摩擦サポートを有するプラント配管系の振動実験*

渡 邊 鉄 也^{*1}, 三 森 友 彦^{*2}, 鈴 木 浩 平^{*2}
清 水 信 行^{*3}, 小 川 信 行^{*4}, 箕 輪 親 宏^{*4}

Vibration Test of Plant Piping System Having Friction Support

Tetsuya WATANABE, Tomohiko MITSUMORI, Kohei SUZUKI,
Nobuyuki SHIMIZU, Nobuyuki OGAWA and Chikahiro MINOWA

This report deals with the experimental study of seismic response behavior of piping systems in the industrial facilities such as petro-chemical plants and nuclear power plants. Special attention is focussed on the nonlinear dynamic response of piping systems due to frictional vibration appeared among piping and supporting devices. 3 dimensional mock-up piping model having 30 m length and 8 inches diameter is excited by large scale (15 m×15 m) shaking table. Power spectra of the response vibration and loading-response relations in the form of hysteresis loop under several excitation levels are calculated. Response reduction effect caused by frictional vibration is evaluated and demonstrated in terms of "response reduction factor". Numerical simulation by use of nonlinear simplified friction model is also performed and calculated piping response is compared with those from vibration tests.

Key Words: Vibration, Nonlinear System, Friction Support, Three Dimensional Piping System, Seismic Design

1. 緒 言

石油化学プラント、原子力発電所などに設置されている配管は、重量支持や内容物供給機能の維持のために一般に架構上に支持されており、その支持も、ガイドやストッパのように部分的に剛性を増して配管の自由度を拘束するものや、スプリングハンガのように弾性的に配管を拘束するものなど、配管の形状や用途によりさまざまなサポートが用いられている。特に、化学プラント配管は、その使用温度が広範囲にわたっているため、配管-支持架構間には、一般に熱膨張を見込んだすきまが存在する。また、固定部分にも施工時に生じるがた、さらに配管と支持架構との相対運動による摩擦が介在するため、地震などの振動が加わったときの挙動は複雑なものとなる。しかし、これらの非線形特性を考慮した配管系の動特性の解明は、一般の化学プラント配管系の耐震解析においてはほとんどなされていないのが現状である。特に、実際のプラント配

管は長い直管部を有するものが多く、その軸方向の振動応答解析の重要性が指摘されながらも、ほとんど研究されていない。その理由の一つとして、現行の耐震設計では、小規模の地震に対しては非線形現象が顕著には現れないとして、その効果を裕度の中に含めて安全側に設計されていることなどが挙げられる。しかし、大規模な地震が生じた場合には、その大振幅によって励起される非線形現象の影響は顕著となり、大きな被害を受ける可能性が高い。したがって、こうした非線形特性を考慮した振動特性を単に解析的に検討するだけではなく、実験的にも精細に解明することは耐震設計法を合理的に発展させる上で重要である⁽¹⁾。

本論文は、特に配管と支持架構の間の摩擦特性に注目して実機相当のプラント配管系を想定した試験体を作製し、大型加振台を用いて行った振動実験の報告である。ここでは、摩擦を介した配管-支持架構系の連成振動特性を明らかにするとともに、配管系の簡便な力学モデルを構築して数値シミュレーションを行い、モデル化の妥当性を検証している。そして、これらの結果を耐震設計法の向上に反映できる基礎データとしようとしている。

