

GA を用いた鉄骨構造物の柱配置と断面選択最適化システム

○上野 修平*¹ 山邊 友一郎*²
谷 明勲*³

キーワード：構造 遺伝的アルゴリズム 断面選択

1. はじめに

建築構造の組み合わせは無数に存在し、通常、建築の構造設計を行う場合、設計者がそれらの中からいくつかの案を提案し、それらを比較・検討していき建築物の構造を決定していく。しかし、このような方法の場合、設計者の経験や勘に依存することも多く、検討を行っていないより優れた構造が存在する可能性があることも考えられる。また、近年急速に性能が向上しているコンピュータを用いる方法も考えられるが、建築構造の解は無数に存在するため解空間の全数探索を行うには未だに多くの時間を要する。

このように、解が無数に存在する組み合わせ最適化問題の解決法として、遺伝的アルゴリズム⁽¹⁾⁽²⁾(GENETIC ALGORITHMS：以下 GA と記す)が用いられている。GA は生物進化の過程(選択淘汰、突然変異)に着想を得たアルゴリズムであり、確率的探索、学習、最適化の一手法と考えられる。GA を用いた建築構造物に関する研究では、これまでコアを含む事務所ビルの構造要素最適化配置⁽³⁾や自由曲面シェルのみずみエネルギー最適化⁽⁴⁾、リカレント建築における多目的最適化による設計支援システム⁽⁵⁾等が行われている。

本研究では、GA を利用して鉄骨構造物の柱配置と部材断面選択に対して最適解の探索を行う。より広い解空間の探索を行うことで建築構造設計を支援できるようなシステムの構築を目的とする。

2. システムの概要

設計する構造物の入力として、対象構造物の X 方向、Y 方向のそれぞれの規模を設定し、次に柱配置候補座標を決定するため X 方向、Y 方向の分割数を設定する。これらの入力情報を基に、GA で用いる染色体配列が生成される。染色体配列と構造物との関係は 4 章で示す。

Fig.1 は正方形の平面に対して、X 方向、Y 方向それぞれ 4 分割に設定したもので赤いマークで柱配置候補座標、青いマークで柱が存在する座標を示している。このように構築された設定に対して GA を適用する。遺伝子情報により柱配置、部材断面を決定し、マトリックス構造解析法の変位法⁽⁸⁾⁽⁹⁾を用いた解析の後、定められた評価指標による適応度を算出、遺伝的操作を加え、終了世代まで繰り返すことで最適化を行う。なお、本研究では遺伝的操作で用いられる遺伝的パラメータについては設定の必要がないパラ

