

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	低剛性の梁端部を有する中低層制振構造建物の耐震性能評価
Title(English)	EVALUATION FOR EARTHQUAKE RESPONSES PERFORMANCE IN A LOW AND MIDDLE-RISE VIBRATION CONTROL STRUCTURE BUILDING WITH BEAM END OF LOW-RIGIDITY
著者(和文)	有間雄太, 脇田直弥, 山口路夫, 綿貫雄太, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 北村春幸
Authors(English)	Yuta ARIMA, Naoya WAKITA, Michio Yamaguchi, Yuta WATANUKI, Toshiaki Sato, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura
出典(和文)	構造工学論文集, Vol. 63B, , pp. 189-194
Citation(English)	Journal of Structural Engineering, Vol. 63B, , pp. 189-194
発行日 / Pub. date	2017, 3
権利情報	日本建築学会

低剛性の梁端部を有する中低層制振構造建物の耐震性能評価 EVALUATION FOR EARTHQUAKE RESPONSES PERFORMANCE IN A LOW AND MIDDLE-RISE VIBRATION CONTROL STRUCTURE BUILDING WITH BEAM END OF LOW-RIGIDITY

有間 雄太^{*1}, 脇田 直弥^{*2}, 山口 路夫^{*3}, 綿貫 雄太^{*2}
佐藤 利昭^{*4}, 佐藤 大樹^{*5}, 北村 春幸^{*6}
Yuta ARIMA, Naoya WAKITA, Michio YAMAGUCHI, Yuta WATANUKI
Toshiaki SATO, Daiki SATO and Haruyuki KITAMURA

In recent years, high response performance is required from viewpoint of the BCP. A vibration control structure of a medium-low-rise building is increasing, not only a high-rise building. Therefore, the development of the vibration control structure building system suitable for medium-low-rise buildings is desired. In this paper, the response performance is planned to improve by changing the beam-end to low-rigidity for extending the displacement of the elastic limit. Also, it was showed that it can reduce the shear force and damage to main the structure, through the time history response analysis with the stiffness of beam-end and amount of damper as parameters.

Keywords : Logistics facility, Hysteresis damper, Semi-rigid connection, Time history response analysis
Residual deformation

物流施設, 履歴減衰型ダンパー, 半剛接合, 時刻歴応答解析, 残留変形

1. はじめに

2011年の東日本大震災以降, 事業継続性 (BCP) の観点より, 耐震性能の向上を目的に, 高層建物のみならず中低層建物にも制振構造を採用する事例が増加している¹⁾。想定される地震動のレベルが年々高くなっている中²⁾, 中低層建物に適した, より合理的で高い耐震性能を有する制振構造システムの開発が求められている。

中低層建物への制振構造の適用性を検討するにあたり, その効果が期待される建物として近年, 建設が増加している鋼構造物流施設が挙げられる。物流施設は, 積載荷重が大きく柱スパンが長いことを特徴とし, 水平力が作用した際に, 長期荷重の影響から片方の梁端部に大きな余力を残し, もう一方の梁端部が損傷・降伏に至る。

本論文では, 一般的な制振構造より主架構の水平剛性を低くしつつ, 主架構の弾性限界までの変位が増大し, 地震時における主架構の損傷を低減するシステムを提案する。その一案として梁端部の剛性を下げる方法を採用する。本システムは, 弾性限界までの変位が増大するだけでなく, 梁端部における長期応力の低減にも寄与するため, より合理的であると言える。一方, 主架構周期の増大に伴い最大変形の増大が懸念されるため, 制振構造として付与するダンパー量と梁端部の剛性の設定は重要となる。

梁端部の剛性を下げる, いわゆる半剛接合には様々な形式が考えられ^(例えば 3),4), 各ディテールに対する実験的研究が行われている。半剛接合を有する骨組に関する設計法の研究として瀧本らは, 高層

のラーメン構造の柱梁接合部にノンダイヤ形式とした半剛接合を採用し, 最大応答の低減など, 梁端部に半剛接合を適用する有用性を確認している⁵⁾。

本論文では, 半剛接合の具体的なディテールを検討する準備として, 中低層建物の制振構造システムとして如何なる特性を有する半剛接合が望ましいのかを検討することを目的に, 梁端部の剛性とダンパー量をパラメータとし, 時刻歴応答解析による検討を行う。検討では, 最大層せん断力, 最大層間変形角の他, 主架構の損傷を判断する指標として, 主架構のエネルギー吸収と残留変形角にも着目し, 上記のシステムの適用性を確認する。

2. 解析条件の概要

2.1 検討対象建物の概要

検討対象建物は, 物流施設を想定した地上4階, 階高6.7m, 高さ26.8m, 長辺方向11.0m×8スパン=88.0m (X方向), 短辺方向10.0m×3スパン=30.0m (Y方向)の鋼構造建物^{6),7)}とする。図1に伏図, 図2に軸組図, 表1に使用部材の断面一覧, 表2に荷重表, 図3に建物重量の高さ方向分布 w_i を示す。建物の総重量は, 118966kNである。主架構断面は, 長期荷重に対して設計し, 短期荷重に対しては制振ダンパーに応力の負担を期待するものとした。柱脚は, 主架構の剛性を低くするため露出柱脚を採用する。なお柱脚の回転剛性は $K_{ec}=253000\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ である。崩壊系は全体崩壊系を想定した

*1株式会社 安藤・間 (当時 東京理科大学大学院) 修士 (工学)

*2新日鉄住金エンジニアリング株式会社 修士 (工学)

*3新日鉄住金エンジニアリング株式会社 博士 (工学)

*4九州大学大学院人間環境学研究院 准教授・博士 (工学)

*5東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)

*6東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)

HAZAMA-ANDO CORPORATION., M.Eng.

Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., LTD., M.Eng.

Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., LTD., Dr.Eng.

Assoc. Prof., Division of Human-Environmental Studies, Kyushu Univ., Dr.Eng.

Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

ものとする。本検討は、剛床を仮定した3次元部材モデルを用いる。構造減衰は、主架構の1次固有周期 T_1 に対して減衰定数 $h=0.02$ となる剛性比例型とする。なお、本検討では、長辺方向(X方向)を解析対象とした。以降、上記の梁端部を剛接合とした建物を比較検討における基準モデルとし、rigidと呼ぶ。

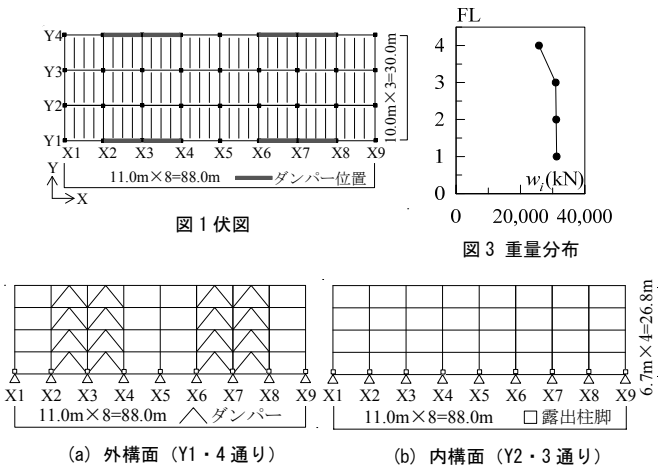
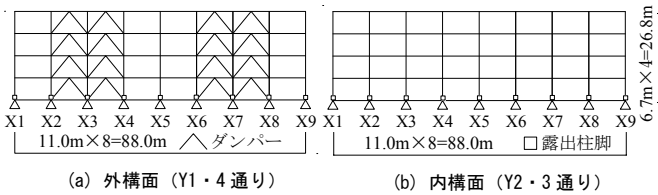


図1 伏図

図3 重量分布



(a) 外構面 (Y1・4 通り)

(b) 内構面 (Y2・3 通り)

図2 軸組図 (剛接合モデル)

表1 部材断面一覧

梁(長辺方向)	H-700×300×13×24~H-800×300×14×32
梁(短辺方向)	H-500×200×10×16~H-600×200×12×22
柱	□-500×500×19×19~□-550×550×32×32

表2 荷重表 (kN/m²)

階	D.L.	L.L.(地震用)	T.L.
R	7.02	2.00	9.02
2~4	4.76	6.00	10.76

2.2 制振部材の概要

制振構造には、履歴減衰型の制振ダンパーを用いる。設置位置は、図2に示すようにY1・4通りのX2~X4とX6~X8間に1層当たり16本配置する。ダンパーは、降伏応力度 $\sigma_y=225\text{N/mm}^2$ 、塑性化部の長さをダンパー全長の25%、弾性部の断面積を塑性化部の200%とした。解析においては、ダンパーを等価な一様断面⁸⁾でモデル化し、復元力特性は完全弾塑性型とする。以降にダンパー諸元の設定について記す。はじめに1層におけるダンパーの降伏層せん断力係数 α_{y1} を与えることで、1層におけるダンパーの降伏せん断力 Q_{y1} を下式で求める。

$$Q_{y1} = \alpha_{y1} \cdot W \quad (1)$$

ここに、 W : 建物の総重量である。続いて、ダンパー1本の降伏軸力 N_{y1} 、塑性化部の断面積 A_{c1} を以下の式で求める。

$$N_{y1} = \frac{Q_{y1}}{n \cos \theta} \quad A_{c1} = \frac{N_{y1}}{\sigma_y} \quad (2a,b)$$

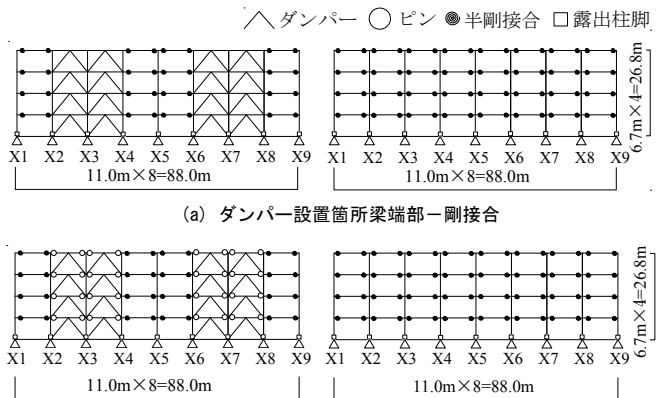
ここに、 n : 1層あたりのダンパー本数、 θ : ダンパーの取付角である。 i 層におけるダンパーの降伏層せん断力 Q_{yi} は、1層の降伏層せん断力に最適降伏層せん断力分布⁹⁾に基づく設計用せん断力比を乗じることで設計した。以降、 α_{y1} をダンパー量と呼ぶ。検討を行うダンパー量は、 $\alpha_{y1}=0.02\sim 0.12$ (0.02刻み)、0.15、0.20とする。また、本検討では塑性化部長さを全層でダンパー量によらず一定としたため、ダンパーの降伏層間変形角 R_y は、約1/720で一定となる。

