

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	強度鋼と制振部材及び変形制御機構を組合せた高耐震性能構造の部材レベルモデルによる検討
Title	
著者(和文)	野村尚史, 佐藤大樹, 北村春幸, 植木 卓也, 宮川 和明
Authors	Naoshi Nomura, daiki sato, Haruyuki Kitamura, Takuya Ueki, Tomoaki Miyagawa
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 83, , 2023
Citation(English)	, Vol. 83, , 2023
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/110009769769

高強度鋼と制振部材及び変形制御機構を組合せた高耐震性能構造の部材レベルモデルによる検討

正会員 ○ 野村尚史^{*1} 同 佐藤大樹^{*1} 同 北村春幸^{*1}
同 植木卓也^{*2} 同 宮川和明^{*3}

構造—振動

高強度鋼 H-SA700 履歴減衰型ダンパー 変形制御機構
中低層建物 部材レベルモデル 時刻歴応答解析

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を機に、塑性変形能力に優れた制振部材を建物に組込むことで中小地震時から大地震時までエネルギーを効率的に吸収し、建物の損傷を軽減する制振構造が多く採用されている¹⁾。一方、南海トラフ地震や首都直下地震、上町断層地震等の極大地震の発生が懸念されており、震度7クラスの極大地震にも主架構を弾性範囲に留め建物機能を維持する高度な耐震性を持った建物も提案されている^(例えば2)。さらに、2011年の東北地方太平洋沖地震ではM9.0という想定以上の極大地震が発生したことから、想定以上の地震動に対する変形制御機構を導入し、過大な変形を制御することの重要性が高まってきている。変形制御機構については、ある一定の変形以上の範囲で作用する硬化型復元力特性を持つ機構として様々な研究がなされており³⁾⁵⁾、硬化型復元力特性を持つ変形制御機構を組込むことで極大地震時の架構の変形を低減できることを解析的に示している。しかし、既往研究では1質点系モデルや多質点系モデルを対象としており、部材レベルで検討しているものはない。

筆者ら⁶⁾は、8層建物を対象とした3次元部材レベルモデルによる検討から、「府省連携 革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発プロジェクト²⁾」で開発された建築構造用高強度 780 N/mm² 鋼材 H-SA700 を主架構全てに用いることで、普通鋼 SN400 を用いた場合と比較して鋼材量を低減でき、履歴減衰型ダンパーを組合せることでレベル2地震動の2倍の地震動に対して主架構は弾性となることを示している。しかし、鋼材量の低減に伴う主架構剛性の低下により、ダンパーを付与しても効率が悪くなり変形が低減しにくくなった。そこで本報では、文献6)で解析対象とした制振構造に、ある変形から剛性を持ち始める変形制御機構を付与することで、大地震時の応答に与える影響を時刻歴応答解析から検討する。

2. 対象建物、入力地震動、制振部材、変形制御機構の概要

2.1 対象建物及び解析モデル概要

図1に対象建物の基準階伏図と軸組図を示す。対象建物の階高は1階が5m、他の階は4mである。平面形状の基本スパンが長辺方向(X方向)で両端部8m、その他6m、短辺方向(Y方向)で1,2,7,8通り8m、その他16mから構成された46m×32mの矩形であり、

