

長周期摩擦系における応答低減マップ*

渡邊鉄也*¹, 柄田顕章*², 田中基八郎*¹

Response Reduction Map Under Long Period Friction System

Tetsuya WATANABE*³, Akinori TOMODA and Kihachiro TANAKA*² Department of Mechanical Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

This paper deals with response reduction effect by friction behavior. Friction is expected to absorb seismic energy. This effect should be utilized positively in seismic design. For past several years, seismic isolation structures have been focused in seismic design of industrial facilities. Seismic isolation effect is controlled by the friction characteristic exists in friction support. Therefore, adjustment of frictional force becomes a very important. In this paper, "Response Reduction Map" for long period friction system is suggested. This map shows the range that response magnification is less than 1 and less than the response of linear system. The response reduction map without complex non-linear time history response calculation can easily obtain the response magnification. At first in this study, the response reduction map by actual earthquake wave is shown. Next, the response reduction map by the artificial earthquake wave calculated using design spectrum is shown.

Key Words: Long Period, Response Reduction Map, Friction, Seismic Design

1. 結 言

近年、兵庫県南部地震(1995)や新潟県中越地震(2004)などをはじめとする大規模な地震が多発しており、一般家屋もさることながら産業施設内建造物の被害も多く報告されている。産業施設内建造物は二次的な災害が懸念されるため、一般家屋とは異なる耐震設計基準が定められている。

ここ数年、産業施設内建造物の耐震設計において、免震構造が目されてきている。免震構造としては、積層ゴム、転がり支承、摩擦支承、ベアリング機構を利用したものなどがあり、系を長周期化することにより、地震荷重の伝達を低減させている。転がり支承、摩擦支承などでは、系に摩擦特性が介在するため、その特性によって免震効果が左右される。したがって、摩擦力の調整は非常に重要な要素となっている。筆者らは、これまでの研究⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾から、実地震波の入力レベルを変化させたときの1自由度摩擦系の加速度応答計

算において、ある入力レベルで応答低減効果が顕著となる場合があることがわかった。すなわち、免震構造物に適切な摩擦力を設定することで、応答低減効果が顕著となる。しかし、摩擦系応答計算は、停止としゅう動を繰り返す(スティックスリップ)1自由度非線形系であるため、摩擦力を変化させて応答計算するのは多大な時間を要する。そこで、本研究では、長周期摩擦系における応答低減マップを提案する。これは、1秒以上の長周期において、応答倍率が1未満で線形系より応答が低減される範囲を示したものであり、複雑な非線形応答計算をせずに適切な摩擦力を推定することが可能である。系を免震構造にした場合、長周期地震動により共振現象が生じる恐れがあるが、現有する摩擦支持部の摩擦力を適切に設定する、あるいは通常用いられているダンパに付加的に摩擦支持部を設けることで、応答低減効果を向上することが可能となる。

本研究では、まず、実地震波における応答低減マップを示す。次に、高圧ガス保安協会の耐震設計指針における応答倍率から逆算して求めた人工地震波を用いて応答低減マップを示す。

* 原稿受付 2006年4月24日。

*¹ 正員、埼玉大学工学部(〒338-8570 さいたま市下大久保255)。*² 学生員、埼玉大学大学院工学研究科。

E-mail: watanabe@mech.saitama-u.ac.jp

2. 入力レベルによる応答倍率

2・1 α の定義 1 自由度摩擦系の運動方程式は式(1)で表される.

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) + f \operatorname{sign}(\dot{x} - \dot{y}) = 0 \quad (1)$$

ここで, m は質量, c は減衰係数, k はばね定数, f は摩擦力, x は質量の変位, y は基礎の変位である. また, $\operatorname{sign}(x)$ は符号関数で, 以下となる.

$$\operatorname{sign}(x) = \begin{cases} -1 & (x < 0) \\ 0 & (x = 0) \\ 1 & (x > 0) \end{cases} \quad (2)$$

次に, 質量と基礎の相対変位を $z = x - y$ とすると, 式(1)は下記のように変形される.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + f \operatorname{sign}(\dot{z}) = -m\ddot{y} \quad (3)$$

ここで, $\frac{c}{m} = 2\zeta\omega$, $\frac{k}{m} = \omega^2$ とすると,

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z + \frac{f}{m} \operatorname{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (4)$$

となる.

