

1. はじめに

建築構造物に生じる振動減衰は、応答速度に比例する粘性減衰として表現されることが多い。しかし、弾塑性時刻歴応答解析で剛性が多数回急変する場合に、一般的な粘性減衰モデルが減衰を過大評価する懸念が指摘されている<sup>1)</sup>。福富ら<sup>2)</sup>は、主要な減衰モデルを整理し、Bilinear型およびMenegotto-Pinto型の履歴モデルを付与した多自由度の弾塑性応答への影響を比較し検討した。本研究は、福富ら<sup>2)</sup>が検討していない主要な履歴モデルを付与した場合に、減衰モデルの差異が弾塑性応答に与える影響を比較し検討した。

2. 解析方法

表1に、福富ら<sup>2)</sup>が整理した、主要な減衰モデルを示す。ここで、 $\{\phi_i\}$ は*i*次の固有ベクトル、 $\omega_i$ は*i*次の固有振動数、 $M_i = \{\phi_i\}^T [m] \{\phi_i\}$ は*i*次の広義質量、 $\zeta_i$ は*i*次モードに対する目標減衰比、 $a_i$ は $\omega_k$ と $\zeta_k$ によって決まる係数である。上添字『\*』は、弾塑性状態に応じて、その値を逐次更新することを意味する。表1の減衰モデルは、弾性領域では例外なく比例減衰であるが、塑性領域で非比例減衰となるモデルがある。係数を逐次更新することで、モデル4と7、13は、弾塑性状態に関わらず常時等価減衰比 $\zeta_{eq}$ を保持する比例減衰である。モデル13は、系の弾塑性状態によらず等価減衰比を目標値に保持する唯一のモデルで、減衰比に振動依存性がない仮定に対する正解と考えられる。

履歴モデルとして、Bilinear型、Flag型、Slip型、柴田・若林モデルの4種類を用いた(図1参照)。福富ら<sup>2)</sup>と同じ5自由度系に、全層Bilinear型を付与したラーメン構造、一層のみFlag型で他層Bilinear型のロッキング構造、全層Slip型の引張ブレース構造、全層柴田・若林モデルの片流れブレース構造を構成した。ラーメン構造は、設計用一次固有周期を0.63

sとしたAi分布とベースシア係数0.3に基づいた層せん断力で、ほぼ層変形角0.0075radで降伏するように各層の剛性を定め、弾性剛性に対する2次剛性の比(剛性比)を0.01とした<sup>2)</sup>。Flag型とSlip型の履歴は、初期弾性剛性と外側の骨格曲線をBilinear型と同一にして、内側の骨格曲線の剛性比をFlag型で0.01、Slip型で0.001、エネルギー吸収性能係数をFlag型で0.1、Slip型で0とした。柴田・若林モデル<sup>3)</sup>は、初期剛性と降伏変位、降伏耐力、2次剛性比をBilinear型と同一に、圧縮座屈荷重を $R_C/R_y = 0.715$ (内部パラメータを $R_E/R_y = 4$ 、 $R_E$ はオイラー座屈荷重)とした。固有値解析に基づく1次固有周期は、1.14sであった。

入力地震動に1995年兵庫県南部地震のJMA神戸記録のNS成分を用い、数値積分に中央差分法を採用し、時間刻みを0.002sとした。初期状態に対する減衰モデルの設定は、履歴モデルに関わらず同一であった。目標減衰比を0.05とし、減衰モデル1から4では1次モード、モデル5から8と10では1と3次モード、モデル9、12と13では全5モード、モデル11では1、2と3次モードの減衰比を目標値に一致させた。

3. 解析結果

図2に、ロッキング構造、引張ブレース構造、片流れブレース構造について、減衰モデル8を採用した場合の、3層の復元力・減衰力と層変形角の関係を示す。減衰モデル8は、弾塑性状態において質量項の影響を抑え、結果として特に低次モードの等価減衰比を目標値以下に抑えることが知られている<sup>2)</sup>。応答が大きかった半または一サイクル分だけを太線で示し、その途中の特定の時刻点を、数字で示す。白丸は、抽出開始点と抽出終了点、黒丸は、降伏や座屈、除荷など、剛性が急変する時刻点である。弾性領域から塑性領域に移行