メータフリー遺伝的アルゴリズム⁽¹⁰⁾(PFGA)を用いて最適化を行った。このシステムのフローを Fig.2 に示す。

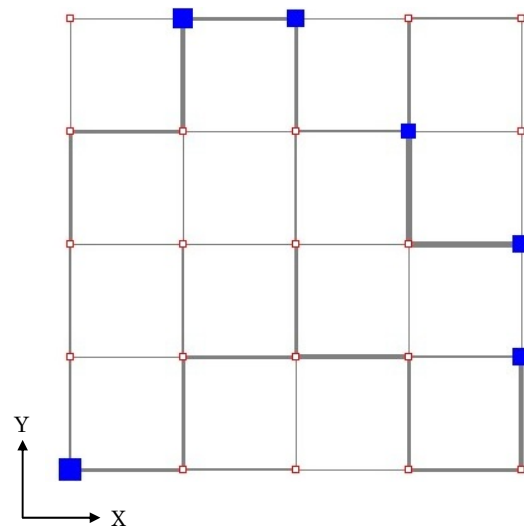


Fig.1 設定のサンプル図

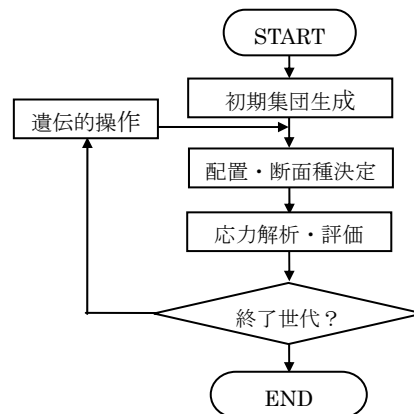


Fig.2 システムフロー

3. 対象モデル

本研究では、最適化の対象構造モデルは、長方形の平面形状を持つ 1 層鉄骨造構造物とし、規模はユーザ入力により決定される。階高は 3.6m で一定とし、設計用荷重は 1 層ではあるが事務所用の床荷重を想定する。また、床、壁、小梁等の二次的な部材は設計対象とせず、柱と梁のみで構成されるラーメン構造を考える。また、接合部は全て剛接合とし、接合部強度の検討は行わないものとする。ここで

は、全部材について断面の算定は行いが、部材配置については柱配置のみを最適化の対象とし、問題の簡略化を図る。

部材の断面算定最適化で選択対象とする部材断面を Tables1, 2 に示す。使用する鋼材種別は、柱部材には角型鋼管(STKR400)を、梁部材には H 型鋼(SN400B) を用いるものとし、柱要素は 6 種類、梁要素は 8 種類用意する。

Table1 柱部材表

柱番号	H (mm)	B (mm)	T (mm)	重量 (kg/m)
1	150	150	4.5	20.1
2	175	175	5	26.2
3	200	200	9	52.3
4	250	250	9	66.5
5	300	300	9	80.6
6	350	350	12	124

Table2 梁部材表

梁番号	H (mm)	B (mm)	Tw (mm)	Tf (mm)	重量 (kg/m)
0	100	50	5	7	9.30
1	148	100	6	9	20.7
2	200	100	5.5	8	20.9
3	250	125	6	9	29.0
4	300	150	6.5	9	36.7
5	400	200	8	13	65.4
6	500	300	11	18	128
7	588	300	12	20	151

解析に用いる荷重は、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。床荷重は固定荷重(2.8kN/m²)、積載荷重(1.8kN/m²)の合計として 4.6kN/m²を梁中央部に設けた接点に集中荷重として作用させる。

次に、水平方向の荷重は、X、Y 方向 2 方向から建物自重の 80%を作用させる。この水平荷重をそれぞれの方向のスパン数で分割して作用させる。水平力を建物総重量の 80%と大きめに設定した理由は、本研究では 1 層構造物を対象とするが、将来的に多層構造物への発展を目指しており、多層構造の 1 層部分を想定しているためである。

4. コーディング

ここでは、最適化対象となる構造モデルと GA における染色体との対応関係について述べる。

構造物については、X 方向、Y 方向ともに、規模(m)と分割数をそれぞれ入力する。これらの情報より一定間隔の座標が決定され、対応する遺伝子座を Fig.3 のように作成する。各遺伝子座では、柱には設定された柱の部材番号 (Table1 参照)または 0 が遺伝子座情報となる。遺伝子座の値が 1~6 の場合は対応する部材断面の柱が遺伝子座の対応する座標に配置され、0 の場合は、その座標に柱を配置せ

ずに架構を構成する。

なお、本研究では、梁の部材の有無の判断は行わず、遺伝子座には設定した梁番号(Table2 参照)が書き込まれる。梁は、設定された座標位置を接点として x、y 両方向に、網目のように配置する。

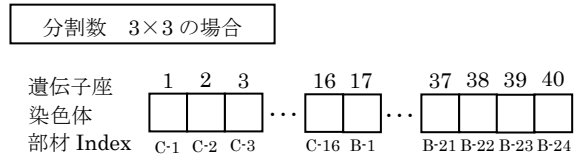


Fig.3 染色体と遺伝子情報(分割数 3×3)

5. 評価指標

GA において各個体の適応度を算出し、現実的に優れた解を選択するために設定した評価指標を以下に示す。

・構造制約条件[Ev.1]

