

# 論文 ソフトストーリーを活用して地震時損傷を制御する RC 建物の設計手法

本間 誠<sup>\*1</sup>・堀 則男<sup>\*2</sup>・井上 範夫<sup>\*3</sup>

**要旨:** ピロティ建築物の1階にオイルダンパー及び変形制御機構を設置してソフトストーリーとし、これを積極的に活用することにより、建物応答が目標値以下となるようなシステムを提案し、その設計手法を示した。さらに、提案するソフトストーリー建物が構造として成立する可能性を示した。本論文で提案するソフトストーリー建物は、一般的な耐震建物と比べて2層以上の応答を大きく低減することができる。また、ソフトストーリーの応答変形がある程度以上となる場合は、フェールセーフとしてリミッターが作動して損傷を2層以上に分散させることにより、建物を全体抵抗機構に変換させて安全性を保つ。

**キーワード:** ピロティ被害, ソフトストーリー, オイルダンパー, リミッター, 設計手法

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震で多く見られた被害モードの一つとして、ピロティ建築物における1階の被害がある。それ以降、ピロティ構造は避けるべき構造形式と判断されてきた。しかしながら、ピロティ構造は1階に広いスペースを設けることにより駐車場や店舗を設置できるため、社会的に大きな需要がある。ピロティ構造の可能性を求めて、関連する研究<sup>(例えば1)2)</sup>も数多く行われている。

ピロティ建築物における1階の被害を低減する方法の一つとして、1階の剛性及び耐力を大きくする方法が挙げられるが、実際には困難である場合が多い。それに対し、変形をピロティに集中させることで積極的にエネルギー吸収を行う設計法が提案されている。鈴木ら<sup>3)</sup>は、変形能力の大きい部材をピロティに用いることで、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

ことを示唆している。一方、筆者ら<sup>4)</sup>はこれまで、オイルダンパーと変形制御機構を併設した制振デバイスを提案してきた。この制振デバイスをピロティ建築物の1階に設置することにより、1階で集中的にエネルギー吸収を行うと共に、変形制御機構により建物の安全性を確保するシステムを提案する(図-1)。本論文では制振デバイスを設置した1階をソフトストーリーと定義し、ソフトストーリーを有する建物(以下、ソフトストーリー建物)に関する検討を行い、その可能性を探った。

## 2. ソフトストーリー建物の基本的考え方

本論文で提案するソフトストーリー建物は、1階の階高を大きくとり、さらに剛性・耐力を低く設定して変形を集中させることによって、地震時のエネルギーを効率的に制振デバイスに吸収させる構造を有する。制振デバイスの設置箇所は1階の一部の構面のみとなるため、全構面に連層耐震壁を有する一般的な耐震建物と比較して1階の平面の自由度を大きくできるという利点がある。また、長周期化による応答加速度および応答層せん断力の低減も期待できる。

ソフトストーリーでは「鉛直荷重を支える部材及び復元材」と「エネルギー吸収材」を明確に分離する。このうち「鉛直荷重を支える部材及び復元材」の機能は柱部材が受け持ち、財産価値が損なわれるような残留変形の発生を防ぐ。柱部材は大変形に追従できるように靱性に富んだ設計とする。「エネルギー吸収材」としてはオイルダンパーを設置する。オイルダンパーを用いる利点としては、周期があまり変化しないため応答加速度が増大しないこと、エネルギー吸収が層間変形の二乗に比例す

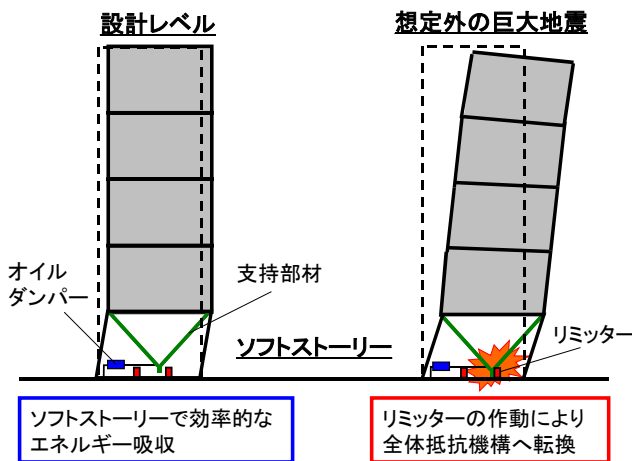


図-1 提案するシステムの概念

\*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 助教 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)

