

論文 耐力の低い層を持つ RC 建物のダンパーと変形制御機構の設計

本間 誠^{*1}・ファーティフ スッチュ^{*2}・堀 則男^{*3}・井上 範夫^{*4}

要旨：多層建物における耐力の低いソフトストーリーに、ダンパーと変形制御機構より構成される、硬化型復元力特性を持つ制振デバイスを設置し、ソフトストーリーの過大な変形を抑制する変形制御機構が作動することによって建物の応答分布形を良好な形状にすることを旨とする。また、等価線形化法に基づいて、各層の応答変形を目標値以内に収めるために必要なダンパー量の算定手法をエネルギー的な観点から提案する。

キーワード：エネルギー応答, 変形制御機構, 硬化型復元力特性, ソフトストーリー

1. はじめに

近年、制振構造への注目が高まっている中、筆者らは、新たな制振デバイスとして図-1に示すような硬化型復元力特性を有するエネルギー吸収デバイスを提案し、その有効性について検討を行ってきた^{[1][2]}。本デバイスは、川股によって考案されたもので、中小地震時にはエネルギー吸収デバイスとして用いたダンパー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（以下リミッターと呼ぶ）の作動により層間変形を抑え、建物およびダンパーの過大な損傷を防ぐことを目指している。このデバイスを使用すれば、剛性や耐力の低い層がある場合には、その層にリミッターが作用してアンバランスな応答を補正することができる。

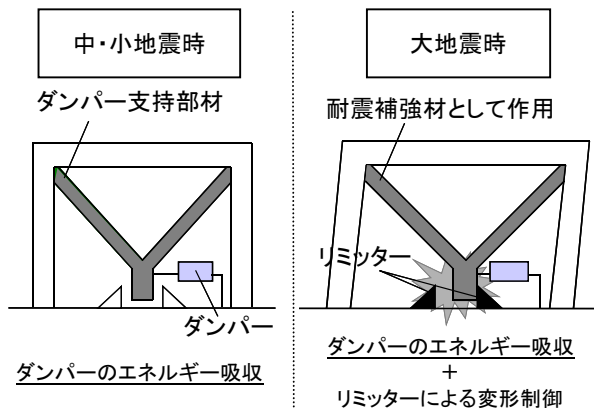


図-1 デバイスの概要

また、本研究では総入力エネルギーと最大変形時の履歴ループとを関連付けることにより必要ダンパー量の算定を行う。この場合には、最大応答変形時の履歴ループにより消費されるエネルギーと総入力エネルギーとの関連を論じる必要があるが^[3]、特に、対象建物が鉄筋コンクリート造で塑性状態となることを前提としているので、検討に当たり塑性時の剛性低下を考慮したエネルギーに関する等価線形の考え方を導入しているところに特徴がある。

具体的検討例としては、耐力の低い層を持つ11階建の鉄筋コンクリート造建物を設定し、この建物に大きな地震動が作用した際、硬化型復元力特性を持つ本デバイスが有効に働き応答変形分布を良好な形状にできることを示すとともに、ここで提案した方法により、目標とした応答層間変形以内に収めるために必要なダンパー量を簡便な方法で算定できることを示す。

2. 解析条件および解析手法

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。この建物は純ラーメンの11層鉄筋コンクリート構造である。1次固有周期は0.77s、各層質量は388.8tonと設定した。

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (正会員)
 *2 イスタンブール工科大学 建築学科 助手 工博 (元東北大学大学院)
 *3 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)
 *4 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)

