

## 長周期摩擦系応答スペクトルに関する研究\*

梶田 顕章\*<sup>1</sup>, 渡邊 鉄也\*<sup>2</sup>, 田中 基八郎\*<sup>3</sup>

## Study on Friction Response Spectrum Under Long Period System

Akinori TOMODA\*<sup>4</sup>, Tetsuya WATANABE and Kihachiro TANAKA\*<sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, Saitama University,  
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

This study deals with seismic isolation design in industrial facilities. Design spectrum modified for long period structure is suggested. Response spectrum calculated by linear analysis using actual seismic waves is different from response spectrum of seismic design for the range of long period. In addition, friction isolator is expected to absorb seismic energy. This effect should be utilized positively in seismic design. However, seismic isolation effect depends on the friction characteristic of system. Therefore, adjustment of frictional force becomes very important. This paper shows Friction Response Spectrum for long period by the synthetic seismic wave using design spectrum. The Friction Response Spectrum is able to obtain the optimum frictional force of seismic isolation instead of non-linear analysis and estimate response magnification of long period system with friction. Moreover, equivalent damping ratio is estimated from Friction Response Spectrum for long period system. Equivalent damping ratio can easily calculate response of friction system.

**Key Words**: Long Period, Seismic Isolation, Seismic Design, Friction Response Spectrum, Synthetic Seismic Wave, Equivalent Damping Ratio

## 1. 結 言

近年, 新潟県中越地震や兵庫県南部地震などの大規模地震が頻発しており, 一般建造物のみならず産業施設内建造物の被害も数多く報告されている。各種産業施設では危険物流出や火災等の2次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おり, 産業施設の構造特性や立地条件を考慮したものとなっている。しかし, 大型貯槽や塔類, 配管系などの固有周期が長い構造物では, 耐震設計基準の加速度応答倍率と実地震波時刻歴応答解析から得られる加速度応答倍率が異なる。したがって, 長周期系に対応した耐震設計基準を設定する必要があり, 現在, 検討が進められている。

一方, 産業施設において地震応答を低減する対策として免震構造が注目されている。免震構造には, 積層ゴム, 転がり支承, 摩擦支承, ベアリング機構を用いたものがあり, いずれも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, 摩擦支承においては, 摩擦による非線形特性により地震応答が低減する効果があることが知られている。この効果を利用することで, 構造物の耐震性を向上させることに加え, 安価に設計することが可能となる。しかし, これらの免震構造では, 応答低減効果が摩擦特性に依存するため, 施工時における摩擦力の調整は非常に重要となる。また, 摩擦系では, 摩擦面において停止としゅう動を繰り返すスティックスリップを考慮した応答計算を行う必要があり<sup>(1)</sup>, 摩擦力を変化させて解析を行うのは多大な時間を要する。著者らは過去の研究において, 短周期における摩擦系応答スペクトルおよび等価減衰比の推定を行ってきた<sup>(2)(6)</sup>。また, 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を示した<sup>(7)</sup>。

そこで, 本研究では, 長周期摩擦系応答スペクトルを提案し, 摩擦支承型免震構造において応答倍率の簡易推定が可能であることを示すとともに, 摩擦減衰効果を等価減衰として扱う方法について述べる。

\* 原稿受付 2006年11月16日。

<sup>1</sup> 学生員, 埼玉大学大学院理工学研究科(☎338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。<sup>2</sup> 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科。<sup>3</sup> 正員, フェロー, 埼玉大学大学院理工学研究科。

E-mail: a-tomoda@tera.mech.saitama-u.ac.jp

2. 長周期応答スペクトル

2・1 実地震波応答計算と耐震設計指針 1 自由度減衰系の運動方程式は式(1)で表される。

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \tag{1}$$

ここで、 $m$  は質量、 $c$  は減衰定数、 $k$  はばね定数、 $x$  は質量の変位、 $y$  は基礎の変位である。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。

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \tag{2}$$

ここで、 $c/m = 2\zeta\omega$ 、 $k/m = \omega^2$  とすると、

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z = -\ddot{y} \tag{3}$$

となる。地震波は不規則波であることから、式(3)を数値積分によって解き、応答倍率を求めた。ここで、応答倍率とは、系に生じる最大加速度を入力加速度の最大値で除したものである。

