GA による橋形構造物の組立・形態の同時最適化に関する研究*

菊池 耕生^{*1}, 原 文雄^{*2}Simultaneous Optimization of Configuration and Assembly Process
of Bridge Structure using a Genetic Algorithm

Kohki KIKUCHI and Fumio HARA

In this paper, we discuss simultaneous optimization of the configuration and assembly process of a bridge structure using a genetic algorithm. The fitness function used to optimize the structure has many local minima. We propose a hybrid GA based on the "local reproduction method". We examine the performance and characteristics of the simultaneous optimization by studying three cases: (1) optimization of final structural configuration without considering assembly process, (2) optimization of the assembly process only and (3) simultaneous optimization of the final structural configuration and the assembly process. We demonstrate the effect of the assembly process on the optimum topology of the bridge structure and the applicability of this GA to multi dimensional optimization problems.

Key Words: Genetic Algorithm, Simultaneous Optimization, Structural Configuration, Assembly Process, Bridge Structure, Local Reproduction, FEM

1. 緒 言

構造物の設計, プラントの配管, 配線計画等では, 最小スペース問題, 最大剛性問題, 最小重量問題等, さまざまな要求が存在する. このような機械製品の複雑化, 多様化に伴い近年ではコンピュータによる設計の自動化が強く求められ, さまざまな論文^{(1)~(3)}が発表されるようになってきている. これまで著者らは, 構造物の最適化の一例として, GA を用いて静的荷重下における構造物の内部形態の最適化を行ってきた⁽⁴⁾. しかしながら, それは構造物の完成時の形態の最適化についてであり, 構造物によっては組立てられないこともあり, 著者らを含め, これらを考慮したデザインは皆無に等しい. 求めた最適形態が, コスト面, 加工面において製造できないことも多く, 製造レベルでの諸条件を考慮した最適化が強く求められている.

そこで本研究では, 組立工程も考慮した形態最適化として, 橋形構造物を取上げ, その組立・形態の同時最適化を行う. 橋形構造物には, 組立工程中に構造物

として崩壊しないという構造保持の条件が加えられ, 組立工程を最適化する目的関数と構造物形態を最適化する目的関数が互いに複雑に干渉し合うため, 非常に多峰性の高い複雑な問題となる. このとき, (1)組立工程を無視して最終形態の最適化のみを行った場合, (2)許容応力内に発生応力を抑えて組立工程の最適化を行った場合, (3)組立工程と最終形態の同時最適化を行った場合, の3ケースについて, とりうる構造形態を比較検討する. また, このような問題に対し地域的生殖法(後述)を用いたGAを適用して最適化を行うことにより, GAの多次元最適化問題への有効性を示す.

遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)^{(5)~(7)}は, Hollandにより提案された生物の進化の過程を模倣した探索アルゴリズムであり, 最適化問題の求解法として最近注目を集めている. GAが従来の解法に対し特徴的なことは, 多峰性の高い問題の大域的最適解を求めるのに信頼性の高いことや, 最適化解法が確立していなくても解の評価さえできれば比較的短時間で実用的最適解を求められることにある. 総当たりでは非常に時間がかかるナップサック問題や, 巡回セールスマン問題等のような問題でも, 適当な遺伝子のコーディングによりその最適化がGAで扱え,

* 原稿受付 1996年6月28日.

^{*1} 正員, 東京理科大学工学部大学院 (〒162 東京都新宿区神楽坂1-3).^{*2} 正員, 東京理科大学工学部.

