

# ゴムチェーンダンパー制振システムの開発

近畿職業能力開発大学校 藤村悦生  
古本勝則  
井上澄雄

Development of Earthquake Response Control System Using Rubber Chain Damper

Etsuo FUJIMURA, Katsunori FURUMOTO, Sumio INOUE

**要約** 現在、日本列島において兵庫県南部・鳥取西部・芸予・福岡県西方沖・新潟県中越等大きな地震が頻発している。さらに、東海・東南海・南海地震の発生確率が高いとされているなかで、地震に対する安全対策意識が高まり、新築に限らず既存建築物の耐震性能も大きな課題となっている。とりわけ、全国に多く存在する既存不適格建築物の対策は急務である。

特に、近畿職業能力開発大学校が設置されている大阪府南部は、和歌山県に近いこともあり和歌山県における耐震対策について技術援助の要望が高い。この要望に対して、地元機械メーカーとともに、既存不適格建築物の耐震対策用に木造建築物用制振装置を開発することとした。本開発は、共同研究開発として行うとともに、建築施工システム技術科の開発課題としても取り組んだ。この木造建築物用制振装置開発について紹介する。

## I. はじめに

在来木造住宅を中心とした耐震対策においては、比較的安価で柔らかい建物向きである制振構造が適当である。さらに、建物にできるだけ損傷を残さない構造であること、免震装置に比べて安価ということも特徴としてあげることができる。

制振構造とは、制振ダンパー等の耐震専用部材によって、建物に伝わってきた風揺れや地震エネルギーを吸収させる構造形式と定義される。

しかし、エネルギーを吸収させるため、建物本体の変形が必要であり、大地震終了時に想定外の損傷が発生する可能性がある。すなわち、地震エネルギーを効果的に制振ダンパー等の耐震専用部材に吸収させる工夫が必要となる。また、耐震補強だけでなく新築の建物でも使用可能とするため、一般的な住宅に多く配置されている半間の壁に収納可能ともしなければならない。

さらに、施工面を考慮すると、一般住宅の施工精度を考慮し、多少の寸法誤差に追従できる方式でなければならない。

これらから、

- ・価格を考え、なるべく部材数を少なくする。
  - ・地震エネルギーを効果的に制振ダンパー等の耐震専用部材に吸収させる機構を製作するとともに機構自体は単純な構造とする。
  - ・簡単に取り付けることができるよう軽量化に努める。
- 等を考慮し、制振装置の開発を行うこととした。

## II. 開発

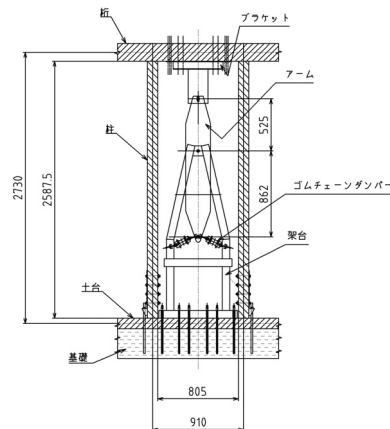


図1 ゴムチェーンダンパー制振システム

### 1 開発趣旨

本技術は、木造の建物の耐震性を向上するために、高いエネルギー吸収能力を有する高減衰ゴムを使用したゴムチェーンダンパーと、建物の変形をこのダンパーに効率よく伝達させる変位増幅機構を採用することにより、「高い耐震性」を有し、「簡単に設置可能な簡便な構造」で、「廉価」となることを意図して開発に取組んだ。

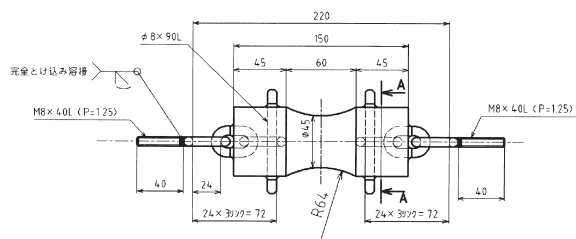


図2 ゴムチェーンダンパー

### 2 開発したゴムチェーンダンパー制振システムの構成と特徴

- 変位増幅機構が軸組に発生する層間変位をゴムチェーンダンパーに増幅して伝達することで、木造の軸組に発生する変位より大きな変位をゴムチェーンダンパーに生じさせ、履歴ループを描く事による減衰効果により振動エネルギーを吸収する。
- ゴムの伸びが大きいため、大地震時における大変形に追従することができる。
- 大きな減衰性を有するため、大地震における振動エネルギーの吸収に大きな効果を発揮することができる。
- ゴムそのものの性能の経年変化が少ないため、長期間の使用に耐えることができる。
- 十分な耐疲労性を有しているため、余震等の繰り返し地震動に対しても効果を持続することができる。
- 小さな変形においても減衰性能を発揮するため、風揺れ等の小さな振動に対しても効果を発揮することができる。

