

近畿大学工業技術研究科建築学専攻修士論文概要

平成 16 年度		番号 氏名	03309215
指導教官	森村 毅 教授		原田 卓哉
題名		骨組の位相最適化手法を用いた制震機構の創生に関する研究	

1. はじめに

構造物の最適な形態を求める位相最適化手法は、主として、構造物の剛性、固有振動数、座屈荷重、強度などを最適化する手法として発展してきた¹⁾。一方、このような手法は、機械分野では、剛体とヒンジを組み合わせたリンク機構や、材料の弾性変形を利用するコンプライアントメカニズムなどの変形を生み出す形態創生技術としても注目されている。建築分野においても、最近、建物の制振装置などに、変形を拡大する機構（トグル機構）などが導入されており、より合理的な制振機構を開発する手法として、このような機構創生技術が応用できる可能性がでてきた。

そこで、本論文では、骨組をベースとする機構形態の創生法を提案し、その応用例として地震による水平変位を拡大する制震機構の開発を試みる。本方法は、藤井ら²⁾が提案したグランドストラクチャー法による位相最適化手法をベースとし、これに変形拡大を行うための新たな制約条件を課す。また、藤井ら²⁾の方法は微少変形理論に基づいているため、大変形時に変形が拘束される形態がしばしば求まる。このため、本論文では、このような形態が求まりにくくなるような工夫を加える。さらに、従来の方法では、一回の解析で一つの最適解のみが求められるが、現実的なメカニズムの開発には、ある程度多様な解が求まることが望ましい。そこで、本論文では、従来の方法に GA による手法を導入することにより、多様な解が得られる方法に拡張する。

以下、本論文第 2 章では藤井ら²⁾の提案したメカニズムの形態創生手法を示す。第 3 章では、制震機構を創生するための解析モデルを示し、従来手法による解析例を示す。次に第 4 章では、変形拡大を行うための新たな制約条件を付加する方法を示し、制震機構の解析例によりその有効性を示す。第 5 章では、大変形時の変形拘束を防ぐための方法を提案し、解析例によってその有効性を検証する。第 6 章では、GA を利用した多様な解の創生法を提案し、解析例によりその有効性を示す。第 7 章では、以上で開発した手法を用いて、より現実的な制震機構の形態創生を行い、木造住宅の耐震補強を想定した制震壁への適用を検討する。第 8 章では、以上の結論を述べる。

2. メカニズムの形態創生理論

2.1 最適化問題の定式化

まず、メカニズムの形態創生を行うための最適化問題の定式化を示す。例として、図 1 に示すラーメン構造内部に、 P_1 点の水平荷重によって、 P_2 点の鉛直変位を生じさせるメカニズムの創生を考える。このようなメカニズムは、図に示すようなラーメン内のトラス構造をベースにして創生される(グランドストラクチャー法)。創生されるメカニズムでは、 P_2 点を引き上げるのに十分な剛性が確保されることが必要であ

る。また、 P_2 点を引き上げる十分な変位が生じることが必要である。この様な 2 つの条件を満足する形態創生問題を定式化すると、次式のようになる。

$$\min_{\alpha} [C^3(\alpha)] \quad (1)$$

where

$$\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_N\}, \quad A_i = (1 - \alpha_i)^p A_i^0 \quad (2)$$

subject to

$$W = \sum_{i=1}^N A_i l_i \leq \bar{W} \quad (\text{体積制約}) \quad (3)$$

$$\bar{u}_D^{\min} \leq C^2(\alpha) \leq \bar{u}_D^{\max} \quad (\text{絶対変位制約}) \quad (4)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq 1 \quad (i=1, \dots, N) \quad (5)$$

ここに、(1)式は、 P_2 点を引き上げる剛性を確保するために、 P_2 を拘束したときのメカニズムの剛性を最大化するものである。(2)式は、トラス部材の部材断面積の大きさを決める設計変数である。また、 p はペナルティ係数である。(3)式は、創生されるメカニズム形態の部材数(総体積)を制約するものであり、 l_i は部材長さ、 W は部材総体積、 \bar{W} は総体積の制約値である。(4)式は、 P_2 点に変位を生じさせるための制約条件であり、 $\bar{u}_D^{\min}, \bar{u}_D^{\max}$ はその制約値である。

(1)式及び(4)式の C^3, C^2 は、次式の仕事量を表している。

$$C^3 = \mathbf{d}^{(c)T} \mathbf{k} \mathbf{d}^{(c)} \quad (6)$$

$$C^2 = \mathbf{1} \cdot \mathbf{u}_{P_2} = \mathbf{d}^{(b)T} \mathbf{k} \mathbf{d}^{(a)} \quad (7)$$

