

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 25 日現在

機関番号：32410

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17999

研究課題名(和文) 疲労破損に必要なエネルギーの定量化手法の構築

研究課題名(英文) Construction of quantification method of energy for fatigue failure

研究代表者

皆川 佳祐 (Minagawa, Keisuke)

埼玉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：30453799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年の被害地震の特徴の一つとして、継続時間の長さや余震の多発が挙げられる。今後の大地震の被害を防ぐには、これら累積損傷を考慮した耐震強度評価法の構築が急務である。このような問題に対し、本研究ではエネルギーに注目し、破損とエネルギーの定量的関係を明らかにすることを目的とした。

まず、引張り試験によりエネルギー算出に関わる材料の物性値を測定した。ここで、引張り試験においてもエネルギーと破損の相関を確認した。その後、有限要素解析により変形やひずみ、エネルギーの関係を求め、それらを統合し、破損に要するエネルギーを求めた。実験結果と比較したところ、誤差はあるものの、合理的な結果を導くことができた。

研究成果の概要(英文)： Long duration time and many aftershocks were features of recent earthquake disasters. Therefore seismic assessment methods considering cumulative damage have been required in order to prevent damage by earthquakes. This study paid attention to energy inputted to a target structure, and intended to clarify quantitative relationships between energy and failure.

First of all, characteristics of material were investigated by tensile tests. Same relationships between energy and failure to dynamic tests were confirmed in tensile tests. Next, relationships among deformation, strain and energy were confirmed by finite element analyses. Then energy for failure was derived by integrating results of finite element analyses. Finally the proposed method was verified by comparison with vibration tests. As a result, the proposed method was reasonable, although there is a slight difference.

研究分野：工学

キーワード：耐震・免震設計 機械力学・制御 疲労損傷 疲労寿命 地震 防災 ヒステリシスエネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 社会的な背景

2011年に発生した東日本大震災では、様々な産業施設に大きな被害が発生した。東北地方太平洋地震の特徴の一例として、「地震継続時間の長さ」と「余震の多発」が挙げられる。製油所や火力発電所においても、本震当日あるいは約1ヶ月たったのちの余震で被害が進行した例がある。今後発生が危惧される南海トラフにおける地震においても、同様の被害が発生すると考えられるが、このような被害を防ぐためには、地震の継続時間や回数すなわち累積損傷を考慮した耐震強度評価法の構築が急務である。

### (2) 技術的な背景

一般に、産業施設の機器・配管系の耐震強度は、最大加速度に基づく荷重により評価されている。産業施設内には極めて多数の機器・配管系が設置されているため、このような従来手法は、コストをかけずある程度合理的な地震荷重を評価できるというメリットがある。しかしながら、繰り返し荷重や疲労損傷を評価できず、前述の東北地方太平洋地震の特徴である「地震継続時間」や「余震」の影響を考慮することは出来ない。

### (3) アプローチ

このような問題に対し、研究代表者は「エネルギー釣合式における総エネルギー入力」や「ヒステリシスエネルギー」に着目し、これまでもエネルギーによる耐震評価に関する研究を実施してきた。エネルギーは運動の累積情報を表したものであり、地震の継続時間や回数を考慮できる。また、地震で入力されたエネルギーと破損に必要なエネルギーを比較することで、地震を経験した構造物が、後どのくらいの地震に耐えられるかなどを評価することができる。エネルギーによる耐震評価は、計測震度、応答変位に基づく手法やCAV (Cumulative Absolute Velocity: 地動加速度の時間積分を用いる評価手法) などと合わせて、最大加速度に基づく荷重に依らない耐震評価手法として、発展が期待されている。特に、エネルギーは累積損傷の評価が可能であることから、大地震後の機能健全性評価や確率的リスク評価手法の評価指標として波及することが期待される。

### (4) これまでの成果と課題

これまでに、研究代表者は、エネルギーと破損の関係はべき関数で表されることを確認している。しかしながら、確認している関係は定性的なものであり、実際の機械構造物へ適用するためには、設計図面レベルの情報から破損に必要なエネルギーを明らかにしなければならない。そのためには、エネルギーと破損の関係を一般化し、定量的に推定できるようにする必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、図面、材料試験等のデータから、破損に要するエネルギーを定量的算出する手法を構築することを目的とする。

