

部材グルーピングを用いた構造断面最適化の試み

An Attempt of Structural Section Optimization with Member Grouping

中村 壮志^{*1}
Soshi Nakamura

木下 拓也^{*1}
Takuya Kinoshita

藤井 英二^{*1}
Eiji Fujii

水島 靖典^{*1}
Yasunori Mizushima

鹿島 孝^{*1}
Koh Kashima

池田 周英^{*1}
Shuei Ikeda

鈴木 琢也^{*1}
Takuya Suzuki

東城 峻樹^{*1}
Takaki Tojo

中村 尚弘^{*2}
Naohiro Nakamura

^{*1} 竹中工務店
Takenaka Corp.

^{*2} 広島大学
Hiroshima Univ.

For all the recent advances of high-performance computing devices and general-purpose optimization software, optimization technique is rarely used in the practical design of building structures due partly to the excessive number of factors to be designed. Among such factors, member grouping is of particular importance since appropriate grouping often leads to drastic reduction in the number of independent design variables in optimization while maintaining the potential for the design to achieve low-cost, efficient structural system. In this paper, a section optimization method with automatic member grouping is introduced, followed by a comparative study to show the practicability of the obtained optimum solution.

1. はじめに

構造設計従事者が行う業務には、建物を支える構造部材の設計を行う構造設計、建築主・意匠設計者・設備設計者との調整、さらに現場における配筋検査などの監理業務と多岐に渡る。それらの業務は、非常にタイトなスケジュールの中で求められ、創造的な設計業務に集中する時間の確保が非常に難しい状況にある。その背景には、近年、首都直下地震や南海トラフ地震の発生が懸念され、建築物には、きわめて高い耐震安全性が求められていること、東日本大震災以降、顕著となっている労働者不足を受けて、建設工事には極めて短工期・低コスト化が求められていること、さらには、免震装置や杭工事のデータ偽装などを受け、建設工事における設計監理の徹底が求められていることが挙げられる。

このような状況において、構造設計の一部を計算機によって効率的に行う手法の1つが構造最適化手法である。しかし、構造最適化が、実務において積極的に使われた事例は非常に少なく、その解決のために、これまでも多くの研究・提案^{例えば[山川2004]や[田村 2008]}がなされている。構造最適化が、実務で利用されない理由の1つに、構造設計における部材断面の決定には非常に様々な要因が複雑に関与していることが挙げられる。表1に部材の断面を決定する際に考慮する要因の例を示す。例えば、鉄骨造の梁を考えた場合、単純に鉄骨重量を下げるためには、安全性を確保した上で断面を小さくしていけばよい。しかし、鉄骨製作にかかるコストを考えると、断面に余力があったとしても、同一断面の梁をたくさん使用した方が、製作コストが下がることもあり、単一目的の最適解では実用的な設計結果に至ることはできない。当然、全ての要因を目的関数とした多目的最適化を行うという選択肢も考えられるが、計算時間の面で困難が生じることは否定できない。

そこで、筆者らは、構造設計者が断面設計の際に行う、グルーピングという手法に着目した。グルーピング手法とは、部材長さや荷重条件などの設計条件が類似の部材を同一グループにまとめ、断面を揃えて設計を行う手法である。グルーピングの概

念を図1に示す。グルーピングを用いることによって、部材の種類が多くなりすぎることを防ぐことができ、その結果、鉄骨工場での製作ミスや、現場で部材を取り違えるリスクも小さくすることができる。すなわち、構造最適化を行う中で、適切なグルーピングを自動的に行うことができれば、実用的な最適解を求めることにつながると筆者らは考えた。

本検討では、まず構造最適化手法において、グルーピングの概念を取り入れた構造最適化を行うことができるシステムの構築を行った。次に、実際に試験モデルを用いてグルーピングを使った構造最適化を実施し、最後に、構造最適化、構造設計従事者、構造設計初心者による設計結果の比較を行った。

表1 構造設計における断面決定要因例(例:鉄骨造)

