空間骨組構造物の耐力制御設計法の提案

- その1 遺伝的アルゴリズムによる構造性能設計 -

PROPOSITION OF CONTROL DESIGN METHOD OF
BEARING CAPACITY FOR SPACE STRUCTURES

Part 1 Structural performance design using genetic algorithm

閔 星 宇*, 大森 博 司**

Xingyu YAN and Hiroshi OHMORI

With a recent development of computer technology, various kinds of excellent algorithms have been developed for optimization problem and new concepts in computer science have been successfully introduced into structural optimization such as genetic algorithm, simulated evolution method, simulated annealing method, dynamic tunneling algorithm, Boltzmann machine method, neural net work, artificial life and so on. In the field of structural design, much more attention on those structures with high redundancy has been focused from the viewpoint of safety as well as sustainable structural design, which in general requires a high cost. In this paper, the control design method of structural bearing capacity is proposed to realize the low cost structures having precisely aimed bearing capacity characteristics by using genetic algorithm (GA) as optimization tool.

Keywords: *Bearing Capacity, Piecewise-Linear Method, Genetic Algorithm, Structural Redundancy*

耐力, 区分的線形解析法, 遺伝的アルゴリズム, 構造冗長性

1. 序

大スパン建築を実現する大空間骨組構造物は、一般的に伝達効率の高い軸力抵抗による形態抵抗型の構造物であり、考えられる建築構造システムの中では比較的少ない使用材料で大きな内部空間を獲得することが可能である。しかしその半面、曲げによる抵抗に期待する一般的な梁柱骨組構造とは異なり、構造システムにゆとりを付与することができにくく、結果として脆性的な崩壊に陥り易い構造物となることが多いとすることができる。

一方、近年では構造最適化の研究が活発に進められている。これらには、予め構造形状が与えられている骨組構造物について、設計荷重に対して効率よく過不足の生じないような断面形状を最適断面として求めるもの(構造断面最適化)¹⁾など、断面形状のみならず、構造物の形状そのものを同時に最適化するもの(構造形状最適化)²⁾など、さらには、骨組構造の組み方そのものを最適化の視野に入れたもの(構造位相最適化)³⁾⁴⁾⁵⁾などと、既に非常に多岐にわたった研究が行われてきており、それらの一部は既に実構造物の設計にも利用されていて⁵⁾⁶⁾、今後もその発展は継続するであろう。

ところで、そのようにして求められる最適設計解は、要請されている設計条件を満足した上で、これを可能な限り少ない材料で実現する構造物、いわば贅肉を落とした構造物を与えるものであることが多く、そうした構造物が、予め考慮している大きさを越える設計

荷重やそもそも考慮していない種類の外乱を受けた場合、その構造応答が過大となり、結果として脆弱な性状を示す可能性を否定できない。

構造冗長性という概念がある。構造物がある外乱下で限界的な挙動を示す時、すぐに脆性的な限界状態に陥り崩壊することなく、それまでとは別の抵抗機構を発現するなどして耐力を維持できる性質といえることができるもので、これを構造抵抗機構の代替機能と考えることもできる⁷⁾。構造設計に際して、構造物にこの構造冗長性を予め明示的定量的に付与することができれば、予め考慮していないような限界的状況に対しても構造物の安全性を確保することができるはずである。

この研究では、目的限界設計荷重を超える耐力を明示的に保証する構造性能をもつ構造物を設計する手法を提案し、これにより構造冗長性を明示的に定義した上で、この考え方を大空間骨組構造物に適用し、得られる構造物の持つ性能を検証する。

2. 遺伝的アルゴリズムによる構造性能設計

2.1. 区分的線形解析法による空間骨組構造の解析

既述のように形態抵抗構造である大空間骨組構造は設計外力に対して、力の伝達効率の高い軸力により抵抗することが多いため、ここでは空間骨組構造のうち、トラス構造を対象とし、その崩壊過

* 名古屋大学大学院環境学研究科 博士後期課程

** 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

Ph. D. Candidate, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.
Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

程を追跡するための簡略的な方法として、区分的線形解析法の考え方をとり入れた手法を採用する。この手法は、圧縮力により座屈する部材の座屈後と、引張力で降伏する部材の引張降伏後の軸力が一定に保たれることを前提条件とする。この仮定により、解析は非常に簡略化できる一方、部材耐力の劣化を考慮しておらず、実情にそぐわないことも考えられる。

以下では例題を用いて、この手法を概説する。

2.1.1. 例題の対象構造物および計算概要

図 1 に示すような 2 次不静定の平面トラス構造物を考える。図中における荷重 P を 1kN とする。各構造部材の断面性能は表 1 に示すように全て同一とする。

図 1 二次不静定平面トラス
(図中の数字は部材番号を示している)

表 1 使用部材

断面形状	中空矩形
断面寸法 (mm)	100 × 100 × 6
I_x (mm ⁴)	3.34×10^6
断面積 A (mm ²)	2163
ヤング係数 E (N/mm ²)	2.1×10^5
設計基準強度 F (N/mm ²)	235

