

# 論文 ソフトストーリーに制振デバイスを設置して建物損傷を制御する設計法

佐藤 朋成<sup>\*1</sup>・堀 則男<sup>\*2</sup>・井上 範夫<sup>\*3</sup>

**要旨**：多層建物に制振デバイスを設置したソフトストーリーを設け、応答変形を集中させることによってその層で集中的にエネルギー吸収し、建物全体の損傷を制御する設計法の基本的考え方を提案し、その応答性状を検討する。ソフトストーリーには、安全性を確保するために、過大な応答変形を防止するリミッターを併設した設計となっている。

**キーワード**：ソフトストーリー，制振デバイス，設計法，硬化型復元力特性，リミッター

## 1. はじめに

現在のフレーム構造の設計では、全層で均等にエネルギー吸収する設計法が一般的である。しかしこの設計法では、全層が降伏するために地震後の修復が困難、各層の層間変形が比較的小さいために制振デバイスが十分に作用しない、といった観点から必ずしも効率的とは言えない。

それに対し、ソフトストーリーを設けて変形を集中させることで積極的にエネルギー吸収させる設計法が提案されている。鈴木ら<sup>1)</sup>は、変形能力の大きい部材をエネルギー吸収材としてソフトストーリーに用いることで免震構造のような効果を有する建物が構造的に可能であることを示している。早部ら<sup>2)</sup>は、フェールセーフ機構を設置した上で、1層の剛性を小さくしてオイルダンパーにより集中的にエネルギー吸収を行うソフトファーストストーリーを設けた制振構造とした実建物の有効性を示している。

一方、筆者ら<sup>3)</sup>は、これまで、新たな制振デバイスとして硬化型復元力特性を有するエネルギー吸収デバイスの提案を行ってきた。本デバイスは、中小地震時にはダンパーのエネルギー吸収により建物全体の応答を低減し、大地震時にはダンパーのエネルギー吸収に加えて変形制御機構（以下リミッター）の作動により、剛性が

増加することで層間変形を抑え、他の層へとエネルギーを分散させることで、建物およびダンパーの過大な損傷を防ぐことを目指すものである。このような特性を生かせば、ソフトストーリー建物に対して本デバイスを用いることで、安全性を確保し、建物損傷を制御することが可能になると考えられる。

そこで本研究では、多層建物に硬化型復元力特性を有するエネルギー吸収デバイスを設置したソフトストーリーを設け、集中的にエネルギー吸収をすると共に、リミッターにより過大な応答変形を防止する機構とすることで、建物全体の損傷を制御する設計法の基本的考え方を提案し（図-1）、その応答性状を検証する。

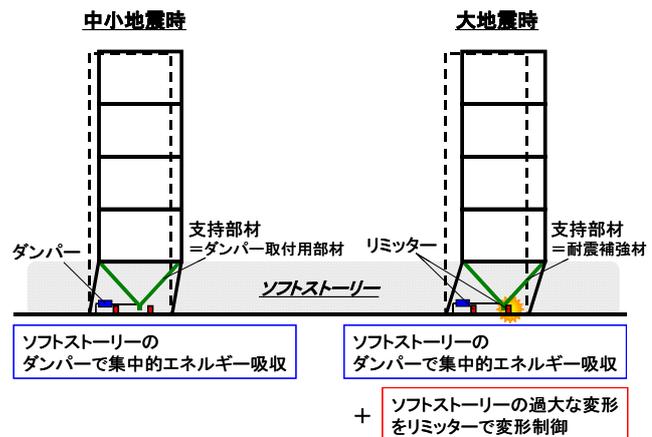


図-1 提案する設計法の概念

\*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (正会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 助手 工博 (正会員)

\*3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 工博 (正会員)