* 平成3年7月11日 1991 Dynamics and Design Conferenceにおいて講演、原稿受付 平成3年10月29日。

^{*1} 准員、東京都立大学工学部 (〒192-03 八王子市南大沢1-1)。

^{*2} 正員、東京都立大学工学部。

^{*3} 正員、いわき明星大学理工学部 (〒970 いわき市中央台飯野5-5-1)。

^{*4} 正員、防災科学技術研究所 (〒305 つくば市天王台3-1)。

2. 供 試 体

供試体は、プラントの実配管を想定し、図1に示すような全長30 m、口径8インチの三次元配管を用いた。材質は配管用炭素鋼鋼管 (SGP) で、全重量は903 kgfである。一般に、プラント配管は直管部が長いことを考慮し、また配管の直管部長手方向の慣性力を増すために、加振方向直管部 (以降、直管部と略す) を10 mとしている。さらに、ロッドレストレイントにより直管部のZ方向の変位を拘束した。配管は三つの支持架構により支持されており、支持架構1, 3は配管を剛支持し、直管部とそれを支持する支持架構2が、しゅう動プレートとシューから構成される摩擦機構を介して連成している。すなわち、図2に示すようなしゅう動部を配管と架構の間に2箇所 (図1のA, B) 設け、しゅう動プレート上を、配管支持反力や摩擦力を計測するための直径22 mmのシューをしゅう動させる固体摩擦を実現する機構となっている。シューの材質はS45C、しゅう動プレートの材質は、配管系で通常用いられているSS41と、それよりも静止摩擦係数の小さいテフロンを用いた。さらに、しゅう動プレートの下に厚さ6 mmのスペーサを設置し、配管支持反力を変動させて、静止摩擦力を調整可能にした。

支持架構2は、剛構造と柔軟構造を実現できるもの

図1 供試体形状

図2 摩擦部の構造

とした。すなわち、鋼板の上にH形鋼(150×150 mm)を乗せた板ばね状の構造とし、左右をブレースで固定すると、後述のように、一次の固有振動数 (35.9 Hz) が配管の固有振動数 (5.07 Hz) に比べて十分高くなることから剛構造とみなしうる。また、ブレースを外した状態にすると柔軟構造 (5.39 Hz) となり、配管と共振しやすい状態となる。材質はSS41であり、剛構造の場合の重量は1137 kgfである。図3, 4に支持架構1~3の形状と寸法を示す。

3. 実験方法

加振台は、防災科学技術研究所所有の大型加振台

図3 支持架構1, 3

図4 支持架構2

図5 計測機器および計測点

(15 m×15 m, 最大振幅±220 mm)を用いた。計測点は、図5に示すように、加速度計を31個、ひずみ計を24個、変位計を2個の計57個設け、200 Hzのサンプリングでデジタルデータとして収録した。

入力波は、系全体の動特性を同定するために広帯域ランダム波(0~30 Hz)と配管の一次モードを励起するための狭帯域ランダム波(4~6 Hz)の2種類を用い、配管の支持条件や摩擦力および加振入力の大さをさまざまに変動させて実験を行った。本研究では、主として直管部軸方向の慣性力によりしゅう動が生じたときの配管-架構系の連成振動応答を明らかにしようとしていることから、特に、加振方向(x 方向)の振動応答に着目し、直管部中央の絶対加速度、配管の架構2に対する相対変位、架構2の加振台に対する相対変位、しゅう動シューの動ひずみの測定を重視した。

4. 実験結果

4.1 予備実験 予備実験として、配管の直管部を懸吊状態にして、摩擦サポートの効果が現れない線形条件下でステップ加振を行い、FFT解析によって得られた伝達関数を偏分反復法を用いて曲線適合⁽²⁾を行った結果、配管および支持架構2の一次の固有振動数、減衰比が表1に示すように同定された。これからわかるように、配管-架構の連成振動応答を把握するために、また、実配管系に即し、配管および架構(柔軟構造)の一次の固有振動数はともに5 Hz付近に設計されている。一方、配管支持反力と、配管が架構上をしゅう動し始めるときの引張荷重から静止摩擦係数を算出すると、しゅう動プレートがSS41の場合にはほぼ0.2~0.3の範囲内に分布し、テフロンの場合には、おおむね0.1前後の値であった。

4.2 時刻歴応答 図6、7に時刻歴応答の例として、狭帯域ランダム波入力時の波形を示す。しゅう動プレートはSS41であり、スペーサなしの場合である。配管-架構間の相対変位に注目すると、配管は架構上をしゅう動と停止を繰り返すような摩擦系に特有の挙動を示していることがわかる。また、配管は入力加速度が大きくなる時刻でしゅう動が生じており、しゅう

動を開始すると、直管部の慣性力の影響で、数周期振動して停止する傾向にある。次に、架構2が剛構造の場合と柔軟構造の場合を比較すると、最大相対変位で柔軟支持構造のときのほうが大きく、2倍以上となっている。これは、入力の大さきにも依存しているが、主に、架構が柔軟構造のために直管部の慣性力が増し、また、配管と架構の上下動が顕著となるためであると考えられる。

