確率統計的観点に基づいた弾塑性サポート支持配管系の 地震応答解析と最適化に関する基礎検討*

新谷 篤彦^{*1}, 永見 唯^{*2}, 伊藤 智博^{*1}, 中川 智皓^{*1}

Basic Study on Seismic Response Analysis and Optimal Design of Piping System Supported by Elasto-Plastic Damper Based on Probabilistic and Statistical Theory

Atsuhiko SHINTANI^{*1}, Tadashi NAGAMI, Tomohiro ITO and Chihiro NAKAGAWA

^{*1} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University
1-1 Gakuen-cho, Naka-ward, Sakai-city, Osaka, 599-8531 Japan

In this paper, we propose the seismic response analysis method and investigate the optimal design of the piping system supported by elasto-plastic damper subjected to the random input based on the random vibration theory. The piping system is modeled by simple cantilever beam with weight. The support force is given by bilinear model. The inputs are given by white Gaussian noises. In this optimal design, we can maintain the structural integrities of both the piping systems and the elasto-plastic supporting devices by taking three indexes; dynamic reliability of pipings, accumulated energy of support and dynamic reliability of support into account. Furthermore, the optimal conditions of parameters such as the supporting location, the capacity of the supporting devices are searched. Numerical simulations are performed using a simple piping system model for the random input based on the probabilistic vibration theory. The optimal design proposed here is applicable to the seismic design of piping systems supported by elasto-plastic dampers subjected to the actual earthquake input.

Key Words : Seismic Response, Probabilistic Method, Piping Systems, Elasto-Plastic Damper , Random Vibration , Nonlinear Vibration , Reliability

1. 緒 言

近年、国内外で大地震が頻発しており、人命のみならず、各種の機器や機械・構造物にも深刻な被害が発生している。特に日本においては、1995 年兵庫県南部地震や 2004 年新潟県中越地震、2011 年東北地方太平洋沖地震など、大規模地震が数多く発生している。このため、我が国において耐震設計は非常に重要である。そこで、我が国の原子力発電所では 2006 年に新しい耐震設計指針が出されている^{(1)–(3)}。この新耐震設計指針では、従来とは異なり、耐震設計を確定論ではなく、確率論に基づいて行う方向に向かいつつある。旧指針では、ある程度の安全率を見込んだ設計でも、万一超巨大地震が発生すると破壊や損傷をひきおこすリスクを持っているため、新指針ではそのリスクの評価を目指している。

また、配管系は発電所や化学プラント等の大規模プラントの重要な構成要素であり、これらの耐震設計は、プラントの被害軽減やその機能の早期復旧の観点から非常に重要となる。近年、配管系の耐震・制振サポートとして、鉛の塑性変形を利用したサポートのように、非線形の履歴特性を持つ弾塑性サポートが実用化され始めている⁽⁴⁾。弾塑性サポート単体の特性については、これまでに行われてきた実験や解析で、ある程度明らかにされている^{(5),(6)}。また、実際に機器や配管系の耐震設計に用いるための検討においても、いくつかの知見が得られている^{(7),(8)}。このような弾塑性サポートで支持された配管系では、配管系の健全性のみならず、サポート自身の健全性の

* 原稿受付 2012 年 10 月 19 日

^{*1} 正員、大阪府立大学大学院工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1)

^{*2} 学生員、大阪府立大学大学院工学研究科

E-mail: shintani@me.osakafu-u.ac.jp

維持が重要であり、特定のサポートへの負荷集中によるサポートの機能低下や損傷が発生する可能性の検討が重要である^{(9),(10)}。

また、弾塑性サポートに確率論を応用した研究は、確率統計的に応答解析を行ったもの⁽¹¹⁾や、統計的等価線形化法を用い履歴系の応答について検討したもの⁽¹²⁾、エネルギー吸収量について検討したもの⁽¹³⁾が挙げられるが、初通過破壊とエネルギー吸収量の双方を考慮したものや、配管系の耐震設計に応用したものは、ほとんど見られない。

