

近畿大学工学部建築学科卒業論文概要

平成 14 年度	番号	99168105
指導教官	氏名	原田 卓哉
題名	変形拡大メカニズムを利用した高減衰制振機構の開発に関する研究	
	藤井 大地 助教授	

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、単に剛性の高い構造形態だけでなく、変位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、平田と藤井ら^{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。

本研究では、これまでの研究を発展させ、解析によって創生されたメカニズム形態から実際の制震機構に応用できそうなモデルを選定し、これらのモデルを作成することにより、解析で得られる挙動が実際に実現されるかどうかを検証する。

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モデルを作成し、その挙動について考察する。最終第 5 章では、以上の結論を述べる。

2. メカニズムの形態創生理論

2.1 形態創生手法

メカニズムの形態を創生する方法としては、目的とするメカニズムの形態を包含する可能性がある骨組構造（グラウンドストラクチャー）を設定し、これから、最適化の手法を用いて、 unnecessary 部材を消去し、最適な形態を浮かび上がらせる方法を採用する。この方法は、一般にグラウンドストラクチャー法と呼ばれ、骨組の最適形態を求める有効な方法として知られている。

ところで、本研究で扱う問題は、変位を拡大するリンク機構である。リンク機構は、本来部材と数箇所のヒンジから構成される不安定構造であるため、そのままの形では解析を実行することが難しい。そこで、藤井ら²⁾の方法では、部材の接合条件として、部材端部に接合部の回転剛性を任意に変化させることのできるバネを設け、グラウンドストラクチャーを安定な構造体とした上で、回転剛性と部材断面積を設計変数とした最適化を行う。グラウンドストラクチャーに用いる構造部材（有限要素）を図 - 1 に示す。梁端部の回転ばねは、梁の曲げ剛性 ($6EI/l$) を基準として、0 以上 1 以下のパラメータ λ により (1) 式で表される。このとき、 $\lambda=0$ の場合はピン接合、 $\lambda=1$ の場合は剛接合となる。

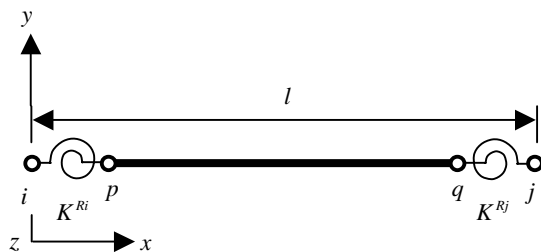


図 - 1 両端に回転バネを有する梁要素

$$K^{Ri} = \frac{\lambda^i}{1-\lambda^i} \frac{6EI}{l}, \quad K^{Rj} = \frac{\lambda^j}{1-\lambda^j} \frac{6EI}{l} \quad (1)$$

また、図 - 1 の要素の剛性方程式は次式となる^{2), 3)}。

$$\begin{bmatrix} k_{11}^e & & & & & \\ & k_{21}^e & & & & \\ & & k_{31}^e & & & \\ & & & k_{41}^e & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \theta_i \\ v_j \\ \theta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_i \\ M_i \\ Q_j \\ M_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} k_{11}^e &= \frac{6EI}{l^3} \frac{\lambda^i + \lambda^j + 4\lambda^i\lambda^j}{1+\lambda^i + \lambda^j}, \\ k_{21}^e &= \frac{6EI}{l^2} \frac{\lambda^i(1+2\lambda^j)}{1+\lambda^i + \lambda^j}, \quad k_{22}^e = \frac{6EI}{l} \frac{\lambda^i(1+\lambda^j)}{1+\lambda^i + \lambda^j}, \\ k_{31}^e &= -k_{11}^e, \quad k_{32}^e = -k_{21}^e, \quad k_{33}^e = k_{11}^e, \\ k_{41}^e &= \frac{6EI}{l^2} \frac{\lambda^j(1+2\lambda^i)}{1+\lambda^i + \lambda^j}, \quad k_{42}^e = \frac{6EI}{l} \frac{\lambda^j\lambda^i}{1+\lambda^i + \lambda^j}, \\ k_{43}^e &= -k_{41}^e, \quad k_{44}^e = \frac{6EI}{l} \frac{\lambda^j(1+\lambda^i)}{1+\lambda^i + \lambda^j} \end{aligned}$$

