

最適化手法による波動透過境界作成に関する研究

A study on wave transmitting boundary by optimization method

古谷 忍¹⁾ 吉田 長行²⁾

Shinobu Furuya, Nagayuki Yoshida

¹⁾ 法政大学大学院工学研究科建設工学

²⁾ 法政大学工学部建築学科

When analyzing the wave propagation problem in the infinite or semi-infinite elastic body, the numerical device which can transmit the outgoing waves should be attached to the boundary of the finite analytical region. For generation of wave transmitting boundary, the discrete models are installed at the boundary. In this research, we propose the method to optimize the coefficients of this discrete model by the genetic algorithm and sensitivity analysis. To investigate the validity of the present method, we use one-dimensional and two-dimensional rod models, and two-dimensional ground models.

Keyword: wave transmitting boundary, discrete model, optimal method

1. はじめに

近年、地盤の非線形な挙動が活発に研究されている。[1][2][3]非線形問題を扱う場合には、有限要素法が有効かつ柔軟な手法であることは良く知られている。しかしながら、有限要素法は本来、有限領域を対象とする数値解析手法であるため、無限あるいは半無限弾性体の波動伝播問題に適用する場合には、Fig.1 のように内部から外部に逸散する波動が境界領域で反射しないための工夫が必要である。

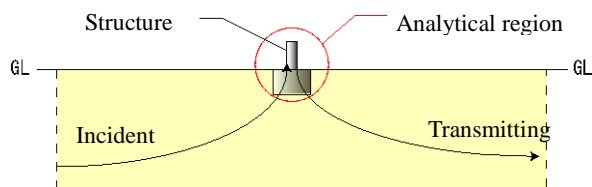


Fig.1 Analytical region

このような無反射処理を行う境界装置の実現には評価関数の設定とその最適化手法の選択が重要である。[4]本研究は有限領域での無反射境界装置の作成を目指した研究であり、無次元地盤再現に向け1次元仮想棒材にて最適化手法、評価関数、境界離散モデルの有効性を比較・検証を行い、2次元仮想棒材モデル、2次元仮想地盤モデルへの拡張を行う。

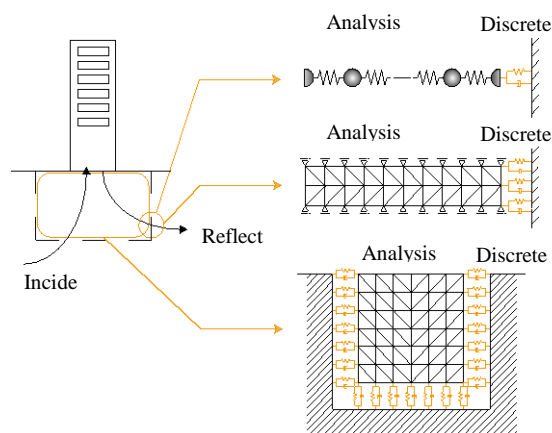


Fig2 virtual phase model

原稿受付 2009年3月6日

発行 2009年3月31日

法政大学情報メディア教育研究センター

2. 1次元仮想棒材解析方法

2.1 1次元解析モデル

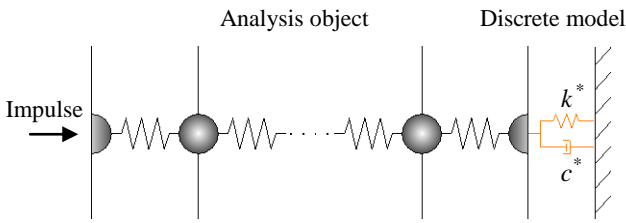


Fig3 1D analytical model (lysme's model)

1次元棒材特性

S波速度 : $V_s = 120m/s$ 密度 : $\rho = 1500kg/m^3$

断面積 : $A = 1m^2$ ポアソン比 : $\nu = 0.49$

2.2 マトリクス振動方程式

非比例減衰を扱う棒材の振動方程式は次のように表される。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (1)$$

ここに,

質量マトリクス要素 : $m = \rho AsTL$

剛性マトリクス要素 : $k = \frac{EAs}{TL}$

$$[M] = \begin{bmatrix} m/2n & & & & \\ & m/n & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m/2n & \\ & & & & m/2n \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & 0 & & \\ & & & c^* & \\ & & & & \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} nk & -nk & & & \\ -nk & 2nk & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & -nk & \\ & & -nk & nk + k^* & \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\{f\} = [f_0 \ 0 \ \dots \ 0]^T$$

$$\begin{pmatrix} f_0 = 1 & \text{in frequency domain} \\ f_0 = 0 & \text{in time domain} \end{pmatrix}$$

