

第3編 片面施工用高力ボルトを用いたボルト止め  
ストップホール工法の疲労試験

### 第3編 片面施工用高力ボルトを用いたボルト止めストップホール工法の疲労試験

#### 目 次

1. はじめに	3-1
2. 試験内容・方法	3-2
2.1 試験方法	3-2
2.2 試験体および比較ケース	3-4
3. 試験結果	3-12
3.1 静的載荷試験結果	3-12
3.2 疲労試験結果	3-19
4. 破面観察	3-29
5. まとめ	3-31
6. おわりに	3-32

#### WG メンバー

明石 直光	((株)総合技術コンサルタント)
井上 崇	((株)東京鉄骨橋梁)
〈加々良直樹〉	((株)東京鉄骨橋梁 旧メンバー)
相田 亨	((株)ビーエムシー)
遠藤 輝好	((株)巴コーポレーション)
段下 義典	(川田工業(株))
〈岩田 祥史〉	(川田工業(株) 旧メンバー)
藤井 克紀	((株)ロブテックスファニングシステム)

## 1. はじめに

近年、車両の大型化や交通量の増加に伴い、鋼道路橋の疲労き裂に伴う補修・補強事例が増加している。これらの補修方法の一つに、ストップホールを高力ボルトで締め付けるボルト締めストップホール工法がある。この工法は、疲労き裂の先端にストップホールを施工して応力集中を緩和させ、高力ボルトで締め付けることによりき裂の進展を抑制する工法であるが、一時的な対応として用いられている。通常は、高力ボルトを使用し両面からの施工が必要となるため、トラス弦材や鋼床版のトラフリブなどの閉断面に発生した疲労き裂の補修では、新たに作業用のハンドホールを施工しなければならない。開口することによりダブリングの設置などが必要となり、構造検討や施工の手間が多くなるといった問題点が挙げられる。そこで恒久補修までの一時的な対応で片面からのボルト締めが可能であれば、大幅に作業を簡略化できる。

本研究では、片面のみ施工可能な状況を想定し、片面施工用高力ボルト（以下、ワンサイドボルトと呼ぶ）を用いたボルト締めストップホール工法の有用性について、疲労試験および静的載荷試験を行い、高力ボルトを用いた場合と比較することで確認することを目的とした。また、ストップホールの孔壁を曲面にグラインダ仕上げした場合についても、ワンサイドボルトを用いた場合との比較を行うため試験を行っている。具体的な着目点を以下に示す。

- ① ストップホールを高力ボルトで締め付ける工法と比較して、ストップホールをワンサイドボルトで締め付ける工法の有用性
- ② ストップホールの孔壁を曲面にグラインダ仕上げした場合と比較して、ストップホール（曲面仕上げ無し）をワンサイドボルトで締め付ける工法の有用性

## 2. 試験内容と方法

### 2.1 試験方法

本試験は、鉸桁の面外ガセット溶接部に発生する疲労き裂に着目し、き裂発生後のボルト締めストップホール工法を用いて再き裂の進展が発生するかを確認した。

載荷方法は、試験の目的であるワンサイドボルトと高力ボルトを比較すること、ストップホールのみケースがあることを考慮して、三点曲げ（単純梁の支間中央に載荷）とした。各ケースは、同じ応力レベルで比較を行うため、桁の中心から左右対称にガセットをすみ肉溶接にて設置した。

試験体の設置状況を写真-1に、ガセット部の状況を写真-2に示す。

試験機は容量 1250 kN の油圧サーボ疲労試験機を使用した。

#### (1) 静的載荷試験

静的載荷試験は、ボルト締めによる効果を確認するほか、疲労試験の開始前、および疲労試験開始後は繰返し回数 10 万回ないし 20 万回ごとに実施する。載荷は、0kN、30kN、130kN、221kN、330kN、412kN の順に荷重をかけた。これらの荷重に対するひずみは、2 ゲージコモンダミー法にて計測・記録する。

#### (2) 疲労試験

疲労試験は、最大荷重  $P_{max}$  を 412kN、最小荷重  $P_{min}$  を 30kN とし、繰返し速度は、0.7Hz～0.9Hz の範囲で行った。

#### (3) 磁粉探傷試験

繰返し回数 10 万回ないし 20 万回ごとの静的載荷試験と同時に磁粉探傷試験を行い、き裂発生の有無を調査した。磁粉探傷試験では、以下の機器を使用した。

(a) 蛍光湿式磁粉液 Sun WFA No. 200LP

(b) 極間式磁粉器 N-1B 型

(c) 携帯用ブラックライト S-100 型

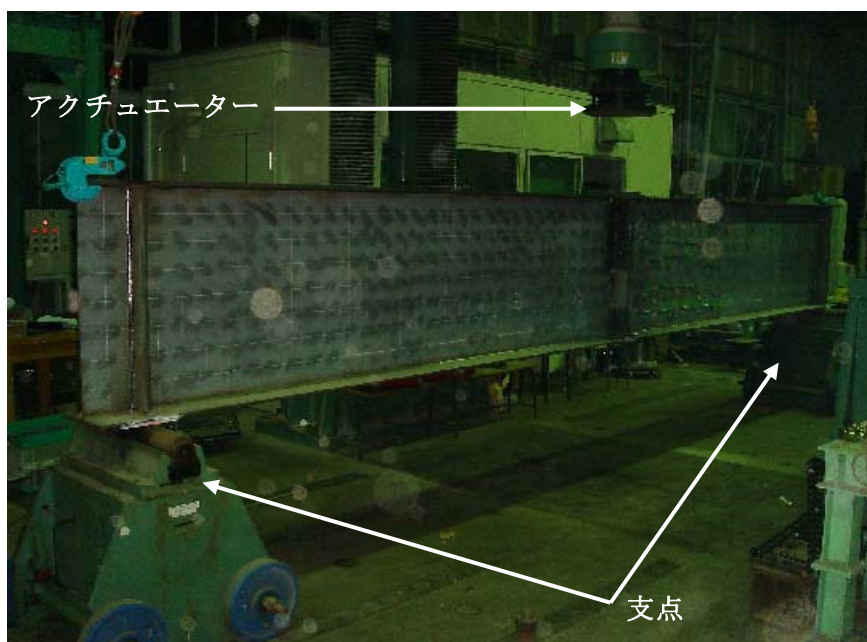


写真-1 試験体設置状況

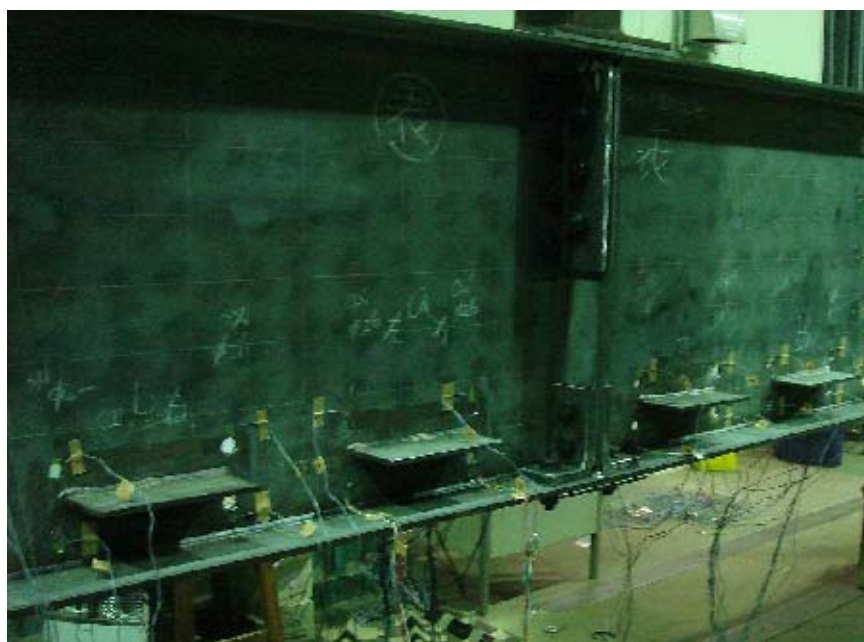


写真-2 試験体のガセット設置状況（ボルト締付け前）

## 2.2 試験体および比較ケース

試験体の形状および寸法を図-1に示す。試験体の材質は、上下フランジおよびウェブの主要部材はSM490YA、補剛材およびガセットはSM400Aを使用した。試験体は、支間が6000mm、桁高が800mmである。フランジとウェブの接合は、脚長7mmのすみ肉溶接とした。また、ウェブの片面に、板厚9mm、長さ250mm、奥行き100mmのガセットを桁中央から250mmピッチで設けた。なお、アクチュエーターから試験体フランジへの荷重伝達を均一にするため、載下点下に板厚10mmの鉛板を挿入した。設置状況を写真-3に示す。

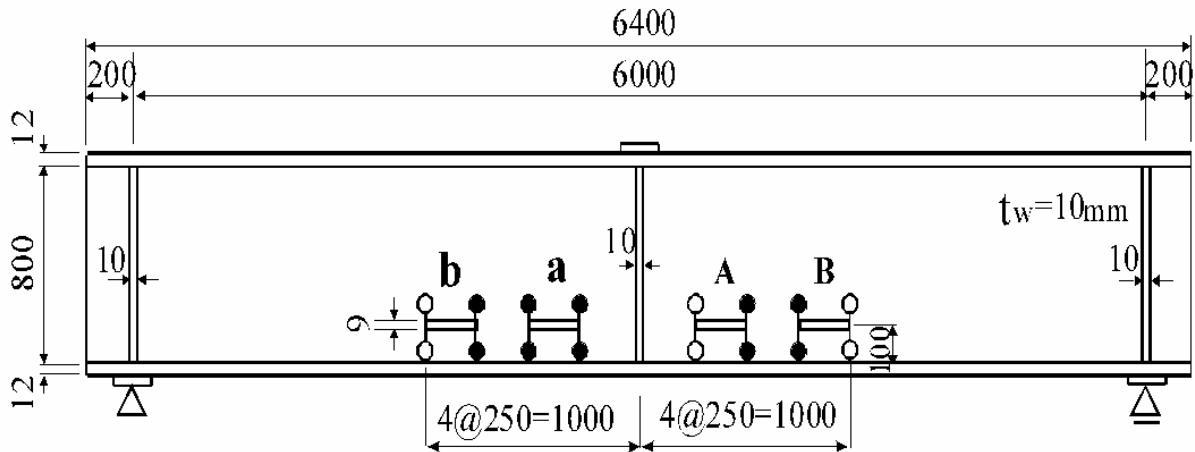


図-1 試験体の形状および寸法



写真-3 載荷点下の荷重伝達治具と鉛板

(1) 比較ケース

本試験での比較ケースおよび 412kN 荷重時の公称応力値、比較内容を表-1 に示す。

本試験は、ワンサイドボルトを用いてストップホールを締付けた場合のき裂再発生の防止効果を高力ボルトと比較することによって確認することを目的としているので、図-2 に示すように、荷重により発生する応力が大きい対称な位置にワンサイドボルトおよび高力ボルトを用いることとした（ケース1）。また、ワンサイドボルトとの比較として、グラインダによりストップホールを曲面仕上げしたもの（ケース2）や、ストップホールを曲面仕上げとはせずストップホール孔明け時に生じるバリを除去しただけのもの（ケース3）について、発生する応力度がケース1 より小さい位置にて、試験体の対称性を考慮し試験を行った。

