

添え板ボルト締めストップホール法による主桁横桁交差部の疲労き裂の補修

白井, 聡也 / SHIRAI, Akiya

(発行年 / Year)

2011-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2011-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2010 年度 修士論文

添え板ボルト締めストップホール法による
主桁横桁交差部の疲労き裂の補修

指導教員：森 猛 教授

法政大学大学院 工学研究科
建設工学専攻 修士課程

09R5113 白井 聡也

添え板ボルト締めストップホール法による 主桁横桁交差部の疲労き裂の補修

09R5113 白井聡也

我国において最も代表的な橋形式である I 断面桁にはいくつかの種類疲労き裂が生じている。これらの中でも、主桁ウェブと横構あるいは横桁下フランジが交差する溶接部には疲労損傷事例が数多く報告されている。このような部分に生じたき裂は、橋軸直角方向に進展するため、放置すれば落橋に至る可能性の高い非常に危険な損傷である。そのため、疲労き裂の早期発見と適切な補修を行う必要がある。

ここでは、横部材が交差する主桁ウェブに生じた疲労き裂に対する適切な補修方法とその効果を明らかにすることを目的として以下に示す検討を行う。

- (1) 添え板ボルト締めストップホール法による補修効果を明らかにする目的で、面外ガセットを有する桁試験体を対象とした疲労試験と 3 次元有限要素応力解析を行う。
- (2) 添え板ボルト締めストップホール法補修部の疲労強度と疲労破壊起点を明らかにする目的で、桁試験体補修部を模擬した小型平板試験体を作成し、疲労試験と 3 次元有限要素応力解析を行う。
- (3) 添え板ボルト締めストップホール法の補修効果をストップホール法あるいはボルト締めストップホール法の補修効果と比較する目的で、それらの補修方法による補修部を模擬した小型試験体の疲労試験を行う。
- (4) 円孔壁を仕上げた場合の、ボルト締めストップホール法の疲労強度評価について、再検討を行う。
- (5) 添え板ボルト締めストップホール法による補修が他の部材に及ぼす影響を明らかにする目的で、実橋を対象とした 3 次元有限要素応力解析を行う。

REPAIR FOR FATIGUE CRACKS AT CONNECTION BETWEEN MAIN GIRDER WEB AND LATERAL GIRDER FLANGE BY BOLTING-STOP-HOLE-METHOD WITH ATTACHED PLATES

09R5113 Akiya SHIRAI

The number of highway bridges of 15 meters or more in length in our country is about 140,000, and the number of steel bridges occupies 40 percent of them. In addition, 90 percent of them is girder type of bridges. The main fatigue damage reported in the I-girder bridge is in saul plate weld, yardarm notch that has circular arc flange and gelber hinge part, out-of-plate gusset welded joints installed in main girder web to install in the under lateral bracing, and connection between main and lateral girders. Especially many fatigue cracks are detected in welded joints connection between main girders and lateral girders or bracing. these cracks are very dangerous damages, because these crack progresses in a bridge axis right-angled direction. And these cracks are prone to extend and may induce collapse of bridge. Therefore, detection of the crack at the early stage and adequate repair method against the damage is needed.

The purpose of this study is examining the best repair method against fatigue cracks on main girder web at connection of lateral girder and an effect of repair method. The examinations are as follows.

- (1) For the purpose of clarifying an effect of “Bolting-Stop-Hole-Method with attached steel plate”, fatigue tests and FEM stress analyses have been performed on girder specimens.
- (2) Fatigue tests and FEM stress analyses have been also carried out on small specimens modeling the repaired parts in order to investigate the fatigue strength and the fatigue crack origins of the repaired parts.
- (3) The effect of the repair method has been compared with those of stop-hole method and/or bolting stop-hole method though the fatigue tests.
- (4) Fatigue strength evaluation method for Bolting-Stop-Hole-Method when polishing a surface of circular holes is reexamined.
- (5) It clarifies the influence that the repair exerts on other parts though FEM stress analyses intended for the actual bridge.

添え板ボルト締めストップホール法による主桁横桁交差部の疲労き裂の補修

目次

	頁
第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往の研究	2
1.3 研究の目的	7
第2章 桁試験体を用いた検討	13
2.1 疲労試験	13
2.1.1 試験体	13
2.1.2 補修方法	14
2.1.3 試験方法	15
2.1.4 疲労試験結果	16
2.1.5 補修部以外での疲労き裂	23
2.1.6 桁試験体の疲労強度	26
2.2 応力解析	27
2.2.1 解析モデル	27
2.2.2 解析手法	28
2.2.3 疲労試験結果との比較	29
第3章 小型試験体を用いた検討	75
3.1 疲労試験	75
3.1.1 試験体	75
3.1.2 残留応力の測定	75
3.1.3 試験方法	76
3.1.4 補修方法	77
3.1.5 疲労試験結果	78
3.1.6 小型試験体の疲労強度	78
3.2 応力解析	79

3.2.1 解析モデル	79
3.2.2 解析手法	79
3.2.3 解析結果	80
第4章 ボルト締めストップホール法による補修部の疲労強度評価	121
4.1 これまでの疲労強度評価	121
4.2 本研究における疲労強度評価	122
4.2.1 材料定数 C, m の算定	122
4.2.2 応力緩和係数 の算定	122
4.2.3 トルシアボルトのモデル化	123
4.2.4 本研究における疲労強度評価法	125
4.3 桁試験体モデル、小型平板試験体モデルの応力解析の再検討	126
4.3.1 桁試験体	126
4.3.2 小型平板試験体	126
第5章 添え板ボルト締めストップホール法による補修部の疲労強度評価	134
第6章 補修が他の部材の応力性状に及ぼす影響	136
6.1 解析モデル	136
6.2 解析手法	136
6.3 解析結果	137
第7章 結論	170

参考文献

謝辞

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

近年，鋼橋の様々な部位において疲労き裂の発生事例が数多く報告されている^{1),2)}．これらは，建設当時には想定していなかった大型重車両や法定重量を上回る過積載車両の走行に伴う繰返し荷重により疲労き裂を生じたものである．全鋼橋の 90% 以上を占める，桁形式橋梁において報告されている疲労き裂の例を図-1.1(a)～(d)に示す．図-1.1(a)は下横構を取り付けるために主桁ウェブに設けられた面外ガセット溶接部に生じたき裂である．図-1.1(b)はソールプレート溶接部に生じた疲労き裂である．図-1.1(c)は円弧状のフランジを有する桁端切欠き部とゲルバーヒンジ部に生じた疲労き裂である．図-1.1(d)は主桁ウェブと横桁フランジの交差部に生じた疲労き裂である．

このなかでも特に，主桁ウェブと横桁フランジの交差部（主桁・横桁交差部）の主桁ウェブ溶接止端に生じたき裂は，放置すれば落橋に至る可能性もある危険な損傷である．そのため，定期的な点検による早期発見と適切な補修が必要となる．近年では，2007 年に国道 25 号名阪国道にある山添橋で長さ約 1m の貫通き裂が発見されている⁴⁾．写真-1.1 にその状況を示す．この疲労き裂の補修は，図-1.2 に示すように，き裂進展防止のためのストップホール削孔，主桁ウェブのあて板による補修，主桁下フランジの補強部材（H 鋼）による補強によって応急的に補修が行われた．また，首都高速道路でも写真-1.2 に示すように，主桁・横桁交差部に多くの疲労き裂が検出されており，早急な補修と点検の見直しが行われている．

主桁・横桁交差部の主桁ウェブに生じた疲労き裂に対する補修方法の 1 つにストップホール法（写真-1.3）がある．この方法は，疲労き裂の先端にストップホールと呼ばれる円孔を開けることによってき裂先端の応力集中を緩和し，疲労強度および疲労寿命の向上を図るものである．この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法（写真-1.4）が用いられることもある．これは，ボルト締めすることで母板とワッシャー間の摩擦により母板内の応力の一部をワッシャーおよびボルト頭，ナットで伝達する方法である．これによって応力集中はさらに緩和され，ストップホール法よりも高い補修効果が得られる．

1.2 既往の研究

疲労き裂の先端に円孔をあけ、応力集中を緩和するストップホール法。そのストップホールをボルト締めすることにより、母板とワッシャーの接合面の摩擦によって力を伝達させ補修効果を向上させるボルト締めストップホール法などが、主桁・横桁交差部の主桁ウェブに生じた疲労き裂の補修方法として考えられる。

これらの補修方法で補修した鋼部材の疲労強度やその疲労強度評価に関する研究が、以下に示すように行われている。

山田ら⁵⁾は、平板中央に疲労き裂を模擬した切欠きを入れ、図-1.3のような長円形の切欠きを有する試験体を用いて疲労試験を行うとともに、長円形の切欠きによる応力集中係数を楕円形の応力集中係数の算定式で求めた。その結果、軸方向力を受ける場合の残存寿命は円孔先端の応力集中係数の値を総断面積に対する応力範囲に乗じた応力範囲 S と疲労寿命 N の S - N 線図から推定できるとしている。すなわち、応力集中係数を加味した円孔先端の応力範囲で疲労寿命を整理できるとした。

三木ら⁶⁾⁷⁾は、面外ガセットを有する桁試験体を用いて疲労試験を行い、疲労き裂をストップホール法とボルト締めストップホール法で補修した。山田らと同様に疲労き裂の両端にあけた眼鏡型の円孔を楕円形の切欠きと考え、円孔先端の応力集中係数を公称応力範囲に乗じて疲労寿命を評価できることを明らかにした。また、ボルト締めストップホール法で補修した場合、素材とほぼ同程度の疲労強度が期待できるという結果を示した。しかし、ボルト締めにより応力集中がどの程度緩和するのかに関しては明らかにされていない。

森⁸⁾⁹⁾は、平板中央に円孔をあけ、これをボルト締めした試験体を用いて、円孔壁でのひずみ測定と疲労試験を行った。その結果、円孔をボルトで締め付けた場合、円孔壁での応力集中が軽減され、疲労強度が向上することを示した。また、ボルトの締め付け力が増大するにつれて、円孔壁での応力集中緩和効果は向上するが、ボルトの締め付け力を極端に大きくすると、疲労強度は低下することを示した。さらに、円孔壁の応力範囲で整理すれば、円孔のみの場合とボルトで締め付けた場合とで疲労寿命は同程度となる、すなわちボルトで締め付けた場合でも円孔壁の応力集中を明らかにすれば疲労寿命評価が可能という結果を示した。

薩川¹⁰⁾¹¹⁾らは、ストップホールをボルト締めすることによる応力集中の緩和に対する影響を明らかにする目的で、平板に円孔をあけてボルト締めした試験体を用いた応

力測定試験およびそれらを対象とした三次元有限要素応力解析を行っている。その結果、ボルト締めにより円孔壁の応力集中は緩和されること。また、この効果は板が薄いほど、ボルト径が大きいほど高くなることを示した。しかし、応力解析では母板、ワッシャー、ボルトを一体と仮定し、またボルト軸力を考慮しなかったためか応力解析から得られたボルト締めした円孔の応力集中係数は実験値よりもかなり小さい値を示した。

森¹²⁾¹³⁾は、3次元有限要素応力解析を行い、平板中央にボルト締めした円孔の応力集中に対するボルト軸力と板厚の影響を明らかにした。このときワッシャーと母板の間にヤング率の小さい要素を挿入することによってワッシャーと母板の間の微小な滑りを表し、さらにボルト軸に強制変位を与えることでボルト軸力を考慮した解析を行った。この結果、ボルト締めによる応力集中の緩和効果は板が薄いほど、軸力が大きいほど高くなることを示した。さらに、森らは母板とワッシャー間の滑りを表す要素のヤング率はボルト軸力ではなく、ワッシャーと母板の接触圧力に比例すると考え、挿入する要素のヤング率を式(1.1)で与えることを提案した。

$$E = \alpha \cdot \sigma \quad \dots \dots (1.1)$$

- E：挿入する要素のヤング率
- α ：接触圧によって決まる係数 (=12.6)
- σ ：注目する部分の接触圧

この応力解析では、高力ボルトを用いて実際に締め付けた場合にボルト頭の方が一定でないことによる影響を無視できるように、接触面積が同じ円形とし、その妥当性について明らかにしている。さらに、平板中央に円孔をあけ応力測定試験を行った結果、応力集中の緩和効果は、板厚が薄くなるほど、ボルトの締め付け力が大きくなるほど、円孔径が大きくなるほど、大きくなることを示すとともに、円孔径 M と板厚 t の比 M/t、導入軸力 F と標準軸力 F_s の比 F/F_s により、式(1.2)に示すようなボルト締めによる応力の緩和効果を推定するための経験式を示した。

$$\gamma = 1.05 - \left\{ 0.33 \left(\frac{F}{F_s} \right) - 0.14 \left(\frac{F}{F_s} \right)^2 \right\} \times \left(\frac{M}{t} \right) = (\alpha_B - 1) / (\alpha_S - 1) \quad \dots \dots (1.2)$$

- α_B ：ボルト締めした円孔の応力集中係数
- α_S ：円孔の応力集中係数

：応力緩和係数 $(=(B - 1) / (S - 1))$

F：導入軸力(N)

F_S：標準軸力(N)

M：円孔径(mm)

t：板厚(mm)

さらに、応力測定試験および3次元有限要素応力解析を行うことにより、ウェブガセットに生じた疲労き裂をボルト締めストップホール法により補修した場合の応力緩和係数は疲労き裂の長さの影響を受けないことを示した。また、ボルト締めストップホール法による疲労損傷補修部材の公称応力範囲と疲労寿命の関係の推定式を提案した。この推定式は森の行ったボルト締めした円孔をもつ平板試験体の疲労試験により得られた公称応力範囲と疲労寿命の関係を提案した式の推定線とほぼ一致するという結果も示した。

森ら¹⁴⁾は、三辺の解析結果¹⁰⁾を再整理し、応力緩和係数は円孔径の2乗 M²と板厚 t の比 M²/t によって整理できるとして、式(1.3)に示す疲労強度評価式を提案した。また、応力測定試験・疲労試験および大谷により得られた結果¹⁵⁾を用いて、提案した疲労強度評価式の適用の妥当性について検討した。これにより残留応力の有無が疲労強度に影響を与えていることを示した。

$$\Delta\sigma_n^m \cdot N = C / \{\gamma(\alpha_s - 1) + 1\}^m \quad \dots \dots (1.3)$$

$\Delta\sigma_n$ ：公称応力範囲

N：疲労寿命

C, m：材料定数

：応力緩和係数

α_s ：円孔のみの応力集中係数

さらに、平板中央に1つ円孔をあけた場合と平板中央に疲労き裂を模擬した切欠きを入れ、その先端に円孔をあけた眼鏡型切欠きの2種類を用いて応力測定試験、疲労試験を行った。その結果、板がある程度薄い場合にはボルト締めすることによって、円孔壁の応力集中よりもワッシャー近傍での応力集中が高くなり、き裂の発生位置が変化することを明らかにした。また、軸方向力を受ける場合よりも面外曲げを受ける場合の方が、ボルト締めストップホール法による補修効果が大きいことも示した。

内田ら¹⁶⁾は面内ガセット溶接部に生じた疲労き裂に対するボルト締めストップホール法の補修効果を明らかにする目的で、面内ガセットを有する桁試験体を対象とした応力測定試験、疲労試験を行った。その結果、ボルト締めストップホール法で補修した面内ガセット溶接継手の疲労強度評価方法を提案し、その妥当性を疲労試験結果との比較により確認した。

西尾ら¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾は面内曲げを受けて面外ガセット溶接部に発生した疲労き裂をボルト締めストップホール法で補修した場合の補修効果を明らかにすること、そして疲労強度評価式の構築を目的として、桁試験体の疲労試験と3次元有限要素応力解析を行った。その結果、ボルト締めストップホール法で補修することにより、応力は大幅に緩和されて疲労寿命が長くなり、疲労き裂が生じる前の継手よりも疲労強度が高くなることを明らかにした。また、軸方向力を受ける場合の疲労強度評価式を応用して、面内曲げを受ける場合の疲労強度評価が可能であることを示した。これによって提案された面内曲げを受ける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の疲労強度評価式は式(1.4)である。

$$\Delta\sigma_n^{5.89} \cdot N = 3.24 \times 10^{21} / \{ \gamma(\alpha_s - 1) + 1 \}^{5.89} \quad \dots \dots (1.4)$$

$$\alpha_s = 0.166 \left(\frac{2c}{M} \right) + 1.64 \sqrt{\frac{2c}{M}} + 1.19 \quad \dots \dots (1.5)$$

$$\gamma = 1.0 - 0.297 \left(\frac{M}{t} \right) \quad \dots \dots (1.6)$$

$\Delta\sigma_n$: 公称応力範囲 (N/mm²)

N : 疲労寿命 (cycles)

: 応力緩和係数

α_s : 円孔のみの応力集中係数

2c : 切欠き長さ (mm)

M : 円孔径 (mm)

t : 板厚 (mm)

内田ら²⁰⁾は、平板の中央に円孔を開けて、当て板をしてボルトで締め付けた試験体を用いて円孔壁での応力測定試験と疲労試験、それらを対象とした3次元有限要素応力解析を行った。その結果、応力緩和係数の推定式と当て板付きボルト締めストップホール法で補修した部材の公称応力範囲と疲労寿命の関係を推定する式を提案している。しかし、使用した試験体は平板に円孔をあけて補修を模擬したものであるため、

本来の補修方法とは異なっている。

杉山ら²¹⁾は、面内曲げにより面外ガセット溶接部に生じた疲労き裂に対するボルト締めストップホール法の補修効果を明らかにする目的で、面外ガセットを有する桁試験体を対象とした応力測定試験、疲労試験を行った。また、西尾の軸方向力を受ける場合の疲労強度評価式を踏まえた上で、3次元有限要素応力解析結果に基づいて、面内曲げを受ける場合の円孔先端の応力集中係数および応力緩和係数について検討した。

その結果、面内曲げにより発生した疲労き裂にボルト締めストップホール法を適用した面外ガセット溶接継手の応力集中係数および応力緩和係数の算定式(式(1.7)、式(1.8))を構築し、その妥当性を確認した。疲労強度評価式は式(1.9)である。なお、 α_s は図-1.4のように定義されている。

$$\alpha_s = \left\{ 0.166 \left(\frac{c}{M} \right) + 1.64 \sqrt{\frac{c}{M}} + 1.19 \right\} \times \left\{ 0.213 \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_l} \right) + 0.787 \right\} \quad \dots \dots (1.7)$$

$$\gamma = \left\{ 1.0 - 0.297 \left(\frac{M}{t} \right) \right\} + \left\{ 0.015 \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_l} \right)^2 - 0.055 \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_l} \right) + 0.040 \right\} \quad \dots \dots (1.8)$$

$$\Delta \sigma_n^m \cdot N = C / \{ \gamma (\alpha_s - 1) + 1 \}^m \quad \dots \dots (1.9)$$

$\Delta \sigma_n$: 公称応力範囲 (N/mm²)

N : 疲労寿命 (cycles)

C, m : 材料定数 (C=3.25 × 10²¹, m=5.89)

: 応力緩和係数

α_s : 円孔のみの応力集中係数

c : 切欠き長さ (mm)

M : 円孔径 (mm)

σ_u : 上側の円孔壁の公称応力 (N/mm²)

σ_l : 下側の円孔壁の公称応力 (N/mm²)

t : 板厚 (mm)

森ら²²⁾²³⁾は軸方向力とせん断力により発生した疲労き裂にボルト締めストップホール法を適用した際の面外ガセット溶接継手の疲労強度評に關しての検討を目的として、面外ガセットを有する桁試験体を用いた応力測定試験、疲労試験とその試験体モデルを対象とした3次元有限要素応力解析を行った。その結果、軸方向力とせん断力により発生した疲労き裂にボルト締めストップホール法を適用した面外ガセット溶接

継手の応力集中係数および応力緩和係数の算定式(式(1.10),式(1.11))を構築し,その妥当性を確認した.また,疲労強度評価式(式(1.12))を構築しその妥当性についても確認した.

$$\gamma = 1.0 - 0.297 \left(\frac{M}{t} \right) \quad \dots \dots (1.10)$$

$$\alpha_s = \frac{\left[\sigma \left\{ 0.402(\theta)^3 - 1.152(\theta)^2 + 0.039(\theta) + 1.000 \right\} + 1.19\tau \left\{ -0.257(\theta)^3 - 0.536(\theta)^2 + 1.799(\theta) - 0.007 \right\} \right] \times \left\{ 0.166(c/M) + 1.64\sqrt{c/M} + 1.19 \right\}}{\left\{ (\sigma/2) + \sqrt{(\sigma/2)^2 + \tau^2} \right\}} \quad \dots \dots (1.11)$$

- : 応力緩和係数
- : 最大主応力の発生位置角度 (rad)
- : 公称の平均せん断応力 (N/mm²)
- : 公称の橋軸方向応力 (N/mm²)

$$\Delta\sigma_n^m \cdot N = C / \left\{ \gamma(\alpha_s - 1) + 1 \right\}^m \quad \dots \dots (1.12)$$

$\Delta\sigma_n$: 公称応力範囲 (N/mm²)

N: 疲労寿命 (cycles)

C, m: 材料定数 (C=3.25 × 10²¹, m=5.89)

α_s : 円孔のみの応力集中係数

1.3 研究の目的

先に示したストップホール法やボルト締めストップホール法は,断面欠損による視覚的な不安のためか,応急的な補修方法として用いられることが多い.そのため,首都高速道路では,恒久的な対策を目指し,写真-1.5に示すようにアングル材や平板を用いた複雑な補修が行われていた.この補修方法の実験的な検討は行われていないものの,断面欠損がないこと,アングル材や平板で応力を伝達できることから,ストップホール法やボルト締めストップホール法よりも高い補修効果が得られることは容易に想像できる.

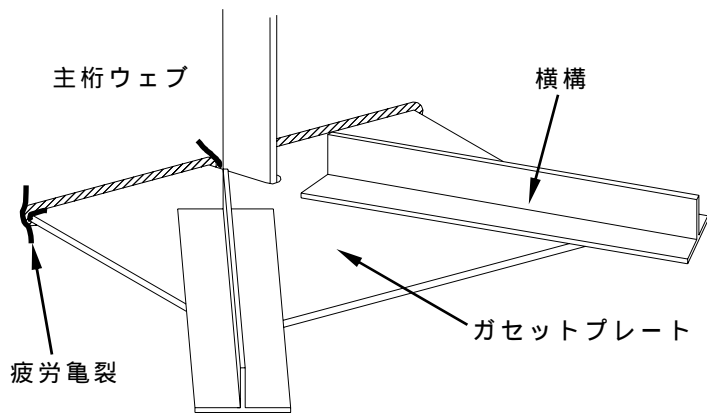
しかし,多数のアングル材と平板を多くの高力ボルトで主桁ウェブや横桁フランジに取り付けるため,工事に手間がかかり,工費も高くなる.その代案として考えられているのが,本研究で対象とする添え板ボルト締めストップホール法である.

この方法は,写真-1.6に示すように,疲労き裂の両端とその両側の,合計6箇所に円孔を開け,さらにそれらの孔を介して添え板を高力ボルトで接合するものである.

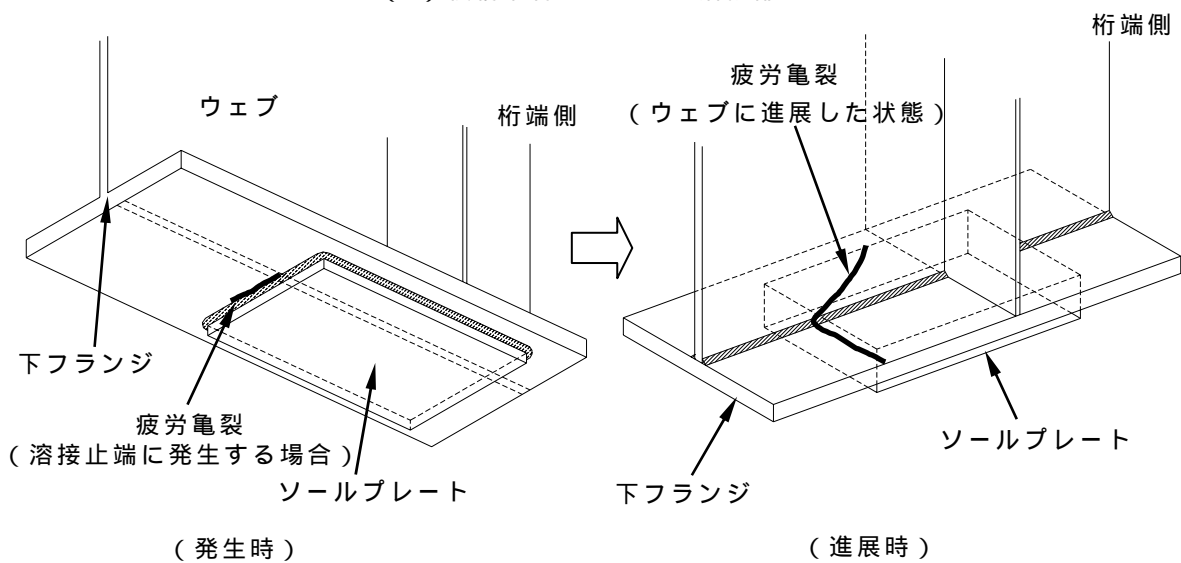
ボルト締めストップホール法と比較すると、き裂を含む円孔の応力集中が、その前後でも添え板とボルト接合されているために添え板での応力伝達機能が向上するため、軽減され、高い補修効果があるものと考えられる。この補修方法は既に首都高速道路で行われているが、実験的な補修効果の検討は少なく、さらなる検討が必要と考えられる。

本研究では、添え板ボルト締めストップホール法により補修した疲労き裂の生じた部材（ウェブガセット溶接部）の補修効果と疲労耐久性、さらにこの補修が他の部材の応力性状に及ぼす影響を明らかにする目的で、以下のような検討を行う。

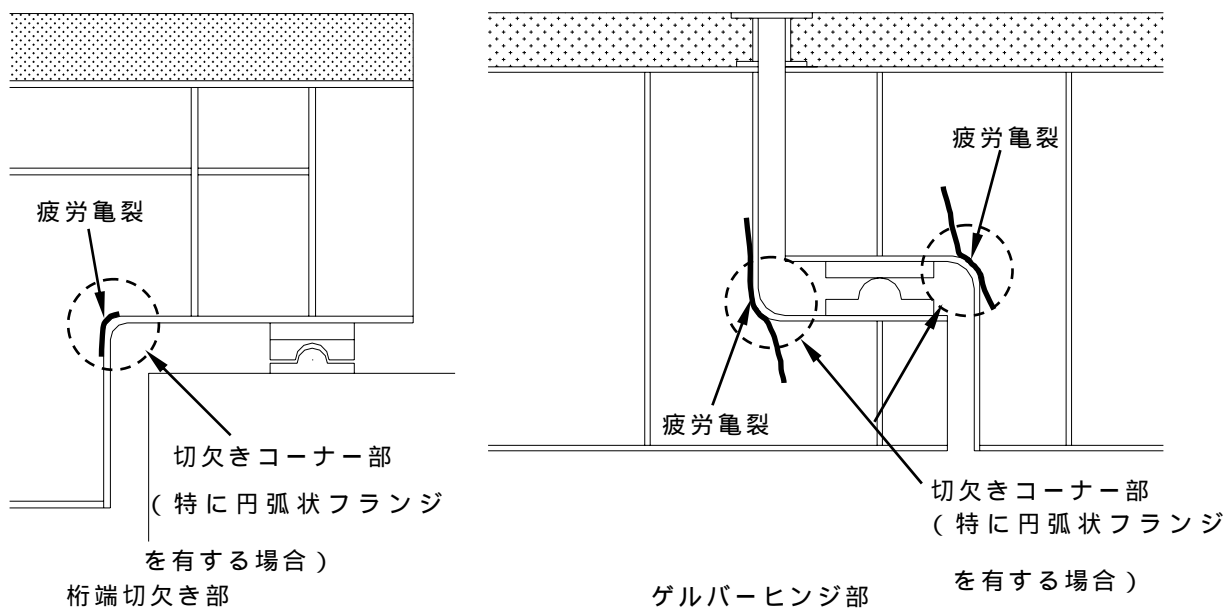
- (1) 添え板ボルト締めストップホール法による補修効果を明らかにする目的で、面外ガセットを有する桁試験体を対象とした疲労試験と3次元有限要素応力解析を行う。また、ボルト締めストップホール法の補修効果との比較を行う。
- (2) 添え板ボルト締めストップホール法補修部の疲労強度と疲労破壊起点を明らかにする目的で、桁試験体補修部を模擬した小型平板試験体を作成し、疲労試験と3次元有限要素応力解析を行う。
- (3) 添え板ボルト締めストップホール法の補修効果をストップホール法あるいはボルト締めストップホール法の補修効果と比較する目的で、それらの補修方法による補修部を模擬した小型試験体の疲労試験を行う。
- (4) 円孔壁を仕上げた場合の、ボルト締めストップホール法の疲労強度評価法について、再検討する。
- (5) 添え板ボルト締めストップホール法による補修が他の部材の応力に及ぼす影響を明らかにする目的で、実橋を対象とした3次元有限要素応力解析を行う。



(a) 横構取付けガセット溶接部



(b) ソールプレート溶接部



(c) 桁端切欠き部

図-1.1 桁形式鋼橋における疲労損傷の例

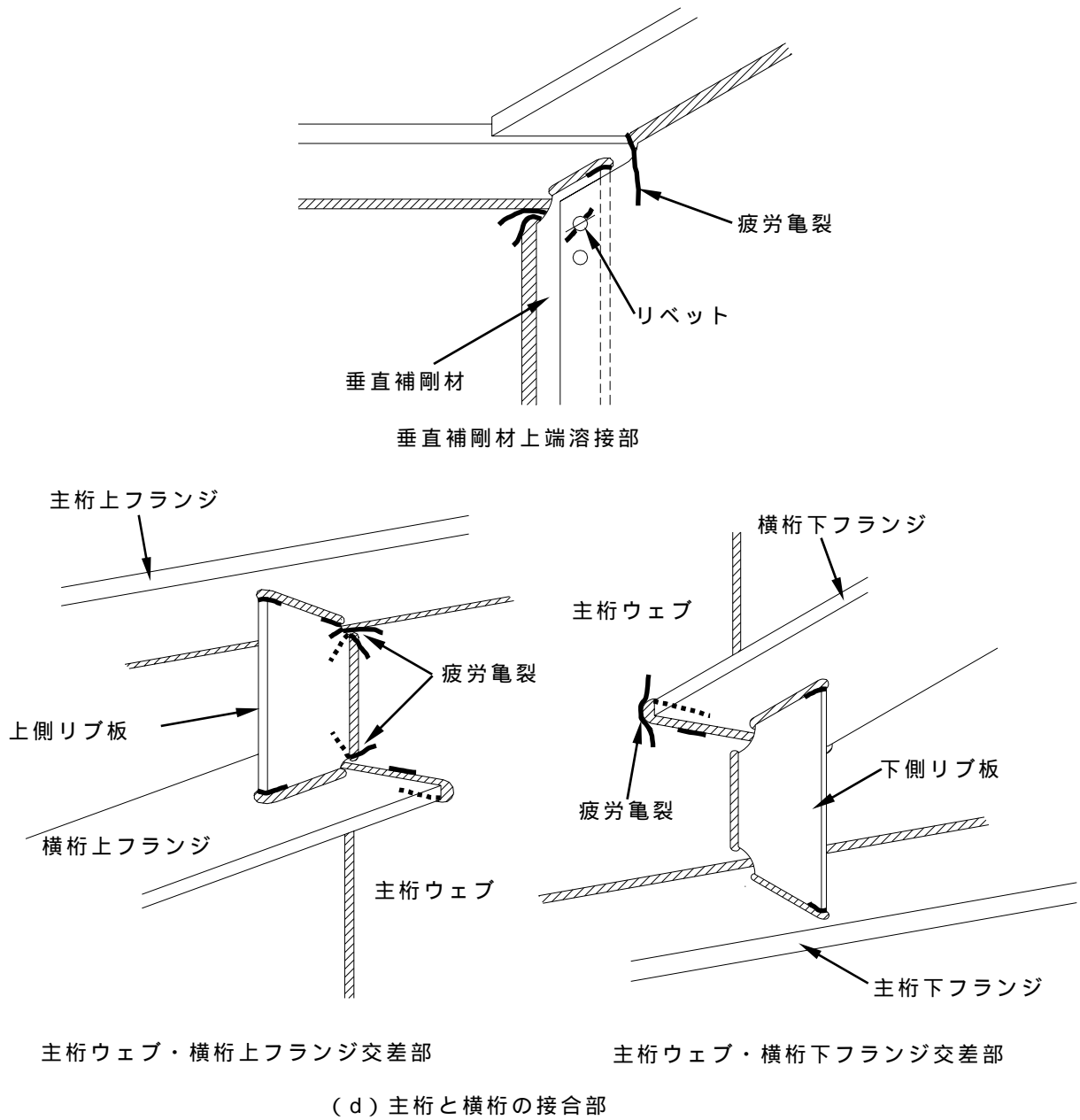


図-1.1 桁形式鋼橋における疲労損傷の例

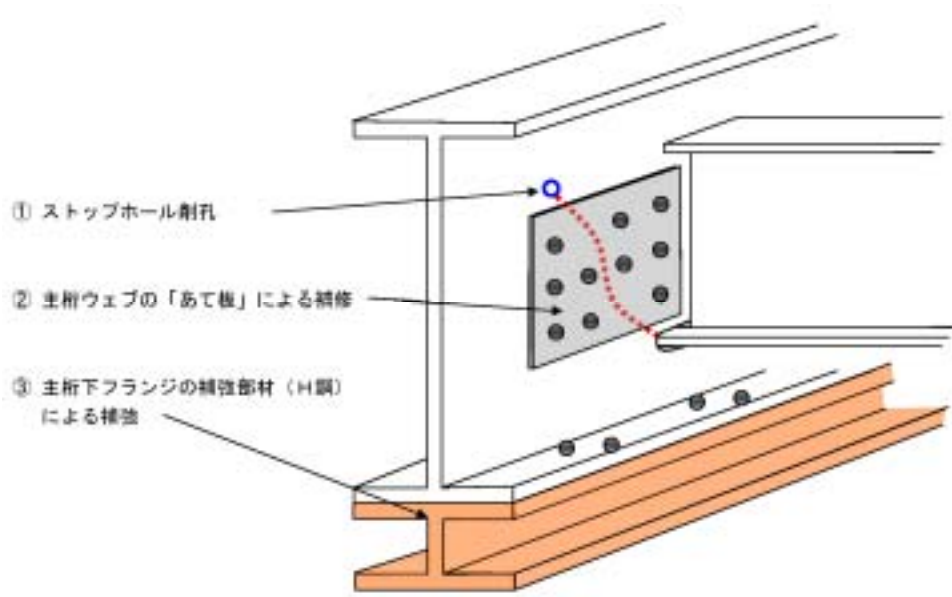


図-1.2 山添橋の疲労き裂補修例



図-1.3 楕円形の試験体

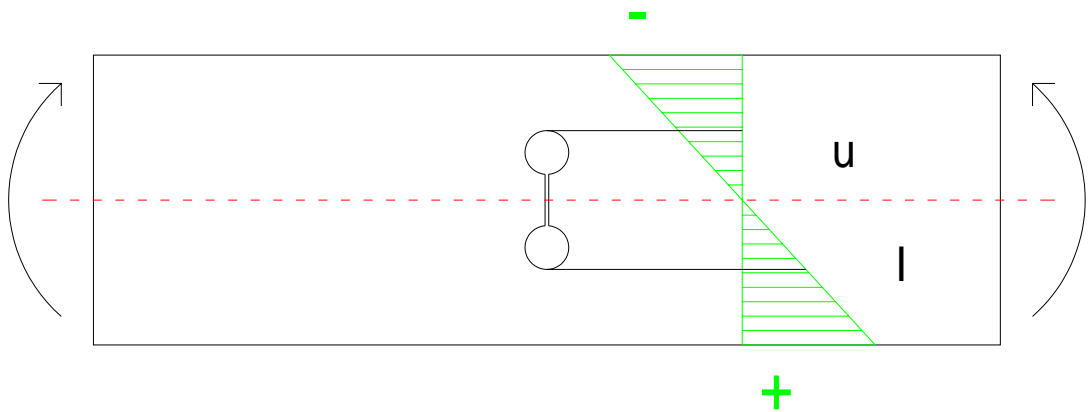


図-1.4 σ_u / σ_l の定義



写真-1.1 山添橋の疲労き裂

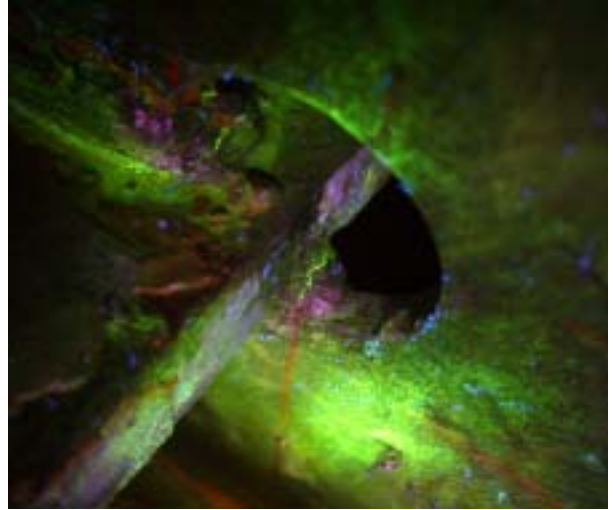


写真-1.2 首都高速道路での疲労き裂の例



写真-1.3 ストップホール法



写真-1.4 ボルト締めストップホール法



写真-1.5 アングル材による補強



写真-1.6 添え板ボルト締めストップホール法

第 2 章 桁試験体を用いた検討

2.1 疲労試験

2.1.1 試験体

供試鋼材は、板厚 9mm の溶接構造用鋼材 SM490A と板厚 12mm の溶接構造用鋼材 JIS SM490YA である。これらの鋼材の機械的性質と化学成分を表-2.1 に示す。これらの鋼材を用いて図-2.1 に示すように 3ヶ所に面外ガセット板を有する溶接桁試験体を 6 体製作した。板厚 9mm の鋼材はウェブと面外ガセットおよび垂直補剛材に、板厚 12mm の鋼材はフランジに使用した。試験体の各寸法は図-2.1 に示すように、上フランジ幅 150mm、下フランジ幅 100mm、上下フランジ厚 12mm、ウェブ高 450mm、ウェブ厚 9mm の I 断面桁試験体で、全長は 3800mm、支点間距離は 3600mm である。試験体の表面を西面、裏面を東面と呼ぶこととし、3 組のガセット板を図-2.2 に示すように北側 (N) から WG1, WG2, WG3 と呼ぶ。また、一つのガセットで疲労き裂の起点となる廻し溶接部が 2ヶ所あるが、それらを S (南側)、N (北側) で区別する。

ガセットはウェブにガセットを通す短形の穴を開けて、開先溶接でウェブに取り付けている。溶接は直径 1.2mm のワイヤーを用いた炭酸ガスアーク溶接法で行っている。溶接電流と電圧は 230A と 33V、溶接速度は 20~26cm/min とした。溶接条件を表-2.2 に示す。歯科用印象材ビニルシリコンを用いて計測した結果を表-2.3 に示す。面外ガセットの廻し溶接部の脚長は、ウェブ側で 14.2mm、ガセット板側で 7.9mm、ウェブ側溶接角度は 112.1°、ウェブ側局率半径は 0.49mm であった。

垂直補剛材の溶接は直径 1.2mm のワイヤーを用いた炭酸ガスアーク溶接法で行っている。溶接電流と電圧は 230A と 33V、溶接速度は 18~23cm/min とした。溶接条件を表-2.4 に示す。

試験体は添え板ボルト締めストップホール法で補修した A 試験体、ボルト締めストップホール法で補修した B 試験体と C 試験体の 3 種類、それぞれ 2 体ずつの合計 6 体である。B 試験体と C 試験体はストップホールの中心間距離が異なる試験体である。

2.1.2 補修方法

(1) A 試験体

A 試験体は、ガセットの廻し溶接部に疲労試験によって予き裂を生じさせた後、添え板ボルト締めストップホール法で補修した。補修方法は、首都高速道路において既に行われているものと同じである。その方法を以下に示す。

疲労き裂発生後、ウェブ側において添え板の当たる部分を#80のディスクグラインダーで仕上げ、ホールソーを用いて、図-2.3(a)に示す位置に直径24.5mmの円孔を設ける。

疲労き裂が円孔内に入らない場合、この円孔と疲労き裂先端をセーパソーを用いてつなげる(写真-2.1)。疲労き裂が出ていない溶接止端部を補修する場合には、上側円孔と下側円孔を直線でつなげた(写真-2.2)。

粒度#80の軸付ゴム砥石を用いてストップホール壁面を滑らかに仕上げる。同時に円孔縁の面取りを行い、バリを除去する。

添え板を当ててシャーレンチを用いて高力ボルトで締め付ける(写真-2.3)。使用したシャーレンチを写真-2.4に示す。

高力ボルトにはトルシア形のS10T-M22を用いている。使用する添え板は図-2.4に示すように縦80mm、横220mm、厚さ9mmのSS400である。添え板の表面には、プラスト処理後、厚膜型ジंकリッチペイントを塗布している。目標の膜圧は75 μ mである。高力ボルトの締め付けはシャーレンチを用いて行う。

トルシアボルトは先端部分に切欠きを設け、そのせん断強度を利用して所定の軸力を得ようとするものである。切欠きの破壊強度はバラつきが少ないため、かなり安定した導入動力が得られ、また締め忘れのチェックも容易である。トルシアボルトの外観を写真-2.5に示す。写真内の赤枠部分に切欠きが設けられている。

(2) B, C 試験体

A 試験体では、溶接のままで疲労試験を行い、疲労き裂を発生させた後に補修した。B, C 試験体では、溶接ままの状態での疲労試験は行わず、あらかじめ補修を行った後疲労試験を行った。

B 試験体は図-2.3(b)、写真-2.6に示すように、ストップホールの中心間距離を添え板ボルト締めストップホール法と同じ119mmとして、ボルト締めストップホール

法により補修を行った。補修後の状況を写真-2.7 に示す。C 試験体は図-2.3 (c), 写真-2.8 に示すように, 短い疲労き裂の補修を想定してストップホールを中心間距離を 75mm として, ボルト締めストップホール法により補修を行った。補修後の状況を写真-2.9 に示す。B,C 試験体ではボルトが当たる母板表面は # 80 のディスクグラインダーで仕上げている。円孔のあけ方とその大きさ, 円孔壁面の仕上げ方法, 使用する高力ボルトは A 試験体と同じである。

2.1.3 試験方法

疲労試験に用いる荷重条件は, これまでに行われている数多くの桁試験体の疲労試験結果^{24)~30)}に基づき, 荷重繰返し数が 100 万回程度で長さ 40mm 程度の疲労き裂が生じるように決定した。すなわち, 桁試験体を用いた既往の疲労試験結果を収集し, き裂長さ 40mm を疲労寿命 N としたときの応力範囲と N の関係を整理した。その結果を図-2.5 に示す。図中の実線は, 最小自乗法により求めた疲労寿命に対する応力範囲の回帰直線である。繰返し数 100 万回に対応する応力範囲は 80 N/mm^2 程度である。このことから面外ガセット位置での応力範囲が 80 N/mm^2 程度となるような荷重条件とした。

疲労試験には動的能力 300kN の電気油圧サ - ボ式材料試験機を用いた。荷重波形は正弦波, 繰返し速度は 2 ~ 2.5Hz, 荷重範囲は 10 ~ 220kN とした。載荷は, 荷重点間距離 800mm, 支点間距離 3600mm の 4 点曲げである。この繰返し荷重による等モーメント区間の面外ガセット溶接部の公称応力範囲は 81 N/mm^2 である。また, 下フランジの首溶接部の公称応力範囲は 159 N/mm^2 である。この条件は 6 体の試験体ともに同じである。試験状況を写真-2.10 に示す。A 試験体の疲労き裂の発生と進展の観察は, 所定の繰返し回数 (5 ~ 10 万回) ごとに, 磁粉探傷法で行った。

A 試験体では, 予き裂を与えるために疲労試験を行って, 60mm 程度の板厚貫通き裂を生じさせた。き裂発生後に添え板とボルトを用いて補修を行い, ふたたび繰返し荷重 (10 ~ 220kN) で最初にき裂補修を施してからの繰返し回数が 500 万回以上となることを目標に試験を行った。

試験体の公称応力を測定するとともに, 試験体長手方向中心の左右で荷重の偏心が無いことを確認するために, 中央のガセット端から 50mm 離れた位置と試験体中央から 250mm および 550mm 離れた下フランジ上面に表裏面で計 12 枚のひずみゲージを貼付した。ひずみゲージは 5mm のリード線を持つ 5mm ゲージを用いた。ひずみゲージの貼付位置とその名称を図-2.6 に示す。荷重を 220kN としたときの応力測定結果

を表-2.5 に示す．表中の計算値は単純梁の梁理論を用いて求めた下フランジ上面での応力である．ガセット端から 50mm 離れたウェブ面で測定された応力は，99～107N/mm² であり，梁理論から計算される値（83.3N/mm²）よりも 20%程度高くなっている．これは 50mm 離れた位置においても面外ガセット溶接継手部による応力集中の影響を受けているためと考えられる．

下フランジの応力分布を図-2.7 に示す．東西面および南北方向での応力の偏心はほとんど生じていない．

2.1.4 疲労試験結果

各面外ガセットでの疲労き裂の発生と進展の状況は次のとおりである．繰返し数の括弧内の回数は試験開始からの総繰返し数を示している．

(1) A-1 試験体

・WG1-N

荷重繰返し数 419.4 万回の時点でも疲労き裂の発生は認められなかった．

・WG1-S

荷重繰返し数が 126 万回に達した時点で試験体西面の溶接止端部に長さ 28mm の疲労き裂が検出された．その状況を写真-2.11 に示す．その後の進展状況を表-2.6 と図-2.8 に示す．き裂検出後約 64 万回（総繰返し数 190 万回）の载荷を行い，疲労き裂が試験体東面まで貫通して長さが西面で 65mm，東面で 71mm となった時点で補修を行った．補修前のき裂状況を写真-2.12 と写真-2.13 に，補修状況を写真-2.14 と写真-2.15 に示す．試験終了後（419.4 万回），添え板とボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが，新たなき裂は検出されなかった．

・WG2-N

荷重繰返し数が 78 万回に達した時点で試験体東面の溶接止端部に長さ 17mm の疲労き裂が検出された．その状況を写真-2.16 に示す．その後の進展状況を表-2.6 と図-2.9 に示す．き裂検出後約 63 万回（141 万回）の载荷を行い，疲労き裂が試験体東面まで貫通して長さが西面東面ともに 79 mm となった時点で補修を行った．補修前のき裂状況を写真-2.17 と写真-2.18 に，補修状況を写真-2.19 と写真-2.20 に示す．試験終了後（419.4 万回），添え板とボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが，新たなき裂は検出されなかった．

・ WG2-S

荷重繰り返し数が 51.6 万回に達した時点で試験体西面の溶接止端部に長さ 19mm の疲労き裂が検出された。その状況を写真-2.21 に示す。その後の進展状況を表-2.6 と図-2.9 に示す。き裂検出後約 60 万回 (111.6 万回) の载荷を行い、疲労き裂が試験体東面まで貫通して長さが西面東面ともに 67mm となった時点で補修を行った。補修前のき裂状況を写真-2.22 と写真-2.23 に、補修状況を写真-2.24 に示す。試験終了後 (419.4 万回)、添え板とボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、新たなき裂は検出されなかった。

・ WG3-N

荷重繰り返し数が 78 万回に達した時点で試験体東面の溶接止端部に長さ 6mm の疲労き裂が検出された。その状況を写真-2.25 に示す。その後の進展状況を表-2.6 と図-2.10 に示す。き裂検出後約 129 万回の载荷を行い、疲労き裂が試験体東面まで貫通して長さが西面 64mm、東面 55mm となった時点で補修を行った。補修前のき裂状況を写真-2.26 と写真-2.27 に示す。これらの写真に示すように、疲労き裂は 2 つからなっており、それぞれのき裂長さは西面で 64mm と 23mm、東面で 55mm と 29mm である。これは主たるき裂が 2 箇所以上で生じたためと考えられる。補修状況を写真-2.28 と写真-2.29 に示す。試験終了後 (419.4 万回)、添え板とボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、新たなき裂は検出されなかった。

・ WG3-S

荷重繰り返し数 419.4 万回の時点でも疲労き裂の存在は認められなかった。

荷重繰り返し数が約 419.4 万回に達した時点で下フランジ首溶接部から発生したと思われる疲労き裂により、下フランジが破断したため試験を終了した。試験終了時の破断状況を写真-2.30 と写真-2.31 に示す。

(2) A-2 試験体

二体目は 1 つのガセットのどちらかの疲労き裂の長さが約 60mm となった時点で両側の溶接部を補修した。

・ WG1-N

荷重繰り返し数が 184 万回に達した時点で補修を行った。補修を行うまでき裂は検出されなかった。補修状況を写真-2.32 と写真-2.33 に示す。試験終了後(604 万回)、添え板とボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、新たなき裂は検出されなかった。

・ WG1-S

荷重繰り返し数が 117 万回に達した時点で試験体西面の溶接止端部に長さ 26mm の疲労き裂が検出された。その状況を写真-2.34 に示す。その後の進展状況を表-2.7 と図-2.8 に示す。き裂検出後約 67 万回(184 万回)の载荷を行い、疲労き裂が試験体東面まで貫通して長さが西面東面ともに 95mm となった時点で補修を行った。補修前のき裂状況を写真-2.35 と写真-2.36 に、補修状況を写真-2.37 と写真-2.38 に示す。試験終了後(604 万回)、添え板とボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、新たなき裂は検出されなかった。

・ WG2-N

荷重繰り返し数が 87 万回に達した時点で試験体西面の溶接止端部に長さ 27mm の疲労き裂が検出された。その状況を写真-2.39 に示す。その後の進展状況を表-2.7 と図-2.9 に示す。き裂検出後約 17 万回(104 万回)の载荷を行い、疲労き裂が試験体東面まで貫通して長さが西面で 53mm、東面で 52mm となった時点で補修を行った。補修前のき裂状況を写真-2.40 と写真-2.41 に、補修状況を写真-2.42 に示す。試験終了後(604 万回)、添え板とボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、新たなき裂は検出されなかった。

・ WG2-S

荷重繰り返し数が 71.1 万回に達した時点で試験体西面の溶接止端部に長さ 30mm の疲労き裂が検出された。その状況を写真-2.43 に示す。その後の進展状況を表-2.7 と図-2.9 に示す。き裂検出後約 33 万回(104 万回)の载荷を行い、疲労き裂が試験体東面まで貫通して長さが西面で 58mm、東面で 59mm となった時点で補修を行った。補修前のき裂状況を写真-2.44 と写真-2.45 に、補修状況を写真-2.46 に示す。試験終了後(604 万回)、添え板とボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、新たなき裂は検出されなかった。

・WG3-N

荷重繰り返し数が117万回に達した時点で試験体西面の溶接止端部に長さ27mmの疲労き裂が検出された。その状況を写真2.47に示す。その後の進展状況を表-2.7と図-2.10に示す。き裂検出後約67万回(184万回)の载荷を行い、疲労き裂が試験体東面まで貫通して長さが西面で67mm、東面で68mmとなった時点で補修を行った。補修前のき裂状況を写真-2.48と写真-2.49に、補修状況を写真-2.50と写真-2.51に示す。試験終了後(604万回)、添え板とボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、新たなき裂は検出されなかった。

・WG3-S

荷重繰り返し数が184万回に達した時点で補修を行った。補修を行うまでき裂は検出されなかった。補修状況を写真-2.52と写真-2.53に示す。試験終了後(604万回)、添え板とボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、新たなき裂は検出されなかった。

最初に補修を行ってからの荷重繰り返し数が500万回に達したため、荷重繰り返し数が604万回に達した時点で疲労試験を終了した。試験終了後、下フランジに磁粉探傷試験を行ったが、疲労き裂は検出されなかった。

(3) B-1 試験体(ストップホール中心間距離119mm)

・WG1-N

試験開始時の補修状況を写真-2.54に示す。試験終了後(429.0万回)高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.55に示す。

・WG1-S

試験開始時の補修状況を写真-2.56に示す。試験終了後(429.0万回)高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.57に示す。

・WG2-N

試験開始時の補修状況を写真-2.58に示す。試験終了後(429.0万回)高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。

その状況を写真-2.59 に示す。

・ WG2-S

試験開始時の補修状況を写真-2.60 に示す。試験終了後（429.0 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.61 に示す。

・ WG3-N

試験開始時の補修状況を写真-2.62 に示す。試験終了後（429.0 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.63 に示す。

・ WG3-S

試験開始時の補修状況を写真-2.64 に示す。試験終了後（429.0 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.65 に示す。

荷重繰り返し数が約 429.0 万回に達した時点で下フランジ首溶接部から発生したと思われる疲労き裂により、下フランジが破断したため試験を終了した。試験終了時の破断状況を写真-2.66 と写真-2.67 に示す。

（4）B-2 試験体（ストップホール中心間距離 119mm）

・ WG1-N

試験開始時の補修状況を写真-2.68 に示す。試験終了後（611.7 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.69 に示す。

・ WG1-S

試験開始時の補修状況を写真-2.70 に示す。試験終了後（611.7 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.71 に示す。

・ WG2-N

試験開始時の補修状況を写真-2.72 に示す。試験終了後（611.7 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.73 に示す。

・ WG2-S

試験開始時の補修状況を写真-2.74 に示す。試験終了後（611.7 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.75 に示す。

・ WG3-N

試験開始時の補修状況を写真-2.76 に示す。試験終了後（611.7 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.77 に示す。

・ WG3-S

試験開始時の補修状況を写真-2.78 に示す。試験終了後（611.7 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.79 に示す。

荷重繰り返し数が約 611.7 万回に達した時点で下フランジ首溶接部から発生したと思われる疲労き裂により、下フランジが破断したため試験を終了した。試験終了時の破断状況を写真-2.80 と写真-2.81 に示す。

(5) C-1 試験体（ストップホール中心間距離 75mm）

・ WG1-N

試験開始時の補修状況を写真-2.82 に示す。試験終了後（107.1 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.83 に示す。

・ WG1-S

試験開始時の補修状況を写真-2.84 に示す。試験終了後（107.1 万回）高力ボルトを

外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.85 に示す。

・ WG2-N

試験開始時の補修状況を写真-2.86 に示す。試験終了後（107.1 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.87 に示す。

・ WG2-S

試験開始時の補修状況を写真-2.88 に示す。試験終了後（107.1 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.89 に示す。

・ WG3-N

試験開始時の補修状況を写真-2.90 に示す。試験終了後（107.1 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.91 に示す。

・ WG3-S

試験開始時の補修状況を写真-2.92 に示す。試験終了後（107.1 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.93 に示す。

荷重繰り返し数が約 107.1 万回に達した時点で下フランジ首溶接部から発生したと思われる疲労き裂により、下フランジが破断したため試験を終了した。試験終了時の破断状況を写真-2.94 と写真-2.95 に示す。

（6）C-2 試験体（ストップホール中心間距離 75mm）

・ WG1-N

試験開始時の補修状況を写真-2.96 に示す。試験終了後（429.0 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.97 に示す。

・ WG1-S

試験開始時の補修状況を写真-2.98 に示す。試験終了後（429.0 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.99 に示す。

・ WG2-N

試験開始時の補修状況を写真-2.100 に示す。試験終了後（429.0 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.101 に示す。

・ WG2-S

試験開始時の補修状況を写真-2.102 に示す。試験終了後（429.0 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.103 に示す。

・ WG3-N

試験開始時の補修状況を写真-2.104 に示す。試験終了後（429.0 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.105 に示す。

・ WG3-S

試験開始時の補修状況を写真-2.106 に示す。試験終了後（429.0 万回）高力ボルトを外して磁粉探傷試験を行ったが、補修部および円孔壁からき裂は検出されなかった。その状況を写真-2.107 に示す。

荷重繰り返し数が約 429.0 万回に達した時点で下フランジ首溶接部から発生したと思われる疲労き裂により、下フランジが破断したため試験を終了した。試験終了時の破断状況を写真-2.108 と写真-2.109 に示す。

2.1.5 補修部以外での疲労き裂

A 試験体では疲労試験の途中で垂直ステイナー取り付け部、載荷点直下の垂直ステ

ィフナ 取り付け部やソールプレート取り付け部の溶接止端から疲労き裂が検出された。それを踏まえ、ボルト締めストップホール法による補修を想定した、BとC試験体については、A試験体で疲労き裂が生じた部位の溶接止端をバークランダーで仕上げ、それらを起点とした疲労き裂の発生の防止を図った。そのため、これらの試験体では、上記部分からの疲労き裂の発生は認められなかった。

A試験体における各部位から検出された疲労き裂の状況を下に示す。

(1) 垂直補剛材におけるき裂

・A-1 試験体

荷重繰り返し数が333.9万回に達した時点で西面の北側の垂直補剛材溶接止端部に疲労き裂が目視によって検出された。磁粉探傷試験の結果、南側の垂直補剛材にもき裂が確認された。このときのき裂長さは北側垂直補剛材で174mm、南側垂直補剛材で60mmであった。その状況を写真-2.110～写真-2.113に示す。そのため、アングル材とボルト、強力シャコ万力を用いて補修を行った。補修図面を図-2.11に示す。また、補修状況を写真-2.114に示す。その後85.5万回(419.4万回)繰り返し荷重を作用させた時点で、下フランジ首溶接部から発生したと思われる疲労き裂により、下フランジが破断したため試験を終了した。

試験終了後、補修材をはずしてき裂を観察したところ、北側のき裂は20mm程度進展していることが確認された。南側については疲労き裂の進展は確認されなかった。試験終了時の状況を写真-2.115～写真-2.118に示す。

・A-2 試験体

A-1試験体で垂直補剛材溶接止端部に疲労き裂が発生したことから、A-2試験体ではあらかじめ止端部をグラインダーで仕上げた。その状況を写真-2.119に示す。

荷重繰り返し数が273.1万回に達した時点で西面の北側の垂直補剛材溶接止端部に疲労き裂が検出された。磁粉探傷試験の結果、南側垂直補剛材にもき裂が確認された。このときのき裂長さは北側垂直補剛材で68mm、南側垂直補剛材で40mmであった。それらの状況を写真-2.120～写真-2.123に示す。A-2試験体ではA-1試験体と補修方法を変え、検出された疲労き裂下端付近に円孔を開け、その円孔をボルト締めすることにより補修を行った。上端は未補修のまま試験を再開した。その状況を写真-2.124～写真-2.127に示す。その後94.1万回(367.2万回)の载荷を行った時点で、北側・南側ともき裂下端の円孔に取り付けたボルトワッシャーにき裂が検出された。その状

況を写真-2.128 と写真-2.129 に示す．その後 331 万回（604 万回）繰り返し荷重を作用させて疲労試験を終了した．き裂補修後は，き裂進展を観察した．き裂長さの定義を図-2.12 に示す．すなわち，垂直補剛材下端の溶接止端から上方向の長さを計り，下方向のき裂を足し合わせてき裂長さとした．き裂進展の様子を図-2.13 に示す．図中の実線は近似線である．北側では徐々に進展速度が遅くなっていることがわかる．これはき裂先端が桁の中立軸に近づき，引張領域から圧縮領域へ進展していたためと考えられる．南側ではほぼ一定の進展速度でき裂進展が進んだと考えられる．

試験終了後，補修板をはずしてき裂を観察した．試験終了後の状況を写真-2.130～写真-2.137 に示す．また，試験終了後のワッシャーの状況を写真-2.138～写真-2.141 に示す．円孔からの新たなき裂の発生は認められない．

(b) 載荷点におけるき裂

・ A-1 試験体

荷重繰り返し数が 333.9 万回に達した時点で垂直補剛材止端部からのき裂が検出されたため，載荷点付近の溶接止端部でも磁粉探傷試験を行った結果，すべての載荷点から疲労き裂が検出された．その状況を写真-2.142～写真-2.149 に示す．そのため，アングル材とボルト，強力シャコ万力を用いて補修を行った．補修図面を図-2.11 に示す．また，補修状況を写真-2.114 に示す．試験終了後，補修をはずしてき裂を観察したところ，補修前のき裂と顕著な変化は見られなかった．試験終了後の状況を写真-2.150～写真-2.153 に示す．

・ A-2 試験体

荷重繰り返し数が 273.1 万回に達した時点で垂直補剛材止端部からのき裂が検出されたため，載荷点付近の溶接止端部でも磁粉探傷試験を行った結果，すべての載荷点から疲労き裂が検出された．その状況を写真-2.154～写真-2.161 に示す．A-2 試験体では載荷点においての補修は行わず，未補修のまま試験を再開した．試験終了後，補修をはずしてき裂を観察したところ，補修前のき裂と顕著な違いは見られなかった．試験終了後の状況を写真-2.162～写真-2.165 に示す．

