

座屈拘束ブレースとオイルダンパーを併用する鋼構造骨組の構造最適化と性能順位付け

正会員 ○横山 晴紀*¹ 同 朝川 剛*²
同 山川 誠*³ 同 永野 康行*⁴

構造最適化 制振構造 座屈拘束ブレース
オイルダンパー 遺伝的アルゴリズム パラメトリックスタディ

1. はじめに

建物において制振機構を組み合わせる場合、構造最適化等を用いて骨組や制振機構の性能を最適化することで構造的に優れた設計案を得られる^{1), 2)}。

一方で、最適配置に際したコスト最適化の検討については田森らの研究³⁾や寺澤らの研究⁴⁾が行われている。

ただし、上記のコストを検討した研究はフレーム内で同一機構を交差配置した最適化設計であり、フレーム内に履歴減衰型と粘性減衰型の2種のブレースを併用配置した検討とそのコストの比較は行われていない。

本稿ではフレーム内異種ブレース混合配置の最適化問題についての基礎的研究として2層1スパンの2次元鋼構造骨組モデルを用いて座屈拘束ブレース (BRB: Buckling-Restrained Brace) 及びオイルダンパー (OD: Oil Damper) の組み合わせ配置を Case 分けし、各 Case で遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を使用して層間変形角と最大減衰量による構造最適化を行う。さらにその際の最大減衰量からコスト指標を設定し建物の性能とコスト指標から順位付けを行う。また、目標とする層間変形角ごとの場合分けからコスト指標による順位推移を考察する。

2. 解析条件

本研究では図1の Case1 に示すような2層1スパンの2次元鋼構造骨組モデルを対象に同図 Case2-Case6 のようにそれぞれ減衰機構を配置し比較検討を行う。

初めに建物の応答性能の最適化として告示波3波に対して Case2-Case6 の解析モデルの最大応答層間変形角 γ_{\max} が1/100以下となることを条件にダンパーの総減衰量を最小化し、その際のBRBの降伏耐力 D_r やODの最大減衰力 F_r を求める。

次にBRB (最大降伏耐力500kN) 1本分のコスト指標を1としたときOD (最大減衰500kN) 1本分のコスト指標が2.5であると仮定し、各 Case の建物全体での性能とコスト指標の比較を行う。

最後に条件の最大応答層間変形角を1/100から1/200まで1/10刻みで変化させた際のパラメトリックスタディを行い、最大応答層間変形角とコストの関係を考察する。

解析モデルは各層階高が4m、柱スパン8m、各層重量48tonを想定し、その際の主架構に使用する部材の性能は全層共通で柱材を角形鋼管 (□-250×250×16)、梁材をH形鋼 (H-400×200×9×22) とし、使用する鋼材はSN490Bとす

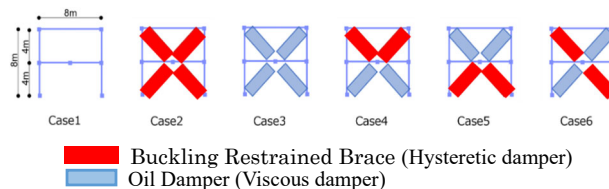


Fig 1. Models

Table 1. Status of BRB

Yield stress σ_y (N/mm ²)	Yield strength P_y (kN)	Sectional area A (cm ²)
225	$0 \leq P_{y,i} \leq 500$	$0 \leq A_i \leq 22$ ($i = 1, 2$)

Table 2. Status of OD

Maximum damping force F_{\max} (kN)	Maximum velocity V_{\max} (cm/s)	Relief force F_r (kN)	Relief velocity V_r (cm/s)
$0 \leq F_{\max,i} \leq 500$	30	$0 \leq F_{r,i} \leq 400$ ($i = 1, 2$)	2.1

