

最適化手法による波動透過境界作成に関する研究

古谷, 忍 / FURUYA, Shinobu

(発行年 / Year)

2009-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2009-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

P377.5
M35-2
2008-37

2008 年度修士論文
Master's Thesis Academic Year 2008

最適化手法による波動透過境界作成に関する研究
A study about wave transmission border making by
optimization method

指導教官 吉田長行 教授

Academic Advisor

Prof. Nagayuki YOSHIDA

法政大学大学院工学研究科建設工学専攻

Department of Architecture,

Graduate School of Engineering, HOSEI University

古谷 忍

Shinobu FURUYA

A study about wave transmission border making by optimization

Shinobu Furuya

Research background

A structure vibrates in response to the influence of the soil. This influence is called "Dynamic Soil-Structure Interaction". When we conduct earthquake response analysis, we need to consider this influence. The method for "Dynamic Interaction" is divided into two main branches.

One method is how to consider and separate the whole system into some part. In one version of this, there is "SR model".

Another method is how to consider structure and soil as a unit. It often uses the finite element method (FEM). In recent years, the nonlinear action of soils has been studied actively. In order to deal with the nonlinear problem, the finite element method is effective. However, it is the numerical analyzing method for finite region. When applying to the wave motion propagation problem of infinity or semi-infinite elastic body, the device for wave motion dissipated outside form inside non-reflecting in boundary region is required.

Until now, many proposals are made about boundary processing. In time history analysis, the technique of preparing viscous boundary is common. If we propose the wave transmitting boundary in a narrow area, that gives the profit to a lot of analysis. Many researchers are proposing the boundary model by control method and the optimization method of the vibration until now. But those are not complete.

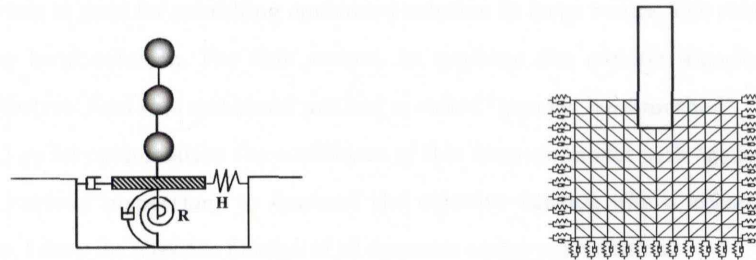


Fig1 SR-model and direct method

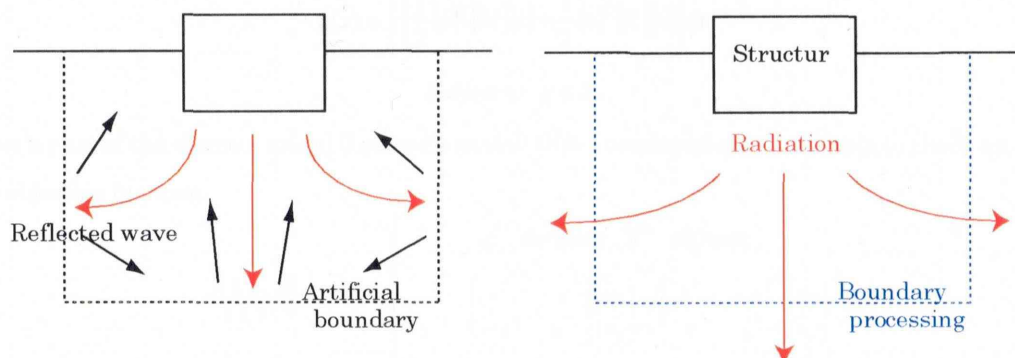


Fig.2 Boundary processing

The method of research

For generation of wave transmitting boundary, discrete models are installed at the boundary. In this research, I go for optimization the coefficient of this discrete model. For the method for it, I employ the genetic algorithm and sensitive analysis. For consideration the validity of its optimal method, I used one-dimensional rod stock model, two-dimension rod stock model, two-dimension ground model.

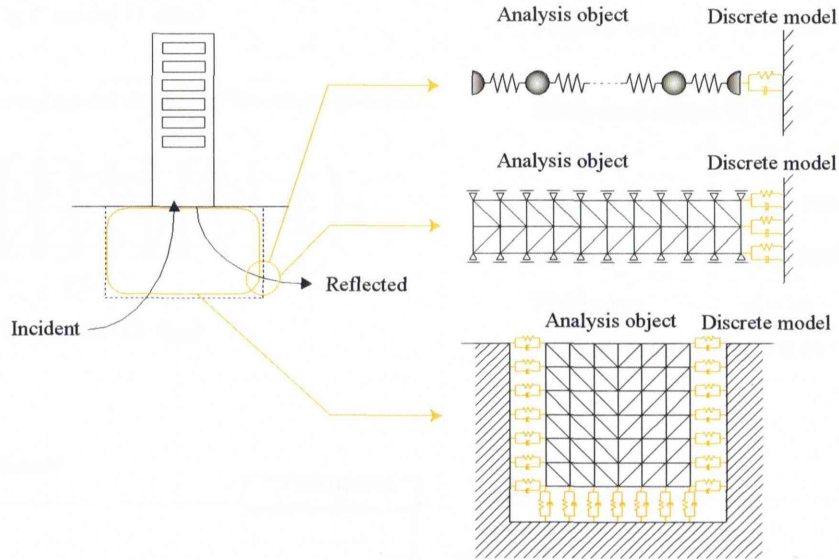


Fig3 Virtual phase model

The genetic algorithm is good for searching optimized solution in large range. The sensitive analysis is good for searching local solution. For this reason, to combine the genetic algorithm and sensitive analysis is very effective. And this combined method is called “genetic local method”.

In this research, I go for optimization the coefficient of this discrete model with “genetic local method”. Again, I perform various inspections to demand the objective function with a technological meaning of non-reflection. Below, I show the objective function of all dynamics energy minimization.

$[M]$: lumped mass matrix, $[K]$: stiffness matrix, $\{x\}$: displacement vector

$$g(x) = \int_0^t \left\{ \frac{1}{2} \dot{x}^T [M] \dot{x} + \frac{1}{2} x^T [K] x \right\} dt$$

Subject to $\chi \in S$

I show a part of the discrete model (Lysmer's model) that I employed as an example to check an effect of the objective function.

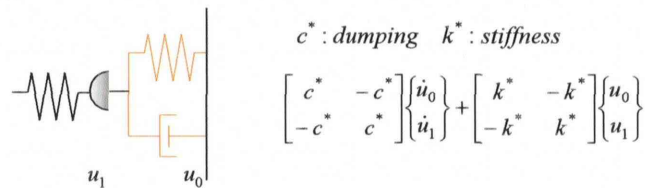


Fig.4 dimensional (Lysmer's model)

Conclusion and Consideration

1 dimensional multi-degree-of-freedom systems

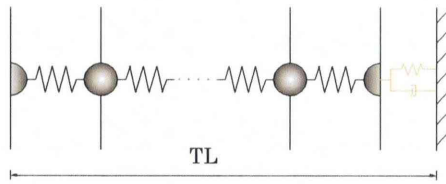


Fig.5 model (1 dim)

Analytical object (1 Dim)

Length : $TL = 100m$
 Wave velocity : $V_s = 120m/s$
 Density : $\rho = 1500kg/m^3$
 Section area : $A = 1m^2$
 Poisson ratio : $\nu = 0.49$

2 dimensional multi-degree-of-freedom systems

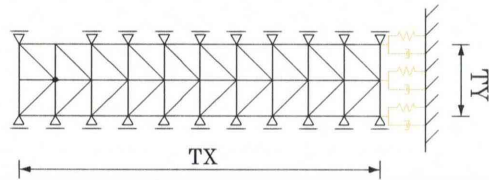


Fig.6 model (2 dim)

Analytical object (2 Dim)

Length : $TX = 100m$ $TY = 20m$
 Wave velocity : $V_s = 120m/s$
 Density : $\rho = 1500kg/m^3$
 Thickness : $A = 1m$
 Poisson ratio : $\nu = 0.49$

Analysis result

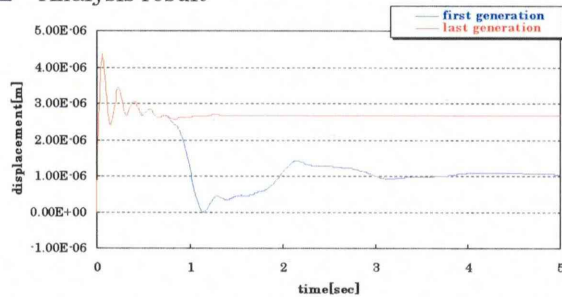


Fig.7 one dimension model

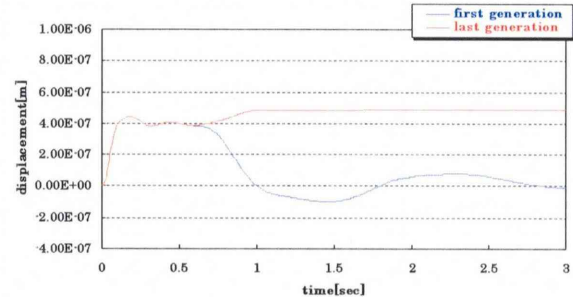


Fig.8 two dimension model

The result has a technological meaning of non-reflection in the objective function of all dynamic energy minimization. Therefore, the energy objective function of dynamic energy is effective for one dimension rod stock model of two rod stock model.

第1章

序論

1.1 本研究の背景

1.2 本研究の目的

1.3 本論文の構成

1.1 本研究の背景

その昔、構造物は剛な基盤の上に固定されているものと見なし、構造物の地震応答解析や耐震設計が行われていた。しかし、実際には地震動を構造物に伝える地盤の動きそのものが構造物の存在により変化する。構造物に入射した地震動エネルギーは、その一部が基礎から散乱し、残りの勢力が透過波として上部構造に伝達されてその振動を引き起こす。一方、振動する構造物は新たな振動源となって地盤に弾性波を放出する。構造物と地盤は、この相互作用を多数回繰り返す、やがて地震動の停止と減衰力の働きによって運動を終了するのである。つまり構造物は地盤の影響を受けて振動するのである。また、地盤上には多くの構造物が存在し、隣接する構造物が地盤を介して影響することもある。この過程においてどのような機構が働き、その結果として構造物にいかなる力が作用し、いかなる量のエネルギーが透過されたか、これら一連の現象が、地盤と構造物との動的相互作用(Dynamic Soil-Structure Interaction)と呼ばれている。これらの現象は、地震時における構造物の挙動を明らかにする上で欠くことのできない要因である。

この動的相互作用を考慮した地震応答を計算する方法には大きく分けて二つの方法がある。一つは地盤と建物を一体の系として計算する方法で直接法または一体解法と呼ばれている。この解析にはしばしば有限要素法が利用され、複雑な地層構造や地盤の非線形性が容易に解析に取り込めるといいう長所がある。反面、無限に広がる地盤を有限の領域で切らなくてはならないため、境界を作成する必要性が生じる。また計算には時間がかかるという欠点もある。

もう一つの方法は、サブストラクチャー法または部分解法と呼ばれるもので、地盤系、構造物系のように系全体をいくつかの構造に分解し計算する方法である。この代表的な例として SR モデルが挙げられるが、個々のステップに適した解法が適用でき、相互作用効果を定量的に確認できる反面、計算がやや煩雑になり、非線形問題への適用が困難になる可能性がある。

今回、前者の方法の境界処理問題を取り上げている。無限に広がる地盤をモデル化するには、境界面で波動が反射せず、透過する境界の作成が望まれる。モデルの確立という点でいえば、無限に広がる地盤を有限領域・狭領域で完全透過するようなモデルは確立されておらず、この実現により仮想地盤解析には大きな利益をもたらすと考えられる。一方で地盤解析という点においては、あいまいなデータを使うのではなく、モデルに仮想地盤データを用い、より実地盤に近づけた状態で解析を試みた。本論文では狭領域における完全透過モデルの確立と同時に、2次元・3次元への飛躍を見据えた地盤の解析を目的とし、双方を網羅する境界の作成の足がかりを得るための提案と検討を行っている。

1.2 本研究の目的

近年、地盤の非線形な動的挙動が活発に研究されている。非線形問題¹を扱う場合、有限要素法が有効かつ柔軟な手法であることはよく知られている。しかしながら、有限要素法は、本来領域を離散化する領域型の解析法であるため、無限に広がる地盤をモデル化することはできず、適当な位置に仮想の境界を設ける必要がある。この仮想境界において、地盤が無限に連続している効果を表現することを一般的に境界処理と呼んでいる。この境界処理法として、境界にダッシュポットを設ける粘性境界が代表的である。粘性境界は、境界を離散化し、その自由度に対応して全体系に境界の影響を加えるため、全体系としての自由度が変わらないという利点があるものの、逸散波の吸収が不完全なため解析領域を広く設定する必要がある上、応答結果に剛体移動が含まれるという欠点がある。よって、有限な狭領域で逸散波を完全吸収できる境界モデルを提案できれば地盤と建物の解析効率に有益をもたらせる Fig1.1 参照。

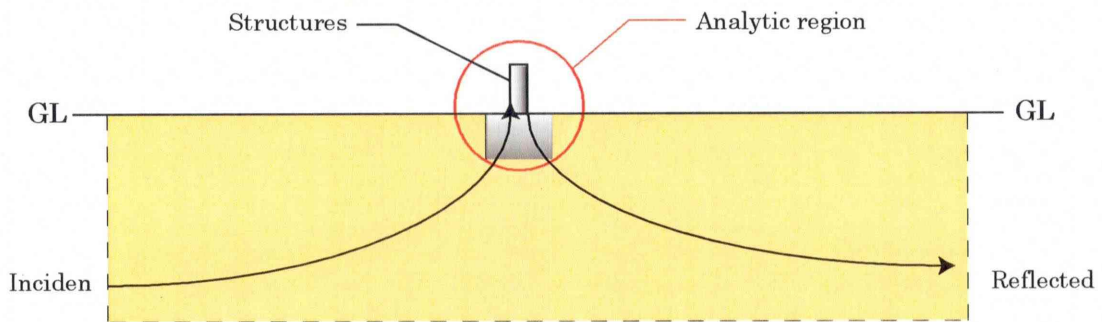


Fig1.1 Analytic region

本研究では、境界面に設計された境界モデルのパラメータの最適化を目指している。最適化手法として、局所探索法、遺伝的アルゴリズムを取り上げ、それぞれの長所を組み合わせたハイブリット手法、遺伝的局所探索法による最適化の検証を1次元モデルで行い、最適化精度最良であるものを、2次元モデルに拡張して検証を行う。

第1章 序論

1.3 本論文の構成

本論文は、第1章・序論を含め全6章から構成されている。第2章以降の概要を以下に示す。

第2章では、研究手順、有限要素法について述べる。まず、研究手順を示し、有限要素法、線形化速度法について示す。第3章では、本研究で用いた手法である遺伝的アルゴリズム、感度解析、遺伝的局所探索法についての基礎的説明を行う。題4章では、1次元棒材、2次元棒材の完全波導透過境界を表現する評価方法を、評価関数、境界離散モデル、最適化手法別に多角的に検証を行い手法の有効性を確認する。第5章では、提案した手法の条件の下で2次元地盤モデルに拡張し検証を行う。第6章では本研究の総括、結論を述べる。

第 2 章

研究概要

- 2.1 解析概要
- 2.2 有限要素法
- 2.3 時刻歴解析

2.1 解析概要

2.1.1 研究過程

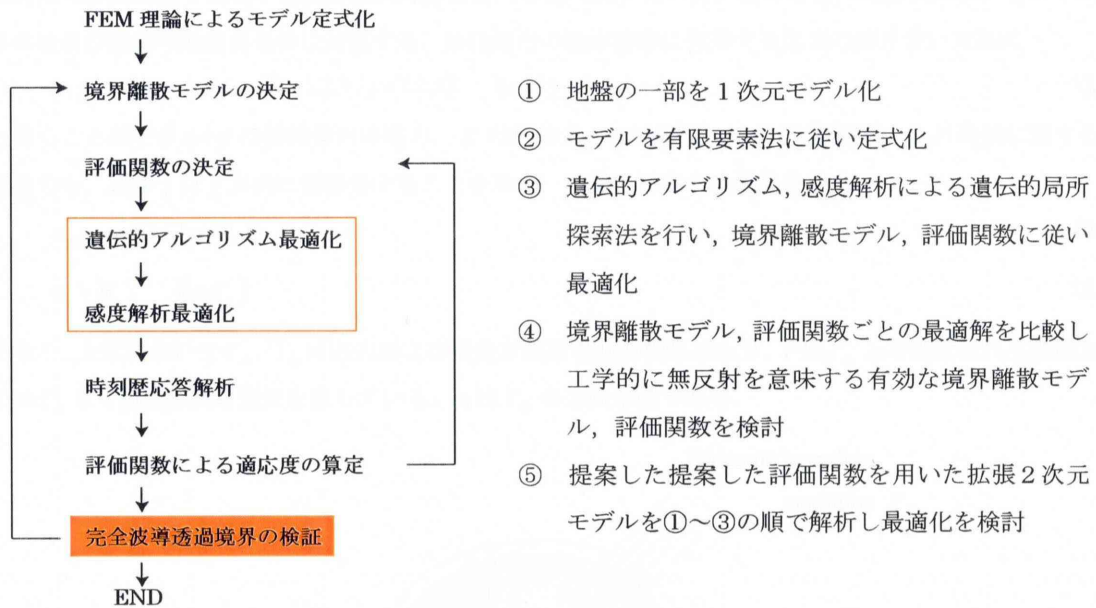


Fig2.1 A study process

2.1.2 解析モデル

本研究は無限に広がる地盤をモデル化し、境界面で波動が反射しないことを目的としている。その上でモデル、評価関数を相互に解析し、比較検討している。今回、モデルは大きく分けると1次元モデルと2次元モデルの2つを用いている。1次元では主に棒材モデルを使用し、境界離散部を3種類設けた。2次元では棒材モデルと拡張モデルを使用し、棒材では固定端と自由端、拡張モデルでは20×20分割、40×40分割、60×60分割を用いた。

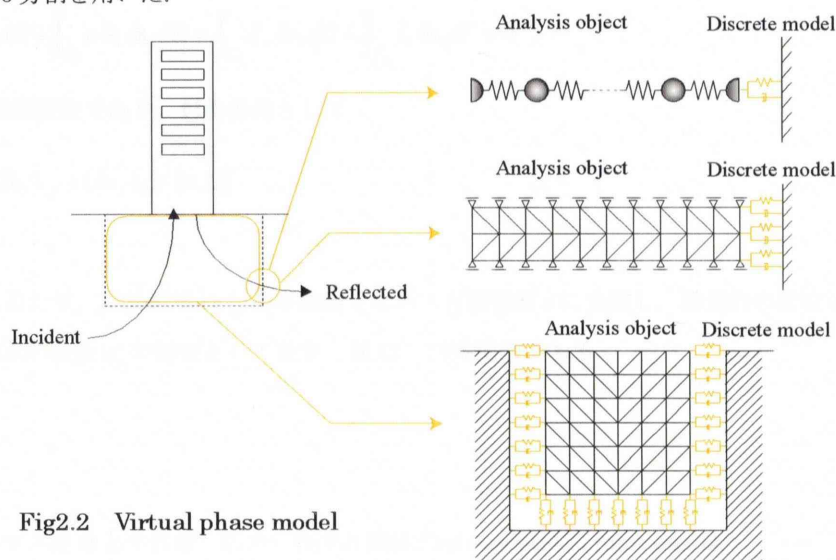


Fig2.2 Virtual phase model

2.2 有限要素法

2.2.1 運動方程式

動的相互作用問題では場の支配方程式は弾性体内の力の釣り合いに、境界条件は境界面における力学的境界条件及び幾何学的境界条件に対応する。弾性体内の微小要素に作用する応力の釣り合い方程式

$$\sigma_{ij,j} + X_i = \rho \ddot{u}_i \quad (i=1,2,3; j=1,2,3) \quad (\text{in } \Omega) \quad (2.1)$$

と書くことができる(σ は弾性体内の応力, X は物体力, u は変位, ρ は質量密度). $\ddot{u}$ は時間に関する2階微分を, 添字 j は j 方向に偏微分することを示す. 一方, 対応する境界条件は,

$$\sigma_{ij} n_j = \bar{t}_i \quad (\text{on } \Gamma_\sigma) \quad (2.2)$$

$$u_i = \bar{u}_i \quad (\text{on } \Gamma_u) \quad (2.3)$$

となる. 上式において Γ_σ , Γ_u は応力および変位が規定される境界であり, $\bar{t}$ は Γ_σ 上で規定される表面力, $\bar{u}$ は Γ_u 上で規定される変位を表している. n は Γ_σ の方向余弦である.

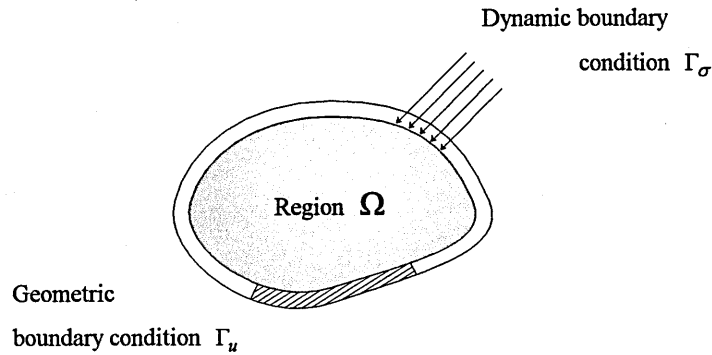


Fig2.3 Analytical Region & Boundary

FEM では, 支配方程式(2.1)を直接解くのではなく弱形式と呼ばれる積分表現に変換した後に近似を導入して解く. 式(2.1)~(2.3)に対して仮想仕事の原理を適用すると,

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} d\Omega + \int_{\Omega} \rho \ddot{u}_i \delta u_i d\Omega = \int_{\Omega} X_i \delta u_i d\Omega + \int_{\Gamma_\sigma} \bar{t}_i \delta u_i d\Gamma = 0 \quad (2.4)$$

を得る. δu は仮想変位であり, 付帯条件として

$$\delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \{ (\delta u_i)_{,j} + (\delta u_j)_{,i} \} \quad (\text{in } \Omega) \quad (2.5)$$

$$\delta u_i = 0 \quad (2.6)$$

式(2.4)を解くにあたり, 解析領域 Ω を微小領域すなわち有限要素 e に分割し, 要素内の変位 $\mathbf{u}$ を要素境界に設けられた節点の変位 $\mathbf{u}^e$ の関数として表す. $\mathbf{N}$ は, 内挿関数である.

$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \mathbf{u}^e \quad (2.7)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{u}^e \quad (2.8)$$

弾性係数マトリクスを $\mathbf{D}$ とすれば, 応力 - ひずみ関係式(stress-strain relations)は,

$$\sigma = DBu^e \quad (2.9)$$

これらを用いて式(2.4)を離散化し書き直す.

$$\sum_e \left[\int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} u^e d\Omega^e + \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} \ddot{u}^e d\Omega^e \right] = \sum_e \left[\int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T \mathbf{X} d\Omega^e + \int_{\Gamma_\sigma} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma^e \right] \quad (2.10)$$

$$\mathbf{K} \mathbf{u} + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{f} \quad (2.11)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{K} &= \sum_e \mathbf{K}^e = \sum_e \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega^e \\ \mathbf{M} &= \sum_e \mathbf{M}^e = \sum_e \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} d\Omega^e \\ \mathbf{f} &= \sum_e \mathbf{f}^e = \sum_e \left[\int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T \mathbf{X} d\Omega^e + \int_{\Gamma_\sigma} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma^e \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

$\mathbf{K}^e$, $\mathbf{M}^e$, $\mathbf{f}^e$, $\mathbf{K}$, $\mathbf{M}$, $\mathbf{f}$ は要素剛性マトリクス, 質量マトリクス, 等価節点力ベクトル, 全体剛性マトリクス, 全体質量マトリクス, 全体等価節点力ベクトルである.

