

## 鉄骨建物の柱脚および基礎梁設計における最適化技術の適用

西羅 康平 西 拓馬

Kohei Nishira, Takuma Nishi

### 概 要

本報は、鉄骨造建物の構造最適化技術について、柱脚と基礎梁を含む部材の最適化を行い、その結果を報告するものである。近年、汎用の多目的最適化ツールと一貫構造計算プログラムを組み合わせた技術への関心が高まっている。本研究では、設計変数として鉄骨部材、在来露出柱脚、RC 基礎梁の断面を選択し、目的関数として部材の合計金額と層間変形角を最小化する最適化問題を設定した。最適化計算には多目的最適化ツール modeFRONTIER と一貫構造計算ソフト SS7 を使用して 7000 回の計算を実施し、制約条件を満たした 1463 個の解を得た。パレート最適解の分析により、鉄骨金額が合計金額に最も大きな影響を与えることが確認されたほか、クラスタリング分析を通じて、部材選択の傾向と目的関数への影響を評価し、柱脚と基礎梁を設計変数に加えることでより経済的な設計が可能であることが示された。特に、鉄骨金額のみを最小化した場合と比較して、柱脚および基礎梁の変数を加えることで合計金額を削減できることを示した。

### Application of Optimization Methodology in Design of Column Bases and Foundation Beams for Steel Structures

#### Abstract

This report presents the application of structural optimization methodology for steel-framed buildings, focusing on expanding the design variables to include column bases and reinforced concrete (RC) foundation beams. In recent years, there has been increasing interest in methodologies that combine general-purpose multi-objective optimization tools with integrated structural calculation programs.

In this study, the cross sections of steel members, conventional exposed column bases, and RC foundation beam were selected as design variables, while the objective functions were set to minimize both total member cost and inter-story drift angle. For the optimization calculations, 7,000 simulations were performed using the multi-objective optimization tool modeFRONTIER in conjunction with the structural analysis software SS7, yielding 1,463 solutions that satisfied all constraints.

Analysis of the Pareto-optimal solutions revealed that steel cost had the most significant influence on total cost. Clustering analysis was employed to examine trends in member selection and their impact on the objective functions. The results demonstrate that more cost-effective designs can be achieved by including column bases and foundation beams as design variables. Specifically, the inclusion of these components led to a reduction in total cost compared to designs that considered only steel member costs.

キーワード：構造最適化，鉄骨造建物，多目的最適化，柱脚，基礎梁，クラスタリング分析

## 1. はじめに

近年、建築の構造設計分野において、汎用の多目的最適化ツールを構造設計に適用する技術への関心が高まっている<sup>1)</sup>。著者らは、これまで鉄骨造建物の柱・梁部材を対象に、多目的最適化ツールを用いてより経済的な柱部材、梁部材の選定を行うための検討を行ってきた<sup>2)~4)</sup>。本報では、最適化の対象を柱脚と基礎梁にも拡張し、より広い範囲においての部材最適化を行った結果を報告する。

## 2. 最適化問題

設計変数として鉄骨の柱部材、梁部材、露出柱脚、RC 基礎梁の断面  $\mathbf{x}$ 、目的関数を最適化対象部材の合計金額  $f_1(\mathbf{x})$  および建物の層間変形角  $f_2(\mathbf{x})$  とし、制約条件を制約条件群  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  とした多目的最小化問題を以下のように定式化する。

$$\text{Find } \mathbf{x} = \{C, G, cB, F\} \quad (1)$$

$$\text{Minimize } f_1(\mathbf{x}) = A_c(\mathbf{x}) + A_G(\mathbf{x}) + A_{cB}(\mathbf{x}) + A_F(\mathbf{x}) \quad (2)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \theta(\mathbf{x}) \quad (3)$$

$$\text{Subject to } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (4)$$

$\mathbf{x}$  は  $k$  層 (階)  $i$  番の柱、梁、柱脚、基礎梁の部材符号  $kC_i$ ,  $kG_i$ ,  $1cB_i$ ,  $1F_i$  に対して表 1 に示す部材から選択した断面番号で構成される変数ベクトルである。目的関数は柱、梁、柱脚、基礎梁の合計金額  $f_1(\mathbf{x})$  と層間変形角  $f_2(\mathbf{x})$  の 2 つであり、 $f_1(\mathbf{x})$  と  $f_2(\mathbf{x})$  を最小化する。 $f_1(\mathbf{x})$  は鉄骨柱のコスト  $A_c(\mathbf{x})$  と鉄骨大梁のコスト  $A_G(\mathbf{x})$ 、柱脚のコスト  $A_{cB}(\mathbf{x})$ 、基礎梁のコスト  $A_F(\mathbf{x})$  の合計である。 $f_2(\mathbf{x})$  は、構造計算結果から得られる各層の層間変形角の最大値  $\theta(\mathbf{x})$  である。制約条件は表 2 に示す構造計算結果および幾何的制約をもとに設定した制約条件群  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  である。