表1 粘性減衰モデルの種類

No.	減衰行列	特性
1	$[c] = a_0 [m]$	比例
2	$[c] = a_1 [k]$	非比例
3	$[c] = a_1 [k^*]$	比例
4	$[c] = a_1^* [k^*]$	$\zeta_{eq}$ 保持
5	$[c] = a_0 [m] + a_1 [k]$	非比例
6	$[c] = a_0 [m] + a_1 [k^*]$	比例
7	$[c] = a_0^* [m] + a_1^* [k^*]$	$\zeta_{eq}$ 保持
8	$[c] = a_0 [m] [k]^{-1} [k^*] + a_1 [k^*]$	非比例
9	$[c] = [m] \sum_{i=0}^{N-1} a_i ([m]^{-1} [k])^i$	非比例
10	$[c] = a_{-1} [m] [k]^{-1} [m] + a_0 [m]$	非比例
11	$[c] = a_{-1} [m] [k]^{-1} [m] + a_0 [m] + a_1 [k^*]$	非比例
12	$[c] = [m] (\sum_{i=1}^N (2\zeta_i \omega_i / M_i) \{\phi_i\} \{\phi_i\}^T) [m]$	非比例
13	$[c] = [m] (\sum_{i=1}^N (2\zeta_i \omega_i^* / M_i^*) \{\phi_i^*\} \{\phi_i^*\}^T) [m]$	$\zeta_{eq}$ 保持

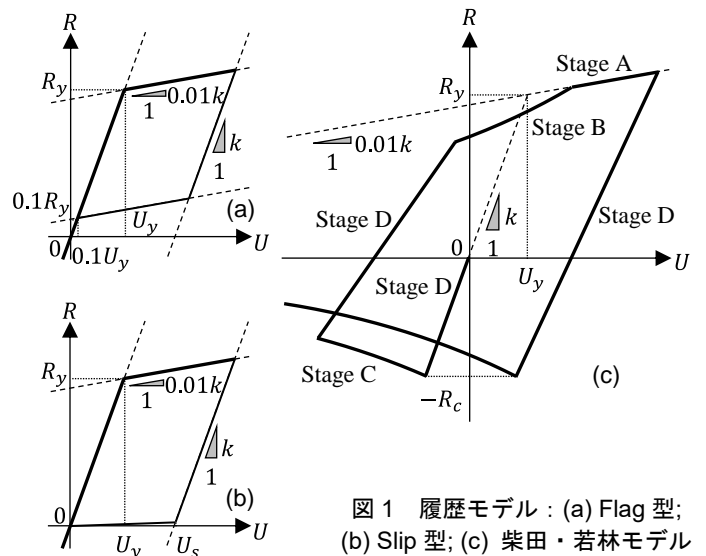


図1 履歴モデル：(a) Flag型；(b) Slip型；(c) 柴田・若林モデル

した瞬間、減衰力が急減する挙動が、どの構造にも現れた。3層目の減衰力が、その層だけでなく、上下層の弾塑性状態に依存した。例えば、引張ブレース構造では、復元力が零の②から③、剛性が零の④から⑤の間でも、減衰力が一時的に零でない時間があった。片流れブレース構造では、座屈後、剛性が負になった③から④の間で、減衰力が復元力と逆方向に作用することを確認した。

#### 4. 考察

図3に、ラーメン構造とロッキング構造、引張ブレース構造について、減衰エネルギーの75%が消費された時間にわたって平均した等価減衰比  $\bar{\zeta}_{eq}$  と、減衰消費エネルギー  $E_D$  の関係を示す。 $\bar{\zeta}_{eq}$  と  $E_D$  には、減衰モデル4を例外として強い相関がみられ、減衰モデル4も含めた相関係数がラーメン構造で0.69、ロッキング構造で0.49、引張ブレース構造で0.70と算定された。剛性比が小さくなる領域の占める割合が高い引張

ブレース構造では、大半の減衰モデルの  $\bar{\zeta}_{eq}$  が目標値 0.05 を大きく超えた。

モデル13以外に、いずれも常時比例減衰のモデル3、7と8が、4種の構造で  $\bar{\zeta}_{eq}$  を 0.05 近くに保持した。レイリー減衰に連なるモデル1から7に注目すると、更新されないモデル1、2、5では、 $\bar{\zeta}_{eq}$  が 0.05 を大きく超えだが、弾塑性状態に応じて更新されるモデル3、4、7では、 $\bar{\zeta}_{eq}$  が 0.05 近くに保持された。1次モードに対する減衰比のみを保持するモデル3と4でも、更新されないレイリー減衰モデル5、剛性のみ更新されるレイリー減衰モデル6より格段に良好な結果を得た。(注意：福富<sup>2)</sup>は、高次モードの寄与率が高い構造では、モデル3と4が減衰力を過大評価することを示している。)

次数  $i$  を自由度数 5 に一致させた Caughey モデル9とモード減衰モデル12でも、 $\bar{\zeta}_{eq}$  が 0.05 を大きく超えた。この例のように剛性が多数回増減する構造では、減衰モデルの次数を高くするだけでは不十分であることが示された。剛性の寄与率が低い項で構成されるモデル10と、モデル10を改良したモデル11でも、 $\bar{\zeta}_{eq}$  が 0.05 を大きく超えた。修正項  $a_1[k^*]$  によって、モデル11はモデル10より幾分か良好だが、特に引張ブレース構造に対して、モデル3、7、8に遥かに劣った。

