

鉄鋼系工業化住宅における構造最適化アルゴリズム

Algorithm of Structural Optimization for Steel Industrialized Housing

中川大輔
Daisuke Nakagawa

佐田貴浩
Takahiro Sada

吉富信太
Shinta Yoshitomi

要 旨

構造設計者の試行錯誤の軽減と個人スキルによらない設計品質の確保を目的として、鉄鋼系工業化住宅を設計対象に自動で最適な構造設計が可能なアルゴリズムを構築した。本構造は構造部材の配置可能間隔が150 mmであり、各種構造部材は規格断面のなかから選択する。このような離散的な制約条件に対応するために、最適化手法は遺伝的アルゴリズム (GA) を採用した。そのうえで、短時間で現実的な最適設計解を得るために、交叉 (こうさ) や突然変異、デコーディング方法に建物構造固有の特性や設計上の知見を取り入れた。また、実物件ベースでのモデルを用い、従来のGAとの比較検証によってその有効性を確認した。

Abstract

A practical optimal design method has been developed for determining the placement and cross-section of structural members used in steel industrialized housing. This method is based on a genetic algorithm (GA) to directly deal with discrete constraints such as selection of member sections from standard products or member placements from a series of points at intervals of 150 mm. Furthermore, we propose new processes of crossover, mutation and decoding for GA by taking into account the experiential procedures of actual design workers. The validity of this method is demonstrated by applying the conventional and proposed methods to realistic examples and comparing the optimal solutions obtained.

1. はじめに

建築物を建てる場合には、あらかじめ構造計算によって地震などに対する安全性を確認する必要がある。構造設計者は、法規上の制約や施主の要望によって定まる要求性能を満足しつつも、極力コストを抑制できるような構造部材の配置や選定 (断面決定) を行う。

通常、構造設計は「部材配置・断面の仮定～構造計算」を繰り返す試行錯誤となり、設計者に多大な労力を強いる。また、限られた時間のなかで最終的に得られる構造設計解の最適性 (無駄の無さ、合理性) は設計者個人の経験やスキルに依存しており、構造設計における最適化手法の適用や自動化が望まれている。

建築構造分野における最適化については過去からさまざまな研究が行われているが、限定的な制約条件下での設計問題を対象としているものが多い[1]-[7]。実務の構造設計では、部材の配置条件や選択可能な断面の種類、応力など多岐にわたる制約条件を考慮しつつ限られた時間内での対応が求められる。特に住宅設計においてその傾向は顕著である。

本取り組みは、規格化された複数種の構造部材を150 mm間隔で配置可能な設計自由度の高い鉄鋼系工業化住宅を対象とし (一般的な鉄鋼系工業化住宅における設計最小単位は300 mm～450 mm程度)、実務上支障のない時間内で合理的な構造設計解が得られる最適化アルゴリズムの構築を目的とする。

部材配置条件に代表される離散的な条件に対応するために、最適化手法は遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を採用した。GAは生物進化の遺伝的な法則を工学的にモデル化した集団探索による発見的手法で、2つの個体を組み合わせる交叉や、個体にランダムな変化を与える突然変異などの操作を繰り返しながら解を探索する[8]。この交叉や突然変異に、対象建物構造に固有の特性や設計上の知見を取り入れて目的関数値の低減や不満足制約の改善を促進し、短時間で実用上の最適解を得られるアルゴリズムを構築した。

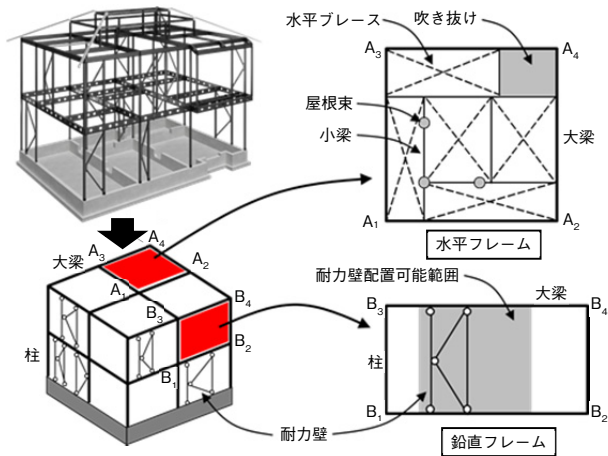
2. GAを用いた最適設計問題

設計対象とする建物構造モデルは第1図に示す鋼構造立体骨組とする。主架構は角形鋼管の管柱、H形鋼の大梁 (おおばり) で構成され、各部材接合部はピン接合でモデル化する。柱脚のアンカーボルトは鉛直および水平変位自由度を拘束したピン支点とする。

