

遺伝的アルゴリズムによる制振構造物の創生的基本設計

林 康 裕
(技術研究所)
護 雅 史
(技術研究所)

§1. はじめに

近年、構造物の安全性と快適性の向上のために、種々の制振機構が考案され、これらを内蔵した構造物が設計・建設されるようになってきた¹⁾。ただし、現在提案されている数多くの制振機構の中からある制振機構を選択し、それを有効に作動させるための設計は、(半)経験的または試行錯誤的に行われているのが現状であるといえる。しかし、制振構造物が持つ通常の構造物に対する動特性の優位性やコストメリットを十分なものとするためには、制振機構、制振装置の特性や配置、構造物の架構形式や部材寸法等のすべてを、建設しようとする構造物の与条件に応じて適切に決定することが望ましいと考えられる。ただし、このような設計は、一般に設計変数の探索領域が非常に広くなり、性能のはる空間も多峰性と不連続性を有したものとなってしまう、非常に困難なものとなってしまう。これは、上述のような設計問題が、寸法決定問題とともに位相(形態)決定問題としての側面を持っている点に大きく依存している。

本論文では、与えられた制約条件の下に多種多様な設計変数を組み合わせて、より適正な制振構造物の基本設計を行うための方法論として、遺伝的アルゴリズム²⁾(Genetic Algorithm: 以下GAと呼ぶ)に基づいた方法を提案する。なお、本論文では、その設計行為を創生的基本設計と呼ぶ。

GAは、計算機学者のJ.H.Holland³⁾が生物の遺伝機構を模倣した人工進化システムとして提案したのが最初であり、主に組合せ論的爆発を起こしている問題に対して大域的な探索を行うことができる手法(あるいは最適化手法)として工学的な応用がなされている。ただし、GAを構造設計問題に適用している例は多くない⁵⁻¹⁴⁾。特に、構造物の位相決定問題に適用した研究のうち、動的荷重に対する応

答性能を向上させるという目的に使用した例としては宇宙構造物の能動的制振装置の最適配置問題に適用した例¹¹⁻¹⁴⁾があるだけで極めて少なく、地震動のような不規則な外乱を受ける建築構造物を対象とした研究を筆者は知らない。本論文で提案する方法は、地震動に対する応答を抑制する受動的制振構造物の基本設計にGAを用いたものである。

しかし、GAは、あくまでも確率的な探索を行うもので、必ずしも最良な解を探索することはできない。さらに、設計変数の多様な組合せによって、同等に優れた性能を有する制振構造物が実現される可能性がある。したがって、GAによって得られた「最良制振構造物」自体に重要な意味があるとは考えにくい。そこで、本論文では、既往のGAに関する論文とは異なるが、GAを最適化手法とは考えずに、所定の性能を満足する制振構造物の候補集合の創生手法であるとみなし、得られた制振構造物候補集合の分類や分析を樹形モデルによって行い、その結果を基に制振構造物の仕様決定を行うという設計プロセスを考えた。

§2. 創生的基本設計

2.1 創生的基本設計の概要

創生的基本設計とは、コンピュータによって設計者には困難な大域的な探索を行って、制振構造物候補集合の創生を行い、その制振構造物候補集合の分類・分析情報を基にして、設計者が制振構造物の基本仕様の決定を行う設計行為である。そして、設計者の経験や知識、創意工夫を中心とした通常の設計行為を補助する役割をするとともに、制振構造物のアイデアを創出することを目的としている。

まず、創生的基本設計においては、設計者が最も重要視する設計性能を基準として、制振構造物候補

集合の創出をGAを用いて行う。しかし、制振構造物の要求性能は、応答変位や応答加速度など多様であり、必ずしも同時に最小化できるとは限らない。また、同程度の応答抑制効果を有する構造物は、全く異なった制振装置や構造形式の組合せによっても実現できる可能性がある。さらに、GAによって得られた制振構造物候補集合が、お互いに異なるタイプなのか同じタイプなのか、また、同じタイプと考えられてもどのような特徴を持っているのか、GAによる探索だけでは分からず、別途分析が必要である。すなわち、制振構造物候補集合に対する分類・分析・評価を行うための方法論が必要となる。既往のGAに関する論文では、最適解を求めるための手法としてGAを位置づけているためか、上述のような分類・分析・評価の方法については言及されていない。本論文では、樹形モデルを用いて、得られた制振構造物候補集合の分類と特徴抽出を試みる。また、GAによる制振構造物候補集合の創出は、設計者が最も重要であると判断した制振性能 J だけを目的関数として行うので、その後で、他の制振性能 J_i も含めた制振構造物候補集合の評価を行い、最終的な基本仕様の決定に役立てる(図-1)。

2.2 解析システムの構成

制振構造物候補集合の創出は、図-2のハッチ部分に示すような解析システムGAOS3N(Genetic Algorithm based Optimization System for 3-dimensional Nonlinear building)によって行う。GAOS3Nは、(A)探索ルーティンと(B)構造物のモデル化と性能評価ルーティンの2段階により構成されている。(A)については、GAの汎用プログラムGENESIS¹⁶⁾の改良版(GAucsd)を用い、(B)については、汎用の3次元質点系の時刻歴非線形応答解析プログラムDAC3N¹⁵⁾を用いている。GAとDAC3Nの間では、a) 設計変数の遺伝子型から表現型への変換、b) DAC3Nへの入力データ(解析モデル)の自動生成、c) 応答解析、d) 目的関数値の算定、の順で処理が実行される。

また、制振構造物の与条件に関する応答解析プログラムの入力データ部分は、プロトタイプデータとして予め作成しておく。そして、設計変数に関する入力データ部分は変化するので、GAから受け渡された遺伝子型を基に自動生成し、プロトタイプデータを付け加えた後、応答解析の入力データとして用いる。一方、各制振構造物の各種応答結果は、その