そこで、本研究では、確率・統計的観点に基づき、弾塑性サポート支持配管系の地震応答解析を行い、配管系とサポート双方の健全性を考慮に入れた弾塑性サポート支持配管系の最適設計について検討を行うこととする。

2. 動的信頼性理論

機械構造物の破壊メカニズムは大きく分けて、初通過破壊と累積疲労破壊の二つに分けられる。ここでは、初通過破壊を取り扱う。 $x(t)$ は各節点での応力や吸収エネルギーに相当し、初期値 $x(0) = 0$ 、平均値 0 の確率過程であるとする、 $x(t)$ が単位時間あたりに限界値 λ と下から交差する回数の期待値 $v_{\lambda}^{+}(t)$ は^{(14),(15)}

$$v_{\lambda}^{+}(t) = \int_0^{\infty} \dot{x}(t) f_{x\dot{x}}(\lambda, \dot{x}, t) d\dot{x} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $f_{x\dot{x}}(\lambda, \dot{x}, t)$ は $x(t)$ および $\dot{x}(t)$ の同時確率密度関数である。また、一定時間 T 内における信頼性 P_S はポアソン近似を仮定すると、次式で与えられる。

$$P_S(\lambda) = \exp\left(-\int_0^T v_{\lambda}^{+}(t) dt\right) \quad (2)$$

3. 解析モデル

3.1 配管系モデル

本研究の配管系の解析モデルを図 1 に示す。配管系は、まずは基礎的な検討を行うために単純配管を対象とする。配管を片持ちはりに見立て、この自由端側に重錘が接合されている場合を考える。

Fig. 1 Piping model

3.2 配管系の運動方程式

図 1 に示す配管系を 5 要素に分割し、有限要素法を用いて、配管系の運動方程式を求める。ただし、右端の節点は重錘の重心に置き、重錘の質量と回転慣性モーメントを考慮に入れる。この配管の地震入力に対する刺激係数を考慮すると応答を支配するのはほとんど 1 次モード、2 次モードである。1 次モードや 2 次モードを表すには、5 要素で十分であり、本研究では 5 要素で検討を行う。局所座標系は左端断面の図心を原点に、図 2 に示すように、要素の図心軸を z 軸、断面の慣性主軸方向を x, y 軸とする右手系とし、 yz 平面内の運動のみを考える。このはり要素に対して圧縮・引っ張り変形と、曲げおよびせん断変形を考慮して運動方程式を求める。

Fig. 2 Beam element

地震入力加速度やサポートから受ける反力も考えると、運動方程式は次式のようなになる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{z}\} - \{F\} \quad (3)$$

ここで、 $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$ は配管系の加速度ベクトル、速度ベクトル、変位ベクトルであり、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスを示す。 $\{\ddot{z}\}$ は地震入力加速度ベクトル、 $\{F\}$ はサポート反力ベクトルである。サポートから受ける反力については後で詳しく述べる。

このとき、減衰マトリックスは、Rayleigh 減衰による比例減衰として

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (4)$$

で与えるものとする。ここでは配管系の 1, 2 次の固有振動数 $\omega_1 = 2\pi f_1$ 、 $\omega_2 = 2\pi f_2$ 、減衰比 ζ_1 、 ζ_2 を用いて

$$2\zeta_n\omega_n = \alpha + \beta\omega_n^2 \quad (n = 1, 2) \quad (5)$$

とおくことにより、 α 、 β を決定した。

3.3 弾塑性サポートモデル

本研究では、弾塑性サポートとして揺動型の鉛ダンパ (Lead Extrusion Damper; LED) を考える。この LED の特徴は、構造やメンテナンスが容易であることと、エネルギー吸収効果が比較的安定していることである。この弾塑性サポートの解析モデルは、図 3 に示すようなバイリニアモデルとする。ここで k_{1st} は第 1 剛性、 k_{2nd} は第 2 剛性、 F_y は降伏応力 (サポート容量)、 x_y は降伏点変位である。このとき、ある時刻 t_n でのサポート反力 F_n は、その時刻での変位 x_n と、1 ステップ前の時刻 t_{n-1} での変位 x_{n-1} と反力 F_{n-1} を用いて、次の 4 つの場合について式 (6) のように表せる。