2.2.2 要素マトリクスの定式化

Fig2.2 に示す 3 節点 1 次要素を考え, 節点に反時計まわりに i, j, k の番号をつける.

$$\delta^T = [u_i \quad v_i] \quad (2.13)$$

$$\delta^T = [u_i \quad v_i \quad u_j \quad v_j \quad u_k \quad v_k] \quad (2.14)$$

要素内の変位場を, 次に示す x, y の 1 次式で仮定する.

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \\ v &= \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y \end{aligned} \quad (2.15)$$

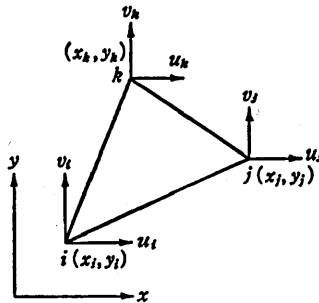


Fig2.4 Node displacement

節点座標を式(2.15)に代入し, 6 個の未定係数 α, β と 6 個の節点変位 u, v の関係式を求める.

第2章 研究概要

$$\left. \begin{aligned} u_i &= \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i & v_i &= \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 y_i \\ u_j &= \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j & v_j &= \beta_1 + \beta_2 x_j + \beta_3 y_j \\ u_k &= \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 y_k & v_k &= \beta_1 + \beta_2 x_k + \beta_3 y_k \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

未定係数を変位で表し、式(2.15)の表示式に代入すると、

$$u = \frac{1}{2\Delta} \{ (a_i + b_i x + c_i y) u_i + (a_j + b_j x + c_j y) u_j + (a_k + b_k x + c_k y) u_k \} \quad (2.17)$$

$$v = \frac{1}{2\Delta} \{ (a_i + b_i x + c_i y) v_i + (a_j + b_j x + c_j y) v_j + (a_k + b_k x + c_k y) v_k \} \quad (2.18)$$

$$\left. \begin{aligned} a_i &= x_j y_k - x_k y_j & a_j &= x_k y_i - x_i y_k & a_k &= x_i y_j - x_j y_i \\ b_i &= y_j - y_k & b_j &= y_k - y_i & b_k &= y_i - y_j \\ c_i &= x_k - x_j & c_j &= x_i - x_k & c_k &= x_j - x_i \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

$$2\Delta = \det \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} = 2 \times (\text{三角形 } ijk \text{ の面積}) \quad (2.20)$$

式(2.17), (2.18)を次式のように表現しておく。

$$\{u, v\}^T = \mathbf{N} \delta = [\mathbf{I} N_i \quad \mathbf{I} N_j \quad \mathbf{I} N_k] \delta \quad (2.21)$$

$$N_n = (a_n + b_n x + c_n y) / 2\Delta \quad (n = i, j, k) \quad (2.22)$$

式(2.18)の変位関数は三角形辺に沿って変位が直線的に変化し、隣接要素との連続性が満足されている。

平面問題における要素内の任意点ひずみは、内部仕事に寄与する3成分によって定めることができる。

$$\varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}^T = \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\}^T \quad (2.23)$$

式(2.23), 式(2.21)より、ひずみ - 変位関係式(displacement-strain relations), 応力 - ひずみ関係式を導くことができる。

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_j}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_k}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_j}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_k}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial x} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_m \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_m & b_k \end{bmatrix} \delta = \mathbf{B} \delta \quad (2.24)$$

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{D} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.25)$$

等方弾性体平面ひずみ問題(Isotropic elastic medium plane strain)の応力 - ひずみマトリクス $\mathbf{D}$ を表わす。

E はヤング係数(Young's modulus), ν はポアソン比(Poisson's ratio)である。

$$\mathbf{D} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2(1-\nu) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

要素 ijk の要素剛性マトリクス(element stiffness matrix)は、式(2.12)より次式で与えられる。

$$\mathbf{K}^e = \iint \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} t \, dx dy \quad (2.27)$$

t は要素の厚さを表し積分は要素三角形の全域について行う。 $\mathbf{D}$ および $\mathbf{B}$ マトリクスは、要素内で一定であるので要素の厚さを一定とすれば、式(2.27)の要素剛性マトリクス $\mathbf{K}^e$ は次式で表される。

$$\mathbf{K}^e = \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} t \Delta \quad (2.28)$$

要素 ijk の要素質量マトリクスは、式(2.12)より次式で与えられる。

$$\mathbf{M}^e = \iint \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} t \, dx dy \quad (2.29)$$

厚さを一定とすると分布質量マトリクス(consistent mass matrix)が作成できる。

$$\mathbf{M}^e = \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} t \Delta \quad (2.30)$$

本研究では、分布質量マトリクス(consistent mass matrix)ではなく、単純なモデルより質量をその要素に属する節点に等分に振り分ける集中質量マトリクス(lumped mass matrix)を用いる。解析精度はほぼ同じであり、解析効率が格段によい。

2.2.3 減衰マトリクスの定式化

式(2.11)は減衰がない場合の基本式である。減衰がある場合には、減衰マトリクスを $\mathbf{C}$ として、

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (2.31)$$

と表すことができる。

周波数応答解析の場合には、複素減衰を用いることによって材料の内部減衰を考慮するのが一般的である。しかしながら、時刻歴応答解析においてはこのような方法は適用できないため、質量マトリクス $\mathbf{M}$ と剛性マトリクス $\mathbf{K}$ の関数で表現する。

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad \begin{pmatrix} \alpha = 2\omega_1\omega_2(h_1\omega_2 - h_2\omega_1) / (\omega_2^2 - \omega_1^2) \\ \beta = 2(h_2\omega_2 - h_1\omega_1) / (\omega_2^2 - \omega_1^2) \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

式(2.32)はレイリー減衰(Rayleigh damping)と呼ばれ ω_i, h_i は i 次の固有振動数、減衰定数である。

2.3 時刻歴解析

2.3.1 数値積分法の定式化

不規則な外乱を受ける構造物の動的応答解析には、微小時間ごとに振動方程式を数値的に積分して解を定める数値積分法が用いられる。時刻 t の応答状態が既知で、微小な時間 Δt 後の時刻 $t + \Delta t$ における状態を近似的に推定し順次解を求める手法である。激震をうける構造物の弾塑性応答のように復元特性が応答履歴に応じて複雑に変化する場合でも、微小区間ごとに動特性の変化を考慮し解を求めてゆくことができる。

■ 線形加速度法(Linear acceleration method)

陰解法タイプの線形加速度法はシミュレーションが時刻 t まで進んだ段階において時刻 $t + \Delta t$ の状態を計算する式で振動方程式と組み合わせ解を定める。新しい時点で微分方程式を満たすような近似解を求める解法より計算には手間がかかる。精度・安定性の面で本研究では直接法を用いて解析を行う。

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (2.33)$$

$$[M]\{\ddot{x}(t + \Delta t)\} + [C]\{\dot{x}(t + \Delta t)\} + [K]\{x(t + \Delta t)\} = \{f(t + \Delta t)\} \quad (2.34)$$

□ 直接法(Direct method)

1 自由度系振動方程式と時刻 t から $t + \Delta t$ までの間の加速度の直線の変化を仮定したものを以下に示す。

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t \dot{x}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{3} \ddot{x}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{6} \ddot{x}(t + \Delta t) \quad (2.35)$$

$$\dot{x}(t + \Delta t) = \dot{x}(t) + \Delta t \frac{\ddot{x}(t) + \ddot{x}(t + \Delta t)}{2} \quad (2.36)$$

$$\ddot{x}(t + \Delta t) = -\frac{c}{m} \dot{x}(t + \Delta t) - \frac{k}{m} x(t + \Delta t) + \frac{f}{m} \quad (2.37)$$

式(2.35),(2.36)を式(2.37)に代入すると、

$$\begin{aligned} m\ddot{x}(t + \Delta t) + c \left[\dot{x}(t) + \frac{\ddot{x}(t) + \ddot{x}(t + \Delta t)}{2} \Delta t \right] \\ + k \left[x(t) + \Delta t \dot{x}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{3} \ddot{x}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{6} \ddot{x}(t + \Delta t) \right] = f(t + \Delta t) \end{aligned} \quad (2.38)$$

式(2.38)を $\ddot{x}(t + \Delta t)$ について解くと、

$$\ddot{x}(t + \Delta t) = \frac{f(t + \Delta t) - c \left\{ \dot{x}(t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{x}(t) \right\} - k \left\{ x(t) + \Delta t \dot{x}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{3} \ddot{x}(t) \right\}}{m + c \frac{\Delta t}{2} + k \frac{(\Delta t)^2}{6}} \quad (2.39)$$

式(2.39)の解を式(2.36),(2.37)に代入すれば $x(t + \Delta t)$, $\dot{x}(t + \Delta t)$ が得られる。

第 3 章

最適化手法

- 3.1 最適化概要
- 3.2 遺伝的アルゴリズム
- 3.3 感度解析
- 3.4 遺伝的局所探索法

3.1 最適化概要

材料費、可搬性、小型化などから構造物の軽量化が望まれ、設計者は経験などから一つの試行的な設計を行い、不具合があれば修正する繰り返し工程で最終的な設計を決定している。合理的・効率的な設計を目指しコンピューターを用いて作業の一部を代行する設計を最適設計と呼んでいる。最適化の基本的精神は同目的を達成するなら最小コスト・エネルギーですべきなど、数学モデルとして表現が困難な現実の細かな点を省いても本質を損なわない程度の単純化が必要である。

$$\text{Modeling} \Rightarrow \text{Optimization} \Rightarrow \text{Verification}$$

意思決定者が不満足な結果のときはモデルを再検討・修正し、プロセスを繰り返す必要がある。最適化における評価は必ずしも客観的・定量的なものではなく意思決定を行う人の感覚的・主観的评价となることがあるが、評価は価値に関わるものなので意思決定者に責任ある依存が必要である。工学分野で数理計画法(mathematical programming) が取り扱う諸問題は数理計画問題(mathematical program) と呼ばれ、次のように定式化される。

$$\text{Minimize } f(x) \tag{3.1}$$

$$\text{Subject to } x \in S \tag{3.2}$$

x は決定変数(decision variable)からなるベクトルで、システムを最適化するにあたって、意思決定者が制御可能ないくつかの種類を表している。 $f(x)$ は決定変数のベクトル x を評価する関数で、評価関数・目的関数(objective function)と呼ばれる S は x が取り得る範囲を形式的に表したもので、制約領域、実行可能領域(feasible region)または実行可能集合(feasible set)と呼ばれる。上の式は、『与えられた制約領域 S の中から目的関数を最小化する x を求めよ』という問題を簡略化したものである。目的関数を最小化する x を最適解(optimal solution)、 $x \in S$ を満たす x を許容解・実行可能解(feasible solution)という。

本研究である無反射境界作成のため離散モデル部の最適化は数学的構造に従うと、組み合わせ的な性質を現す組み合わせ最適化問題(combinatorial optimization problem)・離散的最適化問題(discrete optimization problem)であり、非線形最適化問題といえる。大域的探索かつ設定変数領域が自由に決定できる遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)と、パラメータの変動に伴う挙動の解を効率良く計算できる感度解析(SA: Sensitivity analysis)を合わせたハイブリット手法、遺伝的局所探索法(Genetic local search method)により最適化を実行する。無反射境界を最適化で作成するためには無反射を工学的意味で捉えることのできる評価関数・目的関数(objective function) S を提案し、境界離散モデル別に最適解を比較検討して最良な評価関数の提案を目指す。

3.2 遺伝的アルゴリズム

3.2.1 概要

一般に生物は、環境に対する適応度(fitness)の高い個体ほどその特性を後の世代に受け継がれるように、増殖と淘汰を繰り返して進化していく考えを模倣して、1960年代に Holland によって構築されたアルゴリズムである。環境に対する適応度の高い個体、すなわち問題に対して評価の高い解の特性を残し、より良い解になるよう進化させる手法である。生物が増殖する際には必ず染色体を通してその情報を受け渡すが、遺伝的アルゴリズムでは解を表現する個体解の候補が進化していくので、個々の解の候補を符号化したものを染色体、構成要素であるそれぞれの符号を遺伝子と呼ぶ。遺伝的アルゴリズムを適用して解く最適化問題は、非線形関数の最大値または最小値を探索する問題、しかもパラメータは2つ以上で、多峰性の解空間をもつことが多い。遺伝的アルゴリズムは本質を損なわないならば評価が明確に定量的な形でなくてもよく、局所的探索と大域的探索能力のある染色体群による多点探索によって最適解を求められる。

■ 遺伝的アルゴリズムの流れ

1. 染色体の集団を初期化する。
2. 個々の染色体を評価する。
3. 染色体を交叉交配、突然変異させ新しい染色体を生成する。

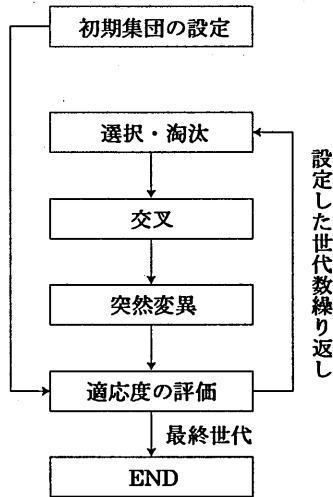
初期値にあたる染色体(chromosome)の初期世代をランダム発生させる。染色体の評価は問題に対する適合性であり、染色体の優秀さを示す尺度となる。評価は大抵スカラ値で与えることが多く、問題に適した関数で求める。この値によって優秀な染色体の形質がより遺伝しやすいような操作を行なう。

交叉(crossover)は親から子の世代を構成する場合に親の染色体の一部を他の親の染色体の一部と入れ替える。こうしてできた子の染色体が示す情報は親のものとはかなり異なったものになる場合もある。突然変異(mutation)は交叉で生成された新たな染色体に対して、ある確率で起こさせるようにする。突然変異は染色体群の多様性を維持し、局所解に陥らないようにするために必要である。突然変異が起こり過ぎると親の良い形質が子に遺伝しにくくなるので、比較的小さな確率にするのが普通である。

遺伝的アルゴリズムの利点を十分引き出すためには、問題の解をどのように染色体として表現するか遺伝子のコーディング法と、親の形質をどのように遺伝させるか交叉ということが重要である。遺伝子のコーディング(coding)・交叉の適切さを測る規範として次の4項目が提案されている。

- ・完備性 : 解候補はすべて染色体として表現できる
- ・健全性 : 染色体はすべて解候補と対応し、致死遺伝子の生成が抑制される
- ・非冗長性 : 染色体と解候補は1対1対応となる
- ・形質遺伝性 : 親の形質は子に適切に継承される

3.2.2 遺伝的アルゴリズムの操作



- ① 初期値にあたる染色体(境界離散モデル部)の初期世代をランダムに個体数分設定する
- ② 評価関数による適応度の評価を行う
- ③ 適応度を基に選択・淘汰を行う
- ④ 残った固体の交叉を行う
- ⑤ 突然変異を与え、解の一樣化を防ぐ
- ⑥ 新しい世代の固体集団に対して、同様に適応度の評価、選択・淘汰、突然変異(②～⑤)を世代数分繰り返す

Fig 3.1 Process of GA

■ 初期集団の設定

離散部の粘性減衰係数 c^* ，ばね剛性 k^* の染色体の初期世代をランダムに与える．各個体は 2 進(binary)コードにより表現される．この表現を遺伝子型(genotype:Gtype)と言い，Gtype の個体を 10 進数で表わしたものを表現型(phenotype:Ptype)と言う．(Fig3.2 参照)

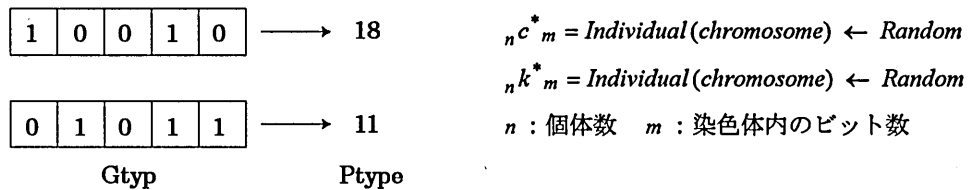


Fig 3.2 Generate individual

■ 適応度の評価

各個体を Ptype で表現し設定された評価関数 S を計算し各個体の適応度を求める．適応度が高いものほど良い固体とみなす．

本研究では無反射境界作成を目的としているため，評価関数自体に工学的無反射の意味合いを含む必要があるので，いくつかの評価関数 S を提案する．また，評価関数による適応度を求める際の解析モデルの動的解析はこの時点で計算を行う．

$$\text{Minimize } f(x)$$

$$\text{Subject to } x \in S$$

第3章 最適化手法

■ 選択・淘汰

GA で新しい個体を生み出す時の原則は「適応度の大きいものほどたくさんの子供を産むようにする」と言うことである。これを実現するには様々な方法がある。集団数を n として固定する。各個体に $1, \dots, n$ には適応度 $f_1, \dots, f_n$ が決まっている。選択・淘汰は n 個体の集団から重複を許して n 個体を選ぶと言う方法である。このとき、適応度の高いものほどたくさん選ぶ。この選び出された n 個体に対して、交叉や突然変異を行って次世代の子を作り出すのである。

本研究ではルーレット戦略、エリート戦略を用いることにより適応度の高い個体がより多くの子孫を残す機構となるように選択・淘汰(selection)を行う。これにより、よりよい個体を形成する遺伝子(gene)が集団中に広がるのである。

□ ルーレット戦略

適応度に比例した割合で選択する方法。一番単純な方法は重み付けのルーレットによるものである。これは適応度に比例した領域をもつルーレットを回し、ルーレットの矢が指した領域の個体を選び出すというものである。

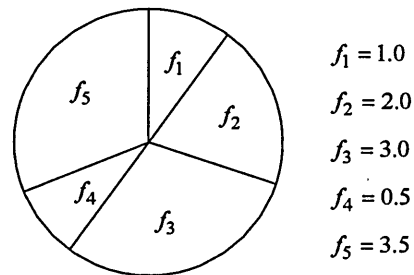


Fig 3.3 Roulette strategy

このときの重み付けのルーレットでの選択を次のように再現する。(Fig3.3 参照)

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 = 10.0 \quad (3.3)$$

適応度の合計は 10.0 より 0 から 10 までの乱数を一様に発生させ次の規則に従って選択する。

乱数の値が 0.0~1.0	→	f_1	
乱数の値が 1.0~3.0	→	f_2	
乱数の値が 3.0~6.0	→	f_3	
乱数の値が 6.0~6.5	→	f_4	
乱数の値が 6.5~10.0	→	f_5	
0.8, 6.9, 5.4, 8.2, 2.6	→	f_1, f_5, f_3, f_5, f_2	(3.4)

という個体を選ばれる。この方式で、集団数(n 個体)分を選び出すのがルーレット方式である。

□ エリート戦略

エリート戦略は、集団の中でもっとも適応度の高い個体をそのまま次世代に残す方法である。この個体は交叉、突然変異による情報の破壊をしてならない。ただし、エリートの個体が遺伝子集団中に急速に広がる可能性が高いため局所解(local minima)に陥る危険性もある。

第3章 最適化手法

■ 交叉

交叉は、二つの親の染色体を組替えて子の染色体を作る操作である。交叉する位置を一つ決めて、その前と後ろでどちらの親の遺伝子型を受け継ぐかを変えるこれを一点交叉(one point crossover) 法, 単純交叉(simple crossover) という。Fig3.4では、四番目と五番目の遺伝子座の間に交叉位置があり、個体Aの染色体の先頭から四番目までと個体Bの五番目から最後までの遺伝子が、新しい個体の遺伝子となる。また、その逆が、他の新しい個体の遺伝子となる。その他にもn点交叉、交叉時にマスクをかけてそれによってどちらの親の遺伝子を受け継ぐかを決定する一様交叉が存在するが本研究ではGAの性能ではなく評価関数に依存させるために単純な一点交叉を用いる。

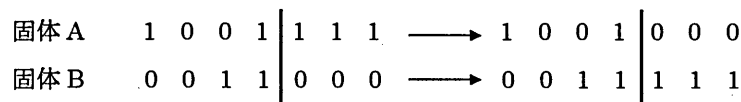


Fig 3.4 One point crossover

■ 突然変異

突然変異は、遺伝子を一定の確率で変化させる操作である。Fig3.5に突然変異の例を示す。突然変異は、あまり大きな変異確率に設定すると、ランダムサーチと化してしまうが、ある程度の突然変異は必要である。突然変異がない場合、初期の遺伝子組み合わせ意外の空間を探索することは出来ず、求められる解の質に限界が出てくる。一般的に、突然変異は固定された確率で各遺伝子が変化するように設定するが、突然変異率を動的に変化させる手法もある。突然変異には、集団中の遺伝子型の多様性を確保し、できるだけ広い解空間を探索しようという狙いがある。交叉と同様に、突然変異の適用確率を突然変異率という。単峰性関数(唯一の極値があり、それが最適値である関数)のときは突然変異率を遺伝子長の逆数とする。これは世代ごとに各遺伝子につき平均一つの遺伝子座で突然変異が起こることを意味する。また初めのうちは大きめの突然変異率を採用し、世代を重ねるにつれて小さくして最終的に遺伝子長の逆数に近づけるのが良い。本研究での突然変異率は近年の研究から以下のように提示する。(式 3.5 参照)

$$\text{Mutation rate} = \frac{2}{\text{Number of bits of chromosomes}} = 0.25 \quad (3.5)$$

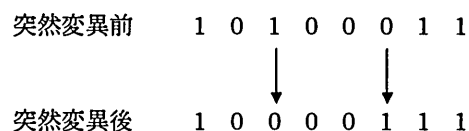


Fig 3.5 Mutation

3.3 感度解析

3.3.1 概要

構造部の各部のパラメータが変化した場合に、変位、加速度、応力等の挙動がどのような影響を受けるのか解析を行うことは重要である。感度解析はパラメータの変化が線形計画問題の最適化に与える影響を分析することである。

感度解析は次のような諸問題に対し有力な解析手段である。

1. パラメータの重要度の判別
2. 感度(傾斜)に基づく最適化手法
3. パラメータの変動に伴う挙動等の解を計算する効率のよい再解析(Reanalysis)

■ 感度解析の定義

$x_1, x_2, \dots, x_n$ のパラメータからなるスカラー関数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ を考える。パラメータのいくつかは、元の値から微小変化したとする。一般性を失わないために、ここではすべての変数がそれぞれ微少量 $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$ だけ変化すると過程して、関数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ の値の変化を調べる。関数がパラメータに関して連続微分可能であれば

$$\begin{aligned} f(x_1 + \delta x_1, x_2 + \delta x_2, \dots, x_n + \delta x_n) &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &+ \left(\delta x_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + \delta x_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + \dots + \delta x_n \frac{\partial}{\partial x_n} \right) f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &+ \frac{1}{2} \left(\delta x_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + \delta x_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + \dots + \delta x_n \frac{\partial}{\partial x_n} \right)^2 f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \dots \end{aligned} \quad (3.6)$$

と書ける。ここに式(3.6)の右辺の第1項は、元の関数の値であり、第2項、第3項等はテーラー展開の1次の項、2次の項等を示す。いま記述を簡便にするために、

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T \quad (3.7)$$

$$\delta X = \{\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n\}^T \quad (3.8)$$

と書けば、式(3.6)は、

$$f(X + \delta X) = f(X) + f_X(X) \delta X + \frac{1}{2} \delta X^T f_{XX}(X) \delta X + \dots \quad (3.6')$$

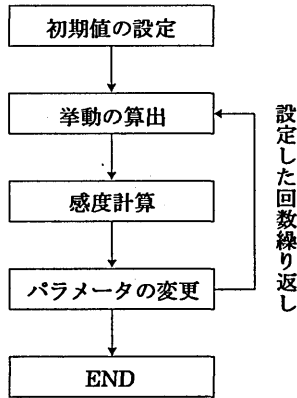
と略記することができる。ここに

$$f_X(X) = \text{grad} \cdot f(X) = \nabla f(X) = \left\{ \frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right\} \quad (f(X) \text{ の傾斜ベクトル}) \quad (3.9)$$

$$f_{XX}(X) = \text{Hess}(X) = H(X) \quad (f(X) \text{ の Hessian マトリクス}) \quad (3.10)$$

と呼ばれているもので、それぞれパラメータの変動に対する元の関数の変化分のうち、 δX の1次及び2次のオーダーの比例定数で、1次の感度、2次の感度と呼ばれる。同じく一般に δX の n 次のオーダーの比例定数は、 n 次の感度と呼ばれる。感度解析とは、1次の感度、1次の感度等の値を計算するための手法と言える。

3.3.2 感度解析の操作



- ① 初期値(境界離散モデル部)を設定する
- ② 線形加速度法を用いて変位, 速度, 加速度を算出する
- ③ 各パラメータの評価関数に対する感度を算出する
- ④ 評価関数によって評価された境界離散モデル部の各パラメータを感度の良い方向に変更する
- ⑤ 設定した回数繰り返し(②~④)最適な値を導く

Fig 3.6 Process of GA

■ 感度計算

動的応答時の変位, 速度, 加速度等の感度計算は, 時間変数 t が直接関与しているので, 時間とともに大きさが変化し, 振動現象に見られるような局所的な極大, 極小点が多く現れる. よって時間変数 t の除去などを含めた合理的な評価方法が必要である.

