

# 原点立上り型復元力特性を有するブレースを設置した 鋼構造架構の複数回地震発生時の地震応答

山西 央朗\*・山田 裕也\*\*・清水 斉\*・小松 真吾\*\*\*・小畑 寛行\*\*\*\*

(平成30年11月1日受付)

## MULTI SEISMIC RESPONSE OF STEEL STRUCTURE WITH BRACE HAVING BUILD-UP-FROM ORIGIN-POINT TYPE

Teruaki YAMANISHI, Yu-ya YAMADA, Hitoshi SIMIZU,  
Shingo KOMATSU and Hiroyuki KOBATA

(Received Nov. 1, 2018)

### Abstract

The authors are conducting research to clarify the seismic performance of the frame with R-brace. In previous studies research was conducted experiments of R-brace and numerical analysis of one-story-one-bay frame. In this paper numerical analysis with multi-story-multi-bay is carried out and performance of R-brace is discuss. As a result. The performance of R-brace is restrained residual deformation when the burden is large. Furthermore, it is possible to decreased the increase of residual deformation when even if multi-earthquakes occur, and to restrain occurrence of residual deformation.

**Key Words:** build up from origin point type, brace, residual deformation reduction, seismic analysis

### 1. 序 論

建築構造物の地震時安定性、並びに性能評価を行う場合においては、紡錘型の復元力特性を付与することが単純かつ取り扱い易い。しかし一方で、当該挙動は、変位と抵抗力との間に位相差が生まれ残留変形を生じる可能性がある。一定値以上となると、二次部材の機能不全や建物使用者の不快感が報告され、地震後、構造物の継続使用が困難なものとなる。また、近年には2016年に発生した熊本大地震のように、極めて稀に起こる地震が複数回発生しており、前震に耐えた構造物が本震で倒壊する事例が挙げられている。このように構造物の耐震安全性を確保するためには、残留変形の問題に対して考える必要がある。残留変形の問題に対しては、“セルフセンタリング性能”と呼ばれる原点指向

型の復元力特性が効果的とされ既往の研究によって明らかとされているが<sup>1,2)</sup>、工法の複雑さ・汎用性に難がある。著者らは、比較的簡単に使用できるブレースにセルフセンタリング性能の期待できる復元力特性を付与させたもの(以後 R-brace と記す)を提案しており、既往の研究よりラーメン架構に R-brace を X 型配置することにより、原点指向型の復元力特性を示し、(図 1 を参照) 残留変形低減効果を

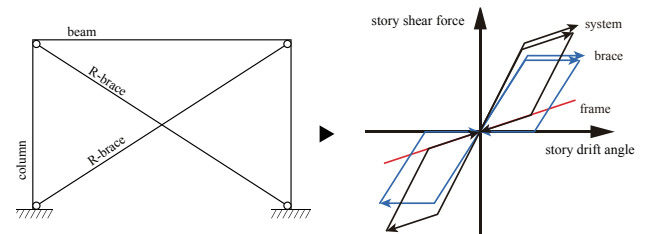


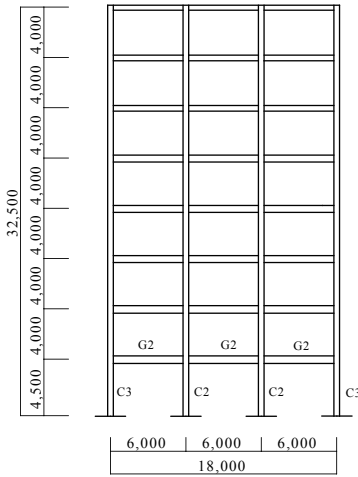
図 1 R-brace を X 型配置した際の復元力特性

\* 広島工業大学工学部建築工学科

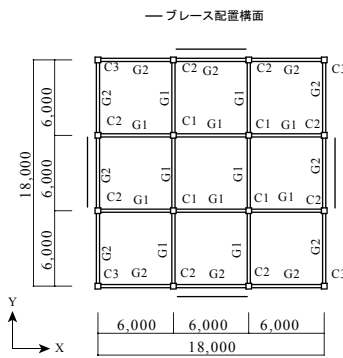
\*\* 広島工業大学工学系研究科建設工学専攻

\*\*\* 東京工業大学

\*\*\*\* 大旗連合建築設計株式会社構造設計部



(a) 立面図



(b) 平面図

図2 解析モデル

表1 部材リスト

層	柱		梁	
	C1,C2	C3	G1	G2
8			H-400×200×9×16	H-400×200×9×12
7	□-400×400×19	□-400×400×16	H-450×250×9×16	H-400×200×12×22
6				
5				
4	□-400×400×22	□-400×400×19	H-500×200×12×22	H-500×200×12×19
3				
2				
1	□-400×400×25	□-400×400×22	H-600×200×12×25	H-600×200×12×22

