

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 裕侍*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 最適化

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、数多くの要素の組合せを考える必要があるが、その組合せは何通りも存在する可能性があり、その中から最適解を探索するのは困難である。このような問題に有効な手法として、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。例えば、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⁴⁾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同時に最適化し、構造計画・構造設計の際に、より良い部材配置、部材断面を提案できる設計支援システムを構築し、システムの有効性を検証することを目的とする。

2. システム概要。

2-1 部材断面リスト

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 7 種類、梁要素は 11 種類用意する。材料強度は、柱、梁ともに SN400 級としている。

Table1 柱断面リスト

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

Tables2 梁断面リスト

梁番号	断面	重量 (kg/cm)	断面積 (cm ²)
0	H-100×50	0.093	11.85
1	H-150×75	0.14	17.85
2	H-200×100	0.209	26.67
3	H-300×150	0.367	46.78
4	H-244×175	0.436	55.49
5	H-350×175	0.494	62.91
6	H-294×200	0.558	71.05
7	H-400×200	0.654	83.37
8	H-450×200	0.749	95.43
9	H-500×200	0.882	112.2
10	H-600×300	1.47	187.2
11	H-800×300	2.07	263.5
12	H-900×300	2.4	305.8

2-2 対象モデル

本研究で対象とするモデルは、数本の柱と梁で支持される 1 層鉄骨ラーメン構造物とし、階高は 3.6m と仮定する。ここでは、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。また、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ものとする。

2-4 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。2 スパンのケースを例に挙げると、まず、Fig.1 に示すように遺伝子座 0~1 で梁の配置場所を決定する。遺伝子座 0 で y 方向梁の始端位置、1 で x 方向梁の始端位置を、それぞれ染色体の数字の位置に梁始端位置を決定し、そこに梁を配置する。

次に、柱の部材選択をする。Fig.2 に示すように 9 箇所ある梁の交点に番号を振り、その番号と対応した遺伝子座の染色体の数字に対応した部材を、Table1 に示す柱断面リ

ストから選択する。なお、染色体の値が0の場合は、その梁節点には柱を設けないこととする。

最後に、梁の部材選択をする。Fig.3 に示すように梁に番号を与え、その番号と対応した遺伝子座の染色体の数字に対応した部材を、Table2 に示す梁断面リストから選択する。

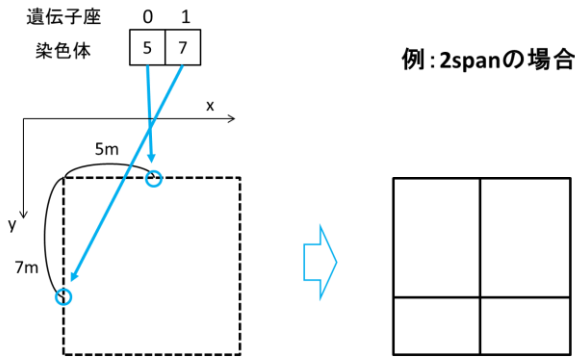


Fig.1 スパン割のコーディング

遺伝子座	2	3	4	5	6	7	8	9	10
染色体	2	4	5	0	1	2	2	6	0

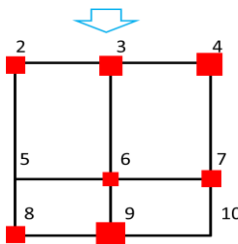


Fig.2 柱コーディング

遺伝子座	11	12	13	...	20	21	22
染色体	2	5	8	...	2	9	6

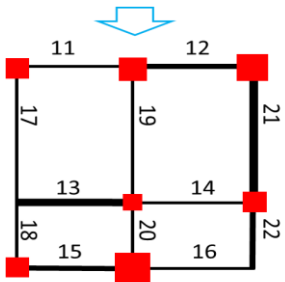


Fig.3 部材断面のコーディング

3. 評価関数

以下に、GA で用いる評価関数を示す。

(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足すべき条件として、許容応力度設計と層間変形角、たわみを、以下の6種を検討し、制約条件とする。

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

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で、1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る。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。

$$\text{Violation} \neq 0 : \text{ev.0} = 0.02 \times (1 - \text{Violation}/100) \quad (1)$$

