

# 実構造物における構造最適化の適用事例

## 遺伝的アルゴリズムによる構造部材の最適化

### Application Example of Structural Optimization in an Actual Structure

#### Optimization of Structural Elements with Genetic Algorithm

○三橋 建\*1, 松山 礼佳\*2  
Tatsuru MIHASHI\*1 and Reika MATSUYAMA\*2

\*1 株式会社三和創研 Project Architects 一級建築士事務所 代表取締役 工修  
Representative Director, Sanwa Soken Co., Ltd. Project Architects Architecture Office, Master of Engineering.

\*2 福岡大学大学院工学研究科建設工学専攻 大学院生  
Graduate Student, Graduate school of Eng., Fukuoka Univ.

キーワード: 構造最適化; 構造設計; 遺伝的アルゴリズム; 性能設計  
Keywords: Structural Optimization; Structural design; Genetic Algorithm; Performance Design.

## 1. はじめに

本報告では福岡県内における実構造物において、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下GA)を使った構造部材の最適化を行った事例の概要とその具体的手法について報告する。

計画建物は延べ床面積約 4500 m<sup>2</sup>、地上 3 階の鉄骨造の工場である。平面は 76m×47m の長方形、高さ 12m の規模の建物となっている。図 1 に建物の外観パースを示す。

本プロジェクトは来年の着工に向けて現在実施設計を進めているところである。

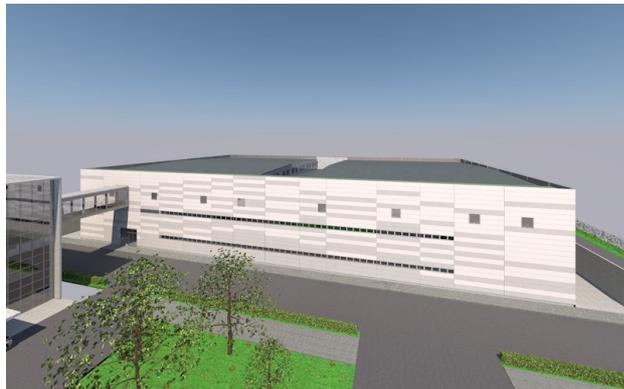


図 1 建物外観

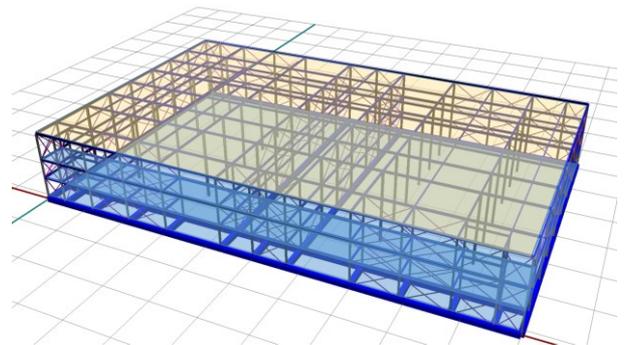


図 2 架構パース

## 2. 構造計画概要及び解析モデル

計画建物の架構形式は鉄骨造のブレース付きラーメン構造となっている。工場内部は 1 階床から屋根まで吹き抜けとなっており、一部 3 層のスラブで構成される範囲を有する。X 方向は 3 構面、Y 方向は 6 構面のブレース架構を設置する計画となっており、屋根面は水平ブレースを設けて面内剛性を確保する計画としている。(図 2・図 3)

