

琉球大学学術リポジトリ

ストップホールとクラックアレスターによる疲労き裂進展抑制手法に関する研究

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学 公開日: 2016-04-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 名嘉, 海人, Naka, Kaito メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/33525

博士（工学）学位論文

Doctoral Dissertation of Engineering

ストップホールとクラックアレスターによる

疲労き裂進展抑制手法に関する研究

**A Study on Simple Methods for Arresting Fatigue Crack
Growth by Application of Stop-hole and Crack Arrester**

2016年3月

March 2016

名嘉 海人

Kaito Naka

琉球大学

大学院理工学研究科

生産エネルギー工学専攻

Material, Structural and Energy Engineering Course

Graduate School of Engineering and Science

University of the Ryukyus

博士（工学）学位論文

Doctoral Dissertation of Engineering

ストップホールとクラックアレスターによる

疲労き裂進展抑制手法に関する研究

**A Study on Simple Methods for Arresting Fatigue Crack
Growth by Application of Stop-hole and Crack Arrester**

2016年3月

March 2016

名嘉 海人

Kaito Naka

琉球大学

大学院理工学研究科

生産エネルギー工学専攻

Material, Structural and Energy Engineering Course

Graduate School of Engineering and Science

University of the Ryukyus

指導教員：教授 真壁 朝敏

Supervisor: Prof. Chobin Makabe

本論文は，博士（工学）の学位論文として適切であると認める．

論文審査会

真壁 朝敏



(主査) 真壁 朝敏

下里 哲弘



(副査) 下里 哲弘

宮崎 達二郎



(副査) 宮崎 達二郎

概要

論文題目

ストップホールとクラックアレスターによる疲労き裂進展抑制手法に関する研究

本論文では、ストップホールとクラックアレスターを併用したき裂進展抑制手法について検討を行った。具体的には、き裂とみなしたスリットを設けた平板試験片のき裂先端にストップホールを加工し、き裂開口変位を抑えるためにき裂をまたいでクラックアレスターを取り付けた。これに対して引張圧縮の疲労試験を行い、ストップホールからのき裂発生および進展挙動をマイクロ스코プにより観察することで、そのき裂進展抑制効果を確認した。実験に使用した材料は、一般構造用圧延鋼 SS400、機械構造用炭素鋼 S45C、溶接構造用圧延鋼 SM490A である。

はじめに、自動車生産設備に発生したき裂に対して、その進展を抑制するための応急補修について検討した。実際の設備の状態に対応させて、平滑な試験片の片側だけにクラックアレスターを取り付け、それと通常のストップホール、ピン打ちストップホール、ボルト締めストップホールを併用した場合のき裂進展抑制効果について検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

き裂先端にストップホールを加工した場合のき裂進展抑制効果は、試験片のき裂形態により異なった。片側き裂試験片の場合、ストップホールのみでの加工ではき裂進展抑制効果はあまりなく、ピン打ちストップホールやボルト締めストップホールの場合でも効果は小さかった。これに対して、ストップホールとクラックアレスターを併用すると、き裂の発生寿命と進展寿命の両方に効果的であり、クラックアレスターの取り付け位置と締め付けトルクは、ストップホールからのき裂発生寿命に大きく影響した。また、ストップホールとクラックアレスターを併用した場合のき裂進展抑制効果は、片側き裂試験片より両側き裂試験片の方が大きい結果となった。

次に、クラックアレスターの適用範囲拡張について検討した。先述した平滑な試験片で得られた結果を基に、板継手と溶接継手のような段差部を有する試験片のき裂に対して、通常のストップホールとクラックアレスターを併用した場合のき裂進展抑制効果について検討した。この場合も片側き裂試験片を用いて、クラックアレスターは試験片の片側だけに取り付けて実験を行った。得られた主な結果は以下の通りである。

板継手や溶接継手のような段差部近傍で発生したき裂に対して、ストップホールとクラックアレスターによる補修をした場合、平滑な面で用いる場合に比べてき裂進展抑制効果は低かったが一定以上の効果は確認できた。また、クラックアレスターの形状と取り付け方によって破断寿命の伸びが異なった。板継手試験片において、最もき裂進展抑制効果が高いのは、き裂面近傍にねじ穴を設けて帯び板に重なるようにクラックアレスターを取り付けた場合であった。なお、溶接継手試験片において、最もき裂進展抑制効果が高いのは、溶接ビードの裏側の平面にクラックアレスターを取り付けた場合であった。

Abstract

Dissertation title

A Study on Simple Methods for Arresting Fatigue Crack Growth by Application of Stop-hole and Crack Arrester

In this study, a simple technical method of arresting fatigue crack growth was investigated. Identical flat plate specimens with a slit, which was regarded as a crack, were used for testing. A crack arrester was attached across the crack to decrease opening displacement, in addition to drilling a stop-hole at the crack tip. Tension-compression fatigue tests were performed to confirm the effectiveness of the method in arresting crack growth through microscopic observation of the crack initiation and propagation behavior from the stop-hole. The materials used were SS400 rolled steel for general structure, S45C carbon steel for machine structure, and SM490A rolled steel for welded structure.

First, a temporary repair method was studied for arresting crack growth in a car production facility. Taking into account the crack initiation conditions at the facility, a crack arrester was attached only on one-side of smooth specimens. Then, the effect on arresting crack growth when using a combination of the crack arrester and a normal stop-hole, pinned stop-hole, or bolted stop-hole was studied. The main results obtained are as follows.

The effect of the stop-hole on arresting crack growth was different, depending on the specimen geometry. In the case of the one-side edge crack specimen, drilling a stop-hole without inserting a pin or bolting it was not effective in arresting crack growth. The attachment position of the crack arrester affected the crack initiation behavior. In addition, when the crack arrester and stop-hole were simultaneously applied, the attachment torque on the crack arrester influenced the crack initiation behavior at the stop-hole. When the crack arrester was used, the number of stress cycles until crack initiation and crack growth was improved.

Next, extension of crack arrester application was studied. On the basis of the results obtained with the previously described smooth specimens, the effect of applying a normal stop-hole and crack arrester to a specimen having a plate joint or a welded joint as a step portion was studied. In this experiment, where the one-side crack specimens were also used, a crack arrester was attached only on one-side of the specimen. The main results obtained are as follows.

The fatigue life of the plate joint or welded joint specimens which has a crack in the vicinity of the step portion was improved by attaching a crack arrester and drilling a stop-hole. The increase in fatigue life was different, depending on the method of attaching the crack arrester. In the plate joint specimens, the fatigue life was longest when the crack arrester was attached to overlap the band plate by screwing a hole in the vicinity of crack surfaces. In the welded joint specimens, the fatigue life was longest when the crack arrester was attached on a flat section on the opposite side of the weld site.

研究関連論文業績

- (1) C. Makabe, K. Naka, M.S. Ferdous, Method of arresting crack growth for application at a narrow working space, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.1, No.6, pp.1-12, 2014.
- (2) 名嘉海人, 真壁朝敏, 宮崎達二郎, クラックアレスターとストップホールを用いた平板試験片のき裂進展抑制について, *圧力技術*, Vol.53, No.2, pp.79-87, 2015.
- (3) 名嘉海人, 真壁朝敏, 宮崎達二郎, 疲労き裂進展停止に関する簡便手法の検討, *JCOSSAR2015 論文集*, pp.399-405, 2015.

謝辞

本研究を行うにあたり, 指導教員である機械システム工学科の真壁朝敏教授には終始丁寧なご指導とご鞭撻を賜りましたことを深く感謝申し上げます。また, 環境建設工学科の下里哲弘准教授, 機械システム工学科の宮崎達二郎准教授には本論文の作成に際し, 有益な助言をいただきましたことを深く感謝申し上げます。

著者が所属する技術部の元技術長の高良一夫氏には, 著者に技術職員としての仕事を教えてくださるだけでなく, 博士課程進学への意義を説き, その道筋をつけていただきました。また, 元前任技術専門職員の中山清光氏, 元技術長の伊舎堂義昭氏には研究を行うにあたり多くの激励をいただきました。

社会人学生として仕事をしながら研究をする上で, 技術部機械システム班班長の大城成栄氏, 機械システム工学科の押川渡准教授には研究がしやすいように仕事を配慮していただきました。学会参加のために担当する実習を休んだ際は, 実習担当教員である機械システム工学科の福本功教授に快く送り出していただきました。また, 機械システム班および工作技術班の技術職員の皆様に著者の担当テーマをフォローしていただきました。

機械システム班班長の大城成栄氏, 技術専門職員の與那覇敏明氏, 沖縄県工業技術センター研究員の山内章広氏には実験に用いる試験片製作でお世話になり, トヨタ車体株式会社の笠井憲太氏, 内田晃治氏, 材料力学研究室の Md. Shafiul Ferdous 氏, 葛島由文氏, 大城朋也氏には実験に協力していただきました。

多くの方々の支援のもとで研究活動を行うことができました。博士課程での学生生活を送る上でお世話になった全ての方々に深く感謝申し上げます。

目次

第1章 序論	3
1.1 緒言	3
1.2 金属疲労について	5
1.3 金属疲労のメカニズム	6
1.4 金属疲労の種類	9
1.5 破壊力学によるき裂の強度評価	10
1.6 き裂の補修法について	12
1.7 本論文の目的と構成	16
参考文献	18
第2章 ストップホールに関する先行研究について	20
2.1 ストップホールに補助穴を加工する手法について	20
2.1.1 緒言	20
2.1.2 解析モデルと解析方法	21
2.1.3 使用材料と実験方法	21
2.1.4 解析・実験結果および考察	22
2.1.5 結言	24
2.2 き裂先端近くに加工した穴にピンを挿入する手法について	25
2.2.1 緒言	25
2.2.2 使用材料と実験方法	26
2.2.3 実験結果および考察	26
2.2.4 結言	29
参考文献	30
第3章 ストップホールとクラックアレスターを併用したき裂進展抑制手法について ..	33
3.1 緒言	33
3.2 使用材料と実験方法	36
3.3 試験片モデルの解析について	40
3.4 実験結果および考察	41
3.4.1 中央き裂試験片および両側き裂試験片での効果について	41
3.4.2 片側き裂試験片での効果について	42
3.4.3 50万回の耐久限度目標としたクラックアレスターについて	46
3.4.4 長い両側き裂試験片での効果について	49
3.5 結言	51
参考文献	52
第4章 クラックアレスターの段差部への適用拡張について	54
4.1 緒言	54
4.2 使用材料と実験方法	54
4.3 実験結果および考察	58

4.3.1 板継手試験片での効果について	58
4.3.2 溶接継手試験片での効果について	62
4.4 結言	66
参考文献	66
第 5 章 結論	69
5.1 本論文の結論	69
5.2 今後の課題	71

第 1 章 序論

1.1 緒言

機械・構造物に損傷を与える原因は物理的因子と化学的因子に分類され、物理的因子が主体をなす損傷は破損と呼ばれる。破損は形態によって以下の3つに分類され、これらの要因の中で最も発生頻度が高いのが疲労破壊である。一般的に破損事故の80%以上は直接または間接的な疲労に起因するといわれる。

破損形態

- ① 変形・座屈—座屈，降伏，くびれ，クリープ，リラクゼーション
- ② 破壊—延性破壊，脆性破壊，疲労破壊
- ③ 摩耗—凝着摩耗，引っかけ摩耗，腐食摩耗，疲労摩耗，フレットイング摩耗

疲労破壊による事故が多い理由として次のような理由が考えられる。機械・構造物に小さなき裂が発生していたとしても見た目からはわかりにくく、き裂が大きくなるにつれてその進展は速くなるので、き裂を発見する前に部材が破断する場合がある。また、破断直前まで延性破壊のような大きな変形がないので事前に気付きにくく、事故が起こってはじめて疲労き裂の発生および進展が起こっていたことを知ることが多い。これらのことが疲労破壊の特徴であり、疲労破壊が多い材料的要因といえる。

このような疲労破壊を起こさないために、機械・構造物の重要部分では疲労き裂が発生していないかを調べるために超音波探傷等の非破壊検査が行われるが、検査技術者のミスや技量のばらつきによりき裂発生を見落とす場合、重要部と見なされずに検査対象からはずれた箇所で疲労破壊が起こる場合、コスト削減のために定期検査を省略する場合等がある。また、機械・構造物の疲労特性を知るには実環境において実機試験を行うのが最も確実だが、大型のものや長年使用するものでそれを行うと莫大な費用と時間がかかるため、航空機等の重要輸送機器を除いては実施されなかったり簡略化される場合も多い。その他には、疲労き裂発生の起点となる応力集中が起こりやすい形状や荷重見積りの甘さ、き裂進展特性を考慮しない材料の選定、不適切な材料加工や部材締結、補修や修理の不備など、設計、製造、保全に携わる技術者の疲労に対する知識不足がある。これらのような人的要因も疲労破壊が多い原因と考えられる。

次に実際に起こった疲労破壊事故例について述べる^{1,2)}。いずれもよく知られた疲労破壊事故であり、世界初のジェット旅客機コメットの空中分解、御巢鷹山の日航ジャンボ機の墜落、アロハ航空機の胴体天井吹き飛び (Fig. 1-1(a))、エルアル機のヒューズピン破断による墜落、ドイツ高速鉄道の車輪脱線事故 (Fig. 1-1(b)) などは多数の死者を出す事故となり、航空機や鉄道などの大型輸送機器における疲労破壊はその社会的影響が大きいことを示している。特に御巢鷹山の日航ジャンボ機の墜落は、単独機での事故としては世界の航空史上最大の死者数を出した大事故となった。この事故の直接的原因は事故の7年前に行われた圧力隔壁の修理ミスによって、圧力隔壁のリベット継手部に過大な荷重がかかり、そのリベット孔から発生した複数き裂が進展したことによる破壊とされている¹⁾。ここでは重大事故を中心に示したが、その他にも数々の事故例が報告されている³⁻⁵⁾。

以上のように、機械・構造物における疲労破壊の特徴や要因、実際の疲労破壊事故例について述べた。これらのことから、機械・構造物を安全に使用するためには、疲労破壊をいかに防ぐかが鍵といえる。



(a) Aloha aircraft



(b) German ICE

Fig. 1-1 Examples of fatigue failure accident²⁾.

疲労破壊事故例^{1,2)} (発生日時, 名称の順で記述)

- ① 1954年1月10日, ジェット旅客機コメットの空中分解
- ② 1980年3月27日, 海洋油田プラットフォームの転覆
- ③ 1985年8月12日, 御巢鷹山の日航ジャンボ機の墜落
- ④ 1988年4月28日, アロハ航空機の胴体天井吹き飛び
- ⑤ 1991年2月9日, 原子力発電所蒸気発生器の伝熱細管破断
- ⑥ 1992年10月4日, エルアル機のヒューズピン破断による墜落
- ⑦ 1995年12月8日, 高速増殖原型炉もんじゅの二次系ナトリウム漏洩
- ⑧ 1998年6月3日, ドイツ高速鉄道脱線
- ⑨ 1999年11月15日, H-IIロケット8号機打上げ失敗
- ⑩ 2002年1月10日, 三菱自動車のリコール隠し
- ⑪ 2007年5月5日, エキスポランドのジェットコースター事故

1.2 金属疲労について

機械・構造物に作用する応力が小さくても、それを繰り返し受けることでき裂が発生して進展すると部材の強度が低下する現象を疲労という。金属で発生するものを金属疲労といい、一般的に疲労といえば金属疲労のことを指す。この疲労現象によって部材が破断に至るのが疲労破壊である。

金属疲労に最も影響がある要因は作用する応力の振幅である。Fig. 1-2 に鋼とアルミニウム合金を例にした繰り返し応力振幅 σ_a と破断寿命 N_f の関係を示す。この図は $S-N$ 曲線と呼ばれ、材料の疲労強度を表す重要な図である。炭素鋼などの場合、応力振幅 σ_a が低くなるほど破断寿命 N_f は長くなり、そのうち応力が繰り返し加わっても破断しない応力値が現れる。図中の矢印を付した水平部分がそれを示しており、この限界応力を疲労限度という。大気中の鉄鋼材料の場合、 10^7 回で破断しなければそれ以上繰り返し応力を加えても疲労破壊は起こらないことが知られている。機械・構造物が疲労破壊を起こさないために、疲労限度は設計する際の一つの基準となる。しかし、鉄鋼材料であっても海水のような腐食環境中の場合、アルミニウム合金のような非鉄金属の場合などは、大気中でも明確な疲労限度はないので注意が必要である。

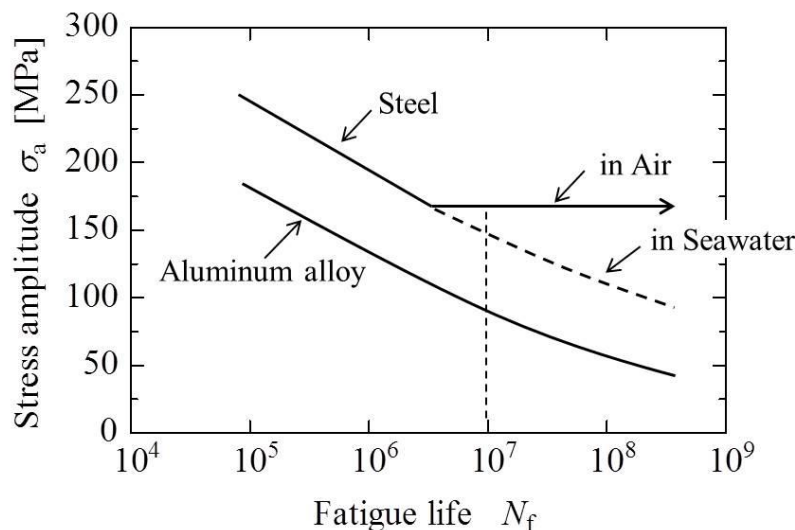


Fig. 1-2 $S-N$ curves.

疲労破壊は寿命によって 2 つに区別される。高い応力で塑性変形を伴い、 10^4 回程度以下の繰り返しで破断に至る疲労を低サイクル疲労（塑性ひずみ疲労）という。また、弾性変形範囲内の低い応力で破断寿命が 10^5 回程度以上で破断に至る疲労を高サイクル疲労（弾性ひずみ疲労）という。例えば、ガスボンベ等の圧力容器は中のガスを使い切ると充填することを繰り返すが、容器の生涯でその繰り返し数は比較的少なく、このような場合は低サイクル疲労について検討される。これに対して、新幹線の車軸などは車輪が回転するたびに繰り返し負荷を受けて長期間使用されるため、このような場合は高サイクル疲労について検討される。

応力振幅以外に疲労強度に影響する要因^{6,7)}として、切欠き、平均応力、残留応力、繰り返し速度、温度、雰囲気などがある。

1.3 金属疲労のメカニズム

Fig. 1-3 は金属疲労の過程を示しており、それを大きく分けると微小き裂の発生、き裂の進展、破断の 3 段階になっている。寺田⁵⁾はこれらをそれぞれステージ I ~ III と定義しており、それぞれの段階について説明する^{5,8)}。

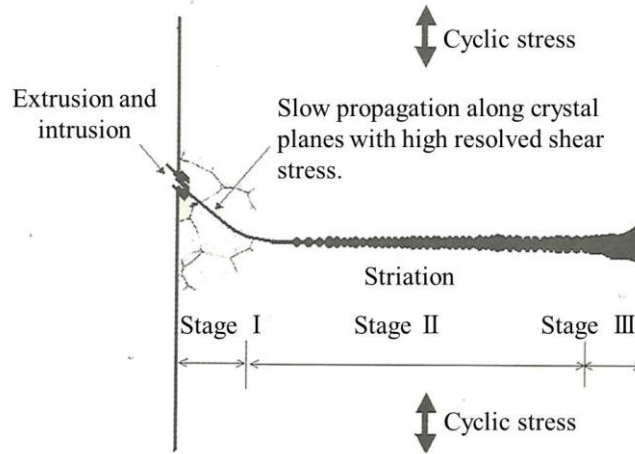
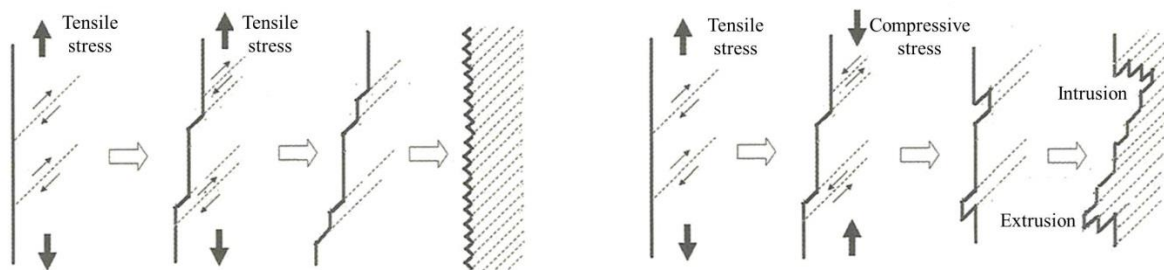


Fig. 1-3 Mechanism of metal fatigue⁸⁾.

1.3.1 ステージ I (微小き裂の発生)

ステージ I は平滑材の側端部や切欠き材の応力集中部の金属結晶内において、き裂の核となるような微小すべりが多数発生し、それらのうちの主だったものが合体して微小き裂へと成長してゆく段階である。これは Fig. 1-4(b)に示す突き出しと入り込みと呼ばれる現象によって起こると考えられている。



(a) In the case of monotonic tensile stress.

(b) In the case of cyclic stress.

Fig. 1-4 Mechanism of crack initiation⁸⁾.

引張荷重を加えると部材表面の最もすべりやすい部分で塑性変形が起こり Fig. 1-4(a)のように変形する。この新たに形成された面は酸化によって硬い膜を作り、荷重が除荷されるあるいは圧縮荷重を加えても元には戻らず、すべりやすい別の面が変形する。これが繰り返されると Fig. 1-4(b)のように微視的な V 形の切欠きが形成される。これが応力集中源となりき裂が発生し進展する。この段階は電子顕微鏡を用いないと見えないマイクロレベルであり、肉眼でき裂と認識するのは不可能である。

結晶粒内のすべりはせん断応力によって生じるため、Fig. 1-3 に示すように引張応力方向に対してほぼ 45 度傾斜した方向に発生する。この段階は応力集中の程度とはあまり関係が

なく、平滑材、切欠き材に関わらず負荷後比較的早い段階で発生することが認められている。すべりはやがて介在物の周辺や結晶粒界に堆積して小さな空隙（ボイド）を形成し、ボイドがいくつか合体して微小き裂となり、肉眼でも認識できる程度となる。微小き裂が結晶粒を2~3個横切ったあたりで、き裂は引張応力に対して直交した方向に進展し始める。なお、平滑材ではいったん微小き裂が発生すると、同じ負荷のもとでは主き裂は破断に至るまで成長を続ける。しかし、応力集中係数が3以上の鋭い切欠きから発生した場合は、作用する負荷レベルによっては切欠き先端近傍における高い応力集中との重疊によって、いったん発生した微小き裂が1mm（以内）程度成長した段階でそのまま停留してしまい、さらに負荷サイクルをかけても進展が見られないことがある。このような状態のき裂を停留き裂という。1.2節で述べた疲労限度は、微小き裂は発生するがそれが進展しないで停留き裂となる限界応力といえる。

1.3.2 ステージⅡ（き裂の進展）

ステージⅡでは、引張応力方向に対して直交方向にき裂が進展するようになる。この段階では、Fig. 1-5に示す⁴⁾ようにき裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の間に次式のような関係が成立し、これをパリス則という。

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (1.1)$$

C と m は材料定数であり、航空機用金属材料で $m=2\sim4$ の範囲のものが多く、その他の構造用金属材料では $m=2\sim6$ の範囲となる。

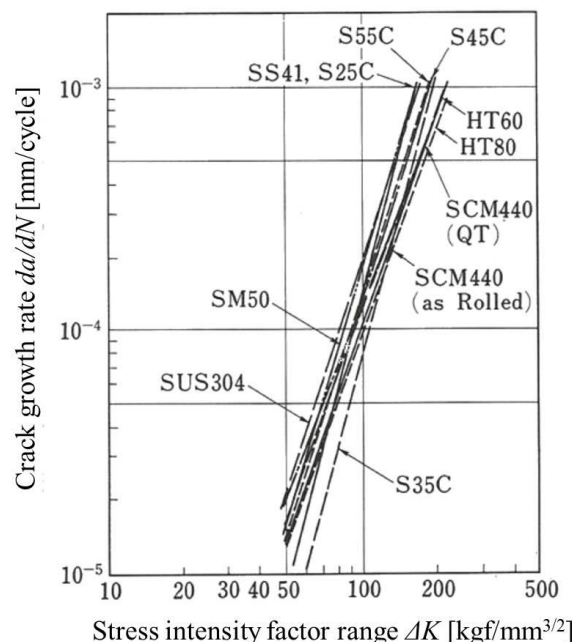


Fig. 1-5 Crack growth rate da/dN vs. stress intensity factor range ΔK ⁴⁾.

き裂進展の過程を Fig. 1-6 に示す⁸⁾。①～③の間では、無負荷の状態から引張荷重が作用するとき裂が開口してすべりによる塑性変形が起こる。最大引張荷重が作用するときき

裂先端は最も引き延ばされて前方にせり出し鈍化する。④～⑥の間では、引張荷重から圧縮荷重に転じてき裂が閉口するとき、①～③のときと逆向きに塑性変形が起こり、き裂先端は押しつぶされて後方にせり出す。引張荷重で鈍化したき裂先端が再び鋭くなり、次の引張過程でき裂がわずかに進展することを繰り返す。結果として、1サイクルごとにき裂が進んだ分だけき裂面には⑤のようなでこぼこができ、電子顕微鏡で破面を観察するとこれが Fig. 1-7 に示すような縞模様に見える。これをストライエーションという。

ストライエーションは疲労破面に必ずしも明確に見えるわけではなく、材料、熱処理の有無、環境などによっては不明瞭な場合も多いが、破壊事故が起きた際に破面を観察して、ストライエーションがあれば原因は疲労と特定することができる。また、ストライエーションの模様からき裂の発生起点や進展方向を推定することができる、その他に、ストライエーションの間隔と個数から繰り返し応力 1 回分のき裂進展量や繰り返し応力の回数を推定することもできる。

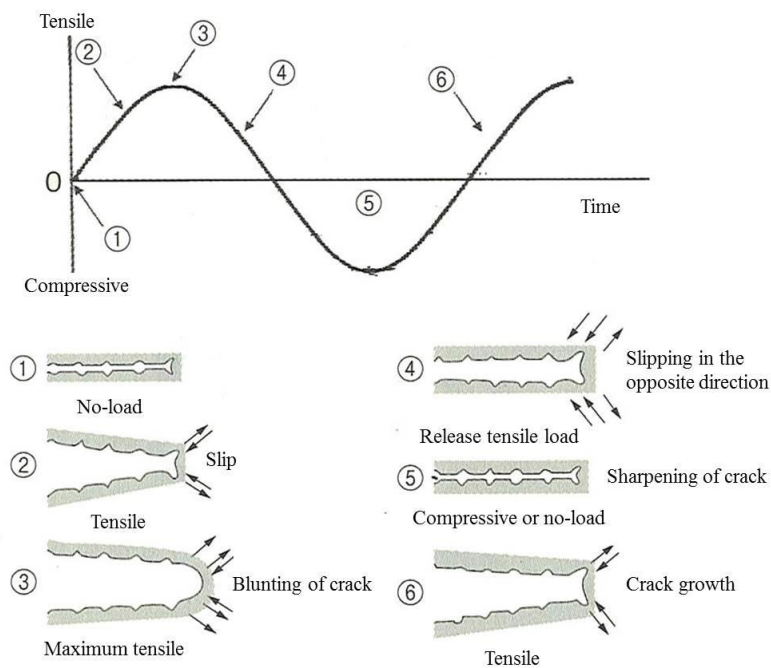


Fig. 1-6 Mechanism of crack growth⁸⁾.

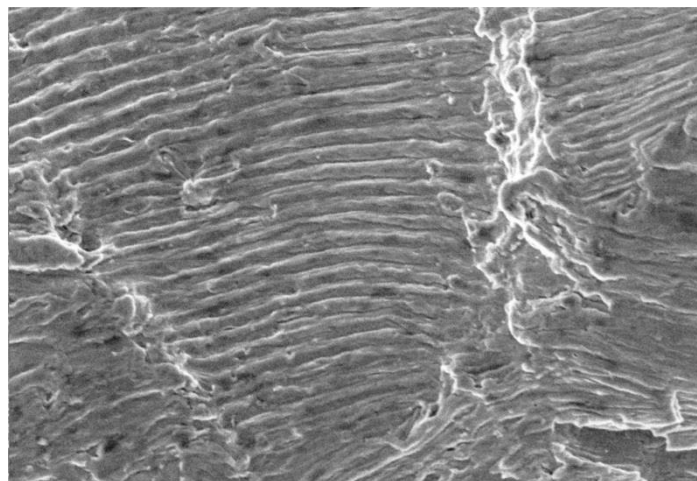


Fig. 1-7 Observation of striation on fatigue failure surface⁹⁾.

1.3.3 ステージⅢ（破断）

き裂の進展とともに応力拡大係数 K が増加して、材料の疲労破壊靱性値 K_{fc} を超えると急速破壊（線形弾性破壊）に至る。高い破壊靱性値を持つ材料は、き裂が相当大きくならなければ K_{fc} を超えないのでその前に塑性崩壊することが多い。これはき裂の進展によって断面積が小さくなり、応力が材料の引張強度を超えて破断するものである。また、この中間の弾塑性破壊が起こる場合もあり、この3つのどれに先に到達するかで最終的な破断形態が決まる。

この段階では、破面に疲労破面特有のストライエーションは観察されず、静荷重による延性破壊に特有のディンプル破面となる。一般的に、疲労破壊の過程でステージⅢが占める割合は0.1%以下であり、機械・構造物の安全性から見れば工学的な意味はあまりないといえる。

1.4 金属疲労の種類

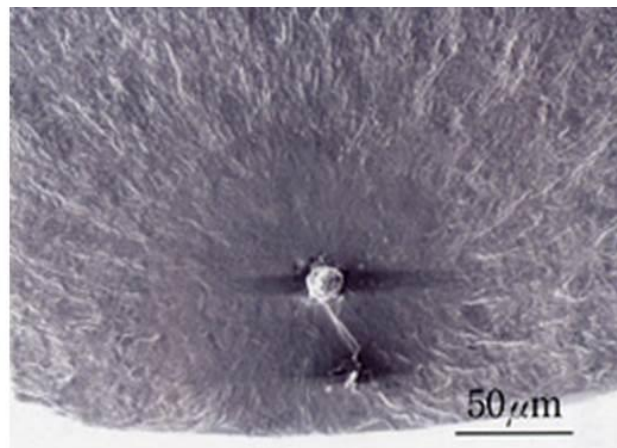
金属疲労は発生メカニズムによって以下のように分類されている¹⁾。

1.4.1 疲労

巨視的な疲労破面は疲労き裂進展過程による破面と最終的な過負荷による破面の2つに大別できる。疲労き裂進展過程の破面は塑性変形をほとんど伴わない平坦な破面であり、負荷応力の変化によって Fig. 1-8(a)に示すようなビーチマークが形成されることがある。また、表面硬化材や高強度鋼などでは内部の介在物からき裂が発生する場合があります。その場合には介在物のまわりに Fig. 1-8(b)に示すような白色円形のフィッシュアイが現れることもある。一方、微視的にはプラトーと呼ばれる平坦部にストライエーションが形成されるのが特徴的であるが、特に高強度鋼では不明瞭の場合も多い。



(a) Beach mark¹⁰⁾



(b) Fish eye¹¹⁾

Fig. 1-8 Observations of fatigue failure surface.

