

道路政策の質の向上に資する技術研究開発  
成 果 報 告 レ ポ ー ト  
No. 24-8

研究テーマ

疲労き裂の補修技術に関する研究開発

研究代表者：名古屋大学教授 館石 和雄  
共同研究者：名古屋大学准教授 判治 剛  
京都大学助教 石川 敏之  
(現 関西大学准教授)  
名古屋大学助教 清水 優 (平成26年4月より)  
名古屋大学助教 崔 誠珉 (平成25年3月まで)

平成27年7月

新道路技術会議

# 目 次

研究概要 .....	1
第 1 章 はじめに .....	3
1. 1 研究の背景と目的 .....	3
1. 2 本報告書の構成 .....	3
第 2 章 ICR 処理 .....	4
2. 1 背景 .....	4
2. 2 ICR 処理部周辺の残留応力計測 .....	4
2. 3 繰返し曲げ荷重下の疲労試験 .....	5
2. 4 繰返し引張荷重下の疲労試験 .....	10
2. 5 I 桁に生じたき裂に対する ICR 処理の効果 .....	12
2. 6 有限要素解析による ICR 処理後のひずみの再現 .....	13
2. 7 ICR 処理された表面き裂の応力拡大係数 .....	15
2. 8 ICR 処理された疲労き裂の余寿命の推定 .....	17
2. 9 まとめ .....	20
参考文献 .....	21
第 3 章 樹脂注入法 .....	22
3. 1 背景 .....	22
3. 2 樹脂浸透試験 .....	23
3. 3 疲労試験 .....	24
3. 4 解析による樹脂注入の再現 .....	27
3. 5 樹脂注入後のき裂進展速度の推定手法 .....	29
3. 6 まとめ .....	30
参考文献 .....	30
第 4 章 溶接補修 .....	32
4. 1 背景 .....	32
4. 2 変動荷重下での溶接施工試験 .....	32
4. 3 試験結果 .....	36
4. 4 溶接ポジションの影響 .....	40
4. 5 溶接割れ発生状況の整理 .....	42
4. 6 溶接中のルートギャップ開口変位の推定 .....	43
4. 7 まとめ .....	47

参考文献.....	48
第5章 疲労き裂の補修技術選定ガイドライン .....	49
5. 1 背景 .....	49
5. 2 補修工法の選定フロー .....	49
5. 3 ICR 処理による疲労き裂の補修ガイドライン案.....	49
第6章 まとめ.....	52
6. 1 研究成果 .....	52
6. 2 今後の道路政策への展開 .....	52
付録 .....	54

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 24 年度採択)  
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.24-8	疲労き裂の補修技術に関する研究開発	名古屋大学 教授 舘石和雄

本研究では、疲労き裂が生じた鋼橋部材に対して、簡易にかつ即時性をもって補修するための技術開発を行う。具体的には、ICR 処理、樹脂注入法、溶接補修の 3 つの技術を取り上げ、それぞれの効果と適用限界を定量的に明らかにするとともに、実施工技術を開発する。

### 1. 研究の背景・目的 (研究開始当初の背景・動機、目標等)

鋼橋の疲労損傷はすでに各所で問題になっており、今後も問題が深刻化することが予想されることから、疲労き裂をできるだけ簡易に補修することのできる技術が望まれている。

本研究は、比較的短い段階の疲労き裂に対する補修法として、ICR 処理、樹脂注入法、溶接補修を取りあげ、それらを実用レベルに発展させることを目的とする。ICR はき裂周辺に簡易なエアハンマーにより塑性変形を導入し、表面にてき裂を閉口させることでその進展を抑制するものである。樹脂注入法はき裂内部に樹脂を注入し、き裂の開閉口挙動を妨げることによってき裂の進展を抑制するものである。溶接補修はき裂を除去した後、溶接によって埋め戻す手法である。

本研究では実験的、解析的検討により、これら 3 つの技術の適用可能範囲を明確にし、実用技術としての確立を目指す。

### 2. 研究内容 (研究の方法・項目等)

【ICR 処理】 曲げおよび引張荷重下での疲労試験により、ICR の効果に対する応力比、処理姿勢、処理時のき裂長や応力レベルの影響を検討した。溶接止端から発生したき裂のみでなく、溶接ルートから主板へと進展したき裂に対する適用性も検討した。さらに有限要素解析により、き裂形状、主板厚、荷重条件などの因子が処理効果に与える影響を定量的に評価し、ICR 後の余寿命の推定方法を提案した。また、施工性や適用性を把握する目的で実橋梁への試験施工も行った。

【樹脂注入法】 面外ガセット溶接継手を対象として、繰返し圧縮荷重により発生した疲労き裂に対して樹脂注入法を適用し、効果的な注入法の開発、注入向きの影響の検討を行った。さらに有限要素解析により、樹脂注入による寿命改善効果に影響を与える因子について検討した。

【溶接補修】 繰返し変動荷重下で溶接施工試験を実施し、溶接割れの発生に影響を与える因子を検討した。さらに熱弾塑性解析により、変動荷重下での溶接を再現し、得られた結果を基に、溶接割れ発生評価式を提案した。

### 3. 研究成果 (図表・写真等を活用し分かりやすく記述)

【ICR 処理】 X 線回折法により ICR 部周辺の残留応力を計測し、処理部近傍では鋼板の降伏応力の 6~7 割程度の圧縮応力が導入されていることを示した。応力比  $R=-\infty\sim 0.5$  の範囲では、応力範囲が  $120\text{N/mm}^2$  以上の場合、ICR 後の疲労寿命は溶接したままのそれと同程度となり、逆に応力範囲が比較的低い領域では、ICR により疲労寿命が大幅に増加することを示した。また処理姿勢や、止端き裂、ルートき裂による効果の違いはみられなかった。引張荷重下の場合であっても、ICR により元の状態までは回復できるが、板曲げ荷重下での効果よりは低下することを明らかにした。さらに、ICR を再現できる解析法を構築し、それによる検討結果を基に、ICR を施したき裂に対する余寿命評価法を提案した。実橋梁に生じたき裂に対して ICR の試験施工を実施し、き裂周辺のひずみ計測結果を基に、ICR を適用可能な部位を明らかにした。

【樹脂注入法】 疲労試験結果より、樹脂の種類や注入向きによる効果の違いはみられなかった。また、き裂部に振動を与えながら注入することにより、高い寿命改善効果が得られることを示した。さらに有限要素解析により、浸透深さによって効果が大きく変化すること、注入材料はある程度の剛性を有していれば十分なことなどを明らかにした。樹脂注入前後でのき裂近傍の応力の

変化から、き裂進展速度の減少割合を予測できることを示した。

【溶接補修】 繰返し荷重下で溶接補修を行う場合、溶接中のルートギャップの開口変位とその繰返し周波数が溶接割れの発生に大きく影響を与えることを示した。また熱弾塑性解析により、溶接中のルートギャップ開口変位を推定する手法を求め、それを取り入れた溶接割れ発生判定式を提案した。求めた判定式により実験結果を安全側に評価できることを示した。

上記3工法に対する成果を基に補修工法選定フロー案、補修技術ガイドライン案を示した。

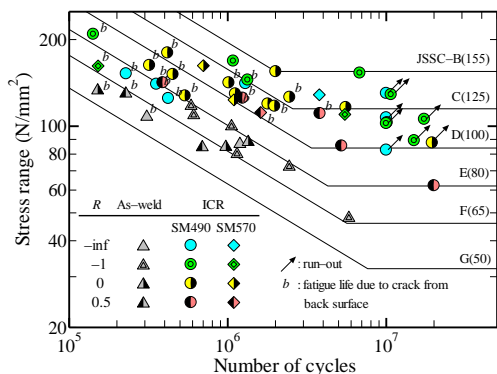


図1 ICR 処理の効果 (応力比の影響, 板曲げ疲労試験)

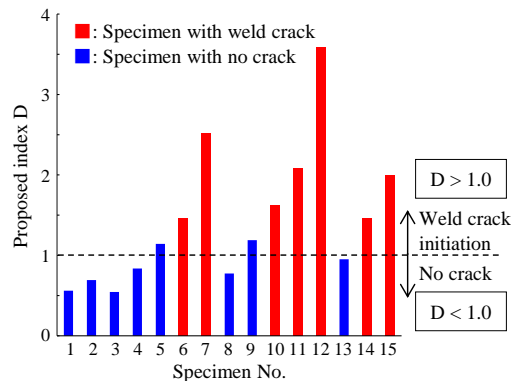


図2 提案式による割れ発生評価結果

#### 4. 主な発表論文 (研究代表者はゴシック、研究分担者は下線)

- 1) Hasegawa Y., Hanji T., Tateishi K. and Choi S.M. (2013) A study on weld repair of steel members under cyclic loading, Proc. of the 12th Japan-Korea Joint Symposium on Steel Bridges, CD-ROM.
- 2) Tateishi K., Hanji T., Tsuruta Y. Sasada S. and Choi S.M. (2013) Fatigue life extension of cracked welded joints by ICR treatment under tensile loading, Proc. of the 10th PSSC, pp.493-498.
- 3) 館石和雄, 判治剛, 石川敏之, 清水優 (2015) 引張または曲げ荷重を受ける溶接継手に対する ICR 処理の効果, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.627-637.
- 4) Hattori M., Hanji T. and Tateishi K. (2015) Simple repair method for fatigue cracks in welded joints by resin injection, Proc. of the IABSE Conference Nara, CD-ROM.
- 5) Hanji T., Hasegawa Y., Tateishi K. and Shimizu M. (2015) An Estimation Method for Weld Crack Initiation in Weld Repair under Cyclic Loading, Proc. of the 8th ISSS (in printing)

#### 5. 今後の展望 (研究成果の活用や発展性、今後の課題等)

ICR 処理に関しては、本研究により多くの知見が蓄積され、補修ガイドライン案を取りまとめることができたことから、今後はそのガイドラインに従って実橋梁での試験施工を繰り返し、実績の蓄積、課題の抽出・改善を行う必要がある。樹脂注入法については、効果にばらつきが大きいことから、安定的な効果を発揮できる注入法や樹脂の開発が課題である。また溶接補修については、本研究により溶接割れ発生判定式を示したものの、非常に複雑な現象であり、全てを網羅できなかったため、他の継手や溶接法での検討、強い拘束条件下での適用などが課題である。

#### 6. 道路政策の質の向上への寄与 (研究成果の実務への反映見込み等)

本研究で対象としたのは比較的短いき裂である。橋梁の近接点検が義務づけられたこともあり、実橋の溶接継手に比較的短いき裂が発見される可能性は、今後、ますます増加するものと考えられる。その対策を考える上で、補修技術ガイドライン案などの本研究成果は有用であると考えられる。

本研究で対象とする技術は、応急補修と恒久対策の中間に位置づけられるものであると考えている。すなわち、これらの技術を適切な条件下で適用すれば、当面の疲労き裂の進展を防止することができるものと期待される。本研究成果を実用的に用いることができれば、恒久対策を施すまでの時間的猶予を得ることができるだけでなく、対象橋梁に要求される耐用年数によっては恒久対策が不要となる場合も想定される。このように、補修・補強の優先順位付けに自由度が生まれ、合理的で弾力的な維持管理計画の策定を可能とする点で、道路政策へ反映することができる。

#### 7. ホームページ等 (関連ウェブサイト等)

<http://skyarch.civil.nagoya-u.ac.jp/>

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の背景と目的

鋼橋の疲労損傷は既に各所で問題になっているが、供用年数の増加に伴い今後も問題が深刻化することが予想される。また、維持管理に費やすことのできる人的・経済的資源の制約から、すべての疲労損傷に対して大がかりな補修・補強を行うことは不可能な状況にある。このような背景から、疲労き裂をできるだけ簡易に補修することのできる技術が望まれている。

現在、疲労き裂に対する応急的な補修方法としてストップホール法が多用されている。ストップホール法は適切に施工されれば当面の疲労き裂の進展を抑制することができる優れた手法である。しかし、ストップホール法は、複雑な構造ディテールや狭隘な箇所に対しては施工が困難な場合があることや、削孔による断面欠損により新たな応力集中を引き起こす場合もあり、必ずしも万能な手法とはいえない。

本研究は、疲労き裂が比較的短い段階での補修を目的として、ストップホール法と並ぶ新たなき裂補修技術を実用レベルに発展させることを目的とする。具体的には、ICR処理、樹脂注入法、溶接補修を取りあげる。ICR処理は疲労き裂の周辺を簡易なエアハンマーで叩き、表面に塑性変形を導入することにより、き裂表面を閉口させることでその進展を抑制するものである。樹脂注入法はき裂内部に樹脂を注入し、き裂の開閉口を妨げることによってき裂の進展を抑制するものである。溶接補修はき裂を除去した後、溶接によって埋め戻す手法である。

これらの3つの手法では、補修処理後の疲労き裂の経過観察が容易に行えることが大きな特徴の一つである。恒久対策で用いられる当て板法などでは、疲労き裂の経過観察が容易でな

く、また、コストや手間に見合うだけの確実な補修・補強効果が要求される。一方、本研究の手法はいずれも簡便に施工可能であり、その後の経過観察が容易であることから、「とりあえずやってみる」ことが可能である。場合によってはそれだけで十分である場合も多いものと期待される。さらに、万が一補修効果が見られない場合でも、これらの手法では部材の原型を変えることがないため、当板補強などのその後の補修・補強工法の妨げとなることもない。

ICR処理と樹脂注入法は新しい技術であり、実験室レベルではその効果が確認されているものの、その適用限界や施工方法などに課題が残されている。溶接補修は古くからある技術であり、手法そのものには目新しさはないが、溶接欠陥の防止条件などが必ずしも明確になっておらず、広く用いられるには至っていない。

本研究では実験的、解析的検討により、これら3つの技術の適用可能範囲を明確にするとともに、適切な実施工技術を開発し、実用技術として確立する。さらに、補修効果を簡易に確認するための技術開発を行う。

## 1.2 本報告書の構成

第1章では、本研究で取りあげるICR処理、樹脂注入法、溶接補修の特徴および課題を述べ、本研究の目的を明確にした。第2章ではICR処理、第3章では樹脂注入法、第4章では溶接補修について実験的、解析的に検討し、その適用範囲や評価手法を提案している。第5章では、補修工法の選定フロー案を提示するとともに、ICR処理に対するガイドライン案を示している。第6章では、本研究の成果をまとめ、今後の道路政策への展開を述べている。

## 第2章 ICR処理

### 2.1 背景

疲労き裂の簡易な補修法として近年提案された衝撃き裂閉口処理 (Impact Crack Closure Retrofit Treatment, ICR処理と呼ぶ)<sup>2.1)</sup>は、疲労き裂の周辺を簡易なエアハンマーで叩き、表面に塑性変形を導入することにより、き裂表面を閉口させてその進展を抑制する技術である。

ICR処理の効果は、主に曲げ荷重下において、平板や溶接継手を対象に実験室レベルで確認されている<sup>2.1)2.4)</sup>。また、実際の鋼床版への試験施工<sup>2.5)</sup>も行われており、2年後の追跡点検においてもき裂の再進展がないことが報告されている<sup>2.6)</sup>。その一方で、応力比やき裂長の影響、引張荷重下のき裂への適用性など、ICR処理の適用限界が明確には示されていないのが現状である。

本研究ではICR処理の適用限界を明らかにするための基礎的な検討として、引張および曲げ荷重下での疲労試験を行い、応力比やき裂長、载荷方法などがICR処理の効果に与える影響を明らかにした。また、ICR処理を模擬した有限要素解析を行い、载荷方法やき裂形状、主板厚がICR処理の効果に与える影響を検討した。さらに、半楕円状表面き裂に対するICR処理後の残存寿命の推定法を提案した。

### 2.2 ICR処理部周辺の残留応力計測

疲労試験に先立ち、X線回折法を用いて、ICR処理によってき裂周辺に導入される残留応力分布を明らかにした。

#### (1) 計測方法

本研究では、非破壊での計測が可能なポータブル用X線回折式残留応力測定システム (PROTO iXRD) を用いて残留応力を計測した。

X線回折法では、ブラッグの条件を満足する結晶からの回折現象を利用して結晶格子面間隔の変化を測定し、それより材料に作用している応力を求める<sup>2.7)</sup>。計測対象は約200×200mmの鋼板であり、板厚は12mmである。鋼種の異なる3枚の鋼板 (SM400A, SBHS500, SBHS700) を対象とし、鋼種による導入応力の差異を明らかにした。ミルシートによる化学成分および機械的性質は表2.1、表2.2に示すとおりである。図2.1に示すように、幅方向の計測は処理部に沿って5列とし、各列では処理部端から約2mm間隔で5点にて行った。なお今回は、ICR処理により鋼板面に導入される応力のみに着目しているため、疲労き裂は導入していない。

計測の前処理として、鋼板を焼鈍して内部応力を除去し、電解研磨により計測位置周辺を仕上げた。ICR処理を行う位置から約6mm離れたところにひずみゲージを貼付し、処理中のひずみ

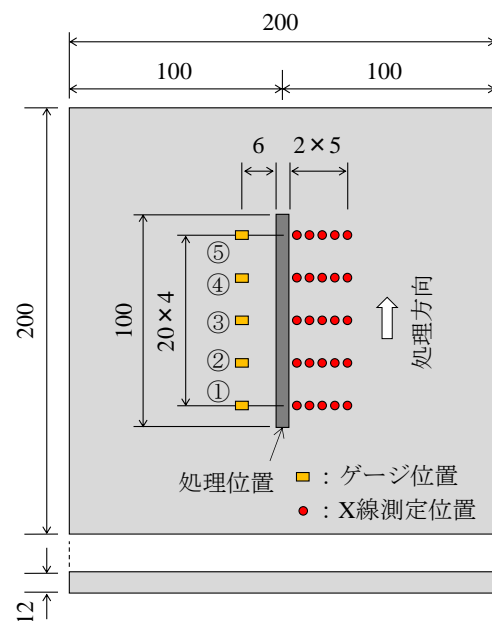


図 2.1 鋼材のひずみ計測位置 (単位: mm)

表 2.1 残留応力計測に用いた鋼材の化学成分

鋼種	化学成分(%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	N	B
SM400A	0.15	0.14	0.61	0.014	0.007						
SBHS500	0.02	0.28	1.35	0.013	0.004	0.43	0.24	0.50	0.001	0.003	0.0018
SBHS700	0.06	0.25	1.37	0.004	0.002	0.98	0.98	0.34	0.30	0.0042	0.0003

みの変化を計測しながらICR処理を行った。ICR処理を1パス行うごとに導入された応力をX線により計測し、ゲージ値の変化量が小さくなるまで8パスの処理を繰り返した。計測した応力はICR処理部に対して直交する方向の成分である。

表 2.2 残留応力計測に用いた鋼材の機械的性質

鋼種	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SM400A	294	430	30
SBHS500	570	633	30
SBHS700	823	846	24

## (2) 計測結果

図2.2にX線による計測値とひずみゲージ値の比較をパスごとに示す。ここでは、図2.1のひずみゲージ①～⑤の平均値とICR処理部から6mm位置のX線計測結果の平均値を示している。本研究で用いたX線計測システムは所定のばらつき(550N/mm<sup>2</sup>のキャリブレーション用基準体で±35N/mm<sup>2</sup>が許容値とされている)を内包しているが、図2.2(a)および図2.2(c)ではX線とひずみゲージの計測値が比較的一致している。一方、図2.2(b)ではばらつきがみられる。これは、ICR処理は手動で操作するため、処理幅を正確に管理することが難しく、処理位置と計測点までの距離が位置によって異なると考えられる。

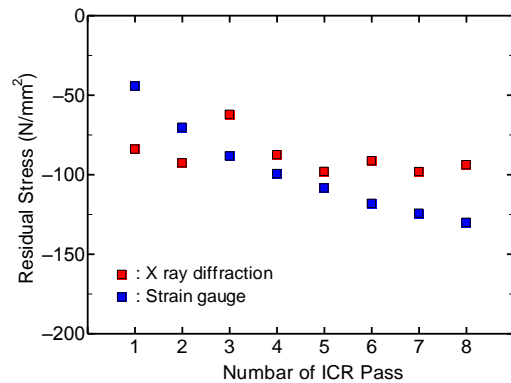
ICR処理を8パス実施した際のX線による応力計測結果を図2.3に示す。全ての鋼種で処理部近傍では圧縮の応力が導入されており、その絶対値は降伏応力が高い鋼種ほど大きくなっている。導入応力と降伏応力の比で考えると、処理部近傍では全ての鋼種で降伏応力の6~7割程度の圧縮応力が導入されている。

## 2.3 繰返し曲げ荷重下の疲労試験

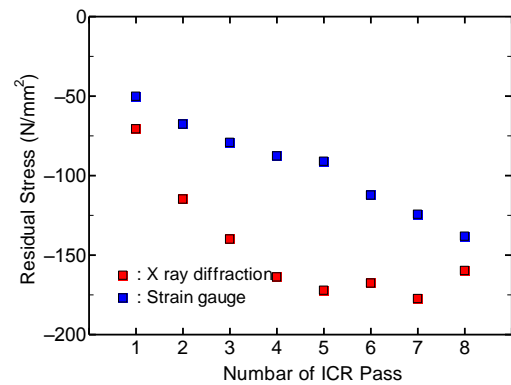
繰返し曲げ荷重下の疲労試験を実施し、過去の疲労試験結果と併せて、応力比やき裂長、綱種、処理姿勢の影響を明らかにした。さらに、ルートき裂に対する適用可能性についても検討した。

### (1) 試験体

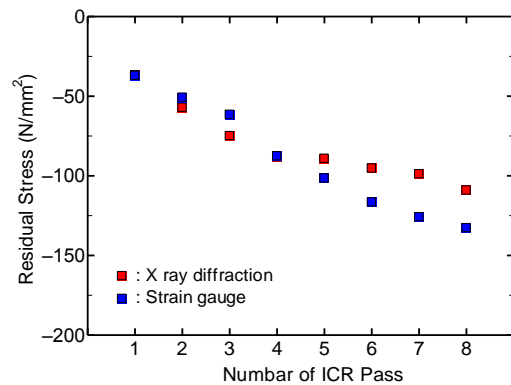
試験体の形状および寸法を図2.4に示す。板厚12mm、幅300mmの主板に、板厚12mm、高さ100mmのガセットが接合されている試験体(Type-1)と、全体の形状は同じで主板厚およびガセット厚が16mm、ガセット高さが300mmの試



(a) SM400A



(b) SBHS500



(c) SBHS700

図 2.2 各パスで導入された残留応力



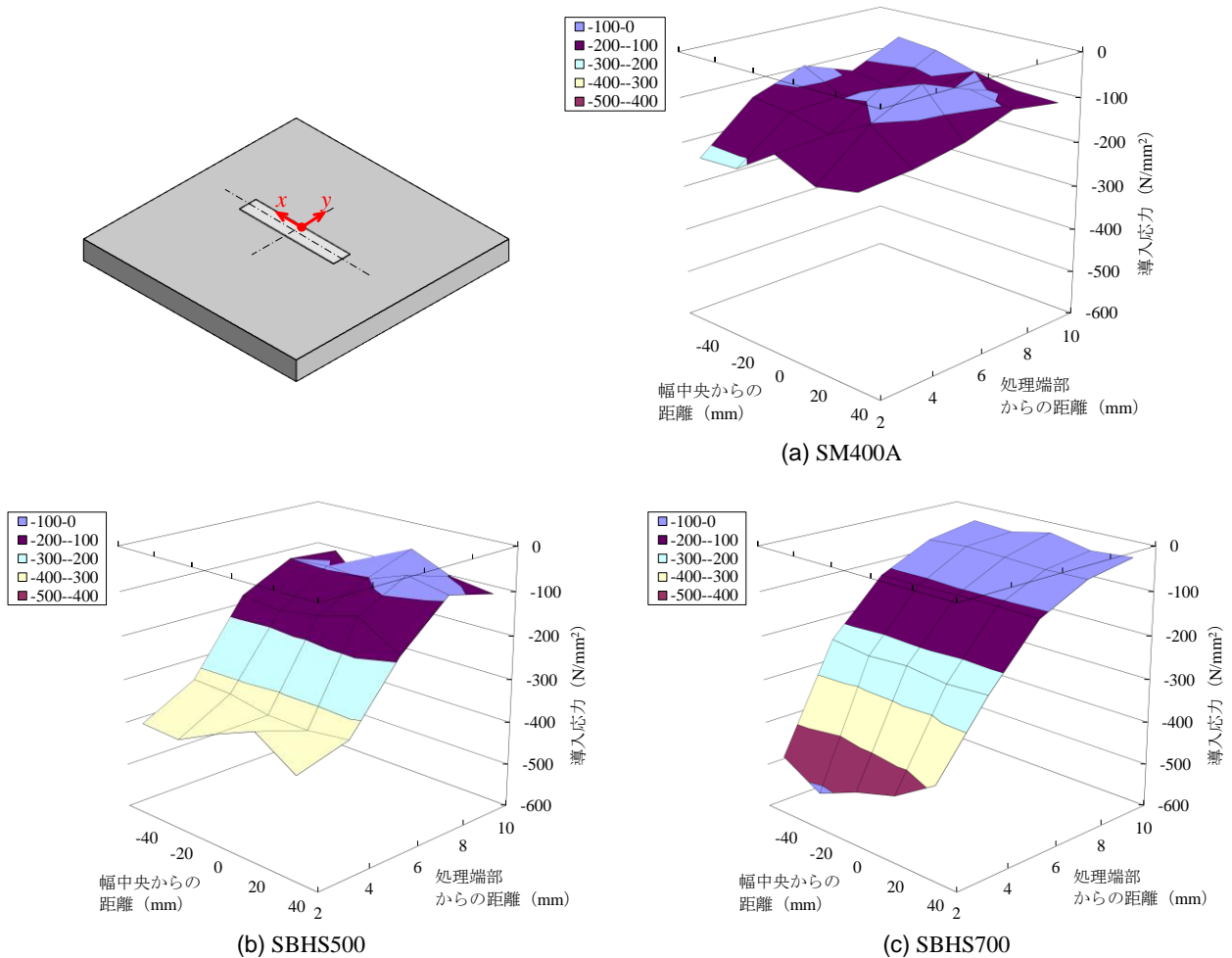


図 2.3 残留応力分布

験体(Type-2)の2種類とした。溶接は下向きの半自動CO<sub>2</sub>ガスシールドアーク溶接で行い、まわし溶接部は等脚長とした。また、まわし溶接部周辺に溶接の継ぎが位置しないように配慮して製作した。

試験体にはSM490YAとSM570の鋼板を用いた。供試鋼材の機械的性質は表2.3に示すとおりである。

## (2) 载荷方法

繰返し曲げ荷重の導入には板曲げ振動疲労試験機<sup>2.2)</sup>を用いた。この試験機では、偏心錘が内蔵された起振器を試験体に取り付け、起振器内の錘を回転させることにより、試験体の着目部に繰返し面外曲げを与えることができる。また、予荷重を与えて応力比を調整することも可能である。この方法では偏心錘の回転によって生じる振動により曲げ荷重を与えるため、き裂の進展に伴って試験体の剛性が変化すると、錘の回転速度によっては応力が急変する場合がある。そこで、図2.4に示すように主板表面にひずみゲージを貼付し、载荷中に一定間隔で計測

することにより、試験体に生じる応力の変化を記録した。

溶接止端位置の公称応力範囲は次のように求めた。まず、試験開始時にゲージBとD、CとEの値の関係を求める。次に、その関係と载荷中に計測したゲージDとEの値を用いて、各载荷

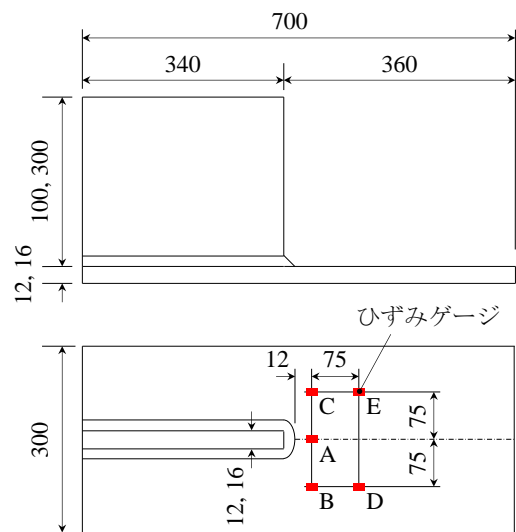


図 2.4 曲げ疲労試験用試験体 (単位: mm)

表 2.3 供試鋼材の機械的性質(ミルシート値)

試験体分類		鋼種	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
曲げ荷重	Type-1	SM490YA	405	537	26
		SM490YA	395	532	26
		SM570	578	636	34
	Type-2	SM490YA	429	532	19
引張荷重		SM490YA	413	548	25

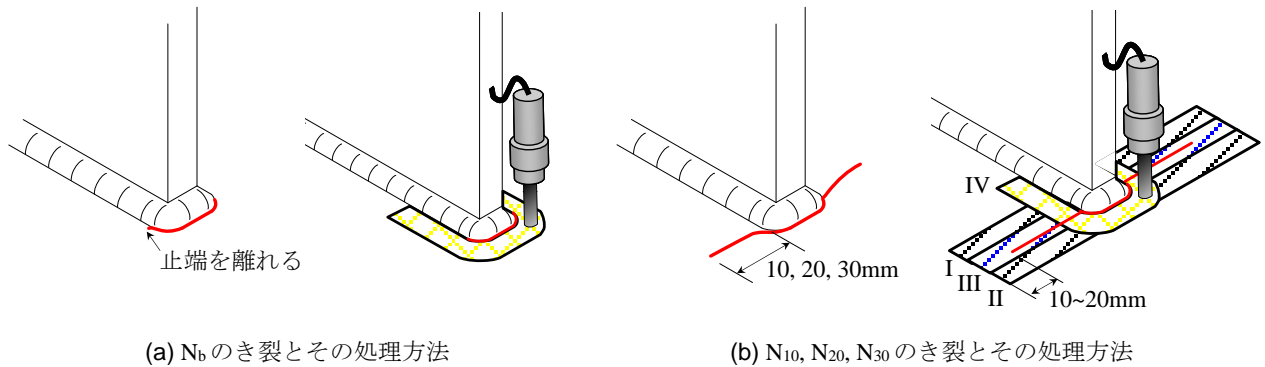


図 2.5 対象としたき裂長の定義と ICR 処理方法

時の止端位置での応力範囲を計算する。得られた応力範囲とその载荷回数から等価応力範囲を算出し、これを試験体の公称応力範囲とした。

### (3) ICR処理

既往の研究<sup>2.1)-2.4)</sup>と同様に、ICR処理には市販のエアツール(フラックスチップ: 打撃数90Hz, ピンストローク16mm, 消費空気量0.14Nm<sup>3</sup>/min)を用いた。タガネの先端は、角が丸みを帯びた4×5mm程度の平坦な面になるように加工した。エアの供給にはタンク容量10リットルの小型エアコンプレッサを使用した。ICR処理中の空気圧力は0.5~0.6N/mm<sup>2</sup>である。ICR処理方法も既往の研究<sup>2.2)</sup>にしたがい、き裂長に応じた方法とした。詳細は後述する。