るため、大変形を生じるソフトストーリーに設置すれば効率的であることなどが挙げられる。さらに、想定外の巨大地震においては、建物全体の安全性を担保するために、フェールセーフとして1層に変形制御機構（以下、リミッター）を設置する。リミッターは過大な入力に対して作動し、1層から2層以上に損傷を分散させることによって、建物の崩壊機構を層崩壊型から全層崩壊型に転換させる。

### 3. 設計条件及び解析条件

#### 3.1 建物モデル

##### (1) 基準モデル

本論文で想定した建物は11層鉄筋コンクリート構造の共同住宅であり、この建物を基準モデルとして設定した。長辺方向は純ラーメン構造であり、短辺方向には全層に渡り耐震壁が設置されている。伏図を図-2に示す。なお、柱寸法は800mm×800mmと想定した。検討は短辺方向についてのみ行う。基準モデルの各パラメータを決定するためには、以下の手順を踏んだ。

はじめに、純ラーメンの11層鉄筋コンクリート構造建物を設計する。各層質量は388.8ton、階高は各層3.5mとした。初期剛性は11層の値が1層の値に対して1/3となる台形分布形になるように設定し、建物の1次固有周期が設計用1次固有周期( $T=0.77s$ )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 $A_i$ 分布の層せん断力とした。

基準モデルは、この純ラーメン構造建物の各層に耐震壁が設置されたと考え、各層の剛性及び耐力をそれぞれ2倍として設定した。解析においてはせん断多質点系を仮定し、荷重変形関係を図-4のように設定した。なお、図-4(a)では、初期剛性 $K_0$ 、降伏時の割線剛性 $K_Y=0.3K_0$ 、降伏耐力 $Q_Y$ 、ひび割れ耐力 $Q_C=Q_Y/3$ 、降伏変形 $\delta_Y$ 、ひび割れ変形 $\delta_C$ とする。復元力特性はTakedaモデル型とした。除荷時剛性は、基準モデルが純ラーメン構造より原点指向型に近づくことを考慮して $K_Y/\mu^{0.8}$  ( $\mu$ : 塑性率)とし、減衰定数は瞬間剛性比例で3%とした。なお基準モデルの1次固有周期は $T=0.55s$ である。

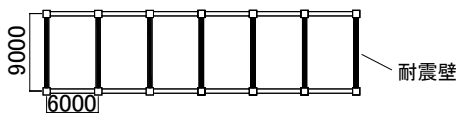


図-2 基準階伏図(単位:mm)

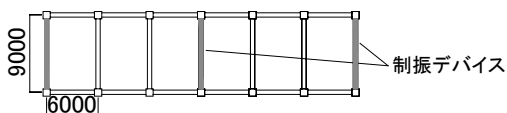
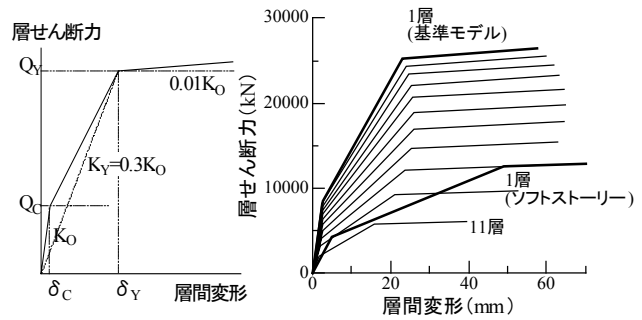


図-3 ソフトストーリー伏図(単位:mm)



