ法の検討における対象亀裂は、デッキプレート-Uリブ間の溶接部に発生するビード亀裂である。一方で、第1章で述べたとおり、閉断面鋼床版では、いくつかのタイプの疲労亀裂が確認されている。ここでは、ビード亀裂以外の亀裂に対し、温度ギャップ法による検出の可能性について検討するものである。なお、検討では、前節で実施した温度計測箇所に加え、縦リブ-横リブ交差部の温度計測も実施しており、それらの計測データも合わせ、温度ギャップ法による亀裂検出の可能性の推定を行った。

(1) 温度計測位置

温度計測を行った位置は、図 3.13 に示す Uリブ支間部、および図 3.18 に示すデッキプレートと横リブと縦リブ (Uリブ) 交差部である。温度センサーの機種、設置条件、計測間隔は、前節と同じである。

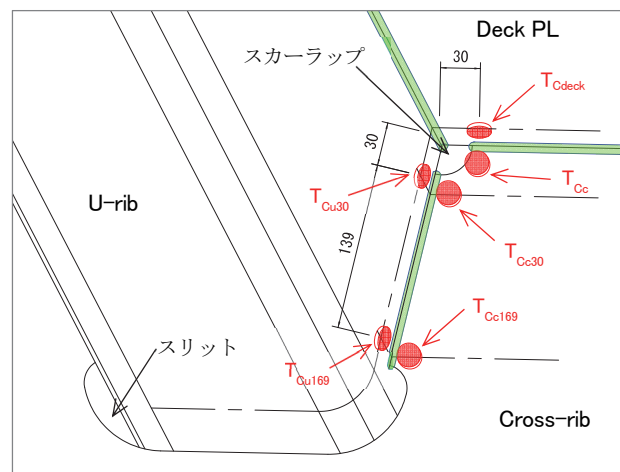


図 3.18 温度センサー設置位置(交差部)

(2) 温度計測結果

1) Uリブ支間部

Uリブ支間部のデッキプレート-Uリブ間の溶接線を跨ぐ月別の日最大温度差($T_{deck}-T_{u9}$)を図 3.19 に、Uリブ溶接止端からの温度センサー各位置での月別の日最大温度差の関係を図 3.14 に示す。図 3.19 からデッキプレート-Uリブ溶接線を跨ぐ温度差($T_{deck}-T_{u9}$)の最大値は6月の0.99K、最低値は12月の0.20Kである。図 3.14 からUリブ表面の3, 6, 9, 12月の各温度勾配は、それぞれ0.012, 0.028, 0.015, 0.003K/mmである。

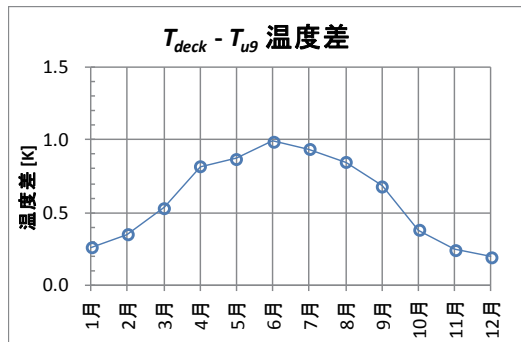


図 3.19 溶接を跨ぐ温度差

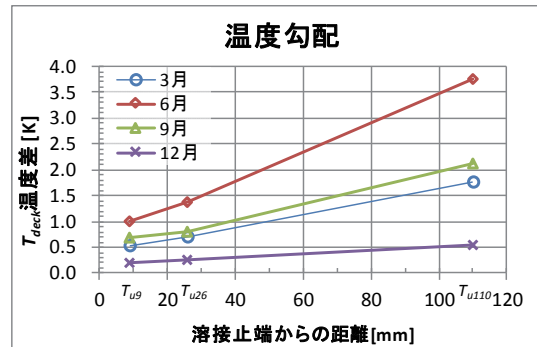
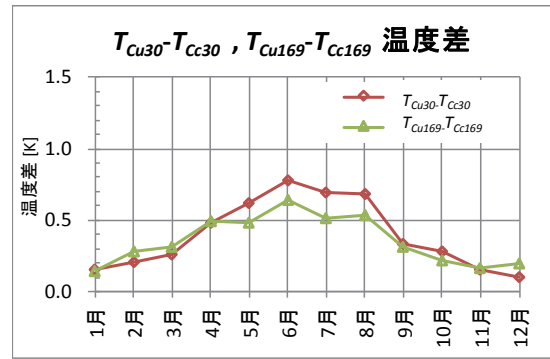
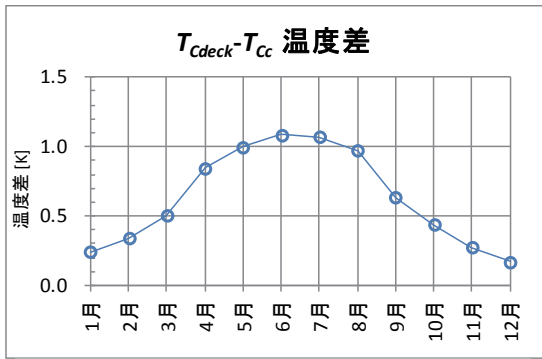


図 3.14 U リブの温度勾配(再掲)

2) 交差部

デッキプレートと横リブと縦リブ (U リブ) 交差部の溶接線を跨ぐ月別の日最大温度差 ($T_{Cdeck}-T_{Cc}$, $T_{Cu30}-T_{Cc30}$, $T_{Cu169}-T_{Cc169}$)を図 3.20 に、U リブー横リブ溶接に平行して設置している温度センサーの U リブ側と横リブ側それぞれの上下間 ($T_{Cu30}-T_{Cu169}$, $T_{Cc30}-T_{Cc169}$)の月別の温度勾配を図 3.21 にそれぞれ示す。図 3.20 から溶接線を跨ぐ温度差の最大値は、全て 6 月であり、デッキプレートと横リブ溶接線 ($T_{Cdeck}-T_{Cc}$)、U リブと横リブの溶接線の上段側 ($T_{Cu30}-T_{Cc30}$)および下段側 ($T_{Cu169}-T_{Cc169}$)で、それぞれ 1.09, 0.78, 0.64K である。また、温度差の最小値は、全て 12 月であり、それぞれ 0.17, 0.11, 0.19K である。図 3.21 から U リブおよび横リブの上下センサー間での 3, 6, 9, 12 月の各温度勾配は、U リブ側および横リブ側ともほぼ同じ値を示しており、それぞれ 0.010, 0.022, 0.013, 0.003K/mm である。温度勾配は、U リブ支間部と比較し、3~9 月では 20%程度小さい。

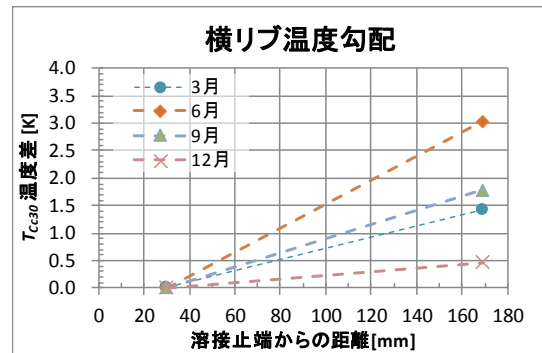
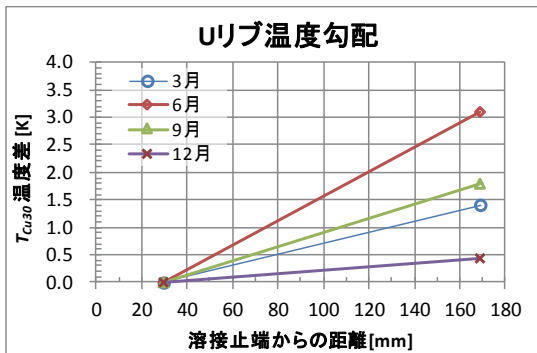
デッキプレートー横リブ溶接部の温度差 ($T_{Cdeck}-T_{Cc}$)は、U リブ支間部のデッキプレートーU リブ溶接部の温度差 ($T_{deck}-T_{u9}$)と同程度の温度差が発生していることがわかる。また、U リブー横リブ溶接部の温度差 ($T_{Cu30}-T_{Cc30}$, $T_{Cu169}-T_{Cc169}$)については、上下それぞれの位置で温度差が発生している。つまり、溶接を跨いで熱伝導が発生していることが推察され、スカーラップやスリット部から疲労亀裂が発生した場合には、亀裂により熱伝導の阻害、または熱伝導距離が変化し、亀裂を挟んだ両側では温度差が発生することが考えられる。次節では、これらの結果を踏まえ、鋼床版に発生する様々な亀裂タイプの検出の可能性を検討する。



(a) デッキプレートと横リブ間($T_{Cdeck}-T_{Cc}$)

(b) Uリブと横リブ間($T_{Cu}-T_{Cc}$)

図 3.20 溶接を跨ぐ温度差



(a) Uリブ温度勾配($T_{Cu30}-T_{Cu169}$)

(b) 横リブ温度勾配($T_{Cc30}-T_{Cc169}$)

図 3.21 温度勾配

(3) 温度ギャップ法での亀裂検出の可能性検討

ここでは、温度測定結果から閉断面鋼床版に発生する様々な亀裂タイプに対する温度ギャップ法による検出可能性を検討する。具体的には、温度勾配等を用い、亀裂が発生した場合、亀裂を挟んだ位置での熱伝導の経路が変化するため、距離の差による温度差を温度勾配から推定し検出の有無を検討する。なお、現時点では、閉断面鋼床版にビード貫通亀裂以外の亀裂がほぼないため、実橋による検証はできていない。今後、亀裂が発生した場合には、検証を行いたいと考えている。

1) 縦リブ(Uリブ)ー横リブ溶接部の亀裂

縦リブと横リブ交差部に発生する亀裂は、スカラップまわし溶接部から発生しUリブ側に進展する亀裂①-1 と横リブ側溶接止端に沿って進展する①-2、およびスリットまわし溶接部から発生しUリブ側に進展する亀裂②-1 と横リブ側に進展する②-2がある(図 3.21)。

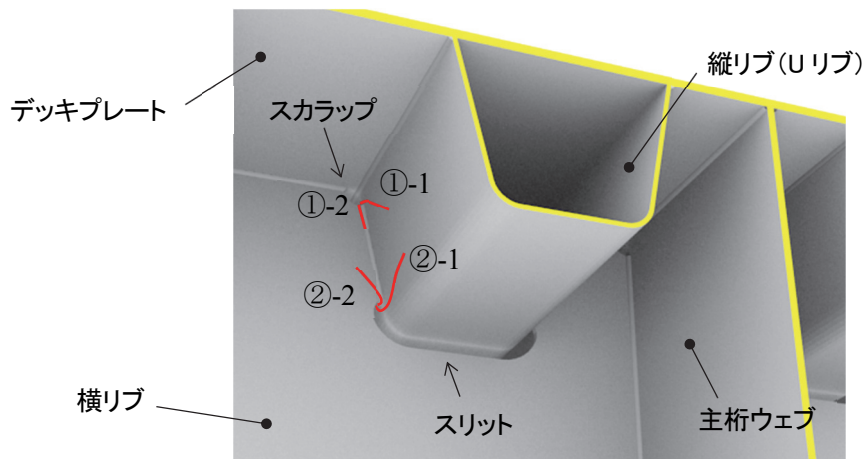


図 3.21 縦リブ-横リブ 溶接部の損傷タイプ(①, ②)

①-1 の亀裂が、下向き 45° 方向に進展していると仮定した場合、スカラップ位置での亀裂による熱伝導距離の差は、図 3.22 に示すとおりとなる。U リブの温度勾配は、6, 9 月それぞれで 0.022, 0.013K/mm である。これらから T_1 と T_2 の温度差が 0.50K となる亀裂長さは、6, 9 月それぞれで 13mm, 23mm となる。亀裂が 20mm 程度となれば、温度ギャップ法で検出可能であると推察される。

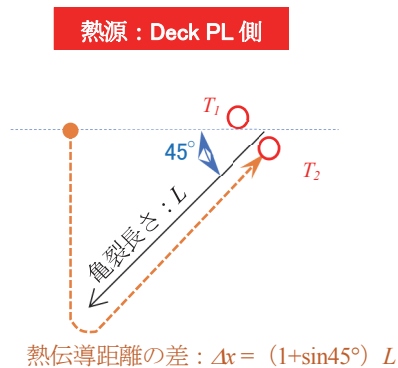


図 3.22 熱源からの熱伝導距離の差

①-2 の亀裂は、U リブ-横リブ溶接止端に沿って進展する亀裂であるため、亀裂が発生し貫通した場合は、図 3.20(b)に示す $T_{Cu30} - T_{Ce30}$ の温度差が亀裂を挟んで発生すると推察される。そのため温度ギャップ法による亀裂検出可能な温度差 0.5K となる 4~8 月には検出可能であると推察される。

②-1 と②-2 の亀裂が、上向き 45° 方向に進展していると仮定した場合、スリット位置での亀裂による熱伝導距離の差は、図 3.23 に示すとおりとなる。前節の温度測定結果から U リブと横リブの温度勾配は、いずれも同じで 6, 9 月それぞれで 0.022, 0.013K/mm である。これから T1 と T2 の温度差が 0.50K となる亀裂長さは、6, 9 月それぞれ 77mm, 131mm となる。亀裂が 80mm を超えれば温度ギャップ法で検出可能と推察される。

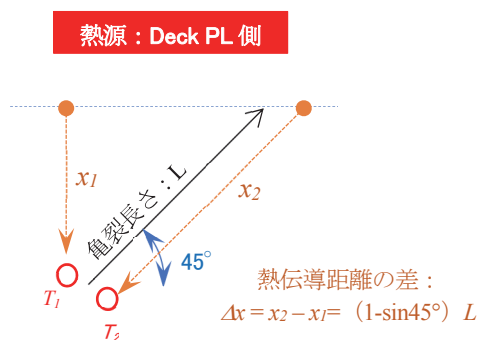


図 3.23 熱源からの熱伝導距離の差

2) デッキプレート-垂直補剛材溶接部の亀裂

デッキプレートと垂直補剛材の溶接部に発生する亀裂は、垂直補剛材上縁端部の垂直補剛材側溶接止端から発生し斜め上方へ溶接部を進展しデッキプレートへ至る③-1、デッキプレート側溶接仕端部から発生し橋軸方向へ進展する③-2、および垂直補剛材側溶接止端から発生し溶接止端を進展する③-3 がある（図 3.24）。

③-1 および③-3 の亀裂は、ビード亀裂と同様にデッキプレートから垂直補剛材への熱伝導を亀裂により阻害するため、温度ギャップ法による検出可能と推定される。③-2 の亀裂は、デッキプレート内で亀裂が発生進展するため、亀裂検出は不可能であると推察される。

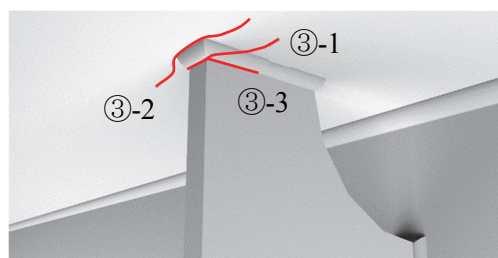


図 3.24 デッキプレート-垂直補剛材 溶接部の損傷タイプ(③)

3) デッキプレート-縦リブ (U リブ) 溶接部の亀裂

デッキプレートと縦リブ (U リブ) の溶接部に発生亀裂は、溶接ルート部から発生しビード表面方向へ進展するビード亀裂④-1、およびデッキ方向へ進展する貫通するデッキ貫通亀裂④-2がある (図 3.25) . ④-1 のビード亀裂は、3.6 までに述べた亀裂であり、検出可能である. ④-2 のデッキ亀裂は、ルート部からデッキ方向へ進展する亀裂であり、温度ギャップ法による検出は不可能である.

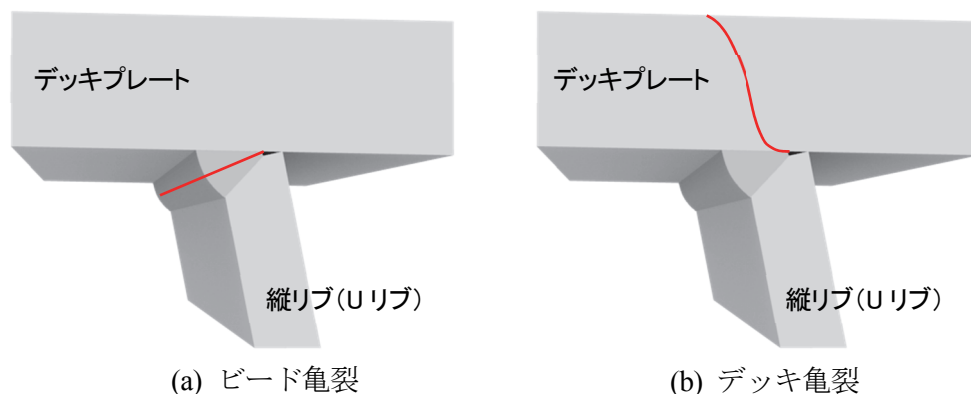


図 3.25 デッキプレート-縦リブ 溶接部の損傷タイプ(④)

4) 縦リブ (U リブ) 現場継ぎ手スカラップ部の溶接部の亀裂

縦リブ (U リブ) 現場継ぎ手スカラップ部の溶接部に発生する亀裂は、U リブ側溶接止端から発生し溶接止端を進展する⑤-1、およびデッキプレート側溶接止端から発生しデッキプレートを橋軸直角方向に進展する⑤-2がある (図 3.24) . ⑤-1 の亀裂は、ビード亀裂と同様にデッキプレートから U リブへの熱伝導を亀裂により阻害するため、温度ギャップ法による検出可能と推定される. ⑤-2 の亀裂は、デッキプレート内で亀裂が進展するため、亀裂検出は不可能であると推察される.

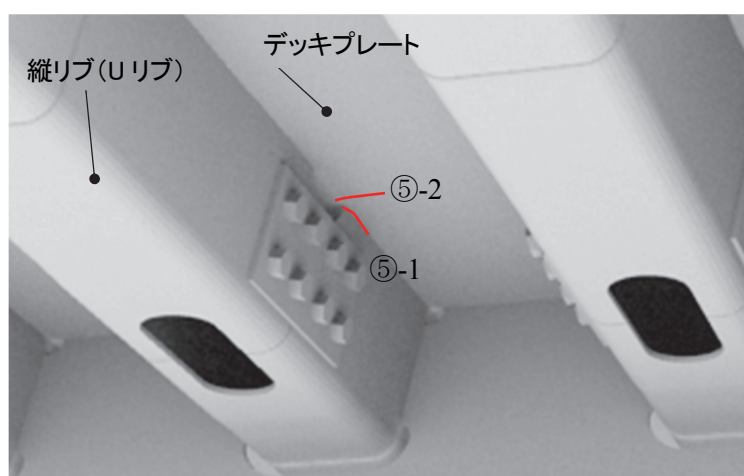


図 3.24 縦リブ(Uリブ)現場継ぎ手スカラップ部の溶接部の損傷タイプ

5) デッキプレート-横リブ溶接部の亀裂

デッキプレートと横リブの溶接部に発生する亀裂は、横リブ側溶接止端から発生し溶接止端を進展する⑥-1、およびデッキプレート側溶接止端から発生しデッキプレートを進展する⑥-2がある(図 3.25)。⑥-1の亀裂は、ビード亀裂と同様にデッキプレートからUリブへの熱伝導を亀裂により阻害するため、温度ギャップ法による検出可能と推定される。⑥-2の亀裂は、デッキプレート内で亀裂が進展するため、亀裂検出は不可能であると推察される。

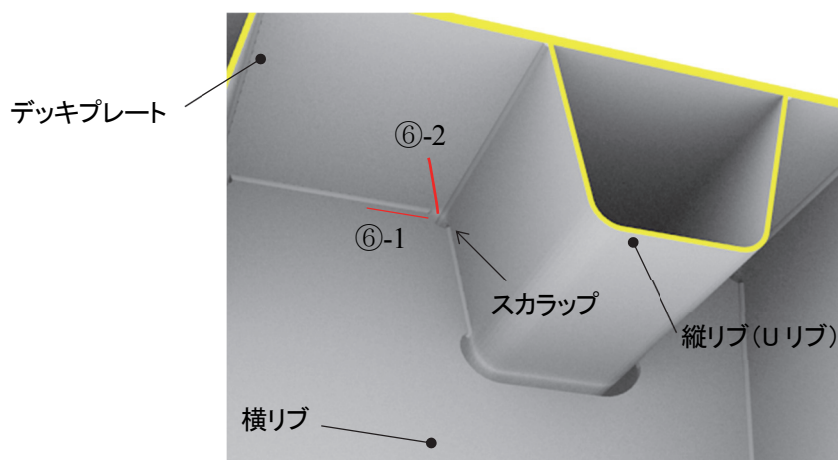


図 3.25 デッキプレート-縦リブ 溶接部の損傷タイプ

6) その他の溶接部の亀裂

縦リブ(Uリブ)と縦リブの溶接部(図 3.26)に発生する亀裂⑦は、亀裂方向と熱伝導方向が同一のため、亀裂を挟んだ両側では温度差が発生しないことが想定されるため、温度ギャップ法による亀裂検出は不可能と推察される。

縦リブと端ダイヤフラムに発生する亀裂⑧および主桁ウェブと横リブの溶接部に発生する亀裂⑨は、温度計測を実施していないため、温度ギャップ法による亀裂検出の可能性は不明である。

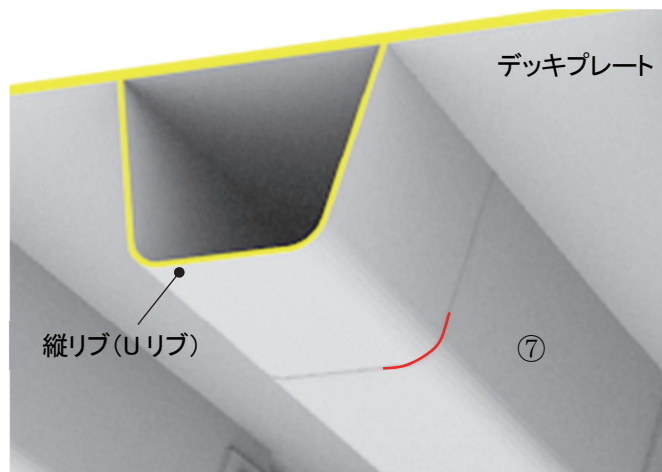


図 3.26 縦リブ(Uリブ)-縦リブ溶接部の損傷タイプ

閉断面鋼床版に発生する亀裂と温度ギャップ法による亀裂検出の可能性の結果を、表 3.5 に示す。

表 3.5 温度ギャップ法による亀裂検出の可能性

亀裂発生部位	亀裂タイプ	検出の可否
① 縦リブ(Uリブ)-横リブ 溶接部(スカラップ部)	①-1	可
	①-2	可
② 縦リブ(Uリブ)-横リブ 溶接部(スリット部)	②-1	可
	②-2	可
③ デッキプレート-垂直補剛材 溶接部	③-1	可
	③-2	不可
	③-3	可
④ デッキプレート-縦リブ(Uリブ) 溶接部	④-1	可
	④-2	不可
⑤ 縦リブ(Uリブ)現場継手部 スカラップ部 溶接部	⑤-1	可
	⑤-2	不可
⑥ デッキプレート-横リブ 溶接部	⑥-1	可
	⑥-2	不可
⑦ 縦リブ(Uリブ)-縦リブ 突合せ溶接部	⑦	不可
⑧ 縦リブ(Uリブ)-端ダイヤフラム 溶接部	⑧	不明
⑨ 横リブ-主桁ウェブ 溶接部	⑨	不明

3.8 結言

以下に本研究で得られた温度ギャップ法による亀裂検出に関する知見を列記する。

- (1) 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による遠隔亀裂検出法は、重防食塗装下の亀裂に対し、塗膜を剥ぐことなく探傷できる。
- (2) 温度ギャップ法は、赤外線サーモグラフィを作業車に搭載し、作業車を走行させながら連続撮影を行うことにより、移動しながら対象溶接線の全線計測が可能である。
- (3) 目視調査では発見できない塗膜割れを伴わない亀裂でも検出可能である。
- (4) 表面の亀裂長さ 40mm 程度の亀裂を十分な精度で検出するためには、赤外線サーモグラフィの温度分解能が 0.03~0.06K 以下の機種を使用し、撮影解像度を 1mm/px 以下で撮影する必要がある。
- (5) 温度画像で判定した亀裂長さ・形状は、実際の溶接線表面に現れた亀裂と良く一致している。
- (6) (1)~(5)は、以下の撮影条件の場合に亀裂検出が可能である。
 - ・ 静止状態での撮影。
 - ・ 移動速度が 250mm/s 以下、かつ、撮影方向と亀裂（溶接線）方向とが同一。
- (7) 温度ギャップ検知法による計測可能時期は、3~11 月で可能であるものの、デッキプレートと U リブの温度差 (ΔT , $T_{deck} - T_{u26}$) が 0.7K 以上となる 3~9 月が望ましい。
- (8) 計測可能時期は、調査した橋梁位置での結果であり、気候が異なる地域で適用する場合には、太陽高度などのデータから計測可能時期を設定する必要がある。
- (9) 閉断面鋼床版に発生する 16 種類の亀裂タイプのうち 8 種類が検出可能であると推察される。

温度ギャップ法は、鋼床版 U リブの溶接線の探傷を全線にわたって短時間に計測が可能であり、塗膜割れを伴わない亀裂も検出可能であることから、目視点検を凌ぐ性能と効率性を兼ね備えた検出法である。つまり、本手法は、道路法の平成 25 (2013) 年 6 月の改正による近接目視点検の同等以上の手段として十分満足するものと考えられるとともに、ビード貫通亀裂の最適メンテナンスの点検として十分な機能を備えた手法として開発できたものと考えている。

第3章 参考文献

- [3-1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編、pp.193-213、2014.3
- [3-2] 土木学会 鋼構造委員会：鋼橋の疲労対策技術、pp.1-52、2013.12.2
- [3-3] de Jong, F. B. P. (2004) Overview fatigue phenomenon in orthotropic steel decks in the Netherlands. Proc. 2004 Orthotropic Bridge Conf., Sacramento, USA, 489–512.
- [3-4] 平林泰明、牛越裕幸、木ノ本剛：首都高速道路における鋼床版損傷、鋼構造と橋に関するシンポジウム報告集、Vol.10、pp.39-53、2007.8
- [3-5] (財)阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策[三訂版]、pp.80-99、2014.3
- [3-6] T. Makita, H. Sakai, T. Suzuki, N. Yagi : Phased array ultrasonic inspection of rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks, 9th IABMAS 2016, FOZ DO IGUACE, BRAZIL, 26-30 June 2016
- [3-7] Miki, C. and Suganuma, H. (2013) Rehabilitation of strengthening of orthotropic steel bridge decks. In: Bridge Engineering Handbook (Edited by Chen W. and L. Duan), CRC Press, Boca Raton, pp. 496–497.
- [3-8] 日本非破壊検査協会 赤外線サーモグラフィ試験II、p.92、2012年
- [3-9] 土木学会 鋼構造委員会：鋼床版の疲労(2010年改訂版)、pp.117-160、2010.12
- [3-10] 気象庁ホームページ 過去の気象データ検索：<http://www.jma-net.go.jp/tokushima/>、2014.12.22
- [3-11] 国立天文台ホームページ 天文情報センター 暦計算室：<http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/>、2014.12.22

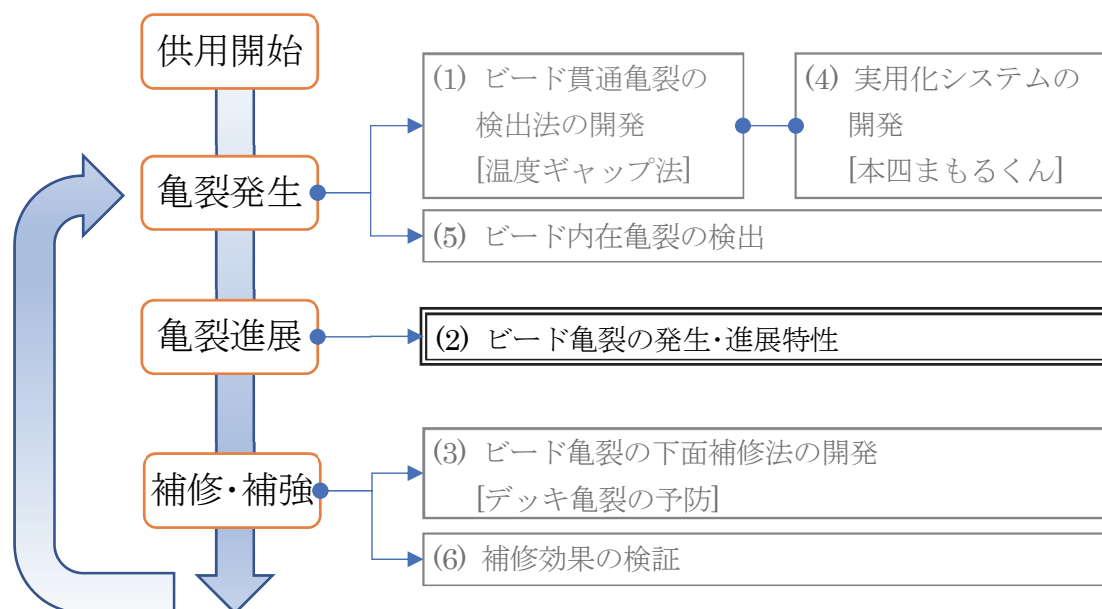
第4章 Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂の発生・進展特性

Uリブ鋼床版のデッキプレート-Uリブ溶接部に発生するビード貫通亀裂の早期検出法として、温度ギャップ法を開発したことにより、溶接ビード表面での長さが約40mmの短い亀裂まで検出が可能になった。補修は、亀裂長さが短い早期に実施することが最適であるものの、様々な事情によりすぐに着手できないケースも考えられる。その場合、ビード貫通亀裂がデッキ方向やUリブのウェブ方向へ進展する前に補修を済ませることが必要となるが、現時点でこの亀裂の進展特性は解明されていない。

また、2013年6月の道路法改正（2014.7.1施工）では5年ごとの近接目視点検が義務化されたが、ビード貫通亀裂に対する適正な点検サイクルがどの程度であるのかについても、現時点では明確になっていない。

これらの課題の解決を目指し、亀裂進展特性等を把握するため、著者らは亀裂長さの測定を約5年間にわたって実施してきた。また、亀裂部と健全部の溶接サイズを計測した結果から、ビード貫通亀裂の形状的特徴から発生特性についても調査した。本章では、それらの研究内容について述べる。

本章で述べるUリブ鋼床版ビード貫通亀裂の発生・進展特性は、緒論で述べた疲労のメンテナンスサイクルにおける、下図の2重枠で示すところに位置づけられる。



4.1 緒言

Uリブ鋼床版は、軽量かつ施工期間が短いことから、海峡を跨ぐ長大橋や都市高速に多く採用されている。近年、重交通路線を中心に、Uリブ鋼床版では、デッキプレートとUリブのすみ肉溶接(以下「縦溶接」という)のルート部より溶接表面へ進展し貫通する亀裂(以下「ビード貫通亀裂」という)が多く確認されている[4-1]。本州四国連絡橋のUリブ鋼床版においても供用27年が経過した橋でビード貫通亀裂が発見され、事後調査によって亀裂の進展が確認された。

本章では、ビード貫通亀裂の溶接表面での亀裂長さの進展量を、磁気探傷(以下「MT」という)によって調査した結果を報告するとともに、亀裂発生と関係が深いと考えられる縦溶接の脚長調査を実施した結果について述べる。

4.2 調査橋梁と亀裂の現状

今回、調査対象とした橋梁は、昭和60年に供用された、橋長1009m、鋼3+4径間連続鋼床版箱桁橋である。その断面図を図4.1に示す。平成27年度までの累積断面交通量は171万台で、大型車混入率(ここでは料金車種区分の中型車、大型車、特大車の割合とする)は26%となっている。本橋梁で確認しているビード貫通亀裂の長さは、40~433mmであり、概ね1年ごとにMTにより進展量を追跡調査している。また、Uリブ母材へ進展している亀裂(亀裂長さ433mm)に対しては、ストップホールを施工するとともに、亀裂が屈曲しているもの(亀裂長さ251mm, 325mm)、一定の長さ(約300mm)を超える亀裂に対しては、先端削孔しデッキプレート側への亀裂進展の有無を確認している。なお、現在、先端削孔したもののうち、デッキプレート側へ亀裂が進展しているものはない。

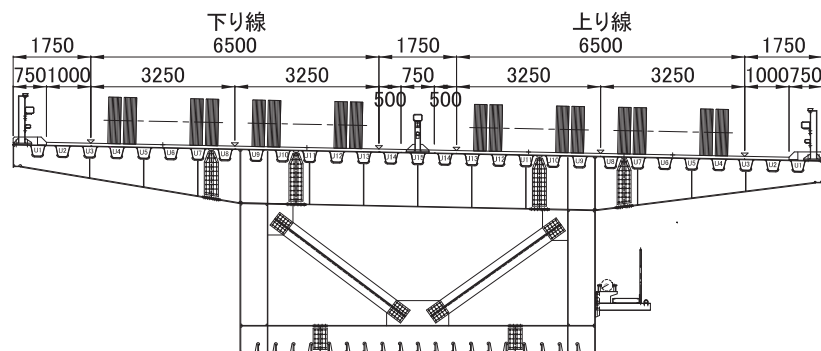


図 4.1 桁断面図

4.3 亀裂進展調査

亀裂長さの推移を図 4.2 に、亀裂長さと進展速度の関係を図 4.3 に、先端削孔の孔壁(亀裂が表面まで到達していない側)の MT 指示模様を写真 4.1 に示す。なお、図 4.3 の亀裂長さは同じ亀裂の今回測定した長さと前回測定した長さの平均値であり、進展速度はその間の亀裂進展量と測定間隔から年間当たりの亀裂進展速度へ換算した値としている。また、先端削孔後の亀裂のデータは、先端削孔をしていない亀裂(以下、亀裂ままと呼ぶ)と比較し、亀裂先端部の応力集中が低減されることが想定され、亀裂ままとは条件が異なるため、図 4.3 に示す亀裂進展速度のデータからは除外している。これらより、以下のことが言える。

- ・ 先端削孔した亀裂は進展が停滞している。
- ・ 亀裂長さの最大進展速度は年間あたり約 40mm である。
- ・ 亀裂長さと進展速度の相関は弱い(0.14)。

亀裂長さと進展速度の相関が低いが、データ数も少ないことから継続的に調査することで、ビード貫通亀裂の進展特性に影響する因子が得られる可能性があると考えている。

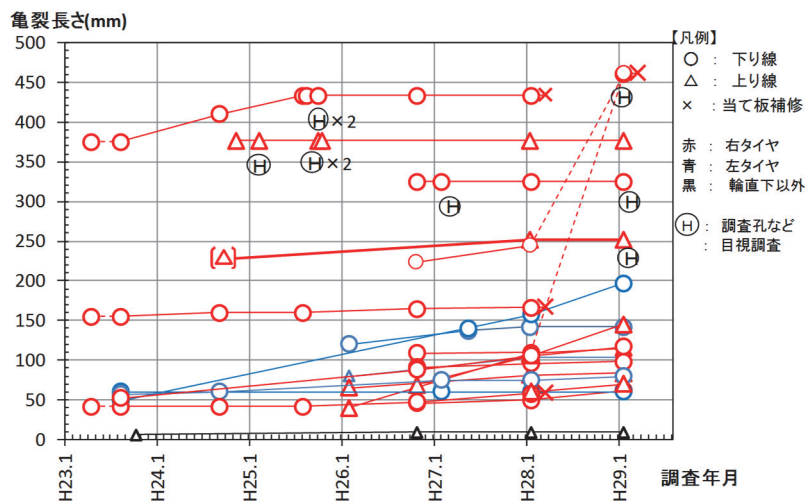


図 4.2 亀裂進展状況

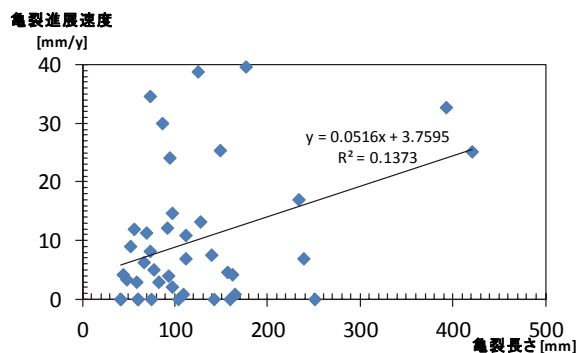


図 4.3 亀裂長さと進展速度

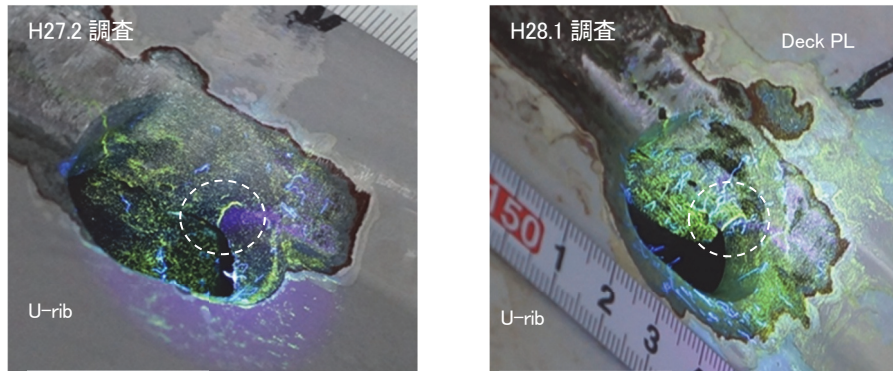


写真 4.1 亀裂先端削孔

4.4 溶接脚長調査

縦溶接のデッキ側，Uリブ側の脚長は，溶接部に印象材を貼付け（写真 4.2），室内にてスライスし測定した．測定箇所としては，亀裂部に対しては，亀裂の先端から溶接線方向に 100mm 程度離れた箇所とし，健全部に対しては，溶接に概ね 150mm ごとに 2 箇所の測定点を設けた．また，健全部の測定は，Uリブの板厚ごとにすみ肉溶接の設計脚長が 1mm 異なるため，それぞれの設計脚長ごとに行った．なお，印象材は 1 箇所あたり 4 断面にスライスし脚長を測定した．