### (4) 応力比の影響

これまでの実験<sup>2.2)</sup>では主に応力比R=-1の場合に対してICR処理の効果が検討されている。本研究ではType-1試験体を用いて、これまでにあまり検討されていない応力比R=-∞, 0, 0.5の条件で疲労試験を行い、応力比の違いが処理効果に与える影響を検討した。

本研究で対象としたき裂長の定義とそれらに対するICR処理方法を図2.5にまとめる。応力比に関する検討では、図2.5(b)に示すようなまわし溶接部の止端から発生した疲労き裂が主板上に10mm進展した状態(このときをN<sub>10</sub>と呼ぶ)

を対象とした。き裂がN<sub>10</sub>に達した後、R=-∞の試験体では、予荷重を開放してからICR処理を実施した。R=0.5の試験体では、最小応力を保ちながら処理を行った。

ICR処理は、図2.5(b)に示すように、き裂部とその進展方向10~20mm程度先の領域までI~IIIの順序で実施し、最後にまわし溶接止端のき裂を閉口するために、まわし部に沿って処理IVを行った。

疲労試験結果を図2.6に示す。過去の実験<sup>2.2), 2.8)</sup>と同様に、まわし溶接止端から主板上にき裂が30mm進展したとき(ICR処理を施した試験体では、き裂先端が処理範囲をぬけた時点で相当する)、または主板上の裏面にき裂を確認したときの繰返し数を疲労寿命とした。ICR処理を行った試験体は処理後からの载荷回数で整理しており、裏面からのき裂により疲労寿命に達したものはプロットの右上にbを付けて区別した。また図2.6(b)には、応力比R=-1で過去に行われた試験結果<sup>2.2), 2.8)</sup>(Referenceと記す)も示している。図の直線はJSSCの疲労強度曲線<sup>2.9)</sup>である。ICR処理を施すことにより、応力比に関わらず、応力範囲120N/mm<sup>2</sup>程度以下の領域で疲労寿命が大幅に向上している。その一方で、応力範囲が100N/mm<sup>2</sup>以上になると、主板上の裏面からのき裂により疲労寿命となる結果が多くなり、応力範囲が120N/mm<sup>2</sup>を超えると、どの応力比でもICR

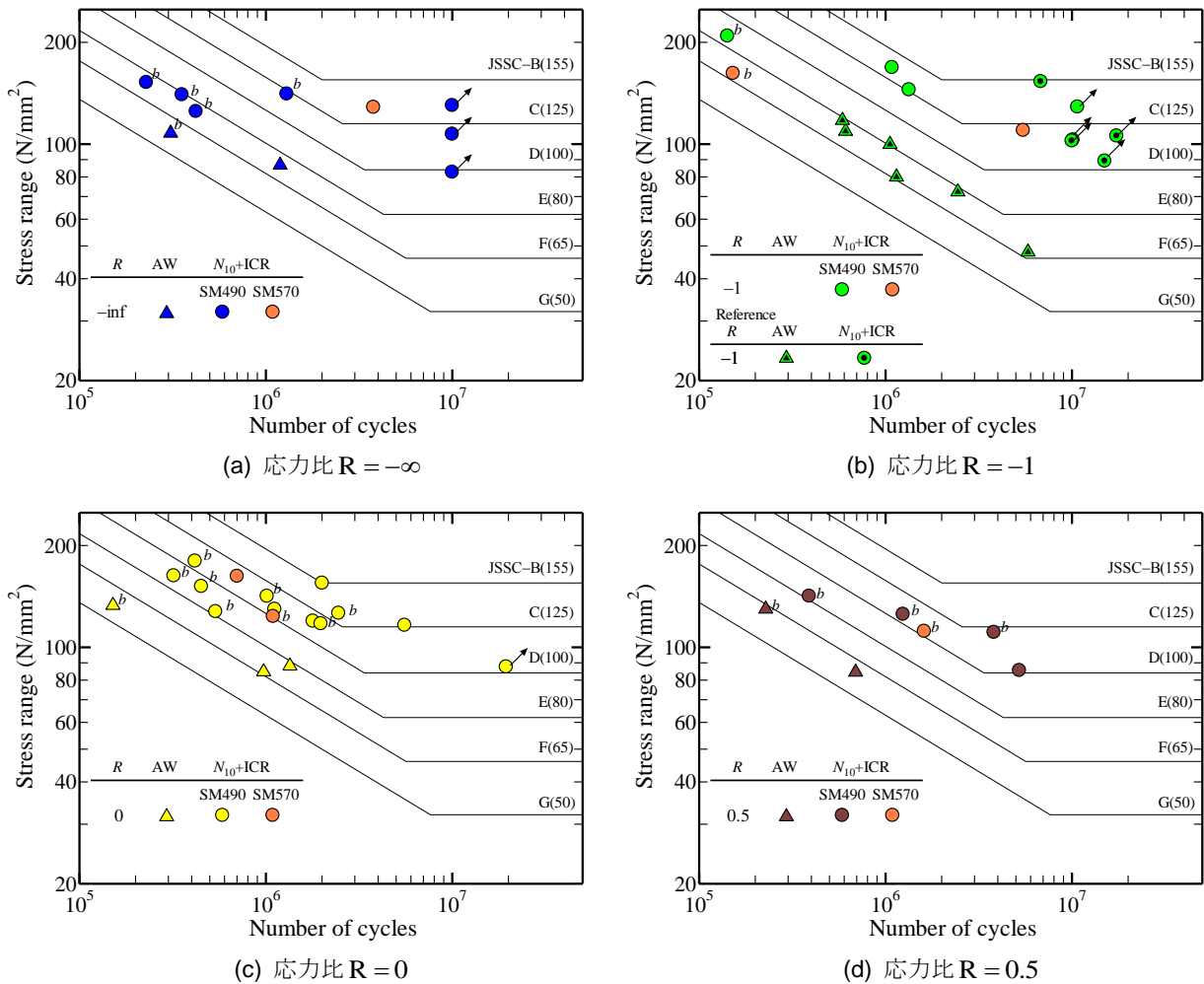


図 2.6 応力比の影響 (き裂長:  $N_{10}$ , ICR 処理: 下向き)

処理試験体の結果は溶接ままの延長線上に位置するようになる。よって、 $N_{10}$ のき裂に対して ICR 処理を行った場合、応力範囲が高い領域では主板裏面からのき裂により、処理後の疲労寿命は溶接ままのそれと同程度になるといえる。

応力比の違いに着目すると、応力比が高くなるにつれて疲労限が低下していることがわかる。疲労寿命も応力比の増加に伴い減少する傾向を示しているが、主板裏面に引張応力が生じる  $R=-\infty$  の場合は裏面からき裂が発生するため、その寿命は  $R=0.5$  と同程度であった。

今回の結果より、応力比が  $R=-\infty \sim 0.5$  の範囲では、ICR 処理により応力範囲  $120 \text{ N/mm}^2$  以下で疲労寿命が増加するが、その程度は応力比が高くなるにつれて減少することが示された。また、高応力範囲では主板の裏面からき裂が発生しやすくなり、ICR 処理後の疲労寿命は溶接ままのそれと同程度となる。すなわち、高応力範囲であっても、ICR 処理を施すことにより溶接ままと同程度の寿命を処理後に確保できる (試験前から考えると2倍の寿命になる)。

### (5) き裂長の影響

前節では  $N_{10}$  のき裂のみを対象としたが、ここでは応力比を  $R=0$  で一定として、処理時のき裂長を変化させてき裂長と処理効果の関係を検討した。なお試験には Type-1 試験体を用いた。

対象としたき裂は、まわし溶接止端から発生したき裂が止端から離れる直前の状態 (このときを  $N_b$  と呼ぶ。図 2.5(a) 参照)、き裂が止端から離れて  $10 \text{ mm}$  または  $20 \text{ mm}$  進展した状態 (後者を  $N_{20}$  と呼ぶ。図 2.5(b) 参照。) の3種類とした。

き裂が  $N_b$ ,  $N_{10}$ ,  $N_{20}$  に達した後、予荷重を開放してから ICR 処理を実施した。  $N_b$  に対する ICR 処理は、図 2.5(a) に示すようにまわし溶接に沿って施工した。  $N_{20}$  に対しては  $N_{10}$  の場合と同様の方法 (図 2.5(b) 参照) で行った。

疲労試験結果を図 2.7 に示す。図中には、応力比  $R=-1$  で行われた過去の結果<sup>2.2), 2.8)</sup> も併記している。応力比  $R=0$  の場合、  $N_b$ ,  $N_{20}$  のき裂に対して ICR 処理を行った試験体では、  $N_{10}$  のき裂ほどの寿命の改善はみられなかった。この理由として、  $N_b$  の場合はき裂先端を両側から叩くことが

できず、き裂を十分に閉口できなかつたことが考えられる。またN<sub>20</sub>の場合は、き裂が長いので裏面からのき裂が発生しやすく、結果としてN<sub>10</sub>の結果より短寿命になったと考えられる。

今回の試験ではN<sub>b</sub>、N<sub>20</sub>ともにN<sub>10</sub>ほどの効果はみられなかったが、ICR処理後からの寿命は少なくとも溶接ままのそれと同程度までは回復する。

### (6) 鋼種の影響

図2.6および図2.7にはSM490YAに加えてSM570に対する疲労試験結果も示している。今回の検討範囲では鋼種による違いはほとんどみられず、SM490YAとSM570では同程度の処理効果が期待できる可能性があると考えられる。

### (7) 処理姿勢の影響

これまででは比較的作業がしやすい下向きでICR処理が行われてきたが、実橋ではさまざまな姿勢での作業が求められる。そこで、下向きや上向きよりも反力がとりにくく、施工が難しい横向きでICR処理を施した試験体の疲労試験

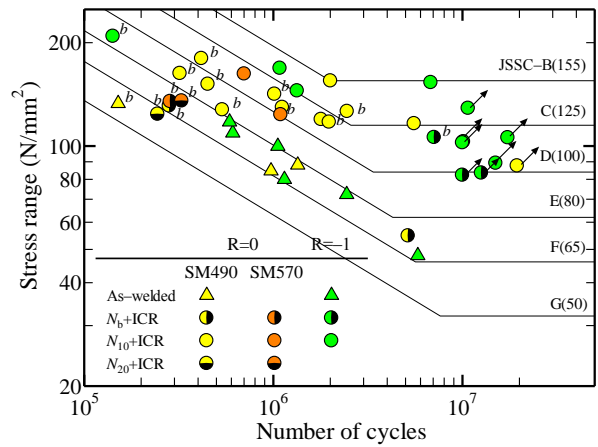


図 2.7 き裂長の影響 (ICR 処理: 下向き)

を行い、処理姿勢の影響を検討した。ここではType-2試験体を用いた。

対象は図2.5に示すN<sub>b</sub>、N<sub>10</sub>のき裂であり、それらに対する処理方法は前述のとおりである。応力比R=0で所定の長さのき裂を導入した後、試験体を別途用意したフレームに固定した上で、横向きでICR処理を行った。横向きでの処理の様子を図2.8に示す。



図 2.8 横向きでの ICR 処理状況

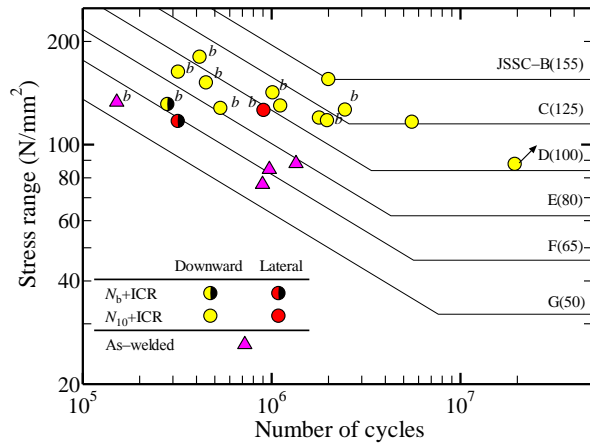


図 2.9 処理姿勢の影響 (応力比: R = 0)



図 2.10 ルートき裂に対する ICR 処理状況

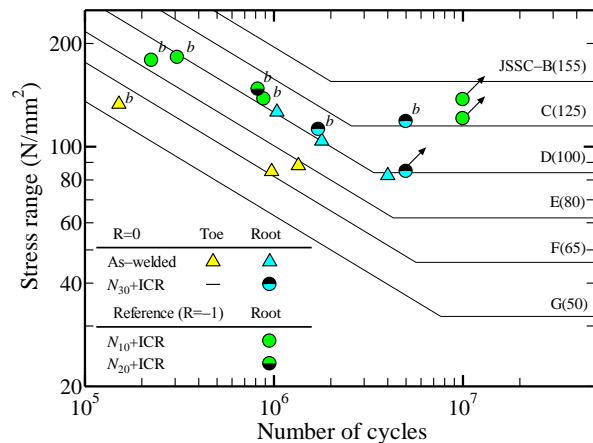


図 2.11 ルートき裂に対する適用可能性 (ICR 処理: 下向き)



疲労試験結果を図2.9に示す。図中には下向きで処理を施したとき（図2.7のR=0）の結果も示している。N<sub>10</sub>の場合は裏面からのき裂により疲労寿命に達したが、下向きの結果とほぼ同じ領域に分布しており、横向きの場合でも下向きと同程度の寿命改善効果が期待できるといえる。またN<sub>6</sub>に対しても向きによる差はみられないが、き裂先端を十分に叩くことができないため、疲労寿命はN<sub>10</sub>のそれより短い。限られた試験結果ではあるが、下向きと横向きの処理姿勢によらずほぼ同程度の処理効果が期待できると考えられる。

#### (8) ルートき裂に対する適用性の検討

止端き裂に対しては、過去の実験および本研究においてICR処理による寿命改善効果が確認されているが、ルートから発生しビードを貫通するき裂に対してICR処理を検討した事例は数少ない。そこで、主板に進展したルートき裂に対するICR処理の有効性について検討した。

溶接ルートから生じ、図2.5(b)に示すように主板に30mm進展した状態のき裂（このときをN<sub>30</sub>と呼ぶ）を対象とした。ルートき裂に対するICR処理後の状況を図2.10に示す。応力比R=0として、溶接ルートから発生したき裂がN<sub>30</sub>の状態になるまで载荷を行い、その後、止端き裂に対する方法を参考にしてICR処理を実施した。ICR処理は、まず図2.5(b)に示すようにき裂とその進展方向10~20mm程度先の領域までI~IIIの順序で実施した。その後、溶接ビード上のき裂に対しても、その周辺および直上をたたいて閉口させた。なおICR処理は下向きで行った。

疲労試験結果を図2.11に示す。図中には溶接ままの止端き裂（図2.7のR=0）の結果も示している。また、ルートから生じたN<sub>10</sub>とN<sub>20</sub>の状態のき裂に対する過去のICR処理（主板のみを処理した）結果<sup>2.10</sup>も載せている。

応力範囲80N/mm<sup>2</sup>の試験体では、ICR処理後、500万回载荷してもき裂の再進展および主板裏面からのき裂は確認されなかった。一方、応力範囲100N/mm<sup>2</sup>では主板裏面からのき裂により疲労寿命となったが、溶接ままの状態と同程度の疲労寿命まで回復している。また応力範囲120N/mm<sup>2</sup>では、ICR処理後に500万回载荷しても表面のき裂の再進展はみられなかったが、そのときに主板裏面において表面と同程度の長さのき裂を確認した。

以上より、ルートき裂に対してもICR処理は有効である可能性があるが、き裂が短い段階での効果についてはさらなる検討が必要である。

## 2.4 繰返し引張荷重下の疲労試験

曲げ荷重下での疲労試験により、ICR処理の効果は応力比の影響を受けるが、応力範囲が比較的小さければ疲労寿命の大幅な改善が期待できることが示された。ここでは、引張荷重下での処理効果を明らかにすることを目的とし、繰返し引張荷重下の疲労試験を行い、そのときのICR処理の効果を検討した。

### (1) 試験体および载荷方法

試験体は図2.12に示す主板厚6mm、幅300mmの面外ガセット溶接継手である。供試鋼材はSM490YAであり、その機械的性質は表2.3に示すとおりである。

疲労試験は、公称応力範囲を100N/mm<sup>2</sup>、载荷速度を5Hz、応力比をほぼゼロとし、一定振幅応力下で行った。ガセット板厚中央から幅方向に75mm離れた位置の主板表裏面にひずみゲージを貼付し、それらの平均値から公称応力範囲を求めた。

### (2) 対象とした疲労き裂とその処理方法

対象としたき裂は、前節で述べたN<sub>6</sub>、N<sub>10</sub>、N<sub>30</sub>の状態のき裂であり、ICR処理の方法は前節と同様である。今回の実験では、ほとんど全ての溶接止端からき裂が発生しており、また主板が薄いため、N<sub>6</sub>の段階で板厚を貫通しているき裂もみられたが、それら全てに対して処理を施した。

ICR処理は、荷重を作用させていない状態で行ったものに加えて、繰返し荷重の平均応力もしくは最大応力を保持しながら行ったものの3

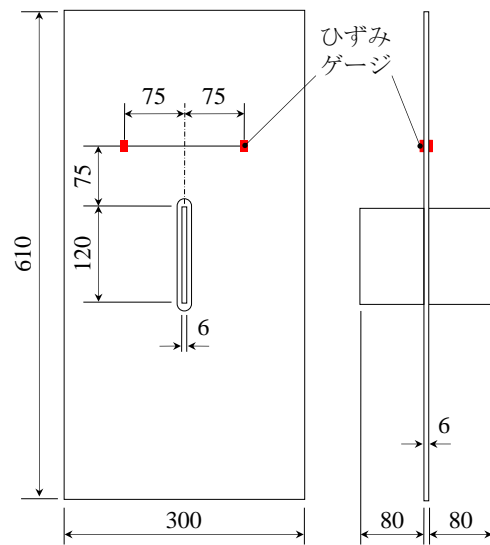


図 2.12 引張疲労試験用試験体 (単位: mm)

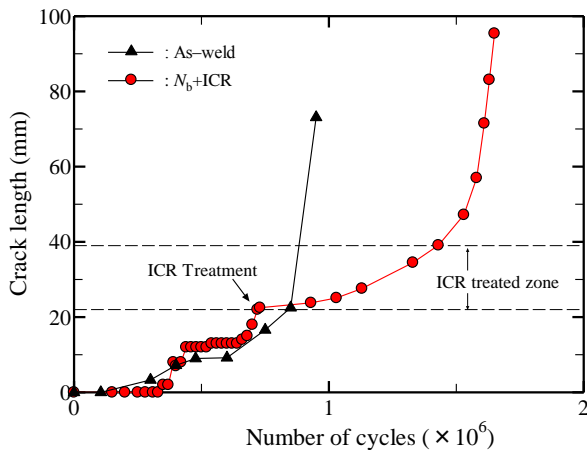


図 2.13 き裂進展挙動

種類とした。ICR処理はすべて横向きで行った。

### (3) き裂進展挙動

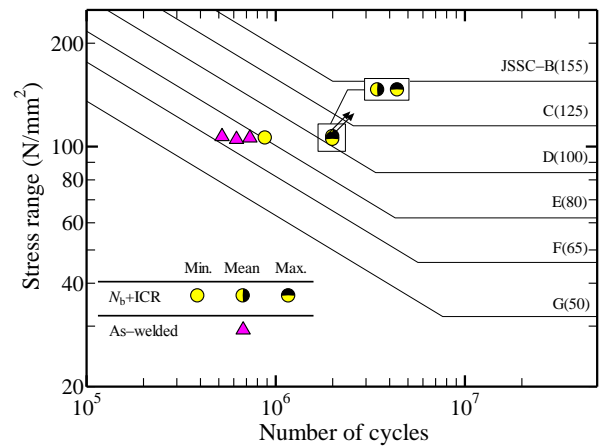
ICR処理を施した試験体におけるき裂進展挙動を図2.13に示す。これは $N_b$ のき裂に対して無荷重下でICR処理を行ったときの結果であり、比較として溶接ままの結果も示している。横軸は試験後の総繰返し回数である。

72万回载荷した時点でICR処理を実施し、その後9万回载荷したとき（試験開始から81万回の時点）にき裂の再進展がみられた。再び進展してからしばらくはき裂の成長は緩やかであったが、これはき裂先端が処理領域をぬけるまで（き裂長約40mm程度まで）はICR処理による圧縮ひずみが影響しているためであると考えられる。き裂先端が処理領域をぬけると急激に進展し始めて破断に至っている。

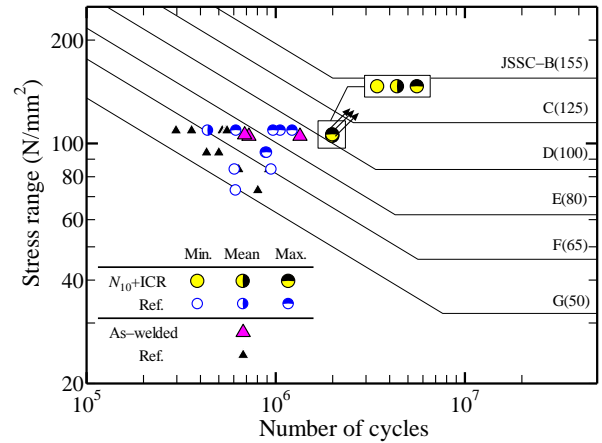
### (4) 疲労試験結果

疲労試験結果を図2.14に示す。本研究では疲労寿命を次のように定義した。ICR処理を施す前の結果については、 $N_b$ ,  $N_{10}$ ,  $N_{30}$ のき裂に達したときの繰返し数を疲労寿命とした。ICR処理後の結果については、処理を行ってからき裂先端がICR処理部をぬけるまでの繰返し数を疲労寿命と考えた。これは前節の結果より、処理領域をぬけるまでのき裂の進展は溶接ままのそれと比べて遅いことから、ICR処理の効果はき裂が処理領域をぬけるまでで評価したほうがよいと考えたためである。また図2.14(b)にはSBHS700を用いた桁試験体（主板厚12mm）に対してICR処理を施した結果<sup>2.11)</sup>も載せているが、この試験では処理後にわずかでも再進展がみられた時点疲労寿命としており、本研究のそれとは定義が若干異なる。

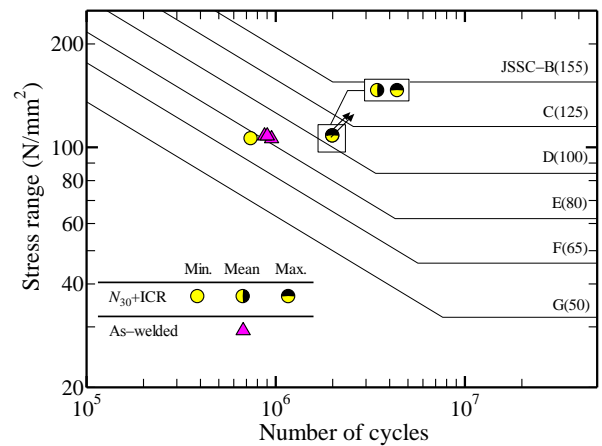
まずき裂長の違いについて考える。無荷重下



(a)  $N_b$ のき裂



(b)  $N_{10}$ のき裂



(c)  $N_{30}$ のき裂

図 2.14 引張荷重下の ICR 処理の効果

でICR処理を行った場合、 $N_b$ ,  $N_{30}$ のき裂ではICR処理によって溶接ままの疲労強度と同程度まで回復している。また $N_{10}$ に対して、本研究ではICR処理後に200万回载荷してもき裂の再進展はみられなかった。一方桁試験体では、無荷重下でICR処理を施した場合には元の疲労寿命までの回復にとどまっている。この理由として、継手試験体と桁試験体の応力分布の違いや主

板厚の影響が考えられるが、詳細は不明である。次に処理時の荷重レベルの違いに着目する。無荷重下で処理をしたものに比べて、平均応力もしくは最大応力を与えながら処理をしたものの効果は高く、いずれも200万回載荷後もき裂の再進展は確認されなかった。これは、ある程度負荷をかけた状態でICR処理を施すことにより、繰返し荷重が作用してもき裂が開口しにくくなるためである。桁試験体においても、負荷をかけながら処理を行うことにより寿命改善効果は高くなっている。

以上より、引張荷重下におけるICR処理の効果は主板厚によって異なる可能性が考えられるが、今回の検討範囲では少なくとも溶接ままの状態と同程度までは疲労寿命が回復すると考えられる。しかし、板厚の影響や表面き裂に対する適用性などについてはより詳細に検討する必要がある。

## 2.5 I桁に生じたき裂に対するICR処理の効果

2.3節および2.4節では小型の溶接継手試験体を用いてICR処理の効果を検証したが、本節では、I桁を模擬した中型の試験体に対して疲労試験を行い、ICR処理の効果について検討した。

### (1) 試験体および荷重方法

試験体は図2.15に示す2体の鋼I桁であり、板厚9mmのウェブに横方向および縦方向の付加

板が溶接されている。縦横の付加板の間隔は35, 50, 100mmと変化させ横方向の付加板の溶接部に生じる応力集中およびICR処理の施工性を変化させている。また、比較のため縦方向の付加板を省略したものも用意した。供試鋼材はSM490YAであり、機械的性質および化学成分は表2.4に示すとおりである。

両試験体ともに荷重は3点曲げで行い、横方向の付加板の荷重点側の公称曲げ応力が $\pm 85\text{N/mm}^2$ 、支点側の公称応力が $\pm 45\text{N/mm}^2$ となるように荷重した。応力比はほぼゼロとし、振動数0.9Hzで荷重した。

### (2) 対象とした疲労き裂とその処理方法

き裂は横方向の付加板溶接部から発生した。2.3節および2.4節で用いた小型の試験体と同様に、主板(ウェブ)上をまわし溶接部に沿って進展した。この試験体では図2.5(b)で示した $N_{10}$ の段階を疲労寿命とした。横方向の付加板が溶接されている面に対しては2.3節および2.4節と同様にICR処理を行い、 $N_{10}$ のき裂の段階でウェブ裏面にもき裂が発生している場合には裏面にもICR処理を行った。

### (3) ICR処理前後での静的荷重試験

ICR処理前後で荷重を静的に荷重し、処理部近傍のひずみを測定してICR処理の効果を確認した。計測結果を図2.16に示す。ICR処理前は、き裂部で力がほとんど伝達されないため、荷重

表 2.4 供試鋼材の機械的性質と化学成分 (ミルシート値)

部位	鋼種	降伏応力 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	伸び (%)	化学成分 (%)				
					C	Si	Mn	P	S
上下フランジ	SM490YA	409	547	27	0.16	0.40	1.40	0.017	0.004
ウェブ 補剛材		480	574	20	0.16	0.40	1.39	0.015	0.005

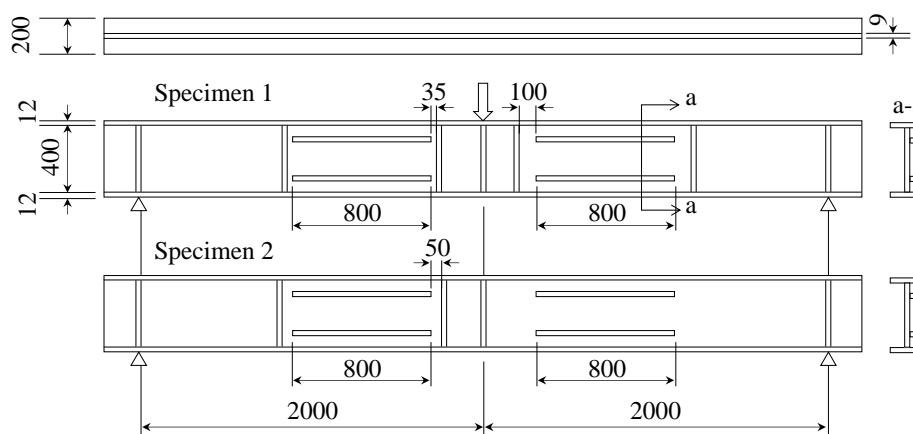


図 2.15 試験体 (単位:mm)

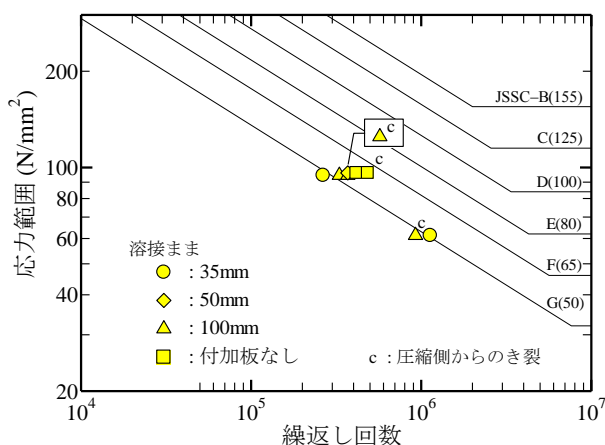
増加によるひずみの変動が小さい。一方、ICR処理を施すとき裂を閉口されて力を伝達するため、き裂近傍のひずみの変動が大きくなっていることがわかる。

#### (4) 疲労試験結果

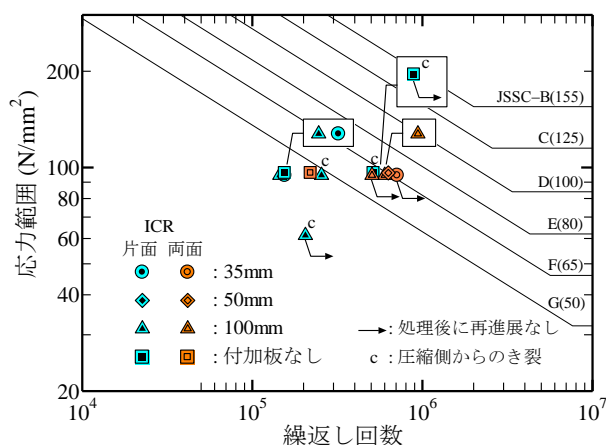
$N_{10}$ の表面き裂に対してウェブの片面のみを処理した場合、き裂は板内部で板厚方向に進展し、裏面に貫通した。一方、 $N_{10}$ の段階でウェブを貫通したき裂に対して表裏面に処理を施した場合は、いくつかの箇所でき裂の再進展が確認された。そこで今回は、処理を施してから、ウェブ表裏面においてき裂の再進展を確認するまでの繰返し数（処理時をゼロ回とする）を処理部の疲労寿命と考えることとした。

ICR処理前後の疲労寿命を図2.17に示す。図中の矢印は、ICR処理部において試験終了までにき裂の再進展を確認できなかったことを示している。またウェブ圧縮側の付加板からのき裂には右肩に“c”を付けて区別している。応力比による補正は行っていない。図2.17(a)より、縦横の付加板の間隔が小さいほど疲労強度等級が小さい傾向がみられる。

図2.17(b)より、横方向の付加板の溶接止端に発生した表面き裂に対して、片面のみからICR処理を行った場合、ICR処理後の残存寿命は元の継手の疲労寿命以下となっている。すなわち、本試験で対象とした継手のように、膜応力下にある表面き裂の場合、ICR処理後も板厚方向にき裂が進展するため、板曲げを受ける場合に比べて延命効果が小さい。一方、き裂が板を貫通した後に両面に処理を施すと、き裂の再進展を遅延でき、元の継手の疲労寿命と同程度まで回復できる可能性があることがわかる。