4.3 周波数応答特性 加速度応答波をFFT解析して得たパワースペクトルから、等価線形化した配

(a) 加振台の絶対加速度

(b) 配管の架構に対する相対変位

(Input:Narrow Band Random Noise, Max.994Gal)
(Support:Rigid, Plate:SS41, W/O Spacer)

図6 架構が剛構造の場合の時刻歴波形

(a) 加振台の絶対加速度

(b) 配管の架構に対する相対変位

(Input:Narrow Band Random Noise, Max.1076Gal)
(Support:Soft, Plate:SS41, W/O Spacer)

図7 架構が柔軟構造の場合の時刻歴波形

表1 配管および架構のモーダルパラメータ

Object	Natural Frequency	Damping Ratio
Piping	5.07 [Hz]	1.84 [%]
Support(Rigid)	35.9 [Hz]	3.26 [%]
Support(Soft)	5.39 [Hz]	0.43 [%]

管系の周波数応答特性を求めた。図8に、広帯域ランダム波を入力したときの入力レベルの違いによるパワースペクトルの比較を示す。この図から、卓越振動数は29 Hz～31 Hzの間で生じており、しゅう動が生じない場合には配管が架構と連成して架構の剛性が配管に加わるため、配管の卓越振動数が5.07 Hzから30.86 Hzに引き上げられていると考えられる。また、この図から、入力レベルを増加ししゅう動が生じると卓越振動数は1.17 Hz低下し、線形条件での配管の固有振動数に近づく傾向にあることがわかる。次に、架構2が柔軟構造の場合のパワースペクトルを図9に示す。卓越振動数は、5 Hz近傍で生じており、この場合もしゅう動が生じるとその卓越振動数はわずかではあるが0.39 Hz低下し、5.07 Hzに近づく傾向にあることがわかる。以上のことから、配管が架構上をしゅう動することにより、配管系の軸方向の卓越振動数が低下することが明らかとなった。

4・4 履歴曲線とエネルギー吸収量 配管-架構系

(Input: Wide Band Random Noise
Support: Rigid, Plate: SS41, W/O Spacer)

図8 直管部中央の絶対加速度のパワースペクトル
(支持架構が剛構造の場合)

(Input: Wide Band Random Noise
Support: Soft, Plate: SS41, W/O Spacer)

図9 直管部中央の絶対加速度のパワースペクトル
(支持架構が柔軟構造の場合)

(a) 履歴曲線

(b) エネルギー吸収量

(Input: Narrow Band Random Noise, Max. 994 Gal)
(Support: Rigid, Plate: SS41, W/O Spacer)

図10 支持架構が剛構造の場合

(a) 履歴曲線

(b) エネルギー吸収量

(Input: Narrow Band Random Noise, Max. 1076 Gal)
(Support: Soft, Plate: SS41, W/O Spacer)

図11 支持架構が柔軟構造の場合

の振動エネルギーは、摩擦支持部でのしゅう動が生じると吸収される。そこで、摩擦力-相対変位の履歴曲線によりエネルギー吸収の特徴を明らかにする。摩擦力はシュ-に作用する曲げモーメントとシュ-に設置したひずみ計により得られる曲げひずみの関係から算出した。図 10(a)、11(a)にそれぞれ架構が剛構造の場合と柔軟構造の場合の履歴曲線を示す。これらの図から、相対変位が変動する、すなわち相対速度が生じている場合には摩擦力は一定で、相対速度が生じず、配管が架構上に静止している場合には摩擦力のみが変動する特徴が顕著に現れている。この形状は、摩擦系の履歴曲線に特有のものである⁹⁾。また、両者を比較すると図 11(a)のほうが履歴曲線の面積が大きいことから柔軟支持構造のほうがエネルギー吸収能が高いと考えられる。そこで、これらの履歴曲線の面積を時刻歴的に積算し、任意の時刻までに摩擦部で吸収したエネルギーの総量を求めた。図 10(b)、11(b)にそれぞれ架構 2 が剛構造の場合と柔軟構造の場合のエネルギー吸収量の変化を示す。図 10(b)に注目すると、しゅう動が生じているところでエネルギー吸収量は急激に増加しており、20 秒後のエネルギー吸収量は 227 J である。これに対し、架構が柔軟構造の場合には、線形条件での配管と架構の固有振動数がそれぞれ 5.07 Hz、5.39 Hz と近接し、共振しやすい状態にあることや、架構が柔軟構造であるために配管および架構の慣性力が増大することからしゅう動の生じる頻度は高く、しゅう動量も大きくなる。したがって、図 11(b)ではエネルギー吸収量は緩慢に増加している。また、20 秒後のエネルギー吸収量は 1 015 J であり、図 11(a)の 4.5 倍の値を示している。