## 3. 検討モデルと解析条件

検討に用いた建物モデルの概観を図 1 に示す。建物は 8×3 スパンの S 造 2 階建ラーメン造である。構造計算はルート 3 とし、一次設計および二次設計を行う。建物形状、部材の配置、スパン、部材グループ、荷重条件などの各種設計条件は、設計者があらかじめ設定したものをを用いる。鉄骨大梁、柱、基礎梁の部材グルーピングは図 2 に示す通りとする。

変数とする柱は各階図 2(a) に青字で示す C1~C9 の 9 種 36 本であり、角形鋼管 (BCR295) のうち表 1(a) の断面から探索を行う。柱脚は表 1(c) のように

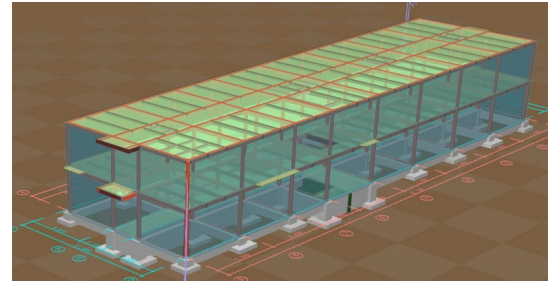


図 1 建物モデル

表 1 断面選択範囲

(a) 柱断面 ( $i=1\sim9$ )

| 符号     | 鋼種     | 最小          | 最大           | 候補数 |
|--------|--------|-------------|--------------|-----|
| $1C_i$ | BCR295 | □-175×175×9 | □-300×300×12 | 9   |
| $2C_i$ | BCR295 | □-150×150×6 | □-200×200×16 | 11  |

(b) 大梁断面 ( $i=1\sim5$ )

| 符号     | 鋼種    | 最小            | 最大             | 候補数 |
|--------|-------|---------------|----------------|-----|
| $1G_i$ | SS400 | H-248×124×5×8 | H-340×250×9×14 | 9   |
| $2G_i$ | SS400 | H-248×124×5×8 | H-340×250×9×14 | 12  |

(c) 柱脚断面 ( $i=1\sim9$ )

| 符号      | 鋼種     | 径        | 本数   | その他       | 候補数 |
|---------|--------|----------|------|-----------|-----|
| $1cB_i$ | ABR490 | M24, M27 | 4, 8 | $1C_i$ 断面 | 4   |

(d) 基礎梁断面 ( $i=1\sim7$ )

| 符号        | コンクリート |            | 主筋    |         |       | その他         | 候補数   |
|-----------|--------|------------|-------|---------|-------|-------------|-------|
|           | Fc     | 寸法         | 材料    | 径       | 本数    |             |       |
| ${}_1F_i$ | 21     | 符号ごと<br>変数 | SD345 | D19,D22 | 3～3/2 | 符号ごと<br>固定値 | 13～78 |

表 2 制約条件

(a) 構造計算結果の条件

|                   |              |                                      |
|-------------------|--------------|--------------------------------------|
| $g_1(\mathbf{x})$ | 柱検定比の最大値     | 1.00以下                               |
| $g_2(\mathbf{x})$ | 梁検定比の最大値     | 1.00以下 ※基礎梁含む                        |
| $g_3(\mathbf{x})$ | 梁たわみの最大値     | 1/300以下かつ20mm以下<br>RFLは1/100かつ25mm以下 |
| $g_4(\mathbf{x})$ | $Q_u/Q_{un}$ | 1.00以上                               |
| $g_5(\mathbf{x})$ | 層間変形角の最大値    | 1/190以下                              |
| $g_6(\mathbf{x})$ | ルート3適用の可否    | $g_4(\mathbf{x})$ 以外の判定○             |
| $g_7(\mathbf{x})$ | 基礎梁ヒンジ       | 増分解析で基礎梁にヒンジなし                       |

