

博士論文

摩擦型ゲージを活用した
疲労損傷点検法開発

2019年9月

岩手大学大学院工学研究科
機械・社会環境システム工学専攻

堀合 聡

目次

1 章 序論	1
1.1 はじめに	2
1.2 鋼橋の劣化・損傷	7
1.2.1 疲労.....	7
1.2.2 腐食.....	11
1.3 鋼橋の疲労損傷部位とその特徴	13
1.3.1 鋼橋の疲労損傷部位.....	13
1.3.2 鋼床版の疲労損傷部位.....	19
1.4 疲労に対する調査・点検手法	24
1.5 研究の目的	28
1.6 研究の構成	29
2 章 振動疲労試験	30
2.1 振動疲労試験概要	31
2.1.1 振動疲労試験機概要.....	31
2.1.2 ひずみゲージ概要.....	34
2.2 面外ガセット溶接継手を対象とした振動疲労試験	36
2.2.1 試験体概要.....	36
2.2.2 ひずみゲージ設置位置.....	37
2.2.3 試験条件.....	38
2.2.4 試験結果.....	40
2.3 鋼床版 U リブ溶接部を対象とした振動疲労試験	44
2.3.1 試験体概要.....	44
2.3.2 ひずみゲージ設置位置.....	47
2.3.3 試験条件.....	50
2.3.4 試験結果・考察.....	51
2.3.4.1 溶接部中央での応力値及び応力比の変動.....	51

2.3.4.2	亀裂周辺における 2 方向の軸方向応力比の検討.....	55
2.3.4.3	主応力方向の検討.....	59
2.3.4.4	磁粉探傷試験及びエッチング処理結果.....	62
3 章	FEM 解析による検討.....	70
3.1	FEM 解析概要.....	71
3.2	円孔を有する平板の解析.....	71
3.2.1	解析モデル.....	71
3.2.2	解析モデルの妥当性.....	73
3.2.2.1	無亀裂モデルの妥当性.....	73
3.2.2.2	亀裂を有するモデルの妥当性.....	74
3.2.3	亀裂周辺の 2 方向の軸方向応力比の検討.....	75
3.2.4	亀裂周辺の主応力方向の検討.....	77
3.3	面外ガセット溶接継手を対象とした FEM 解析.....	79
3.3.1	解析モデル.....	79
3.3.2	解析結果.....	81
3.4	鋼床版 U リブ溶接部を対象とした FEM 解析.....	86
3.4.1	解析モデル.....	86
3.4.2	解析結果.....	88
4 章	摩擦型ひずみゲージを用いた静的載荷試験.....	93
4.1	摩擦型ひずみゲージ概要.....	94
4.2	試験概要.....	95
4.3	試験体概要.....	95
4.4	試験結果.....	97
4.5	接着型ひずみゲージと摩擦型ひずみゲージの差.....	98

5 章	輪荷重走行試験	99
5.1	試験概要	100
5.2	試験体概要	104
5.3	ひずみゲージ貼付け位置	106
5.4	試験結果	108
5.4.1	疲労亀裂発生位置	108
5.4.2	亀裂発生位置周辺の応力値の経時変化	110
6 章	結論	115
	参考文献	119
	謝辞	121
	付録	122

第 1 章

序論

1.1 はじめに

我が国の建設年度別橋梁数の分布を図 1.1 に示す。高度経済成長期と呼ばれる 1955 年から 1975 年までの 20 年間に全体の約 26% が建設されている。これらの橋梁は現在、供用年数が 50 年を超過するいわゆる「老朽化橋梁」となっている過程にあり、今後 30 年のうちに大量の橋梁が老朽化橋梁となることは確実である。これは、インフラを維持する上で極めて大きな問題であると認識されている。国土交通省で公表されている資料では 2023 年には老朽化橋梁が全体の 43%、2033 年には 67% に急増する見通しであり（図 1.2）、今後はこれらの橋梁をいかに維持管理するのが重要となる。

国土交通省が定める橋梁定期点検要領によると、橋梁の定期点検は供用開始後 2 年以内に初回を行い、2 回目以降は、5 年に 1 回の頻度で行うことを基本としている。表 1.1 に示すように、その内容は、点検する部位、部材に応じて、適切な項目に対して点検を実施し、近接目視を基本として評価をするものである。また、点検には専門知識や実務経験のある橋梁検査員、橋梁点検員及び、点検車運転員、交通整理員等必要に応じた人員も編成する必要がある。

全国の橋梁約 70 万橋のうち市区町村が管理を委ねられている橋梁はそのうちの 68% となっている。しかし、図 1.3~1.4 に示す様に財政力不足や職員不足、専門的知見の不足等の問題のより、市町村においてその管理が困難な状況にある。北陸地方の市町における調査によると、跨道橋や、山中にあり通行が希少であるが代替路が無い道路橋など、多数の管理する橋がある場合、点検費用を算出することが精一杯で、予防保全はおろか、事後保全の費用さえも捻出しづらい現状となっていることや、既設橋の管理に対する地域住民の認識の低さも問題となっている。これらの現状のため、市町としては、定期点検の基準の標準化や点検の簡易化、橋梁の維持管理に特化できる専門官を雇用などの要望を出している。また、我々が住む東北地方における橋梁の修繕実施状況は、県・政令市における要修繕橋梁 4441 橋のうち 44.3% の実施率であるが、市町村においては要修繕橋梁 6435 橋のうち 3.7% しか実施できていない状況にある。図 1.5 に 2008 年、2013 年、2014 年の東北地方の市町村における土木技術者数をグラフにしたものを示すが、村においては土木技術者の不足が見てわかる。これは、東北地方の市町村における橋梁の修繕実施状況が低い要因の一つであると考えられる。

定期点検における目視調査についてもいくつか問題がある。多くの橋梁を点検するにあたって、近接目視と遠方目視を行うが、近接目視により塗膜割れなど表面の劣化・損傷は確認できるが、内部における劣化・損傷は確認することができない。また、点検者の技量に大きく左右されてしまうため、熟練の技術者と土

木に初めて携わる技術者では判定が異なる場合がある。

このような橋梁の維持管理に関する現状から、今後は点検の簡易さ、点検者の技量の違いに対する定量的な判断が求められる。

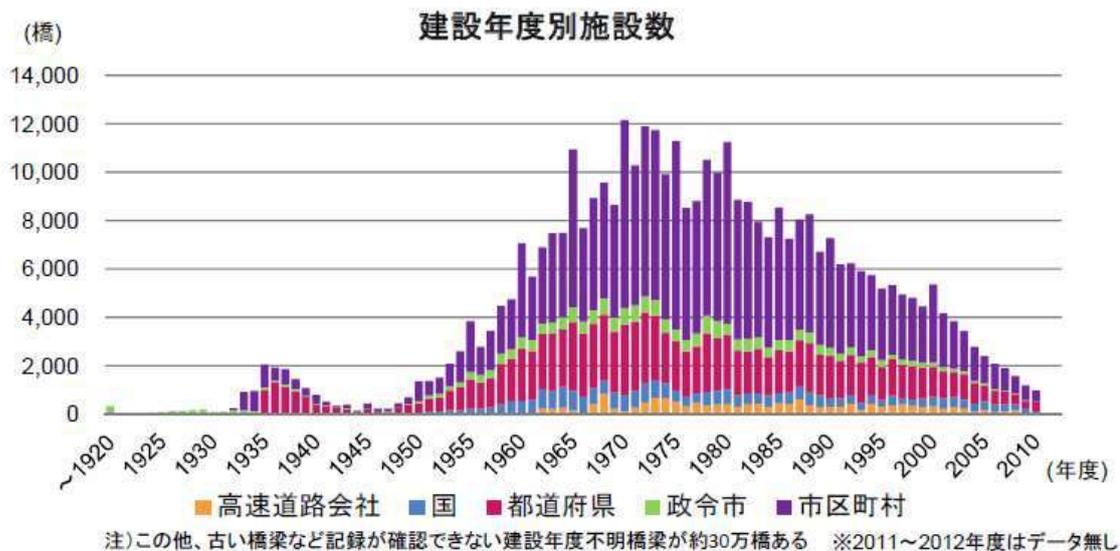


図 1.1 建設年度別橋梁数

出典：道路構造物の現状（橋梁）道路局 H25.4

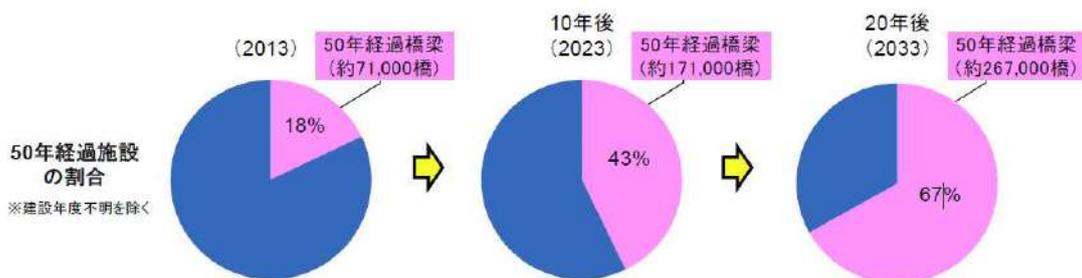


図 1.2 老朽化橋梁数の変遷

出典：出典：道路構造物の現状（橋梁）道路局 H25.4

表 1.1 点検の標準的な方法

材料	番号	損傷の種類	点検の標準的方法	必要に応じて採用することのできる方法の例
鋼	①	腐食	目視、ノギス、点検ハンマー	超音波板厚計による板厚計測
	②	亀裂	目視	磁粉探傷試験、超音波探傷試験、渦流探傷試験、浸透探傷試験
	③	ゆるみ・脱落	目視、点検ハンマー	ボルトヘッドマークの確認、打音検査 超音波探傷(FIT等)、軸力計を使用した調査
	④	破断	目視、点検ハンマー	打音検査(ボルト)
	⑤	防食機能の劣化	目視	写真撮影(画像解析による調査) インペダンス測定、膜厚測定、付着性試験
コンクリート	⑥	ひびわれ	目視、クラックゲージ	写真撮影(画像解析による調査)
	⑦	剥離・鉄筋露出	目視、点検ハンマー	写真撮影(画像解析による調査)、打音検査
	⑧	漏水・遊離石灰	目視	
	⑨	抜け落ち	目視	—
	⑩	床版ひびわれ	目視、クラックゲージ	写真撮影(画像解析による調査)
	⑪	うき	目視、点検ハンマー	打音検査、赤外線調査
その他	⑫	遊間の異常	目視、エベックス	—
	⑬	路面の凹凸	目視、エベックス、ボール	—
	⑭	舗装の異常	目視、エベックス又はクラックゲージ	—
	⑮	支承部の機能障害	目視	移動量測定
	⑯	その他		—
共通	⑰	補修・補強材の損傷	目視、点検ハンマー	打音検査、赤外線調査
	⑱	定着部の異常	目視、点検ハンマー、クラックゲージ	打音検査、赤外線調査
	⑲	変色・劣化	目視	—
	⑳	漏水・滲水	目視	赤外線調査
	㉑	異常な音・振動	聴覚、目視	—
	㉒	異常なたわみ	目視	測量
	㉓	変形・欠損	目視、水系、エベックス	—
	㉔	土砂詰まり	目視	—
	㉕	沈下・移動・傾斜	目視、水系、エベックス	測量
㉖	洗掘	目視、ボール	カラーイメージングソナー	

出典：橋梁定期点検要領 国土交通省 道路局 国道・防災課 H26.6

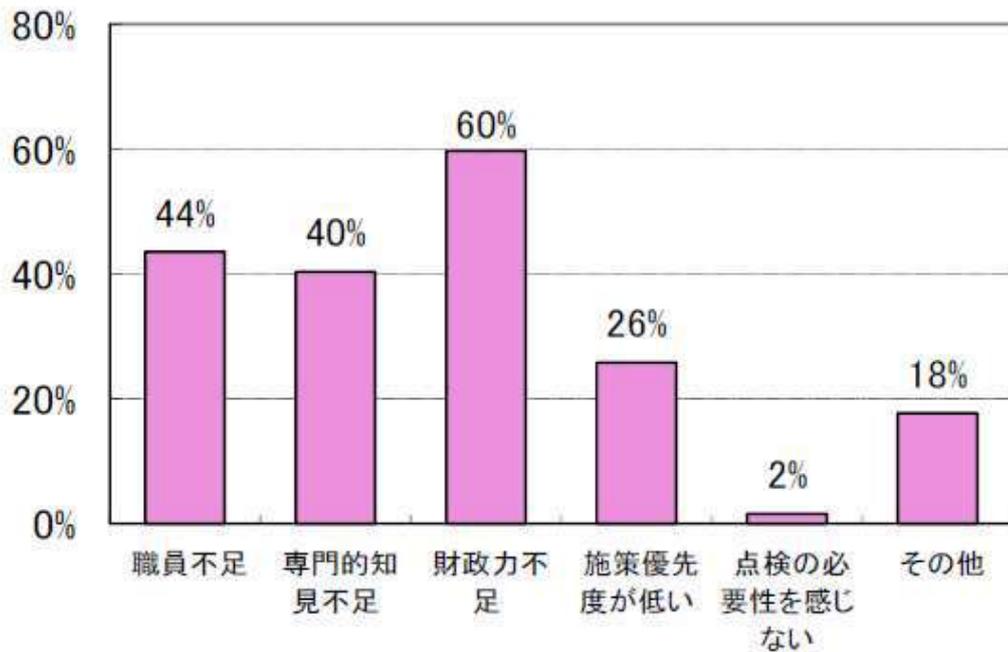
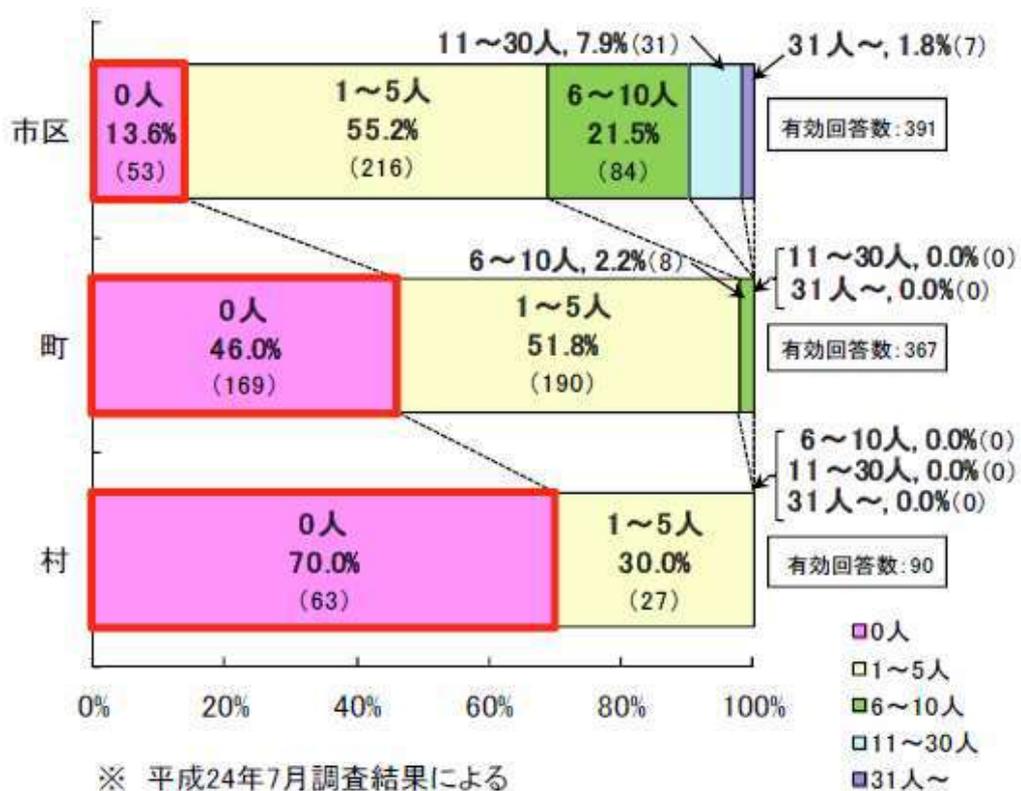


図 1.3 橋梁長寿命化修繕策を策定していない理由

出典：市区町村の橋梁長寿命化施策が進まない主な理由 国土交通省 H24.7



※ 平成24年7月調査結果による

図 1.4 市区町村における橋梁保全業務に携わる土木技術者数

出典：市区町村の橋梁長寿命化施策が進まない主な理由 国土交通省 H24.7

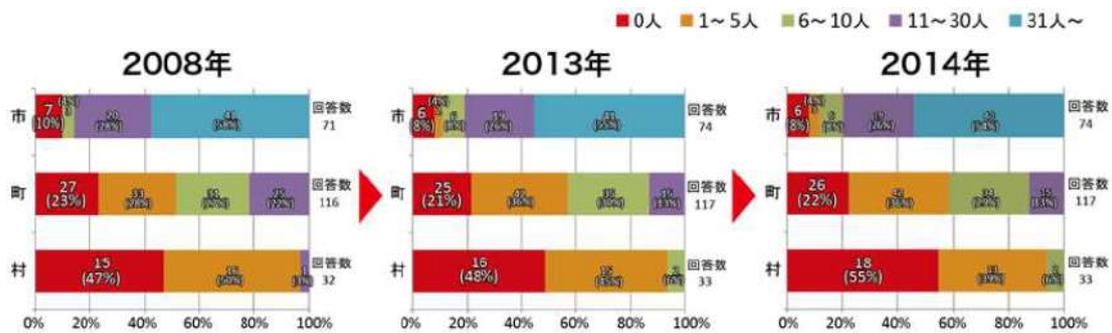


図 1.5 市町村における土木技術者数

出典：土木技術者の現状 国土交通省 東北地方整備局

1.2 鋼橋の劣化・損傷

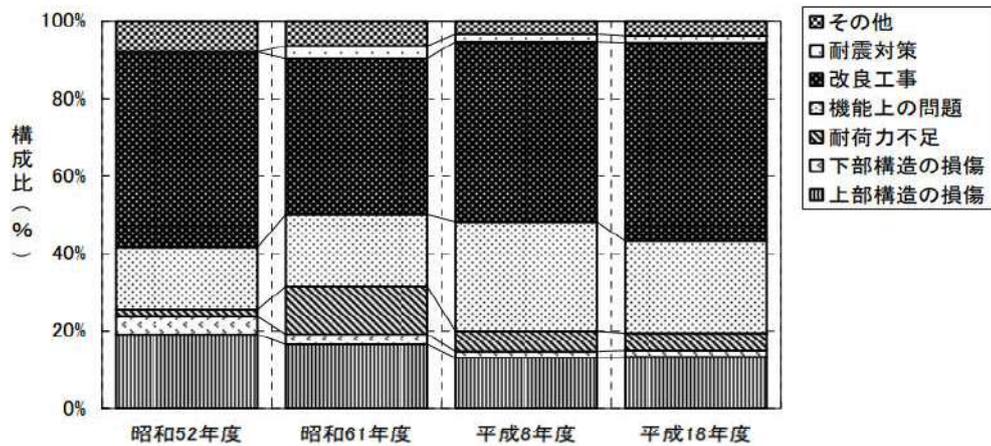
1868年に日本で初めて鉄の橋である「くろがね橋」が建設された。その後、日本では港大橋や明石海峡大橋など数多くの鋼橋を設計・製作されてきたが、建設されてから数十年経った今、重交通化に伴う劣化損傷の問題が浮上している。

近年、鋼橋では疲労による亀裂の発生や疲労破壊による事故、腐食による桁端部の鋼材の損傷による架け替えなど多くの事例が見られる。図 1.6 に架替理由構成比と鋼橋の上部構造の損傷による架替理由の内訳を示すが、これより改良工事、機能上の問題、上部構造の損傷と続いている。このうち上部構造の損傷の内訳においては、荷重の繰り返し作用による床版の疲労損傷と鋼材の腐食に大別されている。本項では、この2つの劣化・損傷についてふれていく。

1.2.1 疲労

疲労とは、時間的に変動する荷重が部材に繰り返し作用することにより亀裂が発生し、それがさらなる荷重の繰り返しによって徐々に進展し、最終的に延性破壊や脆性破壊につながる破壊現象であり、重交通を支える橋梁に生じやすい。特に、応力集中部となる切欠き部や溶接部における疲労損傷の報告は多い。

一般に、鋼材の疲労強度は、表面が平滑な場合には、引張強度が高いほど高くなる傾向にあるが、切欠きや溶接ビード等の形状が急変するような応力集中部が存在すると、疲労強度は極端に低下し、そこが亀裂の起点となる。実際に、80キロ鋼の試験体の疲労試験において、平滑材の100万回における疲労強度は70kgf/mm²に対し、切欠きが存在すると10kgf/mm²程度まで低下するという結果がある。図 1.7 に鋼橋に用いられる代表的な溶接継手を示すが、このように種々の部材が溶接によって接合される構造では、構造部材としての疲労強度は、接合部の構造的な応力集中や溶接そのものの局所的な応力集中に支配されてしまい鋼材強度にほとんど依存していない。つまり、繰り返し回数と疲労亀裂が発生する箇所に作用する応力の振れ幅（応力範囲）を用いて疲労現象は整理され、S-N 曲線または疲労寿命曲線と呼ばれる直線を用いて疲労強度が判断される。溶接継手の疲労強度は継手形式ごとに整理される。図 1.8 にその等級を示す。これらの等級を参考にして、各継手がどの程度の疲労強度を有しているのかを概略把握しておくことは重要である。また、図 1.9 に示すように近年は大型車交通量が多くなっているため、長期間供用された橋梁ほどダメージは大きいものと考えられる。



架替理由構成比

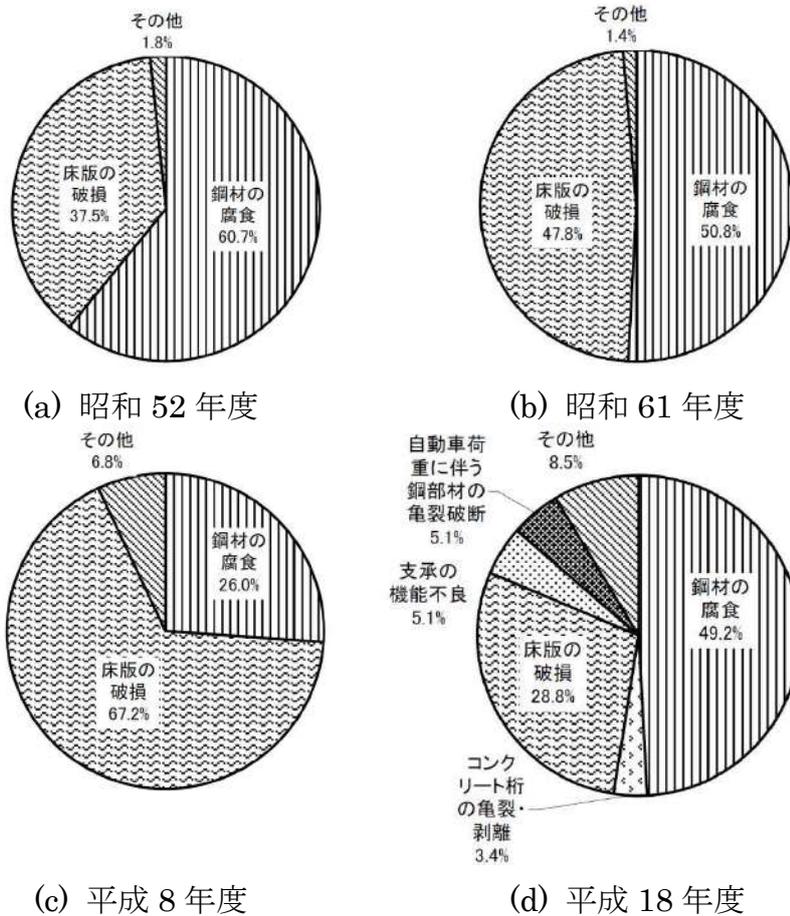


図 1.6 架替理由構成比と上部構造の損傷による架替理由の内訳

出典：橋梁の架替に関する調査結果(IV)

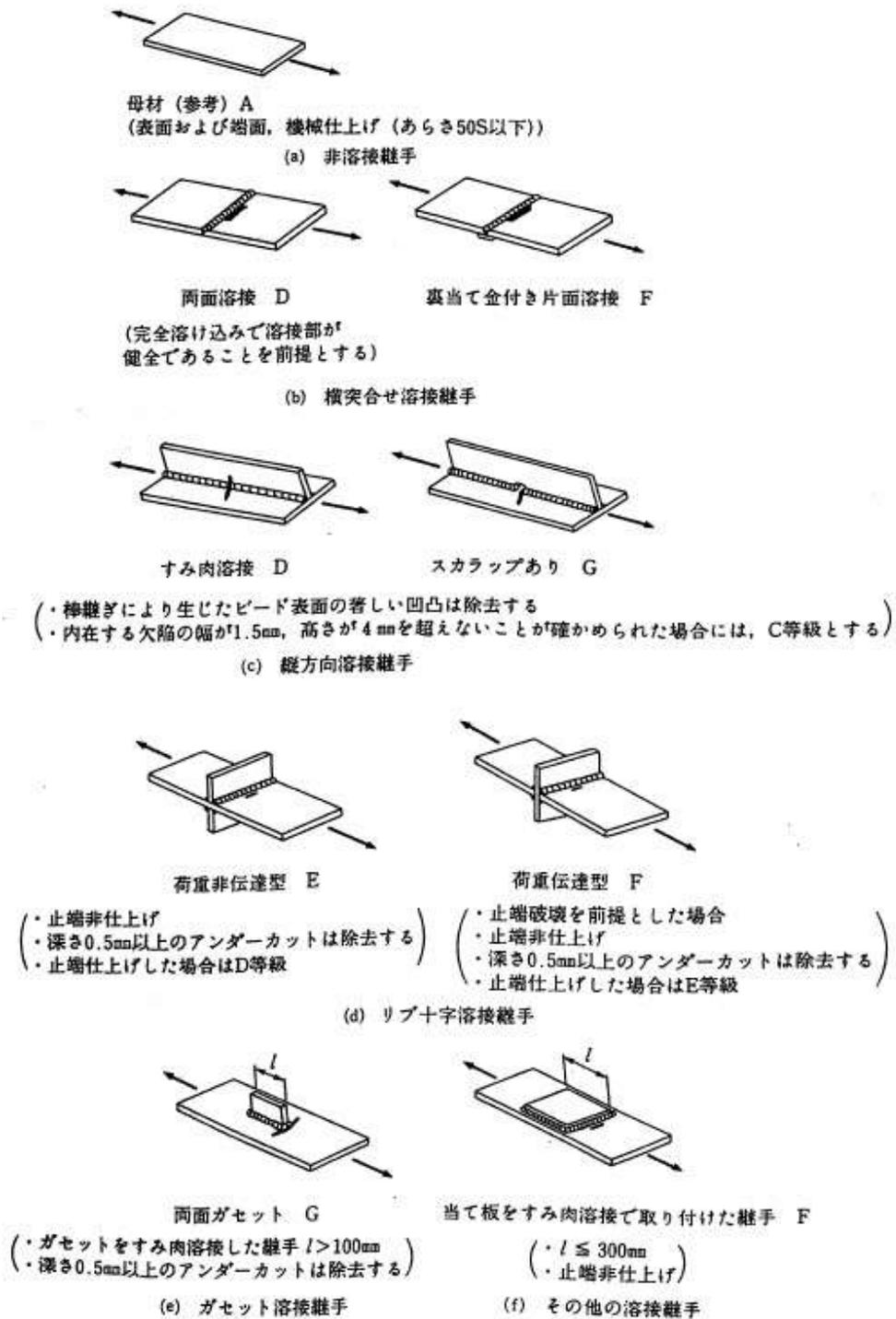


図 1.7 代表的な溶接継手と亀裂の発生箇所

出典：鋼橋の疲労

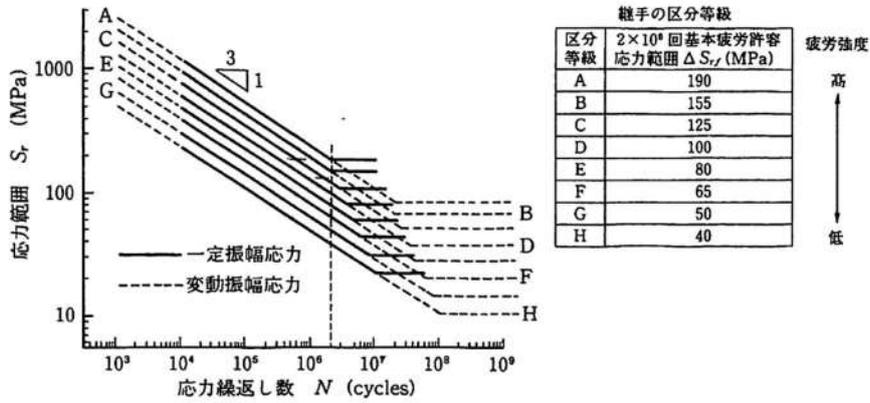
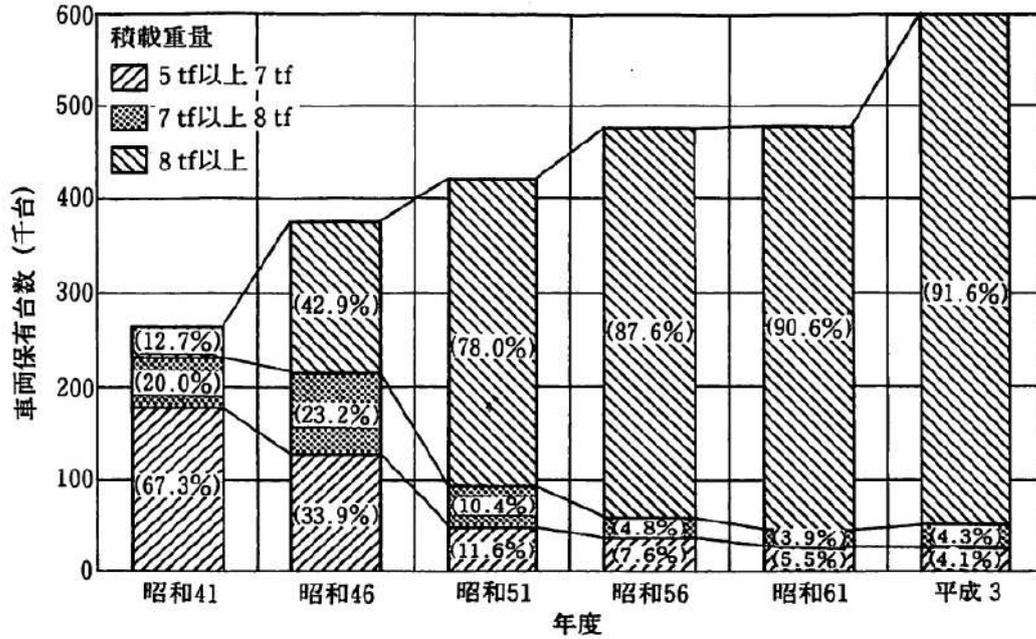


図 1.8 継手の区分等級に対する疲労設計曲線

出典：鋼橋の疲労



注 1) 図中の数値は各年度の構成比
 注 2) 各年 3 月 31 日現在
 出典：運輸省「陸運統計要覧」により作成

図 1.9 大型車の積載重量別車両保有台数の推移

出典：鋼橋の疲労

1.2.2 腐食

腐食とは、金属材料が使用環境中の物質と化学反応（酸化還元反応）あるいは電気化学反応によって、金属イオンまたは非金属の化合物となって損耗していく現象である。図 1.10 及び式 (1.1) ~ (1.5) に鋼材表面における腐食（電気化学反応）を示す。アノード、カソードが鋼材表面の別々の場所で同時に発生して局部電池を形成する。アノード領域で生じるアノード反応とカソード領域で生じるカソード反応は、必ず等量で進行するため、一方の進行を抑制すれば、もう一方の反応も抑制され腐食は止まる。これらの反応のために、水と酸素の存在が不可欠であり、水と酸素の量によってさまざまな組織の錆となる。したがって、腐食を防止する基本的な方法は、水あるいは酸素の供給を断つことである。

鋼構造物の防食方法を図 1.11 に示す。この中でも塗装は、鋼構造物を腐食から護るために広く用いられている防食法である。鋼材表面に形成される塗膜には、鋼材の防食のために水や酸素、塩類といった腐食を促進する物質を遮断するだけでなく、色彩選択の自由度が高く、周辺景観との調和を図りやすいという特色がある。塗装が行われるようになった 1880 年代では、油性錆止め塗料が使われ、1940 年代は調合ペイントが普及し、1950 年代には合成樹脂系塗料が使われるようになった。現在では、ブラスト処理工法の採用、厚膜形ジンクリッチペイントの開発などにより、重防食塗装系が確立され、長期間にわたる防食性能を確保している。

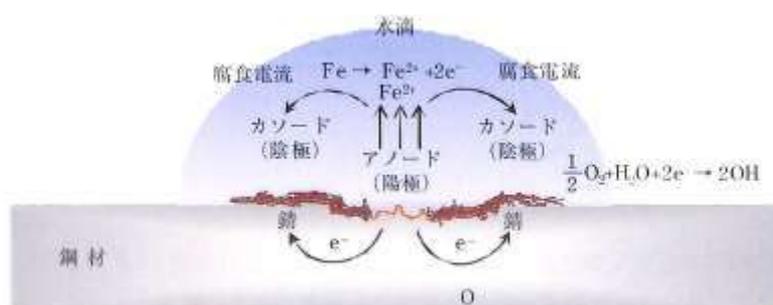
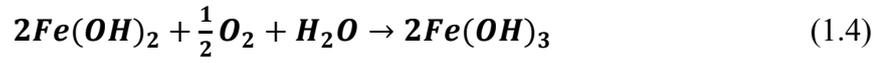


図 1.10 鋼材表面で発生する局部電池の模式図

出典：重防食塗装



(a) 塗装



(b) 金属溶射



(c) 熔融亜鉛メッキ処理



(d) 耐候性鋼材

図 1.11 鋼構造物の主な防食方法

1.3 鋼橋の疲労損傷部位とその特徴

1.3.1 鋼橋の疲労損傷部位

鋼橋における疲労損傷である亀裂の代表的な写真を図 1.12 に示す。また、表 1.2 に鋼橋の主な疲労損傷事例を、図 1.13～1.14 にこれらの事例の代表的な損傷箇所について示す。亀裂の発生部位に関する特徴を以下に示す。

- ① プレートガーダー橋では、対傾構、横桁と主桁の接合部や桁端の切欠き部、ソールプレート部に見られる。
- ② アーチ、トラス橋では、補剛桁あるいはトラス弦材と横桁の接合部、縦桁と横桁の接合部等の床組や、アーチ橋の垂直材上下端の接合部に見られる。
- ③ 鋼床版では、輪荷重走行位置の直下の溶接部（U リブの突合わせ溶接部、横リブと縦リブの交差部および垂直補剛材とデッキプレートの溶接部）に見られる。

これらの部位のうち、桁端部（桁端、ヒンジ部の切欠き構造およびソールプレート溶接部）のように、亀裂の進展が主桁、主構の破断に直接つながる恐れのある部位については特に気をつけて点検を行うことが望ましい。

また、疲労損傷の多くは、溶接継手部、特にすみ肉溶接部から発生している。溶接部の疲労亀裂は、その発生箇所によって一般に図 1.15 の 2 タイプに分類される。1 つはすみ肉溶接端部から発生する亀裂（止端亀裂）であり、もう 1 つはルート部から発生する亀裂（ルート亀裂）である。亀裂の発生箇所は、作用外力と密接に関係する。

図 1.16 は、すみ肉溶接について亀裂の発生位置の例を作用外力の種類別に分類したものである。設計計算時に応力照査が行われる板面内に作用する力に対する損傷事例はほとんどなく、事例の多いのは二次応力としての面内力③、あるいは②④の面外力による損傷である。このとき、疲労亀裂は、すみ肉溶接のサイズが大きい場合には、㉔や㉔の止端部から発生しやすく、設計上必要なサイズより不十分な場合は、㉔のようにすみ肉溶接ルート部から発生しやすく、それが進展し㉔に示すようにビード表面に現れることがある。



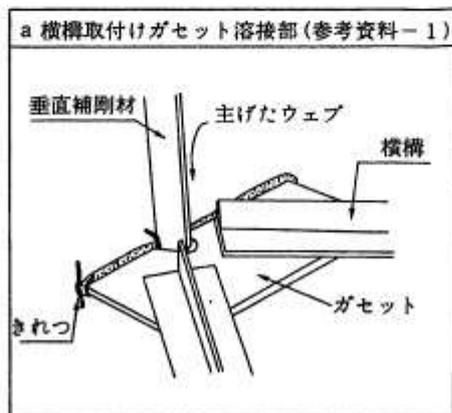
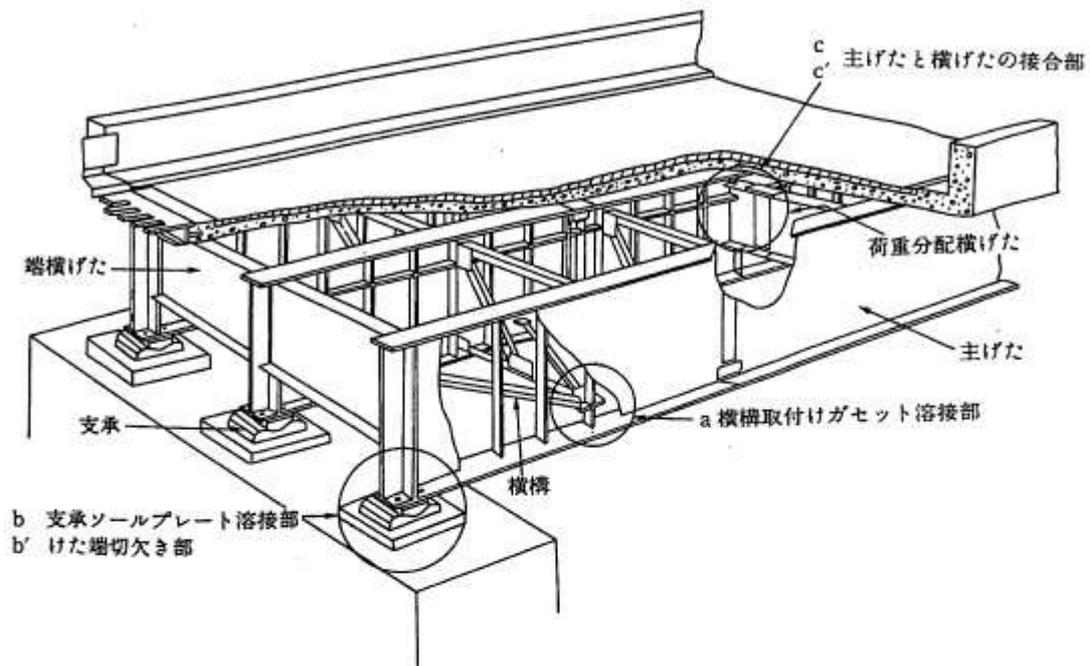
図 1.12 亀裂の写真（左：補剛材溶接部の亀裂、右：デッキプレート溶接部の亀裂）

