

# 振動荷重を受ける梁の進行性変形発生条件に関する研究

Study on ratchet deformation occurrence conditions  
of beams due to vibration load

東京大学	笹木 龍之介	Ryunosuke SASAKI	Student Member
東京大学	一宮 正和	Masakazu ICHIMIYA	Non-Member
東京大学	呂 金其	Jinqi LYU	Non-Member
東京大学	笠原 直人	Naoto KASAHARA	Member

## Abstract

According to experimental observations, the failure modes of piping in nuclear power plants caused by large seismic motion are fatigue or ratchet deformation. However, the mechanism of ratchet deformation under the large seismic load is not so clear. In this study, authors conducted experiments and analysis of beams which simulates piping due to cyclic sinusoidal or more complicated waves (composite sinusoidal wave). As the results, authors confirmed that ratchet deformation occurrence conditions are strongly affected by the frequency of input wave. Moreover, the mechanism of ratchet deformation was explained from the view point of energy transfer from input loading to the beam and amplification factor of the beam.

**Keywords:** Ratchet deformation, Vibration, Frequency ratio, Load-controlled stress, Displacement-controlled stress, Input energy, Amplification factor

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

福島第一原子力発電所の事故以降、「事故が起こらないような設計」に加え「事故が起こることを前提とした対策」を重要視することが必要になっている[1]。そのため設計基準外事象 (BDBE) 下での実際の破損シナリオ評価が必要になる。従来の研究で過大地震が起こるとき、原子力発電所の機器および配管の破損モードとして進行性変形および疲労が確認されている[2]。過大地震荷重におけるこれらの破損モードのメカニズムは明確にはわかっていない。そこで本研究では進行性変形について着目する。進行性変形とは一定の一次応力に、繰り返し二次応力が重畳した場合に、平均ひずみが蓄積されていく変形である (Fig.1)。

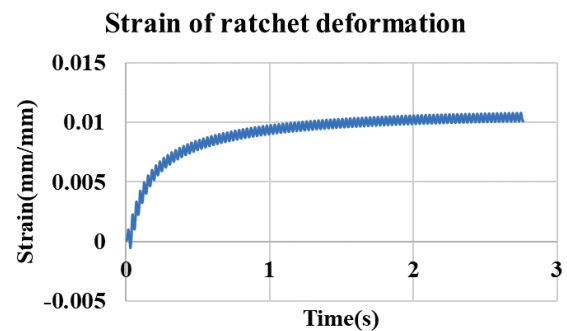


Fig.1 An example of strain at ratchet deformation

### 1.2 これまでの研究

本研究グループでは配管を模擬した梁に対して振動荷重を与えた際の進行性変形の発生条件についての研究が行われている。その中で梁に与える振動荷重を正弦波としたときの進行性変形に関して実験及びFEM解析によって明らかになっている[3]。解析モデルの概略は Fig.2 のようになっている。片持ち梁自身の重さと先端に付与された荷重によって一定の1次応力が働くようになっている。また梁に入力加速度を与えることで繰り返しの2次応力が発生している。進行性変形発生条件は Fig.3 の

連絡先: 笹木 龍之介  
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
東京大学大学院工学研究科原子力国際専攻  
E-mail: chapal19950612@gmail.com

ようにまとめられている。 $f_n$  は梁の固有振動数を表し、 $1.0f_n$  は固有振動数と同じ振動数を持つ正弦波加速度を与えているときに相当する。また横軸は1次応力を降伏応力で除して正規化した値 (X)、縦軸は2次応力を降伏応力で除して正規化した値 (Y) である。図中の青線が進行性変形発生条件を表しており、線より上側の条件で進行性変形が起こる。よってグラフの線が下に来るほど、進行性変形が発生するために必要な2次応力が小さく、進行性変形が発生しやすいということになる。

