

## エネルギーに基づくがた系の応答低減マップ\*

渡邊鉄也\*<sup>1</sup>, 武田知也\*<sup>2</sup>, 田中基八郎\*<sup>3</sup>

## Response Reduction Map of Gap System Based on Energy

Tetsuya WATANABE\*<sup>4</sup>, Tomoya TAKEDA and Kihachiro TANAKA\*\*Division of Mechanical Engineering and Science, Saitama University,  
255 Shimo-Okubo, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

For the past several years, seismic isolation systems have been focused in the seismic design of industrial facilities. This paper deals with the response reduction effect by gap. Gap is expected to decrease the relative displacement by guide. The relative displacement between structure and support becomes larger at long period in the case of linear system. Therefore, the response reduction effect by gap should be utilized positively in the seismic design. However, the response magnification of acceleration is used in the seismic design. The acceleration becomes larger by collision. Therefore, the response reduction effect by gap is evaluated from the viewpoint of energy. The ratio between kinetic energy and input energy is utilized. In this paper, "Response Reduction Map" based on energy for long period gap system is suggested. This map shows the range that energy response ratio is less than the ratio of linear system. The response reduction map without complex non-linear time history calculation can easily obtain the proper parameters, such as natural period or gap size. 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 from the design spectrum is shown.

**Key Words:** Energy, Long Period System, Response Reduction Map, Gap System, 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構造物の被害も多く報告されている。産業施設内構造物は2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、産業施設内構造物の耐震設計において、免震構造が目立ってきている。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。系が長周期化すると変位応答が増大するため、ダンパ等の減衰装置を設置するか、ガイドにより変位応答を強制的に拘束しなくてはならない。ガイドによる変位拘束では、衝

突時に生じるスパイク状の加速度のため、加速度応答倍率が大きくなり、耐震設計には適用できなくなる。しかし、ガイドにより変位が拘束されているため、応答低減効果は顕著であると考えられる。筆者らは、これまでの研究<sup>(1)-(5)</sup>において、摩擦のエネルギー散逸効果に注目して応答低減効果を明らかにしてきた。そこで、本研究では、エネルギーに注目してがたによる応答低減効果を評価する。がた系の応答計算は、1自由度非線形系であるため多大な時間を要する。そこで、長周期がた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、線形系よりエネルギー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応答低減効果の高いパラメータを推定することが可能である。

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模擬地震波を用いて応答低減マップを示す。

\* 原稿受付 2007年7月5日。

<sup>1</sup> 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科(☎ 338-8570 さいたま市下大久保 255)。<sup>2</sup> 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: watanabe@mech.saitama-u.ac.jp

2. エネルギー方程式

2・1 運動方程式 1自由度がた系の力学モデルを図1に示す。M, C, Kはそれぞれ構造物の質量, 減衰係数, ばね定数を示し, xおよびu<sub>0</sub>は構造物および基礎の変位を示す。構造物とガイドの隙間はdとし, ガイドのばね定数はk<sub>G</sub>とする。ガイドの質量は構造物に比べて小さく, 無視する。

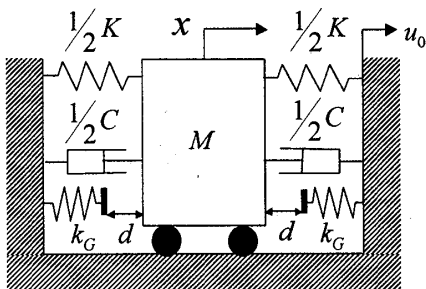


Fig.1 Model of gap system

y = x - u<sub>0</sub>とおくと, 運動方程式は式(1)で表される。

$$\begin{cases} M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = -M\ddot{u}_0 & (-d \leq y \leq d) \\ M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky + k_G(y-d) = -M\ddot{u}_0 & (y > d) \\ M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky + k_G(y+d) = -M\ddot{u}_0 & (y < -d) \end{cases} \quad (1)$$

ここで,  $\frac{C}{M} = 2\zeta\omega_n$ ,  $\frac{K}{M} = \omega_n^2$ ,  $\frac{k_G}{M} = \omega_G^2$ とすると,

$$\begin{cases} \ddot{y} + 2\zeta\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = -\ddot{u}_0 & (-d \leq y \leq d) \\ \ddot{y} + 2\zeta\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y + \omega_G^2 (y-d) = -\ddot{u}_0 & (y > d) \\ \ddot{y} + 2\zeta\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y + \omega_G^2 (y+d) = -\ddot{u}_0 & (y < -d) \end{cases} \quad (2)$$

