

遺伝的アルゴリズムを用いた鉄骨ラーメン構造物の 柱配置と部材断面の最適化に関する研究

○小亀 裕待*¹ 谷 明勲*²
山邊 友一郎*³

キーワード：遺伝的アルゴリズム 構造計画 マトリックス解析

1.はじめに

構造計画を行う際、柱・梁の配置やその断面、床・壁の厚さなど、数多くの要素を組み合わせる必要があり、その組み合わせは何通りも存在し、その中から最適解を見つけるのは困難である。そこで有効な手法として、近年発達が著しいコンピュータの情報処理能力を利用した遺伝的アルゴリズム（以下 GA）¹⁾がある。

GA を用いた柱配置や断面の最適化の研究は、平面計画やトラスなど数多く行われてきた。本研究でも、上野ら²⁾³⁾の GA による鉄骨構造物の柱配置及び部材断面最適化システムなどがある。しかし、これまでの研究では、柱配置の自由度が小さく、柱本数ある程度定めた上で、部材断面の最適化を行う研究が多く見られた。

そこで、本研究では、柱の本数を減らし柱の配置方法に、より自由度をもたせた構造物を対象とし、構造計画を柱・梁のみで構成されるラーメン架構に限定し、問題を簡略化した上で、GA を用いて柱配置と部材断面の組み合わせを最適化し、構造計画・構造設計の支援システムとして、設計の幅を広げることのできるシステムの構築を目指すことを目的とする。また、日本建築学会大会の論文⁴⁾では、柱本数が変更できなかったが、本研究では、柱本数を変更し検討を行った。

2.システム概要

2-1.システムの流れ

Fig.1 に本システムのフローチャートを示す。

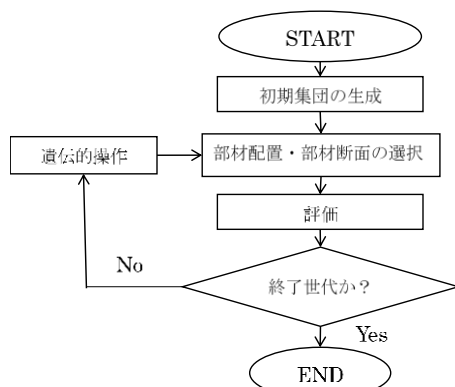


Fig.1 システムのフローチャート

まず、部材配置、部材断面を決定しその構造物について、

構造解析し、設定した目的関数をもとに評価を行い、GA による最適化を行う。

2-2.対象モデル

本研究の対象とするモデルは、数本の柱と梁で支える 1 層鉄骨ラーメン構造物とし、階高は 3.6m と仮定する。柱と梁のみで構成されるラーメン構造を考え、壁・小梁などの部材は設計対象から省くものとする。

2-3.荷重条件

鉛直荷重として Pf(床荷重)、Pb(梁自重)、Pc(柱自重)の 3 種類を作用させる。Pf は固定荷重(2.8kN/m²)・積載荷重(1.8kN/m²)の合計として 4.6kN/m²を各梁の中央に設けた節点に、その梁が負担する面積に応じて集中荷重として作用させる。Pb は梁中央の節点に、Pc は柱頭の節点に作用させる。次に水平荷重は x 方向 y 方向の 2 方向から Pf の 20%を柱頭の節点に作用させる。

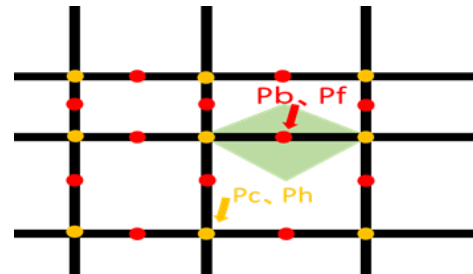


Fig.2 荷重条件

2-4.部材リスト

最適化で選択対象とする部材リストを Tables1、2 に示す。使用部材は、柱・梁の 2 種類で、鋼材種別は、柱部材には角型鋼管を、梁部材には H 型鋼を用いるものとし、柱要素は 9 種類、梁要素は 14 種類用意する。