等の特徴を持つ制振装置を開発することができた。

### Ⅲ. 性能

本制振装置は日本建築総合試験場に性能認証申請を行い、その耐震性能について検証された。検証された内容について以下に示す。

### 1 ゴムチェーンダンパー目標性能

ゴムチェーンダンパーは、安定した荷重-変位特性値（一次剛性、二次剛性、降伏点変位）を有すること。

- ゴムチェーンダンパーの製品性能の基準値および基準値に対するばらつきの許容範囲を表1に示す。

表1 ゴムチェーンダンパーの基準値および許容範囲

	ダンパー基準 一次剛性(kN/mm)	ダンパー基準 二次剛性(kN/mm)	ダンパー基準 降伏点変位(mm)
基準値	0.11	0.055	6.3
ばらつきの許容範囲	±15%	±15%	±15%

この目標値に対して、静的繰り返し試験等で性能確認を行った。

### 2 確認されたゴムチェーンダンパーの性能

限界変位、依存性確認試験結果より、下記のことを確認した。

#### (1) 限界変位特性

- ゴムチェーンダンパーの最大変位量120mm以下において、耐荷能力の低下は認められないので、ゴムチェーンダンパーは変位量120mmの範囲まで使用できる。

#### (2) 変位依存性

- 変位によるダンパー荷重-変位特性の依存性が認められる。ゴムチェーンダンパー制振システムの設計時にゴムチェーンダンパー性能を補正する修正式を、次項に示す。

#### (3) 繰り返し依存性

- 繰り返しによるダンパー荷重-変位特性の依存性が認められる。ゴムチェーンダンパー制振システムの設計時にゴムチェーンダンパー性能を補正する修正式を、次項に示す。

#### (4) 温度依存性

- 温度によるダンパー荷重-変位特性の依存性が認められる。ゴムチェーンダンパー制振システム設計時に、ゴムチェーンダンパー性能を補正する修正式を、次項に示す。

#### (5) 経年依存性

- 経過年数の増加によりゴムチェーンダンパーのエネルギー吸収量は大きくなり、基準経過年数0年で評価すれば安全であるので経過年数に対する荷重-変位特性値の補正はしない。

#### (6) 周波数依存性

- 周波数の増大によりゴムチェーンダンパーのエネルギー吸収量は大きくなり、基準周波数0.05Hz

で評価すれば安全であるので周波数に対する荷重-変位特性値の補正はしない。

以上6種類の実験・分析により、ゴムチェーンダンパーのもつ基本性能について確認した。

### 3 ゴムチェーンダンパー制振システム目標性能

ゴムチェーンダンパーの荷重-変位曲線を用いてゴムチェーンダンパー制振システムの荷重-変位特性値(一次剛性、二次剛性、降伏点変位)の定式化ができること。

### 4 確認されたゴムチェーンダンパー制振システムの性能

以下の手順によりゴムチェーンダンパーの荷重-変位曲線を用いてゴムチェーンダンパー制振システムの荷重-変位特性値(一次剛性、二次剛性、降伏点変位)の定式化ができることが確認された。

- 任意のシステム水平変位における荷重-変位特性値の算定手順  
任意のシステム水平変位に対応するダンパー軸方向変位を変位増幅機構の変位倍率より求め、ダンパー軸方向変位に対応する変化率をゴムチェーンダンパーの変位依存性による修正式より求める。任意のシステム水平変位における荷重-変位特性値は、システム基準値に変化率を乗じて算定される。