2・2 エネルギー応答倍率 エネルギーのつりあいの方程式は

の方程式は

$$\begin{cases} \int_0^t \ddot{y}y dt + \int_0^t 2\zeta\omega_n \dot{y}^2 + \int_0^t \omega_n^2 y \dot{y} dt = -\int_0^t \ddot{u}_0 y dt \\ \int_0^t \ddot{y}y dt + \int_0^t 2\zeta\omega_n \dot{y}^2 + \int_0^t \omega_n^2 y \dot{y} dt + \int_0^t \omega_G^2 (y-d) y \dot{y} dt = -\int_0^t \ddot{u}_0 y dt \\ \int_0^t \ddot{y}y dt + \int_0^t 2\zeta\omega_n \dot{y}^2 + \int_0^t \omega_n^2 y \dot{y} dt + \int_0^t \omega_G^2 (y+d) y \dot{y} dt = -\int_0^t \ddot{u}_0 y dt \end{cases} \quad (3)$$

であり, 左辺第1項は運動エネルギー, 第2項は減衰により散逸されるエネルギー, 第3項, 第4項は弾性歪エネルギーであり, 右辺は入力エネルギーである。左辺第1項と第3項, 第4項は弾性振動エネルギーである<sup>(6)</sup>。ここで, 最大弾性振動エネルギーを最大入力エネルギーで除した値を「エネルギー応答倍率 R<sub>E</sub>」とする。

$$\begin{cases} R_E = \frac{\left( \int_0^t \ddot{y}y dt + \int_0^t \omega_n^2 y \dot{y} dt + \int_0^t \omega_G^2 (y-d \text{ sign}(y)) y \dot{y} dt \right)_{\max}}{\left( -\int_0^t \ddot{u}_0 y dt \right)_{\max}} & |y| > d \\ R_E = \frac{\left( \int_0^t \ddot{y}y dt + \int_0^t \omega_n^2 y \dot{y} dt \right)_{\max}}{\left( -\int_0^t \ddot{u}_0 y dt \right)_{\max}} & |y| < d \end{cases} \quad (4)$$

また, 振動後(時間をTとする)に系に入力された全エネルギーを入力レベルの2乗で除した値を「入力エネルギー率 E<sub>I</sub>」とする。これにより, 入力レベルによる入力エネルギー率は一定値となる。

$$E_I = \frac{\int_0^T \ddot{u}_0 y dt}{A^2} \quad (5)$$

構造物の角固有振動数はω<sub>n</sub>, 構造物とガイドからなる系の角固有振動数はω<sub>G</sub>であり, その比はω<sub>G</sub>/ω<sub>n</sub> = √k<sub>G</sub>/Kとなるので, これを剛性比Rとする。

3. 時刻歴応答

3・1 変位および加速度応答

図2にガイドが無い場合(以降, 線形系と称する)の時刻歴応答波形の一例を示す。系の固有周期は1秒とし, 減衰比は0.05とした。入力波は1964年の新潟地震波を用いた。図2(a)は相対変位応答で(b)は絶対加速度応答である。また, 図3に系の固有周期が1秒, 減衰比が0.05で剛性比R=10, 隙間d=10mmの場合の時刻歴応答波形を示す。線形系の相対変位と比較すると, ガイドの効果で応答が低減されていることがわかる。しかし, 絶対加速度では衝突時に生じるスパイク状の加速度のため, 応答は大きくなっていることがわかる。そこで, 入力レベルによる応答倍率を調べた。図4にその結果を示す。横軸は入力加速度の大きさで, 縦軸は絶対加速度応答倍率である。線形系の場合は, 応答倍率が一定値となる。がた系では応答倍率は一定とはならず, 線形系より大きくなる。したがって, 変位では応答が低減しているが, 加速度では応答が増加している。現在の耐震設計では加速度応答倍率が用いられるため, がた系では応答低減効果は無いことになる。しかし, これは衝突時の瞬間的な加速度であるため, がた系では加速度を用いた応答低減効果の評価は適切ではないことがわかる。