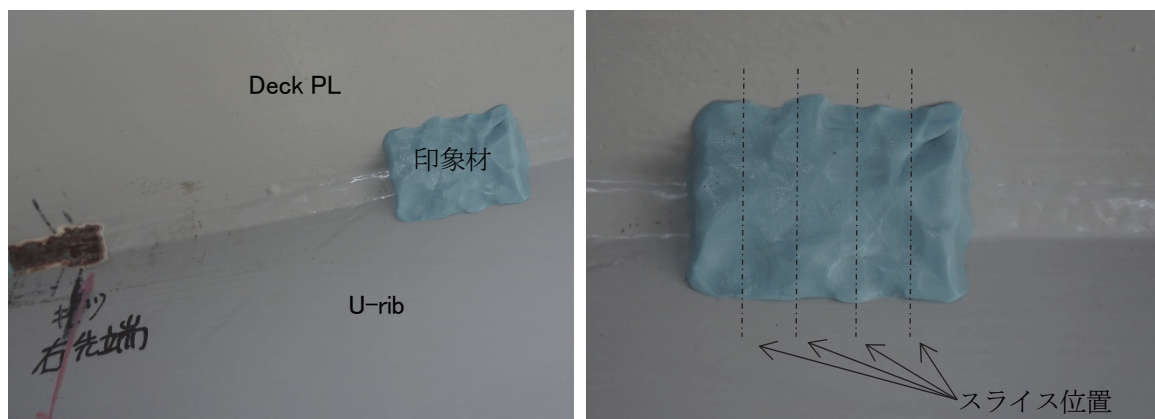


写真 4.2 印象材の貼り付け状況とスライス位置

測定された溶接部の脚長とのど厚の平均値を表 4.1 に，溶接形状を図 4.4 に，Uリブ側とデッキ側の脚長分布を図 4.5 に，溶け込みを 0mm とした場合の，のど厚ヒストグラムを図 4.6 に示す．

〔すみ肉溶接の設計溶接脚長 6mm の結果〕

表 4.1(a)のデッキ側と U リブ側の脚長の平均値は，健全部では 8.7mm と 7.9mm で等脚長に近いが，亀裂部では 9.8mm と 6.9mm でデッキ側が長く U リブ側が短い不等脚長となっている．のど厚の平均値は，健全部が 4.0mm，亀裂部が 3.7mm であり，健全部に対し亀裂部ののど厚が約 1 割薄い．また，図 4.5(a)を見ると，亀裂の発生部位では，溶接形状が不等脚長となっている状況が明瞭である．

〔すみ肉溶接の設計溶接脚長 5mm の結果〕

表 4.1(b)のデッキ側と U リブ側の脚長の平均値は，健全部では 8.7mm と 7.9mm で等脚長に近いが，亀裂部では 9.3mm と 6.9mm でデッキ側が長く U リブ側が短い不等脚長となっている．のど厚の平均値は，健全部が 4.3mm，亀裂部が 4.0mm であり，健全部に対し亀裂部ののど厚が約 1 割薄い．また，図 4.5(b)では亀裂部が不等脚長となっている状況が明瞭である．

これらより，亀裂が発生した部位では，デッキプレートと U リブの溶接時に，溶接棒先端が U リブから数 mm 遠い状態で溶接され，その結果，U リブ側脚長が短く，のど厚は薄くなり，ビード貫通亀裂が発生しやすい一因となったと推察される．

表 4.1 溶接脚長および溶接のど厚の平均値

(a) 設計溶接脚長 6mm					(b) 設計溶接脚長 5mm				
単位:mm	脚長			のど厚 (CE)	単位:mm	脚長			のど厚 (CE)
	Deck (AB)	U-rib (BD)	差 (AB-BD)			Deck (AB)	U-rib (BD)	差 (AB-BD)	
(参考)設計	6.0	6.0		2.7	(参考)設計	5.0	5.0		2.3
健全部 (a)	8.7	7.9	0.8	4.0	健全部 (a)	8.7	7.9	0.8	4.3
亀裂部 (b)	9.8	6.9	2.9	3.7	亀裂部 (b)	9.3	6.9	2.4	4.0
差 (b-a)	+1.1	-1.0		b/a= 0.9	差 (b-a)	+0.6	-1.0		b/a= 0.9

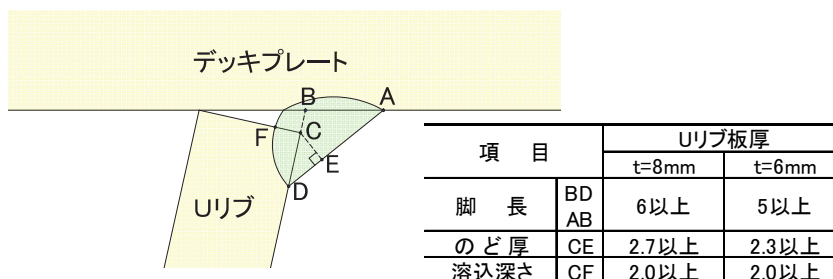


図 4.4 溶接形状

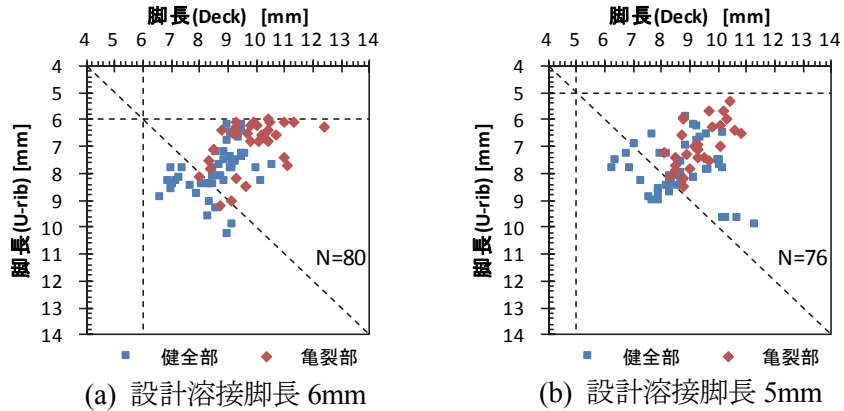


図 4.5 溶接脚長分布

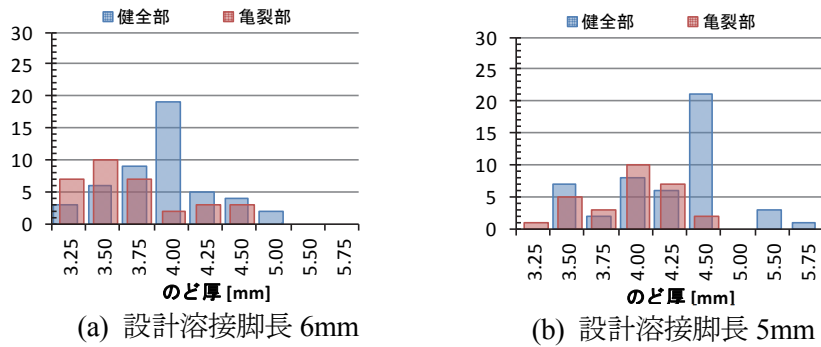


図 4.6 のど厚ヒストグラム

4.5 結言

本調査結果を以下に列記する。

- ・ 亀裂は長さが 250mm を超えると亀裂が屈曲することがある。
- ・ 亀裂先端を削孔することにより進展が停留している。
- ・ 亀裂の最大進展速度は年間あたり約 40 mm である。
- ・ 亀裂長さとの進展速度の相関は弱いものの、データ数も少ないことから調査を継続し、データの補強を図る。
- ・ 溶接脚長は、健全部が等脚に近く、亀裂部ではデッキ側が長く U リブ側が短い不等脚長である。

- ・ のど厚は、健全部に対し亀裂部では約 1 割薄い。そのため、ビード貫通亀裂が発生しやすい一因となったと推察される。

ビード貫通亀裂の進展性、形状的特徴等について、一定の傾向を得ることができた。また、この結果から、以下の推察が可能である。

(1) 亀裂が屈曲するまでの期間

調査した橋梁では、亀裂長さが 250mm を超えると亀裂が屈曲すること、および進展速度の最大が年間あたり 40mm であることから、屈曲するまでの亀裂長さに達するには、亀裂がビード表面に現れてから 6 年以上の期間が必要であることが推察される。

(2) 点検間隔

第 3 章で開発した温度ギャップ法は、約 40mm 以上の亀裂が発見可能である。調査した橋梁では、40mm から 250mm に進展する期間としては約 5 年である。これらから、点検間隔が 5 年であれば、亀裂が屈曲する前に検出できるものと推察される。

なお、上記は少ないデータからの推察であり、今後も継続して調査実施し、データの充実と研究継続をする必要がある。

第 4 章 参考文献

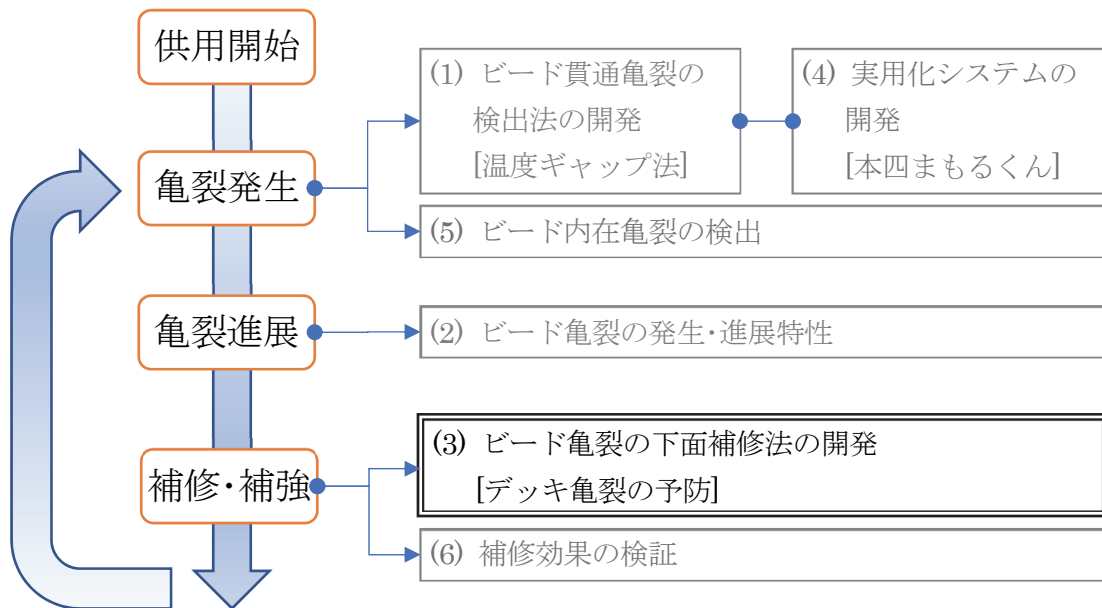
- [4-1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編、pp.193-213、2014.3
- [4-2] 土木学会 鋼構造委員会：鋼橋の疲労対策

第5章 Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂の下面補修法の開発

前章までに、Uリブ鋼床版に発生するビード貫通亀裂の早期検出法の開発とビード貫通亀裂の進展特性等について述べた。本亀裂に対する補修法は、これれまでいくつかの方法が開発され施工されているものの、鋼床版上面からの施工も必要とする工法であるため舗装切削や通行止めなどの交通規制が必要なものや、亀裂再発の可能性がある溶接を伴うものなどであり、下面からのみで施工可能な効果的な工法がないことが課題であった。

今回、開発した補修方法は、スレッドローリングねじ(TRS : Thread Rolling Screw)等を用い鋼床版下面からのみで施工可能な当て板補修工法である。本章では、その性能を確認する目的で行った疲労試験、並びに工場で実施した施工試験及び実橋での試験施工について記述する。

本章で述べるUリブ鋼床版ビード貫通亀裂の下面補修法の開発は、緒論で述べた疲労のメンテナンスサイクルにおける下図の2重枠で示すところに位置づけられる。



5.1 緒言

長大橋や都市高速に多く採用されている鋼床版では、いくつかのタイプの疲労亀裂が報告されている[5-1],[5-2]。このうち、縦リブにUリブを用いた閉断面タイプの鋼床版では、図5.1に示すようなデッキプレート（以下「デッキ」という）とUリブ溶接部のルート部から溶接ビード表面に向かって進展し溶接部を貫通する亀裂（以下「ビード貫通亀裂」という）が多く報告されている[5-1]～[5-5]。

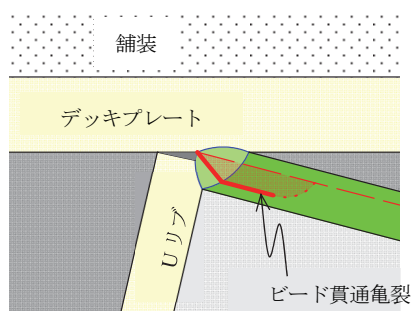


図 5.1 ビード貫通亀裂

既往の補修工法として、Uリブ取り替えや当て板等をデッキ上面から高力ボルトを落とし込んで施工する工法[5-4]、下面からの溶接補修工法[5-6]、下面からのスタッド溶着ボルトによる当て板工法[5-7]～[5-10]が開発され施工されているが、それぞれに以下のような課題がある。

Uリブ取り替えや当て板等をデッキ上面から高力ボルトを落とし込んで施工する工法では、舗装を切削するため交通規制が伴う。そのため、重交通路線や代替路線の無い海峡部長大橋では社会的影響が大きい。また、部分的な舗装切削・復旧は、舗装目地による防水性能低下も懸念される。

下面からの溶接補修工法では、溶接姿勢が上向きになるため品質の確保が難しい。また、溶接施工時に通行止めができない場合は、交通振動を抑えることができず、溶接品質の低下が懸念される。更に、Uリブ内面からの溶接は困難であり、通常はUリブ外面からのみの溶接とするため、完全溶け込みにできず、ルート部に不溶着部が残る。つまり再溶接による補修では、溶接品質の確保が難しいうえに、ルート部からの亀裂が再発する懸念が残る。文献[5-12]では、補修溶接のサイズが小さい場合には、ビード亀裂が再発し、逆に大きい場合にはルート部からデッキプレートに進展するデッキ亀裂が発生しやすいことが報告されている。

また、下面からのスタッド溶着ボルトによる当て板工法では、スタッドボルトの溶接が上向き施工になるため、溶接品質の確保が難しいことが想定される。その上、活荷重によ

る応力変化が大きいデッキプレートへスタッド溶接することから、溶接部からデッキへ進展する亀裂の発生が懸念される。

既往の補修工法に対し、ここで提案する工法は、交通規制や舗装の切削等が不要で、デッキ下面からのみで施工が可能な当て板補修工法である。本工法では、当て板のデッキ側の接合に、従来のトルシア型高力ボルト（以下「HTB」という）による摩擦接合に代わり、デッキ下面から削孔し、ボルトによる支圧接合とする方法である。支圧接合の材料と方法は、鋼板に孔をあけたあとにタップを加工し、ボルトをねじ込む方式のタップボルト（以下「TB」という）と、鋼板に孔をあけたあとにボルト自身が孔壁にめねじを形成しながらねじ込むタッピングボルトを用いた方式（以下「TRS」（Thread Rolling Screw）という）[5-13]～[5-15]を用いた。

疲労試験では、提案する TRS による下面工法、それと比較する TB による下面工法、および HTB による上面工法[5-4]の 3 つの当て板補修工法と、対策なしの合計 4 ケースを比較・検討することによりビード亀裂とデッキ亀裂に対する補修効果を検証した。なお、提案する TRS 下面補修工法については、工場での施工試験、および実橋での試験施工を既に実施しており、1 度目の試験施工では念のために直上車線を規制したが[5-16]、その後の 2 度目の試験施工では、規制なしでも問題なく施工可能であることを確認している。

5.2 実験方法

(1) 試験体

試験体の一般図等を図 5.2 に、主要部材の機械的性質を表 5.1 に示す。試験体の寸法は、幅 2000mm、長さ 2600mm とし、高さは No.1 試験体が 1000mm、No.2 試験体が 900mm であり、2 本の主桁間に 2 本の横リブと 3 本の U リブ（呼び名：320×260×8 - 40）を有している。U リブ間隔は 610mm、横リブ間隔は 2000mm である。

主要部材の板厚と材質は、デッキが 12mm(SM490Y)、U リブが 8mm(SM490Y)、横リブウェブが 9mm(SM400)とした。デッキと U リブの材質と寸法、および U リブ間隔と横リブ間隔は、実橋[5-16]と同じとした。また、横リブの高さは、実橋のブラケット張出部の平均的な高さとしている。主桁の高さは、試験機へ収まる寸法とするため、実橋の 4.5～8.2m に対し 1.0m と 0.9m に縮小している。なお、実橋の U リブの板厚は 6mm および 8mm、デッキと U リブの材質は同一で SS400 および SM490Y が用いられているが、実橋において長いビード亀裂の発生が確認されている板厚 8mm および材質 SM490Y を選択した。主桁ウェブには試験体内部へ出入りするための開口部（600mm 角、2 箇所）を左右対称に設けて

いるが、ウェブのせん断強度等は問題がなく、試験体の挙動についても特に問題は生じなかった。

デッキとUリブの溶接は、脚長 6mm のすみ肉溶接とし、溶け込み深さはビード貫通亀裂が生じやすい 0mm[5-6], [5-12], [5-17] を目標として製作した。各試験体の溶け込み状況を、写真 5.1 に示す。No.1 試験体では約 5mm と目標に対し大きく、No.2 試験体では約 2mm が確認された。

なお、試験体の断面位置を左側の横リブ位置から右への距離で S0 や S2000 と呼ぶこととする。

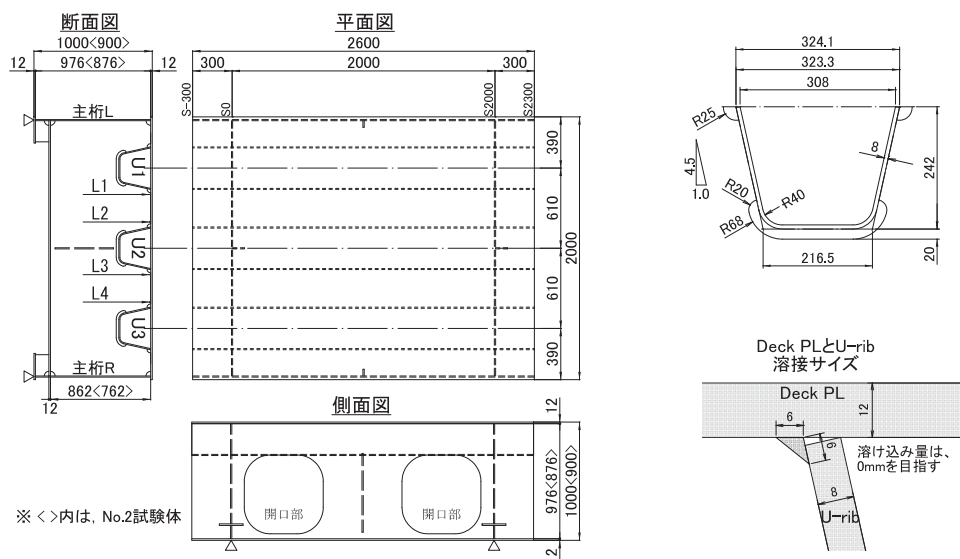


図 5.2 試験体

表 5.1 試験体鋼材の機械的性質

部 材	使用鋼材	板厚 (mm)	機械的性質		
			降伏点	引張強さ	伸び
			(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)
デッキプレート	SM490YA	12	400 <425>	525 <549>	27 <26>
主桁・横リブ 下フランジ	SM490YA	12	400 <396>	525 <511>	27 <25>
Uリブ, 当て板	SM490YA	8	433 <433>	556 <556>	24 <24>
主桁・横リブ ウェブ	SM400	9	309 <325>	431 <444>	29 <28>

※ <>内は, No.2 試験体

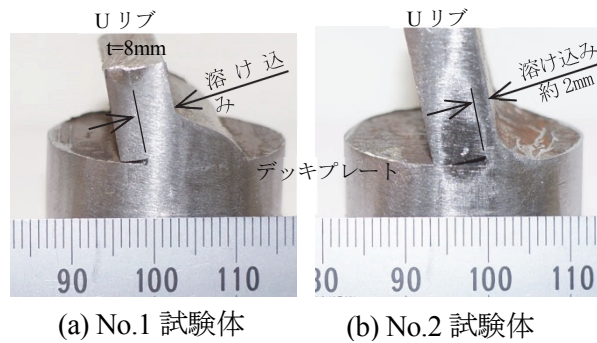


写真 5.1 溶接溶け込み確認状況

(2) 当て板構造と接合方法

当て板を行う溶接線は、図 5.2 に示す L1 から L4 とした。また、橋軸方向の当て板の範囲は、S-300 から S2000 までとし、人力施工となることから、一つの部材質量が 10kg 程度になるように、横リブ(S0)から 600mm と 1400mm の位置で分割した。その結果、当て板の長さは、600mm および 800mm となった。

当て板の接合方法は、図 5.3 に示す 3 種類とし、溶接線毎にデッキ側の接合方法を変えている。L1 は HTB(M20)による摩擦接合とし、デッキと当て板へ $\phi 22.5$ で削孔し、HTB を締付けた。L2 は TB(M16)による支圧接合とし、デッキと当て板へ $\phi 14.0$ で削孔し、その後 M16 用タップを加工し、TB を締め込んだ。L3 と L4 は TRS($\phi 16$)による支圧接合とし、デッキと当て板へ $\phi 15.5$ で削孔し、TRS をねじ込んだ。HTB については、上面からボルトを通すため、デッキ上面の舗装を剥ぎ取る必要がある。TB と TRS については、下面のみから施工が可能であるが、TB はタップ加工工程が必要となる。以上により施工性は TRS がもっとも有利である。

Uリブ側の接合方法は、全てワンサイド高力ボルト(MUTF20)による摩擦接合とし、Uリブと当て板を $\phi 21.5$ で削孔し、MUTF を締付けた。

当て板を接合するためのボルト孔は、デッキおよびUリブとも全て板厚を貫通させている。L4(TRS)当て板後のデッキ上面の状況を写真 5.2 に示す。デッキ上面と TRS 上端はほぼ同一面で、L4(TRS)だけはデッキ削孔時のバリが残った状態で疲労試験を実施した。なお、L4(TRS)以外についてはバリを除去した。

TB と TRS の材質は、それぞれクロムモリブデン鋼(SCM435)と炭素鋼(SWCH)である。TRS は、主に建築関連市場において、ナット不要なタッピング型ワンサイドボルトとして広く用いられている。鋼橋の接合材料として用いるには、軸径が $\phi 8$ 、 $\phi 10$ 、 $\phi 12$ と小径しかなく、1 本当たりの強度が小さいため適していなかった[5-13]。しかしながら、本試験に合わせ、 $\phi 16$ が新規開発され[5-14]、[5-15]、接合材料として現実的な継手設計ができること、およびタップ加工が必要なく施工上有利であることから、本試験で採用したものである。

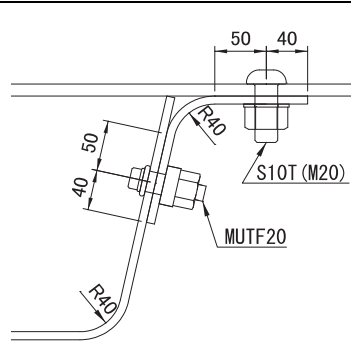
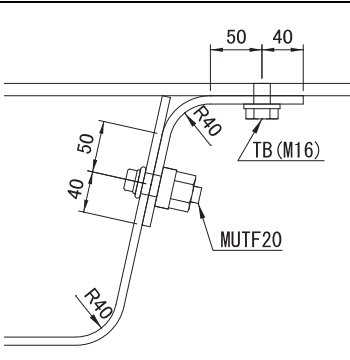
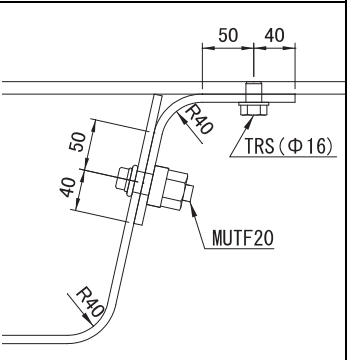
詳細図	試験位置(接合方法)		
	L1(HTB)	L2(TB)	L3(TRS)
			

図 5.3 当て板の接合詳細図

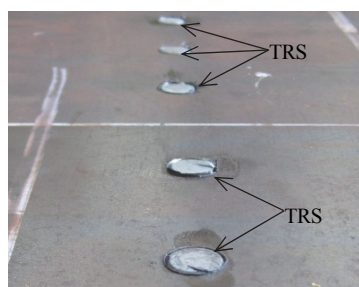


写真 5.2 当て板後の L4(TRS)デッキ上面

(3) 載荷方法

載荷は、3 台のジャッキを用いて、S0, S600, S1200 または S800, S1400, S2000 の 3 断面で行った。なお、車輪走行を模擬するため、3 台のジャッキ間では $2/3\pi(120^\circ)$ の位相差をつけた。繰り返し載荷速度は 3Hz とした。

荷重は、阪神高速道路において、平成 21, 22 年度調査で 24 時間計測された最大軸重 260kN [5-18], [5-19]程度を参考とし、載荷板(200mm×200mm)×2 枚×2 組当たり、荷重範囲 260kN(20-280kN)とした。

載荷位置は、図 5.4(a)に示すビード亀裂が生じやすいデッキと U リブの溶接ビード直上の U リブウェブ直上載荷 (以下「直上載荷」という) と、図 5.4(b)に示すデッキ亀裂が生じやすい溶接ビードを跨ぐ U リブウェブ挟み込み載荷 (以下「挟み込み載荷」という) の 2 パターンとした。これらの定点載荷疲労試験によって、それぞれの亀裂が再現できることは、既に確認済みである[5-12], [5-17], [5-20]。補修前についてはビード亀裂を発生させるために直上載荷を行い、補修後についてもビード亀裂に対しても厳しい直上載荷を行い、その後にデッキ亀裂を発生させるために挟み込み載荷を行った。なお、直上載荷では、デッキ側のボルト接合部直上に載荷している。

各断面では写真 5.3 に示すように、ダブルタイヤを模した 200mm×200mm(t=40mm)のゴムシート 2 枚×2 組に対し、載荷梁を 2 段に配置して、それぞれ 1/2 ずつ均等に荷重がかかるように載荷した。なお、支点は、両側の主桁-横リブ交差部とした。

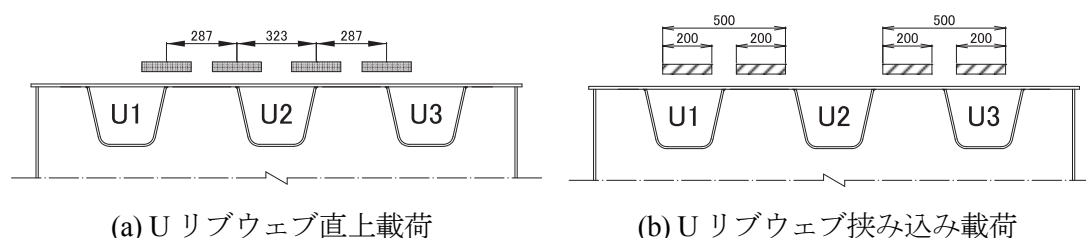


図 5.4 載荷パターン

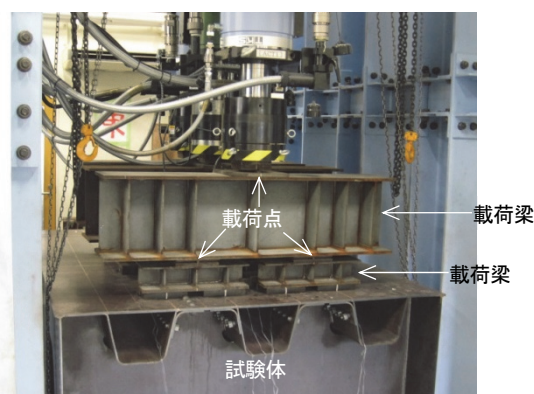


写真 5.3 疲労試験の状況

(4) 当て板工法の設計

補修部材の設計方針は、以下のとおりとした。

- (a) デッキと U リブ間のせん断力は、すみ肉溶接に代わり当て板とボルトによって伝達する。
- (b) 当て板の板厚・材質は、実橋 U リブと同板厚・同材質とする。
- (c) デッキと当て板、当て板と U リブのそれぞれの継手設計は、デッキと U リブのすみ肉溶接のせん断耐力相当を伝達できる継手とする。なお、実橋の設計では溶接脚長 6mm のすみ肉溶接とされているため[5-21]、すみ肉溶接ののど厚は図 5.5 に示すように設計上 2.7mm となる。

すみ肉溶接の単位長さ当たりのせん断耐力を式(5.1)により求めた。

$$S = \tau_a \times a \quad (5.1)$$

ここに、 S ：単位長さ当たりのすみ肉溶接のせん断耐力($120\text{N/mm}^2 \times 2.7\text{mm} \times 1000\text{mm/m} = 324\text{kN/m}$)、 τ_a ：すみ肉溶接部の許容せん断応力度($=120\text{N/mm}^2$, SM490Y)、 a ：すみ肉溶接のど厚($=2.7\text{mm}$)

これに相当するせん断力に抵抗するために必要な、各継手のボルト必要本数を表 5.2 に示す。なお、本試験では、全ての継手で 15 本/m とした。これは、各継手でボルトピッチを変更すると製作が煩雑になるためである。また、すみ肉溶接継手がせん断力に対して設計されているので、同様に TRS 接合（支圧）についてもせん断力に対して設計した。TRS 接合のせん断強度については、文献[5-15]を参照した。

なお、HTB, MUTF20 は、すべり係数 0.4 の摩擦継手として設計し、当て板施工時にグラインダーにより黒皮を除去し粗面とした。

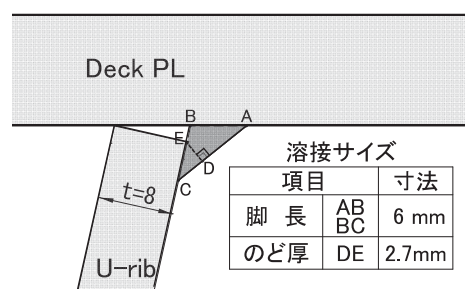


図 5.5 既設溶接サイズ

表 5.2 各継手の設計耐力

Type	接合方法	1 本当たり耐力	必要本数	15 本/m の設計耐力
		(kN/本)	(本/m)	(kN/m)
HTB(M20)	摩擦	47.0	8	611
TB(M16)*	支圧	40.2	9	603
TRS($\phi 16$)**	支圧	32.5	10	488
MUTF20	摩擦	30.8	11	462

※ 強度区分は 8.8

※※ 文献[5-15]

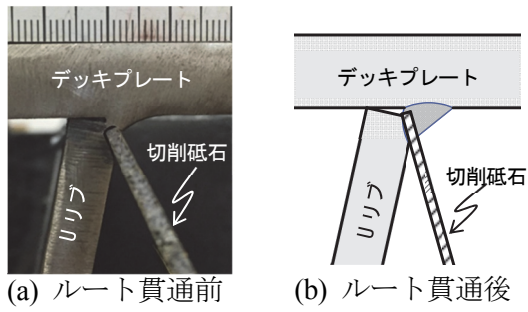


図 5.6 溶接ビード切削状況

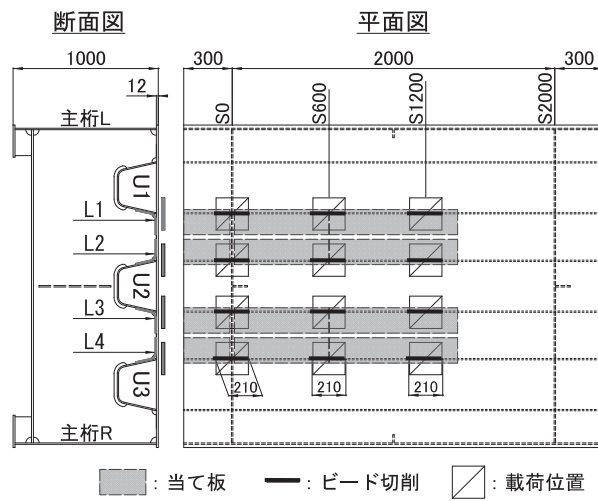
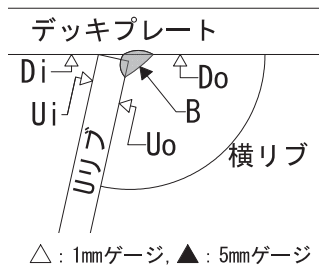


図 5.7 No.1 試験体



- △ : 1mmゲージ, ▲ : 5mmゲージ
- ・ Do, Uo は溶接止端から, Di, Ui はデッキと U リブ接点からそれぞれ 5mm 離してゲージ貼り付け
- ・ 橋軸方向のゲージ位置は, 载荷範囲の中央
- ・ ゲージ方向は, 橋軸直角方向
- ・ 当て板設置時は内面のみ
- ・ B, Do, Uo は, No.2 試験体のみ

図 5.8 ひずみゲージ貼付位置

b) No.2 試験体

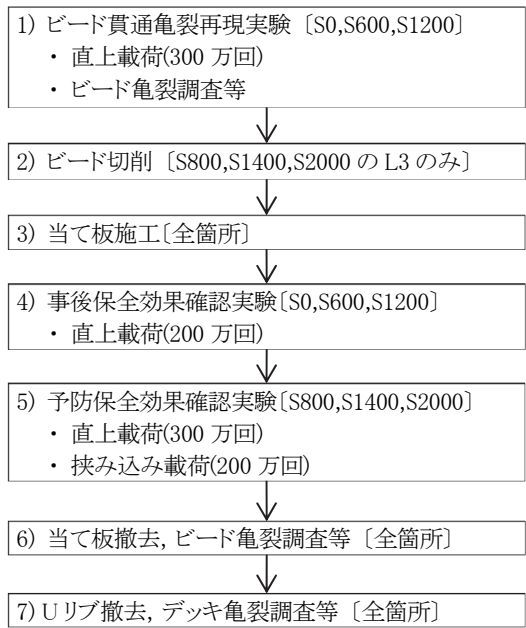
本試験体のデッキと U リブの溶接部の溶け込み量は約 2mm であることから、(写真 5.1(b)参照) 試験体へのビード亀裂再現と事後保全および予防保全の効果確認実験を行った。

載荷試験と当て板等の試験の流れを図 5.9 に示す。試験手順は、まず、溶接ビード切削や当て板をする前に、ビード亀裂再現として、横リブ交差部の S0、支間部の S600 と S1200 で繰り返し載荷を行った。次に、L3 についてのみ、支間部(S800, S1400)の載荷範囲の 200mm、横リブ交差部(S2000)については載荷範囲の 200mm のうち支間側の当て板範囲 100mm について、溶接ビードを切削した。切削後、当て板については L1~L4 の全箇所を施工した。なお、L3 の S2000 については、載荷範囲の半分の外側 100mm の溶接ビードは切削せず、当て板もないため、載荷範囲の中心となる切削端部に対しては最も厳しい条件と考えられる。

その後、事後保全効果確認実験として、ビード亀裂を再現した位置の S0、S600、S1200 へ繰り返し載荷を行った。最後に、予防保全効果確認実験として、当て板前に繰り返し載荷をしていない S800、S1400、S2000 へ繰り返し載荷を行った。なお、S600 と S800、S1200 と S1400 は載荷位置が隣接するが、定点載荷疲労試験では、載荷範囲以外ではデッキ亀裂もビード亀裂も発生しないことは既に確認済みであり[5-12]、[5-17]、隣接載荷によって少なくとも亀裂が発生するほどの疲労被害は受けないと考えられる。

載荷位置を図 5.10 に示す。載荷位置は、ビード亀裂再現実験と事後保全効果確認実験では、L1~L4 のデッキと U リブ溶接線の直上載荷 (図 5.4(a)) とした。また、予防保全効果確認実験では、L1~L4 の直上載荷 (図 5.4(a)) の後に、L1 と L4 を対象に挟み込み載荷 (図 5.4(b)) を行った。これは、まずビード亀裂に対する効果を確認した後に、デッキ亀裂に対する効果を確認するためである。なお、この順序を逆にすれば当然であるが先にデッキ亀裂が生じることが予想される。

ひずみゲージ貼付け位置を図 5.8 に示す。載荷前に、S0 と S2000 では U リブ内面と外面、S600 と S1200 では U リブ外面のみに、それぞれ L1~L4 に加え載荷しない U1 の主桁 L 側と U3 の主桁 R 側にもひずみゲージを貼付け、ひずみ変化を確認しながら試験を進めた。なお、S600 と S1200 の U リブ内面側へのひずみゲージの貼付けは、試験体端部から手が届かないためできない。



注 [] 内は载荷位置等

図 5.9 No.2 試験体 試験手順

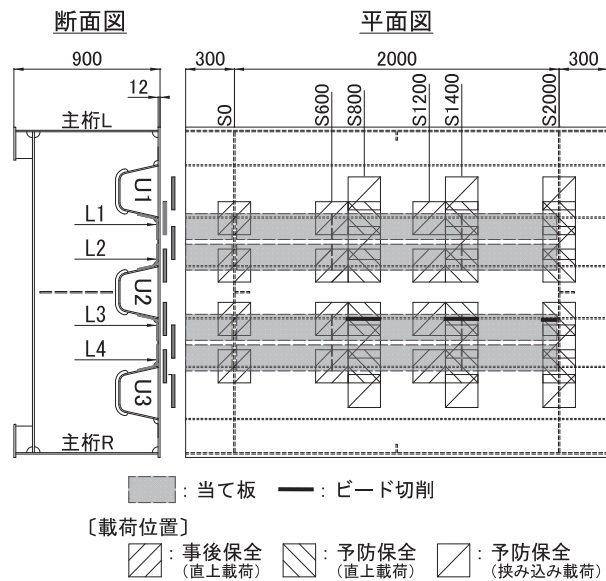


図 5.10 No.2 試験体

5.3 試験結果 (No.1 試験体)

