

## 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

永峰 頌子 西 拓馬 吉田 文久 藪田 智裕  
Shoko Nagamine, Takuma Nishi, Fumihisa Yoshida, Tomohiro Yabuta

### 概 要

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構造最適化技術の検討事例が報告されている。多目的最適化では、複数のパレート解が示されるため、どの解を選択すべきか設計者が判断する必要がある。鉄骨構造の設計業務においては、多目的最適化の目的関数として用いられることの多い鋼材重量や検定比などの構造指標のほか、部材のグルーピングや接合部の施工性、加工費など様々な指標を考慮したうえで解が選択される。

本研究では、設計者がパレート解の中から合理的に解の選択を行うことを目的に、部材断面形状の数や柱・梁段差に着目し、多目的最適化手法を用いた鉄骨構造の柱・梁の断面最適化について検討を行った。検討の結果、パレート解のうち、原設計のモデルよりも鋼材重量が小さく、原設計の部材グルーピングに近い解が得られた。本報で設定した最適化の解析条件は、鉄骨構造の設計業務において断面最適化の検討に有用であると考えられる。

### A Study on Application of Optimization Technology in Structural Steel Design Work

#### Abstract

In recent years, there have been reports of studies on structural optimization techniques that combine general-purpose multi-objective optimization tools and structural calculation programs. Multi-objective optimization presents multiple Pareto solutions, and the designer must decide which one to choose.

In this study, optimization of column and beam cross-sections was investigated, focusing on the number of member cross-sections and the difference in level of columns and beams, for the purpose of allowing designers to rationally select a solution from among the Pareto solutions. As a result of the investigation, a solution was obtained from among the Pareto solutions for which the weight of the steel material was smaller than that of the original design model, and the member grouping was close to that of the original. It is considered that the analysis conditions for optimization set in this paper are useful for examining cross-sectional optimization in the design of steel structures.

キーワード：鉄骨構造，最適設計，多目的最適化，一貫構造計算，断面最適化，パレート解

## 1. はじめに

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構造最適化技術の検討事例が報告されている<sup>1)</sup>。多目的最適化では、複数のパレート解が示されるため、どの解を選択すべきか設計者が判断する必要がある。鉄骨構造の設計業務においては、多目的最適化の目的関数として用いられることの多い鋼材重量や検定比などの構造指標のほか、部材のグルーピングや接合部の施工性、加工費など様々な指標を考慮したうえで解が選択される。そこで、本報では設計者がパレート解の中から合理的に解の選択を行うことを目的に、部材断面形状の数や柱・梁段差に着目し、多目的最適化手法を用いた鉄骨構造の柱・梁の断面最適化について検討を行った。その解析を行った建物の検討結果について報告する。

## 2. 最適化問題

設計変数を柱・梁断面  $x$ 、目的関数を鋼材重量  $f_1(x)$  及び断面統一性指標  $f_2(x)$ 、制約条件を制約条件群  $g_j(x)$  とし、制約条件付き多目的最小化問題を次式で定式化する。

$$\text{Find } x = \{ {}_k C_i, {}_k G_j \} \quad (1)$$

$$\text{Minimize } f_1(x) = w(x) + a(x) \quad (2)$$

$$f_2(x) = 2\{\beta({}_k C_i) + \beta({}_k G_j)\} \quad (3)$$

$$\text{Subject to } g_j(x) \leq 0 \quad (4)$$

$x$  は柱・梁の部材グループ毎の選択部材を特定する断面番号で構成された離散量の変数ベクトルを表す。 ${}_k C_i$ 、 ${}_k G_j$  はそれぞれ  $k$  層  $i$  番で示す柱・梁の断面番号の集合である。 $f_1(x)$  は  $w(x)$  と  $a(x)$  の和として鋼材重量を表す。 $w(x)$  は柱・梁の鋼材重量、 $a(x)$  は図 1 に示すように接合部パネルに取り付く柱・

