

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

INTERACTIVE SECTION DETERMINATION METHOD OF STEEL STRUCTURES WITH MEMBER GROUPING PROCESSES

藤井 英二*, 荒木 慶一**, 上谷 宏二***
Eiji FUJII, Yoshikazu ARAKI and Koji UETANI

Firstly, a nonlinear optimization problem is formulated taking only representative dimensions of steel sections as independent design variables. The other dimensions are determined using proportions, prepared from a list of standard profiles, to the design variables. In the optimization, the members are divided into groups having identical sectional dimensions. Then a method is presented for re-grouping of members to further reduce the optimal cost once obtained for a given set of groups. An indicator is proposed to estimate the probable reduction to be brought by splitting a group. Using the indicator, the group and the split that likely bring the most effective reduction are identified. Finally, a flowchart for structural design support system with the above automatic grouping is proposed. This system also contains interactive processes enabling the structural engineer to modify the grouping for a synthetically better design. Examples are shown to verify the validity of the indicator and to demonstrate the advantages of the support system.

Keywords : Section optimization, Grouping, Standard profiles, Structural design navigation system

断面最適化, グルーピング, 規格断面, 構造設計ナビゲーションシステム

1. 序論

建築物の構造設計には安全性やコストだけでなく、建築計画・設備計画との調和、製作性・施工性、さらには美観・創造性等、実に多様な要素を複合的に考慮することが求められる。それらの中には論理化や数量化が困難なものもあり、しかも互いに深い関連性をもつことが多いので、対象の限定や理想化を伴う最適設計手法がそのまま構造設計者の役割を代行することはできない。一方、現在の構造設計には、部材断面の選定過程に代表されるように単純な試行錯誤の繰り返しによってより良い解を探索する過程も多くある。部材断面の選定過程では通常、ある断面を仮定して構造システムの変形や応力を求め、コストを含む各種性能を評価することを繰り返して、目標性能を満足する断面を探索する。繰り返しの回数や最終的に到達する性能は構造設計者の経験や力量によって少なからず変わるものの、基本的にこれは試行錯誤による探索過程である。つまり、最適設計手法が効果を発揮しやすい分野と言えるが、構造設計の実務ではほとんど用いられていない。

最適設計手法が断面決定にすら用いられない理由については多くの指摘がなされており、その内の幾つかについては解決法も提案されている。鋼構造における代表的な例として、断面寸法もしくは断面性能等の設計変数が通常は断面リストに示された特定の離散値を

とるため、連続変数最適化による結果を直接用いることはできないという問題がある。これについては、断面リストの特徴を反映した連続変数で断面を表現した上で連続変数最適化を適用する手法^{1)~3)}や、遺伝的アルゴリズム(GA)等に基づく離散変数最適化手法⁴⁾が提案されている。また、鋼材重量最小化等の単一目的最適化では構造設計上考慮すべき多様な要素が無視されることとなり、得られる解が実用性の低いものになりがちだという問題もある。これについては、鋼材重量以外の実用上重要な要素を目的関数や制約条件に採り入れる手法^{5)~8)}の他、多目的最適化によって複数の目的関数間のトレードオフ関係を構造設計者に提示して意志決定を支援する手法⁹⁾も提案されている。また、上谷は、構造設計者とコンピュータが逐次情報をやり取りし、制約条件や目標性能を更新しながら、より望ましい方向に設計を誘導していく「構造設計ナビゲーションシステム」という概念^{10), 11)}を提唱している。この中で、ある固定された条件下で望ましい解を探索する際には、最適設計手法が部分的に利用される。

このように、構造設計における最適設計手法の実用化の素地は徐々に構築されてきていると言えるが、これまであまり論じられていない重要な要素に部材のグルーピング、つまり、同一の断面をとる部材集合を決定する過程がある。構造設計の実務では、接合部や

* 株式会社竹中工務店 工修

** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
准教授・博士(工学)

*** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Takenaka Corporation, M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.

仕上げ材との取り合いの標準化を考え、できるだけ多くの部材を同一断面にしたいという要求がある。一方、すべての部材を同一断面とすると、部材によってその断面性能の利用効率のばらつきが大きくなり、不経済な設計となってしまう。現状では両者のバランスをとるのも構造設計者の役割の一つとなっているが、これは繰り返し探索過程である上に一回の探索の中に断面寸法の決定という下位の繰り返し探索過程が含まれるため、到達性能はおのずと構造設計に許される時間という制約の影響を受けやすい。

既往の最適設計手法では部材グルーピングは与条件として取り扱われることが多いが、適切なグルーピングを見出すことを目的とした手法もいくつか提案されている。例えば Krishnamoorthy et al.¹²⁾ や Togan and Daloglu¹³⁾は、予備解析で得た軸力等に応じてトラス部材をグルーピングした上で、GA を用いて断面最適化を行っている。しかしながら、いずれもグルーピングの際に目的関数値が考慮されないという問題がある。また、グループ数は予め規定されており、それが解に与える影響を調べるには最適化を繰り返す必要がある。Wallsa and Elvin¹⁴⁾は、全部材の断面を独立として断面最適化を行った後に、最適断面積の順に並べた部材リストを規定数のグループに分割し、あらためて最適化を実行する手法を提案している。部材リストを分割する際には、あるグループ内のすべての部材断面をそのグループ内の最大断面積のものに揃えるという条件の下で、目的関数値が最小となるような分割位置が総当たりによって探索される。しかしながら、最初の断面最適化で全部材断面を設計変数とすることがあることを考えると大規模構造物への適用は困難である。

本論では、最適設計手法を用いた鋼構造物の部材断面決定問題を対象とし、性能の高い解を効率的に得るための部材グルーピング手法を提案する。本論で扱う最適化問題は、せい・幅等の代表的断面寸法を連続設計変数とし、応力や変位等に関する制約条件の下で部材コストを最小化する断面最適化問題である。まず、任意の方法で部材をいくつかのグループに分類し、グループ内の部材は同一断面をとるとして最適解を求める。次に、部材コストをさらに低減させるために、グループの一つを分割する手法を提案する。最も効果的な分割パターンを見出すために、分割後の再最適化によって低減されるコストを簡便に近似予測する方法を提案する。また、目的関数や制約関数として採り入れることはしないが実務上は無視し切れない重要な要素を反映して実用的な設計解を得るために、構造設計者によるグルーピングの修正操作を含めた対話型の設計支援システムを提案する。部材グルーピングに論理的な評価指標を与え、さらには構造設計者との情報のやり取りを通して最終的な設計解に到達する本論の手法は、構造設計ナビゲーションシステムの基礎的形態の一つと位置づけられる。

2. 断面最適化問題の定式化

節点位置や部材配置、支持条件、荷重条件が与えられた鋼構造物を考える。部材は n_s 個のグループに分類され、グループ i に属する部材番号の集合を S_i とする。部材グルーピングは $S = \{S_i\}$ ($i=1,2,\dots,n_s$) で定義され、本章ではこれを与条件とする。すべての部材 $j \in S_i$ は材質を含めて同一の断面とし、例えばその断面寸法を S_i の断面寸法と呼ぶ。ここで、次の断面最適化問題を定式化する。

断面最適化問題

応力・変位等に関する制約条件の下で総部材コストを最小化するような、各部材グループの断面寸法を求めよ。すなわち、

$$\text{find} \quad \mathbf{x} = \{\mathbf{x}_i\} \quad (1)$$

$$\text{to minimize} \quad P(\mathbf{x}) = \sum_i \beta_i \left\{ \sum_{j \in S_i} w_j(\mathbf{x}) \right\} \quad (2)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) \geq \mathbf{0}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3), (4)$$