- (i) 変形速度が正で変形が弾性域のとき ($\dot{x}_n \geq 0, F_{n-1} + k_{1st}(x_n - x_{n-1}) \leq F_y + k_{2nd}(x_n - x_y)$)
- (ii) 変形速度が正で変形が塑性域のとき ($\dot{x}_n \geq 0, F_{n-1} + k_{1st}(x_n - x_{n-1}) > F_y + k_{2nd}(x_n - x_y)$)
- (iii) 変形速度が負で変形が弾性域のとき ($\dot{x}_n < 0, F_{n-1} + k_{1st}(x_n - x_{n-1}) \geq -F_y + k_{2nd}(x_n + x_y)$)
- (iv) 変形速度が負で変形が塑性域のとき ($\dot{x}_n < 0, F_{n-1} + k_{1st}(x_n - x_{n-1}) < -F_y + k_{2nd}(x_n + x_y)$)

$$F_n = \begin{cases} F_{n-1} + k_{1st}(x_n - x_{n-1}) & \text{(Case(i))} \\ F_y + k_{2nd}(x_n - x_y) & \text{(Case(ii))} \\ F_{n-1} + k_{1st}(x_n - x_{n-1}) & \text{(Case(iii))} \\ -F_y + k_{2nd}(x_n + x_y) & \text{(Case(iv))} \end{cases} \quad (6)$$

サポートが吸収したエネルギー E_{ab} は、履歴曲線が囲む面積で表される。これを数式に直すと、次式のようなになる。

$$E_{ab} = \int_0^{x|_{t=t_e}} F dx = \int_0^{t_e} F \dot{x} dt \quad (7)$$

ここで、 F はサポートの反力 (ここではスカラー量)、 x はサポート取り付け位置での配管系の変位 (ここではスカラー量)、 t_e は加振終了時刻 (地震終了時刻) である。

Fig. 3 Hysteretic curve of a bilinear model

4. 最適化計算

4.1 評価指標

4.1.1 配管系の動的信頼性

配管系の構造健全性を、配管に生じる応力の許容応力を上限値とする動的信頼性 (J_{piping}) で評価する。ここで、動的信頼性は、生じる応力が上限値である許容応力を超えない確率と定義する。評価する応力には、各節点の Tresca 応力を用いる。許容応力 σ_{al} は圧力配管用炭素鋼鋼管 STPG370 の耐力 (215MPa) を用いる。具体的な計算方法は後述する。

4.1.2 エネルギー吸収量の最大化

建造物の制振の観点から、弾塑性サポートができるだけ地震入力エネルギーを吸収することが望ましい。そこで、地震入力エネルギー E_{in} をなるべく吸収するように、吸収エネルギーを E_{ab} として評価指標を式 (8) で定める。

$$J_{\text{energy}} = \frac{\bar{E}_{\text{ab}}}{\bar{E}_{\text{in}}} \quad (8)$$

ここで、 $\bar{E}_{\text{ab}}$ 、 $\bar{E}_{\text{in}}$ は、それぞれ E_{ab} と E_{in} のサンプル平均である。累積吸収エネルギー J_{energy} は、吸収エネルギー E_{ab} が後に示す許容吸収エネルギー (限界値) E_{al} を超えるか超えないかにかかわらず計算を行う。

4.1.3 弾塑性サポートの健全性

弾塑性サポートとして鉛ダンパを扱う場合、鉛の塑性変形により、振動エネルギーを熱エネルギーに変えて吸収するが、この吸収エネルギー E_{ab} によって LED 内部のリング状の鉛の温度が過度に上昇すると、抗力低下などの機能低下を引き起こす。これは弾塑性サポートの健全性低下につながる。

