

ガラス繊維強化プラスチックの貼付による疲労耐久性向上に関する研究

— 面外ガセット溶接継手の疲労試験およびFEM解析検討 —

Experimental study on application of glass fiber reinforced plastic for improvement of fatigue strength of welded joints

— Study on fatigue tests and FEM analyses of out-of plane gusset welded joints —

鈴木博之*, 稲葉尚文**, 富田芳男***, 紫桃孝一郎****, 岡本陽介*****
Hiroyuki Suzuki, Naofumi Inaba, Yoshio Tomita, Koichiro Shito, Yosuke Okamoto

*工博, 明星大学 理工学部建築学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1)

**工修, (株) 高速道路総合技術研究所, 道路研究部橋梁研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

***工修, 国際協力銀行, 開発セクター部 (〒100-8144 東京都千代田区大手町 1-4-1)

****東日本高速道路(株) 関東支社三郷管理事務所 (〒341-0056 埼玉県三郷市番匠免2-101-1)

*****明星大学大学院理工学研究科 (現 京橋メンテック(株)) (〒536-0014 大阪市城東区鳴野西2-2-21)

In this study, fatigue tests are done using two kinds of out-of-plane gusset welded joint specimen; a specimen without strengthening; GN, and a specimen with a glass fiber reinforced polymer (GFRP) pasted with an adhesive on the weld zone; GF. As a result of the experiments, S-N curves, photographs showing crack propagation, and the relation between crack propagation rate and the square root of half length of a crack are given. In addition, stress analyses of GN and GF are done using a finite element method to study the effect of the GFRP on reduction of stress at a weld toe of the round weld at the end of the gusset. Furthermore, the effect of the GFRP on fatigue crack propagation rate is discussed using fracture mechanics.

Key Words: GFRP, out-of-plane gusset welded joint, fatigue, strengthening

キーワード: ガラス繊維強化プラスチック, 面外ガセット溶接継手, 疲労, 補強

1. はじめに

構造物の限界状態の一つに疲労限界状態がある。疲労限界状態には、疲労き裂の発生と部材の破断がある。さらに、疲労き裂の発生には、目視で発見できないようなき裂—たとえば、結晶粒オーダーのき裂—が発生したときを発生とする場合と、目視で発見できるようなき裂にまで成長したときを発生とする場合がある。工学的には、目視で発見できるようなき裂にまで成長したときをき裂発生寿命 N_i とし、き裂を発見したのち部材が破断するまでをき裂進展寿命 N_p としていることが多い¹⁾。

ところで、著者らは、ガラス繊維強化プラスチック（以下、GFRP と記す）は炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP と記す）に比べ引張強度や弾性係数が小さいが、柔軟性に富み溶接継手のような複雑な箇所にも適用可能である上に、透明で施工後においても引き続き目視点検が可能であるという特性を持っている点に着目し、鋼部材の疲労寿命の改善に GFRP を適用することの可能性について実験的および解析的に検討した結果、荷重非伝達型十字溶接継手（非仕上げのすみ肉溶接継手）の溶接

部に GFRP を貼付すると、疲労寿命が改善されることを明らかにした²⁾。この研究においては、GFRP を貼付することによる疲労寿命の改善をき裂発生寿命 N_i に着目して考察した。

しかしながら、前述のように、工学的には、部材の破断までの疲労寿命 N はき裂発生寿命 N_i とき裂進展寿命 N_p の和とする場合が多く、繰返し荷重を受ける部材の破断までの疲労寿命 N の改善に GFRP を適用することの可能性を検討するにあたっては、き裂発生寿命 N_i だけでなく、き裂進展寿命 N_p についても検討する必要がある。

本研究では、GFRP が疲労き裂発生寿命 N_i ならびに疲労き裂進展寿命 N_p の改善に及ぼす効果について検討するため、溶接部にプライマーを用いて GFRP を貼付した面外ガセット溶接継手の疲労試験を行った。また、溶接部に GFRP を貼付した面外ガセット溶接継手の応力解析を実施し、GFRP が疲労き裂発生部位の応力を低減させる効果についても調査した。さらに、GFRP が疲労き裂進展速度の抑制に及ぼす効果について破壊力学的考察を行った。

