

近畿大学工学部建築学科卒業論文概要

平成 15 年度		番号 氏名	00168080
指導教官	藤井 大地 助教授		西山 良太
題名	変形拡大メカニズムを用いた住宅制震壁の開発に関する研究		

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、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、これまでの研究で得られたメカニズム形態からモデルを作成し、改良を加える。また、設置するダンパーの考察を行い、このような制震機構が既存不適格木造住宅の制震壁に利用できるかどうかを検討する。

2. メカニズムの形態創生理論

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-1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。

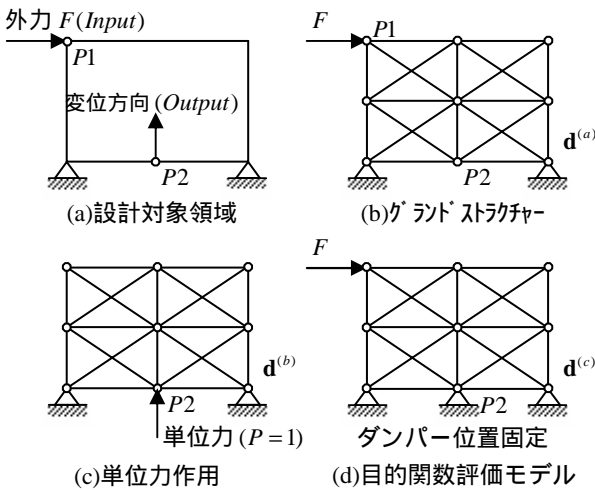


図-1 解析の概念図

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、

グラン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。

$$C^3 = \mathbf{d}^{(c)T} \mathbf{k} \mathbf{d}^{(c)} \quad (1)$$

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-1の P_1 の水平変位)に比較してダンパー変位(図-1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以上に制約する。しかし、相対変位のみの制約では、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_{p_2} は相反定理を用いて次式から計算される。

$$C^2 = 1 \cdot v_{p_2} = \mathbf{d}^{(b)T} \mathbf{k} \mathbf{d}^{(a)} \quad (2)$$

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_{p_1} は次式から求められる。

$$C^1 = F \cdot u_{p_1} = \mathbf{d}^{(a)T} \mathbf{k} \mathbf{d}^{(a)} \quad (3)$$

以上より、最適化問題は次式のように定式化される。

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

where

$$\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_N\}, \quad A_i = (1 - \alpha_i)^p A_i^0, \quad (5)$$

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

subject to

$$W = \sum_{i=1}^N A_i l_i \leq \bar{W} \quad (\text{体積制約}) \quad (6)$$

$$\bar{r}_d^{\min} \leq \frac{C^2(\alpha, \lambda)}{C^1(\alpha, \lambda)/F} \leq \bar{r}_d^{\max} \quad (\text{相対変位制約}) \quad (7)$$

$$\bar{u}_D^{\min} \leq C^2(\alpha, \lambda) \leq \bar{u}_D^{\max} \quad (\text{ダンパー変位制約}) \quad (8)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_i^L \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_i^R \leq 1 \quad (i=1, \dots, N) \quad (9)$$

ここに、 A_i^0 は i 部材の初期部材断面積、 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, 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。

$$I_i = \frac{(1 - \alpha_i)^{2p} A_i^{0.2}}{4\pi} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (10)$$

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. 以前の研究と既存制震壁の紹介

3.1 昨年までの研究

昨年, 原田が 2 節を用いて解析を行い, 考案したメカニズムの中で, 実用化できそうなモデル A(図-3)に改良を加え, より制震装置に適したメカニズムを創生する。