次に、実地震波を用いた応答解析結果と高圧ガス設備等耐震設計指針<sup>(8)</sup>の応答倍率を比較する。図1は、減衰比 0.05 の系に ImperialValley 地震(1940)El Centro における NS 成分と、新潟地震(1964)における EW 成分を入力した結果、および耐震設計指針の基準応答スペクトルである。横軸は系の固有周期、縦軸は加速度応答倍率となっている。基準応答スペクトルは地盤特性を考慮し、4 種のスペクトル (第1~4 種地盤) が設定されている。系の固有周期が長周期において、耐震設計指針の応答倍率が一定となっているため、実地震波応答解析結果と耐震設計指針は大きく異なる。

2・2 実地震波の3重応答スペクトル 式(3)の最大相対変位応答  $S_d$ 、最大相対速度応答  $S_v$ 、最大絶対加速度応答  $S_a$  は近似的に次の関係が成り立つ<sup>(9)</sup>。

$$S_d \doteq \frac{1}{\omega} S_v = \frac{T}{2\pi} S_v \tag{4}$$

$$S_a \doteq \omega S_v = \frac{2\pi}{T} S_v \tag{5}$$

ただし、 $T$  は系の固有周期、 $\omega = 2\pi/T$  である。式(4)、(5)の両辺の対数をとると、図2のように  $S_d$ 、 $S_v$ 、 $S_a$  を一つのグラフで示すことができる。本研究では、実地震波 20 波を用いて 1 自由度減衰系の応答速度を計算し、3 重 (トリパート) 応答スペクトルを求めた。計算結果の一例を図2に示す。いずれも、固有周期が長周期において応答速度が概ね一定値であることがわかる。他の地震波を入力した場合においても、同様の結果が得られた。

2・3 長周期応答スペクトル 前節で示したように、耐震設計指針では長周期において応答加速度が一定となるよう定められている。しかし、図2で示した実地震波の応答スペクトルを考慮すると、長周期では応答速度が一定である。そこで、本研究では、図1に示した耐震設計指針の応答スペクトルを、長周期において応答速度が一定となるようにして、人工地震波の作成および摩擦系応答スペクトルを求めた。図3に、地盤種別ごとの長周期対応型応答スペクトルを示す。

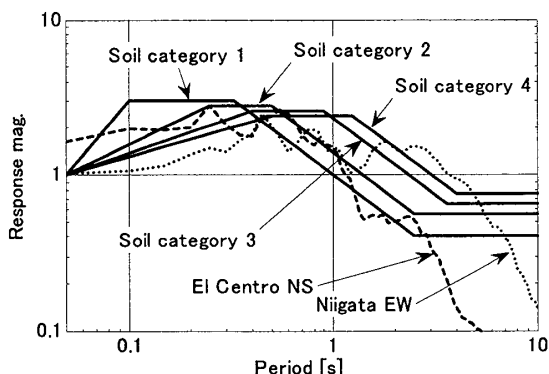


Fig.1 Design spectrum

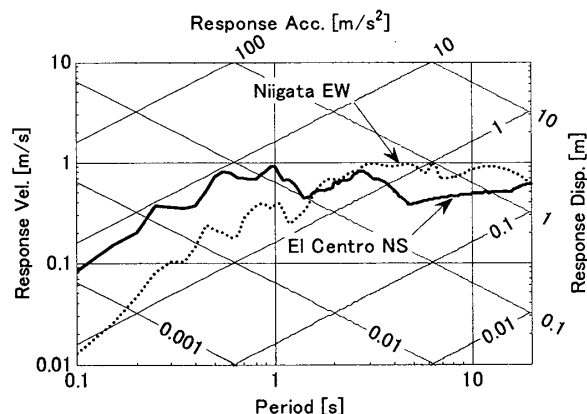


Fig.2 Tripartite response spectrum (El Centro NS, Niigata EW)

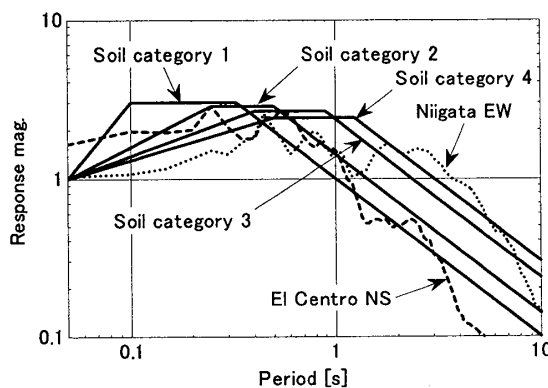


Fig.3 Design spectrum modified for long period

### 3. 人工地震波の作成

本研究では、摩擦支承型免震構造の地震応答特性を把握し、耐震設計時において系の応答を簡易に推定できる長周期摩擦系応答スペクトルを提案することを目的としている。しかし、系への入力波に実地震波を用いた場合、系の最大応答が卓越周期等の地震波特性に影響されてしまい、上記スペクトルの一般性が失われてしまう。そこで、入力波は図3で示した長周期対応型応答スペクトルから逆算した人工地震波を用いることとする。

