

ストップホールとボルト締め併用による疲労き裂抑制効果の評価

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 松佐 利治
(株)四国総合研究所 産業応用技術部 岩田 正純
(株)四国総合研究所 産業応用技術部 野口 新二

キーワード: ストップホール
疲労
き裂停留

Key Words : stop hole
fatigue
crack arrest

Evaluation of Fatigue Crack Suppression Effect by Combining Stop Hole Method and Bolting

Shikoku Research Institute, Inc., Industrial Application Technology Department
Toshiharu Matsusa, Masazumi Iwata and Shinji Noguchi

Abstract

In recent years, fatigue crack propagation events are prominent due to aging of structures. Therefore, the fatigue crack propagation rate and the characteristics of the progress path were clarified. Also, the relationship between crack opening displacement and load stress was calculated. These results are expected to be useful for estimating the cause of fatigue fracture.

The "stop hole method" is considered to be able to arrest crack propagation. It has already been applied as a life extension method. We examined the effectiveness of this method. As a result, by simultaneously using bolt tightening, crack propagation could be further arrested. In order to ensure the effectiveness of the combined method, the optimum thickness of the washer shape was examined.

1. はじめに

材料の高経年化により疲労き裂の発生やき裂の進展・成長が想定される。仮に、き裂が発見された場合でも、破損に至るまでの寿命を延伸することができれば応急処理として有効な手法となる。簡便な方法として、「ストップホール法」が使われることがあるが、その有効性や評価方法についてはあまり検討されていない。そこで、ボルト締め併用も含め、検討したので報告する。

2. ストップホール法について

ストップホール法とは、疲労き裂の先端に円孔をあける方法で、円孔端の応力はストップホールをあける前のき裂先端の応力に比べて、低減するため、疲労き裂の進展速度の低下、あるいはき裂の進展を停止させる効果が期待される。

日本鋼構造協会の疲労設計指針¹⁾によると、ストップホールをあけた部材の疲労強度は、ストップホールを楕円型長径側とする切欠き材と置き換えて、円底での局部応力を求め、疲労寿命を評価する方法がある。(図1)

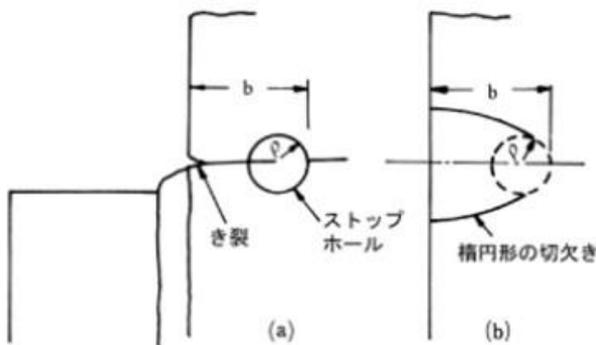


図1 ストップホールの応力集中計算モデル

3. 疲労き裂進展試験方法

3.1 試験片

図2に平板試験片の形状・寸法を示す。初期き裂として長さ30mmの放電加工スリットを片側に加工した。材質は一般的なSUS304ステンレス鋼である。板厚3mm、幅120mm、断面積 360mm^2 とし、四隅の円孔にピンを入れて治具に固定するピン方式とした。なお、ピンに荷重が集中し、ピンに疲労き裂が発生することが分かったため、途中(後述するTP07以降)からM14ボルトによるボルト締め方式に変更した。

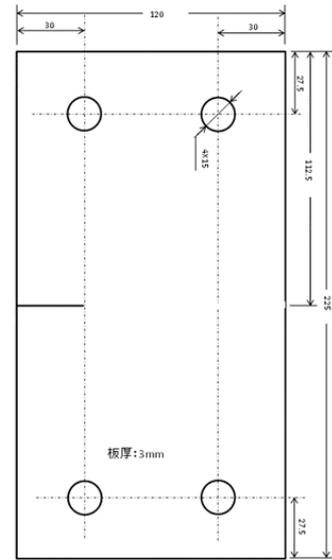


図2 疲労き裂進展試験 試験片

3.2 治具

図3に試験治具の形状・寸法を示す。図3では下側の治具を示しているが、同様な治具が上側にも取り付けられる。試験片を2枚の側板で挟みこみ、ピンあるいはボルトで結合する。側板の間隔は10mmで、試験片の厚みが3mmであるため、隙間を埋めるために、厚み3.5mmの平ワッシャーをピンの両側に入れて、試験片が治具の中心にくるように設定した。