表-1 比較ケースの公称応力値

		公称応力 (MPa)	比較内容
ケース1	OS1-HTB1	111	ワンサイドボルトとHTBの比較
ケース2	OS2-GR2	101	ワンサイドボルトとストップホールの表面曲面仕上げの比較
ケース3	OS3-SH3	91	ワンサイドボルトとストップホールのバリ取りのみの比較
ケース4	SH4-GR4	81	ストップホールの表面仕上げとバリ取りのみの比較

OS:ワンサイドボルト  
 HTB:ハイテンボルト  
 SH:ストップホール(バリ取りのみ)  
 GR:ストップホール(表面曲面仕上げ)

※公称応力はガセット端での値

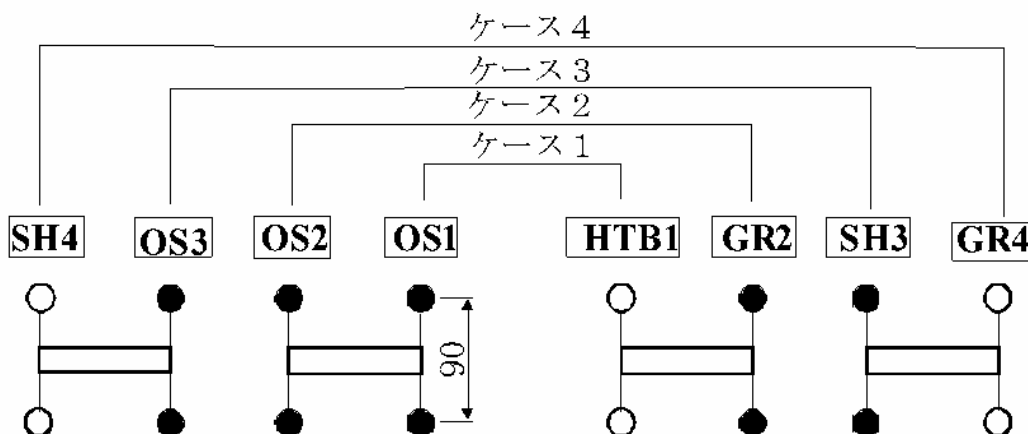


図-2 比較ケースの配置モデル

## (2) ストップホールおよび擬似き裂の導入

ストップホールおよび擬似き裂の作製モデルを図-2（高力ボルト）および図-3（ワンサイドボルト）に示す。

ストップホールは、ガセットのまわし溶接止端部に発生した疲労き裂を模擬した擬似き裂の両先端に孔明を行った。ストップホールの孔径は、高力ボルト用ストップホールが 22mm（高力ボルト M20 使用）、ワンサイドボルト用ストップホールが 26mm（ワンサイドボルト M24 使用）とした。また、孔明によって生じるバリは、グラインダにより表面が平らとなるようバリ取りを行った。ストップホールのグラインダによるバリ取り後の状況を写真-4 に示す。

擬似き裂は、上下のストップホールに電動カッター（セーバーソー）を用いて切目を入れた。き裂長さはストップホール中心で 90mm であり、き裂の幅は約 1mm であった。写真-5 に擬似き裂導入後の一例を示す。

また、グラインダによる孔壁部の曲面仕上げは、写真-6 に示す#120 のと石により形状を曲面に仕上げた後、#220 のゴムと石により孔壁部の表面を一様に滑らかに仕上げるようにした（写真-7）。

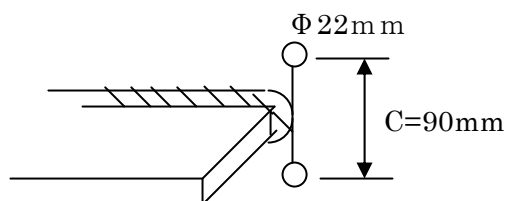


図-2 高力ボルト： F10T M20HTB

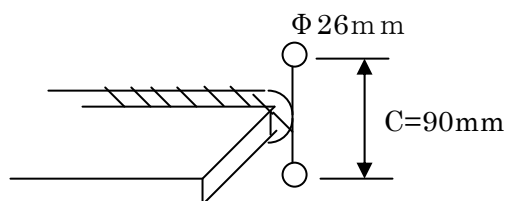


図-3 ワンサイドボルト： MUTF M24





写真-4 ストップホールのグラインダによるバリ取り後

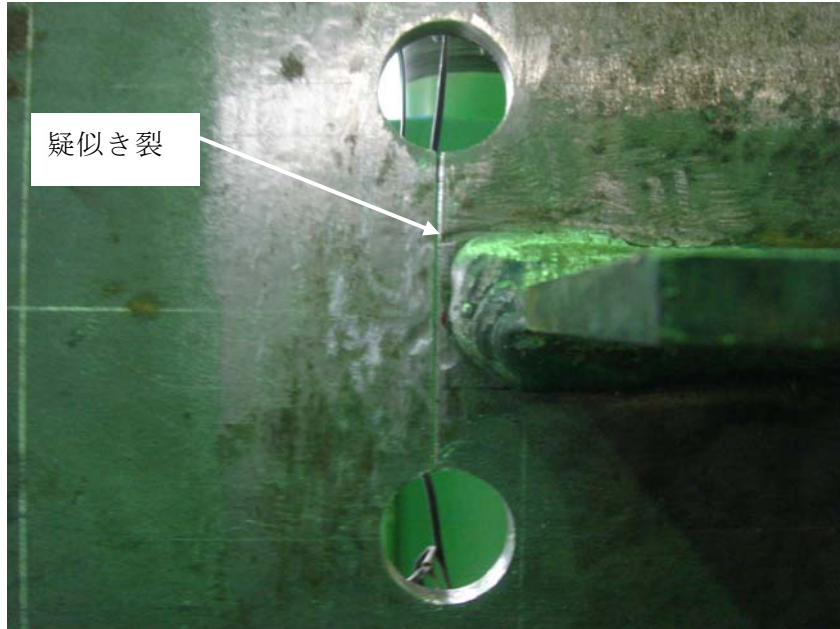


写真-5 ストップホールと疑似き裂



写真-6 孔壁の曲面仕上げに使用したグラインダ、と石

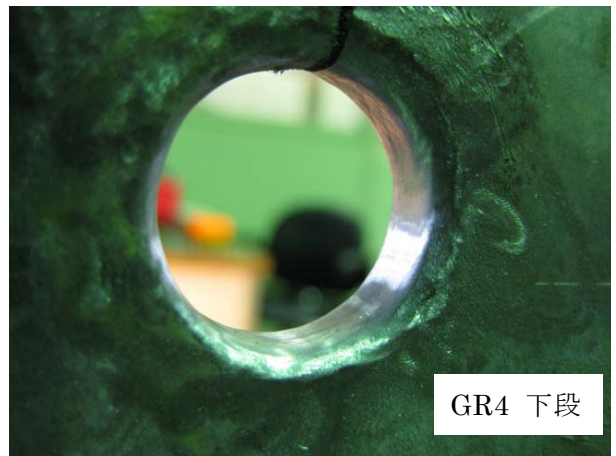
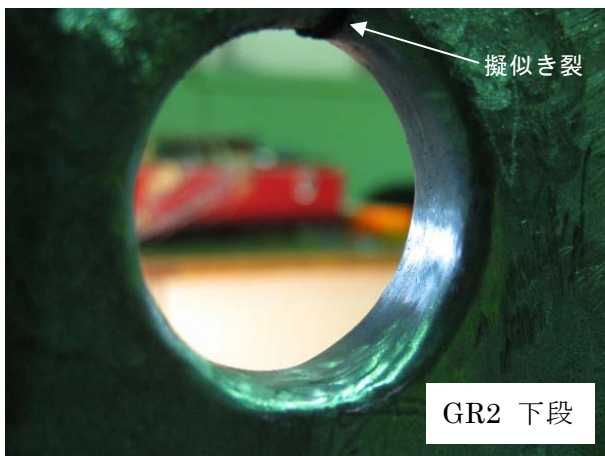
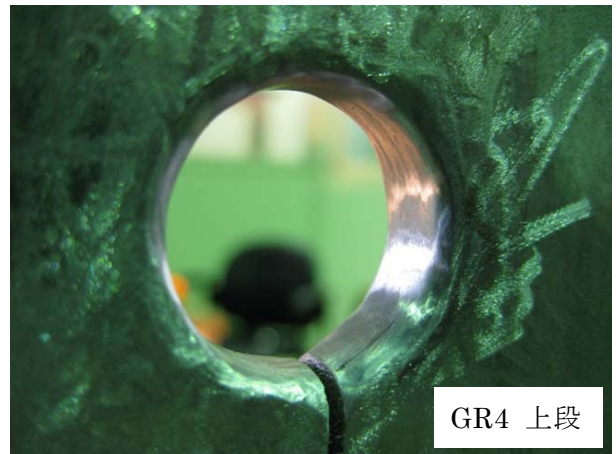
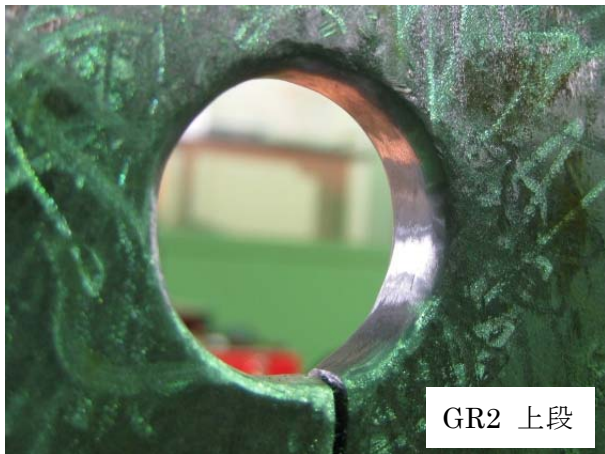


写真-7 孔壁の曲面仕上げ後

(3) 使用ボルトおよびボルト締め

使用するボルトは、ワンサイドボルトを M24、HTB を M20 (F10T) とし、ボルトの引張強さおよび設計軸力は近い性能となるようにした。ワンサイドボルトと HTB の性能比較を表-2 に示す。またワンサイドボルトの形状および各部の名称を図-4 に示す。

表-2 ワンサイドボルトと HTB の性能比較

		呼び径			
		M20	M22	M24	M27
引張強さ (kN)	F8T	196	243	283	368
	F10T	245	303	353	459
	ワンサイドボルト	195	—	263	377
設計軸力 (kN)	F8T	132	164	191	248
	F10T	165	205	238	310
	ワンサイドボルト	131	—	177	254



図-4 ワンサイドボルトの形状および各部名称

高力ボルト (F10T-M20) を締付けるにあたっては、芝浦電動ナットランナーを用いて標準軸力まで締付けた。M20 (F10T) を締付けるトルク値 T を以下に記す。