モデル A は変形拡大倍率 10 倍を超えており, メカニズム自体も比較的簡単で, 最も実用化に近いメカニズムである。

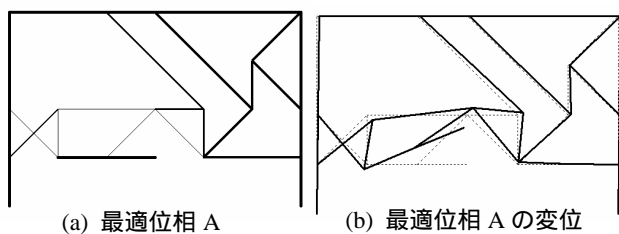
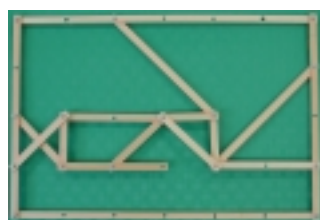
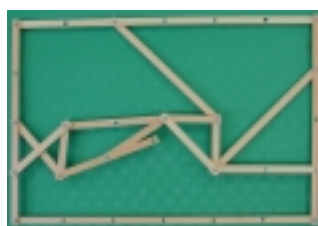


図-2 解析結果 A



(a) 変形前



(b) 右方向変形



(c) 左方向変形

図-3 モデル A

3.2 減震高耐力壁パネル⁷⁾

図-4 は既存する制震壁で, 江戸川木材工業とトキコ株式会社が共同開発した制震装置である。この減震高耐力壁パネルは地震で建物が左右動しようとする運動エネルギーを熱エネルギーに変換する装置である。

室内側に配置する制震装置は地震時に発生する地震エネルギーから建物の変形を吸収する。室外側の高耐力壁構造と合わせる事で相乗効果が生まれ, より高い制震効果が得られる。この制震効果は, 2 階以上は特に目立つが, 1 階は柱と壁の変位

は制御される。床面は地面と同じ程度動く。

新築時に組み込むだけで, 日常のメンテナンスは不要である。温度特性に非常に優れ, 1 年を通じて安定した制震力を保ち 60 年間はメンテナンス不要である。

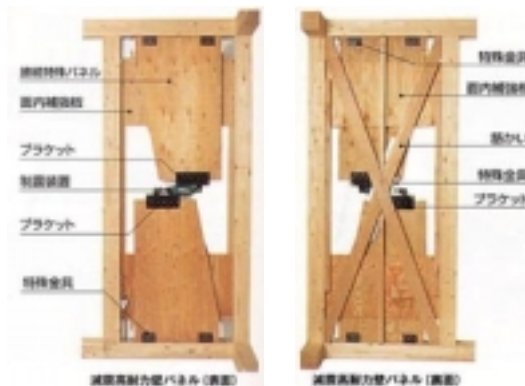


図-4 減震高耐力パネル

4. 実用化に向けたモデルの作成と考察

阪神大震災の被害では, 既存不適格建物の倒壊率が高い。現在でも, 木造住宅の 6 割は既存不適格建物である。そこで, 解析結果 A を木造建築にも適用できるように, 安価で施工の簡単な制震ユニットの製作を行う。

4.1 モデル B

モデル B は, モデル A のメカニズムを上下に配置し, より効果的に変形拡大メカニズムを利用している。W900mm×H1,500mm で, 木造住宅の壁に組み込むことができるサイズにした。中心部にダンパーを配置し, 拡大されたエネルギーを吸収する。

このモデルの問題点は, 変位点の部材が上部の部材に接触し, 変形が拘束される点である。メカニズムによって変形拡大したにもかかわらず, 変形拡大倍率 10 倍という結果が変位点の変形範囲を広くし, 部材の接触・拘束を引き起こしている。その点を考慮し, モデル C を作成した。

