様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２３年６月３日現在

機関番号：32657
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2009～2010
課題番号：21760174
研究課題名（和文）　ヒステリシスエネルギーによる新しい耐震評価法の確立

研究課題名（英文）　Establishment of seismic evaluation method based on hysteresis energy

研究代表者
皆川　佳祐（MINAGAWA KEISUKE）
東京電機大学・工学部・助教
研究者番号：30453799

研究成果の概要（和文）：
本研究は，耐震分野で注目されている「総エネルギー入力」と疲労強度学における「ヒステリシスエネルギー」との関係を解明し，エネルギーによる耐震強度推定手法の構築に向けた基礎的検討を行うことを目的としている．研究の結果，総エネルギー入力とヒステリシスエネルギーが等価であることを確認した．また，エネルギーと破損には相関があり，破損に要するエネルギーは変形量，ひずみに着目することで統一的に評価できることを確認した．

研究成果の概要（英文）：
This study aimed at an establishment of seismic evaluation method based on energy. An input energy is known in seismic engineering field, and a hysteresis energy is known in fatigue strength field. As a result of this study, it was confirmed that the input energy is equivalent to the hysteresis energy. In addition, correlation based on deformation between energies and failure was confirmed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総　計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学
科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御
キーワード：耐震，地震，防災，疲労寿命

１．研究開始当初の背景

現在の耐震評価は，慣性力に基づく静的手法や運動方程式に基づく動的手法など，瞬間の荷重による手法が主流である．一方で，配管の地震時の破壊モードは低サイクル疲労であるとの報告もある．また，一度大地震を経験した構造物がどれだけ耐震強度を維持しているのか明らかにすることは，社会的にも極めて重要な課題である．以上より，耐震安全性の更なる向上のために，累積損傷の影響を考慮した新たな耐震評価法が求められている．

これまでに，研究代表者は累積損傷が評価可能な手法として「エネルギー釣合式における総エネルギー入力」に着目し，疲労破損とエネルギーの関係を明らかにした．これまで明らかにした関係は定性的なものであったが，定量的な関係が明らかになれば，様々な構造物の地震時の疲労損傷時期を推定できると考えられる．

一方，疲労強度学ではヒステリシスエネルギーと疲労破壊に関する研究がなされており，繰返し回数と破損に要するエネルギーの関係も実験により求められている．しかしながら，ここで得られている知見は一般に両端固定の引張圧縮疲労試験に関するもので，地震応答のように曲げやせん断変形を伴い，振幅や振動数がランダムな振動系に直接適用することはできない．

ここで，総エネルギー入力，ヒステリシスエネルギー共に，ヒステリシスループの面積を基に算出していることから，エネルギー釣合式で確認しているエネルギーと破損の関係をヒステリシスエネルギーからも説明できると考えられる．また，両者の関係を明らかにすることで，これまでの疲労強度学の知見をエネルギー釣合式による手法に適用することができ，ヒステリシスエネルギーの振動系への適用が極めて簡便に行えるようになる．

２．研究の目的

本研究は，耐震性評価手法として近年注目されている「総エネルギー入力」と疲労強度学における「ヒステリシスエネルギー」との関係を解明し，エネルギーより耐震強度や疲労損傷時期の推定を行う手法の構築に向けた基礎的検討を行うことを目的とする．

３．研究の方法

(1)供試体の設計・製作

本研究の供試体として，所属機関で所有する水平振動試験装置で破損可能なサイズであることが要求される．そこで，長さ 157[mm]，幅 9[mm]，厚さ 3[mm]のステンレス板に 0.20[kg]の質量を付加する供試体を設計・製作した．固有振動数は 16.3[Hz]，減衰比は 0.53[%]である．また，質量を 0.50 [kg]に付け替えることで，固有振動数を 10.4[Hz]に変更することができる．併せて，供試体を試験装置に固定する治具を設計・製作した．ここで製作された供試体は本研究での試験で一貫して使用された．製作した供試体と治具を図１に示す．