1.4.2 熱疲労

熱疲労は熱応力の繰り返しにより発生する破壊であり、破面の基本的な特徴は一般的な疲労破壊と同じである。熱的過渡による低サイクル熱疲労に加えて、高温と低温の流体が

共存する機器では、熱成層化、間欠流、混合流、熱的衝突による高サイクル熱疲労が問題となる。

1.4.3 腐食疲労

環境の影響を受けて、乾燥空気などの参照環境中とは異なった疲労特性を示す場合を腐食疲労または環境疲労という。起点は孔食の場合が多いが、すべり線などの場合もある。破面は材料、環境、さらに応力繰り返し速度、波形、応力拡大係数などの応力条件に強く依存し、粒内延性割れ、粒内脆性割れ、粒界割れ、または溶解破面などが現れる。脆性ストライエーションなどのストライエーションが観察されることもある。また、破面形成後に腐食を受けることにより破面様相が大きく異なったり、腐食生成物が破面上に残留していることも多く、破面観察には注意が必要である。

1.4.4 フレッシング疲労

フレッシング疲労のき裂は、接触する材料間の微小振動により表面がフレッシング損傷を受けて発生する。き裂は表面から斜めに進展し、内部に行くほど主応力と直角方向に向きを変える。主応力と直角方向に進展している領域では、破面の特徴は一般的な疲労破壊と同じである。き裂発生部には微小振動によって生成された摩耗粉のフレッシング酸化物が付着している。

1.5 破壊力学によるき裂の強度評価

1.3 節で述べたように、疲労破壊は微小き裂が発生して進展することにより起こる。平滑材に対し、切欠き材では穴や溝などの応力集中源がき裂発生起点となる場合が多く、応力集中の程度によって切欠き部からのき裂発生寿命が左右される。高い応力集中の場合は短寿命に、低い応力集中の場合は長寿命となる傾向がある。このため、切欠き材の強度は切欠き底の最大応力に基づく応力集中係数 K_t (Stress concentration factor) が 1 つの評価基準となる。

切欠き材に対し、き裂材の場合はき裂を限りなく鋭い切欠きとみなすと理論上はき裂先端の応力が無限大となるため、応力集中係数 K_t をそのままき裂の強度評価に用いることができない。このため、き裂材に対しては破壊力学の手法が用いられる。切欠き材では応力集中部という点の応力に着目したのに対し、破壊力学ではき裂先端の特異性(応力無限大)を許容して、き裂先端近傍の応力場を取り扱う。この応力場の応力分布を表す係数をパラメータとしてき裂材の強度評価に用いる。このパラメータを応力拡大係数 K (Stress intensity factor) という。ただし、応力拡大係数 K を用いるのは材料全体は弾性変形内であり、き裂先端部近傍に局所的な塑性変形が生じる小規模降伏条件が成立する場合のみである。

1.5.1 き裂の変形モード

破壊力学で定義されるき裂の基本的な変形モードを Fig. 1-9 に示す⁵⁾。それぞれをモード I ~ III とし、これらを基本として全てのき裂の変形はこれら 3 つの組み合わせで表現される。モード I が最も危険性が高く、破壊を考える上で重要なモードである。

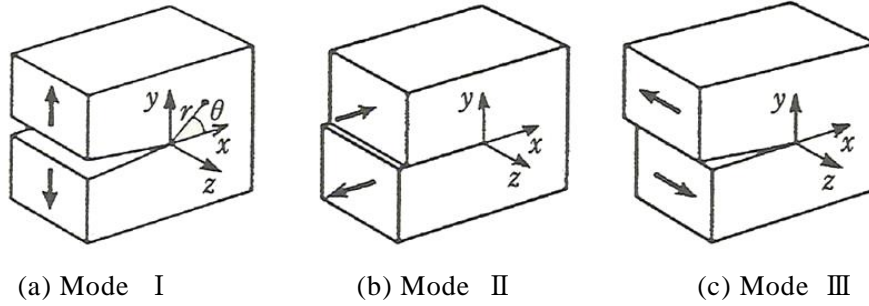


Fig. 1-9 Crack deformation mode⁵⁾.

(a) モード I (開口モード)

き裂面に垂直な引張荷重によって変形する最も一般的な変形モード

(b) モード II (面内せん断モード)

き裂面に沿った面内せん断力によって変形するモード

(c) モード III (面外せん断モード)

き裂面に対して直交する面外せん断力によって変形するモード

1.5.2 応力拡大係数 K を用いたき裂先端近傍の応力場の表示

Fig. 1-1 に示すような無限板中に長さ $2a$ のき裂があり, 無限遠方で引張応力 σ_∞ が作用する場合, モード I に対してき裂先端近傍の応力場は応力拡大係数 K_I を用いて次式で表現される¹²⁾.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{Bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} \quad (1.2)$$

き裂の延長線上の応力は, (1.2)式で $\theta=0$ とすると,

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}, \quad \tau_{xy} = 0 \quad (1.3)$$

となる. ここで K_I は

$$K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \quad (1.4)$$

であり, 無限遠方での引張応力 σ_∞ とき裂長さ a によって定まる, き裂先端近傍の応力場を表す係数となる. 以上のように, き裂先端近傍の応力は $1/\sqrt{r}$ に比例して, き裂先端で応力無限大となる特異性を持つ. また, 負荷応力とき裂長さが異なるき裂材であっても, K 値が同じであればき裂先端近傍の応力分布は同じとなる.

応力が増加するか, き裂が長くなると K 値も大きくなるが, Fig. 1-5 で示したように構造用金属材料ではある程度までき裂は安定的に進展する. しかし, K 値がある値を超えたところでき裂が急速に進展し破壊に至る. この限界値を疲労破壊靱性値 K_{Ic} といい, き裂材の強度評価において, 応力拡大係数 K が疲労破壊靱性値 K_{Ic} を超えないことが重要な基準となる. 疲労破壊靱性値 K_{Ic} は静的な破壊靱性値 K_c よりも一般的に小さくなっている.

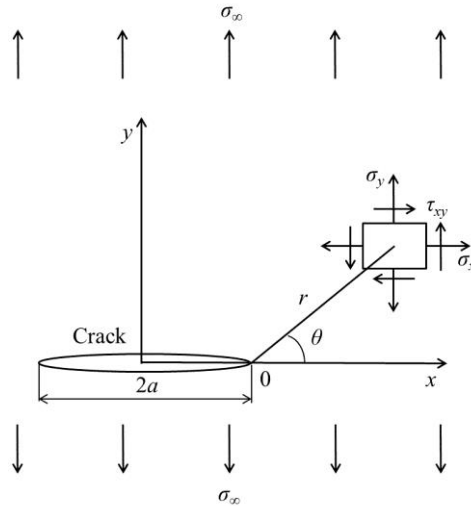


Fig 1-10 Distribution of stresses near the crack tip.

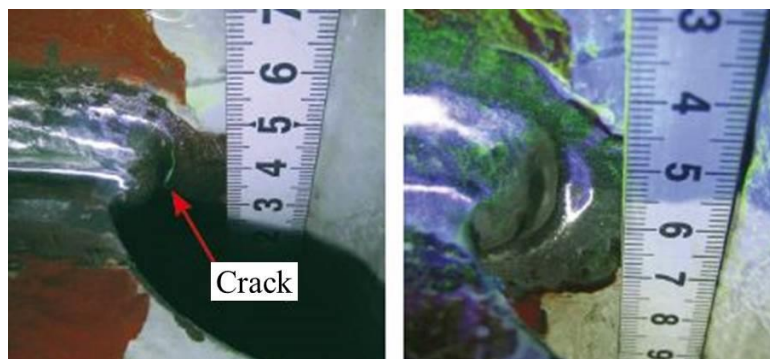
1.6 き裂の補修法について

機械・構造物には疲労き裂の発生起点となる穴や溝などの応力集中部が多数存在する。また、特に応力集中部がない平滑材の場合でも、材料表面のすべり変形による微小き裂が発生することは先に述べた。これらのことから、疲労き裂の発生を完全に防ぐのは困難であり現実的ではないため、き裂の発生を前提とした運用が機械・構造物には求められる。

1.3 節で述べたように、構造用金属材料ではき裂が発生してもすぐに破壊に至るわけではなく、その前にき裂が安定して進展する段階（ステージⅡ）がある。この段階でき裂の補修を行えば、負荷応力やき裂の状態にもよるが、き裂の進展を停止あるいは抑制できる場合があり、機械・構造物の寿命を延ばすことができる。疲労破壊を防止する上でき裂の補修は非常に重要であり、これまでにさまざまな手法が検討されている。本節では、代表的なき裂の補修法について述べる。

1.6.1 切削や研削による除去

Fig. 1-11 に示すように¹³⁾、切削や研削によりき裂をまるごと除去する場合があるが、部材を貫通していない浅いき裂や軽微な貫通き裂に対しての適用に限られる。



(a) Before repair

(b) After repair

Fig. 1-11 Crack repair by cutting removal¹³⁾.

グラインダなどの研削工具を用いてき裂を除去する場合、細かい切粉がき裂面につまってき裂が除去されたように見える可能性があるため、施工終了後には非破壊検査でき裂の有無を確認するのが推奨される。

1.6.2 ストップホール法およびボルト締めストップホール法

Fig. 1-12 に示すように¹⁴⁾、機械・構造物に発生した疲労き裂進展を抑制するためにき裂先端に穴をあける場合があり、この穴はストップホールと呼ばれる¹⁴⁻²⁷⁾。き裂先端に穴をあけることでいったんき裂進展が停止することに加えて、鋭いき裂先端が穴の曲率半径により鈍化して応力集中が緩和する効果があり、ストップホール先端から新たなき裂が発生するまで寿命を延ばすことができる。き裂発生寿命は応力集中に大きく左右され、穴径が大きいほどストップホール先端の応力集中は緩和されて寿命が延びるが、部材形状によって加工できる穴径には制限がある。また、実際の現場での大きな穴の加工には特殊な機械や工具が必要であり困難な場合もあるが、き裂先端に穴をあけるだけで簡便なため広く用いられている手法である。

母材の幅に対してき裂が十分に短い場合、き裂先端にストップホールを加工すると効果的に応力集中が緩和されてき裂発生寿命が延びるが、き裂が長くなるにつれてその効果は薄れていく。Fig. 1-12 のようにストップホールから発生したき裂に対して、さらにストップホールを加工してき裂進展を停止することもできるが、最初に加工したストップホールよりもき裂発生寿命は短くなる。また、ストップホールはき裂発生寿命に対する延命であり、ストップホールからき裂が発生した場合のき裂進展寿命に対する延命効果はない。

ストップホールは、穴をあけることに加えてさらに処置を施すことでその効果を高めることができる場合があり、その代表的なものがボルト締めストップホール法である¹⁶⁻¹⁹⁾。Fig.1-13 にボルト締めストップホールの適用例を示す。これはストップホールをボルト・ナットで締め付けることでき裂開口が抑制され、さらに母材とワッシャー間、ワッシャーとボルト・ナット間の摩擦により荷重が伝達されてストップホールの応力集中が緩和されるとされている。その効果により、ボルト締めストップホールの場合にはき裂発生寿命だけでなくき裂進展寿命も延びるのがストップホールと異なる。簡便で効果が高いため、この手法もまた広く用いられている。その他にもストップホールを基本とした改良型の手法が提案されており、これらについては第2章で述べる。

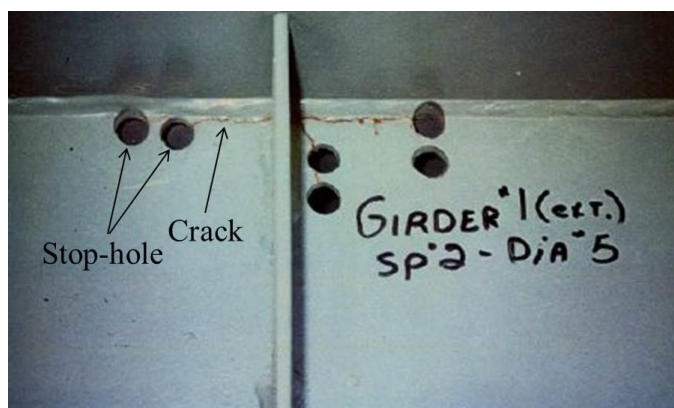


Fig. 1-12 Application example of stop-hole¹⁴⁾.

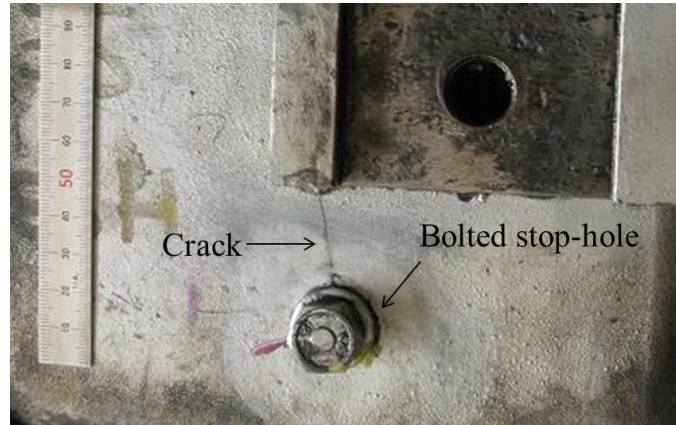


Fig. 1-13 Application example of bolted stop-hole.

1.6.3 パッチ法

Fig. 1-14 にパッチによる鋼橋の補修例を示す¹⁴⁾。この場合はき裂先端にストップホールを加工し、き裂全体を部材の両側から広い当て板で挟み込んで高力ボルトとナットで取り付けている。この例のように鋼橋の場合はボルト・ナット、航空機の場合はリベットで取り付けられるのが標準的となっている。その他には接着や溶接などが用いられる。ある程度の大きさのパッチになると、多数のボルト穴やリベット穴の加工や取り付けに手間はかかるが、作業自体は比較的容易であり、次節 1.6.4 で述べる溶接法に比べて作業者の技量により補修後の疲労強度が左右されることが少ない。

パッチを用いた補修^{13-15, 26, 27)}を行う場合、基本的にストップホールと併用されることが多く、ストップホールをパッチの取り付け穴にすることもできる。パッチを取り付けると、1.6.2 節で述べたボルト締めストップホールよりもき裂開口抑制効果と応力のバイパス効果が高い。これらによる延命効果は高く、航空機や鋼橋などの大型構造物において、ストップホール単独では効果が小さいような長いき裂の補修にはこの方法を用いるのが最も一般的となっている。しかし、次のような課題もある。

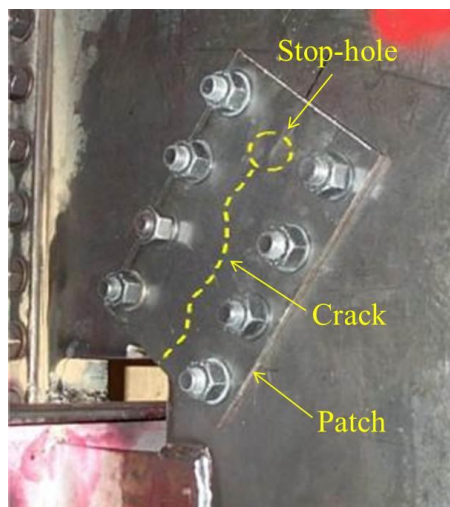


Fig. 1-14 Application example of drilling stop-hole and patch attachment¹⁴⁾.

Fig. 1-12 のような部材端部に発生したき裂のように、部材形状によっては広いパッチが取り付けられない場合がある。通常の施工でも多数のボルト穴加工や取り付けに時間がかかるが、き裂発生箇所が狭い作業空間の場合、使用可能な機械や工具に制限があるためにさらに時間を要する。き裂発生箇所を部材の両側から挟みこんで完全に覆い隠すと、その後の目視による経過観察ができないなどである。

1.6.4 溶接法

溶接による補修²⁶⁻³³⁾は、き裂を溶接して部材形状を原形復帰させる方法である。Fig. 1-12 のようにパッチが設置できないような隅肉部や狭い箇所に対して有効である。ボルト・ナットのような締結部材やパッチのような補強部材は基本的に不要（場合によっては必要）なので、パッチ法に対して費用や作業時間の点では優れている。しかし、溶接時の入熱や凝固過程において材料の変形、結晶組織の粗大化、引張残留応力の発生を伴い、溶接後には溶接止端部が応力集中源となる、これらは疲労強度が低下する要因となり、欠陥のない良好な溶接補修がされたとしても、溶接自体に伴う避けることのできない問題である。溶接割れ、アンダーカット、インクルージョン、ブローホールなどの溶接欠陥が生じた場合も疲労強度が低下する要因となり、溶接欠陥の有無や程度に関しては作業者の技量によるところが大きく、溶接品質の管理が最大の課題である。

以上のように、き裂の溶接補修を行った場合、補修部からき裂が再発生する可能性が高い。このような場合は、溶接止端部にピーニング³⁴⁻³⁷⁾などの後処理を行うと疲労強度を向上させることができる。Fig. 1-15 に超音波ピーニング処理（UIT 処理：Ultrasonic Impact Treatment）を施した溶接止端部の断面を示す³⁷⁾。この処理による疲労強度向上機構は止端部の曲率半径が大きくなることによる応力集中の緩和、止端部近傍に塑性変形による圧縮残留応力が付与されること、止端部近傍の結晶粒が微細化することによるものとされている。

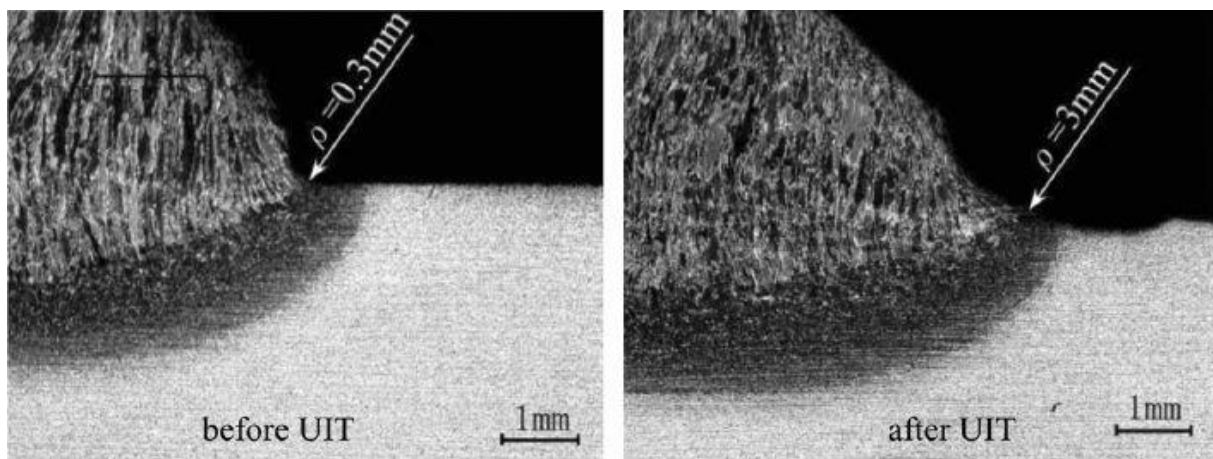


Fig. 1-15 UIT at welded toe³⁷⁾.

ピーニング以外に圧縮残留応力を付与する方法としては低変態温度溶接材料（LTT：Low Temperature Transformation welding material）を使う方法がある。この溶接材料は通常のものより変態開始温度が低く、常温付近で溶接金属が膨張するため、最終的に止端部に圧縮

残留応力を付与できるとされている³¹⁾。この材料を用いてき裂補修を行えば、溶接後の疲労強度向上のための後処理が不要になる可能性があり、これまでにその疲労強度向上効果についての検討がされている³¹⁻³³⁾。

1.6.5 ICR (Impact Closure Retrofit treatment) 法

Fig. 1-16 に示すように⁴⁰⁾、エアツールを用いてき裂周囲に打撃を加えて塑性変形させ、き裂表面を閉口させることでき裂開口を抑制し、き裂進展を抑制する方法がある。これを衝撃き裂閉口処理 (ICR 処理: Impact Crack Closure Retrofit treatment)³⁸⁻⁴¹⁾という。ストップホール加工が困難な箇所や狭い箇所でも、汎用的なエアツールで補修できる簡易さがある。

近年提案された技術であり、その適用性などはまだ不明な点もある。現段階では、引張および曲げ荷重下において平板試験片や溶接継手試験片を対象にその効果が検討されており³⁸⁻⁴¹⁾、実際の鋼橋での試験施工も行われている。また、き裂が発生する前の溶接止端部に ICR 処理をすることによって、先項で述べた超音波ピーニングと同様に疲労強度向上効果があることも確認されている。

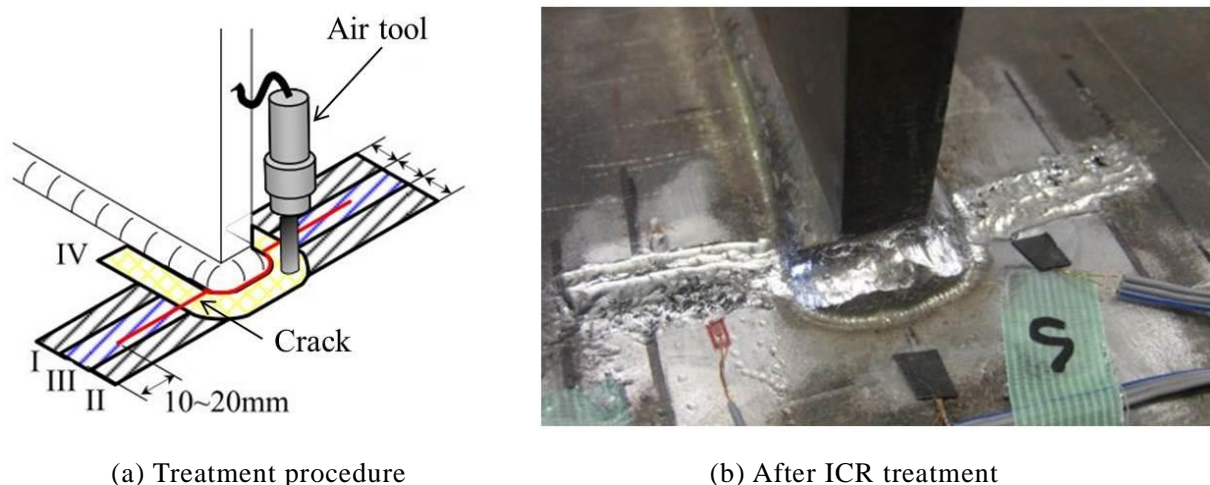


Fig. 1-16 Application example of ICR treatment⁴⁰⁾.

1.7 本論文の目的と構成

前節 1.6 で代表的なき裂補修法についてそれぞれの特徴を述べた。1.6.5 節で述べた ICR 法はまだ試験的な段階であるので、実用的には 1.6.1~1.6.4 節で述べた方法がき裂の状態に応じて使い分けられている。これらなき裂の長さによって分類すると、切削や研削による除去は短いき裂、ストップホール法は比較的短いき裂、パッチ法と溶接法は比較的長いき裂に対して適用される。これらの中で延命効果が最も高いのは、ストップホールと併用したパッチ法でありその採用実績も多い。しかし、パッチが取り付けられない箇所があること、作業に時間を要すること、施工後のき裂の経過観察などの課題もある。また、パッチ法の延命効果は高いが、比較的短いき裂に対して適用するのは作業性の問題から効率的ではない。しかし、ストップホールあるいはボルト締めストップホール単独の補修だといずれき裂が発生する可能性が高く、両者の中間をなすような簡易で効果的な補修法が必要

であると考えられる。

本論文では、パッチに比べて取り付けが簡易である小型の当て板をき裂補修に用いることを試みる。この当て板をクラックアレスターと称し、応急補修法としてストップホールとクラックアレスターを併用したき裂進展抑制手法について検討することを目的とする。具体的には、まずき裂を有する平板試験片のき裂先端にストップホールを加工し、ストップホール先端は観察できるようにき裂をまたいた形でクラックアレスターを取り付ける。これに対して引張圧縮方式の疲労試験を行い、その疲労強度向上効果について検討する。また、クラックアレスターは小型のため、狭い箇所や形状が複雑な箇所が発生したき裂に対しても適用できる可能性がある。その例として、機械・構造物にある段差部を想定した試験片を用いた検討も行う。なお、本論文で検討された結果の一部は、実際の自動車生産設備に発生したき裂の補修に適用されている。

本論文は本章を含め全5章により構成され、各章の概要を以下に示す。

第2章では、ストップホールに関連する2つのき裂進展抑制手法²¹⁻²⁴⁾を紹介する。一つめはストップホールに加えてその近くに補助穴を加工する手法^{21, 22)}について、二つめはき裂先端近くの穴にピンを挿入する手法^{23, 24)}について述べる。前者はストップホール近傍の形状を変えること、後者は穴周りの加工硬化と圧縮残留応力の付与により、ストップホールあるいはき裂先端近傍の応力緩和を図っている。これらの結果を、第3章で適用するストップホールを検討する上で参考にした。

第3章では、自動車生産設備に発生したき裂に対し、ストップホールとクラックアレスターを併用した場合について、設備に作用する1年間の荷重繰り返し数を耐久限度目標とし、有限寿命を考慮した応急補修について検討する。き裂形態の異なる片側き裂、中央き裂、両側き裂を加工した平滑な平板試験片に引張圧縮応力を作用させて、通常ストップホール、ピンを挿入したストップホール、ボルト締めストップホールをそれぞれ単独で適用した場合とクラックアレスターを併用した場合の疲労強度向上効果を比較する。

第4章では、クラックアレスターの適用範囲拡張を検討する。機械構造物には平滑な形状だけではなく段差等のある形状を有するものが多数ある。そのような場合は形状が変化する部分付近で疲労き裂が発生しやすい。第3章で平滑な平板試験片を対象に得られた結果を基に、板継手と溶接継手のような段差部を有する小型の平板試験片に加工したき裂に対し、ストップホールとクラックアレスターを適用し、その疲労強度向上効果について平滑部で用いた場合との違いを比較する。

第5章では、第2章から第4章で得られた結果をまとめる。

なお、本論文の内容は JCROSSAR2015 論文集、疲労き裂進展停止に関する簡便手法の検討, pp.399-405, 2015 (第2章), Mechanical Engineering Journal, Method of arresting crack growth for application at a narrow working space, Vol.1, No.6, pp.1-12, 2014 (第3章), 圧力技術, クラックアレスターとストップホールを用いた平板試験片のき裂進展抑制について, Vol.53, No.2, pp.79-87, 2015 (第4章) に掲載された内容を含んでいる。

参考文献

- 1) 小林英男, 破壊事故 - 失敗知識の活用 -, 共立出版, 2007.
- 2) 科学技術振興機構, 失敗知識データベース, <http://www.sozogaku.com/fkd/>
- 3) 日本機械学会, 技術資料 機械・構造物の破損事例と解析技術, 1984.
- 4) 西田新一, 機械機器破損の原因と対策, 日刊工業新聞社, 1986.
- 5) 寺田博之, わかりやすい構造破壊の防止技術, 養賢堂, 2006.
- 6) 日本材料学会九州支部, 第34回疲労講座 初めて学ぶ金属疲労, 2013.
- 7) 西島敏, 金属疲労のおはなし, 日本規格協会, 2007.
- 8) 谷村康行, 絵とき破壊工学基礎のきそ, 日刊工業新聞社, 2009.
- 9) 労働安全衛生総合研究所, http://www.jniosh.go.jp/publication/mail_mag/2014/73-column-2.html
- 10) パナソニック株式会社解析センター, <http://www2.panasonic.co.jp/aec/blog/analysis/2009/11/post-3.html>
- 11) 物質材料研究機構, <http://www.nims.go.jp/jpn/nimsnow/Vol4/2004-06/>
- 12) 小林英男, 破壊力学, 共立出版, 1993.
- 13) 溝江慶久, 宮浦和彦, 疲労き裂が発生した鋼床版を補修～首都高速湾岸線の鋼床版き裂補修工事の概要～, 川田技報, Vol.28, pp.96-97, 2009.
- 14) U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Manual for repair and retrofit of fatigue cracks in steel bridges, FHWA Publication No. FHWA-IF-13-020, March 2013.
- 15) 雲越隆一, 稲田博史, 村井向一, 荒川河口橋の鋼床版き裂補修, 宮地技報, No.27, pp.82-90, 2014.
- 16) 森猛, ストップホールをボルト締めすることによる疲労亀裂の補修, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.969-976, 1989.
- 17) 森猛, ボルト締めした円孔の応力集中と疲労強度, 土木学会論文集, No.543, pp.123-132, 1996.
- 18) 内田大介, ボルト締めストップホール法で補修した面外ガセット溶接継手部の疲労強度評価, 三井造船技報, No.190, pp.45-53, 2007.
- 19) 三木千壽, 町田文孝, 伊藤博章, ガセット継手部の疲労き裂のストップホールによる補修および応力改善対策, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.283-293, 2011.
- 20) P.S. Song, Y.L. Shieh, Stop drilling procedure for fatigue life improvement, International Journal of Fatigue, Vol.26, No.12, pp.1333-1339, 2004.
- 21) Murdani Anggit, 真壁朝敏, 才本明秀, 宮崎達二郎, 近藤了嗣, 補助穴の加工によるストップホールからの疲労き裂発生の新抑制手法, 材料, Vol.56, No.12, pp.1139-1144, 2007.
- 22) A. Murdani, C. Makabe, A. Saimoto, R. Kondou, A crack-growth arresting technique in aluminum alloy, Engineering Failure Analysis, Vol.15, pp.302-310, 2008.
- 23) 伊禮良樹, Anggit Murdani, 国吉和男, 真壁朝敏, き裂進展挙動に及ぼすき裂先端近傍への穴加工とその穴へのピンの打ち込みの影響について, 日本機械学会論文集 A 編,

- Vol.74, No.741, pp.706-712,2008.
- 24) C. Makabe, A. Murdani, K. Kuniyoshi, Y. Irei, A. Saimoto, Crack-growth arrest by redirection crack growth by drilling stop holes and inserting pins into them, *Engineering Failure Analysis*, Vol.16, pp.475-483, 2009.
 - 25) S. Shkarayev, Theoretical modeling of crack arrest by inserting interference-fit fastener, *International Journal of Fatigue*, Vol.25, pp.317-324, 2003.
 - 26) 山田健太郎, 近藤明雅, 鋼部材の亀裂補修・補強後の疲れ挙動, *土木学会論文集*, Vol.1986, No.368, pp.411-415, 1986.
 - 27) Z. Domazet, Comparison of fatigue crack retardation methods, *Engineering Failure Analysis*, Vol.3, No.2, pp.137-147, 1996.
 - 28) 酒井吉永, 松井鋭一, 山田健太郎, 近藤明雄, き裂の突合せ溶接補修とその疲れ挙動, *構造工学論文集*, Vol.33A, pp.411-420, 1987.
 - 29) 日本溶接協会, プラント圧力設備溶接補修指針, 2009.
 - 30) 上野康雄, 藤平正一郎, 金裕哲, 繰返し荷重下にある鋼橋の溶接補修法の提案, *片山技報*, No.32, pp.10-21, 2013.
 - 31) 判治剛, 鋼橋に生じた疲労損傷に対する溶接補修技術の開発, *J-BEC レポート*, Vol.7, pp.6-13, 2012.
 - 32) 三木千壽, 徳永皓平, 判治剛, 鋼橋に生じた疲労損傷に対する低変態温度溶接材料による溶接補修の試み, *土木学会論文集 A*, Vol.66, No.4, pp.836-849, 2010.
 - 33) 太田昭彦, 渡辺修, 松岡一祥, 志賀千晃, 西島敏, 前田芳夫, 鈴木直之, 久保高宏, 低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の疲労強度向上, *溶接学会論文集*, Vol.18, No.1, pp.141-145, 2000.
 - 34) 田井政行, 三木千壽, 鈴木啓悟, ハンマーピーニング処理による面外ガセットの溶接止端部の疲労強度改善, *土木学会論文集 A1(構造・地震工学)*, Vol.67, No.2, pp.396-409, 2011.
 - 35) S. Roy, J.W. Fisher, B.T. Yen, Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT), *International Journal of Fatigue*, Vol.25, pp.1239-1247, 2003.
 - 36) 野瀬哲郎, 島貫広志, 重ね継手の疲労寿命に及ぼす超音波ピーニングの影響に関する実験および解析, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.74, No.737, pp.166-168, 2007.
 - 37) 大川鉄平, 島貫広志, 野瀬哲郎, 鈴木環輝, き裂進展解析による溶接構造物の疲労寿命予測, *新日鉄技報*, No.392, pp.52-57, 2012.
 - 38) 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.
 - 39) 石川敏之, 松本理佐, 服部篤史, 河野広隆, 山田健太郎, き裂表面閉口によるストップホール縁の応力集中の低減, *材料*, Vol.62, No.1, pp.33-38, 2013.
 - 40) 舘石和雄, 判治剛, 石川敏之, 清水優, 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, 2015.
 - 41) 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.

