

1. はじめに

時刻歴応答解析で構造物の弾塑性挙動により剛性が多数回急変する場合、多用されている粘性減衰モデルで過大な減衰が生じる問題が提起されている<sup>1)</sup>。藤川ら<sup>2)</sup>は、5種の履歴モデルを用いて減衰モデルが時刻歴応答解析へ及ぼす影響を分析し、逐次固有値解析して振動数の変化によらず減衰比を目標値以下に抑える減衰モデルで応答解析する手法を提示した。しかし、Ikogbaら<sup>3)</sup>は、このような減衰モデルをブレース付架構の応答解析に採用した場合、座屈挙動に代表されるような部材の剛性が負となる時点で解析が停止し、減衰比を意図したとおりに設定できない不都合な例があることを確認している。本論では、汎用解析プログラムOpenSeesに、逐次固有値解析を伴う減衰モデルを新たに実装し、減衰モデルがブレース付架構の応答に及ぼす影響を検証したので報告する。

2. 減衰モデルの実装

表1に、文献2)で採用した、弾性領域で比例減衰となるモデルの一覧を示す。なお、上添字『\*』は弾塑性状態に応じた値の逐次更新を意味しており、弾塑性状態においても指定したモードの減衰比を目標値に保持する減衰モデル7<sup>1)</sup>や13が理想的とされる。図1に、OpenSeesの応答解析において、実装した減衰モデルに関連するアルゴリズムをフローチャートで示す。solveCurrentStepにおいて、各時刻ステップにおける係数  $a_0$  と  $a_1$  を読み込み、減衰行列を構成している。本論では、solveCurrentStepの前に瞬間剛性行列 $[k^*]$ を用いた固有値解析を実行し、各ステップにおける減衰係数  $a_0^*$  と  $a_1^*$  を算定するアルゴリズムを新たに追記することで、減衰モデル4と7の実装を実現した。ただし、藤川ら<sup>2)</sup>の手法と比較して、減衰係数の更新に1ステップの遅延が生じる点に留意されたい。なお、陰解法であるNewmark- $\beta$ 法では、減衰係数は各時刻ステップ

表1 減衰モデル

No.	減衰行列	実装
1	$[c] = a_0[m]$	実装済
2	$[c] = a_1[k]$	実装済
3	$[c] = a_1[k^*]$	実装済
4	$[c] = a_1^*[k^*]$	本論
5	$[c] = a_0[m] + a_1[k]$	実装済
6	$[c] = a_0[m] + a_1[k^*]$	実装済
7	$[c] = a_0^*[m] + a_1^*[k^*]$	本論
8	$[c] = a_0[m][k]^{-1}[k^*] + a_1[k^*]$	未実装
9	$[c] = [m] \sum_{i=0}^{N-1} a_i ([m]^{-1}[k])^i$	未実装
10	$[c] = a_{-1}[m][k]^{-1}[m] + a_0[m]$	未実装
11	$[c] = a_{-1}[m][k]^{-1}[m] + a_0[m] + a_1[k^*]$	未実装
12	$[c] = [m] (\sum_{i=1}^N 2\zeta_i \omega_i / M_i) \{\Phi_i\} \{\Phi_i\}^T [m]$	実装済
13	$[c] = [m] (\sum_{i=1}^N 2\zeta_i \omega_i^* / M_i^*) \{\Phi_i^*\} \{\Phi_i^*\}^T [m]$	未実装

の開始時のみに更新し、陰解法の収束計算では維持した。

文献2)で採用した5自由度せん断ばねモデルをOpenSeesで構築し、同様の数値積分法で応答解析することで、実装したアルゴリズムを検証した。図2に、代表的な応答として、本論で算定した各減衰モデルを用いた場合における第5層の最大層変形角を、文献2)の値と併せて示す。OpenSeesでの減衰モデル4と7の最大層変形角は文献2)の値と良好に一致しており、実装したアルゴリズムの妥当性が確認された。