3・2 エネルギー応答

図5にエネルギーの時刻歴変化を示す。横軸は時間で縦軸はエネルギーである。(a)は線形系, (b)はがた系であり, パラメータは前節と同様にした。これらの図から, 入力エネルギーは減衰により散逸されるエネルギーと弾性振動エネルギーの和になっていることがわかる。また, 最大入力エネルギー, 減衰により散逸される最大エネルギー, 最大弾性振動エネルギー全てにおいてがた系は線形系より低減していることがわかる。以上のことから, 加速度応答倍率では評価できない応答低減効果をエネルギーで評価できると考えられる。そこで, 次章ではエネルギーで評価したときに応答低減効果の高いパラメータの範囲を, 応答低減マップを用いて示す。

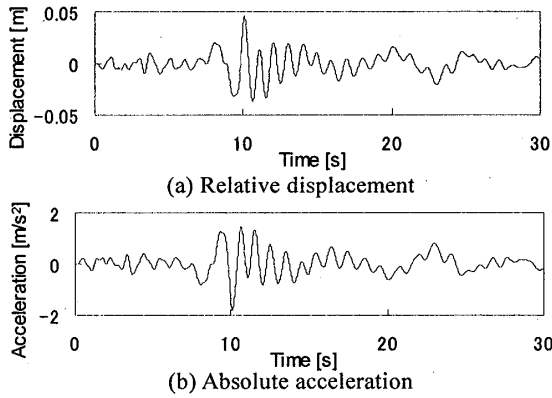


Fig.2 Time history responses without gap

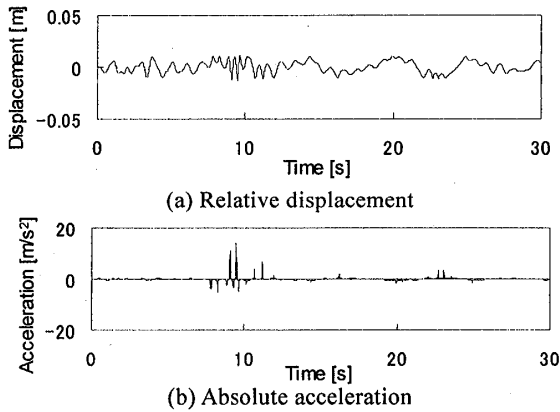


Fig.3 Time history responses with gap

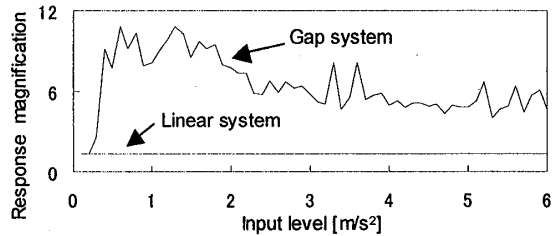
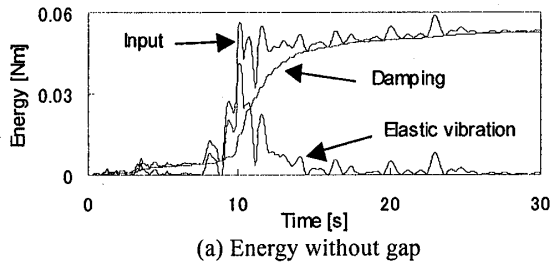
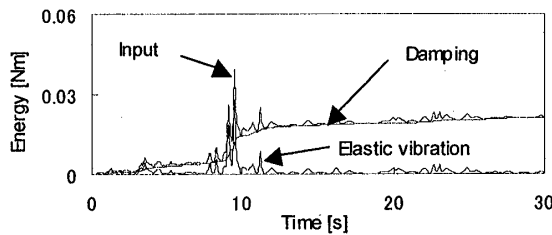


Fig.4 Response magnification of acceleration



(a) Energy without gap



(b) Energy with gap

Fig.5 Time history energy

#### 4. 実地震波における応答低減マップ

応答低減マップとは、横軸を固有周期、縦軸を隙間  $d$  にしてプロットしたものである。本研究では、長周期がた系を対象としているため、固有周期は1秒以上とした。線形系よりエネルギーが低減している場合を白、低減していない場合を黒とした。