ここに、 $v_i, \theta_i, v_j, \theta_j$ は i, j 節点の y 軸方向変位と z 軸まわりの回転角 (dv/dx)、 Q_i, M_i, Q_j, M_j は i, j 節点のせん断力と曲げモーメント、 l は要素長さ（ただし、回転ばねの要素長さは 0 とする。）、 E はヤング係数、 I は z 軸まわりの断面二次モーメントである。ただし、 z 軸は紙面手前方向(右手座標系)に向いているものとする。

2.2 位相最適化問題の定式化

本研究で扱う最適化問題は、1 層平面フレーム内にダンパー設置位置を設定し、その位置の変位（ダンパー変位）が、層間変位に対して拡大するようなリンク機構を創生する問題である。また、このリンク機構には、平面フレームに加わる外力をダンパー位置に伝えるための十分な剛性が必要である。図 - 2 は、このような問題を定式化するために必要な解析の概念図を示したものである。図では、1 層フレームの層間変位は、梁に加わる静的な水平力 F によって与えられる。

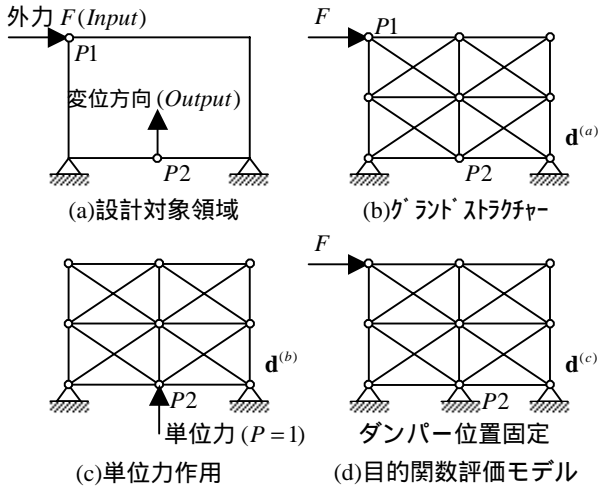


図 - 2 解析の概念図

本問題では、まず、フレームに加わる力をダンパーに伝えるための剛性を確保するため、目的関数を、ダンパー設置位置をダンパーの可動方向に対して固定した場合のコンプライアンス（外力のなす仕事量、荷重が複数ある場合は平均コンプライアンス）とし、これを最小化する。このコンプライアンス C^3 は、グラッドストラクチャーの全体剛性マトリックスを \mathbf{k} 、ダンパーの設置位置を固定した場合の節点変位ベクトルを $\mathbf{d}^{(c)}$ とすると、次式で表される。

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

次に、ダンパー変位を拡大するには、外力 F による層間変位（図 - 2 の P_1 の水平変位）に比較してダンパー変位（図 - 2 の P_2 の指定した方向の変位）を相対的に大きくする必要がある。そこで、本論文では、 P_1 の水平変位と P_2 の指定した方向の変位の比を指定した大きさに以上を制約する。しかし、相対変位のみでの制約では、リンク機構が形成されず、弾性変形メカニズムが形成される場合があるため、ダンパー変位そのものも指定した値以上に制約する。

なお、ここでは、制約条件の感度係数の計算を容易にするため、 P_1, P_2 点の変位もコンプライアンスで表す。文献 2), 3) に示すように、ダンパー変位 v_{P2} は相反定理を用いて次式から計算される。

$$C^2 = 1 \cdot v_{P2} = \mathbf{d}^{(b)T} \mathbf{k} \mathbf{d}^{(a)} \quad (4)$$

ただし、 $\mathbf{d}^{(a)}$ は、ダンパー設置位置を固定せずに梁に水平力を与えた場合の節点変位ベクトル、 $\mathbf{d}^{(b)}$ は、ダンパー設置位置に、単位の力を与えた場合の節点変位ベクトルである。また、 P_1 点の水平変位 u_{P1} は次式から求められる。

$$C^1 = F \cdot u_{P1} = \mathbf{d}^{(a)T} \mathbf{k} \mathbf{d}^{(a)} \quad (5)$$