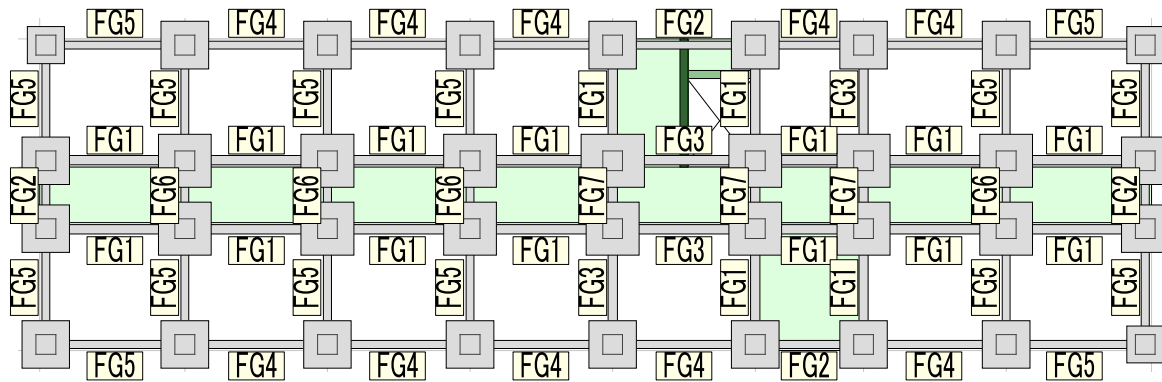
(b) 幾何的制約条件

|                      |     |                                        |
|----------------------|-----|----------------------------------------|
| $g_8(\mathbf{x})$    | 柱段差 | 上階柱径 ≤ 下階柱径<br>同径の場合、<br>上階柱板厚 ≤ 下階柱板厚 |
| $g_9(\mathbf{x})$    | 梁段差 | 30mm以上100mm未満の段差不可                     |
| $g_{10}(\mathbf{x})$ | 基礎梁 | 鉄筋の納まり                                 |

アンカーボルト径および本数を変数とする。アンカーボルトは ABR490 の M24 または M27、本数は 4 本または 8 本の計 4 通りから選択する。ベースプレートや基礎柱については、1 階の柱断面およびアンカーボルトの条件に応じ、構造設計者が各組合せに対して事前に指定した条件で定める。



(a) 柱、鉄骨梁グルーピング



(b) 基礎梁グルーピング

図2 部材グルーピング

鉄骨梁は2FL, RFLそれぞれについて、図2(a)に赤線および赤字で示すG1～G5の5種26本を変数とし、細幅、中幅（SS400）のうち表1(b)に示す断面から探索を行う。図2(a)の赤線ではなく、符号名称が記載されていない梁については、最適化において断面を変更せず、両端ピン接合とする。これは、今回柱脚断面を変数とすることを踏まえ、最適化の過程で層間変形角が制約条件 $g_5(x)$ を満たさない場合が生ずるように調整したものである。

基礎梁は図2(b)に示す7種59本とし、基礎梁のせい、幅、鉄筋径および鉄筋本数を変数とした。各入力変数は符号ごとに設計者が事前に設定した。その他断面を決定するための条件は、符号および変数となる条件ごとに設計者が個別に設定した。

目的関数は、合計金額 $f_1(x)$ の最小化と層間変形角 $f_2(x)$ の最小化の2つである。 $f_1(x)$ のうち、鉄骨柱のコスト $A_c(x)$ と鉄骨大梁のコスト $A_b(x)$ は鉄骨の材料金額である。材料金額の算定には、重量金額に加え、文献4)と同様、表3に示すように断面サイズおよび材質に対してエクストラ金額を考慮する。柱脚のコスト $A_{cb}(x)$ はベースプレートおよびアン

カーボルトの材料金額、柱型のコンクリート、鉄筋の材料金額、鉄筋加工費、型枠金額を考慮する。基礎梁のコスト $A_f(x)$ はコンクリート、鉄筋の材料金額、鉄筋加工費、型枠金額、掘削金額を考慮する。

制約条件群 $g_i(x)$ のうち $g_1(x)$ ,  $g_2(x)$ ,  $g_4(x)$ ,  $g_5(x)$ ,  $g_6(x)$ はルート3の設計条件である。なお、構造性能をわずかに満足しない解を小規模の修正によって満足させて採用することでより経済的な設計が可能となることを想定し、最適化実行時の層間変形角の制約条件 $g_5(x)$ のクライテリアを1/190としている。また、鉄骨梁のたわみ制限を $g_3(x)$ 、基礎梁にヒンジが生じないことを $g_7(x)$ で条件としている。表2(b)に幾何的制約条件の内容を示す。 $g_8(x)$ は上階柱が下階柱よりも大きくならないことを制約条件としている。 $g_9(x)$ はダイアフラムの施工性を考慮した