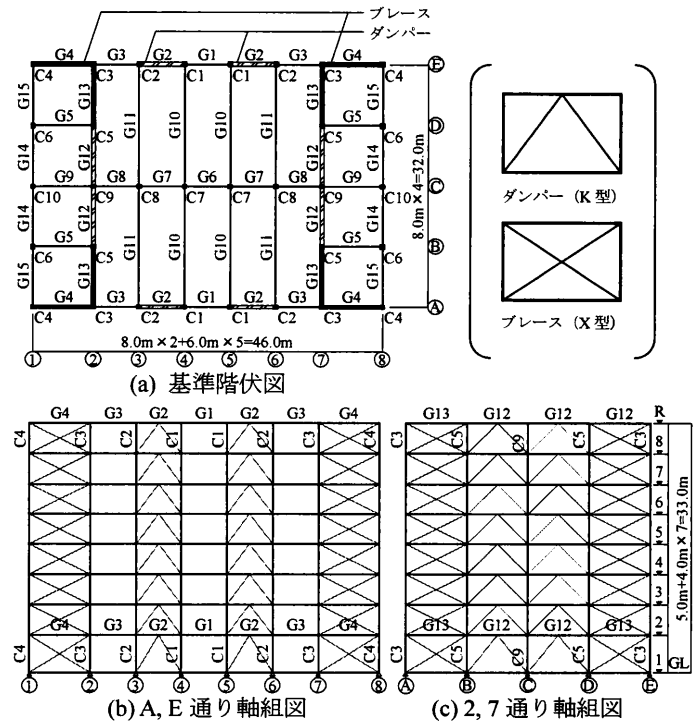


図1 対象建物の基準階伏図及び軸組図

表1 主架構の部材断面

大梁	符号	G1-9, G12-15		G10, 11	
		2-4F	WH-350×250×12×22	~	WH-350×250×12×25
	5-7F	WH-350×250×9×19	~	WH-350×250×9×22	WH-650×250×16×19
	8F	WH-300×200×9×16	~	WH-300×200×9×16	WH-600×200×16×19
	RF	WH-300×200×9×12	~	WH-300×200×9×12	WH-600×200×14×19
柱	符号	C1-10			
		1-3F	□-350×350×25×25	~	□-400×400×36×36
		4-6F	□-350×350×19×19	~	□-400×400×28×28
		7-8F	□-350×350×16×16	~	□-400×400×28×28

各階同一とする。解析はX方向を対象とし、剛床を仮定した3次元部材レベルモデルで行う。構造減衰は主架構の1次固有周期 T_1 に対して2%となる剛性比例型とする。表1に、対象とする解析モデルの主架構の部材断面を示す。解析モデルは、文献6)においてH-SA700を用いて鋼材量を最も低減させたH7-08Hとする。

2.2 入力地震動の概要

図2(次頁)に入力地震動の擬似速度応答スペクトル $p_s v$ ($h = 0.05$)及びエネルギースペクトル V_E ($h = 0.10$)、図3(次頁)に加速度時刻歴波形を示す。本報では、建物周期のばらつきに対する影響が少なくなるよう告示スペクトルに一致するように作成された模

擬波3波を用いることとする。コーナー周期 $T_c \geq 0.64s$ において $p_s v$ が160 cm/sで一定となるよう設定したため、これをレベル2の2倍の地震動として定義する。位相特性としては、JMA KOBE 1995 NS, HACHINOHE 1968 EW, TOMAKOMAI 2003 NSを採用する(以降、ART KOBE 160, ART HACHI 160, ART TOMA 160と表記)。

2.3 制振部材の概要

制振部材(以降、ダンパーと表記)として用いる座屈拘束ブレースは、図4で示すように塑性化部と弾性部で構成される。解析上は、ダンパーを等価なヤング係数 E_{eq} を用いて1要素(一様断面)でモデル化した。ダンパーの軸方向の等価剛性 ${}_d \hat{K}$ は下式で算出される。

$${}_d \hat{K} = \frac{\alpha_e}{1 + \beta_p(\alpha_e - 1) - \beta_x} \frac{E \cdot {}_d A_p}{{}_d L} = \frac{E_{eq} \cdot {}_d A_p}{{}_d L} \quad (1)$$

ここで、 α_e : 塑性化部断面積 ${}_d A_p$ に対する弾性部断面積の比、 β_p : 節点間距離 ${}_d L$ に対する塑性化部長さ ${}_d L_p$ の比、 β_x : ${}_d L$ に対する剛域長さの比である。本報の解析では、 $\alpha_e = 2.0$, $\beta_p = 1/3$, $\beta_x = 0$ と設定することで $E_{eq} = 1.5 E$ とする。

ダンパーの塑性化部にはLY225材(${}_d \sigma_y = 225 \text{ N/mm}^2$)を用い、 ${}_d L$ の1/3とする。履歴性状は完全弾塑性型を用いて表現する。ダンパーは1層あたりK型(図1参照)で8基付与するため、第1層のダンパーの塑性化部断面積 ${}_d A_{p1}$ は第1層のダンパーの降伏層せん断力係数 ${}_d \alpha_{y1}$ を用いて下式で求められる。

$${}_d Q_{y1} = {}_d \alpha_{y1} \cdot \sum_{i=1}^8 m_i g, \quad {}_d N_{y1} = \frac{{}_d Q_{y1}}{8 \cos {}_d \theta_1}, \quad {}_d A_{p1} = \frac{{}_d N_{y1}}{{}_d \sigma_y} \quad (2a-c)$$