本研究では, これを踏まえ, 複雑な入力波形や, 非線形問題に広く適用されている逐次積分法を用いることにより最適化を行う.

□ 逐次積分法と感度解析

逐次積分法では時刻 t の変位, 速度, 加速度などの応答所値がすべて既知であるとして, 微小時間 Δt 経過後の運動方程式をたてる. (式 2.34 参照)

$$[M]\{\ddot{x}(t+\Delta t)\} + [C]\{\dot{x}(t+\Delta t)\} + [K]\{x(t+\Delta t)\} = \{f(t+\Delta t)\} \quad (3.11)$$

時刻 $t+\Delta t$ における変位, 速度, 加速度を以下のように仮定する. (式 2.35, 2.36, 2.39 参照)

$$\{x(t+\Delta t)\} = \{x(t)\} + \Delta t \{\dot{x}(t)\} + \frac{(\Delta t)^2}{3} \{\ddot{x}(t)\} + \frac{(\Delta t)^2}{6} \{\ddot{x}(t+\Delta t)\} \quad (3.12)$$

$$\{\dot{x}(t+\Delta t)\} = \{\dot{x}(t)\} + \Delta t \frac{\{\ddot{x}(t)\} + \{\ddot{x}(t+\Delta t)\}}{2} \quad (3.13)$$

$$\{\ddot{x}(t+\Delta t)\} = \left[[M] + \frac{\Delta t}{2} [C] + \frac{(\Delta t)^2}{6} [K] \right]^{-1} \quad (3.14)$$

$$\left\{ \{f(t+\Delta t)\} - [C] \left\{ \dot{x}(t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{x}(t) \right\} - [K] \left\{ x(t) + \Delta t \dot{x}(t) + \frac{(\Delta t)^2}{3} \ddot{x}(t) \right\} \right\}$$

時刻 $t+\Delta t$ における速度, 加速度の感度は, 式(3.13), (3.14)の両辺を設計パラメータ x_j で微分することにより算出できる.

$$\frac{\partial \{\dot{x}(t+\Delta t)\}}{\partial x_j} = \frac{\partial \{\dot{x}(t)\}}{\partial x_j} + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \frac{\partial \{\ddot{x}(t)\}}{\partial x_j} + \frac{\partial \{\ddot{x}(t+\Delta t)\}}{\partial x_j} \right\} \quad (3.15)$$

第3章 最適化手法

$$\frac{\partial \{\ddot{x}(t+\Delta t)\}}{\partial x_j} = \left[[M] + \frac{\Delta t}{2} [C] + \frac{(\Delta t)^2}{6} [K] \right]^{-1} \left\{ A_1 \{x(t)\} + A_2 \{\dot{x}(t)\} + A_3 \{\ddot{x}(t)\} + [K] \frac{\partial \{x(t)\}}{\partial x_j} + A_4 \frac{\partial \{\dot{x}(t)\}}{\partial x_j} + A_5 \frac{\partial \{\ddot{x}(t)\}}{\partial x_j} + A_6 \{\ddot{x}(t+\Delta t)\} \right\} \quad (3.16)$$

ここに $A_1 \sim A_6$ は以下に示す.

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\partial [K]}{\partial x_j} & A_2 &= \frac{\partial [C]}{\partial x_j} + \Delta t \frac{\partial [K]}{\partial x_j} & A_3 &= \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial [C]}{\partial x_j} + \frac{(\Delta t)^2}{3} \frac{\partial K}{\partial x_j} \\ A_4 &= [C] + \Delta t [K] & A_5 &= \frac{\Delta t}{2} [C] + \frac{(\Delta t)^2}{3} [K] & A_6 &= \frac{\partial [M]}{\partial x_j} + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial [C]}{\partial x_j} + \frac{(\Delta t)^2}{6} \frac{\partial [K]}{\partial x_j} \end{aligned}$$

以上により、初期状態における感度の値が得られれば順次各時刻の感度を計算することができる。初期時刻における感度は、一般に初期変位や初期速度が与えられた系では、変位や速度の初期感度の値は0となり、加速度の初期感度は用意に計算できる。

3.4 遺伝的局所探索法

遺伝的局所探索法とは、遺伝的アルゴリズムと感度解析を組み合わせ解析する方法である。Fig3.7 を見てほしい。関数 $f(x)$ の最適解を求めるにあたって2つの手法がどのように動くのかを確認する。この関数の場合、最適解は solution B になる。まず、遺伝的アルゴリズムは、探索範囲の広い問題の最適値を求めるのに適しているという特徴がある。そのため青い矢印で表すように、ランダムサーチを行い、遺伝を繰り返すことにより最適解 solution B に限りなく近づけることができる。しかし、あくまでランダムサーチであるため、厳密に局所解を見つけるには時間がかかり、解の信憑性にかける部分がある。一方、感度解析は、厳密な最適解を求めるのに適しているという特徴がある。赤い矢印で表すように局所探索を行い、微分を繰り返すことで解に達することができる。しかし、初期値に左右され、line A を境に局所解 solution A と最適解 solution B のどちらかに到達することになる。つまり、局所解を求めることに重点を置いているので、他によりよい解がある場合、そちらを探索することができないということになる。

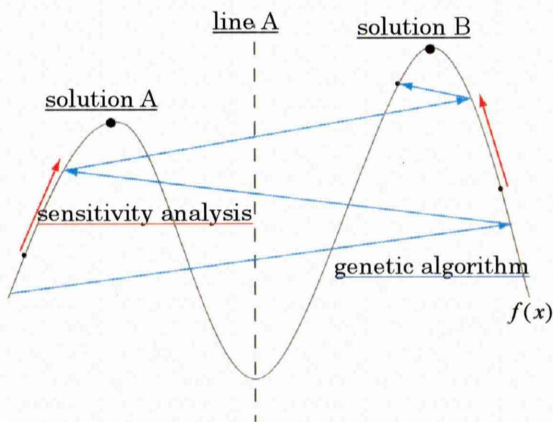


Fig3.7 A characteristic of GA / the SA

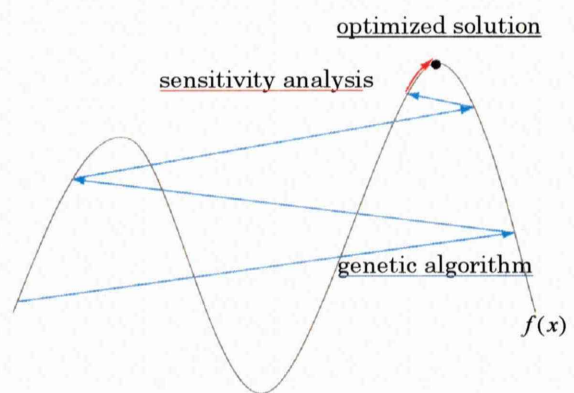


Fig3.8 Genetic Local Search Method

遺伝的アルゴリズムと感度解析にはそれぞれ長所と短所を持っている。しかし、この2つの手法をうまく使い分けることで互いの長所を生かし、短所をなくすることができる。そこで、遺伝的局所探索法ではFig3.8のように、まず遺伝的アルゴリズムでランダムサーチを行い、最適解に近づける。その後、感度解析により局所解まで正確に導く。そうすることで、解析のスピードを上げ、より高精度な解を導き出すことが可能となる。

以上のように、遺伝的局所探索法は遺伝的アルゴリズムが持つ大域的解析と、感度解析が持つ局所探索という長所の両方を持つ。本論文では遺伝的アルゴリズムのみの解析とともに、遺伝的局所探索法による解析も行う。

第4章

手法の検討

- 4.1 工学的評価
- 4.2 1次元棒材概要
- 4.3 1次元棒材解析結果
- 4.4 2次元棒材概要
- 4.5 2次元棒材解析結果

4.1 工学的評価

いくつかの境界離散モデル，評価関数を提案する前に本研究の評価関数に持たせる工学的に必要な基本事項を解析モデル及び解析拡張モデルを対象として述べておく．

■ 完全透過境界の意味

完全透過境界は，地震時に有益となる狭領域解析を行う上で重要となる半無限に広がる地盤（実地盤）の再現，即ち逸散波を無反射するような境界の作成を意味している．本研究では半無限に広がる地盤の一部をピックアップし1次元，2次元の棒材，仮想地盤と仮定して外力の完全透過を狙う．また，完全透過を1次元棒材で考えた場合，理論解を求めることが出来る．

「無反射境界＝完全波動透過境界＝半無限棒理論解」

本研究では1次元での理論解が存在することに対し，完全波動透過の意味を，理論解と解析領域に存在する特性（性質）に着目・比較することにより検討する．しかし，2次元は理論解が存在しないことをここで述べておく．

■ 狭領域での地盤再現

現在までの研究では，広領域での解析においてレイリー減衰を約3%導入すれば無反射境界を再現することが可能である．しかし，本研究の目的はレイリー減衰だけに依存したものではなく，最適化させる際の初期形状の調節のみに利用し，境界離散モデルによる狭領域での逸散波の完全透過の検証を行う．

■ 逸散波を想定した場合に応用できる解析

地震発生後に建物を新たな震源として生じる逸散波はあらゆる種類の周波数をもち，同時に解析対象の物理的モデルは時刻的に急激に変化を生じ，あらゆる挙動を示す．以上より想定される外力の完全透過具合を検証するには周波数領域と時刻歴領域での相互解析が必要である．本研究ではその足がかりとして時刻歴領域での検証を行う．

4.2 1次元棒材解析概要

1次元時刻歴解析の検討にあたり、周波数領域、時刻歴領域の相領域で理論解を求められるので理論解に近似させることは妥当であるが、利用性があくまで1次元半無限棒材であるため、拡張を見越した場合は理論解に依存する評価方法は好ましくないと考え、本研究では解析モデル、評価関数、最適化手法の違いによる無反射境界作成への影響を検証し、境界面で波動が反射しない境界離散モデルを作成することを目的とする。

4.2.1 1次元解析モデル

本研究では、Viscous boundary model, Lysmer's model, Luco's model の3種類の境界離散モデルを用いて比較・検証を行う。Lysmer's model を以下に示す。質点番号はモデルの左端(入力外力点)から順に1～nとしおり、FEM 理論により解析対称部に境界離散モデルを導入し検証を行う。(Fig.4.1 参照)

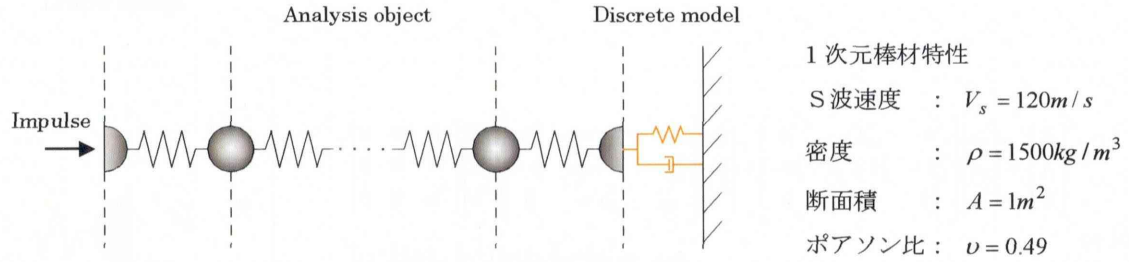


Fig 4.1 1D analytical model (Lysmer's model)

■ 離散モデルの定式化

FEM 理論で作成したマトリクス $[M^*], [K^*], [C^*]$ に境界離散モデル部マトリクス $[M^*], [C^*], [K^*]$ を付加する。以下にマトリクス作成手順を示す。

□ Viscous boundary model

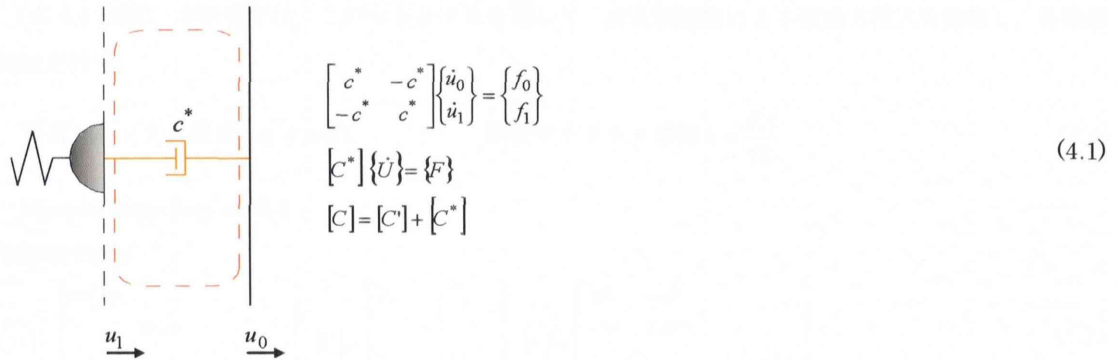
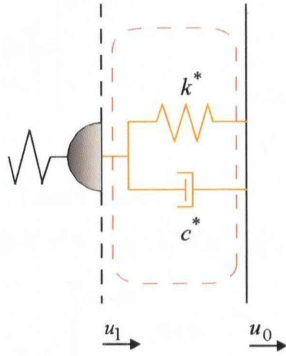


Fig 4.2 Viscous boundary model

□ Lysmer's model



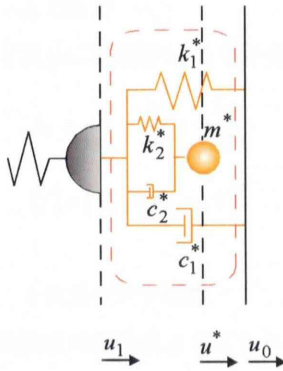
$$\begin{bmatrix} c^* & -c^* \\ -c^* & c^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_0 \\ \dot{u}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k^* & -k^* \\ -k^* & k^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{Bmatrix}$$

$$[C^*] \{\dot{U}\} + [K^*] \{U\} = \{F\}$$

$$[C] = [C'] + [C^*], [K] = [K'] + [K^*]$$
(4.2)

Fig 4.3 Lysmer's model

□ Luco's model



$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_0 \\ \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}^* \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1^* & -c_1^* & 0 \\ -c_1^* & c_1^* + c_2^* & -c_2^* \\ 0 & -c_2^* & c_2^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_0 \\ \dot{u}_1 \\ \dot{u}^* \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1^* & -k_1^* & 0 \\ -k_1^* & k_1^* + k_2^* & -k_2^* \\ 0 & -k_2^* & k_2^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$
(4.3)

$$[M^*] \{\ddot{U}\} + [C^*] \{\dot{U}\} + [K^*] \{U\} = \{F\}$$

$$[M] = [M'] + [M^*], [C] = [C'] + [C^*], [K] = [K'] + [K^*]$$

Fig 4.4 Luco's model

■ 1次元モデルのマトリクス

境界離散部マトリクスを付加したマトリクス $[M], [C], [K]$ を以下に示す。マトリクスの各要素は次式とする。(式 4.4 参照)。本研究では、このマトリクスを用いて、非比例減衰による振動方程式を展開し、各領域で検証を行う。

$$\text{質量マトリクス要素: } m = \rho A T L \quad \text{剛性マトリクス要素 } k = \frac{EA}{TL} \quad (4.4)$$

□ Viscous boundary model

境界離散モデル: c^*

$$[M] = \begin{bmatrix} m/2n & & & \\ & m/n & & \\ & & \ddots & \\ & & & m/2n \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 0 & \\ & & & c^* \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} nk & -nk & & \\ -nk & 2nk & \ddots & \\ & \ddots & \ddots & -nk \\ & & -nk & nk \end{bmatrix}$$
(4.7)

□ Lysmer's model

離散モデル: c^*, k^*

$$[M] = \begin{bmatrix} m/2n & & & \\ & m/n & & \\ & & \ddots & \\ & & & m/2n \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 0 & \\ & & & c^* \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} nk & -nk & & \\ -nk & 2nk & \ddots & \\ & \ddots & \ddots & -nk \\ & & -nk & nk+k^* \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

□ Luco's model

離散モデル: $c_1^*, k_1^*, (m^*, c_2^*, k_2^* : \text{動吸振器})$

$$[M] = \begin{bmatrix} m/2n & & & \\ & m/n & & \\ & & \ddots & \\ & & & m/2n \\ & & & & m^* \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & 0 & & \\ & & & c_1^*+c_2^* & -c_2^* \\ & & & -c_2^* & c_2^* \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} nk & -nk & & & \\ -nk & 2nk & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & & -nk \\ & & -nk & nk+k_1^*+k_2^* & -k_2^* \\ & & & -k_2^* & k_2^* \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

■ 入力外力

遠方質点に初速度 $\dot{x}_0$ を微小時間だけ入力する。式(4.8)参照

$$\dot{x}_0 = \frac{1}{m_1} = \frac{2n}{m} = \frac{2n}{\rho 4TL}$$

$$\{f\} = [\dot{x}_0, 0, 0, \dots, 0]^T \quad (0 \sim 0.01 \text{ sec}) \quad (4.8)$$

■ 1次元ヤング係数

地震波は弾性波と考えられる。弾性波には実体波として疎密波 (P 波・縦波) と振れ波 (S 波・横波) とがある。

1次元棒材の完全透過境界を目指す為S波のみを考える。S波を V_s とすれば、次式が求まる。

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\nu)}} \quad (4.9)$$

式(4.9)を変形するとヤング係数が求まる。

$$E = 2 \times \rho \times (1+\nu) \times (V_s)^2 \quad (4.10)$$

ここで、ポアソン比 ν 、密度 $\rho (N/m^3)$ 、波速度 $V_s (m/s)$ 、ヤング率 $E (N/cm^2)$ である。

本研究では、地盤への拡張を見越した研究を行う為、仮想地盤を想定している。そのため、ポアソン比は建築基礎構造設計指針(日本建築学会)の中で、飽和粘土はポアソン比 0.5、不飽和粘土は 0.37~0.49 とされている。今回、飽和粘土のようなところが建築対象となることは少ないと考え、ポアソン比を 0.49 と設定し、密度を $1500 (N/m^3)$ 、波速度を $120 (m/s)$ と設定している。

4.2.2 評価関数

1次元解析の評価関数の検討にあたり、2次元地盤拡張のため理論解に近似させる事を目的とするのではなく、完全波動透過の意味を理論解と解析領域に存在する特性（性質）に着目し、複数の評価関数を比較・検証を行う。例として Lysmer's model を以下に示す。

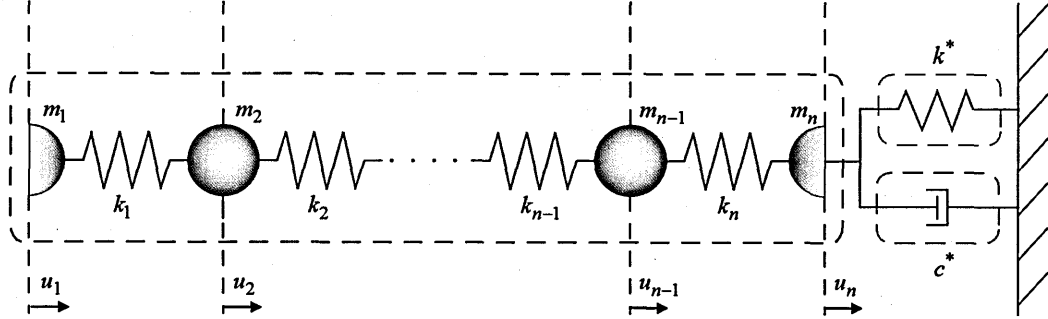


Fig 4.5 1Dim Analytical model (Lysmer's model)

■ 全力学エネルギー評価関数（青色部）

解析対象部の持つ全力学エネルギーを最小化することにより、モデルの挙動を制御することを目指す。

$$\Pi_1 = \frac{1}{2} \int_0^t \left(\{\dot{u}\}^T [M] \{\dot{u}\} + \{u\}^T [K] \{u\} \right) dt \quad (4.11)$$

■ 境界離散モデル部を含む部分の全力学エネルギー評価関数（青色+赤色部）

解析対象部に境界離散モデル部の剛性を含めた場合の全力学エネルギーを最小化することにより、モデルの挙動を制御することを目指す。

$$\Pi_2 = \frac{1}{2} \int_0^t \left(\{\dot{u}\}^T [M] \{\dot{u}\} + \{u\}^T [K] \{u\} + k^* u_n^2 \right) dt \quad (4.12)$$

■ 減衰エネルギー評価関数（緑色部）

境界離散モデル部分に影響する減衰効果に着目し、減衰エネルギーの総和を最大化することで、モデルの挙動自体を制御することを目指す。

$$\Pi_3 = \frac{1}{2} \int_0^t c^* u_n^2 dt \quad (4.13)$$

■ 多目的最適化評価関数

全力学エネルギー評価関数の最小化と減衰エネルギー評価関数の最大化を同時に解析し、減衰効果を挙げながらモデルの挙動を制御することを目指す。

$$\begin{cases} \Pi_1 = \frac{1}{2} \int_0^t \left(\{\dot{u}\}^T [M] \{\dot{u}\} + \{u\}^T [K] \{u\} \right) dt & (4.11') \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Pi_3 = \frac{1}{2} \int_0^t c^* u_n^2 dt & (4.13') \end{cases}$$

4.3 1次元棒材解析結果

4.3.1 固定端モデル

1次元時刻歴解析を行うにあたり，境界離散モデルを設けない固定端モデルの解析結果について検証を行う．境界離散モデルを設けない固定端の場合，質点の挙動は大きく変位をすると共に長時間振動を続ける．