ただし、 \mathbf{k} はグランドストラクチャーの全体剛性マトリックス、 $\mathbf{d}^{(a)}, \mathbf{d}^{(b)}, \mathbf{d}^{(c)}$ は図 1(a),(b),(c)の問題を解析したときの節点変位ベクトルを表す。本論文では、(1)~(5)式の最適化問題を SLP 法を用いて解く。

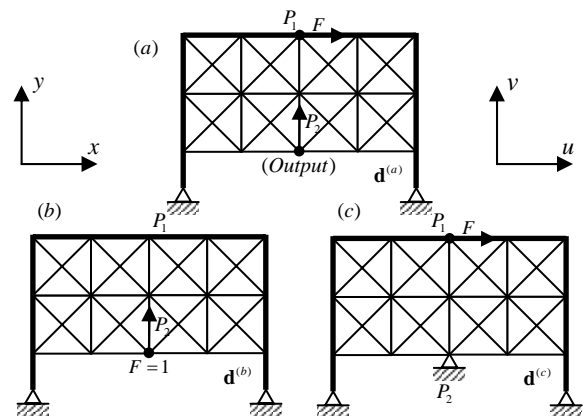


図 1 メカニズムの創生問題の定式化

2.2 多峰性問題

(1)~(5)式の最適化問題は、(2)式の α の初期値によって、得られる最適解が変化する多峰性問題となる。例えば図 2 は、 α の初期値を乱数で変化させることによって、100 問題の最

適解 (C^3) の変化を示したものである。図に示すように、初期値によって最適解が大きく変化していることがわかる。また、図中に示した太線は、グローバルな最適解の変化を示したものであるが、これも問題数が増えるごとに徐々に小さくなっていることがわかる。

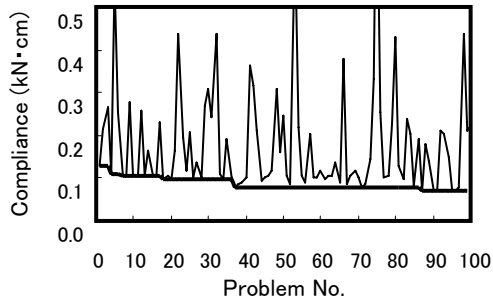


図2 初期値を変化させた最適化問題の目的関数の最適値の変化

そこで、藤井ら²⁾の方法では、設計変数の初期値を乱数によって自動的に変化させ、複数の問題を解くことにより、グローバルな最適解を求めている。ただし、乱数による設計変数の変更は、若干の計算効率の改善を図るためにエリート戦略を採用し、それまでに求められた最も優秀な解の半数の要素のみを変更する。また、問題数が50を超えた時点で変更する要素数を1/4にし、100を超えた時点で1/8にする。図3はこのような計算法の流れを示したものである。

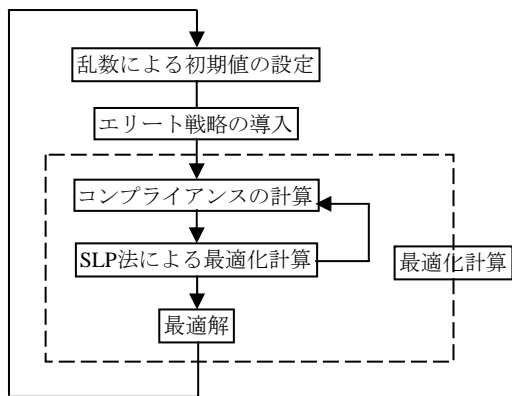


図3 解析方法のフローチャート

3. 制震機構を創生するための解析例

3.1 解析モデル

制震機構を創生するためのモデルを図4に示す。この問題では、ラーメンの水平変位より、B点が引き上げられるメカニズムの創生を想定している。

ラーメン内部のグランドストラクチャーはトラス構造とし、模型の制作の容易さを考慮して、柱、梁の接合部もピン接合としている。また、グランドストラクチャーの部材断面積は、柱、梁の100分の1にしている。なお、本論文では、(3)式の体積制約は、グランドストラクチャーの部材総長さを柱と梁の長さで割ったもので与える。

