

近畿大学工学部建築学科卒業研究概要

平成 16 年度		番号	01168077
指導教官	藤井 大地 助教授	氏名	谷澤 毅
題名	連続体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

近年、コンピュータによる解析技術を利用して、最適な構造形態を求める研究が精力的に行われている¹⁾。この中で、藤井ら²⁾は、骨組の解析法を利用して、単に剛性の高い構造形態だけでなく、変形を拡大するメカニズムの形態を創生する技術を開発した。また、藤井、平田、原田ら^{3), 4)}は、この技術を建物の制震技術に応用することを提案し、これまでにない高減衰を実現する制震機構が開発できる可能性を示した。

一方、藤井ら⁵⁾は、連続体におけるメカニズム創生法も提案しているが、これまでこの方法では、なかなか明解な形態(位相)が創生できなかった。しかし、よりシンプルなメカニズム形態を創生するには、連続体の位相最適化手法の方が有効な場合がある。そこで、本研究では、連続体におけるメカニズム創生法の問題点を解決し、連続体の位相最適化手法により、変形を拡大する制震機構の創生を試みる。

以下、本論文第 2 章では、メカニズムの形態創生理論の概要を述べる。第 3 章では、第 2 章で示した方法により、ラーメン構造内部にラーメンの変形を拡大するメカニズムを創生し、本方法の有効性を示す。第 4 章では、第 3 章で創生したメカニズムをもとに模型を作成し、その挙動について考察する。最終第 5 章では、以上のまとめを述べる。

2. メカニズムの形態創生理論

2.1 構造解析手法

本研究では、図 1 に示すように、ラーメン骨組内に連続体の設計領域を設定し、その設計領域内に、ラーメンの変形を拡大する制震機構を創生することを考える。

形態創生(位相最適化)を行うには、まず、この構造の変位と応力を解析することが必要となる。このため、本研究では、骨組部分は、はり要素を用い、連続体部分は、2次元の平面応力要素(4 節点アイソパラメトリック要素)を用いて有限要素解析を行う。この場合、4 節点の x, y 方向の変位ベクトル $[u_i \ u_j \ u_k \ u_l \ v_i \ v_j \ v_k \ v_l]$ に対する平面応力要素の要素剛性マトリクスは次のように書ける(図 2 参照)。

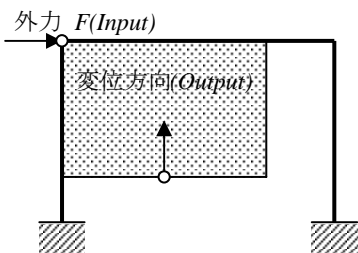


図 1 解析モデルと設計領域

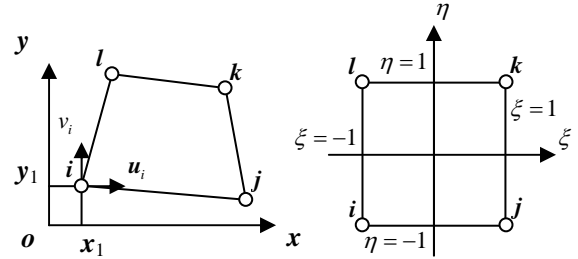


図 2 4 節点面内変形要素

$$\mathbf{k}^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{k}}_{11}^e & \bar{\mathbf{k}}_{12}^e \\ \bar{\mathbf{k}}_{12}^{eT} & \bar{\mathbf{k}}_{22}^e \end{bmatrix} |\mathbf{J}| d\xi d\eta \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{k}}_{11}^e &= \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x} D_{11} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial y} D_{33} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} \\ \bar{\mathbf{k}}_{12}^e &= \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x} D_{12} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial y} D_{33} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \\ \bar{\mathbf{k}}_{22}^e &= \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial y} D_{22} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x} D_{33} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} D_{11} = D_{22} &= \frac{Et}{1-\nu^2}, \quad D_{12} = \frac{\nu Et}{1-\nu^2}, \quad D_{33} = \frac{Et}{2(1+\nu)} \\ \mathbf{N} &= [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4] \\ N_1 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta), \quad N_2 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta), \quad N_4 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \end{aligned} \quad (3)$$

