

群知能と局所探索を用いた塑性崩壊荷重制約条件下の魚骨モデル鋼材量最小設計

○松尾 圭介*¹ 本間 俊雄*²

キーワード：最小重量設計 塑性崩壊荷重制約 魚骨モデル ホタルアルゴリズム 局所探索

1. はじめに

鋼材量最小設計は、大域的最適解の評価値に近接する異なる局所最適解が多数存在することが知られている¹⁾⁴⁾。これら最適解の中には、施工性・経済性の側面で望まれないものも多く、大域的最適解や全ての局所最適解の獲得による評価が重要となる。著者らは、弾性設計の範囲内で群知能 (swarm intelligence: SI) と局所探索を用いることで多数の局所最適解を得る手順の有用性を示している³⁾。文献4)では塑性崩壊荷重制約下の鋼材量最小設計に非凸制約を考慮した非線形計画法の適用により、局所最適解を評価する手順が示されている。

本研究では、発見的多点探索手法の SI に分類されるホタルアルゴリズム (firefly algorithms: FA)⁵⁾に着目する。SI は集団の自己組織化を模倣した最適化計算法であり、遺伝的アルゴリズム (genetic algorithms: GA) に比べスキームが単純で、実数値を直接設計変数に用いることができる点に特徴がある。SI には様々な解法が提案されている⁵⁾⁷⁾。特に、探索個体の評価に目的関数値だけでなく、設計変数空間上の個体間距離を考慮することにより、一回の試行で大域的最適解と多数の局所最適解の探索を可能にする FA が注目され、構造最適化の有効性が示されている⁷⁾。

本報告では、塑性崩壊荷重制約下の鋼材量最小設計に FA を採用し、大域的最適解と局所最適解の探索例を示す。その際、FA で得られた解を初期形態として局所探索 (山登り法⁸⁾)により解の極値性を確認する。

2. 解析モデルと定式化

2.1 解析モデル (魚骨モデル)

解析モデルは文献4)に対応させ、図1に示すような第*i*層高さ h_i 、スパン長 l の n 層魚骨モデルを対象として考える。柱部材には角型鋼管、梁部材には H 形鋼を用いる。第 i 層梁・柱部材の断面積 $A_G^{(i)}, A_C^{(i)}$ と塑性断面係数 $Z_{pG}^{(i)}, Z_{pC}^{(i)}$ の関係を以下のように与える。

$$\begin{cases} Z_{pG}^{(i)} = 1.6(A_G^{(i)})^{1.5}; & i=1, 2, \dots, n \text{ 梁部材} \\ Z_{pC}^{(i)} = 0.9(A_C^{(i)})^{1.5}; & i=1, 2, \dots, n \text{ 柱部材} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 単一目的最適化の定式化

鋼材量最小設計は次の単一目的最適化を設定する。

$$\begin{aligned} & \text{Find} && \mathbf{A} \\ & \text{to minimize} && f(\mathbf{A}) = \sum h_i A_C^{(i)} + \sum l A_G^{(i)} \quad (2) \\ & \text{subject to} && \lambda \geq \underline{\lambda} \quad (\text{塑性崩壊荷重制約}) \quad (3.a) \end{aligned}$$

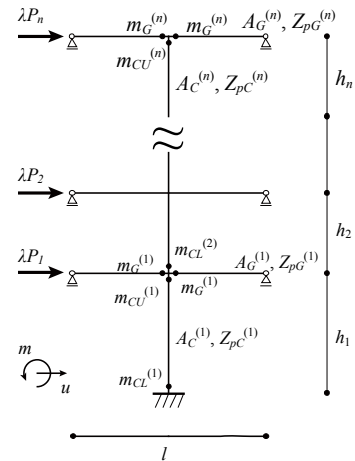


図1 n 層魚骨モデル

$$\begin{aligned} -\mathbf{r}(\mathbf{A}) \leq \mathbf{r} \leq \mathbf{r}(\mathbf{A}) & \quad (\text{降伏応力}) \quad (3.b) \\ Z_{pC}^{(i)} + Z_{pC}^{(i+1)} \geq 3Z_{pG}^{(i)} & \quad (\text{柱梁耐力比}) \quad (3.c) \\ \mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U & \quad (\text{上下限值制約}) \quad (3.d) \end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{A} : 断面積ベクトル ($= [A_G^{(i)}, A_C^{(i)}]$), λ : 崩壊荷重係数, $\underline{\lambda}$: 指定崩壊荷重係数, \mathbf{r} : 部材力ベクトル, $\mathbf{r}(\mathbf{A})$: 全塑性モーメント, $\mathbf{A}^U \cdot \mathbf{A}^L$: 上・下限値ベクトルである。