4.5 摩擦支持による応答低減効果の評価 配管の懸吊状態における線形条件下での最大応答に対して、非線形系(摩擦系)の最大応答の低減効果を定量的

に評価するために、式(1)に示すような応答低減係数¹⁾ β を定義した。

$$\beta = 1 - \frac{X_{\max}(NL)}{X_{\max}(L)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $X_{\max}(NL)$ は非線形系の最大応答であり、 $X_{\max}(L)$ は線形系の最大応答である。

線形系の最大応答は、図 12 に示すような線形近似曲線を線形系の最大応答として用いた。ここで、横軸を入力加速度の最大値、最小値にし、縦軸を配管懸吊状態での最大、最小応答にしてプロットし、最小二乗法で直線近似している。

図 13、14 に入力の大さきによる応答低減係数の計算例を示す。入力は狭帯域ランダム波で、図 13 は直管部中央の絶対加速度の応答低減係数であり、図 14 は配管-架構間の相対変位の応答低減係数である。これらの図から架構が剛構造の場合、本実験で行った入力の大さき(300~1 500 Gal)の範囲内では、加速度で 80% 以上、変位で 90% 以上の応答低減効果が認められた。

(Input:Narrow Band Random Noise)
(Plate:SS41)

図 13 加速度応答の応答低減係数

(Input:Narrow Band Random Noise)

図 12 最大、最小応答の線形近似

(Input:Narrow Band Random Noise)
(Plate:SS41)

図 14 相対変位応答の応答低減係数

また、架構が柔軟構造の場合には、変位で40%以上の応答低減効果が認められた。さらに、しゅう動プレートの違いや入力波の周波数帯域の違いによる比較を行ったところ、表2に示すように、架構が剛構造でしゅう動プレートがSS41、狭帯域ランダム波入力の場合に最も応答低減効果が顕著であることが明らかとなった。

5. 数値シミュレーション

プラント配管系は、形状が複雑で、一般に三次元構造となっている。配管支持部も1箇所ではないため、数値解析を行う場合には、多入力多質点系の問題として取扱わなくてはならない。このような問題を扱う場合には、一般に有限要素法やモード解析法などの手法が用いられているが、これらの手法は、多大なる時間

表2 応答低減効果

Input	Wide Band Random Noise				Narrow Band Random Noise			
	Rigid		Soft		Rigid		Soft	
Support								
Plate	SS41	Teflon	SS41	Teflon	SS41	Teflon	SS41	Teflon
Abs. Acc.	50 %		20 %		80 %	60 %	20 %	30 %
Rel. Disp.	90 %		30 %		90 %	50 %	40 %	30 %

- M_p : 配管の等価質量
- K_p : 配管の等価剛性
- C_p : 配管の等価減衰係数
- M_s : 支持架構2の等価質量
- K_s : 支持架構2の等価剛性
- C_s : 支持架構2の等価減衰係数
- X_p : 配管の加振方向の変位
- X_s : 支持架構2の加振方向の変位
- X_0 : 加振台の加振方向の変位
- N : 配管支持反力
- F : 摩擦力
- μ_d : 動摩擦係数
- μ_s : 静止摩擦係数

図15 供試体の力学モデル

と労力を必要とし、特に、非線形特性を考慮した解析となると、大型計算機を用いた複雑な計算となってしまう。本研究では、配管-支持架構間に摩擦が介在するときの連成振動応答を解明するに当たって、その第1段階として、主として摩擦特性が直管部と架構2に与える影響に着目していることから、簡単なモデルによる計算を行った。すなわち、加振時に最も振幅が大きくなると予想される配管および架構2の一次振動モー

図16 摩擦力特性

(a) 直管部絶対加速度 (実験)

(b) 直管部絶対加速度 (シミュレーション)

(c) 配管-架構間の相対変位 (実験)

(d) 配管-架構間の相対変位 (シミュレーション)