(a)  $N_{10}$ のき裂



(b) ICR 処理後

図 2.17 I 桁試験体の疲労試験結果

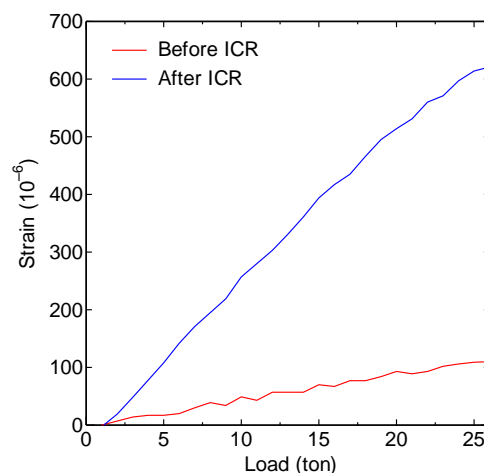


図 2.16 ひずみ計測結果

## 2.6 有限要素解析によるICR処理後のひずみの再現

本節では、ICR処理によるき裂進展の遅延効果を定量的に評価するため、まず有限要素解析を用いてICR処理後のひずみ分布を再現する手法を構築する。

### (1) ICR処理部周辺のひずみ測定

解析を行う前にICR処理によって鋼板の表裏に生じるひずみを測定し、その結果をもとに解析の諸条件を検討することとした。

試験片は板厚6mmの鋼板であり、鋼種は2.3節で用いたものと同じである。鋼板の表裏面に図2.18に示すようにゲージ長1mmのひずみゲージを貼付してICR処理によるひずみの変化を計測した。U1のゲージの真裏に位置するゲージがL1であり、U2とL2、U4とL4がそれと同様の位置関係にある。ICR処理は表面に3パス行った後、その真裏にも同様に3パスで処理を行った。



表 2.5 解析条件

弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	伝導率 (W/mm)		熱膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)		加熱温度 (°C)
		ICR 処理部	左記以外	ICR 処理部 (x, y 方向)	左記以外	
200	0.3	0.05	0	10.8	0	550

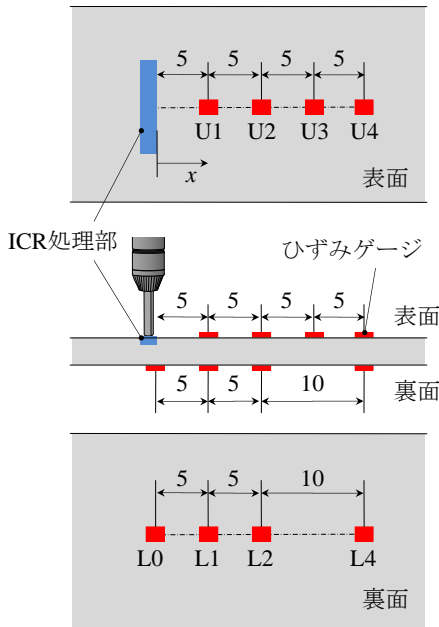


図 2.18 ひずみゲージ貼付位置 (単位: mm)

L0は表面のICR処理部の真裏に貼付したゲージであり、裏面処理時にはひずみゲージ上を打撃することになるため、表面処理時のみの計測とした。なお今回は、ICR処理による鋼板面のひずみ変化のみに着目しているため、疲労き裂は導入していない。

## (2) 測定結果

ICR処理後のひずみ分布を図2.19に示す。ICR処理後、表面では圧縮のひずみが生じており、処理部近傍では約-1200 $\mu$ のひずみが計測された。裏面では、ICR処理部の真裏のゲージを除いて、引張のひずみが生じているが、処理部から離れるにつれて値が小さくなる傾向は表面と同様である。

## (3) 解析によるICR処理の再現

ここでは処理部周辺に導入される圧縮ひずみに着目し、それを解析により再現することでICR処理を模擬する。ICR処理によって鋼板に生じる局所的な塑性変形を解析上では局所的な熱膨張として与え、処理部周辺への圧縮ひずみの導入を試みた。

解析モデルは図2.20に示すとおりであり、平板(板厚6mm、き裂なし)に対するICR処理を

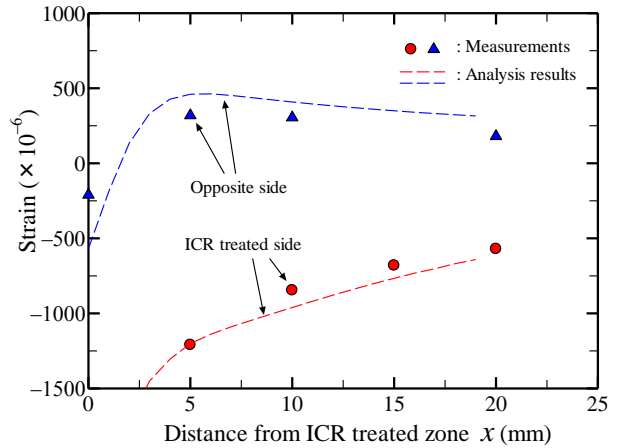


図 2.19 ICR 処理による板表裏面のひずみ分布

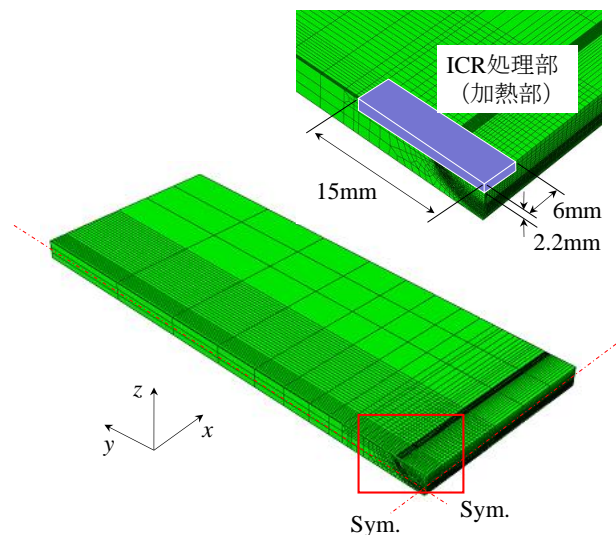


図 2.20 解析モデル

再現した。解析には汎用有限要素解析ソフトウェアAbaqus ver.6.10を使用し、要素には8節点ソリッド要素を用いた。最小要素サイズは0.05×0.1×0.1mmである。

解析条件を表2.5にまとめる。図中に示すICR処理領域のみに熱を与えて要素を膨張させ、その周辺に圧縮ひずみを導入した。処理領域の深さは、疲労試験により得られた破断面の観察結果をもとに2.2mmとした。また処理部はx方向およびz方向のみに膨張するものと仮定し、y方向の線膨張係数はゼロとした。加熱温度をさまざまに変化させて解析を行い、得られたひずみ分布が計測結果と比較的によく一致するときの加

熱温度を求めた。

#### (4) 解析結果

図2.19に解析結果を破線で示している。解析結果より、ICR処理を行った面では高い圧縮ひずみが導入されており、その裏面では処理部から離れるにつれて圧縮から引張へひずみが推移していることがわかる。この傾向は計測結果とよい一致を示している。よって、本解析法および入熱条件によりICR処理によって生じるひずみ分布を再現できていると考えられる。

### 2.7 ICR処理された表面き裂の応力拡大係数

前節で考案したICR処理の有限要素解析による再現方法を用いて、き裂の形状や寸法、主板厚、载荷方法などをさまざまに変化させた解析を行い、それらがICR処理後のき裂の応力拡大係数に与える影響を検討する。

#### (1) 解析方法

解析モデルとその要素分割の例を図2.21に示す。長さ $2a$ 、深さ $d$ の半楕円表面き裂を有する平板(400×400mm)に対して、その板表面にICR処理を行った。要素には8節点ソリッド要素を用い、対称性を考慮して1/4モデルとした。き裂先端の要素寸法は $0.1 \times 0.1 \times 0.1$ mmとした。

ICR処理の模擬は前節に示した手法で行った。処理領域は、疲労試験を参考に長さ $a+15$ mm、幅6mm、深さ2mmとした。ICR処理前後の板表面でのき裂の開閉口を再現するために、き裂面に接触条件を設けた。接触解析では、接触面の法線方向に対して剛接触として、向かい合う要素が交差しないようにした。なお接触面での摩擦は考慮していない。

解析パターンを表2.6に示す。今回は板厚 $t$ 、き裂長さ $2a$ 、き裂深さ $d$ に着目し、それらを表中のように変化させて解析を行った。ICR処理により圧縮ひずみを導入した後、き裂が開くまで曲げもしくは引張荷重を漸増させて与え、そのときのき裂最深部での応力拡大係数の変化を求めた。応力拡大係数の算出にはJ積分法<sup>2.12)</sup>を用いた。

#### (2) 公称応力と応力拡大係数の関係

板表面での公称応力とき裂最深部の応力拡大係数の関係を図2.22に例示する。これは $t=12$ mm、 $a=6$ mm、 $d=3$ mmのときの結果である。実線は解析結果、破線はNewman & Rajuの式<sup>2.13)</sup>により算出した表面き裂のき裂底の応力拡大

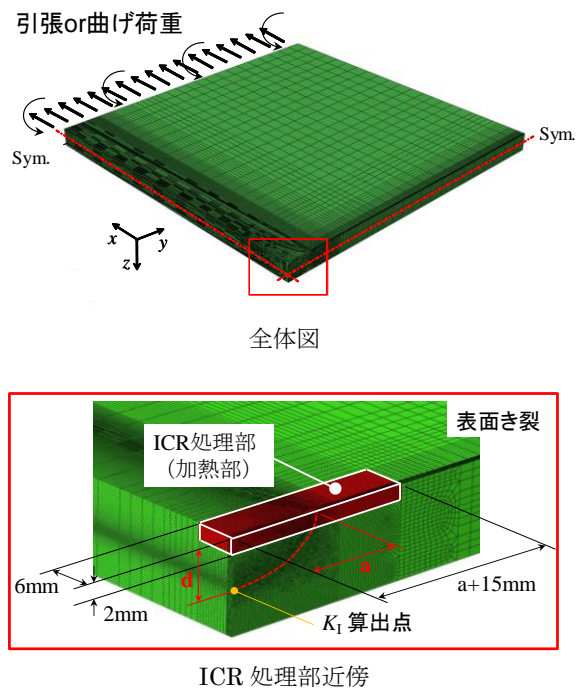


図 2.21 き裂を有する平板の解析モデル

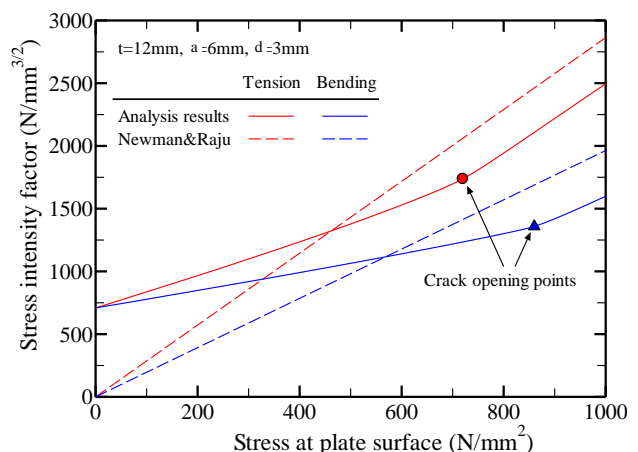


図 2.22 公称応力と応力拡大係数の関係

係数である。

ICR処理により板表面に圧縮ひずみを導入すると、き裂最深部ではわずかに開口するため、荷重が作用していなくても(公称応力 $0 \text{ N/mm}^2$ のとき)応力拡大係数はゼロではない。荷重を徐々に増加させるとき裂表面が徐々に開口し、プロット点の位置ではき裂中央断面のICR処理部が完全に開口する。き裂が開く後は再び表面き裂として振る舞うため、傾きが破線とほぼ等しくなっている。

ICR処理後の残存寿命を推定するためには、き裂が再開するときの公称応力およびき裂開口時の応力拡大係数の低減効果を推定する必要がある。

表 2.6 解析に用いた寸法

解析ケース名*	板厚 $t$ (mm)	き裂長 $2a$ (mm)	き裂深さ $d$ (mm)	$d/a$	$d/t$
t6-sc-1	6	3	1.5	1	0.25
t6-sc-2		6	3	1	0.5
t6-sc-3		12	3	0.5	0.5
t6-sc-4		24	3	0.25	0.5
t6-sc-5		9	4.5	1	0.75
t12-sc-1	12	6	3	1	0.25
t12-sc-2		12	6	1	0.5
t12-sc-3		24	6	0.5	0.5
t12-sc-4		48	6	0.25	0.5
t12-sc-5		18	9	1	0.75
t18-sc-1	18	6	3	1	0.17
t18-sc-2		9	4.5	1	0.25
t18-sc-3		12	6	1	0.33
t18-sc-4		18	9	1	0.5
t18-sc-5		36	9	0.5	0.5
t18-sc-6		72	9	0.25	0.5
t18-sc-7		24	12	1	0.67
t18-sc-8		27	13.5	1	0.75
t24-sc-1	24	12	6	1	0.25
t24-sc-2		24	12	1	0.5
t24-sc-3		48	12	0.5	0.5
t24-sc-4		96	12	0.25	0.5
t24-sc-5		36	18	1	0.75

(3) き裂が再開口するときの公称応力

き裂のアスペクト比が $d/a=1$ となる解析ケースについて、き裂開口時の公称応力とき裂サイズの関係を図2.23に示す。同図では、中塗りのプロットが引張荷重を与えた解析の結果であり、白抜きのプロットが曲げ荷重を与えた解析の結果となっている。この図から、曲げ荷重の解析結果は全体的に上方にプロットされおり、引張荷重の場合よりもき裂が再開口するときの公称応力が大きいことがわかる。またそれぞれの板厚に対して、引張荷重と曲げ荷重の解析結果のプロットがほぼ平行になっている。き裂が開くときの公称応力 $\sigma_{n,op}$ を板厚ごとに比較すると、板厚が大きくなるほど引張荷重と曲げ荷重の違いが小さくなっている。これは、板厚が大きい場合には、ICR処理の深さが板厚に比べて非常に小さいため、ICR処理が施された断面がほぼ一様引張に近い状態になっているためと考えられる。

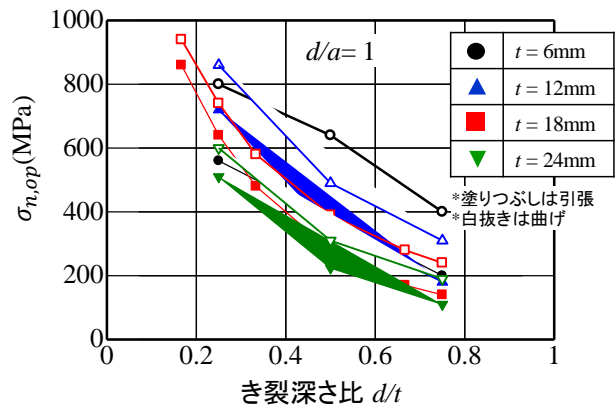
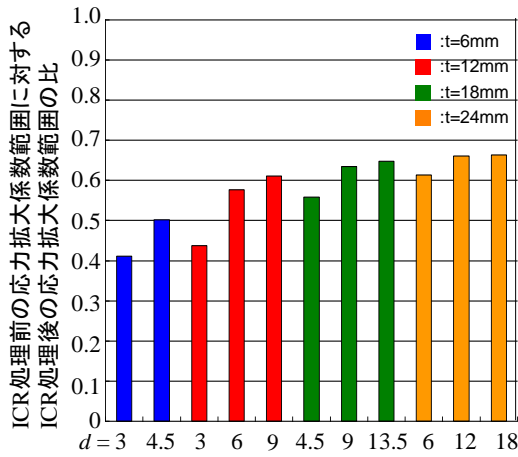


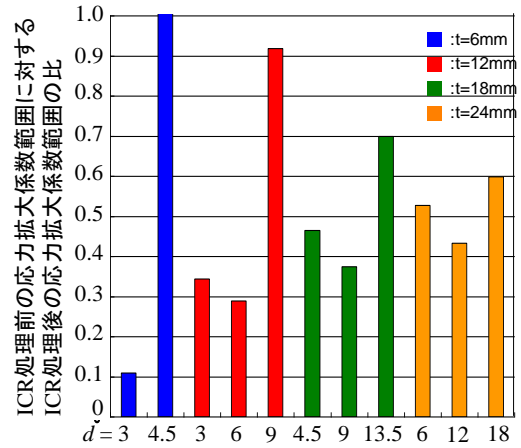
図 2.23 き裂再開口時の公称応力とき裂寸法の関係

(4) 応力拡大係数範囲の低減効果

ICR処理の効果として、処理前後の応力拡大係数範囲の変化を検討した。ここで応力拡大係数範囲とは、荷重による応力拡大係数の変動範



(a) 引張荷重



(b) 曲げ荷重

図 2.24 ICR 処理前の応力拡大係数範囲に対する ICR 処理後の応力拡大係数範囲の比

囲とした。ICR処理後の応力拡大係数範囲は、き裂が開口していない荷重初期段階における応力拡大係数の変化量とした。

処理前の応力拡大係数範囲に対する処理後のその比を図2.24に示す。曲げ荷重、引張荷重ともに、ICR処理により応力拡大係数は減少しており、曲げ荷重の方が引張荷重に比べて応力拡大係数の低減効果が大きいことがわかる。引張荷重の場合、主板厚が小さいほど、またき裂サイズが小さいほど、応力拡大係数の低減効果が大きくなっている。一方、曲げ荷重を受ける場合、き裂が板厚の半分以上のケースを除いて、き裂サイズが大きいほど応力拡大係数の低減効果が大きい。

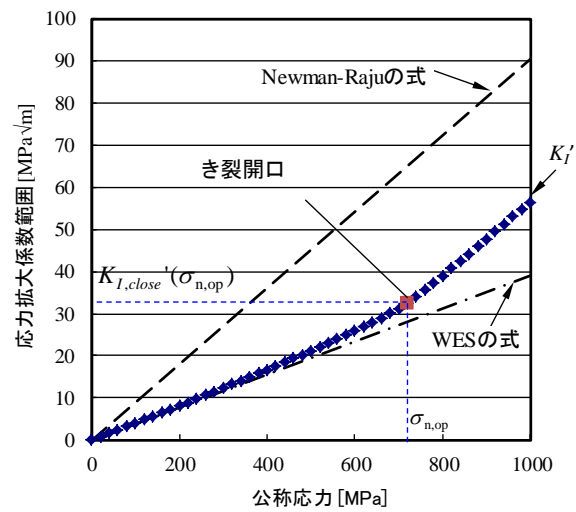


図 2.25 応力拡大係数範囲と公称応力の関係

## 2.8 ICR 処理された疲労き裂の余寿命の推定

ICR処理を施す場合、それによるき裂進展遅延効果を定量的に把握しておく必要がある。本節では、ICR処理後のき裂の応力拡大係数範囲を簡易に推定する方法を求め、それらを用いたICR処理後の余寿命の推定手法を提案する。

### (1) ICR処理後の応力拡大係数範囲

前節にて示したように、ICR処理後はある公称応力 $\sigma_{n,op}$ が作用するまではき裂表面が閉口しており、公称応力が $\sigma_{n,op}$ よりも大きくなるとき裂が開口する。図2.25にICR処理後のき裂最深部の応力拡大係数範囲と鋼板表面の公称応力の関係を示す。ICR処理を施した後、ICR処理後のき裂面に公称応力範囲 $\Delta\sigma_x (= \sigma_{x,max} - \sigma_{x,min})$ なる外力が作用すると、き裂の深さ方向への進展速度は公称応力の最大値に応じて以下の通りとなる。

$$\frac{dd}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (2.1)$$

$$\Delta K(\Delta\sigma_x) = \begin{cases} K_{I,close}(\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}) & \text{for } (\sigma_{x,max} \leq \sigma_{n,op}) \\ K_{I,close}(\sigma_{n,op} - \sigma_{x,min}) + K_{I,open}(\sigma_{x,max} - \sigma_{n,op}) & \text{for } (\sigma_{x,min} \leq \sigma_{n,op} < \sigma_{x,max}) \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで、 $K_{I,close}$  および  $K_{I,open}$  はそれぞれき裂表面が閉口および開口しているときのき裂最深部の応力拡大係数、 $\sigma_{x,max}$  および  $\sigma_{x,min}$  はそれぞれ公称応力の最大値および最小値である。

$\sigma_{x,max} < \sigma_{n,op}$  の場合、常に表面が閉口したき裂として余寿命を評価し、 $\sigma_{x,min} < \sigma_{n,op} < \sigma_{x,max}$  の場合にはき裂の開閉口が繰り返されることを考慮して余寿命を評価する。以降に ICR 処理後の応力拡大係数範囲を推定するのに必要となるき裂開口状態の応力拡大係数  $K_{I,open}$ 、き裂閉口



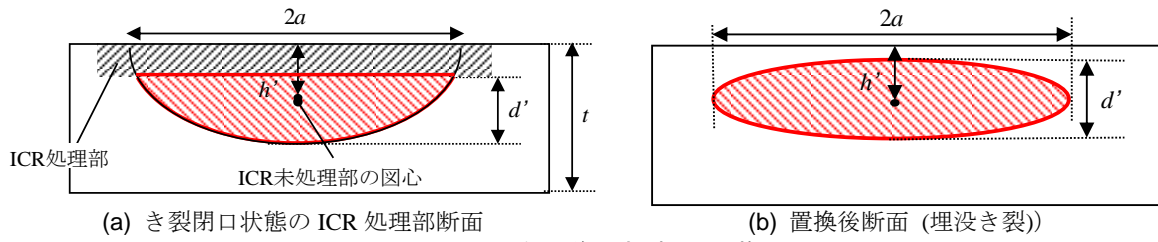


図 2.26 ICR 処理後のき裂面の置換え

状態の応力拡大係数  $K_{I,close}$  およびき裂が開口するときの公称応力  $\sigma_{n,op}$  の推定方法を示す。

## (2) き裂開口状態における応力拡大係数

### $K_{I,open}$ の推定

図 2.25 に示す通り，公称応力の最大値  $\sigma_{x,max}$  が  $\sigma_{n,op}$  よりも大きい場合き裂の開閉口が繰り返される。き裂表面が開口すると，き裂最深部の応力拡大係数は ICR 処理前の表面き裂のそれとほぼ同じとなる。したがって，き裂が開口している範囲 ( $\sigma_{n,op} < \sigma_x < \sigma_{x,max}$ ) の応力拡大係数範囲は Newman & Raju の表面き裂最深部の式<sup>2.13)</sup>にき裂開口状態の応力範囲 ( $\sigma_{x,max} - \sigma_{n,op}$ ) を代入して推定できる。

## (3) き裂閉口状態における応力拡大係数

### $K_{I,close}$ の推定

ICR 処理はき裂表面のみを閉口するため，ICR 処理後であってもき裂前縁の形状は楕円の弧状のままとなっている。このことから，図 2.26 に示すように ICR 処理後に板厚内部に残ったき裂を偏心荷を受ける楕円状埋没き裂に置き換え，き裂閉口状態の応力拡大係数範囲の簡易な推定を試みた。この断面の置換では，残存したき裂の高さと幅をそれぞれ埋没き裂の短径および長径とし，残存したき裂の図心位置と置

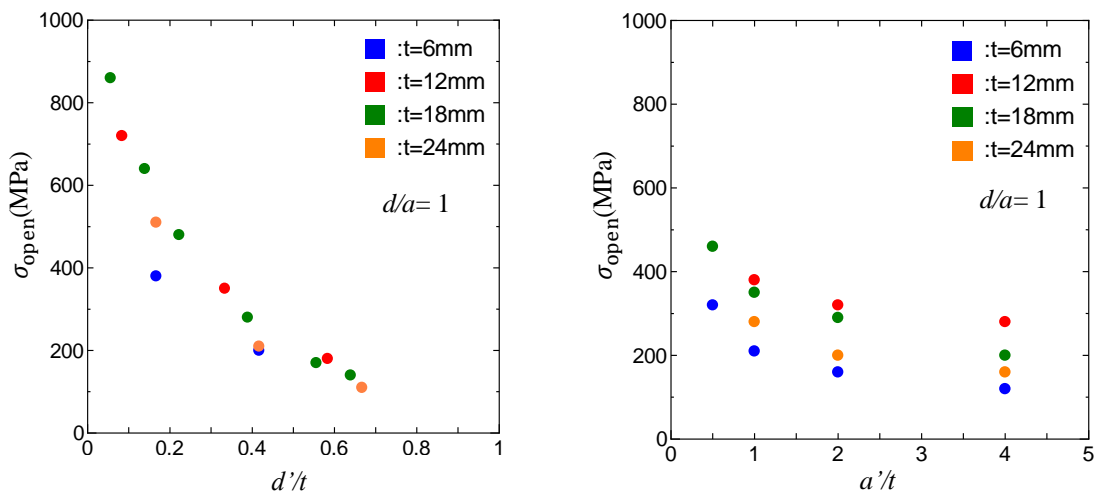
換後の埋没き裂の図心位置が一致するように配置している。

図 2.25 には，図 2.26(b) のように置換されたき裂に対して，WES-2805<sup>2.14)</sup> で提案されている偏心荷を受ける楕円状埋没き裂の応力拡大係数の推定式を示している。き裂が開口するまでの応力拡大係数の傾きは WES の式とほぼ平行であるとみなせる。したがって，き裂が閉口しているときの応力拡大係数範囲は，き裂閉口状態の応力範囲 ( $\sigma_{x,max} < \sigma_{n,op}$  のとき  $\sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}$ ， $\sigma_{x,max} > \sigma_{n,op}$  のとき  $\sigma_{n,op} - \sigma_{x,min}$ ) を WES の式に代入して推定できる。さまざまなき裂寸法や板厚に対して検討した結果，き裂寸法や板厚によらず十分な精度でき裂最深部の応力拡大係数を推定できることは確認している。

## (4) き裂が開口するときの公称応力の推定

前節で示したように，き裂が開口する時の公称応力は板厚やき裂のサイズによって異なる。ここでは回帰分析を用いて，板厚やき裂寸法からき裂が開口するときの公称応力を推定する方法を検討する。

き裂が閉口している状態を埋没き裂に置き換え，置換後の埋没き裂の長径，短径および板厚を用いてき裂が開口するときの公称応力を整理すると図 2.27 のようになる。図 2.27(a) に示



(a) き裂開口時の公称応力とき裂深さの関係 (b) き裂開口時の公称応力とき裂長さの関係

図 2.27 応力拡大係数範囲と公称応力の関係

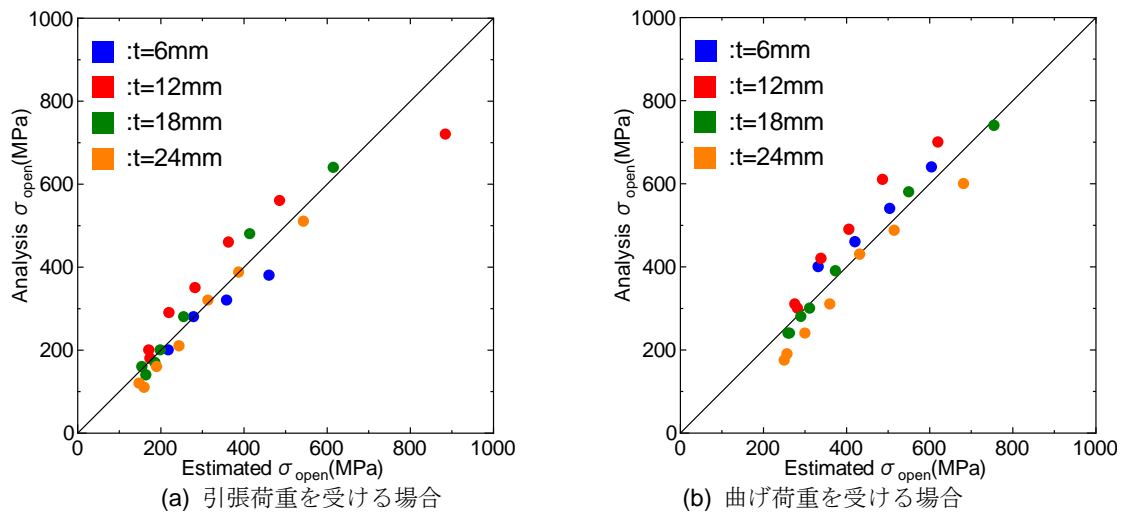


図 2.28 推定式および解析から求めたき裂開口時の公称応力の比較

すように、き裂が開口するときの公称応力と  $d'/t$  の関係には高い相関がみられる。また、図 2.27(b)より、き裂が開口するときの公称応力と  $a/t$  の関係にも板厚ごとの相関がみられる。これらのことから、埋没き裂の代表寸法および板厚を用いて、次式で示すき裂開口時の公称応力推定式を構築した。

$$\sigma_{n,op} = \begin{cases} e^{4.985} \cdot \left(\frac{d'}{t}\right)^{-0.581} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^{-0.3610} & \text{(for tension)} \\ e^{5.458} \cdot \left(\frac{d'}{t}\right)^{-0.485} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^{-0.262} & \text{(for bending)} \end{cases} \quad (2.3)$$

上式による推定値と解析より求めた値の比較を図 2.28 に示す。この図から、限られた解析ケースではあるが、推定式を用いてある程度の精度でき裂開口時の公称応力を求めることができる。ただし、板厚により両者に違いがみられるため、より精度の高い余寿命の評価に向けては  $\sigma_{n,op}$  の推定式を改善する必要がある、今後の課題である。

以上のように、本節で示した推定式を用いてき裂開口状態の応力拡大係数  $K_{I,open}$ 、き裂閉口状態の応力拡大係数  $K_{I,close}$ 、き裂が開口するときの公称応力  $\sigma_{n,op}$  を求めることができ、それにより ICR 処理後のき裂進展速度、さらには余寿命を評価することができる。

### (5) ICR処理後の余寿命の推定手順

ICR 処理後の余寿命の推定には図 2.29 に示すフローに従ってき裂進展解析を行う。

①まず、板厚および初期き裂のサイズから、ICR 処理後の表面き裂を埋没楕円状き裂に置換する。②その後、式(2.3)を用いてき裂が開口す

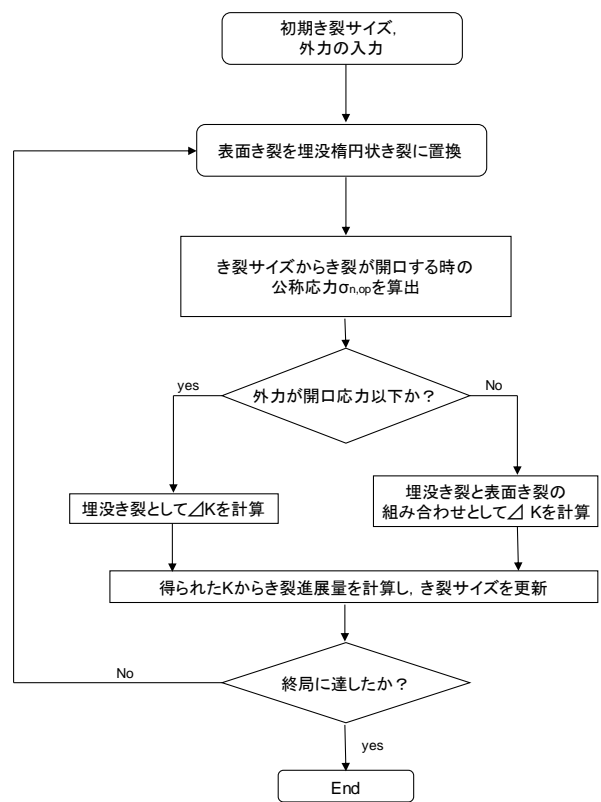


図 2.29 ICR 処理後の余寿命推定フロー

るときの公称応力  $\sigma_{n,op}$  を算出する。③作用する引張応力および曲げ応力が  $\sigma_{n,op}$  より小さい場合には式(2.2)の上式、 $\sigma_{n,op}$  より大きい場合には式(2.2)の下式を用いてき裂の最深部の応力拡大係数範囲を算出する。④式(2.1)より求めたき裂深さの進展速度に十分小さい繰返し回数  $\Delta N$  を乗ずることによって、その間のき裂深さ方向の進展量を  $\Delta d$  求める。⑤初期き裂に  $\Delta d$  を加えたものを進展後のき裂深さと考え、それが定義した終局状態に至っていないかを照査する。⑥き裂