安全性	納まり	コスト
たわみ 冗長性 変形角	デザイン性 設備要望 接合部の納まり	鉄骨量 材料単価 部材種類数

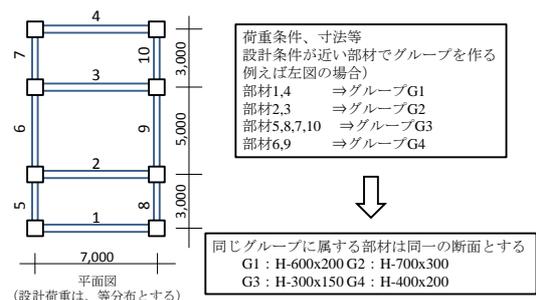


図1 グルーピングの概念

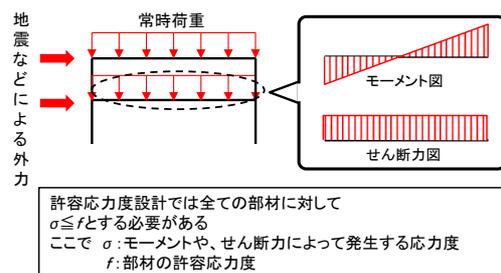


図2 許容応力度設計の概念図

連絡先: 中村壮志, 竹中工務店, 千葉県印西市大塚 1-5-1, 0476-47-1700, 0476-47-6460, nakamura.soushi@takenaka.co.jp

2. 構造最適化システムの構築

2.1 構造計算の概要

ここでは、構造最適化の説明を行うに先立ち、構造計算について概要を示す。

本検討で行う構造計算は、許容応力度設計と言われる設計手法を対象とする。図2に許容応力度設計の概念図を示す。

許容応力度設計において構造設計者は、建物条件(建物の高さ、面積、設備機器など)から、まず建物が受ける荷重、外力(地震力、風圧力など)を設定する。次に、それらの荷重、外力を受けた際に、それぞれの部材に生じる応力度を計算し、全ての部材に対して応力度が許容応力度を下回るように断面を設計しなければならない。

つまり、許容応力度設計においては、部材に発生する応力度の許容応力度に対する比、すなわち検定比は全ての部材で必ず1.0以下である必要がある。

なお、近年は、計算機能力が向上していることから、許容応力度設計については、プログラムを用いて行うことが一般的であり、本検討でも、構造計算プログラム BRAIN を使用した。なお、通常、建物を建設するために求められる構造計算書には、許容応力度設計以外にも様々な計算が求められるが、ここではその詳細については省略する。

2.2 設計変数、目的関数および制約条件の設定

構造最適化を行うにあたり、設計変数、目的関数および制約条件について設定する必要がある。本検討では、設計変数を『部材断面』、目的関数を『鉄骨量』とし、制約条件を、『検定比 ≤ 1.0 』と設定した。

検定比だけを指標として考えた場合、検定比が1.0に近いことは非常に無駄の少ない断面を使用していることを意味し、検定比が非常に小さいということは、耐力が余った無駄な断面を使用していることを意味する。ただし、前述のように部材の断面形状を決定する要因は、検定比だけではない。そのため、実際の構造設計においては、様々な要因を考慮した結果として非常に小さい検定比の部材も存在することが一般的である。

なお、本検討において構造最適化を開始する前提条件として、建築物の平面・立面形状、および荷重条件は既に決定しているものとし、この条件の中で最適な構造断面を探索するものとする。

2.3 グルーピングを用いた最適断面選定手順

ここでは、グルーピングを用いて最適断面を選定する手順について説明する。前述のように検定比を対象とするため、ここでいう最適断面とは検定比が1.0を超えない条件のもと、最も小さい断面(鉄骨量が少ない)のことを指す。ただし、検定比だけをターゲットにして断面を決めていった場合、図3のように多くの部材が異なる断面となる可能性があり、この結果は決して実用的な最適解とは言えない。そこで、前述のグルーピング手法によって、部材の種類数に制限をかけたうえで構造最適化を行う。最適断面を探す手順としては、以下に説明する2つのフェーズに分けて検討した。

最初のフェーズは、断面を小さくすることを目的としたフェーズである。その際、部材の断面はあらかじめ準備した断面リストに従い、耐力が大きなものから順に小さくしていくことで簡便化した。本検討ではこのフェーズを Ph.A とした。(図4)