任意のシステム水平変位 $X_s$ からダンパー軸方向変位 $X_d$ への変換は下式による。

$$X_d = X_s \times y_s$$

ここで、

$y_1$ : 変位増幅機構の変位倍率

$$y_2 = 0.0320X_s + 0.496 \quad (4.55\text{mm} \leq X_s < 27.3\text{mm})$$

$$y_u = -0.00120X_s + 1.37 \quad (27.3\text{mm} \leq X_s \leq 91.0\text{mm})$$

表2に用いられている式 $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_u$ は以下の通りである。

$y_1$ : ダンパー一次剛性の変化率を求める修正式

$y_2$ : ダンパー二次剛性の変化率を求める修正式

$y_u$ : ダンパー降伏点変位の変化率を求める修正式

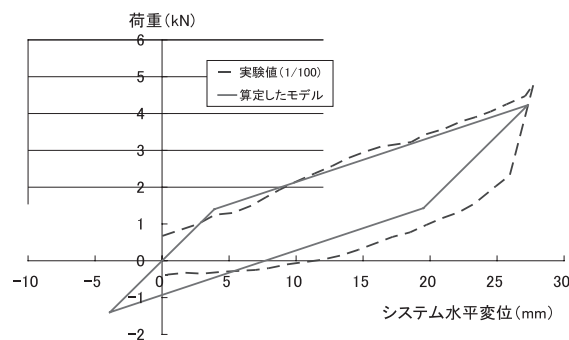


図3 履歴ループモデルと実験値

表2 任意のシステム水平変位における荷重-変位特性値の算定

	システム一次剛性	システム二次剛性	システム降伏点変位
ゴムチェーンダンパーの変位依存性による修正式	$y_1 = 28.3X_d^{(-0.881)}$	$y_2 = 31.6X_d^{(-0.928)}$	$(20 \leq X_d < 80)$ $y_u = -7.00 \times 10^{-5}X_d^2 + 0.0355X_d - 0.313$ $(80 \leq X_d \leq 100)$ $y_u = 0.00500X_d + 1.70$
システム基準値	$K_{S01} = 0.31(\text{kN/mm})$	$K_{S02} = 0.11(\text{kN/mm})$	$\delta_{S0y} = 4.2(\text{mm})$
任意のシステム水平変位における荷重-変位特性値	$K_{S1} = K_{S01} \times y_1 = 8.77X_d^{(-0.881)}$	$K_{S2} = K_{S02} \times y_2 = 3.48X_d^{(-0.928)}$	$\delta_{sy} = \delta_{S0y} \times y_u$ $(20 \leq X_d < 80)$ $\delta_{sy} = -0.000294X_d^2 + 0.149X_d - 1.31$ $(80 \leq X_d \leq 100)$ $\delta_{sy} = 0.0210X_d + 7.14$

## IV. 設 計

### 1 ゴムチェーンダンパー制振システム荷重—変位特性

前項による性能証明試験により、本ゴムチェーンダンパー制振システムの荷重—変位特性が明らかになるとともに設計式を構築することができた。

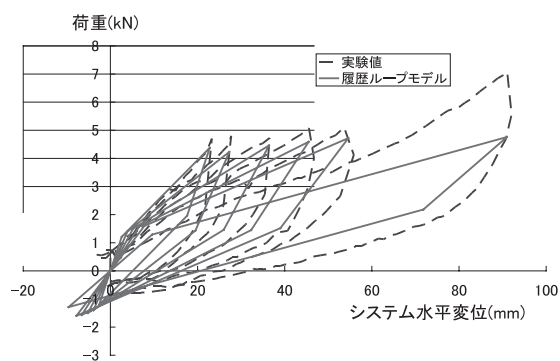


図4 ゴムチェーンダンパー制振システム  
荷重—変位特性

この荷重—変位特性を基に、木造建物の耐震補強設計を行う。

### 2 構造設計基本方針

本ゴムチェーンダンパー制振システムを用いる構造設計は、外乱入力の変動と建物の耐用年数を考慮してレベル1及びレベル2の2段階の入力レベルを設定して時刻歴地震応答解析による動的解析を行い、各々のレベルで設計目標性能を満足していることを確認する事で、建物の構造安全性を検証する。

レベル1は建物の存在期間中に1回程度遭遇する可能性の高い入力レベルを、レベル2は極めて稀に発生する大規模な入力レベルとする。

これらの外乱入力レベルに対する建物の具体的要求性能は、レベル1入力に対して建物を損傷させず機能を維持すること、レベル2入力に対して建物を崩壊あるいは倒壊させないこととなる。