**3・1 人工地震波作成方法** 人工地震波作成のフローチャート<sup>(9)</sup>を図4に示す。人工地震波の周期は0.05～20.0秒とした。また、最大加速度は6 m/s<sup>2</sup>とした。これらは、現在の耐震設計指針で定められている設計地震動を参考にした。

**3・2 人工地震波** 一例として第4種地盤の人工地震波を図5に示す。また、人工地震波から得られたスペクトルと目標スペクトルとの比較を図6に示す。本研究では、長周期摩擦系応答スペクトルを作成する際にスペクトルの平滑化を行う。まず第1～4種地盤の基準スペクトルを基に人工地震波を多数作成した。次に、それぞれの地盤種別基準スペクトルから作成された人工地震波を基準スペクトルと比較した。第1～4種地盤それぞれの基準スペクトルに対して、良好な結果を示す人工地震波10波を採用した。

### 4. 長周期摩擦系応答スペクトル

産業施設内構造物における耐震設計では、設計対象構造物の地震応答解析の際、簡易に系の最大応答を推定できることが重視される。著者らは、過去の研究において<sup>(2)(6)</sup>、固有周期が短い配管系の最大応答を、摩擦系応答スペクトルから簡易に推定できることを示した。そこで、本研究では固有周期20秒までの1自由度摩擦系に対し時刻歴応答解析を行い、長周期対応の摩擦系応答スペクトルを作成する。

**4・1 αの定義** 1自由度摩擦系の運動方程式は式(6)で表される。

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) + f \text{sign}(\dot{x} - \dot{y}) = 0 \quad (6)$$

ただし、 $f$ は摩擦力、 $\text{sign}(x)$ は符号関数で

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} -1(x < 0) \\ 0(x = 0) \\ 1(x > 0) \end{cases} \quad (7)$$

で定義される。相対変位を $z = x - y$ すると、

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + f \text{sign}(\dot{z}) = -m\ddot{y} \quad (8)$$

となる。式(8)を $m$ で除すと、

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z + \frac{f}{m} \text{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (9)$$

となる。実機の摩擦支承型免震構造では、利用可能な摩擦材が限定されるため、摩擦係数を変化または調整することは困難な場合が多い。しかし、摩擦力は垂直抗力の調整により変化させることが可能であること