そこで、周囲との熱交換を無視し、鉛が常温 (20) から融点近くの温度 (250 , 融点の約 75%) まで一様に温度上昇するのに必要な熱量を許容吸収エネルギー E_{al} と定義し、

$$E_{\text{al}} = \gamma \times F_y \quad (9)$$

で与えた。鉛ダンパは容量を決定すると形状が定まる^{(5),(9)}。その形状から質量を計算し、比熱をかけて熱容量を求め、さらに温度上昇量をかけ、許容吸収エネルギーを求めると、サポート容量の定数倍となる。容量 1.5[tonf] の鉛ダンパの場合⁽⁹⁾、質量が 1.7[kg] となり、 $\gamma = 3.4$ が得られる。容量 0.5, 1.0[tonf] の鉛ダンパの場合でも同じ計算を行うとほとんど同じ関係式が得られるため、本研究では上記のような許容吸収エネルギーを設定した。この許容吸収エネルギー E_{al} を上限とする、累積吸収エネルギーの動的信頼性を J_{support} とし、弾塑性サポートの健全性の評価指標とする。具体的な計算方法は後述する。

4.2 最適化項目

最適化計算の際には、弾塑性サポートのどのパラメータを最適化対象にするか決める必要がある。本研究では、以下の弾塑性サポートの取り付け位置と弾塑性サポートの容量を最適化項目とする。

4.2.1 弾塑性サポートの取り付け位置

弾塑性サポートの節点を、図 4 に示すように、Node 1 ~ Node 6 とする。ここで、Node 1 は固定端であるため、最適化計算の際に取り付け可能な位置は、Node 2 ~ Node 6 とする。このいずれかの位置に 1 力所サポートを取り付け最適化計算を行う。

Fig. 4 Support location

4.2.2 弾塑性サポートの容量

弾塑性サポートのサポート容量（サポートの降伏応力） F_y を最適化対象とする．このとき，サポートの第 1 剛性，第 2 剛性は一定とする．容量の取りうる範囲は 500 ～ 3000[N] とする．変形が塑性域に達しなかった場合は，第 1 剛性の線形バネが取り付けられた場合と同等の特性となる．また，容量が 0 の場合は，原点が折れ曲がり点となるため，第 2 剛性の線形バネが取り付けられた場合と同等の特性となる．

5. 解 析 条 件

配管系の各諸元を表 1 に，弾塑性サポートの解析モデルの各諸元を表 2 に示す．

Table 1 Parameter of piping system

Length of piping: L	4.0[m]
Length of a beam element: l	0.8[m]
Cross-sectional area: A	$1.445 \times 10^{-3} [\text{m}^2]$
Young's modulus: E	$1.920 \times 10^{11} [\text{Pa}]$
Geometric moment of inertia: I	$1.267 \times 10^{-6} [\text{m}^4]$
Density: ρ	$7800 [\text{kg}/\text{m}^3]$
Mass of weight: M_{mass}	200[kg]
Moment of inertia of weight: J_m	$2.66 [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
natural frequency: f_n	primary
(without damper)	secondary
damping ratio: ζ	primary
	secondary

Table 2 Parameter of support

First stiffness coefficient: $k_{1\text{st}}$	$6.817 \times 10^6 [\text{N}/\text{m}]$
Second stiffness coefficient: $k_{2\text{nd}}$	$3.158 \times 10^5 [\text{N}/\text{m}]$
Capacity of support: F_y	500～3000[N]

入力波としては，狭帯域ホワイトノイズを 1000 波用いる．実際の地震を参考にし，ここでは，周波数帯域は，0 ～ 10[Hz] とし，この間でスペクトル強度は $0.02 [\text{m}/\text{s}^2]$ で一定とした．これはいろいろな周波数成分を持った入力と考えられるので，この入力波に対して検討しておけば，種々の実地震波に対してある程度の健全性の検討ができると思われる．入力波の一例を図 5 に示す．

Fig. 5 Example of input acceleration

非線形システムにおいて，解析的に信頼性を計算するのは難しい．そのため，本論文では以下のように計算した． J_{piping} では，入力波 1000 波に対する応力の応答を調べ，各応答において許容応力 σ_{al} を限界値とし，許容応力 σ_{al} を超えるかどうかを調べる．限界値を超えない場合はシミュレーション時間内は破壊に至らず健全であると判断する．限界値を超える場合は初めて限界値を超える時刻を調べそれ以降の時刻は限界値を超え破壊したと判断する．この結果から 30[s] までの各時刻における破壊しない標本の数の割合を調べ J_{piping} とする． J_{support} では，入力波 1000 波に対する累積吸収エネルギーの応答を調べ，許容吸収エネルギー E_{al} を限界値として同様の計算を行う．

