

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656533

研究課題名(和文)溶接構造体に対する非接触・累積ダメージ予測システムの確立

研究課題名(英文)Prediction system of accumulated damage without contact for welded structures

研究代表者

堤 成一郎 (Tsutsumi, Seiichiro)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号：70344702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：各種溶接構造体の疲労設計の高度化を目指した研究は、国内外で盛んに行われてきた。しかし、その多くは実験力学的もしくは破壊力学的手法を用いた研究が主流であり、設計上も極めて重要な疲労き裂の発生段階を合理的に解明し得る理論的研究は少ない。本研究では溶接構造体を対象として、き裂発生の前駆段階に負荷応力および繰返し数に応じて変化する塑性ひずみと残留応力を計測するとともに、非線形弾塑性FEM解析技術により予測される塑性ひずみの大きさと残留応力解放挙動との関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Predicting the mechanical fatigue phenomena of materials subjected to cyclic stresses, the mechanisms on generation and accumulation of inelastic deformation has to be clarified. In this study, numerical study based on both macro- and crystal-plasticity FE modeling are conducted to evaluate the mechanical responses under cyclic loading condition. Then, the effects of inclusions on the fatigue behavior at the stress level lower than the yield stress, i.e macroscopically elastic condition, was simulated and compared with the experimental result of a carbon steel.

研究分野：船舶海洋工学

科研費の分科・細目：材料・構造力学

キーワード：疲労 塑性 き裂 数値解析

1. 研究開始当初の背景

船舶・海洋構造物、橋梁、鉄道車両、高層ビル、海上空港等、多くの大型構造物が社会インフラとして活用されているが、現在でも多くの疲労損傷が報告されている。道路鋼製橋脚で多くの疲労損傷が生じ、補修に多大な労力を要し続けていることは記憶に新しい。

社会インフラの疲労損傷は大規模死亡事故を誘発する事もあり、大型溶接構造物における疲労損傷事故を防止することは、豊かかつ安全な社会活動を営むために、極めて重要な課題である。

従来法に則って、一定荷重振幅下で得られる疲労設計曲線 (S-N 曲線) を用いて疲労強度設計をする場合、個々の機械・構造物が受ける荷重履歴の影響を評価できない、また疲労事例の多くは、降伏応力 (もしくは弾性限) よりも小さく、低回数繰返し応力下で得られた応力-ひずみ関係からは、塑性変形が確認されない、いわゆる“巨視的弾性”の繰返し応力に伴う疲労き裂の発生と、その後の伝播挙動に支配されているにもかかわらず、そのプロセスが全く考慮されていない、という二つの大きな問題が挙げられる。

一方、疲労設計の高度化を目指した研究は、これまで国内外で盛んに行われてきた。しかし、初期き裂 (もしくは切欠き) の存在を前提として、き裂の進展だけを対象とする、破壊力学的手法を用いた研究が主流であり、巨視的弾性応力下の疲労き裂発生を解明し得る理論的研究は極めて限定的である。

つまり、疲労設計の高度化には、巨視的弾性の繰返し応力による疲労き裂の発生メカニズムを解明し、荷重履歴の影響も含めて、“疲労き裂の発生から、伝播までの寿命を定量的に評価可能なシステムの確立”が極めて重要である。

2. 研究の目的

各種機械・構造物の疲労き裂発生・伝播寿命を支配する重要な力学的因子の一つに繰返し応力に伴う塑性ひずみの発生とその累積が挙げられる。一般に材料の降伏応力よりも大きな繰返し応力が作用する、いわゆる“低 (もしくは極低) サイクル疲労”試験中に計測された応力-ひずみ曲線内には、ヒステリシス・ループなどの塑性変形が確認され、それらの表現を目的とした材料構成式は数多く提案されている。なお、疲労中に計測される塑性ひずみ振幅と疲労き裂発生寿命 (N) との相関は特に高く、いわゆる Manson-Coffin 則の成立として示されている。一方、比較的小さな繰返し応力が作用する“高サイクル疲労”試験中には、小繰返し回数間に計測された応力-ひずみ曲線からは明瞭な塑性変形が確認されず、いわゆる“巨視的弾性”応答を示す。しかし、巨視的弾性条件下の一定両振り繰返し応力によっても、サイクル数の増加に伴って突如塑性ひずみが発生し、その後疲労き裂発生に至る。巨視的弾性条件下を含む任意の変動