Table1 柱断面リスト

| 柱番号 | 断面 | 重量(kg/cm) | 断面積(cm ²) |
|-----|----------|-----------|-----------------------|
| 0 | □-200×8 | 0.465 | 59.24 |
| 1 | □-250×9 | 0.659 | 83.98 |
| 2 | □-300×12 | 1.05 | 133.3 |
| 3 | □-350×14 | 1.42 | 181.4 |
| 4 | □-400×16 | 1.86 | 237 |
| 5 | □-450×16 | 2.11 | 269 |
| 6 | □-500×19 | 2.77 | 353.2 |
| 7 | □-550×25 | 3.87 | 492.8 |
| 8 | □-600×28 | 4.71 | 600.3 |

Tables2 梁断面リスト

| 梁番号 | 断面 | tw | tf | 重量(kg/cm) | 断面積(cm ²) |
|-----|-----------|-----|----|-----------|-----------------------|
| 0 | H-100×50 | 5 | 7 | 0.093 | 11.85 |
| 1 | H-150×75 | 5 | 7 | 0.14 | 17.85 |
| 2 | H-200×100 | 5.5 | 8 | 0.209 | 26.67 |
| 3 | H-194×150 | 6 | 9 | 0.299 | 38.11 |
| 4 | H-244×175 | 7 | 11 | 0.436 | 55.49 |
| 5 | H-300×150 | 6.5 | 9 | 0.367 | 46.78 |
| 6 | H-294×200 | 8 | 12 | 0.558 | 71.05 |
| 7 | H-350×175 | 7 | 11 | 0.494 | 62.91 |
| 8 | H-400×200 | 8 | 13 | 0.654 | 83.37 |
| 9 | H-390×300 | 10 | 16 | 1.05 | 133.3 |
| 10 | H-450×200 | 9 | 14 | 0.749 | 95.43 |
| 11 | H-500×200 | 10 | 16 | 0.882 | 112.2 |
| 12 | H-500×300 | 11 | 18 | 1.25 | 159.2 |
| 13 | H-600×300 | 12 | 20 | 1.47 | 187.2 |

2-5.GA のコーディング

部材配置は、遺伝子の染色体の情報によって決定される。まず、Fig.3 に示すように遺伝子座 0~4 で梁の始端位置を決め、そこから梁をかける。遺伝子座 0~2 で y 方向梁の始端位置、3~4 で x 方向梁の始端位置を決定する。

次に、柱の配置位置を決める。Fig.4 に示すように 20 箇所ある梁の節点の中から、染色体の数字に対応した位置に柱を配置する方法と、Fig.5 に示すように y 方向の梁 1 本に対し柱が 1 本配置されるように制約を設け、染色体の数字に対応した位置に柱を配置する方法を検討する。

最後に、確定した部材配置をもとに、Fig.6 に示す遺伝子座に構成する柱・梁に部材番号を付与し、その番号順に部材断面を表 1、2 中に示す部材リストから選択する。