次に、新たなグループ分けを行うフェーズである Ph.B について説明する。Ph.B への分岐は Ph.A において検定比が1.0を超

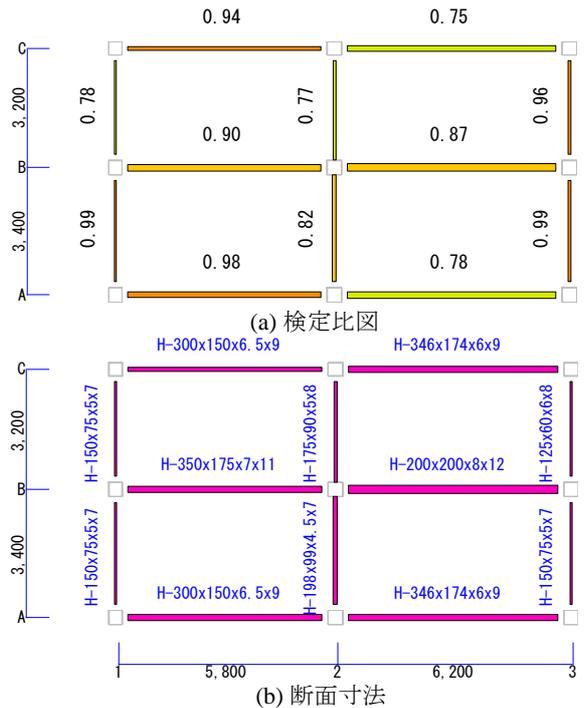


図3 実用的でない断面最適化例

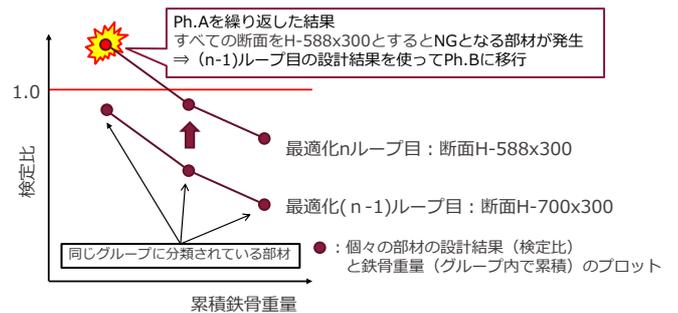


図4 Ph.Aにおける断面選定イメージ

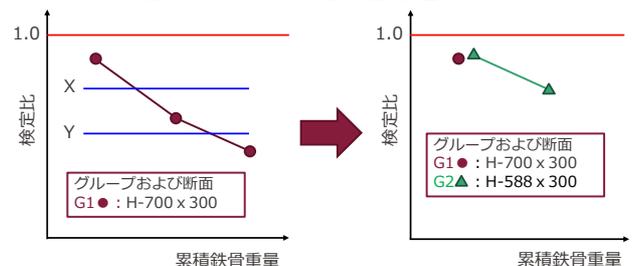


図5 Ph.Bにおけるグルーピング提案

える(NGとなる)部材が発生した際に発生する。Ph.B では、存在する全てのグループの中から、あらたにグループ分けをすることの効果が高いグループを提案する。(図5)

ここで、『グループ分けをすることの効果が高い』とは、あるグループを2つのグループに分けた際、あらたに作成されたグループの断面を小さくすることによって削減する鉄骨量が最も多くなる分け方のことを意味する。図5では、既存グループ G1 を左図に示した X あるいは Y のラインでグループ分けすることを考えた場合、X のラインでグループ分けすることが鉄骨量の低減効果が高いと判断した例を示している。なお、グルーピングを用いた最適化手法については、藤井ら^[藤井 2011]や Krishnamoorthy et al^[Krishnamoorthy 2002]が検討しており、本検討では藤井らの手法を参考にした。