第2章 ストップホールに関する先行研究について

本章では、本研究室で検討してきているストップホールに関する2つのき裂進展抑制手法を紹介する。ここでは後に展開するストップホールとクラックアレスターによるき裂進展抑制手法について検討する上で記述しており、次の2項目に分けて説明する。

1. ストップホールに補助穴を加工する手法について
2. き裂先端近くに加工した穴にピンを挿入する手法について

2.1 ストップホールに補助穴を加工する手法について

ストップホールは応力集中を軽減するために、き裂先端に穴を加工するのが基本である。また、き裂先端以外に穴を加工することもある。本研究室ではその応力集中を軽減するという観点から、き裂先端とそれ以外の近傍に複数の穴を加工する手法[参考文献 1), 2)]を提案している。その手法について本節ではクラックアレスターとの関連から考察する。

2.1.1 緒言

橋梁や航空機等の構造物に発生した疲労き裂進展を抑制するためにき裂先端に穴をあける場合^{3,4)}にこの穴をストップホールと呼び、ストップホールに関するき裂進展抑制手法について各種の研究が行われている³⁻¹²⁾。

ストップホールは穴加工に加えて後処置を施すとその効果が高まる場合がある。このような改良型のストップホールの例として、ストップホール周辺を塑性加工する場合⁵⁾、ストップホールより少し径が大きい鋼球をそれに通過させる場合^{6,7)}、ストップホールに硬い材質のピンを押し込む場合⁸⁾などが検討されている。また、き裂先端にストップホール加工を行わず、き裂を挟んで対称な位置に穴加工またはブリネル圧痕の加工を行った場合^{9,10)}もある。これらの手法において、ストップホールあるいはき裂先端近傍が塑性変形することで、その周囲は加工硬化する。また、その塑性変形は局部的であり、周りの弾性変形域によって塑性変形がある程度拘束されるために圧縮残留応力が発生する。この加工硬化と圧縮残留応力の作用により、き裂開口が抑制されるとともに、ストップホールあるいはき裂先端近傍の応力集中が緩和することでき裂進展が抑制されることが考察されている。また、切欠き等の応力集中要素が2つ以上近い位置にある場合、それぞれの応力集中が互いに干渉して応力集中が緩和される場合があることも示されている^{13,14)}。

本節では、き裂先端へのストップホール加工に加えてその周囲に穴（以降これを補助穴と称する）を加工することでストップホールの応力集中緩和効果をさらに高め、き裂の発生および進展が抑制できるか検討している。はじめに引張荷重を受ける平板に短い中央き裂とストップホールおよび補助穴を加工したモデルを用いて体積力法¹⁴⁻¹⁶⁾による数値解析を行い、ストップホールおよび補助穴の直径や補助穴の配置位置を変化させた場合のストップホールの応力集中係数を求めている。次に解析モデルと同様に中央き裂とストップホールおよび補助穴を加工した3種類の試験片を用いて疲労試験を行い、ストップホールの応力集中緩和による疲労寿命の向上効果について検討している。

2.1.2 解析モデルと解析方法

Fig. 2-1 に試験片の解析モデルを示す．幅 $2W=50\text{mm}$ ，長さ $2H=190\text{mm}$ の平板中央に幅 $2b=0.5\text{mm}$ ，長さ $2t=10\text{mm}$ のスリットを設けこれをき裂とみなし，その両端に直径 d_1 のストップホールを加工している．それに加えてスリットを挟むように上下左右対称に直径 d_2 の補助穴を 4 個配置している．ストップホールと補助穴の中心を結ぶ線と荷重軸方向のなす角度を配置角度 θ ，ストップホールと補助穴の最短距離を穴間距離 δ と定義した．

$$K_t = \sigma_{\max}/\sigma_a \quad (2.1)$$

ストップホール先端 A 点における応力集中係数 K_t を，A 点における最大垂直応力 σ_{\max} と一様応力場の垂直応力 σ_a を用いて(2.1)式とし， d_1 ， d_2 ， θ ， δ をそれぞれ変化させたときの K_t を西谷が開発した体積力法¹⁴⁻¹⁶⁾により算出した．解析は試験片形状の対象性を考慮し 1/4 モデルで行っている．算出した K_t によって，ストップホールと補助穴の直径および穴間距離や補助穴の配置角度がストップホールの応力集中緩和にどのように影響するか検討した．

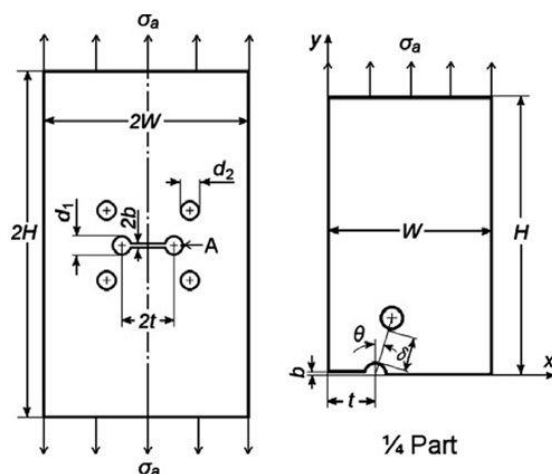


Fig. 2-1 Drilling additional-hole for reducing K_t at stop-hole edges.

2.1.3 使用材料と実験方法

疲労試験に用いた材料はアルミニウム合金 2024-T3 であり，その化学組成と機械的性質を Table 2-1 と Table 2-2 にそれぞれ示す．

Fig 2-2 に試験片の基本形状を示す．幅 50mm，長さ 190mm，厚さ 3mm の平板中央に幅 0.5mm，長さ 10mm のスリットを設け，その両端に直径 3.2mm のストップホールを加工している．この基本形状の試験片で行った実験結果を基本データ(以降 Base とする)として，Fig 2-5 に示すようにストップホールに加え補助穴加工をした場合の結果を Base と比較し，そのき裂進展抑制効果を検討した．

疲労試験は応力振幅 $\sigma_a=62\text{MPa}$ ，繰り返し周波数 $f=10\text{Hz}$ ，応力比 $R=-1$ として，電気油圧サーボ式材料試験機を用いて引張圧縮方式で行い，き裂の発生および進展挙動はマイクロスコープを用いて観察した．

Table 2-1 Chemical composition (mass%).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zn+Ti	Others	Al
0.07	0.18	4.48	0.55	1.51	0.03	0.08	0.02	0.03	0.01	Bal

Table 2-2 Mechanical properties.

0.2% proof strength $\sigma_{0.2}$ [MPa]	Tensile strength σ_B [MPa]	Elongation ϕ [%]
370	460	22.9

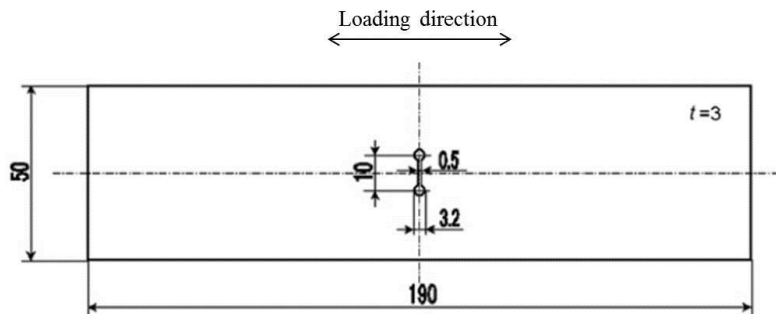


Fig. 2-2 Specimen geometry.

2.1.4 解析・実験結果および考察

Fig. 2-3 にスリット先端に加工したストップホール径を変えた場合のストップホール先端 A 点における応力集中係数 K_t の変化を示す。ストップホール径 $d_1=1.5\sim 5\text{mm}$ の範囲で直径が大きいくほど K_t は低下することが確認できる。

Fig. 2-4(a)にストップホール径 $d_1=2\text{mm}$ 、ストップホールと補助穴の穴間距離 $\delta=0.8\text{mm}$ として、補助穴径 $d_2=2\text{mm}$ 、 3.2mm 、 4.8mm と変えた場合の、補助穴の配置角度 θ による応力集中係数 K_t の変化を示す。点線の Base はストップホールだけを加工した場合の結果である。補助穴径 $d_2=2\text{mm}$ 、 3.2mm 、 4.8mm のいずれの場合も配置角度によって応力集中係数が低下する範囲と増加する範囲があることがわかる。補助穴径 d_2 によって応力集中係数 K_t が最小値となる位置は配置角度 $\theta=0\sim 20^\circ$ の範囲にあり、その位置は補助穴径 d_2 が大きいほど $\theta=0^\circ$ に近づくことがわかる。この場合、応力集中係数 K_t の最小値となったのは $d_2=4.8\text{mm}$ 、 $\theta=0^\circ$ の場合だった。

Fig. 2-4(b)はストップホール径 $d_1=3.2\text{mm}$ の場合の結果である。定性的な傾向は Fig. 2-4(a)と同様だが、応力集中係数 K_t が最小値となる位置が $\theta=10\sim 30^\circ$ の範囲に移動している。この場合も $d_2=4.8\text{mm}$ で応力集中係数 K_t が最少値となり、本解析範囲において補助穴径が大きいほうがストップホール先端の応力集中緩和効果は高いと言える。これはストップホール単独の場合と同様の傾向を示している。また Fig. 2-3 および 2-4 より、ストップホールのみの場合ストップホール径 $d_1=5\text{mm}$ において応力集中係数 K_t は約 5 だが、ストップホールに加えて補助穴を加工した場合は $d_1=2\text{mm}$ において応力集中係数 K_t は約 2.7 となり、補助穴を加工した方がより効果的に応力集中が緩和されることがわかる。

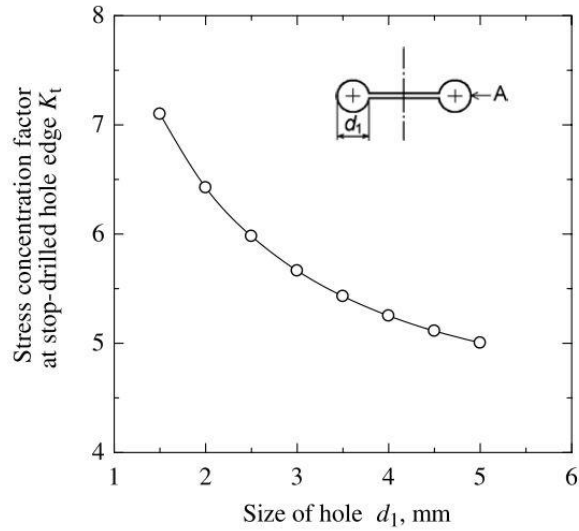


Fig. 2-3 Effect of the size of stop-hole on stress concentration factor K_t at point A.

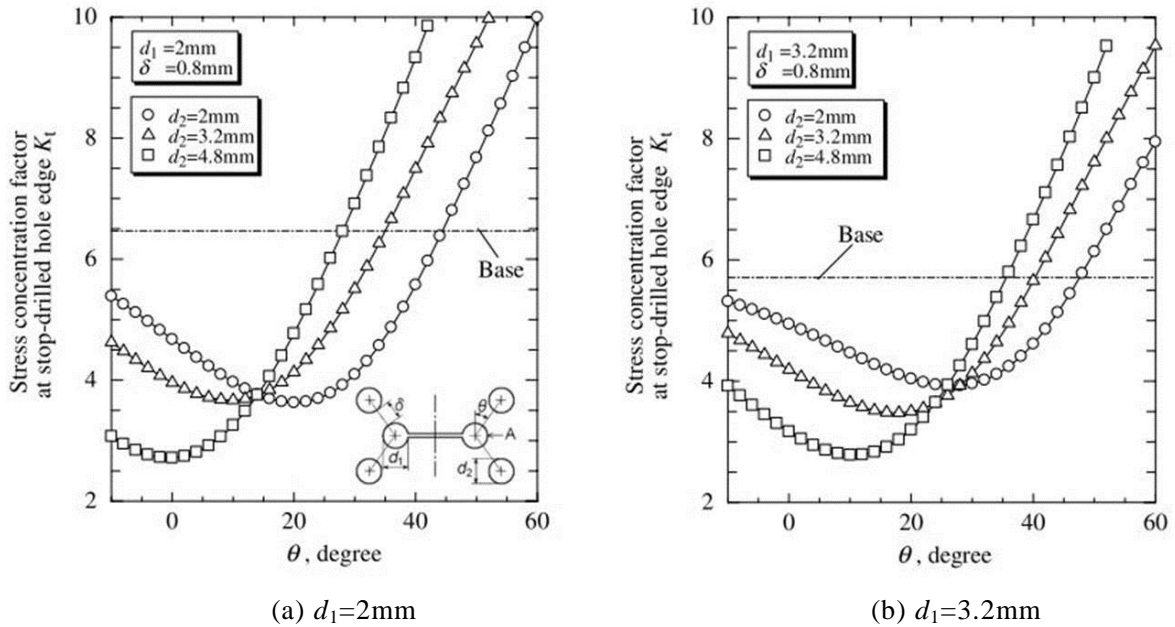


Fig. 2-4 Stress concentration factor K_t at point A in various angle of θ .

Fig. 2-5 に応力振幅 $\sigma_a=62\text{MPa}$, 穴間距離 $\delta=0.8\text{mm}$ として疲労試験を行った場合のき裂進展曲線を示す。き裂長さ a は初期き裂長さ (スリット半長+ストップホール半径) にストップホール先端から発生したき裂長さを加えたものとした。試験片はストップホール径 $d_1=3.2\text{mm}$ として, ストップホール加工のみの場合 (Base), 補助穴の配置角度 $\theta=0^\circ$ として補助穴径 $d_2=3.2\text{mm}$, 4.8mm で補助穴を加工した場合の3種類を用いた。補助穴を加工した場合は Base に比べて疲労寿命が延び, 補助穴径 $d_2=3.2\text{mm}$ より $d_2=4.8\text{mm}$ の場合の方が寿命は長くなった。 $d_2=4.8\text{mm}$ の場合は繰り返し数 300 万回で実験を打ち切っている。これより, Fig. 2-4 で示したストップホールの応力集中緩和により疲労寿命が延びることが確認できた。また, Base と $d_2=3.2\text{mm}$ の場合はき裂発生後の進展挙動にあまり違いはなく, 補助穴による延命効果は主にき裂発生寿命に影響すると思われる。

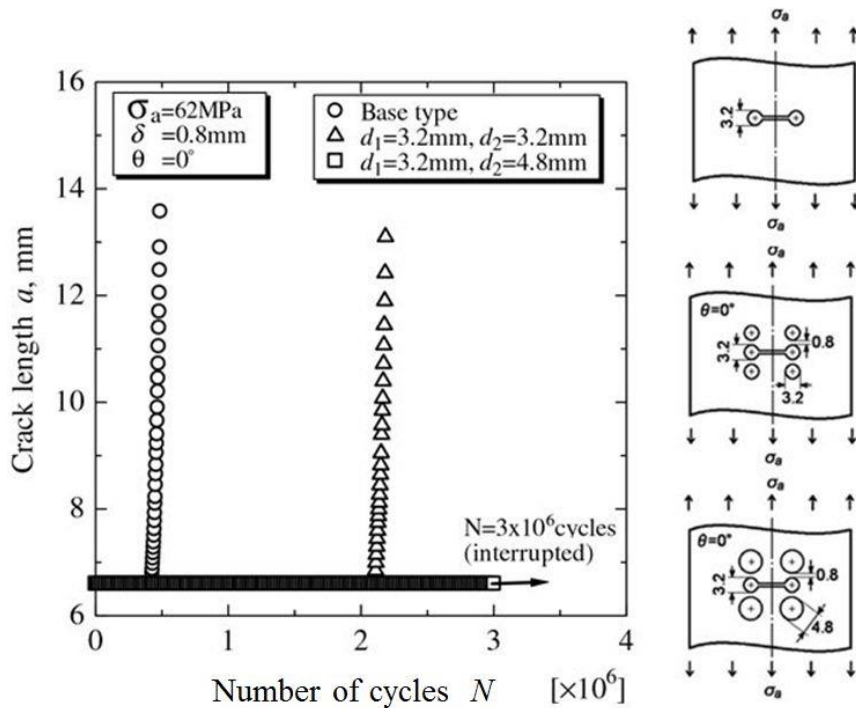


Fig. 2-5 Crack growth curves in the case of additional applied holes.

2.1.5 結言

本節では、ストップホールに加えてその近くに補助穴を加工することによるき裂進展抑制手法を紹介した。本手法では、ストップホールに加えてその近くに補助穴を加工した場合にストップホール加工のみの場合より疲労寿命が延びるかについて、汎用二次元体積力法による応力集中係数の解析と疲労試験によって検討している。本実験範囲で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 数値解析の結果、ストップホールに加えて補助穴を加工した場合はその配置角度 θ によって、ストップホール加工のみの場合に比べ応力集中係数 K_t が低下する範囲と増加する範囲があることがわかった。
- (2) 数値解析の結果、ストップホールの応力集中係数 K_t が最小となる補助穴の配置角度 θ は補助穴径 d_2 によって異なった。また、補助穴径 d_2 が大きいほうがストップホールの応力集中係数 K_t は低下した。
- (3) 疲労試験の結果、ストップホールに加えて補助穴を加工した場合はストップホール加工のみの場合に比べて疲労寿命が延びた。また、補助穴径が大きい場合が最も疲労寿命は長かった。

2.2 き裂先端近傍に加工した穴にピンを挿入する手法について

き裂先端の応力集中の軽減を主目的にせず、き裂先端に圧縮の残留応力を付与する観点からは、ストップホールあるいはき裂先端近傍に加工した穴にピンを挿入する手法[参考文献 17), 18)]について考察する。本手法はクラックアレスターと併用したピン打ちストップホールの効果に関連する。

2.2.1 緒言

機械や構造物の破壊事故の多くは金属疲労に起因しており^{19,20)}、穴や溝などの形状変化部、非金属介在物や偏析などの材料欠陥、溶接欠陥や加工痕などの製造欠陥などが疲労き裂発生起点となる。これら全てのき裂発生を完全に防ぐのはほぼ不可能であるため、機械構造物には疲労き裂の発生や進展を前提とした設計や運用が求められる。例えば、航空機の機体におけるリベット継手は、一つのリベット孔からき裂が発生・進展しても隣接するリベット孔にき裂が進入することで、リベット孔から新たなき裂が発生するまでのき裂進展を一時的に停止できるフェールセーフ構造となっている。しかし、複数のリベット孔から複数のき裂が発生した場合、それらの連結によってき裂進展速度が加速し、不安定破壊が起こる場合^{20,21)}もあり、き裂進展速度とき裂進展経路の制御が疲労破壊を防止する上で重要である。

ストップホール法¹⁻⁸⁾は簡便なき裂進展抑制手法として広く用いられており、2.1節ではき裂先端へのストップホール加工に加えて補助穴を加工する手法^{1,2)}について述べた。これはき裂先端の応力集中を緩和させ、ストップホールからのき裂発生寿命を延ばすことでき裂進展の抑制を図っている。この他には、き裂進展モードがモードⅠからモードⅡに変化した場合²²⁾、き裂進展方向が荷重軸に垂直方向から約45°傾いた方向に変化した場合²³⁾、一定の繰り返し荷重下で過大荷重や過小荷重を負荷した場合²⁴⁻²⁶⁾などにき裂進展速度が変化することが示されている。

き裂進展経路に関しては、脆性的なき裂が進展する場合のき裂進展経路の予知²⁷⁾、CT試験片においてき裂先端付近に穴がある場合のき裂進展経路の予知^{28,29)}、き裂進展方向にストップホールを設けた場合のき裂進展経路の解析³⁰⁾、ニューラルネットワークを用いたき裂進展停止のためのストップホール位置の推定³¹⁾などが行われ、き裂と穴を有する平板等において、き裂が穴に進入して進展が停止する場合としない場合のき裂と穴の位置関係などが考察されている。また、き裂を有する無限板においてき裂先端を挟んで対称に穴加工をした場合³²⁾に応力拡大係数が低下することが示されている。さらに、き裂先端付近を挟んで対称に圧痕を付与した場合³³⁾は、塑性変形による加工硬化と圧縮残留応力によって効果的にき裂進展を抑制できることが示されている。

これらのことから本節では、穴位置によってき裂進展経路が変化すること、き裂先端近傍に圧縮残留応力が分布する場合にき裂進展が遅延することに着目し、複数のき裂が発生した場合を想定して、き裂進展経路の変化とき裂進展の遅延による疲労寿命向上効果について検討している。具体的には、平板中央に両側き裂を有する試験片を用いて、き裂先端近傍に穴加工をした場合とその穴にピンを打ち込んだ場合について引張圧縮の疲労試験を行い、その疲労寿命向上効果について検討している。

2.2.2 使用材料と実験方法

実験に用いた材料は 2.1 節と同じアルミニウム合金 2024-T3 であり，その化学組成と機械的性質は Table 2-1 と Table 2-2 の通りである．

Fig 2-6 に試験片の基本形状を示す．幅 50mm，長さ 190 mm，厚さ 3 mm の平板中央の両側に幅 0.2 mm，長さ 5 mm のスリットを加工し，スリット先端から予き裂を発生させて疲労試験を行った．また，予き裂は試験時より低い応力振幅 $\sigma_a=33\text{MPa}$ ，応力比 $R=-1$ ，繰り返し周波数 $f=10\text{Hz}$ の条件で発生させて，その長さとしスリット長さを含めて初期き裂長さ（5.7~6.4mm の範囲）とした．この基本形状の試験片で行った実験結果を基本データ（以降 Base とする）として，Fig 2-7 および 2-8 に示すようにき裂先端付近に 2 つあるいは 4 つの穴加工をした場合とそれにピンを打ち込んだ場合の結果を Base と比較し，そのき裂進展抑制効果を検討した．

疲労試験は応力振幅 $\sigma_a=50\text{MPa}$ ，繰り返し周波数 $f=10\text{Hz}$ ，応力比 $R=-1$ として，電気油圧サーボ式材料試験機を用いて引張圧縮方式で行い，き裂の発生および進展挙動はマイクロスコープを用いて観察した．

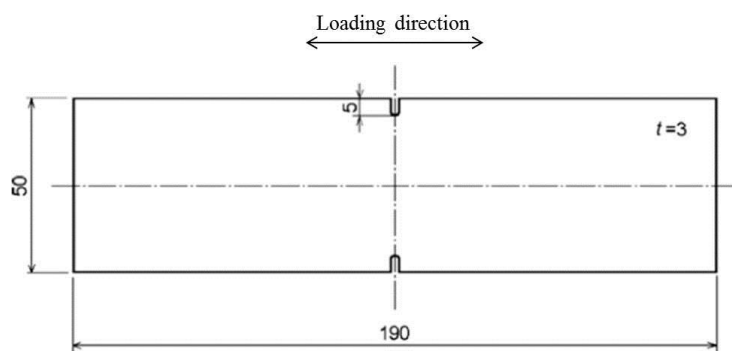


Fig. 2-6 Specimen geometry.

2.2.3 実験結果および考察

Fig. 2-7 にき裂先端付近に 2 つの穴を加工した場合のき裂進展曲線を示す．き裂長さ a はスリットを含めたき裂長さの両側での平均値とした．2 つの穴は試験片中心に対して点対象となるように配置し，その直径は 3.2mm とした．予き裂先端から穴中心までの荷重軸方向の距離は 3.2mm とし，荷重軸に対して垂直方向の距離 X は 0mm と 1.6mm とした．試験片 No.1 は Base の結果を示しており，No.2 は $X=0\text{mm}$ ，No.3 は $X=1.6\text{mm}$ の位置に穴を加工した場合である．No.4 は $X=0\text{mm}$ ，No.5 は $X=1.6\text{mm}$ の位置への穴加工に加え，その穴径より 0.05mm 大きい直径の軟鋼製のピンを打ち込んだ場合である．

試験片 No.1 の破断寿命は約 7 万回であり，穴を加工した No.2 と No.3 の破断寿命はそれぞれ約 11 万回，約 9 万回となり Base に比べてわずかに寿命は延びたが，き裂先端近くに穴を加工することによる延命効果は低かった．また， $X=0\text{mm}$ ， 1.6mm と変化させても破断寿命にあまり変化はなかった．それに対して，穴加工に加えピンを打ち込んだ試験片 No.4 と No.5 の破断寿命はそれぞれ約 22 万回，約 62 万回となり Base に比べ破断寿命が延びた．試験片 No.4 は No.1~3 に比べ，き裂長さが約 8mm になるまではき裂進展が緩やかであることがわかる．試験片 No.1~4 は両側のき裂が荷重軸に対して垂直に進展し，それが連結

して破断した．試験片 No.5 は両側の穴にき裂が進入していったんき裂進展が停止した後，片方の穴からき裂が再発生して進展後に破断した．図中の▽印のプロットが水平になっている部分はき裂の進展が停止している期間を，プロットが不連続になっている部分は穴からき裂進展を確認した点を示している．

穴にピンを打ち込むと，その周りは円周方向に膨らみ塑性変形を生じる．それに伴い塑性変形部の周りの弾性変形部では穴を縮める方向に圧縮残留応力が生じると考えられる．この圧縮残留応力によりき裂を開口する引張応力が緩和されて，試験片 No.4 と No.5 は破断寿命が延びたと考えられる．試験片 No.5 の破断寿命が長いのは，両側のき裂が穴に進入しその進展が一時停止したためである．穴にき裂が進入したことでこの穴はストップホールの機能を果たす．その応力集中緩和効果に加え，穴の周りは塑性変形により加工硬化しており，その周りには圧縮残留応力も生じている．それらによってき裂開口が抑制されることで穴からのき裂発生が遅れて延命したと考えられる．また試験片 No.4 の場合はき裂は穴に進入しなかったが No.5 は進入しており，穴の配置位置によってき裂進展方向が変化することがわかる．これはき裂先端に分布する圧縮残留応力の違いに起因すると考えられる．

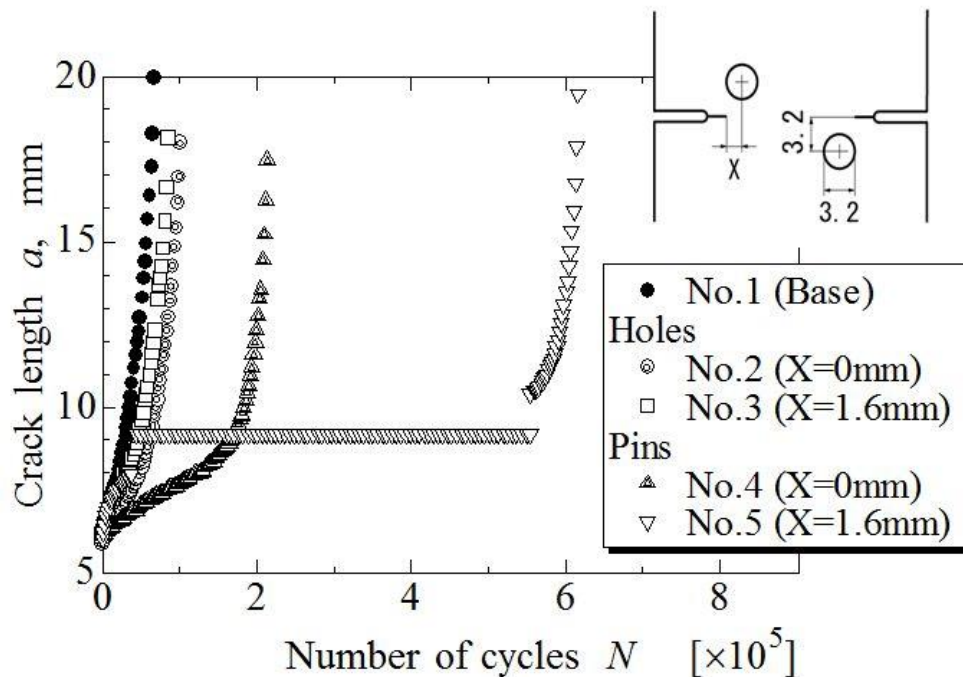


Fig. 2-7 Crack growth curves in the case of pins inserted into stop-hole (2 holes).

