

(28) 複数の目標応答スペクトルに適合した設計用模擬地震動の作成

GENERATION OF SIMULATED EARTHQUAKE MOTIONS WITH MULTIPLE DAMPING RATIOS USING GENETIC ALGORITHMS

恒川 裕史, 阿部康彦

TSUNEKAWA Hiroshi and ABE Yasuhiko

(株) 竹中工務店 技術研究所 (〒 270-13 千葉県印西市大塚 1-5-1)

A technique to generate simulated earthquake motions for structural design considering multiple damping ratios has been developed. Simulated earthquake motions whose response spectrum meet the target response spectrum with 5% damping ratio are often used for earthquake resistant design of structures. As 5% damping ratio doesn't fit facilities and pipes, the resultant simulated earthquake motions wouldn't meet these parts. This technique can generate simulated earthquake motions that meet the target response spectrum with multiple damping ratios using genetic algorithms and pareto optimal method. Example simulated earthquake motions were generated to illustrate efficiency of this technique. Generated motions fitted the target spectrum better than the motions generated by traditional sinusoidal wave superposition method. Pareto optimal set of simulated earthquake motions could enable structural designers to determine input earthquake motions reasonably.

Key Words: multi-objective optimization, genetic algorithms, pareto

1. まえがき

構造物の耐震設計では、5%減衰の目標応答スペクトルに適合するように作成した模擬地震動を入力地震動として用いることが多い。しかしながら、構造物の設計に当たって検討が必要な設備機器、配管などの設計対象の減衰定数は、構造物の減衰定数とは異なっている。このため、構造物の減衰にのみ着目した模擬地震動では、設備のための減衰定数における応答スペクトルが目標とする応答スペクトルと適合しない。したがって、構造物ばかりでなく他の設計対象に対する減衰定数においても目標に適合する模擬地震動が必要である。こうした複数の減衰定数を同時に満足する模擬地震動を作成する手法としては、位相差を利用した Kanda らによる方法¹⁾、最小二乗法で求めたインパルス応答関数を利用した平澤らによる方法²⁾などがある。本研究では、正弦波合成法をベースに遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms 以下 GA) を用いて複数の減衰定数を同時に満足する模擬地震動を作成する手法を提案する。この中で、複数の目的関数を満たすためにパレート解の考え方をを用い、2つの減衰定数に対してパレート解を求める。GA は多点探索型の最適化手法であり、一度に複数の個体を評価する。したがって、GA を用いれば、多目的最適化において有

用なパレート解を従来の方法に比べて比較的容易に求めることが出来る。こうした研究には、Schaffer による VEGA³⁾や、Fonseca による MOGA⁴⁾、Goldberg による Niched Pareto⁵⁾、森らによる方法⁶⁾がある。本研究では、これらの研究を参考にしながら、模擬地震動の作成に適した方法を提案する。

2. 設計用模擬地震動の作成

設計用模擬地震動の作成手法を説明するために、いわゆる従来の正弦波合成法 (以下従来法) の作成手順を図-1に示す。この手法では、まず目標応答スペクトルを選択し、地震動の位相を一様乱数や実地震動の位相角によって決定する。次に、合成振幅を目標応答スペクトルを初期値として設定し、式 (1) に従って加速度波形を合成する。

$$y(t) = g(t) \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

ここで、 $y(t)$: 加速度波形、 $g(t)$: 包絡関数、 a_i : 合成振幅、 ω_i : 角振動数、 ϕ_i : 位相角である。ただし、この過程では現在は FFT を使うことが多い。そして合成した加速度波形を元に応答スペクトルを計算し、目