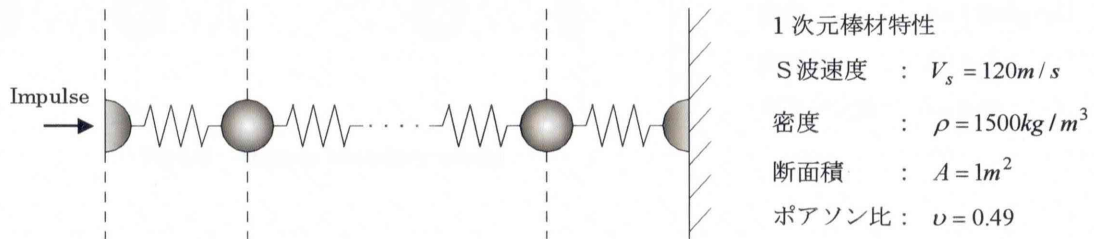


Fig4.6 Fixed end model(1Dim)

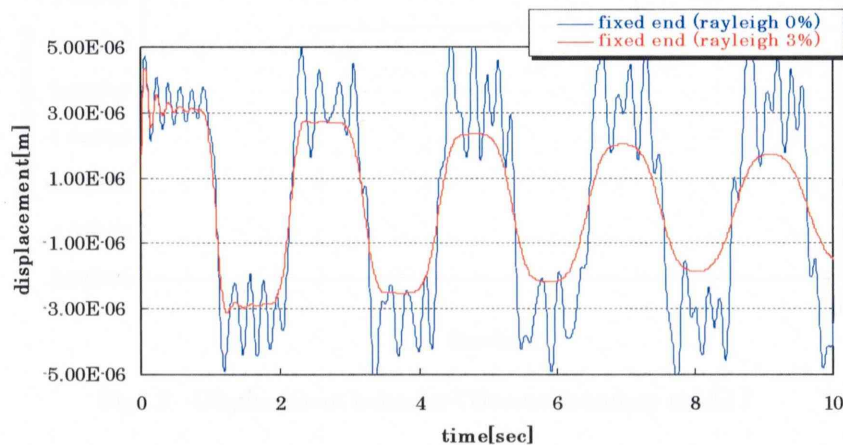


Fig4.7 Displacement behavior (Fixed end model)

4.3.2 1次元遺伝的アルゴリズムによる境界離散モデルの最適化

遺伝的アルゴリズムの「探索範囲の広い問題に適している」という利点を用いて各境界離散モデルを評価関数別に最適化を行う．なお，本研究では遺伝的アルゴリズムの最適化性能自体を評価するのではなく，評価方法・手法の有効性を検討するため，世代数，個体のビット数は多く取らないものとする．しかし今後の研究では解析モデルの領域等に応じて設定数を変更する必要がある．

- ・ 世代数(Generation) : 1000 世代
- ・ 初期個体数(Individual) : 100 個体
- ・ 染色体ビット数(Number of bit) : 16BIT

■ Viscous boundary model

境界離散モデル部に粘性ダッシュポットを設けたモデルを用いて、エネルギー吸収・振動制御を検証する。

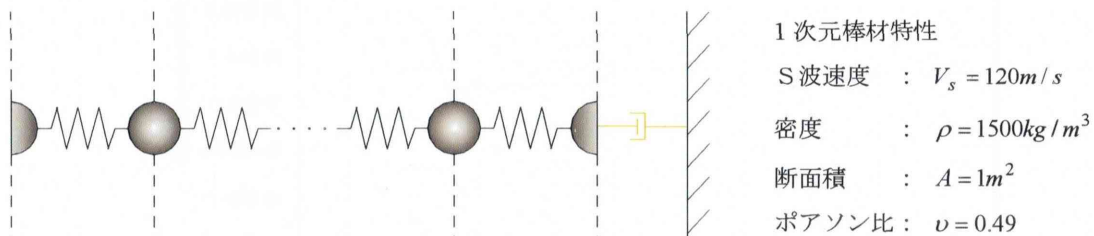


Fig4.8 Viscous boundary model

□ 全力学エネルギー最小化評価関数

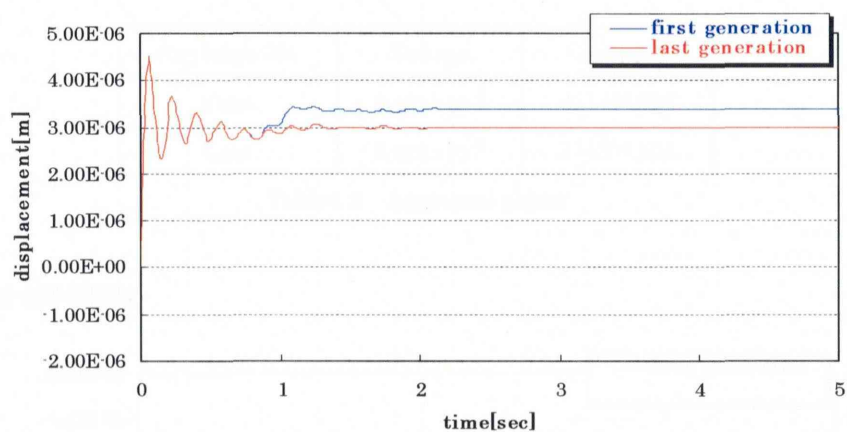


Fig4.9 Displacement behavior (Viscous boundary model)

Rayleigh 3%	Energy	Damping
First	2.217×10^{-3}	243137.255
Last	1.685×10^{-3}	282352.941

Table4.1 Appraisal object

手法の検討

□ 減衰エネルギー最大化評価関数

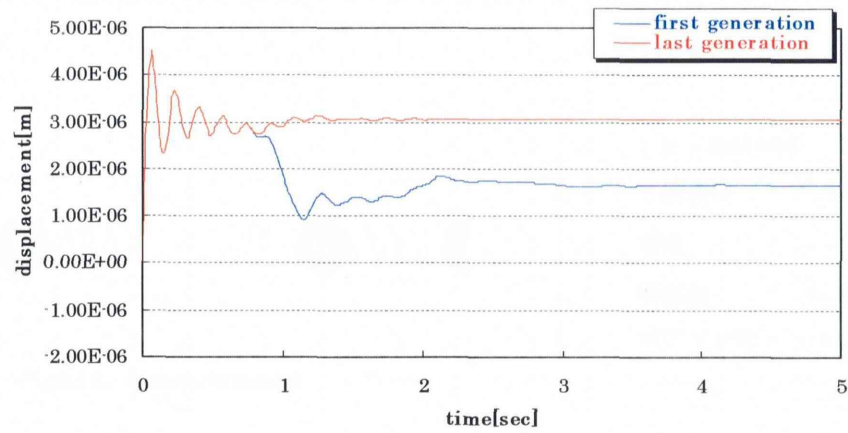


Fig4.10 Displacement behavior (Viscous boundary model)

Rayleigh 3%	Energy	Damping
First	9.452×10^{-4}	462745.098
Last	9.828×10^{-4}	274509.804

Table4.2 Appraisal object

□ 多目的最適化評価関数

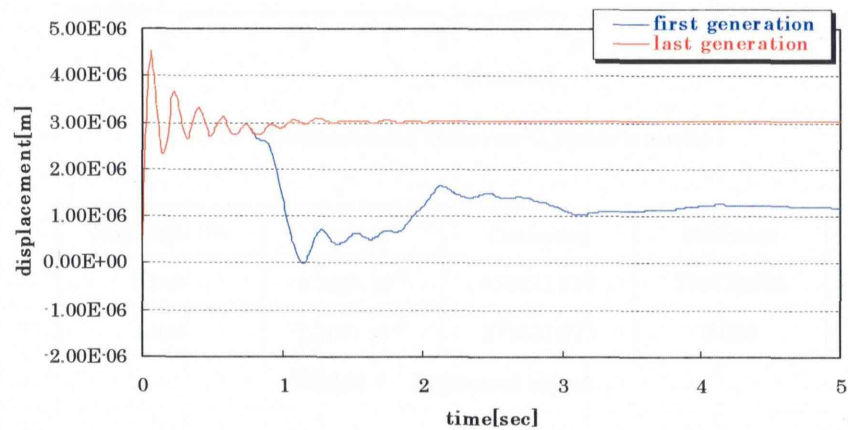


Fig4.11 Displacement behavior (Viscous boundary model)

Rayleigh 3%	Energy	Damping
First	1.525×10^{-3}	631372.549
Last	1.227×10^{-3}	278431.373

Table4.3 Appraisal object

■ Lysmer's model

境界離散モデル部に剛性バネ，粘性ダッシュポットを設けたモデルを用いて，エネルギー吸収，振動制御を検証する．

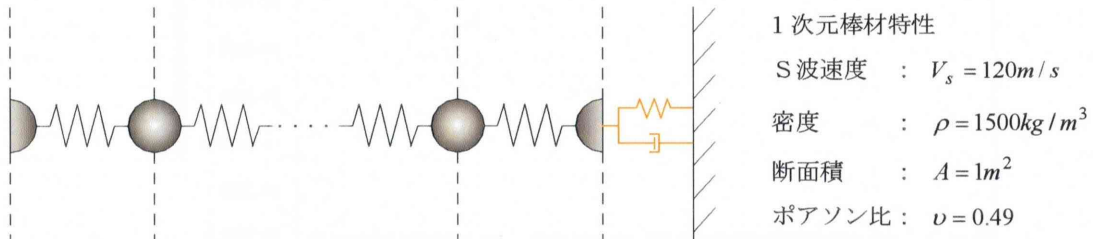


Fig4.12 Lysmer's model

□ 全力学エネルギー最小化評価関数

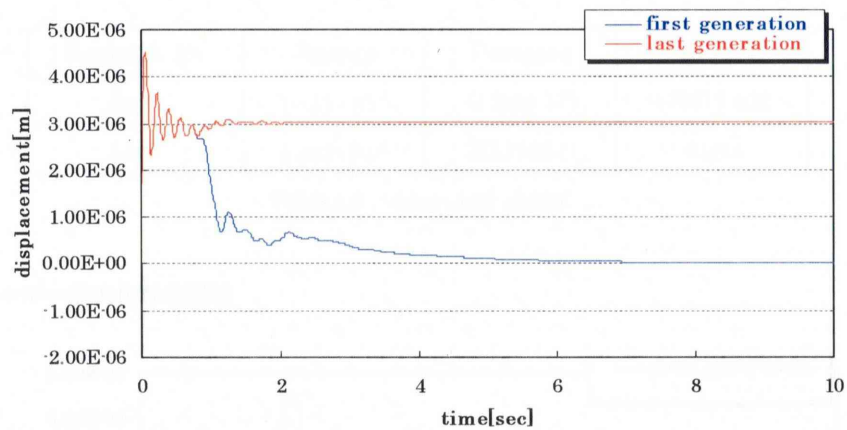


Fig4.13 Displacement behavior (Lysmer's model)

Rayleigh 3%	Energy	Damping	Stiffness
First	2.342×10^{-3}	458823.529	576470.588
Last	2.209×10^{-3}	278431.373	0.000

Table4.4 Appraisal object

手法の検討

□ 全力学エネルギー最小化評価関数（境界離散モデル部含む）

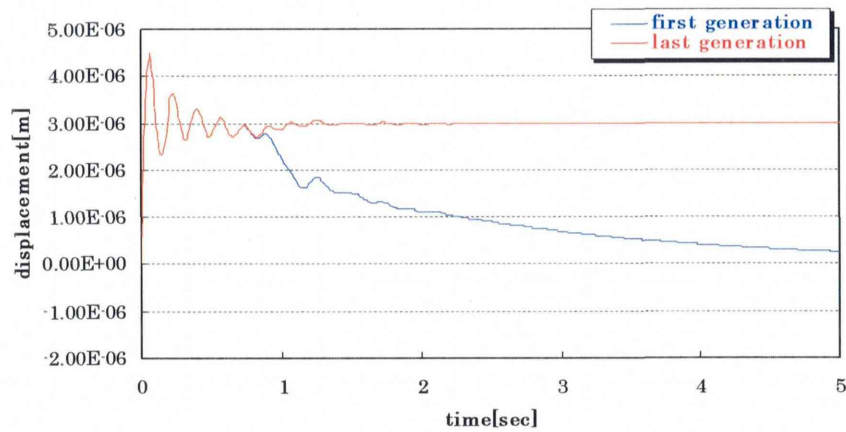


Fig4.14 Displacement behavior (Lysmer's model)

Rayleigh 3%	Energy	Damping	Stiffness
First	2.325×10^{-3}	415686.275	149019.608
Last	2.203×10^{-3}	282352.941	0.000

Table4.5 Appraisal object

□ 減衰エネルギー最大化評価関数

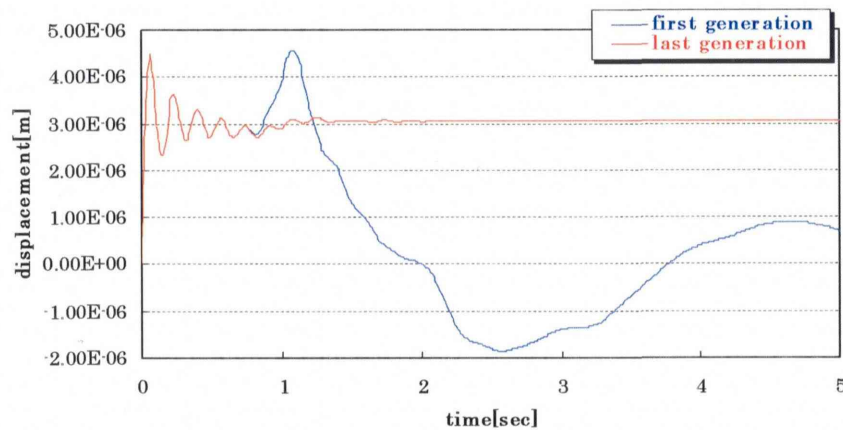


Fig4.15 Displacement behavior (Lysmer's model)

Rayleigh 3%	Energy	Damping	Stiffness
First	9.371×10^{-4}	388235.294	874509.804
Last	9.828×10^{-4}	274509.804	0.000

Table4.6 Appraisal object

□ 多目的最適化評価関数

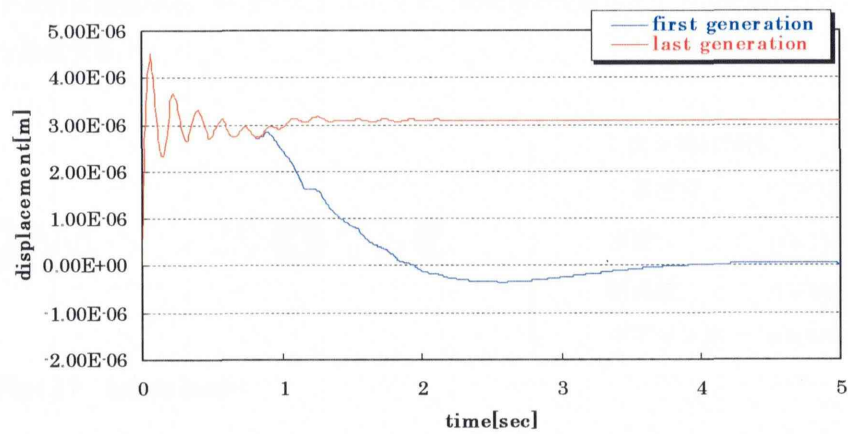


Fig4.16 Displacement behavior (Lysmer's model)

Rayleigh 3%	Energy	Damping	Stiffness
First	1.322×10^{-3}	337254.902	509803.922
Last	1.228×10^{-3}	270588.235	0.000

Table4.7 Appraisal object

■ Luco's model

境界離散モデル部に剛性バネ、粘性ダッシュポット、動吸振器を設けたモデルを用いて、エネルギー吸収、振動制御を検証する。

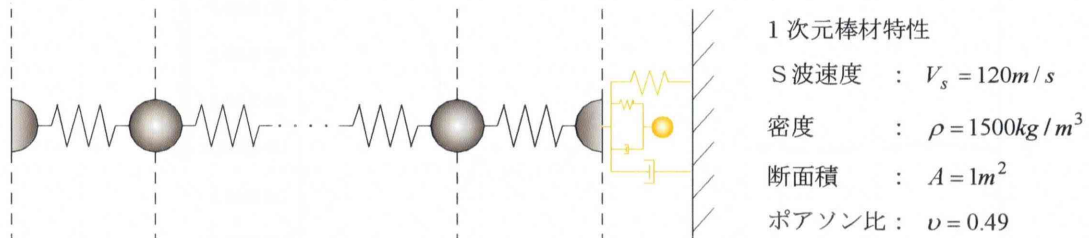


Fig4.17 Luco's model

□ 全力学エネルギー最小化評価関数

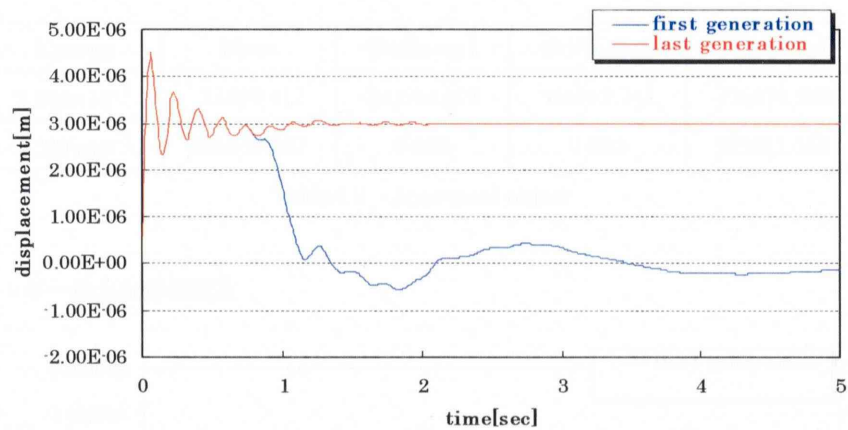


Fig4.18 Displacement behavior (Luco's model)

Rayleigh3%	Energy	Mass	Stiffness1	Stiffness2	Damping1	Damping2
FIRST	2.299×10^{-3}	290196.078	549019.608	180392.157	31372.549	403921.569
LAST	2.209×10^{-3}	243137.255	0.000	0.000	11764.706	0.000

Table4.8 Appraisal object

手法の検討

□ 全力学エネルギー最小化評価関数（境界離散モデル部含む）

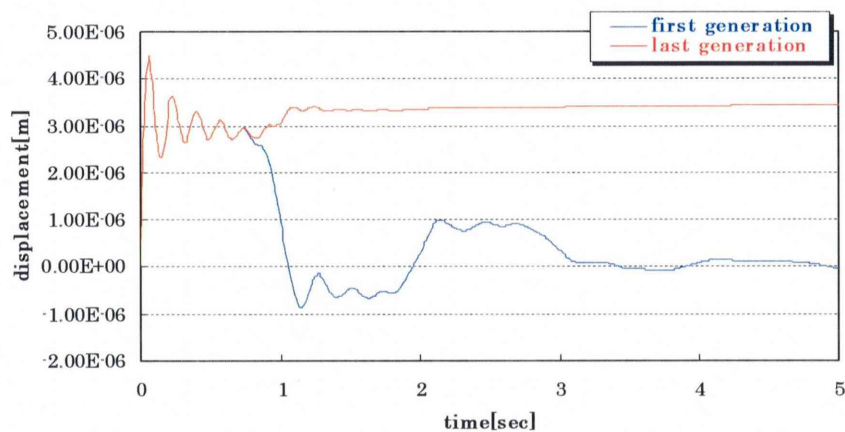


Fig4.19 Displacement behavior (Luco's model)

Rayleigh3%	Energy	Mass	Stiffness1	Stiffness2	Damping1	Damping2
FIRST	2.690×10^{-3}	23529.412	290196.078	956862.745	776470.588	160784.314
LAST	2.222×10^{-3}	666666.667	0.000	0.000	203921.569	43137.255

Table4.9 Appraisal object

□ 減衰エネルギー最大化評価関数

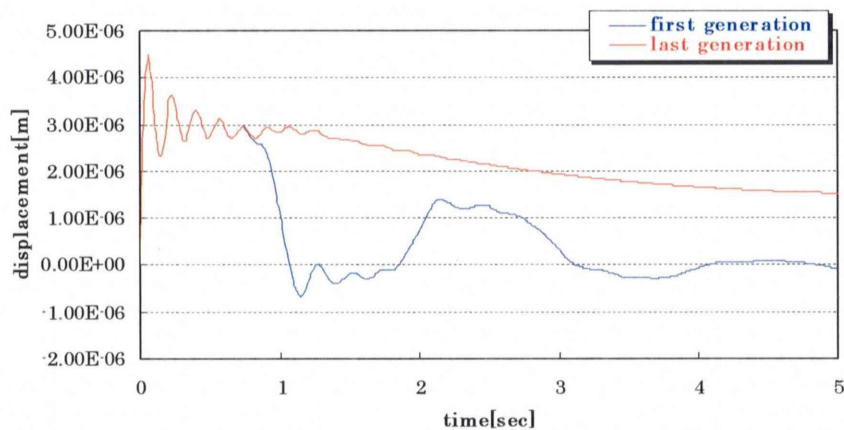


Fig4.20 Displacement behavior (Luco's model)

Rayleigh3%	Energy	Mass	Stiffness1	Stiffness2	Damping1	Damping2
FIRST	7.735×10^{-4}	211764.706	501960.784	776470.589	580392.157	43137.255
LAST	9.807×10^{-4}	968627.451	0.000	70588.235	282352.941	0.000

Table4.10 Appraisal object

□ 多目的最適化評価関数

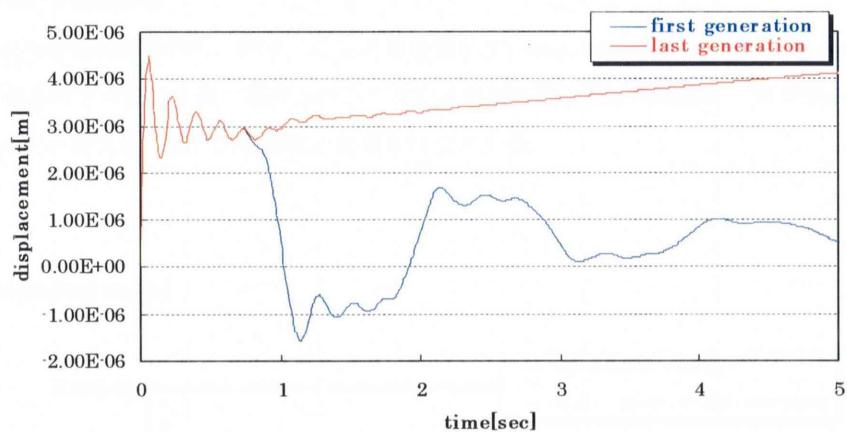


Fig4.21 Displacement behavior (Luco's model)

Rayleigh3%	Energy	Mass	Stiffness1	Stiffness2	Damping1	Damping2
FIRST	2.371×10^{-3}	952941.176	321568.627	11764.706	23529.412	556862.745
LAST	2.118×10^{-3}	215686.275	0.000	43137.255	156862.745	113725.490

Table4.11 Appraisal object

4.3.3 1次元遺伝的アルゴリズム総合評価

■ 境界離散モデル部別評価

最適化の方向性を確実に保持し、収束の良い評価関数を Viscous boundary model, Lysmer's model, Luco's model の各モデル別に比較し検証を行う。なお、検討を行う際評価関数は、全力学エネルギー最小化, 減衰エネルギー最大化, 多目的最適化の比較を行うとする。

