

研究種目： 基盤研究 (C)  
 研究期間： 2006～2008  
 課題番号： 18560233  
 研究課題名 (和文) 大規模配管系と制震支持構造の非線形特性を同時に考慮した最適耐震設計技術の研究  
 研究課題名 (英文) Study on the optimal seismic design technology considering nonlinearities of both seismic supports and large-scale piping systems  
 研究代表者  
 伊藤 智博 (ITO TOMOHIRO)  
 大阪府立大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：60347507

## 研究成果の概要：

本研究は、地震防災を目的として、地震荷重を受ける弾塑性サポートで支持された大規模配管系において、配管系の健全性と支持構造物の健全性の両者を同時に確保できる最適な耐震設計技術の構築を目的として実施した。最適化手法として遺伝的アルゴリズムを用い、また各種評価関数を設定した上で、3次元配管モデルについて、種々の地震波に対する応答解析を行い、本研究で開発した最適耐震設計手法が実際の配管系に対しても適用可能であることを確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	600,000	4,000,000

## 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：耐震設計，最適設計，減災，弾塑性ダンパ，大規模配管系

## 1. 研究開始当初の背景

近年、配管系の耐震設計の合理化のために、弾塑性サポートが実配管に適用され始めている。このような弾塑性サポートでは、過度の吸収エネルギーによる支持装置の機能喪失や構造健全性が損なわれる可能性があり、結果として配管系の損壊が生じることが懸念されている。従って、配管系のみでなく支持装置自身の構造・機能健全性の両者を考慮した設計が不可欠であるが、これら両者の構造健全性を同時に考慮した手法はなく、また、弾塑性サポートの容量や設置位置の決定については、熟練技術者の経験と単純な評価に依存しているのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究では、地震防災を目的として、地震荷重を受けるこれらの弾塑性サポートで支持された大規模配管系において、配管系の健全性と支持構造物の健全性の両者を同時に確保できる最適な耐震設計技術の構築を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、3 ヶ年で実施した。

(1) 2006年度は、単純配管モデルによる基礎技術の検討を行った。これまでの研究により、最適化アルゴリズムとして、遺伝的アルゴリズムが適していることが判明している。そこで、開発したシミュレーション手法を用いて、単純配管モデルによる最適化基礎技術の検討を行った。その場合、最適化の物理的対象として、弾塑性サポートの支持位置、サポートの剛性・容量を選出し、配管系の寸法諸元などをパラメータとした。得られた結果を評価し、最適設計の妥当性、評価関数の妥当性と改良についても検討を行った。

(2) 2007年度は、2次元L型配管モデルによる最適設計技術の検討を行い、最終的な目標である実規模3次元配管系の最適耐震設計技術構築に資するために必要な技術開発を行った。具体的には、2次元L型配管モデルの耐震設計モデル化の検討、平成18年度の検討を踏まえた評価関数の改良、数値シミュレーションプログラミングの改良、パラメータスタディ、最適設計の有効性の評価および評価関数の妥当性検討と改良を行った。

(3) 2008年度は、実規模3次元配管への適用化技術の構築を行うことを目標とした。具体的には、3次元配管モデルの耐震設計モデル化、効率的数値シミュレーション手法の検討、数値シミュレーションプログラミング、パラメータスタディ、解析手法の妥当性評価と最適設計手法の有効性評価および実用化への課題のまとめを行った。

### 4. 研究成果

#### (1)最適化アルゴリズム

##### ①遺伝的アルゴリズム

最適化の手法としては、多量のデータの組み合わせ問題に強い遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。遺伝子と構造パラメータとの関係を Fig. 1 に示す。

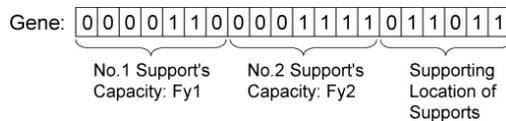


Fig. 1: Relationship between structural parameters and genes

遺伝子にはサポートの取り付け位置と、サポートの容量 (降伏荷重:  $F_{y1}$ ,  $F_{y2}$ ) の二つの情報を持たせる。選択方法はルーレット方式とエリート保存戦略を併用し、上位 2 割の優秀な個体は無条件で次世代に残す。ルーレット方式で大域的な探索能力、エリート保存戦略で局所的な探索能力を担う。交差方法は二点交差とする。突然変異は一点突然変異とし、突然変異率は、最初は高く、進化が進むと

