

# 論文 ダンパーのエネルギー吸収能力を考慮した転倒降伏耐震壁の設計用ベースシア

鄭 海連\*1・日高 桃子\*2・崎野 健治\*3

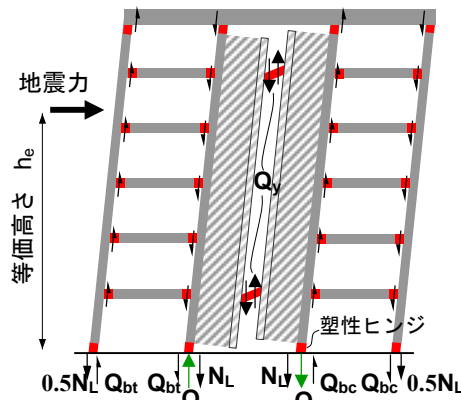
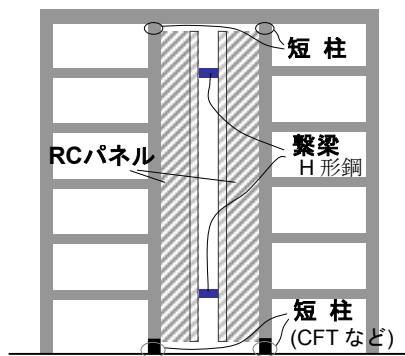
**要旨:** 本論は、転倒降伏耐震壁のもつ大きなエネルギー吸収能力に着目した研究である。相対的にエネルギー吸収能力の乏しい鉄筋コンクリート骨組と転倒降伏耐震壁から成る6層3×6スパン建物の適切な設計用ベースシア係数を動的解析を行うことによって検討している。解析モデルは1~3枚の耐震壁を用いたモデルとする。建物が満足すべき耐震性能の要件を、層間変形角の最大応答値を0.01rad未満に収めることとすれば、転倒降伏耐震壁フレーム構造の設計には、同じ大きさのエネルギー吸収能力をもつ梁降伏型骨組と同等の設計用ベースシア係数を用いてよい。

**キーワード:** 耐震壁, エネルギー吸収能力, 設計用ベースシア係数, 地震応答解析

## 1. はじめに

著者らは、従来の鉄筋コンクリート (RC) 耐震壁と比べエネルギー吸収および変形能力が著しく大きい、壁パネル・繫梁・周辺フレームと壁パネルを繋ぐ短柱から成る合成耐震壁、転倒降伏耐震壁 (以降、転倒壁とよぶ) を提案している<sup>1)</sup>。図-1は転倒壁の各要素に用いる部材種別および降伏機構を示している。降伏部位であ

る繫梁と短柱の果たす機能は、転倒モーメントに対する抵抗、塑性化による地震入力エネルギーの吸収、基礎に生じる引き抜き力および壁パネルに生じるせん断力の制御である。繫梁と短柱には大変形時にもこれらの機能を安定して果たすことが期待されるので、変形能力が高くせん断抵抗に優れる部材として、繫梁には圧延 H 形鋼、短柱にはコンクリート充填鋼管を用いる



$Q_y$ : 繫梁のせん断降伏耐力  
 $Q_{bt}, Q_{bc}$ : 梁 (断面=450x850mm) からの伝達応力による基礎の終局時作用軸力 (引張側, 圧縮側)  
 $N_t$ : 中柱 1 本 (断面=750x750mm) の支持重量  
 $B_w$ : 耐震壁スパン (=8000mm)  
 コンクリート: 転倒壁の転倒モーメント耐力  
 圧縮強度  $24\text{N/mm}^2$   
 Popovics モデル (耐力劣化なし)  
 鋼材: 降伏強度  $350\text{N/mm}^2$   
 完全弾塑性モデル

図-1 転倒降伏耐震壁の構成要素 (左) と降伏機構 (右)

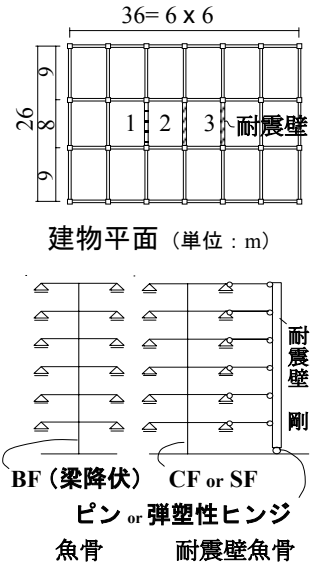


図-2 解析モデル

\*1 東京工業大学 人間環境システム専攻 修士1年 (正会員)  
 \*2 九州大学大学院 人間環境学研究院助手 人間環境博 (正会員)  
 \*3 九州大学大学院 人間環境学研究院教授 工博 (正会員)