(c) 支点におけるき裂

・ A-1 試験体

荷重繰り返し数が 333.9 万回に達した時点で支点付近の溶接止端部からのき裂が検

出されたため、溶接止端部をグラインダーで仕上げた。しかし、深くまで達していたため、き裂を除去することはできなかった。き裂の状況を写真-2.166～写真-2.169 示す。

試験終了後、磁粉探傷試験を行った結果、き裂が検出された。試験終了後の状況を写真-2.170～写真-2.173 に示す。その後、大きなき裂の進展はみられなかった。

・ A-2 試験体

A-1 試験体で支点付近の溶接止端部にき裂が検出されたことから、A-2 試験体では試験前に溶接止端部をグラインダーで仕上げた。その状況を写真-2.174 に示す。試験終了後、磁粉探傷試験を行った結果、き裂が検出された。試験終了後の状況を写真-2.175～写真-2.178 に示す。試験終了後までにき裂は発生したものの大きなき裂の進展はみられなかった。

2.1.6 桁試験体の疲労強度

疲労試験結果を表-2.8(a)(b)に、公称応力範囲で整理した疲労試験結果を図-2.14 に示す。表-2.8(a)に示す溶接ままの継手部の公称応力範囲はガセット板厚中心のガセット板端部、表-2.8(b)に示す補修部の公称応力範囲はストップホール下縁で計算したものである。A 試験体の溶接ままの状態での疲労寿命はき裂長さが 40mm 程度になった時点の繰返し数とした。図-2.5 に示したこれまでの疲労試験結果とここで得られた結果を比較したのが図-2.15 である。ここでの結果はこれまでの結果とほぼ一致している。

(1) A 試験体（添え板ボルト締めストップホール法）

2.1.4 項で示したとおり、疲労試験終了後に補修部を磁粉探傷法で詳細に観察した結果、補修部からの疲労き裂の再発生は認められなかった。このように、補修部からの疲労き裂は認められなかったため、添え板ボルト締めストップホール法の定量的な効果は確認できなかったものの、図-2.13 から判断して、少なくとも溶接ままの状態よりも高い疲労強度を有していると判断できる。また、表-2.8 に示したように、添え板ボルト締めストップホール法による補修部の疲労寿命は溶接ままに比べて最大で 5 倍程度長くなっている。このことは、橋上の交通状態が変化しないとした場合、供用後 20 年で 40mm 程度の疲労き裂が検出されたとすると、ここで示した方法で補修すれば、その後 100 年の供用によっても補修部に疲労損傷が生じないということの意味

している。

(2) B 試験体，C 試験体（ボルト締めストップホール法）

2.1.4 で示したとおり，疲労試験終了後に補修部を磁粉探傷法で詳細に観察した結果，ボルト締めしたストップホールからの疲労き裂の発生は認められなかった。補修部からの疲労き裂は認められなかったため，ボルト締めストップホール法の定量的な効果は確認できなかったものの，図-2.13 から判断して，少なくとも溶接ままの状態よりも高い疲労強度を有していると判断できる。

(3) 首溶接部の疲労強度

桁試験体は全て下フランジ首溶接部から発生したと思われる疲労き裂の進展によって，下フランジが破断したために試験を終了した。下フランジ首溶接から生じた疲労き裂面の写真を写真-2.179～写真-2.188 に示す。疲労き裂は溶接ルートから生じていると考えられるが，どの写真からもその位置にブローホールのような溶接きずの存在は認められない。首溶接部の応力範囲は 160N/mm^2 程度あり，そのため首溶接部から疲労き裂が生じたものと考えられる。図-2.16 に疲労き裂が生じた首溶接部の公称応力範囲と疲労寿命の関係を示す。鋼構造協会の疲労設計指針（JSSC 指針）³¹⁾では，首溶接部の疲労強度等級を C（幅 1.5mm，高さ 4.0mm を超えるきずが無いことを確かめられた場合）としているが，ここでの結果はそれを満たしている。

2.2 応力解析

2.2.1 解析モデル

解析モデルは全長 3800mm，支点間距離 3600mm の I 断面桁試験体である。ウェブ高は 450mm，ウェブ厚は 9mm，上フランジ幅は 150mm，下フランジ幅は 100mm，フランジ厚は 12mm である。載荷方法は 4 点曲げである。このモデルの対象性を考慮して 1/4 モデルで解析を行った。

このモデルのうち中央のガセット中心から上下 105mm，試験体中央から 280mm の部分を solid 要素，それ以外の部分を shell 要素でモデル化したハイブリッドモデルで解析を行った。shell 要素と solid 要素の接合は，ソリッド要素の側面にシェル要素を一枚貼り付ける方法で行った。貼付するシェル要素の厚さは，結合するシェル要素と同じとした。この結合方法の妥当性は，大沢らにより確かめられている³²⁾。対象と

するモデルは、添え板ボルト締めストップホールモデル、ストップホールモデル、ボルト締めストップホールモデルの 3 つである。モデルの概略図を図-2.17 に、各モデルの solid 要素部の要素分割図を図-2.18～図-2.20 に示す。円孔の大きさは直径 24.5mm、ボルト径は 22mm としている。円孔付近の要素寸法は 1mm、それ以外の solid 要素の要素寸法は 2mm 程度とした。切り欠きは二重節点で表現した。

2.2.2 解析手法

応力解析には、CAEFEM VER6.0 を使用する。要素には 8 節点固体要素と板要素を用い、3 次元有限要素応力解析を行う。鋼材のヤング率は $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3 とする。

ボルト頭とナットは実際のボルト頭の六角形と面積の等しい円形とした。ナット形状の簡略化に関しては森ら¹²⁾によってその妥当性が確かめられている。またボルトの軸力 P は森ら¹³⁾により、式(2.1)で表される強制変位 L を与えることで表現できることことが確かめられている。

$$\Delta L = a \frac{\sigma}{\sigma'} \quad \dots \dots (2.1)$$

- L : 軸力を導入するために与える強制変位 (mm)
- a : 初期供与強制変位 (mm)
- σ' : a を与えたときの軸力 (N/mm^2)

母板とワッシャーの接触面で生じる微小な滑りについては、母板とワッシャーの間に厚さ 0.1mm の弾性係数の低い要素を挿入することによってモデル化を行った。この微小なすべりを表すようその弾性係数の大きさは母板とワッシャーの接触圧力に比例するという式(2.2)が提案されている¹³⁾。この式を用いて挿入する要素の弾性係数を決定した。この式を用いて挿入する要素の弾性係数を決定した。

$$E = 12.6 \cdot \sigma \quad \dots \dots (2.2)$$

- E : 挿入する要素の弾性係数 (N/mm^2)
- σ : 注目する部分の接触圧力 (N/mm^2)

2.2.3 解析結果と試験結果の比較

添え板ボルト締めストップホールモデルの解析結果から得られた円孔壁の応力範囲で整理した s - N 関係を図-2.21 に示す。図-2.21 中の直線は式(2.2)で与えられる。この式は、ストップホール法やボルト締めストップホール法で補修した部材について求められている疲労強度曲線¹⁹⁾である。

$$s^{5.39} \cdot N = 1.51 \times 10^{20} \quad \dots (2.2)$$

s : 円孔壁の応力集中係数

N : 疲労寿命

この式が添え板ボルト締めストップホール法で補修した場合にも適用できると考えると、ここで得られた疲労試験結果は、式(2.2)で与えられる線よりも下に位置しており、補修部から疲労き裂が発生しなかったことに対応している。

各補修モデルの円孔壁における最大主応力と応力集中係数を表-2.9 に示す。また、板厚方向の円孔壁に沿った主応力の分布を図-2.22 に、円孔壁の応力集中係数を図-2.23 に示す。なお、母板と添え板の間に挿入した微小な要素の影響を受けるため、板最表面での応力は除いている。いずれの場合も、最大の応力集中は板厚中心で生じており、ストップホールをボルト締め、添え板ボルト締めすることにより応力集中が緩和されている。ストップホール法と比較すると、ボルト締めストップホール法の応力集中係数は0.43倍、添え板ボルト締めストップホール法では0.29倍となっている。また、添え板ボルト締めストップホール法の応力集中係数は、ボルト締めストップホール法に比べて0.68倍となっている。このことから、添え板ボルト締めストップホール法は高い補修効果を有していると考えられる。

式(2.2)に示したように、円孔から疲労き裂を生じる場合の疲労寿命は、円孔壁での応力範囲の5.39乗に反比例することが知られている。これに従えば、添え板ボルト締めストップホール法による補修部の疲労寿命は、ストップホール法の約790倍、ボルト締めストップホール法の約8倍となる。

表-2.1 鋼材の機械的性質及び化学組成

鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分(%)				
		降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び(%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
SM490A	9	367	553	26	16	34	147	17	5
SM490YA	12	450	556	25	17	31	133	17	3

表-2.2 面外ガセット溶接条件

溶接方法		炭酸ガスアーク溶接				
溶接部位		ウェブ-ガセット				
溶接ワイヤ		MX-Z200 (JIS Z 3313 YFW-C50DM) 1.2mm				
ガス流量		CO ₂ 100% 25 l/min				
位置	順序	電流 (A)	電圧 (V)	溶接時間 (sec)	溶接速度 (cm/min)	入熱量 (KJ/cm)
開先内		230	33	54	20	22.8
		230	33	93	21	21.4
		230	33	40	26	17.9
仕上げ部		230	33	50	22	21.1
		230	33	91	22	20.9
		230	33	47	22	21.0

表-2.3 溶接形状測定結果

	ガセット側脚長	ウェブ側脚長	ウェブ側溶接角度	ウェブ側溶接曲率半径
WG1-N-W	7.6	13.7	124.3	0.60
WG1-S-W	8.3	14.3	122.3	0.58
WG2-N-W	8.6	13.7	106.0	0.22
WG2-S-W	7.6	14.6	108.3	0.30
WG3-N-W	7.4	14.8	109.7	0.77
WG3-S-W	8.3	13.7	108.7	0.28
WG1-N-E	7.4	14.8	109.7	0.77
WG1-S-E	8.0	15.3	114.7	0.65
WG2-N-E	7.9	14.0	108.7	0.55
WG2-S-E	7.5	14.0	106.7	0.42
WG3-N-E	7.6	13.2	111.7	0.72
WG3-S-E	7.5	14.6	104.3	0.43
平均値	7.9	14.2	112.1	0.49

表-2.4 垂直補剛材溶接条件

溶接方法		炭酸ガスアーク溶接	
溶接部位		ウェブ-垂直補剛材, フランジ-垂直補剛材	
溶接ワイヤ		MX-Z200 (JIS Z 3313 YFW-C50DM) 1.2mm	
ガス流量		CO ₂ 100% 25 l/min	
電流(A)	電圧(V)	溶接速度 (cm/min)	入熱量 (KJ/cm)
230	33	18~23	20~25

表-2.5 応力測定試験結果

	ゲージ名称	ひずみ(μ)	応力(N/mm ²)	計算値
下 フ ラ ン ジ	W01	711	146.5	153.1
	W02	815	167.9	171.5
	W03	786	161.9	171.5
	W04	694	143.0	153.1
	E01	660	136.0	153.1
	E02	736	151.6	171.5
	E03	765	157.6	171.5
	E04	686	141.3	153.1
ガ ゼ ツ ト	G1-W	520	107.1	83.3
	G2-W	515	106.1	83.3
	G1-E	512	105.5	83.3
	G2-E	478	98.5	83.3

表-2.6 疲労き裂進展 (A-1 試験体)

	WG1-N		WG1-S		WG2-N		WG2-S		WG3-N		WG3-S		
	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	
516000							19						
620000							23						
655000							24						
780000						17	26				6		
815000						17	26				6		
935000						19	28				8		
975000						20	30	10			8		
1050000						22	45	45			8		
1080000						24	58	57			9		
1100000						24	58	57			9		
1120000						25	67*	67*			9		*印補修
1260000			28			31					11		
1300000			29		31	35					12		
1390000			29		69	68					13		
1410000			29		79*	79*					13		*印補修
1540000			29								14		
1750000			34	34							19		
1790000			43	42							22		
1880000			57	63						26	25		
1905000			65*	71*						30	27		*印補修
2045000										58,17	45,25		
2070000										64,23*	55,29*		*印補修

表-2.7 疲労き裂進展 (A-2 試験体)

	WG1-N		WG1-S		WG2-N		WG2-S		WG3-N		WG3-S			
	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	E		
711000							30							
870000					27		32							
1010000					44	41	50	51						
1040000					53*	52*	58*	59*					*印補修	
1170000			26							27				
1274000			29							28				
1324000			31							29				
1460000			31							29				
1495000			37							32				
1840000	*	*	95*	95*						67*	68*	*	*	*印補修

表-2.8 疲労試験結果

(a) 溶接のまま

試験体	ガセット位置	公称応力範囲 (N/mm ²)	疲労寿命 N (× 10 ⁴ cycles)
A-1	WG1-N	49.3	-
	WG1-S	66.7	179.0
	WG2-N	81.2	139.0
	WG2-S	81.2	105.0
	WG3-N	66.7	204.5
	WG3-S	49.3	-
A-2	WG1-N	49.3	-
	WG1-S	66.7	184.0
	WG2-N	81.2	101.0
	WG2-S	81.2	101.0
	WG3-N	66.7	184.0
	WG3-S	49.3	-

(b) 補修部

試験体	ガセット位置	公称応力範囲 (N/mm ²)	荷重繰返し数 N (× 10 ⁴ cycles)
A-1	WG1-N	77.7	-
	WG1-S	105.1	228.9
	WG2-N	127.9	278.4
	WG2-S	127.9	307.4
	WG3-N	105.1	212.4
	WG3-S	77.7	-
A-2	WG1-N	77.7	420.0
	WG1-S	105.1	420.0
	WG2-N	127.9	500.0
	WG2-S	127.9	500.0
	WG3-N	105.1	420.0
	WG3-S	77.7	420.0
B-1	WG1-N	77.7	134.9
	WG1-S	105.1	134.9
	WG2-N	127.9	134.9
	WG2-S	127.9	134.9
	WG3-N	105.1	134.9
	WG3-S	77.7	134.9
B-2	WG1-N	77.7	611.7
	WG1-S	105.1	611.7
	WG2-N	127.9	611.7
	WG2-S	127.9	611.7
	WG3-N	105.1	611.7
	WG3-S	77.7	611.7
C-1	WG1-N	69.0	107.1
	WG1-S	93.3	107.1
	WG2-N	113.6	107.1
	WG2-S	113.6	107.1
	WG3-N	93.3	107.1
	WG3-S	69.0	107.1
C-2	WG1-N	69.0	429.0
	WG1-S	93.3	429.0
	WG2-N	113.6	429.0
	WG2-S	113.6	429.0
	WG3-N	93.3	429.0
	WG3-S	69.0	429.0

表-2.9 円孔壁における最大応力と応力集中係数

	最大主応力	応力集中係数
ストップホール	738.8	5.514
ボルト締め	317.6	2.370
添え板	214.9	1.604

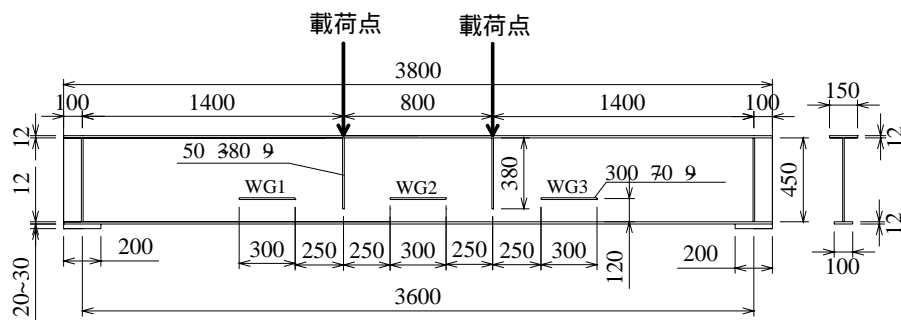


図-2.1 桁試験体の形状と寸法

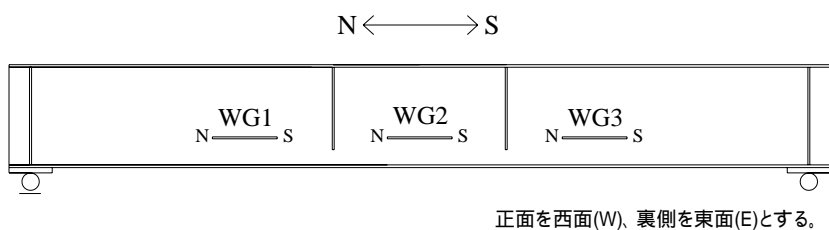


図-2.2 ガゼットの名称と定義

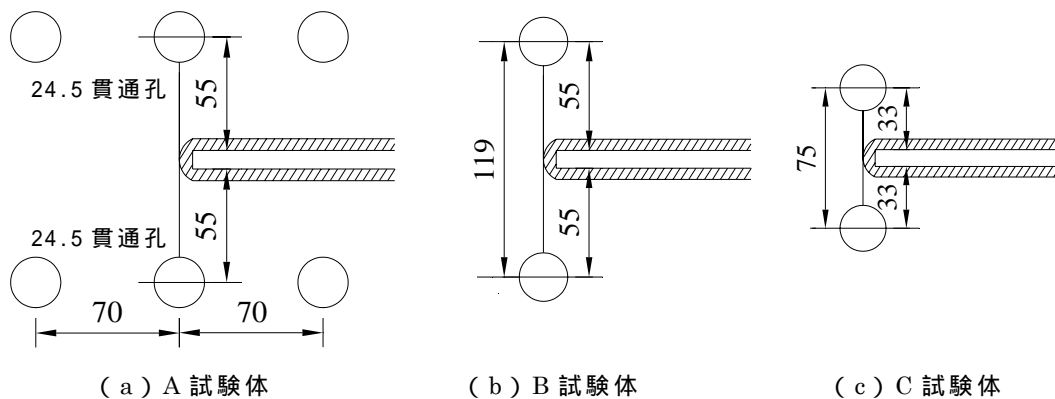


図-2.3 桁試験体の形状と寸法

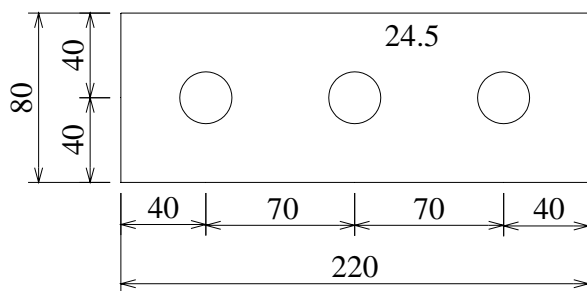


図-2.4 添え板の形状と寸法

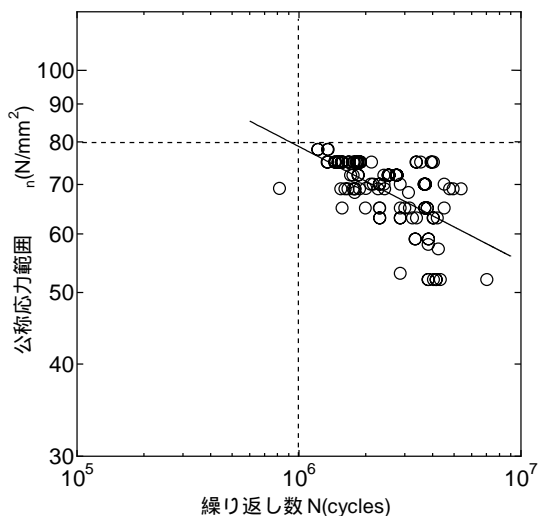


図-2.5 き裂長さ 40mm を疲労寿命としたときの過去疲労試験結果

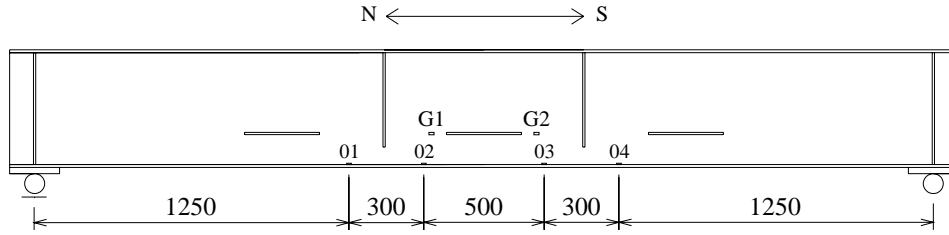


図-2.6 ひずみゲージ貼付位置と名称

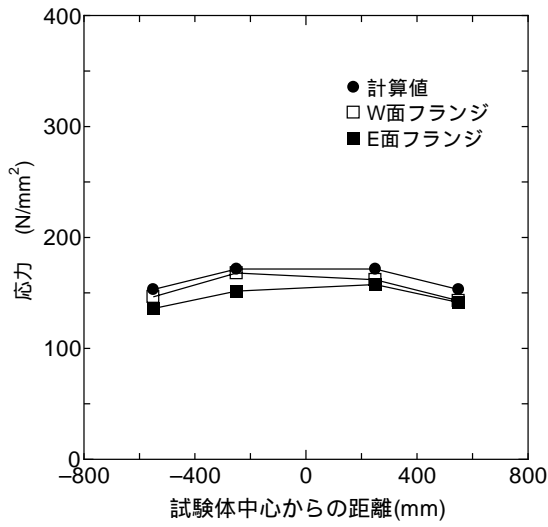


図-2.7 下フランジ応力測定結果

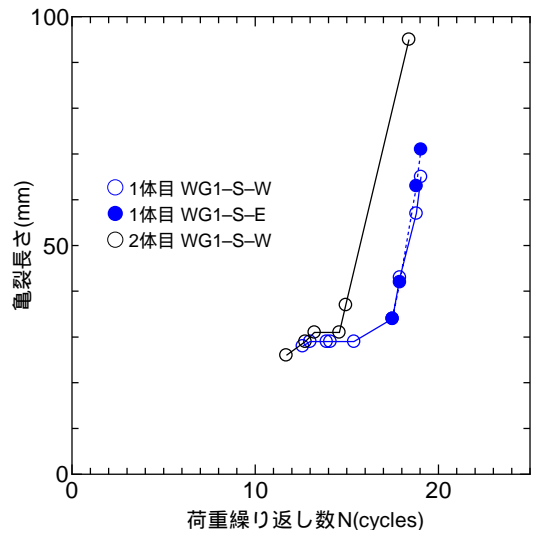


図-2.8 き裂進展 (WG1)

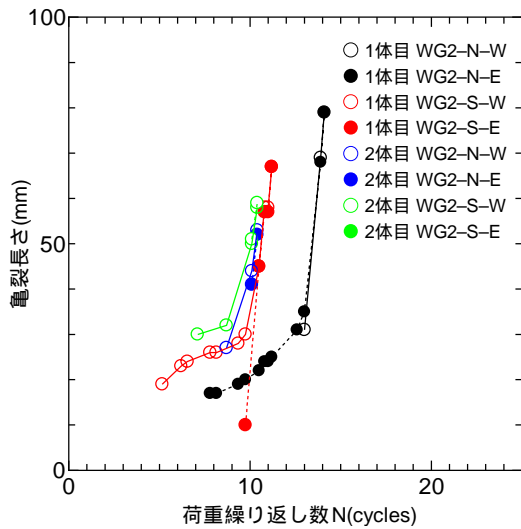


図-2.9 き裂進展 (WG2)

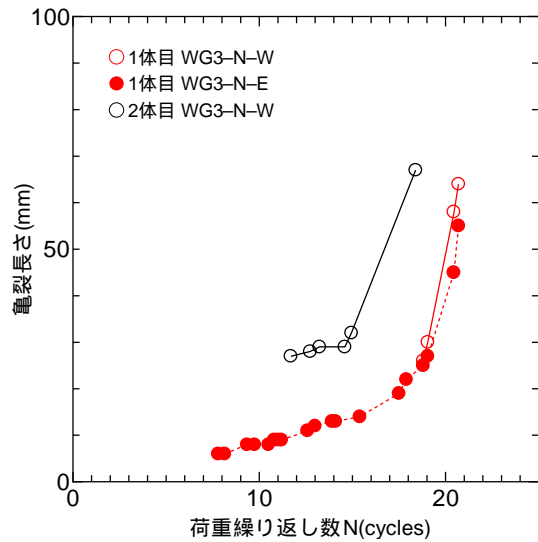


図-2.10 き裂進展 (WG3)

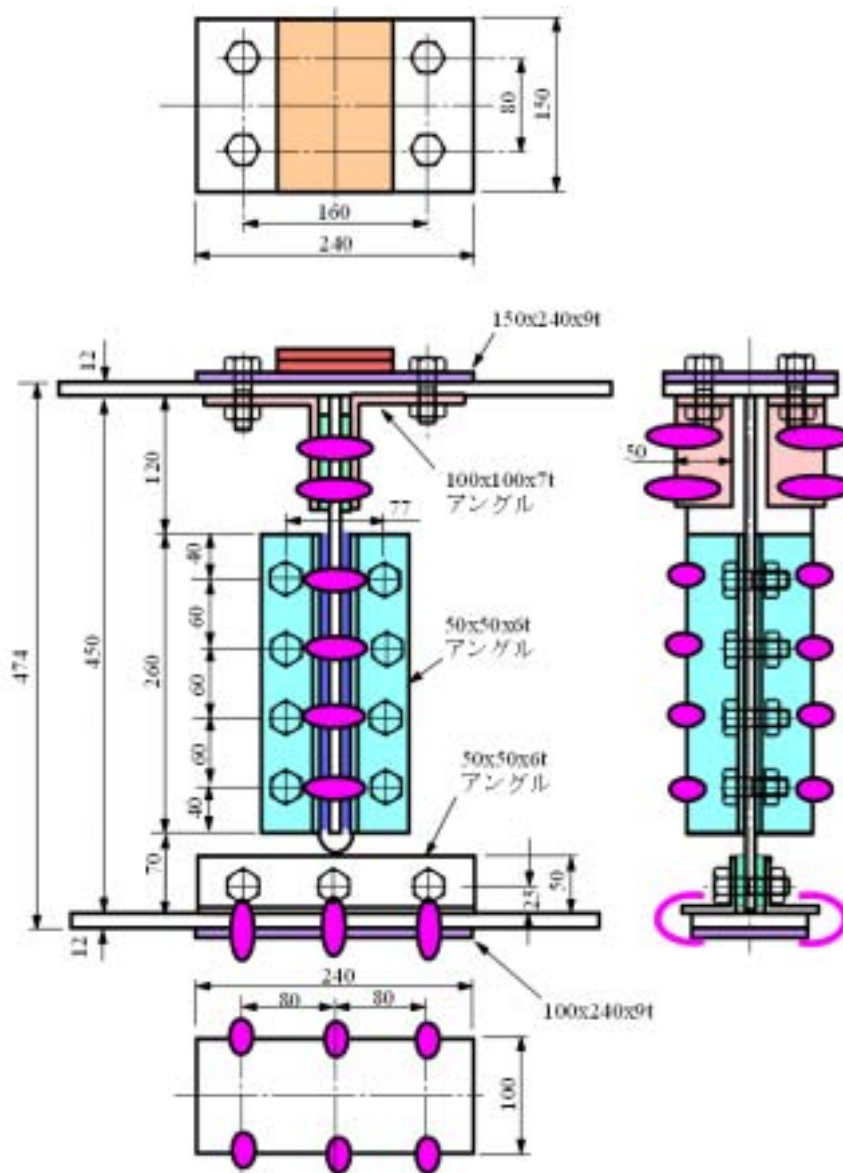


図-2.11 垂直補剛材の補修図



図-2.12 き裂長さの定義

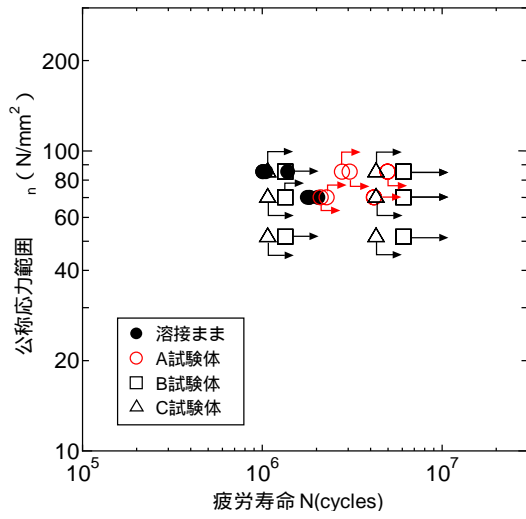


図-2.13 疲労試験結果

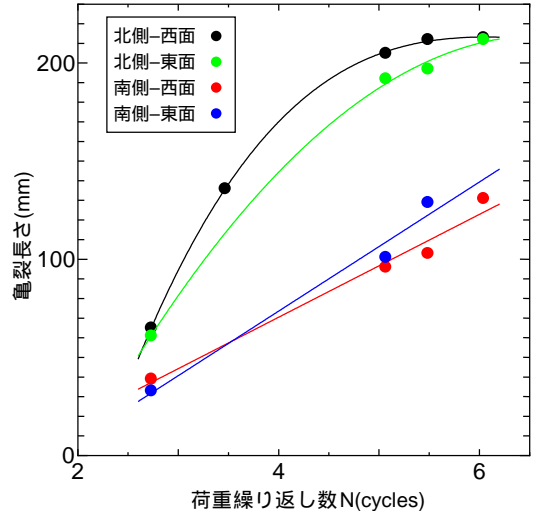


図-2.14 垂直補剛材のき裂進展

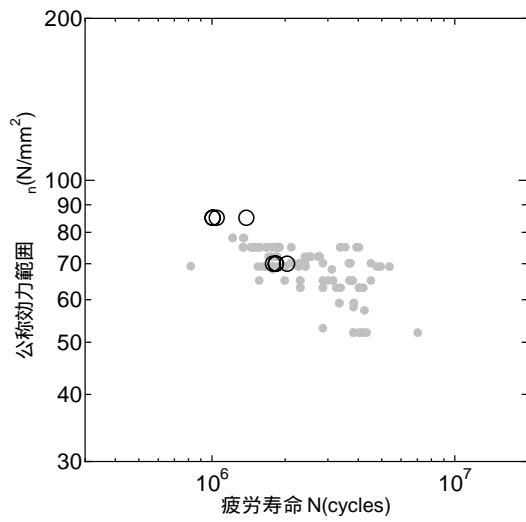


図-2.15 過去の疲労試験結果との比較

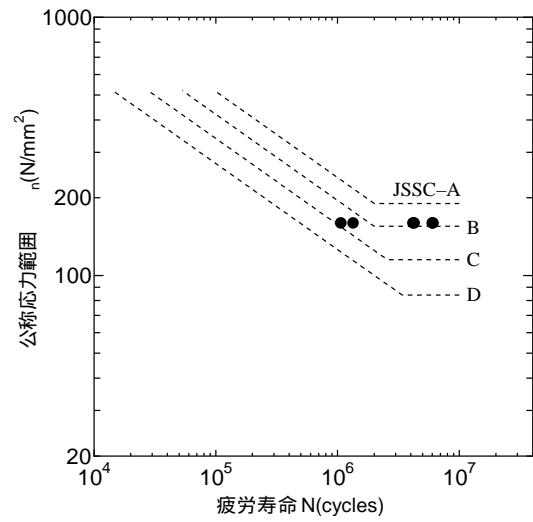


図-2.16 首溶接部の疲労強度

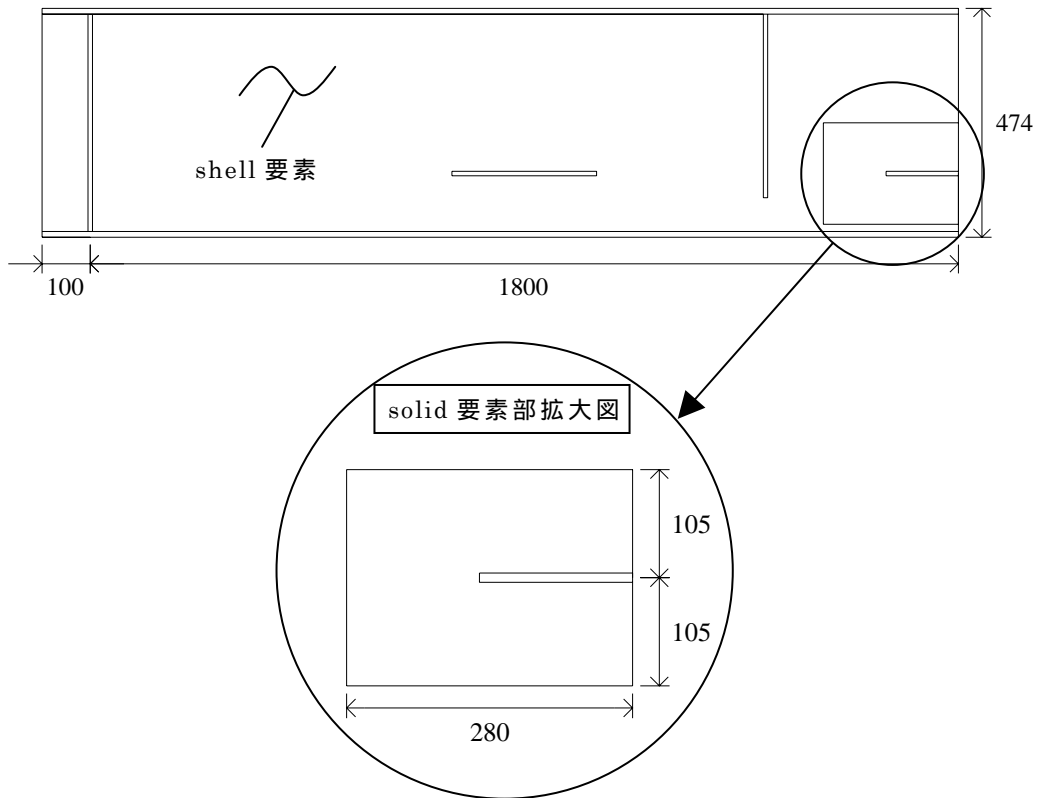


図-2.17 解析モデル概要図

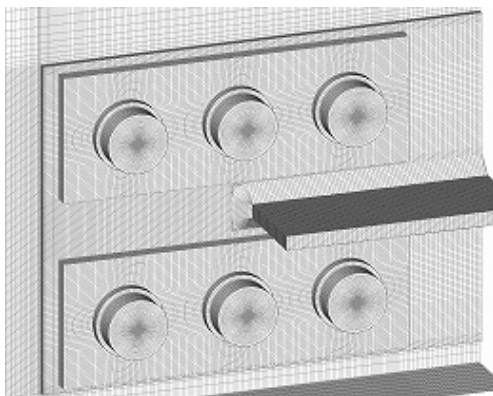


図-2.18 添え板ボルト締め
ストップホールモデル

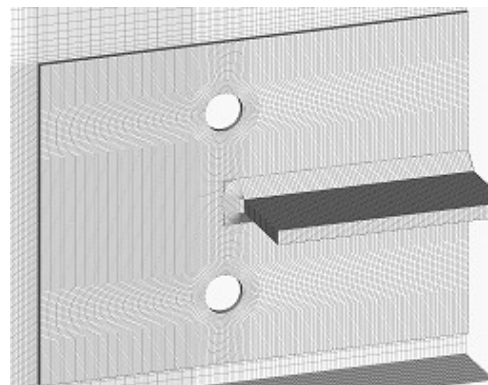


図-2.19 ストップホールモデル

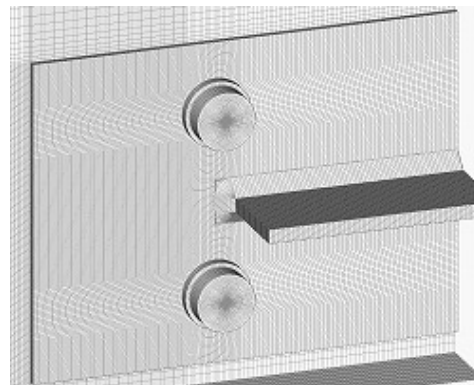


図-2.20 ボルト締めストップホールモデル

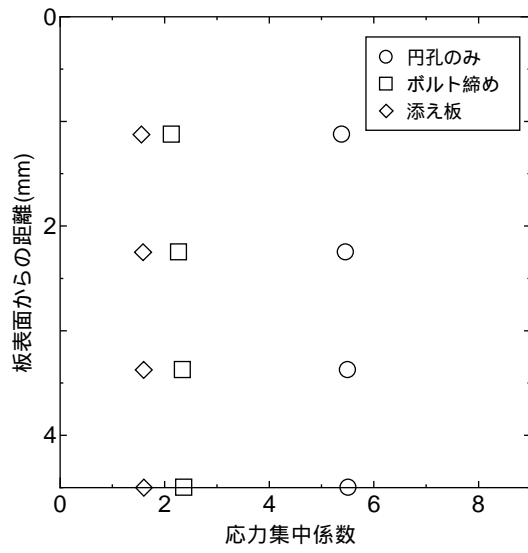


図-2.22 円孔壁沿った主応力分布

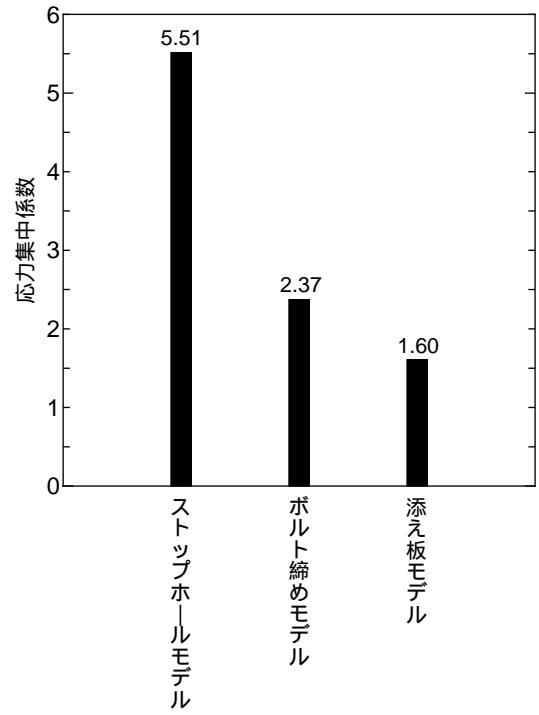


図-2.23 各モデルの円孔壁での応力集中係数



写真-2.1 A試験体 添え板設置前(疲労き裂有)



写真-2.2 A試験体 添え板設置前(疲労き裂無)



写真-2.3 A試験体 添え板設置後



写真-2.4 使用したシャーレンチ



写真-2.5 トルシアボルト

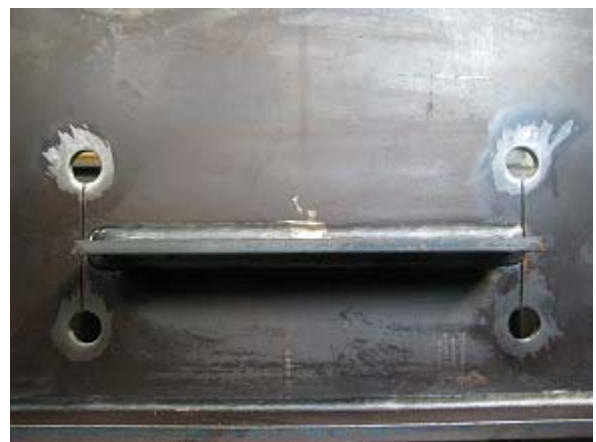


写真-2.6 B試験体 ボルト締め前



写真-2.7 B試験体 ボルト締め後



写真-2.8 C試験体 ボルト締め前



写真-2.9 C試験体 ボルト締め後



写真-2.10 桁試験体の疲労試験状況

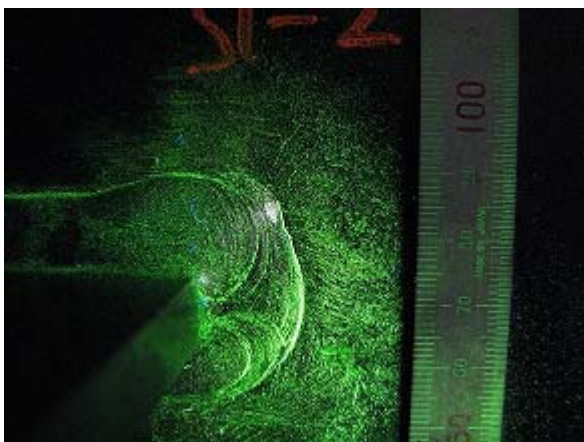


写真-2.11 WG1-S 初期き裂 (西面)



写真-2.12 WG1-S 補修前き裂 (西面)

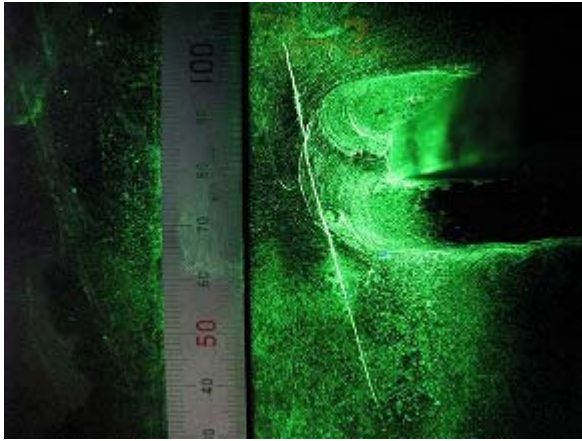


写真-2.13 WG1-S 補修前き裂（東面）



写真-2.14 WG1-S 添え板設置前状況



写真-2.15 WG1-S 添え板設置後状況

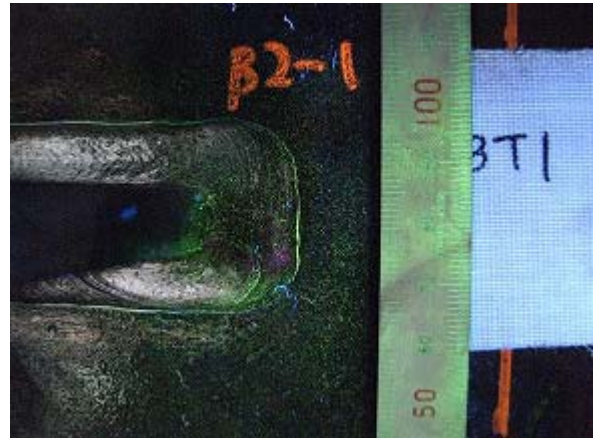


写真-2.16 WG2-N 初期き裂（東面）

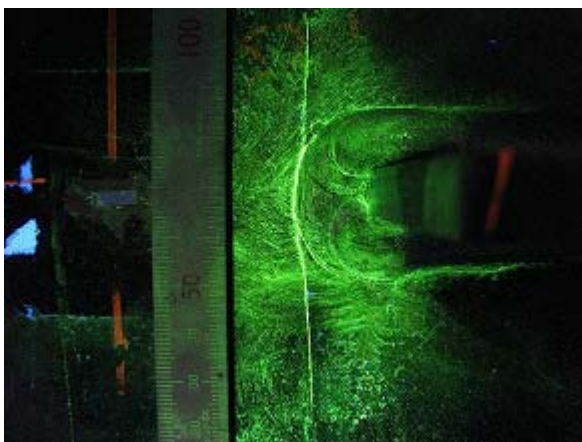


写真-2.17 WG2-N 補修前き裂（西面）

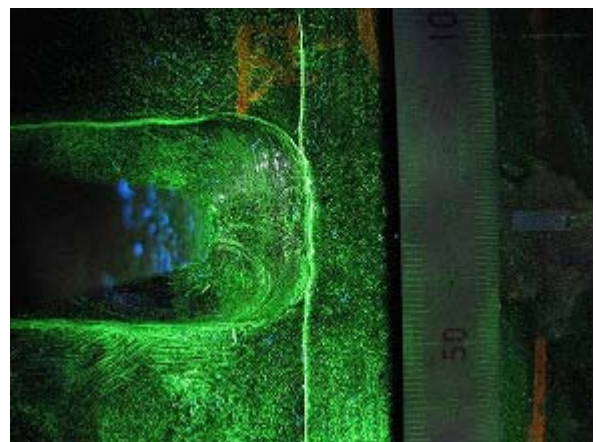


写真-2.18 WG2-N 補修前き裂（東面）



写真-2.19 WG2-N 添え板設置前状況



写真-2.20 WG2-N 添え板設置後状況



写真-2.21 WG2-S 初期き裂 (西面)

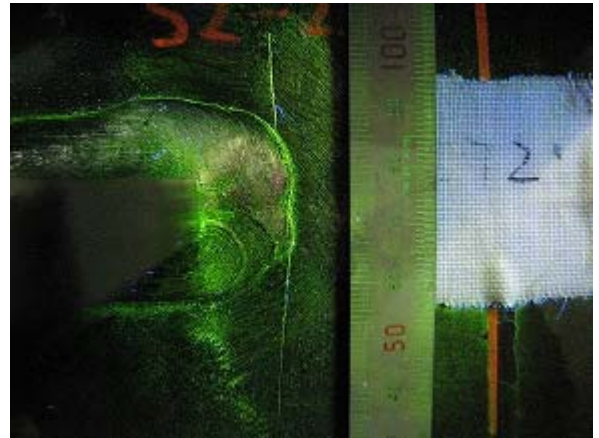


写真-2.22 WG2-S 補修前き裂 (西面)

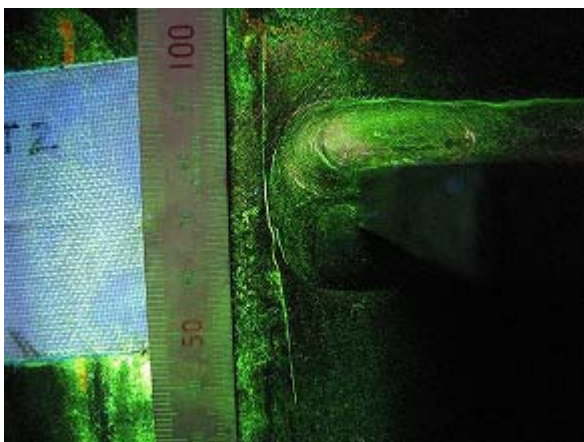


写真-2.23 WG2-S 補修前き裂 (東面)



写真-2.24 WG2-S 添え板設置後状況



写真-2.25 WG3-N 初期き裂 (東面)

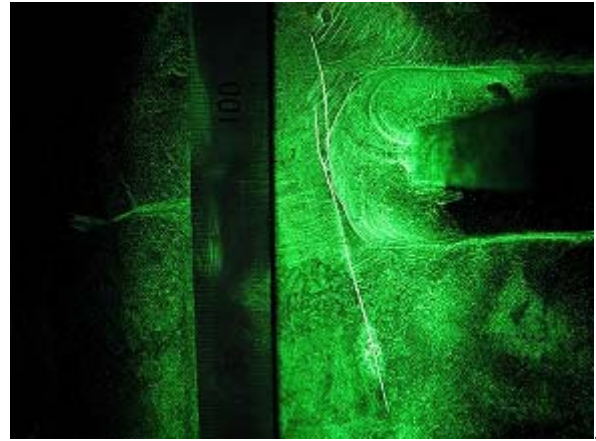


写真-2.26 WG3-N 補修前き裂 (西面)



写真-2.27 WG3-N 補修前き裂 (東面)



写真-2.28 WG3-N 添え板設置前状況



写真-2.29 WG3-N 添え板設置後状況



写真-2.30 A-1 試験体下フランジ破断状況



写真-2.31 A-1 試験体下フランジ破断状況



写真-2.32 WG1-N 添え板設置前状況



写真-2.33 WG1-N 添え板設置後状況



写真-2.34 WG1-S 初期き裂 (西面)



写真-2.35 WG1-S 補修前き裂 (西面)



写真-2.36 WG1-S 補修前き裂 (東面)



写真-2.37 WG1-S 添え板設置前状況



写真-2.38 WG1-S 添え板設置後状況

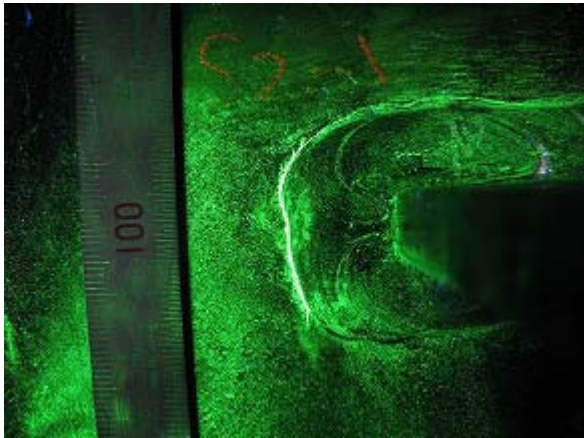


写真-2.39 WG2-N 初期き裂

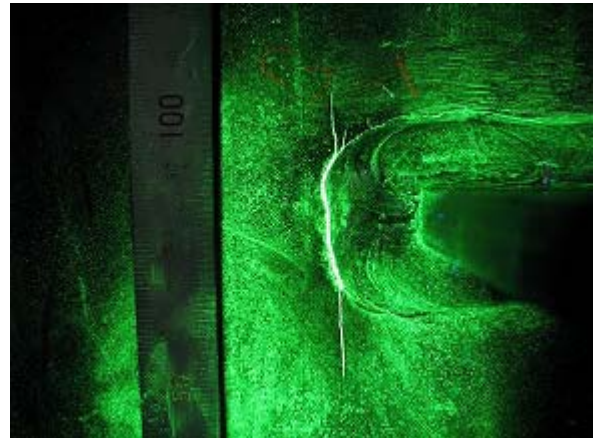


写真-2.40 WG2-N 補修前き裂（西面）

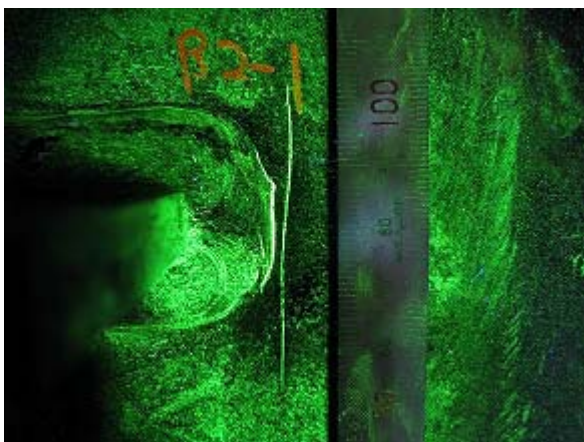


写真-2.41 WG2-N 補修前き裂（東面）



写真-2.42 WG2-N 添え板設置後状況

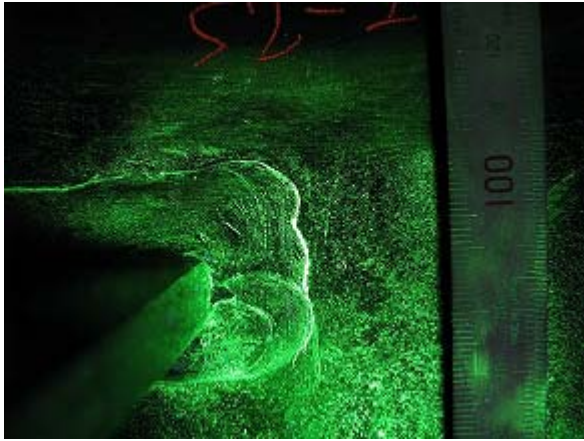


写真-2.43 WG2-S 初期き裂 (西面)

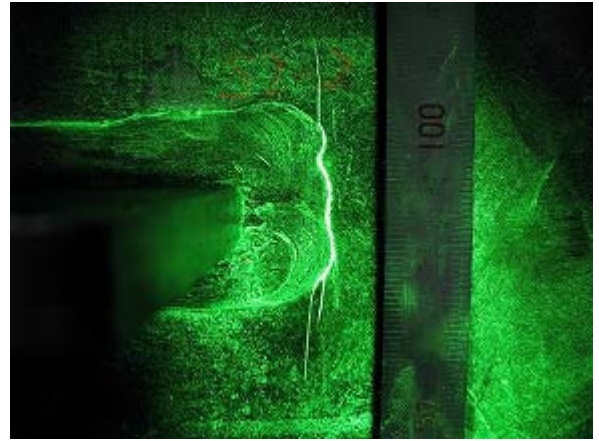


写真-2.44 WG2-S 補修前き裂 (西面)

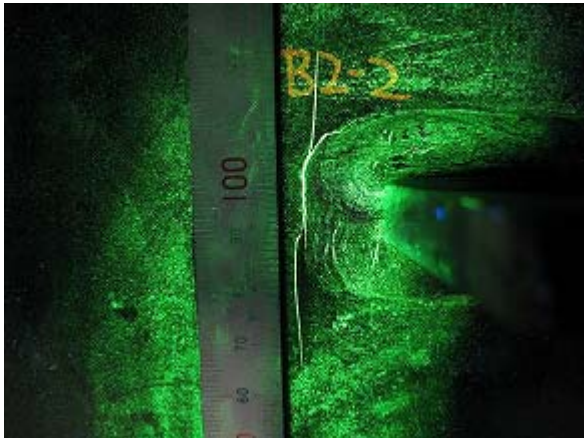


写真-2.45 WG2-S 補修前き裂 (東面)



写真-2.46 WG2-S 添え板設置後状況

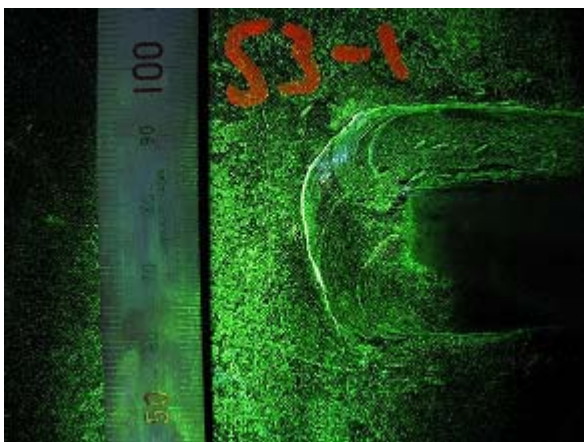


写真-2.47 WG3-N 初期き裂 (西面)

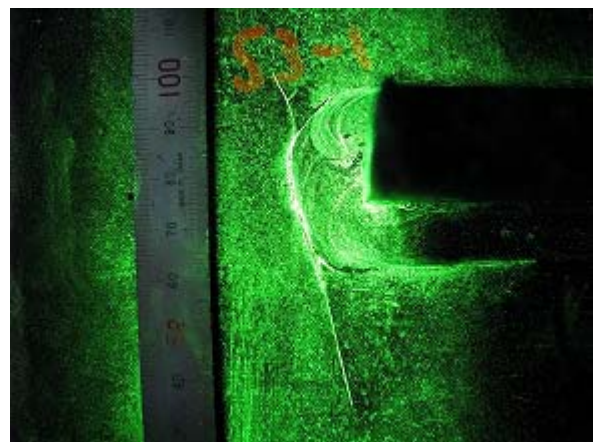


写真-2.48 WG3-N 補修前き裂 (西面)