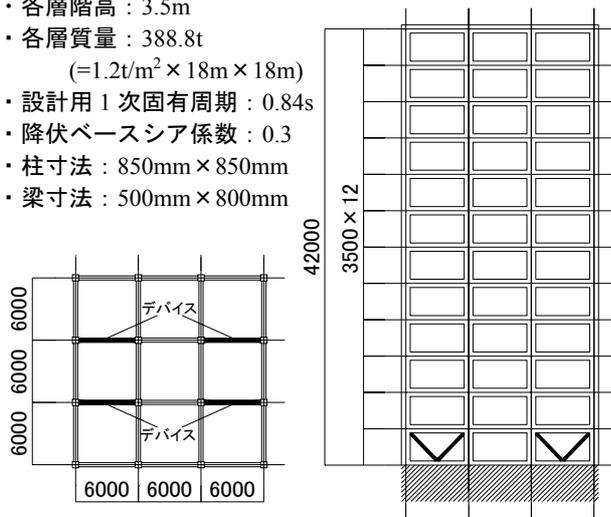
## 2. 解析条件

### 2.1 建物モデル

#### (a) 基本モデル

基本モデルとして設定した検討対象建物を図-2に示す。この建物は、平面が18m×18m（3スパン×3スパン）、高さが42mの純ラーメンの12層鉄筋コンクリート構造である。

- ・各層階高：3.5m
- ・各層質量：388.8t  
(=1.2t/m<sup>2</sup>×18m×18m)
- ・設計用1次固有周期：0.84s
- ・降伏ベースシア係数：0.3
- ・柱寸法：850mm×850mm
- ・梁寸法：500mm×800mm



(a)各層伏図 (b)立面図

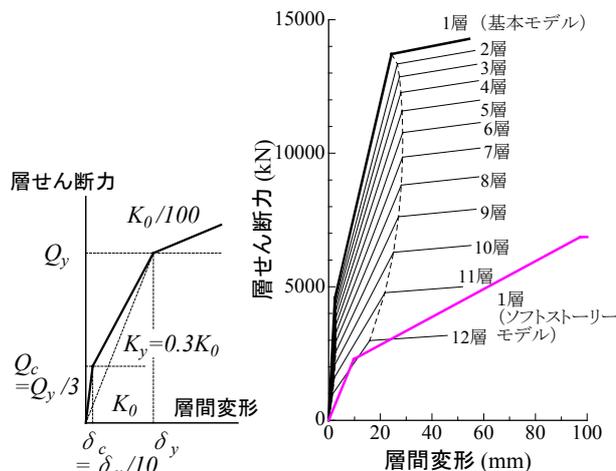
図-2 建物モデル図（単位：mm）

解析においてはせん断質点系を仮定し、各層の復元力特性を図-3のように設定する。初期剛性は、一般的な建物の剛性分布を考慮し、1層に対して12層で剛性が1/3となる台形分布形となるように設定し、固有値解析により、建物の1次固有周期が設計用1次固有周期（0.84s）となるような値とした。降伏耐力はベースシア係数 $C_B=0.3$ に対応する $A_i$ 分布外力作用時の層せん断力とし、図-3(a)に示すように3折線のTakedaモデル型の復元力特性とした。減衰定数は瞬間剛性比例で2%とする。

#### (b) ソフトストーリーモデル

2層以上は通常の基本モデルと同様な復元力特性とし、1層をソフトストーリーにする。ソフトストーリーの復元力特性は、階高を2倍にしたと仮定し、基本モデルに対して、初期剛性を1/8倍、降伏耐力を1/2倍、降伏変形を4倍として図-3のように設定する。減衰定数は基本モ