出典：土木鋼構造物の点検・診断・対策技術

表 1.2 鋼橋の主な疲労損傷の事例

出典：鋼橋の疲労

形 式		着目部位	損 傷 箇 所
I げた 箱げた (RC 床版)	I げた	主げた端部	①下フランジと切り欠いたウェブとの溶接部
		横構ガセットプレート	②支点上横構ガセットプレート取付部
			横構ガセットプレート取付部
		垂直補剛材、対傾構ガセット、横げた端部	③対傾構、横げたの取付け垂直補剛材上端溶接部 対傾構弦材取付けガセットの溶接部、横げた端部 リベット孔部、横げたフランジの貫通部
		端横げた端部	④端横げたの端部、支点上垂直補剛材の上下端溶接部
		枝げた	⑤主げたとの溶接部、横げたとの連結部（リベット孔）
	下フランジ板継ぎ部	⑥下フランジ板継ぎ部の突合せ溶接部	
	共 通	ソールプレート	⑦支承ソールプレートの溶接部
アーチ、 トラス	上路アーチ	垂直材端部	⑧垂直材の上下端の接合部
		補剛げた端部	⑨端支柱上の補剛げたの端部
	中路アーチ	アーチリブウェブ	⑩アーチリブウェブと横げた接合部
	下路アーチ	吊材	⑪吊材の上下端の接合部
	共通(床組)	横げた、端横げた端部	⑫横げたの端部(横げたウェブ面内力に起因) ⑬端横げたおよび横げたの端部(横げたウェブ面外力に起因)
		縦げた端部	⑭縦げた、補強縦げた端部
		端横げた	⑮端横げたウェブと縦げたの接合部(横げたウェブ面外力に起因)
鋼床版橋	鋼床版部	縦リブ	⑯縦リブ(Uリブ)どうしの突合せ溶接部
			⑰デッキプレートと縦リブ(Uリブ)の溶接部
			⑱端横リブ、ダイヤフラムと縦リブの端部のすみ肉溶接部 支点上ダイヤフラム垂直補剛材と縦リブの溶接部
		横リブ	⑲横リブウェブと縦リブとの交差部
	⑳デッキプレートとの溶接部(現場継手部による切欠き部)		
	垂直補剛材上端部	㉑デッキプレートと垂直補剛材との溶接部	
	箱げた部	ダイヤフラム等隅角部	㉒ダイヤフラム隅角部の溶接部 横リブと垂直補剛材、ガセットの溶接部
コーナープレート(下フランジ側)		㉓コーナープレートと下フランジ、ダイヤフラムの溶接部	
ゲルバーヒンジ		円弧状フランジを有するゲルバーヒンジ	㉔下フランジと切り欠いたウェブとの溶接部 I断面(I げた、上路アーチ側径間)、 箱断面(トラス)
吊 橋		ハンガー定着部材	㉕ハンガーを補剛げたに定着する吊ボルト
橋 脚		T型橋脚隅角部	㉖柱とはりの溶接部
付 属 物	標 識 柱	標識柱とその取付け部	㉗箱げたウェブと標識柱基部および柱分岐部の溶接部
	吊 金 具	吊金具の取付け部	㉘I げた橋外げた吊金具取付け溶接部



(注) きれつが溶接ビードからはずれてウェブ内に進展している場合には、進展を監視しながら早急に対処する。

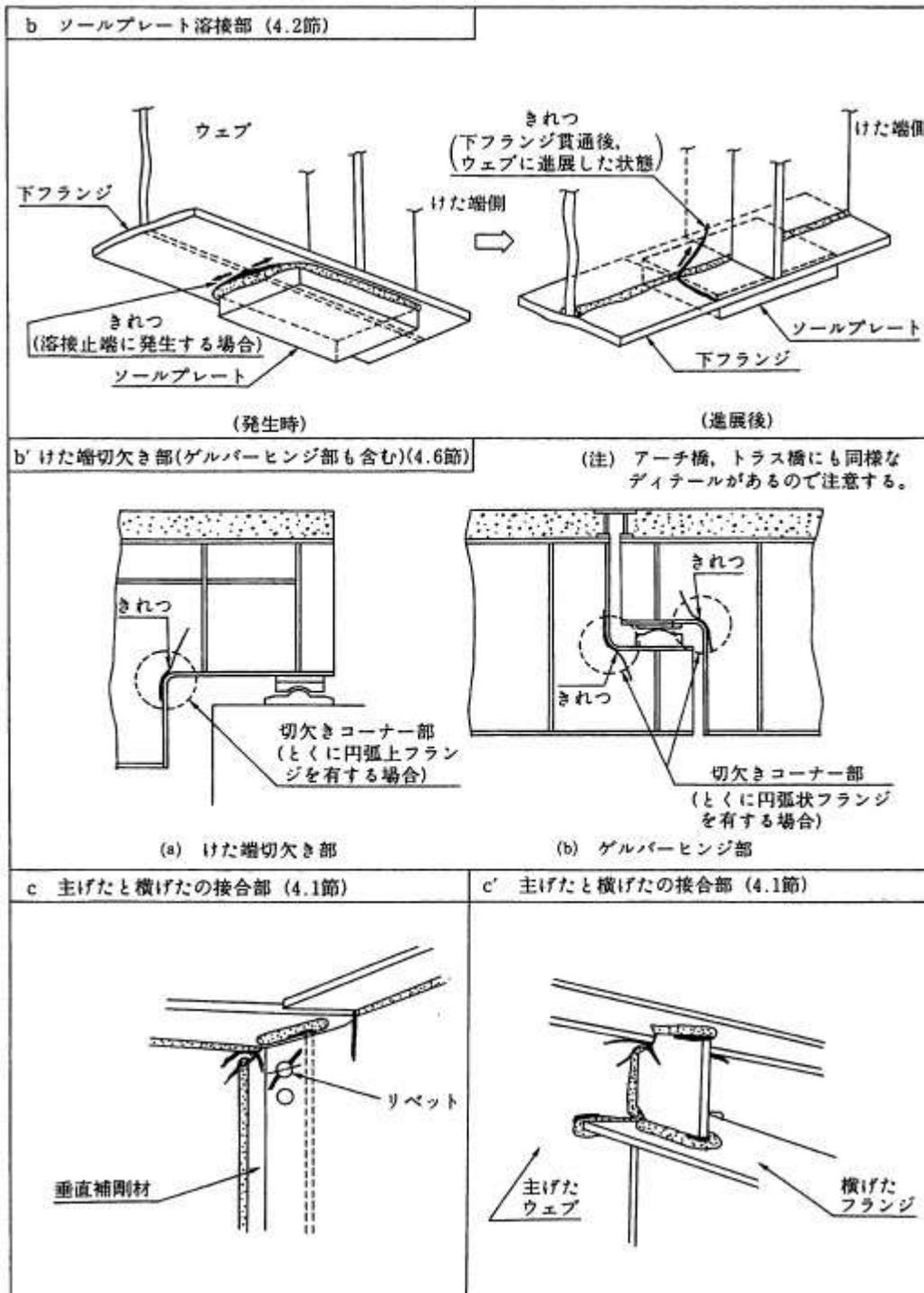


図 1.13 I 桁における主な損傷部位

出典：鋼橋の疲労

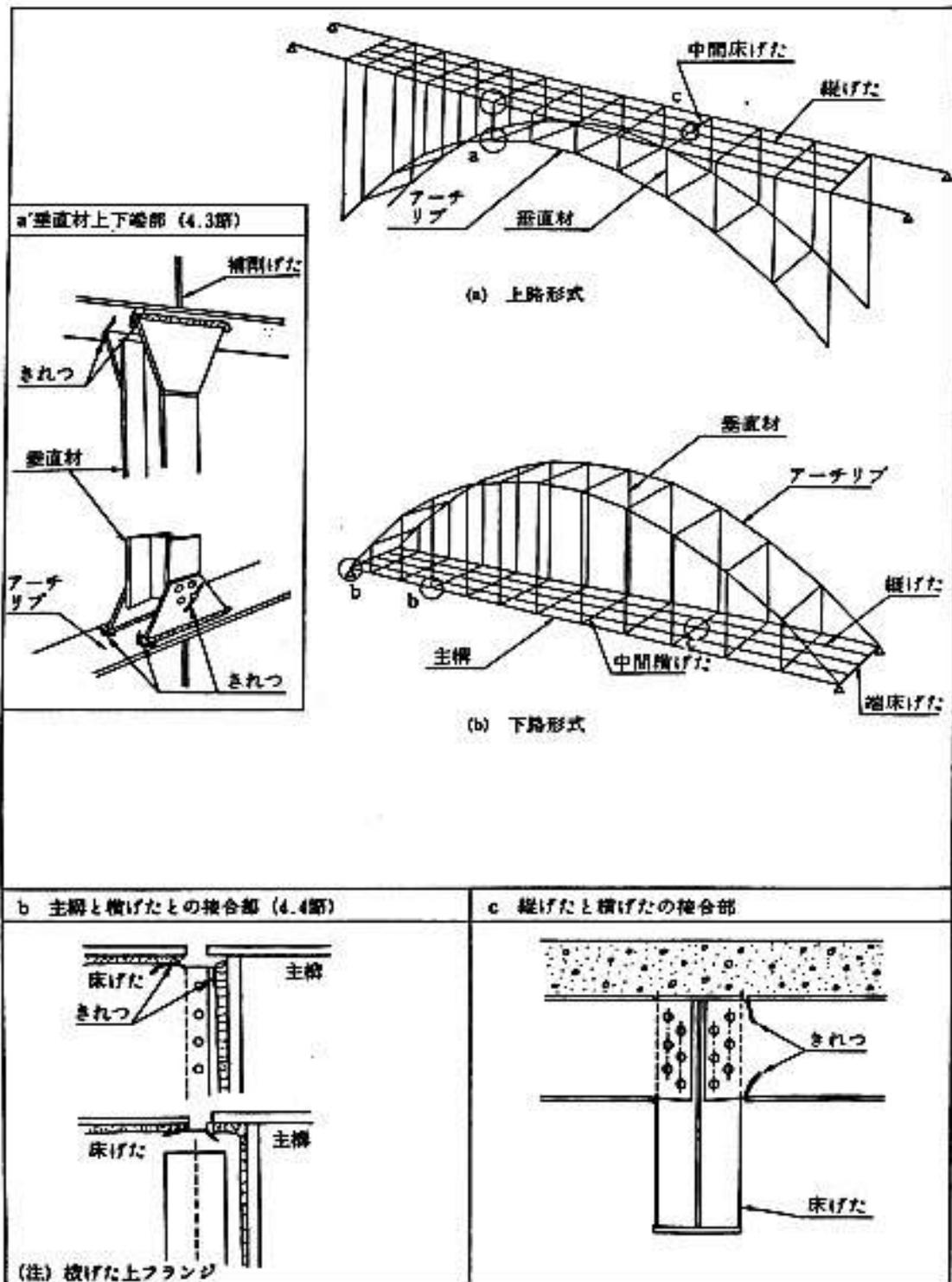


図 1.14 アーチ，トラス橋における主な損傷部位

出典：鋼橋の疲労

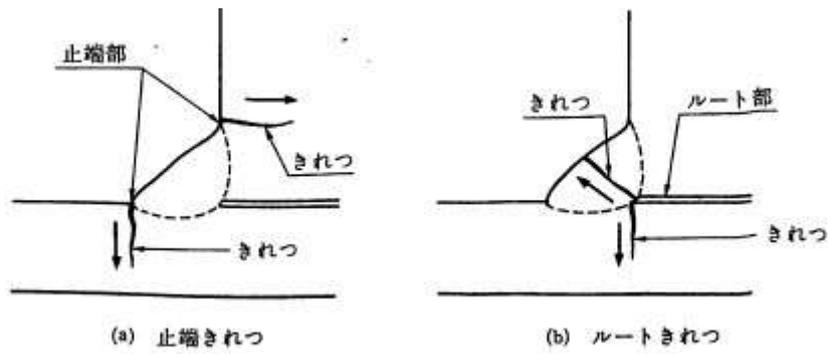


図 1.15 すみ肉溶接部から疲労亀裂

出典：鋼橋の疲労

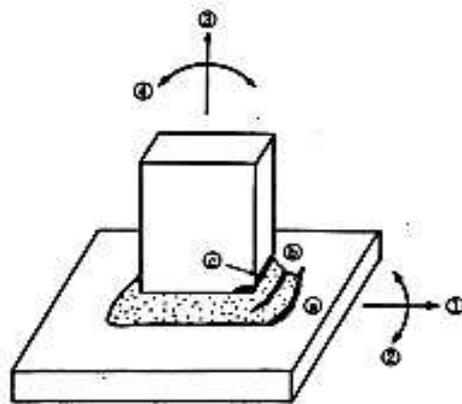


図 1.16 すみ肉溶接部における外力の種類と疲労亀裂発生様式

出典：鋼橋の疲労

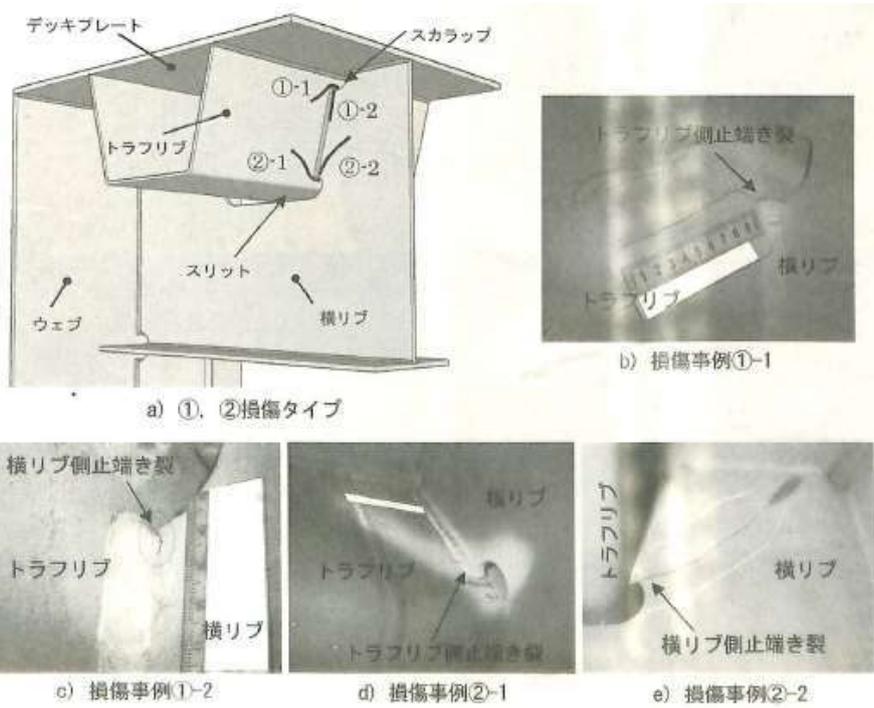
1.3.2 鋼床版の疲労損傷部位

鋼床版の特徴は、軽量であり短い架設工期であることだけでなく、その設計自由度の高さが注目されており、近年、死荷重の比率が高い長大橋や跨線橋、跨道橋や、桁高に制約がある橋梁の他、軟弱地盤の都市地域などにおいて死荷重を軽減させる目的として広く利用されている。

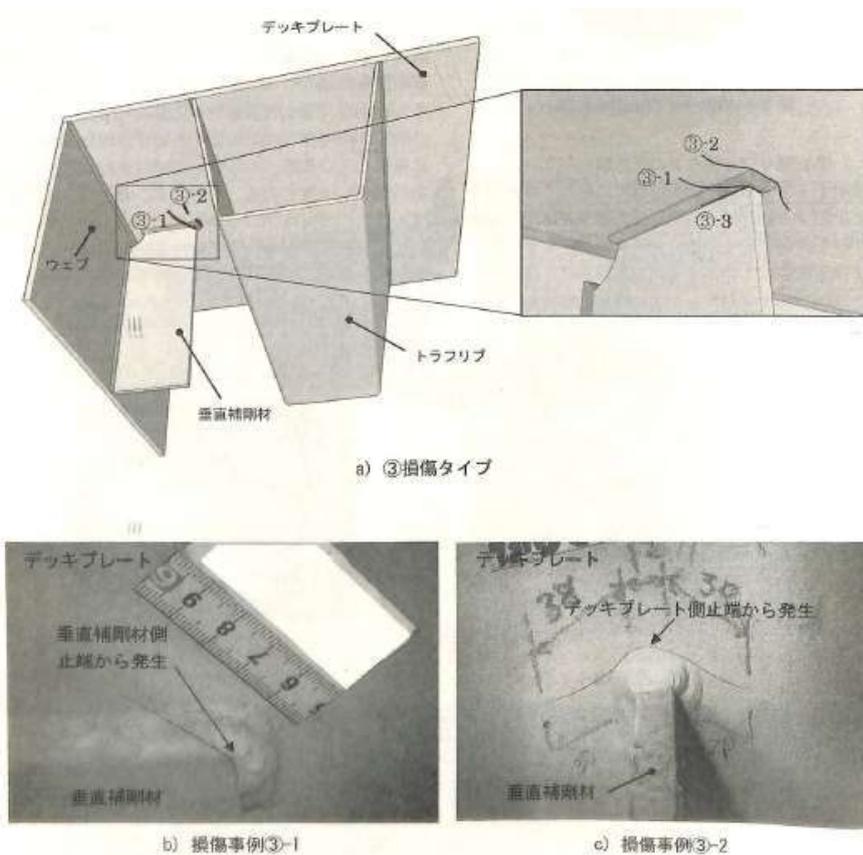
1.3.1 項では鋼橋上部工の疲労について部材の溶接継手を中心に記したが、鋼橋における疲労損傷では、この鋼床版の溶接部周辺においてもその問題が顕著になっている。特に都市部の高速道路や重交通路線など大型車交通量が多いほど、疲労亀裂が発生している事例が多く、その発生箇所としてデッキプレートとUリブなどの溶接部周辺に多い。鋼床版の溶接部周辺に発生する疲労損傷について表 1.3 に示し、その詳細を図 1.17 に示す。横リブやデッキプレート、垂直補剛材の溶接止端部から発生し母材方向に進展するもの、溶接ビード、デッキプレートを貫通するものなど数種類ある。この中でも、デッキプレートを貫通する方向に進展する亀裂については、亀裂がデッキプレート上にまで進展すると路面を陥没させる恐れがあり、利用者にも被害を及ぼす可能性があるため注意しなければならない損傷である。過去に、デッキプレート貫通亀裂の亀裂長が 500mm を超え進展していた事例も多数確認されている。また、鋼床版は主桁の一部として応力を伝達する部材であるため、鋼床版における疲労亀裂の発生は構造系に与える影響も大きいと言える。

表 1.3 Uリブ鋼床版における亀裂発生部位

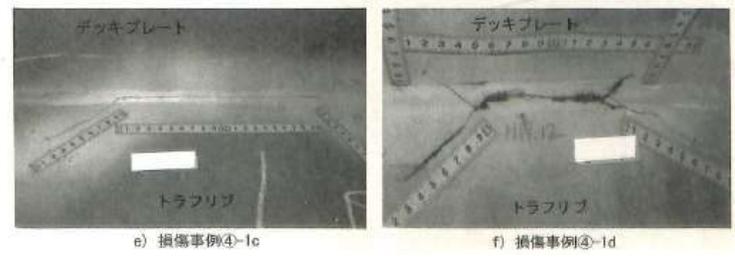
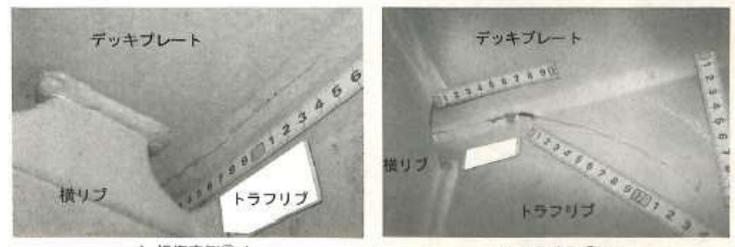
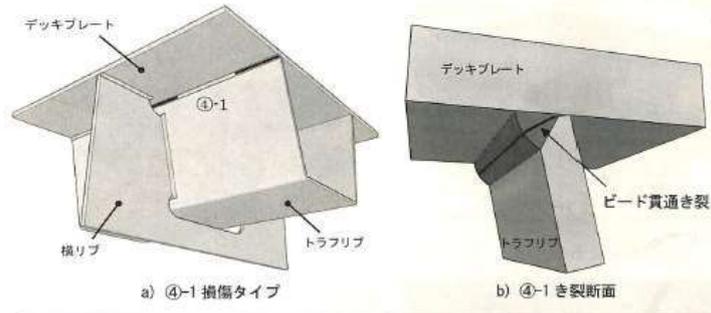
	亀裂発生部位
①	縦リブと横リブ（ダイヤフラム）の溶接部（スカラップ部）
②	縦リブと横リブ（ダイヤフラム）の溶接部（スリット部）
③	デッキプレートと垂直補剛材の溶接部
④	デッキプレートと縦リブの溶接部
⑤	縦リブ現場継手部スカラップ部の溶接部
⑥	デッキプレートと横リブ（ダイヤフラム）の溶接部
⑦	縦リブと縦リブの突合せ溶接部
⑧	縦リブと端ダイヤフラムの溶接部
⑨	横リブ（ダイヤフラム）と主桁ウェブの溶接部



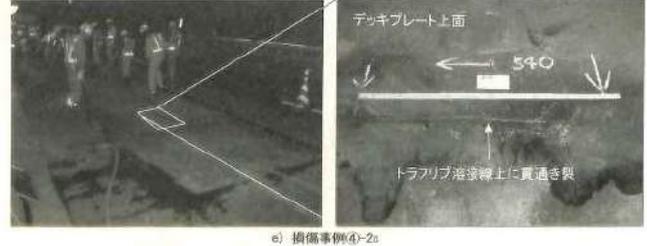
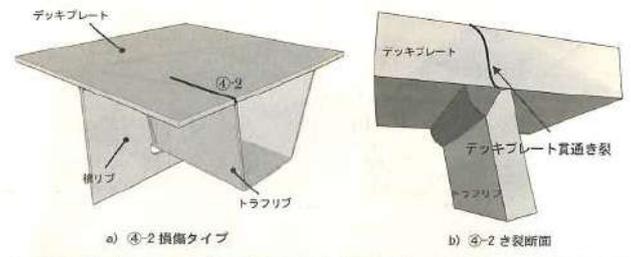
(a) Uリブと横リブ交差部の亀裂損傷



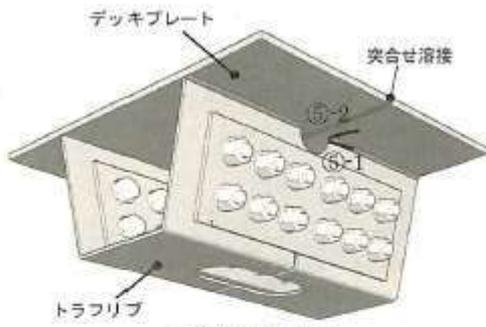
(b) デッキプレートと垂直補剛材の溶接部の亀裂損傷



(c) デッキプレートとUリブの溶接部の亀裂損傷（ビード貫通亀裂）



(d) デッキプレートとUリブの溶接部の亀裂損傷（デッキプレート貫通亀裂）



a) ⑤損傷タイプ

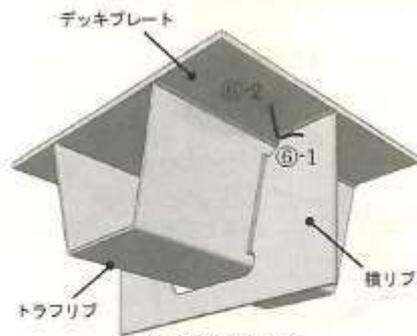


b) 損傷事例⑤-1

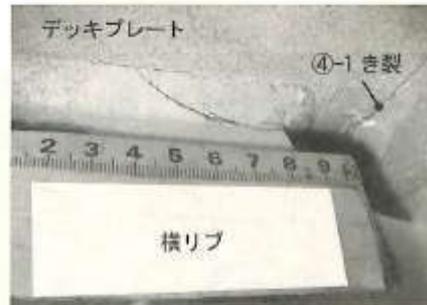


c) 損傷事例⑤-1(デッキ進展)

(e) Uリブ現場継手部の
スカラップの亀裂損傷



a) ⑥損傷タイプ

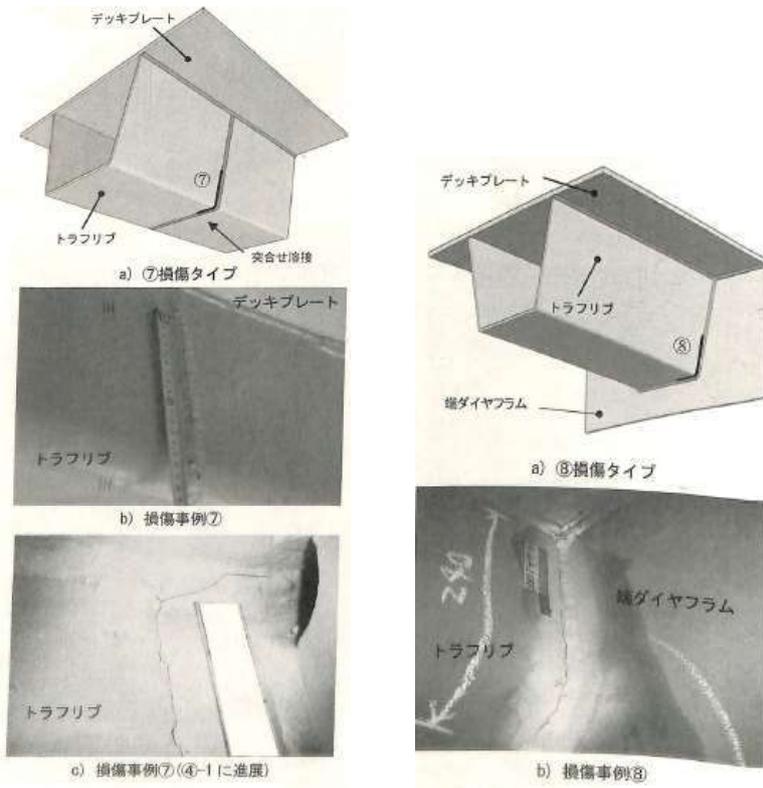


b) 損傷事例⑥-1 (デッキ進展)

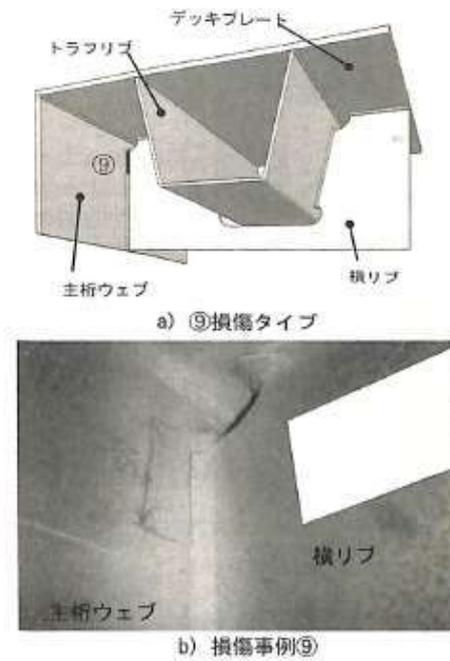


c) 損傷事例⑥-1 (横リブ進展)

(f) デッキプレートと
横リブの亀裂損傷



(g) Uリブの突合せ溶接部の亀裂 (h) Uリブと端ダイヤフラム溶接部の亀裂



(i) 横リブと主桁ウェブ溶接部の亀裂

図 1.17 Uリブ溶接部周辺に発生する疲労亀裂

出典：鋼床版の疲労

1.4 疲労に対する調査・点検手法

疲労に対して現在行われている点検手法には以下のようなものがある。

- ① 近接目視点検
- ② 磁粉探傷試験 (magnetic particle testing, MT)
- ③ 浸透探傷試験 (penetrant testing, PT)
- ④ 渦流探傷試験 (eddy current testing, ET)
- ⑤ 超音波探傷試験 (ultrasonic testing, UT)
- ⑥ 放射線透過試験 (radiographic testing, RT)
- ⑦ 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法

①の手法は、必要に応じて足場・脚立を設置したり、高所作業車を用いるなどして対象部に近づいて行う手法である。塗装された橋梁においては、塗膜の割れやそこから生じている錆汁が疲労亀裂の存在を示す重要なシグナルとなるため、これを見逃してはならない。しかし、塗膜に割れがあっても、塗膜のみの割れである場合と塗膜下に疲労亀裂が存在する場合があるため、必要に応じて塗膜を除去して疲労亀裂の有無を確認しなければならない。

②の手法は、亀裂部分に磁粉を吹き付け電磁石や永久磁石により磁界を発生させ、亀裂部分に滞留した磁粉に紫外線を照射して損傷部として検出する手法であり、表面に現れた損傷、または表面直下の損傷を検出できる。表面亀裂の形状および寸法の測定精度に優れ、微細な亀裂の長さの測定にも有効である。一方、内部欠陥は検出できない、亀裂の検出には塗膜を除去する必要がある、表面の凹凸が著しい場合には判定を誤りやすいといった短所もある (図 1.18)。

③の手法は、亀裂発生部分に塗料を吹き付け、亀裂内に浸透させた後に定着液で塗料を固定し、損傷部を浮き上がらせる手法で、表面に現れた亀裂のみ適用できる。他の探傷試験と比べて電源の供給を必要とせず、用意する器具が少なく簡便である。しかし、磁粉探傷試験と同様な短所もあるうえ、検知能力は磁粉探傷試験より劣るとされている (図 1.19)。

④の手法は、交流を流したコイルに発生する渦電流の変化を電氣的信号として検知し、信号の振幅および位相から損傷部の程度を把握する手法であり、表面近くの亀裂を検出できる。塗膜上からの検査が可能で高速な探傷が可能である。しかし、亀裂を直接観察できるわけではないため、亀裂の大きさなどの定量的な情報を得るのには工夫を要する。また、内部欠陥は検出できないうえ、溶接継手部のように形状が変化する部位への適用は限られている (図 1.20)。

⑤の手法は、鋼材表面に探触子を当て超音波を発信させ、亀裂からのエコーを

感知することにより、亀裂を検出する方法で、内部亀裂の検査や亀裂の深さを測定することも可能である。亀裂の位置、大きさによっては検出精度にばらつきが大きい（図 1.21）。

⑥の手法は、対象部の下面に X 線フィルムを置き、上から放射線を照射すると、亀裂がある箇所を透過してきた放射線は減衰が小さいため、亀裂がないときよりもフィルム上に濃く映しこまれることにより、亀裂の有無や大きさを検知できる。ただし、亀裂の板厚方向の位置に関する情報は得られない（図 1.22）。

⑦の手法は、対象箇所に対して遠隔から赤外線照射し熱弾性温度変動を計測する事により、応力集中部や亀裂を検出・計測する方法であり、ひずみ計測や超音波探傷試験などの点計測よりも効率的に検出・計測することができる。しかし、高額な機器類を揃えなければならないことや、取り扱いが難しいなど使用者を選ぶ（図 1.23）。



図 1.18 磁粉探傷試験

出典：鋼橋の維持管理

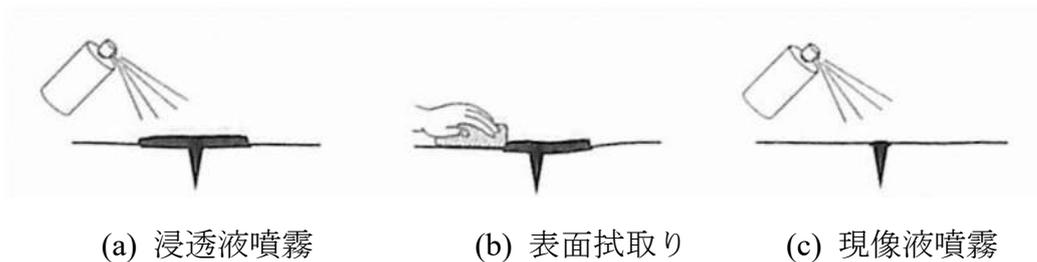


図 1.19 浸透探傷試験

出典：鋼橋の維持管理

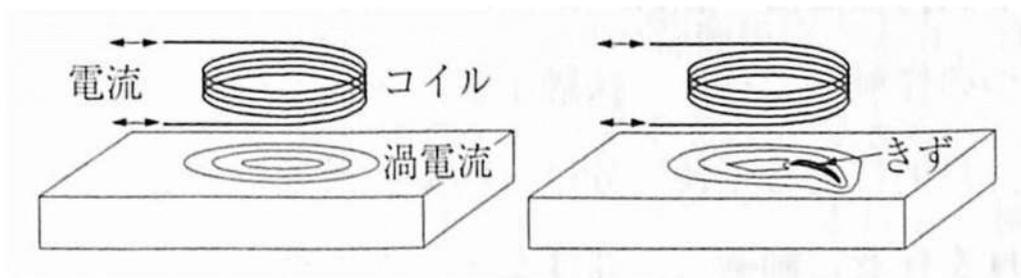
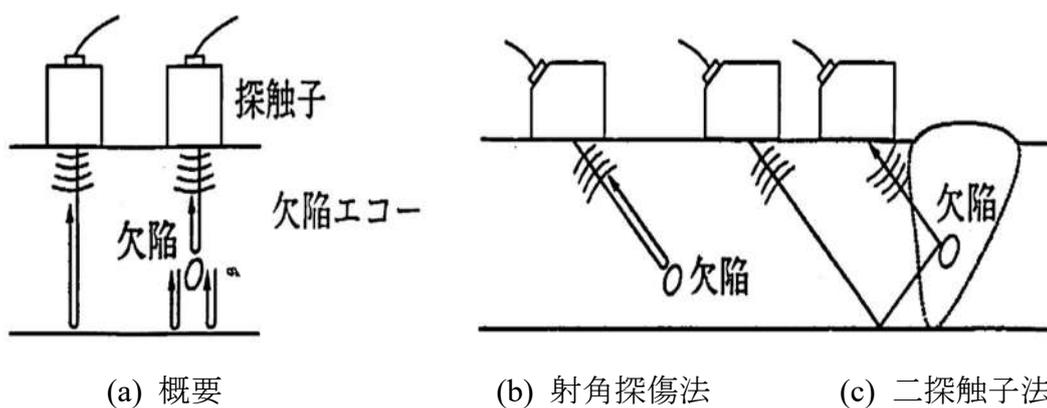


図 1.20 渦流探傷試験

出典：鋼橋の維持管理



(a) 概要

(b) 射角探傷法

(c) 二探触子法

図 1.21 超音波探傷試験

出典：鋼橋の維持管理

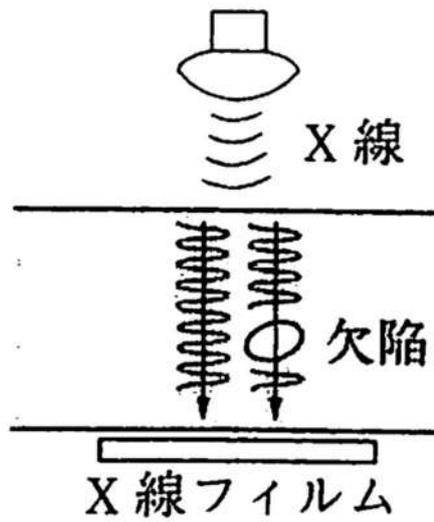


図 1.22 放射線透過試験

出典：鋼橋の維持管理



図 1.23 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法

出典：自己相関ロックインサーモグラフィ法による
経年構造物の疲労き裂の遠隔検出に関する研究

1.5 研究の目的

鋼構造物の溶接部周辺に発生する疲労亀裂は重要な劣化問題であると言える。亀裂を見つけた場合には正しい判定を行なった上で対策を行うことが必要となる。しかし、溶接部は点検しづらい箇所であり、更に塗装などによる防食処理が施されていることが多いため、防食処理の下の亀裂を見つけることは難しい。前述したように、疲労損傷の検査には目視検査が最も多く用いられ、目視結果により亀裂が疑われた際には、必要に応じて浸透探傷試験や磁粉探傷試験などを組み合わせて点検が行われている。しかし、目視検査においては検査者の経験や技量に左右される他、浸透探傷試験や磁粉探傷試験においても、表面もしくは表面近傍に亀裂が生じていない場合は検出することが出来ず、さらには内部の亀裂や表面亀裂の場合でもほとんど開口していなかった場合は亀裂がないものと判断されることがある。

疲労損傷の検査は熟練者による目視検査と、対象ディテールに適した非破壊試験の適用が必要となるが、管理対象施設の増大や、橋梁を含む道路施設に対しての5年に1度の近接目視による点検の実施などにより、点検者の違いに対する定量的な判断や、検査方法の確実性、結果への信頼性は今後より一層求められる。そこで、目視検査や非破壊検査の補助的手段としてひずみゲージを用い溶接部周辺の橋軸方向の応力値と橋軸直角方向の応力値の比を確認することで、亀裂の有無を客観的にかつ、定量的に判断するという手法を検討する。

本研究では、はじめに、面外ガセット溶接継手を対象とした試験体と、鋼床版 U リブ溶接部を対象とした試験体において振動疲労試験を行ない、実際に疲労亀裂を発生させて、その亀裂周辺の応力値を測定し、亀裂の発生により亀裂周辺の X 軸方向と Y 軸方向の応力値、およびそれらの比がどのように変化するかを明らかにした。FEM 解析では簡易な円孔を有する平板モデルを作成し、円孔に亀裂が入った場合の基本的な応力の変化を解析で確認し、試験体と同様の面外ガセット溶接継手を対象としたモデル、鋼床版 U リブ溶接部を対象としたモデルによる亀裂周辺の FEM 解析を行ない、試験体との比較、および軸方向応力比の変動を明らかにした。また、従来の接着型ひずみゲージと摩擦型ひずみゲージの比較を静的载荷試験にて行ない、摩擦型ひずみゲージの有効性を確認し、本手法への適用性を確認した。さらに、先行研究として摩擦型ゲージを使用して鋼床版 U リブを対象とした輪荷重走行試験が行われており、その実験データを利用して X 軸方向と Y 軸方向の軸方向応力比の検証を行ない、本手法の適用性の確認を行った。

1.6 研究の構成

本研究の流れを図 1.24 に示す。

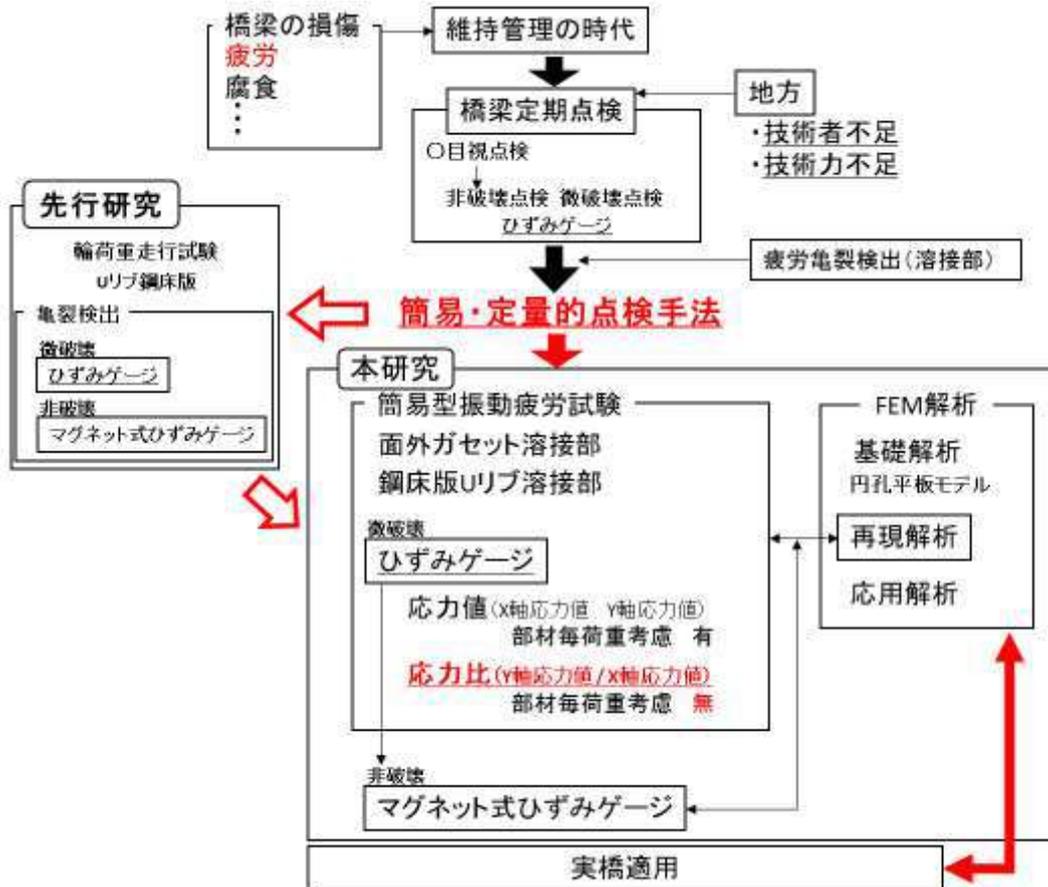


図 1.24 研究の流れ

第 2 章

振動疲労試験

2.1 振動疲労試験概要

2.1.1 振動疲労試験機概要

試験体による振動疲労試験は，名古屋大学で開発された振動疲労試験機を使用した．振動疲労試験機の概要と試験機の写真をそれぞれ，図 2.1～2.4 に示す．この試験機は架台（フレーム），動力部（モーター），制御装置によって構成されている．その詳細を表 2.1 に示す．

この試験機は，試験体を片持ち梁に固定し自由端側に設置した偏心モーターが回転することにより試験体を振動させ，試験体に曲げ応力を発生させるものであり，载荷装置の試験体への取り付け位置や，偏心モーターの回転速度を変化させることによって，試験体に発生する応力の大きさや，振動周波数を調整することができる．今回は，事前に試運転を行って得られたひずみから求めた応力が目標の公称応力となるように振動数を調整することで，荷重の大きさを調整した．また，モーターの回転振動のみでは，応力比が両振り（ $R = -1$ ）の疲労試験となるが，本試験では，試験体の先端にコイルばねを設置し，このコイルばねで試験体を押し下げた状態で疲労試験を行うことにより，試験体に与える応力比を片振り（ $R > 0$ ）として疲労試験を行った．



