

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360097

研究課題名（和文）地震エネルギー入力に基づく原子力機器・配管等の耐震性評価技術の開発

研究課題名（英文）Development on seismic evaluation technique for nuclear equipment and pipes based on seismic energy input

研究代表者

藤田 聡 (FUJITA SATOSHI)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：40143531

研究成果の概要（和文）：一般に耐震性評価は荷重で行われるが、荷重は瞬間的なものであり、地震の継続時間や余震の回数などは考慮できない。本研究では、耐震性評価指標として地震の継続時間や余震の回数を考慮できる地震エネルギー入力に着目し、実地震エネルギー入力と破損の関係を検討した。複数のモデルを用いて実験を行った結果、地震エネルギー入力と破損の間に相関を確認し、地震エネルギー入力により耐震性を評価できることを示した。

研究成果の概要（英文）：In general, seismic evaluation is based on a load. A load is a momentary parameter, so it cannot evaluate duration time of an earthquake and the number of aftershocks. Therefore a seismic energy input was applied in this study. The seismic energy input can evaluate duration time of an earthquake and the number of aftershocks. As a result of experiments using various specimens, relationships between the seismic energy input and failure were confirmed. Therefore seismic energy input is applicable to seismic evaluation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2012年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
総計	13,700,000	4,100,000	17,810,000

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，構造工学・地震工学，原子力エネルギー，減災，機械力学・制御

1. 研究開始当初の背景

平成19年7月16日に発生した「新潟県中越沖地震」では、東京電力柏崎刈羽原子力発電所においても地震による被害が発生した事は記憶に新しい。一般的に原子力プラントの機器・配管の動的荷重に対する強度は、静的荷重により定められた強度限界によってその発生応力を評価している。静的設計は構

造物の振動特性を無視しているため、過度に保守的な設計となっているとも言われている。また、近年の研究によれば、地震による配管系等の破壊現象は、累積的な疲労破壊が支配的であるとの知見もある。したがって、原子力施設の機器・配管等の合理的な耐震設計、動的荷重に対する適切な強度評価を行うためには、地震時に塑性／破壊に至る条件を

明確にする必要がある。

さらに、プラントの地震時における安全性の確認は、地震時の安全停止までを念頭に置いたものとなるが、保安規定では再起動の技術的基準は必ずしも明確にされていない。また、各学協会規格では、原子力施設の建設・設計及び維持の観点に立脚した検討が進められているが、運転管理や保全の観点から地震後の再起動を対象に検討したものはない。一方、米国においては現在累積絶対速度（CAV：Cumulative Absolute Velocity）による評価手法が提唱されており、我が国においてもこうした考え方による合理的な耐震安全性評価方法の確立が望まれている。

2. 研究の目的

研究代表者らは、過去数年間に渡り、機器・配管系の動的強度評価への適用を目的として、エネルギー釣合式に着目し、累積エネルギー量は破損評価の指標として用いることが可能なことを小形の振動モデルを用いて実験的・解析的に検証した。そこで本研究では、これまでの研究を高度化し、動的挙動を考慮したエネルギーベースの限界強度評価手法を将来的に構築するための基礎的技術を開発することを目的とする。そのために、下記の研究課題を遂行する。

- ①実験供試体を大形化し計測誤差ならびに製作誤差を排除し、より高精度なデータを収集する。
- ②破損と入力加速度の影響を明確にするために高加速度入力実験（10G程度）を実施する。
- ③破損に要するエネルギーの形状依存性、材料依存性の調査と従来の疲労理論と整合性検証する。
- ④多自由度のモデルを用い、本手法におけるモードの影響等を考察（将来の配管系への適用）する。

3. 研究の方法

(1) エネルギー釣合式

エネルギー釣合式は、運動方程式に変位増分を乗じ、運動時間全体で積分することで得られる。一般的に、地震時の構造物や機器の応答評価に使用される運動方程式は、時々刻々と変化する力の釣合いを評価するものであり、地震経過前後の構造物の特性の変化や、累積損傷、金属疲労を把握することができない。一方でエネルギー釣合式は、積分により累積情報を表すため、疲労損傷等の定量的評価が可能となる。故に、地震応答のような繰り返し荷重の評価に有効である。