各部材の寸法、荷重条件、支持条件は図 1 の通りであり、図中における荷重 λP は基準とする荷重モードに対して荷重係数 λ を用いて漸増荷重を表現することを示している。部材 i の座屈軸力 $N_{cr}^{(i)}$ 、引張降伏軸力 $N_y^{(i)}$ 及び発生する軸力 $N^{(i)}$ の制約条件は次式のように表わされる。

$$N_{cr}^{(i)} = -\frac{\pi^2 EI^{(i)}}{\ell^{(i)2}} \quad (1)$$

$$N_y^{(i)} = F \times A^{(i)} \quad (2)$$

$$N_{cr}^{(i)} \leq N^{(i)} \leq N_y^{(i)} \quad (3)$$

ここに、

- $EI^{(i)}$: 部材 i の曲げ剛性
- $\ell^{(i)}$: 部材 i の部材長
- F : 設計基準強度
- $A^{(i)}$: 部材 i の断面積

以下、本節で用いる数値解析法のアルゴリズムを、Initial Model と Phase Model とに分けてそれぞれの定式化を行う。

2.1.2. Initial Model (1st Phase Model)

Initial Model は、図 2 の (A)-1 のような初期状態を示すものとし、構造物が健全である状態を表す。Initial Model において、荷重 P を与えたときの部材軸力を N_1' とする。Initial Model にお

図 2 例題における軸力と崩壊荷重の算出過程

ける荷重係数 λ_1 は N_1' の各成分が線形的に増加したときに、部材軸力が座屈荷重あるいは降伏軸力に達するときの荷重倍率の最小値である。このとき、Initial Phase において部材 i の軸力が、線形的に増加するときの座屈・降伏までの倍率 $\lambda_{1cr}^{(i)}$ は、軸力の正負を考慮すると次式のように表される。

$$\lambda_{1cr}^{(i)} = \begin{cases} \frac{N_{cr}^{(i)}}{N_1'^{(i)}} & N_1'^{(i)} < 0 \\ \frac{N_y^{(i)}}{N_1'^{(i)}} & N_1'^{(i)} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) を用いて、Initial Model における荷重係数の増分値 λ_1 は、次式で表される。

$$\lambda_1 = \min_i \lambda_{1cr}^{(i)} \quad (5)$$

ここで、Initial Model に対して荷重増分が行われた結果、初めて座屈あるいは降伏が生じたときの各部材の軸力を N_1 ($N_{cr} \leq N_1 \leq N_y$) とすると、 N_1 は、 N_1' と λ_1 を用いて次式のように表される。

$$N_1 = \lambda_1 N_1' \quad (6)$$

このとき、第 i 部材の軸力に関して、 $N_1^{(i)}$ と $N_1'^{(i)}$ の関係を図 3 に棒グラフを用いて示す。部材数は 11 である。黒色が $N_1'^{(i)}$ を表し、灰色が $N_1^{(i)}$ を表している。例題モデルの Initial Model 解析では、図 2 の (A)-3 に点線で示された DE 部材の軸力 N_{DE} が座屈荷重 N_{cr} となり、まず DE 部材が座屈する結果となる。

2.1.3. m-th Phase Model ($m \geq 2$)

本例題の Initial Model においてはまず DE 部材が座屈する。ここで、DE 部材は座屈後もその座屈耐力を維持したまま荷重の増加に対して抵抗すると考える。そこで、座屈が生じた以降の増分解析では、当該部材を取り除いたモデル (Phase Model) を用いて解

図3 $N_1^{(i)}$ と $N_1'^{(i)}$ の関係

析を行うことによって、荷重係数の増分値を計算する。そのとき、本構造物における 2nd Phase Model は、Initial Model において座屈した DE 部材を取り除いた図 2 の (B)-1 に示すようなモデルであり、これを新たな計算対象構造物として考える。

座屈あるいは降伏部材が発生した場合、数値解析上では、Phase Model を対象として有限要素解析を行う。以下にその定式化を示す。

m -th Phase Model において、荷重 $\mathbf{P}$ を与えたときの部材軸力を $\mathbf{N}_m'$ 、 $(m-1)$ -th Phase Model における各部材軸力を $\mathbf{N}_{m-1}$ とする。このとき、 $\mathbf{N}_{m-1}$ は、Initial Model の場合と同様に、次式で表される。

$$\mathbf{N}_{m-1} = \lambda_{m-1} \mathbf{N}_{m-1}' \quad (7)$$

また、 $(m-1)$ -th Phase までの累積軸力ベクトルを $\mathbf{N}_{m-1}^{acc}$ とおくと、次式のように表すことができる。

$$\mathbf{N}_{m-1}^{acc} = \sum_{k=1}^{m-1} \mathbf{N}_k \quad (8)$$

m -th Phase Model において与えられた部材番号 i の軸力が、線形的に増加するときの座屈・降伏までの倍率 $\lambda_{mcr}^{(i)} \mathbf{P}$ は、 $\mathbf{N}_m'$ 、 $\mathbf{N}_{m-1}^{acc}$ 、要素番号を表す文字 i を用いて成分表示すると、次式のように表される。

$$\lambda_{mcr}^{(i)} = \begin{cases} \frac{N_{cr}^{(i)} - (N_{m-1}^{acc})^{(i)}}{N_m'^{(i)}} & N_m'^{(i)} < 0 \\ \frac{N_y^{(i)} - (N_{m-1}^{acc})^{(i)}}{N_m'^{(i)}} & N_m'^{(i)} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