(1) ひずみ変化 (横リブ交差部 S0 のみ)

荷重繰り返し回数 N とひずみ ε の関係を図 5.11 に、ひずみ変化量を表 5.3 に示す。なお、ひずみ値は、最小荷重時を 0 としたときの最大荷重時の値とした。

ひずみは L1 で 65 万回、L2 で 110 万回、L3 で 45 万回、L4 で 20 万回までにデッキ側、U リブ側とも大きく変化している。また、変化割合は全ての箇所でも U リブ側が大きいことから切削時に残っていた溶接ビードに亀裂が進展し、破断したと推定される。なお、全ての試験終了後、U リブを除去後に破面確認し、破断していることを確認した。詳細は、後述する。

また、図 5.11 に示す各ひずみの初期値は、大きくばらついている。これらは、U リブとデッキの内面側の狭隘な箇所なので、ゲージ貼付け位置のばらつきやビード切削状況の違い等の影響が考えられる。

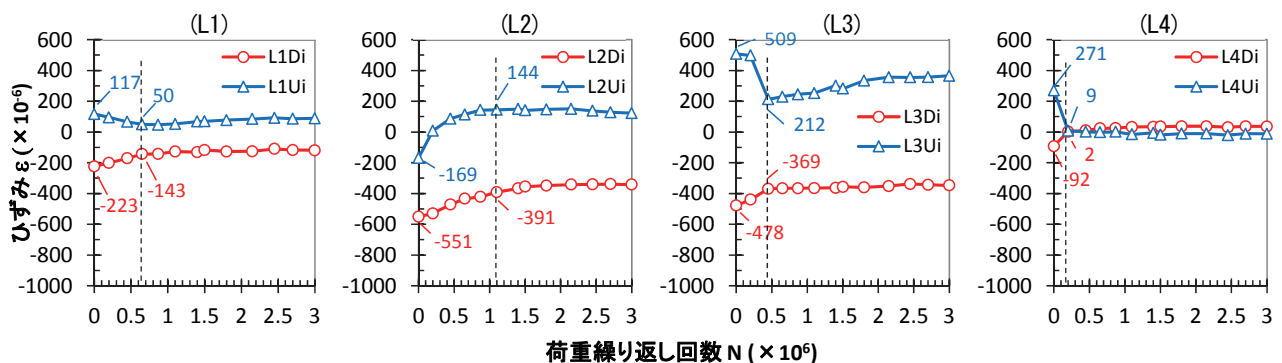


図 5.11 No.1 試験体 S0 のひずみの変化

表 5.3 No.1 試験体 S0 のひずみの変化量

($\times 10^{-6}$)	L1 ($N=0\sim 0.65\times 10^6$)		L2 ($N=0\sim 1.10\times 10^6$)		L3 ($N=0\sim 0.45\times 10^6$)		L4 ($N=0\sim 0.20\times 10^6$)					
	極値	変化量	極値	変化量	極値	変化量	極値	変化量				
Di	-223	-143	80 (36%)	-551	-391	160 (29%)	-478	-369	109 (23%)	-92	2	94 (102%)
Ui	117	50	67 (57%)	-169	144	313 (185%)	509	212	297 (58%)	271	9	262 (97%)

(2) 疲労亀裂等の発生状況

載荷試験後、各部の亀裂調査とボルトの緩み等の変状について調査した。その結果、以下のことが確認できた。

HTB, TB, TRS とともに、緩み等の不具合は認められなかった。また、当て板を外し応力集中が予想されるデッキ、U リブおよび当て板のボルト孔部について、MT を行ったが、それらの箇所には亀裂発生は全く認められなかった。なお、文献[5-22] では、ストップホールに HTB や TRS を施工することにより、疲労寿命改善効果があることが示されている。さらに、分割した当て板の境界部のデッキと U リブについても MT を行ったが亀裂等の変状は認められなかった。

載荷位置のデッキと U リブをガス切断で切り出し、ルート部からのデッキ亀裂の有無を MT により調査したが、デッキ亀裂発生は認められなかった。

切り出した U リブのデッキ側の側面を観察した状況等を図 5.12 に示す。(a)は全景、(b)は U リブの切断状況図、(c)と(d)はデッキ側の側面の状況写真とスケッチである。(c)より、U リブのデッキ側の側面には、ルート面とビード切削面に加え、疲労破面も確認された。ビード切削の施工で、一部ビードが残っても、繰り返し載荷によりビード表面側（貫通方向）に亀裂が進展するため、結果的にビードは切断されることが分かる。なお、亀裂貫通部と切削部のイメージ図を図 5.13 に示す。亀裂貫通部（図 5.13(a)）、切断部（図 5.13(b)）ともに引張残留応力が解放されるため、同様に開口する。また、いずれのケースも U リブ内側のコーナー部（図 5.13）が残っているため、鉛直載荷時にはデッキと接触し力を伝達するものと推察される。

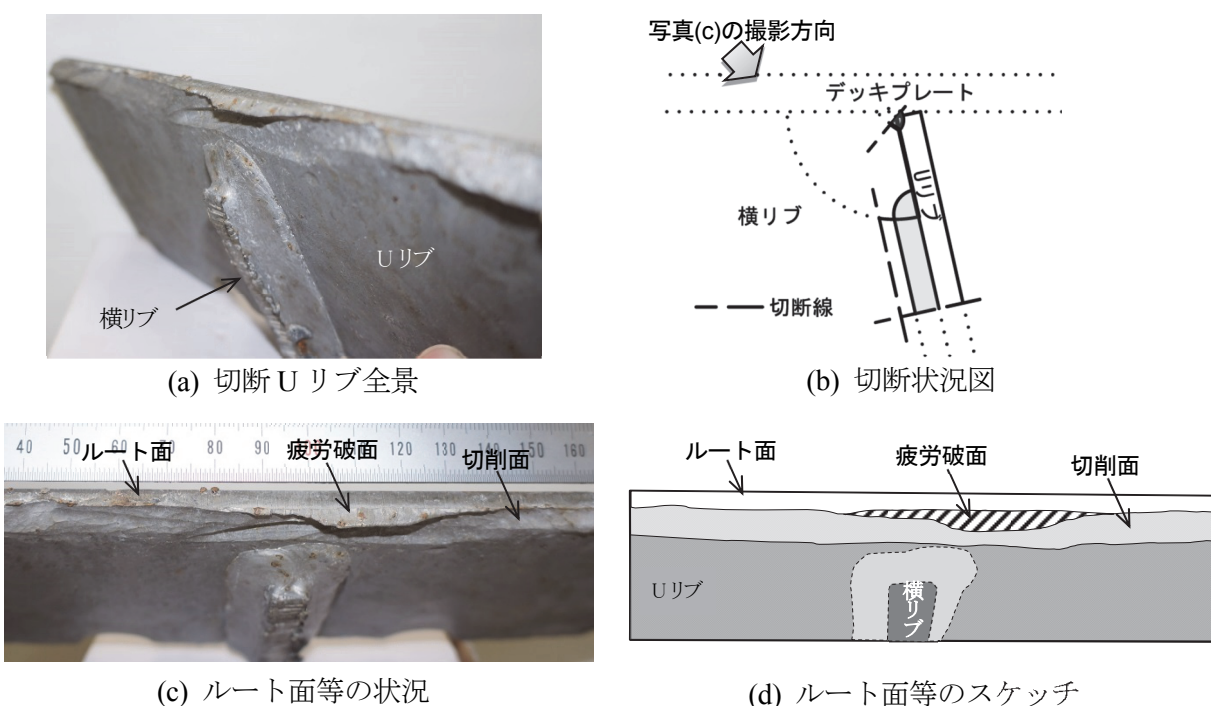


図 5.12 No.1 試験体 U リブのデッキ側の側面(切断後, S0 の L2)

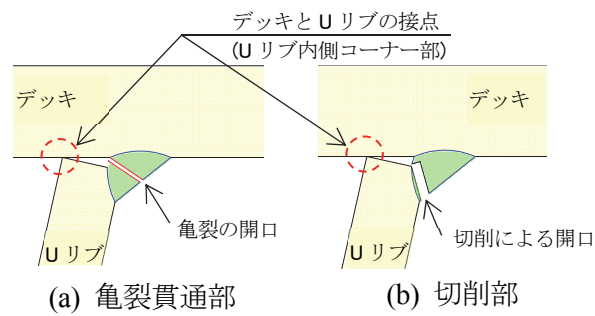


図 5.13 溶接ビード部の開口イメージ図

5.4 試験結果 (No.2 試験体)

(1) ビード貫通亀裂再現実験

試験体へビード亀裂を再現させるため、S0, S600, S1200 へ繰り返し载荷を行った。载荷回数は、S0 ではL1 でビード貫通亀裂が 100 万回で確認されたため、その時点で载荷を停止し、S600 と S1200 の 2 線については引き続き 300 万回まで直上载荷を行った。

a) ひずみ変化

[横リブ交差部 S0]

荷重繰り返し回数 N とひずみ ϵ の関係を図 5.14 に、ひずみ変化量を表 5.4 に示す。なお、U1 の主桁 L 側と U3 の主桁 R 側のひずみ変化のグラフと表は、変化が小さいため省略している。

L1~L4 のビード表面の各ひずみ変化は、 $61\sim 747\mu$ である。これらは、载荷していない U1 の主桁 L 側と U3 の主桁 R 側のビード表面のひずみ変化の最大値 27μ と比較して、2~28 倍と大きいことから、全ての箇所ではビード亀裂またはデッキ亀裂が発生していると推定された。

デッキ下面と U リブウェブの各ひずみ変化の最大を比較すると、L1 では U リブ側が大きいことから、ビード亀裂が発生していることが推定された。L2, L3, L4 ではデッキ下面側が大きいことから、デッキ亀裂が発生していることが推定された。

また、図 5.14 に示す各ひずみの初期値は、大きくばらついている。これらは、ビード近傍の局部的なひずみであるため、ビード形状の不整やビード止端とゲージ位置の距離のばらつきの影響などと考えられる。

〔支間部 S600〕

荷重繰り返し回数 N とひずみ ϵ の関係を図 5.15 に、ひずみ変化量を表 5.5 に示す。なお、U1 の主桁 L 側と U3 の主桁 R 側のひずみ変化のグラフと表は、変化が小さいため省略している。

L1～L4 のビード表面の各ひずみ変化は、41～53 μ である。これらは、载荷していない U1 の主桁 L 側と U3 の主桁 R 側のビード表面のひずみ変化の最大値 20 μ と比較して、2～3 倍と大きいことから、全ての箇所亀裂が発生していることが推定された。

デッキ下面と U リブウェブの各ひずみ変化を比較すると、L1, L4 では U リブ側の変化量・変化率とも大きい。L2 では変化量は同程度であるが、変化率は U リブ側が大きい。このことから、L1, L2, L4 ではビード亀裂が発生していることが推定された。L3 ではデッキ下面側が大きいことから、デッキ亀裂が発生していることが推定された。

〔支間部 S1200〕

荷重繰り返し回数 N とひずみ ϵ の関係を図 5.16 に、ひずみ変化量を表 5.6 に示す。なお、U1 の主桁 L 側と U3 の主桁 R 側のひずみ変化のグラフと表は、変化が小さいため省略している。

ビード表面の各ひずみ変化は、L1 が 20 μ 、L2 が 38 μ 、L3 が 86 μ 、L4 が 26 μ である。L2 と L3 は、载荷していない U1 の主桁 L 側と U3 の主桁 R 側のビード表面のひずみ変化の最大値 10 μ と比較し、それぞれ 4 倍、9 倍と大きいことから、亀裂が発生していると推定した。L1 と L4 では、ひずみ変化が 10 μ の 2 倍程度であり、それほど大きな亀裂は発生していないと推定した。

デッキ下面と U リブウェブの各ひずみ変化を比較すると、L2, L3 では U リブ側の変化率が大きいことから、ビード亀裂が発生していることが推定された。L4 では両方のひずみ変化量、変化率がそれほど大きくないことから、微小なデッキ亀裂程度は発生している可能性があるとして推定された。L1 では両方のひずみ変化量、変化率とも小さいことから、疲労亀裂は発生していないと推定された。

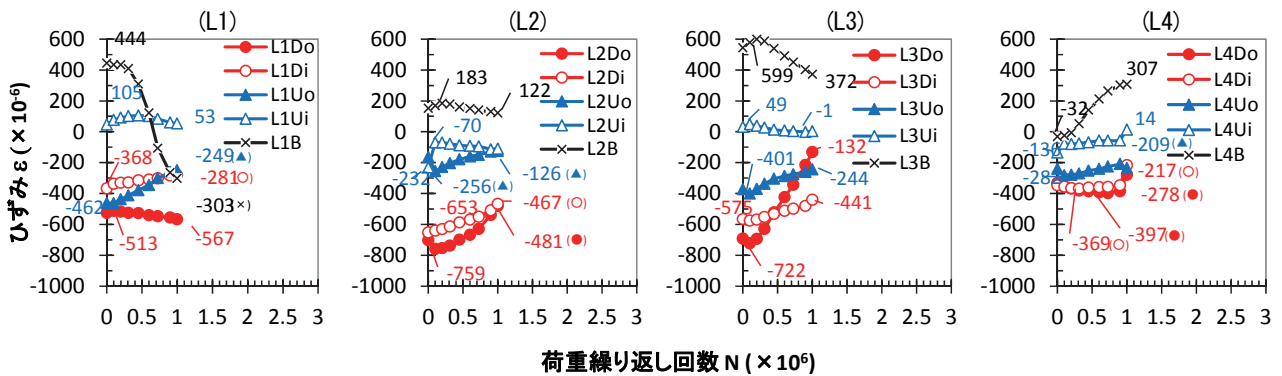


図 5.14 No.2 試験体 亀裂再現時 S0 のひずみの変化
表 5.4 No.2 試験体 亀裂再現時 S0 ひずみの変化量

($\times 10^{-6}$)	L1		L2		L3		L4	
	極値	変化量	極値	変化量	極値	変化量	極値	変化量
B	444	-303	183	122	599	372	-32	307
Do	-513	-567	-759	-481	-722	-132	-397	-278
Di	-368	-281	-653	-467	-575	-441	-369	-217
Uo	-462	-249	-256	-126	-401	-244	-282	-209
Ui	105	53	-232	-70	49	-1	-136	14

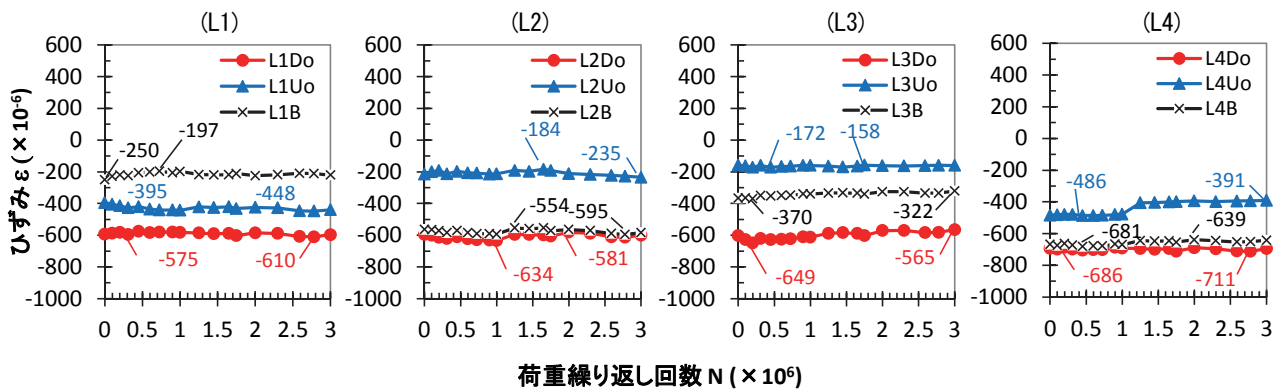


図 5.15 No.2 試験体 亀裂再現時 S600 のひずみの変化
表 5.5 No.2 試験体 亀裂再現時 S600 ひずみの変化量

($\times 10^{-6}$)	L1		L2		L3		L4	
	極値	変化量	極値	変化量	極値	変化量	極値	変化量
B	-250	-197	-554	-595	-370	-322	-681	-639
Do	-575	-610	-634	-581	-649	-565	-686	-711
Uo	-395	-448	-184	-235	-172	-158	-486	-391

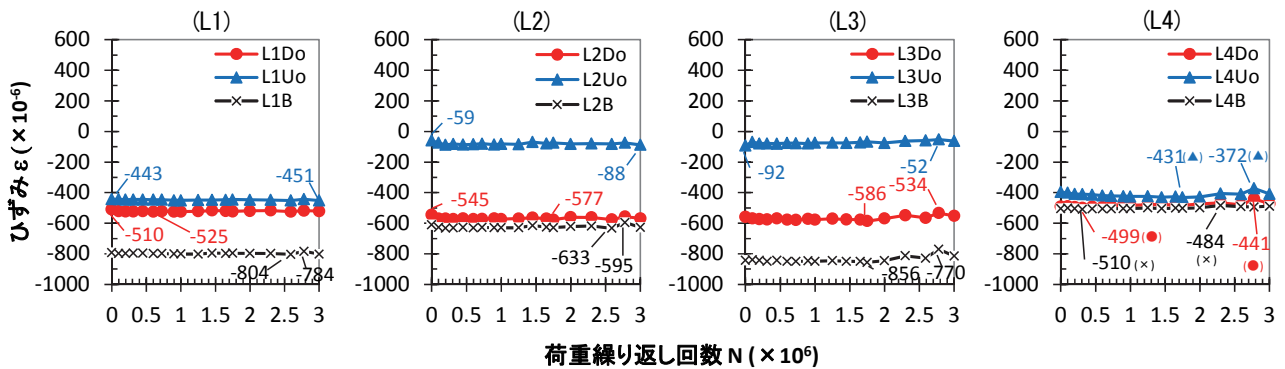


図 5.16 No.2 試験体 亀裂再現時 S1200 のひずみの変化

表 5.6 No.2 試験体 亀裂再現時 S1200 ひずみの変化量

($\times 10^{-6}$)	L1			L2			L3			L4		
	極値		変化量	極値		変化量	極値		変化量	極値		変化量
B	-804	-784	20 (2%)	-633	-595	38 (6%)	-856	-770	86 (10%)	-510	-484	26 (5%)
Do	-510	-525	15 (3%)	-545	-577	32 (6%)	-586	-534	52 (9%)	-499	-441	58 (12%)
Uo	-443	-451	8 (2%)	-59	-88	29 (33%)	-92	-52	40 (43%)	-431	-372	59 (14%)

b) 亀裂再現状況

ビード貫通亀裂再現実験後の亀裂分布図を図 5.17 に示す。ビード亀裂の確認は、再現実験中の静的荷重によるひずみ計測時にビード表面に対し MT で行った。表面に出ていない内部にある亀裂のうち、デッキ亀裂は U リブを除去しなければ調査ができないため、全ての荷重パターン終了後に U リブを除去し、デッキ下面に対して MT により確認した。なお、デッキ亀裂は再現実験中か事後保全効果確認実験中かどの時点で発生したか不明であり、再現実験中に発生した可能性もあるため「全荷重終了後のデッキ下面での亀裂長さを示す。」と明記して図中に記載している。

ビード亀裂に関しては、S0 の L1 で 100 万回繰り返し荷重後に、表面長さ 24mm のビード貫通亀裂が確認されたが、他の 11 箇所では 300 万回の繰り返し荷重後も表面に貫通した亀裂は無く、表面から深さ 3~5mm で切削したところ、写真 5.4 に示すような長さ 1~6mm 程度の MT による指示模様が確認された。これは亀裂の幅が小さく、ルート部では写真 5.1 に示すようにビード側の開口幅が大きくなるため、これらの指示模様はビード内在亀裂と考えられる。写真 5.5 にビード内在亀裂確認のための切削前後の印象材による、ビード削り込み状況の断面図を示す。また、ビード内在亀裂の 11 箇所のうち 7 箇所、6~64mm のデッキ方向に進展した亀裂があった。

デッキ亀裂は、横リブ交差部の S0 の 4 箇所全てで生じ、20~60mm 程度である。縦リブ支間部 S600 では 4 箇所中 2 箇所、S1200 でも 4 箇所中 2 箇所で亀裂が発生した。亀裂長さは 6~60mm 程度である。デッキ亀裂は、交差部の方が発生しやすい傾向が認められる。

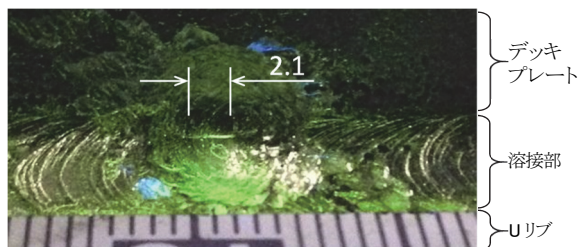
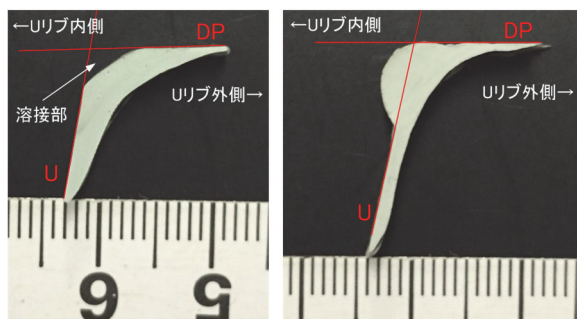


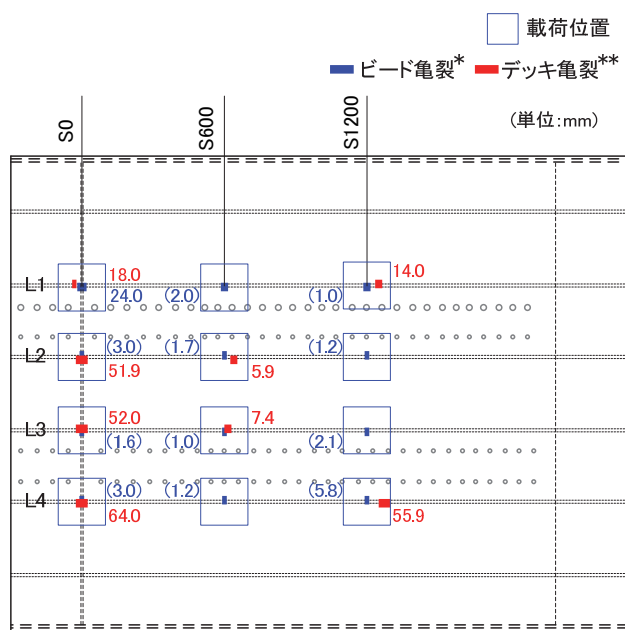
写真 5.4 内在亀裂の状況(S1200, L3)



(a) 切削前

(b) 切削後

写真 5.5 印象材による切削確認(S1200, L3)



平面図

図 5.17 亀裂再現実験後の亀裂分布図

※ ()はビード内在亀裂長さを示す。
 ※※ 全載荷終了後のデッキ下面での亀裂長さを示す。

(2) 事後保全効果確認実験

ビード貫通および内在亀裂が発生した状況で全て当て板を施し、直上載荷で更に 200 万回の繰り返し載荷を継続した。以下に結果を示す。

a) ひずみ変化

亀裂が生じた後、当て板を施したため、ひずみゲージは、手の届く S0 の U リブ内面のデッキ下面と U リブウェブに貼り付けた。荷重繰り返し回数 N とひずみ ϵ の関係を図 5.18 に、ひずみ変化量を表 5.7 に示す。

L1 では、既に長さ 24mm のビード貫通亀裂が生じていたため、ほぼひずみ変化が無かった。L2, L3, L4 では、デッキ下面のひずみ変化量が大きいことから、デッキ亀裂が発生・進展していることが推定された。

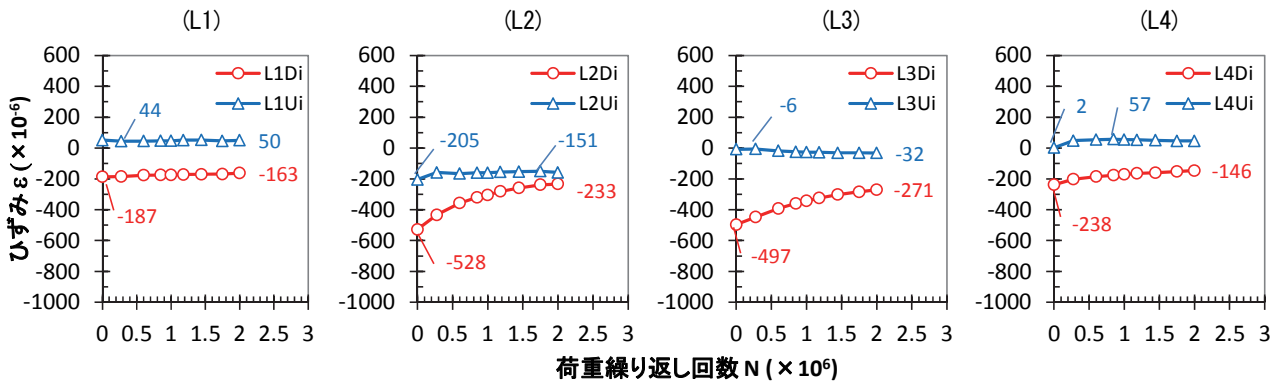


図 5.18 No.2 試験体 事後保全効果確認時 S0 のひずみの変化

表 5.7 No.2 試験体 事後保全効果確認時 S0 ひずみの変化量

($\times 10^{-6}$)	L1		L2		L3		L4	
	極値	変化量	極値	変化量	極値	変化量	極値	変化量
Di	-187	-163 24 (13%)	-528	-233 295 (56%)	-497	-271 226 (45%)	-238	-146 92 (39%)
Ui	44	52 8 (15%)	-205	-151 54 (26%)	-6	-32 26 (81%)	2	57 55 (96%)

b) 亀裂の発生・進展状況

事後保全効果確認実験後の亀裂分布図を図 5.19 に示す。ビード亀裂は事後保全効果確認実験の载荷後に、デッキ亀裂は全ての载荷パターン終了後に U リブを除去し、デッキ下面に対して MT により確認した結果である。

S0 のうち再現実験でビード貫通亀裂が生じた L1 では、ビード亀裂の表面長さ 24mm が 39mm に進展し、ビード亀裂端部付近で長さ 18mm のデッキ亀裂が生じた (図 5.20)。また、L2, L3, L4 では、ビード亀裂は進展しなかったものの、長さ 50mm を越えるデッキ亀裂が生じていた。

S600 と S1200 のビード内在亀裂が生じた 8 箇所のうち 4 箇所では、ビード表面まで亀裂が到達し、表面亀裂長さ 120~200mm 程度のビード貫通亀裂が生じた。それらのうち 1 箇所(S1200 の L4)では、ビード貫通亀裂の端部付近で 56mm 程度のデッキ亀裂が生じた (図 5.21)。残りの 4 箇所中 3 箇所ではビード内在亀裂の進展がほとんど見られず、デッキ亀裂が生じていた。

ビード亀裂とデッキ亀裂の両方が出た箇所 (S0 の L1, S1200 の L4 など) では、それぞれの亀裂発生位置がある程度離れているために別々に進展したものと考えられる。

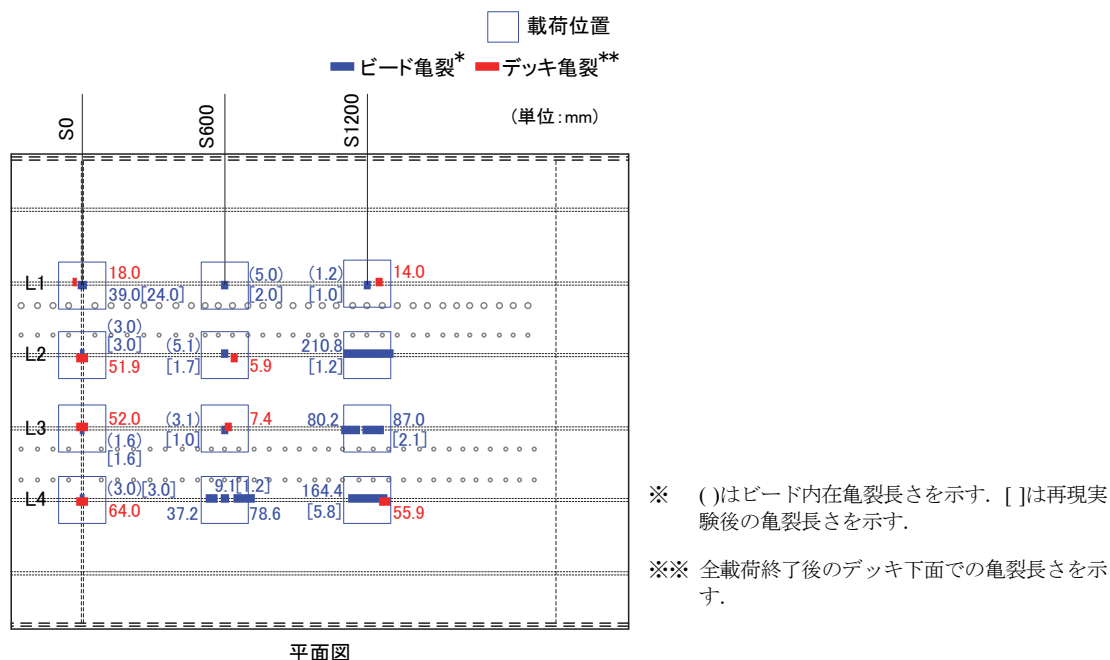


図 5.19 事後保全効果確認実験後の亀裂分布図

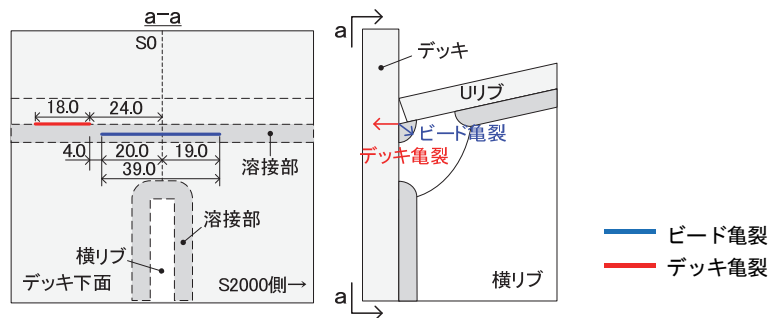


図 5.20 亀裂詳細図(S0, L1)

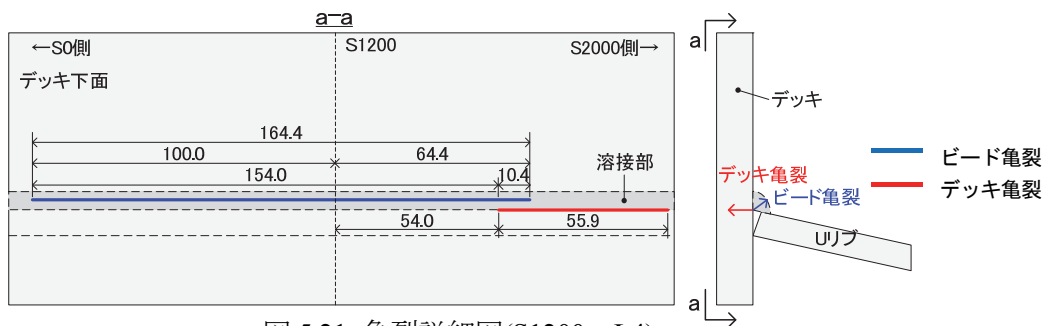


図 5.21 亀裂詳細図(S1200, L4)

(3) 予防保全効果確認実験（直上载荷）

疲労試験前に当て板を施工し、直上载荷で 300 万回の繰り返し载荷を行った結果を以下に示す。なお、当て板施工前に L3 の溶接ビードを切削した。S800 と S1400 の切削長さは、事後保全载荷部と隣接しているため载荷範囲直下のみとし 200mm とした。また、S2000 では当て板範囲が横リブまでとしているため、切削長さは支間側の 100mm とした。各切削位置を図 5.10 に示す。

a) ひずみ変化

荷重繰り返し回数 N とひずみ ϵ の関係を図 5.22 に、ひずみ変化量を表 5.8 に示す。なお、ひずみゲージ貼付け位置は、S2000 の U リブ内面のデッキ側下面と U リブウェブである。

L1, L3 では、デッキ下面のひずみ変化量が大きいことから、デッキ亀裂が発生していることが推定された。L2, L4 では、U リブのひずみ変化量が大きいことから、ビード亀裂が発生していることが推定された。

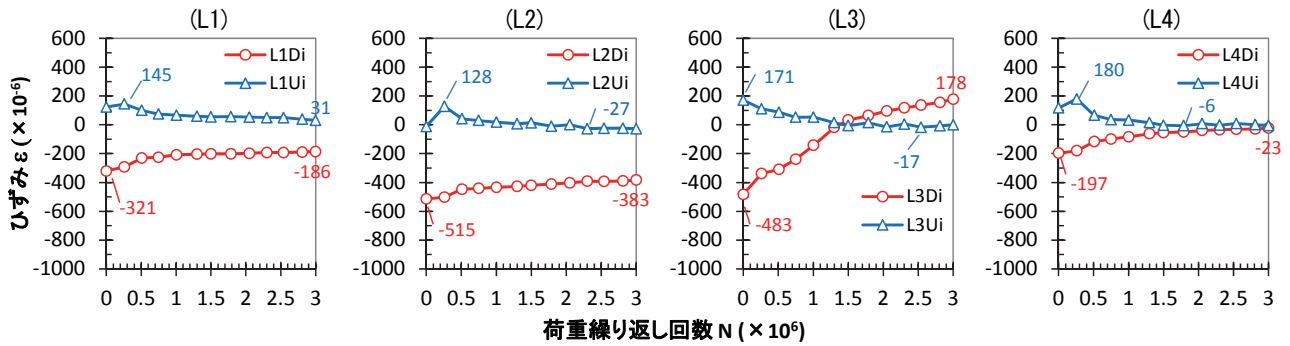


図 5.22 No.2 試験体 予防保全効果確認(直上載荷)時 S2000 のひずみの変化

表 5.8 No.2 試験体 予防保全効果確認(直上載荷)時 S2000 ひずみの変化量

($\times 10^{-6}$)	L1		L2		L3		L4					
	極値	変化量	極値	変化量	極値	変化量	極値	変化量				
Di	-321	-186	135 (42%)	-515	-383	132 (26%)	-483	178	661 (371%)	-197	-23	174 (88%)
Ui	145	31	114 (79%)	128	-27	155 (121%)	171	-17	188 (110%)	180	-6	186 (103%)

b) 亀裂の発生・進展状況

S2000 から端部側へは当て板をしていないため、ビード貫通亀裂の発生・進展状況を実験途中の各段階で確認できる。荷重繰り返し回数 N とビード貫通亀裂の表面長さを図 5.23 に示す。L1~L4 全てで長さ 45~61mm のビード貫通亀裂を確認した。亀裂は、150 万回程度から長さ 50~60mm 程度で進展が停留または遅延している。これは、載荷位置が横リブ交差部なので、剛性が高い横リブ直上に荷重が集中するためと考えられる。

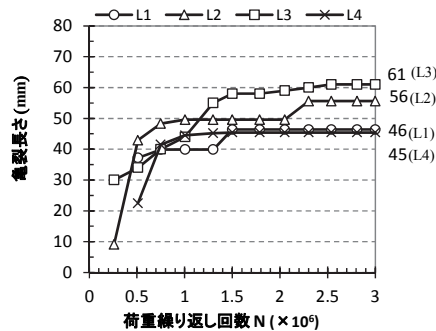


図 5.23 ビード亀裂進展状況(S2000)

(4) 予防保全効果確認実験（挟み込み载荷）

予防保全効果確認実験（直上载荷）に引き続き、Uリブウェブ挟み込み载荷をL1, L4を対象に200万回の繰り返し载荷を行った。

a) ひずみ変化

S2000のUリブ内面のデッキ下面とUリブウェブの荷重繰り返し回数 N とひずみ ε の関係を図5.24に、L1とL4のひずみ変化量を表5.9に示す。

L1では直上载荷で46mmのビード貫通亀裂が生じていたが、デッキ側が100万回を超える付近から急激に変化した。一方、Uリブ側は変化が小さくデッキ亀裂が発生していることが推定された。L4でも既に直上载荷で45mmのビード貫通亀裂が生じていたが、デッキ側、Uリブ側ともひずみ変化量が小さい。よって、こちらの方は、デッキ亀裂は発生していないものと推定された。L2, L3では、载荷していないこともあり、デッキ側、Uリブ側のひずみも小さく、亀裂は発生していないものと推定される。

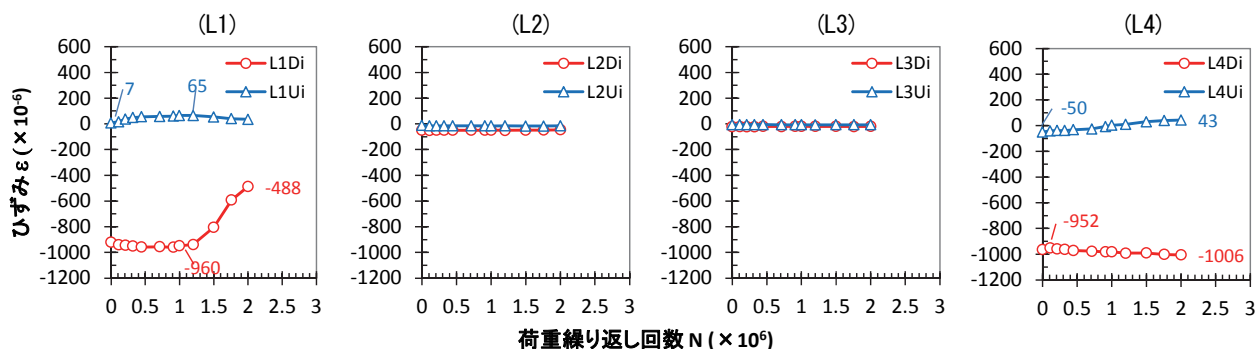


図 5.24 No.2 試験体 予防保全効果確認(挟み込み载荷)時 S2000 のひずみの変化

表 5.9 No.2 試験体 予防保全効果確認(挟み込み载荷)時 S2000 ひずみの変化量

($\times 10^{-6}$)	L1		L4		変化量
	極値	変化量	極値	変化量	
Di	-960	-488	-952	-1006	54 (5%)
Ui	7	65	-50	43	93 (186%)

b) 亀裂の発生・進展状況

予防保全効果確認実験の直上载荷および挟み込み载荷後の亀裂分布図を図5.25に示す。ビード亀裂、デッキ亀裂とも終了後に当て板やUリブを除去してデッキ下面をMTで確認した結果である。

載荷位置の溶接ビードを切削した L3 では、ビード切削部にデッキ亀裂は発生しなかった。一方、ビード切削端部にはビード亀裂とデッキ亀裂が発生した。したがって、当て板端部では、亀裂の再発を抑制・監視するための配慮が必要である。なお、実橋では、当て板端部のデッキと U リブ溶接部を削孔し、経過を監視している[5-14], [5-21].

