

# ジャイロダンパーの最適設計法

1120325 兵頭 慶祐

高知工科大学 工学部 社会システム工学科

ジャイロモーメントを利用した制振装置GD(gyroscopic damper)を用いた建物の地盤振動応答の制振を検討した。副系振幅が大きくなった場合のジャイロモーメントの非線形性を考慮した定式化で、4階建ての建築物を想定した建物模型の地盤振動応答を解析した。また、解析の妥当性を検証するために、模型実験を行った。GDの設計パラメータを変動させて、諸元の建物模型を対象にGDの最適な設計方法を導いた。

**Key word:** ジャイロモーメント, 水平変位, 最適設計法, 双峰特性

## 1. はじめに

村井は線形化された運動方程式に基づいた解析的な検討で、GDを用いた建物の地盤振動応答の制振の可能性を明らかにした。また、大西は解析的な検討の妥当性を検証するために、模型実験を行った。しかし、実験で解析ほどの制振効果が得られなかった。一般に、副系振幅が大きくなった場合のジャイロモーメントは線形化された簡単な式で表されない。村井の解析ではジャイロモーメントの非線形性が考慮されておらず、副系振幅が $90^\circ$ を遥かに超えているような状態でもダンパーは有効に作用しているという評価となっている。

これは現実的ではないため、本解析ではジャイロモーメントの非線形性を考慮することとした。よって、本研究では解析の妥当性を検証するために、既往の模型の状態を厳密に調べた上で、建物模型の地盤振動応答を測定する。また、GDの設計パラメータを変動させるとどのような応答になるのかを解析的に検証し、諸元の建物模型を対象にGDの最適設計法を確立する。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験装置

#### (1) 建築物の模型

4階建ての建築物を想定した模型を製作した。各階の高さ350mm、全体高さ1,400mmとした。平面は4隅に柱を配置した正方形で、柱の中心間隔は400mmである。柱には $10 \times 10 \times 1$ のアルミ角パイプを用いた。振動方向(写真1のx軸方向)に対して直角方向(写真1のy軸方向)の柱間だけに $10 \times 10 \times 1$ のアルミアングル製の梁を設けていたが、結果的に減衰が過大であったため、振動方向にも梁を設けた。また、柱と梁および床を剛結した。各階の天井は厚さ3mmの亚克力板で製作し、その上に各階に1kg、全体で合計4kgの質量を載せた。また、各階の質量は2.36kgである。

#### (2) GD模型

写真1に示した構造のGDを建物模型の2階部分に取り付けた。鉛直軸(z)周りに高速で回転するローターをジンバル枠で支持し、このジンバル枠をy軸に直角な水平軸(x)周りに回転できるように支持する。ジンバルの回転軸(x)周りには、

ジンバルの位置を保持し、エネルギー吸収用のダンパーの役割を果たす復元ばねを設けた。2011年度では、この復元ばねが手作りであったため、非線形性が著しく、ダンパーが有効に作用しなかった。本研究では、復元ばねを市販で販売されているねじりばねで検討した。また、ジンバル枠をy軸に回転できるようにフレームで支持する。フレームと床の間はピン結合、フレームと天井の間は板バネで支持し、建物の層間変形によってフレームがy軸周りに回転する構造となっている。