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以下の 6 種の制約を設ける。

- 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 or 1/250
- 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で、一つでも制約条件を満たさない部材がある場合は、式(1)を用いて評価を大きく低減させ、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 1 とする。

$$Ev.1 = \frac{1 - \left(\frac{violation}{Total} \right)}{10} \quad (1)$$

$$Ev.1 = 1 \quad (2)$$

violation : 違反部材数

Total : 総部材数

・部材総重量[Ev.2]

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。また、総重量が増えることで、構造物に作用する水平荷重の大きさも大きくなる。なお、部材総重量は染色体で決定される部材重量の合計とし、式(3)で評価値を求める。なお、最大総重量は、単位長さ当たりの重量が最も重い部材を全ての柱、梁部材に選択した場合の構造部材総重量とする。式(3)より、部材総重量が小さければ小さいほど適応度が高くなる。

$$Ev.2 = 1 - \left(\frac{weight}{max\ weight} \right) \quad (3)$$

weight : 部材総重量
max weight : 最大重量

・柱本数の評価[Ev.3]

構造物に短スパンで柱が乱立することを防ぎ、室内空間のレイアウトの自由度が増し、使い勝手をよくするための評価指標として、柱本数の評価を設定する。柱本数を柱候補座標数で除し、柱本数が少ない場合に評価が高くなるように式(4)で評価値を求める。

$$Ev.3 = 1 - \left(\frac{Nc}{maxNc} \right) \quad (4)$$

Nc : 柱数
MaxNc : 柱候補座標数

・偏心率の評価[Ev.4]

偏心率を評価する値として Ev.4 を用いる。この評価では、剛心と重心が近いほど評価が高くなるように、X 方向の偏心率と Y 方向の偏心率を相乗平均したものを 1 から引くことにより、式(5)で評価値を求める。また、重心位置は長方形平面を対象としているため、X 方向、Y 方向それぞれ構造物の中点としている。

$$Ev.4 = 1 - \sqrt{Re_x * Re_y} \quad (5)$$

Re_x : X 方向偏心率
Re_y : Y 方向偏心率

最終的な個体の適応度 *Ev* として、Ev.2、Ev.3、Ev.4 を相乗平均に Ev.1 の制約条件評価を乗じたものを用いる。

$$Ev = Ev.1 * \sqrt[3]{Ev.2 * Ev.3 * Ev.4} \quad (6)$$

6. 実行

本研究では、PfGA での家族数を 10 家族に設定する。実行した設定内容を Table3 に示す。

Table3 実行内容

	実行世代数	建物規模(m) x×y	分割数 x×y	乱数系列
No.1	10000	16×16	4×4	1
No.2				2
No.3				3
No.4				1
No.0				1

実行世代数は 10000 世代に統一した。No.1～No.3 では建物規模を 16m×16m、スパンの分割数を 4×4 に設定し、柱候補座標のスパンを X 方向、Y 方向それぞれ 4m スパンとした。なお、Nos.1～3 では、初期集団生成と遺伝的操作のための乱数系列を 1～3 へと変化させた。

また、No.4 では建築物の規模を 20m×20m に拡大し、X 方向、Y 方向の柱候補座標のスパンをそれぞれ 5m とした。

参考として No.0 には既報⁽⁶⁾⁽⁷⁾で使用したシステムの実行

データを用いる。既報のシステムでは評価指標を部材総重量の最小化だけに絞り、重量評価[Ev.2]と制約条件判定[Ev.1]の積により適応度を算出している。

7. 実行結果

Table4 と Figs.4～8 に実行後に出力されたデータを示す。

Table4 には各実行結果の構造物総重量、柱本数、上記の評価指標から得られた最優秀個体適応度を示す。なお、構造物総重量は柱部材、梁部材の重さの合計で、壁などその他の部材の重量は含まれていない。また、No.0 における最優秀個体適応度は重量評価[Ev.2]と制約条件評価[Ev.1]との積であるが、Nos.1～4 では式(6)で得られる値である。