$\mathbf{x} = \{\mathbf{x}_i\}$ は全設計変数、 $\mathbf{x}_i$ は特に S_i に関する設計変数(独立な断面寸法)を表すベクトルである。 β_i は S_i の質量単価、 $w_j(\mathbf{x})$ は部材 j の質量であり、目的関数 $P(\mathbf{x})$ は総部材コストを表す。 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ は制約関数ベクトルである。以下では、問題設定について補足する。

2.1. 設計変数

部材断面を設計変数とする場合、規格断面リスト内の番号といった離散的表現や、断面性能もしくは断面寸法といった連続的表現が用いられることが多い。本論では、断面形状の直感的把握や求解の効率を考え、断面寸法を連続変数として最適化を行い、後に最適解に近い規格断面を選択する。このときすべての寸法パラメータを設計変数に選ぶと、寸法の組が不定または不定に近い状況になり、最適解が規格断面からかけ離れたものとなるという問題が生じる場合がある。このため、リストの規格断面を良好に表現できるように代表寸法を選び、これを独立設計変数として残りの寸法を線形関数で与える。例えば H 形鋼で規格断面リストに JIS G 3192¹⁵⁾ の汎用品を用いる場合、せい H_i と幅 B_i を独立設計変数とし(すなわち $\mathbf{x}_i = \{H_i, B_i\}$)、ウェブ厚 t_{wi} ・フランジ厚 t_{fi} を次の寸法比を用いて従属的に定める。

$$B_i/t_{wi} = 22.5, B_i/t_{fi} = 14.5 \quad (5), (6)$$

ここに 22.5, 14.5 は、規格断面リストにおける当該寸法比の平均値である。式(5)で t_{wi} の決定にウェブ幅厚比に準じる H_i/t_{wi} ではなく B_i/t_{wi} を用いるのは、同リストでは後者の方がばらつきが小さく、規格断面に近い最適解が得やすいことによる。

図 1 には、規格断面および式(5),(6)に基づく近似断面の断面 2 次モーメント(強軸まわり)を示す。ある規格断面およびそれと同じ

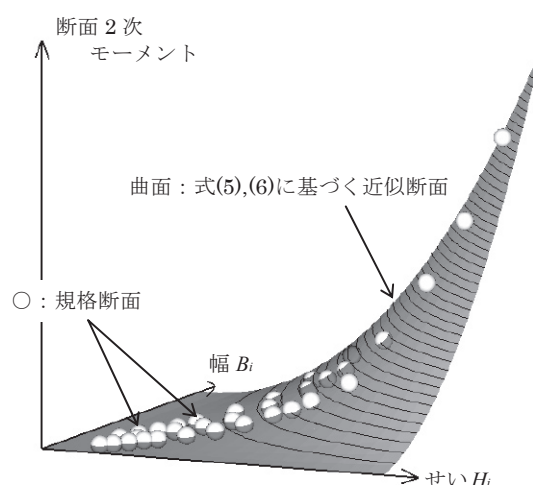


図 1 規格断面と近似断面(曲面)

H_i, B_i をもつ近似断面の断面 2 次モーメントをそれぞれ $I, \bar{I}$ とすると、 $\bar{I}/I$ の全規格断面に関する平均値は 0.98、標準偏差は 0.19 である。同様に、断面積ではそれぞれ 0.98、0.21 である。式(5),(6) による断面が規格断面を断面性能という面で概ね良好に近似していることがわかる。なお、円形鋼管や角形鋼管についても、必要に応じて外形寸法のみを独立設計変数とし、厚さはそれに対する比(それぞれ 39.3, 28.6)を与えて従属的に定める。

2.2. 制約条件

設計変数ベクトルの各成分の上下限制約の他、応力や変位、断面寸法に関する制約を考慮する。応力については、部材 $j \in S_i$ の圧縮もしくは引張応力と曲げ応力との組合せ応力に関する応力度比(存在応力度の許容応力度¹⁰⁾に対する比で正値)を $r_j(\mathbf{x})$ ^{注1)}、 S_i の応力度比を $R_i(\mathbf{x}) = \max_{j \in S_i} \{r_j(\mathbf{x})\}$ とし、これを指定最大値 R_i^u (≤ 1) 以下とする(以下、応力度比制約と呼ぶ)。なお、複数の荷重ケースを考慮する場合は、それらによって部材 j に生じる最大の応力度比を $r_j(\mathbf{x})$ とする。

$$1 - R_i(\mathbf{x}) / \overline{R_i^u} \geq 0 \quad (7)$$

断面寸法については、図 1 の近似曲面上で規格断面が近傍に分布する領域で最適解が求まるよう、外形寸法に関する制約 $1 - B_i/H_i \geq 0$ や幅厚比制約¹⁰⁾を設ける。この他、異なるグループ間の断面寸法に関する制約(例：異なる i について H_i を同一とする)を考慮する。

2.3. 最適化手法および感度計算手法

最適化手法には逐次 2 次計画法¹⁷⁾を用いる。目的関数や制約関数の感度係数は差分法を用いて近似的に計算する。これにより、許容応力度や式(7)の制約関数式に含まれる不連続性の問題は擬似的に解消される。

3. 自動グループ分割手法

3.1. 最適グループ細分割問題の定式化

前章の断面最適化問題の最適解を $\mathbf{x}^*$ とする。 $\mathbf{x}^*$ に対応する諸量についても同様に $()^*$ と表記し、変数名の前に「最適」を付ける。断面最適化では部材グルーピング $\mathbf{S} = \{S_i\}$ ($i=1,2,\dots,n_s$) を与条件としたが、最適解の性能は $\mathbf{S}$ に大きく依存する。例えばすべての部材を同一グループに分類すれば、最適解ではごく一部の部材が応力度比制約をちょうど満足して大多数の部材には冗長性が残されることになるので、最適コスト $P^*(\mathbf{S})$ は大きな値に留まる。逆にすべての部材を互いに異なるグループとすれば、 $P^*(\mathbf{S})$ は限界まで小さくなるものの、そのような解は断面・接合部の種類が多く現実にはかえって高コストとなる。また、構造設計者が与えるグルーピングには節・階等の位置情報や、柱・梁や弦材・斜材等の役割が反映されていることが多く、これらを見捨てグループを改変することは構造設計の総合的な質の低下に繋がってしまう。

これらを考慮して本章では、あるグループ S_i を 2 分割して P^* を改善(低減)し、低減効果が最も大きくなるグループの選定方法およびその分割方法について考える。問題の定義を示す。

最適グループ細分割問題

初期の部材グルーピング $\mathbf{S} = \{S_i\}$ ($i=1,2,\dots,n_s$) の下で、断面最適化問題の最適解 $\mathbf{x}^*(\mathbf{S})$ 、最適コスト $P^*(\mathbf{S})$ 等が得られているとする。ある S_i を $S_{i,1}$ と $S_{i,2}$ ($= S_i - S_{i,1}$) に分割したグルーピング $\mathbf{S}'$ を考えたとき、 $P^*(\mathbf{S}')$ が最小となるようなグループ i とその分割 $S_{i,1}, S_{i,2}$ を求めよ。