図 2.1 振動疲労試験機

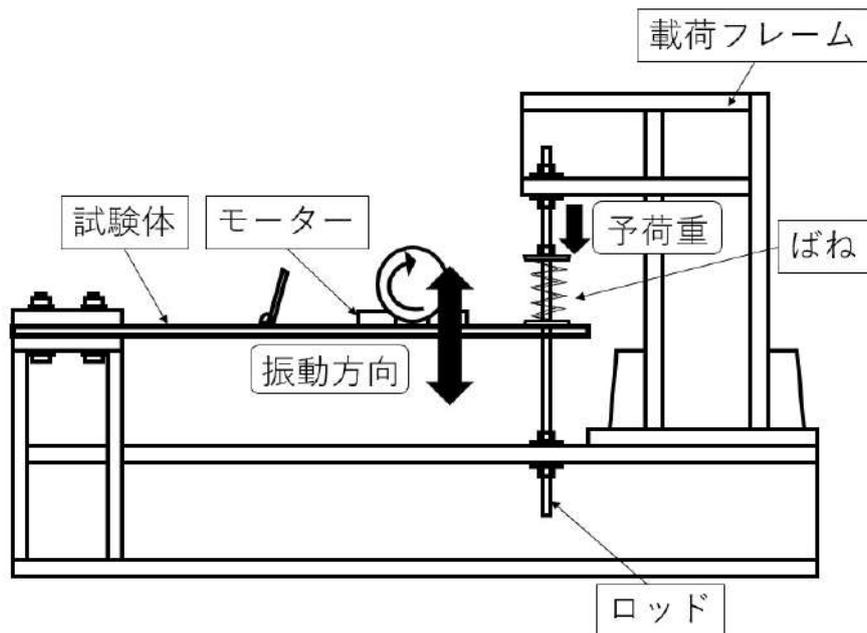


図 2.2 振動疲労試験機概要

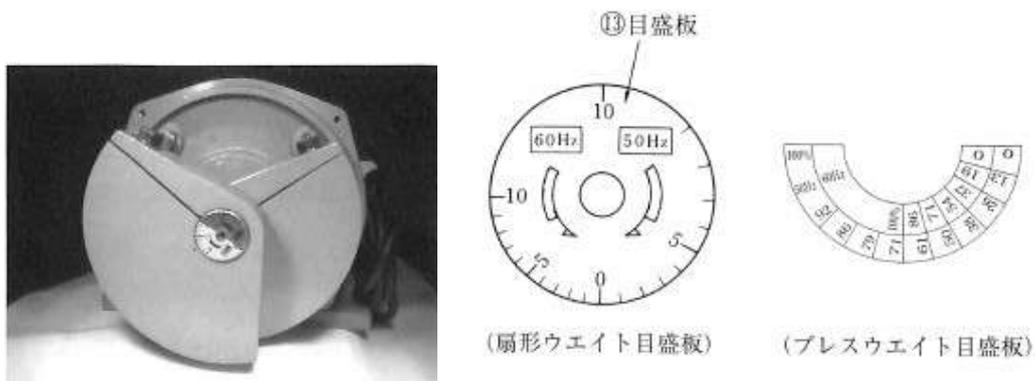


図 2.3 ユーラスパイブレータ及びその重り
 (慣性力 $F = mr\omega^2$ m : 重りの質量 r :
 モーターの軸心から重りの重心までの距離 ω : 回転角速度))



図 2.4 制御装置

表 2.1 振動疲労試験機詳細

重量 (架台 モーター)	400kg 25kg
<動力源>	
動力源	ユーラスバイブレータ KEE3-6 (村上精機社製)
最大振動力	3kN
出力	0.2kW
<制御部>	
電源	100V 電源
駆動方式	インバータ制御
運転速度	3~20Hz
回数計測	近接センサーによるモーター回転数から作用回数表示
断線検知システム	3 系統 (電流遮断にて試験装置停止)

2.1.2 ひずみゲージ概要

ひずみゲージは株式会社東京測器研究所製の 3 軸ゲージ (FRA-1-11), 1 軸ゲージ (FLA-1-11) を使用した。

金属 (抵抗体) は外力を加えて伸縮させると, ある範囲でその抵抗値も増減する。したがって, ひずみが生じる測定対象物に電気絶縁物を介して接着しておけば, 測定対象物の伸縮に比例して金属 (抵抗体) が伸縮し抵抗値が変化する。ひずみゲージとは, この抵抗変化を利用しひずみを測定するセンサーである。その原理, 構造については図 2.5 で示す。また, 3 軸ゲージはロゼットゲージによるロゼット解析の計算法を用いているため, その概要も図 2.6 と式 (2.1) ~ (2.3) で示す。

ひずみゲージは構造が簡単で質量, 容積が小さく測定対象物の応力状態を乱さない他, 周波数応答性が良く, 応力の急激な変化に追従でき, 多点の同時測定, 遠隔測定ができるなど多くの利点があるため, 機械, 船舶, 航空機, 車両, 土木, 建築をはじめとし, センサーの検出素子から医療の分野まで幅広い範囲で使用されている。

本研究では, ひずみゲージと TMR を接続し測定を行った。その際, 式 (2.4) のように TMR にひずみの校正係数を設定し測定を行っている。

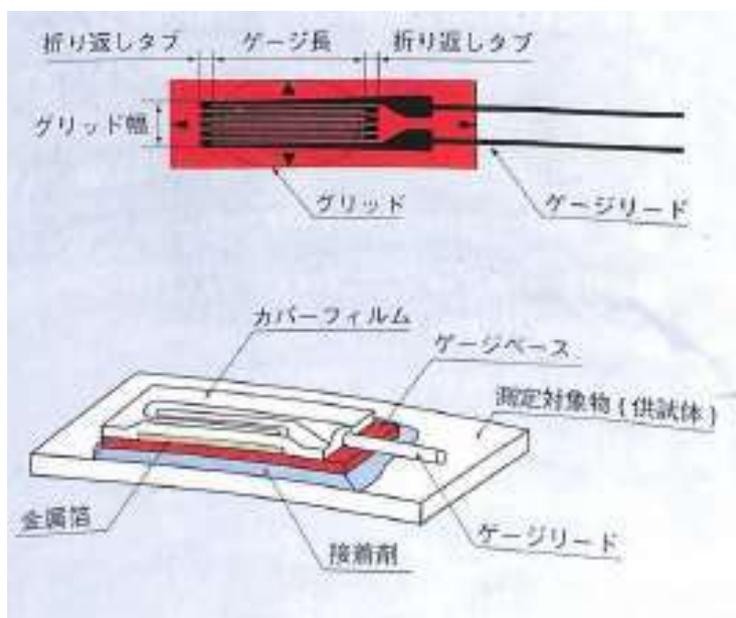


図 2.5 ひずみゲージの構造

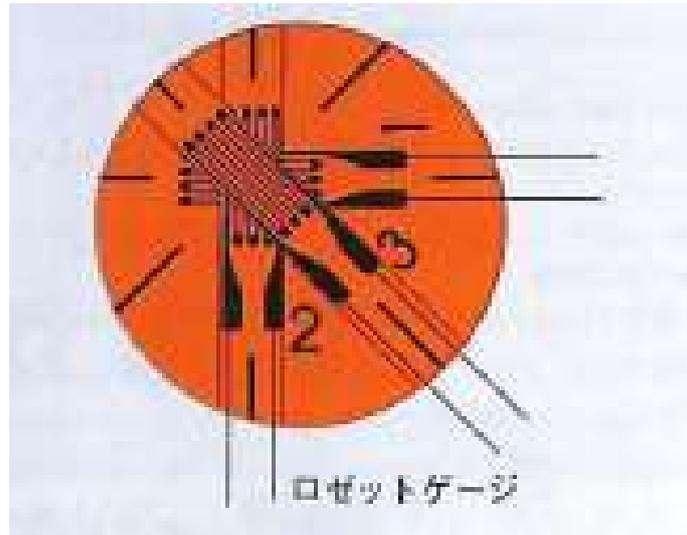


図 2.6 3 軸ゲージ (ロゼットゲージ)

最大主ひずみ

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}} \right] \quad (2.1)$$

最小主ひずみ

$$\varepsilon_{min} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}} \right] \quad (2.2)$$

第 1 軸のひずみゲージから主ひずみ方向までの角度

$$\Phi_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2\varepsilon_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \right\} \quad (2.3)$$

ε_1 : 第 1 軸のひずみ ε_2 : 第 2 軸のひずみ ε_3 : 第 3 軸のひずみ

ここで、 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ の場合、最大主ひずみの方向は第 1 軸のゲージから時計方向に Φ_p 回転した方向で、最小主ひずみの方向は $\Phi_p + 90^\circ$ となり、 $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ の場合、最大主ひずみの方向は第 1 軸のゲージから時計方向に $\Phi_p + 90^\circ$ 回転した方向で、最小主ひずみの方向は Φ_p となる。

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R/R}{K} \quad (2.4)$$

ε : ひずみ R : ゲージ抵抗 ΔR : ひずみを受けたときの抵抗変化量 K : ゲージ率

2.2 面外ガセット溶接継手を対象とした振動疲労試験

2.2.1 試験体概要

本研究で使用した試験体の寸法を図 2.7 に示す。試験体の材質は SS400 とし、板厚 12mm、幅 300mm、長さ 700mm の鋼板に、高さ 100mm、幅 340mm、板厚 12mm のガセットプレートが直角に脚長 10mm ですみ肉溶接されたものである。試験体数は 11 体である。直径 24mm の孔は振動疲労試験機への設置のために、直径 14mm の孔は試験体に偏心モーターを設置するために設けた孔である。

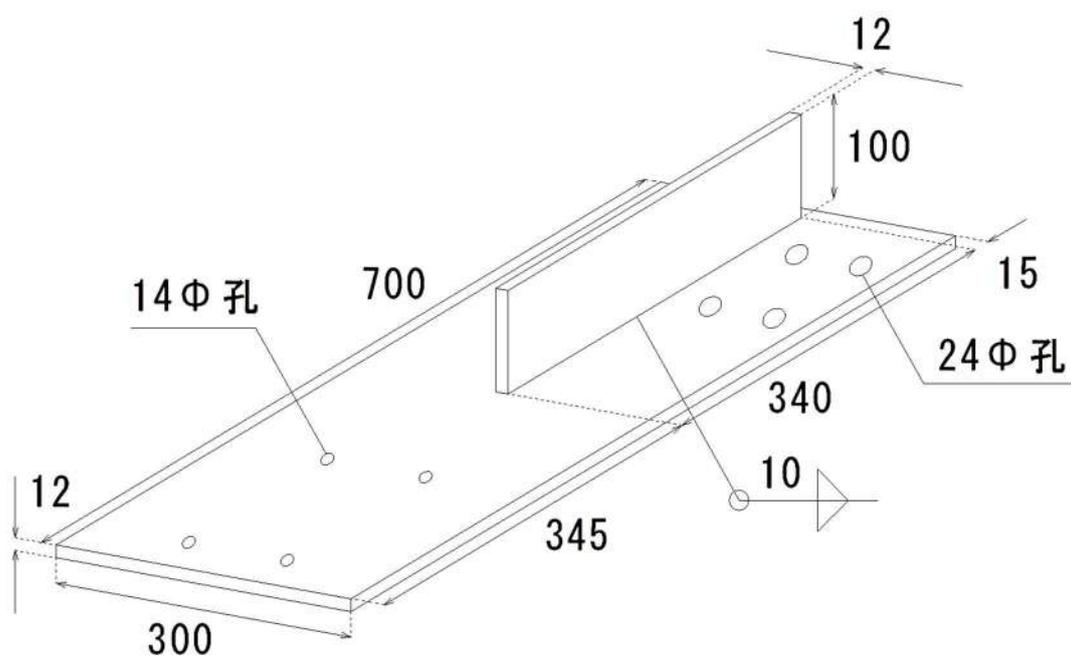


図 2.7 試験体寸法

2.2.2 ひずみゲージ設置位置

ひずみゲージの設置位置を図 2.8 に示す。G3 は応力集中の影響を含んだ応力を測定するためにガセットプレート溶接止端から長手方向に 5mm 離れた位置に配置した。G1, G2, G4, G5 は G3 から長手直角方向にそれぞれ 25mm 離して等間隔に配置し、G6 は G3 から長手方向に 63mm 離れた位置に、G7 はさらに G6 から長手直角方向に 75mm 離れた位置に、G8 は G1~G5 に並列の位置に 25mm 離して配置した。G6, G7, G8 から得られたひずみの計測結果と各ゲージ位置の溶接止端部から長手方向への水平距離を用いて、比例の関係より、溶接止端部の公称応力範囲を求めた。G1~G5 は主応力の測定のためにゲージ長 1mm の三軸ゲージ(FRA-1-11, ベース径 $\phi 4.5\text{mm}$), G6~G8 は応力範囲算出のためにゲージ長 1mm の一軸ゲージ(FLA-1-11, ベース長 5.0mm, ベース幅 2.5mm)を使用した。

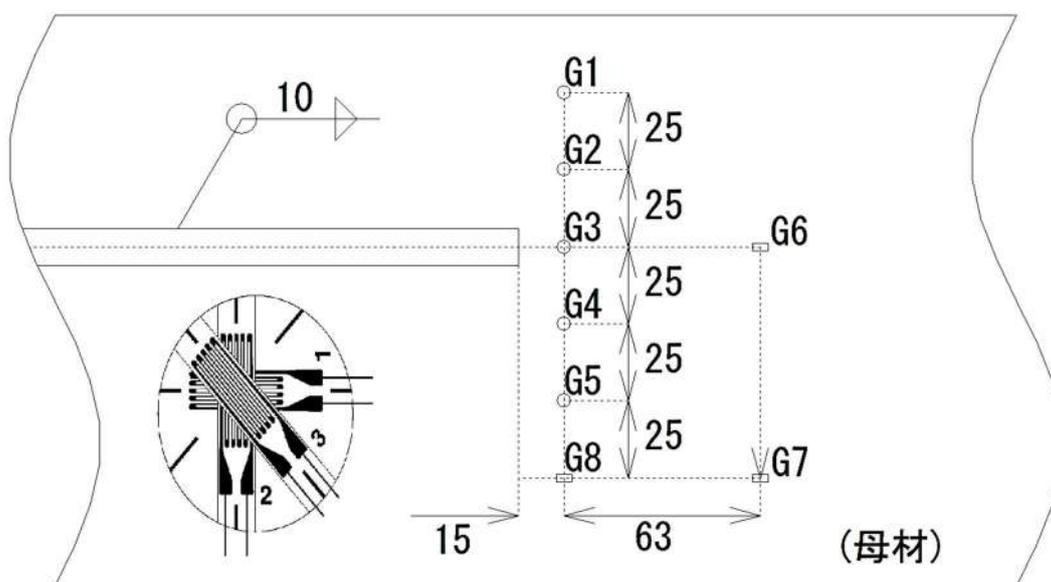


図 2.8 ゲージ位置

2.2.3 試験条件

振動疲労試験により繰り返し载荷を行い，図 2.9，2.10 に示すようにガセット中心から $a=21\text{mm}$ ，両側に $2a=42\text{mm}$ となる位置に亀裂検出用のエナメル線を貼り付け，溶接止端から発生した疲労亀裂の片方どちらかがこの位置まで到達すると，エナメル線が破断し振動疲労試験機が停止するようにし，その疲労亀裂の進展する過程のひずみの値を計測した．各試験体の载荷時の公称応力範囲，規定の亀裂長までの繰り返し回数は表 2.2 に示す通りである．なお，本研究では表中の着色部である試験体 2，9，11 の結果を用い，検討している．

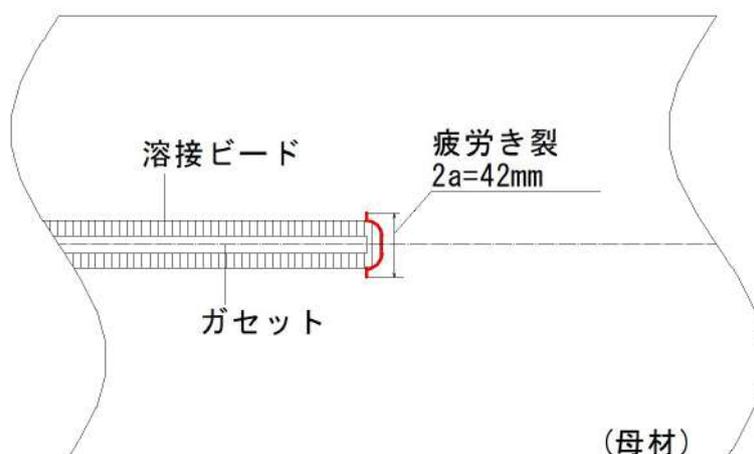


図 2.9 疲労損傷導入

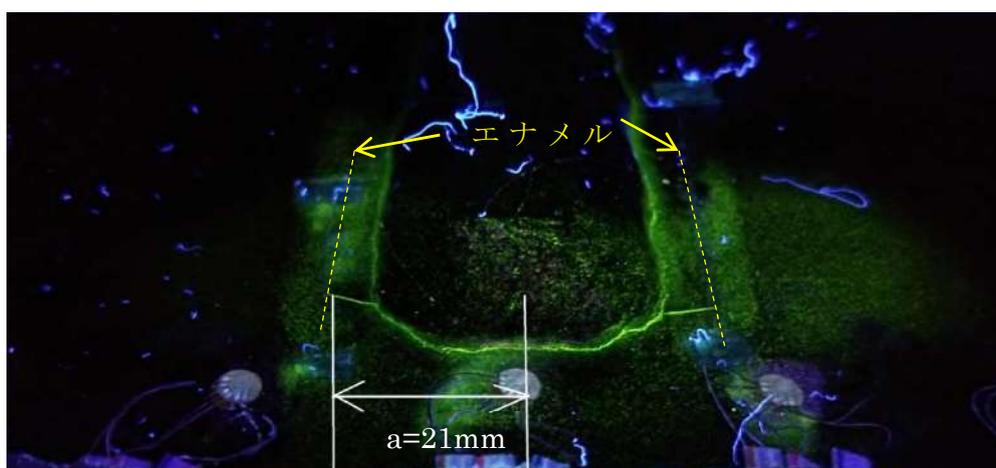


図 2.10 疲労損傷導入

表 2.2 設定公称応力範囲

試験体	公称応力範囲(MPa)	繰り返し回数(Cycle)
1	70.7	1,350,700
2	79.1	890,000
3	79.4	1,928,800
4	80.0	640,000
5	80.3	1,100,100
6	90.9	552,800
7	100.3	370,400
8	100.4	445,200
9	101.5	240,300
10	119.4	467,200
11	119.8	154,800

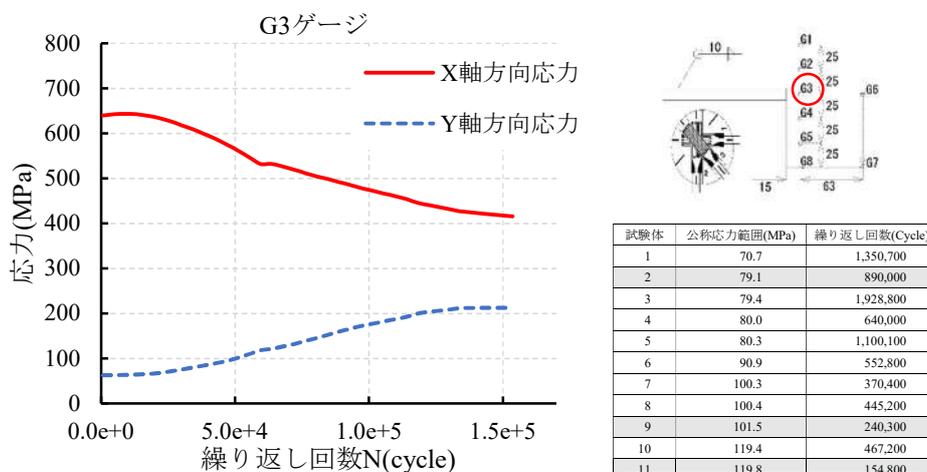
2.2.4 試験結果

振動疲労試験における試験体 2 (79.1MPa), 試験体 9 (105.1MPa), 試験体 11 (119.8MPa) を公称応力が大きい順に並べ, その G3 ゲージの長手方向 (X 軸) と長手直角方向 (Y 軸) の発生応力のグラフを図 2.11 に示す. 各試験体において, 亀裂が進行するにつれ母材表面の X 軸方向の応力が開放され, それに伴い Y 軸方向に応力が移行していくのが確認できる. 試験体 No.11 (119.8MPa) と試験体 No.9 (105.1MPa) は亀裂長 $2a=24\text{mm}$ に達した段階でも, X 軸方向応力と Y 軸方向応力が逆転するまでには至っていないが, 試験体 No.2 (79.1MPa) では, 亀裂長が $2a=24\text{mm}$ に達する前に各軸方向の応力値が逆転している. これは表 2.2 に示したように振動疲労試験における載荷荷重の大きさが関係していると思われる.

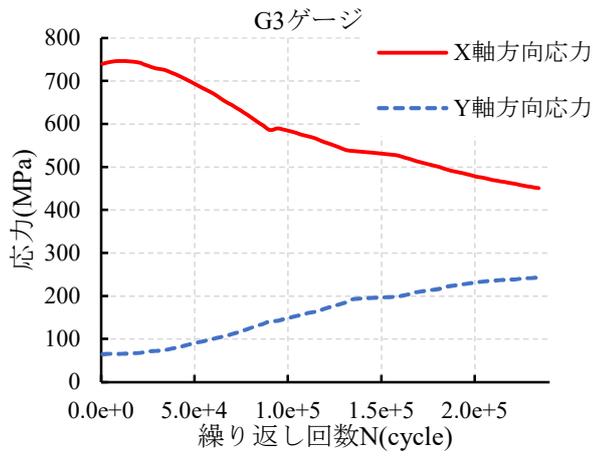
本来, 亀裂が発生していない状態において, 主応力の方向は長手方向 (X 軸) を向いているが, 亀裂が発生した場合, 主応力は亀裂を避けるような向きになるため亀裂発生箇所近傍の主応力方向は長手方向 (X 軸) とは異なる.

これを利用し, X 軸方向応力と Y 軸方向応力の比を取ることで, 亀裂の進展過程を確認しようとしたものを図 2.12 に示す. この図からも各試験体において亀裂の進展に伴い長手方向の応力が開放され, かつ長手直角方向の応力が大きくなっていく傾向がわかる. また, 試験体 No.11 (119.8MPa) と試験体 No.9 (105.1MPa) より, 亀裂がある程度進展した場合でも軸方向応力比 (Y 軸/X 軸) が 0.5 程度であることが明らかになった.

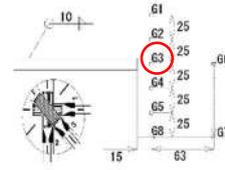
図 2.13 に試験体 11 における主応力角度を示す. これより, 繰り返し回数約 20000 回までは全てのゲージで大きな変化は見られないが, 亀裂発生後は G2, G4 で亀裂進展に伴い主応力方向が X 軸方向から離れていくのが明確である.



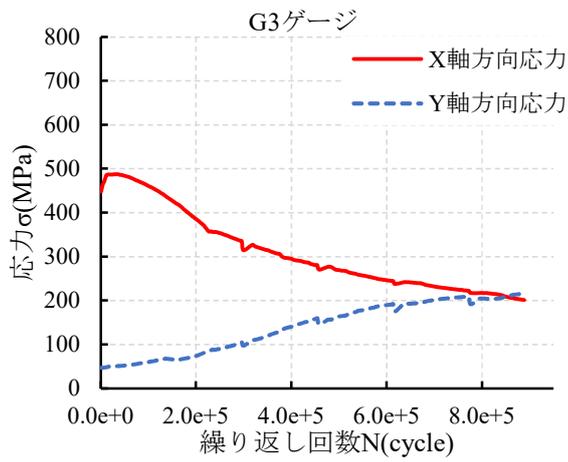
(a) 試験体 11



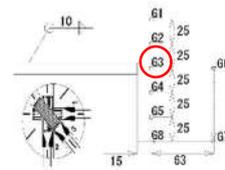
(b) 試験体 9



試験体	公称応力範囲(MPa)	繰返し回数(Cycle)
1	70.7	1,350,700
2	79.1	890,000
3	79.4	1,928,800
4	80.0	640,000
5	80.3	1,100,100
6	90.9	552,800
7	100.3	370,400
8	100.4	445,200
9	101.5	240,300
10	119.4	467,200
11	119.8	154,800

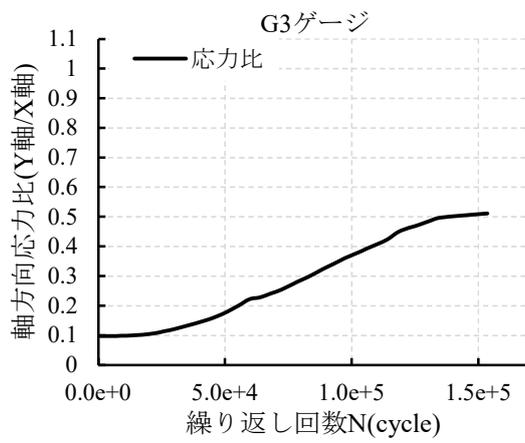


(c) 試験体 2

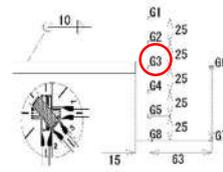


試験体	公称応力範囲(MPa)	繰返し回数(Cycle)
1	70.7	1,350,700
2	79.1	890,000
3	79.4	1,928,800
4	80.0	640,000
5	80.3	1,100,100
6	90.9	552,800
7	100.3	370,400
8	100.4	445,200
9	101.5	240,300
10	119.4	467,200
11	119.8	154,800

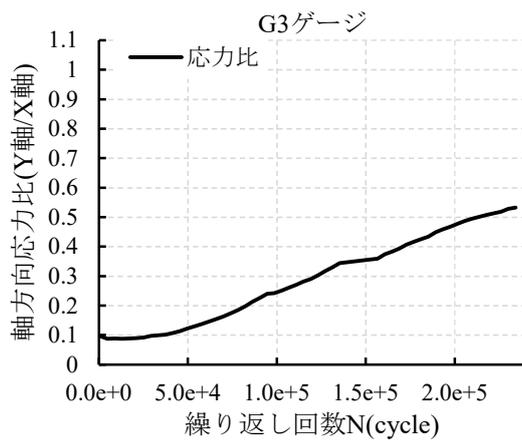
図 2.11 各試験体の軸方向応力値



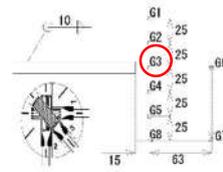
(a) 試験体 11



試験体	公称応力範囲(MPa)	繰り返し回数(Cycle)
1	70.7	1,350,700
2	79.1	890,000
3	79.4	1,928,800
4	80.0	640,000
5	80.3	1,100,100
6	90.9	552,800
7	100.3	370,400
8	100.4	445,200
9	101.5	240,300
10	119.4	467,200
11	119.8	154,800



(b) 試験体 9



試験体	公称応力範囲(MPa)	繰り返し回数(Cycle)
1	70.7	1,350,700
2	79.1	890,000
3	79.4	1,928,800
4	80.0	640,000
5	80.3	1,100,100
6	90.9	552,800
7	100.3	370,400
8	100.4	445,200
9	101.5	240,300
10	119.4	467,200
11	119.8	154,800

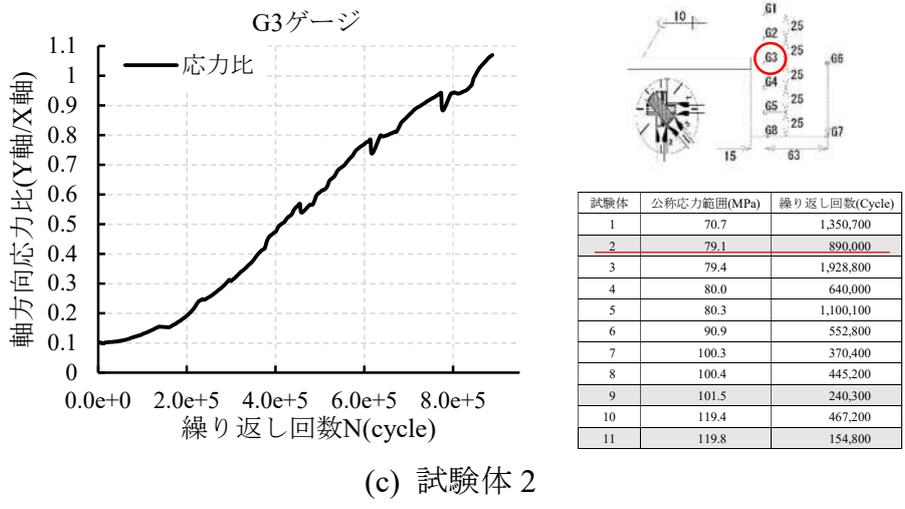


図 2.12 各試験体の軸方向応力比

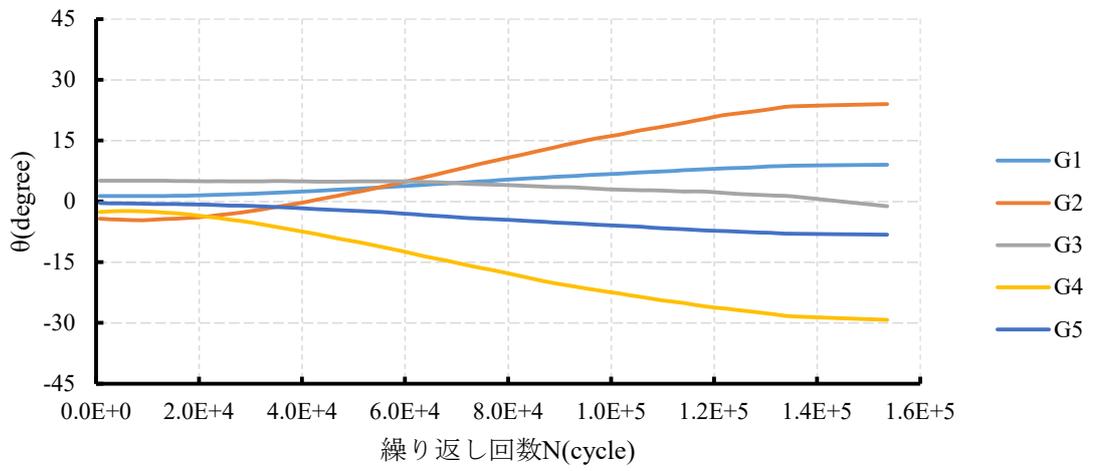


図 2.13 主応力角度 (試験体 11)

2.3 鋼床版 U リブ溶接部を対象とした振動疲労試験

2.3.1 試験体概要

本研究で使用した試験体を図 2.14 に示す。試験体の材質は SM400A とし、鋼床版のデッキプレートを模した板厚 12mm、幅 300mm、長さ 700mm の母材に、U リブの板厚 6mm に相当するリブを角度 78°で溶接したものである。また、通常 U リブ溶接部における溶け込み量は板厚の 75%以上とする基準が設けられているが、本研究では、図 2.15 に示すようにリブ両端から約 75mm を溶け込み量が大きい範囲、リブ中央約 50mm を溶け込み量が少ない範囲とすることで、試験体の幅の中央部に亀裂の起点を生じさせようとした。必要溶け込み量を確保するためリブ両側は開先処理を施し、リブ中央は無開先とし、脚長 5mm 程度の部分溶け込み溶接およびすみ肉溶接とした。なお、両溶接の接続は連続性をもたせるため、漸変区間を設けている。また、直径 24mm の孔は振動疲労試験機への設置のために、直径 14mm の孔は偏心モーターを設置するための孔である。

本研究の No.1 の試験体では実橋を想定し、リブを下向きにした状態で疲労試験を行った。しかし、想定していた亀裂を確認できなかったため、No.2 の試験体以降、山田氏らが行った U リブの板曲げ疲労試験を参考にし、リブが上向きになるように試験体を設置している。道路橋では通行車両による荷重の載荷位置が通行車両によって異なるため、荷重によるデッキプレートの曲げ方向が正負どちらにもなり得ると考えるため、上記の試験条件について問題ないと考え

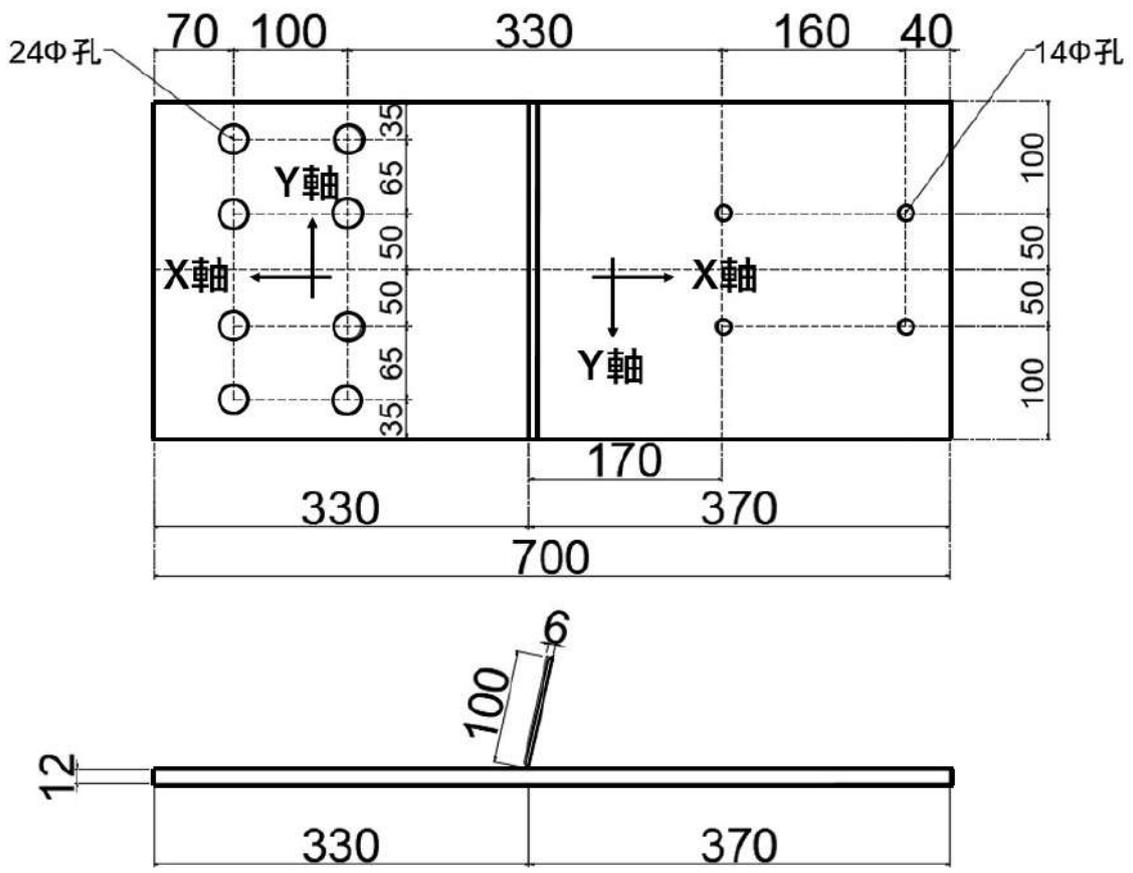


図 2.14 試験体

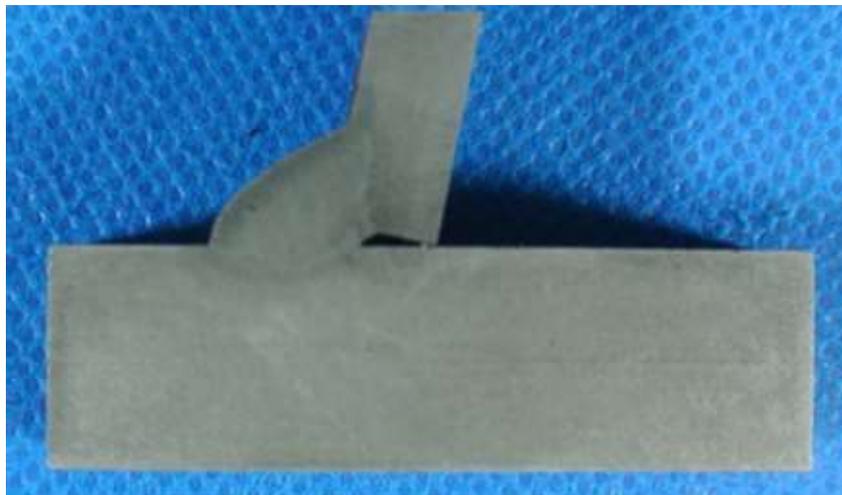
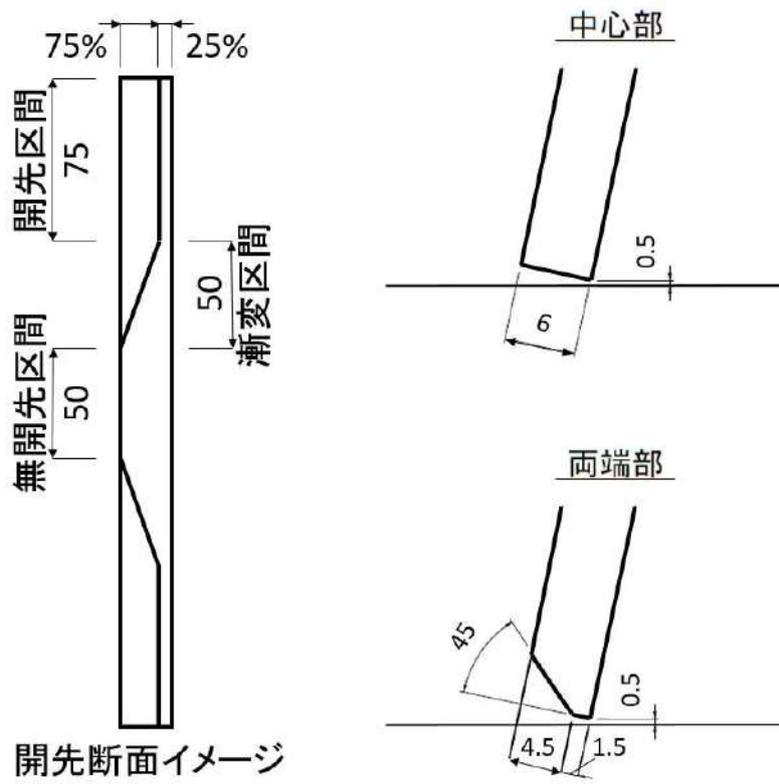


