

多目的 GA を用いたモーメント抵抗接合部をもつ 木質建築物の最適設計システムに関する研究

A Study on Optimal Design System for Wooden Buildings with Moment Resistance Joints Using Multi-purpose Genetic Algorithm

○井下 宙^{*1}, 山邊 友一郎^{*2}
Sora INOSHITA^{*1}, Yuichiro YAMABE^{*2}

*1 神戸大学大学院工学研究科 大学院生
Graduates Student, Graduate school of Engineering, Kobe University

*2 神戸大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学)
Association Professor, Graduate school of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

キーワード：木質建築物; NSGA-II; 最適設計; モーメント抵抗接合部; 半剛接合

Keywords: wooden building; NSGA-II; optimal design; Moment Resistance Joints; semi-rigid joint

1. はじめに

2050年までに、温室効果ガスの排出量を実質的にゼロとする取り組みが進められている(2050年カーボンニュートラル)。近年、カーボンニュートラルの実現に向けて、木質建築物が注目を集めており、小規模なものに留まらず、中規模・大規模建築物も建設されている。一方で、木質建築物は設計の際に考慮する項目が多く、特に接合部の回転剛性や耐力の検討が重要である。そこで本研究では、コンピュータの情報処理技術である遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm¹⁾:以下GAと記す)を多目的最適化問題に拡張したアルゴリズムであるNSGA-II²⁾を用いて最適設計システムを構築する。GAは生物進化における、選択淘汰、突然変異の原理から着想を得たものであり、工学分野においても幅広く活用されている最適化アルゴリズムである。骨組みと接合部を同時に検討するために、断面寸法、接合部のドリフトピンの本数を目的関数とし、これらを最小化する多目的最適化を行う。本研究は、構造設計者がパレート解の中から設計に適した解を選択できるような最適設計システムとしての有効性を検証すること、及び木質建築物の接合部の設計について知見を得ることを目的としている。

2. 最適設計システム

本研究で提案する木質ラーメンフレームの最適設計システムのフローチャートを図1に示す。ユーザーによって入力された荷重、個体数、世代数などの情報をもとに、初期集団を生成する。初期集団には、部材断面、ドリフトピンの本数・配置の情報が含まれており、部材の断面積、断面二次モーメント、接合部回転剛性などの値が求められ、それらの値を用いて構造解析を行う。次に構造解析の結果から、適応度を評価し、NSGA-IIを用いて遺伝的処理(選択、交叉、突然変異)を行う。この一連のプロセスを、終

了条件が満足するまで繰り返す。

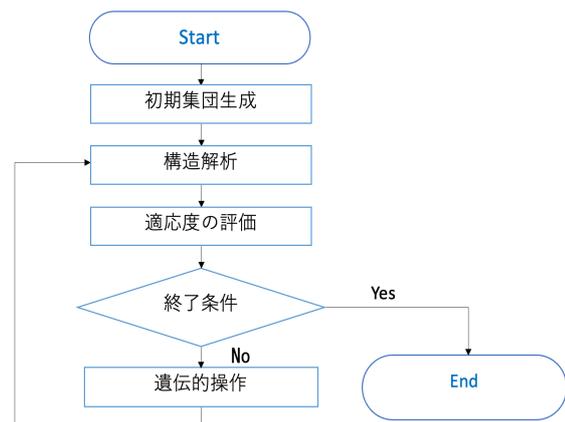


図1 最適設計システムのフローチャート

2.1 対象モデル

3階建て事務所建築の部材架構を想定し、3層の一方方向ラーメンフレームを対象モデルとする(図2参照)。スパンは8m、各階の階高は4mとする。1~3層の梁をそれぞれB1、B2、B3とし、柱はフレーム全体で共通の部材を用い、Cとする。本研究では部材の幅はフレーム全体で共通のものを用いる。骨組に関しては、梁材B1、B2、B3のせい、柱材Cのせい、フレーム全体に共通する幅を設計変数とする。せいは540mm~900mm(30mm刻み)の13種類から、幅は150mm~240mm(15mm刻み)の7種類から選択する。使用する木材の樹種はバイマツとし、柱材に同一等級構成集成材E120-F375を、梁材に異等級構成集成材E120-F330を使用する。