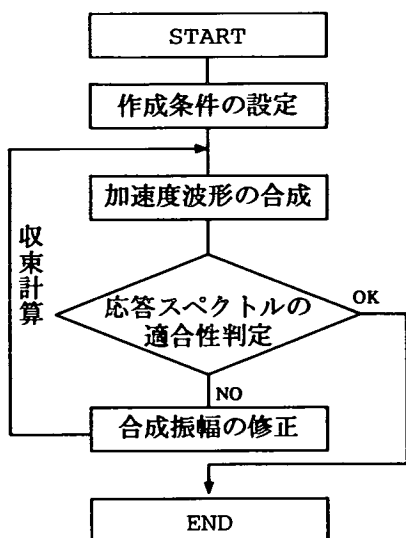


図-1 模擬地震動作成手順

標応答スペクトルとの適合性を判定する。適合性が要求に満たない場合には式 (2) に従って合成振幅を修正し、再び加速度波形を合成し、これを繰り返す。

$${}_{j+1}a_i = {}_ja_i \times \frac{{}_jS_{Ci}}{S_{Ti}} \quad (2)$$

ここで、 ${}_{j+1}a_i$: $j+1$ 回目の合成振幅、 ${}_ja_i$: j 回目の合成振幅、 ${}_jS_{Ci}$: j 回目に生成した模擬地震動による応答スペクトル、 S_{Ti} : 目標応答スペクトルである。この手法は単一の減衰定数では目標応答スペクトルに良く適合した波形を作成することが出来る。しかし、複数の減衰定数に対しては手法が確立されておらず、双方を同時に満足する地震動を作成することは難しかった。

3. GA による設計用模擬地震動の作成

GA による設計用模擬地震動の作成手順を図-2に示す。phenotypeは式(1)における合成振幅とし、genotypeは、これを浮動小数点表現したものとした。IEEE 規格 754 によれば、単精度の浮動小数点は 1 ビットの符号 s 、8 ビットの指数部 e と 23 ビットの小数部 f の合計 32 ビットで構成されている。ただし、本研究の場合、合成振幅が必ず正であること、合成振幅の範囲は限られることから、符号 1 ビットと指数部の 3 ビットを削除し、合計 28 ビットで数値を表すこととした。したがって、この形式では、式 (3) に示す数値を表現することになる。

$$2^{e-15} \times (1 + f) \quad (3)$$

次に、遺伝オペレータに関しては、淘汰をルーレット選択+エリート戦略により行なった。この際、ルーレット選択に使う評価値にはランクを、エリート戦略

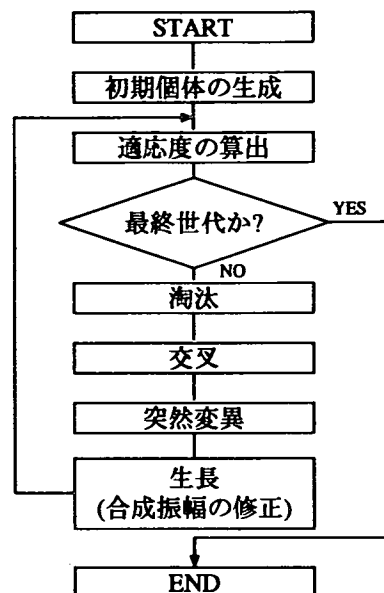


図-2 GA のフロー

は、その世代の最良の個体を次世代の最悪の個体と入れ換える形で実現した。

また、交叉は設計用模擬地震動作成に固有のものを採用した。具体的には、2つの親個体の phenotype の各合成振幅の周期における計算応答スペクトルと目標応答スペクトルとの比を計算し、1に近い方、つまりより目標応答スペクトルに近い方の個体の遺伝子を採用するのである。これは、応答スペクトルに対して各合成振幅がある程度独立に影響を与えることを利用している。この方法では2つの親から1つの子しか生成することが出来ない。そこで、phenotypeに式(1)の位相角発生のための乱数の初期値を加え、これは交叉においてもそのまま継承することで2つの親から2つの異なる子を生成することとした。

また、進化の速度を早めるために、杉本らによって提案された生長オペレータ⁷⁾を用いた。生長オペレータとしては、2節で説明した従来法の合成振幅の修正手法をそのまま採用した。しかしながら、本研究の場合、異なる複数の減衰定数における応答スペクトルを適合させる必要があることから、各々の減衰定数に対する修正を同じ確率で作用させることとした。

適応度は、従来法の適合度の判定法を参考にして、式 (4) により算出した。

$$fitness = \frac{1}{\sqrt{f(1\%)^2 + f(5\%)^2}}$$

但し

$$f(\text{減衰}) = \max_{i=1}^N \left| \frac{S_{Ci}}{S_{Ti}} - 1 \right| + \left| E \left(\frac{S_{Ci}}{S_{Ti}} \right) - 1 \right| + \sigma \left(\frac{S_{Ci}}{S_{Ti}} \right) \quad (4)$$