荷重下に適用可能な材料構成モデルが構築されれば、モデルに基づく疲労き裂発生規準の確立が可能になる。さらに有限要素法などの数値解析手法へ導入することにより、通常非線形変形解析の延長線上で疲労き裂発生から伝播に至る一連のシミュレーションが可能となり、疲労寿命評価に対する極めて有力な手法となり得る。

一方、これまで巨視的弾性条件下の疲労き裂発生予測手法の確立を目的として、転移動力学考察に基づく研究が行われている。そこでは可動転位密度や転位の移動平均距離など、材料の内部構造に関するある程度の情報を元に繰返し数と塑性ひずみ振幅の関係を規定する、いわゆるロジスティック曲線に基づいている。

本稿では、供試材料 SM400B を用いた完全両振り繰返し載荷試験により得られた応力-ひずみ関係を対象として、ロジスティック解析応答との照査を行なった研究結果について詳説する。ここでは特に、繰返し載荷に伴うダメージの蓄積と塑性ひずみ急増現象、繰返し軟化後の硬化現象との関係について考察を行う。

3. 研究の方法

建築構造用圧延鋼材である SM400B を供試材料として、砂時計型の丸棒試験片を用いた一軸引張および両振り繰返し載荷試験を室温大気環境中にて行った。なお、何れの試験も JIS 規格の静的試験条件に準拠して、試験機アクチュエータのヘッド変位速度を 0.0066 (mm/sec) 一定として、ロードセルによる荷重に加え、1 軸 2mm のゲージを用いて最小断面位置でのひずみを計測した。なお、繰返し載荷試験時に採用する各種パラメータの定義を図-1 に示している。ここで、応力ゼロにおける引張り側ひずみループの幅 ($\Delta \epsilon^p$)、ループ中央位置における軸ひずみの値、また $\Delta \epsilon^p$ の積算値の 2 倍を $\Delta \epsilon^p$ とした。実験により得られた代表的な公称応力-ひずみ関係を図-2 に示している。単調載荷試験により得られた上降伏応力 (412MPa) の約 0.74 倍の応力を最大公称応力 (303MPa) とする両振り繰返し試験により得られた特定回における公称応力-ひずみ関係を図-3 に示している。

また、繰返し載荷回数 N と各種パラメータの関係を図-4 に示している。これらの図より、繰返し回数 N が 400 回程度までは、ほぼ弾性的な応答を示すが、その後 N の増加に伴って $\Delta \epsilon^p$ 値が急増する結果が得られた。さらに、サイクル数が 700 回程度になると、ひずみの発生は次第に減速傾向に転じ、1000 サイクル程度で $\Delta \epsilon^p$ 値がほぼ一定になる、いわゆる塑性シェイクダウンの状態に達した。

先の図-4 に示した結果を含めた 4 ケースの繰返し荷重時のサイクル数 N と塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon^p$ の計測結果を図-5 に示している。この図より、応力振幅が小さくなるにつれて、塑性ひずみ急増に至るまでのサイクル数 N が多くな

り、その際に発生するひずみは小さくなる結果を得た。なお、高い繰返し応力側の塑性ひずみ幅はサイクル数の増加と共に減少する結果を得た。

4. 研究成果

(1) ロジスティック曲線

先の実験結果に示されたように、軟鋼に対する観測によると、一定応力振幅・高サイクル疲労下のき裂発生までには、初期に塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon^p$ がほぼゼロである巨視的弾性の第I段階、 $\Delta\varepsilon^p$ が急増する第II段階、 $\Delta\varepsilon^p$ がピークを向かえた後、載荷応力によっては $\Delta\varepsilon^p$ が次第に減少する段階IIIに分類できる。また、転位動力学的には段階IからIIの間は、転位が急激に増殖すると共に、局部的な塑性変形領域が試験片全体に拡大していく段階であると言われている。また、この間の全転位密度 ρ_t は単調に増加し、 $\Delta\varepsilon^p$ のピーク時に ρ_t も飽和する。本節では以上の各段階を包括的に予測可能な解析モデルの定式化を目指す。

まず、疲労過程における塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon^p$ は、可動転位密度を ρ_m 、転位の平均移動距離を l とすると次式で与えられる。

$$\Delta\varepsilon^p = \rho_m l b \quad (1)$$

b はバーガースベクトル長さである。なお、可動転位密度 ρ_m は全転位密度 ρ_t の増加と共に次第に増加するが、 ρ_t は応力の繰返しに伴う転位の増殖と、それに伴って転位同士が会う確立が高くなり異符号転位の相互消滅が競合した結果として存在していると考えられる。

