

両振り塑性域寸法をパラメータとする疲労亀裂伝播 則構築に向けた基礎検討

炭田, 洸志
九州大学大学院工学府 : 修士課程

村上, 幸治
九州大学工学部技術部

松田, 和貴
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/7385549>

出版情報 : 溶接学会九州支部講演論文集. 22, pp. 5-8, 2025. 溶接学会九州支部
バージョン :
権利関係 :



両振り塑性域寸法をパラメータとする疲労亀裂伝播則構築に向けた基礎検討

○炭田洸志*1, 村上幸治*2, 松田和貴*3, 後藤浩二*3

Key Words: 疲労, デジタル画像相関法, 両振り塑性域寸法, ヒステリシスループ

1. 結 言

機械装置や鋼構造物などの工学構造物は、使用中に繰返し荷重を受けることで疲労亀裂が発生・進展し、降伏応力を大きく下回る応力条件下でも破壊に至ることがある。そのため、疲労破壊を防止するには、実用的かつ高精度な疲労亀裂伝播則の確立が重要な課題である。

疲労亀裂伝播則としては、破壊力学に基づく応力拡大係数範囲 ΔK を用いた Paris 則¹⁾が広く知られているが、変動荷重履歴条件下での亀裂成長履歴推定の精度が劣ることから、 ΔK の代わりに疲労亀裂に特有の亀裂開閉口挙動を考慮した有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} ²⁾や、亀裂先端近傍で生じる引張・圧縮の両振り塑性仕事と一義的な関係を有する RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} ³⁾をパラメータとする疲労き裂伝播則が提案され、疲労亀裂成長履歴の推定精度が改善している。しかし、実際の構造物に生じた疲労亀裂において亀裂進展の各段階における応力拡大係数 K を算出することに加え、構造物中に存在する疲労亀裂の開閉口挙動を評価して ΔK_{eff} や ΔK_{RPG} といったパラメータを算定することは困難である。

一方、平ら⁴⁾は、繰返しすべり帯の寸法と疲労亀裂伝播速度との関係を光学顕微鏡による直接観察から明らかにし、塑性域寸法に基づく伝播則の有効性を示している。また、豊貞らは疲労亀裂先端近傍に形成される引張および圧縮の塑性域が重なる領域寸法である両振り塑性域寸法 $\tilde{w}$ との間に ΔK_{RPG} が一意的な関係が成り立つことを、亀裂結合力モデルに基づくシミュレーションにより示している。これらの結果は、両振り塑性域寸法 $\tilde{w}$ は ΔK に代わる疲労亀裂伝播則を律するパラメータとして使用できることが示唆される。

両振り塑性域寸法 $\tilde{w}$ の実測に関して、勝田ら⁵⁾は PIV 法による画像処理を用いた結果を報告している。また、Gonzales ら⁶⁾はデジタル画像相関法（DIC 法）を用いて $\tilde{w}$ が、疲労亀裂伝播を記述するパラメータとして有効であることを実験的に示した。類似の測定事例として、米澤ら⁷⁾は DIC 法により亀裂先端近傍のひずみ場の測定結果を報告しており、この測定結果をもとに、局所ひずみに着目し疲労亀裂の発生寿命や伝播速度の推定にも取り組んでいる。これらのように、亀裂先端近傍の塑性挙動に着目したパラメータの実測の評価に近年注目が集まりつつある。山崎ら⁸⁾やアキノら⁹⁾も DIC 法を用いて $\tilde{w}$ の測定を試みたが、表面ひずみの参照点とするために塗布するスペckルパターンが粗いことや、亀裂先端の特定手法が確立されていないことなどから、測定精度の向上にはなお課題が残されている。

本研究では、先行研究^{8, 9)}に基づく DIC 解析結果、手法を活用し、広範囲の ΔK における両振り塑性域寸法 $\tilde{w}$ を定量的に取得した。その後、疲労亀裂進展ステージⅡにおける両振り塑性域寸法 $\tilde{w}$ をパラメータとした新たな疲労亀裂伝播則の構築に向けた基礎的検討を行う。

