

粘性系ダンパーを用いた制震構造物の簡易設計法
その1 提案設計法の概要

A Simple design method of the seismic control structure using a viscous type damper
Part1 Outline of the proposed design method

金井修司⁴, 秦一平¹, 廣谷直也², 安松哲生³
Shuji Kanai⁴, Ippei Hata¹, Naoya Hirotsu², Tetsuo Yasumatsu³

The response control design using time-history analysis is difficult to determine that floors and numbers of installation are the design of optimum and efficient. For this reason, this paper proposes the parameter design method of the response control structure which is restricted floors and numbers of installation.

1.1. はじめに

制震設計では、構造設計者が想定する地震動に応じて目標クライテリアを定め、これを満足する制震パラメータを時刻歴応答解析の繰返しにより設計している。この際、制震装置の配置箇所は、建築計画の方針に沿って限定されていることが多い為、目標クライテリアを満足できないケースもあり、その場合は、配置箇所を意匠設計者と協議の上変更し、再設計する。このように、設計が煩雑になる理由として、制震装置の配置数・配置箇所に最適解がないためである。

そこで本論文では、配置箇所が限定されているモデルやフレーム系モデルに対して、目標クライテリアを満足する制震設計法は提案する。

1.2. 提案設計法の概要

本論文は、石丸・秦によって提案されている「応答性能設計図表を用いた設計法」^{[1],[2]}に、「モーダルアナリシス」を組み合わせることで、設計上の制約に対応した最適解を導く設計法へ展開する。

応答性能設計図表を用いた設計法は、設計用入力地震動の応答スペクトルと応答性能設計図表の掛け算により、応答値及び目標応答性能を満足するパラメータを逆算的に求めることができる。

ここで、「モーダルアナリシス」は、固有値解析によって算出した構造物の固有周期と振動モードから応答値を計算するものである。固有値と地震動の応答スペクトルを参照すれば、加速度・速度・変位といった構造物の応答値を低減するために、制御するモードを決定することができる。

本設計法は、設計用入力地震動に対する「目標クライテリアを満足する制震性能」と構造物の持つ「限定された配置箇所を得られる最大の制震性能」を粘性減衰定数 h で表現し、それを比較することで、最適解を導くものである。

前者は、新たに粘性系ダンパーを有する弾性構造物モデルに対応させた「応答性能設計図表」を用いる。また後者は、複素固有値解析を利用して「付加剛比式と最適減衰式」^[3]により算出する。

1.3. 弾性範囲の応答性能設計図表

本研究で扱う弾性範囲において、精度の高い応答推定が可能な、応答性能設計図表を作成する。作成には、既往の研究と同様に、「エネルギースペクトルの変数分離」^{[1],[2]}を用いる。

1.3.1 エネルギースペクトルの変数分離

弾性変形エネルギーと線形粘性エネルギーによるエネルギースペクトルの速度換算値 $S_{Bi}(T)$ は、(1-1)式と表される。これは、Figure1-1に示すように、粘性減衰定数 10%の擬似速度スペクトル $pS_{v,10}$ に近似する。そのため、入力地震動と構造物のパラメータの変数分離

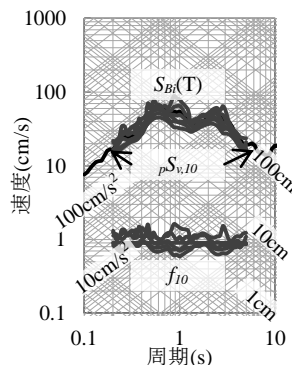


Figure1-1 $S_{Bi}(T)$, $pS_{v,10}$, f_{10} の関係

Table1-1 計算に用いた
実地震動波形

地震名	解析波形数
Imperial Valley	2
Kern Country	2
Tokachi-oki	2
San fernando	4
Miyagiken-OkI	4
HyogoKen Nanbu	12
Tottori-ken Seibu	6
Tokachi-oki	6
Niigata-Ken Chubu	4
Σ	42