Figs.4～8 に最優秀個体における柱梁の配置図と PfGA の最優秀個体の進化過程を示す。配置図で、青いマークは柱配置位置を示し、部材断面の大きさに応じて大きさを変えている。梁部材も同様に大きな部材断面であるほど太い線で示している。また、赤いマークは柱が存在しない柱候補座標を示している。

8. 考察

Nos.1～4 では、解の収束にばらつきが見られる。これは、

Table4 実行結果

	総重量(kg)	柱数(本)	適応度
No.1	12863.36	13	0.673
No.2	12950.23	15	0.633
No.3	13656.44	16	0.604
No.4	19284.54	18	0.530
No.0	11233.04	23	0.682

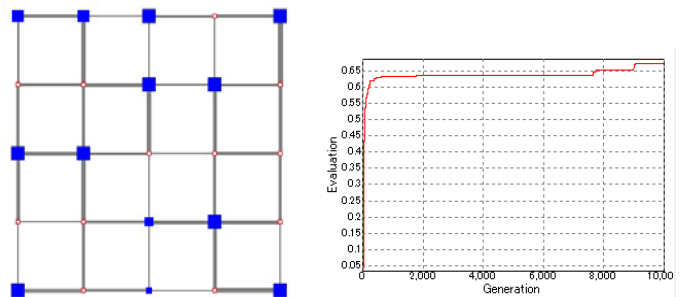


Fig.4 No.1 の最適化結果

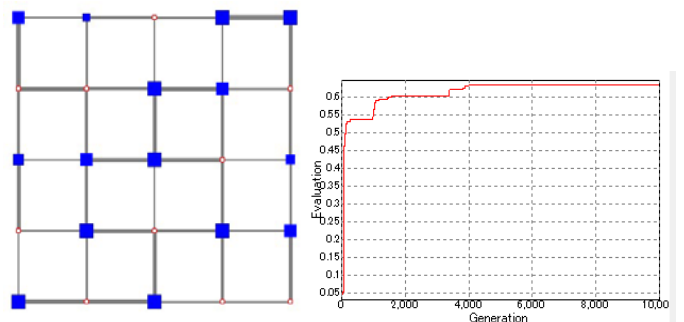


Fig.5 No.2 の最適化結果

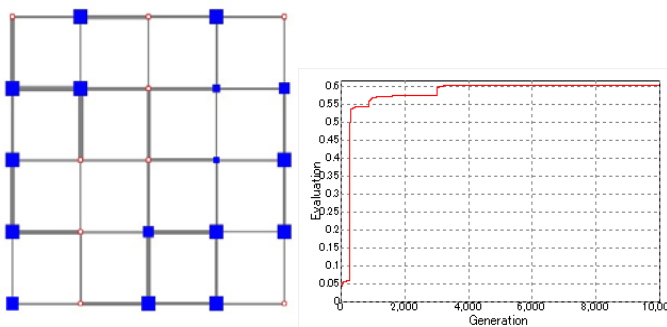


Fig.6 No.3の最適化結果

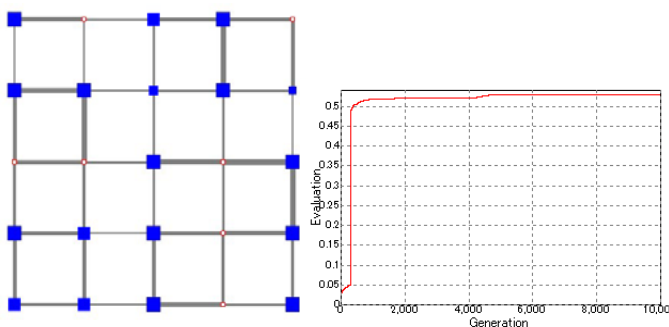


Fig.7 No.4の最適化結果

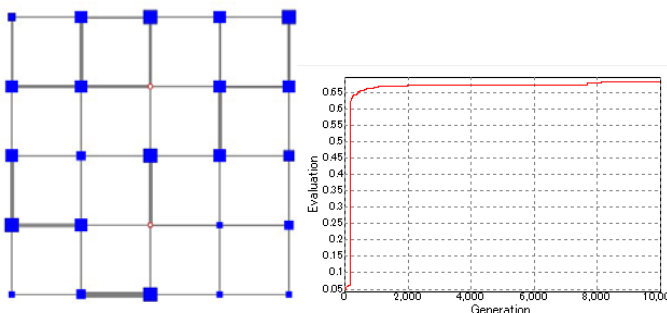


Fig.8 No.0の最適化結果

今回の実行世代数では最適化が十分に進んでいないことが考えられ、今後、世代数を増やした検討を行う必要がある。しかし、偏心率と柱数を評価したことにより、10000世代での優秀個体でも、既報⁽⁶⁾⁽⁷⁾に比べて柱配置の整合性が得られるようになった。また、柱を配置しない座標が増えることで、柱の存在する位置と梁部材の大きさの関係性もわかりやすくなった。今後、それらの関係性についても検討を行う予定である。

重量のみを評価した No.0 の実行結果では、柱本数が多くなるが部材総重量自体は最も小さくなった。これは、梁部材に断面の小さな部材を多く使うことで重量を低減していることが考えられる。しかし、平面内に柱が多く存在するため、大きなスペースを作ろうとする場合、重量評価のみでは適さず、他の場合と比較して早い段階で解が収束している。これは評価指標が単純なためと考えられる。

9. おわりに

本研究では、GA を用いて鉄骨構造物の柱配置と部材断面の最適化を行った。既報⁽⁶⁾⁽⁷⁾の最適化結果と、評価に柱数、偏心率を加えた今回のシステムによる最適化結果を比較し、その違いやそれぞれの有用性が確認できた。また、今後の課題として、柱位置と部材断面種の間係性を明らかにすることがあげられる。このような課題を検討し、その結果をシステムに取り入れることで、より構造設計に有用なシステムの構築を目指す。