上式で得られた λ_{mcr} から、 m -th Phase Model における荷重係数の増分値 λ_m は、次式で表される。

$$\lambda_m = \min_i \lambda_{mcr}^{(i)} \quad (10)$$

ここで、 m -th Phase Model における部材軸力を $\mathbf{N}_m$ とすると、

$\mathbf{N}_m$ は、 $\mathbf{N}_m'$ と λ_m を用いて次式のように表される。

$$\mathbf{N}_m = \lambda_m \mathbf{N}_m' \quad (11)$$

以上より、 m -th Phase までの累積軸力ベクトル $\mathbf{N}_m^{acc}$ ($\mathbf{N}_{cr} \leq \mathbf{N}_m^{acc} \leq \mathbf{N}_y$) は次式のように求められる。

$$\mathbf{N}_m^{acc} = \mathbf{N}_{m-1}^{acc} + \mathbf{N}_m \quad (12)$$

Initial Model, m -th Phase Model のいずれの場合においても、各 Model に対し、荷重 $\mathbf{P}$ を与えたときの軸力から荷重係数の増分最小値である λ_m を求めていることになる。

2.1.4. Phase Model に対する不安定構造物の判定方法

本解析における停止基準は Phase Model が不安定構造物に達したときである。考察対象としている外力に対する構造剛性が消失した場合を不安定としている。このことに対する必要条件は接線剛性行列が特異となるので、そのことのみをチェックするには単純に行列式の値を見ることでよいが、ランクの変化を詳しく検討するには固有値を見ることが有効である。

そこで、数値解析においては各 Phase ごとに固有値解析を行い、得られた固有値のうちの 1 つが定められた微小値以下になった場合を本解析における終了条件とした。本例題においては、2nd Phase Model において座屈した EF 部材を取り除いたときのモデル、即ち 3rd Phase Model において不安定構造物と判定されている。

2.1.5. 崩壊荷重係数の算出および解析結果

R を全 Phase Model 数として、崩壊荷重 は以下のように表される。

$$\lambda_{cr} \mathbf{P} = \left(\sum_{m=1}^R \lambda_m \right) \mathbf{P} \quad (13)$$

図 2 の (C)-2 はそのときの軸力図であり、軸力の大きさにほぼ比例させて線幅を定めている。また、図中に軸力分布を圧縮は黒、引張は灰色として示した。Initial Model において算出された荷重係数 λ_1 は 335.1、2nd Phase Model の荷重係数 λ_2 は 28.4 であった。

本例題においては、3rd Phase Model において構造物が不安定となったため、この時点で構造物が崩壊に至ったと判断する。崩壊時の軸力および荷重係数は図 2 の (C)-2 に示されたように、各 Phase で計算された軸力および荷重係数を足し合わせることで計算される。

図 4 は、各節点の荷重-鉛直変位曲線である。縦軸に荷重係数 λ を、横軸に鉛直変位を表している。図中の各点は、座屈部材の発生により、構造物全体の剛性が低下したことを示す屈曲点である。本節で用いる解析手法の流れを、図 5 に示す。

2.2. 遺伝的アルゴリズムによる構造耐力制御設計法

本節では、先述した区分的線形解析法 (Piecewise-Linear Method, PLM) と遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を併用して、構造耐力性能を直接的に制御する手法の提案を行う。

2.2.1. 構造耐力制御設計法の定式化

本研究では、1 つの部材の断面寸法を遺伝子として、染色体を複数個の遺伝子、即ち、構造物の全部材の断面寸法を記述するために用いており、遺伝子の一連の配列により作られる 1 つの染色体でトラスの個体を表現する (図 6)。

図4 荷重-変位曲線 (y 方向)
(図中, B, C, D, F は図1に示す節点と対応している)

図5 区分的線形解析法のフローチャート

要素断面情報	...	...	...	...	...
0	12	9	8	...	7
鋼材リストの番号					

図6 遺伝子内における各部材の断面情報の表現
(各遺伝子座は各部材に対応しており、そこに格納される番号は予め与えられた鋼材リスト中の番号を示している)

最初に、ランダムに遺伝子を発生させることで、初期世代の個体群を形成する。制約条件をペナルティ項で導入し、これを構造物の総質量の逆数に乗じたものを個体の適合度として、各個体の適合度の評価を行う。染色体間の遺伝子の選択、交叉、突然変異によって、個体の適合度に基づく再生が行われ、世代を経るに従い、より高い適合度を持つ個体群が生成されることになる。

部材断面を設計変数とし、総質量を最小化するために総質量の逆数を目的関数として次式のような単一目的最適化問題を考える。

$$\text{maximize } f(\mathbf{x}) = \frac{1}{W(\mathbf{x})} \prod \gamma_j \quad (14)$$

$$\text{subject to } \mathbf{N}_{cr} \leq \mathbf{N} \leq \mathbf{N}_y \quad (15)$$

$$(\mathbf{N}_{cr} \leq \mathbf{0}, \mathbf{N}_y \geq \mathbf{0}) \quad (16)$$

図7 m -th Phase の耐力に関するペナルティ関数の概念図

- f : 評価関数 (適合度)
- $\mathbf{x}$: 部材断面形状を表すベクトル
- W : 構造物の総質量
- γ_j : 制約条件 j に対するペナルティ関数
- $\mathbf{N}$: 部材の軸力ベクトル
- $\mathbf{N}_{cr}$: 部材の座屈軸力ベクトル
- $\mathbf{N}_y$: 部材の降伏軸力ベクトル

