

ジャイロダンパーによる高層建築物の地震時応答の制振

1110315 門田 光平

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)による地震波に対する制振について検討した。フーリエスペクトルから解析に適しているであろう地震波を3種類導き出した。10階建ての建築物をモデルとして、GDを使用していない場合と使用した場合について解析した。また、ローター回転速度と最大応答振幅の関係から、現実にGDを使用すると想定した場合の最適回転速度を提案した。

Key word : ジャイロダンパー, 地震応答, 最適回転速度, ダンパー変位

1. 研究の目的

村井はGDが地震を想定した地盤振動に対して制振効果を与えることを明らかにしているが¹⁾、解析は正弦波に対する応答だけに限られている。実際の地震における地盤振動は非定常であり不規則に振幅が増減するので、これに対して副系であるGDが有効に作動するかどうかは明らかにされていない。本研究では、実際に発生した地震波を使用して解析を行い、GDが実際の地震波に対しても十分な制振効果を発揮することができるのかを検討することを目的とした。

2. ジャイロダンパー(GD)の概略構造

ジャイロダンパーは文献 1)で想定していた物と同一の構造とする。図-1にその構造を示す。

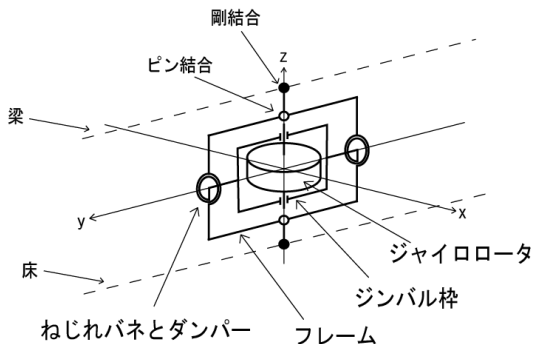


図-1、GDの構造

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(x)軸に垂直な水平軸(y)周りに回転できるように支持する。ジンバルの回転軸(y)周りには、ジンバルの位置を保持するためのねじれバネと、エネルギー吸収用ダンパーを設ける。さらに、このジンバル枠を、(x)軸周りに回転できるようにフレームで支持する。このとき、フレーム側をピン結合、反対側を剛結合とした支持柱で、フレームを梁と床から支えるものとする。

建築物に外力が加わると、せん断変形が生じて層間変形角が発生する。それに伴い、フレームが傾きロータも(x)軸周りに回転するため、(y)軸周りにジャイロモーメントが生じる。このモーメントにより、ジンバルが(y)軸周りに回転し、この(y)軸周りの回転によって(x)軸周りのジャイロモーメントがロータ、従って建築物に作用して制振作用が生じる。

3. 地震波の選定

解析に用いた建築物の固有振動数は約1Hzとなっている。そこで、地震によって共振が発生しやすいと考えられる1Hz付近でのエネルギーが大きい地震波を選ぶこととした。

そこで入手可能な地震波、約20波についてフーリエ解析を行い、1Hz付近のエネルギーに着目して解析に用いる地震波3波を選定した。用いた地震波のフーリエスペクトルを図-2, 3, 4に示す。使用した地震波のうち、2波は兵庫県南部地震、1波は宮城県沖地震で得られたものである。

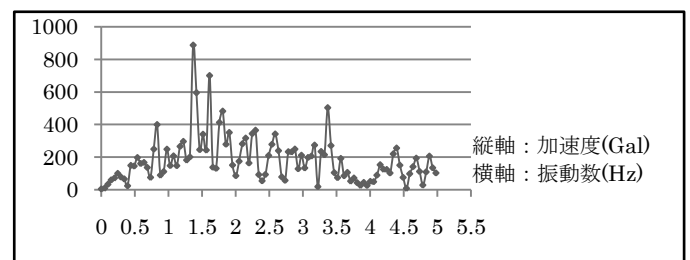


図-2 T2-I-1(1995, HYUGOKEN_South, NS)]