すなわち、個体の phenotype から計算した応答スペクトルと目標応答スペクトルの比の1からのズレの最大値、平均値の1からのズレと標準偏差を加えたものを各減衰定数における適応度とし、総合的な適応度はその相乗平均（適応度平面における原点からの距離）の逆数をとる。

4. 解析例(単目的)

例として、大崎スペクトルのマグニチュード7の減衰定数1%と5%の模擬地震動を作成した。GAの解析に使用した各パラメータは以下の通りである。

個体数	: 50
世代数	: 1000
交叉率	: 0.6
突然変異率	: 0.005
生長率	: 0.4

図-3に、従来法による1%減衰で収束させた解析例を示す。図の中の数字は、式(5)に示すように、生成した模擬地震動による最大速度応答スペクトルと目標最大速度応答スペクトルの比の平均と標準偏差と最大値である。

$$\begin{aligned} \text{average} &: E\left(\frac{S_{C_i}}{S_{T_i}}\right) \\ \sigma &: \sigma\left(\frac{S_{C_i}}{S_{T_i}}\right) \\ \text{max} &: \max_{i=1}^N \left| \frac{S_{C_i}}{S_{T_i}} - 1 \right| \end{aligned} \quad (5)$$

図-3(a)に示す様に、収束させた1%の減衰ではほとんど目標応答スペクトルと生成した模擬地震動の応答スペクトルとは一致している。しかし、図-3(b)に示す様に、5%の減衰ではかなりのずれが見られる。図-4にGAによる解析例を示す。これは前節で説明したように1%と5%の減衰定数を同時に満足するように計算したもので、図-3と比べると1%では従来法によるものの方が適合度が高いが、5%ではGAの方が良く適合しているのがわかる。従来法による5%減衰の応答スペクトルは平均で18%、最大で34%も目標から外れており、2つの減衰定数を考慮すればGAによって求めた模擬地震動の方が優れていると言える。

5. パレート解による多目的最適化

前節で説明した作成方法では、各減衰定数に対する適応度は算出するものの、最終的にはそれを単一の適応度に合成し、単一目的の問題に変換して模擬地震動を求めている。4節の例題では、5%と1%という2つの減衰定数を均等に扱い、単なる相乗平均を求めることで単一目的に変換している。その他には、各減衰定数に対