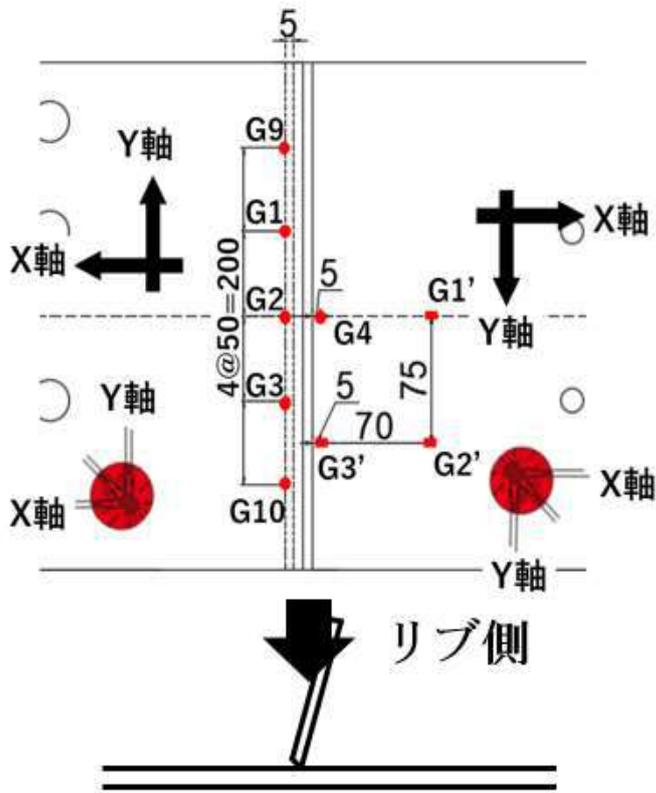
図 2.15 試験体開先断面図

2.3.2 ひずみゲージ設置位置

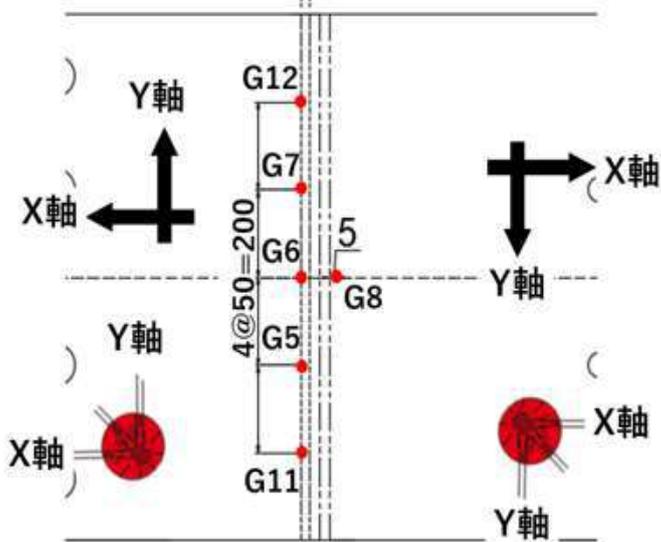
試験体に貼り付けたひずみゲージの状況を図 2.16 示す。ゲージは応力集中の影響を含んだ応力を測定するために溶接止端から長手方向に 5mm, 長手直角方向にそれぞれ 50mm 離れた位置に貼り付けた。さらに, 亀裂の進展方向は板厚を貫通する向きであると考えられるため, ゲージを溶接部周辺に貼り付けた位置に対称となるようにリブのない平面側にも貼り付けた。G1'のゲージは G4 から長手方向に 70mm 離れた位置に, G2'のゲージはさらに G1'から長手直角方向に 75mm 離れた位置に, G3'のゲージは G4 から長手直角方向に 75mm 離れた位置に貼り付けた。この G1', G2', G3'のゲージで計測したひずみの結果を用いて, 比例の関係より公称応力範囲を求めた。

また, 試験体 No.4 以降, G5, 7, 9, 10, 11, 12 ゲージを貼り付けず 3 軸ゲージ 6 枚, 一軸ゲージ 3 枚としている。

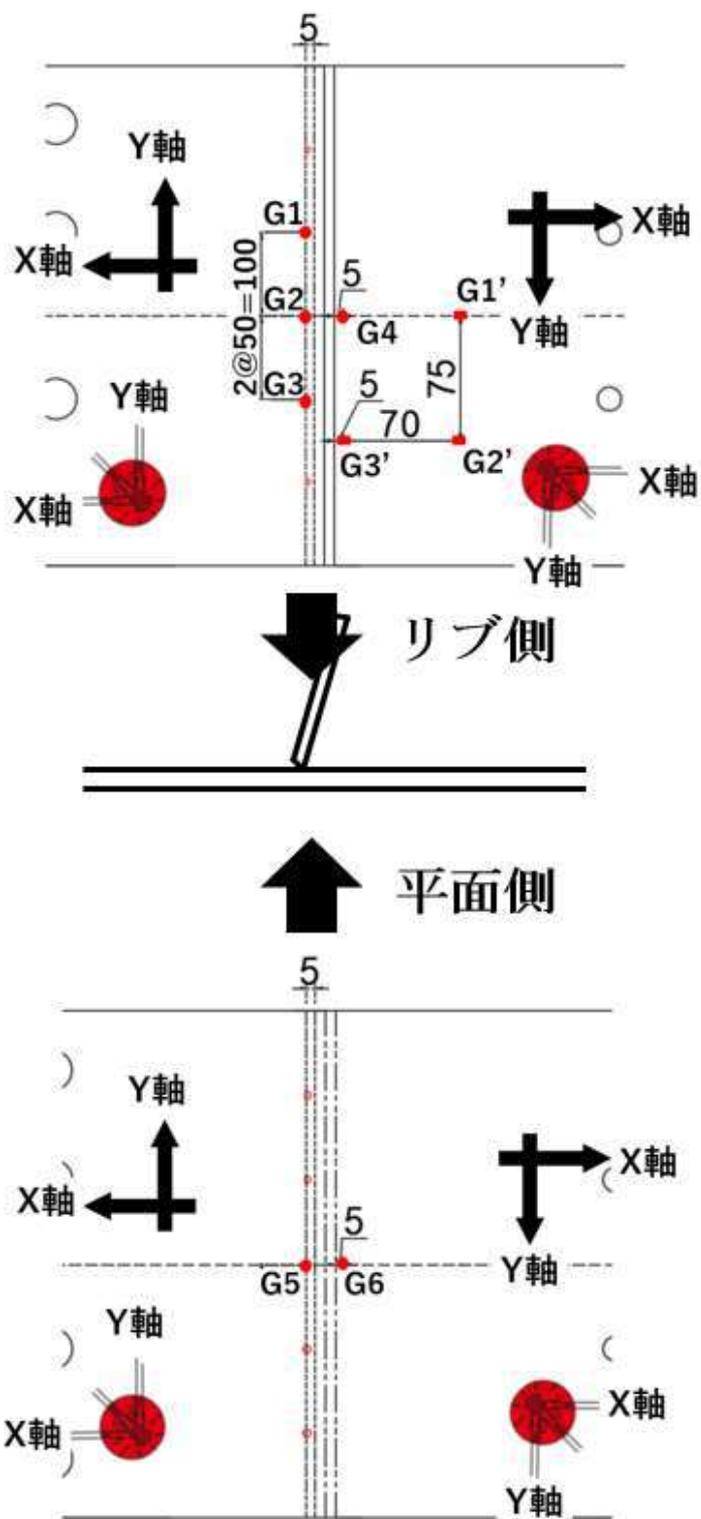
試験体に貼り付けたゲージは G1~G12 の三軸ゲージが FRA-1-11, G1'~G3'の一軸ゲージが FLA-1-11 である。



↑ 平面側



(a) 試験体 No.1~3a



(b) 試験体 No.4~5

図 2.16 ゲージ位置

2.3.3 試験条件

各試験体の試験開始時の公称応力と、試験終了時の繰り返し回数を表 2.3 に示す。試験終了条件は、長手直角方向（Y 軸）の応力値が長手方向（X 軸）の応力値よりも大きくなった場合、またはリブのない平面側に亀裂検出用のエナメル線（0.04mmφ）を貼り付け、溶接部周辺から発生した亀裂が板厚方向に進展し、貫通するまでとした。

また、各試験体でモーターの上限回転数を決め、振動疲労試験と計測時間のサイクルを 1 サイクル当たり 13～14 分中 1 分間（サンプリング間隔 4ms）の測定を行った。

また、試験体 No.3 は公称応力約 80MPa で行ったところ、回転数 2000 万回に達しても亀裂が確認できなかったため、試験体 No.3a とし公称応力約 100MPa に変え、再び試験を行った。

表 2.3 試験条件

試験体番号	公称応力(MPa)	繰り返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
No.2	99.7	1,941,900
No.3	79.1	20,324,700
No.3a	100.0	2,422,200
No.4	122.9	1,549,400
No.5	99.8	2,001,900

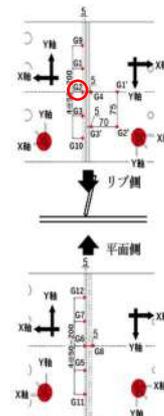
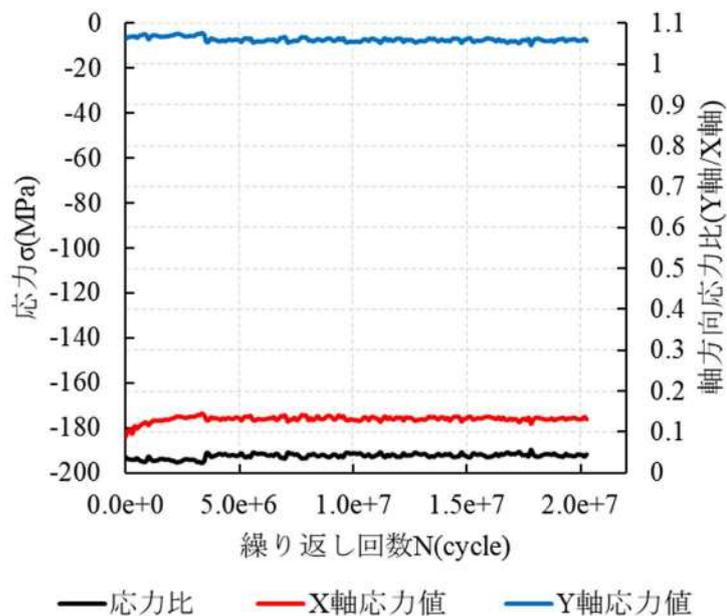
2.3.4 試験結果・考察

2.3.4.1 溶接部中央での応力値及び応力比の変動

振動疲労試験における、各試験体のリブ外側の溶接部の中央に位置する G2 ゲージでの長手方向 (X 軸) と長手直角方向 (Y 軸) の応力値及びその比の絶対値を図 2.17 示す。試験体 No.4 (122.9MPa) に関しては、G2 ゲージでは 1 を超えなかったため、一番早く軸方向応力比が 1 を超えた G1 ゲージの値を使用している。

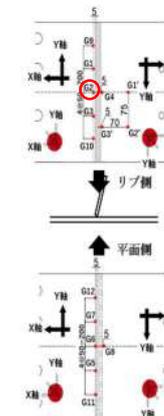
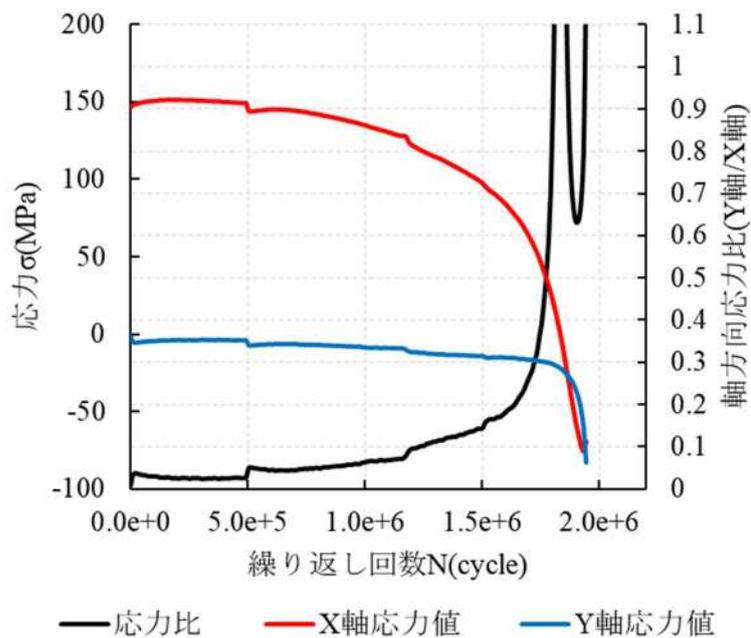
一般に、亀裂が発生していない状態では、主応力の方向は長手方向 (X 軸) を向いているが、亀裂が発生した場合には亀裂を避けるような向きになるため、亀裂発生箇所付近における主応力の向きは長手方向とは異なる向きになる。亀裂の有無を確認することを考えた場合、X 軸、Y 軸方向の応力値だけで判断することは難しく、その時の対象構造物に掛かっている荷重 (外力) も含めて判断しなければならない。そのため、既往の研究では、各軸方向の比を取ることで無次元化することができ、荷重 (外力) を考慮せずに亀裂の有無を判断することが可能である。

これを利用し各試験体の X 軸方向応力値と Y 軸方向応力値の比をとり、同様に亀裂の発生や影響範囲の検討を行った。試験体 No.1 (119.6MPa)、No.3 (79.1MPa) 以外、長手方向 (X 軸) の応力が開放され長手直角方向 (Y 軸) の応力が変動し、その絶対値による比が 1 を超える傾向を示した。試験体 No.1 (119.6MPa)、No.3 (79.1MPa) の 2 方向の軸方向応力の比 (Y 値/X 値) に関しては、2000 万回終了時まで 0.1 を超えることはなく目視による亀裂も確認されなかった。



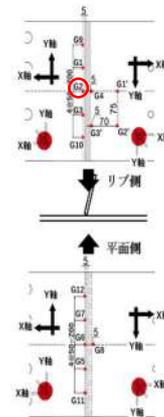
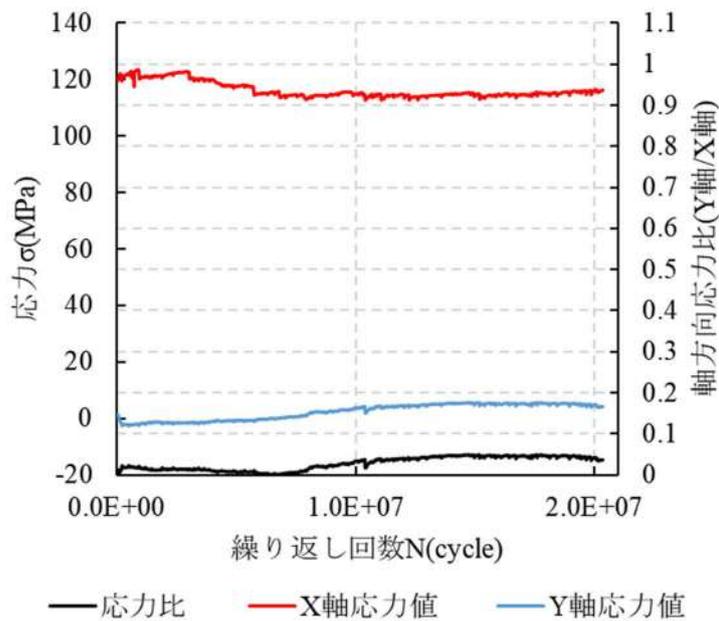
試験体番号	公称応力(MPa)	繰り返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
No.2	99.7	1,941,900
No.3	79.1	20,324,700
No.3a	100.0	2,422,200
No.4	122.9	1,549,400
No.5	99.8	2,001,900

(a) 試験体 No.1(G2)



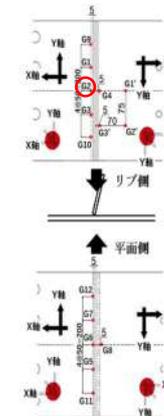
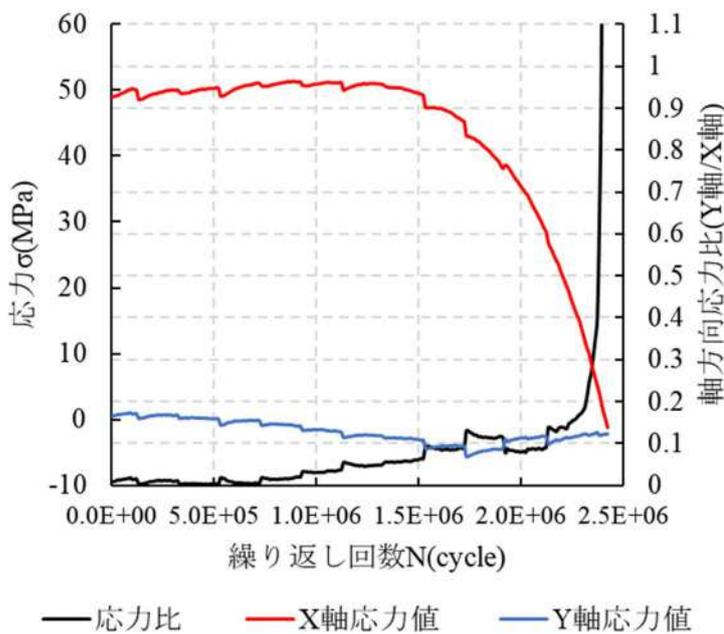
試験体番号	公称応力(MPa)	繰り返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
No.2	99.7	1,941,900
No.3	79.1	20,324,700
No.3a	100.0	2,422,200
No.4	122.9	1,549,400
No.5	99.8	2,001,900

(b) 試験体 No.2(G2)



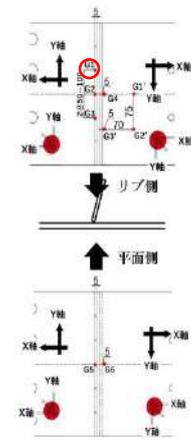
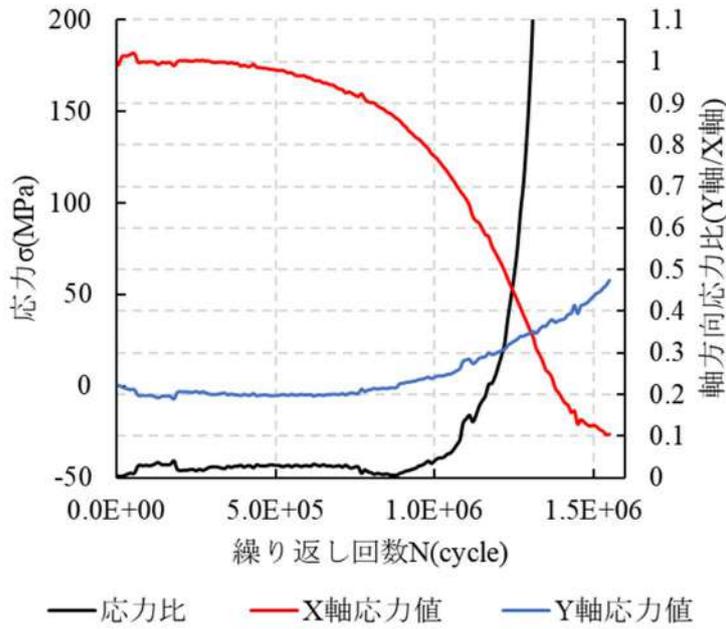
試験体番号	公称応力(MPa)	繰り返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
No.2	99.7	1,941,900
No.3	79.1	20,324,700
No.3a	100.0	2,422,200
No.4	122.9	1,549,400
No.5	99.8	2,001,900

(c) 試験体 No.3(G2)



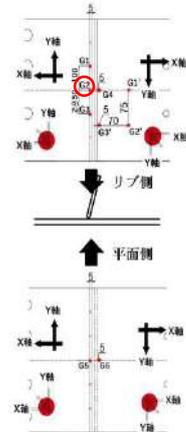
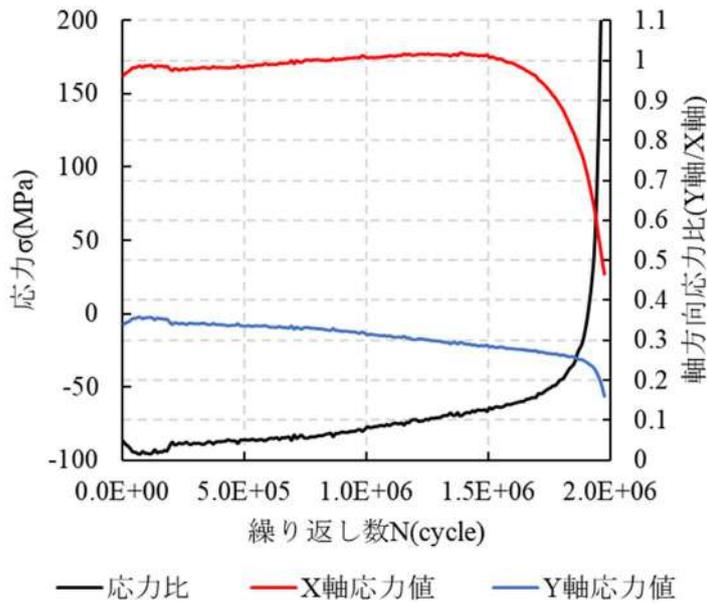
試験体番号	公称応力(MPa)	繰り返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
No.2	99.7	1,941,900
No.3	79.1	20,324,700
No.3a	100.0	2,422,200
No.4	122.9	1,549,400
No.5	99.8	2,001,900

(d) 試験体 No.3a(G2)



試験体番号	公称応力(MPa)	繰り返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
No.2	99.7	1,941,900
No.3	79.1	20,324,700
No.3a	100.0	2,422,200
<u>No.4</u>	<u>122.9</u>	<u>1,549,400</u>
No.5	99.8	2,001,900

(e) 試験体 No.4(G1)



試験体番号	公称応力(MPa)	繰り返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
No.2	99.7	1,941,900
No.3	79.1	20,324,700
No.3a	100.0	2,422,200
No.4	122.9	1,549,400
<u>No.5</u>	<u>99.8</u>	<u>2,001,900</u>

(f) 試験体 No.5(G2)

図 2.17 軸方向応力値及び応力比

2.3.4.2 亀裂周辺における2方向の軸方向応力比の検討

亀裂の発生・進展が確認できた試験体のうち No.2 (99.7MPa) に関して、亀裂の起点であると考えられるリブ側の中央部付近のゲージ位置における軸方向応力比を図 2.18(a)に、リブのない平面側の中央部付近のゲージ位置における軸方向応力比を図 2.18(b)に、さらに、試験体のリブ側とリブのない平面側の中央部に位置する G2, G4, G6, G8 ゲージ位置における軸方向応力比を図 2.18(c)に示す。図 2.18 について、軸方向応力比は絶対値とし、軸方向応力比が大きく増加した繰り返し回数 150 万回以降の範囲を示している。また、図 2.18 において各ゲージの X 軸、Y 軸の2方向の軸方向応力比が初めて1を超えた時における繰り返し回数が早い順に並べ替え、リブ側(着色)とリブのない平面側(無色)で整理したものを表 2.4 に示す。これより、初めに応力比が1を超えたゲージはデッキプレート貫通亀裂の一般的な発生位置に最も近い、リブ側のリブ内側中央にあたる G4 ゲージであることが分かる。次に、溶接部中央の G2 ゲージ、漸変区間にある G1 ゲージ及び G4 ゲージの真下の G8 ゲージ、漸変区間の G3 ゲージ、リブのない側の G6, G7 ゲージという順に応力比が1を超えていることが確認できる。G5 ゲージの応力比は終了時の繰り返し回数の時点で 0.99 であり、1を超えはしないが限りなく1に近い値であった。また、リブ側の G3 ゲージよりもリブのない平面側の G8 ゲージでの軸方向応力比の方が早く1を超えていることから、亀裂の発生は中央部からではなく、G1 ゲージ側に少し寄った位置から発生したものと考えられる。

図 2.18 及び表 2.4 より、初めに亀裂は試験体の溶接ビードの長手直角方向(Y軸方向)中央部付近の G4 ゲージ位置と G1 ゲージ位置の間の G4 ゲージ寄りに発生し、これが板厚方向および長手直角方向に進展したことで、まず G2 ゲージに影響を及ぼし、その後 G1 ゲージ及び G8 ゲージ、G3, G6, G7 ゲージと長手直角方向に広がるように進展し続けたと考えられる。

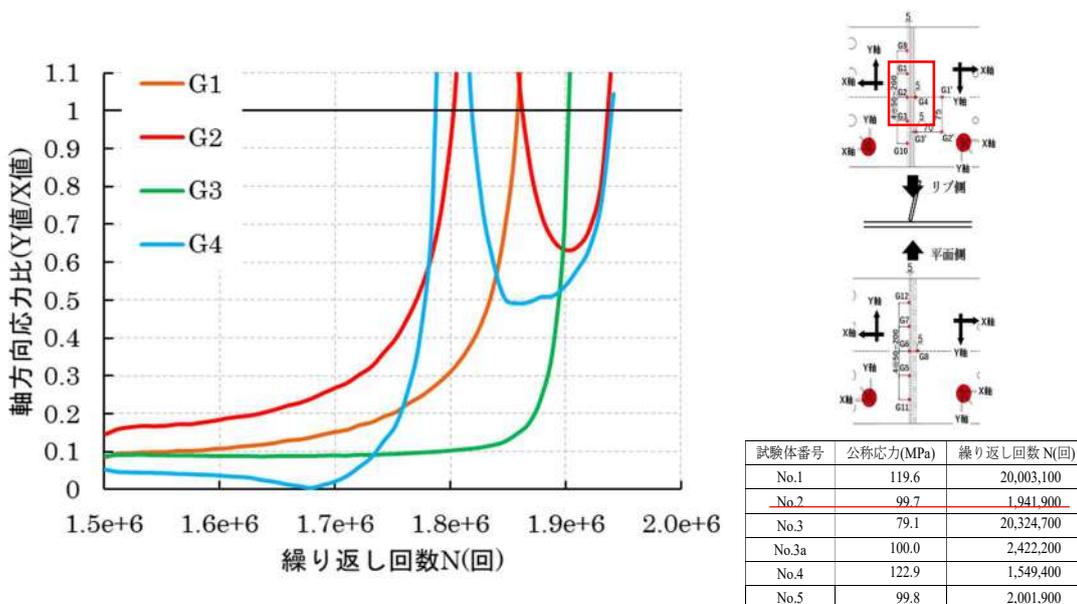
図 2.19 にリブ側端部に位置する G9, G10 ゲージの各軸方向の応力値を示すが、試験体端部の溶け込み量 75%を確保している位置にある G9~G12 ゲージでは、試験終了時まで応力比は1を超えなかった。図 2.19 より、G9, G10 ゲージの各軸方向の応力値は中央付近から発生した亀裂が進展するにつれて増加し、試験終了時には減少している傾向が確認できる。これは、G4 ゲージ付近で亀裂が発生し、長手直角方向に進展し G9, G10 ゲージに近づいたことにより、亀裂先端近傍での応力集中によって応力値が増え、その後亀裂が G9, G10 ゲージ位置を通り過ぎたことにより、ゲージ位置での応力の伝達が断たれ応力値が減る傾向を示したと考えられる。

これら G1~G8 ゲージと G9, G10 ゲージの関係性から、亀裂が試験体中央部

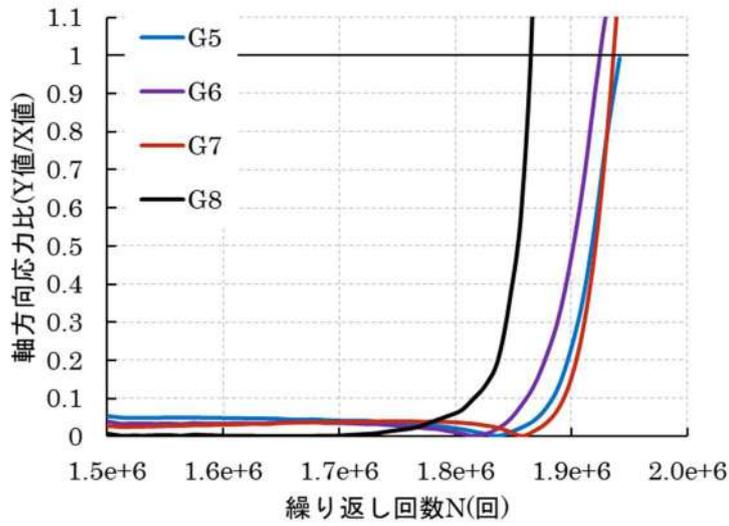
の G4 ゲージ付近に発生し、板厚方向、長手直角方向に広がるように進展したことを明らかにした。

また、他の試験体については付図に示す。試験体 No.2 (99.7MPa) のようにすべてのゲージ位置における軸方向応力比が 1 に近づくまで試験を行わなかったが、亀裂の有無が確認された各試験体において、先にリブ側のゲージ位置での軸方向応力比が 1 を超えたことが確認されたため、亀裂の進展は試験体 No.2 (99.7MPa) と同様な傾向を示していると考えられる。

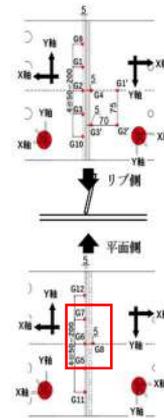
実橋での U リブは閉断面であるため、実橋においてひずみゲージをリブ内側に貼り付けるのは難しい。しかし、試験体 No.2 (99.7MPa) の結果からデッキプレート貫通亀裂を直接確認できない位置でも亀裂の発生、進展による各軸方向の軸方向応力比の増加を確認することができた。このことからリブ外側の溶接部近傍に貼り付けたゲージでも亀裂の判定が可能であると考えられる。



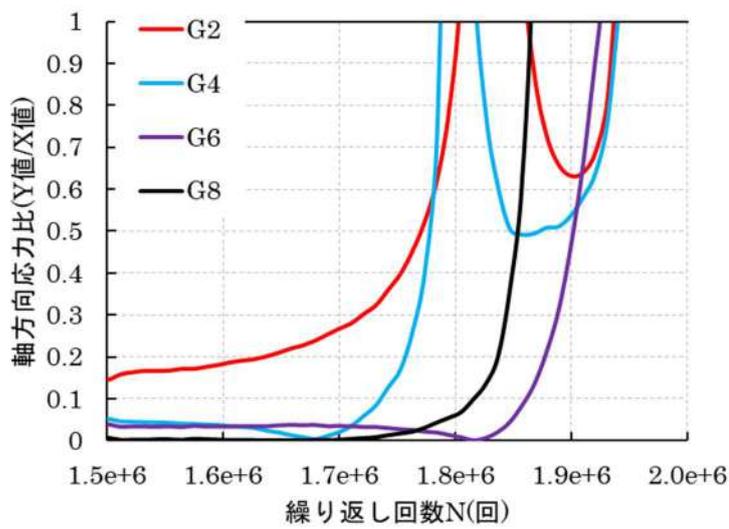
(a) リブ側



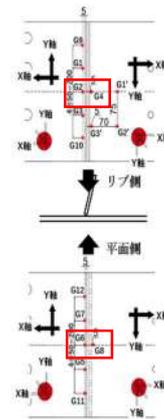
(b) 平面側



試験体番号	公称応力(MPa)	繰り返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
<u>No.2</u>	<u>99.7</u>	<u>1,941,900</u>
No.3	79.1	20,324,700
No.3a	100.0	2,422,200
No.4	122.9	1,549,400
No.5	99.8	2,001,900



(c) 中央部

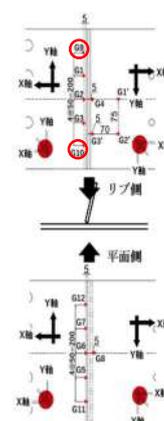
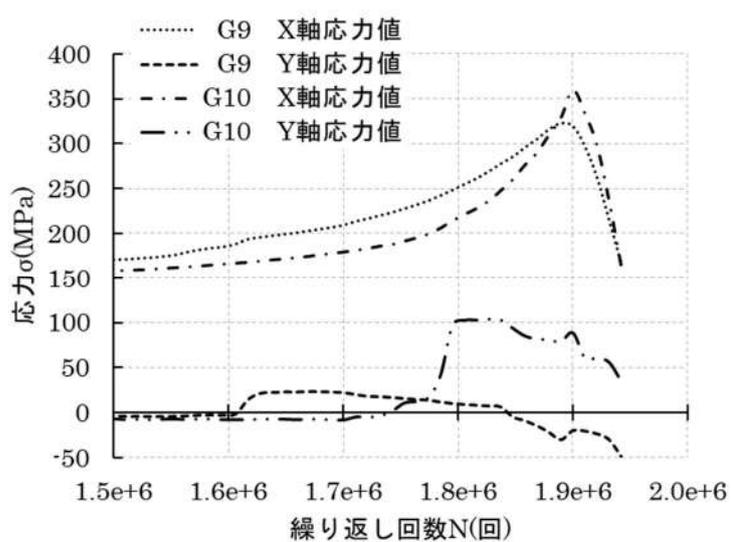


試験体番号	公称応力(MPa)	繰り返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
<u>No.2</u>	<u>99.7</u>	<u>1,941,900</u>
No.3	79.1	20,324,700
No.3a	100.0	2,422,200
No.4	122.9	1,549,400
No.5	99.8	2,001,900

図 2.18 軸方向応力比 (試験体 No.2)

表 2.4 軸方向応力比と繰り返し回数の関係 (試験体 No.2)

位置	ゲージ番号	軸方向応力比 (Y 値/X 値)	繰り返し回数 (回)
リブ側	G4	2.06	1,795,100
リブ側	G2	1.09	1,805,600
リブ側	G1	2.06	1,868,500
平面側	G8	1.40	1,868,500
リブ側	G3	2.26	1,910,500
平面側	G6	1.13	1,931,500
平面側	G7	1.21	1,941,900
平面側	G5	(0.99)	1,941,900



試験体番号	公称応力(MPa)	繰り返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
No.2	99.7	1,941,900
No.3	79.1	20,324,700
No.3a	100.0	2,422,200
No.4	122.9	1,549,400
No.5	99.8	2,001,900

図 2.19 G9 及び G10 での軸方向応力値 (試験体 No.2)

2.3.4.3 主応力方向の検討

振動疲労試験により亀裂の有無が判断できた試験体 No.2 (99.7MPa), No.3a (100.0MPa), No.4 (122.9MPa) の G1~G4 のひずみデータから計算して得られた X 軸 (長手方向) からの主応力角度の変化を表したグラフを図 2.20(a)~(d) に示す. 上述したように, 通常, 亀裂が発生していないとき, 主応力方向は X 軸を向いているが, 亀裂が発生した場合, 亀裂付近の主応力方向は亀裂を避けるような向きになる. よって, 本研究において X 軸を 0° とし, 角度が変化した時点が亀裂発生点とした. また, 主応力角度の計算については 2.1.2 に記述した式(2.4)の通りである.

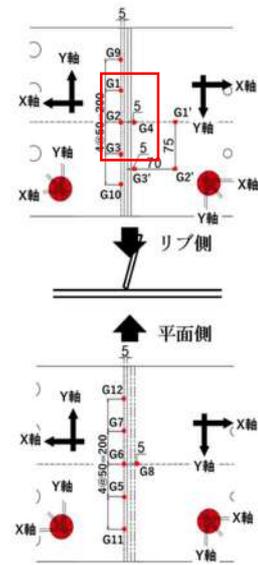
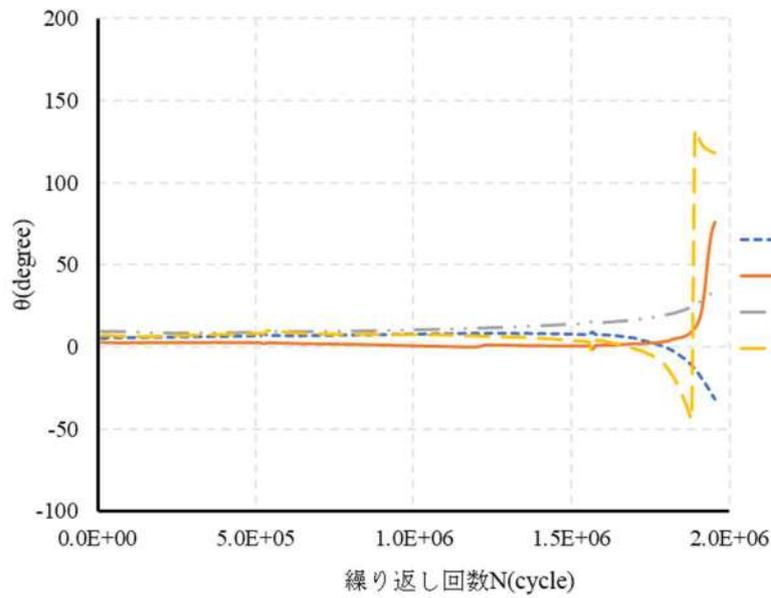
(a)より試験体 No.2 (99.7MPa) では, どの値も繰り返し回数約 150 万回まで大きな変化は見られないが, その後, 各ゲージ位置での主応力方向が X 軸方向から徐々に変化していることがわかる. ただし, G4 のみ繰り返し回数約 190 万回で主応力角度が約 180° 増加している.

(b)より試験体 No.3a (100.0MPa) では, どの値も繰り返し回数約 50 万回まで大きな変化は見られないが, その後, 各ゲージ位置での主応力方向が X 方向から徐々に変化しており, 試験体 No.2, No.4 で見られる急激な角度の変化が見られない. しかし, 試験体 No.3a の G4 ゲージのみ他の試験体とは異なりその角度が正の数になっている.

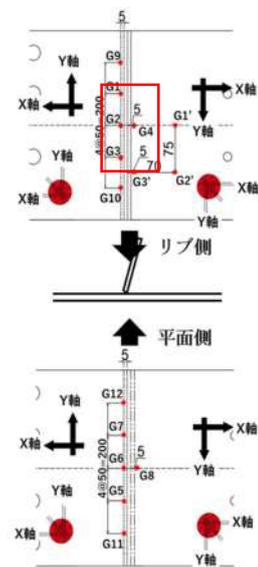
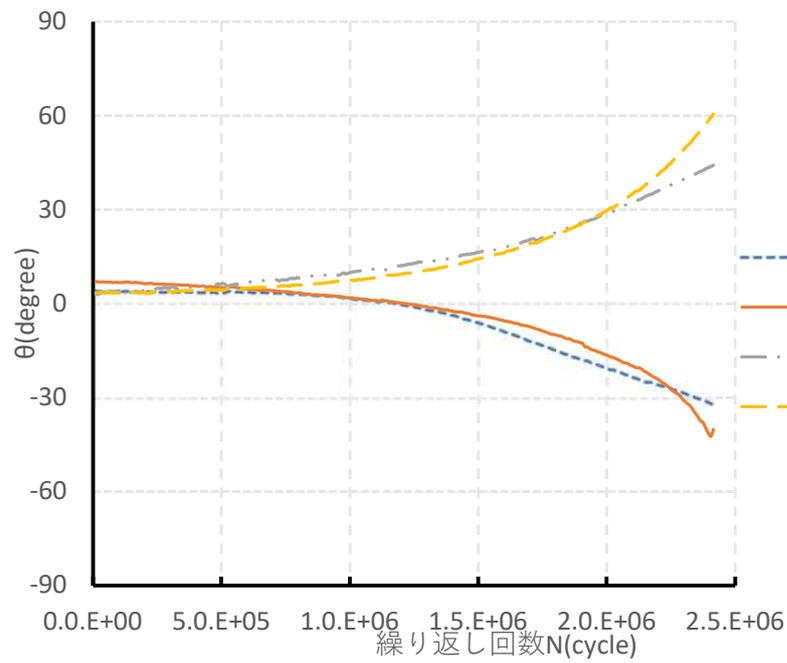
(c)より試験体 No.4 (122.9MPa) では, どの値も繰り返し回数約 80 万回まで大きな変化はないが, その後, 各ゲージ位置での主応力方向が X 軸方向から徐々に変化している. また G1 が繰り返し回数約 130 万回で主応力角度が 180° 増加している.

(d)より試験体 No.5 (99.8MPa) では, G1~G4 のどの値も繰り返し回数約 150 万回まで大きな変化は見られず, その後, 各ゲージ位置での主応力方向が X 軸方向から徐々に変化していることがわかる.

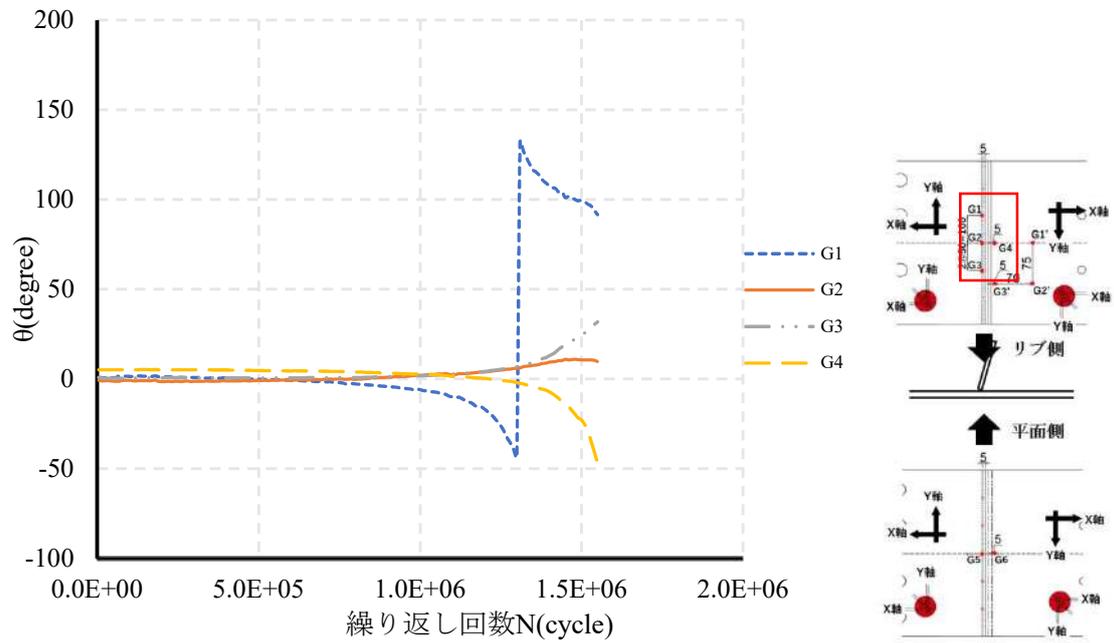
試験体 No.2(99.7MPa), No.4(122.9MPa), No.5(99.8MPa) と No.3a(100.0MPa) の G2, G4 の変化を比べると, 主応力方向について No.2 (99.7MPa), No.4 (122.9MPa), No.5 (99.8MPa) は負の方向に変化しているのに対して, No.3 は正の方向に変化している. これは, 亀裂の発生点 (長手直角方向の位置) が他の試験体とは異なっているためであると考えられる.