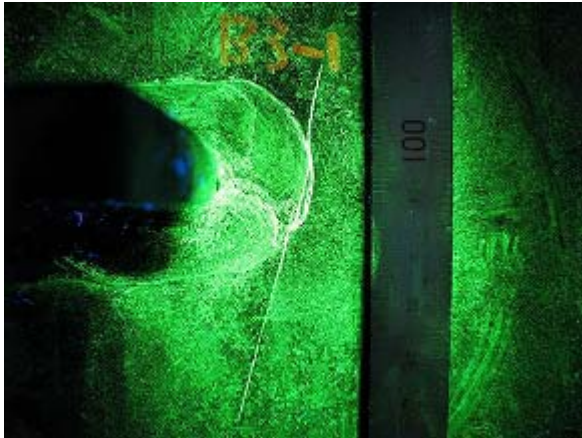


写真-2.49 WG3-N 補修前き裂（東面）



写真-2.50 WG3-N 添え板設置前状況



写真-2.51 WG3-N 添え板設置後状況



写真-2.52 WG3-S 添え板設置前状況



写真-2.53 WG3-S 添え板設置後状況



写真-2.54 WG1-N ボルト締め後状況



写真-2.55 WG1-N 疲労試験終了後



写真-2.56 WG1-S ボルト締め後状況



写真-2.57 WG1-S 疲労試験終了後



写真-2.58 WG2-N ボルト締め後状況



写真-2.59 WG2-N 疲労試験終了後



写真-2.60 WG2-S ボルト締め後状況

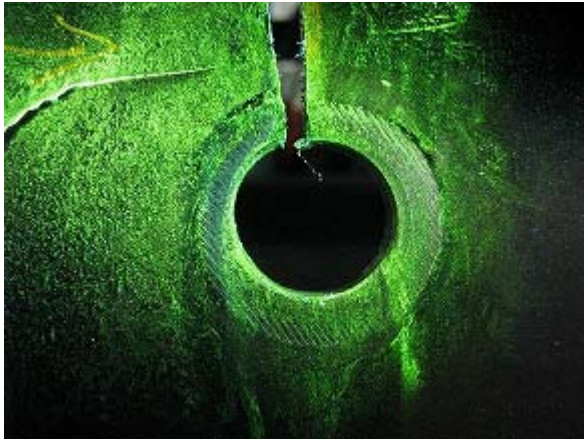


写真-2.61 WG2-S 疲労試験終了後



写真-2.62 WG3-N ボルト締め後状況

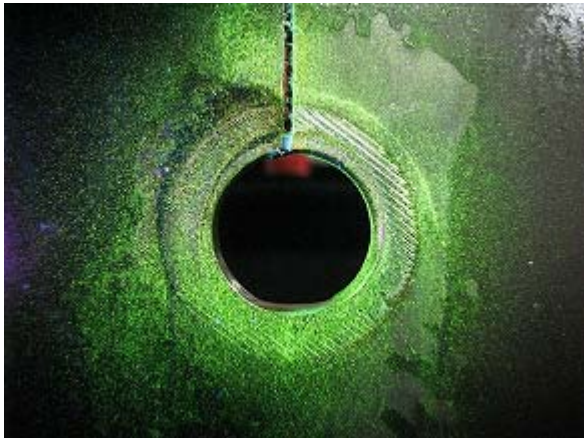


写真-2.63 WG3-N 疲労試験終了後



写真-2.64 WG3-S ボルト締め後状況

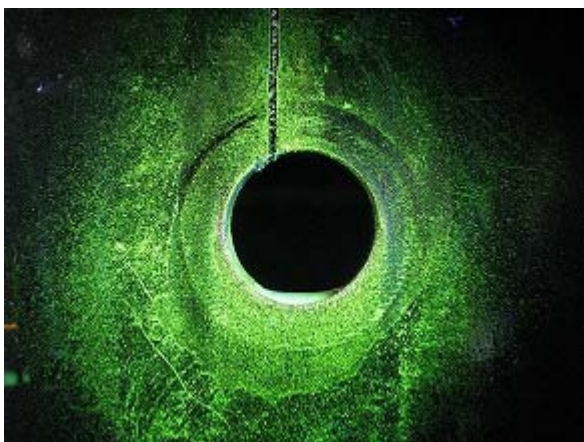


写真-2.65 WG3-S 疲労試験終了後



写真-2.66 B-1 試験体下フランジ破断状況



写真-2.67 B-1 試験体下フランジ破断状況



写真-2.68 WG1-N ボルト締め後状況

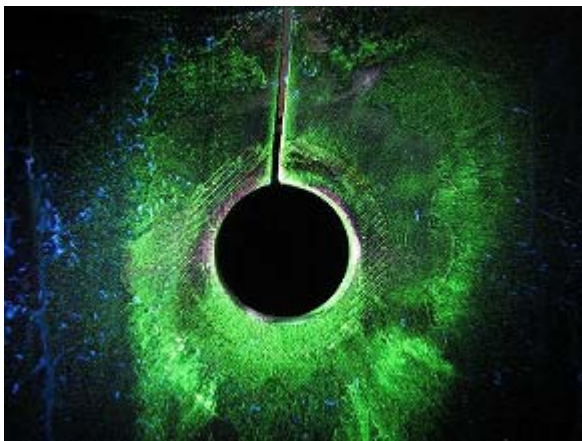


写真-2.69 WG1-N 疲労試験終了後



写真-2.70 WG1-S ボルト締め後状況

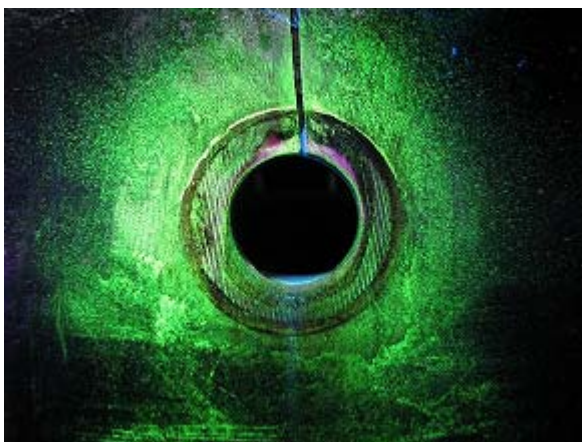


写真-2.71 WG1-S 疲労試験終了後



写真-2.72 WG2-N ボルト締め後状況

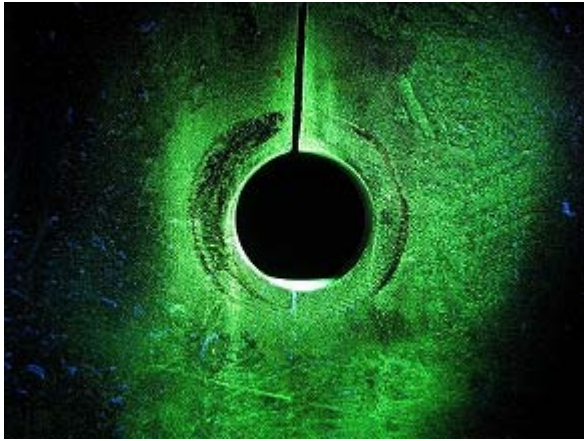


写真-2.73 WG2-N 疲労試験終了後



写真-2.74 WG2-S ボルト締め後状況

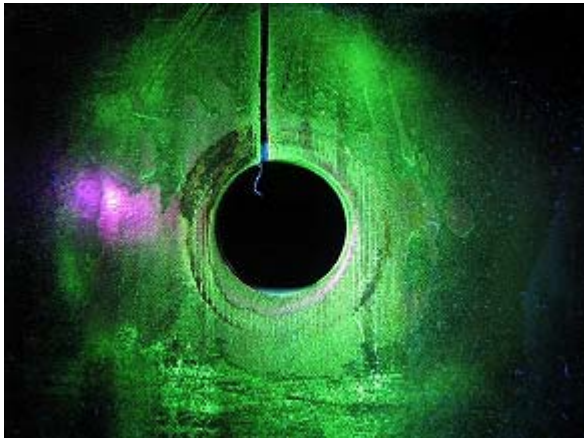


写真-2.75 WG2-S 疲労試験終了後



写真-2.76 WG3-N ボルト締め後状況



写真-2.77 WG3-N 疲労試験終了後



写真-2.78 WG3-S ボルト締め後状況

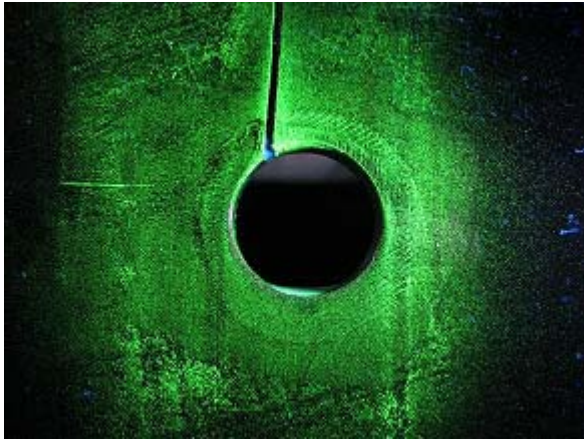


写真-2.79 WG3-S 疲労試験終了後

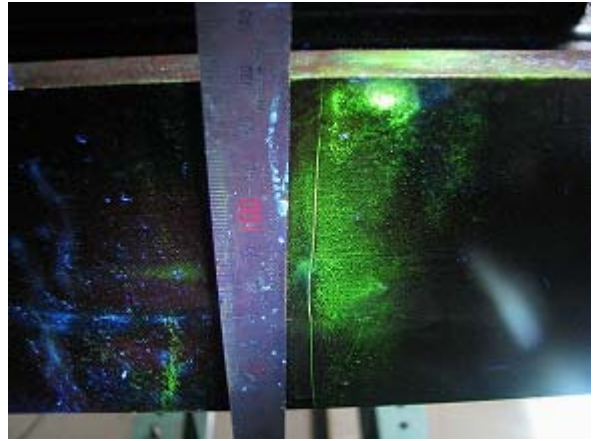


写真-2.80 B-2 試験体下フランジ破断状況



写真-2.81 B-2 試験体下フランジ破断状況



写真-2.82 WG1-N ボルト締め後状況

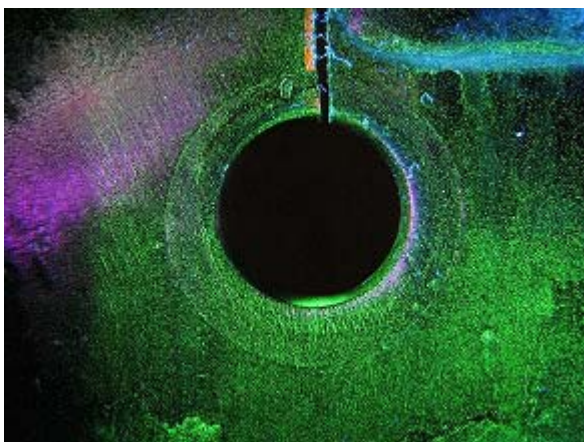


写真-2.83 WG1-N 疲労試験終了後



写真-2.84 WG1-S ボルト締め後状況

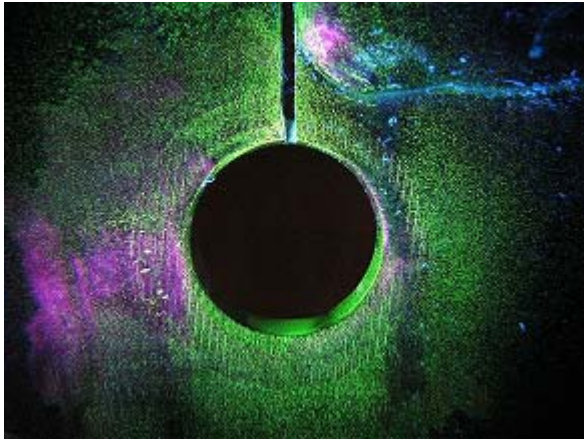


写真-2.85 WG1-S 疲労試験終了後



写真-2.86 WG2-N ボルト締め後状況

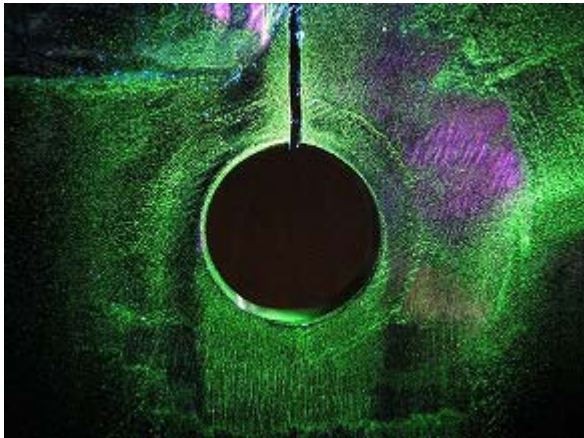


写真-2.87 WG2-N 疲労試験終了後



写真-2.88 WG2-S ボルト締め後状況

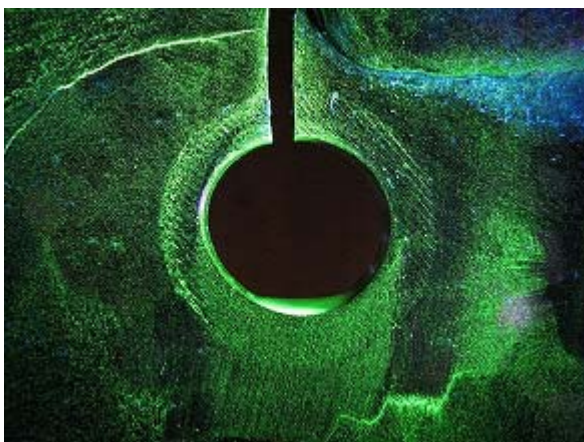


写真-2.89 WG2-S 疲労試験終了後



写真-2.90 WG3-N ボルト締め後状況

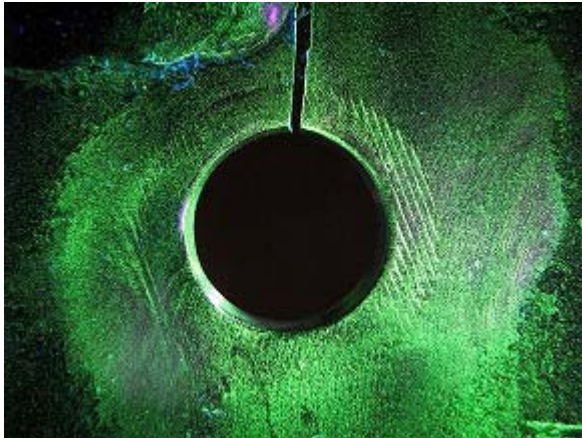


写真-2.91 WG3-N 疲労試験終了後



写真-2.92 WG3-S ボルト締め後状況

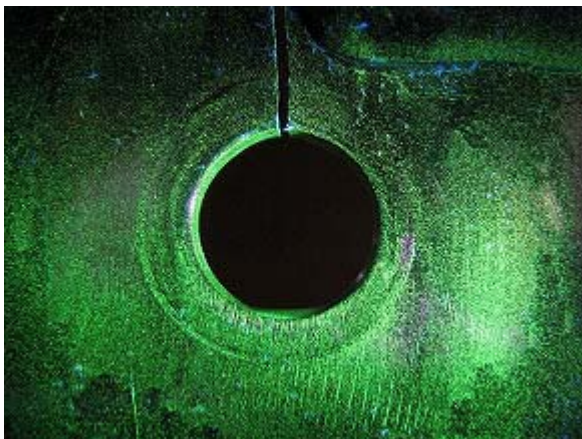


写真-2.93 WG3-S 疲労試験終了後



写真-2.94 C-1 試験体下フランジ破断状況

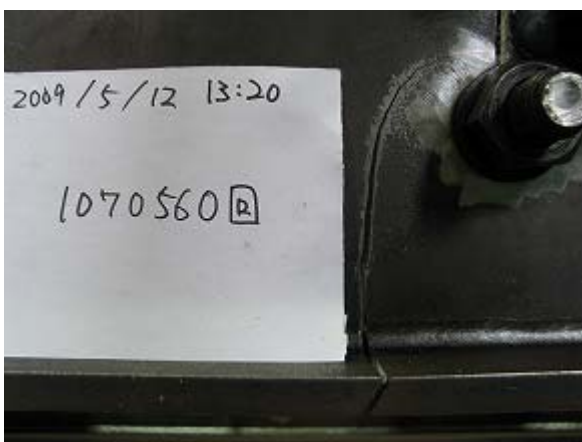


写真-2.95 C-1 試験体下フランジ破断状況



写真-2.96 WG1-N ボルト締め後状況

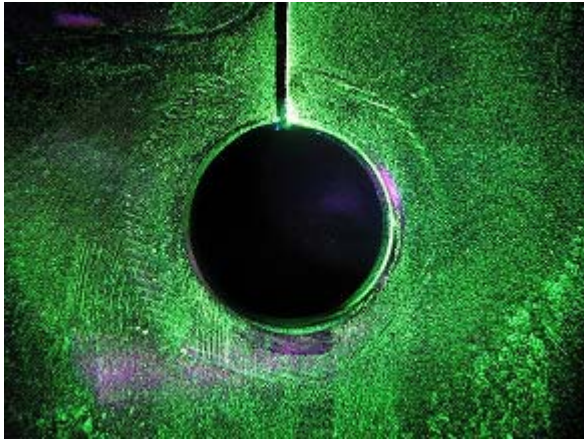


写真-2.97 WG1-N 疲労試験終了後



写真-2.98 WG1-S ボルト締め後状況

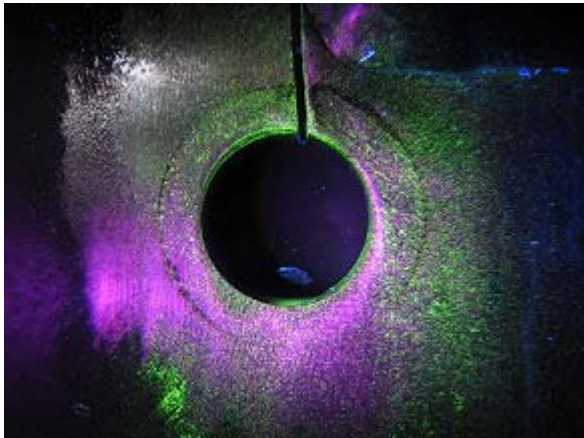


写真-2.99 WG1-S 疲労試験終了後



写真-2.100 WG2-N ボルト締め後状況

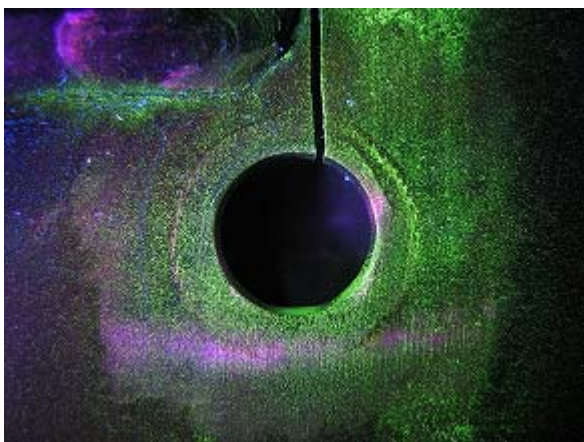


写真-2.101 WG2-N 疲労試験終了後



写真-2.102 WG2-S ボルト締め後状況

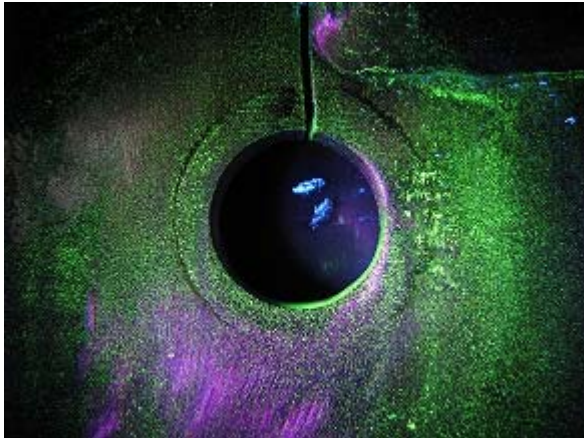


写真-2.103 WG2-S 疲労試験終了後



写真-2.104 WG3-N ボルト締め後状況

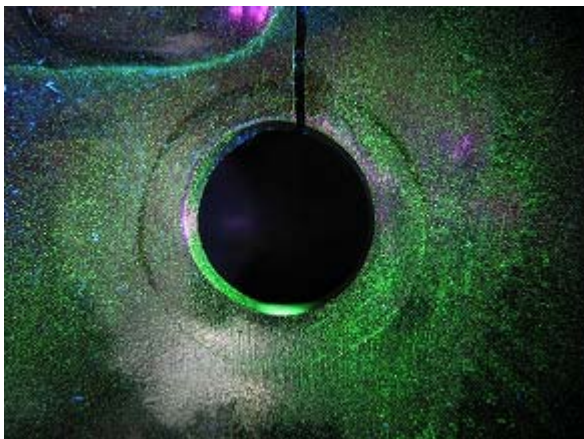


写真-2.105 WG3-N 疲労試験終了後



写真-2.106 WG3-S ボルト締め後状況

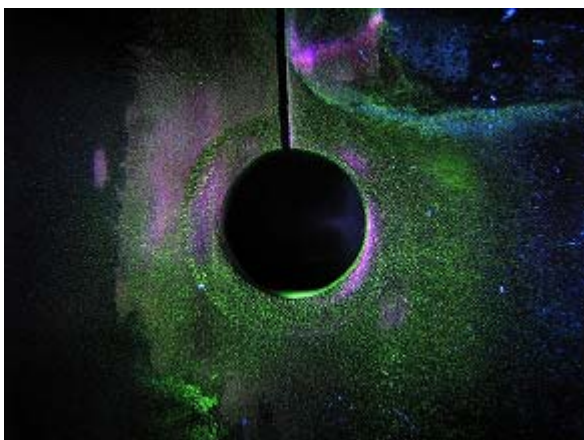


写真-2.107 WG3-S 疲労試験終了後

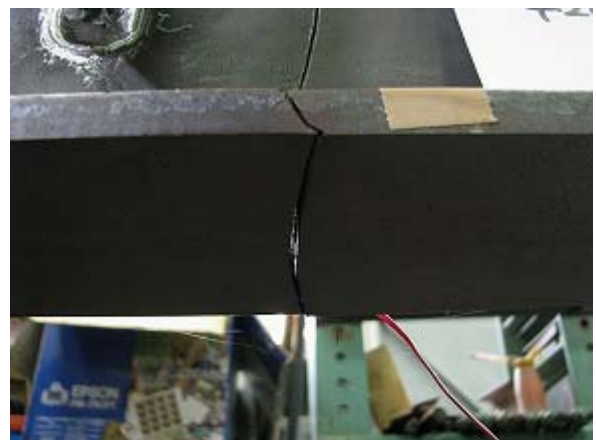


写真-2.108 C-2 試験体下フランジ破断状況

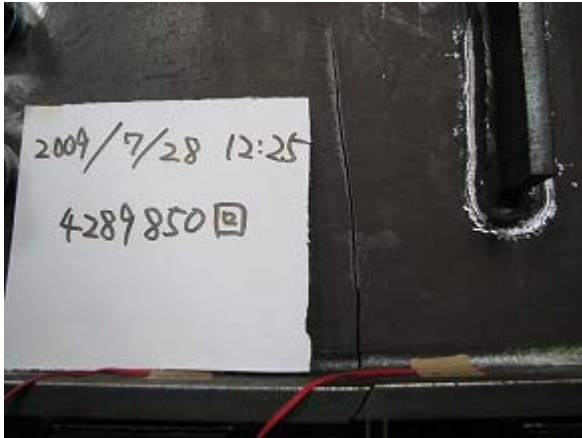


写真-2.109 C-2 試験体下フランジ破断状

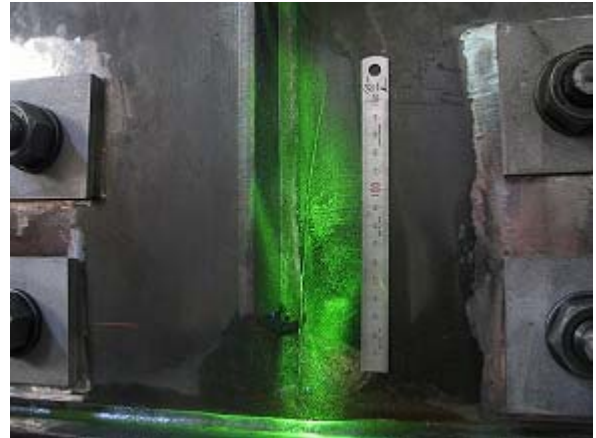


写真-2.110 垂直補剛材 北側西面き裂



写真-2.111 垂直補剛材 南側西面き裂

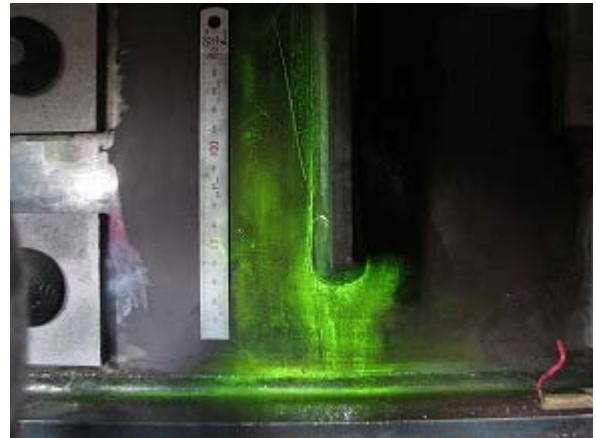


写真-2.112 垂直補剛材 北側東面き裂



写真-2.113 垂直補剛材 南側東面き裂



写真-2.114 垂直補剛材補修状況

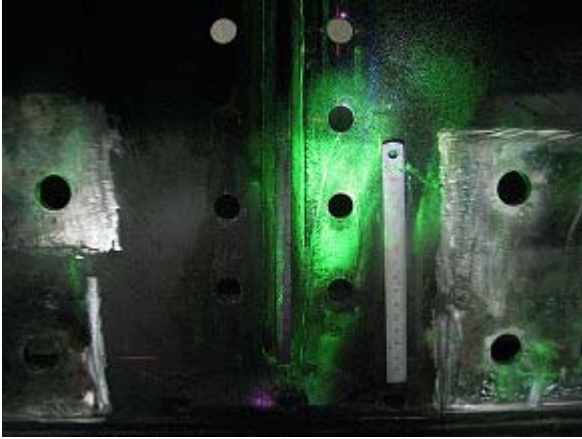


写真-2.115 垂直補剛材 北側西面試験終了後



写真-2.116 垂直補剛材 南側西面試験終了後

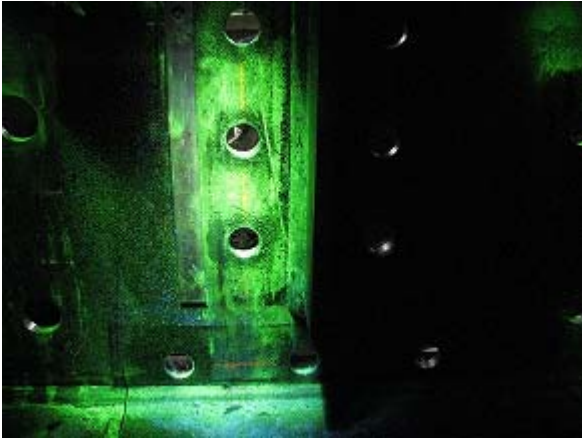


写真-2.117 垂直補剛材 北側東面試験終了後

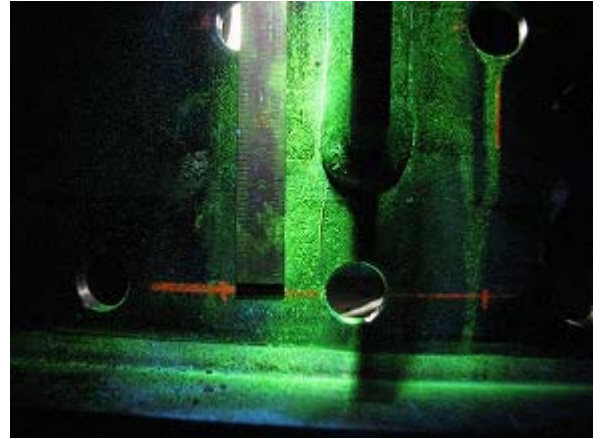


写真-2.118 垂直補剛材 南側東面試験終了後



写真-2.119 垂直補剛材 止端仕上げ状況



写真-2.120 垂直補剛材 北側西面き裂



写真-2.121 垂直補剛材 南側西面き裂

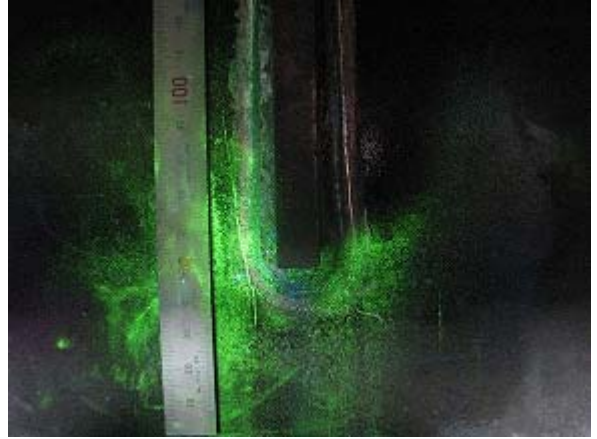


写真-2.122 垂直補剛材 北側東面き裂

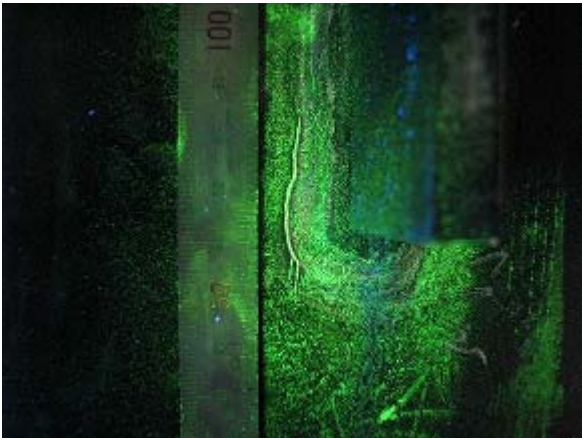


写真-2.123 垂直補剛材 南側東面き裂



写真-2.124 垂直補剛材 北側補修状況



写真-2.125 垂直補剛材 北側補修状況



写真-2.126 垂直補剛材 南側補修状況



写真-2.127 垂直補剛材 南側補修状況



写真-2.128 垂直補剛材 北側ワッシャーき裂

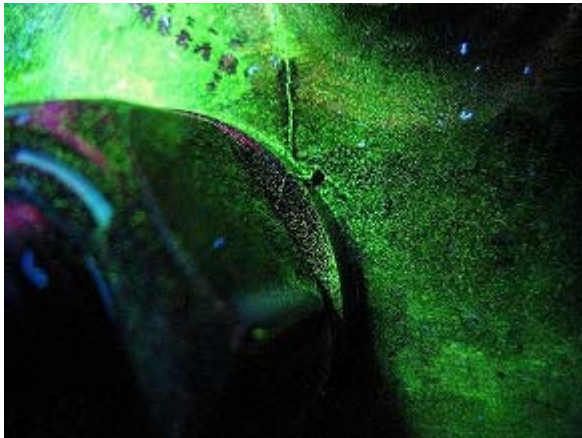


写真-2.129 垂直補剛材 北側ワッシャーき裂



写真-2.130 垂直補剛材 北側西面試験終了後

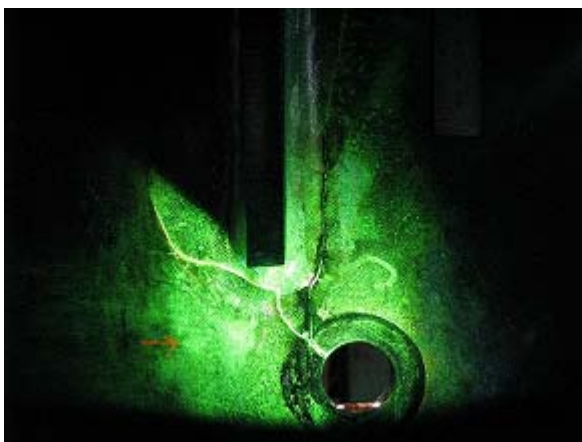


写真-2.131 垂直補剛材 北側西面試験終了後

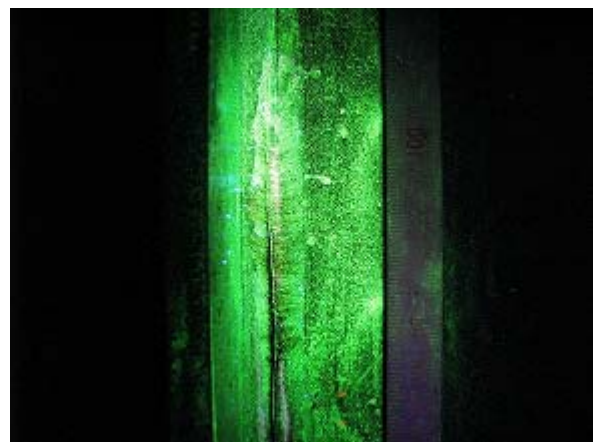


写真-2.132 垂直補剛材 南側西面試験終了後



写真-2.133 垂直補剛材 南側西面試験終了後

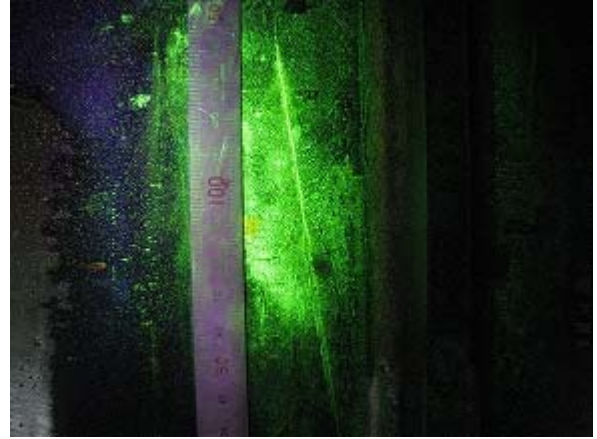


写真-2.134 垂直補剛材 北側東面試験終了後

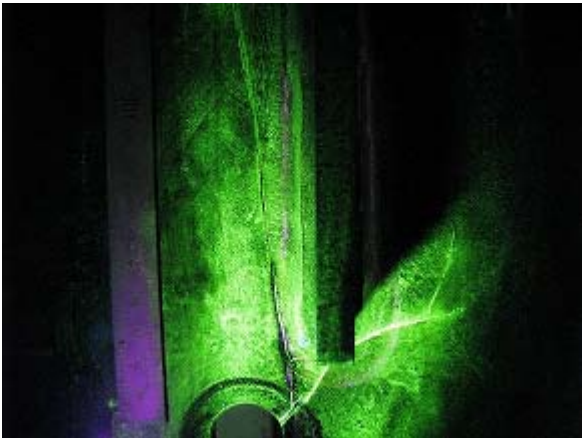


写真-2.135 垂直補剛材 北側東面試験終了後

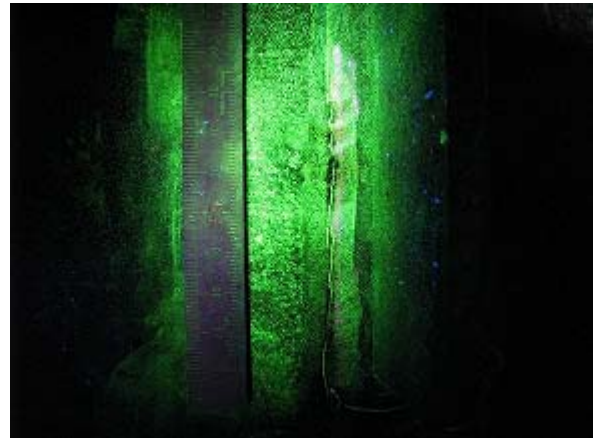


写真-2.136 垂直補剛材 南側東面試験終了後



写真-2.137 垂直補剛材 南側東面試験終了後



写真-2.138 垂直補剛材
北側西面ワッシャーき裂



写真-2.139 垂直補剛材
北側東面ワッシャーき裂



写真-2.140 垂直補剛材
南側西面ワッシャーき裂



写真-2.141 垂直補剛材
南側東面ワッシャーき裂

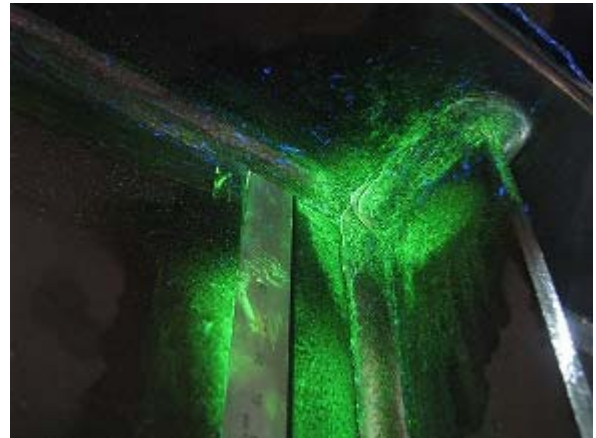


写真-2.142 載荷点 北側西面き裂状況(1)

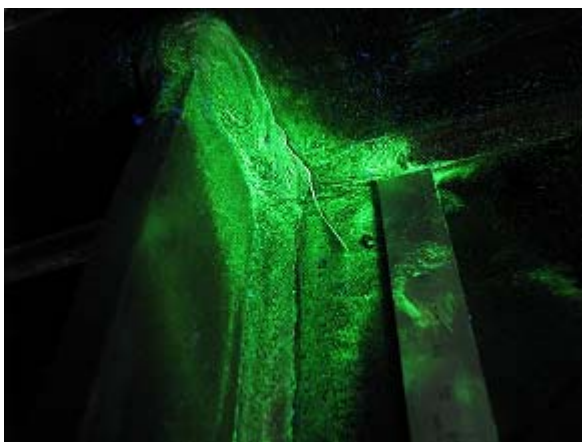


写真-2.143 載荷点 北側西面き裂状況(2)

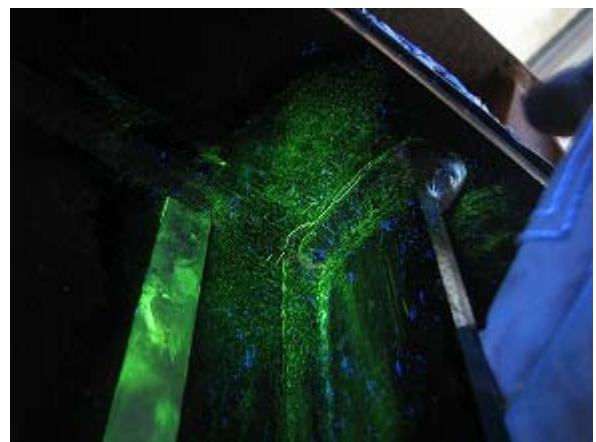


写真-2.144 載荷点 南側西面き裂状況(1)

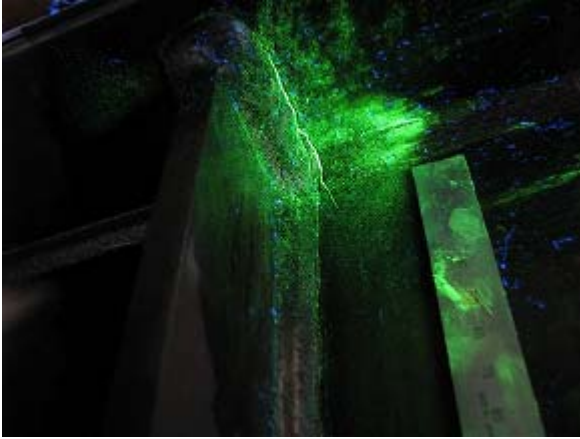


写真-2.145 載荷点 南側西面き裂状況(2)



写真-2.146 載荷点 北側東面き裂状況(1)

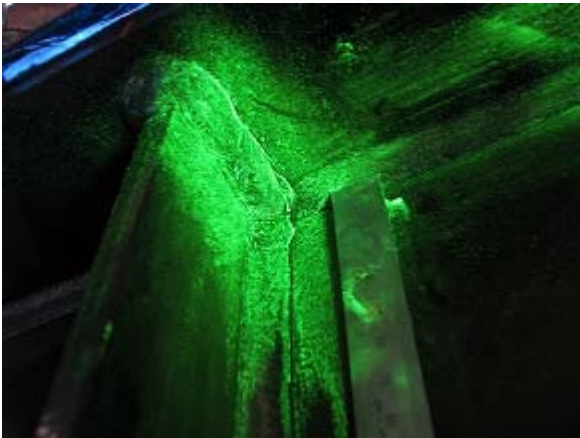


写真-2.147 載荷点 北側東面き裂状況(2)

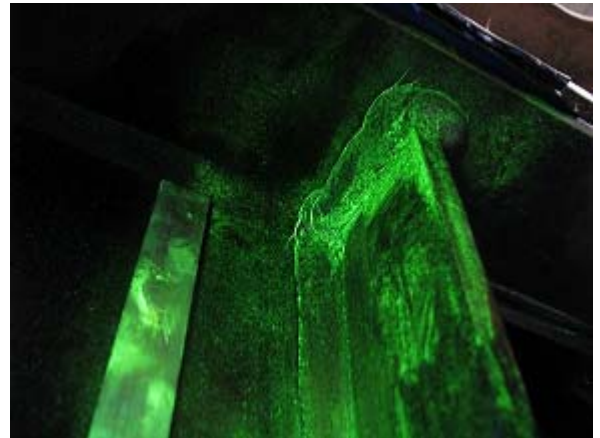


写真-2.148 載荷点 南側東面き裂状況(1)

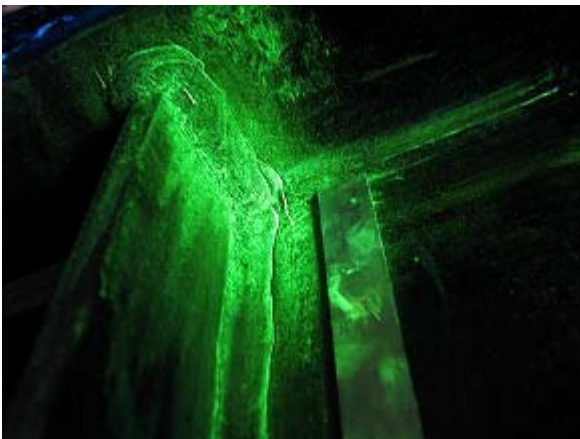


写真-2.149 載荷点 南側東面き裂状況(2)



写真-2.150 載荷点 北側西面試験終了後



写真-2.151 載荷点 南側西面試験終了後

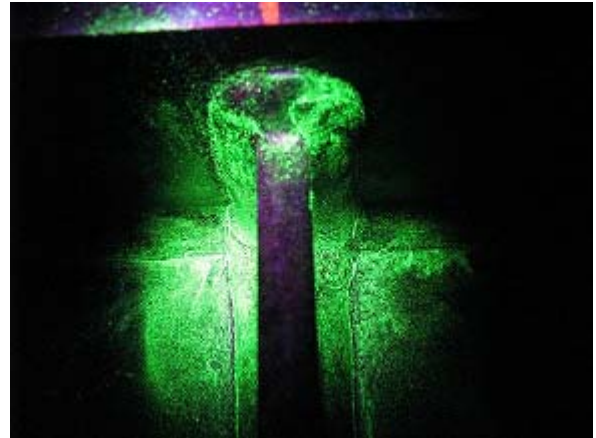


写真-2.152 載荷点 北側東面試験終了後

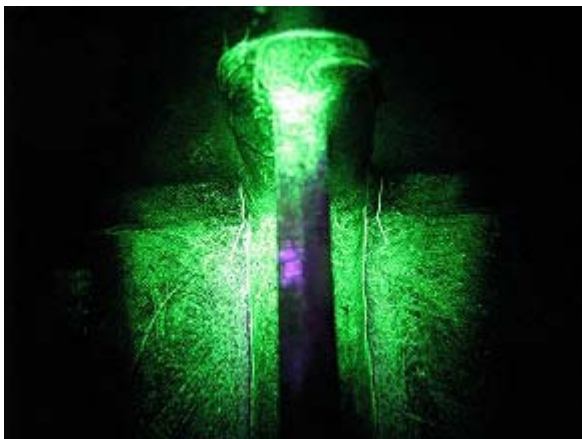


写真-2.153 載荷点 南側東面試験終了後

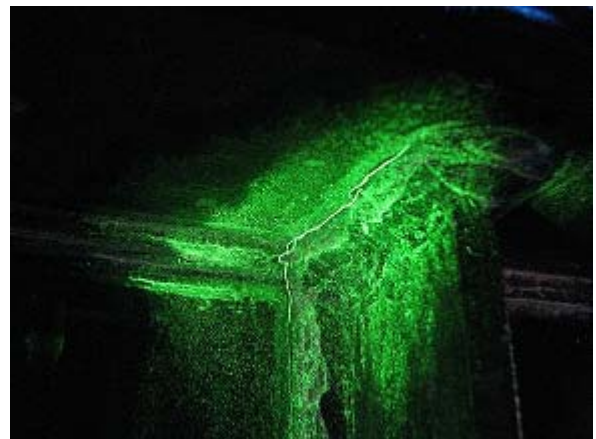


写真-2.154 載荷点 北側西面き裂状況(1)

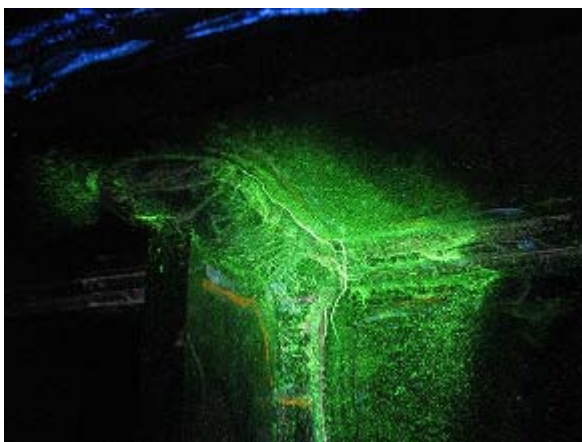


写真-2.155 載荷点 北側西面き裂状況(2)

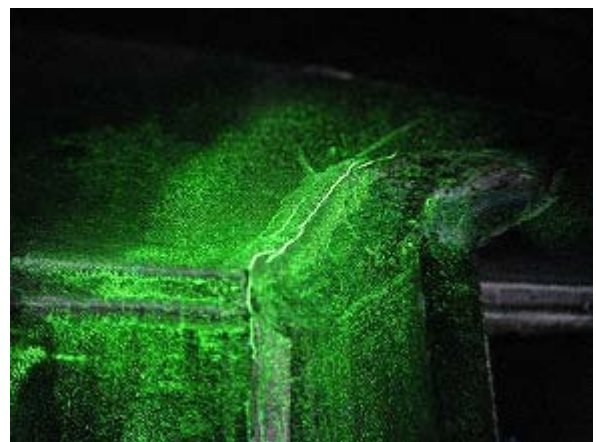


写真-2.156 載荷点 南側西面き裂状況(1)

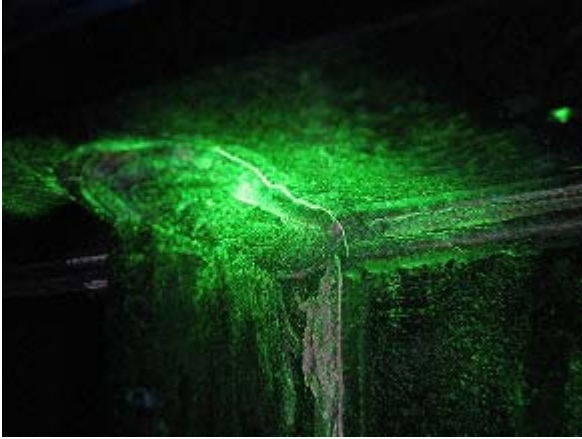


写真-2.157 載荷点 南側西面き裂状況(2)



写真-2.158 載荷点 北側東面き裂状況(1)



写真-2.159 載荷点 北側東面き裂状況(2)



写真-2.160 載荷点 南側東面き裂状況(1)

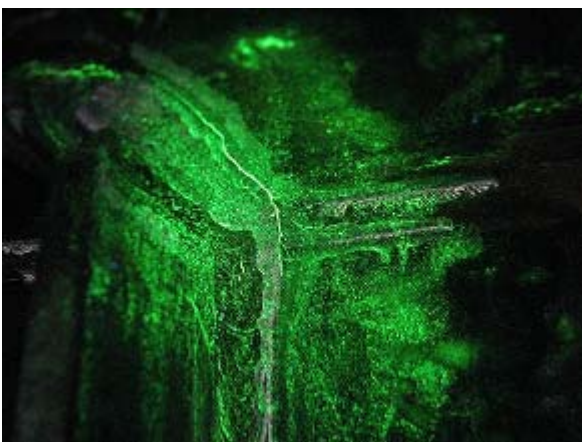


写真-2.161 載荷点 南側東面き裂状況(2)

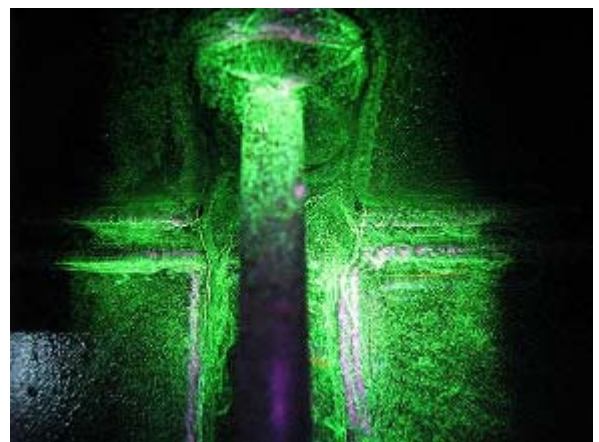


写真-2.162 載荷点 北側西面試験終了後

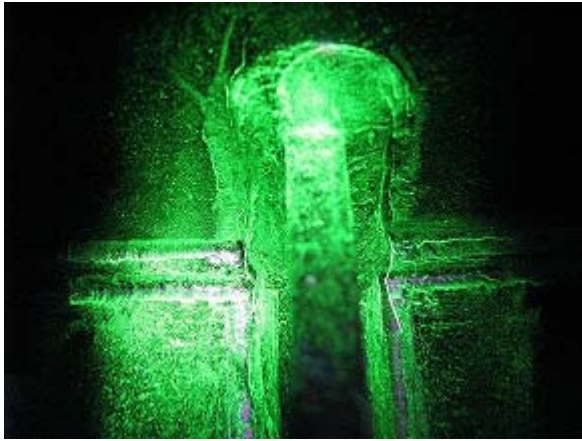


写真-2.163 載荷点 南側西面試験終了後

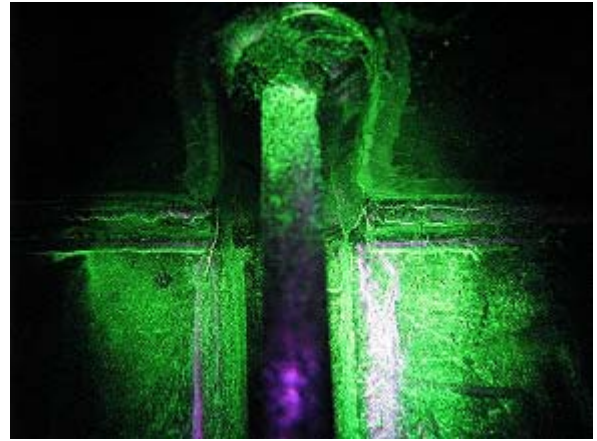


写真-2.164 載荷点 北側東面試験終了後

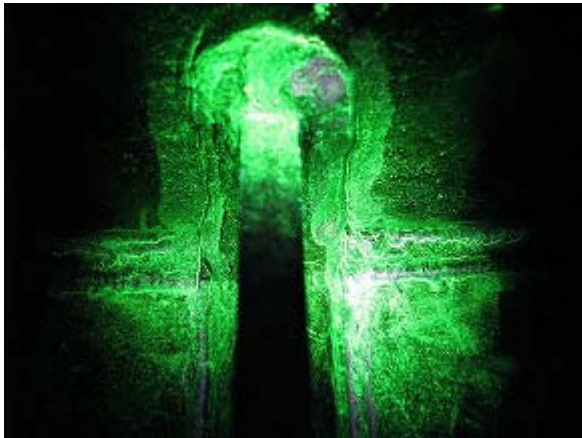


写真-2.165 載荷点 南側東面試験終了後

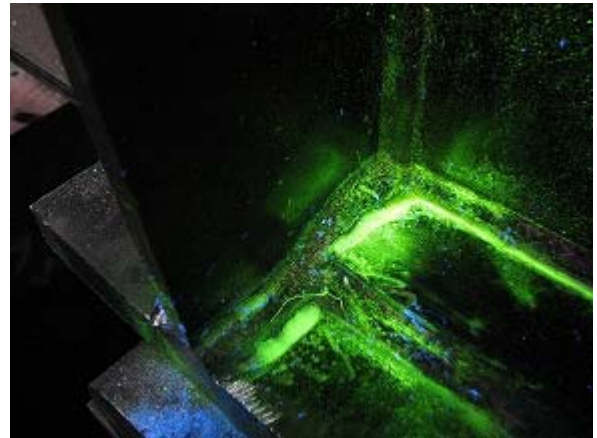


写真-2.166 支点 北側西面き裂状況

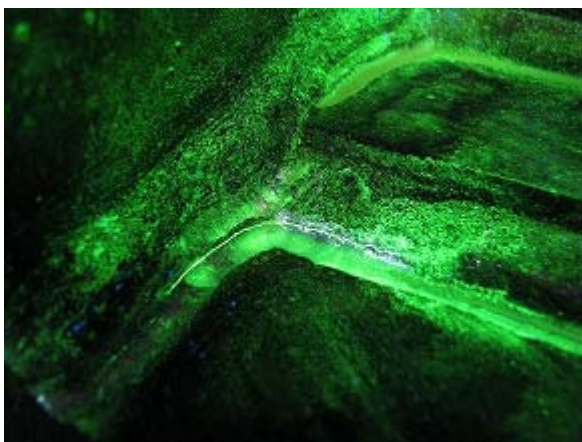


写真-2.167 支点 北側東面き裂状況

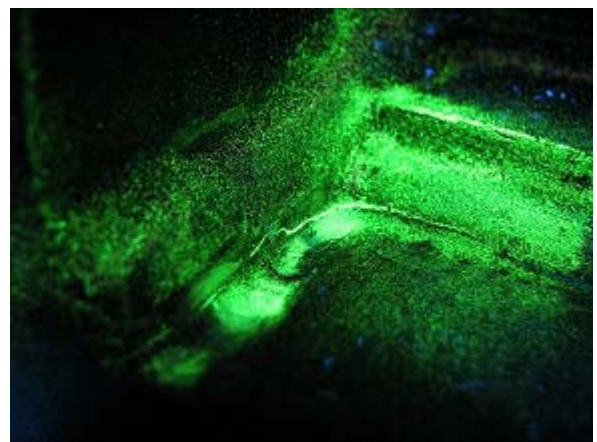


写真-2.168 支点 南側西面き裂状況

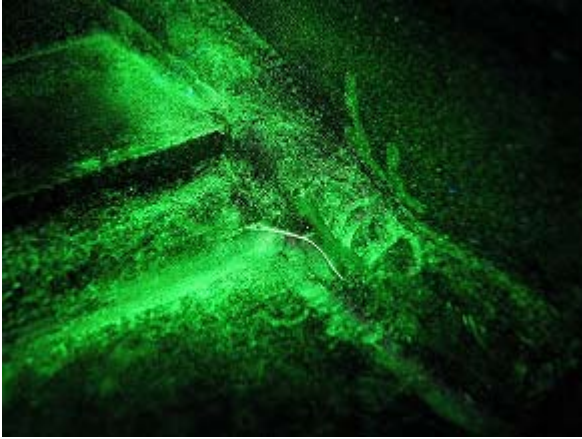


写真-2.169 支点 南側東面き裂状況



写真-2.170 支点 北側西面試験終了後



写真-2.171 支点 南側西面試験終了後

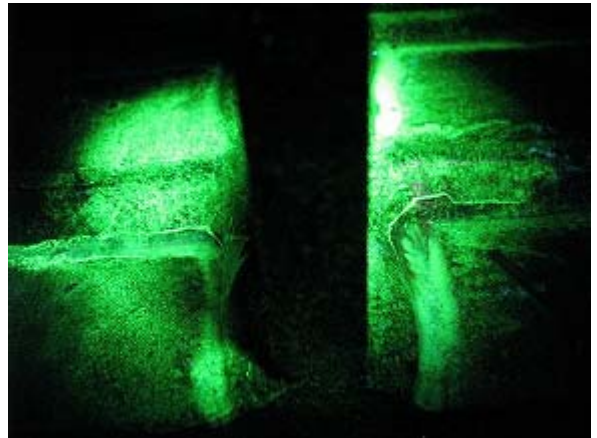


写真-2.172 支点 北側東面試験終了後



写真-2.173 支点 南側東面試験終了後



写真-2.174 支点 止端仕上げ状況

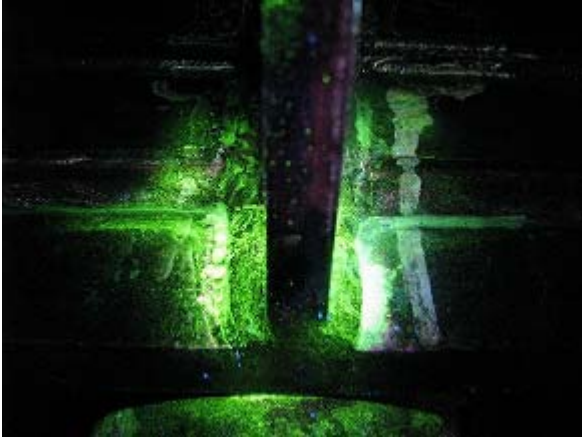


写真-2.175 支点 北側西面試験終了後

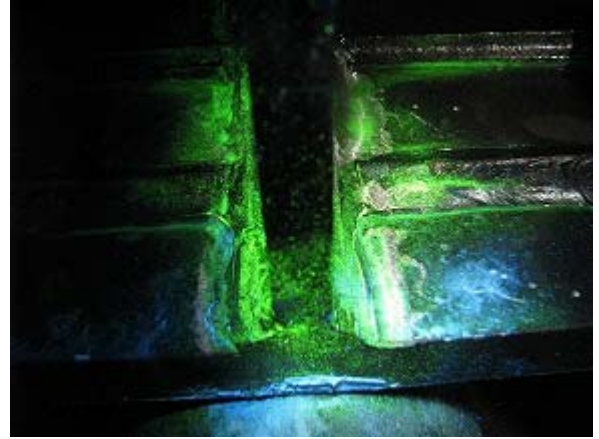


写真-2.176 支点 南側西面試験終了後

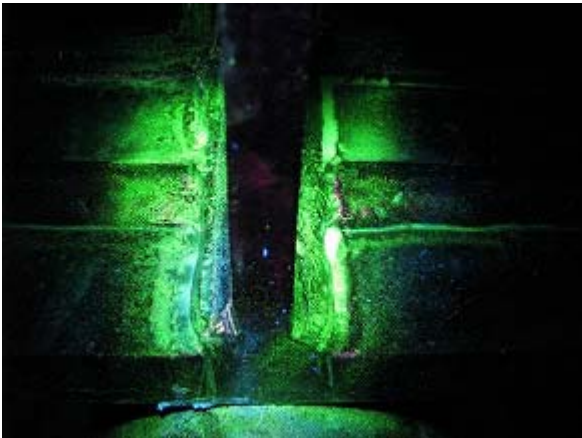


写真-2.177 支点 北側東面試験終了後

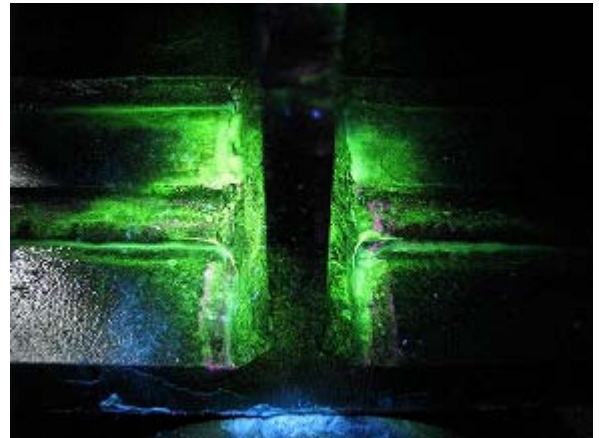


写真-2.178 支点 南側東面試験終了後



写真-2.179 A-1 試験体 疲労破面-北側



写真-2.180 A-1 試験体 疲労破面-南側



写真-2.181 B-1 試験体 疲労破面-北側



写真-2.182 B-1 試験体 疲労破面-南側



写真-2.183 B-2 試験体 疲労破面-北側



写真-2.184 B-2 試験体 疲労破面-南側



写真-2.185 C-1 試験体 疲労破面-北側



写真-2.186 C-1 試験体 疲労破面-南側



写真-2.187 C-2 試験体 疲労破面-北側



写真-2.188 C-2 試験体 疲労破面-南側

第3章 小型試験体を用いた検討

3.1 疲労試験

第2章で示したように、主桁・横桁交差部の主桁ウェブに生じた疲労き裂の補修に添え板ボルト締めストップホール法を用いることにより、疲労損傷を受けていない溶接ままの状態に比べて疲労寿命が5倍以上となる結果を得た。しかし、いずれの試験体においても下フランジの破断により疲労試験を終了したため、実際の疲労強度と破壊起点は不明のままである。ここでは、先の検討で用いた桁試験体補修部を模擬した小型平板試験体を作成し、疲労試験を行った結果を報告する。

3.1.1 試験体

供試鋼材は、板厚 6mm の SM400A である。この鋼材の機械的性質と化学成分を表-3.1 に示す。試験体は、ストップホール法による補修部を模擬した SH 試験体、ボルト締めストップホール法による補修部を模擬した BSH 試験体、添え板ボルト締めストップホール法による補修部を模擬した AP 試験体の3種類である。各試験体の形状と寸法を図-3.1(a)～図-3.1(c) に示す。試験体の幅は 150mm、長さは 700mm、板厚は 6mm である。試験体の表裏面の中央長手方向には、溶接による引張残留応力を模擬する目的で、TIG-dressing を行っている。TIG-dressing の条件は溶接電流：300A、溶接速度：12.5cm/min である。

3.1.2 残留応力の測定

Tig-Dressing を行った試験体の溶融部は熱膨張によって主として Tig-Dressing を行った方向に伸びようとするが、温度が低い周辺部に拘束されるため、溶融部には Tig-Dressing の方向に圧縮応力が生じる。高温となった金属は降伏応力が低下するため、圧縮応力により Tig-Dressing 部付近は圧縮降伏して圧縮塑性ひずみが生じる。その後、温度の低下と共に収縮し、圧縮降伏している Tig-Dressing 部付近は拘束を受けて引張応力が生じる。このように、Tig-Dressing を行った試験体には、残留応力が発生する。また、残留応力は、自己平衡形の応力分布となる。

残留応力の測定は、測定する試験体の表面をサンドペーパーで研磨した後、一軸ひずみゲージ（ゲージ長：2mm）を試験体両面に貼り付け、切断法により行った。切断法とは、貼り付けたひずみゲージの周囲を切断し、そのときに解放されるひずみを測

定することにより残留応力を求める方法である。試験体の切断にはコンターマシン盤を用いた。試験体切断時の様子を写真-3.1に示す。ゲージは、試験体の表裏面の他にも円孔壁面と試験体側面にも貼付している。ゲージの貼付位置、切断位置を図-3.2に、切断後の状況を写真-3.2に示す。残留応力の値は、試験体の切断前後の測定されたひずみ変化に鋼材のヤング率 $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ を乗じることにより求めた。切断後に残留応力が開放されることにより、引張残留応力が作用している箇所は収縮し、圧縮残留応力が作用している箇所は膨張する。そのため、残留応力を求める際にはひずみの符号を反転させて用いた。

残留応力の測定結果を表-3.2に、図-3.3に示す。板中心に近づくにつれて残留応力は大きくなり、疲労き裂の起点となる円孔先端には、切欠きと円孔による再配分によって 200N/mm^2 程度の引張残留応力が生じている。

3.1.3 試験方法

各試験体の試験条件は次に示すとおりである。

(1) SH 試験体

SH 試験体には、動的能力 200kN の 2 軸方向試験機システム（写真-3.3、繰返し速度 10Hz ）を用いて荷重波形を正弦波、下限荷重を 10kN （下限応力 11N/mm^2 ）とした軸引張り荷重下で疲労試験を行った。母板での公称応力範囲は $60, 80, 100 \text{N/mm}^2$ とし、各応力範囲 2 体ずつ、合計 6 体の疲労試験を行った。

(2) BSH 試験体

BSH 試験体には、動的能力 500kN の応力/変位制御高ひずみ試験装置（写真-3.4、繰返し速度 12Hz ）を用いて荷重波形を正弦波、下限荷重を 10kN （下限応力 11N/mm^2 ）とした軸引張り荷重下で疲労試験を行った。母板での公称応力範囲は $120, 140, 160, 180, 200 \text{N/mm}^2$ とし、各応力範囲 2 体ずつ、合計 10 体の疲労試験を行った。

(3) AP 試験体

AP 試験体には、動的能力 500kN の電気油圧サーボ式材料試験機（写真-3.5、繰返し速度 $10 \sim 13 \text{Hz}$ ）を用いて荷重波形を正弦波、下限荷重を 10kN （下限応力 11N/mm^2 ）とした軸引張り荷重下で疲労試験を行った。母板での公称応力範囲は $150, 165, 180, 200, 220 \text{N/mm}^2$ とし、各応力範囲 2 体ずつ、合計 10 体の疲労試験を行った。

