T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

# 論文 / 著書情報
# Article / Book Information

| | |
|---|---|
| 論題(和文) | 複合用途を想定した超高層鋼構造建物の応答性状と制振補強効果 |
| Title | THE SEISMIC RESPONSE AND INFLUENCE OF SEISMIC RETROFIT OF HIGH RISE STEEL BUILDING IN MIXED-USE |
| 著者(和文) | 橋本奨吾, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也, 佐野剛志 |
| Authors | daiki sato, Haruyuki Kitamura, TUYOSHI SANO |
| 出典 / Citation | 構造工学論文集, Vol. 59B, , pp. 309-319 |
| Citation(English) | Journal of structural engineering, Vol. 59B, , pp. 309-319 |
| 発行日 / Pub. date | 2013, 3 |
| rights | 日本建築学会 |
| rights | 本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである |
| relation | isVersionOf:http://ci.nii.ac.jp/naid/110009706600 |

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

Architectural Institute of Japan

構造工学論文集　Vol. 59B（2013年３月）　日本建築学会

# 複合用途を想定した超高層鋼構造建物の応答性状と制振補強効果

# THE SEISMIC RESPONSE AND INFLUENCE OF SEISMIC RETROFIT OF HIGH RISE STEEL BUILDING IN MIXED-USE

橋本奨吾*1，佐藤大樹*2，北村春幸*3，長江拓也*4，佐野剛志*5

*Shogo HASHIMOTO , Daiki SATO , Haruyuki KITAMURA , Takuya NAGAE , Takeshi SANO*

In recent years, due to densification of the city, the compound buildings have increased. Upper layer of compound building is often composed of hotel or housing. And lower layer is often composed of store or office. The hotel and housing are composed of a low floor height and short span. The store and office are composed of a high floor height and long apan. The strength and stiffness of upper layer is larger. A series of dynamic response analyses are conducted for typical compound building. This paper uses a ground motion two times larger than design ground motions and a long period ground motion and a pulse ground motion. As a result, deformation of lower layer is large. This study examines the influences of steel dampers partially installed into the lower part of compound building. The result show that the mainframes are kept to be elastic range by installing the dampers in lower part.

***Keywords*** **:** *High-rise Steel Structure, Strength, Stiffness, Partial Placement, Hysteretic Damper, Damage Concentration*
超高層鋼構造建物，耐力，剛性，部分配置，履歴減衰型ダンパー，損傷集中

## 1．はじめに

高度経済成長期以降，超高層建物が急速に増加した。超高層建物は，大都市を中心に存在し，社会の中枢機能を担っている。これらの超高層建物は，技術の発達と設計者に対する要求の多様化により，時代と共に在り方が変わってきている。1 棟の超高層建物に対して複数の用途をもつ複合超高層建物が，その例である。日本建築センター発行の評価シート [1]より作成した，各年代 [2]ごとの複合超高層建物の割合を表 1 に示す。ここで示す複合建物は，建物用途に事務所・ホテル（住居）を含む超高層建物である。この表から，近年，複合超高層建物が増加していることが確認できる。同様に，評価シートに基づく調査では，下層が事務所で上層がホテル（住居）で構成される複合超高層建物が多く，今後もこのような複合超高層建物は増加すると考えられる。一般的に，事務所は階高が大きく，長スパンで構成させる場合が多い。一方，住居部分は，階高が小さく，短スパンで構成される場合が多い。このような複合超高層建物では，超高層建物の平均的な剛性，耐力分布に比して，上層部分の耐力や剛性が高い傾向にある。高さ方向で，耐力分布や剛性分布が不連続となる場合に，損傷分布についても不連続になることが指摘されている [3)~5)]。

近年，海溝型の巨大地震の発生が高い確率で予想されており，実験的検証により超高層建物の鋼構造骨組に大規模な補修を必要とする損傷が生じる可能性が指摘されている [6)]。既存の超高層建物を制振部材によって耐震改修する場合，その安全性に加え，使用性，つまり機能損失に対する限界性能の向上が要求され，そのために個々の超高層建物に対して適切な制振部材の配置を特定する必要性がある。先に述べた複合超高層建物の構造特性を踏まえた制振部材の配置条件と効果の関係を整理しておくことは，今後の耐震改修を計画する際に，また新たに複合超高層建物を設計する際に参照できる資料の蓄積という意味において有意義である。

以前より，工期短縮と経済的負担の軽減，および効率的なエネルギー吸収という観点から，下層部に対する制振部材の部分配置[例えば 7)-10)]の有効性が検討されてきた。島田ら [10)]は，長周期地震動を受ける超高層建物についてフレームモデルを用いた地震応答解析を実施し，制振部材の下層部のみに対する配置によっても，顕著な損傷低減効果を確認している。本論文では，複合超高層建物を対象とするフレームモデルを用いた地震応答解析を通して，下層部のみに設置した鋼製ダンパーの応答低減効果，損傷低減効果を検証する。解析

**表 1　複合建物の割合**

| 年代 | 年代-1 | 年代-2 | 年代-3 | 年代-4 |
|---|---|---|---|---|
| 期間 | 1966年1月<br>～<br>1981年5月 | 1981年6月<br>～<br>1989年12月 | 1990年1月<br>～<br>1994年12月 | 1995年1月<br>～<br>2001年7月 |
| 全棟数 | 174 | 110 | 293 | 205 |
| 複合建物棟数 | 10 | 11 | 47 | 63 |
| 複合建物割合(%) | 5.7 | 10.0 | 16.0 | 30.7 |

*1 東京理科大学大学院理工学研究科　大学院生　Graduate Student, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science
*2 東京理科大学理工学部建築学科　助教・博士（工学）　Assist. Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
*3 東京理科大学理工学部建築学科　教授・博士（工学）　Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng
*4 (独)防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 主任研究員・博士(工学)　Senior Researcher, EERC, NIED, Dr. Eng.
*5 株式会社　大林組　OOBAYASHI　CORPORATION



NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

では，一般的な剛性，強度分布をもつプロットタイプ骨組を基準とし，これに対して上層部分の剛性と強度を高めることで複合超高層建物を模擬する。当該上層部分の範囲，剛性・強度を変化させた複数の解析条件を用意し，ダンパーの部分配置による低減効果を，部材レベルの累積塑性変形倍率を損傷度と見なして分析する。そこでは，累積塑性変形倍率によって安全限界値を設定する。一方，最大層間変形角は約 0.02 rad までの範囲にあり，本解析においては P-Δ 効果を組み込まないこととする。

本論文の構成を以下に示す。2 章で検討対象となる複合超高層建物の概要および解析におけるモデル化について述べる。また，採用する 3 種類の入力地震動の特徴について述べる。3 章では，複合超高層建物を想定した条件の異なる解析モデルの地震応答特性について考察する。ここでは，各入力地震動に対する応答性状の差異についても確認する。そして，4 章において，下層部に部分配置したダンパーの有効性について考察する。

## 2. 検討対象建物概要および入力地震動

### 2.1. 検討対象建物概要

図 1 にモデル概要を示す。検討の基準となる建物は，島田らが検討に用いた $C_0$=0.3 で設計された，高さ 80.5m の 21 層鋼構造建物[10]である（以降，オリジナルモデルと呼ぶ）。解析では，X 方向を対象とする。設計では，Ai 分布に基づく静的弾塑性解析において，各層の梁がほぼ同時に降伏することが目標とされた。表 2 に，部材断面一覧を示す。柱の材種は BCP325，大梁の材種は SN490 である。解析には，部材の軸力と曲げモーメントに対して弾塑性挙動を表現できる部材レベルの 3 次元立体架構モデルを用いる。柱部材については，材端の 2 平板間に複数の弾塑性軸ばねを部材の断面形状に合わせて配置し，軸力と 2 方向の曲げモーメントに対する弾塑性挙動を評価する。梁部材については，柱部材と同じモデルを用いるが，部材両端部の軸方向変位を等値することにより部材に軸力が生じないようにしている[11]。

オリジナルモデルの 1 次固有周期 $T_1$ は 2.41 秒である。図 2 に静的弾塑性解析より得られた層せん断力 $Q$ と層間変形角 $R$ の関係を示す。図中の◇は，その層のいずれかの部材が降伏モーメントに達した時の値を示し，この時のせん断力を弾性限界せん断力とする。◆はその層のいずれかの部材が全塑性モーメントに達した時の値を示している。弾性限界時のベースシア係数 $C_b$ は 0.195 であり，$C_b \cdot T_1$ は 0.47 である。

本論文では，複合超高層建物を想定し，オリジナルモデルを基準として上層の耐力と剛性を増大した 4 つの建物のモデルを作成する。具体的には，15~21 層，10~21 層，8~21 層，5~21 層の耐力と剛性を 1 倍，1.2 倍，1.4 倍したモデルを作成し，順に FS30 モデル，FS60 モデル，FS70 モデル，FS80 モデルと呼ぶこととする。耐力・剛性の切り替え層 $j$ はそれぞれ，$j$=15，10，8，5 となる（図 1(a)）。本解析では，耐力を増大させるために柱・梁の F 値を 1 倍，1.2 倍，1.4 倍し，剛性を増大させるために柱・梁のヤング係数 $E$ を上げて，層剛性を 1 倍，1.2 倍，1.4 倍することとした。柱および梁の耐力を増大しているために，切り替え層を除いて柱梁耐力比はオリジナルモデルと同様である。

FS30，FS60，FS70，FS80 モデルに対して，耐力と剛性を増大させていない下層にダンパーを設置したモデルを，DS30 モデル，DS60 モデル，DS70 モデル，DS80 モデルとする（図 1 (b)）。なお，図 1 (a)，(b)の黒太線が耐力と剛性を増大させた主架構であることを表す。表 3 にそれぞれのモデルの 1 次固有周期を示す。

### 2.2 ダンパー概要

本論文では，降伏応力度 ${}_d\sigma_y$ =225N/mm$^2$ の座屈拘束ブレースを用いて YB，YC 通りに配置する（図 1 (b)，(c)）。なお，ダンパーの塑