実機の摩擦系では, 摩擦係数を変化させる, あるいは調整することは困難である. しかし, 摩擦力は垂直抗力を変化させることで調整が可能であることから, 本研究では摩擦力をパラメータとして用いることとする. 入力加速度の最大値を $\ddot{y}_{\max} = A$ と表し, 摩擦力と慣性力の比を式(5)のように α と定義する.

$$\alpha = \frac{f}{Am} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \alpha = 0 & : \text{線形系} \\ 0 < \alpha < 1 & : \text{摩擦系} \\ \alpha \geq 1 & : \text{線形系} \end{cases}$$

α の値によって3種類の系に分類することができる.

$\alpha = 0$ の場合は摩擦力が零であるので, 線形系である. $0 < \alpha < 1$ では摩擦部でのしゅう動が生じる系で

である. $\alpha \geq 1$ ではしゅう動は生じないため, 線形系となる. 式(5)を式(4)に代入すると次のような式となる.

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z + A\alpha \operatorname{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (6)$$

数値計算では, α を変化させて式(6)を積分して応答倍率を求める.

2・2 ストップングゾーン 相対速度が零になった時の運動方程式を考える.

$$\ddot{z} + \omega^2 z + A\alpha \operatorname{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (7)$$

変形すると,

$$\ddot{z} = -\omega^2 z - A\alpha \operatorname{sign}(\dot{z}) - \ddot{y} \quad (8)$$

となる. 相対速度が正の状態からストップしたときに相対加速度が負になっていると, そのまま正の方向に運動することができなくなると考える. したがって, 相対速度が零になった後, そのまま停止状態を継続する条件は以下ようになる.

$$\ddot{z} = -\omega^2 z - A\alpha - \ddot{y} < 0 \quad (9)$$

変形すると,

$$-\omega^2 z - \ddot{y} < A\alpha \quad (10)$$

また, 相対速度が負の状態からストップしたときに相対加速度が正になっていると, そのまま負の方向に運動することができなくなると考える.

$$\ddot{z} = -\omega^2 z + A\alpha - \ddot{y} > 0 \quad (11)$$

となり,

$$\omega^2 z + \ddot{y} < A\alpha \quad (12)$$

となる. したがって

$$|\omega^2 z + \ddot{y}| < A\alpha \quad (13)$$

がストップする条件となる.

式(12), (13)より, 次式が得られ, 2つの曲線の間でストップすると, その状態を維持し, 曲線で囲まれる範囲の外に出るときに再び摺動する. この範囲をストップングゾーンという⁶⁾.

$$\begin{aligned} z &> \frac{1}{\omega^2}(-A\alpha - \ddot{y}) \\ z &< \frac{1}{\omega^2}(A\alpha - \ddot{y}) \end{aligned} \quad (14)$$

図1に系の固有周期が0.3秒，正弦波入力加速度の振動数が1Hz， α が0.6の場合の相対変位とストッピングゾーンを示す。ストッピングゾーンの中で停止すると，その状態を維持し，ゾーンの外に出るときに再びしゅう動している。したがって，本研究で用いる応答解析では，スティックスリップを考慮した適切な計算結果が得られることがわかる。

2・3 応答倍率 実地震波を用いた応答計算において，ある入力レベルで応答が線形系より低減され，応答倍率が1以下となる場合があることがわかった。図2に入力レベルによる応答倍率の例を示す。系の固有周期は1秒で α は0.1である。入力波は1940年ImperialValley地震ElCentroにおけるNS方向地震波と2004年新潟県中越地震小千谷におけるEW方向地震波（気象庁）である。この図から，系がしゅう動し始める入力レベルで応答倍率の低減が顕著であることがわかる。このことから， α の値，すなわち摩擦力を適切に設定すれば線形系より応答が低減され，また，応答倍率を1以下にすることが可能であることがわかる。そこで，次章以降で，応答低減マップを示し，応答低減効果が高い α の値の範囲を示していく。