これは組合せ最適化問題であるので、厳密解を得るにはすべての組合せに対して断面最適化問題を解く必要があり膨大な計算負荷を要する。また、厳密解が得られてもそれは単に総部材コストが最小となる設計解であって、接合部の納まり等の現実的要因を加味した修正を必要とすることが予想される。従って、ここでは以下の緩和条件を導入し、良好な近似最適解を効率的に求める方法を提案する。

緩和条件

S_i から $S_{i,1}, S_{i,2}$ への分割は、各部材の最適応力度比 $r_j^*(\mathbf{S})$ のみを用いて行う。つまり、応力度比の閾値(分割応力度比)を ρ_i とし、部材 $j \in S_i$ を $r_j^*(\mathbf{S}) < \rho_i$ のとき $S_{i,1}$ 、 $r_j^*(\mathbf{S}) \geq \rho_i$ のとき $S_{i,2}$ に振り分ける。

これにより、最適グループ細分割問題は $P^*(\mathbf{S}')$ が最小となる (i, ρ_i) を求める問題に緩和される。

3.2. 最適コスト低減効果予測式の提案

緩和条件を導入してもなお、最適グループ細分割問題は連続変数を用いた断面最適化を伴う組合せ最適化問題である。これを近似的ながら効率的に解くために、分割による P^* の低減効果 $Q = P^*(\mathbf{S}) - P^*(\mathbf{S}')$ を分割前の諸量を用いて簡便に予測する手法を提案する。

S_i を $S_{i,1}$ と $S_{i,2}$ に分割してあらためて最適化(再最適化)を実行すると、概して、 $r_j^*(\mathbf{S})$ が大きい $S_{i,2}$ の断面はあまり変化せず、 $r_j^*(\mathbf{S})$ が小さい $S_{i,1}$ の断面が応力度比制約がアクティブになる(式(7)が等号で満足される)まで小さくなって P^* の低減に寄与する。部材断面力は再最適化の前後で不変であり、各部材の応力度比は断面積ひいては部材コストに反比例するという近似的な仮定に基づけば、再最適化後の $S_{i,1}$ の部材コストは再最適化前の ρ_i^d / R_i^u 倍になると予想される。ここに、 $\rho_i^d = \max_{j \in S_{i,1}} \{r_j^*(\mathbf{S})\}$ である。以上を踏まえ、 Q を次の指標 $\tilde{Q}(i, \rho_i)$ を用いて予測することを提案する。

$$\tilde{Q}(i, \rho_i) = \left(1 - \rho_i^d / \overline{R_i^u}\right) \beta_i \sum_{j \in S_{i,1}} w_j^*(\mathbf{S}) \quad (8)$$

初期グルーピング $\mathbf{S} = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_{n_s}\}$ の下で最適化を行って $\mathbf{x}^*(\mathbf{S})$ 、 $r_j^*(\mathbf{S})$ 等を得た後に、次の STEP 1~3 を実行すれば、効果的に P^* を低減することができる。

STEP 1. 全てのグループ i について、 ρ_i を 0 から $\overline{R_i^u}$ まで刻み幅 $\Delta \rho_i$ でパラメトリックに変化させながら式(8)の $\tilde{Q}$ を計算し、それが最大となる (i, ρ_i) を見出す。なお、同式は極めて簡単なので計算負荷は小さい。

STEP 2. 上記の (i, ρ_i) に対応するグルーピングを、新たなグルーピング $\mathbf{S}' = \{S_1, \dots, S_{i,1}, S_{i,2}, \dots, S_{n_s}\}$ (グループ数は $n_s + 1$) とする。

STEP 3. $\mathbf{x}^*(\mathbf{S})$ を初期解とし、 $\mathbf{S}'$ の下で再最適化を実行する。

3.3. 例題による予測式の検証

3.3.1 平面トラス状架構

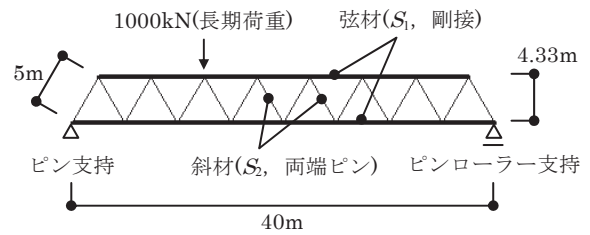
図 2 の平面トラス状架構を用いて、式(8)の予測値 $\tilde{Q}(i, \rho_i)$ が真値 Q を良好に近似することを例証する。初期の部材グルーピングは $S = \{S_i\}$ ($i=1,2$ の順で弦材, 斜材)で, S_1 は $\mathbf{x}_1 = \{H_1, B_1\}$ を独立設計変数とする H 形鋼, S_2 は $\mathbf{x}_2 = \{D_2\}$ (D_2 : 外径)を独立とする鋼管である。それぞれ, 厚さは 2 章の寸法比を用いて定める。応力度比の指定最大値は $\overline{R}_i^u = 0.9$ とする。図 3 に, 求めた最適断面寸法を弦材の最適応力度比 r_j^* とともに示す(同一太さ・濃さの部材は同一グループを表す。線の太さが断面積等を表しているわけではない。以降の図も同様)。最適コストは $P^*(S) = 17.06$ となった。ここでは鋼材の質量単価を $\beta_i = 1$ としたため, P^* はそのまま鉄骨質量(ton)を表す。

図 4 は, グループ毎に $r_j^*(S)$ が小さい順に部材番号を付け直した上で, 各部材 $j \in S_i$ の $r_j^*(S)$ を横軸に, 部材コストの累計値 $V_{i,j} = \sum_{k=1}^j \beta_i w_k^*(S)$ を縦軸にプロットしたものである。 S_1, S_2 それぞれ 1 部材のみで $r_j^*(S) = \overline{R}_i^u$ となり, その他多くの部材には冗長性が残されている。例えば S_1 を応力度比 0.6 を境に分割する場合, $\tilde{Q}(i, \rho_i)$ は同図中の a, b を用いて $\tilde{Q}(1, 0.6) = a/b / \overline{R}_i^u$ となる。図 5 の実線は, ρ_i を $0 \sim \overline{R}_i^u$ までパラメトリックに変化させて $\tilde{Q} - \rho_i$ 関係を求めたものである。ここでは精緻な作図のため $\Delta \rho_i = \overline{R}_i^u / 1000$ とした。しかし, $\tilde{Q}$ が最大となる (i, ρ_i) のみが重要であることや, $r_j^*(S)$ が部材毎の離散値をとるので近接する $r_j^*(S)$ 間では ρ_i がどのような値をとっても予測値 $\tilde{Q}$, 真値 Q ともに不変であることを考えれば, $\Delta \rho_i$ はあまり小さくする必要はなく, 通常は $\Delta \rho_i = \overline{R}_i^u / 100$ 程度で十分である。 S_2 より S_1 を分割する方が $\tilde{Q}$ は大きく, $\rho_i = 0.501 \sim 0.635$ の時に最大値 3.71 をとることがわかる。同図にはあわせて, ρ_i を変化させる際に出現したすべての $S' = \{S_{1,1}, S_{1,2}, S_2\}$ について断面最適化を実行して求めた Q をプロットする。 $\tilde{Q}$ が Q を概ね良好に近似していることがわかる。なお, Q は $\rho_i = 0.486 \sim 0.501$ の時に最大値 3.96 をとっており, 最大の $\tilde{Q}$ を与える ρ_i はこれを僅かに外しているが, 十分に実用的な範囲と言える。図 6 には, 最大の $\tilde{Q}$ を与える (i, ρ_i) に従って S' を構成して再最適化を実行した結果を示す。冗長性の高かった $S_{1,1}$ で部材断面が大きく減少し, $P^*(S')$ は $P^*(S)$ から 20% 減の 13.65 となった。以降, $\tilde{Q}$ を用いてグループ分割・再最適化を行うことを自動グループ分割と呼ぶ。