多質点系のエネルギー釣合式として研究代表者らが提案した手法は、各質点間の相対変位に着目したものであり、各質点のエネルギーや、上部質点から流入したエネルギーを

明らかにすることができる。

(2) 1質点系モデルによる検討

単純な1質点系モデルにより基本検討を行うため、幅数センチ、高さ数十センチの棒の上部に25kgの質量を載せた供試体を設計・製作した。供試体を図1に示す。供試体の設計にあたっては、有限要素解析や既往の疲労強度計算等により、破損箇所、破損時期の推定を行い、研究代表者らが所有している設備で実験可能なサイズを選定した。棒の断面形状が25mm四方の供試体を基準モデルとして、図2のように、断面係数や断面二次モーメントが基準モデルと等価な断面形状を選定し、様々な形状の供試体を製作した。ここで、断面形状は中実ばかりでなく、中空のものも選定した。供試体の固有振動数は棒の高さにより調整するものとし、ここでは固有振動数が20Hzとなるように設計した。また、供試体の材質として、産業施設で良く使用されるオーステナイト系ステンレス鋼を選定した。

以上のモデルを長時間、大加速度で加振し、共振応答させることで疲労破損させ、破損とエネルギーの関係を検討した。入力波は供試体の固有振動数と同等の振動数を有するスイープ波で、掃引帯域を19~22Hzとした。また、複数の入力加速度（1.5~5.0G）で実施した。

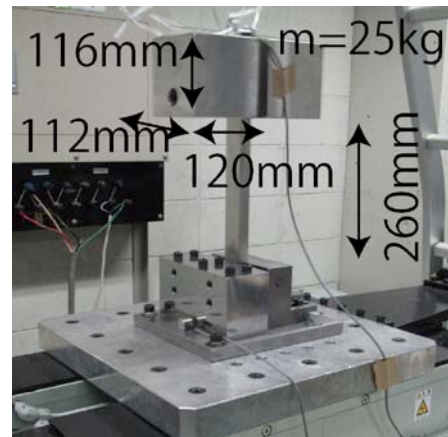


図1 供試体（1質点系）

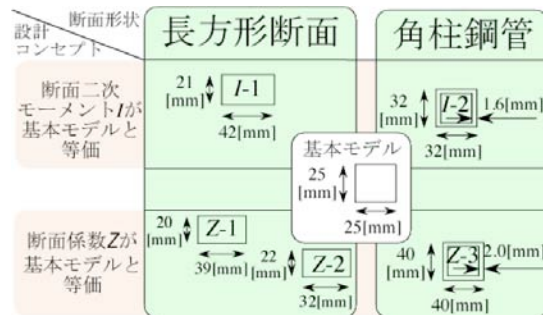


図2 供試体の断面形状（1質点系）

(3) 2 質点系モデルによる検討

2 質点系モデルによる検討では、前述の 1 質点系モデルの供試体の固有振動数と同等の振動数を有することを目標に設計を実施した。有限要素法などによる検討の結果、図3に示す単純な串団子形 of 2 質点系モデルを製作した。下部質点（質点1）の質量は 6.0kg、上部質点（質点2）の質量は 1.7kg、全高は 475mm、支持柱断面は幅 20×厚さ 6mm である。また、供試体の材質は、オーステナイト系ステンレス鋼である。予備試験より、1 次固有振動数が約 5Hz、二次固有振動数が約 23Hz、減衰比が約 0.4% であることを確認した。

振動実験では、供試体を長時間、大加速度で加振し、共振応答させることで疲労破損させた。入力波は供試体の固有振動数と同等の振動数を有するスイープ波で、掃引帯域を 4.2~6.0Hz として 1 次モードを励起させる波形（以下、1 次モード波）、同じく 21~24Hz として 2 次モードを励起させる波形（以下、2 次モード波）、上述の二つの波形を重ね合わせて両モードを励起させる波形、計 3 種を用いた。また、複数の入力加速度（3.7~8.1G）で実施した。

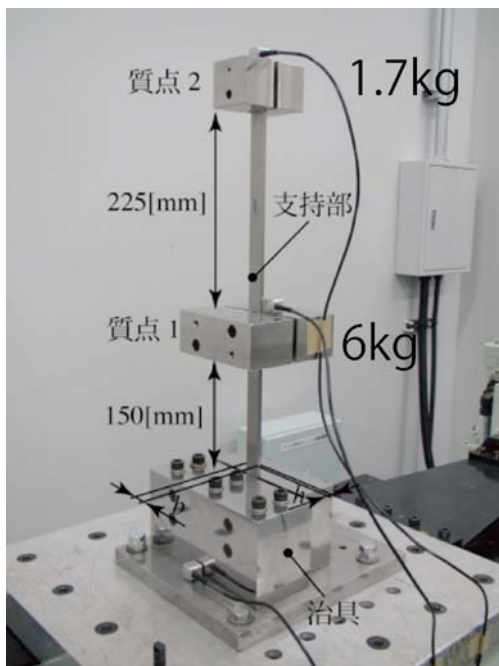


図3 供試体（2 質点系）

4. 研究成果

(1) 1 質点系モデルによる検討

1 質点系モデルによる実験結果として、図4に破損に要したエネルギーと各パラメータの関係を示す。図4より、疲労寿命が長いほど、エネルギーの時間増分が小さいほど、入力加速度振幅が小さいほど、破損に多くのエ

