

損傷力学を用いた鋼構造部材の疲労寿命評価法 に関する基礎的研究

園田佳巨¹・Khampaseuth THEPVONGSA²・彦坂熙³

¹正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門
(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²学生会員 九州大学大学院 博士課程学生 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門
(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

本研究は、連続体損傷力学を用いて鋼構造物の疲労寿命を予測することを目的に、部材レベルの損傷解析を行い、定量的に信頼性の高い値を得るための問題点と対処法について基礎的な考察を試みたものである。一般に、損傷力学は塑性歪みの蓄積による損傷の進展を仮定するため、高サイクル疲労のような巨視的には塑性歪みの発生が認められないケースでは、微視レベルにおける塑性歪みの蓄積を前提とした理論を設け、損傷進展に関わる材料定数を適切に決定しなければならない等の問題が残されている。本研究では、解析に必要な材料定数を既存の疲労試験結果を用いて決定する手法について検討し、確率論的な観点による鋼構造部材の疲労寿命予測の可能性について検証した。

Key Words: *continuum damage mechanics, high cycle fatigue, fatigue life prediction*

1. 緒言

近年、公共投資額の削減の必要性が高まるにつれて、既設構造物に対して合理的な維持・補修計画を立て、ライフサイクルコストを低減することが重要視されるようになってきた。しかし、老朽化した構造物に対して適切な維持・補修計画を立案するためには、作用荷重の将来的な予測のもとに既設構造物の余寿命を定量的に評価することが必要であり、現実には非常に困難である。その原因の一つに、構造物に対する社会的なニーズの変化を含めた長期にわたる供用期間内の外力評価の難しさが挙げられる。また、仮に将来の荷重履歴を正確に予測できたとしても、既設構造物の余耐力の評価は詳細な現状調査をもとにした構造解析を実施すれば可能であると思われるが、余寿命評価に関しては現時点で信頼に足る推定を行うことは非常に難しい。

鋼構造物を例にとると、一般に寿命を左右する主要因は腐食と疲労である¹⁾とされているが、様々なレベルで研究が進んでいる疲労現象に関しても、微視的な空隙の成長・集積から巨視的な亀裂の進展までの一連のプロセスを系統的に評価できる手法は確立されていない。すなわち、巨視的な亀裂の進展に限れば、破壊力学²⁾を用いたアプローチにより定量的な評価が可能で、既に実務

レベルでの適用が行われているが、疲労初期段階に起こる微視的な空隙の成長過程を評価することが困難なために、橋梁診断等の結果をもとにした亀裂の存在を予め仮定しなければならず、解析条件の設定自体が容易でないと言われている。

一方、連続体損傷力学は、微視的空隙を有する材料の力学的挙動を表現することで、空隙の成長・集積とそれにもなう損傷状態の定量的評価を行える学問として、1950年代に金属のクリーブ損傷を対象にKachanovが提案³⁾して以来、金属のみならずコンクリートや高分子材料その他のあらゆる材料への適用が試みられてきた。また、損傷力学は損傷変数の定義によって種々の要因による構造材料の損傷を表現できる自由度を備えているため、腐食による損傷状況の力学的記述を行えば、将来的には疲労と腐食の両要因を同時に考慮した解析も可能であると思われる。しかし、理論式^{4), 5)}の実験的な検証の不足や材料定数の決定方法などいくつかの問題点を残しており、実務への適用例もまだ殆ど見当たらない。

本研究では、連続体損傷力学を鋼構造部材の疲労破壊の定量的評価に適用するために、損傷進展則に関わる材料定数の決定方法について基礎的な検討を行い、鋼構造物の余寿命評価を将来的な目標に据えた損傷度評価法の確立のための考察を行うものである。本研究では、部材

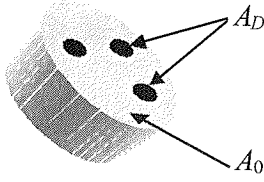


図-1 損傷の概念 (有効断面の減少)

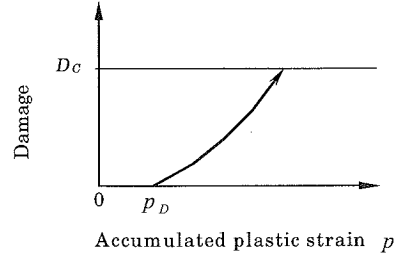


図-2 損傷の発生条件

形状に起因する応力集中によって生じる疲労破壊だけを検討の対象としたが、この手法を実用的なツールへと発展させていくためには、鋼構造物の疲労破壊の大半が溶接継手位置で生じている事実^{6),7)}を踏まえ、溶接部のモデル化・解析についての検討¹³⁾を継続して行う必要がある、今後の検討課題として残している。

2. 損傷力学による疲労損傷解析

(1) 損傷力学の概要⁴⁾

損傷力学は、外的要因による構造部材の破壊を「微視レベルで見たときに存在する多数のひび割れや欠陥が、塑性ひずみの蓄積とともに成長・集積し、耐力を喪失するような巨視レベルのひび割れが発生すること」と定義するもので、損傷度を表す物理量として図-1および式(1)に示すような部材断面内の抵抗力を失った断面の割合を表す損傷変数 D を用いる。

$$D = \frac{A_D}{A_0} \quad (1)$$

ここに、 A_D :微小空隙・欠陥等により抵抗力を失った断面積、 A_0 :全断面積

なお、式(1)は力学的に均質な場とみなせるだけの十分な広がりを持つ領域で適用しなければならず、鋼の場合にはおよそ 0.1mm^3 以上の体積を持つ領域が適切な大きさであると言われている。本研究では、損傷を受けた材料のひずみは無損傷時の構成式に有効応力を適用することで得られると仮定した式(2)の形式で表される「ひずみ等価型」の構成式を用いることにした。

$$\varepsilon = f\left(\frac{\tilde{\sigma}}{E}, \dots\right) = f\left(\frac{\sigma}{E_0(1-D)}, \dots\right) \quad (2)$$