ことを考えている。一方、壁パネルは RC とし、大変形時においても建物の層間変形を高さ方向に一様化する機能を果たすように弾性設計する。

これまでに著者らは、転倒壁の最下層の部分架構試験体の一定軸力下における繰返し水平力実験を行い、転倒壁の履歴特性は完全弾塑性型に近いことを示し、また、各要素の弾塑性性状を調べて設計法を示した<sup>2)</sup>。また、適切な大きさの曲げ剛性を有する壁パネルに連結されることによって、フレームの部分が柱降伏型の建物、または、建物や高さ方向に不整形な建物であっても、層間変形角は高さ方向に概ね等しく生じ、降伏機構は全体降伏機構となることを示した<sup>3)</sup>。

一方、転倒壁の履歴性状は、せん断降伏する H 形鋼繫梁のウェブの弾塑性性状が支配的で、通常の RC 耐震壁と異なり履歴ループは完全弾塑性型に近く大きなエネルギー吸収能力を有す。ゆえに転倒壁フレーム構造の設計においては、通常の RC 耐震壁フレーム構造より小さな設計用ベースシアー係数を用いてよいと考えられる。そこで本論では、6 層程度の RC 転倒壁フレーム構造の適切な設計用ベースシアー係数を数値解析によって調べる。通常の RC 構造の場合、各層の層間変形角の最大応答値は、剛性・耐力の高さ方向の分布によってばらつく。しかし、転倒壁フレーム構造の場合はこのばらつきが極めて

小さく、最大層間変形角の応答は建物の平均層間変形角 ( $R_{ave}$ =頂点変位/建物高さ) の応答と概ね等しく、他方、 $R_{ave}$  の最大応答値は建物の固有周期、保有ベースシアー係数とエネルギー吸収能力に依存する。本論では、平均層間変形角の最大応答値が 0.01rad.となることを条件とする場合、転倒壁フレーム構造の設計には、固有周期が概ね等しい整形な RC フレームと相対的にどの位大きいベースシアー係数を用いるべきであるかという観点から議論する。

## 2. 解析手法

数値解析は、有限要素法プログラム<sup>4)</sup>を用いて行う。静的解析は、層せん断力が  $A_i$  分布となる水平力を各層柱梁節点に漸増载荷する。動的解析には Newmark の  $\beta$  法を用い、減衰は 3% のレーリー型とする。動的解析には、表 2 に示す 3 波を増幅させたものを用いる。

## 3. 解析モデル

解析モデルは図 2 に示す平面をもつ全層同じ質量 (分布質量=1.3ton/m<sup>2</sup>)、同じ高さ (3.6m) の 6 層建物を想定して作成する。転倒壁は中央スパンに配される (図 2 の 1~3) ことを想定する。実際の建物には、柱支配面積の異なる側柱が存在するが、単純化のため、四隅の側柱を中

表 1 解析モデル

モデル名	魚骨	耐震壁	PGA(gal)			固有周期 $T_0$ (sec.)	エネルギー吸収量比		
	COF	Rw	ELCN	HACH	TOHK		全体	内訳	
								壁	魚骨
BF	1.5	-	546	429	258	0.99	1.00	0.00	1.00
CF-RW-0	0.75	0.00	514	369	255	0.91	0.60	0.00	1.00
CF-RW-1		0.15	577	396	309	0.88	1.06	0.49	0.51
CF-RW-2		0.28	643	439	366	0.84	1.56	0.67	0.33
CF-RW-3		0.41	711	485	407	0.80	1.94	0.79	0.21
SF-RW-0	表 2 参照	0.00	526	377	253	0.87	0.61	0.00	1.00
SF-RW-1		0.15	591	406	304	0.87	0.96	0.54	0.46
SF-RW-2		0.30	662	446	369	0.84	1.45	0.71	0.29
SF-RW-3		0.42	724	493	415	0.81	1.90	0.81	0.19