ネルギーを要することが確認できる。なお、一部の断面形状では上記の関係が確認できなかったが、これは、供試体が加振方向以外に振動してしまったためである。以上のエネルギーと破損の相関は、これまでに研究代表者らが実施した小形の供試体による結果と同等であり、エネルギーと破損の相関が構造物のサイズによらず成立することを確認した。

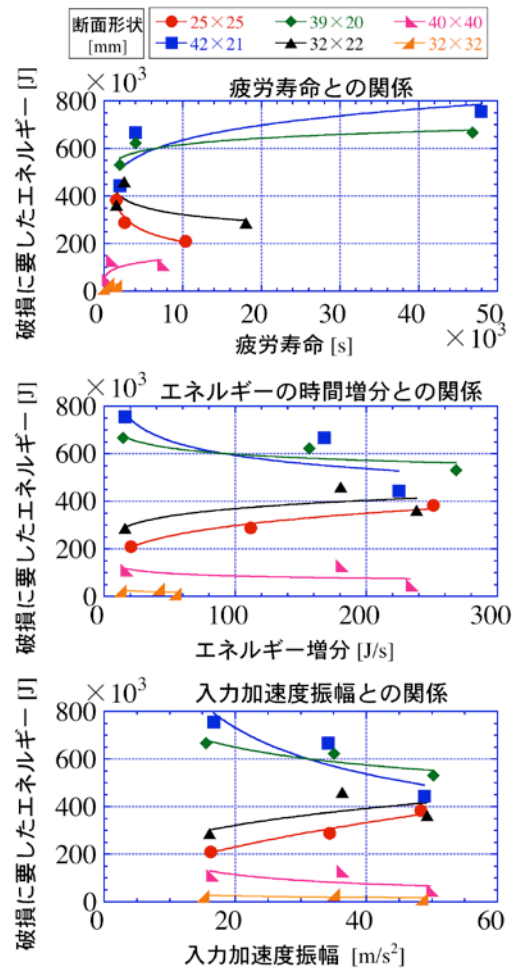


図4 試験結果（1 質点系）

(2) 2 質点系モデルによる検討

実験結果として、図5に 1 次モード波、図6に 2 次モード波を入力した際の破損に要したエネルギーと各パラメータの関係を示す。

図5、6の破損までの時間との関係より、供試体は 10~20 分程度で破損したことが確認できる。また、いずれの入力波においても疲労寿命が長いほど、エネルギー増分が小さいほど、入力加速度振幅が小さいほど、多くのエネルギーを破損に要しており、1 質点系モデルで確認した傾向を 2 質点系モデルでも確認できた。

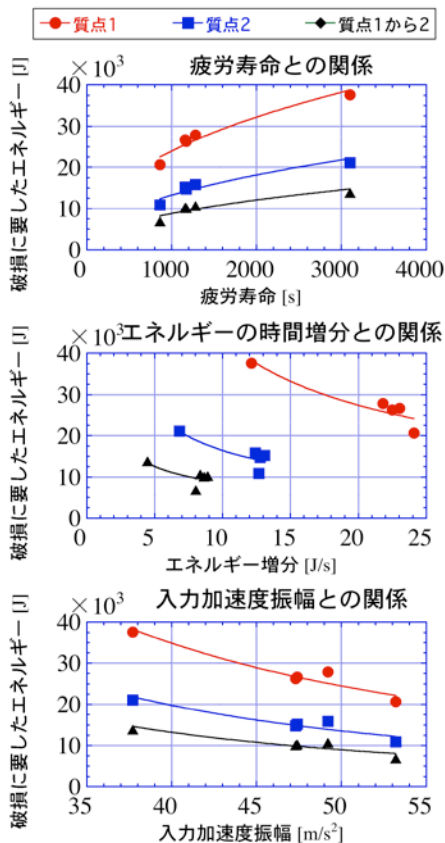


図5 試験結果 (2 質点系, 1 次モード波)