ここに、 σ :公称応力、 $\tilde{\sigma}$:損傷を考慮した有効応力、 E_0 :無損傷時の弾性係数

損傷の進展および破壊は、図-2 に示すように応力の増加と共に塑性ひずみが部材内に蓄積され、ミーゼスの降伏条件の仮定のもとに、式(3)で表される塑性ひずみ増分 dp を積分して求めた累積塑性ひずみ p がある一定値 p_D に達すると損傷が発生し、損傷変数 D が限界値 D_c (≤ 1.0) に達した時に部材の破壊につながるひび割れが生じるものとみなされる。

$$dp = \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p \quad (3)$$

なお、損傷発生時の累積塑性ひずみ p_D は、単軸疲労試験で損傷が発生するまで(除荷剛性が低下し始めるまで)に要するひずみエネルギー量を、多軸応力場においても等価であると仮定して得られた式(4)により定義される。

$$p_D = \varepsilon_{pD} \frac{\sigma_u - \sigma_f}{\sigma_{eq} - \sigma_f} \quad (4)$$

ここに、 σ_u :終局応力、 σ_f :疲労限界応力、 σ_{eq} :相当応力、 ε_{pD} :単軸試験による損傷発生時のひずみ

損傷の進展は、損傷にともなう散逸エネルギーを表わす関数 F_D を定義し、ひずみエネルギー密度解放率 Y と損傷増分 dD 間に共役な関係を仮定することにより、以下の関連流動則を用いて評価される。

$$dD = \frac{\partial F_D}{\partial Y} d\lambda = \left(\frac{Y}{S}\right)^n dp \quad (5)$$

ここに、 λ :塑性乗数、 Y :ひずみエネルギー密度解放率、 S, n :それぞれ損傷に要するエネルギー強度と損傷進展係数

式(5)は、関数 F_D の仮定により様々な要因による損傷に適用できる汎用性を有するが、式中のエネルギー

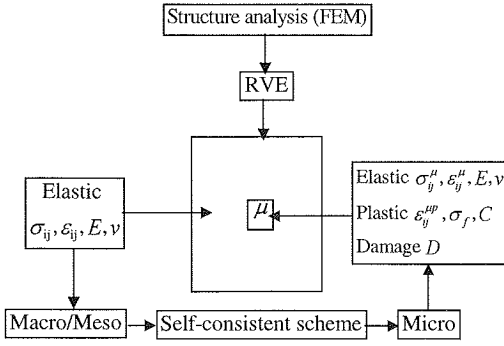


図-3 2つの異なるスケールモデル

強度 S 等のパラメータを決定するには、繰り返し疲労試験における除荷剛性の変化など、既存の疲労試験で計測されていないデータが必要となる。

(2) 高サイクル疲労損傷解析の概要⁹⁾

一般に、許容応力度法のもとで設計された構造物は、疲労破壊の発生までに数百万回以上の载荷回数を要する。このとき、巨視レベルにおいて塑性ひずみが認められるのは、疲労亀裂が発生し始める頃からと言われており、それまでの疲労寿命は、局所的な微視レベルにおける塑性ひずみの発生・蓄積で費やされると考えられる。したがって、通常の弾塑性理論で高サイクル疲労寿命の大半を占めると考えられる微視レベルの塑性ひずみの進展状況を評価することは非常に困難である。本研究では、Lemaitreが提案した考え⁹⁾を引用し、微視レベルの応力場で空隙の存在による塑性ひずみの蓄積と損傷の進展を考え、その影響を均質で等価な巨視損傷場に適用するモデルを採用した(図-3参照)。

すなわち、損傷進展則として、式(6)に示すような微視レベルの累積塑性ひずみと圧縮・引張応力の影響の相違を表わす亀裂の開口効果係数 h を導入したエネルギー解放率 Y^μ を用いて式(7)により評価した。

$$Y^\mu = \frac{1+\nu}{2E} \left[\frac{\langle \sigma_{ij}^\mu \rangle \langle \sigma_{ij}^\mu \rangle}{(1-D)^2} + h \frac{\langle -\sigma_{ij}^\mu \rangle \langle -\sigma_{ij}^\mu \rangle}{(1-Dh)^2} \right] - \frac{\nu}{2E} \left[\frac{\langle \sigma_{kk}^\mu \rangle^2}{(1-D)^2} + h \frac{\langle -\sigma_{kk}^\mu \rangle^2}{(1-Dh)^2} \right] \quad (6)$$

ここに、上付き添字 μ は微視レベルで定義された物理量を示し、 $\langle \rangle$ は括弧内が正のときのみ値を保持する。

したがって、 $x > 0$ のとき $\langle x \rangle = x$ 、 $x \leq 0$ のとき $\langle x \rangle = 0$ となるが、式(6)による計算は、主応力状態の評価後に行う必要がある。

$$\dot{D} = \left(\frac{Y^\mu}{S} \right)^n \dot{p}^\mu \quad (7)$$

疲労損傷過程を追跡するベースとなる構造解析は、通常の3次元有限要素法を用いて巨視レベルで行い、得られた応力を微視レベルの応力に以下の式により変換した。

$$\sigma_{ij}^\mu = \sigma_{ij} - \alpha E \varepsilon_{ij}^{pp} \quad (8)$$

ここに、 σ_{ij} : 巨視レベルの応力、 σ_{ij}^μ : 巨視レベルの応力から換算された微視レベル応力、 α : Eshelbyの理論⁹⁾による空隙の介在する影響を表すパラメータ

式(8)のパラメータ α については、例えば球状の空隙を仮定した場合には以下の式で与えられる。

$$\alpha = \frac{1-\beta}{1+\nu}, \quad \beta = \frac{2}{15} \frac{4-5\nu}{1-\nu} \quad (9)$$