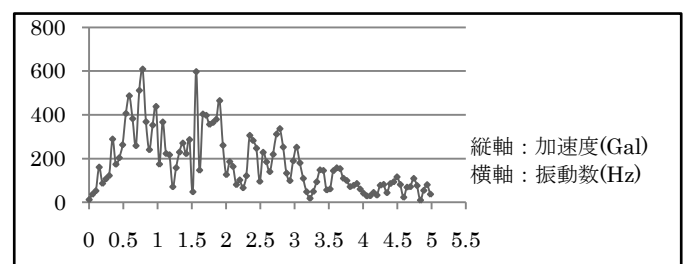


図-3 T2-II-3(1995, HYUGOKEN_South, N30W)

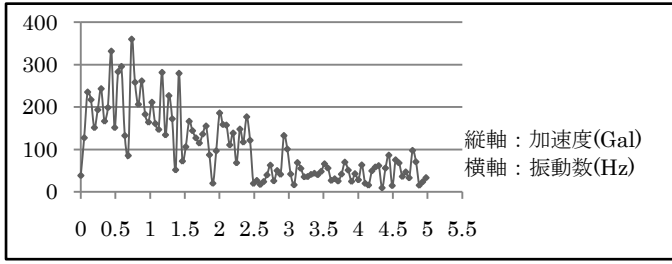


図-4 T1-I-1(1978, MIYAGI-Coast, LG)

4. 解析モデルと運動方程式

4.1 建物モデル

本研究で検討する建物は文献1)と同様に10階とした。建物の諸元を表-1に示す。なお、減衰係数は建築物の設計で標準的に用いられている減衰定数がほぼ $h=0.03$ になるように定めた。

表-1 建物の諸元

階数(階)	10
各階の重量(tf)	300
階高(m)	3.0

階	1~3	4~6	7~8	9~10
バネ係数 ($\times 10^4 \text{tf/m}$)	600	510	360	300
減衰係数 ($\text{tf}\cdot\text{s/m}$)	620	527	372	310

4.2 ジャイロダンパー(GD)の諸元

ジャイロローターの重量は、当初は文献1)を参考にして、建物全重量 3000tf の 0.05% 、すなわち 1.5tf に設定したが、地震に対しては十分な制振効果が得られなかったため、 0.3% 、すなわち 9tf に増した。階高が 3m であることから、室内に設置するローターの半径 R は 1.5m 位が適当であろうと考えた。これより、ローターの厚さ d は 16.2cm となる。ローターの z 軸周りの極慣性モーメント J は次式で計算される。

$$J = \gamma d \frac{\pi R^4}{2}$$

ここに γ は単位体積当たりの質量である。

ローターを含めたジンバル枠の y 軸周りの極慣性モーメント I は文献1)にならって J に等しいと仮定した。文献1)によれば、副系の固有振動数が主系の固有振動数に等しい時にGDの制振効果が最大となる。よって、ジンバルの回転軸に設けるねじれバネのバネ定数は、副系の固有振動数が 1Hz となるように定めた。ジンバル回転軸の減衰係数には明確な最適値はないようであることから、比較的小さな値 $c=660\text{kgf}\cdot\text{s}\cdot\text{m}$ を基本として、これに倍数を乗じてその効果を検討することとした。以上のようにして定めたGDの諸元をまとめて表-2に示す。

4.3 運動方程式

表-2 GDのパラメータ

GDバネの減衰係数 C	660(kgf·m·s)
極慣性モーメント(y) I	10051.8 (kg·m ²)
極慣性モーメント(z) J	10051.8 (kg·m ²)
GDバネ係数 K	6.61 ($\times 10^4 \text{N}\cdot\text{m}$)

一般的な建物の解析では各階の水平変位を変数とするが、本研究では層間変形角 θ を利用してGDに運動を与えているので、運動方程式も層間変形角 θ を変数として導いた。さらに、 θ の1階微分を q とおいて、地盤に地震加速度を与えた場合の時系列解析を行うための状態方程式を導いた。結果を以下に示す。なお、GDは1次モードを対象として2階に設けることとした。

$$\dot{q}_1 + c_1 \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) q_1 - \frac{c_2}{m_2} q_2 + k_1 \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \theta_1 - \frac{k_2}{m_2} \theta_2 = 0$$