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

(Violation : 違反部材数)

(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、建設コストが使用鉄骨量に比例すると考える。部材の総重量は柱・梁の合計を用いて、式(3)を用いて計算する。なお、最大重量 Max は、断面リストの中の最も重い部材のみ使用した柱9本、2スパンの構造物の重量、最小重量 Min は、断面リストの中の最も軽い部材のみ使用した柱4本の2スパンの構造物の重量とする。3スパンの場合でも同じ値を用いている。

$$\text{ev.1} = (M + \text{Min} - 2\text{Max}) / (2\text{Min} - 2\text{Max}) \quad (3)$$

(Min : 最小重量、Max : 最大重量、M : 構造物の重量)

(3) 外柱本数[ev.2]

建物の外周部の柱を減らすことにより、建物の外周の計画の自由度が上がると考え、計画の自由度の評価として、ev.2 を検討する。ev.2 は、式(4)を用いて算定する。

$$\text{ev.2} = 1 - k/24 \quad (4)$$

(k: 外柱本数)

(4) 無柱面積[ev.3]

構造物の内部の使いやすさの評価として、構造物の面積と柱のない最大の長方形の面積の割合を ev.3 の評価とする。ev.3 は、式(5)を用いて計算する。

$$\text{ev.3} = a/A \quad (5)$$

(a: 最大面積、A: 構造物の面積)

(5) 総合評価[Ev]

以上の4つの評価をまとめて、総合評価 Ev を式(6)で算定し、GA の評価値とする。

$$\text{Ev} = \text{ev.0} \times \text{ev.1} \times \text{ev.2} \times \text{ev.3} \quad (6)$$

4. 実行結果

本研究では、Table3 に示すように、Case1 : 10m×10m 2span、Case 2 : 18m×18m 3span、の2 Cases について検討し、それぞれの Case で評価指標の異なる Table3 に示す8パターンについて最適化を行った。Cases 1-1、2、Cases 2-1、2 は、柱位置を固定し、ev.1 のみで評価している。なお、制約条件 ev.0 は、全ての Cases において検討しており、全ての Cases において ev.0=1 となった。また、Tables 4、5 に、各 Case の Ev、ev.1、2、3、建物総重量、柱重量、梁重量

をそれぞれ示す。なお、表中の括弧付きの数値(評価値)は、総合評価の計算には用いていない評価値であるが、参考のため記す。なお、全ての Cases において、4 回の試行を行い、その中で最大評価の結果を示している。Figs.4~11 に、各 Case の最適化結果の部材配置図を示す。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。

Table3 実行 Case

Case	10×10m 2span	Case	18×18m 3span
1-1	柱位置固定 1	2-1	柱位置固定 1
1-2	柱位置固定 2	2-2	柱位置固定 2
1-3	ev. 1	2-3	ev. 1
1-4	ev. 2	2-4	ev. 2
1-5	ev. 3	2-5	ev. 3
1-6	ev. 1 ev. 2	2-6	ev. 1 ev. 2
1-7	ev. 1 ev. 3	2-7	ev. 1 ev. 3
1-8	ev. 1 ev. 2 ev. 3	2-8	ev. 1 ev. 2 ev. 3

Table4 Case1 実行結果

Case	Ev	ev.1	ev.2	ev.3	総重量(kg)
1-1	0.908	0.908	(0.833)	(1)	3593
1-2	0.953	0.953	(0.667)	(0.500)	2781
1-3	0.951	0.951	(0.667)	(0.600)	2865
1-4	0.917	(0.794)	0.917	(0.700)	8059
1-5	1	(0.761)	(0.667)	1	9149
1-6	0.776	0.931	0.883	(0.700)	3511
1-7	0.932	0.932	(0.667)	1	3489
1-8	0.774	0.929	0.833	1	3593