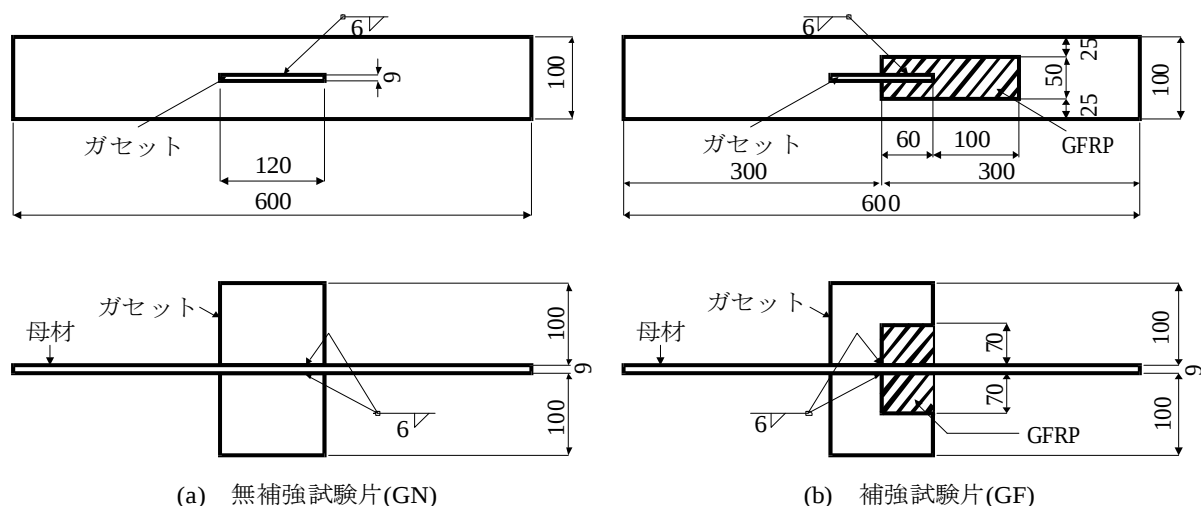


図-1 試験片形状

表-1 鋼材の機械的性質

	Y. P. (MPa)	T. S. (MPa)	E. M. (MPa)	El. (%)
鋼板 (SM400A)	288	443	2.1×10^5	31.0

Y. P. : 降伏点, T. S. : 引張強度, E. M. : 弾性係数,
El. : 伸び

表-2 GFRPおよびプライマーの機械的性質

	T. S. (MPa)	E. M. (MPa)	F. C. (w/w %)
GFRP	201	1.4×10^4	22~36
プライマー	52	4.6×10^3	—

T. S. : 引張強度, E. M. : 弾性係数, F. C. : 繊維含有量

2. GFRP を貼付した面外ガセット溶接継手の疲労試験

2.1 実験方法

試験片形状を図-1に示す。試験片の材質は SM400A である。表-1 に鋼材の機械的性質を示す。試験片の母材は幅 100mm、板厚 9mm、長さ 600mm であり、この母材の両面に高さ 100mm、板厚 9mm、長さ 120mm のガセットをすみ肉溶接により取り付け付けた面外ガセット溶接継手は無補強試験片(以下、GN と呼ぶ)とした。すべての試験片表裏のガセットの片側の回し溶接部止端を仕上げることで、仕上げ側の回し溶接部の応力集中を非仕上げ側より緩和させ、き裂が非仕上げ側の回し溶接部から発生するようにした。補強試験片は、GN の非仕上げ側の回し溶接部に GFRP をエポキシアクリレート系の常温硬化型 2 液性プライマー(以下、プライマーと呼ぶ)を用いて貼付した試験片(以下、GF と呼ぶ)である。表-2 に GFRP およびプライマーの機械的性質を示す。GF は GFRP を 4 層重ねて貼付した試験片であり、GFRP とプライマーの合計の厚さは母材部分で約 2.8mm であった。

本研究で用いた GFRP は、紫外線硬化型樹脂シートであり、ガラス繊維が一方に配置された GFRP である。GFRP は、試験片に荷重が作用していない状態で貼付した。最初に、試験片表裏面のガセットの非仕上げ側溶接部をケレンし、次にプライマーを塗布し、その後、図-1(b)に示すように、GFRP を貼付した。GFRP の貼付手順を図-2に示す。図-2(a)に示すような 3 種類の形状の GFRP を貼付することとした。LT の GFRP のガラス繊維の方向

は縦方向であり、CL および CR のガラス繊維の方向は LT の直交方向である。LT、CL および CR の実線は、ガラス繊維の方向を表している。最初に、図-2(b)に示すように、非仕上げ側の溶接部に LT を 2 層貼付した。LT には荷重を負担させることとし、ガラス繊維の方向は荷重方向に一致させた。この状態では、LT がガセット側面の母材部に接着していないため、荷重が作用すると LT は簡単に剥がれてしまうことが懸念されたので、図-2(c)に示すように、左右に CL と CR をそれぞれ 2 層貼付した。CL および CR のガラス繊維の方向は荷重直交方向とし、ガセット側面と LT を連結し、LT が剥がれないように貼付することとした。疲労試験にあたっては、最小応力は 10MPa とし、最大応力を変化させた。

2.2 実験結果および考察

図-3 に S-N 線図を示す。図には「鋼道路橋の疲労設計指針」の疲労強度等級も示した³⁾。図中の右向きの矢印は、非破壊を表している。「鋼道路橋の疲労設計指針」によれば、ガセットをすみ肉溶接した継手(ガセット長 > 100mm)の疲労強度等級は G 等級であるが、図-3 より、本研究で使用した無補強試験片 GN は E 等級を満たしていることがわかる。また、GFRP を貼付した GF も E 等級を満たしている。