3. 半剛接合モデルの設定及び静的増分解析による変形性能の検討

本章では、半剛接合のパラメータを設定し、主架構に対する静的増分解析より、本システムの目的である主架構の弾性限界までの変位が増大するような主架構モデルを選定する。

3.1 半剛接合の概要

本検討対象建物では、ダンパー非設置箇所(Y2・3通り、Y1・4通りのX1-2、X4-6、X8-9間)の梁端部を半剛接合とする。一方、ダンパー設置箇所(Y1・4通りのX2-4、X6-8間)の梁端部の接合方法は、剛接合またはピン接合とする。半剛接合としたモデルの軸組図を図4に示す。



(a) ダンパー設置箇所梁端部-剛接合

(b) ダンパー設置箇所梁端部-ピン接合

図4 軸組図 (半剛接合モデル)

なお、半剛接合は、接合部の剛性が建物応答に与える影響を検討するため、回転剛性のみ変化させ、耐力は梁部材が先行降伏するものとし一定とする。本論文では解析の都合上、半剛接合は、図5に示すようにマルチスプリング¹⁰⁾と回転バネの直列でモデル化をする。回転バネは弾性とし、梁の曲げ降伏は、フェイス位置の曲げモーメントで評価した。回転剛性は、物流施設の柱スパンが長く長期応力が支配的であることから、梁端部と梁中央の長期曲げ応力の比率($M_e : M_c$)に着目して決定する。検討対象建物では、図6に示すように、Y2通りのX2~X8において剛接合時に $M_e : M_c = 6.3 : 3.7$ 程度になるのに対して5:5、4:6、2:8となるように回転剛性を調整した。2Fにおける半剛接合の回転バネの曲げモーメントと回転角の関係を図7に示す。

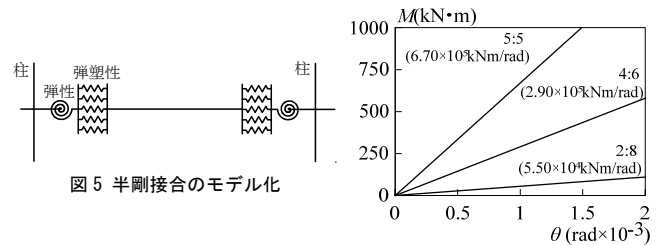


図5 半剛接合のモデル化

図7 回転バネの剛性

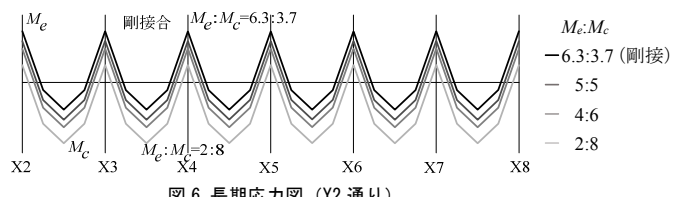


図6 長期応力図 (Y2 通り)

以上より、梁端部の剛性とダンパー設置箇所の接合方法をパラメータとした各モデルの呼称を表3に示す。

表3 モデルの呼称

	$M_e \cdot M_c$	ダンパー設置箇所 梁端接合方法	
		剛接合	ピン接合
半剛接合 回転剛性	5:5	sr-55r	sr-55p
	4:6	sr-46r	sr-46p
	2:8	sr-28r	sr-28p
剛接合	6.3:3.7	rigid	-

3.2 静的増分解析

図8に1層の層せん断力 Q と層間変形角 R の関係を示す。(a)にダンパー設置箇所の梁端部を剛接合とした場合、(b)にピン接合とした場合を示す。プロット●は、いずれかの梁端部にヒンジが形成された点を示す。図8(a)よりダンパー設置箇所の梁端部を剛接合とした場合に着目すると半剛接合としたモデルは、剛接合時より梁端部における長期応力の低減および主架構剛性の低下によりヒンジ形成までの変形角が大きくなっている。しかし、5:5、4:6、2:8と梁端部の剛性が低くなるにつれてヒンジ形成までの変形角が小さくなっている⁶⁾。これは、ダンパー設置箇所における剛接合の剛性が相対的に高くなり、応力が集中したためであると考えられる。続いて(b)のダンパー設置箇所の梁端部をピン接合とした場合は、ヒンジ形成までの変形角が梁端部の剛性の低下に伴い大きくなることがわかる。sr-28pモデルは、梁端部より柱脚が先に降伏するモデルとなっているが、柱脚も層間変形角が1/50以上まで弾性であり、ダンパーの降伏変形角と比較して十分に大きく、後に行うエネルギー吸収等の検討への影響は小さいと考えられる。よって、梁端部を半剛接合とすることでヒンジ形成までの変形角を大きくすることが可能であることを確認した。また、図示はしないが2~4層やダンパーを付与した場合においても同様の傾向にあることを確認した。