次に、繰返し荷重が作用して転位密度が増加すると転位が移動しにくくなり、可動転位の移動距離が減少すると、本研究では a を比例定数とする次の関係を仮定する。

$$l = \frac{a}{\sqrt{\rho_t}} \quad (2)$$

また、全転位密度 ρ_t に対する可動転位密度 ρ_m の割合を r として、次の関係を仮定する。

$$\rho_m = r \rho_t, \quad (0 < r < 1) \quad (3)$$

以上の式(2)および(3)を式(1)に代入すると、

$$\Delta\varepsilon^p = a \sqrt{r \rho_m} l \quad (4)$$

が得られる。なお、転位の二重交差すべり機構に関する考察によれば、正負の転位は同数作られ、応力が高くなる程その数は多くなるので、それだけで消滅する転位の割合も多くなるものと考えられる。そこで本研究では r の具体形として σ_a を一定繰返し応力、 σ_y を材料定数とする次式を提案する。

$$r = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_y} \right)^\gamma \quad (5)$$

ここで、 σ_y は材料の降伏応力である。

次に、繰返し数と ρ_m の関係についてモデル化する。一般に ρ_m が増加すれば転位同士が会う確立が高くなり、正負の転位によって消

滅が生じる。これまで、繰返し負荷の1サイクル当たりの ρ_m の変化として次式が導出されている。

$$\frac{d\rho_m}{dn} = \alpha \rho_m - \beta \rho_m^2 \quad (6)$$

上式を初期可動転位密度 $\rho_m = \rho_{m0}$ をもとに解けば

$$\rho_m = \left(\frac{\beta}{\alpha} + C \exp(-\alpha n) \right)^{-1} \quad (7)$$

ここに、

$$C = \frac{1}{\rho_{m0}} - \frac{\beta}{\alpha}$$

式(7)は、いわゆるロジスティック曲線と呼ばれる。しかし、式(7)は初期に塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon^p$ の潜伏期を示し、その後急増して一定値に漸近する曲線を表すのみで、段階IIIで見られるような塑性ひずみ幅の減少傾向を表すことができない。なお、段階IIIでは繰返し応力が作用して全転位密度 ρ_t が増加する間に点欠陥が形成され、それに起因する短範囲の摩擦応力の増加によって可動転位が移動しにくくなり、結果的に平均自由行程が減少すると考えられている。

そこで、式(6)の可動転位消滅項に $(1 + \kappa n)$ の補正係数を追加した次式が提案されている。

$$\frac{d\rho_m}{dn} = \alpha \rho_m - \beta (1 + \kappa n) \rho_m^2 \quad (8)$$

上式を解くと次式が得られる。

$$\rho_m = \left(\left(\frac{\beta}{\alpha} - \frac{\beta \kappa}{\alpha^2} \right) + C \exp(-\alpha n) + \frac{\beta \kappa}{\alpha} n \right)^{-1} \quad (9)$$

ここで、 α は塑性ひずみ幅が増加するときの繰返し回数、 β は可動転位の消滅係数、 κ は荷重1サイクル辺りの硬化量を表している。また、式(9)は次式で近似される。

$$\rho_m = \left(\frac{\beta}{\alpha} + \frac{1}{\rho_{m0}} \exp(-\alpha n) + \frac{\beta \kappa}{\alpha} n \right)^{-1} \quad (10)$$

なお本研究では、一定応力振幅下の初期可動転位密度 ρ_{m0} として、式(3)より得られる次式で与える。

$$\rho_{m0} = R \rho_{t0} \quad (11)$$

以上、式(4)および(10)より、繰返し数の増加に伴う可動転位密度 ρ_m の変化がわかれば塑性ひずみ幅の変化がわかる。なお、式(4)中の比例定数 a は単位大きさ1としても実験結果とのフィッティング上問題はなく、ロジスティック曲線は α 、 β 、 γ および κ の4つのパラメータを用いて評価される。

(2) 実験結果の比較

解析に用いた材料定数のうち、 ρ_{t0} および b は鋼について通常用いられる測定値 3.48×10^5 ($1/\text{mm}^2$)および 2.48×10^{-7} (mm)をそれぞれ用いた。本研究で得られた実験結果を元に、材料の降伏応力は $\sigma_y = 412$ (MPa)とした。また、式(5)中の材料定数は $\gamma = 6$ を採用した。応力