標準ボルト張力  $N = 18.2 \text{ ton}$

ボルト径  $d = 20\text{mm}$

トルク係数値  $K = 0.160$

$T = 0.160 \times 20 \times 18.2 = 58.2 \text{ (kgf}\cdot\text{m)}$

ワンサイドボルト (MUTF24) の締付けにあたっては、ワンサイドボルト専用シャーレンチを用いて締付けを行った。ワンサイドボルト締結後の状況を写真-8 (ナット側) および写真-9 (バルブスリーブ側) に示す。

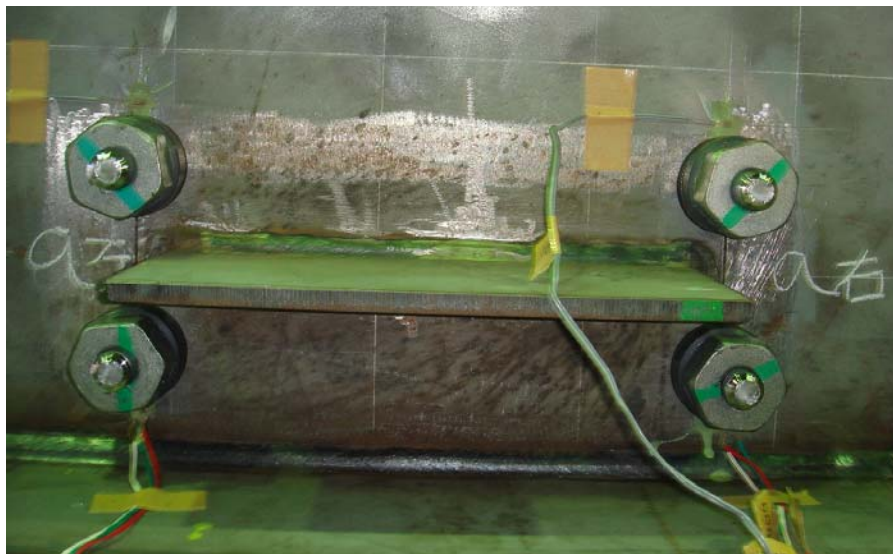


写真-8 ワンサイドボルト (ナット側)



写真-9 ワンサイドボルト (バルブスリーブ側)

#### (4) ゲージ貼付

梁の応力分布を調べるため、ひずみゲージ（単軸、長さ 5mm）を貼付した。ひずみゲージの貼付位置を図-5 に示す。なお、ゲージの貼付にあたり、鋼材表面に存在する黒皮をベルトサンダーで除去し、さらにサンドペーパー #100 および #320 にて表面仕上げを行った。また、静的載荷試験によるひずみ測定結果からもき裂発生の有無を調査するため、ストップホールおよびワッシャーの縁から 5mm の位置にひずみゲージを貼付した。

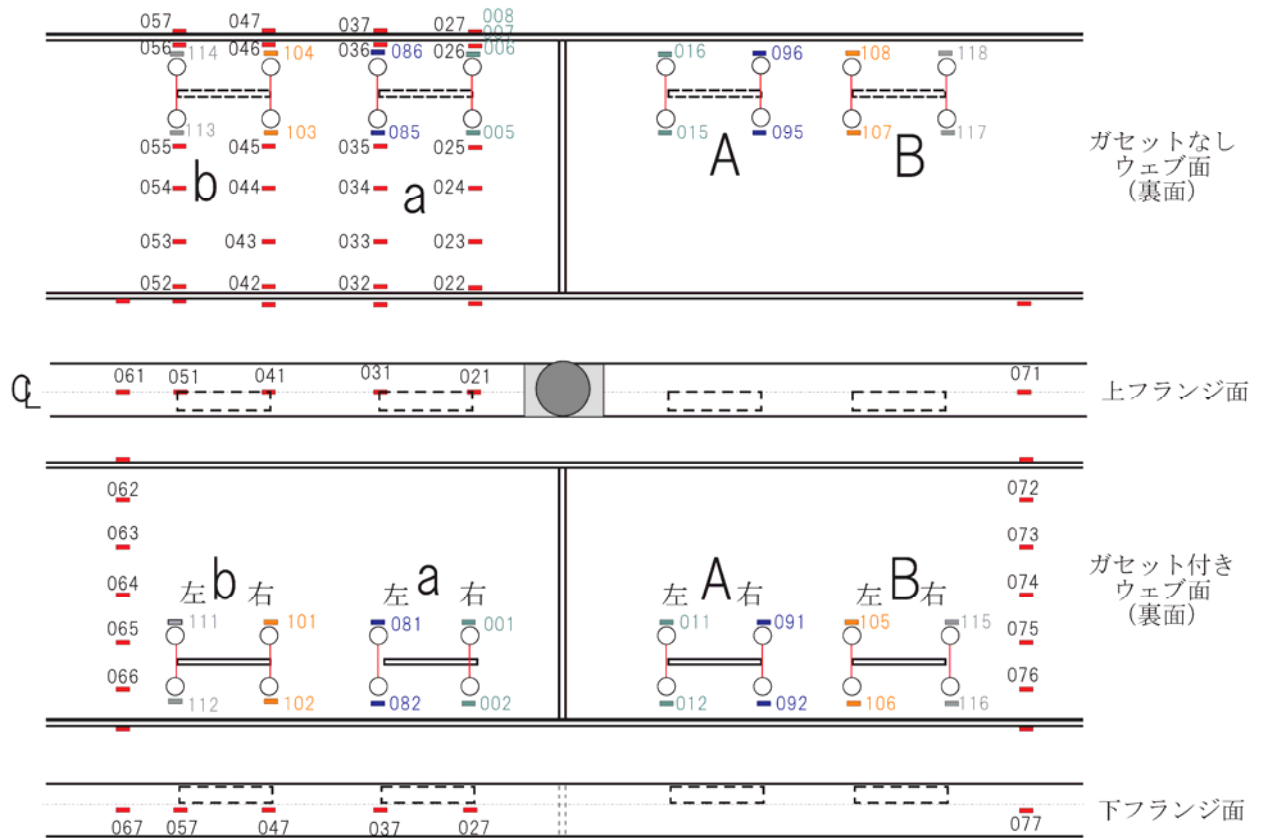


図-5 ひずみゲージ貼付け位置

### 3. 試験結果

#### 3.1 静的載荷試験結果

##### (1) ボルト締付け前後の静的載荷試験

ボルト締付け前後に行った静的載荷試験の最大荷重  $P=412\text{kN}$  時のガセット付きウェブ面（以下、ガセット側と記す）の応力値を図-6、ガセット裏側の応力値を図-7 に示す。図中の点線で囲まれたグループは、ボルト締付け前の測定結果であり、実線で囲まれたグループは、ボルト締付け後である。この結果より、以下のことが推察される。

- ・ 高力ボルトおよびワンサイドボルトのいずれにおいても、ボルトを締付けることにより、その近傍母材の応力を低減する効果がある。
- ・ 発生する応力は、ガセット側とその反対面であるガセット裏面にて若干の相違があるものの、大きな差は確認されない。
- ・ 擬似き裂やストップホールを作製する前の公称応力と比較すると、ストップホールを明け擬似き裂を設けた時のストップホール周辺の局部応力は、約2倍となった。

（孔明前の公称応力は上段で  $79\text{Mpa}$ 、下段が  $129.1\text{Mpa}$  に対し、ストップホールを明け擬似き裂を入れた後のストップホール近傍の局部応力は、上段で  $177.5\text{Mpa}$ 、下段で  $241.7\text{Mpa}$  であった。）