実験及び解析において様々な振動数比の入力波に対する進行性変形発生条件をまとめたものを Fig.4 及び Fig.5 に示す。実験においても FEM においても、固有振動数及びそれより低周波側の振動数を与えるときに進行性変形が発生しやすくなることがわかった。また、この傾向は定常応力の大きさにかかわらないことが確認できる。



Fig.2 A schematic of the analysis model

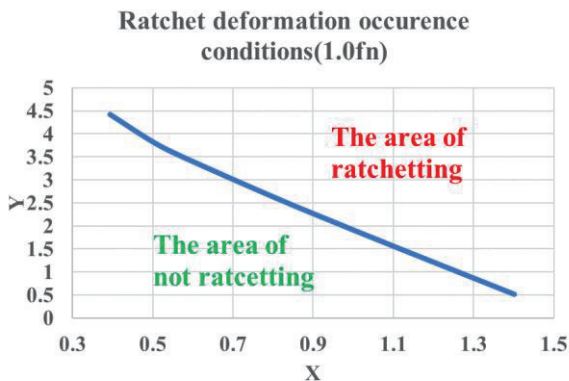


Fig.3 Ratchet deformation occurrence condition at 1.0fn

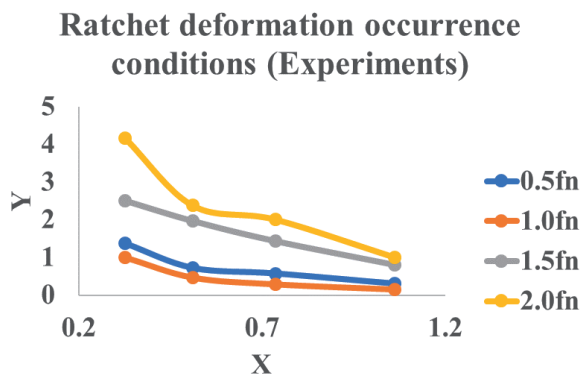


Fig.4 Ratchet deformation occurrence conditions (experiments)

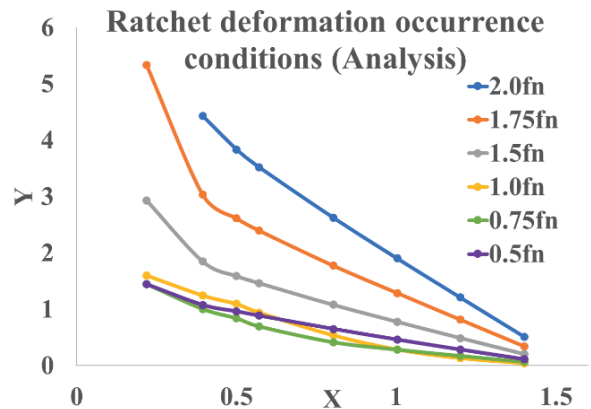


Fig.5 Ratchet deformation occurrence conditions (analysis)

### 1.3 目的

従来の研究により、梁に正弦波加速度を与えたときの進行性変形の発生条件については整理がなされている。しかし、実際には正弦波よりも複雑な地震動が起こっており、そうした状況下での構造物の進行性変形の発生条件およびメカニズムは明確になっていない。本研究では実際の地震現象に近づくため、梁に与える入力加速度を正弦波より複雑な波形とした場合の進行性変形の発生条件明らかにすることを目的とした。具体的には、正弦波の結果と複雑波の結果を周波数に着目して比較してそれぞれの相違点を明らかにし、そこから正弦波および複雑波における進行性変形発生メカニズムを検討する。

## 2. 方法

### 2.1 実験装置及び実験方法

Fig.6 に示すように鉛アンチモン合金の平板試験体の下端を振動台に固定して、水平振動を与えた。鉛アンチモン合金の物性値は table1 のようになっている。また試験体の形状は Fig.7 のようになっている。