以降の時刻歴応答解析は、ヒンジ形成までの変形角がより大きくなるダンパー設置箇所の梁端部をピン接合としたモデルにて検討を行う。表4に主架構のみの1次固有周期 T_1 を示す。

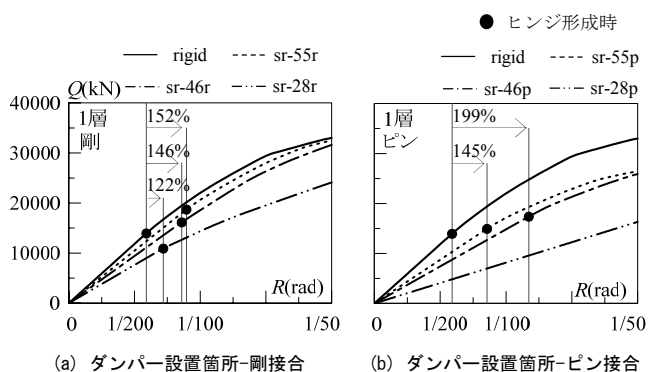


図8 層間変形角と層せん断力の関係

表4 主架構の1次固有周期

モデル名	rigid	sr-55p	sr-46p	sr-28p
周期(s)	1.70	2.09	2.33	3.47

4. 時刻歴応答解析による応答および損傷の低減に関する検討

本章では、ダンパー量 $s\alpha_{p1}$ をパラメータとし、時刻歴応答解析を行い、本システムの応答低減効果および損傷低減効果を検討する。

4.1 検討用地震動の概要

検討に用いる入力地震動は、コーナー周期 $T_c=0.64s$ 以降で、擬似速度応答スペクトル ${}_pS_v=0.5, 1.0, 1.5 m/s$ ($h=0.05$) が一定となる模擬地震動を用いる。位相特性は、HACHINOHE 1968 EW および KOBE 1995 NS とする。以降、それぞれ ART HACHI 50,100,150, ART KOBE 50,100,150 と呼ぶ。なお ${}_pS_v=0.5, 1.0, 1.5$ をそれぞれ、レベル1地震動、レベル2地震動、レベル2を超える極大地震動と位置づける。図9に擬似速度応答スペクトル ${}_pS_v$ とエネルギースペクトル V_E をそれぞれ示す。

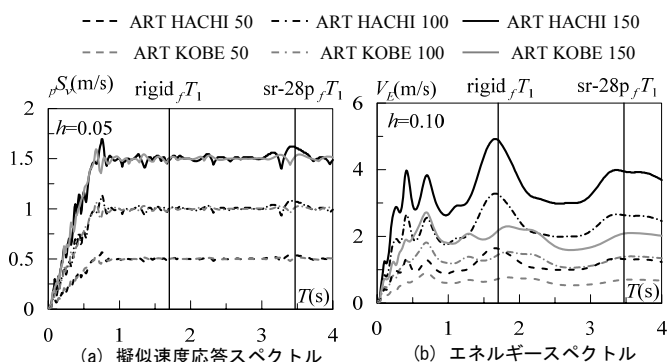


図9 擬似速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

4.2 応答低減効果の検討

図10にダンパー量 $s\alpha_{p1}$ と最大層せん断力 Q_{max} の関係を示す。図10より、最大層せん断力は、ダンパー量によらず周期の増大に伴い低減していることがわかる⁶⁾。入力レベルに着目すると、入力レベルが大きい程、剛性の高いモデルにおいて $s\alpha_{p1}=0$ 時の応答に対するダンパー付与時の応答低減効果が減少している。これは、rigidモデルにおいて主架構が損傷し、周期が伸びたためであると考えられる。図11にダンパー量と最大層間変形角 R_{max} の関係を、図12にダンパー量 $s\alpha_{p1}$ と入力エネルギーに対するダンパーのエネルギー吸収率 ${}_pW_p/E$ の関係を示す。はじめに、モデル間の差に着目すると本報で提案するシステムは、半剛接合を用いて主架構周期を伸ばしているため変形角の増大が懸念されたが、ダンパー量を増やすことにより主架構周期に関係なく概ね同じ応答を示すことが図11より分かる。これは、ダンパー設置に伴うダンパー弾性時の短周期化および、主架構の剛性低下に伴いダンパーへ応力が集中し、図12に示すようにダンパーのエネルギー吸収効率が上昇したためであると考えられる。続いて、ダンパー量と応答の関係に着目する。ダンパー量が増加するにつれ最大層間変形角は収束する傾向にあることがわかる。また、位相特性の違いについて着目すると ART HACHI と比較して ART KOBE は、 ${}_pS_v=1.0, 1.5$ において半剛接合のモデルが rigid と概ね同じ最大層間変形角になるのに必要なダンパー量が多いことがわかる。これは、図12に示すように ART HACHI は、少ないダンパー量でエネルギー吸収率が概ね一定になるのに対して ART KOBE は、パルス性の地震動であるため、繰返しによるエネルギー吸収が期待できず、少ないダンパー量時にダンパーのエネルギー吸収率が低くなるためであると考えられる。よって、本システムの高い応答低減効果が確認された。

