

機関番号：15401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21760433

研究課題名 (和文) 鉄骨建築構造の製作コストを考慮した最小コスト設計手法

研究課題名 (英文) Minimum cost design methods for steel building structures considering fabrication cost

研究代表者

澤田 樹一郎 (SAWADA KIICHIRO)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：90284166

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、与えられた耐震安全性の制約条件のもとで著者らがすでに提案している鉄骨製作コストと材料コストの和を最小化する鉄骨ラーメン骨組の最適設計問題を取り扱い、このような問題に対して、連続最適化手法、列挙法、GA という 3 つの解法の可能性をそれぞれ検討した。それぞれの方法の計算性能改善の方策、数値計算における計算効率、計算精度を示した。

研究成果の概要 (英文)：

In this study, the optimization problem, was set up, which minimizes total of fabrication cost and material cost subject to specified seismic constraints for steel building frames. Three approaches were adopted, which are continuous optimization, an enumeration method and a genetic algorithm. The enhanced algorithms were proposed for each approach, and computational speed and accuracy were demonstrated in numerical results.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：鋼構造最適設計、鋼構造耐震設計、腐食部材の耐震性

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：鋼構造、平面骨組、鉄骨製作コスト、鋼材コスト、最小コスト設計、列挙法、GA

## 1. 研究開始当初の背景

建築構造物の骨組重量は、建築生産コストを評価するためのパラメータとして様々な場で多用されている。例えば、建築骨組の構造最適化に関する研究では、目的関数を骨組重量で定義することが多い。また、建築計画の初期段階で重量単価に基づくコスト試算が行われている。しかしながら、骨組重量に

より、建築生産コストを的確に予測できない場合もある。骨組重量が、建築生産コストを必ずしも的確に予測し得ない理由の一つに、建築生産コストの何割かを占める鉄骨製作コストが、骨組重量よりむしろ接合部の複雑さなどのような鉄骨製作労務の難易度に依存するものであることが挙げられる。したがって、複雑な接合部の設計解が得られやすい

傾向がある最小重量設計よりも鉄骨製作コストも考慮した最小コスト設計の方がより合理的な解が得られると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、与えられた耐震安全性の制約条件のもとで鉄骨製作コストと材料コストの和を最小化する鉄骨ラーメン骨組の最適設計問題を取り扱う。本研究で扱うコスト関数は、接合部に結合する左右の梁せいの一致、不一致により接合部のダイアフラム数や溶接量が不連続に変化していくため、規格断面使用を考慮した最適化問題の定式化が前提となり、離散最適化（または組み合わせ最適化）とよばれる計算困難な問題となる。ここでは、鉄骨製作コストを考慮した鉄骨骨組の最小コスト設計問題を定式化した上で、そのような問題に対して、連続最適化手法、列挙法、GA という 3 つの解法の可能性をそれぞれ検討し、計算性能改善の方策を提案する。また、数値計算により計算精度、計算効率を検証する。

## 3. 研究の方法

ここでは、以下の最適化問題を取り扱う。

Find  $D_{idc} (idc = 1, \dots, NDC), H_{idb} (idb = 1, \dots, NDB)$   
which minimize

$$C = KF \cdot TF + KS \cdot \left( \rho \sum_{i=1}^{NM} A_i L_i + \rho \sum_{i=1}^{NJ} V_{Di} \right)$$

subjected to

$$G_{Li} = \frac{N_{Li}}{A_i f_{NLi}} + \frac{M_{Li}}{Z_i f_{MLi}} \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, NM)$$

$$G_{Si} = \frac{N_{Si}}{A_i f_{NSi}} + \frac{M_{Si}}{Z_i f_{MSi}} \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, NM)$$

$$G_{Dk} = \frac{\delta_k / H_k}{1/200} \leq 1 \quad (k = 1, 2, \dots, NF)$$

$$G_{CBRk} = \sum_i M_{PCki} / \sum_i 1.5 M_{PBki} \geq 1 \quad (k = 1, \dots, NF)$$