なお、後の解析では断らない限り、レイリー減衰3%を導入する。

2.3 境界離散モデル

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の検証を行う。以下に例として Lysmer's model を示す。

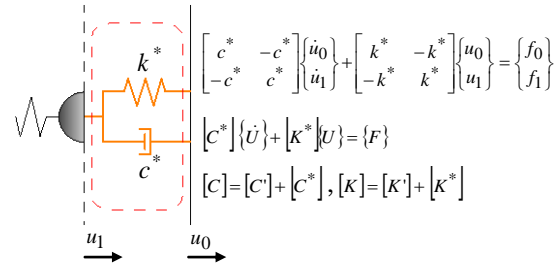


Fig4 Lysme's model

2.4 最適化手法

■ 遺伝的アルゴリズム

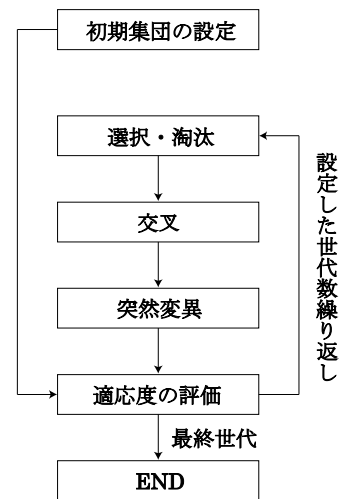


Fig5 Process of GA

GA の中でもルーレット戦略とエリート戦略を用いる。

$$\text{Minimize or Maximum } f(x) \quad (3)$$

$$\text{Subject to } x \in S \quad (4)$$

$f(x)$ は決定変数ベクトル x の関数で、評価関数と呼ばれ、次節で具体的に示される。 S は x が取り得る範囲を形式的に表したものである。また、突然変異率は染色体ビット数に依存して決定する。

$$\frac{2}{\text{bit count of chromosomes}} = 0.25 \quad (5)$$

GA の解析条件を Table 1 に示す.

Table 1 Analytical condition of GA

generation number	1000
number of individuals	100
bit count of chromosomes	16
mutation rate	0.25

■ 感度解析

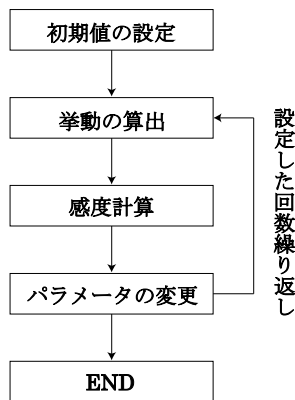


Fig6 Process of SA

本研究では感度解析は 100step として行う.

■ 遺伝的局所探索法

遺伝的アルゴリズムと感度解析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に長所を生かし, 短所をなくすことができる. 遺伝的局所探索法では Fig7 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.

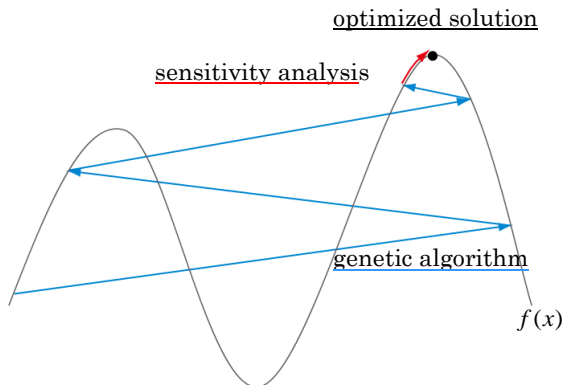


Fig7 Genetic Local search method

2.4 評価関数

1次元半無限 (仮想) 棒材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ことを目的とするのではなく, 完全は同等化の意味を理論解と解析領域に存在する特性に着目し, 複数の評価関数の比較・検証を行う.