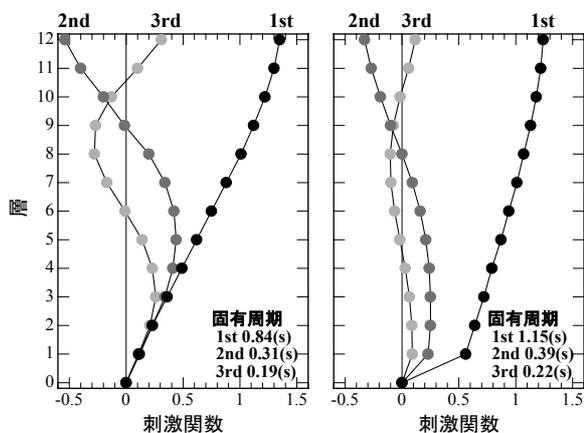
デルと同様に瞬間剛性比例で2%とする。



(a)復元力の設定方法 (b)各層の復元力特性

図-3 フレームの復元力特性

図-4に2つの建物モデルの固有値解析結果を示す。ソフトストーリーモデルでは1層の変形が全体の半分程度を占めている。



(a)基本モデル (b)ソフトストーリーモデル

図-4 固有値解析結果

## 2.2 支持部材

ダンパーの支持部材は、H-250×250×9×14のH形鋼を用い、図-2に示すように建物に4set、図-5のようなV型に設置する。この時、1層あたりの支持部材の水平剛性は1568904kN/m、せん断降伏耐力は11544kNである。ただし、支持部材は座屈止めによって座屈しないものと仮定し、降伏耐力はH形鋼の圧縮・引張降伏強度で決まるものとする。また、ソフトストーリー

モデルの場合、階高が異なるために実際には同じ部材を用いても水平剛性や降伏耐力が異なってしまうが、ここでは、基本モデルと同様な水平剛性および降伏耐力を有するような部材を用いたこととする。

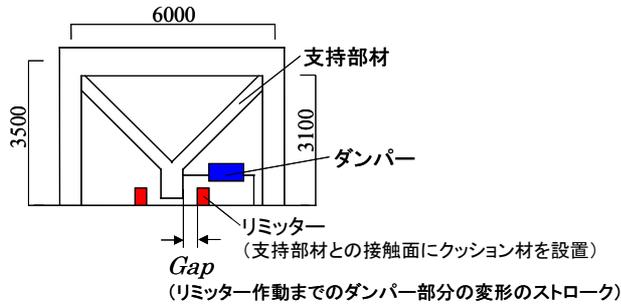


図-5 デバイス概要 (単位: mm)

### 2.3 ダンパー

微小振幅時から機能を発揮し、安定した楕円形の履歴ループを描く制振デバイスとしてオイルダンパーを用いる。

なお、基本モデルは全層同量のダンパーを設置し、ソフトストーリーモデルは1層にのみダンパーを設置することとする。

### 2.4 リミッター

ソフトストーリーは、変形を制御するリミッターを設置した機構とする。リミッターを設置した場合、図-5の状態から変形が進み、支持部材がリミッターと接触し、ブレース架構の状態となり建物の剛性を高めることでソフトストーリーの過大な変形を防止する。リミッターと支持部材の接触時の衝撃を緩和するため、図-6に示すような復元力特性を有するゴム製のクッション材<sup>3)</sup>を設置する。クッション材のサイズは受圧面積 150mm×150mm、厚さ 48mm とする。

本研究では、リミッターが作動してブレース架構の状態になるまでのダンパー部分の変形のストロークを Gap と称する(図-5を参照)。Gapの大きさは、ソフトストーリーの塑性率 $\mu$  (=最大変形/降伏変形)を基準に、塑性率1の大きさ(97.3mm)と、塑性率0.6の大きさ(58.4mm)の2種類とする。

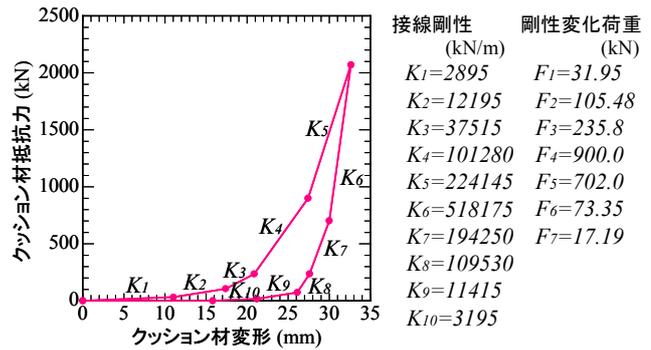


図-6 クッション材の復元力モデル

## 2.5 入力地震動

入力地震動は、日本建築センター作成の模擬地震動 BCJ-L1 と BCJ-L2 を用いることとし、中地震レベルとして Level 1 を、大地震レベルとして Level 2 を、想定外地震レベルとして Level 3 を以下のように設定する。

<b>Level 1</b> : BCJ-L1(Max:233.3gal,28.6kine)
<b>Level 2</b> : BCJ-L2(Max:355.7gal,53.4kine)
<b>Level 3</b> : BCJ-L2 の 1.5 倍(Max:533.6gal,80.1kine)

