

# 偏心を有する非対称 Z 型 NC ブレース架構の地震応答性状

高松 隆夫\*・玉井 宏章\*\*・山西 央朗\*\*\*・小松 真吾\*\*\*\*・栗原 将平\*\*\*\*\*

(平成27年10月30日受付)

## Earthquake response analyses of non-symmetric Z-type NC braced frame with eccentricity

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI,  
Shingo KOMATSU and Shouhei KURIHARA

(Received Oct. 30, 2015)

### Abstract

An earthquake produces a torsional vibration of structures with eccentricity. The torsional vibration causes large damage to structures. Authors propose a new earthquake resistant system of a non-symmetric Z-type NC braced frame with performance of earthquake response reduction. The system produces incremental torsional deformation with function of elastic response reduction. In this paper earthquake response analytical results of the NC braced frames with the eccentricity show the same level of torsional vibration as BRB frames. The system can be applied to frames with the eccentricity.

**Key Words:** eccentric, NC brace, anti-symmetric Z-type, seismic response analyses

### 1. はじめに

建築計画上の制約から、平面的に、バランスよく壁、ブレースなどの構造要素を配置できない場合がある。これらの建物は、質量中心と剛性中心のずれにより、地震時、振り振動が生じることで、建物が大きな損傷を被る可能性が高い。このことから、近年では、履歴ダンパーが偏心して取り付けられた場合に対する検討が行われる等<sup>1),2)</sup>、履歴ダンパー架構のような構造物においても、偏心は重要な課題の一つとして認識されている。

ところで、著者等は、図1のような非対称 Z 型 NC (ノンコンプレッション) ブレース架構 (NC ブレースを Z 型かつ同一回転方向に配置した架構) が中小地震時、層の振り変形が一方向に漸増することによる弾性ひずみエネルギーの蓄積で、地震応答低減を期待が可能であることを明らか

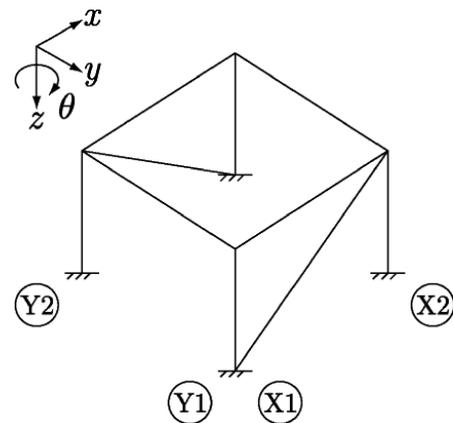


図1 非対称 Z 型 NC ブレース架構

にした。

本研究では、振り振動が生じる場合における、非対称 Z 型 NC ブレース架構の適用を検討する。方法としては、履

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 長崎大学工学部工学科

\*\*\* 広島大学大学院工学研究科

\*\*\*\* 広島工業大学大学院工学系研究科知的機能科学専攻

\*\*\*\*\* 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

歴ダンパー架構を比較対象として、中小地震を想定した地震応答解析を行い、特に、加速度、振り角の応答に着目し、地震応答低減効果について、考察する。また、本論では、偏心を有する架構の基礎的検討として、一方向のみにブレースを配置した、一軸質量偏心架構を取り扱う。

## 2. 漸増振り変形機構<sup>3)</sup>

引張力のみ作用する NC ブレースを図 1 のように配置したとき、各構面のブレース負担水平力は重心  $G$  に同一回転方向の振りモーメントを生じさせる。この振りモーメント  $M_T$  が生じたときの振り角  $\theta$  は、図 2 に示す  $z$  軸回りモーメントの静的なつりあいから、(1) 式のように表せる。

$$\theta = \frac{M_T}{K_r} = \frac{\sum_i ({}_b Q_{Yi} \cdot y_i)}{\sum_i (k_{Yi} \cdot y_i^2 + k_{Xi} \cdot x_i^2) + \sum_j c k_{rj}} \quad (1)$$

ここに、 $K_r$ ：主架構の振り剛性、 ${}_b Q_{Yi}$ ： $Yi$  構面ブレース負担水平力、 $k_{Yi}$ ,  $k_{Xi}$ ,  $c k_{rj}$ ： $Yi$ ,  $Xi$  構面骨組の剛性、柱  $j$  の振り剛性。