まず、有限要素解析結果をもとに、構造物の変形やひずみの関係、変形量とエネルギーの関係を算出する。その後、Coffin-Mansonの式などにより破損に必要な繰返し数を算出し、破損に要するエネルギーを求める。最後に、実験により構築した手法を確認する。

## 3. 研究の方法

### (1) 引張り試験による材料特性の把握

材料の応力ひずみ曲線を取得するために引張り試験を実施した。供試体はステンレス鋼製である。試験の様子を図1に示す。なお、試験中に、引張り速度と破損に要するエネルギーにも関係があることに気付いたため、複数の試験条件で引張り試験を実施した。

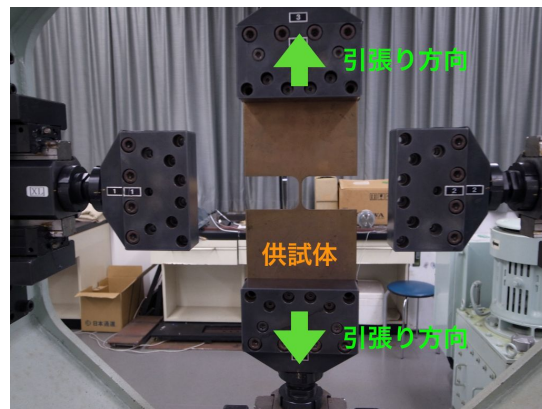


図1 引張り試験の様子

### (2) 非線形有限要素解析

(1)の引張り試験で得た結果や一般的な材料物性値を用いて、非線形有限要素解析を実施した。これにより対象とする構造物の地震時の変形量と局所的なひずみの関係(変形量-ひずみ関係)ならびに荷重-変位関係を算出することができる。

### (3) 破損に必要なエネルギーの算出

これまでに、破損に必要なエネルギーは変形が大きいくほど小さくなることを、実験により確認している。そこで、ここではその関係を計算により求めた。

破損に必要なエネルギーは、1回の振動で入力されるエネルギーに破損までの繰返し回数を乗じることで算出できる。1回の振動で入力されるエネルギーは(2)で求めた荷重-変位関係から算出する。また、破損までの繰返し回数はLangerの式やCoffin-Mansonの式などで算出することが可能である。ただし、破損までの繰返し回数を算出する式は、ひずみの関数である。そこで、(2)で求めた変形量-ひずみ関係を元に、変形量をひずみに変換して使用した。

(4) 振動実験による手法の確認

ここでは、(3)で構築した理論が正しいかを、振動実験により検証した。試験の様子を図2に示す。振動により供試体を破損させるには大きな応答が必要であったため、正弦波を基本とした入力波とした。

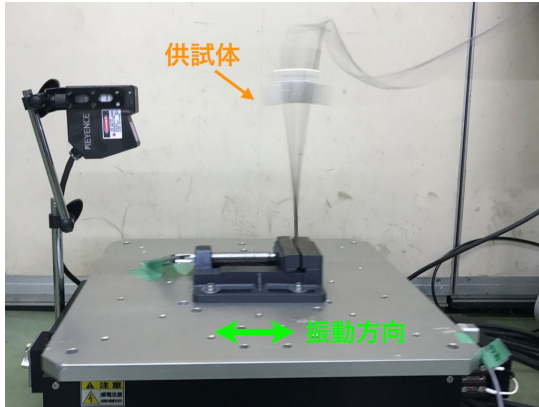


図2 振動試験の様子

4. 研究成果

(1) 引張り試験による材料特性の把握

引張り試験の結果の一例とし、図3に応力ひずみ曲線を示す。試験機の制御の関係で波形に所々ガタがあるが、破損に到るまでのデータを取得できた。なお、この曲線と横軸で囲まれた面積がヒステリシスエネルギーである。