各 Phase における荷重係数は、前節で概説した方法で計算される。

2.2.2. 短期許容応力度設計によるペナルティ

部材 i における軸力を $N^{(i)}$, 座屈荷重を $N_{cr}^{(i)} (< 0)$, 降伏軸力を $N_y^{(i)} (> 0)$ とすると、短期設計荷重 (長期荷重を含む) が与えられたときの、許容応力度比 $r^{(i)}$ は次式で表される。

$$r^{(i)} = \begin{cases} \frac{N^{(i)}}{N_{cr}^{(i)}} & \text{if } (N^{(i)} < 0) \\ \frac{N^{(i)}}{N_y^{(i)}} & \text{if } (0 < N^{(i)}) \end{cases} \quad (17)$$

全部材の中で最大の許容応力度比 $r_{\max}$ は次式で表される。

$$r_{\max} = \max_i r^{(i)} \quad (18)$$

このとき、短期設計荷重によるペナルティ関数を以下のように表し、短期設計荷重を満足しない場合にはペナルティを課す。

$$\gamma_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq r_{\max} \leq 1 \\ \frac{1}{r_{\max}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

2.2.3. 耐力に関するペナルティ

m -th Phase の荷重増分過程で構造物の一部に損傷が生じる耐力を直接的に制御するためのペナルティ関数の定式化を以下に示す。

m -th Phase ($m = 1, 2, \dots, R$; R : 全 Phase 数) における耐力は、 m -th Phase で部材の損傷が生じるまでに増分された累積荷重係数 λ_m^{acc} として次式のように表される。

$$\lambda_m^{\text{acc}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m = \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (20)$$

m -th Phase における耐力 λ_m^{acc} に対して設計耐力範囲 α を設定し、耐力が指定範囲外であった場合にペナルティを与える。ペナルティの与え方は、図7に示すように各 Phase に対して耐力範囲を設定し、この範囲に収まらなかった場合、それらの差異の大きさに応じ

図 8 ペナルティ関数 γ_{bm}

てペナルティの度合いを設定する。以上の考え方をういて、 m -th Phase の耐力に関するペナルティ関数 γ_{bm} を以下のように定める。図 8 に示すように、解析によって得られた各 Phase の累積荷重係数の値が耐力範囲に近ければ近いほど、ペナルティの値は 1 に近い値とする。図中に灰色で描かれた領域は耐力制御が満足する領域である。本論文では $m = 4$ まで γ_{bm} を設定する。

$$\gamma_{b1} = \begin{cases} 0.05 & \text{if } \lambda_1 < 0 \\ 0.3 & \text{if } 0 \leq \lambda_1^{acc} < \bar{\lambda}_1^{acc} - 2\alpha \\ & \bar{\lambda}_1^{acc} + 3\alpha < \lambda_1^{acc} \\ 0.5 & \text{if } \bar{\lambda}_1^{acc} - 2\alpha \leq \lambda_1^{acc} < \bar{\lambda}_1^{acc} - \alpha \\ & \bar{\lambda}_1^{acc} + 2\alpha < \lambda_1^{acc} \leq \bar{\lambda}_1^{acc} + 3\alpha \\ 0.6 & \text{if } \bar{\lambda}_1^{acc} - \alpha \leq \lambda_1^{acc} < \bar{\lambda}_1^{acc} \\ & \bar{\lambda}_1^{acc} + \alpha < \lambda_1^{acc} \leq \bar{\lambda}_1^{acc} + 2\alpha \\ 1.0 & \text{if } \bar{\lambda}_1^{acc} \leq \lambda_1^{acc} \leq \bar{\lambda}_1^{acc} + \alpha \end{cases} \quad (21)$$

$$\gamma_{b2} = \begin{cases} 0.6 & \text{if } \lambda_2^{acc} < \bar{\lambda}_2^{acc} - 2\alpha \\ & \bar{\lambda}_2^{acc} + 3\alpha < \lambda_2^{acc} \\ 0.65 & \text{if } \bar{\lambda}_2^{acc} - 2\alpha \leq \lambda_2^{acc} < \bar{\lambda}_2^{acc} - \alpha \\ & \bar{\lambda}_2^{acc} + 2\alpha < \lambda_2^{acc} \leq \bar{\lambda}_2^{acc} + 3\alpha \\ 0.7 & \text{if } \bar{\lambda}_2^{acc} - \alpha \leq \lambda_2^{acc} < \bar{\lambda}_2^{acc} \\ & \bar{\lambda}_2^{acc} + \alpha < \lambda_2^{acc} \leq \bar{\lambda}_2^{acc} + 2\alpha \\ 1 & \text{if } \bar{\lambda}_2^{acc} \leq \lambda_2^{acc} \leq \bar{\lambda}_2^{acc} + \alpha \end{cases} \quad (22)$$