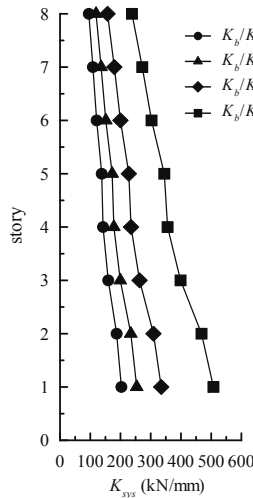
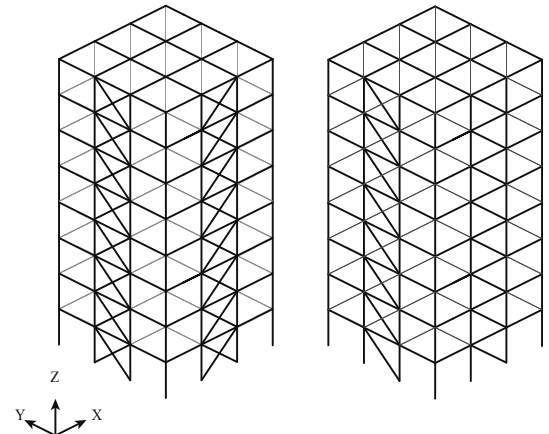


図3 剛性分布



(a) R-brace

(b) BRB

図4 ブレース配置

有することを明らかとしている<sup>3,4)</sup>。

本論では、中層鋼構造物を対象として数値解析を行い、複数回の地震発生時における R-brace 付き架構の地震応答性状を明らかとすることを目的とする。また併せて、一般的に使用される座屈拘束ブレース（以後 BRB と記す）を設置した架構の解析を行い、比較・検討を行い、R-brace の性能について議論する。

## 2. 数値解析概要

### 2.1 解析モデル<sup>5)</sup>

図2に解析モデルを表1に解析モデルの部材リストを示す。解析モデルは、一般的な中層事務所ビルを想定し、階高が1階4.5 m、2～8階4 m、スパン長6 mの8層3スパンの立体架構である。解析モデルの条件を以下に示す。

1. 設計用地震力は地域係数  $Z=1.0$ 、設計用一次固有周期  $T=0.03H$  ( $H$ : 建物の高さ)、地震種別は第2種地盤、標準せん断力係数  $C_0=0.2$  とし、 $A_f$  分布に基づいて仮定する。
2. 本解析モデルの部材重量を除いた床の固定荷重は一般層を  $4,470 \text{ N/mm}^2$ 、最上階を  $6,590 \text{ N/mm}^2$  とする。積載荷重として、一般層を事務所、最上階を屋上と仮

定する。

3. 各層の床には剛床を仮定する。
4. 柱、梁、ブレースの鋼材種は、それぞれ BCP325, SN490B, SNR490B とし、ヤング係数  $E=205,000 \text{ N/mm}^2$ 、降伏応力度は実勢値を加味して公称値の1.1倍である  $\sigma_c=358 \text{ N/mm}^2$  とする。
5. 各層の梁の全塑性モーメントの総和  $\Sigma M_{pb}$  に対する軸力を考慮した柱の全塑性モーメントの総和  $\Sigma M_{pc}$  の比  $\Sigma M_{pc}/\Sigma M_{pb}$  が1.5を上回るように設定している。
6. 図3に架構の剛性の分布を示す。各層の剛性は直線的な分布となっている。

### 2.2 解析対象

#### 2.2.1 ブレース

対象とするブレースは、R-brace, BRB の2種類とし、単軸バネによってモデル化を行う。BRB には完全弾塑性型の復元力特性を、R-brace には原点立上り型を再現した bi-linear 型の復元力特性を設定する。またブレースの配置は図4に示すように、各層の外側中央構面に配置し BRB は片流れ方 (Z型) に、R-brace は X型に配置する。表2にブ