る。BRBの芯材にはLY225を仮定する。また、本モデルは剛床とし梁の曲げ剛性を1.5倍して解析を行う。BRB及びODの材料特性を表1、表2に示す。BRBは芯材の断面積 A 、部材長 l 、ヤング係数 E 、降伏耐力 P_y 、降伏強度 f_y 、初期剛性 K_1 、第2次剛性 K_2 に対し、 $P_y = \sigma_y A$ 、 $K_1 = EA/l$ 、 $K_2 = 0.01K_1$ とする。またODはリリース速度 V_r 、リリース荷重 F_r 、1次減衰係数 C_1 、2次減衰係数 C_2 に対し、 $C_1 = F_r/V_r$ 、 $C_2 = 0.0192C_1$ とする。

時刻歴応答解析に用いる設計用地震動は建築省第1461号に従い1968年十勝沖地震の八戸港湾、1978年宮城県沖地震の東北大学、1995年兵庫県南部沖地震の神戸海洋気象台の位相特性を持つ告示波3波をPGV50cm/sec (極めて稀に発生する地震) 相当に基準化し、解析時間60sとして用いる。解析には有限要素解析ソフトウェアOpenSees⁵⁾を用いた。

本解析の構造最適化条件を以下式(1)に示す。

$$\begin{cases} \text{Find} & x = \{A | D_r_i \cup F_r_j\} \quad (0 \leq i, j \leq 2) \\ \text{That Minimize} & \sum (D_r_i + F_r_j) / \gamma_{\max} \\ \text{Subject to} & \gamma_{\max} < 1/100 \quad (\text{rad}) \end{cases} \quad (1)$$

最適化には数値解析ソフトウェアMATLAB⁶⁾を用い、遺伝的アルゴリズムによる最適化を行った。その際の個体群は20、最大世代数は2,500とした。

3. 解析結果

図2に各Caseの1層での層せん断力を示す。神戸波が支配的であることが見て取れるが、神戸波を除くとCase3, Case4, Case6は比較的小さな応答を示すのに対し、Case2, Case5は大きな応答を示す傾向にあり、1層にODを配置するのか、BRBにするかで応答に差がみられる。

図3に各Caseの1層での転倒モーメントを示す。Case2, Case5のように1層にBRBを配置する場合、建物1層の剛性が高くなるため、転倒モーメントが比較的大きくなるが1層にBRBを配置してもCase6のような配置では比較的小さく抑えられることが見て取れる。

図4に1層の転倒モーメントを1層の層せん断力で除した値を示す。最小値を比較するとCase1に次いでCase6が最小の値を示し、引き抜きへの高い性能を示している。

図5に層最大絶対加速度を示す。比較すると、Case3とCase4のモデルがより高い低減効果を示した。Case1とCase3の東北の地震波に対する応答値では約32%の低減がみられた。また、Case4のモデルもCase3がほぼ同程度の低減効果がみれることから、下層にODを配置していることによる免震効果が絶対加速度の制御に対して有効に働いていると考えられる。

表3に各Caseの応答値を順位付けしたものを示す。最も平均順位が高かったのはCase6となった。

最後に図6にCase2, Case3, Case6でターゲットとなる変形角を変えた際のコスト指標の推移を示す。制御機構を混合配置した場合コスト指標は一部を除きBRBのみより高くODのみより低いが、同一もしくは低いコスト指標で層間変形角に対する建物の性能が高くなる場合がある。

4. まとめ

本稿では2層1スパンの2次元鋼構造骨組モデルを用いてBRBとODを併用した際の構造最適化と性能順位付けを行った。以下に知見と課題を示す。

- (1). 最適化問題から得られた解より、BRBとODで検討する場合、異なる減衰機構を組み合わせることが有効であることを確認した。
- (2). 異なる減衰機構の組み合わせであるCase4, Case5, Case6の中でもCase6が示す応答値はその多くが応答値に優れる点から異なる減衰機構の2層間でのたすき掛けが優れた設計方法であると考えられる。
- (3). 減衰機構を組み合わせたモデルでは同じコスト指標で性能を上げられる場合がある。
- (4). 本研究では最適化の際に減衰量の変数を最大応答層間変形角で除したが実状は必要ないため除さない検討が課題である。