3.3.2 平面ラーメン架構

図 7 の平面ラーメン架構を用いて, 曲げ抵抗型の架構についても式(8)の予測値 $\tilde{Q}(i, \rho_i)$ が真値 Q を良好に近似することを例証する。初期の部材グルーピングは $S = \{S_i\}$ ($i=1,2$ の順で柱, 梁)で, S_1 は $\mathbf{x}_1 = \{A_1\}$ (A_1 : 外法辺長)の角形鋼管, S_2 は $\mathbf{x}_2 = \{H_2, B_2\}$ の H 形鋼である。厚さは 2 章の寸法比で定める。各節点には鉄骨質量および梁長さ 1m あたり 5ton に相当する集中質量が配置されている。鉛直下向き荷重を $W = 1.0g$ (g : 重力加速度), 水平荷重を $E = 0.4g$ (注 2)とし, $W \pm E$ を短期荷重ケースとして作用させる(荷重ケース数は 2)。層間変形角に関する制約は考慮しない。 $\overline{R}_i^u = 0.9$ とし求めた最適断面寸法を, 柱の r_j^* とともに図 8 に示す。最適コストは $P^*(S) = 20.32$ となった。本例題でも $\beta_i = 1$ であり, P^* は鉄骨質量(ton)を表す。

図 9 に $\tilde{Q}(i, \rho_i)$ と Q の比較を示す。 S_1, S_2 の両方で予測精度は概ね良好である(注 3)。 $\tilde{Q}, Q$ の最大値はともに $\rho_i = 0.361 \sim 0.525$ の範



※長期荷重に部材自重も考慮。設計基準強度 $F=235\text{N/mm}^2$

図 2 平面トラス状架構

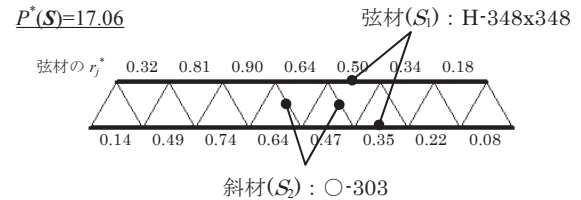


図 3 S の下での最適解

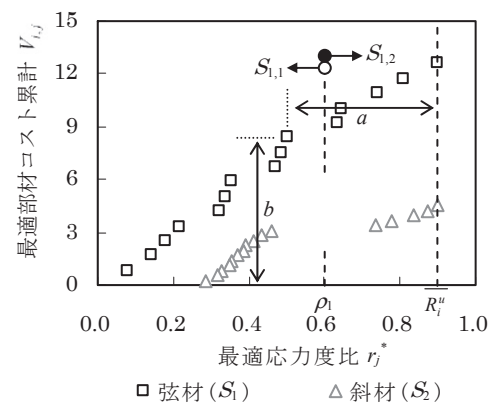


図 4 S の下での最適部材コスト累計と最適応力度比

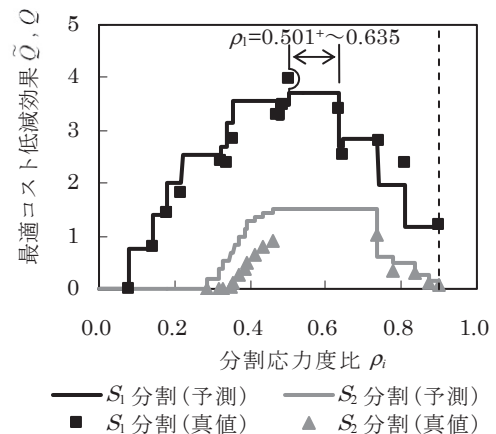


図 5 最適コスト低減効果—分割応力度比関係(予測・真値)

$P^*(S') = 13.65$

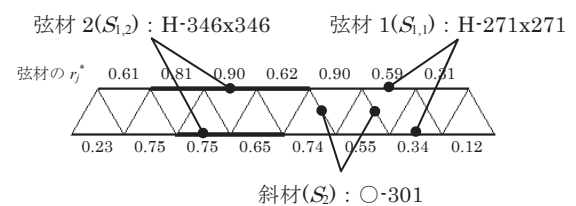
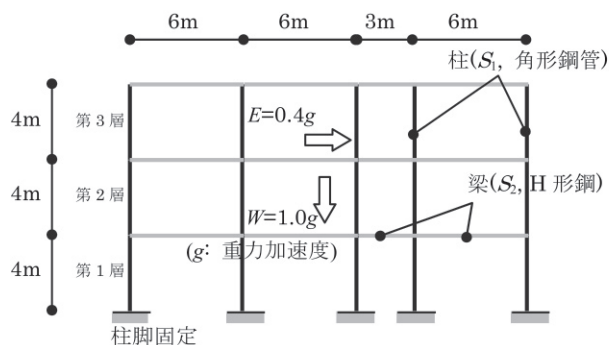


図 6 S' の下での最適解

図で現れ、それぞれ 3.83, 3.73 である。 $\tilde{Q}$ による簡便な予測で最もコスト低減効果の高い (i, ρ_i) を特定できたことになる。図 10 には、特定した (i, ρ_i) に従って $S' = \{S_{1,1}, S_{1,2}, S_2\}$ を構成して再最適化を実行した結果を示す。支持荷重の小さい第 2 層の外柱と第 3 層の柱が $S_{1,1}$ に分類されて断面が小さくなっており、妥当な結果と言える。



※各節点には、鉄骨質量および梁長さ 1m あたり 5ton に相当する集中質量を配置。設計基準強度 $F=235\text{N/mm}^2$

図 7 平面ラーメン架構

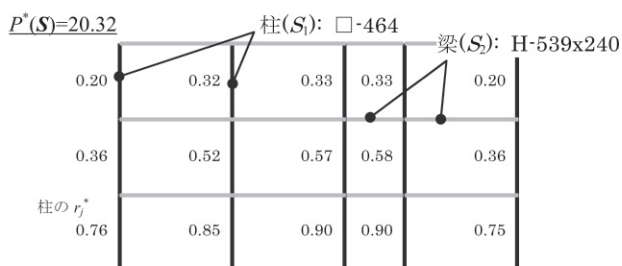


図 8 S の下での最適解

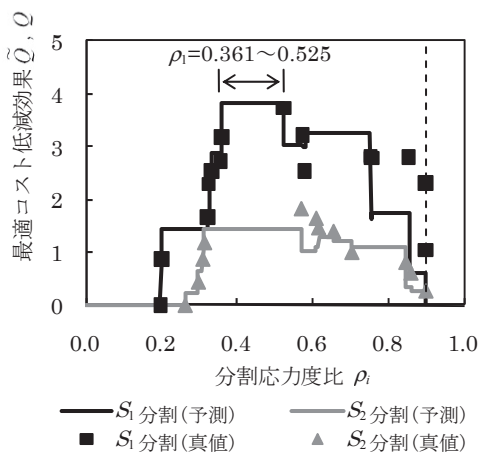


図 9 最適コスト低減効果—分割応力度比関係(予測・真値)