[参考文献]

- 1) Holland, J. H. : Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan, 1975, and MIT Press, 1992.
- 2) 北村宏明 著：遺伝的アルゴリズム、産業図書、1993.6
- 3) 山邊友一郎、藤井健司、谷明勲：GA を用いた低層鉄骨構造物の構造要素最適配置システム 単一目的最適化と多目的最適化の比較、構造工学論文集、vol.57B, pp.61-67, 2011.
- 4) 和田大典、本間俊雄：解の多様性を考慮した GA 系解法による自由曲面シェル構造のひずみエネルギー最適化に関する研究、コロキウム 構造形態の解析と創生、pp25-30, 2009.
- 5) 北村大輔、谷明勲、山邊友一郎、河村廣：リカレント建築における多目的最適化による設計支援システム、第 29 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、論文、pp.37-42、2006
- 6) 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、日本建築学会近畿支部研究報告集 第 52 号、2012.6
- 7) 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、日本建築学会学術講演梗概集、2012.9
- 8) A. Ghali, A. M. Neville, 川上洵 著：構造解析の基礎と応用—線形・非線形解析および有限要素法—、pp.275-307、技報堂出版、2001.
- 9) 青山博之、上村智彦：マトリックス法による構造解析、培風館、1988.2
- 10) 北村宏明 著：遺伝的アルゴリズム 4、産業図書、2000.8
- 11) DeJong, K. : An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems, Ph. D. Thesis, University of Michigan, 1975
- 12) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：2007年版建築物の構造関係技術基準解説書、全国官報販売協同組合、2007.8
- 13) 社団法人鋼材倶楽部：わかりやすい鉄骨の構造設計、技報堂出版、1994.2

*1 神戸大学大学院工学研究科 修士課程
 *2 神戸大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学)
 *3 神戸大学大学院工学研究科 教授 博士(工学)