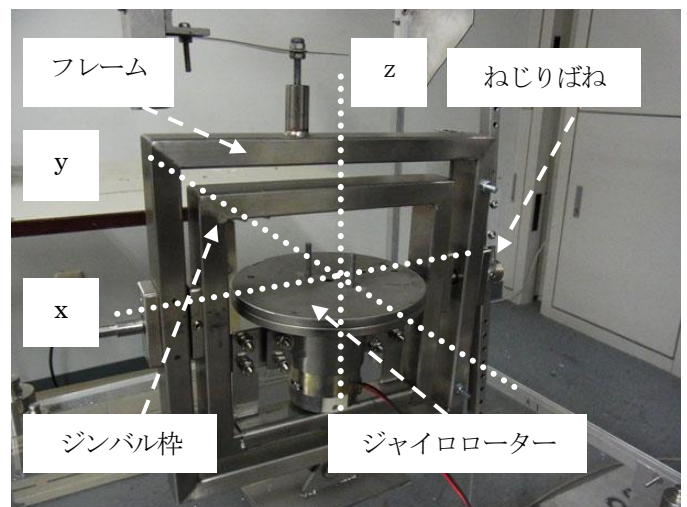


写真1 使用したジャイロダンパー

### 2.2 実験方法

GDを取り付けた模型の1階床部分を振動台に固定し、正弦波で加振して建物の地盤振動応答を測定した。加振振動数は1.0~2.0Hzの範囲とし、変位振幅は約1mmである。応答については、Load Cellによる模型屋上部に取り付けた引張バネの反力から測定した。ローター回転数はモーターにかける電圧で調整した。本実験では電圧は5V、10Vで検討した。文献2)によれば、モーター電圧とローター回転数の関係はほぼ比例関係であることが明らかにされているため、この関係を利用してローター回転数を算出した。電圧が5Vおよび10Vのときのローター回転数はそれぞれ、870rpm、1740rpm程度となった。

### 3. 解析モデルと運動方程式

#### 3.1 解析モデル

本研究で用いる解析モデルは、GD 質量を考慮した4階建ての建築物を想定した建物模型である。一般的な解析では GD の質量効果を見捨てることが多いが、今回の GD 模型 (2.88kg) は各階の質量 (2.36 kg) に対して過大であったため、制振装置として成立する範囲を超えている。したがって、GD 質量を考慮した解析モデルを検討した。図1に本研究で用いる解析モデルを示す。

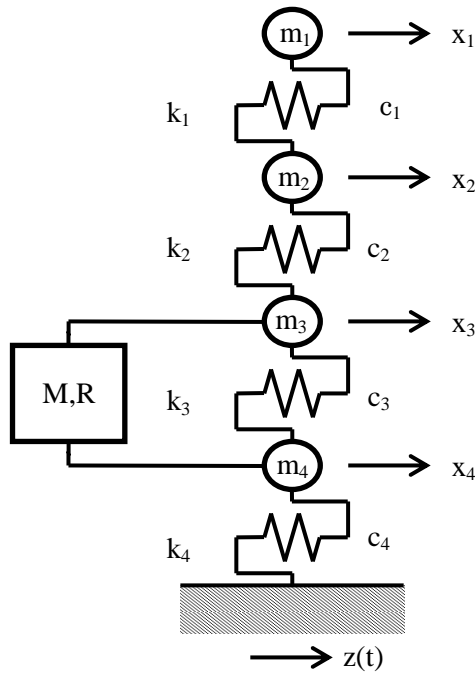


図1 解析モデル

#### 3.2 運動方程式

4階から順に各層の質量を  $m_1, m_2, m_3, m_4$ 、各質量の水平変位を  $x_1, x_2, x_3, x_4$ 、とする。また、質量  $m_i$  と  $m_{i+1}$  を結ぶ剪断バネ  $k_i$  とし、図は省略するが剪断バネには並列にダッシュポットを設け、その粘性抵抗係数を  $c_i$  とする。また、地盤の水平変位を  $z(t)$  とする。図1のモデルの運動方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) &= 0 \\
 m_2 \ddot{x}_2 + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_1(x_2 - x_1) + k_2(x_2 - x_3) &= 0 \\
 m_3 \ddot{x}_3 + c_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + k_2(x_3 - x_2) + k_3(x_3 - x_4) \\
 &= -\frac{M}{4}(\ddot{x}_3 + \ddot{x}_4) - \frac{MR^2}{h^2}(\ddot{x}_3 - \ddot{x}_4) - \frac{\dot{\theta}}{2h}J\Omega \cos \theta \\
 m_4 \ddot{x}_4 + c_3(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + c_4(\dot{x}_4 - \dot{z}) + k_3(x_4 - x_3) + k_4(x_4 - z) \\
 &= -\frac{M}{4}(\ddot{x}_3 + \ddot{x}_4) + \frac{MR^2}{h^2}(\ddot{x}_3 - \ddot{x}_4) + \frac{\dot{\theta}}{2h}J\Omega \cos \theta
 \end{aligned}$$

ここに、 $M, R, h, \theta, J, \Omega$  はそれぞれ、副系質量、副系の  $y$  軸周りの2次半径、ジンバルのピン間隔、 $x$  軸周りの回転変

