

GA による免震積層ゴムの最適設計

ミシシッピ州立大学 ○本山 恵一 日大生産工(院) 柴田 拓実
日大生産工 高橋 亜佑美 日大生産工 見坐地 一人

1. まえがき

近年、製品開発に於いて高度な要求性を満足する為、高精度の解析技術、複数分野を同時に考慮する解析技術等が必要とされることがある。これに伴い CAE(Computer Aided Engineering)技術分野でも「複雑現象の解明」, 「最適化」, 「計算の高速化」等に関し、活発な議論がされている。

複雑現象の解明に関しては非線形現象に対するモデル化技術、材料モデルの開発、複合領域解析等に注目している。これまでの金属材料を対象とした解析から複数材料から成るモデルに対し熱と流体が連成したような計算をイメージすると解り易い。より複雑なシミュレーションを対象に最適化計算が適用されてきた。また、非線形性の強い現象に対し、遺伝的アルゴリズム¹⁾ (GA: Genetic Algorithms) 等の旧来の手法と異なるアプローチでの成果も報告されている。「京」, 「TSUBAME」に代表される高速コンピュータを使つての製品開発への貢献も積極的に議論されている。²⁾⁻⁴⁾

本研究では免震積層ゴムの解析を対象とし、最適化計算と組合せる事により、積層ゴムの免震性能が改良できるか等、議論する。

本活動は「日本大学生産工学部とミシシッピ州立大学との教育・研究交流に関する覚書」⁵⁾⁻⁶⁾に端を発するものであり、教育・研究交流に配慮しチーム編成、役割分担等を決定した。

本稿では数理情報工学科が開発した免震積層ゴムモデル⁷⁾⁻⁸⁾をミシシッピ州立大学で用いているGAと組合せ、システム開発、計算等を実施し、その結果について報告する。

2. 解析手法

2.1. 免震積層ゴムを持つ高層構造物のモデル化

本研究では、10 階建ての高層構造物を 10 層のバネマス質点系で表現する。高層構造物の質量 m , 減衰 c , 剛性 k は表 1 の諸元を用

いる。1 層目から 10 層目の質量を $m_1, m_2, \dots, m_{10}$, 減衰を $c_1, c_2, \dots, c_{10}$, 剛性を $k_1, k_2, \dots, k_{10}$ とする。免震層の質量は m_b とし、免震層の減衰、剛性はべき関数型等価線形系解析手法により逐次変化する。

図1の模式図から免震層を考慮した10自由度系に強制外力(加速度 $\ddot{y}$) が作用する場合の運動方程式は次式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} m_b \ddot{x}_b + C_b \dot{x}_b + K_b x_b &= -m_b \ddot{y} \\ m_1 (\ddot{x}_1 - \ddot{x}_b) + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_b) + k_1 (x_1 - x_b) &= -m_1 \ddot{y} \\ m_2 (\ddot{x}_2 - \ddot{x}_1) + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) &= -m_2 \ddot{y} \\ &\vdots \\ m_{10} (\ddot{x}_{10} - \ddot{x}_9) + c_{10} (\dot{x}_{10} - \dot{x}_9) + k_{10} (x_{10} - x_9) &= -m_{10} \ddot{y} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

表1 高層構造物の諸量

	Mass ($\times 10^3 \text{kg}$)	Damping Coefficient ($\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}$)	Spring Coefficient (kN / m)
10 th Layer	175.4	191226.0	130300
9 th Layer	638.0	889047.5	774300
8 th Layer	550.3	994816.3	1124000
7 th Layer	546.6	1078096.0	1329000
6 th Layer	551.1	1195178.0	1620000
5 th Layer	564.1	1269990.0	1787000
4 th Layer	567.8	1364359.0	2049000
3 rd Layer	568.9	1417035.0	2206000
2 nd Layer	564.1	1503633.0	2505000
1 st Layer	595.2	1527476.0	2450000
Seismic Layer	498.1	C_b	K_b

2.2. べき関数型等価線形系解析手法(PFT-ELS)