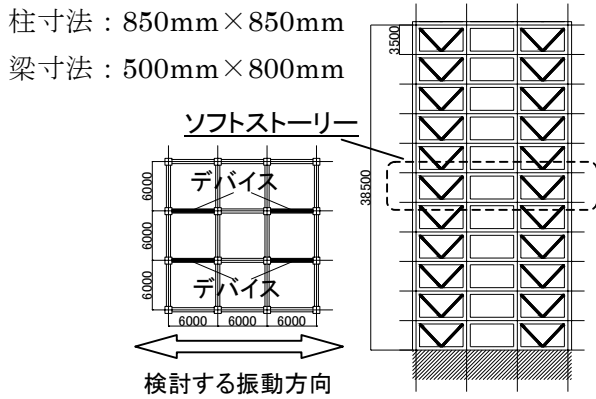
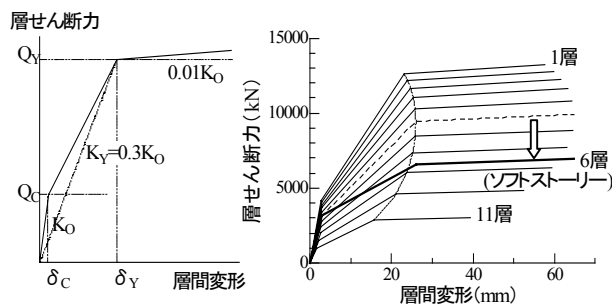


図-2 建物モデル(単位:mm)

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-3(a)のように設定した。各層の値を図-3(b)に示す。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(0.77s)となるような値とした。ま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、復元力特性は Takeda モデル型とした。図-3(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 $Q_C=1/3Q_Y$ 、降伏変形 δ_Y 、ひび割れ変形 δ_C とする。除荷時剛性は $K_Y/\sqrt{\mu}$ (μ : 塑性率)、減衰定数は瞬間剛性比例で3%とする。



(a) 荷重変形関係の設定 (b) 各層の荷重変形関係

図-3 荷重変形関係

(b) ソフトストーリーモデル(耐力の低い層を有するモデル)

本来は任意の層で耐力が低い建物を想定するが(不測の事態により局所的に耐力低下が生じた場合も含む)、ここでは6層を耐力の低いソフトストーリーとし、6層以外は基本モデルと同様の復元力特性とする。ソフトストーリーの復元力特性は、極端な例として、基本モデルに対

して降伏耐力のみを30%低下させて図-3(b)のように設定した。減衰定数は基本モデルと同様に瞬間剛性比例で3%とする。

2.2 等価周期及び周期低減係数

図-3のように降伏剛性を $K_Y=0.3K_0$ とすれば、等価周期 T_{EQ} と弾性周期 T_0 の関係は等価線形化法に基づいて $T_{EQ} = T_0 \sqrt{\mu/0.3}$ (μ : 塑性率) と表されるが、建物の等価周期が地震動卓越周期より長い場合には、実際の建物の振動周期は等価周期より短くなる傾向にあるため、本研究では等価周期 T_{EQ} に周期低減係数 R を乗じて取り扱う。周期低減係数 R は塑性率 μ の関数として定義することとし、 μ が増加すると R の値は小さくなると仮定する。なお、 R を考慮したときの等価剛性 K_{REQ} は初期剛性 K_0 及び等価剛性 K_{EQ} を用いて以下のように表される。

$$K_{REQ} = \frac{K_{EQ}}{R^2} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{0.3K_0}{\mu} \quad (1)$$

ここでは地震動の総エネルギー入力 E_I に着目し、弾性応答解析及び弾塑性応答解析によって各塑性率における E_I の速度換算値 V_E を求め、そこから R の関係式を推定していくこととする。なお E_I は各層の慣性力がなす仕事量の総和として求めた。図-4に、1978年宮城県沖地震 東北大学建設系1階NS記録に対する V_E を示す。なお、弾性応答解析では減衰定数10%、弾塑性応答解析では5%を用いた。また、弾塑性応答解析において塑性率は $\mu=1.0, 1.5, 2.0$ とした。(a)は弾性周期を横軸とした図であるが各スペクトルのずれが大きい。(b)では横軸を等価周期として表現したが、ピーク近傍ではややずれが生じていることが確認できる。ここで、 R と μ の関係を以下のように仮定する。