☐ Viscous boundary model

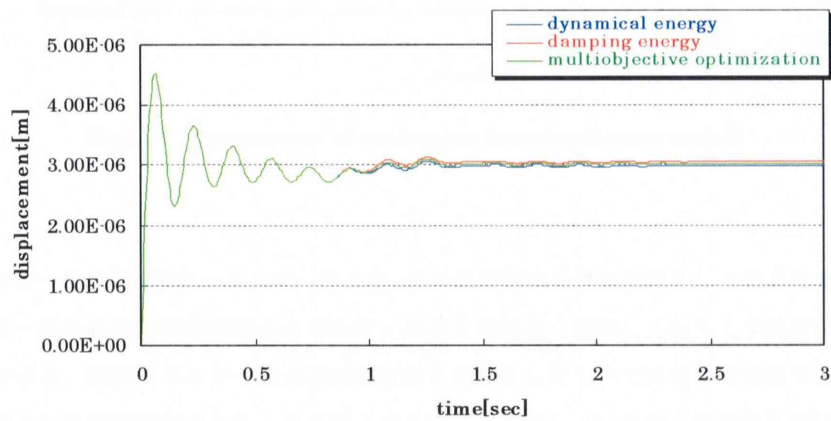


Fig4.22 Comparison of evaluation function (Viscous boundary model)

☐ Lysmer's model

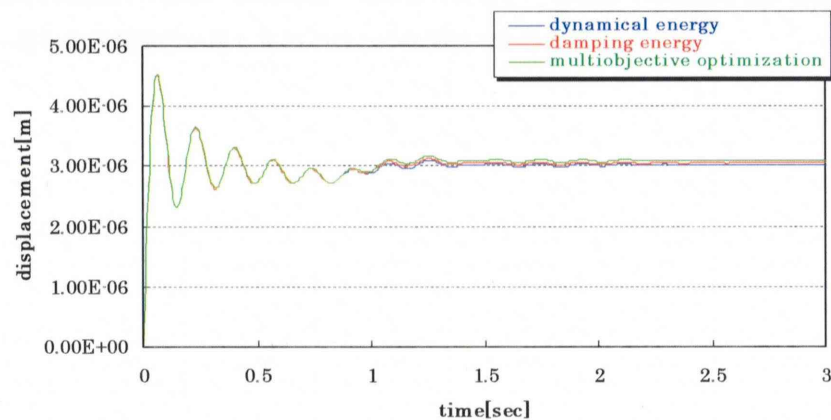


Fig4.23 Comparison of evaluation function (Lysmer's model)

□ Luco's model

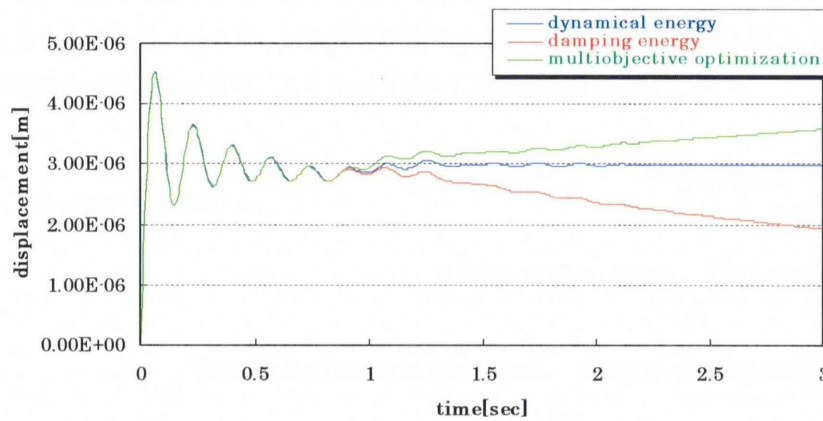


Fig4.24 Comparison of evaluation function (Luco's model)

■ 検証

全力学エネルギー最小化, 減衰エネルギー最大化, 多目的最適化を評価関数として最適化を行った結果, 全力学エネルギー最小化は解析対称部のエネルギー自体を制度良く吸収しており工学的無反射の意味を持たせることができる。減衰エネルギー最大化は無反射を目的としたものではなく減衰効果を最大限有効にすることを目的とした評価関数であり, 全力学エネルギーと関連しているが, 最適化自体には多様な減衰効果最大化があるため有効とは言えない。多目的最適化は全力学エネルギー, 減衰エネルギーの両方を指標として最適化を行うが, 双方の重みの割合によって Luco's model での解析結果のように異なる解を導いてしまうことがある。しかし多目的最適化は複数の目的に関する最適化が行えるので, 今後の研究での発展が期待出来る。

以上より、工学的無反射の意味, 解析時間・効率を考えると, 現段階では無反射境界作成においては全力学エネルギー最小化評価関数が最も有効である評価関数であると言える。

■ 棒材長さ別比較

1次元棒材における更なる解析精度の向上を追及するためにこの解析を行った。本論文では、無限である地盤を解析対象としている。つまり、解析結果が棒材の材長に依存することは好ましくない。今回、この解析を通じて現時点での解析の精度、また今後の展望も視野に入れて検証していく。

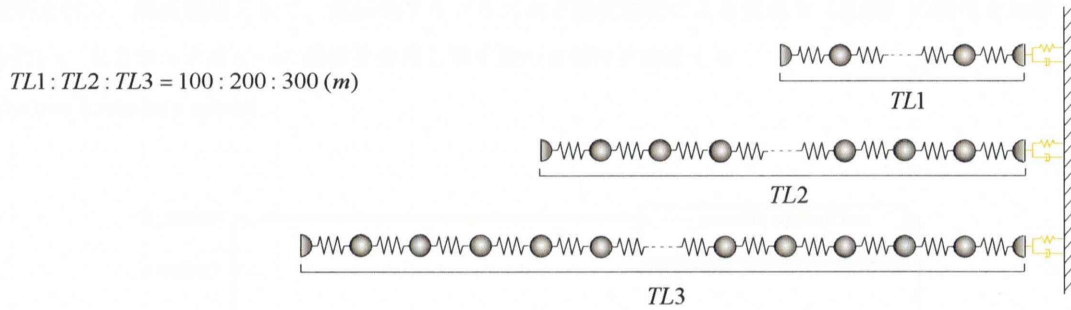


Fig4.25 Figure of total length

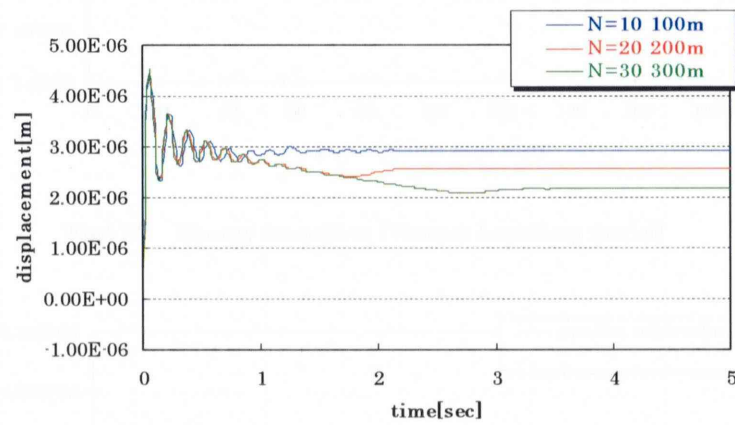


Fig4.26 Comparison of total length (Lysmer's model)

□ 検証

それぞれの材長で精度の良い最適解を導くことができた。総合的に見ると、材長によって剛体移動に差はあるが、変位挙動自体には大きなずれはないのがわかる。よって、この解析方法は領域に依存していないといえる。

4.3.4 1次元遺伝的局所探索法による境界離散モデルの最適化

■ 境界離散モデル部別解析

遺伝的アルゴリズムを用い、100世代解析を行い、解析結果を参照し感度解析を用いて100step解析を行う。境界離散部別解析結果から有効とされた全力学エネルギー最小化評価関数を用いて各境界離散モデルの解析を行う。解析結果として、遺伝的アルゴリズムと感度解析による質点1（左端）の変位を比較・検証を行い、全力学エネルギーの推移を表現し本手法の有効性を検証する。

☐ Viscous boundary model

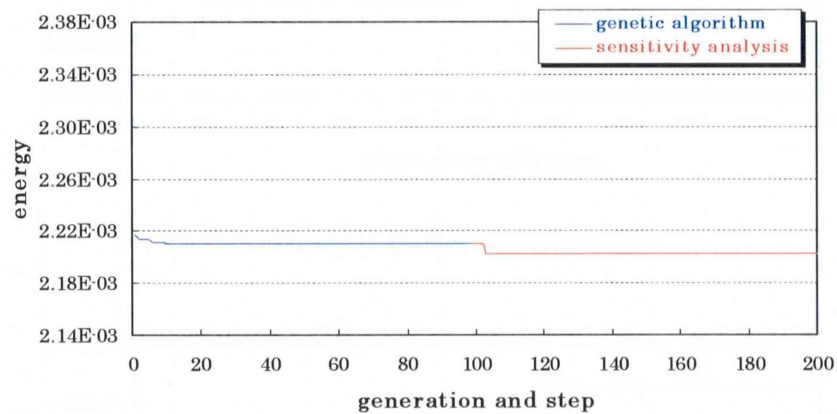


Fig4.27 Energy transition (Viscous boundary model)

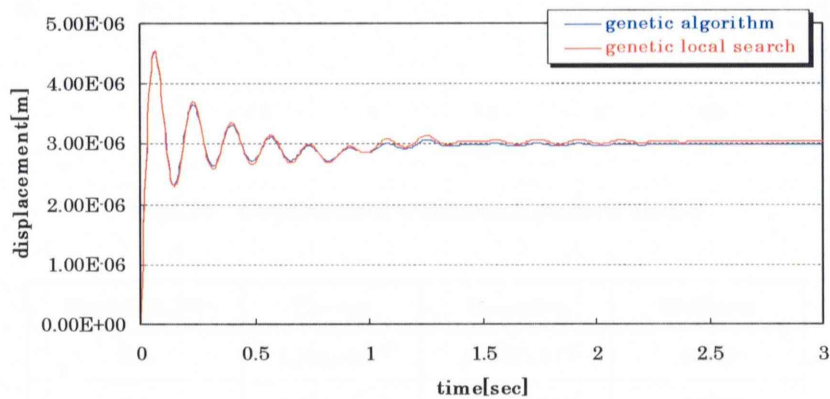


Fig4.28 Displacement transition (Viscous boundary model)

Rayleigh 3%	Energy	Damping
GA	2.209×10^{-3}	282352.941
SA	$2.2.03 \times 10^{-3}$	276733.815

Table4.12 Appraisal object

□ Lysmer's model

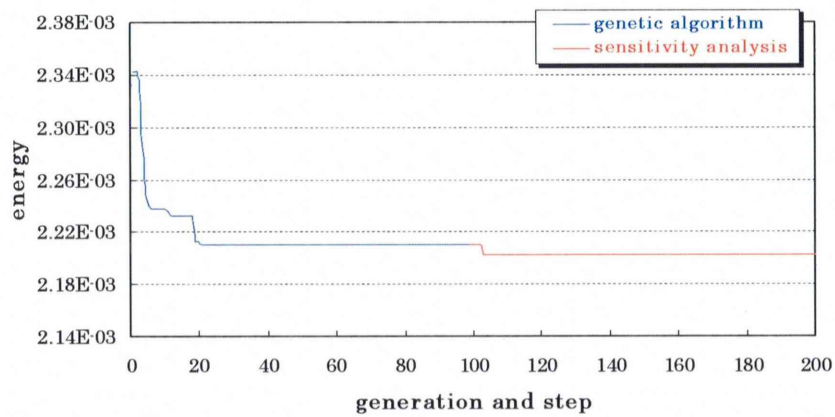


Fig4.29 Energy transition (Lysmer's model)

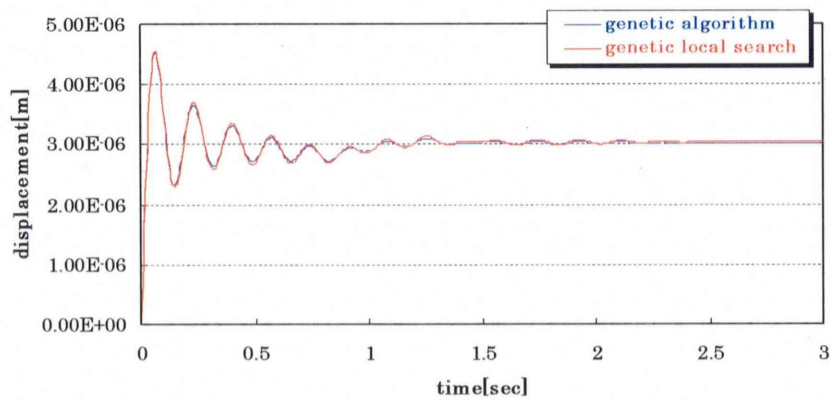


Fig4.30 Displacement transition (Lysmer's model)

Rayleigh 3%	Energy	Damping	Stiffness
GA	2.209×10^{-3}	278431.373	0.000
SA	2.203×10^{-3}	276733.815	0.000

Table4.13 Appraisal object

□ Luco's model

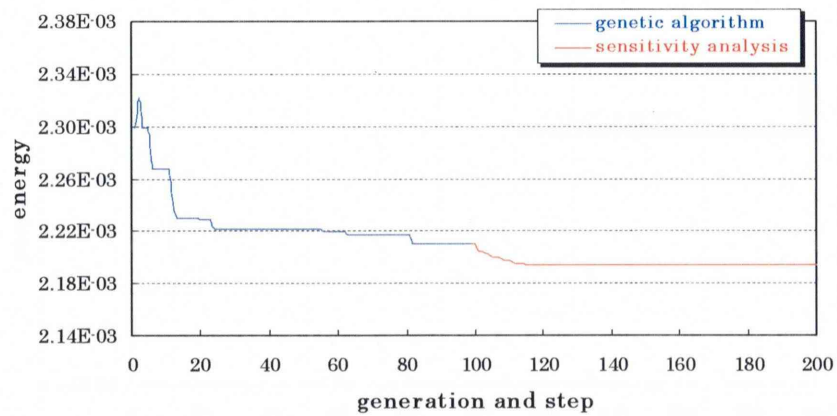


Fig4.31 Energy transition (Luco's model)

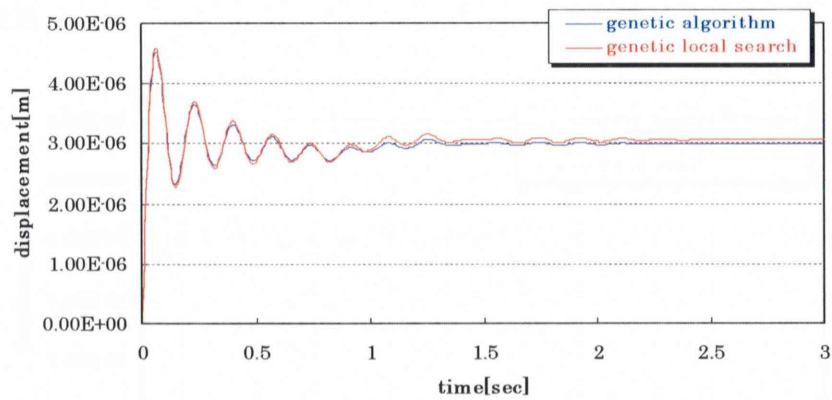


Fig4.32 Displacement behavior (Luco's model)

Rayleigh3%	Energy	Mass	Stiffness1	Stiffness2	Damping1	Damping2
GA	2.209×10^{-3}	243137.255	0.000	0.000	270588.235	11764.706
SA	2.194×10^{-3}	0.000	0.000	0.000	274885.110	7910.698

Table4.14 Appraisal object

4.3.5 1次元遺伝的局所探索法総合評価

■ 全力学エネルギー最小化評価関数比較

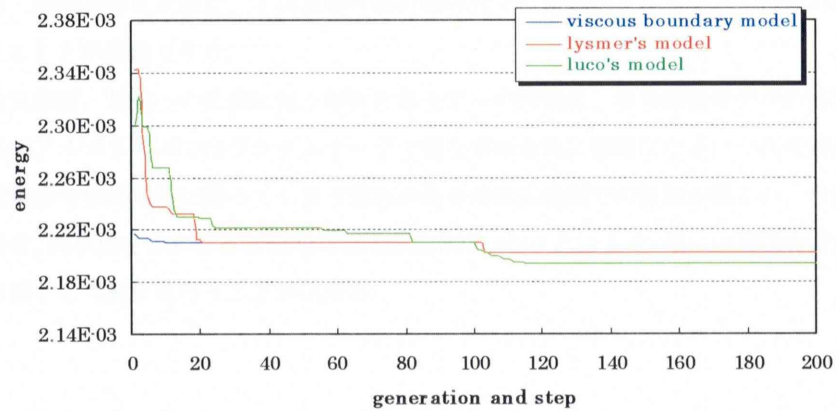


Fig4.33 Comparison of energy transition

■ 変位挙動比較

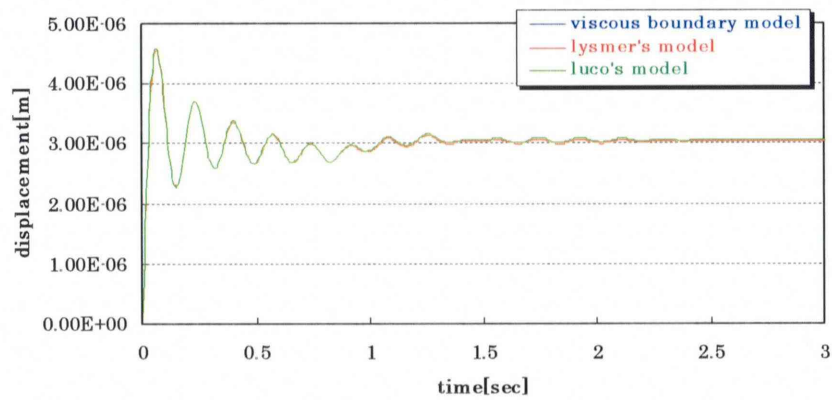


Fig4.34 Comparison of displacement behavior

■ 検証

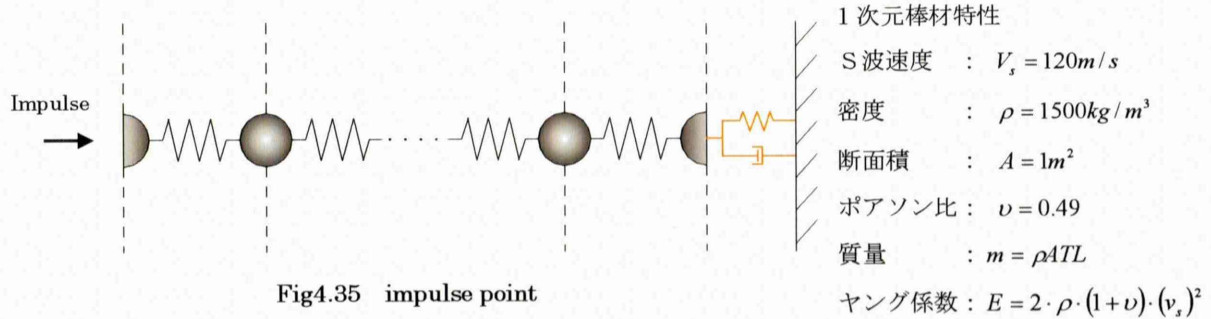
全力学エネルギー、変位挙動に着目した場合、遺伝的局所探索法を用いると無反射境界作成において、より制度の向上が確認でき、Luco's model のような複雑なモデルの場合、精度の有効性が顕著に確認できる。

反面、計算時間・効率を考えた場合、1次元棒材解析の研究では遺伝的アルゴリズムのみの検証で十分な制度を確保できることが確認できる。

しかし、2次元棒材、地盤への拡張に伴う解析対象モデルの複雑化、境界離散モデルの複雑化などを考えた場合、遺伝的アルゴリズムではランダムサーチで解を求める為に複雑になるにつれて解の信憑性に不安が残り、感度解析では局地解に陥ってしまう恐れがある為に広範囲での検証が難しい。今後さらに複雑な解析を行う場合、両手法を合わせる遺伝的局所探索法を用いることにより、解に信憑性を持たせること、他の手法との指標として解析を行うことが出来る。

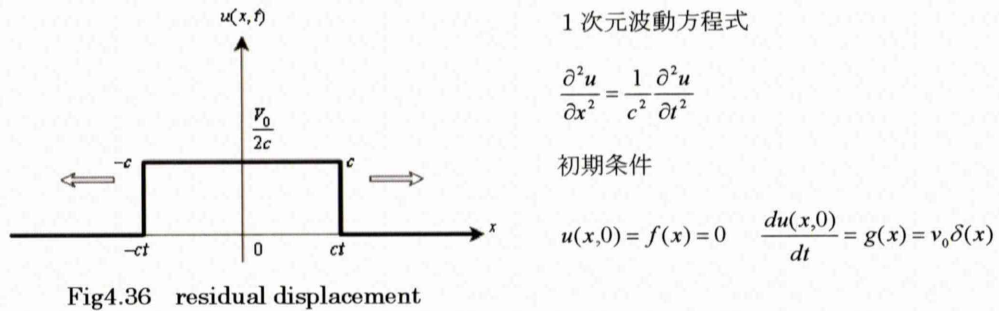
4.3.6 剛体移動の理論解

1次元棒材モデルの解析では $c^* = \rho V_s$, $k^* = 0$ が理論解であり, 解析結果もその値に極めて近いものとなっている. その際, ダッシュポットのみが作用し剛体移動が残るという結果に到る. その剛体移動の理論解をヘビサイド関数を用いて求めていく.



■ 関数のグラフ化

残留変位の理論解を求めるために, まず理論解を導く関数のグラフ化を行う. グラフと本論文の剛体移動の波形は近似していることがわかる. ここで, $V_0/2c$ は, 今回求めていく剛体移動の解析解にあたる. (fig4.34 参照.)



■ 関数から導く理論解

ここからは実際に数値として理論解を導き出していく. ラプラス変換とフーリエ変換を繰り返し定式化された半無限棒の理論解を導く関数:

$$u(x, t) = \frac{v_0}{2c} \{1 - H(x - ct) - H(-x - ct)\} \quad (4.14)$$

この式の $V_0/2c$ に以下の条件を代入し, 計算を行うと,

$$V_0 = \frac{1}{m_1}, \quad V_b = \frac{t}{TL}, \quad c = \frac{V_b}{l} \quad (4.15)$$

$$\frac{V_0}{2c} = 2 \cdot \frac{1}{m_1} \cdot \frac{l \cdot TL}{t} = 2.89 \times 10^6 \quad (4.16)$$

となる. 以上の過程によって剛体移動の理論解を導き出すことができる.