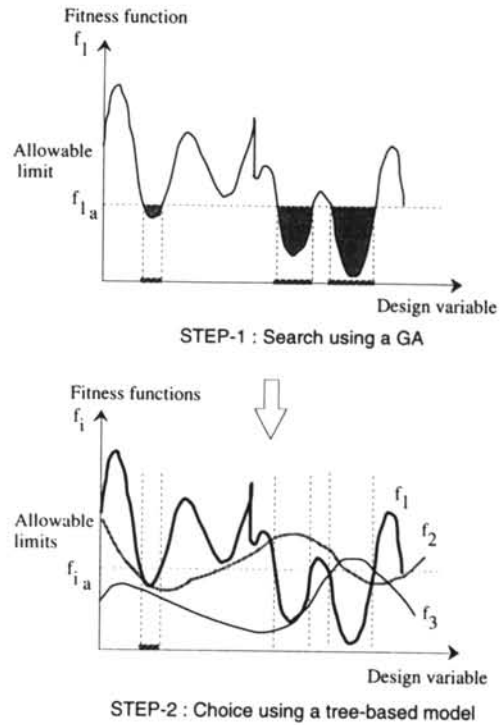


図-1 制振性能の評価手順

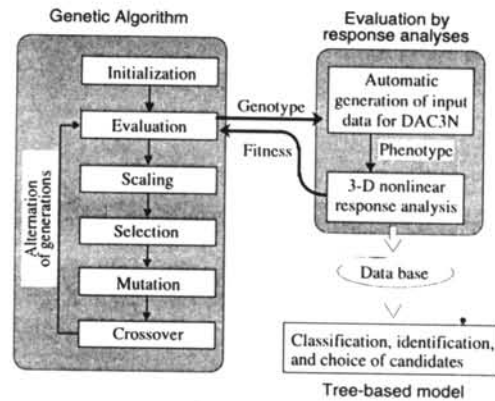


図-2 創生的基本設計システム

構造物の設計変数とともにファイルに出力し、樹形モデル^{17,18)}による分類と分析に用いる。

2.3 遺伝的アルゴリズム

GAの詳細は文献^{2,19)}に譲るが、ここでは、GAの概略フローを図-3に示し、基本的なアイデアを説明する。GAでは、2進数化された設計変数を繋げて1連の2進数(遺伝子型)をつくり、これを記憶

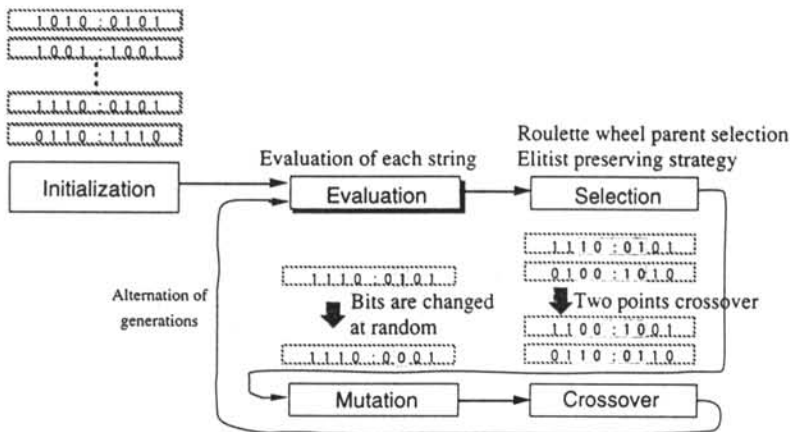


図-3 遺伝的アルゴリズム

		VALUE	PROPERTY
Node		(a) Weight, Rotational inertia (b) Coordinate (or Position)	(f) Constraint condition (g) Reduction
Element	Spring, Beam Dashpot, Truss	(c) Stiffnes (Dimensions or properties) (d) Damping factor	(i) Constraint condition (Pin or Rigid) (h) Connection or position of nodes (j) Damping type
Hysteresis rule	Bilinear Trilinear	(e) Yield displacement or force Ultimate displacement and strength	-

表-1 設計変数の例

する。これを遺伝子と呼ぶ。すなわち、一連の遺伝子は、ある制振構造物(表現型)を表現している。そしてまず、遺伝子をランダムに複数個初期生成する。その数を個体数 N と呼び、その集まりを世代と呼ぶ。各世代の遺伝子は、並列的に評価され、それらの目的関数値 J に基づいて、選択、突然変異、交叉というGA特有の操作を行って、次世代の N 個の遺伝子が再生成される。この評価から再生成までのループは、目的関数値が十分に小さくなって停留するまで繰返す。ここで、選択とは、各遺伝子の目的関数値 J に基づいて、目的関数値が小さい遺伝子ほど高い点数 J_c を与えるようにスケーリングした後、その点数に比例した確率で次世代に生き残る遺伝子を定める操作である。選択を行う時、世代交代率 G を次世代で淘汰される遺伝子の確率と定義すれば、 $N \cdot G$ 個の遺伝子が入れ替わり、残りはそのまま生き残る。突然変異とは、2進数化された遺伝子のビットを反転する(0と1を入れ替える)操作であり、遺伝子中の各ビットに対して突然変異確率 P_m に従って反転させる。また、交叉とは、交叉確率を P_c とした時、 $N \cdot P_c$ 個の遺伝子をランダムに選び出してペアリングを行い、その2つの遺伝子の一部を交換す

る操作である。本論文では、二点交差を用いている¹⁹⁾。

2.4 制振構造物のモデル化

まず、構造設計上、予め定まっている部分については、数学モデルとして直接モデル化する。一方、各設計変数については、その可能な値または種類(表現型)を網羅し、それらの特性の変化に従って順に番号をふる。この番号をランク I と呼ぶ。また、ランキングされた各設計変数は、隣り合うランク間のハミング距離を1とするGray codeを用いて2進数にコーディングする²⁾。そして、図-4(d)のように、これらの2進数化された設計変数を1連の2進数に合成して遺伝子を構成する。1つの遺伝子の中には、構造部材の断面や配置などを表す部分と、制振装置の仕様や配置などを表す部分とが渾然一体となっており、1つの遺伝子が1つの制振構造物を表現している。

ここで、設計変数として考え得るものの例を整理して表-1に示す。設計変数としては、節点、要素、非線形履歴特性に関する値、もしくは、属性が考えられる。まず、値を設計変数とする場合の例として

