

初期剛性付与型変位制御ブレースの構造最適化による2次元鋼構造骨組モデルの応答制御

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 初期剛性 PC 鋼棒
制振構造 初期変位 皿ばね

1. はじめに

建築構造においてブレースに初期変位を与えることで想定を超えるレベルの地震動に対応することが考えられる。一例として、朝川らによる変位制御型 PC 鋼棒ブレース (DRB) ^[1] が提案された。また、渡邊らによる研究では DRB を使用した 2 次元鋼構造骨組モデルが解析され、想定を超える大地震時の応答制御効果が検証された^[2]。さらに、小早川の研究では DRB に皿ばねによる初期剛性を付与した初期剛性付与型変位制御ブレースが提案され、質点モデルでの時刻歴応答解析によりその挙動が確認された^[3]。しかし、これまでの研究では解析に使用された皿ばねの性能が限定的であり、骨組モデルを想定した構造最適化による検証についても行われていない。

本研究では 2 次元鋼構造骨組モデルに初期剛性付与型変位制御ブレースを組み込み、構造最適化を行う。その際建物の各層最大応答層間変形角とその変化量の平均値から建物の変形とその滑らかさを評価し骨組モデルでの初期剛性付与型変位制御ブレースの性能を検証する。さらに、最適化によって得られた値を基として、近似した値による設計の可能性を検証する。

2. 解析条件

本研究における初期剛性付与型変位制御ブレースのモデルには小早川による研究で提案されたものを使用する。DRB の端部に図 1 (b) に示すように皿ばねを挿入し、初期剛性を与える。図 1 (c) に初期剛性付与型変位制御ブレースの荷重-変形グラフでの履歴特性を示す。このとき、皿ばねによる初期剛性を与えるためのばね定数 K_d は PC 鋼棒の荷重-変形グラフ上での傾き K_b を用いて、

$$K_d = \alpha_i K_b \quad (0 \leq \alpha_i \leq 0.3) \quad (1)$$

によって与えられるものとする。また、各層ブレースの性能は渡邊らの研究で最適化された初期変位 u_0 (mm) と断面半径を持つ変位制御型ブレースを想定する。本研究では皿ばねによる初期剛性を決定する剛性比率係数 α_i と定め、第 i 層における最適な皿ばねの剛性比率 α は挿入する DRB の初期変位によらず独立した変数であるものとする。今回想定する K_d は部材性能を考慮し PC 鋼棒に対して 30% を上限とする。また本研究では、PC 鋼棒の塑性化後の破断までの耐力は安定的でない^[4]ものとしてブレースが塑性域に達していない範囲での解析を評価する。

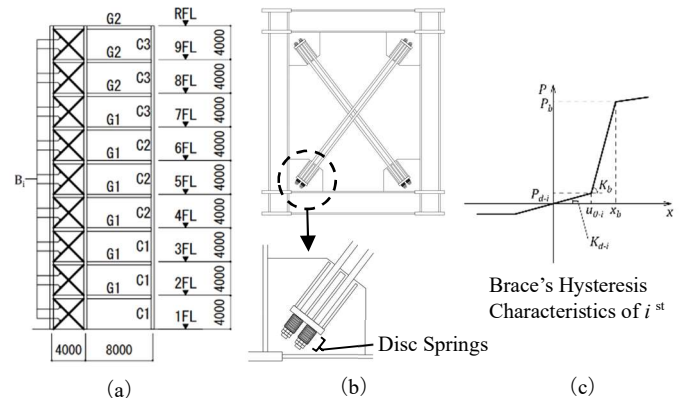


Fig.1 Models and hysteresis characteristics

本解析では図 1 (a) に示すような 9 層 2 スパンの鋼構造骨組モデルを用いて各層に初期剛性付与型変位制御ブレースを配置し時刻歴応答解析による応答制御設計を行う。DRB と本研究とで性能を比較するために骨組モデルには渡邊らの研究によって使用されたものと同じものを使用する。ブレースは 1 層から 9 層まで榫掛けで配置し、各層 1 組のブレースはそれぞれ同一の性能を持つものとする。