(a) 荷重変形関係の設定 (b) 各層の荷重変形関係

図-4 荷重変形関係

##### (2) ソフトストーリーモデル

ソフトストーリーモデルは基準モデルの1層のみを変化させて作成する。まず1層の階高を5.0mとして耐震壁を設置せず、代わりに制振デバイスを3箇所を設置してソフトストーリーとした。伏図を図-3に示す。各構面のうち半分以上は壁のない空間となるため、基準モデルより自由度の高い平面となっている。1層の荷重変形関係は、降伏耐力はベースシア係数 $C_B=0.3$ に対応する層せん断力とし、降伏変形は変形角1/100に相当する値として図-4(b)のように設定した。なお、1層は純ラーメン構造に近づくため、除荷時剛性は $K_Y/\mu^{0.5}$ としている。2層以上については、基準モデルと同様の復元力特性とした。減衰定数は基準モデルと同様に瞬間剛性比例で3%とする。なおソフトストーリーモデルの1次固有周期は $T=0.66s$ である。

#### 3.2 ソフトストーリーの概要

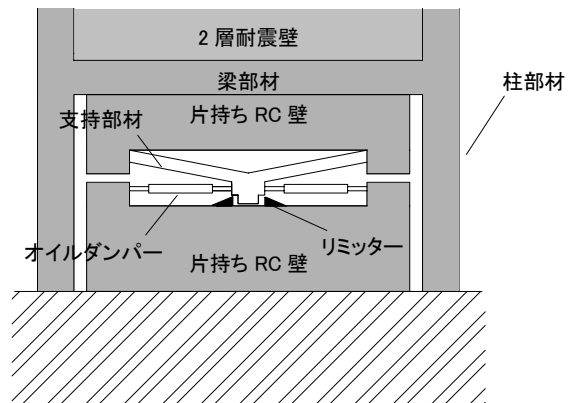


図-5 ソフトストーリーの概要

##### (1) 柱部材・片持ちRC壁

ソフトストーリーに用いる柱部材は、繊維補強コンクリートを用いる、あるいは帯筋を高密度化するなどして靱性を大きくし、少なくとも変形角1/30程度まで軸力を保持し靱性を保つと仮定する。制振デバイスに用いる片持ちRC壁は、高強度コンクリート、鉄骨鉄筋コンクリート等を使用し、オイルダンパーやリミッターから伝達

される力に十分抵抗できると考える。

(2) 支持部材・オイルダンパー

ダンパーの支持部材は、H-250×250×9×14のH型鋼を用い、図-5のようなV型に設置する。支持部材の水平剛性は層全体で3500000kN/mとし、支持部材は降伏及び座屈しないものと仮定する。オイルダンパーはリリーフ機構を有しないものとし、図-5のように支持部材及び片持ちRC壁を介して設置する。

(3) リミッター

リミッターは基礎梁上にある片持ちRC壁上に設置され、支持部材との接触により変形を抑制する。リミッターと支持部材の接触時の衝撃を緩和するため、ゴム製のクッション材をリミッター表面に設置する。クッション材の復元力特性は既往の圧縮実験結果に基づき、図-6に示すように設定した。なお、本論文では支持部材とクッション材のクリアランスをGAPと称する。

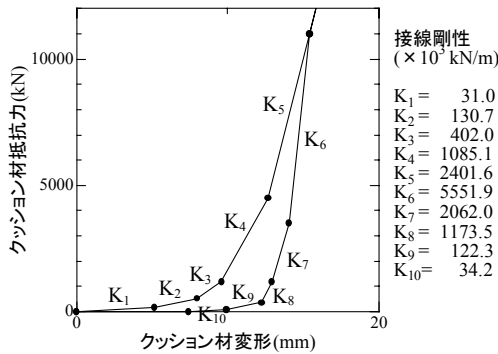


図-6 クッション材の荷重変形関係

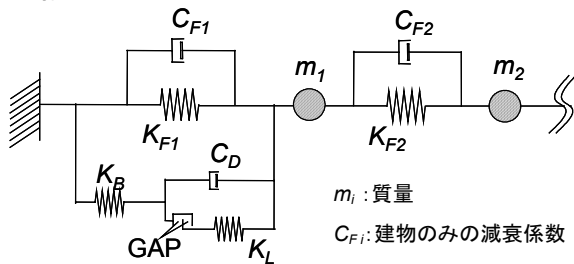
3.3 入力地震動

入力地震動として用いた2波を以下に示す。

- ・1995年兵庫県南部地震 神戸海洋気象台NS記録 (以下神戸波)
- ・1968年十勝沖地震 八戸港湾EW記録 (以下八戸波)