$$R = 1.0 - 0.1 \cdot \mu \quad (2)$$

(c)は等価周期に R を乗じたものであり、各スペクトルの形状はほぼ一致しているといえる。

表-1に、本検討で目標としている塑性率 $\mu=1.0$ に対応する R 及び各周期の値を示す。

表-1 周期低減係数 R 及び各周期

μ	R	弾性周期 T_0 (s)	等価周期 T_{EQ} (s)	$R \cdot T_{EQ}$ (s)
1.0	0.90	0.77	1.41	1.26

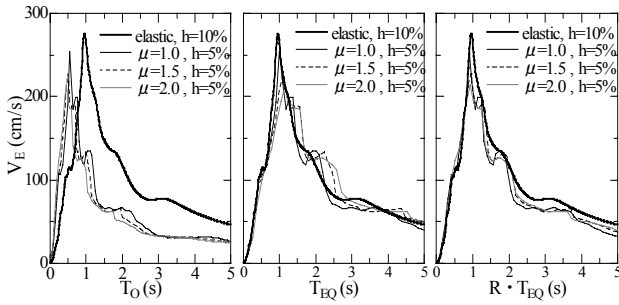


図-4 周期低減係数 R の評価

2.3 支持部材・ダンパー

ダンパーの支持部材は $250 \times 250 \times 9 \times 14$ の H 型鋼を用い、図-2 に示すように配置する。この際、1 層あたりの全支持部材の水平剛性は $K_B = 1.52 \times 10^6$ kN/m、せん断降伏耐力は $Q_B = 1.09 \times 10^4$ kN である。ただし、本解析では支持部材は座屈ならびに降伏しないものと仮定する。またダンパーはオイルダンパーを用いることとし、ダンパー量は基本モデル・ソフトストーリーモデルとも等しく、かつ全層同量とする。

2.4 リミッター

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-5 のような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実験結果^[1]に基づき、図-6 に示すように設定した。また、本研究では支持部材とクッション材の隙間を GAP と称する。

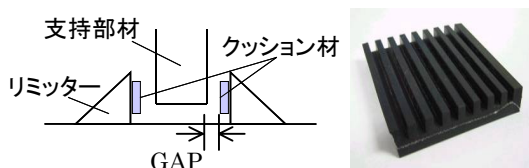


図-5 クッション材の概要

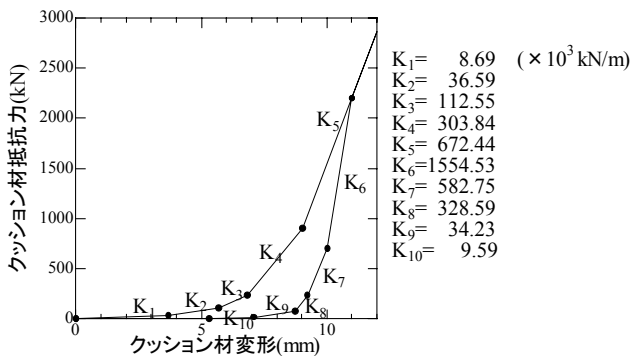


図-6 クッション材の復元力特性

2.5 解析手法

本デバイスを組み込んだ多質点系の解析モデルを図-7 に示す。

- M_i : 質量
- C_{Fi} : フレーム減衰係数
- K_{Fi} : フレーム剛性
- K_{Bi} : 支持部材剛性
- C_{Di} : ダンパー減衰係数
- K_{Li} : リミッター剛性
- X_{Bi} : 支持部材変形
- X_{Di} : ダンパー変形
- X_{Ri} : 層間変形

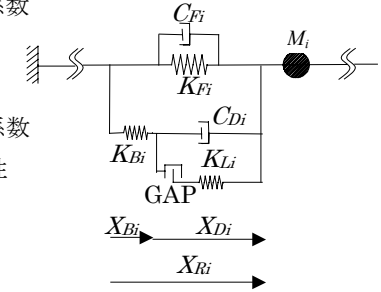


図-7 i 層部分の振動モデル

運動方程式は以下のように表せる。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C_F]\{\dot{X}\} + [K_F]\{X\} = -[M]\{1\}\ddot{X}_0 - \{F\} \quad (3)$$