本解析ではブレースの初期剛性を決める α の値を前述の式 (1) の範囲内での変数とし、Case 1 においてブレースの性能最適化を行う。次に Case 2 において Case 1 で最適化された初期剛性を基に α_i の値を近似し時刻歴応答解析を行う。以下に Case 1 での最適化問題を示す。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Find} \\ \text{That Minimize} \\ \text{Subject to} \end{array} \right\} \begin{array}{l} x = \{\alpha_1, \dots, \alpha_i\} \\ \delta_{\max}(x; A_j^{\text{PGV50}}) \\ 0 \leq \alpha_i \leq 0.3 \end{array} \quad (2)$$

このとき x は求める各層ブレース初期剛性比率の集合、 j は第 j 設計用地震動、地震波 A_j^{PGV50} は告示波 (PGV50) からなる任意の波の集合体とし、 δ_{\max} は解析モデルの最大応答層間変形角とする。時刻歴応答解析には有限要素解析ソフトウェア Opensees ^[注] を用い、その際に変数として与える α_i を数値解析ソフトウェア MATLAB ^[注] によって最適化する。時刻歴応答解析には Lv.2 相当の告示波 3 波 (八戸, 東北, 神戸) を使用する。モデルには 120 秒間の振動を与え、1/1000 秒間隔で解析を行う。その際の減衰は 5% の初期剛性比例型とし、直接時間積分には Newmark β 法を用いる。最適化手法には直接探索法を用いて解析を行い、その際の初期値は複数のパターンを任意に与える。

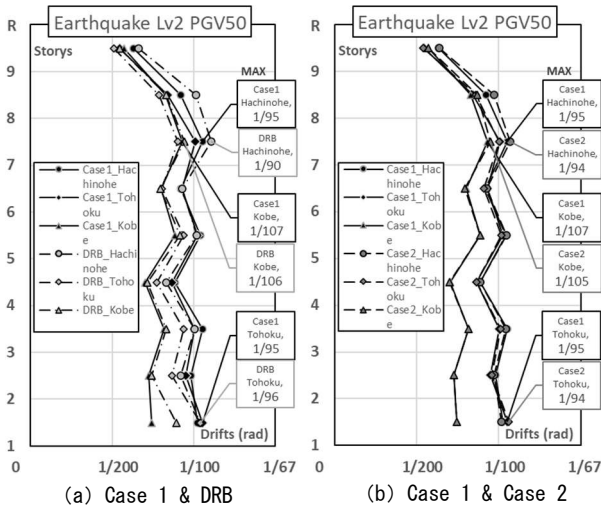


Fig.2 Maximum interstory drifts

3. 解析結果と考察

表1にはCase1におけるブレース性能の最適化によって得られた皿ばねの剛性割合 α_i を示す。4, 6, 9層において $\alpha = 0$ であり α_9 では最大値の30%となっている。その他の層では3%程度であった。このことから、全層に初期剛性の最大性能を与えるのではなく、構造最適化から建物全体の挙動に即して各層に初期剛性を付与することが効果的であることが示された。

図2(a)にCase1とDRBの各層最大応答層間変形角を比較したグラフを示す。Case1でLV2相当の八戸と神戸の地震波を与えた場合はDRBを使用した場合と比べ最大応答層間変形角が減少した。一方で、東北の地震波を与えた場合は最大応答層間変形角が増加した。Case1の最大応答層間変形角の値は3層で最大となり、DRBの最大値と比べて低い値であった。この結果から、皿ばねによる初期剛性を付与することで建物の性能は向上するが、その効果は地震波の位相に依存し位相によっては建物の最大応答層間変形角が増加してしまうことが示された。