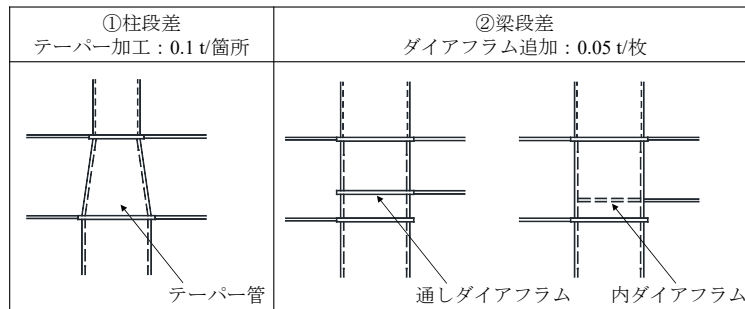


図 1 柱・段差に伴う鋼材重量  $a(x)$  の設定

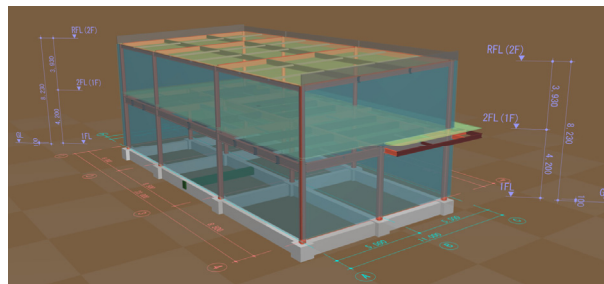


図 2 検討モデル (S 造 2 階建て両方向ラーメン架構)

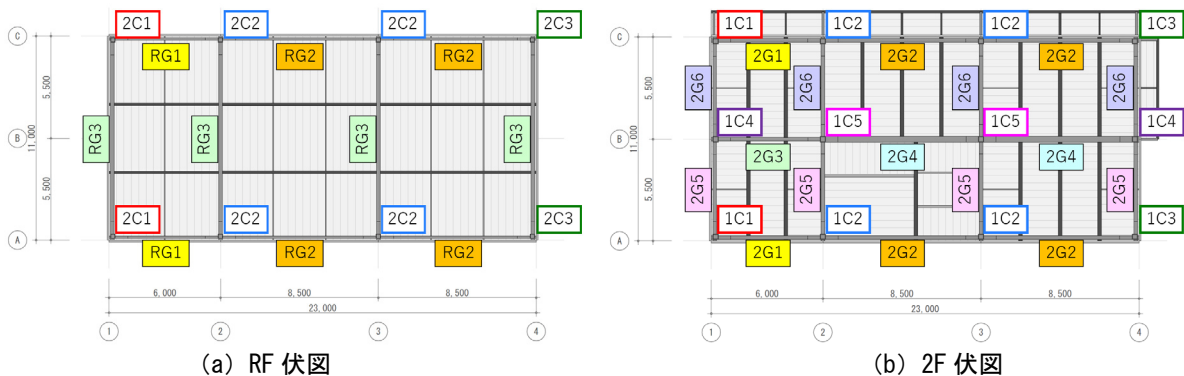


図 3 柱・梁の部材グループ

梁の段差に伴う接合部の加工費を考慮した鋼材重量の換算値を表す。 $f_2(x)$ は $\beta(kC_i)$ と $\beta(kG_i)$ の平均値の逆数で表される断面統一性指標であり、柱・梁に使用する部材断面形状の種類数が少ないほど小さい値となる。 $\beta(kC_i)$ と $\beta(kG_i)$ は、柱・梁の部材断面形状の種類数 $n_C$ 、 $n_G$ と配置される部材本数 $N_C$ 、 $N_G$ を用いて次式で与える。

$$\beta(kC_i)=1-n_C/N_C \quad (5)$$

$$\beta(kG_i)=1-n_G/N_G \quad (6)$$

$g(x)$ は制約条件群を表し、構造上の要求性能として柱・梁検定比、層間変形角、梁のたわみ、ルート3適用の可否判定、施工上の要求性能として柱・梁の段差量について制約条件を設定する。