位、ローター回転軸周りの極慣性モーメントおよびローターの回転速度である。以上が主系に関する運動方程式である。次に副系に関する運動方程式を考える。以下の通りとなる。

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = \frac{\dot{x}_3 - \dot{x}_4}{h}J\Omega \cos \theta$$

ここに、 $I, C, K$  はそれぞれ、副系の  $x$  軸周りの慣性モーメント (ローター、ジンバル枠など  $x$  軸周りに回転する全ての質量に関する慣性モーメント)、ねじれの粘性抵抗係数、ねじりバネ定数である。また、 $\cos \theta$  はジャイロモーメントの非線形性を表している。この運動方程式を解くと、基盤水平振動  $z$  に対する振動応答が得られる。

### 4. 実験結果と解析結果との比較

模型の応答特性を調べる必要があるため、本実験に先立って建物模型およびGD 模型の固有振動数を測定した。数回の測定の結果、建物模型の固有振動数は約 1.8056Hz 程度で、GD 模型の固有振動数は約 2.345Hz 程度であった。以上の条件で実験を行った。実験結果と解析との整合性を調べるため、模型諸元を用いた4階の建物の解析を行った。諸元については、正確に測定することが難しいため、定量的にはかなり誤差を含む結果であるが、製作した模型の応答が解析結果と基本的に整合するかどうかを判断することは可能と考えられる。諸元は表1および表2に示す。また、実験結果と解析結果を比較したものは図2に示す。

表1 建物諸元

質量(kg/階)	2.36
減衰(Ns/m)	7.1
柱剛性(N/m)	2874.3

表2 GD 諸元

質量(kg)	2.88
ローターの半径 (m)	0.06
ピン間隔 (m)	0.25
バネ定数(固有振動数) (Nm/rad)	0.1558 (2.345Hz)
$x$ 軸周りの極慣性モーメント (kg m <sup>2</sup> )	$7.175 \times 10^{-4}$
減衰係数(Nms/rad)	$2.876 \times 10^{-3}$
ローターの厚さ (m)	0.01

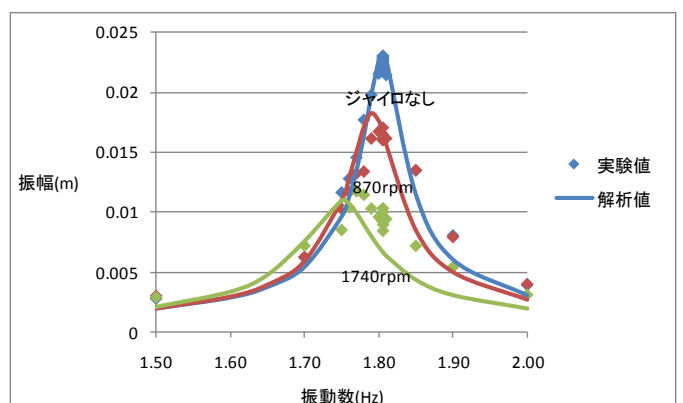


図2 実験結果と解析結果

実験結果と解析結果を整合性の観点から比較して、ジャイロモーメントが作用していない場合は共振点より高振動数側の応答が若干ずれているが、それ以外はほぼ一致しているように見える。一方、ジャイロモーメントが作用している場合は全体的に誤差が生じているが、GD 諸元の誤差を考慮すれば、妥当の範囲である。また、どちらもローター回転数の増加に伴い、応答が単調に減少している。よって、この解析は妥当であると言える。

## 5. GD の最適な設計方法

### 5.1 制振効果に及ぼすパラメータの影響

文献1)によれば、設計パラメータは副系の固有振動数(バネ定数)、減衰係数およびローター回転数と明らかにされている。GD の最適設計法を確立するに先立って、設計パラメータが制振効果に及ぼす影響を把握する必要がある。設計パラメータを変動させて、応答解析を行う。設計パラメータは前項で示した諸元をもとに検討する。副系の固有振動数を主系の固有振動数(1.8056Hz)に対して、近い値をとると、応答は減少することは明らかであるため、バネ定数(固有振動数)を 0.1Nm/rad(1.879Hz)程度とし、主系の固有振動数に近い値をとった。副系減衰は、制振効果に大きく影響するため、値を変動させながら副系減衰の影響を把握する。表2の減衰係数とその値を1/10 および10倍した値と比較検討する。ローター回転数は870rpm および1740rpm で検討し、結果をローター回転数別で表す。図3、4に870rpm, 1740rpm の建物応答を示す。また、図5、6に870rpm, 1740rpm のGD 振幅を示す。