また、図4は引張り速度と破損に要するヒステリシスエネルギーの関係をまとめたものである。図4の通り、引張り速度が大きいほど、破損に要するヒステリシスエネルギー

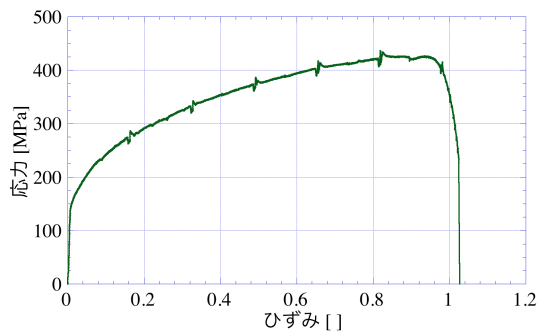


図3 応力ひずみ曲線

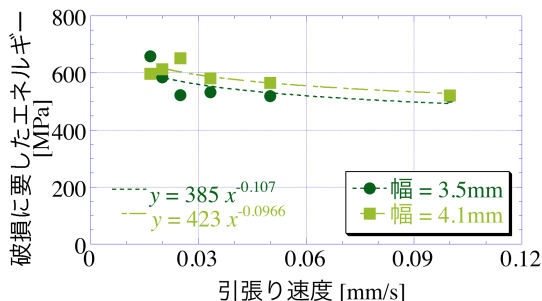


図4 引張り速度と破損に要するエネルギー

は小さくなることが確認できる。これは、これまでに振動実験で確認している傾向と同じであり、引張り試験でも同様の傾向が確認できた。

(2) 非線形有限要素解析

ここでは、鋼板の片持ちばりの上部に質量部をつけた供試体を対象に、水平方向に質量部が非線形有限要素解析を実施した。図5に有限要素解析の結果の一例を示す。図5より、根元に大きな変形が生じることがわかる。そこで、質量部の変形量と片持ちばり根元のひずみの関係を求め、図6のようにまとめた。図6には別途実施した試験の結果も併記してある。図6より有限要素解析による結果は実験結果を下回っている。これは有限要素解析を実施する際の材料の非線形特性を表すパラメータに起因するものと考えられる。有限要素解析の小変形時の関係をそのまま延長すれば試験結果と一致することから、有限要素モデルを精緻に作り込むことで、この問題は解決できると考えられる。

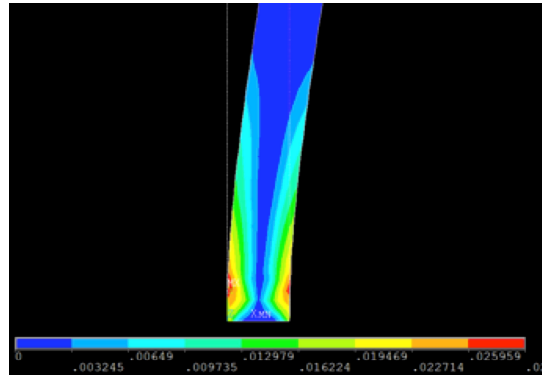


図5 非線形有限要素解析の一例

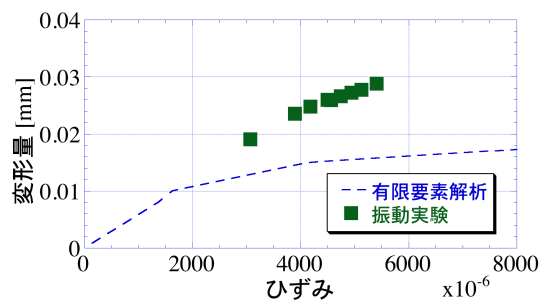


図6 ひずみと変形量

(3) 破損に必要なエネルギーの算出

ここでは、(2)で取り扱った供試体の破損に必要なエネルギーを計算する。

まず、(2)の荷重-変位関係から、1回の振動で入力されるエネルギーを算出する。図7に算出結果を示す。図7において、有限要素解析結果のエネルギーが大きくなる傾向にあるが、これは図6と同じ理由である。

次に、ひずみと破損までの繰返し回数の関

係を Langer の式により求めた．図 8 に算出結果を示す．同図より，計算値と実験値が良好な一致を示すことがわかる．

最後に，図 8 のひずみと破損までの繰返し回数の関係を，図 6 の関係に基づき変形量と破損までの繰返し回数の関係に変換し，図 7 の 1 回の振動で入力されるエネルギーを乗じれば，破損に必要なエネルギーが算出できる．

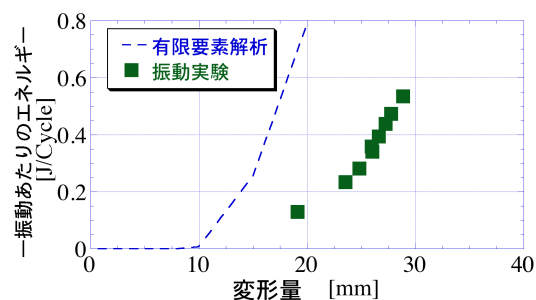


図 7 変形量と 1 振動あたりのエネルギー



図 8 ひずみと破損までの繰返し回数

#### (4) 振動実験による手法の確認

最後に，振動疲労破損実験を実施し，(3) で構築した理論が正しいかを検証した．供試体は(2)で取り扱ったものとする．また，多くの実験結果と比較するため，過去に実施した実験結果なども合わせて評価した．

図 9 に，ひずみと破損に要するエネルギーの関係について実験結果と計算値を比較した結果を示す．なお，ひずみの代わりに変形量を用いるのが好ましいが，図 6, 7 の通りひずみと変形量の関係について，実験結果と有限要素解析結果の間に誤差が生じていたため，ここではひずみを採用した．図 9 より，計算値が実験値を下回っているものの，同様の傾向を示していることがわかる．計算値と実験値の差の原因として，引張り試験からの物性値抽出の際の誤差や有限要素解析におけるモデル化の誤差が考えられる．したがって，これらの誤差を解消することで，本手法の精度は向上すると考えられる．なお，一般に疲労破損の実験データは対数で表され，従来の疲労試験においても比較的大きな誤差が発生することから，本手法の誤差も許容される程度のものといえる．

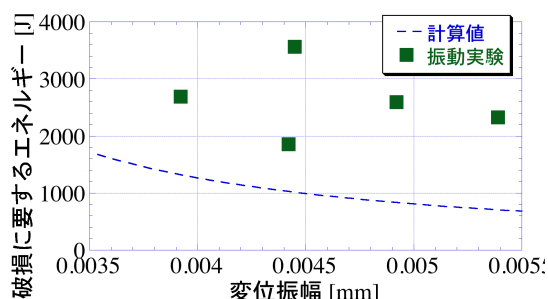


図 9 実験結果と計算値の比較

#### (5) まとめ

本研究では，理論解や有限要素解析の結果から，破損に要するエネルギーを算出する手法を構築した．本研究で扱った供試体は単純なものであったが，複雑な形状の構造物も有限要素解析によりエネルギーの算出が可能であり，本手法を適用できると見込まれる．

#### 5. 主な発表論文等

##### 〔雑誌論文〕(計 1 件)

皆川 佳祐，エネルギーに着目した材料の引張強度評価 埼玉工業大学先端科学研究所アニュアルレポート 2015，査読無，No.14，2016，pp.31-34

##### 〔学会発表〕(計 3 件)

Keisuke MINAGAWA, Satoshi FUJITA, Fundamental Study on Energy Necessary for Tensile Failure, 2016 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2016 年 7 月 20 日，バンクーバー（カナダ）

Keisuke MINAGAWA, Satoshi FUJITA, Shigeki OKAMURA, Fatigue Failure Evaluation Method and Fragility Curve Using Energy, 2015 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2015 年 7 月 23 日，ボストン（アメリカ）

皆川 佳祐，趙 希祿，材料が吸収するエネルギーに着目した強度評価，第 13 回埼玉工業大学若手フォーラム 2015，2015 年 7 月 18 日，埼玉工業大学（埼玉県深谷市）

##### 〔その他〕

埼玉工業大学工学部機械工学科機械力学研究室ホームページ

<http://www.sit.ac.jp/user/minagawa/research.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

皆川 佳祐 (MINAGAWA, Keisuke)  
埼玉工業大学・工学部・機械工学科  
研究者番号：30453799