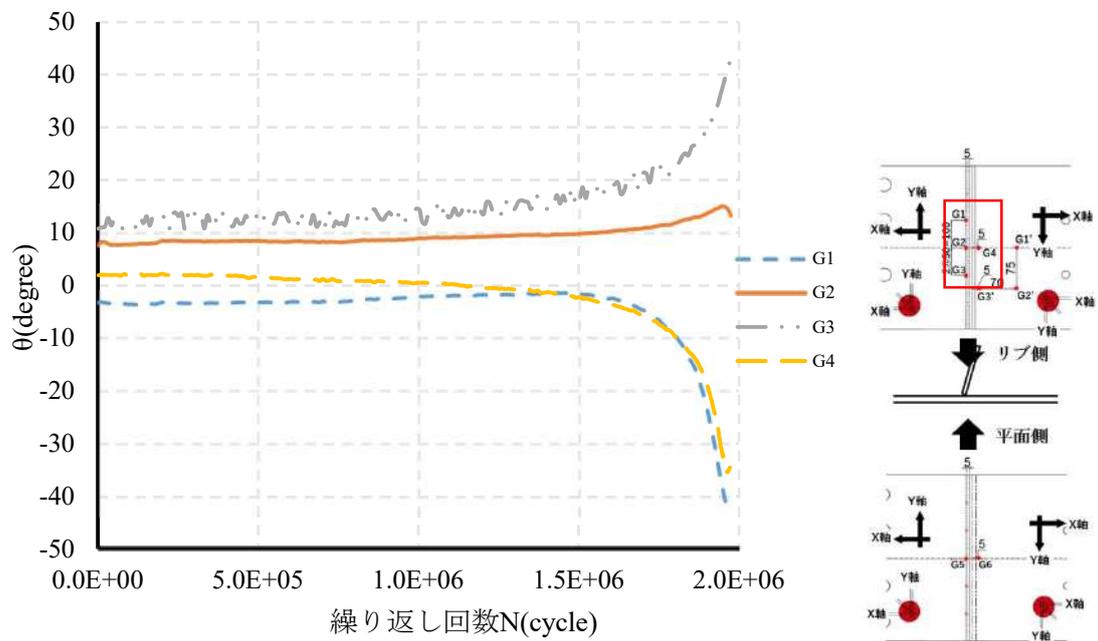
(a) 試験体 No.2



(b) 試験体 No.3a



(c) 試験体 No.4



(d) 試験体 No.5

図 2.20 主応力角度の変化

2.3.4.4 磁粉探傷試験及びエッチング処理結果

疲労亀裂が板厚方向に進展し、母材を貫通していないかを確認するために磁粉探傷試験を行った。磁粉探傷試験に用いた機材とその状況を図 2.21～2.22 に示す。

磁粉探傷試験を行った各試験体の結果を図 2.23 に示す。どの試験体でも亀裂を確認することはできなかった。2.3.4.1, 2.3.4.2 項に記した応力の関係と合わせると、亀裂は発生しているが、母材を貫通するに至らなかったということが明らかになった。

次に、この亀裂がどの程度の深さまで進展しているかを確認するため試験体を切断し、断面を確認できる試験片を作成しエッチング処理をした。エッチング処理の手順及び切断位置を図 2.24, 2.25 に示す。

また、エッチング処理した試験片を図 2.26 に示す。亀裂は溶接止端部から発生していることが確認できる。試験体 No.3a (100.0MPa) の結果では、亀裂深さが 5mm 程度となっている。

試験体 No.4 (122.9MPa) の結果では、亀裂深さが 9.5mm 程度であった。また、他の試験体と違い反対側の溶接止端部からも深さ 2.5mm 程度の亀裂が発生していることがわかる。これは、最も公称応力が大きい状態で、初めに応力比が 1 を超えた後に他のゲージ位置でも 1 を超えるまで試験を行ったため亀裂が深くまで進展し、応力の集中が反対側の溶接部周辺に移ったためであると考えられる。また、No.4 の軸方向応力比がリブ内側において最初に 1 を超えず、リブ外側が先に 1 を超えたのも 2 つ目の亀裂が発生していたことが原因であると考えられる。

試験体 No.5 (99.8MPa) の結果では、亀裂深さが 9mm 程度であった。

磁粉探傷試験、エッチング処理の結果より、本手法は亀裂が貫通しなくとも、亀裂深さが 5~9mm 以上になれば検出可能であることが明らかになった。



(a) ブラックライト



(b)



(c) 磁粉探傷用蛍光磁粉液

図 2.21 磁粉探傷試験用機材

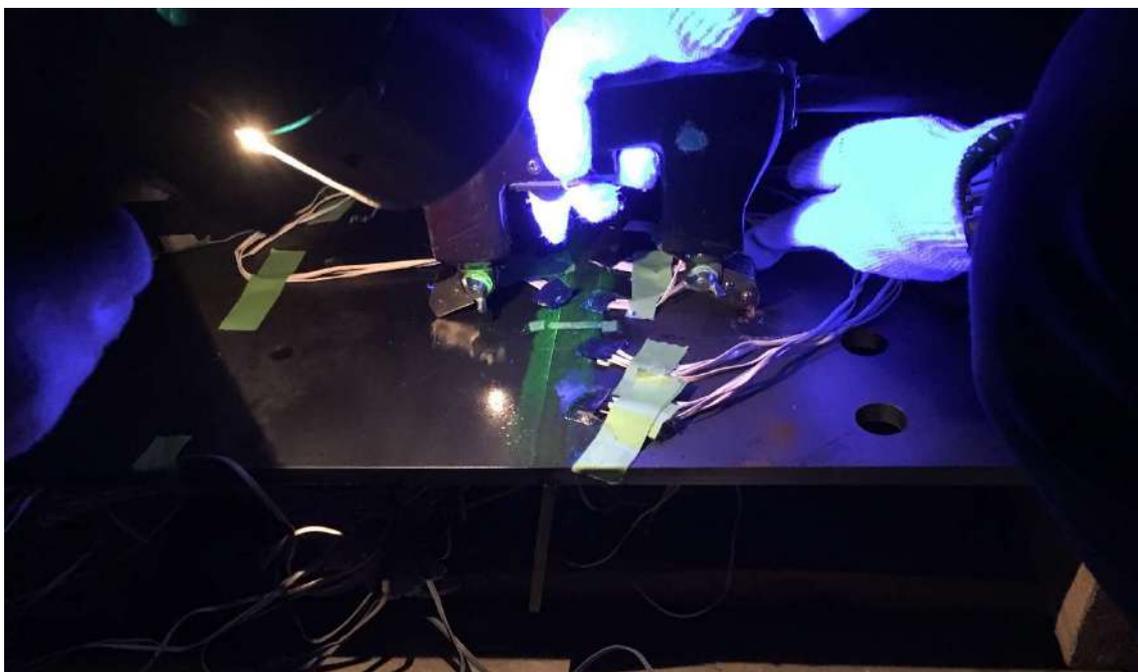
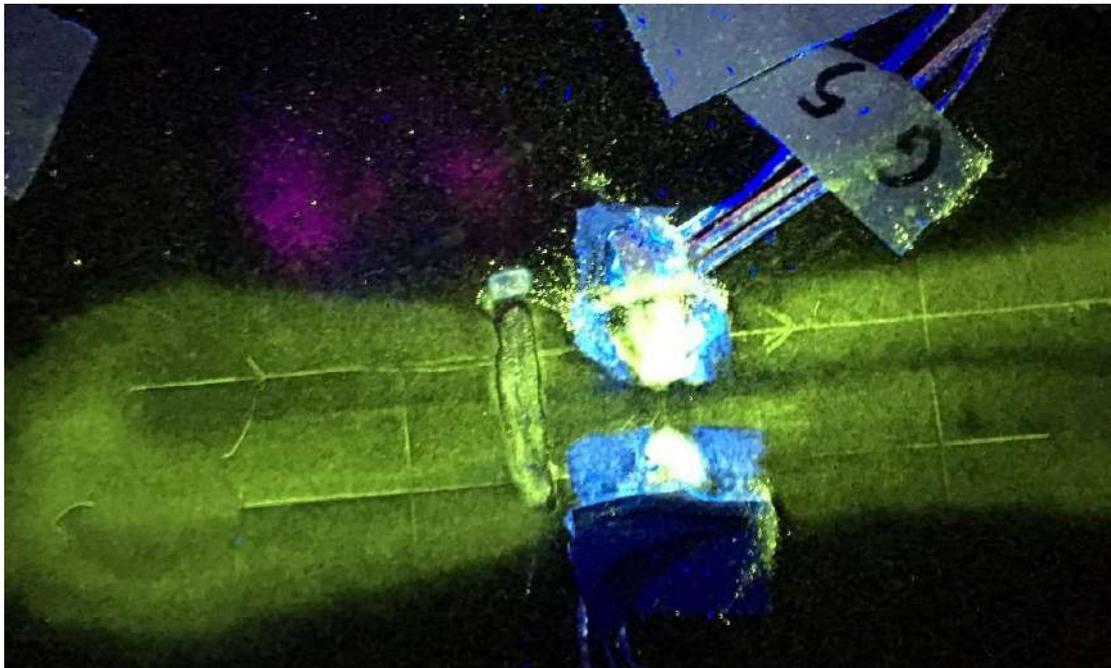


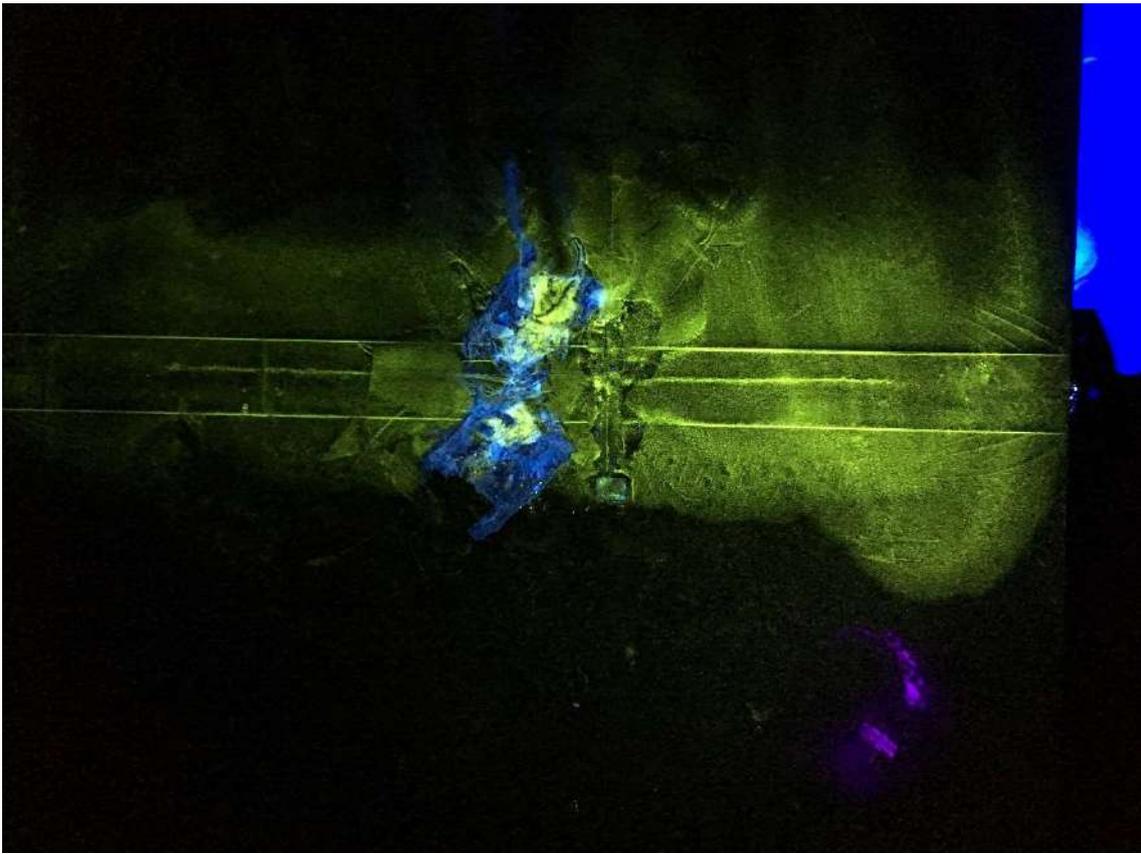
図 2.22 磁粉探傷試験状況



(a) 試験体 No.3a



(b) 試験体 No.4



(c) 試験体 No.5

図 2.23 磁粉探傷試験結果

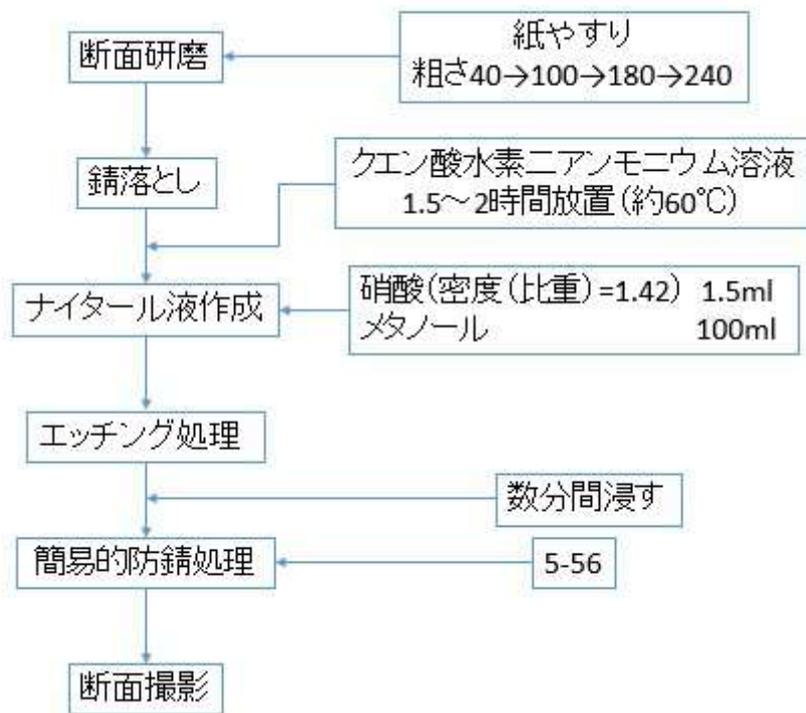


図 2.24 エッチング手順

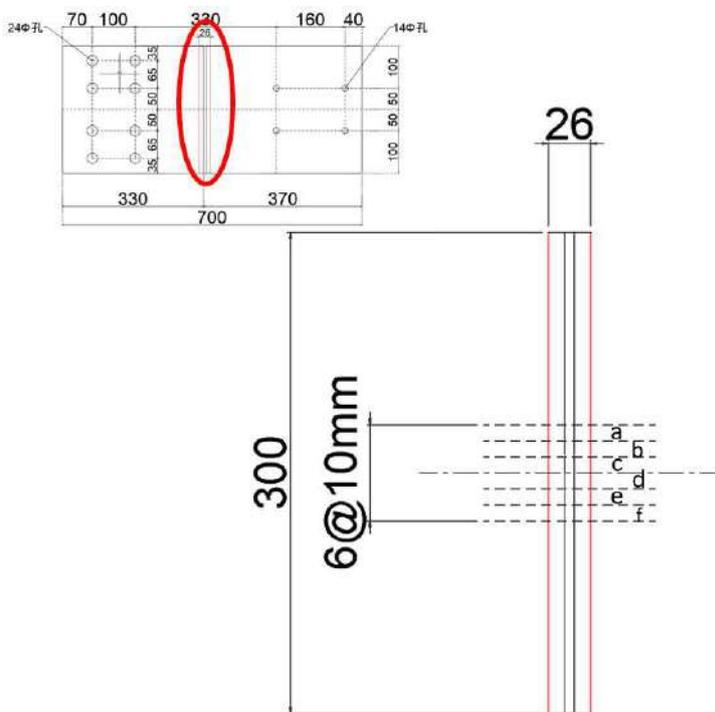
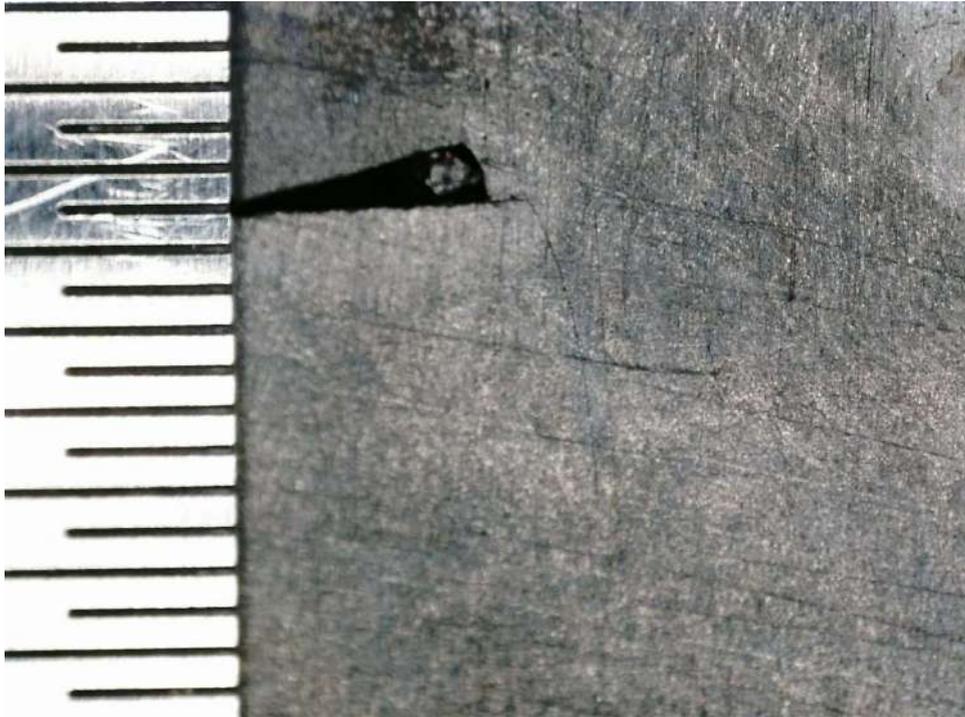
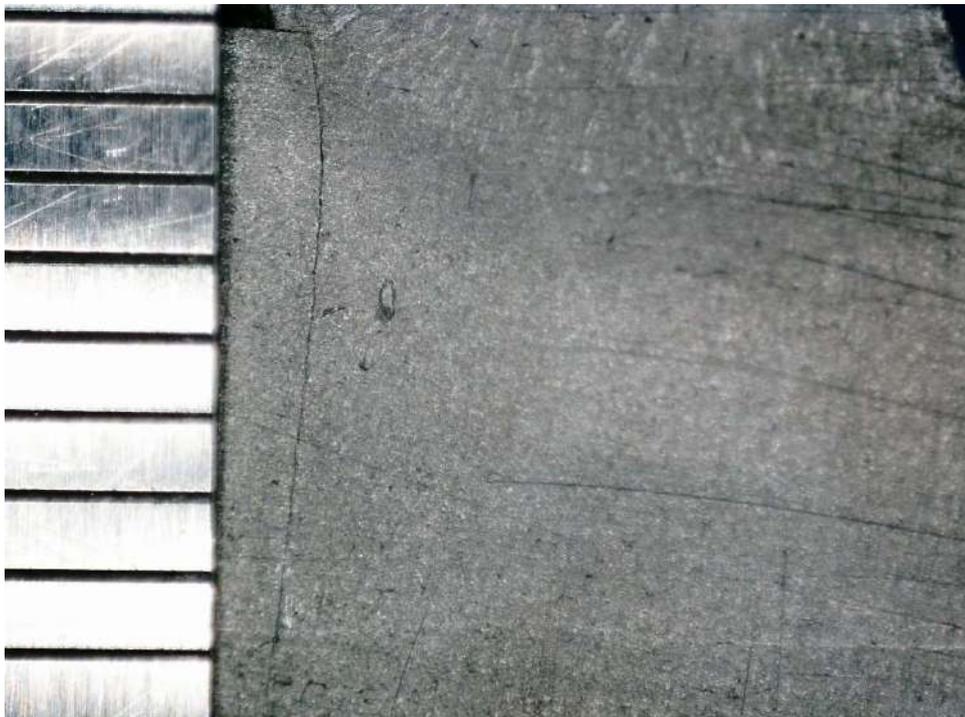


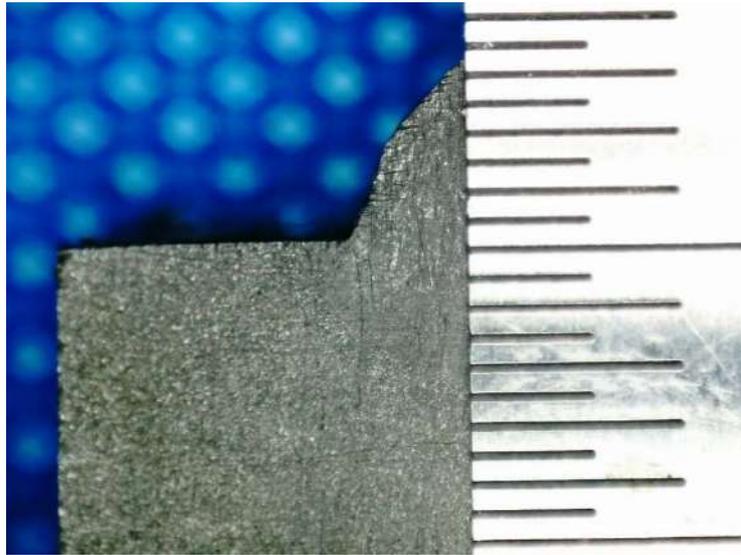
図 2.25 試験体切断位置 (試験片作成)



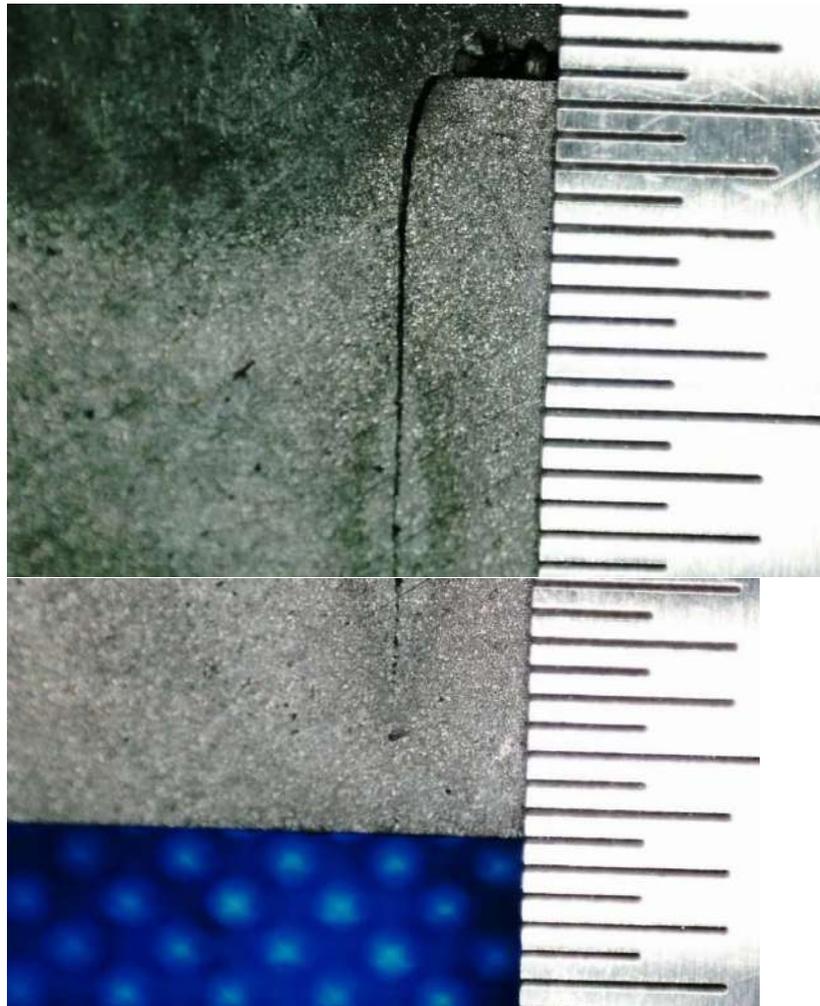
(a) 試験体 No.3a (リブ内側 亀裂深さ 5mm)



(b) 試験体 No.4 (リブ内側 亀裂深さ 8.5~9mm)



(c) 試験体 No.4 (リブ外側 亀裂深さ 2.5mm)



(d) 試験体 No.5 (リブ内側 亀裂深さ 9.5mm)

図 2.26 エッチング結果

第 3 章

FEM 解析による検討

3.1 FEM 解析概要

解析には汎用有限要素解析プログラム (SOFiSTiK) を用いて解析を実施した。解析モデルの材料特性は一般鋼材を想定し、鋼材のヤング率 $E=210,000\text{N/mm}^2$, ポアソン比 $\nu=0.3$ と設定し、8 節点ソリッド要素を用いた六面体要素によるモデル化を行った。

まず初めに、亀裂周辺の基本的な主応力の方向を確認することを目的とし、円孔を有する平板の解析を行い、その後、2 章に示した振動疲労試験の結果をもとに解析を行った。

3.2 円孔を有する平板の解析

3.2.1 解析モデル

平板に円孔があり、その円孔から長手直角方向両側に亀裂を模した切り込みを入れ、長手方向面内に引張力を与えたモデルを考えた。解析モデルは長手方向 (X 軸方向) を 540mm, 長手直角方向 (Y 軸方向) を 160mm, 厚さ (Z 軸方向) を 9mm, 円孔の半径を 10mm とし、切り込みの長さを 10mm と 20mm とした 2 ケースのモデルと無亀裂のモデルを作成した。境界条件は、モデル片側では XYZ 軸の並進自由度を拘束し、各軸方向の変位を全て拘束した。もう片側は自由端とし、長手方向への引張力(100kN/m^2)を自由端側の断面に載荷した。要素寸法は亀裂周辺で $1.0\text{mm}\times 0.7\text{mm}\times 1.5\text{mm}$ とした。作成したモデルを図 3.1~3.2 に示す。

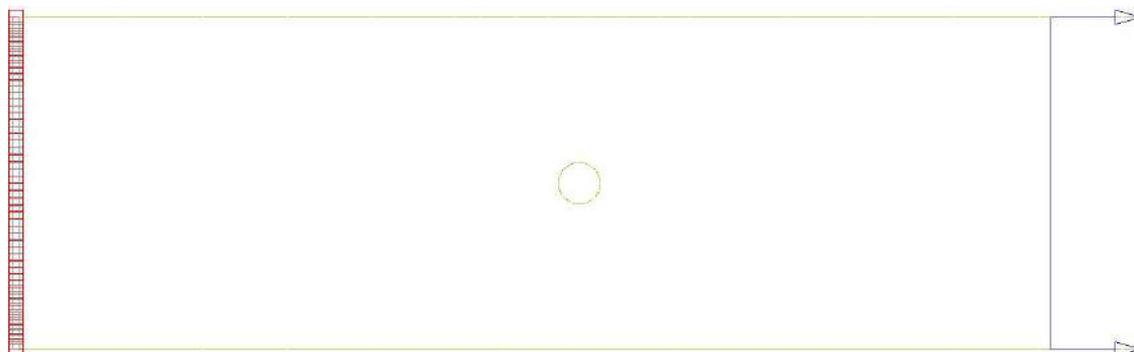
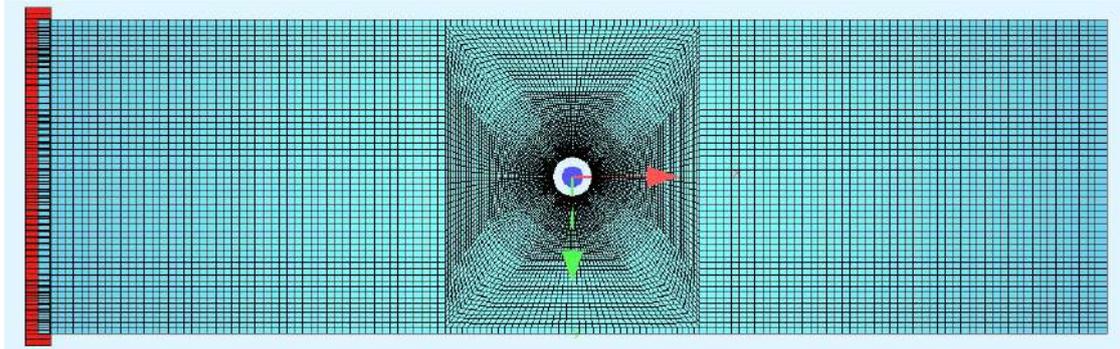
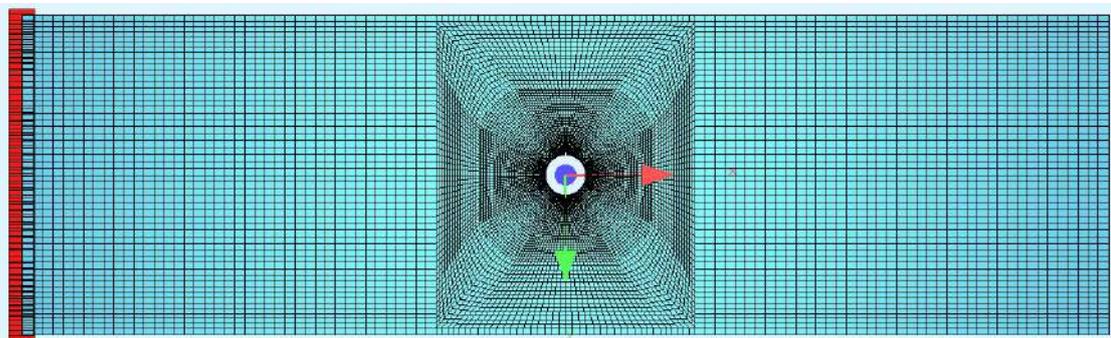


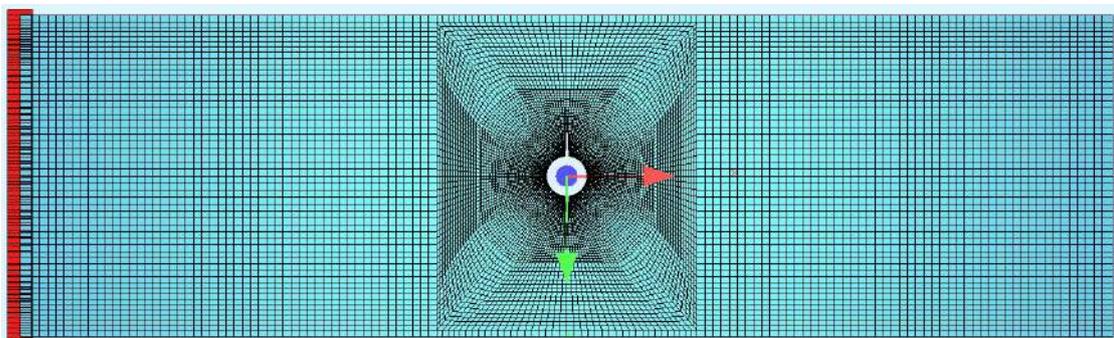
図 3.1 円孔平板モデル



(a) 亀裂長 0mm



(b) 亀裂長 10mm



(c) 亀裂長 20mm

図 3.2 各円孔平板モデル

3.2.2 解析モデルの妥当性

作成した無亀裂モデルおよび亀裂を有するモデルの妥当性の確認をした。

3.2.2.1 無亀裂モデルの妥当性

図 3.3 より、応力集中係数の理論値を推定する。今回の解析モデルでは、 $r=10$ 、 $d=160$ であるため、 $r/d=0.0625$ となる。したがって、応力集中係数 K はおよそ $K=2.65$ である。また、解析結果が $\sigma_{\max}=0.268$ 、 $\sigma_{\text{平均}}=0.101$ であったため、図 3.4 より応力集中係数の解析値は $K=\sigma_{\max}/\sigma_{\text{平均}}=2.65$ であった。応力集中係数の理論値と解析値に大きな差がないことより無亀裂モデルの妥当性を確認した。

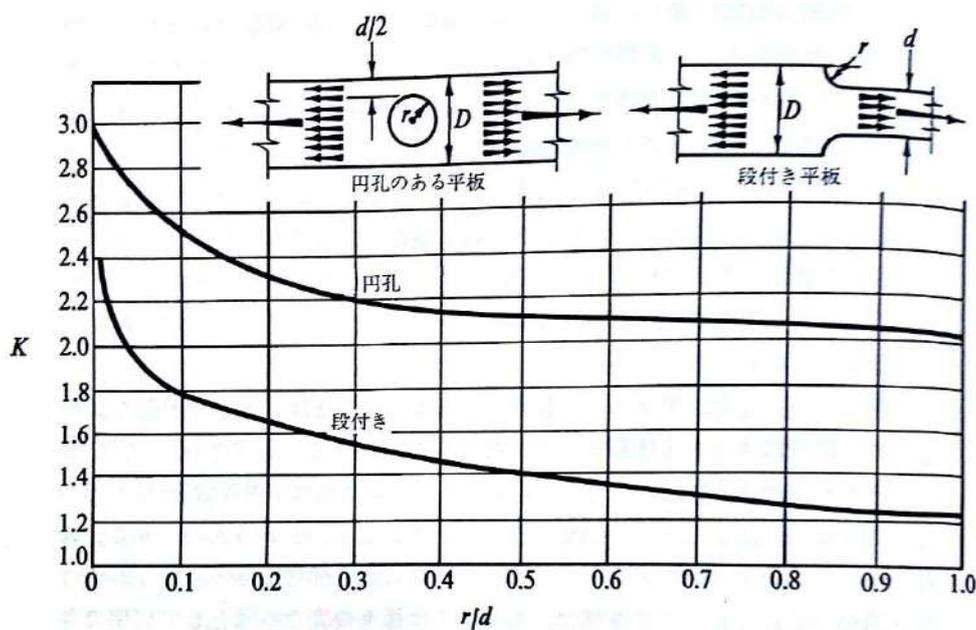


図 3.3 引張力を受ける平板に対する応力集中係数

出典：固体の力学

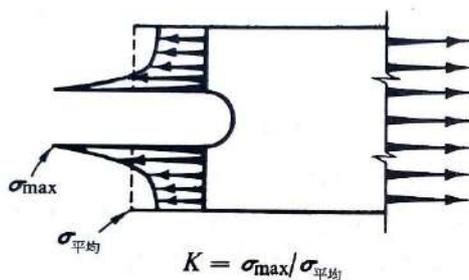


図 3.4 応力集中係数の意味

出典：固体の力学

3.2.2.2 亀裂を有するモデルの妥当性

亀裂先端を原点とした極座標を取り (図 3.5), 亀裂周辺の任意の点の応力値を式(3.1)の計算式にて比較した.

