

復元力モデルと減衰モデルがブレース付架構の動的応答に与える影響

Effect of Hysteresis Model and Damping Model on the Dynamic Response of Steel Braced Frame

空間性能システム専攻 建築構造性能学研究室 渡井悠介

Abstract

Time-history response analysis was conducted to examine how the choice of hysteresis model and damping model affects the nonlinear behavior of steel braced frames. Hysteretic response of steel angle braces reported in the literature was extracted through digital image processing. A phenomenological hysteresis model was adjusted to represent steel angle braces that exhibit local-buckling induced degradation at the plastic hinges. This model was implemented in OpenSees to perform the time-history response analysis of a 2-story braced frame model. As a result, a suite of key dynamic response induced by unrealistic damping force is reported.

Keywords: Damping Model, Steel Brace

1. はじめに

文献 1)によると、建築構造物の減衰比は振動モードによらず、ほぼ一定である。塑性化すると構造物の剛性は低下するため、弾塑性状態に応じて減衰係数を更新しないと、過剰な減衰力を生じることが指摘されている²⁾³⁾。軸力と軸変形を変数とした現象論でブレースの復元力特性をモデル化すると、同モデルと比較して計算量が少ない利点がある。しかし、モデル化方法によらず、ブレースの座屈に伴って軸剛性が負に転じ、正定値でない剛性行列を生じ、非現実的な応答を計算する可能性があり、数値計算上の課題がある。

本研究では、鋼材ブレースの現象論モデルである柴田-若林モデル(SWモデル)⁴⁾⁵⁾を、動的応答解析に適用し、あるべき減衰モデルと組み合わせるための課題を検証した。

2. ブレースに関する実験データの収集

ブレース付架構の動的応答の分析には、ブレースの軸力-軸変形関係を模擬する必要がある。例として山形鋼ブレースを対象とし、学術資料からブレースの軸力-軸変形関係を定量的に把握することを試みた。7件の文献より、細長比 $\lambda=24\sim 52$ の計17体を対象とした。

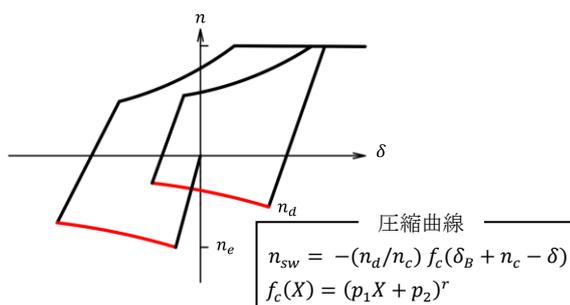


図1 SWモデル⁵⁾

2.1 実験結果のデータ化手法

図2に示すように、画像より、軸力-軸変形の履歴に適合する点 P_i (i …データ数)を、画素のRGB値で自動検索した。点 P_i の軸力と軸変形を座標軸との相対距離から算定した。点 P_i を時系列で並び替えるために目標点 G_k を手動で設定した。目標点 G_k と G_{k+1} を結ぶ線分と履歴の誤差は降伏強度に対して7%に収めた。時系列に応じて点 P_i を並び替えた点を点 F_j とした。目標点 G_{k-1} と G_k の間で、式(1)のscoreが最大となる点 P_i を、点 F_j の次の点 F_{j+1} とした。

$$score_i = \cos \theta_i / |\overline{F_j P_i}| \quad (1)$$

任意の点 P_i の中で点 F_{j+1} は F_j と相対的に距離が小さく、 $|\overline{F_j P_i}|$ の組み合わせにおいて、 $\overline{F_j F_{j+1}}$ は $\overline{F_j G_k}$ と比較的近い方向になる。抽出したデータの圧縮側最大耐力は、実験結果と4%以内で整合した。

2.2 山形鋼ブレースへの柴田若林モデルの適用

本研究で対象とした山形鋼ブレースは、全ての試験体で全体座屈を生じると同時に局部座屈を生じた。SW-M3_model⁵⁾は局部座屈による劣化を想定していないため、修正を試みた。SW-M3_modelの圧縮側曲線は式(2)、(3)で表される。