ここに、 ${}_d Q_{y1}$: ダンパーの降伏層せん断力、 m_i : 第 i 層の質量、 g : 重力加速度、 ${}_d N_{y1}$: ダンパーの降伏軸力、 ${}_d \theta_1$: ダンパーの取付け角度である。 ${}_d \alpha_{y1}$ の変化で ${}_d A_{p1}$ が決定されるため、 ${}_d \alpha_{y1}$ をダンパー量と表記する。なお、第 i 層におけるダンパーの降伏層せん断力係数 ${}_d \alpha_{yi}$ は、地震層せん断力係数の高さ方向分布(A_i 分布)に基づく設計用層せん断力分布を ${}_d \alpha_{y1}$ に乗ずることで求める。

2.4 変形制御機構の概要

変形制御機構(以降、ブレースと表記)は1層あたりK型で8基付与するが、引張応力のみ作用させるため一方向に力が掛かる際は1層あたり4基が作用することとなる。図5に復元力特性のイメージを示す。ブレースは架構が過大な変形となるのを防ぐ役割として設置するため、架構がある層間変形角以上になった場合に作用することとする。なお、ブレースが作用し始める層間変形角 ${}_b R_{gap}$ はダンパーの降伏層間変形角 ${}_d R_{y1}$ より大きく設定するものとする。ブレースの剛性 ${}_b k_i$ は、主架構の剛性 ${}_f k_i$ を用いて下式で表される。

$${}_b k_i = {}_b \kappa \cdot {}_f k_i \quad (3)$$

ここに、 ${}_b \kappa$: ${}_f k_i$ に対する ${}_b k_i$ の割合である。なお、 ${}_b R_{gap}$ に至るまでのブレースの剛性 ${}_b k_{gap}$ は ${}_b k_i$ の1/1000と設定している。ブレース諸元としては ${}_b R_{gap}$ と ${}_b \kappa$ を設定し、全層同一の値としている。