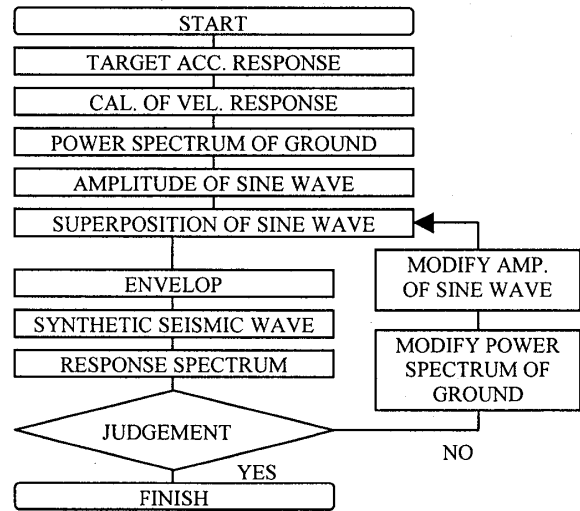


Fig.4 Flow chart of synthetic seismic wave generation

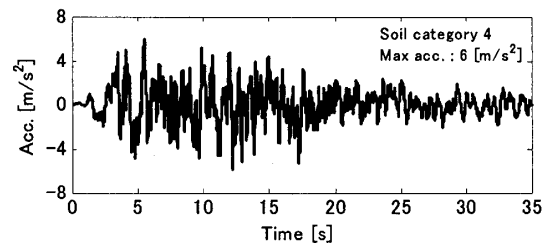


Fig.5 Synthetic seismic wave

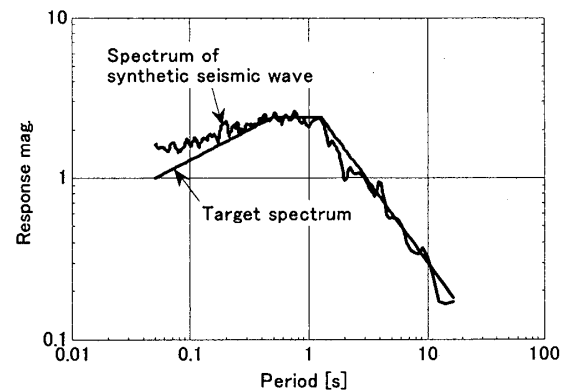


Fig.6 Comparison of spectrum (Soil category 4,  $\zeta=0.05$ )

から、本研究では摩擦力をパラメータとして用いる。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以下のように  $\alpha$  と定義する。

$$\alpha = \frac{f}{Am} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \alpha = 0 & : \text{線形系} \\ 0 < \alpha < 1 & : \text{摩擦系} \\ \alpha \geq 1 & : \text{線形系} \end{cases} \quad (11)$$

$\alpha$  の値によって 3 種類の系に分類できる。  $\alpha = 0$  の場合は、摩擦力が 0 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ある。  $\alpha \geq 1$  では、しゅう動が生じないため線形系となる。式(10)を式(9)に代入すると次式となる。

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2z + A\alpha \text{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (12)$$

系の最大応答は式(12)を数値積分して求める。

**4・2 長周期摩擦系応答スペクトル** 第 1~4 種の各地盤種別に対応した長周期摩擦系応答スペクトルを図 7~10 に示す。図 3 の基準スペクトルを基に生成した人工地震波を、地盤種別ごとに 10 波ずつ用いて応答解析を行い、各解析結果の平均を求めることによって応答スペクトルの平滑化を行っている。図 7~10 は、摩擦支承型免震構造を導入することにより系の応答が低減されることを示している。しかし、摩擦力  $\alpha$  の値と固有周期の組合せによっては、線形系よりも応答倍率が増加することがあり、注意が必要である。図 7 に注目すると、固有周期 1 秒前後においてスペクトルが交差し、長周期では  $\alpha$  を小さい値にすることで応答低減効果が高まる。固有周期 10 秒付近では、第 1~4 種地盤のすべてにおいて  $\alpha$  の値を 0.1 前後とすることで、地震荷重の低減を図ることができる。

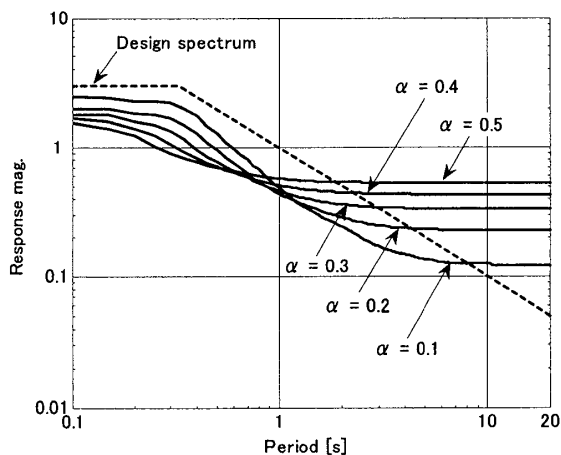


Fig.7 Friction Response Spectrum  
(Soil category 1,  $\zeta=0.05$ )

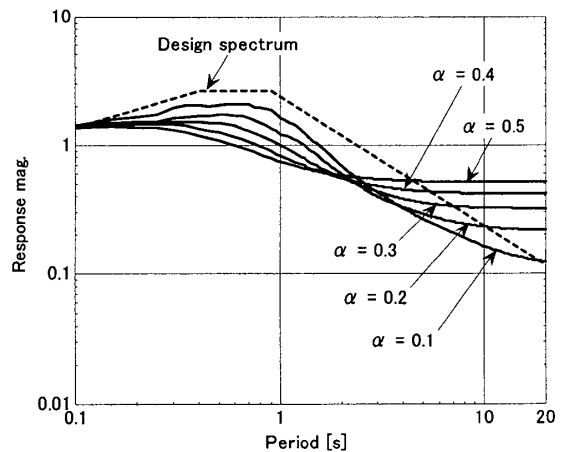


Fig.9 Friction Response Spectrum  
(Soil category 3,  $\zeta=0.05$ )