6. 数値シミュレーション

6.1 応答の確率分布

図 6(a), (b) にそれぞれ, サポート容量 F_y を 500[N], サポート取り付け位置を Node 2 とした時の Node 3, Node 6 に作用する応力のヒストグラムを示す. 応力の平均値は 4.83×10^4 [Pa], 標準偏差は 1.46×10^8 [Pa] である. ここで, 平均値は標準偏差に対して非常に小さいため, 0 とみなすことができる. この平均値と標準偏差を持つガウス分布の分布曲線を実線で示す. 図 6 より, 今回用いた入力波形の体系においては, Node 3, 6 に作用する応力はガウス分布に近い結果となった. このことを調べるために, 図 7 にヒステリシスループの例を示す. この例ではあまり大きな範囲を動くことはなく, 大きなエネルギー吸収はみられなかった. したがって, 今回用いた入力波形の体系においては, 系の非線形性が比較的小さかったためと考えられる. 入力波の大きさによっては, もっと大きな非線形性を示すこともあり得ると考えられる.

Fig. 6 Histogram of stress (with support at Node 2)

Fig. 7 Hysteresis loop for elasto-plastic damper

Fig. 8 Histogram of accumulated energy

図 8(a) に, サポート容量 F_y を 1500[N], サポート取り付け位置を Node 4 とした時の弾塑性サポートによる累積吸収エネルギーのヒストグラムを示す. 図 8(a) より, 平均値は 255[J], 標準偏差は 149[J], 形状母数は 2.95, 尺

度母数は 86.6 となる．この値を持つガンマ分布の分布曲線を実線で示すと，似た形状になった．また，図 8(b) より時間の経過と共に平均値は単調増加し，分布の歪度は小さくなった．

6.2 評価指標

6.2.1 サポ-ト取り付け位置の影響

ここでは，評価指標のサポ-ト取り付け位置の影響について調べる．ここではサポ-ト容量 F_y を 500, 1000, 1500, 2000, 2500[N] とした時の結果の中から代表的な結果を示す．図 9 に，サポ-ト容量 F_y を 1000[N], 2000[N]

(a) $F_y = 1000[\text{N}]$

(b) $F_y = 2000[\text{N}]$

Fig. 9 Effect of support location on dynamic reliability of piping system

(a) $F_y = 1000[\text{N}]$

(b) $F_y = 2500[\text{N}]$

Fig. 10 Effect of support location on accumulated energy

(a) $F_y = 500[\text{N}]$

(b) $F_y = 1500[\text{N}]$

Fig. 11 Effect of support location on dynamic reliability of support

とした時の配管系の動的信頼性 J_{piping} を示す．図 9 より，時間とともに配管系の信頼性は低下している．また，配管系の動的信頼性 J_{piping} はサポートを自由端側に配置するほど，向上している．これは，サポートを自由端側に配置するほど，配管系の変位は抑制され，作用する応力が小さくなったためであると考えられる．