Fig. 2-8 にき裂を挟み込むように4つの穴を加工した場合のき裂進展曲線を示す．試験片 No.2~4 は上下対称に，No.5 はちどりがけに直径 3.2 mm のストップホールを加工している．予き裂先端から穴中心までの荷重軸方向の距離は全て 3.2 mm とした．荷重軸に対して垂直方向の距離については，試験片 No.2 は $X=0\text{mm}$ ，No.3~5 は $X=1.6\text{mm}$ とした．試験片 No.2~5 は4つの穴全てにピンを打ち込んでおり，No.3 だけ打ち込んだピンを抜き取ってから実験を開始している．

図には示していないが，試験片 No.3 と同じ位置に穴加工をただけの場合は Base と破断寿命はあまり変わらず，Base と同様に両側のき裂が荷重軸に対して垂直に進展しそれが

連結して破断した。しかし、ピンを打ち込んだ試験片 No.2~5 は全て Base に対して寿命が延び、 $X=0\text{mm}$ の試験片 No.2 よりも $X=1.6\text{mm}$ の試験片 No.3~5 が寿命が長かった。これは Fig. 2-7 に示す 2 つの穴加工をした場合と同様の傾向だが、その延命効果は 4 つの穴の場合が大きい。これより、き裂先端を挟み込むように穴を配置した方がき裂進展経路により多くの圧縮残留応力が分布し、き裂開口抑制効果は高いと考えられる。試験片 No.2 は繰り返し数約 50 万回で破断したが、試験片 No.3~5 は繰り返し数 200 万回まで破断しなかったのここで実験を打ち切っている。また試験片 No.3 の結果より、ピンを抜いても穴周りに生じた加工硬化と圧縮残留応力はき裂開口抑制に効果的であることがわかる。

Fig. 2-9(a), (b)に繰り返し数 200 万回時で試験片 No.3 と No.4 のき裂進展が停止した状態をそれぞれ示す。ピンを抜いた試験片 No.3 の場合、き裂は荷重軸とほぼ垂直方向に進展し 2 つの穴の間の中央部で停止した。この場合、上下の穴からもき裂が発生し荷重軸方向に進展している。ピンが入ったままの試験片 No.4 の場合は穴にき裂が進入しそこで停止した。本研究では応力拡大係数や残留応力等の値を定量的に算出しておらず、き裂進展経路についての詳細な検討は今後に残された課題である。

なお、実験結果は省略するがき裂先端にストップホールを加工してそこにピンを打ち込んだ場合の方が Fig. 2-7 および 2-8 の場合よりも効果は高い。実際の問題ではき裂先端に穴を加工できない場合もあることおよびき裂進展挙動の興味深さの観点から、本節ではき裂先端を外して穴を加工した場合の結果を示している。

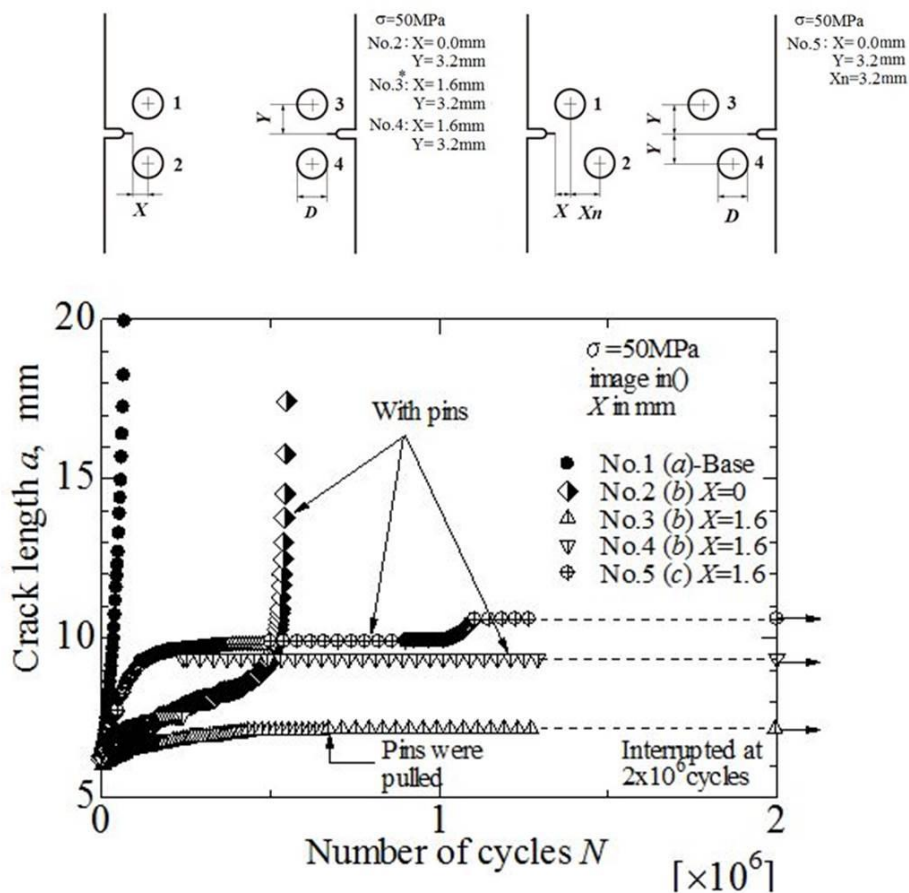
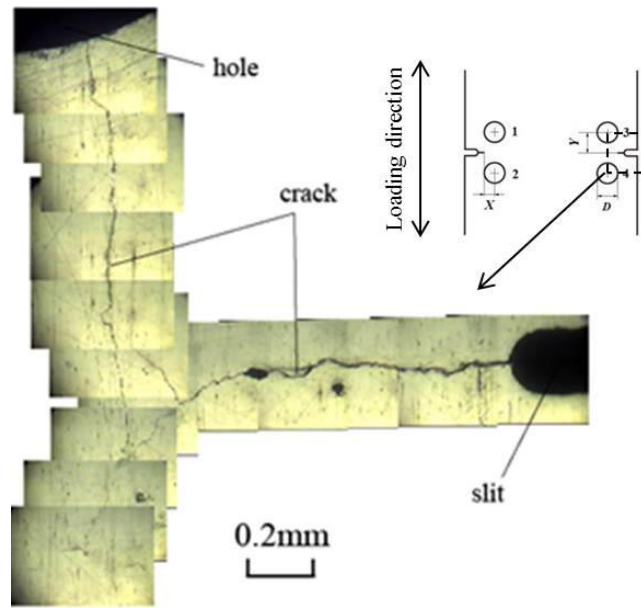
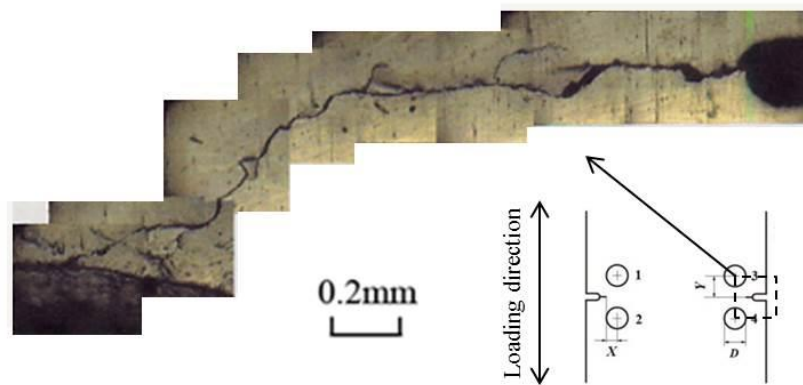


Fig. 2-8 Crack growth curves in the case of pins inserted into stop-hole (4 holes).



(a) Pins removed before testing (specimen No.3)



(b) Pins inserted into holes (specimen No.4)

Fig. 2-9 Examples of arrested crack growth due to compressive residual stress.

2.2.4 結言

本節では、き裂先端付近に加工した穴にピンを打ち込むき裂進展抑制手法を紹介した。本手法では、き裂先端付近に加工した穴へのピンの挿入によって生じる穴周りの加工硬化と圧縮残留応力が、穴の数や配置によってき裂進展経路やき裂進展抑制効果にどのような影響を与えるかについて検討している。本実験範囲で得られた結果は以下の通りである。

- (1) き裂先端から外れた位置に穴を加工した場合、穴加工だけで延命効果はあまりなかったが、穴加工に加えピンを打ち込んだ場合は破断寿命の増加やき裂進展速度の低下、き裂進展方向の変化が生じた。
- (2) 穴にピンを打ち込んだ場合、き裂先端から穴中心までの水平方向距離 X は破断寿命に大きく影響し、 X が大きい方が破断寿命は長かった。
- (3) き裂進展経路に穴を加工してピンを打ち込むことでき裂進展方向が変化し、複数き裂の連結を防止できる場合がある。

参考文献

2.1 節で引用された参考文献は以下の通りである。

- 1) Murdani Anggit, 真壁朝敏, 才本明秀, 宮崎達二郎, 近藤了嗣, 補助穴の加工によるス
トップホールからの疲労き裂発生の新抑制手法, 材料, Vol.56, No.12, pp.1139-1144,
2007.
- 2) A. Murdani, C. Makabe, A. Saimoto, R. Kondou, A crack-growth arresting technique in
aluminum alloy, Engineering Failure Analysis, Vol.15, pp.302-310, 2008.
- 3) Z. Domazet, Comparison of fatigue crack retardation methods, Engineering Failure Analysis,
Vol.3, No.2, pp.137-147, 1996.
- 4) P.S. Song, Y. L. Shieh, Stop drilling procedure for fatigue life improvement, International
Journal of Fatigue, Vol.26, pp.1333-1339, 2004.
- 5) G. Fujiwara, H. Terada, Y. Kakuta, Effect of stop-drilled hole on fatigue crack behavior in
aluminum alloy, Aviation Engineering, No.239, pp.3-16, 1975.
- 6) R. Ghfiri, H.J. Shi, R. Guo, G. Mesmacque, Effects of expanded and non-expanded hole on
the delay of arresting crack propagation for aluminum alloys, Materials Science and
Engineering A, Vol.286, pp.244-249, 2000.
- 7) R. Ghfiri, A. Amrouche, A. Imad, G. Mesmacque, Fatigue life estimation after crack repair in
6005 AT-6 aluminium alloy using the cold expansion hole technique, Fatigue and Fracture of
Engineering Materials and Structures, Vol.23, pp.911-916, 2000.
- 8) S. Shkarayev, Theoretical modeling of crack arrest by inserting interference-fit fastener,
International Journal of Fatigue, Vol.25, pp.317-324, 2003.
- 9) 宮川浩臣, 西谷弘信, 穴または圧こんの負荷による板材の疲労き裂伝ば遅延効果, 日
本機械学会論文集 A 編, Vol.51, No.462, pp.445-449, 1985.
- 10) M. Goto, H. Miyagawa, H. Nisitani, Crack growth arresting property of a hole and
Brinell-type dimple, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.19,
No.1, pp.39-49, 1996.
- 11) C.S. Shin, C.M. Wang, P.S. Song, Fatigue damage repair: a comparison of some possible
methods, International Journal of Fatigue, Vol.18, pp.535-546, 1996.
- 12) N. Vulic, S. Jecict, V. Grubisic, Validation of crack arrest technique by numerical modeling,
International Journal of Fatigue, Vol.19, No.4, pp.283-291, 1997.
- 13) A. Al-Ostaz, I. Jasiuk, Crack initiation and propagation in materials with randomly
distributed holes, Engineering Fracture Mechanics, Vol.58, pp.395-420, 1997.
- 14) N.A. Noda, T. Matsuo, Singular integral equation method in optimization of stress-relieving
hole: a new approach based on the body force method, International Journal of Fracture,
Vol.70, pp.147-165, 1995.
- 15) H. Nisitani, D.H. Chen, Body force method and its applications to numerical and theoretical
problems in fracture and damage, Computational Mechanics, Vol.19, pp.470-480, 1997.
- 16) H. Nisitani, A. Saimoto, Effectiveness of two-dimensional versatile program based on body
force method and its applications to crack problems, Key Engineering Materials, Vol.251-252,

pp.97-102, 2003.

2.2 節で引用された参考文献*は以下の通りである.

*ただし, 2.1 節と重複するものは省略する

- 17) 伊禮良樹, Anggit Murdani, 国吉和男, 真壁朝敏, き裂進展挙動に及ぼすき裂先端近傍への穴加工とその穴へのピンの打ち込みの影響について, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.741, pp.706-712, 2008.
- 18) C. Makabe, A. Murdani, K. Kuniyoshi, Y. Irei, A. Saimoto, Crack-growth arrest by redirection crack growth by drilling stop holes and inserting pins into them, Engineering Failure Analysis, Vol.16, pp.475-483, 2009.
- 19) S. Nishida, Failure analysis in Engineering Applications, Butterworth Henemann, 1986.
- 20) A.J. McEvily, Metal Failures, John Wiley & Sons, INC, 2002.
- 21) T. Nishimura, Y. Noguchi, T. Uchimoto, Damage tolerance analysis of multiple-site cracks emanating from hole array, Journal of Testing and Evaluation, Vol.18, No.6, pp.401-407, 1990.
- 22) S. Harada, T. Endo, On the validity of Miners Rule under sequential loading of rotating bending and cyclic torsion, Fatigue Under Biaxial and Multiaxial Loading (ESIS Publication 10), Edited by K.F. Kussmaul, D.L. McDiarmid, D.F. Socie, Mechanical Engineering Publications, pp.161-178, 1991.
- 23) 真壁朝敏, 山根琢矢, 末吉敏恭, 宮崎達二郎, 純アルミニウムの疲労き裂伝ば特性に関して一混合モードき裂伝ばの観察と評価一, 材料, Vol.54, No.12, pp.1288-1293, 2005.
- 24) A.J. McEvily, Z. Yang, The nature of the two opening levels following an overload in fatigue crack growth, Metallurgical Transactions A, Vol.21, pp.2717-2727, 1990.
- 25) C.M. Ward-Close, A.F. Blom, R.O. Ritchie, Mechanisms associated with transient fatigue crack growth under variable-amplitude loading; An Experimental and numerical study, Engineering Fracture Mechanics, Vol.32, pp.613-638, 1989.
- 26) C. Makabe, A. Purnowidodo, A.J. McEvily, Effect of surface deformation and crack closure on fatigue crack propagation after overloading and underloading, International Journal of Fatigue, Vol.26, pp.1341-1348, 2004.
- 27) 村上敬宜, き裂伝ば経路の予知について, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.46, No.407, pp.729-738, 1980.
- 28) 藤原敏, 宮園高, 福田収一, 疲労き裂進展経路の予知に関する研究 (第 1 報, 予備的検討), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.52, No.481, pp.2139-2142, 1986.
- 29) 萩原芳彦, Doulet Shohret, 渋谷知足, 星野利章, 応力集中部近傍を進展する疲労き裂のシミュレーション, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.57, No.539, pp.1528-1533, 1991.
- 30) 角洋一, 大橋一聡, 江村元, き裂経路数値予測に基づく円孔のき裂阻止機能の解明, 日本造船学会論文集, Vol.1986, No.159, pp.314-320, 1986.

- 31) 尾崎弘明, 中林靖, 矢川元基, 金永鎮, 階層型ニューラルネットワークとき裂進展解析によるクラックアレスター位置の推定, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.763, pp.303-310, 2010.
- 32) H. Nishitani, T. Yoshida, Interference effect among a crack and circular holes in an infinite plate under tension, Annual Report of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol.57, No.5, pp.627-632, 1984.
- 33) T. Nishimura, Experimental and numerical evaluation of crack arresting capability due to a dimple, Transactions of the ASME, Vol.127, pp.244-250, 2005.

第3章 ストップホールとクラックアレスターを併用した き裂進展抑制手法について

3.1 緒言

本章では、パッチ¹⁻³⁾に比べて取り付けが簡易である小型の当て板をき裂補修に用いることを試みる。この当て板をクラックアレスターと称し、ストップホール¹⁻²²⁾とクラックアレスターを併用したき裂進展抑制手法について検討する。クラックアレスターは小型のため、特に狭い作業場所や緊急補修を行う場合に効果的と考える。また、ある程度形状が複雑な部材にも適用できる可能性があり、このような問題については次章で述べる。

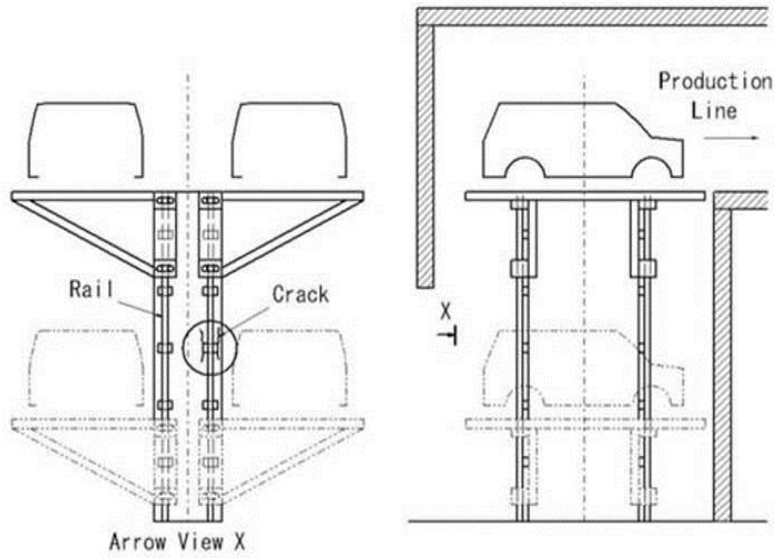
まず、クラックアレスターが実際に自動車生産設備で使用された例を記す。Fig.3-1 は自動車生産設備の昇降装置の一部に発生したき裂に対してクラックアレスターとボルト締めストップホールを適用し、き裂進展を停止することができた例である^{6,7)}。その設備においては1階部で塗装し、2階部で塗装したペイントを乾燥させる。その際の車を昇降させるための設備に多数のき裂が生じた。

Fig. 3-1(a)に設備の概略図を示す。昇降用のレールは支柱に溶接された支持台にボルトで固定されており、その支持台の溶接部分は1本のレールにつき14~16か所あり、昇降する際にレールには繰り返し曲げが生じる。この設備では溶接されたレール支持台の溶接部から多数の疲労き裂が発生し、それが支柱の軸方向に進展した。設備全体では100か所以上のき裂発生が確認された。

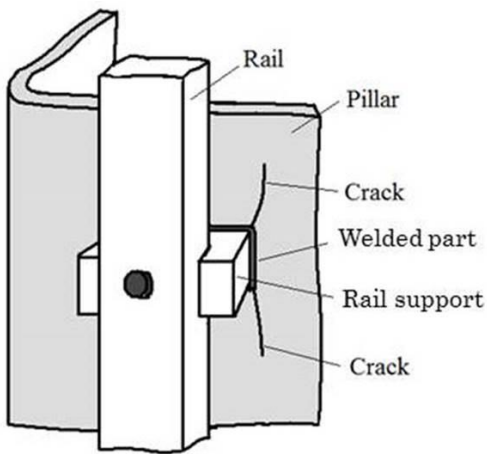
Fig. 3-1(b)にき裂発生部の概略図を示す。支柱は中空であり、外側からの補修作業は可能であるが、支柱内部からの作業はできないことがわかる。はじめに、発生した多数のき裂の進展を応急的に停止させるために、Fig. 3-1(c)に示すようにき裂先端へのストップホール加工がされた。しかし、その加工による効果は小さく、すぐにストップホールからき裂が再発生し進展した。この結果から、き裂が長くなるとその進展を抑制するための条件が厳しくなり、ストップホールだけでは効果が低い場合があることが分かる。このとき加工されたストップホールの直径は約10mmである。応力集中を軽減するためにはより大きな穴の加工が必要であるが、支柱が設置されている場所は狭い空間のため、大径穴加工用のマグネットドリルなどを用いて作業をするのは困難であった。

通常運用時に設備を停止すると多大な経済的損失を生じるため、再設計・施工時期を考慮し設備更新までの約1年間、き裂の応急補修で設備を継続使用することが計画された。この計画では約10日間の連続休暇期間中に補修作業を行う必要があり、パッチによる補修を行うには、発生したき裂の数、設備の空間、使用可能な工具、作業性の問題などがあった。このような背景から、Fig. 3-2に示すようにストップホールとクラックアレスターを用いたき裂の応急補修を試みた。

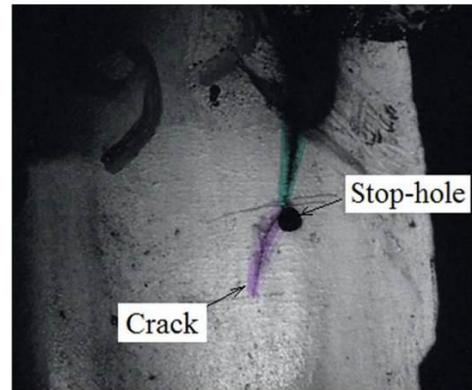
Fig. 3-2(a)は昇降レールを取り付けた状態で、Fig. 3-2(b)は昇降レールを取り外した状態である。この場合はクラックアレスターとボルト締めストップホール⁸⁻¹⁰⁾を併用し、クラックアレスターが取り付けられない場所にはボルト締めストップホールを単独で用いている。なお、本手法では設備の都合に対応させて、ボルト締めストップホールは通常と違い、ストップホールにめねじを切ってボルトを取り付けている。また、クラックアレスターも支柱にめねじを切り、支柱の外側だけに取り付けている。



(a) Car lifting equipment



(b) Crack initiation position

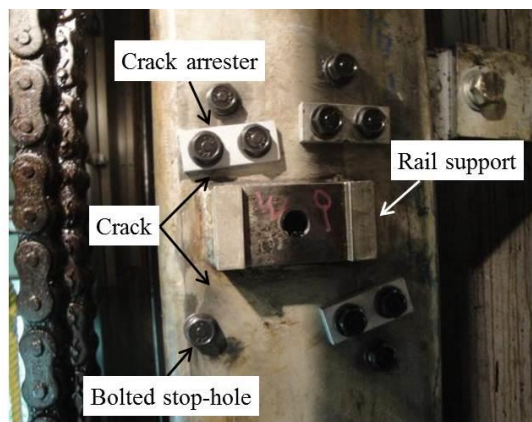


(c) Example of applying a stop-hole to prevent crack growth

Fig. 3-1 Crack initiation at a car production facility.

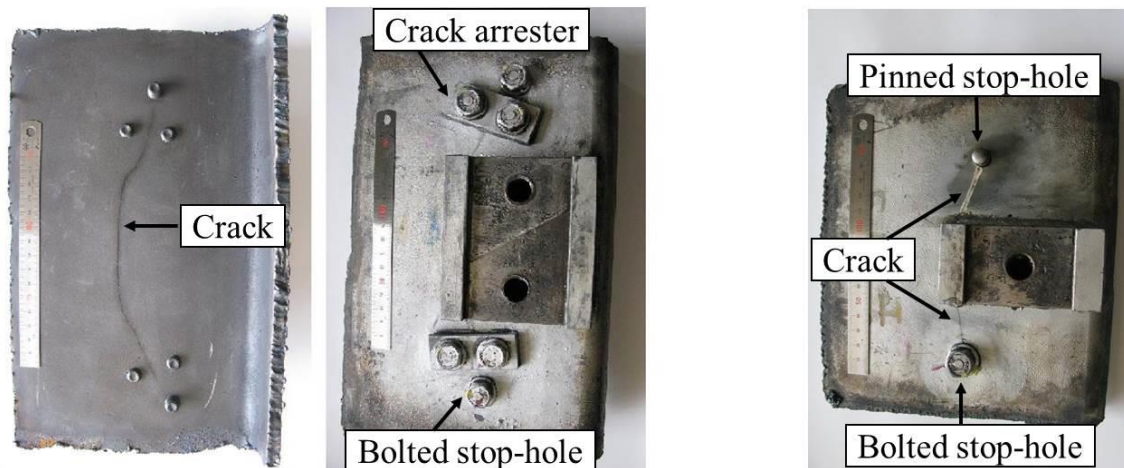


(a) With rail



(b) Without rail

Fig. 3-2 Example of applying a bolted stop-hole and crack arrester.



(a) Stop-holes and crack arresters for a long crack

(b) Stop-holes for a short crack

Fig. 3-3 Cracked part on pillar.

この応急補修の結果，クラックアレスターが有効に機能してき裂進展が停止した． Fig.3-3はこの補修を行ってから約 1 年後の設備更新時に，交換された支柱から補修部分を切りだしたものである． Fig. 3-3(a)に示すように，クラックアレスターとボルト締めストップホールによって，長いき裂が約 1 年間進展せずに停止していたことが確認された． また，比較的短いき裂の場合は Fig. 3-3(b)に示すように，ピンを挿入したストップホールやボルト締めストップホールを単独で用いた場合もき裂進展は停止しており，補修の効果が確認できた．

以上に示したき裂の補修を行う前に予備実験を行っている． まず，クラックアレスターと組み合わせるストップホールについて検討した． 本例のようにストップホール径を大きくできない場合は，前章で示したようにストップホール近傍に補助穴を加工する手法^{11,12)}やピンを挿入する手法^{13,14)}がストップホールの応力集中緩和に有効であり，まずこれらの手法の適用について検討した．

ストップホール近傍に補助穴を加工する場合^{11,12)}，ストップホールと補助穴は近接した方がストップホールの応力集中緩和効果は高く，穴間距離のわずかな違いで効果が異なるために穴位置の精度が重要になる． また，ストップホールに加えて複数の補助穴の加工も必要であり，狭い作業空間と限られた時間の中，手作業で行うには難しいと判断した．

それに対して，穴にピンを挿入するのは比較的容易で効果も高いため¹³⁻¹⁵⁾，本手法ではき裂先端にストップホールを加工してそこにピンを打ち込み，これをピン打ちストップホールと称して用いた． その他には，通常のストップホール，第 1 章で述べたように簡便な疲労強度向上手法として普及しているボルト締めストップホールを用いて実験を行った．

実験の前に有限要素法による弾性解析を行い，き裂形状の異なる片側き裂，中央き裂，両側き裂を加工した平滑な平板試験片に対して，ストップホールのみを加工した場合の応力分布およびき裂開口変位を定性的に検討した． その結果を基にして，実験には主に片側き裂試験片を用いている． 実験では，1 年間の車の昇降回数約 10 万回を耐久限度目標とし，通常のストップホール，ピン打ちストップホール，ボルト締めストップホールの 3 種類について，これらを単独で適用した場合とクラックアレスターを併用した場合のき裂進展抑制効果について緊急的な検討を行った．

3.2 使用材料と実験方法

試験片とクラックアレスターの素材は実機と同じ一般構造用圧延鋼材 SS400 基材としたものを用いた。その化学組成と機械的性質を Table 3-1 と Table 3-2 にそれぞれ示す。

Fig.3-4 に片側き裂試験片とクラックアレスターの基本形状を示す。試験片は幅 150 mm、長さ 400 mm、厚さ 9 mm の平板中央に幅 0.2 mm、長さ 75 mm のスリットを加工して、それをき裂とみなした。

Fig.3-5 はき裂の状態に応じた各試験片を示し、き裂先端には直径 10 mm のストップホールを加工している。Fig.3-5(a)を片側き裂試験片、(b)を中央き裂試験片、(c)と(d)を両側き裂試験片として、(c)と(d)はき裂長さを変えている。Fig. 3-5(a)~(c)の各試験片においてき裂長さは一致させており、主な実験には片側き裂試験片を用いている。

実験は、ストップホールのみを加工した場合、ストップホールにピンを打ち込んだ場合（以降、ピン打ちストップホールとする）、ストップホールにめねじを切りボルトを締め付けた場合（以降、ボルト締めストップホールとする）、これらに加えてクラックアレスターを試験片に取り付けた場合について行った。それらの概略図を Fig.3-6 に示す。

ピンを打ち込む場合、ピン径はストップホール径の 4% 増しとし、ハンマーによる手作業が無理なく行えるように考慮している。また、ボルト締めの場合、実際の設備の都合に対応させて、通常のボルト締めストップホール⁸⁻¹⁰⁾と違い、ストップホールにめねじを切ってボルトを取り付けている。また、クラックアレスターも試験片にめねじを切り、試験片の片側だけに取り付けている。

Table 3-1 Chemical composition (mass, %)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.12	0.21	0.6	0.015	0.012	Bal.

Table 3-2 Mechanical properties of the material.

Yield stress σ_S [MPa]	Tensile strength σ_B [MPa]	True fracture stress σ_T [MPa]	Reduction of area ϕ [%]
600	630	1070	64

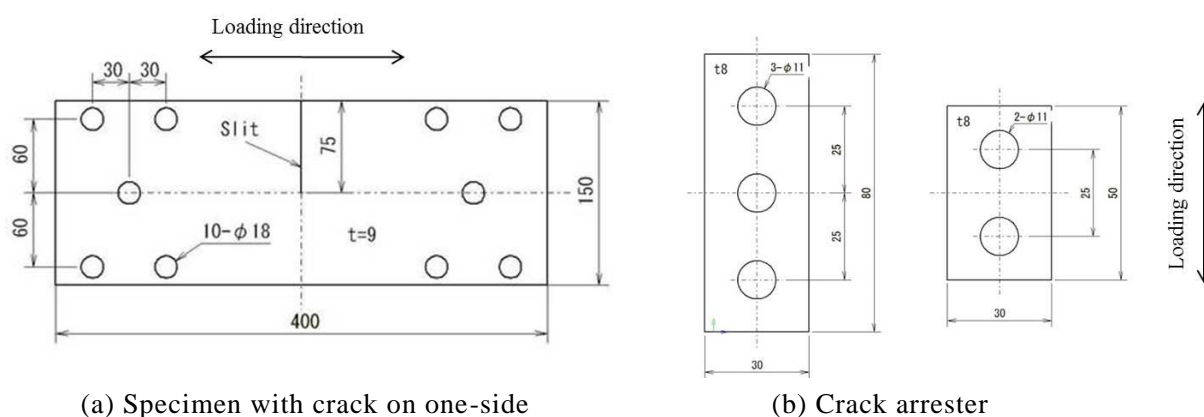


Fig. 3-4 Examples of specimen and crack arrester (mm).

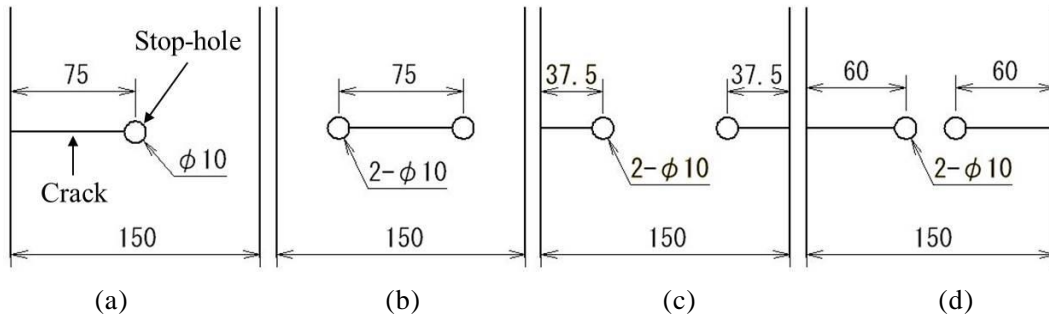


Fig. 3-5 Specimen with stop-hole, (a) Crack on one side with stop-hole, (b) Center crack with stop-holes, (c) Both-sides cracks with stop-holes (longer ligament), (d) Both sides cracks with stop-holes (shorter ligament).