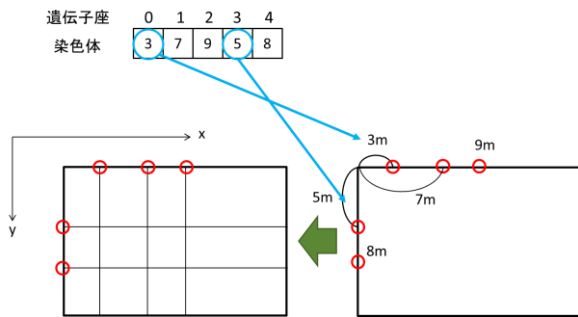


Fig.3 梁コーディング

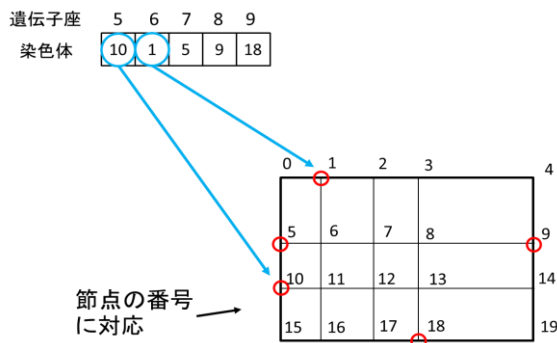


Fig.4 柱コーディング

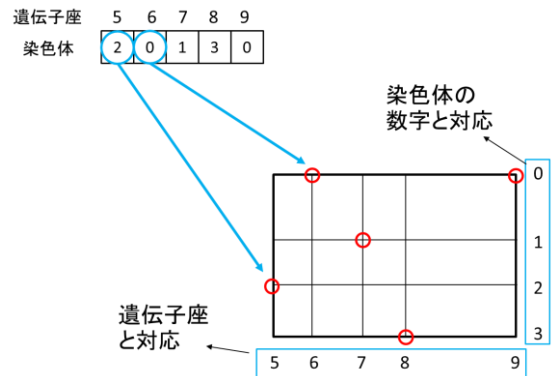


Fig.5 制約のある柱コーディング

| 部材番号 | C1 | C2 | C5 | B1 | B29 | B30 | B31 |
|------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 遺伝子座 | 10 | 11 | 14 | 15 | 43 | 44 | 45 |
| 染色体 | 2 | 0 | 1 | 1 | 10 | 9 | 2 |

| | 柱 | 梁 | 柱 | 梁 | |
|---|----------|-----------|----|----------|-----------|
| 0 | □-350×14 | H-100×50 | 7 | □-700×28 | H-350×175 |
| 1 | □-400×16 | H-150×75 | 8 | □-750×32 | H-400×200 |
| 2 | □-450×16 | H-200×100 | 9 | | H-390×300 |
| 3 | □-500×19 | H-194×150 | 10 | | H-450×200 |
| 4 | □-550×25 | H-244×175 | 11 | | H-500×200 |
| 5 | □-600×28 | H-300×150 | 12 | | H-500×300 |
| 6 | □-650×28 | H-294×200 | 13 | | H-600×300 |
| | | | 14 | | H-700×300 |

Fig.6 部材断面のコーディング

3.目的関数

(1)構造制約条件[Ev.0]

建築構造物が、安全性、機能性を保持するために必ず満たすべき条件として、許容応力度設計と層間変形角、たわみを、以下の 6 種で検討し、制約条件とする。

- ①柱：圧縮と曲げの組合せ応力度 ≤ 許容応力度
- ②柱：せん断応力度 ≤ 許容応力度
- ③梁：曲げ応力度 ≤ 許容応力度
- ④梁：せん断応力度 ≤ 許容応力度
- ⑤梁：たわみ ≤ 1/300
- ⑥層間変形角 ≤ 1/200

配置された各柱・梁部材が上記の条件を満足しているかを確認する。これらの制約条件は、構造物として全てを満たすことが必要なので、一つでも制約条件を満たさない部材がある場合は構造物として成り立たないので、式(1)を用いて評価を大きく低減させ、GA で選ばれにくくした。また、すべての部材がこれらの制約条件を全て満たす場合は、式(2)のように評価値を 1 とする。

$$\text{Violation} \neq 0 : \text{Ev.0} = 0.02 \times (1 - \text{Violation}/\text{Total}) \quad (1)$$

$$\text{Violation} = 0 : \text{Ev.0} = 1 \quad (2)$$

(Violation : 違反部材数、Total : 総部材数)

(2)部材総重量[Ev.1]

構造物の経済性に関する指標として、使用構造部材の総

重量を評価指標に設定する。ここでは、建築構造コストが構造物の重量に比例すると考える。

部材の総重量は柱・梁の合計を用い、評価値は使用部材の最大重量、最小重量を考え、式(3)を用いて計算する。なお、最大重量は、断面リストの中の最も重い部材のみ使用した柱5本の構造物の重量、最小重量は、断面リストの中の最も軽い部材のみ使用した柱5本の構造物の重量とする。

$$Ev.1 = 1 - ((W - Wmin) / (Wmax)) \quad (3)$$

(Wmin : 最小重量、Wmax : 最大重量、W : 構造物の重量)

(3)総合評価[Ev]

以上の2つの評価をまとめて、総合評価 Ev を式(4)で算定し、GA の評価値とする。

$$Ev = Ev.0 \times Ev.1 \quad (4)$$

4.実行結果

本研究では、柱5本で、Case1 : 10m×10m、Case2 : 10m×15m、Case3 : 10m×20mの規模の違う3ケースと、規模は10m×10mで、柱本数を、Case4 : 5本、Case5 : 6本、Case6 : 7本、Case7 : 8本と柱本数の違う4ケースの、7ケースについて最適化を行った。また、Cases1~3は、柱の配置に制約を設け、Cases4~7は、柱の配置に制約はない場合で研究を行った。Fig.7~13、Table 1に、各ケースの最適化結果の部材配置図と評価値 Ev、建物総重量をそれぞれ示す。なお、部材配置図では、部材断面が大きいほど柱を大きく、梁線を太く表示している。