地震などの水平力は2本の角形鋼管柱と上下1対の斜材で構成される耐力壁で負担する。耐力壁は、隣接する1対の柱と上下の大梁 (1階については上部大梁と基礎) で定義する鉛直フレーム内に配置される。

同一水平構面内の大梁で囲まれた矩形 (くけい) 領域として定義する水平フレーム内には、床版などを受けるためのH形鋼の小梁 (こばり) が配置される。また、面内剛性を確保するために、大梁または小梁で区画される

全矩形領域（吹き抜けを除く）に丸鋼の水平ブレースが配置される。



第1図 設計対象の建物構造モデル

Fig. 1 Housing structural model of design object

2.1 最適化対象の設計項目と設計条件

建物の形状に応じて主架構である柱、大梁の位置は設計者によってあらかじめ定められる。最適化対象の設計項目は、耐力壁配置（幅・位置）、大梁断面、小梁配置、の3点である。部材配置や断面選択に関する主な条件を以下に示す。

- 耐力壁は3種の幅（450 mm, 600 mm, 900 mm）から選択
- 耐力壁は開口部などを除いた範囲内に配置し、耐力壁幅によらず各鉛直フレーム内に0枚～2枚配置可能
- 耐力壁の柱と鉛直フレームの柱は共有可能
- 同一鉛直フレーム内に耐力壁が2枚配置される場合、両耐力壁の柱共有および位置重複は不可
- 水平構面内において、吹き抜け（階段含む）の4辺と屋根束（つか）位置には必ず梁が必要
- 耐力壁と小梁の位置は150 mm間隔で選択可能
- 大梁、小梁の断面は規格断面のなかから選択（屋根構面：3種、床構面：5種）

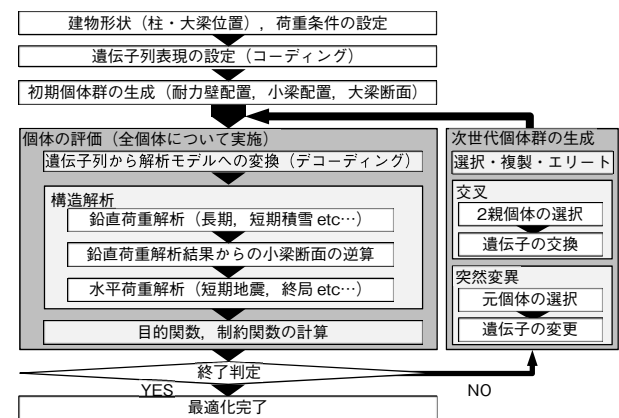
柱と水平ブレース断面は一意に決定する。水平ブレースの配置は小梁配置が決まれば自動的に決定され、小梁断面は鉛直荷重に対する解析結果から逆算して必要最小断面が定まる。したがって、これらは最適化対象の変数としない。

2.2 GAを用いた最適設計フロー

第2図にGAを用いた最適設計フローを示す。初期個体群（複数の設計解候補）をランダムに生成し第1世代個体

群とする。各世代において全個体の評価を実施し、終了判定を満足すれば最適化計算を終了する。満足していなければ交叉や突然変異によって次世代の個体群を生成し同様の処理を繰り返す。

各個体の評価処理は、遺伝子列情報から解析モデルへ変換するデコーディング、構造解析、目的関数・制約関数の計算、で構成される。本稿では目的関数を総鋼材量（全部材の体積）として最小化を行う。制約関数は各制約条件への適合度として定義する。