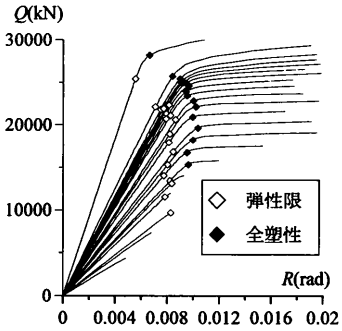



図 2 Q-R の関係

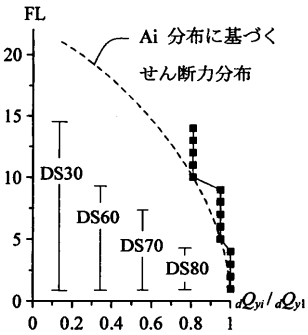


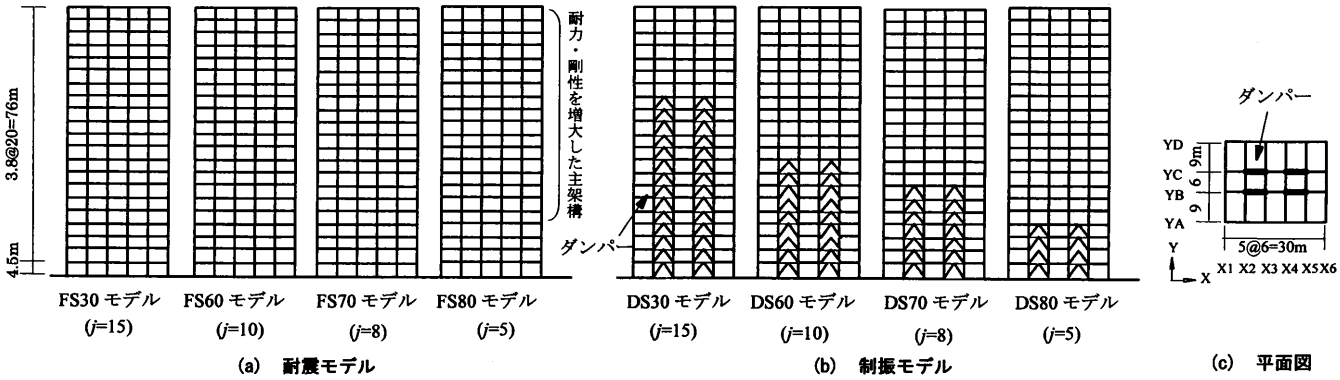

図 3 ダンパーの降伏耐力比

表 3 各モデルの 1 次固有周期（単位:s）

| モデル ＼ 耐力・剛性 | 1倍 | 1.2倍 | 1.4倍 |
|---|---|---|---|
| FS30 | 2.41 | 2.39 | 2.37 |
| FS60 | | 2.33 | 2.28 |
| FS70 | | 2.31 | 2.24 |
| FS80 | | 2.26 | 2.14 |

表 2 部材断面一覧

| | |
|---|---|
| 柱 | □-450×450×16×16 ~ □-600×600×40×40 |
| 大梁 | BH-600×250×12×19 ~ BH-600×300×12×32 |




(a) 耐震モデル　(b) 制振モデル　(c) 平面図

図 1 モデル概要



NII-Electronic Library Service

性化部長さ $L$ は材長に対して 1/4 であり，履歴特性は，2 次剛性が 0 となる完全弾塑性型としている。各層のダンパーの降伏耐力の高さ方向の比率は，図 3 に示すように，Ai 分布に基づく設計用層せん断力分布をもとに決定した。図 3 の横軸は，第 1 層目のダンパーの降伏耐力 ${}_dQ_{y1}$ に対する比率である。${}_dQ_{y1}$ は第 1 層目のダンパーの降伏せん断力係数 ${}_d\alpha_{y1}$ により，下式で表される。

$$ {}_dQ_{y1} = {}_d\alpha_{y1} \cdot \sum_{i=1}^{n} m_i \cdot g \qquad (1) $$

ここで，$n$:層数，$m_i$:$i$ 層目の質量，$g$:重力加速度である。本論文では，${}_d\alpha_{y1}$ をダンパー量と呼ぶこととする。

$i$ 層のダンパーの降伏変形 ${}_d\delta_{yi}$ および 1 次剛性 ${}_dK_{1i}$ は以下の式によって算出される。

$$ {}_d\delta_{yi} = \frac{L \cdot {}_d\sigma_y}{4E}, \quad {}_dK_{1i} = \frac{E \cdot A_i}{L} \qquad (2a,b) $$

$$ A_i = \frac{{}_dN_{yi}}{{}_d\sigma_y}, \quad {}_dN_{yi} = \frac{{}_dQ_{yi}}{n \cdot \cos\theta_i} \qquad (3a,b) $$

ここで，${}_dN_{yi}$：ダンパー1 本の降伏軸力，$n$：ダンパー本数，$\theta_i$：ダンパーの取り付け角度，${}_dK_{1i}$：ダンパー1 本の 1 次剛性，$E$：ヤング係数，$A_i$：ダンパーの断面積，$L$：ダンパーの塑性化部長さを表す。

各モデルに配置するダンパー量は，パラメータスタディの結果，主架構の塑性化を最も抑えることが出来た値を用いることとし，DS30 モデルでは ${}_d\alpha_{y1}$=0.04，DS60 モデルでは ${}_d\alpha_{y1}$=0.06，DS70 モデルでは ${}_d\alpha_{y1}$=0.08，DS80 モデルでは ${}_d\alpha_{y1}$=0.1 を用いることとする。

### 2.3 入力地震動

地震動について，1 つめとしては，通常の設計用地震動レベルの 2 倍となる速度応答スペクトル $S_V$=1.60m/s に基準化した，位相特性が HACHINOHE 1968 EW である ART-HACHINOHE（以降 ART-HACHI160）を設定した。他に，入力倍率を 1 倍とした長周期地震動の三の丸波 [12]（以降 C-SAN）および直下型地震の JMA KOBE 1995 NS（以降 JMA KOBE）を使用する。図 4,5 に時刻歴波形とスペクトル図を示す。図 5 の矢印で示す範囲は，本論文での耐震および制振モデルの 1 次固有周期帯を表す。図 5(a)より，短周期化することで，ART-HACHI160 および JMA KOBE の $V_E$ が大きくなり，C-SAN の $V_E$ は小さくなることが確認できる。図 5(b)~(d)より，周期 2.41s の場合，各入力地震動の $S_A$, $S_V$ および $S_D$ は，同程度の値を示している。一方で，周期 1.6s 付近では，$S_A$, $S_V$, $S_D$ 全て，各地震動で大きく値が異なる。

## 3. 耐震モデルの応答性状

### 3.1 耐震モデルにおける切替え層の耐力および剛性変化率

本節では，設計で用いる場合の参考値として，耐力および剛性切替え層とその下層における耐力，剛性の比率（以降，耐力変化率，剛性変化率と呼ぶ）について静的増分解析から得られた結果を図 6(a),(b)に示す。例えば FS30 モデル($j$=15)における，耐力変化率は $Q_{y15}/Q_{y14}$ であり，剛性変化率は $K_{15}/K_{14}$ で表せる。ここで，$Q_{yj}$：切り替え層（$j$ 層）のいずれかの部材が降伏モーメントに達した際の層せん断力，$K_j$：切り替え層（$j$ 層）の層剛性を表す。

図 6(a)より，FS30, FS60 および FS70 モデルにおいて，上層の部材の F 値を 1.4 倍した場合でも，$j$ 層の耐力が $j$-1 層の影響を受けているために切り替え層の耐力変化率は 1.4 にならないことが確認できる。例えば，オリジナルモデルの $Q_{y12}$ に対して FS70 モデルにおける耐力・剛性 1.4 倍の $Q_{y12}$ を比較すると約 1.4 倍になっていることを確認している。図 6(b)より，上層の層剛性が 1.0 倍の場合，切替

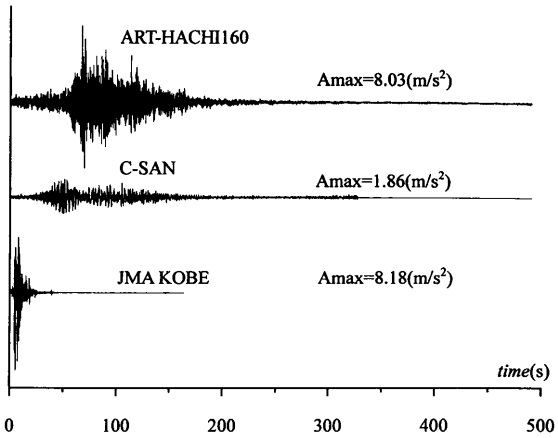



図 4 時刻歴波形

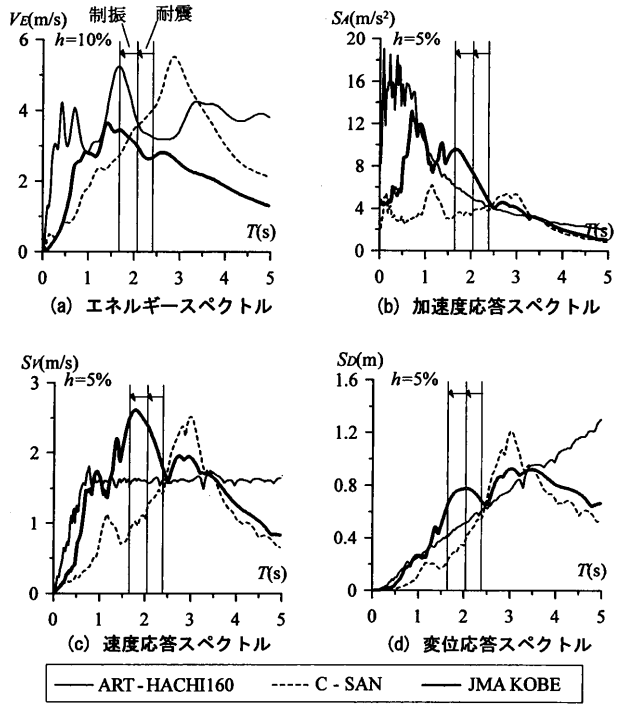



図 5 スペクトル

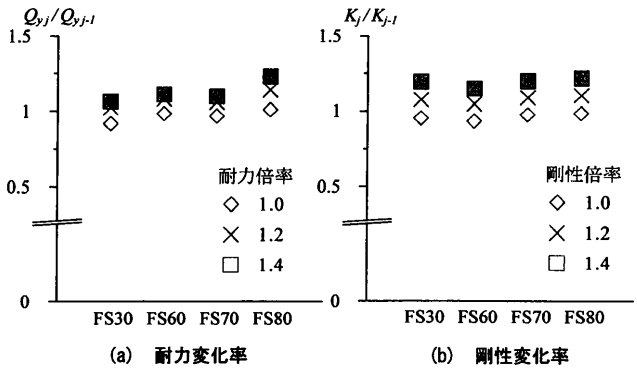



図 6 切替え層の耐力および剛性変化率（耐震モデル）



NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

え層の剛性変化率は約 0.9 程度であることがわかる。これは，下層に対して上層は，梁および柱の断面が小さくなっているためである。オリジナルモデルの剛性変化率 0.9 に対して，剛性を 1.4 倍した場合については，切替え層の剛性変化率は約 1.2 である。層剛性は，周辺層の影響が相対的に小さく，耐力よりも大きな値を示している。