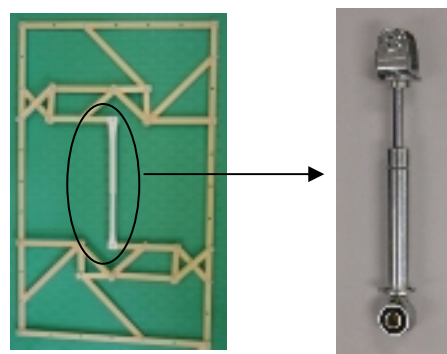


図-5 モデル B とダンパー

4.2 モデル C

モデル C は, ストロークを十分に取れるように改良し, 変形が拘束されないようにした。しかし, 中心部の距離が短くなったためダンパーの許容範囲を超えてしまう。高さを上げることによって問題は解決するが, 層間変形角が小さくなるため, 高さを上げることはできない。

そこで, メカニズムを 2 つ使用する形は, ストロークの問題から無理と判断し, モデル D を作成した。

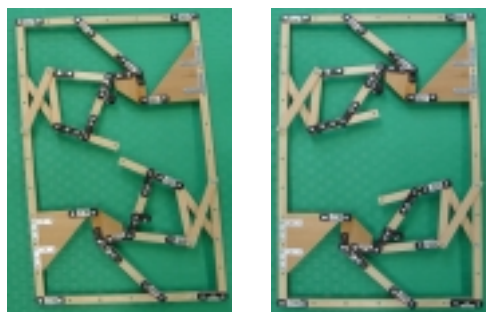


図-6 模型 C

4.3 模型 D

模型 D は、変形の拘束も問題ない程度で、ダンパーの設置・ストロークも問題ない。しかし、左図の状態では変位点が自重で変形してしまう。また、層間変形が小さすぎる。そこで右図の状態を設置する。そうすることによって自重での変形、層間変形角の問題が解消できる。四つの模型の中で最も実用化に近い模型 D の実物大模型 E を作成し、問題点がないか考察する。

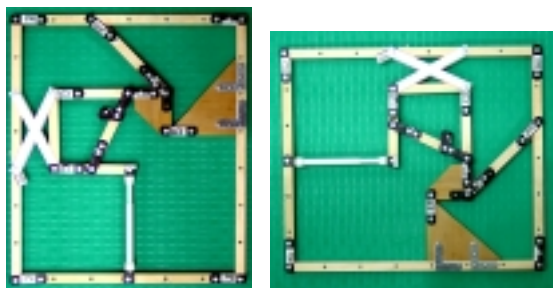


図-7 模型 D

4.4 模型 E

模型 E は実用化可能と判断した模型 D を実物大で作成した。変形の拘束、ダンパーの設置スペース、変位点のストロークすべて問題ない。非常にスムーズな動きで、解析通りの変形が起こる。変形拡大倍率は、模型の精度や接合方法の問題により約 5 倍という結果になったが、制震装置としての利用には問題ないと考えられる。静止状態でも、自重で多少の変形をしているが問題ない程度である。ねじりの動きに不安があるが、住宅に設置する場合は壁にはめ込むので問題ない。フレームの強度に心配があるので実験を行い、許容範囲を確かめる必要がある。

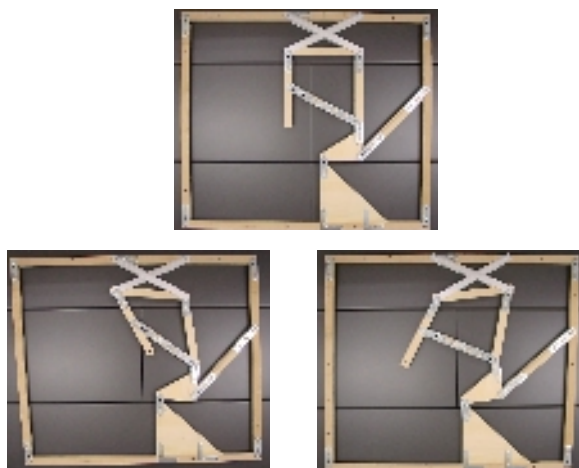


図-8 模型 E

5. 最適ダンパーの選択⁶⁾

模型 E に取り付ける最適なダンパーを、ダンパーの種類・性能を考慮し、検討を行う。

ダンパー(減衰機構)とはエネルギー吸収機構のことであり、地震時の入力エネルギーを吸収し構造物の振動応答を減少させるものである。ダンパーの分類として、金属の塑性履歴エネルギーを利用した履歴減衰型や摩擦エネルギーを利用した摩擦減衰型と、流体の粘性抵抗力や粘弾性体のせん断抵抗力を利用した粘性減衰型とに分類される。

