

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420175

研究課題名(和文)履歴復元力特性を有する多入力配管系の地震時の最大応答量推定に関する研究

研究課題名(英文) Study on Method for Estimating Maximum Response for Seismic Design of Multiple Supported Elastic-Plastic Piping Systems

研究代表者

曽根 彰 (Sone, Akira)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：20197015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦特性を有する1入力灰家計に対して手案されている手法を、2入力を受ける弾塑性配管系に応用し、求められた推定値と時刻歴応答解析により求められる厳密解との比較、及び2入力の加振実験を行い、以下の結果を得られた。(1)2入力の相関係数が増加すると、応答低減係数が増加する。また、相関係数の増加に伴い、推定法の精度も向上する。(2)入力波の卓越周波数帯域と配管の固有振動数の組み合わせによって、推定精度変化するが、いずれの組み合わせにおいても、配管の応答が大きいとき、その精度は向上する。

研究成果の概要(英文)：A method proposed for a one-input piping system having friction characteristics is applied to an elasto-plastic piping system receiving two inputs, a comparison between the obtained estimated value and an exact solution obtained by time history response analysis, and two input excitation experiments, and the following results were obtained.(1) As the correlation coefficient of two inputs increases, the response reduction coefficient increases. As the correlation coefficient increases, the accuracy of the estimation method also improves.(2) Although the estimation accuracy varies depending on the combination of the dominant frequency band of the input wave and the natural frequency of the piping, its accuracy improves when the response of the piping is large in any combination. As the initial rigidity and the stiffness ratio after yield decrease, the response reduction coefficient increases and accordingly the accuracy of the estimation method improves.

研究分野：機械力学

キーワード：配管系 耐震設計 弾塑性応答 非線形 バイリニア

### 1. 研究開始当初の背景

原子力プラントや化学石油プラント等の産業施設内に設置される配管系は、地震時に過大な動的応答を生じないように設計されなければならない。配管系は一般に複雑な三次元形状をしており、応答計算の簡略化を図るために簡易応答計算法が開発される一方で、計算技術の発展によってかなり複雑な配管系に対しても応答計算ができるようになってきた。このように、配管系の応答計算法が発展するに伴って、配管系のサポート系のモデル化や応答特性についての関心が高まってきた。したがって、簡易応答計算法を確立するためには次の問題点があげられる。配管系は機器・構造物あるいはハンガ、スナッパなどのサポート機器などにより支持されており、したがって、地震時には多点から加振されることになり、多入力・多次元問題として扱う必要がある。上記のようなサポート系と配管の間には、非線形復元力特性やガタ・摩擦などの非線形性が存在しており、非線形問題として扱う必要がある。前者に対しては、多くの研究者により解析法や多入力応答スペクトル法など設計手法が検討されている。一般的にはこの方法では、各入力からの最大応答量の加算に際し、二乗平方根法 (SRSS 法)、または安全裕度をみて、絶対値和法 (ABS 法) を用いるが、これらの加算法が多入力系の耐震設計の流れの中での位置づけが確立されているとは言えない。また、後者については、地震時の非線形復元力特性を考慮したサポート系や配管の動特性の解明は、研究代表者らにより若干なされている。例えば、最近では、等価線形化による摩擦応答スペクトルの提案等があるが、まだ不十分と言える。まして、非線形特性を考慮した多入力・多次元加算問題に対する影響の評価については、全く検討されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、原子力プラントや化学石油プラントなどの配管系の地震による振動問題を多入力・多次元問題とならびにガタや摩擦などによる非線形問題と扱い、動的解析法、さらには設計のために最大応答量を合理的に計算する手法を確立することを目的とする。研究代表者は、耐震設計の多入力問題を不規則荷重間の相関特性を導出した最大応答の加算法を提案したおり、その加算法をもとに非線形性を考慮に入れた実用的な加算法を新たに提案し、その適用性を解析的に解明し、2入力1質点系の基本的なモデルや実際の配管系モデルを用いた数値シミュレーションと簡単な2入力非線形モデルを用いた実験によって検証する。