地震動の強さは両波ともに50kine及び75kineの2ケースずつとする。

3.4 解析手法<sup>4)</sup>



K<sub>B</sub>: 支持部材剛性 C<sub>D</sub>: ダンパー減衰係数 K<sub>L</sub>: リミッター剛性

図-7 ソフトストーリー建物の解析モデル

ソフトストーリー建物の解析モデルを図-7に示す。

運動方程式は以下のように表せる。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C_F]\{\dot{X}\} + [K_F]\{X\} = -[M]\{1\}\ddot{X}_0 - \{F\} \quad (1)$$

ここで{F}は制振デバイス部分の抵抗力を、 $\ddot{X}_0$ は地動加速度を表す。

4. ダンパー及びリミッターの設計<sup>4)</sup>

4.1 設計の方針

本論文では、地震動の入力エネルギーとダンパーの消費エネルギーの釣合に基づいて必要ダンパー量の算定を、最大変形時の力の釣合よりリミッターの設計を行う。必要ダンパー量の算定においては、最大変形時のダンパーの履歴ループを関連付けて検討を行っている。ソフトストーリー建物の設計目標を4.2に、ダンパー及びリミッターの具体的な設計手法を4.3~4.7に示す。

なお、Step1~3においては、設置するダンパー量をC<sub>D</sub>=800kNs/mと仮定して応答解析を行っている。この値は、弾性剛性に対してダンパー減衰定数2%程度、50kine目標変形時(4.2参照)の等価剛性に対して12%程度に相当する。

4.2 ソフトストーリー建物の設計目標

設計レベルの地震動(50kine)では軽微な損傷を目標とし、ダンパーのみで設計を行う。設計目標は1層で層間変形100mm(μ=2.0に相当)かつ2層以上でμ=0.5程度とする。

想定外の巨大地震(75kine)では建物が倒壊・崩壊しないことを目標とし、50kineで設計したダンパーに加えてリミッターで設計を行う。設計目標は1層で変形角R=1/35かつ2層以上でμ=1.0程度とする。

4.3 Step1-入力エネルギーの算定

入力エネルギーE<sub>I</sub>は、高次モードの影響を評価するために、等価線形多質点系モデルを用いた線形応答解析により計算した。各層剛性の値は50kine目標変形時の等価剛性とした。表-1に、入力エネルギーE<sub>I</sub>の算定結果を示す。

表-1 入力エネルギー

入力エネルギー	神戸波	八戸波
算定値(kNm)	5808	8671

4.4 Step2-ダンパー消費エネルギーの算定

Step2では、ダンパー消費分のエネルギーE<sub>D</sub>と入力エネルギーE<sub>I</sub>の比を関係付けることにより、Step1で算定した入力エネルギーE<sub>I</sub>からE<sub>D</sub>を算定する。ここでは、既往の研究<sup>4)</sup>より導き出された関係式に基づいて消費エネルギー比 $\sqrt{E_D/E_I}$ を求める。

弾性時のダンパー減衰定数h<sub>D</sub>、建物のみの減衰定数h<sub>F</sub>、塑性率μをパラメータとした消費エネルギー比の関係式を式(2)に示す。

$$\sqrt{E_D/E_I} = 3.95h_D - 2.14h_F - 0.07\mu + 0.739 \quad (2)$$

なお式(2)では、各層に均等にダンパーが設置された、一般的な剛性分布を持つ建物の弾塑性応答を想定している。しかし本論文で検討しているソフトストーリー建物においては、2層以上の応答が非常に小さく、1層はほぼオイルダンパーの減衰消費と柱の履歴消費でエネルギーが吸収されると考えられる。建物のみ減衰定数  $h_F$  がエネルギー消費に寄与する割合は小さいと考えられるので、 $h_F=0\%$ とする。 $h_D=2\%$ ,  $h_F=0\%$ ,  $\mu=2.0$ を式(2)に代入すると、 $E_D=0.460E_I$ と求められる。

#### 4.5 Step3—等価繰り返し回数の算定

等価繰り返し回数とは最大応答変形を仮定したループがダンパー消費エネルギーをすべて消費するのに必要とするサイクル数を等価的に表したものである。計算方法を以下に示す。