徐々に低くなるよう変化させる。また、局所解への収束を防ぐために、その世代の最優秀個体と前の世代の最優秀個体の遺伝子が同じ場合は、進化停滞期と見なして突然変異率を 100%にする。Fig. 2 に遺伝的アルゴリズムの基本的フローチャートを示す。

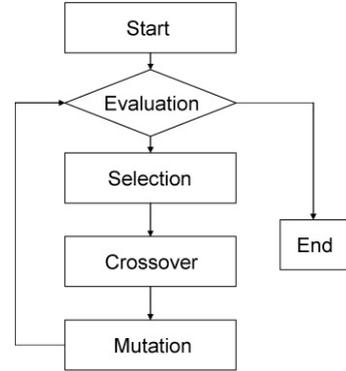


Fig. 2: Flowchart of GA

#### ②最適化アルゴリズムの改良と高速化

最適化計算においては、多数回の非線形計算を行う必要があるため、計算の高速化が必要である。そのために、以下の手法を導入した。これらの手法により、探索点数は 2 倍以上になり、計算時間は 40% まで短縮が可能となった。

- 一度探索した探索点を記録し、重複して探索を行わないよう、同じ探索点に行き当たった場合は強制的に突然変異を起こさせる。
- 地震応答計算に、モーダル時刻歴応答解析手法を導入する。その際、非線形のサポート反力は擬似外力として取り扱う。

#### (2)解析モデル化

配管系は、先端に錘のついた L 型の配管とした。Fig. 3 に解析モデル図を示す。全長が 8 m で規格が 3BSch40 とし、錘の質量は 100 kg である。地震動は、X 方向に加わるものとした。従って、配管の立ち上がり部には、曲げ、せん断、ねじりの 3 種類の荷重が加わるモデルである。

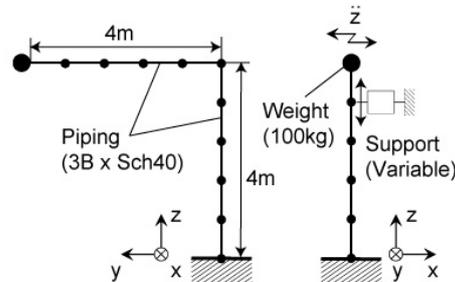


Fig.3 Analytical Model

また、サポートの個数は、最大2つとし、それらの取り付け位置と容量をパラメータとした。

弾塑性ダンパの履歴特性は、Fig.4のようなバイリニア型の特徴で模擬した。このとき、第1剛性、第2剛性はそれぞれ、6817 k N/m、316 k N/mに固定した。容量のとりうる範囲は、0~12700Nとし、100N刻みで変化させた。これらの値は、既往文献の値を参考とした。

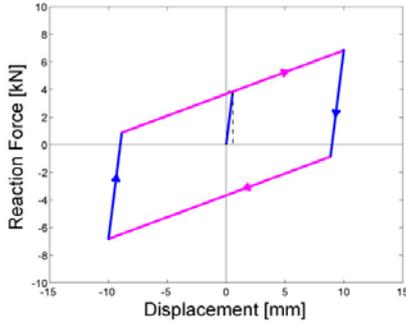


Fig.4 Hysteretic Curve for Elastoplastic Damper

(3)運動方程式とサポートによるエネルギー吸収

Fig.3 のモデルの運動方程式は、式(1)のようになる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{z}\} - \{F\} \quad (1)$$

ここで、 $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$  は配管系の各自由度の加速度、速度、変位であり、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスを示す。減衰は Rayleigh 減衰を適用し、 $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$  ( $\alpha$ 、 $\beta$  は定数) とする。 $\{\ddot{z}\}$  は地震入力加速度、 $\{F\}$  はサポートの非線形反力である。この解析モデルの X 軸方向に地震を加え、時刻歴応答の結果を評価する。また、式(1)の各辺の左側から  $dx = \{\dot{x}\}dt$  をかけ、加振時間で積分すると、エネルギーのつりあいの式(2)が得られる。各辺は左からそれぞれ、配管系の運動エネルギー、減衰エネルギー、ひずみエネルギー、地震入力エネルギー  $E_{in}$ 、サポートの吸収エネルギー  $E_{ab}$  を示す。

$$\int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\dot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T [K] \{x\} dt = - \int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{z}\} dt - \int_0^t \{\dot{x}\}^T \{F\} dt \quad (2)$$