図-4 は、各シリーズの疲労試験結果の回帰線を示した S-N 線図である。図中の GN と GF の回帰線を比較すると、応力範囲の高い領域では回帰線は接近しているが、応力範囲が低くなるにつれて、GF の疲労寿命は GN よ

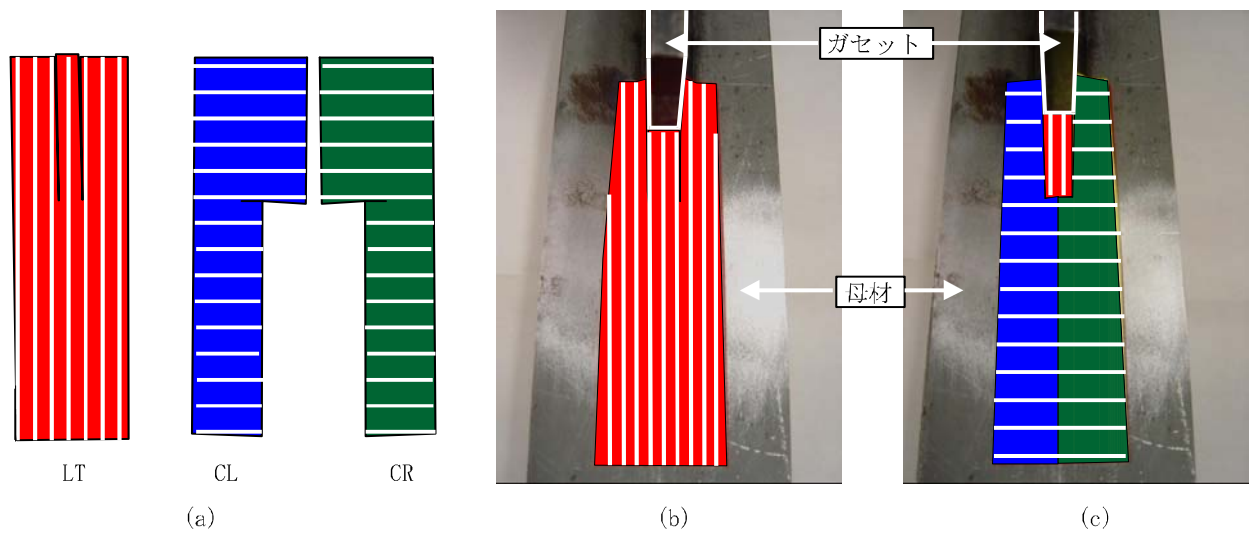


図-2 GFRP の貼付方法

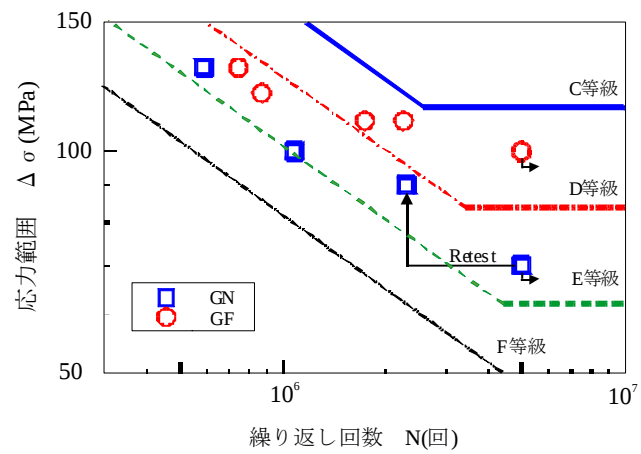


図-3 S-N 線図(疲労強度等級)

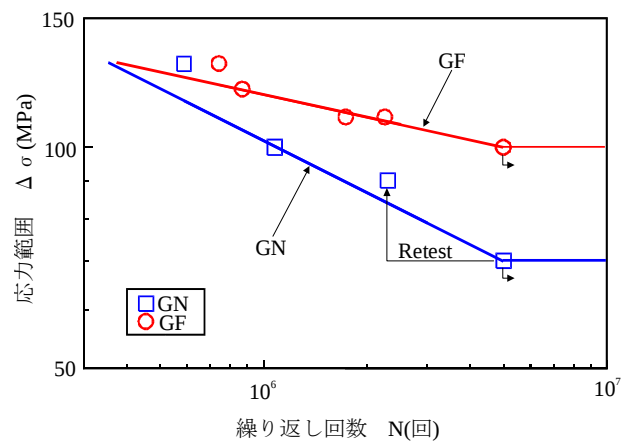


図-4 S-N 線図(回帰線)