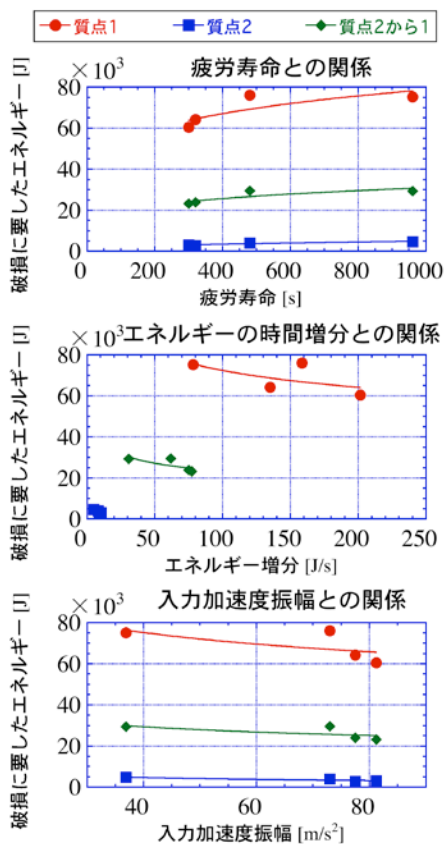


図6 試験結果 (2 質点系, 2 次モード波)

また, 1 次モード波では, 上部質点のエネルギーが下部質点の 50%程度であったのに対し, 2 次モード波では 5%程度であった。さらに, 1 次モード波では下部質点から上部質点にエネルギーが移動しているのに対し, 2 次モード波では上部質点から下部質点にエネルギーが移動している。このように, 振動モードの違いによるエネルギーの振る舞いの違いも確認しており, 今後は, エネルギーに着目することで, 振動モードを推定することも可能になると考えられる。さらに, 振動モードが明らかになることで, 破損箇所も明らかになると考えられる。

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)

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) Keisuke MINAGAWA, Satoshi FUJITA, Seiji KITAMURA, Tomoyoshi WATAKABE, Relationship between Cross section of Test piece and Input Energy for Failure, Proceedings of the 2011 ASME Pressure Vessels and Piping Conference CD-ROM 査読有り, 2011 年, PVP2011-57866. pdf
- (2) 皆川佳祐, 藤田聡, 金枝真吾, 遠藤六郎, 雨宮満彦, エネルギー釣合式の多質点系への拡張に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有り, 760 号 75 巻, 2011 年, pp. 290-299
- (3) Keisuke MINAGAWA, Satoshi FUJITA, Shingo KANAEDA, Comparison Between Hysteresis Energy and Input Energy for Failure, Proceedings of the 2010 ASME Pressure Vessels and Piping Conference CD-ROM, 査読有り, 2010 年, PVP2010-25411. pdf
- (4) Keisuke MINAGAWA, Satoshi FUJITA, Shingo KANAEDA, Seismic Damage Monitoring and Evaluation using Energy Balance Equation, Proceedings of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, 査読無し, 2010 年, 176. pdf

[学会発表] (計 7 件)

- (1) Keisuke MINAGAWA, Cumulative Damage Evaluation based on Energy Balance Equation, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012 年 9 月 26 日, ポルトガル, リスボン
- (2) 藤田聡, 地震エネルギー入力に基づく機器・配管系の耐震性評価に関する研究, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2012, 2012 年 9 月 18 日, 慶応義塾大学
- (3) 藤田聡, エネルギー釣合式に基づく機械

構造物の耐震性評価に関する研究, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 10 日, 金沢大学

- (4) Keisuke MINAGAWA, Application of Energy Balance Equation to 2 Degree-of-Freedom Model, 2012 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2012 年 7 月 18 日, カナダ, トロント
- (5) 藤田聡, エネルギー釣合式による多質点系モデルの耐震性評価に関する研究, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2011, 2011 年 9 月 6 日, 高知工科大学
- (6) 藤田聡, 機器・配管系の耐震工学的課題, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, 2010 年 11 月 19 日, エポカルつくば
- (7) 藤田聡, 破断エネルギーの定量的評価に関する基礎的研究 (供試体断面形状の影響), 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2010, 2010 年 9 月 15 日, 同志社大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 聡 (FUJITA SATOSHI)
東京電機大学・工学部・教授
研究者番号: 40143531

(2) 研究分担者

小見 俊夫 (OMI TOSHIO)
東京電機大学・工学部・講師
研究者番号: 30408645
皆川 佳祐 (MINAGAWA KEISUKE)
埼玉工業大学・工学部・講師
研究者番号: 30453799