突然変異, 交差, 自然淘汰等の遺伝的操作を施すことにより, 実用的時間内に実用的最適解を得ることができる。

2. モデル化とコーディング

橋形構造物の組立・形態の同時最適化とは, 図 1 に示すような中心に荷重のかかる両端支持の構造物において, その支持点と荷重点を含む空間に, ある設計目的に従ってどの部材をどのようにどの順番で配置して最終的に最適構造形態を造るかという問題である。これまでも GA を用いて構造形態の最適化が行われているが, 図 1 のような両端支持の構造物の中心に組立機械などによる荷重がかかるときの一定重量応力最小化という設計目的から求められるものの多くは, 組立工程の最終段階である図 2 (d) の形態の最適化であり, そこへ到達するまでの過程は考えられていない。我々は, 以下に示す設計条件に従い, 構造物を図 2 (a)~(d) のように順次組立てることにより, 構造物の最終構造形態を決定する。

2.1 構造物のモデル 橋形構造物は, 図 2 で示されるように組立工程において常に先端に荷重 F がかかるはりとみなし, そのはりを成長させていくことにより, 中心まで組立てられる。取扱いを簡単にするために, この構造物について以下のような仮定をする。

- (1) 構造物は二次元平面内にあるとする。
- (2) 構造物は壁面で支持され, 各組立工程において常に上部最先端に y 軸方向の荷重 F がかかるものとする。
- (3) 各組立工程(Stage)は, L 個のセルで作られるユニットを結合または取外すという作業で構成される。
- (4) 構造物は, $M \times N$ のセル空間 (x, y) において, $(0, n)$ を壁面とし, $(1, n)$ の位置のセルが壁面で支持され, 固定端になるものとする。
- (5) セル同士は, セルの辺でのみ結合されるものとする。
- (6) 各セルは, すべて同一形, 同一材料とする。

2.2 遺伝子のコーディング 染色体(個体)は, 各組立工程を表す遺伝子とジョイント数を表す遺伝子によって表現される。図 3 の上部に各組立工程において付加したユニットと, その下部にそのときの構造物形態を組立工程順に示す。各組立工程は, L 個のセルで作られるユニットで構成され, セルが空間に占める xy 座標がそのまま遺伝子となる。また, セルを取除くという遺伝子は, x 座標を負にすることで表す。これが組立工程数 $\times L$ 個存在するため, 遺伝子は可変長となる。ジョイント数とは, 左と右から成長し, 結合した橋形構造物の中心 $(x=M)$ を構成するセルの総数であると定義し, 構造物の組立終了条件に用いる。図 3 で考えると, これは Stage 3 の $x=M$ におけるセルの総数であり, 2 である。組立工程において, 中心のセル結合数が予定されたジョイント数を満たしたと

Fig. 1 Structural model

Fig. 2 Model of assembling process of structural elements

Table 1 Expression of block assembling by chromosome

	Genes			
Stage 0	(1, 5)	(1, 4)	(1, 3)	(1, 2)
Stage 1	(2, 3)	(2, 4)	(2, 5)	(3, 5)
Stage 2	(3, 4)	(4, 4)	(4, 5)	(5, 5)
Stage 3	(5, 4)	(6, 5)	(6, 4)	(6, 5)
Joint Number	2

Fig. 3 Assembling model

きに、構造物は完成形(最終形態)をむかえる。本来この遺伝子は、構造形態には関与しないものであり、それなしでも構造物を構成することはできるが、未完成構造や組立過多といった主に初期世代における致死遺伝子を受け、個体群の取束性を向上させるために取束された。

以上のようにコーディングすることにより、図3のような組立工程を有する橋形構造物の遺伝子は、表1のように表せる。

3. 設計における評価

3.1 評価関数 各個体の適応度の評価に以下の式を用いる。ここで、総合評価関数式(1)には、組立工程を最適化する関数 f_1 と最終形態を最適化する関数 $f_2 \sim f_4$ が含まれ、非常に複雑な問題となる。例えば、構造物全体の応力を表す f_2 と構造物の重量を表す f_3 等は互いに反対の方向性を持つなど、すべての構成関数の最小化は不可能である。そこで本研究では、設計者の目的にあわせた各構成関数の重み係数 a_k を用いて、そのときの総合評価関数 F の最小値を求める。

$$F = \frac{\sum_{k=1}^4 a_k f_k}{\sum_{k=1}^4 a_k} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$f_1 = \sum_{k=0}^{\text{Stage}} \sigma_{\max(k)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$f_2 = \sigma_{\max}(\text{Stage}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$f_3 = \text{Total}(\text{Stage}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$f_4 = \text{Flat}(\text{Stage}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