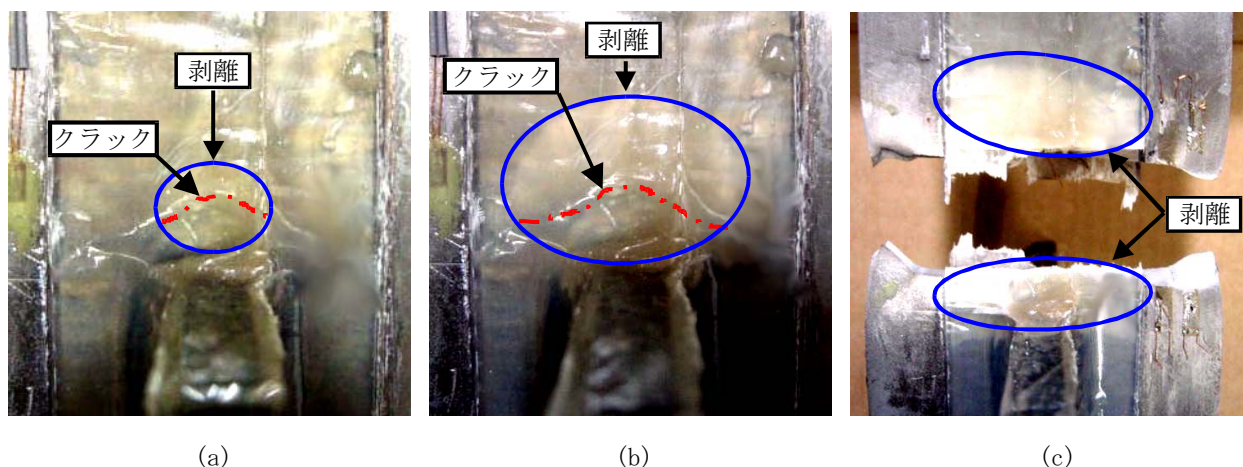


図-5 破断状況

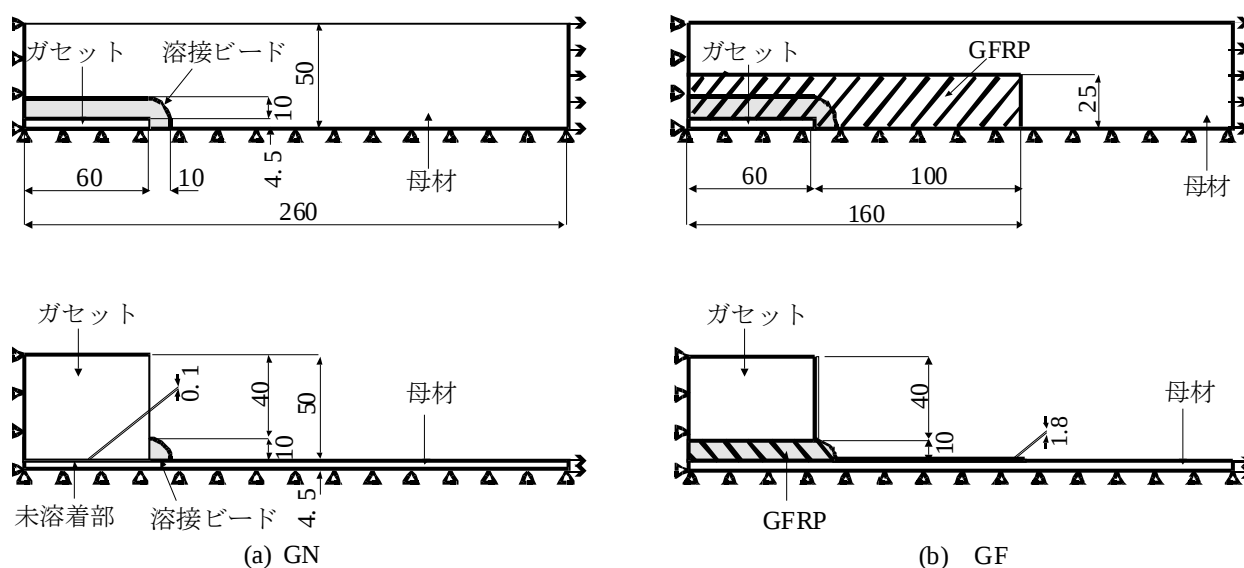


図-6 解析モデル

り著しく延びていることがわかる。したがって、応力範囲の高い領域では、GFRP 貼付による補強効果はあまり期待できないかもしれないが、応力範囲の低い領域では補強効果が高いことが確認できる。

図-4 の回帰線は以下の通りである。

$$\text{GN: } \Delta \sigma^{3.46} \cdot N = 1.22 \times 10^{13} \quad (5.9 \times 10^5 \leq N < 5.0 \times 10^6) \\ \Delta \sigma = 70 \text{ MPa} \quad (N \geq 5.0 \times 10^6) \quad (1)$$

$$\text{GF: } \Delta \sigma^{7.27} \cdot N = 1.75 \times 10^{21} \quad (7.4 \times 10^5 \leq N < 5.0 \times 10^6) \\ \Delta \sigma = 100 \text{ MPa} \quad (N \geq 5.0 \times 10^6) \quad (2)$$