$$\gamma_{b3} = \begin{cases} 0.7 & \text{if } \lambda_3^{acc} < \bar{\lambda}_3^{acc} - 2\alpha \\ & \bar{\lambda}_3^{acc} + 3\alpha < \lambda_3^{acc} \\ 0.75 & \text{if } \bar{\lambda}_3^{acc} - 2\alpha \leq \lambda_3^{acc} < \bar{\lambda}_3^{acc} - \alpha \\ & \bar{\lambda}_3^{acc} + 2\alpha < \lambda_3^{acc} \leq \bar{\lambda}_3^{acc} + 3\alpha \\ 0.8 & \text{if } \bar{\lambda}_3^{acc} - \alpha \leq \lambda_3^{acc} < \bar{\lambda}_3^{acc} \\ & \bar{\lambda}_3^{acc} + \alpha < \lambda_3^{acc} \leq \bar{\lambda}_3^{acc} + 2\alpha \\ 1 & \text{if } \bar{\lambda}_3^{acc} \leq \lambda_3^{acc} \leq \bar{\lambda}_3^{acc} + \alpha \end{cases} \quad (23)$$

$$\gamma_{b4} = \begin{cases} 0.75 & \text{if } \lambda_4^{acc} < \bar{\lambda}_4^{acc} - 3\alpha \\ 0.8 & \text{if } \bar{\lambda}_4^{acc} - 3\alpha \leq \lambda_4^{acc} < \bar{\lambda}_4^{acc} - 2\alpha \\ 0.85 & \text{if } \bar{\lambda}_4^{acc} - 2\alpha \leq \lambda_4^{acc} < \bar{\lambda}_4^{acc} - \alpha \\ 0.9 & \text{if } \bar{\lambda}_4^{acc} - \alpha \leq \lambda_4^{acc} < \bar{\lambda}_4^{acc} \\ 1 & \text{if } \bar{\lambda}_4^{acc} \leq \lambda_4^{acc} \end{cases} \quad (24)$$

λ_m^{acc} : m -th Phase における耐力

$\bar{\lambda}_m^{acc}$: m -th Phase の設計耐力範囲の下限值

α : 設計耐力範囲幅

$\bar{\lambda}_m^{acc} + \alpha$: m -th Phase の設計耐力範囲の上限値

ここで、耐力を R -th Phase まで制御すると考えたとき、 m -th Phase の耐力に関するペナルティ関数 γ_{bm} を用いて、耐力に関する

図 9 構造耐力制御設計法のフローチャート

るペナルティ関数 γ_2 を次式のように定める。

$$\gamma_2 = \prod_{m=1}^R \gamma_{bm} \quad (25)$$

2.2.4. 既座屈部材の細長比によるペナルティ

部材が弾性座屈する場合に、座屈後軸力は一定のひずみ量以下であれば維持されるが、塑性座屈の場合には、座屈後の耐力低下が早期に現れる。ここでは、部材の塑性座屈が先行する崩壊を回避するために、既座屈部材の細長比に応じたペナルティを設ける。限界細長比を Λ 、 $(m-1)$ -th Phase における座屈部材の細長比を $\lambda_{buckle(m-1)}$ としたとき、 i -th Phase ($i \geq 2$) における座屈部材の細長比によるペナルティ関数 γ_{sm} を以下のように設定する。

$$\gamma_{sm} = \begin{cases} 1 & \text{if } \Lambda \leq \lambda_{buckle(m-1)} \\ \frac{\lambda_{buckle(m-1)}}{\Lambda} & \text{if } \lambda_{buckle(m-1)} < \Lambda \end{cases} \quad (26)$$

このとき、構造物が不安定となる Phase 数である R -th Phase までの座屈部材の細長比によるペナルティ関数 γ_{sm} をかけ合わせた値を、既座屈部材の細長比によるペナルティ関数 γ_3 と扱い、次式で表す。

$$\gamma_3 = \prod_{m=2}^R \gamma_{sm} \quad (27)$$

図 10 立体トラスモデル
(4 隅点ピン支持, 外周スパン中央点面外方向ローラ支持)

表 2 GA パラメータ

アルゴリズム	単純 GA
設計変数	20
個体数	100
世代数	10,000
交叉率	0.7
突然変異率	0.3

図 11 部材のグルーピング
(○がついてる数字は節点番号, ○がついてない数字は部材番号を示している)

本節で用いる構造耐力の直接制御設計法の流れを図 9 に示す。

3. スペーストラスによる数値解析

3.1. 解析モデル

解析の対象とするモデルとして、図 10 に示すような 2 層立体トラスを考える。支持条件は四隅をピン支持とし、ピン支持のスパン中央に位置する計 4 つの外周上の節点について、X 軸上に配置される節点は Y 方向のみ移動可能なローラー支持とし、Y 軸上に配置される節点は X 方向のみ移動可能なローラー支持とする。解析対象は 1/8 対称性を考慮し、図 11 の太線で示された部分としている。図中に示された数値は部材番号を示し、○で囲まれた数値は節点番号を表している。

GA パラメータを表 2 に示す。部材の断面情報を設計変数としており、部材断面情報をグループ毎に与え、各グループは独立に変化させることとした上で、GA により表 3 で示された選択対象部材のリストから選択している。こうして決められた設計変数の総数は 20 である。一般的に遺伝子長の逆数とされる突然変異率からするとここでの突然変異率は大きめに設定されている。これは、解の早期の収束よりも多様な解の取得を目指したパラメータ設定で、筆者らのこれまでの経験によりこのように設定した。

荷重は、自重および積載荷重を考慮するものとする。まず鋼材の単位体積重量 (76.93 kN/m³) による自重を与え、次にガラスの屋根面を想定した積載荷重 (300N/m²) を用いてトラス上面に積載荷