f_1 : 各ステージにおける最大応力 $\sigma_{\max}$ の累積値。

f_2 : 最終形態における最大応力 σ 。

f_3 : 構造物全体を構成するセルの総数。

f_4 : 上端の平坦さ。

Stage: 組立工程数。

a_k : 重み係数

ここで、 f_1, f_2 の値は、有限要素法(FEM)⁽⁶⁾により求める。このとき、Mises の降伏条件を越えたものについては、崩壊を意味させ、適応度を下げる目的でそれらの値を 100 倍する。組立工程の最適化を意味する f_1 の値には、組立工程中における構造物が崩壊しないという構造保持の要求と組立工程数の最小化のため、各組立工程における最大応力値の累積値を採用した。また、最終形態の最適化を意味する f_2 は橋形構造物の強度を、 f_3 は構造物の材料費や重量を、そして f_4 は橋形構造物上部の平坦さをそれぞれ表す。

以上、上記のモデルにおいて、総合評価関数 F の値

Fig. 4 2-dimensional FEM element

を最小にするようなユニットの組立と橋形構造物の形態を求める。

3.2 FEM による計算法 本研究では、二次元構造物の一つのセルを正方形のセルでモデル化したため、有限要素は一辺が a の二次元四角要素とした。

まず、 $M \times N (= 12 \times 20)$ のフィールドにおける任意の位置 (m, n) のセルについて考える。図4に示すように、セルの節点に反時計回りに 1, 2, 3, 4 と番号をつけ、各節点の変位を $(u_i, v_i) (i=1, 2, 3, 4)$ と置くと、セル内の任意の点 (x, y) における変位は、

$$u = \sum_{i=1}^4 u_i N_i(x, y), v = \sum_{i=1}^4 v_i N_i(x, y) \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表せる。ここで N_i は

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{(x-a)(y-a)}{a^2}, N_2 = \frac{-x(y-a)}{a^2} \\ N_3 &= \frac{xy}{a^2}, N_4 = \frac{-(x-a)y}{a^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で示される内挿関数であり、材料を等方性であると仮定すると、応力-ひずみ関係式は、

$$\sigma = D \epsilon \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ν : Poisson Ratio

E : Young Modulus

となる。セル内のひずみ ϵ は、式(6)より、

$$\epsilon = A u \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここで、

$$u^* = [u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, u_4, v_4]^T \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

となるような変位ベクトル u^* と、マトリックス N を導入すると、ひずみ ϵ は、

$$\epsilon = A N u^* \equiv B u^* \quad \dots\dots\dots (14)$$

と表せる。また、任意の位置の要素の要素剛性マトリ

ックス k は,

$$k = \int_V B^T DB dV \dots \dots \dots (15)$$

であり、各節点にかかる体積力と各節点における変位 u^* の関係は、

$$f^* = ku^* \dots \dots \dots (16)$$

となる。これをその工程での構造全体に拡張すれば、以下の式を得る。

$$F^* = KU^* \dots \dots \dots (17)$$

ここで、 F^* は、図3で示される外力ベクトルであり、 U^* は、すべての有限要素の節点の変位ベクトルである。 K は、要素剛性マトリックス k で合成される全体剛性マトリックスである。

以上により、式(8)から、任意の要素(m, n)における節点の応力 σ が求められる。この計算をフィールド内すべての要素について行い、最大応力 $\sigma_{\max}$ を求める。この $\sigma_{\max}$ を、各組立工程において累積したものを f_1 [式(2)] とし、最終形態においては f_2 [式(3)] とする。

3・3 初期集団の生成 まずはじめに、ジョイント数をランダムに決定する。次に、フィールド内の任意の点(x, y)にセルを生成する。このとき、このセルが固定端もしくは他のセルと結合できなかった場合は、図5の(a)で示されるように、セルを x 軸の負の方向にシフトし、浮遊しないようにする。また、すでにその座標にセルが存在する場合はセルを x 軸の正方向にシフトし、セルの重複を避ける。次に、図5の(b)で示されるように、その前後左右4セル内に次のセルを生成する。このセルについても上記と同様の補正を行う。これを L 回繰返して1ステージ L 個のセルを生成し、図5の(c)で示されるようなユニットとする。この作業をステージ単位でジョイント数を満たすまで繰返すことにより、初期個体とする。