剛体移動理論解との比較

遺伝的アルゴリズムによる全力学エネルギー評価関数最小化解析の3種類のモデルと剛体移動理論解を比較した。数値的には $1.0 \times 10^7 m$ のずれが生じた。その理由としては、質点数・レイリー減衰と理論解との関係があるということが考えられる。しかしながら、その要因を考慮したうえで、十分満足のいく結果を得ることができた。

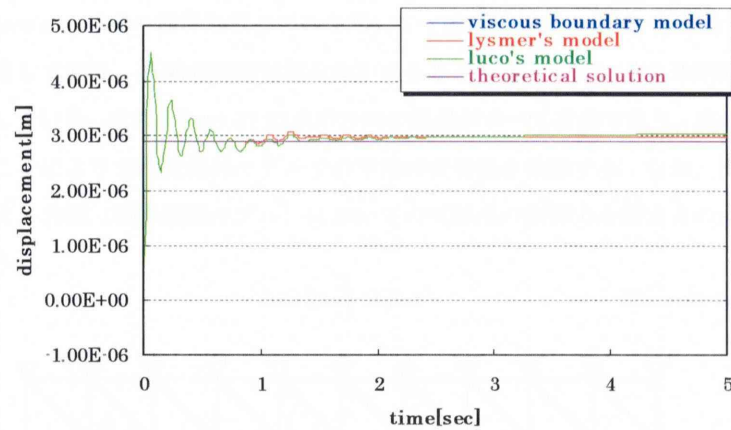


Fig4.37 Comparing with Theoretical Solution

4.4 2次元棒材解析概要

2次元棒材解析の検討にあたり，2次元棒材では周波数領域，時刻歴領域の相領域で理論解が存在しないことにより評価関数の検討が困難である．本研究では1次元棒材解析で有効であった手法を用いて最適化を行い，比較・検証し新たな評価法を模索する．

4.4.1 解析概要

本研究では Lysmer's model の境界離散モデルを用いて1次元棒材との比較・検証を行う．Fig4.36 は鉛直方向を上下に固定しており，震動の制御性能を確かめることを主としているため剛体移動防止用に水平方向は左端で固定している．また，Fig4.37 は水平方向の節点がすべて自由であり，本モデルを1次元棒材モデルと比較することにより2次元棒材モデルでの手法の有効性を検証する．なお，両モデルとも左端からインパルスを与え，右端（境界離散モデル）においての反射波の制御力を接点Aの水平変位を調べることで検証を行う．

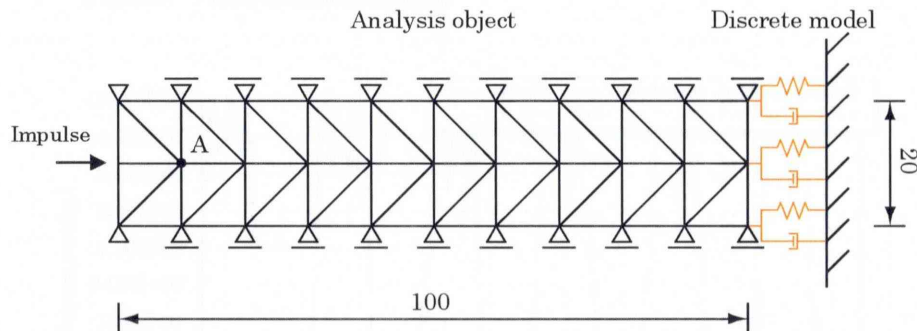


Fig 4.38 2D analytical model (Control)

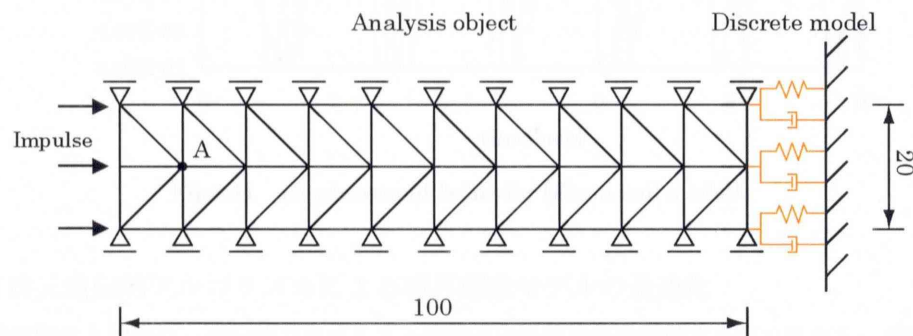


Fig 4.39 2D analytical model (NO Control)

■ 2次元棒材特性

鉛直方向距離 : $L_X = 20m$

水平方向距離 : $L_Y = 100m$

S波速度 : $V_s = 120m/s$

密度 : $\rho = 1500kg/m^3$

厚さ : $A = 1m^2$

ポアソン比 : $\nu = 0.49$

■ 評価関数・解析手法

2次元棒材解析において，1次元棒材解析で解析時間・効率・工学的無反射の意味において有効であった全力学エネルギー最小化評価関数を用いて遺伝的局所探索法による解析を行う．

4.5 2次元棒材解析結果

4.5.1 固定端モデル

2次元時刻歴解析を行うにあたり、境界離散モデルを設けない固定端モデルの解析結果について検証を行う。境界離散モデルを設けない固定端の場合、質点Aの挙動は大きく変位をすると共に長時間振動を続ける。

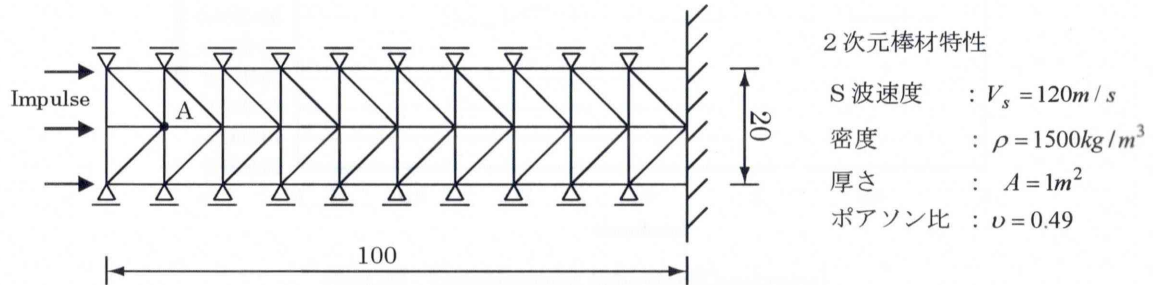


Fig4.40 Fixed end model(2Dim)

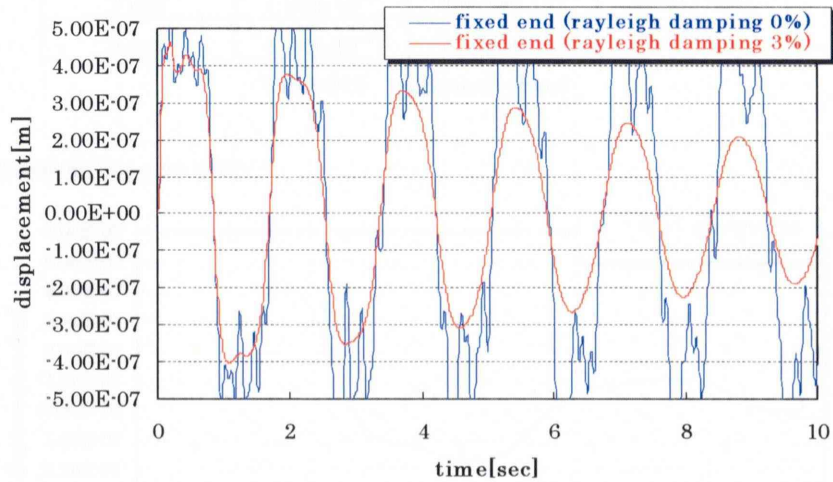


Fig4.41 Displacement behavior (Fixed end model)

4.5.2 2次元遺伝的アルゴリズムによる境界離散モデルの最適化

1次元棒材解析と同様に、遺伝的アルゴリズムの最適化性能自体を評価するのではなく、手法の有効性を検討するため、世代数、個体のビット数は多く取らないものとする。

- ・世代数(Generation) : 1000 世代
- ・初期個体数(Individual) : 100 個体
- ・染色体ビット数(Number of bit) : 16BIT

- 拘束条件別解析
□ 拘束棒材解析結果(Fig 4.38 参照)

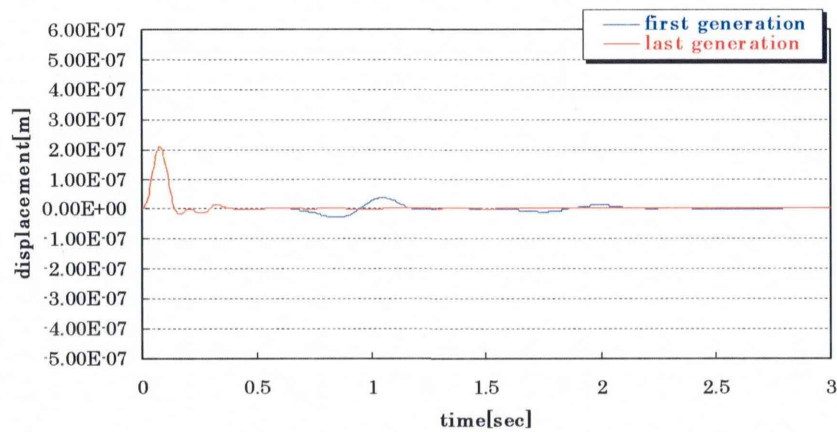


Fig4.42 Displacement behavior (Constraint)

Rayleigh 3%	Energy	Damping	Stiffness
First	1.198×10^{-4}	9607843.137	3294117.647
Last	1.183×10^{-4}	2392156.863	0.000

Table4.15 Appraisal object

- 自由棒材解析結果(Fig 4.39 参照)

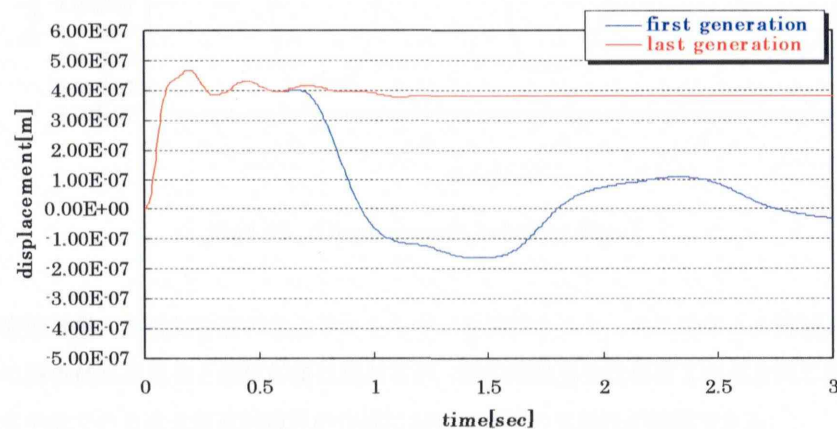


Fig4.43 Displacement behavior (free)

Rayleigh 3%	Energy	Damping	Stiffness
First	7.400×10^{-4}	8313725.490	8784313.725
Last	6.168×10^{-4}	2509803.932	0.000

Table4.16 Appraisal object

- 比較・検証
- 拘束棒材比較

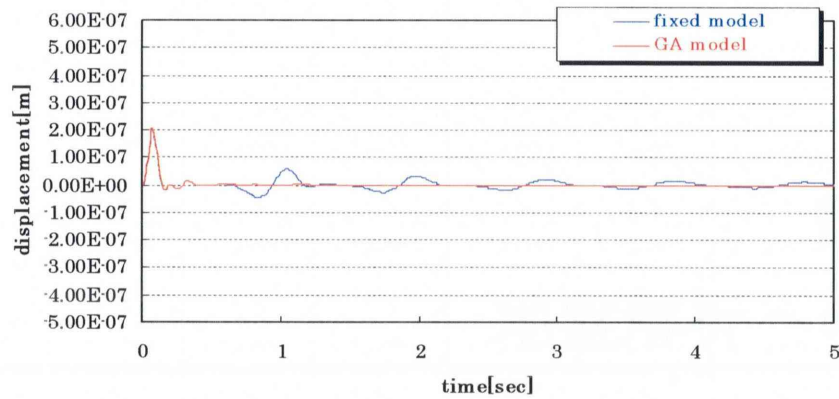


Fig4.44 Displacement behavior (Constraint)

- 自由棒材比較

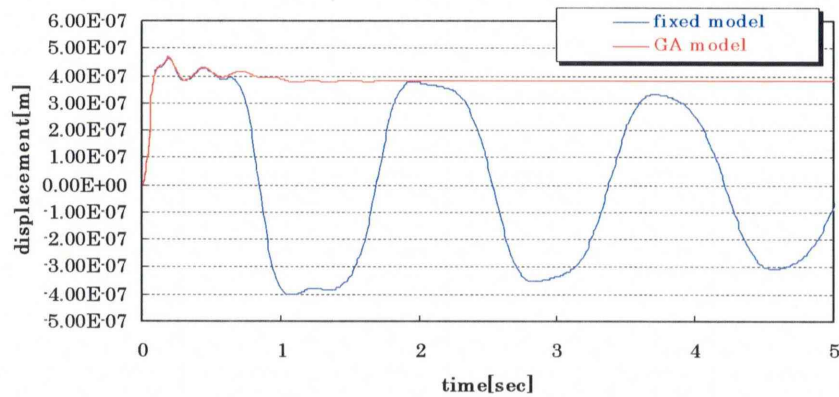


Fig4.45 Displacement behavior (free)

- 検証

拘束棒材の変位挙動，解析対称部の全力学エネルギーを検証すると，共に効率よく低減されている．また，自由棒材の解析結果を見ると変位の値は異なるが，変位挙動自体はほぼ1次元と同じ挙動を示していることから，本手法での2次元無反射境界の作成において手法の有効性が確認できる．

しかし，2次元棒材に拡張した場合，情報量の増加によって遺伝的アルゴリズムのみの解析では解の信憑性がとてもあいまいである．指標として，1次元解析でも行った遺伝的局所探索法を採用することにより高精度で信憑性を持たせることができる．

第5章 地盤解析への適用

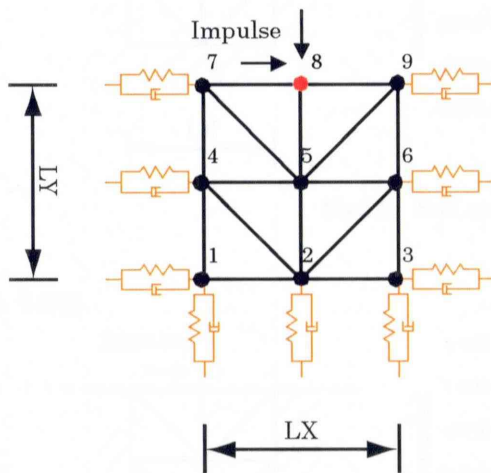
- 5.1 2次元地盤解析概要
- 5.2 2次元地盤解析結果
- 5.3 2次元地盤総合評価

5.1 2次元地盤解析概要

2次元棒材解析の検討にあたり，2次元地盤では先にも述べたが周波数領域，時刻歴領域の相領域で理論解が存在しないことにより評価関数の検討が困難である．本研究では，1次元棒材，2次元棒材解析で有効であった手法を用いて最適化を行い，比較・検証し新たな評価方法を模索する．

5.1.1 2次元地盤解析概要

本研究では，Lysmer's model の境界離散モデルを用いて1次元棒材，2次元棒材解析との比較・検証を行う．Fig5.1 は面要素を 2×2 分割し，面要素8，総接点数9の三角形要素で構成する．本研究では，入力外力をインパルスとして接点8に3種類与え，接点8においての水平変位，鉛直変位を調べることで検証を行う．以下に水直方向に荷重を与えた場合を示す．(Fig5.1 参照)



2次元地盤特性

長さ	: $LX = 20, LY = 20$
要素数	: $NE = 8$
総接点数	: $NOD = 9$
S波速度	: $V_s = 120m/s$
密度	: $\rho = 1500kg/m^3$
厚さ	: $A = 1m^2$
ポアソン比	: $\nu = 0.49$

Fig5.1 Soil model (2Dim)

damping1 : 境界接点 x 方向の減衰

damping2 : 境界接点 y 方向の減衰

stiffness1 : 境界接点 x 方向のバネ剛性

stiffness2 : 境界接点 y 方向のバネ剛性

■ 評価関数・解析手法

2次元地盤解析において，2次元棒材解析と同様に，1次元棒材解析での解析時間・効率・工学的無反射の意味において有効であった全力学エネルギー最小化評価関数を用いて遺伝的アルゴリズムによる解析を行う．

5.2 2次元地盤解析結果

5.2.1 固定モデル

2次元地盤解析を検証するにあたり、境界離散モデルを設けない固定モデルの解析結果について検証を行う。なおレイリー減衰は3%とする。境界離散モデルを設けない固定端の場合、接点8（赤色部）の挙動は荷重の与え方により水平、垂直ともに大きく変位をすると共に長時間振動を続ける。

■ 垂直荷重

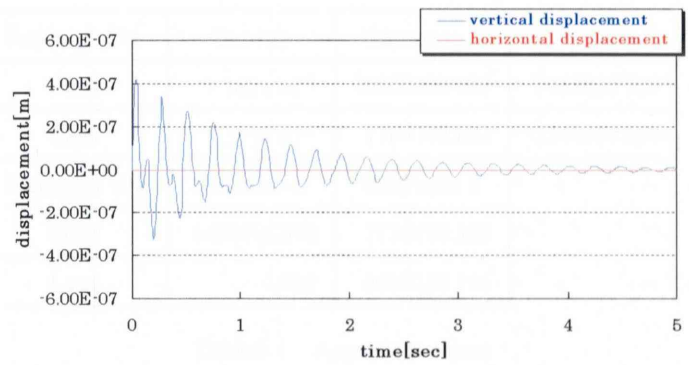
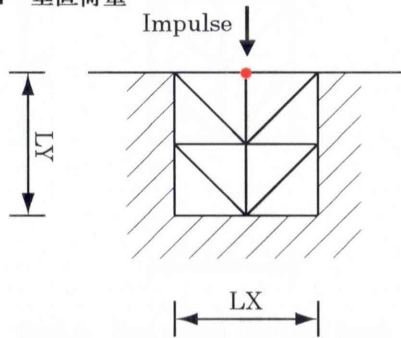


Fig5.2 Soil model (Vertical load)

■ 水平荷重

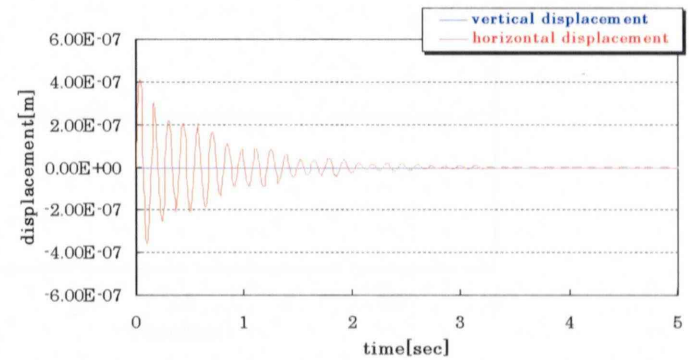
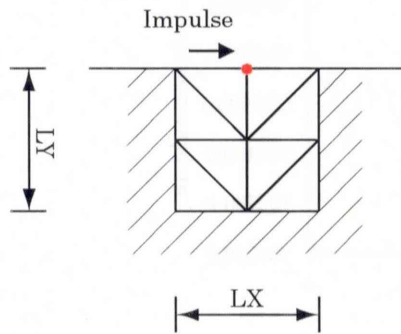


Fig5.3 Soil model (Horizontal load)

■ 水平・垂直荷重

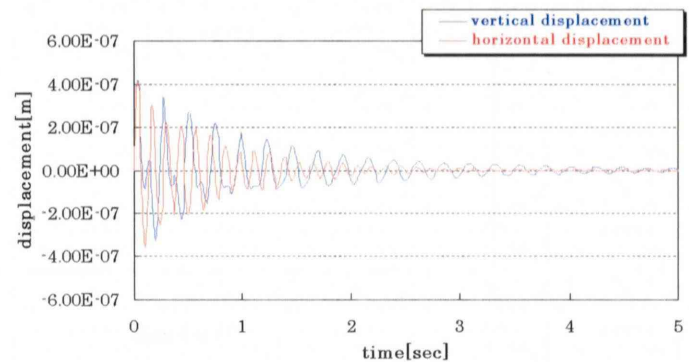
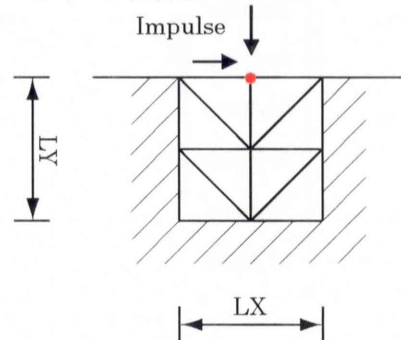
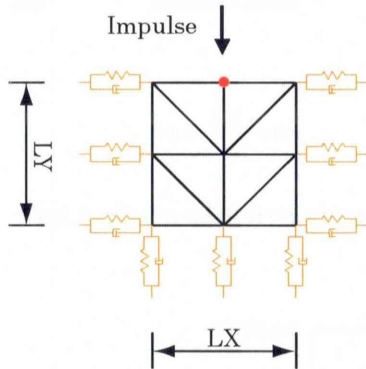


Fig5.4 Soil model (Vertical & Horizontal load)

5.2.2 2次元遺伝的アルゴリズムによる境界離散モデルの最適化

1次元棒材、2次元棒材解析と同様に、遺伝的アルゴリズムの最適化性能自体を評価するのではなく、手法の有効性を検討するため、1次元棒材、2次元棒材解析と同様に世代数、固体のビット数は多く取らないものとする。

■ 垂直荷重



Rayleigh 3%	Energy	Damping 1	Damping 2
First	1.362×10^{-4}	10000000.000	1058823.529
Last	1.311×10^{-4}	1764705.882	2549019.609
Rayleigh 3%	Stiffness 1	Stiffness 2	
First	1490196.078	7176470.588	
Last	0.000	5098039.216	

Fig5.5 Soil model (Vertical load)

Table5.1 Appraisal object

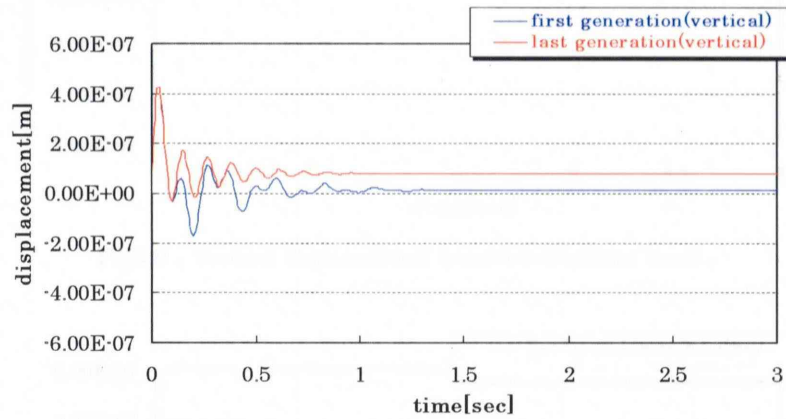


Fig5.6 Vertical displacement behavior (Vertical load)

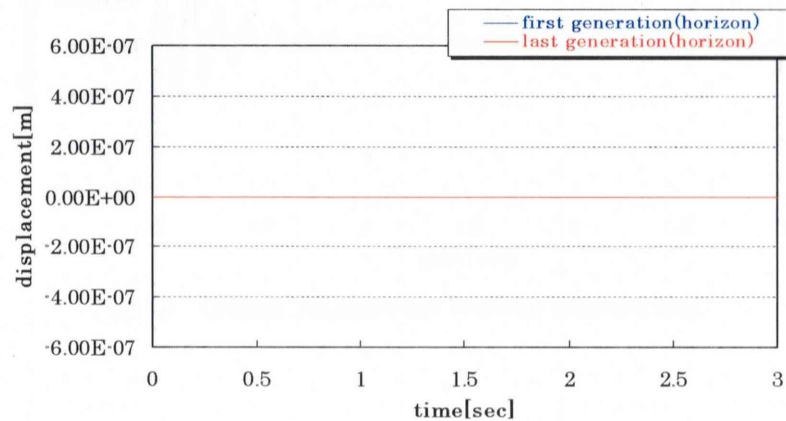
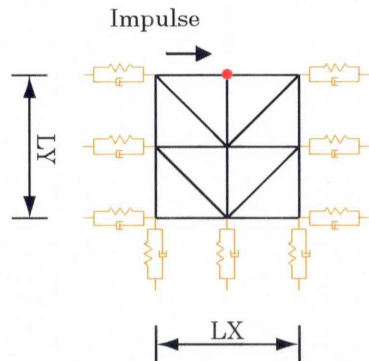