### 3. 検討モデルと解析条件

検討に用いた建物のモデルを図2に示す。建物は、実物件をもとに3×2スパンのS造2階建て両方向ラーメン架構とし、柱は角形鋼管(BCR295)、梁はJIS H形鋼(SS400)を用いる。構造計算は、一次設計及び二次設計を行い、構造計算ルートはルート3である。建物形状、部材の配置やスパン、部材グループ、荷重条件、設計クライテリアなどは、原設計をもとにあらかじめ設定したものをを用いる。

柱・梁の部材グループを図3に示す。配置される部材本数は、柱は1Fが12本、2Fが8本の計20本、梁は1Fが17本、2Fが10本の計27本である。部材グループは柱・梁のスパン・負担面積などを考慮して、柱は1Fが5種、2Fが3種の計8種、梁は1Fが6種、2Fが3種の計9種とした。柱・梁の断面は、部材グループ毎に表1に示す選択部材一覧から部材番号で選択する。柱の選択部材は角形鋼管柱(BCR295)を対象に柱幅200mmから400mmまでの断面として計23種、梁の選択部材はJIS規格

のH形鋼(SS400)のうち細幅・中幅を対象に梁せい298mmから600mmまでの断面として計20種とする。なお、柱脚は柱断面に対してメーカー製品を一意に対応付け、梁は断面係数順に番号を割り当てた。

表2に制約条件を示す。柱・梁検定比、梁のたわみ、層間変形角、保有水平耐力、柱脚部の破断防止、ルート3適用の可否判定、柱・梁の段差量の合計9

表1 柱・梁の選択部材一覧

No.	柱	No.	梁
1	□-200x200x6	24	H-298x149x5.5x8 細幅
2	□-200x200x9	25	H-300x150x6.5x9 細幅
3	□-200x200x12	26	H-346x174x6x9 細幅
4	□-250x250x6	27	H-294x200x8x12 中幅
5	□-250x250x9	28	H-350x175x7x11 細幅
6	□-250x250x12	29	H-396x199x7x11 細幅
7	□-250x250x16	30	H-400x200x8x13 細幅
8	□-300x300x6	31	H-340x250x9x14 中幅
9	□-300x300x9	32	H-446x199x8x12 細幅
10	□-300x300x12	33	H-450x200x9x14 細幅
11	□-300x300x16	34	H-496x199x9x14 細幅
12	□-300x300x19	35	H-500x200x10x16 細幅
13	□-350x350x9	36	H-390x300x10x16 中幅
14	□-350x350x12	37	H-596x199x10x15 細幅
15	□-350x350x16	38	H-482x300x11x15 中幅
16	□-350x350x19	39	H-440x300x11x18 中幅
17	□-350x350x22	40	H-600x200x11x17 細幅
18	□-400x400x9	41	H-488x300x11x18 中幅
19	□-400x400x12	42	H-582x300x12x17 中幅
20	□-400x400x16	43	H-588x300x12x20 中幅
21	□-400x400x19		
22	□-400x400x22		
23	□-400x400x25		

表2 制約条件

制約条件		
$g_1(x)$	柱検定比の最大値	1.00以下
$g_2(x)$	梁検定比の最大値	1.00以下
$g_3(x)$	梁たわみの最大値	1/500以下かつ10mm以下
$g_4(x)$	層間変形角の最大値	1/200以下
$g_5(x)$	保有水平耐力	$Q_u/Q_n \geq 1.0$
$g_6(x)$	柱脚部の破断防止	判定○
$g_7(x)$	ルート3適用の可否	保有水平耐力、柱脚部の破断防止以外の判定○
$g_8(x)$	柱段差	上階柱幅は下階柱幅以下 同幅の場合、上階柱板厚は下階柱板厚以下
$g_9(x)$	梁段差	30mm以上100mm未満の段差不可