初めに、ダンパーの履歴ループ形状が図-8のような楕円形であると仮定し、1サイクルあたりの最大消費エネルギー  $\Delta E_D$ を式(3)により求める。

$$\Delta E_D = \pi \delta_{MAX} C_D \dot{\delta}_{MAX} \quad (3)$$

$\delta_{MAX}$  : 最大応答変形  
 $\dot{\delta}_{MAX}$  : 最大応答速度  
 $C_D$  : ダンパー減衰係数

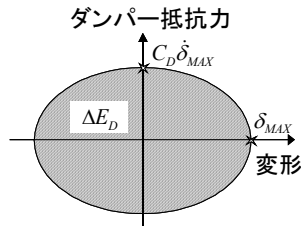


図-8 最大消費エネルギー

式(3)より、等価繰り返し回数  $n_C$  は等価周期  $T_{EQ}$  を用いて式(4)で表される。

$$n_C = \frac{E_D}{\Delta E_D} = \frac{E_D}{\pi \cdot C_D \cdot 2\pi/T_{EQ} \cdot \delta_{MAX}^2} \quad (4)$$

次に、弾塑性応答解析より等価繰り返し回数を算出する。等価繰り返し回数の算出においては、簡便のために出来るだけ質点数の小さいモデルを用いることが望ましい。ソフトストーリー建物では、1層と2層以上の特性の差を表現するのに適した2質点系モデルを用いる。2質点系モデルは以下のような手順で作成した。

- (1) 1層は弾塑性とし、荷重変形関係及び復元力特性を11層ソフトストーリーモデルの1層と等しくする。
- (2) 2層は等価線形として扱う。2質点系モデルの1次等価周期・1次等価質量（この時の1層剛性は  $\mu=2.0$  の時の等価剛性とした）が11層ソフトストーリーモデルと等しくなるように、2層の剛性及び2つの質点の質量を決定する。ただし2質点系モデルの総質量をソフトストーリーモデルの総質量と概ね等しくする。上記のような手順で2質点系モデルを作成し、弾塑性応答解析により等価繰り返し回数を算定した。繰り返し回数

数は0.5刻みとし、端数を切り捨てて値を丸めた。作成した2質点系モデルの諸元を図-9に、等価繰り返し回数の算定結果を表-2に示す。なお、作成された2質点系モデルの1層の履歴ループ形状が、11層ソフトストーリーモデルの1層と近い形状を示すことを確認した。

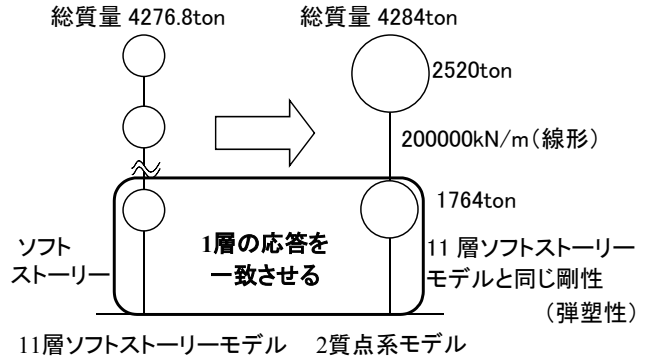


図-9 2質点系モデルの作成

表-2 等価繰り返し回数

等価繰り返し回数	神戸波	八戸波
算定値	2.0	3.0

#### 4.6 Step4—1層必要ダンパー量の算定

最後に、1層の必要ダンパー量を算定する。必要ダンパー量を  $C_D^*$ 、ダンパー消費エネルギーを  $E_D$ 、1サイクルあたりの最大消費エネルギーを  $\Delta E_D$ 、最大変形を  $\delta_{MAX}$  とおくと、

$$E_D = n_C \cdot \Delta E_D = n_C \cdot \pi \cdot C_D^* \cdot (2\pi/T_{EQ}) \cdot \delta_{MAX}^2 \quad (5)$$

$\delta_{MAX} = \mu \delta_y$  ( $\delta_y$ : 1層部分の降伏変形)であるから、必要ダンパー量  $C_D^*$  は、

$$C_D^* = \frac{E_D}{n_C \cdot \pi \cdot (2\pi/T_{EQ}) \cdot \mu^2 \delta_y^2} \quad (6)$$