表 3 選択対象部材 (鋼管)

部材番号	φ-t(mm)	Area(mm ²)	I (mm ⁴)
No.0	21.7 - 2	123.8	6,070
No.1	27.2 - 2	158.3	12,600
No.2	27.2 - 2.3	179.9	14,100
No.3	34.0 - 2.3	229.1	28,900
No.4	42.7 - 2.3	291.9	59,700
No.5	42.7 - 2.5	315.7	64,000
No.6	48.6 - 2.3	334.5	89,900
No.7	48.6 - 2.5	362.1	96,500
No.8	48.6 - 2.8	402.9	106,000
No.9	48.6 - 3.2	456.4	118,000
No.10	60.5 - 2.3	420.5	178,000
No.11	60.5 - 3.2	576.0	237,000
No.12	60.5 - 4	710.0	285,000
No.13	60.5 - 4.5	791.7	312,000
No.14	76.3 - 2.8	646.5	437,000
No.15	76.3 - 3.2	734.9	492,000
No.16	76.3 - 4	908.5	595,000
No.17	76.3 - 4.5	1015.0	657,000
No.18	89.1 - 2.8	759.1	707,000
No.19	89.1 - 3.2	863.6	798,000
No.20	89.1 - 4.5	1196.0	1,070,000
No.21	101.6 - 3.2	989.2	1,200,000
No.22	101.6 - 4	1226.0	1,460,000
No.23	101.6 - 4.5	1373.0	1,620,000
No.24	101.6 - 5	1517.0	1,770,000
No.25	114.3 - 3.2	1117.0	1,720,000
No.26	114.3 - 3.5	1218.0	1,870,000
No.27	114.3 - 4.5	1552.0	2,340,000
No.28	139.8 - 3.5	1498.0	3,480,000
No.29	139.8 - 3.6	1540.0	3,570,000
No.30	139.8 - 4	1707.0	3,940,000

重を与える。短期荷重として積雪荷重を考慮し、これを増分させるものとし、名古屋市の短期積雪荷重 (600N/m²) を基準としてトラス上面に漸増荷重を与える。これらの荷重は等価節点荷重として各節点に分配する。積雪荷重のみを漸増荷重として扱い、その荷重倍率を荷重係数とする。

以上の解析モデルおよび荷重条件を用いて、同一断面を用いて設計された構造物と、耐力制御設計された構造物を比較することによって、第 2 章で提案された手法の特性を検証する。耐力制御設計における制御耐力に関するペナルティ関数の諸量として、設計耐力範囲幅 α は 0.1 とし、各 Phase における設計耐力範囲の下限値は、設計基準を参考して、 $\bar{\lambda}_1^{acc} = 1.0$, $\bar{\lambda}_2^{acc} = 1.5$, $\bar{\lambda}_3^{acc} = 1.8$, $\bar{\lambda}_4^{acc} = 2.0$ と設定する。ここでは試算としてこれらのパラメータを採用しており、数値に特に意味を持たせてはいない。設計耐力の下限値を変えれば解は変わる。下限値そのものは、設計基準に対応させることになると考えられるが現状では任意に設定している。なお、別の数値による計算^{注1)}も行っており、値の採り方によっては制約条件をすべて満たす結果が得られない場合もあった。

3.2. 解析結果および考察

3.2.1. 解の収束の確認

本解析により得られた適合度の推移を図 12 に、総質量の推移を図 13 に示す。図中において、同一断面設計により得られた構造物の重量を一点鎖線で示した。同一断面設計では、許容応力度設計により実設計において採用される断面寸法 (表 3 の No.14) を用いた。

図 13 より、10,000 世代までの適合度の推移において 5,000 世代以降に適合度の大きい変化が現れなかったことから、概ね収束していると考えられる。また、10,000 世代までに各 Phase において計算された累積荷重係数の推移を図 14 に示す。図中において、灰色で描かれた領域は耐力に関するペナルティが与えられない領域 ($\gamma_2 = 1$)、即ち耐力制御に関する制約条件を満たす領域である。従って、初期の世代を除いて、耐力が全 Phase にわたって設計耐力範囲内に収まっているため、構造物に対して行った耐力制御設計が実現されていることが確認できる。

注1) ($\bar{\lambda}_1^{acc}, \bar{\lambda}_2^{acc}, \bar{\lambda}_3^{acc}, \bar{\lambda}_4^{acc}$) = (1.0, 1.8, 2.2, 2.4), (1.0, 1.8, 2.4, 2.7), (1.0, 1.9, 2.0, 2.5), (0.6, 1.0, 1.8, 3.0) について計算し、(0.6, 1.0, 1.8, 3.0) のみは解が得られなかった。選択部材の不足が原因と考えている。

図 12 適合度の推移
(Maximum Fitness は各世代におけるエリートの適合度を表している)

図 13 総質量の推移
(各世代におけるエリートの総質量を表している)

図 14 各 Phase における累積荷重係数 λ_m^{acc} の推移
(各世代におけるエリートの崩壊までの累積荷重係数を表している)

今回の解析では、既座屈部材の細長比によるペナルティは全世代にわたり生じなかった。解析結果より、400 世代までは、限界細長比より小さい細長比を有する部材が選択されているが、これらの部材は座屈荷重が大きいため座屈することはない、結果としてペナルティは生じていない。400 世代以降でも、質量の最小化により、限界細長比よりも大きい細長比を有する部材のみが選択されているた