2. 供試材及び試験方法

板厚 12.5mm の溶接構造用圧延鋼材 SM490A (JIS-G3106¹⁰⁾) を供試材とした。SM490A の化学組成および機械的性質を Table 1 に示す。

疲労試験片は Fig. 1 に示す CT 試験片を使用した。CT 試験片の機械切欠き全長は 20 mm であり、機械切欠き先端の 2 mm 分のみ放電加工にて幅 0.2 mm に加工が施されている。この際、疲労試験中の疲労亀裂周辺のひずみ場は DIC 法により測定した。試験片表面には白色スプレーで下地を塗装した後に黒色スプレーを噴霧したも

原稿受付 2025 年 9 月 12 日, 2025 年度九州支部研究発表会で発表

*1 九州大学 大学院工学府 修士課程 Master course, Graduate School of Engineering, Kyushu University

*2 九州大学 工学部技術部 Technical Division, School of Engineering, Kyushu University

*3 正 員 九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門 Member, Department of Marine System Engineering, Kyushu University

の、試験片加工時の機械研削肌に3%ナイトール液でエッチングしたもの、鏡面研磨仕上げしたのちに3%ナイトール液でエッチングしたもの、それぞれ3種類のスペckルパターンを施し、DIC解析用マーカーとした。解析マーカーを施した試験片表面の撮影画像をFig. 2に示す。

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SM490A.

Chemical composition [mass %]					Mechanical properties	
C	Si	Mn	P	S	Yield stress [MPa]	Tensile strength [MPa]
0.11	0.26	1.28	0.014	0.003	391	522

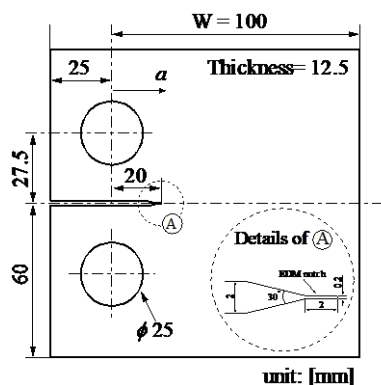
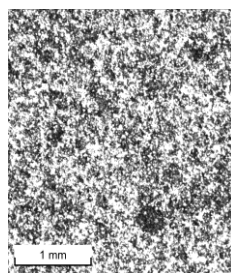
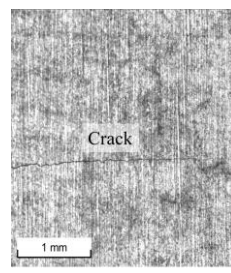


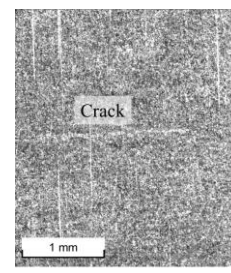
Fig. 1 Geometry of CT specimen.



(a) White and black spray paint.



(b) 3% nital etching solution.



(c) Etched with 3% nital after polishing.

Fig. 2 Image of the specimen surface with analytical markers.

デジタル画像の撮影には、高感度デジタルハイスピードカメラ HAS-DX を、レンズには VS-LTC3.3- 45/FS を使用し、フレームレートを 1000 fps とすることで周波数 10 Hz のまま、载荷中に撮影を行った。DIC 解析の条件を Table 2 に示す。疲労試験は、50 kN 油圧式サーボ試験機を用いて、室温、大気環境下で、周波数 10 Hz、正弦波形で一定振幅の繰返し負荷を実施した。疲労試験条件を Table 3 に示す。

Table 2 DIC analysis conditions.

Test ID	SM490-242	SM490-243, 244
Image size [pixel]	1920 × 1080	
Image resolution [μm/pixel]	3	
Subset size [pixel]	37	
Step size [pixel]	9	3
Filter size [pixel]	9	3
Reference image	At minimum load	

Table 3 Fatigue test conditions.