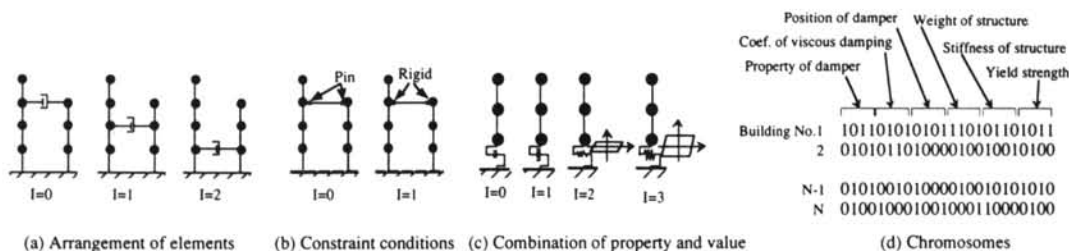


図-4 典型的な設計変数と遺伝子へのエンコーディング

は、
 (a)質点や要素の重量や回転慣性、
 (b)節点の座標値 (はり要素やトラス要素などでは材長を決めることができる)、
 (c)要素の剛性値 (はり要素の場合は、断面積、断面二次モーメントやヤング定数などの物性)、
 (d)減衰定数、
 (e)非線形履歴特性の種別と特性値、

などが挙げられる。これらの設計変数は、取り得る値を網羅して、その値の変化に従ってランキングする。後述の例題では、(c)ばね要素の剛性値 (K_{mi}) や (e)Bilinear型の非線形履歴特性を有する制振装置の特性値 (K_{sl} , F_{y1}) を設計変数として採用し、それらをランキングした例 (I_{mi} , I_{sl} , I_{y1}) を示している。

- また、属性に関する設計変数としては、
 (f,i) 節点や要素の支持条件や境界条件、
 (h) 要素が結ぶ節点の組み合わせ、
 (g) 自由度の縮合条件、
 (j) 減衰の種別

(Rayleigh減衰、歪みエネルギー比例減衰等)、などを選択することができる。これらの属性に関する設計変数についても、その属性の変化に従ってランキングする。例えば、(f)の場合には、節点の自由度の有無をそれぞれ0,1により表現し、(i)の場合には材端を剛接とするかピンとするかをそれぞれ0,1で表現する(図-4(b))。

一方、属性と値を組み合わせたものをランキングすることも可能である。例えば、図-4(c)のように、制振装置としてオイルダンパー(ダッシュポット要素)と履歴ダンパー(非線形形のばね要素)のどちらを選択するか、そして、その制振装置の特性をどのような値とすればよいか、を直接ランキングすることも出来る。

ここで、(b)節点の座標、(f,i) 節点や要素の支持条件や境界条件、(h)要素が結ぶ節点の組み合わせ、

(g)自由度の縮合条件などを設計変数とすることにより、架構形式(さらには形態)も決定することができる。すなわち、寸法設計だけでなく位相設計も行うことができる。たとえば、(h)を用いれば、図-4(a)のように制振装置の配置を決定することができる。また、後述の例題においては、自由度の縮合の機能を用いた例を示す ($I_{sl}=16$ の場合)。

2.5 入力地震動と目的関数

まず、制振構造物の性能評価には、当該地点での地域特性が反映された設計用入力地震動を用いる。レベル2相当の地震動としてすでに提示されているものとしては、文献^{20,21)}によるものがこれに相当する。すなわち、当該地点に関して、すでに提案されている種々の方法で作成した模擬地震波のスペクトルをほぼ包絡するように作成された設計用地震動スペクトルを基に、波形を作成したものである。上記のように提示されていない地点についても、想定サイトの条件(構造物の与条件、地盤条件、震源情報等)を十分吟味した上で設計用入力地震動を設定する^{22,23)}。GAにおける探索では、計算手法上の限界から、上記のように設定された設計用入力地震動のうち1波だけを用いる。したがって、地震動の違いによる制振構造物の応答のばらつきや安全性評価は、樹形モデルによる分類や分析を行った後、最終的に制振構造物の基本仕様を決定する前に行っておく必要がある。

一方、通常の構造物の動特性適正化においては、地震時の損傷の集中を回避するような目的関数が採用されてきた。しかし、制振構造物のように、制振装置を設置して応答を低減することを目的とした構造物の場合には、構造物の損傷が集中しないように分散するだけではなく、分散された損傷を最小とする必要がある。また、制振装置や構造部材は、その特性に応じて許容される変形量が異なっているため、損傷を表す尺度として次元量である変形を用いる

のではなく、構造物各部の変形を対応する許容変位で除した無次元化変形量を用いることが望ましい。本論文の数値解析例で用いた目的関数 J は、応答解析の結果から得られた各相対変形のr.m.s.値を、あらかじめ設定した許容値 d_0 によって除した無次元化変形量 d_j^* を算定し、その最大値を最小化するように、次式のように定めた。

$$J = \max_j \{d_j^*\}$$

ここで、最大応答変位や、加速度や応力等の他の応答量 X_{ij} についても、構造物各部 j の仕様に応じて設定した許容値による無次元化応答量 X_{ij}^* を用いて、次のように目的関数を設定することが可能である。

$$J_i = \max_j \{X_{ij}^*\}$$

本論文では、制振構造物候補集合の探索には J を用い、最大層間変位の無次元化応答量の最大値 J_i も参考にして、制振構造物の基本仕様を決定している。

2.6 樹形モデル

樹形モデル^{17,18)}は、対象とする空間をできる限り均質とみなせるように2分割を繰り返していくことによって作られるモデルである。本論文では、GAOS3Nによって評価した制振構造物を対象として、これを同じ様な性質を有する制振構造物の部分集合に分割する。数学的には、制振構造物の性能(数値あるいはこれを因子化したもの)を反応変量 y 、設計変数を予測変量 x とした時、予測変量 x の値を与えたときの反応変量 y の条件付き確率を階段関数で推定することになる。そして、分割された部分集合と分割条件を分析することによって、どのような条件でどのような性能を持った制振構造物を実現できるかを判断することが可能となる。以下では、文献¹⁸⁾に基づき、分割方法について簡単に説明する。