2.3 ペナルティ関数

制約条件式(3)を満たさない場合には、式(4)に示す項 (ペナルティ関数値⁹⁾)を目的関数値に付加する処理を行う。

$$\eta \sum C_j \quad (4)$$

$$\text{ここで、} C_j = \sum |\min(0.0, c_j(i))| \quad (5)$$

$$c_1(i) = \lambda - \underline{\lambda} \geq 0 \quad (\text{塑性崩壊荷重制約}) \quad (6)$$

$$c_2(i) = \sigma_y Z_{pG}^{(i)} - |m_G^{(i)}| \geq 0 \quad (7.a)$$

$$c_3(i) = \sigma_y Z_{pC}^{(i)} - |m_G^{(i)}| \geq 0 \quad (7.b)$$

$$c_4(i) = \sigma_y Z_{pC}^{(i)} - |m_G^{(i)}| \geq 0; i=1, 2, \dots, n \quad (\text{降伏応力}) \quad (7.c)$$

$$c_5(i) = Z_{pC}^{(i)} + Z_{pC}^{(i+1)} - 3Z_{pG}^{(i)} \geq 0; i=1, 2, \dots, n-1 \quad (\text{柱梁耐力比}) \quad (8)$$

$$c_6(i) = A_C^{(i)} - A_{Ci}^L \geq 0 \quad (9.a)$$

$$c_7(i) = A_{Ci}^U - A_C^{(i)} \geq 0 \quad (9.b)$$

$$c_8(i) = A_G^{(i)} - A_{Gi}^L \geq 0 \quad (9.c)$$

$$c_9(i) = A_{Gi}^U - A_G^{(i)} \geq 0; i=1, 2, \dots, n \quad (\text{上下限值制約}) \quad (9.d)$$

η : ペナルティパラメータ ($\eta \geq 0$), C_j : 制約条件 j に対するペナルティ関数値, σ_y : 降伏応力, $m_G^{(i)}$: 第 i 層梁端モーメント, $m_{CU}^{(i)}, m_{CL}^{(i)}$: 第 i 層柱材端モーメント, $A_{Ci}^U \cdot A_{Ci}^L$: 第 i 層梁部材断面積に対する上・下限値, $A_{Gi}^U \cdot A_{Gi}^L$: 第 i 層柱部

材断面積に対する上・下限値である。

なお、採用する FA と山登り法の計算手順は文献 3) を参照されたい。ただし、FA では、解の多様性を考慮し、FA パラメータ α, β を固定値とし、 γ は $1, 10^3, 10^5$ に変化させる。また、山登り法では、効率的な探索を行うため、標準偏差 $\sigma = 0.3$ の正規乱数を用い側面制約の $r\%$ の範囲(乱数発生範囲)に近傍個体を作成する。さらに、近傍個体内の許容解の割合に応じて r を小さくする処理を導入する。収束条件は r が下限値以下とする。

3. 魚骨モデル鋼材量最小設計

解析モデルは 10 層魚骨モデル($n=10$)を考える。第 1 層の高さを $h_1 = 600\text{cm}$ 、第 2 層以上の高さを $h_2 = h_3 = \dots = h_{10} = 400\text{cm}$ 、スパン長 $l = 960\text{cm}$ と与える。全部材 SN490 級鋼(降伏応力 $\sigma_y = 295\text{N/mm}^2$)を用いる。基準水平荷重は表 1 に示すような必要保有水平耐力分布(A_i 分布)とし、指定崩壊荷重係数 $\lambda = 1$ すなわち、必要保有水平耐力以上の耐力確保を設計条件とする。部材断面積の上下限値は

$$\begin{cases} 10\text{cm}^2 \leq A_G^{(i)} \leq 400\text{cm}^2, & i=1, 2, \dots, 10 \text{ 梁部材} \\ 10\text{cm}^2 \leq A_C^{(i)} \leq 600\text{cm}^2, & i=1, 2, \dots, 10 \text{ 柱部材} \end{cases} \quad (13)$$