接合部は、木質ラーメン構造では一般的な接合方式である、鋼板挿入ドリフトピン式モーメント抵抗接合部とした

2) (図3参照)。ドリフトピンと鋼板にはSS400の部材を用いる。鋼板の厚さは9mm、ドリフトピンの径は16mmのものを使用する。ドリフトピンの配置形式には、円形配置と四角形配置にする場合の両方があるが、本研究では四角形配置のみ考える。

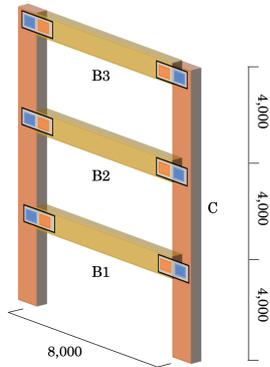


図2 対象モデル

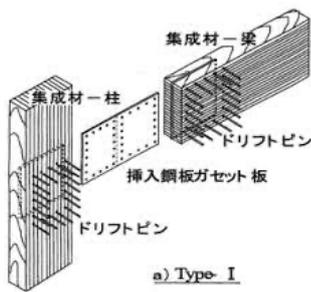


図3 接合方式³⁾

2.2 ドリフトピンの配置

1層分ドリフトピンの配置に関する情報を持った設計変数には、 nbx : 梁上のドリフトピンの本数(x方向)、 nby : 梁上のドリフトピンの本数(y方向)、 ncx : 柱上のドリフトピンの本数(x方向)、 ncy : 柱上のドリフトピンの本数(y方向)、 m : ドリフトピンの配置(何周配置するか)の5つの情報が含まれている。

まず柱側・梁側の鋼板の4隅にそれぞれドリフトピンを配置する。これらのドリフトピンは設計変数に関わらず、必ず配置するものとする。これらのピンの位置は材端からの距離によって決まる。

次に4隅のピンとピンの間に、設計変数の値(nbx 、 nby 、 ncx 、 ncy)だけ配置する。この際、隣り合うピン相互の間隔が等しくなるように配置する。(図4参照)1周目のピン配置が終了すると、設計変数の値(m)に応じて内側にピンを配置していく。この際、内側のピンは、1周外側のドリフトピンの中央の位置に配置する。以上の操作により、ドリフトピンの配置・本数が決まる。

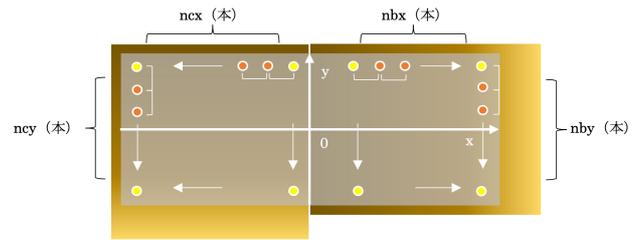


図4 ドリフトピンの配置(1周目)

2.3 構造解析

短期荷重として、1・2層目の梁には11.0kN/mを、3層目の梁には8.0kN/mの等分布荷重(固定荷重・積載荷重)を鉛直方向に作用させ、鉛直荷重の30%を水平荷重として作用させる。(図5参照)構造解析には、マトリクス構造解析の変位法を用いて部材に生じる応力や架構の変形を算出した。柱脚を固定端とし、接合部は半剛接合として、接合部剛性を考慮した上で計算を行った。

