

## 1. はじめに

建築構造物を設計する際には、通常は、外力に対して十分な剛性と強度を持つように設計する。しかし、いわゆる「柔構造」といわれるような、しなやかな挙動によって地震入力を低減する方法は、超高層骨組の黎明期から議論され、最近では、構造物の柔性や塑性挙動を利用した設計が一般に利用されている。柔性を利用した構造の代表例には免震構造があり、地震外乱の入力を遮断することによって、構造物の振動を低減する。さらに、制振ブレースのように、塑性や粘性挙動によってエネルギーを吸収する考え方は、建築のみならず、工学の多くの分野で利用されている。本稿では、幾何学的非線形性や材料非線形性を効率よく利用して構造物の性能を向上させるための最近の研究を紹介する [1,2]。

## 2. 構造設計と最適化

設計時に想定される外力に対する応答変位・応力などの力学的特性量に関する制約の下で、何らかのコストを代表する関数を最小化することを構造最適化という [3]。このように書けば、何か現実離れした方法のような印象を受けるかもしれないが、構造設計者の設計行為を、設計条件を満たして最も望ましい部材配置、断面形状、材料などを選択する行為であると考えれば、構造最適化は設計行為を自動的にかつ効率よく行う方法であるといえる。構造最適化に対する批判として、「設計者の判断で設計変更を行わず最適化によって自動的に設計できたとしても、なぜそのような設計が望ましいか理解できず、設計者の能力を高めることができない」という考え方がある。もちろん設計条件が満たされるように設計者の判断で断面変更を繰り返すことは、設計者の能力を高めるという見地からは重要であるが、そのような方法は、効率的な面で、あるいは「設計者が思いつかなかった設計が得られるかもしれない」という立場からは必ずしも有効であるとは言えない。例えば数十年前はたわみ角法やモーメント分配法を熟知することが優秀な構造設計者の必要条件であり、それらの過程を通じて、構造物に作用する力の流れを感じることもできた。しかし、最近は構造解析をコンピュータに任せることに異議を唱えることは稀であり、解析の結果を理解する能力が構造設計者に要求される。また、ビジュアルなアウトプットから力の流れを感じることは、ゲーム世代の若者にとっては困難なことではない。このように考えれば、将来は構造最適化が構造設計の一つのステップとなり、その結果を理解して設計条件を変更することが構造設計者の役割となっても不思議ではない。

構造最適化は、数理工学や経営工学で発展した最適化手法を構造設計に応用した分野であり、最も一般的な非線形計画法に基づく方法では、設計変更したときの応答量の増加量（感度係数）を計算し、最適化アルゴリズムにしたがって設計変更を行う。図1は、「最適化アルゴリズム」、「設計感度解析」、「構造解析」の関係を示したものであり、矢印の方向は、データを必要とする方向を示している。最適化アルゴリズムを積極的に用いない場合でも、感度解析によって、効率のよい設計変更の方向を知ることができる。しかし、幾何学的非線形性や材料非線形性を考慮して最適化を行うためには、感度解析が極めて困難であり、感度係数が不要ないわゆる「発見的手法」の適用が望ましい。種々の発見的手法の中で、一つの解を保持して探索する手法の基本は局所探索法であり、定められたアルゴリズムにしたがって設計を少し変更し、変更前より性能が改善された場合に変更を採用する[4]。すなわち、局所探索法は、構造設計者が手作業で行っている行為を効率よく行ってくれる方法であり、100回程程度の構造解析を現実的な時間で実行できるならば、非線形性が強く高度な解析を用いて得られる応答量を考慮した最適化も可能である。

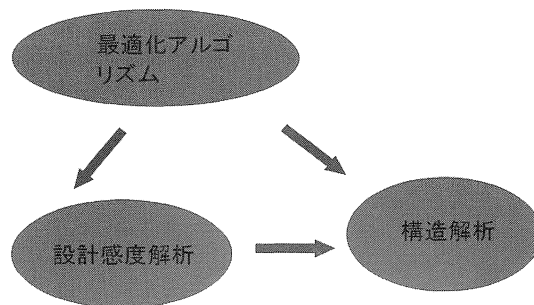


図1 非線形計画法による最適化の構成

### 3. 柔軟な構造の設計

構造物に荷重を作用させたとき、塑性化をとまわずに急激に変形が進行する現象を座屈という。図2に示した2部材トラスのように、荷重の作用方向に変形が進行する座屈をスナップスルー（極限点型座屈）といい、図3のように、荷重の作用方向と直交する方向に変形が進行する座屈を分岐点型座屈という。