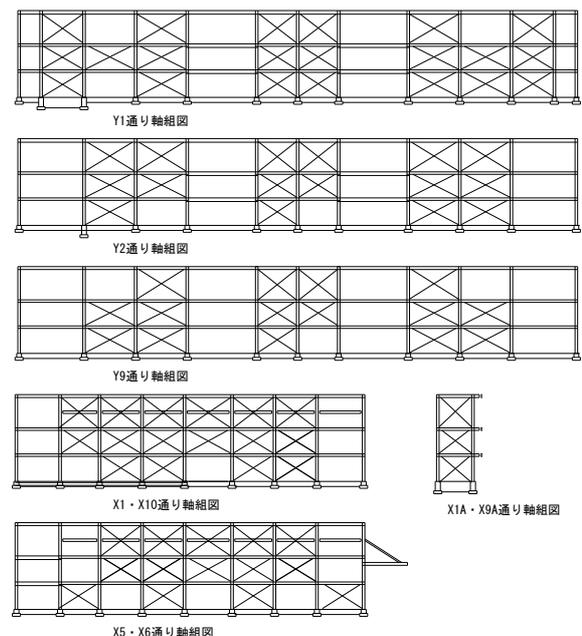


図 3 代表軸組図

Y 方向の重心が偏っており、X 方向のブレースの配置にあたっては偏心率を確認しながら計画を行う必要がある。

解析モデルは、屋根面及び床スラブは柔床仮定とし、床の水平面内の変形を考慮する。鉛直ブレース及び水平ブレースは引張ブレースであるため、Newton 法による収束計算を行う。節点数は 378、柱・梁・トラスの要素数は 1204 となっている。

建築基準法における耐震計算は建築基準法における鉄骨造のルート 2 とする。

### 3. 最適化システムの構築

最適化計算ができる一貫構造計算プログラムがまだ販売されていない事もあり、実務に構造最適化が行われている事例はまだ少ない。

現在行われている構造最適化は、市販の骨組解析ソフト（解析ソルバー・一貫計算プログラムや汎用応力解析ソフト）と最適化ソフトの二つの組み合わせていることが多いと予想される。

この方法で最適化計算を行った場合、解析ソルバー部分（骨組解析ソフト）においては、プログラムの起動、入力データの読込、応力解析、解析結果の出力の処理が必要となり、最適化計算部分においては、解析結果の読込、目的関数の評価、設計変数の出力の処理が必要となる。（図 4 における黒のフロー）

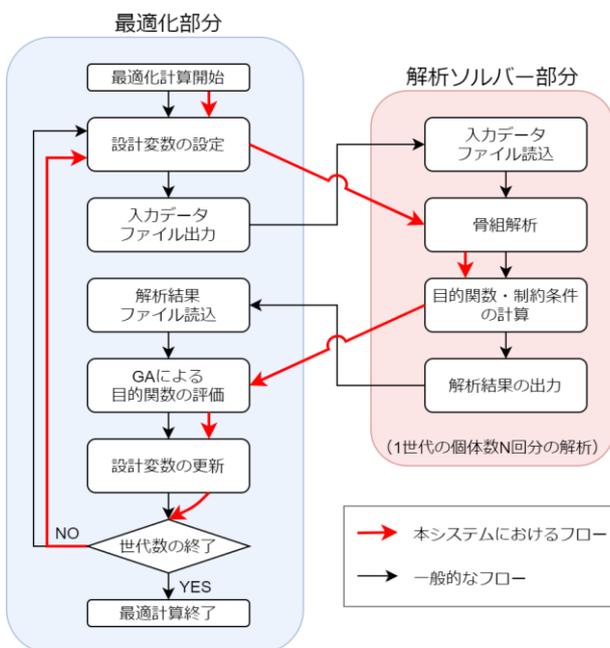


図 4 最適化フロー

時刻歴応答解析や静的荷重増分解析のように、解析そのものに時間を要するような構造物の場合は、ファイルの入出力に要する時間が占める比率はさほど大きくない

が、本検討における弾性解析においては、1 ケースの解析時間に要する時間がかなり短いことから骨組解析と最適化計算以外のファイルの入出力時間に要する時間がある程度の比率を占めると想定される。

GA による最適化計算を行う場合には、一般的には膨大な量の解析を行う必要があるため、開発言語 Python を用いて、解析ソルバー及び最適化計算部分を一体化したシステムを構築し、最適化システムの高速度を図った。（図 4 における赤のフロー）

GA による最適化計算は、多目的最適化が可能で、制約条件が比較的容易に設定できる Python の最適計算ライブラリ pymoo (<https://pymoo.org/>) を使用する事とした。