以上を個体数だけ繰返し、初期集団を発生させる。

3・4 淘汰と増殖 本研究では、式(1)で示されるように、総合評価関数内のそれぞれの構成関数が複雑に干渉しあい、非常に多峰性の高い解空間をもっていると考えられる。このような場合、個体群は初期

Fig. 5 Process of structural connection development

収束しやすく、ある局所解に陥りやすい。そこで我々は、探索可能な空間を広げ、初期収束を避けて各構成関数 $f_1 \sim f_4$ の影響を反映した地域的な遺伝子を残し空間探索度を上げるために、より地域的な生殖法 (Local Reproduction Method) を提案する。図6のように互いに逆向きに干渉しあう関数 $f_a(x)$ と $f_b(x)$ によって構成される総合評価関数 $H(f_a(x), f_b(x))$ の最小値(または最大値)を求める場合、一般的淘汰により生殖を行えば、初期集団では総合評価値のよい確率の高い図6のC領域の遺伝子が選択されやすく、極小値の空間の狭い図6のAやBの領域に存在する遺伝子は淘汰されやすい。このため、図6のCの領域に初期収束しやすく、最適解の探索率は低くなる。よってこのような場合には、構成関数 $f_a(x)$, $f_b(x)$ を反映した遺伝子による総合評価関数 H へのアプローチが必要となる。次に、この具体的手法を示す。

図7に、地域的な生殖法による次世代の集団の生成図を示す。まず始めに、トーナメント方式により評価値のよい順に全体の10%を選択する [図7(A)]。続いて40%を総合評価関数 F を用いた普通のルーレットルールで選択し [図7(B)]、残り50%を以下に述べるローカルなルーレットルールで選択する [図7(C)]。まず、総合評価関数 F 内のそれぞれの構成関数 f_k を重視した $F'_{(k,n)}$ によるルーレット板を各構成

Fig. 6 Picked region by Local Reproduction

Fig. 7 Group of next generation by Local Reproduction

関数ごとに用意する [式(19)]. ここで, $F'_{(k,n)}$ の板を用いたルーレットで個体 n が選択される確率 $P_{(k,n)}$ は, 式(18)のようになる.

$$P_{(k,n)} = \frac{F'_{(k,n)}}{\sum_{p=1}^{POP} F'_{(k,p)}} \dots\dots\dots (18)$$

$$F'_{(k,n)} = e_{(g)} \left(\sum_{i=1}^4 \alpha_i f_i - \alpha_k f_k \right) + \alpha_k f_k \dots\dots\dots (19)$$

$$e_{(g)} = \frac{1}{1 + \exp \left\{ -20 \left(\frac{g}{G} - 0.25 \right) \right\}} \dots\dots\dots (20)$$

$e_{(g)}$: 各評価値における重み関数

g : 世代数

n : 個体番号

G : 全世代数

m : 各評価値番号

POP : 個体数

式(20)は Neural Network などでも用いられるシグモイド関数であり, 世代が進むにつれて 0.0~1.0 まで変化し, 図 8 のようになる. これにより, 構成関数 f_k を重視した評価値 $F'_{(k,n)}$ は, 初期世代では f_k の影響を強く受け f_k の値のよいものを次世代の個体として選択するようになる. また, 世代が進むにつれて総合評価的効果が強くなり, 最終世代では一般的なルーレットルールを用いた生殖と同様となる. このような地域的な生殖法と普通の生殖法を 100 回のシミュレーションにおいて比較実験した結果, 平均的に約 10% の適応度の向上が見られた. このことは, この方法が普通の生殖法に対し, 局所解に陥ることが少なく, 最適解により収束しやすいことを意味しており, 評価関数における構成関数がトレードオフの関係にあって局所解に初期収束しやすい問題に対しては, 効果のある方法であるといえる.

3.5 交差 交差には, Cut & Splice, 最終形一直線交差の二つを用い, それぞれをランダムに選択するようにした.