### 3. 研究の方法

本研究では多入力非線形系の簡便な最大加速度応答の推定式を提案するための基礎研究として、異入力間の相関係数に着目し、

それが多入力非線形系の応答に与える影響を数値シミュレーションにより明らかにする。検証のために、図1のような弾塑性特性を有する2入力1質点系モデルを用いる。

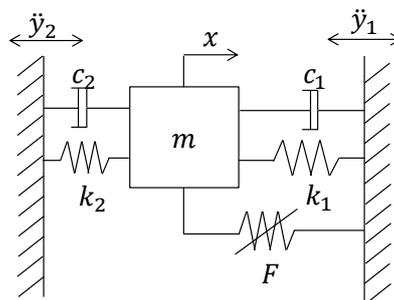


図1 2入力1質点系モデル

なお、弾塑性特性は、後述する、Bi-Linear型復元力特性を想定し、その大きさは  $F_y$  とする。まず、入力間の相関特性が、一般的な形で与えられた場合、指数関数型の相互相関特性を用いモンテカルロシミュレーションにより、2入力加速度 ( $\ddot{y}_1, \ddot{y}_2$ ) を作成する。さらに、配管系の入力は、その支持構造物系の振動特性を反映したものであることを考慮して、配管支持構造物系モデルとしてみなした1質点系 ( $\omega_{si}, \zeta_{si}$ ) に同一の定常白色雑音・実地震波を通して得られた絶対加速度応答波入力とした多入力非線形応答解析を行う。この研究では、実験室レベルでの加振実験、すなわち、相関2入力を受ける弾塑性特性を有する配管系モデルの応答特性を調べ、加算法の検討を行う。図2のように、多入力配管系を考え、実験では、弾塑性特性を有する配管モデルを二つの電磁式加振機で加振を行う。弾塑性特性は、金属板の種類を変化させて与える。

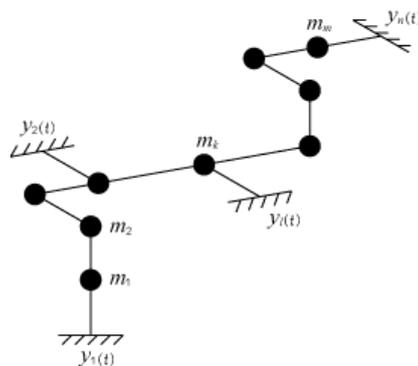


図2 多入力配管モデル

加振方向は、配管モデルに対して面外方向であり、面外1次振動モードに着目する。配管中央部と各々固定端に圧電式加速度計を設置し、その点の加速度を測定する。

### 4. 研究成果

(1) 数値シミュレーション

構造物の復元力特性として弾塑性履歴を想定し、これを図3に示すようなBi-Linear型のモデルとする。本研究では降伏後の剛性 $K_p$ と初期剛性の剛性 $K_\epsilon$ の比を $\alpha$ とする。また、 $x_y$ は降伏変位であり、Bi-Linear型復元力特性を有する1自由度系の基礎に地震加速度 $\ddot{x}_g(t)$ が入力された時の質点の運動を検討する。

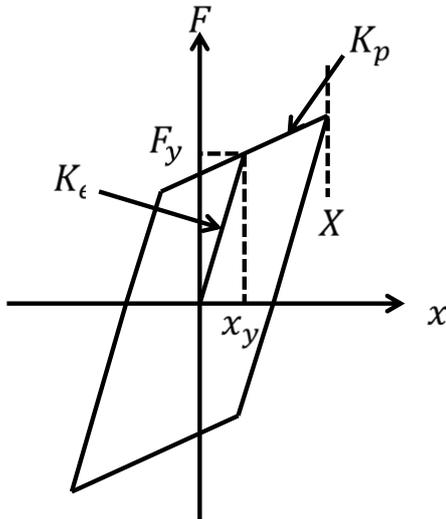
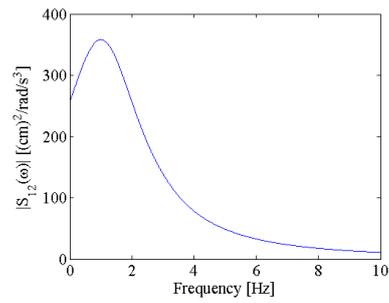
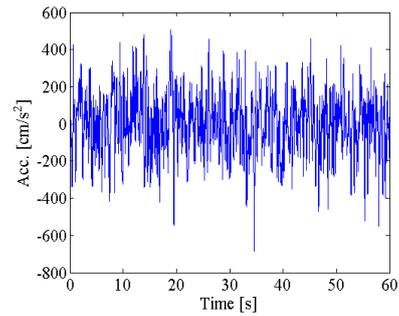