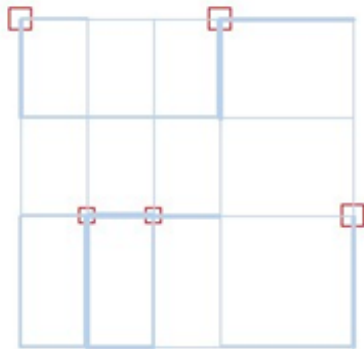


Fig.7 Case1、10m×10m

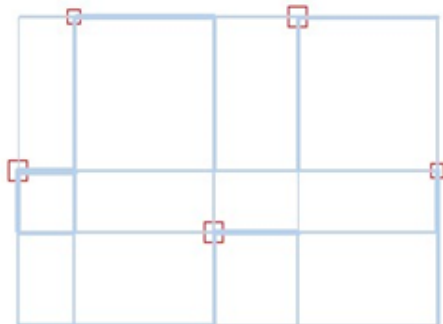


Fig.8 Case2、10m×15m

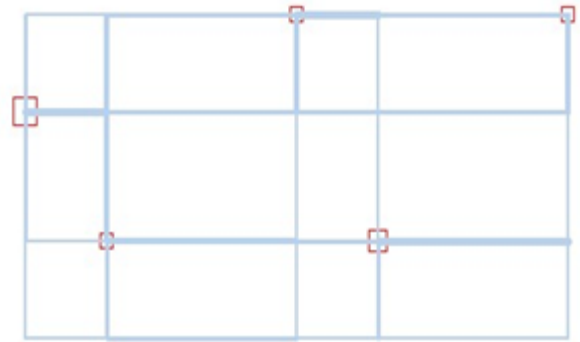


Fig.9 Case3、10m×20m

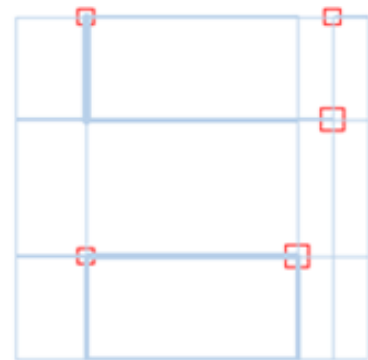


Fig.10 Case4、5本

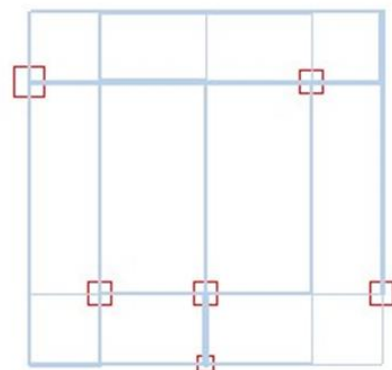


Fig.11 Case5、6本

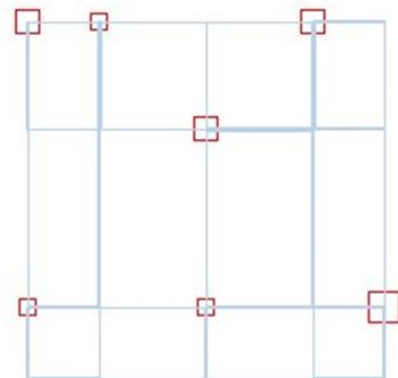


Fig.12 Case6、7本

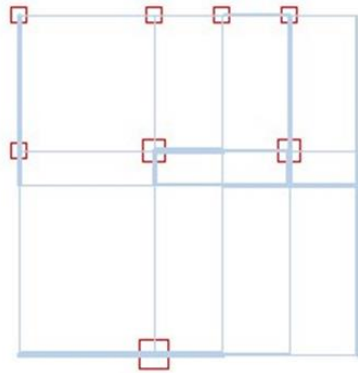


Fig.13 Case7, 8本

Table3 各ケースの評価値

| | Ev | 重量(t) |
|-------|-------|-------|
| Case1 | 0.707 | 8.02 |
| Case2 | 0.645 | 10.6 |
| Case3 | 0.585 | 13.5 |
| Case4 | 0.731 | 7.51 |
| Case5 | 0.726 | 7.61 |
| Case6 | 0.786 | 6.32 |
| Case7 | 0.772 | 6.62 |