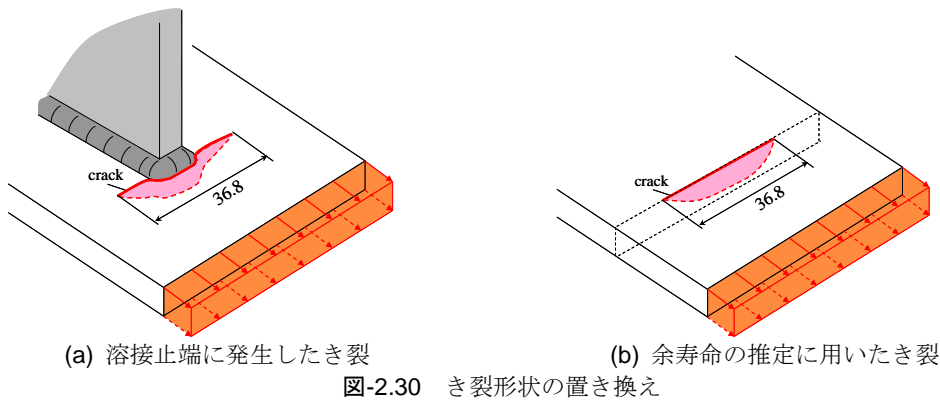


表 2.7 桁ウェブに発生したき裂への ICR 処理後の余寿命推定値と実験値

	実験結果	推定値		
		$d/a=0.2$	$d/a=0.25$	$d/a=0.3$
ICR 処理後の寿命(回)	155,000	661,580	277,220	139,140

が終局状態に至っていない場合、進展後のき裂形状を基に、再度進展解析を行う。

この計算過程で終局状態に達するまでに費やした繰返し回数を余寿命とする。

#### (6) I 桁ウェブに発生したき裂への ICR 処理後の余寿命推定

2.5 節で行った I 桁疲労試験の ICR 処理後の余寿命を推定し、実験結果と比較する。

この疲労試験では I 桁ウェブに取り付けられた付加板の止端から発生したき裂に対して ICR 処理を施した。ICR 処理時のき裂長さ  $2a$  は 36.8mm であり、深さ  $d$  は確認することができなかったため、山田ら<sup>2.15)</sup>によって確認された表面き裂のき裂形状比を参考に  $a/d=0.2, 0.25, 0.3$  となる 3 種類と仮定した。図 2.30 に示すように溶接止端から発生したき裂を平板上の半楕円状表面き裂とみなし、ICR 処理後のき裂の進展解析および余寿命の推定を行った。

き裂が発生した継手は理論上は膜応力成分のみが発生することになるため、引張荷重を受けるき裂として ICR 処理後の余寿命を推定した。ICR 処理は最小荷重を載荷した状態で行ったため、ICR 処理後の作用応力の最小値  $\sigma_{x,min}$  は 0 N/mm<sup>2</sup>、最大値  $\sigma_{x,max}$  は 83.3N/mm<sup>2</sup> となる。鋼道路橋の疲労設計指針・同解説<sup>2.9)</sup>を参考に、下限応力拡大係数範囲  $K_{th}=76(N/mm^2)$ 、 $C=1.1 \times 10^{-12}$ 、 $m=2.75$  とした。なお、ICR 処理後はき裂が深さ方向のみに進展すると仮定し、き裂長さは一定としてき裂進展解析を行った。

き裂が 9mm のウェブを貫通するのに要する繰返し回数の推定値を表 2.7 に示す。なお、今回のき裂進展解析ではき裂がウェブを貫通す

るまで、作用応力  $\sigma_{x,max}$  の値が  $\sigma_{n,op}$  より小さかった。すなわち、今回の作用応力では ICR 処理面は再開口していなかったと考えられる。

疲労試験においてき裂がウェブを貫通しているのが確認されたのは載荷回数 155,000 回するときであった。き裂進展解析を用いた推定値はき裂形状比によって最大で 5 倍程度値が異なるが、いずれの結果も実験値と同じ桁数に収まっている。本解析結果ではき裂形状比  $d/a$  を 0.3 としたときに最も実験値に近い値となっており、実験値と約 16,000 回程度の誤差で推定することができている。

#### 2.9 まとめ

本章では、荷重条件、応力比、処理姿勢、処理時のき裂長、応力レベルが ICR 処理の効果に与える影響を検討した。さらに ICR 処理後の余寿命の推定方法を提案した。得られた主な結果を以下に記す。

- X線回折法により処理部周辺の残留応力を計測した結果、処理部近傍では鋼板の降伏応力の 6~7 割程度の圧縮応力が導入されていることが示された。
- 繰返し曲げ荷重を受けるとき、板表面の曲げ応力が 120N/mm<sup>2</sup> 以下であれば、応力比  $R=-\infty \sim 0.5$  のいずれの場合でも ICR 処理後の疲労寿命は溶接したままのそれと同程度以上となった。
- 繰返し引張荷重を受けるとき、公称応力が 100N/mm<sup>2</sup> 以下であれば、ICR 処理後の疲労寿命は溶接したままのそれと同程度以上とな

った。ただし、曲げ荷重を受ける場合よりも ICR 処理の効果は小さくなった。

- 処理姿勢および鋼種が ICR 処理の効果に及ぼす影響はみられなかった。
- 溶接部から主板に進展し始めた段階のき裂に対しては、ICR 処理による効果小さい。これは、主板上のき裂が短い場合にはき裂先端を十分に処理できないことが原因であると考えられる。
- 楕円状表面き裂に対して ICR 処理を行うとき、ICR 処理後に板内部に残存するき裂を楕円状埋没き裂に置き換えることでき裂最深部の応力拡大係数を推定することができる。
- 本レポートでは紙面の都合上割愛したが、実橋梁に生じた疲労き裂に対して ICR 処理の試験施工を行っている。き裂周辺のひずみの計測結果を基に ICR 処理を適用可能なき裂を明らかにした。

## 参考文献

- 2.1) 山田健太郎, 石川敏之, 柿市拓巳: 疲労き裂を閉口させて寿命を向上させる試み, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.4, pp.961-965, 2009.
- 2.2) 石川敏之, 山田健太郎, 柿市拓巳, 李蒼: ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No.2, pp.264-272, 2010.
- 2.3) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎: 鋼板の側面にガセットプレートがすみ肉溶接された継手への ICR 処理による疲労強度向上効果, 鋼構造論文集, Vol.18, No.70, pp.39-47, 2011.
- 2.4) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎: すみ肉溶接継手の溶接止端に発生した疲労き裂の ICR 処理による補修・補強, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.665-672, 2013.
- 2.5) 杉本義博, 塚本成昭, 青木康素: 疲労き裂に対する ICR 処理の試験施工と補修効果, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集, I-553, pp.1105-1106, 2013.
- 2.6) 塚本成昭, 大田典裕, 岡本亮二, 青木康素, 高井由喜: 垂直補剛材廻し溶接部に対する ICR 処理 2 年後の追跡点検と非破壊検査方法, 土木学会第 69 回年次学術講演会概要集, I-458, pp.915-916, 2014.
- 2.7) 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明: 残留応力の X 線評価—基礎と応用—, 養賢堂, 2006.
- 2.8) 山田健太郎, 小菌江朋亮, 小塩達也: 垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験, 鋼構造論文集, Vol.14, No.55, pp.1-8, 2007.
- 2.9) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例— (2012 年改定版), 技報堂出版, 2012.
- 2.10) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎: 面外ガセット継手のルートき裂・ガセット止端き裂への ICR 処理, 鋼構造年次論文報告集, Vol.19, pp.323-330, 2011.
- 2.11) 判治剛, 館石和雄, 小野秀一, 段下義典: 橋梁用高降伏点鋼板(SBHS)を用いた溶接継手の疲労特性, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.587-595, 2014.
- 2.12) 白鳥正樹, 三好俊郎, 松下久雄: 数値破壊力学, 実教出版, 1980.
- 2.13) Newman, J.C. and Raju, I.S.: Stress-intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads, *NASA Technical Memorandum* 85793, 1984.
- 2.14) 日本溶接協会: WES2805, 溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法, 2007.
- 2.15) 山田健太郎, 牧野時則, 馬場千尋, 菊池洋一: 疲労き裂の進展挙動に注目したガセット継手の疲労強度解析, 土木学会論文集, No.303, pp.31-41, 1980.



## 第3章 樹脂注入法

### 3.1 背景

繰返し荷重下にある疲労き裂は開閉口を繰返し、それにより進展する。一般に、き裂の進展性は最大開口幅と最小開口幅の差、つまり開口量の変動分（これをき裂開口変位と呼ぶ）により評価できる。そのため、開口変位を低減できればき裂の進展を遅延もしくは停留させることが可能である。

過去の実験<sup>3.1)</sup>において、き裂内部に生じた腐食生成物がき裂の閉口を抑制するによってき裂進展速度が変化することが報告されている。腐食生成物がいわゆる「くさび」のように働き、き裂閉口を抑制することによりき裂開口変位が減少し、き裂進展速度が変化するというメカニズムである。これをくさび効果と呼ぶが、この考え方を利用した補修方法がこれまでにいくつか提案されている。

例えば、微細粒（磁粉およびアルミナ粒子）を含んだ油をき裂内に浸透させ、それによるくさび効果が検討されている<sup>3.2, 3.3)</sup>。外力により強制的に開口させた中央貫通き裂に対して適用した結果、き裂の進展を遅延できることが示されているが、き裂長によって効果の程度が異なることが指摘されている。これは同じ大きさの荷重であってもき裂長によって開口量が異なるため、粒子径が同一の場合は開口量が大きくなると、くさび効果による開口変位の低減割合が低下するためである。つまり、微細粒子をき裂内に注入する方法ではき裂長の変化に柔軟に対応できない可能性が考えられる。

き裂内に樹脂を注入し、それが硬化することによりくさびとしての効果を期待する手法も提案されている。樹脂注入法によるき裂進展遅

延メカニズムを図3.1に示す。図3.1(a)に示すようにき裂を有する平板を考え、無応力時に完全閉口し、応力作用下で $\delta_0$ だけ開口するものとする。き裂が開口しているときに樹脂を注入して除荷すると、樹脂の弾性変形分だけ閉口するが、き裂内の樹脂がくさびとして機能するため、き裂が開口したままとなる。このときの残留開口量を $\delta_1$ とする。その後再び載荷すると、き裂は $\delta_0$ まで開口するが、開口変位は $\delta_0 - \delta_1$ に減少するため、き裂進展速度が減少することとなる。なおこの樹脂注入法では、樹脂がくさびとして働けばよく、樹脂がき裂面を接着して開口を抑制する効果は期待していない。

既往の研究<sup>3.4-3.8)</sup>において、引張荷重が作用する平板や十字溶接継手、曲げ荷重が作用する面外ガセット溶接継手に生じた疲労き裂に対する樹脂注入法の有効性が検討されている。その結果、き裂内に十分に樹脂が充填されれば、引張や曲げにかかわらずき裂進展の遅延が期待できることが示されている。なお、き裂が最大に開口しているときに樹脂を注入することで最大の効果が得られるため、これらの検討では、樹脂注入時に引張荷重を作用させたり、き裂近傍を加熱して熱膨張によりき裂を開口させるなどの工夫をしている。

溶接継手において、圧縮荷重の繰返しにより生じた疲労き裂を考えると、このき裂は引張溶接残留応力の影響により無荷重状態で最も開口しており（図3.1(b)の状態）、荷重が作用することにより閉口する。つまり、繰返し圧縮荷重下のき裂に対しては、き裂を開口させるための作業が不要であり、死荷重のみの状態で樹脂を注入できると考えられる。しかし、繰返し圧縮荷重を受けるき裂に対する樹脂注入法の効果

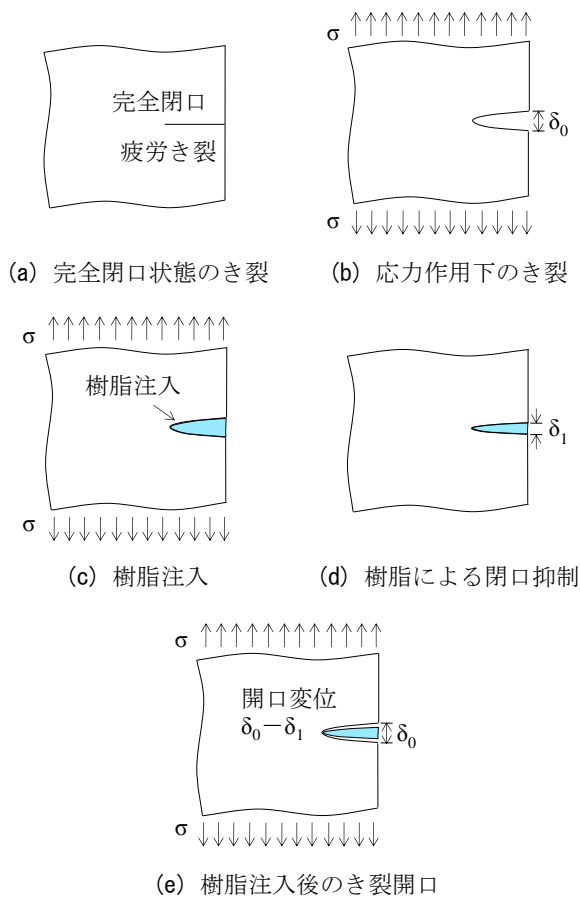


図 3.1 樹脂注入によるき裂進展抑制の原理

はほとんど明らかにされていない。

そこで本研究では、圧縮の繰返し荷重下のき裂に対する樹脂注入法の適用性を検討することを目的とする。そのためにまず、樹脂の粘度や硬化時間などの観点から、効果的にき裂内に充填可能な樹脂を選定するために、樹脂浸透試験を実施した。次に、面外ガセット溶接継手に生じた疲労き裂に樹脂注入法を適用し、本手法によるき裂進展遅延効果を明らかにした。その際、樹脂の種類や注入の向きによる効果の違いについて検討した。さらに有限要素解析により、樹脂注入によりき裂遅延効果が期待できる条件を明らかにするとともに、樹脂の浸透量を定量的に評価できる手法を提案した。

### 3.2 樹脂浸透試験

き裂内に効果的に浸透する樹脂を選定するために、粘性や硬化時間の異なる樹脂を用いた浸透試験を実施した。き裂を模擬したスリット試験体に4種類の樹脂を注入し、浸透量を計測した。

表 3.1 樹脂の仕様の規格値

樹脂	粘度 (mPa·s)	硬化養生時間
R <sub>1</sub>	300 (5°C)	25 分 (15°C)
R <sub>2</sub>	30	—
R <sub>3</sub>	450±100 (20°C)	24 時間程度
R <sub>4</sub>	3 (20°C)	30 秒

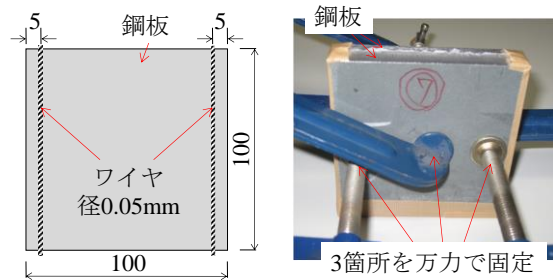


図 3.2 試験体 (単位: mm)

#### (1) 試験方法

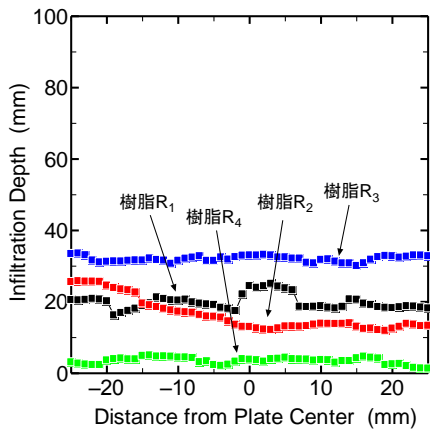
本試験にて用いた樹脂の仕様を表3.1に示す。樹脂R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>は2液混合型であり、樹脂R<sub>4</sub>は1液型である。樹脂R<sub>1</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>は市販品であり、粘度の規格値は、樹脂R<sub>1</sub>が300mPa·s (5°C)、樹脂R<sub>3</sub>が450±100mPa·s (20°C)、樹脂R<sub>4</sub>が3mPa·s (20°C)である。また、樹脂R<sub>1</sub>では硬化養生時間が25分 (15°C)、樹脂R<sub>3</sub>では24時間程度、樹脂R<sub>4</sub>では30秒とされている。樹脂R<sub>2</sub>は試作品であり、その仕様は不明である。

図3.2に示すように、表面を丁寧に研磨した2枚の鋼板 (100×100mm) の間に0.05mm径のワイヤを挟むことによりき裂を模擬したスリットを製作し、それに樹脂を注入した。スリット幅は板幅方向の位置によらずほぼ一定であり、全てでほぼ同程度のスリット幅であることは確認している。なお、スリット幅の平均値は0.06mmであった。

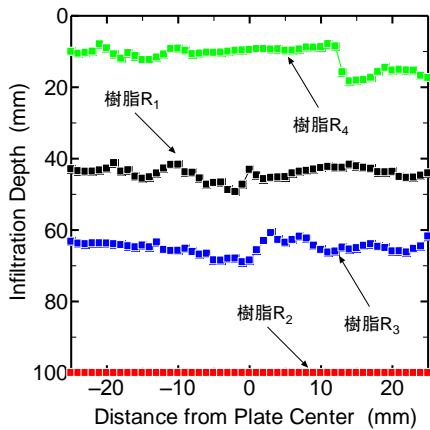
樹脂の注入は、スリットの上面 (下向きに注入) もしくは下面 (上向きに注入) から行った。試験中の室温は21°C、湿度は80%前後であった。樹脂R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>の注入量は約15gとし、樹脂R<sub>4</sub>は、樹脂の硬化時間とされている30秒間注入し続けることとした。

#### (2) 試験結果

約96時間後に2枚の鋼板を分離し、接合面を観察して浸透量の計測を行った。計測結果を図3.3に示す。これは、板幅中央から±25mmの範囲における下面および上面からの浸透量を1mm間隔で計測したものである。



(a) 上向き注入 (浸透方向: 下から上)



(b) 下向き注入 (浸透方向: 上から下)

図 3.3 樹脂の浸透試験結果

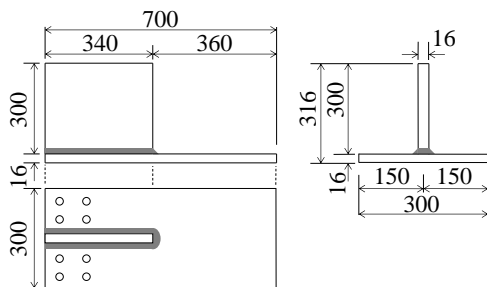


図 3.4 疲労試験体 (単位: mm)

表 3.2 供試鋼材の機械的性質 (ミルシート値)

鋼種	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SM490YA	429	532	19

表 3.3 供試鋼材の化学成分 (%) (ミルシート値)

鋼種	C (×100)	Si (×100)	Mn (×100)	P (×1000)	S (×1000)	Cu (×100)	Ni (×100)	Cr (×100)	Mo (×100)	V (×100)	B (×10000)
SM490YA	15	20	110	14	4	1	1	2	1	1	1

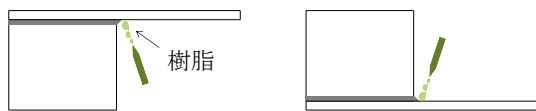
上向きに樹脂を注入した場合でも毛管現象により樹脂が浸透していることがわかる。硬化時間が比較的早い樹脂R<sub>1</sub> (規格値: 25分 (15℃)) では平均で19.9mmの浸透量が得られた。樹脂R<sub>2</sub>の浸透量は平均で16.4mmであったが、約96時間 (約4日) 後も注入口付近の樹脂が硬化していなかった。樹脂R<sub>3</sub>は樹脂R<sub>1</sub>に比べて硬化までに時間を要するが、平均で32.1mmと4種類の樹脂の中で最も大きい浸透量であった。樹脂R<sub>4</sub>は硬化時間が極めて短いため、浸透する前に硬化してしまったと考えられ、浸透量は平均で3.5mmとほとんど浸透しなかった。

下向きに樹脂を注入した結果、樹脂R<sub>1</sub>で平均44.1mm、樹脂R<sub>3</sub>で65.0mm、樹脂R<sub>4</sub>で11.6mmの浸透量が得られた。なお樹脂R<sub>2</sub>は粘性が小さいため全面に浸透していたが、上向きの場合と同様に、試験体分離時に硬化していない領域が確認された。

樹脂注入を実橋へ適用する場合には、硬化時間が短くて広範囲に浸透する樹脂が理想であり、今回用いた樹脂の中では、硬化時間および浸透量の両面から考えて、樹脂R<sub>1</sub>およびR<sub>3</sub>の適用可能性が考えられる。樹脂R<sub>4</sub>については、下向きであればある程度浸透し、軽微なき裂に対してなら適用できる可能性がある。また、硬化時間までの時間については改良の余地があるが、浸透量の観点からは樹脂R<sub>2</sub>も効果が期待できると考えられる。そこで本研究では、樹脂R<sub>3</sub>を基本とし、その他の樹脂も含めて圧縮荷重下でのき裂遅延効果を検討することとした。

### 3.3 疲労試験

圧縮荷重の繰返しにより溶接止端部に生じた疲労き裂を対象に、樹脂注入法の適用性を明らかにするとともに、樹脂の種類や注入向きがき裂進展遅延効果に与える影響を検討した。さらに、樹脂をより深くまで浸透させる注入法についても検討した。

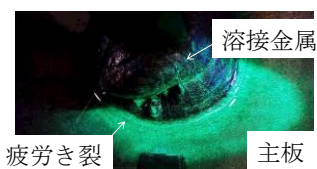


(a) 上向き注入 (b) 下向き注入

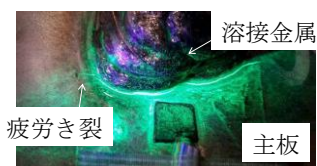
図 3.5 樹脂の注入方向

表 3.4 樹脂の注入パターンと試験体名

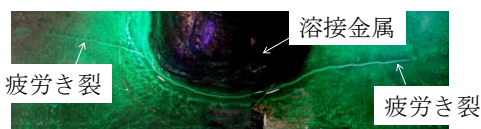
試験体名	樹脂種類	注入量 (g)	注入向き
N	無し	—	—
R <sub>1</sub> -O	R <sub>1</sub>	15	上
R <sub>1</sub> -U	R <sub>1</sub>	15	下
R <sub>2</sub> -O	R <sub>2</sub>	15	上
R <sub>2</sub> -U	R <sub>2</sub>	15	下
R <sub>3</sub> -O	R <sub>3</sub>	15	上
R <sub>3</sub> -U	R <sub>3</sub>	15	下
R <sub>3</sub> I-15-O	R <sub>3</sub> +鉄粉	15+15	上
R <sub>3</sub> I-15-U	R <sub>3</sub> +鉄粉	15+15	下
R <sub>3</sub> I-30-O	R <sub>3</sub> +鉄粉	15+30	上
R <sub>3</sub> I-30-U	R <sub>3</sub> +鉄粉	15+30	下



(a) 止端に沿ったき裂 (き裂長 37.9mm)



(b) 主板に伸び始めたき裂 (き裂長 45mm, 樹脂注入)



(c) 試験終了時のき裂 (き裂長 90mm)

図 3.6 き裂進展挙動

### (1) 試験体および载荷方法

試験体の形状および寸法を図3.4に示す。試

験体は主板の長さ700mm, 幅300mm, 板厚16mmの面外ガセット溶接継手である。鋼種はSM490YAであり, 供試鋼材のミルシートによる機械的性質を表3.2に, 化学成分を表3.3に示す。

疲労試験には, 第2章で述べた板曲げ振動疲労試験機<sup>39)</sup>を用いた。試験システムの詳細は省略するが, 今回は自由端側のコイルばねを上方に押し上げて, 溶接止端部に圧縮の平均応力を与えた状態で疲労試験を行った。公称応力範囲は80N/mm<sup>2</sup>, 応力比は-∞とした。

試験は次の手順で行った。まず, 圧縮の繰返し荷重下で疲労試験を実施し, 溶接止端部に疲労き裂を発生させ, 板表面での長さが約45mmになるまで载荷を続けた。次に, そのき裂に対して, 次項に述べる方法で内部に樹脂を注入した。樹脂が硬化した後, 疲労試験を再開し, き裂長が90mmに達した時点で破断とみなして载荷を終了した。なお, 樹脂注入後のき裂進展量は破面のビーチマークから測定した。ビーチマークは, 平均応力を変えずに公称応力範囲を1/2とし, 15万回载荷を繰り返すことにより導入した。樹脂を注入する直前に1回, および注入後から一定サイクル毎にビーチマークを入れた。

### (2) 樹脂注入方法

樹脂の注入は, 室温21℃, 湿度90%前後に保たれた恒温室で行った。図3.5に示すように試験体を設置し, 下向きまたは上向きで樹脂を注入した。注入する樹脂には樹脂R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>を用いた。樹脂の注入パターンを表3.4にまとめる。今回は, 樹脂に充填材用鉄粉を適量混ぜ, 鉄粉によるくさび効果にも期待する試験体も用意した。鉄粉入り樹脂は, 樹脂と鉄粉を1:1もしくは1:2の割合で混ぜ合わせたものを注射器によりき裂に注入した。樹脂注入後, 樹脂R<sub>1</sub>では24時間, 樹脂R<sub>2</sub>では96時間, 樹脂R<sub>3</sub>および鉄粉入りの樹脂R<sub>3</sub>では48時間恒温室で養生し, 疲労試験を再開した。

試験体名は, 樹脂注入を行わなかったものを「N」とし, 樹脂を入れたものは, 樹脂 (R<sub>1</sub>~R<sub>4</sub>) と注入向き (上向き: O, 下向き: U) の組み合わせで表している。また鉄粉入りのものは, 「R<sub>3</sub>I-7.5」(樹脂: 鉄粉=2: 1), 「R<sub>3</sub>I-15」(樹脂: 鉄粉=1: 1), もしくは「R<sub>3</sub>I-30」(樹脂: 鉄粉=1: 2) とした。

### (3) き裂進展挙動

図3.6にき裂発生および進展状況を示す。図は, まわし溶接止端部を斜め上から撮影したものである。図3.6(a)に示すように, 止端部に発生



したき裂は、まわし溶接の止端に沿って幅方向に進展し、ある程度大きくなった段階で、同図(b)に示すように止端から主板に進展し始めた。最終的には同図(c)のように、板幅方向に全長約90mmに達した時点で荷重を終了した。

#### (4) 破面観察

図3.7に樹脂を注入した試験体の破面の例を示す。これは下向きで樹脂R<sub>1</sub>を注入したR<sub>1</sub>-U試験体の破面である。板幅中央部において深さ方向に8.3mm程度まで浸透しており、樹脂注入時のピーチマークと比較すると、9割程度まで充填されていると予想される。なお、上向きで注入した試験体もほぼ同様の結果であり、樹脂の注入向きによる違いはほとんどなかった。

鉄粉を混入した一部の試験体では、樹脂の浸透領域が二層に分かれていることが観察できた。これは、き裂表面部で鉄粉が停留し、樹脂の浸透を阻害してしまったためであると考えられる。

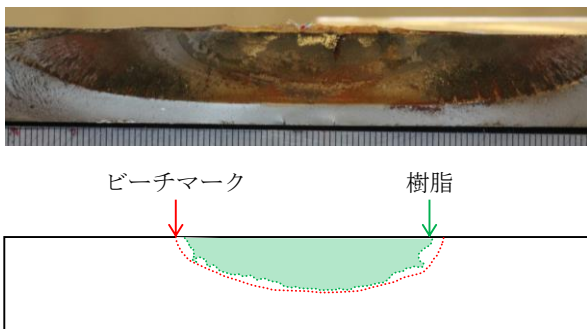


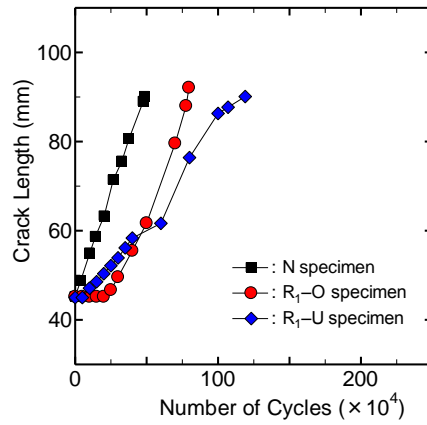
図 3.7 破面の例 (R<sub>1</sub>-U 試験体)

#### (5) き裂長と繰返し数の関係

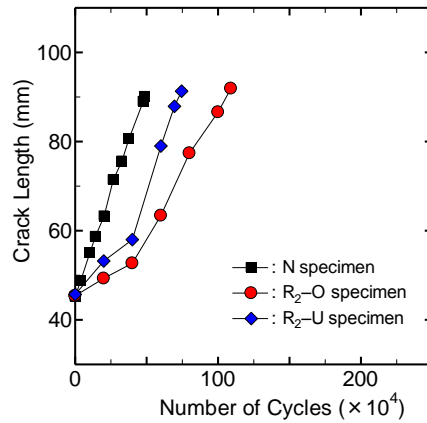
破面から樹脂注入後のき裂の伸びを計測した。図3.8にき裂長と繰返し数の関係の例を示す。縦軸は主板表面におけるき裂長、横軸は樹脂注入後からの荷重回数である。ただし、樹脂注入を行っていない試験体(N試験体)については、樹脂注入時のき裂長に達したときをゼロとし、それ以降の荷重回数で整理している。

上向きで樹脂を注入した場合(色付実線)、注入後から100万回程度まで進展が遅延している。他の樹脂の場合では、注入後、20~40万回程度まではき裂進展が若干遅くなっている。下向きの場合(色付破線)、上向きと同様に、どの樹脂でも注入後から20~40万回程度まではき裂進展が遅延している。よって、き裂進展遅延効果の観点からみても、注入向きの影響や樹脂の違いによる差異はあまりみられないといえ