ここで、木造軸組の耐震性能指標として、木材料が健全であることを前提におけば、建築技術『特集木造軸組住宅の壁量設計と構造計画—監修大橋好光』2006.10の壁倍率評価<sup>(1)</sup>における考え方や一連の実験・解析を通じて、以下のように捉えることができる。

- ①層間変形角 1/120以下  
ほぼ弾性的な挙動
  - ②変形角 1/60まで  
小破でわずかな補修での再利用が可能
  - ③変形角 1/30まで  
中破で相当な補修後に再利用が可能
- 設計目標性能の設定値は、
- ・レベル1に対しては最大応答変形角を弾性変形範囲である1/120とする。
  - ・レベル2に対して設計者は、建築主の要求に基づき、1/30～1/60の範囲で設定する。

### 3 最大地表面速度（地震レベル）の設定

日本建築総合試験所『時刻歴応答解析建築物構造安全性評価業務方法書』4.4.1 (3) に、過去に観測された代表的な観測地震波のうち、建設地および建築物の特性を考慮して選択した3波以上について50cm/sとして作成した地震波を極めて稀に発生する地震動とすることができるとしている。

一方、地震荷重を定めた建設省告示1461号では、稀に発生する地震動と極めて稀に発生する地震動の比率が1：5となっていることから、

- (1) レベル1入力  
最大地表面速度を10cm/sの地震動
  - (2) レベル2入力  
最大地表面速度を50cm/sの地震動と設定する。
- 以上の条件により耐震補強設計を行う。

### 4 解析事例

『木造住宅の耐震診断と補強方法』財団法人日本建築防災協会 P140に記載されているA建物を参考に模擬設計建物を設定した。設定した建物概要を以下に示す。

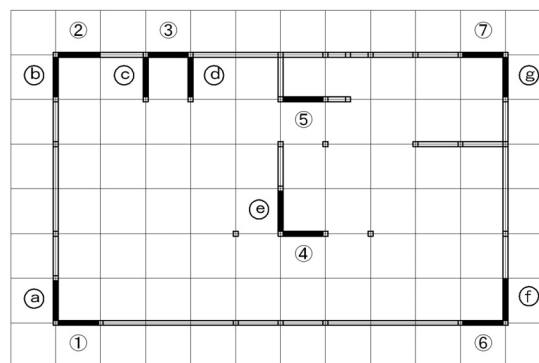


図5 建物概要と1階平面図

(1) 耐震性能確認 (1階X方向)

①固定荷重、積載荷重の算定

本例では、建築基準法施行令に準じて、各層の荷重を算定した。

表3 荷重表 (床面積あたり)

	屋根荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	外壁荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	内壁荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	床荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	積載荷重 (kN/m <sup>2</sup> )
2階	1.30	0.75	0.45	0.00	0.00
1階	0.00	0.75	0.45	0.60	0.60

表4 荷重表 (まとめ)

	床面積 (m <sup>2</sup> )	屋根部分 面積 (m <sup>2</sup> )	短辺割増 (短辺6m 未満)	各層重量 (kN)
2層目(3階 床レベル)	0.00	49.68	1.00	94.4
1層目(2階 床レベル)	49.68	0.00	1.00	119.2

②個別耐震要素の開口・接合部及び劣化による低減  
個別耐震要素の耐力低減は、開口低減係数・接合部による耐力低減係数・柱の劣化による耐力低減係数を算定し考慮する。ただし、本設計例では適用箇所は無い。

③耐力壁の骨格曲線の作成

標準骨格曲線は、『木造住宅の耐震診断と補強方法』財団法人 日本建築防災協会設計に記載されている「標準骨格曲線データ」を用いる。この時、筋交いについては圧縮、引張の平均値とする。

表5 標準骨格曲線データシート

層水平変位(mm)	0.00	2.73	5.46	8.19	13.65
石膏ボード(大壁)	0.00	0.43	0.86	1.19	1.70
ラスシート(モルタル塗)	0.00	0.88	1.76	2.46	3.50
筋交い45×90たすき	0.00	0.70	1.39	2.05	3.35