3. 座屈挙動を伴うブレースへの適用

本章では、減衰モデル4と7を新たに実装したOpenSeesを用いて、加力されたブレースの剛性が負となる時点で解析不能となる要因について検討する。

3.1 解析モデル

図3に、解析対象とした細長比88.3に相当する部材長3,000mmで $\phi$ -101.6 $\times$ 5.7の円形鋼管ブレースを示す。部材中央に中間節点を設け2つのファイバー要素でブレースを構成した。ファイバー要素は、軸方向に設けた5つの積分点で、断面を周方向に16分割、厚さ方向に3分割した。各ファイバーの材料特性には移動硬化則によるバイリニア型を採用し、降伏強度を258.5 N/mm<sup>2</sup>とし、降伏後の接線係数を弾性係数の1%と

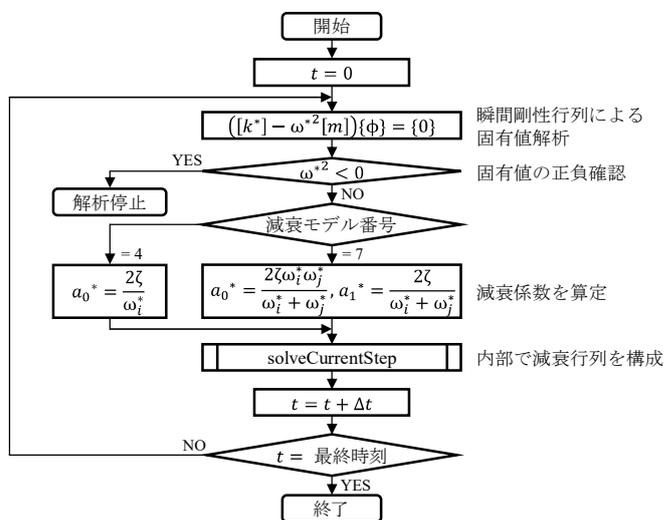


図1 実装アルゴリズム

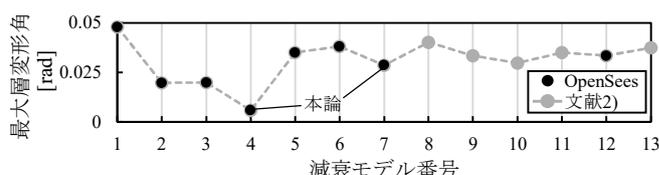


図2 第5層の最大層変形角の比較

50%、60%の3種を選定した。幾何剛性と共回転変形<sup>4)</sup>を考慮した。中間節点でY方向に、部材長の1/1000倍の初期不整を与えた。境界条件は、部材左端をピン支持とし、右端をX方向の並進移動のみ許容するローラー支持とした。材料の密度を7.85 t/m<sup>3</sup>として全長の半分に相当する質量を中間節点に、部材右端に50 tの集中質量を付与した。減衰モデルは6または7とし、1次と2次の目標減衰比を3%とした。数値積分法には平均加速度法を用い、時間刻みは0.001 sとした。入力地震動にはJR鷹取EW成分を用い、X軸方向に一様加振した。

### 3.2 解析結果

図4に、降伏後の接線係数を弾性係数の1%と設定した場合における要素1の軸力-軸変形関係の履歴を示す。減衰モデル6については、減衰モデル7の解析停止時刻から0.020秒経過した時点までの挙動を示している。減衰モデル6を採用した場合、ブレースの座屈後における圧縮耐力の劣化域まで追跡できた。減衰モデル7を採用した場合、ファイバー要素が降伏し始めた時点で解析停止となった。

図5に、減衰モデル7を採用し、降伏後の接線係数を弾性係数の50%と60%と設定した場合における要素1の軸力-軸変形関係を示す。接線係数を弾性係数の50%とした場合、断面の塑性化によりブレースの剛性が徐々に劣化し始めた時点で解析は停止したが、60%と設定した場合、座屈により圧縮側の耐力が劣化し始めた後も解析は継続した。

### 4. 考察

図6に、減衰モデル7を採用し、接線係数を弾性係数の1%と、50%、60%とそれぞれ設定した場合におけるブレースの復元力と1次モードの固有値の時刻歴を示す。接線係数を弾性係数の1%と50%とした場合では、黒破線の時点で固有値が正から負に転じたため、解析が停止した。一方、60%とした場合においては、正の固有値を保持し続けたため、地震動入力の終