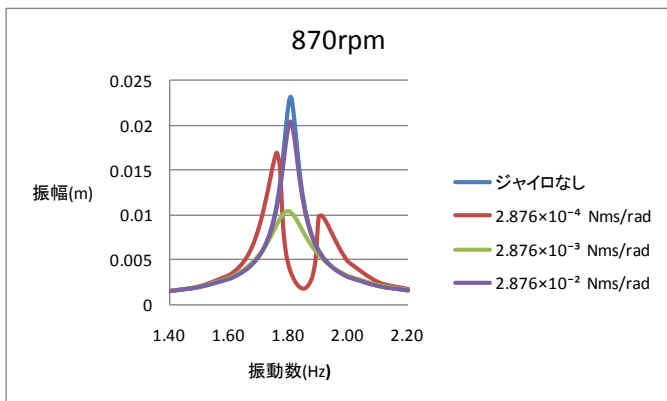


図3 建物応答(870rpm)

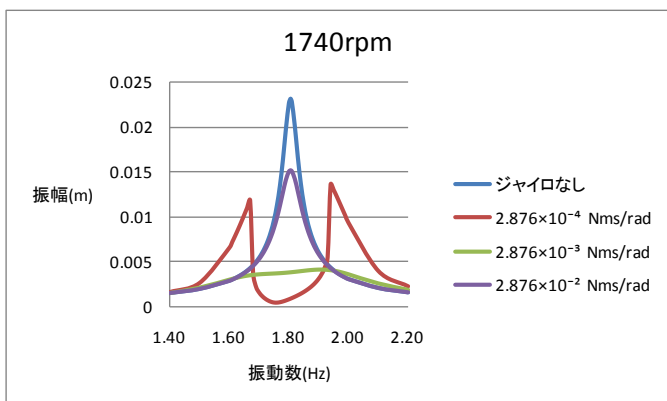


図4 建物応答(1740rpm)

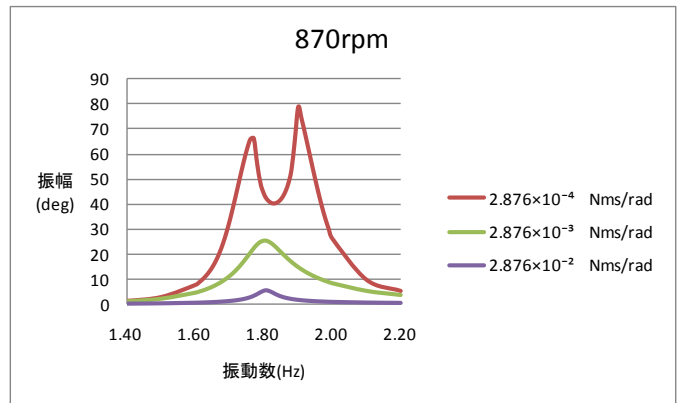


図5 副系振幅(870rpm)

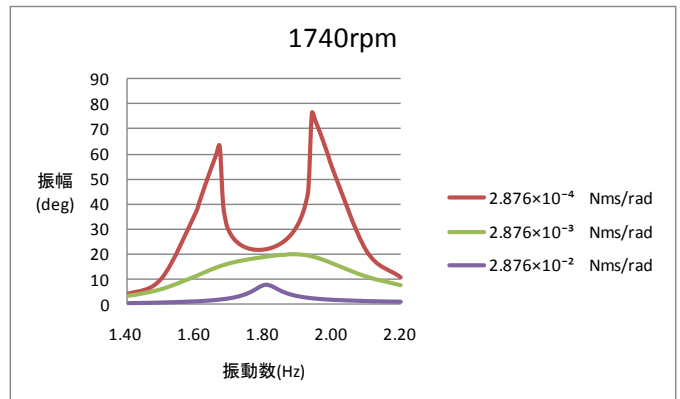


図6 GD 振幅(1740rpm)