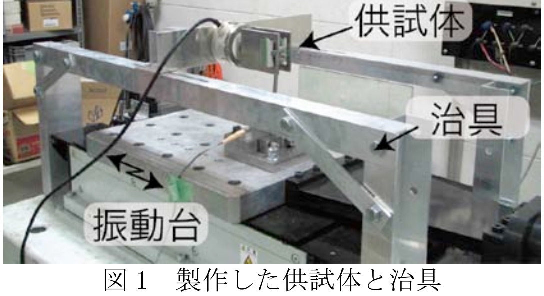

図１　製作した供試体と治具

(2)正弦波による振動試験

正弦波加振で供試体に入力される総エネルギー入力を計測するため，振動試験を行った．供試体の下端を振動台に固定，上部を自由にし，正弦波を入力波とする．ここで，正弦波の振動数は供試体が共振するように供試体の固有振動数と同等とした．さらに，供試体が塑性変形後も共振するように，振動数 14.4～16.4[Hz]で時間変動するスイープ波とした．このような条件のもと複数の入力加速度振幅で実験を行い，総エネルギー入力や供試体に生じるひずみを求めた．また，供試体が破損するまで振動台を揺らし続け，総エネルギー入力と破損の関係を求めた．

(3)正弦波による曲げ試験

正弦波状の荷重が加わった際のヒステリシスエネルギーを計測するために，曲げ試験を行った．この試験では，供試体上部をロードセルを介して固定点に固定し，供試体下部を振動台に固定した．振動台を「(2)正弦波による振動試験」における応答変位振幅と同等の振幅で揺らし，ヒステリシスエネルギーや供試体に生じるひずみを求めた．また，供試体が破損するまで振動台を揺らし続け，ヒステリシスエネルギーと破損の関係を求めた．

(4)ランダム波による振動試験

ランダム波加振で供試体に入力される総エネルギー入力を計測するため，振動試験を行った．ランダム波の作成には模擬地震波の作成方法として知られているスペクトル適合法を用い，10 秒間の波を作成した．ここで，供試体が共振するように，振動数 14.4～16.4[Hz]でピークを取るスペクトルを目標スペクトルとした．その他，「(2)正弦波による振動試験」と同様の条件で試験を行った．破損を伴う実験では，前述の 10 秒間のランダム波を繰り返し入力した．

(5)ランダム波による曲げ試験

ランダム波状の荷重が加わった際のヒステリシスエネルギーを計測するために，曲げ試験を行った．入力するランダム波は「(4)ランダム波による振動試験」で計測された供試体の応答変位とした．但し，振動試験機の性能上，時間軸は 1/5 にスケールダウンした．その他，「(3)正弦波による曲げ試験」と同様の条件で試験を行った．