COF: 柱梁耐力比  $COF = (cM_{i-1} + cM_i) / 2bM_i$  ( $cM_{i-1}$ ,  $cM_i$  および  $bM_i$  は、 $i-1$ ,  $i$  層柱および  $i$  層梁の最大曲げ耐力)  
Rw: 転倒壁の転倒モーメント負担率, PGA: 動的解析に用いた地動加速度の最大値  
ELCN, HACH, TOHK: El Centro (NS), 八戸 (EW), 東北大 (NS) の記録地震波  
エネルギー吸収量比:  $R_{ave}$  0.01rad. の振幅 1 サイクル中の吸収エネルギーをモデル BF の吸収エネルギーで除した値

柱 1/4 本, 他の側柱を中柱 1/2 本に換算し, 解析モデルにはスパン 6m×9m の RC 中柱をモデル化した魚骨を用いる。N 枚の壁を有す転倒壁魚骨モデルは (18-2N)本の魚骨を N 枚の壁に軸変形しないトラス要素で連結したモデルとする。

解析には, 転倒壁魚骨モデルと, 比較のための保有ベースシア係数が 0.3 の魚骨モデル (BF) を用いる。解析モデルを表-1 に示し, その概要を図-2 に示している。図-2 ではトラス要素の片端を魚骨の梁端と接合しているが, 実際は魚骨の柱梁接合部節点と連結している。転倒壁魚骨モデルの解析変数は, 転倒壁の枚数 (1~3) と魚骨の種類 (CF と SF) である。

転倒壁は, 転倒モーメント耐力を建物に付与するという意味で曲げ壁と類似した挙動をする。このことと, 大きな層間変形角一様化機能をもつ<sup>2)</sup>ことを考慮して, 転倒壁は, 図-2 のように脚部がピン支持であるか層間変形角が 0.003rad.の時に降伏する弾塑性ヒンジをもつ剛な壁に置換する。壁がピン支持であるモデル RW-0 の場合, 転倒壁は転倒モーメントに抵抗せず層間変形一様化機能のみ発揮する。そのほかのモデル (RW-N, N=1~3) の転倒壁は, N×M<sub>w</sub> の大きさの転倒モーメント耐力をもつ。M<sub>w</sub> の大きさについてであるが, 図-1 の降伏機構時の転倒壁構面において, 引張側の RC 柱と壁脚に生じる軸力が零であるのは, 図-1 中の Q<sub>bt</sub> が側柱支持重量 0.5N<sub>L</sub> (N<sub>L</sub>=中柱体の支持重量) と, H 形鋼繫梁のせん断耐力 Q<sub>y</sub> が 1.5N<sub>L</sub> とそれぞれ等しい場合である。繫梁のせん断降伏耐力 Q<sub>y</sub>=1.5N<sub>L</sub> である場合, 転倒壁 1 枚の転倒モーメント耐力は, 概ね 1.5N<sub>L</sub>・B<sub>w</sub> (B<sub>w</sub>: 転倒壁スパン) と等しい。転倒壁 1 枚の転倒モーメント耐力は M<sub>w</sub> =1.5N<sub>L</sub>・B<sub>w</sub> とし, また, 復元力特性は完全弾塑性型とする。

魚骨に関する詳細を図-1 に記している。柱梁鉄筋量は, N 枚の転倒壁と (18-2N)本の魚骨から成るモデル全体の保有ベースシア係数 V<sub>s</sub> が所定の値 (0.3 を基本とする) となるように定める。転倒壁魚骨モデルの魚骨は, A<sub>i</sub> 分布層せん

表-2 魚骨 SF の COF

層数	SF-RW-0	SF-RW-1	SF-RW-2	SF-RW-3
5	0.49	0.63	0.74	0.88
1	0.84	1.06	1.21	1.37

断耐力をもち柱梁耐力比 COF が一定 (0.75) の柱降伏型魚骨 (CF) と著者らが転倒壁フレーム構造の設計法として提案している簡易設計法<sup>5)</sup>を用いて設計した全層等断面の RC 魚骨 (SF) の 2 種である。簡易設計法では, 柱の主筋は設計用地震力と無関係に, 軸力比や最少鉄筋比の観点から決定する。本解析モデルの場合は, 文献 6) の最少鉄筋比の観点から定めている。一方, 梁の主筋は, 静的解析の R<sub>ave</sub>=0.01rad.時においてモデルのベースシア係数が 0.3 となるように決定する。このように設計された魚骨の層せん断力分布は A<sub>i</sub> 分布と大きく異なる。また, 魚骨が SF であるモデルの 1 層と 5 層の魚骨の COF を表-2 に示す。SF の COF は層によって異なり下層の方が大きい, 1 を下回る場合が多く, SF は概ね柱降伏型の魚骨であることがわかる。これらに対し, 比較のための魚骨モデル (BF) は, A<sub>i</sub> 分布層せん断耐力をもち柱梁耐力比 COF が一定 (1.5) の梁降伏型魚骨である。