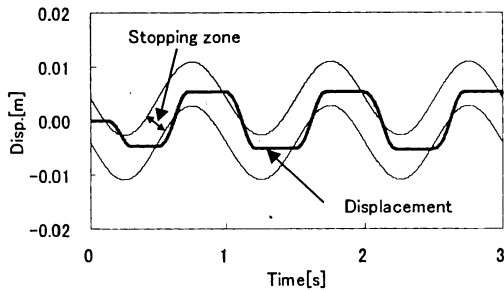


Fig.1 Stopping zone

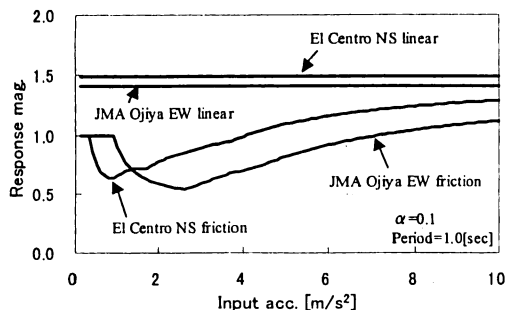


Fig.2 Response mag. respected to input acc. level

3. 実地震波における応答低減マップ

3・1 応答低減マップ 応答低減マップとは，横軸を固有周期，縦軸を α にしてプロットしたものである。応答倍率は色の濃さで表現しており，黒が応答倍率1で白が応答倍率0である。本研究では，長周期摩擦系を対象としているため，固有周期は1秒以上とした。また，応答倍率が1倍を超えた場合を1，線形系より応答倍率が大きい場合も1とし，上限1のマップとした。このマップから応答倍率が1以下で，線形系より応答低減効果がある α の値を得ることができ，適切な摩擦力を推定することが可能となる。図3から図9に実地震波および日本建築センター模擬波の応答低減マップを示す。

3・2 応答低減表 応答低減マップは個々の地震波に対し適切な α の値を求めることができるが，多くのデータを掲載することが出来ない。そこで，応答低減効果のある周期と α の範囲を表として纏めた。表1に応答低減表を示す。この表より，新潟地震のような長周期成分を含んでいる地震波では応答低減効果が高い周期と α の範囲が広く，長周期成分の少ない地震波では範囲が狭いことがわかる。これは，系の固有周期を1秒以上にしているため，長周期成分の少ない地震波では応答が励起されず，摩擦部におけるしゅう動が少なく，線形系より応答倍率が高くなるためである。この表より，適切な摩擦力を推定することが可能となる。

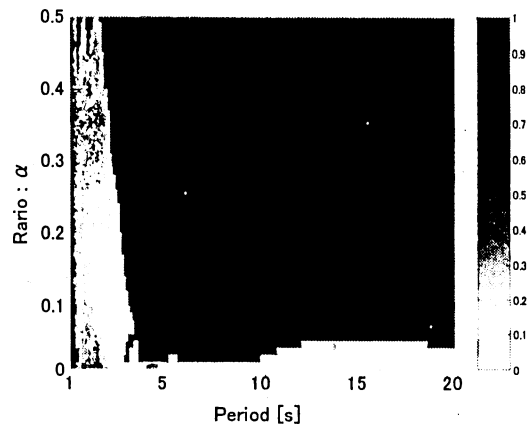


Fig.3 Response reduction map (El Centro NS)

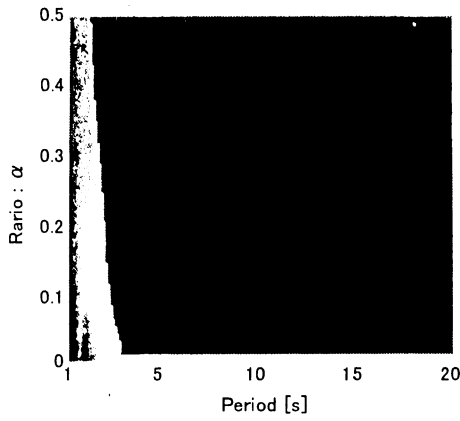


Fig.4 Response reduction map
(Niigata cyuetsu JMA Ojiya NS)

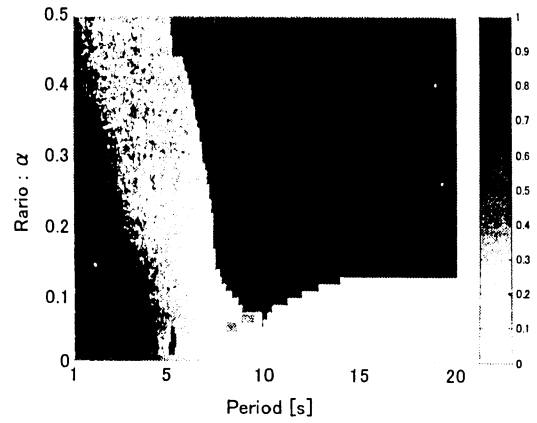


Fig.7 Response reduction map
(1964 Niigata EW)