表2 ブレース断面リスト

層	$A_b$ (mm <sup>2</sup> )			$K_0$ (kN/mm)			$T_{by}$ (kN)		
	$K_b/K_{sys}=0.2$	$K_b/K_{sys}=0.4$	$K_b/K_{sys}=0.6$	$K_b/K_{sys}=0.2$	$K_b/K_{sys}=0.4$	$K_b/K_{sys}=0.6$	$K_b/K_{sys}=0.2$	$K_b/K_{sys}=0.4$	$K_b/K_{sys}=0.6$
8	302.4	786.3	1814.4	8.6	22.4	51.6	108.1	281.1	648.7
7	345.4	898.2	2072.7	9.8	25.5	58.9	123.5	321.1	741.0
6	384.5	999.8	2307.2	10.9	28.4	65.6	137.5	357.4	824.8
5	438.0	1138.8	2628.1	12.5	32.4	74.7	156.6	407.1	939.5
4	452.0	1175.3	2712.3	12.9	33.4	77.1	161.6	420.2	969.6
3	506.6	1317.2	3039.6	14.4	37.4	86.4	181.1	470.9	1086.7
2	594.7	1546.3	3568.4	16.9	44.0	101.4	212.6	552.8	1275.7
1	725.1	1885.3	4350.8	19.8	51.5	118.9	259.2	674.0	1555.4

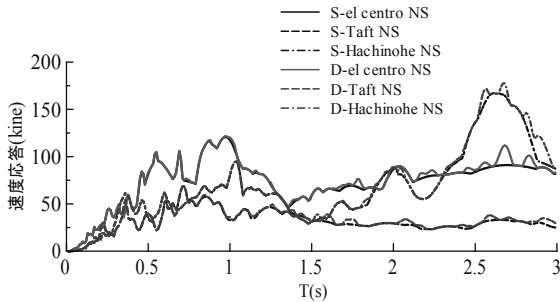


図5 速度応答スペクトル ( $h=0.02$ )

表3 固有周期

モデル	固有周期 (s)	
	1次	2次
ラーメン架構	1.368	0.476
$K_b/K_{sys}=0.2$	1.235	0.432
$K_b/K_{sys}=0.4$	1.113	0.386
$K_b/K_{sys}=0.6$	0.987	0.331

ブレースの断面リストを示す。架構の剛性に対しブレースが占める剛性の割合を、ブレース系水平力負担率  $K_b/K_{sys}$  (式(1)より算定) とし  $K_b/K_{sys}$  が0.2, 0.4, 0.6となるようにブレース断面積  $A_b$  を決定し式(2), (3)より降伏耐力  $T_{by}$ , 弾性剛性  $K_{b0}$  を入力する。

$$K_b / K_{sys} = \frac{K_b}{K_b + K_f} \quad (1)$$

$$T_{by} = A_b \cdot \sigma_y \quad (2)$$

$$K_b = \frac{E \cdot A_b}{l_b} \quad (3)$$

### 2.2.2 入力加速度

図5に速度応答スペクトルを示す。入力加速度は、標準3波 (el centro, Taft, Hachinohe) を使用し、各観測波のNS成分をX軸方向にのみ入力する。また図6に示すように、観測波を連続させたものも併せて入力する。更に、R-brace と BRB の性能の違いを明確にするため、最大速度が75 kine, 100 kine となるように基準化を行う。固有周期は表3に示すように、およそ0.9~1.2の範囲に分布して