図-5 に GF の破断状況を示す。写真には、GFRP の剥離箇所を実線で囲って示し、目視で GFRP 越しに推定したき裂を一点鎖線で示した。試験片は、き裂が GFRP 貼付側溶接部の回し溶接部止端より発生し、試験片幅方向に進展したのち、破断に至った。目視により、GFRP は、き裂の進展に伴い、図-5(a), (b) のように剥離したことが確認された。それ故、疲労き裂が発生、進展すると、き裂近傍の GFRP は剥離すると結論できる。しかし、き裂

が GFRP を貼付した範囲を越えて進展した後も GFRP はき裂近傍以外は剥離することはない、最終的には図-5(c) のように破断した。このように、溶接ビード形状が複雑な回し溶接部でも、GFRP は試験片の破断まで完全に剥離することはない、GFRP は補強材として有用であると思われる。また、本研究における GFRP は良好な接着であったものと判断される。

3. GFRP を貼付した面外ガセット溶接継手の応力解析

3.1 解析方法

ここでは、面外ガセット溶接継手の溶接部に GFRP を貼付することにより、疲労寿命が改善されたことについて解析的に検討する。なお、この解析は、GFRP やプライマーの剥離あるいは破断が生じる前を想定している。

解析は 8 節点ソリッド要素を用いた弾性 FEM 解析である。解析モデルを図-6 に示す。解析対象は図-1 に示した

表-3 解析ケース

	tg※1 × Ng※2	tp※3
GN	—	—
GF	0.6×2	0.3

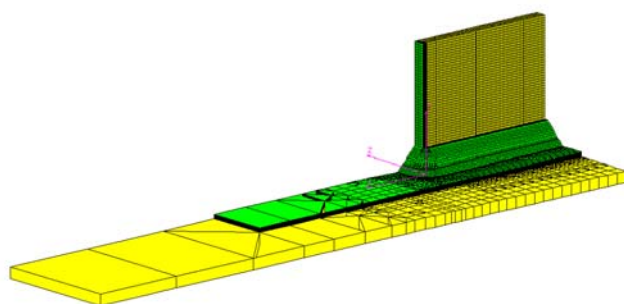
※1：GFRPの板厚(mm)

※2：GFRPの層数

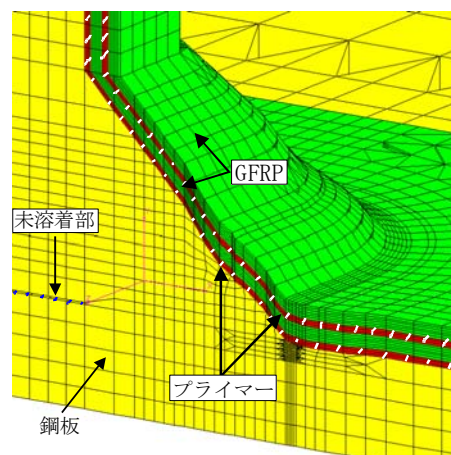
※3：プライマーの厚さ(mm)

表-4 材料の機械的性質

	弾性係数(MPa)	ポアソン比
鋼板(SM400A)	2.1×10^5	0.3
GFRP	1.4×10^4	0.34
プライマー	4.6×10^3	0.3



(a) 全体図



(b) 拡大図

図-7 有限要素分割の一例 (GF)

すみ肉溶接された面外ガセット溶接継手であり、解析モデルは対称性を考慮して解析対象の1/8モデルとした。解析対象の母材の長さは600mmであるが、解析モデルの長さが解析結果に及ぼす影響は少ないと考えられるので、解析モデルにおいては図-6に示すように母材の長さを短くすることとした。また、母材の長さ同様、ガセットの高さも、解析結果に及ぼす影響は少ないと判断し、解析対象のガセットの高さは100mmであるが、解析モデルでは50mmとした。疲労試験に使用した試験片においては、ガセットはすみ肉溶接によって母材に取り付けられているので、母材とガセットの間には溶接されていない部分（未溶着部と呼ぶ）があり、解析モデルにおいても母材とガセットの間に4.5mm×0.1mm×60mmの未溶着部を設けた。溶接止端近傍については、疲労試験に使用した試験片の溶接ビード形状をレーザ変位計により計測し、その結果を解析モデルに反映させた。

表-3に解析ケースを示す。解析は無補強モデルGNと厚さ0.6mmのGFRPをプライマー（厚さ0.3mmと仮定）を用いて溶接部に2層貼付した補強モデルGFの2ケースにつ

いて行った。なお、実験におけるGFにはGFRPを4層重ねて貼付したが、上の2層（図-2(a)のCLとCR）は荷重軸方向とガラス繊維方向が直交しており、荷重を負担していないと思われるので、解析におけるGFには、ガラス繊維の方向と荷重軸方向を等しくした2層（図-2(a)のLT）だけを貼付して解析することとした。GFRPの厚さ(0.6mm)は公称値である。

図-7に有限要素分割の一例を示す。最小要素サイズは0.100mm×0.056mm×0.900mmである。

荷重は母材端部の公称応力 σ_n が1MPaとなるように作用させた。解析に用いた材料の機械的性質を表-4に示す。表中のGFRPの弾性係数はガラス繊維方向の弾性係数である。本実験に用いたGFRPはガラス繊維が一方向に配置された異方性材料であるので、繊維と直交方向の弾性係数は表-4に示した値の1/10とした。