図3 Bi-Linear型復元力特性

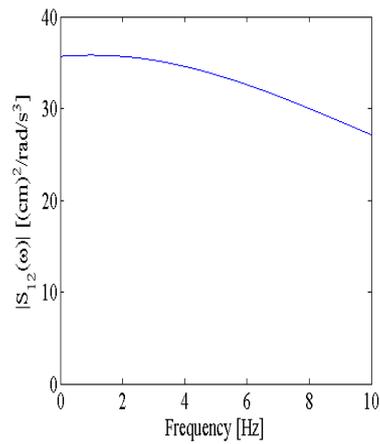
次に、作成した互いに相関を持つ2つの入力波を以下に示す。作成した模擬地震波は配管のモデルに入力し、地震応答解析を行うため入力波の振幅レベルは異入力間の相関の度合いに関わらず、一定であることが望まれるが、前述の通りモンテカルロシミュレーションは乱数を基にしているため、試行毎に振幅のレベルが変化してしまう。よって最初にパワースペクトル密度関数に従う1波 $\ddot{y}_1$ を作成し、この1波に対して相関係数が $\epsilon = 0, \epsilon = 0.25, \epsilon = 0.50, \epsilon = 0.75, \epsilon = 1.0$ の波 $\ddot{y}_2$ を作成する。つまり、 $\ddot{y}_1$ に対して $\ddot{y}_2$ を合計5波作成することになる。これにより $\ddot{y}_1$ の入力レベルは一定になるが、 $\ddot{y}_2$ に関しては条件付確率密度関数を用いてガウス確率変数を抽出するため、1回の試行では振幅に差が出てしまうため適切とはいえない。そこで本研究では平均をとるため、相関係数が5個の波を30セット作成し、計150波の入力波を作成した。また、入力波形の振動数幅を示すパラメータ $\kappa = 10$ の場合と $\kappa = 100$ の場合の2通りで150波ずつ作成した。作成した波形の相互パワースペクトルと時刻歴波形の例を図4に示す。また、1自由度系の初期剛性から決まる固有周期 $T_0 = 2\pi(m/K_0)^{1/2}$ 、及び粘性減衰の減衰比 $\zeta_0 = c/(2(m/K_0)^{1/2})$ はそれぞれ $T_0 = 1.0$  s、 $\zeta_0 = 0.01$ とし、復元力の降伏荷重 $F_y$ は、入力加速度の最大振幅の30波平均値を $\ddot{x}_0$ とした時に、次式により決定した



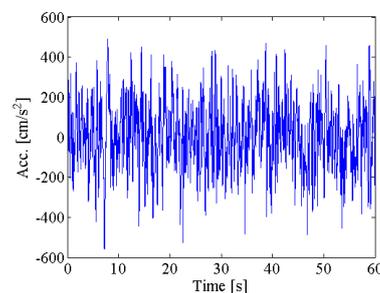
(a)  $\kappa = 10$  の場合



(b)  $\kappa = 10$  の場合



(c)  $\kappa = 100$  の場合

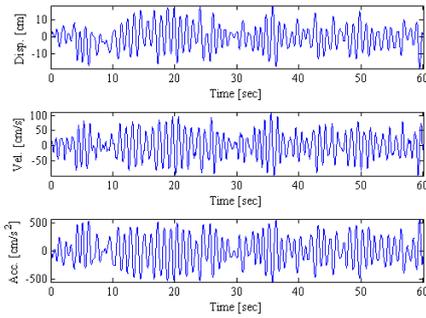


(d)  $\kappa = 100$  の場合

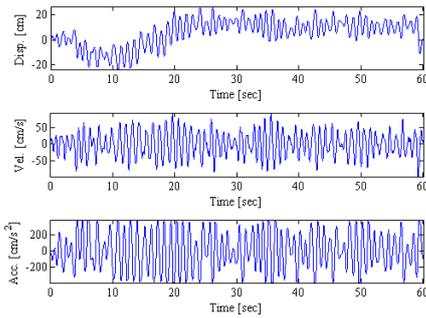
図4 相互パワースペクトルと時刻歴波形

$(m\ddot{x}_0/F_y = \beta = 1.5)$  .