地震時に  $M_T$  が単調増加することが漸増振り変形の機構であり、これは図 1 の  $x$  方向に繰返し外力が作用する場合で説明できる (図 3)。簡単のため、外力は全てブレースが負担するものとし、剛性偏心は考えない。

まず、(a) のように外力  $P$  が作用すると、 $Y1$  構面ブレースのみが抵抗して  $M_T$  は  $1/2P \cdot l$  となる。次に、(b) のように外力が  $\Delta P$  除荷されると、 $Y1$  構面ブレースには除荷により、 $Y2$  構面ブレースには直ちに生じる引張抵抗により、それぞれ正方向に  $1/2\Delta P$  の水平力が作用して  $x$  方向の力がつりあう。これにより、 $M_T$  は除荷後においても変わらずに保持される。(b) における  $M_T$  の保持は  $0 \leq \Delta P \leq 2P$ 、すなわち、外力の大きさが  $|P|$  以下の領域で行われ、区間の下限  $\Delta P = 0$  が (a) に、上限  $\Delta P = 2P$  が (c) に対応する。(c) から外力が  $\Delta P$  増加して、外力の大きさが  $|P|$  を超えること

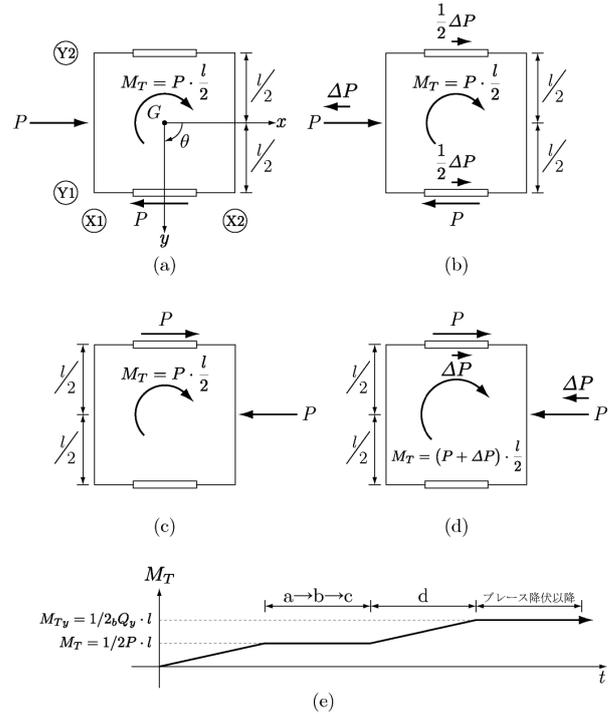


図 3  $M_T$  増加の機構

で、(d) に示すように  $M_T$  は再び上昇する。

(d) において、 $P + \Delta P$  が増加してブレース降伏水平力  ${}_b Q_y$  に達したとする。ブレース材料を完全弾塑性とする仮定よりブレースの耐力は  ${}_b Q_y$  以上とまらないので、ブレース降伏時の降伏振りモーメント  $M_{Ty} = 1/2 {}_b Q_y \cdot l$  が限界であることが分かる。(e) には (a) → (b) → (c) → (d) に至るまでの  $M_T$  の時間的変化を示す。

## 3. 地震応答解析の概要

### 3.1 解析モデル

解析モデルを図 4 に、解析モデルの諸元を表 1 に示す。主架構は柱脚を固定とし、柱を  $\square$ -300×300×12、梁を H-400×200×8×13 とした 1 層 1 スパンの立体架構である。また、総質量は 37 t であり、主架構の固有周期は 0.300 s となっている。ブレースは  $x$  方向に非対称 Z 型配置する。

### 3.2 解析変数

解析は、ブレースの種類、入力地震波、 $y$  方向の偏心率  $R_{ey}$  の組み合わせにより、計 18 ケース行う。

ブレースの種類は、図 4 のブレースを NC ブレースとした NC-type、座屈拘束ブレースとした BRB-type である。ブレースの復元力特性モデルを図 5 に示す。ブレースの剛性  $K_b$  は、両者ともに 21.5 kN/mm とした。NC-type のブレースは降伏軸力  $P_y$  を 295 kN、BRB-type のブレースの  $P_y$  は両者のブレース系の降伏軸力を一致させるために、NC-type の半分とした。