を適用した免震積層ゴムのモデル化

変位振幅を変化せた履歴復元力曲線から骨曲線と履歴面積を求め、その値が等価となるべき関数型復元力モデル(以下 PFT-RFM) を

Optimal Design of Seismic Isolation Laminated Rubber by Genetic Algorithms
Keiichi MOTOYAMA, Takumi SHIBATA, Ayumi TAKAHASHI and
Kazuhito MISAJI

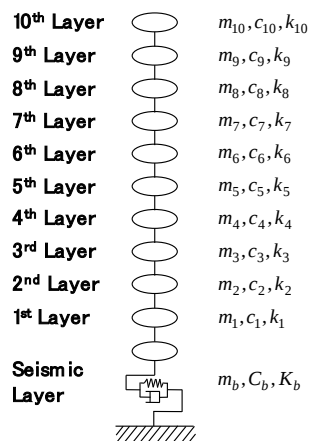


図1 高層構造物の模式図

作成し、減衰係数、ばね定数を求める手法である。今回対象となる免震積層ゴムの履歴復元力曲線の実測値から、骨曲線と履歴面積関数を作成した。これらの関数式を表2に示す。これにより、対象とする系の振動特性を求めることができる。

本手法をMathWorks社MATLAB⁹⁾環境下にて解析ソフトウェアを開発した。モデル化及び計算の詳細は参考文献⁷⁻⁹⁾を参照されたい。

表2 骨曲線と面積関数

$F_0 = A_1 X_0^3 + A_2 X_0^2 + A_3 X_0 + A_4$	$G_0 = B_1 X_0^2 + B_2 X_0$
$A_1 = 2.0 \times 10^{-5}$	$B_1 = 2.2425$
$A_2 = -0.0106$	$B_2 = 551.8$
$A_3 = 4.3811$	
$A_4 = 151.27$	

3. 最適化システム

ここでは修士研究の教育効果も考慮し通常の勾配法でなくGAを用いての最適化計算を議論した。

システムの概要を図2に示す。柔軟に商用ソフトウェアと接続出来るよう考慮した。

まず、GAが生成するデータはNext.datに書き込まれる。次に、mkdt.exeはNext.datの内容から次の計算用の入力データを作成する。MATLAB上のSolverは積層ゴムの評価計算を実行する。その結果はEval.exeによって評価されGAに戻される。ここでは構造物の10層目の速度、加速度を目的関数として、目的関数の最小化を試みた。(図1参照)

モデル中の復元力と面積の定数倍を設計変数としてより良い組合せを見出す。

このシステムをスタートするとPC上でMATLABのSolverが自動的に計算を開始し計算を継続しながら最適値(より良い結果)を探索する。

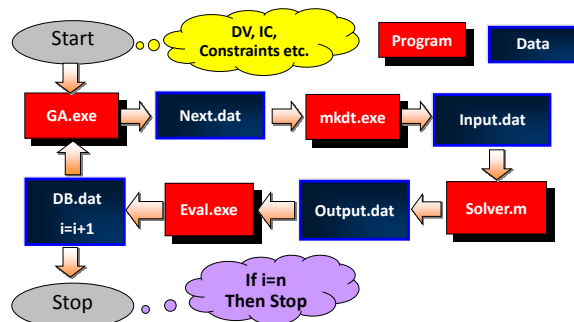


図2. GAによる最適化システムの概要

3.1. 遺伝的アルゴリズム (GA)

ここで用いた遺伝的アルゴリズムについて、その概要を記す。ダーウィンの「適者生存の法則」に基づく最適化アルゴリズムであり、アルゴリズムの中に「優秀な子供は優秀な親から生まれる(生殖活動)」, 「まれに普通の親から優秀な子供が生まれることもある(突然変異)」等の仕組みが組込まれている。具体的には、設計変数の値を2進数を用い、遺伝子表現(String)する。世代(Generation)及び人口(Population)という概念を定義し、世代毎に複数の設計案を用意し、それらにより再生産(Reproduction)、交差(Crossover)、突然変異(Mutation)を考慮しながらコンピュータ上で設計案に対する生殖活動(生存、淘汰)を続ける。これは現世代の複数の設計案が次世代の設計案を作り出すことを意味する。