実際には理想的な形状の空隙や亀裂が存在することはありえないため、理論との整合を図るために空隙の形状や大きさに関するデータの統計的な処理のもとにパラメータ α の評価を行うことも考えられるが、現実的なアプローチとは言い難い。そこで、本研究では球状の空隙を仮定した式(9)を適用し、損傷進展に関わる2つのパラメータ(エネルギー強度 S 、損傷進展係数 n)により実際の疲労損傷進展状況との対応を図ることとした。

これらの基本的考えのもとに、式(10a)~(10g)に示す降伏条件式、関連流動則、移動硬化則が微視応力場においても適用できると仮定し、先に示した式(6)、(7)を連立させることで微視レベルの損傷場の解析を行った。

$$f^\mu = \left(\tilde{\sigma}^{\mu D} - X^{\mu D} \right)_{eq} - \sigma_f \quad (10a)$$

$$\left(\tilde{\sigma}^{\mu D} - X^{\mu D} \right)_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\tilde{\sigma}_{ij}^{\mu D} - X_{ij}^{\mu D} \right) \left(\tilde{\sigma}_{ij}^{\mu D} - X_{ij}^{\mu D} \right)} \quad (10b)$$

$$\varepsilon_{ij}^\mu = \varepsilon_{ij}^{\mu e} + \varepsilon_{ij}^{\mu p} \quad (10c)$$

$$\varepsilon_{ij}^{\mu e} = \frac{1+\nu}{E} \tilde{\sigma}_{ij}^\mu - \frac{\nu}{E} \tilde{\sigma}_{kk}^\mu \delta_{ij} \quad (10d)$$

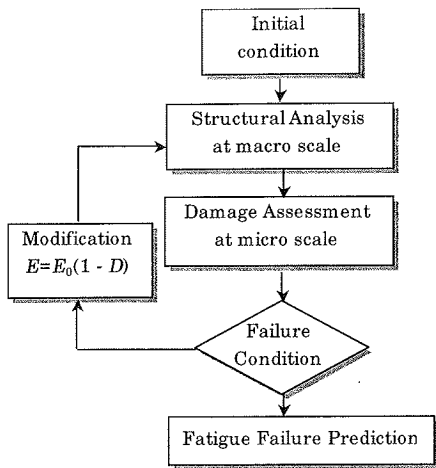


図-4 高サイクル疲労損傷解析のフロー

$$\tilde{\sigma}_{ij}^{\mu} = \sigma_{ij}^{\mu} / (1 - D) \quad (10e)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\mu p} = \frac{\partial f^{\mu}}{\partial \sigma_{ij}^{\mu}} \dot{\lambda} \quad (10f)$$

$$\dot{X}_{ij}^{\mu D} = \frac{2}{3} C \dot{\varepsilon}_{ij}^{\mu p} (1 - D) \quad (10g)$$

ここに、 f^{μ} ：微視レベルにおける降伏関数、 σ_f ：疲労限界応力、 $\sigma_{ij}^{\mu D}$ ：微視レベル偏差応力、 $X^{\mu D}$ ：微視レベル背応力の偏差成分、 $\varepsilon_{ij}^{\mu e}$ ：微視レベル弾性ひずみ、 $\varepsilon_{ij}^{\mu p}$ ：微視レベル塑性ひずみ、 δ_{ij} ：クロネッカーのデルタ、 λ ：塑性乗数、 C ：移動硬化係数

本研究で行った高サイクル疲労損傷解析の手順をまとめると以下ようになる。

1) 3次元有限要素法を用いた弾性解析により、構造部材の応力解析を巨視的レベルで行い、各要素の積分点における応力・ひずみ成分を求める。

2) 式(8)～(10g)を用いて、巨視レベルの応力・ひずみを微視レベルのものに換算し、式(6)および式(7)を用いた損傷度評価を行う。ただし、高サイクル疲労の計算を行う場合、 10^6 オーダーの繰り返し計算を行うのは現実的ではない。そこで本研究では、1回载荷による結果を载荷数だけ重ね合わせることが可能と考えられる適切なサイクル数を設定した簡易法¹²⁾(例えば、1回载荷後の結果を100倍することで、100回载荷後の結果とする)を用い、時間の節約を図る。

3) 2)で得られた損傷度を巨視レベル解析に適用し、破壊判定・要素剛性の修正を行う。

4) 部材全体としての破壊条件を満たしていない場合には1)に戻り、次ステップの荷重に対する解析を

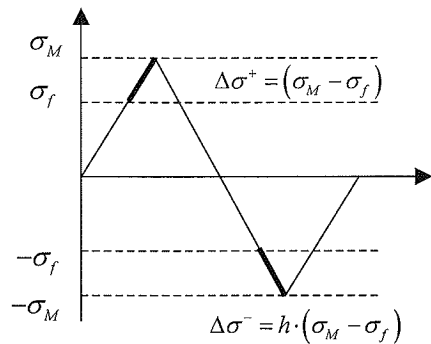


図-5 有効応力振幅

継続する。もし、その条件を満たした場合には、その時のサイクル数を疲労寿命 N_f とする。ここで、亀裂の長さ l_D が限界亀裂長さ l_C に達した時 ($l_D = l_C$) を破壊条件と仮定する。

以上の手順を整理すると、図-4のようになる。

3. 損傷進展に関するパラメータの決定

本研究で用いた理論で、実際の構造部材の疲労解析を行うには、損傷進展速度に関わる材料定数の決定が不可欠である。すなわち、式(7)中のエネルギー強度 S と損傷進展係数 n は、疲労寿命の定量的評価に最も重要であるが、これらを既存の疲労試験データから直接的に得ることはできない。そこで、この2種類の損傷パラメータを間接的に求める方法として、簡易推定式を用いた評価法⁹⁾を検証するとともに、今後の疲労試験データの蓄積を見込んだニューラルネットワークによる推定法の有効性についても検討を行った。