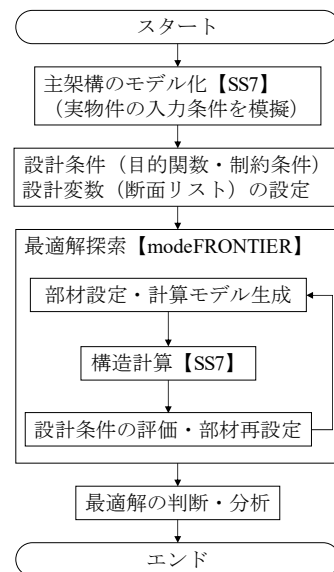


図4 検討フロー

つの制約条件を設けた。保有水平耐力、柱脚部の破断防止については、ルート 3 適用の可否判定に含まれるが、実行不可能解の被制約比率を確認するために制約条件として個別に確認した。

図 4 に検討フローを示す。最適化問題の最適解の探索には Esteco 社の modeFRONTIER (最適化アルゴリズムは pilOPT) を用いる。一貫構造計算プログラムはユニオンシステム社の SS7 を用いる。SS7 の入出力 CSV データを modeFRONTIER の変数として扱えるように CSV データを読取変換する Excel マクロを作成し、modeFRONTIER にて最適解の探索を実施する。原設計の計算モデルに対して SS7 の構造計算を一度行った後、modeFRONTIER にて柱・梁断面を変化させながら SS7 にて構造計算を繰り返し、目的関数  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  を最小化する多目的最適化計算を計 1500 回行う。本報では、3 台のマシンで並列計算を行い、11 時間 12 分で解析が完了した。

#### 4. 検討モデルと解析条件

図 5 に鋼材重量  $f_1(x)$  と断面統一性指標  $f_2(x)$ , 図 6 に鋼材重量  $f_1(x)$  と層間変形角  $g_4(x)$  の散布図を示す。図中の色付きの点は、全ての制約条件を満たす設

計可能解、白抜きの点は、いずれかの制約条件を満たさない設計不可能解である。設計可能解は、断面統一性指標の値に応じて色付けする。図中の×印は、原設計の計算モデル、+印は、鋼材重量が最小となった計算モデル(以下、Case1)を示す。いずれの相関においてもパレート解が確認できる。鋼材重量の小さい範囲や断面統一性指標の小さい範囲において解の探索が行われており、目的関数の設定に応じた最適化が行われていることが確認できる。鋼材重量を目的関数とした 1500 モデルのうち設計可能解は 297 モデル (約 19.8%) であった。図 7 に残りの設計不可能解の被制約比率を示す。被制約比率は、梁段差制限、梁検定比、柱段差制限の比率が大きく、柱検定比、柱脚部の破断防止、梁たわみの比率が小さい。

原設計と Case1 のモデルについて、表 3 に解析結果一覧、表 4 に部材断面一覧を示す。図 8 と図 9 に原設計と Case1 の柱・梁の部材番号を各階伏図上に示す。原設計の鋼材重量は 31.1 tf, 断面統一性指標は 1.15, 柱検定比は 0.65, 梁の検定比は 0.98, 層間変形角は 0.0039 rad である。部材断面は柱・梁ともにスパンや負担幅に応じて統一されており、柱の耐力に余裕のある設計であることがわかる。Case1 の鋼材重量は 29.1 tf, 断面統一性指標は 1.16,