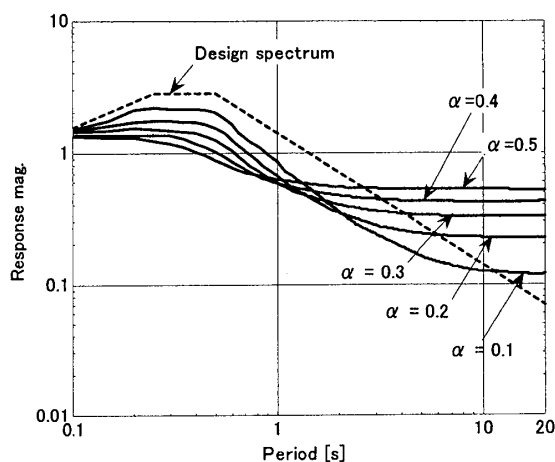


Fig.8 Friction Response Spectrum  
(Soil category 2,  $\zeta=0.05$ )

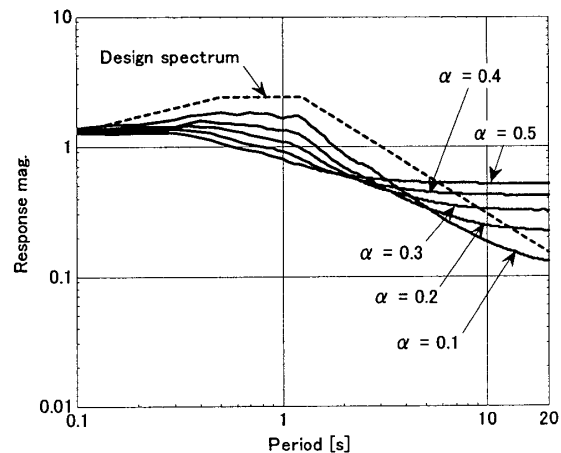


Fig.10 Friction Response Spectrum  
(Soil category 4,  $\zeta=0.05$ )

5. 応答倍率の簡易推定法

5・1 長周期摩擦系基準応答スペクトルの提案

前章の図7~10で示した長周期摩擦系応答スペクトルを用いて、系の応答倍率の簡易推定を行うため、各スペクトルの包絡線を求める。図11は、第4種地盤種別における設計用スペクトルと $\alpha=0.1$ の応答スペクトルである。包絡線は、応答倍率が時刻歴応答解析の結果よりも下回らず、設計用スペクトルに対して平行となるようにした。図12~15は、各地盤種別における包絡線を示している。図12に注目すると、 $\alpha=0.1$ のスペクトルは $0.33 \leq T \leq 6.40$ において加速度応答倍率を $0.82/T$ で求めることができる。つまり、構造物の固有周期、摩擦力および入力加速度レベルがわかれば、系の最大応答を推定できる。さらに、 $\alpha=0.1$ の摩擦系は線形系に比べ最大応答が18%低減されている。

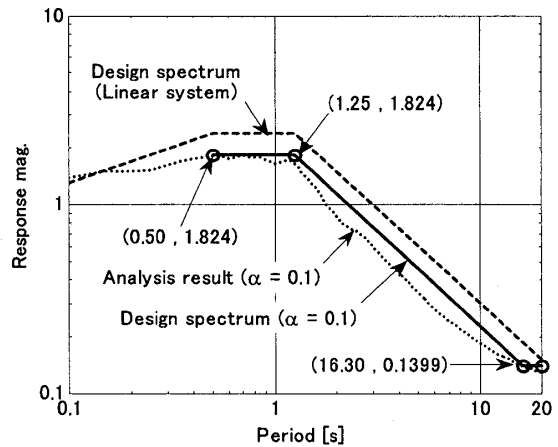


Fig.11 Definition of envelope curve (Soil category 4,  $\zeta=0.05$ )

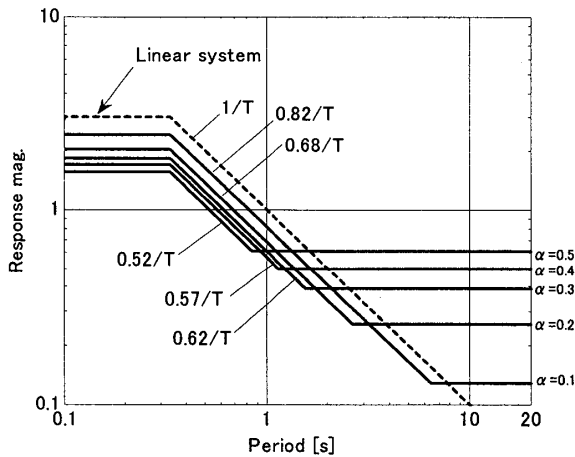


Fig.12 Design spectrum for friction system (Soil category 1,  $\zeta=0.05$ )

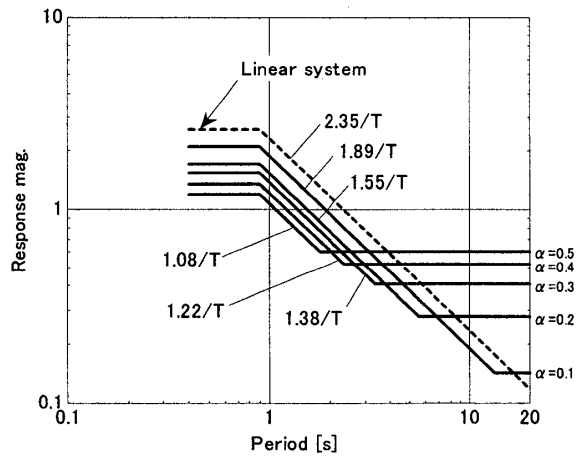


Fig.14 Design spectrum for friction system (Soil category 3,  $\zeta=0.05$ )

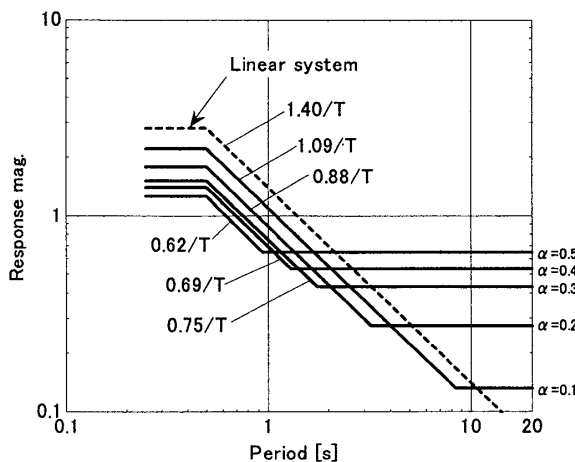


Fig.13 Design spectrum for friction system (Soil category 2,  $\zeta=0.05$ )

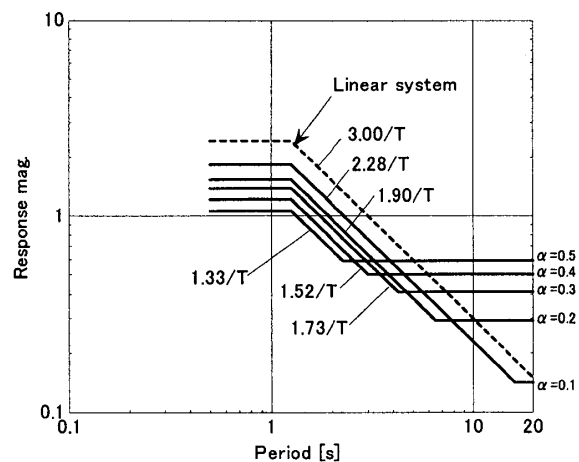


Fig.15 Design spectrum for friction system (Soil category 4,  $\zeta=0.05$ )

Table 1 Equivalent damping ratio :  $\zeta_{eq}$ 

		Ratio : $\alpha$				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Soil category	No.1	0.088	0.137	0.165	0.193	0.232
		$0.10 \leq T \leq 6.40$	$0.10 \leq T \leq 2.65$	$0.10 \leq T \leq 1.55$	$0.10 \leq T \leq 1.15$	$0.10 \leq T \leq 0.85$
	No.2	0.101	0.160	0.218	0.257	0.298
		$0.25 \leq T \leq 8.40$	$0.25 \leq T \leq 3.20$	$0.25 \leq T \leq 1.75$	$0.25 \leq T \leq 1.30$	$0.25 \leq T \leq 0.95$
	No.3	0.092	0.145	0.183	0.233	0.285
		$0.40 \leq T \leq 13.30$	$0.40 \leq T \leq 5.55$	$0.40 \leq T \leq 3.35$	$0.40 \leq T \leq 2.35$	$0.40 \leq T \leq 1.80$
	No.4	0.106	0.158	0.189	0.244	0.298
		$0.50 \leq T \leq 16.25$	$0.50 \leq T \leq 6.50$	$0.50 \leq T \leq 4.25$	$0.50 \leq T \leq 3.00$	$0.50 \leq T \leq 2.25$

## 6. 結 言

5・2 等価減衰比の推定 構造物に摩擦力を付加すると、加速度、速度、変位の各応答が低減する。これを等価減衰比として算出することが可能ならば、線形系減衰におきかえて応答低減効果を評価することができる<sup>(9)</sup>。ここで、高圧ガス耐震設計指針の基準スペクトルは系の減衰比を0.05としている。これ以外の減衰比を持つ系の応答倍率を求める場合は、図16に示すように、減衰比が0.05の応答倍率を1としたときの補正係数が用意されている。本研究では、この補正係数から等価減衰比 $\zeta_{eq}$ を求める。等価減衰比算出の一例として、第4種地盤上に設置された免震構造物を考える。摩擦支承部の摩擦力は $\alpha=0.1$ である。線形系に対する $\alpha=0.1$ の応答の比は図15から、

$$\frac{(2.28/T)}{(3/T)} = 0.76 \quad (13)$$

となる。この値を補正係数とすると、図16から等価減衰比は0.106となる。数値解析において、摩擦系の減衰比を0.05としているので、摩擦による付加減衰は0.056となる。減衰比が0.05である摩擦系において、各地盤種別、摩擦係数 $\alpha$ における等価減衰比と、等価減衰比が適用可能な固有周期の範囲を表1に示す。いずれも摩擦により減衰が増加されていることを示している。

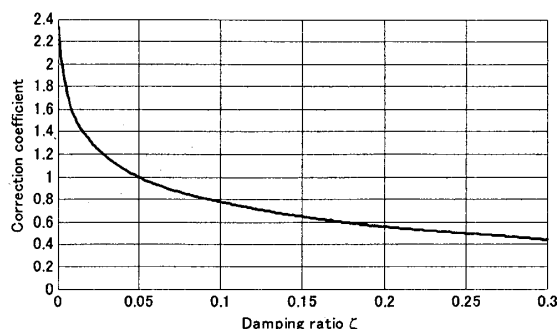


Fig.16 Correction coefficient

本研究では、長周期摩擦系の応答低減効果に注目し、系の非線形性を考慮した1自由度系の時刻歴応答解析を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 高圧ガス設備等耐震設計指針の基準スペクトルは、長周期の範囲で実地震波応答解析の結果と異なることがわかった。

(2) 人工地震波を用いて、長周期摩擦系応答スペクトルを作成した。その結果、免震構造に摩擦支承を付加することで系の応答が低減されることがわかった。また、長周期系では、固有周期に応じて適切な摩擦力を選択する必要があることがわかった。

(3) 応答倍率の簡易推定を行うため、長周期摩擦系基準応答スペクトルを提案した。このスペクトルから、長周期摩擦系の応答倍率を簡易に推定できた。

(4) 長周期摩擦系の応答低減効果を線形系減衰として評価することができた。

## 参 考 文 献

- (1) Marui, E., Kato, S., Forced vibration with solid friction, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.49 No.443(1983), pp1146-1152.
- (2) Watanabe, T., et al, Vibration Test of Plant Piping System Having Friction Support, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.58, No.552(1992), pp17-23.
- (3) 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), pp63-68
- (4) Watanabe, T., Suzuki, K., Seismic Response of Piping System with Friction Sliding on a Plane, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.64 No.617(1998), pp64-69.
- (5) 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), pp87-92.
- (6) Watanabe, T., Suzuki, K., Estimation of Equivalent Damping Ratio using Friction Response Spectrum, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.66 No.642(2000), pp87-92.
- (7) Watanabe, T., Tomoda, A., Tanaka, K., Response Reduction Map under Long Period Friction System, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.72 No.722(2006), pp3221-3226.
- (8) KHK, Seismic design of high pressure gas facility, (1997)
- (9) JSME, Computer analysis on dynamics, (1990), pp222-237