### 3.2 層間変形角

図 7(a)~(d)に，各モデルの層間変形角 $R$ を示す。図 7(a)のオリジナルモデル（◇）に着目し，地震動ごとの特徴を把握する。ART-HACHI160 入力時においては，4 層付近と 13 層付近で変形が大きくなり，他の地震動と比較すると上下層の変形が同程度となっている。一方，C-SAN においては，下層の変形のみが大きくなる傾向にあり，JMA KOBE では，上層のみの変形が大きくなる傾向にある。このような 3 つの異なる応答性状を示す波を使用することで，上層の耐力・剛性が大きい建物の応答性状を把握する。

図 7(a)~(d)より，上層に着目すると，どの地震波入力時においても，耐力と剛性を増大した層の変形が小さくなっていることが確認できる。ART-HACHI160 入力時においては，オリジナルモデルに対して，上層の耐力・剛性を 1.4 倍した場合，上層の変形が最大約 40%小さくなっていることを確認した。これは，耐力を増大させたことによって弾性に留まったことと，剛性を増大させたことによって初期剛性が高くなったことが原因と考えられる。下層について着目すると，図 7(a)より，FS30 モデルにおいては，上層の耐力・剛性を増大したモデルにおいても下層の変形に大きな変化は見られない。一方，図 7(b)~(d)より，FS60，FS70，FS80 モデルにおいては，上層の耐力・剛性を増大したモデルで下層の変形が大きくなる傾向にある。この傾向は，耐力・剛性が増大した層が多いほど顕著に見られる。FS70 および FS80 モデルの C-SAN 入力時においては，オリジナルモデルに対して，上層の耐力・剛性を 1.4 倍した場合，下層の変形は最大約 50 %増大した。FS70 モデルの C-SAN 入力時と FS80 モデルの全ての地震動においては，3 層付近で 0.02rad を上回っていることが確認できる。したがって，耐力・剛性を増大する範囲が多いほど，下層の変形は大きくなるので注意が必要である。

### 3.3 梁の累積塑性変形倍率

図 8(a)~(d)に，各モデルの梁の累積塑性変形倍率 $_G\eta$ を示す。本論文の $_G\eta$ は，各層で最大となる梁端の値を用い，正負サイクルの合計値とする。

地震動ごとに着目する。ART-HACHI160 入力時においてオリジナルモデルの $_G\eta$ は，文献 13)で示す実験結果の統計値である安全限界値 13.5 を全層で下回っていることが確認できる。なお，この安全限界値は既往の部材実験結果の統計処理によって設定されており，床スラブ付きの現場溶接接合部が対象となる。上層の耐力・剛性を 1.2 倍，1.4 倍した全モデルについて見ると，下層の $_G\eta$ が 13.5 を大きく上回る結果となった。10~15 層の $_G\eta$ は，オリジナルモデルの場合，最大で約3を示したのに対して，FS60，FS70 および FS80 モデルの上層の耐力・剛性を1.4倍したモデルでは，$_G\eta$ がほぼ0となっていることが確認できる。これは，耐力が大きくなっていることと，剛性が大きくなったことによって変形が小さくなったことよる。

図 8(a)~(d) の C-SAN 入力時に，全ての解析モデルにおいて，下層の $_G\eta$ が13.5を大きく上回る結果となった。図 8(b)~(d)より，上層の耐力・剛性を 1.4 倍した場合(■)と耐力・剛性を 1.2 倍した場合(×)を比較すると，上層の耐力・剛性を 1.4 倍した場合の方が，下層の $_G\eta$ は小さい値を示していることが確認できる。これは，上層の耐