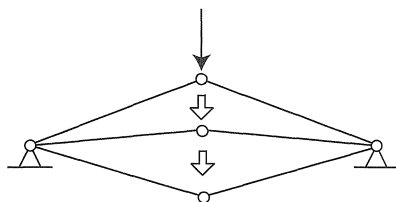


図2 スナップスルー（極限点型座屈）

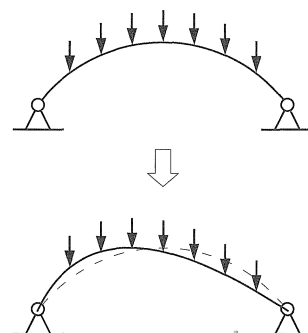


図3 分岐点型座屈の例（対称アーチの座屈）

構造物を設計する際に、座屈は避けなければならない現象と考えられる。しかし、柔軟な構造物において、荷重を作用させたときに部材の塑性化や非構造材の損傷が生じず、荷重除去後に初期状態に戻るならば、座屈が発生しても問題はない。一方、座屈現象を有効に利用すると、小さい荷重あるいは強制変位によって構造物を大きく変形させることができる。さらに、スナップスルーを利用すれば、変形後に荷重を除去しても、安定な自己釣り合い状態を保つことも可能となる。このような構造物を、バイステータブル・コンプライアントメカニズムという [3,4]。

例えば、図4に示すようなトラスの入力節점에鉛直下向き荷重を作用させると、スナップスルーが発生し、出力節点が大きく上向きに変位する。また、入力節点の下の適切な位置に障害物を設置すれば、節点と障害物の接触により、座屈後の釣り合い状態は安定化され、外力の作用なしに変形状態を保つことができる。このようなメカニズムを利用すると、図5に示すような形態変化する構造をデザインすることができる。変形後の形状は障害物によって安定化され、形態変化後の付加エネルギーは不要である。また、載荷方向とは逆方向に微小な荷重を作用させると、初期状態に戻る。

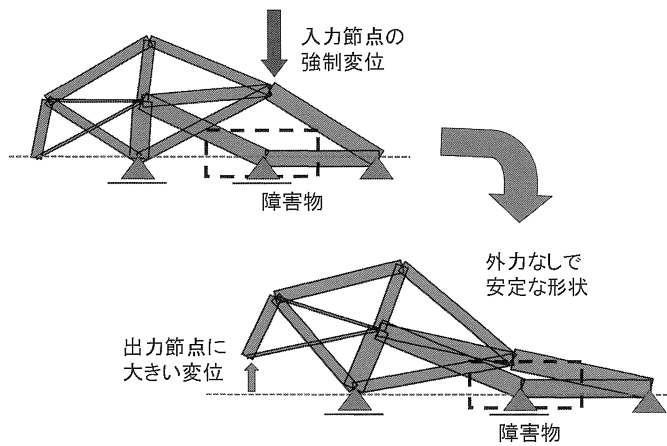


図4 バイステータブル・コンプライアントメカニズム

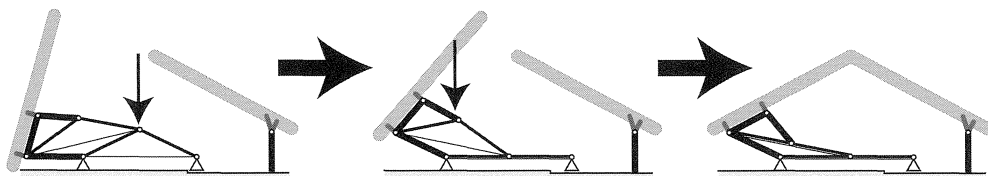


図5 スナップスルーによって形態変化する構造の模式図

#### 4. 弾塑性応答を考慮した部材・デバイス最適化

局所探索法に基づく方法を用いれば、弾塑性応答を考慮した最適化が可能であり、制振ブレースや部材接合部の形状を最適化（チューンアップ）することができる。とくに、鋼構造物の弾塑性応答は、有限要素解析によって極めて高精度で予測することができる。例えば、文献7で得られている材料試験結果を再現するため、汎用有限要素解析プログラム ABAQUS [8] によって材料定数を同定して図6(a)のようなモデルに対して1軸繰返し载荷を行うと、図6(b)のように高精度で応力ひずみ関係を再現できた。また、文献7での梁の繰返し载荷実験をシミュレートすると、図7のような結果が得られた。さらに、2007年に防災科学技術研究所・兵庫耐震センター（Eディフェンス）で実施された4層鋼構造骨組完全崩壊実験[9]での崩壊挙動をシミュレートするため、約40万自由度のシェル要素による有限要素解析をABAQUSで行い、弾塑性時刻歴応答を十分な精度で再現できることを示した[10]。変形状態の例を図8に示す。