L2 と L4 では、全ての箇所では表面長さ 40~90mm 程度のビード貫通亀裂を確認したが、デッキ亀裂は発生していなかった。L1 では、全ての箇所ではビード貫通亀裂とデッキ亀裂を確認した。亀裂長さは、ビード貫通亀裂が 10~50mm 程度、デッキ亀裂が 30~70mm であった。

以上より、L1 と L4 は同じ載荷条件であるが、亀裂の発生状況は異なる。これは、当て板の接合方法(L1:HTB, L4:TRS)の違いか、溶接の溶け込み量の違いによる可能性が考えられる。

また、直上載荷のみを行った L2 の全箇所ではビード亀裂のみが生じ、挟み込み載荷も行った L1 と L4 では 6 箇所中 3 箇所ではデッキ亀裂が生じた。直上載荷の場合はビード亀裂が生じやすく、挟み込み載荷の場合にはデッキ亀裂が生じやすい傾向であると推察される。なお、ビード亀裂とデッキ亀裂の亀裂タイプと溶け込み量の関係を調査したところ、溶け込み深さによる亀裂タイプ発生の傾向が見られた。結果については後述する。

ビードを残して当て板を施工した場合には、ビード亀裂とデッキ亀裂が生じた。一方、ビードを切削した箇所は、ビード切削端部の一部で亀裂が発生したが、切削部では亀裂は発生していない。このことから、ビードを残すと亀裂が発生するので、切削により取り除く必要があることが確認できた。

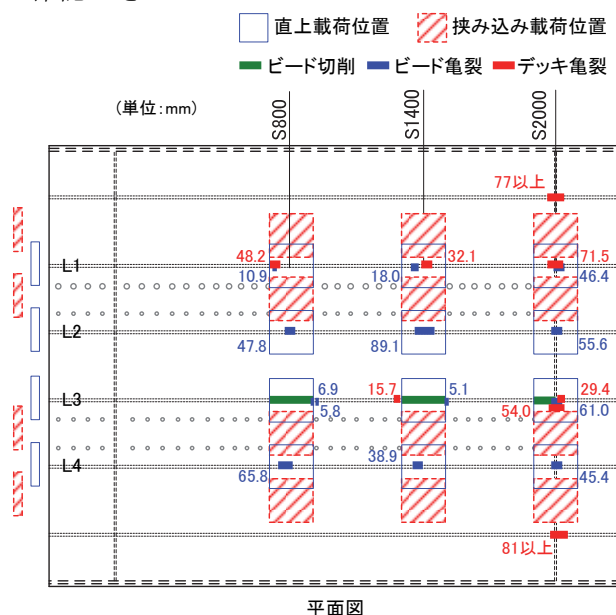


図 5.25 亀裂分布図(最終：全載荷後)

5.5 疲労亀裂の発生進展挙動に関する考察

本論文では、ルート部から発生するビード亀裂とデッキ亀裂に対する補修効果を検討しているため、それらの亀裂の発生進展挙動の把握は重要である。ここでは、実験で得られたひずみ変化によるビード亀裂とデッキ亀裂の発生進展挙動の推定、およびそれらの亀裂発生に及ぼすデッキとUリブ溶接の溶け込み量の影響について考察する。

(1) ひずみ変化による亀裂発生進展挙動の推定

事後保全ケースに対する亀裂発生推定結果と実際の亀裂の発生状況を表 5.10 に、予防保全ケースに対する亀裂発生推定結果と実際の発生状況を表 5.11 に示す。

ビード貫通亀裂は、ひずみ変化による発生を推定した 8 箇所中の 6 箇所ではビード貫通亀裂を、残る 2 箇所ではビード内在亀裂を確認した。一方、ビード内在亀裂は、ひずみ変化が小さいため推定できない箇所があった。

デッキ亀裂は、ひずみ変化による発生を推定した 7 箇所中の全てで亀裂を確認した。なお、S0 の L1 は、ビード貫通亀裂の端部からデッキ側へ亀裂が発生したケースであり、更には、ゲージ位置とデッキ亀裂の発生位置とが離れているため推定できなかったものと推察される。

表 5.10 ひずみ変化による亀裂発生推定と実際の発生状況（事後保全ケース）

		L1		L2		L3		L4	
		再現	事後	再現	事後	再現	事後	再現	事後
S0	推定	B	—	D	D	D	D	D	D
	実際	B・D		(B)・D		(B)・D		(B)・D	
S600	推定	B		B		D		B	
	実際	(B)		(B)・D		(B)・D		B	
S1200	推定	—		B		B		D	
	実際	(B)		B		B		B・D	

[凡例] B：ビード貫通亀裂，(B)：ビード内在亀裂，D：デッキ亀裂，—：亀裂発生の可能性小

表 5.11 ひずみ変化による亀裂発生推定と実際の発生状況（予防保全ケース）

		L1		L2		L3		L4	
		直上	挟込	直上	挟込	直上	挟込	直上	挟込
S2000	推定	D	D	B		D		B	—
	実際	B・D		B		B・D		B	

[凡例] B：ビード貫通亀裂，(B)：ビード内在亀裂，D：デッキ亀裂，—：亀裂発生の可能性小

(2) 亀裂発生に及ぼす溶け込み量の影響

No.2 試験体の全ての荷重パターン終了後に、Uリブを除去して、Uリブデッキ溶接部の溶け込み量を測定した。測定方法は、Uリブのルート面に対しデバイダーにてルート面の幅を測定し、Uリブ板厚($t=8\text{mm}$)から差し引いて溶け込み量とした。

測定箇所は、横リブ交差部の S2000 の L1~L4 の 4 箇所で行った。溶け込み状況の写真、測定データと亀裂範囲を図 5.26 に示す。L2 と L4 ではビード亀裂のみが発生し、L1 と L3 ではビード亀裂とデッキ亀裂の両方が発生している。

L2 と L4 のビード亀裂のみが発生した区間の溶け込み量は、L2 で $2.1\sim 2.7\text{mm}$ (平均 2.4mm)、L4 で $2.0\sim 2.2\text{mm}$ (平均 2.1mm) と全ての区間で溶け込み量が小さい。つまり、溶け込み量が小さいケースでは、ビード亀裂が発生したものと推察される。

L1 と L3 のデッキ亀裂が発生した範囲には、 3mm 程度の溶け込み量が確認されている区間がすべて含まれており、溶け込み量が大きいためデッキ亀裂が発生したものと推察される。なお、L1 と L3 では溶け込み量の最小値が 1.9mm と小さい区間もあったためビード亀裂も発生したものと推察される。

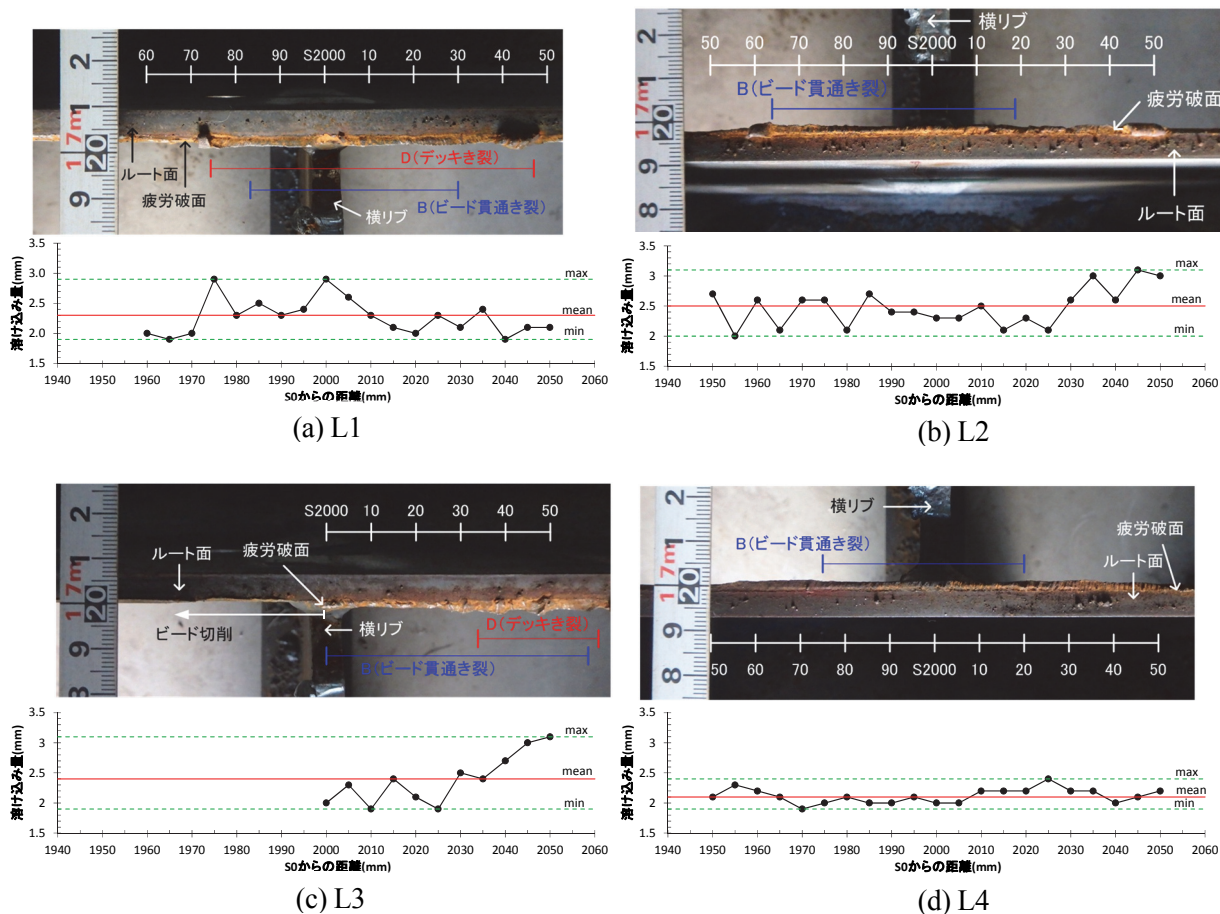


図 5.26 No.2 試験体 溶け込み量の分布状況 (S2000 付近)

5.6 実橋への適用

疲労試験の結果、開発した下面補修法の疲労耐久性が確認できたことから、本補修法を実橋へ適用することとした。適用に当たっては、はじめに疲労試験の当て板施工の知見から、施工手順を示したマニュアル（案）を作成した。次に工場での施工試験を経て実橋での試験施工を実施した。

(1) 施工方法

TRS（写真 5.4）による当て板を実橋へ適用するに先立ち、疲労試験での結果を踏まえ施工手順を示したマニュアル（案）を作成し、以下の手順で実施することとした。

- 1) 当て板範囲ビード両端部の削孔
- 2) デッキ -U リブ溶接部の切削
- 3) 当て板の仮固定（写真 5.5）
- 4) デッキ側 TRS $\phi 12$ 用ボルト孔（ $\phi 11.5$ ）の削孔（写真 5.5）
- 5) 当て板仮留め：TRS $\phi 12$ による仮留め
- 6) U リブ側へ MUTF20 用ボルト孔の削孔
- 7) U リブ側の MUTF20 のボルト群のうち中心付近の 2 本を 1 次締め
- 8) デッキ側へ TRS $\phi 16$ 用ボルト孔の削孔
- 9) デッキ側 TRS $\phi 16$ の締め込み（写真 5.6）
- 10) U リブ側の MUTF20 のボルト群全数を 1 次締め
- 11) U リブ側の MUTF20 のボルト群全数を本締め
- 12) シーリングおよび塗装による防せい

なお、手順の 8)～9)は、1 本ずつ当て板端部から施工し、全数の TRS $\phi 16$ 締め込み後に 10)以降の施工を行った。当て板設置完了状況を写真 5.7 に示す。また施工にあたり、いくつか特殊な工具を開発した。以下に代表的な開発工具を説明する。

- ・ ドリルストッパー内蔵の切削刃：デッキ側の削孔時に、舗装を切削しないよう削孔深さを調整するもの（写真 5.8）。
- ・ 磁石付きセンターピン：U リブ側削孔時に、削孔コアが U リブ内に落ち込まないようにするもの（写真 5.9）。

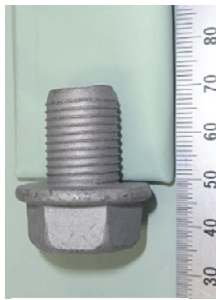


写真 5.4 TRS



写真 5.5 ボルト孔の削孔



写真 5.6 TRS 締め込み状況

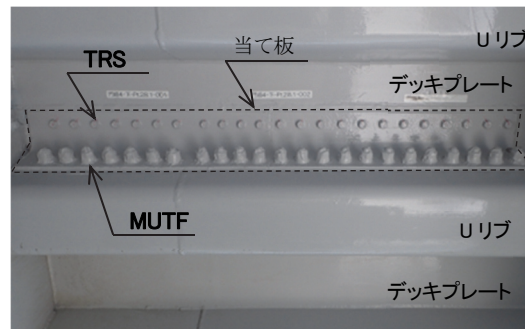


写真 5.7 施工完了

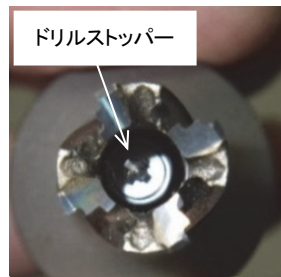


写真 5.8 デッキ側削孔刃



写真 5.9 Uリブ側削孔刃

(2) 施工試験

実橋での施工に先立ち、作業員の訓練と開発した工具等の有効性を確認するため、原寸大供試体を製作し、工場で施工試験を実施した[5-14]。施工試験では、ビード切削時のディスクグラインダーの当て方や切削深さの見極め方、工具の使い分け、当て板仮留め時の補助工具等の使用方法など、各手順の確認と施工能力の把握を行った。

(3) 実施工（試験施工）

横リブを挟む約 2m 区間について当て板を 3 分割し、施工試験で確認した手順で実施した[5-14]。橋に常設する点検作業車を使用した環境での施工に加え、初めての施工であったため、当て板の施工には 3 日を要した。なお、施工後 1 年の経過観察では、ボルトの緩みや漏水、亀裂再発などは確認されていない。

5.6 結言

開発した下面からのみで施工可能なビード貫通亀裂に対する補修法に対する、疲労試験、および実橋適用に当たって実施した施工試験や試験施工の結果、ビード貫通亀裂に対する補修法として有効性と、下面からのみで施工可能であることを確認できた。また、本補修法を実施することにより、デッキ亀裂に対しても有効な補修法であることも確認できた。以下に本検討を通じて得られた結果をまとめて列記する。

(1) 疲労試験における亀裂再現状況

ビード亀裂に関しては、横リブ交差部の1箇所のみでビード貫通亀裂が生じ、他の3箇所と縦リブ支間部の8箇所、計11箇所では、ビード内在亀裂が確認された。また、それら11箇所のうち、交差部3箇所と支間部4箇所でデッキ亀裂が生じていた。

(2) 事後保全対策効果

ビードを残して当て板補修を施した場合、ビード亀裂もデッキ亀裂も発生・進展したことから、当て板補修時にはビードを切削する必要があることを確認できた。

(3) 予防保全対策効果

予防保全対策として、デッキとUリブの溶接ビードを切削し当て板を施工することにより、デッキ亀裂を防止できることが確認された。また、切削時に部分的に切削残りが生じて、繰り返し载荷によって残ったビードは破断し、その後、デッキ亀裂は発生しないことを確認した。

ビードを切削した範囲では、ビード亀裂およびデッキ亀裂の発生は認められなかった。ただし、切削端部においてビード亀裂、デッキ亀裂が生じる場合があった。したがって、切削端部では削孔による亀裂進展抑止[5-19]などの処置を行うとともに、定期的な監視を行う必要がある。

(4) ビード亀裂とデッキ亀裂の発生条件

デッキとUリブ溶接の溶け込み量が小さい(2mm程度以下)場合にはビード亀裂が生じ、溶け込みが大きい(3mm程度以上)場合にはデッキ亀裂が生じる傾向がある。また、Uリブウェブ直上载荷の場合にはビード亀裂が生じやすく、Uリブウェブ挟み込み载荷の場合にはデッキ亀裂が生じやすい傾向があることが確認された。

(5) 接合方法の評価

HTB, TB, TRSの3種類の接合方法とも、ボルトの緩みやボルト孔からの亀裂発生などの変状が生じないことを確認した。また、亀裂発生の有無や発生した亀裂長さを比較すると、事後保全および予防保全のケースとも接合方法による亀裂発生状況に大きな違いは認

められず、実験を行った繰り返し載荷荷重と回数の範囲内ではほぼ同等であると評価できる。また、施工性に関しては、TB と TRS は下面からのみの作業で当て板施工が可能であり、特に TRS は TB と比べめねじ形成工程が省略できることから、より施工性が高く有利な施工方法であることが検証できた。

(6) 実施工

開発した補修法により舗装を傷めることなく、下面からのみによる当て板補修が可能であることを確認できた。また、施工後1年の経過観察でも、ボルトの緩みや漏水、亀裂再発などは確認されておらず、良好な結果を得ている。

以上、Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂に対する下面補修工法について、実物大試験体による疲労試験による検討、および実橋への適用を目的とした施工試験や試験施工、ならびに実橋施工後の経過観察から、従来の当て板構造と同等の耐久性を確保でき、下面からのみで施工可能な補修法を開発することができた。ここで得られた知見は、本試験体と同様な構造ディテールをもつ鋼床版に対して適用可能であると考えられる。

また、前章までの結果と合わせ、ビード貫通亀裂に対する検出、進展特性、補修の一連の最適メンテナンスサイクルが構築できたものと考えている。

第5章 参考文献

参考文献

- [5-1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, pp.193-213, 2014.3.
- [5-2] 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針, pp.1-55, 2002.3.
- [5-3] 平林泰明, 牛越裕幸, 木ノ本剛：首都高速道路における鋼床版損傷, 鋼構造と橋に関するシンポジウム報告集, Vol.10, pp.39-53, 2007.8.
- [5-4] (財) 阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策 [三訂版], pp.82-88, 2014.3.
- [5-5] de Jong, F. B. P. (2004) Overview fatigue phenomenon in orthotropic steel decks in the Netherlands. Proc. 2004 Orthotropic Bridge Conf., Sacramento, USA, 489–512.
- [5-6] 川上順子, 高田佳彦, 坂野昌弘：鋼床版の疲労損傷に対する溶接を用いた補修補強工法に関する検討, 鋼構造年次論文報告集, 第15巻, pp.371-376, 2007.11.
- [5-7] 田畑晶子, 青木康素, 小野秀一, 山口隆司：Uリブ鋼床版のスタッドボルトを用いた補強方法の提案, 土木学会第69回年次学術講演会, I-466, 2014.9.
- [5-8] 青木康素, 田畑晶子, 小野秀一, 渡辺真至, 馬場敏, 山口隆司：スタッドボルトを用いて当て板したUリブ鋼床版の載荷試験, 土木学会第69回年次学術講演会, I-467, 2014.9.
- [5-9] 中井勉, 田畑晶子, 小野秀一, 山口隆司：スタッドボルトを用いて当て板したUリブ鋼床版の実物大試験体による静的載荷試験, 土木学会第70回年次学術講演会, I-385, 2015.9.
- [5-10] 小野秀一, 渡辺真至, 田畑晶子, 中井勉, 山口隆司, 儀賀大己：スタッドボルトを用いて当て板したUリブ鋼床版の輪荷重疲労試験, 土木学会第70回年次学術講演会, I-386, 2015.9.
- [5-11] A. Sato, A. Tabata, S. Ono : Improving the Durability of Existing Orthotropic Steel Decks using Steel Plates and Stud Bolts, 9th IABMAS 2016, FOZ DO IGUACE, BRAZIL, 26-30 June 2016

- [5-12] 坂野昌弘, 西田尚人, 田畑晶子, 杉山裕樹, 丹波寛夫: 鋼床版 U リブとデッキ間のビード貫通亀裂補修溶接部の疲労耐久性評価, 鋼構造年次論文報告集, 第 20 卷, pp.565-570, 2012.11.
- [5-13] 鈴木博之: スレッドローリングねじで接合された継手の強度に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.61A, pp.614-626, 2015.3.
- [5-14] 奥村淳弘, 坂野昌弘, 藤永政司, 藤井勝義: $\phi 16$ スレッドローリングスクリューのせん断強度, 土木学会第 70 回年次学術講演会, CS4-007, 2015.9.
- [5-15] 奥村淳弘, 坂野昌弘, 藤永政司, 藤井勝義, 西山圭介: $\phi 16$ スレッドローリングスクリューのせん断強度, 材料学会 若手学生研究発表会, No.5, 2015.10.
- [5-16] 金澤高宏, 貴志友基, 溝上善昭, 森下元晴, 西山圭介, 坂野昌弘: U リブ鋼床版のビード亀裂に対する下面補修, 土木学会第 71 回年次学術講演会, CS6-003, 2016.9.
- [5-17] 西田尚人, 坂野昌弘, 田畑晶子, 杉山裕樹, 迫田治行, 丹波寛夫: 鋼床版 U リブとデッキ溶接部のビード貫通き裂の再現実験, 第 7 回道路橋床板シンポジウム論文報告集, pp.67-72, 2012.6.
- [5-18] 杉山裕樹, 閑上直浩, 佐々木一則: 阪神高速道路における実態活荷重調査, 阪神高速道路第 43 回技術研究発表会論文集, pp.1-6, 2011.5.
- [5-19] (財) 阪神高速道路管理技術センター: 阪神高速道路における鋼橋の疲労対策 [三訂版], pp.7-12, 2014.3.
- [5-20] 坂野昌弘, 西田尚人, 田畑晶子, 杉山裕樹, 奥村学, 夏秋義広: 内面溶接による U リブ鋼床版の疲労耐久性向上効果, 鋼構造論文集, 第 21 卷第 81 号, 2014.3.
- [5-21] 溝上善昭, 花井拓, 鎌田将史, 新野貴大, 神田隼太: U リブ鋼床版ビード貫通亀裂の進展特性, 土木学会第 71 回年次学術講演会, I-386, 2016.9.
- [5-22] 岡本陽介, 大谷将一郎, 中山太士, 松井繁之: 鋼部材に発生した疲労き裂の補修方法に関する検討, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 卷, 2014.11.

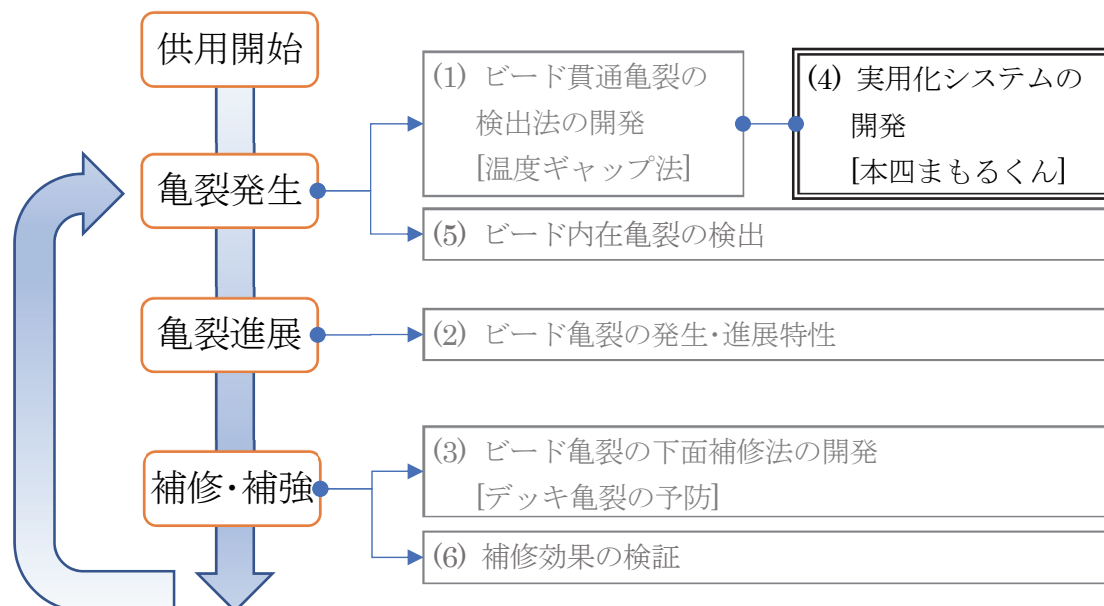
第6章 温度ギャップ法を用いたビード貫通亀裂検出の

実用化システムの開発

赤外線サーモグラフィを用いた疲労点検を実橋へ導入するには、検出法開発時に使用した汎用機を用いるより効率的に撮影でき、評価者による判定のバラツキのないシステムの導入が効率性、確実性、信頼性の観点から必要不可欠である。

導入にあたり実用化システムに対しては、点検環境にあった撮影装置の開発と、亀裂や疑似亀裂などを区分し検出できるアルゴリズムの開発が必要となる。本章では、本手法に関する当面の開発課題として、本州四国連絡橋を対象とした実用化システムの開発を行った内容について述べる。

本章で述べる、温度ギャップ法を用いたビード貫通亀裂検出の実用化システムの開発は、緒論で述べた疲労のメンテナンスサイクルにおける、下図の2重枠で示すところに位置づけられる。



6.1 緒言

第3章において、温度ギャップ法による亀裂検出については、赤外線サーモグラフィによる遠隔からの移動撮影でも、非破壊で疲労亀裂の検出が十分に可能であることを述べた。従来の磁気探傷や超音波探傷による非破壊検査手法と比較して、温度ギャップ法を用いた疲労亀裂の検出法は、格段に検査スピードが速く、対象となる溶接全線の探傷も十分可能な手法である。これまで開発に用いた赤外線サーモグラフィ汎用機による手法でも、亀裂点検としては目視点検以上の性能は確保できるものの、検査対象となる溶接線延長が車線延長の6~8倍と非常に長くなるため、同技術の現場実装に当たっては、専用の計測装置による更なる効率的な撮影手法の確立が必要となる。また、亀裂の検出は、解析システムによる自動亀裂検出により、評価者による欠陥検出のばらつきを無くすことも重要である。

本章では、赤外線サーモグラフィを用いた撮影により得られた温度測定データから、亀裂等の欠陥の有無を、属人性を排除して自動判定するための方法について述べる。次に、現場実装のための計測システムとして温度画像を効率的かつ的確に取得するための撮影装置と、取得したデータから亀裂等を自動検出する解析ソフトを開発した内容について記述する。

6.2 検出原理

本手法による検出対象としている亀裂は、図6.1に示すUリブ鋼床版のデッキプレート-Uリブ溶接部に発生するビード貫通亀裂である[6-1]。第3章において述べたが、亀裂検出原理は以下のとおりである。図6.2に示すとおり、路面が日射を受け、舗装が温められることによりデッキプレートからUリブへ伝わる熱伝導が、亀裂部では阻害されることにより健全部と異なる温度場を示す。これを赤外線サーモグラフィで捉え、亀裂として検出する[6-2]。

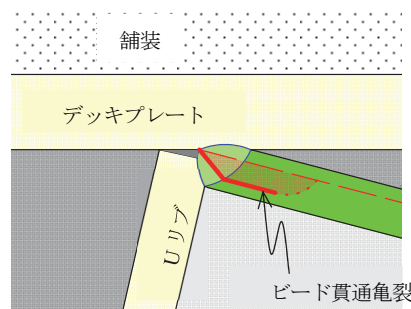


図 6.1 ビード貫通亀裂

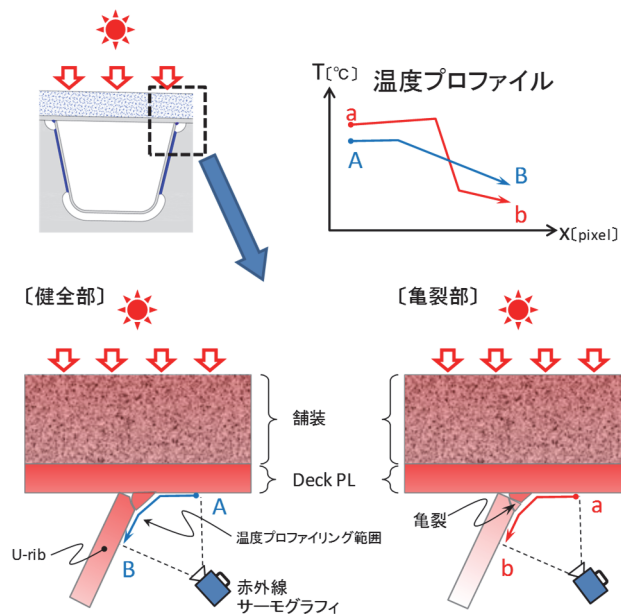


図 6.2 温度ギャップ検出法の原理

6.3 亀裂と亀裂以外の温度分布特性

温度ギャップ法による検出を行う場合、亀裂の他に局所的な温度変化を示す変状として、塗膜の浮きや局所的な汚れによる疑似表面温度変化などの変状(以下「塗膜浮き等」と呼ぶ)がある。亀裂の自動検出を精度よく行うためには、変状の検出に加えて、亀裂による変状と塗膜浮き等の外乱による変状とを区別することが必要である。まず、これまでに計測した亀裂と塗膜浮きの温度分布特性について検討する。

亀裂部と塗膜浮き部の温度画像、温度画像内ライン上の温度プロファイルとその微分値分布、および微分最大・最小値分布をそれぞれ図 6.3(亀裂部)および図 6.4(塗膜浮き部)に示す。なお、これらの図は、後ほど説明する平滑化処理によるノイズ改善を行っている。

図 6.3(a)および図 6.4(a)に示した温度画像上のライン A およびライン B 上の温度プロファイルでは、塗膜浮き部(図 6.4(b)A-Line)では、浮き部のみ温度低下するため、その微分値(図 6.4(c)A-Line)の分布では、プラス側とマイナス側の両方に極大値を示す。それに対し、亀裂部(図 6.3(b)A-Line)では、亀裂部の微小な隙間によってデッキプレートから U リブへの熱伝導が阻害されるため、亀裂部で温度低下した後は、塗膜浮き部のような大きな温度の上昇傾向は見られない。そのため、微分値(図 6.3(c)A-Line)は、マイナス側のみ極大値を示すことになる。図 6.3(d)および図 6.4(d)は、ライン A やライン B などのラインごとに、温度微分値のプラス側とマイナス側のそれぞれの極値である最大値と最小値を、x 方向すな

わち溶接線方向へプロットしたものである。つまり、最大値とは温度微分値のプラス側の極大値の分布であり、最小値とは温度微分値のマイナス側の極小値の分布である。図 6.4(d)に示す塗膜浮き部では、前後の健全区間と比較して、温度微分値の最大値側は大きく、最小値側は小さい。図 6.3(d)に示す亀裂部では、前後の健全区間と比較し、温度微分値の最大値側の変化はなく、温度微分値の最小値側のみ小さい値を示している。このように、亀裂部と塗膜浮き部では、温度微分値の最大値側と最小値側の組み合わせに異なる傾向を示している。

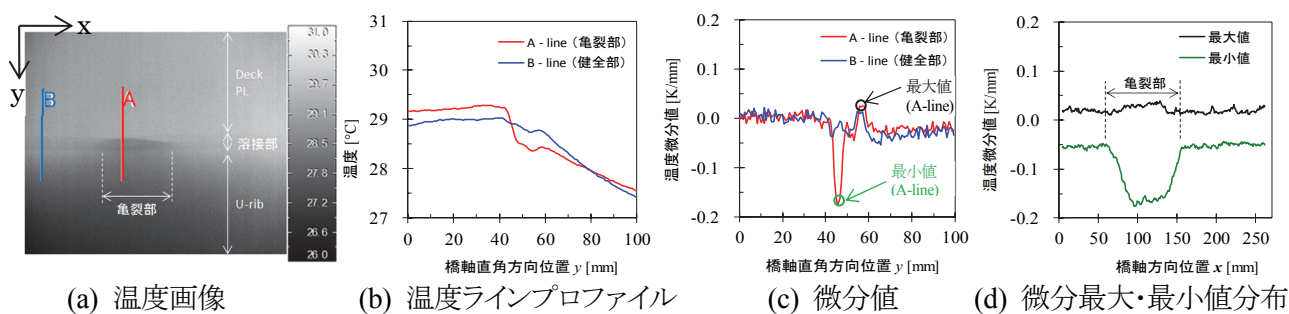


図 6.3 亀裂部の温度評価結果

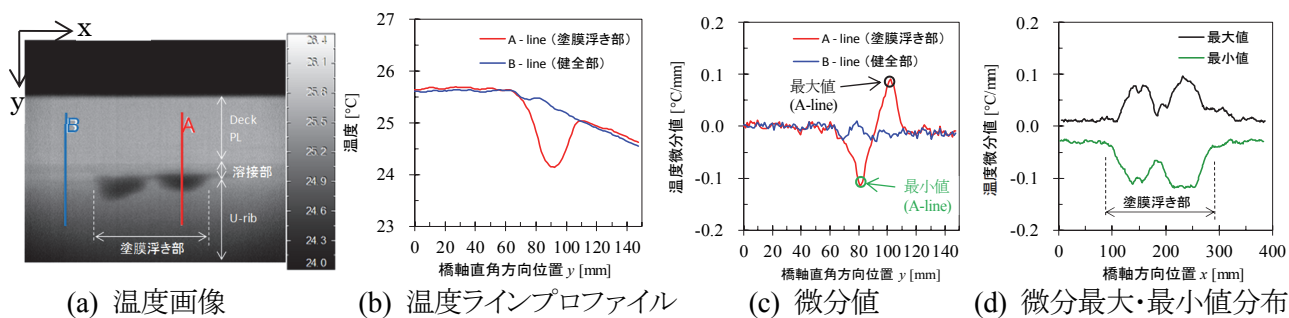


図 6.4 塗膜浮き部の温度評価結果

6.4 温度画像のノイズ改善

赤外線サーモグラフィにより計測した温度画像は、一般的に信号処理を行うことにより、ノイズを改善し、温度分布画像の画質を向上させる[6-3]。表 6.1 にノイズ改善のために用いられる代表的な2つの手法を示す。温度ギャップ法では、測定対象物に対してカメラを移動させながら連続撮影することを想定しているため、同じ部位、同じ視野の赤外線計測データを複数撮影できないことから、時間的な平均化処理に基づくノイズ改善を行うことは困難である。そのため、本手法では空間的な平滑化処理を用いたノイズ改善を行うこととし、その場合に最適な平滑化画素数について検討する。

表 6.1 ノイズ改善の手法と特徴

名称	処理方法と特徴
平均化処理 (画像加算 平均処理)	複数枚撮影した画像を加算して平均化する処理 温度差の少ない試験対象物を撮影する場合や、温度分解能が低い場合、ノイズの多い画像の画質を向上させるのに有効
平滑化処理	注目画素を中心として近傍画像の平均値を、その画素の代表値として置き換える移動平均化手法. 3×3 , 5×5 画素等の奇数値の倍数が使用され、平均化する画素数が多くなるほど全体がぼやけた画像となる.