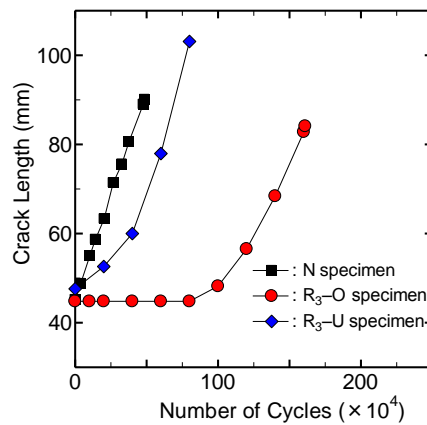
るが、この試験結果からは本手法により明らかな遅延が得られたとはいえない。



(a) 樹脂 R<sub>1</sub>



(b) 樹脂 R<sub>2</sub>



(c) 樹脂 R<sub>3</sub>

図 3.8 き裂長と繰返し数の関係の例

#### (6) 主板を加振しながらの樹脂注入

これまでの注入は、き裂部に樹脂を垂らし、主に毛管現象により浸透することに期待したものであった。ここでは、より深くまで浸透させることを狙い、バイブレータで主板に振動を与えながら樹脂を注入する方法を試行した。

今回は樹脂R<sub>3</sub>を用いた下向き注入に限定し、バイブレータで振動を与えながら樹脂を入れた。バイブレータには第2章で用いたICR処理用ツールを利用し、き裂から十分に離れた箇所を打撃することにより、き裂部に振動を与えた。注入中とその後に数十秒間打撃した後、48時間恒温室で養生し、疲労試験を再開した。

試験体名は、前述のものの末尾に振動（V）を付けて区別することとした。

### (7) 疲労寿命の比較

疲労試験結果を図3.9に示す。横軸には樹脂注入後からの繰返し数を取り整理している。つまり、樹脂注入を行った試験体では、注入後からき裂長が90mmに達するまでの载荷回数を寿命としている。一方、樹脂を注入していない試験体の寿命は試験開始後からの载荷回数としている。なお、ピーチマーク試験の载荷回数は含まれていない。また、いずれの結果も応力比の影響を考慮した等価応力範囲を用いている。

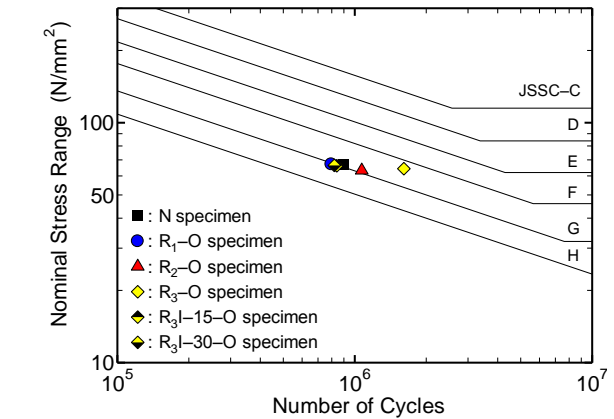
振動を加えない場合、樹脂を注入した試験体の疲労寿命は、樹脂の種類や注入向きに関わらず、樹脂を注入していないN試験体の0.5~1.8倍程度の範囲にばらついていた。一方、振動を加えながら樹脂注入を施した試験体では寿命が大幅に延びており、N試験体の約2.5倍であった。よって、さらなるデータの蓄積が必要ではあるが、き裂を振動させながら樹脂を注入することにより寿命の改善効果は向上する可能性があり、その場合、少なくとも元の状態と同程度の寿命までは回復すると考えられる。

### 3.4 解析による樹脂注入の再現

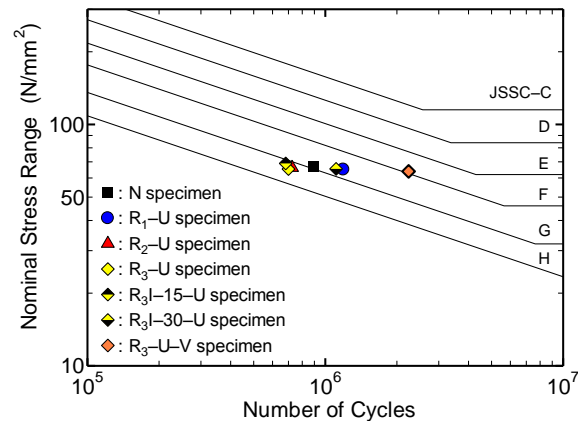
疲労試験結果では、振動を加えつつ樹脂を注入すればき裂の進展を遅延できる可能性が示された。ここでは、樹脂を充填したき裂を対象に有限要素解析を行い、樹脂の弾性係数や浸透量がき裂先端の応力拡大係数範囲に与える影響を検討した。

#### (1) 応力拡大係数範囲の算出方法

応力拡大係数範囲の算出方法としてさまざまな方法が提案されているが、本研究では、単純で精度が比較的高いといわれている変位外挿法を用いた。ただし、き裂内部に樹脂が完全に充填されていないモデルに対しては、変位外挿法のみでは応力拡大係数を求めることができないため、変位外挿法と応力外挿法を組み合わせた接続外挿法<sup>3,10)</sup>により算出した。



(a) 上向き注入



(b) 下向き注入

図 3.9 疲労寿命の比較

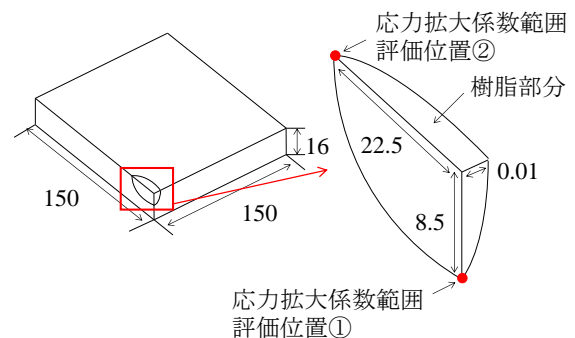


図 3.10 解析対象 (単位: mm)

#### (2) 解析方法

解析対象は図3.10に示す板中央に半楕円形の表面き裂を有する平板（板厚16mm）である。き裂の長さおよび深さは、疲労試験で得られた破面を参考に決定した。解析モデルは対称性を考慮して1/4モデルとした。要素には8節点ソリッド要素を用い、き裂先端部近傍の要素サイズは0.002×0.003×0.005mmとし、できるだけ均一となるように分割した。鋼材の弾性係数は

200kN/mm<sup>2</sup>, ポアソン比は鋼材, 樹脂ともに0.3とした。

解析は図3.11に示す手順で実施した。まず表面き裂を有するモデルに引張荷重を与え, き裂を開口させた(図3.11(a))。次に, 無荷重状態で, このときのき裂形状を有するモデルを作成し(図3.11(b)), き裂部に樹脂に相当する要素を挿入した(図3.11(c))。それに対して, 圧縮の軸方向荷重または曲げ荷重を作用させて, き裂先端の応力拡大係数範囲を求めた(図3.11(d))。応力拡大係数の算出位置は, 図3.10に示すように, き裂最深部(評価位置①)および表面のき裂先端部(評価位置②)とした。

今回は, 樹脂の弾性係数を0~10000N/mm<sup>2</sup>, 浸透率を0~100%の範囲で変化させた。ここで樹脂の浸透率は, 図3.12に示すように, き裂の深さと長さに対する樹脂の浸透量の割合と定義している。载荷は板表面での応力が-80N/mm<sup>2</sup>となるように行った。

### (3) 解析方法の妥当性の検討

き裂内部に樹脂を充填していないモデルに対して求めた応力拡大係数範囲と, Newman & Rajuの提案式<sup>3,11)</sup>によって求めた値を表3.5に示す。本解析方法により算出した応力拡大係数範囲は提案式により求めた値とよく一致しており, 本解析の妥当性を確認することができる。

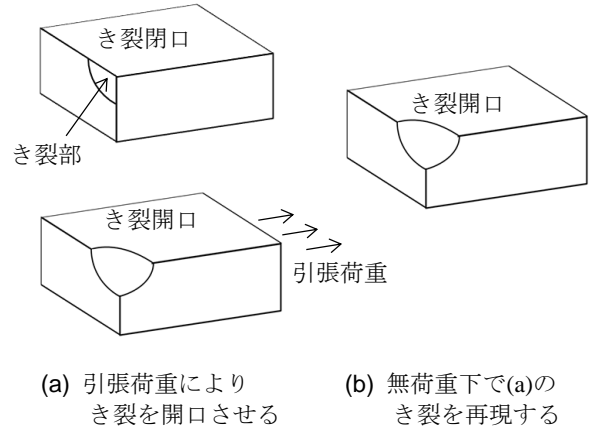
### (4) 樹脂の弾性係数の影響

図3.13に, 樹脂の浸透率を100%とし, 弾性係数を変化させたときの解析結果を荷重タイプごとに分けて示す。なお弾性係数が0N/mm<sup>2</sup>とは樹脂が入っていないモデルを意味する。荷重タイプによらず, 樹脂の弾性係数が増加するにつれて, 応力拡大係数範囲が減少する傾向にあり, 弾性係数が2700N/mm<sup>2</sup>以上で値がほぼ収束している。よって, 圧縮, 曲げともに, 樹脂が100%浸透していれば, 弾性係数が小さくてもき裂進展遅延効果は期待できると考えられる。

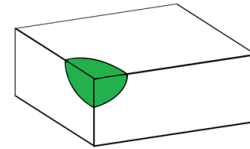
### (5) 樹脂の浸透率の影響

樹脂の弾性係数を2700N/mm<sup>2</sup>で一定とし, 浸

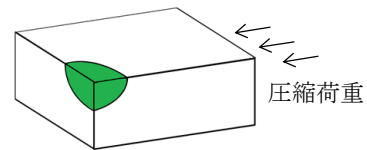
透率を変化させたときの結果を図3.14に示す。図より, 浸透率の増加とともに応力拡大係数範囲は徐々に小さくなっていることがわかる。よって, 弾性係数の場合と異なり, 樹脂注入されたき裂の応力拡大係数は樹脂の浸透率に左右されるといえる。



(a) 引張荷重によりき裂を開口させる (b) 無荷重下で(a)のき裂を再現する



(c) き裂内に樹脂に相当する要素を挿入する



(d) 圧縮荷重を載荷し, 応力拡大係数を算出する

図 3.11 解析の手順

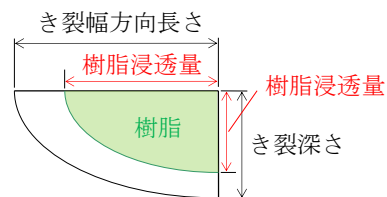
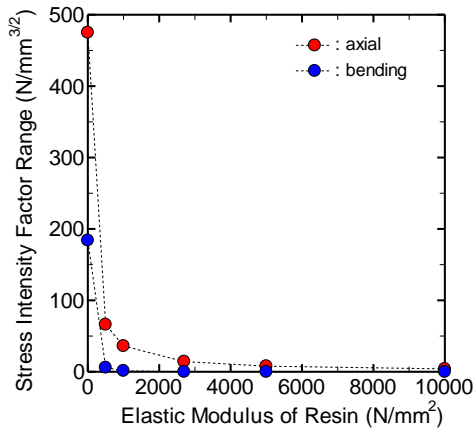


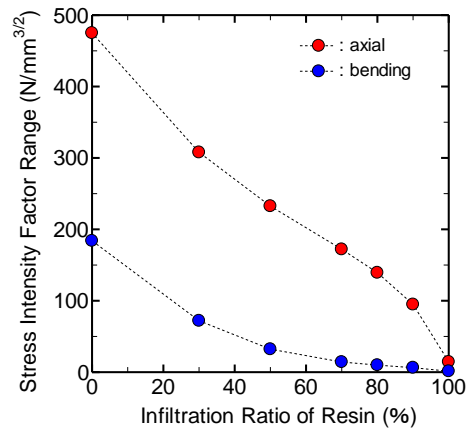
図 3.12 樹脂の浸透率の定義

表 3.5 応力拡大係数範囲の比較

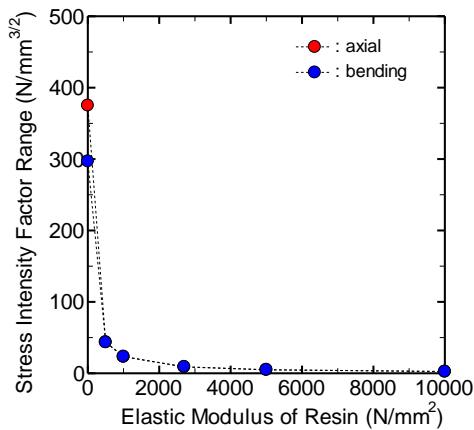
算出方法	樹脂の有無	応力拡大係数範囲 (N/mm <sup>3/2</sup> )			
		評価位置① (最深部)		評価位置② (表面)	
		圧縮荷重	曲げ荷重	圧縮荷重	曲げ荷重
Newman & Raju	樹脂無し	490.9	182.1	361.7	288.4
有限要素解析		474.3	184	375.1	296.9



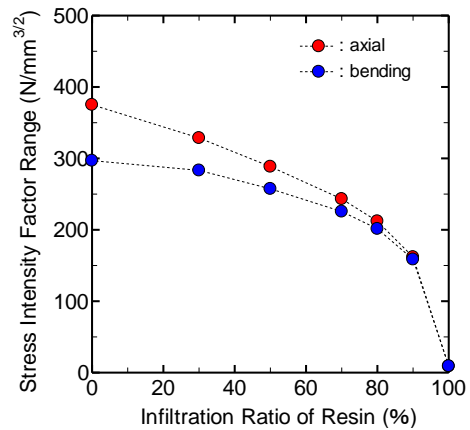
(a) き裂最深部 (評価位置①)



(a) き裂最深部 (評価位置①)



(b) 板表面 (評価位置②)



(b) 板表面 (評価位置②)

図 3.13 樹脂の弾性係数の影響

図 3.14 樹脂の浸透率の影響

### 3.5 樹脂注入後のき裂進展速度の推定手法

前節にて述べたように、樹脂注入法の効果は樹脂の浸透率に依存するため、樹脂注入後の樹脂の浸透量を把握することは重要である。ここでは、き裂先端の応力に着目し、樹脂注入前後での値の変化から浸透率を推定する手法について検討した。

#### (1) 樹脂の浸透率とき裂近傍の応力の関係

前節の解析モデルを用いて、き裂近傍の応力と樹脂の浸透率の関係を明らかにした。その結果の一例を図3.15に示す。図の縦軸はき裂面から荷重軸方向に7.5mm離れた位置における応力であり、樹脂注入前後の応力範囲の比 $\sigma_{After}/\sigma_{Before}$ で示している。また横軸はき裂の先端から中央への距離である。図中には浸透率100%、90%、80%のときの結果を示している。図より、注入前後の応力範囲の比は浸透率と相関があり、浸透率が低下するに従い曲線は下方にシフトしていることがわかる。

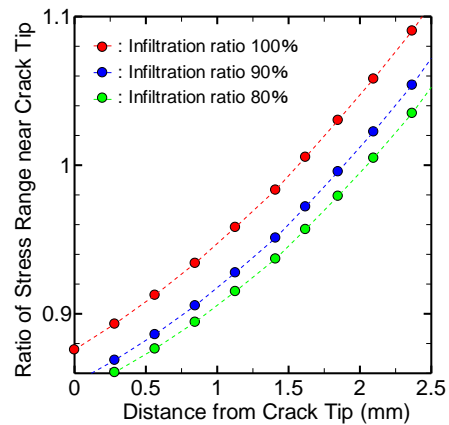


図 3.15 樹脂注入によるき裂近傍の応力範囲の変化と浸透率の関係

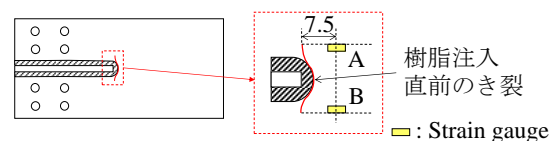


図 3.16 ひずみゲージ貼付位置 (単位: mm)



表 3.6 き裂進展速度の実測値

樹脂注入した試験体 (mm/cycle)		樹脂を注入していない 試験体 (mm/cycle)
ゲージ A	ゲージ B	
$4.91 \times 10^{-6}$	$9.02 \times 10^{-6}$	$4.8 \times 10^{-5}$

## (2) 樹脂注入後のき裂進展速度の推定

樹脂注入前後でき裂先端近傍のひずみを計測し、その比率と図3.15の関係を照らし合わせるにより、樹脂の浸透率を推定できると考えられる。さらに、樹脂の浸透率とき裂先端の応力拡大係数範囲は解析により求めることができ、例えば図3.14のように求められている。つまり、き裂先端近傍の計測結果から、樹脂を注入することによる応力拡大係数の低減割合を推定でき、さらにはき裂進展速度の変化を予測することができると考えられる。そこで新たに実験を行い、き裂近傍の応力とき裂進展速度の関係を調べた。

疲労試験方法はすでに述べたとおりであり、面外ガセット溶接継手を用いて繰返し曲げ载荷下で試験を実施した。また樹脂R<sub>3</sub>を用い、バイブレータで振動を与えながら注入した。試験体には図3.16に示すようにき裂先端近傍にひずみゲージを貼付し、樹脂注入前後の変化を計測した。

計測結果を基に、き裂先端からの距離と応力範囲の変化量から樹脂の浸透率を推定すると、G7、G8位置における浸透率はそれぞれ約92%、87%となった。図3.14(b)から、浸透率が92%および87%のとき、樹脂を入れていない場合(0%)に比べて応力拡大係数範囲はそれぞれ約65%、53%減少すると求められる。この結果と $da/dN - \Delta K$ の関係<sup>3,12)</sup>から、樹脂を入れることにより、板表面におけるき裂進展速度が約6~13%に低減されると予測できる。

破面から計測した樹脂注入直後の板表面におけるき裂進展速度を表3.6に示す。これは、樹脂を注入した後に導入した1本目のビーチマークを基に算出したものである。樹脂を入れていない試験体における計測結果も合わせて示している。これより、樹脂注入前後のき裂進展速度を比較すると、約10~19%に低減されていることがわかる。

以上より、ひずみゲージから予測したき裂進展速度の低減割合と、実際に計測したそれを比較すると、両者は比較的良好一致している。したがって、樹脂注入前後でき裂先端の応力を計

測することにより、樹脂注入によってき裂進展速度をどの程度低減できるかを推定できる可能性があるといえる。ただし、ここで推定した進展速度は樹脂注入直後のものであり、それが継続する载荷回数にはばらつきがある。いったん遅延してもすぐに元に戻る可能性があることに注意すべきであり、樹脂注入法を確立するためには、この点を解決する必要がある。

## 3.6 まとめ

本章では、面外ガセット溶接継手を対象として、繰返し圧縮荷重により発生した疲労き裂に対する樹脂注入法の効果を検討した。本章において得られた成果を以下にまとめる。

- き裂を模擬したスリットに対して、粘度と硬化時間が異なる4種類の樹脂を用いて浸透試験を行った。その結果を基に、浸透量の観点から疲労試験に用いる樹脂を選定した。
- 圧縮荷重の繰返しにより溶接止端部に導入した疲労き裂に対して樹脂注入法を適用し、その効果を検討した。その結果、樹脂の注入向きによらず、き裂内への樹脂の浸透量は同程度であることを示した。
- き裂部に振動を加えながら樹脂を注入することにより、寿命改善効果が高くなった。データの蓄積が望まれるが、その場合、少なくとも元の状態と同程度の寿命までは回復する可能性があると考えられる。
- 樹脂の弾性係数や浸透量の違いがき裂進展遅延効果に与える影響を有限要素解析により検討した。その結果として、き裂深さに対して樹脂が100%充填されていれば、弾性係数が小さくてもある程度のき裂進展遅延効果は期待できること、また遅延効果は樹脂の浸透率に大きく依存することが示された。
- 樹脂注入前後でのき裂近傍の応力の変化から、樹脂の浸透の程度を推定でき、それよりき裂進展速度の減少割合を予測できる可能性が示された。

## 参考文献

- 3.1) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 松田喜彦: 鋼の腐食疲労き裂の進展に対する腐食生成物の力学的効果, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.46, No.412, pp.1337-1343, 1980.
- 3.2) 高橋一比古, 高橋千織, 古谷典子: 微細粒のくさび効果による疲労き裂進展抑制, 日本造船学会論文集, Vol.184, pp.361-367, 1998.
- 3.3) 高橋一比古, 牛嶋通雄, 高橋千織, 植松進, 古谷典子: アルミナペースト塗布による疲労き裂進展の自動抑制

- および目視検出, 溶接学会論文集, Vol.22, No.4, pp.531-541, 2004.
- 3.4) 北河一喜, 館石和雄, 吉嶺建史, 鈴木永之, 鈴木博之: 樹脂注入による鋼材の疲労き裂進展抑制に関する実験的研究, 第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.563-564, 2002.
- 3.5) 館石和雄, 北河一喜, 稲葉尚文, 富田芳男: 局部加熱を併用した硬化材注入手法による鋼材の疲労き裂進展抑制, 土木学会論文集, No.808/I-74, pp.193-198, 2006.
- 3.6) 三浦聡史, 館石和雄, 鬼頭和也: 鋼板の面外変形を伴って発生する疲労き裂の進展挙動, 第 61 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.1195-1196, 2006.
- 3.7) 三浦聡史, 館石和雄, 山田浩二: 溶接継手に発生した疲労き裂への硬化材注入によるき裂進展遅延効果, 第 62 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, pp.63-64, 2007.
- 3.8) Tateishi, K., Tsuboi, R. and Hanji, T.: Retardation of fatigue crack propagation in welded joints under plate bending by hardening material injection, Proceedings of the 6th International Symposium on Steel Structures, pp.352-357, 2011.
- 3.9) 山田健太郎, 小藺江朋堯, 小塩達也: 垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのみ肉溶接の曲げ疲労試験, 鋼構造論文集, Vol.14, No.55, pp.1-8, 2007.
- 3.10) 北川英夫, 結城良治, 木須博行, 川端廣己: 境界要素法による表面き裂の応力拡大係数の解析, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.50, No.450, pp.129-138, 1984.
- 3.11) Newman, J.C. and Raju, I.S.: Stress-intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads, NASA Technical Memorandum 85793, 1984.
- 3.12) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例一 (2012 年改定版), 技報堂出版, 2012.

## 第4章 溶接補修

### 4.1 背景

本研究は、比較的短い段階の疲労き裂に対する補修法として溶接補修に着目する。溶接補修は、疲労き裂を除去し、溶接によって埋め戻すことにより原型回復をはかるもの<sup>4.1)</sup>であり、鋼材の利点を活かした補修法といえる。

高圧ガス容器やプラント圧力設備に対しては溶接補修基準<sup>4.2, 4.3)</sup>が定められており、適用可能なき裂長さ、溶接補修前の試験方法、母材の材料ごとの溶接法や溶接材料、溶接補修後の検査法などが示されている。

鋼橋を考えた場合、交通を規制せずに補修することが望ましく、交通荷重による振動下での溶接が求められる場合が多い。繰返し荷重下の溶接では高温割れが発生することが明らかにされており<sup>4.4)</sup>、その発生の有無は、ルートギャップの溶接線直角方向の変動成分の大きさとその周波数、継手形状や継手剛性、溶接条件などにより異なることが示されている<sup>4.5, 4.6)</sup>。また、その結果を基に溶接施工可否判定方法が提案され、実橋への適用が報告されている<sup>4.7)</sup>。

これらの知見を反映する形で、1993年に「供用下にある鋼構造物の溶接施工指針（案）」<sup>4.8)</sup>が発刊された。しかし、その後も溶接補修が広く普及するには至っていない。この原因の一つとして、当時補修対象となった鋼材の溶接性がよくなる<sup>4.9)</sup>、現場での溶接に耐え難い鋼材が多かったため、溶接そのものが補修の選択肢にあがらなかった可能性が考えられる。

鋼材の溶接性は近年格段に向上しており、溶接性の高い鋼材を用いた橋梁からの疲労き裂の発生は増えるものと予想される。また溶接材料も改良され、溶接も進歩している。このよう

な背景から、溶接補修が改めて着目されるようになり、溶接施工に及ぼす静的荷重や繰返し荷重の影響が実験により検討されている<sup>4.10-4.12)</sup>。さらに、実橋への適用も増えつつある<sup>4.13, 4.14)</sup>。

本研究では、溶接補修の普及に向けての基礎的知見を蓄積することを目的とし、最も厳しい溶接環境である繰返し荷重下の溶接における割れ発生条件について、溶接施工試験および熱弾塑性有限要素解析により検討した。

### 4.2 変動荷重下での溶接施工試験

外力の大きさや周波数、試験体の寸法などを変化させて繰返し荷重下での溶接施工試験を行い、溶接割れの発生に対して支配的な要因を明らかにした。ここでは、横向き溶接のみを対象とし、溶接ポジションの影響については4.6において検討する。

#### (1) 試験体

試験体の形状および寸法を図4.1に示す。板幅300mm、板厚10mmの鋼板を上下に突合せた状態の試験体である。突合せ部にはルートフェイス4.5mm、ルートギャップ2mmのレ型開先を設けており、その両端（側面から50mmの領域）は溶接によりあらかじめ固定し、中央の未接合部に溶接を施した。開先角度と溶接割れの関係を明らかにするため、開先角度 $\theta$ を40°、45°、50°の3種類とした。またレ型開先の向きを上下に変化させることで、開先方向の影響を検討した。ここでは図4.1に示す開先の向きを上側開先と呼ぶ。試験体の長さ $h$ は2種類（400mm、600mm）とした。

表 4.1 供試鋼材の機械的性質 (ミルシート値)

鋼種	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SM400A	283	426	32
SM490YA	413	510	24
SM570	548	626	31

表 4.2 供試鋼材の化学成分(%) (ミルシート値)

鋼種	C (×100)	Si (×100)	Mn (×100)	P (×1000)	S (×1000)	Cu (×100)	Ni (×100)	Cr (×100)	Mo (×100)	Nb (×100)	V (×100)
SM400A	14	14	75	15	4	1	2	2	1	0	0
SM490YA	15	19	110	11	3	1	1	2	0	1	0
SM570	8	26	158	12	3	2	2	8	0	2	4

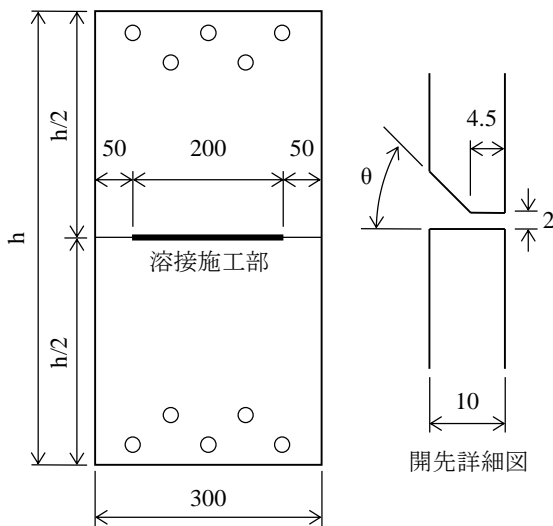


図 4.1 横向き溶接用試験体 (単位: mm)

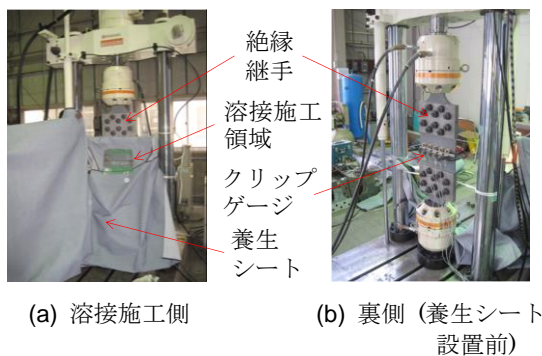


図 4.2 試験体設置状況

供試鋼材のミルシートによる機械的性質および化学成分をそれぞれ表4.1, 表4.2に示す。鋼材強度の違いが溶接割れに与える影響を検討するために、鋼種はSM400A, SM490YA, SM570の3種類とした。本鋼材の溶接割れ感受

性組成 $P_{cm}$ は、SM400Aで約0.19%, SM490YAで約0.21%, SM570で約0.18%である。道路橋示方書・同解説<sup>4.15)</sup>によれば、今回用いた鋼材に対して予熱は必要ないとされている。

## (2) 試験方法

試験状況を図4.2に示す。試験機には動的最大荷重300kNの島津サーボパルサーを使用した。試験体に引張の繰返し荷重を载荷しながら溶接を行い、溶接後に溶接割れ発生の有無や発生位置等を観察した。なお溶接完了後は試験体の温度が常温になるまで1800秒間(30分間) 载荷を継続した。

実橋における振動調査<sup>4.16)</sup>より、実橋梁の基本振動数は1~6Hzであるといわれている。また振動実験<sup>4.17)</sup>により、主な振動源である20トン級トラック後輪の共振振動数がおよそ3Hzであることが示されている。そこで本試験では、荷重の繰返し周波数の基本値を3Hzとし、比較のため0.3Hz, 6Hz, 9Hzでも実験を行った。繰返し载荷は荷重変動範囲を一定とする荷重制御で行ったが、その大きさは、後述する溶接ルートギャップの開口変位の初期値を指標として、目標とする開口変位が得られるように試験体ごとに調節した。ルートギャップ開口変位と荷重範囲の関係は溶接補修前に静的载荷を行うことにより求めた。

試験体はボルト継手を介して試験機に取り付けたが、溶接中の電流が試験機に流れるのを防止するために絶縁高力ボルト継手<sup>4.18)</sup>を用いた。具体的には、試験体と添接鋼板の間に絶縁材として市販のエポキシ樹脂板を挟み、通常の高力ボルトの軸部に絶縁テープを巻きつけて製作した絶縁ボルトにより固定することで絶

縁継手とした。絶縁状況は試験体ごとにチェックし、絶縁を確認した上で溶接を行った。また溶接時のスパッタおよびヒューム等が試験装置に飛散・付着するのを防ぐために、補修部以外の部分は養生シートにより防護した。

### (3) ルートギャップ開口変位

外力が繰返し作用すると、溶接ルート部が開閉口を繰り返すこととなり、これが溶接品質に影響を与えると考えられる。そこで本研究では、ルートギャップの開口変位量に着目し、この大きさを変化させて試験を行った。ここでルートギャップ開口変位の初期値 $\Delta\delta_0$ とは、溶接前における最大荷重のときのルートギャップの開口量と最小荷重のときの開口量の差である。図4.3に示すように、ルートギャップの開口量はクリップゲージ（標点間隔50mm）をより計測した。クリップゲージのベースと試験体の間には木材を挟み込み、溶接時の電流や熱が計測機器に伝わらないように注意した。クリップゲージは、図4.4に示す①溶接始端部、②始端部と中央部の中間、③中央部、④中央部と終端部の中間、⑤溶接終端部の5箇所に設置した。

既往の研究<sup>4,19)</sup>において、鋼製橋脚横梁支点部直下のダイヤフラムに生じた疲労き裂では $\Delta\delta_0$ が最大で0.17mmといわれている。そこで本研究ではゲージ③の値に着目し、その位置の開口変位を0.05~0.2mmの間で変化させて载荷を行った。なおこれらの値は溶接施工前に設定したものであり、前項で述べたように载荷は荷重範囲