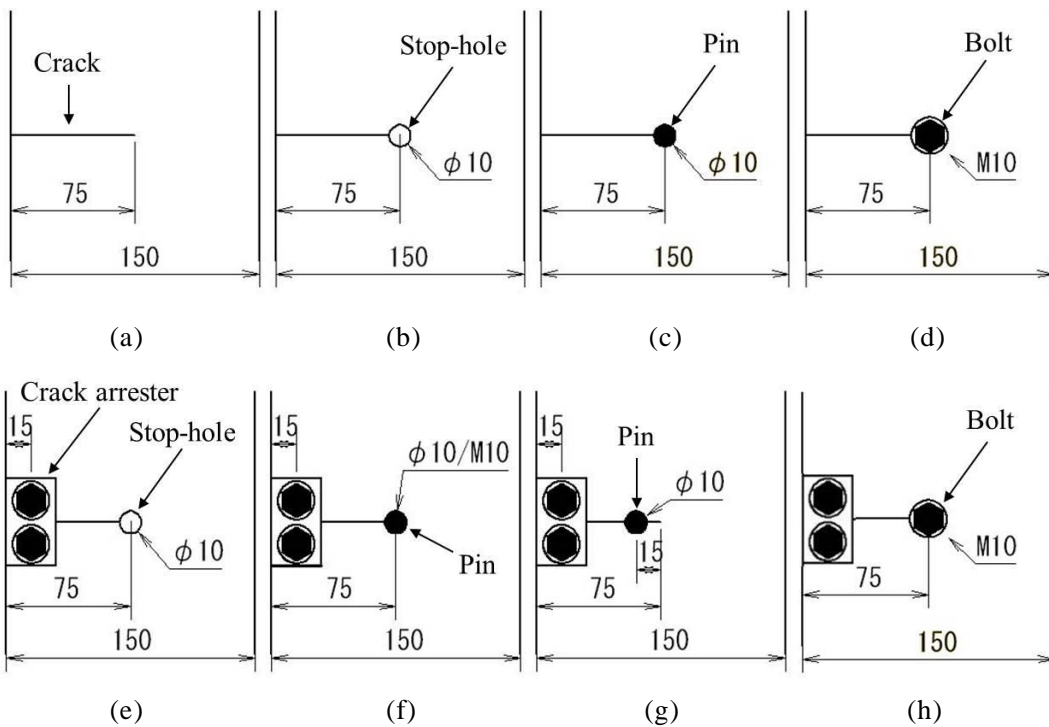


Fig. 3-6 Application patterns of a stop-hole and crack arrester in the case of crack on one side, (a) Base, (b) Normal stop-hole, (c) Pinned stop-hole, (d) Bolted stop-hole, (e) Normal stop-hole and crack arrester, (f) Pinned or bolted stop-hole and crack arrester, (g) Pinned stop-hole and crack arrester, (h) Bolted stop-hole and crack arrester

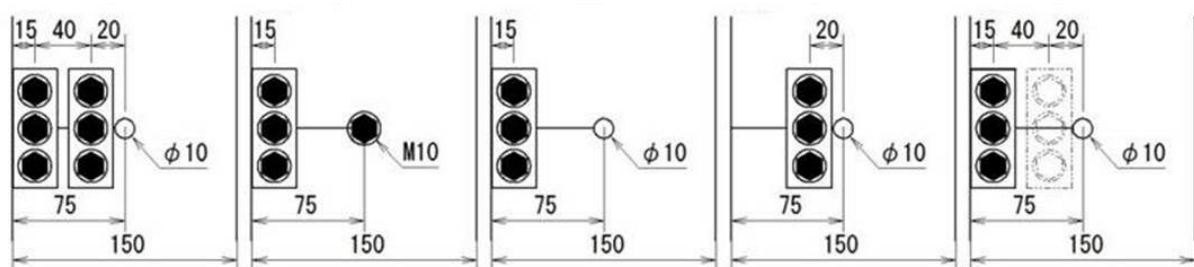
Fig. 3-6(a)を何も処置を施さない基本タイプとし、(b)は通常のストップホール、(c)はピン打ちストップホール、(d)はボルト締めストップホールの場合である。(e)~(h)は各ストップホールとクラックアレスターを併用した場合であり、(g)はき裂先端から 15mm 外れた位置にピンを挿入している。Fig. 3-6(c), (f), (g)においてピンを用いる場合は、直径 9.6mm の下穴を加工し、それに対し 4%増しの S45C の直径 10 mmのピンをハンマーで打ち込んでいる。ボルト締めストップホールとクラックアレスターの取り付けのために用いたボルトは市販の SCM435 の高力六角ボルト（強度区分 10.9）であり、ばね座金と平座金を組み合わせて用いている。また、ボルトの締め付けはトルクレンチを用いたトルク管理により一

定軸力を得られるようにしている。

Fig. 3-7はFig. 3-6における実験結果に基づき、より効果的にクラックアレスターの効果を引き出すことを検討するための試験片を示している。ストップホールとクラックアレスターの組み合わせによるタイプA～Eでの効果の違いを検討した。全てストップホール加工を基本としており、タイプBだけボルト締めストップホールとしている。タイプAは、クラックアレスターをストップホール側と試験片端部側に2個取り付けている。タイプBとタイプCはクラックアレスターを試験片端部側に、タイプDはクラックアレスターをストップホール側に取り付けている。タイプEは、はじめにクラックアレスターを試験片端部側に取り付けて実験を行い、後に破線で示すストップホール側にクラックアレスターを追加して取り付けている。

実験は主にFig. 3-5(a)に示す片側き裂試験片を用いて行っているが、Fig. 3-5(d)に示す初期き裂長さの長い両側き裂試験片を用いた実験も行っている。これは後の解析結果で示すように、Fig. 3-5(d)の長い両側き裂試験片は、Fig. 3-5(b)の中央き裂試験片およびFig. 3-5(c)の短い両側き裂試験片よりも、ストップホール先端の応力集中度が高いためである。片側き裂試験片で得られた実験結果を基に、違うタイプの試験片にストップホールとクラックアレスターを適用した場合の効果の違いを確認するために、Fig. 3-8に示す3種類の試験片を用いた検討も若干行った。

Fig. 3-8(a)は片方のき裂先端に通常のストップホール、もう一方はボルト締めストップホールとし、そのき裂進展抑制効果を同時に比較するものである。Fig. 3-8(b)は片方に通常の平ワッシャーを用いたワッシャーA、もう一方はノルトロックワッシャーを用いたワッシャーBとし、両方ともボルト締めストップホールとしている。Fig. 3-9に両ワッシャーの形状とノルトロックワッシャーの外観を示す。ノルトロックワッシャーはボルト・ナットの緩み防止用に開発されたものであり、Fig. 3-9(b)に示すように母材に食いつくように突起がついた形状となっている。これより、通常の平ワッシャーに比べ、試験片表面とワッシャー間の摩擦力に差が生じることが予想され、その影響を比較する。Fig. 3-8(c)はクラックアレスターを取り付ける際の締め付けトルクの影響を比較する。



(a) Type A (b) Type B (c) Type C (d) Type D (e) Type E

Fig. 3-7 Application patterns of a stop-hole and crack arrester in the case of crack on one side for an endurance limit of 5×10^5 cycles.

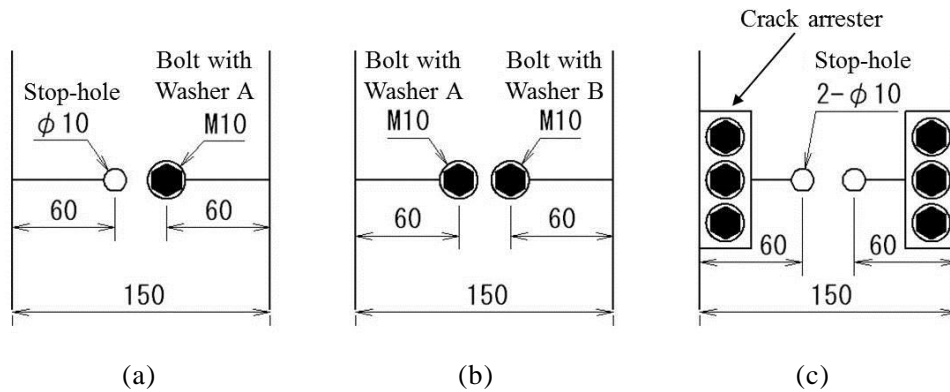
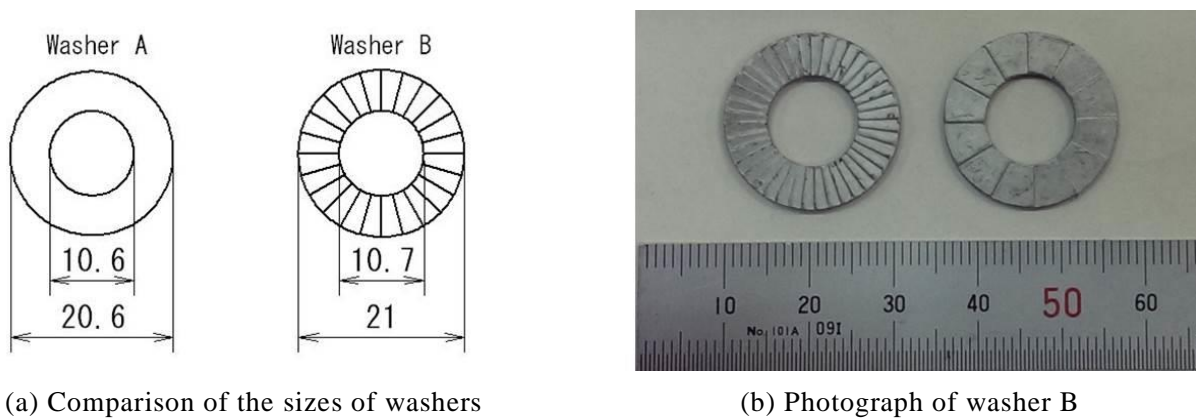


Fig. 3-8 Application patterns of a normal or bolted stop-hole and crack arrester in the case of crack on both sides, (a) Normal and bolted stop-hole, (b) Comparison of the effect of friction of washers A and B on crack initiation, (c) Specimen for testing the effect of crack arresters.



(a) Comparison of the sizes of washers

(b) Photograph of washer B

Fig. 3-9 Geometry of the washers.

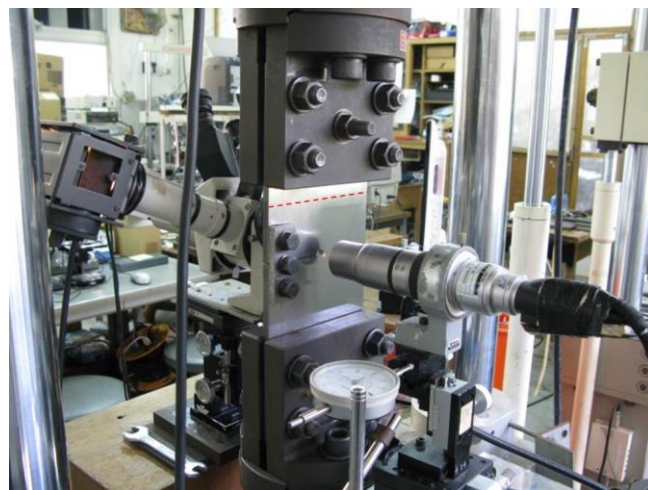


Fig. 3-10 Observation of crack initiation and growth from stop-hole by optical microscope.

Fig. 3-10 に示すように、疲労試験は電気油圧サーボ式材料試験機を用いて引張圧縮方式で行った。設備に作用する設計荷重を参考にして実験における応力値を決定した。車の昇降時の最大応力に相当する、本実験の試験片平行部（赤破線を付した部分）での応力は約

30MPa と見積もられた．そこで，その応力よりも条件が厳しい-15MPa から 45MPa の応力（応力比 $R=-1/3$ である）を繰返して実験を行った．設計では圧縮応力は零に近いものと想定されているが，実験では圧縮応力を作用させ，き裂が発生し易い条件となるように考慮した．繰返し周波数 $f=10\text{Hz}$ である．以上の条件で，設備更新までの約 1 年間の車の昇降回数約 10 万回を耐久限度目標としたき裂進展抑制効果について検討を行った．

試験片の外観の変化はデジタルカメラで撮影し，き裂の発生と進展はマイクروسコープを用いて観察して検討した．また，ボルト頭部の都合による観察の問題と，き裂の発生と進展が優先的に生じるという問題から，主にボルト頭部がない側の面で観察を行っている．本研究ではき裂の進展挙動を詳細に検討する目的ではなく，き裂発生に着目したため，き裂発生時期が早い面での結果を優先した．

3.3 試験片モデルの解析について

Fig. 3-5 に示す片側き裂，中央き裂，両側き裂を有する試験片にストップホールのみを加工した場合の応力分布およびき裂開口変位について，解析コード ANSYS による弾性解析を行った．形状の対称性を考慮し，片側き裂の場合は試験片の 1/2，中央き裂と両側き裂の場合は試験片の 1/4 の部分において解析を行った．

Table 3-3 は試験片の上下端部に一様応力 ($\sigma_0=100\text{MPa}$) を作用させて，解析した場合の各試験片のき裂面に生じる最大のき裂面開口変位 δ_{\max} と最大応力値 σ_{\max} を比較したものであり，Fig. 3-11 はそれぞれの試験片の応力分布を示している（応力は上下端部の一様応力 σ_0 で無次元化した値を示している）．Table 3-3 および Fig. 3-11 より，切欠きの全長を同一にして全リガメント幅を一致させた場合 (Fig. 3-5(a)~(c))，片側き裂の場合が最もストップホール先端の応力集中度が高く，き裂開口変位が大きいことがわかる．これは左右非対称な形状により，引張負荷に伴う曲げ作用が加わるためである．このことが後に示す実験結果において，ストップホールにピンを打ち込んでもき裂進展抑制に大きな効果がなかったことと関係している．

Table 3-3 Variations in crack opening displacement and stress concentration (δ_{\max} : maximum crack opening displacement (mm), σ_{\max}/σ_0 : non-dimensional value of maximum stress, $\sigma_0=100\text{MPa}$)

Specimen	δ_{\max} [mm]	σ_{\max}/σ_0
Fig. 3-5 (a)	0.98	27.3
Fig. 3-5 (b)	0.12	9.3
Fig. 3-5 (c)	0.12	8.3
Fig. 3-5 (d)	1.78	13.7

また Table 3-3 より，Fig. 3-5(c)，(d)の両側き裂の場合，当然ながらき裂が長くなると応力集中度は高くなり，Fig. 3-5(d)においてはき裂開口変位が片側き裂のそれより大きく上回ることがわかる．これらの解析結果を基に，最もき裂が発生しやすいと予想される片側き裂試験片を実験では主に用いている．また，片側き裂試験片で得られた実験結果を基に，

違うタイプの試験片にストップホールとクラックアレスターを適用した場合の効果の違いを確認するために、Fig. 3-5(d)に示す長い両側き裂試験片を用いた検討も若干行った。

なお、本節の解析結果は汎用二次元体積力法のプログラム²³⁾を用いて解析した値と10%程度かそれ以内の誤差であったので、試験片形状と応力集中の傾向を比較する上では問題がないことを確認している。

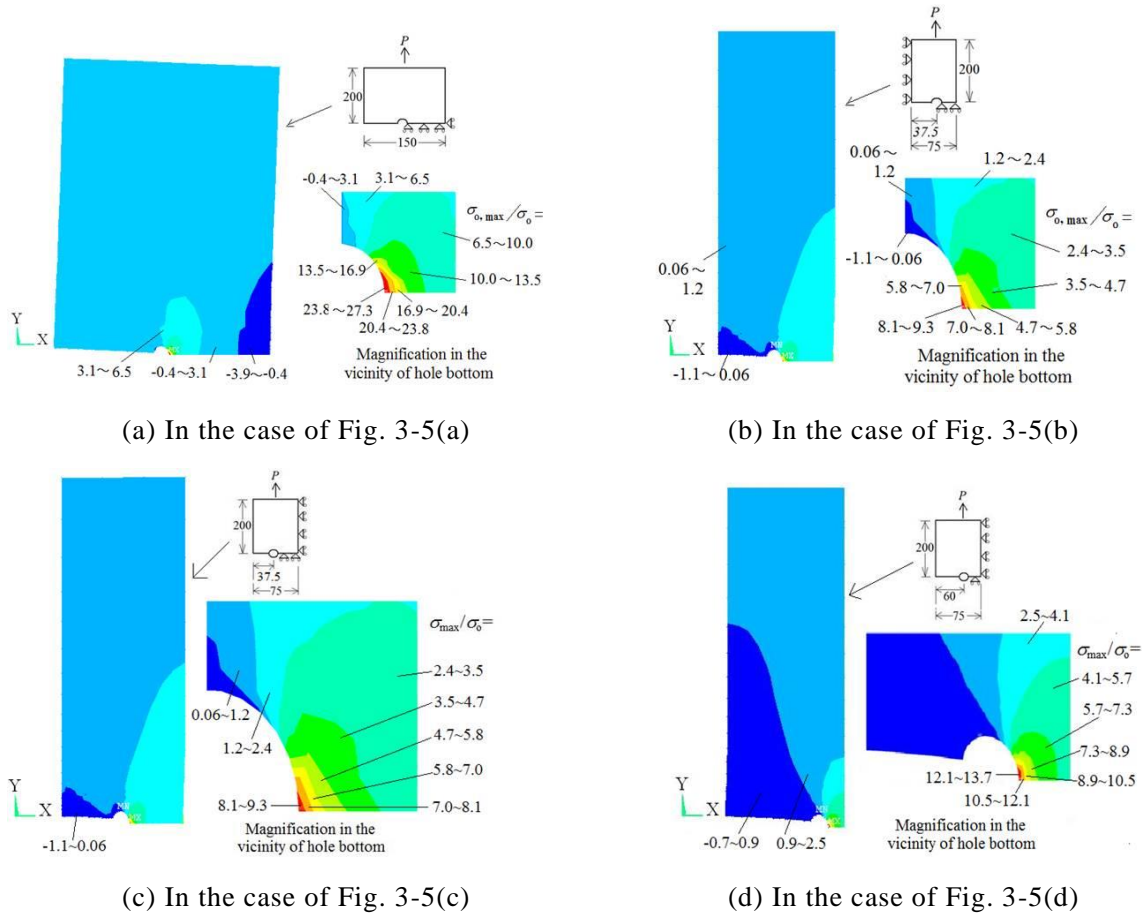


Fig. 3-11 Comparison of stress concentration.

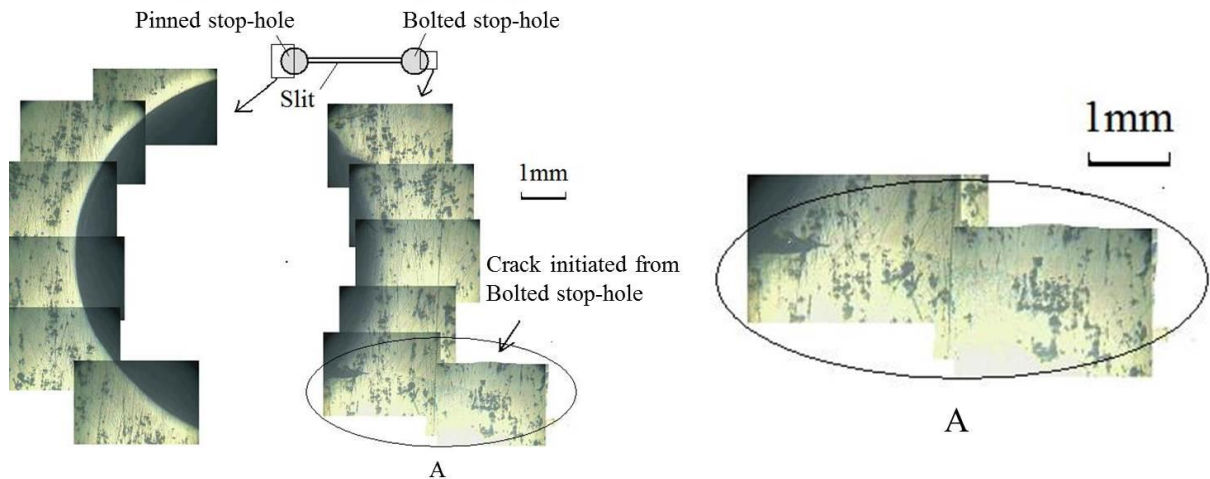
3.4 実験結果および考察

3.4.1 中央き裂試験片および両側き裂試験片での効果について

中央き裂試験片においては、片方のき裂先端にピン打ちストップホール、もう一方は締め付けトルク約 22Nm でのボルト締めストップホールを施し、その効果を比較してみた。Fig. 3-12 に 10 万回の応力繰返し後において観察した結果を示す。ピンを打ち込んだ穴からき裂は発生していなかったが、ボルト穴からはき裂発生とみなされる模様が観察された。このようにボルトの締め付けトルクが低い場合はき裂の発生が生じる場合がある。トルク約 52Nm で締め付けた場合には、ピン側とボルト側の両方とも 10 万回の応力繰返しでき裂は発生しなかった。

両側き裂の場合は、片方のき裂先端にストップホールのみを加工し、もう一方はピン打ちストップホールとした。この場合、両方とも 10 万回の応力繰返しではき裂が発生しなかった。

以上の結果から，試験片の左右に対称的な応力が作用している場合はピン打ちストップホールとボルト締めストップホールが有効であることがわかる．しかし，実際の現場で対称的な応力分布になるとは限らず，また前節の解析結果が示すように最も応力状態が厳しいのは片側き裂試験片であるので，き裂進展抑制効果を安全側に評価するために次節に示す片側き裂試験片の結果を重視した．



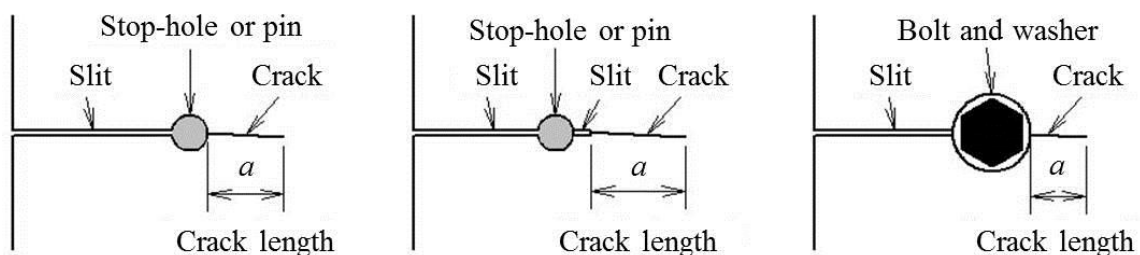
(a) Hole edge of two sides

(b) Magnification of area A

Fig. 3-12 Observation of crack initiation at stop-hole edge in center-cracked specimen.

3.4.2 片側き裂試験片での効果について

本実験では，ストップホールから発生したき裂の長さ a を Fig. 3-13 のように定義した．Fig. 3-13(a)に示すようにピンやボルトがある場合も含めて，き裂長さ a はストップホール先端から新たに発生したき裂先端までの長さである．また，スリット先端から左側に約 15mm 外れた位置にストップホールを加工してピンを打ち込んだ場合，Fig.3-13(b)に示すようにき裂長さ a はスリット先端からの長さとした．なお，次節 3.4.3 ではボルト締めストップホールを施した試験片の表と裏の両面でき裂長さを測定している．その場合，ボルト頭部のない側では Fig. 3-13(a)と同様に穴端部からき裂長さ a を測っているが，頭部のある側では Fig. 3-13(c)に示すように座金の端部からき裂長さ a を測っている．本節でのき裂進展挙動はき裂が発生し易いボルト頭部がない側で観察した結果を示す．



(a) Stop-hole edge

(b) Slit edge

(c) Washer edge

Fig. 3-13 Definition of crack length a from stop-hole edge, slit edge or washer edge.

ここで、ストップホールへのピンの打ち込み、ボルト締めの効果とそれに対するクラックアレスターの効果について説明しておく。ストップホール径より大きいピンの打ち込みによりストップホールの直径は増加する。そのため、塑性変形による加工硬化と圧縮残留応力が生じ、それらがストップホールからの新たなき裂の発生を抑制する。その場合、塑性変形により穴周りでは円周方向に引き延ばされるように変形するので、その外側の弾性変形領域の影響を受けて圧縮の残留応力が形成される。また、ボルト締めの場合にはねじ山を試験片自体に加工しているので、ボルト締めによるストップホール部分での穴軸方向の変形が生じる。そして、ボルトの張力によって座金と試験片表面で摩擦力が発生し、その効果でストップホール先端での繰返し変形が拘束される。その変形の拘束によるき裂発生の抑制効果はねじを切ることによる応力集中の発生という負の効果よりも大きいことが予想される。それらに対して、クラックアレスターでは、き裂開口量を抑制し、ストップホール先端に作用する応力をより効果的に低減することを目的としている。言いかえると、ストップホール先端に発生する繰返し塑性域は、き裂とみなしたスリットの開口変位の大きさに影響を受けるので、その軽減を狙っている。

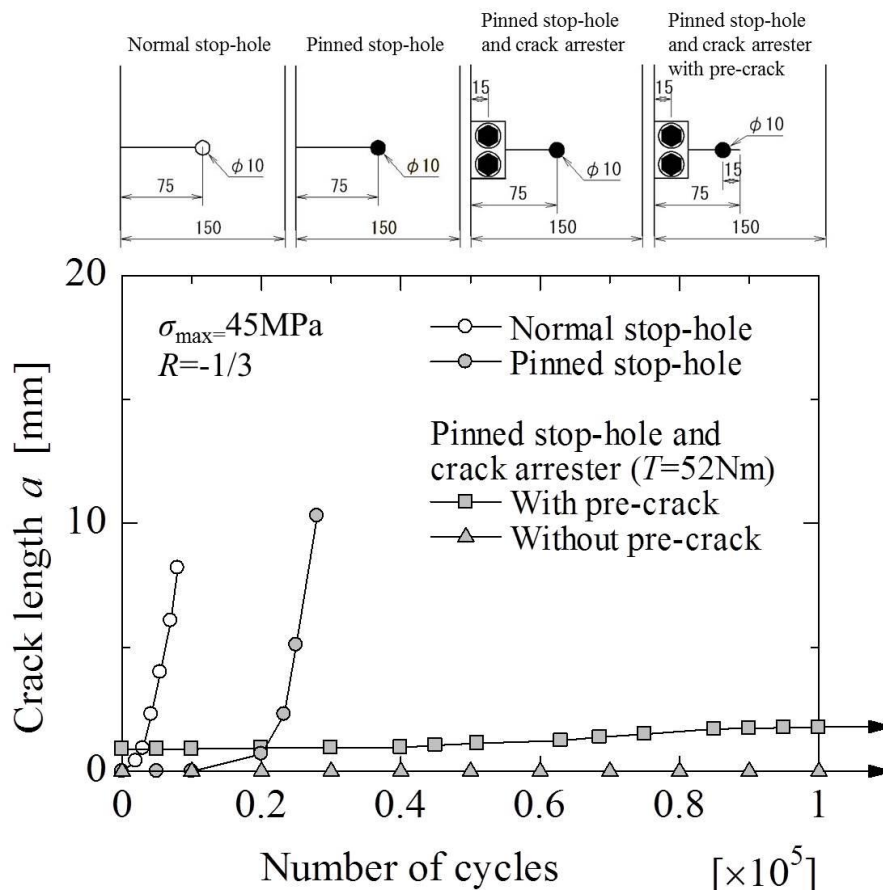


Fig. 3-14 Crack growth curves in the case of stop-hole or pinned stop-hole and crack arrester (σ_{\max} : Maximum cyclic stress, R : Stress ratio, T : Bolt tightening torque).

Fig. 3-14 にピン打ちストップホールを単独あるいはクラックアレスターと併用した場合のき裂進展曲線を示す。図より、ストップホールのみの場合が最もき裂発生寿命が短い上にき裂進展速度も高く、繰返し数 1 万回以内に試験片が破断した。それに対して、ピン

打ちストップホールの場合にはき裂発生寿命はわずかに延び、き裂発生後の初期にき裂進展速度は低下しているが、すぐにストップホールのみの場合と同じようにき裂が急速進展し破断に至った。

中央き裂や両側き裂の場合、試験片の全体的な変位は引張りと圧縮が作用するようなほぼ上下方向の変位であった。それに対して片側き裂の場合は、試験片形状が左右非対称なために曲げ応力も発生し、スリットの開口変位が大きくなった。その影響はアクチュエータ側に取り付けた試験片つかみ部の変位からも検出され、そのつかみ部では上下および左右方向に繰返し変位が生じた。そして、ストップホールにピンを打ち込んでも、繰り返される曲げの作用によってピンとストップホールの接触部に隙間が発生した。その隙間の発生は引張負荷時に試験片表側からの照明光が裏側の接触部から漏れることを顕微鏡で検知することで確認した。Fig. 3-15 にその様子を示す。

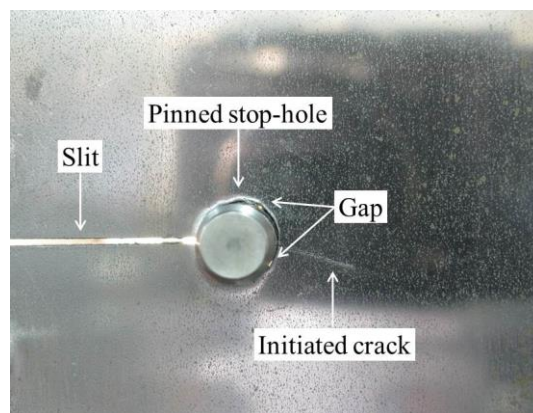


Fig. 3-15 Observation of pinned stop-hole vicinity.