ノイズ改善の検討は、第3章において述べた、検出性能の確認実験に用いた、長さ 42mm と 52mm の短い 2 つの亀裂を対象とし、夏計測の A.M.11 時台のデータを用いて行った。検討にあたっては、平滑化処理を行う周囲画素の x 方向(溶接線方向), および y 方向(溶接線直交方向)の画素数 M_x および M_y をパラメータとし、亀裂信号 S (温度微分最小値)と健全区間のノイズ成分 N (温度微分最小値分布の標準偏差)の比率である S/N 値を比較とした。なお、 N は、それぞれの亀裂に隣接する健全区間(約 600mm)のデータから算出している。

ノイズ改善を行った結果を図 6.5 に示す。平滑化処理を行うことにより、温度微分最小値の S/N 値が改善されていることが分かる。 x 方向の平滑化画素数は、一部 $M_x=5$ または 11 点で頭打ちの傾向を示すものもあるが、概ね画素数増加に伴い S/N 値は単調に向上している。一方、 y 方向については、 $M_y=7$ または 9 点を超えると S/N 値が低下する傾向が見られた。これは、平滑化処理によって亀裂部での温度勾配が小さくなったために生じたものであると考えられる。

平滑化処理する画素数を適切に設定することにより、本手法における欠陥検出性の向上が可能であることが示された。なお、以後に示す実験結果は、画素数 $M_x=11$, $M_y=5$ で平滑化処理し、ノイズ改善したデータを用いたものである。

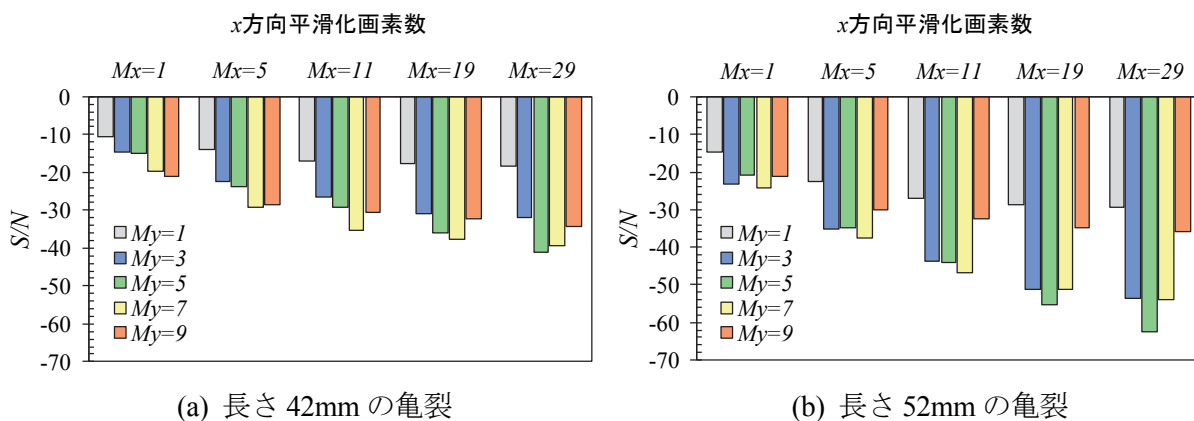


図 6.5 平滑化画素数別の S/N 値

6.5 亀裂検出アルゴリズム

温度ギャップ法により亀裂を高精度に検出するために、前章までに検討した亀裂部や塗膜浮き部に見られた温度等の特性から、温度微分最小値側に着目することで、亀裂等の変状を判定することを考える。しかしながら、温度微分最小値側のみによる判定では、亀裂のほかに塗膜浮き等も検出されてしまうため、塗膜浮き等の変状を、検出されたすべての変状から区分する必要がある。

ここでは、まず亀裂を確実に検知するため、亀裂の特徴である温度微分最小値側に着目し、亀裂と塗膜浮き等とを検出する判定式の検討を行った。その後、亀裂と塗膜浮き等を仕分ける区分式の検討を行った。最後に、亀裂および塗膜浮き等の自動検出フローを提案する。

(1) 亀裂および塗膜浮き等の判定式

第3章[6-2]において述べた、検出性能の確認実験時に用いた、長さ42、52および160mmの各亀裂に対して得られた、夏、秋の計測での時刻ごとの温度微分値の最小値（以下、温度微分最小値と呼ぶ） L を図6.6に、計測ごとの亀裂部の温度微分最小値 L を健全区間における L の平均値 L_{mean} で除した a 値(式(6.1))の結果を図6.7にそれぞれ示す。

図6.6に示した、温度微分最小値 L は、季節ごとまた時刻ごとに変化している。一方、図6.7に示す a 値は、亀裂ごとに一定の範囲内に収まっている。亀裂や塗膜割れ等の変状を検出するためには、式(6.1)による判定の基準化が有効であることが分かる。

$$a = \left| \frac{L}{L_{\text{mean}}} \right| \quad (6.1)$$

- a : 亀裂や塗膜浮き等の判定式
 L : 温度微分最小値 [K/mm]
 L_{mean} : 温度微分最小値の平均値(健全区間) [K/mm]

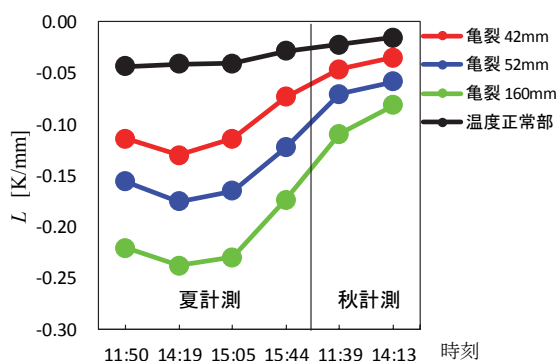


図 6.6 温度微分最小値 L

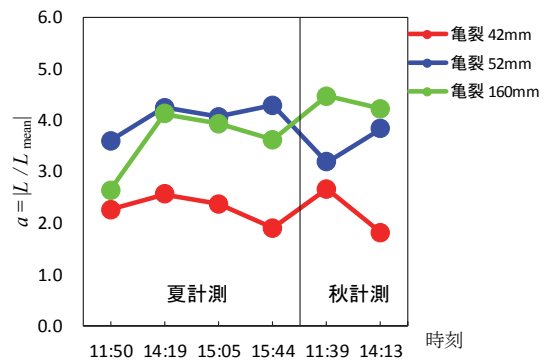


図 6.7 健全区間により基準化した a 値(= L/L_{mean})

(2) 亀裂と塗膜浮き等の変状の区分式

前節で判定された変状には、亀裂のほかに、塗膜浮き等の外乱も含まれる。ここでは、それらを仕分ける区分式の検討を行った。

第3章[6-2]において述べた未検査橋梁での計測(未検査領域に対して、初めて温度ギャップ法を適用した実験)において、温度ギャップ法による亀裂や塗膜浮きを確認した変状の温度微分値の分布を、図6.8に示す。図に示しているのは、ビード表面上の長さが40、46、65および120mmの4つの亀裂と2つの浮きに対するものである。亀裂と塗膜浮きでは温度微分最大値 H に明瞭な違いが現れている。このことから、亀裂と塗膜浮きとを仕分ける区分式として、以下の3つの式を検討する。

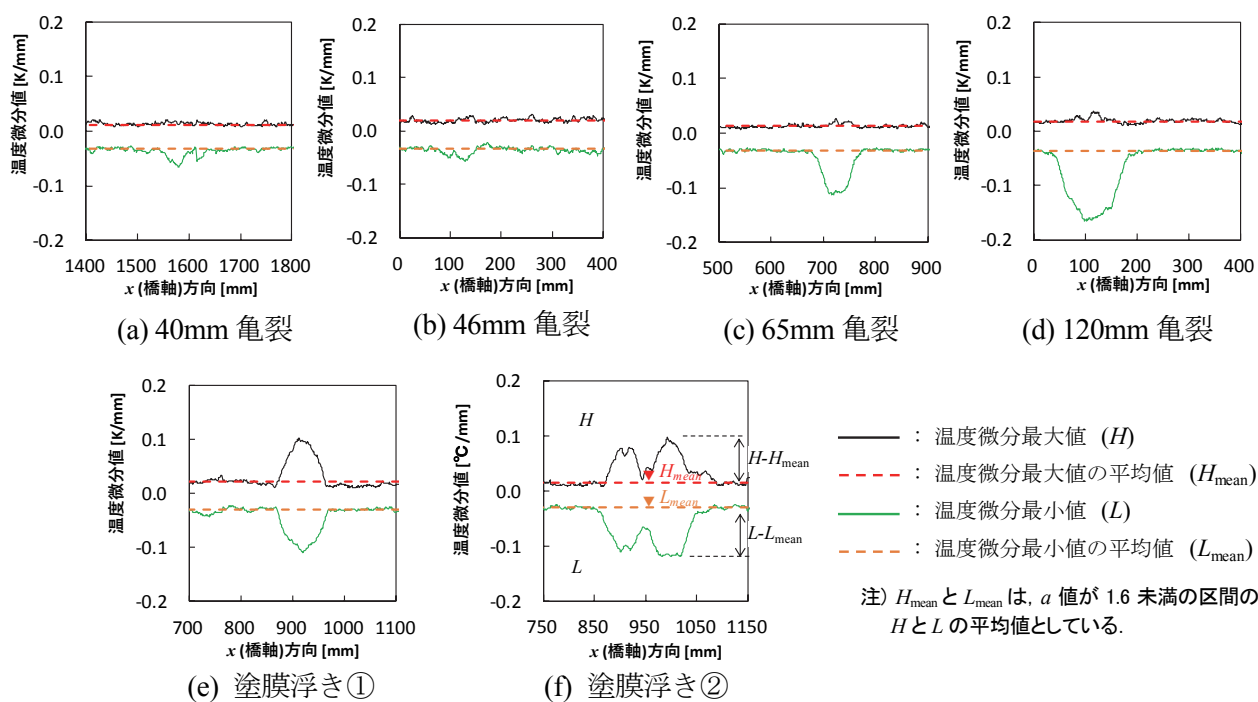


図6.8 温度微分値分布

$$b = \left| \frac{H}{H_{\text{mean}}} \right| \quad (6.2)$$

$$c_1 = \left| \frac{H}{L} \right| \quad (6.3)$$

$$c_2 = \left| \frac{H - H_{\text{mean}}}{L - L_{\text{mean}}} \right| \quad (6.4)$$

b, c_1, c_2 : 亀裂と塗膜浮き等の区分式

H : 温度微分最大値 [K/mm]

H_{mean} : 温度微分最大値の平均値(健全区間のみ) [K/mm]

L : 温度微分最小値 [K/mm]

L_{mean} : 温度微分最小値の平均値(健全区間) [K/mm]

なお、 H_{mean} と L_{mean} の健全区間とは、亀裂や塗膜浮き等が含まれる横リブ間のうち、それらの変状を除く区間である。

式(6.2)の b 値は、温度微分最大値 H と健全区間の平均値 H_{mean} により、塗膜浮き部を計測したデータから区別する方法であり、式(6.1)の a 値の考え方に類似する手法である。しかしながら、この方法は、健全部や亀裂部ではノイズを除き明瞭な温度上昇がないため、分母側の H_{mean} が 0 に近くなり、その結果 b 値が不安定になるため好ましくない。

一方、式(6.3)の c_1 値や式(6.4)の c_2 値は、式(6.1)において一定の a 値以上が検出された範囲であるため、温度微分最小値 L は健全区間の平均値 L_{mean} との差が大きく、式(6.3)や式(6.4)の分母となる $|L|$ や $|L - L_{\text{mean}}|$ は一定以上の値を示す。よって、 c_1 値と c_2 値は、 b 値と比較し安定した値を期待でき、亀裂部と塗膜浮き部を区別するための閾値を設定することが可能になるものと考えられる。

各亀裂と塗膜浮きの a, c_1, c_2 値を表 6.2 に、 c_1, c_2 値のグラフを図 6.9 に、それぞれ示す。 c_2 値は c_1 値と比較した場合、亀裂では全て小さく、浮きでは全て大きい値を示しており、 c_2 値を用いたほうが確実に、かつ安定して亀裂と塗膜浮き等の区別を行うことができることがわかる。

表 6.2 亀裂等の a , c_1 , c_2 の値

	a 値	c_1 値	c_2 値
亀裂	40mm	2.04	0.32
	46mm	1.66	0.49
	65mm	3.50	0.28
	120mm	4.57	0.18
浮き	①	3.72	1.04
	②	3.88	0.86

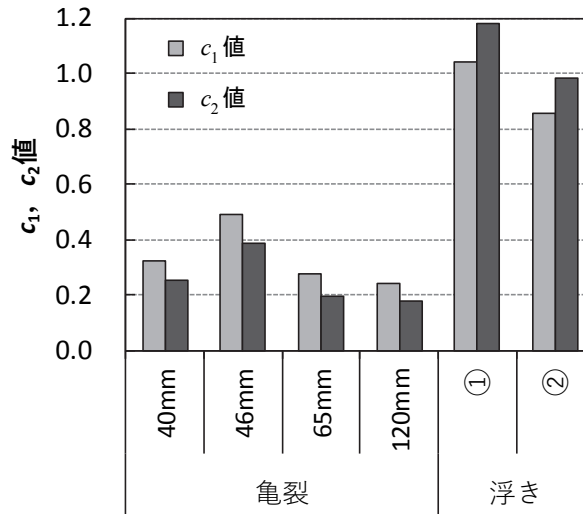


図 6.9 亀裂等の c_1 , c_2 の値

(3) 亀裂等の自動検出フロー

亀裂等の自動検出フローを、図 6.10 に示す。自動検出フローでは、はじめに判定式 a (式(6.1)) により、亀裂などの温度異常部(変状)を検出し、次に区分式 c_2 (式(6.4)) により、亀裂と塗膜浮き等の変状に仕分けることによって、効果的な亀裂等の自動検出が可能となる。

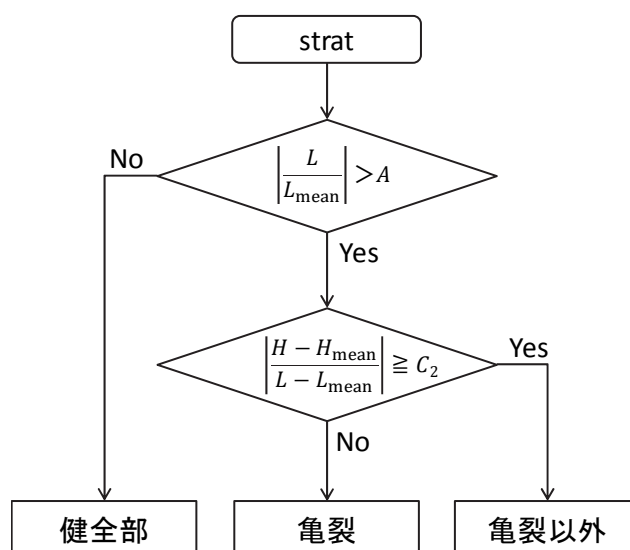


図 6.10 亀裂等自動検出フロー

6.6 亀裂検出実用化システム

亀裂検出実用化システムの開発においては、特に撮影録画システムの部分について、橋梁の管理路の設置状況や橋梁下の状況により、様々な走行装置を開発することが考えられる。今回の実用化システムでは、橋梁の様々な設置環境に対応が可能な共通部分と、各橋梁固有の条件に対応する個別部分とを考慮しながら、システム開発をすることとした。共通部分は、赤外線サーモグラフィ本体等であり、軽量コンパクトとし、想定できる範囲の撮影手法でも対応できる機種とした。個別部分は、走行装置であり、今回は海峡を跨ぐ長大橋である本州四国連絡橋を前提とした装置とすることとして、実用化システムの開発を行った。

本州四国連絡橋は、長大橋であることから死荷重軽減を目的に、ほぼ全ての橋梁で鋼床版を採用している。その総車線延長は約 100km と長く、国内で採用されている高速道路の閉断面タイプの鋼床版面積のうち約 16% を占めている[6-4]。これらに対して温度ギャップ法を用いた従来法による撮影と解析作業、すなわち汎用の赤外線サーモグラフィを用いた

撮影と収録した温度画像の目視によるコントラスト判定よりも、効率的かつ確実に温度ギャップ法による点検を進めるため、実用化システムを開発した。

実用化システムは、赤外線サーモグラフィ等により撮影する撮影録画システムと、亀裂等を自動的に検出する解析閲覧システムから構成される。解析閲覧システムには、前節までに述べた、亀裂等の自動検出フローをアルゴリズムとして採用している。なお、解析処理を高速化するため、一部の係数について、基準となる健全部での温度微分値の算出方法について検討した。

(1) 撮影録画システム

温度ギャップ法による撮影は、管理路や作業車の設置状況など、橋梁ごとにいくつかの撮影手法が考えられる。実用化にあたり、まずはデッキプレートとUリブ溶接部の溶け込み量が小さく、ビード貫通亀裂が発生しやすい構造を有し[6-5]，[6-6]，[6-7]，かつ累積の大型車交通量が多い、瀬戸大橋に対する装置開発を先行して進めることとした。

瀬戸大橋(斜張橋)の鋼床版の断面図および内面作業車の設置状況を、図 6.11 に示す。瀬戸大橋では、走行車線の輪荷重直下の溶接線は 16 本となるが、図に示したとおり、すべてを内面作業車と管理路から撮影することが可能である。そのため、内面作業車や管理路にレールを設置し、レール上を赤外線サーモグラフィ搭載の車輪式台車を走行させて温度分布計測を行うこととした。

開発した装置での撮影状況を写真 6.1 に、撮影装置と制御装置を写真 6.2 に、搭載した赤外線サーモグラフィの仕様を表 6.3 に示す。撮影装置は、車輪式台車上に赤外線サーモグラフィ、レーザーポインタ、ロータリーエンコーダ等を搭載している。また、可視画像撮影用に、ビデオカメラも搭載し、赤外線カメラと非同期ではあるが、可視画像の撮影を実施している。なお、現在、小型カメラによる赤外線画像との同期収録可能な装置へ改良しており、後述する解析作業の更なる効率化を目指している。

制御装置には、台車の制御、赤外線撮影の制御、録画・表示およびユーザーインターフェイスを組み込んでいるほか、撮影開始時に亀裂検出可能な環境条件であることを確認する機能なども搭載している。また、車輪式台車と制御装置は、当初は有線接続としていたが、現在では無線接続とし、有線ケーブルを捌く煩わしさが無くなり撮影作業が効率的にできるように改良している。

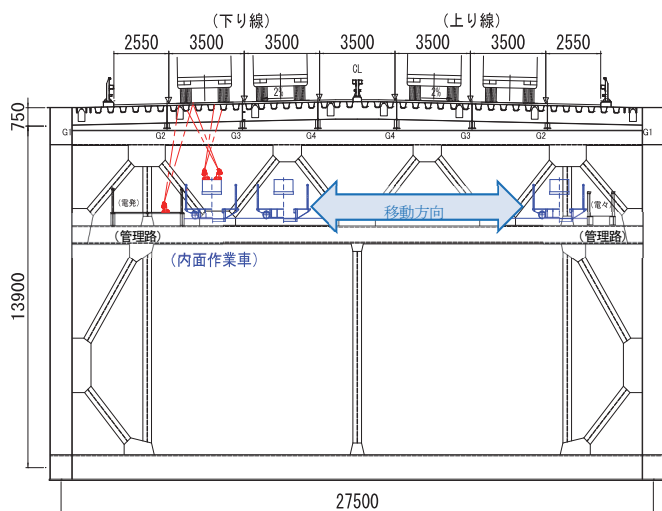


図 6.11 瀬戸大橋(斜張橋) 桁断面図

表 6.3 赤外線サーモグラフィの仕様

項目	仕様
検出器の種類	マイクロボロメータ
検出器画素数	640×512
測定波長帯	7.5～13.5 μm
温度分解能	0.030 K
フレームレート	30 Hz
使用レンズ (視野角)	60 mm Lens (10.4°×8.3°)



写真 6.1 開発装置による撮影状況



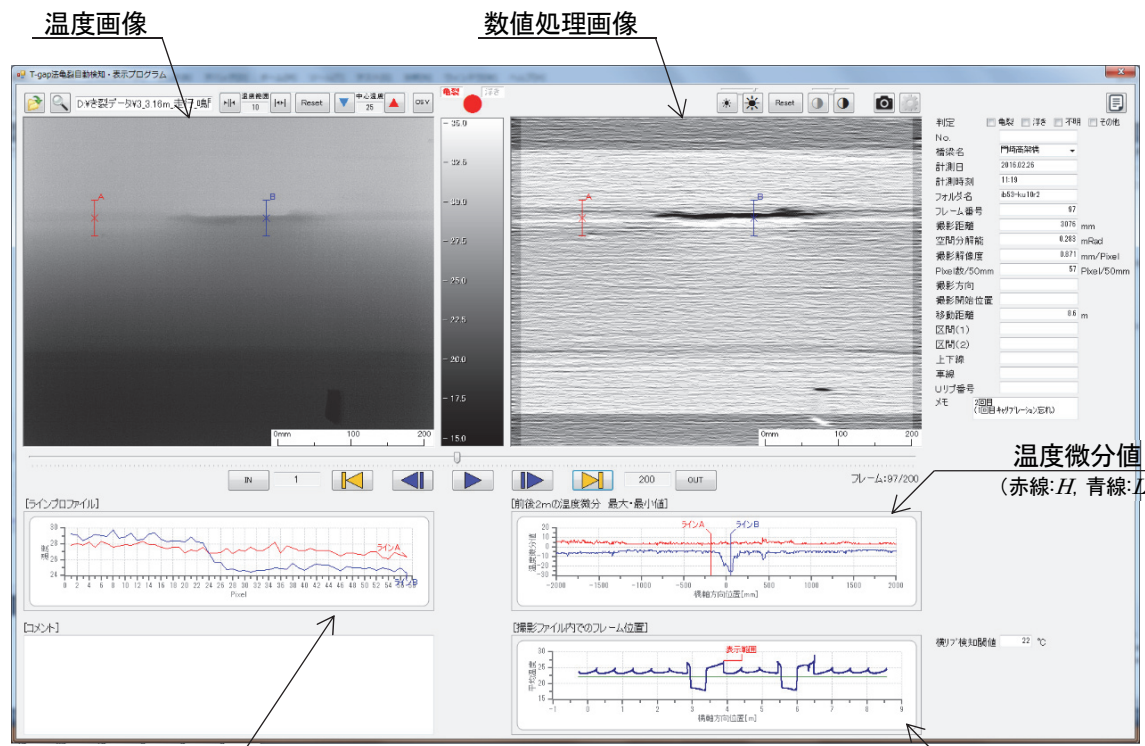
写真 6.2 撮影装置と制御装置
(愛称：本四まもるくん(仮称))

(2) 解析閲覧システム

閲覧画面の例を図 6.12 に、開発した解析閲覧システムのシステムフローを図 6.13 に、それぞれ示す。従来法は、評価者が温度画像コントラストの違いから亀裂指示模様を抽出し、温度プロファイル等を参考に亀裂指示箇所として検出していた。また、亀裂指示箇所的位置は、台車の移動速度や撮影したデータのフレーム番号、温度画像に映り込む横リブ(温度低下部)から特定していた。

開発した解析閲覧システムでは、前節までの検討結果と、後述する解析処理の高速化を目指した解析手法に基づき「亀裂」と「亀裂以外(塗膜浮き等)」を自動検出する。検出された亀裂等の変状箇所の閲覧は、ジャンプ機能により迅速に確認できる。また、温度画像に加え数値処理(微分処理)した画像を表示することにより、亀裂指示長さを推定でき、同期

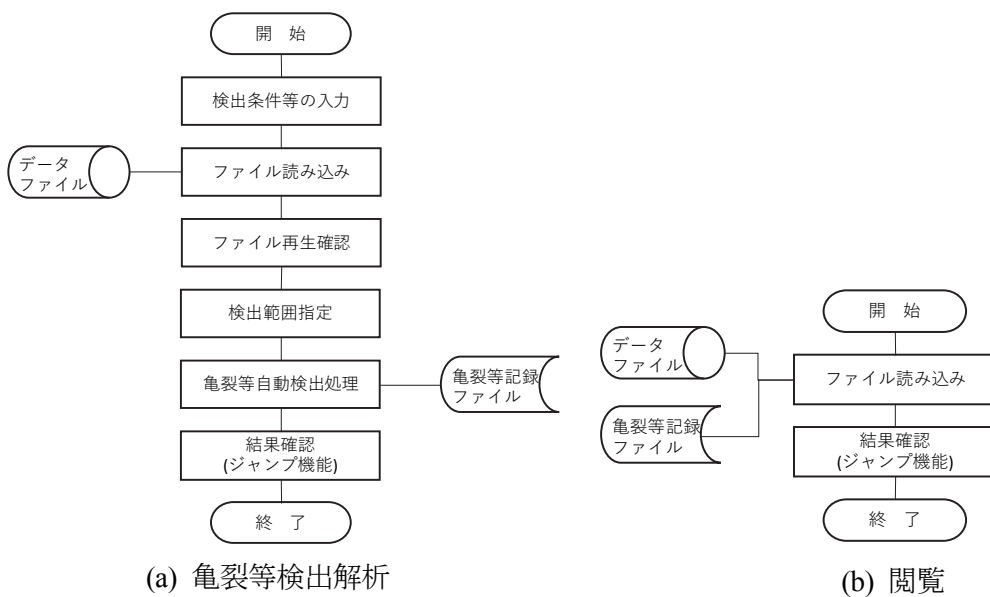
収録した位置情報、および検出した判定値や区分値などの属性情報も表示し、最終判定する評価者を支援するシステムとなっている。



温度ラインプロファイル

図 6.12 閲覧画面の例

表示フレーム位置



(a) 亀裂等検出解析

(b) 閲覧

図 6.13 解析・閲覧システムフロー図

(3) 解析処理の高速化

前章の検討では、亀裂等の判定基準となる温度微分最小値の平均値 L_{mean} や最大値の平均値 H_{mean} は、横リブ間における亀裂等の区間を除外した健全区間の平均値としているが、解析前では亀裂等の区間は不明である。そのため解析では、はじめに L_{mean} と H_{mean} を横リブ間における x 方向(溶接線方向)全ての断面(画素)の平均値とし、暫定的に亀裂等の区間を検出したのち、 L_{mean} と H_{mean} を再設定し、亀裂等を再検出する反復法による解析手法が考えられる。

しかしながら、赤外線による温度データは、撮影解像度 1mm/px 程度としており、撮影画角 640×480px で全溶接線を連続収録するため、解析処理するデータ量は膨大となる。さらに解析処理では、データの前処理として、温度データのノイズ改善処理が必要なことから、反復法では解析処理に時間を要することが想定される。そのため、解析処理を高速化するため反復法を省略する手法について検討することとした。

1) 解析処理の高速化の手法

高速化の手法は、 L_{mean} と H_{mean} を横リブ間の亀裂や塗膜浮き等を含んだ平均値とし、反復法を省略するものである。以下では、その影響について、前章で検討した亀裂や塗膜浮き等の区間を含まない健全区間のみで平均値を求める case1 と、高速化を目指した全区間で平均値を求める case2 について、 L_{mean} や H_{mean} 等を比較・評価し適用の可否について検討する。なお、検討対象としたのは、前節で用いた 4 つの亀裂と 2 つの浮きに対して得られた計測データである。

2) 平均値(H_{mean} , L_{mean})へ与える影響

温度微分最小値の平均値 L_{mean} と最大値の平均値 H_{mean} を、横リブ間の健全区間のみ(case1)および全区間(case2)から求めた結果を表 6.4 に示す。 L_{mean} の変化率は、120mm の亀裂と浮き②(変状区間 200mm 程度)の変状区間が長いもので 17%であるが、他は 10%以下と小さい。 H_{mean} の変化率は、浮き②が 22%、浮き①(変状区間 100mm 程度)が 9%であり、4 つの亀裂では 2%以下である。亀裂や浮きなど変状区間が長いものでは、10%を超える変化がみられるため、次節において亀裂や浮き等を検出する判定値 a と、仕分ける区分値 c_2 へ与える影響を検討する。

3) 亀裂等の判定値 a と区分値 c_2 へ与える影響

亀裂や浮き等を変状として検出する判定値 a と、亀裂と浮きとを仕分ける区分値 c_2 について、case1 と case2 を比較した結果を表 6.5 に、 a 値と c_2 値の case1 と case2 の比較グラフを図 6.14 にそれぞれ示す。

表 6.5 や図 6.14(a)に示した、亀裂や塗膜浮き等の変状を判定する a 値の変化率は、100mm 以下の亀裂と短い浮き①では 7%以下と変化は小さい。120mm の亀裂と長さ 200mm 程度

の浮き②では 15%程度 a 値が変化しているものの、 a 値はそれぞれ 3.91 と 3.32 であり、40mm や 46mm の短い亀裂と比較し十分大きく、全区間の平均値を用いた case2 であっても、これらの変状を見逃す可能性はない。

また、表 6.5 に示す c_2 値は、120mm の亀裂で 27%変化しているが、亀裂と浮きを区別する場合でも、図 6.14(b)で示すとおり亀裂と浮きの c_2 値の差は十分大きく、仕分けへの影響は小さいことが分かる。なお、100mm 以下の短い亀裂や浮きの c_2 値の変化率は 10%以下であり、仕分けへの影響はない。

以上に示した結果より、 L_{mean} と H_{mean} としては、横リブ間の亀裂や塗膜浮き等を含む平均値の case2 を用いても、今回検討した亀裂や塗膜浮き等では検出性や変状の区別に影響がないことがわかった。

一方で、今回検討した亀裂や塗膜浮きを超える長さの亀裂や塗膜浮き等の変状に対しては、120mm の亀裂の L_{mean} が 17%変化したこと、塗膜浮き区間が長い(200mm 程度)浮き②の L_{mean} と H_{mean} がそれぞれ 17%と 22%変化したことから、亀裂等の判定値 a や区分値 c_2 が大きく変化し、検出性や仕分けに影響する可能性も考えられる。しかしながら、これらに対しては、 L_{mean} や H_{mean} が大きく変化することから、隣り合う横リブ間の L_{mean} や H_{mean} を比較・監視することで、温度異常部を見逃しすることなく検出が可能であると考えられる。

表 6.4 亀裂等の有無が L_{mean} と H_{mean} へ与える影響

	L_{mean} [K/mm]			H_{mean} [K/mm]			
	健全区間 (case1)	全区間 (case2)	case1 case2	健全区間 (case1)	全区間 (case2)	case1 case2	
亀裂	40mm	-0.033	-0.035	1.07	0.012	0.012	1.02
	46mm	-0.034	-0.034	1.00	0.019	0.019	1.00
	65mm	-0.033	-0.035	1.07	0.012	0.012	1.02
	120mm	-0.036	-0.042	1.17	0.017	0.017	1.02
浮き	①	-0.030	-0.032	1.07	0.022	0.024	1.09
	②	-0.031	-0.036	1.17	0.016	0.019	1.22

表 6.5 亀裂等の有無が a , c_2 値に与える影響

	a 値			c_2 値			
	健全区間 (case1)	全区間 (case2)	case1 case2	健全区間 (case1)	全区間 (case2)	case1 case2	
亀裂	40mm	2.04	1.90	0.93	0.25	0.27	1.07
	46mm	1.66	1.66	1.00	0.39	0.39	1.00
	65mm	3.50	3.26	0.93	0.19	0.20	1.03
	120mm	4.57	3.91	0.85	0.18	0.23	1.27
浮き	①	3.72	3.47	0.93	1.18	1.19	1.01
	②	3.88	3.32	0.86	0.98	1.00	1.02

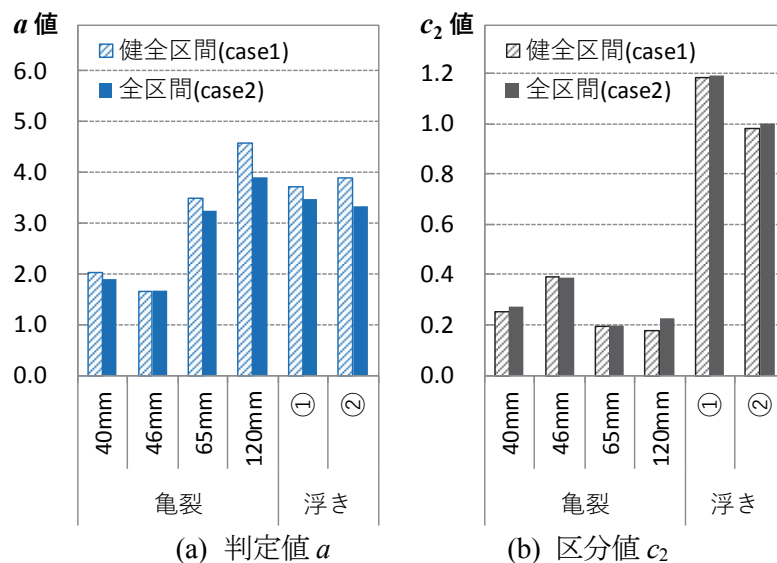


図 6.14 亀裂等の有無が a , c_2 値へ与える影響

6.7 結言

以下に、本研究で得られた温度ギャップ法での亀裂等の検出，および実用化システム開発と解析処理の結論について述べる。

- (1) y 方向 (溶接線直交方向)の温度微分値は，健全部と比較して亀裂部では最小値側のみに，塗膜浮き部では最小値側と最大値側の両方に大きな値を示す。
- (2) 温度画像を平滑化処理することにより欠陥検出性が向上する。最適な平滑化画素数は， x 方向(橋軸方向)では 5 または 11 点で頭打ちの傾向を示すものがあったが，概ね画素数増加に伴い S/N 値は単調に向上する。 y 方向(橋軸直角方法)は，7 または 9 点を超えると S/N 値が低下する傾向がみられており，5 または 7 点にするのが望ましい。
- (3) 亀裂と塗膜浮き等の欠陥の検出は，判定式 a (式(6.1)) によって判定するのが有効である。
- (4) 亀裂と塗膜浮きの仕分けは，区分式 c_2 (式(6.4)) を用いると確実，かつ安定して仕分けが可能である。
- (5) 開発した実用化システム (撮影録画・解析閲覧システム) により，温度ギャップ法による亀裂検出を効率的に実施できる。
- (6) 解析閲覧システムの欠陥検出では，健全部の基準値として横リブ間の微分最小値の平均値 L_{mean} と微分最大値の平均値 H_{mean} を用いても，今回検証した亀裂等の欠陥長さの変状に対する検出性や仕分けには影響がない。なお，長い変状では， L_{mean} や H_{mean} が健全部のみの場合と比較して大きく変化するが，隣り合う横リブ間の L_{mean} や H_{mean} を

比較・監視することにより，変状を見逃しすることなく検出できると考えらる．

Uリブ鋼床版のビード貫通亀裂に対し，温度ギャップ法による亀裂等の欠陥自動検出アルゴリズムの構築と実用化システムの開発により，汎用機を用いた従来法より高効率かつ高精度の欠陥検出が可能となった．今後は，検出した欠陥を分析し，判定パラメータ a 値および c_2 値の閾値の検証を進めるとともに，本州四国連絡橋のみならず，広くUリブ鋼床版を保有する管理者が使用できるような，実用化システムを目指していきたいと考えている．また，本システムの開発により，亀裂検出性能が高く，効率的な検出法が確立できた．本システムは，ビード貫通亀裂に対する最適メンテナンスサイクルの一翼を担うものと考えている．

第6章 参考文献

- [6-1] 土木学会：鋼床版の疲労(2010年改訂版)，pp.63-71，2010.12.
- [6-2] 溝上善昭，小林義弘，和泉遊以，阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版デッキプレート-Uリブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出，鋼構造論文集，第22号第87号，2015.9.
- [6-3] 日本非破壊検査協会：赤外線サーモグラフィ試験II 2012，pp.81-84，2012.11.
- [6-4] 土木学会：鋼床版の疲労(2010年改訂版)，pp.9-10，2010.12.
- [6-5] 溝上善昭，森山彰，小林義弘，坂野昌弘：Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂に対する下面補修工法の提案，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.73，No.2，pp.456-472，2017.8.
- [6-6] 川上順子，高田佳彦，坂野昌弘：鋼床版の疲労損傷に対する溶接を用いた補修補強工法に関する検討，鋼構造年次論文報告集，第15巻，pp.371-376，2007.11.
- [6-7] 西田尚人，坂野昌弘，田畑晶子，杉山裕樹，迫田治行，丹波寛夫：鋼床版Uリブとデッキ溶接部のビード貫通き裂の再現実験，第7回道路橋床板シンポジウム論文報告集，pp.67-72，2012.6.

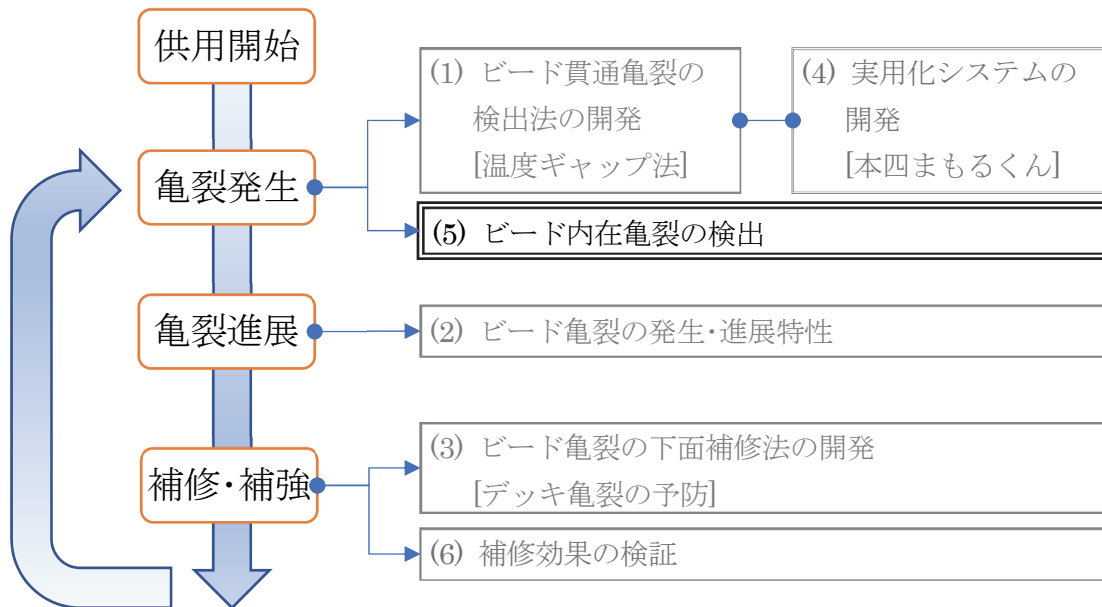
第7章

温度ギャップ法によるビード内在亀裂の検出性に関する研究

鋼床版のデッキプレート-Uリブ溶接部に発生するビード貫通亀裂は、ルート部から溶接ビード表面に進展・貫通する亀裂である。温度ギャップ法（第3章）および実用化システム（第6章）を開発したことにより、貫通に至った亀裂を高精度かつ効率的に検出することが可能となった。

その一方で、この亀裂はルート部を起点として溶接ビード中を進展する亀裂であり、亀裂前縁がビード表面に到達する前の亀裂内在状態における、亀裂検出に関する温度ギャップ法の有効性については、これまでに明らかとなっていない。そこで、本章では、温度ギャップ法を用いた内在状態の疲労亀裂検出の可能性に関して、基礎的な実験を行った内容について述べる。

本章で述べる温度ギャップ法によるビード内在亀裂の検出性に関する研究は、緒論で述べた疲労のメンテナンスサイクルにおける、下図の2重枠で示すところに位置づけられる。



7.1 緒言

Uリブ鋼床版のデッキプレートとUリブ溶接部に発生するビード貫通亀裂は、ルート部からビード表面に進展し貫通に至る亀裂である。貫通する前のビード内在状態での亀裂検出に対しては、Makitaらはフェイズドアレイ超音波探傷法に着目し装置開発を進めている[7-1]。また、首都高速道路株式会社においても、セミオートマチック超音波探傷装置(SAUT)による亀裂検出も実施されている[7-2]。しかしながら、いずれも検査スピードは遅く、検査するための足場等が必要になることも想定され、対象となる溶接全線に対して検査を実施するにはコスト的な課題が大きいことが推察される。

一方で、前章までに述べたように、Uリブ鋼床版のデッキプレートとUリブ溶接部に発生するビード貫通亀裂に対する低コストかつ効果的な非破壊検査手法として、著者らは、赤外線サーモグラフィによる温度ギャップ法[7-3]を提案し、既に実橋への適用を行っている[7-4]。本検出法は、亀裂面間に生じた微小な空隙により、舗装からデッキプレートを介してUリブへと伝わる熱伝導が阻害される部分に現れる温度ギャップを検出することで、疲労亀裂を検出するものである。

これまで、亀裂がルート部から溶接ビード表面まで貫通したビード貫通亀裂に対しては、温度ギャップ法による亀裂検出の有効性が示されている。しかしながら、疲労亀裂がルート部から溶接ビード表面に到達するまでの内在状態での亀裂検出性、あるいは貫通しているビード亀裂の両端から外側に隣接する区間に連続して存在していると考えられる亀裂前縁の内在区間の評価性については検討されていない。

そこで本章では、非貫通のビード亀裂(ビード内在亀裂)に対し、温度ギャップ法の有効性を確認するため、平板試験片を用いた亀裂検出基礎実験、および実橋におけるビード内の亀裂内在状態の把握を目的とした温度計測と、内在亀裂の形状計測を行った結果について述べる。

7.2 平板試験片による内在亀裂検出実験

(1) 実験方法

内在亀裂を模擬した平板試験片を用いて、温度ギャップ法による亀裂検出実験を行う。実験の概要を図7.1に、平板試験片を図7.2に、それぞれ示す。

平板試験片の材質はSS400であり、寸法は300×60×10mmである。平板試験片は、亀裂の長さや深さを変化させた試験片Aと、亀裂の空隙幅を変化させた試験片Bを作成し

た. 試験片 A および B に導入した亀裂寸法を表 7.1 および表 7.2 にそれぞれ示す. 亀裂の加工方法としては, 試験片 A では放電加工により, 亀裂幅 C_W を 1mm として, 亀裂長さ C_L と亀裂深さ C_D を変化させた半楕円形状の模擬亀裂とし, 試験片 B では中央に直径 1mm × 深さ 1mm のドリル孔を 3 点連結させた切欠きを導入した後, 4 点曲げ疲労試験により疲労亀裂を発生進展させた. また, 試験片 B1 は, 4 点曲げの静的载荷により試験片を塑性変形させることで, 板表面における亀裂開口幅を, 表 7.3 に示すように変化させた. 試験体 B の亀裂深さは, 亀裂深度計 (日本マンテック, RMG4015) により測定した.