第2図 GAを用いた最適構造設計フローチャート

Fig. 2 Flowchart of structural optimization using GA

3. GAにおける遺伝子列表現[9]

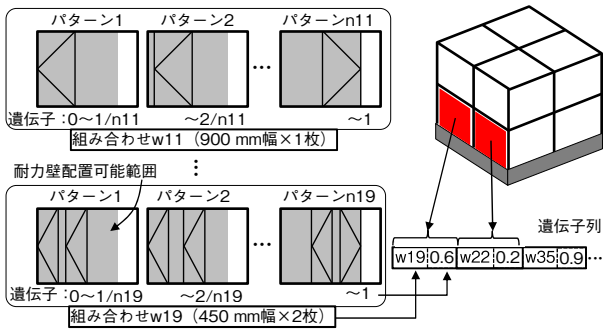
2.1節に示した最適化対象の設計変数は極めて離散的である。特に小梁配置に関しては、小梁の材軸方向や配置順の組み合わせによって無数の配置パターンが存在する。これら全ての設計項目・条件に対応できる遺伝子列表現を考案した。この表現方法では交叉、突然変異を施してもデコーディング時に矛盾を生じることなくGAを実行できる。

3.1 耐力壁遺伝子列の表現

鉛直フレームごとに遺伝子列を設定し、各鉛直フレームの耐力壁配置を「組み合わせ」、「パターン」の2種類の遺伝子で表現する（第3図）。

「組み合わせ」遺伝子は配置される耐力壁幅と枚数の組み合わせ10種類（配置無し含む）のうち1つを特定する。

また、各鉛直フレームについて、耐力壁幅と枚数の組み合わせごとに耐力壁配置可能範囲内で配置可能な全パターンをあらかじめリスト化する。「パターン」遺伝子は、前記の各組み合わせリストのなかから1つのパターン、つまりは耐力壁の位置を特定する。



第3図 耐力壁配置の遺伝子列表現例
Fig. 3 Example of gene expression for bearing wall placement

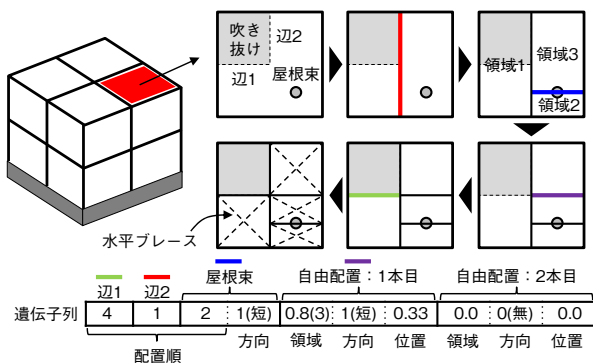
3.2 小梁遺伝子列の表現

水平フレームごとに遺伝子列を設定し、各水平フレームの小梁配置を以下の3種類の小梁に分類して表現する。

- (1) 自由配置小梁
- (2) 位置指定小梁 (吹き抜け4辺)
- (3) 位置指定小梁 (屋根束位置)

(1)は方向や位置を自由に設定できる小梁であり、1本の小梁配置を「領域」、「方向」、「位置」の3遺伝子で表現する。(2)は位置と方向が一意に定まるので「配置順」遺伝子のみで表現する。(3)は屋根束の点を通るように配置されるため位置が一意に定まり「配置順」、「方向」の2遺伝子で表現する。

第4図に概要を示す。水平フレームは小梁によって「小梁本数+1」個の小領域に分割され、「領域」遺伝子はどの小領域に小梁を配置するかを特定する。「方向」遺伝子は小梁の材軸方向(例えば配置領域に対して0:配置無し, 1:短辺方向, 2:長辺方向)を特定する。「位置」遺伝子は小梁の位置(150 mm間隔)を特定する。「配置順」遺伝子は小梁配置順の変化により多様な配置パターンを表現するために設定している。なお、(1)については水平フレームごとにあらかじめ最大本数を設定しておき、対応



第4図 小梁配置の遺伝子列表現例
Fig. 4 Example of gene expression for beam placement

する個数の遺伝子を用意する。

3.3 大梁遺伝子列の表現

大梁1本ごとに1つの遺伝子(「断面」遺伝子)を設定し、規格断面のなかからそれぞれの断面を特定する。

3.4 遺伝子の数値型

耐力壁遺伝子列の「組み合わせ」、小梁遺伝子列の「方向」および「配置順」、大梁遺伝子列の「断面」遺伝子は離散型(整数値)で表現する。その他の遺伝子は、デコーディング候補が動的に変化する。例えば、小梁は配置される領域の大きさによって位置候補となる座標の数変動する。したがってこれらの遺伝子は連続型(0~1の実数値)で表現し、各デコーディング候補に対して数値範囲を均等に割り当てる。