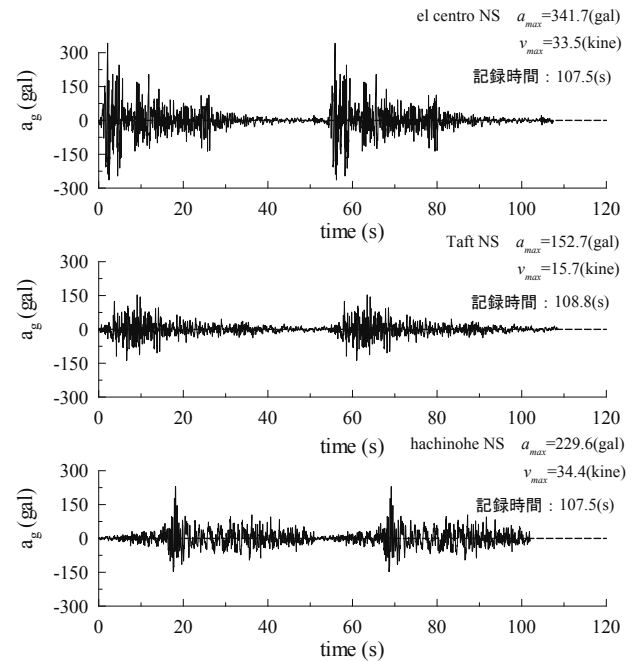


図6 連続させた入力加速度

いる。

### 2.3 解析条件

解析条件は以下のとおりとする。

1. 数値解析には SNAP.ver6.0 (任意形状立体フレーム弾塑性解析ソフト) を使用する。
2. 数値積分の方法は Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=0.25$ の平均加速度法) とする。
3. 減衰は瞬間剛性比例型で減衰定数  $h=0.02$  とする。
4. 地震終了時の残留変形を得るため、1波入力では地震後自由振動が十分に小さくなる100s迄、2波入力の場合には、150s迄解析を行う。

### 3. 数値解析結果と考察

#### 3.1 ラーメン架構の性能

図7に50 kineに基準化した標準3波を1回入力した際の、正負方向の最大応答、残留変形角の分布を、図8にTaft波を連続させた地震波を75 kine, 100 kineに基準化し

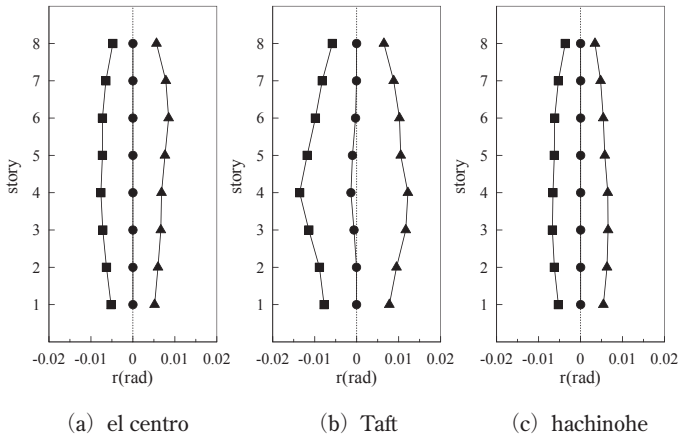


図7 正負最大応答・残留変形角分布 (50 kine)

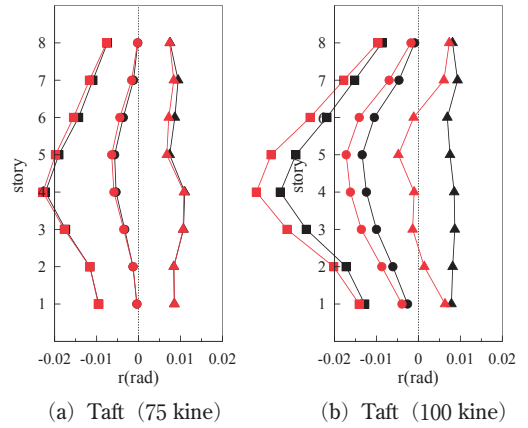


図8 正負最大応答・残留変形角分布 (2波入力)  
 ■ 負方向最大応答(1波) ▲ 正方向最大応答(1波) ● 残留変形角(1波)  
 ■ 負方向最大応答(2波) ▲ 正方向最大応答(2波) ● 残留変形角(2波)