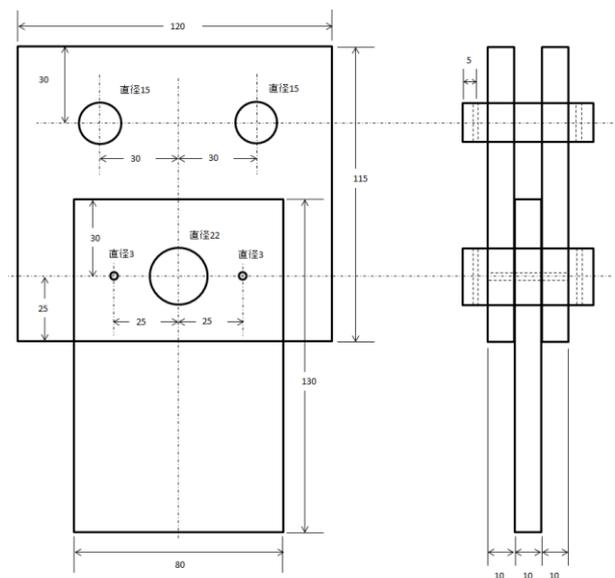


図3 疲労き裂進展試験用治具

3.3 試験荷重

疲労き裂伝ば速度やき裂伝ば経路に関するデータを蓄積し、試験条件を決定した。最大荷重 25kN、最小荷重 2.5kN、すなわち応力全振幅 $\Delta \sigma = 62.5\text{MPa}$ 、応力比 $R=0.1$ とし、荷重は 10Hz の正弦波を用いた。所定のき裂寸法まで進展させた後、進展対策として、下記の処理を施した。その後、試験を再開し、破断寿命を求めた。

- ・直径 12mm のストップホール加工
- ・さらに M12 ボルト締め

4. 試験結果

4.1 試験結果一覧

試験結果を表 1、図 4 に示す。

表 1 疲労き裂進展試験結果

試験片番号	ストップホールの直径	ストップホールの中心位置	ボルト締付け	破断(経過)回数
TP01	-	-	-	102,286
TP02	12mm	開口端より24mm	-	>1,000,000
TP03	"	開口端より60mm	-	103,452
TP04	"	開口端より40mm	-	102,174
TP05	"	"	M12ボルト バネワッシャー 締付トルク42Nm	>846,072
TP06	"	開口端より60mm	"	138,922
TP07	"	"	M12ボルト すべり止めワッシャー 締付トルク42Nm	118,324
TP08	"	"	M12ボルト 30D×5円板ワッシャー バネワッシャー 締付トルク50Nm	>800,000

特徴的な結果について、以下、記述する。

TP02：開口端から 24mm 位置に、直径 12mm の円孔を放電加工した。100 万回でもき裂の発生は無い。き裂が短く、円孔縁が滑らかなため、き裂が発生しなかったものと思われる。図 5 に放電加工孔の外観と 60 万回後の試験片全景を示す。

