

繰返し曲げ作用による鋼材の累積損傷度評価に関する基礎的研究

九州大学大学院 ○学生会員 大曲 正紘
九州大学大学院 学生会員 玉井 宏樹
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. 緒言

近年、アルカリ骨材反応による、コンクリートの膨張の影響により、鉄筋コンクリート構造物中で曲げ加工が施された鉄筋のみが、その隅角部において破断するという事例が発生している。そのような曲げ加工された鉄筋の隅角部では、大きな塑性変形の蓄積による疲労現象を考慮する必要がある、もはや健全な状態ではなく、劣化・損傷した状態であると考えられ、曲げ加工が鉄筋に及ぼす影響を、事前に知る術が必要になってくると考えられる。そこで、本研究では、鋼材に一定角度で繰返し曲げを与えた場合を想定し、数値解析により得られる塑性ひずみ幅から累積損傷度を定義する手法を提案した。また、実際に、その累積損傷度を用いて、鋼材が破断するまでの繰返し回数（以降、破断繰返し回数と称す）の算出を試みた。

2. 累積損傷度評価の概要

2.1 累積損傷度の定義

繰返し曲げ加工される鋼材の疲労形態は低サイクル疲労であると考えられる。金属材料の低サイクル疲労における破断繰返し回数は、塑性ひずみ幅に支配されるといわれており、本研究では、図-1 に示すような塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ と、破断繰返し回数 N_f との関係式である、Manson-Coffin 則（式(1)）を用いた。

$$\Delta\epsilon_p N_f^\alpha = C \cdots (1) \quad \alpha, C: \text{材料定数}$$

ここで、ある n 回目の折り曲げ解析時に、得られた応力 - ひずみ曲線から $\Delta\epsilon_{pn}$ を求め、式(1)に代入すると、 N_{fn} が式(2)のように求まる。

$$N_{fn} = (C/\Delta\epsilon_{pn})^{1/\alpha} \cdots (2)$$

次に、各折り曲げ解析ごとに蓄積する損傷度が、Miner 則に従うと仮定し、 n 回目の折り曲げで蓄積した損傷度の増加量は式(3)のように考えた。

$$\Delta D_{0n} = 1/N_{fn} = (C/\Delta\epsilon_{pn})^{-1/\alpha} \cdots (3)$$

ここで、式(3)は図-1 のような理想的な閉じた両振幅のループに対して成り立つものであるが、本解析で得られる応力 - 塑性ひずみ曲線は図-2 に示すようなものであったため、図-1 に対応させる変換を行った。エネルギー的観点から面積に注目し、理想的な閉じたループ $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A$ で囲まれる面積 S_{0n} に対する、灰色部分の面積 S_n の割合 m_n を求め、式(3)に m_n を乗じることで、 n 回目の折り曲げで蓄積する損傷度の増加量を式(4)のように変換した。

$$\Delta D_n = m_n \cdot \Delta D_{0n} = m_n \cdot (C/\Delta\epsilon_{pn})^{-1/\alpha} \cdots (4)$$

よって、累積損傷度を Miner 則より式(5)のように定義した。

$$D_n = \sum_{k=1}^n \Delta D_k = \sum_{k=1}^n m_k \cdot (C/\Delta\epsilon_{pk})^{-1/\alpha} \cdots (5)$$

この損傷度を用いて、次の $n+1$ 回目の折り曲げ解析時の弾性勾配に $(1-D_n)$ を乗じることで剛性を低下させ、鋼材の損傷を表現した。

2.2 破断回数の算出法

鋼材要素の破壊は、その要素内の各積分点の累積損傷度 D_n が全て 1 に達した時点で起こるとし、それ以降は、剛性マトリックスが特異となることを防ぐため、

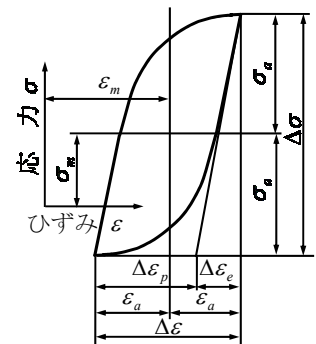


図-1 Manson-Coffin 則における応力 - ひずみ曲線

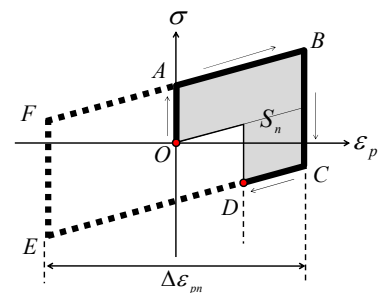


図-2 応力 - 塑性ひずみ曲線

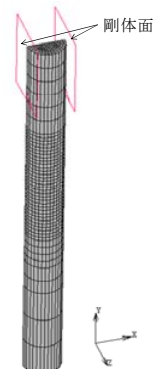


図-3 解析モデル図

損傷限界を $D_c = 0.99$ とした。最終的な鋼材の破断繰返し回数は、鋼材要素が破壊していき、初めて破断面が形成されるときまでの折り曲げ回数として求めた。その際、損傷変数と折り曲げ回数の関係における近似曲線により、破断繰返し回数を予想した。