■ 全力学エネルギー最小化評価関数

解析対称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.

$$\Pi_1 = \frac{1}{2} \int_0^t (\dot{u})^T [M] \dot{u} + \{u\}^T [K] \{u\} dt \quad (6)$$

■ 減衰エネルギー評価関数

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.

$$\Pi_2 = \frac{1}{2} \int_0^t c^* u_n^2 dt \quad (7)$$

■ 多目的最適化評価関数

全力学エネルギー最小化評価関数と減衰エネルギー最大化評価関数を同時に解析し, モデルの挙動を制御することを目指す.

$$\begin{cases} \Pi_1 = \frac{1}{2} \int_0^t (\dot{u})^T [M] \dot{u} + \{u\}^T [K] \{u\} dt & (6) \\ \Pi_2 = \frac{1}{2} \int_0^t c^* u_n^2 dt & (7) \end{cases}$$

3. 1次元半無限 (仮想) 棒材解析

3.1 境界離散モデル別解析結果

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する. なお遺伝的アルゴリズムによる最適化を行うものとする.

■ Viscous boundary model

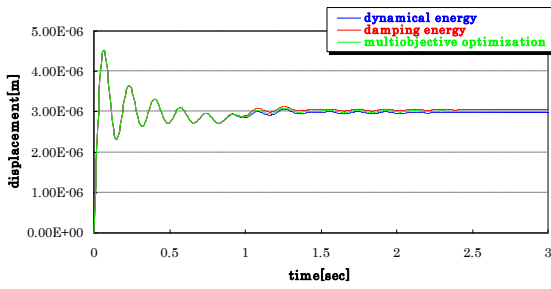


Fig8 Comparison of evaluation function (Viscous boundary model)

■ Lysmer's model

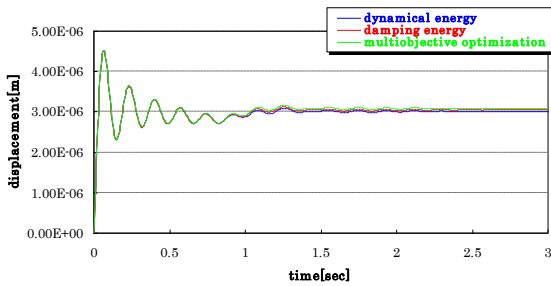


Fig9 Comparison of evaluation function (Lysmer's model)

■ Luco's model

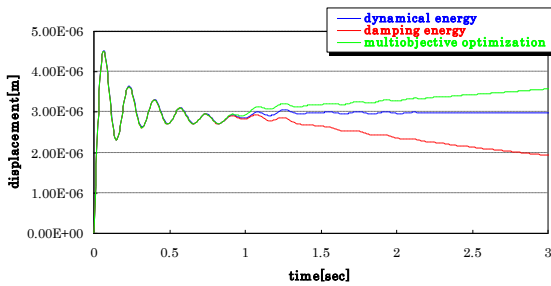


Fig10 Comparison of evaluation function (Luco's model)

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行った結果，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，境界離散モデルに Lysmer's model を

用いる事が最も有効な手法であると言える。

3.2 1次元遺伝的局所探索法解析結果

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。

■ 全力学エネルギー最小化評価関数比較

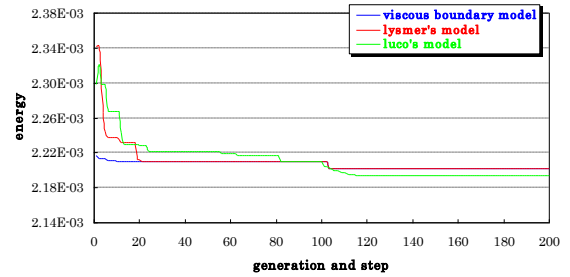


Fig11 Comparison and step

■ 変位挙動比較

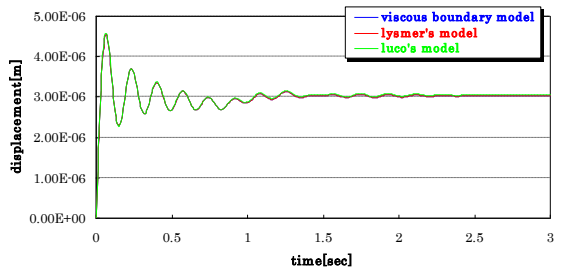


Fig12 Comparison of displacement behavior

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より精度の向上が確認できる。しかし計算時間・効率を考えた場合，遺伝的アルゴリズムのみの検証で十分な精度を確保できることが確認できる。