４．研究成果

(1)正弦波による振動試験と曲げ試験の結果の比較

振動試験における供試体の変形と曲げ試験におけるそれとの関係を調査するため，正

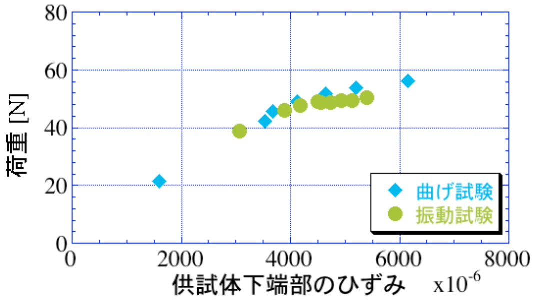

図 2　ひずみと荷重の関係

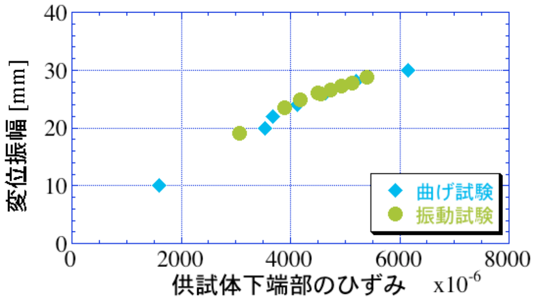

図 3　ひずみと変位振幅の関係

弦波による振動試験と曲げ試験の結果を比較した．いずれの試験でも供試体下端部で破損が生じたため，供試体下端部でのひずみに着目して実験結果を整理した．

その結果，図 2，3 に示すように，試験方法によらず，ひずみが同じならば変位や荷重は同じになることが確認された．したがって，荷重を加える方法によらず，同様の変形をすることを確認した．

(2) 正弦波による総エネルギー入力とヒステリシスエネルギーの比較

試験方法によらず供試体の変形が同じであることが確認できたため，次に，総エネルギー入力とヒステリシスエネルギーの関係を調査した．まず，一振動あたりのエネルギーに着目したところ，図 4 に示す通り，変位（すなわち，ひずみ）が同じであれば一振動あたりの総エネルギー入力とヒステリシスエネルギーは一致すること確認した．

また，破損とエネルギーの関係を整理したところ，図 5 に示す通り，いずれのエネルギーも変位振幅が大きいほど，少ないエネルギーで疲労破損する傾向があることを確認した．また，変位振幅が同程度であれば破損に要する総エネルギー入力とヒステリシスエネルギーは同程度であることを確認した．

(3) 固有振動数による破損に要する総エネルギー入力の比較

破損に要する総エネルギー入力に関して，固有振動数の影響を検討した．0.20[kg]，

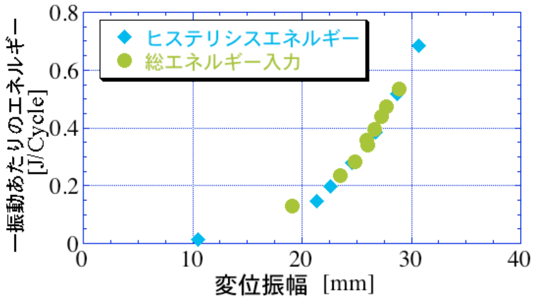

図 4　変位振幅とエネルギーの関係

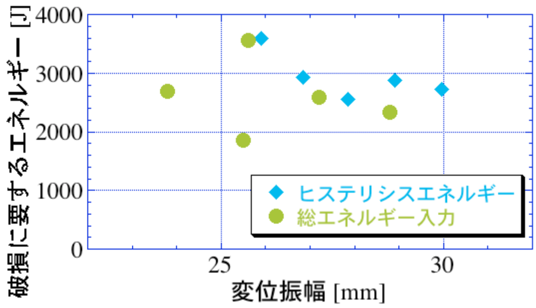

図 5　変位振幅と
破損に要するエネルギーの関係

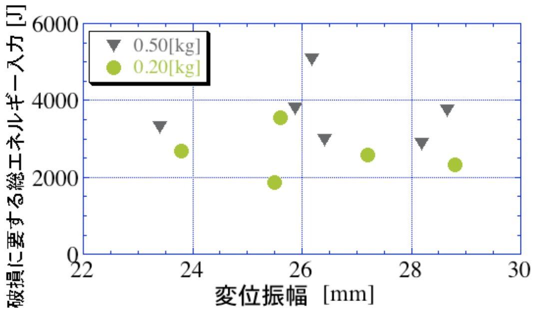

図 6　質量による
破損に要する総エネルギー入力の比較

0.50[kg]の質量を用意し，供試体の質量で固有振動数を変化させる．なお，破損箇所となるステンレス板の形状は共通である．固有振動数が違うため破損に要する時間は異なったが，応答変位振幅に着目して整理すると，図 6 に示す通り，固有振動数によらず同程度の総エネルギー入力で破損することが確認出来た．