4. GAの実務適用のための改良[9]

従来のGAにおける交叉や突然変異はランダム性が強く自由度の高い最適化問題では探索効率が悪い。したがって、最適解を得るためには非常に多くの計算世代数を要し、実務構造設計への適用は困難である。

また、施工性などの観点から、目的関数に影響しない限り複数の小梁はラインを揃(そろ)えて配置されることが望ましい。しかし、小梁位置の自由度が高いため、制約条件を満足していても小梁のラインが揃わない非現実的な部材配置が最適解となってしまう可能性も高い。

本取り組みでは、対象建物構造に固有の特性や設計上の知見を取り入れた交叉や突然変異を考案し最適化計算に要する世代数の短縮を図るとともに、デコーディング時に小梁のラインが揃いやすくする仕組みを取り入れた。

4.1 交叉の改良

交叉は親個体となる2個体の遺伝子列の一部を入れ替えて子個体を生成するGAの特徴的なプロセスである。ここでは、入れ替える遺伝子列のまとまりである交叉単位ごとに、親個体間での優劣比較を取り入れた交叉とした。

[1] 有意な交叉単位の設定

交叉単位の設定によっては交叉において子個体に親個体の性質が十分に伝達されない恐れがあり、交叉による効率的な個体の進化を促すためには交叉単位の設定が重要である。例えば、各層に配置される耐力壁枚数の総数は地震時の建物の変形への影響が大きく、この値が親個体から子個体に伝達されるような交叉単位が望ましいと考えられる。

このような知見に基づき、以下のような2パターンの

交叉単位の分け方を設定した。

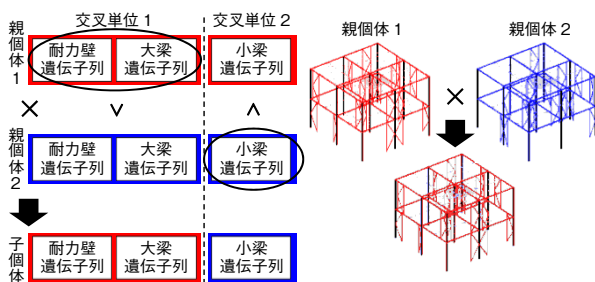
- (A) 耐力壁+大梁遺伝子列, 小梁遺伝子列 (2単位)
- (B) 階・方向ごとの耐力壁+大梁遺伝子列, 階ごとの小梁遺伝子列 (2階建て: 6単位, 3階建て: 9単位)

[2] 交叉単位ごとの優劣判定による交叉

前項で示した交叉単位ごとに, 2体の親個体間で優劣判定を行い, 優判定された交叉単位の遺伝子列を組み合わせることで子個体を1個体生成する。交叉単位の(A)の分け方による交叉のイメージを第5図に示す。

交叉単位ごとの優劣判定に際しては, まず各制約条件を関連性の高い交叉単位に割り当てる。例えば小梁の応力制約は(A)の小梁遺伝子列の単位や(B)の該当階の小梁遺伝子列の単位に紐(ひも)付ける。紐付けられた制約条件の制約関数を調べ, 違反しているものがあれば違反度が小さいほうの親個体の交叉単位を優と判定し, 違反しているものがなければ鋼材量の少ないほうの親個体の交叉単位を優と判定する。

交叉単位が大きいほど親個体の性質の伝達性が高い。したがって, まず(A)の交叉単位分けで判定し, どちらの交叉単位も一方の親個体が優と判定された場合は(B)の交叉単位分けで判定を行う。(B)の判定で全ての交叉単位とも一方の親個体が優と判定された場合は, 交叉単位数および交叉単位分けを都度無作為に設定するランダム交叉によって子個体を生成する。なお, ランダム交叉では交叉単位ごとの優劣判定は行わない。



第5図 交叉単位分け(A)での交叉イメージ

Fig. 5 Image of crossover type (A)

4.2 突然変異の改良

突然変異は遺伝子列の一部をランダムに変化させて解の多様性を保つプロセスである。加えてここでは, 確率分布を調整し遺伝子の変化の方向性を制御することで, 効率的な個体の進化を促す。