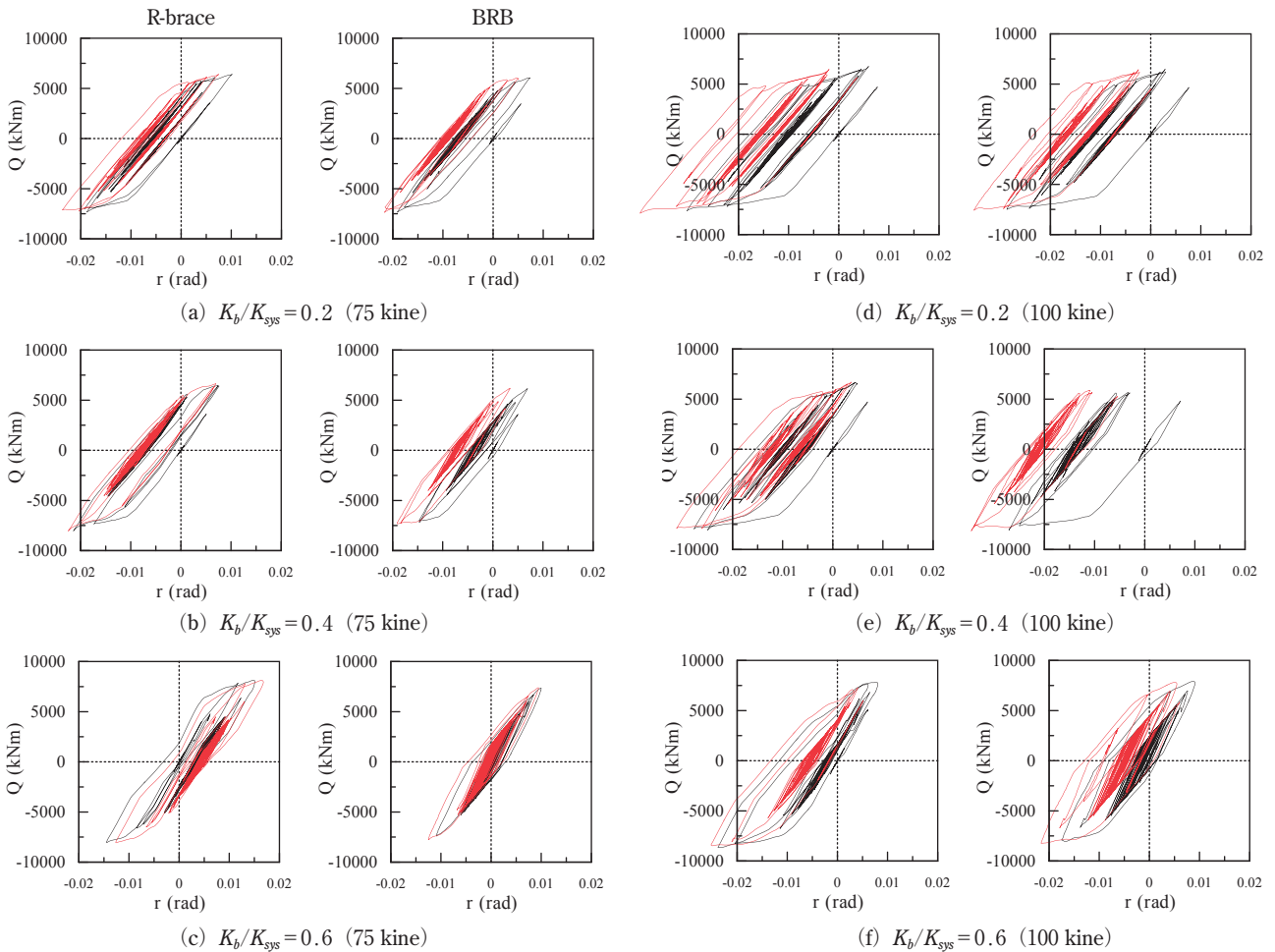


図9 層せん断力-層間変形角関係 (4層)

実際の正負方向の最大応答，残留変形角の分布を示す。図7より架構のみの性能として，架構の強度を大きく設計してしまったため el centro, hachinohe では共に，架構は弾性範囲であり最大応答は小さく，残留変形は生じていない。しかし Taft の場合には中層付近で最大応答は 1/100 rad 以上となり，残留変形が生じている。更に図8より二回連続して入力した場合には，75 kine, 100 kine 共に大きな変形