また、 E はヤング係数、 ν はポアソン比、 t は板厚、 \mathbf{J} はヤコビアンマトリクスである。また、(1)式の積分は、ガウスの 2 点積分で計算するが、シアロックを防ぐため、せん断剛性項 (D_{33} が含まれる項) は 1 点積分で計算する(選択低減積分法)。また、はり要素はオイラーはり理論にもとづくものとする。

2.2 位相最適化問題の定式化

次に、制震機構を創生するための位相最適化問題の定式化を示す。いま、図 3(解析モデル)に示すように、ラーメン骨組が、水平力 F を受けるとき、有限要素分割された設計領域の P_2 点を鉛直上方に動かすメカニズム(機構)を創生することを考える。

創生されるメカニズムでは、 P_2 点が鉛直上方に動くことが必要であるため、 P_2 点の変位を制約条件として与える。また、ラーメン骨組の変形によって P_2 点を引き上げるためには、図 3(c)のように P_2 点を拘束した場合に十分な反力が確保される必要がある。すなわち、図 3(c)の条件下では、メカニズムに

十分な剛性が確保されなくてはならない。以上のような条件の下で、設計領域の要素密度（体積）を設計変数とする位相最適化問題を定式化すると、次のようになる。

$$\min_{\alpha} [C^3(\alpha)] \quad (4)$$

where

$$\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_N\}, \quad V_i = (1 - \alpha_i)^p \bar{V}_i \quad (5)$$

subject to

$$V_s = \sum_{i=1}^N (1 - \alpha_i) \bar{V}_i \leq V_s^{\max} \quad (\text{体積制約}) \quad (6)$$

$$d_{out}^{\min} \leq C^{21}(\alpha) \leq d_{out}^{\max} \quad (\text{変位制約}) \quad (7)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad (i = 1, \dots, N) \quad (8)$$

ここに、 C^3 は、図 3(c)の条件下の剛性を評価する量で、この問題を解いた時の外力のなす仕事量（設計領域）

$$C^3 = \mathbf{d}^{(c)T} \mathbf{k} \mathbf{d}^{(c)} \quad (9)$$

を表す。ここに、 \mathbf{k} 、 $\mathbf{d}^{(c)}$ は図 3(c)の設計領域部分の全体剛性マトリクスと節点変位ベクトルを表す。また、 α_i は i 番目要素の設計変数、 N は設計領域の要素数、 \bar{V}_i は、要素の初期体積を表し、 p は、中間的な要素体積を残さないためのペナルティである。なお、 p は 2~3 の値で与える。また、 V_s は全要素の体積を表し（この場合ペナルティを課さない）、 V_s^{\max} は体積の制約値（上限値）を表す。また、 C^{21} は、 P_2 点の鉛直変位を表す仕事量で、次式で表される。

$$C^{21} = 1 \cdot v_{p2} = \mathbf{d}^{(b)T} \mathbf{k} \mathbf{d}^{(a)} \quad (10)$$

ここに、 $\mathbf{d}^{(b)}$ 、 $\mathbf{d}^{(a)}$ は図 3 の(b)、(a)の問題を解いたときの節点変位ベクトルを表す。また、 d_{out}^{\min} 、 d_{out}^{\max} は P_2 点の変位の制約値（上下限值）である。

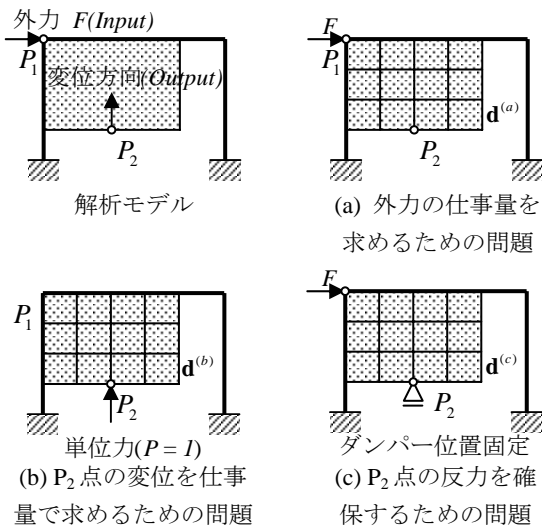


図3 定式化のための概念図

(4)~(8)式の最適化問題は、解が非常に収束しにくい問題であるため、計算安定性の高いSPL法で解く。しかし、文献5)等では、制約値を非常にセンシティブに調整しないと良い解が得られなかった。一方、骨組をベースとする同様な手法

