

S8-1-3.

遺伝的アルゴリズムを用いた
地下鉄防振対策の最適化

[土] 〇西宮 裕騎 (新潟大学大学院), [土] 阿部 和久 (新潟大学), [土] 古田 勝 (東京都交通局)

Subway track optimization for vibration reduction by genetic algorithm

Yuuki NISHINOMIYA, Member (Graduate School, Niigata University)

Kazuhisa ABE, Member (Niigata University)

Masaru FURUTA, Member (Transportation Bureau of Tokyo Metropolitan Government)

A multiobjective genetic algorithm is applied to subway track optimization in the context of vibration reduction. The objective functions are defined by the vibration acceleration level, the construction cost and the fatigue life of rail. The design parameters are given by the stiffness of sleeper pad, the weight of sleeper and the tunnel thickness. Since the evaluation of track vibration needs very long computation time, a neural network is introduced to reduce the computational effort. It is found that the developed method provides Pareto solutions effectively. The characteristics of the Pareto solution are discussed based on the numerical results.

キーワード：地下鉄, 振動低減, 多目的遺伝的アルゴリズム, ニューラルネットワーク

Key words: subway track, vibration reduction, multiobjective genetic algorithm, neural network

1. はじめに

過密都市部に建設される地下鉄は、その周辺に公共施設や住宅が林立し、それらの直下を通過せざるを得ない場合も少なくない。このような状況を受け、振動発生源である地下鉄自体に対し様々な防振対策が講じられている。

現在では数値解析による防振対策の評価がある程度可能となっている¹⁾。しかし、実際の設計では防振性に加え経済性などを考慮に入れた総合的評価に基づく検討が必要となる。

本研究では地下鉄道において施されている主要な防振対策を対象に、防振効果・建設費用・レール寿命に関して総合評価し、最適な設計条件を見出すための一手法を構築する。なお、防振効果とその対策費用やレール寿命とは相反する関係にあり、前者の改善は後者の性能低下を招く。このような問題においては、各目標に対する妥協解、いわゆるパレート解を求める必要がある。

パレート解の探索では多数の妥協解を同時に求める必要があり、このような目的に対し遺伝的アルゴリズム (GA) が適している²⁾³⁾。多目的最適化問題を対象とした GA (多目的 GA) は、近年多くの研究がなされており、幅広い分野で応用されている⁴⁾⁵⁾。以下では、防振対策に関連する防振パッドのバネ定数・まくらぎ重量・トンネル覆工厚の 3 つを設計変数にとり、上述の 3 項目を目的関数とした多目的 GA を構築する。また、具体例を通しその適用可能性について検討する。

2. 対象とする地下鉄構造と設計変数

Fig.1 に示すような単線シールドトンネルを対象を考える。一般的なコンクリート直結道床で、二次覆工はないものとする。レール・まくらぎ間には公称バネ定数 110MN/m の

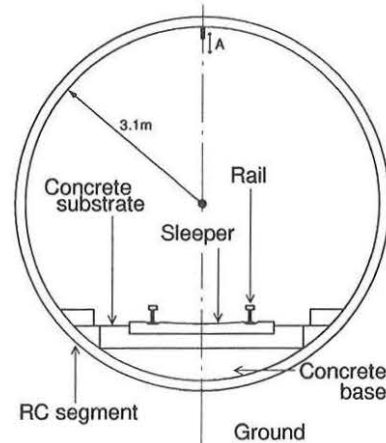


Fig. 1 Section of tunnel

軌道パッドが設置されている。また、まくらぎ間隔は 58cm で、列車走行速度は 20m/s とした。

設計変数には過去の研究⁶⁾において顕著な防振効果の認められた、防振パッドのバネ定数 k_s 、まくらぎ重量 m_s 、RC セグメント厚 (覆工厚) t_{RC} の 3 つを設定する。各設計変数の設定範囲は、 $2 \leq k_s \leq 40(\text{MN/m})$ 、 $200 \leq m_s \leq 300(\text{kg})$ 、 $0.25 \leq t_{RC} \leq 0.35(\text{m})$ とした。なお、防振パッドとはまくらぎ・道床間に挿入されるゴムパッドのことであり、低バネ定数のもの程高い防振効果を発揮する。しかし、極端に剛性の低いものは、列車走行安定性に支障をきたす恐れがある。まくらぎ重量と覆工厚については、それらの値の増加により防振性の向上を図ることができる。