ここで $\{F\}$ はダンパー部分の抵抗力を、 \ddot{X}_0 は地動加速度を表す。

2.6 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)
- 1978 年宮城県沖地震 東北大学建設系 1 階 NS 記録(以下東北大波)

本研究では、各地震動を入力したときの建物応答変形を概ね等しくするために、 $T = R \cdot T_{EQ} = 1.26$ s における弾性変位応答スペクトルが等しくなるように各地震波を基準化して用いることとした。基準化した入力波を図-8 及び表-2 に示す。なお、減衰定数については、今回は目標の塑性率が $\mu = 1.0$ であるため履歴減衰は無視し、フレーム減衰 3% とダンパー減衰 5% (仮定) の和と考え全体で 8% とした。

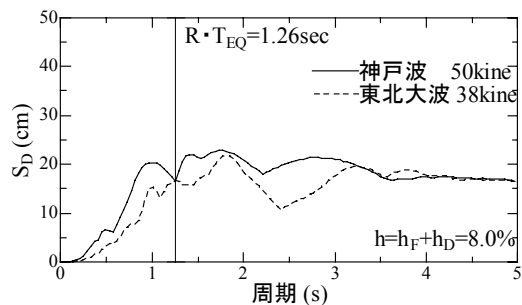


図-8 弾性変位応答スペクトル

表-2 入力地震動の基準化

Input Motion	基準化前	基準化後	入力倍率 (%)	最大速度 (kine)
	$S_D(\text{cm})$ $R \cdot T_{eq} = 1.26 \text{sec}$			
神戸波	27.60	16.70	60.5	50.0
東北大波	18.30		91.3	38.0

3. ダンパー及びリミッターの設計

3.1 設計の方針

本検討では建物全層にダンパーを、ソフトストーリー部にリミッターを設置する。変形制御機構であるリミッターの効果により応答塑性率は高さ方向で均一化されるものと考えており、これを前提として、得られた塑性率が目標値以下になるようにダンパー及びリミッターを設計する。具体的な設計手法を以下に示す。

3.2 Step1-入力エネルギー

入力エネルギー E_I は高次モードの影響を無視できないため、2.1(a)で設定した建物モデルの剛性を塑性率に対応して修正した等価線形多質点系モデルを用いて、線形応答解析により計算する。等価線形多質点系モデルの各層質量は2.1(a)で設定した建物モデルと等しく、減衰定数は10%とした。また、各層の塑性率が等しいと仮定し、式(1)の関係を全層に適用すると、任意の i 層部分において下式が成り立つ。なお i 層初期剛性を K_{0i} とする。

$$i \text{ 層剛性 } K_{REQi} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{0.3K_{0i}}{\mu} \quad (4)$$

ここで式(4)に表-1の値を代入して各層の等価な剛性を求め、その値を用いて入力エネルギーを計算した。表-3に計算結果をまとめる。

表-3 入力エネルギー

Input motion	神戸波	東北大波
$E_I(\text{kNm})$	5863	6054

3.3 Step2-消費エネルギー比

Step2では、ダンパー消費分のエネルギー E_D と入力エネルギー E_I の比を関係付けることにより、Step1で推定した入力エネルギー E_I からダンパー消費エネルギー E_D を算定する。ここでは、塑性率を均一化した多質点系モデルと等価1質