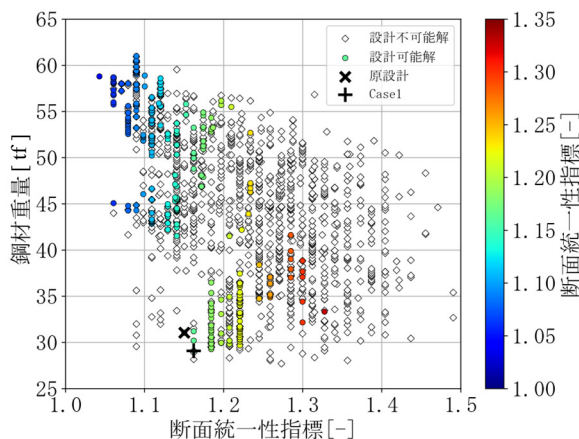


図 5 鋼材重量  $f_1(x)$  - 断面統一性指標  $f_2(x)$

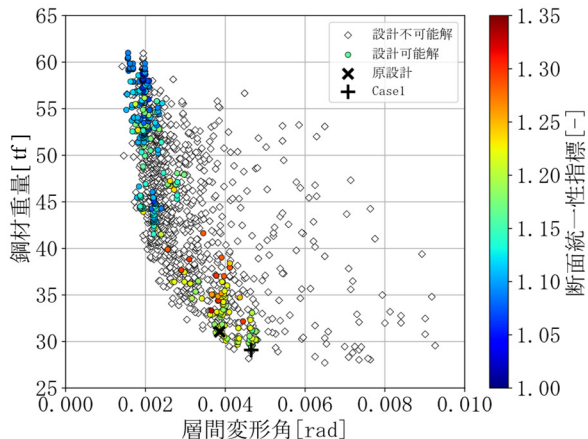


図 6 鋼材重量  $f_1(x)$  - 層間変形角  $g_4(x)$

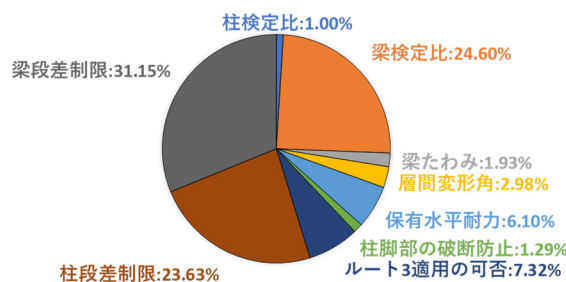


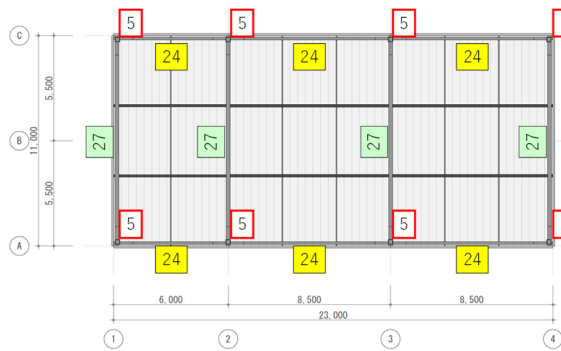
図 7 設計不可能解の被制約比率

柱検定比は 0.81, 梁の検定比は 1.00, 層間変形角は 0.0047 rad である。部材断面は原設計と同程度に統一されており, 柱・梁ともに原設計よりも小さい断面が多く選択されたことで, 鋼材重量は原設計よりも約 7%削減されている。柱の断面は, FD ランクの柱が選択されるとともに, 1C3 柱の板厚が他の柱の板厚に比べて厚い。

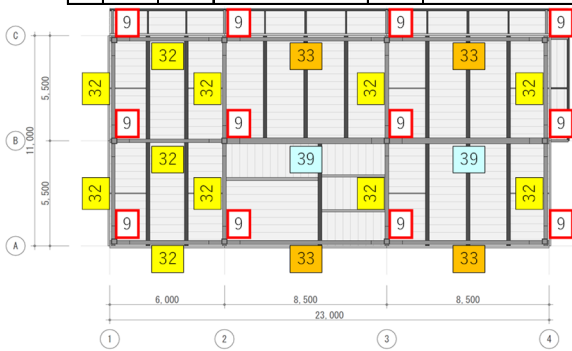
制約条件に含めていない部材ランクや配置バランスを考慮すると, 鋼材重量, 断面の統一性, 構造性能の余裕度など様々な観点から, 原設計の部材選択がパレート解の中でもバランスの良い優れた

