

履歴型ダンパーの設置された制振建物の減衰評価に関する検討

Study on Damping Ratio of Building with Hysteretic Dampers

平田 裕一 YUICHI HIRATA

野田 博 HIROSHI NODA

作田 美知子 MICHIKO SAKUTA

本報告では、既存の減衰評価方法を整理し、その特徴をまとめている。また、各種減衰評価法の中から、システム同定を取り上げ、履歴型ダンパーを有する制振建物の履歴減衰評価を試みた。地震応答の非定常性により、履歴減衰定数が時間とともに変動することが示されている。また、減衰定数をパラメータとした風応答解析結果から、最大変形時の定常ループから定まる減衰定数を用いた応答量は、過小評価される傾向にあることが確認された。

キーワード：減衰定数、減衰評価方法、システム同定、履歴減衰

In this paper, the evaluation methods of damping ratio and those characteristics are compiled. The evaluation of the hysteretic damping ratio was made against a building with the hysteretic dampers. It is shown that the hysteretic damping ratio varies with elapsed time for non-stationary vibration of the earthquake. It is also recognized by the parametric studies that the wind response using the damping ratio evaluated by the stationary loop of maximum deformation are underestimated.

Key Words: Damping Ratio, Evaluation Method, System Identification, Hysteretic Damping

1. はじめに

近年、性能設計の必要性が高まる中で、要求される性能を満足させるために制振構法を用いた事例が増加している¹⁾。制振建物の減衰性能を適切に評価することは設計上重要である。しかしながら、減衰性能の評価方法は数多く、用いる方法により結果が異なることがある。

本報告は、一般に用いられている減衰評価方法を整理するとともに、履歴型ダンパーを有する制振建物の地震および風応答解析を行い、その応答解析結果から履歴減衰の評価を試みている。

2. 減衰性能評価法

(1) 減衰性能評価法の分類

構造物の減衰性能は、減衰定数で表すことが一般的であり、その評価は以下のような三種類に分類される¹⁾。

- ・自由振動波形から推定する方法
- ・周波数応答から推定する方法
- ・時刻歴波形から直接推定する方法

(2) 自由振動波形から推定する方法

a) 自由振動波形の推定

構造物の自由振動波形が得られれば、減衰定数が推定できる。自由振動波形の取得は、構造物に自由振動させる場合と時刻歴波形から抽出する方法がある。自由振動を生じさせる方法には、起振機、人力、制振装置等が利用される。時刻歴波形から抽出する方法は、構造物への入力波形が白色雑音の場合、応答の自己相関関数が自由振動波形と一致するという性質を利用するものである。自己相関関数の推定方法としては、定義に基づいて直接計算する自己相関関数法と、データから部分サンプルを取り出し平均をとる RD 法が代表的なものである。

b) 減衰定数の評価

減衰定数の評価法は、波形の振幅比から対数減衰率を求めて計算する方法と、カーブフィッティングによる方法がある。カーブフィッティングは、振幅以外の情報も利用する推定である。

(3) 周波数応答から推定する方法

a) 周波数応答の推定

周波数応答の推定方法は、振動数を逐次変えて正弦波

加振し周波数応答曲線を直接得る方法と時刻歴波形から抽出する方法がある。正弦波加振を行う方法としては、起振機や制振装置が利用される。

日野³⁾によれば、周波数応答を抽出する方法は、Blackman-Tukey法、FFT法、MEM法がある。

Blackman-Tukey法でパワースペクトル密度を計算するには、自己相関関数を定義に従って計算し、それをWiener-Khintchineの関係に基づいてフーリエ変換することになる。相関関数を経由するので、相関法あるいは間接法と呼ばれることもある。これに対して、FFT法は、相関関数を経由せずに直接スペクトルを求める方法である。相関関数を経由しないところから、直接法と呼ばれる場合もある。Blackman-Tukey法もFFT法も、スペクトルの平滑化³⁾を行うことが必要である。測定時間を多くしても精度の本質的な向上にはならない点に注意が必要である。MEM法は、情報のエントロピーを最大にするようにスペクトルを決定する方法である。自己相関関数を経由するYule-Walker法と自己相関関数をあらかじめ推定しないBurg法とがある。得られたスペクトルから、伝達関数を推定する方法としては、文献4)によれば、以下に示す3通りがある。文献1)には、構造物の基礎部と頂部の伝達関数を求めるには、式(1)が適していると述べられている。

