第３回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集　1993年12月

(18) 非連続目的関数を有する構造設計へのＧＡの応用について

AN APPLICATION OF GA TO THE DESIGN OF FRAMED-STRUCTURES USING READY-MADE STEEL PRODUCTS

杉本博之*　鹿汴麗**
Hiroyuki SUGIMOTO 、 LU Bian Li

GA is applied to the design problems whose design variables are discrete and objective functions are discontinuous. One design problem is the optimum design of framed-structures where the hardness of obtaining the specified ready-made steel products is considered. And another problem is the optimum design where the irregularity of the section ranks in a member group is considered as a factor which raise the cost of the structure. GA can be applied to the problems very easily and the results of the numerical examples are reasonable. It is concluded that, as the design method for the structural design, GA is robust and useful.

Key Words: GA, discontinuous objectve function, framed-structures

１．まえがき

近年、種々の工業設計の分野において、最適設計法の利用がますます一般的になってきた。特に連続変数と連続関数からなる設計問題を扱う最適化手法は、十分実用の段階に達していると考えられる。しかしながら、実際の設計においては、設計変数は離散的、あるいは設計の評価を定量化する目的関数が非連続である場合も少なくない。このような非連続目的関数と離散変数からなる構造物の最適設計には、従来の微係数に基づき、連続量を扱う最適化手法は利用できない。一方、離散変数を扱う手法としては、例えば列挙法と分枝限定法があるが、離散変数の数の増加に伴って、計算時間が極めてかかり、必ずしも利用し易い方法とは考えられない。

一方、最近、離散的な要因を含む設計問題に対して、遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）が注目されている。この方法は関数の微係数に依存せず、目的関数の値のみによって最適化することができる。したがって、離散変数を容易に取り扱うと同時に、非連続な目的関数からなる最適設計へも利用が可能であると考えられる。

筆者らは、このHolland 等が開発したＧＡ[1)]の上に、『生長オペレータ』を加えてＧＡの信頼性の向上を試みた[2)3)]が、本研究では、既製形鋼を用いるトラス、および平面骨組構造物の設計において、目的関数を非連続関数として定義し、より実際的な、変数が離散量および関数が非連続な最適化問題に対してのＧＡの可能性について検討を試みた。

本研究における非連続な目的関数とは、一つは、鋼材の入手難易を考慮した目的関数であり、もう一つ

＊　工博　室蘭工業大学助教授　工学部建設ｼｽﾃﾑ工学科　（〒050 室蘭市水元町２７－１）
＊＊　室蘭工業大学大学院　工学部建設ｼｽﾃﾑ工学科　（〒050 室蘭市水元町２７－１）

は、部材間の鋼材の不揃いをコストアップの要因として考慮した目的関数である。

2．構造設計法と最適設計法

工業設計全体では、最適設計法の利用はかなり一般的になってきているが、土木工学における構造設計においては必ずしもそうではなく、従来の設計法が相変わらず主流を占めている。ここでは、本論のＧＡの説明に入る前に、構造設計と最適設計法の関係について若干の考察を試みる。

設計法という概念は、必ずしも明確にされていなく、意外な程混乱して用いられている。それらを、ここでは、「デザイン的設計法」と「照査的設計法」の二つに分けて考え、それぞれの設計法の簡単な流れ図を図－１に示した。図の左の流れが「デザイン的設計法」であり、右が「照査的設計法」である。

設計とは、本来、物（システム）を作る行為であるから、「作る」という部分が一番重要ではないかと思われるが、図にあるように、従来の設計法においては、照査、評価、解析が主要な要因であり、いかにしてものを作るか、意思決定をするかという部分が見事なまでに欠落、あるいは軽視されている。

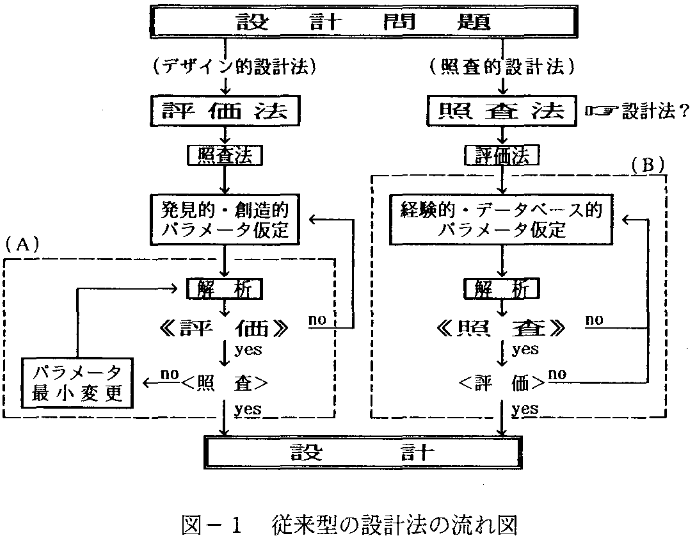
評価、解析に対する重点の置き方は、「デザイン的設計法」と「照査的設計法」では若干異なると思われるので、図ではそれを文字の大きさで示してある。