$$G_p = \lambda_p \geq 1$$

$D_{idc}$  は、鋼管柱の規格断面番号を示す。また、 $H_{idb}$  は、H形鋼梁の規格断面番号を示す。これらの部材断面は、表 2(A), (B) で示されている規格断面リストより選定される。 $NDC, NDB, NM$  は、それぞれ柱設計変数の総数、梁設計変数の総数、部材総数である。 $g_{Li}$  は、鉛直荷重時に関する制約関数、 $g_{Si}$  は、鉛直および水平の同時荷重時に関する制約関数、 $g_{Dk}$  は、層間変形角の制約関数を示す。 $g_{CBRk}$  は、柱梁耐力比の制約関数、 $g_p$  は、骨組の崩壊荷重に対する制約関数である。 $N_i, M_i, f_{Ni}, f_{Mi}, Z_i$  は各部材の軸力、曲げモーメント、軸力と曲げの許容応力度、断面係数である。 $\delta_k, H_k, NF$

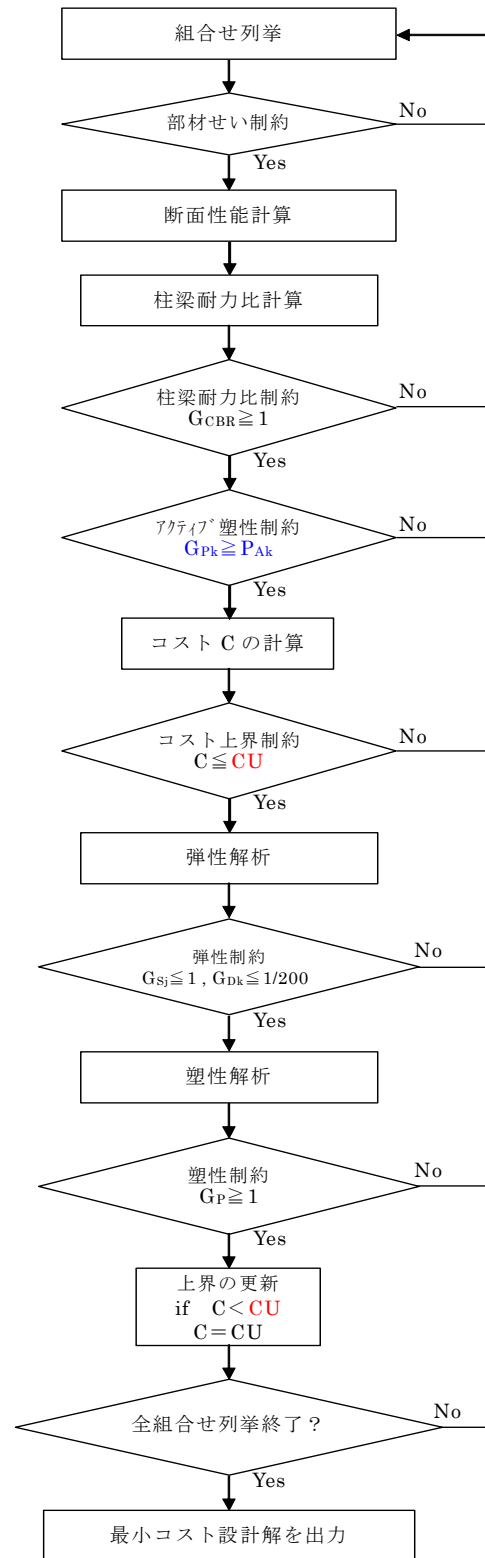


図 1 計算フローチャート (列挙法)

は、各層の層間変形、階高および階数である。 $M_{PCKi}$ ,  $M_{PBKi}$ は、柱梁の部材耐力を示す。 $A_p$ は、設計用水平荷重に対する崩壊機構形成時の荷重倍率を示す。

