10901 原子力機器・配管の複数次モード振動を低減するパッシブ型動吸振器に関する研究（三次元動吸振器モデルの減衰特性の評価）

Study on passive dynamic damper to reduce multiple mode vibrations of nuclear piping system (Evaluations of damping characteristics of three-dimensional dynamic damper model)

正 藤本 滋（都市大） 〇学 長尾 晃太（都市大院）

Sigeru FUJIMOTO, University of Tokyo city, Tamadutumi-1, Setagaya, Tokyo

Kouta NAGAO, Graduate school of Tokyo city, Tamadutumi-1, Setagaya, Tokyo

The purpose of this study is to develop a three-dimensional passive dynamic damper using springs with high damping material to suppress multiple vibration modes of piping systems. In this paper, firstly, studies of theory for design of a three-dimensional passive dynamic damper are performed. As a result, multiple TMD theory is confirmed that is appropriate for the design of three-dimensional passive dynamic damper. Next, vibration tests using a small dynamic damper model using springs with high damping material and pipe models are performed in order to investigate effects of vibration reductions of the dynamic damper model. As a result, the damping characteristics of the pipe model are confirmed to be improved by using the dynamic damper model. Further, reductions of resonant response of the piping model under sinusoidal excitations are confirmed.

Key Words: Dynamic damper, Multiple modes, Modal analysis, Multiple TMD theory, High damping material

1. 緒言

原子力施設内の機器・配管では複数次の振動モードが励起されるため、大地震時には構造物に共振現象や大きな揺れが発生し、損傷を起こす可能性がある。実際に 2007 年の中越沖地震では、柏崎刈羽原子力発電所内の変圧器が損傷し、火災が発生した。B,C クラス機器・配管が損傷すると、発電所の復旧や再起動に支障をきたす可能性が高く、地震時の応答低減を積極的に図る必要がある。本研究の目的は、こうした機器・配管に適する高減衰材を用いた三次元動吸振器の提案と設計手法の確立である。これまでの研究では、動吸振器の設計理論の検討を行うとともに、動吸振器の小型模型と模擬配管模型を用いた振動試験によって、製作した動吸振器の減衰効果の評価を行った。

2. 三次元動吸振器のための基礎理論の検討

2.1 三次元動吸振器の設計理論

今回設計した動吸振器の設計理論には、モーダル理論⁽¹⁾を適用した手法の延長である分散型 TMD 理論⁽²⁾を用いた。この理論は、制振対象とする構造物の振動モード毎に動吸振器を設計し、振動モード毎の刺激係数とモードベクトルの乗算によって算出される刺激関数を重ね合わせ、その最大値を持つ質点に集中して動吸振器を装着するという考えに基づいた理論である。

2.2 地震応答解析による動吸振器の効果確認

分散型 TMD 理論⁽²⁾を用いて作成したモデルに対し、地震波を用いた地震応答解析を行って、応答低減性能を比較・評価した。制振対象となる構造物モデルは図 1 に示す無減衰の振動モデルとし、それに対して図 2 は分散型 TMD 理論⁽²⁾によって作成した 1 次モード、2 次モードに対する各動吸振器を、制振対象の持つ各次モードの最大振幅質点に装着したモデルとした。これら 2 通りのモデルに図 3 に示す兵庫県南部地震 神戸海洋気象台観測波の N-S 波（以下、神戸地震波）を入力して、地震応答解析を行った。各解析モデルの地震応答解析の例として、図 4 に神戸地震波を入力した際の各解析モデルにおける質点 M_1 の応答加

速度時刻歴を示す。

Fig.1 Structure model

Fig.2 Added-damper model

Fig.3 Acceleration time history of KOBE N-S earthquake

Fig.4 Time history of response acceleration of analytical models

解析モデルの加速度応答時刻歴を比較すると、分散型 TMD 理論⁽²⁾の設計理論に基づいた動吸振器を、適切な位置に取り付けることで、構造物の振動を動吸振器が吸収・消散し、