#### 4. 転倒モーメント耐力と吸収エネルギー

転倒壁の層間変形一様化機能によって, 転倒壁魚骨モデルの地震時の挙動においては, 直線型の 1 次モードが支配的である。多層建物の振動が直線モードの場合, この骨組の振動方程式は, 各層の高さ位置ベクトル {h} と建物の層間変形角 R<sub>ave</sub> を用いて (1) 式であらわされる。

$$[M]\{h\}\ddot{R}_{ave} + [C]\{h\}\dot{R}_{ave} + \{Q(R_{ave})\} = -[M]\{1\}\ddot{x}_g \quad (1)$$

ここで, [M], [C] は質量および減衰マトリクス,  $\ddot{x}_g$  は地動加速度, 左辺の第 3 項は建物の復元力ベクトルである。式(1)の両辺に, 左側から {h}' の転置を乗じると,

$$\begin{aligned} \{h\}' [M]\{h\}\ddot{R}_{ave} + \{h\}' [C]\{h\}\dot{R}_{ave} + \{h\}' \{Q(R_{ave})\} \\ = -\{h\}' [M]\{1\}\ddot{x}_g \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)は、建物に作用する転倒モーメント(スカラー)の釣り合い式である。終局状態において、復元力に関する左辺の第3項は、魚骨と耐震壁が各々負担する転倒モーメントである。設計用ベースシア係数が  $V_s$ 、層せん断力が  $A_i$  分布となる水平力が設計用地震力であるとすれば、全層等質量・等高さの建物全体の設計用転倒モーメントは  $V_s W h_e$  ( $W$ : 建物全重量,  $h_e$ : 等価高さ。層の質量が全層等しい場合は,  $h_e = \text{建物高さ} \times 0.7$ ) である。一方、転倒壁の転倒モーメント耐力負担率  $R_w$  は次式で定義される。

$$R_w = M_w / (V_s W h_e) \quad (3)$$

ここで、 $M_w$  は転倒壁の転倒モーメント耐力。さらに、式(2)をエネルギー積分し、振動がおさまった状態を考えると、

$$E_h + E_{dw} + E_{df} = - \int \{h\}^T [M] \{1\} \ddot{x}_g dR_{ave} \quad (4)$$

ここで、 $E_h$ : 減衰により消費されるエネルギー、 $E_{dw}$  および  $E_{df}$ : 転倒壁および RC 魚骨の履歴吸収エネルギー、右辺は地震入力エネルギーである。転倒壁の履歴特性は完全弾塑性型であるので、吸収エネルギーは原点指向型の履歴特性をもつ RC 魚骨より極めて大きい。したがって、モデルのエネルギー吸収能力は転倒壁の枚数が増え転倒モーメント耐力の負担率  $R_w$  (表-1に各モデルの  $R_w$  の値を示す) が大きくなると比例して増加する。

図-2に2枚の転倒壁魚骨モデルのベースシア係数 ( $V_s$ ) - 平均層間変形角 ( $R_{ave}$ ) 関係を示す。魚骨は SF である。転倒壁が  $R_{ave} = 0.003 \text{rad}$  で降伏するのに対し、SF-RW-2の魚骨は  $R_{ave}$  が  $0.007 \text{rad}$  程度の時点で降伏している。転倒壁に連結される魚骨は柱降伏型であるので、転倒壁がなければ、 $P\delta$  効果が最も顕著な最下層が降伏した後にはこの層に層間変形が集中し耐力は急減するが、本解析の転倒壁魚骨モデルでは、転倒壁の層間変形一様化機能によって、大変形時においても耐力劣化は生じない。

図-3(a)は梁降伏型魚骨モデル BF と、転倒モーメント耐力を負担しない転倒壁に魚骨が連結されているモデルの  $R_{ave} 0.01 \text{rad}$  振幅1サイク