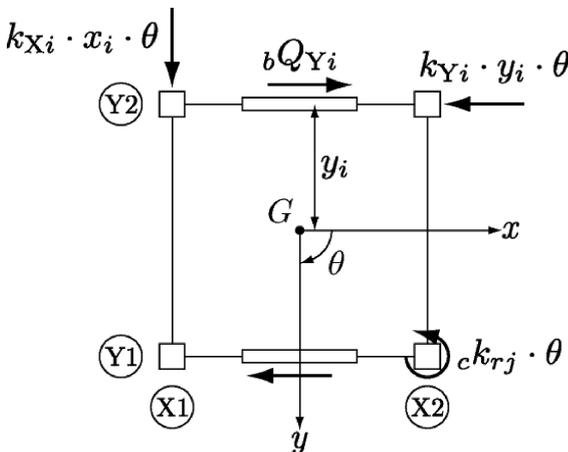


図 2  $z$  軸回りのつりあい

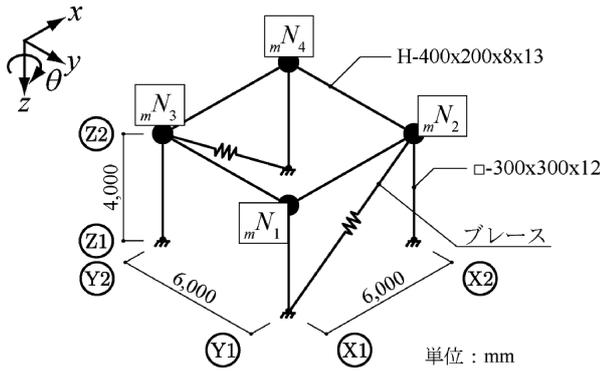


図4 解析モデル

表1 解析モデル諸元

	水平剛性 (kN/mm)	固有周期 (s)
主架構	9.15	0.300
NC-type	27.0	0.183
BRB-type	27.0	0.183

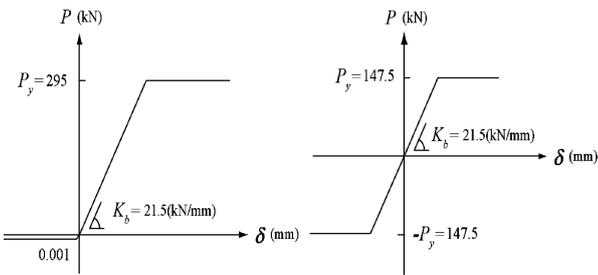


図5 ブレース復元力特性

入力地震波は、最大速度を 0.25 m/s に基準化した (図 6) El Centro NS, Taft NS, Hachinohe NS を解析モデルの  $x$  方向に入力する。

偏心については、主架構および BRB-type の  $y$  方向偏心量を基準とする。 $y$  方向の主架構の偏心率  $R_{ey}$  は、表 2 に示す接点質量  $mN_i$  の分配により、 $R_{ey}=0, 0.15, 0.30$  を採用した。 $R_{ey}$  の算出に当たっては、文献 4) に記されている偏心率の算定方法を参照した。

### 3.3 解析条件

解析条件を以下に示す。

- 1) 地震応答解析には、SNAP を用いる。
- 2) 数値積分には、Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=0.25$ ) を用いる。
- 3) 数値積分の時間刻みは、0.02 s とする。
- 4) 減衰は初期剛性比例型とし、減衰定数は 0.02 とする。