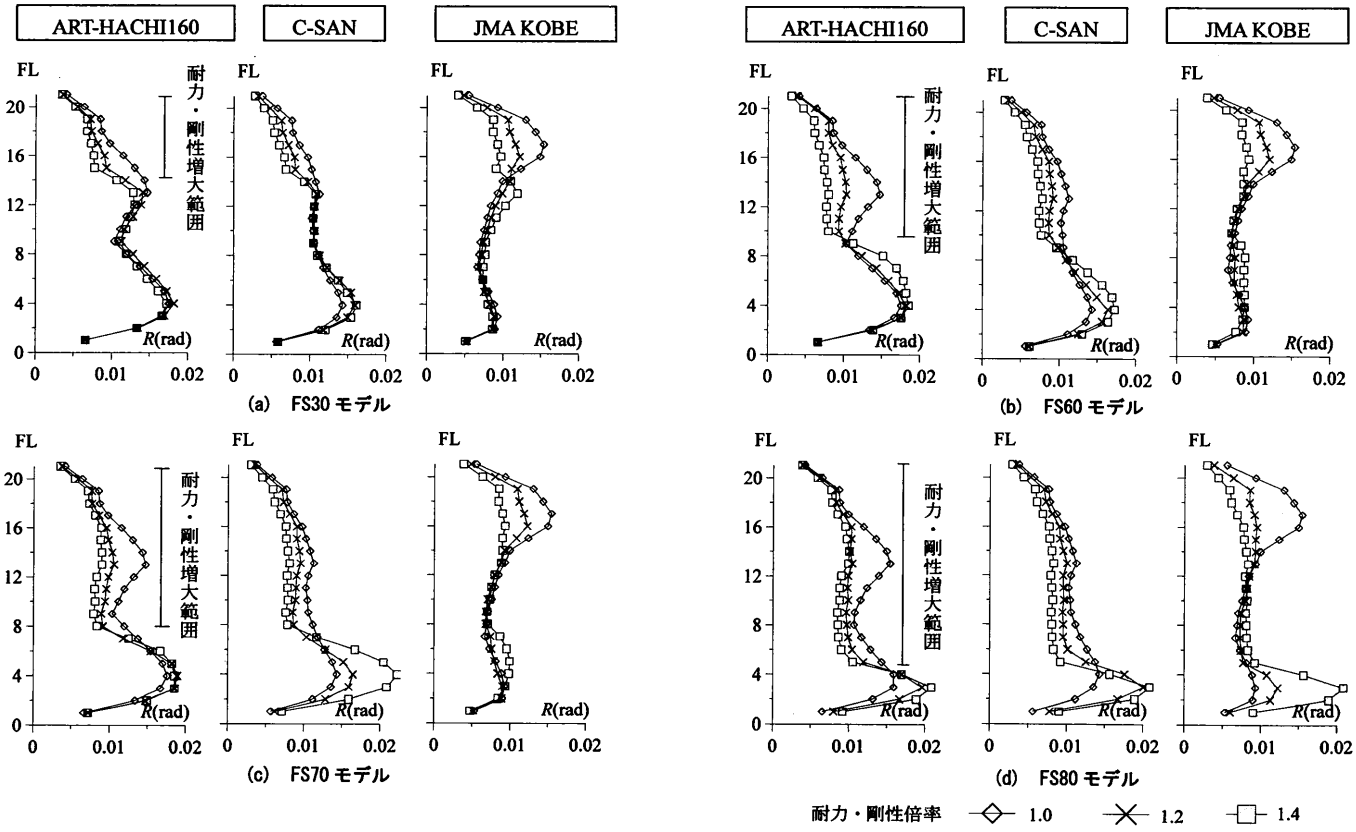



図 7 層間変形角（耐震モデル）



NII-Electronic Library Service

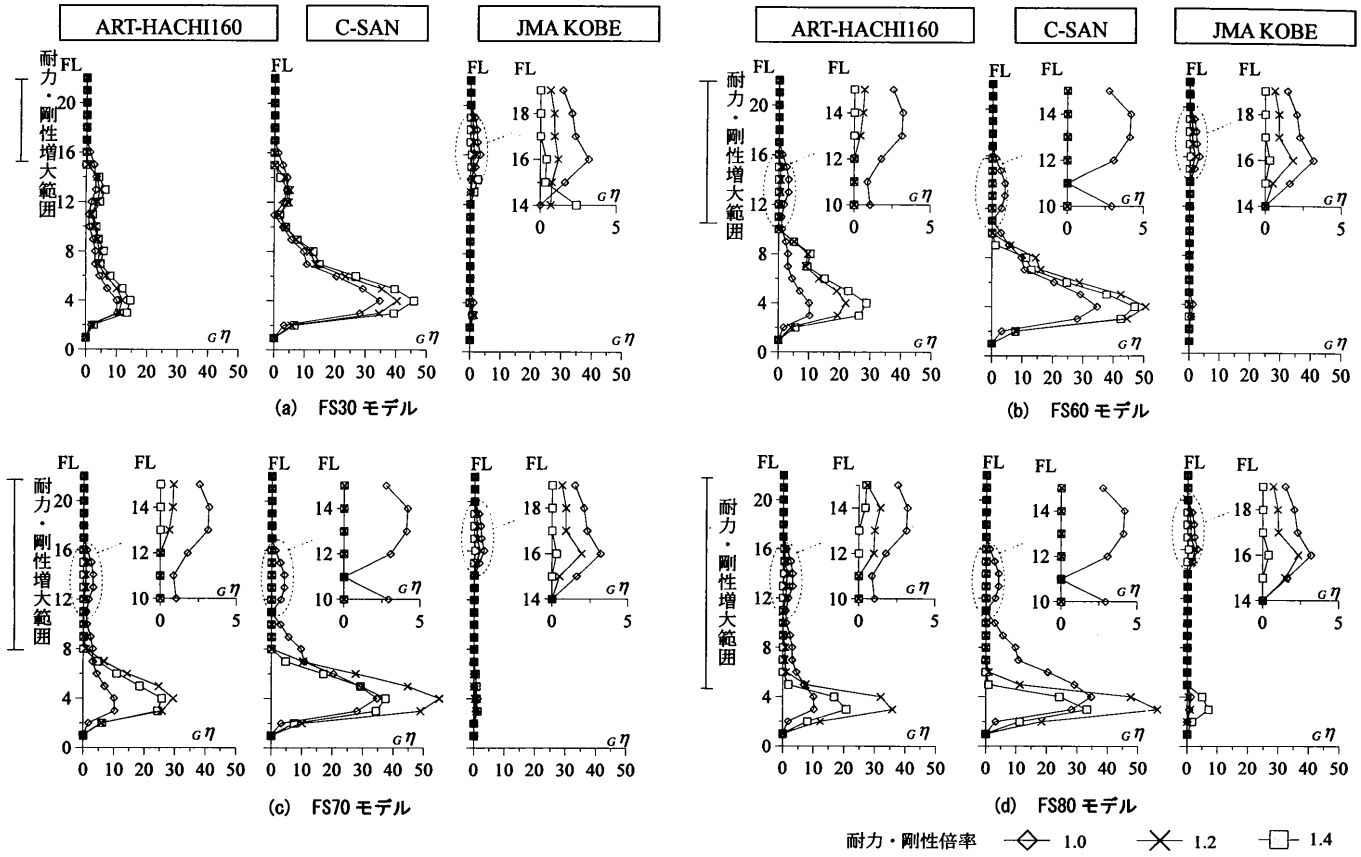



図 8 梁の累積塑性変形倍率（耐震モデル）

力・剛性を増大させることによる建物の周期変動によって，入力エネルギーが減少したためである（付表 B)。10~15層の $_G\eta$ は，オリジナルモデルで最大約 4 を示したのに対して，FS60，FS70 および FS80 モデルの，上層の耐力・剛性を 1.2 倍，1.4 倍したモデルでは 0 を示し，弾性範囲にとどまった。

JMA KOBE 入力時においては，FS80 モデルの 1.4 倍したモデルを除いて，下層の $_G\eta$ が最大で約 2 と非常に小さい値を示している。全てのモデルにおける14~19層の $_G\eta$ は，オリジナルモデルで最大約 3 を示し，耐力・剛性を 1.4 倍した場合は最大で約 0.5 を示し，概ね弾性であることを確認した。JMA KOBE 入力時には，ダンパーを付与しない状態でも，上層の耐力・剛性を 1.4 倍したモデルでは，全層の梁が概ね弾性範囲に留まった。

### 3.4 絶対加速度

図 5(b)の加速度応答スペクトルを見ると，短周期化することで，特に JMA KOBE 入力時に縦軸の加速度振幅が大きくなっていることが分かる。そこで，本節では各地震動入力時の絶対加速度 $A$ に着目する。図 9(a)~(d)に，各モデルの絶対加速度 $A$ を示す。初めに，オリジナルモデル（◇）の各地震動に着目し，地震動ごとの特性を把握する。ART-HACHI160 入力時については，変形と同様に，上下層で大きな違いは見られない。一方，C-SAN 入力時については，上層につれて絶対加速度は大きくなり，JMA KOBE 入力時には，最上層と 5 層付近で大きくなる傾向にある。最大値を比較すると JMA KOBE, ART-HACHI160, C-SAN の順に大きい。また，全てのモデルにおいて，上層の耐力・剛性を大きくしたモデルでも，絶対加速度 $A$ の大きな変化は見られない。これは，下層の塑性化による等価減衰および等価周期の増大によるものと思われる。これらから，本論文に用いた地震動と耐力および剛性変化率（図 6）の範囲においては，絶対加速度 $A$ の変化は小さいと考えられる。

### 3.5 梁の塑性率

表 4(a)~(c)に，動的解析より得られた梁の塑性率をまとめて示す。表中の「上層の状態」には，耐力・剛性を増大した範囲が弾性に留まった場合を○，塑性化した場を×で表している。初めに，上層における梁の塑性率について検討を行う。表 4(a)の ART-HACHI160 および表 4(c)の JMA KOBE 入力時については，上層の耐力・剛性を 1.4 倍したモデルでは，弾性範囲に留まることを確認した。表 4(b)の C-SAN を入力した際には，上層の耐力・剛性を 1.2 倍した場合，弾性範囲に留まった。次に，下層の梁の塑性率について考察を行う。ここで，塑性率（最大変形 / 降伏変形）を算出する際には，全てのモデルにおいて，もっとも応答が大きくなる傾向にあった 4 層の値を用いることとする。$\mu_4$ は，上層の耐力・剛性を増大したモデルの4層梁の塑性率を表す。$_{org}\mu_4$ は，上層の耐力・剛性が 1.0 倍であるオリジナルモデルにおける 4 層梁の塑性率である。$\mu_4/_{org}\mu_4$ は，オリジナルモデルに対して上層の耐力・剛性を大きくすることで，4 層の梁の塑性率がどの程度変化したかを表すものである。表 4(a)，(b)より，上層の耐力・剛性の増大範囲が大きいほど、$\mu_4/_{org}\mu_4$ は大きくなる傾向にあることが分かる。表 4(a)~(c)より，地震動ごとに着目すると，$\mu_4/_{org}\mu_4$ は，C-SAN, ART-HACHI160, JMA KOBE の順に大きいことが分かる。

そこで，次章では損傷の集中している層にのみダンパーを設置することで，主架構の損傷を大いに低減出来るか検討を行う。



NII-Electronic Library Service

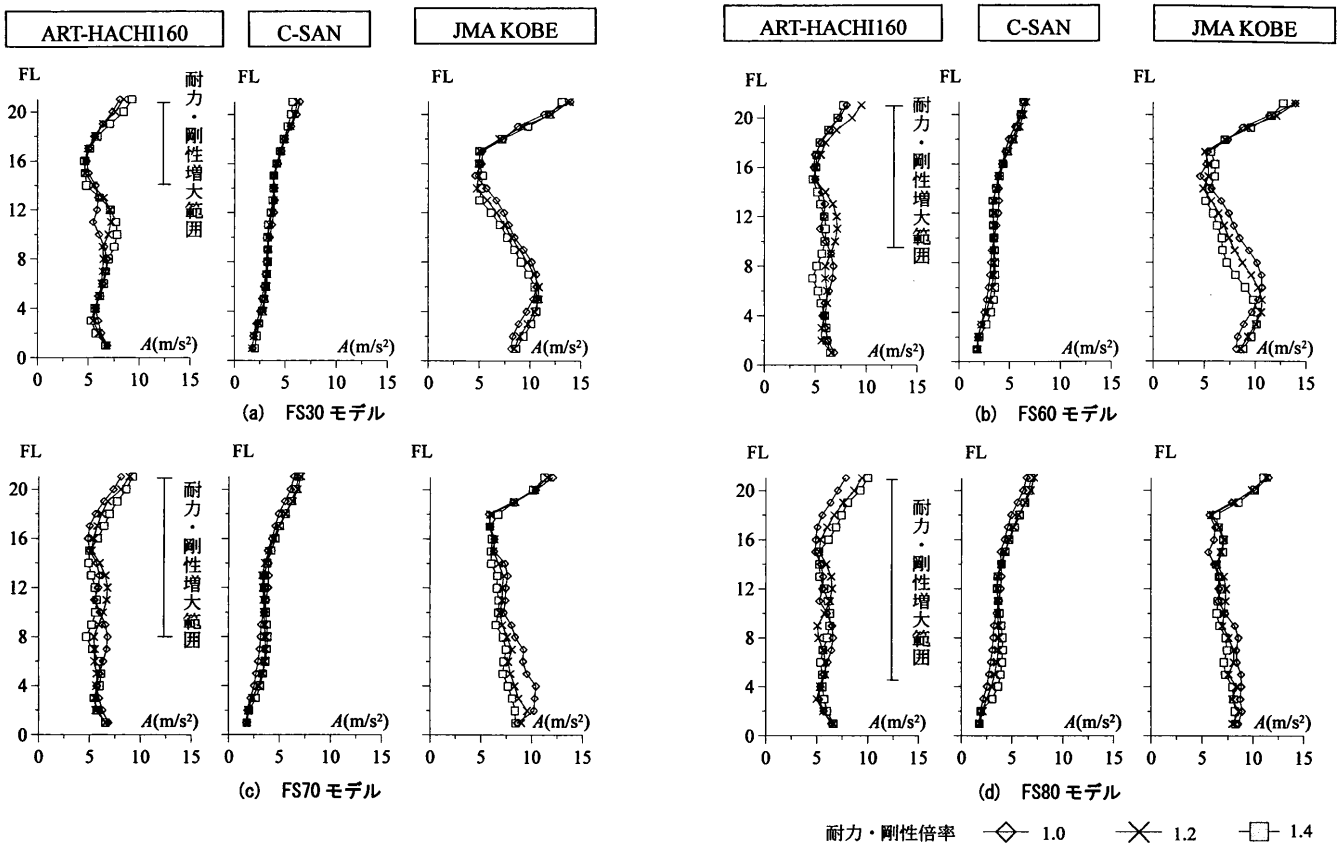



図 9 絶対加速度（耐震モデル）

表 4 梁の塑性率（耐震モデル）

(a) ART-HACHI160

| モデル名 | original | FS30 | | FS60 | | FS70 | | FS80 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 耐力・剛性倍率 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 |
| 上層の状態 | × | ○ | ○ | × | ○ | × | ○ | × | ○ |
| 4層梁の塑性率$\mu_4$ | 3.53 | 3.46 | 3.49 | 4.24 | 4.34 | 5.02 | 5.26 | 5.78 | 4.53 |
| $\mu_4/_{org}\mu_4$ | 1.00 | 0.98 | 0.99 | 1.20 | 1.23 | 1.42 | 1.49 | 1.64 | 1.28 |