樹形モデルでは、対象観測データを1つの節点で表し、これを2つの節点に再帰的に分割していくことにより樹を形成する。対象とする全観測データを示す節点は特に根元と呼ばれる。節点の均質度を表す尺度としては後で定義されるような尤離度を用いる。この尤離度が小さい程均質であり、尤離度の変化がもっとも大きくなるように分割が行われる。例えば、制振構造物の性能が所定の基準を満足するかどうか、言い換えれば、目的関数値 J が許容値 J_0 以下である場合を1、そうでない場合を0として、2水準の反応変量を考える場合には、反応変量は因子変量となり、樹形モデルはデータを分類する分類樹となる。そして、反応変量の分布モデルは二項分布

に従うものとし、 $J < J_0$ となる確率を p とすれば、ある反応変量 y_1 に対する尤離度 $D(\mu; y_1)$ は、

$$D(\mu; y_1) = -2 \{y_1 \log(p) + (1-y_1) \log(1-p)\}$$

で与えられる。一方、反応変量を数値変量である目的関数値とする場合には、樹形モデルは回帰樹となる。この時、反応変量の分布を平均値 μ 、分散 σ^2 の正規分布と仮定すれば、尤離度は

$$D(\mu; y_1) = (y_1 - \mu)^2$$

で与えられる。 μ の最小尤離度推定量 $\bar{\mu}$ は、分類樹の場合には各水準の相対出現度数のベクトル $\bar{\mu} = (\bar{p}, 1 - \bar{p})$ 、回帰樹の場合には y_1 の平均値となる。そこで、各節点の尤離度を

$$D(\bar{\mu}; y) = \sum D(\bar{\mu}; y_i)$$

として定義する。この尤離度は反応変量がすべて同じであれば0で、ばらつきが大きくなるにつれて増大する。したがって、元の節点の尤離度に比べて分割後の2つの節点の尤離度の和が最も小さくなるように分割が行われる。

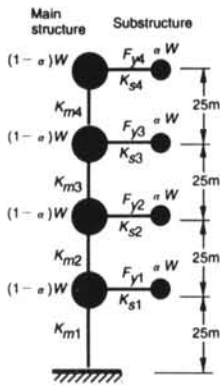
分割の停止は、節点の尤離度が根元の尤離度のある一定値以下になるか、節点に含まれる観測数があるあらかじめ定めた数より少なくなった時に行われる。しかし、実際には、樹の成長(観測データの分割)は特に制限せずに行い、成長が終わった後で各節点の尤離度などを参考にして樹の剪定を行い、樹形モデルの性質が簡明になるように加工する。

§ 3. 数値解析例

3.1 対象構造物と設計変数

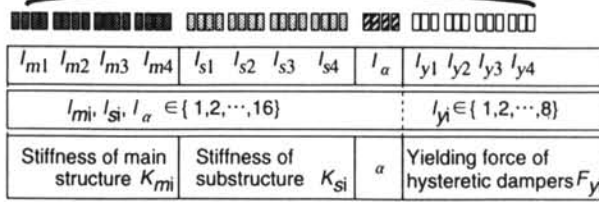
構造物のモデル化とその設計変数の2進数へのエンコーディングの方法を図-5に示す。対象構造物は、図-5(a)に示すように高さ100mの超高層のメガストラクチャーで、その主構造体を25m間隔の4つの質点で表わしている。4つの質点のそれぞれには副構造体を表す質点が1つずつ取付き、その間は、図-5(b)に示すようなBilinear型の履歴特性を有する制振装置によって連結されている。制振装置の弾性限界変位は1mmとする。主構造体の各質点間の許容相対変位 d_{ami} は25cmで、副構造体-主構造体間の制振装置の許容相対変位 d_{asi} は50cmと設定した。また、副構造体と主構造体の重量の和 W は10,000ton、主構造体の減衰定数は振動数に依存しないように歪エネルギー型減衰として2%を与えた。

設計変数は、主構造体の剛性 K_{mi} 、制振装置の剛



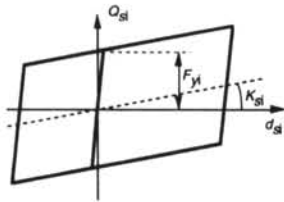
(a) Analysis model

Chromosome 48 bits

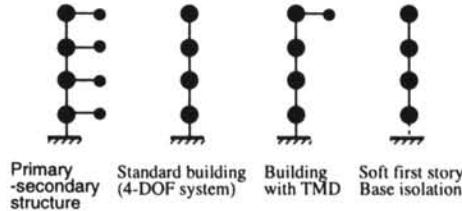


$$\begin{cases} K_{mi} = 2500 \cdot (l_{mi} + 5) & (\text{ton/m}) \\ K_{si} = 400 l_{si} & (\text{ton/m}) \quad (\text{for } l_{si} \neq 16) \\ \alpha = 3 l_{\alpha} / 100 \\ F_{yi} = 15 l_{yi} & (\text{ton}) \end{cases}$$

(c) Encoding of design variables



(b) Hysteresis rule of dampers



(d) Possible control buildings

図-5 制振構造物のモデル化

性 K_{si} と降伏耐力 F_{yi} 、主構造体と副構造体の質量比 α であり、図-5(c)に示すようにランキング(ランク値: l_{mi} , l_{si} , l_{yi} , l_{α})を行った後に2進数にコーディングする。ただし、 $l_{si}=16$ の時、主構造体と副構造体の2つの質点は1つの質点に縮合される。そして、縮合のされ方により、例えば、図-5(d)のような様々な制振構造形式を表現することができ、それらの中から応答を低減できる(制振)構造形式を選択することとなる。なお、制振構造物の性能比較のために、 $l_{si}=16$ として、4質点モデルで表される通常構造物の場合についても計算を行った。

制振構造物の性能を評価するための入力としては、以下のような手順に従って人工地震波を30波作成し、その中から平均的な特性を有する1波を選定して用いた。まず、パワースペクトルが次式で定義できる金井・田治見($f_g=2.5\text{Hz}$, $h_g=0.4$)のスペクトルとし、位相を乱数として時系列加速度波形を作成した。次に、包絡形状をJenningsタイプ²⁴⁾(M8.4)に修正した後、r.m.s.値が60Galとなるように振幅を補正した。