ル履歴ループである。モデル BF の履歴ループは、柱の降伏をともなって転倒モーメントに抵抗する CF や SF の魚骨よりも紡錘形に近いが、魚骨が CF と SF のループ形状はほぼ等しい。1サイクル中に BF に吸収されるエネルギーは  $0.2E_o$  ( $E_o$  は図-3(a)のグレーの四角の面積。  $E_o = 4 W V_s h_e \times 0.01$ ) である。各モデルの吸収エネルギーの BF に対する比を表-1に示しているが、CF と SF の魚骨に吸収されるエネルギーは、いずれも BF の 0.6 倍程度 ( $0.12E_o$ ) である。

一方、図-3(b)は2枚の転倒壁魚骨モデル CF-RW-2の転倒壁と魚骨の履歴ループである。魚骨と転倒壁の各々の履歴ループも示している。このモデルの場合、転倒壁の転倒モーメント負担率 ( $R_w$ ) は 0.28 である。転倒壁が  $0.01 \text{rad}$  の振幅1サイクル中に吸収するエネルギー  $E_{dw1}$  は、 $0.7R_w E_o$  ( $E_o = 4 W V_s h_e \times 0.01$ ) で、 $R_w = 1$  とすれば BF の 3.5 倍と極めて大きい。一方、CF 魚骨の吸収エネルギーは  $0.12(1 - R_w)E_o$  であり、また、 $R_w$  は転倒壁の枚数 ( $N$ ) に比例する。したがって、表-1に示すように、転倒壁魚骨モデルの1サイクル中の吸収エネルギーは  $N$  に比例する。

## 5. 動的解析

2通りの方針に従う動的解析を行う。1つ目の解析では、解析モデルの保有ベースシア係数 ( $V_s$ ) は等しいが、地震波はモデルによって異なった大きさに増幅したものを用いる。2つ目の解析では、地震波の大きさは一定だが、 $V_s$  の値

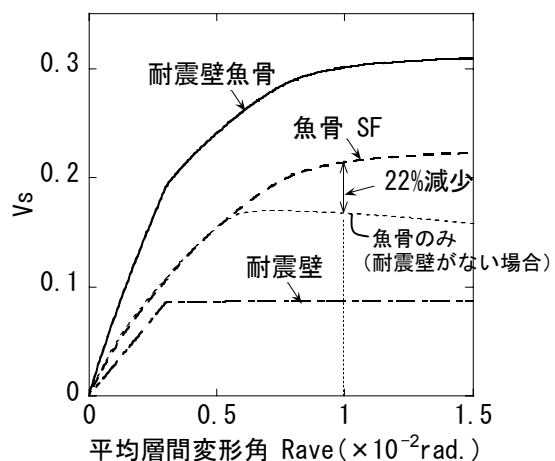


図-2 ベースシアー平均層間変形角関係

はモデルによって異なる。どちらにおいても、平均層間変形角の最大応答値 ( $R_{ave\ max}$ ) の最大応答が 0.01rad.となるよう、地震波や  $V_s$  の大きさを調整する。1 つ目の解析では  $V_s=0.3$  であるモデル、2 つ目の解析では BF モデルに対して  $R_{ave\ max}=0.01\text{rad.}$ となる大きさの地震波を用いる。

まず 1 つ目の解析についてであるが、表-1 に示すモデルの弾性固有周期は概ね等しい。また、いずれのモデルも、質量は同じかつ  $R_{ave\ max}=0.01\text{rad.}$ であるので、いわゆる等価固有周期も等しい。したがってこの解析の場合、使用する地震波の大きさは、モデルのエネルギー吸収能力のみに依存すると考えられる。解析結果について、表-1 に各モデルの平均層間変形角の最大応答値を 0.01rad.とする地震波の最大地動加速度 (PGA) を示す。また、図-4 に各モデルの PGA と  $R_{ave\ 0.01\text{rad.}}$  振幅 1 サイクル中の吸収エネルギーの関係を示す。図-4 の縦軸は、各モデルの PGA を BF の PGA で除した比 ( $r_{PGA}$ ) である。横軸は、各モデルの吸収エネルギーを BF の値で無次元化した値で、3 地震波の  $r_{PGA}$  の平均値を太線で結んでいる。 $r_{PGA}$  は地震波によってばらつくが、概ね吸収エネルギー比に比例している。転倒壁魚骨モデルの結果を魚骨の種類によって分けて示しているが、魚骨の種別による顕著な結果の変化は認められない。吸収エネルギーは、1 枚の転倒壁付きモデルの場合 BF と同程度で、この場合、 $r_{PGA}$  は八戸波のみ 1 を下回っているが、