振動が低減されていることがわかる。以上から、動吸振器の設計理論に分散型 TMD 理論⁽²⁾を用いることは十分妥当であるといえる。

3. 三次元動吸振器模型を用いた振動実験

3.1 三次元動吸振器模型の基本構造

原子力施設の配管は、複数の振動モードを持ち、その振動も X,Y,Z 軸の 3 方向に現れる。このため、装着する動吸振器も、複数の振動モードに対応が可能で、3 方向の振動全てに対応できる必要がある。

以上の設計理論をもとに、図 5 に示すような、後で述べる配管模型に対応した動吸振器構造を設計・製作した。

Fig.5 Structure of 3D dynamic damper model

高減衰合金材である Mn-Cu 材を減衰材を兼ねるばね材として使用することで、XY 軸方向の振動を①の Mn-Cu 材が、Z 軸方向の振動を②の Mn-Cu 材がそれぞれ制振する。この構造は以下のような特徴を持つ。

- (1) 機械的減衰を用いずに減衰能を確保でき、構造の単純化が可能。
- (2) 制振部材先端に取り付けた錘の位置を変えることで簡易に振動モーメントを調整でき、幅広い固有振動数に対応可能。

3.2 振動実験手順

提案した三次元動吸振器構造の減衰特性を評価するため、小型模型を用いた振動実験を行った。実験は図 6 に示す実験装置(図 6 左側)に動吸振器を装着(図 6 右側)して行った。実験に使用する配管模型には鋼製の中実丸直棒及びパイプを使用し、それぞれについて動吸振器を装着した場合と装着していない場合でどのように入力振動が減衰するかについて実験した。実験は、自由振動実験と正弦波加振実験の 2 通り行った。

Fig.6 Vibration testing system

自由振動実験は直棒の先端をゴムハンマーで打撃して行い、正弦波加振実験は振動台により正弦波振動を加振して行った。

3.3 自由振動実験結果

中実丸直棒を用いた振動実験の結果の例として、動吸振器を取り付けた場合と取り付けていない場合の中実丸直棒先端の加速度時刻歴および減衰比をそれぞれ図 7, 8 に示す。

動吸振器の固有振動数を直棒の固有振動数に合わせて調整し装着した場合、直棒のみの場合に対し、減衰比は約 1.5 倍に増加している。また、減衰時間も、直棒のみでの約 5 秒に対し、動吸振器ありでは約 2 秒と短縮されることが確認された。

Fig.7 Time history of response acceleration of Non-damper

Fig.8 Time history of response acceleration of Added-damper

3.4 正弦波強制加振実験結果

正弦波強制加振実験では、約 0.1 (G) の正弦波を 15(Hz) から 25(Hz) まで加振した。その際、加速度計で直棒先端での加速度と振動台の加速度を、各周波数ごとに 10 秒間測定し、振動台の加速度に対する直棒先端の加速度の比として図 9 に示すような加速度応答倍率曲線を作成した。

この応答倍率曲線から、動吸振器によって、入力波に対する配管模型の加速度応答が大幅に低減されていることがわかり、動吸振器模型による減衰効果が確認された。

Fig.9 Resonance response acceleration magnification of Steel rod

4. 結言

今回の実験・解析結果から、以下のような結論が得られた。

1. 三次元振動に対する動吸振器構造について、設計理論から動吸振器模型の構造を提案し、試作模型を製作した。
2. 自由振動を用いた振動実験の結果から、動吸振器模型によって配管模型の減衰特性の向上が確認された。
3. 正弦波振動を用いた振動実験の結果から、動吸振器模型によって配管模型の入力に対する共振応答が大幅に低減されることが確認された。

今後は、今回使用した配管模型以外に、曲がり要素を持った三次元配管模型を使用し、三次元方向の実験による検証を行う。

参考文献

- (1) 背戸 一登・他 2 名, 機論(C), 50-458(1984), p1962.
- (2) 吉中 進・他 1 名, AIJ 構造系論文集, 586(2004), p123.