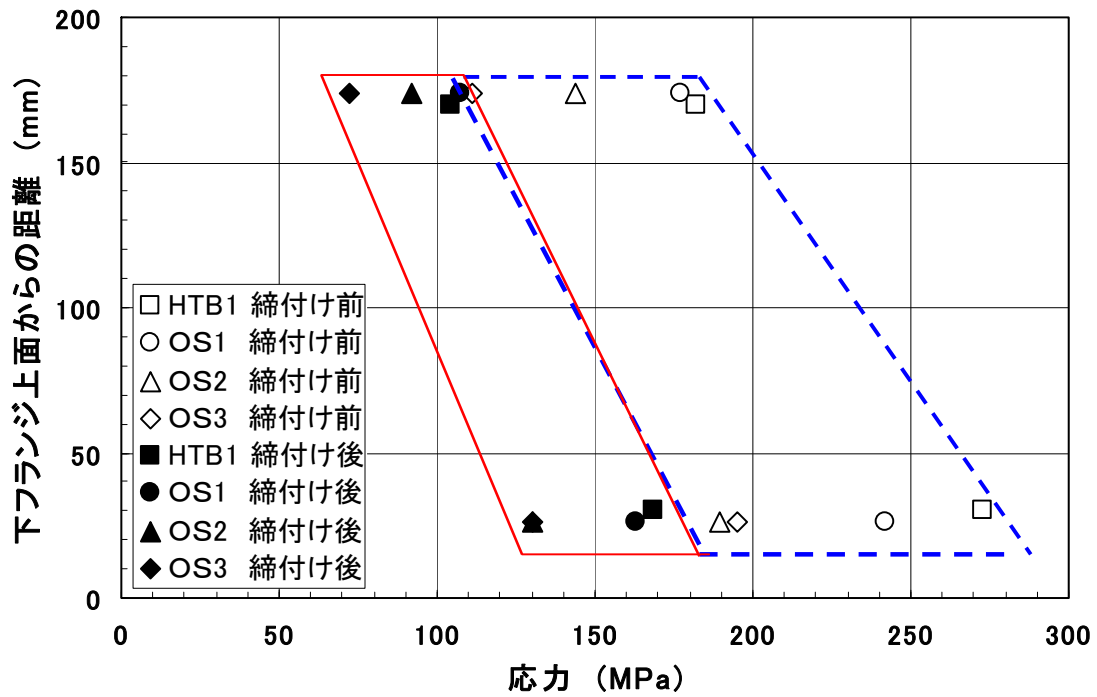


図-6 ボルト締付け時の応力（ガセット側）

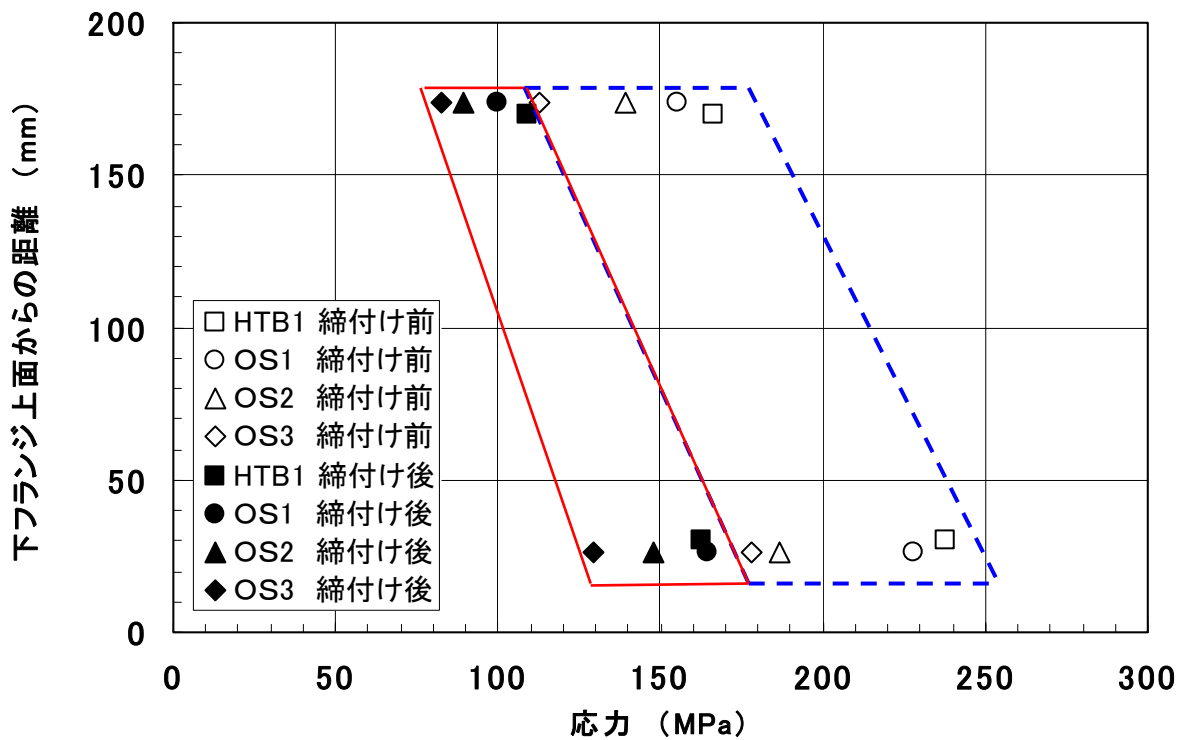
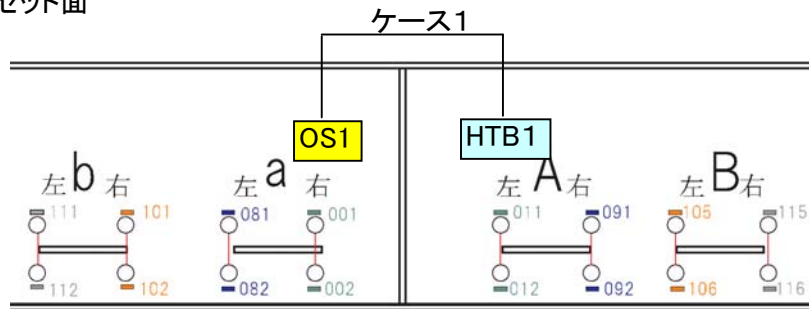


図-7 ボルト締付け時の応力（ガセット裏側）

ケース1：ワンサイドボルトと高力ボルトの比較結果

図-8 はケース1に着目し、締付前の応力に対する締付後応力の低減の程度を示したものである。

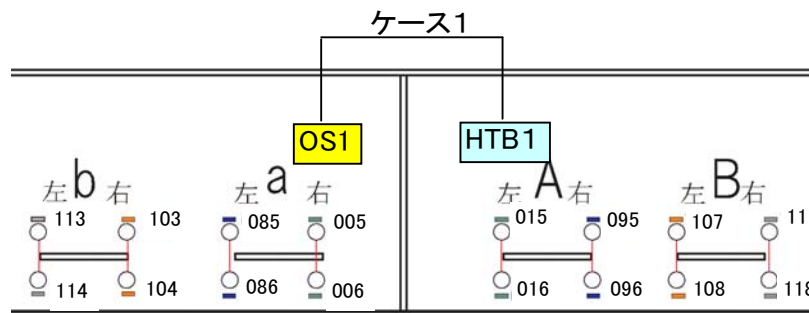
ガゼット面



			締付前	締付後	低減値	低減率(%)
OS1	上	001	177.5	107.1	70.4	60.4
HTB1		011	182.3	104.6	77.7	57.4
OS1	下	002	241.7	163.2	78.5	67.5
HTB		012	272.6	168.6	104.0	61.9

応力 (Mpa)

裏側



			締付前	締付後	低減値	低減率(%)
OS1	上	005	155.5	99.5	56.1	64.0
HTB1		015	166.3	109.2	57.1	65.7
OS1	下	006	227.6	164.4	63.2	72.2
HTB1		016	237.7	162.8	75.0	68.5

応力 (Mpa)

図-8 ケース1の比較

・締付前後の応力値の低減率を見ると、ワンサイドボルトは60～70%程度に対し高力ボルトは57～62%程度であり、高力ボルトの方が若干応力低減効果が高いことが分かる。



(2) 繰返し疲労試験における実験ケース 1~4 の応力変化

疲労試験 0 万回~107 万回 (破断時)までのストップホールおよびワッシャーの縁から 5mm の位置の繰返しにおけるケース 1~4 の応力変化を図-9、図-10、図-11、図-12 に示す。

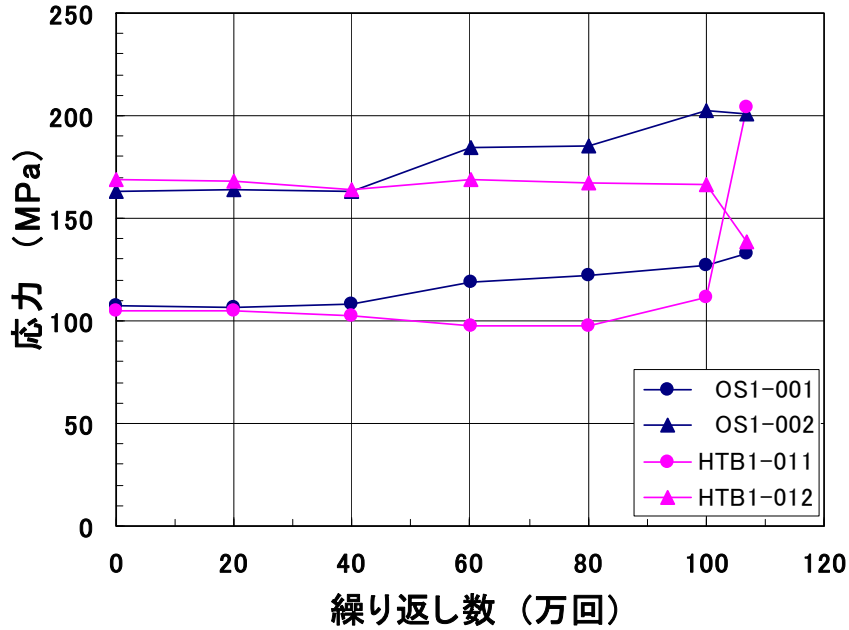


図-9-1 ケース 1 (ガセット側)

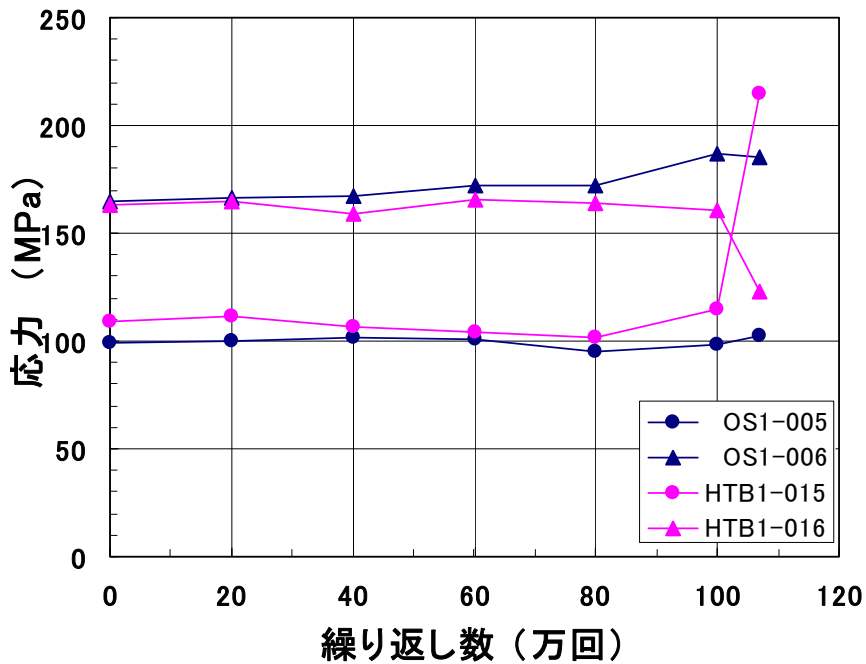


図-9-2 ケース 1 (ガセット裏側)

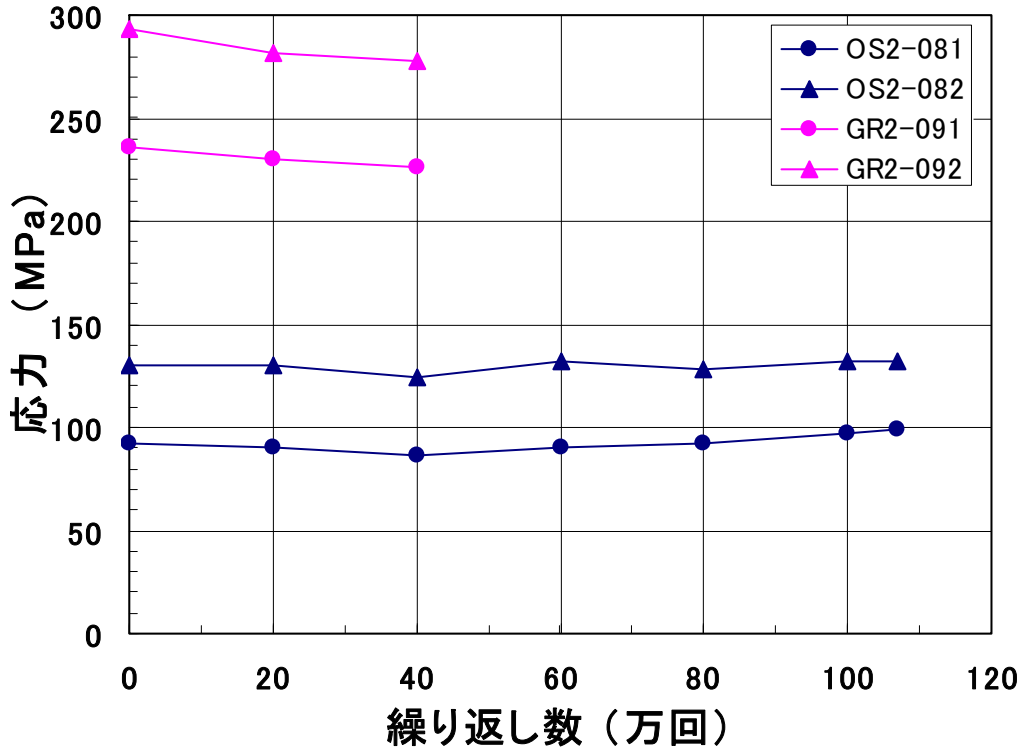


図-10-1 ケース 2 (ガセット側)