図から明らかなように、ローター回転数870rpmより1740rpmの方が顕著な応答になっている。そのためローター回転数1740rpmに着目すると、減衰係数が $2.876 \times 10^{-4}$  Nms/radの場合ではGD 振幅が約 $70^\circ$ 程度に達しており、極端な双峰特性で不連続に似た応答になっている。 $2.876 \times 10^{-3}$  Nms/radの場合には僅かな双峰特性が表れ、ピーク値は大幅に抑えられている。GD 振幅は約 $20^\circ$ 程度である。また、 $2.876 \times 10^{-2}$  Nms/radの場合には、単峰特性の応答で、ピーク値はさほど減少しておらず、GD 振幅は $10^\circ$ 以下である。以上の結果から減衰係数には最適値が存在することが分かる。GD 減衰が大きくなる場合はGD 振幅が減少し、ジャイロモーメントが小さくなるため、制振効果は低くなる。一方、GD 減衰を小さくすると、GD 振幅増加に伴い、ジャイロモーメントの非線形性の影響が表れるため、応答は非線形な挙動となる。双峰特性については、TMD(Tuned Mass Damper)から類推すれば、あり得る現象である。

### 5.2 ジャイロモーメントの非線形性の影響

GD 振幅が大きくなるとジャイロモーメントの非線形性が顕在化するので減衰係数を小さくしていきながら、GD 振幅がどの程度に達すると応答は非線形な挙動をとるのかを検討した。図7, 8には減衰係数 $6.00 \times 10^{-4}$  Nms/radで検討した例を示す。

GD 振幅は約 $50^\circ$ 程度に達しており、建物応答は若干の非線形性の影響が表れている。したがって、GD 振幅 $50^\circ$ 程度に達した時、ジャイロモーメントの非線形性の影響が顕著に表れるのではないかと考えられる。また、若干制振効果が得られる程度で許容できる範囲はGD 振幅 $45^\circ$ 程度までと考えられる。