Test ID	SM490-242	SM490-243	SM490-244
Maximum load [kN]	9.7		
Stress ratio	0.1		
Crack length [mm]	28.0 ~ 40.4	24.0 ~ 42.0	32.2 ~ 65.1
Stress intensity factor range [MPa·m ^{0.5}]	11.8 ~ 16.2	10.6 ~ 17	13.1 ~ 37.4
Speckle pattern printing	White and black spray paint	3% nital etching solution	Etched with 3% nital after polishing

3. 両振り塑性域の同定方法

両振り塑性域寸法 $\hat{w}$ を決定するためには、両振り塑性域先端位置と亀裂先端位置の2点の座標が必要となる。一例として試験体 SM490-243、亀裂長さ 42 mm における両振り塑性域寸法 $\hat{w}$ について、以下に説明する。亀裂先端位置に関しては試験片毎に2種類の方法で決定した。試験体 SM490-242 に関しては、試験片をカメラにて撮影した測定画像から目視で観察し決定した。また、試験体 SM490-243、SM490-244 においては Fig.3 に示す DIC 法を用いて測定した Y 方向変位分布を基に決定した。X-Y 平面上の各位置における Y 方向変位を Z 軸にプロットしたグラフを Fig.4 に示す。Fig. 4 に示すように実亀裂部を含む領域では y 方向変位の変化量が周囲と比べ顕著に大きくなる領域の先端位置を実亀裂先端と決定した。

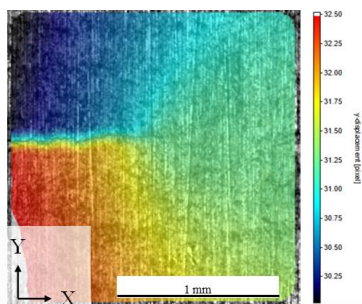


Fig. 3 Y-displacement contour near the crack tip.

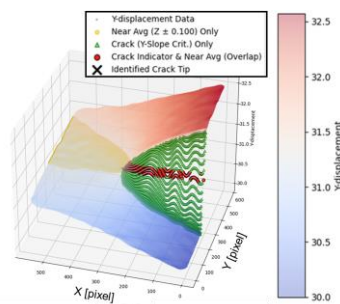


Fig. 4 3D plot of the Y-displacement near the crack tip.

両振り塑性先端位置は DIC 法を用いて測定したひずみ分布を用いて決定した。亀裂先端近傍のひずみ分布の測定例を Fig. 5 に示すが、典型的なバタフライ形のひずみ分布が確認された。亀裂線上のひずみの値に除荷弾性コンプライアンス法を適用し、ロードセルから得た荷重との関係からヒステリシスループを取得した。Fig. 6 に得られたヒステリシスループの一例を示す。なお、ID-1 は亀裂先端、ID-2 は亀裂先端からの距離が 0.045 mm、ID-3 が 0.090 mm の地点におけるループである。両振り塑性域内では Fig. 4 ID-1 のように膨らんだ形状となり、亀裂先端から遠ざかるにつれて Fig. 6 ID-3 のように次第に潰れた形状へ遷移し弾性状態ではほぼ線形になる。ヒステリシスループの幅の変化を評価するため、山崎ら⁷⁾は、亀裂線上の任意の位置について荷重と引算ひずみの関係における標準偏差を計算し、亀裂先端からの距離と標準偏差の分布を求め、値が収束する位置を求めることで $\tilde{a}$ を決定する手法を提案した。本研究においても同手法により DIC 解析画像から両振り塑性先端位置を決定した。荷重と引算ひずみの関係における標準偏差の推移を Fig. 7 に示す。

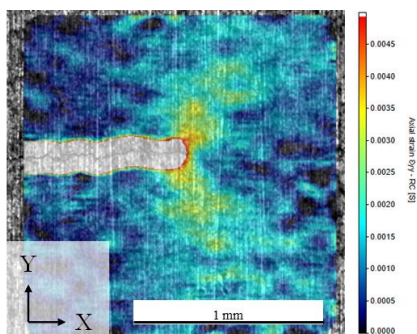


Fig. 5 Strain contour near the crack tip.