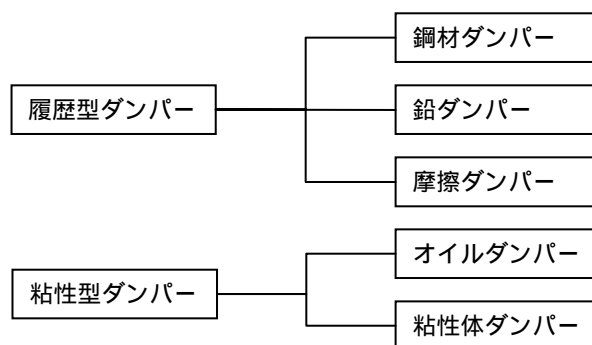


図-9 ダンパーの分類

5.1 鋼材ダンパー

鋼材の塑性変形を利用するもので、水平方向の大変形とそれに伴う鉛直方向の変形に追従できるように形状、支持部のディテールなどにそれぞれ工夫がされている。素材の塑性変形により減衰効果を発揮する機構であるため、降伏変形以前の小変形領域ではダンパーとして機能しない。降伏変形は 3cm 程度のものが多い。

鋼材ダンパーは建物の変形が大きいほど吸収するエネルギー量は増える。低層である木造建築は、高層建物ほどの変形は生じない。その点から見て、変形量の小さい木造建築の制震装置に鋼材ダンパーを用いるのは、あまり有効ではない。また、鋼材ダンパーは、大きな力が加わらなければダンパーが動き始めないため、メカニズムに無理な力が架りメカニズムの破壊が起こると推測できる。したがって、鋼材ダンパーは使用不可能と判断した。

5.2 鉛ダンパー

純度の高い鉛が大変形領域で優れた繰り返し塑性変形能力を示すことを利用するものである。鉛はきわめて延性に富んだ特性を示すことから、大変形領域で用いるのに適している。

鉛ダンパーは性能的に鋼材ダンパーとよく似ており、鋼材ダンパーと同じ理由から使用不可能と判断した。

5.3 摩擦ダンパー

2 面間の固体摩擦を利用するものである。復元力は滑り後の荷重が一定となる特徴を示す。

摩擦面に与える面圧により、滑り耐力を調節できる機構となり得ることが大きなメリットである。摩擦面の種類を適切に選択することによって、鋼材ダンパーなどに比べ、多くの繰り返しに対して安定した性能を発揮することが期待でき、振幅や振動数に依存せずコンスタントな摩擦力を得る機構とすることも可能である。

摩擦ダンパーは、地震や風などで大きく変形した時には、効

果があるが、歩行振動などの振幅が 1mm 以下の微小振動に対しては効果を期待しにくい。また、既存摩擦ダンパーを使用する場合、本研究のメカニズムに設置できる形状・ストロークのものを見つけるのは極めて難しい。したがって、既存の摩擦ダンパーは使用できないと判断した。しかし、摩擦ダンパーの機構は単純であり、独自のダンパーを作成することは可能である。そこで、本研究ではメカニズムに設置可能な摩擦ダンパーを作成した。そのことは、5.6 節に書く。

5.4 オイルダンパー

車両用として広く使用されているショックアブソーバーを大型化したピストン式のものがある。

一般には、免震構造としての絶縁効果に影響を及ぼすほどの剛性は持たないと考えられるので、中小地震に対する免震効果が期待できる。また、速度依存性の減衰機構として、小振幅から大振幅まで振幅に応じた減衰力が作用する。速度に比例した減衰力を大略仮定することで、減衰定数の形式で性能を設定することができ、応答スペクトルなどを介して効果の把握が比較的容易にできることもメリットの一つである。