Table-2 $S_{Bi}(T)$ の計算条件

周期T	0.2~5秒 (28分割)
地震波	Table1-1の地震波42波
減衰定数 h_0	0.03,0.05,0.1,0.2,0.3,0.4
計	7056パターン

$$S_{Bi} = \omega_0 \cdot D_{max} \sqrt{\frac{1}{4} + 2\pi h_0} \quad (1-1)$$

$$S_{Bi}(T) = f_{10}(h_0) \cdot pS_{v,10}(T) \quad (1-2)$$

$$f_{10}(h_0) = -0.886944h_0^2 + 0.567068h_0 + 0.888978 \quad (1-3)$$

1: 日大理工・教員・建築 2: 日大理工・院(後)・建築 3: 東日本旅客鉄道株式会社 4: 日大理工・院(前)・建築

が可能となり、(1-2)式が成立する。\$S_{Bi}(T)\$ を Table1-1 の実地震動波形 42 波に対して計算し、実験式 \$f_{i0}\$ を作成した。得られた結果を(1-3)式に示す。このときの計算条件を Table1-2 に示す。

1.3.2 応答倍率式の算出

(1-2)式の変数分離が可能となったため、変位、速度の応答倍率式を導出する。本研究では、予測精度を高くするために、粘性減衰定数 \$h\$ と周期 \$T\$ による補正式 \$\gamma_D, \gamma_V\$ を最小二乗法により作成した。この補正式を用いて、応答倍率式を(1-4)、(1-5)式とした。

$$\left(\frac{D_{max}}{D_{10}}\right) = \frac{f_{i0}}{\sqrt{\frac{1}{4} + 2\pi h_0}} / \gamma_D : \text{最大変位応答倍率式 (1-4)}$$

$$\left(\frac{V_{max}}{S_{v,10}}\right) = \eta_{i0} \left(\frac{D_{max}}{D_{10}}\right) / \gamma_V : \text{最大速度応答倍率式 (1-5)}$$

$$\gamma_D(h_0, T) = \gamma_{11}T^2 + \gamma_{12}T + \gamma_{13} \quad (1-6)$$

$$\gamma_V(h_0, T) = \gamma_{21}T^2 + \gamma_{22}T + \gamma_{23} \quad (1-7)$$

ここに、 $\eta_{i0}(h_0) = -0.769342h_0^2 + 1.189988h_0 + 0.882680$

$$\gamma_{11} = 0.037936h_0^2 - 0.047165h_0 + 0.003667$$

$$\gamma_{12} = 0.329511h_0^2 - 0.139482h_0 + 0.018267$$

$$\gamma_{13} = -0.644752h_0^2 + 0.616554h_0 + 0.939756$$

$$\gamma_{21} = 0.000551h_0^2 + 0.121001h_0 - 0.010128$$

$$\gamma_{22} = 1.202069h_0^2 - 1.508961h_0 + 0.143935$$

$$\gamma_{23} = -1.360355h_0^2 + 2.031519h_0 + 0.804438$$

補正式の有無による、変位と速度の予測精度の変化を Figure1-2 に示す。図中 \$\bar{X}\$ は予測値/解析値の平均値、\$\sigma\$ はその標準偏差である。\$\alpha\$ は相関係数を示し、1.00 に近いほど強い相関関係があることを示す。補正前と比較すると、平均値 \$\bar{X}\$ が 1.00 となり、標準偏差 \$\sigma\$ も小さくなっていることから、ばらつきが抑えられていることがわかる。また、相関係数 \$\alpha\$ が 1.00 に近づいていること、概ね全結果が誤差率 20%以内になっている