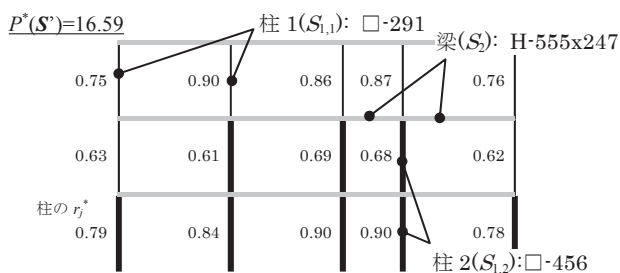


図 10 S' の下での最適解

4. 対話型グルーピングによる設計支援システムの提案

自動グループ分割を複数回適用すれば、総部材コストの観点から望ましい部材グルーピングに効率的に到達することができるが、実際の建築物には他にも考慮すべき重要な要素が多くある。例えば、部材断面の種類(グループ数)は少なくともその組合せである接合部の種類が多いような場合、断面の統一化の効果は現れ難い。また、詳細な製作性や施工性等、構造設計段階で考慮はされるが定量化や判断のアルゴリズム化が困難なものも多い。

構造設計者が多種多様な要件を自ら反映して総合的に満足できる設計解に到達するために、ここでは自動グループ分割に対話型のグルーピング修正操作を加えた設計支援システムを提案する。図 11 にフローを示すが、これはシステムがある条件下における最適解の性状(グルーピングの状態やアクティブな制約条件、応力度比分布、コスト等)を提示し、構造設計者がその情報を基に総合的な観点からグルーピングを修正するというやり取りを繰り返して、最終的に満足する設計解に到達するものである。以下に、フローに含まれる①～⑥の操作を説明する。

①冗長部材のグループ移動

自動グループ分割(グループ分割・再最適化)を実行すると、基本的に $S_{i,1}$ の断面の方が $S_{i,2}$ より小さくなる。再最適化によって部材断面力は変化するので、 $S_{i,2}$ の部材の中から $S_{i,1}$ の断面でも応力度比制約を満足するものが出現する場合があるが、ここではそのような部材を自動的に検出して $S_{i,1}$ に移動する。なお、他の制約条件が支配的で応力度比制約がアクティブでないグループがある場合は特に、移動後の再最適化によって P^* が逆に増加することがある。本論では、そのような P^* の増加を事前に予測するのではなく、増加した場合に移動前のグルーピングおよび解に戻ることにする。

②指定部材のグループ移動

部材を指定して所属グループを変更する。これは、総部材コストが多少増加しても接合部の標準化を優先したい場合等に行う。

③グループ統合

複数のグループを統合して 1 つのグループとする。これは、異なるグループの最適断面寸法に大きな差異が見られない場合、つまり別々のグループとする意義が小さい場合等に行う。

④断面寸法制約の変更

梁せいを揃える等、異なるグループ間の断面寸法に関する制約を追加・変更もしくは解除する。

⑤指定グループ分割

分割グループと分割応力度比を指定してグループ分割を行う。

⑥設計対象の解除・再選択

グループ数を増やすと設計変数や制約条件の数が増えるので、最適化にかかる計算時間も増加する。一方、上記①～⑤の操作を経た後の再最適化では、操作を施さなかったグループの断面は基本的にあまり変化しないので、常にすべてのグループの断面を設計変数とする必要性は小さい。ここでは、指定したグループを設計変数や制約条件から除外もしくは必要に応じて再選択する。本システムにより、部材コストの観点から論理的なグルーピングを行うこと、さらにはそれを総合的な観点から調整することが可能となる。なお、それぞれのグルーピングにおける断面は、前の条件における最適解を初期解とする断面最適化により効率的に求められる。

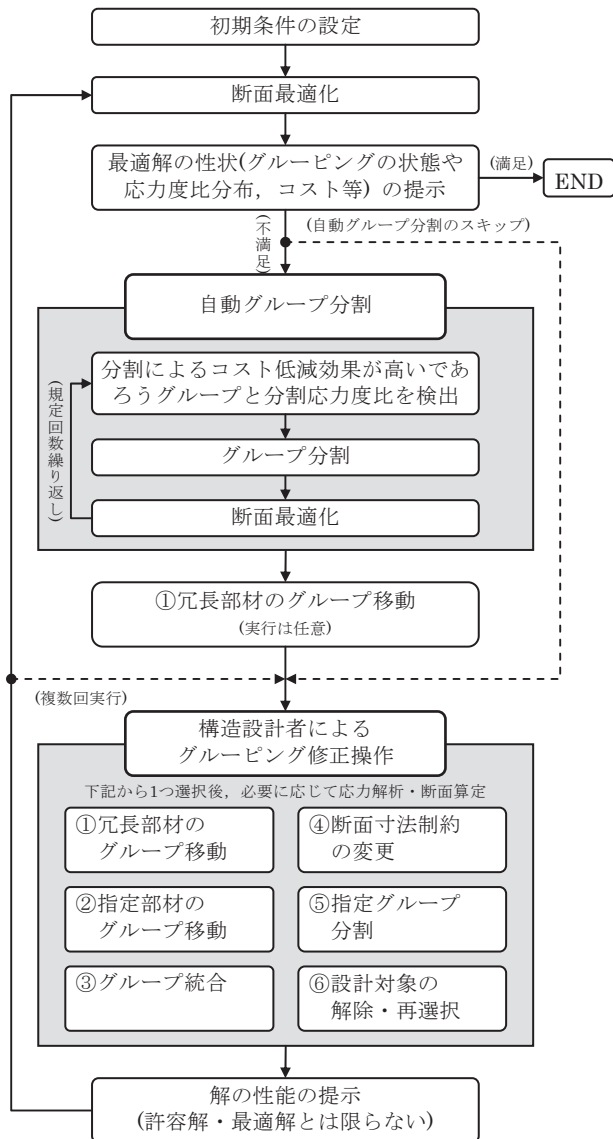


図 11 設計支援システムのフロー

5. 例題

ここでは、図 11 のフローに基づいて構築した設計支援システムを用いて、図 12 に示す立体トラス状架構の試設計を行う。上弦面・下弦面は XY 平面位置がずれた 5m 角の格子となっており、それらを長さ 5m の斜材が繋いでいる。部材数は 432、節点数は 124 である。下弦格子の -Y 側長辺の全節点および +Y 側の ±X 端は鉛直支持(Z 方向支持)されており、鉄骨自重に加えて上弦面の各節点に 3.2kN/m^2 に相当する節点荷重が長期荷重として載荷される。格子材は両端剛接合の H 形鋼、斜材は両端ピン接合の鋼管で、設計基準強度はともに $F = 325\text{N/mm}^2$ とする。許容応力度の算定においては、節点間距離すなわち 5m を個材の座屈長さとする。以下にシステムを用いた設計過程の例を説明するが、断面最適化においては指定最大応力度比を $R_t^* = 0.9$ とする応力度比制約および H 形鋼のウェブ幅厚比制約等を考慮する。フランジ幅厚比および鋼管の径厚比については、2 章の寸法比を用いることで自動的に満足される。なお、格