### 4. 骨組解析の概要

最適化システムの解析ソルバーとして OpenSeesPy を採用した。OpenSeesPy は架構・荷重のデータは Python のコードの中に記載し、解析結果も内部変数に出力する仕様となっており、プリポスト部分は必要に応じてユーザー側で準備する必要がある。

今回は、構造システム社の一貫構造計算プログラム NBUS7 の入力インターフェースを利用して骨組解析に必要なデータを入力し、架構・荷重データをテキスト出力することとした。

解析ソルバーでは、この出力データから節点座標、部材配置及び荷重条件を初回に読み込んでおき、GA で生成された個体毎に選択された部材断面（断面性能）を設定し、骨組解析を行う。

最適計算における解析ソルバーの 1 回の解析においては、一次設計用地震荷重時 XY 方向の 2 ケースの解析を行う。本計画においては引張ブレースを採用しているため、本来は正負方向加力での検討も必要であるが、解析時間を短縮するため、正方向加力のみ解析を行う。

解析結果は各要素の断面力（曲げ・せん断・軸力）及び各節点座標の変形を内部変数に持っており、これらの値より、各要素の断面検定、層間変形角、剛性率、偏心率、鉄骨総重量を計算する。これらの値を使って GA における目的関数の評価を行う。

最終的には最適計算の結果における選定されたブレース及び柱の断面を NBUS7 に戻して解析結果の確認を行う。

NBUS7 と OpenSeesPy の解析結果は、節点変位及び断面力について検証した結果、ほぼ一致することを確認している。

なお、1 回の解析に必要な時間は今回の解析に使用した PC (Corei7-7700 2.80GHz) で 0.2~0.4 秒程度であった。

## 5. 最適化計算の条件設定

今回の検討で採用する最適化のアルゴリズムはNSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)を採用し、多目的最適化を行う。

本検討における目的関数は、建物の性能を表す指標の断面検定の平均値、最大層間変形角及びコストを示す鋼材重量とした。(表1)

最適化の対象とする設計用荷重は常時荷重時と一次設計用地震荷重時の組み合わせによる短期荷重時とする。性能設計を行うため、地震荷重は重要度係数  $I=1.0$  及び  $1.5$  とした場合について検討を行う。風荷重や雪荷重については別途検討を行うものとし、最適化の対象としない。

一次設計用地震荷重時の設計目標を制約条件として表2に示すように設定した。目標とする層間変形角は  $1/200$  以下であるが、傾向を確認するために制約条件は範囲を広げて  $1/120$  以下としている。

最適化を行う部材は、鉛直ブレース、水平ブレース及び柱断面とし、表3に示すようにグルーピングし、最適化における設計変数番号に割り当てる。本検討では梁断面は地震荷重によって決定される影響が小さいため、設計者が選定した断面で固定とした。

表 1. 目的関数の最適化条件

| 目的関数     | 条件  |
|----------|-----|
| 断面検定の平均値 | 最小化 |
| 層間変形角    | 最小化 |
| 鉄骨総重量    | 最小化 |

表 2. 制約関数の制約条件

| 制約関数    | 条件         |
|---------|------------|
| 各要素の検定値 | 0.9 未満     |
| 層間変形角   | $1/120$ 以下 |
| 剛性率     | 0.6 以上     |
| 偏心率     | 0.05 以下    |

表 3. 設計変数

| 設計変数番号   | 位置                  |
|----------|---------------------|
| 0,1,2    | X1・X10 鉛直ブレース (各階)  |
| 3,4,5    | X5・X6 鉛直ブレース (各階)   |
| 6,7,8    | X1A・X9A 鉛直ブレース (各階) |
| 9,10,11  | Y1 鉛直ブレース (各階)      |
| 12,13,14 | Y2 鉛直ブレース (各階)      |
| 15,16,17 | Y9 鉛直ブレース (各階)      |
| 18       | 柱 1 (X 方向強軸)        |
| 19       | 柱 2 (Y 方向強軸)        |
| 20       | 水平ブレース (R 階)        |