$$H_1(\omega) = \frac{S_{XY}(\omega)}{S_{XX}(\omega)} \quad (1)$$

$$H_2(\omega) = \frac{S_{YY}(\omega)}{S_{YX}(\omega)} \quad (2)$$

$$H_R(\omega) = \frac{S_{XY}(\omega)}{|S_{XX}(\omega)|} \sqrt{\frac{S_{YY}(\omega)}{S_{XX}(\omega)}} \quad (3)$$

ここに、

$S_{XX}(\omega)$: 入力のパワースペクトル密度

$S_{YY}(\omega)$: 出力のパワースペクトル密度

$S_{XY}(\omega), S_{YX}(\omega)$: 入出力のクロススペクトル密度

b) 減衰定数の評価

周波数応答からの減衰定数の評価方法には、応答倍率を用いる場合は $1/\sqrt{2}$ 法が、パワースペクトル密度を用いる場合はハーフパワー法が用いられる。減衰定数が大きく応答倍率のピークの幅が広がる場合には、位相曲線の $f/f_0=1$ (共振点)の勾配から減衰定数を評価する方法がある。また、周波数応答の理論式をカーブフィッティングすることによって減衰定数を評価する方法も用いられている。カーブフィッティングは、周波数応答曲線を利用する場合と伝達関数のナイキスト線図、逆ナイキスト線図を用いる場合がある。

(4) 時刻歴波形から直接推定する方法

a) システム同定

時刻歴波形から直接推定する方法は、システム同定手法を用いる。システム同定のモデルは、入力、出力、誤差の3つの項目から構成される点に特徴があり、出力と誤差の2つの項目から構成される時系列解析のモデルとは区別されている。

システム同定のモデルには、構造物の剛性や減衰係数などを直接未知量とする物理モデルと、入出力間のデジタルフィルタとしてモデルが構成される非物理モデルがある。前者には、状態空間モデルや通常の応答解析を利用するものがあり、後者には、多項式モデルがある。

多項式モデルは、一般的に次式で表され、そのモデル係数の取り方によって表-1に示すようなモデルが考えられている⁵⁾。

$$A(q)y(k) = \frac{B(q)}{F(q)}u(k) + \frac{C(q)}{D(q)}w(k) \quad (4)$$

ここに、 u : 入力信号、 y : 出力信号、
 $u(k) = u(k\Delta T)$ 、 $y(k) = y(k\Delta T)$ 、 $k = 0, 1, 2, \dots$
 ΔT : サンプル時間、 w : 白色雑音
 q : 時間シフト演算子 ($q^{-1}u(k) = u(k-1)$)
 A, B, C, D, F : q の多項式

表-1 多項式モデル

モデル	条件	入出力の伝達関数G(q)	雑音の伝達関数H(q)
ARX	C=D=F=1	B/A	1/A
ARMAX	D=F=1	B/A	C/A
FIR	A=C=D=F=1	B	1
OE	A=C=D=1	B/F	1
BJ	A=1	B/F	C/D

各モデルの未知パラメータは、予測誤差の分散を最小化する方法や予測誤差と入出力データとの相関をなくす方法等によって定められる。

b) 減衰定数の評価

システムが線形で連続関数の場合、システムの伝達関数は、ラプラス変換により、 s 平面で表示される。システムの特徴である固有振動数と減衰定数は、伝達関数の極から容易に計算できる。これに対して、システム同定のモデルは離散時間のモデルである。システム同定のモデルで用いられる時間シフト演算子は、 z 変換と同じものと見なせるので、システム同定モデルの伝達関数は、 z 平面で表示されていると見ることができる。システムの特徴(固有振動数、減衰定数)が伝達関数の極で表されることは s 平面の場合と同様なので、 z 平面の極と s