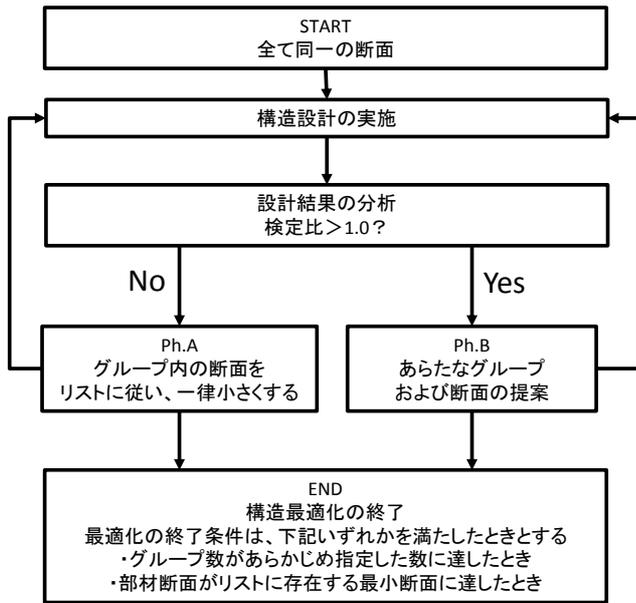


図6 構造最適化のフローチャート

図6に本検討で行う、構造最適化のフローチャートを示す。検討では、まず全ての断面を同一部材(同じグループ)とした状態からスタートし、Ph.AとPh.Bを繰り返していくことで、最適断面を算定する。

3. 試検討モデルによる構造最適化

前章で説明した構造最適化手法を用いて、試検討モデルによる構造最適化を行った。また、比較対象として、構造設計従事者および構造設計初心者による構造最適化を用いず、同じモデルに対して断面設計を実施させ、設計結果の比較を行った。以降に、その詳細を示す。

3.1 試検討モデルおよび検討条件

試検討モデルは1層の鉄骨造建物とした。最適化は屋根の大梁16本を対象とし、屋根面に考慮する設計荷重は、等分布(大梁設計用:1,200N/m²)とした。図7に屋根伏図を示す。また、前述したように実際の断面設計は、検定比だけで決まるものではないが、本検討においては、問題を単純化するため、たわみや横座屈などは設計の要因として考慮しないものとした。

断面選定においては、部材断面は表2に示したH型鋼の断面14種類から選定するものとし、鋼材種別はSS400材のみとした。選定候補リスト中の断面では、断面No.が大きくなるほど耐力は大きくなる。

比較対象として断面設計を実施した構造設計従事者および構造設計初心者には、十分と思う断面が決まるまで設計すること、表2のリストから部材断面を選定することを伝え、それ以外の判断基準は実施者の判断に任せた。

なお、本検討での構造最適化においては、終了判定の1つであるグループ数の上限は特に与えないものとした。

3.2 最適化結果

構造最適化によって計算された検定比図および部材断面を図8に示す。同様に、図9に構造設計従事者の試設計例を、図10に構造設計初心者の試設計例を示す。3者の設計結果として、グループ数と鉄骨重量を整理したものを表3に示す。

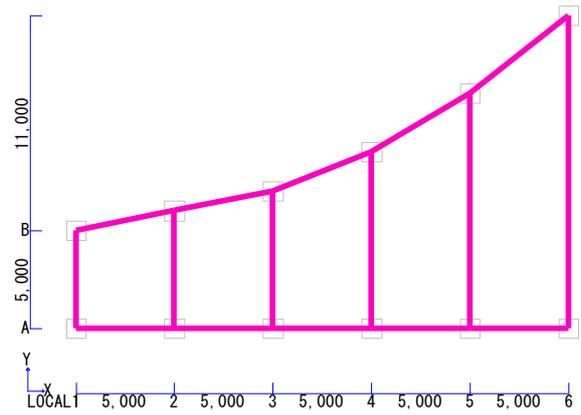
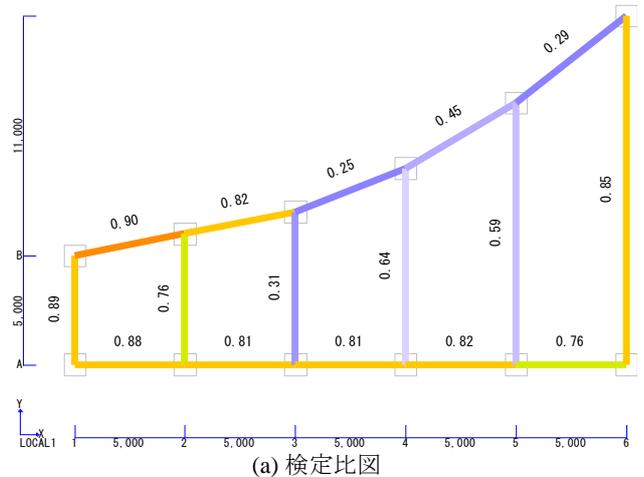