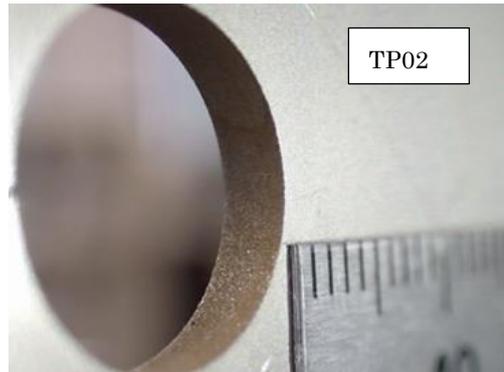


図 5 (a) 放電加工孔の外観

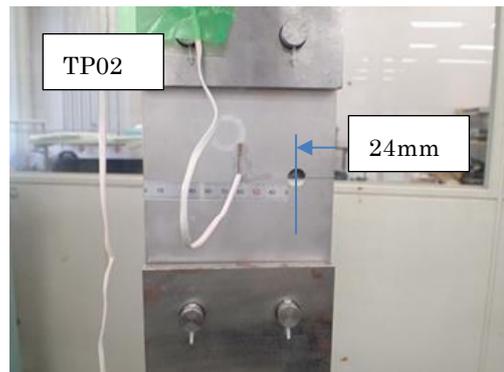


図 5 (b) 60 万回後の試験片全景

TP08：開口端から 60mm 位置に、直径 12mm の円孔をドリル加工し、M12 ボルト＋円板ワッシャー＋バネワッシャーで締めつけた結果、80 万回でも破断しなかった。TP01(対策なし)と比較して、約 8 倍以上の寿命延伸があり、効果は大きい。図 6 にボルト締付後およびボルトをはずした状況を示す。き裂側に摩耗粉が認められた。

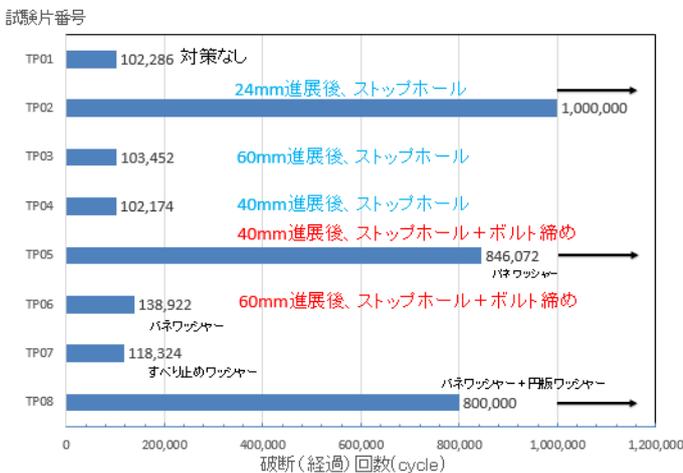


図 4 疲労き裂進展試験結果

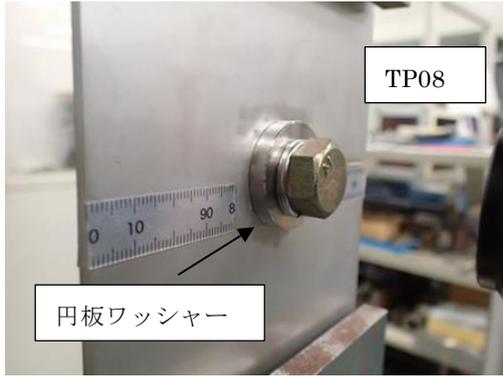


図 6 (a) 対策処理後の試験片

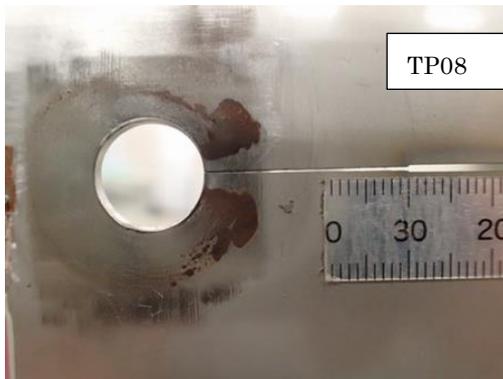


図 6 (b) 80万回後のストップホール

4.2 試験結果のまとめ

試験結果から得られた知見を以下に示す。

- ①き裂長さが比較的短い場合(板幅の 20%)は、放電加工孔が有効であるが、現実的でない(TP02)。後述するが、ドリル孔でも効果はありと推定。
- ②き裂長さが板幅の 33%、50%の場合は、ドリル孔のみでは有効でない(TP03,04)。
- ③き裂長さが板幅の 33%の場合は、M12 ボルトを用いて、締付トルク 42Nm で約 8 倍以上の寿命延伸が図られる(TP05)が、き裂長さが板幅の 50%になると、この手法は有効でなくなる(TP06,07)。ボルト締めを用いる場合は、き裂長さを考慮する必要がある。
- ④ボルト締めを用いるワッシャーとして、ボルト径の 2 倍以上で、厚みがある円板ワッシャーを挟み込んだところ、き裂長さが板幅の 50%