試験体の先端には剛な金属棒を取り付け、さらにその棒の先に錘がついている。重力により梁に定常1次曲げ応力が発生する。また試験体に加速度を与えることで慣性力が働き、これにより繰り返し曲げ応力が発生する。本実験では従来の研究に比べ複雑な振動を考えるため、入力加速度として、異なる振動数の正弦波を足し合わせた複合波を用いた (下式)。

$$\ddot{x}_e = A(\sin 2\pi f_1 t + \sin 2\pi f_2 t)$$

ここで $A$ は入力波の振幅を表し、 $f_1$ および $f_2$ は実験のパラメータとして与える複合波の振動数となっている。例えば $0.5fn+1.0fn$ の複合波を入力波として用いる場合、 $f_1 = 0.5fn$ 、 $f_2 = 1.0fn$ となる。本実験では、 $f_1$ は固有振動数の0.5倍で固定し、 $f_2$ を変化させてそれぞれの条件において進行性変形が発生するための加速度を求め、ここから進行性変形の発生条件をまとめた。進行性変形発生基準は入力振動100サイクルに対して、最大ひずみ（梁の根本部分、Fig.7の黒丸部分）が1.0%となった時と設定している。

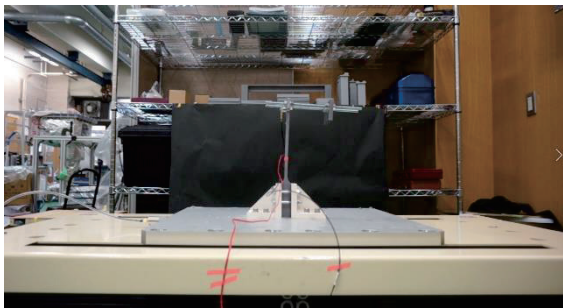


Fig.6 Experiment apparatus

Table1 Material properties of Pb99%-Sb1%

Young's modulus	Yield Stress	Density
16GPa	8.5MPa	11340kg/m <sup>3</sup>

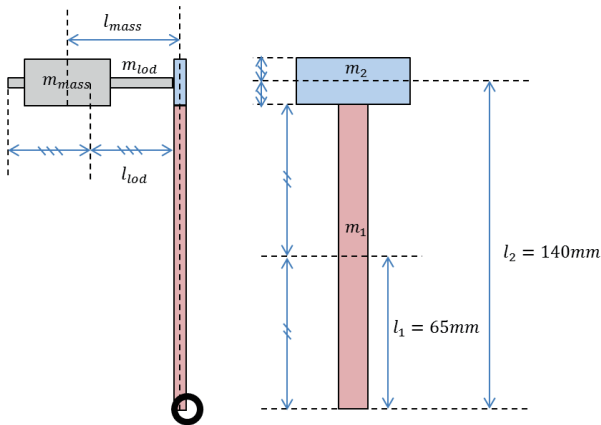


Fig.7 Size of specimen

## 2.2 FEM 解析

実験の条件を模擬したモデルの作成をプリ・ポストプロセッサ FEMAP ソフトウェアによって行い、有限要素解析をソルバーとして FINAS/STAR を使用し行った。解析方法は大変形を考慮した動的弾塑性時刻歴解であり、実験と同様に、各振動数比条件において進行性変形

に必要な加速度の大きさを求め、進行性変形の発生条件をまとめた。

モデルはFig.8のようになっている。断面が $6\text{mm} \times 13\text{mm}$ 、長さが $140\text{mm}$ の一樣矩形梁モデルを用いており、試験体の梁部分を模擬した形になっている。長手方向がx方向、y方向が高さ方向、z方向が奥行き方向になっている。梁の右端を自由端とし、先端荷重が付与されている。左端は中央部分のみ完全拘束になっており、その他はy方向のみ自由度を与えている。平面応力要素を使用しており、メッシュの分割数は長手方向に120、高さ方向に32分割されており、総メッシュ数は3840個になっている。またラチェットが発生するのは梁の固定端上部(Fig.8の丸部分)なので、その周辺のメッシュが一番細くなるようにしている。

また材料は純鉛としており、各物性値はTable.3のようになっている。完全弾塑性モデルを用いており、塑性域において応力は降伏応力で一定になるようになっている(Fig.9)。