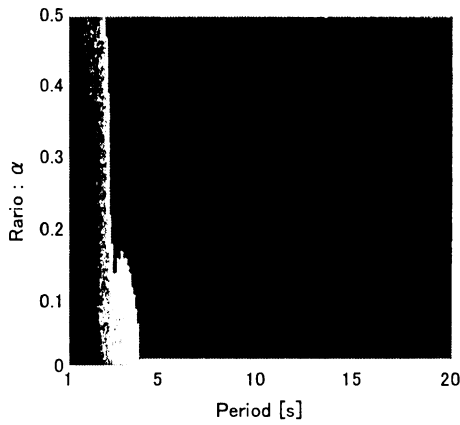


Fig.5 Response reduction map
(Kobe JR Takatori EW)

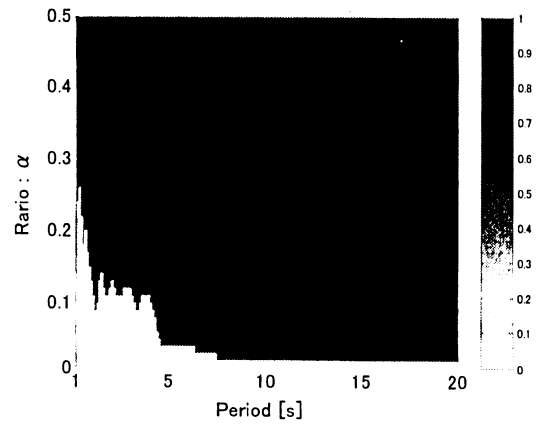


Fig.8 Response reduction map (Taft EW)

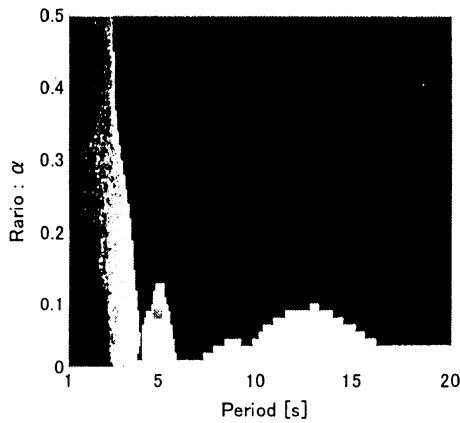


Fig.6 Response reduction map
(1968 Tokachi EW)

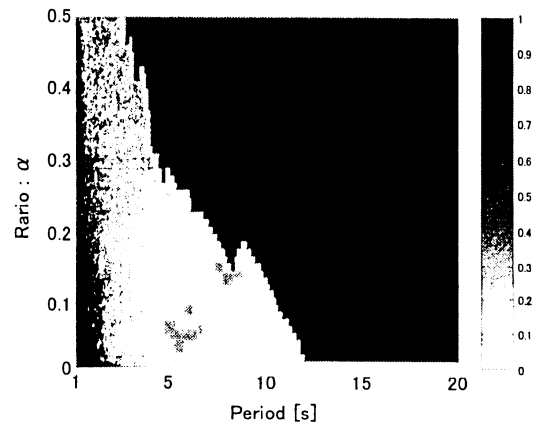


Fig.9 Response reduction map
(The Building Center of Japan BCJ-L2)