耐力壁遺伝子列の「組み合わせ」遺伝子については, あらかじめ遺伝子に各耐力壁組み合わせでの鋼材量と概算耐力性能を関連づけておく。突然変異を施す元個体の耐力壁に紐付く制約関数(例えば層間変形角に対する制

約関数)を調べ, 違反している場合は元個体より耐力性能の高い組み合わせに変異する確率を, 満足している場合は元個体より鋼材量の少ない組み合わせに変異する確率を高く設定する。

小梁配置に関してはまず自由配置小梁の本数を制御する。突然変異を施す元個体の小梁や水平ブレースに紐付く制約関数を調べ, 違反している場合は元個体より多い本数となる確率を, 満足している場合は元個体より少ない本数となる確率を高く設定した確率分布に基づき本数を確定させる。その後, 「領域」遺伝子は辺長・面積が大きい領域が選択される確率を, 「方向」遺伝子は領域の短辺方向に配置される確率を高く設定する。「配置順」遺伝子については, 早い配置順ほど選択される確率を高く設定した確率分布に基づき突然変異させる。

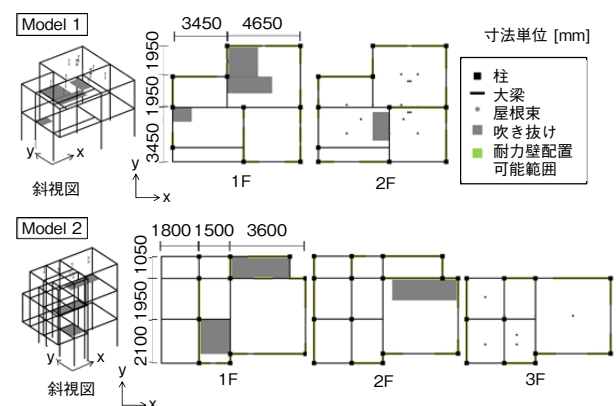
なお「パターン」, 「位置」, 「断面」遺伝子については一様分布に基づきランダムに変化させる。

4.3 小梁デコーディングの改良

小梁配置のデコーディングの際, 0~1の範囲を取る「位置」遺伝子は通常, 小梁を配置できる位置候補の各座標に対して均等に割り当てる。このときに, 既配置の梁の延長線上に位置する候補座標に対する遺伝子範囲の割り当てに重み付けを行うことで, 小梁ラインの揃いやすさを高める。

5. 最適設計例題

本章では第6図に示す2階建てのModel 1, 3階建てのModel 2での最適設計例を報告する。従来のGAによる結果との比較を行い4章に記した改良手法の妥当性, 有効性を確認した。なお, 両モデルとも実物件を元に設定した。



第6図 検証用モデル

Fig. 6 Sample models for verification

5.1 構造解析の荷重ケースと制約条件

本例題では構造解析の荷重ケースとして以下の3ケースを考慮する。

- (1) 長期鉛直荷重時の解析
- (2) 短期地震荷重時の解析 (X, Yの水平2方向)
- (3) 短期地震時の水平構面解析 (X, Yの水平2方向)

荷重ケース(1), (2)は剛床(ごうしょう)モデルで解析を行い, 各部材の応力制約と, 荷重ケース(2)については層間変形角制約も考慮する。剛床モデルは, 床面の面内剛性が十分高く面内変形が生じない仮定のもとで, 同一の水平構面にある節点間で水平方向に相対変位が生じない(以下, 同一変位設定)とした解析モデルである。荷重ケース(3)は前記の剛床を保証するための解析であり, 同一変位設定を解除した非剛床モデルで解析し, 水平ブレースの応力制約と水平構面の面内変形制約によって剛床仮定の成立を確認する。

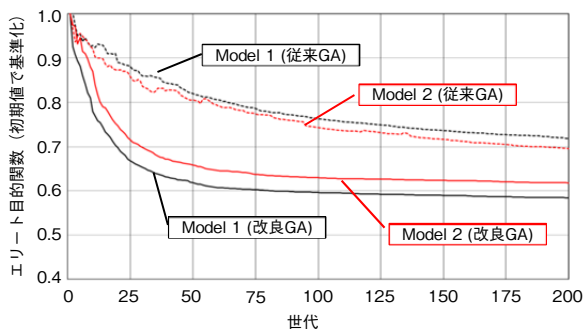
5.2 最適化計算のパラメータ設定

個体数は50体, 計算世代数は200世代とする。次世代個体群は, 現世代中最良の1個体をエリート個体として残り, 残りの35個体を交叉, 14個体を突然変異によって生成する。制約条件に違反する個体については, その違反度に応じたペナルティ値を目的関数に加算する。