表3 エクストラ金額（一例）

|   | 断面              | エクストラ種別 | 金額    |
|---|-----------------|---------|-------|
| 柱 | □-400×400×16    | サイズ     | 8円/kg |
| 梁 | H-482×300×11×15 | サイズ     | 4円/kg |

ものであり、各柱に取りつく梁のせいを比較し、それぞれの差が 30mm~100mm でないことを制約条件としている。 $g_{10}(x)$ は、引張鉄筋比、あばら筋比の上下限を設定している。また、鉄筋と基礎梁幅をとともに変数としているため、鉄筋を基礎梁の幅に配置することが可能であることを制約条件としている。

最適化計算にはmodeFRONTIERとSS7を用いた。原設計のモデルの計算を含め、最適化計算を 7000 回行った。原設計断面は、詳細な構造計算を行う前に設計者が選定した部材断面のモデルである。なお、計算回数については、十分収束すると想定される回数として設定している。

#### 4. 計算結果およびパレート最適解の分析

計算回数 7000 回のうち、制約条件群  $g_f(x)$  全てを満足した解は 1463 個 (20.9%) であった。計算結果の合計金額  $f_1(x)$ —層間変形角  $f_2(x)$  関係を図 3 に示す。 $f_1(x)$ は原設計モデルの合計金額で除した値である。制約条件群  $g_f(x)$ のいずれかを満足しない解は白プロットで、 $g(x)$ を全て満足する解はその解の計算 ID をプロットの色で示し、原設計の計算結果を×プロットで示す。図 3 より、 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ ともに小さ

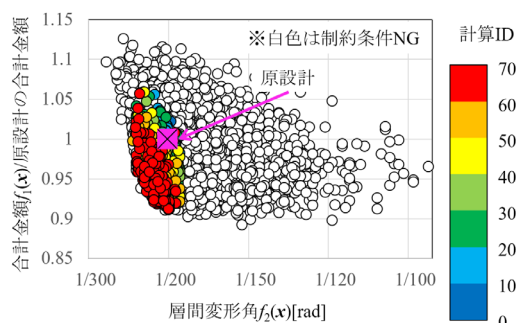


図 3 合計金額  $f_1(x)$ —層間変形角  $f_2(x)$  関係

くする方向に探索が行われ、計算終盤の赤色のプロットがパレートライン近傍に多く分布していることから、最適化計算は概ね収束していると考えられる。 $g(x)$ を満足する解は、層間変形角は 1/235~1/191, 合計金額は原設計比 0.91~1.06 の範囲に分布した。得られたパレート最適解は 14 個であった。

図 4 に層間変形角  $f_2(x)$ 、合計金額  $f_1(x)$ 、鉄骨金額  $A_c(x)+A_g(x)$ 、柱脚金額  $A_{cB}(x)$ 、基礎梁金額  $A_F(x)$  について、最適化計算結果の多次元解析チャートを示す。パレート解を黒線、パレート解ではないが鉄骨金額  $A_c(x)+A_g(x)$ が最小となる解を赤線で示す。各項目はそれぞれ原設計で除した値である。図 4 より、鉄骨金額  $A_c(x)+A_g(x)$ は原設計比 0.95~1.09 であり、合計金額  $f_1(x)$ と概ね線形関係にある。一方、柱脚金額  $A_{cB}(x)$ は原設計比 0.87~1.00 に広く分布しており、基礎梁金額  $A_F(x)$ は原設計比 0.85~0.89 の狭い範囲に収まっている。以上のことから、今回の最適化計算においては、原設計に比べて良好な解が探索できていること、層間変形角  $f_2(x)$ を目的関数としても基礎梁金額  $A_F(x)$ の変化幅は小さく、入力変数とした部材の中で鉄骨金額  $A_c(x)+A_g(x)$ が合計金額  $f_1(x)$ への影響が最も大きいことがわかる。