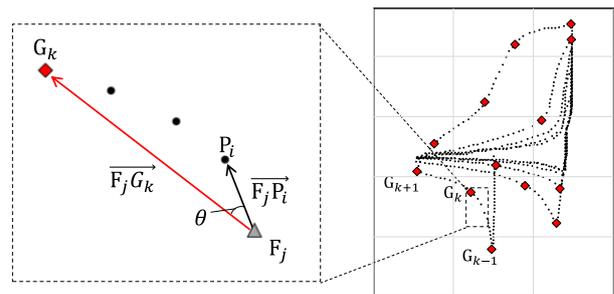


図2 目標点間の検索

$$n_{i,sw} = -(n_d/n_c) f_c(\delta_B + n_c - \delta) \quad (2)$$

$$f_c(X) = (p_1 X + p_2)^r \quad (3)$$

ただし、 n_d は劣化後圧縮耐力である。式(3)の係数 p_1, p_2, r を修正し、山形鋼ブレースの局部屈曲に応じて係数を修正したモデル SW-M6_model を検討した。2 サイクル目の圧縮側曲線で、実験値と SW-M6_model との誤差の 2 乗和 Δ_j を、各試験体で算定した。図 3 に、各試験体で最小の Δ_j となる係数 r の値を丸いマーカーで示す。ただし、 β は幅厚比である。係数 r は β と相関がみられ、式(4)の通り定義した。 $8 \leq \beta \leq 17$ とした。

$$r = -0.267 \times \sqrt{\beta} \quad (4)$$

図 4 に、 r を式(4)として、各試験体で最小の Δ_j となる係数 p_1, p_2 の値を丸いマーカーで示す。係数 p_1, p_2 は $\lambda\beta$ と相関がみられ、式(5),(6)の通り定義した。 $8 \leq \beta \leq 17, 200 \leq \lambda \leq 800$ とした。

$$p_1 = 6.84 \times 10^{-4} \times \lambda\beta \quad (5)$$

$$p_2 = 6.91 \times 10^{-6} \times (\lambda\beta)^2 \quad (6)$$

2 サイクル目の圧縮曲線によるエネルギー吸収量について、SW-M3_Model は実験値に対して各試験体の誤差が平均 62%であり、SW-M6_Model は平均 42%だった。

3. ブレース付架構

円形鋼管ブレースを採用したブレース付架構の地震応答に、復元力モデルと減衰モデルが及ぼす影響を検証した。

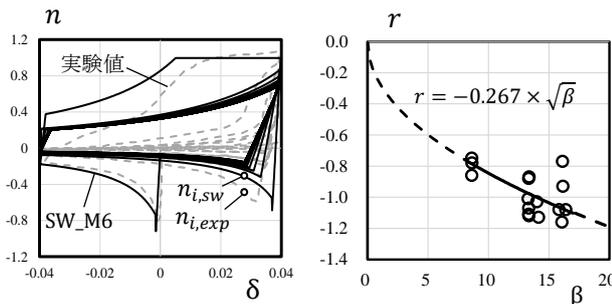


図 2 変数 p_1, p_2 決定

図 3 β と r の関係

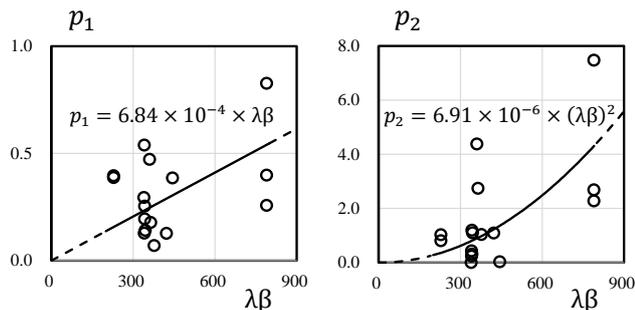


図 4 p_1, p_2 と $\lambda\beta$ の関係

3.1 解析モデル

図 5 に示すように、2 層のブレース付架構を対象に解析モデルを構築した。柱脚、ブレース接合部、柱梁接合部はピン接合とした。ブレースのみが塑性化する想定で、柱断面に H-310×107×11×17、梁断面に □-127×76.2×4.8、ブレース断面に ○-100×0.65(1F), 100×0.4(2F)を採用した。柱梁接合部、ブレース接合部を剛体で模擬した。柱や梁は弾性要素とし、ブレースのみ弾塑性要素とした。解析パラメータは、ブレースに採用した履歴モデルと、減衰モデルとした。ブレースの軸力-軸変形関係を、Force-based fiber モデルで模擬した Model F、または SW-M3 モデルで模擬した Model T, Model TC を設定した。Model F では、ブレースの座屈挙動を模擬するため、材中央で材長の 1000 分の 1 にあたる変位を材軸の垂直方向に初期不整を設け、円形鋼管の断面を厚さ方向に 3 つ、周方向に 15 つに分割した。SW-M3 モデルの負剛性となる状態で、接線剛性を初期剛性の 0.01 倍として減衰係数を設定した Model TC を設けた。減衰モデルには、表 1 に示す 7 種のモデルを採用し、目標減衰比を 0.05 とした。上添字『*』は、弾塑性状態に応じてその係数または行列を逐次更新することを意味する。Model F のブレースの弾塑性復元力特性を、Menegotto-Pinto モデルでモデル化し、2 次剛性を初期剛性の 0.01 倍とした。入力地震波には、加速度を 2.5 倍した El Centro を用いた。時間積分の時間区分は 0.0005s とし、中央差分法を用いた。