GA における設計変数は離散値 (整数) とし、ブレースは 10 種類、柱は 4 種類の断面リストを準備し、番号に対してそれぞれの断面性能を割り当てている。

GA におけるパラメーターは表 5 のように設定を行った。

表 4. 断面リスト

| 番号 | ブレース形状           | 番号 | 柱形状             |
|----|------------------|----|-----------------|
| 0  | ブレースなし           | 0  | H-300×300×10×15 |
| 1  | L - 75×75×9      | 1  | H-350×350×12×19 |
| 2  | L - 90×90×10     | 2  | H-400×400×13×21 |
| 3  | L - 90×90×13     | 3  | H-390×300×10×16 |
| 4  | [-150×75×9×12.5  |    |                 |
| 5  | [-200×90×8×13.5  |    |                 |
| 6  | 2[-125×65×6×8    |    |                 |
| 7  | 2[-150×75×6.5×10 |    |                 |
| 8  | 2[-150×75×9×12.5 |    |                 |
| 9  | 2[-200×90×8×13.5 |    |                 |

表 5. GA におけるパラメーターの設定

| 引数      | 設定値                        |
|---------|----------------------------|
| 個体数     | 500                        |
| 世代数     | 100                        |
| 初期集団の抽出 | ランダムサンプリング                 |
| 交叉方式    | Simulated Binary Crossover |
| 突然変異方式  | Polynomial Mutation        |

## 6. 最適化計算の結果

GA による最適計算の結果 (パレート解) を図 5 及び図 6 に示す。鋼材量一層間変形角の関係はきれいなパレート解の曲線が得られているが、鋼材量一断面検定平均値の関係はばらつきが大きい結果となっている。パレー

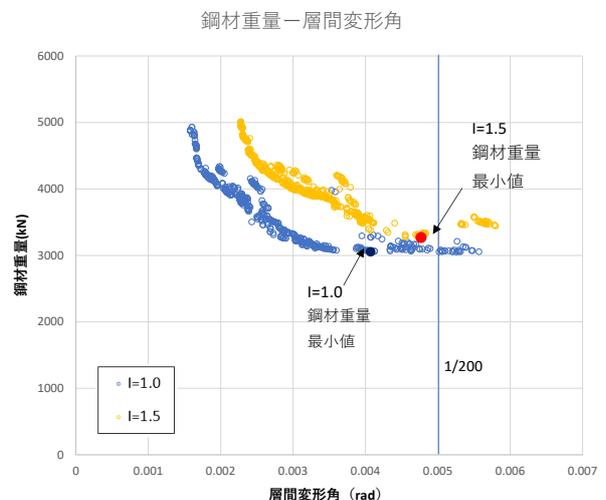


図 5 鋼材重量一層間変形角関係

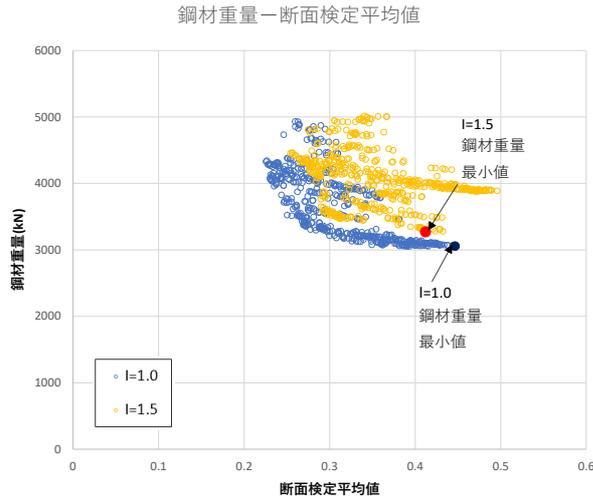


図6 鋼材重量—断面検定平均値

ト解が幅を持ったものになっているのは3つの関数について最適化を行ったことによると考えられる。

今回の解析結果 (I=1.5) で得られた最適解の一つ、層間変形角が 1/200 以下かつ制約条件を満足した中で、最も重量が小さいものの断面リストの例を表6に示す。