ランダム性による結果のばらつきを考慮して, 両モデルとも同条件で10回ずつ最適化計算を試行した。

5.3 最適設計の結果

第7図に各世代のエリート個体の目的関数の推移を示す。第1世代のエリート個体の目的関数値で基準化しており, いずれも10回試行での平均値を示している。従来GAでは200世代目においても0.7程度であるのに対し, 改良GAでは25世代前後で0.7に達し, 200世代目では0.6程度まで低減できており, 最適化計算世代数を大きく短縮できている。なお, Model 1, Model 2の200世代最適化計算の

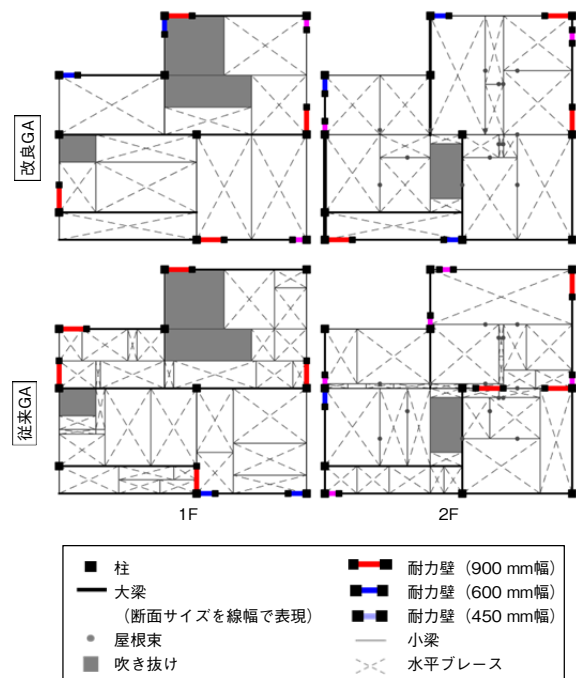


第7図 エリート個体の目的関数推移 (10回平均)
Fig. 7 Change of objective function for the elite (average in 10 trials)

平均所要時間(改良GAおよび従来GAの計20回試行における平均)は, CPU: Xeon^(注1) E3-1290 V2, 3.70 GHz (4Core) のPCでそれぞれ6049秒, 7796秒であった。

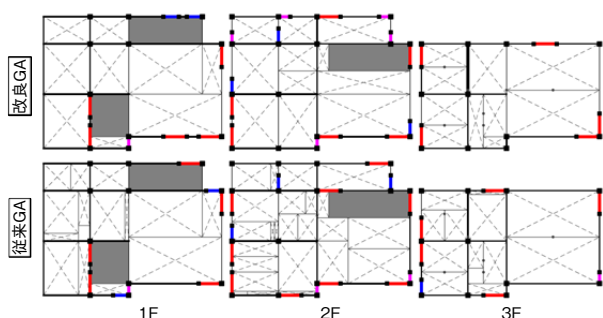
第8図にModel 1, 第9図にModel 2の200世代目におけるエリート個体の部材配置の一例を示す。改良GAでの結果は従来GAに比べ部材数が削減されている。また, 小梁配置に関しては吹き抜け周囲や屋根束位置に確実に梁が配置されるとともに, 自由な位置に配置可能な小梁についても他の梁と材軸を揃えて配置されており, 実用上違和感のない配置となっている。

得られた構造設計解が最適か否かを判断するためには, 各個体なかの最も厳しい制約条件(アクティブ制約)の制約関数値に着目することが重要である。Model 1では層間変形角, Model 2では層間変形角と大梁応力がアクティブ制約となっており, 改良GAで得られた設計解ではいずれのアクティブ制約も閾(しきい)値に対する余裕度が1%未満に抑えられていることを確認している。したがって, 改良GAで得られた構造設計解は無駄な部材のない, 実用上十分に最適化された設計解であると判断できる。