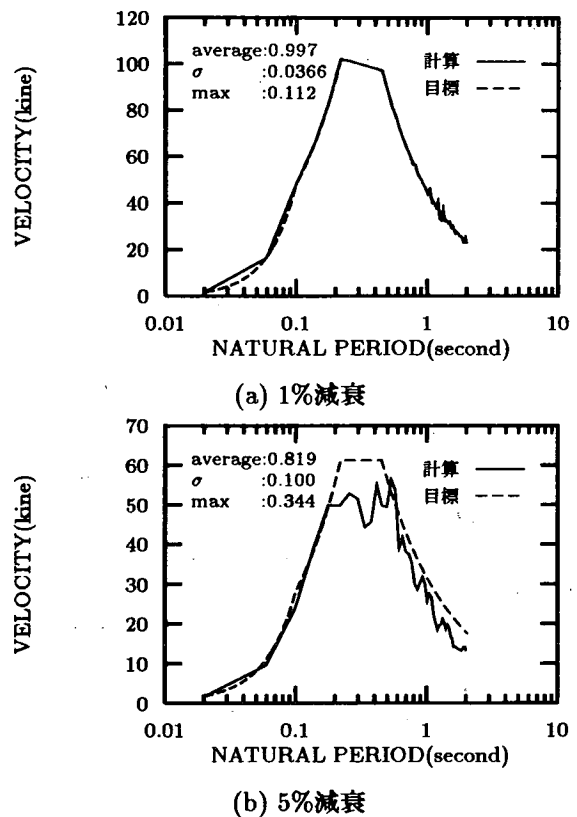


図-3 従来法による模擬地震動の応答スペクトル

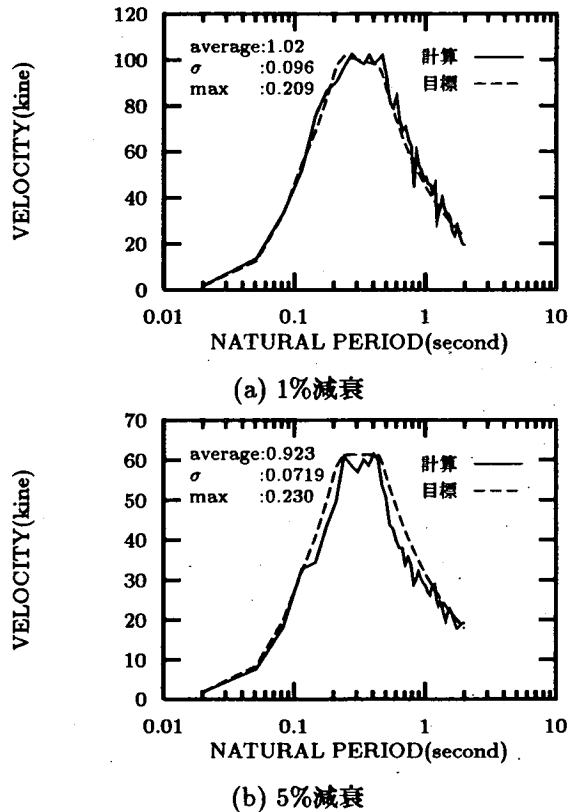


図-4 GAによる模擬地震動の応答スペクトル

して重みを設定して重みつき平均を行なって単一目的に変換する方法がある。しかしながら、予め重みを設定することが困難な場合にはこの方法をとることは難しい。このような場合にパレート最適解を求め、設計者が得られた模擬地震動同士を比較することによって採用する模擬地震動を選ぶことが出来れば、合理的な設計が可能になる。

GA でパレート最適解を探索する手法としては、前述したように VEGA や MOGA がある。VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithms) は population 全体を目的関数の個数分の subpopulation に分割し、各目的関数で淘汰を行なったあとで再びまとめ、交叉や突然変異の操作を行なう方法である。VEGA において subpopulation を統合する操作は、結局は単一の目的関数に変換する操作と同等であることが示されている⁸⁾。これに対して MOGA (Multiple Objective Genetic Algorithms) はパレート最適解としての順位を表す rank を個体の評価に使用している。本研究では、MOGA のランキング法を使用し、rank1 の個体間の順位づけのために各減衰定数に対する適応度の相乗平均を用いた。MOGA のランキ

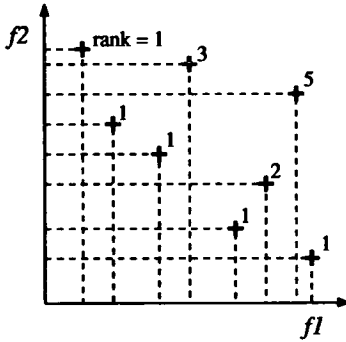


図-5 MOGA のランキング

ング法は、目的関数最小化問題では図-5に示すように、すべての目的関数（図では f_1 と f_2 ）の値においてその個体の値よりも小さい個体の数に 1 を加えた値を、その個体の rank とする。したがって、パレート最適解は rank1 となる。しかし、このままでは rank1 の個体間での淘汰圧が働かない。また、rank は 1 つの世代の中の相対的な順位であるため、そのまま適応度とすると適応度（特に最大適応度）が世代間であまり意味のないものになってしまう。そこで、rank1 の個体に限って単一目的に変換した適応度を使用することで、この問題を解決している。使用した適応度関数を、式 (6) に示す。

$$fitness = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{f(1\%)^2 + f(5\%)^2}} & \text{if rank1} \\ \frac{1}{rank + \max(rank1, \sqrt{f(1\%)^2 + f(5\%)^2})} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