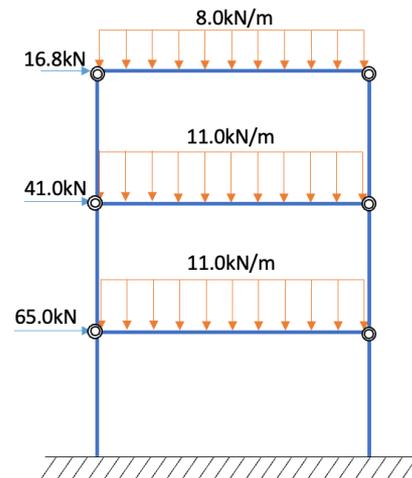


図5 荷重の設定

2.4 目的関数・制約条件

評価式として、 $Ev.1 \sim Ev.3$ を定めた。 $Ev.1 \sim Ev.3$ の式をそれぞれ式1~3に示す。

$$\begin{aligned} \text{Fulfilled} &= \text{Requirements のとき} \\ Ev.1 &= 1 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \text{Fulfilled} &\neq \text{Requirements のとき} \\ Ev.1 &= \frac{\text{Fulfilled}}{10 \times \text{Requirements}} \end{aligned} \tag{2}$$

$$Ev.2 = 1 - \frac{\sum \text{Number} - \text{minNumber}}{\text{maxNumber} - \text{minNumber}} \tag{2}$$

$$Ev.3 = 1 - \frac{\sum \text{Volume} - \text{minVolume}}{\text{maxVolume} - \text{minVolume}} \tag{3}$$

$Ev.1$ は、構造制約条件を満足することを評価する式であ

る。式 1 の Fulfilled は満たした制約条件の数、Requirements は全ての制約条件の数を示している。構造制約条件として、許容応力度、梁中央たわみ、層間変形角、ドリフトピン一本当たりの耐力、接合部の耐力の構造制約条件⁴⁾⁵⁾⁶⁾を考慮している。Ev.2 は、ドリフトピン本数を削減することを評価する式である。式 2 の \sum Number はドリフトピンの合計本数、minNumber は配置できるドリフトピンの最小本数、maxNumber は配置できるドリフトピンの最大本数を示している。Ev.3 は、部材総体積を削減することを評価する式である。 \sum Volume は部材総体積、minVolume は最小部材総体積、maxVolume は最大部材総体積を示している。

Ev.1~Ev.3 を組み合わせて 2 つの目的関数 f1、f2 を定めた。(式 4、式 5) 本研究で構築する最適化システムは f1、f2 の 2 目的最大化問題とする。

$$f1 = Ev.1 \times Ev.2 \quad (4)$$

$$f2 = Ev.1 \times Ev.3 \quad (5)$$

3. 実行結果と考察

個体数を 500 とし、世代数を 200 として多目的最適化を行った。最適化の過程を表 1 に示す。

表 1 最適化過程 (目的関数)

世代数	f1 の最大値	f2 の最大値
初期世代	0.878	0.761
50 世代	0.989	0.806
100 世代	0.989	0.806
200 世代	0.989	0.806

初期世代から 50 世代までは目的関数の値に変化が見られるが、50 世代以降はほとんど変化が見られなかった。200 世代実行時の解の分布を図 6 に示す。

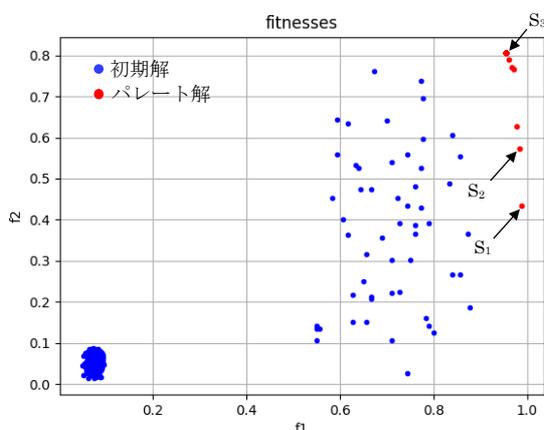


図 6 解の分布

初期解について、目的関数の値 f1、f2 がともに 0.1 以下のものと、ともに 0.1 以上のものに大別される。これは構

造制約条件の評価式 (式 1) による影響で、f1、f2 が 0.1 以下のものは構造制約条件を満足しておらず、f1、f2 が 0.1 以上のものは構造制約条件を全て満足していることがわかる。200 世代実行時の解について、パレートフロントが見られたことから、接合部のドリフトピンの本数 (f1) と部材総体積 (f2) はトレードオフの関係にあることがわかった。次に、パレート解集合から特徴的な三つの解 S₁ (f1 が最大となる解)、S₂ (S₁ と S₃ の中間に位置する解)、S₃ (f2 が最大となる解) を取り出して比較する。目的関数の値を表 2 に、ドリフトピンの本数、部材総体積は表 3 に示す。