²⁾では、最適化問題が明らかに初期値に依存する多峰性問題であることが判明したため、初期値を乱数で変化させて複数の最適化問題を解くことにより、グローバルな最適解を求める方法を提案している。これから類推すると連続体においても、(4)~(8)の最適化問題が多峰性問題になっている可能性が高い。そこで、本研究では文献2)と同様に、(4)~(8)式の最適化問題を初期値を乱数により変化させ、複数回問題を解いて最適解を求める方法を適用する。また、計算効率を上げるため、エリート戦略を導入し、乱数による設計変数の変更は、それまでの最も最適解を元に乱数で選択した1/4の要素についてのみ行う。

3. 解析例

3.1 解析モデル

制震機構の形態創生モデルとして、図4に示すような問題を考える。これは、1層1スパンラーメンを示し、領域Aを制震機構を創生する設計領域とする。設計領域の要素分割数は 40×20 とする。また、設計領域のヤング係数は $E = 2058 \text{ kN/cm}^2$ 、ポアソン比は $\nu = 0.3$ 、 $t = 0.5 \text{ cm}$ 、で、柱部材のヤング係数は $E = 20580 \text{ kN/cm}^2$ 、ポアソン比は $\nu = 0.3$ 、 $A = 4957 \text{ cm}^2$ 、 $I = 1846000 \text{ cm}^4$ とし、梁部材のヤング係数は $E = 20580 \text{ kN/cm}^2$ 、ポアソン比は $\nu = 0.3$ 、 $A = 5144 \text{ cm}^2$ 、 $I = 3127000 \text{ cm}^4$ とする。荷重は水平方向の集中荷重で $F = 10 \text{ kN}$ とする。

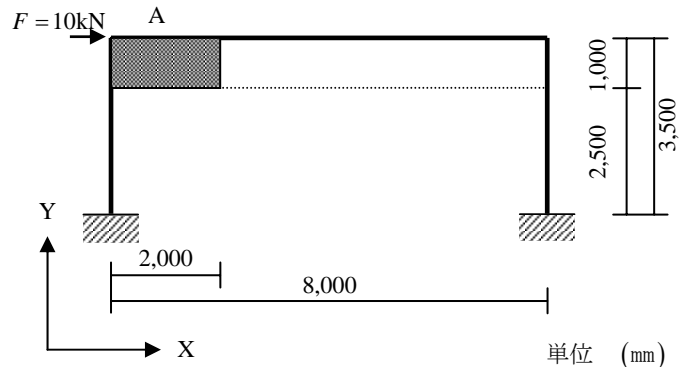


図4 解析モデル

3.2 解析結果と考察

まず、CASE_Aでは、図5に示すA部分の変位を矢印方向に動かすメカニズムを創生する。A部分の変位の上下限值および体積制約値は、図中に示すとおりである。ただし、 V_i ($V_i = \sum \bar{V}_i$) は設計領域の全体積を表す。また本研究では、異なる初期値に対して、1000問題を解いている。図6はこの場合の最適位相と、その変形図を表している。図に示すようにかかなり明解な位相が求まっていることがわかる。ちなみに、この問題で、設計変数に均一な初期値を与えて、1問題のみを解いた場合の解を図7に示す。図に示されているように、1問題のみでは、明解な位相が得られないことがわかる。このことから、本最適化問題は、多峰性問題であることがわかる。

CASE_Bは、CASE_Aと同じ位置を動かす条件の下で、変

位制約値と体積制約値を変えたものである。解析問題数は CASE_A と同じである。図 7 は、この場合の最適位相とその変形を示している。この場合も、非常に明解な位相が求まっていることがわかる。

CASE_C は、動かす位置を図中の C の位置に変更し、動かす方向も上方にした問題である。制約条件は図中に示すとおりである。図 9 は、この問題の最適位相とその変形を示している。この場合も明解な位相が求まっていることがわかる。