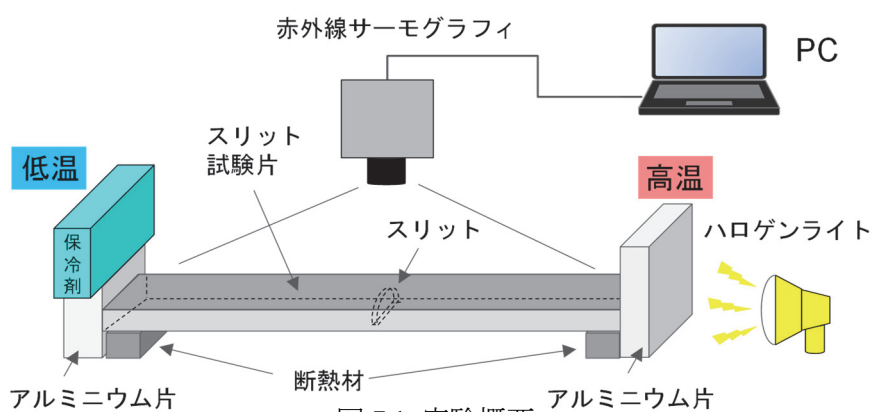


図 7.1 実験概要

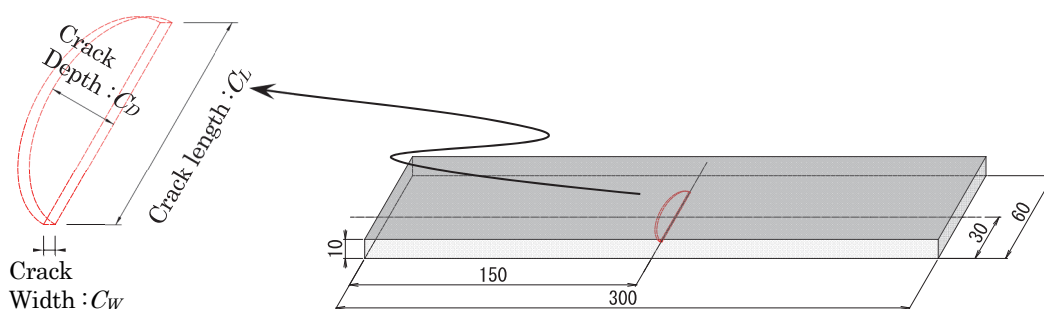


図 7.2 平板試験片の寸法等

表 7.1 試験片 A の亀裂サイズ (放電加工)

試験片	亀裂長さ	亀裂最大深さ	亀裂開口幅
	C_L [mm]	C_D [mm]	C_W [mm]
A1	30.1	9.0	1.0
A2	30.0	8.0	1.0
A3	30.1	7.0	1.0
A4	30.1	6.0	1.0
A5	15.2	9.0	1.0
A6	45.0	9.0	1.0

表 7.2 試験片 B の亀裂サイズ (4 点曲げ疲労試験)

試験片	亀裂長さ	亀裂最大深さ	最大亀裂開口幅
	C_L [mm]	C_D [mm]	$C_{W\max}$ [mm]
B1	40	6.4	0.059
B2	30	5.4	0.025
B3	28	5.4	0.008
B4	27	4.6	0.076

表 7.3 試験片 B1 の静的荷重後の最大亀裂開口幅

試験片	静的荷重	最大亀裂開口幅
	[kN]	$C_{W\max}$ [mm]
B1-1	初期状態	0.055
B1-2	-6.1	0.080
B1-3	-6.7	0.102
B1-4	-7.8	0.178
B1-5	-8.8	0.209

試験片への温度勾配の生成は、図 7.1 に示したように、試験片の一方をハロゲンライトにより加熱し、他方を保冷剤により冷却することにより実現した。実験時の温度勾配は、0.04K/mm となるようにした。これは、実際の鋼床版デッキプレート-U リブ溶接部付近における 4~8 月の日中に相当する値であり、ビード貫通亀裂を高い精度で検出できる条件である。

試験片温度勾配が現れた状態で亀裂部の温度分布を、赤外線サーモグラフィにより計測した。赤外線サーモグラフィは、温度分解能 0.025K (FLIR System, Phoenix) の機種を使用した。

(2) 試験結果

1) 試験片 A (亀裂深さ, 亀裂長さの影響)

第 6 章 6.4 の検討で明らかになったように、温度の空間平均を行った温度微分画像を用いることにより、断熱効果による亀裂部の温度ギャップの検出性が向上することがわかっており、本実験においても同様の方法を用いた。

平板試験片の測定結果表示範囲を図 7.3 に示す。平板試験片には、 $x=150\text{mm}$ の位置に亀裂を模擬したスリットがある。図 7.4 および図 7.5 は、それぞれ空間平均処理無しの場合および 3×3 の空間平均を施した場合の、試験片 A1 の温度分布と温度微分値の分布である。空間平均によるノイズ改善を行うことにより、亀裂部で温度微分値が局所的に大きくなって線状の領域を顕在化させることができた。

試験片 A シリーズに対して得られた、温度微分値の分布画像を図 7.6 に示す。空間平均の点数は、事前検討により、良好なノイズ改善と分布の保存性が認められた 9×9 とした。図 7.6(a)~(d)より、亀裂が深いほど、温度微分値が局所的に大きくなっている線上の領域が明瞭に現われていることがわかる。亀裂深さが 6mm と浅い試験片 A4 においても温度微分値が局所的に大きくなっている線上の領域が観察された。また、亀裂の深さが同じで長さが異なる図(a), (e)および(f)より、スリットの長さに応じて温度微分値が局所的に大きくなっている線上の領域が変化することが確認された。

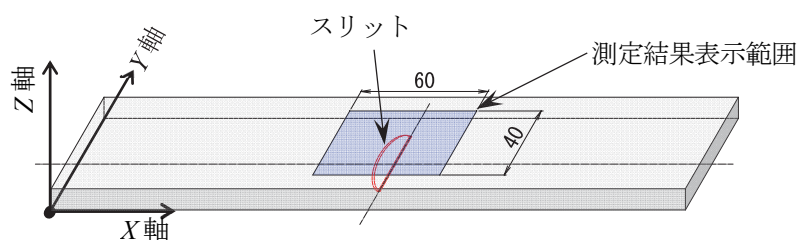
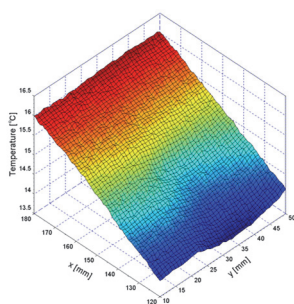
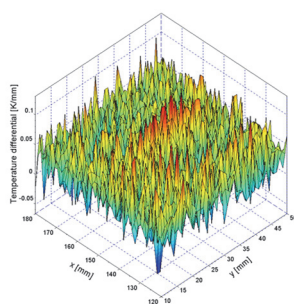


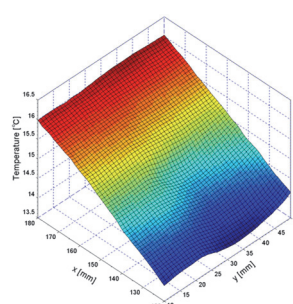
図 7.3 平板試験片の寸法等



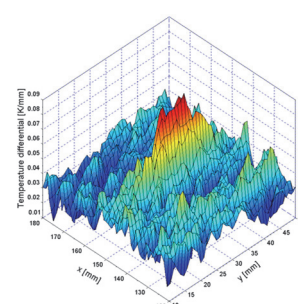
(a) 温度分布



(b) 温度微分値分布



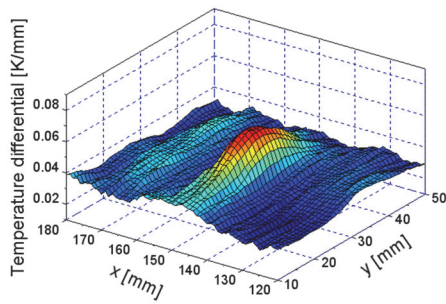
(a) 温度分布



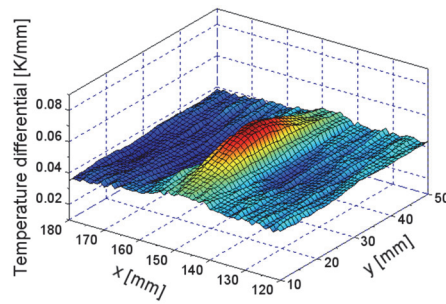
(b) 温度微分値分布

図 7.4 空間平均なしの結果 (試験片 A1)

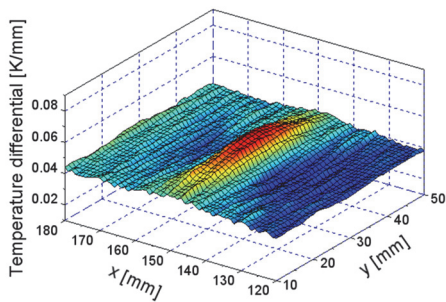
図 7.5 $3 \times 3\text{px}$ による空間平均した結果 (試験片 A1)



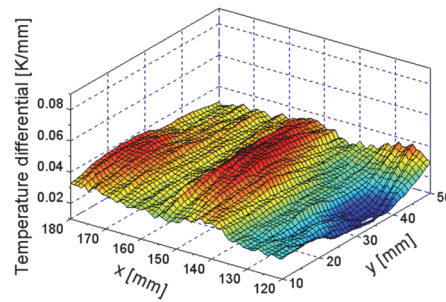
(a) 試験片 A1
($C_L=30.1\text{mm}$, $C_D=9.0\text{mm}$)



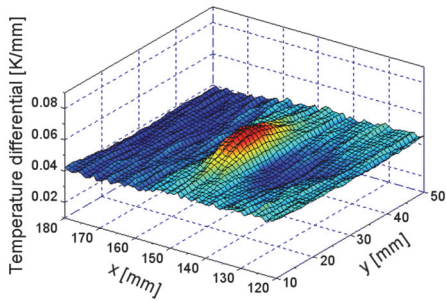
(b) 試験片 A2
($C_L=30.0\text{mm}$, $C_D=8.0\text{mm}$)



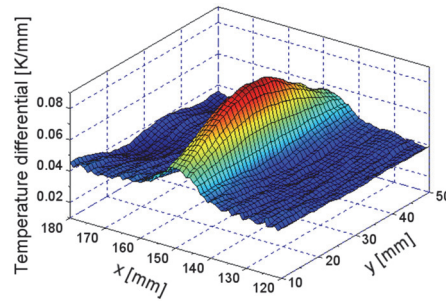
(c) 試験片 A3
($C_L=30.1\text{mm}$, $d=7.0\text{mm}$)



(d) 試験片 A4
($C_L=30.1\text{mm}$, $C_D=6.0\text{mm}$)



(e) 試験片 A5
($C_L=15.2\text{mm}$, $C_D=9.0\text{mm}$)



(f) 試験片 A6
($C_L=45\text{mm}$, $C_D=9.0\text{mm}$)

図 7.6 試験片 A1～A6 の温度微分値分布

2) 試験片 B (亀裂幅)

試験片 B シリーズに対して得られた、温度微分値の分布画像を図 7.7 に示す。試験片 B1, B2 および B4 では、亀裂部に発生している温度ギャップが確認された。試験片 B2, B4 は試験片板厚($t=10\text{mm}$)の約 1/2 の深さの亀裂であるが、温度ギャップを確認することができた。しかしながら、試験片 B3 は、試験片 B2 と亀裂長さと同様であるものの、亀裂幅が小さいため、亀裂面どうしの部分的な接触などによる熱伝導が生じやすいことにより、温度ギャップが確認できなかったものと考えられる。

試験片 B1 の開口幅を変化させた場合の温度微分値の最大値と、亀裂部を完全断熱と仮定した FEM 解析による温度微分値の最大値を図 7.8 に示す。亀裂開口幅 C_W を 0.055～0.209mm まで変化させたが、温度微分値の変化は小さく、FEM 解析による最大値に近い値を示している。亀裂幅は、0.055mm 以上あれば、亀裂面どうしの部分的な接触による熱伝導は生じないものと考えられる。

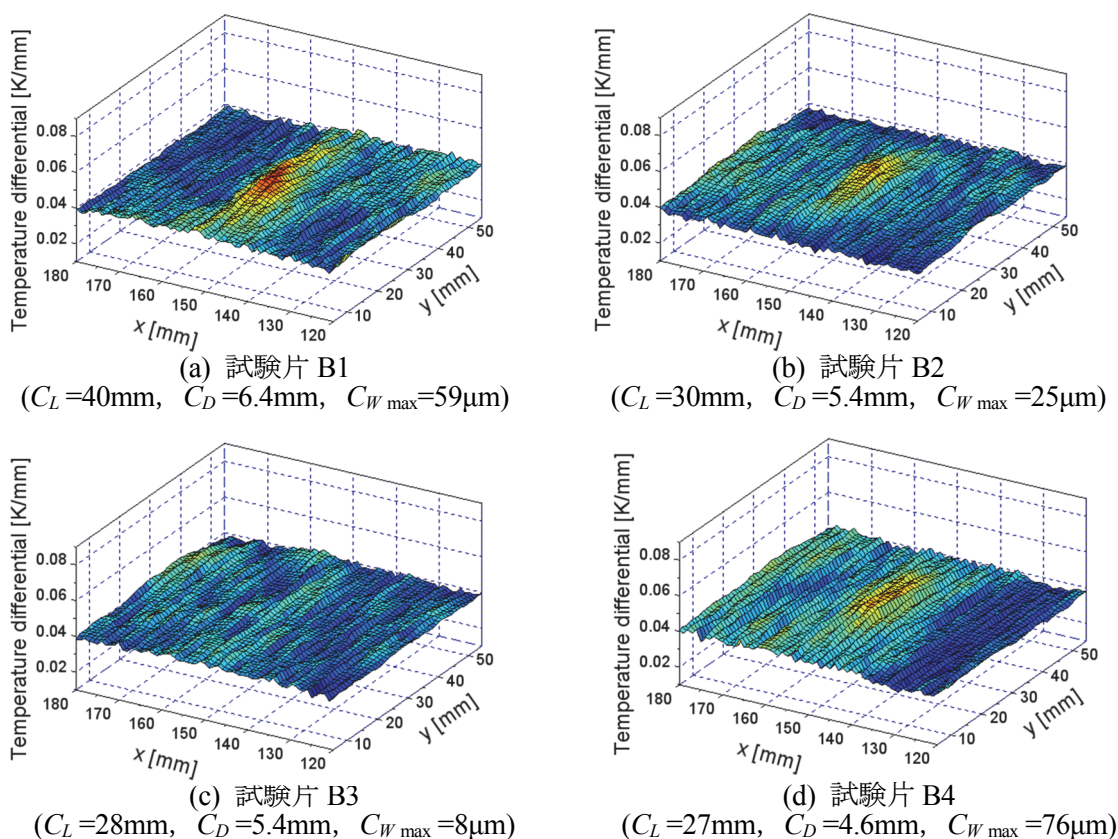


図 7.7 試験片 B1～B4 の温度微分分布

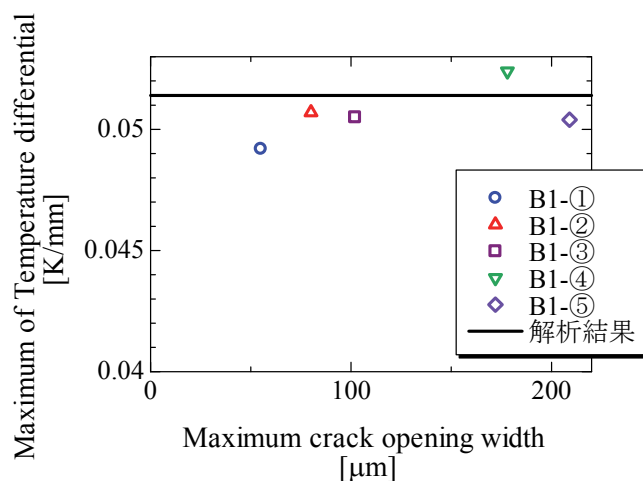


図 7.8 亀裂開口幅と温度勾配の関係

7.3 実橋における内在亀裂状態の確認

実橋におけるビード亀裂のイメージ図を図 7.9 に示す。実橋におけるビード貫通亀裂に連続している内在亀裂前縁の存在範囲，およびビード表面からの亀裂前縁位置，並びに内在亀裂部の温度特性について把握するための現場計測を実施した。

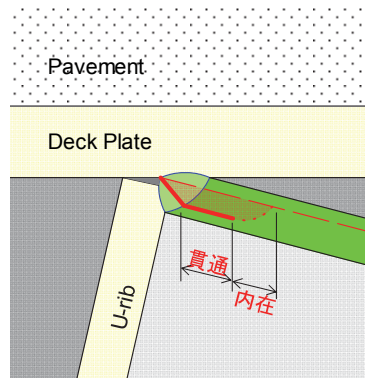


図 7.9 ビード亀裂のイメージ図

(1) 調査方法

対象橋梁は，第 3 章において温度ギャップ法の開発を行った際に対象とした橋梁と同じである。対象とする亀裂は，温度ギャップ法を用いた検査によってビード貫通亀裂発生が疑われる 2 か所である。調査手順としては，以下のとおりとした。まず内在亀裂に対するビード表面上の温度微分値等を検討するための温度データを収集するため，塗膜を残したままビード表面の温度を計測した。その後，内在亀裂の存在範囲と亀裂前縁位置を調査するため，図 7.10 に示すように亀裂先端部近傍へ削孔を行うことで，亀裂が削孔した孔壁に現れるようにし，亀裂長さを測定できるようにした。削孔後には，ルートからビード表面までの亀裂長さを MT により測定した。その後は，図 7.11 に示すように，先端削孔位置を，数 mm ずつ順次移動させながら，ルートからビード表面方向に進展している亀裂長さを MT により測定することを繰り返し，内在亀裂の亀裂前縁の形状を評価することとした。

調査に用いる赤外線サーモグラフィは，量子型 (InSb 素子) の機種を用いた。温度計測は，157Hz で 10s 間撮影し，後処理で平均化処理等によるノイズ処理などが可能なようにしている。

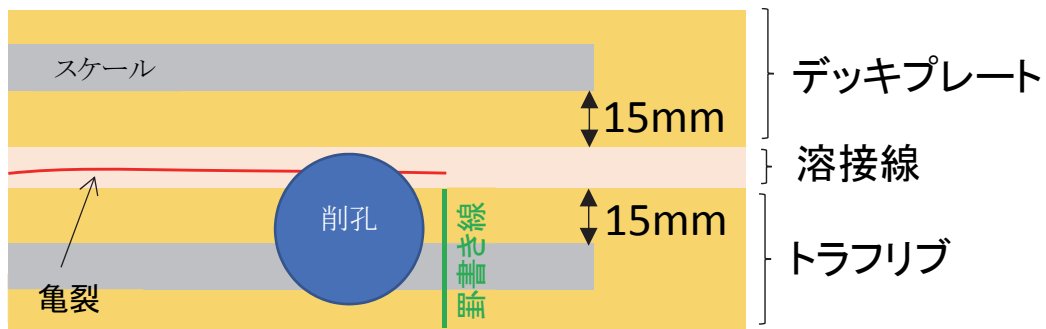


図 7.10 削孔位置イメージ図

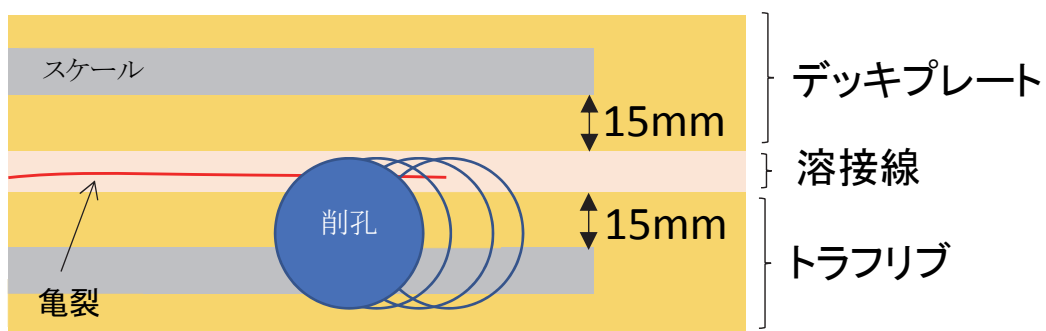


図 7.11 ビード削り込みイメージ図

(2) 内在亀裂の状況と温度測定の結果

2つのビード亀裂の計測結果を図 7.12 に示す。ビード表面上の亀裂長さは、亀裂 No.1 が 56.0 mm、亀裂 No.2 が 111.5mm であった。亀裂 No.1 における内在亀裂の広がり方としては、表面亀裂左側先端から橋軸方向へ 53.5mm 削孔した位置での残存のど厚が 5.5mm（亀裂長さが 1.5mm）、右側先端から 35.3mm 削孔した位置での残存のど厚は 5.1mm（亀裂長さが 1.1mm）であった。亀裂 No.2 における内在亀裂の広がり方としては、表面亀裂左側先端から橋軸方向へ 12.5mm 削孔した位置での残存のど厚が 5.5mm（亀裂長さが 0.0mm）、右側先端から 18.6mm 削孔した位置での残存のど厚が 4.7mm（亀裂長さが 1.8mm）であった。残存のど厚については、亀裂 No.1 が両側とも 40～60mm 程度の広い範囲でなだらかに変化しているのに対し、亀裂 No.2 は両側とも約 20mm の狭い範囲で変化している。ビード貫通部分と内在部分を含めた亀裂長さの比は、亀裂 No.1 がビード表面に現れている長さ(56.0mm)の約 2.6 倍(144.8mm)に対し、亀裂 No.2 がビード表面に現れている長さ(111.5mm)の約 1.3 倍(142.6mm)であった。ビード亀裂は、それぞれの亀裂において内在部分の範囲、形状が異なる結果となった。

削孔前に取得した温度分布画像を図 7.13 に、温度微分値分布を図 7.14 に、それぞれ示す。なお、図 7.13 の温度画像は、撮影した 1570 フレーム(157Hz×10s)を時間平均処理している。また、図 7.14 の温度微分値分布は、1570 フレームの時間平均処理に加え、3×3 px の空間平均処理を行っている。

亀裂 No.1 の表面亀裂の両側には、温度画像および温度微分値分布とも内在亀裂らしき温度低下部や温度微分値の高い領域が現れている。一方、亀裂 No.2 の表面亀裂の両側には、亀裂 No.1 ほど明確な温度低下部や温度微分値の高い領域はない。これらは、切削し MT により確認した内在亀裂の形状から推察される温度微分値の分布と合致するものと考えられる。

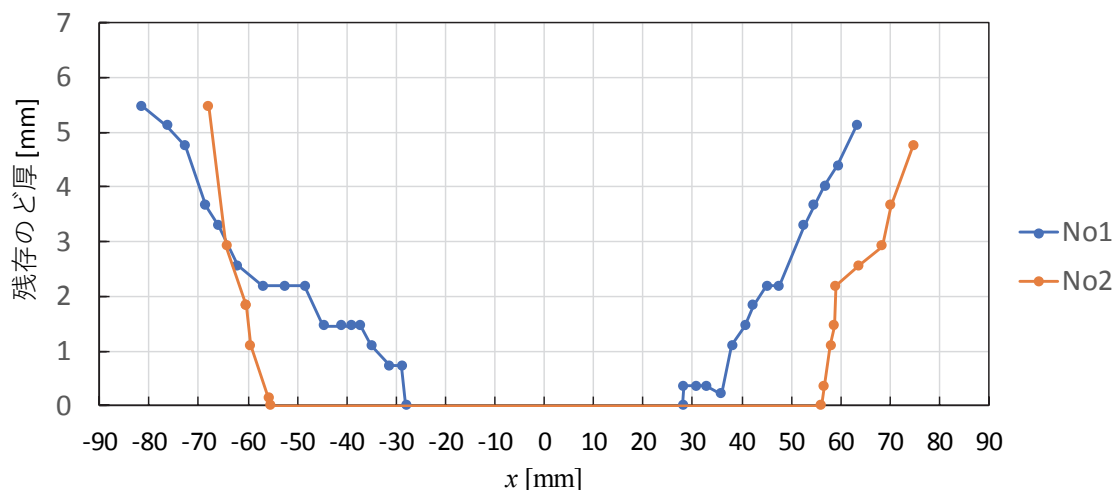
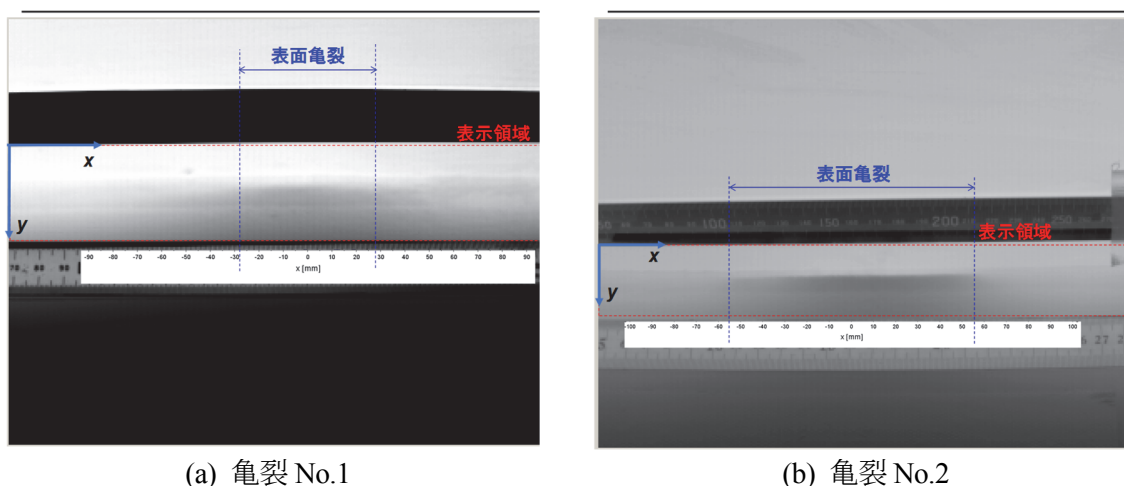


図 7.12 残存のど厚の計測結果



(a) 亀裂 No.1

(b) 亀裂 No.2

図 7.13 温度画像 (空間平均 3×3px、時間平均 1570 frames)

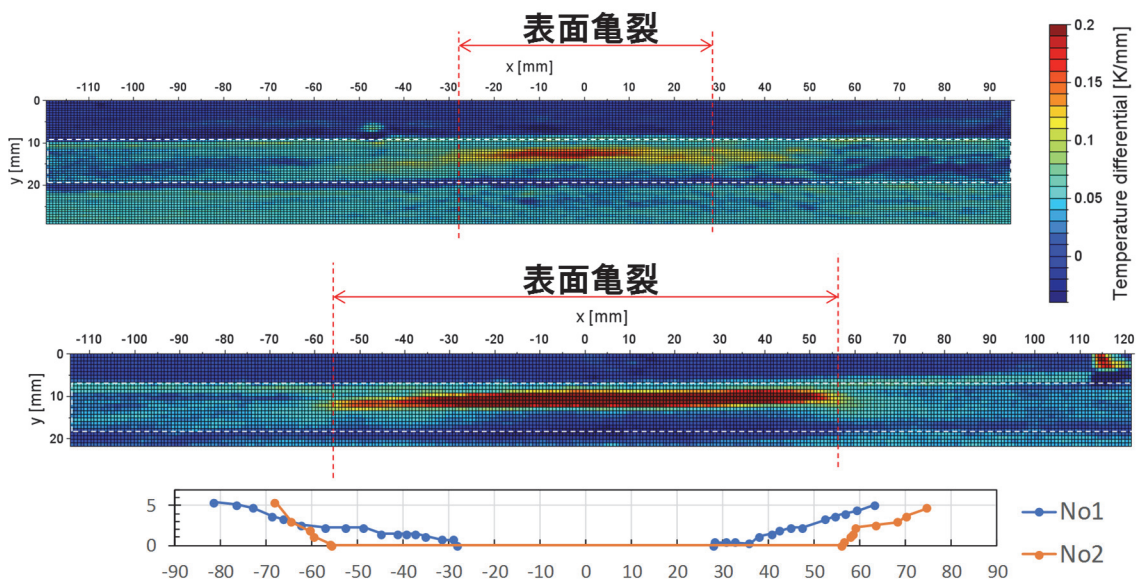


図 7.14 温度微分値分布（空間平均 3×3 px, 時間平均 1570 frames）

7.3 結言

各実験から以下の知見を得た。

(1) 平板試験片による内在亀裂のサイズによる検出性

- ・ 内在亀裂深さが深い（残存のど厚が浅い）ほど，内在亀裂長さが長いほど，温度微分（勾配）は大きい。
- ・ 内在亀裂幅は， $55\mu\text{m}$ あれば温度勾配は十分大きく，それ以上に開口幅が大きくても温度勾配は変化しない。

(2) 実橋におけるビード内在亀裂の状態

- ・ ビード亀裂に隣接する内在部分の範囲，深さ（残存のど厚）は，亀裂ごとに異なる。
- ・ 内在亀裂の形状から推察される温度勾配分布と，温度計測による実測値からの温度勾配分布は，合致する傾向が得られたものと考えられる。

平板試験片による室内実験と，実橋におけるビード内在亀裂の確認と温度測定結果から，ビード内在亀裂またはビード貫通亀裂に隣接する内在亀裂部分の検出の可能性が確認できた。今後，立体試験体による実験や解析を進め，ビード内在亀裂等の検出性に関する研究を進める予定である。

第7章 参考文献

- [7-1] T. Makita, H. Sakai, T. Suzuki, N. Yagi : Phased array ultrasonic inspection of rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks, 9th IABMAS 2016, FOZ DO IGUACE, BRAZIL, 26-30 June 2016
- [7-2] Miki, C. and Sukanuma, H. (2013) Rehabilitation of strengthening of orthotropic steel bridge decks. In: Bridge Engineering Handbook (Edited by Chen W. and L. Duan), CRC Press, Boca Raton, pp. 496–497.
- [7-3] 溝上善昭, 小林義弘, 和泉遊以, 阪上隆英 : 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版デッキプレート-Uリブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出, 鋼構造論文集, 第22号第87号, pp.47-56, 2015.9.
- [7-4] 大藤時秀, 溝上善昭, 和泉遊以, 阪上隆英 : 温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による亀裂検出実用化システム, 第71回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.1417-1418, VI-709, 2016.9.
- [7-5] 溝上善昭, 森山彰 : 鋼床版Uリブビード貫通亀裂検出法の開発と疲労関連業務の体制整備, 本四技報 Vol.40 No.125, 2015.9.