ストップホールは切れ目のない閉じた穴ではなく、スリットで一端が切れている。そのため、ピンと穴部側面に隙間が生じると円周方向の圧縮残留応力がある程度解放される。そして、き裂あるいはき裂とみなしたスリットの開口変位の影響によるストップホール端部での繰返し変位が抑えられず、き裂発生寿命がストップホールのみの場合と大きく変わらない結果になったと考えられる。この実験結果は、前節の有限要素法による解析結果とも対応している。従って、曲げの作用が顕著であると、ピンを打ち込む場合は効果がなくなることがあるとわかった。

しかし、き裂先端にピン打ちストップホールを施し、スリットを挟んで2個のボルトでクラックアレスターを取り付けた場合はき裂発生寿命が長くなり、10万回の繰返しではき裂は発生しなかった。このとき、クラックアレスターを取り付ける場合の締め付けトルクは約52Nmとした。また、スリット先端から左側に外れた部分にピン打ちストップホールを施した場合は、スリットの先端から0.9mmの予き裂を発生させている。その場合においても、クラックアレスターを取り付けるとき裂進展は緩やかであり、10万回の繰返しでは試験片は破断しなかった。これら2つのデータは10万回の位置に矢印を付している。したがって、クラックアレスターの取り付けによって曲げによるき裂開口が抑えられたと判断できる。これにより、クラックアレスターはき裂発生寿命およびき裂進展寿命の両方の延命に効果があることが確認できた。

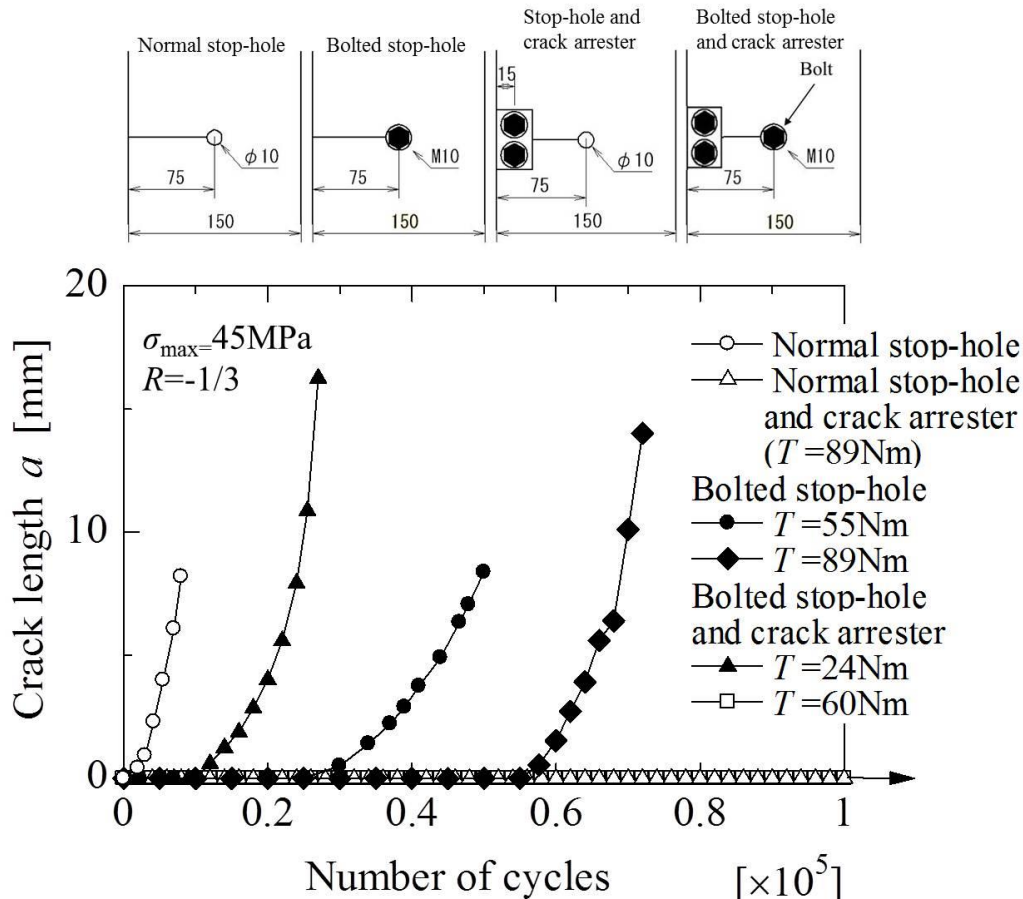


Fig. 3-16 Crack growth curves in the case of stop-hole or bolted stop-hole and crack arrester (σ_{\max} : Maximum cyclic stress, R : Stress ratio, T : Bolt tightening torque).

Fig. 3-16 はストップホールおよびボルト締めストップホールを単独あるいはクラックアレスタと併用した場合の結果を示している。ボルト締めストップホールの場合、Fig. 3-14 に示したピン打ちストップホールの場合よりもき裂発生寿命が延びている。これはボルト頭部とワッシャー間、ワッシャーと試験片間、ボルトのネジ山と試験片のネジ山間の摩擦力により、ピンに比べるとき裂開口が抑制されたためと考えられる。また、ボルトの締め付けトルクが大きい方がき裂発生寿命が長くなることがわかる。さらに、試験片はき裂観察のために鏡面仕上げをしているが、実機の場合には鏡面仕上げしてないので、ボルトとともに使用したワッシャーと母材表面の接触部の摩擦力がより大きく効果があることも予想される。

ボルト締めストップホールに加えて、クラックアレスタを取り付けた場合にはピン打ちの場合と同様にき裂発生寿命が長くなる。ただし、ストップホールへのボルト締めおよびクラックアレスタの締め付けトルクが約 24Nm の場合は繰り返し数が約 3 万回に達する前に破断している。これより、締め付けトルクが低い場合にはき裂進展抑制に対して大きな効果はなく、ある程度以上のトルクで締め付ける必要があることがわかる。これに対して、締め付けトルクを約 60Nm とした場合は 10 万回の繰り返しでもき裂が発生しなかった。また、ストップホールのみを加工し、クラックアレスタの締め付けトルクを約 89Nm

とした場合も 10 万回の繰り返しでき裂は発生しなかった。

以上のように、クラックアレスターと併用した場合は、通常のストップホール、ピン打ちストップホール、ボルト締めストップホールのいずれも 10 万回の耐久限度をクリアした。ピン打ちストップホールおよびボルトボルト締めストップホール単独での実験結果と、現場での作業性を考慮した結果、実機へのき裂補修には主にボルト締めストップホールとクラックアレスターの併用を適用した。

3.4.3 50 万回の耐久限度目標としたクラックアレスターについて

前節 3.4.2 では、応力繰り返し数 10 万回を耐久限度目標とした実験結果を示した。これらの結果に基づき、本節では 50 万回の応力繰り返し数を耐久限度目標とした実験結果を示す。Fig. 3-7 に示すように、ストップホールに加えて 3 本のボルトでクラックアレスターを取り付けた場合のき裂進展抑制効果について検討した。具体的にはクラックアレスターの取り付け位置や個数、通常のストップホールとボルト締めストップホールを組み合わせた場合の効果の違いを比較した。このときの締め付けトルクは約 52Nm とした。なお、ボルトの標準締め付けトルクは M10, 1.8T 系列の場合 (SCM435 の高力六角ボルトと対応)、約 44Nm であるがそれよりも高いトルクで締め付けている。実験は前節 3.4.2 の場合と同様に、繰り返し最大応力 $\sigma_{\max}=45\text{MPa}$ 、応力比 $R=-1/3$ の条件で行っている。

3 本のボルトでクラックアレスターを取り付けた理由は、き裂開口をより抑制するために、き裂面上とき裂面を挟む上下の位置にねじ穴を設けてクラックアレスターを取り付け、クラックアレスター表面と試験片表面に発生する摩擦力の効果を特にき裂面に近い部分で高めるためである。また、き裂開口変位を抑えるには、局所的ではあっても、き裂をまたいだクラックアレスターにリガメントに集中する引張荷重を分担させることが有効であると考えた。その引張荷重の分担は摩擦力の大きさに依存するので、より高い摩擦力の発生を期待して 3 本のボルトを用いた場合の検討を行っている。

Fig. 3-17 にストップホールとクラックアレスターを併用した場合のき裂進展曲線を示す。き裂の観察はクラックアレスターを取り付けていない面を表面 (Front side) とし、クラックアレスターを取り付けた面を裏面 (Back side) とし、この場合には試験片の両面からき裂の発生・進展を観察した。

試験片タイプ A のように通常のストップホールに加えて 2 つのクラックアレスターを取り付けた場合、タイプ B のようにボルト締めストップホールに加えて 1 つのクラックアレスターを取り付けた場合は、50 万回の繰り返しでストップホールから新たなき裂は発生しなかった。したがって、タイプ A と B のような補修を行うと、設備更新するまでに余裕をもって安全側でき裂発生と進展の対策ができると判断できる。

試験片タイプ C と D のように、通常のストップホールに加えて 1 つのクラックアレスターを取り付けた場合には、50 万回の繰り返しに至る前にストップホールからき裂が発生して進展した。試験片端部側にクラックアレスターと取り付けしたタイプ C の場合は、繰り返し数約 35 万回で表面からき裂が発生してその長さが 10mm 程度に達すると、裏面からもき裂が発生し、それが急速進展して表面のき裂長さに追いついている。Fig. 3-16 で示したボルト締めストップホールを単独で用いた場合 (締め付けトルク $T=89\text{Nm}$) に対し、タイプ C はき裂発生寿命が約 6 倍延びているが、タイプ D では約 5 万回の繰り返しでき裂が発生

し、き裂発生寿命があまり変わらなかった。これより、クラックアレスターはその取り付け位置によっては、ある程度高いトルクで締め付けてもあまり効果がないことがわかる。

また、試験片タイプ C と D の場合は、Fig. 3-18 に示すようにストップホールからのき裂がある程度進展した段階で、試験片より先にクラックアレスターが破断した。他の試験片タイプ A, B, E のように、2つのクラックアレスターを用いた場合やボルト締めストップホールと併用した場合は、実験終了時までクラックアレスターが破断することはなかった。

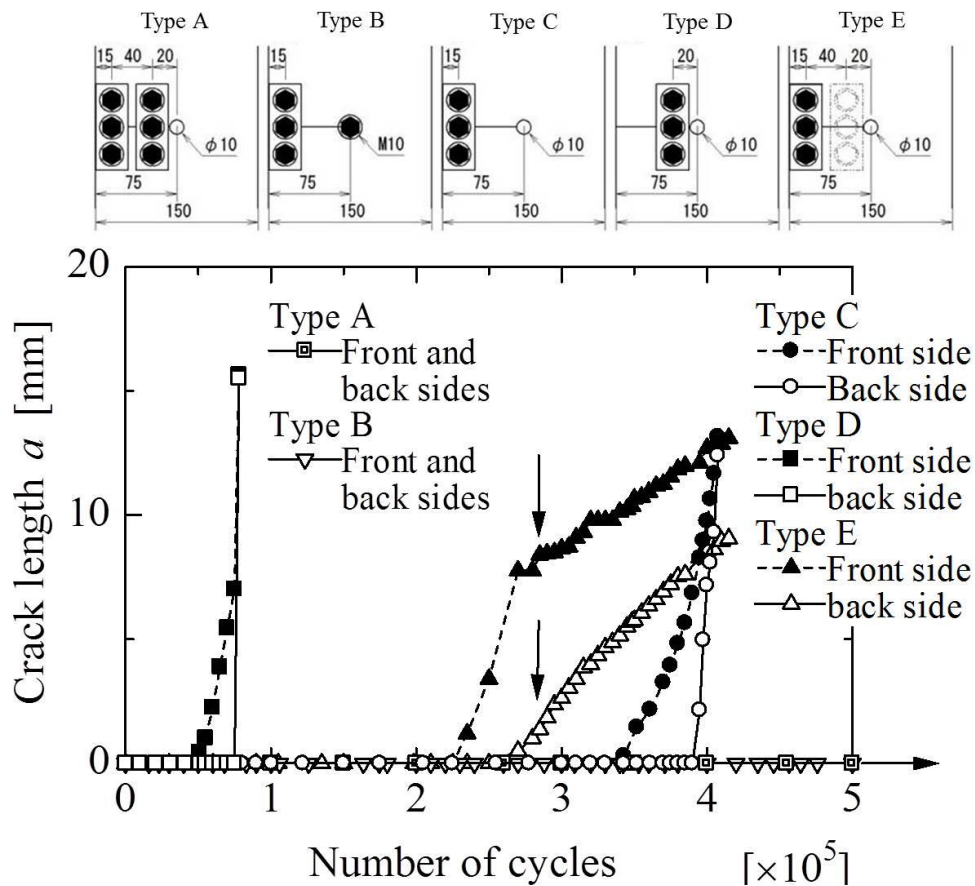
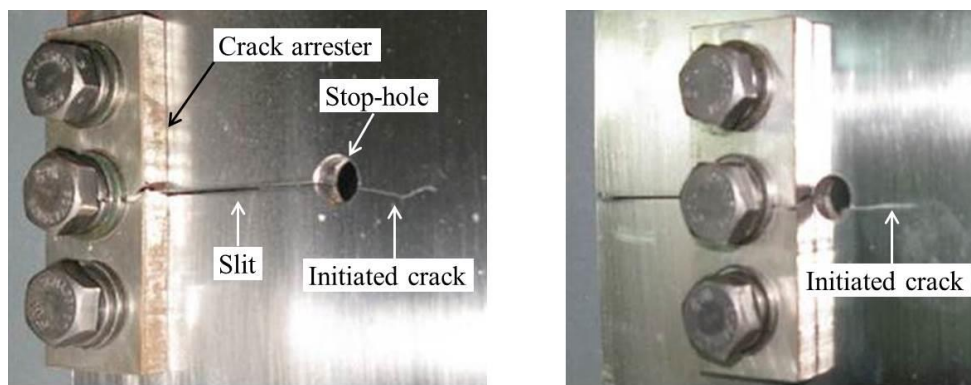


Fig. 3-17 Crack growth curves in the case of stop-hole and crack arrester (σ_{\max} : Maximum cyclic stress, R : Stress ratio, T : Bolt tightening torque).



(a) Type C

(b) Type D

Fig. 3-18 Fractured crack arrester.

このようなことから、き裂の状況に応じてクラックアレスターの形状、厚さ、穴の位置等にも注意する必要があるが、本実験ではき裂発生寿命に主に着目しているため、クラックアレスターも含めたき裂進展挙動について詳細な検討はしておらず、この問題は改善する余地が残されている。例えば、クラックアレスターがき裂発生や限界き裂進展量を知らせるセンサーとしても機能する可能性がある。

試験片タイプ E は、はじめに試験端部側にクラックアレスターを取り付けて実験を行い、き裂が発生した後に 2 つめのクラックアレスターをストップホール側に追加して取り付けて実験を継続した。2 つめのクラックアレスターを取り付けた時点は縦方向の矢印で示してある。新たにクラックアレスターを取り付けた時点から明確にき裂進展速度が変化しており、クラックアレスターによってき裂の開口が抑制されるとき裂進展速度が低下すると考えられる。

比較的小さな寸法の試験片において、き裂先端に加工したストップホールにピンを挿入した場合には¹³⁻¹⁵⁾、そのストップホールからのき裂発生寿命が長くなるが、いったんストップホールからき裂が発生・進展すると、き裂進展速度はストップホールを加工しない場合とほとんど同じ状態になる。しかしながら、本実験の結果から、クラックアレスターを併用するとき裂発生寿命だけでなく、ストップホールから発生したき裂の進展速度も低下することが確認できた。

き裂の発生と進展挙動はクラックアレスターを取り付けた面 (Back side) とクラックアレスターを取りつけていない面 (Front side) では異なり、クラックアレスターを取りつけていない側でき裂の発生が早く、き裂の長さが長い傾向にある。そして、試験片タイプ C と D とともに、後からき裂が発生したクラックアレスターを取り付けた側のき裂長さが急速にクラックアレスターのない側のき裂長さに近づくことが分かる。なお、Fig. 3-19 に参考までにタイプ C のクラックアレスターを取りつけていない面 (Front side) で観察したき裂の様子 (繰り返し数 $N=3.5 \times 10^5$ 、き裂長さ $a=1.45\text{mm}$) を示す。

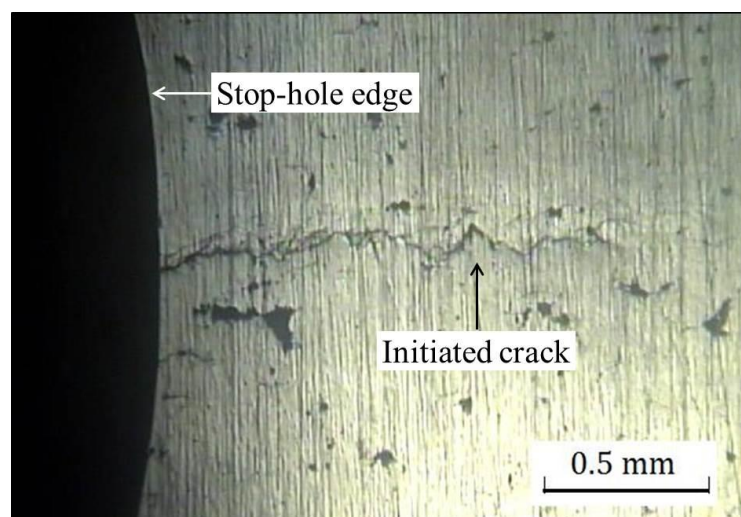


Fig. 3-19 Crack growth observation in the case of Type C.

この結果を実機に置き換えると、クラックアレスターを取り付けていない支柱の内側でき裂が発生・進展していたとしても支柱の外側は見た目上の変化がなく、き裂が部材を貫通して支柱の外側でき裂発生を検知できた段階では、その後急速進展することになる。したがって、安全性の観点から、本手法のように部材の片側だけに処置をした場合はき裂発生監視を怠らないことが重要である。

3.4.4 長い両側き裂試験片での効果について

3.4.1～3.4.3 節では、Fig. 3-5(a)～(c)に示す片側き裂試験片、中央き裂試験片、両側き裂試験片を用いた実験結果を示した。本節ではここまで得られた実験結果を基に、Fig. 3-5(d)に示す長い両側き裂試験片に対して、ストップホールとクラックアレスターを適用した場合のき裂進展抑制効果を確認するために、Fig. 3-8 に示す 3 種類の試験片を用いた検討を若干行った。前節 3.4.3 と同様に、ボルト締めストップホールやクラックアレスターを取り付ける際の締め付けトルクは約 52Nm とし、繰り返し最大応力 $\sigma_{\max}=45\text{MPa}$ 、応力比 $R=-1/3$ 、繰り返し周波数 $f=10\text{Hz}$ の条件で実験を行った。なお、Fig. 3-20 においては繰り返し最大応力 $\sigma_{\max}=30\text{MPa}$ 、応力比 $R=-1$ の条件でも実験を行っており、Fig. 3-22 では締め付けトルク $T=10\sim 30\text{Nm}$ としている。

Fig. 3-20 に Fig. 3-8(a)の試験片の実験結果を示す。応力比によってき裂進展挙動が多少異なり、 $R=-1$ より $R=-1/3$ の場合の方がストップホールからのき裂発生寿命が短い。これは $R=-1/3$ の場合の方が平均応力が高いためである。ボルト締めストップホールは、 $R=-1/3$ の場合には約 15 万回までき裂が発生しなかった。Fig. 3-16 におけるボルト締めストップホールよりき裂発生寿命が長く、 $R=-1$ の場合はさらに効果的である。

Fig. 3-21 に Fig. 3-8(b)の試験片の実験結果を示す。ワッシャーA は通常の平ワッシャー、ワッシャーB はノルトロックワッシャーを用いたボルト締めストップホールである。ノルトロックワッシャーは振動発生箇所におけるボルトの緩み防止に有用なツールであり、Fig. 3-9 に示すような形状となっている。この突起がついた形状がボルトを締めつけたときに母材にくいつくことでより強い摩擦力が発生し、それがき裂開口抑制に効果的ではないかと考えた。しかし、結果はノルトロックワッシャーを用いたボルト締めストップホールの方から先にき裂が発生し、期待した効果がなかった。この結果から、ワッシャーの突起部に局部的に高い接触圧力が作用するより、平ワッシャーのように平均的に接触圧力が分布した方がき裂開口抑制には効果的だと考えられる。Fig. 3-22 は破断した試験片を示しており、試験片表面にノルトロックワッシャーの跡がついているのが確認できる。

Fig. 3-23 に Fig. 3-8(c)の試験片の実験結果を示す。ストップホールに加えてクラックアレスターを取り付け、その締め付けトルク $T=10\text{Nm}$ 、 $T=20\text{Nm}$ とした場合は 30 万回以内に試験片が破断した。しかし、締め付けトルク $T=30\text{Nm}$ とした場合は 50 万回でもき裂は発生しなかった。Fig. 3-16 の片側き裂試験片においても一例を示したが、クラックアレスターを取り付ける際にはその締め付けトルク（言い換えると、締め付けにより発生するボルト軸力）が重要であり、それによってき裂発生寿命が左右されることがわかる。また、Fig. 3-17 におけるタイプ C の場合 ($T=52\text{Nm}$) より、低い締め付けトルクで延命効果は高い。これより、片側き裂試験片よりも両側き裂試験片の方がクラックアレスターのき裂進展抑制効果が高いことが確認できた。

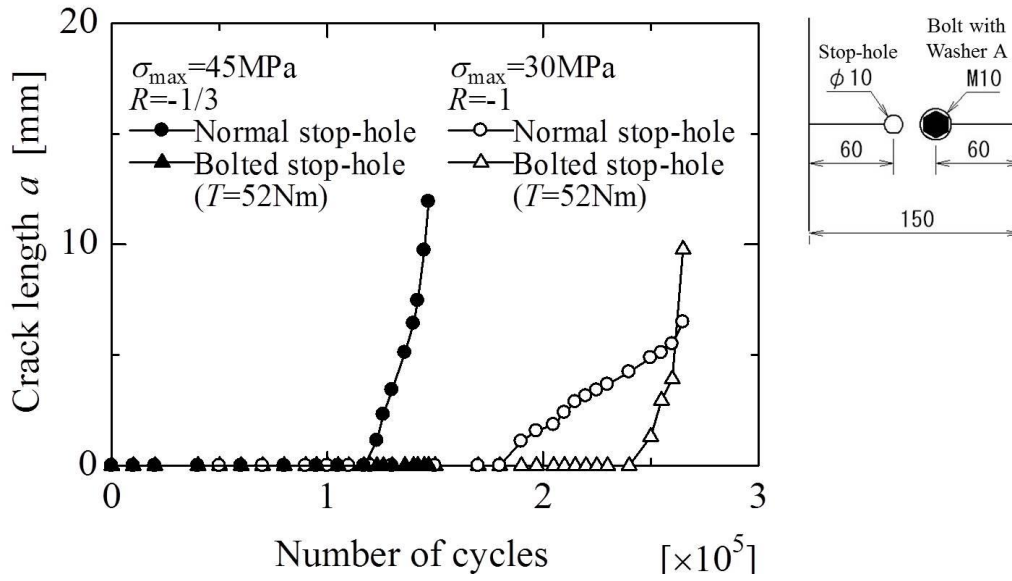


Fig. 3-20 Crack growth curves in the case of specimen type of Fig. 3-8(a).

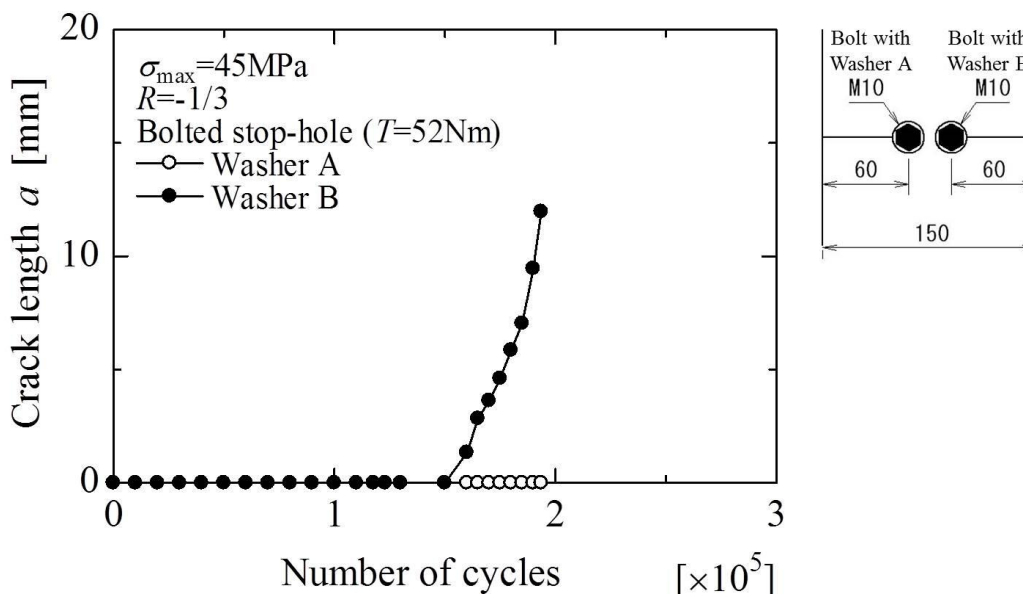


Fig. 3-21 Crack growth curves in the case of specimen type of Fig. 3-8(b).

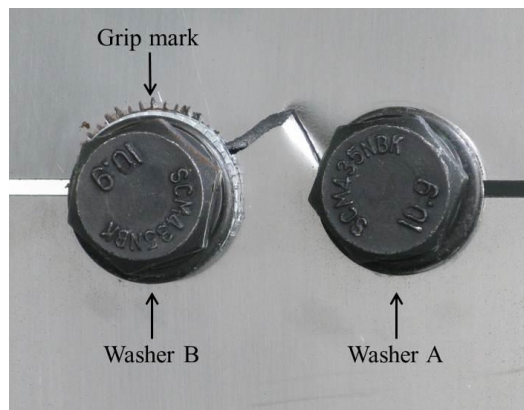


Fig. 3-22 Fractured specimen in the case of Fig. 3-8(b).

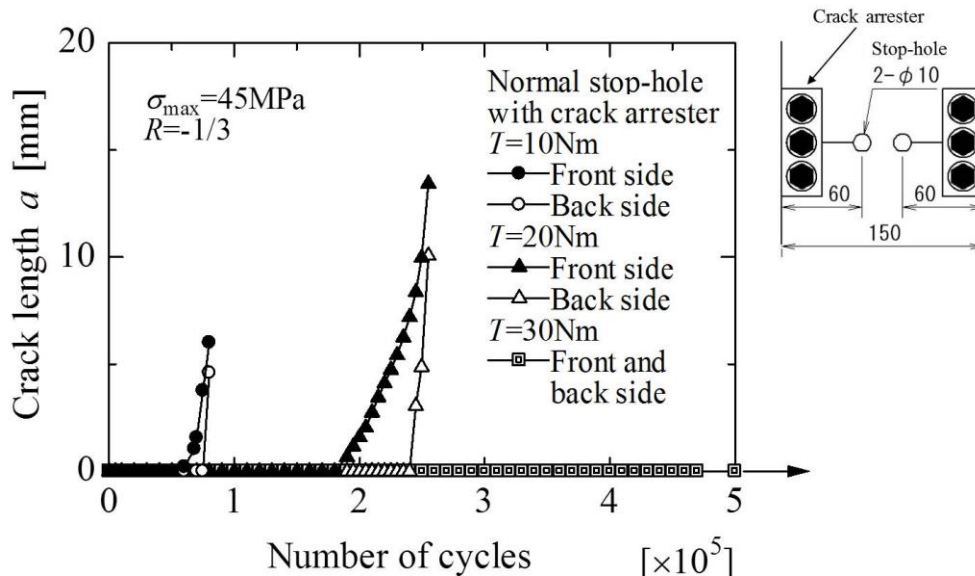


Fig. 3-23 Crack growth curves in the case of specimen type of Fig. 3-8(c).

3.5 結言

本章では、自動車生産設備に発生したき裂に対して、その進展を抑制するための応急補修法について検討した。実際の設備の状態に対応させて、試験片の片側だけにクラックアレスターを取り付け、それと通常のストップホール、ピン打ちストップホール、ボルト締めストップホールを併用した場合のき裂進展抑制効果について検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) き裂先端にストップホールを加工した場合のき裂進展抑制効果は、試験片のき裂形態により異なった。片側き裂試験片の場合、ストップホールのみの加工ではき裂進展抑制効果はあまりなく、ピン打ちストップホールやボルト締めストップホールの場合でも効果は小さかった。
- (2) ストップホールとクラックアレスターを併用すると、き裂の発生寿命と進展寿命の両方に効果的であり、クラックアレスターの取り付け位置と締め付けトルクは、ストップホールからのき裂発生寿命に影響する。
- (3) クラックアレスターと併用した場合は、通常のストップホール、ピン打ちストップホール、ボルト締めストップホールのいずれも 10 万回の耐久限度目標までき裂は発生しなかった。それらのき裂進展抑制効果と現場での作業性を考慮した結果、実機へのき裂補修には主にボルト締めストップホールとクラックアレスターの併用を適用した。
- (4) 部材の片側面だけにクラックアレスターを取り付ける場合は、反対面とのき裂発生寿命に差が生じるので注意が必要であると考えられる。
- (5) ストップホールとクラックアレスターを併用した場合のき裂進展抑制効果は、片側き裂試験片より両側き裂試験片の方が大きい結果を示した。

参考文献

- 1) A. Baker, Fatigue studies related to certification of composite crack patching for primary metallic aircraft structure, Proceedings of the FAA-NASA Symposium on the Continued Airworthiness of Aircraft Structure, FAA Report No. DOT/FAA/AR-97/2, I , pp.313-330, Atlanta, Georgia, 1997.
- 2) P.E. O'Donoghue, Z. Zhuang, A finite element model for crack arrester design in gas pipelines, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.22, No.1, pp.59-66, 2002.
- 3) 日本道路協会, 鋼橋の疲労, pp.53-79, 2007.
- 4) 寺田博之, フェールセーフ, メカライフ, Vol.2, No.3, pp.52-57, 1986.
- 5) 藤原源吉, 寺田博之, 角田義秋, アルミ合金の疲れき裂に対するストップホールの効果について, 航空技術, No.239, pp.3-16, 1975.
- 6) 名嘉海人, 真壁朝敏, Md. Shafiul FERDOUS, 笠井憲太, 内田晃治, 設備に発生したき裂の進展抑制に関して; 応急処置に対する実験結果, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, No.800, pp.497-506, 2013.
- 7) C. Makabe, K. Naka, M.S. Ferdous, Method of arresting crack growth for application at a narrow working space, Mechanical Engineering Journal, Vol.1, No.6, pp.1-12, 2014.
- 8) 内田大介, ボルト締めストップホール法で補修した面外ガセット溶接継手部の疲労強度評価, 三井造船技報, No.190, pp.45-53, 2007.
- 9) 森猛, ストップホールをボルト締めすることによる疲労亀裂の補修, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.969-975, 1989.
- 10) 森猛, ボルト締めした円孔の応力集中と疲労強度, 土木学会論文集, No.543, pp.123-132, 1996.
- 11) Murdani Anggit, 真壁朝敏, 才本明秀, 宮崎達二郎, 近藤了嗣, 補助穴の加工によるストップホールからの疲労き裂発生の新抑制手法, 材料, Vol.56, No.12, pp.1139-1144, 2007.
- 12) A. Murdani, C. Makabe, A. Saimoto, R. Kondou, A crack-growth arresting technique in aluminum alloy, Engineering Failure Analysis, Vol.15, pp.302-310, 2008.
- 13) 伊禮良樹, Anggit Murdani, 国吉和男, 真壁朝敏, き裂進展挙動に及ぼすき裂先端近傍への穴加工とその穴へのピンの打ち込みの影響について, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.741, pp.706-712, 2008.
- 14) C. Makabe, A. Murdani, K. Kuniyoshi, Y. Irei, A. Saimoto, Crack-growth arrest by redirection crack growth by drilling stop holes and inserting pins into them, Engineering Failure Analysis, Vol.16, pp.475-483, 2009.
- 15) 伊禮良樹, 国吉和男, 真壁朝敏, Murdani Anggit, ストップホールへのピンの挿入がき裂進展挙動に及ぼす影響, 材料試験技術, Vol.56, No.1, pp.11-17, 2011.
- 16) R. Ghfiri, H.J. Shi, R. Guo, G. Mesmacque, Effects of Expanded and Non-Expanded Hole on the Delay of Arresting Crack Propagation for Aluminum Alloys, Materials Science and Engineering, Vol. 286A, pp.244-249, 2000.
- 17) Md. Shafiul Ferdous, 藤田翔太郎, 山内章広, 真壁朝敏, 過大荷重負荷後の疲労き裂進展の加速とストップホール法によるき裂進展挙動の改善, 圧力技術, Vol.50, No.1, pp.22-30, 2008.