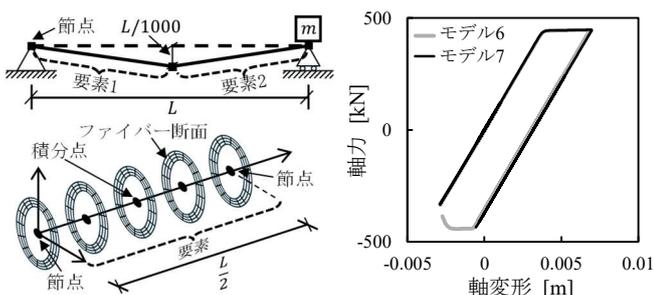


図3 解析モデル

図4 要素1の履歴

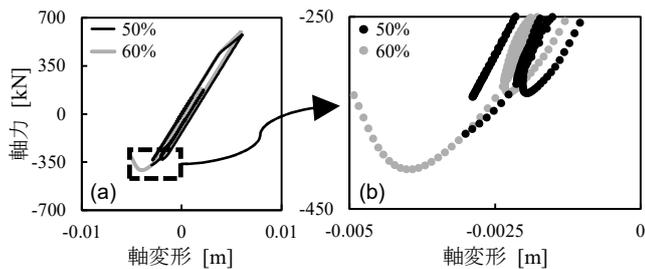


図5 減衰モデル7を採用した場合の要素1の履歴

(a)全体履歴; (b)拡大

了時点まで解析が継続したことが確認された。

以上の検討より、逐次固有値解析を伴う減衰モデルで解析停止とならないための条件は、バイリニア型での接線係数の急変や、部材の塑性化ではないということが突き止められた。これは、部材の剛性が負になる時点で解析は停止するという文献3)の結論と符合しない。減衰モデル7で、ブレース付架構のように負剛性を伴う構造の時刻歴応答解析を遂行するためには、ブレースの座屈後においても固有値が負とならないような構造要素と材料の構成則が必要となる。文献2)で、種々の構造モデルにおいて減衰比を目標値以下に留められる減衰モデル8が推奨されているが、OpenSeesを含むどのソフトウェアでも未実装である。減衰モデル6でブレースの座屈挙動を捉えつつ解析を実行できたため、理論上可能となる減衰モデル8のOpenSeesへの実装を今後検討する。

### 5. まとめ

本報では、意図しない減衰力を抑制するため逐次固有値解析を伴い減衰係数を定義する減衰モデルを、汎用解析プログラムOpenSeesに実装した。この減衰モデルを、部材の剛性が負となる座屈挙動を伴うブレースに適用し、時刻歴応答解析の可否について分析した。まとめを以下に示す。

- 1) 逐次固有値解析を伴う減衰モデル4と7を適用したせん断ばねモデルでの検討により、適切に減衰モデルを実装したことを確認した。
- 2) 逐次固有値解析を伴う減衰モデルを採用した構造モデルで、時刻歴応答解析が不能となるのは、剛性の急変または部材の塑性化ではないことを突き止めた。

### 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) Fujikawa, Y. et al.: Influence of hysteretic models on viscous damping in nonlinear response history analysis of buildings, IABSE Symposium 2025, 2025.05
- 3) Ikogba, K. et al.: Effect of Damping Models on the Nonlinear Time-History Response of Steel Braced Frames, 日本建築学会北海道支部研究報告集 第94巻, 55-58, 2021.06
- 4) Hajjar, J. F. and Denavit, M. D.: Description of geometric nonlinearity for beam column analysis in OpenSEES, Report No. NEU-CEE-2013-02, 2013.2

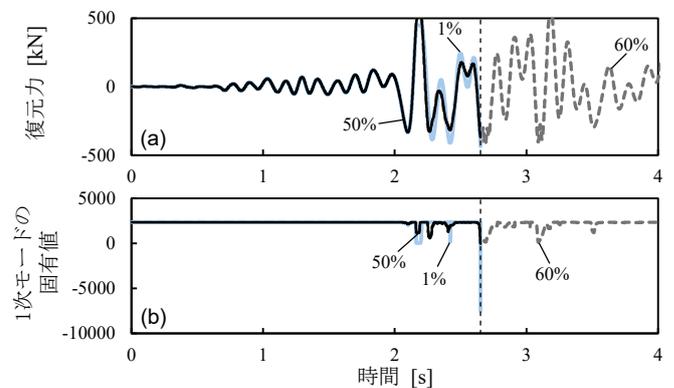


図6 減衰モデル7を採用した場合の時刻歴

(a)復元力応答; (b)1次モードの固有値