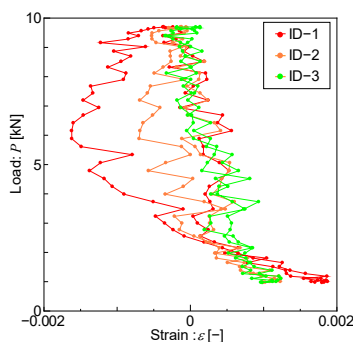


Fig. 6 Relationship of load and strain.

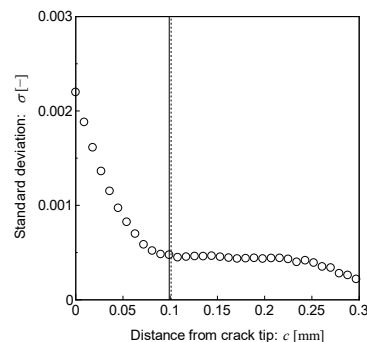


Fig. 7 Standard deviation of subtracted strain on the crack line.

4. 測定結果

DIC 法によって得られた $\tilde{a}$ と ΔK の関係を整理し、豊貞らによる亀裂結合力モデルに基づく疲労亀裂伝播シミュレーションプログラムにて計算した $\tilde{a}$ と ΔK の関係と比較したグラフを Fig. 8 に示す。SM490-242 の測定点においては、数値シミュレーションと比較して、同一の ΔK に対して両振り塑性域寸法が大きく測定された。目視によって決定した亀裂先端位置が不正確であり誤差が大きくなったと考え、SM490-242 を除いた他の測定点を用いて最小二乗法により求めた近似直線は、計測結果と良好に一致した。これは先の研究⁹⁾と比べ、スペckルパターン塗布方法の改良、実亀裂先端位置の決定方法の確立により、両振り塑性域の推定精度を改善できたためであると考えられる。次に RPG 荷重基準の応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} と両振り塑性域寸法 $\tilde{a}$ の関係を両対数グラフで整理したものを Fig. 9 に示す。 ΔK_{RPG} と $\tilde{a}$ の関係は両対数グラフ上で線形であることが確認できる。両振り塑性域寸法 $\tilde{a}$ と亀裂進展速度 da/dN の関係を Fig. 10 に示す。SM490-242 の測定点を除くと数値シミュレーション結果と良好に一致した。以上の結果から $\tilde{a}$ は疲労亀裂進展則に使用する亀裂進展パラメータとして有用であり、亀裂先端における塑性挙動が考慮されていることから、変動荷重下でも適用できる可能性が示唆される。

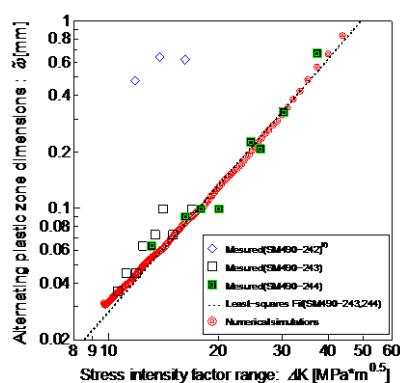


Fig. 8 Relationship between stress intensity factor range and alternating plastic zone dimensions.

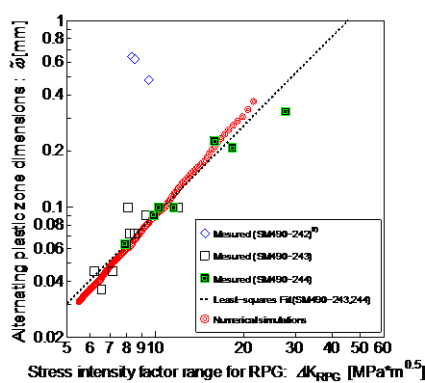


Fig. 9 Relationship between RPG based stress intensity factor range and alternating plastic zone dimensions.