目的関数  $C$  は、鉄骨製作コストと鋼材コストの合計コスト（以降では、単に合計コストと呼ぶ。）である。 $\rho$ ,  $A_j$ ,  $L_j$ は、それぞれ鋼材比重、部材断面積、部材長である。 $V_{Di}$ は、 $i$ 番目の接合部のダイヤフラム体積、 $N_j$ は、接合部総数である。TFは、文献で示す鉄骨製作の労務時間関数である。 $KF$ は労務単価、 $KS$ は鋼材単価である。

以下の3つの計算手法の有効性を検討する。

(1) 連続最適化手法を出発点とした離散断面選定手法

以下のステップを段階的に実行する離散断面選定手法を提案している。

① 塑性制約下の連続近似最小重量設計

② ①を出発点とした弾性・塑性制約下のラウンド・アップの改善手法による離散断面の選定

③ ②を出発点としたコスト判定による部材断面せいの統一性変更

(2) 列挙法

列挙法における骨組解析の前に、(1)の解のコストによる上界値  $CU$  と(1)の①の計算過程で得られるアクティブ塑性制約  $G_{Pk} \geq P_{Ak}$  により明らかに最適解でない組み合わせをそぎ落とし、計算効率を向上させる。また、弾性解析や塑性解析、柱梁耐力比のチェック、アクティブ塑性制約のチェック、コストのチェックなどの各段階でのチェックを計算効率が最適となるようなチェック順序とする。計算フローチャートを図1に示す。

(3) GA

著者らが事前に行った、通常のGAによる計算では、厳密解が得られる可能性は、極めて低かった。ここでは、以下に示す一次元直線探索法および指定部材ペア探索をGAに組み込んだ計算手法（図2）を提案している。なお、フローチャート図中の  $F^*$  は、個体の適応度関数であり、次式により評価する。

$$F^* = (1 + \Delta G) \cdot F$$

$$\Delta G = \sum_{G_{Li} > 1} (G_{Li} - 1) + \sum_{G_{Si} > 1} (G_{Si} - 1) + \sum_{G_{Dk} > 1} (G_{Dk} - 1) + \sum_{G_{CBRk} < 1} (1 - G_{CBRk}) + \sum_{G_p < 1} (1 - G_p)$$

ここで、 $\sum_{g > 1}$  は、 $g > 1$  を満足するもの、

$\sum_{g < 1}$  は、 $g < 1$  を満足するものの総和で、制

約条件に関するペナルティを表す。

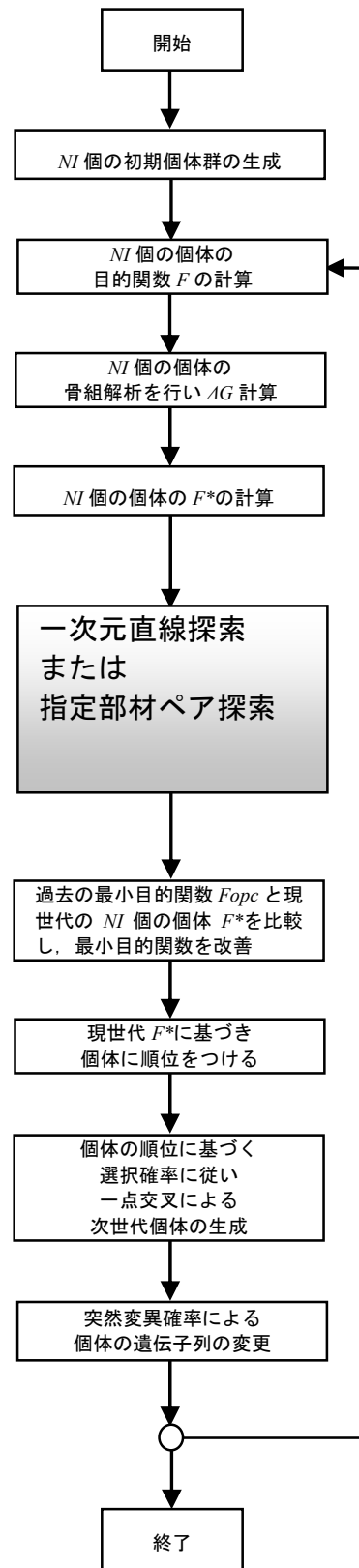


図2 計算フローチャート (GA)