(4)評価関数

ここでは、評価関数として、以下の4種類を用いた。

①配管系の最大応力値の評価

配管に生じる最大応力  $\sigma_{max}$  を以下の式で評価する。ここで、 $\sigma_{al}$  は許容応力であり、

圧力配管用炭素鋼鋼管 STPG370 の耐力 215MPa を用いた。

$$J_{stress} = \begin{cases} (\sigma_{max}/\sigma_{al})^2 & (\sigma_{max} < \sigma_{al}) \\ 1000 \times (\sigma_{max}/\sigma_{al})^2 & (\sigma_{max} \geq \sigma_{al}) \end{cases} \quad (3)$$

②サポートエネルギー吸収量最大化の評価

2つのサポートの吸収エネルギーの和を  $\Sigma E_{ab}$  とし、地震入力エネルギー  $E_{in}$  を極力吸収するよう評価関数を次式で定義する。

$$J_{energy} = \left( 1 - \frac{\Sigma E_{ab}}{E_{in}} \right)^2 \quad (4)$$

③サポート内部材料(鉛)の溶融防止評価

弾塑性ダンパとして、鉛ダンパを用いる場合、鉛の塑性変形でエネルギーを吸収するが、吸収したエネルギーにより鉛の温度が上昇する。過渡に上昇すると、鉛の溶融などによりダンパ機能が低下する。そこで、許容吸収エネルギーを鉛の体積と熱容量から式(5)で求め、評価関数を式(6)で定義する。

$$E_{al} = 3.4F_y \quad (5)$$

$$J_{support} = \begin{cases} 0 & (E_{ab} < E_{al}) \\ 1000 & (E_{ab} \geq E_{al}) \end{cases} \quad (6)$$

④サポートの使用率の均衡化

特定のサポートへの負荷集中を防止するため、サポートの使用率の均衡化を図る。使用率は、 $E_{ab}/E_{al}$  で定義し、評価関数を式(7)で定義する。

$$J_{balance} = \left| \frac{E_{ab1}}{E_{al1}} - \frac{E_{ab2}}{E_{al2}} \right|^2 \quad (7)$$

⑤評価関数の組み合わせ

上述の4種類の評価関数の組み合わせで、最終的な評価関数が決まる。これまでの検討で、最小限必要な関数は、 $J_{stress}$  と  $J_{support}$  であり、 $J_{balance}$  と  $J_{energy}$  を付加することでさらに信頼性の高い設計が可能となることが分かっている。そこで、ここでは、評価関数として式(8)を用いた。また、適合度は、その逆数で求めた。

$$J = J_{stress} + J_{energy} + J_{support} + J_{balance} \quad (8)$$

(5)最適化計算結果

①入力地震波

4種類の異なるスペクトル特性を持つ入力地震波について、最適化計算を行った。Table 1 に、最大加速度と卓越周期を示す。また、Fig. 5 に、それらの応答スペクトル(減衰比5%)を示す。用いた配管系のダンパなしにおける固有周期は、1次モードが1.56 s、2次モードが0.28 sである。ここでは、紙面の都合上、JMA Kobe-NS 波と

Tokamachi-NS 波の2つに対する最適化結果を述べる。

Table 1 Characteristics of Input Waves

Input Wave	Max Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Predominant Period(s)
JMA Kobe-NS	8.20	0.35
Tokamachi-NS	17.20	0.22
Simulated Wave A	7.11	0.61
White Noise	7.15	0.03

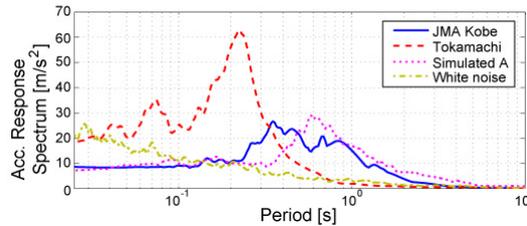


Fig.5 Response Spectra of Input Waves

### ②JMA Kobe-NS 波に対する最適化

入力地震波が JMA Kobe-NS 波の場合について、弾塑性ダンパの取り付け位置と容量の同時最適化を行った。Fig.6 に最適化結果を示す。また、Fig.8(a)に、最適化前後の配管系の固有周期の変化を示す。

Fig.6 の左上の図は、適合度の世代ごとの推移を示している。実線が最優秀固体の適合度であり、エリート保存戦略を適用しているため、単調増加となっている。平均適合度は集団内の多様性を示す。この値が最優秀固体の値に近いならば、ほとんどの固体が同じ遺伝子を持ち、局所解に陥った可能性があるが、この結果ではその可能性はない。今回の場合、約 20 世代でほぼ最適設計が行えたと推定される。