ただし、耐力壁の終局変位  $\delta_u$  は最大荷重後の最大耐力80%時の骨格曲線上の変位と定める。  
これにより、この建物の最大層間変位は75mm (1/36.4rad) となる。

④主架構の復元力特性値の算定

主架構の一次剛性、降伏点変位、二次剛性を、完全弾塑性モデルにより解析する。

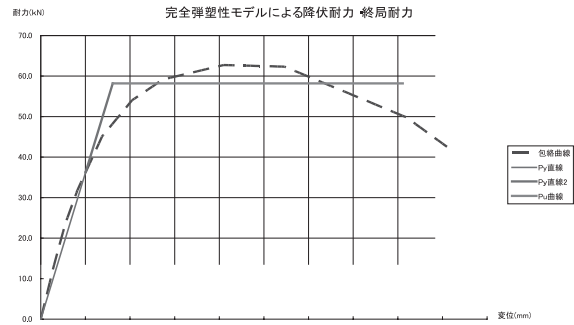


図6 完全弾塑性モデルによる降伏耐力、終局耐力

結果を以下に示す。

- 終局耐力 :  $P_u = 74.4 \text{ kN}$
- 一次剛性 :  $K_1 = 3.26 \text{ kN/mm}$
- 降伏点変位 :  $\delta_v = 22.8 \text{ mm}$
- 二次剛性 :  $K_2 = 0.033 \text{ kN/mm}$

⑤層復元力特性値の低減係数

層における復元力特性値の低減係数  $F_e$  は、

$$F_e = F_{ep} \times F_{ef}$$

となる。

ここで、

$F_{ep}$  : 偏心率による低減係数

$F_{ef}$  : 床の仕様による低減係数

・偏心率による低減については

偏心率 ( $R_{e,x}$ 、 $R_{e,y}$ ) が

$$R_{e,x} = \frac{e_y}{r_{e,x}} = 0.13$$

$$R_{e,y} = \frac{e_x}{r_{e,y}} = 0.10$$

となることから、偏心率による剛性の低減係数は、

$$F_{ep} = 1.0$$

・床の仕様による低減係数

床仕様はII (荒板+火打ち) : 床倍率0.63

X方向の偏心率  $R_{e,x}$  : 0.13より、床の仕様による低減係数は、

$$F_{ef} = 1.0$$

以上より

$$F_e = F_{ep} \times F_{ef} = 1.0$$

⑥時刻歴地震応答解析

本ゴムチェーンダンパー制振システムによる耐震補強設計は、時刻歴地震応答解析を基本に保有水平

耐力診断法との比較検討により総合的に評価する。  
ここで、特に時刻歴地震応答解析を実施する上での注意点について述べる。

・履歴特性について

木造軸組み構造の履歴特性については、各層の  $Q-\delta$  関係からバイリニア型・スリップ型或いは原点指向型に近似し設定する。実験に基づいた復元力特性値が得られない場合は、復元力特性タイプに「スリップ型」を選択して、保有水平耐力に相当する降伏点変位を設定する。

・減衰定数について

木造軸組み構造の粘性減衰については、剛性比例型剛性比型とする場合その値は原則として3%とする。<sup>(2)</sup>

・解析モデルについて

設計対象の木造建物の剛床・柔床の種別による影響については、偏心率・床倍率による剛性の調整で考慮する。また、この剛性の調整により、建物の床が剛床と見なせることにより、等価せん断型質点系モデルに置換する。

・入力地震動

入力地震動は、以下の条件を満足する模擬地震波を使用する。

- 1) 平成12年建設省告示1461号第四号イに示される解放工学的基盤における加速度応答スペクトルをもつ地震動で、位相分布の異なる3波(告示スペクトル適合波)
- 2) 地震動の入力位置は基礎位置とする。
- 3) 告示スペクトル適合波は、解放工学的基盤( $V_s \geq 400\text{m/s}$ )に入力して得られる地表面での応答波形とする。表層地盤の動的特性は、告示1457号別表第一、別表第二に示される  $G-\gamma$ ,  $h-\gamma$  関係などにより適切に評価する。