「デザイン的設計法」では、評価が重要であり、照査は相対的に２次的な位置付けがなされる。パラメータの仮定・決定も発見的、創造的になされるのが、デザインたるゆえんである。ただ、デザイン的な要求から来る形態は、制約が厳しく、照査を満足する「許容設計」を得るのは、困難になると予想される。

「照査的設計法」は、現在、特に骨組構造物の設計を中心に広く用いられている方法である。ここでは、照査式の決定に主力がそがれ、場合によっては、照査式を称して設計法といわれることもある。初期のパラメータの設定が、最終的な設計に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、それにまったく論理性がなく相変わらず経験的になされている。照査式を満足しなかった場合のパラメータの変更の論理が、完全に欠落している。評価に対する重みは少なく、基本的に照査式を満足することが評価と表裏一体の関係がある。万が一、評価的なものがあったとしても、それを設計パラメータに反映する論理が、やはり完全に欠落している。これは、照査法（照査法の意義を十分認めた上で）と呼ばれるべきプロセスであって、決して設計法と呼ばれるものではない。

この「照査的設計法」を設計法と呼ぶことが根強く定着していることが、国内において、真のデザイン的な設計法が確立しない理由の一つであろうし、土木工学において、最適設計法に対する、真の理解が生まれない土壌と考えられる。

図－１において、「デザイン的設計法」では（Ａ）の部分に、「照査的設計法」では（Ｂ）の部分に最適化手法を用いることは、現在では極めて容易であり、その結果、許容設計が容易に得られる、あるいは、設計の合理化、設計の質の向上が期待できる。



図－１　従来型の設計法の流れ図

土木工学においても、最適設計法の導入は、早急に検討すべき課題ではないかと考えられる。

3．非連続な目的関数からなる構造物の最適設計

本研究では、JIS G3444 に決める一般構造用炭素鋼鋼管（以下、鋼管と略する）を用いるトラス構造物と、JIS G3192 に決めるH形鋼（以下、H鋼と略する）を用いる平面骨組構造物を対象としている。

（1）入手難易を考慮する骨組構造物の最適設計

鋼管とH鋼に用いられる既製形鋼の中には、常時圧延サイズでなく事前協議を要するものがあるので、入手難易は断面寸法により差がある[4]。断面ランクと、部材断面積及び入手難易の関係を表－1に示した。このような断面寸法による入手難易の差を考慮した骨組構造物の最適化問題は、以下のように定義できる。

目的関数： $$O=\sum_{i=1}^{n} N_d(I_i)\cdot A(I_i)\cdot L_i \tag{1}$$

制約条件： $$g_j=g_j(\{I\})\leqq 0 \quad (j=1\sim m) \tag{2}$$

設計変数： $$\{I\}=\{I_1 \quad I_2 \quad I_3 \cdot\cdot\cdot I_n\} \tag{3}$$

ここで、$N_d(I)$ は断面ランクIに対応する入手難易係数、I_i は設計変数 i の断面ランク、A（I）は断面ランクIに対応する部材断面積、L_i は設計変数 i にリンクされている部材長の総和、nは設計変数の数、mは制約条件の数、g_j は応力に関する制約条件である。入手難易係数は、次のように決めた。

$$\begin{cases} N_d=1 & ：\text{事前協議を要しない鋼材} \\ N_d=\nu_d \quad (\nu_d>1) & ：\text{事前協議を要する鋼材} \end{cases} \tag{4}$$

この問題は、そもそも設計変数が離散量であるが、さらに目的関数も非連続関数となるので、関数の微係数に基づく最適化手法の応用は困難と考えられる。

（2）部材断面の不揃いを考慮する骨組構造物の最適設計

構造物の最適化においては、最小重量設計は良く行われるが、その結果、得られた各部材の断面は異なることが多い。しかし、異なる断面を採用するより、なるべく同種類の部材（例えば、上弦材）内に、同じ断面を使用する方が、加工と施工等いろいろな面で、コストを減らすことが考えられ、より実際的である場合もある。この部材断面の不揃いの程度を評価する骨組構造物の最適化問題は、以下のように定義される。