## 4. 解析結果

本章では、 $x$  方向または  $\theta$  方向の応答性状について、論

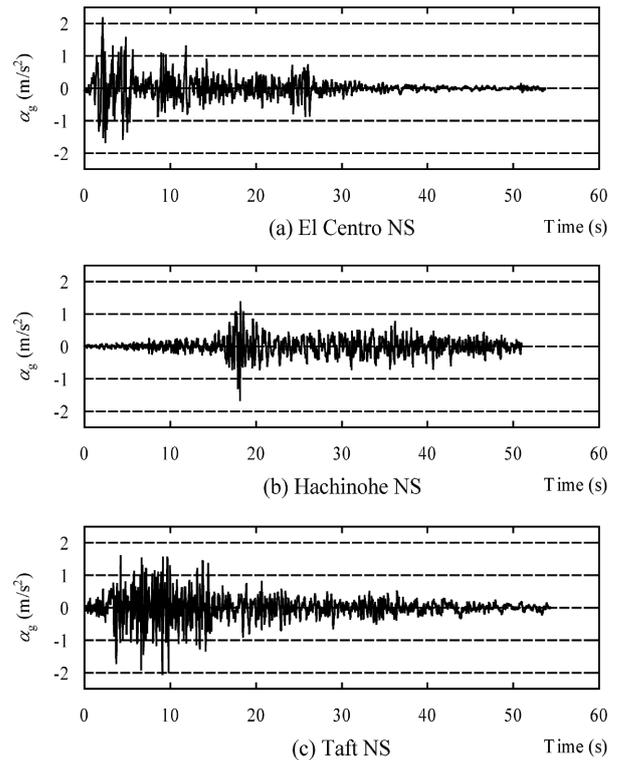


図6 入力地震波

表2 偏心率  $R_{ey}$ , 節点質量  $mN_i$

$R_{ey}$	$mN_1$ (t)	$mN_2$ (t)	$mN_3$ (t)	$mN_4$ (t)	$\Sigma mN_i$ (t)
0	9.25	9.25	9.25	9.25	37
0.15	11.0	11.0	7.50	7.50	37
0.30	12.7	12.7	5.80	5.80	37

じる。

### 4.1 絶対加速度応答 $\alpha_x$ の時刻歴

図 7 に 0 秒から 30 秒までの、重心の絶対加速度応答  $\alpha_x$  の時刻歴を示す。まず、El centro, NC-type とした解析ケースの  $\alpha_x$  を比較する。 $\alpha_x$  は、 $R_{ey}$  により重心が異なるが、重心での応答結果であることから、波形が若干違うこと、また、最大の  $\alpha_x$  には大きな差はない。このような性状のもと、同系統の比較でもこの考察ができることから、偏心による  $\alpha_x$  の最大に、大小関係を排除した比較検討となる。

両者のうち、全解析ケースにおいて、BRB-type の最大の  $\alpha_x$  は NC-type の最大の  $\alpha_x$  を上回っていた。Hachinohe,  $R_{ey}=0.30$  の解析ケースでは、BRB-type は、18 秒付近で最大の  $\alpha_x=4.36 \text{ m/s}^2$  となり、一方、NC-type は、同時刻で  $\alpha_x=3.17 \text{ m/s}^2$  となり、BRB-type に比べ、3 割程度小さくなっている。

図 8 に全解析ケースの BRB-type の最大の  $\alpha_x$  に対する NC-type の  $\alpha_x$  の低減効果  $R_{ax}$  を示す。El Centro, Taft を入力したケースにおいて、 $R_{ax}$  は、 $R_{ey}$  によりばらつきがあり、