$$\dot{q}_2 - \frac{c_1}{m_2} q_1 + c_2 \left(\frac{1}{m_2} + \frac{1}{m_3} \right) q_2 - \frac{c_3}{m_3} q_3 - \frac{k_1}{m_2} \theta_1 + k_2 \left(\frac{1}{m_2} + \frac{1}{m_3} \right) \theta_2$$

$$- \frac{k_3}{m_3} \theta_3 = 0$$

$$\dot{q}_3 - \frac{c_2}{m_3} q_2 + c_3 \left(\frac{1}{m_2} + \frac{1}{m_3} \right) q_3 - \frac{c_4}{m_4} q_4 - \frac{k_2}{m_3} \theta_2 + k_3 \left(\frac{1}{m_3} + \frac{1}{m_4} \right) \theta_3$$

$$- \frac{k_4}{m_4} \theta_4 = 0$$

:

:

$$\dot{q}_i - \frac{c_{i-1}}{m_i} q_{i-1} + c_i \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_{i+1}} \right) q_i - \frac{c_{i+1}}{m_{i+1}} q_{i+1} - \frac{k_{i-1}}{m_i} \theta_{i-1} + k_i \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_{i+1}} \right) \theta_i$$

$$- \frac{k_{i+1}}{m_{i+1}} \theta_{i+1} = 0$$

:

:

$$\dot{q}_9 - \frac{c_8}{m_9} q_8 + c_9 \left(\frac{1}{m_9} + \frac{1}{m_{10}} \right) q_9 - \frac{c_{10}}{m_{10}} q_{10} - \frac{k_8}{m_9} \theta_8 + k_9 \left(\frac{1}{m_9} + \frac{1}{m_{10}} \right) \theta_9$$

$$- \frac{k_9}{m_{10}} \theta_{10} - \frac{\Omega J}{m_9 h^2} = 0$$

$$\dot{q}_{10} - \frac{c_9}{m_{10}} q_9 + \frac{c_{10}}{m_{10}} q_{10} - \frac{k_9}{m_{10}} \theta_9 + \frac{k_{10}}{m_{10}} \theta_{10} = -\frac{\dot{z}}{h}$$

$$\dot{\theta}_1 = q_1$$

$$\dot{\theta}_2 = q_2$$

:

$$\dot{\theta}_{10} = q_{10}$$

$$\dot{q} + \frac{C}{I} q + \frac{K}{I} \theta + \frac{\Omega}{I} q_9 = 0$$

$$\dot{\theta} = q$$

ただし、添え字のない θ 、 q はGDの各変位に関する変数、 Ω はローターの回転角速度(rad/s)である。

m_i : 各階の重量
k_i : バネ係数
c_i : 減衰係数
h : 階高
θ_i : 各階の層間変形角

5. 地震波に対する応答

GDの減衰係数に乗じる倍数、およびローターの回転角速度をパラメーターとして、3個の地震波に対する応答を解析した。図6, 7, 8は最上階の水平変位の最大値に対するローター回転角速度の影響を示したものである。なお、減衰係数に乗じる倍数は800, 1600, 2400の3段階に変化させた。