と与える。計算パラメータは表 2, 3 に示す。FA は $\gamma = 1, 10^3, 10^5$ 毎に 3 回試行する。図 2 は FA のエリート解に対する目的関数値の遷移(縦軸: 目的関数値, 横軸: 反復回数)である。図 3 は FA で得た解を初期形態とし、山登り法を適用した解の目的関数値の遷移を示す。図 4 は図 3 に示した解の断面分布(縦軸: 断面積, 横軸: 層)である。form-1 ~ -3 は FA ($\gamma = 1$) による解形態、form-4 ~ -9 は FA ($\gamma = 10^3$) による解形態、form-10 ~ -15 は FA ($\gamma = 10^5$) による解形態である。参考として、文献 4) による局所解の断面分布を図 5 に示す。各解形態の目的関数値は表 4 に示す。図 6 は解形態の例である。

4. 考察

図 2, 4 より、 $\gamma = 1$ の時、目的関数値の評価が比較的低い値に収束し、試行によって異なる解形態を得た。この形態は、目的関数値の評価が比較的低い局所最適解に収束した

表 1 基準水平荷重(kN)

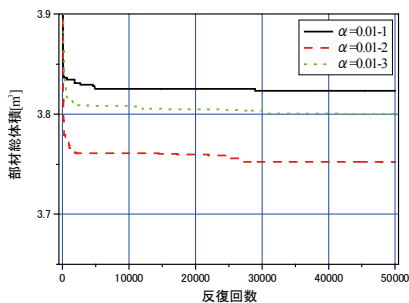
1F	2F	3F	4F	5F
25.8	37	48.5	60.3	72.7
6F	7F	8F	9F	10F
85.8	100.1	116.7	138.2	318.3

表 2 FA の基本計算パラメータ

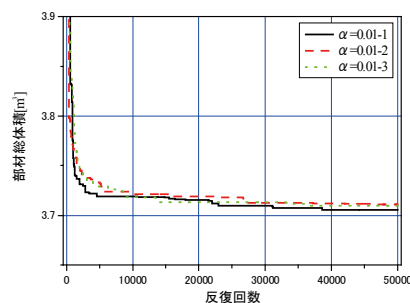
個体数	200
α	0.001
β	1
γ	$1, 10^3, 10^5$
反復回数	50000
設計変数数	20

表 3 山登り法の計算パラメータ

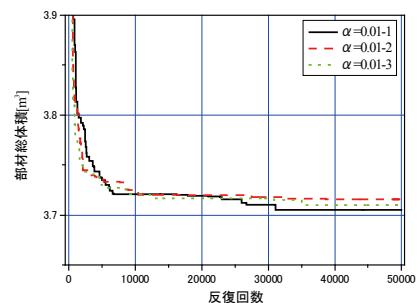
近傍個体数	200	
反復回数	20000	
r	初期値	1
	下限値	0.0001
σ	0.3	