式(6)より、地震動ごとに必要ダンパー量  $C_D^*$  を計算できる。求められる必要ダンパー量の値を表-3に示す。

表-3 必要ダンパー量

必要ダンパー量	神戸波	八戸波
算定値(kNs/m)	8798	8756

#### 4.7 Step5—リミッターのGAPの算定

GAPの値は、1層の層間変形からクッション材及び支持部材の変形を減じた値として式(7)で示される。

$$GAP = \delta_y \cdot \mu - (\delta_{CN} + \delta_B) \quad (7)$$

ただし、 $\delta_{CN}$ : クッション材変形、 $\delta_B$ : 支持部材変形

クッション材変形  $\delta_{CN}$  は、クッション材抵抗力  $Q_{CN}$  が与えられれば、クッション材の載荷時の荷重変形関係に基づいて図-10のように求められる。クッション材は変形が進むと勾配が非常に大きくなるため、クッション材

抵抗力（縦軸）の値に多少の誤差があっても、クッション材変形（横軸）の値を精度良く求められることがこの手法の利点である。

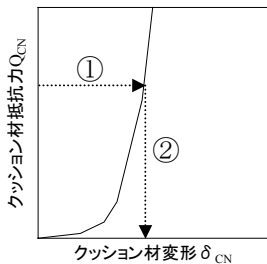


図-10 クッション材変形の算出

ここでは、 $Q_{CN}$ は繰り返し計算より1層降伏耐力の90%とする。支持部材変形 $\delta_B$ は、支持部材抵抗力がクッション材抵抗力と等しいと仮定しクッション材抵抗力を支持部材剛性で除して求める。

本論文では1層の目標塑性率は $\mu=2.0$ であるから、GAPの値を式(7)に基づいて124mmと設定する。

## 5. 地震応答解析

### 5.1 比較対象建物ケース

本システムの有効性及び本設計手法の妥当性を示すため、50kine入力時では以下に示す(a), (b)の2ケースを、75kine入力時では(a)~(c)の3ケースを比較対象建物ケースとする。

(a) 基準モデル

(b) 4.3~4.6で設計したダンパーを1層に設置したソフトストーリーモデル（以下、ソフトストーリーモデル（ダンパーのみ設置））

(c) (b)にさらに4.7で設定したGAPを持つリミッターを1層に設置したケース（以下、ソフトストーリーモデル（ダンパー+リミッター設置））

### 5.2 最大応答値

#### (1) 50kine 入力時

50kine入力時における、各地震動に対する最大応答値を図-11~13に示す。(a)では、塑性率1.0~2.0程度の変形が生じてしまう。(b)では、4.6で示した量のダンパーを設置することで、1層で95mm~105mm程度、2層以上で塑性率0.5程度の変形となり、それぞれの地震動において応答変形を概ね目標値程度に抑えられることを確認した。また、絶対加速度および応答層せん断力は、(a)と比較してそれぞれ60%程度に低減される。(b)におけるダンパーの抵抗力は最大で約900kN/本であった。また、(b)において1層の残留変形は最大で7mm程度であることを確認しており、50kineの設計目標「軽微な損傷」を満たしていると考えられる。

ここで、4.3~4.5で算定した各パラメータについての検証を行う。1層の応答変形がちょうど目標変形となる

ようにダンパー量を調整して応答解析を行い得られた値（以下、基準値）と4.3~4.5で算定した値（以下、算定値）を比較したところ、両者の比（算定値/基準値）は表-4のようになった。各Stepにおける算定の精度をより高めていくことは今後の課題である。

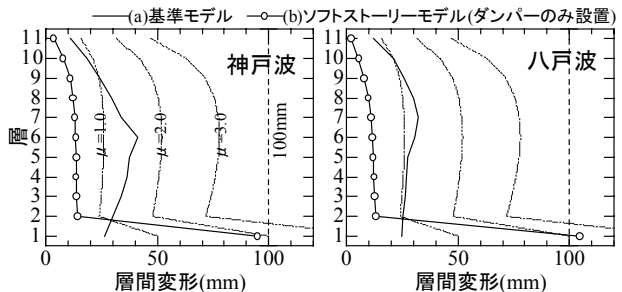


図-11 最大応答変形(50kine)