図 15 同一断面設計解および耐力制御設計解の部材配置

(左の凡例に示す番号は表 3 に示すものに対応している、No.14 は同一断面設計解の断面寸法である)

表 4 最終世代における諸量

	同一断面設計	耐力制御設計
W(kg)	3105	1936.4
λ_1^{acc}	$\lambda_1^{acc}=1.0$	1.10
λ_2^{acc}	$\lambda_2^{acc}=1.5$	1.60
λ_3^{acc}	$\lambda_3^{acc}=1.8$	1.87
λ_4^{acc}	$\lambda_4^{acc}=2.0$	2.09
λ_5^{acc}	-	2.10

(耐力制御設計解は Phase5 で崩壊する。 λ_5^{acc} は崩壊荷重係数である)

め、ペナルティは生じていない。

3.2.2. 総質量および崩壊荷重係数

次に、同一断面設計解と GA を用いた耐力制御設計解についての詳細を示し、両者の比較を行う。同一断面設計解および最終世代における設計解の諸量を表 4 に示す。表 4 より、耐力制御設計解が同一断面設計解における総質量と比較して 2/3 程度の鋼材重量を用いて、崩壊荷重係数が 4/3 倍程度大きい形態が創生されたことが分かる。また、図 14 より、GA による解析を通じて、耐力に関する制約を満足した後、総質量が低減するにつれて各 Phase における耐力 λ_m^{acc} が設計耐力範囲の下限値 $\bar{\lambda}_m^{acc}$ に近づいていることが確認される。

このように、耐力制御設計法により、構造物に損傷が生じた後の荷重の伸び率を制御することができることがわかる。損傷後の荷重の伸びは、空間骨組構造物において欠如しやすい性質である。本提案手法を用いて構造物を設計することができれば、設計者が意図した崩壊に対する余裕度を有した構造物を設計することができ、結果として構造物に明示的に構造冗長性を付与することができると考えられる。

3.2.3. 部材配置形態

同一断面設計解と GA による耐力制御設計解 (最終世代) をそれぞれ図 15 に比較して示す。図 15 では各部材において選択された断面積の大きさにほぼ比例して線幅を表している。これらと比較すると、断面の変化を許して求めた耐力制御設計解では、立体トラス全体を板として考えた際に、曲げモーメントが最も大きくなると考えられる中心部において、上弦材、下弦材共に大きな断面積を有する部材が選択されていることがわかる。さらに、圧縮となる上弦材や支持点に接続された斜材にも大きな断面積を有する部材が選択されていることがわかる。

3.2.4. 崩壊機構

同一断面設計解と耐力制御設計解に区分的線形解析法を適用して求めた際の崩壊機構の形成過程を図 16, 17 に示す。同一断面設計解の崩壊過程において、トラスは圧縮部材の座屈のみによって崩壊

図 16 同一断面設計の崩壊機構の形成過程
(○印で示した部材が当該の Phase で新たに座屈した部材)

に達した。耐力制御設計解の場合、Phase 4 で降伏部材が現れた。図中、これらの座屈または降伏部材は各 Phase において○印で示した。

これらの崩壊機構形成までの過程を比較すると、耐力制御された形態の崩壊機構は全体崩壊に近い形態となっており、同一部材で設計された形態の崩壊機構は構造物の部分的な不安定化により崩壊機構を形成していることが確認できる。同一断面設計解に部分的な不安定化が生じている原因は、構造物の中央部の部材が健全な状態であるにもかかわらず、支持節点に接続される全ての斜材が座屈したことによるものであることがわかる。一方、耐力制御により創生された構造物はそれらの部材に大断面積の部材が選択されており、支持部材の座屈による部分的な不安定化が避けられており、構造物の耐力上昇に各部材が均等に貢献していることがわかる。下弦材を板として考えた際に、曲げモーメントが最も大きくなると考えられる中心付近の部材が最終的に降伏することになった。

3.2.5. 荷重係数と変位の関係

同一断面設計解の各節点における荷重係数と z 方向変位の関係を図 18 に、耐力制御設計解の各節点における荷重係数と z 方向変位の関係を図 19 に示す。最大変位が得られた節点である下層の中央に位置する節点に着目し、2つの設計解の変形性状を比較するために、耐力制御設計解および同一断面設計解の両設計解に関して、荷重係数と中央節点 1 の z 方向変位の関係をまとめたものを図 20 に示す。

この図から、同一部材で設計された形態は構造物の剛性が高く、損傷が生じた後の荷重の伸びや変形の伸びが小さく、部材に座屈が発生した後の剛性の低下も小さいことが確認される。一方、耐力制御された形態は、荷重の伸びや変形の伸びが比較的大きく、座屈あるいは降伏部材数が蓄積されていくにつれて剛性が低下し、ラーメン構造物に類似した靱性的な特性がもたらされていることがわかる。

4. 結語

この研究では建築骨組構造物に構造冗長性を明示的定量的に付与するための方法として、耐力制御設計法と呼ぶ方法を提案している。これは骨組構造の荷重増分過程における構造性能の変化過程を、荷重レベルで逐一制御しようとするもので、骨組構造物の耐荷重性能