表 2 最適化結果 (目的関数)

	f1	f2
S ₁	0.989	0.433
S ₂	0.978	0.627
S ₃	0.956	0.806

表 3 最適化結果 (ピンの本数、総体積)

	ドリフトピンの本数(本)	部材総体積(mm ²)
S ₁	152	7,509,600
S ₂	160	6,307,200
S ₃	172	5,148,000

目的関数 f1 の適応度の差は小さかった。最大値である 1 に近く、理論上最小のドリフトピン本数となる配置方法になった。目的関数 f2 の適応度の差は大きかった。これは部材幅による影響が大きいと考える。

S₁ の部材幅は 210mm、S₂ の部材幅は 180mm、S₃ の部材幅は 150mm である (図 7 参照)。これより、ドリフトピンの本数が少なくなるほど部材幅は小さくなる傾向があることがわかる。このような関係になる理由を調べるために、全ての構造制約条件の検定比を調べた。最も検定比が大きくなった条件とその数値を表 4 に示す。

表 4 各解の最大検定比

	条件	検定比
S ₁	floor2 の柱上ドリフトピン 1 本の耐力	0.98
S ₂	floor3 の柱上ドリフトピン 1 本の耐力	0.97
S ₃	floor3 の柱上ドリフトピン 1 本の耐力	0.95

全ての解で、柱に配置された特定のドリフトピン 1 本当たりの耐力が最も検定比が大きくなった。これより、最適化結果の断面寸法、ドリフトピンの配置は、柱に配置された特定のドリフトピン 1 本の耐力で決まっていると考える。