(b) C-SAN

| モデル名 | original | FS30 | | FS60 | | FS70 | | FS80 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 耐力・剛性倍率 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 |
| 上層の状態 | × | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 4層梁の塑性率$\mu_4$ | 3.07 | 3.59 | 3.68 | 3.82 | 4.12 | 3.88 | 5.74 | 4.82 | 4.77 |
| $\mu_4/_{org}\mu_4$ | 1.00 | 1.17 | 1.20 | 1.24 | 1.34 | 1.26 | 1.87 | 1.57 | 1.55 |

(c) JMA KOBE

| モデル名 | original | FS30 | | FS60 | | FS70 | | FS80 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 耐力・剛性倍率 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.4 |
| 上層の状態 | × | × | ○ | × | ○ | × | ○ | × | ○ |
| 4層梁の塑性率$\mu_4$ | 1.52 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.37 | 1.61 | 1.41 | 2.37 |
| $\mu_4/_{org}\mu_4$ | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.90 | 1.06 | 0.93 | 1.56 |

＊ ○:弾性 ×：塑性

## 4. 制振モデルの応答性状

### 4.1 制振モデルにおける切替え層の耐力・剛性変化率

図 10 (a), (b)に，制振モデルの耐力変化率および剛性変化率を示す。DS30 モデルであれば，耐力変化率は，$Q_{y15}/Q_{y14}$ であり，剛性変化率は，$K_{15}/K_{14}$ である。ここで，制振モデルにおいては，$Q_{yj\text{-}1}$：$j$-1 層の弾性限界せん断力と $j$-1 層のダンパーの降伏せん断力の和，

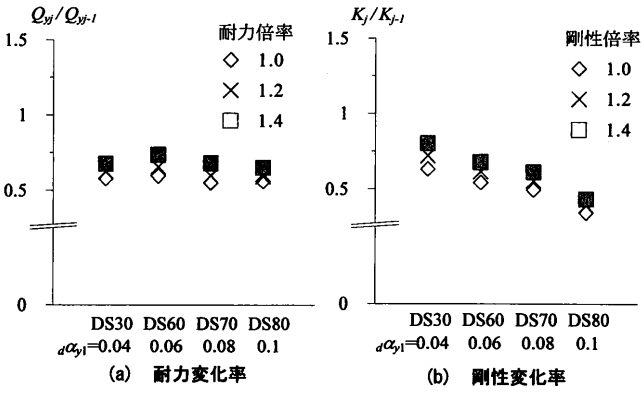



図 10 切替え層の耐力・剛性変化率（制振モデル）

$K_{j\text{-}1}$:制振部材を設置した場合の $j$-1 層の層剛性を表す。図 10(a)より，制振モデルでは，ダンパーを設置することで下層の耐力が増大するために，耐震モデル（図 6）と比べて，耐力変化率は大きく増大しないことが分かる。図 10(b)より，制振モデルの場合，ダンパーを設置することで下層の剛性が高くなるため，剛性変化率は耐震モデルと比較して小さくなり，0.4~0.8 程度になることを確認した。また，DS30 モデルから DS80 モデルになるにしたがって，ダンパー量 $_d\alpha_{y1}$ が変化しているため，剛性変化率が低下していることが確認できる。

### 4.2 層間変形角

図 11(a)~(d)に，制振モデルの層間変形角 $R$ を示す。耐震モデルの上層の耐力・剛性を増大したモデルの場合，下層の変形が大きくなるが（図 7(a)~(d)），図 11(a)~(c)の，DS30, DS60 および DS70 モデ



NII-Electronic Library Service

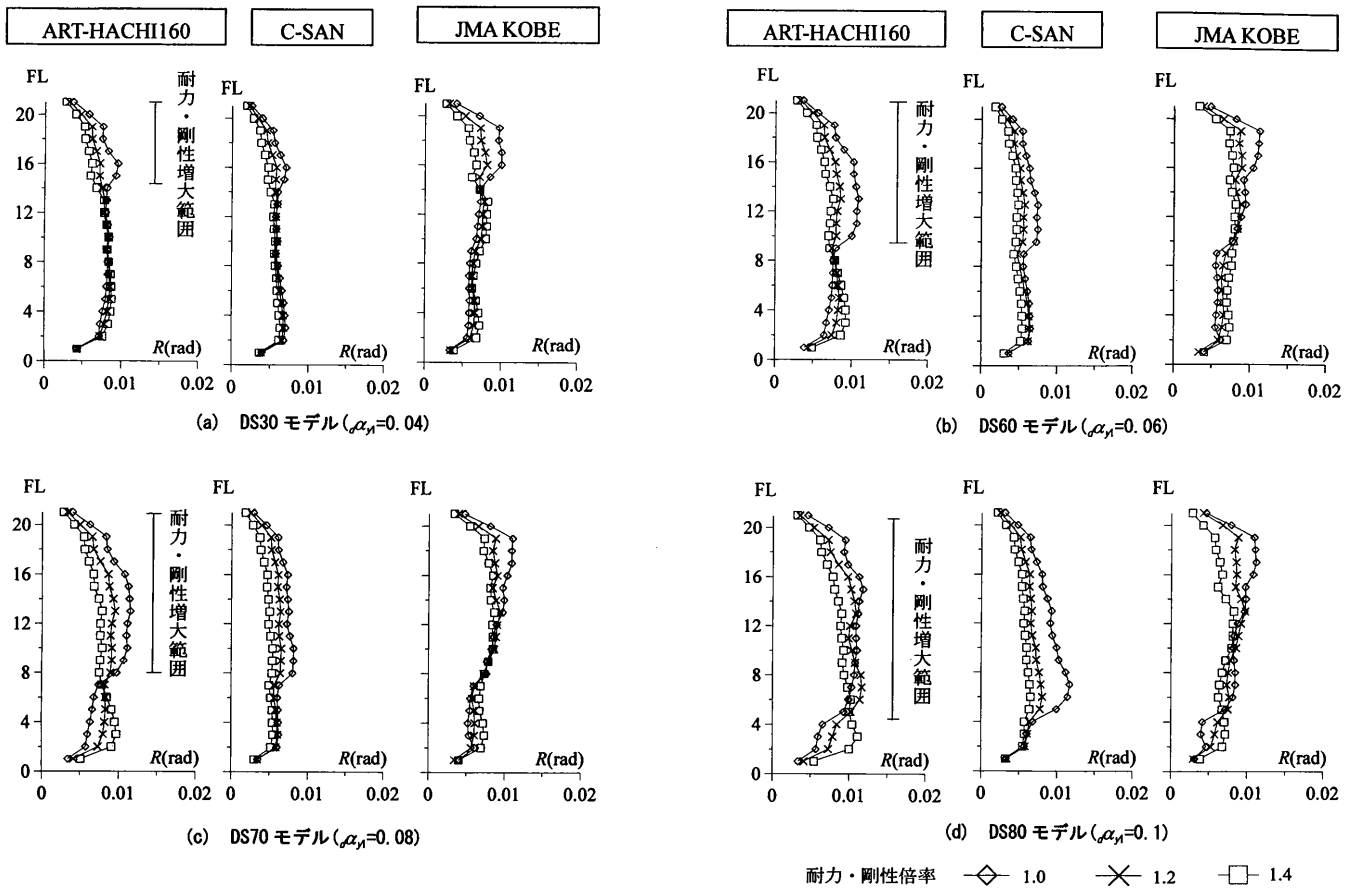



図 11 層間変形角（制振モデル）

ルにおける下層の変形は，ダンパーによって低減されている。特に，ART-HACHI160 および C-SAN 入力時においては，上層の耐力・剛性を 1.2 倍したモデルの場合，上層と下層の変形が同程度になっていることが確認できる。FS70 モデルの C-SAN 入力時には，下層が 0.02rad を示したのに対して，制振化した場合，下層の変形は 0.006 rad 程度にまで低減していることが確認できる。これには，図 5 のスペクトルからも分かるように，下層へのダンパー設置により，制振モデルの固有周期が短くなったことで，$V_E$ および $S_D$ が，小さくなっている影響も含まれている。

図 11(c), (d)の DS70 と DS80 モデルより，ART-HACHI160 入力時に上層の耐力・剛性を 1.4 倍したモデルでは，下層の変形が大きくなる傾向にあるが，下層の変形は，上層と同程度である。

### 4.3 梁の累積塑性変形倍率

図 12(a)~(d)に，制振モデルにおける梁の累積塑性変形倍率 $_G\eta$ を示す。図 12(a)~(d)より，制振モデルの場合，耐震モデル（図 8）と比較して $_G\eta$ は大きく低減されていることが確認できる。DS30, DS60 および DS70 モデルは，いずれの地震波においても上層の耐力・剛性を 1.2 倍した場合，梁を概ね弾性に留める事が出来ている。図 12(d)の DS80 モデルの場合，C-SAN および JMA KOBE 入力時において，上層の耐力・剛性を 1.2 倍，1.4 倍したモデルでは，梁が弾性範囲に留まった。DS80 モデルの C-SAN 入力時において，上層の耐力・剛性 1.0 倍の際は，6 層で約 4 と大きな値を示しているのに対して，上層の耐力・剛性を 1.2 倍したモデルでは弾性範囲に留まっている。一方で，ART-HACHI160 入力時においては，上層の耐力・剛性を 1.4 倍したモデルでも $_G\eta$ は最大約1となっており，塑性化の程度は小さいものの，塑性化していることを確認した。これらから，上層の耐力・剛性が大きくなることによる上層の応答低減効果は地震動によって異なると考えられる。

### 4.4 ダンパーの累積塑性変形倍率

図 13(a)~(d)に，制振モデルにおけるダンパーの累積塑性変形倍率 $_d\eta$ を示す。モデルごとに着目すると，ダンパー設置層が少ないほど $_d\eta$ は小さい値を示した。これは，DS30 モデルに対して DS80 モデルで，ダンパー量($_d\alpha_{y1}$)が多いためである。

図 13(b)~(d)より，C-SAN 入力時において，上層の耐力・剛性を 1.4 倍した場合(■)と耐力・剛性を 1.2 倍した場合(×)を比較すると，上層の耐力・剛性を 1.4 倍した場合(■)の方が，下層の $_d\eta$ は小さい値を示していることが確認できる。これは，上層の耐力・剛性を増大したモデルは，入力エネルギーが減少したためである（付表 B)。