Cut & Splice は, 図 9 に示すような遺伝子形で行う交差で, 常にステージ単位で行うものとする. この交差では遺伝子の長さが変化するため, セルが構造物の

中心まで届かず, 致死遺伝子となるものが現れる. このようなものについては, 後述する“致死遺伝子”の項に示す方法で復活させるものとする.

また, 本研究においては, Cut & Splice だけでは, 巡回セールスマン問題における交差の問題(一方の親の特徴しか継承しにくいという問題)と同じような問題が発生し進化しにくい. 最終形状で交差しその後に組立てを決定するという最終形一点交差をも取入れた. これは, まず選択された親 A と親 B を図 10 で示すように, ランダムな直線をもって二次元的に交差させ, その後, ユニットの整合性をとりながら組立てていくという表現形を用いた交差である.

交差確率 $C(t)$ には, 個体群の収束率の変化に伴い確率が変化する以下の式を用いた.

$$C_{(t)} = 0.3 \left(0.5 + 0.5 \frac{F_{\min}}{F_{\text{ave}}} \right) \dots\dots\dots (21)$$

$F_{\min}$: その世代における最小評価値

F_{ave} : その世代における平均評価値

これは, 多様性のある初期世代においては, スキーマを破壊するだけのむだな交差は避け, 世代が進み局所探索に入ったときに交差数を増やして山登りの速度を上げるという効果を期待している. 以上により, 交差確率 $C(t)$ は, 世代数 t の増加や個体群の収束率の変化により, 一般的に 0.2~0.3 の間を変化する.

3.6 突然変異 突然変異率 $M(t)$ には, 世代数と個体群の収束率の変化に伴い確率が変化する以下の式を用いた.

$$M_{(t)} = 0.03 \left\{ 0.5 + 5.0 \left(\frac{g}{G} \right)^6 \right\} \frac{F_{\min}}{F_{\text{ave}}} \dots\dots\dots (22)$$

これにより突然変異率 $M(t)$ は, 世代数 t の増加と,

Fig. 9 Procedure of Cut & Splice crossover

Fig. 10 Procedure of final structure crossover

Fig. 8 Sigmoid function

個体群の収束状況に伴い、一般的に図 11 のように変化する。ここで、突然変異が確定した個体は、互いに独立に (A) 100%、(B) 50%、(C) 50% の確率で、それぞれ以下の 3 種の突然変異パターンを選択する。

(A) Mutation-A: ランダムな位置のセルをその近傍 8 セル内に移動させる突然変異。

(B) Mutation-B: ランダムに選んだ二つのステージ内の遺伝子をすべて交換 (ユニットを交換) する突然変異。

(C) Mutation-C: 図 12(a) の点線で示されるような、二次元フィールドで組立てられた構造物のランダムなある範囲に対し、遺伝子の y 軸値に ± 1 でゆらぎをかけ、図 12(b) のようにセルをスライドさせる突然変異。これは、徐々に形態を整えていくことにより、アニーリングに似た効果をもつ。

以上により、解に多様性のある初期世代では突然変異率を低めにして無駄に探索空間を広げることを防ぎ、その後徐々に上げていくことにより効率のよい探索空間の調整を行う。また、後期世代においては、GA が探索している局所解近傍での突然変異個体 (Mutation-A や Mutation-C のような、ビルディングブロックのある程度確立した後期世代においては、現在探索している山を離れることのないような微小な変異をもつ突然変異個体) を増やすことにより、局所解への山登りを高速化する効果を得る。

3・7 致死遺伝子の防止 交差や突然変異の過程において、セル同士が辺で結合されない浮遊構造をもつ遺伝子や、同一領域内にセルがいくつも重なってしまう遺伝子が生成される場合がある。このような構造物として成立しない遺伝子 (致死遺伝子) を次のように変更する。浮遊構造については図 5 (a) で示したような x 軸の負の方向にシフトさせ、重複構造について