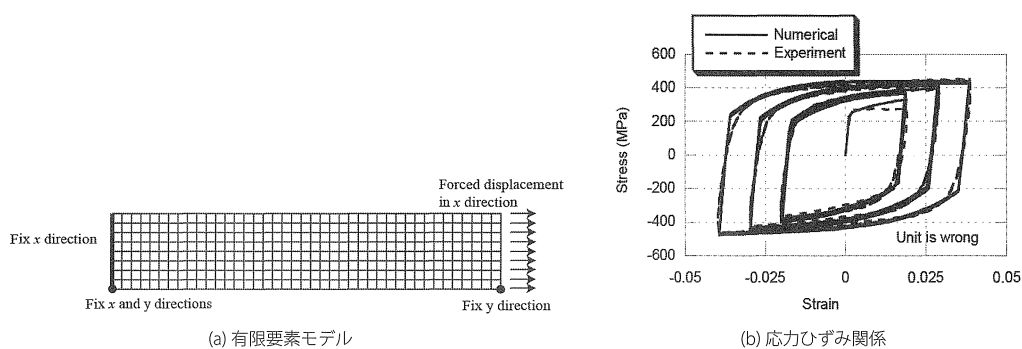


図6 鋼材の材料試験の有限要素解析

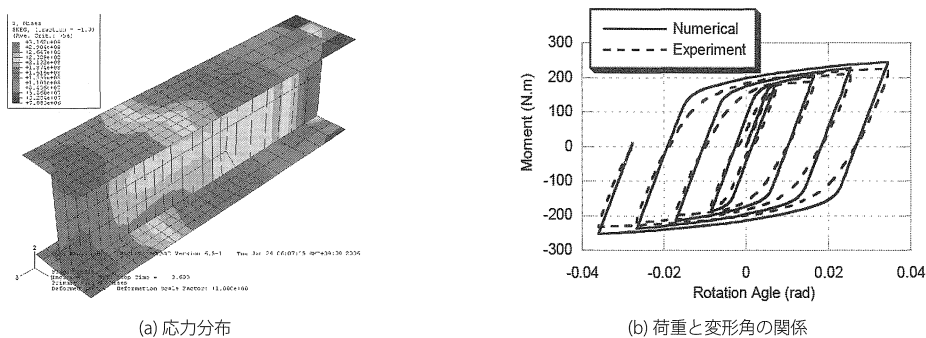


図7 繰返し载荷を受ける梁の有限要素解析



図8 地震外力を受ける4層鋼構造骨組の変形状態と応力分布

以上のように、高精度有限要素解析プログラムと最適化プログラムを結合できれば、複雑な材料非線形性及び幾何学的非線形性を考慮した解析による最適化が可能となる。ところで、汎用の有限要素解析プログラムでは、データの生成や解析の実行を制御するためのスクリプトが使用できるものが多い。例えば、弾塑性解析を ABAQUS で行い、局所探索法に基づく疑似焼きなまし法で最適化を実行し、それらを Python スクリプトで結合する際のアルゴリズムを図 9 に示す。このアルゴリズムを用いて、固定端での累積塑性ひずみに関する制約の下で、塑性吸収エネルギーを最大化するような片持ち梁のフランジ形状を求めると、図 10 のような形状が得られた [9]。このように、高精度有限要素解析を物理実験の代わりに用いて最適化を実行することにより、新しい構造形式やデバイスを開発するためのコストと期間を大幅に削減できるものと期待される。

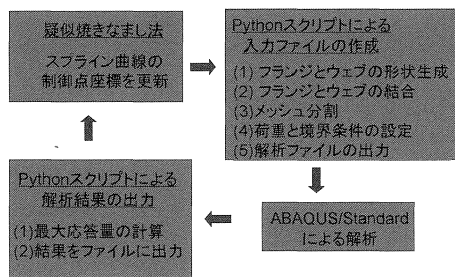


図 9 ABAQUS を用いた最適化

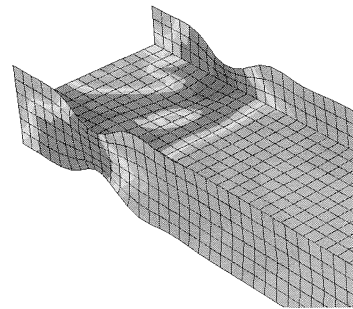
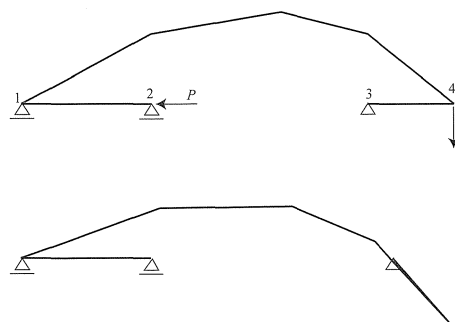