Table1 Response reduction table

Earthquake	Period[s] ($0.0 < \alpha \leq 0.1$)	Period[s] ($0.1 < \alpha \leq 0.2$)	Period[s] ($0.2 < \alpha \leq 0.3$)	Period[s] ($0.3 < \alpha \leq 0.4$)	Period[s] ($0.4 < \alpha \leq 0.5$)
El Centro NS	1.2~3.6	1.0~3.4	1.0~2.9	1.0~2.6	1.0~1.3
El Centro EW	1.4~7.5	1.3~6.5	1.2~4.4	1.0~4.0	1.0~3.6
Kobe JR takatori NS	2.4~2.5	2.3~2.5	2.1~2.5	2.0~2.5	1.7~2.5
Kobe JR takatori EW	2.4~4.2	1.9~3.1	1.7~3.0	1.4~2.9	1.0~2.8
1964Niigata NS	3.4~4.5 7.0~7.8 8.8~14.0	3.0~7.9 8.4~11.6	2.5~9.4	1.9~8.0	1.0~7.7
1964Niigata EW	3.7~5.6 6.1~8.4 13.1~20.0	3.0~7.8	1.0~1.2 2.3~7.2	1.0~6.5	1.0~6.5
1968Tokachi NS	1.7~4.9	1.7~3.8	1.1~1.3 1.7~3.5	1.0~1.4 1.6~3.4	1.0~1.3 1.7~3.3
1968Tokachi EW	2.9~4.4 5.4~5.8	1.9~4.1	1.9~3.6	1.5~3.3	1.3~3.2
Building Center of Japan BCJ-L1	1.5~8.5	1.0~5.8	1.0~4.6	1.0~3.5	1.0~2.8
Building Center of Japan BCJ-L2	1.7~10.7	1.1~7.5	1.1~4.7	1.0~4.4	1.0~3.3
Taft N21E	1.3~3.1	1.3~1.5 2.4~2.6	N/A	N/A	N/A
Taft S69E	1.0~1.8 2.4~2.7 3.7~3.9	1.0~1.3	N/A	N/A	N/A
Niigata Cyuetsu JMA Ojiya NS	1.0~3.0	1.0~2.7	1.0~2.5	1.0~2.2	1.0~2.0
Niigata Cyuetsu JMA Ojiya EW	1.3~2.6	1.1~2.4	1.0~2.1	1.0~1.9	1.0~1.8

4. 人工地震波による応答低減マップ

4.1 人工地震波作成方法 実地震波を用いた応答倍率計算で得られた α の値には一般性がないため、ここでは、高圧ガス施設等耐震設計指針の応答

ベクトルに適合させた人工地震波を用いる。人工地震波作成のフローを図10に示す⁽⁷⁾。また、図11に耐震設計指針の応答スペクトルを示す⁽⁸⁾。減衰比は5%である。耐震設計指針の応答スペクトルは2秒以上の長周期において加速度が一定となっているが、実際の地震波の応答スペクトルを考慮し、本研究では速度一定として人工地震波を作成した。長周期における応答スペクトルの扱いは現在検討がなされているが、まだ指針とはなっていない。図12に人工地震波の一例を示す。最大加速度は 6m/s^2 とした。また、図13に目標スペクトルと人工地震波のスペクトルの比較を示す。適合させる周期は0.05~20秒とした。