図6にエネルギー応答倍率  $R_E$  を用いた場合の応答低減マップの一例を示す。これは、「エネルギー応答低減効果」を示している。入力波は新潟地震波で、減衰比は0.05、 $R=10$ の場合である。この図からエネルギー応答倍率が低減している範囲がわかる。

エネルギー応答倍率  $R_E$  は最大入力エネルギーで無次元化しているため、線形系に入力されるエネルギーと、がた系に入力されるエネルギーが異なる。そこで、図7に入力エネルギー率  $E_I$  を用いた場合のマップを示す。これは、「入力エネルギー低減効果」を示している。すなわち入力エネルギーが線形系より少ない範囲を示している。この図から、新潟地震波では入力エネルギーが少ない範囲が広いことがわかる。

図6はエネルギー応答倍率の低減範囲、図7は入力エネルギーの低減範囲を示している。そこで、図6と図7の両者を満たす場合に、応答低減効果が高いことになる。図8に応答低減マップを示す。図の灰色部分は図6か図7のいずれかが白の場合を示している。これらの図から、がた系において応答低減効果の高いパラメータの範囲が推定できる。

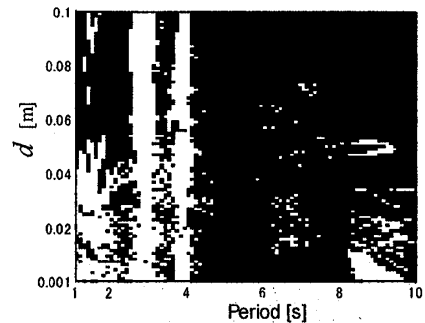


Fig.6 Energy reduction map

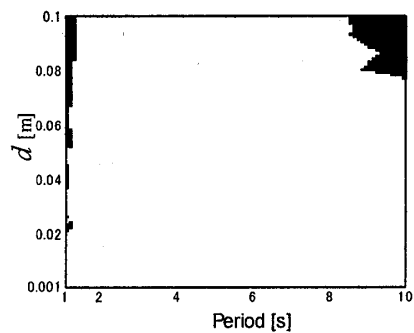
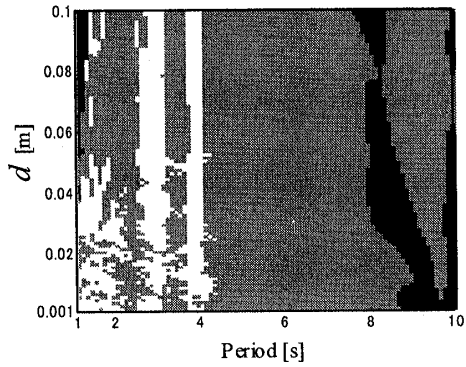
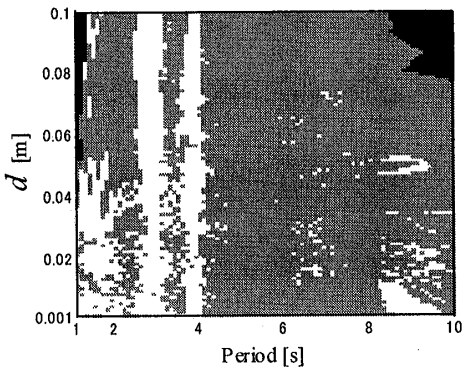