第8図 200世代目における部材配置例 (Model 1)
Fig. 8 Examples of member placement at 200th generation (Model 1)

(注1) 米国およびその他の国における Intel Corp. の登録商標または商標



第9図 200世代目における部材配置例 (Model 2)

Fig. 9 Examples of member placement at 200th generation (Model 2)

6. まとめ

遺伝的アルゴリズム (GA) をベースに、鉄鋼系工業化住宅を設計対象とした構造最適化アルゴリズムを構築した。この最適化アルゴリズムでは、対象建物構造に固有の特性や設計上の知見を取り入れた交叉、突然変異、デコーディングを行うことで、最適化計算時間を短縮しつつ現実的な部材配置の最適設計解が得られる。また、実物件ベースのモデルを用いた検証によってその有効性を確認し、実務構造設計へ適用し得る可能性を提示した。この検証では、従来の単純GAに比して1/10程度の世代数で同等の設計解が得られた。

実用化に当たっては、実務設計のなかで用いる解析モデルや解析条件での検証とそれらに合わせた交叉や突然変異手法の調整が必要と考える。特に本報の検証では終局時 (大地震時) の解析を省略しており、終局時まで考慮した検証が今後の課題である。ただし、提案手法は感度解析を用いない最適化手法であり、異なる解析モデルや条件に対しても問題なく適応可能であると考えられる。

GAでは一世代中の各個体の評価プロセスが独立しているため、並列処理によって最適化計算時間の更なる短縮が可能である。50~100程度の並列処理環境としてクラウドコンピューティングを活用し、複数拠点において短時間で最適構造設計が可能なシステムの実用化を目指す。

参考文献

- [1] 清水 齊 他, “ラーメン骨組の最適設計における遺伝的アルゴリズムの改善提案,” 日本建築学会構造系論文集, vol. 75, no. 648, pp. 327-336, 2010.
- [2] 大崎 純, “局所探索法による鋼構造骨組の多目的最適化,” 日本建築学会構造系論文集, vol. 73, no. 634, pp. 2135-2141, 2008.

- [3] 吉富 信太 他, “二段階緩和法に基づく鋼構造骨組の最適離散断面選択法,” 日本建築学会構造系論文集, no. 586, pp. 95-100, 2004.
- [4] 大森 博司 他, “多目的最適化法による鋼構造物の構造設計支援手法の提案—ブレース配置最適化問題への応用—,” 構造工学論文集, vol. 55B, pp. 239-246, 2009.
- [5] 小玉 真一 他, “多目的最適化法による鋼構造物の構造創生支援に関する研究—小梁配置最適化問題への応用—,” 構造工学論文集, vol. 56B, pp. 553-558, 2010.
- [6] 本間 俊雄 他, “解の多様性を考慮した遺伝的アルゴリズムによる構造形態の創生,” 日本建築学会構造系論文集, no. 614, pp. 35-43, 2007.
- [7] 澤田 樹一郎 他, “重量制限を課した遺伝的アルゴリズムによる鋼構造建築ラーメン骨組の最小重量設計,” 日本建築学会構造系論文集, no. 600, pp. 89-96, 2006.
- [8] 三井 和男 他, 発見的最適化手法による構造のフォームとシステム, 計算工学シリーズ4 (編), (株) コロナ社, 東京, 2004.
- [9] 吉富 信太 他, “鉄鋼系工業化住宅における構造最適化に関する研究—遺伝的アルゴリズムに基づく実用的な構造部材最適配置法—,” 日本建築学会構造系論文集, vol. 80, no. 714, pp. 1347-1355, 2015.

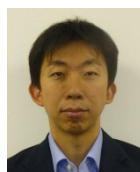
執筆者紹介



中川 大輔 Daisuke Nakagawa
パナホーム (株) 住宅・技術研究所
Technology and Housing Research Institute,
PanaHome Corp.



佐田 貴浩 Takahiro Sada
パナホーム (株) 住宅・技術研究所
Technology and Housing Research Institute,
PanaHome Corp.



吉富 信太 Shinta Yoshitomi
立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科
Department of Architecture and Urban Engineering,
College of Science and Engineering, Ritsumeikan
University
博士 (工学)