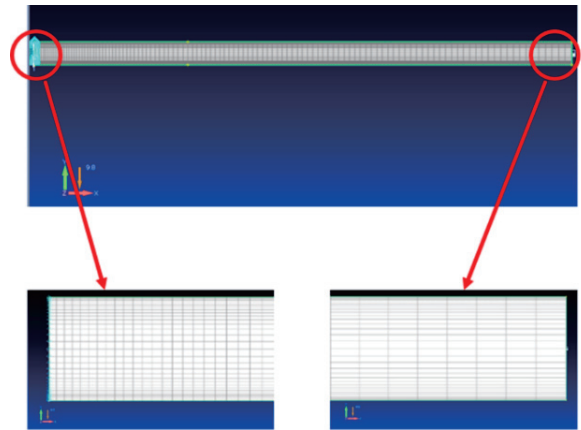


Fig.8 An analysis model

Table.3 Material properties of pure Pb

Young's modulus	Yield stress	Density	Poisson ratio
16 GPa	5.0 MPa	11340 kg/m <sup>3</sup>	0.44

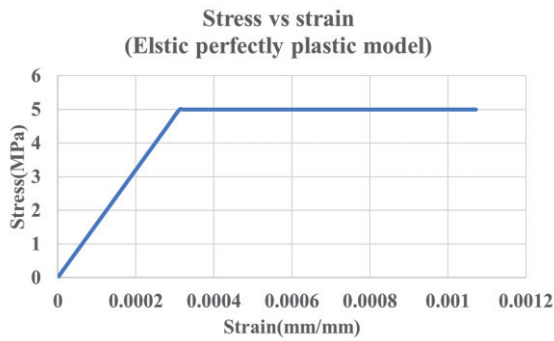


Fig.9 Stress vs Strain (Elastic perfectly plastic model)

ここでは重力加速度は図の下向きにかかっている。先端に錘を付与することで梁及び錘の重さによって梁に定常曲げモーメントが発生する。一方固定端に正弦波加速度を与えることで梁及び錘に慣性力が働き、これによる曲げモーメントが加わる。これらのモーメントにより梁の各部分に応力が発生するが、引張応力が最大になるのは梁の固定端の最上部であり、ここで進行性変形が発生することになる。進行性変形発生基準は実験のものとの比率を揃え、50 サイクルの入力波に対してひずみが0.5%になった時と定めた。

### 3. 結果

振動数ごとにみた進行性変形発生条件は Fig.10 のようになった。ここでは正弦波においても過去の研究データを用いてまとめ直している。正弦波のグラフ (左) の横軸は与えた入力波の振動数比、複合波のグラフ (右) における横軸は  $0.5f_n + x f_n$  としたときの  $x$  になっている。例えば正弦波のグラフにおいて横軸 1.0 は  $1.0f_n$  の正弦波を与えた時に対応するが、複合波のグラフにおいての横軸  $1.0f_n$  は  $0.5f_n + 1.0f_n$  の複合波を与えた時に対応する。Y の値は各振動数比の条件に対して進行性変形が発生する入力加速度の大きさを示しており、Y の値が小さいほど、小さな加速度で進行性変形が発生することになる。

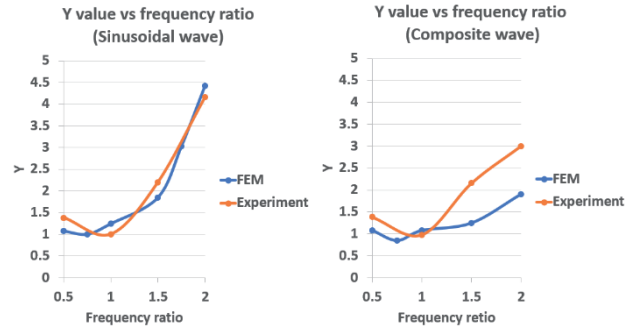


Fig.10 Y value vs frequency ratio (Sinusoidal and Composite)