(Input: Narrow Band Random Noise, Max. 994 Gal)
(Support: Rigid, Plate: SS41, W/O Spacer)

図17 実験結果とシミュレーション結果の比較

ドのみに注目し、図 15 のように配管、架構 2 をそれぞれ自由度の力学系にモデル化した。摩擦特性は図 16 のように摩擦モデルのシミュレーションでよく用いられているクーロン摩擦を想定した。この力学モデルがしゅう動しているときの運動方程式は、相対変位 $x_p = X_p - X_0$, $x_s = X_s - X_0$ を用い、また、 $M_p/M_s = \gamma$, $K_p/M_p = \omega_p^2$, $K_s/M_s = \omega_s^2$, $C_p/M_p = 2\zeta_p\omega_p$, $C_s/M_s = 2\zeta_s\omega_s$ とおくと最終的に

$$\begin{cases} \ddot{x}_p + 2\zeta_p\omega_p\dot{x}_p + \omega_p^2x_p \\ + \frac{\mu_d N}{\gamma M_s} \text{sign}(\dot{x}_p - \dot{x}_s) = -\ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_s + 2\zeta_s\omega_s\dot{x}_s + \omega_s^2x_s \\ - \frac{\mu_d N}{M_s} \text{sign}(\dot{x}_p - \dot{x}_s) = -\ddot{x}_0 \end{cases}$$

$$\text{sign}(X) \begin{cases} X > 0: 1 \\ X = 0: 0 \\ X < 0: -1 \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

となる。しゅう動状態から停止状態への切換え条件は、

$$\mu_s N > \frac{\gamma M_s}{1 + \gamma} |(2\zeta_p\omega_p - 2\zeta_s\omega_s)\dot{x} - \omega_p^2x_p + \omega_s^2x_s|$$

ただし $\dot{x}_p = \dot{x}_s = \dot{x} \dots\dots\dots (3)$

であり、停止状態からしゅう動状態への切換え条件は符号が逆になる。この運動方程式を数値積分して応答を求めた。計算におけるパラメータは配管供試体に即して、予備実験から得た値を用いた。

図 17 に実験結果と本シミュレーション結果の時刻歴波形の一例を示す。これらの図から、絶対加速度、相対変位、ともに比較的良好に一致していることがわかる。相対変位に注目すると、シミュレーション結果はしゅう動と停止を繰り返しており、摩擦系の特徴を良く表していることがわかる。ほかの実験ケースについても同様のことが確認でき、本研究で採用した簡便な

モデル化で、配管-支持架構間の摩擦を介した連成振動の特徴を把握することが可能となった。

6. 結 言

本研究の主な成果を以下に示す。

- (1) 摩擦部でしゅう動が生じると配管-架構系の卓越振動数は、架構が剛構造の場合には 1.17 Hz, 柔軟構造の場合には 0.39 Hz 低下し、線形条件での配管の固有振動数に近づくことが明らかとなった。
- (2) 配管-架構間に摩擦が介在する場合、配管が架構上をしゅう動と停止を繰返すことや、摩擦力-相対変位の履歴曲線が摩擦系特有のく形に近い形状となっていることなどの特徴が実験的に明らかとなった。
- (3) 最大応答で評価すると、本実験で用いた入力の大さきの範囲内では、支持架構は剛構造で、しゅう動プレートの摩擦係数が大きいほうが応答低減効果が高いことが明らかとなった。
- (4) 簡便な力学モデルによる数値シミュレーションを行い、摩擦特性が介在する配管系の連成振動の特徴を把握することができた。

本研究の実験を行うに当たり石川島検査計測(株)の越智義夫氏、石川島播磨重工(株)の千葉敏郎、小林博栄、横井領の各氏には、試験体の製作、設置に当たり、全面のご支援をいただいた。また、防災科学技術研究所の御子柴正氏には、データ整理を行う上で御助力をいただいた。上記の方々に厚くお礼申し上げる。

文 献

- (1) 柴田(編), 化学プラントの耐震設計, (1976), 137, 丸善.
- (2) 日野, スペクトル解析, (1977), 158, 朝倉書店.
- (3) 徳岡(編), 振動論, (1984), 11, サイエンス社.
- (4) 曾根・鈴木・小林, 配管系の多入力振動応答解析に関する研究, 機論, 53-486, C (1987), 330.