点系モデルの弾塑性応答解析結果が概ね一致していることを確認し、詳細な検討は1質点系モデルで行うこととした。図-9に、ダンパー減衰定数 h_D 、フレーム減衰定数 h_F 、フレームの塑性率 μ を変化させて1質点系解析モデルを用いた弾塑性応答解析を行ったときの消費エネルギー比 $\sqrt{E_D/E_I}$ の変化を示した。ここで平方根を用いて両者の関係を表したのは、エネルギーの速度換算値の比として考えているからである。なお、ここでは神戸波の結果を例として示したが、入力地震動の種類及び強さに対する依存性はあまり見られなかった。図-9に基づき、 h_D 、 h_F 、 μ をパラメータとした回帰分析により求めた消費エネルギー比の関係を式(5)に示す。

$$\sqrt{E_D/E_I} = 3.95h_D - 2.14h_F - 0.07\mu + 0.739 \quad (5)$$

ここで、本検討で仮定した条件である $h_D=5\%$ 、 $h_F=3\%$ 、 $\mu=1.0$ を式(5)に代入すると、 $\sqrt{E_D/E_I} = 0.802$ より $E_D = 0.643E_I$ となる。

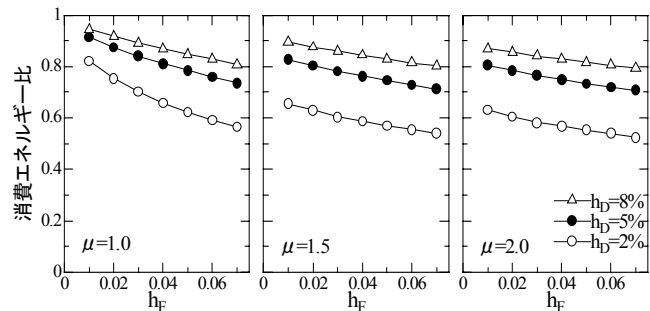


図-9 消費エネルギー比(神戸波)

3.4 Step3-等価繰返し回数

Step2で算出したダンパー消費エネルギーから、等価繰返し回数を求める。等価繰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。等価繰返し回数は、全層の平均的な値として評価するため、Step2と同様に1質点系解析モデルを用いて弾塑性応答解析を行い算出した。計算方法は以下による。まず、ダンパーの履歴ループ形状が図-10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 ΔE_D を式(6)より求める。

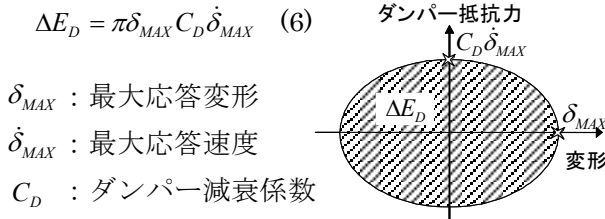


図-10 最大消費エネルギー

ここで最大応答速度と最大応答変形は、等価周期及び周期低減係数 R を介して擬似応答関係にあると考えると次式が得られる。

$$\dot{\delta}_{MAX} = \frac{2\pi}{R \cdot T_{EQ}} \delta_{MAX} \quad (7)$$

よって等価繰り返し回数 n_C は式(8)で表される。

$$n_C = \frac{E_D}{\Delta E_D} = \frac{E_D}{\pi \cdot C_D \cdot \left\{ 2\pi / (R \cdot T_{EQ}) \right\} \cdot \delta_{MAX}^2} \quad (8)$$

式(8)より、弾性周期 T_0 が与えられれば1質点系モデルによる弾塑性応答解析から直接 n_C を求められる。 T_0 をパラメータとして繰り返し解析を行うと、図-11に示すようなスペクトルが得られる。ただし $h_D=5\%$, $h_F=3\%$, 応答塑性率 $\mu=1.0$ として算出している。ダンパーの設計に用いる n_C の値としては、対象建物の1次固有周期の値である $T_0=0.77s$ 及びその近傍の周期での値を考慮し、かつ安全側になるように小さな値とし、表-4に示すように設定した。

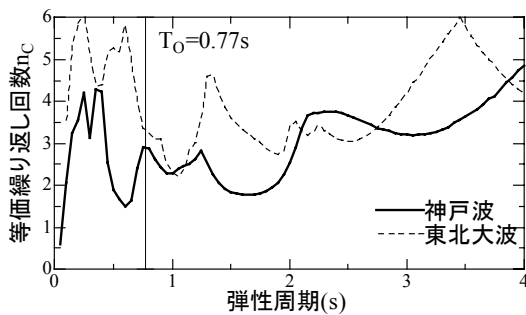


図-11 等価繰り返し回数 ($\mu=1.0$)