Fig5.7 Horizon displacement behavior (Vertical load)

■ 水平荷重



Rayleigh 3%	Energy	Damping 1	Damping 2
First	1.011×10^{-4}	4784313.725	9960784.313
Last	0.995×10^{-4}	2313725.491	2117647.059
Rayleigh 3%	Stiffness 1	Stiffness 2	
First	6274509.804	1843137.255	
Last	1215686.275	9843137.255	

Fig5.8 Soil model(Vertical load)

Table5.2 Appraisal object

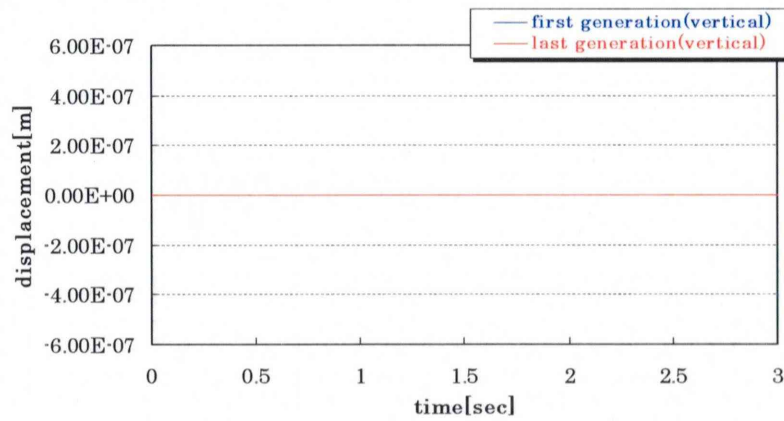


Fig5.9 Vertical displacement behavior (Horizon load)

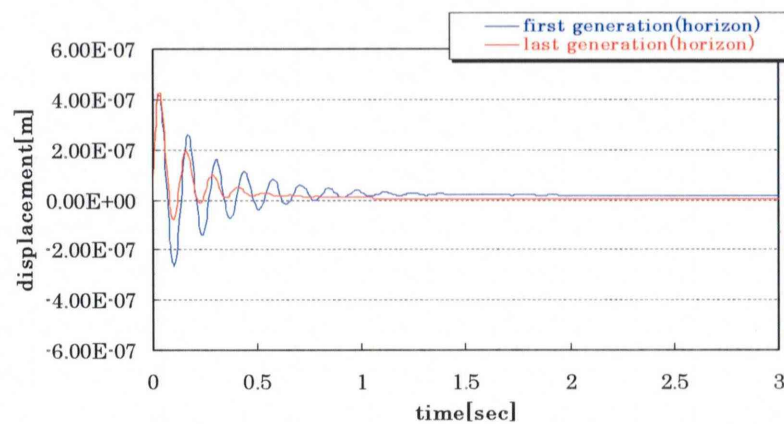
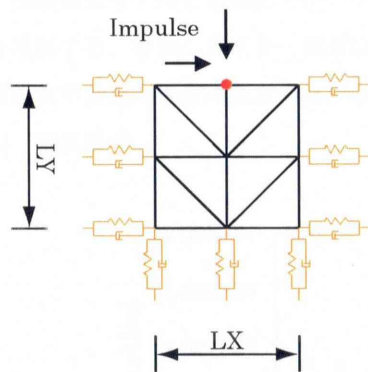


Fig5.10 Horizon displacement behavior (Horizon load)

■ 垂直・水平荷重



Rayleigh 3%	Energy	Damping 1	Damping 2
First	1.445×10^{-4}	1843137.255	9843137.255
Last	1.391×10^{-4}	1921568.627	0.000
Rayleigh 3%	Stiffness 1	Stiffness 2	
First	7764705.882	9725490.196	
Last	1843137.255	8901960.784	

Fig5.8 Soil model(Vertical load)

Table5.3 Appraisal object

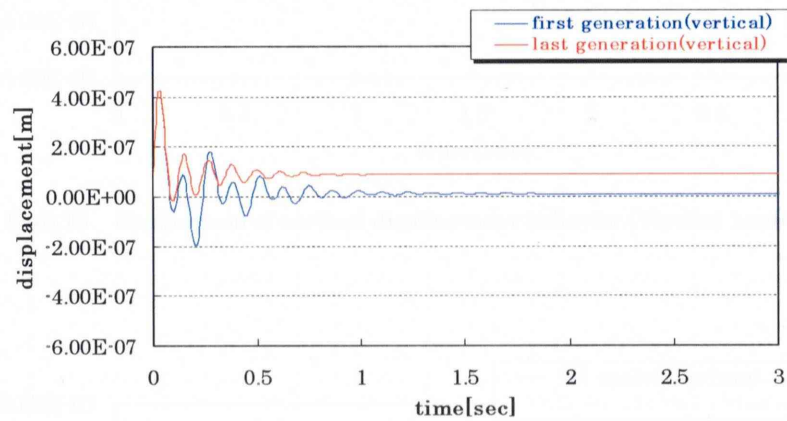


Fig5.11 Vertical displacement behavior (Vertical & Horizontal load)

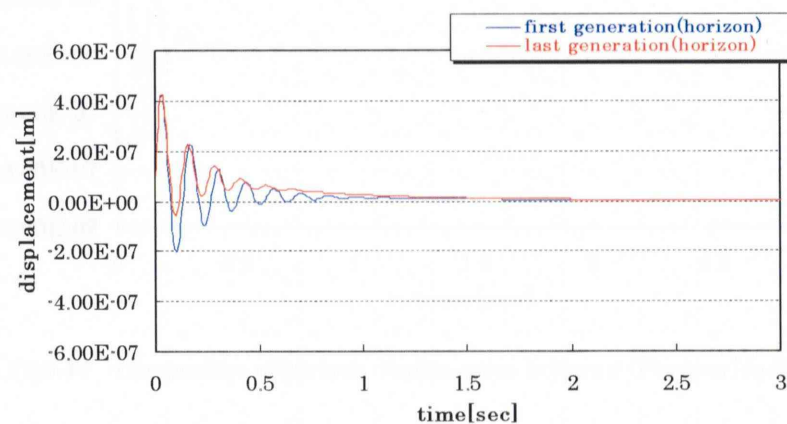


Fig5.12 Horizon displacement behavior (Vertical & Horizontal load)

■ 固定モデルとの比較

境界固定モデルと遺伝的アルゴリズムにより境界離散モデルを最適した場合との比較を行い挙動の変化を検証する。なお、レイリー減衰は3%とし、垂直加重の場合は垂直変位、水平荷重の場合は水平変位、垂直水平荷重の場合は双方の比較を行う。

□ 垂直荷重

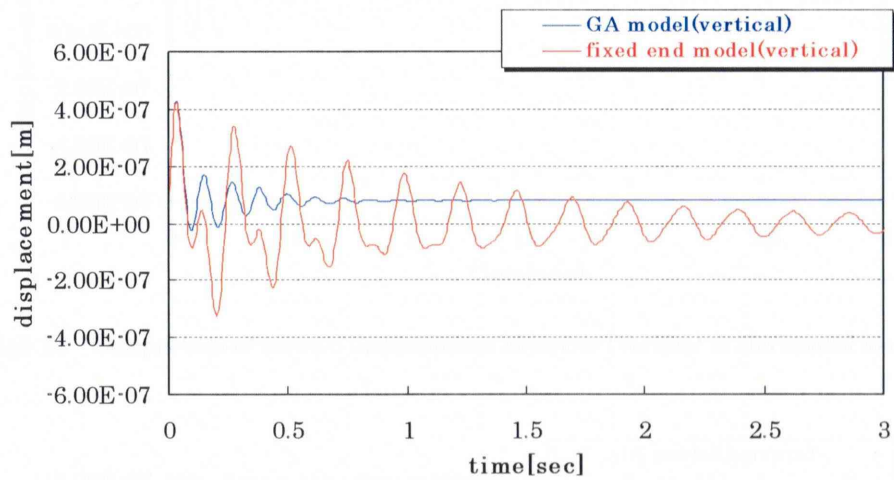


Fig5.13 Comparison of vertical displacement behavior (Vertical load)

□ 水平荷重

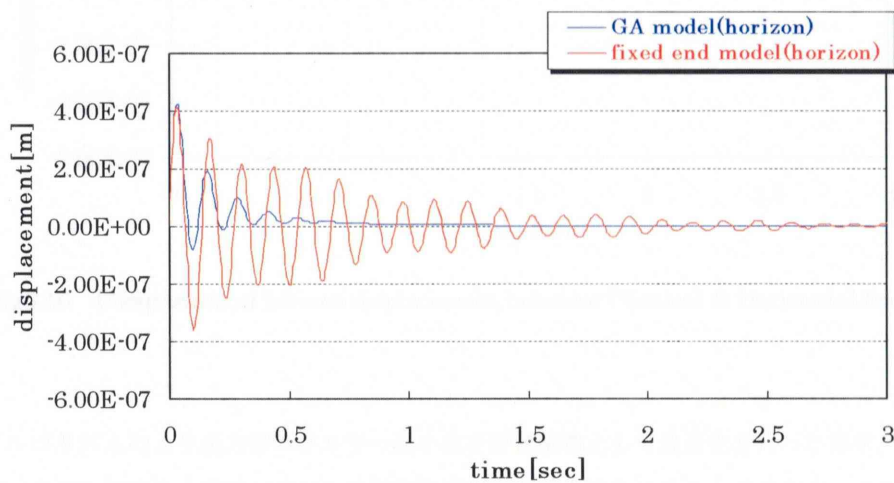


Fig5.14 Comparison of horizon displacement behavior (Horizon load)

□ 垂直・水平荷重

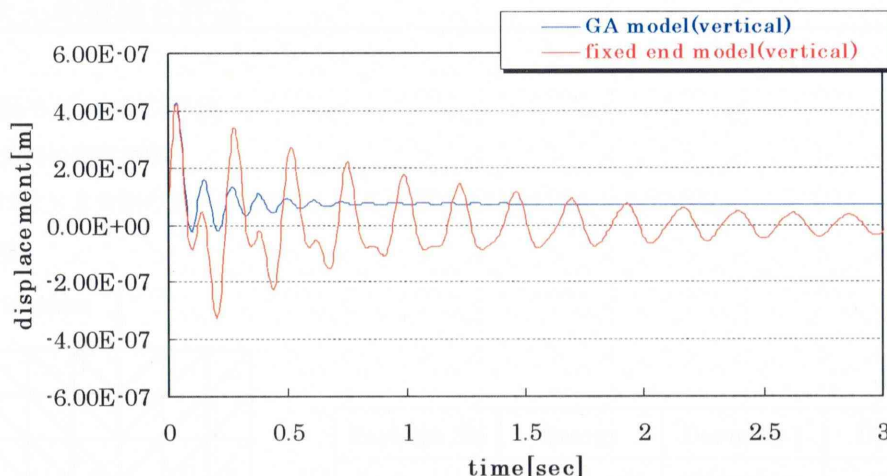


Fig5.15 Comparison of vertical displacement behavior (Vertical & Horizontal load)

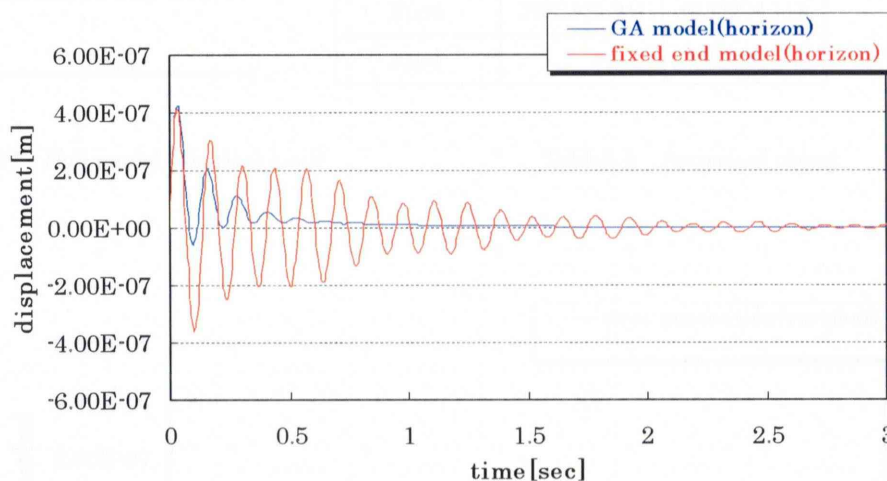


Fig5.16 Comparison of horizon displacement behavior (Vertical & Horizontal load)

■ 検証

遺伝的アルゴリズムのより全力学エネルギー最小化を評価関数として最適化を行った結果、解析対称部のエネルギー自体を制度良く吸収しており工学的無反射の意味を持たせることができる。また、境界固定モデル、遺伝的アルゴリズム初期世代と比較を行った場合、変位挙動も垂直方向に関しては反射を起こすこと無く収束していることが分かる。水平方向に関しては、今解析の場合左端、右端の引っ張りによる関係上反射自体は起こってしまっている。これは遺伝的アルゴリズムのランダムサーチで最適値を求めるという手法事態の問題であると考えられる。しかし、振動自体は良く制御されていることが分かる。

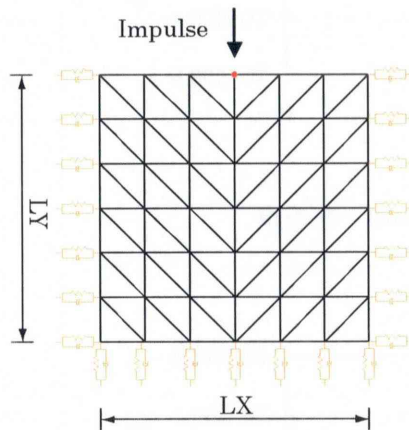
5.3 2次元地盤総合評価

5.3.1 拡張モデルでの評価

■ 6×6分割の変位挙動

地盤特性は2×2分割のものと同様にし、長さ((LX, LY))は60mとしている。

□ 垂直荷重



Rayleigh 3%	Energy	Damping 1	Damping 2
First	1.481×10^{-4}	9725490.196	9254901.961
Last	1.386×10^{-4}	1725490.196	3058823.529
Rayleigh 3%	Stiffness 1	Stiffness 2	
First	7882352.941	6235294.118	
Last	0.000	7882352.941	

Fig5.17 Soil model (Vertical load)

Table5.4 Appraisal object

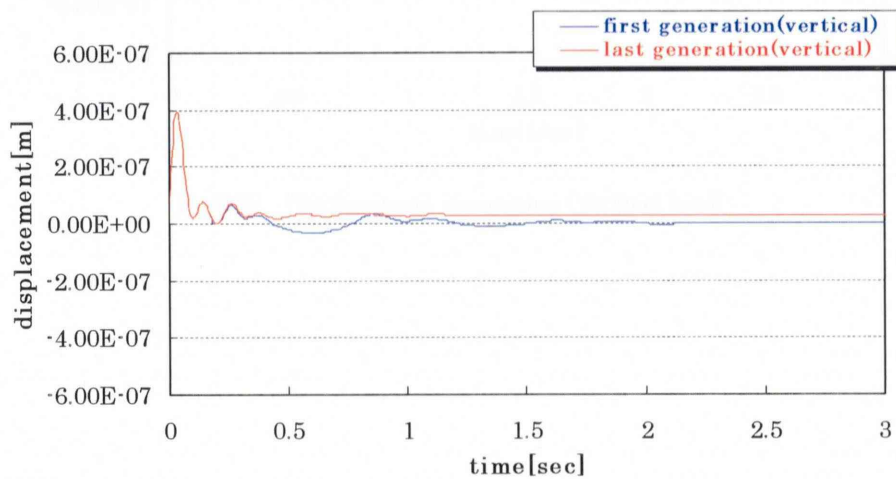


Fig5.18 Vertical displacement behavior (Vertical load)

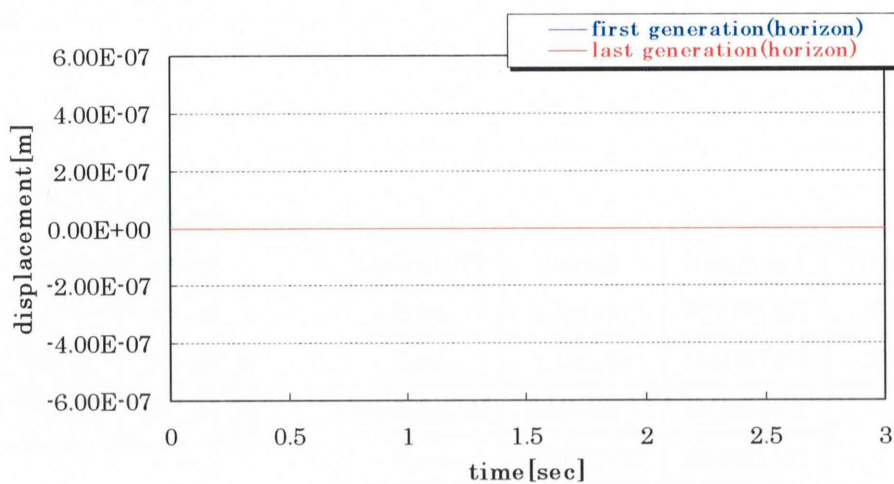


Fig5.19 Horizon displacement behavior (Vertical load)

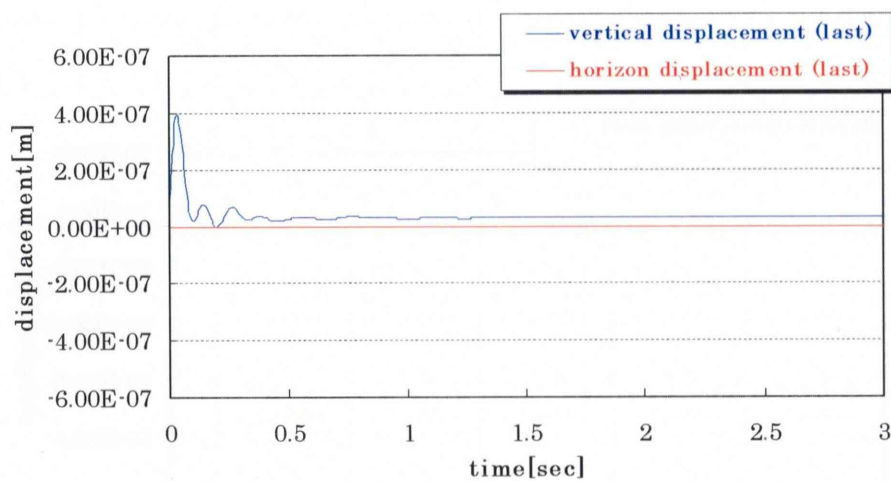


Fig5.20 Displacement comparing (Vertical load)

□ 水平荷重

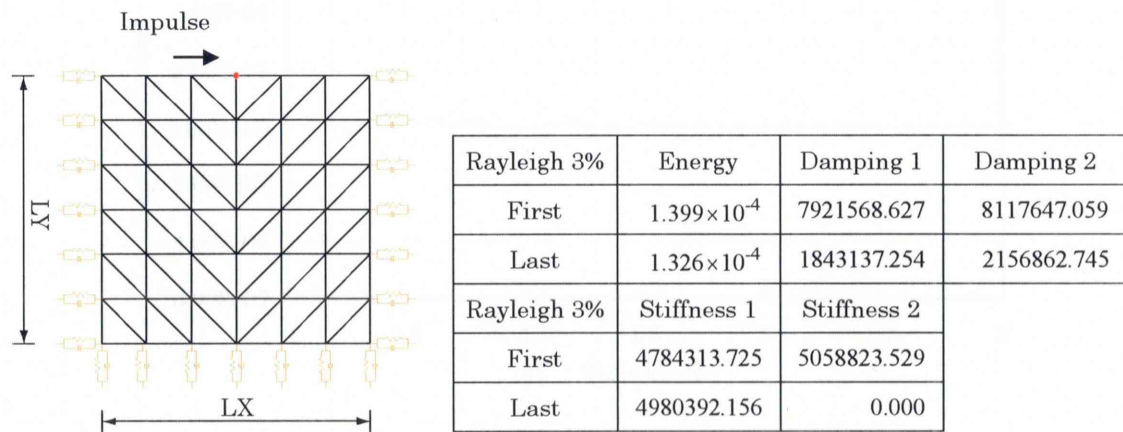


Fig5.21 Soil model(Horizon load)

Table5.5 Appraisal object

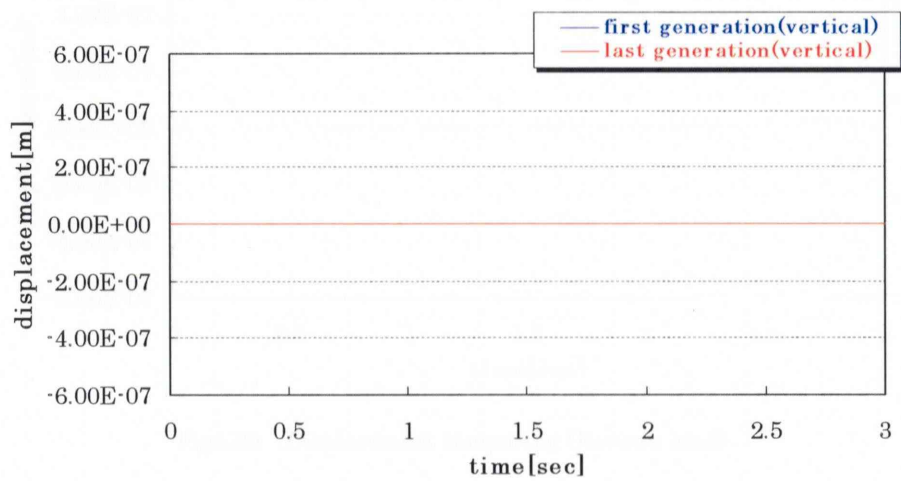


Fig5.22 Vertical displacement behavior (Horizon load)

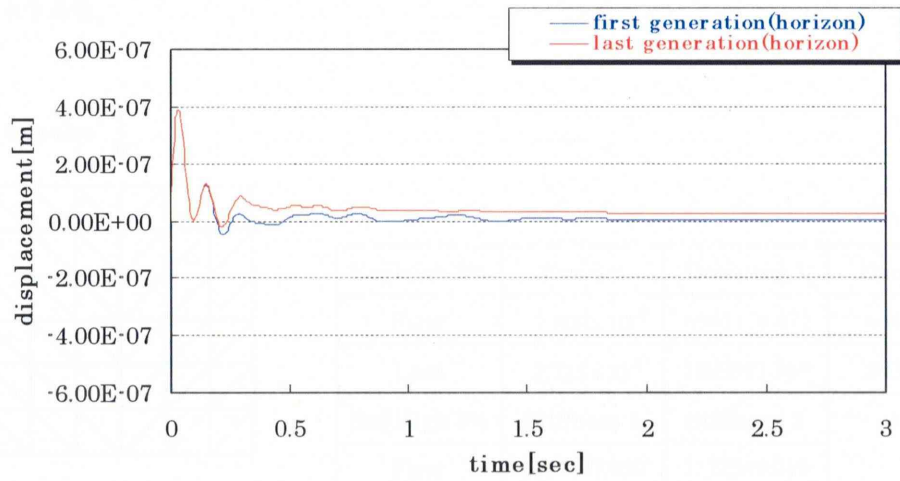


Fig5.23 Horizon displacement behavior (Horizon load)