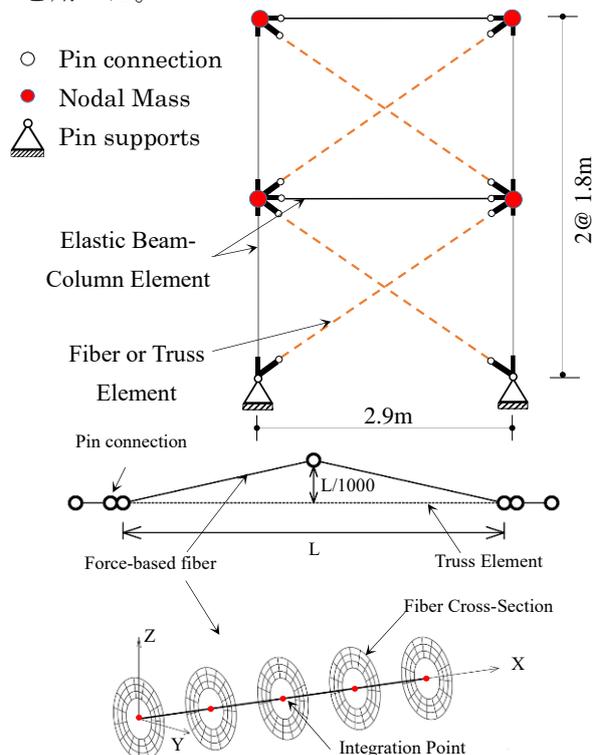


図 5 解析モデル形状

3.2 解析結果

図6に、Model F、Model T、Model TC で得られた最大層変形角を、減衰モデルごとに示す。Model T では、剛性が負となる場合に応答が計算できないため、減衰モデル4、6、7では応答が得られなかった。各モデルとも、減衰モデルによる最大層変形角の差異は0.004 rad 以内で、減衰モデル5の最大層変形角の35%以内であった。図7に示すように、各層の節点に作用する復元力と減衰力の水平成分の総和を取り、1層、2層の復元力 R_1 、 R_2 および減衰力 D_1 、 D_2 と定義した。図8に、ブレースをModel TCで、減衰モデルを2、3とした場合で、時刻1.5から2.5 s までの復元力 R_2 —層変形角関係と、減衰力 D_2 —層変形角関係を示す。図中の①は各ブレースの座屈と引張降伏、②は両ブレースの除荷開始、③は、片側ブレースの引張降伏によりブレースの剛性は初期剛性の0.01倍となり、④は片側ブレースの除荷開始で、①から④までの履歴を太実線で示す。減衰モデル3の復元力特性はモデル2とほぼ同等だが、塑性状態で低下した接線係数で減衰係数を定義したため、両ブレースが塑性化した①から②において減衰力がモデル2の0.01倍の値を示した。図9にブレースをModel Tで、減衰モデル3とした場合の減衰力 D_2

表1 使用する減衰モデル

番号	減衰モデル
1	$[c] = a_0 [m]$
2	$[c] = a_1 [k]$
3	$[c] = a_1 [k^*]$
4	$[c] = a_1^* [k^*]$
5	$[c] = a_0 [m] + a_1 [k]$
6	$[c] = a_0 [m] + a_1 [k^*]$
7	$[c] = a_0^* [m] + a_1^* [k^*]$