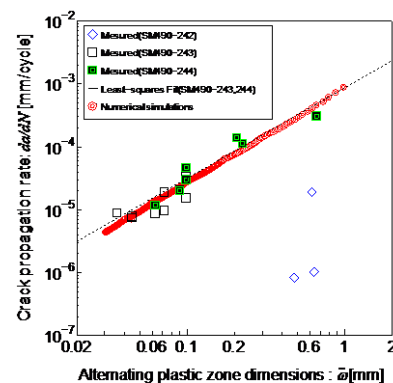


Fig. 10 Relationship between crack propagation rate and alternating plastic zone dimensions.

5. 結 言

本研究では、DIC 解析結果、手法を活用し、広範囲の ΔK における両振り塑性域寸法 $\deltā$ を定量的に取得後、疲労亀裂進展ステージⅡにおける両振り塑性域寸法 $\deltā$ をパラメータとした新たな疲労亀裂伝播則の構築に向けた基礎的検討を行った。以下に本研究で得られた知見ならびに考察を示す。

- 1) 両振り塑性域先端位置を精度よく決定するため、表面処理を改良し、より微細なスペックルパターン付与方法を提案、検証した。
- 2) 亀裂線直交方向の変位方向を用いた実亀裂先端位置の決定法を提案、検証した。
- 3) 亀裂進展パラメータである ΔK 、 ΔK_{RPG} と DIC 法から得られた $\deltā$ の関係を整理した結果、両対数グラフで線形関係となった。また、数値伝播シミュレーションの結果と良好な一致を示した。
- 4) これらの結果から両振り塑性域寸法 $\deltā$ に基づく疲労亀裂伝播則が有用である可能性が示唆された。

今後の疲労亀裂伝播則の構築には、広範囲でより高精度かつ高密度なピッチでの DIC 測定、応力比の異なる条件下での実験における測定が望まれる。

6. 謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 JP23K26319 の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) P. C. Paris and F. Erdogan : A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, Series D, Vol.85, No.4, pp.528-534, 1963.
- 2) W. Elber : The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP-486, pp.230-242, 1971.
- 3) M. Toyosada, K. Gotoh and T. Niwa : Fatigue crack propagation for a through thickness crack : a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip, International Journal of Fatigue, Vol.26, No.9, pp.983-992, 2004.
- 4) 平修二, 田中啓介 : 光学顕微鏡による冷間圧延加工した低炭素鋼材の疲労き裂伝播過程の観察, 材料, Vol.18, No.190, pp.620-626, 1968.
- 5) 石井成政, 白石麻理子, 勝田順一 : PIV 法による CT 型試験片の疲労亀裂伝播中の挙動評価, 溶接学会九州支部講演論文集, No.14, pp.35-38, 2017.
- 6) Gonzales, Giancarlo L. Gomez, et al. Experimental determination of the reversed plastic zone size around fatigue crack using digital image correlation. Theoretical and Applied Fracture Mechanics pp.125, 2023.
- 7) 米澤隆行, 羅鵬軍, 堤成一郎 : 局所ひずみに基づく繰返し軟化特性の異なる構造用鋼の疲労亀裂発生・伝播特性評価, 鉄と鋼, Vol.110, No.1, pp.15-24, 2024.
- 8) 山崎真尚, 村上幸治, 後藤浩二 : デジタル画像相関法を用いた疲労亀裂先端近傍の両振り塑性域寸法の測定, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, No.25, 2017A-GS2-14, pp.341-346.
- 9) アキノトーレス ルイス, 村上幸治, 松田和貴, 後藤浩二 : デジタル画像相関法を用いた両振り塑性域寸法の測定精度向上に向けた検討, 溶接学会九州支部講演論文集, 21, pp. 1-4, 2024.
- 10) JIS G 3106, 溶接構造用圧延鋼材, 2015.