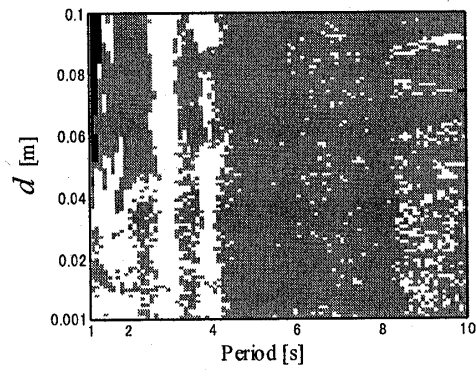
Fig.7 Input energy reduction map



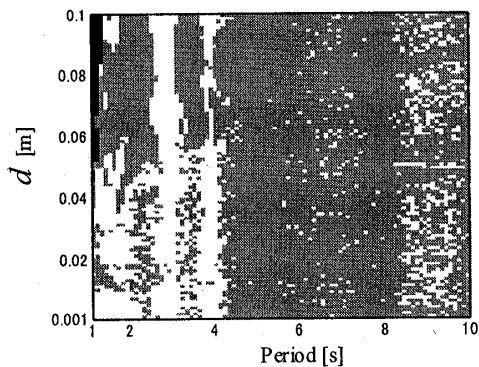
(a) R=5



(b) R=10



(c) R=20



(d) R=100

Fig.8 Response reduction map

### 5. 模擬地震波による応答低減マップ

#### 5・1 模擬地震波作成方法

実地震波を用いた応答低減マップ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スペクトルに適合させた模擬地震波を用いる。模擬地震波作成のフローチャートを図9に示す<sup>(7)</sup>。また、図10に耐震設計指針の応答スペクトルを示す<sup>(8)</sup>。図中のNo.1~No.4は第1種地盤~第4種地盤である。減衰比は0.05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模擬地震波を作成した。長周期における応答スペクトルの扱いは現在検討されているが、まだ指針とはなっていない。図11に模擬地震波の一例を示す。最大加速度は $6\text{m/s}^2$ とした。また、図12に目標スペクトルと模擬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。