3. 目的関数の設定

3.1 振動加速度レベル

$$\begin{aligned} \text{VAL} &= 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \text{ (dB)} \\ P^2 &= \int_{f_1}^{f_2} S(f) df \\ S(f) &= \frac{1}{T} |F(f)|^2 \end{aligned} \quad (1)$$

本解析モデルは車両をモデル化していないため、10Hz以下における車両の固有振動モードが再現できないこと、及び地盤を伝播して行く主要な周波数帯が60Hz前後に分布することを考慮に入れ、周波数範囲を10Hz～100Hzとした。

3.2 建設費用

まくらぎ単価は 100(円/kg) とした。1km あたり約 1724 本敷設されているので、200kg のまくらぎを基準とし、そこからの差分によりまくらぎ費用関数 f_1 を次式で与える。

トンネルの建設費用 f_2 はその建設実績から、断面積の増加比率で評価し、トンネル覆工厚 0.25m の場合からの増分により、式 (3) のように設定した。

The diagram illustrates a mechanical model of a vehicle-track system. Two wheels, each subjected to a downward load $P_b = 36.75 \text{ kN}$, are positioned on a track. The horizontal distance between the wheel centers is the wheel base, 2.18 m . The track structure consists of several layers: Rail, Rail pad, Sleeper, Sleeper pad, and Substrate. The wheels are in contact with the Rail layer. The Rail and Sleeper layers are supported by vertical springs. The horizontal distance between the centers of the first two sleepers is 0.58 m . The total length of the track segment shown is $0.58 \text{ m} \times 24 \text{ intervals} = 13.92 \text{ m}$. An X-axis is indicated at the bottom left, pointing to the right.

3.3 レール寿命

レール寿命の評価に際し、まずレール底面の絶対最大曲げ応力を静的解析により求める。解析では Fig.2 に示すように、レールをはり要素で離散化し、パッド類を非線形バネでモデル化した。

4. 多目的 GA による最適解の探索

以下では文献⁹⁾に示した GA を基本に、本研究で新たに構成した多目的 GA について述べる。

4.1 コード化

GA では通常二進数表現された染色体により個体を定義するが，コード化とデコード化が必要となる上，精度向上にはビット数を増やす必要があり効率的とはいえない．そこで，個体を実数で表現する実数型 GA を用いる．この時，各個体は設計変数空間内の位置ベクトル $\mathbf{x}_i$ により定義される．

4.2 評価

j 番個体の i 番目的関数を $F_i(\mathbf{x}_j)$ とし, 適合度 $\Phi_i(\mathbf{x}_j)$ を次式により定義する.

ここで, $F_{i,max}$, $F_{i,min}$ は各目的関数の最大値と最小値である.

4.3 選択

適合度の高い個体を親として選択し再生する。選択には Baker の線形ランキング選択⁸⁾を用いる。まず適合度に基づき 4.4 に示す方法で各個体のランクを設定し、その下で第 i 番個体の選択確率 p_i を次式で与える。

$$p_i = \eta_p - (\eta_p - \eta_m) \frac{R_i - 1}{R_{max} - 1} \quad (5)$$

ここで、 R_i は i 番個体のランク、 R_{max} はランクの最大値である。また、 η_p, η_m は $1 \leq \eta_p \leq 2, \eta_m = 2 - \eta_p$ の条件下で設定されるパラメータである。最終的な選択確率は総計で 1 となるように次式により規格化して与える。

$$p'_i = \frac{p_i}{\sum_j p_j} \quad (6)$$

4.4 パレートランキング法

多目的最適化問題では一般に最適解を一意に決めることはできない。パレート解は次の条件を満たす集合として定義される²⁾。

$x^* \in X$ に対して、 $F_i(x) \leq F_i(x^*), i = 1, \dots, M$ で、しかもある j について $F_j(x) \leq F_j(x^*)$ となるような $x \in X$ が存在しないとき、 x^* をパレート最適解と呼ぶ。ここで、 M は目的関数の個数である。

多目的 GA ではパレート解の集合を探索する必要がある。本研究ではパレート解の探索に Fonseca らによって提案されたパレートランキング法²⁾を用いる。

4.5 ニッチング

本問題の場合、パレート解は 3 次元空間中の曲面として現れる。したがって、この曲面全体が適切に捉えられなければならない。そのため、各個体がパレート面上に様に分布するように計算を進める必要がある。このように、個体の局所化を防ぎ解の多様性を維持するようになされる操作をニッチングという。ニッチングは Fitness Sharing 法¹⁰⁾(FS 法)に基づいて行なう。