を生じており 1/200 rad 以上の残留変形を生じている。よって Taft 波の結果を例として示し R-brace の性能について議論する。

### 3.2 地震動入力が一波の場合

図9に4層の層せん断力-層間変形角関係を示す。まず， $K_b/K_{sys}$  による影響として  $K_b/K_{sys}$  の増加は，保有水平耐力

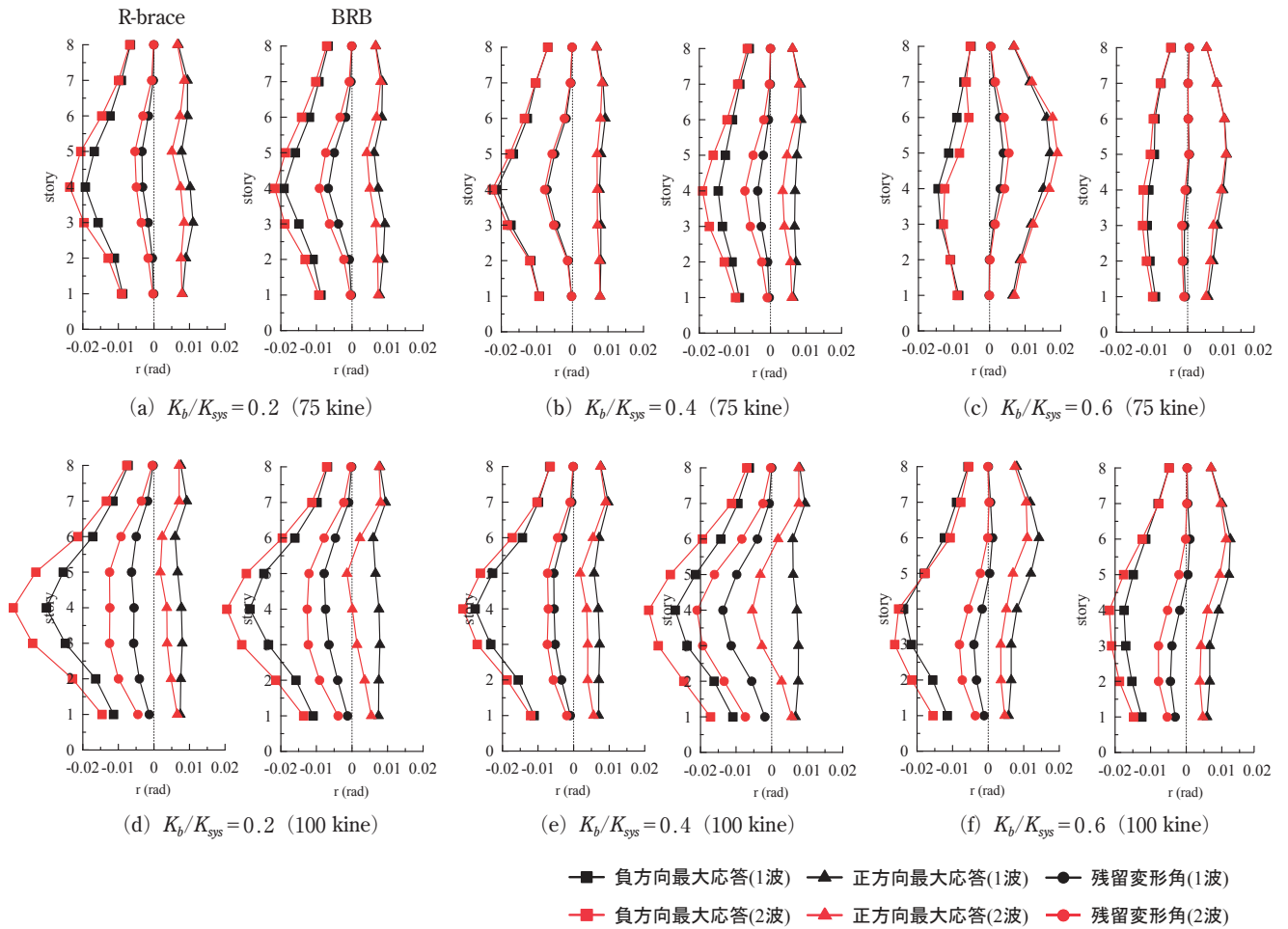


図10 正負方向の最大応答，残留変形角の分布

の増加に繋がるため同じ入力波であっても最大層間変形角は低減する傾向がある。また履歴形状はブレースの履歴特性の支配率が大きくなるため R-brace では原点指向型復元力特性が、発現しやすくなる。次に図9，10より R-brace は前述のとおり  $K_b/K_{sys}$  が増加するにつれ残留変形は低減していく傾向がある。しかし  $K_b/K_{sys}$  が小さく、紡錘型の履歴形状に近い場合にあっては、R-brace を設置しても、最大応答が  $1/50 \text{ rad}$  を超過する場合には大きな残留変形が生じる。