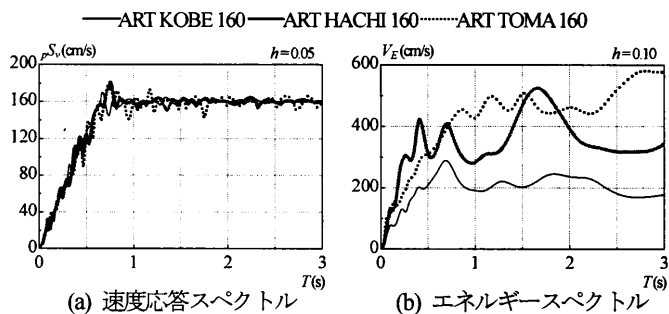


図2 入力地震動のスペクトル

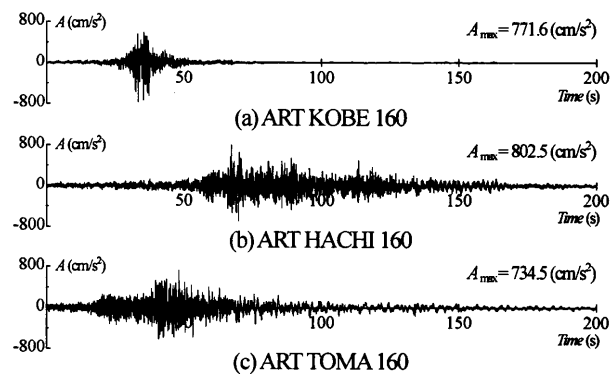


図3 入力地震動の加速度時刻歴波形

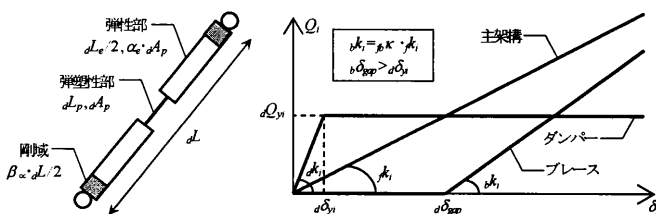


図4 ダンパーのモデル化 図5 復元力特性のイメージ

3. 採用ダンパー量の選定

ダンパー量はレベル2地震動に対して選定することとし、レベル2地震動としては、 $T_c \geq 0.64s$ において $p_s v$ が80 cm/sで一定となるように作成した模擬波 ART KOBE 80, ART HACHI 80, ART TOMA 80を採用する。 ${}_d \alpha_{y1}$ をパラメータとして0.02~0.30まで変化させた時の応答を比較する。表2(次頁)に各ダンパー量での1次固有周期 T_1 、図6(次頁)にダンパー量の変化による応答比較を示す。図6に示す評価指標は、(a)第1層の架構全体とダンパーの最大層せん断力係数 $\alpha_1, {}_d \alpha_1$ 、(b)最大層間変形角 R_{max} である。

図6より、(a) $\alpha_1, {}_d \alpha_1$ に着目すると、 ${}_d \alpha_{y1}$ の増加に伴いダンパーの耐力比(${}_d \alpha_1 / \alpha_1$)は増大傾向となり、 ${}_d \alpha_{y1} = 0.04 \sim 0.06$ の範囲において ${}_d \alpha_1 / \alpha_1 = 0.25 \sim 0.40$ 程度となることがわかる。(b) R_{max} に着目すると、 $1/120 \sim 1/100 \text{ rad}$ 程度で一定となる傾向にあり、レベル2地震動に対する R_{max} の設計クライテリアを $1/120 \text{ rad}^2$ とすると、 ${}_d \alpha_{y1} = 0.06$ において全ての地震動に対して $R_{max} = 1/120 \text{ rad}$ 程度となることがわかる。以上より、 ${}_d \alpha_1 / \alpha_1$ 及び R_{max} の結果から、最適なダンパー量としては ${}_d \alpha_{y1} = 0.06$ を選定し、これ以降の検討で用いることとする。

4. 変形制御機構の諸元が応答に与える影響

4.1 変形制御機構の諸元の設定

ブレース (変形制御機構) の解析パラメータは、ブレースが作用し始める層間変形角 bR_{gap} と主架構の剛性に対するブレースの剛性の割合 $\beta\kappa$ である。ブレースはレベル2以上の地震動に対して作用することを想定しているため、 bR_{gap} は 1/120 rad を基準値として 1/200, 1/100 rad を設定する。さらに、レベル1地震動を想定して 1/500 rad を設定する。 $\beta\kappa$ は 1.0~4.0 まで 1.0 刻みで設定する。なお、本章ではブレースの付与による応答の変化を明確にするため、主架構を弾性設定とする。また、 $bR_{gap} = 1/500, 1/120$ rad, $\beta\kappa = 3.0, 1.0$ を検討対象とし、ART KOBE 160 入力時の結果のみを示すこととする。

4.2 高さ方向の応答分布の比較

図7に高さ方向の応答分布を示す。図7(i)に $bR_{gap} = 1/500$ rad, 図7(ii)に $bR_{gap} = 1/120$ rad の結果を示し、図7では $\beta\kappa$ をパラメータとして変化させている。着目する各層の評価指標は、(a)最大層間変形角 $R_{max,i}$, (b)最大層せん断力係数 α_i , (c)最大加速度 A_i であり、図中にはブレース付与しない場合の応答も示している。

図7(a) $R_{max,i}$ に着目すると、ブレースを付与しない場合の R_{max} は低層部で 1/47 rad と 1/50 rad を上回る応答となるが、ブレースを付与することで 1/50 rad 以下となり、低層部の $R_{max,i}$ は低減していることがわかる。低層部の $R_{max,i}$ の低減傾向は、 bR_{gap} が小さく $\beta\kappa$ が大きいほど顕著である。また、低層部の $R_{max,i}$ が低減したことで、全層で応答値が揃う傾向となることがわかる。しかし、レベル2の2倍の地震動に対する R_{max} の設計クライテリアを 1/75 rad²⁾ とすると、ブレースを付与しても満足しておらず、ブレースの付与による大幅な R_{max} の低減効果は見込めないことがわかる。なお、ART HACHI 160, ART TOMA 160 入力時では、ブレースを付与しない場合の R_{max} が 1/69 rad, 1/65 rad となり、ブレースを付与することで 1/75 rad 以下となることを確認している。また、全ての地震動において上層部ではブレースを付与することで $R_{max,i}$ が増大する傾向も見られ、ブレース諸元や地震動を変化させた検討より、この傾向は $d\alpha_{y1}$ が小さいほど顕著であることを確認している。図7(b) α_i 及び図7(c) A_i に着目すると、ブレースを付与することで応答値は増大し、 $\beta\kappa = 3.0$ ではほとんどの層で $A_i = 980$ cm/s² を大きく上回る応答となることがわかる。 α_i 及び A_i の増大傾向は $\beta\kappa$ が大きいほど顕著である。