$r_{PGA}$  の平均は比較的 1 に近い。さらに、2 枚の転倒壁付きモデルでは、八戸波でも  $r_{PGA}$  は 1 を上回っている。転倒壁が 3 枚用いられる場合は、 $r_{PGA}$  の平均値を参照すれば、BF の 1.35 倍の大きさの地震波に対して建物の平均層間変形角を 0.01rad.未満とすることができる。

2 つ目の解析では、層の質量は変えずにモデルの魚骨の本数を 1 つ目の解析モデルの魚骨本数から増減することにより  $V_s$  の大きさを変化させる。この場合、モデルはエネルギー吸収能力のほかに、固有周期も  $V_s^{1/2}$  に比例して大きくなる。解析結果について、表-3 に、 $V_s=0.3$  のモデルの魚骨の本数 ( $n_0$ ) および固有周期 ( $T_0$ ) と 2 つ目の解析に用いたモデルの魚骨本数 ( $n$ ) およびその場合の固有周期 ( $T$ ) を示している。また、図-5 に耐震魚骨の本数が  $n$  本のモデルの保有ベースシア係数を示す。魚骨の種類によって結果は大きく変化しないので、図表は魚骨が SF のモデルの結果のみ示している。

図-5 では、モデルの転倒壁枚数によって分けて結果を示している。図-5 の実線は、保有ベースシア係数の 3 地震波の平均値 ( $V_{SDm}$ ) である。破線は、図-4 (b) のモデルの保有ベースシア係数 (=0.3) を図-4 (b) の  $r_{PGA}$  の平均値で除した値 ( $V_{SDPGA}$ ) である。図-4 の結果と同様、図-5 の結果も地震波によってばらつくが、必要保有ベースシア係数の平均値 ( $V_{SDm}$ ) は転倒壁の数に反比例する。また、比較すると

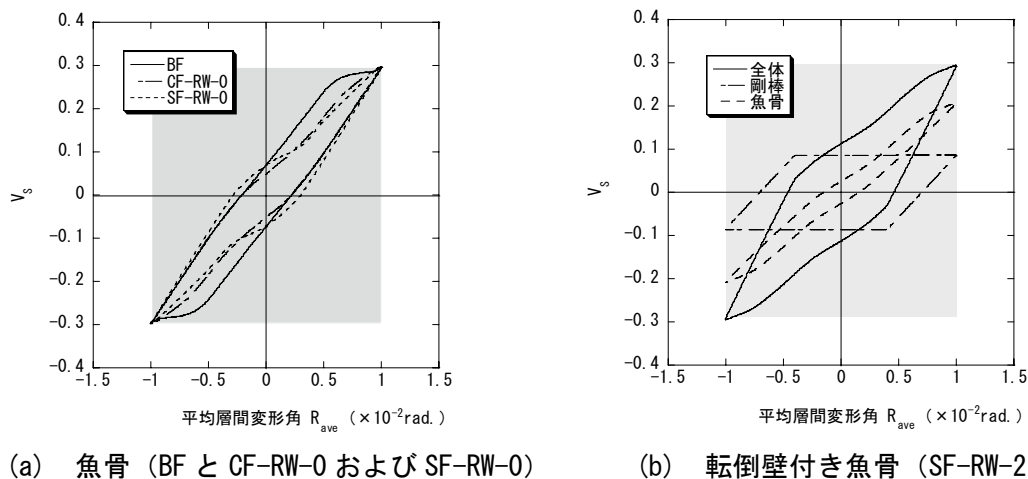


図-3 平均層間変形角 0.01rad. 振幅 1 サイクルの履歴ループ

$V_{SDm}$ は  $V_{SDPGA}$  の 70%程度である。まとめると、転倒壁の数を多くすることで建物のエネルギー吸収能力が増加し、反比例的に設計用ベースシア係数は減少する。さらに固有周期が変化することにより、設計用ベースシア係数は 30%程度低減されることがわかる。