なお、繰り返し回数が 2000 万回に達した時点で疲労破壊しなかった場合には、そこで疲労試験を中止した。

3.1.4 補修方法

各試験体は以下のようにして補修を行った後、疲労試験を行った。

(1) SH 試験体

SH 試験体では TIG-dressing を行った後、図-3.1 (a) に示すような所定の位置と寸法に直径 18mm の円孔をドリルであけ、それらの孔を鋸引きにより結合して疲労き裂のストップホール法による補修を模擬した。この眼鏡型切欠きの長さは 70mm である。使用した高力ボルトは S10T-M16 であり、円孔壁面は桁試験体と同様に#80 の軸付ゴム砥石を用いて滑らかに仕上げた。

(2) BSH 試験体

BSH 試験体では、図-3.1 (b) に示すように SH 試験体の円孔を高力ボルトでボルト締めすることで補修を模擬した。ボルト締めを行う前には、ボルトが当たる部分の母板表面を#80 のディスクグラインダーで仕上げた。使用した高力ボルトは S10T-M16 であり、円孔壁面は桁試験体と同様に#80 の軸付ゴム砥石を用いて滑らかに仕上げた。

(3) AP 試験体

AP 試験体では、図-3.1 (c) に示すように合計 6 つの円孔をドリルで空け、中央の 2 つの円孔を鋸引きにより結合した後、添え板が当たる部分の母板表面の黒皮をディスクグラインダーで除去し、母板に添え板を当てて高力ボルトでボルト締めした。黒皮の除去は#40 のディスクグラインダーで荒削りした後、#80 のディスクグラインダーで仕上げるにより行った。使用する添え板は幅 50mm、長さ 160mm、板厚 6mm であり、その表面は桁試験体に用いた添え板と同様、厚膜無機ジンクリッチペイントを塗布している。膜厚は 75 μ m である。ここで用いた母板と添え板の板厚、円孔径、ボルト径、切欠き長さは、桁試験体の 2/3 程度となるように設定した。使用した高力ボルトは S10T-M16 であり、円孔壁面は桁試験体と同様に#80 の軸付ゴム砥石を用いて滑らかに仕上げた。

3.1.5 疲労試験結果

SH 試験体と BSH 試験体の破断部と疲労破面を写真-3.6～写真-3.19 に示す。いずれの試験体においても疲労破壊の起点は円孔壁である。

AP 試験体の破断状況と疲労破面を写真 3.20～写真 3.29 に示す。疲労破面から判断して、いずれの試験体においても添え板を介してボルト締めした円孔から疲労き裂が生じたものではなく、円孔の外側の母板表面から発生したものと判断できる。

添え板を外して未破断側に磁粉探傷試験を行った結果を写真 3.30～写真 3.39 に示す。10 体中 4 体の試験体では、ボルト孔から 10mm 程度外側の母板表面から疲労き裂が生じ、ほぼ母板幅方向にき裂が進展して破断している。また、3 体の試験体では、破断面にボルト孔が含まれているものの、純断面が最も小さくなる位置ではなく、そこから外側にずれた位置が破断面となっている。残りの 3 体は、円孔を含む断面と円孔から 10mm 程度離れた断面の 2 つからなっている。

これらの疲労き裂は、通常の高力ボルト摩擦接合継手と同様、添え板と母板のフレッシングにより生じたものと考えられる。

3.1.6 小型試験体の疲労強度

疲労試験結果を表-3.3 に、公称応力範囲で整理した疲労試験結果を図-3.4 に示す。図中の直線群は、最小 2 乗法により求めた各試験体の疲労寿命に対する応力範囲の回帰直線である。各試験体の回帰直線は式 (3.1)～(3.3) で与えられる。

$$\text{SH 試験体: } n^{9.07} \cdot N = 3.36 \times 10^{23} \quad \dots \dots (3.1)$$

$$\text{BSH 試験体: } n^{8.26} \cdot N = 2.51 \times 10^{24} \quad \dots \dots (3.2)$$

$$\text{AP 試験体: } n^{4.34} \cdot N = 1.28 \times 10^{16} \quad \dots \dots (3.3)$$

これらの回帰直線から求められた 200 万回疲労強度は、SH 試験体で 79.1N/mm²、BSH 試験体で 156N/mm²、AP 試験体で 182N/mm² である。

図-3.4 中には、第 2 章で得られた桁試験体の疲労試験結果も示している。ストップホール法補修部を模擬した SH 試験体の疲労強度は、純断面積が総断面積の約半分程度となっているにも関わらず、桁試験体溶接ままの疲労強度と同程度となっている。それらに比べ、ボルト締めストップホール法補修部を模擬した BSH 試験体の疲労強度は桁試験体溶接ままの約 2 倍となっている。また、添え板ボルト締めストップホール

法補修部を模擬した AP 試験体の疲労強度は，BSH 試験体よりもさらに高くなっている．

このように，ボルト締めストップホール法，添え板ボルト締めストップホール法補修部は高い疲労強度を有していることが確認できた．この結果は，桁試験体補修部で疲労き裂が観察されなかったことと対応している．

3.2 応力解析

補修部の応力性状を解析的にも検討するため，疲労試験で用いた小型平板試験体を対象とした 3 次元有限要素応力解析を行った．

3.2.1 解析モデル

解析対象は長さ 700mm，幅 150mm，板厚 6mm の小型平板試験体である．載荷方法は軸引張りとする．このモデルの対象性を考慮して 1/8 モデルで解析を行った．対象とするモデルは，SH 試験体モデル，BSH 試験体モデル，AP 試験体モデルの 3 つである．高力ボルトはトルシアボルトをモデル化した．各モデルの要素分割図を図-3.5～図-3.7 に示す．円孔の大きさは直径 18mm，ボルト径は 16mm としている．補修部近傍の要素寸法は 1mm としてモデルを作成した．

3.2.2 解析手法

応力解析には，CAEFEM VER6.0 を使用する．要素には 8 節点固体要素を用い，3 次元有限要素応力解析を行う．鋼材のヤング率は $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，ポアソン比は 0.3 とする．

ボルト頭とナットは実際のボルト頭の六角形と面積の等しい円形とした．ナット形状の簡略化に関しては森ら¹²⁾によってその妥当性が確かめられている．またボルトの軸力 L は森ら¹³⁾により，式(3.1)で表される強制変位 L を与えることで表現できることことが確かめられている．

$$\Delta L = a \frac{\sigma}{\sigma'} \quad \dots \dots (3.1)$$

L : 軸力を導入するために与える強制変位 (mm)

a : 初期供与強制変位 (mm)

': a を与えたときの軸力 (N)

母板とワッシャーの接触面で生じる微小な滑りについては、母板とワッシャーの間に厚さ 0.1mm の弾性係数の低い要素を挿入することによってモデル化を行った。この微小なすべりを表すようその弾性係数の大きさは母板とワッシャーの接触圧力に比例するという式 (3.2) が提案されている¹³⁾。この式を用いて挿入する要素の弾性係数を決定した。

$$E=12.6 \cdot \dots \dots (3.2)$$

E : 挿入する要素の弾性係数 (N/mm²)

: 注目する部分の接触圧力 (N/mm²)

3.2.3 解析結果

解析によって得られた円孔壁の応力集中係数を表-3.4 と図-3.8 に示す。AP 試験体モデルの円孔壁の応力集中係数は SH 試験体モデルの 0.20 倍、BSH 試験体モデルの円孔壁の応力集中係数は SH 試験体モデルの 0.35 倍となった。この結果から、添え板を介してボルト締めすることにより、ボルト締めのみの場合と比べて応力集中がさらに緩和されたことがわかる。

これまでの研究から、応力緩和の程度を表す指標として応力緩和係数というパラメータが示されており、この値が小さいほど応力集中の緩和効果が大きいのことになる。応力緩和係数は、式 (3.3) により算出される。

$$\gamma=(1-\alpha_B)/(1-\alpha_S) \dots \dots (3.3)$$

α_S : 円孔壁の応力集中係数

α_B : ボルト締めした円孔壁の応力集中係数

応力解析によって得られた円孔をボルト締めすることによる応力緩和係数は 0.222、さらに添え板を当てた場合には 0.044 である。

しかし、破壊起点が必ずしも補修部とはならないため、ボルト締めストップホール法で補修した場合に適用される円孔壁の応力範囲による疲労強度評価は適用できず、添え板ボルト締めストップホール法で補修した場合の疲労強度評価には別のアプローチによる検討が必要と考えられる。

表-3.1 試験体の機械的性質と化学組成

鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分(%)				
		降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び(%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
SM400A	6	339	459	30	13	19	92	18	3

表-3.2 残留応力測定結果

中心からの距離 (mm)	ひずみ(μ)			残留応力 (N/mm ²)
	表面	裏面	平均	
75	-	-	-156	31.2
70	191	171	181	-36.2
60	163	222	192.5	-38.5
50	69	120	94.5	-18.9
40	-269	-161	-215	43.0
35	-	-	-817	163.4
-35	-	-	-879	175.8
-40	-294	-190	-242	48.4
-50	96	185	140.5	-28.1
-60	172	290	231	-46.2
-70	186	207	196.5	-39.3
-75	-	-	-157	31.4

表-3.3 疲労試験結果

試験体名	公称応力範囲 (N/mm ²)	疲労寿命N (cycles)
SH-1	100	185462
SH-2	100	423323
SH-3	80	2123534
SH-4	80	1117828
SH-5	60	20000000
SH-6	60	20000000
BSH-1	200	159070
BSH-2	200	228540
BSH-3	180	807037
BSH-4	180	927879
BSH-5	160	1419323
BSH-6	160	2833926
BSH-7	140	3793517
BSH-8	140	4307220
BSH-9	120	15620970
BSH-10	120	12374836
AP-1	220	1002532
AP-2	220	1096892
AP-3	200	1202168
AP-4	200	1066217
AP-5	180	1922341
AP-6	180	2663801
AP-7	165	2805617
AP-8	165	2440359
AP-9	150	4515188
AP-10	150	4939661

表-3.4 解析結果

	応力集中係数	応力緩和係数
AP試験体モデル	1.23	0.222
BSH試験体モデル	2.17	
SH試験体モデル	6.28	

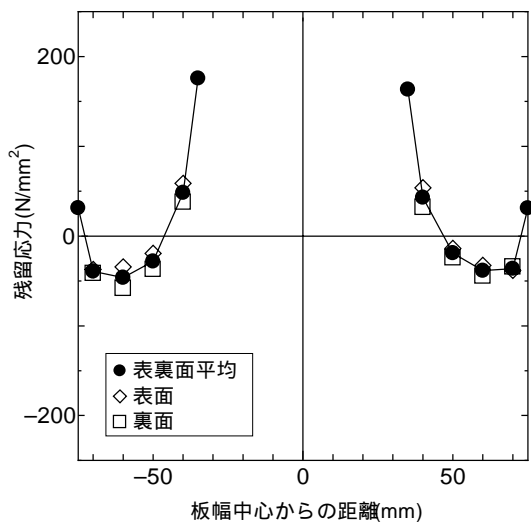


図-3.3 残留応力測定結果

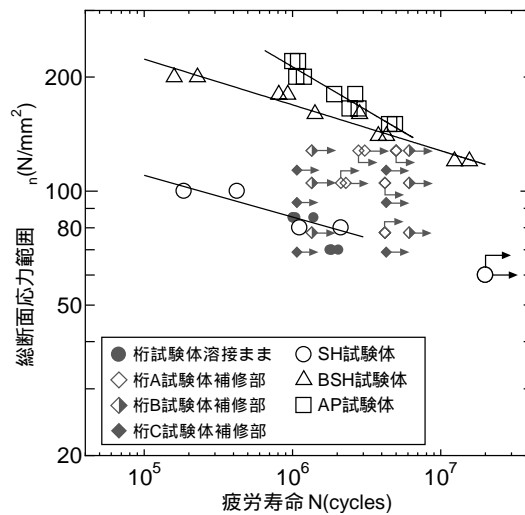


図-3.4 疲労試験結果

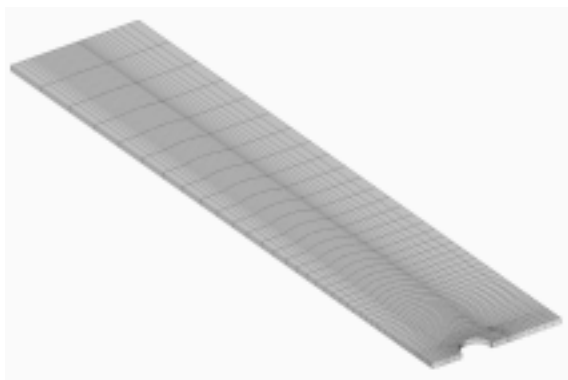


図-3.5 SH 試験体モデル



図-3.6 BSH 試験体モデル

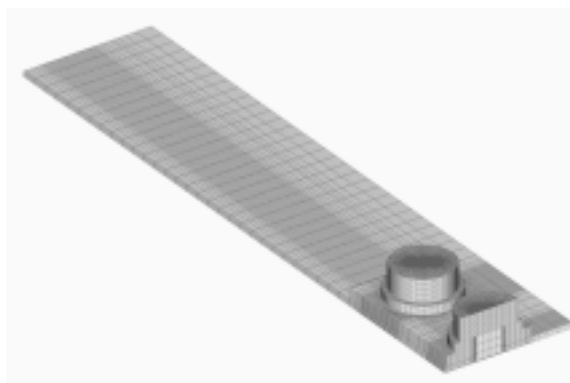


図-3.7 AP 試験体モデル

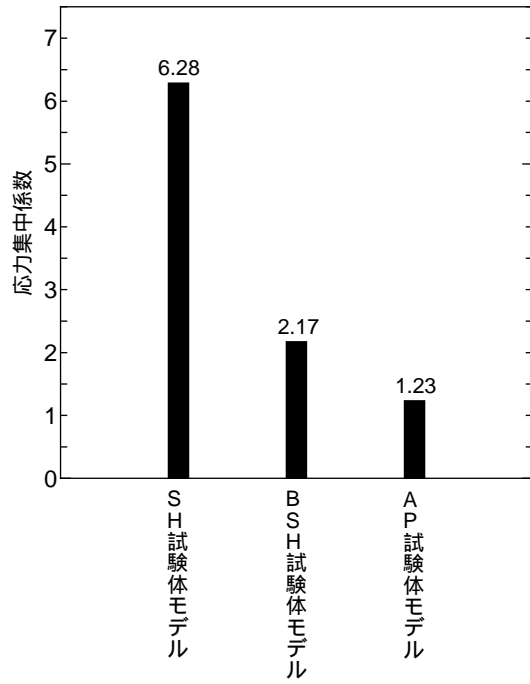


図-3.8 円孔壁の応力集中係数

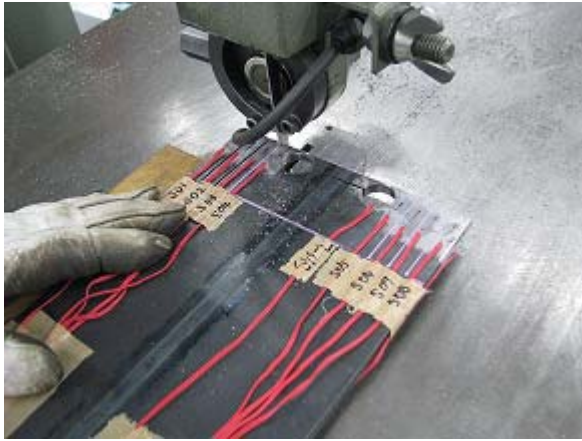


写真-3.1 試験体切断の様子

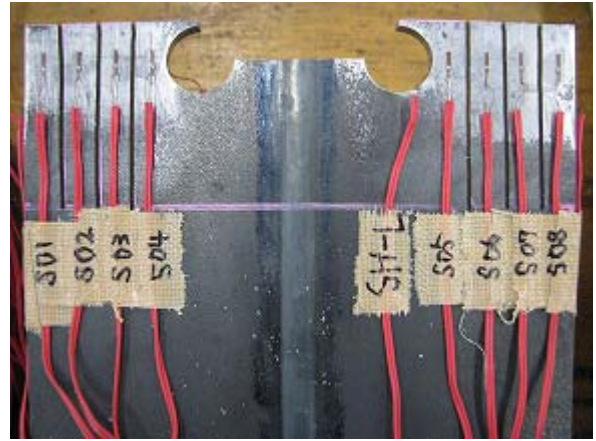


写真-3.2 試験体切断後の状況



写真-3.3 SH 試験体の試験状況

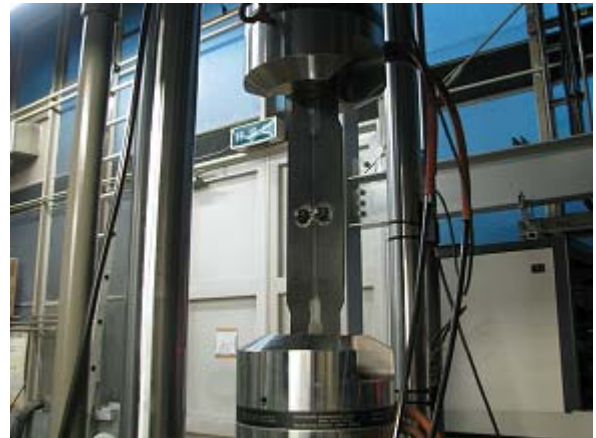
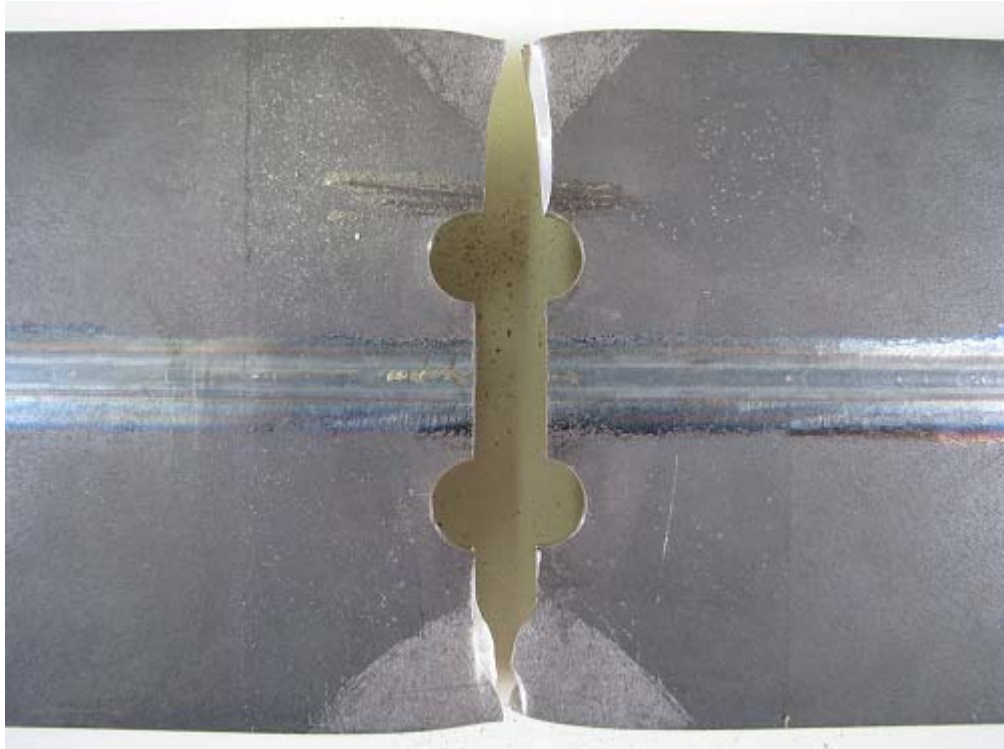