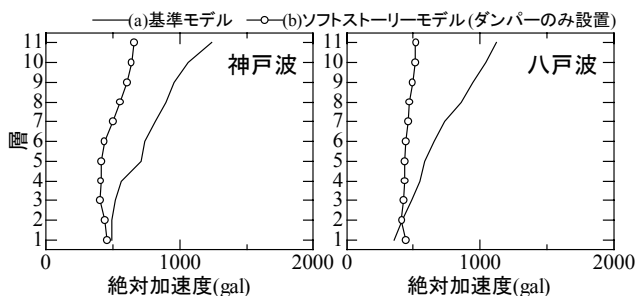


図-12 最大応答加速度(50kine)

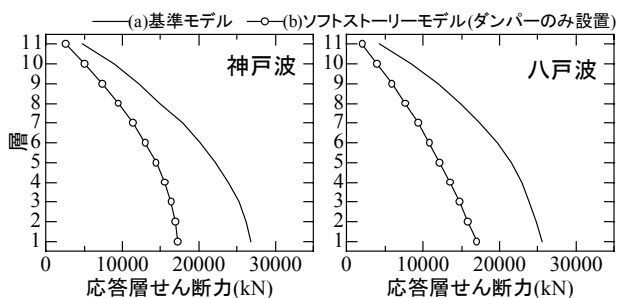


図-13 最大応答層せん断力(50kine)

表-4 算定値と基準値の比

算定値/基準値	$E_1$ (Step1)	$E_D/E_1$ (Step2)	$n_c$ (Step3)
神戸波	0.86	1.05	0.78
八戸波	0.86	0.86	0.83

#### (2) 75kine 入力時

75kine入力時における、各地震動に対する最大応答値を図-14~16に示す。(a)では、塑性率3.0程度にまで変形が進んでしまう。(b)では、1層の変形が目標値（変形角1/35）を大きく超えてしまっているのがわかる。(c)では、1層でリミッターが作動することにより、それぞれの地震動において1層変形を変形角1/35程度以下に抑えられることを確認した。リミッターの作動により損傷が分散するため、2層以上で変形がやや増加するが、目標値である $\mu=1.0$ 未満となっている。また下層部で絶対加速度が増加するが、クッション材の効果によりその値は過大なものではなく、最大でも(a)の頂部の値と同程

度である。応答層せん断力も(b)と比べ増加するが、その値は(a)と同程度以下である。なお、制振デバイスの取り付け付いた柱が圧縮側で受ける最大の軸力は約 16100kN/本であり、この値を柱の断面積で除すと、圧縮応力度は約 25N/mm<sup>2</sup>と求められる。(c)におけるダンパーの抵抗力は最大で約 1100kN/本、リミッターの抵抗力は最大で約 4600kN/箇所であった。

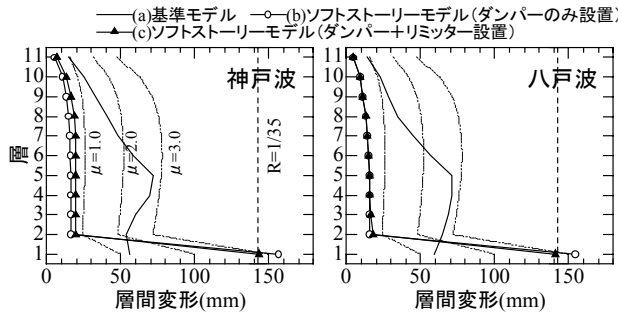


図-14 最大応答変形(75kine)

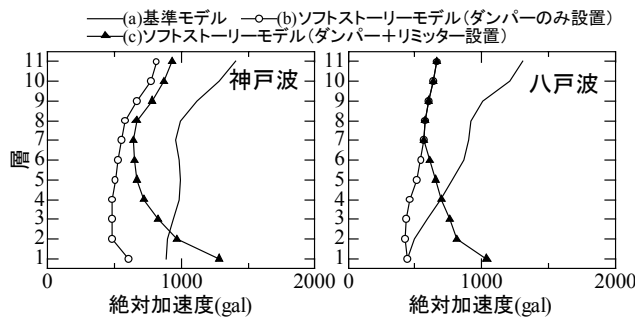


図-15 最大応答加速度(75kine)