作成した入力波を、弾塑性配管モデルに入力し、数値解析を行った結果を示す。初期剛



(a)  $\alpha = 1.0$  の場合



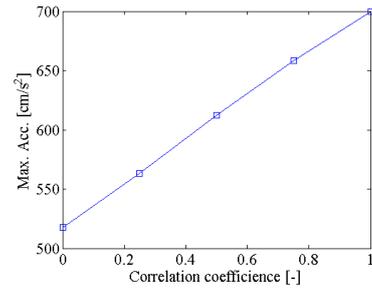
(b)  $\alpha = 1/50$  の場合

図 5 応答の時刻歴

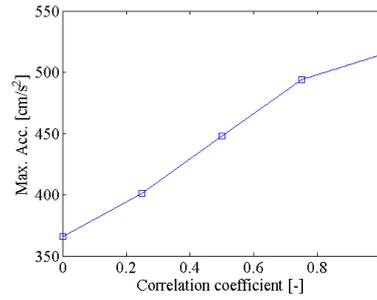
性  $K_e$  に対する降伏後の剛性  $K_p$  の比  $\alpha$  を 1.0 と 1/50 の 2 通りに設定した。図 5 に  $\kappa = 10$  で、それぞれ  $\alpha = 1.0, 1/50$  とした動的変位応答、動的速度応答と動的加速度応答の解析結果を示した。  $\alpha = 1.0$  の線形系の場合には、いずれの波形にも振動中心のずれはないといえる。  $\alpha = 1/50$  の場合には、絶対絶対応答において、振動中心が移動しており残留変形が残っている。この残留変形による吸収エネルギーによって、動的速度応答と動的加速度応答が線形系の場合より低減される。

作成した入力波を、弾塑性配管モデル ( $\beta = 1.5$  とした) に入力し、数値解析を行った結果を示す。初期剛性  $K_e$  に対する降伏後の剛性  $K_p$  の比  $\alpha$  を 1.0 と 1/50 の 2 通りに設定した。図 6 に  $\alpha = 1.0$  で、それぞれ  $\kappa = 10, \kappa = 100$  とした加速度応答解析結果を示す。これらの図を見ると、相関係数を増加させると最大加速度応答も線形的に増加していることがわかる。これは  $\alpha = 1.0$ 、つまり塑性変形しない条件のもとと解析を行ったため、ある程度線形的な結果が得られたと考えられる。

図 7 に  $\alpha = 1/50$  で、それぞれ  $\kappa = 10, \kappa = 100$  とした加速度応答解析結果を示した。これらの図を見ると、相関係数を増加させると最大加速度応答も増加しているが、  $\alpha = 1.0$  の時よりばらつきが見て取れる。これは  $\alpha = 1/50$ 、つまり塑性変形を考慮した条件のもとと解析を行ったため、入力した 150 波のう

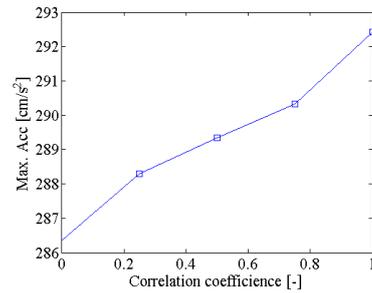


(a)  $\kappa = 10$

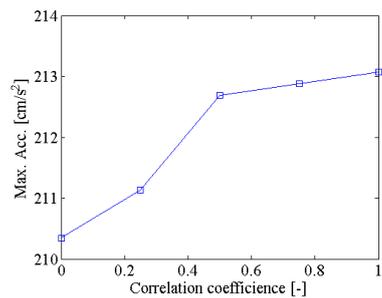


(b)  $\kappa = 100$

図 6 最大加速度と相関係数の関係



(a)  $\kappa = 10$



(b)  $\kappa = 100$

図 7 最大加速度と相関係数の関係

ち、塑性変形したものとしなかったものが混在していた。そのため、最大加速度応答にばらつきが見られたと考えられる。

次に、初期剛性  $K_e$  に対する降伏後の剛性  $K_p$  の比  $\alpha$  が、多入力配管系における最大加速度応答の変化に及ぼす影響を検討する。図 8 は  $\kappa = 10$  で、  $\alpha$  を横軸にとり、縦軸を最大加速

度応答を示した図である。相関係数が  $\epsilon = 0$ ,  $\epsilon = 0.25$ ,  $\epsilon = 0.50$ ,  $\epsilon = 0.75$ ,  $\epsilon = 1.0$  の場合である。この図を見ると、塑性特性における第一勾配に対する第二勾配の比  $a$  が減少すると、最大加速度応答が小さくなっていることが分かる。これは、塑性変形することによって、振動エネルギーが塑性変形エネルギーへと吸収されるからである。