3.2 解析結果および考察

GNとGFの試験片幅中央の溶接部近傍の荷重軸方向応力分布を図-8に示す。荷重軸方向応力が2.1MPa以上の応

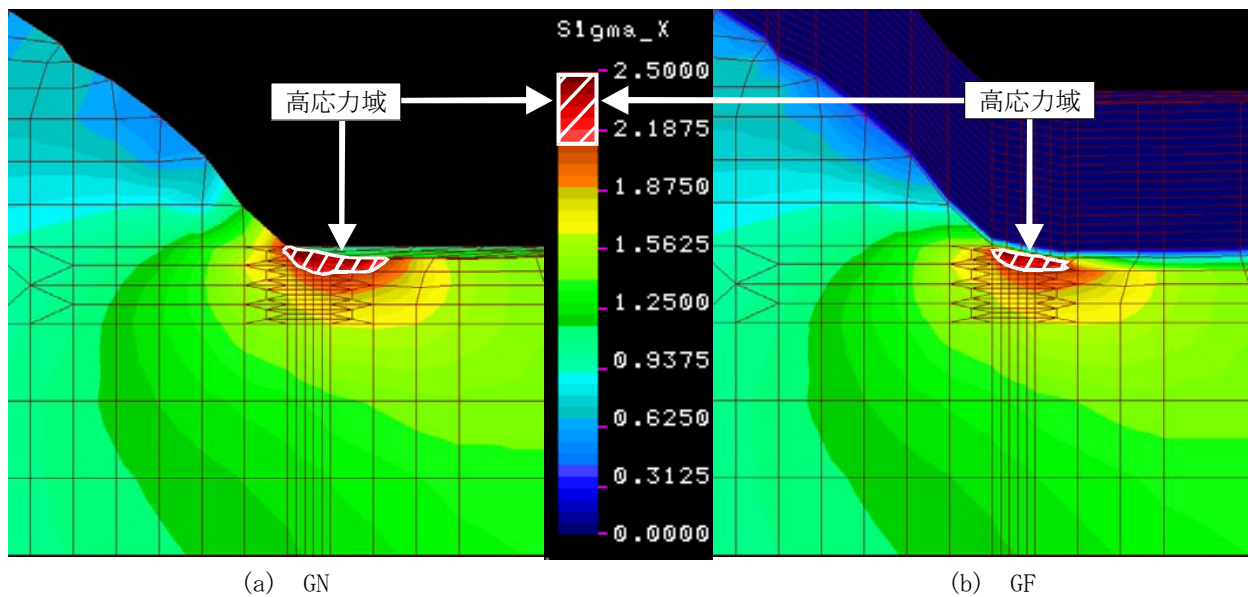


図-8 荷重軸方向応力分布

表-5 応力集中係数

	GN	GF
応力集中係数	3.43	3.31
GNとの比較	—	-3.5%

力域を高応力域と呼ぶこととすると、図より、GFでは高応力域がGNより若干緩和しているものの、大きな差はないことがわかる。GNおよびGFの荷重軸方向応力の応力集中係数およびGNとの比較を表-5に示す。表中の応力集中係数とは、回し溶接止端部の荷重軸方向応力の最大値を公称応力 σ_n で除した値である。表より、荷重軸方向応力の応力集中係数が、GFRPをプライマーで貼付することにより3.5%、無補強の場合より低減されているものの、プライマーを用いたGFRPの貼付は、回し溶接止端部の応力を低減させる効果は少ないことが確認される。

3.5%の応力集中係数の低減は、既報のように、GFRPが荷重を負担し、応力を低減させる効果とプライマーが溶接部を仕上げることに類似した効果の両方の効果によるためであると考えられるが、3.5%の応力集中の低減は僅かであり、応力集中係数3.43と3.31は溶接継手試験片においてはばらつきの範囲である²⁾。したがって、3.5%の応力集中の低減が実験結果に有意な差をもたらすとは言えず、図-4に示す疲労寿命の違いがこの応力集中係数3.43と3.31の違いに起因するとの説明は十分ではない。