(1) 損傷パラメータの簡易推定式

損傷と弾性変形との相互作用が無いことを仮定し、得られる損傷増分の式(11)を正負交番载荷(圧縮・引張等振幅)を想定して破壊時まで ($D_c = 1.0$ と仮定) 積分すると、応力振幅 σ_M と破壊までの载荷回数 N_R との関係式(12)が得られる(ただし、図-5に示すように圧縮側応力に対する亀裂の開口効果を表わす係数として $h = 1$ を導入した)。

$$dD = \left[\frac{(\sigma_{eq} + k\sigma_f)^2 R_v^{\mu}}{2ES(1+k)^2(1-D)^2} \right]^n \frac{d\sigma_{eq}}{C(1+k)} \quad (11)$$

表-1 解析に用いた各種材料定数

Elastic modulus	E	2×10^5 MPa
Poisson's ratio	ν	0.3
Fatigue limit stress	σ_f	165 MPa
Yield stress	σ_y	290 MPa
Ultimate stress	σ_u	410 MPa
Damage threshold	ϵ_{pD}	0
Critical damage	D_C	0.9
Hardening parameter	C	2000 MPa
Crack closure	h	0.2

N_R : 破壊までの載荷回数

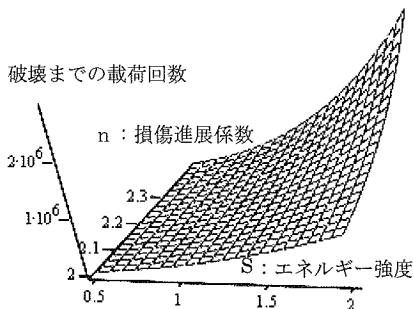


図-6 損傷パラメータと疲労寿命の関係

$$N_R = \frac{(2ES)^n C}{2(R_v^H)^n \left[\left(\frac{\sigma_M + k\sigma_f}{1+k} \right)^{2n+1} - \sigma_f^{2n+1} \right]} \quad (12)$$

ここに、 $R_v^H = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left[\frac{\sigma_H(1+k)}{\sigma_{eq} + k\sigma_f} \right]^2$: 三軸応

力比, σ_H : 静水圧応力, $k = 3\alpha E/2C$, σ_M : 応力振幅

式(12)には、暗黙にMiner則を用いている等の仮定が存在するため、疲労損傷寿命の簡易推定式とみなすべきであるが、疲労寿命の一次予測には十分に適用可能であると考えられる。そこで、式(12)において損傷パラメータが疲労寿命に与える影響に関して考察を行った。図-6は、式(12)に亀裂開口係数 $h=1.0$ 、応力振幅 $\sigma_M=180$ MPa、疲労限界応力 $\sigma_f=165$ MPaを仮定し、エネルギー強度と損傷進展係数をそれぞれ $S=0.5 \sim 2.0$ MPa, $n=2.0 \sim 2.4$ の範囲でパラメトリックに変えたときの疲労寿命の変化を求めたものである。この図より、両パラメータともにその値が大きくなると、損傷進展のために消費されるエネルギー量が増すため、疲労寿命は単調に増加することがわかる。したがって、応力振幅と破壊までの載荷回数の相関性が高い良好な試験データを利用することが可能であれば、

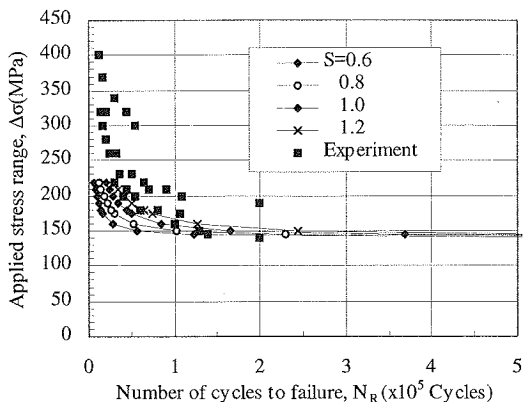


図-7 簡易式による材料定数の推定

両者の妥当な値の決定はさほど困難ではないと考えられる。しかし、一般には同一材料・形状の試験片においても疲労試験結果にはバラツキがあることを考えると、疲労曲線上の情報($\Delta\sigma, N$)だけでなく、除荷剛性の低下率等も含めた総合的なデータの蓄積とその利用によって精度の向上を図ることも検討する必要があり、定量的かつ実用的な疲労寿命予測のための重要な今後の課題であると思われる。

図-7は、損傷進展係数を $n=2.1$ と仮定し、式(12)を用いてエネルギー強度をパラメータとした疲労曲線群上に設計用疲労曲線データ¹⁰⁾(日本鋼構造協会:円孔を有する母材)をプロットしたものである。この図より、本試験データは $n=2.1$ と仮定した場合、 $S=1.2$ MPa程度の値を与えることにより概ね疲労試験データの下限側を包絡可能であることがわかる。

以上の考察から、損傷に関するパラメータを簡便に求める1次評価の手段として、式(12)に実試験データ($\Delta\sigma, N$)を用いることが有効であると認められた。なお、この方法は損傷進展係数を予め決定し、エネルギー強度 S のみを求めることになるが、図-6にも認められるように、疲労寿命はエネルギー強度の単調な増加関数となることが明白である。そこで、 $n=2.0$ と仮定すると疲労寿命がエネルギー強度の2次式と簡便になる利点を考慮し、以後の1次評価には $n=2.0$ の一定値を与えることにした。

(2) ニューラルネットワークによる推定法

次に、損傷パラメータ決定の第2の方法として、図-4に示した3次元有限要素解析によりエネルギー強度 S と損傷進展係数 n をパラメータとした疲労試験のシミュレーションを行い、得られた結果(単に解析条件として与えた各応力振幅 $\Delta\sigma$ に対する破壊までの載荷回数 N だけでなく、亀裂進展速度 da/dN (a : 亀裂寸法)