写真-3.4 BSH 試験体の試験状況



写真-3.5 AP 試験体の試験状況

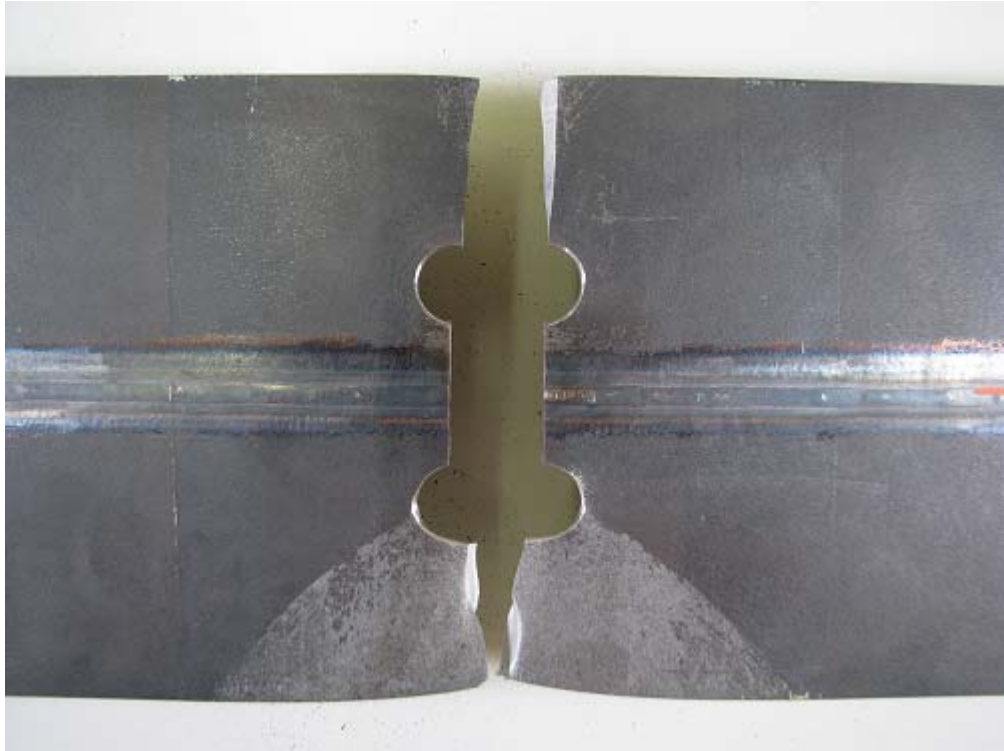


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.6 SH-1 試験体の破断状況と疲労破面

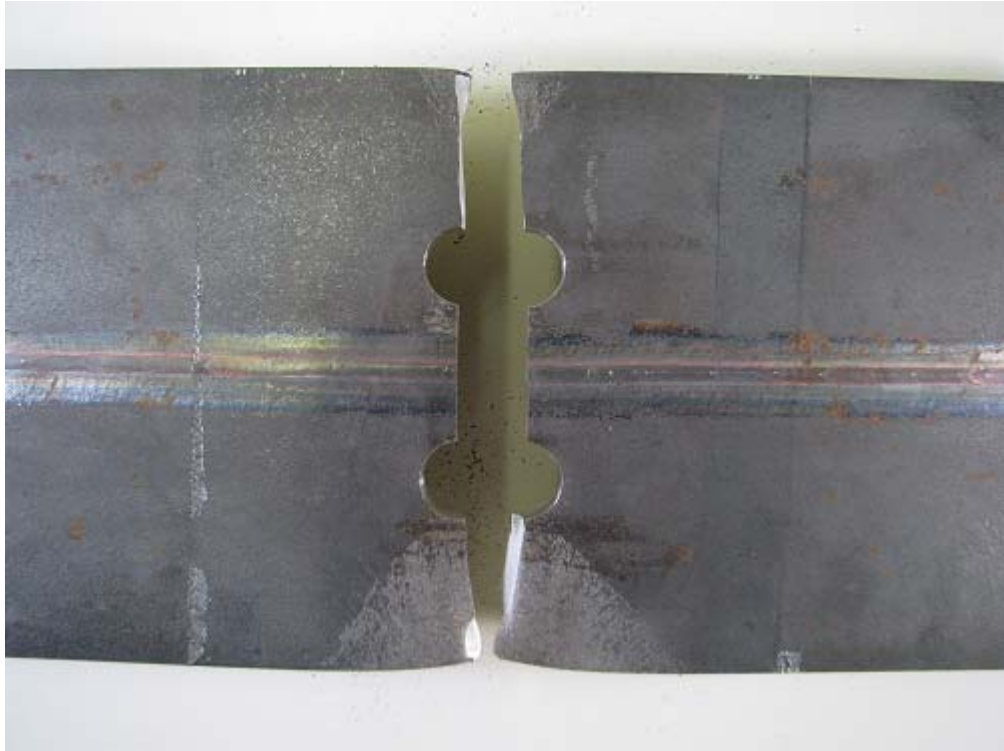


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.7 SH-2 試験体の破断状況と疲労破面

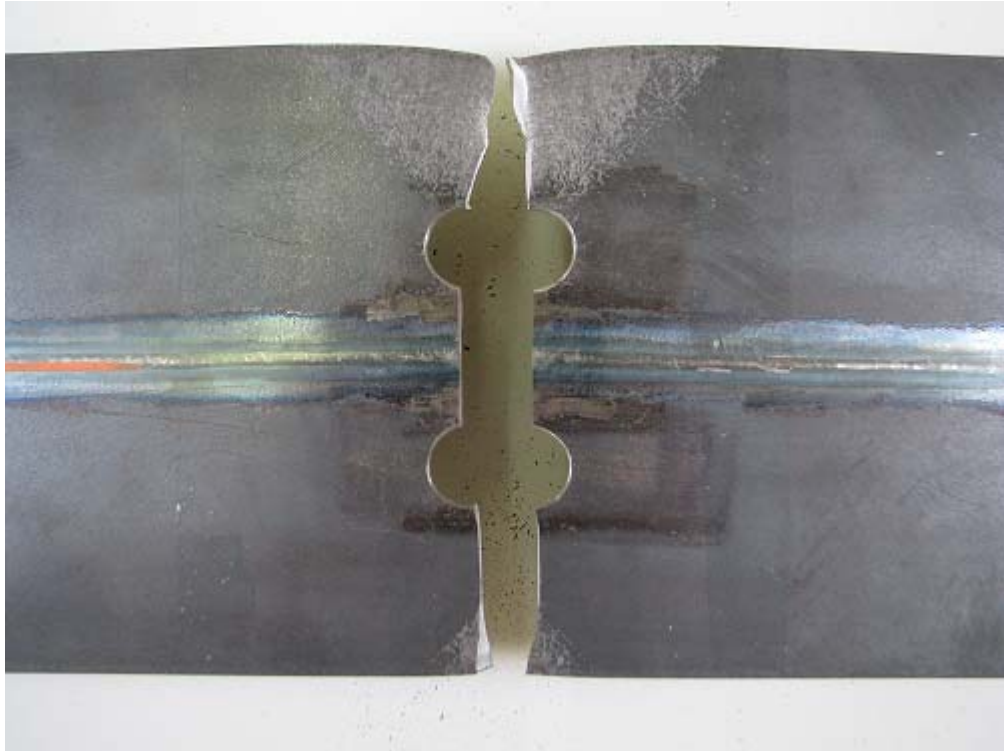


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.8 SH-3 試験体の破断状況と疲労破面

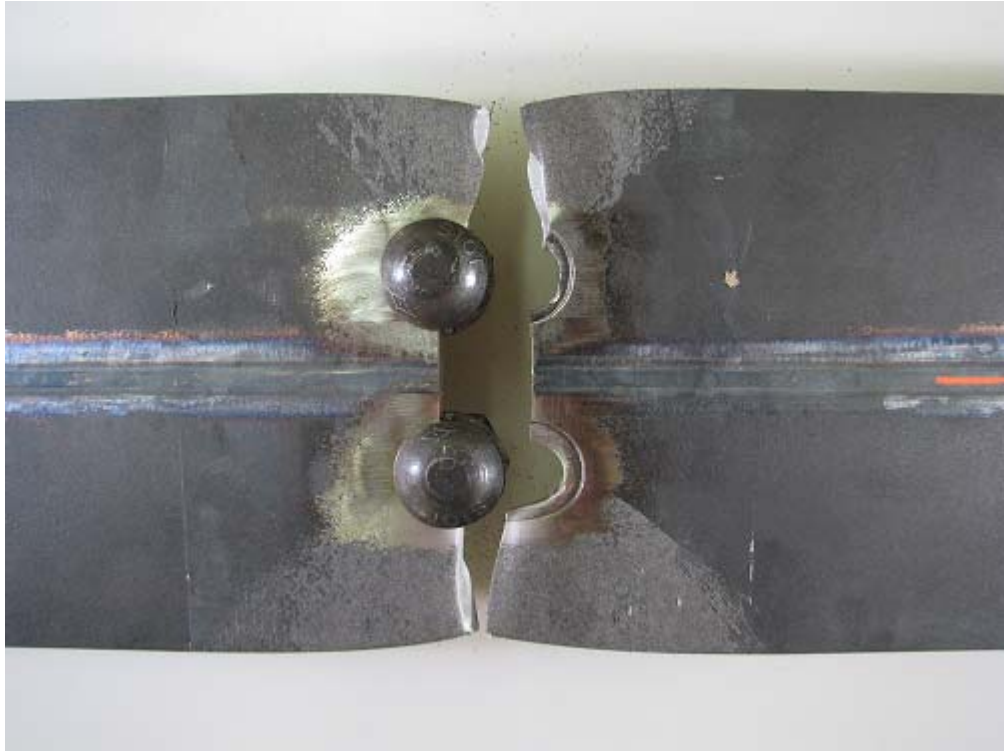


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.9 SH-4 試験体の破断状況と疲労破面

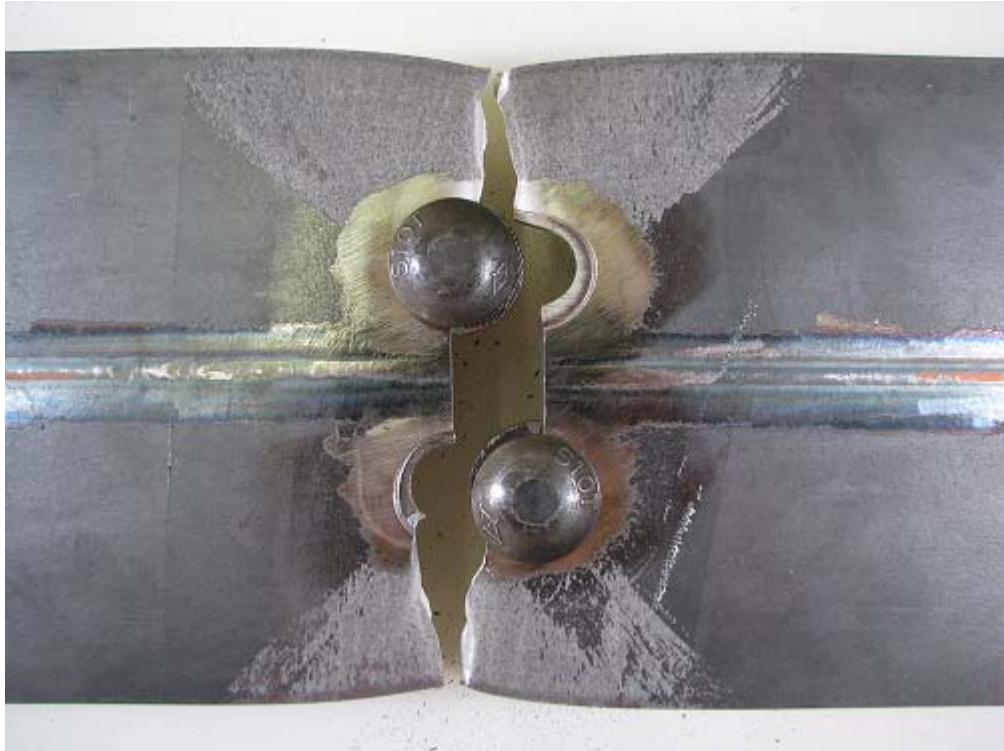


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.10 BSH-1 試験体の破断状況と疲労破面

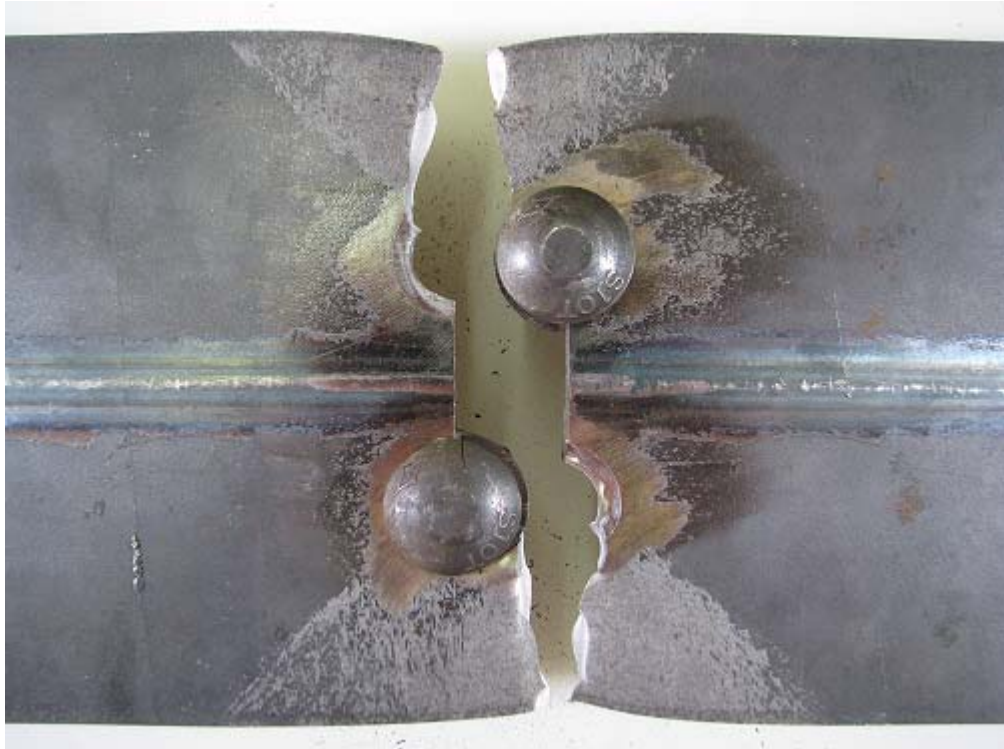


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.11 BSH-2 試験体の破断状況と疲労破面

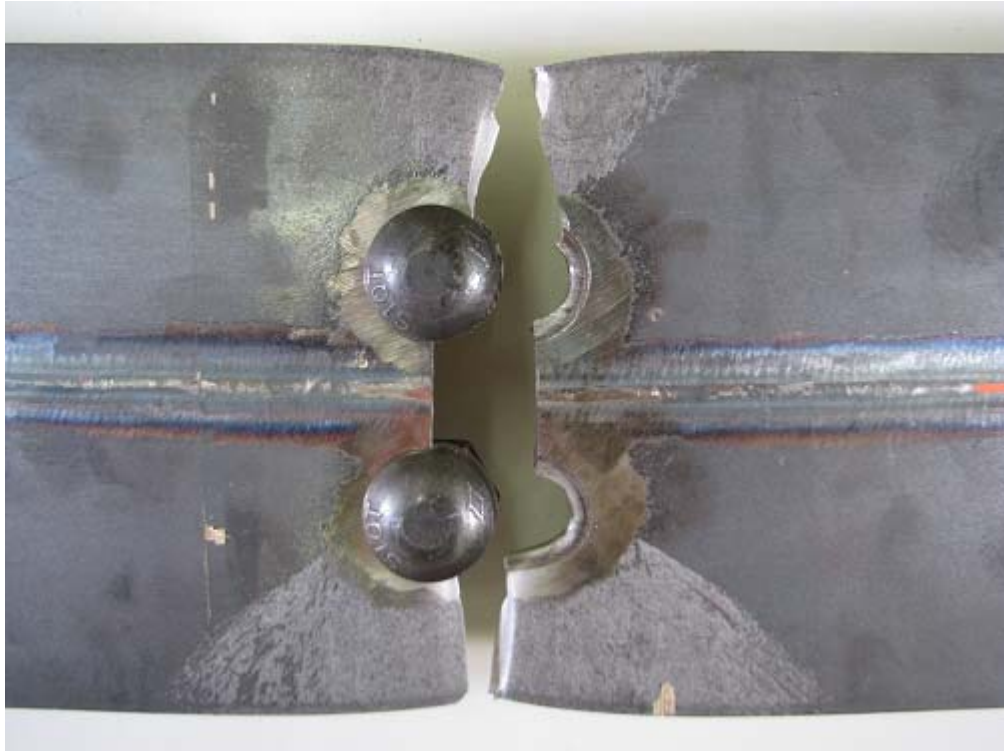


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.12 BSH-3 試験体の破断状況と疲労破面

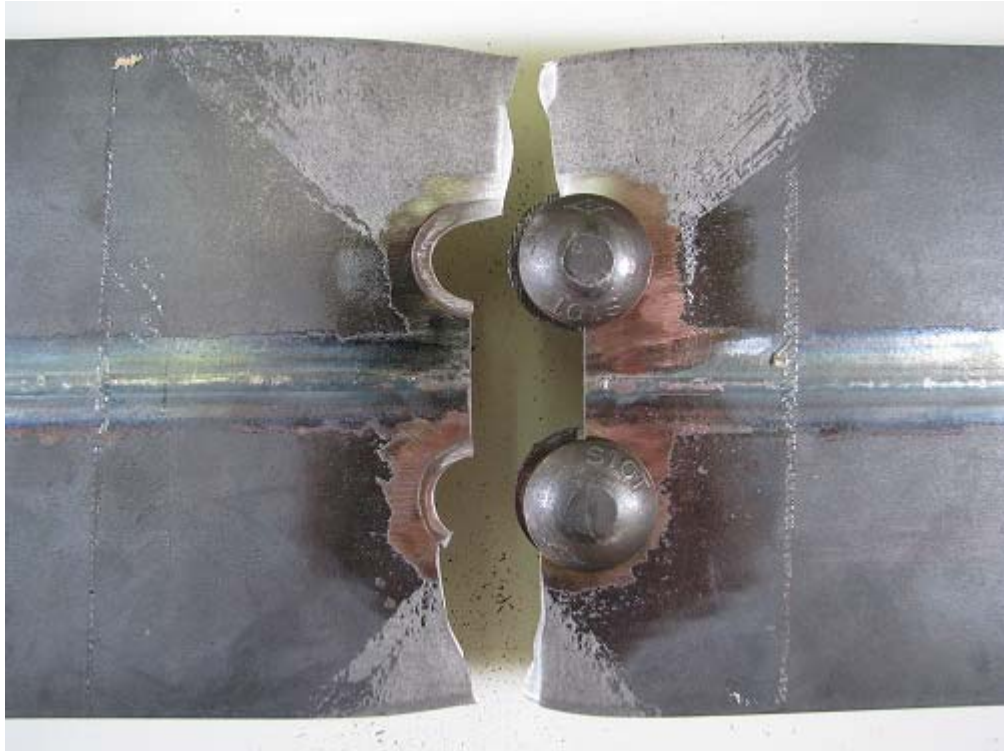


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.13 BSH-4 試験体の破断状況と疲労破面

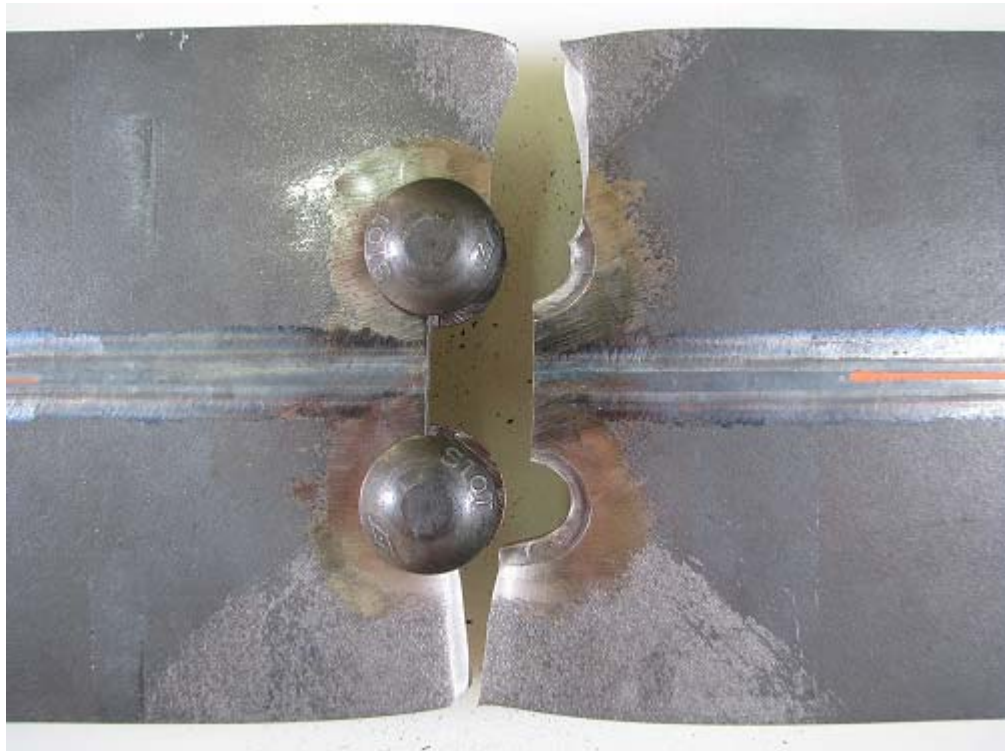


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.14 BSH-5 試験体の破断状況と疲労破面

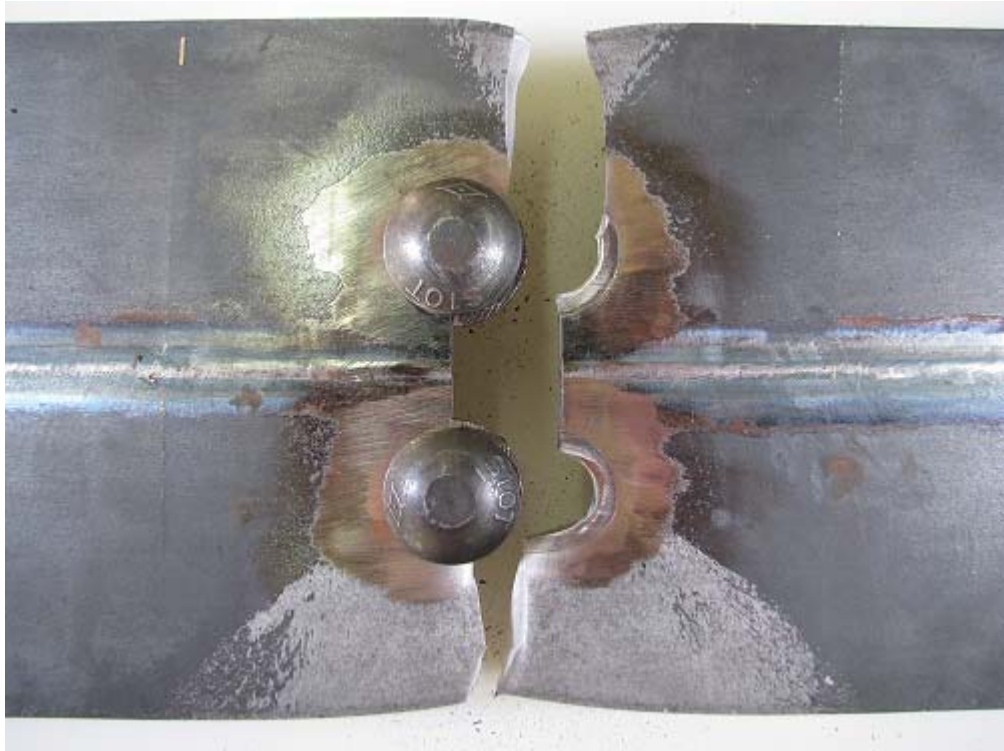


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.15 BSH-6 試験体の破断状況と疲労破面

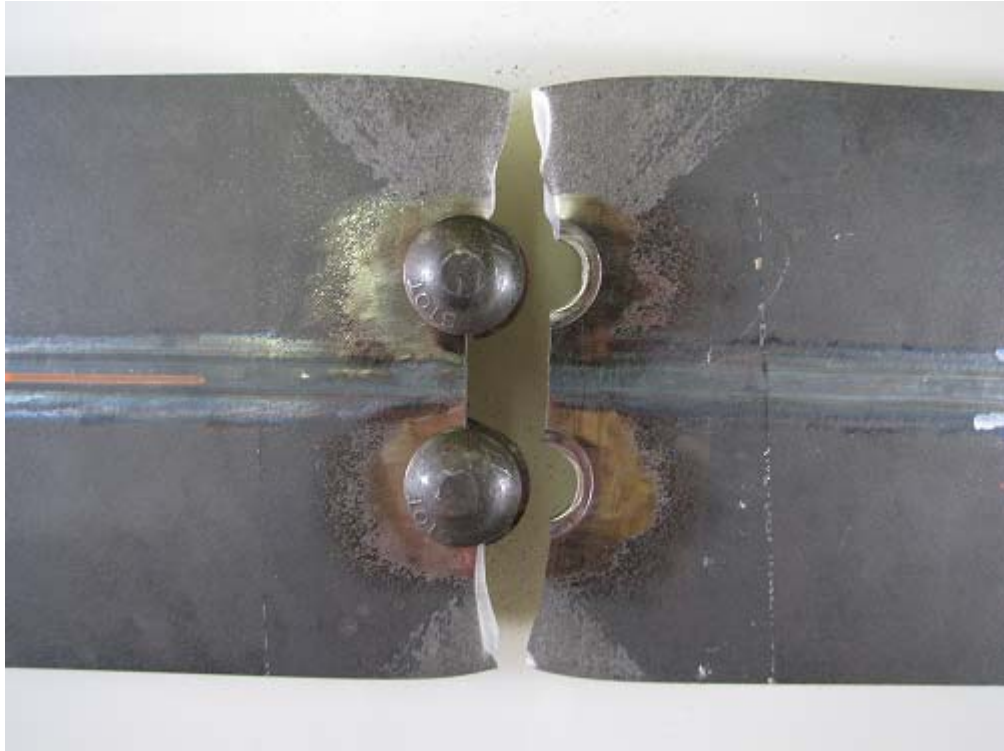


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.16 BSH-7 試験体の破断状況と疲労破面



(a) 破断状況

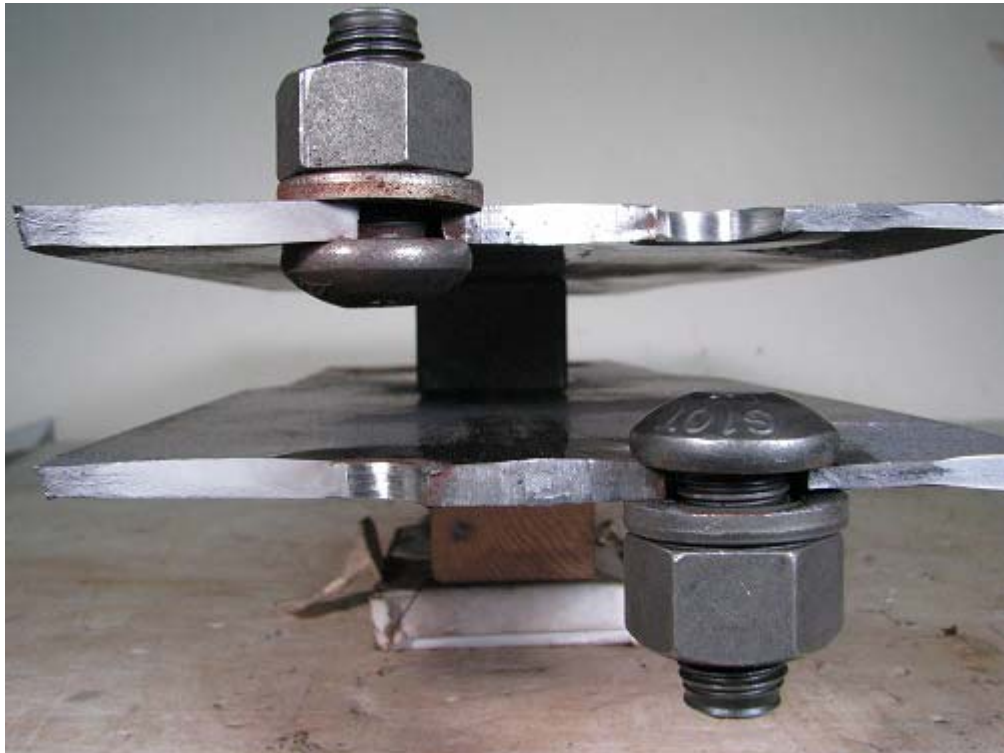


(b) 疲労破面

写真-3.17 BSH-8 試験体の破断状況と疲労破面

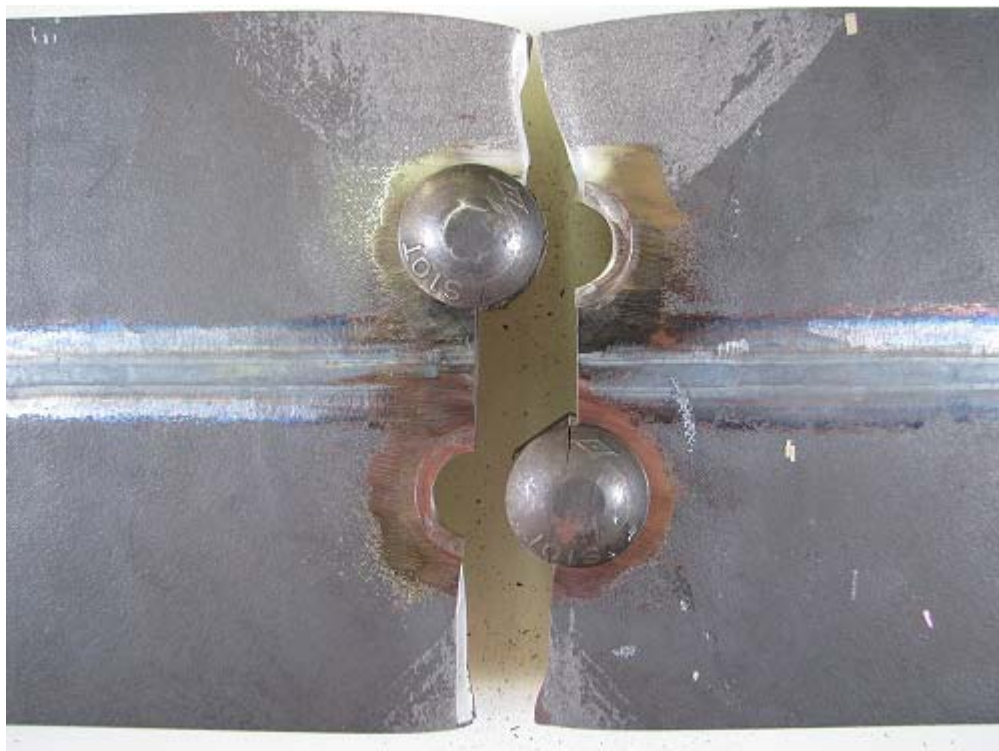


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.18 BSH-9 試験体の破断状況と疲労破面

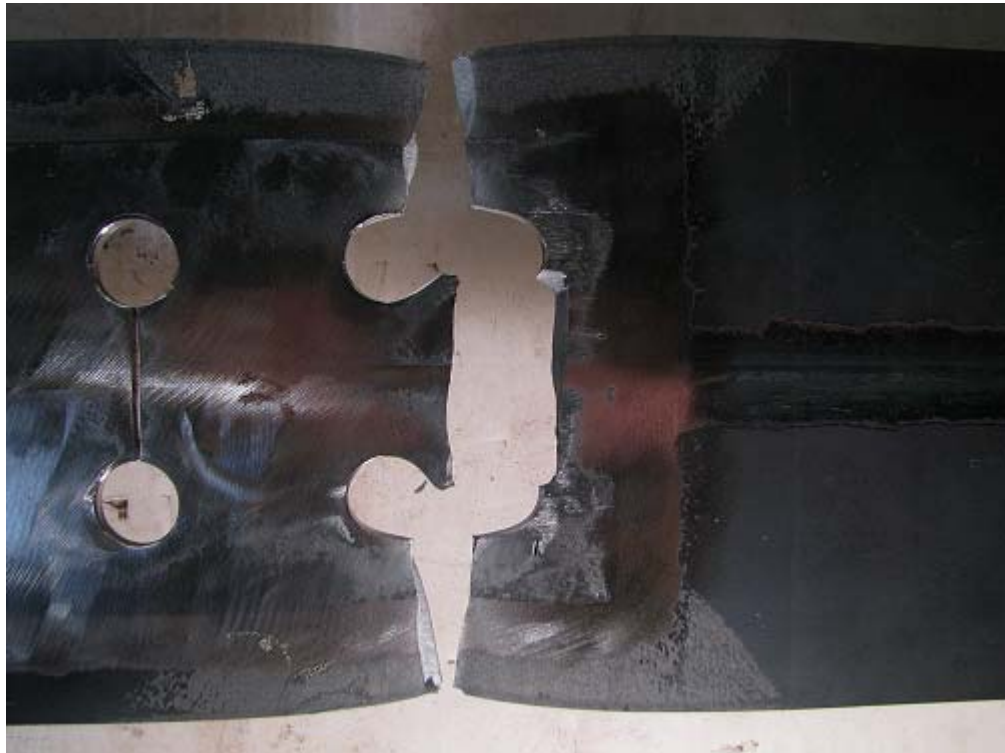


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.19 BSH-10 試験体の破断状況と疲労破面



(a) 破断状況

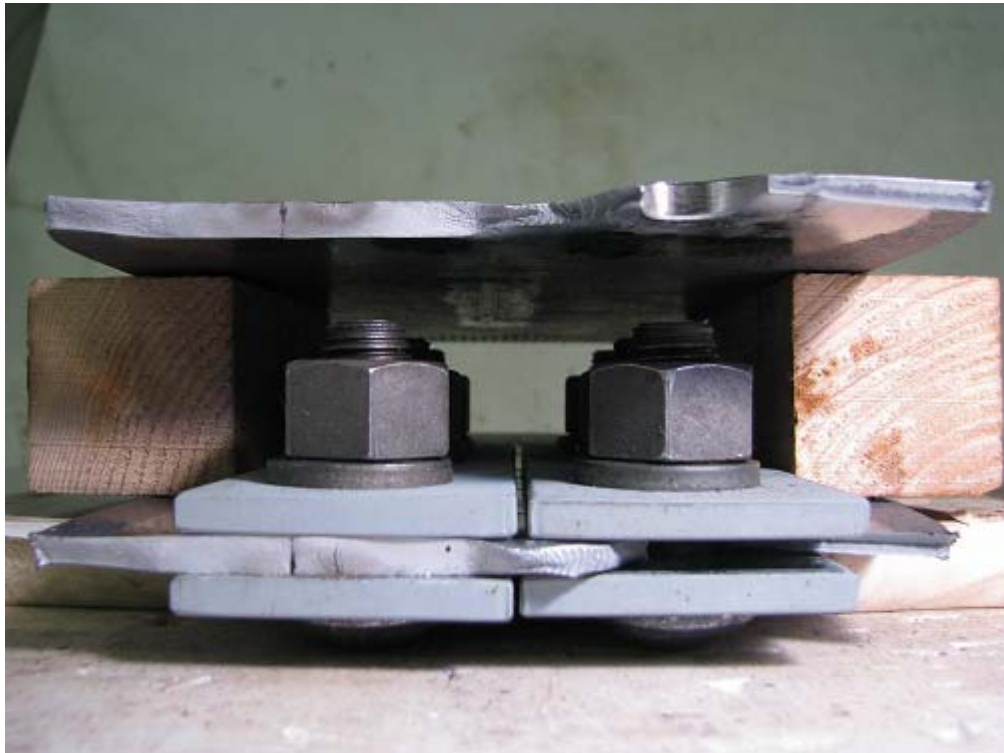


(b) 疲労破面

写真-3.20 AP-1 試験体の破断状況と疲労破面

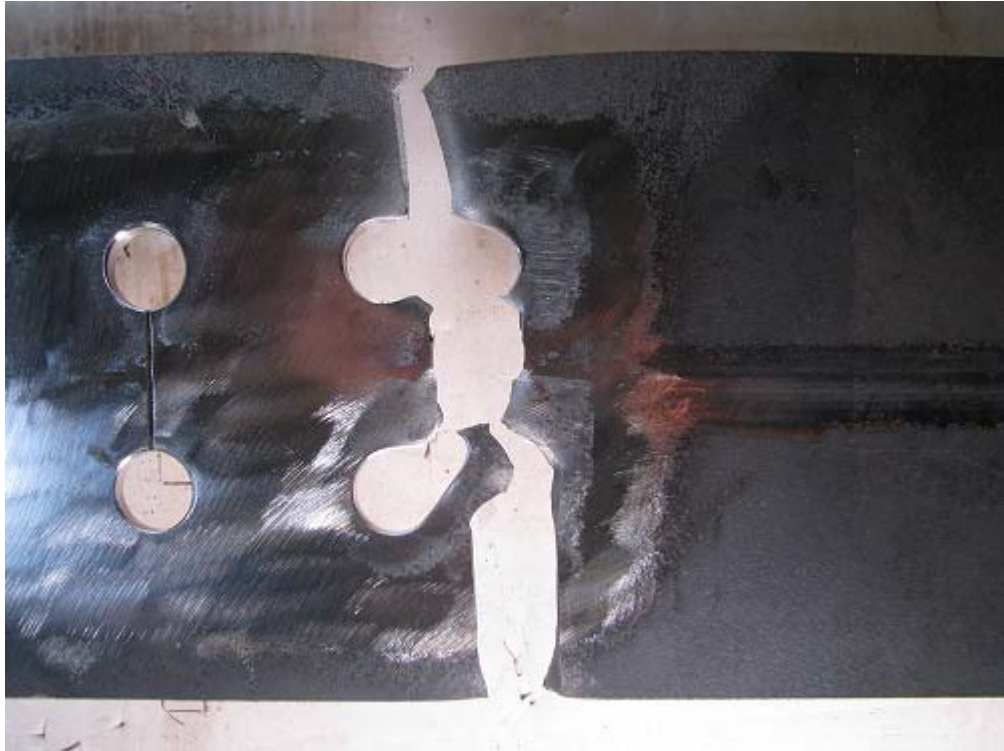


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.21 AP-2 試験体の破断状況と疲労破面

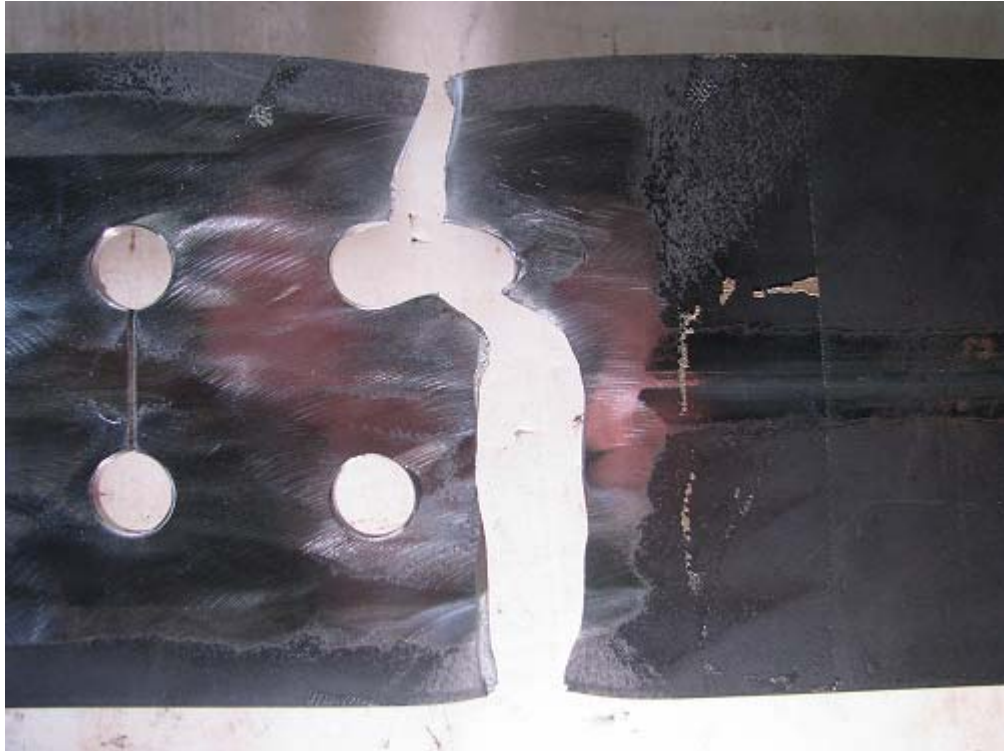


(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.22 AP-3 試験体の破断状況と疲労破面



(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.23 AP-4 試験体の破断状況と疲労破面



(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.24 AP-5 試験体の破断状況と疲労破面

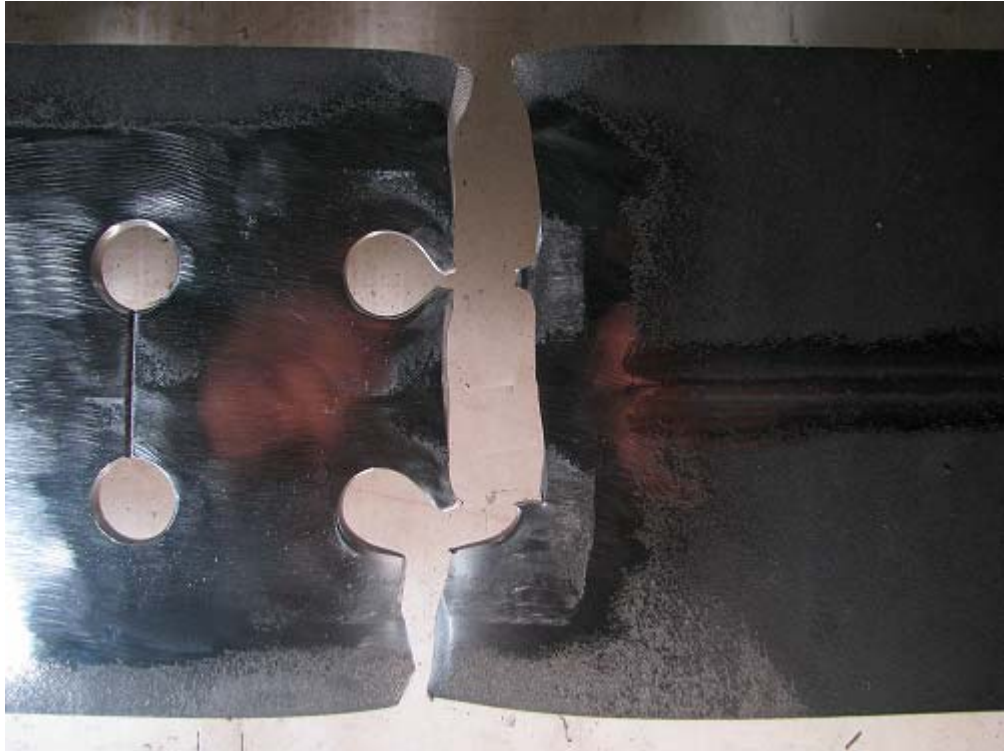


(a) 破断状況

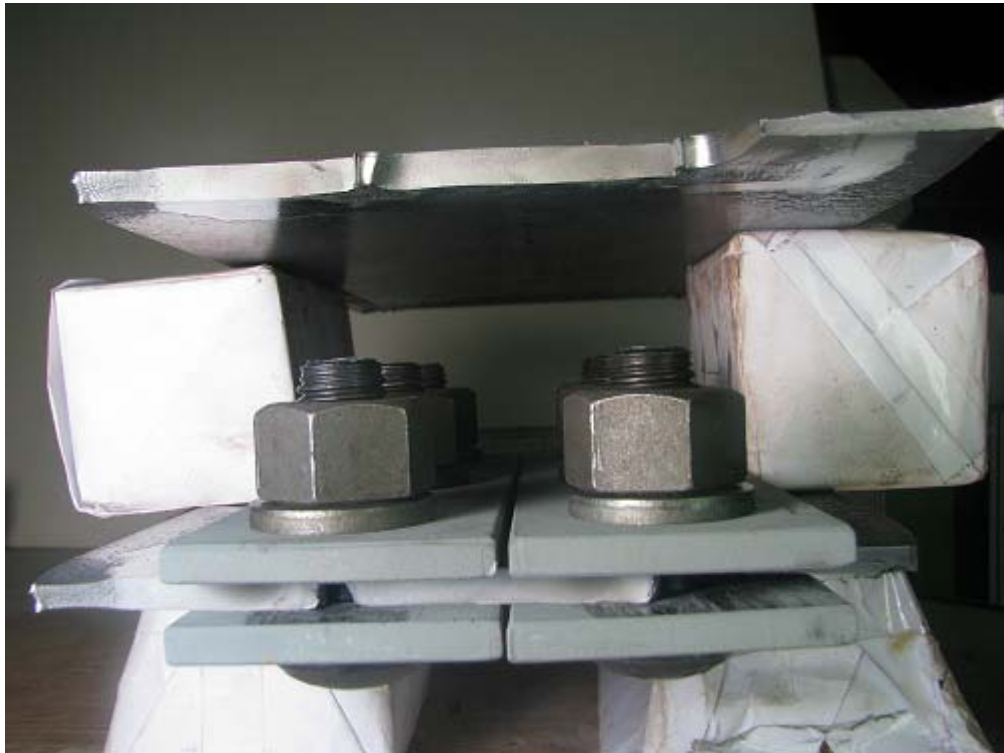


(b) 疲労破面

写真-3.25 AP-6 試験体の破断状況と疲労破面



(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.26 AP-7 試験体の破断状況と疲労破面



(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.27 AP-8 試験体の破断状況と疲労破面



(a) 破断状況



(b) 疲労破面

写真-3.28 AP-9 試験体の破断状況と疲労破面

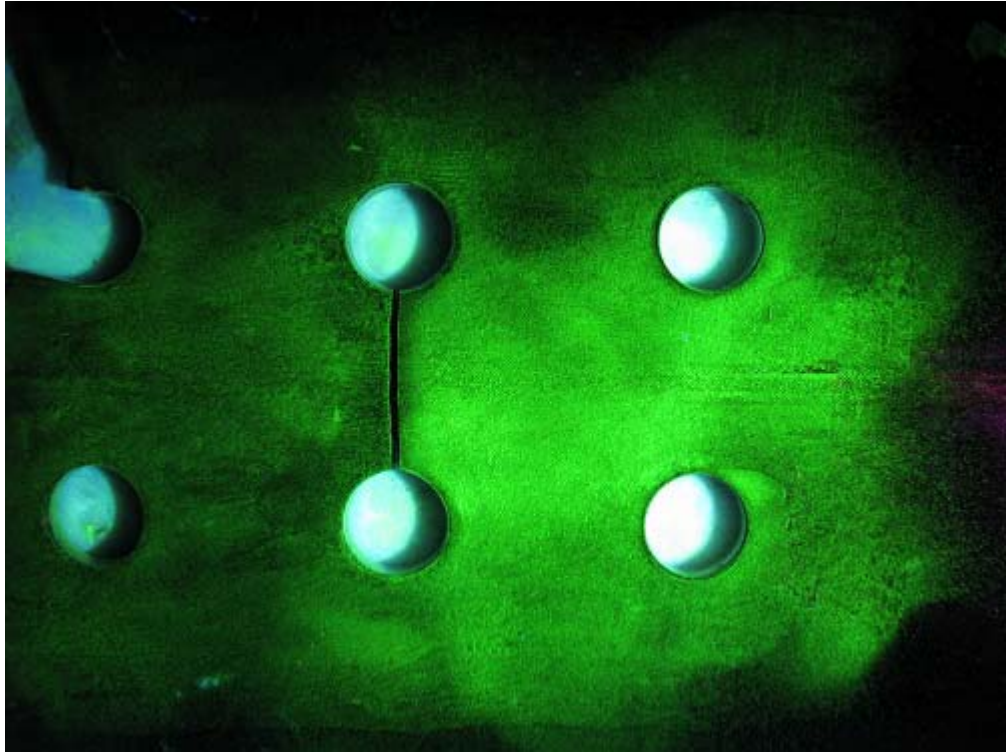


(a) 破断状況

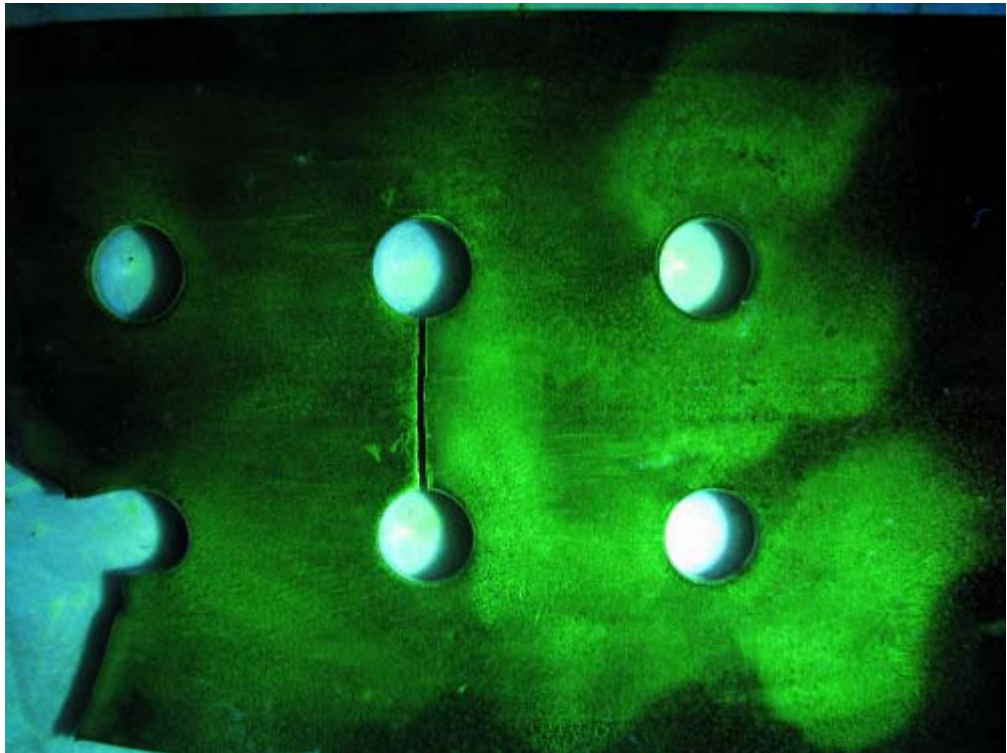


(b) 疲労破面

写真-3.29 AP-10 試験体の破断状況と疲労破面

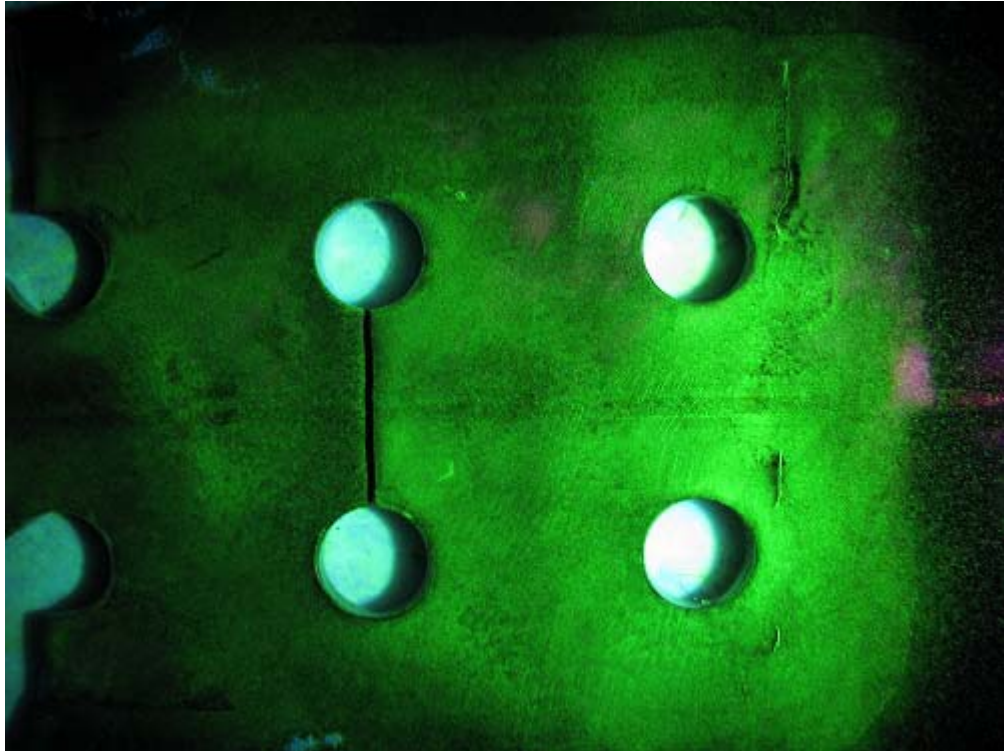


(a) 表面

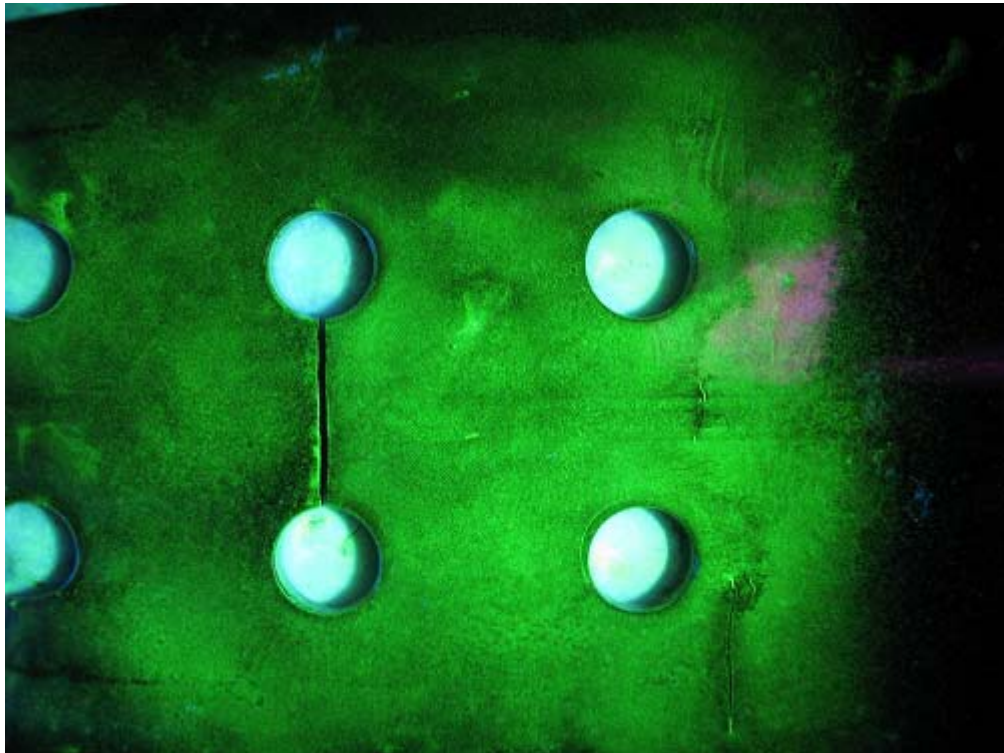


(b) 裏面

写真-3.30 AP-1 試験体の磁粉探傷試験結果

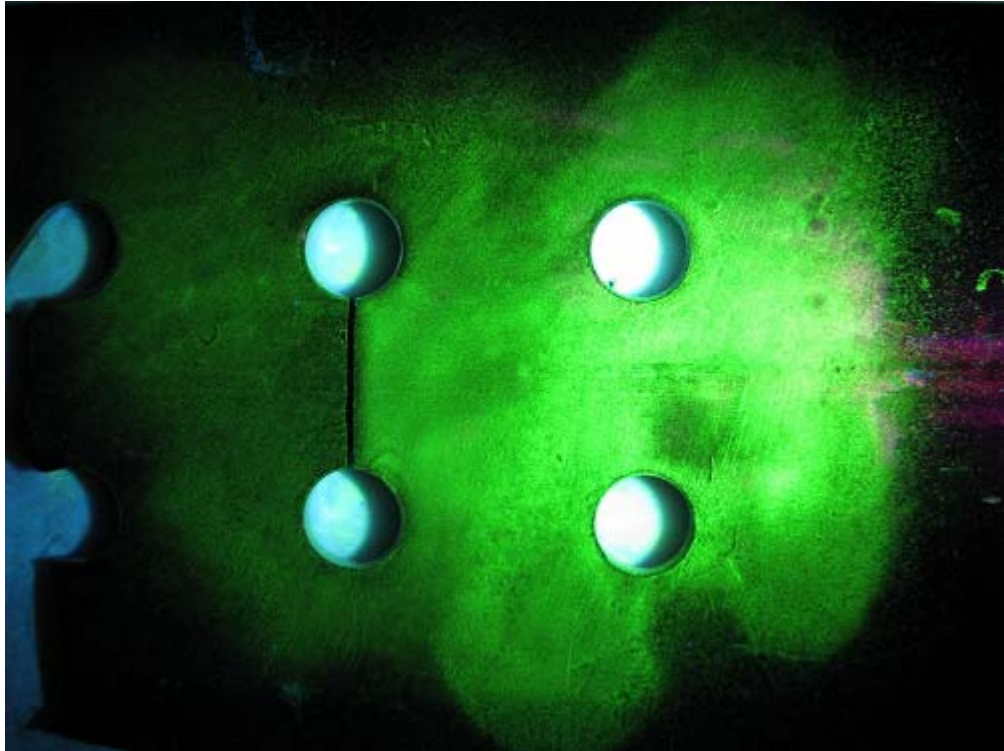


(a) 表面

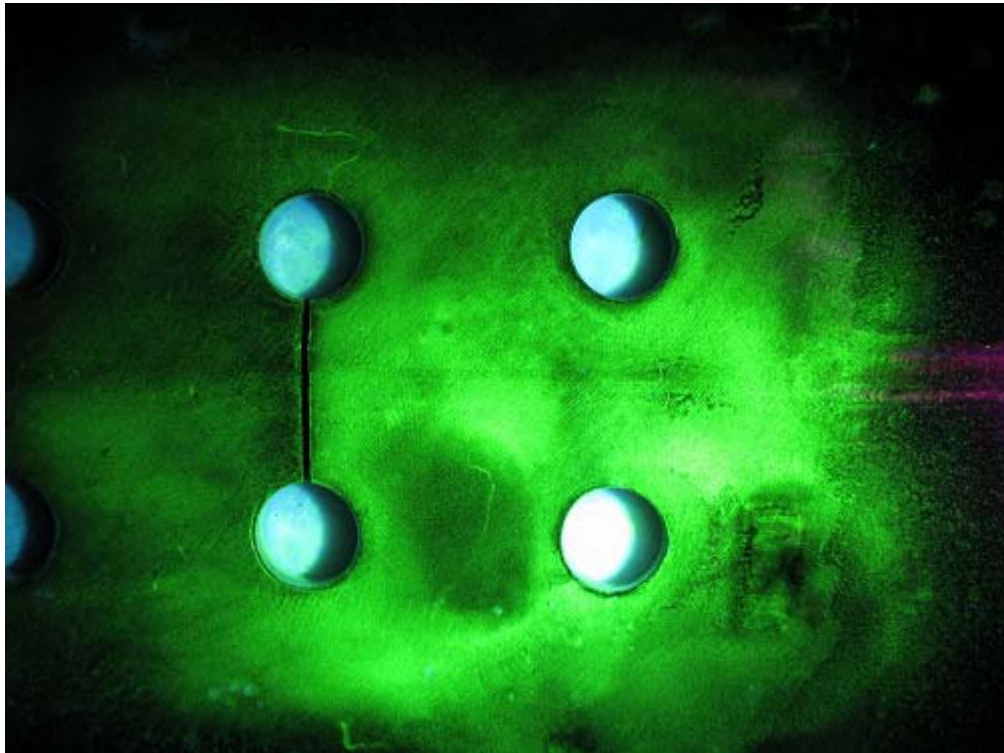


(b) 裏面

写真-3.31 AP-2 試験体の磁粉探傷試験結果

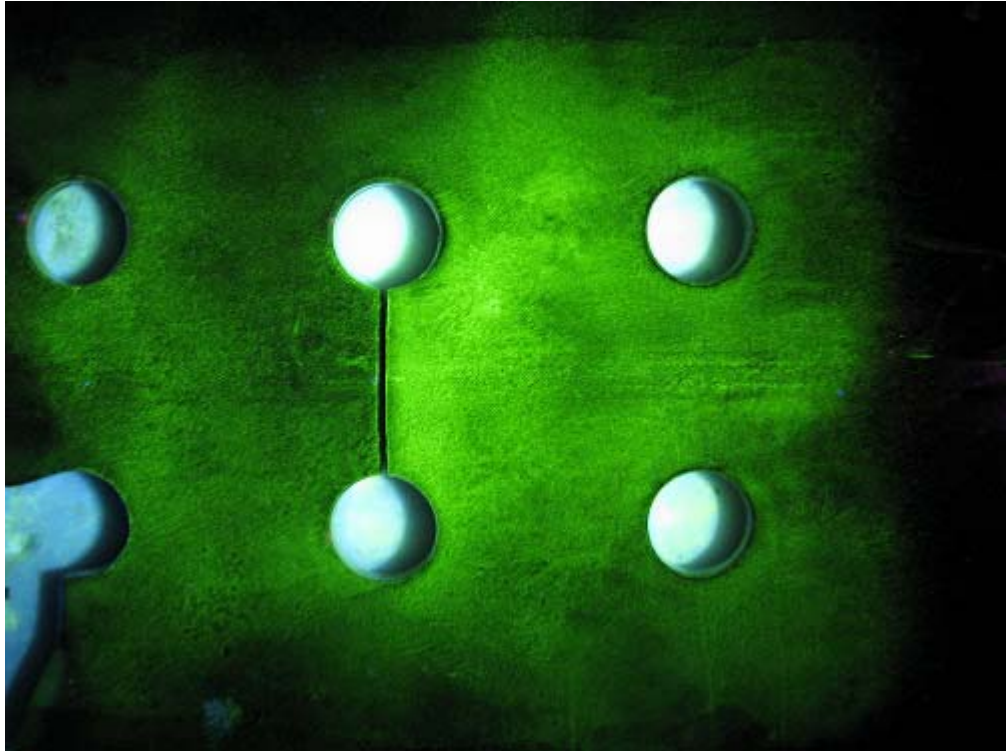


(a) 表面

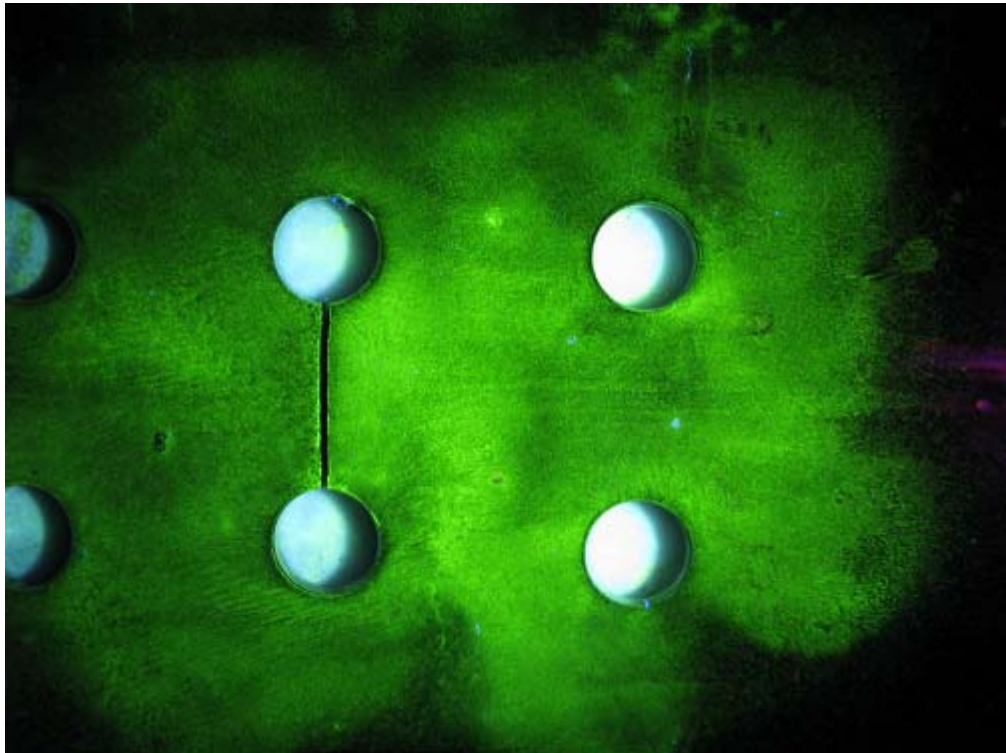


(b) 裏面

写真-3.32 AP-3 試験体の磁粉探傷試験結果

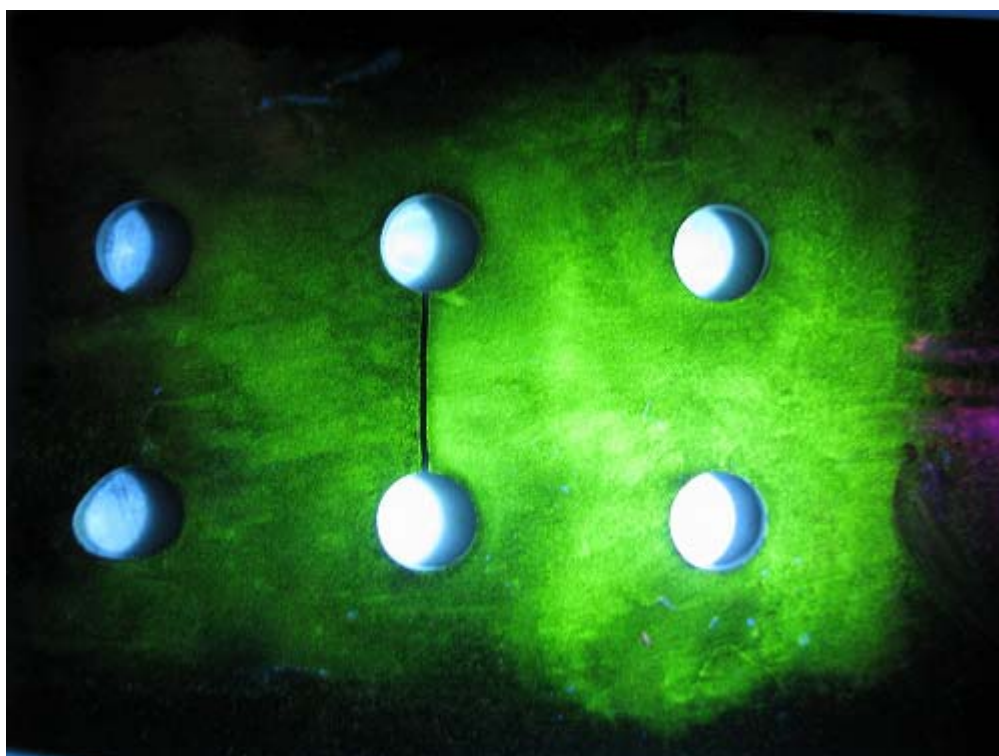


(a) 表面

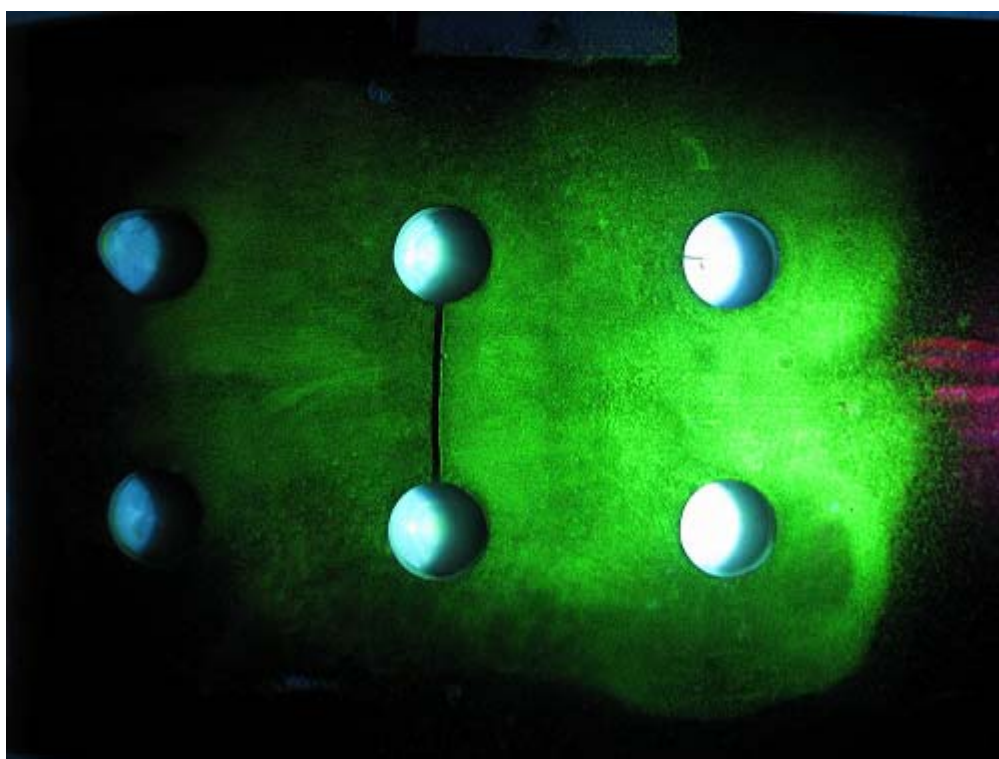


(b) 裏面

写真-3.33 AP-4 試験体の磁粉探傷試験結果

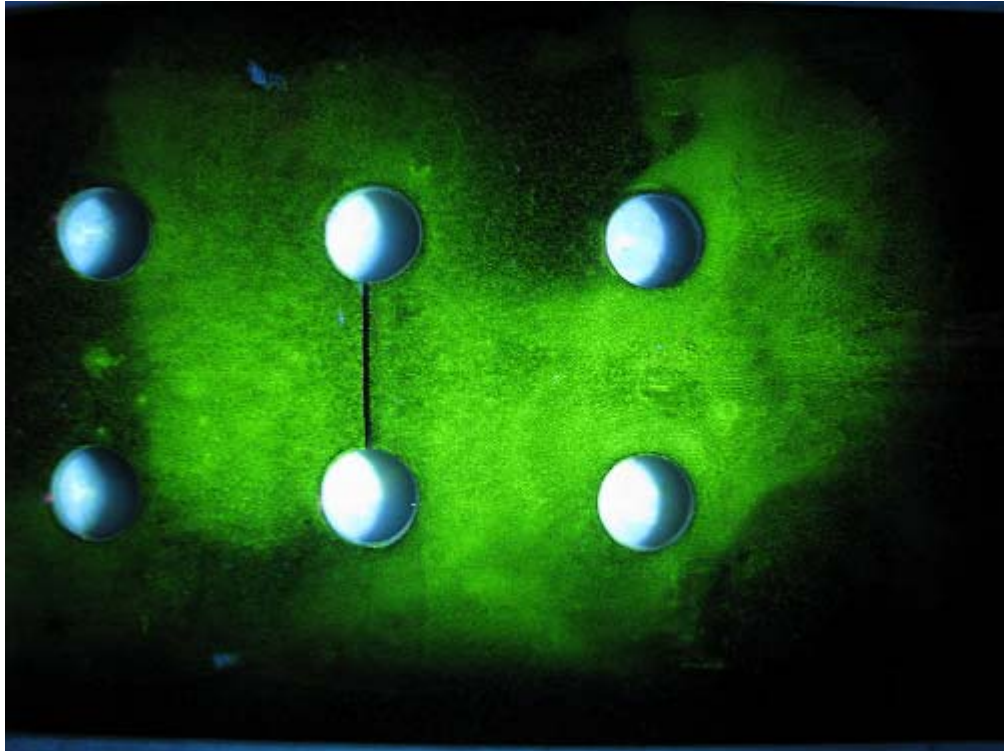


(a) 表面

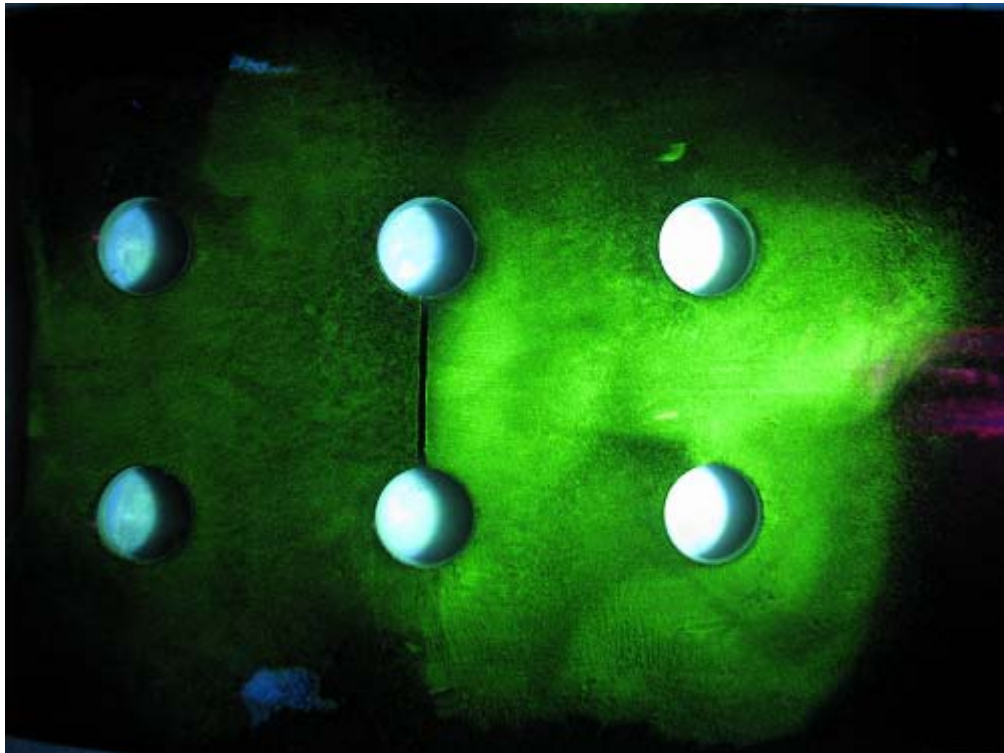


(b) 裏面

写真-3.34 AP-5 試験体の磁粉探傷試験結果

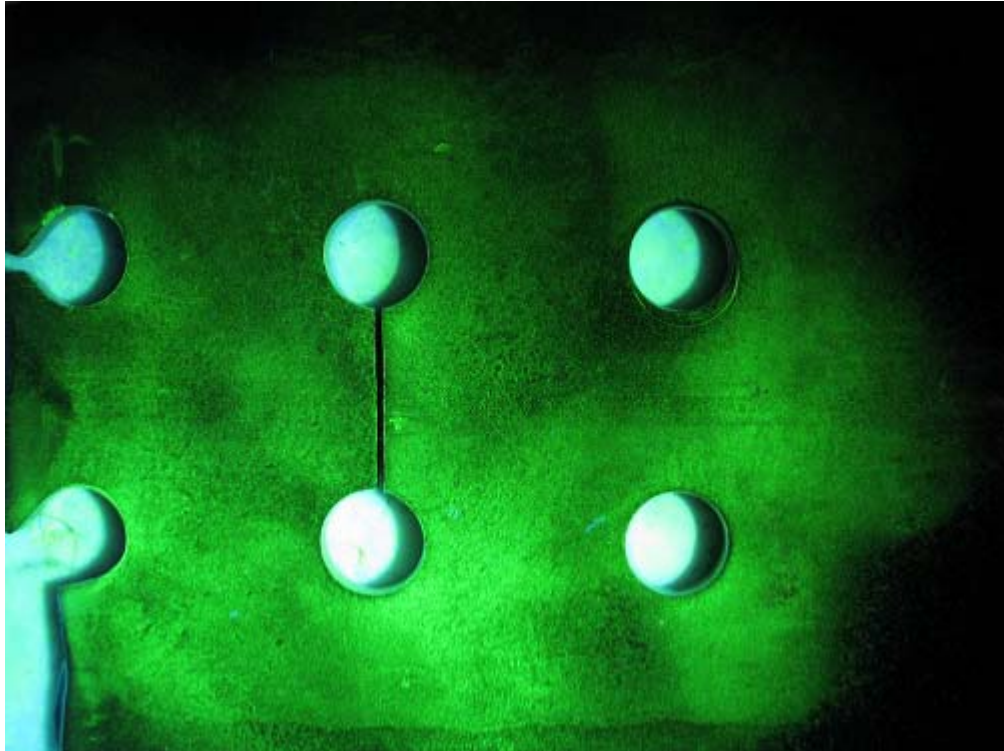


(a) 表面

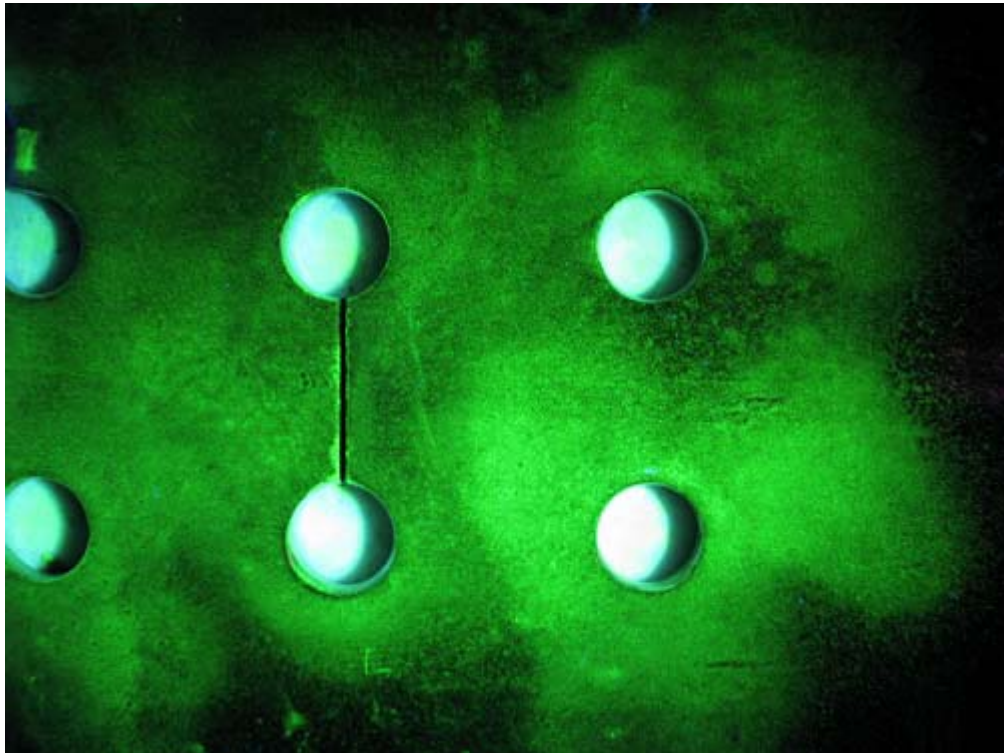


(b) 裏面

写真-3.35 AP-6 試験体の磁粉探傷試験結果

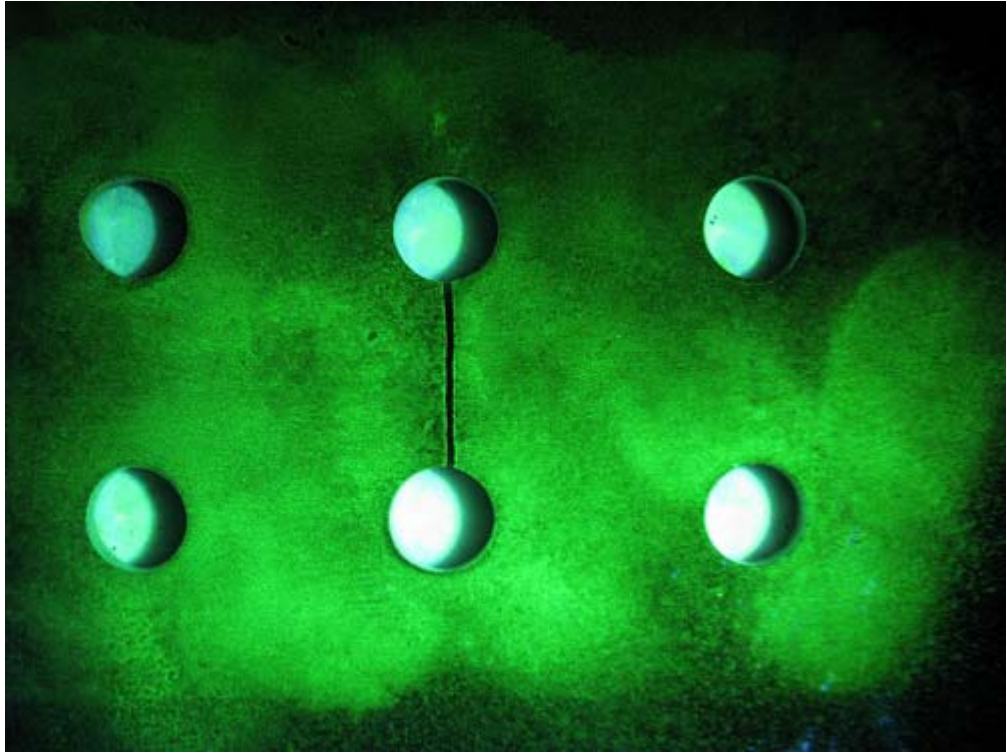


(a) 表面

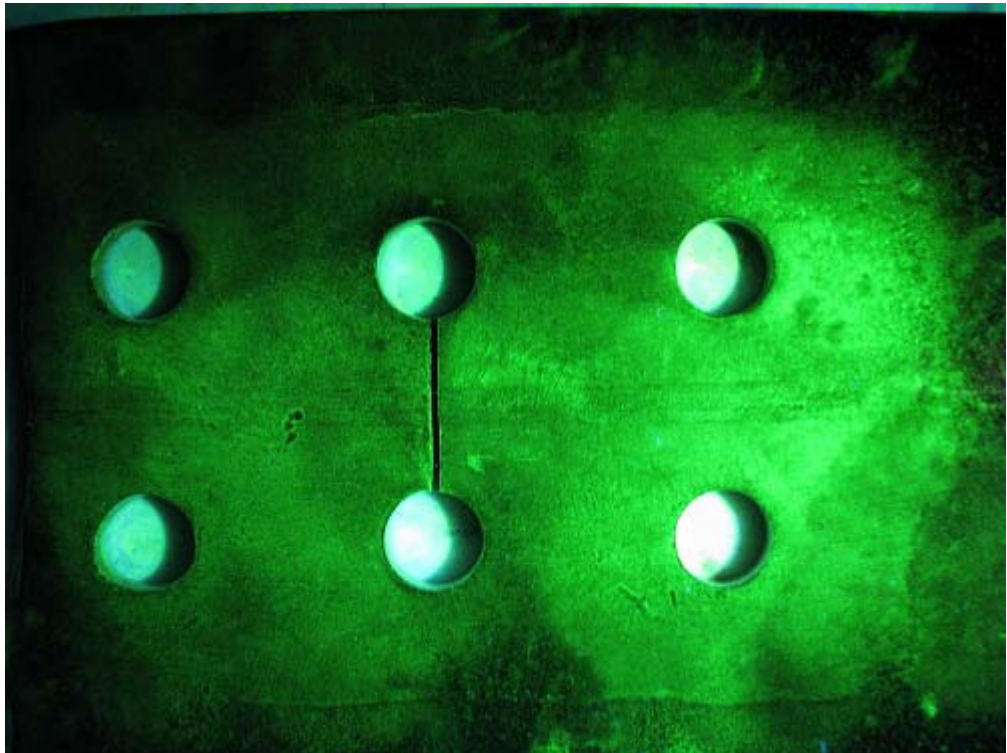


(b) 裏面

写真-3.36 AP-7 試験体の磁粉探傷試験結果

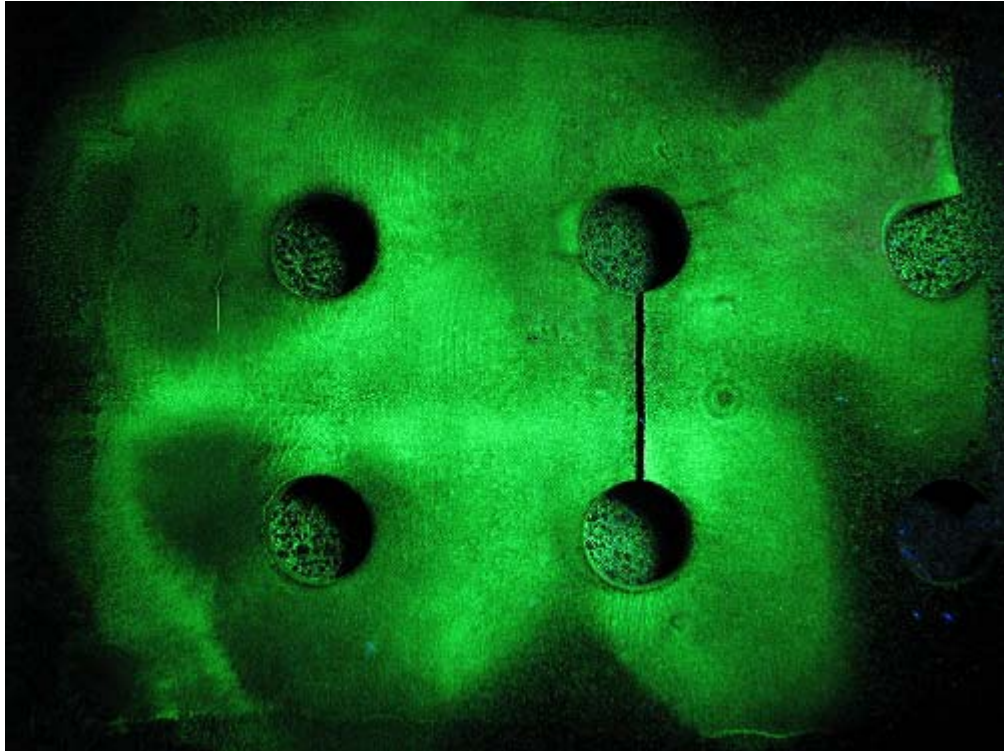


(a) 表面

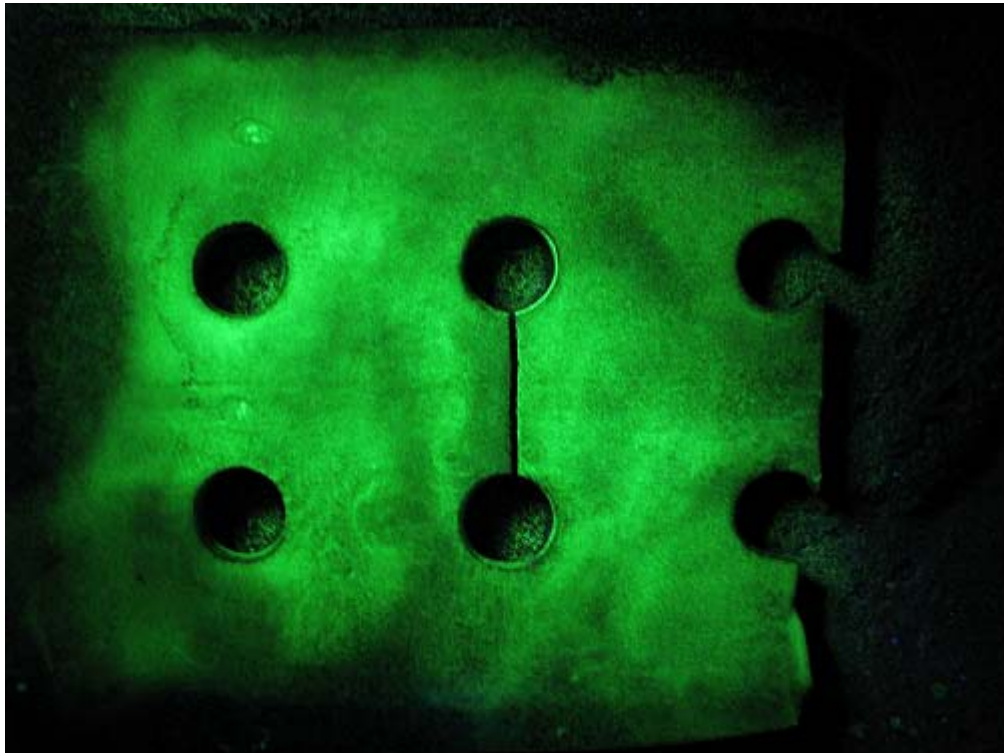


(b) 裏面

写真-3.37 AP-8 試験体の磁粉探傷試験結果

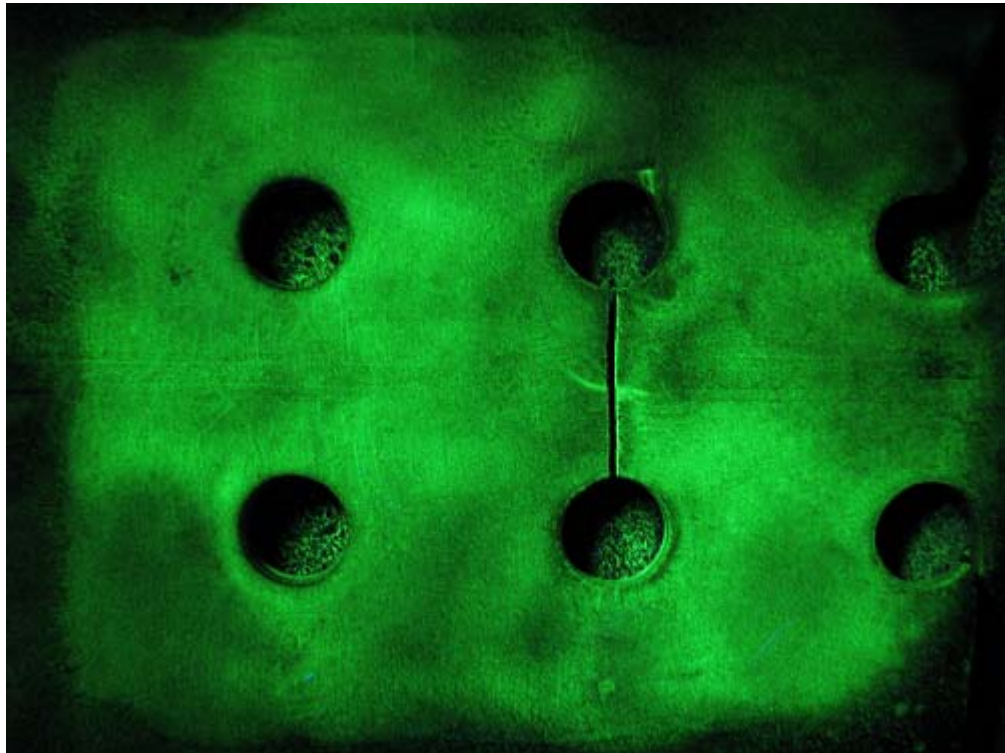


(a) 表面

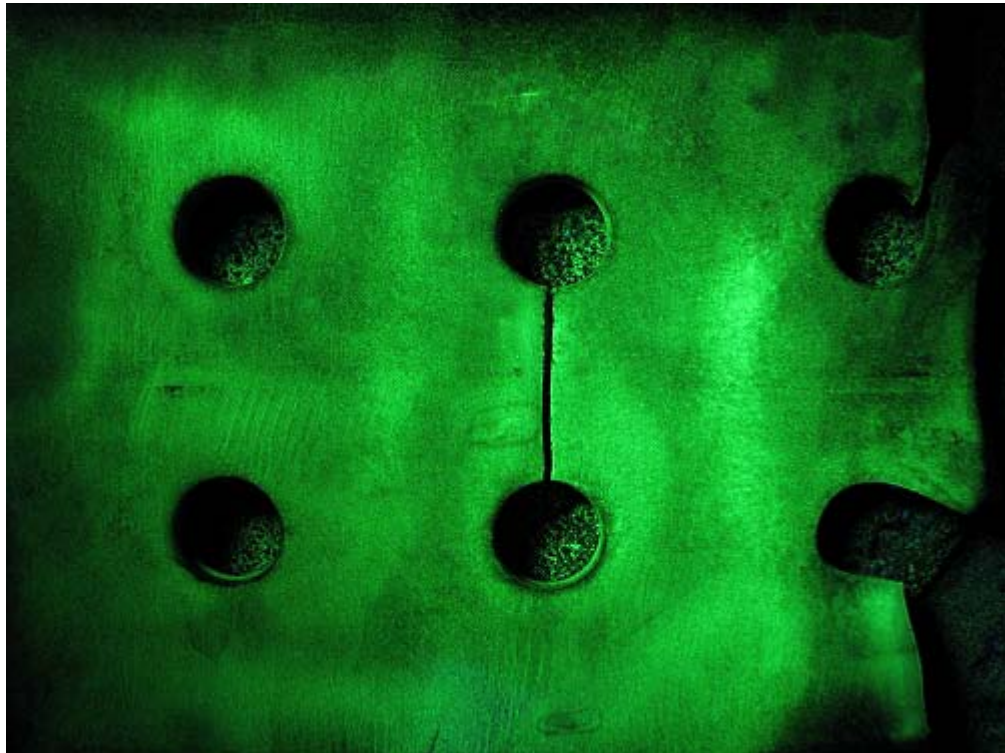


(b) 裏面

写真-3.38 AP-9 試験体の磁粉探傷試験結果



(a) 表面



(b) 裏面

写真-3.39 AP-10 試験体の磁粉探傷試験結果

第4章 ボルト締めストップホール法による補修部の疲労強度評価法

4.1 これまでの疲労強度評価法

当研究室で行われてきた一連の研究^{12)・23)}により，ストップホール法および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式が，式(4.1)のように提案されている．

$$\Delta\sigma^m \cdot N = C / [Y(\alpha_s - 1) + 1]^m \quad \dots \dots (4.1)$$

$\Delta\sigma$ ：公称応力範囲 (N/mm²)

N：疲労寿命 (cycles)

C, m：(ボルト締めした)ストップホール先端の応力範囲と
疲労寿命の関係を表す材料定数

(C = 1.51 × 10²⁰, m = 5.39)

s：ストップホール先端の応力集中係数

$$s = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi \cdot c/2}{w}\right)} \times \{0.166(c/M) + 1.64 \sqrt{c/M} + 1.19\} \quad \dots \dots (4.2)$$

c：切欠き長さ (mm), w：板幅 (mm)

M：円孔径 (mm)

：応力緩和係数 (= (1 - B) / (1 - s))

B：ボルト締めしたストップホール先端の応力集中係数

$$= 1.0 - 0.297(M/t) \quad \dots \dots (4.3)$$

t：板厚 (mm)

この評価式は，応力集中を含むストップホール先端の応力範囲で疲労寿命を整理できるという仮定に基づいたものであり，その有効性は数多くの疲労試験データとの比較により確かめられている．

4.2 本研究における疲労強度評価法

4.2.1 材料定数 C, m の算定

式(4.1)に示す定数 C, m の値は、図-4.1に示すように静的強度 $400 \sim 800\text{N/mm}^2$ クラスの鋼材の疲労試験結果に基づいて定められたものである。図中の実線は、これらの試験データに基づいて求めた疲労寿命に対する円孔壁の応力範囲(σ_s : 円孔壁での応力範囲)の回帰直線であり、この直線から式(4.1)の C と m の値を定めている。また、図中の破線は回帰直線から2標準偏差離れた応力範囲-疲労寿命関係を示している。これらの試験体の板厚は12mmであり、本研究で用いたSH試験体(板厚6mm)とは異なるものの、板幅、長さ、切欠き長さなどの寸法は同じである。しかし、板厚12mmの試験体(12mm試験体と呼ぶ)の円孔はドリル孔のままであるのに対し、SH試験体の円孔壁は#80の軸付ゴム砥石を用いて仕上げている。

図-4.2に、SH試験体の疲労試験結果を示す。また、昨年度廣戸が行った板厚9mmの同一形状の試験体(9mm試験体と呼ぶ)で得られている疲労試験結果³³⁾も示している。この試験体では、円孔をドリル孔のままとした状態と#80の砥石で仕上げた状態で疲労試験が行われている。ドリル孔のままの円孔を有する9mm試験体の疲労強度は12mm試験体とほぼ同じとなっている。また、円孔を仕上げたSH試験体および9mm試験体の疲労強度はほぼ同じであり、ドリル孔のままの試験体(9mm, 12mm)よりも高くなっている。このことから、円孔壁を仕上げた場合の補修部の円孔壁の応力範囲-疲労寿命関係を示す C と m の値は、式(4.1)で与えられるものとは異なると考えられる。

円孔を仕上げた試験体の疲労試験結果に最小二乗法を適用して求めた C と m の値は、以下のとおりである。

$$C = 8.98 \quad , \quad m = 1.58 \times 10^{30} \quad \dots \dots (4.4)$$

4.2.2 応力緩和係数 K の算定

式(4.3)に示す応力緩和係数 K は、ボルト締めによる円孔壁での応力集中の緩和の程度を表す係数であり、母板とワッシャーの間に微小なすべりを考慮するためにヤング率の小さい厚さ0.1mmの要素を挿入し、この要素のヤング率が接触圧に比例(12.6倍)するとして求めたものである¹²⁾。しかし、この経験式は円孔径 M (18, 25mm) と板厚 t (9~36mm) の比 M/t が2.78以下の範囲で求められたものであり、本研究

で使用した板厚 6mm，円孔径 18mm の $M/t=3$ の場合は想定されていない．そこで，新たにパラメータを増やし， M/t の範囲を 3 (板厚 6mm，円孔径 18mm) まで拡張して，これまでの研究¹⁸⁾¹⁹⁾²¹⁾と同様の応力解析を行うことで応力緩和係数算定式について再検討した．

解析対象は図-4.3 に示すような平板モデルとし，有限要素解析ソフト CAEFEM VER6.0 を利用して行った．要素には 8 節点固体要素を用い，材料特性はヤング率が $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，ポアソン比は 0.3 とする．

解析パラメータは，表-4.1 に示すように板厚 t が 6, 9, 12, 18, 25, 36mm の 6 種類，切り欠き長さ c が 75, 100, 150, 300mm の 4 種類，円孔径 M が 18, 25mm とした．したがってここで用いたモデル数は合計 45 となる．高力ボルトは円孔径 18mm では F10T-M16，円孔径 25mm では F10T-M22 を想定してモデル化した．ストップホールモデル，ボルト締めストップホールモデルの解析を行い，得られた円孔壁の応力集中係数を用いて前述の式 (3.5) で応力緩和係数を算出する．

解析から得られた応力緩和係数を表-4.2 に，応力緩和係数を円孔径に対する板厚の比 M/t で整理したものを図-4.4 に示す．図中には式 (4.3) で与えられる結果も破線で示している．

M/t が 2 程度以下の領域では，式 (4.3) が解析より得られた M/t 関係をよく再現しているものの， M/t が 2 を超える領域では，を低く評価している．図-4.4 中には， M/t 関係が 2 次曲線として与えられるとして最小二乗法より求めた関係，式 (4.5) も示している．

$$= 0.052(M/t)^2 - 0.399(M/t) + 1.000 \quad \dots \dots (4.5)$$

M : 円孔径 (mm)

t : 板厚 (mm)

図-4.4 より判断すると， M/t 関係は直線よりも 2 次曲線で表すのが適切と考えられる．

4.2.3 トルシアボルトのモデル化

本章における解析モデルに用いたボルトは六角ボルトをモデル化したものであるが，本研究の疲労試験で使用した高力ボルトはトルシアボルトである．六角ボルトとトルシアボルトではボルト頭の形状が異なるため，六角ボルトの解析結果ではトルシアボ

ルトを用いた試験体の疲労強度評価には適用できないことも考えられる。そこで、小型平板試験体における解析モデルに用いる高力ボルトにトルシアボルトをモデル化し、六角ボルトモデルとの比較を行った。

解析対象は第4章の疲労試験で用いた小型平板試験体モデルである。解析モデルは対象性を考慮して1/8モデルで解析を行う。AP試験体モデル、BSH試験体モデルの要素分割図を図-4.5と図-4.6に示す。SH試験体については前章で得られた解析結果を使用する。解析手法や解析に使用するソフトは3.2.2項と同じである。

解析によって得られた円孔壁の応力集中係数を表-4.3に、六角ボルトモデルとトルシアボルトモデルを比較したものを図-4.7に示す。トルシアボルトモデルの円孔壁での応力集中係数は、六角ボルトモデルと比べてボルト締めモデルで0.75倍、添え板ボルト締めストップホールモデルで0.92倍となった。また、トルシアボルトモデルで求めた応力緩和係数は0.119となった。六角ボルトに比べて効果が高くなった要因として、接触圧の違いが挙げられる。トルシアボルトをモデル化した際の、高力ボルトとナット間に挿入した微小要素にかかる接触圧は最大で3.26倍となった。このように、接触圧が極端に高くなる箇所もあったため、六角ボルトをモデル化した際の微小要素のヤング率の算定式 $E=12.6$ はトルシアボルトをモデル化した際には適用できない可能性も考えられる。

以上のように、六角ボルトとトルシアボルトでは解析結果に違いが現れたため、トルシアボルトではボルト頭とナットで形状が異なることも考慮して、ボルト全体をモデル化した1/4モデルで再度応力解析を行い、応力緩和係数の再検討を行う。検討するパラメータや解析モデル、解析手法は4.2.2項と同じである。

解析から得られた応力緩和係数を表-4.4に、応力緩和係数と切欠き長さ c の関係を図-4.8に示す。板厚と円孔径は同じであれば、 β の値は切欠き長さによらずほぼ一定となっている。また、板が薄いほど、円孔径が大きいほど、 β の値は小さくなっている。このような結果は、六角ボルトをモデル化した場合¹⁹⁾と同じである。

応力緩和係数 β を円孔径に対する板厚の比 M/t で整理したものを図-4.9に示す。前述のとおり、トルシアボルトでモデル化した際には、補修効果を過大に表現してしまう可能性がある。差を明確にするため、log-scaleで比較した $\beta - M/t$ 関係を図-4.10に示す。円孔径 M が18mmの場合と25mmの場合とで $\beta - M/t$ 関係に若干の差が生じている。そこで、本研究では $M=18\text{mm}$ 、 $M=25\text{mm}$ の2つに場合分けして応力緩和係数の算定式を構築することとする。図中に示す黒の実線と赤の実線は最小二乗法より求めた M/t に対する応力緩和係数 β の近似直線である。近似直線の式を式(4.6)

と式(4.7)に示す。

$$(M=18\text{mm}) = \exp(-0.465(M/t)) \quad \dots\dots(4.6)$$

$$(M=25\text{mm}) = \exp(-0.531(M/t)) \quad \dots\dots(4.7)$$

M: 円孔径 (mm)

t: 板厚 (mm)

M=18mm の場合と M=25mm の場合では、応力緩和係数の値として M/t = 3 で M=18mm のとき 0.248, M=25mm のとき 0.203 となり、約 40%程度の差が生じた。ここでは、M=18mm の場合の式(4.6)が適用できるとして、疲労強度評価を行う。

4.2.4 本研究における疲労強度評価法

以上の結果に基づき、ここでは式(4.1)の C と m を式(4.4)で、式(4.3)を式(4.6)に変更することにより得られる次式で、新たにボルト締めストップホール法による補修部の疲労強度を評価することを提案する。

$$\Delta\sigma^m \cdot N = C / [\gamma(as - 1) + 1]^m \quad \dots\dots(4.8)$$

$\Delta\sigma$: 公称応力範囲 (N/mm²)

N: 疲労寿命 (cycles)

C, m: (ボルト締めした)ストップホール先端の応力範囲と疲労寿命の関係を表す材料定数

(C = 1.58 × 10³⁰, m = 8.98)

s: ストップホール先端の応力集中係数

$$s = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi \cdot c/2}{w}\right)} \times \{0.166(c/M) + 1.64 \sqrt{c/M} + 1.19\} \quad \dots\dots(4.9)$$

c: 切欠き長さ (mm), w: 板幅 (mm)

M: 円孔径 (mm)

: 応力緩和係数 (= (1 - B) / (1 - s))

B: ボルト締めしたストップホール先端の応力集中係数

$$= \exp(-0.465(M/t)) \quad \dots\dots(4.10)$$

(M=18mm とする)

t : 板厚 (mm)

提案する方法で推定した BSH 試験体の応力範囲 疲労寿命関係を , 図-4.11 中に赤い破線で示す . 推定した関係は , 小型平板試験体の疲労試験結果よりも上に位置しており , 補修部から発生した疲労き裂による破断ではなかったことに対応している .