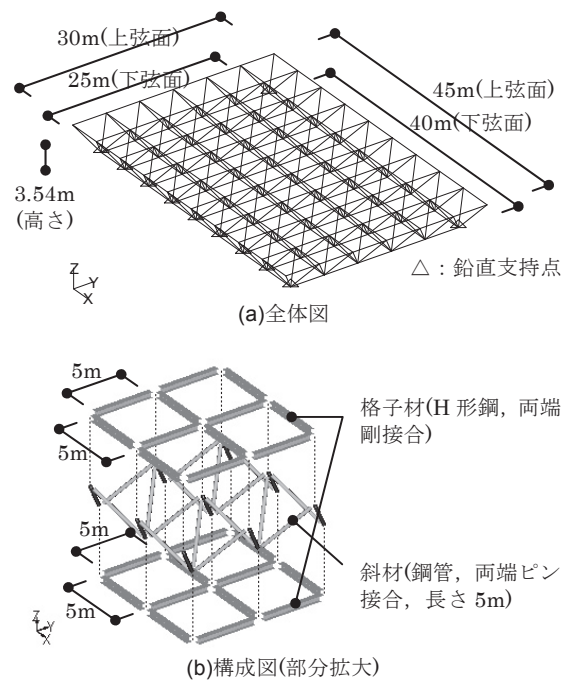


図 12 立体トラス状架構

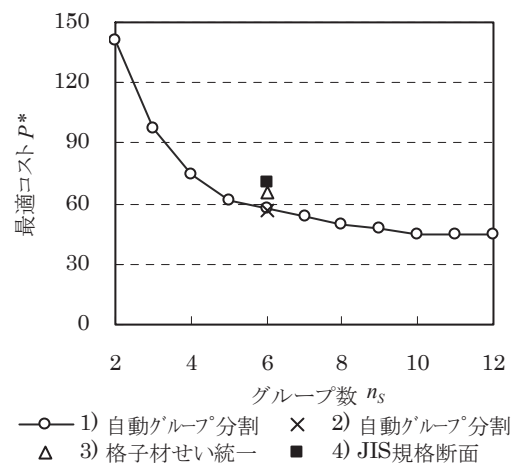


図 13 $P^* - n_s$ 関係

子材では $150 \leq H_t \leq 1000$ および $75 \leq B_t \leq 1000$ ，斜材では $21.7 \leq D_t \leq 1000$ (単位は mm) の設計変数上下限制約を設ける。

1) 部材グループ数の決定

まず、最適コスト P^* と部材グループ数 n_s の関係を把握し、適切な n_s を決定する。図 13 は、格子材(上下弦面とも)および斜材の $n_s = 2$ から自動グループ分割を繰り返して求めた $P^* - n_s$ 関係である(図中の ×, △, ■ については後述する)。ここで、鋼材の質量単価は $\beta_t = 1$ としているため、 P^* はそのまま鉄骨質量 (ton) を表す。 $n_s = 2$ の場合に約 140 だった P^* は n_s の増加に伴って急激に減少するが、その度合いは徐々に鈍化し、 $n_s \geq 10$ ではほぼ一定で約 45 となる。 $n_s = 12$ では格子材から派生したグループの一部でせい下限値に抵触し、その中では幅が近いものも発生しているため、これ以上分割しても P^* はあまり減少しない。なお、自動グループ分割では P^* の低減効果の高いグループを検出して分割するため、格子材と斜

材のグループ数は必ずしも同じではなく、 $n_s=12$ ではそれぞれ 8 および 4 グループとなった。図 14 および図 15 には、 $n_s=2$ および 12 の時の最適応力度比 r_j^* のヒストグラムを示す。両図の縦軸のスケールが異なることに注意されたい。 $n_s=2$ では $r_j^* = \overline{R_j^*} (=0.9)$ つまり応力度比制約がアクティブとなる部材はごく僅かで、約半数の部材で $r_j^* \leq 0.1$ となる不経済な設計解となっている。これに対し $n_s=12$ の場合は r_j^* の高値の領域に多くの部材が分布しており、部材の断面性能を効率的に活用できていることがわかる。ただし、本架構で 12 種類もの断面を許容することは接合部の標準化等の観点から好ましくない。以下では、少ない n_s で比較的小さな P^* が得られている $n_s=6$ を採用する。この時の最適コストは $P^*=57.83$ である。

2) 自動グループ分割および冗長部材のグループ移動

次に、格子材と斜材のグループ数が同数となるように制御しながらあらためて自動グループ分割を $n_s=2$ から $n_s=6$ まで 4 回繰り返す、さらに図 11 の①に示す冗長部材のグループ移動を 1 回行った上で断面最適解を求めた。表 1 に最適断面寸法を、図 16 に r_j^* のヒストグラムを示す。図 17 には上弦格子面・斜材・下弦格子面のそれぞれについて断面の分布すなわちグルーピングの状態を示す。概

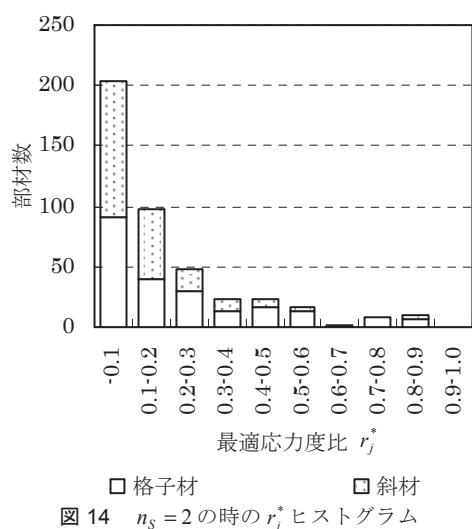


図 14 $n_s=2$ の時の r_j^* ヒストグラム

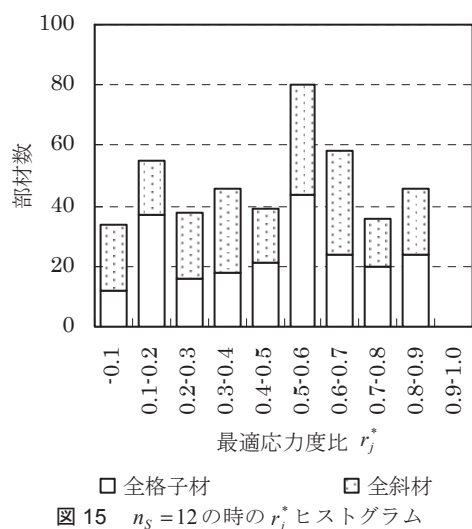


図 15 $n_s=12$ の時の r_j^* ヒストグラム

して -Y 側に開いたコの字状に大きな断面が配置されており、支持点位置に応じた妥当な結果となっている。なお、これは上記 1) の $n_s=6$ 時と同じグルーピングではないが、 P^* は図 13 の×に示すように 56.74 となっており、1) との差はごく僅かである。

3) 格子材せいの統一

表 1 のようにせいが異なる H 形鋼を剛接合すると接合部の納まりが複雑となり、全体として高コストの架構になりがちである。そこで、図 11 の④にあるように異なる断面間の寸法制約を変更する。具体的には、格子材 A, B, C の部材せいをすべて同一とする制約を追加した上で、上記 2) の最適解を初期解としてあらためて断面最適化を行った。表 2 に最適断面寸法を、図 18 に r_j^* のヒストグラムを示す。図 13 には、この時の $P^*=65.09$ を△で示す。格子材 C の r_j^* は最大でも 0.59 で応力度比には余裕があるが、これはせいを格子材 A, B と同一の大きな値とした一方、幅をこれ以上小さくするとウェブ幅厚比制約が満足されなくなるためである。H 形鋼のウェブ厚は幅に対する寸法比で定めていることに注意されたい。