図 10 に，サポート容量 F_y をそれぞれ 1000[N]，2500[N] とした時のエネルギー吸収量の最大化指標 J_{energy} を示す．時間とともにエネルギー吸収量は累積されていくため， J_{energy} は，単調増加している．また， J_{energy} は，サポート容量 $F_y = 1000$ [N] では，サポート取り付け位置を Node 6 としたとき，サポート容量 1500[N] 以上では，2500[N] のようにサポート取り付け位置を Node 3 としたとき最大となっている．弾塑性サポートにおいて，より多くエネルギーを吸収するには，ある程度変位させる必要がある．弾塑性サポートを固定端側に配置すると，配管系の変位は大きくなるが，サポートの変位が小さく，あまりエネルギーを吸収できない．一方，弾塑性サポートを自由端側に配置すると，制振効果が大きくなり，変位を抑制するためエネルギー吸収量も小さくなる．また，サポート容量を大きくするとヒステリシスループの面積が大きくなるため，同じ変位量であれば，吸収エネルギーが大きくなるが，過度に大きくすると，第一剛性域が支配的になるため，変位が抑制され，エネルギー吸収量も小さくなる．そのため，結果としてサポート容量が小さい $F_y = 1000$ [N] では，サポート取り付け位置を Node 6 とすることによりエネルギー吸収量が大きくなり，サポート容量が大きい $F_y = 1500$ [N] 以上では，2500[N] と同様な傾向であり，サポート取り付け位置を Node 3 としたとき変位量が大きくなるため，エネルギー吸収量が最大となっている．

図 11 に，サポート容量 F_y を 500[N]，1500[N] としたときの弾塑性サポートの動的信頼性 J_{support} を示す．図 11 より，サポート容量が小さい時は時間とともに弾塑性サポートの信頼性は低下し，サポート容量が大きい時はあまり信頼性が低下しない．これは，サポート容量が大きくなると，式 (9) で与えられる許容吸収エネルギーが大きくなったことにより，初通過破壊の限界値が大きくなったため信頼性があまり低くならないと考えられる．また，サポート取り付け位置を Node 4 に近づけて配置するほど，弾塑性サポートの動的信頼性 J_{support} は低くなっている．これは，図 10 の結果から $F_y = 1500$ [N] では Node 4 付近でサポートした場合，累積エネルギー吸収量が大きくなりその結果サポートが劣化するためと考えられる．累積エネルギー吸収量 J_{energy} が大きいと，サポートは劣化しサポートの信頼性 J_{support} は下がるので， J_{energy} が大きいところでは，概ねサポートの信頼性 J_{support} が低くなると考えられる．しかし， J_{energy} は入力エネルギーに対する吸収エネルギーの相対的な割合を示し， J_{support} は累積エネルギー吸収量の値そのものが限界値を超えない標本数の割合を示している．また，前述のように J_{energy} は，吸収エネルギー E_{ab} が許容吸収エネルギー（限界値） E_{al} を超えるか超えないかにかかわらず計算を行っている．そのため，必ずしも J_{energy} の最大値をとるところと J_{support} が最小値をとるところは必ずしも一致しないと考えられる．

6.2.2 サポート容量の影響

ここでは，評価指標のサポート容量の影響について調べる．図 12 に，サポート取り付け位置を Node 3，Node 6 としたときの配管系の動的信頼性 J_{piping} を示す．配管系の動的信頼性 J_{piping} に関して，図 12(a) においては，30 秒経過時の信頼性はどのサポート容量でも同様に小さくなっているが，図 12(a)，(b) とともに，0～30 秒の間を全体的にみると，サポート容量が $F_y = 1000$ [N] または 1500[N] のときに最大となっている．

Fig. 12 Effect of capacity of support on dynamic reliability of piping system

(a) Support location Node 3

(b) Support location Node 6

Fig. 13 Effect of capacity of support on accumulated energy

(a) Support location Node 4

(b) Support location Node 6

Fig. 14 Effect of capacity of support on dynamic reliability of support

図 13 に、サポ-ト取り付け位置を Node 3, Node 6 としたときのエネルギー吸収量の最大化指標 J_{energy} を示す。累積吸収エネルギー量が最大値をとるサポ-ト容量は、サポ-ト取り付け位置によって異なるが、ここには示していない Node 4, 5 の結果も含め、サポ-トを自由端側に配置するほど、累積吸収エネルギー量が最大値をとるサポ-ト容量は小さくなっている。

図 14 に、サポ-ト取り付け位置を Node 4, Node 6 としたときの弾塑性サポ-トの動的信頼性 J_{support} を示す。弾塑性サポ-トの動的信頼性 J_{support} は、サポ-ト容量が $F_y = 500 \sim 1000[\text{N}]$ 程度では減少しているが、サポ-ト容量 $F_y = 1500[\text{N}]$ 以上では 1 で一定となっている。これは、サポ-ト容量の変化によるエネルギー吸収量の変化の影響よりも、式 (9) で与えられる許容吸収エネルギーが大きくなったことにより、初通過破壊確率の限界値が大きくなったため信頼性が高くなったと考えられる。