表-2 ニューラルネットワークの設定

ユニット数			
入力層	2	許容誤差 (Error)	0.1
隠れ層	30	安定化係数 (α)	0.8
		学習定数 (η)	0.75
出力層	1	学習パターン数	369

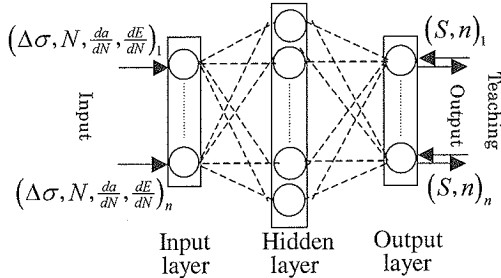


図-8 ニューラルネットワークによる評価

および部材平均で評価した弾性係数の低下率 dE/dN を求めておく)を教師データとしたニューラルネットワークによる推定を試みた。すなわち、疲労解析の入力データであるエネルギー強度・損傷進展係 (S, n) と、比較的容易に実際の試験データが得られると考えられる2つの項目(亀裂進展速度, 部材レベルの弾性係数低下率)を加えた疲労試験結果 ($\Delta\sigma, N, da/dN, dE/dN$) の関係を学習させ、未知の試験データに対応する2つの損傷パラメータを推定させるものである。この方法を用いるには、教師データのために多数の疲労解析結果(有限要素解析による)を用意する必要があるが、式(12)を用いた簡易評価と比べて、以下の利点を有すると考えられる。

(a) 式(12)では、1サイクル間の損傷の進展度は全く同じであるが、詳細な有限要素解析を行うことで損傷の進展とともに部材内部に生じる応力状態の変化を反映させることができるため、より正確な疲労寿命の推定が可能であると思われる。

(b) 推定しようとしている2つの損傷進展パラメータと亀裂進展速度・部材剛性の変化は、力学的に考えると直接的に関連するものであることから、実試験データとしてこれらを得ることができれば、これら解析パラメータの推定値の実用精度は飛躍的に向上すると考えられる。

図-8は、ニューラルネットワークによる計算過程を示したものである。現時点では、既往の疲労試験データとして利用できるものは、応力振幅と载荷数 ($\Delta\sigma, N$) が大半であるため、今回は式(12)による推定と同様に ($\Delta\sigma, N$) からエネルギー強度 S のみを入力

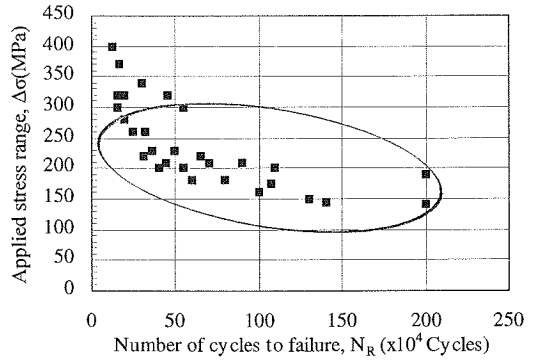


図-9 エネルギー強度推定に用いた試験データ

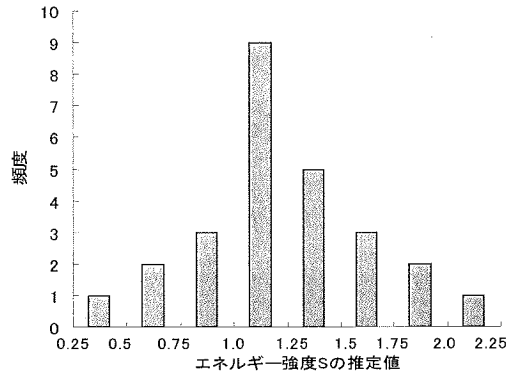


図-10 エネルギー強度の推定値(21ケース)

することにし、先に示した1次評価法の場合との対応について調べた。今後、図-8に示すような適切な入力情報の追加を行うことで、信頼性の向上を図る必要がある。なお、ニューラルネットワークの手法としては、表-2に示す設定値のもとで、隠れ層を1層設けた誤差逆伝播方式の学習方法を用いた。学習を行うにあたり、入出力データ間の適切な写像関係を得るために、各ユニットの値の順位を(0, 1)の範囲に正規化する一般化空間格子変換法¹¹⁾(GSL変換法)を用いたデータの前処理を行っている。

4. 数値計算例および考察

(1) 損傷のエネルギー強度の決定

図-9は、エネルギー強度の推定に利用した疲労試験結果を示したものである。本研究では、少なくとも100万回以上の高サイクル疲労を前提にしていることから、作用応力が300MPa以下の21ケース(図中に実線で囲まれた)を対象に検討を行った。図-10は、式(12)を用いて(後ほど示すFEM解析との整合を図るため、亀裂開口係数 $h=0.2$ を仮定した)得られた頻度分布を示