図3には、片流れブレース構造の解析結果を示していない。剛性が負に転じた時刻点があり、その時刻点で固有振動数が虚数となるために、係数  $a_i$  の逐次更新を必要とするモデル4、7、13の減衰力も、 $\bar{\zeta}_{eq}$  も算定不可能になるためである。有望なモデル4、7、13を、剛性が負に転じる場合に対して拡張することが、今後の課題に挙げられる。

#### 5. まとめ

- 1) 剛性が多数回急変する構造において、目標減衰比を保持する減衰モデルは、3、7と8である。しかし、モデル3は高次モードへの対応に限界があり、モデル7は計算負荷が大きい。
- 2) 負剛性領域を持つ片流れブレース構造の解析において、モデル4、7、13を適用することが、今後の課題である。

#### 6. 参考文献

- 1) Charney, F. A.: Unintended consequences of modeling damping in structures. J. Struct. Eng., Vol.134, pp.581-592, 2008
- 2) 福富将ら: 粘性減衰モデルが弾塑性系の時刻歴応答解析に与える影響(その1): 減衰モデルの比較, 日本建築学会構造系論文集 第85巻 第778号, 1555-1563, 2020.12
- 3) 柴田道生, 若林實: 鉄骨筋違の履歴特性の定式化-その2 応答解析への適用-, 日本建築学会論文報告集 第320号, 29-35, 1982.10

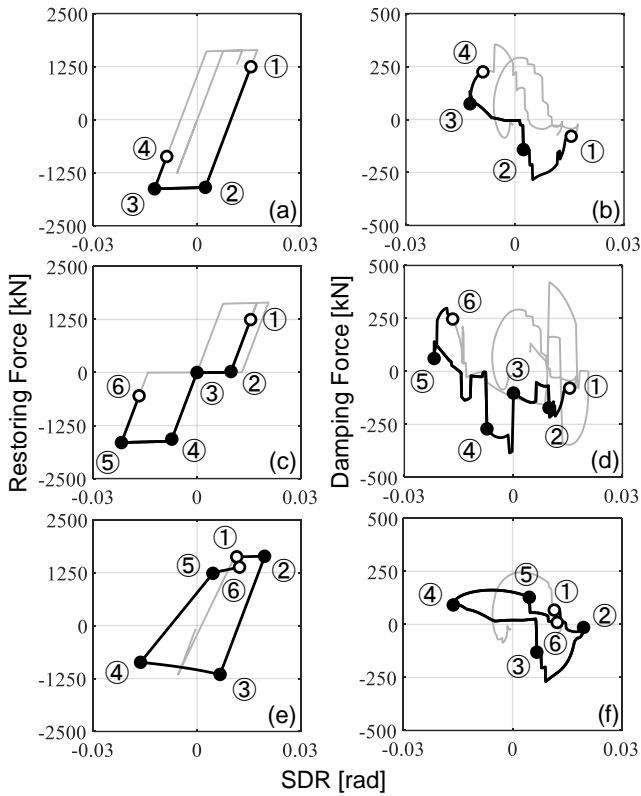


図2 復元力(左)と減衰力(右)の履歴: (a,b) ロッキング構造; (c,d) 引張ブレース構造; (e,f) 片流れブレース構造

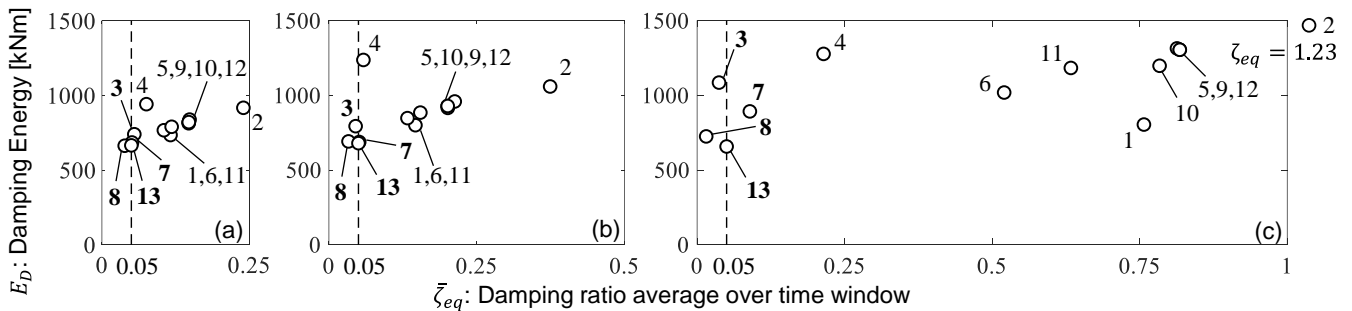


図3 各減衰モデルの  $\bar{\zeta}_{eq}$  と  $E_D$  の関係: (a) ラーメン構造; (b) ロッキング構造; (c) 引張ブレース構造