以上より、最適化問題は次式のように定式化される。

$$\min_{\alpha, \lambda} [C^3(\alpha, \lambda)] \quad (6)$$

where

$$\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_N\}, \quad A_i = (1 - \alpha_i)^p A_i^0, \quad (7)$$

$$\lambda = \{\lambda_1^L, \lambda_1^R, \lambda_2^L, \lambda_2^R, \dots, \lambda_i^L, \lambda_i^R, \dots, \lambda_N^L, \lambda_N^R\}$$

subject to

$$W = \sum_{i=1}^N A_i l_i \leq \bar{W} \quad (\text{体積制約}) \quad (8)$$

$$\bar{r}_d^{\min} \leq \frac{C^2(\alpha, \lambda)}{C^1(\alpha, \lambda)/F} \leq \bar{r}_d^{\max} \quad (\text{相対変位制約}) \quad (9)$$

$$\bar{u}_D^{\min} \leq C^2(\alpha, \lambda) \leq \bar{u}_D^{\max} \quad (\text{ダンパー変位制約}) \quad (10)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_i^L \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_i^R \leq 1 \quad (i=1, \dots, N) \quad (11)$$

ここに、 A_i^0 は i 部材の初期部材断面面積、 α_i は部材断面積に関する設計係数、 p は断面積に課すペナルティ係数（本論文では $p=2.4$ としている）、 l_i は部材長さ、 W は部材総体積、 \bar{W} は総体積の制約値、 $\bar{r}_d^{\min}, \bar{r}_d^{\max}$ は相対変位の制約値、 $\bar{u}_D^{\min}, \bar{u}_D^{\max}$ はダンパー変位の制約値、 λ_i^L, λ_i^R は部材の左端および右端の接合部剛性の設計変数（(1)式参照）、 N は部材総数である。なお、本研究では、解析の簡略化のために、部材はすべて円柱としてモデル化している。このため、断面二次モーメント I は、断面積の関数として次式から計算している。

$$I_i = \frac{(1 - \alpha_i)^{2p} A_i^0{}^2}{4\pi} \quad (i=1, \dots, N) \quad (12)$$

以上の最適化問題を SLP 法によって解く。また、本問題は多峰性問題であるため、初期値を乱数で変化させた 1000 問題の解の中から最適解を求めている。

3. 解析例

3.1 下梁との間にダンパーを設置する場合

まず、図 - 3 に示すような問題を考える。図 - 3 は、1 層 1 スパンの平面フレーム内部に格子状のグラッドストラクチャーを設定し、 B 点と下梁の間にダンパーを設置することを想定したモデルである。

設計対象は、柱・梁を除く内部の格子状グラッドストラクチャー部分で、グラッドストラクチャー部材のヤング係数は $E=10000$ 、ポアソン比は $\nu=0.3$ 、初期断面積は $A^0=1$ とした。また、柱と梁は、ヤング係数 $E=10000$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、断面積 $A=3$ に設定した。また、柱と梁の接合部はピン接合で、弾性変形を起こさないようにする。これは、模型をピン接合で作成することを考慮している。

ダンパー変位の制約値は、上限値 10、下限値 5、梁の変位とダンパー変位の比は、下限値 10、上限値 100、体積制約は 20.8% で解析した。

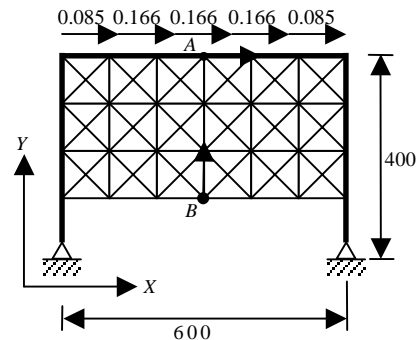


図 - 3 解析例 A

図 - 4 は、解析結果を示す。図では、断面積に比例した太さで、最適位相（最適形態）を示している。また、図 - 5 は、最適解の変位を示している。この場合、梁部分の水平変位とダンパー位置の鉛直変位の比は、約 10 倍になっており、非常に大きな変形拡大となっていることがわかる。

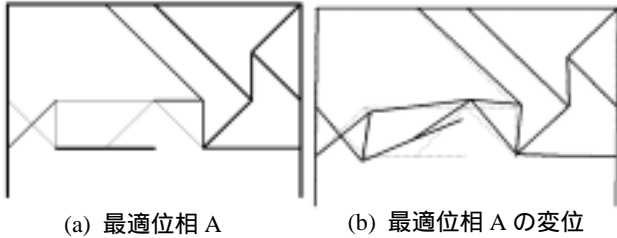


図 - 4 解析結果 A

3.2 上梁との間にダンパーを設置する場合

次に、図 - 5 に示す問題を考える。図 - 5 は 1 層 1 スパンの平面フレーム内部に 3×6 の格子状のグランドストラクチャーを設定し、ダンパーを上部の梁に連結できるように空間を設けたものである。設計対象領域の初期条件は、解析例 A のものと同じである。