図 13(c), (d)より，ダンパー設置層が少ない DS70 と DS80 モデルでは，切り替え層付近の $_d\eta$ が大きくなる傾向にあり，注意が必要である。

### 4.5 ダンパーの実効変形比

図 14(a)~(d)に，ダンパーの実効変形比 $\alpha_e$ を示す。実効変形比とは，ダンパーの稼動効率を表す指標であり，層間変形の最大値をダンパーの水平方向変形の最大値で除すことで算出される。なお一般的に，実効変形比 $\alpha_e$ は，上層で大きく低減し，変形が増大することで大きくなり，ダンパー量 $_d\alpha_{y1}$ が増大することで小さくなることが確認されている[14]。変形が大きくなることで，実効変形比 $\alpha_e$ が大きくなる



NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

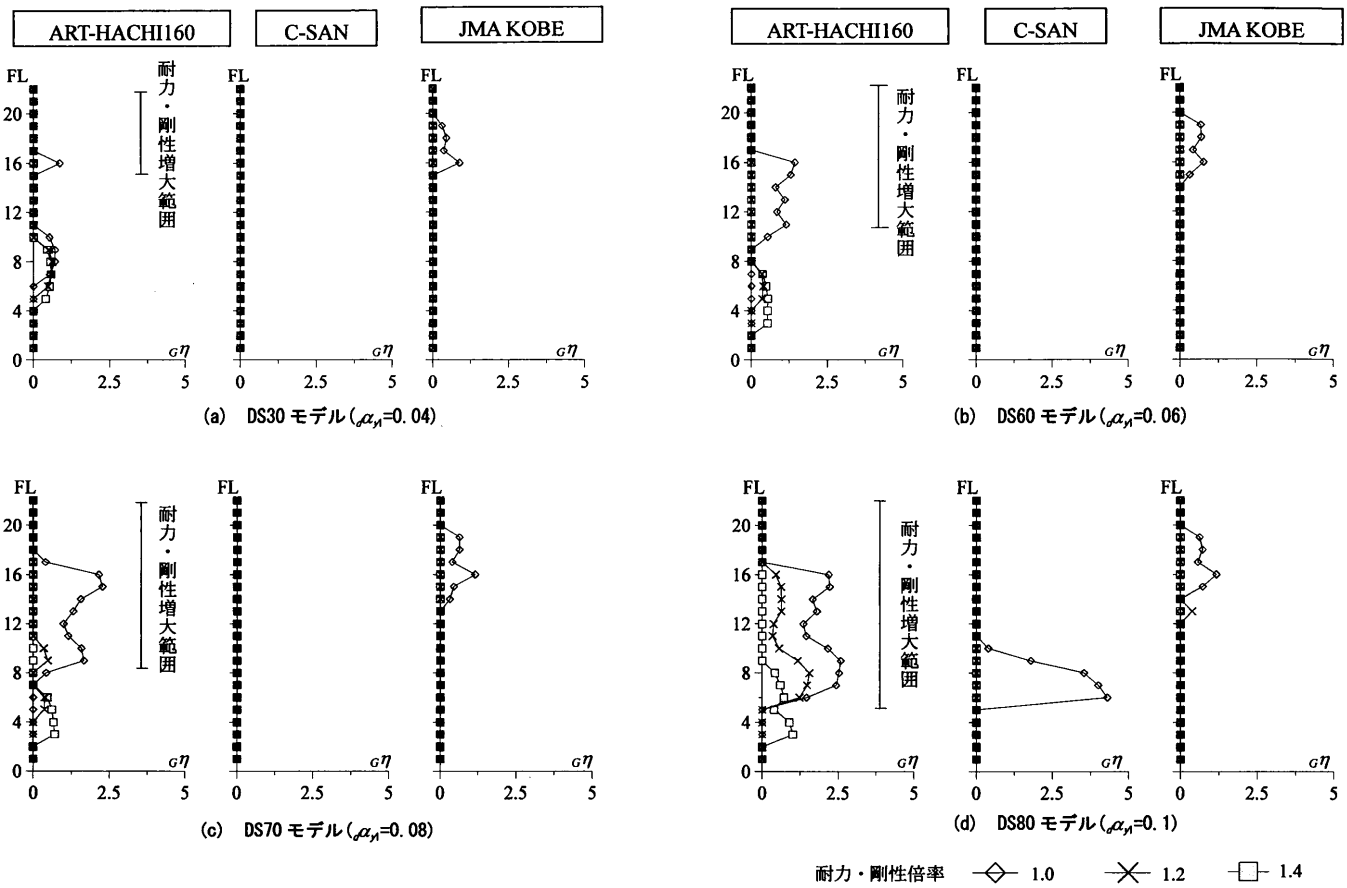



図 12 梁の累積塑性変形倍率（制振モデル）

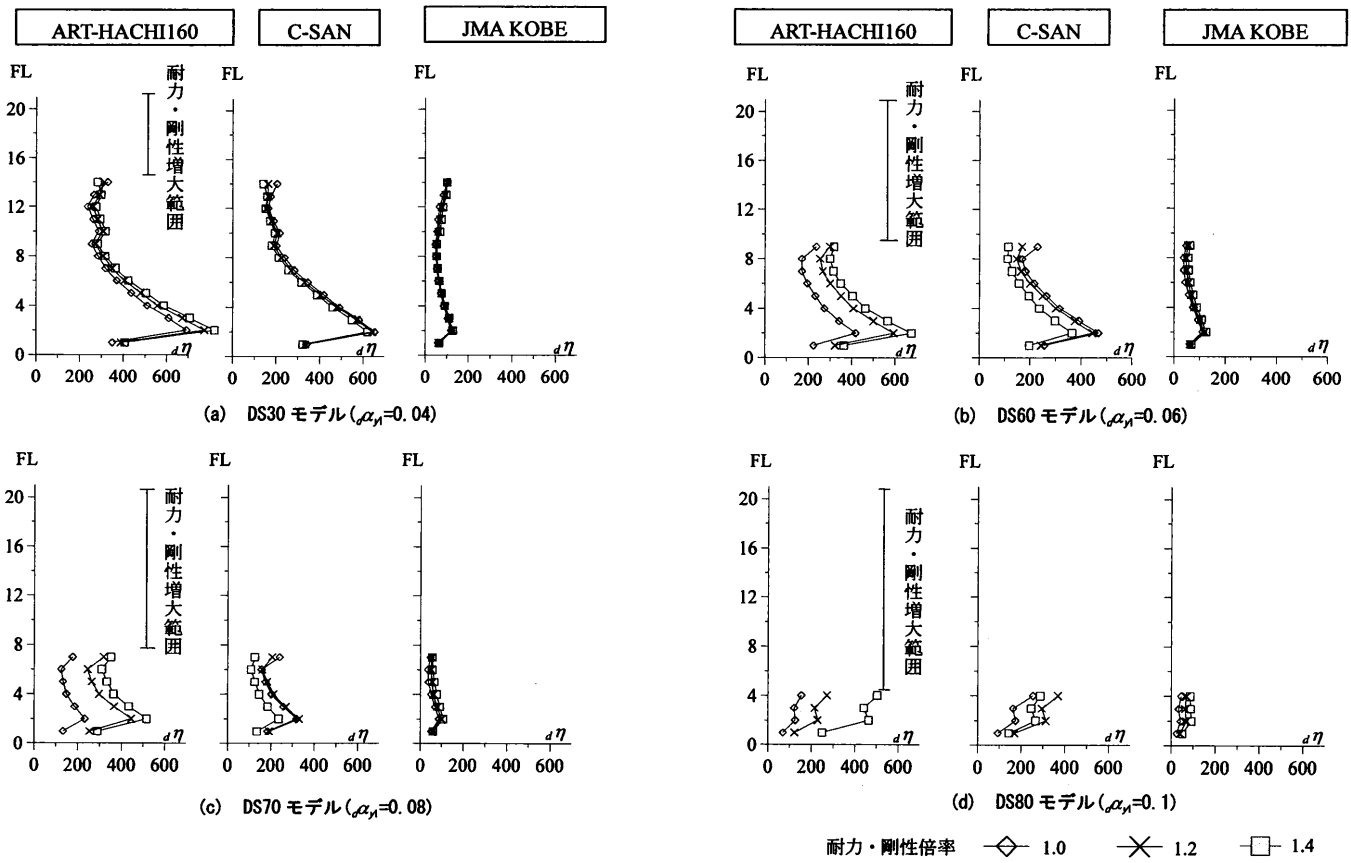



図 13 ダンパーの累積塑性変形倍率



NII-Electronic Library Service

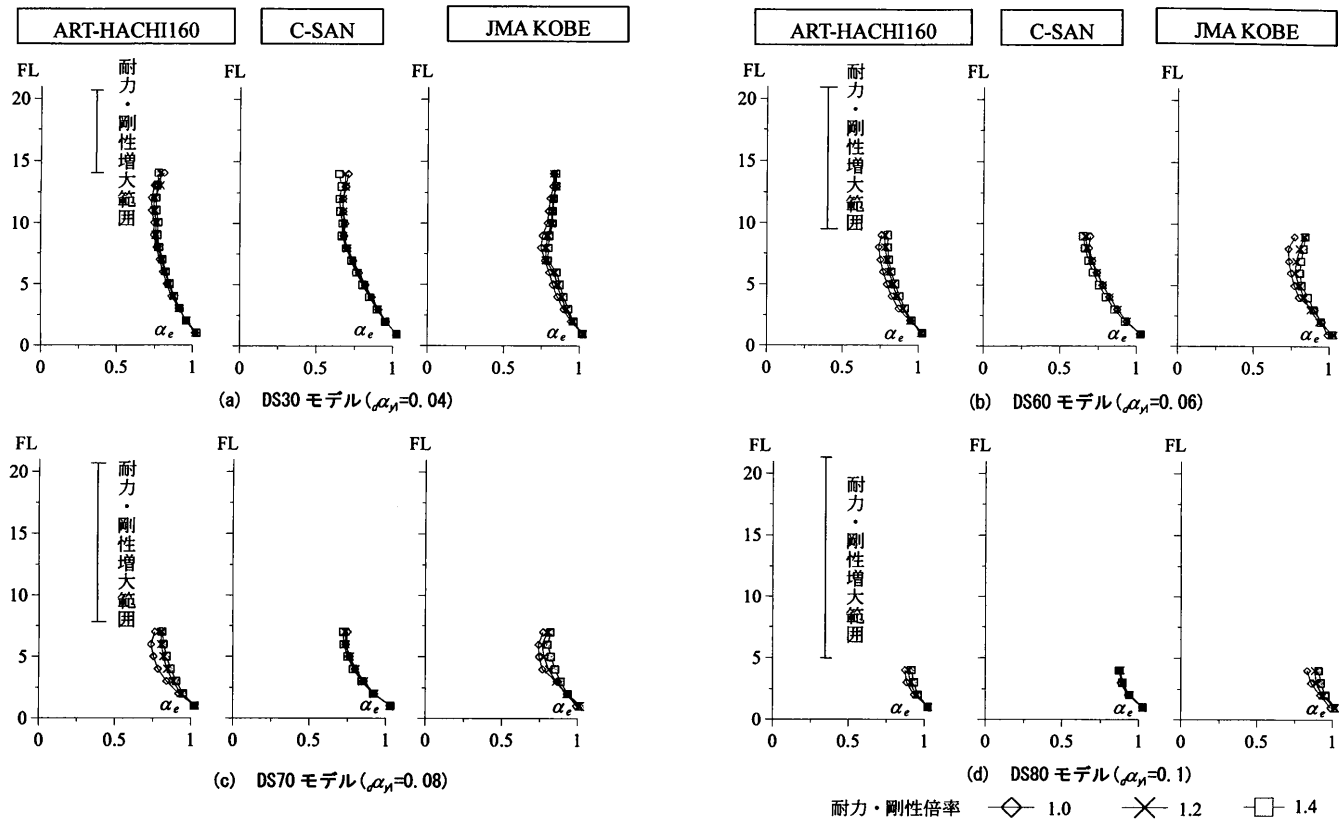



図 14 ダンパーの実効変形比

原因は，主架構に対してダンパーの等価剛性が低くなるためである。

図 14(a)~(d)について，地震動ごとに着目すると，JMA KOBE 入力時は，上層の変形が大きくなるために，ART-HACHI160 および C-SAN 入力時よりも，実効変形比$\alpha_e$は大きい値となっている。

各モデルごとに着目すると，図 14(a)の DS30 モデルにおいて，上層の実効変形比$\alpha_e$は,大きく低減していないことが確認できる。これは，切り替え層付近で変形が大きくなるためである。図 14(a),(d)より，DS80 モデルは，DS30 モデルと比較してダンパー量 $_d\alpha_{y1}$ が増大しているのにも関わらず，実効変形比$\alpha_e$は低減していない。つまり，ダンパー設置層が少ないほど，ダンパーが効率よく稼働していることを意味している。上層の耐力・剛性の大きさに着目すると，DS60, DS70 および DS80 モデルは，上層の耐力・剛性を増大することで，下層の変形が相対的に大きくなるため，耐力・剛性 1.0 倍の時に対して 1.4 倍したモデルは，実効変形比$\alpha_e$が約 10%大きくなっている。

## 5. まとめ

本論文では，複合超高層建物を対象とするフレームモデルを用いた時刻歴解析を通して，下層部のみに設置した鋼製ダンパーの応答低減効果，損傷低減効果を検証した。入力地震動として，速度応答スペクトル $S_V$ を 1.60m/s に基準化した ART-HACHINOHE に加え,著名な長周期地震動および直下型地震として，三の丸波および JMA KOBE を使用した。本解析条件に限られた範囲であるが，以下の知見を得た。

(1) 耐震モデルにおいて，上層の耐力・剛性を増大した場合，下層の変形が大きくなる傾向にある。特に，上層の耐力・剛性を増大させる層が多いほど，この傾向は強く見られる。

(2) 本論文で対象とする範囲では，上層の耐力・剛性を増大させることでの，絶対加速度の大きな変化は見られなかった。これは，梁が塑性化することで，等価減衰および等価周期が増大したことが原因と考えられる。

(3) 上層の耐力・剛性の増大によって下層に集中した変形は下層に部分配置したダンパーで大きく低減することが出来，上層の耐力・剛性を 1.2 倍したモデルでは，梁を概ね弾性範囲に留める事が出来た。

(4) 上層の耐力・剛性が大きいモデルでは，ダンパーの実効変形比$\alpha_e$は大きくなる傾向にあり，ダンパー設置層が少ないほどその傾向は大きい。

**謝辞**

本研究は，社団法人日本鉄鋼連 2011 年度「鋼構造研究・教育助成事業」による「一般テーマ研究助成」（研究代表者：佐藤大樹）によって実施いたしました。ここに記して謝意を表します。

**参考文献**

1) 日本建築センター性能評価シート（高層建築物），ビルディングレター，1966.1~2001.5

2) 助村浩太郎，佐藤大樹，大下優作，北村春幸，長江拓也，佐野剛志：性能評定シートによる既存超高層鋼構造建物の耐震性能評価 - その 1 年代・地区に着目した既存建物の耐震性能分析 -，日本建築学会関東支部研究報告集，pp257-260，2011.3

3) 加藤誠一，荒川利治：高さ方向の剛性分布が不連続な建物の水平せん断力分布－曲げせん断型均等フレームの地震応答性状－，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp497-498，1999.9