## 6. 結論

柱降伏型 RC 魚骨と転倒壁で成る 6 層建物モデルの静的・動的解析を行い、以下の結論を得た。

- 柱降伏型 RC 魚骨のエネルギー吸収能力は梁降伏型 RC 魚骨 (BF) の 0.6 倍程度と小さいが、転倒壁のエネルギー吸収能力は BF の 3.5 倍と大きい。ゆえに、転倒壁の負担転倒モーメント耐力に比例して建物のエネルギー吸収能力は向上する。
- 保有ベースシア係数・エネルギー吸収能力がともに梁降伏型魚骨と同等の転倒壁魚骨の地震応答は同等である。転倒壁魚骨の設計には、建物のエネルギー吸収能力に反比例し、更に、固有周期の変化によって 30%ほど小さい設計用ベースシア係数を用いてよい。

## 参考文献

- 崎野健治, 上枝豊, 日高桃子: 転倒降伏耐震壁に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 584 号, pp. 177-184, 2004.10
- 日高桃子, 崎野健治: 転倒降伏耐震壁の 1 層部におけるせん断性状に関する実験的研究,

日本建築学会構造系論文集, 第 586 号, pp. 163-170, 2004.12

- Hitaka T. and Sakino K. : Performance of a Composite Wall Utilized for Retrofit of Building Frames, Proc. International Symposium on Earthquake Engineering Commemorating Tenth Anniversary of the 1995 Kobe Earthquake, CD-ROM, 2005.1, Kobe/Awaji, Japan
- Kawano A., Griffith C., Joshi R. and Warner F. : Analysis of the Behavior and Collapse of Concrete Frames Subjected to Seismic Ground Motion, Research Report No.R163, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Adelaide, 1998. 11, Australia
- 日高桃子, 崎野健治, 峯松徹: 転倒降伏耐震壁の提案とその構造特性に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 587 号, pp.139-145, 2005.1.
- 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 日本建築学会, p.14, 1999.11

表-3 最少魚骨と壁からなる構造の固有周期

モデル名	$n_0$	$T_0$	ELCN		HACH		TOHK	
			n	(T)	n	(T)	n	(T)
SF-RW-1	16	0.87	5	1.28	19	0.81	8	1.11
SF-RW-2	14	0.84	4	1.12	7	1.01	4	1.12
SF-RW-3	12	0.81	2	1.04	3	1.01	1	1.07

$n_0$ と  $T_0$ :  $V_s=0.3$  のモデルの魚骨本数と固有周期 (s)

$n$ と  $T$ :  $R_{ave}$  の最大応答値を 0.01rad.未満にするために

必要な最少魚骨本数とその場合の固有周期 (s)

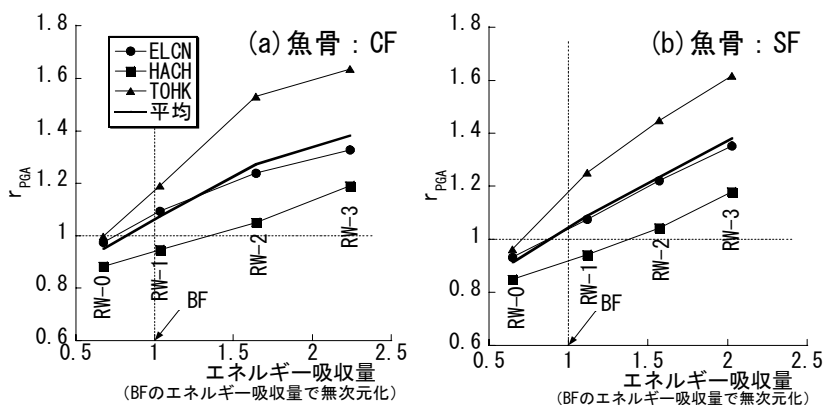


図-4 各モデルの PGA とエネルギー吸収量 (BF の値で無次元化)

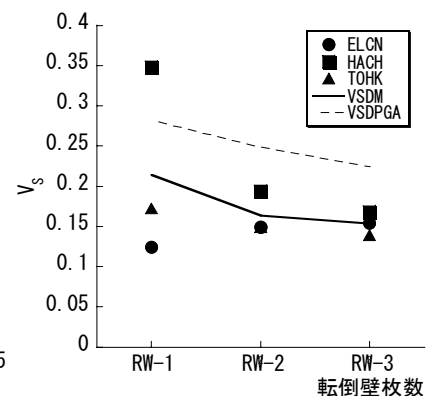


図-5 転倒壁魚骨の  $V_s$