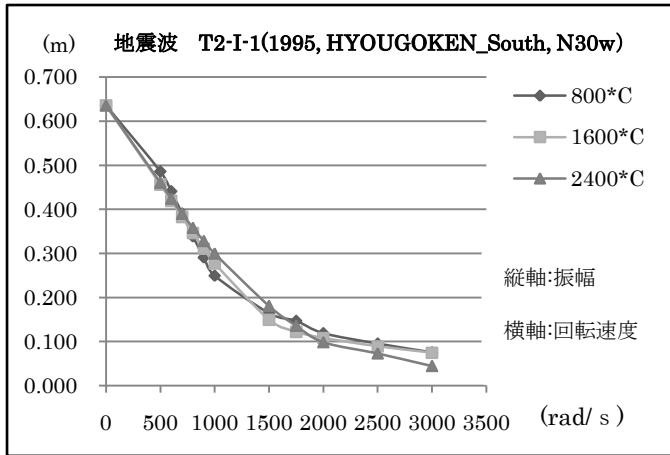


図-6 各回転数における最大振幅

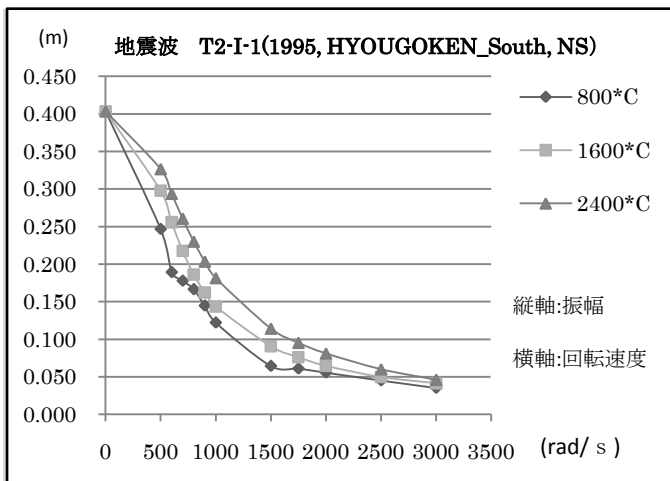


図-7 各回転数における最大振幅

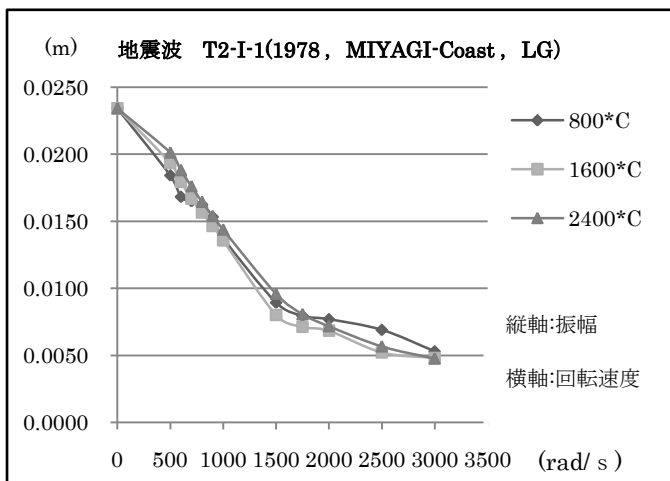


図-8 各回転数における最大振幅

図から明らかなように、減衰係数の影響は概して小さいと言える。比較的減衰の影響が大きい図-7によれば、減衰係数の増加に伴って応答振幅が増加している。一般的な振動の場合と異なり、減衰の増加が制振効果の増加につながらないことは文献1)で報告されているところと整合する。

図から、ローター回転速度を増加させると、当然ながら、制振効果も増すことが分かる。ただし、効率という点で見ると、1500rad/s程度までは回転速度の増加にともなって応答が激減するものの、これ以上に回転速度を増しても振幅はさほど減少しない。地震に対してもGDが有効であるかどうかという問題について言えば、正弦波に対する制振効果のように劇的に応答が減少することはないものの、応答が1/3~1/4程度に減少しており、他の制振装置や免震構造などと比べて遜色ないものと言える。3波の地震に対する応答を比較すると、地震波によって制振効果が大きく変わることはないようであるが、制振率は若干変化していることが分かる。今回解析した範囲では、GDを用いていない場合(回転速度=0)の応答が大きい場合に制振効果が大きいようであるが、その理由は不明であり、一般的な現象であるかどうか分からない。