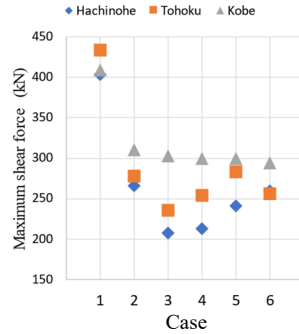


Fig 2. Maximum shear force

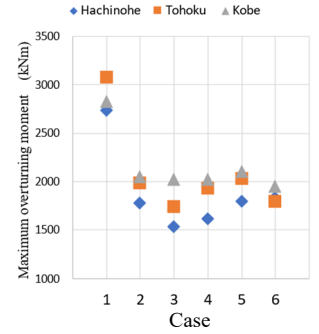


Fig 3. Maximum overturning moment

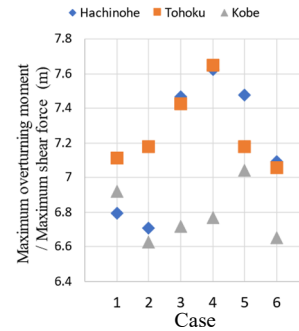


Fig 4. Maximum overturning moment per Maximum shear force

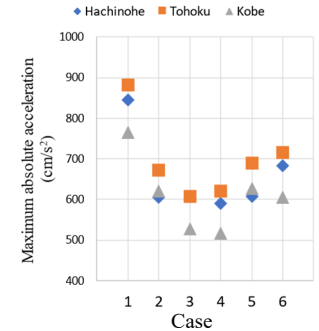


Fig 5. Maximum absolute acceleration

Table 3. Performance Rankings

	Story shear force	Overturning moment	Pull-out strength	Absolute acceleration	Cost indicator
Case1	6	6	2	6	—
Case2	5	4	3	3	1
Case3	4	3	4	1	5
Case4	3	2	6	2	4
Case5	2	5	5	4	2
Case6	1	1	1	5	3

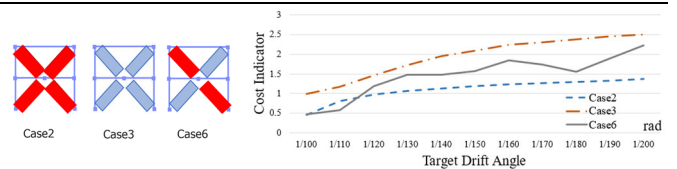


Fig 6. Trends in cost indicator by maximum drifts conditions

謝辞

本研究は元東京電機大学大学院未来科学研究科の榎本氏の修士課程学位論文の内容に加筆修正したものであり、本論作成にご協力いただいた榎本氏には深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 渡邊佳菜, 山川誠, 朝川剛: 変位制御型ブレースと制振機構を用いた鋼構造骨組の応答制御設計, 構造工学論文集, 66B, pp. 433-440, 2020.3
- 2) 大森博司, 石田高義, 小玉真一: 多目的最適化法による鋼構造物の構造設計支援手法の提案, 構造工学論文集, 56B, pp. 395-401, 2010.3
- 3) 田守伸一郎, 林善太郎: 遺伝的アルゴリズムによる免震装置の最適配置計画, 構造工学論文集, 49B, pp. 111-121, 2003.3
- 4) 寺澤友貴, 田中陽樹, 竹内 徹: ダンパーの導入費用対効果に着目した制振スリット付ブレースチューブ構造の最適地震応答制御, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 87, No. 801, pp. 1082-1092, 2022.11
- 5) PEERC: Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) v3.2.0. UCB, CA. Available at <http://opensees.berkeley.edu/>, 2016
- 6) The Math Works, Inc. : Optimization ToolBox 7.0 User's Guide, 2014

*1 東京電機大学大学院先端科学技術研究科博士課程 修士(工学)
 *2 東京電機大学未来科学部建築学科 准教授・修士(工学)
 *3 東京理科大学工学部建築学科 教授・博士(工学)
 *4 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 教授・博士(工学)

*1 Graduate School of Advanced Science and Technology, Tokyo Denki Univ., M.Eng.
 *2 Assoc. Prof., School of Sci. and Tec. for Future Life, Tokyo Denki Univ., M.Eng.
 *3 Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Science., D.Eng.
 *4 Prof., Grad. Sch. Dis. Res. and Gov., Univ. of Hyogo, D. Eng.