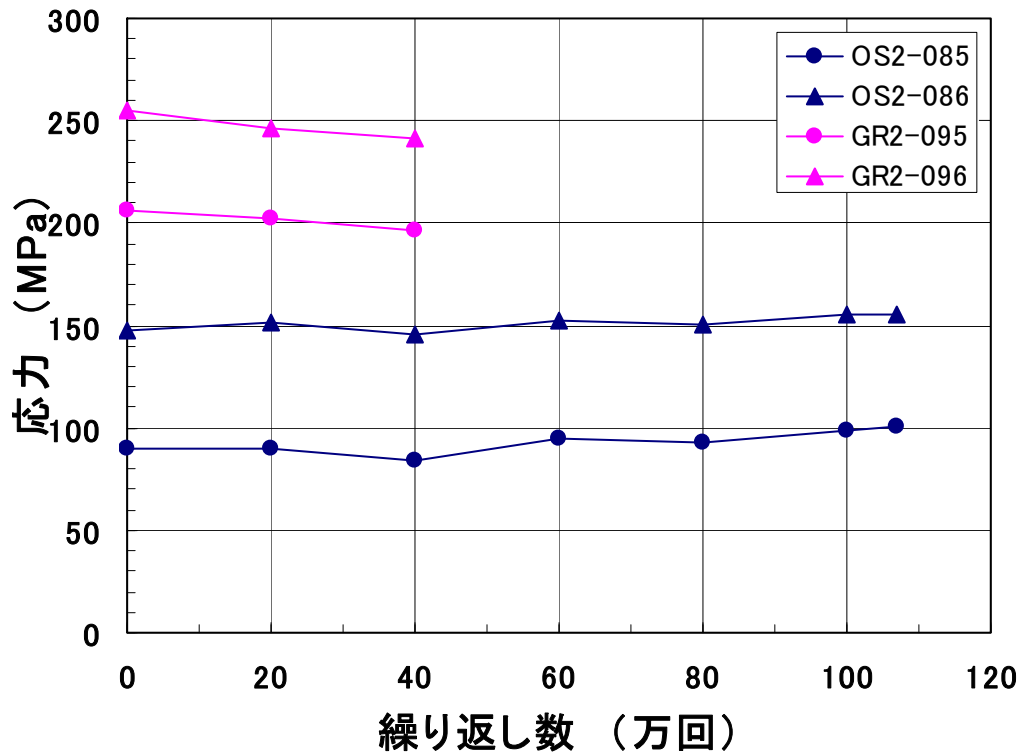


図-10-2 ケース 2 (ガセット裏側)

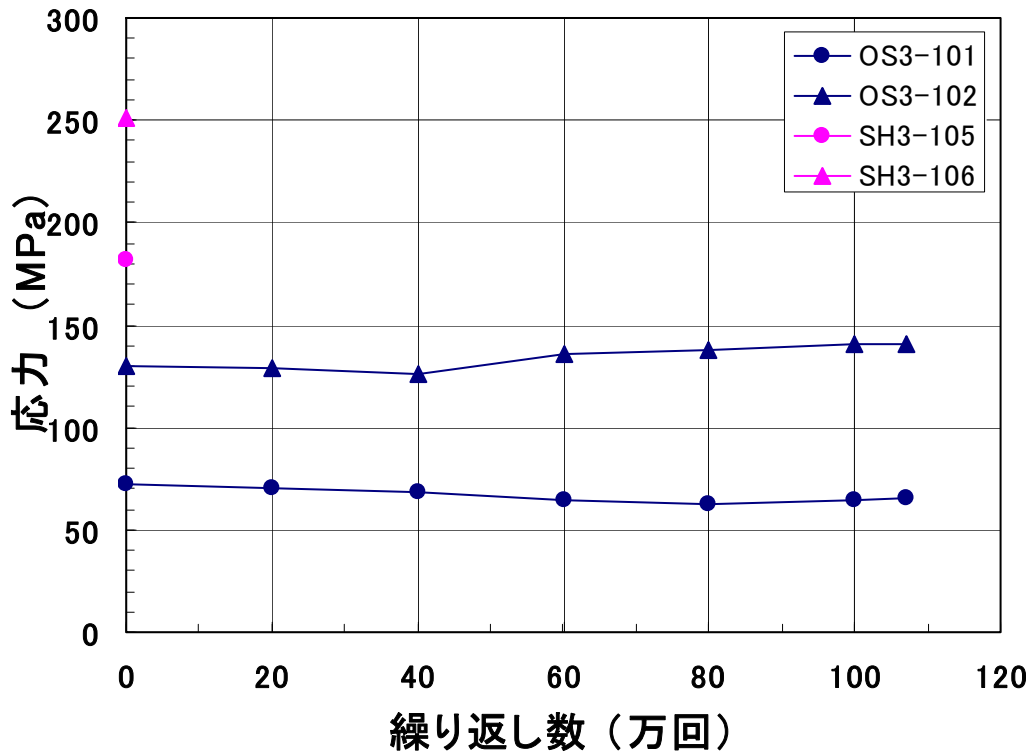


図-11-1 ケース 3 (ガセット側)

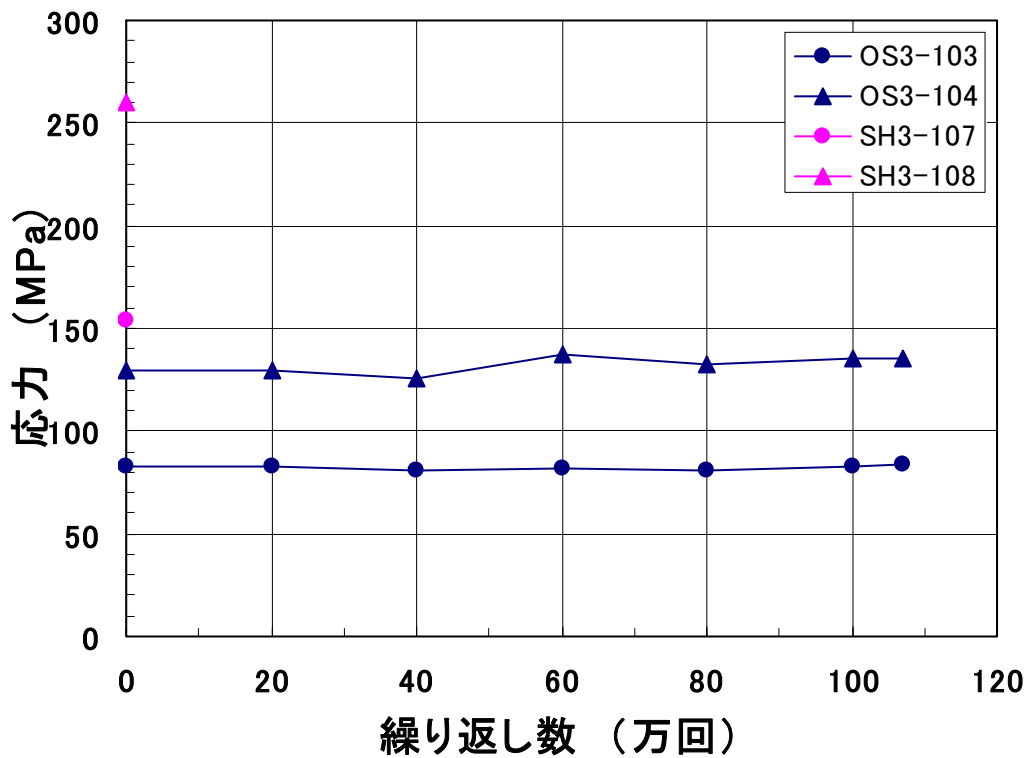


図-11-2 ケース 3 (ガセット裏側)

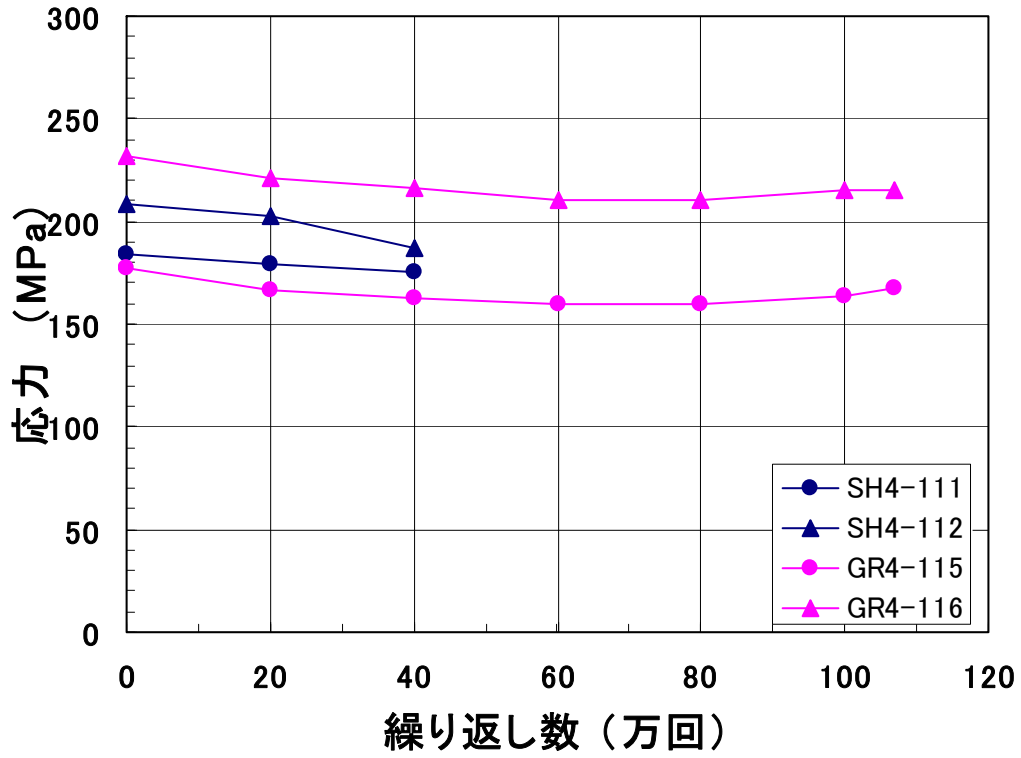


図-12-1 ケース 4 (ガセット側)