①<sub>r</sub> 一次元直線探索法

図3に示す門型平面骨組に一次元直線探索を適用した場合の概念図を図4に示す. 図3に示す門型平面骨組の場合,  $R_{i1}$ は個体*i*の柱断面,  $R_{i2}$ は個体*i*の梁断面に対応する遺伝子を示す. 図4中の●印は同世代の個体を意味している. ここで全個体の全設計変数から, 指定確率  $PI$  で一次元直線探索を実行する設計変数を選定(以降では, 特定設計変数と呼ぶ.)する. 特定設計変数として個体*i*の  $R_{i2}$ が選定された場合,  $R_{i1}$ の規格断面は固定したままで,  $R_{i2}$ を全規格断面の中から順次変更することで派生する個体全ての  $F^*$ を計算する. 図3中の縦方向に並んだ○印は,  $R_{i2}$ が採用可能な全規格断面を順次変更した場合の個体*i*からの派生個体を意味している. 次に, 個体*i*と全派生個体の  $F^*$ の中で, 最小の  $F^*$ を与える規格断面に個体*i*の  $R_{i2}$ を変更する. これにより, 最適設計解への収束性及び到達率が改善されると考えられる.

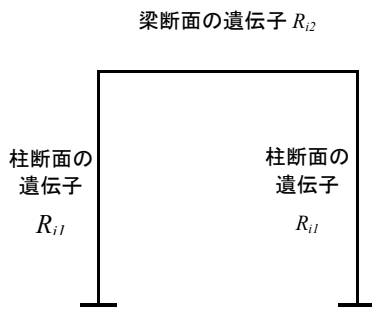


図3 門形平面骨組

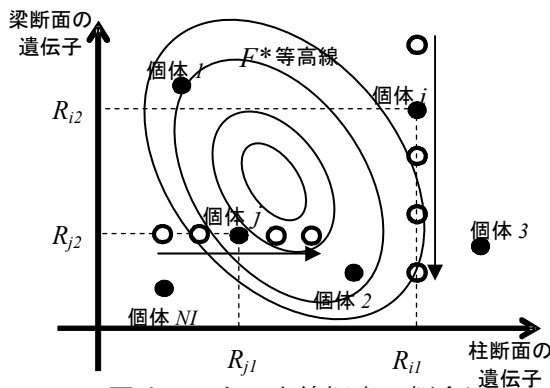


図4 一次元直線探索の概念図

②<sub>r</sub> 指定部材ペア探索

GAによる構造物の離散断面最適化に関する研究では, これまで, 収束の冗長性と乱数の初期整数の依存性が課題とされてきた. 特に, 本問題のように, 隣接する左右上下の部材せい的一致, 不一致によりコスト関

数が不連続的に変化する場合には, 厳密解への到達率が低下する傾向にあることが指摘されている. ここでは, 部材せい的一致, 不一致が問題となる部材ペアをあらかじめ入力し, 指定部材ペアの組み合わせ探索をGAと併用する方法を提示する.

ランク戦略3)に基づくGAの手順の交叉の前に, 全個体に対して, 指定部材ペアの組み合わせ探索の操作を追加する. 指定部材ペアの組み合わせ探索は, 以下の手順で実行される.

Step1  $i=0$  とする.

Step2  $i=i+1$  とする. ただし,  $i$  が指定部材ペアの総数を超えたら, 組み合わせ探索を終了する.