一方、BRB は紡錘型の履歴形状を示すものの、最大応答は R-brace に比較して小さくなるため、残留変形は R-brace と同程度に抑えられる層もある。但し、R-brace と同程度の最大応答が生じた場合においては、残留変形は大きくなる傾向がある。これらは、紡錘型復元力特性がエネルギー吸収効率が良い一方で、残留変形が生じやすいと言う基本的な性状に一致する。

### 3.3 地震動入力が二波の場合

図11に正・負方向最大応答の増大率を、図12に残留変形角の増大率を示す。先ず、図9，10より (a)，(d) は前述のように  $K_b/K_{sys}$  が小さく、履歴形状は紡錘型の復元力特性

に近い履歴を示す。よって R-brace，BRB は共に、負方向に移行していくため大きな残留変形を生じている。また図11，12に示すように最大応答，残留変形の増大率は大きい。しかし (b)，(c)，(e)，(f) の場合において R-brace は、残留変形は増加しているものの、二波目の履歴形状が一波目と重複した履歴形状を示すため最大応答，残留変形の増加率は共に小さい値を示している。一方 BRB は履歴が負方向に移行しており残留変形は増加していく傾向にある。特に (e) については、R-brace と比べ BRB の残留変形の増加率は大きく、大きな残留変形が生じている。

このように  $K_b/K_{sys}$  が大きい (e)，(f) のようにブレースの履歴形状の支配率が大きい場合、特に R-brace においては、残留変形が抑制できる傾向にある。従って R-brace の本来の履歴形状である図1に示す原点指向型の復元力特性が支配的となる履歴形状を示すように R-brace を配置することによって複数回の地震が発生した場合においても、残留変形の発生を抑制することができ、BRB のように変位が一方方向に移行することを防ぐことが可能である。結果として残留変形の増加を抑制できると考えられる。