- 18) M.R. Ayatollahi, S.M.J. Razavi, H.R. Chamani, Fatigue life extension by crack repair using stop-hole technique under pure mode-I and pure mode-II loading conditions, *Procedia Engineering*, Vol. 74, pp. 18-21, 2014.
- 19) J. Crain, *Fatigue Enhancement of Undersized, Drilled Crack-Stop Holes*, 2010, <<http://kuscholarworks.ku.edu/handle/1808/6288>>, (accessed on 4 August, 2014).
- 20) NA. Noda, T. Matsuo, Singular integral equation method in optimization of stress-relieving hole: a new approach based on the body force method, *International Journal of Fracture*, Vol. 70, No.2, pp. 147-165, 1995.
- 21) C.S. Shin, C.M. Wang, P.S. Song, Fatigue damage repair: a comparison of some possible methods, *International Journal of Fatigue*, Vol.18, No.8, pp.535-546, 1996.
- 22) P.S. Song, Y.L. Shieh, Stop drilling procedure for fatigue life improvement, *International Journal of Fatigue*, Vol.26, No.12, pp.1333-1339, 2004.
- 23) H. Nisitani, A. Saimoto, Effectiveness of Two-Dimensional Versatile Program Based on Body Force Method and Its Applications to Crack Problems, *Key Engineering Materials*, Vols. 251-252, pp. 97-102, 2003.

第4章 クラックアレスターの段差部への適用拡張について

4.1 緒言

機械・構造物は機械加工痕、表面の傷、ボルト穴、段、隅肉部、切欠き部、溶接部などを起点とした疲労破壊が多い¹⁾。その理由は、形状が変化する部分は応力集中源となりやすいためである。西田²⁾や小林³⁾、日本機械学会⁴⁾が行った調査報告では、そのような応力集中部を起点とした疲労破壊事故例が多数報告されている。

機械・構造物の代表的なき裂発生箇所として Fig. 4-1 に示すような段差部がある⁵⁾。Fig. 4-1(a)は摩擦接合継手であり、Fig. 4-1(b)はリベット継手の端部に仮止め溶接がされている。これらの例においては母材と継手との境界が応力集中部となる。また、第1章で述べたように溶接部は形状以外にも、入熱による材料の劣化や引張残留応力などの影響でき裂が発生しやすく⁶⁻²⁰⁾、その事例も多い、

そこで、第3章にて検討したストップホール²¹⁻²⁷⁾とクラックアレスターを併用したき裂進展抑制手法^{26,27)}が、このような段差部近傍で発生したき裂に対しても適用できないか検討した。このような段差がある部分で発生したき裂に対しては、その部分形状に合わせたクラックアレスターを用いなければならない。

本章では、板継手と突合せ溶接継手に発生したき裂を設定し、それぞれの形状に合わせたクラックアレスターを3種類ずつ用いて疲労試験を行い、前章で検討した板の平面でクラックアレスターを用いた場合と比較して、そのき裂進展抑制効果を比較した。

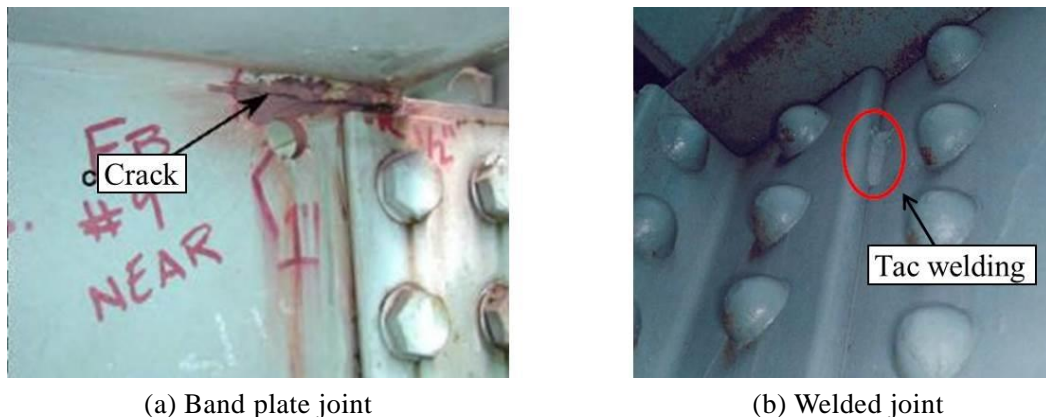


Fig. 4-1 Crack initiation at a structure having step portions⁵⁾.

4.2 使用材料と実験方法

実験に用いた材料は機械構造用炭素鋼 S45C と溶接構造用圧延鋼 SM490A である。機械構造用炭素鋼 S45C の化学組成と機械的性質を Table 4-1 と Table 4-2 に、溶接構造用圧延鋼 SM490A の化学組成と機械的性質を Table 4-3 と Table 4-4 にそれぞれ示す。

Fig. 4-2 に板継手試験片の基本形状を示す。幅 50mm、長さ 190mm、厚さ 5mm の平板に、幅 20mm、長さ 50mm、厚さ 2.5mm の帯板を取り付けて段差とみなした。帯板の側に幅 0.2mm、長さ 25mm のスリットを加工し、前章と同様に片側き裂とした。これを板継手型試験片と称する。素材は試験片母材とクラックアレスターに機械構造用炭素鋼 S45C、段差を模擬した帯板には SS400 を用いた。

Table 4-1 Chemical composition (mass%, S45C).

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.44	0.24	0.72	0.013	0.006	Bal.

Table 4-2 Mechanical properties (S45C).

Yield strength σ_s [MPa]	Tensile strength σ_B [MPa]	Elongation ϕ [%]
304	589	29.6

Table 4-3 Chemical composition (mass%, SM490A).

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.16	0.39	1.44	0.15	0.04	Bal.

Table 4-4 Mechanical properties (SM490A).

Yield strength σ_s [MPa]	Tensile strength σ_B [MPa]	Elongation ϕ [%]
383	540	25

クラックアレスターは前章のように平滑部に用いるものを通常タイプ (Normal) とし、段差形状に合わせた3つのタイプをそれぞれタイプ A, B, C とした。Fig. 4-3(a)~(d)にそれぞれのクラックアレスターの形状寸法を示し、それらを取り付けた試験片の状態を Fig. 4-4 に示す。前章と同様にクラックアレスターは、試験片にめねじを切って、試験片の片面だけに取り付けている。帯板およびクラックアレスターは M5 並目六角ボルト (SCM435, 強度区分 10.9) とワッシャーを用いて、締め付けトルク 8.0Nm で取り付けている。

先述したように、Fig. 4-4(a)に示す Normal は段差のない平面にクラックアレスターを取り付けた場合である。(b)に示すタイプ A のクラックアレスターの基本形状は Normal と同様だが、ボルト穴の位置を変えて、試験片のき裂面上ともう1か所にねじ穴を加工し、帯板に接する形で取り付けている。(c)のタイプ B と(d)のタイプ C は帯板に重なるように段差を設けたクラックアレスターを取り付けている。タイプ B はき裂面近傍とき裂をまたいだ位置に、タイプ C は帯板上とき裂をまたいだ位置にネジ穴を加工して取り付けている。なお、タイプ C は帯板上のボルトとの干渉を避けるために、クラックアレスターの一部を切欠き状にして、その近くのボルト穴を中心線上からずらしている。

Fig. 4-5 に溶接継手試験片の基本形状を示す。幅、長さ、厚さは板継手試験片と同様で、試験片中央部に突合せ溶接を行っている。参考値として、溶接ビード幅は約 14mm、余盛り高さは約 3mm である。そして、溶接ビード止端部近傍に幅 0.2 mm、長さ 25 mm のスリットを加工している。これを溶接継手試験片と称する。素材は試験片母材に溶接構造用圧延鋼 SM490A、クラックアレスターには SS400 を用いた。

クラックアレスターは溶接ビードの形状に合わせた3つのタイプをそれぞれタイプ A, B, C とした。Fig. 4-6(a)~(c)にそれぞれのクラックアレスターの形状を示し、それらを取

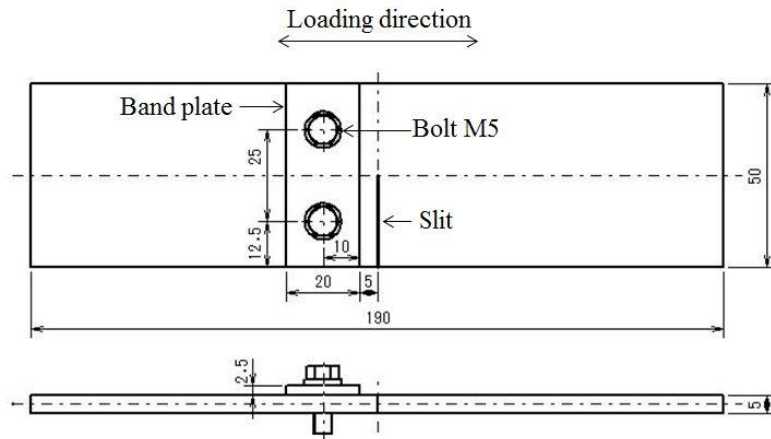
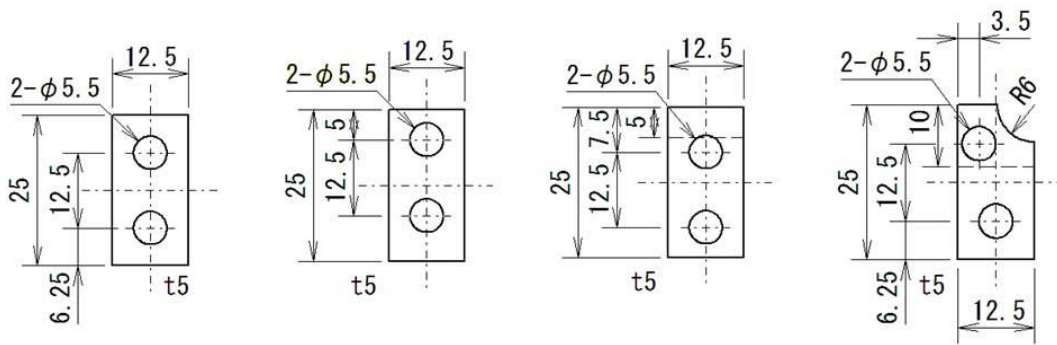
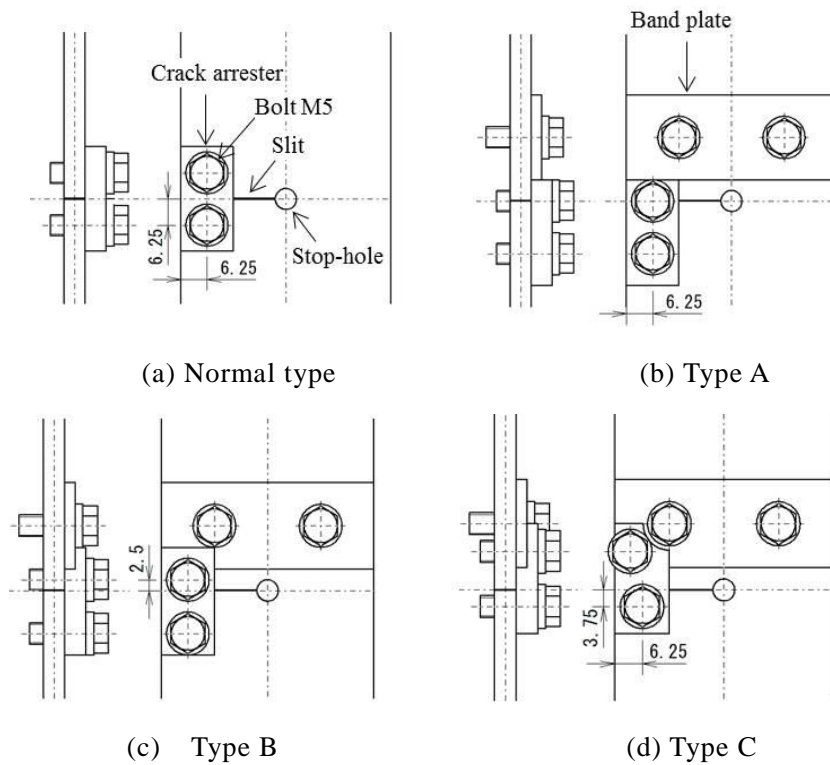


Fig. 4-2 Geometry of band plate specimen with crack on one side.



(a) Normal type (b) Type A (c) Type B (d) Type C

Fig. 4-3 Geometry of crack arrester for band plate specimen (mm).



(a) Normal type (b) Type A (c) Type B (d) Type C

Fig. 4-4 Application patterns of a stop-hole and crack arrester to band plate specimen (mm).

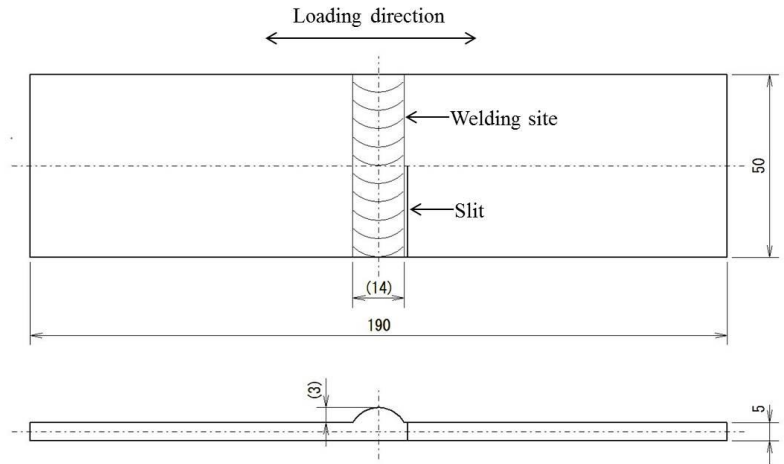


Fig. 4-5 Geometry of welded specimen with crack on one side.

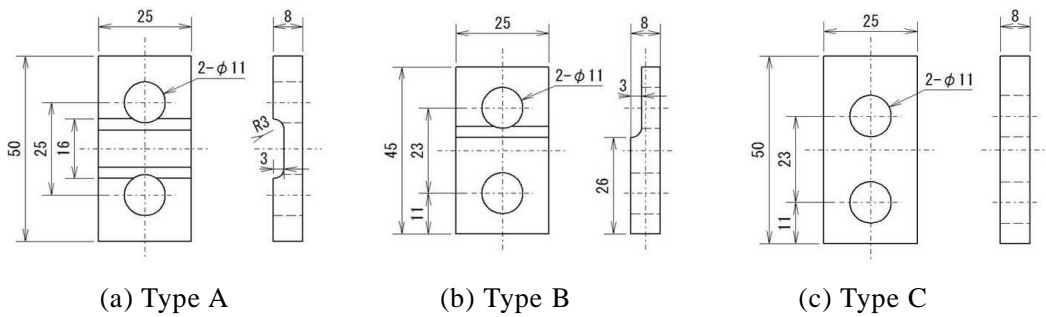


Fig. 4-6 Geometry of crack arrester for welded specimen (mm).

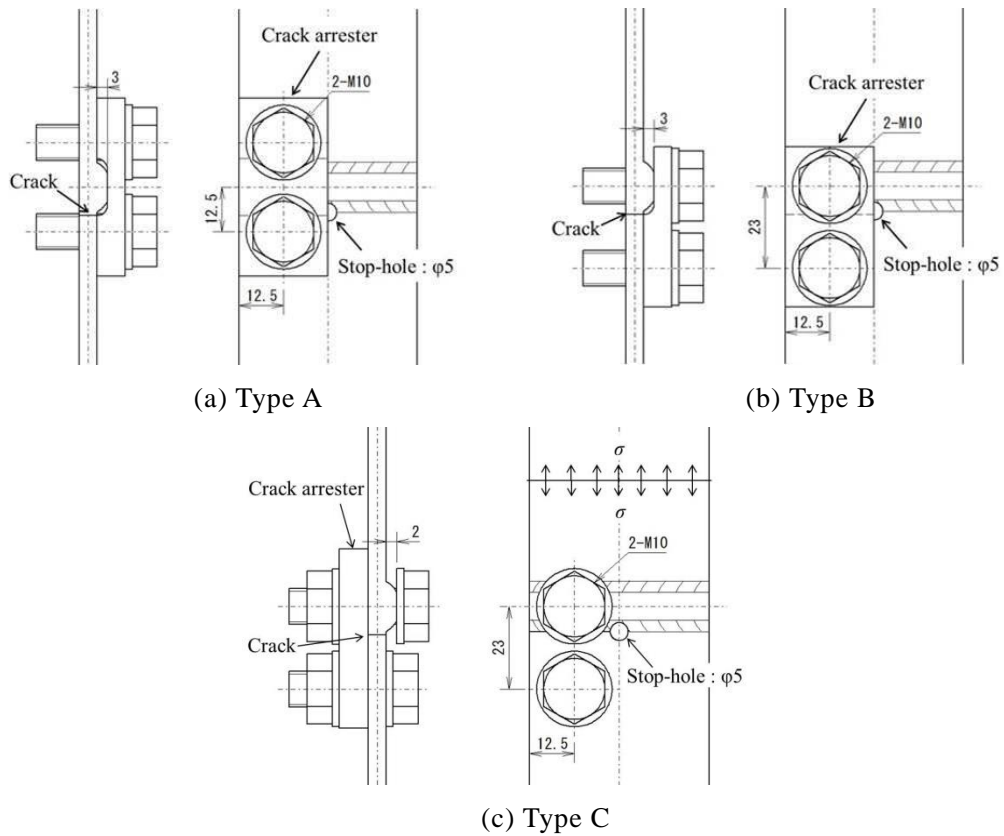


Fig. 4-7 Application patterns of a stop-hole and crack arrester to welded specimen (mm).

り付けた試験片の状態を Fig. 4-7 に示す. ここでもクラックアレスターの取り付けは試験片の片面だけとし, M10 並目六角ボルト (SCM435, 強度区分 10.9) とワッシャーを用いて, 締め付けトルク 63.0Nm で取り付けている.

タイプ A の場合は, クラックアレスターと接触するように溶接ビードの頂上部を約 1mm 削って平面を出し, 溶接ビードをまたぐ形でねじ穴を設けクラックアレスターを取り付けている. タイプ B の場合は, 溶接ビードの頂上部を削ってビード上にねじ穴を設け, クラックアレスターの上部がビードに重なるように取り付けている. タイプ C の場合は, タイプ B の場合と同様に溶接ビード上に直径 11mm の取付穴を設け, 溶接ビードの裏側の平面部にボルトとナットでクラックアレスターを取り付けている.

それぞれの試験片は 600°C で 2 時間保持の真空焼鈍をして実験に供した. 実験は応力比 $R=0$, 最大繰り返し応力 $\sigma_{\max}=60\sim90\text{MPa}$, 繰り返し周波数 $f=10\text{Hz}$ として, 電気油圧サーボ式材料試験機を用いて引張圧縮方式で行い, き裂の発生および進展挙動はマイクロスコープを用いてクラックアレスターを取りつけていない面で観察した. なお, Fig. 4-7(c) に示すように, 応力は帯板や溶接ビードがない試験片平行部で定義する.

4.3 実験結果および考察

4.3.1 板継手試験片での効果について

Table 4-5 に各板継手試験片におけるき裂発生寿命 N_i と破断寿命 N_f , Fig. 4-8 に $S-N$ 曲線を示す. プロットは各繰り返し最大応力における試験片の破断寿命 N_f を示している. 矢印を付したデータはストップホール先端からき裂は発生せず, 途中で実験を打ち切っている. クラックアレスターは取り付けず, ストップホールを加工しただけの試験片の結果を基本データ (以下, Base) とする. Fig. 4-9 には $\sigma_{\max}=75\text{MPa}$ で破断した試験片を示す.

Table 4-5 Fatigue test results (σ_{\max} : Maximum stress, N_i : Crack initiation life, N_f : Fatigue life).

Specimen	σ_{\max} [MPa]	N_i [$\times 10^4$]	N_f [$\times 10^4$]
Base	60	10.0	15.9
	75	5.2	8.1
	90	1.3	2.3
Normal	75	171.0	180.9
	82.5	15.0	24.7
	90	7.0	16.2
A	60	/	500*
	75	8.2	11.0
	90	3.8	5.9
B	75	20.1	40.0
	90	6.8	12.7
C	60	/	500*
	75	15.3	22.6
	90	7.7	12.1

*: Test was stopped before crack initiation.

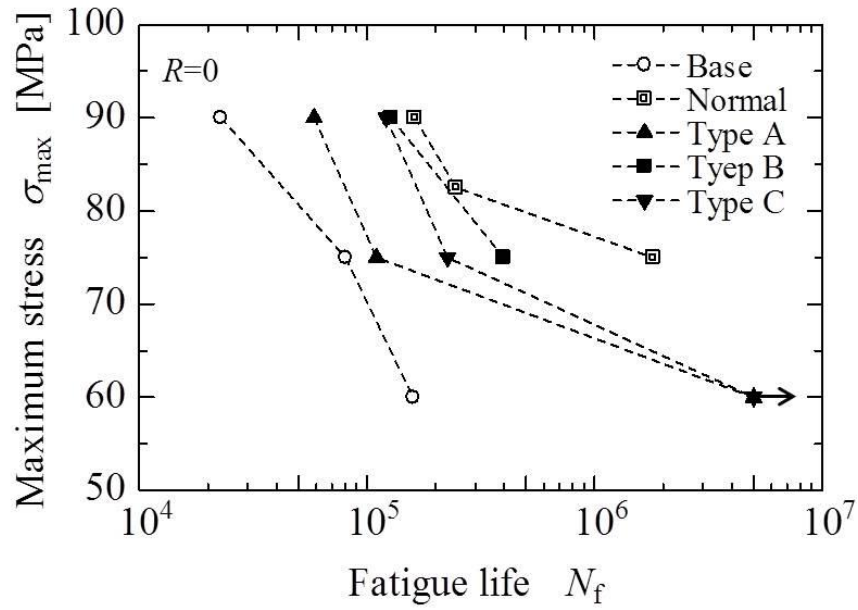


Fig. 4-8 S-N curves of band plate specimen.

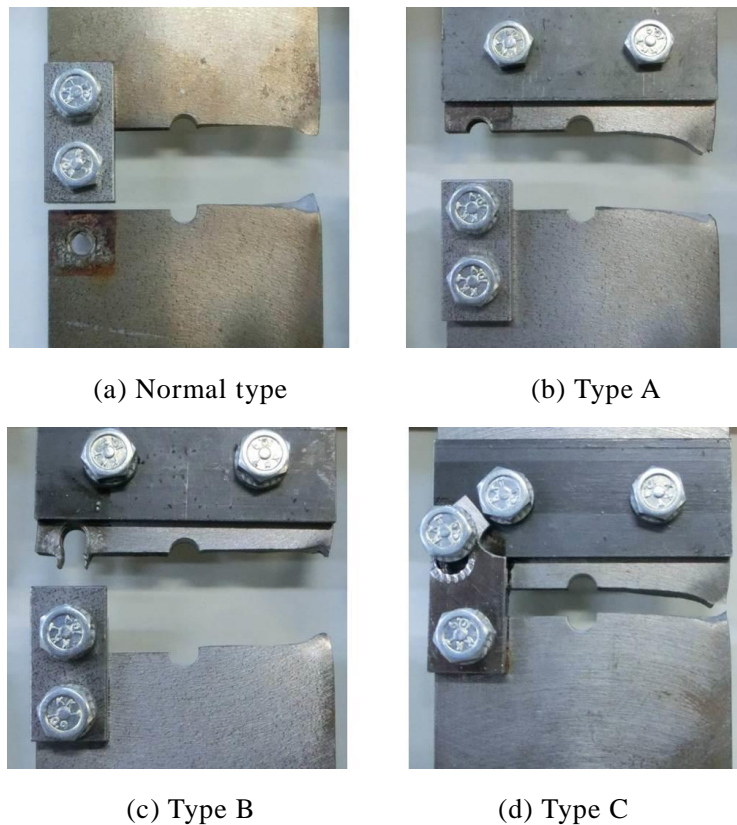


Fig. 4-9 Fractured specimen ($\sigma_{max}=75\text{MPa}$).

Fig. 4-8 より，Normal タイプの場合が各繰返し最大応力において最も疲労寿命が長いことが確認でき，本実験では帯板のある試験片の場合がクラックアレスターの効果が低いことがわかる．ただし，Base に対しては全タイプの試験片で寿命が延びており，タイプ B，C，A の順に効果が高かった．この結果から，本実験のように一体化していない帯板が取

り付けられた段差のある試験片でもストップホールとクラックアレスターによる寿命改善効果はあることが確認できる。

Table 4-5 に示したように、Base の場合は $\sigma_{\max} = 90\text{MPa}$ で $N_f = 2.3 \times 10^4$ 回、 $\sigma_{\max} = 75\text{MPa}$ で $N_f = 8.1 \times 10^4$ 回、 $\sigma_{\max} = 60\text{MPa}$ で $N_f = 15.9 \times 10^4$ である。それらに対し、最も効果が高いタイプ B は $\sigma_{\max} = 90\text{MPa}$ で $N_f = 12.7 \times 10^4$ 回、 $\sigma_{\max} = 75\text{MPa}$ で $N_f = 40.0 \times 10^4$ 回となり、Base に対して $\sigma_{\max} = 90\text{MPa}$ では約 5.5 倍、 $\sigma_{\max} = 75\text{MPa}$ では約 5 倍疲労寿命が向上した。次に効果があったのがタイプ C であり、 $\sigma_{\max} = 90\text{MPa}$ で $N_f = 12.1 \times 10^4$ 回、 $\sigma_{\max} = 75\text{MPa}$ で $N_f = 22.6 \times 10^4$ 回となった。最も効果が低いのはタイプ A で、 $\sigma_{\max} = 90\text{MPa}$ で $N_f = 5.9 \times 10^4$ 回、 $\sigma_{\max} = 75\text{MPa}$ で $N_f = 11.0 \times 10^4$ 回であり、Base よりわずかに延命しただけである。なお、最大繰り返し応力が低い $\sigma_{\max} = 60\text{MPa}$ においては、補修の効果が大きく、タイプ A と C の場合では $N = 5.0 \times 10^6$ 回でもき裂は発生しなかった（タイプ B の効果も同様になると予測している）。

タイプ A の場合はクラックアレスターと試験片の接触面積がスリットより上側の部分では小さい。そのために均等にはスリット面が押しえられず十分な摩擦力が生じておらず、き裂開口抑制効果が小さかったと考えられる。したがって、タイプ A ではクラックアレスターの取り付けが簡便であるが、応力振幅が低いときのみしかその効果がないことがわかった。タイプ C では帯板上のボルトを避けるためクラックアレスターの一部を切り欠いている。そのため、帯板の部分ではクラックアレスターの取り付けボルトは中心より左にずれており、摩擦力には多少のロスが生じることが予想される。

本実験の範囲では、タイプ B の場合が最も効果的だった。その理由としては、スリットをまたいだ上下部分においてクラックアレスターが試験片自体のボルト穴に固定され、クラックアレスターの平面上での形状を対称に近い状態に保ったこと等から、試験片表面の接触面での摩擦力（接触圧）が比較的均等になったことが考えられる。また、帯板上にはクラックアレスターを取り付けるためのボルトはないので、帯板の動きがクラックアレスターのき裂開口変位を抑える効果に及ぼす影響が少なかったと考えている。

なお、タイプ C のクラックアレスターの形状は、Fig. 4-3(d)に示すように片端部のボルト穴の部分が薄肉で強度不足のため、最終的には Fig. 4-9(d)で示したようにクラックアレスターは破断する。しかし、クラックアレスターの破断が生じてから試験片自体にき裂が発生・進展したわけではない。ストップホールから発生したき裂が長く（10mm 以上）なるまで、クラックアレスターの穴部からは破断していないことは確認済である。

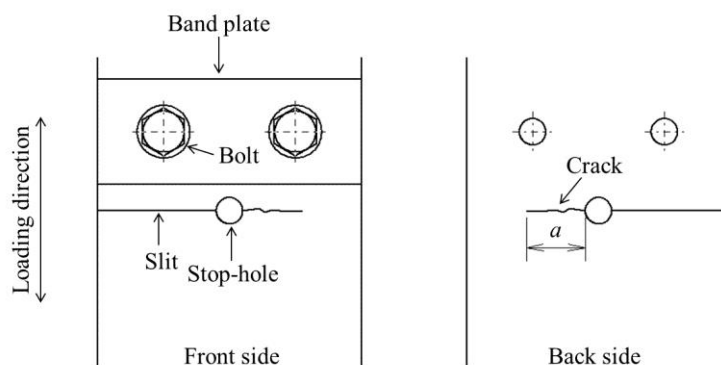


Fig. 4-10 Definition of crack length a of band plate specimen.