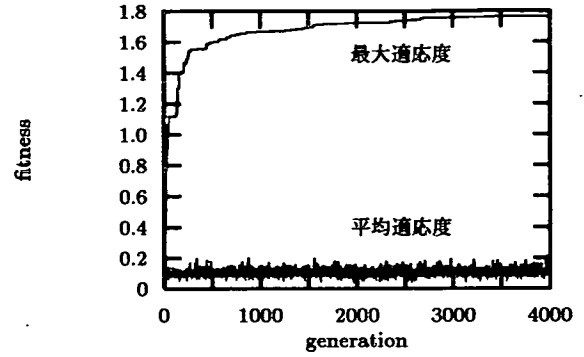


図-6 適応度の推移

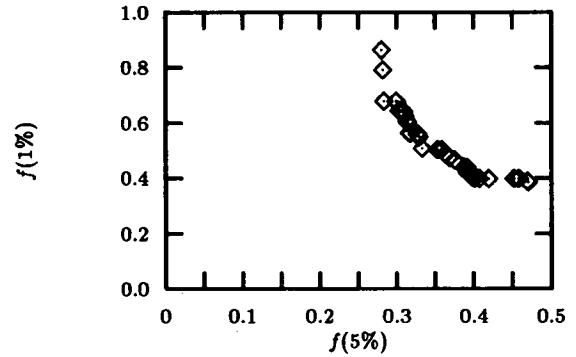


図-7 パレート最適解

実際には、こうして得られた適応度をさらに通常のランキング戦略を用いて変換して淘汰を行なった。また、各世代のパレート最適解の個体を保存し、保存した個体の中でさらにパレート最適解を求めることで最終的なパレート最適解を得ることとした。これによって、途中で生成される解を有効に利用して多くのパレート最適解を収集できる。

6. 解析例 (パレート最適解)

例として 4 節と同じ条件でパレート最適解を求めた。なお、十分なパレート最適解を求めるために、進化させる世代を 4000 世代とした。進化に応じた適応度の状況を図-6に、得られたパレート最適解を図-7に示す。1%および 5%減衰とともに適応度が高い個体は必ず rank1 となるため、最大適応度曲線は単一目的に変換した解析との対応をとることができる。また、rank1 以外の個体の適応度が rank1 の個体の適応度に比べてかなり小さくなるため、平均適応度はあまり向上が見られない。最大適応度は、200~300 世代までに急激に増大し、そのあとはなだらかに増加して、おおむね 3000 世代で最終的な解が得られている。特に初期世代での最大適応度の

変化は生長パラメータによる合成振幅の修正の効果が大きいと考えられる。得られたパレート最適解は、1%減衰の適応度で0.35から0.9の範囲に、5%減衰の適応度で0.25から0.5の範囲にばらついている。図-8に、最終的に得られた最大適応度を持つ個体の結果を、図-9と図-10に各々1%および5%減衰で適応度が高かった個体の結果を示す。

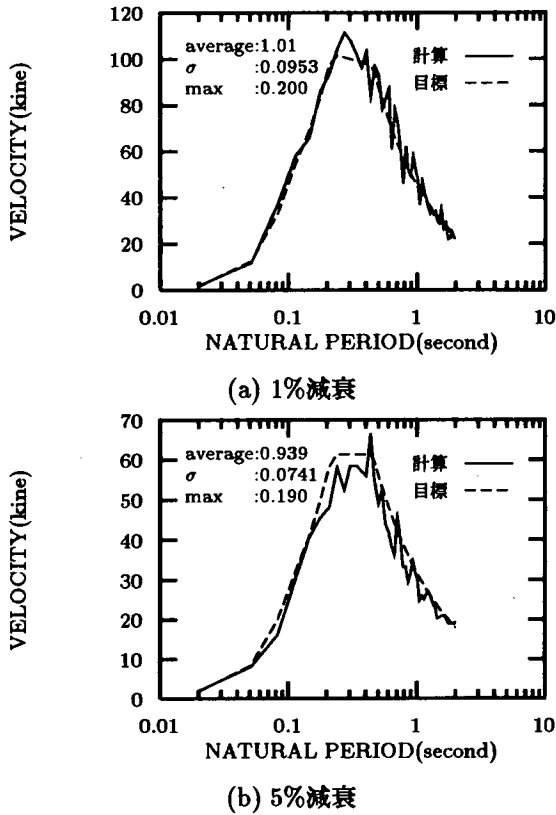


図-8 パレートによる模擬地震動 (最大適応度)

最大適応度の個体に関しては、図-4に比較して、1%減衰では目標応答スペクトルへの適合度がほぼ同等であった。また、5%減衰では生成した応答スペクトルと目標応答スペクトルの比で比べると平均および最大では図-8の方が、標準偏差では図-4の方がわずかに良い。前述したように最大適応度の個体は常にrank1となるため、単一目的に変換した解析と同等の結果が得られたものと考えられる。