4.6 VAL の評価の効率化

GA による最適解の探索には、多数の個体毎に設計変数を変更しながら軌道系連成解析を繰り返し実行し、VAL を求める必要がある。しかし、これには多大な時間を必要とするため、振動評価の効率化の目的でニューラルネットワーク (N.N.) を導入する。

本研究では階層型 N.N. を採用し、学習は一括型誤差逆伝播則に基づいて行なう。具体的には、防振パッドのバネ定数・まくらぎ質量・トンネル厚の 3 つのパラメータを入力し、振動加速度レベル VAL を出力するものを、50N, 60kg レール各々に対して作成した。

N.N. を含めたアルゴリズム全体の流れを Fig.3 に、多目的 GA に用いた諸パラメータを Table.1 に示す。

Table 1 Parameters in the present multiobjective GA.

the number of generations N_e	50
population N	1000
probability of crossover p_m	0.6
probability of mutation p_c	0.005
interval of niching (generations)	10

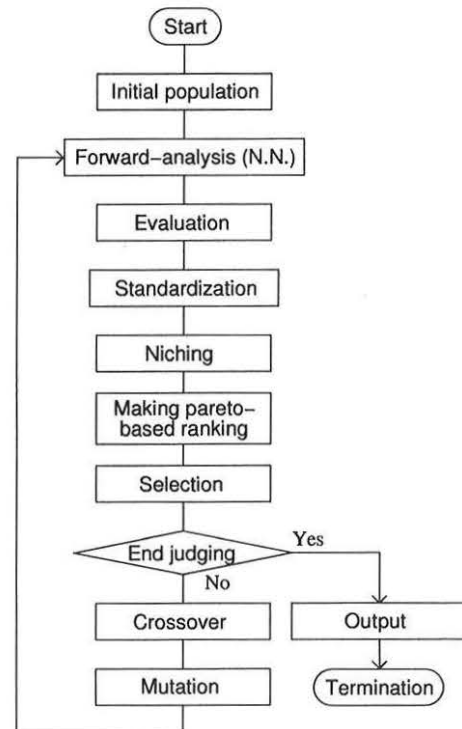


Fig. 3 Multiobjective GA using N.N.

5. 解析結果

得られたパレート解は 3 つの目的関数を持つため、三次元空間中の曲面として与えられる。これを分かりやすく説明するため、各二次元平面に射影したものを Fig.4 に示す。

Fig.4 より、振動加速度レベルと費用のトレードオフ面が $(P_1), (P_2)$ に現れ、寿命とのトレードオフ面が $(P_3), (P_4)$ に現れている様子が確認できる。

振動加速度レベルの低減には、トンネル覆工厚の増加・まくらぎの重量化・防振パッドの低バネ化の 3 種類の選択肢がある。その中で防振効果と費用に大きな影響を与えるのはトンネル覆工厚であり、 $(VAL < -8)$ の範囲ではトンネル増厚に伴う費用の増加が顕著に現れている (Fig.4(a)(b))。Fig.4(c)(d) より、 $(VAL < -9)$ になるとトンネル増厚・まくらぎ重量化だけでは対応できず、防振パッドの低バネ化による寿命の低下がトレードオフ面として現れている (P_3, P_4) 。

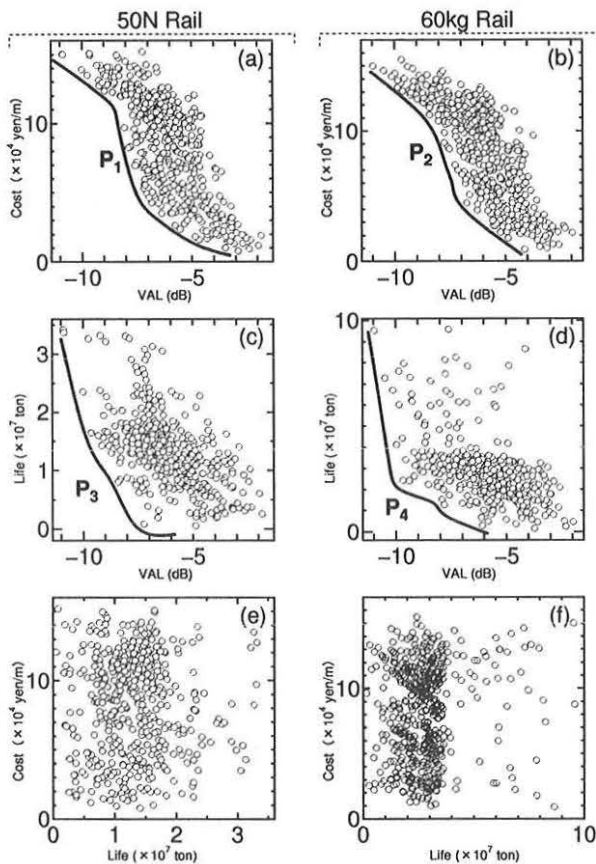


Fig. 4 Projection of Pareto solutions to each coordinate plane.