Step3 実行確率  $p$  の割合で, Step4へ移動,  $1-p$  の割合で Step2へ移動する.

Step4  $i$  番目の指定部材ペアの規格断面の全組み合わせを順番に列挙していく.

Step5 (1)式により合計コスト  $F$  を計算する.

Step6 合計コスト  $F$  が次式を満足する場合, Step7へ移動する. それ以外の場合, Step4へ移動する.

$$\gamma \cdot F_{opc} \leq F \leq F_{opc} \quad (14)$$

$F_{opc}$ : その時点までで制約条件を満足する個体の中での最小の合計コスト値を示す.  $\gamma$ : 合計コストの下限値を決める係数 ( $0 \leq \gamma < 1$ ) を示す.

Step7 構造解析を実行する.

Step8 合計コストと制約条件の満足度から,  $F^*$ を計算する.

Step9 元の断面より  $F^*$ が改善されていれば, その解を現時点での最適解として更新する.

Step10 Step4へ移動する. ただし, Step4での列挙がすべて終了したら, Step2へ移動する.

4. 研究成果

鉄骨製作コストを考慮した鉄骨骨組の最小コスト設計問題を定式化した上で, そのような問題に対して, 連続最適化手法, 列挙法, GAという3つの解法の可能性をそれぞれ検討し, 計算性能改善の方策を提案した. ここでは, 5層3スパン骨組(図6)の計算結果を示す. 設計変数は, 下層部(1,2層), 上層部(3,4,5層)の柱, 各層外梁, 各層内梁の計12変数である. 鉛直荷重は, 固定荷重と積載荷重の和として  $6.72(\text{kN/m}^2)$ とし, 水平荷重については, 弾性制約に対して標準層せん断力係数  $C_0=0.2$ の  $A_i$  分布層せん断力を用いるが, 塑性制約に対しては,  $D_s=0.4$ とした地震力を用いている. 使用する規格断面リストについては, 文献[1]または[2]を参照されたい. 柱部材は角形鋼管(BCR295), 梁部材は細幅・中幅H形鋼(SN400)である. ヤング係数  $E$  は  $2.06 \times 10^5(\text{N/mm}^2)$ としている. コスト算出に用いる鋼材の材料単価  $KS$  は

4079 円/kN (4 万円/トン)、労務単価 KF は 2250 円/時間とした。連続最適化手法を出発点とした離散断面選定手法では、(列挙法により得られた) 厳密解に比較的近い解が得られることが確認された(表 1、表 2 参照)。列挙法では、5 層骨組において、厳密解が約 30 分で得られた(LINUX ワークステーション 8 ノード並列計算)。また、直線探索法併用による GA の計算性能改善により、5 層骨組で、80%の厳密解到達率(乱数列の異なる 5 回の実行中 4 回が厳密解に到達、解析回数 15000 回)が確認された。また、指定部材ペア探索による GA の計算性能改善により、5 層骨組で、実効確率  $p=0.03, 0.05, 0.10$  のいずれでも 100%の厳密解到達率(乱数列の異なる 5 回の実行中 5 回が厳密解に到達、解析回数 10000 回以内)が確認された(図 5 参照)。

表 1 列挙法による厳密解(図 6 の 5 層 3 スパン骨組、鋼材単価 4 万円/t)

		A(cm <sup>2</sup> )
3,4,5層柱	□-400×16	237.0
1,2層柱	□-400×19	277.2
5層外梁	H-500×200×10×16	112.2
4層外梁	H-500×200×10×16	112.2
3層外梁	H-600×200×11×17	131.7
2層外梁	H-600×200×11×17	131.7
1層外梁	H-600×300×12×20	187.2
5層内梁	H-500×200×10×16	112.2
4層内梁	H-500×200×10×16	112.2
3層内梁	H-600×200×11×17	131.7
2層内梁	H-600×300×12×20	187.2
1層内梁	H-600×200×11×17	131.7
柱梁重量		26.00 t
コスト		¥3,132,483