(4) ランダム波による総エネルギー入力とヒステリシスエネルギーの比較

ランダム波を入力した際の，総エネルギー入力とヒステリシスエネルギーの関係を調査した．一入力波あたりのエネルギーを図 7 に示す．図 7 の通り，多少の差が生じているが，変位（ひずみ）が同じであれば一入力波あたりの総エネルギー入力とヒステリシス

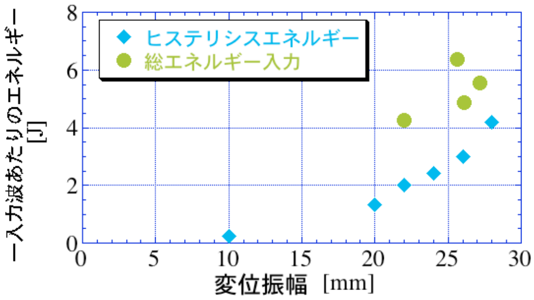

図７　最大変位振幅とエネルギーの関係

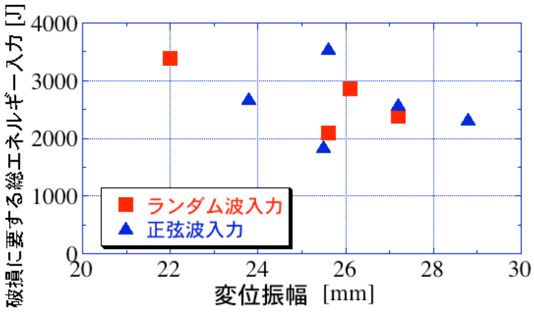

図８　入力波による
破損に要する総エネルギー入力の比較

エネルギーは同程度になることを確認した．ヒステリシスエネルギーの計測時に，摩擦などの影響が生じたことが，誤差の原因だと考えられる．

(5)入力波による破損に要する総エネルギー入力の比較

正弦波による振動実験，ランダム波による振動実験について，入力波と破損に要する総エネルギー入力の関係を調査した．図８に示した通り，応答変位振幅に着目して整理したところ，応答変位振幅が同じであれば破損に要する総エネルギー入力も同程度になることを確認した．

(6)総括

以上の研究成果を総括する．本研究より，振動試験，曲げ試験によらず供試体は同じ変形をし，総エネルギー入力とヒステリシスエネルギーは等価であることを確認した．また，変位振幅，ひずみ振幅に着目することで供試体や試験方法，着目するエネルギーによらず破損に要するエネルギーは同等になることを確認した．したがって，変形量，ひずみ量に着目することで，破損に要するヒステリシスエネルギーから破損に要する総エネルギー入力を求めることができ，統一的な評価が可能になると言える．

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）

〔学会発表〕（計４件）

(1)皆川佳祐，藤田聡，エネルギー釣合式を用いた耐震強度評価手法に関する研究 -(2)総エネルギー入力とヒステリシスエネルギーの関係-，日本原子力学会 2010 年秋の大会，2010 年 9 月 15 日，北海道大学

(2)皆川佳祐，藤田聡，金枝真吾，Comparison Between Hysteresis Energy and Input Energy for Failure，米国機械学会 Pressure Vessels and Piping Division Conference 2010，2010 年 7 月 19 日，アメリカ合衆国ワシントン州ベルビュー

(3) 金枝真吾，皆川佳祐，藤田聡，遠藤六郎，雨宮満彦，エネルギー釣合式を用いた原子力施設･配管系の耐震評価手法の高度化に関する研究，日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2009，2009 年 8 月 3 日，北海道大学

(4)皆川佳祐，藤田聡，北村誠二，岡村茂樹，Fundamental Study on Shape Dependency of Input Energy for Failure，米国機械学会 Pressure Vessels and Piping Division Conference 2009，2009 年 7 月 27 日，チェコ共和国プラハ

６．研究組織

(1)研究代表者

皆川　佳祐（MINAGAWA KEISUKE）
東京電機大学・工学部・助教
研究者番号：30453799

(2)研究分担者　なし

(3)連携研究者　なし