目的関数：

$$O=\sum_{k=1}^{NG} U_k \ \{\sum_{i=1}^{NJ} A(I_{ik})\cdot \ell_{ik}\} \tag{5}$$

制約条件：

$$g_j=g_j(\{I\})\leqq 0 \quad (j=1\sim m) \tag{6}$$

設計変数：

$$\{I\}=\{I_1 \quad I_2 \quad I_3 \cdot\cdot\cdot I_n\} \tag{7}$$

ここで、NGは部材グループの数、NJはkグループに属する部材数、U_k はkグループで用いられる断面ランクの不揃いの程度に応じた係数で、式（8）で計算される。I_{ik} はkグループのi部材の断面ランク、ℓ_{ik} はkグループのi部材の部材長である。

$$U_k=(N_{Rk}-1)\cdot d_0+1 \tag{8}$$

表－1　断面と要事前協議の鋼材

ランク	断面積 (cm²)	
	H形鋼	鋼 管
1	63.53	22.72
2	71.53	29.94*
3	72.38	38.36
4	84.12	54.08
5	84.30	67.55
6	92.18	70.21
7	96.76	80.42*
8	101.30	90.64*
9	101.50	100.90*
10	104.70*	133.60
11	131.30*	138.80*
12	134.40	148.80
13	152.50*	163.90
14	157.40	167.10*
15	163.50	179.10
16	173.90	195.40*
17	174.50	209.40
18	192.50	217.90
19	211.50*	221.70*
20	222.40*	238.20
21	235.50	259.40*
22	243.40*	278.70
23	267.40	301.70*
24	295.40*	319.20
25	309.80	343.80*
26	360.70*	349.40
27	364.00*	400.50
28	528.60*	451.60
29	770.10*	502.70

ここで、N_{Rk} は、kグループで用いられる断面ランクの種類の数、d_0 は、断面ランクの不揃いによるコストアップの程度を表す不揃い係数。この最適化問題も、制約条件は部材の断面積に関して連続であるが、目的関数は不連続である。したがって、微係数を用いる最適化手法の適用は困難である。

4．生長オペレータ

単純GAは、淘汰、交叉及び突然変異の三つのオペレータで構成されている。これらの説明、及びこれら

についての種々の工夫は、他の論文で詳細に説明されているので[5)6)]、ここでは生長オペレータのみについて説明する。単純ＧＡに加えるこの生長オペレータの目的は、線列集合の不特定の部分に、ごく簡単な論理により、明らかに設計上良くなるという方向に改良を加えることにより、線列全体の多様性の質を向上させることにある[6)]。生長オペレータの具体的な手続きは、設計問題によって当然異なるものであるが、本研究では、応力に関する制約条件のみを受ける骨組構造物の設計を対象として、以下のような手続きを試みた。

（１）入手難易を考慮する場合の生長オペレータ

この最適化問題では、式（１）に示したように、事前協議を要する鋼材に入手難易係数をかけている。それ以外は、普通の最小重量設計と同じである。したがって、平面骨組構造物の最小重量設計の生長オペレータ[6)]を利用できる。すなわち、各線列（設計）毎に、次の３項目の内１つを等しい確率で選択して、線列の改良を行う。

ａ）危険な構造物であれば安全側にする。　ｂ）応力に過大な余裕がある構造物であれば、その贅肉を落とす。　ｃ）何もしない。

（２）部材断面の不揃いを考慮する場合の生長オペレータ

この最適化問題は、部材のグループの中になるべく同じ断面を使用し、かつ構造物の重量を最小化する問題であるので、生長オペレータの手続きは上に述べたａ、ｂ、ｃで行うと同時に、問題の特徴を考慮して、確率的に下の手続きも行う。

ｄ）各部材グループ毎に、各部材の断面ランクの平均の断面ランクに揃える。

４．計算例[7)]

図－２のトラス構造物、および図－３の平面骨組構造物の、それぞれ入手難易、および不揃いを考慮した設計の結果を以下に説明する。

トラス構造物は鋼管を用い、その鋼材はSM50、平面骨組構造物はＨ鋼を用い、その鋼材はSS41である。許容応力等細部の規定は、道路橋示方書に従っている。

制約条件のある最適化問題は、ＧＡでは外点ペナルティ関数を用いて無制約の問題に変換されるが、本研究では、次の外点ペナルティ関数を用いて計算を行った。

$$P = C + (\gamma^0 + 8000 \cdot k) \sum_{j=1}^{m} \{\max[0, g_j]\}^2 \qquad (9)$$