は x 軸の正の方向にシフトさせる。ここで、 x 方向のシフトによりフィールドの範囲を超えてしまうものは、セルの重複を許すこととする。この場合、1 ステージが L 個以下のセルで構成される遺伝子が生成される。また、ジョイント数条件を満たさない遺伝子については、ステージ数を増やして新たにユニットを加えるという作業を条件を満たすまで繰り返す。これにより、遺伝子はより広い解空間を探索することになり、収束性の向上が期待される。以上、交差や突然変異によって選択されたすべての遺伝子に対しこれらの作業を行った。

4. シミュレーション

式 (1) に用いる各係数 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ の値を表 2 に示す。シミュレーションには、Pattern 1: 最終形状における応力を重視し係数 α_2 の値を大きくしたもの、Pattern 2: 組立工程中の応力を重視し係数 α_1 の値を大きくしたもの、Pattern 3: 組立と最終形状の両面における応力を考慮したもの、の 3 パターンを用いた。

以上を基に、個体数 $POP=200$ 、世代数 $G=300$ として各 100 回シミュレーションを行う。ここで個体数と世代数は、探索空間の範囲や世代による進化率等を考慮して予備実験した結果上記のように決定した。

Table 2 Weighting parameter values

<i>Fitness Weight</i>	α_1	α_2	α_3	α_4
<i>Pattern 1</i>	0.0	5.0	1.0	2.0
<i>Pattern 2</i>	0.2	0.0	1.0	2.0
<i>Pattern 3</i>	0.2	5.0	1.0	2.0

Table 3 Minimum fitness values for Pattern 1, 2 and 3 (100 trials)

	<i>Fitness</i>		
	<i>Average</i>	<i>Best</i>	<i>Worst</i>
<i>Pattern 1</i>	10.4	9.50	11.0
<i>Pattern 2</i>	8.98	7.12	11.5
<i>Pattern 3</i>	13.1	12.7	13.4

Table 4 Component fitness values for Pattern 1, 2 and 3 (100 trials)

	<i>Local Fitness</i>			
	$f1$	$f2$	$f3$	$f4$
<i>Pattern 1</i>	(17400)	15.3	34	0
<i>Pattern 2</i>	91.2	(32.9)	30	0
<i>Pattern 3</i>	128	13.8	47	2

Fig. 11 Mutation rate in terms of generation

(a) Before Mutation-C (b) After Mutation-C

Fig. 12 Explanation of mutation C

5. 結 果

Pattern 1, 2 および 3 における 100 回のシミュレーション結果を左側からそれぞれ平均, 最も評価値のよい解, 最も評価値の悪い解として表 3 に示す。次に, 各パターンにおける各構成関数値 $f_1 \sim f_2$ を表 4 に示す。ここで, 括弧内の数字は係数が零のため評価関数に関与していないことを表す。また, 各パターンにおける GA による最適解と, 全体の左側 1/2 の領域における主応力線図をそれぞれ図 13~15 に示す。

組立・形態の同時最適化という非常に解空間の広い問題にもかかわらず, 表 3 の評価値において 100 回の試行に対する分散値は小さく, GA で求めた解の信頼性は高いといえる。

Pattern 1 は, 組立工程を考慮しない従来型であるため, 最小重量平均応力という概念から, 構造物内に

空間を有する三角形トラス構造となっている。この構造は, 材料力学的構造物の形態最適化という面では, ほぼ最適解と呼ぶことができるであろう。しかし, ここで組立工程中について考えると, この構造物は, 図 13 の Stage 1 に見られるように曲げ剛性の小さい片持ちばりとなっており, はりの先端の荷重 F により非常に大きな応力が発生している。よって, 生産性, 安全性の観点から見れば, 最適解であると呼ぶことは難しい。

Pattern 2 は, 組立工程の最適化であるので, 許容範囲内応力においての組立工程数の最小化を行っている。また, 組立工程中において最も応力が大きくなるのは構造物が両端支持される直前の片持ちばりの状態のときであり, この状態におけるはりの長さを短くすることが組立工程の最適化につながる。本シミュレーションでは, 8 Cells/Stage としたために図 14 に示さ

Fig. 13 Optimal topology and assembling process obtained by GA (down) and principal stress distribution for the test Pattern 1 (up)