表-4 等価繰り返し回数

Input motion	神戸波	東北大波
n_C	2.0	3.0

3.5 Step4-ダンパー量の算定

最後に、必要なダンパー量を算定する。ダンパー量は全層同量の C_D とし、各層の塑性率は

等しいと仮定する。 i 層部分のダンパー消費エネルギーを E_{Di} , 1サイクルあたりの最大消費エネルギーを ΔE_{Di} , 最大変形を δ_{MAX-i} とおくと、

$$E_{Di} = n_C \cdot \Delta E_{Di} = n_C \cdot \pi \cdot C_D \cdot \left\{ 2\pi / (R \cdot T_{EQ}) \right\} \cdot \delta_{MAX-i}^2 \quad (9)$$

$E_D = \sum_{i=1}^H E_{Di}$, $\delta_{MAX-i} = \mu \delta_{yi}$ (δ_{yi} : i 層部分の降伏変形)であるから、必要ダンパー量 C_D は、

$$C_D = \frac{E_D}{n_C \cdot \pi \cdot \left\{ 2\pi / (R \cdot T_{EQ}) \right\} \cdot \mu^2 \sum_{i=1}^H \delta_{yi}^2} \quad (10)$$

式(10)より、地震動ごとに計算した必要ダンパー量 C_D を表-5に示す。

表-5 必要ダンパー量(各層当たり)

Input motion	神戸波	東北大波
C_D (kNs/m)	19721	13576

3.6 Step5-リミッターの GAP の設定

リミッターはソフトストーリーである6層のみに設置する。GAPの値は、層間変形からクッション材変形 δ_{CN} 及び支持部材変形 δ_B を減じた値として式(11)で示される。

$$GAP = \delta_y \cdot \mu - (\delta_{CN} + \delta_B) \quad (11)$$

クッション材変形 δ_{CN} は、クッション材抵抗力 Q_{CN} が与えられれば、図-6に示したクッション材の荷重変形関係より求められる。ここでは、クッション材抵抗力 Q_{CN} は6層全体の応答層せん断力 Q_6 から6層のフレームが負担する層せん断力 Q_{6F} を減じて求める。ただし応答層せん断力は慣性力から算定する。また応答層せん断力は層の上下で急激に変化しないものと仮定し、6層全体の応答層せん断力 Q_6 は上下階の応答層せん断力の平均値とみなす。よってクッション材抵抗力 Q_{CN} は式(12)より求められる。

$$Q_{CN} = Q_6 - Q_{6F} = \frac{Q_5 + Q_7}{2} - Q_{6F} \quad (12)$$

支持部材変形は、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、下式より求める。

$$\delta_B = Q_{CN} / K_B \quad (K_B : \text{支持部材剛性}) \quad (13)$$

本研究では目標の塑性率は $\mu=1.0$ であるから、ソフトストーリーにおける GAP は式(12)~(13)に基づき 12mm と設定する。

4. 地震応答解析

4.1 比較対象建物ケース

本設計法の有効性を示すため、以下に示す3ケースを比較対象建物ケースとする。

- (a) 2.1(b)のソフトストーリーモデルにおける建物フレームのみのケース（以下、フレームのみ）
- (b) (a)に 3.5 で設計したダンパーを各層に設置したケース（以下、ダンパーのみ設置）
- (c) (b)にさらに 3.6 で設定した GAP を持つリミッターを6層のみに設置したケース（以下、ダンパー+リミッター設置）

4.2 地震応答解析結果

各ケースにおける最大応答値を比較する。まず図-12に最大応答変形を示す。(a)ではソフトストーリーで大変形が生じている。(b)では全体的に応答変形が低減するが、ソフトストーリーにおいては塑性率 $\mu=1.5\sim 2.0$ 程度の変形が生じてしまう。(c)ではソフトストーリーの変形が概ね $\mu=1.0$ 程度に収まる。ソフトストーリー以外の層では変形がわずかに増加するが、各層の塑性率は均一化されて $\mu=1.0$ 程度となっており、概ね目標値以下に収まっているといえる。