4) 渡辺智明，荒川利治，洪忠憲：高さ方向に構造的不均等性を有する曲げせん断型均等フレームの振動性状（その 1. 質量・剛性の不均等性），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp971-972，1995.8

5) 荒川利治，渡辺智明，洪忠憲：高さ方向に構造的不均等性を有する曲げせ



NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

ん断型均等フレームの振動性状（その 2. 剛性と梁強度分布の不均等性），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp971-972，1996.9
6) 長江拓也，鐘育霖，島田侑，福山國夫，梶原浩一，井上貴仁，中島正愛，斉藤大樹，北村春幸，福和伸夫，日高桃子：超高層建物の耐震性能を検証する実架構実験システムの構築－E-ディフェンス振動台実験－，日本建築学会構造系論文集，第 640 号，pp1163-1171，2006.9
7) 山崎昭司，大宮幸，村岡康祐，寺本隆幸：低降伏点鋼制振部材を用いた超高層建築の応答性状に関する研究　その 1, 2，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2, pp.723-724, 2003.9
8) 平田淳二，寺本隆幸：各種ダンパーを用いた鋼構造建物の応答性状に関する研究－ダンパー配置による影響－，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.569-570，2008.9
9) 星幸男，鱒沢曜，久田嘉章，小菅芙沙子：首都圏にある超高層キャンパスの地震防災対策に関する研究（その 4）超高層ビルの制震補強の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.619-620，2007.8
10) 島田侑，佐藤大樹，長江拓也，北村春幸，福山國夫，梶原浩一，井上貴仁，中島正愛，斎藤大樹，福和伸夫，日高桃子：超高層建物の下層階に部分配置する履歴型ダンパーの効果と影響に関する検討-長周期地震動を想定した耐震改修-，日本建築学会構造系論文集，第 75 巻，第 649 号，pp549-557，2010.3
11) 北村春幸：性能設計のための建築振動解析入門，彰国社，2002.9
12) 愛知県建築住宅センター：名古屋三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成（概要版）、（財）愛知県建築住宅センター耐震構造委員会設計用入力地震動検討部会、pp1-48、2004.6
13) 北村春幸，宮内洋二，浦本弥樹：性能設計における耐震性能判断基準値に関する研究—JSCA 耐震性能メニューの安全限界値と余裕度レベルの検討—，日本建築学会構造系論文集，第 604 号，pp.183-191，2006.6
14) 添田幸平，佐藤大樹，北村春幸，石井正人，吉江慶祐，宮崎充，佐々木和彦，岩崎雄一：連層配置した履歴型ダンパーと粘性型ダンパーが超高層建物の制振効果に与える影響，日本建築学会技術報告集，No18，pp.477-482，2012.6
15) 独立行政法人 建築研究所：鋼構造建築物へのエネルギー法活用マニュアル，-平成 17 年国土交通省告示第 631 号「エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法」に準拠して-，技術堂出版，2008.9

**付録 A　ダンパーの疲労評価**

時刻歴応答解析の結果，DS30 モデル($_d\alpha_{y1}$=0.04)で最も大きいダンパーの累積塑性変形倍率 $_d\eta$を示した。そこで，DS30 モデルに ART-HACHI160 入力時の，ダンパーの累積塑性変形倍率 $_d\eta$と塑性変形倍率 $_d\mu$の関係を付図 A 示す。ここで，$_d\eta$と $_d\mu$は，各層のダンパーの最大値を示す。なお，実線で示しているのがダンパーの破断曲線である。破断曲線は以下の式を用いて算出した [15]。

$$ {}_d\eta = \frac{(2_d\mu - 3\sigma_y)/E \times (2_d\mu - \sigma_y/20.48E)^{-(1/0.49)}}{(\sigma_y/E)} \qquad \text{(A-1)} $$

ここで，$\sigma_y$: 降伏応力，$E$: ヤング率

付図 A-1 より，全てのダンパーが破断線を超えないことを確認した。しかし，上層の耐力・剛性を 1.4 倍したモデルが最も厳しい結果となったために，ART-HACHI160 を 2 回入力した際の $_d\eta$と $_d\mu$を付図B–2に示す。付図A–2より，2，3層のダンパーが破断線に至った。

**付録 B　エネルギー概要**

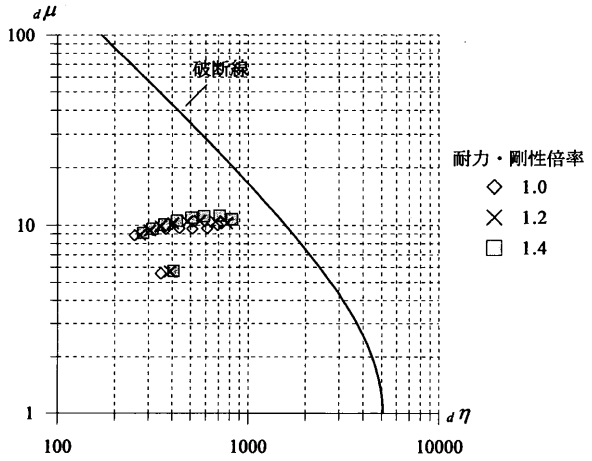
付表 B に，各地震動を入力した際の入力エネルギー$E$，減衰エネルギー$_hW_h$，主架構の累積塑性歪エネルギー$_pW_p$，ダンパーの累積塑性歪エネルギー$_dW_p$を示す。