しかし応力緩和係数 の算定式に関しては , 検討が不十分な点もあるため , 今後更なる検討が必要であると考えられる .

4.3 桁試験体モデル , 小型平板試験体モデルの応力解析の再検討

これまでで , 六角ボルトとトルシアボルトでは解析結果に違いが現れてしまうことがわかった . そこで , 第 3 章と第 4 章で行った応力解析をトルシアボルトでモデル化し , 再度検討し直した . なお , 解析手法や解析に使用するソフトは各章と同様とする .

4.3.1 桁試験体

要素分割図を図-4.12 ~ 図-4.16 に示す . 解析結果を表-4.5 に , 六角ボルトとトルシアボルトの解析結果を比較したものを図-4.17 に示す . ストップホール法と比較すると , ボルト締めストップホール法の応力集中係数は 0.38 倍 , 添え板ボルト締めストップホール法では 0.28 倍となっている . また , 添え板ボルト締めストップホール法の応力集中係数は , ボルト締めストップホール法に比べて 0.73 倍となっている .

4.3.2 小型平板試験体

要素分割図を図-4.18 ~ 図-4.20 に示す . 解析結果を表-4.6 に六角ボルトとトルシアボルトの解析結果を比較したものを図-4.21 に示す . AP 試験体モデルの円孔壁の応力集中係数は SH 試験体モデルの 0.18 倍 , BSH 試験体モデルの円孔壁の応力集中係数は SH 試験体モデルの 0.30 倍となった . また , 今回の応力解析によって得られた円孔をボルト締めすることによる応力緩和係数は 0.172 , さらに添え板を当てた場合には 0.032 となった .

表-4.1 応力緩和係数の検討パラメータ

円孔径M=18mm		円孔径M=25mm	
板厚t	切り欠き長さc	板厚t	切り欠き長さc
6	70	9	100
6	100	9	150
6	150	9	300
6	300	12	100
9	70	12	150
9	100	12	300
9	150	18	100
9	300	18	150
12	70	18	300
12	100	25	100
12	150	25	150
12	300	25	300
18	70	36	100
18	100	36	150
18	150	36	300
18	300		
25	70		
25	100		
25	150		
25	300		
36	70		
36	100		
36	150		
36	300		

単位：mm

表-4.2 応力緩和係数の解析結果

	板厚	M/t	c70	c100	c150	c300
	M18	6	3	0.262	0.274	0.287
9		2	0.410	0.419	0.428	0.439
12		1.5	0.515	0.522	0.529	0.535
18		1	0.653	0.659	0.663	0.665
25		0.72	0.748	0.752	0.755	0.756
36		0.5	0.833	0.836	0.838	0.837

	板厚	M/t	c 70	c100	c150	c300
	M25	9	2.78		0.258	0.270
12		2.08		0.364	0.373	0.384
18		1.39		0.516	0.521	0.525
25		1.00		0.631	0.635	0.635
36		0.69		0.742	0.745	0.742

表-4.3 円孔壁の応力集中係数

	応力集中係数	応力緩和係数
AP試験体モデル	1.15	
BSH試験体モデル	1.63	0.119
SH試験体モデル	6.28	

表-4.4 応力緩和係数の解析結果

M18	板厚	M/t	c70	c100	c150	c300
	6	3	0.221	0.234	0.249	0.271
	9	2	0.375	0.388	0.399	0.412
	12	1.5	0.487	0.495	0.503	0.512
	18	1	0.631	0.637	0.643	0.647
	25	0.72	0.733	0.738	0.741	0.744
	36	0.5	0.824	0.827	0.831	0.831

M25	板厚	M/t	c 70	c100	c150	c300
	9	2.78		0.210	0.225	0.247
	12	2.08		0.316	0.327	0.342
	18	1.39		0.470	0.477	0.484
	25	1.00		0.591	0.596	0.599
	36	0.69		0.711	0.715	0.715

表-4.5 解析結果（桁試験体）

	最大主応力	応力集中係数
ストップホール	721.2	5.383
ボルト締め	274.7	2.050
添え板	200.1	1.494

表-4.6 解析結果（小型平板試験体）

	応力集中係数	応力緩和係数
AP試験体モデル	1.17	
BSH試験体モデル	1.91	0.172
SH試験体モデル	6.28	

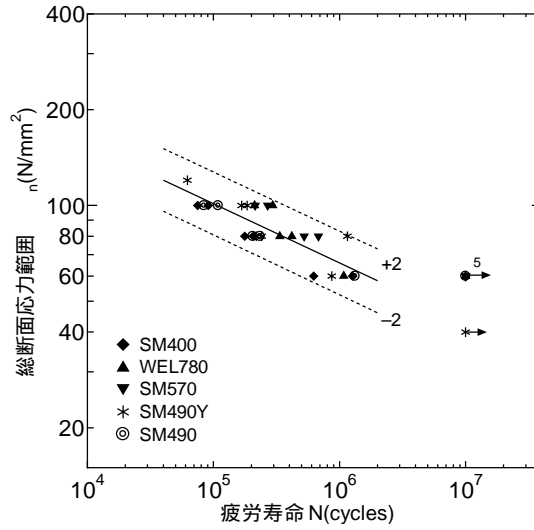


図-4.1 一連の研究^{12)・23)}による疲労試験試験結果

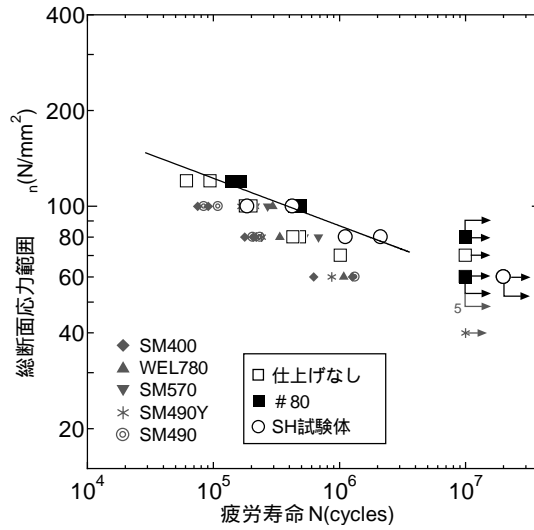


図-4.2 円孔壁の仕上げが疲労強度に及ぼす影響

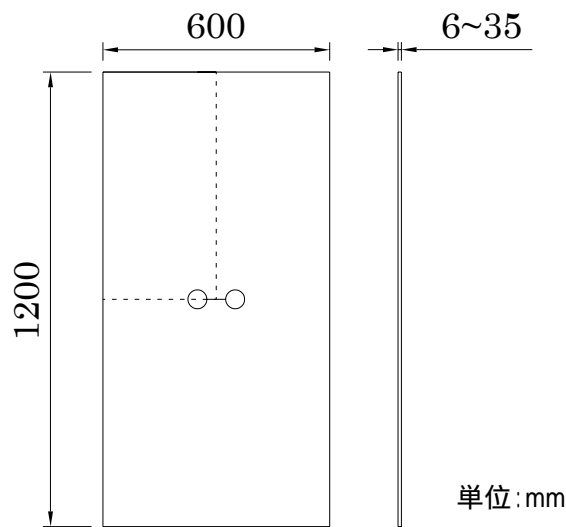


図-4.3 応力緩和係数検討のための解析モデル

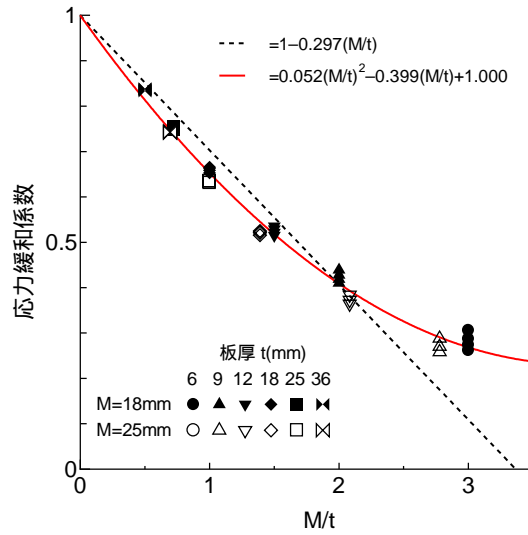


図-4.4 応力緩和係数の解析結果



図-4.5 BSH 試験体 (トルシアボルトモデル)



図-4.6 AP 試験体 (トルシアボルトモデル)

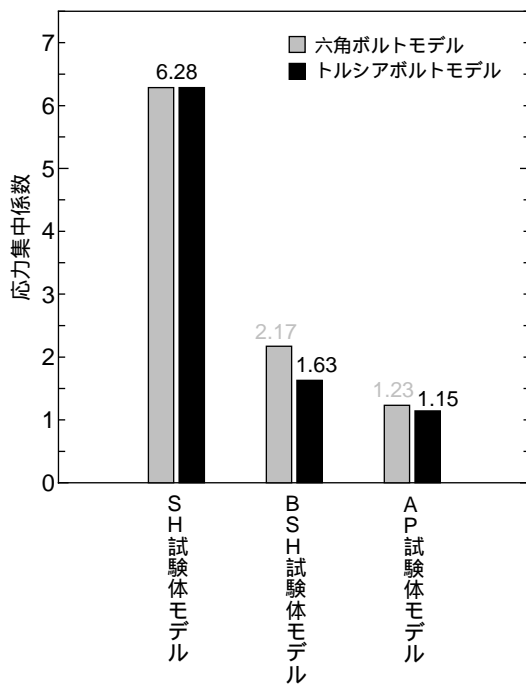


図-4.7 円孔壁の応力集中係数

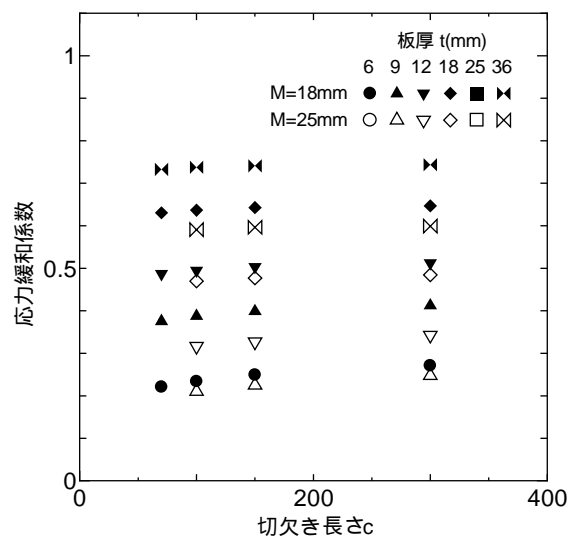


図-4.8 応力緩和係数と切欠き長さの関係

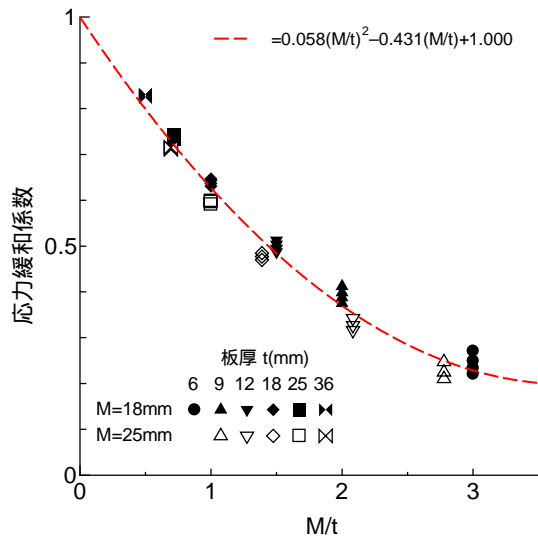


図-4.9 $-M/t$ 関係

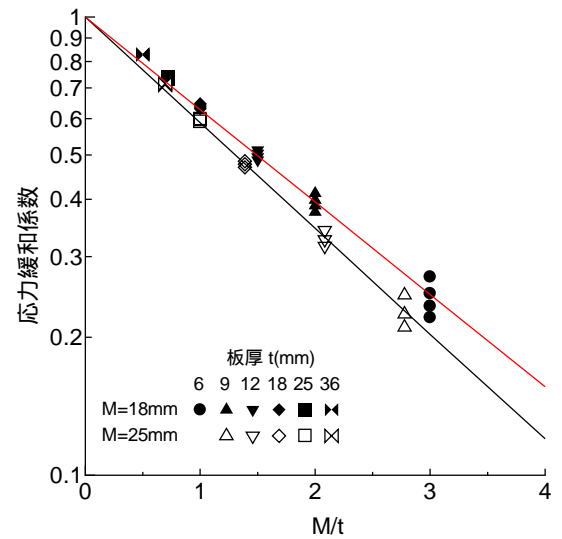


図-4.10 log-scale による比較

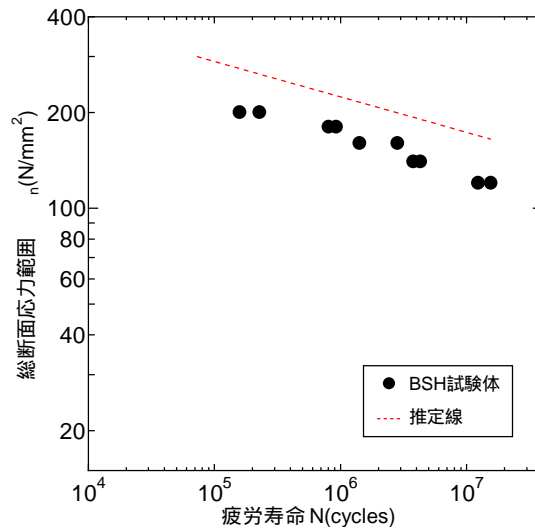


図-4.11 推定式による $n - N$ 関係

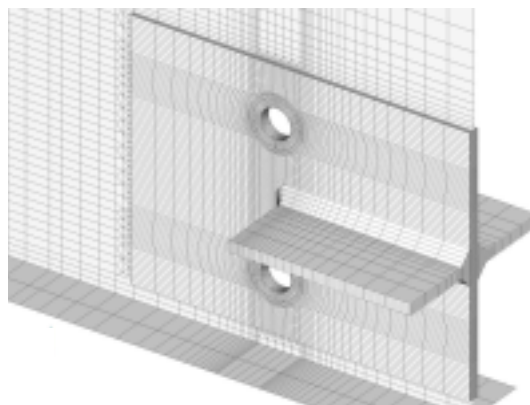


図-4.12 ストップホールモデル

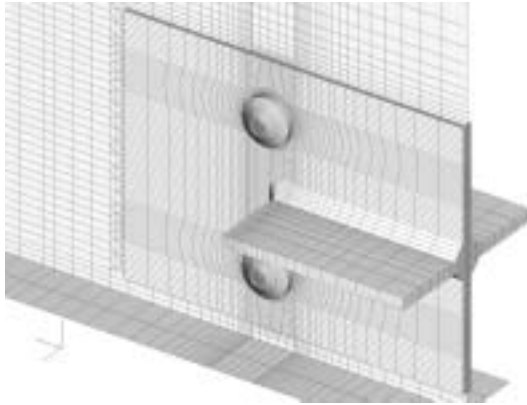


図-4.13 ボルト締めストップホールモデル
(ボルト頭側)

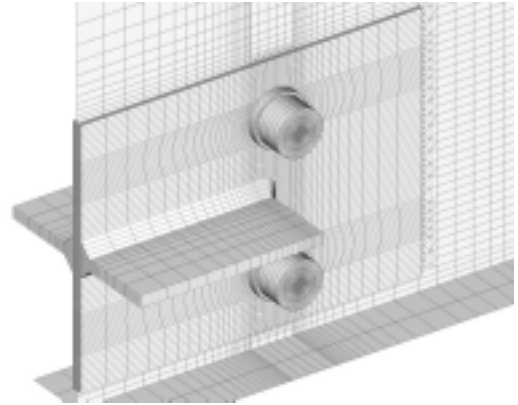


図-4.14 ボルト締めストップホールモデル
(ナット側)

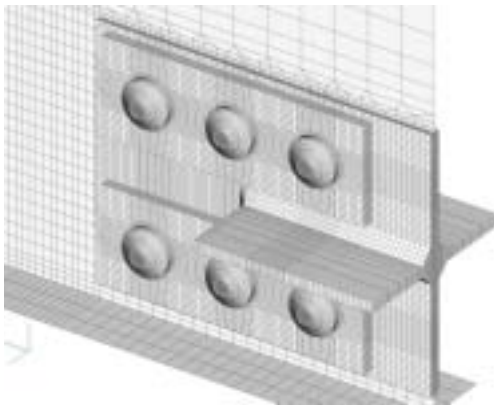


図-4.15 添え板ボルト締めストップ
ホールモデル(ボルト頭側)

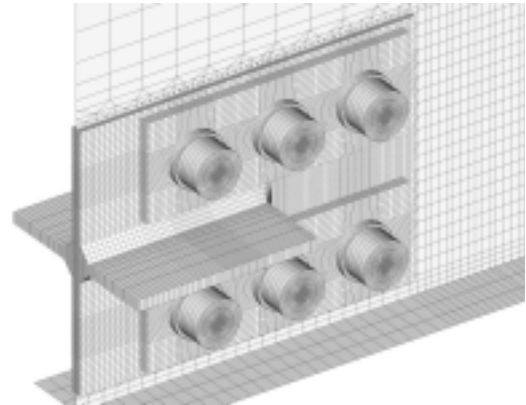


図-4.16 添え板ボルト締めストップ
ホールモデル(ナット側)

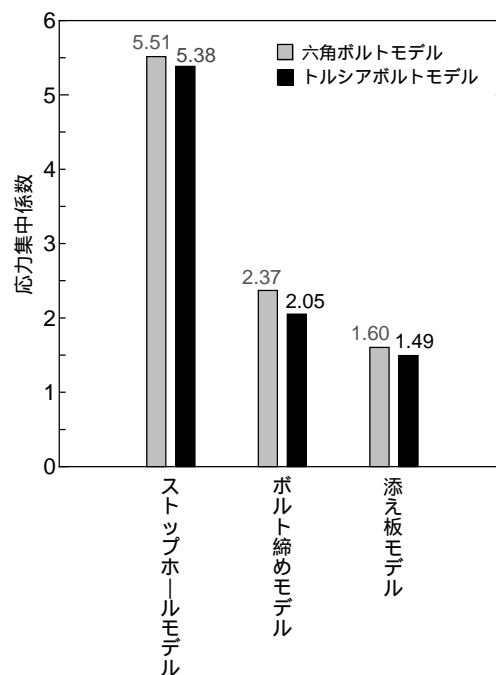


図-4.17 高力ボルトの違いによる比較

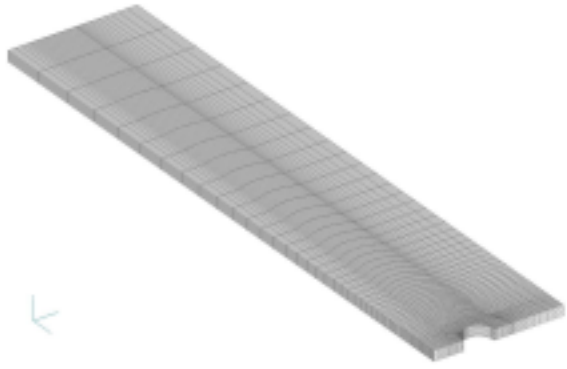


図-4.18 SH 試験体モデル(1/4モデル)



図-4.19 BSH 試験体モデル(1/4モデル)



図-4.20 AP 試験体モデル(1/4モデル)

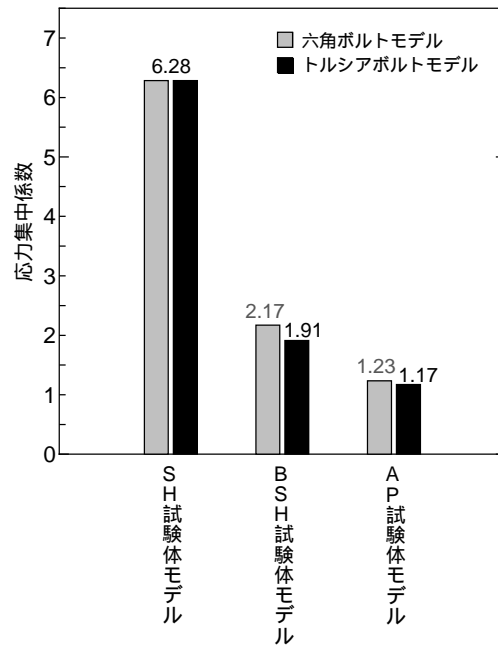


図-4.21 高力ボルトの違いによる比較

第 5 章 添え板ボルト締めストップホール法による補修部の疲労強度評価

第 3 章で示したように，添え板ボルト締めストップホール法による補修部は非常に高い疲労強度を有することが明らかとなった．また，その疲労破壊起点は，ストップホールやボルト孔ではなく，ボルト孔から外側に離れた母板表面であり，このき裂は母板と添え板のフレットングにより生じたことが明らかとなった．そこで，高力ボルト摩擦接合継手も非常に高い疲労強度をもち，フレットングによる疲労き裂の発生や，連結版端部の母版側からの破断など添え板ボルト締めストップホール法と同様の破壊形態を示すことから，ここでは文献³⁴⁾⁻³⁹⁾より調べた高力ボルト摩擦接合継手の疲労試験結果と比較した．

文献に掲載されている図からの疲労試験結果の読み取りは，Dizirizer Ver.1.0.1 を用いて行った．

文献調査から得られた，総断面応力範囲（公称応力範囲）で整理した高力ボルト摩擦接合継手の疲労試験結果を図-5.1 に示す．図中の実線は高力ボルト摩擦接合継手試験体の疲労試験結果に対して，最小二乗法を適用することによって求めた疲労寿命に対する公称応力範囲の回帰直線である．また，2本の破線は，回帰直線から2標準偏差離れた公称応力範囲 - 疲労寿命関係である．AP 試験体の疲労試験結果は，高力ボルト摩擦接合継手の疲労試験結果とほぼ一致している．したがって，添え板ボルト締めストップホール法で補修した部材の疲労強度は，高力ボルト摩擦接合継手と同程度と考えることができる．

JSSC 指針では，高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度等級を B としている．その際の，照査応力は総断面応力とされている．図-5.1 には，疲労強度等級 B の設計 - N 関係も示しているが，公称応力範囲（総断面応力範囲）で整理した AP 試験体の疲労試験結果は疲労強度等級 B を満たしている．したがって，添え板ボルト締めストップホール法による補修部の疲労強度を等級 B とみなせば，適切な評価が行えるものと考えられる．

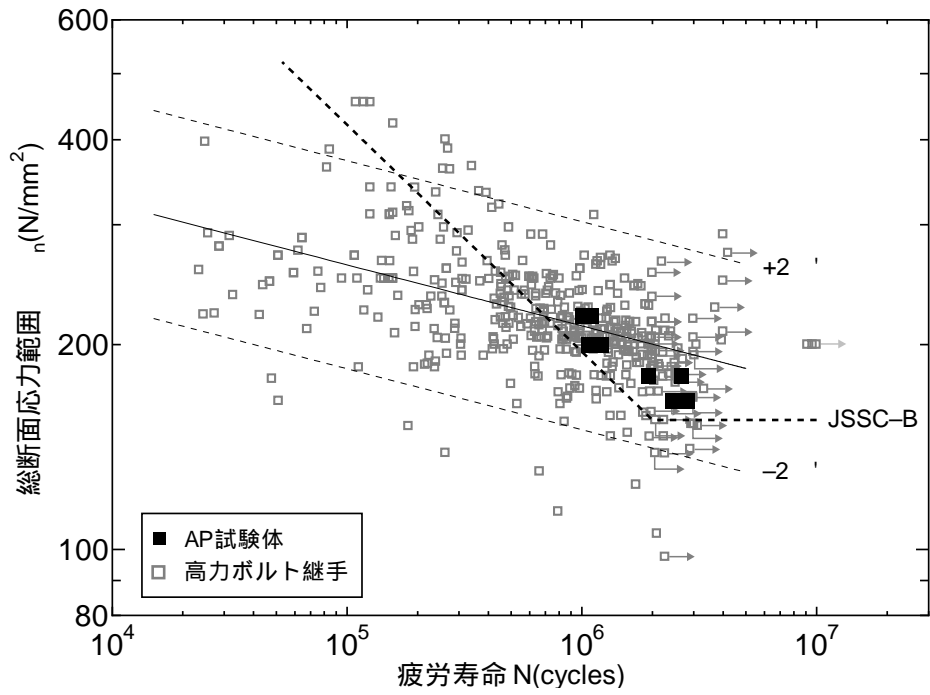


図-5.1 高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度との比較

第 6 章 添え板ボルト締めストップホール法による補修が他の部材に及ぼす影響

実橋における主桁・横桁交差部はガセットプレートや横構，垂直補剛材などが接続されており，複雑な応力場となっている．そのため，実橋で添え板ボルト締めストップホール法による疲労損傷の補修を行った場合，補修が他の部材の応力に影響を及ぼすことが懸念される．補修によって他の部材の応力が高くなった場合，新たな疲労き裂の発生を誘発することにもなる．本章では，首都高速道路のある橋梁を対象に，シェル要素を用いた 3 次元有限要素応力解析を行うことにより，補修が他の部材の応力性状に及ぼす影響について検討する．

6.1 解析モデル

解析対象は，橋長 30000mm，支間 29300mm，橋幅 18200mm，桁高 1600mm，桁間隔 2666.7mm，主桁本数 7 の上下 4 車線一体構造の合成単純桁である．解析対象の平面図を図-6.1，断面図を図-6.2 に示す．それぞれの図に記載されている E，W，S，N の文字は，それぞれ東西南北を表し，解析モデルの方向を明確にするために設定したものである．車線は図-6.2 に示すように主桁 G1 側から西側に第一車線，第二車線，第三車線，第四車線とする．支承は北側を move，南側を fix とする．

6.2 解析手法

解析は汎用解析プログラム NASTRAN を用いて行った．解析モデルの作成には FEMAPver9.31 を用いた．コンクリート床版は solid 要素，主桁，横桁，対傾構，横構，ガセットは shell 要素でモデル化した．添え板の補修は，添え板の寸法で作成した shell 要素を板厚の中心間隔だけ離し，ボルトに当たる位置の節点をボルトと同じ直径，断面積の棒要素でつなぐことで模擬した．また，き裂あるいは補修による切欠きは二重節点で模擬することとした．解析モデルの要素分割図を図-6.3 と図-6.4 に，補修部の詳細な要素分割図を図-6.5 と図-6.6 に示す．図-6.3 は橋梁全体，図-6.4 は床版を除いて橋梁モデルを示したものである．また，図-6.5 は補修部全体，図-6.6 は添え板を除いてボルトのみを示したものである．

補修は主桁 G1 から主桁 G7 までの全ての主桁・横桁交差部を補修した場合(図-6.7)，片側のみ (fix 側) 補修した場合 (図-6.8)，補修をしていない場合 (図-6.9) の 3 通

りについて解析を行った。これらの解析ケースを表-6.1 に示す。

横構とガセットの連結部など，高力ボルトで接合されている部分は，ボルトの中心位置に剛体要素を挿入することでモデル化している。また，アスファルト舗装は路面の温度変化によって剛性が変動するため省略した。その他，添接板などモデル化が困難な部位も，モデルから省略した。鋼材の弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，ポアソン比を 0.3 とし，コンクリートの弾性係数は $3.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ （鋼材の 1/7 程度），ポアソン比は 0.1667 とした。

荷重は T 荷重とし，第一車線と第二車線それぞれのスパン中央に配置した場合の 2 通りとする。T 荷重を図-6.10 に示す。

向井⁴⁰⁾により，主桁・横桁交差部のガセットプレートに設けたスカラップ付近の垂直補剛材溶接部やスカラップ内部の廻し溶接部が疲労強度上の弱点であることが明らかにされている。これを踏まえた上で，本研究では主桁 G1 および G7 における主桁・横桁交差部のガセットプレートに設けたスカラップ内部の廻し溶接部とガセットプレート廻し溶接止端部，主桁 G2 から主桁 G6 までの主桁・横桁交差部のウェブ交差部の廻し溶接部を着目点として解析を行い，補修が他の部位の応力に及ぼす影響を明らかにする。着目部の要素分割図を図-6.11～図-6.38 に示す。補修部近傍の要素寸法は 10mm である。

6.3 解析結果

解析結果を表-6.2 に，各着目点における最大主応力の補修による変化を図-6.39～図-6.102 に示す。これらの図には該当する着目部の要素分割図の番号も示している。

主桁 G1 では第一車線に載荷した場合，第二車線に載荷した場合ともにスカラップ内部のウェブ面とガセットに高い応力集中が生じている。ガセット端部で補修による応力の軽減が見られたが，その他のどの着目点においても補修による応力の上昇は見られなかった。

主桁 G2 から主桁 G6 ではどの着目点においても応力の増加は見られず，補修後に応力の軽減が起こっている。また，両側を補修した場合は補修前と比べて応力が 50% 程度まで減少している。

主桁 G7 では第二車線に載荷した場合において，片側を補修した場合に若干の応力の増加が見られた。しかし主桁 G7 は載荷位置からは最も遠い着目点であるためか，その差は 10% 程度であり，またその位置の応力も 5N/mm^2 程度にすぎない。その他で

はどの着目点においても、補修前と比較して補修後に応力が増加することはなかった。

したがって、添え板ボルト締めストップホール法による補修が他の部材の応力に及ぼす影響は小さく、特に考慮する必要はないと考えられる。

表-6.1 解析ケース

荷重ケース	補修ケース
第一車線に載荷	補修なし
	片側のみ補修
	両側を補修
第二車線に載荷	補修なし
	片側のみ補修
	両側を補修

表-6.1 解析結果

				東側						西側					
				1lane	1lane 片側	1lane 補修	2lane	2lane 片側	2lane 補修	1lane	1lane 片側	1lane 補修	2lane	2lane 片側	2lane 補修
主桁G1	move	止端	ウェブ面	12.6	12.7	0.00	6.08	6.11	0.00	32.7	32.5	0.03	15.9	15.8	0.02
			ガゼット上面	-	-	-	-	-	-	17.97	17.85	2.81	8.12	8.06	1.02
			ガゼット下面	-	-	-	-	-	-	17.8	17.7	2.95	9.21	9.16	1.83
		スカラップ	ウェブ面	-3.28	-3.55	-3.61	-8.77	-8.90	-8.93	51.1	51.1	50.4	36.6	36.6	36.3
			ガゼット上面	-	-	-	-	-	-	34.6	34.7	34.3	26.0	26.0	25.8
			ガゼット下面	-	-	-	-	-	-	48.9	49.0	48.6	43.8	43.9	43.7
	fix	止端	ウェブ面	12.1	0.0	0.00	6.13	0.00	0.00	33.4	0.0	0.04	15.7	0.0	0.02
			ガゼット上面	-	-	-	-	-	-	18.6	3.0	2.97	7.93	0.98	0.97
			ガゼット下面	-	-	-	-	-	-	18.1	2.9	2.93	9.14	1.88	1.88
		スカラップ	ウェブ面	-2.70	-2.76	-3.03	-8.83	-8.86	-8.98	50.1	49.4	49.4	36.7	36.4	36.4
			ガゼット上面	-	-	-	-	-	-	33.7	33.3	33.4	26.1	25.9	25.9
			ガゼット下面	-	-	-	-	-	-	47.9	47.5	47.7	44.0	43.8	43.9
主桁G2	move	止端	ウェブ面	39.1	36.0	0.01	27.9	25.7	0.01	40.9	37.8	0.02	30.0	27.8	0.01
			横桁上面	19.0	17.3	5.83	15.7	14.5	6.86	18.3	16.6	5.65	15.3	14.0	6.85
			横桁下面	19.3	17.5	6.34	16.5	15.2	7.55	19.3	17.5	6.51	16.1	14.8	7.55
	fix	止端	ウェブ面	38.7	0.0	0.01	27.9	0.0	0.01	41.1	0.0	0.02	29.9	0.0	0.01
			横桁上面	19.1	6.80	5.93	15.5	7.26	6.64	18.2	6.60	5.73	15.1	7.29	6.67
			横桁下面	19.3	7.18	6.28	16.7	8.41	7.76	19.2	7.38	6.48	16.2	8.38	7.73
主桁G3	move	止端	ウェブ面	22.2	20.4	0.01	39.0	36.2	0.01	21.2	19.5	0.01	39.3	36.5	0.01
			横桁上面	6.57	5.70	0.24	27.4	25.7	16.6	6.70	5.81	0.23	27.4	25.8	16.7
			横桁下面	7.41	6.43	0.37	26.5	24.9	15.8	7.64	6.65	0.37	26.4	24.8	15.8
	fix	止端	ウェブ面	21.6	0.0	0.01	38.9	0.0	0.01	21.7	0.0	0.01	39.3	0.0	0.01
			横桁上面	6.71	0.35	0.24	27.1	17.1	16.3	6.55	0.33	0.22	27.0	17.1	16.3
			横桁下面	7.34	0.51	0.35	26.8	17.0	16.1	7.47	0.52	0.37	26.7	16.9	16.1
主桁G4	move	止端	ウェブ面	12.4	11.4	0.01	29.3	27.1	0.01	12.2	11.1	0.01	28.0	25.9	0.01
			横桁上面	2.79	2.40	-0.05	17.3	16.1	9.30	2.85	2.45	-0.05	17.5	16.3	9.26
			横桁下面	3.08	2.63	0.00	17.6	16.3	9.50	3.11	2.65	0.00	18.0	16.7	9.54
	fix	止端	ウェブ面	12.0	0.0	0.01	29.1	0.0	0.01	12.6	0.0	0.01	28.1	0.0	0.01
			横桁上面	2.89	0.00	-0.04	17.2	9.7	9.08	2.80	0.00	-0.05	17.2	9.6	9.00
			横桁下面	3.06	0.04	-0.01	17.8	10.4	9.74	3.01	0.04	-0.01	18.2	10.4	9.82
主桁G5	move	止端	ウェブ面	6.82	6.19	0.00	18.5	17.1	0.01	6.76	6.15	0.00	17.9	16.5	0.01
			横桁上面	1.31	1.12	-0.10	8.33	7.52	2.55	1.35	1.15	-0.10	8.41	7.59	2.52
			横桁下面	1.44	1.22	-0.07	9.03	8.19	3.25	1.42	1.20	-0.07	9.22	8.37	3.27
	fix	止端	ウェブ面	6.46	0.00	0.00	18.2	0.0	0.01	7.18	0.00	0.00	18.2	0.0	0.01
			横桁上面	1.39	-0.07	-0.09	8.38	2.90	2.50	1.33	-0.07	-0.09	8.23	2.83	2.42
			横桁下面	1.45	-0.05	-0.07	9.11	3.75	3.33	1.38	-0.05	-0.08	9.26	3.81	3.38
主桁G6	move	止端	ウェブ面	2.71	2.43	0.00	11.7	10.8	0.00	3.26	2.98	0.00	11.4	10.5	0.00
			横桁上面	0.56	0.47	-0.06	4.47	3.96	0.52	0.53	0.44	-0.06	4.55	4.03	0.52
			横桁下面	0.60	0.51	-0.05	4.93	4.40	0.95	0.55	0.46	-0.05	4.98	4.45	0.94
	fix	止端	ウェブ面	2.64	0.00	0.00	11.5	0.0	0.00	3.44	0.00	0.00	11.6	0.0	0.00
			横桁上面	0.59	-0.04	-0.06	4.52	0.72	0.50	0.54	-0.04	-0.05	4.47	0.71	0.49
			横桁下面	0.61	-0.04	-0.05	4.93	1.19	0.92	0.54	-0.04	-0.05	4.93	1.20	0.93
主桁G7	move	止端	ウェブ面	0.75	0.75	0.03	2.51	2.52	0.00	0.02	0.02	0.00	5.18	5.14	0.00
			ガゼット上面	0.10	0.10	0.01	2.45	2.43	0.32						
			ガゼット下面	0.11	0.11	0.20	2.76	2.74	0.58						
		スカラップ	ウェブ面	10.7	10.7	10.7	3.37	3.32	3.31	-8.13	-8.14	-8.15	4.45	4.44	4.32
			ガゼット上面	-1.09	-1.09	-1.10	1.86	1.86	1.79						
			ガゼット下面	-0.60	-0.60	-0.60	2.04	2.04	1.98						
	fix	止端	ウェブ面	1.32	0.02	0.02	2.83	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	4.70	0.00	0.00
			ガゼット上面	0.11	0.33	0.33	2.59	0.65	0.64						
			ガゼット下面	0.07	0.03	0.03	2.15	0.30	0.29						
		スカラップ	ウェブ面	10.6	10.6	10.6	3.05	3.04	2.99	-7.95	-7.97	-7.97	5.06	4.94	4.94
			ガゼット上面	-1.04	-1.04	-1.04	2.19	2.12	2.12						
			ガゼット下面	-0.57	-0.57	-0.57	2.40	2.34	2.34						

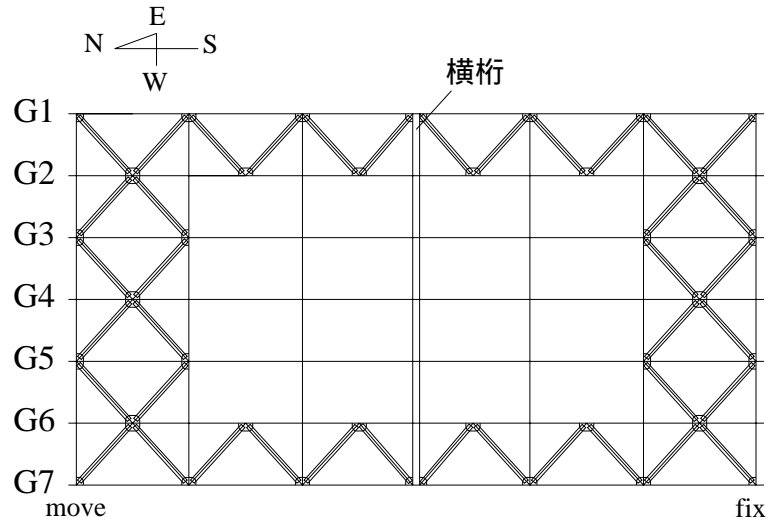


図-6.1 平面図

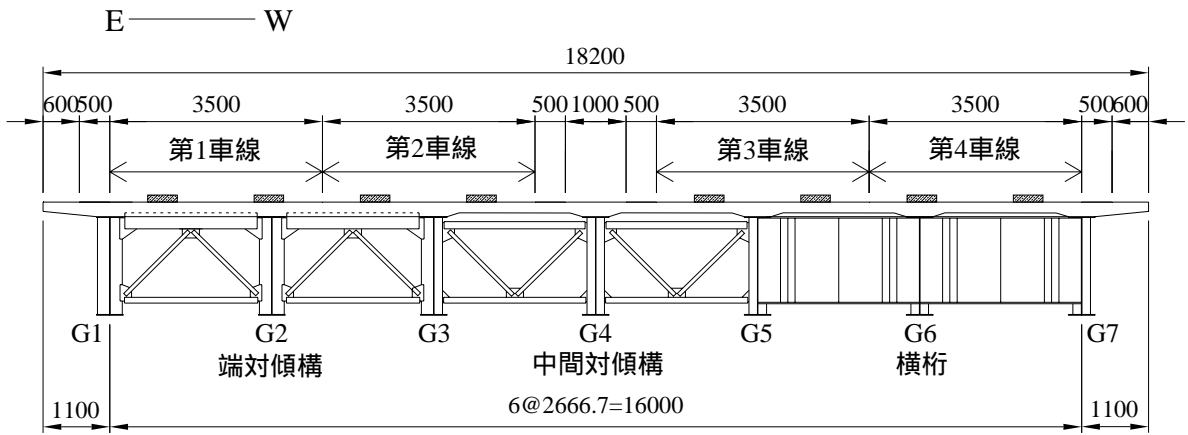


図-6.2 断面図

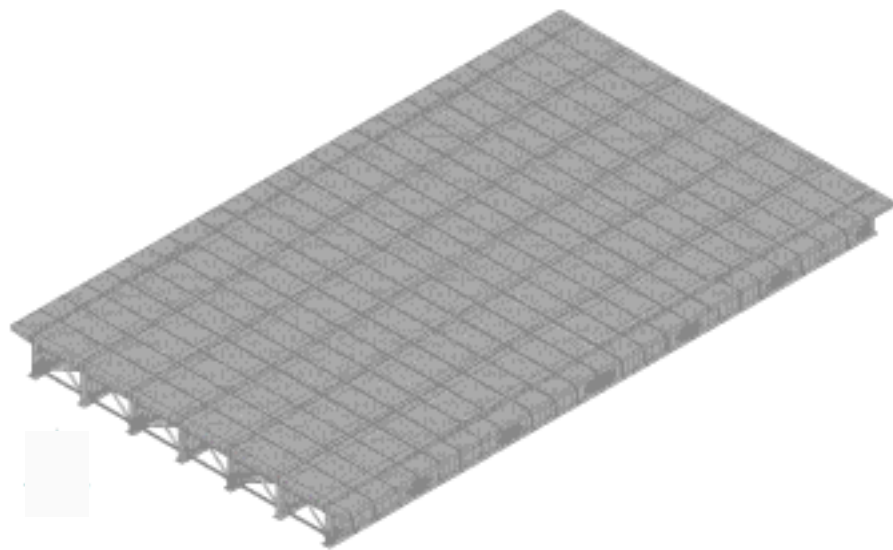


図-6.3 解析モデル (床版あり)