平面の極の関係が分かれば、システム同定モデルの極(z 平面)から s 平面を介して減衰定数と固有振動数を計算できることになる。この関係は、連続時間系での ΔT 秒の遅れ(平行移動)が、 s 平面では $e^{-s \Delta T}$ の乗算に変換されること、および離散時間系のサンプリング時間が ΔT 秒の場合、 ΔT 秒の遅れは z 平面の z^{-1} のものであることから、 $z=e^{-s \Delta T}$ として表される⁶⁾。この関係から、システムの固有振動数、減衰定数は、それぞれ式 (5)、式 (6) で与えられる。

$$f_j = \frac{|\log_z p_j|}{2\pi\Delta T} \quad (5)$$

$$h_j = \frac{-\log|z p_j|}{2\pi f_j \Delta T} \quad (6)$$

ここに、 f_j : j 次振動数、 h_j : j 次減衰定数、
 $z p_j$: z 平面における伝達関数の極、
 ΔT : サンプリング時間

3. 履歴型ダンパーの減衰評価

(1) 解析対象

解析対象は、各層に弾塑性履歴ダンパーを配置した RC 造30階の集合住宅である。建物形状は幅、奥行き、高さをそれぞれ $B \times D \times H=30\text{m} \times 30\text{m} \times 96\text{m}$ とした。建物の層重量は、単位面積当たりの重量を $w=10.78\text{kN/m}^2$ として定めている。建物主架構の剛性分布は、 A_i 分布から定まる層せん断力分布に比例する分布形状を仮定し、主架構のみの周期が $T=0.025H=2.4$ 秒になるように設定した。なお、居住性レベルの振動を検討するため、主架構は弾性とした。配置したダンパー量は、剛性は主架構に対する剛性比を $\alpha=0.4$ 、降伏耐力は、主架構の耐力を $D_s=0.35$ と考えて、全耐力に占める割合を 5% とし、耐力上昇を 1.5 倍としている。復元力特性は、耐力上昇型のトリリニアモデルである。なお、層間変形に占める主架構の曲げ変形量+ダンパー取り付け部変形量の割合を、頂部で 0.8 となる線形分布とし、ダンパーの剛性を低減することで評価している。

(2) 解析方法

振動モデルは、30質点の等価せん断モデルである。主架構の減衰は内部粘性型で $h_1=3\%$ であり、主架構のみの周期に対して設定している。ダンパーの内部減衰は無視している。この建物モデルにより、地震応答解析ならびに風応答解析を行った。

履歴型ダンパーの履歴減衰を評価する方法には、地震応答では、システム同定で多用される ARX モデルを用

いた。ARX モデルは線形モデルのため、通常弾塑性応答には適用されないが、ここでは履歴型ダンパーの等価減衰定数を評価するために用いている。地震応答の解析パラメータは減衰定数を評価する波形区間長である。対象とした波形区間の開始点はすべて 0 秒であり、終了点は、3 秒から 10 秒までを 1 秒ピッチ、それ以降は、10 秒ピッチで設定した。50 秒評価区間は地震動のほぼ全区間を評価対象とした場合である。風応答に関しては、通常入力が未知であることから、システム同定の適用が難しいので、最大応答変位での履歴ダンパーの等価粘性減衰定数から等価減衰係数を計算した後、物理モデルを用いて試行錯誤により補正することとした。

(3) 外力の設定

入力地震動は、EL CENTRO 1940 NS であり、最大速度を $v_{\max}=10\text{cm/s}$ に基準化している。層風力は Noda and Nakayama⁷⁾ の手法を用いて、30 層の層風力を同時に人工的に発生させた。風速はレベル 2 を想定して建物頂部で $U_H=56.2\text{m/s}$ とし、平均変位を有さない風直角方向振動を対象とした。