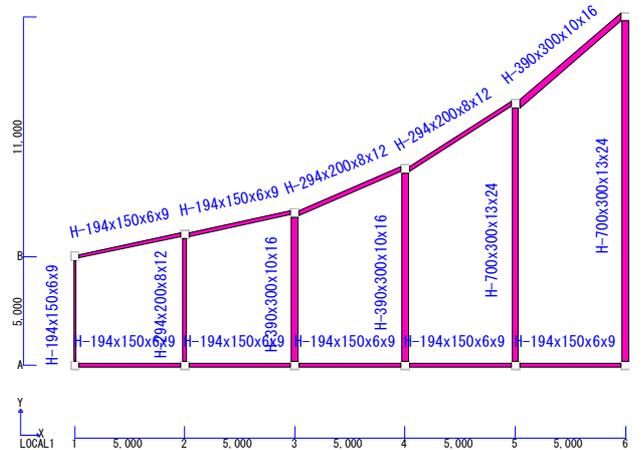
図7 試検討モデル 屋根伏図

表2 断面選定候補リスト(SS400)

断面No	断面形状	断面No	断面形状
1	H-194x150x6x9	8	H-588x300x12x20
2	H-244x175x7x11	9	H-594x302x14x23
3	H-294x200x8x12	10	H-700x300x13x24
4	H-340x250x9x14	11	H-800x300x14x26
5	H-390x300x10x16	12	H-900x300x16x28
6	H-440x300x11x18	13	H-912x302x18x34
7	H-488x300x11x18	14	H-918x303x19x37