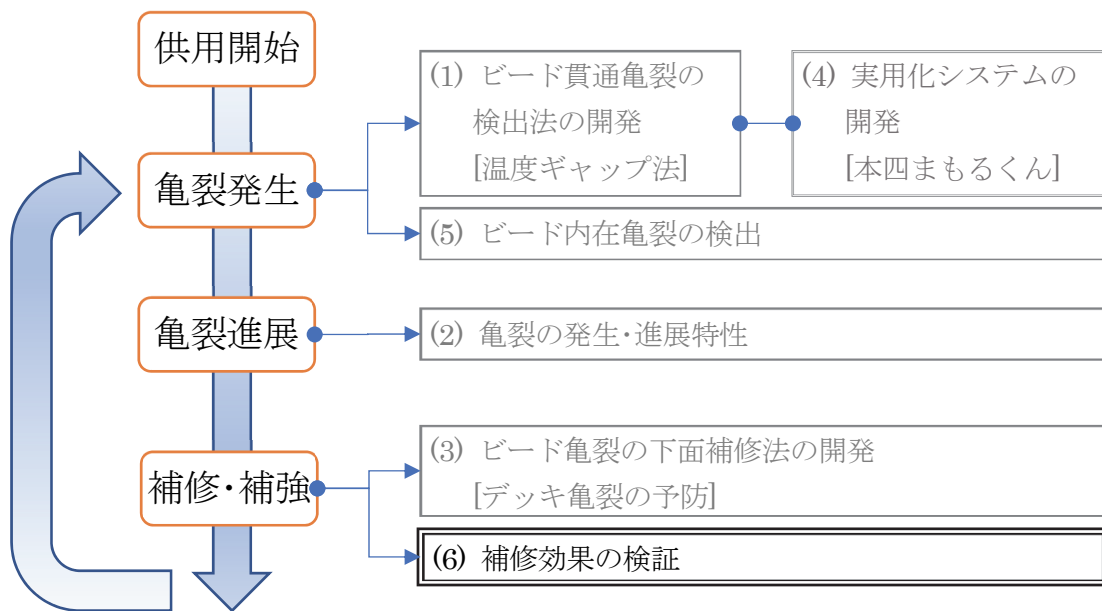
第 8 章

赤外線サーモグラフィを用いた疲労亀裂補修効果の検証

供用されている鋼構造物に疲労亀裂が発生した場合、その原因の調査・推定を行い、補修設計および補修工事等が実施される。原因の調査においては、発生する応力とその頻度を測定するため、また補修工事が実施された後の効果確認の検証においては補修設計で検討した応力緩和などの効果を確認するため、一般にひずみゲージを用いた測定が実施される。

著者らはこれまで、非破壊検査手法として赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性効果に基づく応力分布計測法を用いて、ビード貫通亀裂やウェブギャップ板に発生した疲労亀裂に対し、疲労亀裂進展性や補修効果の確認を目的とした測定を実施してきた。本計測法の特徴としては、疲労亀裂が発生した周辺部も含めた範囲の応力場を、遠隔から非接触で測定することが可能である技術であることが挙げられる。そのため、ひずみゲージによる応力測定では不足する、広い範囲の面的な応力分布を測定することが可能な手法であり、疲労亀裂に対する補修効果の検証には優れた手法であると考えられる。そこで本章では、鋼橋の縦桁－横桁交差部の補剛材に発生した疲労亀裂を対象に、疲労亀裂補修前後に熱弾性応力計測を実施し、補修による応力低減効果の検証をした内容について述べる。

本章で述べる赤外線サーモグラフィを用いた疲労亀裂補修効果の検証に関する研究は、緒論で述べた疲労のメンテナンスサイクルにおける、下図の 2 重枠で示すところに位置づけられる。



8.1 緒言

瀬戸大橋の斜張橋（岩黒島橋、櫃石島橋）の、鋼床版の縦桁－横桁の交差部にある垂直補剛材において、疲労亀裂の発生が報告されている。この疲労亀裂は、構造的要因で自動車荷重や列車荷重の作用時に、局部的に垂直補剛材の上縁端部に大きな応力が発生することで生じる疲労損傷である[8-1]。疲労亀裂に対する原因調査では、ひずみゲージによる応力やその頻度の測定が実施され、補修設計では FEM 解析によって部分的な R 切欠き補修による応力低減などの対策が提案された[8-2]。また、補修工事では、局部的な応力低減を期待した当て板補修工法なども試行している。

補修効果の検証では、一般にひずみゲージによる測定が用いられ、補修前後で構造の特定点における作用応力を比較し、補修設計の解析結果と照らし合わせ補修効果を確認する。

一方、赤外線サーモグラフィは、センサの性能向上と装置の小型化等により、現場環境において計測可能な装置が開発され、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性効果に基づく応力計測が、様々な分野において応用が進展している[8-3]～[8-6]。阪上らが開発した「自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労亀裂の遠隔非破壊検査技術」では[8-7]、主応力の変動分布を、遠隔から高精度に赤外線サーモグラフィによる撮影のみよって計測できる。本計測法によれば、亀裂先端近傍の実働応力分布を精度よく計測でき、これをもとにした破壊力学評価により疲労亀裂の進展性評価も可能となると考えられる。また、本計測法は、赤外線サーモグラフィの視野範囲内の作用応力分布を面的に測定できる特徴を有しており、従来法であるひずみゲージで不足する周辺部の応力状況も同時に測定することが可能となる。

本章では、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力分布計測法により、鋼床版に生じた疲労亀裂に対して、種々の方法による補修を施した前後において、亀裂先端近傍や補修範囲の応力測定を実施することにより、本計測法が補修効果の検証に有効な非破壊評価手法であることを確認する実験を行った結果について述べる。

8.2 対象橋梁と疲労亀裂の状況

疲労亀裂が発生している橋梁の一般図および主桁断面図を図 8.1 と図 8.2 にそれぞれ示す。本橋梁は、瀬戸大橋の一部を形成する 2 連の鋼 3 径間連続斜張橋で、上路が道路、下路が鉄道の道路・鉄道併用橋である。この橋の鋼床版は、他の補剛トラス吊橋等とは異なり、左右の両端は主構と一体化され、鋼床版縦桁は主横トラスに剛結された構造となっている。

2009年10月に、この橋梁の鋼床版縦桁の横桁交差部の垂直補剛材で亀裂が発見された。亀裂部の詳細図および亀裂状況写真を、図 8.3 および写真 8.1 にそれぞれ示す。疲労亀裂発見後、同種の構造部位に対する詳細調査が実施された結果、多くの塗膜割れとともに、数箇所において疲労亀裂が発見されている。

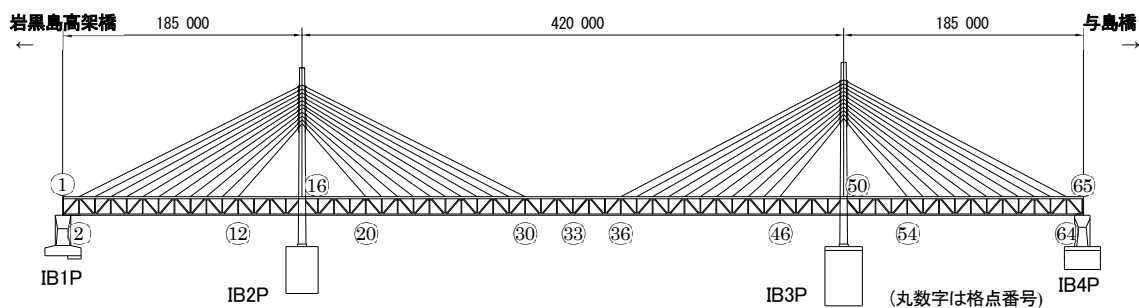


図 8.1 橋梁一般図

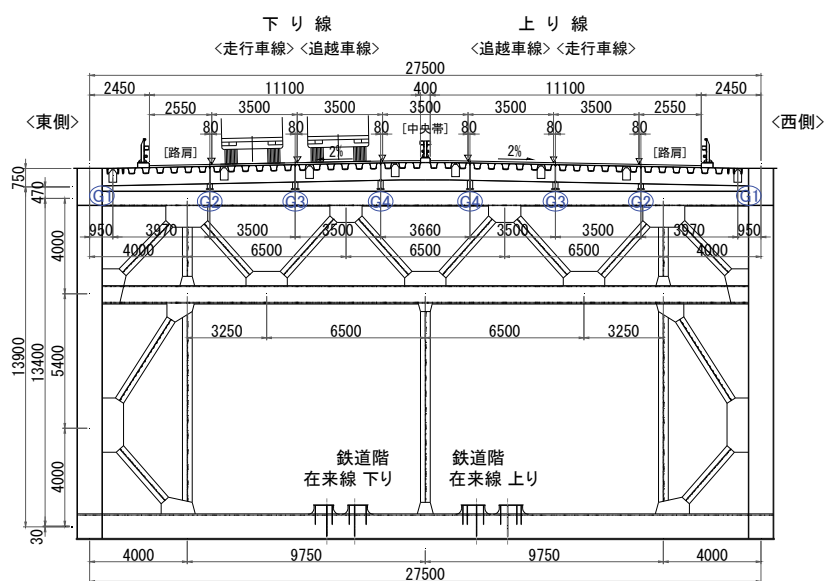


図 8.2 桁断面図

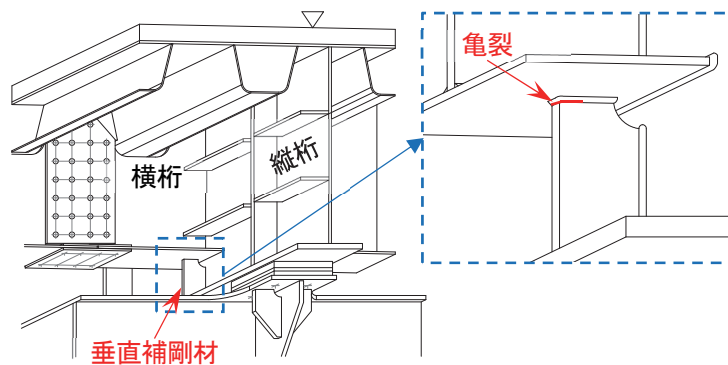


図 8.3 亀裂発生位置と詳細図



写真 8.1 亀裂状況

8.3 補修設計

疲労亀裂発生の原因は、川端らの調査により、自動車荷重および列車荷重による局所的な応力集中と繰り返しによるものとされた[8-1]。また、補修設計では、高田らにより、図 8.4 に示すような円弧切欠き法（以下「R 切欠き」と呼ぶ）が提案された。この補修法の選定については、これまでに FEM 解析により、図 8.5 に示す三つの形状について疲労耐久性等が比較され、ケース 3 の補修方法が選定されている[8-2]。疲労耐久性は、現在の垂直補剛材の上縁溶接部の端部に集中している応力を、溶接全線にわたり平均的な応力となるように分散化することで、溶接部の疲労耐久性を向上させている。また、R 切欠きを行ったことにより円弧部に集中する応力に対しては、応力集中箇所が母材部であることから溶接部と比較し疲労等級が高く、垂直補剛材上縁溶接部よりも寿命が長い結果となっている。解析の結果は、R 切欠き部の最大応力と上縁溶接部の最大応力は、ケース 1 が-179MPa と -84MPa、ケース 2 が-139MPa と -64MPa、ケース 3 が-148MPa と -58MPa であり、ケース 2 とケース 3 の結果が良く、大きな差がない結果となっている。しかしながら、選定にあたっては、ケース 2 の垂直補剛材上縁溶接部に発生する応力のうち、縦桁側が高い応力を示

すことから、将来の疲労亀裂再発や点検のやりやすさを考慮したとき、ケース2ではスペースが狭く発見が遅れる可能性があるため、ケース3を選定することとされている。

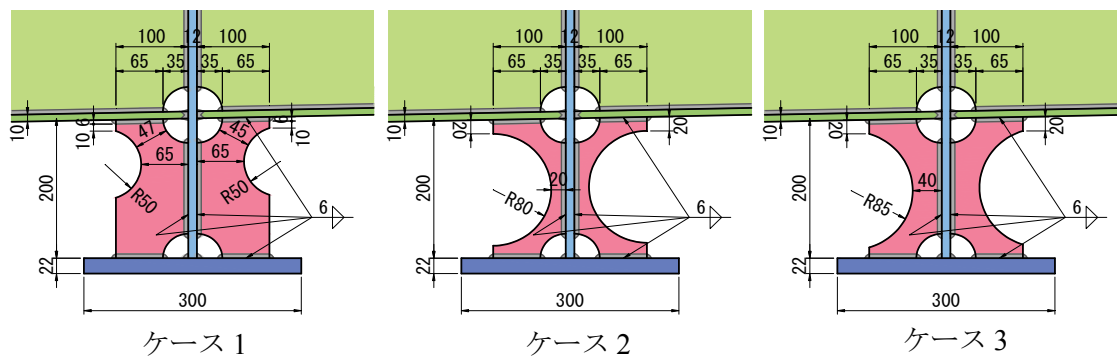
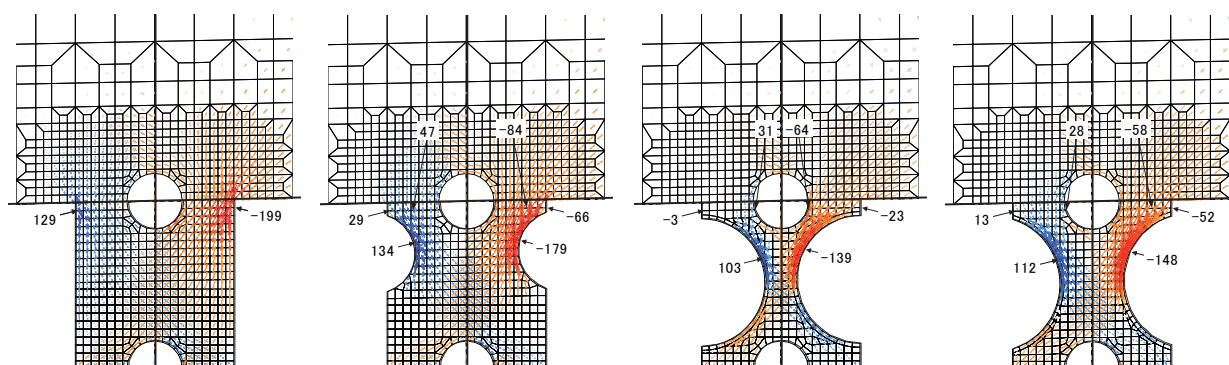


図 8.4 提案する補修形状モデル図



横リブしたフランジした面から 10mm 応力分布

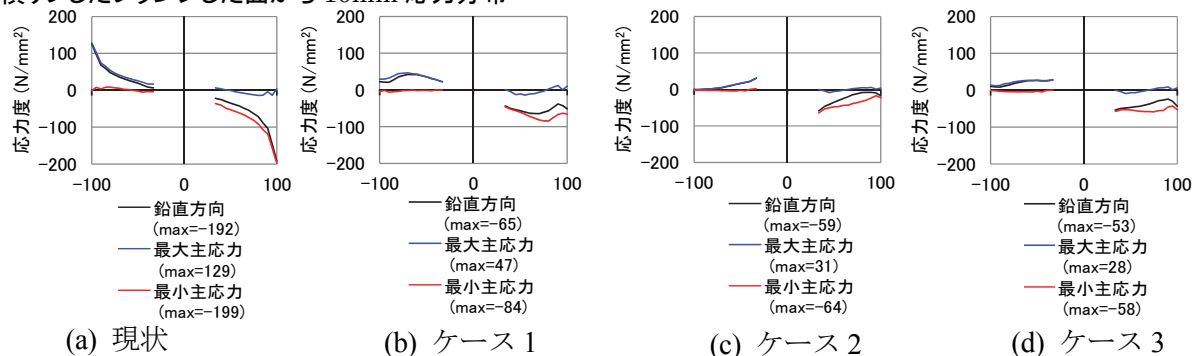


図 8.5 提案する補修形状での FEM 解析結果

8.4 本研究で検討した補修方法

本研究で有効性を検討した補修方法としては、設計を実施した上述の R 切欠きに加え、垂直補剛材の上縁溶接部の局部応力を緩和するため、当て板をする案についても検討・実施している[8-8]。また、R 切欠き補修および当て板補修のそれぞれについて、タイプの異なる 2 種類ずつを施工している。各補修方法を示す概念図と、それぞれの特徴を整理したものを、図 8.6 および表 8.1 にそれぞれ示す。

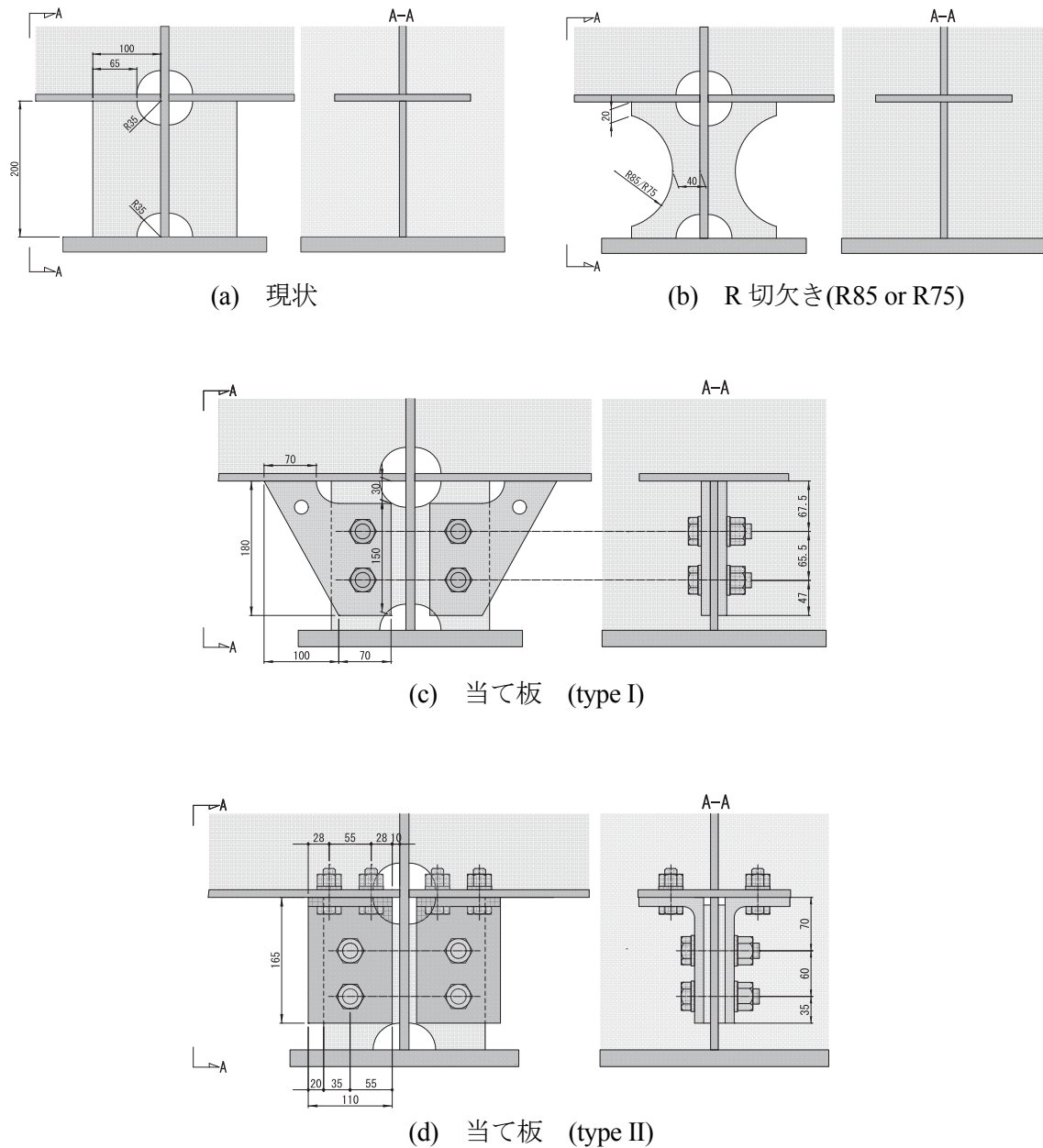
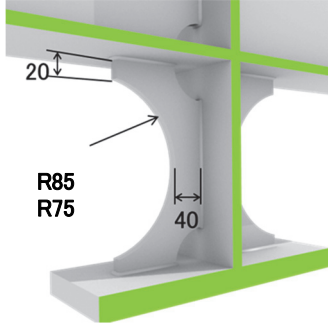
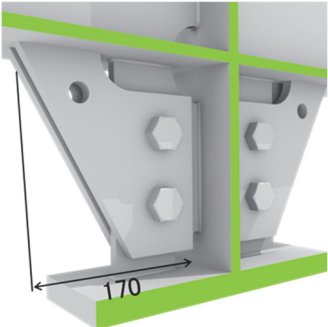
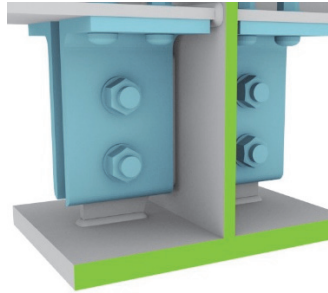


図 8.6 試験施工を実施した各補修図

表 8.1 各補修の特徴

名称	イメージ図	特徴
R 切欠き (Type R85)		補修設計を実施したもの。施工は、小型の磁気ボール盤で切欠き形状に合わせ小径で削孔し(写真 8.2), ディスクグラインダーにより R 形状に切削する。〔2015 施工〕
R 切欠き (Type R75)		Type R85 の施工性を向上させるため、大型ホールソーにより切削する(写真 8.3)。大型ホールソーの最大サイズが直径 150mm であったため、R 切欠きサイズを R85 から R75 へ変更した。〔2016 施工〕
当て板 (type I)		垂直補剛材の上縁溶接部の端部に集中する応力集中を緩和するため、当て板を垂直補剛材へ高力ボルト(S10T)を用い取り付け付けた。また、当て板と横桁下フランジとの密着性を確保するため、ブルマン等を用い密着性を確保したのち(写真 8.4), 高力ボルトの施工を実施した。〔2015 施工〕
当て板 (type II)		当て板(type I)と同じ考え方の補修法であるが、当て板と横桁下フランジとの密着性を向上させるため高力ボルト(S10T)による接合を実施した。〔2016 施工〕

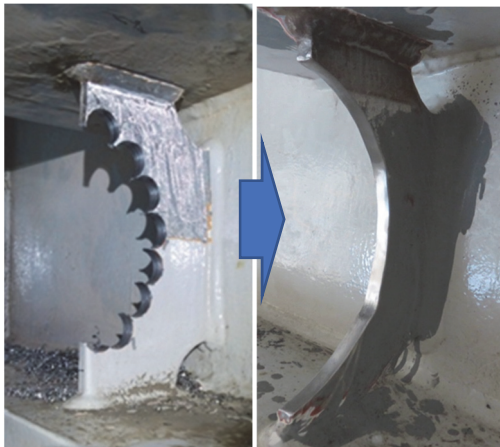


写真 8.2 type R85 施工中・施工後状況



写真 8.3 type R75 施工中・施工後状況



写真 8.4 当て板 type I 施工中・施工後状況

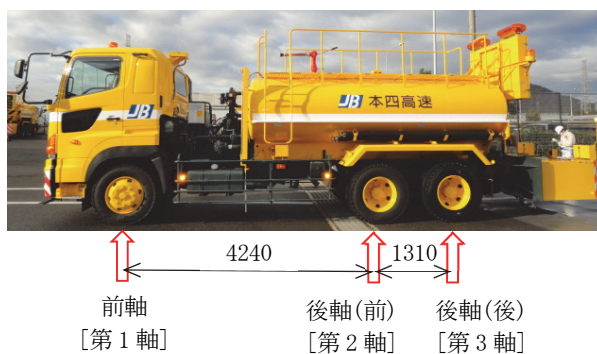
8.5 各補修方法における補修効果の確認実験

各補修方法の効果を確認するため、補修の前後で、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力計測を実施することにより、垂直補剛材に作用する実働応力の分布およびその値を評価し、補修効果の確認を行った。計測時には、ひずみゲージも測定対象とした補剛板の数か所に貼り付け、ひずみゲージによる応力測定値を熱弾性応力計測結果と比較することとした。赤外線サーモグラフィによる応力分布計測の状況を写真 8.5 に示す。

応力計測は、総重量および軸重が既知の荷重車を、走行車線の中央を時速 80km/h で走行させながら測定することとした。荷重車の総重量・軸重を図 8.7 に示す。



写真 8.5 計測状況

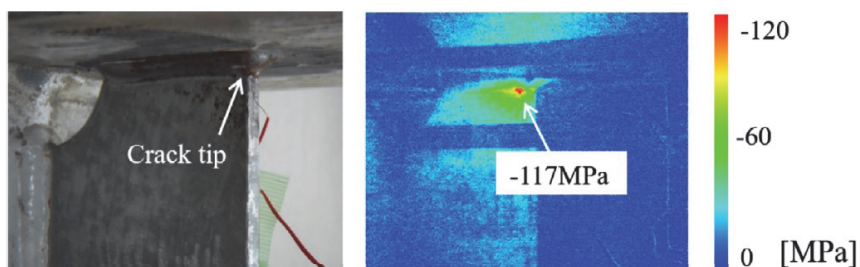


荷重車	総重量		210 kN
	軸重	前軸 [第1軸]	64 kN
		後軸(前) [第2軸]	71 kN
		後軸(後) [第3軸]	75 kN

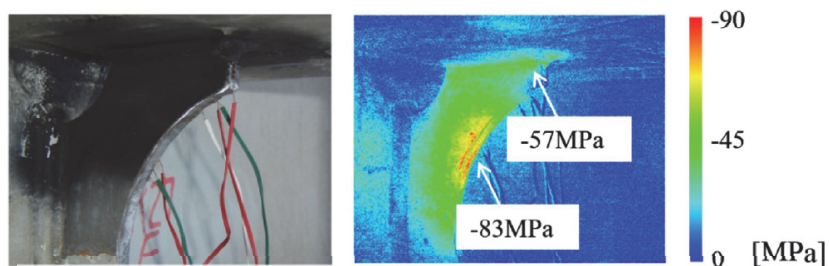
図 8.7 荷重車データ

(1) R 切欠き補修の効果検証

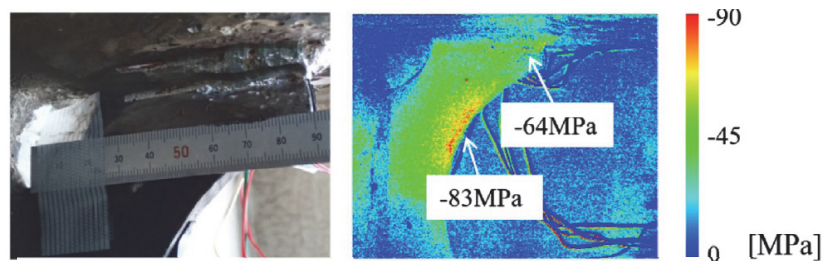
R 切欠き type R85 補修の施工ステップごとに実施した、赤外線サーモグラフィによる応力測定結果を図 8.8 に、ひずみゲージによる応力測定位置と結果を図 8.9 に示す。なお、応力測定部位は、残留応力を含めた死荷重状態から荷重車走行によって圧縮側へ応力が変動する部位である。そのため、図 8.8～図 8.15 に示す応力値は、死荷重状態をゼロとし荷重車走行のみにより変動した応力履歴中の最大の応力変動を示している。



(a) 補修前の状況と応力分布



(b) R 切欠き補修後（亀裂存置）の状況と応力分布



(c) R 切欠き補修後（亀裂除去後再溶接）の状況と応力分

図 8.8 type R85 赤外線による熱弾性応力測定結果

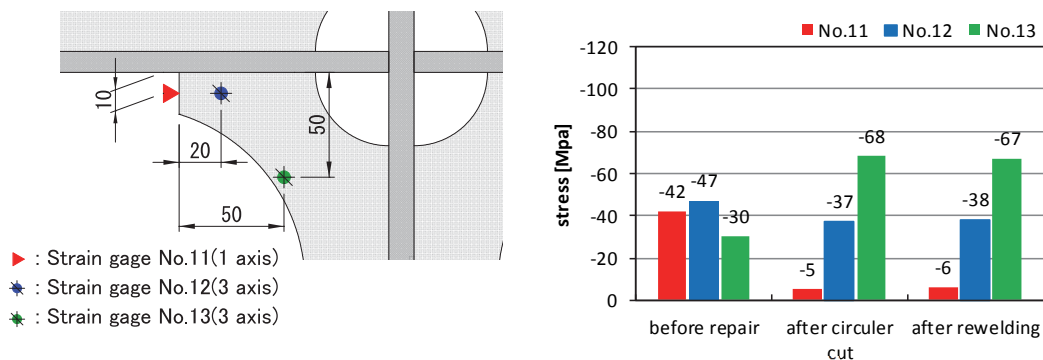
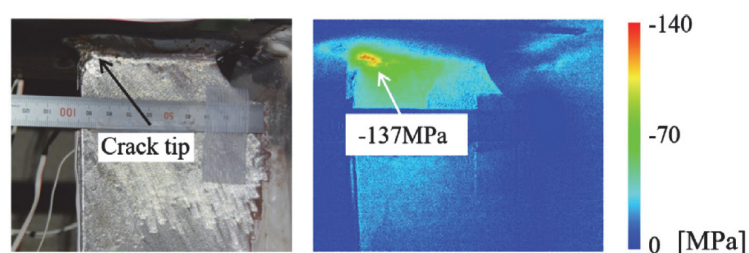


図 8.9 ひずみゲージによる応力測定結果

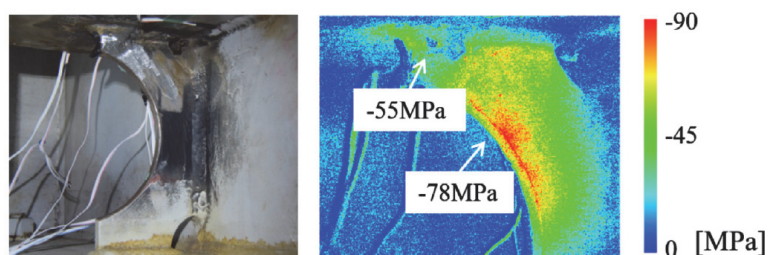
図 8.8 より、亀裂先端部近傍の補修前の応力が -117MPa に対し、亀裂を残したまま R 切欠き補修した後の応力は -57MPa であり、50%に低減している。一方で、R 切欠きの円弧上には、 -83MPa の応力集中箇所が発生していることがわかる。この結果を補修設計での FEM 解析結果 (図 8.5 ケース 3) と比較すると、応力集中の発生位置が一致していることがわかる。また、再溶接前の応力分布 (図 8.8(b)) と亀裂を除去し再溶接後の応力分布 (図 8.8(c)) を比較した場合、垂直補剛材の上縁端部の応力が -57MPa と -64MPa と約 1 割程度しか変わらず、円弧上に集中している応力が -83MPa と -83MPa と同じであり、それぞれ補修前後で大きく変わらないことが確認できる。

R 切欠き type R85 は、補修設計で期待したとおりの性能を示したが、写真 8.2 に示した方法で施工するため、小型磁気ボール盤による削孔や、人力によるグラインダーを用いた R 形状への切削など、施工に時間がかかるという問題点を残した。また、R 形状の精度は、作業員の技量に左右されやすい。このような欠点を解決するため、切欠きのサイズは 10mm 小さくなるが、写真 8.3 に示すような大型ホールソーを用いた施工による、R 切欠き type R75 補修を次に実施した。補修前後の赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力結果を、図 8.10 に示す。切欠き R サイズは 10mm 小さくなったが、補修後の上縁溶接部端部や R 切欠き円弧上の応力集中箇所に見られる応力状態は、それぞれ type R85 と同程度であることが確認できる。

赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定を用いる手法は、ひずみゲージによる応力測定と比較して、より広い範囲の応力状態を把握でき、効果的・効率的な補修効果の確認ができる手法であることがわかった。



(a) 補修前の状況と応力分布

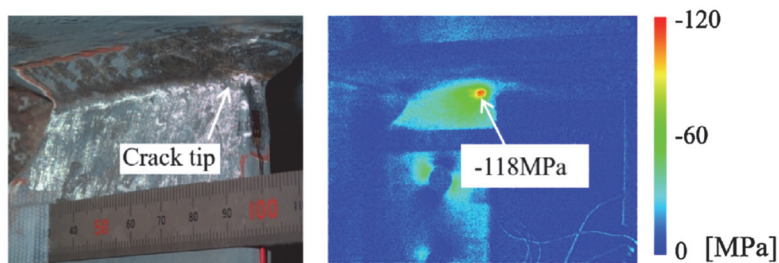


(b) R 切欠き補修後 (亀裂除去後再溶接) の状況と応力分

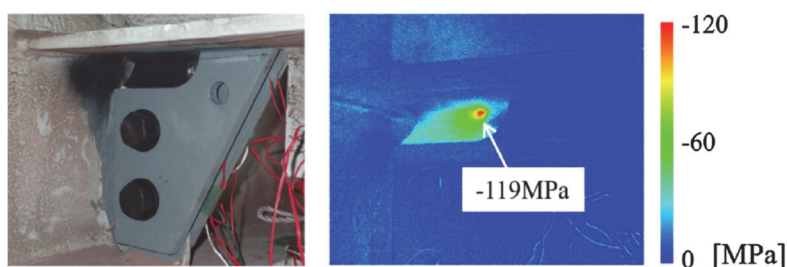
図 8.10 type R75 赤外線による熱弾性応力測定結果

(2) 当て板(type I)補修の効果検証

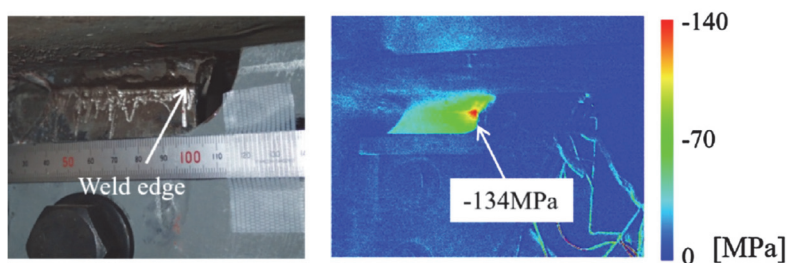
当て板 (type I) 補修の施工ステップごとに実施した、赤外線サーモグラフィによる応力測定結果を図 8.11 に、ひずみゲージによる応力測定位置と結果を図 8.12 に示す。



(a) 補修前の状況と応力分布



(b) 当て板補修後（亀裂存置）の状況と応力分布



(c) 当て板補修後（亀裂除去後再溶接）の状況と応力分布

図 8.11 当て板(type I)の赤外線による熱弾性応力測定結果

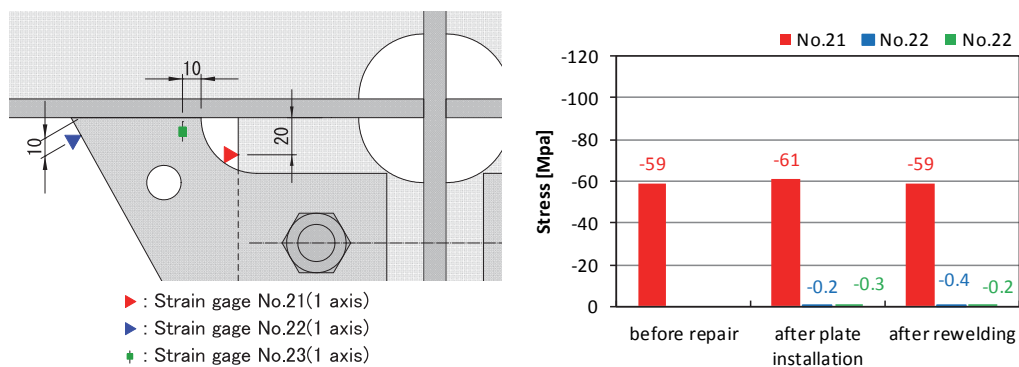
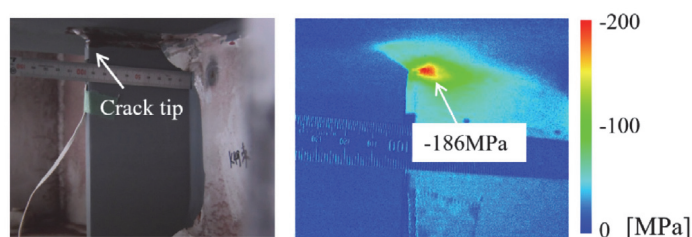


図 8.12 当て板(type I)のひずみゲージによる応力測定結果

亀裂先端部近傍の応力に注目すると、図 8.12(a)に示した補修前と、図 8.12(b)に示した亀裂を残したままの当て板補修後では、作用応力の値に変化はなく、補修による作用応力低減効果が全く得られていないことがわかる。更に、当て板を一端取り外し、亀裂切削と再溶接を行い、当て板を再度設置したあとの応力測定の結果を、図 8.12(c)に示す。垂直補剛材の上縁溶接部端部の作用応力は当て板施工後も依然として高く、当て板による垂直補剛材上縁端部の応力集中の緩和が、全く機能していないことがわかる。また、ひずみゲージでの測定結果も同様の傾向を示しており、垂直補剛材上縁に設置したゲージ No.21 の応力は、補修前後で同等であった。当て板(type I)が機能しなかった理由は、当て板と横桁下フランジ下面の密着度が、施工後に低下したことが要因と想定している。施工は、当て板をブルマン等で横桁下フランジ下面に密着させる手法である。施工後は、大型車両等の通過により横桁から当て板へ荷重が伝達される。一方、当て板と垂直補剛材は、高力ボルトで接合されているものの、ボルト孔と高力ボルトの軸部には隙間がある。そのため、当て板は、施工後から荷重を受け徐々に鉛直方向に移動し、結果として当て板と横桁下フランジ下面の密着度が低下し、荷重をバイパスする機能が早期になくなったものと推察している。

(3) 当て板(type II)補修の効果検証

当て板 (type II) 補修の施工ステップごとに実施した、赤外線サーモグラフィによる応力測定結果を図 8.13 に、ひずみゲージによる応力測定位置と結果を図 8.14 に示す。また、本補修による当て板補修後は、形状的に亀裂先端近傍の赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定による作用応力の測定が困難になる。そのため、垂直補剛材を挟み込むように設置する L 型鋼の片方に観察窓を設置した。観察窓付き当て板の形状を図 8.15 に示す。また、観察窓付き当て板は、熱弾性応力測定による効果確認のためのものであり、効果確認の計測後には、観察窓のない当て板へ取り替えている。



(a) 補修前の状況と応力分布



(b) 当て板補修後（亀裂存置）の状況と応力分布

図 8.13 当て板(type II)の赤外線による熱弾性応力測定結果

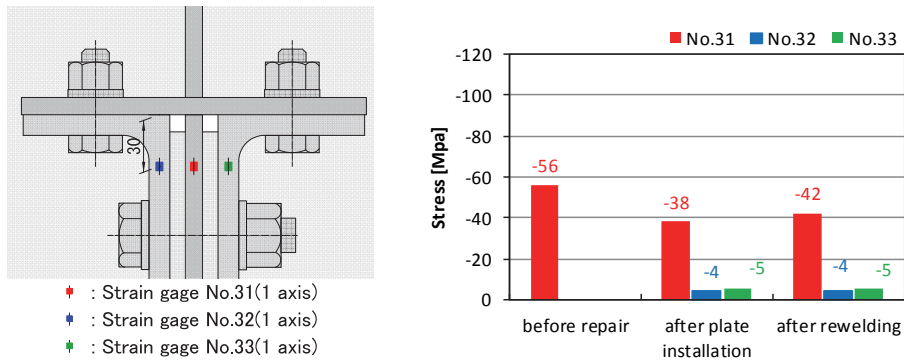


図 8.14 当て板(type II)のひずみゲージによる応力測定結果

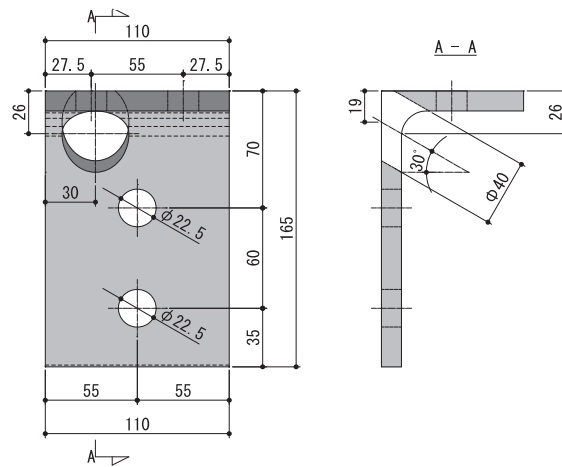


図 8.15 観察窓付き当て板

赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定の結果から、亀裂先端部近傍の作用応力を比較する。図 8.13(a)に示した補修前では亀裂先端近傍の作用応力が-186MPa であるのに対し、図 8.13(b)に示した亀裂を残したまま観察窓付き当て板を施工した補修後では亀裂先端近傍の作用応力の値は-137MPa となり、約 30%作用応力が緩和していることがわかる。図 8.14 のひずみゲージによる作用応力の測定結果でも、垂直補剛材のゲージ No.31 の作用応力が補修前後で約 30%緩和していることが確認できる。

当て板 (type II) 補修法は、当て板 (type I) と比較し、垂直補剛材の上縁端部の応力集中を当て板へと確実に分担させることができる補修方法であることが確認できた。また、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力測定による補修効果確認は、ひずみゲージによる応力測定より広い範囲の応力分布測定結果から補修効果を評価できるため有効な手法であると言える。

垂直補剛材の疲労亀裂に対する補修効果の検証について、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定により今回実験を行った全てのタイプの補修法に対し、補修効果の検証を

行った。その結果、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定を用いることにより、従来から実施されているひずみゲージによる応力測定と比較し、補修範囲の広い領域の応力状態を把握できるため、補修前後の比較がもれなく可能となる。また、亀裂先端近傍に発生する高い応力集中も測定できるため、後述する破壊力学パラメータによる亀裂進展性評価も可能となる可能性がある。したがって、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定は、補修効果を効率よく定量的に確認できる手法であると言える。

8.6 熱弾性応力測定からの亀裂進展性評価

当て板 (type II) では、図 8.15 に示したように観察窓付き当て板を製作し、疲労亀裂を残したまま当て板を施工し、赤外線サーモグラフィによる疲労亀裂周辺の熱弾性応力測定を実施した。熱弾性応力測定では、亀裂先端近傍に形成された応力特異場が直接測定できることから、これをもとに補修前後の破壊力学パラメータを算出して、亀裂進展性の評価を行った。破壊力学パラメータとして応力拡大係数範囲 ΔK を求め、これに基づき亀裂進展速度 da/dN の推定を行う評価法について検討した。

(1) 亀裂先端場の応力

補修前後の亀裂先端から 1mm ごとの応力分布を図 8.16 に示す。図より、それぞれの位置での応力は、当て板の施工により施工前と比較して 25~30%低減していることがわかる。