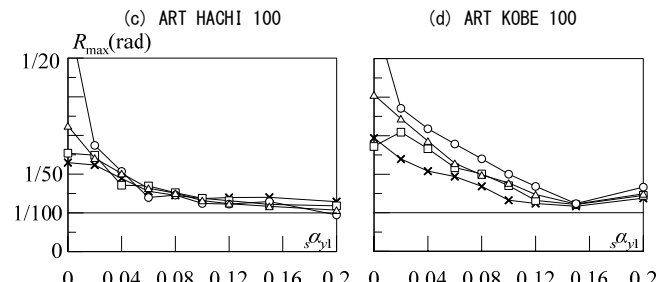
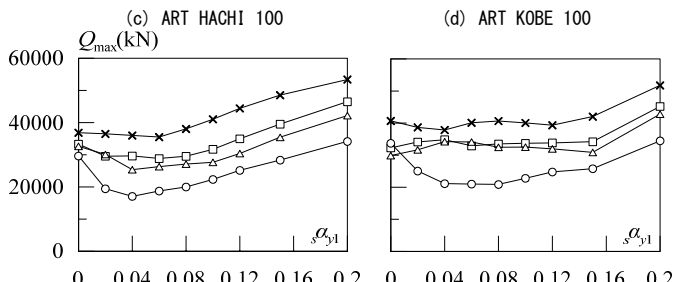
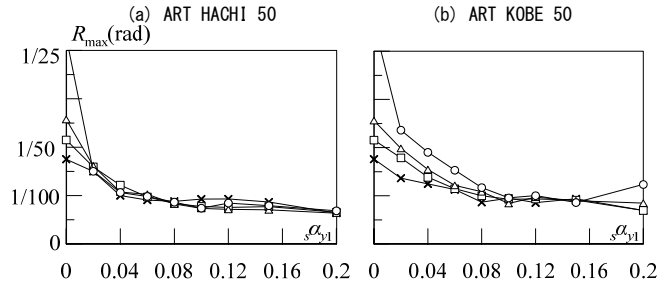
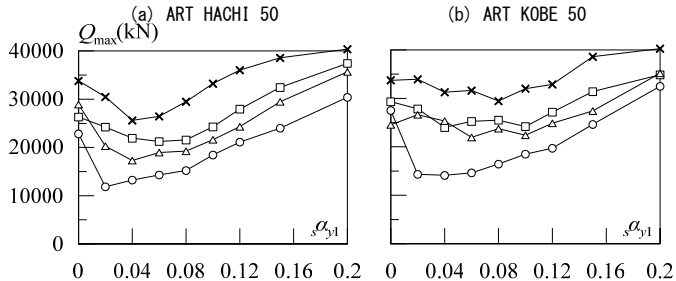
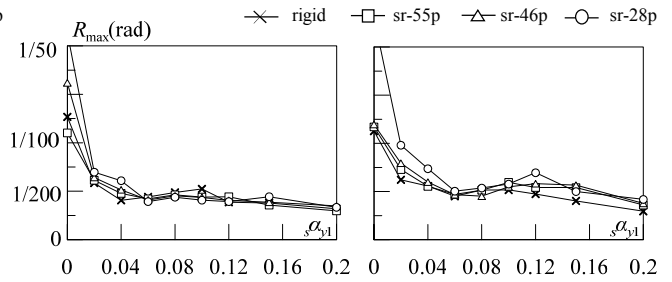
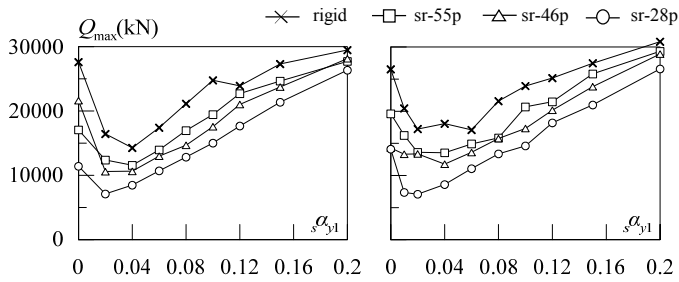