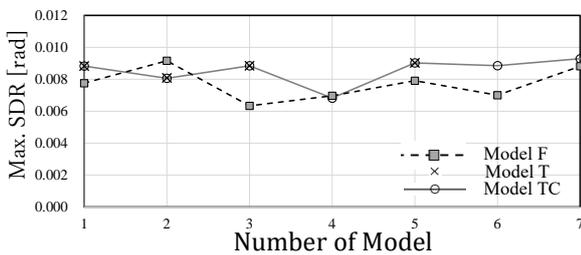


図6 2F 最大変形角

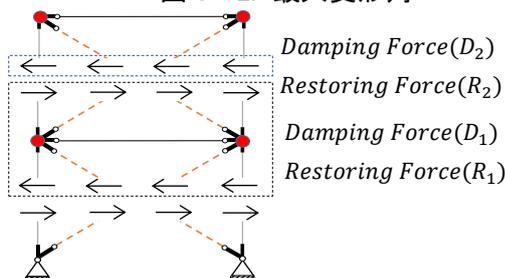


図7 力学モデル

一層変形角関係を示す。圧縮耐力の劣化域で接線剛性を負と見なして減衰力を算定したため、①の時点で速度と逆向きの減衰力が生じた。この逆向きの減衰力の大きさは1 kN と、同時点の復元力70 kN と比べて小さいため、架構の応答に及ぼす影響は限定的で、Model TC と大差ない層変形角が得られた。

各モデルの減衰特性を評価する指標として、式(7)の等価減衰比を用いた^{2),6)}。

$$\zeta_{i,eq} = \frac{\{\Phi_i^*\}^T [c] \{\Phi_i^*\}}{2 \cdot \omega_i^* \cdot \{\Phi_i^*\}^T [m] \{\Phi_i^*\}} \quad (7)$$

ここに、 $\zeta_{i,eq}$ は、 i 次モードの等価減衰比であり、 ω_i^* 、 Φ_i^* は塑性状態において逐次再計算される固有振動数、固有ベクトルである。

また、式(8)と(9)により、逐次の有効モード質量 m_i^* と、有効モード質量比 γ_i^* を定義する。

$$m_i^* = \beta_i^{*2} \cdot \{\Phi_i^*\}^T [m] \{\Phi_i^*\} \quad (8)$$

$$\gamma_i^* = \frac{m_i^*}{\sum_{i=1}^{NT} m_i^*} \quad (9)$$

γ_i^* を重みにとった、全モードの等価減衰比の加重平均を以下の式で定義できる。以下では、 ζ_{eq} を減衰比の代表値とする。また、自由度は6とした。

$$\zeta_{eq} = \sum_{i=1}^{NT} \zeta_{i,eq} \cdot \gamma_i^* \quad (10)$$

図10に、ブレースにModel TC、減衰にモデル5を採用した場合の γ_i^* 、 $\zeta_{i,eq}$ 、 ζ_{eq} の時刻歴を示す。①から④は、図6に示した時刻と同時点である。

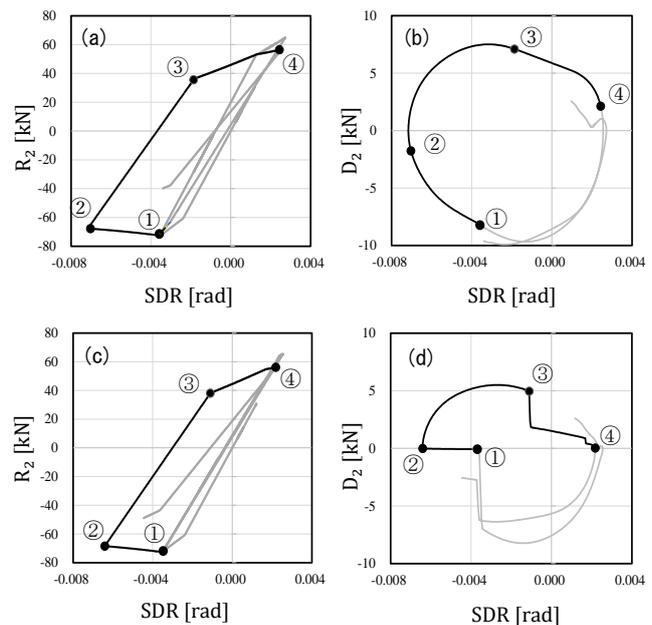


図8 Model TC-復元力・減衰力(2F) 応答
(a, b) Model 12; (c, d) Model 13

弾性範囲では、 ζ_{eq} のうち1次モード、2次モードで占める割合が90%、10%であり、①から④の範囲でも割合に変化は見られず、他の減衰モデルでも同様の傾向が見られた。図11に各減衰モデルの ζ_{eq} の推移を示す。モデル7の ζ_{eq} が、全時刻を通して、設定した減衰比0.05に最も近い値を示した。モデル4は、 ζ_{eq} の最大値0.34で示されるように、より大きな減衰力を生じたことが原因で、最大層変形角がモデル7の8割程度と計算されたと考えられる。減衰モデルの設定によりブレース付架構の変位応答に3割の差異が生じたことから、構造形式に応じて適切な減衰モデルを選択することが重要であることを再確認した。