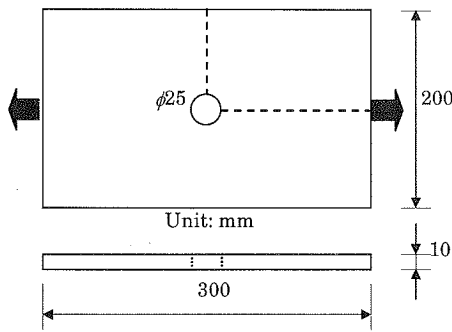


図-11 解析モデル

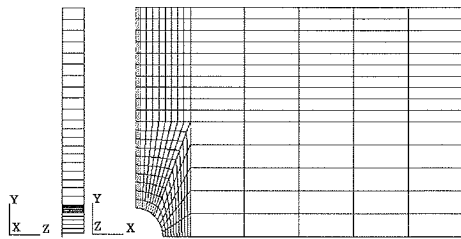


図-12 部材破壊の定義

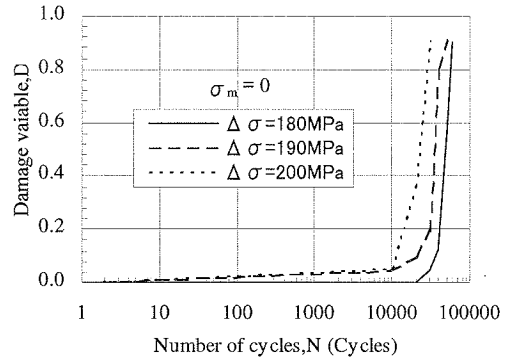


図-13 損傷進展速度に対する作用応力の影響

したものである。この図より、試験結果自体のバラツキの影響でエネルギー強度にも大きなバラツキが見られるため、確率論的な観点から評価することが望ましいものと考えられる。そこでエネルギー強度を正規分布に従う確率変数と仮定すると、平均値1.48MPa、標準偏差0.327MPaの値が得られ、99.7%の下限側信頼区間を与える値として、損傷進展係数 $n=2.0$ とエネルギー強度 $S=0.50\text{MPa}$ が求められた。一方、ニューラルネットワークを用いて、 $(\Delta\sigma, N)$ 2種類の入力データからエネルギー強度 S を推定する(エネルギー強度 S と応力範囲 $\Delta\sigma$ を入力し、計算結果 N との関係を学習させると、99.7%の下限側信頼区間に対する推定値は $S=0.556\text{MPa}$ であり、両者には10%程度の相違が見られた。このことから、将来的には作用応力と载荷数 $(\Delta\sigma, N)$ だけでエネルギー強度 S を推定する式(12)を1次評価用とし、それ以外のデータも利用可能な場合にはニューラルネットワークを2次評価用に用いるように位置付けることで、部材の重要度に応じて使い分けを行うことも考えられる。

(2) 鋼構造部材の疲労損傷解析

本研究では、任意の鋼構造部材の疲労破壊シミュレーションを行うために、3次元有限要素法の解析プログラムを作成した。ここでは、図-11に示すような円孔を有する鋼板の高サイクル疲労破壊のシミュレ

ーションを行った。解析対象とした鋼板は、幅200mm、長さ300mm、厚さ10mmで、中央に直径25mmの円孔を有するSS400材を想定した。解析は、境界条件の対称性を考慮して1/4領域に対して行い、8節点ソリッド要素を用いてモデル化した。なお円孔周囲の最も応力集中が生じる箇所は辺長 1mm^3 サイズの要素で離散化を行った。また、本解析はほぼ平面応力状態に等しく、板厚方向の損傷進展は一樣であると仮定されるため、板厚方向の要素分割は1要素とした。解析に用いる損傷パラメータは、式(12)で求めた $n=2.0$ 、 $S=0.50\text{MPa}$ である。

a) 疲労損傷の進展状況

疲労損傷の進展シミュレーションを行うにあたり、要素内の各積分点における損傷変数が $D=0.9$ に達した時点を局所破壊(積分点の剛性がほとんど無い状態、図中●で表示)とみなし、図-12に示すように部材断面全面に破壊が及んだ時点を部材破壊とみなすことにした。図-13は、圧縮・引張交番载荷時(平均応力 $\sigma_m=0$)の作用応力レベルと損傷変数の変動との関係を、最も応力集中が大きな要素において調べたものである。この図より、190MPa以上の応力が作用すると、応力集中部には最初から損傷が発生・進展するが、急激に進展し始めるには10000回以上の载荷数が必要で

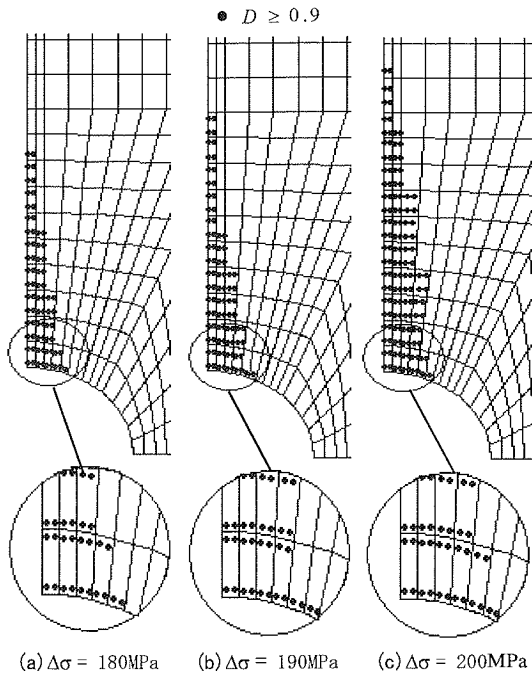


図-14 損傷領域の分布 ($N=5 \times 10^6$ cycles)

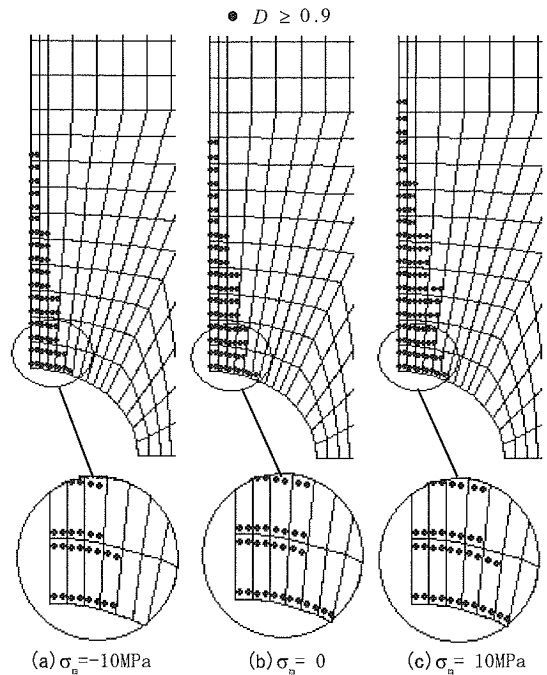


図-16 損傷領域の分布 ($N=5 \times 10^6$ cycles)