Table5 Case2 実行結果

Case	Ev	ev.1	ev.2	ev.3	総重量(kg)
2-1	0.796	0.796	(0.667)	(0.500)	11129
2-2	0.873	0.873	(0.500)	(0.333)	7549
2-3	0.860	0.860	(0.542)	(0.389)	8141
2-4	0.792	(0.627)	0.792	(0.389)	18985
2-5	0.833	(0.503)	(0.500)	0.833	24690
2-6	0.566	0.754	0.750	(0.611)	13076
2-7	0.444	0.727	(0.625)	0.611	14336
2-8	0.314	0.771	0.667	0.611	12295

5. 考察

(1)Case1(10m×10m、2span)に対する考察

重量のみを考慮する場合は、柱位置を固定した Case1-2 が最も評価が高くなった。柱位置を固定した Case1-1 では、部材数は少ないが、梁スパンが大きくなり、Case1-3 では、柱が少し偏り、スパンの大きい梁ができるため、断面の大きな梁が使用され、Case1-2 より重くなったと考える。経済性を高くするには、柱を増やし、梁のスパンを小さくすることで、小さな梁断面でも制約条件を満たすことができ、重量を軽くすることができると思われる。

Cases1-4、6をみると、内柱を片側に寄せることで、外

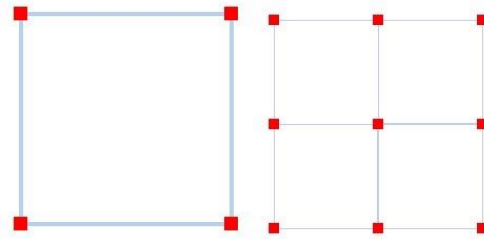


Fig.4 Cases1-1 (左図)、2 (右図)

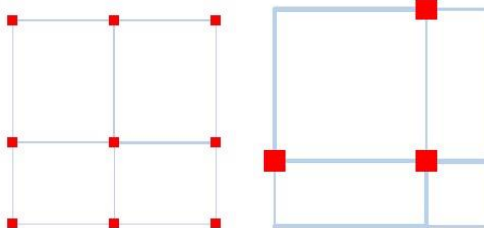


Fig.5 Cases 1-3 (左図)、4 (右図)

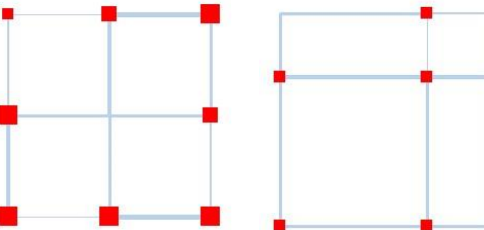


Fig.6 Cases 1-5 (左図)、6 (右図)

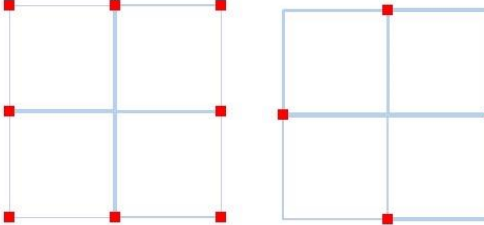


Fig.7 Cases 1-7 (左図)、8 (右図)

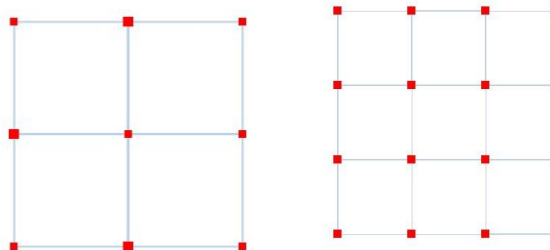


Fig.8 Cases 2-1 (左図)、2 (右図)

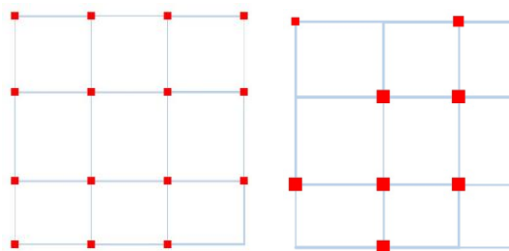


Fig.9 Cases 2-3 (左図)、4 (右図)