(4) 解析結果

地震入力を行った場合の頂部加速度の時刻歴波形を図-1に示す。最大応答加速度は $t=6.3$ 秒で発生し、 $ACC_{\max}=141\text{cm/s}^2$ である。100 cm/s^2 を超える加速度は $t=13$ 秒以降は見られない。

本解析では、15 層より下層のダンパーが降伏している。代表的なものとして第 5 層のダンパー力の時刻歴波形を図-2に示す。図より、第 5 層では、 $t=5$ 秒で降伏点に達している。また、最大応答を示した $t=6 \sim 8$ 秒付近で、正負両方向に明瞭な塑性流れが見られる。

図-3に建物全体に入力される地震エネルギーの分担を示す。図-4は、履歴ダンパー部分のエネルギー吸収量である。図より $T=3$ 秒から 8 秒間で急激に地震エネルギーが投入されている。総エネルギー入力に占める履歴ダンパーの吸収エネルギーの割合は、約 19% であった。

図-5に、ARX モデルと式 (5)、式 (6) で評価した振動数、減衰定数を示す。図より、ダンパー降伏以前の評価区間で同定した振動数、減衰定数は、弾性振動数 1 次 $f_1=0.472\text{Hz}$ 、2 次 $f_2=1.196\text{Hz}$ および弾性時減衰定数 1 次 $h_1=2.66\%$ 、2 次 $h_2=7.15\%$ とほぼ対応している。ダンパーが降伏を始める 5 秒以降から 1 次、2 次ともに振動数が低下するとともに、減衰定数が増加する傾向が見られる。ダンパーに顕著な塑性流れが生じた 6 ~ 8 秒までの各区間の平均の固有振動数は、1 次 $f_1=0.461\text{Hz}$ 、2 次 $f_2=1.188\text{Hz}$ 、減衰定数は、1 次 $h_1=4.42\%$ 、2 次 $h_2=7.81\%$

である。この付近をピークとして、地震動の主要動が終了するにともない、固有振動数が再び増加し、減衰定数は、1次 $h_1=3.68\%$ 、2次 $h_1=7.01\%$ に収束している。本ダンパーの付加減衰は、波形全体を対象とする場合は、主要動を対象とする場合の約83%である。評価する目的に応じて適切な値を選択する必要があると考えられる。

図-6に風応答解析の結果を示す。風応答の場合も、15層より下層のダンパーが降伏している。図は、最大層間変位とダンパーの初期降伏耐力から等価粘性減衰定数と等価剛性を計算し、その値を用いた弾性応答解析と弾塑性応答解析結果を比較したものである。

図より、最大変位から想定した等価剛性と等価減衰では、応答量を過小評価している。そこで、等価減衰係数の値を0.8倍から0.4倍まで変化させた解析を行ったところ、応答加速度は0.4倍がよく対応し、応答層間変位は0.6倍がよい一致を示した。この時の複素固有値解析による減衰定数は、0.4倍が $h_1=3.61\%$ 、0.6倍が $h_1=4.06\%$ 、0.8倍が $h_1=4.51\%$ 、1.0倍が $h_1=4.90\%$ であり、0.4倍と0.6倍の平均が $h_1=3.84\%$ である。

風応答は定常応答と考えられるので、評価区間には影響しないと考えられるものの、実際の応答は各レベルの振幅が混在するので、最大振幅での履歴面積による減衰評価はやや過大になると思われる。

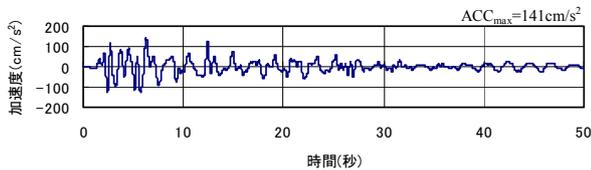


図-1 頂部応答加速度波形

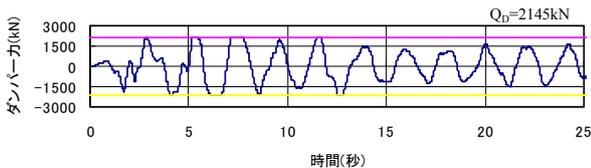


図-2 ダンパー力波形 (第5層)