表 3 解析結果

設計条件		原設計	Case1
目的関数	$f_1(x)$ 鋼材重量[t]	31.1	29.1
	$f_2(x)$ 断面統一性指標[-]	1.15	1.16
制約条件	$g_1(x)$ 柱検定比[-]	0.65	0.81
	$g_2(x)$ 梁検定比[-]	0.98	1.00
	$g_3(x)$ 梁たわみ	○	○
	$g_4(x)$ 層間変形角[rad]	0.0039	0.0047
	$g_5(x)$ 保有水平耐力[-]	1.48	1.29
	$g_6(x)$ 柱脚部の破断防止	○	○
	$g_7(x)$ ルート3適用の可否	○	○
	$g_8(x)$ 柱段差	○	○
	$g_9(x)$ 梁段差	○	○

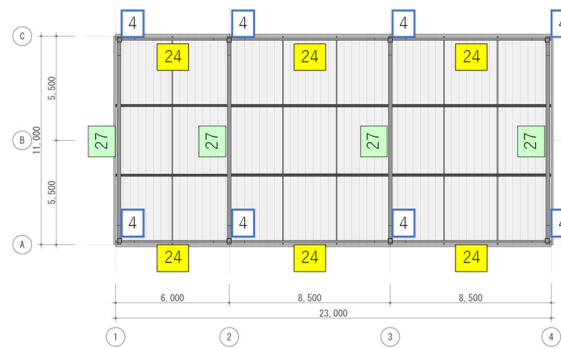


(1) RF 伏図



(2) 2F 伏図

図 8 原設計部材番号



(1) RF 伏図



(2) 2F 伏図

図 9 Case1 部材番号

解であることを確認できた。

## 5. まとめ

梁段差や部材断面形状の数に関する指標を考慮した制約条件付き多目的関数最小化問題を定式化し, 柱・梁の断面最適化を行った。

表 4 部材断面一覧

部材符号	原設計		Case1	
	番号	断面サイズ	番号	断面サイズ
柱	1C1	9 □-300x300x9	8	□-300x300x6
	1C2	9 □-300x300x9	8	□-300x300x6
	1C3	9 □-300x300x9	11	□-300x300x16
	1C4	9 □-300x300x9	8	□-300x300x6
	1C5	9 □-300x300x9	8	□-300x300x6
	2C1	5 □-250x250x9	4	□-250x250x6
	2C2	5 □-250x250x9	4	□-250x250x6
	2C3	5 □-250x250x9	4	□-250x250x6
	梁	2G1	32 H-446x199x8x12	32
2G2		33 H-450x200x9x14	32	H-446x199x8x12
2G3		32 H-446x199x8x12	32	H-446x199x8x12
2G4		39 H-440x300x11x18	39	H-440x300x11x18
2G5		32 H-446x199x8x12	32	H-446x199x8x12
2G6		32 H-446x199x8x12	32	H-446x199x8x12
RG1		24 H-298x149x5.5x8	24	H-298x149x5.5x8
RG2		24 H-298x149x5.5x8	24	H-298x149x5.5x8
RG3		27 H-294x200x8x12	27	H-294x200x8x12

- (1) 目的関数の設定に応じた最適化が行われていることを確認した。
- (2) パレート解のうち、原設計のモデルよりも鋼材重量が小さく、原設計の部材グルーピングに近い解を得たことを確認した。
- (3) パレート解を比較することで、原設計がバランスの良い優れた解であったことを客観的に確認することができた。
- (4) 本報で設定した最適化の解析条件は鉄骨構造の設計業務において断面最適化の検討に有用であると考えられる。

#### 参 考 文 献

- 1) 杉浦良和, 武居秀樹, 池田隼人, 玉木智大, 山下淳一,

坊野弘治, 田畑健, 佐藤慶太: 構造設計実務における最適化を用いた設計法の提案 その2 一貫構造計算プログラムを用いた断面最適化, 日本建築学会学術講演梗概集(関東)構造 I, pp.277-278, 2020.9

#### 執筆者紹介

##### ひとこと

社内展開へ向けてテンプレートの作成などに取り組んでいる。構造設計者の意見を取り入れながら、使いやすいシステムを構築したい。



永峰 頌子  
修士 (工学)