次にCase1の最適化結果からCase2における α_i の値を4, 6, 9層で $\alpha = 0$, 8層で $\alpha = 30$, その他の層で $\alpha = 3$ と設定した。図1(b)にCase2とCase1の各層最大応答層間変形角を比較したグラフを示す。Case1が優位なものの、Case1とCase2の最大値の差は1%未満であった。このことから、最適化された初期剛性比率の値を基に近似した初期剛性比率を用いた設計においても建物性能に大きな変動はないことが示された。

図3に各層最大応答層間変形角の平均変化量と標準偏差を示す。このときの平均変化量は層*i*に対して地震波3波全てにおいてDRBと比べたときのCase1の最大応答層間変形角の平均変化量は少ない値をとっている。一方で標準偏差においてはCase1でDRBより少ない値をとったの

Table 1 Stiffness ratio of disc springs to PC steel bars.

α_i	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9
%	3.00	2.74	3.00	0	3.00	0	4.63	30.00	0

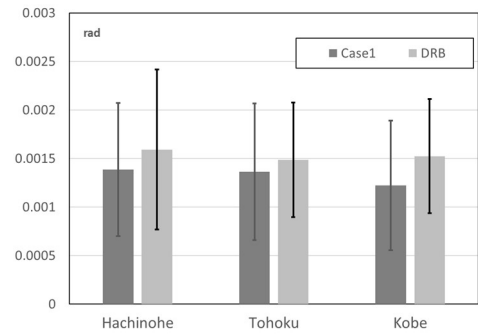


Fig.3 Average variation and standard deviation of maximum interstory drifts (Case 1 & DRB)

は八戸の地震波のみで東北と神戸の地震波では標準偏差の値は増加した。総合すると、各層最大応答層間変形角の変化量は皿ばねによる初期剛性を加えることでばらつきは出るものの全体的に減少することが示された。

4. 終わりに

本研究で次のような知見が得られた。

- 1) 皿ばねによる初期剛性を構造最適化によって付与することで建物の応答性能が向上する場合がある。
- 2) 初期剛性付与による効果は地震波の位相に依存し、位相によっては建物の最大応答層間変形角が増加する。
- 3) 各層最大応答層間変形角の変化量は初期剛性を付与した場合ばらつきは出るものの全体的に減少し、初期剛性の付与によって建物がより滑らかな変形をする。
- 4) 実務では最適化された初期剛性の値を基に近似した値を用いて設計することが可能である。

一方で、本研究では皿ばねの性能について実際の初期剛性付与型変位制御ブレースの挿入空間の確保を考慮せずにあくまで剛性比率によって初期剛性を決定した。しかし実際には所定の性能を発揮するための空間の確保が必要となるため、今後より実情に即すにはブレース特性の制約として挿入スペースを考慮した初期剛性の付与を行う必要がある。

参考文献

- [1] 朝川剛, 高嶋伸明, 山川誠, 田川浩: DRBを用いた鋼構造建物の応答制御設計, 鋼構造年次論文報告集第24巻, pp.874-881, 2016.11
 - [2] 渡邊佳菜, 山川誠, 朝川剛: 変位制御型ブレースと制御機構を用いた鋼構造骨組の応答制御設計, 日本建築学会構造工学論文集, 第66B号, pp.433-440, 2020.3
 - [3] 小早川裕太, 朝川剛, 深澤協三, 宮津裕次, 山川誠: 準静的載荷試験による変位制御型PC鋼棒ブレースの端部挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-III, pp.1035-1036, 2020.9
 - [4] 下瀬誠希, 朝川剛, 深澤協三, 小早川裕太, 宮津裕次, 山川誠: 変位制御型PC鋼棒ブレースの終局耐力載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.207-208, 2021.9
- 注: 本研究では以下のソフトウェアを使用した。
 ● PEER: Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees). UCB, CA. Available at <http://opensees.berkeley.edu/>, v3.3.0.
 ● MATLAB: The Math Works, Inc. <https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>, R2021a.

*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.