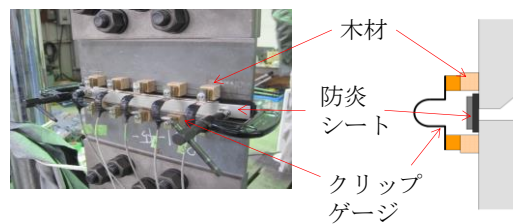
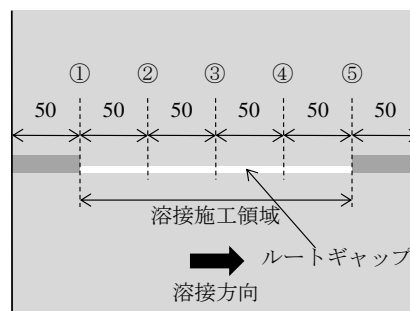


図 4.3 クリップゲージ設置状況



①～⑤：クリップゲージ番号

図 4.4 クリップゲージ設置位置 (単位: mm)

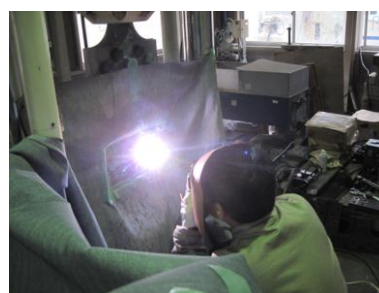


図 4.5 溶接施工状況

表 4.3 溶接条件

姿勢	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (mm/sec)	入熱量 (kJ/mm)
横向き	120~143	28~26	1.9~2.6	1.50~2.68
下向き	140~158	32~37	1.9~2.0	2.28~2.90
上向き	118~125	30~33	1.4~1.7	2.21~2.60

表 4.4 溶接棒の機械的性質 (規格値)

名称	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	吸収エネルギー (J)
L-55	480	550	32	190 (0°C), 170 (-20°C)
L-60	540	640	29	180 (-10°C)

表 4.5 溶接棒の化学成分(%) (規格値)

名称	C (×100)	Si (×100)	Mn (×100)	P (×1000)	S (×1000)	Ni (×100)	Mo (×100)
L-55	7	62	118	11	8	-	-
L-60	7	42	112	-	-	73	22

を一定として行ったため、溶接過程で開口変位は変化する。そこで、溶接中も開口量を動的に計測することにより、開口変位の変化を記録し

た。動的計測のサンプリング数は200回/secとした。

表 4.6 試験条件一覧 (横向き溶接)

試験体	鋼種	主板長 $h$ (mm)	開先方向	開先角度 $\theta$ (°)	ルートギャップ 開口変位初期値 $\Delta\delta_0$ (mm)	繰り返し 周波数 $f$ (Hz)
H1	SM400A	600	上側	45	0.125	3
H2	SM570					
H3	SM400A		下側			
H4	SM570					
H5	SM400A	400	上側	45	0.125	3
H6			下側			
H7	SM570		上側			
H8			下側			
H9	SM400A	600	上側	40	0.125	3
H10				50		
H11			下側	40		
H12				50		
H13	SM570		上側	40		
H14				50		
H15			下側	40		
H16				50		
H17	SM400A	600	上側	45	0.05	0.3
H18						3
H19						6
H20					0.125	0.3
H21						6
H22					0.2	0.3
H23						3
H24						6
H25	SM490YA	400	上側	45	0.05	9
H26					0.075	3
H27						6
H28						9
H29					0.1	3
H30						6
H31						9
H32						3
H33					0.15	0.3
H34					0.18	0.3

#### (4) 溶接条件

溶接条件を表4.3に、溶接作業状況を図4.5に示す。変動荷重下での溶接割れという観点から考えると、初層溶接部が重要になると考えられるため、本試験では1パス溶接を採用した。溶接は熟練工が行い、横向き姿勢の被覆アーク溶接とした。なお予熱は行っていない。溶接棒は母材の強度に合わせて変えて、SM400A、SM490YAに対してはL-55（JIS Z3211 E4916U）を、SM570に対してはL-60（JIS Z3211 E5916-N1M1U）を用いた。溶接棒の機械的性質および化学成分は表4.4、表4.5に示すとおりである。

#### (5) 試験パラメータ

試験条件を表4.6にまとめる。試験体の種類を表すパラメータとして、鋼種、主板長、レ型開先の向き、開先角度に着目し、また変動荷重下の状態を表すパラメータとして、ルートギャップ開口変位の初期値とその周波数（これを繰返し周波数と呼ぶ）に着目している。これら6つの試験パラメータを組み合わせた34パターンの条件下で試験を行った。

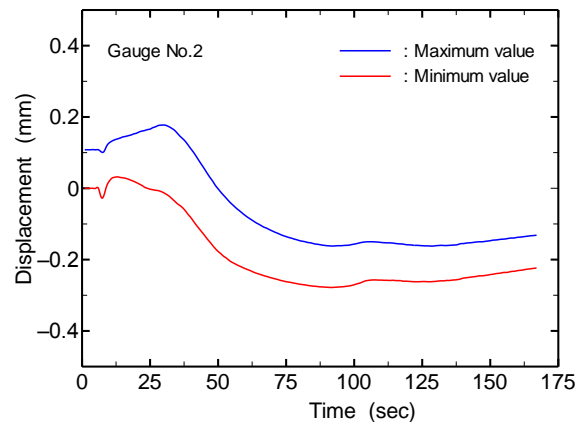
### 4.3 試験結果

#### (1) 溶接中のルートギャップ開口量の変化

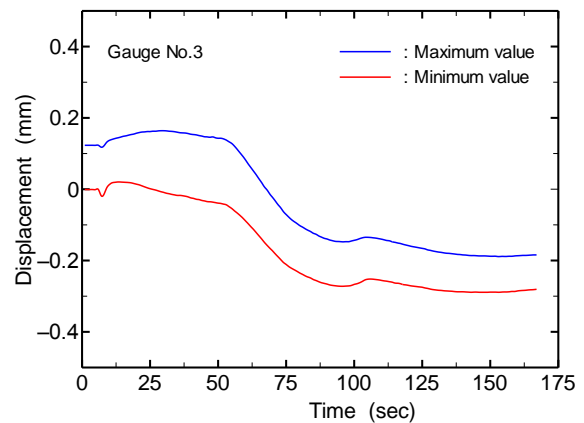
今回の試験では、ルートギャップ開口変位が表4.6に示す設定値になるときの荷重範囲を静的載荷試験により溶接前に求めておき、その条件のもとで荷重制御にて繰返し載荷を行った。そのため、溶接が進むにつれて、熱の影響や未接合部の減少に伴って開口変位が変化する。そこで、溶接中に計測したクリップゲージの値から、ルートギャップ開口量の最大値と最小値の変化を求めた。例として試験体H1の結果を図4.6に示す。図中の青線が最大開口量の、赤線が最小開口量の時間推移を示し、灰色部は着目したゲージ周辺に溶接棒が位置する時間帯を表している。またゲージ番号②～④の値を例示している。図中の0秒から約100秒までが溶接中の計測結果である。溶接棒は、0秒のときゲージ①付近に位置し、25秒、50秒、75秒、100秒あたりでそれぞれゲージ②～⑤付近を通過している。

溶接開始後、溶接熱により溶接棒付近の母材や溶接金属の剛性が低下するため、最大値、最小値ともに増加する傾向にある。最大開口量は溶接棒が着目ゲージに近づくにつれて大きくなり、溶接棒が着目ゲージを通過すると、母材

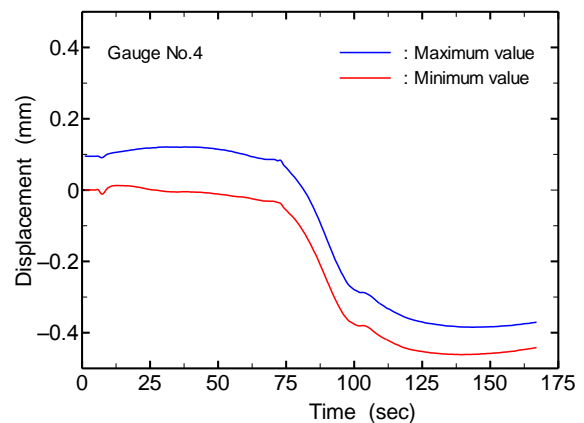
の冷却および溶接金属の凝固が始まり、値は徐々に減少している。このように、着目位置のルートギャップの大きさは溶接中に変化していることがわかる。



(a) ゲージ②



(b) ゲージ③



(c) ゲージ④

図 4.6 ルートギャップの最大・最小開口量の推移



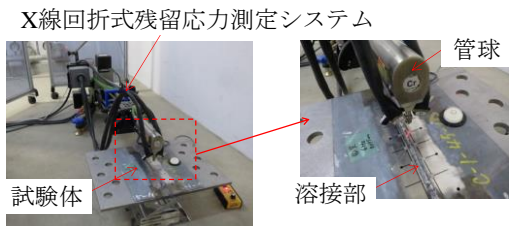


図 4.7 残留応力測定状況

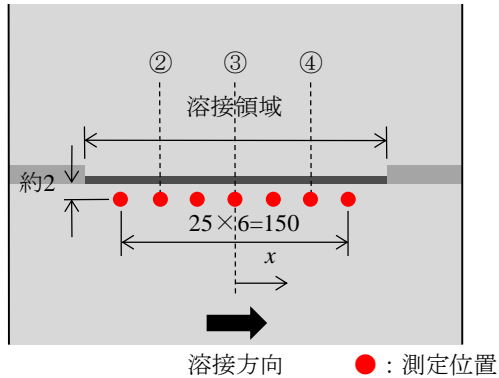


図 4.8 測定位置

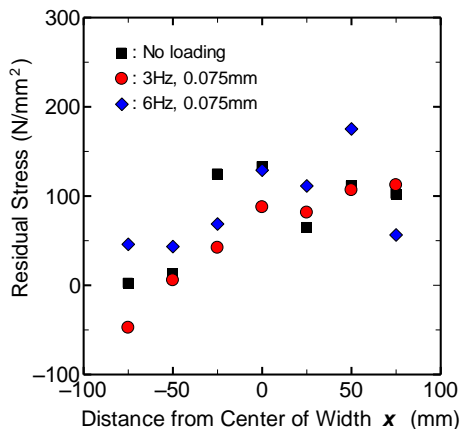


図 4.9 残留応力計測結果

## (2) 溶接残留応力

溶接補修された継手の疲労強度が低下する原因として、割れの発生と高い溶接残留応力の導入が考えられる。そこでまず、変動荷重下で溶接を施した試験体の溶接残留応力分布をX線回折法により計測した。得られた結果と無荷重下で溶接したものを比較し、変動荷重が残留応力分布に与える影響を検討した。

計測状況を図4.7に示す。非破壊での計測が可能なポータブル用X線回折式残留応力測定システム (PROTO iXRD) を用いて残留応力を計測した。X線回折法では、ブラッグの条件を満足する結晶からの回折現象を利用して結晶格子面間隔の変化を測定し、それより材料に作用する応力を求めることができる<sup>4,20)</sup>。

計測した試験体は、繰返し周波数3Hz, 6Hzで溶接を施した試験体H26とH27である。どちらの試験体もルートギャップ開口変位は0.075mmである。また、繰返し荷重を作用させずに無荷重下で溶接した試験体に対しても同様に残留応力を計測した。3つの試験体の入熱量はできるだけ同程度となるようにしている。計測は図4.8に示すように、溶接部から長手方向に約2mm離れた位置で、溶接線に沿って7箇所で行った。応力成分は溶接線に直交する方向とした。

図4.9に計測結果を示す。横軸は板幅中央からの距離である。図より、どの試験体においても、溶接始端側から終端側にかけて徐々に残留応力が高くなる傾向にあることがわかる。また繰返し荷重下で溶接を行った場合でも、無荷重下のものと顕著な差はみられない。よって、残留応力分布に関しては、変動荷重下の溶接であっても無荷重下のものと同程度である可能性が高いといえる。

## (3) 鋼種と割れ発生状況の関係

溶接部の断面マクロ試験を実施し、着目したパラメータと溶接割れ発生の有無の関係を検討した。ゲージ番号②, ③, ④の位置で試験体を切断し、その断面を十分に研磨した上で、ナイタル腐食溶液を塗布した。なお、以下に示すマクロ写真は、特にことわりのない限りゲージ③位置のものとする。

鋼種が異なる試験体のマクロ試験結果の例を図4.10に示す。ここでは試験体H1とH2を比較する。どちらの試験体においても溶接割れが発生しており、両者に大きな違いは確認されなかった。他の試験ケースにおいても鋼種の差による割れ発生状況の差はみられなかった。よって今回の試験条件では、母材の鋼種および溶接棒の違いによる溶接割れへの影響はほとんどないと考えられる。そこで以後は、主にSM400Aの試験体の結果を用いて比較するものとする。

## (4) 主板長と割れ発生状況の関係

主板長が600mmの試験体H1と400mmの試験体H5の比較を図4.11に示す。図の見方は図4.10と同様である。両者に大きな差異はなく、溶接ルートから発生し、溶接金属と母材との境界上に割れが確認できる。なお、試験体H2とH7, H3とH6, H4とH8についても、主板長の違いによる割れ発生状況に大きな差はみられなかった。よって、今回の主板長の違いでは割れに対して差はみられないといえる。



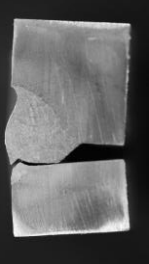
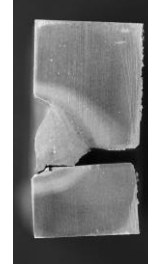
試験体	H1	H2
共通条件	$h=600\text{mm}$ , 上側開先, $\theta=45^\circ$ , $\Delta\delta_0=0.125\text{mm}$ , $f=3\text{Hz}$	
マクロ写真		
鋼種	SM400A	SM570

図 4.10 鋼種の影響

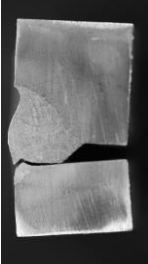
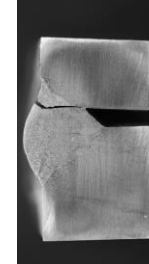
試験体	H1	H3
共通条件	SM400A, $h=600\text{mm}$ , $\theta=45^\circ$ , $\Delta\delta_0=0.125\text{mm}$ , $f=3\text{Hz}$	
マクロ写真		
開先方向	上側	下側

図 4.12 開先方向の影響

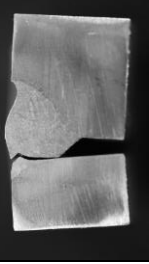
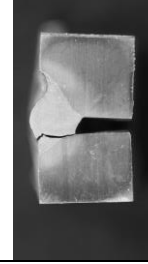
試験体	H1	H5
共通条件	SM400A, 上側開先, $\theta=45^\circ$ , $\Delta\delta_0=0.125\text{mm}$ , $f=3\text{Hz}$	
マクロ写真		
主板長	600mm	400mm

図 4.11 主板長の影響

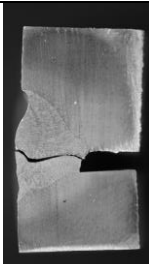
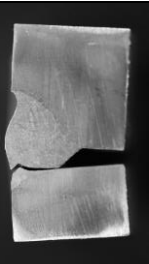
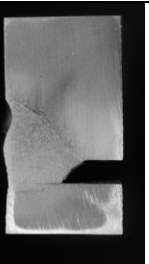
試験体	H9	H1	H10
共通条件	SM400A, $h=600\text{mm}$ , 上側開先, $\Delta\delta_0=0.125\text{mm}$ , $f=3\text{Hz}$		
マクロ写真			
開先角度	$40^\circ$	$45^\circ$	$50^\circ$

図 4.13 開先角度の影響

#### (5) 開先方向と割れ発生状況の関係

開先向きが異なる試験体の比較の例を図 4.12 に示す。ここでは試験体 H1 と H3 をとりあげる。開先方向が変わっても割れの発生状況に大きな違いはみられなかった。この傾向は他の試験ケース（試験体 H2 と H4, H5 と H6, H7 と H8）においても同様であり、どちらも溶接ルートから発生し、ボンド部に沿って割れていた。

#### (6) 開先角度と割れ発生状況の関係

試験体 H1, H9, H10 のマクロ試験結果を図 4.13 に示す。試験体 H9 ( $\theta=40^\circ$ ) では割れは溶接ビード内に発生しているが、試験体 H1 ( $\theta=45^\circ$ ) ではボンド部あたりを貫通する割れがみられる。また試験体 H10 ( $\theta=50^\circ$ ) では割れは 2.5mm（溶接部の約 50% 程度）のところで止まっており、貫通には至っていない。溶接ビード高さ  $H$  とビード幅  $W$  の比 ( $H/W$ ) が溶接割れの発生に関係があるといわれており、開先角度が変わると  $H/W$  も変化することから、割れの発生状況に違いがみられたと考えられる。

#### (7) ルートギャップ開口変位および繰返し周波数と溶接割れ発生状況の関係

ルートギャップ開口変位の初期設定値とその周波数の違いに着目して整理した結果を図 4.14 に示す。鋼種および主板長は割れ発生にほとんど影響を与えないことから、ここではその違いは区別せずに整理している。また、開先の向きは上側で統一している。なお、試験体 H24 では、溶接中に発生した割れが溶接後の繰返し载荷によって進展し、载荷中に破断したためマクロ試験は実施していない。

割れの形状は、①溶接金属と母材の境界上で割れたもの（試験体 H1, H22, H30）と、②溶接金属内を斜め方向に進展するもの（試験体 H21, H24, H31）に分けられる。

まず、ルートギャップ開口変位の影響を検討する。繰返し周波数は 6Hz とし、試験体 H27 ( $\Delta\delta_0=0.075\text{mm}$ )、H30 ( $\Delta\delta_0=0.1\text{mm}$ )、H21 ( $\Delta\delta_0=0.125\text{mm}$ ) で比較すると、ルートギャップ開口変位の大きさによって割れの角度が異な

り、開口変位が増加するほど割れの形態が①から②へと移行する傾向にある。次に、ルートギャップ開口変位は0.1mmとし、繰返し周波数に着目すると、試験体H29 ( $f=3\text{Hz}$ ), H30 ( $f=6\text{Hz}$ ), No.31 ( $f=9\text{Hz}$ )の結果から、開口変位の場合と同様に繰返し周波数の大きさによって割れに違いがみられ、繰返し周波数が大きくなるに従っ

て①から②の割れへ変化することがわかる。このことは、ルートギャップ開口変位が0.125mmの場合でも同じである。なお、開口変位が小さいとき ( $\Delta\delta_0=0.05\text{mm}$ ) には繰返し周波数にかかわらず割れは発生しなかった。

試験体H21を例にとって破面観察を行った。図4.15に走査型電子顕微鏡 (SEM) にて倍率

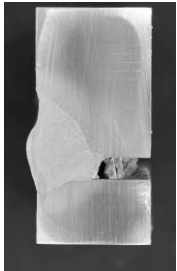
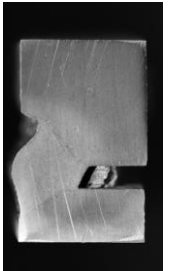
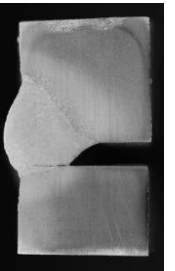
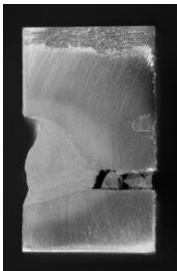
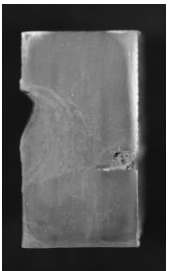
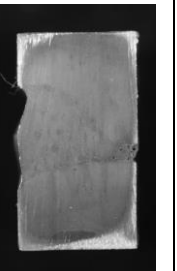
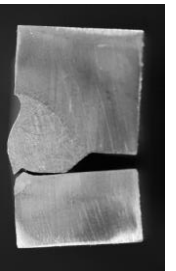
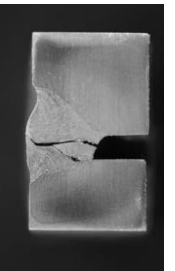
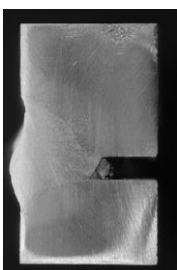
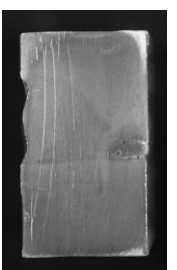
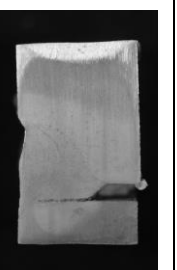
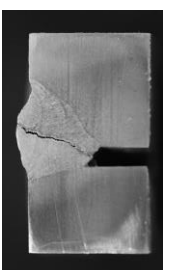
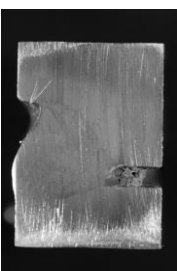
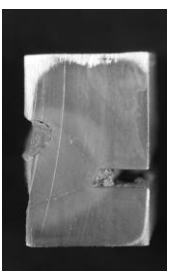
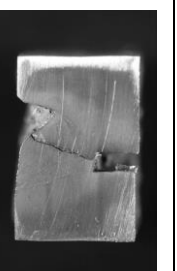
		ルートギャップ開口変位				
		0.050mm	0.075mm	0.100mm	0.125mm	0.200mm
繰返し 周波数	0.3Hz		No test	No test		
		H17			H20	H22
	3Hz					
		H18	H26	H29	H1	H23
	6Hz					載荷中に破断したためマクロ写真はなし
		H19	H27	H30	H21	H24
	9Hz				No test	No test
		H25	H28	H31		

図 4.14 ルートギャップ開口変位および繰返し周波数の影響

1000倍で撮影した写真を示す。観察位置は、溶接線中央部における溶接部中央（図中斜線部）である。高温割れ特有の凝固割れの破面であり、②の割れが生じた試験体では、いずれも凝固割れであると考えられる。一方①の割れは、凝固後の冷却過程の延性低下温度域において、ひずみ集中部である溶接ルートにひずみが繰返し作用したことにより生じた高温割れであると考えられる。これは延性低下割れと呼ばれ、過去の実験<sup>4,21)</sup>においても同様の割れが確認されており、その発生条件も凝固割れが発生した変動応力と割れが生じない変動応力の間の領域であることが示されている。今回観察された①の割れは②の凝固割れとは発生機構が異なるが、以後の割れの評価では区別せずに扱うこととする。

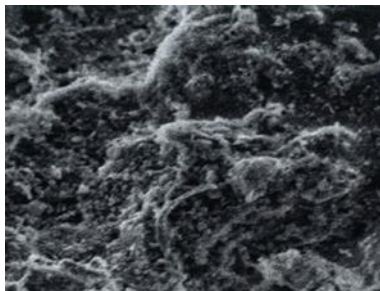
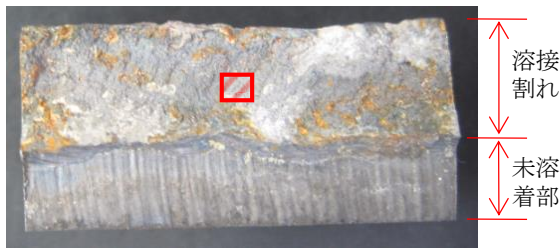


図 4.15 破面観察

#### 4.4 溶接ポジションの影響

前節において横向き溶接を対象として、ルートギャップ開口変位とその繰返し周波数が溶接割れに影響を与えることを示した。そこで本節では、下向き溶接および上向き溶接の場合についても同様の実験を行い、溶接ポジションによる影響を検討した。

##### (1) 試験体

試験体の形状および寸法を図4.16に示す。横向き溶接用試験体と同じように板幅300mm、板厚10mmの2枚の鋼板を上下に配置し、その間に板幅300mm、板厚10mmの鋼板を挟み込んだ十

字型の試験体である。上下どちらか一方の鋼板にルートフェイス4.5mm、ルートギャップ2mm、開先角度45°のレ型開先を設け、その両端（側面から50mmの領域）を溶接によりあらかじめ固定し、中央の未接合部に溶接を施した。図4.16に示すように、開先のある鋼板を上側に配置した場合は下向き溶接となり、下側に配置することで上向き溶接となる。なお開先のない鋼板はすみ肉溶接により全幅を中板に接合している。試験体の長さは400mmとした。なお、鋼材には横向き溶接のときに使用したSM490YAを用いた。

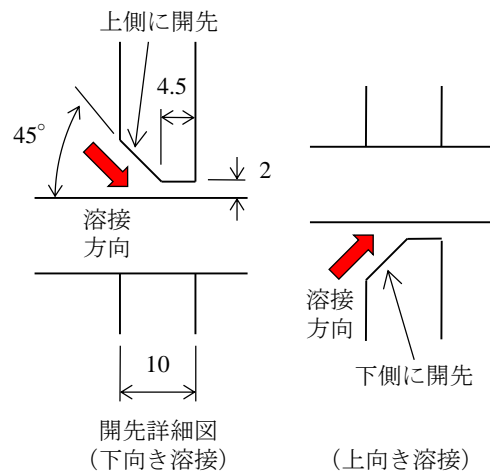
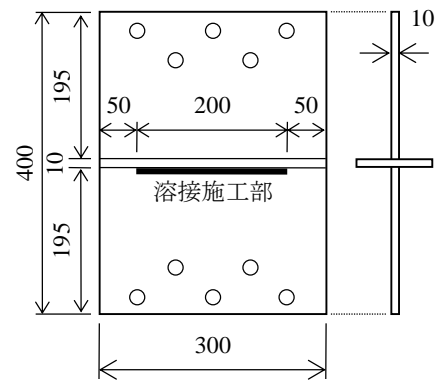


図 4.16 上向き・下向き溶接用試験体 (単位: mm)

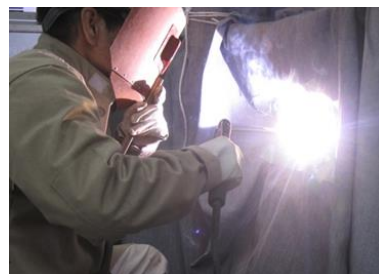
##### (2) 試験方法

試験方法は横向き溶接の場合と同様である。試験条件は表4.7に示すとおりであり、下向き溶接および上向き溶接ともに、ルートギャップ開口変位とその周波数に着目し、合計22パターンの条件下で試験を行った。設定したルートギャップ開口変位の初期値は0.05~0.2mmの間で変化させ、その繰返し周波数は0.3Hz, 3Hz, 6Hz, 9Hzの4種類とした。

表 4.7 試験条件一覧 (上向き, 下向き溶接)

試験体	溶接姿勢	$\Delta\delta_0$ (mm)	$f$ (Hz)
F1	下向き	0.05	0.3
F2			3
F3			6
F4			9
F5		0.1	9
F6		0.125	0.3
F7			3
F8			6
F9		0.2	0.3
F10			3
F11			6
O1	上向き	0.05	0.3
O2			3
O3			6
O4			9
O5		0.1	9
O6		0.125	0.3
O7			3
O8			6
O9		0.2	0.3
O10			3
O11			6

割れは発生していない。この傾向は横向き溶接と同様である。また試験体O10とO11の割れの形態は同様であり、割れは中板側の溶接ルートから発生し、中板と平行に進展して溶接ビードを貫通している。ビード表面での板幅方向の割れの長さは約150mmであった。



(a) 下向き溶接



(b) 上向き溶接



(c) 横向き溶接

図 4.17 溶接施工状況

溶接中の状況を図4.17に示す。また、溶接条件は表4.3に示すとおりである。横向きの場合と同じように初層溶接部に着目するため、1パス溶接とした。溶接は被覆アーク溶接とし、横向きと同じ溶接工が行った。溶接姿勢は下向きもしくは上向きとした。溶接棒にはL-55 (JIS Z3211 E4916U) を用いた。溶接棒の機械的性質および化学成分は表4.4、表4.5に示している。なお予熱は行っていない。

### (3) 割れ発生状況

割れの発生状況の例を図4.18に示す。全て上向き溶接のときの結果であり、ルートギャップ開口変位の初期設定値は0.2mm、繰返し周波数はそれぞれ0.3Hz、3Hz、6Hzである。

ルートギャップ開口変位が比較的大きい0.2mmであっても、繰返し周波数が小さければ

試験体	O9	O10	O11
共通条件	上向き溶接, $\Delta\delta_0=0.2\text{mm}$		
マクロ写真			
周波数	0.3Hz	3Hz	6Hz

図 4.18 上向き溶接の割れ発生状況の例

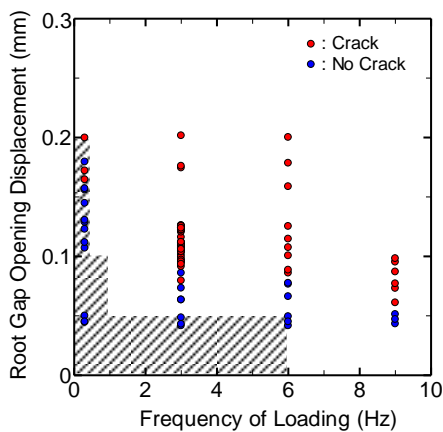


図 4.19 ルートギャップ初期値による整理

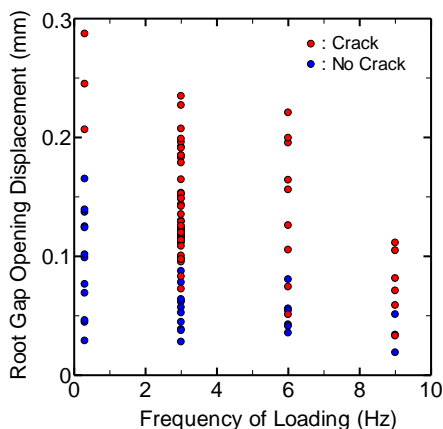


図 4.20 溶接中のルートギャップによる再整理

この他に割れの確認された試験体は、上向き溶接では、設定開口変位0.125mm、周波数3Hzの試験体 (O7)、下向き溶接では0.1mm、9Hzの試験体 (F5) のみである。いずれも中板側のルートから発生して、ボンド部あたりを進展する割れであり、ビードの貫通までには至っていない。今回の検討範囲内で割れが発生した試験体数が少なく、今後のさらなる実験が必要ではあるが、次節において溶接割れの発生と溶接ポジションの関係について整理して検討する。

#### 4.5 溶接割れ発生状況の整理

今回の試験条件の範囲では、溶接割れの発生に影響を与える主要因は溶接ビード断面形状（溶接ビード高さ $H$ とビード幅 $W$ の比 ( $H/W$ )), ルートギャップ開口変位, 繰返し周波数であると考えられる。ビード断面形状に関しては、開先形状を調整することにより制御できることから、ここではルートギャップ開口変位, 繰返し周波数と溶接割れ発生との関係について考察した。