GAは以下の特徴を有する。

- (1)解の探索には、変数を2進数等にコード化した染色体と呼ばれる遺伝子を用いる。
- (2)設計空間内の1点からの探索ではなく、多数の点からの同時探索を行う。

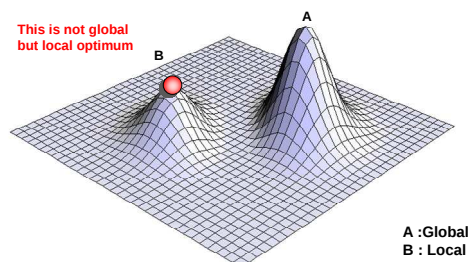


図3 局所解の例 (勾配法)

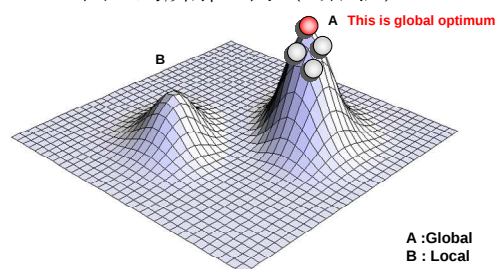


図4 大域解の例 (GA)

(3)解の評価には目的関数値のみを用い、その微分値は用いない

(4)確定的でなく、確率的な方法である。

以上の特徴から“数理的に明記できない問題”，“多峰性の強い問題”，“局所解が存在する問題”にも貢献が期待できる。（図3，図4参照）

また、勾配法と異なり微分情報を必要としないので、シミュレーションが正常終了しない場合も、最適化計算は継続される。

旧来の勾配法と比べ、複雑系の最適化にも成果をあげ、著者らは車体構造を対象に天文学的数字の組合せを有するシステムの最適化を行っている。²⁾

4. 解析結果及び考察

図5に10層目の速度を目的関数とした最適化の結果、図6に10層目の加速度を目的関数とする最適化の結果を示す。両プロット共、縦軸が目的関数、横軸が世代である。世代は計算の経過を表現する単位である。ここで、第一世代は計算開始直後の時点の意味する。世代数が増加するに従い、目的関数の値は減少していく。

ここでは、対象物の地震時の被害を最小化する為に速度と加速度の最小化を別々に試みた。この対象の目的関数の定義に関しては、いくつか議論があるかと思うが、ここでは更に進めて速度と加速度を多目的とする最適化を実施した。図5にその結果を示す。縦軸が加速度で横軸が速度である。これは最適解の候補をプロットしたもので、速度と加速度の関係に所謂トレードオフの関係が見られる。2目的関数である為、判り易いプロットが可能であるが、原点に近い程、優れた解と言う事になる。