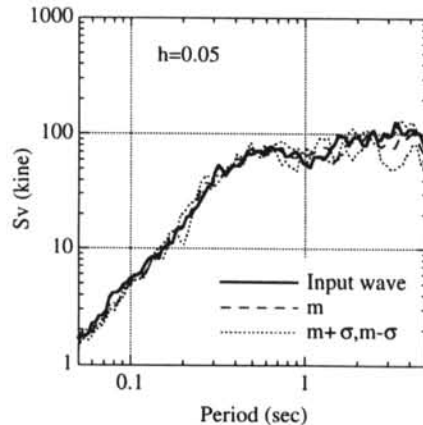


図-6 設計用入力地震動(人工地震波)

$$S(f) = \{1 + 4h_g^2(f/f_g)^2\} / \{1 - (f/f_g)^2 + 4h_g^2(f/f_g)^2\}$$

図-6に、作成した人工地震波の速度応答スペクトル($h=5\%$)の平均と平均±標準偏差、および、応答計算に用いた波の速度応答スペクトルを示す。

目的関数としては、制振構造物各部の応答を低減し、安全性が向上するように以下のように設定した。まず、設計用入力地震動1波を構造物モデルに入力し、得られた構造物各部の相対変形のr.m.s.値の3倍をそれぞれの許容値 (d_{ami} , d_{asi}) によって除した無次元化変形量 d_j^* を算定し、その最大値を最小化するように目的関数 J を次のように定めた。

$$J = \max_j \{d_j^*\}$$

GAの代表的な設定値は、文献4.25)による遺伝的アルゴリズムの最適パラメータの検討の結果を踏まえて次のように設定した。個体数 $N=40$ 、突然変異率 $P_M=0.01$ 、交差確率 $P_C=0.6$ 、世代交代率 $P_G=0.5$ であり、エリート保存戦略を用いた。エリート保存戦略とは、各世代の中で最も小さな目的関数値を記録した遺伝子を、その次の世代に必ず残していく方法で、優れた特徴を破壊することなく保存するための方法である。また、 σ truncation (σ 係数2.0)によってスケールングを行って、次世代の遺伝子を選択する際の得点 J_e の計算を行っている。すなわち、 J_e を、その世代での目的関数の平均値 J_m と標準偏差 J_s とした時、

$$J_e = J_m + 2.0 \cdot J_s - J$$

として計算している。ただし、 $J_e < 0$ の場合、 $J_e = 0$ とする。

3.2 GAによる探索結果

図-7に4質点モデルの場合とメガストラクチャーの場合のGAによる探索状況を示す。図-7はGAの試行を5回行い、各世代の J の平均値と最小値を5回の試行の平均値の形で示している。各試行では、約60世代で停留値に至っており、それまでに平均約2000回程度の応答解析を必要としている。また、4質点モデルの場合、世代交代に伴って目的関数値は徐々に減少してはいくものの、その減少量はわずかである。これは、構造物の減衰定数が2%であり、他に振動エネルギーを吸収する要素がないために、剛性の分布を変化させるだけでは、応答値の大幅な低減は望めないことを示唆している。一方、メガストラクチャーの場合には、履歴型のエネルギー吸収機構を有しており、世代交代に伴って制振構造物の性能が改善されていく。ただし、5回の各試行で得られた各停留解は、いずれの目的関数値 J も0.45以下の小さな値となっているが、すべて異なっている。また、5つの停留解の中での最良解が、全探索領域における最適解である保証もない。

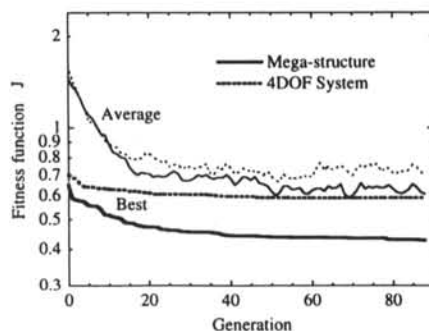
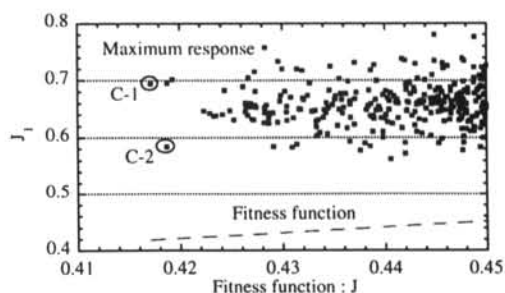
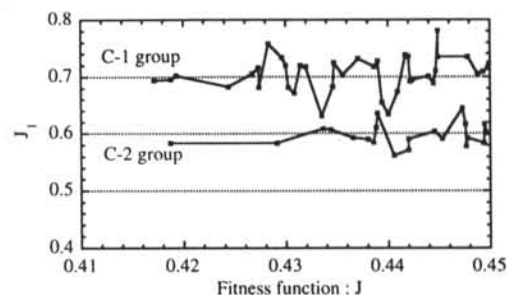


図-7 GAによる探索状況



(a) 制振構造物候補集合



(b) C-1 group と C-2 group

図-8 無次元化最大層間変形

次に、メガストラクチャーの場合について、 $J < J_a = 0.45$ となったものを制振構造物候補集合として検討を行った。 $J < 0.45$ となった制振構造物候補は約300あった。図-8(a)に、構造物各部についての最大相対変形を許容値(d_{ami} , d_{asi})によって除した無次元化最大層間変形量 d_j を算定し、その最大値 J_1 ($=\max_j \{d_j\}$)を目的関数値(無次元化層間変形量のr.m.s.値の最大値) J をパラメータとして示す。同等の目的関数値 J に対して、 J_1 のばらつきが大きいことがわかる。例えば、最も小さな目的関数値を示したC-1と2番目に小さな目的関数値を示した

C-2とでは、 J_1 に15%以上の差が生じている。そこで、C-1とC-2について選択された各設計変数のランク値 (I_{m1} , I_{s1} , I_{y1} , I_{α}) の分布を図-9に示す。明らかに、C-1とC-2では、剛性分布や質量比が大きく異なっている。また、 $J < 0.45$ となった場合について、各設計変数のランク値の最大値と最小値を点線で図-9に示している。ランク値の最大値と最小値の間、すなわち、ランク値が取られた変数の範