図 10 ダンパー量と最大層せん断力の関係

図 11 ダンパー量と最大層間変形角の関係

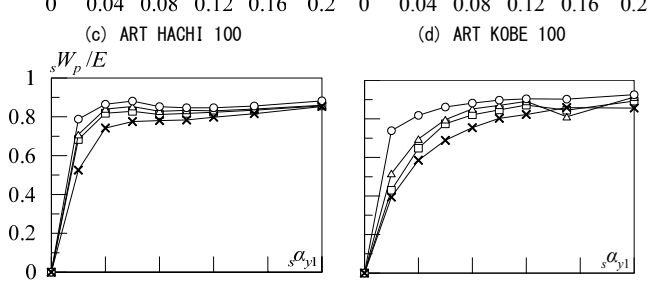
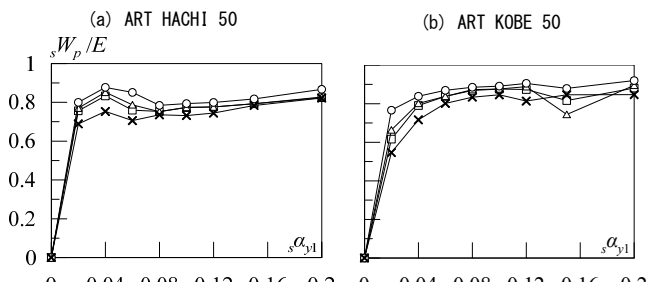
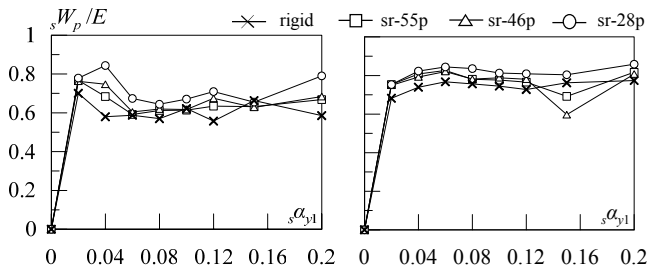


図 12 ダンパー量とダンパーのエネルギー吸収率の関係

4.3 主架構における損傷低減の検討

梁端部のエネルギー吸収量 ${}_gW_p$ より、主架構の損傷について検討を行う。図 13 に各モデルの Y2 通りにおける塑性化による梁端部のエネルギー吸収量 ${}_gW_p$ を示す。プロット●は、梁端部が降伏した箇所を示す。地震動レベルは、損傷の大きくなる ${}_pS_v = 1.0, 1.5 \text{ m/s}$ とした。ダンパー量は、rigid モデルにおいてレベル 2 地震動で最大層間変形角が $1/100$ 以下になる ${}_s\alpha_{y1} = 0.08$ とした。(図 11) なお、sr-28p モデルは、全ての地震動において梁端部が弾性であったため、rigid, sr-55p, sr-46p モデルのみ検討を行う。図 13 より、レベル 2 地震動では、rigid モデルにおいて梁端部の損傷が確認できる。対して半剛接合とした架構は、ART HACHI100 で、主架構が無損傷となる結果となった。ART KOBE100 においても sr-46p モデルで無損傷、sr-55p モデルにて損傷した梁端部の数およびエネルギー吸収量を低減できている。よって、梁端部を半剛接合とした架構は、レベル 2 地震動に対して概ね無損傷とすることが可能であるとわかった。レベル 2 を超える極大地震に対しては、sr-55p, sr-46p モデルと梁端部の剛性低下およびヒンジ形成までの変形角の増加に伴い損傷が抑制されていることがわかる。sr-46p モデル・ART HACHI150 においては梁端部の損傷が特に小さい結果となった。

また、主架構の損傷を大きく低減するには、最大変形より主架構の弾性限界までの変形を大きくすることが重要であるが、前節の図 11 からわかるように、主架構周期に関わらずダンパーを多く付与しても、最大変形は地震動によって一定の値に収束する傾向にある。例えば、レベル 2 を超える極大地震に対しては、最大層間変形角を

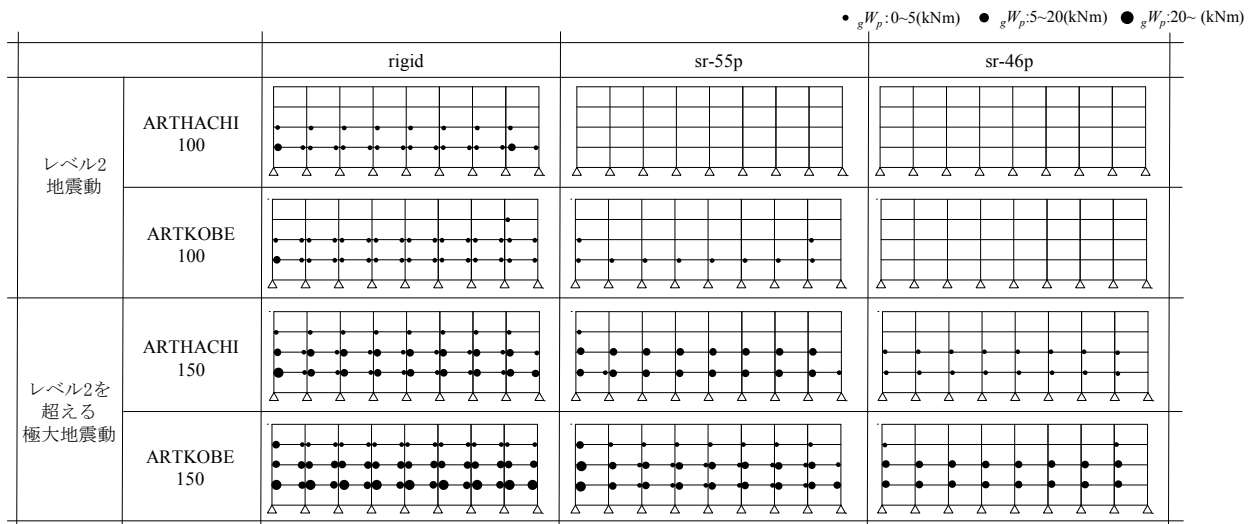


図 13 梁端部のエネルギー吸収量 (Y2 通り)

1/100 以下にする事は困難である。よって、最大変形より主架構の弾性限界までの変形を大きくし主架構の損傷を低減するには、ダンパー量を増やすだけでは難しく、主架構の弾性限界までの変形を増大させることが必要であると考えられる。

4.4 残留変形角

本節では、ダンパーに対する主架構の負担せん断力の低下に伴い残留変形角が増大する¹¹⁾ことが懸念されるため残留変形角の検討を行う。図 14 にダンパー量 $s\alpha_{y1}$ と全層の中で最大となる残留変形角 R_{resmax} の関係を、図 15 に全層における主架構の塑性率 $f\mu_i$ と残留変形角 R_{resi} の関係を示す。主架構の塑性率 $f\mu_i$ は、下式より算出した。

$$f\mu_i = R_{maxi} / fR_{yi} \quad (3)$$

ここで、主架構の降伏変形角 fR_{yi} は、図 16 に示すように、静的増分解析より求められた層せん断力と層間変形角の関係を基に層間変形角 $R=1/50$ で履歴面積が等価となる完全弾塑性型の復元力とした際の降伏変形角とした。なお、sr-28p モデルは、 $R=1/50$ で弾性となるため図 14 から除外した。図 14 より、レベル 1,2 地震動に対しては、全検討モデルにおいて $R_{res} = 1/1000$ 程度であり、概ね問題ない値¹²⁾を示していると考えられる。レベル 2 を超える極大地震動に対しては、ダンパーに対する主架構の負担せん断力比が最も小さい sr-28p モデルで残留変形角の増大が懸念されたが、レベル 1,2 地震動と同程度の値を示した⁷⁾。一方、rigid モデルは、全体として大きな値を示す傾向にある。これは、図 15 より主架構の塑性率が 1.0 を超えると残留変形角が大きく増大することがわかるように、ダンパーのみならず主架構が塑性化したことに原因があると考えられる。また、ART KOBE150 においては、sr-55p モデルも大きな値を示している。これは、図 13 で示したように ART KOBE150 では、最大層間変形が大きく、sr-55p モデルも主架構が塑性化したことに原因があると考えられる。対して、sr-28p モデルが最も小さい理由は、主架構が弾性となっているためである。以上より、残留変形角を微小範囲に留めるには、主架構を塑性化させないことが重要であり、この視点からも主架構の弾性範囲が大きい本システムの有用性が示されたと考えられる。

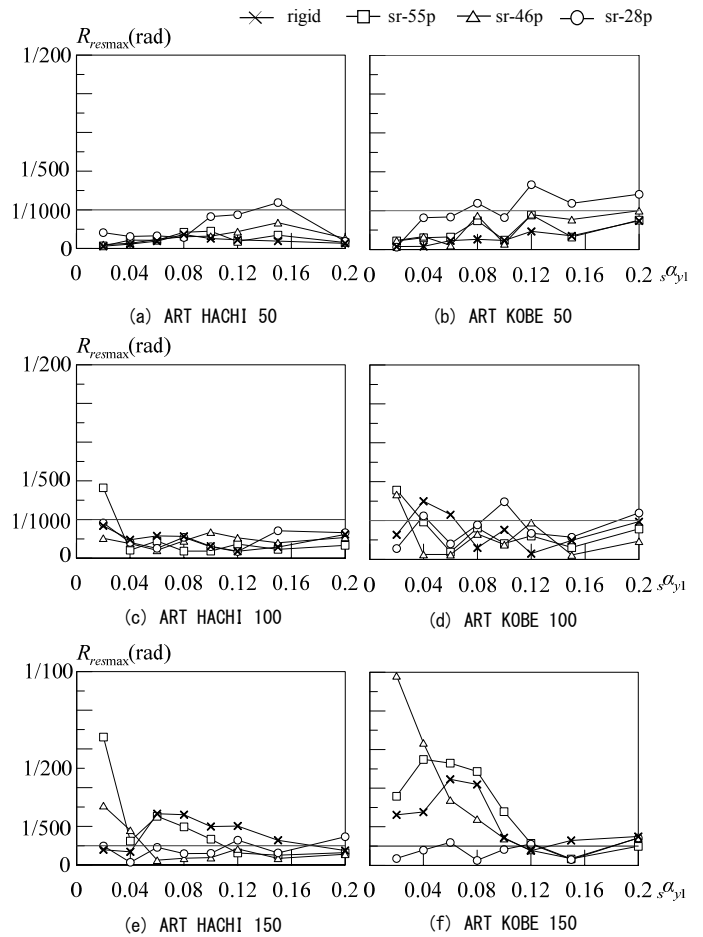


図 14 ダンパー量と残留変形角の関係

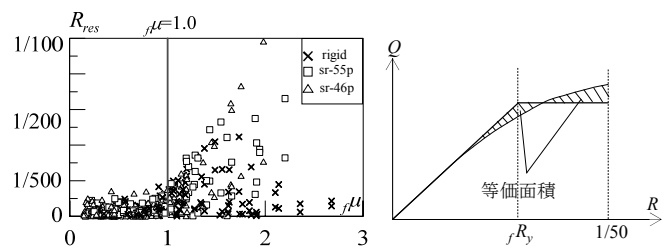


図 15 主架構の塑性率と残留変形角の関係

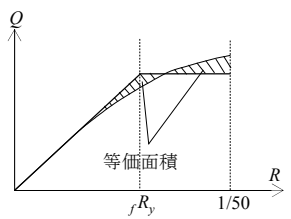


図 16 主架構の降伏変形角

5. まとめ

物流施設を想定した中低層制振構造建物において梁端部を半剛接合とした際の検討を行った。静的増分解析より弾性限界までの変形性能を、時刻歴応答解析より最大応答および主架構の損傷を検討した。以下に得られた知見を示す。

1. 静的増分解析の結果より、梁端部の剛性が低下することで、梁端部における長期応力の低減と主架構剛性の低減により、弾性限界までの層間変形が大きくなることを確認した。
2. 時刻歴応答解析の結果より、層の応答の最大値に着目すると、最大層せん断力は、ダンパー量に因らず梁端部の剛性を下げるほど小さくなった。一方、最大層間変形角は、ダンパー量を増加させるほど主架構周期に因らず同程度の応答に抑制される結果となり、梁端部の剛性を下げることにより、変形を同程度としつつ最大せん断力の低減効果が期待される結果となった。
3. 主架構の損傷は、梁端部を剛接合とした架構に対して弾性限変位が大きな半剛接合の場合の方が、損傷の抑制に効果的であることが確認された。レベル 2 地震動に対して言えば、半剛接合を採用した架構は概ね無損傷で、さらにレベル 2 を超える極大地震動に対しても、損傷の抑制効果が認められた。
4. 主架構の剛性が低下する半剛接合の架構では、ダンパーの負担せん断力比が大きいため、残留変形角の増大が懸念されたが、主架構に大きな損傷を与えなければ 1/1000 程度と問題ない結果となった。一方で、梁端部を剛接合とした場合は、主架構の損傷により残留変形角が大きくなった。よって主架構を弾性に留めることは、残留変形角の観点からも重要である。

以上より、限られた条件の検討ではあるが、梁端部の剛性を下げた半剛接合とすることにより、主架構の水平剛性を低くしつつ、主架構の弾性限界までの変位が増大する新たな制振構造システムの有用性を示した。今後は、本検討で得られた知見を基に、半剛接合の開発とそれを採用した制振構造建物の設計に取り組む予定である。

謝辞

本研究は、新日鉄住金エンジニアリング株式会社、東京工業大学佐藤研究室、東京理科大学北村研究室によるエネルギー法研究会の成果の一部を用いたものです。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 脇田直弥, 松蔭知明, 樋口公平, 中村秀司: エネルギー法による建物の構造設計～優れた耐震性と経済性を両立した設計手法の確立～, 新日鉄エンジニアリング技報, 第 3 号, pp.48-56, 2012.1
- 2) 国土交通省: 「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策案について」に関するご意見募集について, 2015.12
- 3) 秋山宏, 呉相勲, 大竹章夫, 福田浩司, 山田哲: 無補強角形鋼管柱・梁接合部のモーメント一回転角関係の一般化, 日本建築学会構造系論文集, 第 484 号, pp.131-140, 1996.6
- 4) 大井謙一, 近藤日出夫, 陳似一, 高梨晃一, 嶋脇興助, A.S.エルナシャイ: 半剛接合部を有する鋼構造骨組の地震応答実験, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.39B, pp.155-164, 1993.3

- 5) 瀧本哲也, 原田幸博: 半剛接合部を有する高層鋼構造骨組の耐震性能に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp.376-383, 2014.11
- 6) 有間雄太, 脇田直弥, 山口路夫, 綿貫雄太, 佐藤利昭, 渋谷政斗, 佐藤大樹, 北村春幸: 梁端部を半剛接合とした制振構造建物の応答評価, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.285-288, 2015.3
- 7) 有間雄太, 脇田直弥, 山口路夫, 綿貫雄太, 佐藤利昭, 渋谷政斗, 佐藤大樹, 北村春幸: 地震動の入力レベルが梁端部を半剛接合とした制振構造建物の応答および制振効果に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), B-2, pp.779-780, 2015.9
- 8) 栗林晃司, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 西本晃治: 実効変形を考慮した履歴減衰型制振部材を有する鋼構造建物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 661 号, pp.543-552, 2011.3
- 9) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999.11
- 10) 斎藤安生, 石井正人, 浅野美次, 堀井昌博: マルチスプリングモデルの特性 その 2 鉄骨部材の弾性挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), B-1, pp.385-386, 1997.7
- 11) 秋山宏, 高橋誠: 地震時における柔剛混合せん断型多層骨組の残留変形, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), B-2, pp.397-398, 1998.9
- 12) 日本建築センター: エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法の技術基準解説及び計算例とその解説, p.22, 2005.10