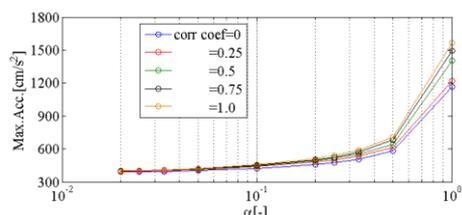


図 8 最大加速度応答と相関係数の関係

## (2) 2入力実験

2入力1質点系弾塑性モデルをもとに実験装置を試作して実験を行い上記の解析結果を確認する。本研究に用いる実験装置は以下の条件を満たすものとする。

- (1) 1自由度系であるとする。
- (2) 線形時と非線形時の切り替えが容易であること。
- (3) 塑性変形する素材を鉛とし、その塑性変形が目視で確認できること。
- (4) 系の固有振動数が10Hz付近であること。

試作した実験装置の概観図を図9示す。

二つ並んだ円状のものが電磁式小型加振器であり、それらに取り付けられた2枚の金属平板が、L字型の錘につながっている。錘は下のリニアガイドにつながっており、リニアガイドの床にしっかりと固定されている。錘はリニアガイド上をすべることになる。ただし、線形系の場合として、アルミニウム板を用いた。さらに、2入力にランダム加振を予定であったが、小型加振器の特性により、まずは正弦波加振によって実験を行った。ただし、2入力の相関係数はそれらの位相差を用いた。

図10, 図11に正弦波加振による位相差と相関係数の関係と最大加速度応答と相関係数を示す。横軸が位相差, 縦軸が相関係数を表す。この図から、ほぼ理論値(青線)と実験値(赤線)が一致していることが分かる。横軸は位相差, 縦軸は最大加速度を表す。赤線がアルミニウムと鉛の板, 青線が両方ともアルミニウムの板を用いた。二つの入力波は正弦波で、位相差だけを0~180°まで30°刻みで変えた。位相差が小さくなる、すなわち相関係数が大きくなる線形系[Al (アルミニウム)-Al]と次第に応答が大きくなるが、鉛板を用いた赤線[Al-Pb(鉛)]鉛の塑性変形により応答が低下している。図10と図11の結果を組み合わせると、図12になる。横軸は相関係数,



図 9 2入力加振実験装置

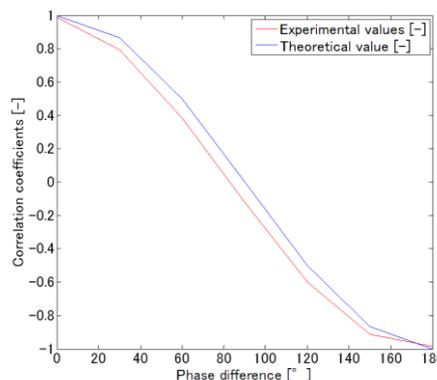


図 10 位相差と相関係数の関係

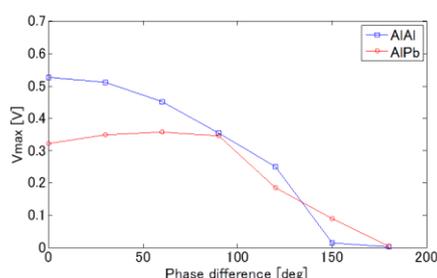


図 11 位相差と最大加速度応答の関係

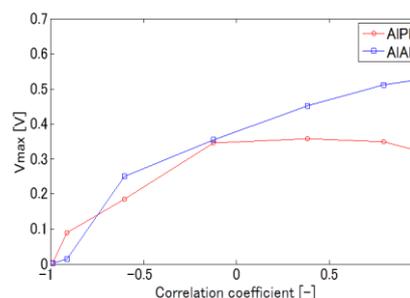


図 12 最大加速度応答と相関係数の関係

縦軸が最大加速度を表す。赤線がアルミニウムと鉛の板, 青線が両方ともアルミニウムの板を用いた場合である。相関係数が一定 (約

0.0) を超えると鉛の塑性変形のエネルギー吸収によって応答が低減される。相関係数が1 のとき、低減効果が最大となり、応答は38.78%低減されている。

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

## 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)

研究者番号：

(4) 研究協力者 ( )

[雑誌論文] (計 件)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 塩見 卓也, 岡崎 嵐麻, 松田 知之, 三浦 奈々子, 曾根 彰, 多入力を受ける弾塑性配管系の応答低減効果, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference2016 講演論文集(山口大学), 2016, pp.1-12
- ② 岡崎 嵐麻, 塩見 卓也, 松田 知之, 三浦 奈々子, 曾根 彰, 多入力を受ける弾塑性配管系の応答低減効果の実験による検証, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference2016 講演論文集(山口大学), 2016, pp.1-9

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

曾根 彰 (SONE Akira)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：20197015

(2) 研究分担者

( )