4.3 層の履歴曲線及び時刻歴波形の比較

図8に架構全体の層せん断力 Q_i と層間変形角 R_i の履歴曲線を示し、図9に Q_i 及び R_i の時刻歴波形を示す。 $\beta\kappa = 1.0$ を検討対象とし、第2層に着目する。図8より、 bR_{gap} 以降でブレースが作用することで架構の剛性が増大することが確認できる。図8, 9より、ブレースが作用することで Q_i は増大し、 R_i の最大値は低減していることがわかる。しかし、図9の時刻歴波形を見ると R_i が増大する時

表2 各ダンパー量での1次固有周期 T_1

$d\alpha_{y1}$	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.15	0.20
T_1 (s)	2.389	1.787	1.569	1.455	1.383	1.334	1.298	1.260	1.218

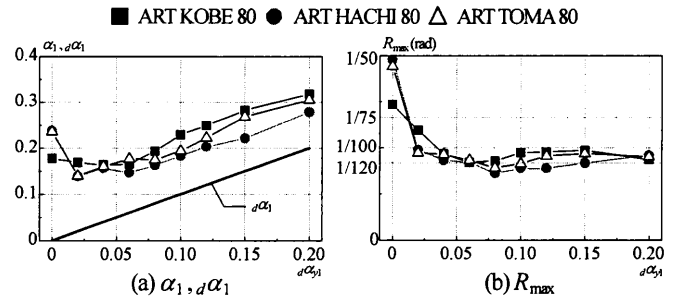


図6 ダンパー量の変化による応答比較

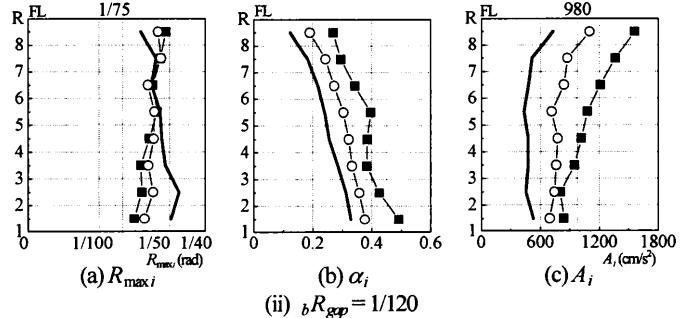
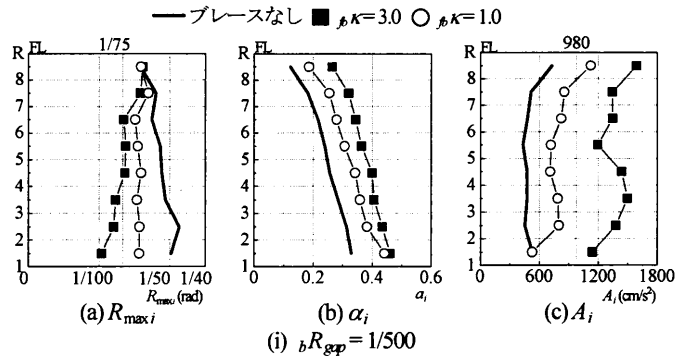