#### (1) ルートギャップ開口変位の初期設定値による整理

横向き溶接に着目し、試験によって得られた溶接割れ発生状況を図4.19にまとめる。横軸は繰返し周波数, 縦軸は溶接前に測定したルートギャップ開口変位の初期設定値 $\Delta\delta_0$ である。断面の観察は1体あたり3箇所 (ゲージ②, ③, ④の位置) で行っており, それぞれの位置における開口変位の初期値で整理している。ここで示した試験結果は, 上側開先, 開先角度 $45^\circ$ のものであり, 鋼種, 主板長は影響が小さいと考え, 区別していない。また, 割れの形態にかかわらず, 割れが生じたものを赤印で, 生じなかったものを青印で示している。

図中の斜線部は, 過去の実験<sup>4.11)</sup>により溶接割れが発生しないと示されている範囲である。ただし,  $-40\text{kN}$ から $-800\text{kN}$ の圧縮範囲で繰返し荷重を与えている点, さらに溶接に炭酸ガス半自動溶接を用いている点が本試験と異なる。本研究で得られた割れの発生しない領域は, 既往の研究<sup>4.11)</sup>で示された範囲と同程度か, 若干ではあるが広いことがわかる。よって, 被覆アーク溶接と炭酸ガス溶接の溶接割れ発生条件はほぼ同程度である可能性が考えられる。

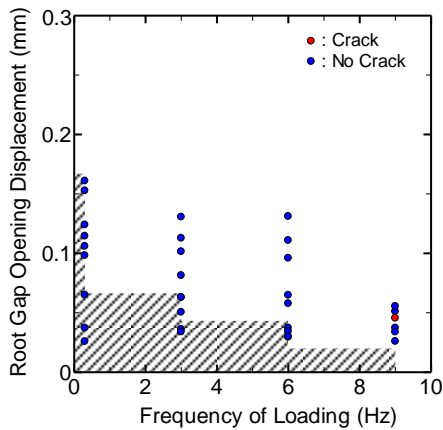
図より, 右上の領域では割れが発生しやすく, 逆に左下の領域では発生しないという傾向は確認できるが, 割れ発生境界は明確でなく, かなりばらつきがみられる。そこで, 他の指標による試験結果の整理を試みる。

#### (2) 溶接により変化したルートギャップ開口変位による整理

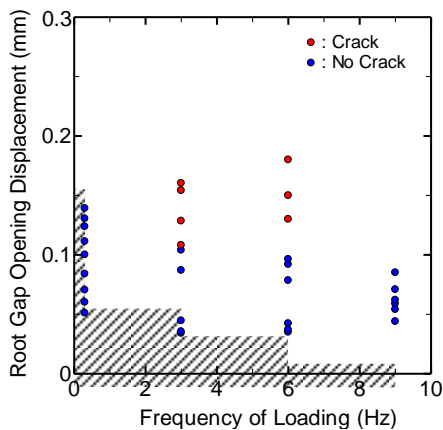
ルートギャップ開口変位は溶接過程において熱影響や試験体剛性の変化により変動する。そのため, 溶接棒が観察断面付近に位置したときの開口変位で結果を整理したほうがより合理的であると考えられる。そこで, 図4.19に示した関係を溶接中に計測した開口変位を用いて再整理する。その結果を図4.20に示す。横軸は繰返し周波数であり, 縦軸は溶接棒が観察断面位置 (ゲージ②, ③, ④付近) にあるときのルートギャップ開口変位の計測値 $\Delta\delta_a$ である。

図より, 開口変位の初期値で整理した場合に比べ, 割れ発生境界がより明確になっていることがわかる。よって, 着目した位置における溶接中の開口変位 $\Delta\delta_a$ とその繰返し周波数により, 溶接割れ発生の有無を評価できると考えられる。なお溶接中の開口変位の推定方法については次節において検討する。





(a) 下向き溶接



(b) 上向き溶接

図 4.21 溶接中のルートギャップによる整理

### (3) 溶接ポジションの違いによる整理

下向きおよび上向き溶接時の割れ発生状況を図4.21にまとめる。横軸は繰返し周波数であり、縦軸は溶接中に溶接棒が断面観察箇所位置したときのルートギャップ開口変位 $\Delta\delta_a$ である。斜線部は図4.20にて得られた横向き溶接で割れが生じなかった領域の上限である。図より、横向き溶接の場合に比べ、下向きや上向き溶接のほうが割れの生じない領域が大きい、少なくとも横向きの結果を用いれば安全側で評価できる可能性があるといえる。

## 4.6 溶接中のルートギャップ開口変位の推定

前節までの検討により、溶接中のルートギャップ開口変位 $\Delta\delta_a$ により溶接割れの発生を評価できる可能性が示された。そこで、3次元熱弾塑性解析により溶接をシミュレーションし、溶接中の開口変位を推定する手法を構築した。

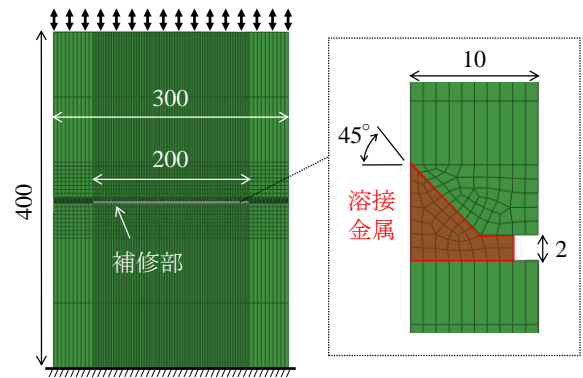


図 4.22 解析モデル (単位: mm)

### (1) 解析による溶接のシミュレーション

溶接を模擬した非定常熱伝導解析を行い、溶接部近傍の温度変化を実験値と比較することにより解析手法の妥当性を検証した。

解析には汎用有限要素解析ソフトABAQUS Ver.6.13を用い、図4.1に示した突合せ型試験体に対する溶接を再現することを試みた。解析モデルは図4.22に示すとおりであり、実際の試験体寸法を基に、主板長 $h=400$ mm、板幅 $W=300$ mm、板厚 $t=10$ mm、補修長 $L=200$ mm、開先角度 $\theta=45^\circ$ とした。境界条件は実験と同じように、モデル下端を完全固定とし、上端は板厚方向および板幅方向を拘束した。

図中の入熱要素とは、溶接金属部を表した要素であり、この要素を溶接線方向（溶接進行方向）に出現させ、それに入熱することを繰返し行うことにより熱源の移動を再現した。実験と同様に、溶接補修長は200mmとした。溶接領域は溶接線方向に2mmずつメッシュ分割し、1要素分ずつ出現・入熱を繰り返した。要素は前の要素の入熱が完了した直後に出現させ、入熱はその要素が出現した時点で実施した。1要素あたりの出現・入熱時間を1秒間とし、溶接速度が試験時の平均である2mm/secとなるように設定した。なお入熱要素のサイズは、試験体のマクロ写真から得られた溶接金属部の大きさを参考にした。

入熱として次式にて求められる入熱量 $q$ を物体熱流束として与えた。入力値には表4.3の横向き溶接の電流および電圧を用い、溶接速度は前述の通り2mm/secとした。アーク溶接の場合の熱効率 $\eta$ は0.6~0.8をとるとされており<sup>4,24)</sup>、繰返し試験の結果、本研究では $\eta=0.63$ と設定した。また、モデル外周の自然冷却は物体表面からの熱伝達およびふく射として表現している。初期温度および雰囲気温度は実験室と同程度の10°Cとした。

$$q = \eta \frac{EI}{v} \quad (4.1)$$

ここで、 $E$ は電圧 (V)、 $I$ は電流 (A)、 $v$ は溶接速度 (mm/sec)である。

実験と同様に、母材はSM490YA、溶接金属はL-55 (JIS Z3211 E4916U)とした。それぞれの機械的性質は表4.1と表4.4に示すとおりである。また、材料の物理定数および機械的性質の温度依存性は既往の文献<sup>4.22, 4.23</sup>を参考にして設定した。

図4.22に示す解析モデルに対し、熱源の移動を考慮した手法で非定常熱伝導解析を行い、実験において計測した温度履歴と比較することにより本解析の妥当性を検討した。温度計測は、試験体の背面 (クリップゲージを貼付した面) において熱電対を用いて行った。計測した点は図4.23に示すルートギャップから25mm離れた位置であり、幅方向中央とそこから50mm離れた位置の3箇所とした。

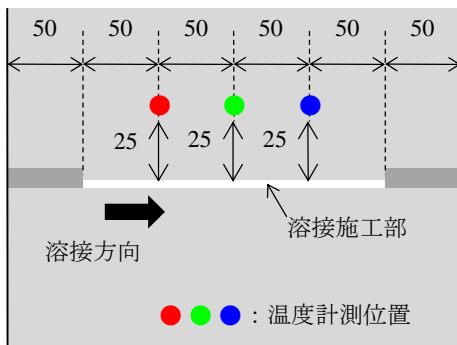


図 4.23 温度計測位置 (単位 : mm)

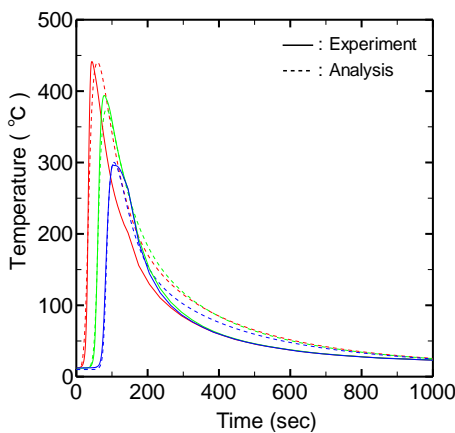


図 4.24 温度履歴の比較

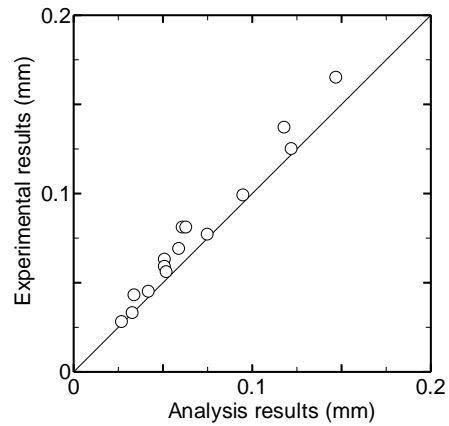


図 4.25 溶接中の開口変位の比較

温度計測結果と解析により得られた温度履歴の比較を図4.24に示す。図中のプロットの色は、図4.23に示す熱電対の位置 (計測位置) と対応させている。これらの結果より、今回の解析方法により得られた温度は実験値と概ね一致しており、本手法の妥当性が示された。

## (2) 溶接中のルートギャップ開口変位の再現

前節により示された解析手法により溶接を再現し、その過程で荷重を負荷させたときのルートギャップの開口挙動を検討する。

解析は次の手順で実施した。まず、溶接を再現する前の解析モデル (中央に200mmのスリットを有するモデル) に対して荷重を与え、その際のルートギャップ開口変位の初期値 $\Delta\delta_0$ を実験値と比較し、解析における荷重や境界条件などの妥当性を確認した。境界条件は図4.22に示すとおりであり、荷重はモデル上端に一律の鉛直荷重として与えた。次に、同モデルに対して溶接を再現した。繰返し荷重を与えながらの溶接シミュレーションは計算時間が膨大となり現実的ではないため、ここでは、溶接が着目位置 (ゲージ位置) に達した直後に1サイクルのみ荷重を与え、そのときのルートギャップ開口変位を溶接中の開口変位 $\Delta\delta_d$ とすることとした。なお解析においても、試験時のクリップゲージ設置位置 (標点距離は50mm) における変位量からルートギャップ開口変位を求めた。

解析により得られたルートギャップ開口変位の初期値 $\Delta\delta_0$ を実験値と比較し、その妥当性を確認した後、溶接中の開口変位を求め、実験値との比較を行った。今回はゲージ②、③、④の位置に着目し、各ゲージ位置まで溶接を行った後に荷重を載荷して、その位置でのルートギャップ開口変位を求めた。繰返し周波数の違いは1回の載荷に要する時間を変化させることで



表 4.8 着目したパラメータ一覧

パラメータ		設定値
開口変位の初期値 $\Delta\delta_0$ (mm)		0.075, 0.1, 0.18
繰返し周波数 $f$ (Hz)		0.3, 3, 6, 9, 12, 15
溶接速度 $v$ (mm/sec)		1, 2, 3, 4
補修長比 $L/W$	$L$ (mm)	50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500
	$W$ (mm)	300, 600, 1200
板厚 $t$ (mm)		8, 10, 15, 20
鋼材の降伏応力		SM400A( $\sigma_y=283\text{N/mm}^2$ ) + L55( $\sigma_y=480\text{N/mm}^2$ ), SM490YA( $\sigma_y=413\text{N/mm}^2$ ) + L55( $\sigma_y=480\text{N/mm}^2$ ), SM570( $\sigma_y=548\text{N/mm}^2$ ) + L60( $\sigma_y=540\text{N/mm}^2$ )

表現した。このようにして求めた解析値と実験値の比較を図4.25に示す。多少のずれはみられるが、解析結果は実験値と比較的よく一致しており、今回のように簡易に再現した手法であっても溶接中に繰返し荷重を受ける試験体のルートギャップ開口変位を推定できるといえる。

### (3) 溶接中の開口変位に影響を与える因子の検討

上記の検討により、上記の解析手法により溶接中のルートギャップ開口変位を推定できることが示された。そこで、その手法を用いて溶接中の開口変位 $\Delta\delta_a$ に影響を与える因子を検討した。ここでは、ゲージ③の位置の開口変位に着目した検討について紹介する。なお、ゲージ②位置に対しても同様に検討したが、紙面の制約上、ここでは割愛する。

着目したパラメータを表4.8にまとめる。変動荷重に関するパラメータとして溶接前の開口変位の初期値 $\Delta\delta_0$ 、繰返し周波数 $f$ 、溶接入熱に関するパラメータとして溶接速度 $v$ 、形状や鋼材に関するパラメータとして補修長 $L$ と板幅 $W$ の比 $L/W$ （補修長比）、主板厚 $t$ 、母材および溶接金属の降伏応力 $\sigma_y$ とした。

解析結果をそれぞれのパラメータに着目して以下に示す。解析結果は、縦軸に溶接中の開口変位 $\Delta\delta_a$ を初期開口変位 $\Delta\delta_0$ で除し無次元化した値 $\Delta\delta_a/\Delta\delta_0$ （開口変位比）をとり、横軸に各パラメータの値をとり整理した。なお、ここでは顕著な影響がみられた溶接速度 $v$ 、主板厚 $t$ 、補修長比（補修長 $L$ と板幅 $W$ の比 $L/W$ ）を変えた場合の結果について述べる。

まず、溶接速度の影響について示す。横向き溶接のときの溶接速度の平均値である2mm/secを基本として解析を行った。このときの入熱量

は1.6kJ/mmである。溶接速度の変化は、溶接金属部の溶接線方向のメッシュ分割数を変え、1秒間あたりに出現・入熱する要素サイズを変化させることで再現した。なお、溶接金属部の断面積および電流・電圧は全パターンを通して一定と仮定している。

溶接速度を変化させたときの解析結果を図4.26に示す。溶接速度が遅くなるほど溶接中の開口変位が増加し、逆に速くなると低下する傾向が得られた。これは、低速で入熱量が大きいほど溶接金属が冷却、凝固するまでの時間が長くなるためであると考えられる。一般に、入熱量が大きいほど溶接割れの発生率が増加するといわれている点からみても、この結果は妥当であるといえる。また、この関係は開口変位の初期値の大きさによっても若干変化し、同じ溶接速度でも、初期開口変位が小さいほど開口変位比は小さくなる。

次に主板厚の影響を検討する。主板厚を変化させる際には、溶接金属部の位置が主板の板厚中央付近となるようにし、できるだけ偏心による付加曲げが作用しないように注意した。ここでは実験（板厚 $t=10\text{mm}$ ）で得られたマクロ写真を参考にして溶接金属部の大きさを求め、それを全パターンで一定として解析を行った。

解析結果を図4.27に示す。いずれの初期開口変位の場合も、板厚の増加に伴い線形的に開口変位比は減少するものの、板厚15mm以上では傾きがほぼ水平になっている。この原因として、板厚が増加することで継手の剛性も高まり、入熱による溶接金属および母材の剛性低下が小さく抑えられた可能性が考えられるが、詳細は不明である。この点については今後検討する必要があるが、ここでは、 $t=15\text{mm}$ 以上の場合は $t=15\text{mm}$ の結果をそのまま適用することとする。

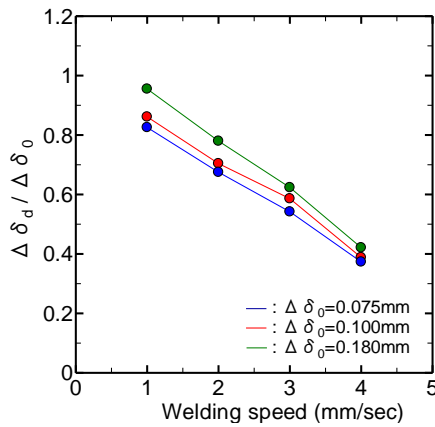


図 4.26 溶接速度の影響

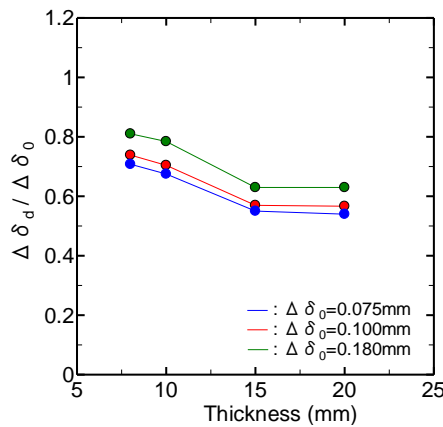


図 4.27 板厚の影響

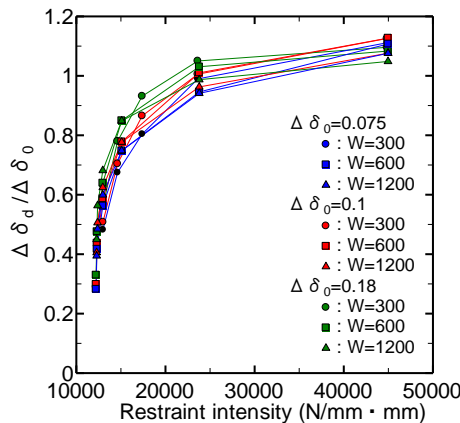


図 4.28 拘束度の影響

補修長比 $L/W$ の影響については、継手の剛性を表す指標である拘束度 $R(x)$ を用いて整理することを考えた。本研究で使用した突合せ型試験体の拘束度 $R(x)$ は次式で表される<sup>4.25)</sup>。

$$R(x) = \frac{\sigma(x) \cdot h_w}{\delta(x)} \quad (4.2)$$

ここで、 $\sigma(x)$ は開先に作用する応力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $h_w$ は溶接のど厚 (mm)、 $\delta(x)$ は開先の変位 (mm)

である。 $\sigma(x)$ はルートギャップを $\delta(x)$ だけ変位させるために必要なルート部に作用する応力と考えることができ、本解析では、ルートギャップの節点を単位長さだけ閉口させるために必要な応力を求め、それから着目部であるゲージ位置③での拘束度を求めた。

拘束度によって整理した結果を図4.28に示す。図より、どの条件においても拘束度が増加するほど開口変位比も非線形的に増加し、その傾向はほぼ同じとなることがわかる。また、開口変位の初期値 $\Delta\delta_0$ の増加とともに開口変位比が大きくなる傾向にある。

以上より、溶接速度、主板厚、拘束度が開口変位比に与える影響は大きいと考えられることから、これらに着目して開口変位比の推定式を提案する。

#### (4) 溶接中の開口変位の推定式

図4.28から回帰分析によって溶接中のルートギャップ開口変位の推定式を求めた。得られた推定式を以下に示す。式中の係数 $C$ は溶接速度の影響に関する係数 $C_v$ と板厚の影響に関する係数 $C_t$ の積として表される。それらは、基準とした条件（溶接速度の場合 $v=2\text{mm}/\text{sec}$ 、板厚の場合 $t=10\text{mm}$ ）で得られた開口変位比に対する比として得られた関係式である。つまり、係数 $C$ によって、基準となる条件下で得られた開口変位比を補正するというものである。なお、繰返し周波数と母材の降伏応力の影響は小さいと判断し、本推定式では考慮していない。

$$\frac{\Delta\delta_d}{\Delta\delta_0} = C \cdot \frac{R(x) - 11400}{-8600 + (-0.278 \cdot \Delta\delta_0 + 0.911) \cdot R(x)} \quad (4.3a)$$

$$C = C_v \cdot C_t \quad (4.3b)$$

ここで、 $\Delta\delta_0$ はルートギャップ開口変位の初期値 (mm)、 $\Delta\delta_d$ は溶接中のルートギャップ開口変位 (mm)、 $R(x)$ は着目する位置の拘束度 ( $\text{N}/\text{mm} \cdot \text{mm}$ )、 $C_v$ は溶接速度の影響を考慮するための係数 ( $C_v = -0.22v + 1.44$ )、 $C_t$ は板厚の影響を考慮するための係数 ( $C_t = -0.036t + 1.36$ ) である。

実験において得られた溶接中の開口変位と推定式によって求めたそれを比較した。その結果を図4.29に示す。プロットの色は溶接割れの発生の有無を表している。図より、割れの発生の有無にかかわらず、いずれの場合も比較的良く実験値を推定できていると考えられる。全体的にみて、推定値が実験値よりも若干大きめではあるが、少なくとも実験値を過小に評価する結果にはなっていない。

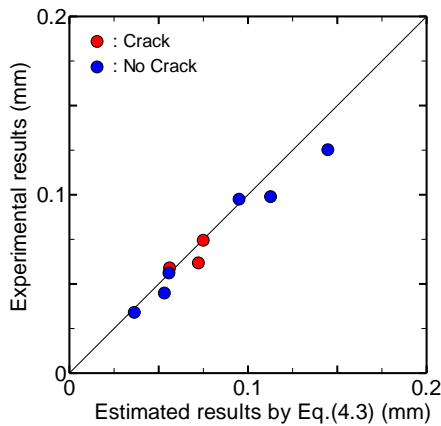


図 4.29 推定値と実験値の比較

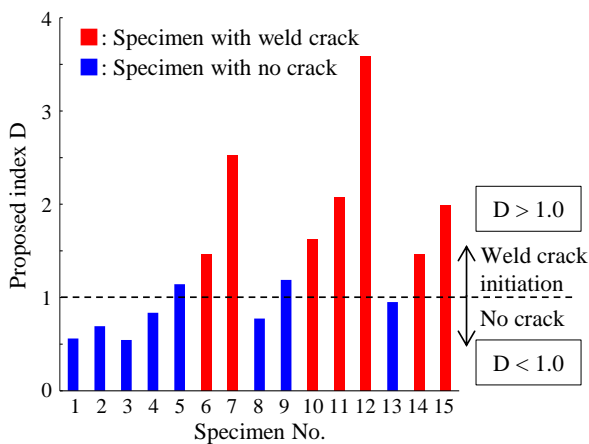


図 4.30 提案した評価式による割れ発生判定

### (5) 溶接割れ発生評価式の提案

横向き溶接の実験において得られた図4.20に示す溶接割れ発生状況から、この関係の下限を通るように、溶接中の開口変位 $\Delta\delta_d$ とその繰返し周波数 $f$ を用いて溶接割れ発生限界式を求めると式(4.4)が得られる。この式を満足する場合には割れは発生しないと考えることができる。この式と前項において求めた溶接中の開口変位の推定式(4.3)を組み合わせると、ゲージ③位置における溶接割れ発生評価式を導出することができる。評価式を式(4.5)に示す。

$$\Delta\delta_d \leq 0.114 \cdot f^{-0.506} \quad (4.4)$$

$$C \cdot \Delta\delta_0 \frac{R(x) - 11400}{-8600 + (-0.278 \cdot \Delta\delta_0 + 0.911) \cdot R(x)} \cdot \frac{1}{0.114 \cdot f^{-0.506}} \leq 1 \quad (4.5)$$

なお、周波数0.3Hzのように载荷速度が遅い場合には、本解析により十分に再現できなかったが、ここでは周波数の違いは溶接中の開口変位に影響を与えないと考えて求めている。

求めた割れ発生評価式は、溶接補修部におけ

る溶接前のルートギャップ開口変位 $\Delta\delta_0$ 、その位置における繰返し周波数 $f$ および拘束度 $R(x)$ による式となっており、その適用は比較的容易であると考えている。

### (6) 求めた評価式の妥当性の検討

式(4.5)を用いて今回の実験における溶接割れの発生の有無を評価し、その結果と実際の割れ状況を比較することにより本評価式の妥当性を検討する。ここで、式(4.5)の左辺を変数 $D$ と定義し、それが1を超えると割れ発生と判定できる。

判定結果を図4.30に例示する。図において、赤色の結果は実際に割れが発生したもの、青色は割れが発生していないものを表している。いずれの試験体においても、実験で得られた割れ発生状況と本評価式の判定結果がほとんど一致しており、十分な精度で割れ発生の有無を評価できているといえる。結果が一致しなかったものもみられるが、評価式により割れが発生すると判定されたが、実際には割れが発生しなかった場合であり、少なくとも危険側の評価とはなっていない。

以上より、求めた溶接割れ発生評価式の妥当性が示されたといえる。この式は、補修部における溶接前の時点の開口変位 $\Delta\delta_0$ 、繰返し周波数 $f$ 、拘束度 $R(x)$ で構成されており、いずれの指標も実測もしくは比較的簡易な解析により求めることができるため、従来手法よりも適用しやすいものと考えられる。また今回は、拘束度を試験パラメータとした溶接施工試験を実施できていないため、今後は拘束度と溶接割れとの関連を明らかとする実験を行い、本評価式のさらなる妥当性の裏付けが必要であると考えている。

### 4.7 まとめ

本章では、供用下の鋼橋への溶接補修を対象として、繰返し変動荷重下で溶接施工試験を実施し、溶接割れの発生に影響を与える因子を明らかにした。さらに、熱弾塑性解析により、変動荷重下での溶接を再現し、得られた結果から溶接割れ発生評価式を提案した。本章において得られた結果を以下にまとめる。

- 今回の試験条件下では、鋼種、主板長、開先方向の違いが溶接割れ発生状況に与える影響は小さいと考えられる。
- 開先角度が増加すると割れが発生しにくくな

- る可能性が示された。
- ルートギャップ開口変位とその周波数が割れの発生に大きく影響し、開口変位や繰返し周波数が大きくなると割れが発生しやすくなる傾向がみられた。
  - 割れの形状として、①溶接金属と母材の境界上で割れたものと、②溶接金属内で斜め方向に割れたものが観察された。ルートギャップ開口変位が大きくなる、またその周波数が増加するにしたがい、割れの形態が①から②へと移行する傾向がみられた。
  - 本研究にて割れが生じなかった条件は、既往の研究にて示されているものより若干ではあるが広範囲となった。
  - ルートギャップ開口変位の初期値よりも、溶接中の開口変位を用いたほうが、割れ発生の境界をより明確にとらえることができる。
  - 今回の検討では、横向き溶接の場合より、下向きや上向き溶接のほうが割れが生じにくいという結果となった。
  - 熱弾塑性解析を用いて変動荷重下での溶接を再現できる方法を構築した。さらに、その解析法を用いて、溶接中のルートギャップ開口変位を推定する式を提案した。
  - 実験によって得られた割れ発生限界式と、解析によって求めた溶接中の開口変位の推定式を組み合わせることにより、変動荷重下での溶接における割れ発生評価式を提案した。
  - 提案した評価式により、実験における割れ発生の有無を十分に判定できることを示した。

## 参考文献

- 4.1) 土木学会：鋼橋の疲労対策技術，鋼構造シリーズ 22，2013。
- 4.2) 高圧ガス保安協会：容器保安規則関係 例示基準集（新装版），pp.371-650，2007。
- 4.3) 日本溶接協会：プラント圧力設備溶接補修指針，2009。
- 4.4) 井元泉，中西保正，堀川浩甫：変動荷重下における溶接割れに対する実験的考察，溶接学会論文集，Vol.7，No.3，pp.319-325，1989。
- 4.5) 井元泉，中西保正，金裕哲，鈴木博之，堀川浩甫：変動荷重下の凝固割れに対する力学的指標と割れ発生評価式の提案，溶接学会論文集，Vol.8，No.1，pp.38-43，1990。
- 4.6) 井元泉，金裕哲，中西保正，鈴木博之，堀川浩甫：変動荷重下の凝固割れに対する力学的検討，溶接学会論文集，Vol.9，No.1，pp.43-47，1991。
- 4.7) 井元泉，金裕哲，中西保正，堀川浩甫：変動荷重下における溶接施工可否判定法，溶接学会論文集，Vol.9，No.2，pp.294-298，1991。
- 4.8) 日本鋼構造協会：供用下にある鋼構造物の溶接施工指針（案），JSSC テクニカルレポート，No.22，1993。
- 4.9) 日本橋梁建設協会：鋼橋の維持管理に配慮した設計・施工の留意点—過去の補修・補強事例からのフィードバック—，平成 21 年度橋梁技術発表会論文，2009。
- 4.10) 上野康雄，李相亨，藤平正一郎，金裕哲：溶接施工に及ぼす静的荷重の影響，溶接学会論文集，Vol.28，No.4，pp.391-394，2010。
- 4.11) 上野康雄，李相亨，藤平正一郎，金裕哲：繰返し荷重下における溶接施工性の検証，溶接学会論文集，Vol.28，No.4，pp.436-442，2010。
- 4.12) 上野康雄，李相亨，藤平正一郎，金裕哲：繰返し荷重下における溶接補修法の提案，溶接学会論文集，Vol.29，No.4，pp.267-273，2011。
- 4.13) 上坂健一郎，峯村智也，佐藤歩：垂直補剛材溶接部の疲労き裂に対する溶接補修検討，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，I-278，pp.555-556，2012。
- 4.14) 三宅将，山崎達夫，三河麻奈未：鋼床版疲労き裂における溶接補修の取組み検討事例，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，I-299，pp.597-598，2012。
- 4.15) 日本道路協会：道路橋示方書・解説，II 鋼橋編，2012。
- 4.16) 加藤雅史，島田静雄：橋梁実測振動特性の統計解析，土木学会論文報告集，No.311，pp.49-58，1981。
- 4.17) 本田秀行，橋野智洋，田中孝義：振動実験による 20tf および 25tf 大型貨物車の振動特性と 3 次元車両モデルの諸元，土木学会橋梁振動コロキウム 1997 論文集，pp.147-152，1997。
- 4.18) 市川篤司，長嶋文雄，山田稔，羽田政浩：絶縁性能を付与した摩擦接合継手の静的強度および疲労強度試験，土木学会論文集，No.549/I-37，pp.65-76，1996。
- 4.19) 鷹羽新二，安田修，梶原仁：TIG 現場溶接による鋼製橋脚横梁支点部直下の疲労き裂補修，溶接学会全国大会講演概要集，Vol.81，pp.136-137，2007。
- 4.20) 田中啓介，鈴木賢治，秋庭義明：残留応力の X 線評価—基礎と応用—，養賢堂，2006。
- 4.21) 中西保正，中村義隆，村山武弘，酒井啓一，河野武亮，上條建夫：変動応力載荷中の溶接施工に関する研究，溶接学会論文集，Vol.3，No.1，pp.60-68，1985。
- 4.22) 金裕哲・李在翼・猪瀬幸太郎：すみ肉溶接で生じる面外変形の高精度予測，溶接学会論文集，Vol.23，No.3，pp.431-435，2005。
- 4.23) 日本規格協会：JIS B 8270 压力容器（基盤規格），pp.236，1993。
- 4.24) 溶接学会：新版 溶接・接合技術特論，産報出版，2003。
- 4.25) 溶接学会：第 2 版 溶接接合便覧，丸善，2003。