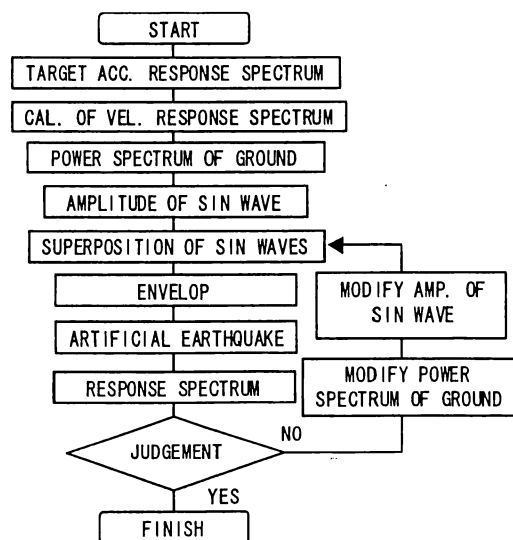


Fig.10 Flow of artificial earthquake generation

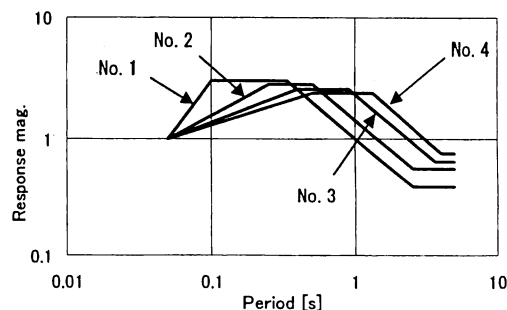


Fig.11 Design response spectrum

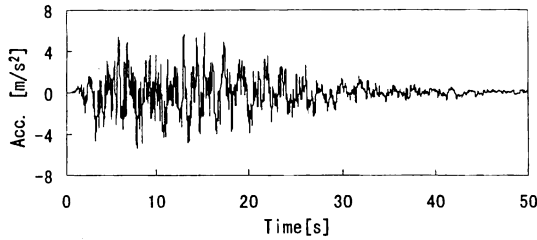


Fig. 12 Artificial earthquake

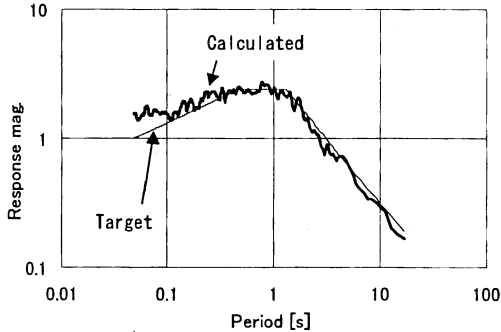


Fig. 13 Comparison of spectrum

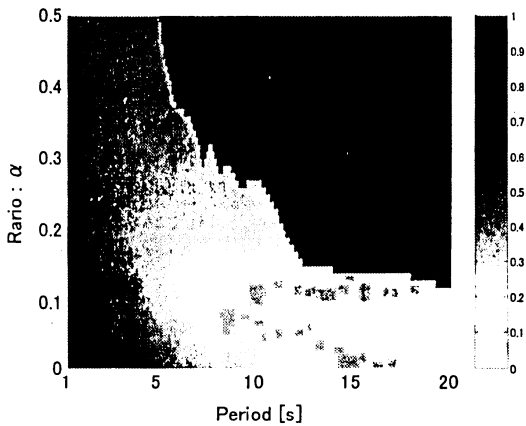
Fig. 14 Response reduction map
(Artificial earthquake)

Table 2 Response reduction table

α	Period[s]
$0 < \alpha \leq 0.1$	3~6
$0.1 < \alpha \leq 0.2$	2~10
$0.2 < \alpha \leq 0.3$	2~6
$0.3 < \alpha \leq 0.4$	1.5~4
$0.4 < \alpha \leq 0.5$	1~3

4・2 応答低減マップ 前節で作成した 10 種類の人工地震波を用いて、応答低減マップを作成する。図 14 にその 1 例を示す。表 2 に応答倍率が 1 未満で線形系の応答より小さくなる α と固有周期の範囲を示す。この表は 10 種類の人工地震波の応答低減マップから得られたものである。図 14 より、人工地震波は 20 秒までの長周期成分を含んでいるため、摩擦による応答低減効果は長周期まで顕著であることがわかる。また、表 2 から、 α の値が大きくなると、長周期での応答低減効果は低くなっている。これは、図 13 からわかるように、長周期では速度一定としているので加速度レベルが小さくなり、 α の値が大きいと、しゅう動が生じないためである。表 2 を用いると系の固有周期が得られれば、応答低減効果が高い α の範囲がわかり、適切な摩擦力を推定することが可能となる。

5. 結 言

本研究では、1 秒以上の長周期において、応答倍率が 1 未満で線形系より応答が低減される範囲を示す長周期摩擦系応答低減マップを提案した。まず、実地震波における応答低減マップを示し、次に、高圧ガス保安協会の耐震設計指針における応答倍率から逆算して求めた人工地震波を用いて応答低減マップを示した。また、応答低減マップを表にした応答低減表を示した。これにより、複雑な非線形応答計算をせずに適切な摩擦力を推定することが可能となり、摩擦を考慮した耐震設計を行なう上での指針を示すことができた。

参 考 文 献

- (1)Watanabe,T., et al, Vibration Test of Plant Piping System Having Friction Support, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.58, No.552(1992),pp.17-23.
- (2)Watanabe,T., et al, Seismic Responses of Plant Piping System Having Friction and Vibro-impact Characteristics, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.62, No.595(1996),pp.63-68.
- (3)Watanabe,T., Suzuki,K., Seismic Responses of Piping System with Friction Sliding on a Plane, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.64, No.617(1998),pp.64-69.
- (4)Watanabe,T., Suzuki,K., Seismic Response Analysis of Piping System with Friction Support (Maximum Response Estimation Using Frictional Response Spectrum), *Trans. of JSME, Series C*, Vol.64, No.619(1998),pp.87-92.
- (5)Watanabe,T., Suzuki,K., Estimation of Equivalent Damping Ratio using Friction Response Spectrum, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.66, No.642(2000),pp.87-92.
- (6)Marui,E. and Kato,S., Forced vibration with solid friction, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.49, No.443(1983),pp.1146-1152.
- (7)JSME, Computer analysis on dynamics,(1990), pp.223-240.
- (8)KHK, Seismic design of high pressure gas facility, (1997).