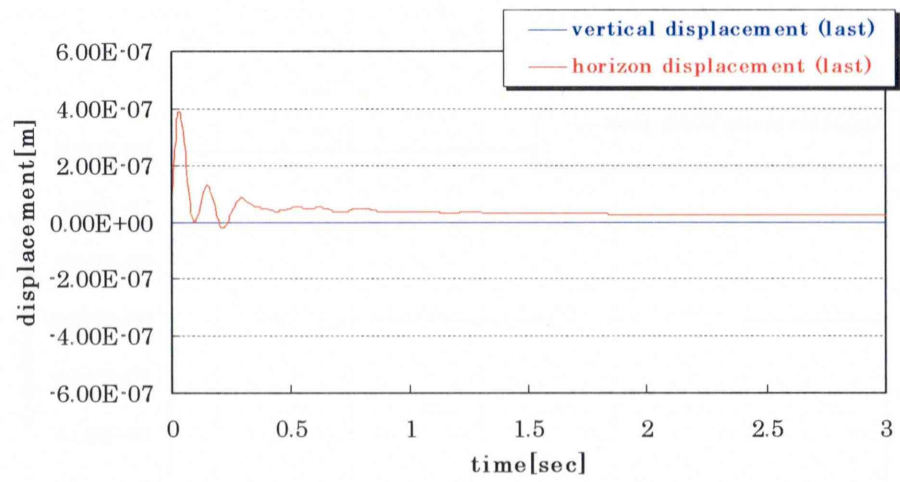
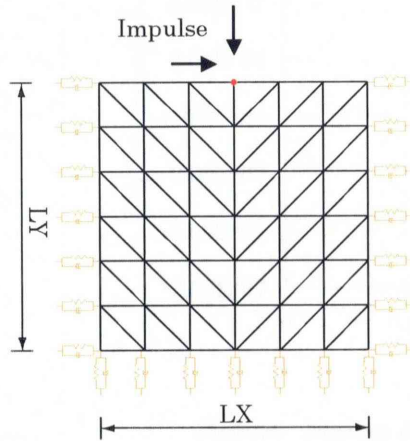


Fig5.23 Displacement comparing (Horizon load)

□ 垂直・水平荷重



Rayleigh 3%	Energy	Damping 1	Damping 2
First	2.803×10^{-4}	6941176.471	6549019.679
Last	2.725×10^{-4}	1803921.569	2431372.549
Rayleigh 3%	Stiffness 1	Stiffness 2	
First	6117647.059	3372549.019	
Last	784313.725	705882.352	

Fig5.24 Soil model(Vertical & Horizon load)

Table5.6 Appraisal object

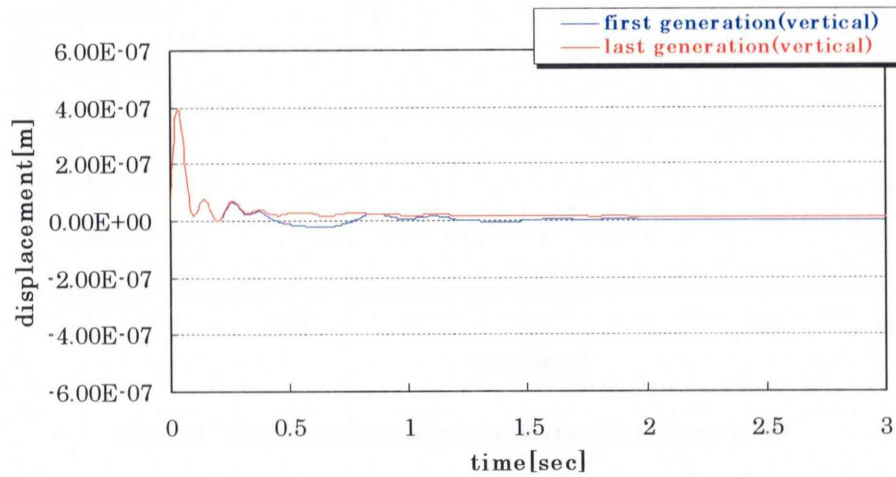


Fig5.25 Vertical displacement behavior (Vertical & Horizon load)

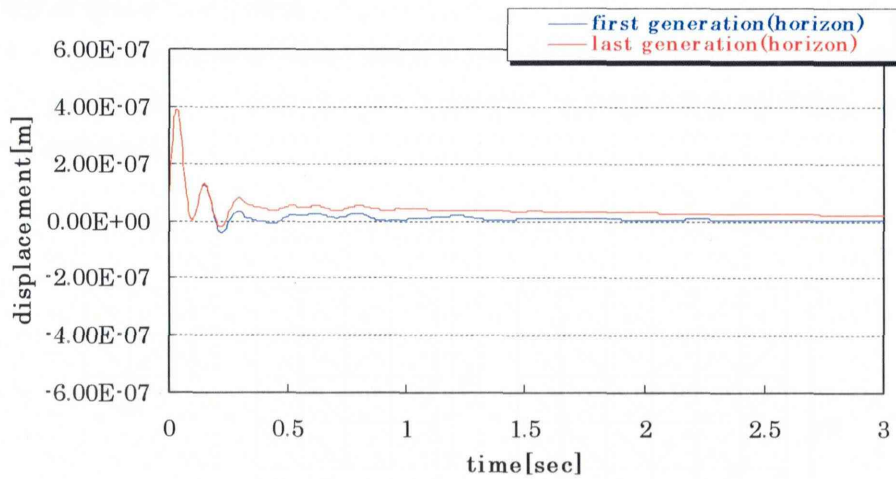


Fig5.26 Horizon displacement behavior (Vertical & Horizon load)

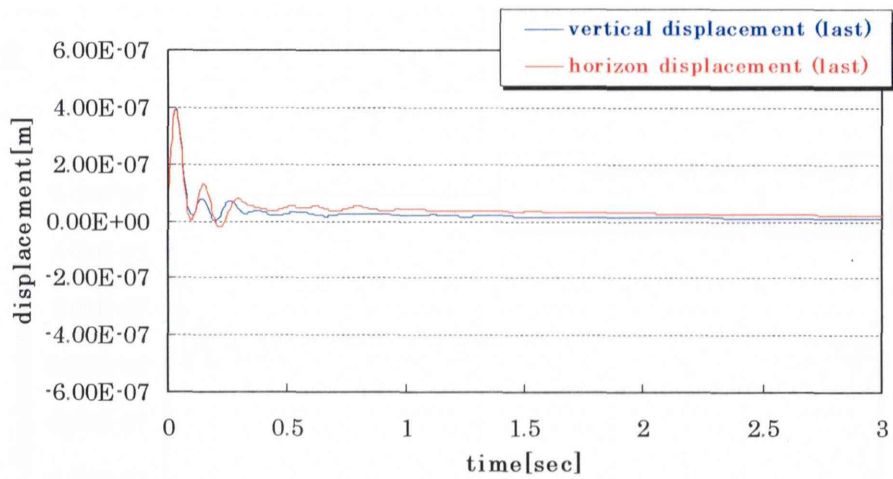


Fig5.27 Displacement comparing (Vertical & Horizon load)

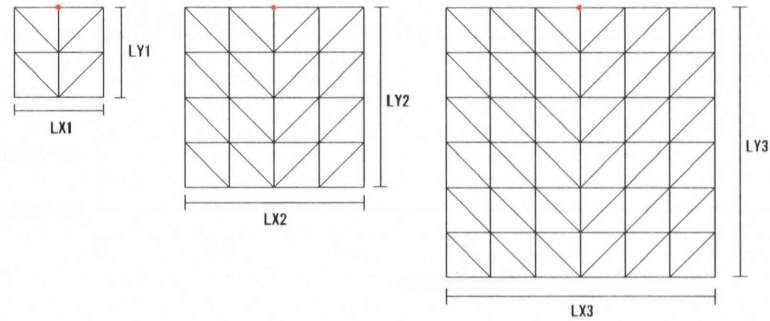
■ 検証

20×20(m) 地盤解析と同様に遺伝的アルゴリズムのより全力学エネルギー最小化を評価関数として最適化を行った結果、解析対称部のエネルギー自体を制度良く吸収しており工学的無反射の意味を持たせることができる。また、今解析でも、遺伝的アルゴリズムのランダムサーチで最適値を求めるという手法により解を一つには特定できていない。しかし、振動自体は良く制御されていることから、解析効率は低下するが、世代数や個体数を増やすなどして遺伝的アルゴリズムにある程度ゆとりを持たす事で精度の向上は見込める。

5.3.2 領域別要素解析からの検証

有限要素サイズを変更せずに領域の面積と要素数を4倍9倍と増やし、時刻歴変位応答を検証する。
 なお、レイリー減衰は3%とし、垂直加重の場合は垂直変位、水平荷重の場合は水平変位、垂直水平荷重の場合は双方の比較を行う。

$$LX1:LX2:LX3=1:2:3 \quad LY1:LY2:LY3=20:40:60 \quad (m)$$



■ 垂直荷重

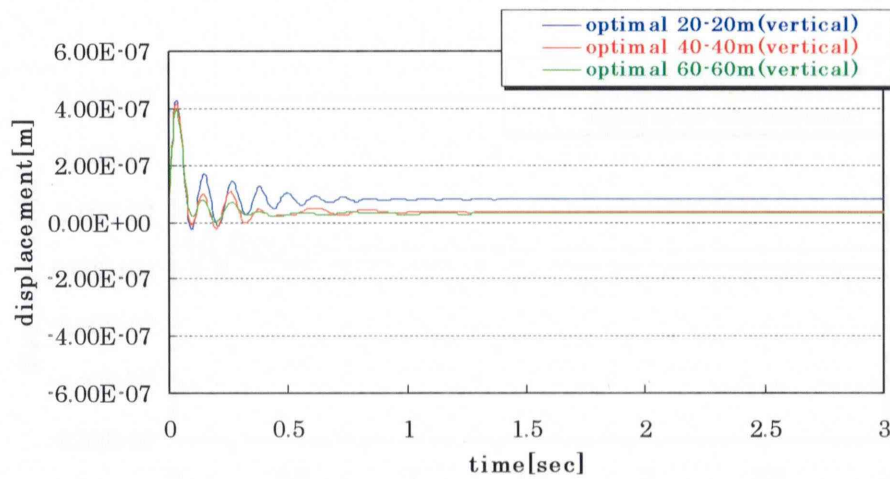


Fig5.28 Comparison of 3 model (Vertical displacement)

■ 垂平荷重

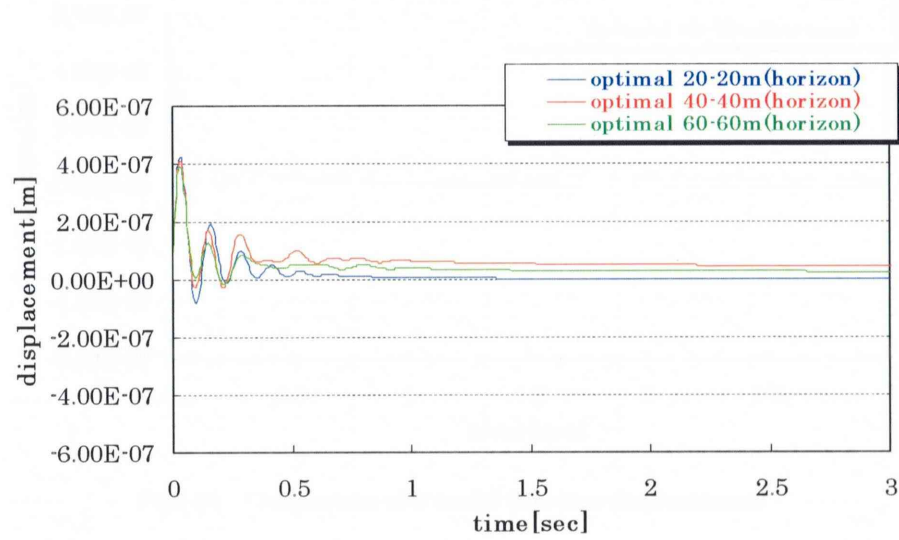


Fig5.29 Comparison of 3 model (Horizon displacement)

■ 垂直垂平荷重

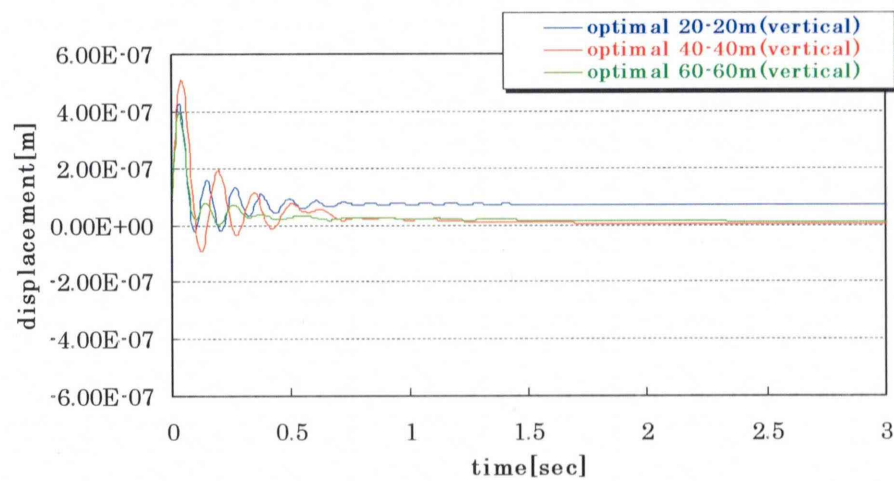


Fig5.30 Comparison of 3 model (Vertical displacement)

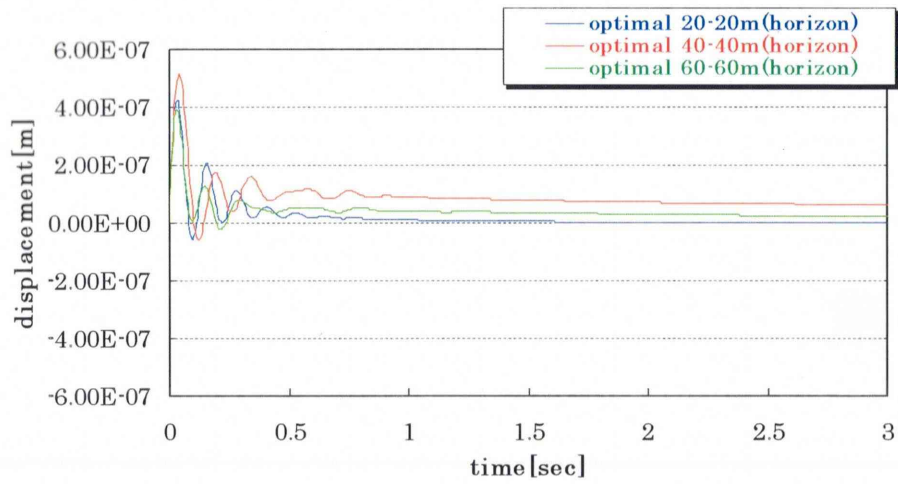


Fig5.31 Comparison of 3 model (Horizon displacement)

■ 検証

$20 \times 20m$, $40 \times 40m$, $60 \times 60m$ の地盤モデルを解析した結果, 各モデルにおいて似たような応答を示すことがわかる. しかし, 地盤モデルに拡張した場合遺伝的アルゴリズムではランダムサーチでは最適値を検索できず, 解に信憑性をもたせることは出来ない.

第 6 章

結論

6.1 考察・結論

6.2 研究課題

6.1 考察・結論

6.1.1 結果と考察

- 1次元棒材で複数の最適化手法を検討した結果、遺伝的局所探索法が最も有効な最適化手法であるということが確認できる。しかしその反面、遺伝的局所探索法は遺伝的アルゴリズムと感度解析を合わせるという手法なので解析効率が低下するという欠点がある。
遺伝的局所探索法は一つの指標として検証し、遺伝的アルゴリズム、感度解析を状況によって使い分ける事により、より効率的で高精度な解析を行えると考ええる。
- 時刻歴領域の解析では、解析対称部の全力学エネルギー最小化評価関数が無反射境界作成にあたり最も理論的かつ解析の有効性も高い優秀な評価関数であるといえる。
現段階の研究では、工学的意味・有効性共にあいまいであった多目的最適化評価関数は今後の研究において新たな手法として利用できると考える。その為には境界処理問題をさらに多角的に考え、複数の評価関数を工学的意味のある形で結びつける必要がある。
- 境界離散モデル部の比較・検証において、Luco's model はパラメータが5つというやや複雑である為に遺伝的アルゴリズム、感度解析のみの手法では解に信憑性を持たせることが出来ない為遺伝的局所探索法を用いるべきであると考ええる。又、波動透過境界の作成において、半無限棒の理論解は粘性減衰なので、動吸振器により全力学エネルギーを吸収させることに工学的意味を見出すことは難しい。しかし2次元地盤を考えた場合の挙動など、さらに多角的に評価をする必要があると考ええる。
- 2次元棒材解析において、1次元棒材の挙動を比較することにより本手法の有効性を確認できる。よって2次元棒材から2次元地盤解析へと拡大して解析を行うことができる。しかし、2次元地盤解析を行う上で、解析対称の拡大により、遺伝的アルゴリズムのランダムサーチという手法では、解に安心感が得られない事が分かる。この問題は世代数や個体数を増やすことによりある程度解決できるが、解析効率の低下などの欠点がある。

6.1.2 結論

- 時刻歴領域において、解析対称部の全力学エネルギー最小化評価関数は、解析効率・精度共に優秀であるといえる。
- 2次元地盤解析に拡張した場合、遺伝的アルゴリズムのみの手法ではエネルギー自体は効率よく低減するが解の安定性は得られない。
- 解析対象物の拡大により、手法の変更、精度の向上などが要求される。

6.2 考察・結論

6.2.1 研究課題

■ 無反射精度の追求

- 1) 時刻的に離散モデルが変動するハイブリッド手法の研究.
- 2) 遺伝的局所探索法との組み合わせ研究.
- 3) 遺伝的アルゴリズムに変わる新しい手法の探索

■ 実地盤再現

- 4) 地震波の導入.
- 5) 3次元への拡張.

■ 本研究の可能性

- 6) 有限狭領域での解析効率の飛躍的な向上.
- 7) 地震時の挙動検証・リスク分析・総合解析ツールの開発.
- 8) 室内波動発生プールの吸水波スポンジ壁の作成.
- 9) 構造物のブレースダンパー減衰係数値の最適化.

謝辞

謝辞

今、私は学生生活との別れを向かえています。私は中学生の頃から法政大学第一中学校に入学しましたので12年もの間法政という名の下に過ごしてきたことになります。その最後に、境界処理問題という研究を取り組み、本論文を書き上げられた事を心からうれしく思います。そして、本論文を作成するにあたり、市ヶ谷に新校舎を建てたばかりでお忙しい中度重なる議論、研究に対しての考え方を指導していただいた吉田長行教授に深く感謝を申し上げます。そして佐々木睦朗教授、坪井善隆教授をはじめ、ご指導くださった先生方にも感謝を申し上げます。

もし私が人生を繰り返さねばならないとしたら、私は私の人生を再び繰り返したい。

過去を悔やまず、未来を恐れもしないから

この言葉は16世紀ルネサンス期のフランスを代表する哲学者ミシェル・エケム・ド・モンテーニュの言葉です。今、卒業を向かえこの言葉がとても心にしみました。吉田研究室での3年間は、今思うととてもすばらしい時間でした。頼りになる先輩、信頼できる友人、後輩に出会い共に学んだことはこれから先の人生の宝物です。もし私が再び人生を繰り返すとしても、日々努力し、友人達と協力することの楽しさを教えていただいた吉田研究室を再び繰り返したいと思います。

特に、共に長い時間研究を共にした安川君、渡辺君は私のゼミでの3年間をとっても充実なものにしてくれました。そして私に様々な考え方や手助けをしていただき、心から尊敬できる先輩である伊野先輩、畠山先輩にはとても感謝しています。そして研究室の事を考え様々な作業をしてくれた助川君には大変お世話になりました。

社会にでて、これからまた様々な人に出会い様々な経験をしますが、今のこの気持ちを忘れること無く日々努力していきたいと思います。そしてこれから、友人という言葉だけでなく自分自身みんなに負けること無くライバルとしてこれからも良い関係を築いていきたいと思います。

最後に、長い時間応援していただいた両親、友人、本当にありがとうございました。そして3年間私達を暖かい目で見守ってくれた吉田長之教授本当にありがとうございました。再びお会いしたとき、自信を持ってお会いできるようにがんばりますのでこれからもよろしくお願いします。

2009年2月 古谷 忍

参考文献

- [1] 森口, 宇田川, 一松: 岩波公式 I 微分積分・平面曲線, 岩波書店
- [2] 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用, 日本建築学会
- [3] John P. Wolf: 構造物と地盤の動的相互作用解析—時間領域処理法—, 鹿島出版会
- [4] 戸川 隼人: 有限要素法概論, 共立出版
- [5] 戸川 隼人: 有限要素法による振動解析, サイエンス社
- [6] 福森 栄次: よくわかる有限要素法, オーム社
- [7] 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書
- [8] 加川 幸雄: 有限要素法による振動・音響工学／基礎と応用, 培風館
- [9] 加藤 直樹, 大崎 純, 谷 明勲: 建築システム論, 共立出版株式会社
- [10] 渡辺 嘉二郎: 振動工学におけるコンピュータアナリシス, コロナ社
- [11] 山川 広司: “最適化デザイン”計算力学 GAE シリーズ 9, 培風館
- [12] 川井 忠彦: 応用有限要素解析, 丸善
- [13] 柴田 明德: 最新建築学シリーズ 9・最新耐震構造解析, 森北出版
- [14] 大崎 順彦: 建築振動理論, 彰国社
- [15] 大崎 順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会
- [16] 土質工学会: 土質・基礎工学のための地震・耐震入門, 土質工学会
- [17] 山口 宏樹: 構造振動・制御, 共立出版
- [18] 西村敏充, 狩野弘之: 制御のためのマトリクス・リカッチ方程式, 朝倉書店
- [19] 吉田 長行: 無反射境界の制御, 第 5 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム, pp.121-124
- [20] 志田祐一, 吉田長行: 最適制御による無反射境界, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.877-878
- [21] 志田祐一, 吉田長行: 最適制御による無反射境界と地盤解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 2002
- [22] 三浦房紀, 沖中宏志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた 3 次元構造物 - 地盤系の動的解析手法, 土木学会論文集 I, 404/I-11, pp.395-404
- [23] 中尾浩行: 遺伝的アルゴリズムによる無反射境界の離散化決定法, pp.20-27
- [24] 永井正夫・景山一郎・田川泰敬: 振動工学通論, 1995, pp.133-143
- [25] 古田均・杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997, pp.50-66
- [26] 田治見宏: 建築振動学, コロナ社, 1965
- [27] 加藤哲義: 地盤振動解析における境界処理問題
- [28] 中山弘隆, 他: 多目的最適化と工学設計, 現代図書, 2007
- [29] 坂和正敏著: 非線形システムの最適化, 森北出版, 1986
- [30] 坂和正敏: 離散システムの最適化, 森北出版, 2000
- [31] 成瀬勝武: 新土木設計データブック, 森北出版, 1968
- [32] 大野豊・磯田和男: 新版数値計算ハンドブック, オーム社, 1990

参考文献

- [33] 日本建築学会：地盤振動-現象と理論-, 日本建築学会
- [34] 日本建築学会：建築と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 日本建築学会
- [35] 鷲津久一郎：有限要素法ハンドブックⅠ基礎編, 培風館
- [36] 鷲津久一郎：有限要素法ハンドブックⅡ応用編, 培風館
- [37] K.J.Bathe / E.L.Wilson：有限要素法の数値解析, 科学技術出版
- [38] Sondipon Adhikari : Derivative of Eigensolutions of Nonviscously Damped Linear Systems,
University of Cambridge