Fig. 14 Optimal topology and assembling process obtained by GA (down) and principal stress distribution for the test Pattern 2 (up)

Fig. 15 Optimal topology and assembling process obtained by GA (down) and principal stress distribution for the test Pattern 3 (up)

Fig. 16 Examples of topology and assembling process obtained by GA for the test Pattern 3
[A] : $F=13.3$, B) : $F=13.3$, C) : $F=13.4$

れるような形状が多く見られたが、1ステージにおけるセル数を変えることによりほかにもさまざまな組立工程が見られると思われる。例えば、8 Cells/Stageの条件のために生成不可能であった図 13 のような組立工程を考慮しない最適解も、16 Cells/Stage にすることにより生成可能になる。

組立工程と形態の両面からの最適化である Pattern 3 では、図 15 に示すように、最終形状においては最小重量で応力最小化を行い、組立工程中のどの段階においても許容範囲内の発生応力で組立工程数の最小化を行っている。最終形態における最大応力値を比較すると、Pattern 3 の $f_2=13.8$ という値は、Pattern 1 の $f_2=15.3$ とほとんど変わらず、形態最適化という概念において目的は達成されているといえる。また、組立工程中の累積最大応力値 f_3 を比較しても、Pattern 3 の $f_3=128$ という値は、Pattern 2 の $f_3=91.2$ に対し大差はない。以上から、組立工程と形態の同時最適化が成功したといえることができる。

また、最後に Pattern 3 における特徴的な解の例を図 16 に紹介する。ほとんどの解が、図 16 A), B) のように片持ちばりのような形状を徐々に成長させて結合するという組立工程を有する。また、図 16 C) のように最小組立工程数で左右を結合し、安定形態としてから最終的に形態を整えていくという解も存在する。この方法を用いると極めて Pattern 1 に近い解が得られるが、組立工程数が増えるという欠点があり全体の評価はあまりよくない。

6. 結 言

本研究では、橋形構造物の組立最適化と形態最適化という互いに干渉し合う目的関数の最小化問題を GA を用いて解く方法を検討し、その具体的設計法を構築した。これにより、以下のことが明らかにになった。

(1) 目的関数に組立工程を含めることにより、組立工程の全段階で構造的に安定でしかも最適組立工程のうちに組立つ最適構造形態を求めることができた。

(2) 本問題のように、構造物を構成する要素の組合せが膨大な解空間においても、地域的生殖法を用いた GA を適用して求めることにより精度よく最適構造形態を得ることができた。

(3) 上述のような組立行程・形態の同時最適化問題のように、目的関数が複雑な多次元最適化問題に対する GA の有効性を示した。

本研究における同時最適化は、現実問題を抽象して、その最適化の特性がよりよく見られるように、評価関数における構成関数を四つに限って行った。より現実問題へのアプローチとしては、評価関数に現場のニーズに応えるような関数を新たに組み込むことが考えられる。

文 献

- (1) 古口日出男・渡辺浩・矢田敏夫, 遺伝的アルゴリズムを用いた二次元弾性逆解析, 機論, 60-572, A(1994), 1029-1034.
- (2) 坂本二郎・尾田十八, 遺伝的アルゴリズムを利用した最適トラス形態決定法, 機論, 59-562, A(1993), 1568-1573.
- (3) 朝山正輝・長谷川浩志・川面恵司, GA を利用した応力制約下におけるトラス構造の寸法最適化に関する一数值実験, 機論, 62-597, A(1994), 1234-1241.
- (4) Hara, F. and Kikuchi, K., Topology Optimization by Genetic Algorithm for Smart Structure Element, Fifth Int. Conf. Adaptive Structures, (1994), 439-449.
- (5) 安居院猛・長尾智晴, ジェネティックアルゴリズム, (1993), 昭晃堂.
- (6) 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム(1993), 産業図書.
- (7) Holland, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial System*, Ann Arbor, (1972), MI: University of Michigan.
- (8) Tong, P. and Rosettens, J. N., エンジニアのための有限要素法, (1983), 共立出版.