1%減衰で最も良い適応度を示した個体に関しては、図-8に比較して、1%減衰ではほぼ同等もしくは若干改善されている。また、5%減衰では平均ではむしろ改善されているが、標準偏差および最大では1割から2割程度悪くなっている。これは、図-9で0.6秒よりも長い周期でのフィッティングが悪くなっているためと考えられる。機器に対する適合度を重要視する場合にはこちらをとるのが自然だと考えられるが、1%減衰における改

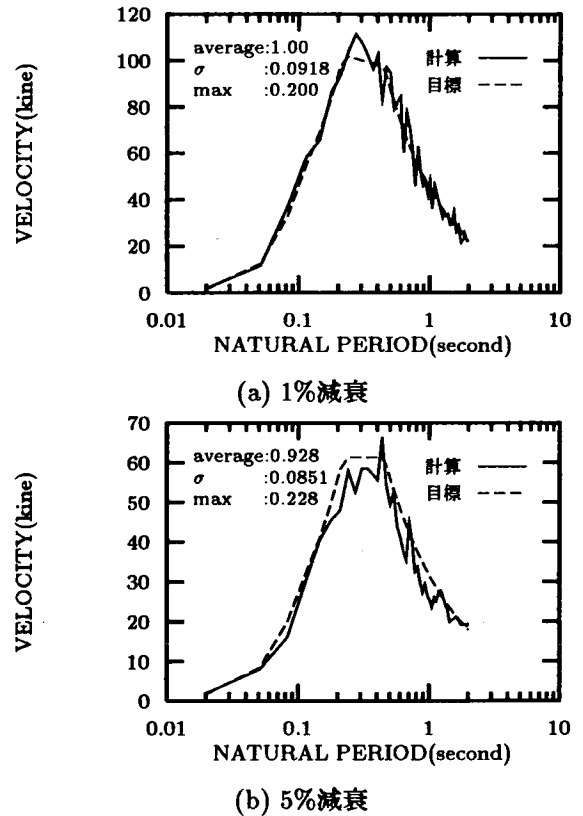


図-9 パレートによる模擬地震動 (1%減衰)

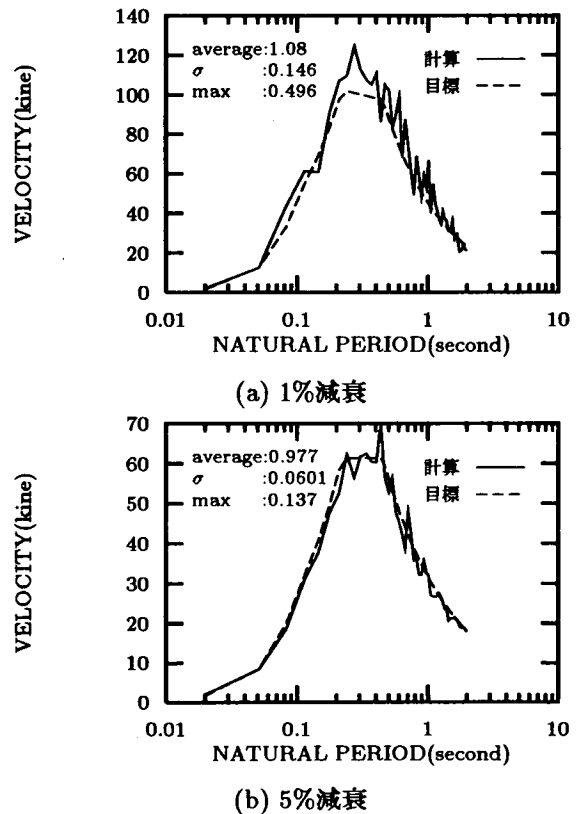


図-10 パレートによる模擬地震動 (5%減衰)

善がそれほどでもないことを考慮すると、最大適応度の個体を探る方が合理的と判断できるかも知れない。

5%減衰で最も良い適応度を示した個体に関しては、図-8に比較して、1%減衰ではいずれの指標でも悪くなっている。また、5%減衰では平均は4%ほど悪くなっているが、標準偏差および最大では2割から4割の改善が見られる。ただし、1%減衰では最大で5割も外れていることから、この地震動もあまり適切とは言えない。