その他、解析に直接関係する条件は、その解析ごとに示す。

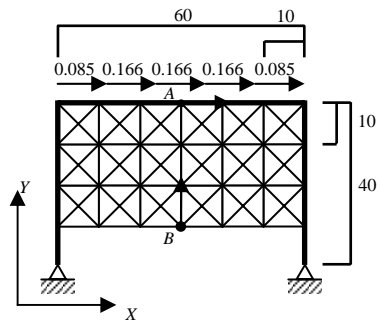


図4 解析例

3.2 従来の方法による解析例

まず、第2章に示した解析法によって、図4の問題の解析を行う。本解析では、初期値を変化させて500問題を解いている。また、(4)式の \bar{u}_d^{\min} を5、 \bar{u}_d^{\max} を20とする。そして、図5は、体積制約を変化させて、ある程度明解なメカニズムが求まった2種類の例を示している。

図より、B点の上方へ変形が生じているが、メカニズムが比較的複雑であり、体積制約0.9の場合は、A点の変位に対するB点の変形拡大はあまり生じていない。

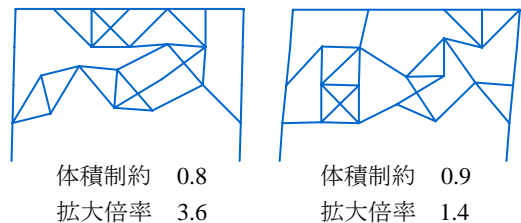


図5 絶対変位制約による解析結果

4. 変形拡大を行うための手法

第2章で示した方法では、図5に示した結果からわかるように、必ずしも変形を大きく拡大するメカニズムが創生されるとは限らない。したがって、ここでは、図1の P_1 点に比較して、 P_2 点の変位を相対的に大きくする制約条件を新たに(1)~(5)式の最適化問題に付加する。ただし、感度解析の計算効率を高めるため、制約条件は、仕事量で表す必要がある。この場合、 P_1 点と P_2 点の相対変位の制約条件を仕事量で表すと、次式となる。

$$\bar{r}_d^{\min} \leq \frac{C^2(\boldsymbol{\alpha})}{C^1(\boldsymbol{\alpha})/F} \leq \bar{r}_d^{\max} \quad (\text{相対変位制約}) \quad (8)$$

ここで、 $\bar{r}_d^{\min}, \bar{r}_d^{\max}$ は相対変位の制約値であり、 C^1 は次式で表せる。

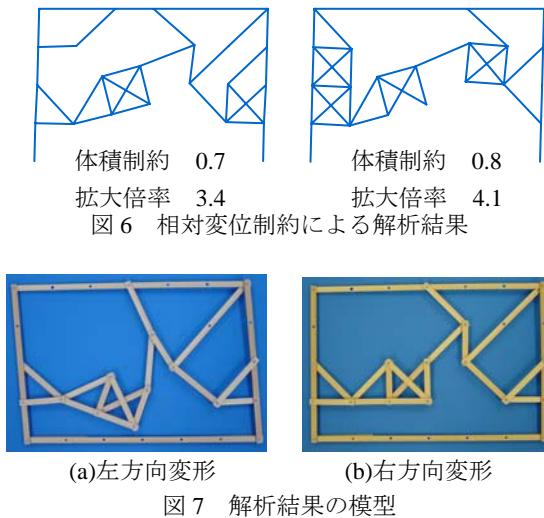
$$C^1 = F \cdot \mathbf{v}_{P_1} = \mathbf{d}^{(a)T} \mathbf{k} \mathbf{d}^{(a)} \quad (9)$$

ただし、 $\mathbf{d}^{(a)}$ は、図1(a)問題を解いた場合の節点変位ベクトルである。

図6は、3.2節と同様の条件のもとで解析した結果を示している。ただし、相対変位の制約値 \bar{r}_d^{\min} は10、 \bar{r}_d^{\max} は100としている。図からわかるように、この場合は、図5と比較して、よりシンプルなメカニズムが創生されており、変形拡大倍率も大きくなっていることがわかっている。

図7は、体積制約0.7の解析結果を参考にして模型を作成にしたものである。図に示すように、左方向の変形に対しては解析通りの変形が実現されているが、右方向の変形に対しては、変形が拘束されて、動かないことがわかった。これは、