においても、80 万回以上の寿命延伸が認められた(TP08)。

5. 考察

5.1 ストップホール(ドリル孔)の有効性検討

切り欠き材の疲労強度 σ_{wk} は、平滑材の疲労強度 σ_w と切り欠き係数 β (ここでは、疲労強度低下係数 $K_f(=\beta)$ と表す) から、(1)式で求められる。

$$\sigma_{wk} = \sigma_w / \beta = \sigma_w / K_f \quad \dots (1)$$

また、図 7 にステンレス鋼について求められた応力集中係数 K_t と疲労強度低下係数 K_f の関係を示す²⁾。

この図から K_f が K_t に比例すると仮定すると、以下の関係が求められる。

$$K_f = 1 + (K_t - 1) * 0.6 \quad \dots (2)$$

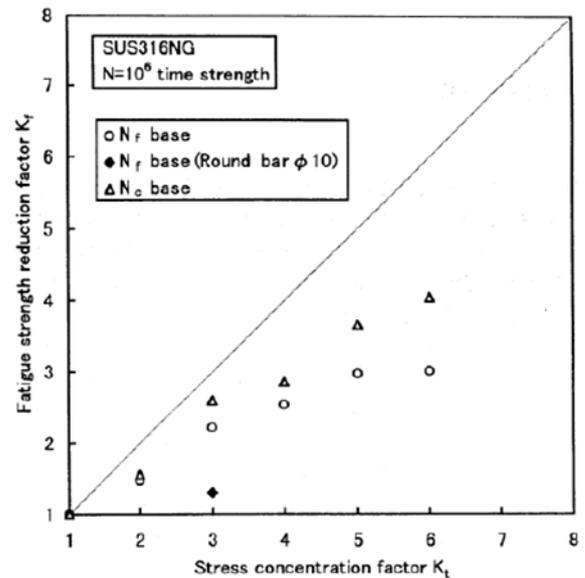


図 7 K_t と K_f の関係

したがって、ステンレス鋼の平滑材の疲労強度振幅と応力集中係数が分かると、切り欠き材の疲労強度は求められる。そこで、切り欠き材の応力集中係数を有限要素法により解析し、平滑材の疲労強度³⁾を $\Delta \sigma_w = 380 \text{MPa}$ とし、(1),(2)式の関係を用いて、円孔の中心位置の異なる平板の平均応力振幅と疲労強度の関係を求めた。計算結果を図 8 に示す。

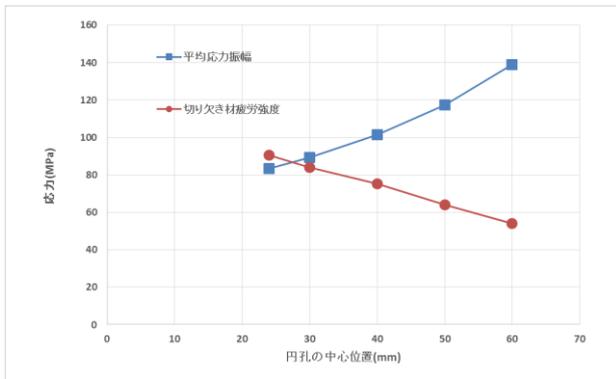


図8 平均応力振幅と疲労強度の比較

応力振幅が疲労強度を上回ると、き裂が発生し破壊することになる。したがって、図8において、赤線が青線を下回る範囲ではき裂が発生することになる。交点は約27mmとなることから、27mm以上ではき裂が発生する。