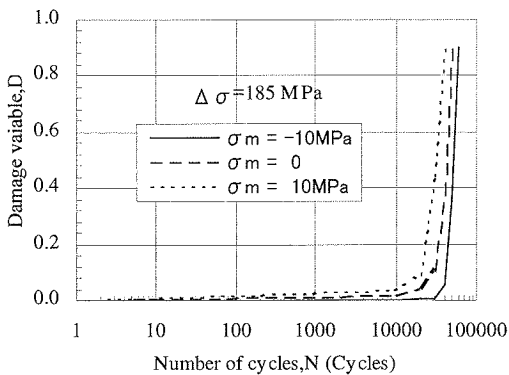


図-15 損傷進展速度に対する平均応力の影響

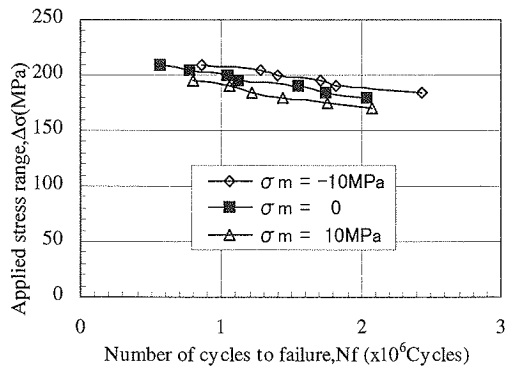


図-17 平均応力と疲労曲線の関係

あることがわかる。図-14は、50万回載荷したときの損傷状況を D 値 (モデル前面の積分点位置) の分布により示したもので、作用応力が大きくなるにつれて損傷領域が拡大している状況が明瞭に表われている。

b) 平均応力の影響

次に、鋼部材の疲労損傷の進展に平均応力が与える影響について検討した。図-15は、圧縮・引張応力振幅を $2\sigma_M = 185 \text{ MPa}$ の一定とし、平均応力を $\sigma_m = -10 \text{ MPa}$, 0 MPa , 10 MPa の3通りに変えたときの応力集中部における損傷の進展を示したものである。この図より、平均応力が引張側から圧縮側に移行するにつれて損傷の進展が抑制される傾向がわかる。この結果の定量的な評価は、解析に用いる亀裂の開口効果係数 h

の値とともに検討する必要があるが、一般的に知られている疲労寿命に対する平均応力の影響を解析により容易に再現できることが認められた。図-16は、50万回載荷時の損傷変数 D 値 (モデル前面の積分点位置) の分布を示したもので、平均応力が圧縮側へと移行するにつれて損傷領域が小さくなり、疲労破壊が抑制されている状況が認められる。図-17は、作用応力範囲をパラメータとした解析による疲労曲線の比較を行ったものである。この図より、平均応力が -10 MPa から 10 MPa へ変動することで、 190 MPa の作用応力下の疲労寿命が約200万回から100万回に半減する結果が得られている。

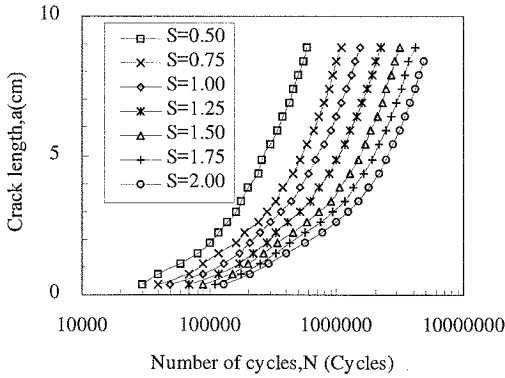


図-18 エネルギー強度が亀裂進展速度に与える影響

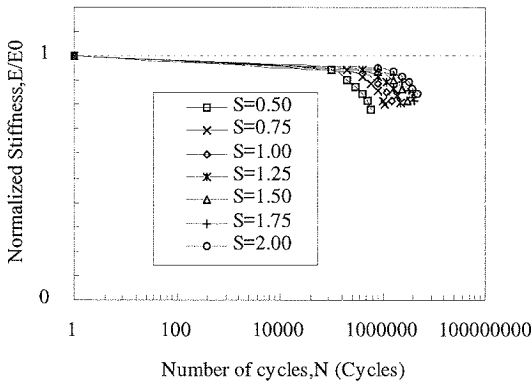


図-19 エネルギー強度が剛性低下率に与える影響

c) エネルギー強度と損傷進展状況の関係

エネルギー強度の値を大きくすると、損傷進展に要するエネルギー量が増すため、疲労寿命は単調に増加することは、式(12)をもとに既に述べた。ここでは、図-11のモデルについて、エネルギー強度をパラメータとした解析を行い、亀裂進展速度および部材剛性の低下率に対する影響を検討した。図-18は、損傷変数が $D=0.9$ に達した領域を亀裂範囲と仮定して求めた亀裂長と载荷数の関係である。同様に、図-19は部材全体の軸剛性(最大変位の変動から求めた)の低下率を求めたものである。これらの図からも明らかなように、亀裂進展速度と剛性低下率はエネルギー強度と非常に高い相関性を有しており、実試験データとしてこれらも加えた損傷パラメータの推定が可能となれば、データのバラツキが大きな高サイクル疲労破壊解析の精度向上に有効であることが推察された。

d) 疲労寿命の予測

これまでの考察を基に、現時点で適用可能な式(12)により決定したエネルギー強度を用いて、3次元有限要素解析を行い、図-11に示す円孔を有する鋼板の疲労寿命予測を行った。損傷パラメータは、簡易推定式