## 4. 考察

### 4.1 振動数の進行性変形発生条件への影響について

正弦波において  $1f_n$  より低い振動数に着目すると、どこも Y の値が 1 付近と小さく進行性変形が起りやすくなっているが、 $1f_n$  より高振動数側では振動数が大きくなるにつれて進行性変形が起りにくくなっている。一方複合波において  $1f_n$  より低振動側では正弦波の時とほぼ同じ値になっている。しかし  $1f_n$  より高振動側では正弦波の時に比べ Y の値が小さくなり、進行性変形が起りやすくなっていることがわかる。これは固有振動数より低振動数側である  $0.5f_n$  の影響であり、低振動数と高周波数の複合波においては低振動数が進行性変形の発生条件に対して支配的な影響を持つ。

### 4.2 入力エネルギーによる進行性変形発生条件のメカニズムの説明

4.1 での考察は振動 1 サイクル当たりの梁に入力されるエネルギーの観点から理解することができる。Fig.11 は梁に働く入力加速度の最大値を一定値に定めたときにおける、正弦波及び複合波の振動数比ごとの入力されるエネルギーを表した図である。正弦波及び複合波においてピークが  $0.75f_n$  となり、振動数がそれより高くなるに従い入力エネルギーは低下する。また全体的に複合波に比べ正弦波の時の方がやや値が大きくなっている。これより複合波  $0.5f_n$  の成分によって進行性変形が起りやすくなっていることがわかる。

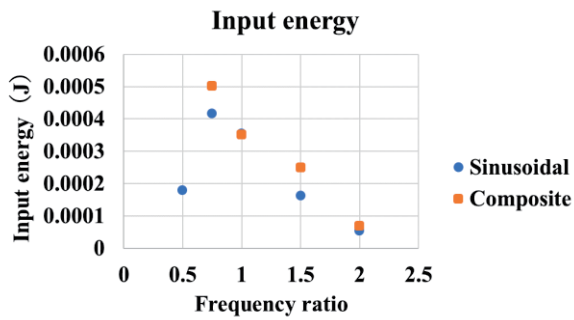


Fig.11 Input energy per 1 cycle load

### 4.3 1 自由度系モデルによる複合波加速度での振幅倍率及び正弦波との比較

梁を1自由振動系とみなした時の応答倍率を考える。正弦波及び複合波の時の応答倍率を理論式から求めるとそれぞれ Fig.12 および Fig.13 となる。

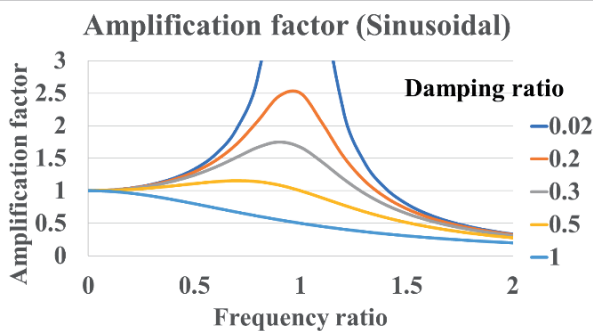


Fig.12 Amplification factor (sinusoidal)

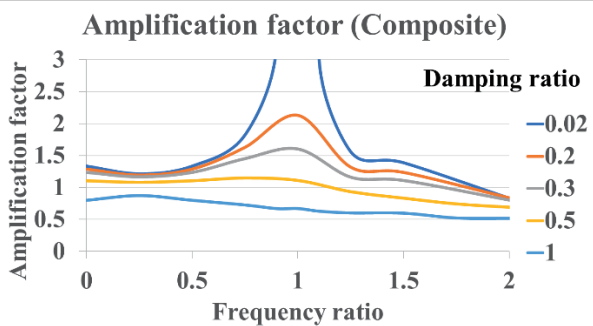


Fig.13 Amplification factor (composite)