次に、図-13に最大応答加速度を、図-14に慣性力から算定した最大応答層せん断力をそれぞれ示す。まず図-13においては、リミッターの作動に伴い、絶対加速度が(b)と比べて最大で3割程度増加しているが、クッション材の効果によりその値は過大なものではなく、(a)の場合とほぼ同程度である。次に図-14においては、リミッターが作動しても応答層せん断力は(b)と比べて最大で2割程度しか増加しない。

5. まとめ

耐力の低いソフトストーリーを持つ11階建の鉄筋コンクリート造建物に大きな地震動が作用した時に、硬化型復元力特性を持つ本デバイスが有効に働いてソフトストーリーの過大な変形を抑え、応答変形分布を良好な形状にすることができることを示した。またリミッターの作動に伴う応答加速度や慣性力から算定した応答

層せん断力の増加も、リミッターが作動しないケースと比較して最大で2割程度だった。さらに、ここで提案した方法により、目標とした応答層間変形以内に収めるために必要なダンパー量を簡便な方法で算定できることがわかった。

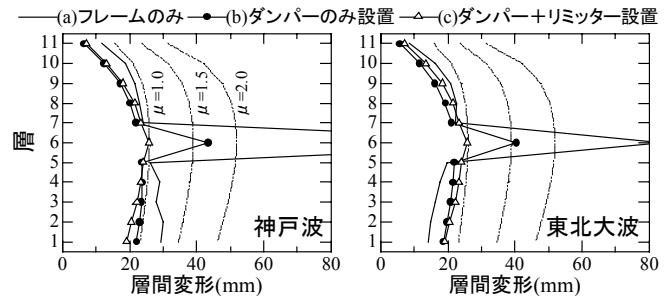


図-12 最大応答変形

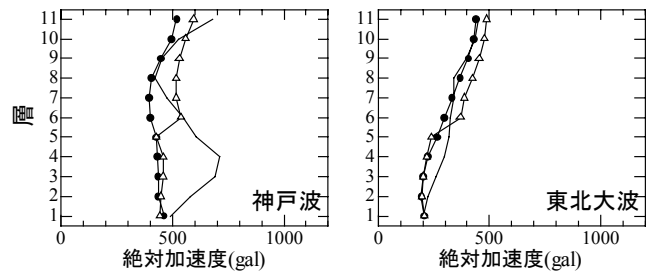


図-13 最大応答加速度

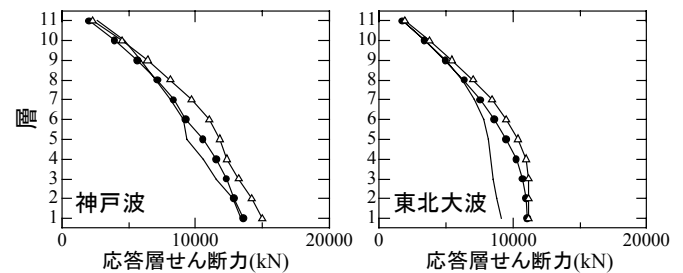


図-14 最大応答層せん断力

参考文献

- [1]康在完, 堀則男, 井上範夫, 川股重也: 硬化型復元力特性をもつエネルギー吸収デバイスを設置したRC造建物の地震応答性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1171 - 1176, 2003.7
- [2]Fatih SUTCU, Norio HORI, Norio INOUE: Damper design of a structure with a displacement controlled soft-story, 構造工学論文集, Vol.52B, pp.255 - 260, 2006.3
- [3]古間直希, 向井智久, 衣笠秀行, 野村設郎: エネルギー釣り合いに基づく純ラーメンRC建物の制振補強設計, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.13 - 18, 2003.7