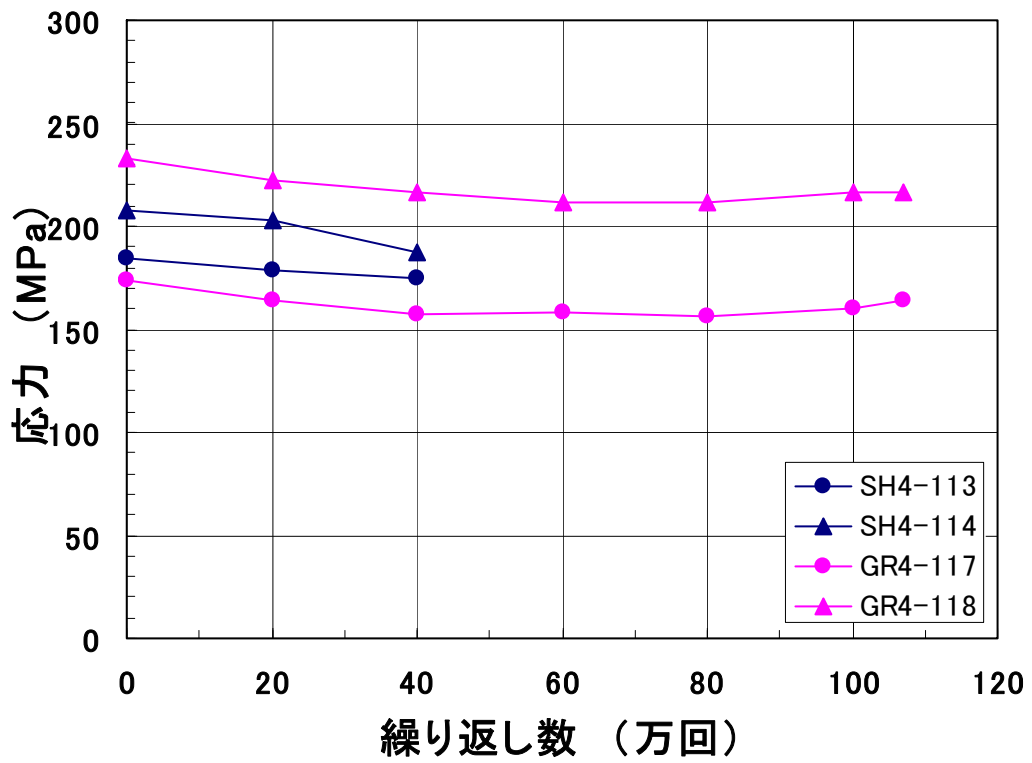


図-12-2 ケース 4 (ガセット裏側)

### 3.2 疲労試験結果

#### (1) 繰返し数 20 万回

20 万回の繰返し载荷後に、写真-10 および写真-11 に示すように、SH3(ストップホールのみ)に長さ 23mm の疲労き裂を確認した。この SH3 の疲労き裂は、孔の周囲を仕上げていないために、切削傷やバリが起点となって疲労き裂が発生したものである。このき裂については、以下の補修を行った。

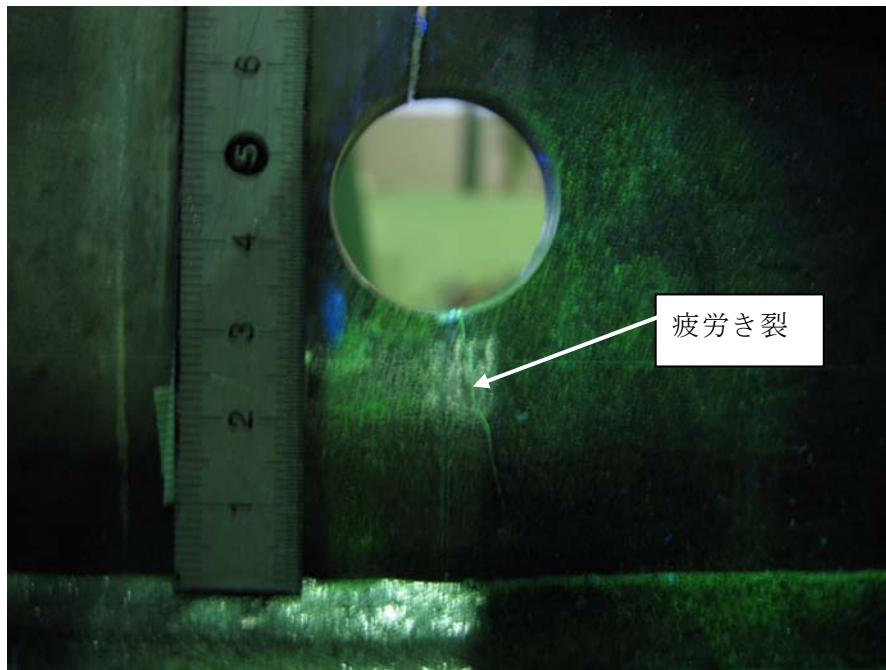


写真-10 SH3 に発生した疲労き裂

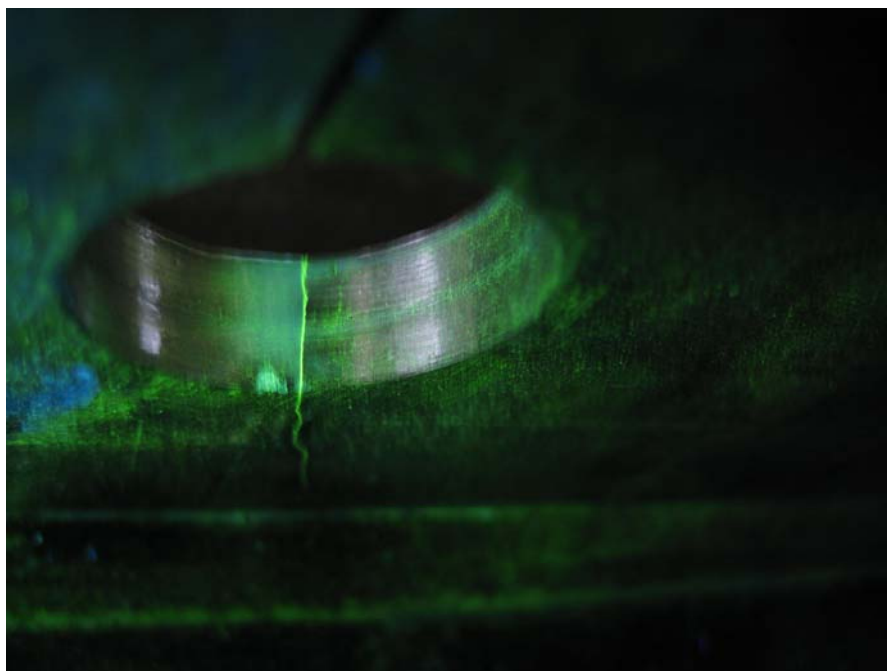


写真-11 SH3 のストップホール壁面

き裂先端に電動ドリルで 13mm のストップホールを明け、高力ボルトのねじの外径 16mm まで、グラインダで拡張し、ミニルーターMM50/D を用いて表面の研磨仕上げを行った。研磨の粗さは #120、#180、#220、#320、#400 の順番で使用した。研磨仕上げ後を写真-12 に示す。研磨したストップホールを、高力ボルト (F10T-M16) を用いたボルト締めストップホール工法 (以下 HTB-M16 という) で補修 (写真-13) し、疲労試験を継続した。

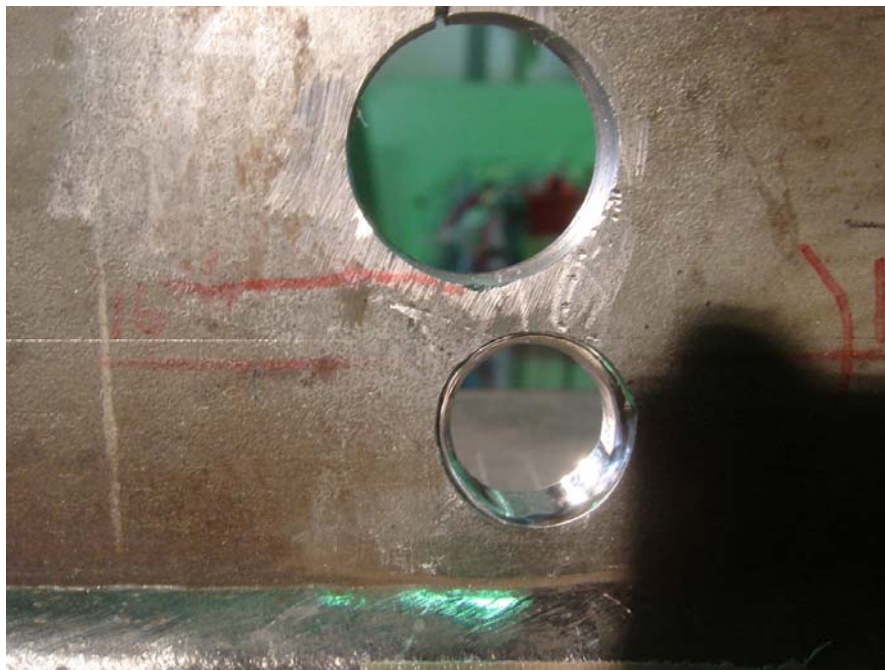


写真-12 SH3 のストップホール仕上げ状況



写真-13 SH3 の M16 によるボルト止めストップホール工法の補修

(2) 繰返し数 40 万回

40 万回の繰返し载荷後に、前述の M16 のワッシャー2 枚にき裂が確認されたので、ワッシャーを交換して疲労試験を継続した。

(3) 繰返し数 53 万回

53 万回の繰返し载荷後に、SH4(ストップホールのみ)に 10mm、GR2(ストップホールに表面仕上げを行った)に 7mm の疲労き裂を確認したため、これらのき裂に HTB-M16 工法による補修を行った。GR2 の疲労き裂を写真-14、SH4 の疲労き裂を写真-15 に示す。