Table 2 Pareto solutions.

	Case1	Case2	Case3	
k_s	6.96	2.59	15.82	(MN/m)
m_s	294.2	302.6	244.8	(kg)
t_{RC}	25.7	34.5	25.2	(m)
Rail	50N	50N	50N	
VAL	-5.78	-10.89	-3.47	(dB)
Cost	2.64	15.01	1.01	($\times 10^4$ yen/m)
Life	2.28	3.42	1.62	($\times 10^7$ ton)

また、寿命は防振パッドのバネ定数で決定されるが、費用の評価に防振パッドが含まれていないため、費用と寿命に関する相関性は存在しない (Fig.4(e)(f))。

60kg レールは 50N レールに比べて、レール亀裂が 25mm に達するまでの通過トン数が大きいいため、60kg レールにおけるパレート解は相対的に寿命低下の小さいものに集中している (Fig.4(c)(d))。

50N レールを対象に、パレート面上で得られた設計変数

の中から 3 つの例を Table.2 に示す。Case1 は建設費用増分が 3(万円/m) 以内のもので、最大の防振効果を与えた例である。Case2 は得られた解の中で最も高い防振効果を与えたものを示している。この場合、費用増加・寿命低下が顕著に現れている。Case2 の設計変数を参照すると、トンネル覆工が厚いものが選択され、まくらぎの重量も高く、防振パッドも低バネ定数のものが選択されている。Case3 は最小のコスト増分を与えた解を示しており、あまり大きな防振効果は得られていない。

6. おわりに

地下鉄軌道の防振対策を対象に、多目的 GA を用いた最適設計手法の構成を試みた。得られた解は経験的に見ても妥当に思われ、良好な多目的最適化手法が構築できていると考えられる。

多目的 GA はパレート最適解を求める手法として非常に有効である。これによって、様々な条件下での妥協解を求めることが可能となる。実際の設計時に参考となるデータを作成するためには、目的関数と設計変数の設定が重要となる。今回は寿命や費用に簡易的な指標を用いて問題設定をしたが、これらを具体事例に合わせ適宜設定することで、実際の設計段階で有用な情報の提供が可能となるものと考ええる。

参考文献

- 1) Abe, K., Satou, D., Suzuki, T. and Furuta, M.: Three-dimensional analysis of subway track vibrations due to running wheels, Wave2002, N. Chouh & G. Schmid (eds), 149-156, Balkema, 2003.
- 2) Fonseca, C.M. and Fleming, P.J.: An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization, *Evol. Comp.*, 3, 1-16, 1995.
- 3) Schaffer, D.J.: Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms, *Proc. of the 1st Int. Conf. on Genetic Algor.*, 93-100, 1985.
- 4) Houis, S.J. and Rawlins, G.J.E.: Pareto optimality, GA-easiness and deception, *Proc. of the 5th Int. Conf. on Genetic Algor.*, 118-123, 1993.
- 5) Sasaki, D., Obayashi, S. and Nakahashi, K.: Navier-Stokes optimization of supersonic wings with four objective using evolutionary algorithm, *J. Aircraft*, 39, 621-629, 2002.
- 6) 阿部 和久, 佐藤 大輔, 古田 勝: 地下鉄軌道における各種防振対策の解析的検討, 鉄道力学論文集, No.7, 7-12, 2003.
- 7) 柏谷 賢治, 石田 誠: レール横裂成長速度予測モデル, 鉄道力学論文集, No.7, 79-84, 2003.
- 8) 坂和 正敏, 田中 雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, 1995.
- 9) 阿部 和久, 佐藤 大輔, 古田 勝: 遺伝的アルゴリズムによる軌道振動モデルの未知パラメータ同定, 鉄道力学論文集, 5, 55-60, 2001.
- 10) Fonseca, C.M. and Fleming, P.J.: Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization, *Proc. of the 5th Int. Conf. on Genetic Algor.*, 416-423, 1993.