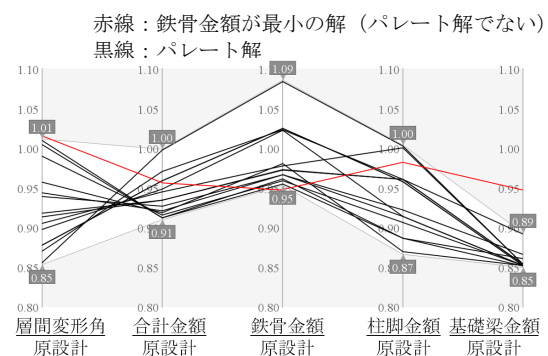


図 4 最適化計算結果の多次元解析チャート

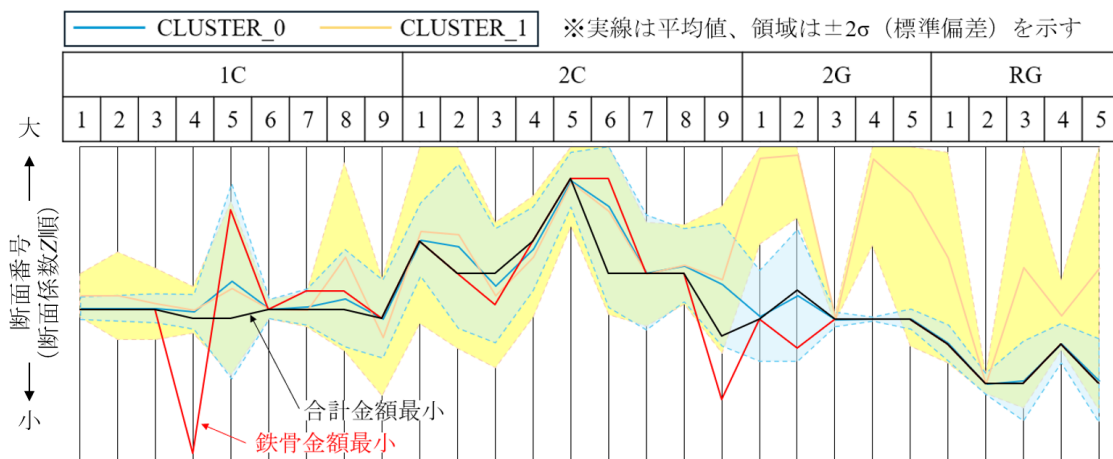


図 5 クラスタリング結果の多次元解析チャート

柱脚, 基礎梁を変数に加えたことの効果の検討のため, 図 5 に赤線で示す制約条件を満足する中で鉄骨金額  $A_c(\mathbf{x}) + A_g(\mathbf{x})$  が最小の解と黒線のパレート解との比較を行う。赤線の解は鉄骨金額  $A_c(\mathbf{x}) + A_g(\mathbf{x})$  が最小であるが柱脚金額  $A_{cb}(\mathbf{x})$  と基礎梁金額  $A_f(\mathbf{x})$  が大きい, 合計金額  $f_1(\mathbf{x})$  がパレート解より大きい。このように, 鉄骨金額  $A_c(\mathbf{x}) + A_g(\mathbf{x})$  のみを最小化した場合と比べ, 柱脚と基礎梁を入力変数, 目的関数に含むことでより経済的な設計が可能となる。

## 5. クラスタリング分析

入力変数の傾向や目的関数への影響の大きい符号の分析のため, 図 3 の色付きプロットで示す制約条件群  $g_i(\mathbf{x})$  を満たす解に対して, 入力変数  $\mathbf{x}$  を用いてクラスタリング分析を行った。分析手法は k-means 法とし, 距離タイプはユークリッド距離, クラスタ数は 2~10 のうち DB 指標が最小となる 2 とした。クラスタリング結果のうち, 原設計の解が含まれるものを CLUSTER\_0, 含まれないものを CLUSTER\_1 とする。入力変数  $\mathbf{x}$  のうち鉄骨断面  $C, G$  について, クラスタリング結果の多次元解析チャートを図 5 に示す。横軸は部材符号, 縦軸は断面係数順に並び変えられた鉄骨断面リストの断面番号を表す。クラスタの平均値を実線,  $\pm 2\sigma$  の範囲を領域とし, CLUSTER\_0 を青色, CLUSTER\_1 を黄色で示す。2 章で考察した鉄骨金額最小の解と合計金額最小のパレート解を赤線, 黒線で示す。クラスタ間の部材選択を比較すると, 柱は CLUSTER\_1 が CLUSTER\_0 を概ね包絡しており, CLUSTER\_1 は部材が幅広い部材から選択されていることがわかる。大梁は CLUSTER\_1 の断面番号の方が大きく, 特に 2G1, 2G2, 2G4, 2G5, RG1, RG3, RG5 で顕著である。図 5 の赤線と黒線の比較から, 大梁  $G$  の断面は 2G2 を除き同一であるが, 柱  $C$  の部材選択が大きく異なることがわかる。断面の違いは表 4 に示す通りであり, 断面サイズが 1 サイズ異なる結果となった。なお, 鉄骨金額  $A_c(\mathbf{x}) + A_g(\mathbf{x})$  を最小化する解と合計金額  $f_1(\mathbf{x})$  を最小化する解はともに CLUSTER\_0 に所属する。