## 2.6 解析手法

本デバイスを用いた多質点系の解析モデルを図-7に示す。

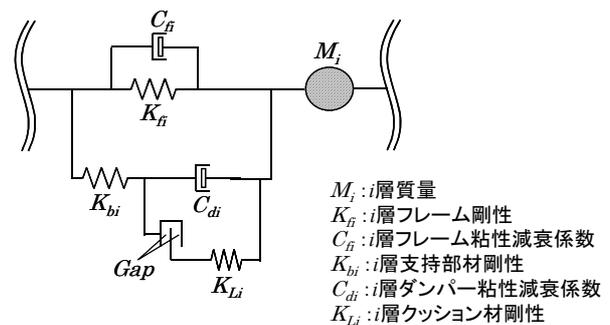


図-7 多質点系の解析モデル

運動方程式は、

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C_f]\{\dot{x}\} + [K_f]\{x\} = -[M]\{\ddot{x}_0\} - \{F\} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで $\{F\}$ はダンパー部分の抵抗力を表している。 $\ddot{x}_0$ は地動加速度を表す。

## 3. 比較対象建物ケース

本設計法の有効性を示すため、以下の5ケースを比較対象建物ケースとする。

- (A) 基本モデル(フレームのみ)
- (B) 基本モデル+全層にダンパー設置
- (C) ソフトストーリーモデル+ダンパー設置
- (D) ソフトストーリーモデル+リミッター設置(Gap :  $\mu=1$ )
- (E) ソフトストーリーモデル+リミッター設置(Gap :  $\mu=0.6$ )

(A)は、建物フレームのみのケースである。

(B)は、建物フレームに全層同量のダンパーを設置するケースで、Level 2 で全層の変形が塑性率 1 以下となることを目標とし、各層のダンパーの粘性減衰係数を  $C_d=3450\text{kNs/m} \times 12$  層、建物への付加減衰にして 1%と設定する。

(C)は、建物フレームの 1 層をソフトストーリーとして、この 1 層部分にのみダンパーを設置するケースで、Level 2 で 1 層を含む全層の変形が塑性率 1 以下となることを目標とし、1 層部分のダンパーの粘性減衰係数を  $C_d=24210\text{kNs/m}$ 、建物への付加減衰にして 15%と設定する。

(D,E)は、ダンパー設置である(C)にさらにリミッターを併設することで Level 3 での安全性確保を目標とし、Gap を 2 通りに変化させたケースである。

## 4. 解析結果

### 4.1 最大応答値比較

各ケースにおける最大応答値を比較する。表-1 に得られた応答レベルをまとめる。

#### (1) Level 1 に対する応答

Level 1 における最大応答値を図-8 に示す。

(A)基本モデル(フレームのみ)、(B)基本モデル+全層ダンパー設置の場合、塑性率約 0.4 程度の変形が生じている。

これに対し、(C~E)ソフトストーリーモデルの場合、1 層の変形は塑性率 0.3 以下であり、上層部の変形も基本モデルの 1/2 以下で、6 層以上では塑性率 0.1 でひび割れも生じない。また、応答加速度に関しても(B)基本モデル+全層ダンパー設置の 7 割程度と小さくなっている。

#### (2) Level 2 に対する応答

Level 2 における最大応答値を図-9 に示す。

(A)基本モデル(フレームのみ)では、塑性率 1.5 程度の変形が生じてしまう。(B)基本モデル+全層ダンパー設置では、ダンパーのエネルギー吸収により全層で変形が塑性率 1 以下に抑えられる。

これに対し、(C)ソフトストーリーモデル+ダンパー設置では、1 層の変形が塑性率 1 以下で、さらに、2 層以上は塑性率 0.5 程度の変形となり、(B)基本モデル+全層ダンパー設置の場合の 1/2 に低減できる。また、応答加速度も(B)基本モデル+全層ダンパー設置の 1/2 程度となる。(E)ソフトストーリーモデル+リミッター設置(Gap :  $\mu=0.6$ )の場合、リミッターの作動により、1 層の変形が 10mm 程度低減される。またこの時、ダンパーの粘性減衰係数は、(B)基本モデル+全層ダンパー設置の場合の 12 層分の総和  $C_d=41400\text{kNs/m}$  に比べて、(C~E)ソフトストーリーモデルの場合の 1 層のみでは  $C_d=24210\text{kNs/m}$  と 4 割程少なくなっており、ソフトストーリーモデルとした場合の方が効率的である。