図 17 耐力制御設計の崩壊機構の形成過程
(○印で示した部材が当該の Phase で新たに座屈または降伏した部材)

を荷重レベルで直接設計する可能性を持つものと言うことができる。

この論文では、このような考え方を形態抵抗構造物である大スパン骨組構造物（空間骨組構造物）への応用可能性について検討した。本論文で得られた結果を要約すれば以下の通りである。

1. 遺伝的アルゴリズムを利用した規格部材選択による最小重量設計を、部材の引張、圧縮性能を完全弾塑性と仮定した上で、設計荷重増分過程の構造性能変化を荷重レベルで制御する制約条件下で行い、これにより所定の構造性能を持つ、軽量設計解が得られることを示した。

図 18 荷重係数—変位曲線 (同一断面設計解)
(数字は各節点番号を示している)

図 19 荷重係数—変位曲線 (耐力制御設計解)
(数字は各節点番号を示している)

図 20 両設計解の中央下部節点の荷重係数と z 方向変位の関係

2. 設計荷重増分過程を直接制御することにより、対象とするトラス構造物の構造全体としての靱性能を付与することが可能であることを示した。

なお、本論文では構造部材に弾性座屈の制約を課すために細長比制約を設けているが、弾性座屈を生じる場合でも細長比が限界細長比以上となる場合には座屈後耐力が低下するため、トラス構造物全体の耐力の評価にはこの効果を考慮する必要がある。これについては稿を改めて報告する予定である。

参考文献

- 1) 本間俊雄, 登坂宣好, 角宏幸: 自律分散アプローチによる逆問題の計算法, 日本建築学会構造系論文集, No.526, pp.69-76, 1999.12.
- 2) 藤井大地, 藤谷義信: 薄肉はり置換法による高層ビルの形状および形状剛性分布の最適化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.510, pp.99-106, 1998.8.
- 3) 河村拓昌, 大森博司: 遺伝的アルゴリズムによる立体トラス構造物の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, No.538, pp. 115-121, 2000.12.
- 4) 河村拓昌, 大森博司: 遺伝的アルゴリズムによる接合状態を考慮した離散的構造物の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, 第 555 号, pp.121-128, 2002.5.
- 5) 大森博司, 風袋宏幸, 飯嶋俊比古, 武藤厚, 長谷川泰稔: 構造形態塑性法によるオフィスの設計, 日本建築学会技術報告集, 第 20 号, pp.77-82, 2004.12.
- 6) 薫田匡史, 栗田光樹夫, 大森博司: ホモロガス変形を考慮したトラス構造物の構造形態創生に関する研究—光赤外線望遠鏡支持構造物への適用—, 日本建築学会構造系論文集, 第 676 号, pp.899-904, 2012.6.
- 7) 日本建築学会構造委員会応用力学運営委員会, ロバスト性・冗長性を向上させた建物の構造デザイン, 2011 年度日本建築学会大会 (関東), 構造部門 (応用力学) パネルディスカッション資料, 2011.8.
- 8) Van den Broek: Theory of Limit Design, John Wiley and Sons, Inc., 1948.
- 9) 山崎康太, 船橋健吾, 大森博司: 空間骨組構造物における冗長性評価手法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 構造 I, pp.731-732, 2009.7.
- 10) 岩田衛: はじめてのシステムトラス—スペースフレームが創る自由な空間—, 建築技術, 1996.
- 11) 日本建築学会: SI 単位版 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 日本建築学会, 1998.
- 12) 日本建築学会: 鋼構造物の座屈に関する諸問題, 1992.3.
- 13) P. Blaikie, T. Cannon, I. Davis, B. Wisner: At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters, Routledge, 1994.
- 14) 山川宏, 宮下真: ロバスト構造に関する研究 (第 1 報, ロバスト構造の概念とその設計方法), 日本機械学会論文集 (C 編), 544 号, pp. 173-178, 1991.
- 15) 伊山潤, 桑村仁: 地震に対するフェールセーフ構造, 日本建築学会構造系論文集, 第 507 号, pp. 29-34, 1998.5.
- 16) マチス・レヴィイ, マリオ・サルバドリー, 建物が壊れる理由, 建築技術, 1995.
- 17) 三井和男, 登坂宣好: 遺伝的アルゴリズムの空間構造形態解析への応用, 日本建築学会構造系論文集, No.484, pp.75-83, 1996.6.
- 18) 尾田十八, 松本徳之, 王安麟: GA によるホモロガス構造の創生法, 日本機械学会論文集 (A 編), 57 巻, 568 号, pp.3056-3061, 1993.12.
- 19) 李正林, 大井謙一, 伊藤拓海: 極限解析による鉛直荷重支持能力に対する部材感度解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, 構造 III, pp.695-696, 2003.7.
- 20) G. K. Fu, Dan M. Frangopol: Balancing weight, system reliability and redundancy in a multi-objective optimization framework, Structural Safety, Vol. 7, pp. 165-175, 1990.
- 21) Y. S. Feng: The theory of structural redundancy and its effect on the structural design, Computer and Structures, Vol. 28, No. 1, pp. 15-24, 1988.
- 22) S. V. Barai, P. C. Pandey: Structural sensitivity as a measure of redundancy, Journal of Structural Engineering, 3, pp. 360-364, 1997.

(2012年 8 月 6 日原稿受理, 2012年11月15日採用決定)