GDの設計という点では、GD自身の角変位も大きな問題となる。解析した3ケースについて、ジャイロの角変位を図-9, 10, 11に示す。

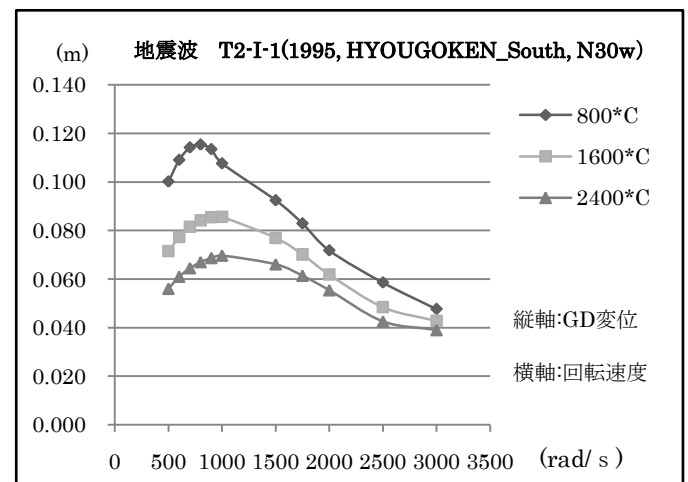


図-9 各回転数におけるジャイロの最大変位

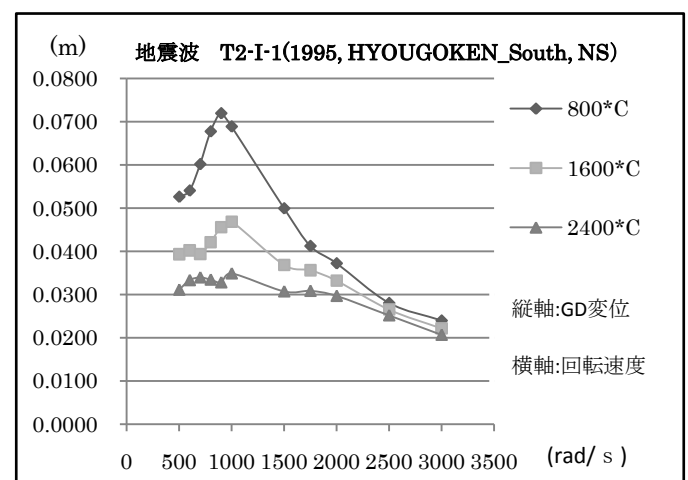


図-10 各回転数におけるジャイロの最大変位

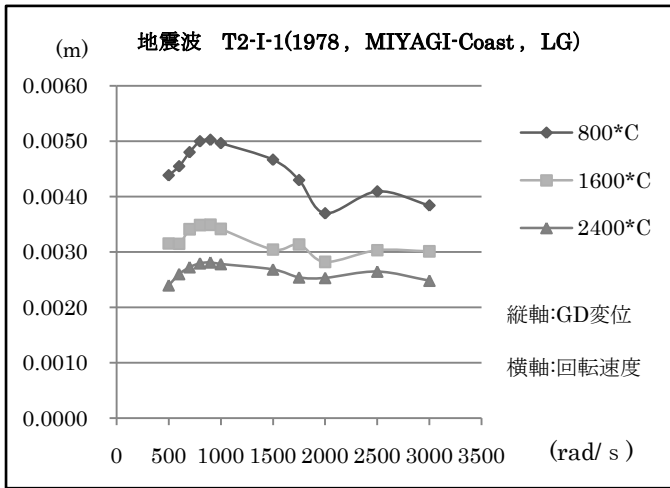


図-11 各回転数におけるジャイロの最大変位

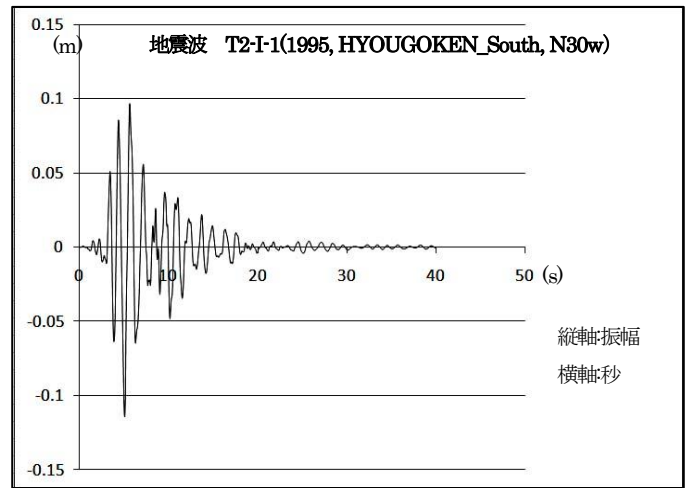


図-13 GD 回転速度=700(rad/s)のときの振幅

図-11 の変位が他の2ケースと異なった傾向を示しているが、大局的には回転速度が1000rad/s弱で変位が極大となった後、回転速度の増加とともにGD変位が減少する傾向にあると言える。ある程度の回転速度を確保すればGDの最大変位を14°程度以下に抑えることができる。この程度の値であれば、実施設計は十分可能と考えてよいであろう。GD変位に対しては減衰増加の効果が明確で、減衰を増せばGD変位を小さく抑えることができると言える。