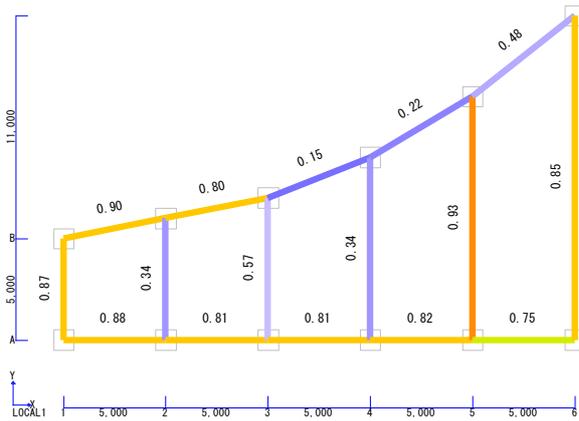


(a) 検定比図

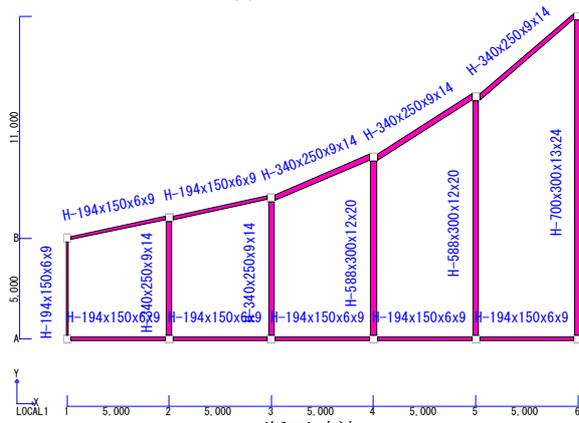


(b) 断面寸法

図8 構造最適化結果

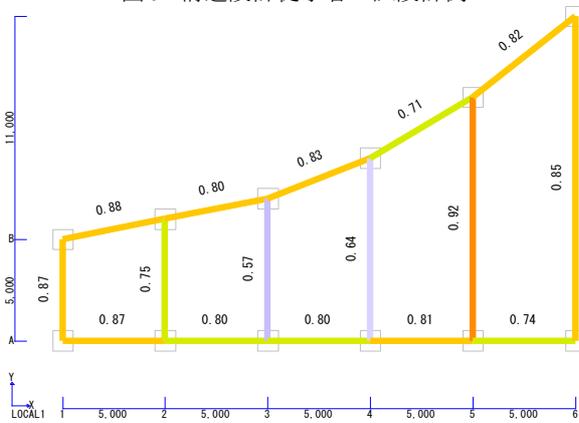


(a) 検定比図

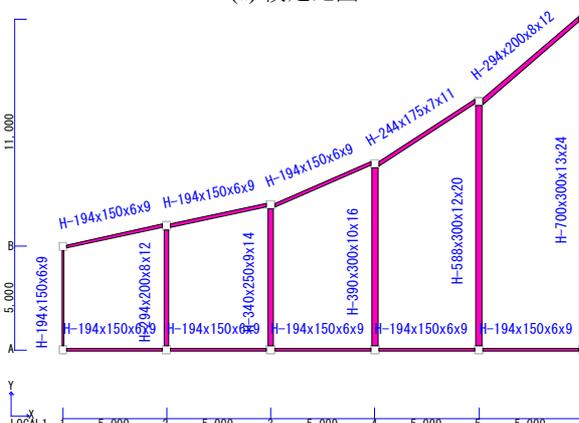


(b) 断面寸法

図9 構造設計従事者の試設計例



(a) 検定比図



(b) 断面寸法

図10 構造設計初心者による試設計例

表3 設計結果

	大梁 グループ数	大梁 総 ton 数
構造最適化	4	9.60
構造設計従事者	4	9.59
構造設計初心者	7	8.47

今回の検討では、グルーピングを用いた構造最適化において、グループ数に上限等の制約条件を与えなかったが、結果的にグループ数を構造設計従事者と同じ結果とすることができた。一方、断面の選定結果については差異が見られた。

ヒアリングの結果、構造設計従事者は、施工性・溶接性を考慮して同じ柱に取りつく大梁の梁せいは、同一に揃えるかあるいは梁せいの差を 150mm 程度以上とするということを経験的に理解し、実施していることが分かった。今後、大梁選定時の制約条件として、上記梁せいの条件など経験による知識を導入することでより高精度な最適解の提案に繋げることができると考える。

一方、構造設計初心者による試設計例では、経験から基づく知識は反映されていない。その結果、鉄骨量こそ小さくなっているが、断面種類は多くなっており、実用的な設計ではなくなっていると言える。

以上より、非常に簡単な検討例ではあるが、構造最適化において実用的な最適解を提案するためには、グルーピングという手法が非常に有用に作用する可能性があることが確認できた。

4. まとめ

本報では、従来の構造最適化では、提案することが難しかった実用的な最適解の算出に対して、グルーピングという手法の適用と、汎用化に向けた検討を行った。

結果として、グルーピング手法を用いた構造最適化は、構造設計従事者が算定する設計例に近い実用的な最適解を導き出し、グルーピング手法を最適化システムに取り入れることが、実用的な最適解を求めるために有効であることを示すことができた。

ただし、この結果は、本検討で実施した試設計の結果に限られるため、今後、異なるモデルによる検討事例の蓄積が必要であると考える。また、構造最適化の実用性を向上させるため、過去の設計事例を分析し、構造設計者が経験的に実施している行為の抽出と最適化への適用を行っていきたい。

参考文献

- [山川 2004] 山川誠, 吉富信太, 上谷宏二: 混合主成分分析による部材断面表現を用いた鋼構造骨組の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集 第 583 号, pp77-83, 2004. 9
- [田村 2008] 田村尚士, 大森博司: 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 その1 許容応力度設計における最適設計法, 日本建築学会構造系論文集 第 628 号, pp891-897, 2008. 6
- [藤井 2011] 藤井英二, 荒木慶一, 上谷宏二: グルーピング過程を含む鋼構造物の対話型部材断面決定法, 日本建築学会構造系論文集 第 664 号, pp1161-1169, 2011. 6
- [Krishnamoorthy 2002] C.S.Krishnamoorthy, P.Venkatesh Prasanna, R.Sudarshan : Object-Oriented Framework for Genetic Algorithms with Application to Space Truss Optimization, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 66-75, 2002