ここで、Ｐはペナルティ関数、Ｃは目的関数、γ^0 はペナルティ係数の初期値で本研究では２００００としている、ｋは世代数、ｍは制約条件の数、g_j は制約条件である。

（１）入手難易を考慮する構造物の最適設計

式（１）～（３）で定義された最適化問題を、図－２、図－３の構造物に対して、入手難易係数（ν_d = 1.2 、1.5 、2.0)を変えて、計算した。

ａ）トラス構造物　：　結果は表－２にまとめてある。

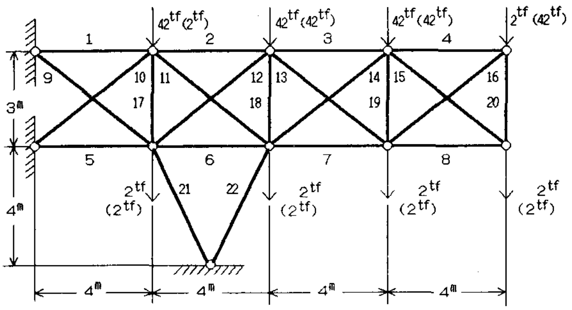
表中、設計変数の下欄はリンクされる部材の番号、その下に、得られた断面ランクを示した。O_{min} は計算終了するまでに得られた目的関数中の最小値、Ｖは鋼材総容積である。入手難易係数が1.0 の場合の結果は最小重量設計となる。そのときの断面ランクI^0 とすると、表中のO_s は次の式で計算される。

$$O_s = \sum_{i=1}^{n} N_d(I_i^0) \cdot A(I_i^0) \cdot L_i \qquad (10)$$

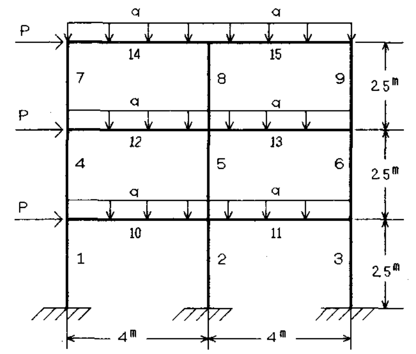
各入手難易係数の値に対して、当然、下の式（11）の関係は成立しなければならない。

$$V \leqq O_{min} \leqq O_s \qquad (11)$$

表－２に示すように、最小重量設計の時は、入手難のランクが部材２、３、12、14に現れているが、ν_d =1.2 では、入手難のランクは３つのみに減少し、ν_d =1.5 以上では、２つになっている。また、どちらの場合でも式（11）は成立している。



図－２　トラス構造物



図－３　平面骨組構造物

表－２　入手難易を考慮したトラス構造物の最適設計の結果

設計変数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	O_{min}	V	O_s
部　材		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22			
ν_a	1.0	4	7*	7*	1	1	3	5	1	1	1	3	2*	1	7*	1	3	1	4	1	1	1	10	401160	401160	401160
	1.2	4	7*	7*	1	1	4	5	1	1	1	3	1	2*	6	1	3	1	4	1	1	1	10	418200	402340	425060
	1.5	4	7*	7*	1	1	4	5	1	1	1	3	1	3	6	1	3	1	4	1	1	1	10	438720	406550	460910
	2.0	4	7*	7*	1	1	4	5	1	1	1	3	1	3	5	1	3	1	5	1	1	1	10	473600	409260	520670

表－３　入手難易を考慮した平面骨組構造物の最適設計の結果

設計変数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	O_{min}	V	O_s
部　材		1　3	4　6	7　9	2	5	8	10　11	12　13	14　15			
ν_a	1.0	20*	7	4	1	17	4	14	13*	3	588000	588000	588000
	1.2	15	9	3	20*	15	7	14	14	4	619410	608490	634640
	1.5	17	9	7	17	16	3	15	14	3	606200	606200	704600
	2.0	15	9	3	15	15	7	15	14	6	605090	605090	821200

表－４　不揃い係数を考慮したトラス構造物の最適設計の結果

グループ		上弦材				下弦材				斜　材								垂直材				脚　材		O_{min}	V	O_s
部　材		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22			
d_0	0.0	4	7	7	1	1	3	5	1	1	1	3	2	1	7	1	3	1	4	1	1	1	10	401160	401160	401160
	0.1	4	7	7	1	1	4	4	1	1	1	3	1	1	7	1	3	1	4	1	1	1	10	461330	402450	484630
	0.2	8	8	8	1	1	4	4	1	1	1	3	1	1	7	1	3	1	4	1	1	1	10	532570	421250	568100
	0.5	7	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	1	5	1	1	1	10	677140	621830	818510