実験では、円孔位置が24mmの場合では、き裂が発生せず、円孔位置が40,60mmの場合にはき裂が発生した。図8の解析結果は実験結果とよく一致している。

以上から、ドリル孔のみでの対策が有効かどうかの判定を行う方法として、応力集中係数からの推定方法が有効であると考えられる。

5.2 ボルト締めによる有効性検討

円孔をあけた後、ボルトで締付ける工法について、通常のパネワッシャーのみで締付けた場合には、円孔の位置が40mmでは有効であったのに対し、60mmでは効果が無いという結果が得られた(図4のTP05,06,07)。このような差異がでた理由について考察を行った。

前項の検討結果から、疲労き裂の発生については、円孔縁の応力すなわち、応力集中係数から推定できる見通しを得た。この考え方をボルト締め状態に適用することとした。しかし、円孔縁の最大応力は、ボルトで締め付けられているため、ひずみゲージでの測定ができず、応力解析も難しい。そこで、円孔の位置によらず、開口変位と円孔縁応力の間に比例関係があることを解析から見出しているため、開口変位の測定から、円孔縁の応力を推定することを試みた。ここで、開口変位(d)とは試験片側端(開口端)における開口変化量の測定値である。

応力解析から、開口変位と円孔縁応力の関係を探し、開口変位から応力を推定する式を直線近似したものを図9に示す。

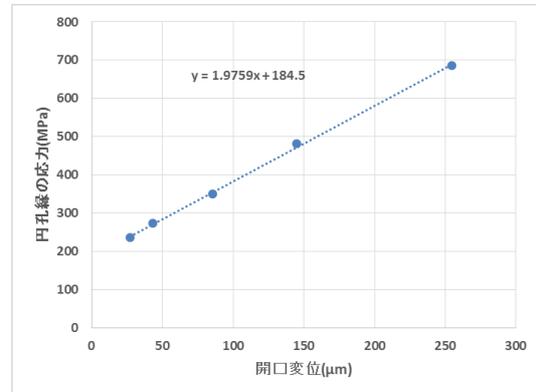


図9 開口変位と円孔縁の応力の関係

これによると、円孔縁の応力 σ_{max} は開口変位 d により、下記で求められる。

$$\sigma_{max} = 1.9759d + 184.5 \quad \dots (3)$$

以下に、ストップホール(円孔)をあけた後、ボルトで締付ける工法について、開口変位から、き裂進展対策の効果の評価するフローを示す。

- ① ボルト締めした状態で、疲労試験の最大荷重と最少荷重の差分の荷重 (F=22.5kN) を負荷した時の開口変位 (d) を測定する。
- ② 測定された d を(3)式に代入して、円孔縁の最大応力 σ_{max} を求める。
- ③ 最大応力 σ_{max} を平均応力 σ_m で除して、応力集中係数 K_t を求める。

$$K_t = \sigma_{max} / \sigma_m$$
- ④ K_t を(2)式に代入して、疲労強度低下係数 K_f を求める。
- ⑤ K_f を(1)式に代入して、切欠き材の疲労限度 $\Delta \sigma_{wk}$ を求める。
- ⑥ 平均応力範囲 $\Delta \sigma_m$ と切欠き材の疲労限度 $\Delta \sigma_{wk}$ を比較する。

- ⑦判定結果 $\Delta \sigma_m < \Delta \sigma_{wk}$ 、→対策効果あり
 $\Delta \sigma_m > \Delta \sigma_{wk}$ 、→対策効果なし

5.3 疲労延伸効果をもたらす有効な円板ワッシャーサイズ、締付トルクについての検討

今回の対策として用いた円板ワッシャーとして、直径 30mm、板厚 5mm を用い、締付トルク 50Nm とした場合に、寿命延伸効果の有効性が認められた。有効な対策を施すためには、円板ワッシャーサイズの選定が重要と考えられるため、ここでは、板厚および締付トルクを変えて有効性を検討した。