例として今回解析に使用した模擬地震波を示す。

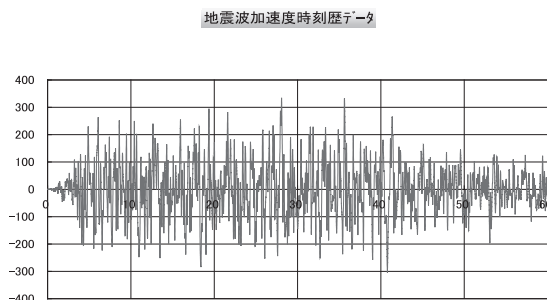


図7 解析に使用した模擬地震動

・今回解析に使用した模擬地震波の概要

特性	加速度応答スペクトル適合波
位相特性	強度関数及びランダム位相角
地表面最大加速度	334.9cm/s <sup>2</sup>
地表面最大速度	67.4cm/s
継続時間	60s

・解析結果

1階最大層間変位	202.7mm
1階最大層間変位角	13.5rad
1階最大層せん断力	80.2kN

※ 参考

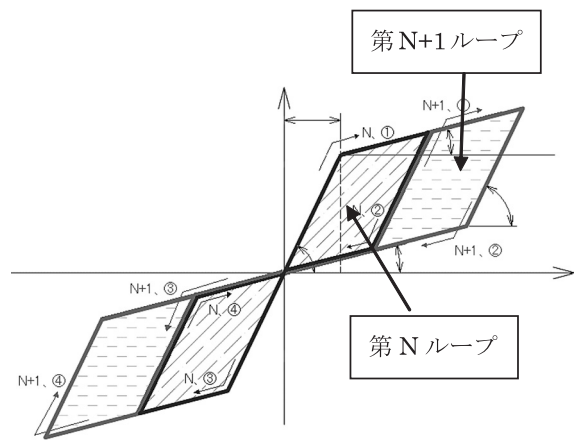


図8 時刻歴地震応答解析に用いる履歴ループ(木造軸組みにおけるスリップ型モデル)

⑦保有水平耐力法による精密耐震診断

保有水平耐力法による精密耐震診断を行い、時刻歴地震応答解析値と比較する。

・必要耐力の算定

- 1) 外力分布係数  $A_i$  の算定

$$T = 0.160$$

$A_i$  の算定

	各階重量 (kN)	支持重量 (kN)	$\alpha_i$	$A_i$
2階	99.4	99.4	0.455	1.222
1階	119.2	218.6	1.000	1.000

- 2) 振動特性係数  $R_t$  の算定

2種地盤  $T_c=0.6$

$T=0.16$  より

$R_t=1.0$

3) 構造特性係数Dsの算定

塑性率算定の基点は層の降伏点による。

Dsの算定

	塑性率 $\mu$	Ds
2階	3.14	0.435
1階	3.29	0.423

4) 必要耐力の算定

必要耐力の算定

	支持重量 (kN)	Ds	Ai	Rt	Qun
2階	99.4	0.435	1.222	1.0	52.89
1階	218.6	0.423	1.000	1.0	92.55

5) 判定

必要耐力の算定

	Qun	Qu(=Pu)	上部構造 評点	判定
2階	52.89	87.3	1.65	倒壊しない 一応倒壊 しない
1階	92.55	92.6	1.01	

(2) 結果の分析

時刻歴地震応答解析結果によると、層の履歴特性曲線から想定した最大層間変位許容値(75mm)を大きく上まわっている。一方、精密耐震診断結果からは、一応倒壊しないとの判定となる。そこで、既存記録地震波による解析を行うとともに耐震診断で倒壊しないといわれる上部構造評点値1.5となるように主架構とゴムチェーンダンパー制振システムで補強し、再度、時刻歴地震応答解析を行った。

表 6 時刻歴地震応答解析結果まとめ

設計に使用した模擬地震動		
層	最大層間変位(cm)	
	主架構補強前	主架構補強後
2F	1.84	6.47
1F	20.27	7.36
ELCentro 1940 NS		
層	最大層間変位(cm)	
	主架構補強前	主架構補強後
2F	1.80	3.82
1F	21.18	8.99
Taft 1952 EW		
層	最大層間変位(cm)	
	主架構補強前	主架構補強後
2F	1.63	2.75
1F	8.82	6.21
Hachinohe 1968 NS		
層	最大層間変位(cm)	
	主架構補強前	主架構補強後
2F	1.52	2.34
1F	4.11	3.87