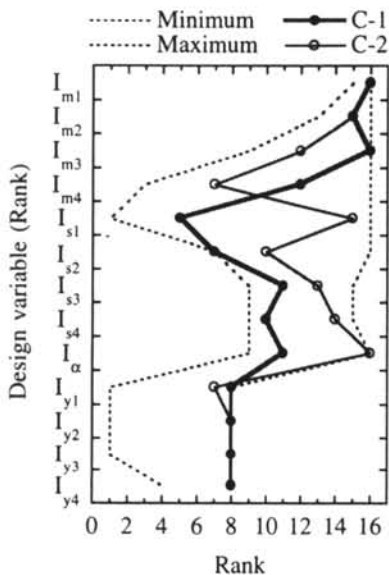


図-9 候補集合のランク値の上下限値とC-1、C-2の設計変数のランク値

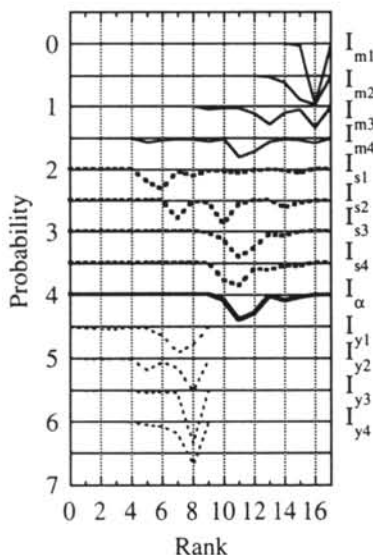


図-10 候補集合における各設計変数のランク値の選択確率

囲は、設計変数が取りうる全領域と比較して、それほど狭くなっていないことがわかる。しかも、 $J < 0.45$ となるものには、 $I_{s1}=16$ あるいは $I_{s2}=16$ のものが存在し、下から1番目あるいは2番目の副構造体が主構造体に縮合された構造形式が含まれている。すなわち、異なった位相の制振構造物も混入していることがわかる。図-10には、 $J < 0.45$ となった場合を対象に、各ランク値が選択された確率分布を示す。図-10の確率分布において、 I_{m3} , I_{s2} , I_{y2} などは分布形状が顕著に2山となっている。

3.3 樹形モデルによる分類・分析

3.2の議論から、制振構造物候補集合の中には、いくつかの異なる構造形式の制振構造物が選定されていると推察される。そこで、制振構造物候補集合を大まかに類型化し、特徴抽出をするという目的で、樹形モデルによる分類・分析を行った。

まず、候補集合に含まれたか否かが、どのような条件によって決定されているかを検討した。GAで評価した全ての構造物を対象として、候補集合に含まれたか($J < 0.45$)否か($J > 0.45$)を反応変数として、それぞれTRUEまたはFAULTで表した。また、予測変数としては、設計変数のランク値 I_{m1} , I_{s1} , I_{y1} , I_{α} を用いた。図-11に、得られた分類樹を示す。図-11(a)には詳細な分類樹を示し、図-11(b)には見やすいように剪定を行った分類樹を示す。節点は丸で葉は四角で表し、その中に反応変数を、また、その下に誤分類率(= (誤分類された観測数)/(節点に属する全観測数))を示している。また、樹の枝部分には分割条件を記入している。図-11(b)からも明らかのように、まず、主構造体の第1層の剛性値($I_{m1} > 15.5$)が最も重要である。次に、制振装置の降伏点の設定が重要で、特に、上層部分の設定が重要である。また、図-11(a)を詳細に見ると、質量比 I_{α} が一定値(10または11)以上である必要がある事なども分かる。以上のようにして、所要の目標を達成するために必要な設計変数の条件を特定することが可能となる。

ここで、以上のような分類樹は目的関数 J の分類の基準値 J_0 をどのレベルにするかによって異なるし、許容変位をどう設定するかによっても異なる。参考のために、制振装置の許容相対変位 d_{as1} を50cmから100cmに変えた以外は、3.1と同一条件で、GAによる探索を行った結果について、同様な検討を行った。得られた分類樹を図-12に示す。ただし、目

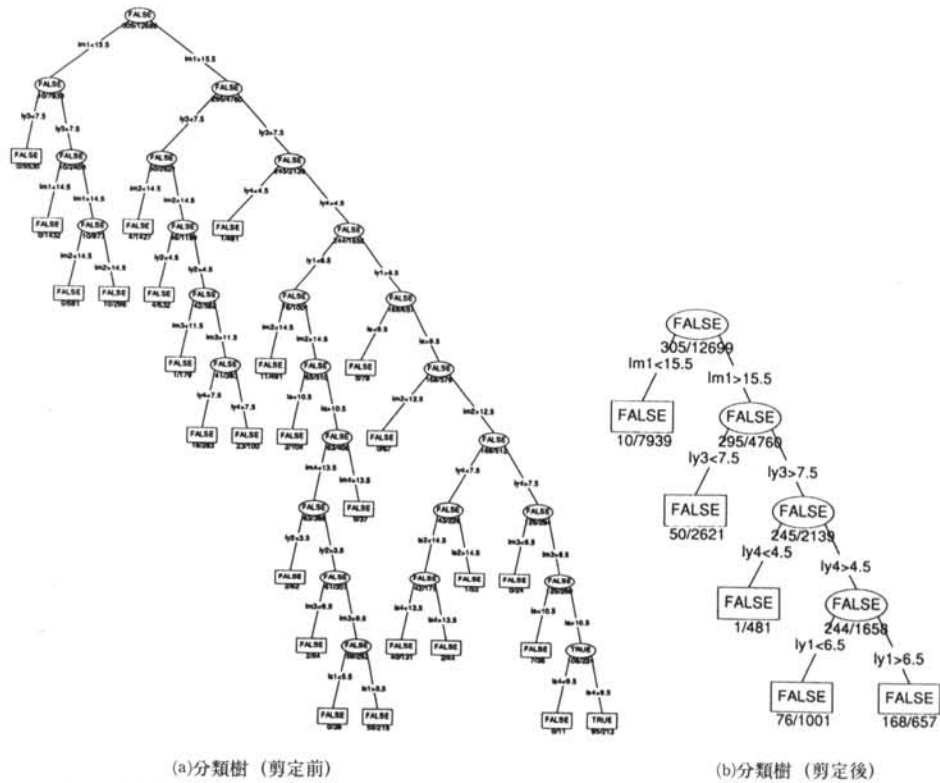


図-11 制振構造物候補集合の選択条件 ($d_{asi} = 50\text{cm}$)