図7 高さ方向分布

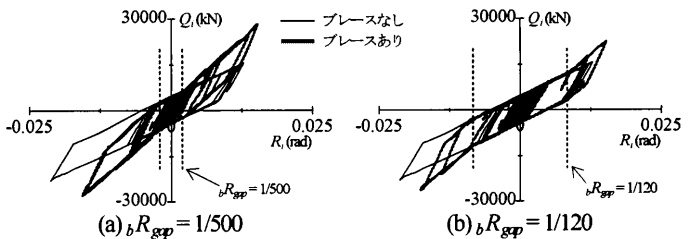


図8 Q_i-R_i の履歴曲線_第2層, $\beta\kappa = 1.0$

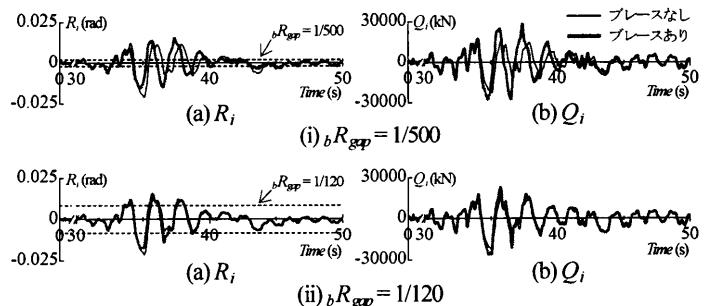


図9 Q_i 及び R_i の時刻歴波形_第2層, $\beta\kappa = 1.0$

間帯も確認できる。また、 $bR_{gap} = 1/500$ rad ではブレースが作用する時間帯が長いので、ブレースの付与により応答に与える影響が大きく、ブレースの有無によって応答に位相差が生じることがわかる。図7~9の結果より、 bR_{gap} が小さいほど層間変形角の低減効果が見込めるが、 bR_{gap} が小さすぎると小さなレベルの地震動に対してもブレースの付与による層せん断力の増大が懸念されるため、そのことを考慮して bR_{gap} を設定する必要がある。

5. 変形制御機構が主架構の損傷に与える影響

前章では、主架構を弾性設定として解析を行っていたが、ブレースの付与により α_i 及び A_i が増大することで主架構の塑性化が懸念される。よって本章では、主架構を弾塑性設定とした場合に、ブレースが主架構の損傷に与える影響を検討する。表3に各解析ケースにおける ART KOBE 160 入力時の梁端の最大塑性率 $G\mu_{max}$ を示す。表中の0は塑性化していないことを表す。表3より、 $\beta\kappa = 1.0$ においては bR_{gap} によらず梁の塑性化は見られないが、 $\beta\kappa = 2.0 \sim 4.0$ においては梁が塑性化するケースがある。なお、ART HACHI 160, ART TOMA 160 入力時では、いずれの解析ケースにおいても梁の塑性化は見られないことを確認している。また、 $d\alpha_{y1} = 0.15$ とした場合に はブレースを付与しても梁は塑性化しないことを確認している。

$d\alpha_{y1} = 0.06$, $bR_{gap} = 1/120$ rad, $\beta\kappa = 3.0$ を対象として、図10に ART KOBE 160 入力時における梁の塑性化箇所を示し、図11にA通り8FLの2-3通り間のG3梁端における曲げモーメント $G M_i$ と回転角 $G\theta_i$ の履歴曲線を示す。対象ケースにおいて梁が塑性化したのは、A通り8FLの2-3, 6-7通り間のG3梁(ブレース設置構面とダンパー設置構面に挟まれた梁)のみであったため、図10には第7, 8層部分のみを示しており、図中に示す数値は $G\mu_{max}$ を表す。図11にはブレースを付与していない場合の履歴曲線も示しており、この場合の主架構は弾性範囲となった。図10より、ブレース設置構面とダンパー設置構面に挟まれた境界梁に応力が集中することがわかり、境界梁に応力が集中する傾向は文献6)でも示されている。図11より、ブレースを付与しない場合では主架構が弾性範囲に留まるケースでも、ブレースを付与することで梁が塑性化する可能性がある。

6. まとめ

本報では8層建物を対象として、H-SA700を主架構全てに用いて鋼材量を低減させた制振構造に、ある変形から剛性を持ち始めるブレースを付与することで、大地震時の応答に与える影響を3次元部材レベルモデルによる時刻歴応答解析から検討した。限られた範囲での検討ではあるが、以下に得られた知見を示す。

- (1) ブレースを付与することで低層部の最大層間変形角 $R_{max,i}$ は低減し、低層部の $R_{max,i}$ が低減したことで全層の $R_{max,i}$ が揃う傾向