振幅 σ_a に依存するパラメータは表-1のように設定した。

表-1 ロジスティック解析パラメータ

σ_a (MPa)	α (1/cycle)	β (mm ² /cycle)	κ (1/cycle)
360	1.2×10^{-1}	3.0×10^8	8.0×10^{-4}
340	3.5×10^{-2}	4.2×10^7	1.0×10^{-4}
303	1.5×10^{-2}	1.4×10^7	2.0×10^{-5}
263	3.5×10^{-3}	1.4×10^6	-

4種類の繰返し応力に対して計算された塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon^P$ と実験結果の比較を図5および6に示している。なお、 $\kappa=0$ 時の計算結果も合わせて示している。この図より、荷重初期にはそれぞれ小さな塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon^P$ を呈しているものの、サイクル数の増加と共に急激に $\Delta\varepsilon^P$ 値が増加しピーク値に近づく。また、応力振幅 σ_a が大きいほど立ち上がり早く、その値も大きくなる挙動が予測されている。さらに、 κ の導入により応力振幅 σ_a が大きい場合に計測されるピーク後の塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon^P$ の減少も適切に再現されている。ただし、ロジスティック曲線を用いた解析では、塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon^P$ を予測するのみで、材料の応力-ひずみ関係は予測されないことに注意が必要である。