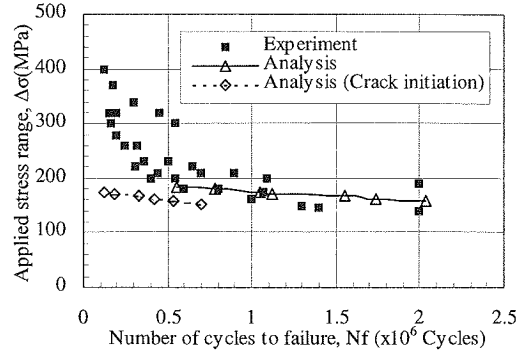


図-20 疲労寿命の予測(実験値との比較)

(12)による結果で得られた $n=2.0$, $S=0.50$ の値を用いた。図-20は、解析で得られた亀裂発生時(最も応力集中が大きな積分点において $D \geq D_c$ となったとき)と部材の破壊時(断面全体で $D \geq D_c$ となったとき)の2ケースについて実験結果との比較を行ったものである。最終的な比較対象の実験データは、予め図-10の推定の際にも利用しているため、この比較は単に式(12)により決定したエネルギー強度の値を有限要素解析の入力データとして用いることの妥当性を調べたことに相当すると考えられる。この図より、解析による疲労寿命の予測値は、簡易推定式(12)によって求めた損傷パラメータを使用しているため、実験結果の下限側を完全には包絡できていない。しかし、実験値との対応は良好なものであることから、簡易な1次評価用と位置付けた手法によっても定量的に妥当な疲労寿命予測が可能であることが確認された。

5. 結論

本研究は、損傷力学による鋼構造部材の疲労寿命予測を目的に基礎的な考察を試みたもので、得られた成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 微視レベルと巨視レベルの2つの異なるスケールを想定した解析により、高サイクル疲労破壊の予測が可能であることを確認した。
- (2) 疲労破壊の定量的な評価を行う場合に最も重要な損傷パラメータを決定する方法として、既往の疲労試験データを用いた簡易式による評価とニューラルネットワークによる推定のいずれも統計的な処理を施すことにより有効であることが認められた。
- (3) 本手法を用いて、疲労寿命に対する平均応力の影響等の一般的な傾向を容易に再現できるだけで

なく、損傷変数値の分布により部材内部の損傷進展状況を示すことが可能であることがわかった。

(4) 今後、亀裂進展速度や部材剛性の低下率等の項目を追加した疲労試験データを蓄積し、ニューラルネットワークによる損傷パラメータの決定方法の構築を図れば、解析結果の精度・信頼性を向上させることが可能であると思われる。

今回の試算では、鋼構造部材の形状に起因する応力集中箇所の高サイクル疲労損傷を検討した。しかし、鋼構造物の疲労破壊の大半は、溶接箇所の不具合や残留応力等が原因となり発生していることを考慮すると、本手法を実務で使用できる有用なツールとするためには、今後、溶接部の影響（残留応力の影響、溶接部近傍の材料特性の変化等）について検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 太田孝二, 深沢誠: 橋と鋼, 建設図書, 2000.
- 2) Anderson, T.L.: *Fracture mechanics*, CRC Press, 1995.
- 3) Kachanov, L.M.: On Creep Rupture Time, *Izv. Acad. Nauk SSSR, Otd. Techn. Nauk*, No.8, pp.26-31, 1958.
- 4) Lemaite, J.: *A Course on Damage Mechanics*, Springer Verlag, 1992.
- 5) Dusan Krajcinovic: Damage mechanics: accomplishments, trends and needs, *Int. J. of Solids Structures*, Vol.37, pp.267-277, 2000.

- 6) Nishikawa, K., Murakoshi, J. and Matsuki, T.: Study on the fatigue of steel highway bridges in Japan, *Const. Build. Materials*, Vol.12, pp. 133-141, 1998.
- 7) Fisher, J.W.: *Fatigue and Fracture in Steel Bridge*, John Wiley & Sons, 1984.
- 8) Lemaitre, J., Sermage, J.R. and Desmorat, R.: A two-scale damage concept applied to fatigue, *Int. J. Fracture*, Vol.97, pp. 67-81, 1999.
- 9) Eshelby, J.D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proc. Royal Soc. London A*, Vol.241, pp. 376-390, 1957.
- 10) JSCE: *Fatigue design recommendations for steel structures*, Japanese Society of Steel Construction, 1995.
- 11) Yagawa, G. and Okuda, H.: Neural networks in computational mechanics, *Arch. Comp. Meth. Eng.*, Vol.3-4, pp.435-512, 1996.
- 12) Lemaitre, J. and Doghri, I.: Damage90: A post-processor for crack initiation, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol.115, pp.197-232, 1994.
- 13) Thepvongsa, K., Sonoda, Y. and Hikosaka, H.: Fatigue damage analysis of welded structural members by using damage mechanics, *J. Appl. Mechanics*, JSCE, Vol.6, pp.1227-1234, 2003.

(2002. 11. 12 受付)

BASIC STUDY ON THE FATIGUE LIFE PREDICTION OF STEEL STRUCTURAL MEMBER BASED ON THE CONTINUUM DAMAGE MECHANICS

Yoshimi SONODA, Khampaseuth THEPVONGSA and Hiroshi HIKOSAKA

In this study, high cycle fatigue damage analysis and life prediction of steel structural member based on continuum damage mechanics is proposed. Three-dimensional finite element implementation of an elasto-plastic constitutive equation coupled with damage is employed. In case of high cycle fatigue, no plastic strain observable at a mesoscale, thus a two-scale model had already presented by Lemaitre. To apply this theory and obtain reasonable results, two kinds of identification method of damage parameter are considered. The fatigue failures due to the typical stress concentration are simulated, and confirmed the efficiency of this method with appropriate identification technique of damage parameter.