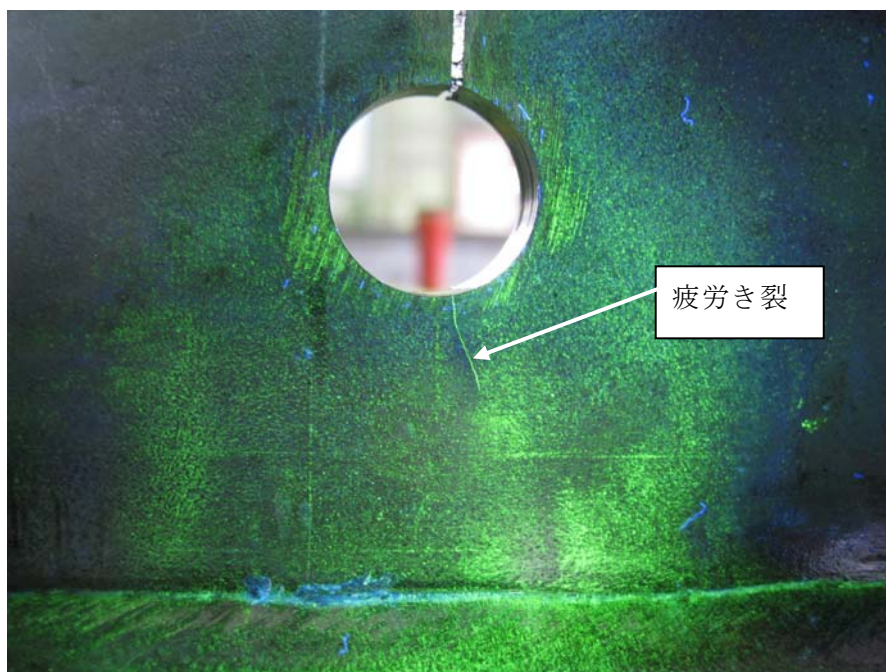


写真-14 GR2 の疲労き裂

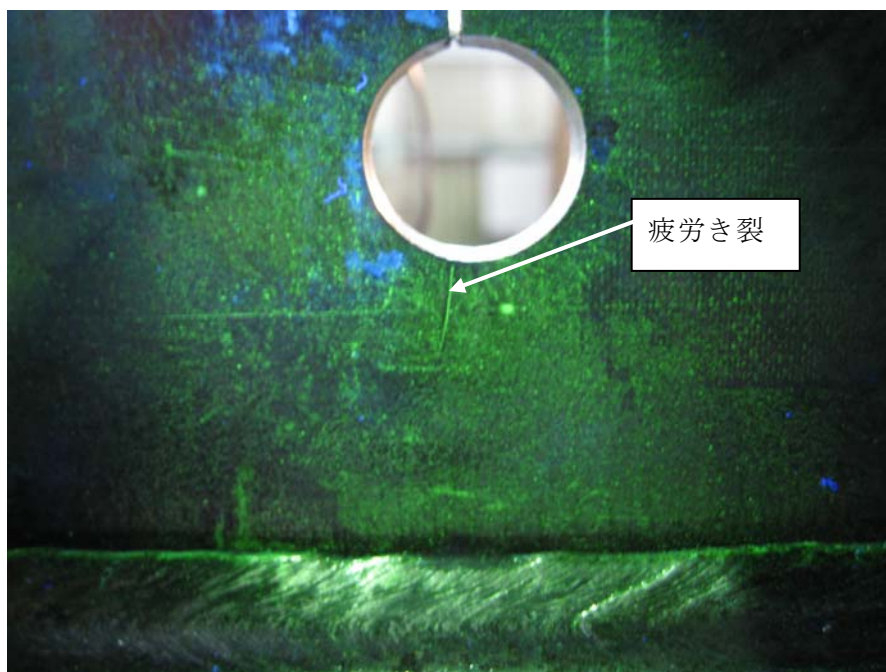


写真-15 SH4 の疲労き裂



#### (4) 繰返し数 60 万回での補修

60 万回の繰返し載荷後に、HTB1 のナット側 (写真-16) およびボルト頭側 (写真-17) のワッシャー、OS1、OS2、OS3 のフィルターワッシャー (写真-18)、およびバルブスリーブ (写真-19) にき裂を確認した。

これらは、繰返し荷重を受けるウェブに導入した疑似き裂の開閉口挙動によりウェブと、フィルター、バルブスリーブ、およびワッシャーとの間に摩擦が生じ、フレッチング疲労によりき裂が発生したものと考えられる。図-9 のグラフから、繰返し数 60 万回以降ワンサイドボルトの応力値が増加傾向にある。この原因として、ワンサイドボルトのバルブスリーブにき裂が生じたことにより、ワンサイドボルトの軸力抜けが発生し、ボルトの締付け効果が低下したものと考えられる。これに対して高力ボルトでは、座金にき裂が生じても周辺母材の応力は上昇せず、この状態に至っても締付け効果が保持されていると推察される。

また、40 万回の繰返し載荷後に補修した SH3 の高力ボルト (F10T-M16) のナット側のワッシャーに疲労き裂が再発生した。



写真-16 HTB1 ナット側ワッシャーの疲労き裂

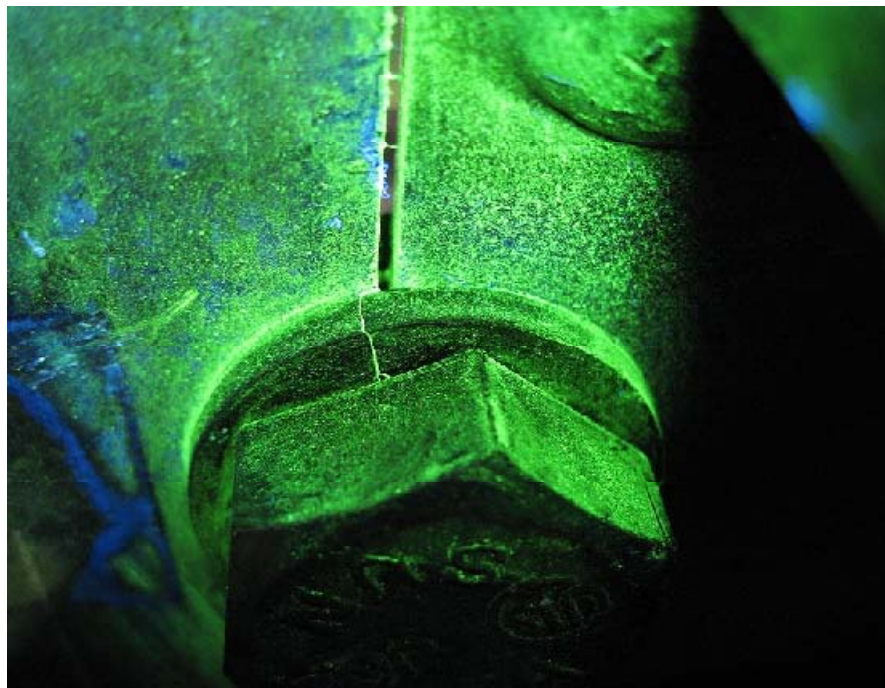


写真-17 HTB1 ボルト頭側ワッシャーの疲労き裂

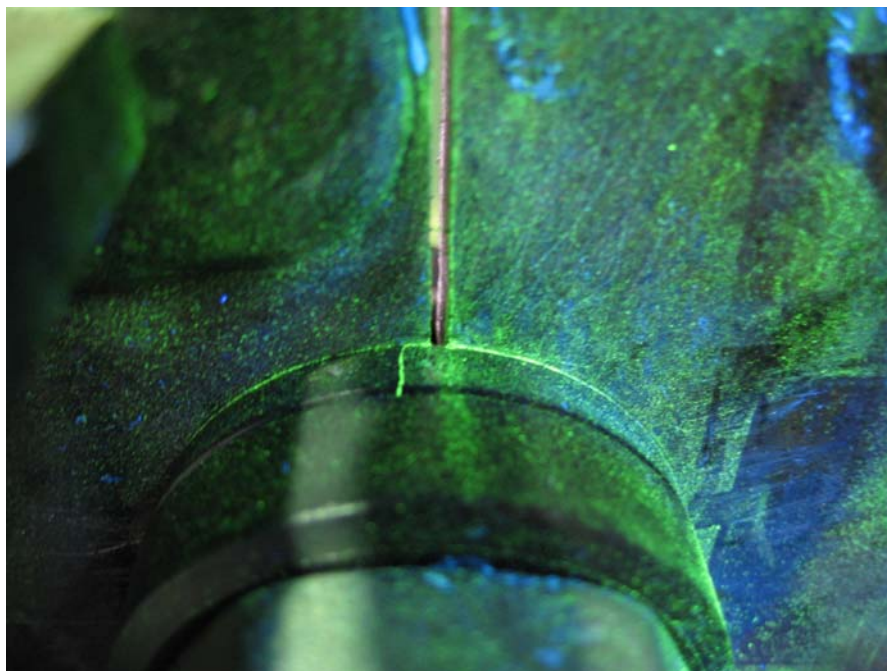


写真-18 OS1 フィラーワッシャーの疲労き裂

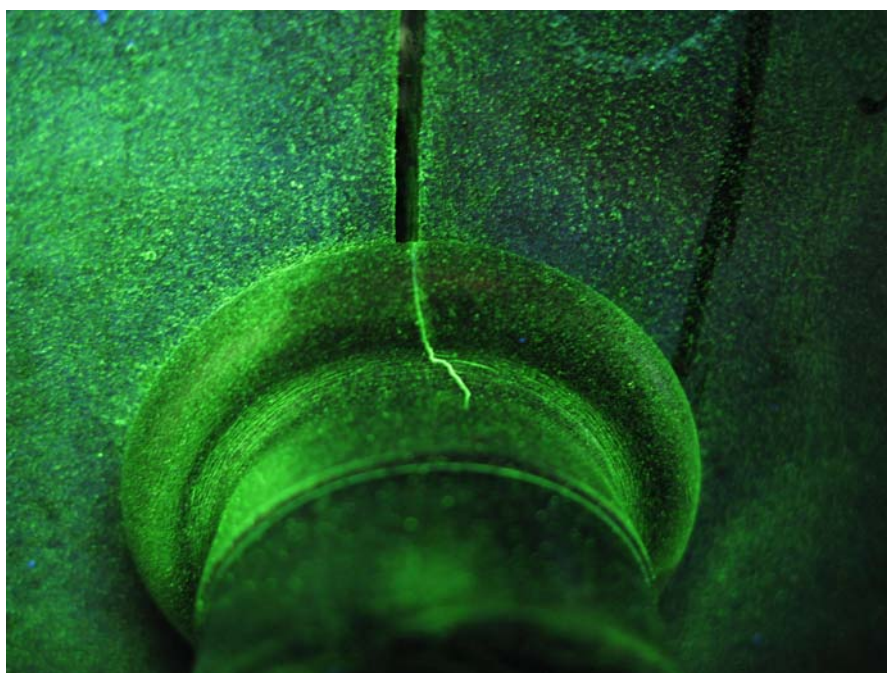


写真-19 OS2 バルブスリーブの疲労き裂

### (5) 下フランジの破断

試験体は、108万回の繰返し载荷後、写真-20、21に示すように破断した。破断の起点となった疲労き裂は、下フランジとウェブのすみ肉溶接から発生した。この疲労き裂は、下フランジを破断させるとともに、ウェブを伝達し、ガセット溶接ビードにぶつかり、そこから支間中央側に向かって溶接ビード上を水平方向に進展後、HTB1の擬似き裂に伝わり、ウェブの中立軸に向かって急速に進展した。き裂発生起点は、写真-22～24に下フランジとウェブのすみ肉溶接のルートからと考えられる。