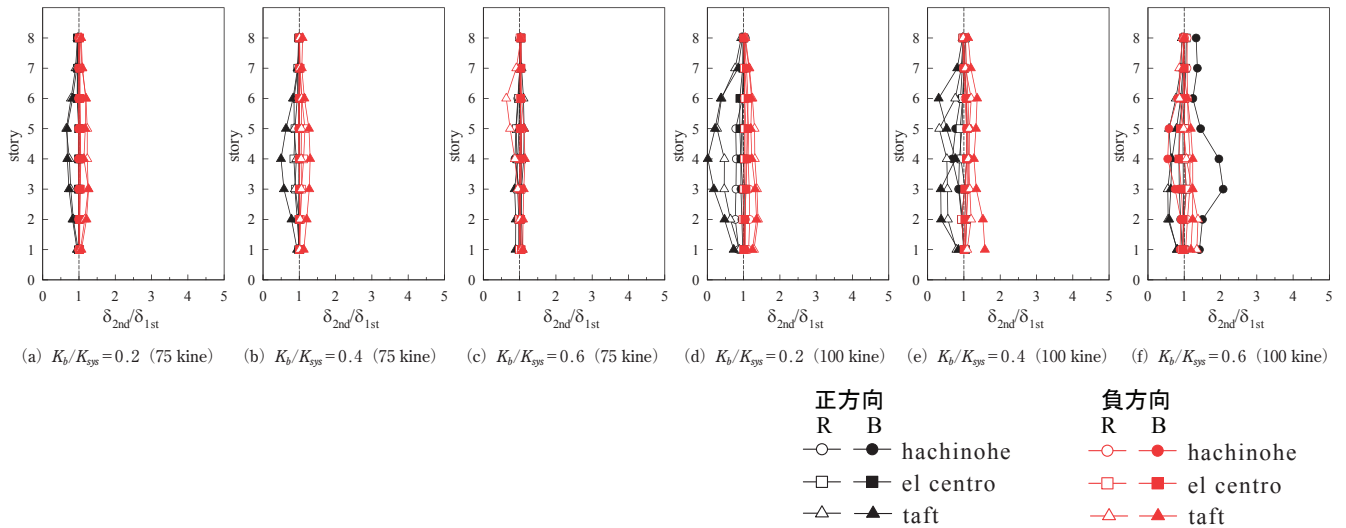


図11 正・負最大応答の増大率

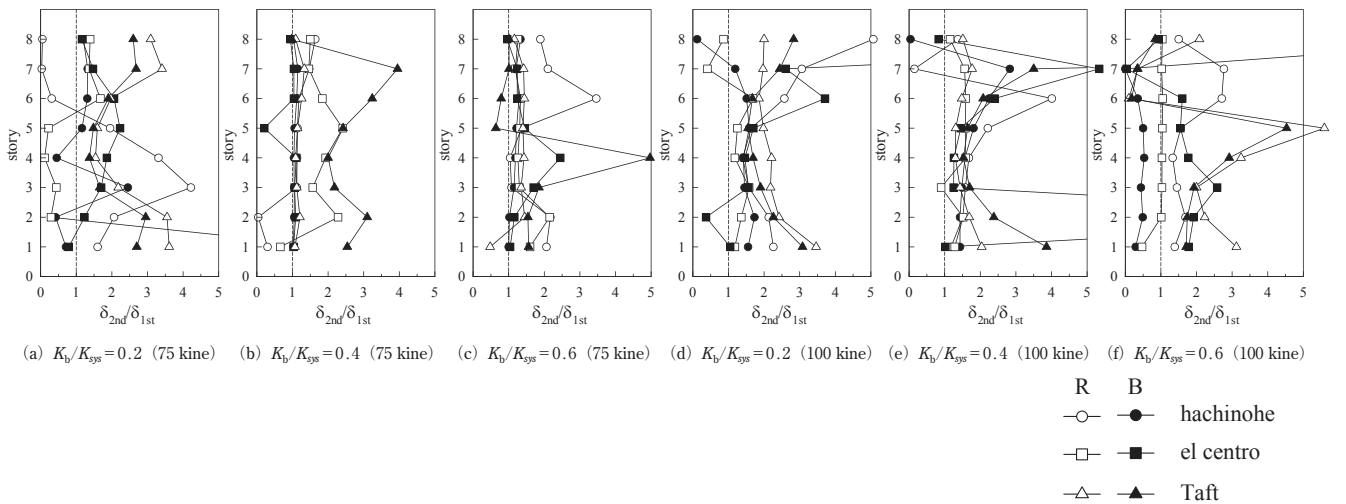


図12 残留変形角の増大率

#### 4. 結論

1. プレースの履歴形状の支配率が大きい場合 ( $K_b/K_{sys} = 0.4, 0.6$ ) においては、最大応答が  $1/50 \text{ rad}$  を超過する場合であっても残留変形を抑制できる傾向にある。
2. 1のように  $K_b/K_{sys}$  が大きい場合には、複数回の地震を受けても、BRBのように一方向に移行することなく一波目と重複した履歴を示すため、残留変形の増加率は小さく、発生を抑制できる傾向にある。

#### 文 献

- 1) 池永昌容, 長江拓也, 中島正愛, 吹田啓一郎: 残留変形低減をめざしたセルフセンタリング中脚の開発と載荷実験, 日本建築学会構造系論文集, 第612号, pp. 223-230, 2007.2
- 2) 池永昌容, 松宮智央, 倉田真宏, 中島正愛, 吹田啓一

郎:セルフセンタリング導入による鋼構造骨組の残留変形低減効果, 日本建築学会学術講演梗概集 (北海道), pp. 765-766, 2004.8

- 3) 石橋亮, 山西央朗, 田川浩, 高松隆夫: 原点立上り型復元力特性を有するプレースの鋼構造物応答・残留変形低減効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 1065-1066, 2015.9
- 4) 石橋亮, 山西央朗, 田川浩, 高松隆夫: 原点立上り型復元力特性を有するプレースと制振プレースを併用した低層鋼構造物応答について, 日本建築学会中国支部研究報告集 日本建築学会中国支部 編, 39巻, pp. 337-340, 2016.3
- 5) 高松隆夫, 玉井宏章, 小松真吾, 山西央朗: 多層 NC プレース架構の地震応答性状に関する研究, 広島工業大学紀要. 研究編, 51巻, pp. 69-75, 2017.2