関数Jの分類の基準値 J_0 は0.35とした。制振装置の許容相対変位 d_{asi} を50cmから100cmに変えて、制振装置の変形能力を高めた場合には、基準値を0.45から0.35へと小さくしたにもかかわらず、根元の誤分類率は869/12710となり、 d_{asi} を50cmとした場合の305/12699に比べて候補の数が増加している。すなわち、制振性能を向上しやすくなっていることが分かる。さらに、重要な設計変数が制振装置の剛性と降伏点や副構造体と主構造体との質量比となり、主構造体の剛性に対する制約が比較的小さくなっていることもわかる。

次に、制振構造物候補集合の分類を試みる。反応変量は d_j の最大値 J とし、予測変量は設計変数のランク値 I_{m1} , I_{s1} , I_{y1} , I_a を用いた。得られた回帰樹を図-13に示す。図-13は剪定を行った結果であり、5つのグループ(葉)に分類されている。図中、節点には反応変量の平均値を、節点の下には節点の尤離度を示している。各葉にも反応変量の平均値を示しており、C-1とC-2がどの葉に分類されているかを記入している。まず、図-13から、C-1とC-2が

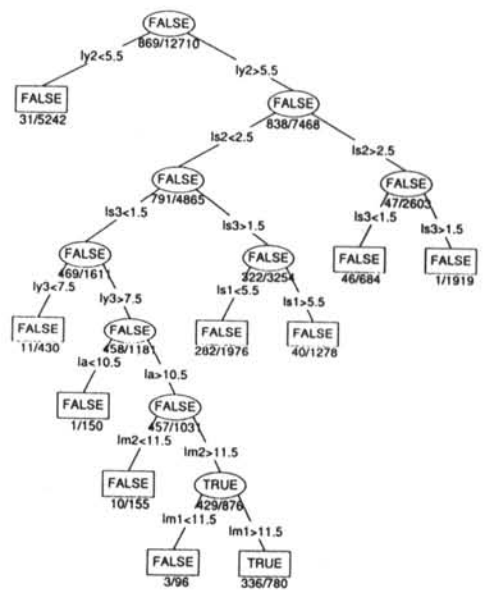


図-12 制振構造物候補集合の選択条件 ($d_{asi} = 100\text{cm}$, 剪定後)

属するグループ（以下ではC-1 groupおよびC-2 groupと呼ぶ）との差を最も特徴づけている設計変数は I_{s2} であることがわかる。また、C-1 groupとC-2 groupの反応変数には明らかに差がある。そこで、図-8(b)に、C-1 groupおよびC-2 groupについて、 d_j の最大値 J_1 を目的関数値 J をパラメータとして示す。C-1 groupまたはC-2 groupの中での J_1 のばらつきは、制振構造物候補集合全体での J_1 のばらつきに比べて小さくなっていることがわかる(図-8(a)参照)。そして、C-2 groupの方がC-1 groupに比べて、 J_1 が小さくなっている。すなわち、 d_j の最大値を小さくするためには、C-2に似た特性を有している方が有利であると言える。

3.4 基本仕様の決定

以上の検討の範囲内では、C-2が最も優れた制振

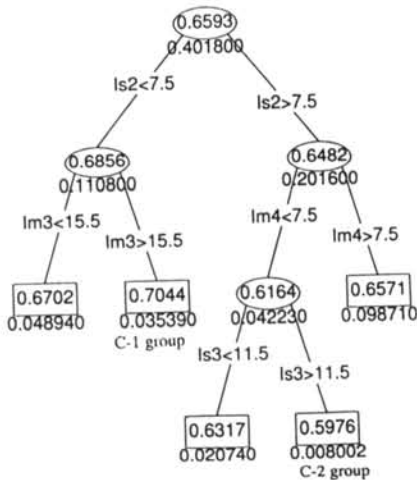
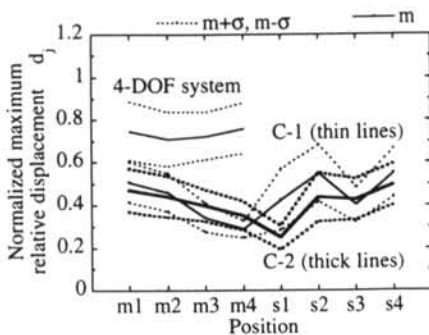


図-13 制振構造物候補集合の分類



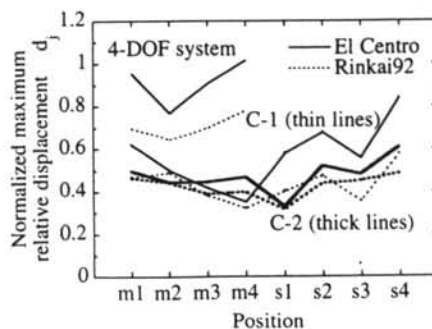
(a) 人工地震波(30波)入力

構造物候補であることがわかる。しかし、上記の評価では、高々1波の地震波に対する結果である。つまり、応答解析に用いた地震動の特性に影響を受ける可能性があり、その影響を検討しておく必要がある。そこで、図-14に、C-1およびC-2に他の地震波を入力した場合の d_j の分布を示す。図-14(a)は人工地震波30波に対する d_j の平均±標準偏差の値を示し、図-14(b)は代表的な設計用地震動として用いられるEl Centro 1940 NS成分(最大速度を50kineに基準化)と臨海'92波²⁰⁾に対する最大応答値の分布を示す。参考のために4質点モデル($I_{m1}=16, I_{m2}=14, I_{m3}=10, I_{m4}=5$)の応答解析結果も図中に示す。C-1およびC-2の主構造体部分(m1~m4)の最大応答値は、いずれも、4質点モデルの最大応答値に比べて小さくなっている。しかし、C-1の副構造体部分(s1~s4)の応答は、主構造体の応答に比べて若干大きくなる場合があり、したがって d_j の最大値も大きくなる傾向にある。これに対して、C-2の副構造体の応答値は主構造体と同程度の値となっており、その分布も一様に近い。したがって、C-2の方がC-1よりも優れた特性を有していると言える。