表 3.1 に式(3.1)による計算値と解析値を示す. これより, 亀裂を有するモデルでも計算値と解析値に大きな差はないと言える. 代表的な 2 点を取り上げたが, 他の点も同様な傾向を示す.

$$\sigma_x = \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right) \quad (3.1)$$

σ_0 : 引張応力 a : 切り込み長さ (亀裂長) r : 亀裂先端からの距離
 θ : 任意点と亀裂先端を結んだ線と亀裂進行方向とのなす角度

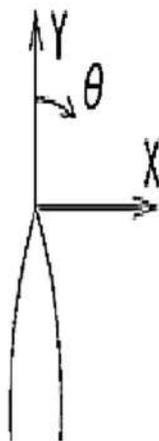


図 3.5 極座標の取り方

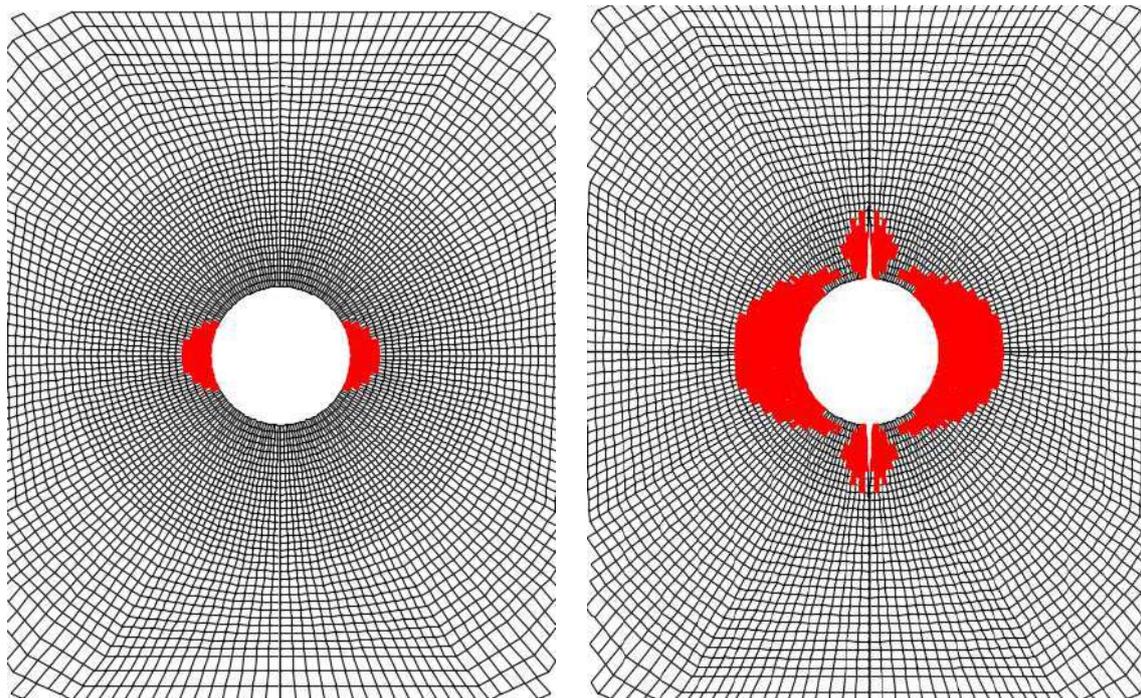
表 3.1 応力値比較

解析モデル	r	θ	σ_x 計算値	σ_x 解析値
亀裂長 10mm	2.49	-65.13	0.259	0.282
亀裂長 20mm	2.44	-65.39	0.370	0.361

3.2.3 亀裂周辺の2方向の軸方向応力比の検討

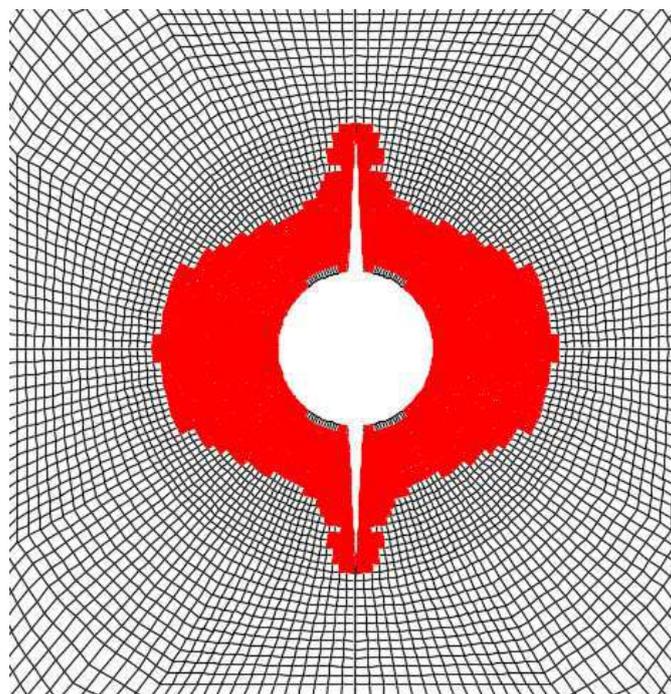
実橋の亀裂発生箇所に対して対策を講じる際には，必要に応じて対策前後に応力測定を行いその効果の確認を行うが，測定結果を正しく評価するには測定時の外力（荷重）等を含めて評価しなければならず，実際には荷重車などを載荷して計測を行い，載荷荷重を考慮しての測定結果の判断を行うので，計測は大掛かりになることが多い．そこで，測定した X 軸方向，Y 軸方向の応力値の比を取ることで外力（載荷荷重）の値を利用せず亀裂周辺の応力変化を確認できるか検討を行なった．この引張力を与えたモデルにおいて，X 軸方向の応力値と Y 軸方向の応力値を比較し逆転している範囲を確認する．

図 3.6 に Y 軸方向の応力値が X 軸方向の応力値を上回っている範囲を解析モデル上にプロットしたものを示す．この図において，Y 軸方向の応力値が X 軸方向の応力値を上回っている箇所を赤色で着色している．亀裂の無い状態だと，円孔の X 軸方向両端部においては X 軸方向の応力が伝達されないため Y 軸の軸方向応力値が大きい結果を示している．解析モデルにおいて，円孔の Y 軸方向両端部において無亀裂の状態であれば Y 軸方向の応力値より X 軸方向の応力値が大きい値を示している．しかし，亀裂により周辺の応力状態が乱され，Y 軸方向の応力値が X 軸方向の応力値より大きくなっている事が確認できる．これより亀裂周辺の X 軸方向の応力値と Y 軸方向の応力値を比較することにより亀裂の有無を判定できると考える．



(a) 亀裂長 0mm

(b) 亀裂長 10mm



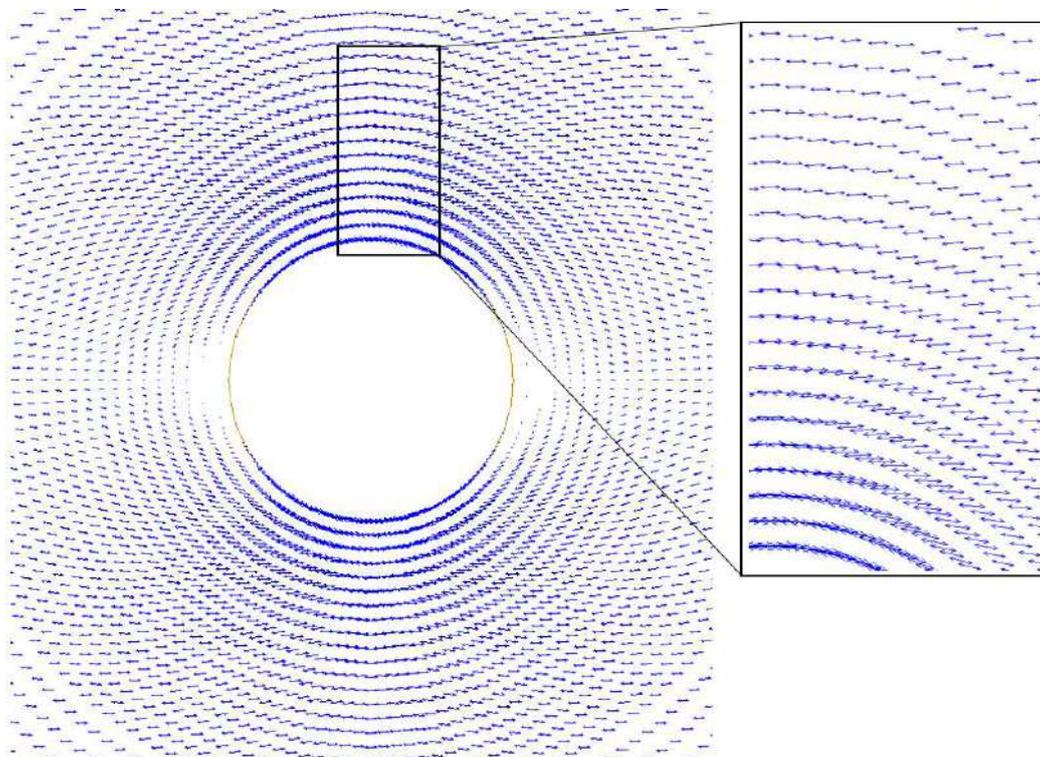
(c) 亀裂長 20mm

図 3.6 軸方向応力比の影響範囲 (Y 軸応力値/X 軸応力値 > 1)

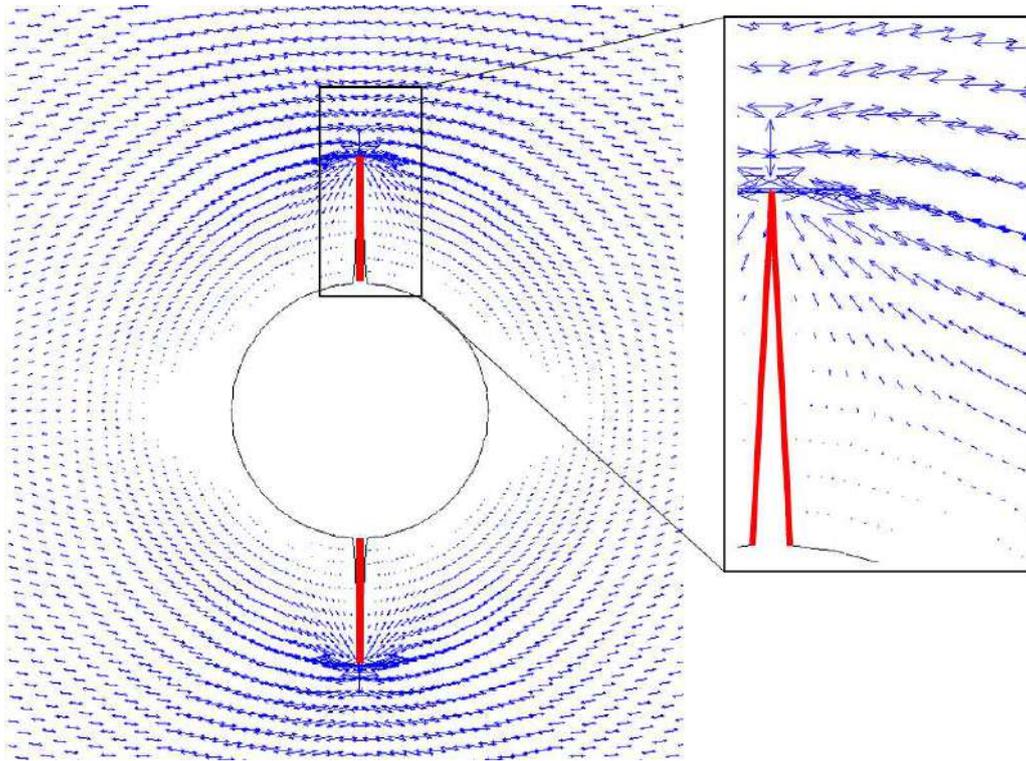
3.2.4 亀裂周辺の主応力方向の検討

無亀裂モデルと亀裂長 10mm, 20mm のモデルにおける主応力方向の xy 平面への射影を図 3.7 に示す. 図中の赤線は亀裂を, 青線は主応力方向を表示している. 図中の黒線で囲まれた部分を拡大したものを各図の右側に示す.

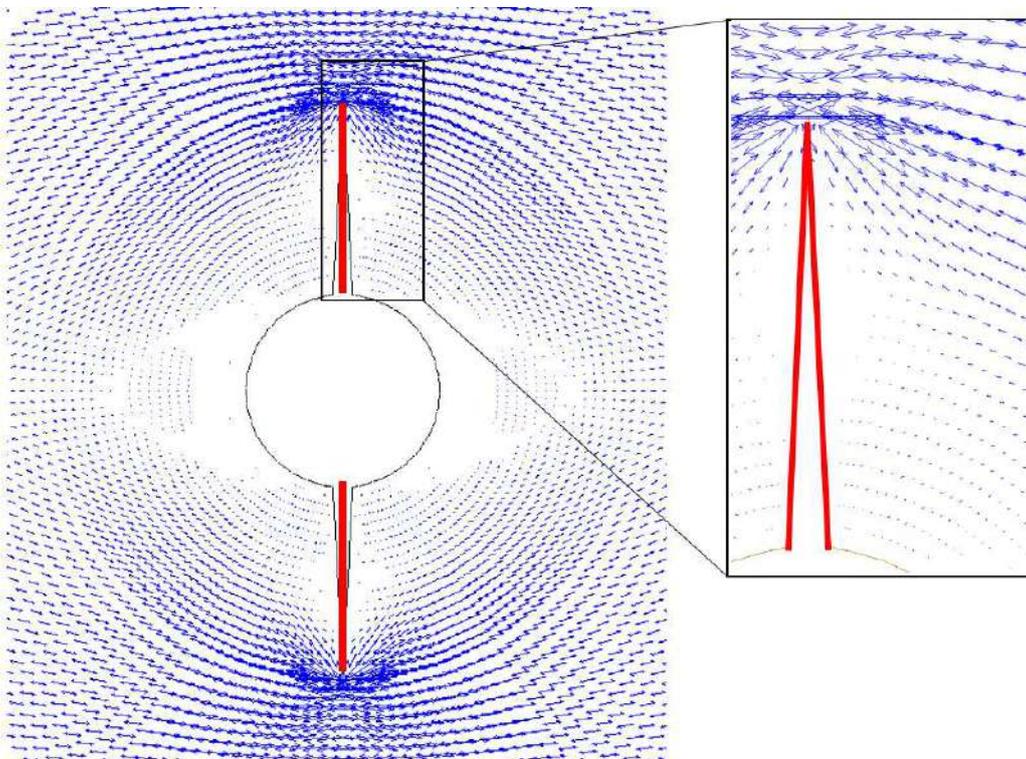
無亀裂モデルでは, 長手方向 (X 軸) に主応力が向いている. 応力集中部から長さ 10mm の亀裂が生じると, 亀裂周辺の主応力方向は亀裂先端から放射線状に広がり, 亀裂周辺では亀裂を避ける向きに向いている. 亀裂長 20mm モデルでも同様の傾向がより顕著に見られる. 亀裂進展に伴い, 亀裂周辺の主応力方向は亀裂先端から放射線状に広がっていることを確認した.



(a) 亀裂長 0mm



(b) 亀裂長 10mm



(c) 亀裂長 20mm

图 3.7 主応力方向

3.3 面外ガセット溶接継手を対象とした FEM 解析

3.3.1 解析モデル

解析モデルは図 3.8 のように試験機への固定部から自由端側の部分をモデル化した。振動疲労試験機に固定している側の XYZ 軸の並進自由度を拘束し、ガセットプレート溶接止端部の Z 軸の並進自由度を拘束することでガセットプレートを擬似的に再現した。また、解析の計算を円滑にするために、モデルはハーフモデルとし、境界の拘束条件を X 変位、Z 変位及び Y 軸周りの回転以外拘束とした。解析モデルは、無亀裂、亀裂長 1mm、2mm、5mm、10mm、試験体の試験終了時と同様の 21mm 状態を想定し、亀裂深さは振動疲労試験の際に亀裂深さの測定を行っていないため、(亀裂深さ/亀裂長=1/2) と仮定してモデルを作成し、それぞれのモデルにおいての亀裂周辺の主応力の状態を確認した。検証を行いたい亀裂想定部(溶接止端部)周辺の要素寸法は 1mm×1mm×1mm とした。各解析モデルの亀裂部の詳細を図 3.9 に示す。この図において、亀裂を赤線で示す。

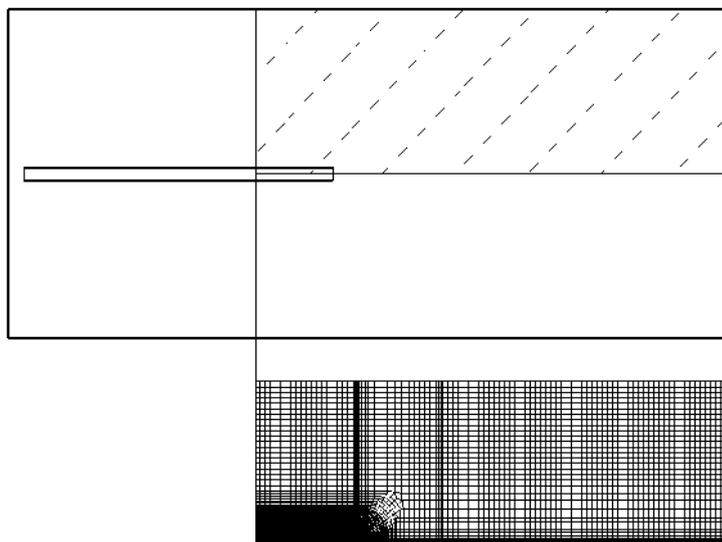
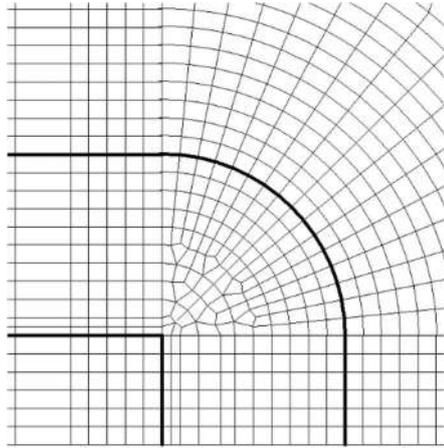
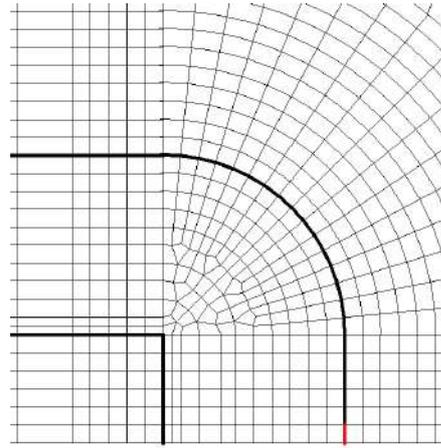


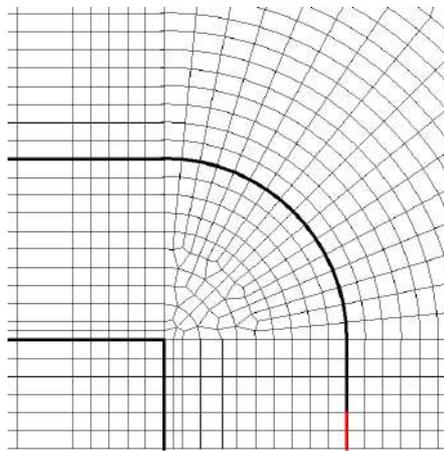
図 3.8 解析モデル



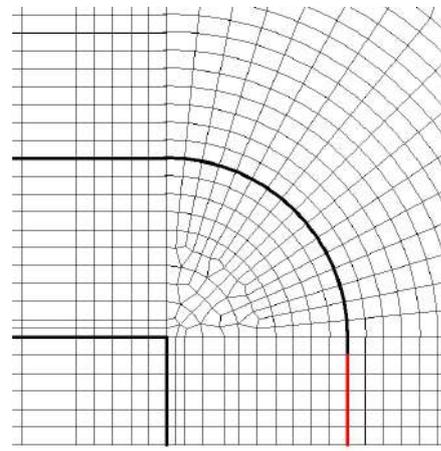
(a) 亀裂長 0mm



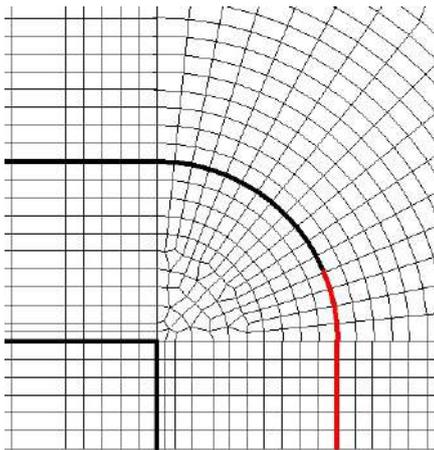
(b) 亀裂長 1mm



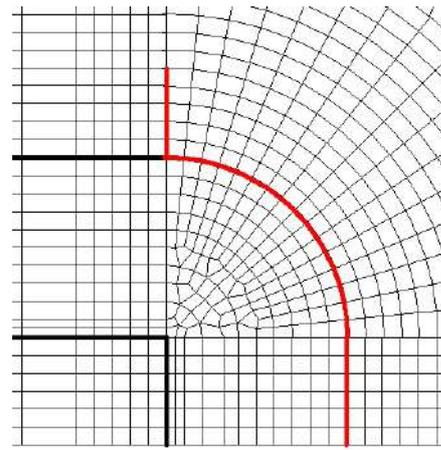
(c) 亀裂長 2mm



(d) 亀裂長 5mm



(e) 亀裂長 10mm



(f) 亀裂長 21mm

図 3.9 亀裂部詳細

3.3.2 解析結果

各解析モデルの亀裂長における解析を行い、2章図 2.8 で示した G1, G2, G3 のゲージ位置での X 軸方向（試験体長手方向）と Y 軸方向（試験体長手直角方向）の応力の値を示した表を表 3.2 に示す。亀裂長 1mm と 2mm のモデルにおいて、各ゲージ位置での X 軸方向の応力と Y 軸方向の応力値を見ると、亀裂の長さが 2mm 程度の場合、一番近い G3 ゲージにおいても大きな変化を確認することができない。亀裂の長さが 5mm に達したモデルでは、一番近い G3 ゲージの X 軸方向の応力値が減少し、Y 軸方向の応力値が増加している。これは、亀裂により母材の表面付近に伝わっていた応力の伝達が絶たれ、亀裂近くに設置したゲージ位置での X 軸方向のひずみが伝達されなくなり、それに伴い Y 軸方向にひずみ移行したと考えられる。亀裂長 10mm および 21mm のモデルになると、その傾向は顕著になっていることが確認でき、振動疲労試験の結果が再現出来ている。また、G1 ゲージ、G2 ゲージ位置ではそれほど顕著な影響を及ぼすまでには至っていない。

図 3.10 は、それぞれの亀裂長において、母材のどの範囲で Y 軸方向の応力値が X 軸方向の応力値を上回るかを検討した結果を解析モデル上にプロットしたものである。Y 軸方向の応力値が X 軸方向の応力値を上回っている箇所を赤色で着色している。亀裂長 1mm モデルや 2mm モデルでは、やはり亀裂の長さが短いので、(Y 軸応力値/X 軸応力値) の影響範囲はごく限られた範囲である。亀裂長 5mm のモデルでは亀裂位置から長手方向 (X 軸方向) に 7mm 程度まで (Y 軸応力値/X 軸応力値) の影響がみられ、亀裂長 10mm のモデルでは亀裂位置から長手方向に 13mm 程度まで (Y 軸応力値/X 軸応力値) の影響がみられ、加えて長手直角方向においても亀裂位置から離れるにつれて影響範囲が減少していることを確認した。亀裂長 21mm になると、かなりの広範囲において (Y 軸応力値/X 軸応力値) の影響を及ぼしていることが確認できる。

また、いずれのモデルにおいても長手方向に影響範囲が伸びているのが確認できる。この結果により、亀裂が発生することにより、X 軸方向の応力が開放され、Y 軸方向の応力が大きくなり、X 軸と Y 軸の軸方向応力値が逆転することを確認した。

各モデルにおける主応力方向の xy 平面への射影を図 3.11 に示す。図中の赤線は亀裂を、青線は主応力の方向を表示している。また、青線の長さは主応力の大きさを表しており、黒細線の交点はゲージの位置を示している。亀裂を有するモデルを見ると、2章で確認したように、亀裂先端から放射線状に主応力方向が向いていることが分かる。

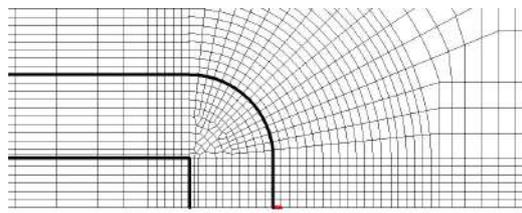
無亀裂モデルでは、すべてのゲージの位置において主応力方向はほぼ X 軸を

向いている。亀裂長が 1mm, 2mm に達すると、亀裂周囲 2~3mm 程度の範囲で主応力方向が Y 軸方向を向くようになるが、G3 ゲージの位置では亀裂の影響による主応力方向の変化は見られない。亀裂長が 5mm になると、亀裂の影響範囲が広くなり G3 ゲージ位置で主応力方向が Y 軸方向になるが、他のゲージ位置では大きな影響は出ていない。亀裂長が 10mm に達しても G1, G2 ゲージに大きな変化はないが、亀裂長が 21mm になると、G2 ゲージ位置において角度が X 軸方向から離れるように変化していることが分かる。

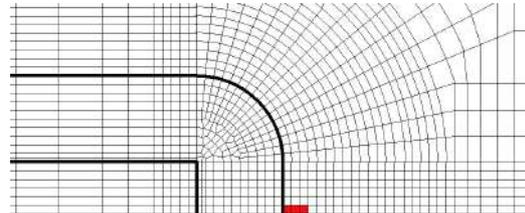
解析結果と振動疲労試験結果との比較のために、試験開始直後と試験終了直前の主応力方向を図 3.12 に示す。図中の赤線は亀裂を、青線は主応力の方向を表示している。また、青線の長さは主応力の大きさを表しており、黒点線の交点がゲージの位置を示している。図 3.11 と図 3.12 から、主応力方向に関して解析結果は試験結果と同様の傾向が見られることを確認した。しかし、G3 の主応力角度は解析と実験で大きく異なる結果となった。この要因の 1 つとして、最大亀裂深さを（最大亀裂深さ／亀裂長=1/2）と仮定しモデルを作成したことが考えられる。

表 3.2 各ゲージでの応力値(MPa)

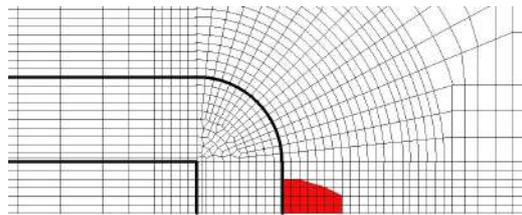
Analysis model	G1			G2			G3			G6
	X	Y	Y/X	X	Y	Y/X	X	Y	Y/X	X
Crack length 1mm	129.7	27.5	0.212	192.5	76.9	0.399	243.8	167.4	0.687	98.5
Crack length 2mm	130.0	27.6	0.212	193.0	77.1	0.399	213.9	167.0	0.781	98.4
Crack length 5mm	132.0	28.2	0.214	197.6	79.0	0.400	89.5	165.2	1.846	97.7
Crack length 10mm	138.5	29.9	0.216	211.5	83.9	0.397	24.8	143.5	5.786	95.5
Crack length 21mm	155.1	27.4	0.177	215.7	54.5	0.253	-54.7	212.1	-3.880	89.6



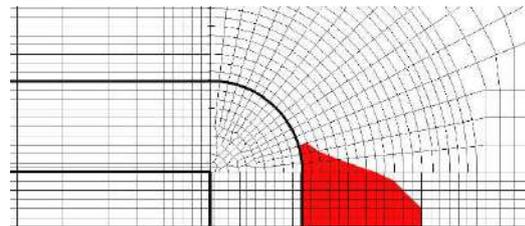
(a) Crack Length 1mm



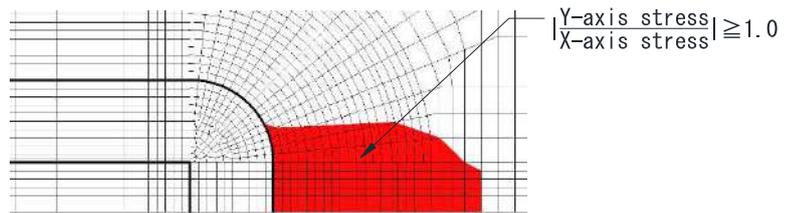
(b) Crack Length 2mm



(c) Crack Length 5mm

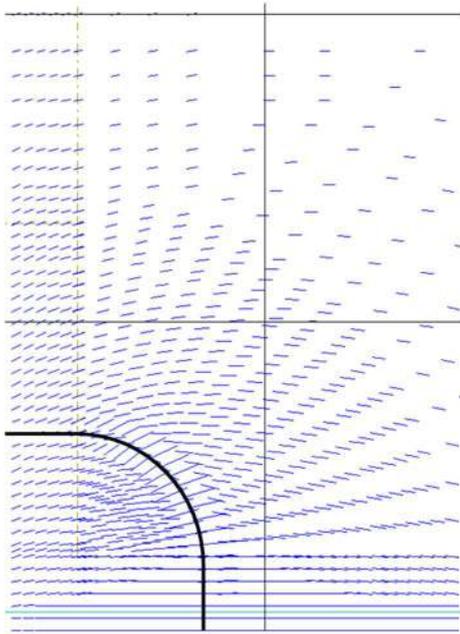


(d) Crack Length 10mm

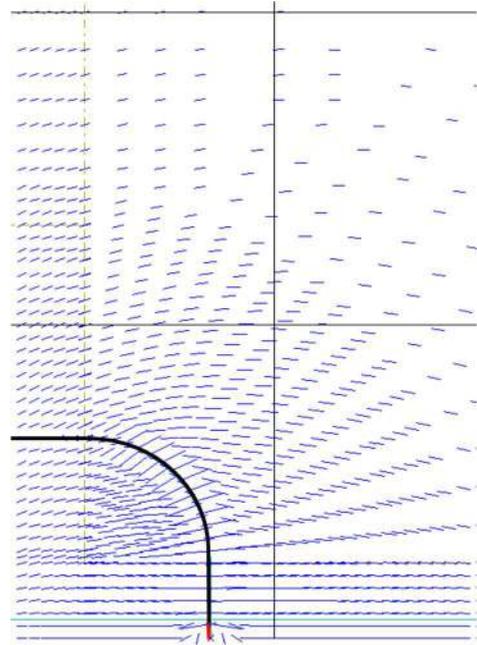


(e) Crack Length 21mm

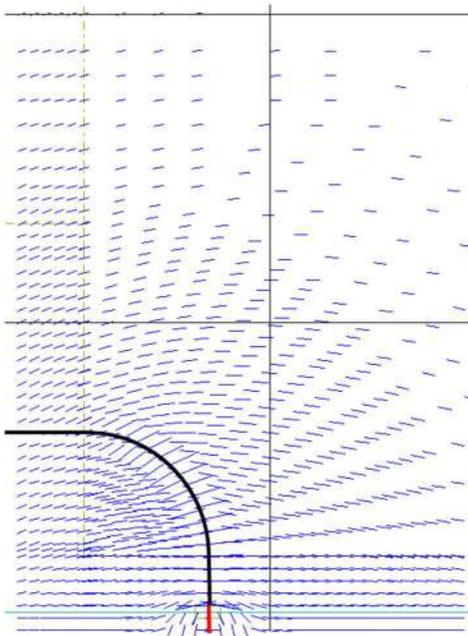
図 3.10 各モデルの亀裂付近の亀裂影響範囲
(Y 軸応力値/X 軸応力値>1)



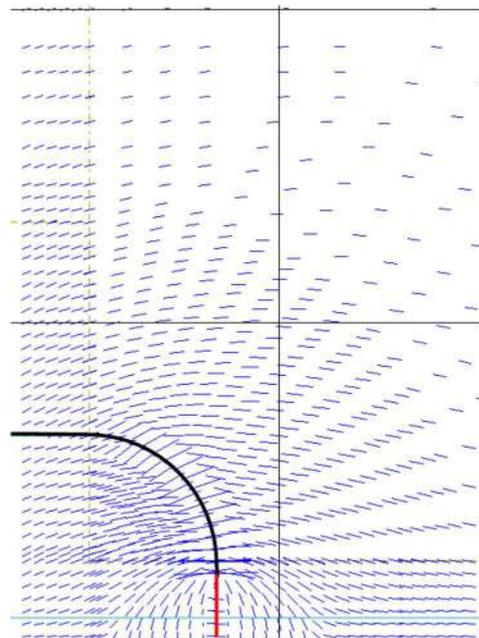
(a) 無亀裂



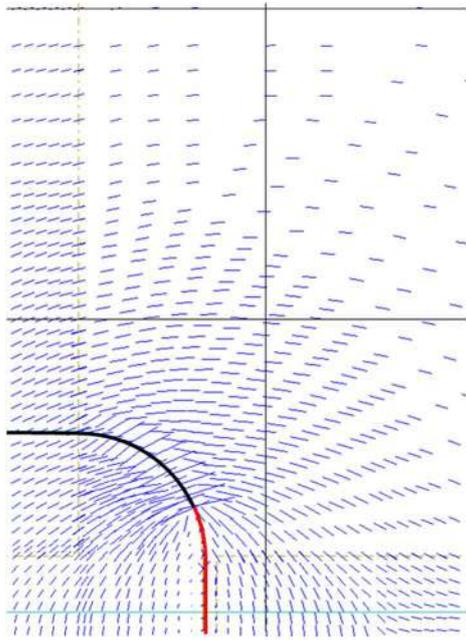
(b) 亀裂長 1mm



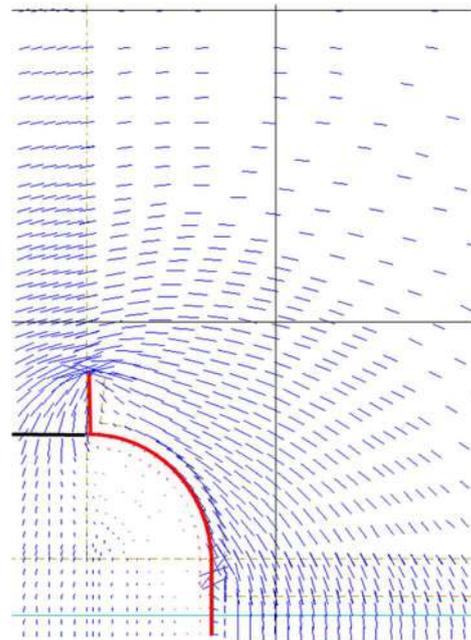
(c) 亀裂長 2mm



(d) 亀裂長 5mm

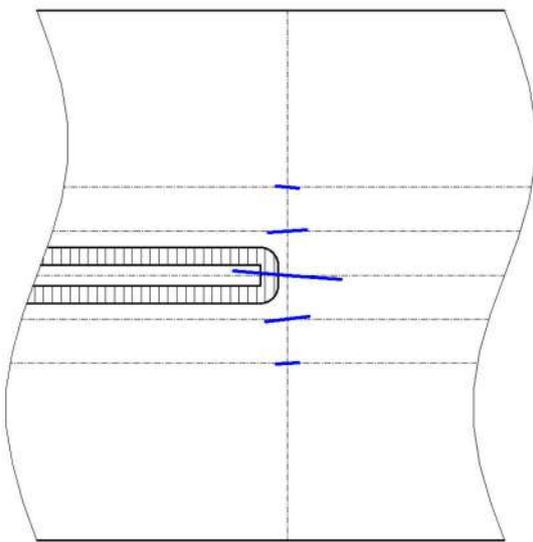


(e) 亀裂長 10mm

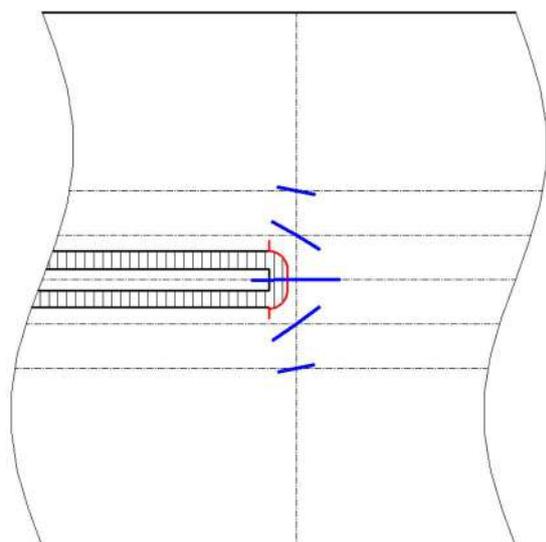


(f) 亀裂長 21mm

図 3.11 主応力方向



(a) 試験開始直後(無亀裂)



(b) 試験終了直前(亀裂長 21mm)

図 3.12 主応力方向 (実験結果)

3.4 鋼床版 U リブ溶接部を対象とした FEM 解析

3.4.1 解析モデル

解析モデルは図 3.13 に示すような鋼床版 U リブ試験体の一部分をモデル化した平面モデルとし、振動疲労試験機に固定している側の XYZ 変位および回転を拘束した剛結とした。また、面外ガセットの解析モデルと同様に、モデルはハーフモデルとし、境界の拘束条件を X 変位、Z 変位及び Y 軸周りの回転以外拘束とした。解析モデルの亀裂は、振動疲労試験結果の 2 方向の軸方向応力比の変化に基づき、U リブ溶接止端部から亀裂が進展していく過程を想定し、亀裂長を、無亀裂、1mm、5mm、12mm、18mm、30mm とし、亀裂深さを（亀裂深さ／亀裂長=1/2）としてモデルを作成し、それぞれのモデルにおいての亀裂周辺の応力の状態を確認した。検証を行いたい亀裂想定部（溶接止端部）周辺のメッシュサイズは 1mm を基本とし、母材の厚さ方向にも 1mm とした。各解析モデルの亀裂部の詳細を図 3.14 に示す。この図において、亀裂を赤い太線で示している。

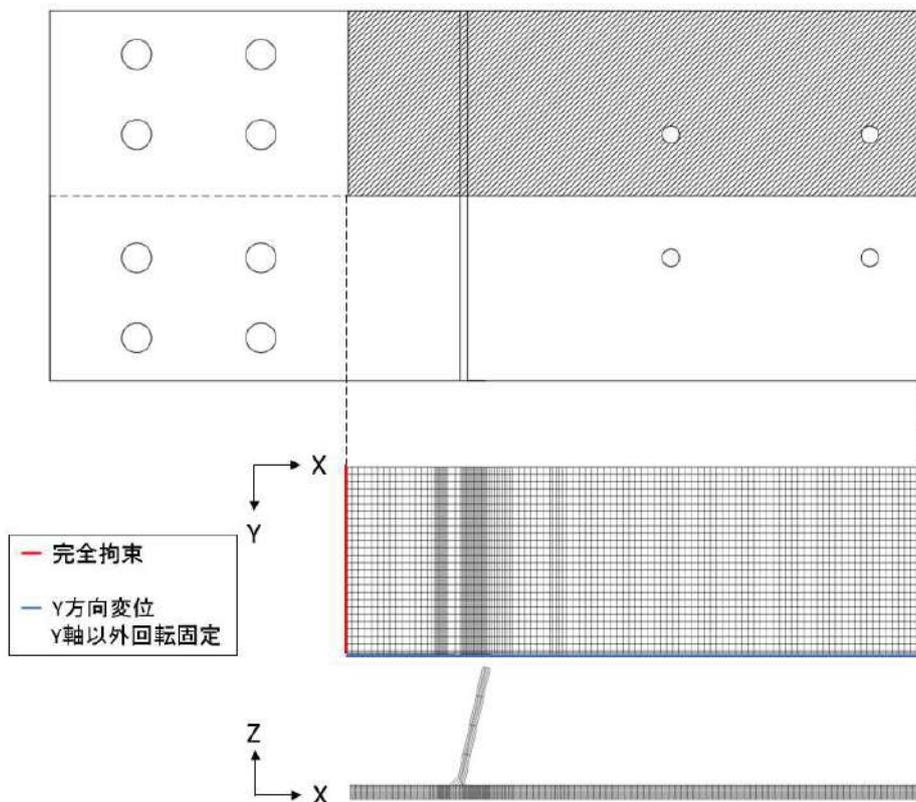


図 3.13 U リブ解析モデル

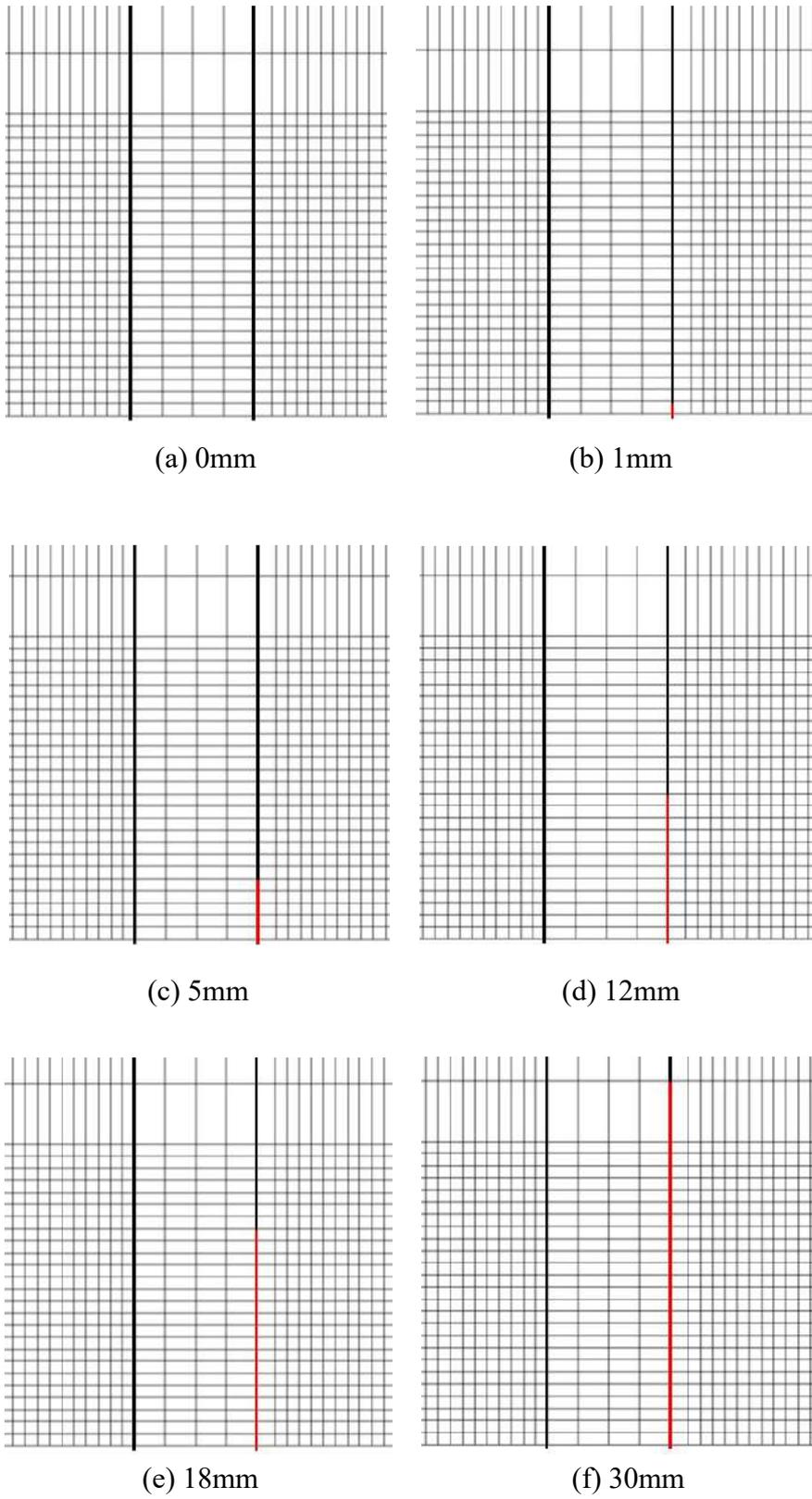


図 3.14 亀裂部詳細

3.4.2 解析結果

各モデルにおける 2 方向の軸方向応力比の影響範囲を図 3.15 に、主応力方向の xy 平面への射影を図 3.16 に示す。図中の赤線は亀裂を、灰色に着色した部分は応力比が 1 を超えた範囲を、青線は主応力の方向を示している。

まず、軸方向応力比の影響範囲について結果を述べる。無亀裂モデル、1mm モデルでは影響範囲は現れなかった。5mm モデルにおいては、小さい範囲ではあるが軸方向応力比の影響範囲が現れている。12mm モデルでは、5mm と比べ、長手方向 (X 軸) に影響範囲は広がっていないが、長手直角方向 (Y 軸) に若干広がっているのが分かる。18mm モデルでは、広範囲にわたって影響範囲が広がったのが分かる。G4 ゲージ位置においても軸方向応力比が 1 を超えていることが分かる。30mm モデルでは、さらに広範囲にわたり影響範囲が広がっていることが分かる。しかしながら、実験結果とは異なり、G2 ゲージ位置では軸方向応力比は 1 を超えていなかった。