## 第5章 疲労き裂の補修技術選定ガイドライン

### 5.1 背景

第2章から第4章までの検討結果を踏まえ、ここでは補修工法選定に対するガイドラインを示す。ただし、補修効果にばらつきが大きく、効果が確実に保証できない樹脂注入については対象としない。また溶接補修について、本研究は変動荷重下での溶接割れの発生に着目して検討したものであり、第4章で得られた知見のみでは溶接補修ガイドラインの構築は困難であることから、本節では主にICR処理の適用に関して述べる。

### 5.2 補修工法の選定フロー

ここではICR処理の適用を主とした補修工法選定フローを示す。ICR処理の適用が困難な場合は溶接補修や他の手法を用いることとする。

図5.1に補修工法の選定フローを示す。以下に補修工法選定の流れを述べる。

- ① 本研究で検討したICR処理、溶接補修および樹脂注入工法の適用はいずれもき裂が軽微な場合に限る。き裂が大きい場合（例えば貫通き裂など）には、本研究で検討した補修方法の対象外とし、他の補修法を検討するものとする。貫通き裂に対して板表裏にICR処理を施すことにより延命できる可能性があるが、検討事例が少ないことから、ここでは対象から外す。
- ② 対象としたき裂がICR処理の適用可能部位かどうかを確認する。施工性や導入ひずみ量の観点から、実橋においては鋼床版デッキプレートと垂直補剛材との溶接部などが適用

性が高い。

- ③ き裂周辺の応力状態について、直応力が支配的な場合は $100\text{N/mm}^2$ 以下、板曲げ応力が支配的な場合は $120\text{N/mm}^2$ 以下をICR処理の適用範囲とする。これは疲労試験において、引張荷重下では $100\text{N/mm}^2$ 以下の領域で少なくとも元の状態まで回復すること、曲げ荷重下では $120\text{N/mm}^2$ 以下の領域で応力比に関わらず、疲労寿命が延びることが示されたことによる。
- ④ ICR処理を施工した場合の余寿命を推定し、要求される寿命を満足するか照査する。
- ⑤ ICR処理の適用が難しいと判断された場合は、き裂周辺の作業空間の観点から、十分な作業スペースが確保できるときには溶接補修の適用を考える。狭隘な箇所からき裂が生じているときには、樹脂注入も含め、他の補修法を考える。
- ⑥ 溶接補修の適用を考える場合には、供用下での溶接の可否を判断し、溶接欠陥や低温割れ、高温割れの観点から、適用可能と判定されれば溶接補修を用いる。適用不可となった場合は、樹脂注入も含め、他の補修法を考える。

### 5.3 ICR処理による疲労き裂の補修ガイドライン案

#### (1) ICR処理

ICR処理（衝撃き裂閉口処理、Impact Crack Closure Retrofit treatment）とは、発生した疲労



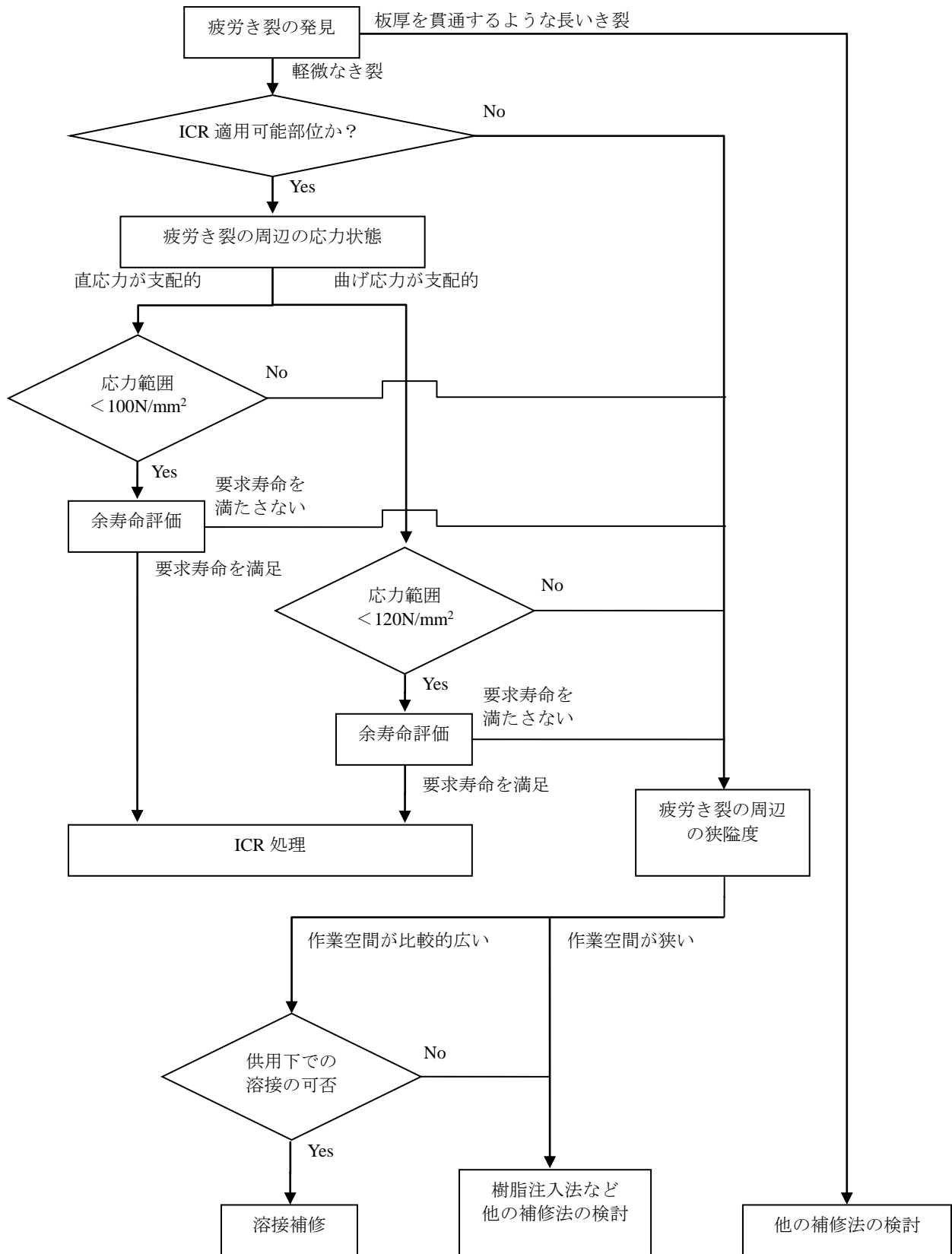


図 5.1 補修工法選定フロー案

き裂の近傍の母材とその直上を、エアツール等で叩いて鋼材表面を塑性変形させ、き裂の表面

を閉口させて疲労き裂の進展を遅延させる工法である。

## (2) ICR処理に対する要求性能

ICR処理を施すことにより、少なくとも元の状態以上に回復させなければならない。つまり、供用開始時から考えて、ICR処理により疲労寿命が2倍以上になることを基本とする。

## (3) ICR処理の適用範囲

### 1) 鋼種に対する適用範囲

適用できる鋼種は、道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編で規定される全ての鋼種とする。

### 2) 作用応力に対する適用範囲

直応力を受ける場合、最大の応力範囲が100N/mm<sup>2</sup>以下となる部位を対象とする。

板曲げ応力を受ける場合、最大の応力範囲が120N/mm<sup>2</sup>以下となる部位を対象とする。

### 3) き裂寸法に対する適用範囲

表面き裂に対する適用を基本とする。

## (4) ICR処理ツール

ICR処理には以下を満足するエアツールを用いなければならない。

### 1) フラックスチップ

空気圧0.8N/mm<sup>2</sup>以下の打撃振動数50~200Hz程度のフラックスチップを利用することを基本とする。

### 2) タガネ

先端に、一辺が3~5mm程度の正方形あるいは長方形の平坦な面を有し、角がR加工されているタガネを用いる。

### 3) ポンプ

フラックスチップの必要空気容量を満足するポンプとし、ICR施工中に安定して空気を供給できるものとする。

## (5) ICR処理の施工方法

ICR処理は以下を満足するように施工しなければならない。

1) ICR処理ツールを用い、タガネ先端の平坦部が主板に垂直±10°程度の範囲となるようにICR処理を行うことを原則とする。

2) ICR処理の施工順序は、最初に疲労き裂近傍の主板をき裂が閉口するように処理し、き裂の直上は最後に処理することを原則とする。

3) 溶着金属をICR処理する場合、き裂が閉口するようにき裂の近傍の溶着金属を最初に叩き、き裂の直上は最後に処理する。

4) ICR処理は、同じ処理範囲を少なくとも2往復(4パス)は施工する。

5) ICR処理は、き裂の先端からき裂進展方向に10mm以上先まで施工することを原則とする。

## (6) ICR処理の姿勢

熟練の作業者が施工する場合には、ICR処理時の姿勢に関して特に制約を設けない。

## (7) 検査

ICR処理時は十分な圧縮応力によってき裂が閉口されていることを適切な方法により確認する必要がある。

## (8) ICR処理を施した疲労き裂の余寿命評価

ICR処理を施した疲労き裂に対しては、破壊力学の概念を用いたき裂進展解析により余寿命を評価することが可能である。

## 第6章 まとめ

### 6.1 研究成果

本研究で対象としたICR処理，樹脂注入法，溶接補修の3つの課題について，それぞれの工法別の成果は以下の通りである。

#### (1) ICR処理

- ・ X線回折法によりICR処理部周辺の残留応力を計測し，処理部近傍では降伏応力の6~7割程度の圧縮応力が導入されていることを示した。
- ・ 曲げ荷重を受けるとき，応力比 $R=-\infty\sim 0.5$ の範囲では，応力範囲が $120\text{N/mm}^2$ 以上の場合にICR処理後の疲労寿命は溶接したままのそれと同程度となり，逆に応力範囲が比較的低い領域では，処理を施すことにより疲労寿命が大幅に増加することを示した。
- ・ 処理姿勢や鋼種，止端き裂，ルートき裂による効果の違いはみられなかった。
- ・ 引張荷重下の場合であっても，ICR処理により元の状態までは回復できるが，板曲げ荷重下での効果よりは低下することを明らかにした。
- ・ ICR処理を再現できる解析法を構築し，それによる結果を基に，ICR処理を施した疲労き裂に対する余寿命評価法を提案した。
- ・ 本レポートでは紙面の都合上割愛したが，実橋梁に生じた疲労き裂に対してICR処理の試験施工を行っている。き裂周辺のひずみの計測結果を基に，ICR処理を適用可能なき裂を明らかにした。

#### (2) 樹脂注入法

- ・ 疲労試験結果より，樹脂の種類や注入向きによる効果の違いはみられなかった。

- ・ き裂部に振動を与えながら注入することにより，高い寿命改善効果が得られることを示した。
- ・ 有限要素解析により，注入深さによって寿命改善効果が大きく変化すること，注入材料はある程度の剛性を有していれば十分なことなどを明らかにした。
- ・ 樹脂注入前後でのき裂近傍の応力の変化から，き裂進展速度の減少割合を予測できることを示した。

#### (3) 溶接補修

- ・ 繰返し荷重下で溶接補修を行う場合，溶接中のルートギャップの開口変位とその周波数が溶接割れの発生に大きく影響を与えることを示した。
- ・ 熱弾塑性解析により溶接中のルートギャップ開口変位を推定する手法を提案した。
- ・ 求めた推定手法を用いて，溶接割れ発生判定式を提案した。求めた判定式により実験結果を安全側に評価できることを示した。

以上の個別課題に対する成果を基に，補修工法の選定フロー案を作成するとともに，補修技術ガイドライン案を示した。

### 6.2 今後の道路政策への展開

本研究で対象としたのは比較的短いき裂である。橋梁の近接点検が義務づけられたこともあり，実橋の溶接継手に比較的短いき裂が発見される可能性は，今後，ますます増加するものと考えられる。その対策を考える上で，補修技術ガイドライン案などの本研究成果は有用であると考えられる。

本研究で対象とする技術は、応急補修と恒久対策の中間に位置づけられるものであると考えている。すなわち、これらの技術を適切な条件下で適用すれば、当面の疲労き裂の進展を防止することができるものと期待される。本研究成果を実用的に用いることができれば、恒久対策を施すまでの時間的猶予を得ることができ

るだけでなく、対象橋梁に要求される耐用年数によっては恒久対策が不要となる場合も想定される。このように、補修・補強の優先順位付けに自由度が生まれ、合理的で弾力的な維持管理計画の策定を可能とする点で、道路政策へ反映することができる。

# 付録

## 付録A ICR処理に関する疲労試験結果

付表1 応力比を変化させたときの板曲げ疲労試験結果一覧 (2.3.(4)の試験結果)

Specimens	Stress ratio	$\Delta\sigma_{ini}$ (N/mm <sup>2</sup> )	主板裏面からき裂発生		き裂が 30mm 進展		
			$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )	
AW(R=-inf)-1	-∞	81.9	-	-	86.7	1,193	
AW(R=-inf)-2		104.3	107.8	308			
N <sub>10</sub> +ICR(R=-inf)-1		79.4	-	-	82.7	10,000*	
		124.3	125.0	422			
N <sub>10</sub> +ICR(R=-inf)-2		137.8	140.1	355			
N <sub>10</sub> +ICR(R=-inf)-3		104.8	-	-	107.1	10,000*	
		128.5	-	-	130.2	10,000*	
		139.5	140.8	1,296	143.1	1,961	
N <sub>10</sub> +ICR(R=-inf)-4		149.9	152.3	229	155.8	573	
N <sub>10</sub> +ICR(R=-1)-1		-1	128.9	-	-	<u>128.9</u>	10,718*
	208.9		<u>208.9</u>	142	<u>208.9</u>	216	
	N <sub>10</sub> +ICR(R=-1)-2		144.9	-	-	<u>144.9</u>	1,336
	N <sub>10</sub> +ICR(R=-1)-3		156.7	-	-	168.6	1,084
AW(R=0)-1	0	83.3	-	-	88.1	1,346	
AW(R=0)-2		128.8	133.1	151	135.6	215	
AW(R=0)-3		83.4	-	-	84.7	972	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-1		126.2	<u>126.2</u>	2,457	<u>126.2</u>	2,775	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-2		119.6	-	-	<u>119.6</u>	1,790	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-3		127.6	<u>127.6</u>	538	<u>127.6</u>	1,027	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-4		180.0	<u>180.0</u>	417	<u>180.0</u>	602	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-5		155.2	162.8	321	164.3	356	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-6		150.2	-	-	154.9	2,006	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-7		86.1	-	-	87.6	19,467*	
		128.2	-	-	129.7	1,116	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-8		111.8	-	-	116.3	5,553	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-9		138.7	141.7	1,016	143.6	1,299	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-10		113.9	117.5	1,974	118.7	2,401	
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-11		146.5	151.5	451	155.5	676	

\*: run-out (き裂発生せず)



付表 1 応力比を変化させたときの板曲げ疲労試験結果一覧 (2.3.(4)の試験結果)(つづき)

Specimens	Stress ratio	$\Delta\sigma_{ini}$ (N/mm <sup>2</sup> )	主板裏面からき裂発生		き裂が 30mm 進展	
			$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )
AW(R=0.5)-1	0.5	81.7	-	-	84.5	691
AW(R=0.5)-2		125.3	129.8	228	130.3	246
N <sub>10</sub> +ICR(R=0.5)-1		81.2	-	-	85.5	5,225
N <sub>10</sub> +ICR(R=0.5)-2		121.2	141.8	389	142.5	490
N <sub>10</sub> +ICR(R=0.5)-3		104.3	110.5	3815	110.8	4,490
N <sub>10</sub> +ICR(R=0.5)-4		112.7	125.3	1,242	125.4	1,310
N <sub>10</sub> +ICR(R=0.5)-5		61.1	-	-	62.2	20,000*

\*: run-out (き裂発生せず)

付表 2 き裂長を変化させたときの板曲げ疲労試験結果一覧 (2.3.(5)の試験結果)

Specimens	Stress ratio	$\Delta\sigma_{ini}$ (N/mm <sup>2</sup> )	主板裏面からき裂発生		き裂が 30mm 進展	
			$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )
N <sub>b</sub> +ICR(R=0)-1	0	127.7	131.1	282	133.0	386
N <sub>b</sub> +ICR(R=0)-2		54.3	-	-	54.8	5,160
N <sub>20</sub> +ICR(R=0)-1		122.7	123.9	245	129.6	1,946
N <sub>20</sub> +ICR(R=0)-2		51.6	-	-	51.9	20,014*
		78.3	-	-	78.8	10,000*
		103.1	104.5	5,344	-	-

\*: run-out (き裂発生せず)

付表 3 SM570 に対する板曲げ疲労試験結果一覧(2.3.(6)の試験結果)

Specimens	Stress ratio	$\Delta\sigma_{ini}$ (N/mm <sup>2</sup> )	主板裏面からき裂発生		き裂が 30mm 進展	
			$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )
N <sub>10</sub> +ICR(R=-inf)-1	$-\infty$	126.7	128.3	3,762	128.4	4,992
N <sub>10</sub> +ICR(R=-1)-1	-1	157.5	162.0	152	179.7	510
N <sub>10</sub> +ICR(R=-1)-2		109.8	-	-	109.9	5,478
N <sub>b</sub> +ICR(R=0)	0	122.6	134.9	285	134.9	285
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-1		121.5	123.5	1,095	123.6	1,480
N <sub>10</sub> +ICR(R=0)-2		152.5	-	-	162.3	702
N <sub>20</sub> +ICR(R=0)		131.3	132.5	328	135.4	948
N <sub>10</sub> +ICR(R=0.5)-1	0.5	107.0	111.6	1,169	111.6	1,169

付表 4 横向きで ICR 処理を施したときの板曲げ疲労試験結果一覧 (2.3.(7)の試験結果)

Specimens	Stress ratio	$\Delta\sigma_{ini}$ (N/mm <sup>2</sup> )	主板裏面からき裂発生		き裂が 30mm 進展	
			$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )
AW(R=0)	0	-	-	-	76.6	894
$N_b$ +ICR-H(R=0)	0	101.6	-	-	116.9	320
$N_{10}$ +ICR-H(R=0)		105.7	123.6	720	125.9	910

付表 5 ルートき裂に対して ICR 処理を施したときの板曲げ疲労試験結果一覧 (2.3.(8)の試験結果)

Specimens	Stress ratio	$\Delta\sigma_{ini}$ (N/mm <sup>2</sup> )	主板裏面からき裂発生		き裂が 30mm 進展	
			$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta\sigma_{eq}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_f$ ( $\times 10^3$ )
AW-Root(R=0)	0	75.7	-	-	83.8	4,000
		102.7	-	-	105.0	1,790
		122.0	-	-	126.9	1,037
$N_{30}$ +ICR-Root(R=0)	0	85.3	-	-	85.8	5,000*
		102.7	122.6	1,720	120.0	2,990
		117.4	116.0	5,000**		

\*: run-out (500 万回でき裂発生せず)

\*\* : 裏面き裂の明確な発生時期は不明

付表 6 引張疲労試験結果一覧 (2.4.(4)の試験結果)

Crack length at ICR treatment	Stress level at ICR treatment	$\Delta\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	Number of Cycles $N_f$ ( $\times 10^3$ )	
			Before ICR	After ICR
$N_b$	No loading	106	730	880
	Mean stress	107	520	2,000*
	Maximum stress	105	620	2,000*
$N_{10}$	No loading	105	1,343	2,000*
	Mean stress	105	721	2,000*
	Maximum stress	106	685	2,000*
$N_{30}$	No loading	106	950	740
	Mean stress	108	872	2,000*
	Maximum stress	108	902	2,000*

\*: run-out (200 万回でき裂発生せず)

付表 7 I 桁の疲労試験結果一覧 (試験体 1) (2.5.(4)の試験結果)

ギャップ量	位置		公称曲げ応力(N/mm <sup>2</sup> )	主応力(N/mm <sup>2</sup> )	疲労寿命 (cycle)	ICR 処理後のき裂状況
35mm	載荷点側	引張	83.3	94.6	265000	処理後, 155000 回で裏面に貫通 表裏面処理後, 再進展なし
		圧縮	-83.3	-94.6	—	
	支点側	引張	44.0	61.4	1130000	処理せずに試験終了
		圧縮	-44.0	-61.4	—	
100mm	載荷点側	引張	83.3	94.6	330000	処理後, 145000 回で裏面に貫通 表裏面処理後, 600000 回で再進展 表裏面に再処理後, 55000 回で再 進展のため試験終了
		圧縮	-83.3	-94.6	370000	処理後, 255000 回で裏面に貫通 表裏面処理後, 再進展なし
	支点側	引張	44.0	61.4	—	
		圧縮	-44.0	-61.4	925000	処理後, き裂の貫通なし

注: 試験体 1 は 113 万回載荷終了

付表 8 I 桁の疲労試験結果一覧 (試験体 2) (2.5.(4)の試験結果)

ギャップ量	位置		公称曲げ応力(N/mm <sup>2</sup> )	主応力(N/mm <sup>2</sup> )	疲労寿命 (cycle)	ICR 処理後のき裂状況
50mm	載荷点側	引張	84.8	96.2	370000	疲労寿命時に裏面への貫通あり 表裏面処理後, 630000 回で裏面に き裂の再進展があり, 試験終了
		圧縮	-84.8	-96.2	—	
	支点側	引張	44.8	62.4	—	
		圧縮	-44.8	-62.4	—	
V.S.なし	載荷点側	引張	84.8	96.2	415000	処理後, 155000 回で裏面に貫通 表裏面処理後, 220000 回で再進展 表裏面に再処理後, 70000 回で再 進展
		圧縮	-84.8	-96.2	485000	処理後, き裂の貫通なし
	支点側	引張	44.8	62.4	—	
		圧縮	-44.8	-62.4	—	

注: 試験体 2 は 100 万回載荷終了

## 付録B 樹脂注入に関する疲労試験結果

付表9 振動を与えずに樹脂注入したときの疲労試験結果一覧 (3.3.(7)の試験結果)

試験体名	公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	樹脂注入前 繰返し数 (×10 <sup>3</sup> ) (き裂長 0~45mm)	樹脂注入後 繰返し数 (×10 <sup>3</sup> ) (き裂長 45~90mm)	総繰返し数 (×10 <sup>3</sup> ) (き裂長 0~90mm)
N	66.7	408	487	894
N [2.8]	61.5	576	1400	1976
R <sub>1</sub> -O	67.2	324	796	1120
R <sub>1</sub> -U	65.1	930	1190	2120
R <sub>2</sub> -O	63.3	639	1090	1709
R <sub>2</sub> -U	66.2	352	745	1097
R <sub>3</sub> -O	64.3	300	1610	1910
R <sub>3</sub> -U	65.4	316	600*	91.61*
R <sub>3</sub> I-15-O	66.1	490	840	1330
R <sub>3</sub> I-15-U	69.0	295	682	977
R <sub>3</sub> I-30-O	66.4	921	1110	1741
R <sub>3</sub> I-30-U	65.4	478	820	1588
R <sub>4</sub> -U [2.8]	61.5	1075	1949	3024

\* : き裂長 77.95mm

付表10 振動を与えながら樹脂注入したときの疲労試験結果一覧 (3.3.(7)の試験結果)

試験体名	公称応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	樹脂注入前 繰返し数 ×10 <sup>3</sup> ) (き裂長 0~45mm)	樹脂注入後 繰返し数 (×10 <sup>3</sup> ) (き裂長 45~90mm)	総繰返し数 (×10 <sup>3</sup> ) (き裂長 0~90mm)
R <sub>3</sub> -U-V	63.9	350	2240	2590
R <sub>3</sub> I-7.5-U-V	65.4	403	939	1342
R <sub>3</sub> I-30-U-V	67.1	404	790	1194

付録C 溶接補修の溶接施工試験結果一覧

付表 11 横向き溶接における試験条件および試験結果一覧 (○：割れあり，×：割れなし)

試験体	f (Hz)	ゲージ②			ゲージ③			ゲージ④		
		$\Delta\delta_o$ (mm)	$\Delta\delta_a$ (mm)	割れ	$\Delta\delta_o$ (mm)	$\Delta\delta_a$ (mm)	割れ	$\Delta\delta_o$ (mm)	$\Delta\delta_a$ (mm)	割れ
H1	3	0.09476	0.11822	○	0.12408	0.18283	○	0.108	0.125	○
H2	3	0.10339	0.12299	○	0.12144	0.192	○	0.1115	0.1225	○
H3	3	0.1012	0.11132	○	0.12408	0.15181	○	0.106	0.0975	○
H4	3	0.10976	0.1127	○	0.12288	0.14352	○	0.1225	0.0875	×
H5	3	0.10442	0.13524	○	0.12408	0.20727	○	0.0955	0.142	○
H6	3	0.11086	0.11776	○	0.12408	0.1645	○	0.109	0.1135	○
H7	3	0.11132	0.115	○	0.12596	0.22701	○	0.0915	0.191	○
H8	3	0.10442	0.11362	○	0.12408	0.19599	○	0.107	0.1195	○
H9	3	0.10442	0.12098	○	0.12596	0.1786	○	0.1075	0.129	○
H10	3	0.11132	0.115	○	0.12455	0.12314	○	0.112	0.078	×
H11	3	0.09936	0.09798	○	0.12408	0.14852	○	0.109	0.1085	○
H12	3	0.10856	0.11822	○	0.12549	0.15322	○	0.112	0.0975	○
H13	3	0.10584	0.11907	○	0.12048	0.19872	○	0.0935	0.12	○
H14	3	0.11613	0.11809	○	0.12192	0.1848	○	0.1065	0.1255	○
H15	3	0.10731	0.11613	○	0.1224	0.1176	○	0.104	0.0725	○
H16	3	0.09702	0.10045	○	0.12384	0.15264	○	0.106	0.083	○
H17	0.3	0.0445	0.0445	×	0.04992	0.04608	×	0.04508	0.02891	×
H18	3	0.04165	0.05243	×	0.04848	0.06384	×	0.043	0.0375	×
H19	6	0.04165	0.04116	×	0.04944	0.05424	×	0.045	0.0355	×
H20	0.3	0.107	0.124	×	0.12288	0.1392	×	0.11172	0.10143	×
H21	6	0.11466	0.12593	○	0.12528	0.19536	○	0.1075	0.156	○
H22	0.3	0.1645	0.245	○	0.19975	0.28717	○	0.17204	0.20654	○
H23	3	0.17444	0.18473	○	0.2016	0.23472	○	0.176	0.1485	○
H24	6	0.15876	0.16415	○	0.20016	0.2208	○	0.1785	0.1995	○
H25	3	0.06348	0.06256	×	0.07332	0.04465	×	0.0635	0.028	×
H26	6	0.06624	0.0805	×	0.07661	0.05593	×	0.0775	0.0425	×
H27	9	0.04324	0.05106	×	0.05123	0.03384	×	0.047	0.019	×
H28	9	0.07314	0.08142	○	0.07708	0.05875	○	0.061	0.033	○
H29	3	0.07958	0.09522	○	0.09729	0.06157	×	0.086	0.0385	×
H30	6	0.08602	0.10534	○	0.10058	0.07426	○	0.0885	0.051	○
H31	9	0.09522	0.11132	○	0.09823	0.10481	○	0.087	0.071	○
H32	3	0.09568	0.12972	×	0.12455	0.09729	×	0.111	0.057	×
H33	0.3	0.1288	0.13708	×	0.14476	0.0987	×	0.1305	0.069	×
H34	0.3	0.15594	0.16514	×	0.17954	0.12502	×	0.157	0.0765	×



付表 12 下向き溶接における試験条件および試験結果一覧 (○：割れあり，×：割れなし)

試験体	f (Hz)	ゲージ②			ゲージ③			ゲージ④		
		$\Delta\delta_0$ (mm)	$\Delta\delta_d$ (mm)	割れ	$\Delta\delta_0$ (mm)	$\Delta\delta_d$ (mm)	割れ	$\Delta\delta_0$ (mm)	$\Delta\delta_d$ (mm)	割れ
F1	0.3	0.0483	0.03726	×	0.0517	0.02585	×	0.0455	0.106	×
F2	3	0.04462	0.06302	×	0.05029	0.03619	×	0.0445	0.034	×
F3	6	0.04324	0.03726	×	0.05123	0.03431	×	0.0455	0.03	×
F4	9	0.04554	0.03726	×	0.05076	0.03384	×	0.042	0.026	×
F5	9	0.08786	0.05106	○	0.10152	0.05546	○	0.0875	0.0455	×
F6	0.3	0.11776	0.11454	×	0.12737	0.09823	×	0.113	0.065	×
F7	3	0.10672	0.08142	×	0.12408	0.06298	×	0.115	0.0505	×
F8	6	0.09292	0.06486	×	0.12267	0.05781	×	0.1015	0.0295	×
F9	0.3	0.1817	0.161	×	0.20163	0.15275	×	0.192	0.124	×
F10	3	0.1771	0.13064	×	0.20163	0.1128	×	0.183	0.1015	×
F11	6	0.17756	0.1311	×	0.19975	0.11092	×	0.177	0.096	×

付表 13 上向き溶接における試験条件および試験結果一覧 (○：割れあり，×：割れなし)

試験体	f (Hz)	ゲージ②			ゲージ③			ゲージ④		
		$\Delta\delta_0$ (mm)	$\Delta\delta_d$ (mm)	割れ	$\Delta\delta_0$ (mm)	$\Delta\delta_d$ (mm)	割れ	$\Delta\delta_0$ (mm)	$\Delta\delta_d$ (mm)	割れ
O1	0.3	0.03772	0.05106	×	0.04888	0.06016	×	0.0505	0.084	×
O2	3	0.03588	0.03404	×	0.04841	0.04465	×	0.0455	0.0355	×
O3	6	0.0368	0.03496	×	0.04935	0.0423	×	0.0485	0.037	×
O4	9	0.0437	0.05888	×	0.05029	0.05405	×	0.05	0.044	×
O5	9	0.08786	0.07084	×	0.10199	0.08507	×	0.0895	0.062	×
O6	0.3	0.1196	0.11132	×	0.13301	0.10011	×	0.118	0.0705	×
O7	6	0.10442	0.092	×	0.12596	0.09635	×	0.119	0.0785	×
O8	3	0.11086	0.10396	○	0.12596	0.1081	○	0.1175	0.087	×
O9	6	0.17802	0.14996	○	0.19975	0.18001	○	0.1805	0.13	○
O10	0.3	0.16974	0.12374	×	0.19458	0.13912	×	0.178	0.1305	×
O11	3	0.18584	0.1541	○	0.19834	0.16027	○	0.185	0.1285	○