Fig.6 の右上の図は、最適設計条件での 2 つのダンパの荷重—変位特性を表している。No.2 ダンパのエネルギー吸収が大きいことが分かる。また、No.1 ダンパの履歴が小さく、このことから、No.1 ダンパは従来の線形サポートで代用可能であることが分かる。左下の図は、同じく最適条件下での、変位モード、ダンパ設置場所および配管に生じる最大応力を表している。この場合、ダンパは配管の錘近傍と固定部近傍に設置されている。また、応力は許容応力の 4 分の 1 程度であり、十分小さい値となっている。右下の図は、最適条件における地震入力エネルギーと各ダンパの吸収エネルギーの累積値の時間的な変化を表している。入力エネルギーの大部分がダンパで吸収されていることがわかる。

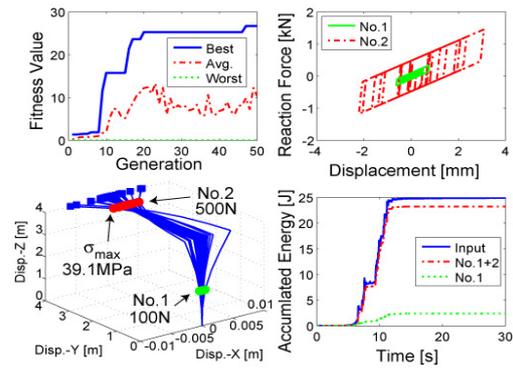


Fig. 6 Optimization Result for JMA Kobe-NS

### ③Tokamachi-NS 波に対する最適化

Tokamachi-NS 波の場合について、最適化を行った。Fig.7 に最適化の結果を示す。この場合は、約 10 世代で最適化に達している。また、2つのダンパで効率よくエネルギーを吸収していることが分かる。ダンパの設置位置は、エルボ近傍となっている。また、配管応力の最大値は、先端の錘付近となっている。これは、錘の回転慣性が大きいこと、曲げモーメントが先端で大きくなっていることによるものである。さらに、入力エネルギーの大部分がダンパで吸収されていることが分かる。

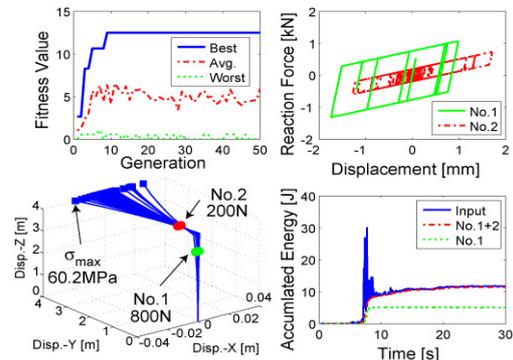


Fig. 7 Optimization Result for Tokamachi-NS

### ④最適化による配管系の固有振動数変化

ダンパなしの状態における固有周期は、前述のように、1次モードが 1.56 s、2次モードが 0.28 s である。最適化によって、ダンパが設置され、それにより配管系の固有周期が変化する。逆に言えば、最適化計算では、ダンパの設置位置を動かすことにより、最適化を行っていると考えられる。そこで、最適化後の配管系の固有周期を求め、ダンパなしの状態からの変化について検討した。その際、ダンパの第 1 剛性で配管系がサポートされているとした。

Fig.8 に、2つの入力地震波における最適化後の配管系の固有周期の変化を示す。JMA Kobe-NS 波の場合、最適化前の 2 つの配管系固有周期は、入力地震波のピークを

またぐような領域にあるが、最適化後は、1次モードも2次モードと同様ピークの左側に来ている。また、Tokamachi-NS波の場合、最適化前には、固有周期は2つとも入力波のピークの右側にあるが、最適化後は、1次モードはピークの右側に残り、2次モードはピークの左側に来ている。いずれの場合にも、入力地震波の卓越ピークを避けるような領域に固有周期が変化していることが分かる。すなわち、最適化計算においては、入力地震波との共振が生じないように位置にダンパを設置していることが分かる。