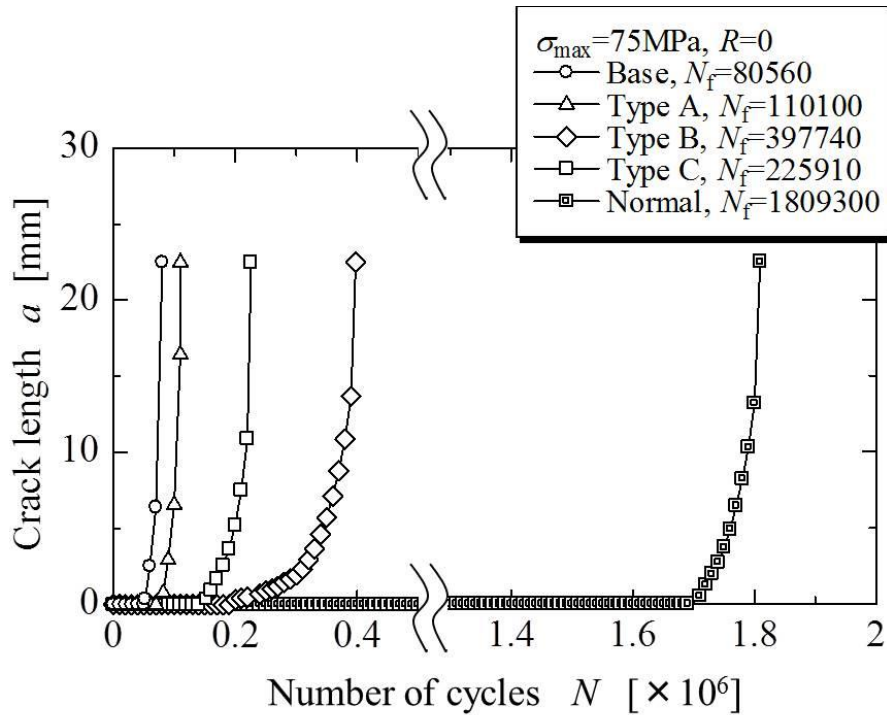


Fig. 4-11 Crack growth curves of band plate specimen (N_f : fatigue life).

本実験結果から、試験片に帯板等がありその近くで発生したき裂を補修するため、クラックアレスターを帯板等に重ねる場合は片当たりにも注意しなければならないと思われる。また、ボルト自体に変動する軸力等が加わる場合はゆるみ等の影響がクラックアレスターの性能に影響する可能性がある。

本節では、ストップホールから発生したき裂の長さ a を Fig. 4-10 に示すように、帯板がない面のストップホール先端から新たに発生したき裂先端までの距離とした。

Fig. 4-11 に $\sigma_{\max}=75\text{MPa}$ における板継手試験片のき裂進展曲線を示す。タイプ A の場合は Base に対してわずかにき裂発生寿命が延びただけで、き裂発生後は Base と同じように急速進展しており、き裂進展速度に対する遅延効果はほとんどない。タイプ B および C の場合は Base に対し少しくき裂進展速度が低下している。き裂発生寿命はタイプ B の場合が $N_i=20.1 \times 10^4$ 回、タイプ C の場合は $N_i=15.4 \times 10^4$ 回であり、き裂発生寿命に大きな差はなく破断寿命の差はき裂進展速度に起因していると考えられる。Normal タイプは $N_i=171.0 \times 10^4$ 回となり、 $\sigma_{\max}=90\text{MPa}$ ($N_i=7.0 \times 10^4$ 回) の場合に比べて、き裂発生寿命が大きく延びた。このようにクラックアレスターを平面で用いる Normal タイプの場合に比べて、タイプ A~C の効果は低いですが、その中で最も効果が高いタイプ B においては Base に対して約 5 倍の延命効果が確認できた。

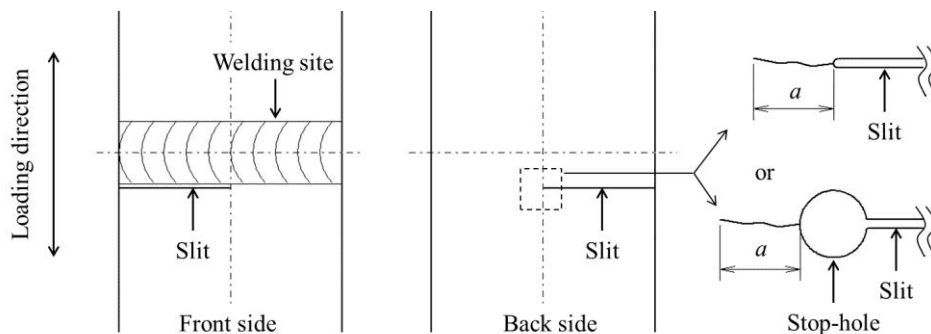
Fig. 4-11 に示したき裂進展曲線は、一般的なき裂進展挙動ではなく、ボルトの締結状態やクラックアレスターに生じる曲げ等の影響が関係すると考えられるが、詳細な機構は検討していない。ボルトのゆるみや疲労は軸力の低下に直結するので、すなわちクラックアレスターのき裂開口抑制効果の低下を意味する。クラックアレスターを取り付けた場合はボルト締結や摩擦力の効果を検討しないといけないので、通常の片側き裂試験片のき裂進展則は適用できない。また、急速なき裂が不安定的に進展する場合は、小規模降伏による

き裂進展評価も意味がなくなる。このようなことも、クラックアレスターでのき裂補修後のき裂進展挙動に考慮する必要がある。

橋村らはボルトの軸直角方向に繰返し荷重が作用する場合において、ボルトの締結状態がボルトの緩みや疲労に与える影響について示している²⁸⁻³⁰⁾。クラックアレスターのき裂進展抑制効果をより高めるためには、これらの挙動を考慮した検討も必要と考えるが、それについては今後の検討課題としたい。なお、本実験の場合には帯板から若干離れた位置にき裂が発生した場合を検討した。帯板の端部でき裂が発生した場合、き裂をまたいでクラックアレスターを設置するにはより工夫が必要になる。これらの問題についても検討する余地が残されている。

4.3.2 溶接継手試験片での効果について

本節では、ストップホールから発生したき裂の長さ a を Fig. 4-12 に示すように、溶接ビードがない面のスリットあるいはストップホール先端から新たに発生したき裂先端までの距離とした。



(a) Situation of initial crack or slit (b) Length a of new crack

Fig. 4-12 Definition of crack length a of welded specimen.

Fig. 4-13 に $\sigma_{\max}=75\text{MPa}$ における溶接継手試験片のき裂進展曲線を示す。Base はクラックアレスターを取り付けず、ストップホールも加工していない試験片の結果である。この場合は約 3 万回で破断した。全タイプの試験片で Base より寿命が延びているが、クラックアレスターの形状と取り付け方によって効果に差がでており、タイプ C, B, A の順に効果が高かった。最も効果が低いタイプ A の場合でも、破断寿命は約 35 万回で Base に対して約 10 倍の延命となり、タイプ B の破断寿命は約 83 万回でタイプ A の 2 倍以上の効果があった。特にタイプ C はき裂発生 (約 243 万回) から破断 (366 万回) まで 100 万回以上を要しており、そのき裂進展抑制効果が高いことがわかる。タイプ A, B, C の順にき裂発生寿命とき裂進展寿命がともに延びている。

Fig. 4-14 に各試験片のき裂進展速度 da/dN とき裂長さの関係を示す。き裂進展の初期において、各タイプとも明確にき裂進展速度が Base より低下しており、き裂が長くなるにつれて Base に漸近していく。特にタイプ C の効果が顕著であることが、き裂進展速度の点からも確認できた。また、Base はき裂長さが約 7.5mm 以上になると急速進展しているが、タイプ A~C においては約 13mm まではき裂が安定進展していることがわかる。これより、ストップホールとクラックアレスターによるき裂進展速度の低下に伴い、急速破壊が抑制

されることもわかる。

Fig. 4-15 にタイプ A とタイプ C におけるストップホール先端の様子を示す。Fig. 4-15(a) に示すようにタイプ A の場合は、応力繰返し数が約 25 万回においてき裂が約 3mm まで進展しているが、Fig. 4-15(b)に示すようにタイプ C の場合は、210 万回でもき裂の発生は見られない。なお、ストップホール縁から荷重軸と垂直方向に伸びている線は、き裂ではなくエメリー紙によるひっかき傷である。

Fig. 4-16 に破断した各タイプの試験片を示す。Fig. 4-16(a)に示すように、タイプ A のクラックアレスターは赤矢印を付した部分を支点に曲げ変形している。この変形は試験片の最終破断時に生じたものであるが、試験時においてもこの部分に曲げの作用がかかっていることを示す。これは溶接ビードをまたぐためにクラックアレスターの中央部を薄くし、クラックアレスターと溶接ビードとの間にすきまがあるために、ボルトが引っ張られた際に曲げが作用してそこが応力集中部となる。この影響によりクラックアレスターが変形しやすく、き裂開口抑制効果が小さくなったと考えられる。

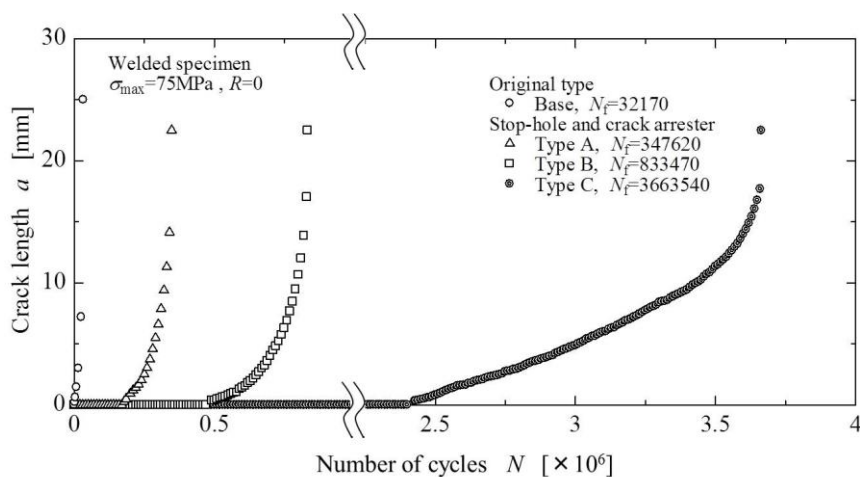


Fig. 4-13 Crack growth curves of welded specimen (N_f : fatigue life).

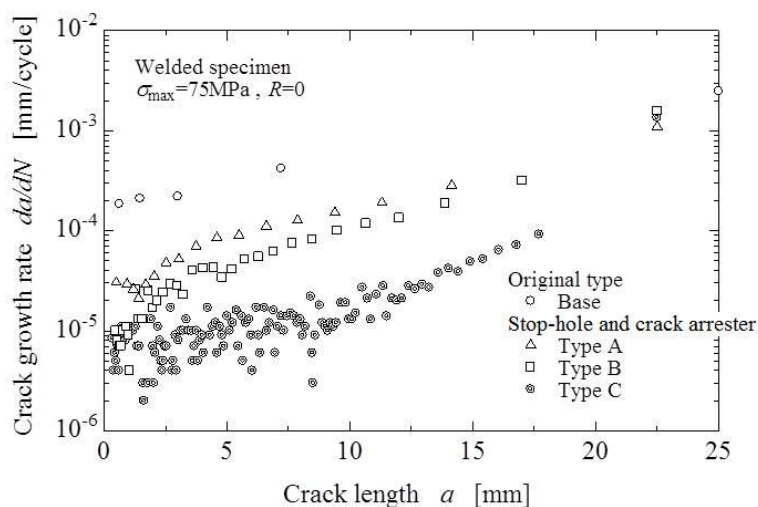


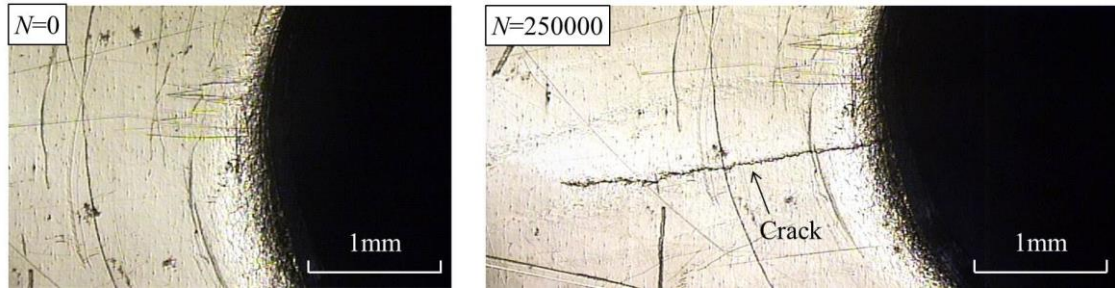
Fig. 4-14 Crack growth rate da/dN vs. crack length a .

また、き裂をまたいだ形で取り付けているため、試験片とクラックアレスターの接触面がビード上とビードをまたいだ平面部の3つに分かれることも一因と考えられ、接触面が不連続になることによって、通常のクラックアレスターに比べて摩擦力の低下が予想される。さらに、摩擦力の低下要因としては前節 4.3.1 と同様に片当たりの影響がある。本実験のように段差形状に合わせたクラックアレスターを用いた場合、試験片とクラックアレスターの接触部には程度の差はあるが必ず片当たりが発生する。特に、溶接継手は入熱による変形があるので前節の板継手の場合よりもその影響が大きいと考えられる。

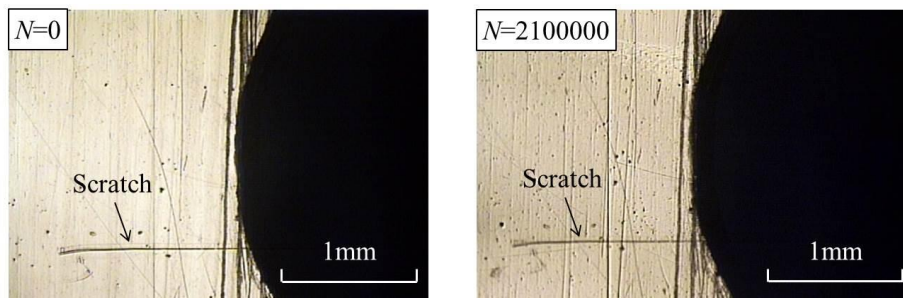
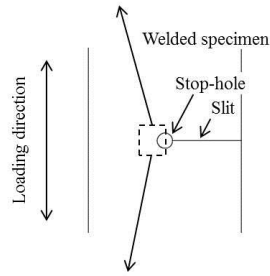
Fig. 4-16(b)に示すようにタイプ B の場合は、ビード上と平面部の2面接触であることに加えて、き裂面に近い位置で連続的な接触面が大きいことでタイプ A に比べて効果が大きかったと考えられる。タイプ A の場合と同様に、ボルトが引っ張られることで赤矢印を付した部分を支点にクラックアレスターは変形するが、タイプ A に比べてその程度は小さいと考えられる。それは、一方のねじ穴を溶接ビード上に設けることで平面の場合に比べて、クラックアレスターを取り付けたときの試験片とボルトのネジ山のかみ合いが長くなることで、変形に対するボルトの剛性が上がるためと考えている。

Fig. 4-16(c)に示すようにタイプ C の場合は、溶接ビードがない平滑な面にクラックアレスターを取り付けたことで、試験片との接触面積を十分とれたことにより、最もき裂開口抑制効果が高かったと考えられる。また、ボルト・ナットを用いてクラックアレスターを締め付けたことで、タイプ A, B のような曲げ変形の影響が少なかったと考えられる。Fig. 4-16(c)において、クラックアレスターはタイプ A, B のような変形は見られない。実験は行っていないが、タイプ B と C のクラックアレスターを組み合わせると両面補修を行えば、さらに効果が上がると期待できる。

以上のように、段差を有する板継手型試験片と溶接継手型試験片に対して、ストップホールとクラックアレスターを適用した場合のき裂進展抑制効果について検討した。補修を行わない場合に比べて、ある程度の疲労寿命向上効果は確認できたが、平滑部で適用する場合に比べてクラックアレスターの効果が低いことがわかる。本手法のように、段差がある部材に対してクラックアレスターを片面だけに取り付ける場合は、荷重負荷に伴うクラックアレスターの曲げの影響があることを考慮しなければならない。また、き裂開口変位を最も抑えられる取り付け方を選択することが重要だといえる。その取り付け手法や形状にはまだ改善の余地があり、残された課題である。

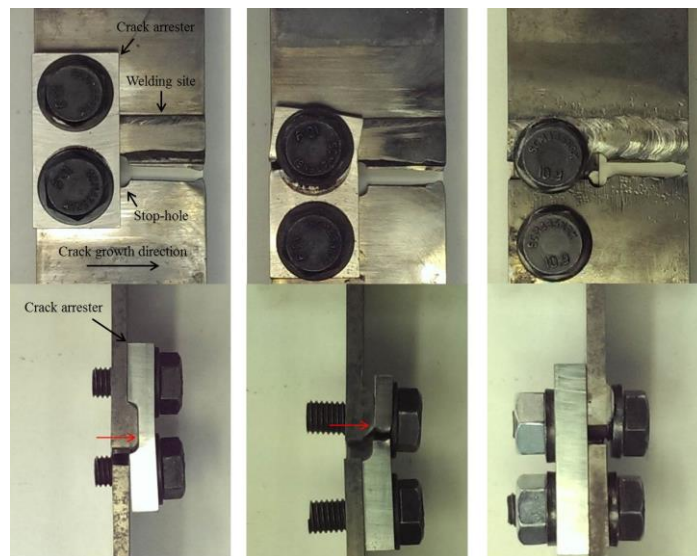


(a) Type A



(b) Type C

Fig. 4-15 Observation of stop-hole vicinity to compare the effect of crack arrester on new crack initiation.



(a) Type A

(b) Type B

(c) Type C

Fig. 4-16 Features of fractured specimens.

4.4 結言

本章では、段差部を有する板継手型試験片と溶接継手型試験片に対して、ストップホールとクラックアレスターを適用した場合のき裂進展抑制効果について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 板継手や溶接継手のような段差部近傍で発生したき裂に対して、ストップホールとクラックアレスターによる補修をする場合、平滑な面で補修する場合に比べてき裂進展抑制効果は低かったが一定以上の効果は確認できた。また、クラックアレスターの形状と取り付け方によって破断寿命の延びが異なった。
- (2) 板継手試験片において、最もき裂進展抑制効果が高いのは、き裂面近傍にねじ穴を設けて帯び板に重なるようにクラックアレスターを取り付けたタイプ B の場合だった。その場合、クラックアレスターを用いないでストップホールだけを加工した Base の場合に対し、繰り返し最大応力 $\sigma_{\max}=75\text{MPa}$ では破断寿命が約 5 倍延びた。
- (3) 板継手試験片において、最もき裂進展抑制効果が低いのは、き裂面上にねじ穴を設け帯び板に接するようにクラックアレスターを取り付けたタイプ A だったが、繰り返し最大応力 $\sigma_{\max}=60\text{MPa}$ では繰り返し数 500 万回まで試験片は破断せず、低い応力域では有効であることがわかった。
- (4) 溶接継手試験片において、最もき裂進展抑制効果が高いのは、溶接ビードがない面にボルト・ナットを用いてき裂をまたぐ形でクラックアレスターを取り付けたタイプ C の場合だった。ただし、この場合は溶接ビードの裏側の平面を使った補修である。
- (5) 溶接継手試験片において、タイプ A、B ではタイプ B の方がき裂進展抑制効果が高かった。この場合、何も補修を行わない Base の場合に対し、繰り返し最大応力 $\sigma_{\max}=75\text{MPa}$ では破断寿命が約 26 倍延びた。
- (6) 溶接継手試験片において、クラックアレスターと溶接ビードの間にすきまがある場合、荷重負荷に伴いクラックアレスターに曲げ作用がかかるため、その影響を考慮したクラックアレスターの取り付けや設計が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本材料学会九州支部，第 34 回疲労講座 初めて学ぶ金属疲労，2013.
- 2) 西田新一，機械機器破損の原因と対策，日刊工業新聞社，1986.
- 3) 小林英男，破壊事故 - 失敗知識の活用 - ，共立出版，2007.
- 4) 日本機械学会，技術資料 機械・構造物の破損事例と解析技術，1984.
- 5) U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Manual for repair and retrofit of fatigue cracks in steel bridges, FHWA Publication No. FHWA-IF-13-020, March 2013.
- 6) 山田健太郎，近藤明雅，鋼部材の亀裂補修・補強後の疲れ挙動，土木学会論文集，No.368，pp.411-415，1986.
- 7) 寺田博之，溶接残留応力場のき裂解析とその疲労き裂進展特性評価への応用，航空宇宙技術研究所報告，TR-1248，1994.

- 8) 村上理一, 秋園幸一, 溶接残留応力場での疲労き裂成長速度に及ぼす残留応力緩和の影響, 材料, Vol.34, No.377, pp.202-207, 1984.
- 9) 山本智, 高梨正祐, 飯田國廣, 疲労荷重による溶接残留応力の緩和, 圧力技術, Vol.31, No.2, pp.74-81, 1993.
- 10) 小林朋平, 仁瓶寛太, 疲労センサによる溶接構造物の疲労寿命診断, 溶接学会誌, Vol.76, No.4, pp.221-225, 2007.
- 11) 猪瀬幸太郎, 松本直幸, 神林順子, 阿部大輔, 大畑和夫, 鋼構造物に生じたき裂のレーザ補修技術開発, 溶接学会全国大会講演概要集, Vol.94, pp.82-83, 2014.
- 12) 大川鉄平, 島貫広志, 野瀬哲郎, 鈴木環輝, き裂進展解析による溶接構造物の疲労寿命予測, 新日鉄技報, No.392, pp.52-57, 2012.
- 13) 日本溶接協会, プラント圧力設備溶接補修指針, 2009.
- 14) 上野康雄, 藤平正一郎, 金裕哲, 繰返し荷重下にある鋼橋の溶接補修法の提案, 片山技報, No.32, pp.10-21, 2013.
- 15) 判治剛, 鋼橋に生じた疲労損傷に対する溶接補修技術の開発, J-BEC レポート, Vol.7, pp.6-13, 2012.
- 16) 三木千壽, 徳永皓平, 判治剛, 鋼橋に生じた疲労損傷に対する低変態温度溶接材料による溶接補修の試み, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.836-849, 2010.
- 17) 太田昭彦, 渡辺修, 松岡一祥, 志賀千晃, 西島敏, 前田芳夫, 鈴木直之, 久保高宏, 低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の疲労強度向上, 溶接学会論文集, Vol.18, No.1, pp.141-145, 2000.
- 18) 田井政行, 三木千壽, 鈴木啓悟, ハンマーピーニング処理による面外ガセットの溶接止端部の疲労強度改善, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.396-409, 2011.
- 19) S. Roy, J.W. Fisher, B.T. Yen, Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT), International Journal of Fatigue, Vol.25, pp.1239-1247, 2003.
- 20) 野瀬哲郎, 島貫広志, 重ね継手の疲労寿命に及ぼす超音波ピーニングの影響に関する実験および解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.737, pp.166-168, 2007.
- 21) P.S. Song, Y.L. Shieh, Stop drilling procedure for fatigue life improvement, International Journal of Fatigue, Vol.26, pp.1333-1339, 2004.
- 22) M.R. Ayatollahi, S.M.J. Razavi, H.R. Chamani, Fatigue life extension by crack repair using stop-hole technique under pure mode-I and pure mode-II loading conditions, Procedia Engineering, Vol.74, pp.18-21, 2014.
- 23) C.S. Shin, C.M. Wang, P.S. Song, Fatigue damage repair: a comparison of some possible methods, International Journal of Fatigue, Vol.18, No.8, pp.535-546, 1996.
- 24) S. Shkarayev, Theoretical modeling of crack arrest by inserting interference-fit fastener, International Journal of Fatigue, Vol.25, pp.317-324, 2003.
- 25) 石川敏之, 松本理佐, 服部篤史, 河野広隆, 山田健太郎, き裂表面閉口によるストップホール縁の応力集中の低減, 材料, Vol.62, No.1, pp.33-38, 2013.
- 26) 名嘉海人, 真壁朝敏, Md. Shafiul Ferdous, 笠井憲太, 内田晃治, 設備に発生したき裂の進展抑制に関して; 応急処置に対する実験結果, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, No.800, pp.497-506, 2013.

- 27) C. Makabe, K. Naka, M.S. Ferdous, Method of arresting crack growth for application at a narrow working space, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.1, No.6, pp.1-12, 2014.
- 28) 橋村真治, D.F. Socie, 軸直角方向振動下におけるボルト締結体のゆるみと疲労に関する研究, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.72, No.716, pp.1297-1304, 2006.
- 29) 橋村真治, 梅野慎一, 倉掛優, ボルト締結体における軸直角方向疲労強度への締結条件の影響, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.76, No.771, pp.1436-1443, 2010.
- 30) 橋村真治, 倉掛優, 梅野慎一, ボルト締結体における軸直角方向疲労強度予測法, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.76, No.772, pp.1659-1666, 2010.

第5章 結論

5.1 本論文の結論

本論文では、パッチに比べて取り付けが簡易である小型のクラックアレスターを用いた応急補修法として、ストップホールとクラックアレスターを併用したき裂進展抑制手法について検討した。また、パッチの適用が難しい段差部に対してクラックアレスターの適用性について検討した。各章で得られた結果を以下に示す。

第2章では、第3章以降で用いるストップホールについて検討をする上で参考にしたストップホール法に関する先行研究について、以下の2つの手法について紹介した。それらで得られている結果は以下の通りである。

1. ストップホールに補助穴を加工する手法について
 - (1) 数値解析の結果、ストップホールに加えて補助穴を加工した場合はその配置角度 θ によって、ストップホール加工のみの場合に比べ応力集中係数 K_t が低下する範囲と増加する範囲があることがわかった。
 - (2) 数値解析の結果、ストップホールの応力集中係数 K_t が最小となる補助穴の配置角度 θ は補助穴径 d_2 によって異なった。また、補助穴径 d_2 が大きいほうがストップホールの応力集中係数 K_t は低下した。
 - (3) 疲労試験の結果、ストップホールに加えて補助穴を加工した場合はストップホール加工のみの場合に比べて疲労寿命が延びた。また、補助穴径が大きい場合が最も疲労寿命は長かった。
2. き裂先端近くに加工した穴にピンを挿入する手法について
 - (1) き裂先端から外れた位置に穴を加工した場合、穴加工だけで延命効果はあまりなかったが、穴加工に加えピンを打ち込んだ場合は破断寿命の増加やき裂進展速度の低下、き裂進展方向の変化が生じた。
 - (2) 穴にピンを打ち込んだ場合、き裂先端から穴中心までの水平方向距離 X は破断寿命に大きく影響し、 X が大きい方が破断寿命は長かった。
 - (3) き裂進展経路に穴を加工してピンを打ち込むことでき裂進展方向が変化し、複数き裂の連結を防止できる場合がある。

第3章では、自動車生産設備に発生したき裂に対して、その進展を抑制するための応急補修法について検討した。実際の設備の状態に対応させて、試験片の片側だけにクラックアレスターを取り付け、それと通常ストップホール、ピン打ちストップホール、ボルト締めストップホールを併用した場合のき裂進展抑制効果について検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) き裂先端にストップホールを加工した場合のき裂進展抑制効果は、試験片のき裂形態により異なった。片側き裂試験片の場合、ストップホールのみ加工ではき裂進展抑

制効果はあまりなく、ピン打ちストップホールやボルト締めストップホールの場合でも効果は小さかった。

- (2) ストップホールとクラックアレスターを併用すると、き裂の発生寿命と進展寿命の両方に効果的であり、クラックアレスターの取り付け位置と締め付けトルクは、ストップホールからのき裂発生寿命に影響する。
- (3) クラックアレスターと併用した場合は、通常のストップホール、ピン打ちストップホール、ボルト締めストップホールのいずれも 10 万回の耐久限度目標までき裂は発生しなかった。それらのき裂進展抑制効果と現場での作業性を考慮した結果、実機へのき裂補修には主にボルト締めストップホールとクラックアレスターの併用を適用した。
- (4) 部材の片側面のみにはクラックアレスターを取り付ける場合は、反対面とのき裂発生寿命に差が生じるので注意が必要であると考えられる。
- (5) ストップホールとクラックアレスターを併用した場合のき裂進展抑制効果は、片側き裂試験片より両側き裂試験片の方が大きい結果を示した。

第 4 章では、段差部を有する板継手型試験片と溶接継手型試験片に対して、ストップホールとクラックアレスターを適用した場合のき裂進展抑制効果について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 板継手や溶接継手のような段差部近傍で発生したき裂に対して、ストップホールとクラックアレスターによる補修をする場合、平滑な面で補修する場合に比べてき裂進展抑制効果は低かったが一定以上の効果は確認できた。また、クラックアレスターの形状と取り付け方によって破断寿命の伸びが異なった。
- (2) 板継手試験片において、最もき裂進展抑制効果が高いのは、き裂面近傍にねじ穴を設けて帯び板に重なるようにクラックアレスターを取り付けたタイプ B の場合だった。その場合、クラックアレスターを用いないでストップホールだけを加工した Base の場合に対し、繰り返し最大応力 $\sigma_{\max}=75\text{MPa}$ では破断寿命が約 5 倍延びた。
- (3) 板継手試験片において、最もき裂進展抑制効果が低いのは、き裂面上にねじ穴を設け帯び板に接するようにクラックアレスターを取り付けたタイプ A だったが、繰り返し最大応力 $\sigma_{\max}=60\text{MPa}$ では繰り返し数 500 万回まで試験片は破断せず、低い応力域では有効であることがわかった。
- (4) 溶接継手試験片において、最もき裂進展抑制効果が高いのは、溶接ビードがない面にボルト・ナットを用いてき裂をまたぐ形でクラックアレスターを取り付けたタイプ C の場合だった。ただし、この場合は溶接ビードの裏側の平面を使った補修である。
- (5) 溶接継手試験片において、タイプ A, B ではタイプ B の方がき裂進展抑制効果が高かった。この場合、何も補修を行わない Base の場合に対し、繰り返し最大応力 $\sigma_{\max}=75\text{MPa}$ では破断寿命が約 26 倍延びた。
- (6) 溶接継手試験片において、クラックアレスターと溶接ビードの間にすきまがある場合、荷重負荷に伴いクラックアレスターに曲げ作用がかかるため、その影響を考慮したクラックアレスターの取り付けや設計が必要であると考えられる。

5.2 今後の課題

以上に得られた結果を基に、ストップホールとクラックアレスターを併用したき裂進展抑制手法について、以下のような課題があげられる。

- (1) クラックアレスターを平面や段差で用いる場合について、ボルト締結状態がクラックアレスターのき裂進展抑制効果に与える影響について詳細な検討を行う必要がある。
- (2) 板幅，き裂長さ，ストップホール径，クラックアレスターの寸法や取付位置，ボルトの導入軸力などの組み合わせを変えた場合，それらがき裂進展抑制効果に与える影響について，実験を行い詳細に検討する必要がある。
- (3) (2)で用いたパラメータを用いて，ストップホールの応力集中やき裂開口量について評価式の検討を行う必要がある。
- (4) (1)~(3)までの結果を踏まえて，本手法による応急補修の適用範囲を明確にする必要がある。
- (5) 試験片より先にクラックアレスターが破断した実験結果を踏まえて，取り付け状態や形状によっては，クラックアレスターがき裂発生や限界き裂進展量を検知できるセンサーとしても機能する可能性があり，その効果について検討する必要がある。