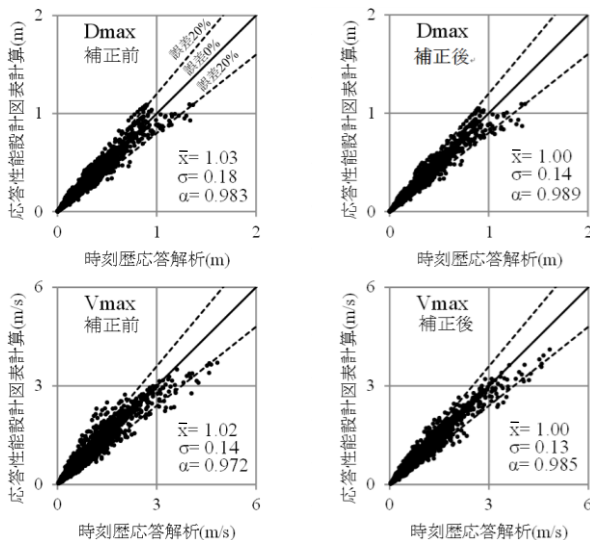


Figure1-2 補正式による予測精度の変化

ことがわかる。これにより、補正式によって予測精度が向上していることがわかる。予測精度の高い、応答性能設計図表を用いることで、目標クライテリアを満足する制震性能を精度よく把握することができる。

1.4. 制震装置の最適配置と最大粘性減衰定数 \$h_{ST,n}\$

制御対象モデルに付与可能な最大粘性減衰定数 \$h_{ST,n}\$ は、(1-8)式で表される。なお、添え字 \$n\$ は全て \$n\$ 次モードを表す。(1-8)式より、最大粘性減衰定数 \$h_{ST,n}\$ は、(1-9)式に示す付加剛比 \$\kappa_{k,n}\$ のみで構成されていることが分かる。付加剛比 \$\kappa_{k,n}\$ は、複素固有値解析により、非制震時の固有周期 \$T_{0,n}\$ と粘性ダンパーの減衰係数を無限大としたときの固有周期 \$T_{\infty,n}\$ を算出することで求めることができる。

$$h_{ST,n} = 0.6 \frac{\kappa_{k,n}}{2 + \kappa_{k,n}} : n \text{ 次モードの最大減衰定数 (1-8)}$$

$$\kappa_{k,n} = \left(\frac{T_{0,n}}{T_{\infty,n}}\right)^2 - 1 : n \text{ 次モードの付加剛比 (1-9)}$$

ここで、付加剛比 \$\kappa_{k,n}\$ に着目することで、制震装置の最適配置論を展開できることを示す。(1-8)、(1-9)式から、\$T_{\infty,n}\$ が短くなることで付加剛比 \$\kappa_{k,n}\$ が大きくなり、その結果最大減衰定数 \$h_{ST,n}\$ が大きな値になることがわかる。つまり、限定された範囲でより大きな減衰定数を得る為には、付加剛比 \$\kappa_{k,n}\$ が大きくなる箇所に制震装置を配置することが最適配置と言える。

付加剛比 \$\kappa_{k,n}\$ は層間刺激関数の大小関係と近似する。これは、層間刺激関数が大きければ、その層間変位応答値も大きくなり、その層間に配置したダンパーのエネルギー吸収効率が大きくなる為である。従って、層間刺激関数の大きな層に制震装置を設置すれば、最大減衰定数 \$h_{ST,n}\$ を効率よく大きくすることができる。

1.5. まとめ

「目標クライテリアを満足する制震性能」を精度の高い応答性能設計図表で把握し、「限定された配置箇所」で得られる最大の制震性能」を複素固有値解析で求めることができることを示した。これにより、実務上の制約に対応した最適解を導くことが可能となることを示した。

1.6. 参考文献

[1] 石丸辰治：応答性能に基づく「対震設計入門」，彰国社，2004。
 [2] 秦一平，石丸辰治，長谷川純：非線形粘性ダンパーと弾塑性ダンパーを併用した系の応答性能設計手法，日本建築学会構造系論文集，第 617 号，p47-54，2007.7
 [3] 石丸辰治，秦一平，三上淳治，公塚正行：付加剛比による D.M. 同調システムの簡易設計法，日本建築学会構造系論文集，第 654 号，p1455-1464，2010