3.3 理論解との比較

1次元仮想棒材モデルの解析では $c^* = \rho V, k^* = 0$ が理論解であり，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いたる。その剛体移動の理論解はヘビサイド関数により求めることができる。

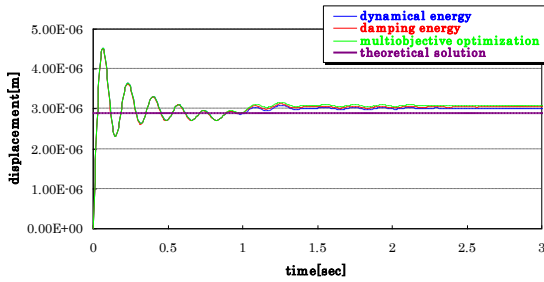


Fig13 Comparing with theoretical solution

遺伝的アルゴリズムにより最適化を行った結果と剛体移動の理論解を比較するとほぼ同一の値となることから本手法は有効であると言える。

4. 2次元半無限（仮想）棒材解析

本研究では、2次元領域では周波数領域、時刻歴領域の総領域で理論解が存在しないことにより、1次元半無限（仮想）棒材解析で有効であった遺伝的アルゴリズムによる全力学エネルギー最小化評価関数を用いて最適化を行い、新たな評価法を模索する。

4.1 解析モデル

振動の制御性能を確かめることを主とする拘束棒材モデルと1次元棒材モデルと比較することにより手法の有効性を確認する自由棒材モデルでの解析を行うものとする。

■ 拘束棒材モデル

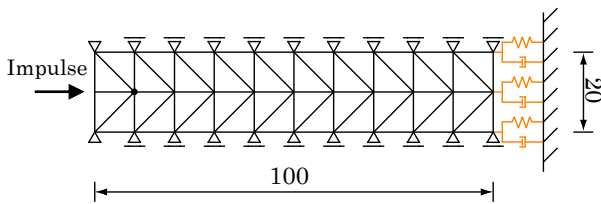


Fig14 2D analytical model (Constraint)

■ 自由棒材モデル

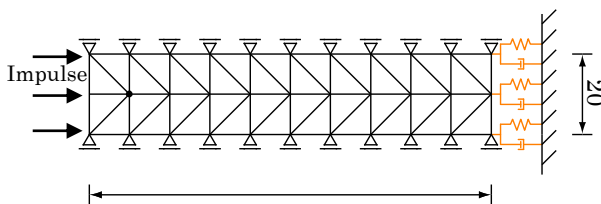


Fig15 2D analytical model (Free)

2次元棒材特性

S波速度： $V_s = 120m/s$ 密度： $\rho = 1500kg/m^3$
 厚さ： $A = 1m$ ポアソン比： $\nu = 0.49$

4.2 解析結果

■ 拘束棒材モデル

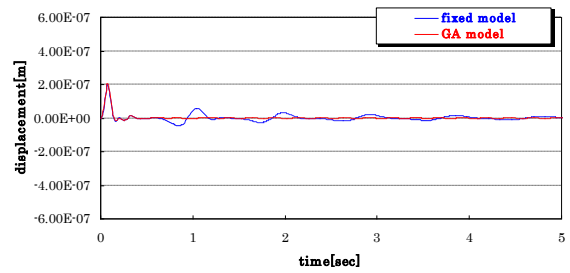


Fig16 Displacement behavior (Constraint)

■ 自由棒材モデル

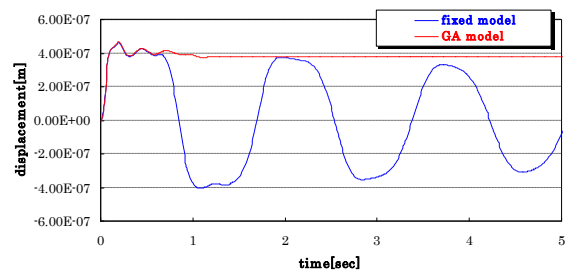


Fig17 Displacement behavior (Free)

拘束棒材モデルを検証すると変位挙動がよく低減されていることが分かる。また自由棒材モデルの解析結果を検証すると、変位の値自体は異なるが、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。

5. 2次元半無限（仮想）地盤解析

本研究では半無限を仮想した1次元棒材解析，2次元棒材解析で有効であった遺伝的アルゴリズムによる全力学エネルギー最小化評価関数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。