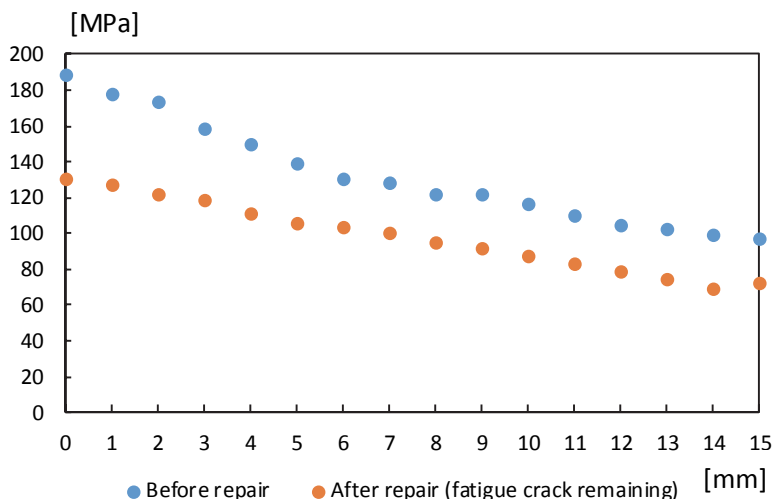


図 8.16 亀裂先端からの応力分布

(2) 応力拡大係数

本亀裂は、図 8.5(a)の FEM 解析結果から明らかなように、亀裂の変形モードはモード I であると見なすことができる。したがって、本検討では、モード I 負荷形式における亀裂先端周辺の応力分布解を利用して、赤外線サーモグラフィにより計測した亀裂先端近傍の応力分布を用いて、応力拡大係数 K を算出することを試みた。モード I 負荷形式において、図 8.17 に示すような無限板中に存在する 2 次元亀裂の亀裂先端では、亀裂先端を原点に図のように r - θ 座標をとると、亀裂先端の応力分布解は、式(8.1)のように表される。

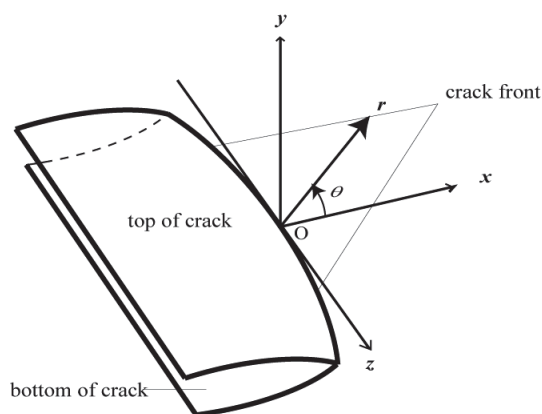


図 8.17 亀裂前縁と座標系

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \left(\sqrt{\frac{2}{\pi r}} \cos \frac{1}{2} \theta \right) K + C_2 + \left(\sqrt{r} \cos \frac{1}{2} \theta \right) C_3 + \dots \quad (8.1)$$

本実験では、右辺第 1 項のみを考慮した関数形に対し、データフィッティングにより応力拡大係数を算出した。また、亀裂先端のごく近傍では、熱拡散等の影響により正確な応力計測が困難であるため、図 8.16 に示したデータのうち亀裂先端からの距離 r が 5~15mm までのデータを外挿することにより応力拡大係数範囲 ΔK を算出することにした。なお、外挿する応力データは亀裂進展方向の直線上 ($\theta=0^\circ$) のデータとした。亀裂先端からの距離 r と応力 $\sigma_r + \sigma_\theta$ を外挿した結果を図 8.18 に、外挿により求められた補修前後の応力拡大係数範囲 ΔK を表 8.2 に、それぞれ示す。

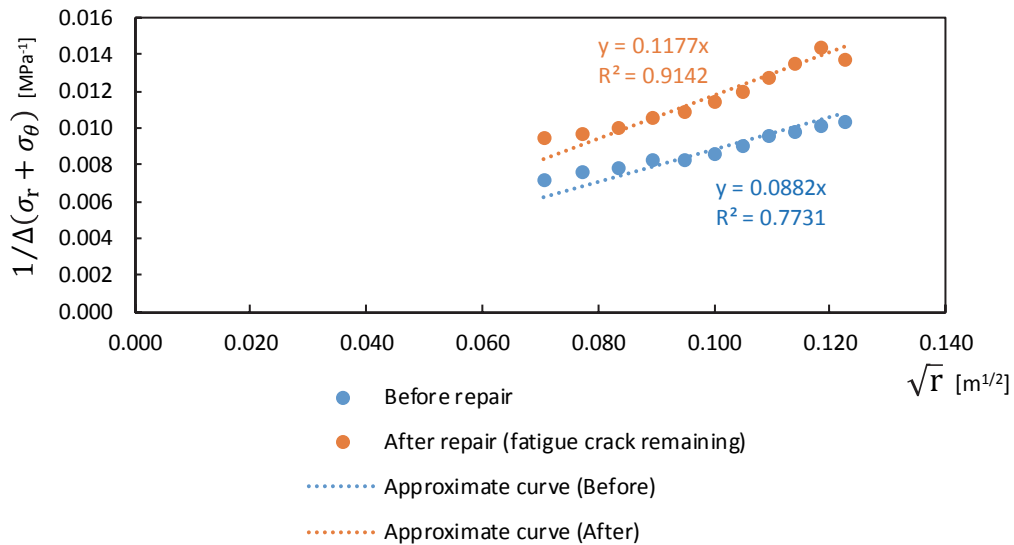


図 8.18 補修前後の外挿した結果

表 8.2 応力拡大係数範囲 ΔK

項目	ΔK [MPa·m ^{1/2}]
補修前	14.20
補修後 (亀裂あり)	10.72

亀裂先端場の応力から求めた応力拡大係数範囲は、補修により 25%低減される結果を得た。

(3) 亀裂進展速度

太田ら[8-9]が行った SM490 鋼に対する実験結果における疲労亀裂伝播速度と応力拡大係数範囲の関係式 (式(8.2)) を用い、疲労亀裂伝播(進展)速度を表 8.3 に示す。SM490 鋼の下限界応力拡大係数範囲と各定数は、太田ら[8-9]が行った実験結果のうち応力比 $R=0.8$ のもの ($\Delta K_{th}=3.50$, $C=1.45 \times 10^{-12}$, $m=3.60$) を用いている。これは、 $da/dN-\Delta K$ は、応力比 R の影響を受けるが、 $da/dN-\Delta K_{eff}$ であれば応力比 R に依存しない一価関数となる[8-10]。また、応力比が高い場合の $da/dN-\Delta K$ は、 $da/dN-\Delta K_{eff}$ に近いことが知られている[8-10]。つまり、本実験において測定した主応力和の応力範囲を用いた亀裂進展速度の評価を行う場合には、 $da/dN-\Delta K_{eff}$ に近い応力比 $R=0.8$ の実験結果である $da/dN-\Delta K$ における各定数を用いることとした。

$$da/dN = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (8.2)$$

ΔK : 応力拡大係数範囲 [MPa^{1/2}]
 ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数範囲(=3.50) [MPa^{1/2}]
 C, m : 定数($C=1.45 \times 10^{-12}$, $m=3.60$)

表 8.3 亀裂進展速度 da/dN

項目	da/dN [m/cycle]
補修前	2.03×10^{-8}
補修後 (亀裂あり)	7.28×10^{-9}

亀裂進展速度は、補修により 64%低減される結果を得ることができた。これにより、亀裂進展特性を定量的に評価できる可能性があると考えられる。なお、本結果を導く際に用いた SM490 鋼の ΔK_{th} 、 C 、 m の各定数は、太田らによる部分片振り引張($R=0.8$)における実験で得られた定数である。実橋では、圧縮応力が作用しており、また、測定方法も太田らの実験とは異なる赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力測定法である。そのため、今後は、熱弾性応力測定法を用いた疲労試験を実施して、応力拡大係数範囲と亀裂進展速度の関係を得る必要があると考えている。

8.7 結言

疲労亀裂の補修に対し、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力測定を用いることにより、以下のようなことが言える。

- ・ ひずみゲージを用いた応力計測より広い範囲の応力状態を確認できるため、応力集中箇所が変わるような補修法に対する補修効果検証には適している手法である。
- ・ 亀裂先端場の応力測定から、補修前後の亀裂進展抑制効果を定量的に評価できる可能性が高い。

鋼橋に発生する亀裂に対する補修効果の検証に、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力測定を用いることが、従来法であるひずみゲージによる応力測定より有効であるケー

スを紹介できたと考えている。また、破壊力学評価による補修前後の亀裂進展性評価が可能となることにより、補修効果の検証における有効な指標となると考えられる。

今後、実験の継続によりデータの充実を図り、補修効果の検証への赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定が有効な手段の一つとなるよう研究を進める予定である。

- [8-1] 第8章 参考文献川端淳：岩黒島橋の鋼床版垂直補剛材のひずみ計測と疲労評価，本四技報 Vol.37, No.120, pp.3-10, 2013.3.
- [8-2] 高田大資，藤城忠朗，大谷康史：鋼床版支点部補剛材に生じた亀裂の補修対策検討，土木学会第70回年次学術講演会，pp.1061-1062, 2015.9.
- [8-3] Greene RJ, Patterson EA, Rowlands RE. Thermoelastic stress analysis. In: Springer handbook of experimental solid mechanics. LLC New York: Springer Science + Business Media; 2008. p. 743–67.
- [8-4] Dulieu-Barton JM, Stanley P. Development and applications of thermoelastic stress analysis. *J. Strain Anal Eng Des* 1998;33:93–104.
- [8-5] Dulieu-Barton JM. Introduction to thermoelastic stress analysis. *Strain* 1999;35:35–9.
- [8-6] Pitarresi G, Patterson EA. A review of the general theory of thermoelastic stress analysis. *J. Strain Anal Eng Des* 2003;38:405–17.
- [8-7] 阪上隆英，西村隆，久保司郎，崎野良比，石野和成：自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔非破壊検査技術の開発，日本機械学会論文集 A 編，Vol.72, No.724, 2006-12, pp.1860-1867.
- [8-8] 中山和真，花井拓，阪上隆英，塩澤大輝，和泉遊以：鋼床版支点部補剛材に生じた亀裂の補修，土木学会第71回年次学術講演会，pp.241-242, 2016.9.
- [8-9] 太田昭彦，鈴木直之，小菅通雄，前田芳夫，廻俊夫：圧力容器用鋼及び構造用鋼突合せ溶接継ぎ手の疲労伝ば特性，金材技研材料強度データシート資料8，1995 発行
- [8-10] Yui Izumi, Takahide Sakagami, Koki Yasumura, Daiki Shiozawa : A new approach for evaluating stress intensity factor based on thermoelastic stress analysis *Recent Advances in Structural Integrity Analysis: Proceedings of the International Congress (APCF/SIF-2014)*, pp.47-51, 2014-12, Elsevier Cambridge.

第9章 結言

橋梁をはじめとする鋼構造のメンテナンスを将来にわたって最適に実施するための重要な要素となるのが、『防食』と『疲労』である。著者の研究では、疲労をテーマに、最適なメンテナンスサイクル構築に向けた「点検」「診断」「補修」の各分野で実施した研究を述べてきた。特に、Uリブで補剛された鋼床版におけるデッキプレートとUリブの溶接部のルート部を起点としてビード表面に進展するビード亀裂に対しては、メンテナンスサイクルのすべての分野で研究を進めた。

点検では、遠隔から非接触で測定可能な赤外線サーモグラフィによる亀裂検出手法を開発し、従来、一般的に実施していた目視点検に比べ、検出性能が高く、全数検査が可能な非破壊検査法を研究開発することができた。また、実用化システムの開発を行い、点検への実装を行った。

診断では、点検の研究において遠隔から非接触で全数検査が可能な手法とシステムの開発したこと、および後述する下面からのみで施工できる補修方法を開発できたこともあり、補修に至るまでの亀裂限界長さや亀裂進展速度などの特性を把握することで、最適な点検間隔などを検討した。

補修では、TRSを当て板の接合材料として使用することで、下面からのみで施工可能な方法を開発し、実物大の疲労試験や、施工試験などを通じて、下面からのみで補修できる効果的かつ効率的な補修方法を開発した。

また、ビード亀裂以外についても、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力測定法により、補修効果の検証手法として用いることで、ひずみゲージによる応力測定を補完し、更には、より効果的・効率的な検証法としての可能性を研究することができた。

本研究で得られた上述の成果を、以下にまとめる。

9.1 ビード亀裂に関するメンテナンスサイクル

(1) 点検

1) 赤外線サーモグラフィを用いた亀裂検出手法の開発と実用化システムの整備

ビード貫通亀裂に対し、本研究で開発した赤外線サーモグラフィを用いた検出手法では、従来、目視点検では発見が困難であった塗膜割れを伴わない疲労亀裂を発見することが可

能であり目視点検よりも検出能力が高い。つまり、本手法は、道路法において義務化された近接目視点検の同等以上の検出能力を有する。また、本手法は、移動しながらの計測も可能であることから点検効率が良く、点検可能時期も3～9月の長期間可能であり、近接目視点検に組み込み、対象となる全数の検査が十分可能である。

点検への実装は、2015年度より長大橋の基本点検（定期点検）として位置づけ、まずは、瀬戸大橋において試行を開始した。また、基本点検として試行開始時には、汎用機を用いた計測と温度画像からの目視による亀裂判定よりも、効率的に点検可能な専用の撮影装置と解析アルゴリズムからなる実用化システムの開発を開始した。実用化システムは、2016年度の点検より本格的な稼働を開始しており、現在も更なる効率的なシステムへ改良を重ねているところである。

今後は、点検業務で得られた亀裂検出結果を精査し、 a 値や c_2 値などの判定値の適正化や、亀裂検出アルゴリズムの高度化を進めるとともに、非破壊検査としての信頼性向上（空振りや見逃しの低減）を目指した研究を進めることが必要と考える。

2) ビード内在亀裂の研究

ビード内在亀裂は、貫通に至っていない亀裂、および貫通している亀裂に連続する内在部分の広がり等を、温度ギャップ法の原理に従い、その検出性を検討している研究である。現時点で得ている結論は、以下である。

- ・ 平板試験片による室内実験により、亀裂のビード表面までの到達度、亀裂の広がりや幅により温度勾配が異なるものの、温度ギャップ法を用いた検出の可能性が示された。
- ・ 実橋に発生しているビード貫通亀裂に隣接する内在亀裂部分についても、精密な温度測定と削孔による内在部分の広がりの調査から、温度ギャップ法を用いた検出の可能性が示された。

今後は、実用化に向けた検討を進め、より早期のビード亀裂の検出が可能な手法を研究する必要があると考える。

(2) 亀裂の進展特性

ビード貫通亀裂の最適な点検間隔を決めるためには、亀裂が検出可能な最短の長さ、亀裂の進展速度、早期補修と定義される亀裂の限界長さなどの情報が必要となる。亀裂が検出可能な最短の長さは、温度ギャップ法の開発により約40mmの亀裂が検出可能となった。

残る，亀裂の進展速度と早期補修と定義される亀裂の限界長さについて研究するため，既存ビード貫通亀裂の進展量を約5年間，毎年調査した。

その結果，ビード貫通亀裂の長さが250mmを超える場合，亀裂が屈曲していることが判明した。また，亀裂進展速度もばらつきは非常に大きいものの，最大のもので年間あたり40mmであった。これらより，点検間隔を5年にすることにより，ビード貫通亀裂の長さが250mm以下で検出することが可能であると推察できる。

しかしながら，本研究に用いた亀裂数は少なく，ばらつきも大きい。そのことから今後データの充実を図り，精度向上を目指す必要があると考えている。

(3) 補修法の開発

ビード貫通亀裂の補修は，舗装を剥ぎデッキプレート上面からボルトを落とし込み当て板により補修する工法，亀裂を除去し再溶接により補修する工法，デッキプレート下面へスタッド溶接し当て板により補修する工法などが実施されていたが，それぞれに課題があった。本研究では，TRSを用いることにより下面からのみで施工可能な工法を開発し，実物大の試験体を用いた疲労試験と，施工性を確認するための施工試験や実橋での試験施工により，疲労耐久性および施工性について確認を行った。

その結果，TRSを用いた当て板工法は，従来実施されているデッキ上面からHTBを用いた当て板工法と同等の疲労耐久性を確認できた。また，本補修方法は，疲労試験においてビード亀裂のみならずデッキ亀裂に対しても有効であることを確認できた。更に，施工試験でも下面からのみで施工できることを確認し，実橋での試験施工もトラブルなく施工できた。実橋での施工後1年の経過観察では，ボルトの緩み，亀裂の再発などは発生していない。

本補修法の開発により，通行止めなどの交通規制を必要としない効果的な補修法が開発できたものと考えている。今後は，経過観察を続け，実橋における状況を監視する予定である。

(4) 各研究結果とビード亀裂のメンテナンスサイクル

研究で取り組んだビード亀裂の点検手法の開発，進展特性の研究，補修法の開発の位置づけ，および研究結果から得られた知見，並びにビード亀裂に対する劣化曲線と回復の模式図を図9.1に示す。ビード亀裂は，ルート部を起点に溶接ビードに進展する亀裂である。亀裂は，発生初期段階では溶接ビード内に内在状態にあり，供用年数の増加とともにビー

ド表面へ到達する。その後も亀裂は溶接線方向に進展するが、温度ギャップ法の開発により、溶接ビード表面における亀裂長さが40mm程度に比較的短い段階での検出が可能となった。亀裂進展特性の研究からは、ビード表面上の最大亀裂進展速度は年間最大約40mmであること、および表面長さが250mmを超える場合にデッキ方向やUリブウェブ方向へ亀裂が屈曲するケースがあることも判明した。デッキ方向やUリブウェブ方向への亀裂進展は、デッキプレートへの陥没やUリブの曲げ剛性の著しい低下による路面の面外方向の変形など、重篤な変状につながる。また、補修する場合には、舗装切削やUリブ取り換えなど大規模な補修が必要となる。これらのことから、ビード貫通亀裂に対する維持管理限界は、亀裂が屈曲する前の250mmとすることが、軽微な補修で済む状況であり、最適と考えられる。また、補修方法については、下面からのみで施工可能な当て板工法を開発したことにより、舗装切削や交通規制が不要となり、本来舗装がもつ防水機能の低下の心配もなく、簡易に補修が可能となった。これらにより、一部課題はあるもののビード亀裂の予防保全的な枠組みが構築でき、最適メンテナンスに近づいたものと考えている。

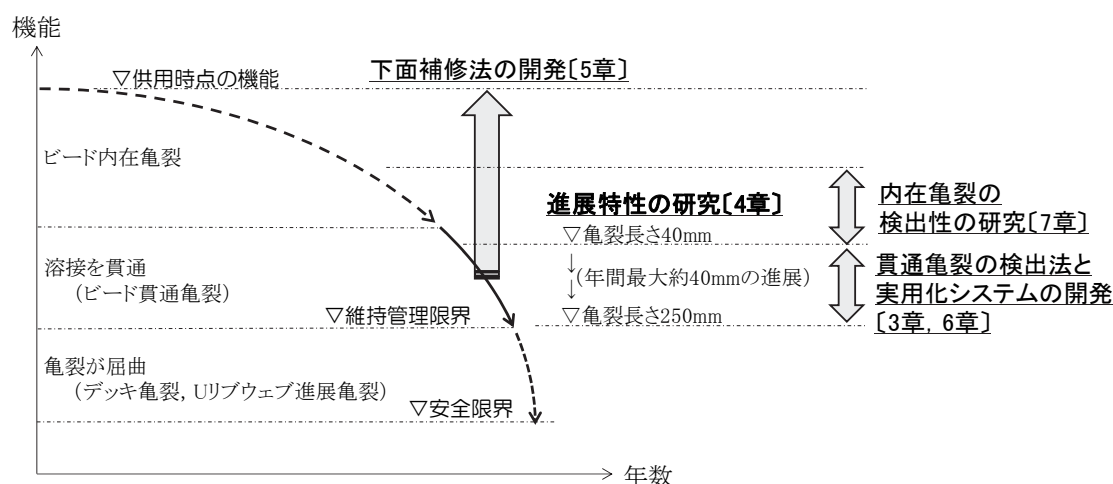


図 9.1 ビード亀裂の劣化曲線と、各研究の位置づけと結果

9.2 赤外線サーモグラフィを用いた疲労亀裂補修効果の検証

本研究は、疲労亀裂の原因調査、補修効果の検証のために、一般的に実施されるひずみゲージによる応力測定に代わり、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定により効果の検証を行ったものである。ひずみゲージは、計測対象部位に貼り付け応力を測定するが、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定では、温度測定を行う視野すべてにおいて応力が求められる特性を生かし、疲労亀裂の補修効果の検証に従来型のひずみゲージ計測より効果的に検証ができるものと考え実施したものである。

その結果、以下のことが確認できた。

- ・ ひずみゲージを用いた応力計測より広い範囲の応力状態を確認できるため、応力集中箇所が変わるような補修法に対する補修効果検証には適している手法である。
- ・ 亀裂先端場の応力測定から、補修前後の亀裂進展抑制効果を定量的に評価できる可能性が高い。

鋼橋に発生する亀裂に対する補修効果の検証に、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力測定を用いることが、従来法であるひずみゲージによる応力測定より有効であるケースを研究できたと考えている。また、破壊力学評価による補修前後の亀裂進展性評価が可能となることにより、補修効果の検証における有効な手法になると考えられる。

9.3 まとめ

鋼橋の疲労亀裂に関する「点検」「診断」「補修」の各分野において、研究を実施した。特に、ビード亀裂では、診断および補修技術の研究開発により予防保全としての枠組みが構築でき最適メンテナンスサイクルに近づいたものと考えている。また、その他の研究においても、データの充実など課題はあるものの、鋼構造物の最適メンテナンスサイクルの構築に向けた一定の成果が研究により得られたものと考えている。

今後も、研究を継続し、鋼橋の疲労亀裂に関する最適メンテナンスサイクルの向上に目指した研究を継続したいと考えている。

付録 1. 発表論文リスト

◆ 学位論文に関する論文

A. 赤外線サーモグラフィを用いたビード貫通亀裂検出法，および実用化システムの開発 [第 3 章，第 6 章]

- A01. 溝上善昭，奥村淳弘，大藤時秀，和泉遊以，阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ法によるUリブ鋼床版のビード貫通亀裂の自動検出と装置開発，構造工学論文集，Vol.64A，2018.3.（査読あり） [掲載決定*]
- A02. 溝上善昭，小林義弘，和泉遊以，阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版デッキプレート-Uリブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出，鋼構造論文集，第 22 号第 87 号，pp.47-56，2015.9.（査読あり）
- A03. Atsuhiko Okumura, Yoshiaki Mizokami, Akira Moriyama, Tokihide Oto, Takahide Sakagami, Yui Izumi : Fatigue inspection for orthotropic steel deck with infrared thermography, 39th IABSE Symposium, pp.2022-2029, September 21-23 2017, Vancouver, Canada (査読あり)
- A04. 溝上善昭，小林義弘，和泉遊以，阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版の亀裂検出技術，高速道路と自動車，pp.35-38，2014.10.（査読あり）
- A05. Takahide.SAKAGAMI, Yui.IZUMI, Yoshihiro.KOBAYASHI, Yoshiaki.MIZOKAMI, Sunao.KAWABATA : Applications of infrared thermography for nondestructive testing of fatigue cracks in steel bridges, Proc. of SPIE, 2014.7.
- A06. Takahide.SAKAGAMI, Yui.IZUMI, Yoshihiro.KOBAYASHI, Yoshiaki.MIZOKAMI, Sunao.KAWABATA : Remote nondestructive evaluation of fatigue crack in steel bridges by infrared thermography, Proc. of The Fifth US-Japan Symposium on Emerging NDE Capabilities for a Safer World, 2014.6.
- A07. 溝上善昭，森山彰，奥村淳弘，大藤時秀，和泉遊以，阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ計測による亀裂検出の高度化，第 72 回土木学会年次学術講演会講演論文集，土木学会，pp.1885-1886，VI-943，2017.9.
- A08. 大藤時秀，溝上善昭，和泉遊以，阪上隆英：温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による亀裂検出実用化システム，第 71 回土木学会年次学術講演会講演論文集，pp.1417-1418，VI-709，2016.9.

- A09. 和泉遊以, 溝上善昭, 阪上隆英, 小林義弘, 西脇周季: 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ計測による亀裂の検出性及びその高精度化に関する検討, 第 70 回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.779-780, I-390, 2015.9.
- A10. 阪上隆英, 和泉遊以, 溝上善昭, 西脇周季, 小林義弘: 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ計測における亀裂判別方法に関する検討, 第 70 回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.781-782, I-391, 2015.9.
- A11. 溝上善昭, 森山彰: 鋼床版 U リブビード貫通亀裂検出法の開発と疲労関連業務の体制整備, 本四技報 Vol.40 No.125, 2015.9.
- A12. 溝上善昭, 小林義弘, 和泉遊以, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による疲労亀裂検出, 第 69 回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.957-958, I-479, 2014.9.
- A13. 和泉遊以, 溝上善昭, 小林義弘, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知に基づく鋼床版の亀裂検出技術, 第 69 回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.955-956, I-478, 2014.9.
- A14. 和泉遊以, 溝上善昭, 小林義弘, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ計測に基づく鋼床版のき裂検出技術, 非破壊検査協会 平成 26 年度春季講演大会, 2014.6.
- A15. 溝上善昭, 和泉遊以, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による疲労亀裂検出技術, 第 68 回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.1115-1116, I-558, 2013.9.
- A16. 小林義弘, 川端淳, 溝上善昭: 赤外線サーモグラフィ法による疲労亀裂の検出, 本四技報 Vol.37 No.119, 2012.9.

※ 上記 A01 の論文は, すでに投稿し, 土木学会において, 掲載が決定しているが, 学位論文提出時において, 印刷公表していないもの.

B. U リブ鋼床版ビード貫通亀裂の進展特性 [第 4 章]

- B01. 溝上善昭, 花井拓, 鎌田将史, 新野貴大, 神田隼太: U リブ鋼床版ビード貫通亀裂の進展特性, 第 71 回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.771-772, I-386, 2016.9.

C. Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂の下面補修法の開発 [第4章]

- C01. 溝上善昭, 森山彰, 小林義弘, 坂野昌弘 : Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂に対する下面補修工法の提案, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.2, pp.456-472, 2017.8. (査読あり)
- C02. 溝上善昭, 金澤高宏, 坂野昌弘 : Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂に対する TRS を用いた下面補修法の開発, 高速道路と自動車, pp.20-24, 2017.10. (査読あり)
- C03. Yoshiaki MIZOKAMI, Yoshihiro KOBAYASHI, Yuki KISHI, Masahiro SAKANO : A study on Repair Method using TRS for Fatigue Cracks in Orthotropic Steel Deck, 8th IABMAS 2016, June 26-30, 2016, Fos do Iguace, Brazil (査読あり)
- C04. 溝上善昭, 森山彰, 貴志友基 : 鋼床版 Uリブとデッキ間のビード貫通亀裂に対する TRS を用いた下面補修法の開発, 本四技報 Vol.41 No.128, pp.2-9, 2017.3.
- C05. 金澤高宏, 貴志友基, 溝上善昭, 森下元晴, 西山圭介, 坂野昌弘 : Uリブ鋼床版のビード亀裂に対する下面補修, 第 71 回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.5-6, CS6-003, 2016.9.
- C06. 楠元崇志, 奥村淳弘, 坂野昌弘, 小林義弘, 溝上善昭 : Uリブ鋼床版のビード亀裂に対する補修方法の検討, 第 70 回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.15-16, CS-008, 2015.9.
- C07. 楠元崇志, 奥村淳弘, 坂野昌弘, 小林義弘, 溝上善昭 : Uリブ鋼床版のビードき裂の再現実験, 土木学会関西支部 年次学術講演会, 2015.5.

D. 温度ギャップ法によるビード内在亀裂の検出性に関する研究 [第7章]

- D01. 上西広稔, 和泉遊以, 阪上隆英, 溝上善昭, 森山彰 : 温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による裏面亀裂の検出, 第 72 回土木学会年次学術講演会講演論文集, 土木学会, pp.1887-1888, IV-944, 2017.9.
- D02. 和泉遊以, 阪上隆英, 溝上善昭, 森山彰, 三宮広之 : 温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による裏面亀裂の検出・評価, 第 71 回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.1419-1420, VI-710, 2016.9.

E. 赤外線サーモグラフィを用いた疲労亀裂補修効果の検証技術 [第8章]

- E01. Takahide SAKAGAMI, Yoshiaki MIZOKAMI, Daiki SHIOZAWA, Taisei FUJIMOTO, Yui IZUMI, Taku HANAI, Akira MORIYAMA : Verification of the repair effect for fatigue cracks in members of steel bridges based on thermoelastic stress measurement, Engineering Fracture Mechanics, 2017. (査読あり)
- E02. Takahide.SAKAGAMI, Yui.IZUMI, Daisuke.SHIOZAWA, Taisei.FUJIMOTO, Yoshiaki.MIZOKAMI, Taku.HANAI : Nondestructive Evaluation of Fatigue Cracks in Steel Bridges Based on Thermoelastic Stress Measurement, Proc. of ECF21, 2016.6.
- E03. 藤本泰成, 溝上善昭, 花井拓, 阪上隆英, 塩澤大輝, 東智之, 和泉遊以 : 熱弾性応力測定による鋼構造の疲労き裂補修対策実施効果の検証, 第71回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.243-244, I-122, 2016.9.

◆ 学位論文に関係するもの以外の発表論文

F. 赤外線サーモグラフィを用いた様々な非破壊検査手法

- F01. 溝上善昭, 森山彰, 花井拓 : 赤外線サーモグラフィによる維持管理技術高度化に関する技術開発の現状と今後, 平成28年度国土交通省国土技術研究会, イノベーション部門I, pp.230-235, 2016.11. (優秀賞受賞)
- F02. 溝上善昭, 花井拓, 阪上隆英, 竹内優人, 和泉遊以 : 走査加熱を用いたコンクリート構造物のアクティブサーモグラフィ非破壊検査試験, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, pp.5-8, 2016.10. (査読あり)

G. 鋼橋の疲労に関する論文

- G01. 川端淳, 北村岳伸, 溝上善昭, 梁取直樹, 坂野昌弘 : 吊橋非合成鋼床版横リブの実働応力と疲労寿命評価, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.1095-1103, 2015.3. (査読あり)
- G02. 梁取直樹, 溝上善昭 : 瀬戸大橋吊橋鋼床版横リブひずみ計測, 本四技報 Vol.39 No.123, 2014.9.
- G03. 溝上善昭, 酒井修平, 山内誉史, 荒木健二, 上原正太郎 : 簡易なエアーツールを用いたピーニング工法の重ねプレートすみ肉溶接部の疲労試験, 第67回土木学会年次学術講演会講演論文集, I-264, pp.527-528, 2012.9.

H. その他の論文

- H01. 松下穂高, 畔柳昌己, 溝上善昭, 山本将士, 山野修: ヒーティングケーブルを埋設したP R C床版の施工性の確認と昇温性能, 第 67 回土木学会年次学術講演会講演論文集, I-593, 2012.9.
- H02. 山野修, 山本将士, 畔柳昌己, 溝上善昭, 松下穂高, 松井繁之: ヒーティングケーブルを埋設した床版を有するコンクリート合成桁の負曲げ載荷試験, 第 67 回土木学会年次学術講演会講演論文集, I-594, 2012.9.
- H03. 山本将士, 山野修, 畔柳昌己, 溝上善昭, 松下穂高, 松井繁之: ヒーティングケーブルを埋設したコンクリート床版の輪荷重走行試験, 第 67 回土木学会年次学術講演会講演論文集, I-595, 2012.9.
- H04. 松田祥吾, 溝上善昭, 宮下英明: カウンターウェイトを用いた鋼ポータルラーメン橋の合理的な設計法, 第 67 回土木学会年次学術講演会講演論文集, I-462, 2012.9.
- H05. 檜作正登, 溝上善昭, 中村隆志, 内田裕也, 長岡睦己, 田口章: 養老ジャンクションの大規模夜間架設, 橋梁と基礎 2012 年 9 月号, 2012.9.
- H06. 山田達哉, 溝上善昭, 荒木健二, 山野修: 曲線を有する鋼少数連続 I 桁橋の横構の設置検討, 第 67 回土木学会年次学術講演会講演論文集, I-470, 2012.9.
- H07. 山野修, 大久保宣人, 宮下英明, 山本将士, 溝上善昭, 中原達雄: I 桁と箱桁の結合部に関する解析的検討, 第 66 回土木学会年次学術講演会講演論文集, I-076, 2011.9
- H08. 溝上善昭, 酒井修平, 長尾千瑛: 名古屋支社管内における新設橋梁の維持管理に配慮した細部構造の取り組み, NEXCO 技術情報-第 17 号, 2012.7.
- H09. 溝上善昭, 酒井修平, 長尾千瑛, 山田達哉, 村岡史朗: 維持管理に配慮した新設橋梁の細部構造, 第 66 回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp.21-22, CS7-011, 2011.9.
- H10. 越野勝, 溝上善昭: 大鳴門橋 (バックスティ径間部) 落橋防止システム設置, 本四技報 Vol.35 No.115, 2010.9.
- H11. 金子正猪, 内藤真, 溝上善昭: 新尾道大橋の概要と桁内の防錆仕様, 鋼橋塗装 Vol.27 No.1, 1999.3.

I. その他の口頭発表

- I01. 溝上善昭：新型ワンサイドボルトを用いた鋼床版の下面補修工法，鋼橋の維持管理全体の高度化に関するワークショップ，土木学会関西支部，2016.7.
- I02. 溝上善昭：本州四国連絡橋の疲労に対する取り組み，「非破壊検査小委員会」「赤外線サーモグラフィ部門」「鉄筋コンクリート構造物の非破壊検査部門」合同ミニシンポジウム，日本材料学会・日本非破壊検査協会，2015.1.

付録 2. 出願した特許

◆ 学位論文に関連する特許

1. 鋼床版の亀裂検出方法および亀裂検出装置：特許第 6025737 号
(発明者) 溝上善昭，和泉遊以，阪上隆英，小林義弘
(出願日) 平成 26 年 1 月 29 日
(登録日) 平成 28 年 12 月 9 日
2. 鋼床版の下面補修方法：特願 2015-199267
(発明者) 坂野昌弘，小林義弘，溝上善昭
(出願日) 平成 27 年 10 月 7 日

◆ その他の出願した特許

1. ワンサイドボルトで縦リブとデッキプレートを接合した鋼床版構造：特願 2016-139546
(発明者) 坂野昌弘，森山彰，溝上善昭
(出願日) 平成 28 年 7 月 14 日
2. 塗膜劣化検出方法：特願 2017-254215
(発明者) 阪上隆英，塩澤大輝，竹口昌弘，林昌弘，溝上善昭
(出願日) 平成 29 年 12 月 28 日

付録 3. 受賞歴

1. 建設技術展 2015 近畿「赤外線サーモグラフィによる鋼床版の亀裂検出」，審査委員特別賞 受賞，2015.10.29.
2. 平成 28 年度国土交通省国土技術研究会 自由課題(イノベーション部門 I)「溝上善昭，森山彰，花井拓：赤外線サーモグラフィによる維持管理技術高度化に関する技術開発の現況と今後」論文投稿・発表，優秀賞 受賞，2016.11.2.
3. 第 32 回日本道路会議「奥村淳弘，溝上善昭，阪上隆英，塩澤大輝，和泉遊以：赤外線サーモグラフィによる橋梁維持管理の高度化」，優秀論文賞 受賞，2017.11.1

謝 辞

本研究は、神戸大学大学院工学研究科 機械工学専攻 阪上研究室との共同研究をきっかけに、様々な橋梁での実橋実験や研究室での室内実験を通じ得られた成果をまとめた内容となっております。本研究を進め、まとめるにあたりましては、神戸大学大学院工学研究科 教授 阪上隆英先生より、研究の進め方やご助言、学術的な観点からのご指摘や論文のまとめかたなど多岐にわたりご指導をいただき、心より感謝いたします。亀裂下面補修法の開発では、関西大学環境都市工学部 都市システム工学科 坂野研究室との実験や実橋等での試験を通じて開発初期から、関西大学環境都市工学部 教授 坂野昌弘先生に多くのご助言、論文の細部までのご指導をいただき、心より感謝いたします。温度ギャップ法の開発では滋賀県立大学工学部 助教 和泉遊以先生、破壊力学による亀裂進展性評価では神戸大学大学院工学研究科 准教授 塩澤大輝先生に、それぞれ研究を進めるための助言、論文のご指導をいただき心より感謝しております。神戸大学大学院工学研究科 教授 中井善一先生、神戸大学大学院工学研究科 教授 森川英典先生には、ご多忙中の中、快く審査を引き受けていただき、本論文に対する適切なご指導をいただきました。厚くお礼申し上げます。

温度ギャップ法による亀裂検出システムの点検業務への実装と実用化システムの開発、亀裂下面補修法の実橋への適用にあたっては、本四高速 長大橋技術センター、保全部、各管理センターの関係する方々に、多くの助言やご支援をいただきました。温度ギャップ法の点検への実装には、小林義弘氏、ブリッジ・エンジニアリング 大藤時秀氏に、亀裂下面補修法の実橋への適用、施工治具の開発、論文のまとめかたなどは、森山彰氏、東大阪橋梁維持管理研究会に多くの助言やご指導をいただきましたこと、深く感謝いたします。

研究に集中する環境にも恵まれ、阪上研究室の学生諸君、坂野研究室の坂本氏、楠本氏、職場の同僚や後輩には、各実験やそれぞれの研究データの整理、論文のチェック、参考文献のチェックなどあらゆる面でご支援いただきました。本論文は、そのご協力がなければ未だ完成には至っていないと考えます。深く感謝申し上げます。

最後に、本研究をまとめるにあたり進学することを含め、支援そして応援してくれた、妻 由佳、娘 ひかり に感謝しています。

本研究は、多くの方のご指導、ご支援により達成できました。ここに全ての関係者の皆様に感謝し、謝辞といたします。

2018年1月
溝上 善昭

神戸大学博士論文

「鋼橋の疲労亀裂に対する最適メンテナンスサイクルの構築に向けた

診断および補修技術に関する研究」全 167 頁

提出日 2018 年 1 月 19 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **Kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 溝上 善昭

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。