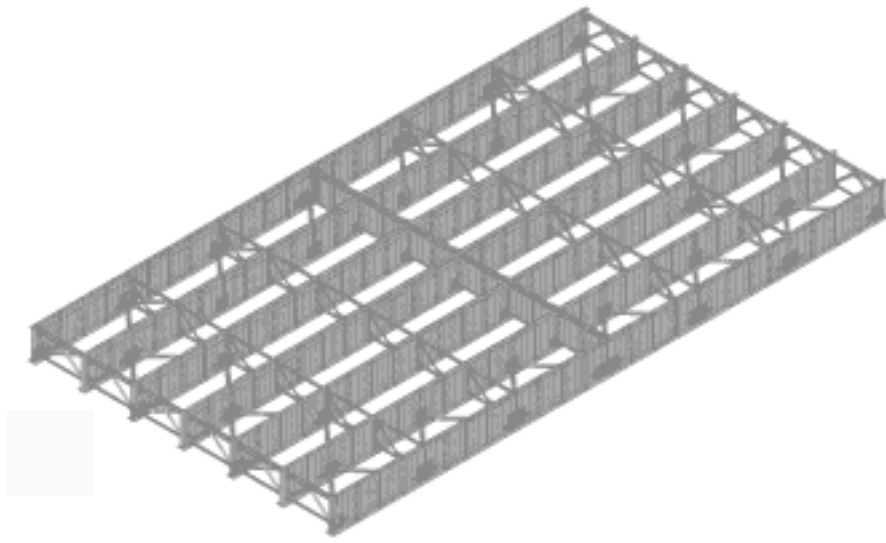


図-6.4 解析モデル（床版なし）

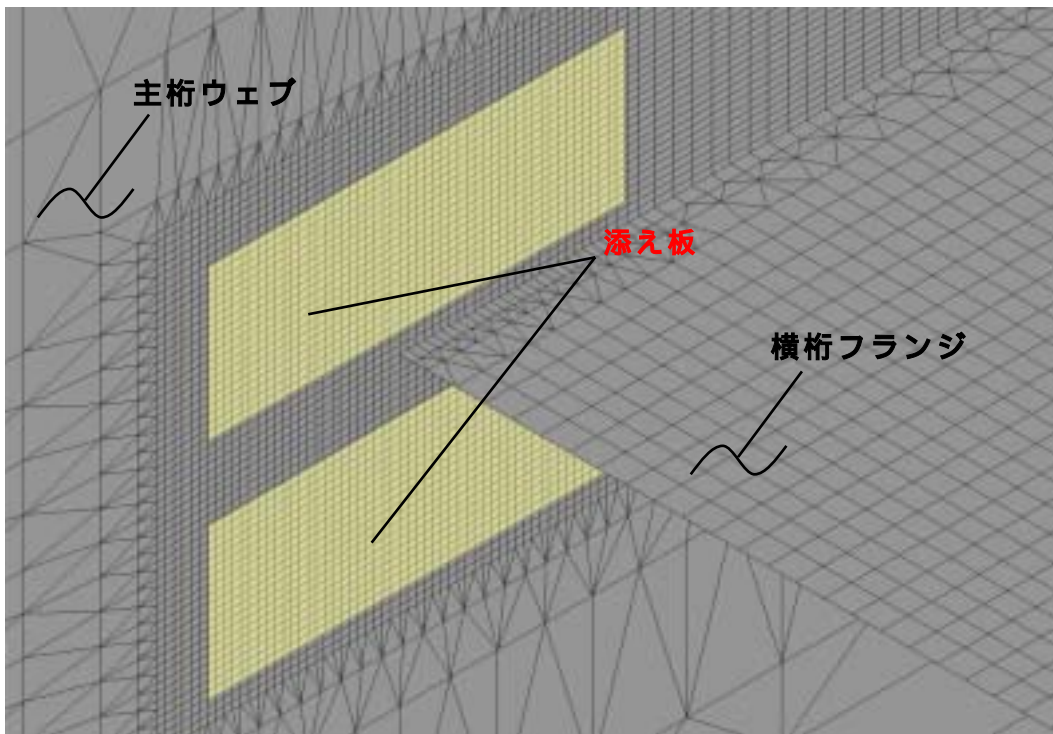


図-6.5 補修部の要素分割図（補修全体）

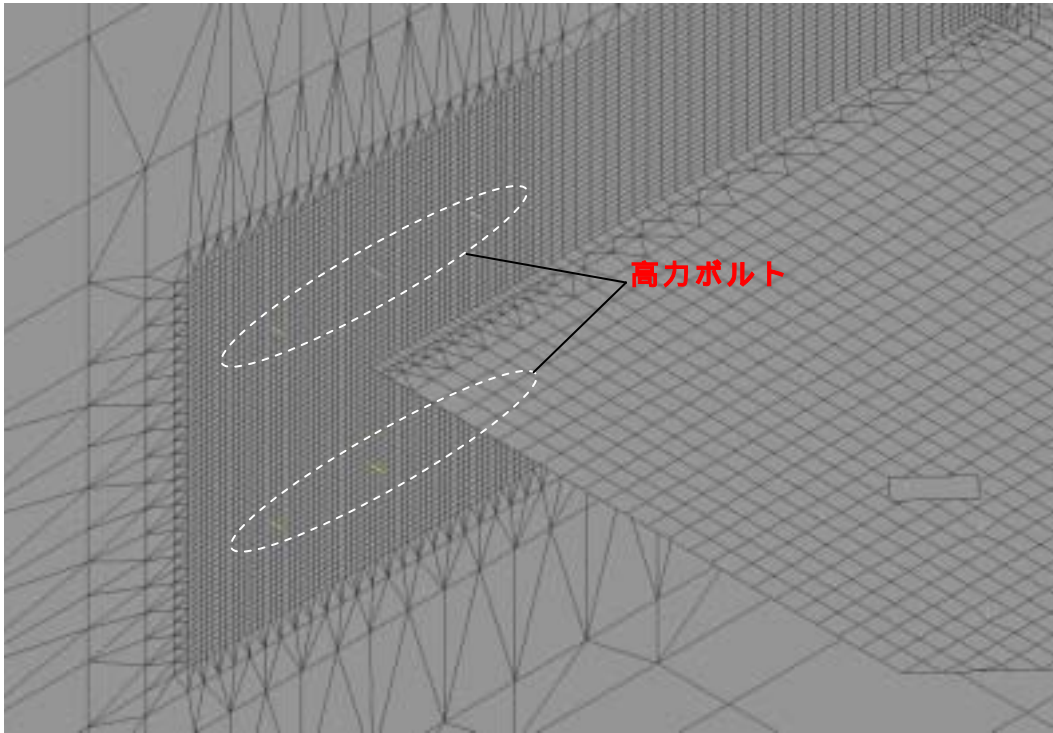


図-6.6 補修部の要素分割図（高力ボルト）

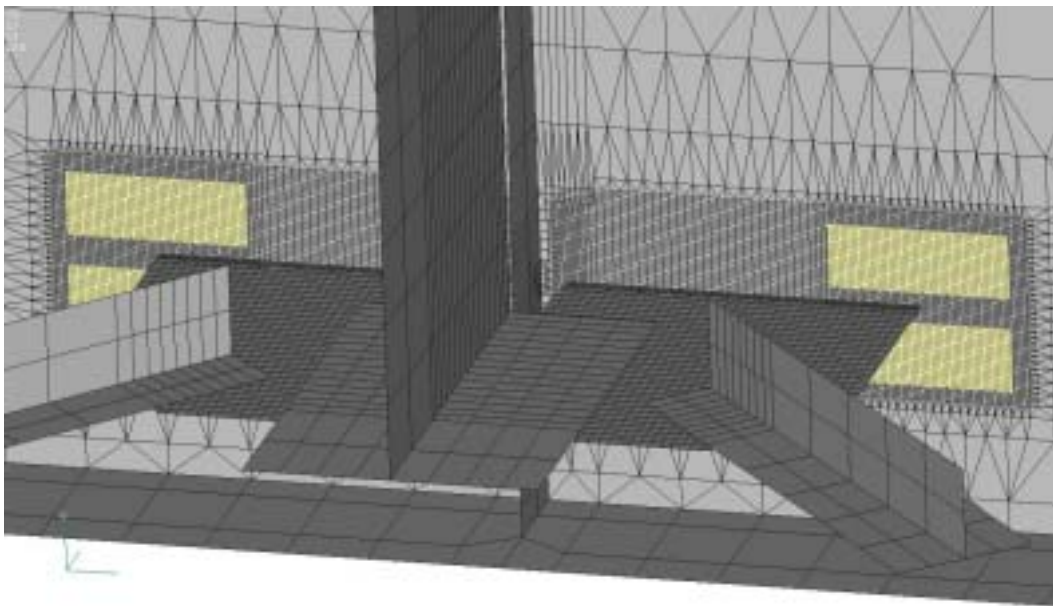


図-6.7 両側を補修した場合

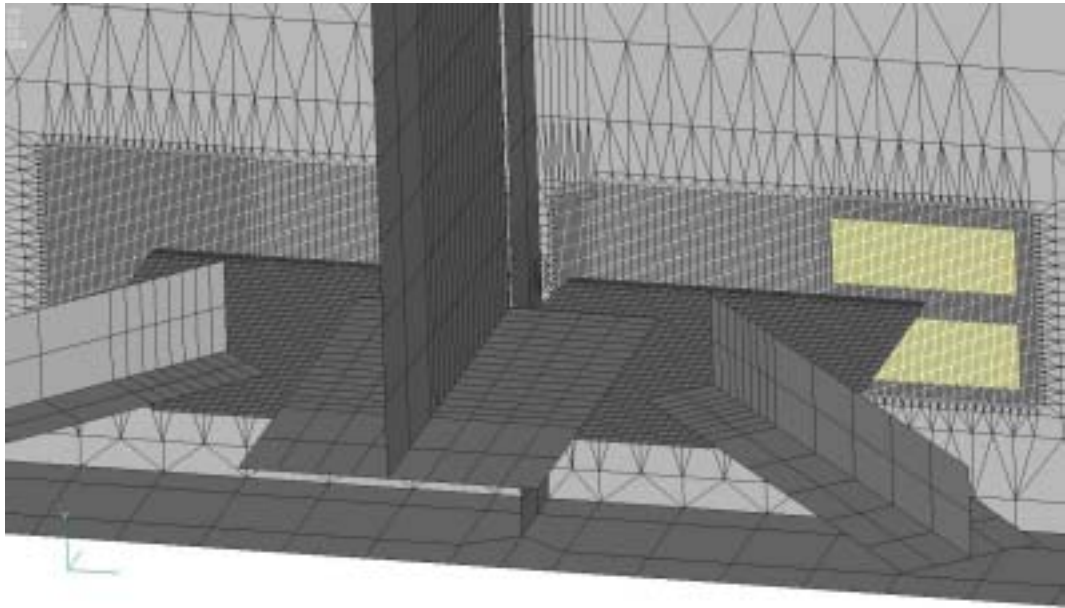


図-6.8 片側を補修した場合

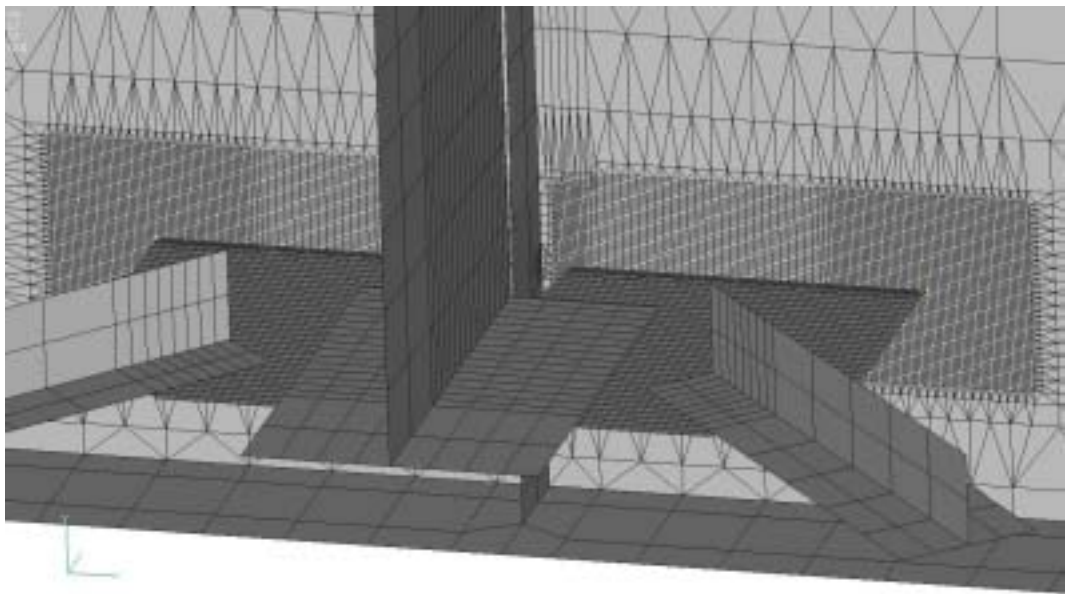


図-6.9 補修をしていない場合

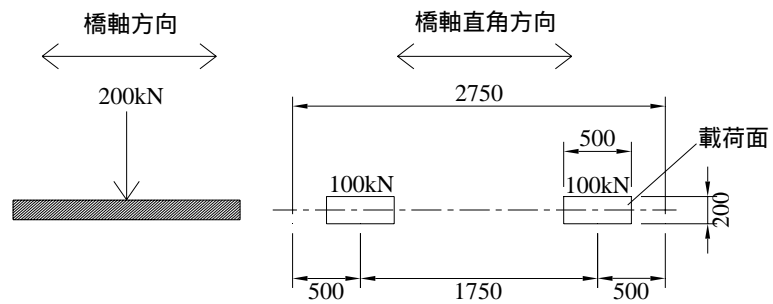


図-6.10 T 荷重

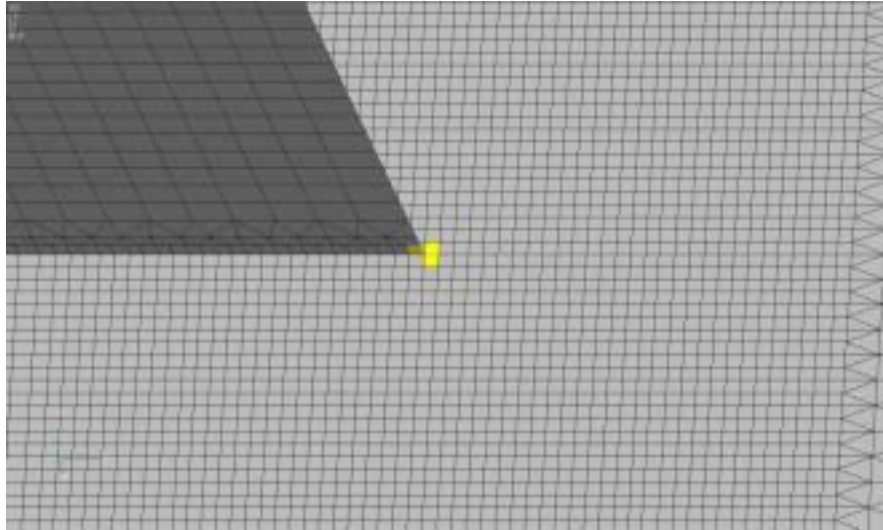


図-6.11 主桁 G1 ガセット止端 fix 側着目部

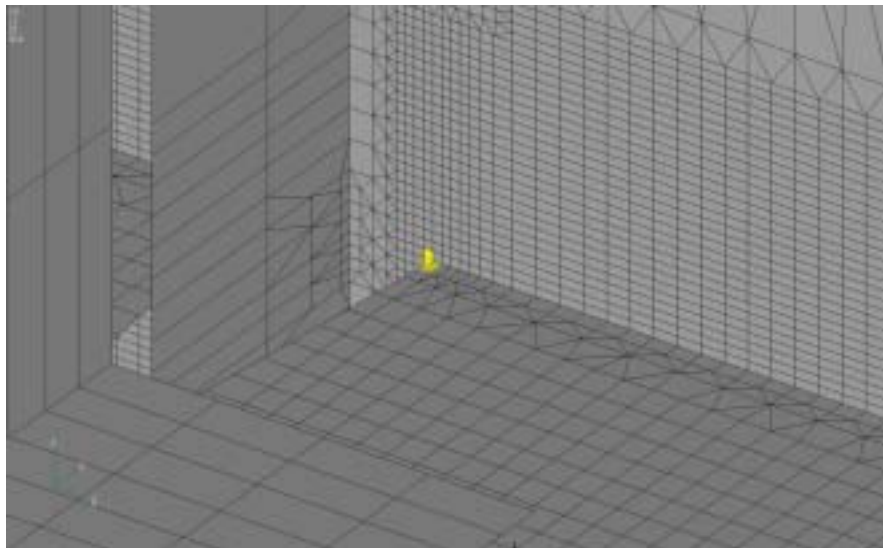


図-6.12 主桁 G1 スカラップ止端 fix 側着目部

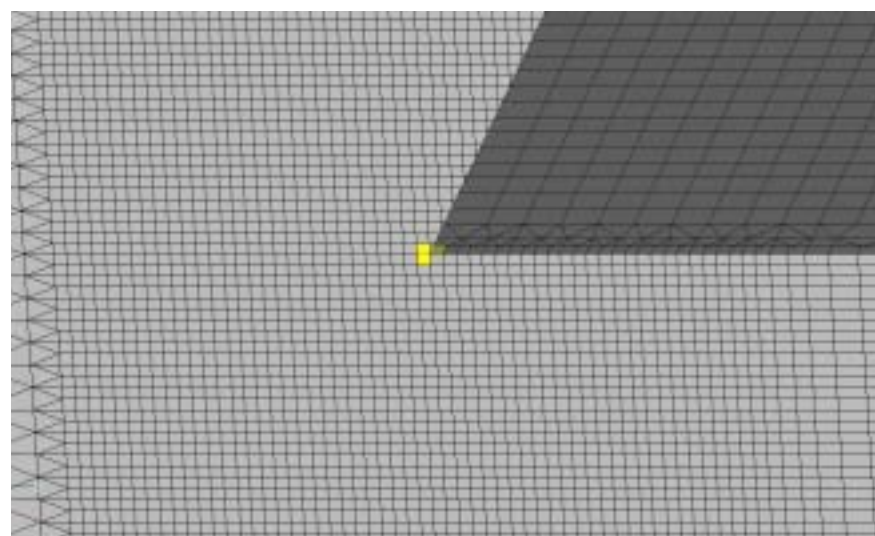


図-6.13 主桁 G1 ガセット止端 move 側着目部

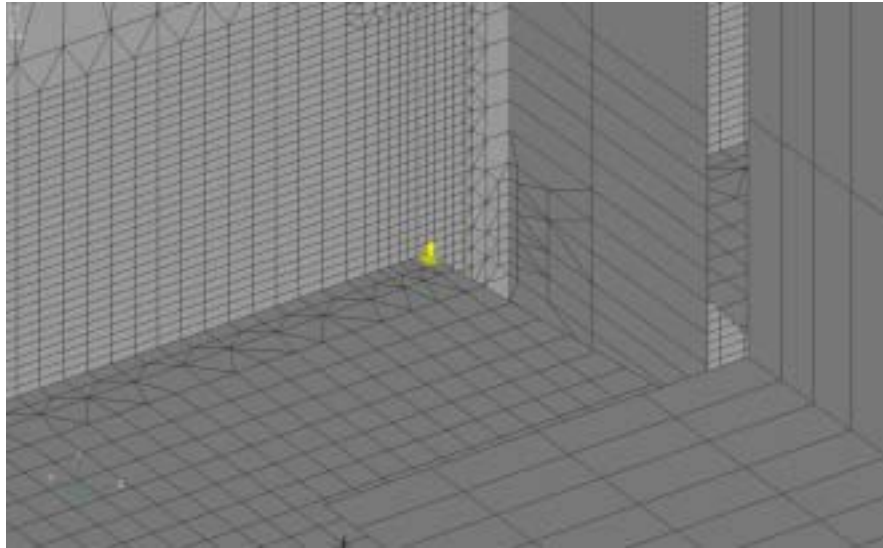


図-6.14 主桁 G1 スカラップ止端 move 側着目部

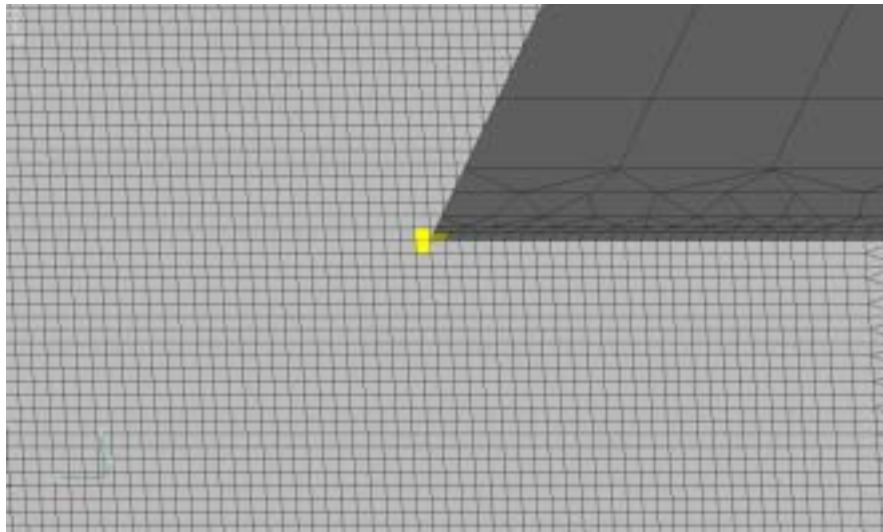


図-6.15 主桁 G2 (主桁 G1 側) ガセット止端 fix 側着目部

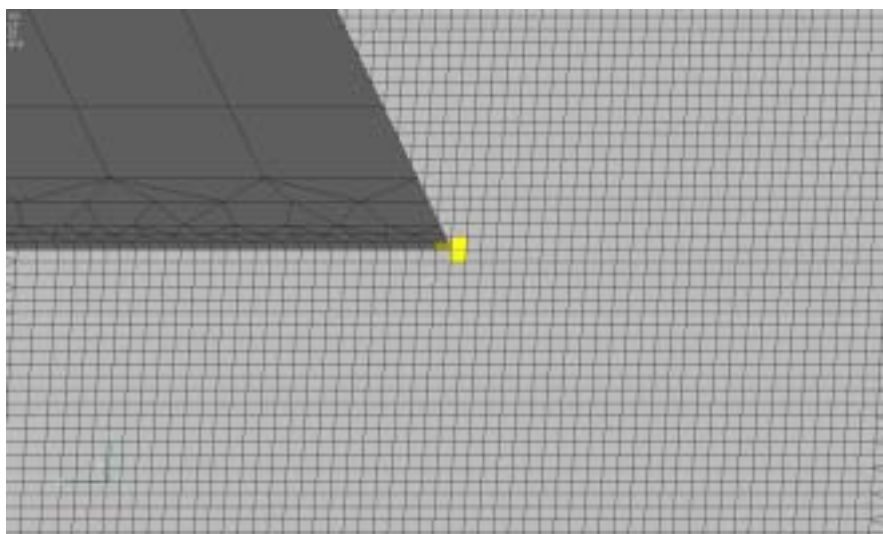


図-6.16 主桁 G2 (主桁 G1 側) ガセット止端 move 側着目部

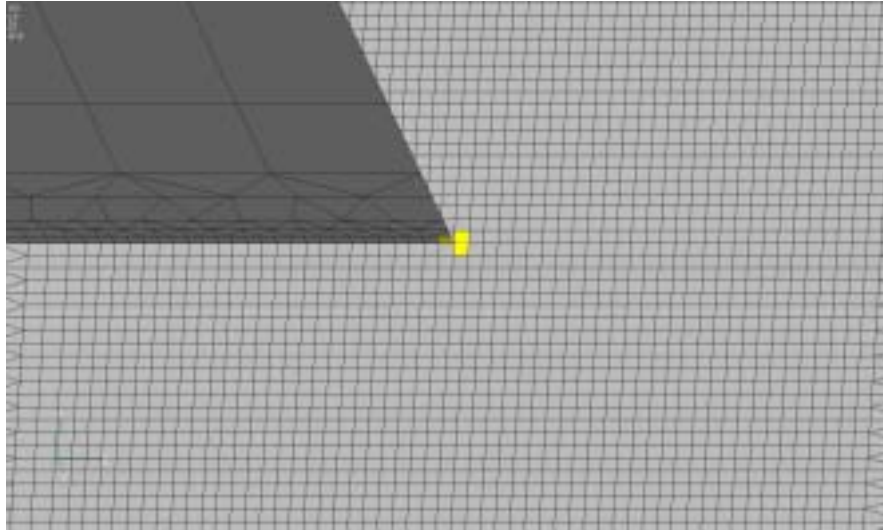


図-6.17 主桁 G2 (主桁 G3 側) ガセット止端 fix 側着目部

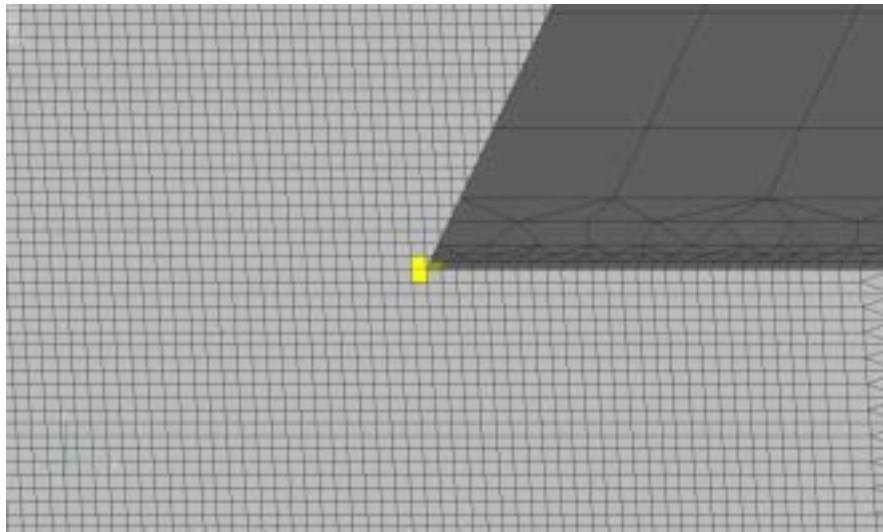


図-6.18 主桁 G2 (主桁 G3 側) ガセット止端 move 側着目部

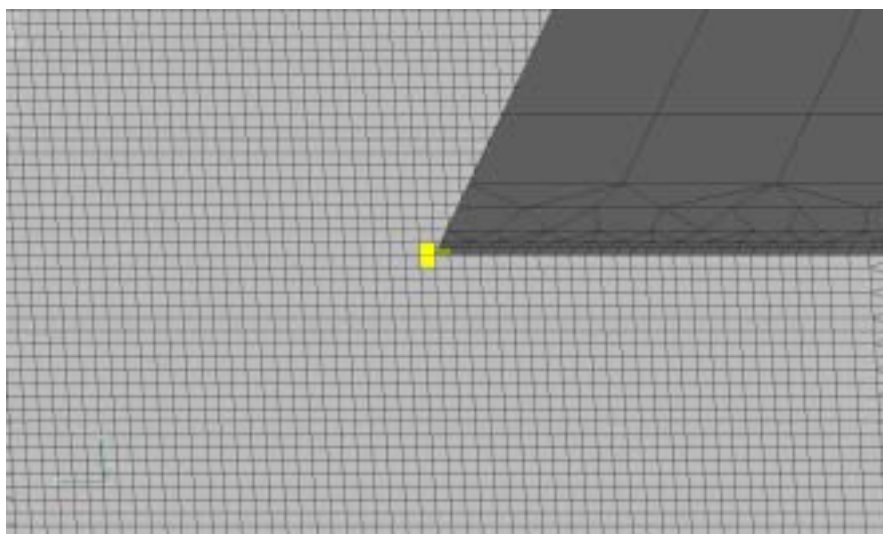


図-6.19 主桁 G3 (主桁 G2 側) ガセット止端 fix 側着目部

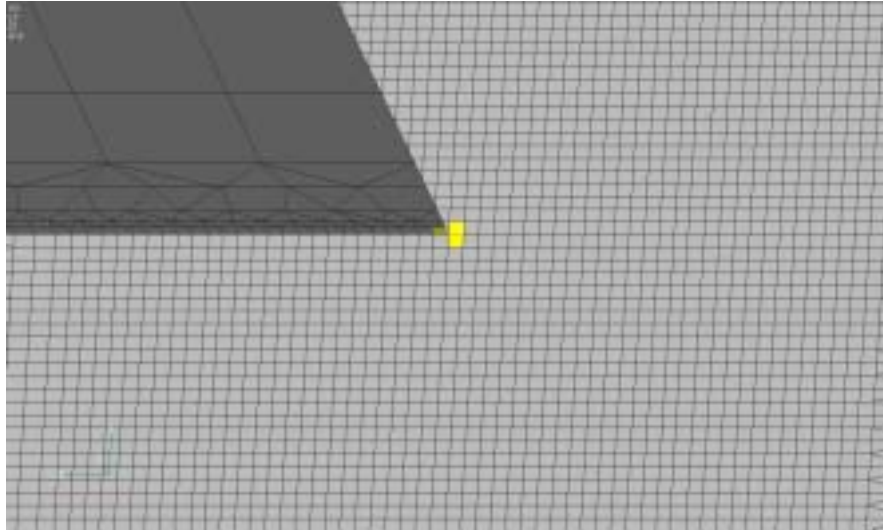


図-6.20 主桁 G3 (主桁 G2 側) ガセット止端 move 側着目部

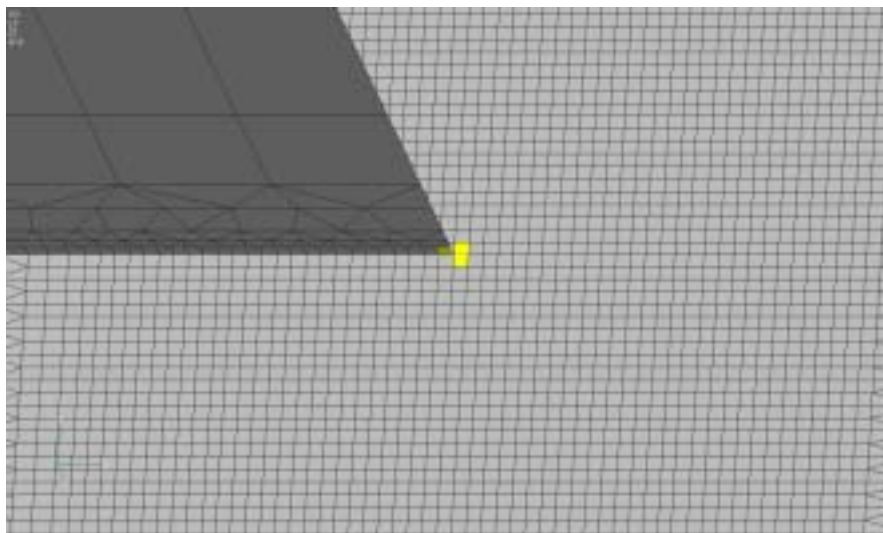


図-6.21 主桁 G3 (主桁 G4 側) ガセット止端 fix 側着目部

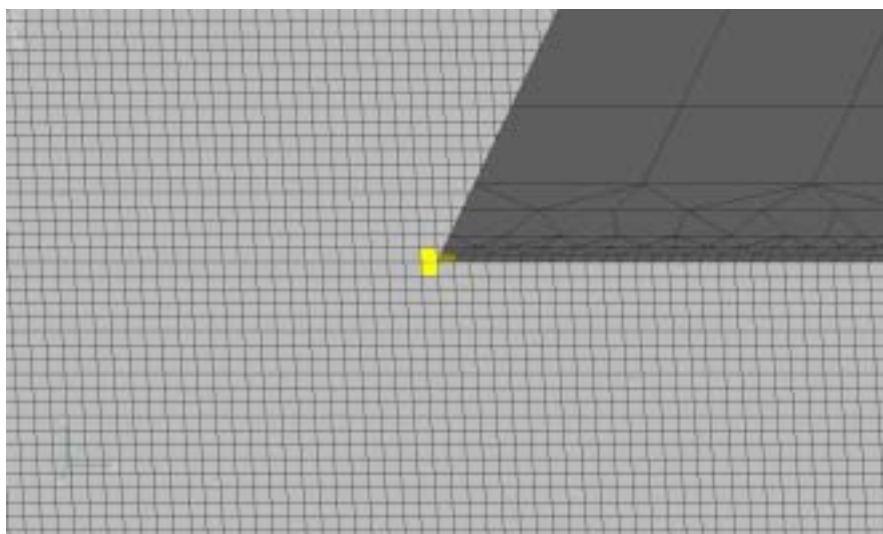


図-6.22 主桁 G3 (主桁 G4 側) ガセット止端 move 側着目部

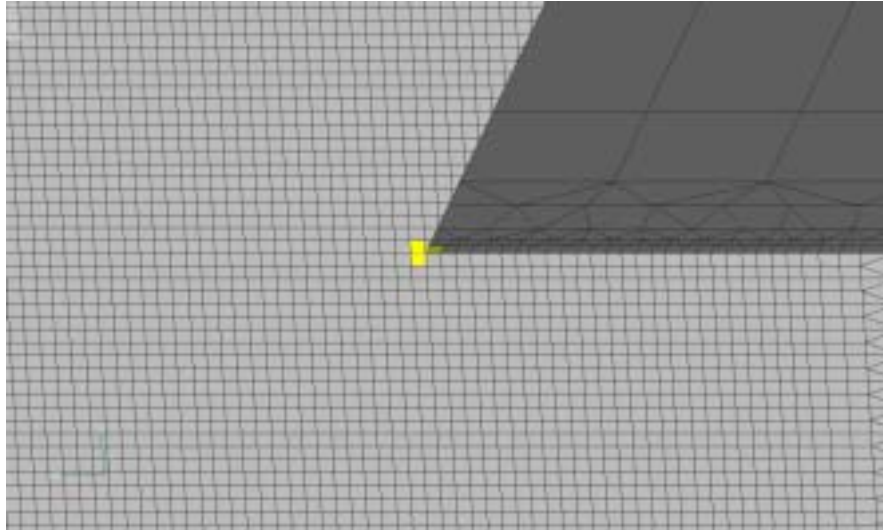


図-6.23 主桁 G4 (主桁 G3 側) ガセット止端 fix 側着目部

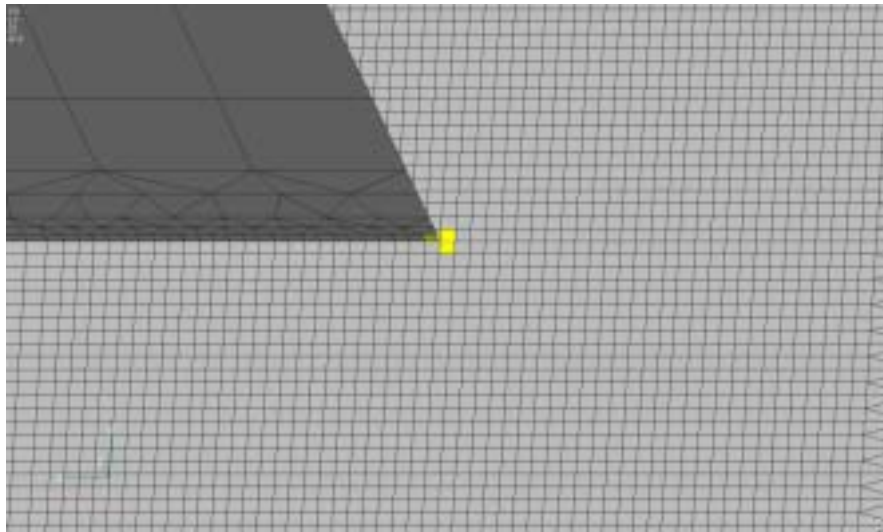


図-6.24 主桁 G4 (主桁 G3 側) ガセット止端 move 側着目部

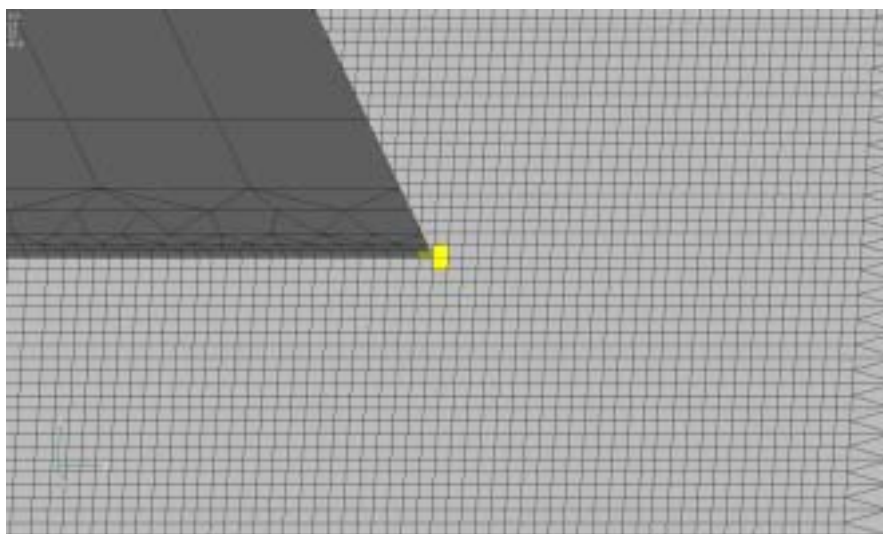


図-6.25 主桁 G4 (主桁 G5 側) ガセット止端 fix 側着目部

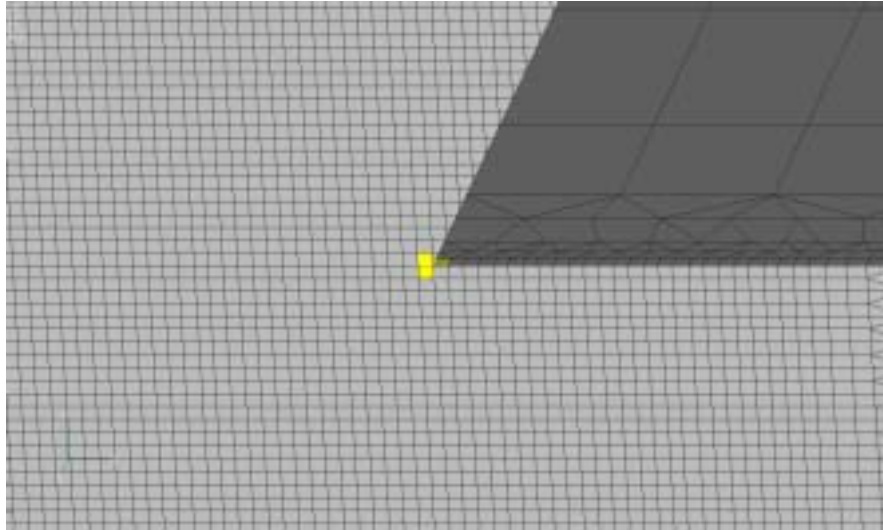


図-6.26 主桁 G4 (主桁 G5 側) ガセット止端 move 側着目部

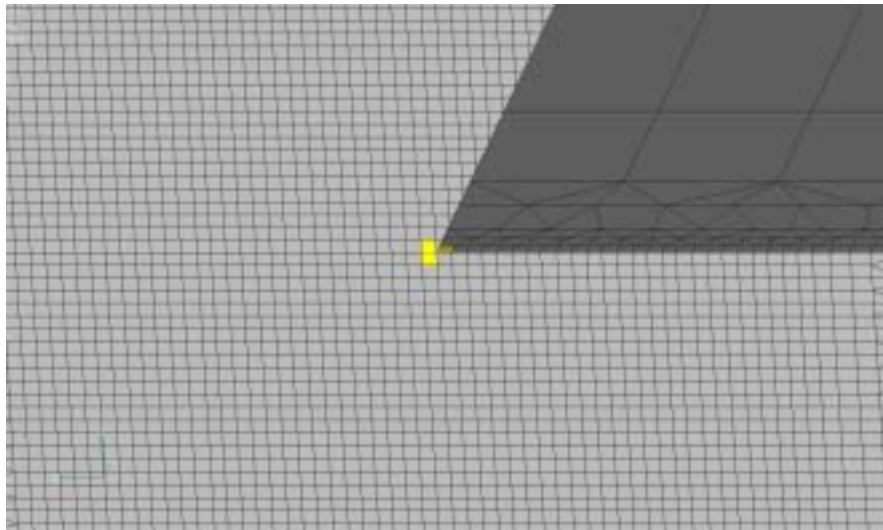


図-6.27 主桁 G5 (主桁 G4 側) ガセット止端 fix 側着目部

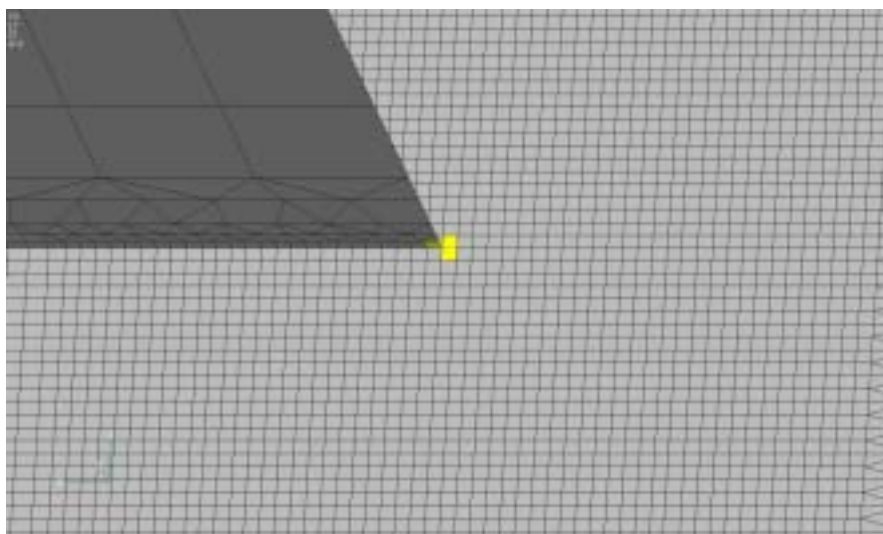


図-6.28 主桁 G5 (主桁 G4 側) ガセット止端 move 側着目部

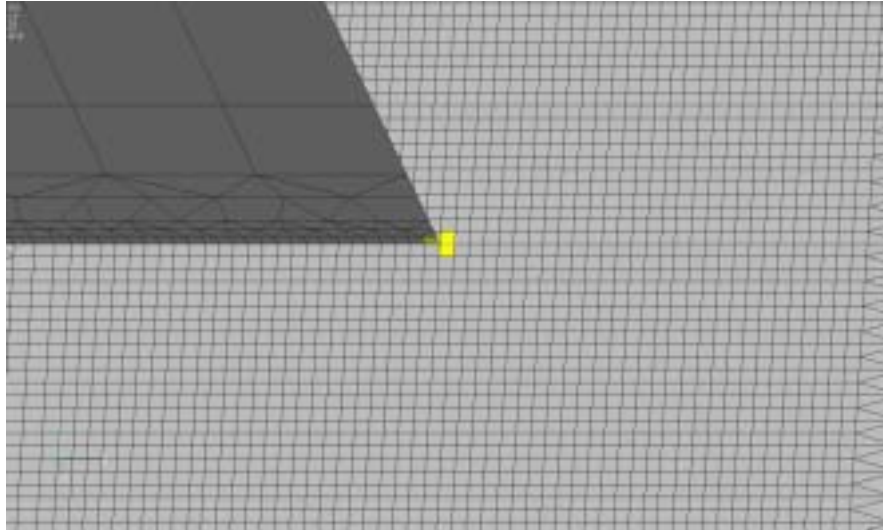


図-6.29 主桁 G5 (主桁 G6 側) ガセット止端 fix 側着目部

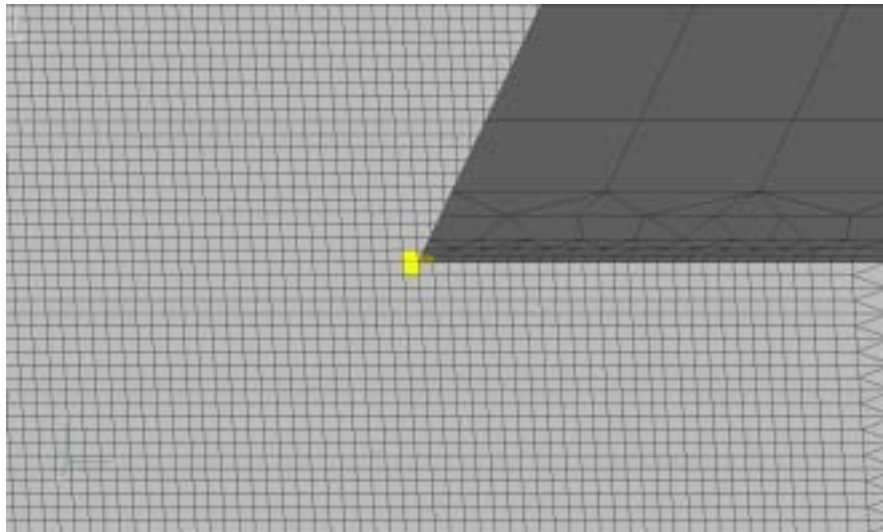


図-6.30 主桁 G5 (主桁 G6 側) ガセット止端 move 側着目部

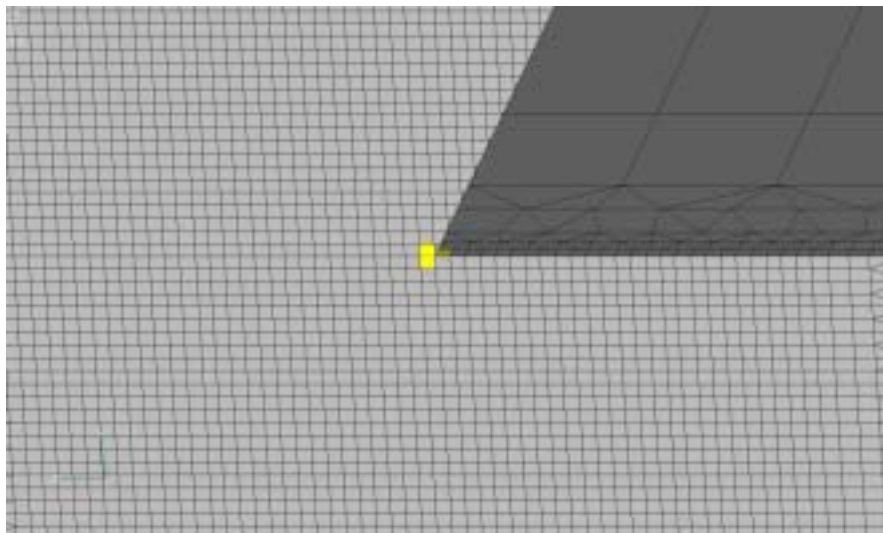


図-6.31 主桁 G6 (主桁 G5 側) ガセット止端 fix 側着目部

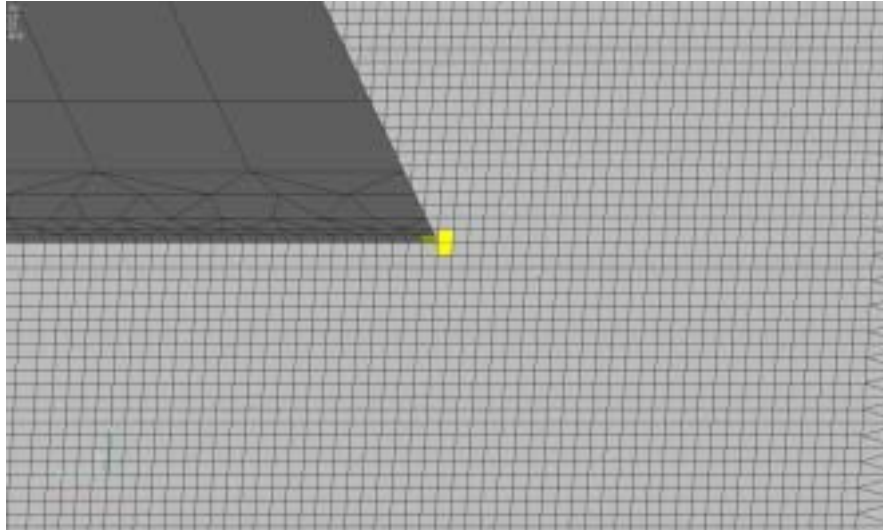


図-6.32 主桁 G6 (主桁 G5 側) ガセット止端 move 側着目部

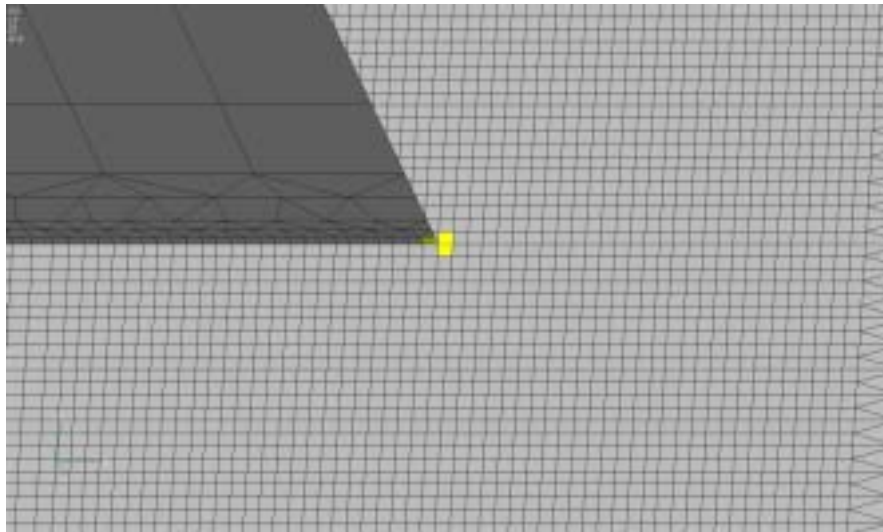


図-6.33 主桁 G6 (主桁 G7 側) ガセット止端 fix 側着目部

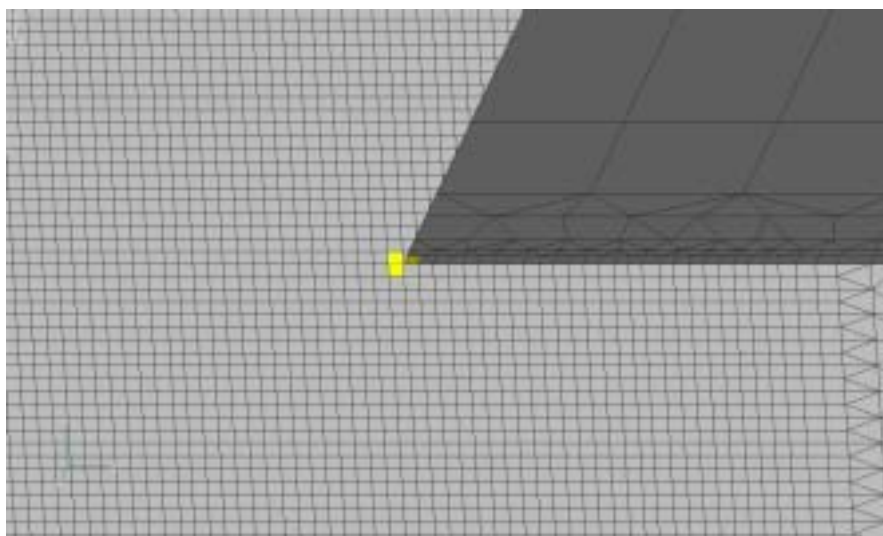


図-6.34 主桁 G6 (主桁 G7 側) ガセット止端 move 側着目部

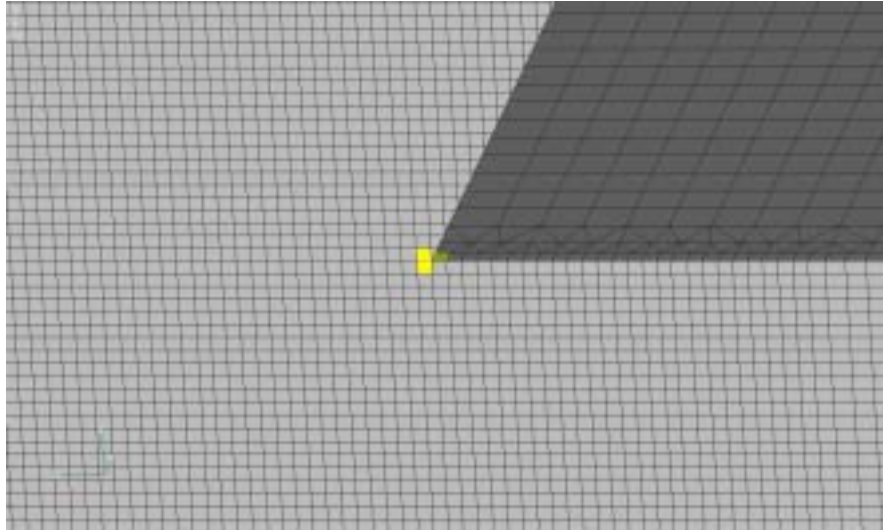


図-6.35 主桁 G7 ガセット止端 fix 側着目部

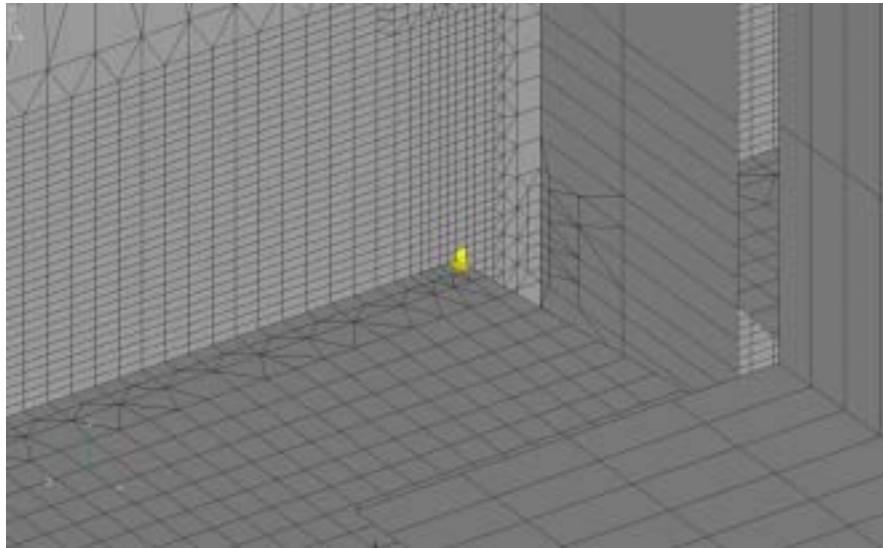


図-6.36 主桁 G7 スカラップ止端 fix 側着目部

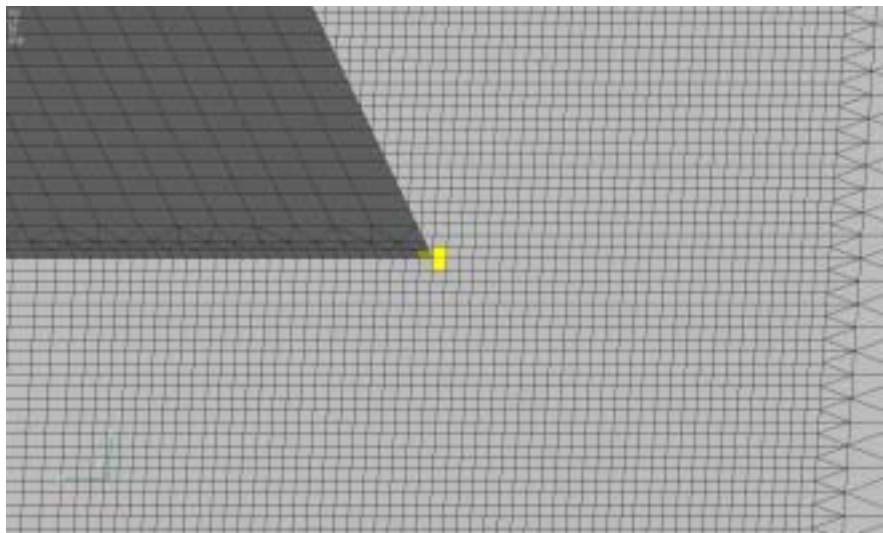


図-6.37 主桁 G7 ガセット止端 move 側着目部

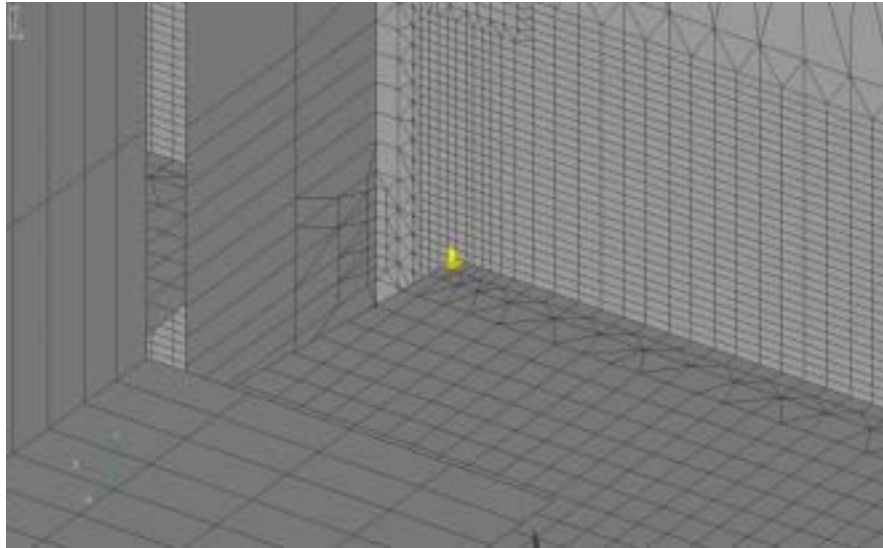


図-6.38 主桁 G7 スカラップ止端 move 側着目部

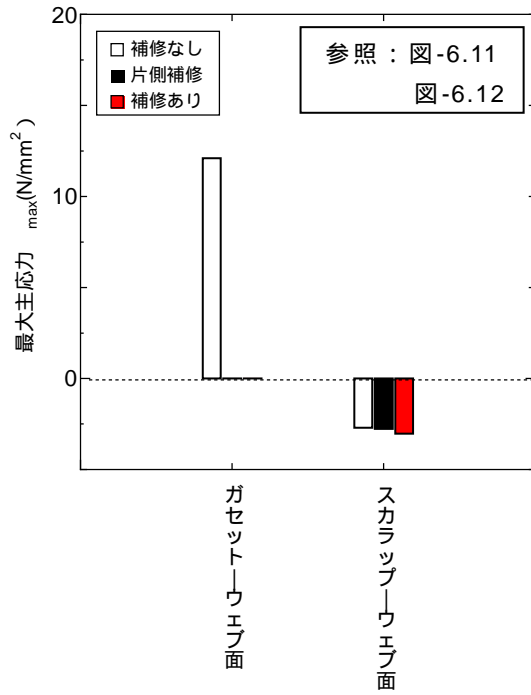


図-6.39 主桁 G1 第一車線載荷
fix 側東面

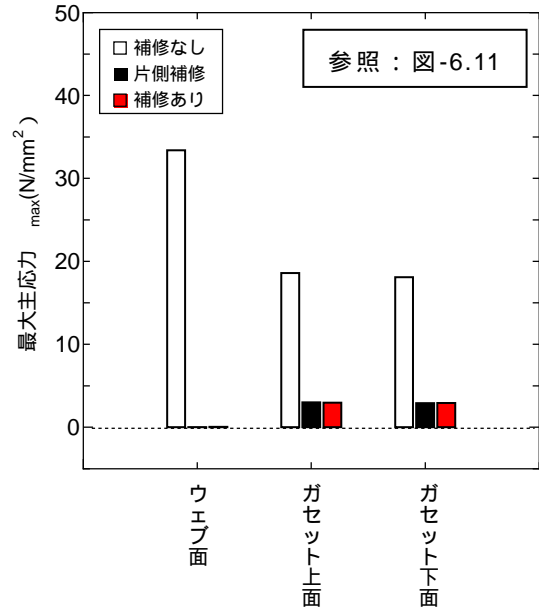


図-6.40 主桁 G1 第一車線載荷
fix 側西面 ガゼット止端

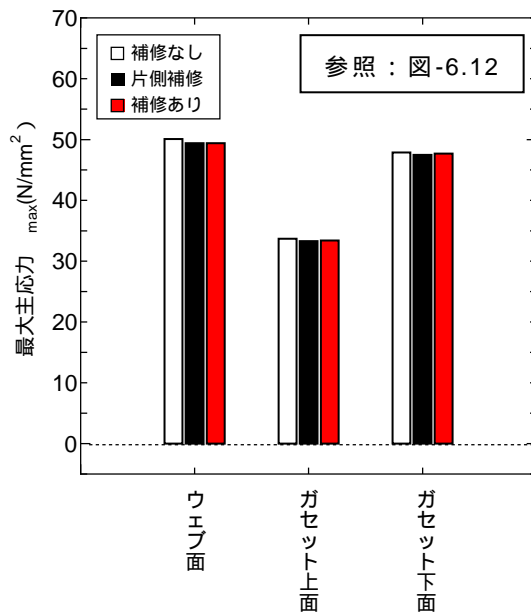


図-6.41 主桁 G1 第一車線載荷
move 側西面 スカラップ止端

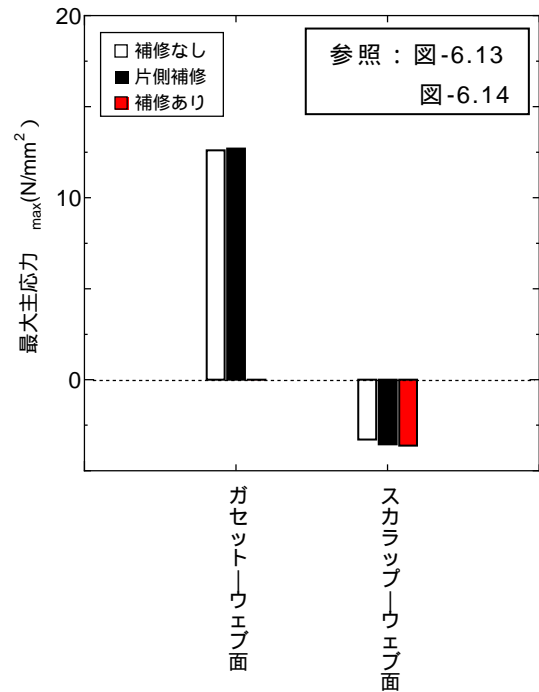


図-6.42 主桁 G1 第一車線載荷
move 側東面

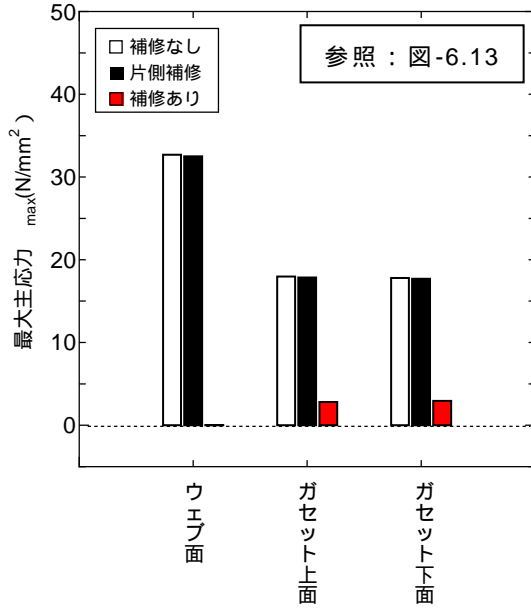


図-6.43 主桁 G1 第一車線載荷
move 側西面 ガゼット止端

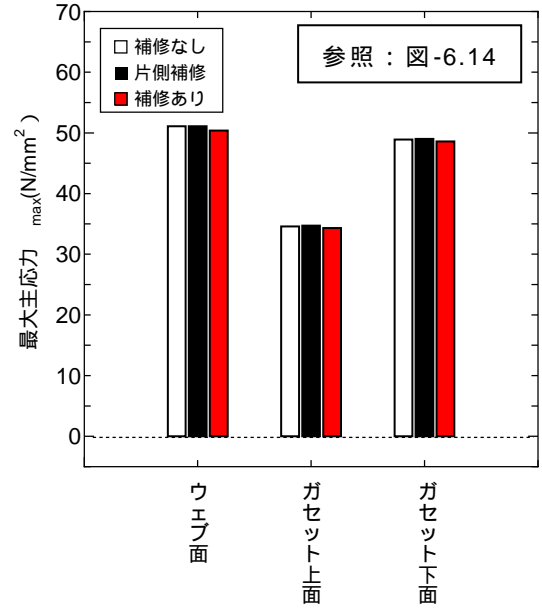


図-6.44 主桁 G1 第一車線載荷
move 側西面 スカラップ止端

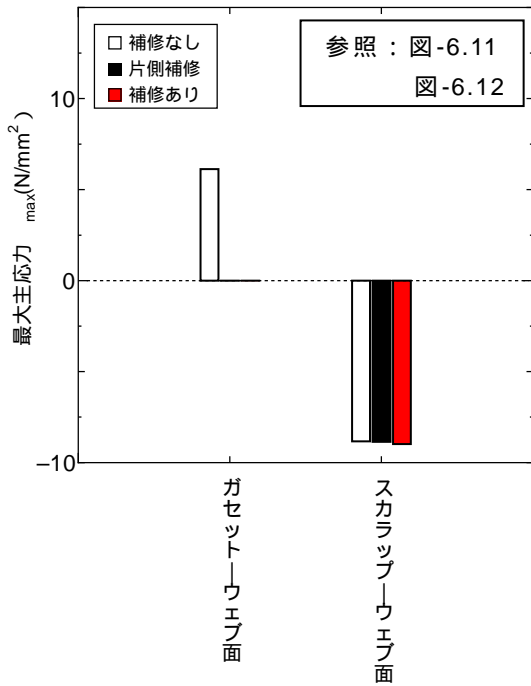


図-6.45 主桁 G1 第二車線載荷
fix 側東面

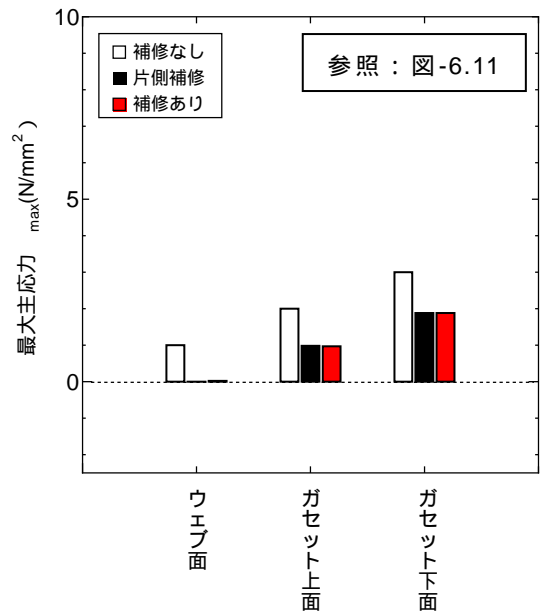


図-6.46 主桁 G1 第二車線載荷
fix 側西面 ガゼット止端

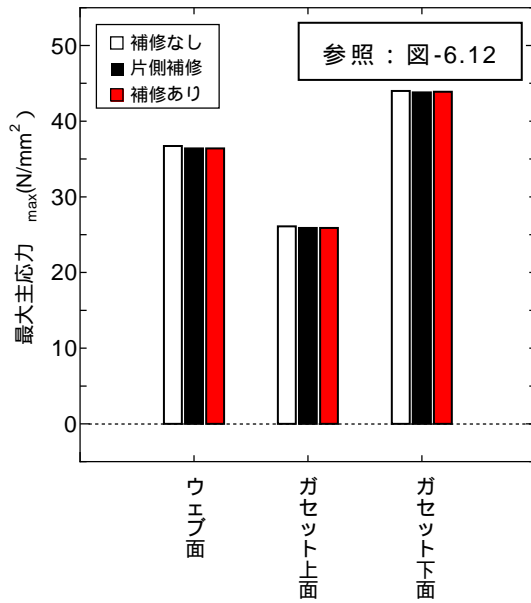


図-6.47 主桁 G1 第二車線載荷
fix 側西面 スカラップ止端

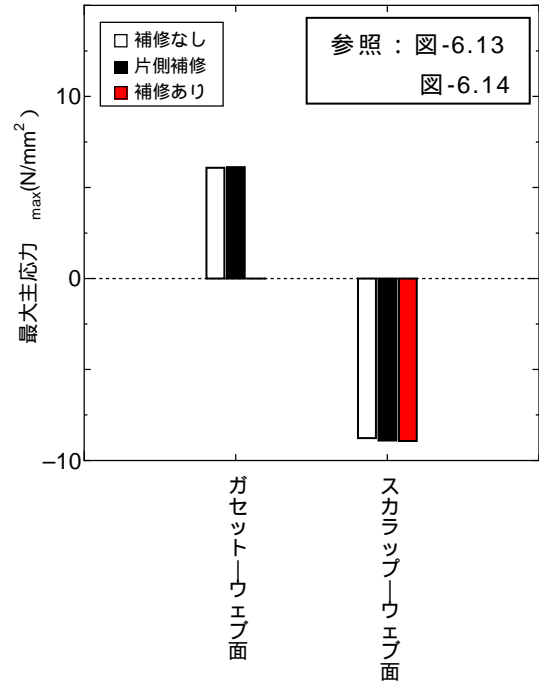


図-6.48 主桁 G1 第二車線載荷
move 側東面

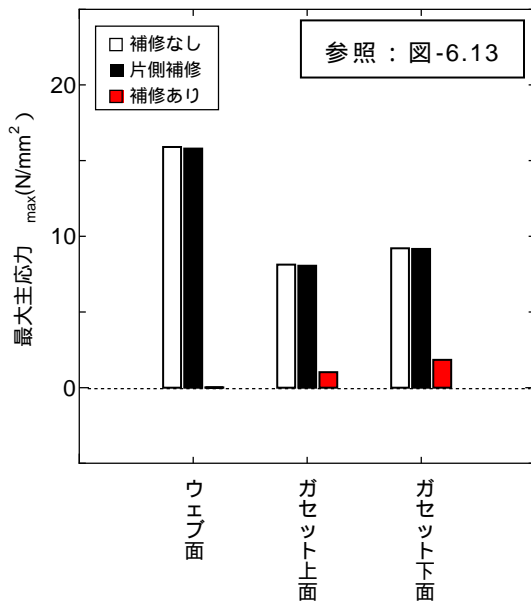


図-6.49 主桁 G1 第二車線載荷
move 側西面 ガゼット止端

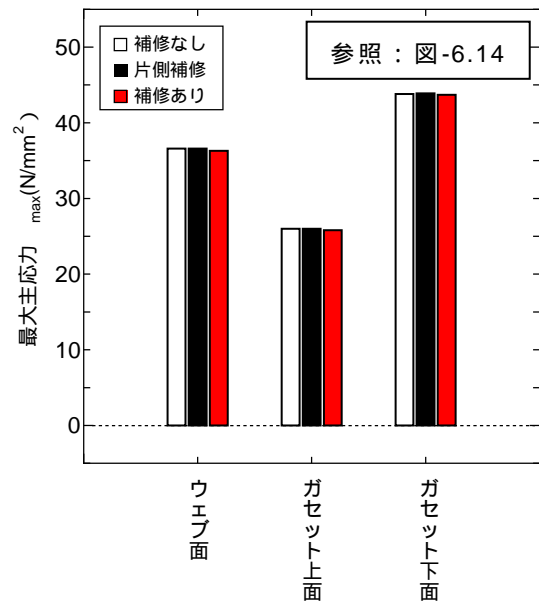


図-6.50 主桁 G1 第二車線載荷
move 側西面 スカラップ止端

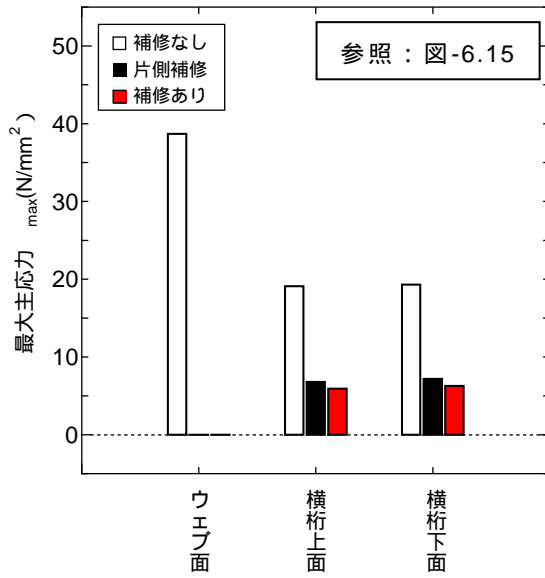


図-6.51 主桁 G2 第一車線載荷
fix 側東面 ガセット止端

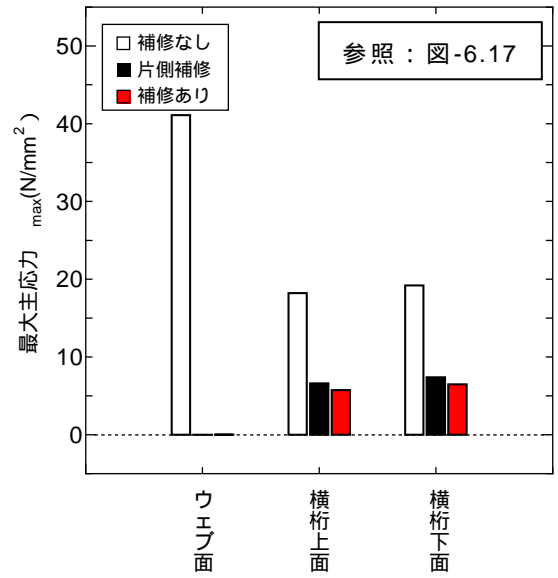


図-6.52 主桁 G2 第一車線載荷
fix 側西面 ガセット止端

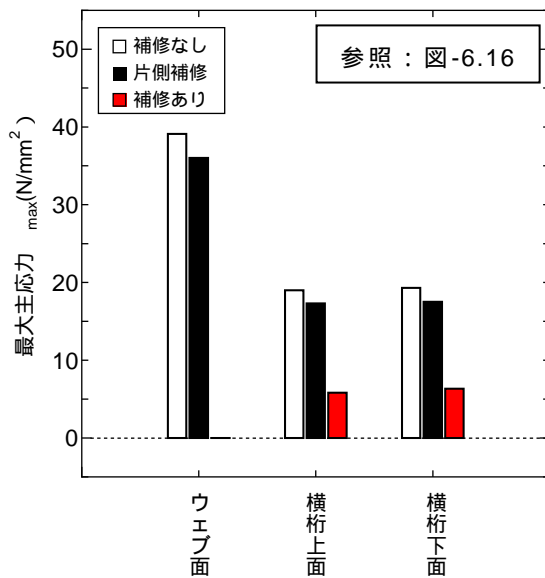


図-6.53 主桁 G2 第一車線載荷
move 側東面 ガセット止端

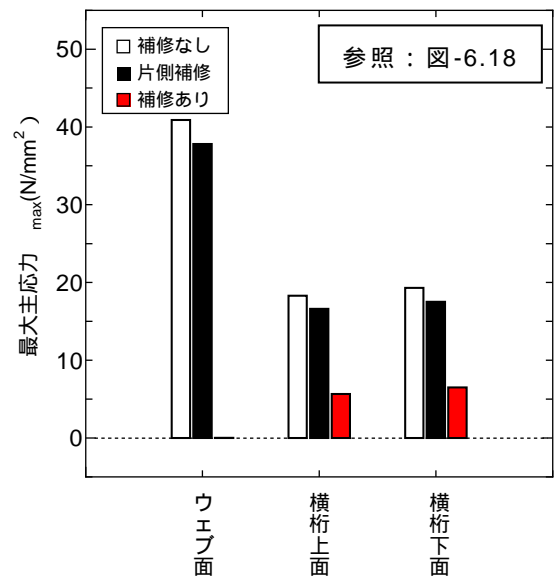


図-6.54 主桁 G2 第一車線載荷
move 側西面 ガセット止端

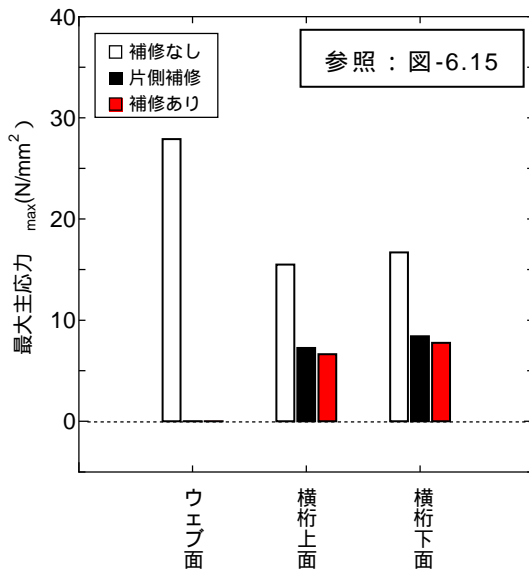


図-6.55 主桁 G2 第二車線載荷
fix 側東面 ガセット止端

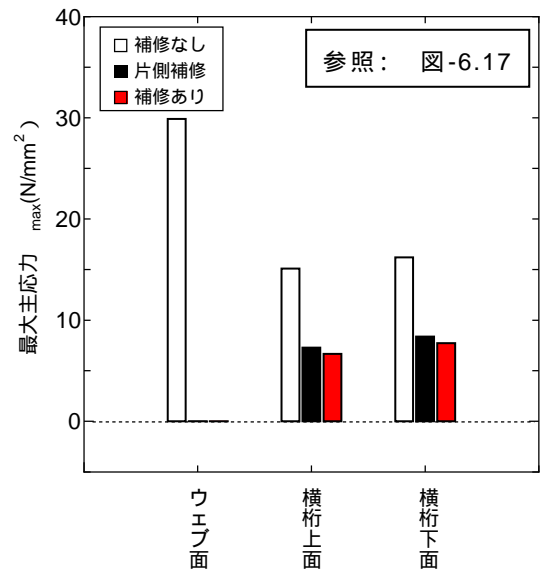


図-6.56 主桁 G2 第二車線載荷
fix 側西面 ガセット止端

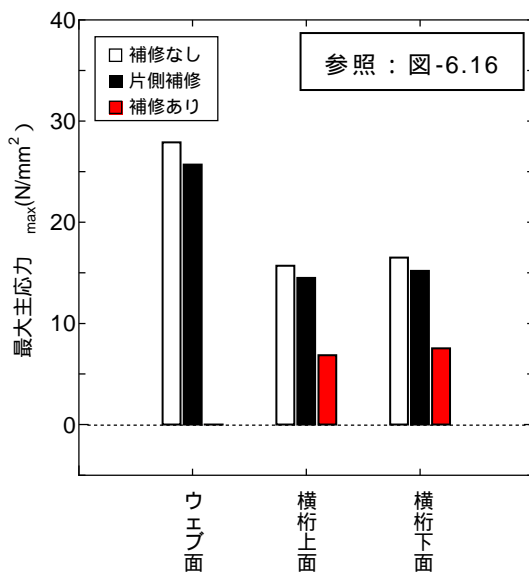


図-6.57 主桁 G2 第二車線載荷
move 側東面 ガセット止端

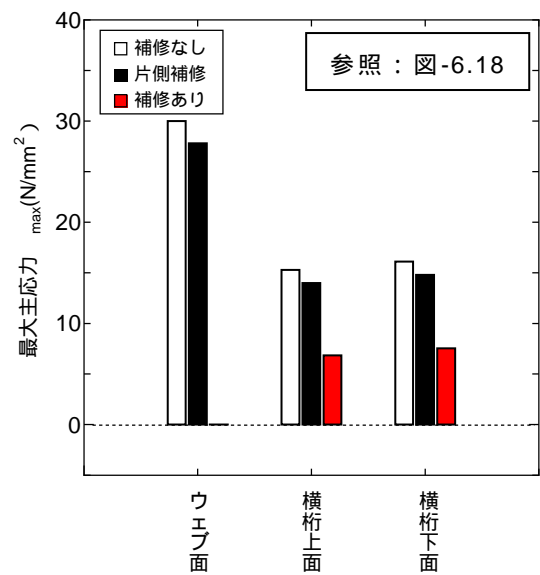


図-6.58 主桁 G2 第二車線載荷
move 側西面 ガセット止端

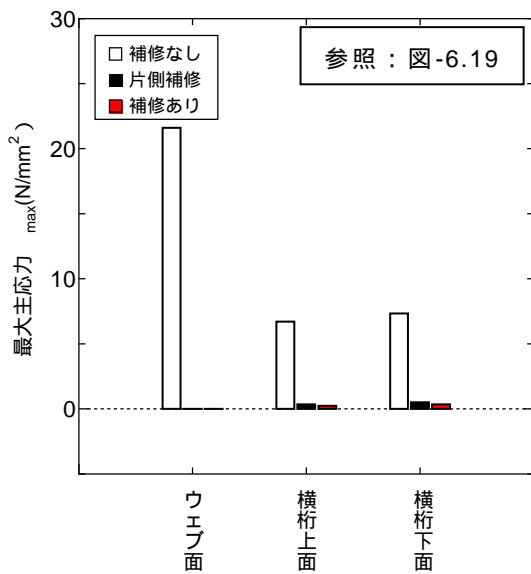


図-6.59 主桁 G3 第一車線載荷
fix 側東面 ガセット止端

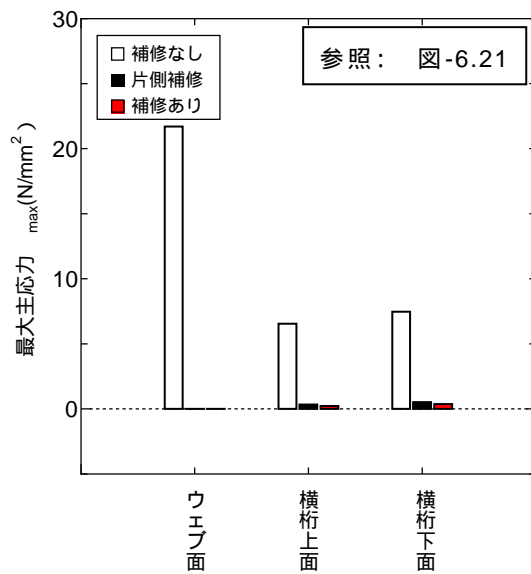


図-6.60 主桁 G3 第一車線載荷
fix 側西面 ガセット止端

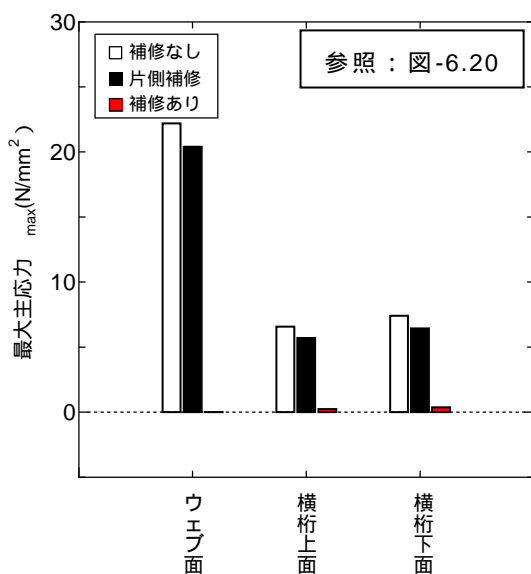


図-6.61 主桁 G3 第一車線載荷
move 側東面 ガセット止端

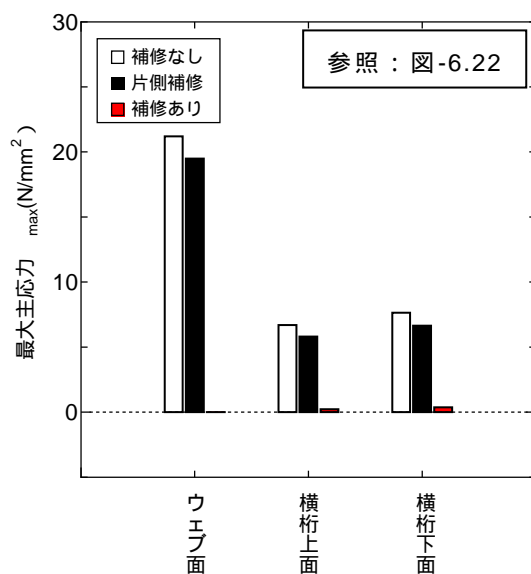


図-6.62 主桁 G3 第一車線載荷
move 側西面 ガセット止端

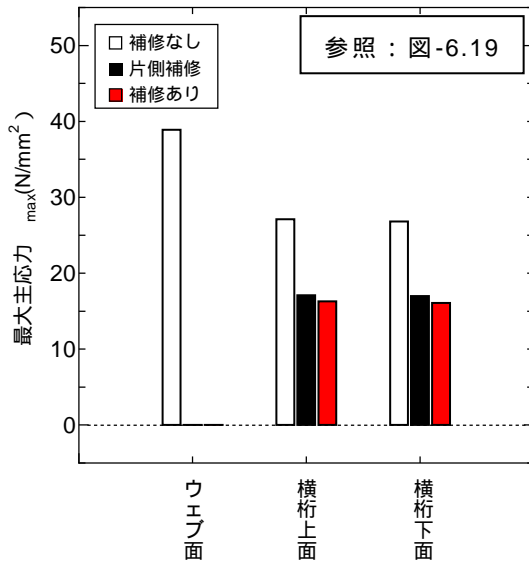


図-6.63 主桁 G3 第二車線載荷
fix 側東面 ガセット止端

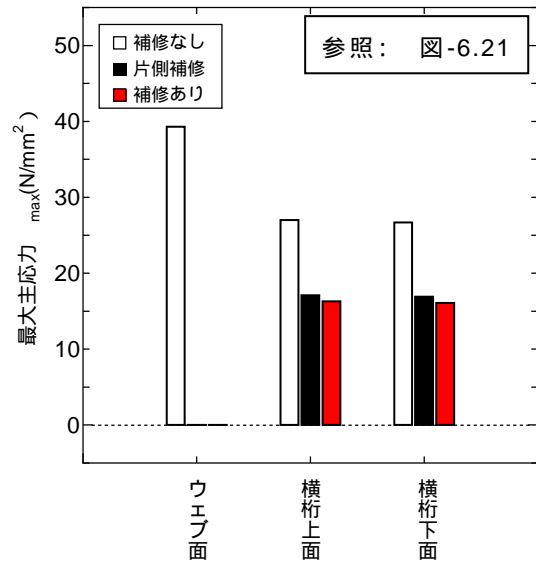


図-6.64 主桁 G3 第二車線載荷
fix 側西面 ガセット止端

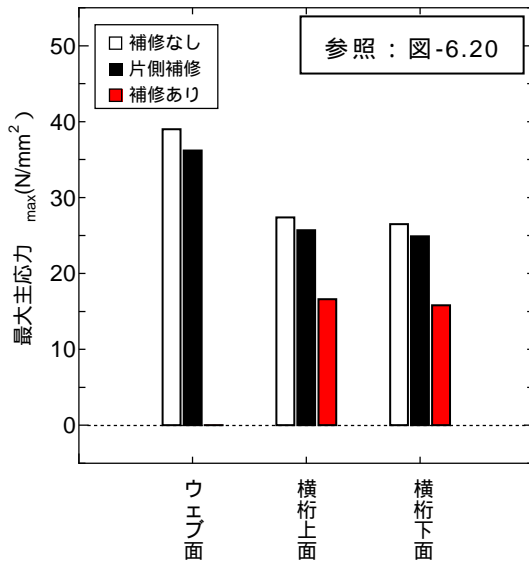


図-6.65 主桁 G3 第二車線載荷
move 側東面 ガセット止端

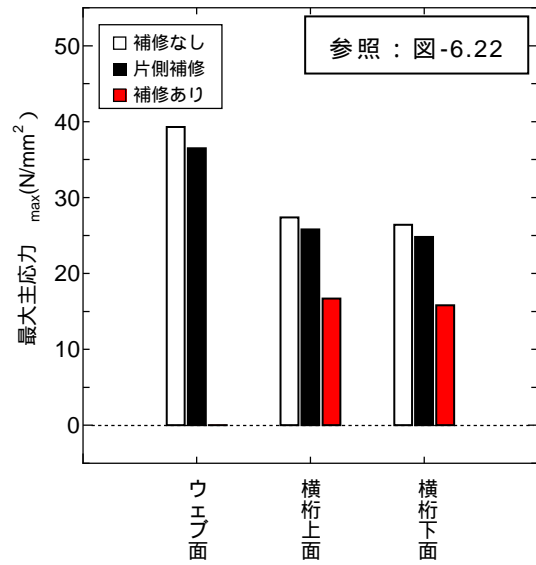


図-6.66 主桁 G3 第二車線載荷
move 側西面 ガセット止端

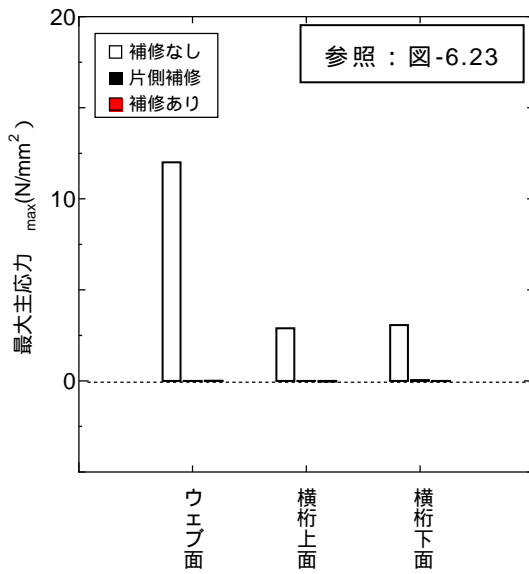


図-6.67 主桁 G4 第一車線載荷
fix 側東面 ガセット止端

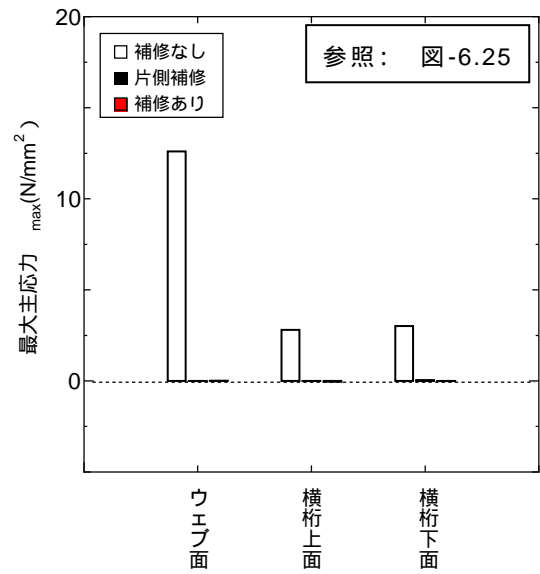


図-6.68 主桁 G4 第一車線載荷
fix 側西面 ガセット止端

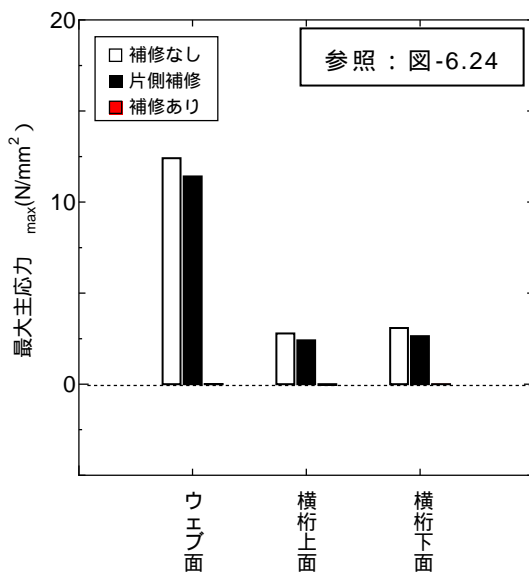


図-6.69 主桁 G4 第一車線載荷
move 側東面 ガセット止端

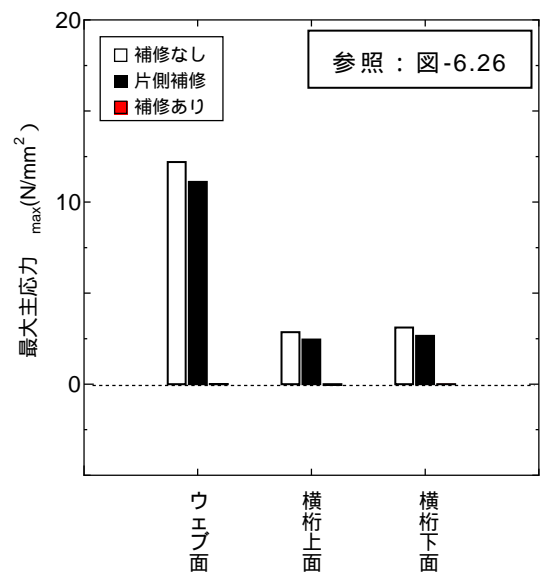


図-6.70 主桁 G4 第一車線載荷
move 側西面 ガセット止端

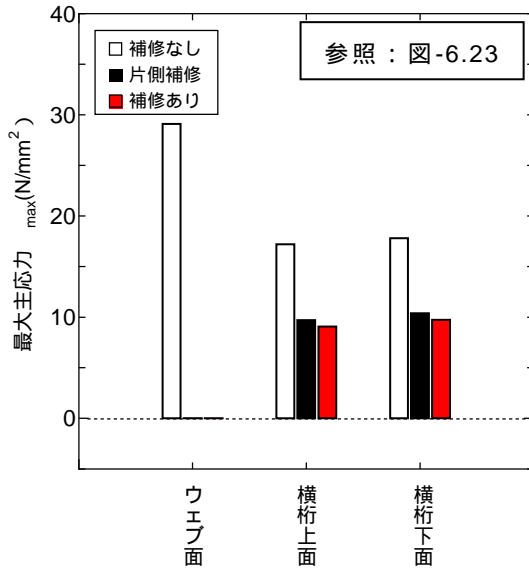


図-6.71 主桁 G4 第二車線載荷
fix 側東面 ガセット止端

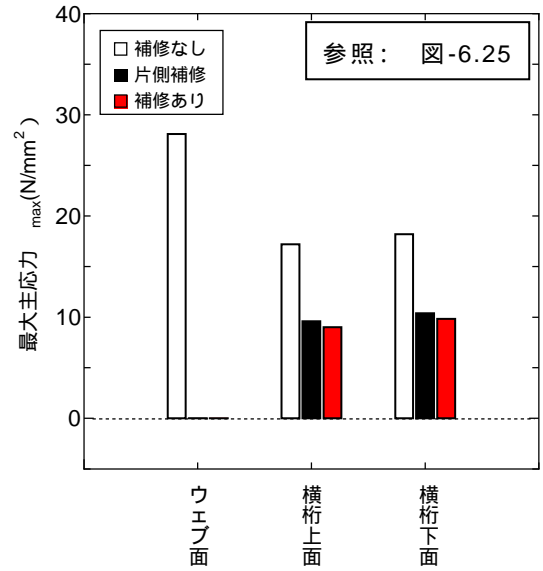


図-6.72 主桁 G4 第二車線載荷
fix 側西面 ガセット止端

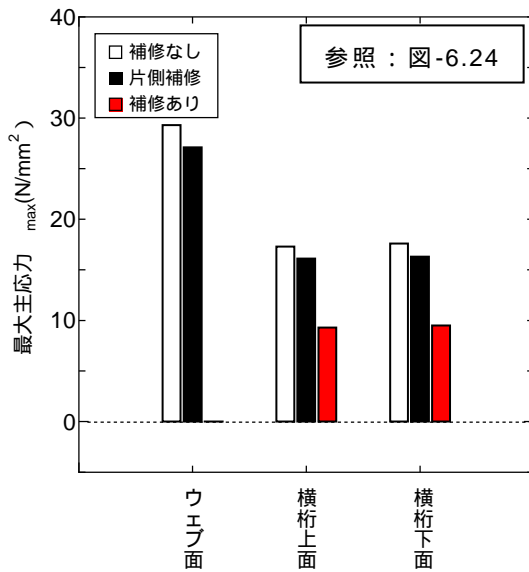


図-6.73 主桁 G4 第二車線載荷
move 側東面 ガセット止端

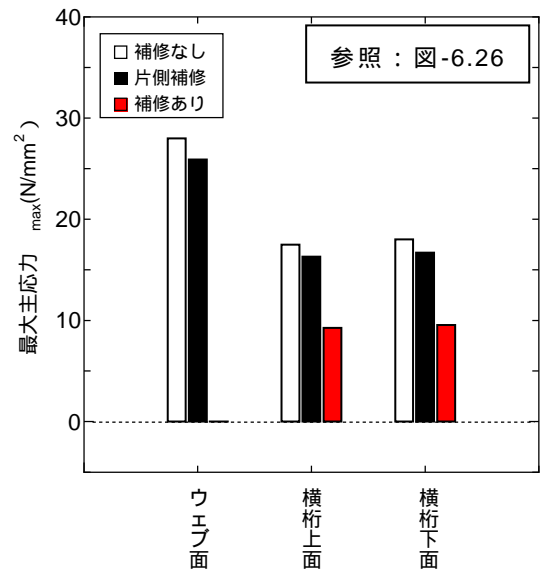


図-6.74 主桁 G4 第二車線載荷
move 側西面 ガセット止端

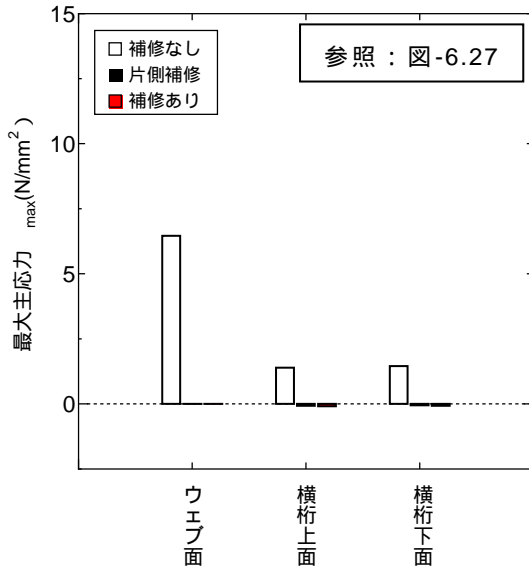


図-6.75 主桁 G5 第一車線載荷
fix 側東面 ガセット止端

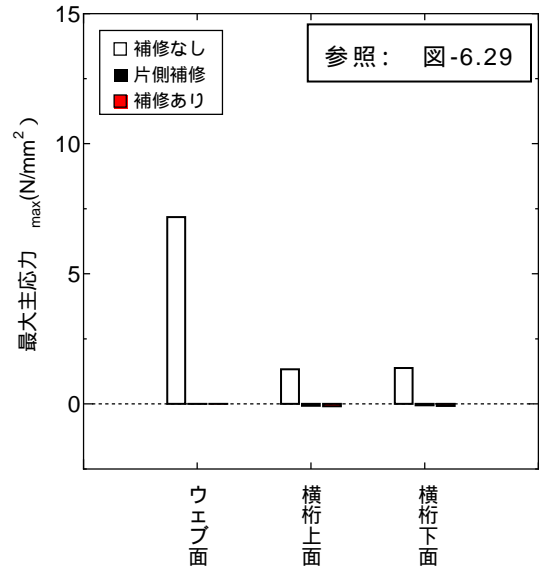


図-6.76 主桁 G5 第一車線載荷
fix 側西面 ガセット止端

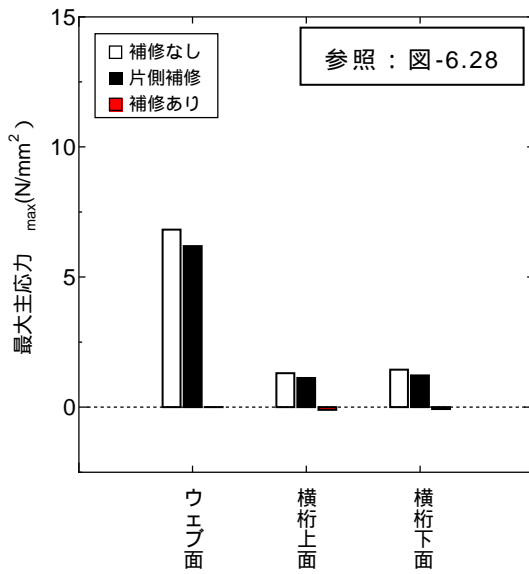


図-6.77 主桁 G5 第一車線載荷
move 側東面 ガセット止端

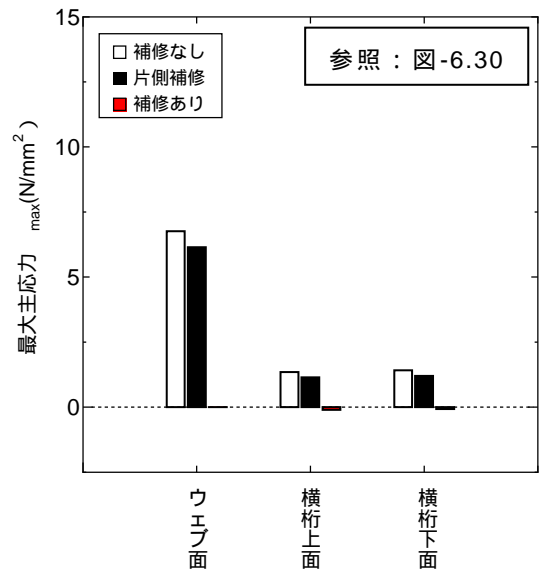


図-6.78 主桁 G5 第一車線載荷
move 側西面 ガセット止端

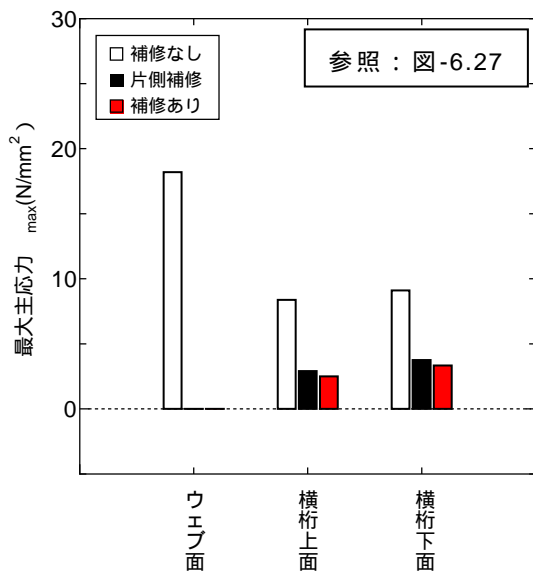


図-6.79 主桁 G5 第二車線載荷
fix 側東面 ガセット止端