5.1 解析モデル

本研究では面要素を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半無限（仮想）地盤モデルでの解析を行う。また入力外力をインパルスとして赤丸部に3種類与え水平変位，垂直変位を検証することにより本研究の有効性を確かめる。

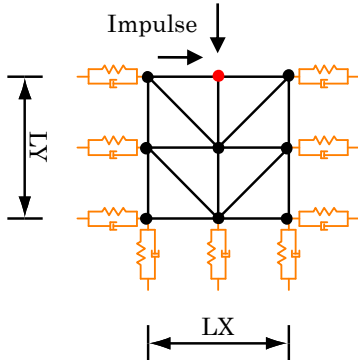


Fig18 Soil model (2Dim)

2次元地盤特性

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

5.2 解析結果

■ 垂直荷重

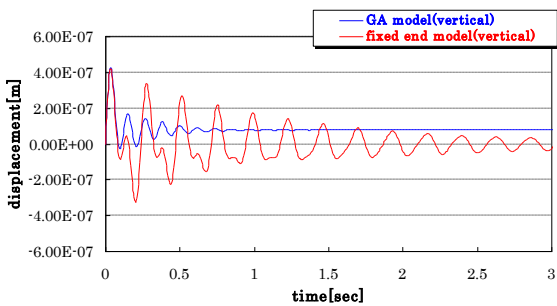


Fig19 Comparison of vertical displacement behavior

■ 水平荷重

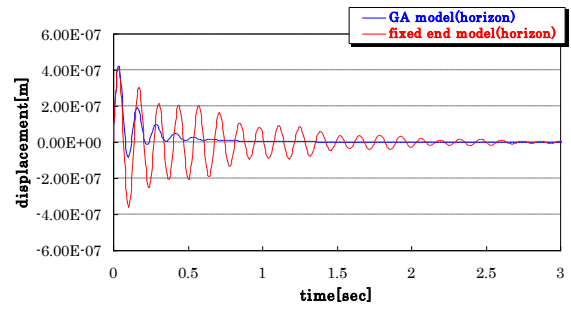


Fig20 Comparison of horizon displacement behavior

■ 垂直水平荷重

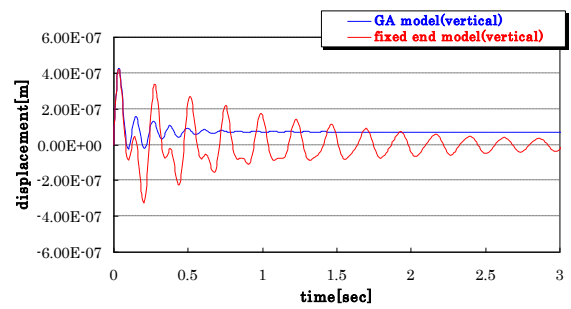


Fig21 Comparison of vertical displacement behavior

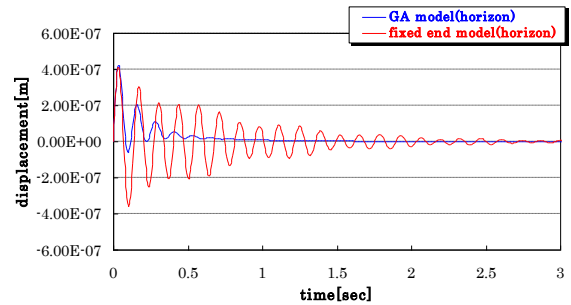


Fig22 Comparison of horizon displacement behavior

境界固定モデルと最適化モデルを比較した場合，変位挙動がよく制御されていることが確認できる。

6. 結論・結果

遺伝的アルゴリズムによる1次元古層棒材の全力学エネルギー最小化評価関数は，1次元半無限棒材の理論解とほぼ同一の挙動を示したことにより，有効な手法であると言える。

2次元仮想棒材においても変位挙動，解析対処部

のエネルギーを検証すると、共に効率よく低減されている。自由棒材の解析結果を見ると変位挙動自体の値は異なるが、1次元仮想棒材とほぼ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法の有効性が確認できた。

7. 参考文献

- [1]日本建築学会：地盤振動-現象と理論，日本建築学会，pp.180-295, 2005年
- [2]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，pp.11-55, 2006年
- [3]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，pp.1-111, 1996年
- [4]伊野慎二，吉田長行：波動透過境界の最適化に関する研究