まず複合波加速度の振幅倍率の傾向を確認する。正弦波加速度のときと同様に、振幅倍率のピークは減衰比が大きくなるほど固有振動数より低振動側に移動する。これは塑性化に従って共振周波数が低下する現象である。これにより低振動数側で振幅倍率が大きくなり進行性変形が起りやすくなっている。一方高振動数側では振幅倍率が小さくなり、進行性変形が起りにくくなっている。

また、正弦波加速度の場合との比較を行う。Fig.12 と Fig.13 を比べると、高振動数側において複合波加速度の方が正弦波加速度に比べ振幅倍率が高くなっている。これは複合波における0.5fnの成分による影響であり、低振動数の成分が進行性変形を起しやすくしていることがわかる。

## 5. 結論

本研究では梁に対して、2種類の周波数の正弦波を重ね合わせた複合波加速度を与えた実験及びFEM解析を行い、単一周波数の正弦波加速度の結果と比較することで下記のことが新たに分かった。

### 5.1 複合波加速度を与えたときの進行性変形発生条件の傾向

複合波加速度の成分がどちらも低振動数側（周波数比が1より小）であるときの進行性変形発生条件は、どちらか片方の正弦波加速度を与えたときの進行性変形発生条件と変わらなかった。低振動数同士の加速度成分は互いの進行性変形発生条件に対して影響を与えないことがわかった。

一方複合波加速度の成分が高振動数（周波数比が1より大）と低振動数の組み合わせの時は、進行性変形は高振動数の正弦波の時に比べ起りやすくなる。これは低振動数の成分が加わったことによる影響だと考えられる。

### 5.2 入力エネルギーによる進行性変形発生メカニズム

正弦波加速度及び複合波加速度を与えたときの進行性変形発生条件の傾向は定常状態における振動荷重1サイクル当たりに梁に入力されるエネルギーの観点から説明することができた。低振動数側で入力エネルギーは大きくなり、高振動数になるに従いエネルギーは入りづらくなった。また、複合波と正弦波の差異についても、入力エネルギーにより説明できた。

### 5.3 振幅倍率による進行性変形発生メカニズム

1自由度理論モデルを用いて複合波加速度における振幅倍率線図を作成した。低振動数側で振幅倍率が大きくなり、高振動数側で振幅倍率が小さくなるという結果は、複合波加速度における進行性変形発生条件の傾向を

説明することができた。また高振動数側では正弦波加速度の時に比べ複合波加速度の方が振幅倍率は大きくなった。これは低振動数成分の影響であり、このことは高振動数側において入力エネルギーが複合波加速度の方が大きいこと、進行性変形が複合波加速度の方がしやすいことの理由を説明している。これらの結果から、進行性変形の発生に対して、低振動数の正弦波成分が支配的な影響を及ぼすことがわかった。これより、実際の地震荷重を与えたときの進行性変形の発生条件を評価する際、地震波の周波数成分の中で、機器配管の固有振動数より低振動数側の加速度成分に着目すればよいという仮定が生まれる。本研究は、今後実現現象である地震荷重を対象に研究を行っていくうえで有益な結果が出たといえる。

複合波加速度を与えたときの進行性変形発生条件を振動数比ごとにまとめることができた。また同じ形式で正弦波加速度の時の進行性変形発生条件もまとめ、これらと比較することで複合波においては低振動数の成分が進行性変形を起こしやすくすることがわかった。この傾向は一定の外力を与えたときに低振動成分を持つ方が入力エネルギーが大きくなることから理解することができた。

## 参考文献

- [1] ASME, “Forging a New Nuclear Safety Construct”, 2012
- [2] EPRI, “Piping and Fitting Dynamic Reliability Program Volume 1: Project Summary”, 1994.
- [3] Md Abdullah Al Bari, Ryota Sakemi, Yamato Katsura, Naoto Kasahara, “Proposal of Failure Mode Map under Dynamic Loading – Ratcheting and Collapse”, Journal of Pressure Vessel Technology, ASME (Submitted, January 2017), pp-3.