a. $\gamma = 1$

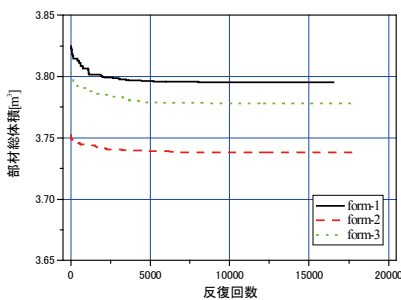


b. $\gamma = 10^3$

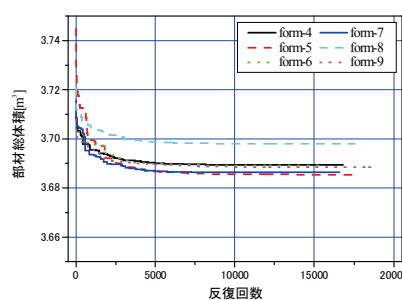


c. $\gamma = 10^5$

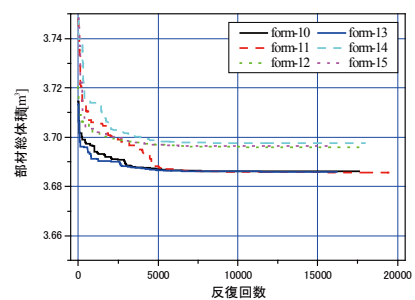
図 2 FA による目的関数値の遷移



a. $\gamma = 1$

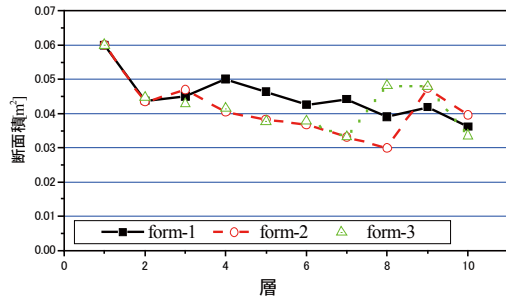


b. $\gamma = 10^3$

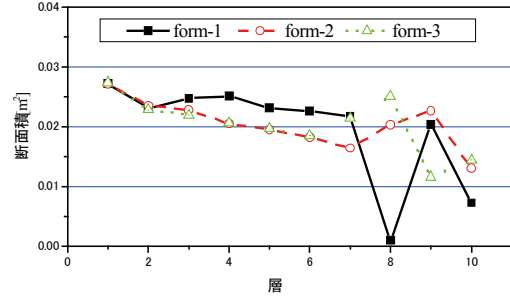


c. $\gamma = 10^5$

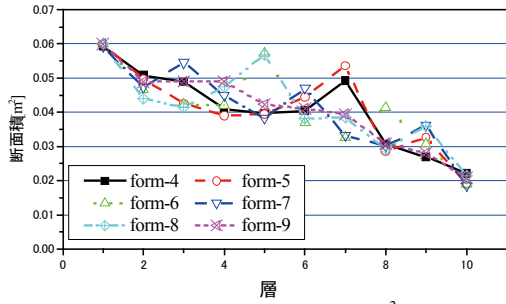
図 3 山登り法による目的関数値の遷移



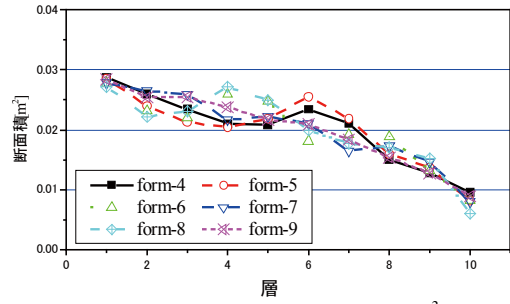
(a.1) 柱部材断面(FA: $\gamma = 1$)



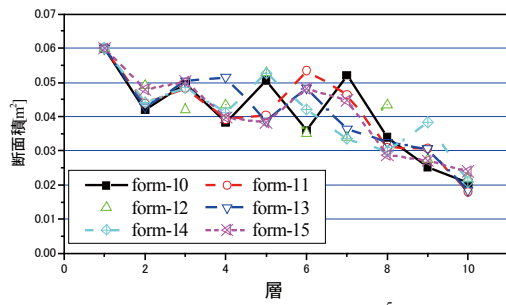
(a.2) 梁部材断面(FA: $\gamma = 1$)



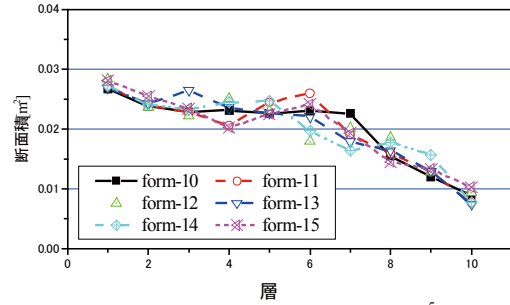
(b.1) 柱部材断面(FA: $\gamma = 10^3$)



(b.2) 梁部材断面(FA: $\gamma = 10^3$)