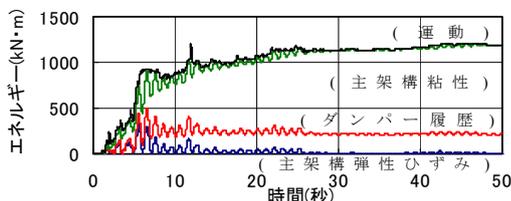


図-3 地震エネルギーの分担

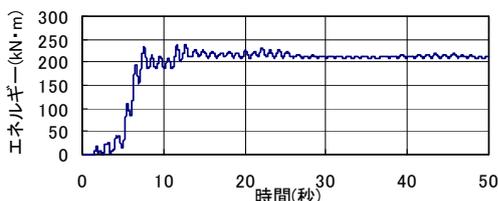


図-4 履歴ダンパーのエネルギー吸収量

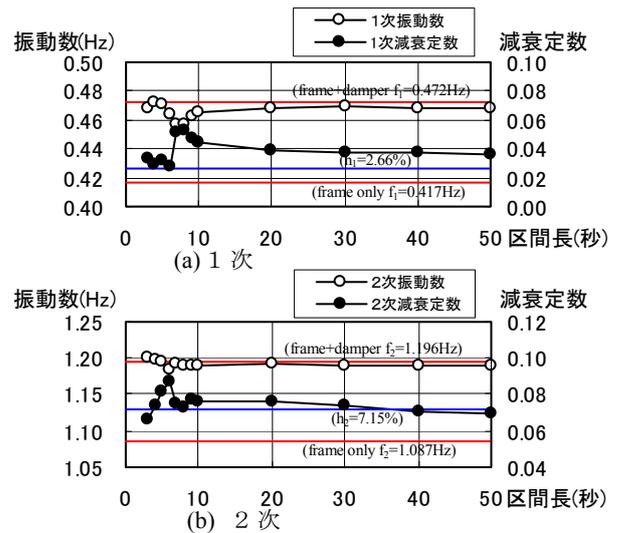


図-5 ARXモデルによる同定結果

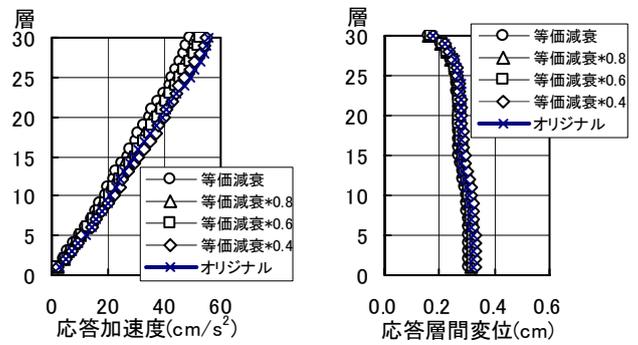


図-6 風応答解析結果

4. まとめ

既存の減衰評価方法を整理して示した。また、履歴型ダンパーを有する制振建物の地震、風応答解析に基づいた履歴減衰を評価し、地震では評価区間により減衰定数が大きく変動すること、風応答では最大振幅からの減衰評価が過大になることを確認した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物の減衰，2000
- 2) 日野：スペクトル解析，朝倉書店，1977
- 3) 大崎：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994
- 4) 理論地震動研究会：地震動 その合成と波形処理，鹿島出版会，1994
- 5) 足立：MATLABによる制御のためのシステム同定，東京電機大学出版局，1996
- 6) 雨宮，高木：デジタル制御入門，オーム社，1986
- 7) H.Noda, A.Nakayama: Reproducibility of flow past two-dimensional rectangular cylinder in a homogeneous turbulent flow by LES, J. of Wind Eng. and Ind. Aero. 91, pp.265-278, 2003