本解析法が微少変形理論に基づいているためである。



5. 大変形時の変形拘束を防ぐための方法

図7に示すような変形拘束を防ぐためには、大変形理論の適用が必要であるが、この場合、理論が複雑になり、また、解析には膨大な計算時間を必要とする。このため、本論文では、(1)~(5),(9)式の最適化問題が多峰性問題であることを利用して、変形拘束の生じる局所最適解をグローバル最適解に採用しないことによって、この様な変形拘束の問題を解決する方法を提案する。具体的には、大変形時の部材長さを簡易的に計算し、部材長さが増加するメカニズムの最適値(C^3)にペナルティを課す。大変形時の部材長さは、図8に示すように、微少変形による解析によって得られた変位により、部材の節点位置を変更し、再度同様の解析を行うことにより、近似的な大変形の部材長さを計算する。この様にして得られた各部材の伸び量の総和を無次元量として次式のように表す。

$$\xi = \sum_{i=1}^N (\Delta u_i^L / l_i) \quad (10)$$

このとき、 Δu_i^L は2段階変形を起こした時の*i*番目部材の2段階分の伸び量、 l_i は*i*番目要素の長さである。この制約値 ξ にべき乗係数 q を課し、この q を局所解の目的関数を $C^3 \times \xi^q$ のように長さ制約の重みとして与える。なお、このべき乗係数 q は、本論文では3としている。ただし、*i*番目要素の設計変数が、指定した値以上である場合はその長さ計算を行わない。この値を部材閾値とする。

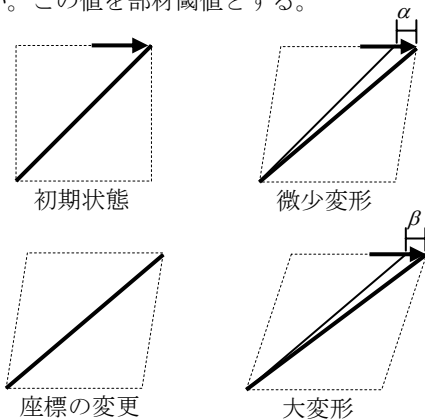
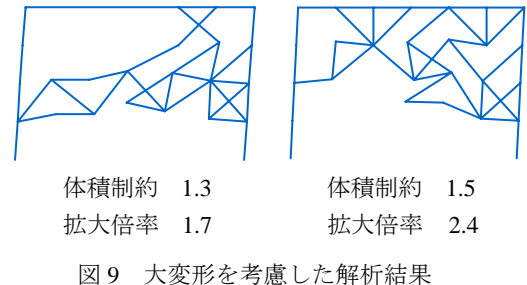


図8 二段階変形により大変形を考慮した変形

図9は第4章と同様な解析を行った結果である。図9に示させる形態をもとに作成された模型では、図7に見られるような拘束は見られなかった。したがって、本章で提案した方法は有効であることが確かめられた。



6. GAを用いた多様な解の創生³⁾

第2章に示した最適化問題の解法では、グローバル最適解を求めるために、単純なエリート戦略を用いているため、一度の解析で1つのグローバル最適解しか求めることができない。しかし、実際の問題では様々な制約があるため、複数の候補からより適したモデルを採用することになる。したがって、本章では、設計変数の初期値の生成にGAを適用することにより、多様なグローバル最適解を創生する方法を提案する。

図10は初期値の設定にGAを用いた場合の計算フローを示している。ただし、各個体の評価値は、(1)~(5),(8)式 of 最適化問題を解いて得られる目的関数値 C^3 とする。ただし、(3),(4),(8)式の制約が満足されない場合は、評価値にペナルティを課している。

淘汰はルーレット方式を用いている。ただし、エリート戦略により、全個体数の1/2は、評価値の高いものを残している。交差は1点交差を用いている。交差率は0.6、突然変異率0.02としている。

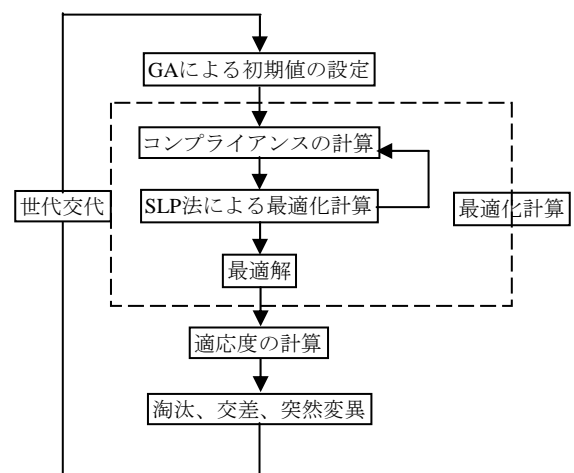


図10 GAを用いたフローチャート

図 11 は、設計変数の初期値の個体数を 15 体とし、65 世代の解析を行った結果のうち、優秀な 2 個体の形態を示したものである。図に示すように、これまでの解析に比較してよりシンプルな形態が得られていることがわかった。