オイルダンパーは、建物の動きが比較的小さな段階から制震効果を発揮し、小振幅から大振幅まで減衰力が期待できる。地震時の低層木造建築の変形でも有効にダンパーが働き、建物の揺れを抑えたと考える。オイルダンパーの機能的には十分使用できる。しかし、既存のオイルダンパーでは、形状・ストロークの問題を満たすものがなく、本研究では使用しない。

5.5 粘性体ダンパー

高粘性材料のせん断抵抗を利用するものがある。

オイルダンパーと同様の理由で、中小地震に対する免震効果が期待できること、小振幅から大振幅まで振幅に応じた減衰力が作用すること、減衰定数の形式で効果の把握が比較的容易にできることなどメリットとして数えられる。このほか、方向性を持たない比較的単純な機構でダンパーを構成できることなどが挙げられる。

粘性体ダンパーは、オイルダンパーの性能とよく似ており、機能的には十分使用可能である。しかし、粘性体の取り扱いが難しく、形状・ストロークの問題からオイルダンパーと同様に使用が難しい。

5.6 摩擦ダンパーの考案

木材の摩擦抵抗を利用した図-10 のダンパーを作成した。本研究の制震装置は変形拡大メカニズムを用いているため、変位部材の変形が非常に大きい。したがって、ピストン式のダンパーなどでは対応できない可能性がある。そこで、本研究では図-10(左図)のような蛇腹をダンパーに使えないか考え、図-10(右図)のようなダンパーを考案した。このダンパーは接合部の接触面の摩擦を利用した摩擦ダンパーである。機構的にも単純で、節点数を増やすことによって、摩擦抵抗を容易に調整できる。

図-9 の制震装置に取り付け挙動を確かめた。ストロークは問題ない。減衰力の効果は見られないが、これは接合部をボルトで仮締めしているだけだからと思われる。これは、適切な接合を用いることにより解決する。現時点では、実際にダンパーとして使用するのは困難であるが、改良を加え、摩擦抵抗を調節することで、本研究の制震壁の減衰装置として、利用できると考えている。

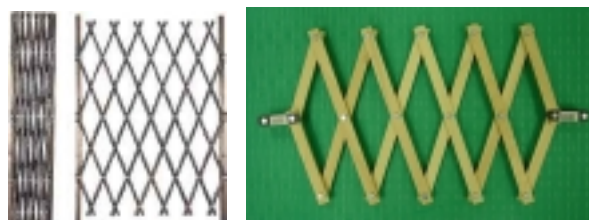


図-10 蛇腹のイメージ図と作成したダンパー



図-11 蛇腹ダンパーの設置

6. まとめ

本論文では、昨年までの研究で得られた、変形拡大メカニズムにもとづいて、新しい制震壁の開発を行った。

装置は木材を使用し作成した。精度、接合部の問題から解析通りの変形拡大倍率は得られなかったが、制震壁としては十分使用可能であることがわかった。また、本格的な実用化を考え、設置するダンパーの検討も行った。既存のダンパーでは適切な減衰効果が得られなかったため、独自のダンパーを考案し、模型を作成した。結果、節点の数により摩擦抵抗を制御できるため、効果的に用いることができるのではないかと考えている。

この装置を実用化するには、接合部の改良、制震装置の有効な配置計画・設置方法、動的応答解析によりどの程度の減衰効果が得られるかなど、まだまだ多くの課題が残っている。しかし、将来、この装置が完成すれば、画期的な制震装置として普及すると考えている。

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
- 6) 日本免振構造協会 <http://www.jssi.or.jp/>
- 7) 江戸川木材工業株式会社 <http://www.edogawamokuzai.co.jp>