表3 梁端の最大塑性率_ART KOBE 160, $d\alpha_{y1} = 0.06$

$G\mu_{max}$	bR_{gap} (rad)	$\beta\kappa$			
		4.0	3.0	2.0	1.0
1/500		1.374	0	0	0
1/200		0	1.315	1.338	0
1/120		1.401	1.381	1.381	0
1/100		1.390	1.368	1.329	0

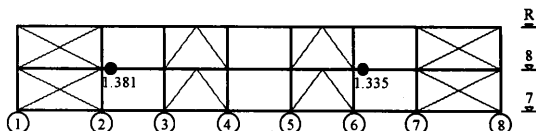


図10 塑性化箇所_ART KOBE 160, $d\alpha_{y1} = 0.06$, $bR_{gap} = 1/120$, $\beta\kappa = 3.0$

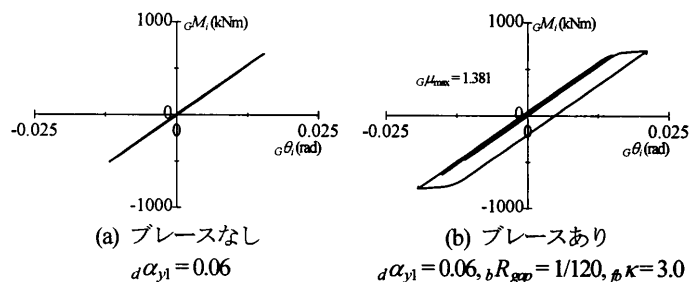


図11 $G M_i - G\theta_i$ の履歴曲線_ART KOBE 160, A通り8FL, 2-3通り間, G3

となることを確認した。しかし、ブレースを付与しない場合に R_{max} が過大となる場合は、ブレースを付与しても設計クライテリアを満足するほどの低減効果は見込めない。一方で、ブレースの付与により架構の剛性が増大するため、各層の最大層せん断力係数 α_i 及び最大加速度 A_i は増大することを確認した。

- (2) ブレースが作用し始める層間変形角 bR_{gap} が小さく主架構の剛性に対するブレースの剛性の割合 $\beta\kappa$ が大きいほど低層部の $R_{max,i}$ は低減するが、 $\beta\kappa$ が大きすぎると最大加速度が 980 cm/s^2 を大きく上回り、 bR_{gap} が小さなレベルの地震動に対してもブレースの付与による層せん断力の増大が懸念されるため、これらを考慮してブレースの諸元を設定する必要がある。
- (3) ブレースを付与しない場合では主架構が弾性範囲に留まるケースでも、ブレースを付与することで境界梁に応力が集中し、塑性化する可能性があることを示した。これより、ブレースの配置方法にも注意が必要である。

参考文献

- 1) 北村春幸, 北村佳久, 伊藤優, 坂本光雄: 適用建物調査に基づく日本の応答制御構造の分析・評価, 日本建築学会技術報告集, 第18号, pp.55-60, 2003.12
- 2) 府省連携 革新的制振材料を用いた新構造システム建築物研究開発プロジェクト: 新構造システム建築物設計・施工(案), 新都市ハウジング協会, 日本鉄鋼連盟, 日本鋼管協会, 2009.3
- 3) 渡辺宏一, 田村和夫: ギャップ連層壁架構の基本振特性, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.2753-2758, 1998.11
- 4) 本間誠, 堀則男, 井上範夫: エネルギー応答に基づいた地震を受ける鉄筋コンクリート建物におけるダンパーと変形制御機構の設計, 日本建築学会構造系論文集, 第618号, pp.49-56, 2007.8
- 5) 南博之, 鈴木恭平, 多幾山法子, 大西良広, 林康裕: パルス性地震動に対する変形制御機構の効果に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第39号, pp.471-476, 2012.6
- 6) 野村尚史, 佐藤大樹, 北村春幸, 藤澤一善: 建築構造用高強度鋼材H-SA700と制振部材を組合せた高耐震化中低層鋼構造建物の応答性状, 構造工学論文集, Vol.58B, pp.179-187, 2012.3

*1 東京理科大学 *2 JFE スチール株式会社 *3 JFE シビル株式会社