そこで、図-8の個体よりは5%減衰での適応度が落ちるが、その分1%減衰での適応度が良い個体を、図-7の中から検討した。一例を図-11に示す。この個体は、図-8の個体に比べて5%減衰での平均比率は2%ほど悪くなっているが、標準偏差および最大比率では各々15%、5%改善されている。また、1%減衰での最大比率も0.243と図-10に比べて半分程度に押えられている。2つの減衰定数を総合的に判断して、適合度の悪い1%減衰での応答スペクトルが目標スペクトルよりもおおむね安全側であることも考慮すれば図-11の個体を採用するのが合理的と判断できる。

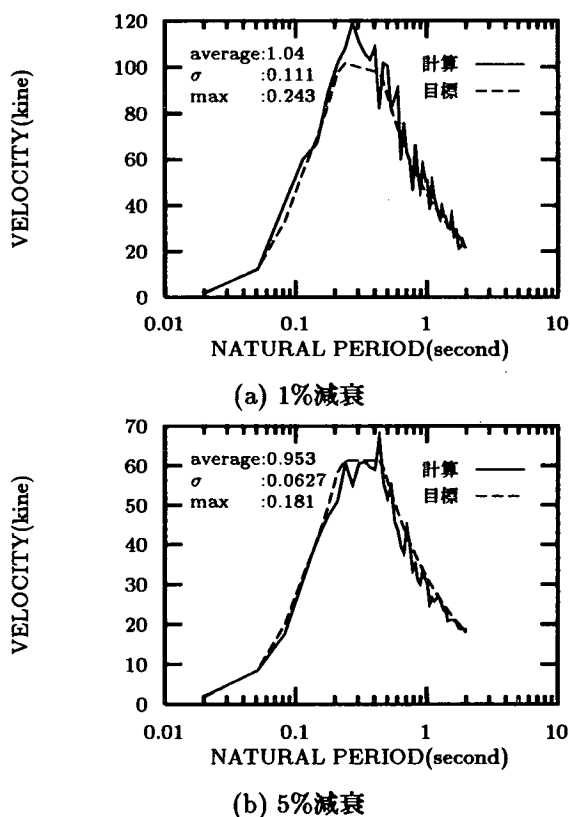


図-11 パレートによる模擬地震動

7. まとめ

耐震設計において、構造物、機器、配管などの減衰定数の異なる設計対象に対して各々対応する減衰定数における目標応答スペクトルに適合する模擬地震動を作成

する手法を提案した。提案した手法によって作成した模擬地震動は、従来の正弦波合成法による模擬地震動よりも、複数の減衰定数を考慮した場合には優れていることを示した。また、GAによってパレート最適解が求められることを示し、各減衰定数における適合状況を見ながら模擬地震動を選択することによって合理的な模擬地震動が作成できる可能性を示した。今後進展していくと思われる性能設計の中では設計者がその責任において入力地震動を決めることも求められていくと予想され、そうした場面では有効な手段になる考えられる。

参考文献

- 1) Kanda, J., Iwasaki, R., Ohsaki, Y., Masao, T., Kitada, Y. and Sakata, K.: Generation of Simulated Earthquake Ground Motions Considering Target Response Spectra of Various Damping Ratios, Trans. 7th Int. Conf. Struct. Mech. React. Technology, pp.71-79, 1983.
- 2) 平澤, 渡部: 多価の目標応答スペクトルに適合する模擬地震動の作成, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.339-340, 1991.
- 3) Schaffer, J.D.: Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms, Proc. First Int. Conf. on Genetic Algorithms, pp. 93-100, 1985.
- 4) Fonseca, C.M. and Fleming, P.J.: Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization, Proc. Fifth Int. Conf. on Genetic Algorithms, pp.416-423, 1993.
- 5) A Niche pareto genetic algorithm for multiobjective optimization, The First IEEE Conf. on Evolutionary Computation, 1994.
- 6) 森, 山村, 小林: 遺伝的アルゴリズムによるポートフォリオ選択, 第19回知能システムシンポジウム, 1994.
- 7) 杉本, 鹿, 山本: 離散的構造最適化のためのGAの信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No.471/I-24, 1993.
- 8) Richardson, J.T., Palmer, M.R., Liepins, G. and Hilliard, M.: Some guidelines for genetic algorithms with penalty functions, Proc. Third Int. Conf. on Genetic Algorithms, pp.191-197, 1989.