板厚が 1,3,5mm の円板ワッシャーについて、締付トルクを変えて、試験応力 62.5MPa を負荷した場合の開口変位を測定した。この結果を図 10 に示す。

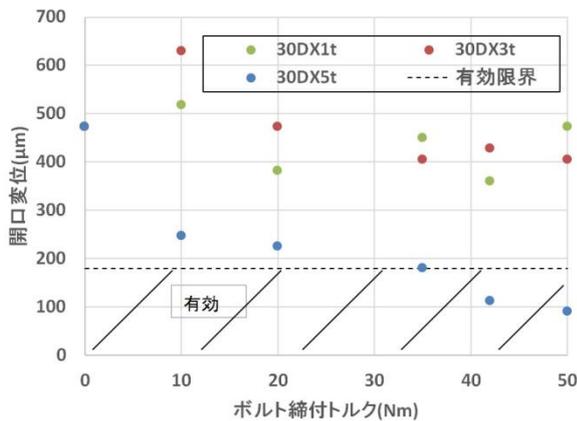


図 10 板厚の異なる円板ワッシャーを用いた場合の開口変位の測定値 ($\sigma = 62.5\text{MPa}$)

図 10 を見ると、締付トルクが大きいく程、開口変位は減少し、円板ワッシャーの板厚が 5mm の場合に効果が大きい。

先に示した(1)~(3)式を用いると、疲労寿命延伸効果をもたらす有効な開口変位を求めることができる。それによると、寿命延伸効果が期待できるのは、開口変位が $180\mu\text{m}$ 以下であった。図 10 によると、開口変位が $180\mu\text{m}$ 以下になるのは、円板ワッシャーの直径が 30mm で板厚 5mm を用いて、締付トルクが 35Nm 以上の場合であることがわかる。

開口変位を抑えるためには、ボルト締めにより円板ワッシャーと試験片が密着する必要がある。

円板ワッシャーの板厚を変えても、締付トルクが同じであれば、軸力はほぼ同じと考えられる。ところが、開口変位に大きな差が出ており、板厚 1,3mm では締付の効果が十分出ていない。

この理由を調べるために、ばねワッシャーと円板ワッシャーについて、試験片と接触する部分の面圧を締付けトルクを変えて、面圧測定シールを用いて、測定した。この結果を図 11(a)、(b)に示す。図より、ばねワッシャーではばねの隙間部分が完全に接触していないため、この部分はき裂開口の押さえ込みに有効でない。