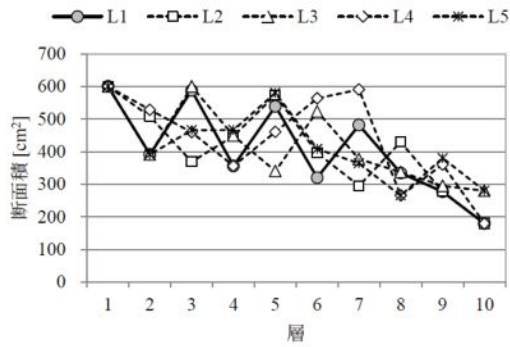


(c.1) 柱部材断面(FA: $\gamma = 10^5$)

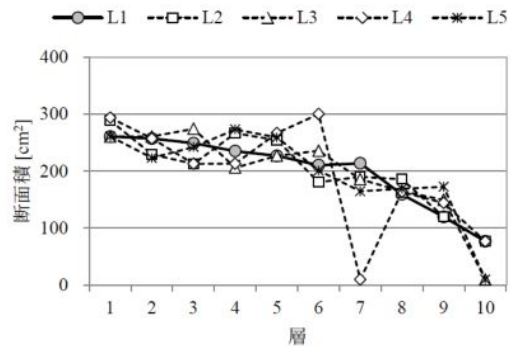


(c.2) 梁部材断面(FA: $\gamma = 10^5$)

図4 山登り法による解の断面分布



(1) 柱部材断面



(2) 梁部材断面

図5 文献4)による局所解の断面分布

表4 各解の目的関数値[m³]

	form-1	form-2	form-3
FA ($\gamma=1$)	3.825	3.752	3.803
山登り	3.795	3.738	3.778

	form-4	form-5	form-6	form-7	form-8	form-9
FA ($\gamma=10^3$)	3.709	3.745	3.713	3.716	3.723	3.709
山登り	3.692	3.689	3.689	3.69	3.697	3.689

	form-10	form-11	form-12	form-13	form-14	form-15
FA ($\gamma=10^5$)	3.716	3.749	3.722	3.715	3.75	3.764
山登り	3.688	3.694	3.694	3.687	3.699	3.692