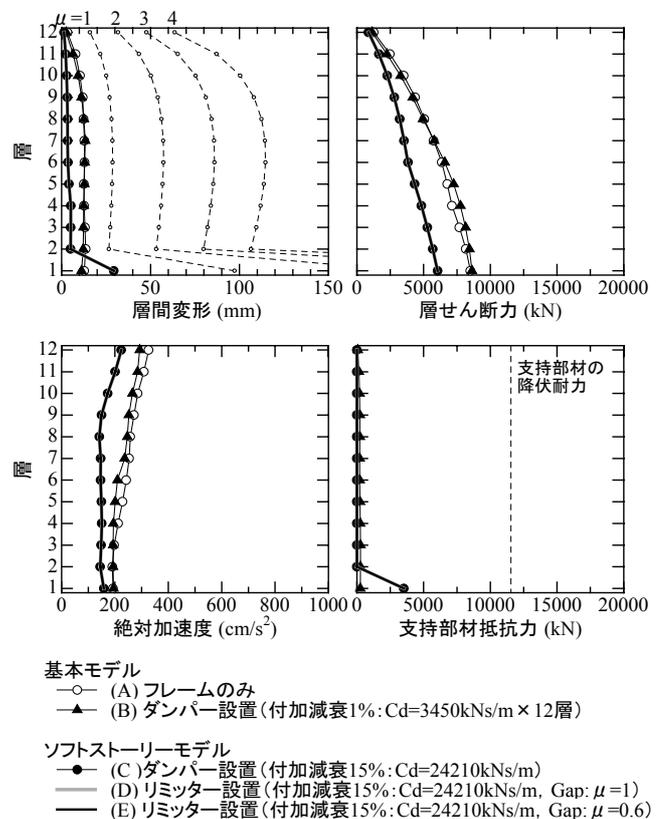


図-8 最大応答値比較 (Level 1)

(3) Level 3 に対する応答

Level 3 における最大応答値を図-10 に示す。

(A)基本モデル(フレームのみ)では、塑性率 3 にまで変形が進んでしまう。(B)基本モデル+全層ダンパー設置の場合、ダンパーのエネルギー吸収により全層で塑性率 2 に変形が抑えられる。

これに対し、(C)ソフトストーリーモデル+ダンパー設置では、1 層の変形が塑性率 1.4 (層間変形角 1/50) 程度の大きな変形が生じてしまうが、2 層以上は塑性率 1 以下となっている。応答加速度に関しても(B)基本モデル+全層ダンパー設置の 80%と小さい。(D)ソフトストーリーモデル+

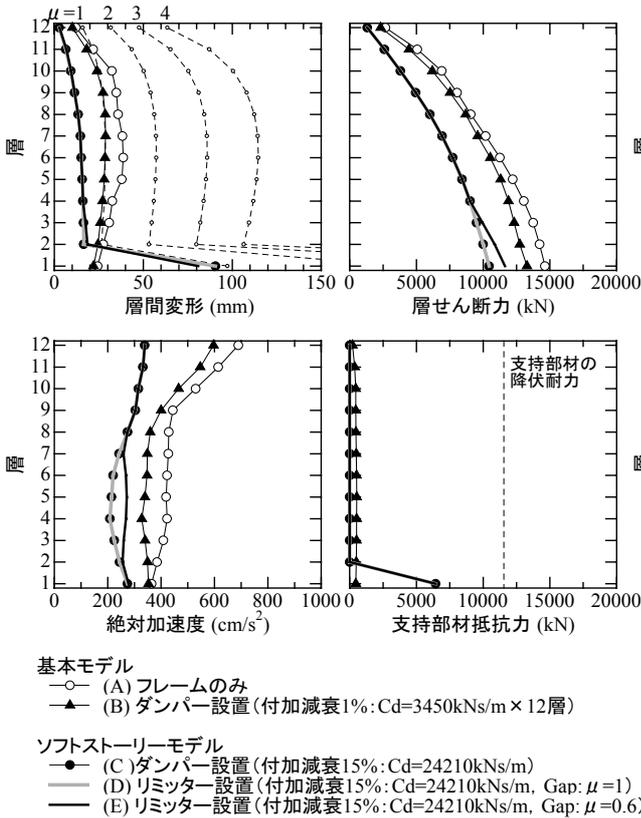


図-9 最大応答値比較 (Level 2)