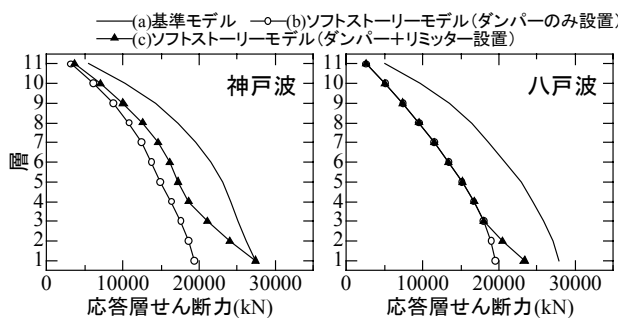


図-16 最大応答層せん断力(75kine)

### 5.3 消費エネルギー

各ケースに対するエネルギーの応答性状を確認する。一例として神戸波 75kine 入力時の消費エネルギーを図-17 に示す。(a)では、全層でエネルギー吸収が行われている。(b)では、ソフトストーリーで全体の約 85%のエネルギーを消費しており、ダンパー消費分はその内の 60%程度である。建物の履歴消費分は 1 層以外ではほとんど見られず、2 層以上の損傷を低減できている。(c)では、リミッターの作動により(b)と比べて変形が低減しているにも関わらず、ダンパーは同程度のエネルギーを吸収することが出来ている。

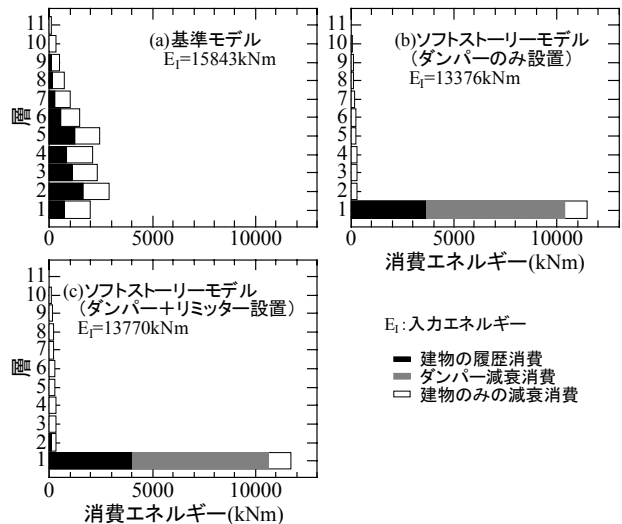


図-17 消費エネルギー・神戸波(75kine)

### 6. まとめ

ピロティ建築物の 1 階にオイルダンパー及び変形制御機構を設置してソフトストーリーとした。これを積極的に活用することにより、建物応答が目標値以下となるようなシステムを提案し、その設計手法を示した。ソフトストーリー建物では一般的な耐震建物と比べて 2 層以上の応答を大きく低減することができた。また、ソフトストーリーの応答変形がある程度以上となる場合は、リミッターの作動により損傷を 2 層以上に分散させ、システム全体の安全性を保つことが確認できた。以上より、提案したソフトストーリー建物が構造として成立する可能性を示した。

### 参考文献

- 1) 福山洋, 岩渕一徳: 空間の確保と損傷の防止を目的とした既存ピロティ建築物の地震応答制御, 日本建築学会構造系論文集, No.580, pp.105 - 112, 2004.6
- 2) 真田靖士, 壁谷澤寿海, 倉本洋, 福田俊文, 松本和行, 奈良岡誠也, 平田昌宏, 加藤敦, 小川信行: 耐震壁を有する鉄筋コンクリート造ピロティ建物の動的実験, 構造工学論文集, Vol.47B, pp.511 - 520, 2001.3
- 3) 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
- 4) 本間誠, 堀則男, 井上範夫: エネルギー応答に基づいた地震を受ける鉄筋コンクリート建物におけるダンパーと変形制御機構の設計, 日本建築学会構造系論文集, No.618, pp.49 - 56, 2007.8