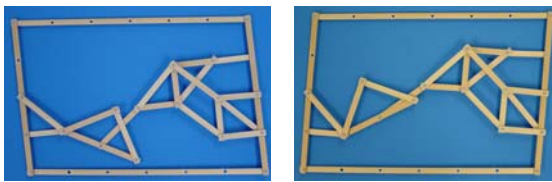
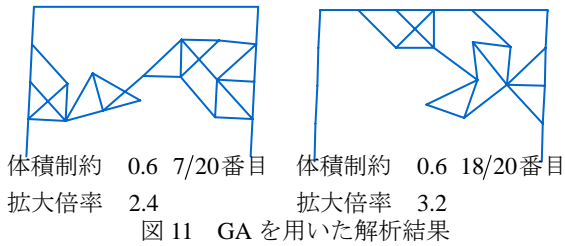


図 12 解析結果の模型

7. 木造住宅の制震ユニットの開発

以上で開発した解析法により、様々な条件の下で解析を行い、現実に利用できそうなメカニズム形態として、図 13 に示す結果を得た。そこで、本結果をもとに木造住宅を対象にした制震機構の開発を試みた。

制作する制震壁のユニットは図 13 の形態を使用し、図 14 の様に制作する。ただ、このユニットでは、ストロークが大きく、既存のオイルダンパーでは対応できないことがわかっている。そのため、使用するメカニズムを 1 つに減らし、図 15 のユニットに改良した。ここで、メカニズムが横向きに変更されているのは、こちらの方が、層間変位の点で有利だからである。

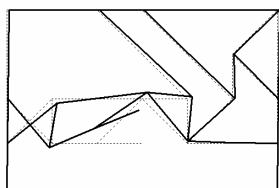


図 13 制震壁に使う位相

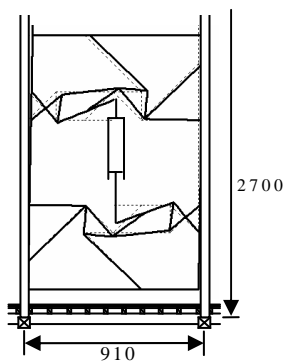


図 14 提案する制震壁

次に図 15 に使用するダンパーを考える。この形態においても、既存のオイルダンパーを使用するのは難しい。そのため、機構が単純で安価に製作できることから、蛇腹を用いた摩擦ダンパーを使用することを考えた。摩擦ダンパーは微小変形では効果を発揮しにくいという欠点があるが、これは、変形を拡大するメカニズムを用いるため問題ない。製作したダンパーは図 16 に示す。この模型の段階では、問題はなくこのようなユニットの製作は可能と考える。

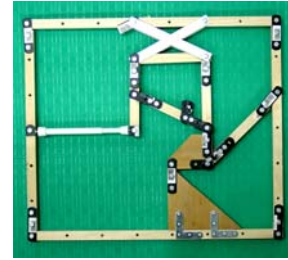


図 15 制震ユニット



図 16 蛇腹ダンパーを用いた制震ユニット

8. まとめ

本論文では、建築物の新たな制震機構を開発するために、グランドストラクチャー法による位相最適化手法をベースとする新たなメカニズム創生法を提案した。本論文で示した解析例により、本方法は、地震による水平変位を大きく拡大することが可能であり、従来の方法に比較してよりシンプルで多様な解が得られることが示された。また、実際に模型を作成し、大変形時の挙動を確かめた結果、本論文で提案した大変形時の変形拘束を防ぐ方法により、変形拘束が生じる形態が創生されにくいことが検証された。

以上で提案した方法により、実際の制震機構として適用可能な形態を創生し、これまでにない変形倍率を有する制震ユニット模型を作成した。また、この制震ユニットに適用するダンパーとして、非常に大きなストロークを実現できる蛇腹ダンパーを提案した。

本研究で提案した制震ユニットは、製品化までは至らなかったが、今後、製品化に向けてさらなる発展が望まれる。

参考文献

- 1) 藤井大地, パソコンで解く構造デザイン, 丸善株式会社, p.29-90 p.178-200
- 2) 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣, 石川雅意, 弾性リンク機構の形態最適化 (変位を制約条件とする骨組構造の位相最適化), 日本機械学会論文集C編, 第 67 巻, 664 号, 2001.12
- 3) 長尾智春, 最適化アルゴリズム, 昭晃堂, 2000.5