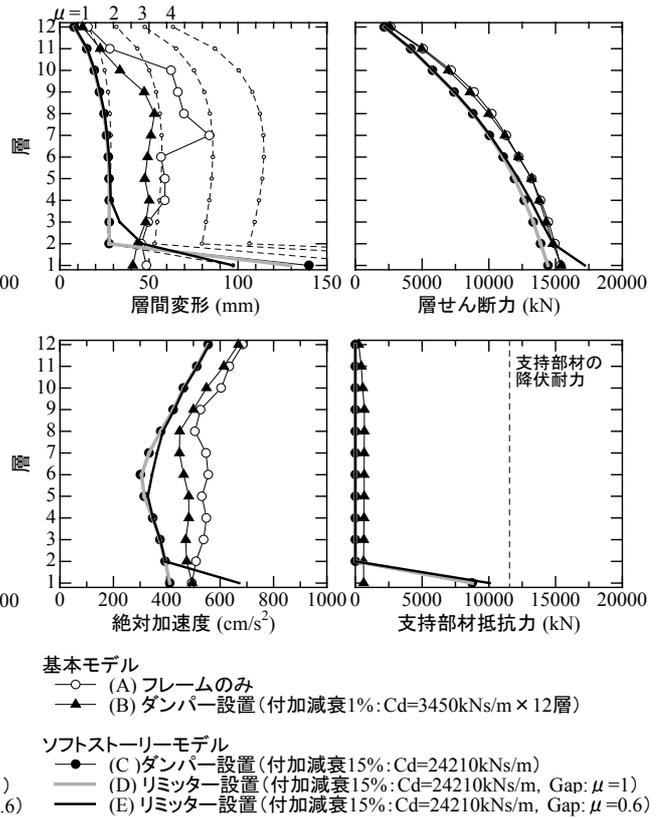


図-10 最大応答値比較 (Level 3)

表-1 応答レベル

μ : 塑性率

	Level 1 (中地震)	Level 2 (大地震)	Level 3 (想定外地震)
(A)基本モデル (フレームのみ)	全層 : μ ≤ 0.5	全層 : μ ≤ 1.5	全層 : μ ≤ 3
(B)基本モデル +全層ダンパー設置	全層 : μ ≤ 0.5	全層 : μ ≤ 1	全層 : μ ≤ 2
(C)ソフトストーリーモデル +ダンパー設置	1層 : μ ≤ 0.3 2層以上 : μ ≤ 0.2 加速度 : (B)の 70%	1層 : μ ≤ 1 2層以上 : μ ≤ 0.5 加速度 : (B)の 50%	1層 : μ ≤ 1.5 2層以上 : μ ≤ 1 加速度 : (B)の 80%
(D)ソフトストーリーモデル +リミッター設置 (Gap : μ=1)	(C)と同じ (リミッター作動しない)	(C)と同じ (リミッター作動しない)	1層 : μ ≤ 1.4 2層以上 : μ ≤ 1 加速度 : (B)の 80%
(E)ソフトストーリーモデル +リミッター設置 (Gap : μ=0.6)	(C)と同じ (リミッター作動しない)	1層 : μ ≤ 1 2層以上 : μ ≤ 0.5 加速度 : (B)の 50%	1層 : μ ≤ 1 2,3層 : μ ≤ 1.5 4層以上 : μ ≤ 1 加速度 : (B)と同程度

リミッター設置(Gap:  $\mu=1$ )の場合、1層の変形が10mm程抑えられ、リミッターがソフトストーリーのセーフティーとして有効に作用している。(E)ソフトストーリーモデル+リミッター設置(Gap:  $\mu=0.6$ )の場合、リミッターにより1層の変形が塑性率1(層間変形角1/70)以下に抑えられ、過大な変形を防止できている。ただし、2層と3層では塑性率1.5程度と変形がやや増加するが、(B)基本モデル+全層ダンパー設置の場合と比べれば局所的であり、その変形も小さい。また、リミッターの作動により応答加速度が増加しているが、クッション材の効果によりその値は過大なものでなく(B)基本モデル+全層ダンパー設置の場合と同程度である。さらに、支持部材抵抗力に関しても降伏値以下に収まっている。

#### 4.2 応答エネルギー

各ケースにおけるエネルギー消費性状を確認する。一例として、Level 3における消費エネルギーを図-11に示す。

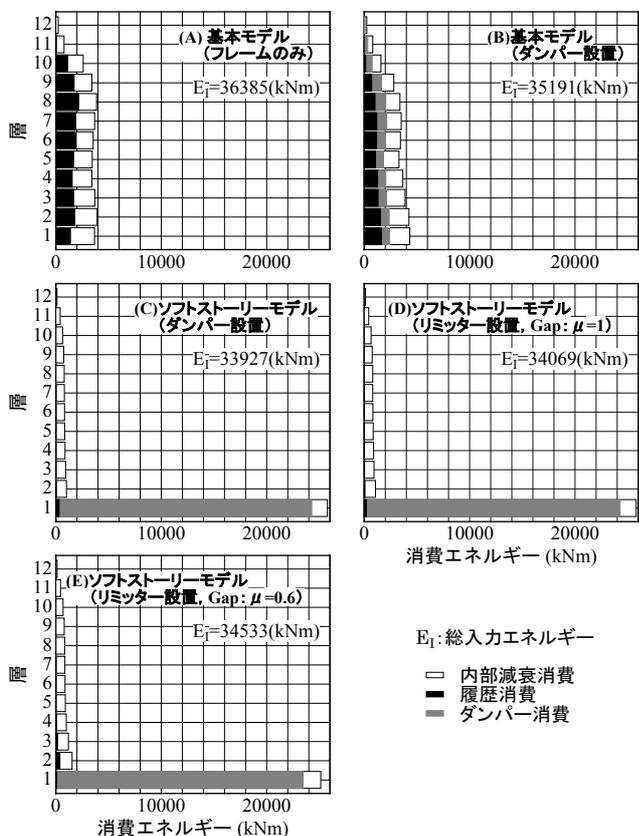


図-11 エネルギー消費 (Level 3)

各ケースで総入力エネルギーに大きな違いは見られない。(B)基本モデル+全層ダンパー設置では全層でほぼ等しくエネルギー吸収しており、建物の履歴減衰分がダンパー消費よりも大きくなっている。(C~E)ソフトストーリーモデルでは、ソフトストーリーが全体の75%のエネルギーを消費し、ダンパー消費分がその内の90%であり、建物の履歴減衰分はほとんどなく建物への損傷を低減できている。(E)ソフトストーリーモデル+リミッター設置(Gap:  $\mu=0.6$ )では、リミッターの作動により(C)ソフトストーリーモデル+ダンパー設置に比べて変形が大きく低減されているにも関わらず、ダンパーは同程度のエネルギーを消費することができている。

#### 5. まとめ

ソフトストーリーに制振デバイスを設置して建物損傷を制御する設計法の基本的考え方を提案し、その応答性状を検証した。

ソフトストーリーモデル+リミッター設置とすることで、中地震・大地震時に、基本モデル+全層ダンパー設置とした場合よりも応答変形および応答加速度を大きく低減することができた。さらに想定外地震時には、リミッターによりソフトストーリーの過大な変形を防止しつつその他の層の応答変形を低減できた。以上より、本設計法の有効性を確認する1例を示すことができた。今後、ソフトストーリーの設定方法が及ぼす影響について検討が必要であると思われる。

#### 参考文献

- 1) 馬華, 鈴木計夫, 文雪峰: 下層部にソフト・ストーリーを有する多層建築物の必要エネルギー吸収能力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.257~262, 1996.7
- 2) 早部安弘, 渡邊祐一: ソフトファーストストーリー制振構造による応答制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.1027~1028, 2005.9
- 3) 佐藤朋成, 堀則男, 井上範夫: RC造建物に硬化型復元力特性を有するエネルギー吸収デバイスを設置した場合の有効性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.997~1002, 2005.7