ダンパー変位の制約値は、上限値-1、下限値-10、梁の変位とダンパー変位の比は、下限値-10、上限値-20、体積制約は 21.9% で解析した。

図 - 6(a) は、解析結果を示す。図では、断面積に比例した太さで、最適位相（最適形態）を示している。また、図 - 6 (b) は、最適解の変位を示している。この結果も、梁部分の水平変位とダンパー位置の鉛直変位の比は、約 17 倍になっており、非常に大きな変形拡大となっていることがわかる。

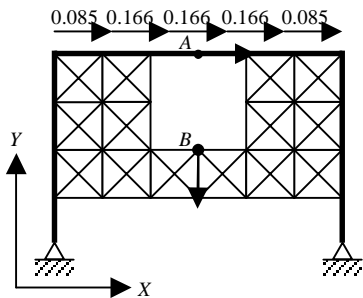


図 - 5 解析例 B

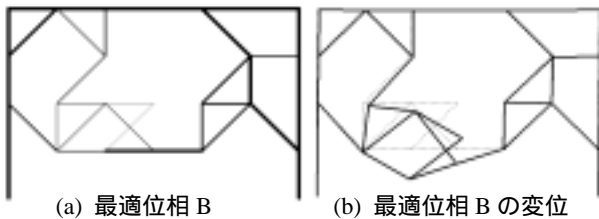


図 - 6 解析結果 B

3.3 ラーメンの片側領域にダンパーを設置する場合

次に、図 - 7 に示すような片側空間のみを設計対象にしたモデルを解析する。これは、片側にドア・窓などを設置することを考慮したものである。図 - 7 では、1 層 1 スパンの平面フレーム内部に格子状のグランドストラクチャーを設定し、上梁との間にダンパーを設置することを想定している。

設計対象は、柱・梁を除く内部左半分の格子状グランドストラクチャー部分で、設計対象領域の初期条件は、解析例 A と同じである。

ダンパー変位の制約値は、上限値-1、下限値-10、梁の変位とダンパー変位の比は、下限値-10、上限値-100、体積制約は 20.1% で解析した。

図 - 8(a) は、解析結果を示す。図では、断面積に比例した太さで、最適位相（最適形態）を示している。また、図 - 8 (b) は、最適解の変位を示している。この結果も、梁部分の水平変位とダンパー位置の鉛直変位の比は、約 18 倍になっており、非常に大きな変形拡大となっていることがわかる。

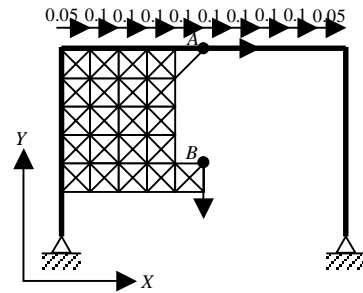


図 - 7 解析例 C

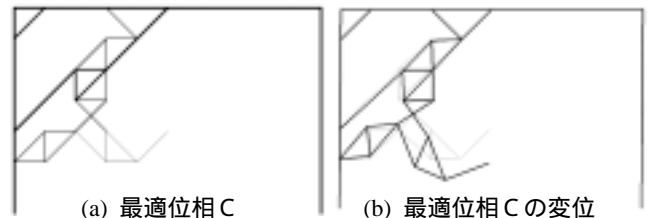


図 - 8 解析結果 C

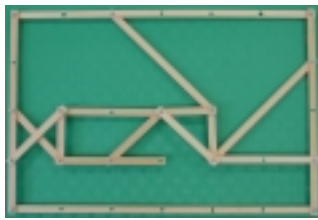
4. モデルの作成と考察

4.1 解析例 A

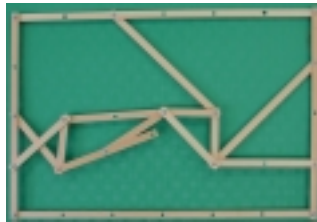
解析結果 A (図 - 4) は、解析上では変形拡大倍率は 10 倍を超えており、メカニズム自体も比較的簡単である。また、メカニズムの変形が柱、梁に障害される可能性もない。さらに、左右どちらの変形にも完全なリンク機構が成り立つと予測できる。したがって、この結果にもとづいてモデルを作成した。図 - 9 は完成したモデルと、その変形状態を示している。ただし、実用化を考え、モデルは、図 - 4 の形態をさらに簡略化している。なお、この簡略化により、変形拡大倍率が変化しないことを解析によって確かめている。