写真-20 鋼桁破断全景

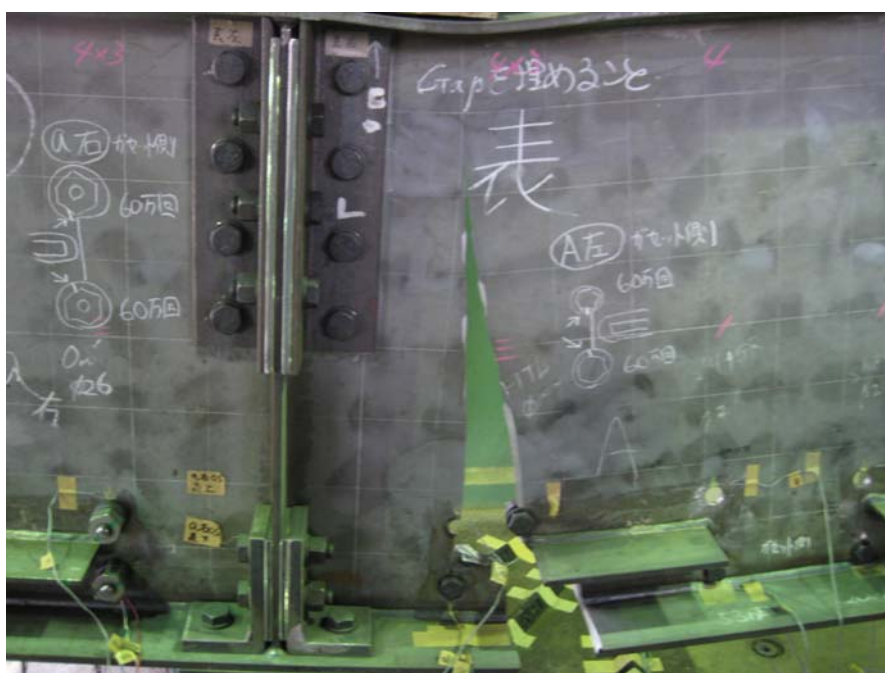


写真-21 鋼桁破断（ガセット側）

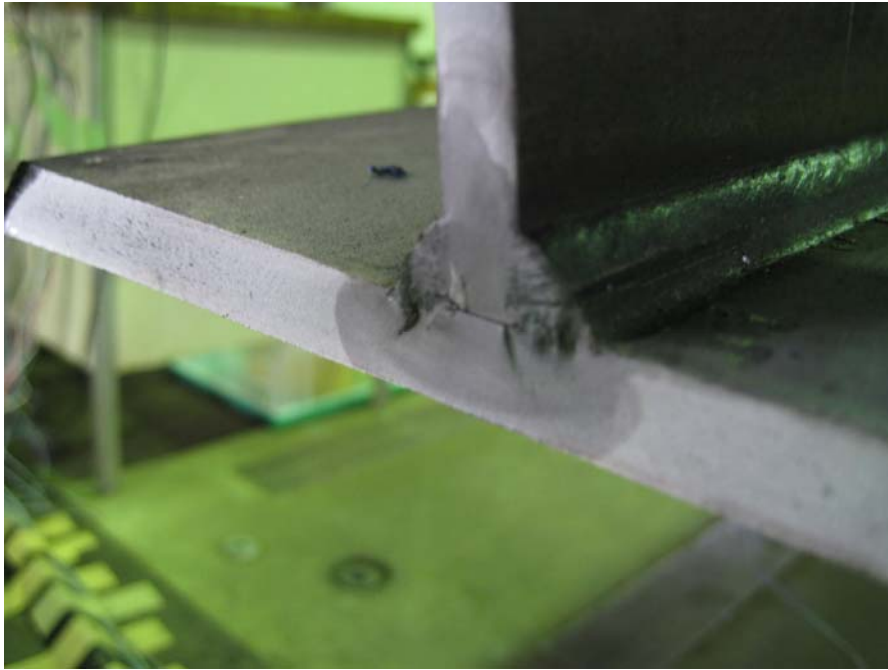


写真-22 鋼桁破断下フランジ



写真-23 鋼桁破断下フランジ（切出し）



写真-24 鋼桁破断下フランジ (拡大)



写真-25 鋼桁破断面切出し

#### 4. 破面観察

写真 16 から写真 19 に示される HTB のワッシャーおよびワンサイドボルトのバルブスリーブに発生したき裂について、走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope 以下 SEM と呼ぶ）を用い破面観察を行い、き裂の原因の究明を試みた。

観察する面は、ワッシャーと桁の接触面とし、ワッシャーがどのような状態かを考察する。

写真-26 はワッシャーを取り出し SEM に設置するために切断した写真である。発生した亀裂を中心に両側 7mm 程度の箇所を切断した。

写真-26 の切断片で 2000 倍に拡大した接触面を写真-27 に示す。写真-27 の (b) は、(a) の写真に、こすれ傷(緑線)とき裂(赤線)を記入した写真である。

緑線のこすれ傷は、ワッシャーと桁 (web) に微少な相対的すべりが生じた痕跡と考えられ、それに直交する形状でき裂 (赤線) が生じている。写真-27 の状態はき裂の初期状態と考えられ、これらの無数の初期き裂の中で応力が集中した箇所がき裂として進展すると考えられる。

このようなわずかなすべりが繰り返されて表面が損傷することをフレットング摩耗と呼び、機械工学などで研究が進められている。フレットング摩耗からさらに応力が作用することでフレットング疲労となり、疲労き裂が発生する。

本研究でのワッシャーやバルブスリーブに生じたき裂もフレットング疲労によって発生したものと推測される。

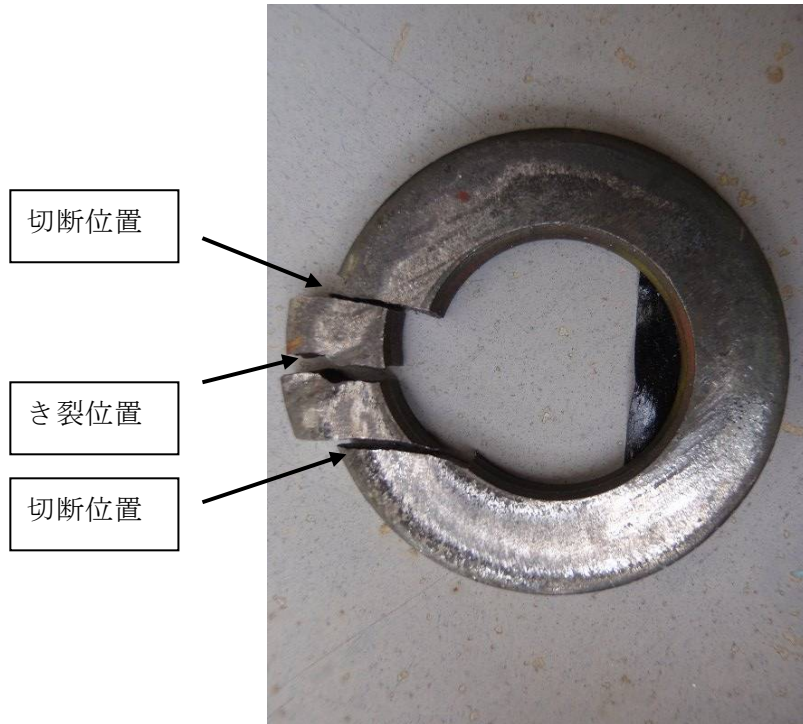
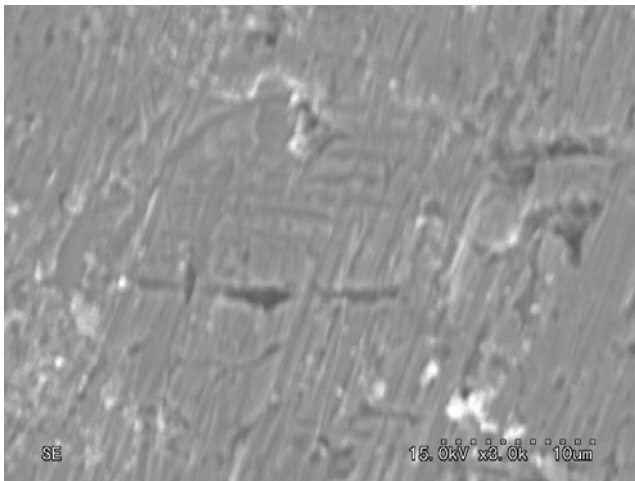
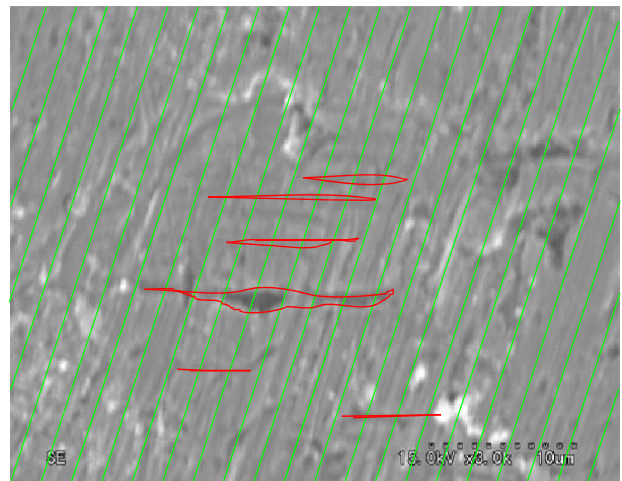


写真-26 ワッシャーの切断状況



(a)



(b)

写真-27 ボルト側ワッシャーの桁接触面 (×3000)



## 5. まとめ

本研究は、ボルト止めストップホール工法でワンサイドボルトを使用した場合の有用性を確認するため、高力ボルトとワンサイドボルトを同条件にして疲労試験を行った。試験の結果は表-3にまとめるとおりである。また静的載荷試験も含め得られた結論は以下の通りである。

- (1) ワンサイドボルトを用いたボルト締めストップホール工法は、108万回（桁が破断するまで）の繰り返し載荷時まで高力ボルトと同様にき裂再発生を防止することを確認できた。（ケース1の比較より）
- (2) ボルトの締付前後の静的載荷試験結果から、ワンサイドボルトを用いたボルト締めストップホール工法は、高力ボルトを用いた場合より若干劣るが、ほぼ同程度の応力低減効果があることを確認できた（ケース1）。
- (3) ワンサイドボルトを用いたストップホール工法で、繰返し数60万回以降、静的載荷時の母材応力値が増加しており、締付け効果が低下している。この原因として、バルブスリーブのき裂の影響によるボルト軸力の低下が考えられる（ケース1）。
- (4) ストップホールにボルト締付けを行わない場合（曲面仕上げまたは、バリ除去）と比較すると、ワンサイドボルトによる応力低減効果があり、それに伴うき裂進展抑制の効果も高いことが確認された。
- (5) 切削傷の研磨やバリをとるなどの処置を行うだけでも疲労強度が向上することが確認できた（ケース4の比較より）。

表-3 試験経過表

繰返し回数		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
		OS1-HTB1	OS2-GR2	OS3-SH3	SH4-GR4
20万回	現象			SH3にき裂 (表23mm、裏22mm)	
	対策			M16によるSH法処置	
40万回	現象			M16WSにき裂	
	対策			ワッシャー交換	
53万回	現象		GR2にき裂 (7mm)		SH4にき裂 (10mm)
	対策		M16によるSH法処置		M16によるSH法処置
60万回	現象	OS1のFillerWSにき裂 OS1のバルブスリーブにき裂 HTB1のWSにき裂	OS2のFillerWSにき裂 OS2のバルブスリーブにき裂	OS3のFillerWSにき裂 OS3のバルブスリーブにき裂	
	対策	処置無し	処置無し	処置無し	
108万回	現象	試験体のフランジとウェブのすみ肉溶接からのルート割れにより桁が破断			GR4のき裂は無し
	対策	バルブスリーブとWSに生じたき裂の破面を電子顕微鏡で確認する。	←(今後の予定)		

## 6. おわりに

本編では、ワンサイドボルトを用いたストップホール工法の有用性を HTB を用いた場合と比較することで確認し、疲労試験 108 万回までにおいて同等の効果があることの結果を得た。ワンサイドのバルブスリーブに疲労き裂が進展した場合には、ワンサイドボルトの締付け効果が低下することが確認され、本試験においては、そのことが直ちに母材の疲労き裂進展に寄与することは確認されなかったが、実橋で使用する場合には、ごく短期間に限定して使用するなど慎重にする必要があると考えられる。しかし、静的載荷試験結果において示したとおり、ワンサイドボルトの締付けにより、高力ボルトの締付けと同程度の効果が確認され、一時的な対策として高力ボルトを使用できない条件において、ワンサイドボルトを用いる効果はあると考えられる。

閉断面などの箇所で一時的な疲労き裂の補修方法として、ワンサイドボルトを用いたストップホール工法が選択されれば、従来の開口を伴う方法に比べて、コストだけではなく時間的なメリットでも大きく寄与するものとする。本研究が、疲労き裂の補修工事での一助になれば幸いである。