表 2 連続最適解を出発点とした離散断面選定手法による解(図 6 の 5 層 3 スパン骨組、鋼材単価 4 万円/t)

	部材断面寸法	A(cm <sup>2</sup> )
3-5F柱	□-350×22	272
1,2F柱	□-500×19	353.2
5F外梁	H-500×200×10×16	112.2
4F外梁	H-500×200×10×16	112.2
3F外梁	H-600×200×11×17	131.7
2F外梁	H-600×300×12×20	187.2
5F内梁	H-700×300×13×24	231.5
4F内梁	H-500×200×10×16	112.2
3F内梁	H-500×200×10×16	112.2
2F内梁	H-600×200×11×17	131.7
1F内梁	H-600×200×11×17	131.7
2F内梁	H 700×300×13×24	231.5
骨組重量		30.405 t
合計コスト		¥3,590,000 (4万円/t)

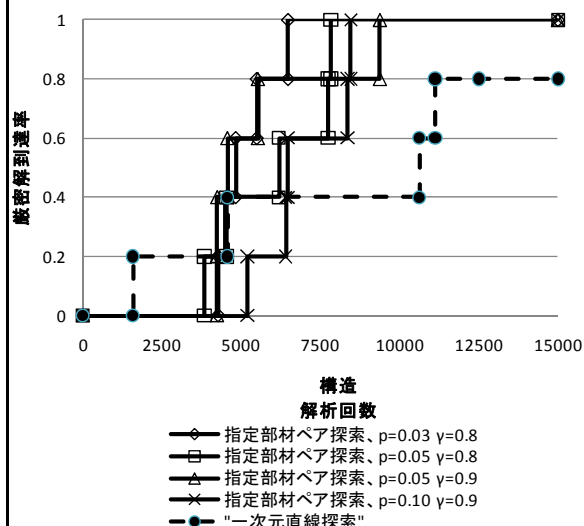


図 5 厳密解到達率(図 6 の 5 層 3 スパン骨組、鋼材単価 4 万円/t)

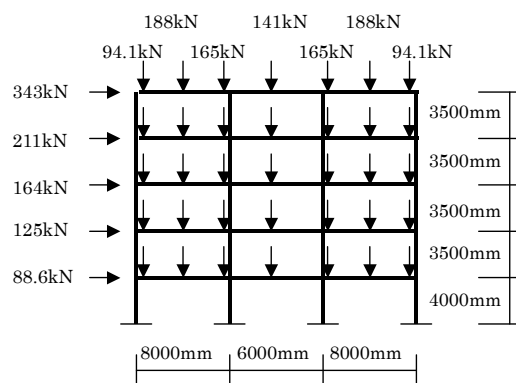


図 6 5 層 3 スパン骨組

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

[1] 清水 齊、澤田樹一郎、松尾 彰：ラーメン骨組の最適設計における遺伝アルゴリズムの改善提案、日本建築学会構造系論文集、第 75 巻、第 648 号、327-336、2010 年 2 月、査読あり

[2] 澤田樹一郎、松尾 彰、清水 齊、佐々木 尊一：鉄骨骨組の最小コスト設計のための列挙法と GA の計算性能改善、鋼構造年次論文報告集、第 18 巻、465-472、2010.11、査読あり

[学会発表] (計 1 件)

[1] Hitoshi Shimizu, Kiichiro Sawada and Akira Matsuo: A Line Search Technique in Combined Genetic Algorithm for Optimum Cost Design of Steel Structures, 6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical

Systems June 22-25, 2010, Kyoto, Japan  
(CD-ROM)

[その他]  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤田 樹一郎 (SAWADA KIICHIRO)  
広島大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：90284166

(2) 研究分担者

( )

:

(3) 連携研究者

( )

: