

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	オイル・鋼製ダンパーを用いた下層部分制振補強の効果と影響に関する検討
Title(English)	INVESTIGATION ON EFFECTIVENESS AND INFLUENCE OF LOWER PARTIAL RETROFITTING WITH OIL DAMPER OR STEEL DAMPER
著者(和文)	加藤翼, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 北村春幸, 長江拓也, 石井正人, 吉江慶祐
Authors(English)	Daiki Sato, Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura, Takuya Nagae, Masato Ishii, Keisuke Yoshie
出典(和文)	日本建築学会技術報告集, Vol. 21, No. 48, pp. 533-538
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 21, No. 48, pp. 533-538
発行日 / Pub. date	2015, 6
権利情報	日本建築学会
Relation	<a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/21/48/21_533/_article/-char/ja/">https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/21/48/21_533/_article/-char/ja/</a>
Note	本文データは学協会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである

# オイル・鋼製ダンパーを用いた 下層部分制振補強の効果と影響 に関する検討

# INVESTIGATION ON EFFECTIVENESS AND INFLUENCE OF LOWER PARTIAL RETROFITTING WITH OIL DAMPER OR STEEL DAMPER

加藤 翼 ——— \* 1 佐藤大樹 ——— \* 2  
佐藤利昭 ——— \* 3 北村春幸 ——— \* 4  
長江拓也 ——— \* 5 石井正人 ——— \* 6  
吉江慶祐 ——— \* 6

Tsubasa KATO ——— \* 1 Daiki SATO ——— \* 2  
Toshiaki SATO ——— \* 3 Haruyuki KITAMURA — \* 4  
Takuya NAGAE ——— \* 5 Masato ISHII ——— \* 6  
Keisuke YOSHIE ——— \* 6

キーワード：  
高層建物, 制振補強, 長周期地震動, オイルダンパー, 鋼製ダンパー

Keywords:  
High-rise building, Seismic retrofit, Long-period ground motion, Oil damper, Steel damper

According to past researches, partial retrofitting which install steel dampers into lower stories of existing high-rise building as vibration control method for long-period ground motion is suggested. This paper reports the seismic response and response characteristics of the analysis models partial installed oil dampers or steel dampers aimed at enhancing the adaptive range of partial retrofitting. The analysis result shows effectiveness of oil damper and some points of attention to design such as the increase of deformation in the damper installed stories and the damper non-installed stories.

## 1. はじめに

超高層建物の設計において、長周期地震動に対する検討の必要性が広く認識されつつある<sup>1)</sup>。しかし、超高層建物の設計方法・技術は、時代とともに変化を続けており<sup>2),3)</sup>、建設年代によっては、長周期地震動に対する検討が必ずしも十分ではない場合も想定される。1980年以前に建設された初期の超高層建物の実架構を再現した E-ディフェンス震動台実験<sup>4)</sup>では、長周期地震動による長時間の繰返し変形によって現場溶接接合を採用した柱梁接合部の破断が確認されている<sup>5),6)</sup>。実際に柱梁接合部に現場溶接接合を採用している超高層建物は多く現存していることから<sup>7)</sup>、多くの建物で長周期地震動に対する耐震補強が必要となる可能性も考えられる<sup>8),9)</sup>。

長周期地震動に対する耐震補強方法として、制振ダンパーを用いた制振補強の有用性が報告されている<sup>1)</sup>。しかし、超高層建物は、社会の中枢機能を担うものであり、改修工事期間の建物機能の停止は、大きな経済的損失に繋がる。さらに、超高層建物では、主架構の全体曲げ変形の影響により上層部のダンパーが有効に機能しないという問題点も報告されている<sup>10)</sup>。そこで筆者ら<sup>11)</sup>は、工期短縮による経済的負荷の軽減と耐震性能の向上を両立する手法として、長周期地震動などの巨大地震によって超高層建物の下層部に損傷が集中する応答特性<sup>12)</sup>を考慮し、下層部のみ履歴減衰型鋼製ダンパー（以後、鋼製ダンパー）を部分配置する部分制振補強を提案しており、実験からもその効果を実証されている<sup>13)</sup>。しかし、文献14では、ダンパーの投入量や配置層数、入力地震動の大きさなどの条件によ

っては、ダンパー非設置層である上層部の主架構が損傷を受ける可能性が示唆されており、部分制振補強の更なる検証が求められる。

本報は、文献9の発展として検討対象建物を追加し、下層部分制振補強の検討範囲の拡張と本手法を用いる上での留意点を報告することを目的に、地震応答解析結果を整理したものである。本報では、鋼製ダンパーに加えて、粘性減衰型オイルダンパー（以後、オイルダンパー）を採用したモデルを対象に検討を行い、オイルダンパーを下層部分配置する有用性を確認するだけでなく、両ダンパーの応答特性の違いも比較検討を通して示す。

## 2. 解析条件概要

### 2.1 検討対象建物概要

検討用解析モデルは、1980年代以前に建設された初期の純ラーメン構造の超高層建物を想定した（付録A）地上21階と35階の鋼構造建物である（以後、21 model と 35 model）<sup>11)</sup>。使用部材断面を表1に、検討モデルの軸組図、伏図および制振ダンパーの配置箇所を図1にそれぞれ示す。建物重量は、21 model が 115346 kN、35 model が 373870 kN である。解析には、剛床を仮定した3次元立体架構モデルを用い、X方向への1方向入力とした。柱の弾塑性挙動は、曲げと軸力の連成を考慮するマルチスプリングモデルで評価した。剛床仮定のため、梁の軸伸縮は考慮しないが、梁端部の弾塑性挙動もここでは同様に処理した。スラブの合成効果は、梁の曲げ剛性のみで考慮し、片側スラブで1.4倍、両側スラブで1.8倍とする。主架構

<sup>1)</sup> 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生  
(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

<sup>2)</sup> 東京工業大学建築物理研究センター 准教授・博士 (工学)

<sup>3)</sup> 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士 (工学)

<sup>4)</sup> 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)

<sup>5)</sup> 名古屋大学減災連携研究センター 准教授・博士 (工学)

<sup>6)</sup> ㈱日建設計構造設計部 博士 (工学)

<sup>1)</sup> Graduate Student, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

<sup>2)</sup> Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Inst. of Technology, Dr. Eng.

<sup>3)</sup> Assist. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

<sup>4)</sup> Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

<sup>5)</sup> Assoc. Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

<sup>6)</sup> Nikken Sekkei Ltd., Dr. Eng.

表1 使用部材断面表

21model	柱	□-450x450x16x16 ~ □-600x600x40x40
	大梁	BH-600x250x12x19 ~ BH-600x300x12x32
35model	柱	□-600x600x16x16 ~ □-700x700x85x85
	大梁	BH-700x200x12x19 ~ BH-800x350x14x40

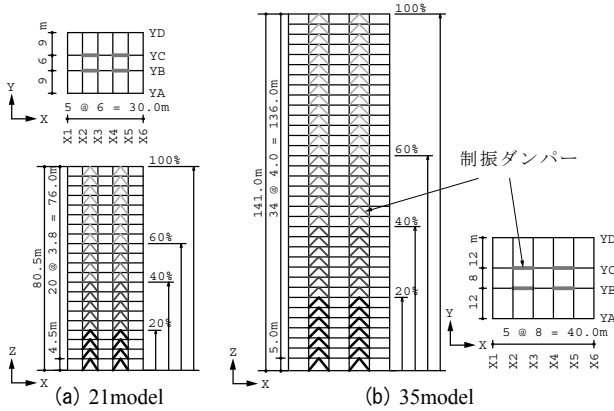


図1 検討対象建物の軸組図・伏図

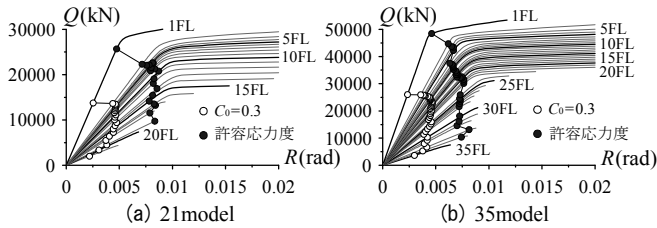


図2 静的弾塑性解析結果

のみの耐震モデルにおける1次固有周期 $fT_1$ は21modelが2.41s, 35modelが4.07s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○印は標準層せん断力係数 $C_0=0.3$ における値(固有周期 $fT_1$ , 地盤の卓越周期0.6s, 地域係数1.0)を, ●印は当該層のいずれかの部材が降伏モーメントに達した許容応力度時の値をそれぞれ表す。許容応力度時のベースシア係数 $C_b$ は, 21modelが0.195, 35modelが0.084であり, これに1次固有周期を乗じた値 $C_b \cdot fT_1$ (振動特性係数 $R_i$ を考慮した $C_b$ の $C_0$ 相当値<sup>15)</sup>)は, 21modelが0.470, 35modelが0.342である。構造減衰は, 減衰定数 $h=2\%$ の初期剛性比例型とし, 主架構のみに与える。

## 2.2 制振ダンパー概要

本報では, 制振ダンパーを下層20%, 40%, 60%および全層100%に配置した場合を対象に検討を行う。オイルダンパーを配置したモデルをV20, V40, V60, V100, 鋼製ダンパーを配置したモデルをH20, H40, H60, H100とダンパー配置層数によってそれぞれ呼び分ける。

オイルダンパーは, 非線形粘性ダッシュポットと弾性バネを直列結合したMaxwellモデルで構成する。ダンパー速度 $dV_i$ と減衰抵抗力 $dF_i$ の関係を図3に示す。図中のリリーフ速度 $dV_R$ は, 21modelで0.032m/s, 35modelで0.015m/s<sup>16)</sup>, 粘性係数比 $p$ (1次粘性係数に対する2次粘性係数の割合)は, 0.068を採用する。内部剛性 $dK_i$ は, 粘性係数 $dC_i$ を用いて(1)式で表される<sup>16)</sup>。

$$dK_i = \beta \cdot dC_i \quad (1)$$

ここで,  $\beta$ : 内部剛性係数であり,  $\beta = 3dV_R$ を採用する<sup>17)</sup>(この時,  $dV_R$ の単位は, cm/s)。鋼製ダンパーには, 座屈拘束プレースを採用し, LY225材(降伏応力度225N/mm<sup>2</sup>)を用いる。塑性化部長さは, 部

材長さの1/4とし, 完全弾塑性型の復元力特性を用いる。塑性化部の軸剛性は, 降伏軸力と降伏応力度の関係より求まる断面積, 塑性化部長さ, ヤング係数を用いて算出した。議論を明確にするため, 本研究では両ダンパーの支持部材を含む塑性化部以外を剛と仮定した。また, 両ダンパーの端部は, 主架構に対してピン接合とした。

オイルダンパー1本当たりのリリーフ荷重 $dF_{Ri}$ および鋼製ダンパー1本当たりの降伏軸力 $dF_{yi}$ は, 1層当りのダンパー設置基数 $n$ , ダンパー設置角 $\theta_i$ を用いて(2a,b)式よりそれぞれ算出する。

$$dF_{Ri} = \frac{dQ_{Ri}}{n \cdot \cos \theta_i}, \quad dF_{yi} = \frac{dQ_{yi}}{n \cdot \cos \theta_i} \quad (2a,b)$$

ここで,  $dQ_{Ri}$ : 各層のリリーフ層せん断力,  $dQ_{yi}$ : 各層の降伏層せん断力であり, 本報では, 第1層のリリーフ層せん断力 $dQ_{R1}$ および降伏層せん断力 $dQ_{y1}$ を基準とし,  $A_i$ 分布に基づく設計用層せん断力分布をもとに図4に示すように4段階分布とした。 $dQ_{R1}$ ,  $dQ_{y1}$ は(3a,b)式でそれぞれ算出する。

$$dQ_{R1} = d\alpha_{R1} \sum_{i=1}^N m_i g, \quad dQ_{y1} = d\alpha_{y1} \sum_{i=1}^N m_i g \quad (3a,b)$$

ここで,  $d\alpha_{R1}$ : 第1層のリリーフ層せん断力係数,  $d\alpha_{y1}$ : 第1層の降伏層せん断力係数,  $N$ : 全層数,  $m_i$ : 各層の質量,  $g$ : 重力加速度であり, 本報では,  $d\alpha_{R1}$ ,  $d\alpha_{y1}$ をそれぞれオイル・鋼製ダンパーのダンパー量として用いる。

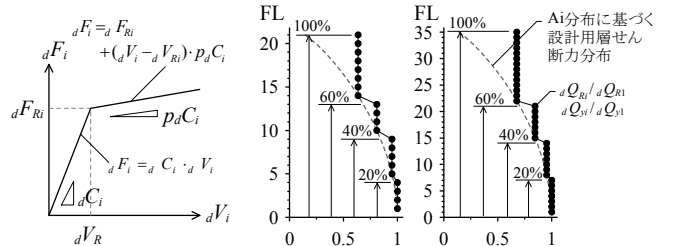


図3 オイルダンパーの速度-荷重関係

図4 リリーフ・降伏層せん断力の分布

## 2.3 解析用入力地震動概要

入力地震動には, 設計における標準波として用いられている最大速度を0.5m/sに基準化したEl Centro 1940 NS(以後, El Centro)と, 想定される長周期地震動として東海・東南海地震の予測波C-SAN-EW<sup>18)</sup>, さらに, 本検討モデルに対してC-SAN-EWと同等の入力レベルとなるように調整した模擬地震動として, Hachinohe 1968 EW位相を用いて0.64秒以降の周期帯域の速度応答スペクトル $S_V$ ( $h=5\%$ )を1.4m/sに基準化した告示波ART HACHI 140を採用する。図5に速度応答スペクトル $S_V$ ( $h=5\%$ )およびエネルギースペクトル $V_E$ ( $h=10\%$ )をそれぞれ示す。

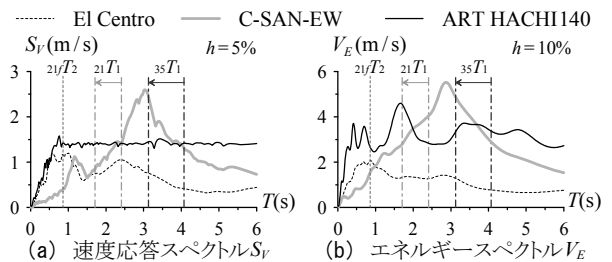


図5 入力地震動のスペクトル

なお、図中の矢印で示す範囲は、本検討で使用する 21 model および 35 model の耐震モデル ~ H100 の弾性 1 次固有周期  ${}_{21}T_1$  (2.41 ~ 1.71 s) ,  ${}_{35}T_1$  (4.07~3.13 s) をそれぞれ表す。また、本報では、高次モードによる影響の検証を行うため、図中には、21 model の耐震モデルにおける 2 次固有周期  ${}_{21}T_2$  (0.86 s) も併せて表示している。

### 3. 時刻歴応答解析に基づく応答評価

#### 3.1 検討対象建物の耐震性能評価

はじめに、耐震モデルを対象に時刻歴応答解析を行い、検討対象建物の耐震性能を把握する。図 6 に、応答解析より得られた層間変形角  $R$  および梁の累積塑性変形倍率の各層における最大値  ${}_{\sigma}\eta$  の高さ方向分布をそれぞれ示す。

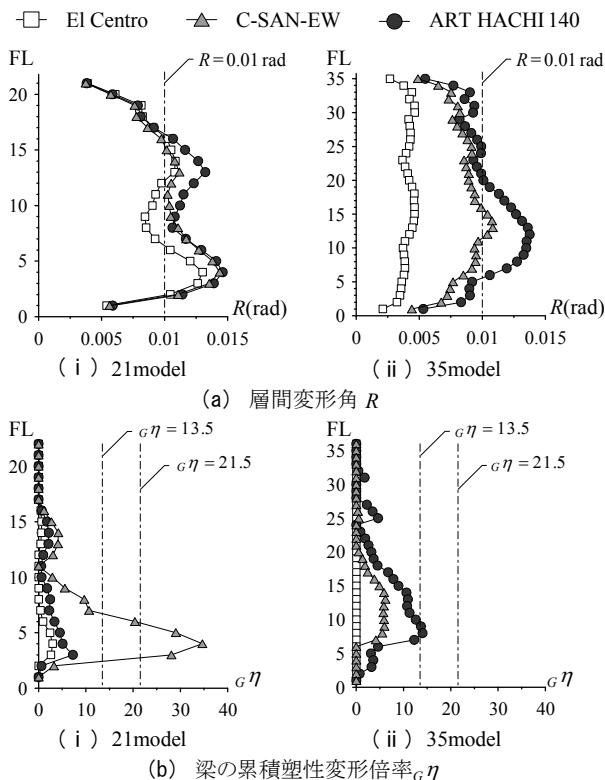


図6 耐震モデルの応答性状の高さ方向分布

図 6(a) の層間変形角について見ると、(i) 21 model は、C-SAN-EW, ART HACHI 140 入力時に同等の変形を示しており、最大で  $R = 0.015$  rad 程度まで変形していることが確認できる。(ii) 35 model は、ART HACHI 140 入力時の方が C-SAN-EW 入力時より大きな応答を示しており、最大変形は、(i) 21 model 同様、 $R = 0.015$  rad 程度の値を示している。図 6 (b) の梁の累積塑性変形倍率に着目すると、(i) 21 model は、同等の最大変形を示した C-SAN-EW 入力時と ART HACHI 140 入力時で大きく異なる応答値を示しており (図 5 (b) より、入力エネルギーの差異によるものと考えられる)、C-SAN-EW 入力時には、下層部の梁に集中的な累積損傷が発生していることが分かる。文献 19 では、 ${}_{\sigma}\eta$  の安全限界値として、柱梁接合部を現場溶接接合とした場合  ${}_{\sigma}\eta = 13.5$ 、工場溶接接合とした場合  ${}_{\sigma}\eta = 21.5$  を提案しており、C-SAN-EW 入力時の応答値はそれらを超過していることから、大きな損傷の発生が予測される。(ii) 35 model においても、ART HACHI 140 入力時に下層部の梁に大きな損傷が見られ、最

大で  ${}_{\sigma}\eta = 13.5$  を上回る結果となった。以上より、本検討モデルのような初期の超高層建物において、長周期地震動入力時の応答が設計用地震動である標準波入力時の応答を大きく上回る可能性が認められ、制振補強などを行い最大変形や部材の累積損傷を低減する必要がある。

#### 3.2 オイル・鋼製ダンパーのダンパー量に関する検討

前節の検討を踏まえ、オイル・鋼製ダンパーをそれぞれ配置した制振モデルを対象に時刻歴応答解析を行い、ダンパー量の違いによる応答性状の変化の確認ならびに以降の検討で採用するダンパー量の決定を行う。本節の検討では、ダンパーの配置層数およびダンパー量の変更による固有周期の変化を考慮し、周期変動による影響の小さい ART HACHI 140 を入力地震動として用いる。

はじめに、エネルギー吸収量の分担について考察する。図 7 に 35 model のダンパー量  ${}_{d}\alpha_{R1}$ ,  ${}_{d}\alpha_{y1}$  と入力エネルギー  $E$  に対する全ダンパーのエネルギー吸収量  ${}_{d}W_p$  の割合  ${}_{d}W_p/E$  および主架構のエネルギー吸収量  ${}_fW_p$  の割合  ${}_fW_p/E$  の関係をそれぞれ示す。なお、図中の  ${}_{d}\alpha_{R1} = 0$ ,  ${}_{d}\alpha_{y1} = 0$  は、耐震モデルの応答値を意味する。

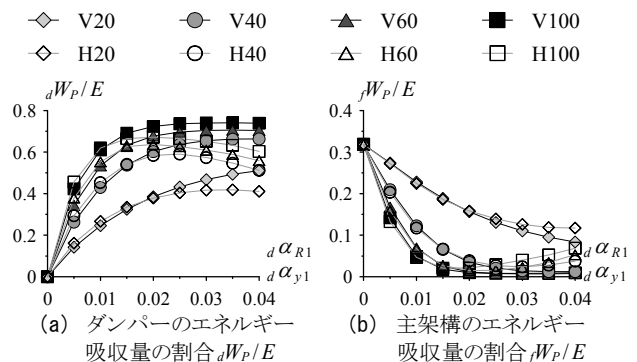


図7 ダンパー量によるエネルギー吸収量の分担の変化(35model)

図 7 (a) のダンパーのエネルギー吸収量は、鋼製ダンパーの場合、ある入力に対して極大値を示すダンパー量が存在することが知られているが<sup>20)</sup>、下層部分配置を採用した場合においても同様の傾向が認められる。オイルダンパーは、極大値となるダンパー量がないため、ダンパー量の多い範囲では、鋼製ダンパーに比べて高いエネルギー吸収能力を示している。しかし、極大値以下となるダンパー量の少ない範囲では、エネルギー吸収量が鋼製ダンパーと同等の値を示した。図示はしないが、21 model においても同様の傾向が確認された<sup>9)</sup>。図 7 (b) の主架構のエネルギー吸収量は、オイル・鋼製ダンパーともにダンパー量の増加に伴い大きく低減している。ただし、鋼製ダンパーを配置したモデルの場合、エネルギー吸収量が極小値を示すダンパー量が存在し、それ以上のダンパー量においては、鋼製ダンパーが塑性化しにくくなることで主架構のエネルギー吸収量の割合が増加傾向を示した。そこで、図 8 に 35 model の V100, H100 の各ダンパー量における梁の累積塑性変形倍率  ${}_{\sigma}\eta$  の平面分布を示す。検討対象箇所は、耐震モデルにおいて最大の  ${}_{\sigma}\eta$  を示した第 8 層の YB 通りの梁端部とし、図中には、参考として耐震モデルの応答値を破線で併記している。図 8 (a) より、V100 は、ダンパー量の増加に伴い梁端部の損傷が大幅に低減していることが分かる。一方、図 8 (b) の H100 では、 ${}_{d}\alpha_{y1} = 0.015$  を上回るダンパー量において、ダンパー配置箇所に隣接する境界梁 (X3-X4) の損傷のみがダンパー量の増加に伴い増大

傾向を示し、 $d\alpha_{y1} = 0.04$  で耐震モデルの応答値を上回っていることが確認できる。これは、連層配置した鋼製ダンパーによって誘発された主架構の全体曲げ変形が、周りの境界梁に大きな強制変形を与えるためである<sup>11)</sup>。一方でオイルダンパーは、全体曲げ変形を緩和することが出来るため<sup>21)</sup>、V100において $d\alpha_{R1}$ を大きくすることによる境界梁への損傷集中は発生しなかったと考えられる。また、下層部分配置を採用することによっても、主架構の全体曲げ変形は緩和されるため<sup>11)</sup>、H40、H60ではH100に比べてダンパー量の増加に伴う境界梁の損傷増大は軽減されていた。しかし、ダンパー設置層と非設置層の切り替わり層付近の損傷の増大が確認された(図10後述)。

なお、21 modelは、35 modelに比べて建物高さが低く、全体曲げ変形量が小さいことに加えて $C_b \cdot f_y T_1$ が高いため、境界梁への損傷集中はほとんど見られないことを確認している<sup>9)</sup>。

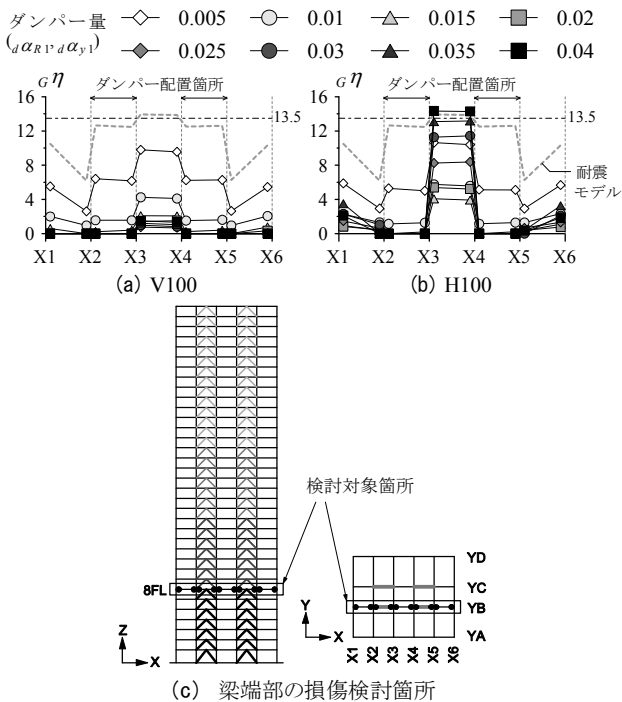


図8 ダンパー量と梁の累積塑性変形倍率の関係 (35model)

次に、最大応答値について考察する。図9に21 model, 35 modelにおけるダンパー量 $d\alpha_{R1}$ ,  $d\alpha_{y1}$ と応答解析結果の最大層間変形角 $R_{max}$ の関係を示す。

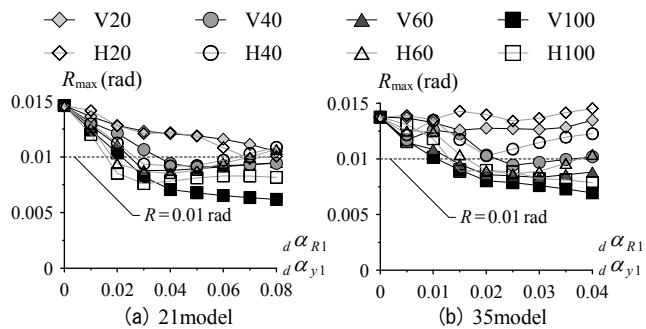


図9 ダンパー量による最大層間変形角の変化

本報では、 $R_{max} \leq 0.01$  radを設計目標と定めてダンパーの応答低減効果を評価する。図9より、各モデルにおける設計目標を満足する

ために必要なダンパー量 $d\alpha'_1$  ( $R_{max} \leq 0.01$  radを満足する $d\alpha_{R1}$ ,  $d\alpha_{y1}$ の最小値)を抽出し、整理したものを表2に示す。ただし、21 modelのV20および35 modelのV20, H20, H40については、今回検討した範囲のダンパー量では、0.01 rad以下に抑えることが出来なかったため、 $R_{max}$ が最小となるダンパー量を記載している(括弧付きで表記)。また表中には、当該ダンパー量における $R_{max}$ を併せて表示している。

表2 必要ダンパー量 $d\alpha'_1$ と最大層間変形角 $R_{max}$

21model		35model			
	$d\alpha'_1$	$R_{max} (\times 10^2)$		$d\alpha'_1$	$R_{max} (\times 10^2)$
V20	(0.08)	(1.05)	V20	(0.03)	(1.26)
V40	0.04	0.94	V40	0.025	0.94
V60	0.03	0.88	V60	0.015	0.95
V100	0.03	0.82	V100	0.015	0.90
H20	0.07	0.98	H20	(0.025)	(1.34)
H40	0.03	0.94	H40	(0.02)	(1.03)
H60	0.02	0.94	H60	0.02	0.89
H100	0.02	0.85	H100	0.015	0.89

\* 括弧付きは、 $R_{max} \leq 0.01$  radを満足しなかったモデルの値

表2より、21 modelの場合、鋼製ダンパーの方がオイルダンパーに比べて小さなダンパー量で $R_{max} \leq 0.01$  radを満足することが出来ており、鋼製ダンパーの変形抑制能力の高さが窺える。しかし、35 modelのH40では、V40とは異なり、 $R_{max} \leq 0.01$  radを満足することが出来なかった。そこで、図10に35modelのV40とH40の各ダンパー量における層間変形角 $R$ の高度方向分布を示し、ダンパー量の増加に伴う変形分布の変化を確認する。

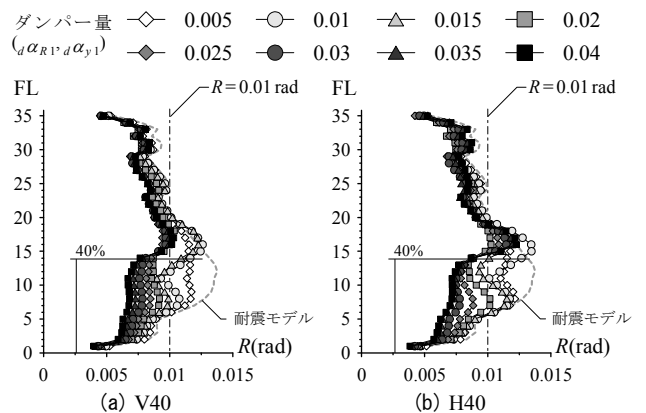


図10 ダンパー量による層間変形角の変化 (35model)

図10より、V40, H40ともにダンパー設置層は、ダンパー量の増加に伴い変形が低減しているが、切り替わり層付近の変形については、一定のダンパー量を超えると逆に増大していくことが確認できる。ただし同図より、過大なダンパー量の投入による切り替わり層付近の変形の増大傾向は、オイルダンパーを採用することで鋼製ダンパーに比べて緩和されることが分かる。切り替わり層付近の変形増大は、特定層への損傷集中に直結するため、部分制振補強を採用する上で、適度なダンパー量を投入し、かつ十分なダンパー配置層数を確保する等の配慮が必要である。

続いて、各モデルの全層のダンパーの累計投入量について考察する。図11にダンパー配置層数と $d\alpha'_1$ におけるダンパー総投入量 $\Sigma dQ'_i$  (全層の $dQ_{Ri}$ ,  $dQ_{yi}$ の累計値)の関係を示す。なお、図中の×印は、 $R_{max} \leq 0.01$  radを満足できなかったモデルの値を意味する。

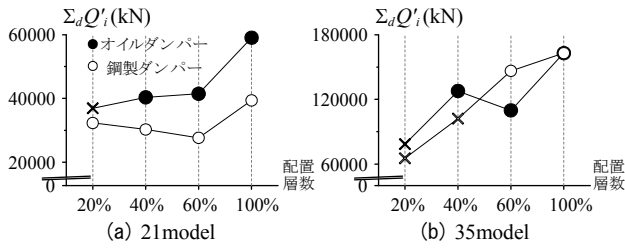


図11 ダンパーの配置層数とダンパー総投入量の関係

図11より、21 model の場合、V40, V60 および H20, H40, H60 は、V100, H100 に比べてダンパー総投入量が抑えられている。さらに、H60 は、H20, H40 よりも総投入量が小さいことから、適切な配置層数を確保することで、ダンパー総投入量を最小限に留められることが分かる。35model についても、V60 は V40 よりダンパー総投入量が抑えられていることが確認できる。

### 3.3 下層部分制振補強モデルの応答特性

前節の検討を踏まえ、下層部分制振補強を採用した建物の応答特性について考察する。本節の検討では、設計目標を満足できなかった4例を除き、最大層間変形角が同等であると考え、ダンパー量として表2に記載した $\alpha_1$ を採用することとする。

はじめに、層せん断力の分布形状を確認する。図12にART HACHI 140入力時における各モデルの層せん断力分布 $Q_i/Q_1$ (第1層のせん断力 $Q_1$ に対する各層のせん断力 $Q_i$ )を示す。なお、図中の太線は、耐震モデルにおける $A_i$ 分布に基づく設計用層せん断力分布を表す。

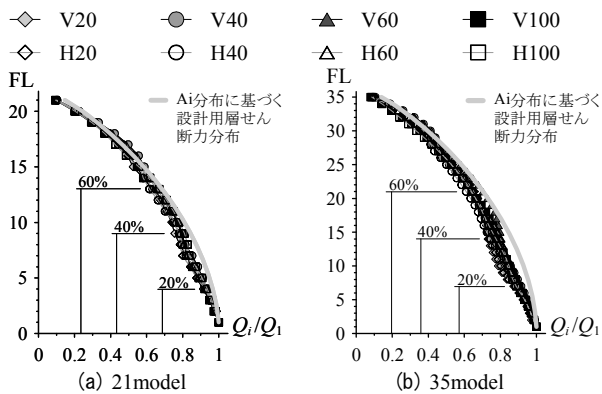


図12 各モデルにおける層せん断力分布 (ART HACHI 140)

図12より、層せん断力の分布形状は、オイル・鋼製ダンパーの違いやダンパーの配置層数による変化がほとんど見られず、概ね耐震モデルにおける設計用層せん断力分布と対応していることが分かる。なお、この傾向は、他の地震動の入力に対しても確認された。

続いて、部分制振補強による応答低減効果と各層の応答性状を確認する。検討対象は、図6の耐震モデルの応答解析結果より、長周期地震動によって梁端部に特に大きな累積損傷が発生した21 modelとする。C-SAN-EW入力時における各モデルの層間変形角 $R$ および梁の累積塑性変形倍率の各層の最大値 $\sigma\eta$ の高さ方向分布を図13, 14にそれぞれ示す。図中には、耐震モデルの応答値を破線で併記する。図13の層間変形角について見ると、V20, H20を除き、制振補強を施したモデルは、全層が $R=0.01$  rad以下に収まっている。切り替わり層付近の変形に着目すると、ダンパー設置層に比べて、変形の増大

が認められるが、耐震モデルの応答値を上回ることにはなかった。図14の梁の累積塑性変形倍率については、固有周期の変動による影響もあるが、制振補強を施すことによって梁端部の損傷が大幅に低減していることが確認できる。ただし、V20, H20では、切り替わり層付近の梁に損傷が発生しており、上記の層間変形角の検討結果と合わせても配置層数が十分でないと判断できる。

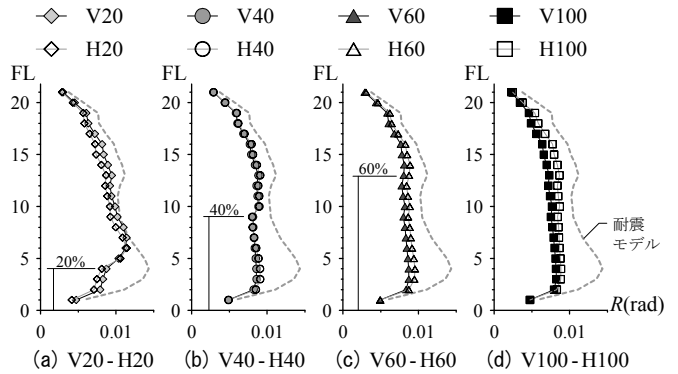


図13 層間変形角の高さ方向分布 (C-SAN-EW)

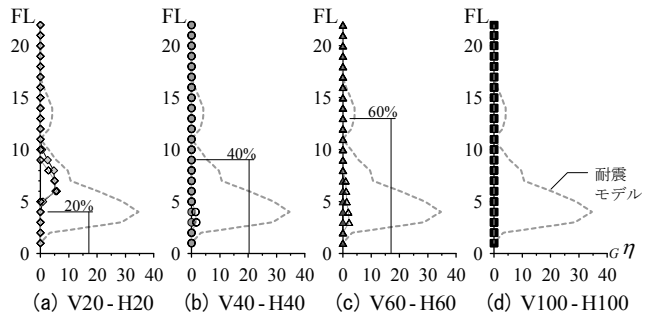


図14 梁の累積塑性変形倍率の高さ方向分布 (C-SAN-EW)

最後に、上層部の応答増大が予想される高次モードの影響について検証する。入力地震動には、図5の21 modelの2次固有周期 $2_{1f}T_2$ とスペクトルの関係より、2次モードの影響を強く受けると考えられるEl Centroを採用することとし、その入力倍率を1.5倍(El Centro 75)とした場合の応答解析より得られた層間変形角 $R$ の高さ方向分布を図15に示す。図中の破線は、耐震モデルの応答を意味する。

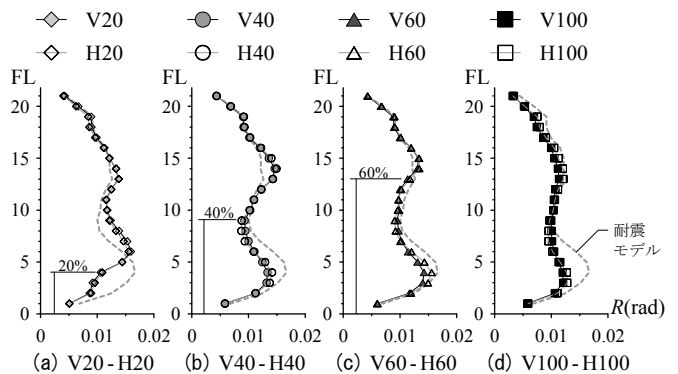


図15 層間変形角の高さ方向分布 (El Centro 75)

図15より、オイル・鋼製ダンパーにかかわらず、ダンパーを下層部分配置したモデルでは、切り替わり層より上層で耐震モデルを上回る変形を示していることが確認できる。ここから、入力地震動によ

っては、下層部分制振補強がマイナスに作用する場合も考えられる。ただし、図示はしないが入力倍率を 1.0 倍としたいずれの入力波の解析結果からは、上記の様な傾向は認められず、全層が耐震モデル以下の応答に低減していることを確認している。以上より、設計時において高次モードの影響の出やすい地震動を採用することに加えて、上層の応答が増大する入力レベルを把握することが必要である。

#### 4. まとめ

本報では、既存超高層建物に対する制振補強方法として、下層にのみオイルまたは鋼製ダンパーを部分配置する手法を提案し、21 階および 35 階の鋼構造建物に対して下層 20%、40%、60% および全層に配置したケースを対象に地震応答解析を行い、応答性状の比較検討を行った。限られた範囲ではあるが得られた知見を以下に示す。

- ・ オイルダンパーを下層部分配置することで、鋼製ダンパー同様、長周期地震動入力時の最大変形および梁端部の累積損傷を大幅に低減することが出来た。ただし、高い制振効果を期待する場合、十分な配置層数の確保が必要となる。
- ・ オイルダンパーを採用することで、大きなダンパー量を投入した時の境界梁への損傷集中および切り替わり層付近の変形の増大傾向が、鋼製ダンパーを採用した場合に比べて緩和された。
- ・ 両ダンパーともに、部分配置を採用することにより、設計目標を満足するために必要なダンパー総投入量を全層配置に比べて抑えることが出来た。さらに、適切な配置層数を確保することによって、総投入量を最小限に留めることが出来ることを示した。
- ・ オイル・鋼製ダンパーを部分配置した場合、入力レベルが大きく、高次モードの卓越する地震動の入力によって、ダンパー非設置層の変形が、耐震モデルの応答値を上回る可能性が認められた。

今回の検討は、 $P-A$  効果の影響が小さい範囲であるため、解析時に  $P-A$  効果を考慮していないが、入力がさらに増大した場合には、 $P-A$  効果を考慮した検討が必要になると思われる。これについては、今後検討を行う予定である。

#### 謝辞

本研究成果は、防災科学技術研究所と東京理科大学の共同研究の一部です。検討を進めるにあたり、日建設計、オイレス工業、東京理科大学による制振研究会では、貴重な助言を頂きました。また、本研究の一部は、社団法人日本鉄鋼連盟「鋼構造研究・教育助成事業」による「一般テーマ研究助成」によって実施されたものです。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：長周期地震動と超高層建物の対応策-専門家として知っておきたいこと-、2013. 10
- 2) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、2007. 12
- 3) 加藤翼、佐藤利昭、佐藤大樹、北村春幸、長江拓也、石井正人、吉江慶祐：文献調査に基づく既存超高層建物の現状把握と地震応答解析モデルの構築、日本建築学会技術報告集、第 20 巻、第 45 号、pp.575-590、2014. 6
- 4) 長江拓也、鐘育森、島田侑、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛、齊藤大樹、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大規模実験システムの構築-E-ディフェンス震動台実験-、日本建築学会構造系論文集、第 640 号、pp.1163-1171、2009. 6
- 5) 佐藤大樹、島田侑、大内隼人、長江拓也、北村春幸、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛：長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物のエネルギー吸収と分担率-部分切り出し架構に対する 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 75 巻、第 653 号、pp.1217-1226、2010. 7

- 6) 岡崎太郎、松宮智央、長江拓也、福山國夫、井上貴仁、中島正愛：超高層鋼構造建物の現場溶接接合が有する耐震性能を検証する 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 78 巻、第 685 号、pp.569-578、2013. 3
- 7) 中川真里奈、佐藤大樹、長江拓也、北村春幸、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梁端現場溶接接合部の調査、日本建築学会技術報告集、第 19 巻、第 42 号、pp.579-584、2013. 6
- 8) 佐藤大樹、長江拓也、北村春幸、中川真里奈、助村浩太郎、梶原浩一：既存超高層鋼構造建物の長周期地震動に対する耐震性評価と制振補強、第 10 回日中建築構造技術交流会論文集、pp.61-70、2013. 11
- 9) 加藤翼、佐藤大樹、佐藤利昭、長江拓也、北村春幸、石井正人、吉江慶祐：下層部にオイルダンパーを部分配置した超高層建物の応答評価、第 14 回日本地震工学シンポジウム、pp.2271-2280、2014. 12
- 10) 日本建築構造技術者協会：応答制御構造設計法、彰国社、2000. 12
- 11) 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、齊藤大樹、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、pp.549-557、2010. 3
- 12) 金紋延、荒木慶一、山川誠、田川浩、五十子幸樹：極大地震動に対する超高層純ラーメン鋼構造建物の動的応答に及ぼす  $P-A$  効果の影響、日本建築学会構造系論文集、第 74 巻、第 644 号、pp.1861-1868、2009. 10
- 13) 佐藤大樹、長江拓也、大内隼人、島田侑、北村春幸、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛、齊藤大樹、福和伸夫：長周期地震動を受ける超高層建物の鋼製ダンパーによる制振改修に関する 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 76 巻、第 667 号、pp.1139-1648、2011. 9
- 14) 橋本奨吾、佐藤大樹、北村春幸、長江拓也、佐野剛志：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、構造工学論文集、Vol.59B、pp.309-319、2013. 3
- 15) 戸張涼太、佐藤大樹、古谷慶、北村春幸、石井正人、吉江慶祐、宮崎充、佐々木和彦、岩崎雄一：骨組特性値を用いた履歴型ダンパーを有する建物の制振性能評価、構造工学論文集、Vol.59B、pp.321-327、2013. 3
- 16) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル、第 3 版、2013. 11
- 17) 笠井和彦、伊藤浩資、小椋崇之：オイルダンパーの等価剛性調節による制振構造の応答制御手法、日本建築学会構造系論文集、第 73 巻、第 630 号、pp.1281-1288、2008. 8
- 18) 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、pp.1-48、2004. 6
- 19) 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
- 20) 古谷慶、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：履歴ダンパーを有する超高層弾性架構の実効変形比に着目した制振性能評価、構造工学論文集、Vol.58B、pp.197-207、2012. 3
- 21) 加藤翼、佐藤大樹、助村浩太郎、北村春幸、石井正人、吉江慶祐、宮崎充、佐々木和彦、岩崎雄一：1970 年代を想定した超高層建物の長周期地震動に対する応答特性と制振補強 その 2 鋼製・粘性ダンパーを用いた制振補強、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、B-2、pp.819-820、2013. 8
- 22) 日本建築学会：高層建築技術指針、1967. 6

#### 付録 A 文献調査結果に基づく検討対象建物の妥当性検証

想定年代である 1980 年代以前の超高層建物を対象とした文献調査結果<sup>3)</sup>より得られた設計用ベースシア係数  $C_b$  および本検討モデルの許容応力度時ベースシア係数  $C_b$  と 1 次固有周期  $T_1$  の関係を図 A に示す。図中の破線は、高層建築技術指針<sup>22)</sup>の基準である  $C_b=0.18/T_1$ 、 $0.36/T_1$  の関係を表す。図 A より、35model は、 $C_b=0.18/T_1 \sim 0.36/T_1$  の範囲内に存在しているが、21model は、 $C_b=0.36/T_1$  を上回る結果となった。ただし、21 model については、当時の設計手法を踏まえた地震応答解析<sup>3)</sup>より、その妥当性を確認している<sup>9)</sup>。

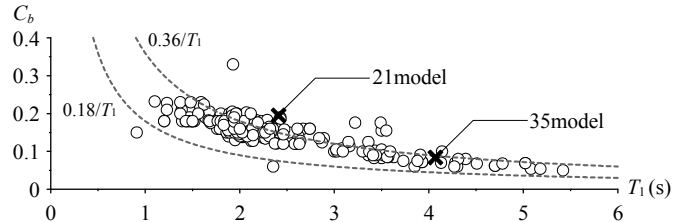


図 A 検討対象建物の固有周期とベースシア係数の対応

[2014 年 10 月 15 日原稿受理 2014 年 12 月 4 日採用決定]