文献4)の	L1	L2	L3	L4	L5
局所解	3.67	3.67	3.69	3.73	3.70

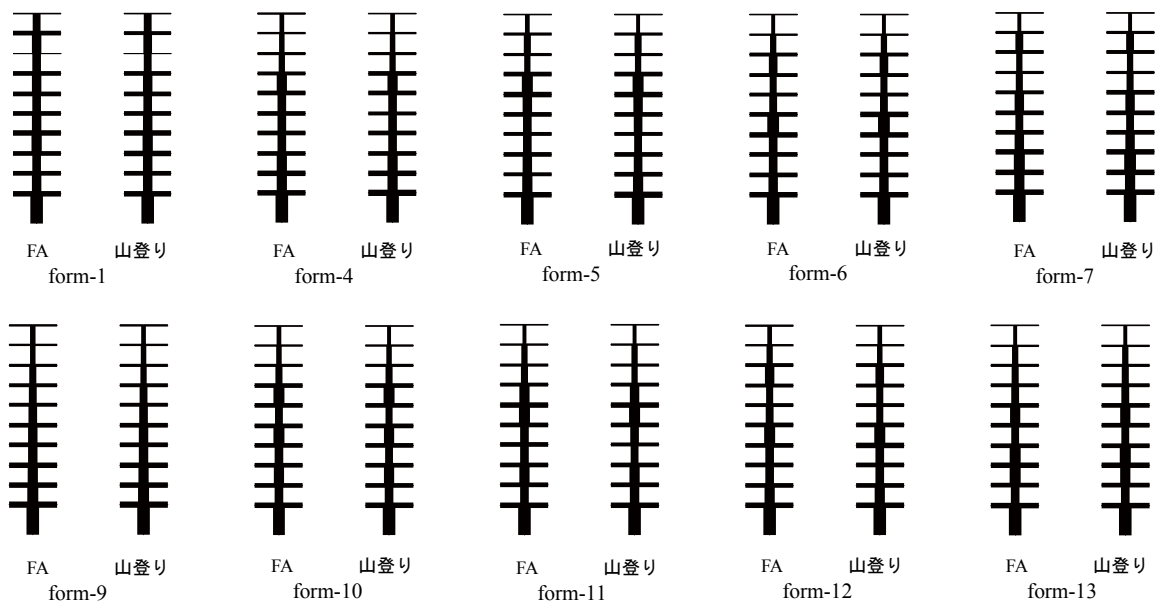


図6 解形態

と考えている。 $\gamma=10^3, 10^5$ の時は目的関数値の評価が比較的高く、多様な解形態が得られている。図3に示すようにFAで得た解を山登り法に適用することで、より目的関数値の評価が高い解形態を得る。form-4 ~ -15より、目的関数値の評価が近接する異なる断面分布の解形態が多数存在することが判る。

これらの解形態を文献4)の解形態(図5)と比較する。図4, 6, 表4に示すように、form-1は目的関数値の評価が比較的低い局所最適解である。form-10は局所解L1と同形態の解であり、form-6, -12は局所解L2と同形態の解である。局所解L4の断面分布に近い解はform-5, -11であるが、同形態の解ではない。form-7, -13は下層の柱が上層の柱よりも細く、チェッカーボード状の断面分布の解であり、施工性・経済性の側面で望まれない。これに比べ、form-9の断面は、柱・梁とも層方向に変動せず、文献4)の解形態よりもなめらかな分布を示している。このような解形態の獲得が重要である。

図4より、 $\gamma=10^3, 10^5$ の時は各試行で多様な解形態を獲得し、 $\gamma=1$ の時は一回の試行で一つの解形態に収束する。この理由は、FAが目的関数値を直接評価値とせず、個体間距離を考慮した探索を行っているためである。つまり、 γ は解形態の多様度に関係する。従って、FAのパラメータは設計変数空間や解空間に応じ、設定を変える必要がある。

5. まとめ

本報告では塑性崩壊荷重制約下の鋼材量最小設計に群知能に分類されるホタルアルゴリズム(FA)を適用し、局所最適解の探索例を示した。その際、FAで得られた解を初期形態として山登り法の適用により解の極値性を確認した。さらに、FAで得られた解に対し、山登り法の適用で多数の局所最適解を得ることができた。なお、文献4)の解

よりもなめらかな断面分布の解が多く獲得でき、本問題に対するFAの有用性と適用性が確認できたと考えている。今後は、効率的になめらかな断面分布の解形態を獲得していきたい。

【参考文献】

- 1) 宋昶, 山川誠, 上谷宏二: 鋼構造骨組の最小重量設計問題における凸緩和, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.673, 369-377, 2012.3
- 2) 澤田樹一郎, 松尾彰: 弾性・塑性制約下における鋼構造建築骨組の離散最適化問題に対する列挙型アルゴリズムの改善解法, 日本建築学会構造系論文集, No.574, 93-98, 2003.12
- 3) 松尾圭介, 本間俊雄: ホタルアルゴリズムと局所探索による鋼構造骨組の最小重量設計, 日本建築学会, コロキウム構造形態の解析と創生 2013, 2013.11 (発表予定)
- 4) 山川誠, 上谷宏二: 塑性崩壊荷重制約条件下の鋼材量最小設計問題における凸緩和を用いた局所解の制度評価, 第35回情報・システム・利用・技術シンポジウム, 49-54, 2012.12
- 5) Xin-She Yan: Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, Proc. 5th Inter. Conf. on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications (2009), 169-178, 2009
- 6) 永田洸大, 本間俊雄: 優良解探索を導入した群知能による自由曲面シェルの構造形態, 日本建築学会構造系論文集, No.684, 345-354, 2013.2
- 7) N. Tanaka, T. Honma: Structural Shape Optimization of Free-Form Surface Shell Using Firefly Algorithm, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, "BEYOND THE LIMITS OF MAN", CD-ROM, 1-8, 2013.9
- 8) 三井和男, 大崎純, 大森博司, 田川浩, 本間俊雄: 発見的手法による構造フォルムとシステム, コロナ社, 2004
- 9) 茨城俊秀, 福島雅夫: FORTRAN77最適化プログラミング, 岩波書店, 1991

*1 鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻 院生

*2 鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻 教授 工博