また、応力集中に基づいた考察はき裂発生寿命に着目

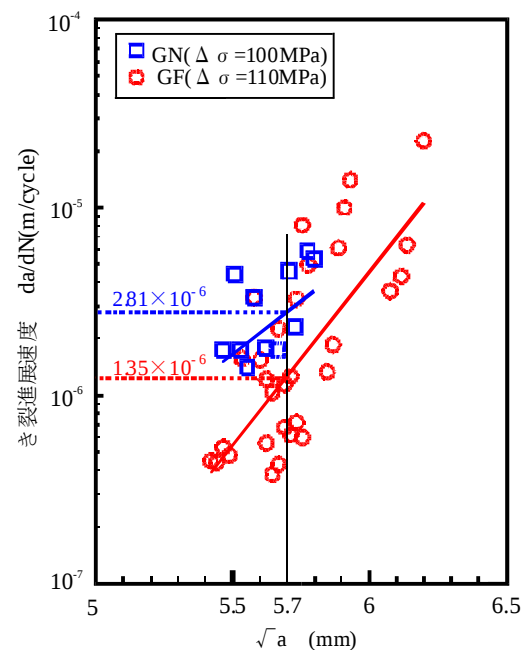


図-9 き裂進展速度と $\sqrt{a}$ との関係

したものであつてき裂進展寿命を考えたものではなく、応力集中係数3.43と3.31の溶接継手のき裂発生寿命の違いだけで図-4に示す結果になるとは考えられない。そこで、図-4の疲労寿命の増加を考察するためGFRPおよびプライマーがき裂の進展速度に及ぼす効果に着目することとした。

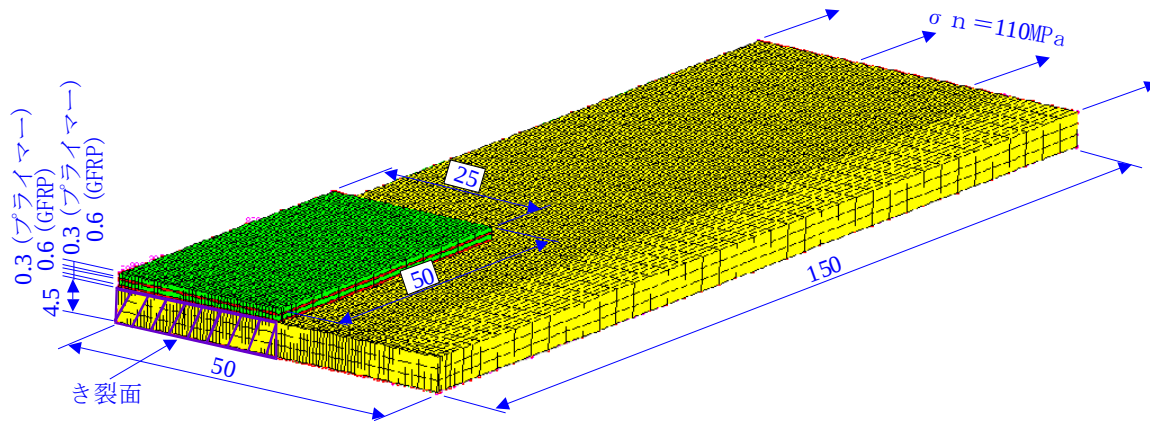


図-10 解析モデル(GFRP 貼付モデル)

4. き裂進展速度の抑制効果

応力集中に基づいた考察では図-4に示す結果を十分説明できないので、ここではき裂進展寿命に着目して検討することとする。

試験片 GN および GF におけるき裂の進展速度 da/dN とき裂長さの半長の平方根 $\sqrt{a}$ の関係を図-9 に示す。この図におけるき裂進展速度 da/dN はクラックゲージを用いて実験から求めたものである。図-9 の GN には $\Delta\sigma=100\text{MPa}$ のデータを使用し、GF については $\Delta\sigma=110\text{MPa}$ のデータを使用した。

図-9 より、GN と GF に明らかな違いがあることがわかる。一例として、き裂長さ $65\text{mm}(a=32.5\text{mm})$ のときのき裂進展速度 da/dN を求めてみると、

$$\text{GN} : da/dN = 2.81 \times 10^{-6} \text{ m/cycle} \quad (3)$$

$$\text{GF} : da/dN = 1.35 \times 10^{-6} \text{ m/cycle} \quad (4)$$

となり、GN は応力範囲 $\Delta\sigma$ が GF より 10MPa 低いにもかかわらず、同一のき裂長さに対して GN の進展速度は GF より明らかに速いことがわかる。

線形破壊力学によれば、応力拡大係数 K は一般に、

$$K = \sigma \sqrt{\alpha \pi a} \quad (5)$$

ここに、 σ : 作用応力

α : 試験片の形状とき裂の寸法によって定まる量

a : き裂長さの半長

で表される⁴⁾。

また、平面応力状態において作用応力 σ が降伏点 σ_Y より十分小さい場合、応力拡大係数 K とき裂開口変位 δ の間には

$$\delta = K^2 / (\sigma_Y \cdot E) \quad (6)$$

ここに、 E : 弾性係数

の関係があり、き裂進展速度と応力拡大係数範囲の間に

は、

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (7)$$

ここに、 C, m : 定数

の関係があることが知られている。

GF において、GFRP がき裂の開口を抑制したと考えると、式(6)より、GF の応力拡大係数 K は、同一のき裂長さの GN の応力拡大係数 K より小さくなる。式(6)の応力拡大係数 K およびき裂開口変位 δ は、それぞれ応力拡大係数範囲 ΔK およびき裂開口変位の範囲 $\Delta\delta$ と読み換えても差し支えないので、式(7)より、GF においては応力拡大係数範囲 ΔK が同じき裂長さの GN の ΔK より小さくなったため、き裂進展速度が遅くなったものと理解される。