§4. まとめ

本論文では、制振構造物の概略仕様を決定するための方法論を提示した。提案手法は、制振機構や架橋形式の多種多様な組み合わせの中から、構造物の与条件に適し、制振性能の優れたものを選択することを可能とするものである。

まず、制振構造物の候補集合の創出を、遺伝的アルゴリズムと汎用の応答解析プログラムを組み合わせ



(b) El Centro波、臨海'92波入力

図-14 無次元化最大相対変位の分布

せた解析システムGAOS3Nを用いて行う。汎用の応答解析プログラムは、設計変数である制振機構や架構形式等をモデル化し、制振構造物の性能に相当する目的関数を算定するのに用い、遺伝的アルゴリズムは、明らかに不連続で多峰性を有するであろう目的関数の大域的探索に用いる。

一般に、GAOS3Nによって得られる制振構造物候補集合は、多数であるとともに、多種多様な構造特性を有している。したがって、制振構造物候補集合を類型化し、特徴抽出する必要がある。また、制振構造物の候補集合の創出においては考慮しなかつ

た性能指標などについても考慮して総合的に判定し、制振構造物の基本仕様を決定することが望ましい。本論では、その一つの試みとして樹形モデルを用いた分類・分析を行った。

数値解析例では、メガストラクチャー型の超高層制振構造物を想定して、提案手法の手順を具体的に説明するとともに、提案手法の有効性を例示した。

〈謝辞〉 技術研究所・基礎研究室の渡辺宏一氏には、樹形モデルについての有益な助言を頂いた。ここに深く感謝致します。

〈参考文献〉

- 1) Fujita, T. : Seismic Isolation and Response Control for Nuclear and Non-nuclear Structures, Special Issue for the Exhibition of SMIRT 11, 1991, International Conference on SMIRT
- 2) Goldberg, D. : Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989
- 3) Holland, J.H. : Adaptation in natural and artificial systems, Ann Arbor, The Univ. of Michigan Press, 1975
- 4) Dejong, K.A. : Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, Ph.D. Thesis, Dept. Computer and Communication Sciences, Univ. of Michigan, 1975
- 5) Goldberg, D.E. and Samtani, M.P. : Engineering Optimization via Genetic Algorithm, Proc. of 9th Conference on Electronic Computation, pp.471-482, 1986
- 6) Le Reiche, R. and Haftka, R.T. : Optimization of Laminate Stacking Sequence for Buckling Load Maximization by Genetic Algorithm, Proceedings, AIAA/ASCE/AHS/ASC 34th Structures, Structural Dynamics and Material Conference, pp.2564-2575, 1992
- 7) Rajeev, S. and Krishnamoorthy, C.S. : Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.118, No.5, pp.1233-1250, 1992
- 8) Hajela, P. : Genetic Search - An Approach to the Non-convex Optimization Problem, AIAA Journal, Vol. 26, No.7, pp.1205-1210, 1990
- 9) 杉本博之：近似の概念を利用したトラス構造物の離散的最適設計法に関する研究，土木学会論文報告集，No.432/I-16, pp.79-88, 1991
- 10) 杉本博之，鹿汁麗，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，No.471/I-24, pp.67-76, 1993
- 11) Rao, S.S., Pan, T.S., and Venkayya, V.B. : Optimal Placement of Actuators in Actively Controlled Structures using Genetic Algorithms, AIAA Journal, Vol. 29, No.6, pp.942-943, 1990
- 12) Furuya, H. and Haftka, R.T. : Genetic Algorithms for Placing Actuators on Space Structures, Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms, pp.536-542, 1993
- 13) Watabe, H. and Okino, N. : A Study on Genetic Shape Design, Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms, pp.445-450, 1993
- 14) 坂本，尾田：遺伝的アルゴリズムを利用した最適トラス形態決定法，日本機械学会論文集(A編)，59巻562号，pp.156-161, 1993
- 15) 渡辺宏一，福和伸夫，大沢一彦，林康裕，金子美香，田村和夫，小柳義雄：三次元非線形振動解析システムDAC3Nの開発，第11回情報システム利用技術シンポジウム，pp.181-186, 1989
- 16) Grefenstette, J. J., GENESIS : a system for using genetic search procedures, Proc. of Conference on Intelligent Systems and Machines, pp.161-165, 1984

- 17) Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R., and Stone, C.J., Classification and Regression Trees, Wadsworth International Group, Belmont, California, 1984
- 18) J.M. チェンバース, T.J. ヘイスティ編: Sと統計モデル—データ科学の新しい波—, 共立出版株式会社, 1994
- 19) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, pp.26-27, 1993
- 20) 財団法人日本建築防災協会: 「臨海部における大規模建築物群の総合的な構造安全に関する調査・検討報告書」, 1991, 1992
- 21) 社団法人日本建築構造技術者協会: 「横浜市高層建築物耐震指導基準策定委員会報告書」, 1992
- 22) 日本建築学会: 地震荷重—地震動の予測と建築物の応答, 1992
- 23) 日本建築学会: 地震動予測—設計のための地震動予測をめざして—, 第20回記念地震動シンポジウム, 1992
- 24) Jennings, P.C., Housner, G.W. and Tsai, N.C.: Simulated Earthquake Motions for Design Purpose, IV WCEE, Sandiego, California Institute of Technology, Pasadena, 1968
- 25) Grefenstette, J.J.: Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybanetics, Vol. SMC-16, No.1, pp.122-128, 1986
- 26) 林康裕, 護雅史: 遺伝的アルゴリズムによる構造物の動特性適性化システム, 日本建築学会大会梗概集, pp.465-466, 1993
- 27) 林康裕, 護雅史: 遺伝的アルゴリズムによる構造物の動特性適性化, 第6回計算力学講演会論文集, pp.385-386, 1993
- 28) 林康裕, 護雅史: 遺伝的アルゴリズムを用いた制振構造物の適性設計, 第43回応用力学連合講演会論文集, pp.555-558, 1994