図 10 最適フランジ形状

最後に、スナップスルーと塑性化を同時に考慮した例として、図 11 のような骨組モデルにおいて、支点 4 を鉛直下向きに移動させた時に、スナップスルーが発生し、支点 2 での鉛直方向反力を最大化するような最適形状を求める。ここで、支点以外の全ての節点の鉛直座標を設計変数とする。最適化によって得られた形状を図 11(a) に示す。また、その変形後の形状を図 11(b) に示す。さらに、節点 4 での変位と荷重（強制変位の反力）の関係を図 12 に示す。図 12 より、最適形状ではスナップスルーが実現されていることがわかる。したがって、支点 3 と部材の接触により、骨組は安定化されるので、外力の作用なしに変形状態を維持できる。



(a) 変形前 (b) 変形後

図 11 反力を最大化する骨組モデルの最適形状

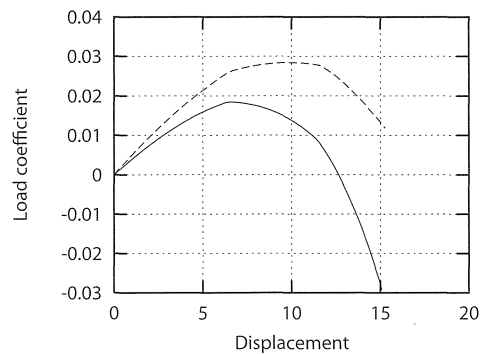


図 12 変位と荷重係数の関係  
(点線：初期形状、実線：最適形状)

## 5. おわりに

高精度有限要素解析を用いて、材料非線形性や幾何学的非線形性を考慮して構造物の部材、接合部、デバイスなどを最適化するための手法を紹介した。このような手法を用いると、とくに鋼材料に対しては物理実験の多くの部分を数値解析で代替でき、高性能構造物の設計やデバイスの開発を効率よく行うことができる。

### 参考文献

- [1] 大崎 純, 解析技術の最先端、建築技術, No. 701, pp. 162-163, 2008.
- [2] 大崎 純, 高度な解析技術を用いた形態デザイン、建築技術, No. 709, pp. 140-141, 2009.
- [3] J. S. Arora, Introduction to Optimum Design, Academic Press, 2004.
- [4] 大崎 純, 局所探索法による鋼構造骨組の多目的最適化、日本建築学会構造系論文集, Vol. 73(634), pp. 2135-2141, 2008.
- [5] 大崎 純, 西脇真二, スナップスルーを利用したバイステープルコンプライアントメカニズムの形状設計法、日本機械学会論文集 A, Vol. 70, No. 700, pp. 23-28, 2004.
- [6] M. Ohsaki and S. Nishiwaki, Shape design of pin-jointed multistable compliant mechanism using snapthrough behavior, Struct. Multidisc. Optim., Vol. 30, pp. 327-334, 2005.
- [7] 山田 哲, 今枝知子, 岡田 健: パウシンガー効果を考慮した構造用鋼材の簡潔な履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集, No. 559, pp. 225-232, 2002.
- [8] ABAQUS Ver. 6.7 Documentation, ABAQUS Inc., 2007.
- [9] 吹田啓一郎, 松岡祐一, 山田 哲, 島田侑子, 多田元英, 笠井和彦, 震動台実験の概要と弾性応答特性 -実大4層鉄骨造建物の完全崩壊実験その1-, 日本建築学会構造系論文集, NO. 635, pp. 157-166, 2009.
- [10] P. Pan, M. Ohsaki and J. Y. Zhang, Collapse analysis of 4-story steel moment resisting frames, in: Proc. 14th World Conf. on Earthquake Eng., Beijing, Paper No. 05-01-0003, 2008.
- [11] P. Pan, M. Ohsaki and H. Tagawa, Shape optimization of H-beam flange for maximum plastic energy dissipation, J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 133(8), pp. 1176-1179, 2007.