さらに鋼材量の少ない組み合わせが存在することを確認しているが、おおむね良好な結果が得られている。

表 6. 最適計算結果の解の一例 (I=1.5)

| 位置     | 1F                | 2F                | 3F               |
|--------|-------------------|-------------------|------------------|
| X1/X10 | 2[-150×75×6.5×10] | L-90×90×13        | [-150×75×9×12.5] |
| X5/6   | 2[-150×75×6.5×10] | 2 [-125×65×6×8]   | —                |
| X1A/9A | [-200×90×8×13.5]  | [-200×90×8×13.5]  | L-90×90×10       |
| Y1     | 2[-150×75×9×12.5] | [-200×90×8×13.5]  | —                |
| Y2     | 2[-150×75×6.5×10] | [-200×90×8×13.5]  | 2 [-125×65×6×8]  |
| Y9     | 2[-150×75×6.5×10] | 2[-150×75×6.5×10] | [-150×75×9×12.5] |
| 柱 X    | H-390×300×10×16   |                   |                  |
| 柱 Y    | H-390×300×10×16   |                   |                  |
| 屋根面    | L-75×75×9         |                   |                  |

今回の設計変数と断面リストの数から計算される総組み合わせ数は  $10^{19} \times 4^4 = 2.6 \times 10^{21}$  ケースである。1 ケース 0.4 秒かかるとして、これらすべてのケースを解析すると、33 兆年と天文学的な時間を要することになるが、本システムではおおむね 5~6 時間で解析結果が得られており、効率的に解が得られていると判断される。

## 7. 耐震性能における性能設計

本構造物の構造設計では耐震性能における性能設計を行っており、重要度係数 I=1.0、1.5 の場合の躯体コストと耐震性能の関係について説明を行った。

I=1.5 を採用した場合、I=1.0 とした場合に比べて躯体のコスト増が 6%程度であったことから、クライアントと協議の上、実施設計では重要度係数 1.5 を採用して耐震設計を行うこととした。

最適化計算の結果は性能設計における耐震性能の可視化ツールとしても有用であると考えられる。

## 8. まとめ

今回の検討における一回の最適化計算に要する時間は 5~6 時間となっており、実務で使用するためには解析時間の短縮が必要である。

AWS や GCP 等のクラウドシステムが提供するサーバーレスコンピューティングを利用すれば、大量の並列解析を行う事が可能である。

図7に示すような GA における 1 世代の解析を並列解析することで 1 回の最適化の大幅な時間短縮が可能となり、実務ベースでも最適化を利用しやすくなると考えられるため、開発を進める予定である。

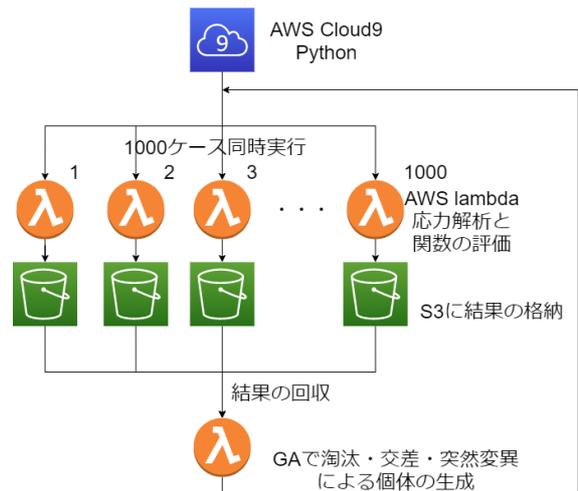


図7 並列処理による最適化システムの高速度化

今回試みた構造最適化は、構造設計者が経験に基づいて断面リストをあらかじめ選定するものであり、断面選定における補助的なツールとして使用する事を目的としている。本報告における手法はブレース構造に限らず、他の構造形式(純ラーメン架構や耐震壁付ラーメン架構)でも応用可能であると考えられ、今後のプロジェクトへ応用していく予定である。

## 【参考文献】

- 1) GH\_CPython と OpenSeesPy を用いた Grasshopper 上におけるオープンソースな構造形態創生環境の構築 藤田 慎之輔 第 42 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 2019 年 12 月