5.考察

(1)Cases 1～3、建築規模の比較

Cases 1～3 の結果を比較すると、柱に接続してあるスパンの大きい梁は断面サイズが大きくなるという特徴がみられる。逆に、それ以外の梁の断面サイズは小さくなる傾向があり、総重量の低減が図られている。すなわち、柱と接する梁の本数は決まっているため、少ない柱で梁スパンを小さくできる柱配置が高評価になると考える。また、柱配置の共通点としては、構造物の中央付近に柱が少なく、外周に柱が多い配置が得られた。構造物の平面が大きくなった場合、柱の断面サイズはあまり変化しないが、梁の断面サイズは、柱配置にもよるが全体的に大きくなる傾向がみられる。また、構造物の平面サイズが大きいほど最適化時の最大評価値が小さくなっているが、これは、構造物の平面の大きさに比例してサイズの大きい部材断面が選択され、その結果、建物重量が大きくなるためと考える。

(2) Cases 1、4、柱配置の制約の有無の比較

Case1 と Case4 の結果を比較すると、Case1 では柱配置に制約があるため、柱が構造物の端にも配置されているが、Case4 では柱配置の制約がないため、構造物の両端に柱が配置されず、構造物の中央に多く柱が配置されている。また、評価値は Case4 の方が高くなった。これは、柱配置に制約がないため、より多くの選択肢から解を探索し、より建物総重量の小さい解が得られたためと考える。しかし、部材を自由に配置し選択肢を広げると、解が収束しない可能性もあり、ある程度の制約を設けることも必要であると

考える。

(3) Cases 4～7、柱本数の比較

Cases 4～7 の結果を比較すると、評価値は Case4.5 より、柱の多い Case6.7 の方が高くなった。これは、柱が増えた分、柱 1 本あたりの負担が小さくなり、断面サイズの小さな部材でも許容応力度を満たすことができ、総重量の軽減ができたので、評価値が高くなった。また、Case6.7 は、柱が多いので梁の負担が減り、太い梁が少なくなったことも評価値を上げる要因になった。

4Cases の中でいちばん評価値が高くなったのは、Case6 の柱 7 本のケースであるが、Case4.5 より柱の 1 本あたりの負担が少なく、Case7 より少ない柱で支えていて、重量の軽減が図れたからだと思う。また、Case6 の柱の配置は偏在することなく構造物に満遍なく配置されているので、梁への負担を小さくできた。

6.まとめ

本研究において、GA による鉄骨構造物の柱配置および部材選択の最適化を行った。なお、本研究では、許容応力度設計を満足することを制約条件とし、建物重量の最小化を目的関数とした最適化を行った。

本研究で構築した最適化システムにより、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た。これより、本システムは、構造計画の支援システムとして有効であると考えられる。

また、日本建築学会大会の研究から、柱本数の変更を行い、より多くのケースについて検討できた。評価値は高くなり、よりよい解が得られたと考える。

今度は、柱本数や建築規模などを変更し、より多くのケースを検討し、また、評価項目を追加して、よりユーザーの要望に近い構造物が見つかるように、システムの拡張を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 北村宏明 著：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993.6
- 2) 上野修平、山邊友一郎、谷明勲：GA による鉄骨構造物の柱配置及び部材断面最適化システム—最適化対象と評価指標の設定による解の比較—、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 52 号・構造系、pp.353-356、2012.6.
- 3) 上野修平、山邊友一郎、谷明勲：GA を用いた鉄骨構造物の柱配置最適化と部材断面最適化 評価方法による解の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、論文番号 11004、pp.7-8、2012.9.
- 4) 小島裕侍、山邊友一郎、谷明勲：GA を用いた鉄骨造ラーメンの柱配置と部材断面の最適化に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、論文番号 11064、pp.137、2014.9

*1 神戸大学大学院工学研究科 大学院生

*2 神戸大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

*3 神戸大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)