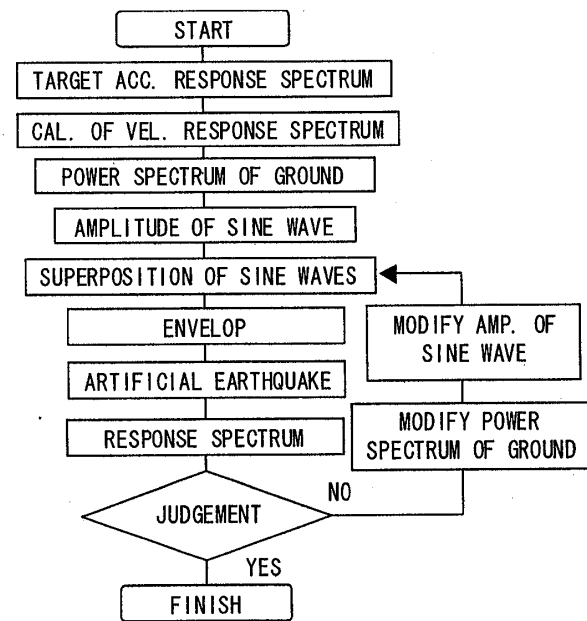


Fig.9 Flow chart of artificial earthquake generation

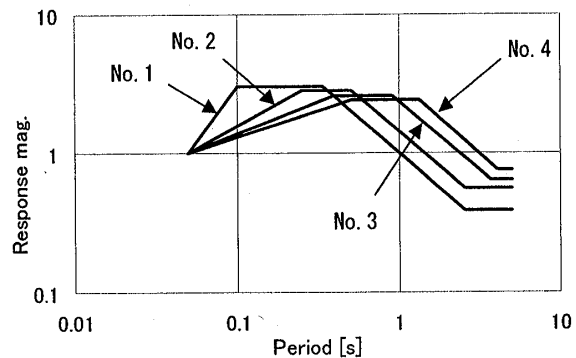


Fig.10 Design response spectrum

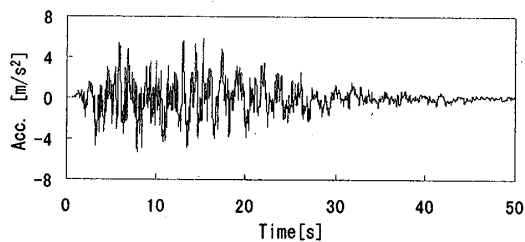


Fig. 11 Artificial earthquake

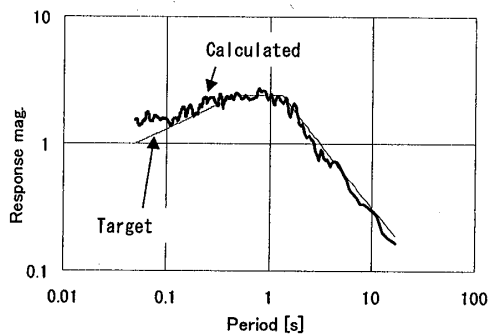


Fig. 12 Comparison of spectrum

**5・2 応答低減マップ** 前節で作成した模擬地震波を用いて応答低減マップを作成する。図 13, 図 14 にその 1 例を示す。図 13 は第 1 種地盤における模擬地震波を入力した場合の応答低減マップで、図 14 は第 4 種地盤における模擬地震波を入力した場合の応答低減マップである。横軸は系の固有周期、縦軸は隙間  $d$  である。(a),(b),(c),(d)は、それぞれ、剛性比  $R$  が 5,10,20,100 の場合である。図の白い部分では、「エネルギー応答倍率」および「入力エネルギー率」が線形系より低減しており、灰色の部分では、いずれかが線形系より低減している。黒い部分では、両者とも線形系より大きくなっている。

図 13 は入力波の卓越周期が 1 秒以下であり、「入力エネルギー低減効果」は低い、「エネルギー応答低減効果」は高い傾向にあった。これに対し、図 14 は入力波の卓越周期が 1 秒以上であり、「入力エネルギー低減効果」は高く、「エネルギー応答低減効果」は低い傾向にあった。全体的には図 14 の方が応答低減効果の高い範囲が広い傾向にあることがわかる。これは、卓越周期が長い地震波の方が長周期系を励起させるため、線形系の入力エネルギーが、がた系の入力エネルギーより多くなり、入力エネルギー低減効果が高くなるためである。しかし、衝突頻度が高くなるため、エネルギーの最大値で評価しているエネルギー応答低減効果は低くなる。図 14 の 1 秒と 3 秒付近では、線形系のエネルギー応答倍率が高いため、 $R$  によらず白くなっている。これは、入力波の特性であり、3 秒と 4 秒の時刻歴波形を比較すると、最大値が生じる時間が異なっていた。したがって、入力波によって励起される周波数と時間が異なるため、多

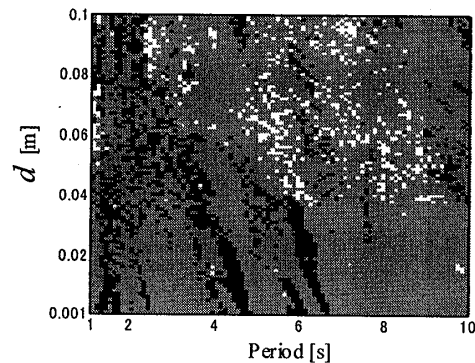
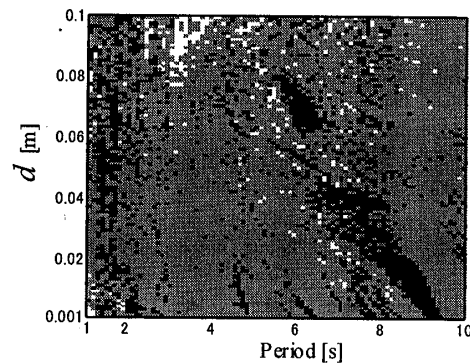
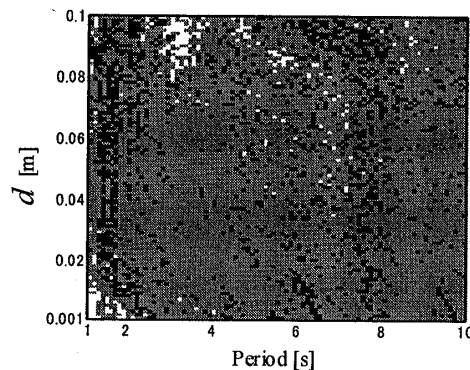
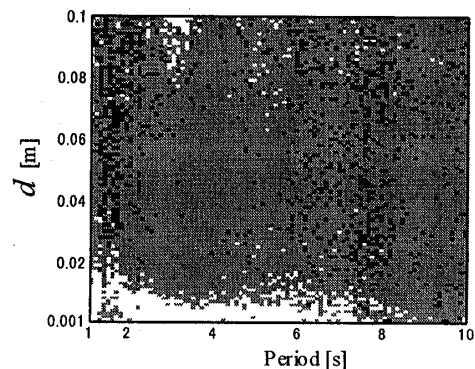
(a)  $R=5$ (b)  $R=10$ (c)  $R=20$ (d)  $R=100$ 