次に、各モデルにおける主応力方向の解析結果について述べる。無亀裂モデルでは、すべてのゲージの位置において主応力方向はほぼ X 軸を向いている。1mm のモデルでは、ほとんど主応力方向が変化していなかった。5mm のモデルでは、亀裂に近い位置において角度が大きく変動していることが分かるが、ゲージ位置ではほとんど変動していない。12mm のモデルでは、さらに広範囲にわたり主応力方向が変動しており、G2 ゲージ側でも変動を確認できる。18mm では、G4 の位置で主応力方向が亀裂を避ける向きになっている。G2 ゲージ側でも G2 ゲージ位置ではないが亀裂先端付近において、溶接部から 5mm 離れた位置でも角度が変動していることが分かる。

各モデルにおける解析の結果から、亀裂が深く進展した場合、G4 ゲージ側における溶接部周辺の応力比及び主応力方向、G2 ゲージ側の溶接部周辺における主応力方向の変化が確認できた。これは、実験結果と同様な傾向を示していると言える。これより、鋼床版 U リブ溶接部のリブ外側において応力比、角度の増加、変動が計測された場合、内部での亀裂は深く進展していると考えられる。

しかしながら、解析と実験結果を比べた時、2 方向の軸方向応力比、主応力方向の変化の傾向は同様であったが、その値の大きさは等しいとは言えなかった。これは、振動疲労試験において、試験終了時の亀裂の長さを正確にとらえることができなかったこと、また、動的解析ではなかったことが原因であると考えられる。実際に、実験と解析のリブ外側の溶接止端部から 5mm 離れた位置での 2 方向の軸方向応力比を比べた場合、亀裂長が 30mm の場合でもリブ外側では 1 に近づきはするが最終的には 1 には届かなかった。今後は、亀裂長、深さなどをビ

一チマーク試験により測定し、FEM 解析の再現度を高くする必要があると考える。

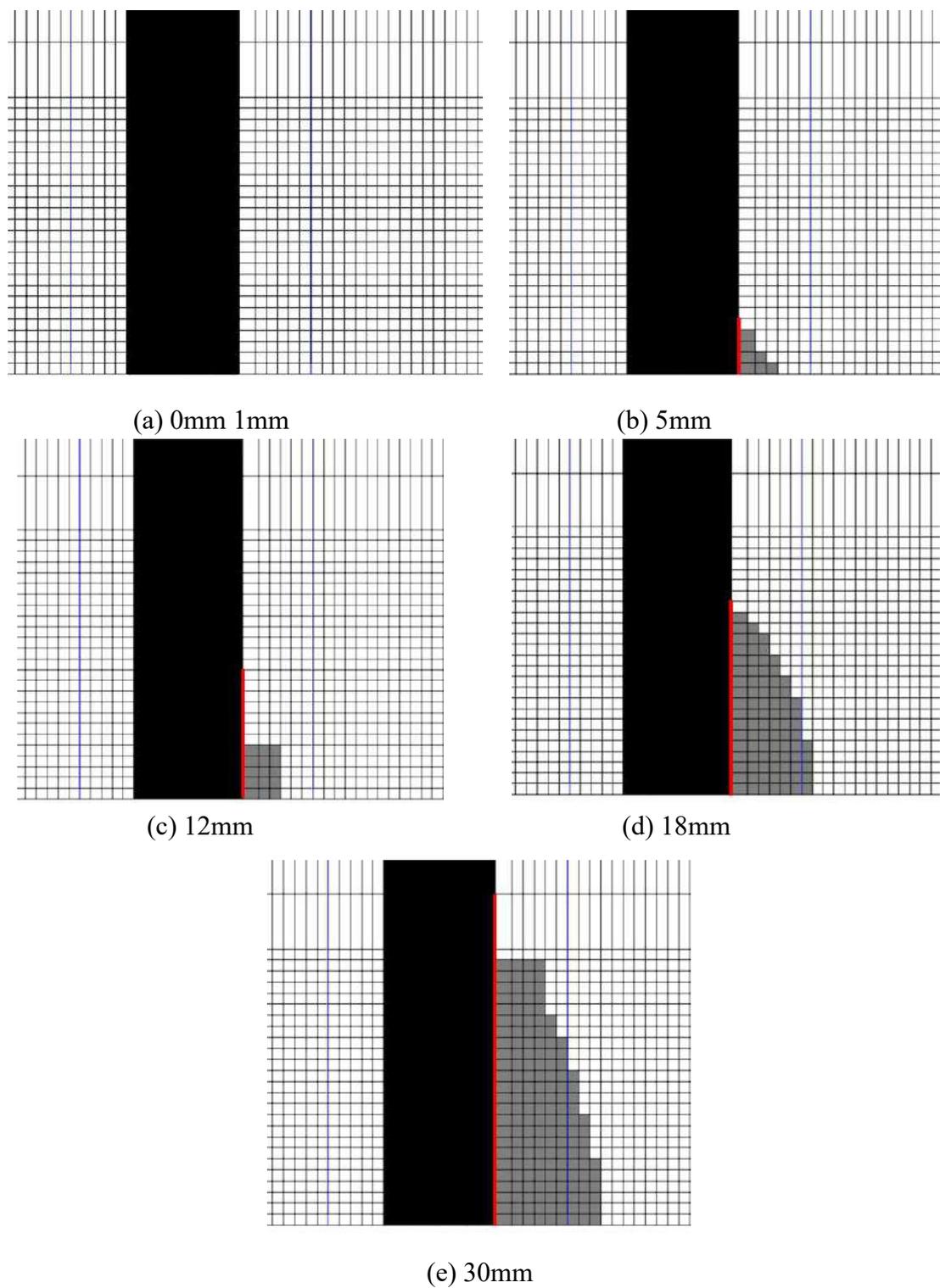
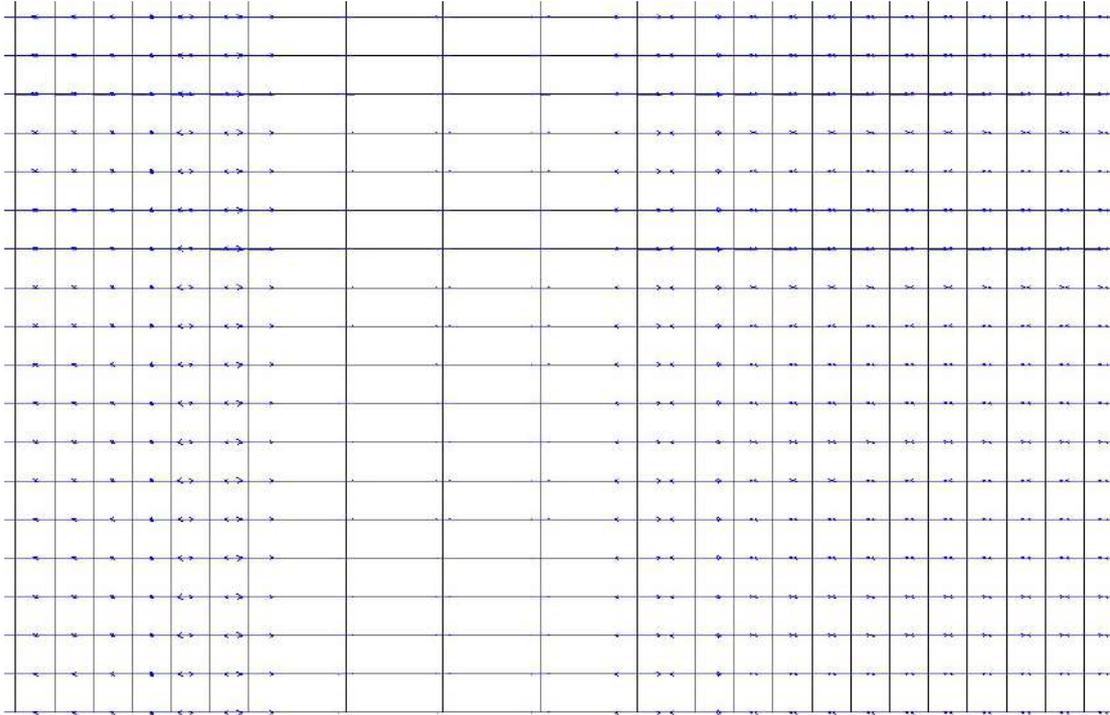
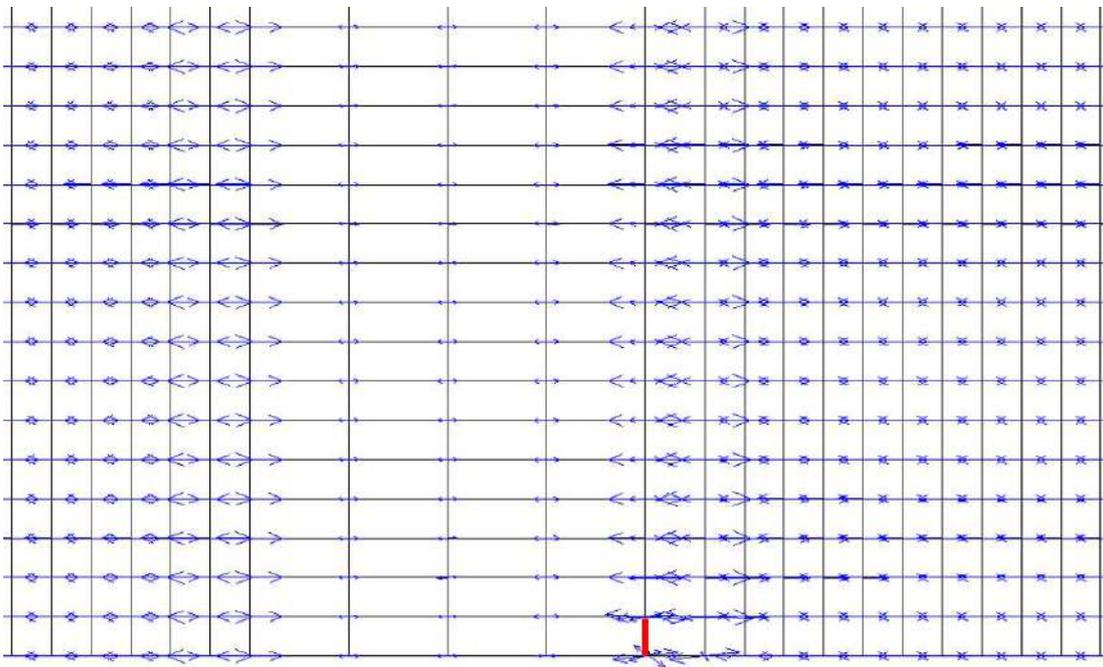


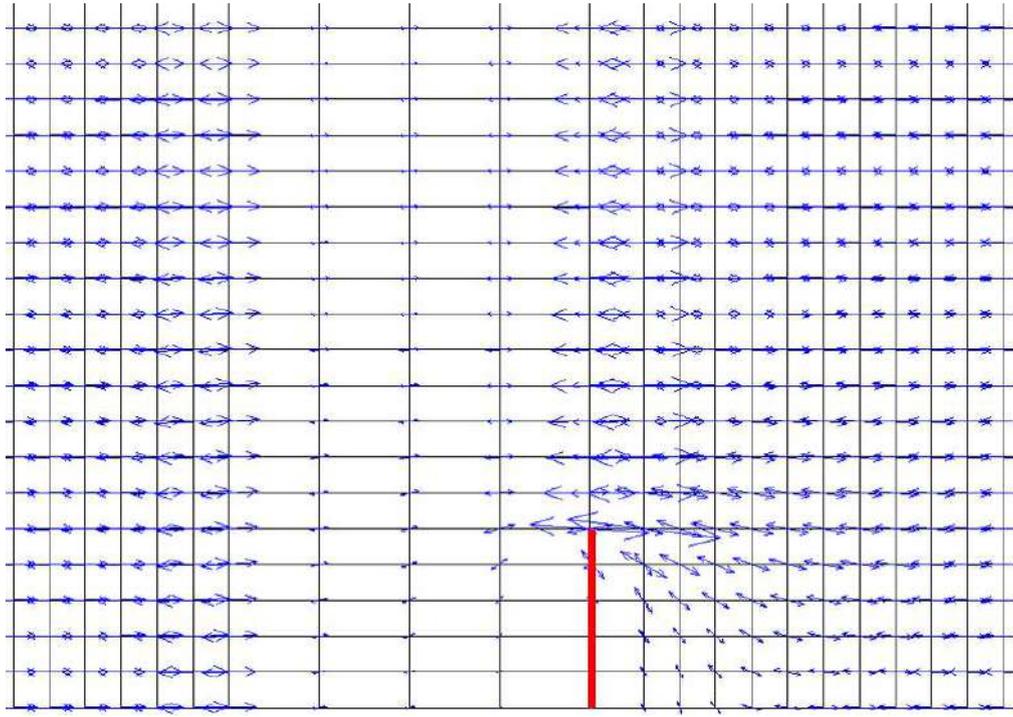
図 3.15 軸方向応力比の影響範囲 (Y 軸応力値/X 軸応力値 $>$ 1)



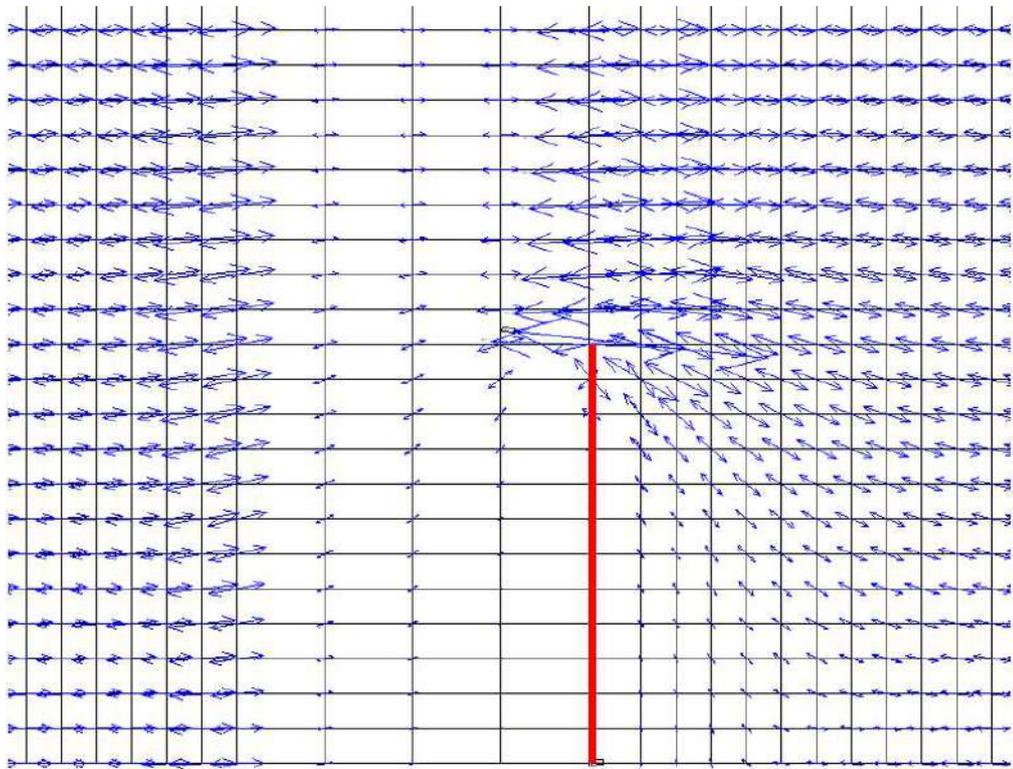
(a) 0mm



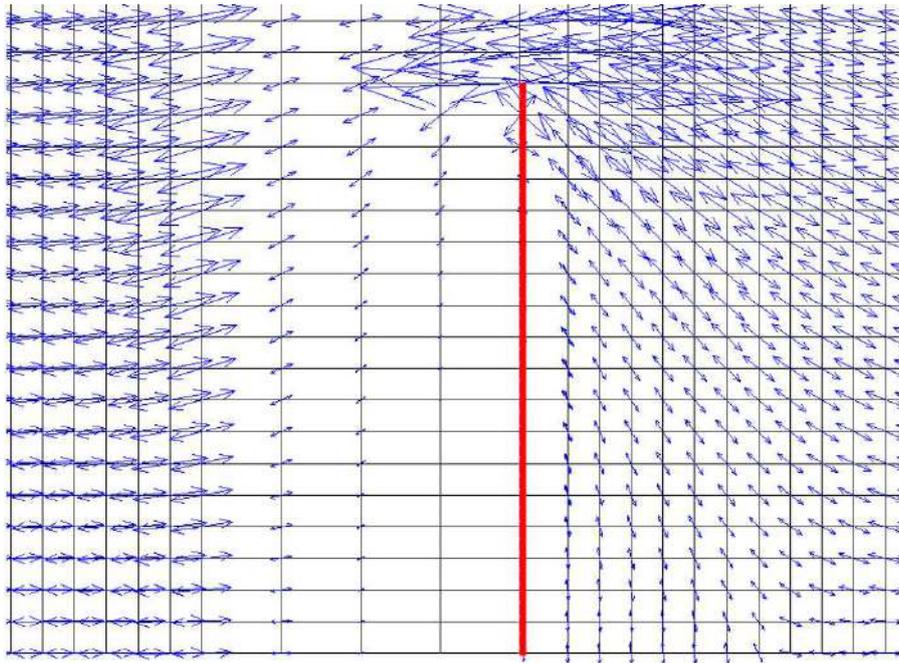
(b) 1mm



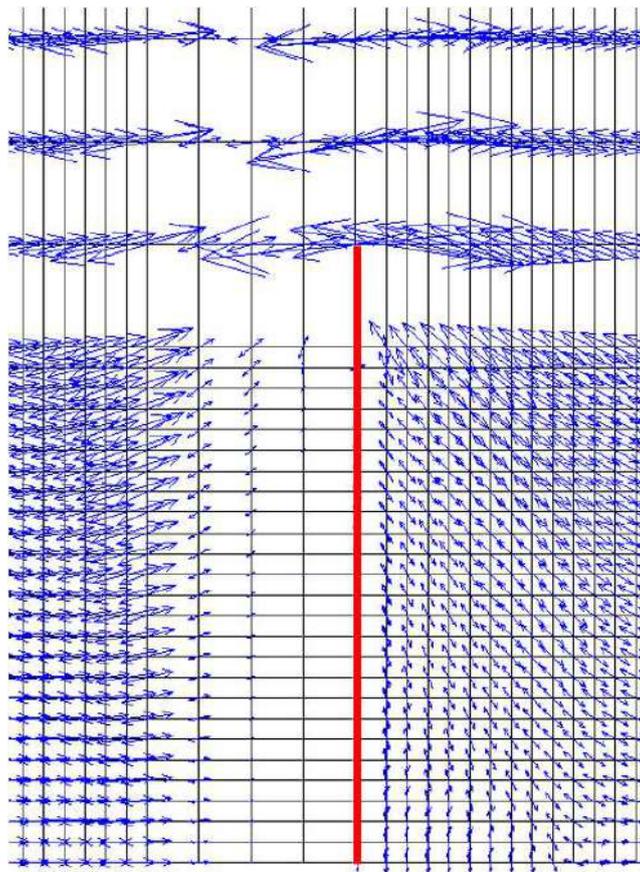
(c) 5mm



(d) 12mm



(e) 18mm



(f) 30mm

图 3.16 主应力方向

第4章

摩擦型ひずみゲージを用いた静的載荷試験

4.1 摩擦型ひずみゲージの概要

実橋での応力の測定を考えた場合、一般的な接着型ひずみゲージを用いての測定では、鋼橋では表面に塗装などの防食処理が施されているため表面の防食被覆物を除去し、鋼材素地を出さなければならない。そのため、ひずみ測定後には鋼材にもう一度、補修塗装などの防食処理を行う必要がある。このことにより、疲労亀裂の発生が疑われる箇所が複数ある場合、作業時間が長期化することが考えられる。そこで、本章ではひずみの測定にあたり使用するひずみゲージを摩擦型ひずみゲージに置き換えて計測を行うことができないか検討を行った。

摩擦型ひずみゲージの外観を図 4.1 に示す。摩擦型ひずみゲージはマグネットで受感部を測定部に押し当て、境界面に発生する摩擦によってひずみを測定するものである。そのため、通常の接着型のひずみゲージと異なり、測定箇所の下地処理やゲージの接着作業、計測後の補修塗装が不要であるため作業の大幅な短縮が期待できる。

本章では H 型の梁の曲げ試験を行い、そのひずみを接着型ひずみゲージと摩擦型ひずみゲージの両方で測定し値を比較、検証した。



図 4.1 摩擦型ひずみゲージ

4.2 試験体概要

試験に用いた H 形鋼の断面寸法は JIS G 3192 に規定される 150mm×150mm (高さ×辺) 用い, 全長は 2000mm とした. 試験体の様子と寸法を図 4.2 に示す. H 型の梁には載荷点であるスパン中央と支点部のウェブには試験中の座屈や梁のねじれを防ぐために垂直補剛材を配置して補強した.

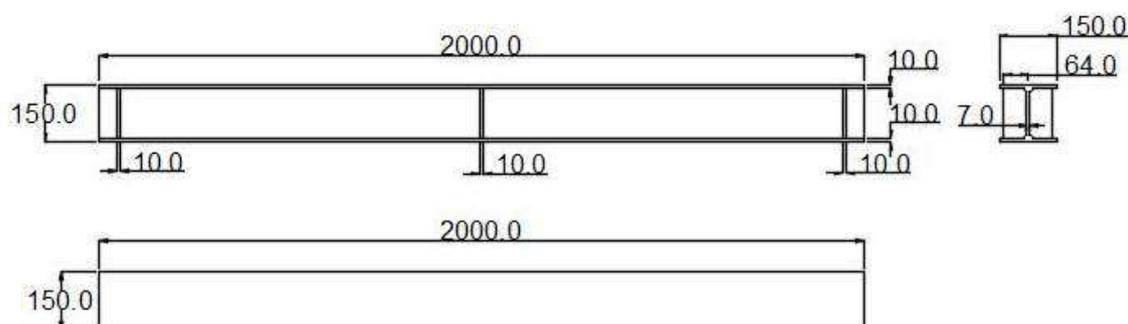
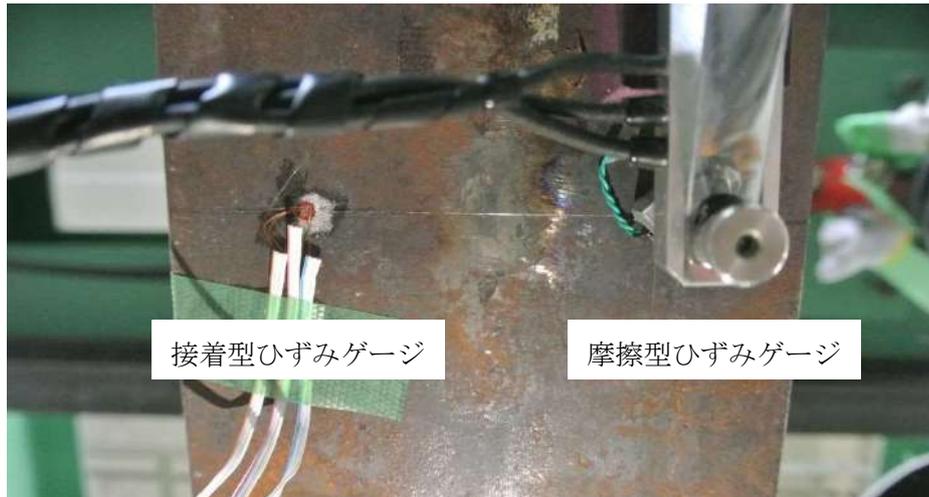
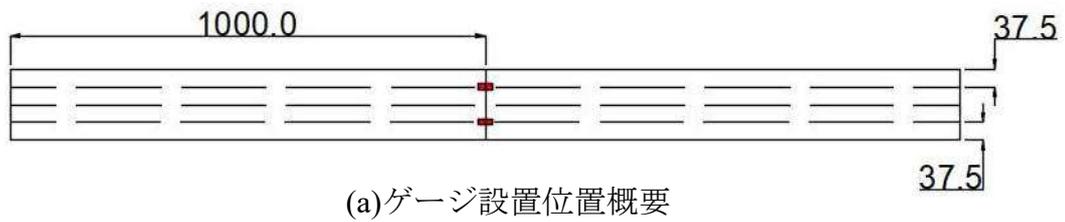


図 4.2 試験体概要

4.2 試験概要

試験は 3 点曲げによる静的載荷を採用した. 支点条件は単純支持とし, 支間長は 1900mm とした. 試験はスパン中央のたわみが $L/500$ ($=3.8\text{mm}$) となるまでとした.

ひずみゲージの設置位置とその様子を図 4.3 に, 試験体設置の様子を図 4.4 に示す. ひずみの測定はスパン中央の下フランジ下面において行い, 長手直角方向に端部から 37.5mm の位置に接着型と摩擦型をそれぞれ取り付けた. ひずみゲージは両方とも三軸タイプを用いて行い, 長手方向, 長手直角方向のひずみ値を測定しそれぞれの値の比較を行った.



(b)ゲージ設置状況

図 4.3 ひずみゲージ設置位置



図 4.4 試験体設置の様子

4.4 試験結果

測定された試験結果を図 4.5 に示す。測定結果から接着型と摩擦型でひずみの値は、長手直角方向においてほぼ同様の値を示していたが、長手方向において多少の値の差がみられた。これは、ひずみゲージの設置位置が載荷点の直下であり局所的な変位が生じていたこと、計測箇所の錆を除去しておらず凹凸を帯びたことで、一方のゲージが設置面より多少滑ったため生じた差であると考えられる。

長手方向のひずみの値には若干差が生じる結果となったが、梁のたわみに伴う値の変化においては同様の傾向が得られた。

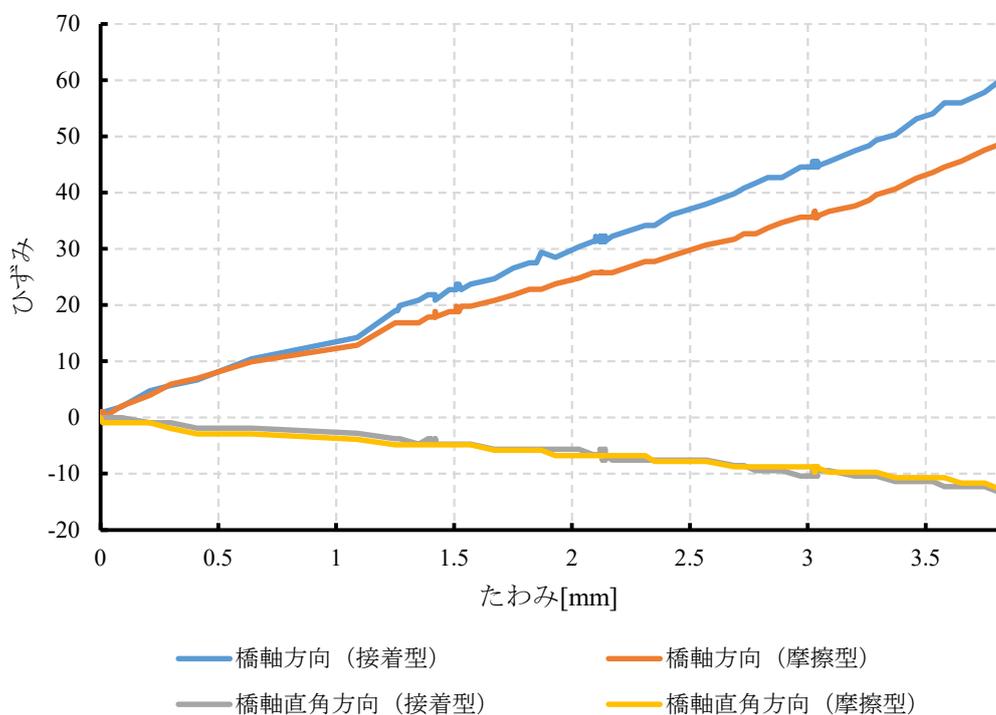


図 4.5 静的試験結果

4.5 接着型ひずみゲージと摩擦型ゲージの差

今回の試験より接着型ひずみゲージと摩擦型ひずみゲージの計測値を比較した結果、多少の差異は見られるが、ほぼ同様の結果が得られた。本研究で検討を行っている X 軸および Y 軸の軸方向応力値を比較しようとした場合、摩擦型ひずみゲージを使用して検討することは可能と考える。

摩擦型ひずみゲージの接触点が小さいことから、測定部が著しい凹凸を帯びている場合や、曲面である場合には正しい値が取れない可能性があるため、計測箇所の事前確認は必要と考える。しかし、塗装面上からの計測が可能であることや接着剤が不要で何度でも繰り返し使用できること、取り付けに際し専門的な作業が不要である事は、簡易にひずみの計測を可能としているといえる。さらに従来のひずみゲージのように鋼材表面の塗膜の除去を行わないことは、鋼部材の防食機能の劣化を防ぐことであり、維持管理上においても非常に有用であると考えられる。

第 5 章

輪荷重走行試験

この章では、大阪大学大学院の吉波氏の修士論文より、摩擦型ひずみゲージを使用した輪荷重走行試験及び定点載荷疲労試験の実験結果のデータを使用して、摩擦型ひずみゲージの有用性について検証を行った。以下に当時の実験の概要を示す。

5.1 試験概要

1.3.2 項に記したように、鋼床版 U リブ溶接部における疲労亀裂には、U リブ溶接部のルート部からデッキプレートへ進展・貫通する亀裂 (デッキプレート貫通型)、U リブ溶接部のルート部から溶接ビード部へ進展する亀裂 (溶接ビード部貫通型) がある。本研究ではデッキプレート貫通型亀裂を対象とし、これを再現するために実物大鋼床版モデルを用いた輪荷重走行試験を実施した。

輪荷重走行試験機を図 5.1 に示す。この試験機は橋軸方向に 2000mm の範囲で荷重を載荷したまま毎分 30 往復程度の移動速度で往復運動する。この試験機により、道路橋床版上を走行する車両の移動輪荷重に近い荷重載荷状態を再現している。

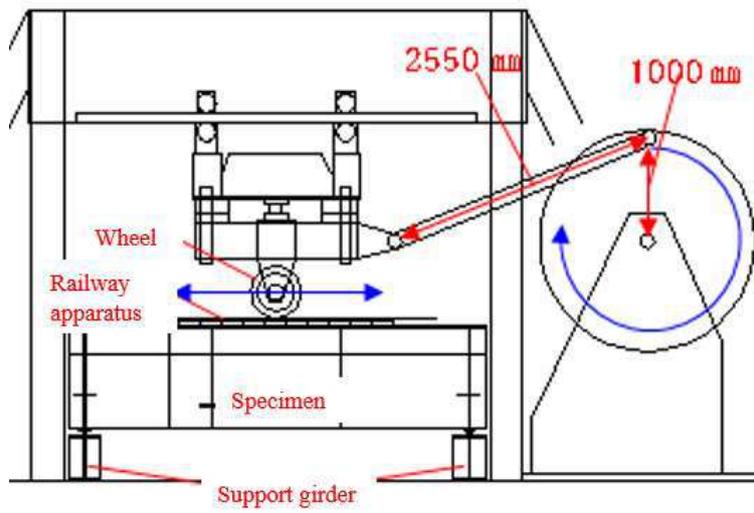
輪荷重走行試験機の車輪には耐久性を確保するために鉄輪を使用しているため、試験体に載荷した場合、線荷重を載荷することになる。そこで試験体上面に図 5.2 に示す橋軸方向 200mm、橋軸直角方向 190mm の鉄製の載荷ブロックを床版上面に多数並べ、その上を鉄輪が走行することで面荷重を再現できるようにしている。載荷ブロックの上には車輪の走行面の平滑性を確保するために厚さ 12mm の鉄板を設置した。設置状況を図 5.3 に示す。さらに衝撃の緩和や騒音の防止、載荷板と床版上面の摩耗防止のために載荷板と鉄板、載荷板とデッキプレートの上に厚さ 5mm のベニヤ板を挟んでいる。以下、これらの機材を軌道装置と呼ぶ。

また、軌道装置の設定・載荷位置を図 5.4 に示す。この載荷位置は既往の研究によりデッキプレート貫通型亀裂の誘発に成功している。

載荷荷重は T 荷重 98kN を考慮し、117.6kN とした。試験体の支持条件は、試験体の主桁と端部の横リブが交差する 4 点で主桁下フランジと支持桁上フランジの間に丸鋼を用いて固定している。



(a) 輪荷重走行試験状況



(b) 輪荷重走行試験機概要

図 5.1 輪荷重走行試験機

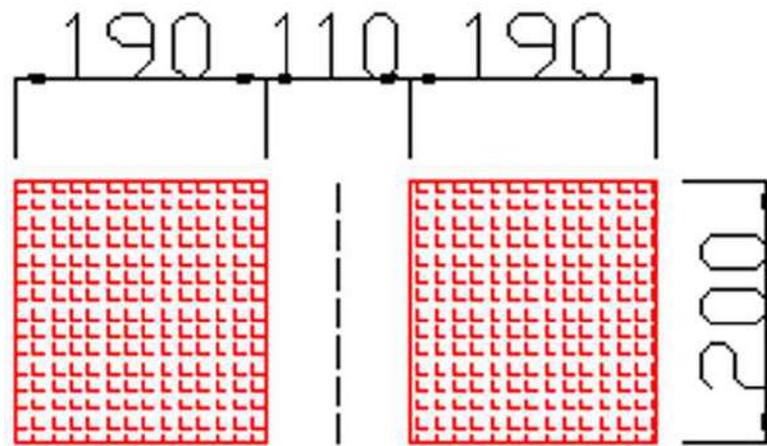


図 5.2 载荷ブロック

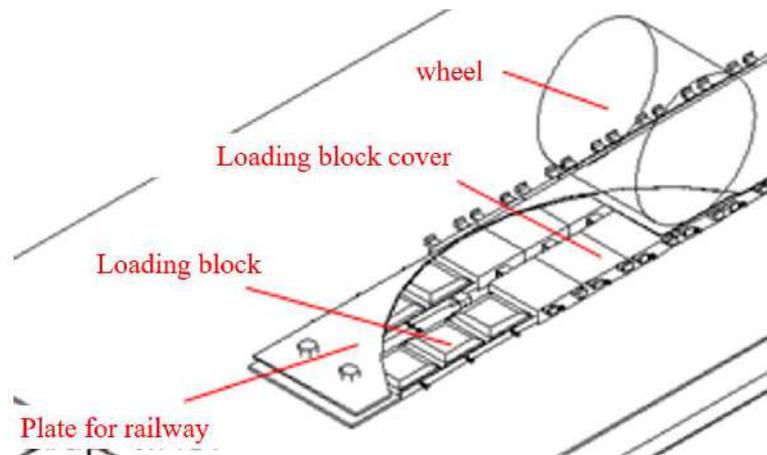
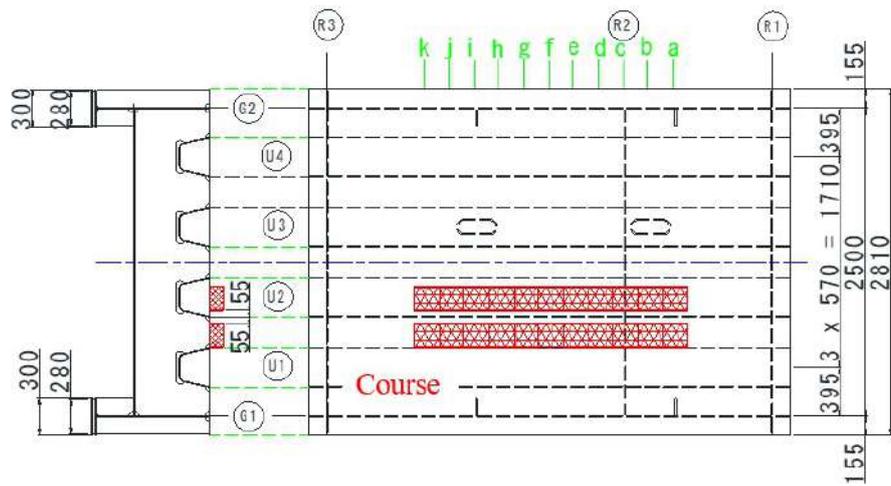
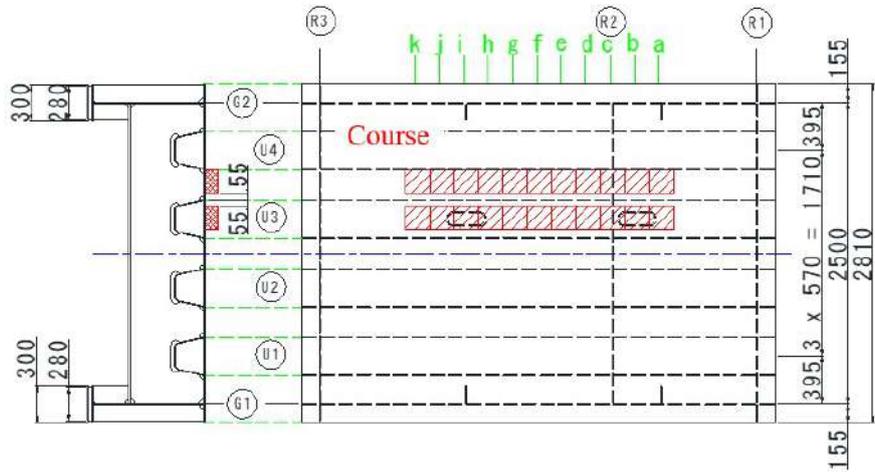


図 5.3 軌道装置設置概要



(a) 試験体 1



(b) 試験体 2

図 5.4 軌道装置設置及び走行位置

5.2 試験体概要

輪荷重走行試験において使用した試験体の詳細を図 5.5, 図 5.6, 表 5.1 に示す. Uリブを 4 本, 横リブを 3 本有しており, 試験室に搬入可能な限り実橋に近い寸法で製作した. また, 一部の横リブ支間部を 2380mm とし, 輪荷重走行試験機の走行範囲内に位置するように製作している. 試験体は 2 体作成し, 試験体 1, 2 とした. 試験体 1 は U リブ・デッキプレート溶接部の溶け込み量を 20~40%程度, 試験体 2 は 75%以上としている. その他の詳細は同一である. また, U リブの一部, U3 リブ底面にハンドホールを設けており, U リブ閉断面内にひずみゲージを貼り付けた後, カバープレートをも溶接により取り付けた.