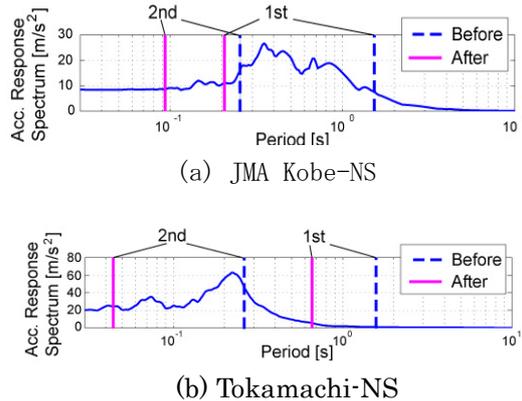


Fig. 8 Natural Period Shift against the Predominant Period of Input Waves

#### (6) 結言

ここでは、弾塑性ダンパで支持されたL型配管系を用いて、種々の周波数特性を有する入力地震波に対する最適設計手法の適用性について検討を行った。

その結果、本手法では、種々の周波数特性を持つ入力地震波に対しても、それらの卓越周期を避けるようにダンパ位置を決めることにより、最適設計が行えることを確認した。また、局所的にバルブ等の重量物を有する配管系に対しても最適設計が可能であること、および、弾塑性ダンパを設置すべきか線形ダンパで十分なのかの判定も可能であることが分かった。

#### 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3件)

- ① T. Ito, M. Michiue and K. Fujita, Investigation of optimal seismic design methodology for piping systems supported by elasto-plastic dampers (Part1: Evaluation functions), Journal of System Design and Dynamics, 3-1, 59-69, 2009, 有.
- ② T. Ito, K. Fujita and M. Michiue, Application of optimal design methodology for piping systems subjected to seismic waves with various

frequency characteristics, Proc. of ASME PVP Conf., CDROM No. PVP2007-26436, 2007, 有.

- ③ T. Ito, M. Michiue and K. Fujita, Application of optimal design methodology on the seismic design of piping systems supported by elasto-plastic dampers, Proc. of ASME PVP Conf., CDROM No. PVP2006-ICPVT-11-93259, 2006, 有.

[学会発表] (計10件)

- ① 三好善幸, 伊藤智博, 藤田勝久, 水平・上下方向入力地震波を考慮した弾塑性サポート支持配管系の最適耐震設計, 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会, 2009年3月16日, 近畿大学.
- ② T. Ito, K. Fujita and M. Michiue, Application of optimal design methodology for piping systems subjected to seismic waves with various frequency characteristics, Proc. of ASME PVP Conf., July 22, 2007, Texas, USA.
- ③ 道上雅史, 伊藤智博, 藤田勝久, 弾塑性サポート支持配管系の最適耐震設計手法(種々の入力地震波への適用性の検討), 日本機械学会D&D大会, 2007年9月25日, 広島大学.
- ④ 道上雅史, 伊藤智博, 藤田勝久, 弾塑性サポート支持配管系の最適耐震設計手法(最適化アルゴリズム改良の検討), 日本機械学会関西支部第82期定時総会講演会, 2007年3月17日, 大阪産業大学.
- ⑤ 道上雅史, 伊藤智博, 藤田勝久, 弾塑性ダンパ支持配管系の最適耐震設計における入力地震波の周波数特性の影響, 日本機械学会D&D大会, 2006年8月6日, 名古屋大学.
- ⑥ T. Ito, M. Michiue and K. Fujita, Application of optimal design methodology on the seismic design of piping systems supported by elasto-plastic dampers, Proc. of ASME PVP Conf., July 23, 2006, Vancouver, Canada.
- ⑦ 道上雅史, 伊藤智博, 藤田勝久, 弾塑性サポートを有するL型配管系の最適耐震設計法の検討, 日本機械学会関西支部第81期定時総会講演会, 2006年3月18日, 同志社大学.
- ⑧ 道上雅史, 伊藤智博, 藤田勝久, 弾塑性サポート支持配管系の耐震設計への最適化法の適用(評価関数の設定), 日本機械学会2005年度年次大会, 2005年9月19日, 電気通信大学.
- ⑨ 道上雅史, 伊藤智博, 藤田勝久, 弾塑性サポート支持配管系の耐震設計における最適化手法の適用, 日本機械学会関西学生会平成16年度卒業研究発表講演会, 2005年3月16日, 京都大学.
- ⑩ 里見保成, 伊藤智博, 藤田勝久, 弾塑性サポートを有する配管耐震設計への最適化法の適用, 日本機械学会関西学生会平成15年度卒業研究発表講演会, 2004年3月17日, 大阪府立大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 智博 (ITO TOMOHIRO)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60347507

(2) 研究分担者

新谷 篤彦 (SHINTANI ATSUHIKO)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90295725