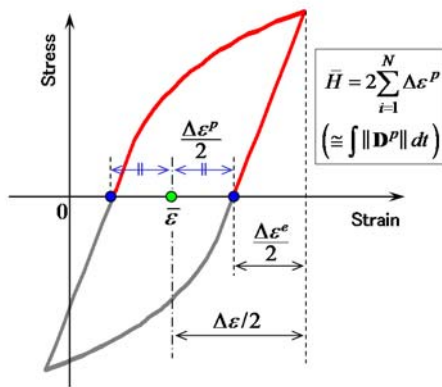


図-1 各種パラメータの定義

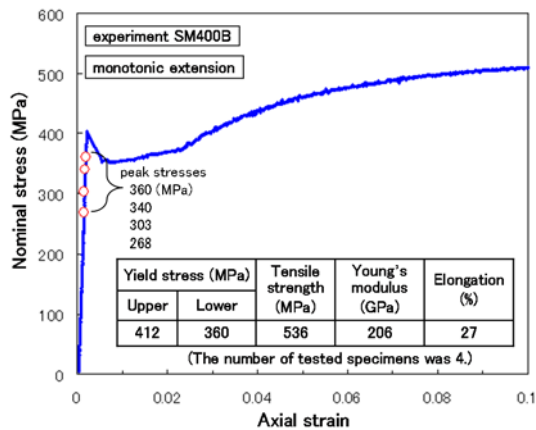


図-2 単調引張荷条件下の応力-ひずみ関係

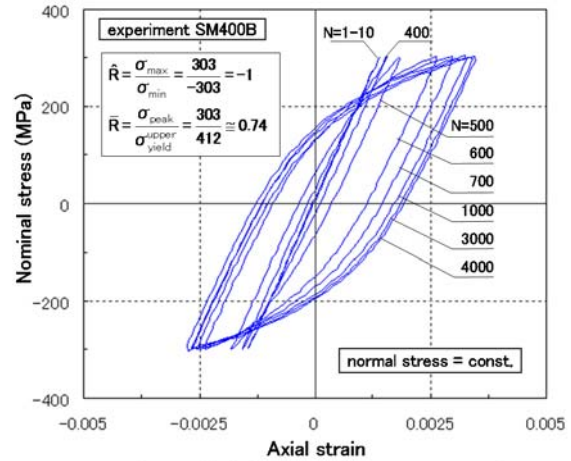


図-3 繰返し荷条件下の応力-ひずみ関係

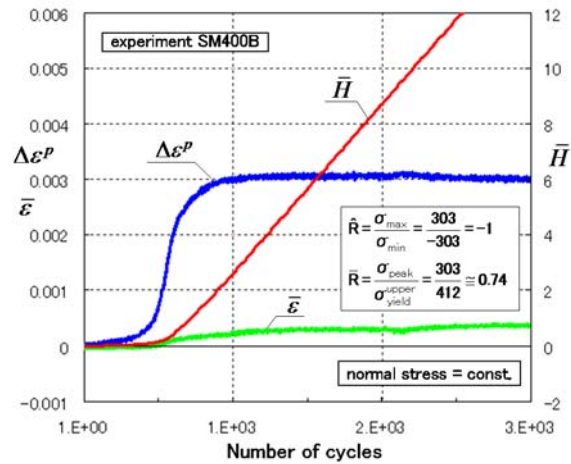


図-4 繰返し荷回数と各種パラメータの関係

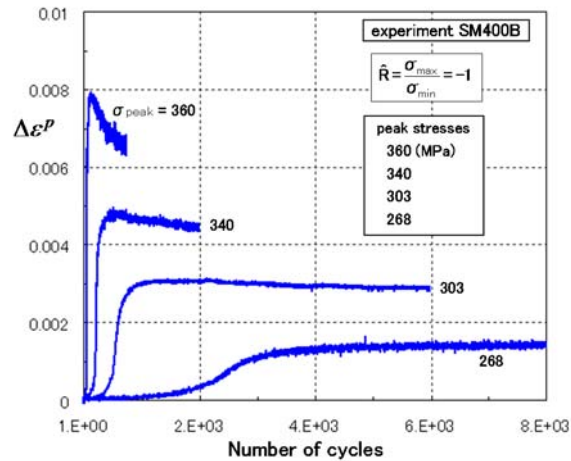


図-5 繰返し荷回数Nと塑性ひずみ幅変化の関係

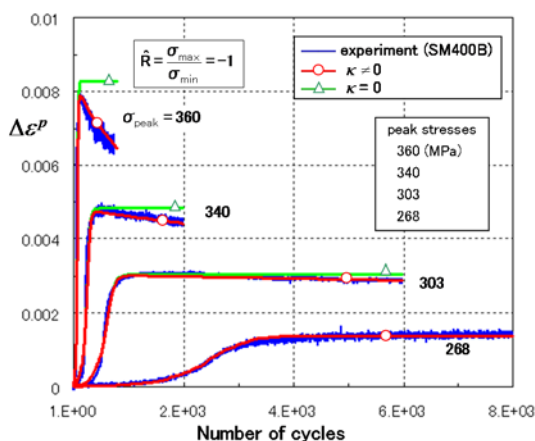


図-6 繰返し载荷回数 N と塑性ひずみ幅変化の関係 (実験結果, 計算結果 $\kappa=0$ and $\kappa \neq 0$)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 堤成一郎, 大和真征, 後藤浩二, 渡邊育夢, Fionn Dunne, 結晶塑性 FE 解析による巨視的弾性応力下の繰返し軟化挙動の考察, スマートプロセス学会誌, 2, 3(2013), 123-127
- ② 渡邊育夢, 細川明秀, 堤成一郎, 有限要素解析による複合組織鋼の力学挙動評価, スマートプロセス学会誌, 2, 3(2013), 119-122
- ③ Tsutsumi, S., Prediction of fatigue crack initiation life by an extended cyclic plasticity model with damage counting parameter, Asia Pacific IIW International Congress, (2013)
- ④ Tsuboi, K., Tsuchiyama, T., Takaki, S., Tsutsumi, S., Mechanical properties of strength-gradient steel sheets produced by solution nitriding, ISIJ International, 52, 10(2012), 1872-1878
- ⑤ Tsutsumi, S., Mechanical response of an extended cyclic plasticity model under multi-step variable amplitude loading condition, Transactions of JWRI, 41, 2, (2012), 69-74

[学会発表] (計 5 件)

- ① Tsutsumi, S., Riccardo Fincato, Kenjiro Terada, Tomohiro Ishida, Effect of mechanically induced phase transformation on local stress distribution predicted by a crystal FE analysis, International Symposium on EcoTopia Science 2013, Nagoya, Japan, P-10-24

- ② Tsutsumi, S., Fincato, R., Convergence of Cutting-Plane Algorithm in FE Analyses Based on a Cyclic Plasticity Model, 日本船舶海洋工学会 平成 25 年秋季講演会, 大阪, (2013. 11. 21-2013. 11. 22), GS30
- ③ Tsutsumi, S., Plasticity FE Analysis in Multi-scale for Predicting Deformation and Fatigue Life of Steel, JWRI-INDO workshop 2013, Osaka, Japan, (2013. 11. 11)
- ④ Fincato, R., Tsutsumi, S., Terada, K., On Convergence Rate of Cutting-Plane Algorithm in Numerical Analyses of a Cyclic Plasticity Model, 日本機械学会 第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2912
- ⑤ 堤成一郎, 多段変動応力下の繰返し変形と疲労き裂発生寿命予測, 溶接学会 平成 25 年度秋季全国大会, 岡山

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等 特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堤 成一郎 (TSUTSUMI, Seiichiro)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号: 70344702