4. まとめ

ブレースの軸力-軸変形関係を模擬するため、山形鋼ブレースを対象とし、文献から軸力-軸変形関係を把握することを試みた。また、2層のブレース付架構の解析モデルを対象とし、復元力モデル・減衰モデルによる弾塑性応答を比較検証した。総括を以下に述べる。

- 1) 細長比が24から52の範囲に相当する山形鋼ブレースの軸力-軸変形関係を、文献資料から定量的に抽出する手法を示した。
- 2) 現象論モデルを用いて、山形鋼ブレースの座屈による耐力劣化の特徴を捉えた復元力特性の係数を同定した。
- 3) 現象論モデルでブレースの圧縮耐力が劣化する範囲で、見かけ上の負の剛性を用いた場合の架構の応答は、弾性剛性の1/100倍に置換した場合の応答とほぼ同等となることを確認した。

なお、分析した解析モデルの数は限定的で、ブレースの剛性が負となる領域における、地震応答については、構造物の高さや構成などを変化させ、より広範に検証する必要があると考えられ、今後も課題とする。

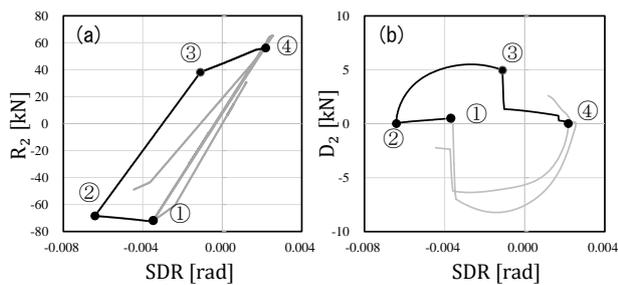


図9 Model1-復元力・減衰力(2F)応答
(a, b) Model3

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築の減衰,2000
- 2) Chamey, FA: Unintended Consequences of Modeling Damping in Structures, J. Struct. Engrg., ASCE, 134, pp.581-592,2008
- 3) Ikogba KELVIN: Effect of Damping Models on the Nonlinear Time-History Response of Steel Braced Frames, 北海道大学大学院修士論文2021.03
- 4) 柴田道生,若林實:鉄骨筋違の履歴特性の定式化-その1 定式化関数の誘導-,日本建築学会論文報告集, No.316, pp.18-23, 1982.6
- 5) 竹内 徹,中村 悠,松井 良太,小河 利行,今村 晃:部材破断を考慮した鋼管トラス鉄塔の耐震性能,日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.669, pp.1971-1980, 2011.11
- 6) 柴田明徳:最新耐震構造解析(第3版),森北出版2014

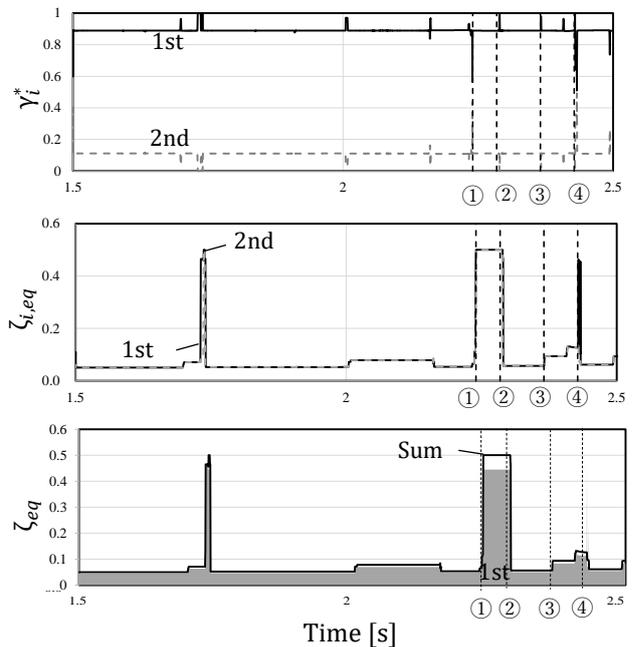


図10 有効モード質量比・等価減衰比の推移

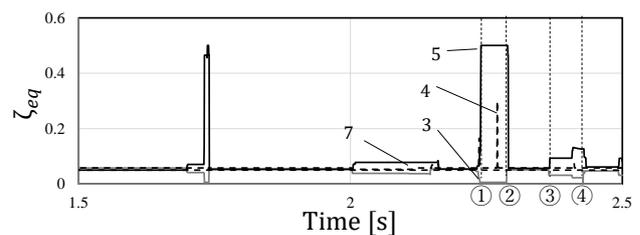


図11 各減衰モデルの等価減衰比の推移