表－５　不揃い係数を考慮した平面骨組構造物の最適設計の結果

グループ		柱　1			柱　2			柱　3			梁						O_{min}	V	O_s
部　材		1	4	7	2	5	8	3	6	9	10	11	12	13	14	15			
d_0	0.0	17	10	1	27	18	7	1	1	7	17	1	15	7	2	7	571580	571580	571580
	0.1	21	9	9	20	13	8	11	11	8	11	11	11	11	11	11	678640	634770	733630
	0.2	17	4	4	14	14	14	15	15	15	13	13	13	13	13	13	709500	692360	895680
	0.5	27	12	12	14	14	14	11	7	6	11	11	11	11	11	11	830590	671430	1382800

b）平面骨組構造物　：　結果は表－３にまとめてある。

入手難易係数ν_d ＝1.0 の場合は、入手難のランクは２つ現れている。ν_d ＝1.2 では、入手難のランクは１つのみに減少し、ν_d ＝1.5 以上では、全部消えている。また、式（11）は成立している。

（２）部材断面の不揃いを考慮する構造物の最適設計

式（５）～（８）で定義された、部材断面の不揃いを考慮する最適化問題を、前記した構造物について、断面の不揃いによるコストアップの程度を表す不揃い係数を変えて（d_o=0.1、0.2、0.5 ）計算した。

この最適化問題では、式（８）で設定されたように、部材グループの中に断面ランクの不揃い程度が大きければ大きいほど，各断面にかける係数U_j は大きくなる。不揃い係数d_o ＝0.0 の場合に、結果は最小重量設計となる。その時の断面ランクI^o とすると、O_s は次の式で計算される。

$$O_s = \sum_{K=1}^{NG} U_K \left\{ \sum_{i=1}^{GJ} A\left(I^o_{iK}\right) \cdot \ell_{iK} \right\} \tag{12}$$

各不揃い係数の値に対して、当然、下の式（13）の関係は成立しなければならない。

$$V \leqq O_{min} \leqq O_s \tag{13}$$

a）トラス構造物　：　断面の不揃い係数を考慮した最適設計の結果を表－４に示した。

部材グループを、上弦材、下弦材、垂直材、脚材に分けている。不揃い係数d_oの増加に従い、断面ランクが、各グループ毎に揃ってきており、d_o =0.5では、各グループ毎に完全に同一ランクになった。

式（13）は成立している。

b）平面骨組構造物　：　最適設計の結果を表－５に示した。

部材グループは、表－５に示したように、柱１、柱２、柱３、および梁に分けた。

前例と同様に、d_oの増加にともない、各グループ毎の断面ランクが揃ってくる傾向が見られる。

５．あとがき

構造物の設計の評価を、鋼重ですることは一つの方法ではあるが、実際には、それ以外にコストに係わる種々の要因があり、それらが評価関数（目的関数）を非連続にし、最適化手法の応用を断念する原因の一つになっていることを考慮し、離散的な設計変数の上に、目的関数も非連続になる構造物の最適設計問題を想定し、ＧＡの応用を試みた。

紙面の都合により、モンテカルロ法による結果の妥当性の検証は省略したが、設定した係数の変化に対する反応は合理的であり、この程度の問題であれば、難なく応用でき、実用的な設計を提供できることがわかった。

参考文献

１）Goldberg,D.E.:Genetic Algorithms in Search,Optimization,and Machine Learning,Addison-Wesley Publishing Company、1989.

２）Sugimoto,H.:DISCRETE OPTIMIZATION OF TRUSS STRUCTURES AND GENETIC ALGORITHMS, Proc. of the Korea-Japan Joint Seminar held in Seoul, Korea. pp.1-10、1992.

３）杉本博之・鹿汴麗・山本洋敬：離散的構造最適設計のためのＧＡの信頼性向上に関する研究、土木学会論文集　No.471/I-24 、pp.67-76、 1993.

４）日本橋梁建設協会：デザインデータブック、日本橋梁建設協会、1987.

５）鹿汴麗・杉本博之・山本洋敬：遺伝的アルゴリズムの応用に関する基礎的研究、第２回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp.181-186、1991.

６）杉本博之：ＧＡの工業設計への応用にむけて、数理科学、No.353, NOVEMBER、pp.45-50、1992.

７）杉本博之・鹿汴麗：ＧＡの工業設計への応用に関する一考察、第42回応用力学連合講演会、1993.