ここで、上述の説明における仮定「GF において、GFRP がき裂の開口を抑制したと考えると」を有限要素法を用いて解析的に検証することとする。解析対象は、中央に板厚貫通き裂を有する平板 ($100\text{mm} \times 9\text{mm} \times 300\text{mm}$) であり、対象性を考慮し 1/8 モデルとした。き裂長さは、 50mm ($a=25\text{mm}$) から 78mm ($a=39\text{mm}$) までの 6 ケースとした。この解析においては面外ガゼットを考慮しなかった。GFRP の貼付範囲は、き裂中心から片側に、幅 25mm 、長さ 50mm とし、プライマーの厚さ、GFRP の板厚および層数は表-3 と同じとした。使用した要素はソリッド要素であり、作用荷重は公称応力 σ_n が 110MPa となる荷重とした。解析モデルの一例を図-10 に示す。

解析結果を図-11 に示す。図の横軸はき裂長さの半長 a (mm) であり、縦軸はき裂中央の荷重軸方向変位 δ (mm) である。図より、無補強の GN より GFRP をプライマーを用いて貼付した GF の開口変位が小さくなっていることがわかる。き裂長さ 65mm ($a=32.5\text{mm}$) の場合を例にとると、GN の開口変位は 0.46mm 、GF は 0.28mm であり、GF は GN の 61% に低減している。したがって、上

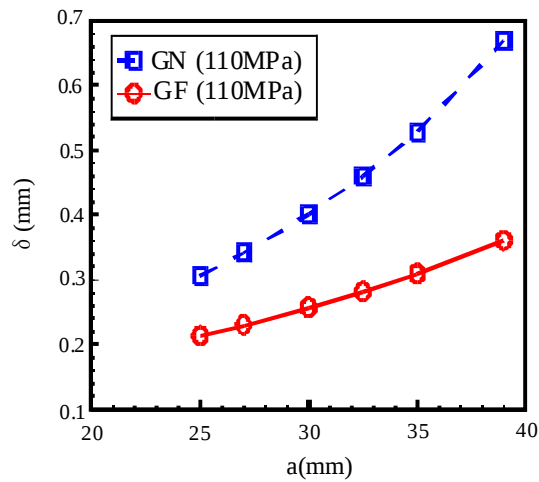


図-11 き裂の開口変位 δ とき裂長さの半長 a の関係

述の仮定「GFにおいて、GFRPがき裂の開口を抑制したと考えると」は妥当であると結論される。

図-9において、GFがGNよりき裂長さの長い領域まで測定できているのも、GFにおいてはGFRPが貼付してあったためであると説明される。すなわち、GFにおいてはGFRPが貼付してあったため、き裂開口変位の範囲 $\Delta\delta$ が小さくなり、式 (6) に示すように、それに伴って応力拡大係数範囲 ΔK も小さくなる。不安定破壊への移行は ΔK が限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{\max}$ に達したときに生じるので、GFの ΔK がGFRPを貼付することによって低減されるとGFにおいてはGNより長いき裂になるまで ΔK は $\Delta K_{\max}$ に達しない。その結果、GFはGNよりき裂長さの長い領域まで安定してき裂が進展し、不安定破壊への移行が遅くなったものと理解される。

以上より、GFの破断寿命がGNより増加したのは、GFRPがき裂開口変位を抑制する効果によるものであると判断される。

5. まとめ

本研究では、面外ガセット溶接継手の回し溶接部にGFRPをプライマーを用いて貼付することによる疲労寿命の改善について実験的に検討した。また、解析も実施した。結果を要約すると次の通りである。

- (1) 面外ガセット溶接継手の回し溶接部にGFRPをプライマーで貼付することにより、疲労寿命の改善が確認された。

- (2) GFRPは柔軟性に富んでいるので、溶接ビード止端近傍の複雑な形状でも、補強材として適用することが可能であり、実用化の可能性が示された。
- (3) GFRPを貼付して補強することによる疲労寿命の改善効果は、応力範囲の高い領域ではあまり認められなかったが、応力範囲の低い領域では補強効果が高いことが明らかになった。
- (4) GFRPをプライマーで貼付することによる疲労寿命の改善効果は、本研究の範囲においては、GFRPが疲労き裂発生後の進展速度を遅延し、疲労き裂進展寿命を改善した効果によるものと判断された。

謝 辞：試験片へのGFRPの貼付にあたってはサンコーテクノ(株)の協力を得た。記して、謝意とする。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会編：各種構造物の設計とその思想，1987。
- 2) 稲葉尚文，富田芳男，紫桃孝一郎，鈴木博之，岡本陽介：GFRPシート貼付によるリブ十字溶接継手の補強に関する一提案，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.89-100，2005.9。
- 3) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3。
- 4) 佐藤邦彦，向井喜彦，豊田政男：溶接工学，理工学社，1979。

(2007年9月18日受付)