3. 丸鋼の繰返し曲げ解析

解析対象鋼材は、直径 12mm、長さ 120mm の普通丸鋼を想定した。この鋼材を 90° 折り曲げた後、元の位置まで戻すという過程を折り曲げ回数 1 回と定義し、これを 5 回繰返した。図-3 に解析モデル図を示す。解析モデルは 8 節点ソリッド要素により離散化し、総要素数は 4512、総節点数は 5424 であった。表-1 に解析に用いた鋼材の物性値および材料定数を示す。図-4 に本解析で仮定した鋼材の単軸換算応力-ひずみ関係を示す。降伏条件として、Mises の降伏条件を仮定した。また、繰返し塑性問題であることから、バウジナガー効果を考慮するために、移動硬化則を適用し、弾塑性体としてモデル化した上で、硬化係数は初期勾配の $1/100$ とした。

本解析では、大変形・大回転を伴うことから、アップデートラグランジェ法による大変形解析を適用し、鋼材が 0.5° 刻みで折り曲がるような変位増分を与える変位制御で解析を行った。解析モデルは奥行き方向に対称の $1/2$ モデルとした。境界条件として鋼材下部の表面の節点変位を全固定とした。

4. 解析結果および考察

図-5 に隅角部引張側の積分点での相当応力 - 相当ひずみ関係を示す。ただし、この相当応力は、ループを描かせるために、平均応力の符号をもとに圧縮・引張り状態を判断し、相当応力の符号を修正している。折り曲げ回数が増えるごとに、弾性勾配が低下している様子が伺える。また、折り曲げ回数 4 回目以降からループ形状が潰れているが、この積分点では 4 回目で破壊に至ったといえる。また、図-6 に各折り曲げ回数終了時における変形状と損傷度の分布図を示す。この図より、折り曲げ回数が増加するごとに、損傷が隅角部を中心に、広がっていく様子が分かる。隅角部の損傷に着目すると、圧縮側の方が引張側より、損傷の進展速度が早いことが分かる。これは、ひび割れは曲げ内側の圧縮側から生じるといふ事例をよくシミュレートできていると思われる。図-7 は、近似曲線により破断繰返し回数を算出したもので、この図より破断繰返し回数は 40 回であると推定される。

5. 結論

本研究では、Manson-Coffin 則と Miner 則を用いた累積損傷度評価法を提案し、また、丸鋼の繰返し曲げ解析を行うことでその有用性に関して考察を行った。その結果、本手法により、鋼材を一定角度で繰返し折り曲げ加工した際の累積損傷度分布および破断繰返し回数を容易に算出できることが確認できた。

表-1 鋼材の物性値および材料定数

	鉄筋
弾性係数 (N/mm ²)	2.00×10^5
ポアソン比	0.30
降伏強度 (N/mm ²)	300
材料定数C	0.61 (軟鋼)
材料定数 α	0.611 (軟鋼)

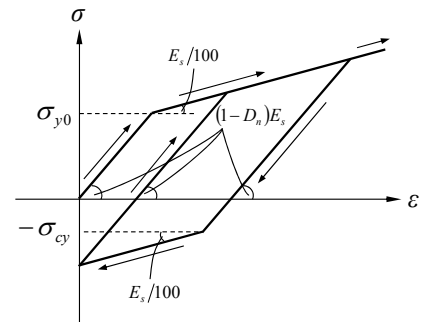


図-4 鋼材の構成則

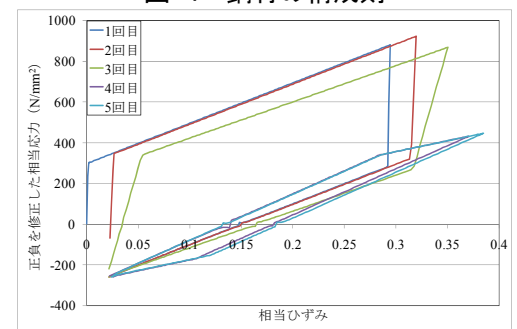


図-5 相当応力(符号を静水圧応力の正負により補正) - 相当ひずみ関係

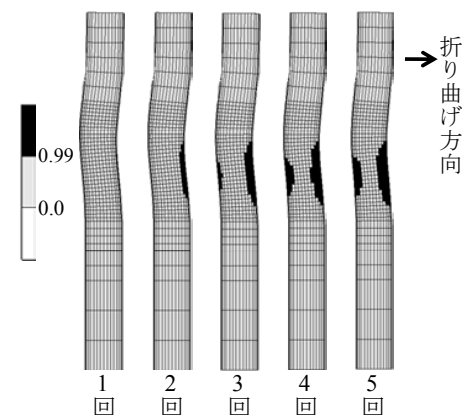


図-6 変形状と損傷度分布図

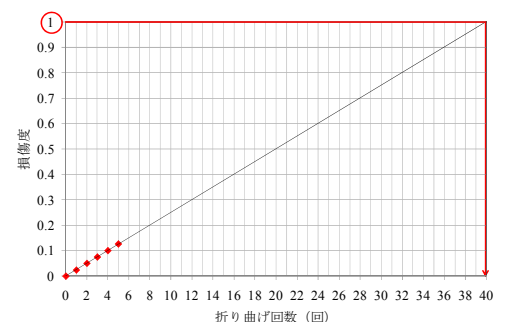


図-7 近似曲線による破断回数算出