ドリフトピン 1 本の耐力と部材幅、ドリフトピンの本数の関係性について考察する。ドリフトピンの本数が少ない

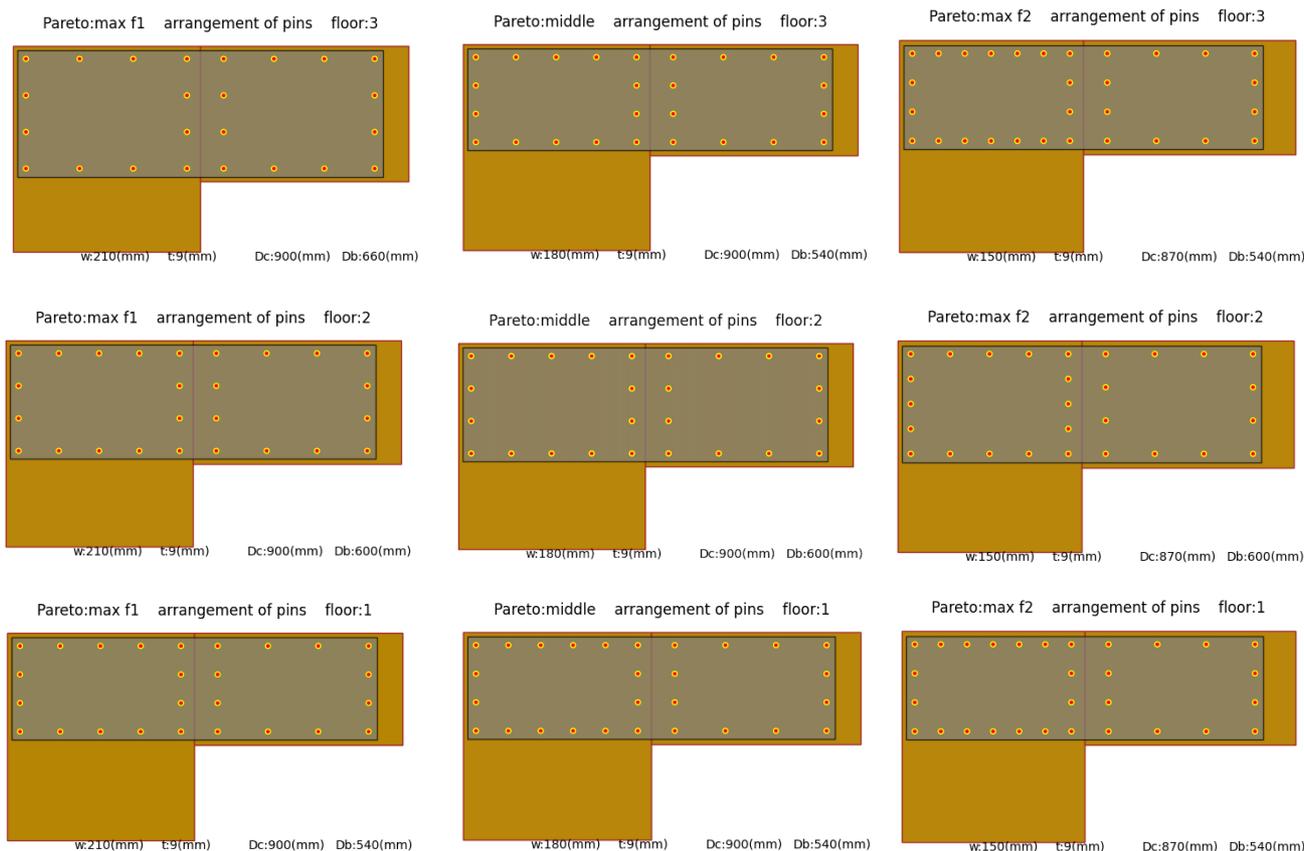


図7 ドリフトピンの配置図(左から S₁、S₂、S₃)

接合部の場合、1本のドリフトピンが負担する外力は大きくなるので、構造制約条件を満足するための降伏耐力が必要である。ドリフトピン1本当たりの降伏耐力は、有効厚さ(部材厚さから鋼板厚さ+2mmを減じた値)が大きいほど大きくなるため、ドリフトピンの本数が少ないほど、部材厚さは大きくなると考えられる。

4. まとめ

本研究では、安全性を担保した上で、経済性を向上させることを目的関数として、木質構造ラーメンフレームの部材断面選択とドリフトピンの配置を設計変数として、多目的GAによる最適化を行った。その結果、構造制約を満足した上で、より経済性に優れた解を探索することができた。また、複数のパレート解集合が得られ、システムの有効性を検証できた。ドリフトピンの本数と部材総体積はトレードオフの関係にあることがわかった。検定比を元に考察を進めると、直接トレードオフと関係にあるのは、ドリフトピンの本数と部材幅であるということが明らかになった。

今後は、システムをより実用的にするため、ラーメンフレームのみならず、耐力壁やプレースの配置も考慮できるシステムへと発展させ、建物全体を対象モデルとする予定である。

【参考文献】

- 1) Holland, J. : Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan, 1975, and MIT Press, 1992
- 2) Kalyanmoy Deb, Associate Member, IEEE, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and T. Meyarivan : A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II, IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 6, NO. 2, APRIL 2002
- 3) 道総研「道産材を用いた木造住宅における 接合部開発・設計の手引き (2011.7)」
<<https://www.hro.or.jp/list/building/koho/pdf/gijutu/setugoubu.pdf>> (2023.1 閲覧)
- 4) 大橋好光、朝川剛、山田憲明、瀧口真衣子、角野大介 著:ひとりで学べる中層木造建築(ラーメン構造等)の構造設計演習帳、日本建築センター、2020.2
- 5) 稲山正弘 著: 中大規模木造建築物の構造設計の手引き、彰国社、p.116~117、2017.2
- 6) 木質構造接合部設計マニュアル、日本建築学会、p.196~207、2009.11