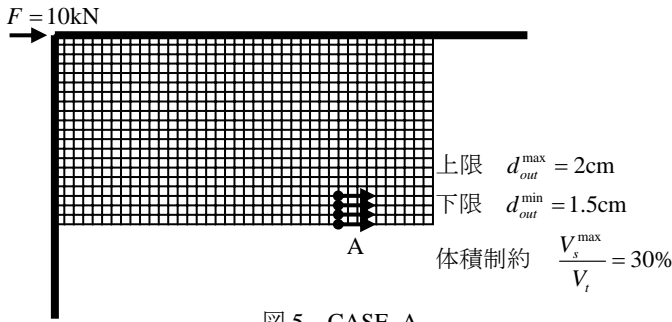
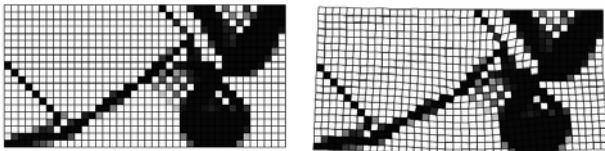
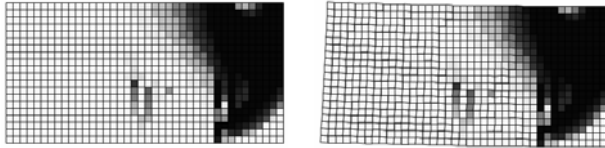


図 5 CASE_A



(a) 最適位相 A (b) 最適位相 A の変位

図 6 解析結果 A



(a) 最適位相 (b) 最適位相の変位

図 7 1 問題のみを解いた場合の結果

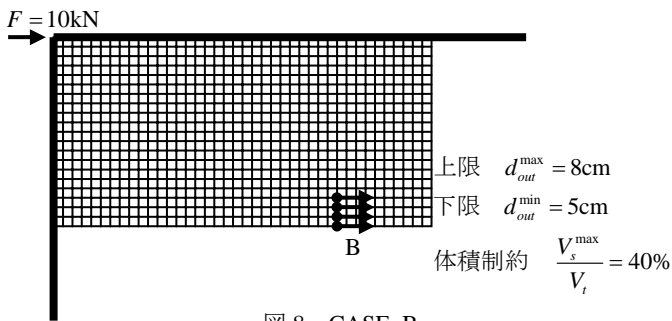
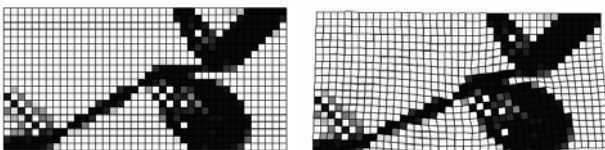


図 8 CASE_B



(a) 最適位相 B (b) 最適位相 B の変位

図 9 解析結果 B

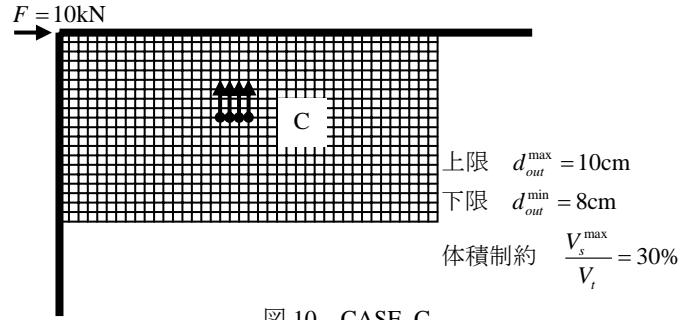
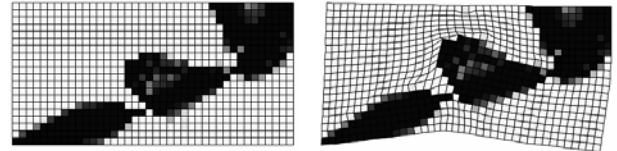


図 10 CASE_C



(a) 最適位相 C (b) 最適位相 C の変位

図 11 解析結果 C

4. 模型の作成と大変形時の挙動の考察

図 12～図 14 は、得られた最適位相をもとに 1/8 模型を作成したものである。ラーメン部分は、図 11 に示すように木の角材を L 型金具で止めている。また制振機構部分は、ケント紙で作成し、ボルトナットでヒンジ部を作成した。

作成した模型により、機構の変形を調べた結果、CASE_A では大変形時に変形拘束を生じたが、CASE_B と CASE_C では変形拘束が生じなかった。また CASE_B と CASE_C では、図の○で囲む部分が板バネの役割をすることが明らかになった。また CASE_B と CASE_C では、ラーメン部分の水平変位に比較して、B, C 部分の変位が約 5 倍と 8 倍に拡大されていることがわかった。