ここで3ケースの最適化計算を実施したが、それぞれ、top5の結果は以下の通りである。

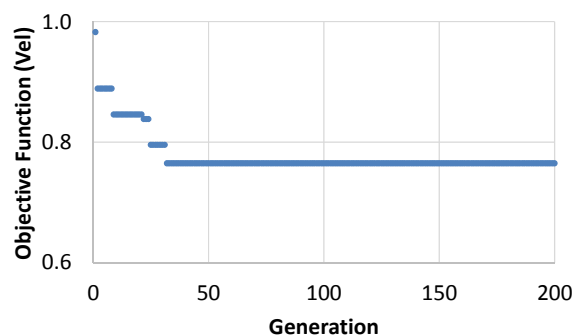


図5 最適化の経過（目的関数：加速度）

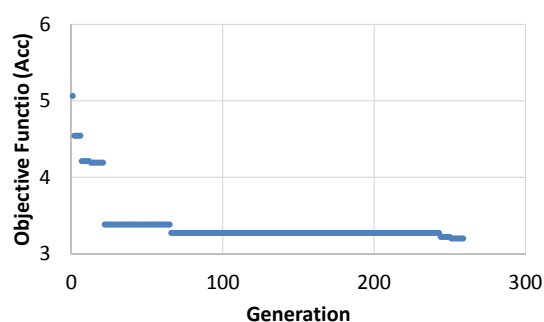


図6 最適化の経過（目的関数：加速度）

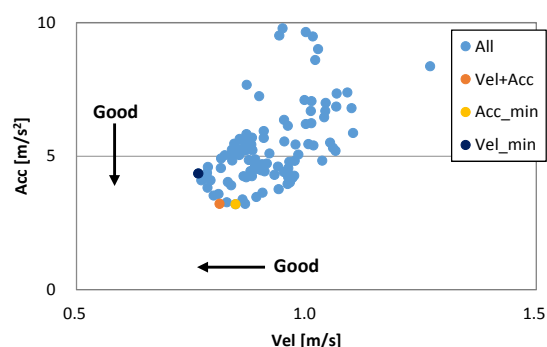


図7 速度・加速度を対象とする多目的最適化の結果（目的関数：速度及び加速度）

表3 得られた結果top5 [速度]

順位	復元力の定数倍	履歴面積の定数倍	Vel
1	1.20E+00	1.30E+00	7.65E-01
2	1.20E+00	1.20E+00	7.75E-01
3	1.30E+00	1.40E+00	7.86E-01
4	1.10E+00	1.10E+00	7.91E-01
5	1.30E+00	1.20E+00	7.95E-01

表4 得られた結果top5[加速度]

順位	復元力の定数倍	履歴面積の定数倍	Acc
1	8.00E-01	8.00E-01	3.20E+00
2	7.00E-01	7.00E-01	3.22E+00
3	9.00E-01	9.00E-01	3.27E+00
4	9.00E-01	8.00E-01	3.38E+00
5	8.00E-01	7.00E-01	3.47E+00

表5 得られた結果top5[速度及び加速度]

順位	復元力の定数倍	履歴面積の定数倍	Vel	Acc
1	8.00E-01	9.00E-01	8.11E-01	3.22E+00
2	8.00E-01	8.00E-01	8.46E-01	3.20E+00
3	1.00E+00	1.00E+00	8.08E-01	3.58E+00
4	1.00E+00	1.10E+00	7.85E-01	3.82E+00
5	8.00E-01	7.00E-01	8.91E-01	3.47E+00

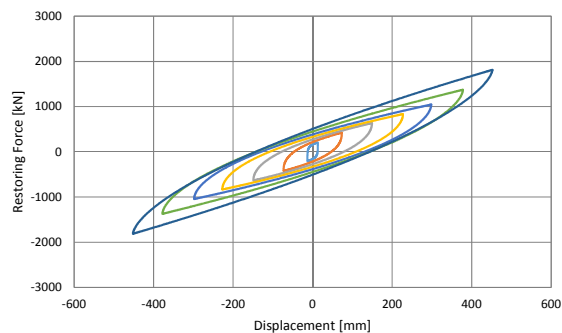


図8 最適化前の履歴復元力曲線(PFT-ELS)

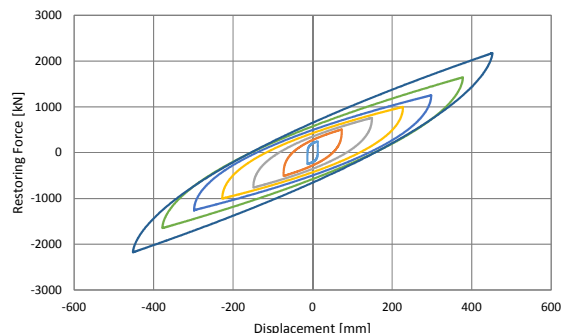


図9 最適化後の履歴復元力曲線(速度)