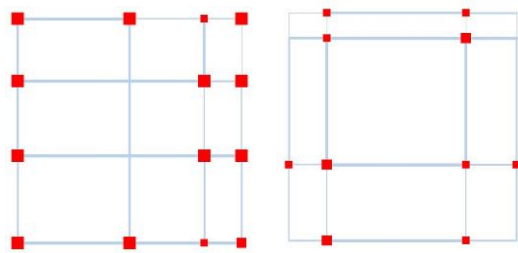


Fig.10 Cases 2-5 (左図)、6 (右図)

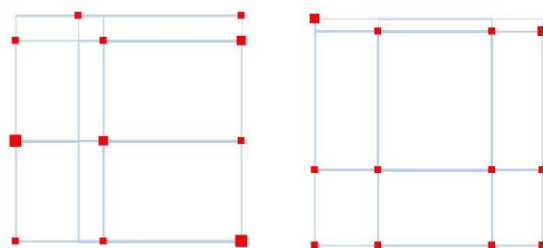


Fig.11 Cases 2-7 (左図)、8 (右図)

柱を減らす柱配置となった。Case1-4 では重量を考慮していないので、断面の大きい部材を使い、外柱が2本まで減る結果となった。Case1-6 は、Case1-4 に比べ、外柱が多いが、その部材1つあたりの荷重が減少し、断面の小さな部材で制約条件を満たすことができたので、経済性が高い結果が得られた。

Case1-5 では、無柱面積のみで評価しているため、内柱を抜くと ev.3 が最大となり、最適の解になるので問題が簡単になり、多数解のうちの1つとなった。Case1-7 は、内柱がなく ev.3=1 となった上で、柱断面を小さくした結果となった。しかし、構造物内部の梁はスパンが大きく、断面も大きい結果となった。

Case1-8 の結果を見ると、外柱4本で片持ち梁によって支える結果となった。今回の評価関数の設定では、外柱を1本減らすよりも、内柱を1本減らす方が、評価が上がりやすいので、このような結果になったと考える。この場合の結果は、全ての評価指標が高い結果となった。

(2) Case2(18m×18m, 3span)に対する考察

重量のみを考慮する場合は、Case1 の場合と同じく、柱位置を固定した Case2-2 が最も評価が高くなった。Case2-3 は Case2-2 より柱が1本少ないが、梁スパンが大きくなったために断面の大きな梁が使用され、Case2-2 より重くなったと考える。

Case2-4 では、梁のスパンを小さくし、大きい断面の柱を使うことで、外柱の本数が減少した。この場合、梁スパンが大きくならないように、外柱をまばらに減らしている傾向がある。Case2-6 では、評価に重量を考慮しているため、柱と接していない梁のスパンが大きくなならない構成とするため、内柱が偏る結果となった。

Case2-5 では、2本の内柱が片側に寄り、無柱面積が大き

くなる結果となった。しかし、梁スパンが大きいため、大きい断面が多く使われており、重量は重くなっている。評価に重量も考慮している Case2-7 の場合は、無柱面積の評価は低い、重量が軽い結果が得られた。

Case2-8 は、外柱を減らしつつ無柱面積を広くとるために、2本の内柱を外周から1mのところのところに配置される結果となった。この結果から、外柱がない方に内柱を寄せると、ev.1、ev.2、ev.3 ともに高い評価が得られることがわかった。

(3) Cases1、2に対する考察

Cases 1、2 ともに、構造物の規模が大きくなっても、柱断面はあまり大きくならなかったが、梁のスパンが大きくなると梁断面も大きくなるので、構造物の規模が大きくなると、柱重量より梁重量が大きくなるのがわかった。したがって、経済性を高くするには、梁スパンが大きくならないような柱配置が必要であると考える。

また、構造物の規模が大きいと、制約条件を満たしにくくなるので、Case2 は Case1 に比べ、ev.2、ev.3 の評価が上がりにくい傾向が見られた。

6.まとめ

本研究では、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、外柱本数、無柱面積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。

今度は、梁のスパン割のコーディングを見直し、短いスパンが生成されない柱配置とすることや、評価値に重みをつけることで、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) 小亀裕侍、谷明勲、山邊友一郎：GA を用いた鉄骨造における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 11030、pp.59-60、2015.9.

- *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)