クラスタリング結果について, 合計金額  $f_1(\mathbf{x})$  - 層間変形角  $f_2(\mathbf{x})$  関係を図 6 に示す。合計金額  $f_1(\mathbf{x})$  は図 3 と同様原設計の合計金額で除した値である。図より, クラスタリング分析は入力変数のみを用いて行っているにもかかわらず, CLUSTER\_0 は合計金額  $f_1(\mathbf{x})$

表 4 鉄骨金額最小と合計金額最小の断面比較

| 符号        | 鉄骨金額最小        | 合計金額最小         |
|-----------|---------------|----------------|
| ${}_1C_4$ | □-200×200×6   | □-250×250×9    |
| ${}_1C_5$ | □-300×300×9   | □-250×250×9    |
| ${}_2C_6$ | □-200×200×12  | □-175×175×12   |
| ${}_2C_9$ | □-175×175×6   | □-200×200×6    |
| ${}_2G_2$ | H-346×174×6×9 | H-396×199×7×11 |

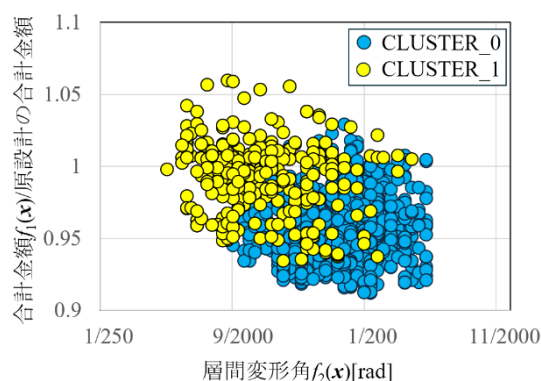


図 6 クラスタリング結果の  $f_1(\mathbf{x})$  -  $f_2(\mathbf{x})$  関係

が小さく層間変形角  $f_2(\mathbf{x})$  が大きい領域に, CLUSTER\_1 はその逆の領域に分布することがわかる。特に 14 個のパレート最適解のうち, 合計金額  $f_1(\mathbf{x})$  が小さい解 9 個が CLUSTER\_0, 層間変形角  $f_2(\mathbf{x})$  が小さい解 5 個が CLUSTER\_1 となった。

## 6. まとめ

合計金額と層間変形角を目的関数とした多目的最適手法の鉄骨造建物への適用において, 鉄骨部材に加えて柱脚, 基礎梁を設計変数とした。その結果, 鉄骨部材のみを設計変数とした場合に比べ, 柱脚と基礎梁を設計変数, 目的関数に含むことでより経済的な設計が可能となった。また, 制約条件を満足する解に対して, 設計変数を用いたクラスタリング分析を行い, 得られた解の分類とそれぞれに対する分析を行った。その結果, クラスタによって部材番号が大きく異なる部材符号が確認された。また, 目的関数で見た場合も, 合計金額を小さくするクラスタと層間変形角を小さくするクラスタに分かれた。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会: 構造最適化の最近の発展と設計への応用事例, 第 1 版, 2020.5
- 2) 永峰頌子, 西拓馬, 吉田文久, 藪田智裕: 鉄骨構造の設計業務における最適化技術の適用に関する検討 その 1 検討



概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 321-322，  
2023. 9

- 3) 西拓馬，永峰頌子，吉田文久，藪田智裕：鉄骨構造の設計  
業務における最適化技術の適用に関する検討その 2 検討  
結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.323-324，2023.9
- 4) 西羅康平，西拓馬，吉田文久，永峰頌子：鉄骨構造の設計  
業務における最適化技術の適用に関する検討 その 3 エキ  
ストラ金額，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.245-246，  
2024.8

## 執筆者紹介

### ひとこと

最適化技術の設計への適用，  
機能改善に取り組んでいます。  
構造最適化技術のさらなる適  
用範囲の拡大，最適化の効率化  
を進めていきたいと思っています。



西羅 康平  
修士（工学）