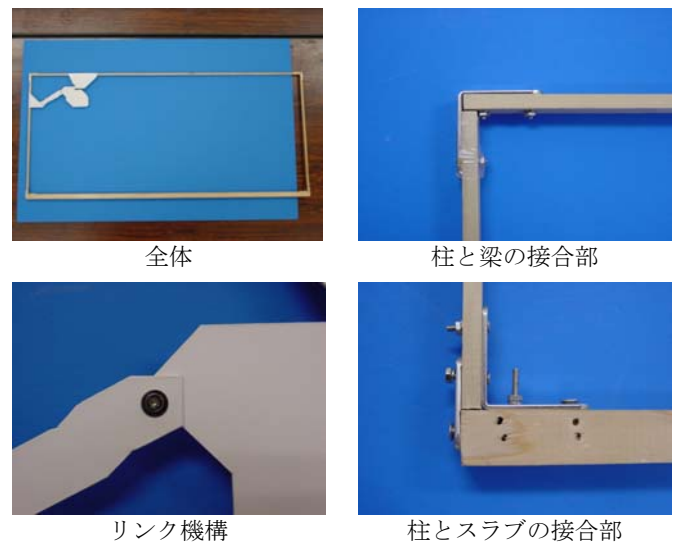


図 11 模型の全体とディテール



(a) 変形前

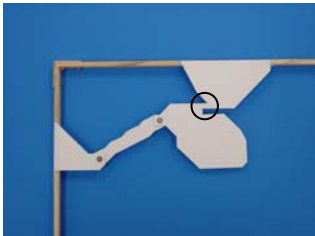


(b) 負方向変形



(c) 正方向変形

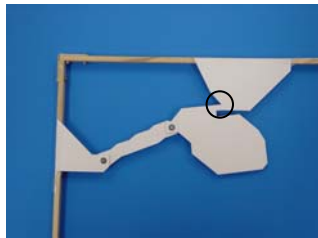
図 12 模型 A



(a) 変形前

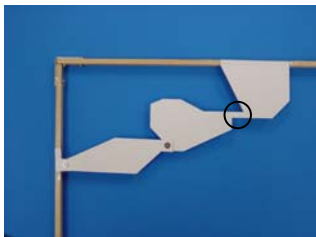


(b) 負方向変形

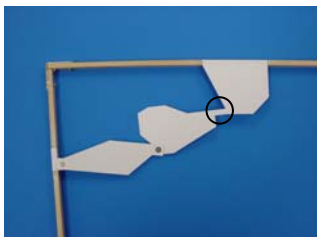


(c) 正方向変形

図 13 模型 B



(a) 変形前



(b) 負方向変形



(c) 正方向変形

図 14 模型 C

5. まとめ

本論文では、連続体のメカニズム創生問題が多峰性問題であることに着目し、連続体の最適化問題の解法に、骨組問題のメカニズム創生で提案した設計変数の初期値を乱数で変化させる方法を適用することにより、グローバルな最適解を求める手法を提案した。そして、本方法を、ラーメン構造内にラーメンの変形を拡大するメカニズムを創生する問題に適用した。その結果、本方法により、従来法⁵⁾に比較して明解な位相が求められることが検証された。また創生された位相から、模型を作成して大変形挙動確かめた結果、大変形が可能な位相が得られることも確認できた。

今後は、このような手法を用いて現実問題に適用可能な制震機構を開発していく予定である。

謝辞

本研究は、三菱重工とリョーセンエンジニアズからの受託研究として行ったものである。本研究を進めるにあたり、三菱重工の尾木靖夫氏、原田秀秋氏、リョーセンエンジニアズの阿比留久徳氏、山本利弘氏に、貴重な助言を頂いた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 藤井大地分担執筆：「構造形態創生の理論と応用」、日本建築学会、2001
- 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、pp.3730-3737、2001.12
- 3) 平田裕一、藤井大地、藤谷義信：制振ダンパーの変位拡大機構への位相最適化手法への適用、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、構造II、pp.811-812、2002.9
- 4) 原田卓哉、藤井大地、位相最適化手法を用いたメカニズムの創生(GAを利用した多様な解の創生)、日本建築学会学術講演梗概集（北海道）、構造I、p.305-306、2004.8
- 5) 藤井大地、江島晋、菊池昇：均質化設計法を用いた弾性変形機構の位相最適化、日本建築学会構造系論文集、No.528、pp.99-105、2000