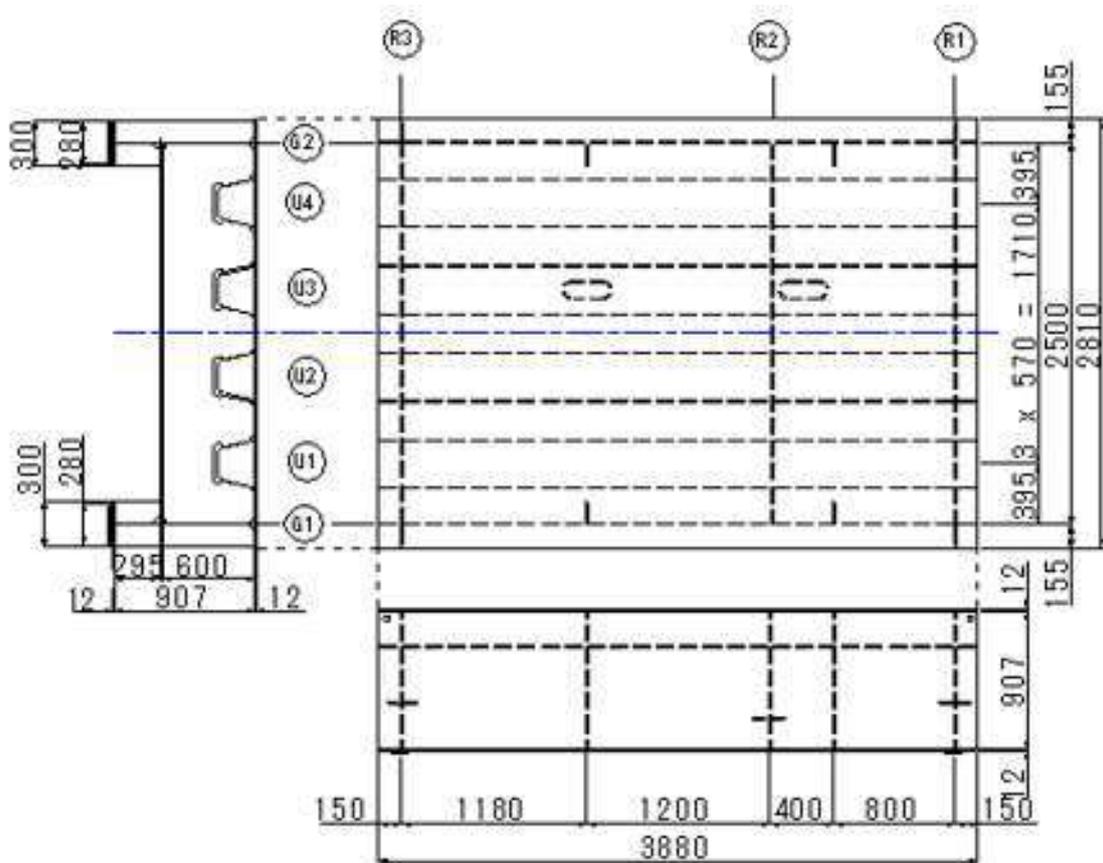


図 5.5 試験体概要 (試験体 1, 2)

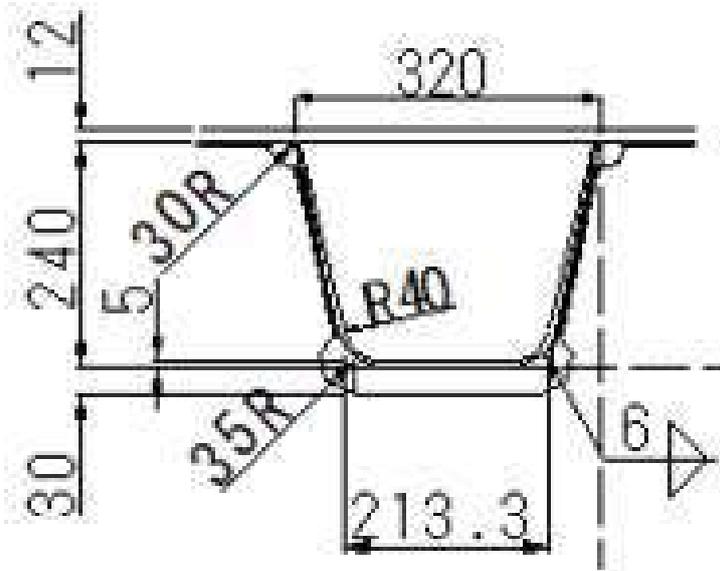


図 5.6 Uリブ断面図

表 5.1 主部材詳細

Member	Measurement
Deck plate	12
U-rib	320 × 240 × 6-R40
Lateral rib (G1, G3)	web:600 × 10 flg:200 × 12
Lateral rib (G2)	web:700 × 10 flg:200 × 12
Main girder	web:907 × 10 flg:300 × 12

5.3 ひずみゲージ貼付け位置

輪荷重走行試験において図 5.7 に示すように 200mm 間隔で 11 断面設定し, 特に c 断面 (横リブとの交差部), f 断面 (試験体の中心), i 断面 (横リブ支間中央部) に対して静的載荷試験を実施した. この時の各部のひずみを計測するために, 図 5.7 に示す断面のうち b, c, d, f, i の 5 断面にひずみゲージを設置した. これらの断面のうち, 今回は c 断面 (横リブとの交差部) に着目した. 軌道装置を設置したリブ U2 と U3 近傍におけるひずみゲージの貼り付け位置を図 5.8 に示す. また, 図 5.9 に示す位置では図 5.8 に示す同一の位置から 10mm 程度離れた位置に別のひずみゲージ (3 軸) を貼り付け, 輪荷重走行下における動的計測を実施した.

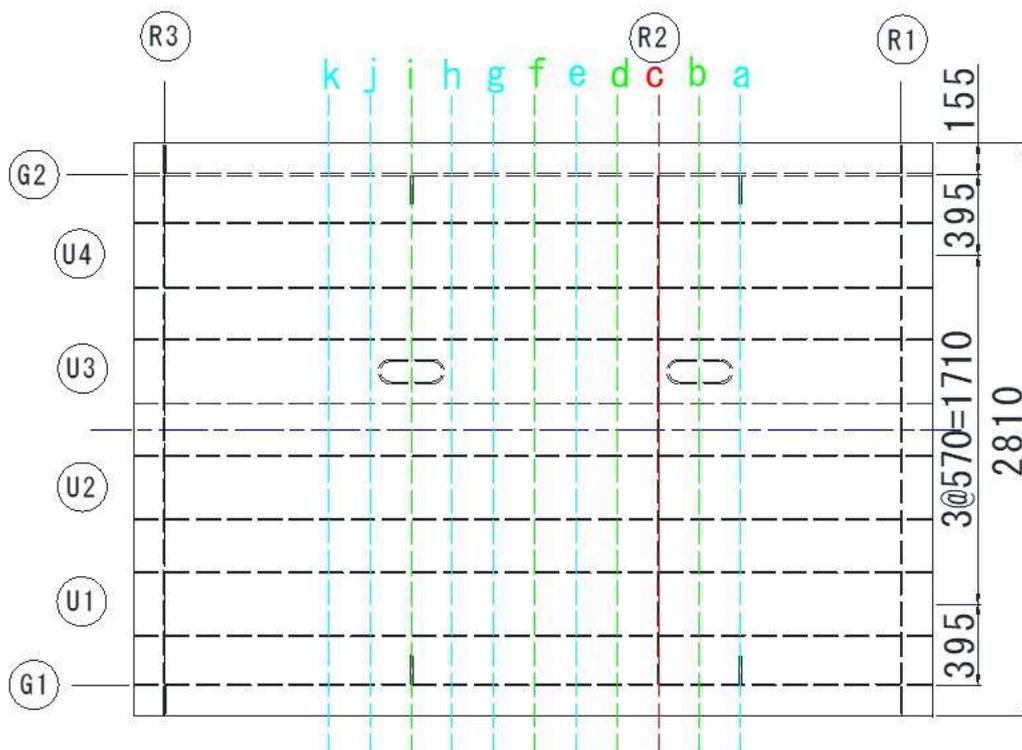


図 5.7 計測断面 (試験体 1, 2)

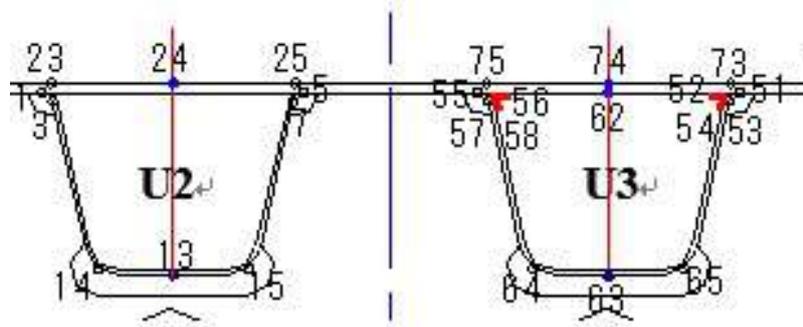
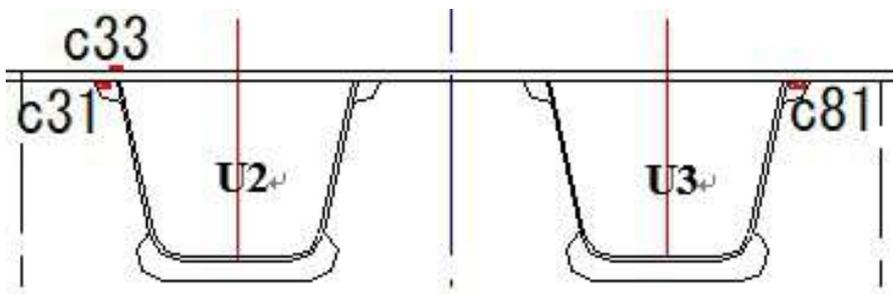
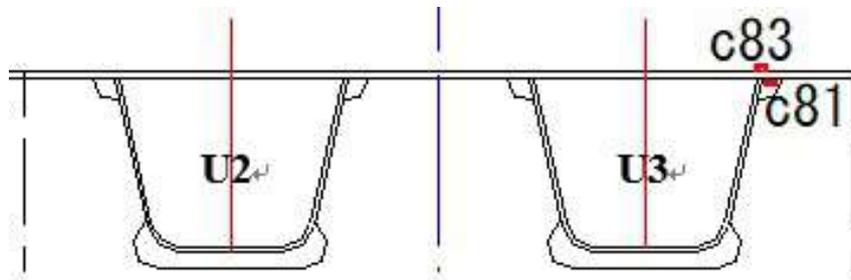


図 5.8 ゲージ位置 (試験体 1, 2)



(a) 試験体 1



(b) 試験体 2

図 5.9 3 軸ひずみゲージ位置

5.4 試験結果

5.4.1 疲労亀裂発生位置

試験体 1 では荷重回数 261 万回時にデッキプレート上面のひずみゲージの値が急激に変化したため、デッキプレート上面を確認したところ、疲労亀裂が確認された。位置は c 断面周辺、荷重ブロックで挟み込んだ溶接部上である。亀裂の発生位置・状況を図 5.10 に示す。亀裂は c 断面から 80mm 進展したものと、その延長線上に 214mm 進展したものの 2 本確認された。疲労亀裂が確認された位置の直下の溶接部に磁粉探傷試験を実施したが、亀裂は確認されなかった。そのため、この疲労亀裂がデッキプレート貫通型亀裂と判断できる。また、同時期に実施した自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法によれば荷重回数 60 万回付近で図 5.10 に示す位置でデッキプレート貫通型亀裂と判断できる応力集中部の移動が確認されている。サーモグラフィで計測された亀裂は、確認された右側の長さ 80mm の亀裂と思われる。なお、その他の溶接部及びデッキプレート上面では亀裂は確認されなかった。

試験体 2 では 126 万回でハンドホール・カバープレート溶接部から発生した亀裂が U リブ溶接止端部まで到達したため試験を打ち切った。荷重試験終了時に U リブ溶接部及びデッキプレート上面に対して磁粉探傷試験を実施したが亀裂は発見されなかった。

また、亀裂が発生すると予想していた位置及び荷重初期、試験終了時の荷重回数 126 万回の際に実施した自己相関赤外線サーモグラフィの計測結果を図 5.11 に示す。これより、荷重回数 126 万回付近でデッキプレート貫通型亀裂と判断できる応力集中部の移動が確認された。

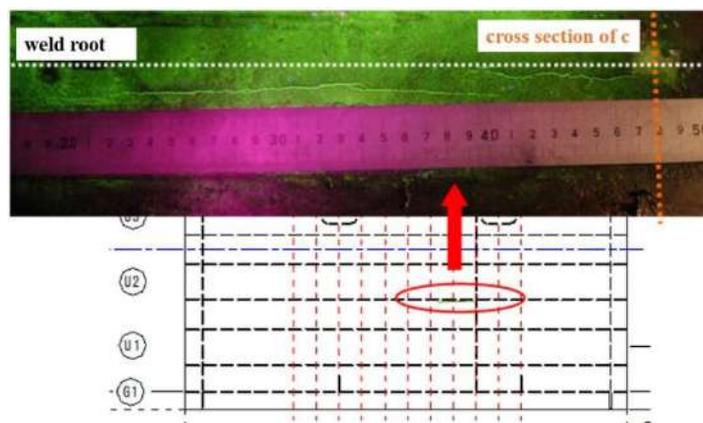
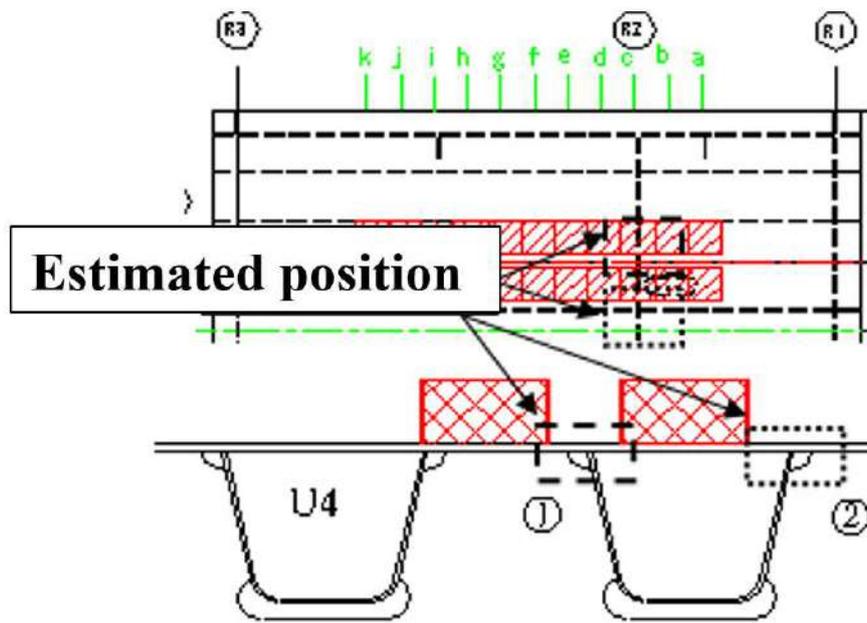
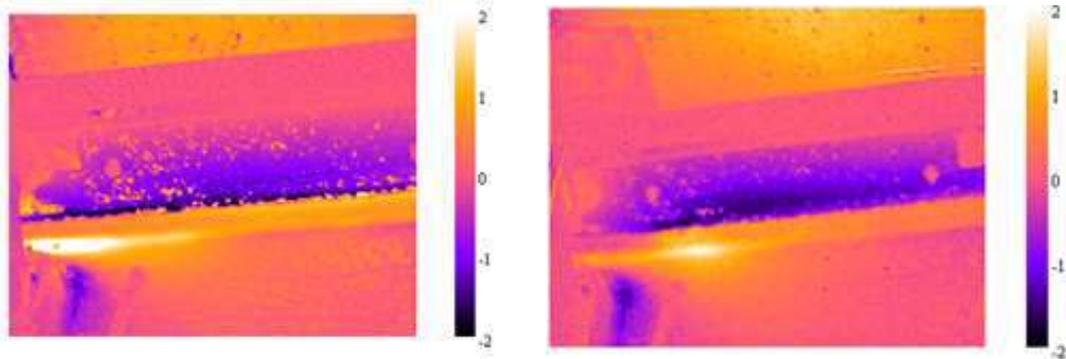


図 5.10 デッキプレート上に発生した疲労亀裂（試験体 1）



(a) 亀裂発生予想位置



(b) 試験開始時 (①)

(c) 1,260,000回 (①)

図 5.11 亀裂発生予想位置と赤外線サーモグラフィの結果 (試験体 2)

5.4.2 亀裂発生位置周辺の応力値の経時変化

各試験体の動的計測によって得られた結果のうち、c31、c81の橋軸直角方向及び橋軸方向の応力値を載荷回数別に示した図を図5.12、13に示す。なお、a断面の位置を-400mm、c断面の位置を0mm、k断面の位置を1600mmとした。

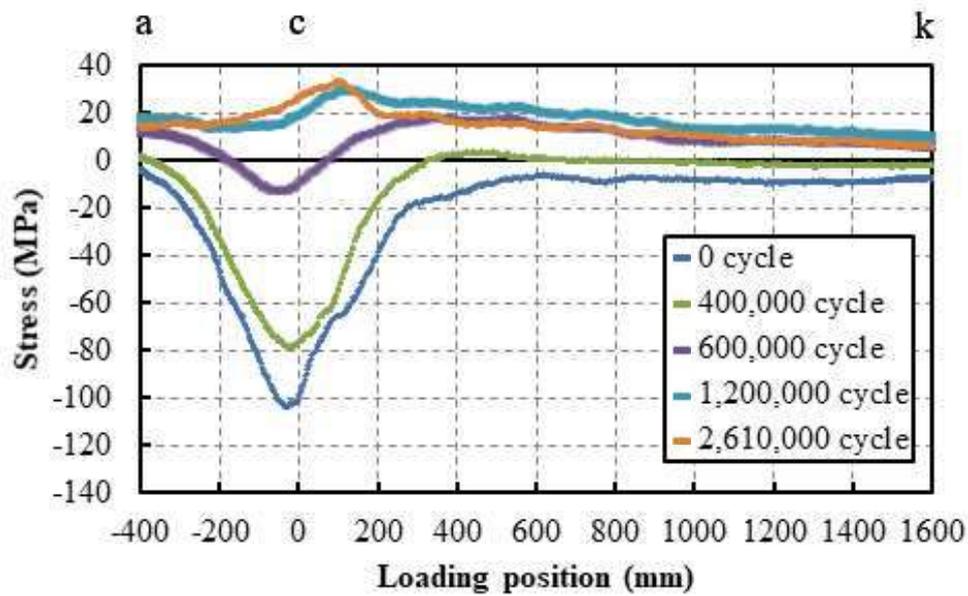
図5.12の橋軸直角方向の応力値を見ると、載荷回数を重ねるにつれ、圧縮側支配の挙動が引張側支配へと変化していることが確認できる。また、図5.13の橋軸直角方向の応力値では、試験体1のように圧縮側から引張側の支配へと変化はしなかったものの、応力値が徐々に減少する傾向が確認できる。

各試験体の輪荷重走行下に計測されたc31、c81の橋軸直角方向及び橋軸方向の応力値と載荷回数の関係を図5.14に示す。これは、図5.12、13より各走行回数で橋軸直角、橋軸方向の応力値がc地点前後で最も変動している点をまとめたものである。橋軸直角方向の応力値は疲労亀裂が発生し、進展するに伴い、応力値は減少した。さらに、試験体1からは応力値が引張側になった後、一定の値になる傾向が見られる。これは、亀裂が発生、進展し、亀裂の先端がc31の位置から離れ、この位置付近の応力が解放されて応力値が減ったためであると考えられる。

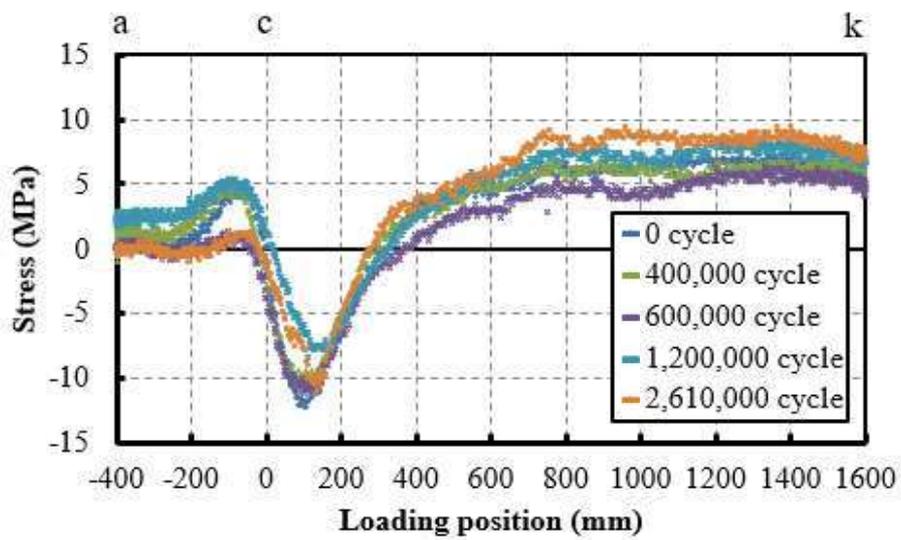
橋軸方向、橋軸直角方向の発生応力の大きさの図を示したが、前述している通り亀裂周辺では亀裂により応力が開放されてしまい、その応力値のみでは判断することができず、その部材に載荷されている荷重を用いて部材の応力値を判定しなければ難しい。また、亀裂が発生した場合、主応力は亀裂を避けるような向きになるため、亀裂の発生していない状態と比べ、亀裂発生箇所近傍の主応力方向に変化が生じる。

これを利用し、本試験においても橋軸直角方向、橋軸方向の軸方向応力値の比を取ることで亀裂の進展過程を確認しようとした。そのグラフを図5.15に示す。2章及び3章より亀裂の有無の判定を比が1に近付いたときとしている。図より、試験体1では60万回のときにその比が1に近付いているため、亀裂が発生していると判定できる。自己相関赤外線サーモグラフィ法の結果でも同時期に亀裂の判定ができていたため、この方法は有用であると言える。試験体2では比が1に近い値とはならなかった。これは、試験体2はUリブの溶接ビードからの亀裂ではなく、ゲージ位置から離れたハンドホールからの亀裂であることが原因であると考えられる。しかし、経時的に軸方向応力比を取ることで、どちらも60万回辺りから変化しており、亀裂の発生が確認できた。

これらより、鋼床版Uリブにおいても軸方向応力比を確認することで亀裂の有無を判定することができると思われる。

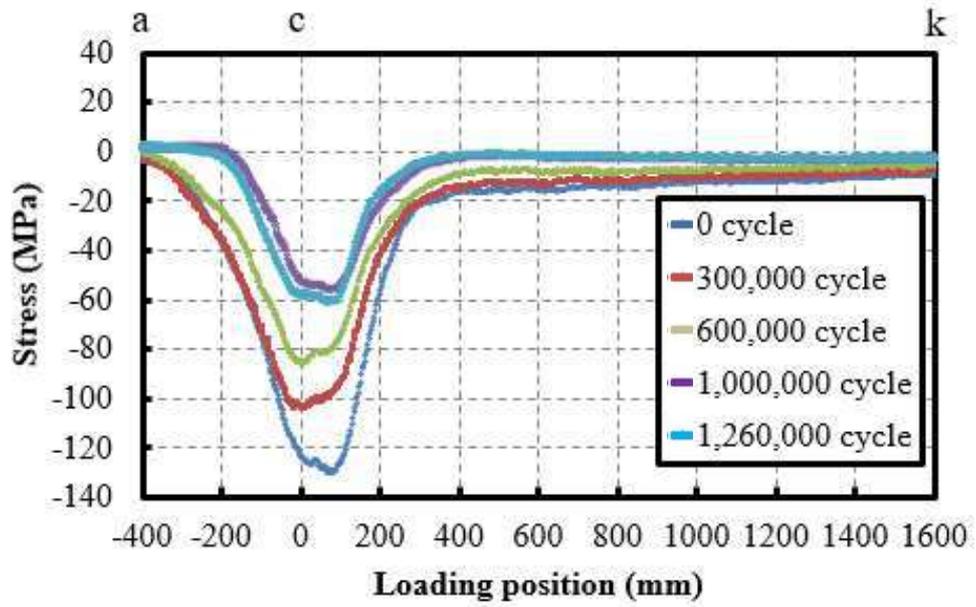


(a) 橋軸直角方向

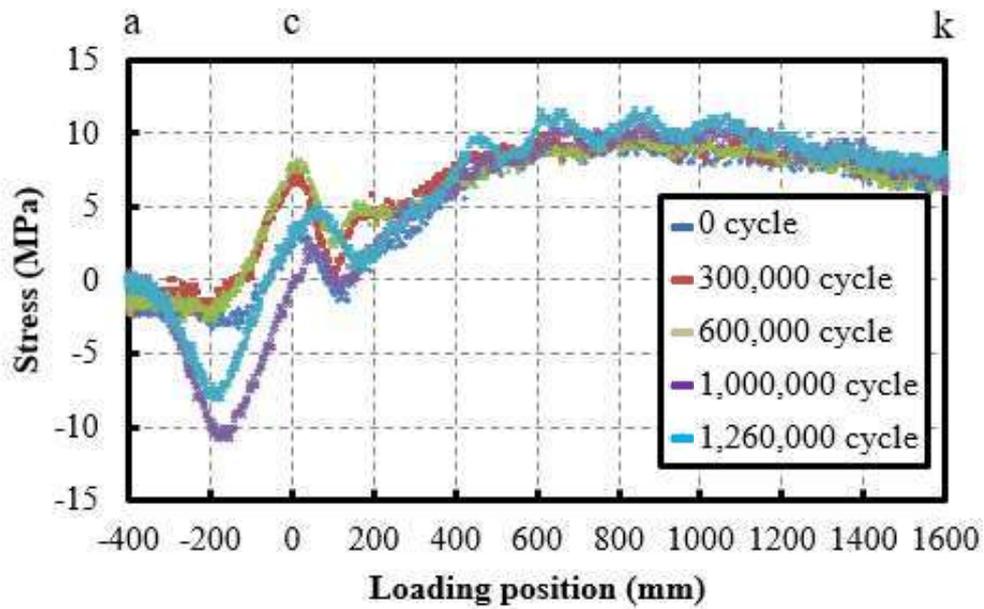


(b) 橋軸方向

図 5.12 発生応力値 (c31 試験体 1)

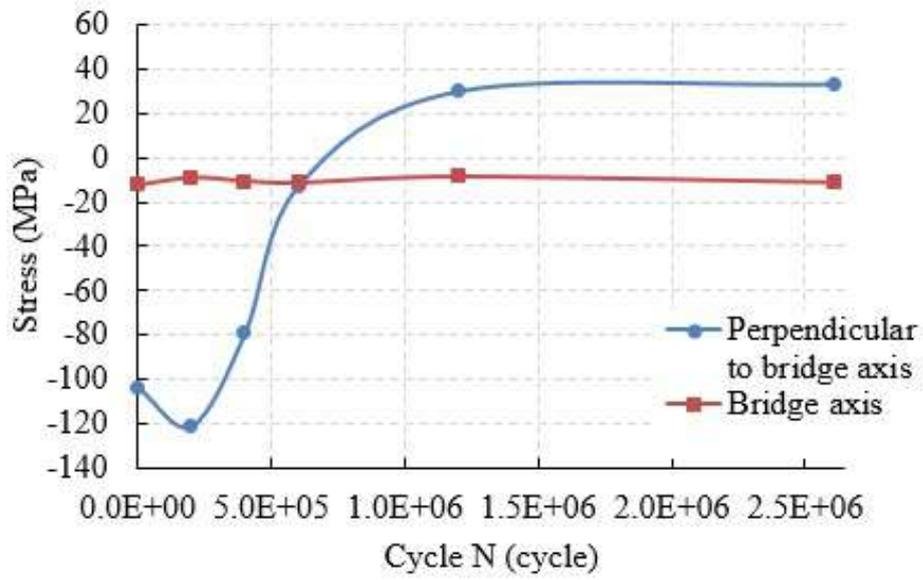


(a) 橋軸直角方向

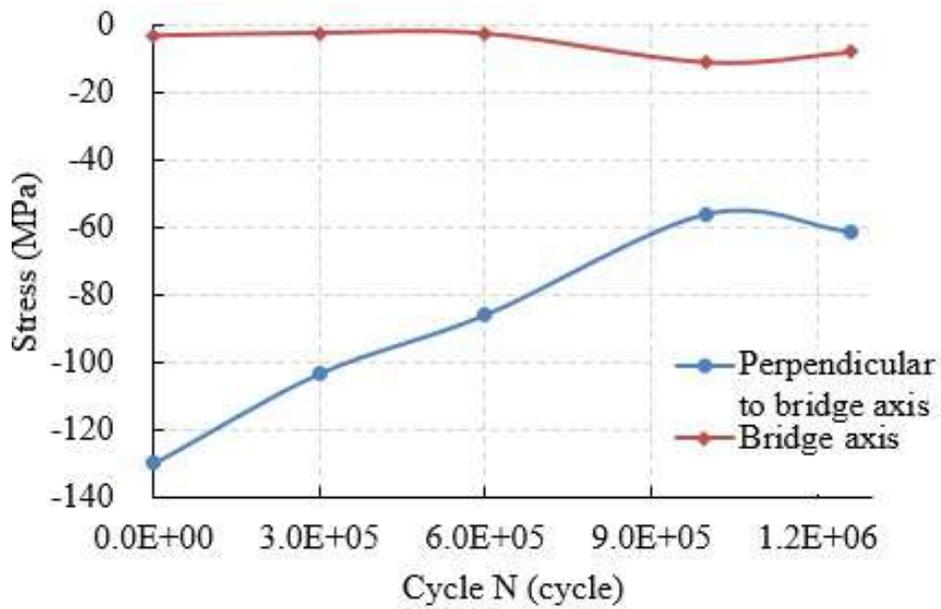


(b) 橋軸方向

図 5.13 発生応力値 (c81 試験体 2)

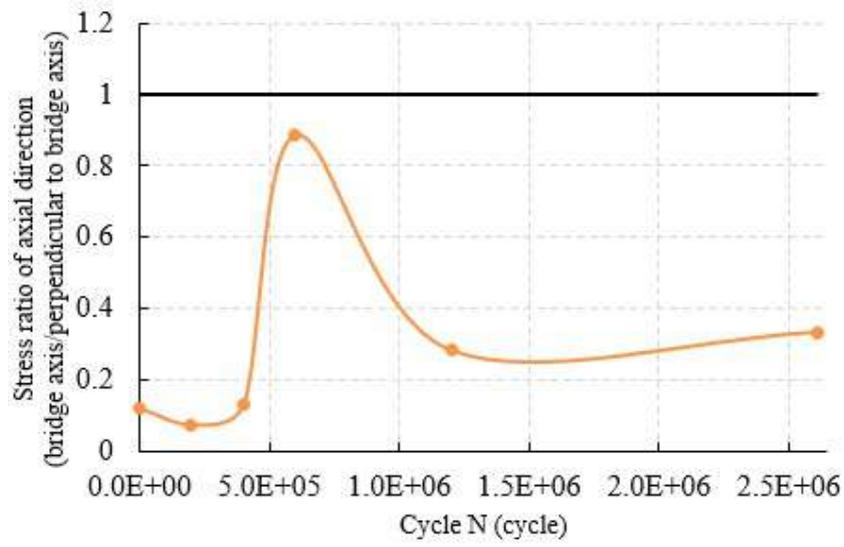


(a) 試験体 1 (c31)

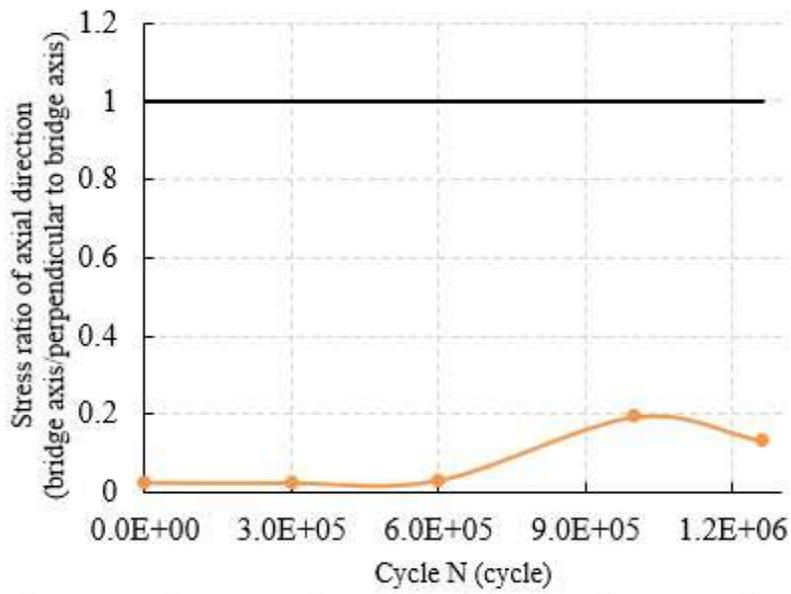


(b) 試験体 2 (c81)

図 5.14 軸方向応力値



(a) 試験体 1 (c31)



(b) 試験体 2 (c81)

図 5.15 軸方向応力比

第 6 章

結論

鋼構造物に劣化が生じた場合には、早期の発見と適切な対処が求められる。鋼構造物の劣化要因の 1 つである疲労に着目すると、疲労亀裂を対象とした点検は溶接継手を中心に目視点検が行われ、亀裂損傷が疑われた場合には必要に応じて種々の非破壊検査を併用し、亀裂損傷の有無を確認している。しかし、亀裂の発見は点検者の技量及び経験に左右され、亀裂の見落としは起こりうる。そこで、技量や経験に左右されず、簡易かつ客観的に疲労亀裂を発見できる手法として、溶接部周辺の応力比を確認することで亀裂の有無を判断するという手法を検討した。

実験には、面外ガセット溶接継手及び鋼床版 U リブ溶接部を模した試験体を用い振動疲労試験を行い、その結果を参照し FEM 解析を行った。以下に、その結論を示す。

振動疲労試験

- (1) 面外ガセット溶接継手試験体及び鋼床版 U リブ溶接部を模した試験体による振動疲労試験により、疲労亀裂の発生、進展時の溶接部周辺における長手方向 (X 軸方向)、長手直角方向 (Y 軸方向) の 2 方向の軸方向応力の変化を明らかにした。
- (2) 亀裂の発生、進展に伴い、X 軸方向の応力値が減少し、その後 Y 軸方向の応力値が変動した。ここで、絶対値としてこの 2 方向の軸方向の応力値を見ると、Y 軸方向の応力値の変動量に比べ、X 軸方向の応力値の減少量が大きいことから、相対的に、2 方向の軸方向応力比が増加することを明らかにした。
- (3) 亀裂の進展に伴い、亀裂の発生する側 (リブ側) のゲージ位置において応力値の変動、応力比の増加を計測でき、ある程度亀裂の発生点、進展方向を特定することが可能であることを明らかにした。
- (4) U リブ鋼床版は閉断面であるため、亀裂発生点に最も近いリブ内側 (本研究でいう G4 ゲージ側) にひずみゲージを設置することが困難である。しかし、亀裂の進展に伴いリブ外側においても内側と同様な応力比の変動を確認できたため、設置が容易なリブ外側にひずみゲージを設置し発生応力を計測することで亀裂の有無を判定できることを明らかにした。
- (5) 本手法では、疲労亀裂が板厚方向に貫通する前に計測することが可能であることを明らかにした。
- (6) 主応力方向も併せて確認することでも亀裂の発生・進展の判定の補助的役割を果たすことを明らかにした。

FEM 解析

- (1) 簡易的な引張モデルにおける亀裂周辺の軸方向の応力状態の検討より，亀裂の有無，その大きさに伴い X 軸方向と Y 軸方向の応力値の大きさが増減することを明らかにした。
- (2) FEM 解析より，亀裂の進展により溶接部周辺での応力が乱され，軸方向応力比が増加する傾向を明らかにした。
- (3) 面外ガセット溶接継手モデルの解析において，亀裂が発生する可能性が高い位置において亀裂の長さがある一定値（本モデルにおいては 5mm）に達した場合，各軸方向の応力値の大きさが増減し，それらの比（Y 値/X 値）を確認することで亀裂の有無を判定できる事を示した。
- (4) 解析モデルでのそれぞれの亀裂長において，亀裂周辺の軸方向応力比（Y 値/X 値）を確認し，逆転している影響範囲を示した。
- (5) 応力比の変動から亀裂の発生点・進展をある程度判定可能であることを明らかにした。
- (6) 溶接部周辺の主応力方向が亀裂の進展に伴い変動する傾向を明らかにした。

H 型鋼静的載荷試験

- (1) H 型鋼を用いた静的載荷試験において，接着型ひずみゲージと摩擦型ひずみゲージの計測結果に大きな差はないことを明らかにした。
- (2) 接着型ひずみゲージと摩擦型ひずみゲージの計測結果の傾向は同様であるため，軸方向の応力比を取ることでどちらの場合でも同様な結果を得られることを明らかにした。

輪荷重走行試験

- (1) U リブを溶接した鋼床版の輪荷重走行試験における結果より，それぞれの軸方向の応力比を取り無次元化することは，輪荷重走行試験においても疲労亀裂の有無を簡易に判断可能であることを明らかにした。

本研究の結論をまとめる。

長手方向（X 軸），長手直角方向（Y 軸）の軸方向応力値の比を取り無次元化し，荷重を考慮せず亀裂の有無を判断する本手法で，面外ガセット溶接継手や U リブ溶接部を対象とした場合でも亀裂の有無の判定が可能であり，目視点検や非破壊検査の補助的な手段となり得ることを明らかにした。さらに，デッキプレ

一ト貫通亀裂のような表面からは測定が困難な内部亀裂に対しても適用できることを明らかにした。

また、本手法では、2方向の軸方向応力比を取り亀裂の有無の判定をしたが、同じ部材上での計測であるため、直接ひずみゲージから計測できるひずみ値を使用して比を取ることで更に簡易に亀裂の有無の判定が可能であると考えられる。

既往のひずみ測定などでは初期値などと比較し、変動状態、経時変化などを考慮しなければならないが、本手法を用いることで、仮に初期値や経時変化を記録していない場合でも、計測時に比がある閾値を超えていれば亀裂が発生していると判断することができる。

本手法において、事前に測点を計画しても亀裂の発生位置や進展状況によっては比の影響範囲外となり、亀裂の有無を判断することが困難となる。接着型ひずみゲージを使用した場合、ゲージ数や下地処理・補修の関係上、計画していた測点以上の計測を行うことは難しいため亀裂の見落としが考えられる。しかし、摩擦型ひずみゲージを使用した場合、下地処理、接着、補修といった専門的な作業や技量がほとんど必要なく、簡易かつ任意に測点を変更できるため、比の影響範囲を捉え亀裂の見落としを防ぐことができる。また、前述したように荷重を考慮せず比の値で亀裂の有無を判断するため、計測時間・間隔を任意に設定することも可能である。

よって、この摩擦型ひずみゲージを使用して、本手法を適用することは有用であるといえる。

参考文献

1. 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3.
2. 国土交通省 道路局：橋梁定期点検要領，2014.6.
3. 国土交通省 東北地方整備局：道路施設の老朽化の現状：
http://www.thr.mlit.go.jp/road/panel/panel_web3/panel_all_p00.html
4. 宮里心一，深田宰史，伊藤始，鈴木啓悟，花岡大伸：北陸地方の市町における道路橋の維持管理の合理化に向けた地元大学の取組み，
5. 東北地方整備局 道路部：東北地方における橋梁老朽化対策の取組み，2015.4
6. 国土交通省 国土技術政策総合研究所：橋梁の架替に関する調査結果(IV)，国土技術政策総合研究所資料 No.444，2008.4.
7. 名取暢，西川和廣，村越潤，大野崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析，土木学会論文集，No.688，I-54，299-311，2001.1
8. 社団法人日本鋼構造協会：重防食塗装，2012.2.
9. 国土技術政策総合研究所：損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する研究，2010.9.
10. 時田英夫，永井政伸，三木千壽：交通データをベースとした首都高速道路の疲労環境の評価，土木学会論文集 No.794，2005.7.
11. 日本道路協会：鋼橋の疲労，1997.5.
12. 土木学会：鋼構造シリーズ 19 鋼床版の疲労 2010年改訂版，2010.12.
13. 小西季里子：国道 357号における鋼床版の補修事例について
14. 一般社団法人 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の点検・診断・対策技術，2013.8.
15. 阪上隆英，西村隆，久保司郎，崎野良比呂，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亀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）72巻724号，2006.12.

16. 横野泰和：溶接・接合部の非破壊試験法と検査，溶接学会誌第 78 巻第 3 号，2009.
17. 三木千寿，深沢誠，加藤昌彦，大畦雄：表面疲労亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性，土木学会論文集，第 386 号，I-8，1987,10
18. 山田健太郎，舘石和雄：鋼橋の維持管理，2015.6.
19. 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2017.8.
20. 吉浪泰祐：摩擦型ゲージを用いた鋼床版 U リブ・デッキプレート溶接部に発生する疲労亀裂の検出手法，2010.2.
21. 山田聡，渡辺直起，山田健太郎，小塩達也：簡易型振動疲労試験機の開発と適用試験，トピー工業技法 No.24 2008.
22. 三木千壽，横山薫，吉田大介，穴見健吾，大庭潤輝：レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた鋼床版 U リブ溶接部疲労亀裂の補修，鋼構造論文集第 23 巻第 91 号，2016.9.
23. 山田健太郎，Ya Samol：U リブすみ肉溶接のルート亀裂を対象とした板曲げ疲労試験，土木学会構造工学論文集 Vol.54A，2008.3.
24. 木下幸治，荒川慎平：板曲げを受ける面外ガセット継手の亀裂形状比を適用した疲労亀裂進展解析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）Vol.69 No.1 20-25，2013.
25. 木下幸治，荒川慎平：XFEM による板曲げを受ける面外ガセット溶接継手部の疲労亀裂進展経路シミュレーション，構造工学論文集 Vol.58A，2012.3.
26. 山田健太郎，小塩達也，鳥居詳，白彬，佐々木裕，山田聡，面外ガセット溶接継手の曲げ疲労強度に及ぼすショットブラストの影響，構造工学論文集 Vol.54A，2008.3.
27. E.P.ポポフ，成岡昌夫，浜田実：固体の力学入門 1，2 1975.
28. 坂野昌弘，新井正樹：面外ガセット溶接継手の疲労強度に及ぼす板厚の影響 2003.
29. 宮川豊彰，森川秀典，大西弘志，他：図説 わかるメンテナンス 土木・環境・社会基盤施設の維持管理，2010.11.