Fig. 13 Response reduction map (No. 1)

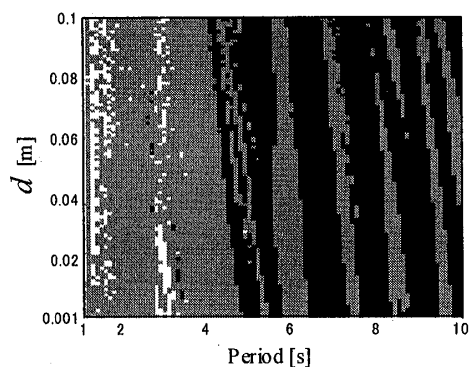
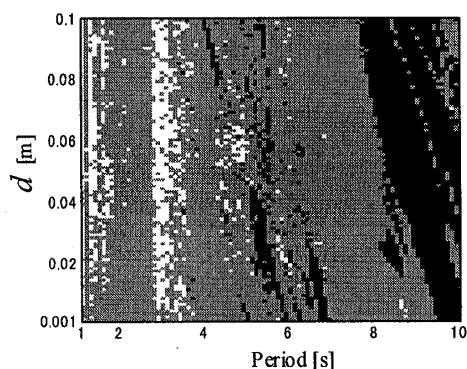
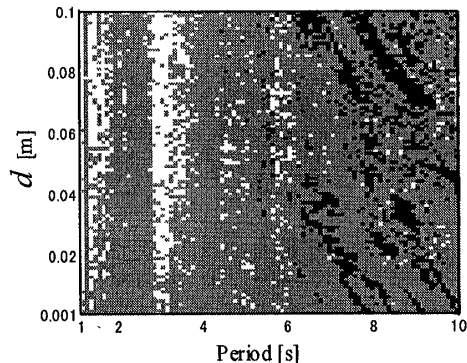
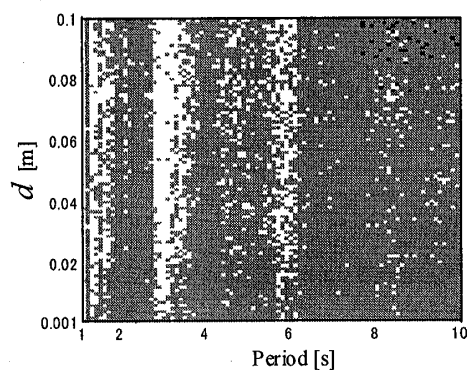
(a)  $R=5$ (b)  $R=10$ (c)  $R=20$ (d)  $R=100$ 

Fig.14 Response reduction map (No. 4)

数の模擬地震波を作成して統計的に評価する必要がある。しかし、ここでは、がた系の応答低減効果をエネルギー的観点から評価できることを示したいため、統計的評価は今後の課題とする。

以上のことから、がた系では応答低減効果の高い白い部分の範囲は狭いが、灰色の部分は広く、入力エネルギー低減効果あるいはエネルギー応答低減効果のいずれかに注目すれば、線形系より低減している範囲は広いことがわかる。また、第1種地盤の模擬地震波のように、卓越周期が短い地震波では、「エネルギー応答低減効果」が高く、第4種地盤の模擬地震波のように卓越周期が長い地震波では、「入力エネルギー低減効果」が高いことがわかった。したがって、免震構造物に長周期地震動が作用した場合、ガイドを設置することにより入力エネルギーを低減できる。

## 6. 結 言

本研究では、最大弾性振動エネルギーを最大入力エネルギーで除した「エネルギー応答倍率」を用いて、「エネルギー応答低減効果」を評価した。また、系に入力された全エネルギーを入力レベルの2乗で除した「入力エネルギー率」を用いて「入力エネルギー低減効果」を評価した。さらに、エネルギー応答倍率と入力エネルギー率が線形系より低減する範囲を示す、「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模擬地震波を用いて、応答低減マップを示した。これにより、複雑な非線形応答計算をせずに応答低減効果が高いパラメータを推定することが可能となり、がた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)Akiyama,H., Earthquake-resistant Design Method for Buildings Based on Energy Balance, Gihodo-Shuppan, (1999).
- (7)JSME, Computer analysis on dynamics,(1990), pp.223-240.
- (8)KHK, Seismic design of high pressure gas facility, (1997).