4) JIS 規格断面の選択

最後に、3) で得られた解に近い断面を JIS 規格断面リストから選択し、あらためて応力解析・断面算定を行う。表 3 に選択した断面を示すが、選択にあたっては適宜ユーザ(構造設計者)の判断を加えている。例えば、格子材 A の 3) における最適解 H-262x262 (x11.6x18.0) にせい・幅が近い規格断面は H-250x250x9x14 と H-300x300x10x15 だが、前者では全ての寸法が最適解より小さいので 0.9 以下に抑えていた応力度比が 1 を超える可能性が高いと判断し、後者を選択している。なお、この選択過程には若干の試行錯誤が生じることもある。図 19 には r_j^* のヒストグラムを示す。 r_j^* の分布は 2) や 3) に比してやや低値側にシフトしているものの、概ね断面性能を効率的に利用している。この時のコストは図 13 の■に示すように $P^*=70.95$ で、先述の 2) に比して約 25% 増となっている。2) は格子材にせいの異なるビルトアップ H 形鋼を用いた解であることを考えると、せいが揃った JIS 規格断面を用いる本解は製作上・施工上の優位性が高く、総合的により良い設計解と言える。

表 1 最適断面寸法

グループ	最適断面寸法
格子材	A H-261x261(x11.6x18.0)
	B H-170x170(x7.6x11.7)
	C H-150x118(x5.3x8.1)
斜材	A ○-242(x6.2)
	B ○-150(x3.8)
	C ○-110(x2.8)

※H: H 形鋼, ○: 鋼管。()内は従属設計変数

表 2 最適断面寸法

グループ	最適断面寸法
格子材	A H-262x262(x11.6x18.0)
	B H-262x173(x7.7x12.0)
	C H-262x136(x6.0x9.4)
斜材	A ○-242(x6.2)
	B ○-144(x3.7)
	C ○-110(x2.8)

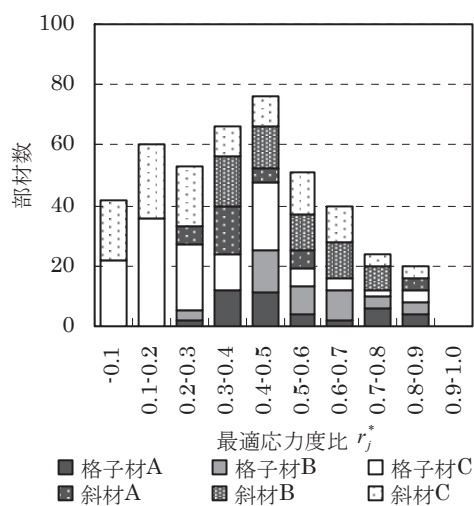


図 16 $n_s = 6$ (格子材 3, 斜材 3) の場合の r_j^* ヒストグラム

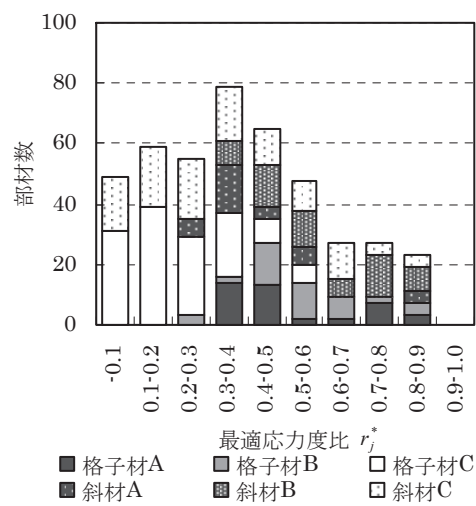


図 18 格子材せい統一後の r_j^* ヒストグラム

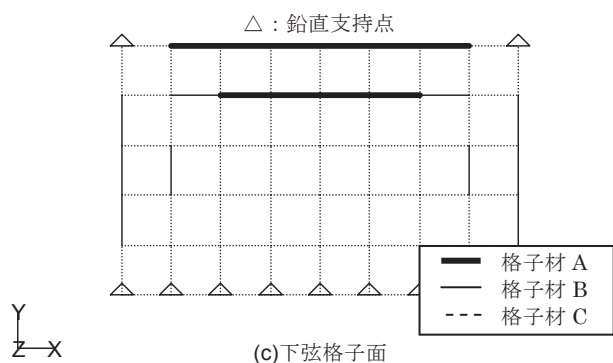
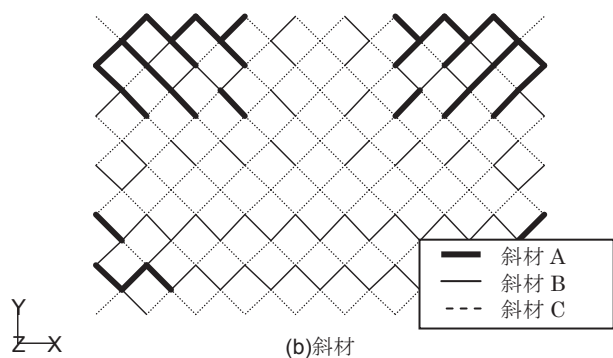
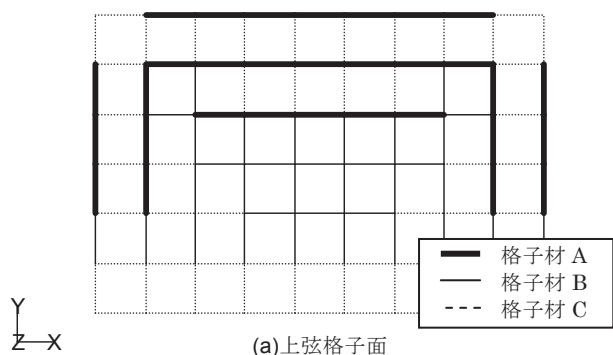


図 17 $n_s = 6$ (格子材 3, 斜材 3) の場合の部材グルーピング

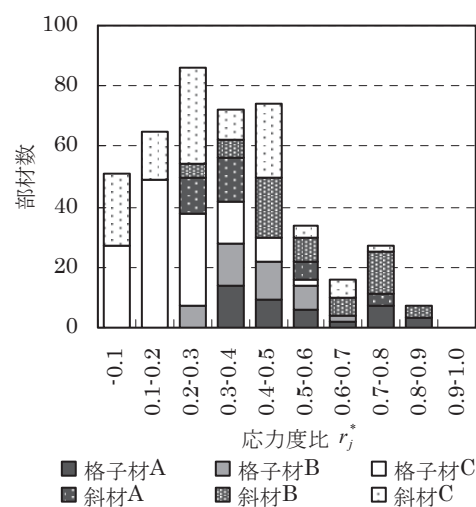


図 19 JIS 規格断面を用いた場合の r_j^* ヒストグラム

表 3 選択した JIS 規格断面		
グループ	最適断面寸法	
格子材	A	H-300x300x10x15
	B	H-294x200x8x12
	C	H-300x150x6.5x9
斜材	A	○-267.4x6.0
	B	○-139.8x4.5
	C	○-114.3x3.2

このように、4 章の設計支援システムを用いることで、構造設計者の判断を交えながら総合的に満足できる設計解に極めて効率的に到達することができる。

6. 結論

本論では、最適設計手法を用いた鋼構造物の部材断面決定問題について、次の結論を得た。

- 1) 外形寸法等、部材断面の代表寸法を連続な独立設計変数とし、残りの寸法は規格断面リストを基に予め定める線形関数で与える手法を提案した。これにより、少ない設計変数で断面最適化問題を