図 - 9 より、モデルは解析どおりの変形をしていることがわかる。また、左右どちらの荷重に対しても同様の変形拡大を

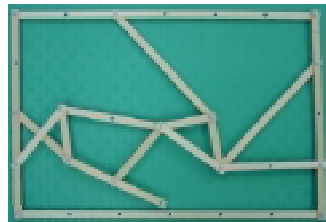
実現できる。したがって、本モデルは実用可能モデルと判断できる。



(a) 変形前



(b) 右方向変形

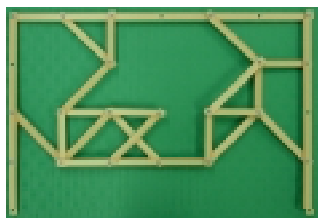


(c) 左方向変形

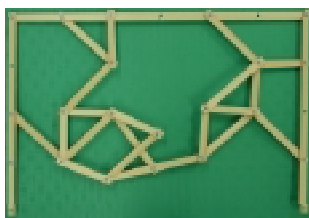
図 - 9 模型 A

4.2 解析例 B

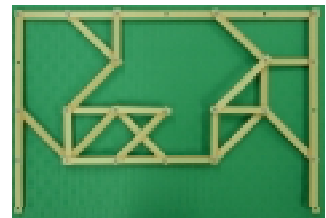
次に、解析結果 B (図 - 6) についても、実用の可能性があると判断して模型を作成した。図 - 10 は、完成した模型とその変形状態を示している。図 - 10 より、右方向の荷重に関しては、解析どおりの変形が生じるが、左方向の荷重に関しては、変形が拘束されることがわかる。これは、解析が微小変形理論にもとづいて行われているためと考えられる。したがって、このモデルでは、左方向の荷重に対して、メカニズムが破壊される可能性があるため、実用化は難しい。



(a) 変形前



(b) 右方向変形



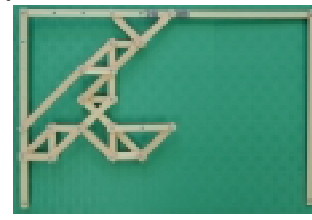
(c) 左方向変形

図 - 10 模型 B

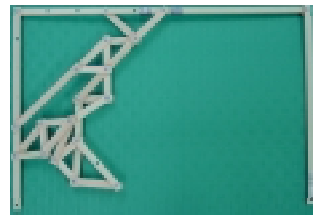
4.3 解析例 C

次に、解析結果 C (図 - 8) にもとづいて模型を作成した。図 - 11 は、完成した模型と変形状態を示している。図 - 11 からわかるように、本モデルでは、初期状態で、メカニズムの自重により変形が生じてしまう。また、左方向の荷重に関しては、大きな変形が生じるが、右方向の荷重に関しては、

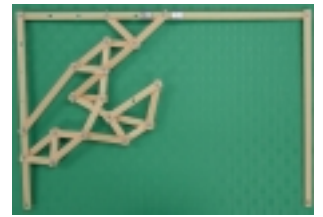
変形が拘束されてしまう。したがって、本モデルも、実用化には問題がある。



(a) 変形前



(b) 自重変形



(c) 左方向変形

図 - 11 模型 C

5. まとめ

本論文では、位相最適化手法を用いて、ラーメンの変形を拡大するメカニズムを創生する方法を示し、この結果にもとづいて作成した模型により、実際の変形挙動を考察した。

その結果、解析で得られた形態の中には、水平方向の一方の変形を実際には拘束してしまうものがあつた。これは、メカニズムの形態創生が微小変形にもとづく理論で構成されているためである。また、変形する点を支えないと力を与える前に自重で変形してしまうものもあつた。

しかしながら、解析の挙動のとおりに変形するものもあり、このようなモデルから新しい制震機構が開発できることが確かめられた。このようなモデルでは、ラーメンの変位に比較して約 10 倍のダンパー変位を創出でき、これまでにない高減衰の制震機構を開発できる可能性がある。

今後は、以上で得られた制震機構を実際の建物に組み込み、動的応答解析により、どの程度の減衰力が得られるか、また、制震機構を組み込んだラーメンに過大な応力が生じないかを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 「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: 位相最適化手法による制振装置の変位拡大機構, 日本計算工学会講演会論文集, Vol.7, pp.655-658, 2002.5
- 4) 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, pp.811-812, 2002.9
- 5) 小林繁夫, 近藤恭平共著, 弾性力学, 倍風館, 1987