この結果の中で、既存記録地震波結果と模擬地震動の結果は、Hachinohe1968NS以外はよく一致している。また、主架構とゴムチェーンダンパー制振システムで補強した効果は、木造住宅の倒壊しないレベル(層間変形1/30以下)を満足していることで確認できる。

一方、先に挙げた『保有水平耐力法による精密耐震診断』結果は、補強前においても一応倒壊しないとの判定結果となっている。これは、『保有水平耐力法による精密耐震診断』が静的な解析手法であり、地震動等の繰り返し荷重に対して木造建物のようなスリップ型モデルの構造特性を持つ建物については、危険な設計を行う可能性があると考えられることによる。

すなわち、木造軸組みにおいては、繰り返しのエネルギー吸収能力を持つだけでなく、建物に損傷を与えるとひずみとして蓄積される。

これに対して、今回開発したゴムチェーンダンパー制振システムは、安定した繰り返しエネルギー吸収能力を持つ。静的解析ではこの効果について検証できないため、繰り返しエネルギー吸収能力の効果により、2種類の解析法による結果の違いが出たものと考えられる。

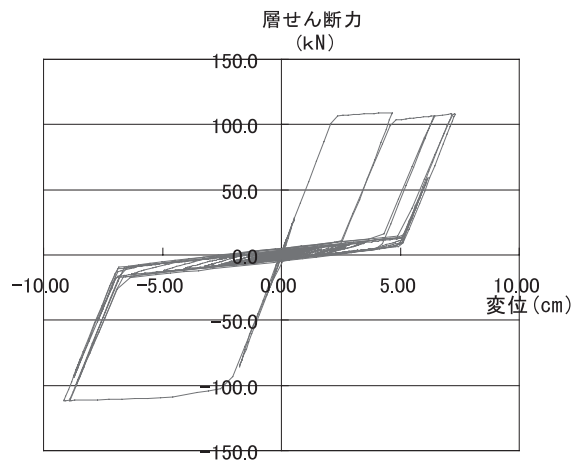


図 9 層せん断力—変位特性

- 中央のバイリニア成分がゴムチェーンダンパー制振システムで補強した効果で、繰り返し履歴回数が多く、エネルギー吸収効果が高いことを示している。

## V. おわりに

この開発研究は、以下3点について開発研究してきた。

- ①製品の開発
- ②製品の性能把握と証明
- ③設計法の確立による使用方法の提案

この3点の項目は今後の『ものづくり』において重要な要素であり、単なる製品製作では社会のニーズに応えることはできないことが改めて認識できたところである。さらに、今振り返ってみると、(株)昭和機械商事との共同研究開発だけでなく、近畿職業能力開発大学校建築施工システム技術科の学生による開発課題としても取り組んだ効果が大きい。

ゴムチェーンダンパーそのものの性能向上については、専門的な知識と技術力が大きく影響したが、変位増幅機構の性能向上については、学生諸君の工夫・改善提案が有効であった。具体的には、ダンパーの取り付け方法の改善によるダンパー圧縮応力の利用や、アームのブラケット取り付け部の長穴加工による応力伝達の効率化など、工夫・改善による性能向上効果を随所に確認できる。

今後、『ものづくり』を実践する学生諸君にとっても有効な開発研究であったと考えている。以上、このような共同研究開発は学生の資質を高める上でも有効であり、今後とも積極的に取り組んでいきたいと考えている。

## 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、工夫し改良するとともに実験及びデータ整理いただいた、

建築施工システム技術科

平成17年度卒業生

新井隆夫君 近藤 聡君 小崎重人君 村井 稔君  
渡邊満美子さん

平成18年度卒業生

伊藤 仁君 清原大祐君 楠田忠志君 真田 歩さん  
また、共同開発者として大きな御尽力をいただいた、

(株)昭和機械商事

代表取締役社長 岡崎啓司氏 総務部長 山内 修氏  
チェーン式補強土グループ 重吉勝氏 望月康博氏  
チェーン技術部 東 正高氏

の諸氏に深く感謝いたします。

## [参考文献]

- (1) 建築技術『特集木造軸組住宅の壁量設計と構造計画－監修大橋好光』
- (2) (財)日本建築防災協会 2004年度版『木造住宅の耐震診断と補強方法』