6.3 最適化計算

本節では、4.1 節で提案した評価指標を用いて最適化計算を行う。評価指標は式 (10) ~ (15) のような 6 通りの組み合わせを考える。

$$(i) \quad J = J_{\text{piping}} \quad (10)$$

$$(ii) \quad J = J_{\text{energy}} \quad (11)$$

$$(iii) \quad J = J_{\text{piping}} + J_{\text{support}} \quad (12)$$

$$(iv) \quad J = J_{\text{energy}} + J_{\text{support}} \quad (13)$$

$$(v) \quad J = J_{\text{piping}} + J_{\text{energy}} \quad (14)$$

$$(vi) \quad J = J_{\text{piping}} + J_{\text{support}} + J_{\text{energy}} \quad (15)$$

ここでは研究の第一段階として重みをつけない単純な和を用いた．これらの組み合わせにおいて，弾塑性サポートの容量を 500～3000[N] の 6 種類，サポート位置を Node 2-6 の 5 か所の組み合わせの計 30 ケースで評価指標を計算し，最大となるものを最適値として求めた．

ここでは，6 つのケースの代表として，(vi) の式 (15) に示すように，3 つの評価指標全てを足しあわせた評価指標を用いて最適化を行うときの評価指標 J を図 15 に示す．また，6 つのケースについての最適化結果を表 3 に示す．表 3 の信頼性においては，実際の地震の主要動の継続時間程度に注目し，5 秒経過後の値を記した．図 15 では評価指数を $J = J_{\text{piping}} + J_{\text{support}} + J_{\text{energy}}$ としたため，配管系の信頼性と弾塑性サポートを考慮しつつ，エネルギー吸収量の最大化を図ることができるようになったと考えられる．表 3 から J_{piping} ， J_{energy} を主に検討すればよい評価指標になると考えられる．

Fig. 15 Evaluation index J in Case (vi)

Table 3 Optimization result

Item	Symbol	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)	unit
Supporting location		Node 6	Node 3	Node 6	Node 3	Node 6	Node 6	
Capacity of supports	F_y	1000	2500	1000	2500	1000	1000	[N]
Absorbed energy of supports	$\bar{E}_{\text{ab}}$	1285	1812	1285	1812	1812	1285	[J]
Seismic input energy	$\bar{E}_{\text{in}}$	1604	2149	1604	2149	2149	1604	[J]
Reliability of the piping	J_{piping}	0.68		0.68		0.68	0.68	
Accumulated energy	J_{energy}		0.843		0.843	0.843	0.801	
Reliability of the support	J_{support}			1	1		1	

7. 結 言

本研究では，弾塑性サポート支持配管系モデルを構築し，確率統計的な観点に基づき，配管系とサポート双方の健全性を考慮した耐震設計手法について検討することを目的として，数値シミュレーションを行い，本論文で対象とした配管系の場合には以下のような結果が得られた．

評価指標

(i) サポート取り付け位置の影響

配管系の動的信頼性 J_{piping} は，サポートを自由端側に配置するほど向上する．エネルギー吸収量の最大化指標 J_{energy} は，サポート容量が小さい $F_y = 1000$ [N] では，サポート取り付け位置を Node 6 としたとき，サポート容量が大きい $F_y = 1500$ [N] 以上では，サポート取り付け位置を Node 3 としたとき最大となる．弾塑性サポートの動的信頼性 J_{support} は，サポート取り付け位置を Node 4 に近づけて配置するほど低くなる．