また、円板ワッシャーでは、板厚が 1,3mm で締付トルクが低い場合には、面圧分布が均等ではなく、押さえ込みが不十分となり、有効でない。

一方、板厚が 5mm では、均等な面圧分布となり、全体をしっかりと押さえ込んでいるのがわかる。

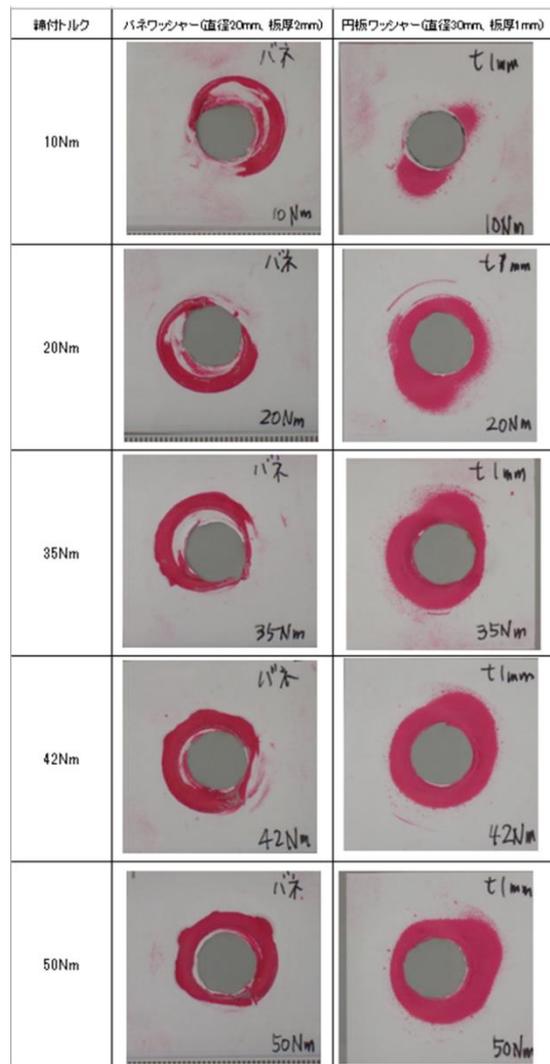


図 11(a) ワッシャーの面圧分布

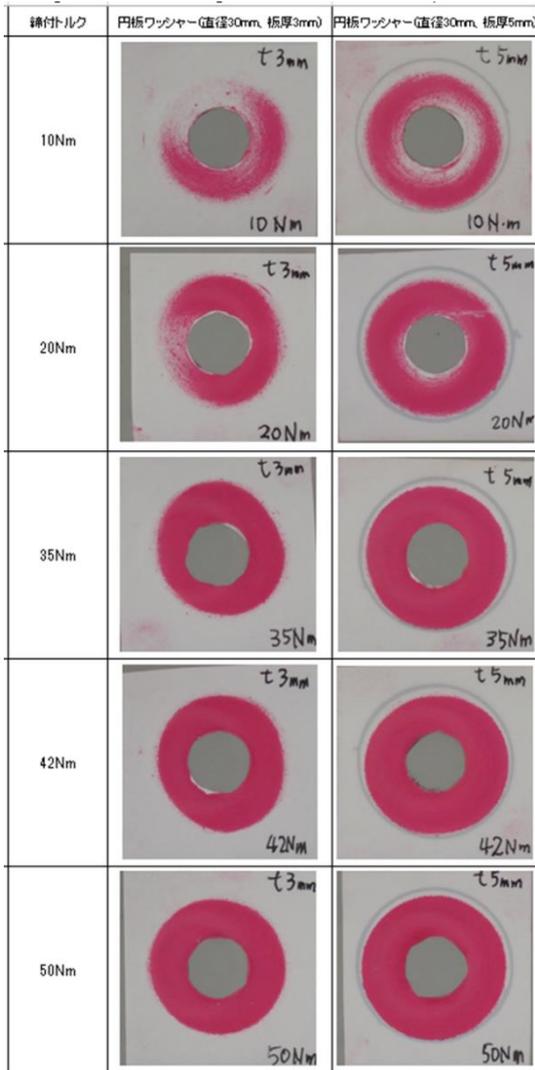


図 1 1 (b) ワッシャーの面圧分布

以上のように、円板ワッシャーの採用が有効であるが、これを用いる場合には、板厚の影響が大きいため、適切な板厚に設定しないと、寿命延伸効果は得られないことが判明した。

6. まとめ

ストップホールは有効であるが、き裂長さが長くなると、ほとんど効かなくなることがある。ボルト締めにより補強する手法についても、き裂長さや使用するワッシャーにより効果が異なることが明らかになった。

き裂の開口変位から疲労き裂発生の有無を評価する式を導出した。これを実験結果に当てはめたところ、寿命延伸効果を正確に評価できることがわかった。

ボルト締めには、円板ワッシャーで両側から挟

みこむ方法が有効であり、今回の試験条件では、直径 30mm、板厚 5mm の円板ワッシャーをボルト締付トルク 35Nm 以上で締付けた場合に有効性があると評価された。また、円板ワッシャーの板厚が薄い場合には、面圧分布が均一でなく、有効性が劣ることがあるため、円板ワッシャーの板厚の選定が重要であることがわかった。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 日本鋼構造協会：「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」，技報堂出版，p. 317(1993)
- 2) 日本溶接協会：「原子力機器用ステンレス鋼の疲労強度評価研究」，EFS 小委員会(2015)
- 3) 科学技術庁 金属材料技術研究所：「金属材料技術研究所 疲れデータシート」，No. 33(1983)