以上から地震応答に対してもGDは十分制振効果を発揮することが分かったが、非定常な地震波に対してGDが効果的であるメカニズムは必ずしも明らかではない。そこで、GDの有無について建物の応答の時系列波形、およびGDの応答変位波形を調べた結果を図12, 13, 14に示す。図から分かるように、最初の大きな地震動に建物が応答すると同時にGDにも大きな変位が生じている。代表的な制振装置であるTMDの場合は、主系の振動が一定時間続くことによって副系の振動が誘起され、これによって制振作用が発生することが知られているが、GDの場合は、GDにx軸周りの角速度が生じると、ジャイロモーメントの効果で直ちにこれと直交する方向に大きなモーメントが発生するのではないかと推定される。これが地震に対してGDが有効な理由ではないかと考えられる。詳細については、さらに検討が必要ではあるが、地震に対してはTMDよりもGDの方が適している可能性を示唆するものかもしれない。

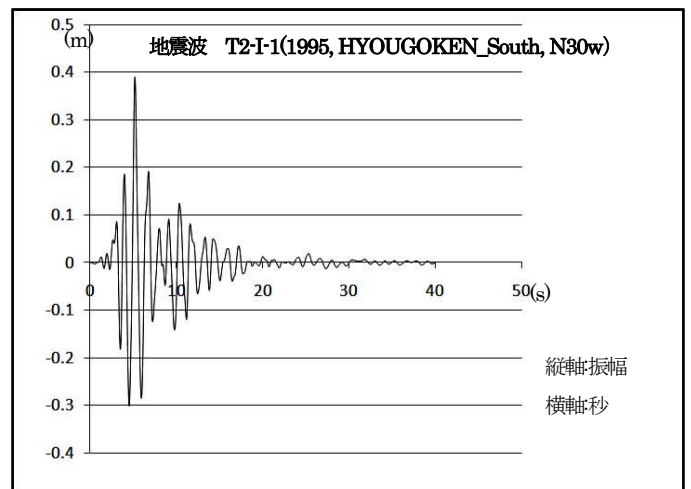


図-14 GD 回転速度=700(rad/s)のときのGD変位

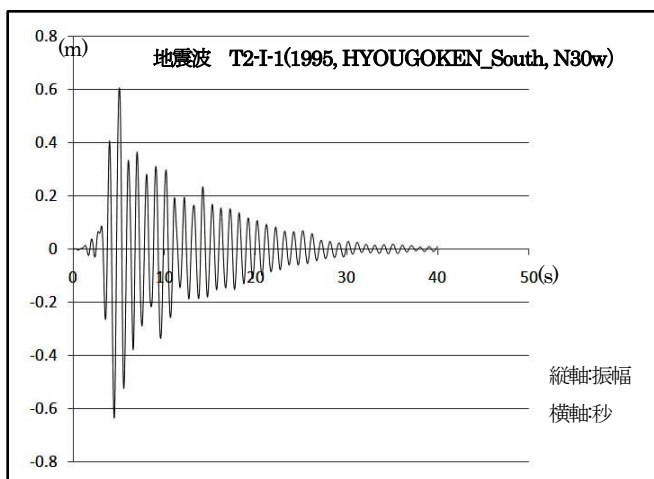


図-12 GD 回転速度=0(rad/s)のときの振幅

6. まとめ

正弦波の代わりに実際の地震波を使用して、GDの地震振動に対する効果について検討をした。以下に今回の解析の結果から得られた結論を示す。

- (1) GDは実際の地震振動に対しても有効である。
- (2) GDの回転速度は1500(rad/s)くらいまでが妥当である。
- (3) 建物の応答に対する減衰係数の影響は小さいが、ジャイロの変位には大きく現れる。
- (4) GDの応答は振動の開始時とほぼ同時に生じている。つまり、GDは振動発生と同時にその効果を発揮していると考えられる。
- (5) 地震波の種類によっては減衰係数の増大がそのまま応答振幅の減少につながるとは限らない。

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