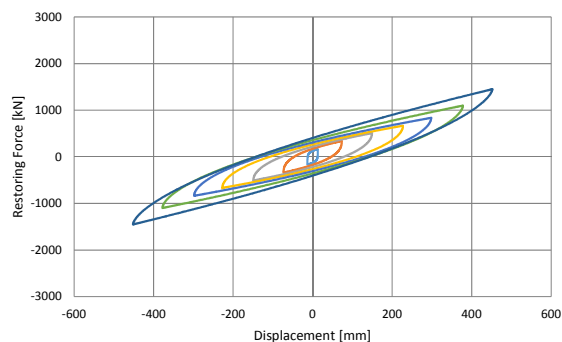


図10 最適化後の履歴復元力曲線(加速度)

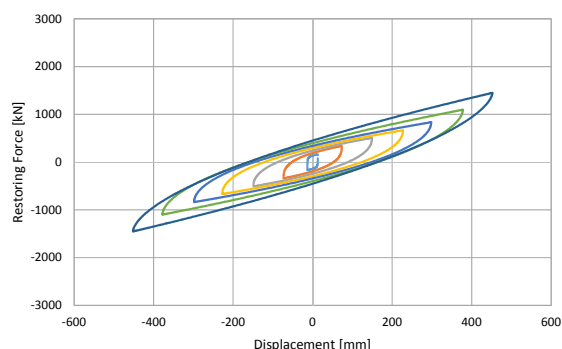


図11 最適化後の履歴復元力曲線
(速度及び加速度)

次に、最適化計算した結果から、10層目の速度、加速度、速度及び加速度がそれぞれ最小となる組合せをもとに、免震ゴムの履歴復元力曲線を作成した。図8は最適化前の履歴復元力曲

線、つまり、表2の骨曲線、履歴面積関数から求めた履歴復元力曲線である。図9は速度が最小となる履歴復元力曲線、図10は加速度、図11は速度及び加速度が最小となる履歴復元力曲線を示す。これらの結果から、速度が最小となる履歴復元力曲線(図9)は、最適化前(図8)よりも履歴面積が増加しているため速度が減少したと考えられる、また加速度(図10)と、速度及び加速度(図11)ではほとんど同じ傾向の復元力曲線が得られたが、表4と表5で比較すると、表5の順位3と順位4は速度が小さくなる組合せが存在する。つまり、速度及び加速度の最適化計算結果は、速度と加速度の影響をバランスよく捉えていることがわかる。

5. 結論

「日本大学生産工学部とミシシッピ州立大学との教育・研究交流に関する覚書」⁵⁾⁶⁾に基き、共同研究を開始した。得られた成果は以下の通りである。

- 1)これまで開発した免震積層ゴム解析システムに GA ベースの最適化ソフトウェアを組み込み、設計支援システムを開発した。
- 2)若手エンジニアでもこのシステムを使う事ができ、要求仕様を入力するだけで設計の候補を見出し、免震ゴムの要求仕様を復元力特性で示せた。
- 3)今後、設計変数、目的関数等の定義を検討し、より現場的なシステムに拡張する。

参考文献

- 1) Goldberg, D. E, Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company
- 2) Motoyama, K. etc., New Technique for Optimizing Member Cross-Sections in Car Bodies to Reduce Noise and Weight, SAE 2012 World Congress
- 3) Islam, M. R., Bujik, A., Rais-Rohani, M., & Motoyama, K. (2014). Simulation-Based Numerical Optimization of Arc Welding Process for Reduced Distortion in Welded Structures. Finite Elements in Analysis and Design. Elsevier. 84, 54-64. DOI: 10.1016/j.finel.2014.02.003.
- 4) 機械工学年鑑, 日本機械学会誌 Vol118, No.1161, pp.451-456
- 5) <http://www.cit.nihon-u.ac.jp/news/2015/k=467/>
- 6) <http://www.msstate.edu/state-spotlight/2015/06/nihon-m-su-mou/>
- 7) 見坐地一人他, "車両用防振ゴムの振動特性に関する研究", 日本機械学会論文集 C 編, 60(578), 3274-3280, 1994-10-25
- 8) "べき関数型等価線形系解析手法を用いた高層構造物の免震に関する研究", 柴田拓実他, 機械学会 Dynamics & Design Conference 2015, 2015 年 8 月.
- 9) <http://www.mathworks.com/products/matlab/>