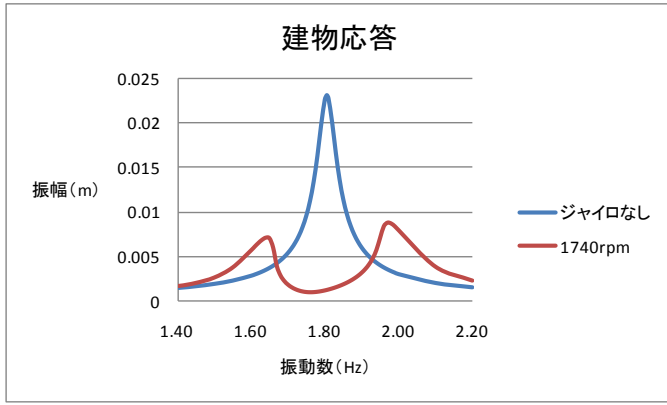


図7 減衰係数  $6.00 \times 10^{-4}$  Nms/rad で検討した建物応答の例

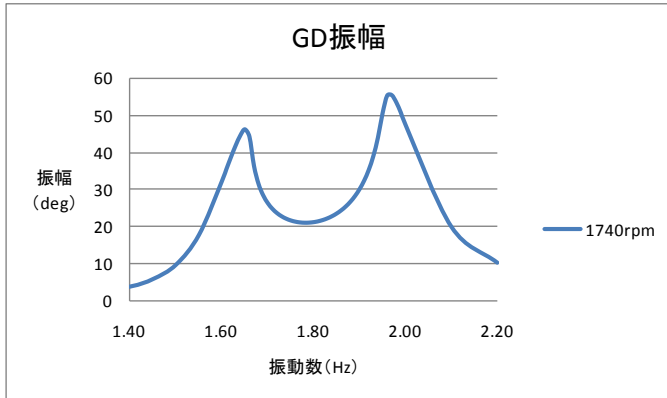


図8 減衰係数  $6.00 \times 10^{-4}$  Nms/rad で検討したGD 振幅の例

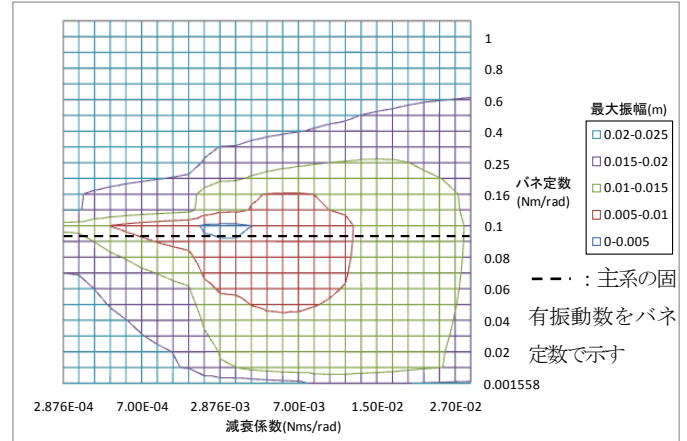


図9 最大応答で評価した結果(1740rpm)

表3 最大応答振幅(m)

	$2.876 \times 10^{-4}$	$2.876 \times 10^{-3}$	$2.876 \times 10^{-2}$
0.001558	0.0231342	0.02265507	0.0206498
0.09	0.0170631	0.00521387	0.0151533
0.1	0.0135942	0.00413702	0.015142
0.1558	0.0201656	0.0109771	0.0152221
0.2	0.0216463	0.01581905	0.0155393
1.558	0.0230352	0.02314724	0.0224641

## 6. 結論

運動方程式の変数を一般に用いられる水平変位で検討した。ジャイロモーメントの非線形性を考慮した解析の妥当性を検証するために模型実験を行った。また、諸元の建物模型を対象にGDの最適設計法を確立した。得られた主要な結論は次の通りである。

- (1) GDはTMDなどの制振装置と同様に固有振動数を主系の固有振動数に近い値にすると、十分な制振効果を得ることができる。
- (2) 副系減衰の影響は減衰係数を大きくすると、発生するジャイロモーメントが小さくなり、制振効果は低下する。一方、小さくすると、ジャイロモーメントは非線形となり、応答はその影響を受け、イレギュラーな変化の応答になる。
- (3) 副系の固有振動数を主系の固有振動数より低い値をとっても制振効果にさほど影響はないと考えられる。一方、主系より高い値をとると、ある程度までは十分な制振効果を得られるが、ある値を超えると急激に制振効果は低くなる。
- (4) 実際にダンパーを設置する上で、主系の固有振動数が変動することを考慮しなければならないため、副系の固有振動数は主系の固有振動数より低くする方が良い。

## 参考文献

- 1) 村井玲太 ジャイロダンパーによる高層建築物の制振 高知工科大学卒業論文、2010
- 2) 大西健二 ジャイロダンパーの制振効果に関する実験的研究 高知工科大学卒業論文、2011

### 5.3 最適設計法の確立

前述のように設計パラメータを変動させながら、応答解析を行い、最大応答でGD性能を評価する。パラメータ間の相互作用が考えられるので、マトリックス的な解析で検討する。表2の諸元の副系のバネ定数を1/100~10倍、減衰係数は1/10~10倍の範囲およびローター回転数1740rpmで応答解析を行う。図9は縦軸にバネ定数(固有振動数)、横軸に減衰係数をとっており、最大応答を等高線グラフで示す。また、表3には最大応答振幅の具体的な数値を表した表を示す。

ジャイロなしの最大応答振幅が約0.023mであるため、制振率が50%以下となっていなければ、十分な制振効果を得たと言えない。よって、図9のグラフより制振効果が最大となる設計パラメータはバネ定数(固有振動数)を0.09~0.1Nm/rad(1.783~1.879Hz)程度の値をとったときである。これは主系の固有振動数に非常に近い値である。また、表3よりバネ定数(固有振動数)0.1Nm/rad(1.879Hz)から0.1558Nm/rad(2.345Hz)に変動させると、最大応答振幅が急激に大きくなっている。一方、バネ定数(固有振動数)を0.1Nm/rad(1.879Hz)以下に変動させると、最大応答振幅はあるバネ定数(固有振動数)までほぼ一定で制振効果は大きいことが言える。よって、バネ定数(固有振動数)を主系の固有振動数1.8056Hzより低い値に設定しても、十分な制振効果が得られることが分かる。また、建築物にダンパーを設置する上で、建物の固有振動数が変動することを考慮しなければならないため、固有振動数を低く設定した方がダンパーが有効に作用するのではないかと考えられる。