**付録 C　FS60 モデル，FS80 モデルにおける *Q-R* の関係**

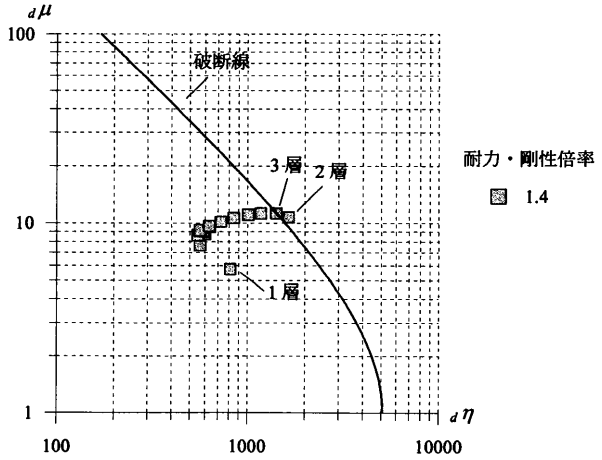
付図 C(a)に，例として FS60 モデルの耐力・剛性を 1.2 倍，1.4 倍したモデルにおける *Q-R* の関係を示す。付図 C(b)に，FS80 モデルの耐力・剛性を 1.2 倍，1.4 倍したモデルにおける *Q-R* の関係を示す。

**付録 D　ダンパー設置による層剛性・耐力変化**

オリジナルのモデルに対して，下層にダンパーを設置した際の層剛性 $K$ と耐力 $Q_y$ の変化を付図 D に示す。DS30 モデルでは $_d\alpha_{y1}$=0.04，DS60 モデルでは $_d\alpha_{y1}$=0.06，DS70 モデルでは $_d\alpha_{y1}$=0.08，DS80 モデルでは $_d\alpha_{y1}$=0.1 のダンパーを設置した場合である。(a)は，それぞれ，DS30，DS60，DS70，DS80 モデルのダンパー設置層の層剛性を表している。層剛性は，静的解析より得られた初期剛性を表している。ダンパーを設置することで層剛性が大きく増大していることが確認できる。(b)は，ダンパーを設置した際の耐力を表している。各層の弾性限界せん断力とダンパーの降伏せん断力の和である。DS70 モデルの 1 層と DS80 モデルの 1，2 層の主架構が降伏しなかったために，示していない。




付図 A-1　ダンパーの疲労評価(DS30 モデル, ART-HACHI160)




付図 A-2　ダンパーの疲労評価(DS30 モデル, ART-HACHI160_2 回入力)



NII-Electronic Library Service

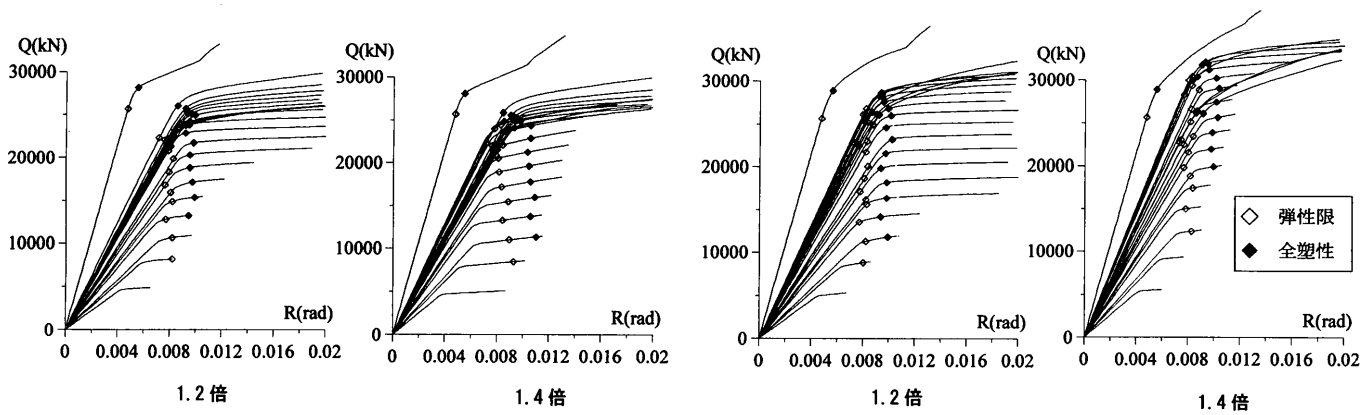
付表 B　エネルギー概要 (KNm)

(a)　耐震モデル

| モデル＼地震波 | | $T_1$(s) | ART-HACHI160 | | | C-SAN | | | JMA KOBE | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $E$ | ${}_fW_h$ | ${}_fW_p$ | $E$ | ${}_fW_h$ | ${}_fW_p$ | $E$ | ${}_fW_h$ | ${}_fW_p$ |
| オリジナルモデル | | 2.41 | 38529 | 27382 | 11145 | 78670 | 44420 | 34246 | 15237 | 13290 | 1945 |
| FS30 | 1.2倍 | 2.39 | 44137 | 30314 | 13821 | 85644 | 45645 | 39995 | 15361 | 14193 | 1167 |
| | 1.4倍 | 2.37 | 49626 | 33090 | 16532 | 87984 | 44810 | 43170 | 14601 | 13731 | 870 |
| FS60 | 1.2倍 | 2.33 | 58973 | 37500 | 21468 | 86535 | 42714 | 43817 | 15030 | 14113 | 916 |
| | 1.4倍 | 2.28 | 64369 | 38726 | 25636 | 75577 | 37962 | 37611 | 14179 | 13919 | 260 |
| FS70 | 1.2倍 | 2.31 | 62847 | 39186 | 23656 | 83036 | 41234 | 41798 | 15353 | 14361 | 991 |
| | 1.4倍 | 2.24 | 53623 | 34056 | 19562 | 68635 | 40923 | 27710 | 14320 | 13789 | 530 |
| FS80 | 1.2倍 | 2.26 | 58349 | 37638 | 20707 | 70555 | 41028 | 29524 | 15744 | 14403 | 1340 |
| | 1.4倍 | 2.14 | 42471 | 31632 | 10836 | 58454 | 43967 | 14487 | 16254 | 14130 | 2122 |

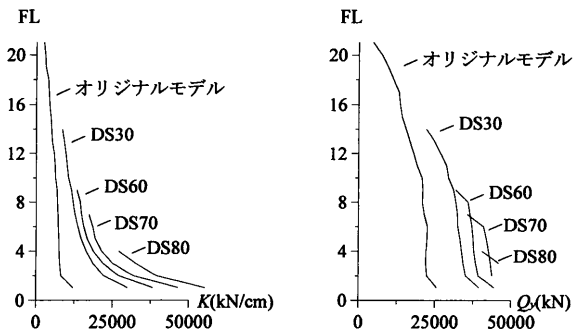
(b)　制振モデル

| モデル (${}_d\alpha_{y1}$)＼地震波 | | $T_1$(s) | ART-HACHI160 | | | | C-SAN | | | | JMA KOBE | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $E$ | ${}_fW_h$ | ${}_fW_p$ | ${}_dW_p$ | $E$ | ${}_fW_h$ | ${}_fW_p$ | ${}_dW_p$ | $E$ | ${}_fW_h$ | ${}_fW_p$ | ${}_dW_p$ |
| DS30 (0.04) | 1.0倍 | 1.83 | 105620 | 32577 | 224 | 57815 | 68601 | 17952 | 1 | 50643 | 19270 | 7892 | 150 | 11216 |
| | 1.2倍 | 1.79 | 97137 | 34026 | 135 | 62953 | 64849 | 16157 | 0 | 48687 | 19436 | 7513 | 4 | 11907 |
| | 1.4倍 | 1.76 | 99411 | 33610 | 163 | 65613 | 61474 | 14718 | 0 | 46751 | 19735 | 7239 | 5 | 12480 |
| DS60 (0.06) | 1.0倍 | 1.92 | 78117 | 37631 | 188 | 39707 | 68818 | 24898 | 0 | 43917 | 20641 | 10023 | 432 | 10171 |
| | 1.2倍 | 1.81 | 99059 | 40997 | 100 | 57943 | 59959 | 19489 | 0 | 40467 | 21208 | 9854 | 31 | 11312 |
| | 1.4倍 | 1.73 | 109370 | 43234 | 511 | 65923 | 46370 | 14628 | 0 | 31738 | 21957 | 9382 | 6 | 12559 |
| DS70 (0.08) | 1.0倍 | 1.98 | 68597 | 40250 | 1630 | 26689 | 65411 | 29142 | 31 | 36236 | 21223 | 11573 | 509 | 9126 |
| | 1.2倍 | 1.85 | 98355 | 46661 | 182 | 51491 | 59953 | 23393 | 0 | 36557 | 22221 | 11348 | 57 | 10808 |
| | 1.4倍 | 1.75 | 111650 | 50379 | 251 | 61000 | 41328 | 16397 | 0 | 24927 | 22811 | 10512 | 10 | 12281 |
| DS80 (0.1) | 1.0倍 | 2.13 | 50722 | 33317 | 11076 | 14256 | 53707 | 30339 | 2829 | 20534 | 16637 | 11398 | 639 | 4580 |
| | 1.2倍 | 1.96 | 70528 | 43804 | 1506 | 25187 | 66934 | 32385 | 2 | 34546 | 19677 | 12219 | 90 | 7363 |
| | 1.4倍 | 1.82 | 102620 | 51797 | 884 | 49914 | 52276 | 23827 | 0 | 28446 | 21627 | 11825 | 53 | 9744 |




(a) FS60 モデル　　(b) FS80 モデル

付図 C　FS60, FS80 モデルにおける $Q$-$R$ の関係




(a)　層剛性変化　　(b)　耐力変化

付図 D　ダンパー設置による層剛性および耐力変化



NII-Electronic Library Service