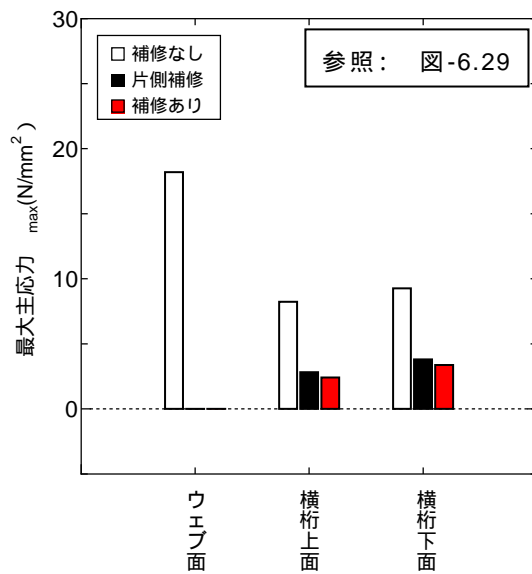


図-6.80 主桁 G5 第二車線載荷
fix 側西面 ガセット止端

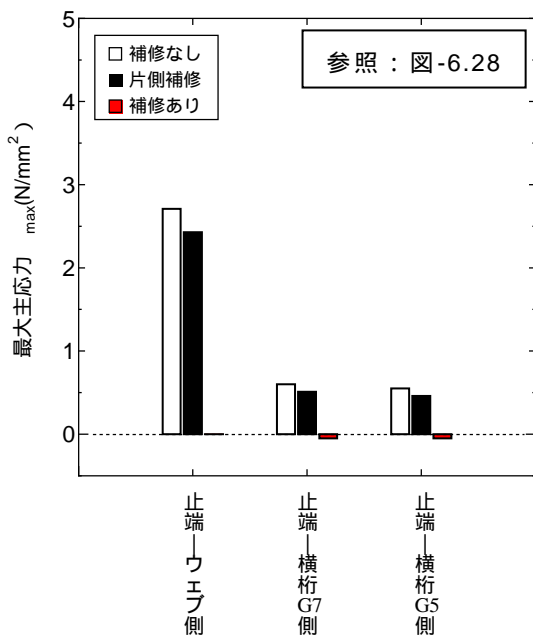


図-6.81 主桁 G5 第二車線載荷
move 側東面 ガセット止端

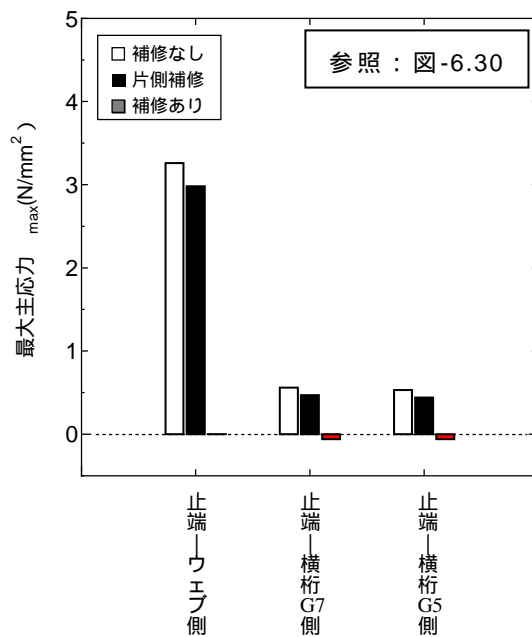


図-6.82 主桁 G5 第二車線載荷
move 側西面 ガセット止端

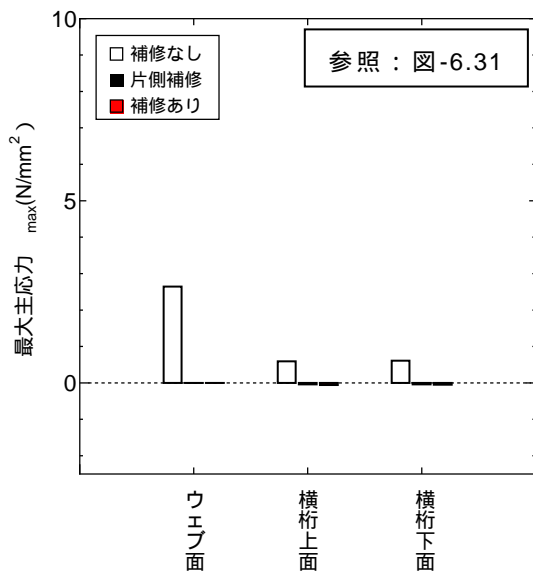


図-6.83 主桁 G6 第一車線載荷
fix 側東面 ガセット止端

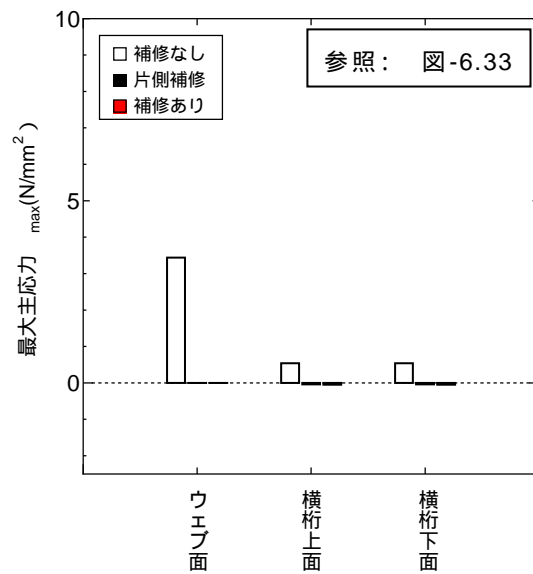


図-6.84 主桁 G6 第一車線載荷
fix 側西面 ガセット止端

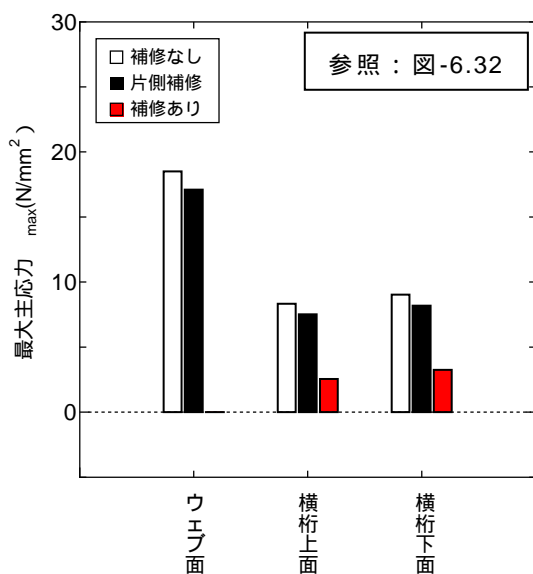


図-6.85 主桁 G6 第一車線載荷
move 側東面 ガセット止端

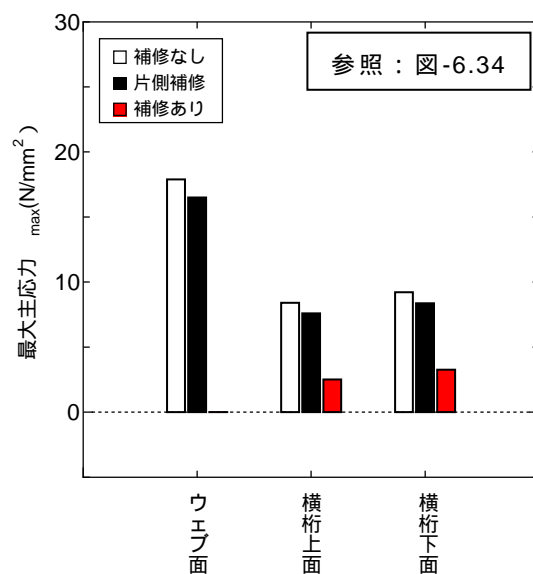


図-6.86 主桁 G6 第一車線載荷
move 側西面 ガセット止端

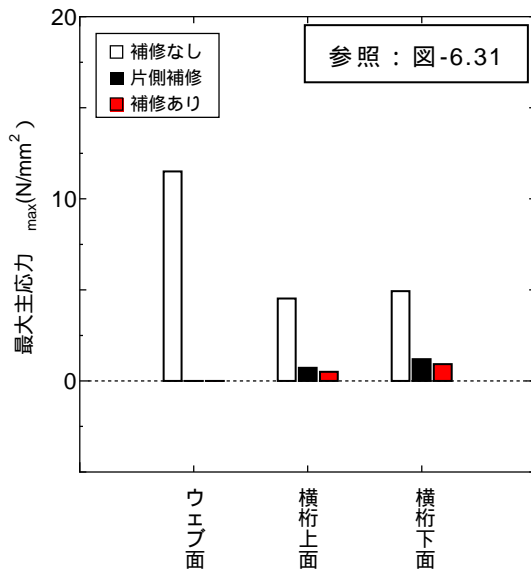


図-6.87 主桁 G6 第二車線载荷
fix 側東面 ガセット止端

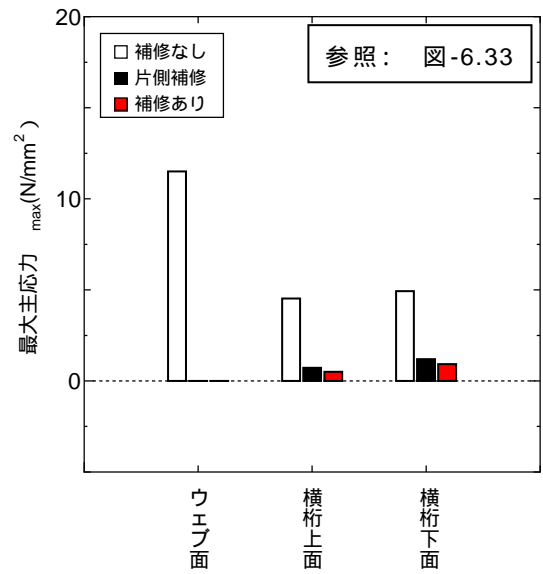


図 6.88 主桁 G6 第二車線载荷
fix 側西面 ガセット止端

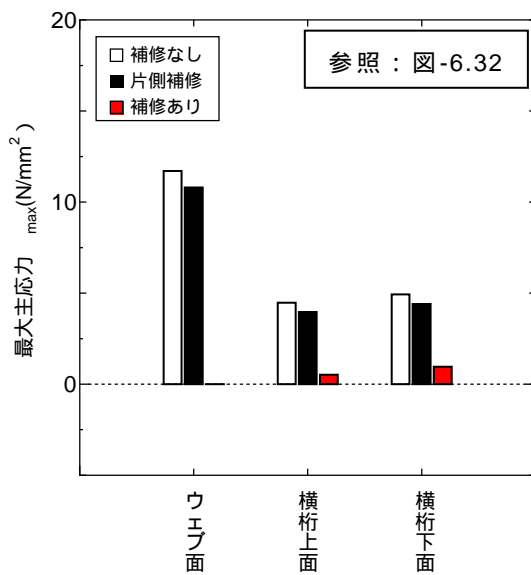


図-6.89 主桁 G6 第二車線载荷
move 側東面 ガセット止端

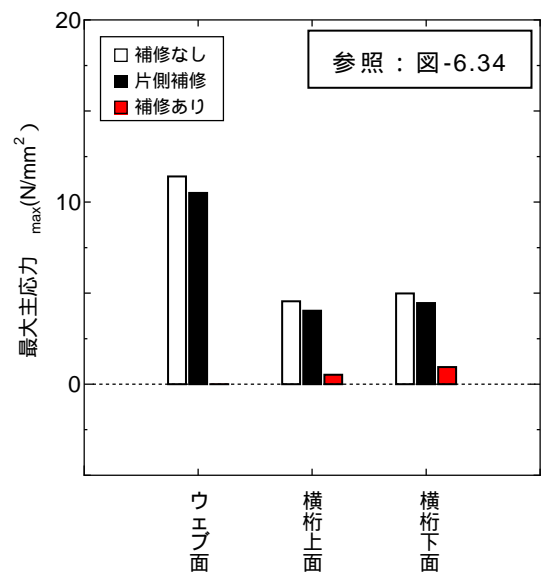


図-6.90 主桁 G6 第二車線载荷
move 側西面 ガセット止端

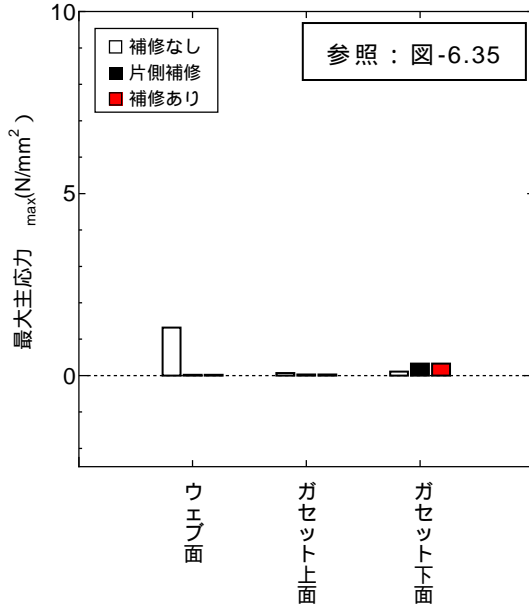


図-6.91 主桁 G7 第一車線載荷
fix 側東面 ガゼット止端

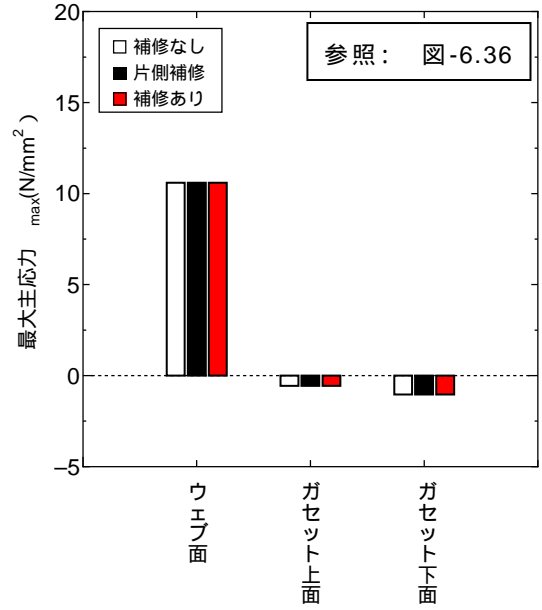


図-6.92 主桁 G7 第一車線載荷
fix 側東面 スカラップ止端

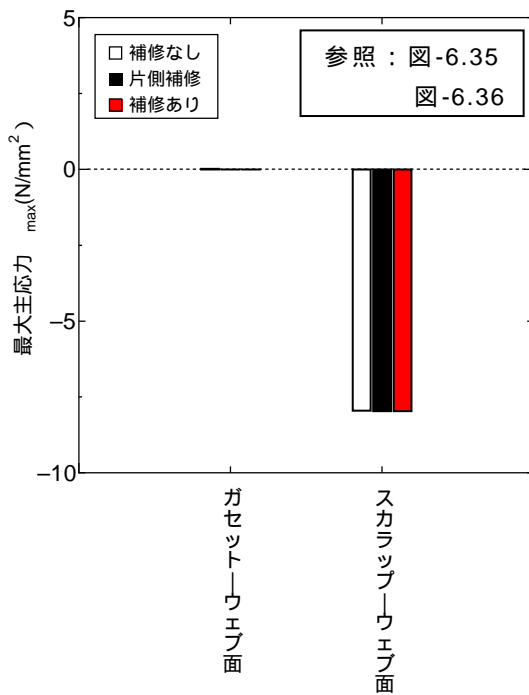


図-6.93 主桁 G7 第一車線載荷
fix 側西面

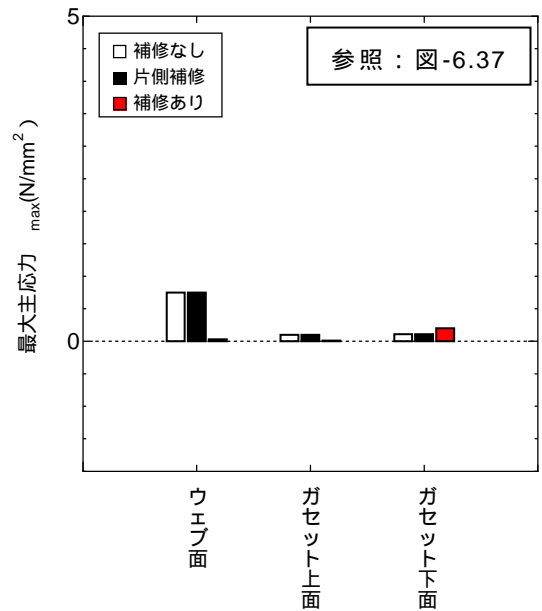


図-6.94 主桁 G7 第一車線載荷
move 側東面 ガゼット止端

端

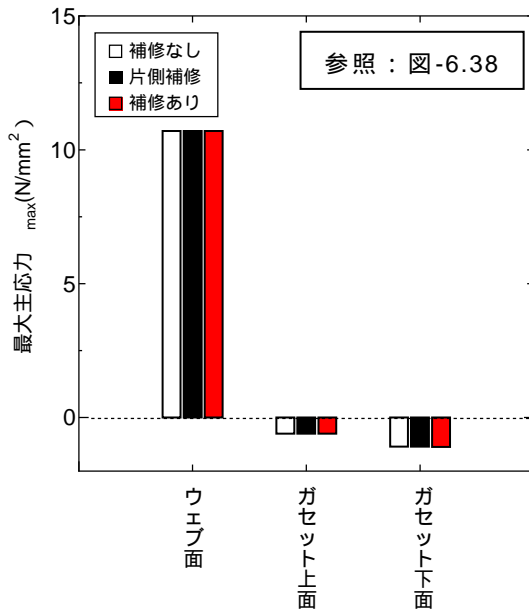


図-6.95 主桁 G7 第一車線載荷
move 側東面 スカラップ止端

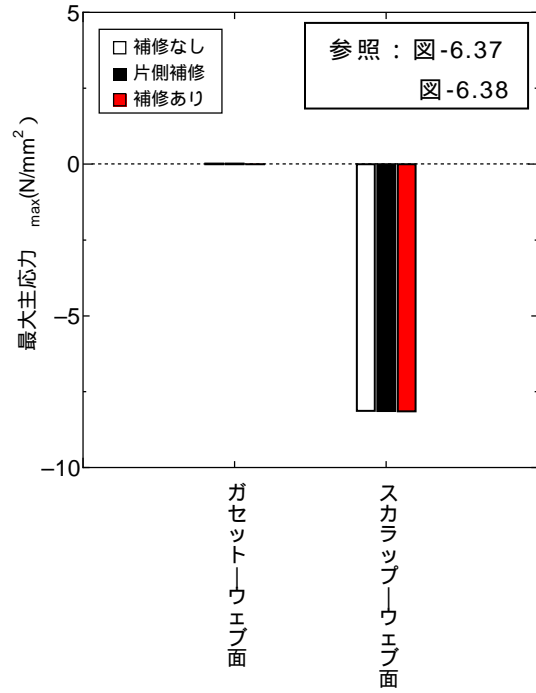


図-6.96 主桁 G7 第一車線載荷
move 側西面

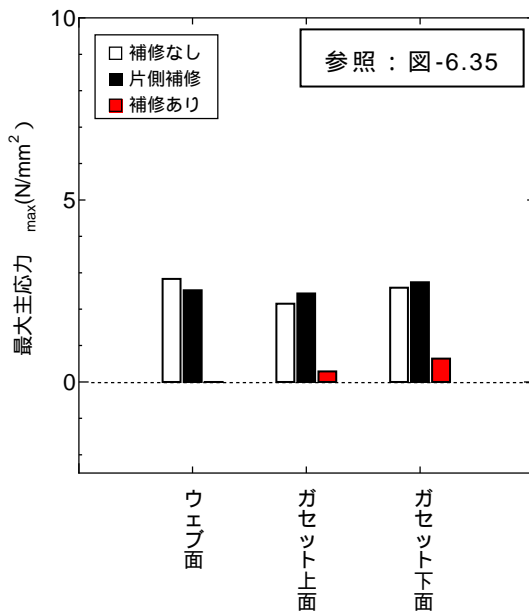


図-6.97 主桁 G7 第二車線載荷
fix 側東面 ガゼット止端

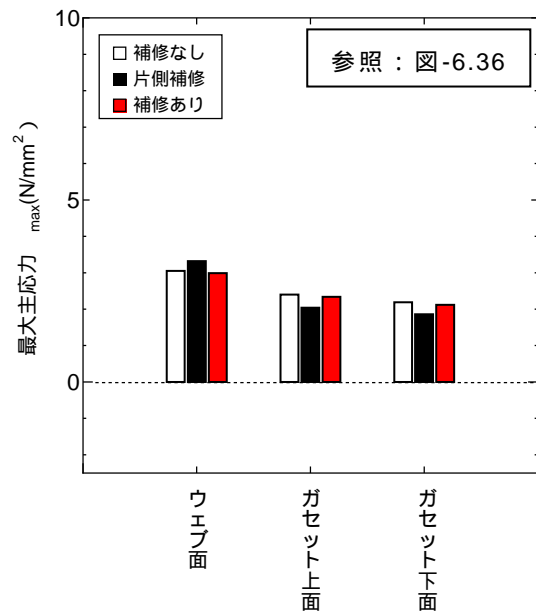


図-6.98 主桁 G7 第二車線載荷
fix 側東面 スカラップ止端

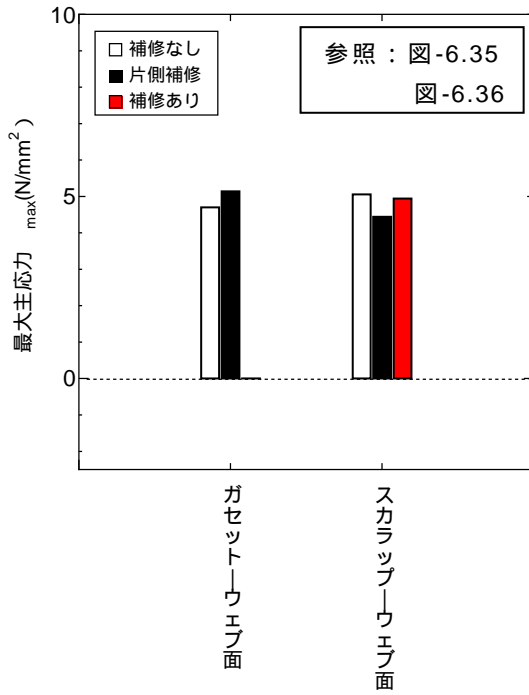


図-6.99 主桁 G7 第二車線載荷
fix 側西面

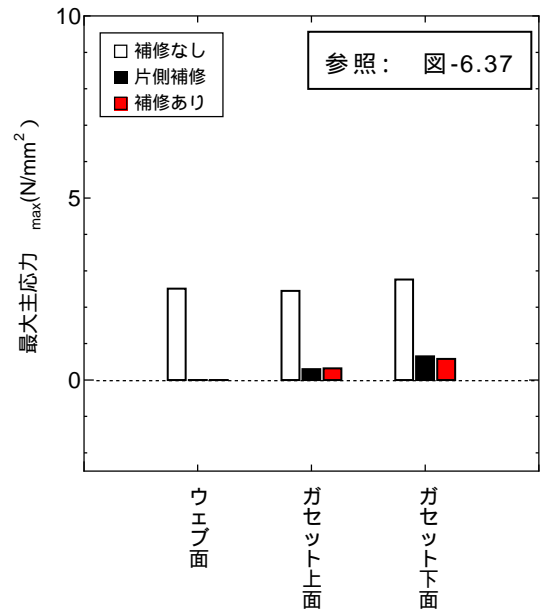


図-6.100 主桁 G7 第二車線載荷
move 側東面 ガゼット止端

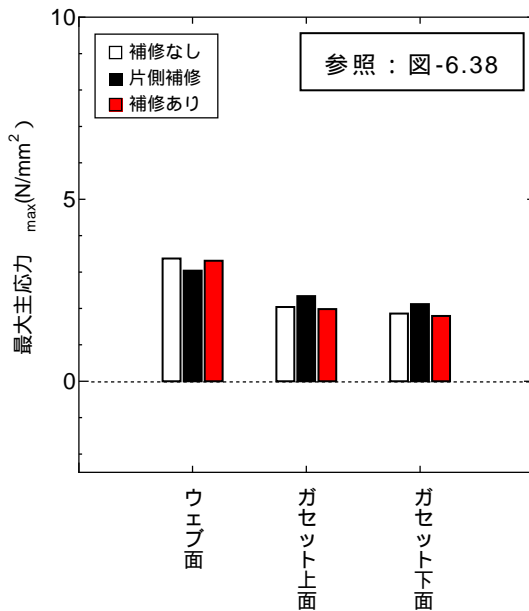


図-6.101 主桁 G7 第二車線載荷
move 側東面 スカラップ止端

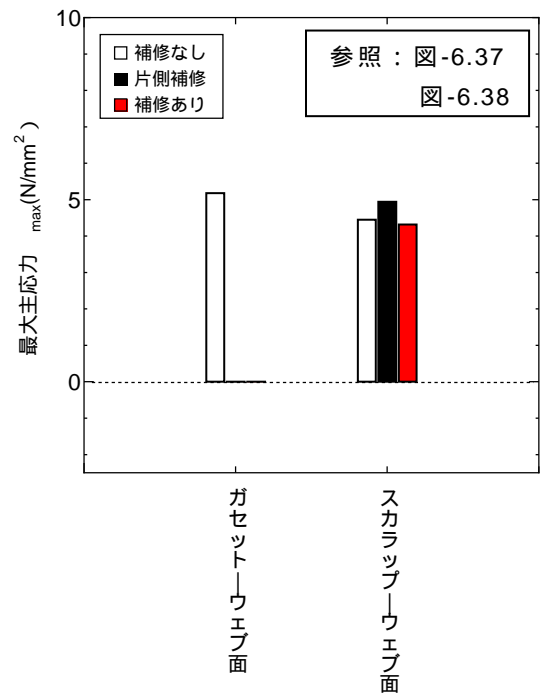


図-6.102 主桁 G7 第二車線載荷
move 側西面

第 7 章 結論

本研究で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 添え板ボルト締めストップホール法による補修部の疲労強度は溶接のままの状態よりも十分に高く、その補修効果はストップホール法あるいはボルト締めストップホール法によりも高い。
- (2) 添え板ボルト締めストップホール法による補修部の疲労破壊起点は、ボルト締めしたストップホールやボルト締めした母板のボルト孔ではなく、ボルト孔から外側に離れた母板の表面である。これは、通常の高力ボルト摩擦接合継手と同様に、添え板と母板のフレットングにより生じた疲労き裂によるものと考えられる。
- (3) 添え板ボルト締めストップホール法による補修部の疲労強度は、高力ボルト摩擦接合継手と同程度である。
- (4) ボルト締めストップホール法による補修部の疲労強度評価法の鍵となる材料定数 C と m を、円孔壁を仕上げた場合の n - N 関係から求めた。また、応力緩和係数 λ をトルシアボルトをモデル化することで再検討した。
- (5) 添え板ボルト締めストップホール法が他の部材に及ぼす影響は小さく、特に配慮する必要は無い。

参考文献

- 1) 西川和宏：道路橋における疲労問題と補修，橋梁と基礎，Vol.17，No8，pp.19-23，1983
- 2) 道路協会：鋼橋の疲労，丸善，pp.56-65，276-289，1997.5.
- 3) 平山繁幸、森猛、秋本伸介：鋼 I 桁断面橋脚の主桁・横桁交差部の応力性状と疲労寿命評価，法政大学工学部土木工学科博士論文，pp1-15，2005.2.
- 4) 西田拓二，山本健二：名阪山添橋の損傷と緊急対応・保全対策について，近畿地方整備局研究発表会論文集，2008.7.
- 5) 山田健太郎，近藤明雄：鋼部材の亀裂補修補強後の疲れ挙動，土木学会論文集，第 368 号，pp.411-415,1986.4.
- 6) 三木千寿，豊田幸広，森猛，榎土尚宏：鋼桁ディテールの道路橋シミュレーション道路荷重，構造工学論文集，Vol.53A，pp.951-960，1989.9.
- 7) MIKI, C., TOYODA, Y., MORI, T., ENOKIDO, N. : FATIGUE OF LARGE-SCALE WELDED GIRDERS UNDER SIMULATED HIGHWAY LODINGS, Structural Eng./Earth quake Eng. Vol.7.NO.2,pp.283-291,1990,10.
- 8) 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.969-976，1989.3.
- 9) 森猛：ウェブガセット溶接継手部に生じた疲労亀裂のストップホールによる補修，土木学会年次学術講演会論文集， -397，pp.824-825，1990.9.
- 10) 三辺考志，薩川能成，森猛：円孔をボルト締めすることによる応力集中の緩和，土木学会年次学術講演会論文集， -490，1992.9.
- 11) MORI, T., SATSUKAWA, Y. : STRESS ANALYSIS AND MEASUREMENT OF BOLTED CIRCULARHOLE, The second Japan-Korea Joint Seminar On Steel Bridges, pp.1-9, 1992.7.
- 12) 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， -36，pp.123-132，1996.7.
- 13) 森猛：疲労亀裂の簡便な補修方法：ボルト締めストップホール法，日本造船学会誌，第 807 号，pp.671-677，1996.9
- 14) 森猛，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の疲労強度，鋼構造論文集，第 8 巻第 29 号，pp.15-26，2001.3.
- 15) 大谷浩二：ボルト締めストップホール法により補修した面外ガセット溶接継手の

- 疲労強度，法政大学工学部土木工学科卒業論文，1995.2.
- 16) 内田大介，森猛：ボルト締めストップホール法により補修した疲労損傷面内ガセット溶接継手の疲労強度，溶接学会全国大会講演概要集，Vol.61，pp.528-529，1997.9
 - 17) 西尾一徹：鋼桁ウェブ・面外ガセット溶接部の疲労損傷に対するボルト締めストップホール法の補修効果，溶接学会全国大会講演概要集，Vol.67，pp.434-435，2000.9
 - 18) 森猛，西尾一徹，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の疲労強度評価式の提案，鋼構造論文集，第9巻，第33号，pp.13-23，2002.3.
 - 19) 内田大介，森猛，西尾一徹：板曲げを受ける疲労損傷面外ガセット溶接継手に対するボルト締めストップホール法の補修効果，鋼構造年次論文報告集，第11巻，pp.473-480，2003.11.
 - 20) 内田大介，森猛：当て板付きボルト締めストップホール法で補修したガセット溶接継手の疲労強度，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp.97-102，2005.11.
 - 21) 内田大介，森猛，杉山規子：ボルト締めストップホール法で補修した面内曲げ応力下にある面外ガセット溶接継手部の疲労強度評価，鋼構造論文集，第12巻第48号，pp.55-65，2005.12.
 - 22) 森猛，内田大介，池谷岳史：ボルト締めストップホールで補修した組み合わせ応力場にある面外ガセット溶接継手部の疲労強度評価式，鋼構造論文集，第14巻第54号，pp.95-104，2007.6.
 - 23) 内田大介，杉山規子：直応力とせん断応力を受けるボルト締めストップホール補修部の疲労強度評価方法，土木学会年次学術講演会講演概要集第1部 Vol. 60，pp.829-830，2005.9
 - 24) 越後滋，町田文孝，吉岡昭彦，三木千壽：疲労亀裂の応急補修方法の検討，土木学会年次学術講演会講演概要集第1部 Vol. 49，pp.426-427，1994.9
 - 25) 谷貝誠，横井昭仁：塗装鋼板溶接桁の疲労強度，法政大学工学部土木工学科卒業論文，1992.2.
 - 26) 朝倉健雄，後藤和宗：首溶接部の疲労強度におよぼすブローホールの影響，法政大学工学部土木工学科卒業論文，1993.2.
 - 27) 森猛，田中雅人，木幡善人，三木千寿：塗装鋼板溶接桁の疲労強度，構造工学論文集，Vol.40A，pp.1233-1242，1994.3.

- 28) 橋剛志，丸田恭嗣：溶接材料の軟質化による疲労強度の向上，法政大学工学部土木工学科卒業論文，1994.2.
- 29) 橋剛志：溶接部を軟質化した高張力鋼継手の疲労強度，法政大学大学院工学研究科建設工学専攻修士論文，1996.2.
- 30) 慶甲秀，森猛，三木千寿，橋剛志：高強度鋼溶接継手部の溶接材料軟質化による疲労強度向上の試み，土木学会論文集，No.570，-40，97-106，1997.7.
- 31) 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，1993.4
- 32) N. Osawa, K. Hashimoto, J. Sawamura, T. Nakai, S. Suzuki：Study on shell-solid FE analysis for fatigue assessment of ship structure, Marine Structures, Vol.20, pp.143-163, 2007.
- 33) 廣戸一也，森猛，小杉剛史，平野秀一，盧相坤：ストップホール壁の表面粗さが疲労強度に及ぼす影響，鋼構造年次論文報告集，Vol.18，pp.485-492，2010.11
- 34) 日本鋼構造協会：鋼構造接合資料集成,技報堂出版，1977.
- 35) 吉田龍生，田中照男：高力ボルトによる溶融亜鉛めっき継手の接合について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.921-922，1975..
- 36) 福島公，村山哲夫，浜岡喬：溶融亜鉛めっき高力ボルト摩擦接合継手のすべり特性および疲労強度，川田製鉄技報 pp101-110，1978.
- 37) 三木千壽,森猛,稲沢秀行,中村賢造：押し抜きせん断加工孔を用いた高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度，土木学会論文集，第 410 号 I-12，pp.345-350，1989..
- 38) 辻岡静雄：高力ボルト摩擦接合部の疲労特性に関する研究，日本建築学会北陸支部研究報告書第 41 号，pp.111-114，1998.
- 39) 岩崎英治,山野達也,森猛：レーザー加工孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力と疲労強度，構造工学論文集 Vol.55A，pp992-1004，2009.
- 40) 向井天：鋼 I 断面橋梁横構仕口部の応力解析，法政大学工学部都市環境デザイン工学科卒業論文，2008.2.
- 41) 崎元達郎：構造力学〔上〕，pp.114-149，1991.9.
- 42) 三木千壽：鋼構造，共立出版株式会社，2000.7.