定式化しつつ、規格断面に近い最適解を得ることができる。

- 2) 与えられた同一断面部材グループの下で総部材コストを最小化する断面最適化問題では、最適解において一部の部材が応力度比制約をちょうど満足し、その他の部材には冗長性が残される。あるグループ内の部材を定められた応力度比(分割応力度比)を境に 2 つのグループに分け、あらためて最適化を行うことでコストはさらに減少するが、その度合いは分割するグループや分割応力度比の値に依存する。
- 3) 分割前の最適解における応力度比や部材コストを用いて、ある分割グループ・分割応力度比に対応するコスト低減効果を簡便に予測する指標を提案した。本指標が最も大きいグループ・応力度比で分割し、あらためて最適化を実行することで、コストは効果的に減少する。本指標は厳密に最適な分割を与えることを保証するものではないが、その目的に照らして十分な精度を有していることを例証した。
- 4) グループ分割・再最適化を重ねることでコストは減少が続けるが、その度合いは徐々に鈍化することを例証した。過度なグループ分割には実用上の意味がないばかりか、異種断面の接合が増えて製作性・施工性等が低下することになる。コストとグループ数の関係は、構造設計者が最終的な部材グループを決定する際の有力な判断材料となる。
- 5) 上記 3) の指標を用いた自動グループ分割に加え、特定部材のグループ間移動、グループ統合、断面間寸法制約の変更等を対話型で行うことのできる設計支援システムを提案・構築した。本システムにより、構造設計者は部材断面の選定過程における多くの試行錯誤から解放されるだけでなく、専門的かつ総合的な判断を行うための有益な情報を効果的に得ることができる。また、同システムを用いて立体トラス状架構の試設計を行い、提案した手法の有効性を示した。

参考文献

- 1) 沢田樹一郎, 中村雄治, 松尾彰: 反復線形計画法による平面ラーメンの最適設計(その 1), 日本建築学会中国・九州支部研究報告 第 9 号, pp. 385-388, 1993
- 2) 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, pp. 77-83, 2004. 9
- 3) 吉富信太, 山川誠, 上谷宏二: 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 第 586 号, pp. 95-100, 2004. 12
- 4) Koumoussis, V. K., P. G. Georgiou, 'Genetic Algorithms in Discrete Optimization of Steel Truss Roofs, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 309-325, 1994
- 5) 大崎純: 遺伝的アルゴリズムに基づく不連続コスト関数を有する構造物の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集 第 464 号, pp. 119-127, 1994. 10
- 6) 松本慎也, 藤井大地, 藤谷義信: はりせいを制約した鉄骨骨組構造の最小重量設計, 日本建築学会中国支部研究報告書 第 22 巻, pp. 221-224, 1999
- 7) 澤田樹一郎, 松尾彰, 清水斉, 安井孝, 南波篤志: 鉄骨製作コストの簡易評価手法と鉄骨骨組の最適設計, 日本建築学会中国支部研究報告集 第 28 巻, pp. 221-224, 2005
- 8) 佐々木尊一, 清水斉, 松尾彰, 澤田樹一郎, 南波篤志, 安井孝: 労務時間資料に基づく鉄骨製作コストの簡易評価手法に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集 第 30 巻, pp. 69-72, 2007
- 9) 田村尚土, 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 許容応力度等設計における最適設計法, 日本建築学会構

造系論文集 第 73 巻 第 628 号, pp. 891-897, 2008. 6

- 10) 上谷宏二: 構造設計理論化のもくろみは、実務の壁を突破できるか?, 日本建築学会近畿支部構造力学講究録 第 35 号, pp. 63-67, 2003
- 11) 五十子幸樹, 山川誠, 上谷宏二: 数理的設計手法に基づく建築構造設計と最適設計解感度分析, 日本建築学会構造系論文集 第 599 号, pp. 87-94, 2006. 1
- 12) Krishnamoorthy, C. S., Venkatesh, P. Prasanna, Sudarshan, R.: 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
- 13) Togan, V., Daloglu, A. T.: An improved genetic algorithm with initial population strategy and self-adaptive member grouping, Computers & Structures, Vol. 86, Issues 11-12, pp.1204-1218, 2008
- 14) Wallsa, R. and Elvin, A.: An algorithm for grouping members in a structure, Engineering Structures, Vol. 32, Issue 6, pp. 1760-1768, 2010
- 15) 日本規格協会: JIS ハンドブック 2009 ②鉄鋼Ⅱ, pp. 544-545, 2009
- 16) 日本建築学会: 鋼構造設計規準 一許容応力度設計法一, 2005
- 17) Spellucci, P.: An SQP method for general nonlinear programs using only equality constrained subproblems, Mathematical Programming 82, pp.413-448, 1998.

注

注 1) 架構全体の力の流れを把握するには、軸力や曲げモーメントの影響度合いを評価することが望ましいが、応力度比 r_f を用いてこのような評価を行うのは難しい。その理由を以下に述べる。

鋼構造設計規準¹⁰⁾の「6 章 組合せ応力」では、軸力と曲げモーメントによる組合せ応力の応力度比検定式が軸力の正負に応じて 2 つずつ与えられている。これらは異なる検討対象(引張縁と圧縮縁、もしくは降伏と座屈)に対応している。本論では、それら 2 つの応力度比を両部材端について算出した上で、その最大値を部材の応力度比 r_f としている(本論では部材中間位置の応力度比は考慮していないが、採り入れることは難しい)。また、荷重ケースが複数ある場合は、それぞれの荷重ケースに対して上記のように応力度比の最大値を算出し、それらの最大値の中で最も大きな値をあらためて r_f としている。つまり、 r_f は部材によってそれを与える部材端や検討対象、荷重ケースが一般に異なるので、 r_f だけから架構全体の力の流れを把握することはできない。また、応力度比は単に軸力の寄与分と曲げの寄与分の和ではなく、差をとる場合もあるため(例: 引張力と曲げモーメントを受ける部材の横座屈検定)、 r_f をそれぞれの寄与に分解することは困難である。

なお、本論では部材せん断力に関する制約条件は設けていない。最適解についてせん断力に関する検討を行い、せん断耐力が不足する部材には必要な修正(ウェブ厚を上げる等)を施した上であらためて応力解析および断面算定を行うものとする。修正を要する部材が多数ある場合は、非規格断面の使用を前提として式(5)の寸法比を小さい値に設定して最適化をあらためて行うことも考えられる。これらの判断は構造設計者に委ねられる。

注 2) 平面ラーメン架構の例題(3.3.2 節)では、各節点に鉄骨質量(構造質量)と梁分布質量(非構造質量)の和に相当する集中質量を設けた上で、それらに鉛直もしくは水平方向の一定加速度を乗じて節点荷重を算出している。鉄骨質量ひいては節点荷重は従属設計変数であり、最適化が終了するまで値が確定しない。そのため本論では節点荷重を加速度の値のみを用いて表現することとした。

注 3) 平面ラーメン架構の例題(3.3.2 節)において、柱(S_1)は圧縮力と曲げモーメントを受ける部材、梁(S_2)はほぼ曲げモーメントのみを受ける部材である。本例題では分割すべきグループとして S_1 が特定されたため、曲げ抵抗型の骨組における提案手法の有効性が例証されたと言い切れない側面が残る。だが、図 9 を見ると S_2 についても $\bar{Q}$ は Q を概ね良好に近似しており、少なくとも式(8)がモーメントが支配的な部材グループについても有効であることは例証できている。

(2011 年 1 月 7 日原稿受理, 2011 年 3 月 4 日採用決定)