(ii) サポート容量の影響

配管系の動的信頼性 J_{piping} は，サポート容量 $F_y = 1000 \sim 1500$ [N] で最大となる．エネルギー吸収量の最大化指標 J_{energy} が最大値をとるサポート容量は，サポート取り付け位置によって異なるが，サポートを自由端側に配置するほど，累積吸収エネルギー量が最大値をとるサポート容量は小さくなる．弾塑性サポートの動的信頼性 J_{support} は，サポート容量が $F_y = 1500$ [N] 以上では，十分信頼性がある．

最適設計

確率統計的観点に基づき、弾塑性サポート支持配管系の配管系と弾塑性サポート双方の健全性を考慮に入れた最適設計を行った。いろいろな周波数成分を持ったホワイトノイズを入力として考えているため、今回得た最適解を用いることで、種々の実地震波に対してもある程度の健全性の検討ができると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は関西原子力懇談会学術振興奨学金の助成を受けて行われたことを記し、ここに感謝の意を表する。

文 献

- (1) 原子力安全委員会安全目標専門部会，発電用軽水型原子炉施設の性能目標について 安全目標案に対応する性能目標について (2006).
- (2) 原子力安全委員会『発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針』等の耐震安全性に係る安全審査指針類の改訂等について (2006).
- (3) 原子力安全委員会『耐震設計審査指針』の改訂を機に実施を要望する既設の発電用原子炉施設等に関する耐震安全性の確認について (2006).
- (4) 原子力発電技術機構，“もし地震がきたら”，通商産業省資源エネルギー庁（原子力発電施設耐震信頼性実証試験レポート，No.12）(1997)，pp.1-12．
- (5) Fujita, K., Ito, T., Kaiji, S., Kokubo, E., Nakatogawa, T., Kato, T., “Study on a Rotary Type Lead Extrusion Damper as a High Damping Support for Nuclear Piping Systems”, *11th Structural Mechanics in Reactor Technology*, Vol.K, No.33/1 (1991), pp.475-480.
- (6) Fujita, K., Kimura, T., Ohe, Y., “Vibration Characteristics and Seismic Responses of Mechanical Structures With Hysteresis Elements”, *Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.126 (2004), pp.98-104.
- (7) 浪田芳郎，川畑淳一，市橋一郎，福田俊彦，“弾塑性ダンパ支持配管系の耐震設計手法の開発（第2報，一次元配管モデル試験とその応答解析）”，日本機械学会論文集 C 編，Vol.61，No.590，(1995)，pp.3874-3880．
- (8) 浪田芳郎，川畑淳一，市橋一郎，福田俊彦，“弾塑性ダンパ支持配管系の耐震設計手法の開発（第3報，三次元配管モデル試験とその応答解析）”，日本機械学会論文集 C 編，Vol.61，No.590，(1995)，pp.3881-3888．
- (9) 伊藤智博，藤田勝久，“鉛の塑性変形を利用した高減衰サポートのエネルギー吸収特性と配管の地震応答特性”，日本機械学会論文集 C 編，Vol.69，No.686，(2003)，pp.2602-2609．
- (10) 三好善幸，伊藤智博，新谷篤彦，藤田勝久，“3次元加振時における弾塑性サポート支持配管系の最適耐震設計（サポート取り付け角度の最適化）”，日本機械学会論文集 C 編，Vol.76，No.765，(2010)，pp.1226-1231．
- (11) 浅野 幸一郎，“弾塑性履歴特性を有する質点構造物の確率統計的地震応答：その 1. 擬定常 White Noise 入力を受ける 1 自由度系”，日本建築学会論文報告集，No.247，(1976)，pp.75-82．
- (12) 浅野 幸一郎，“統計的等価線形化法による弾塑性構造物の振動解析”，日本建築学会論文報告集，No.335，(1984)，pp.10-14．
- (13) 小山 慶樹，大鳥 靖樹，石田 勝彦，北村 春幸，“履歴型復元力特性を有する建築構造物のエネルギーの確率論的評価法：その 1 エネルギーの確率論的評価法の提案”，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2, 構造 II, 振動, 原子力プラント，No.270，(2005)，pp.327-328．
- (14) 星谷勝，確率論手法による振動解析 (1974)，鹿島出版会.
- (15) 星谷勝，確率論手法による構造解析 (1973)，鹿島出版会.