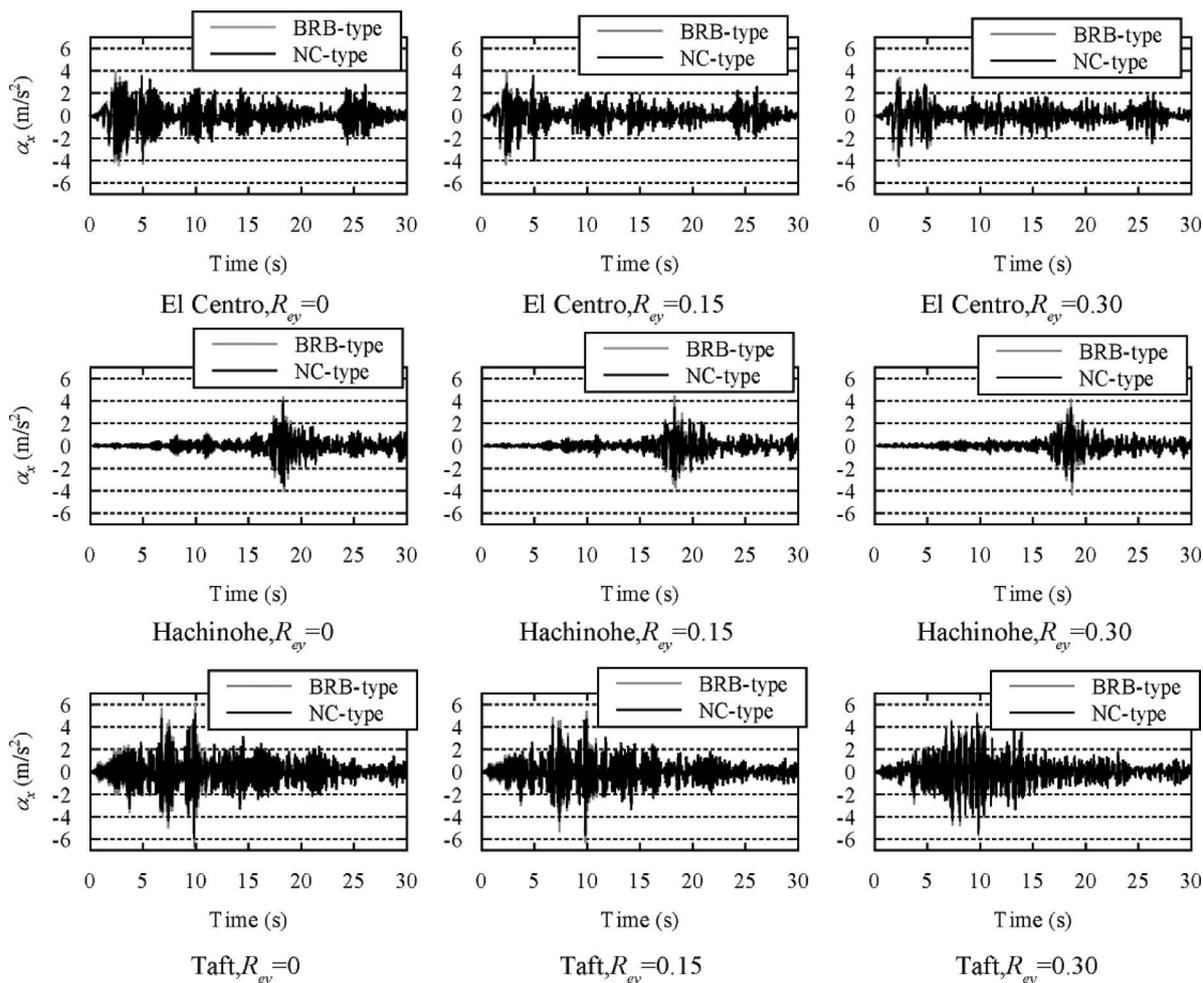


図7 絶対加速度応答  $\alpha_x$  の時刻歴 (0-30 s)

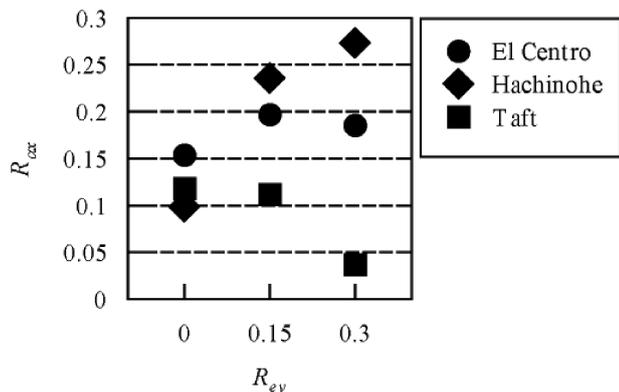


図8 最大加速度応答低減効果  $R_{ax}$

Hachinohe では、 $R_{ey}$  が大きくなるにつれて、増加し、地震波のなかで、低減効果が顕著に表れている。また、すべての解析ケースにおいて、低減効果を確認できた。

#### 4.2 振り角 $\theta$ の時刻歴

図9に、全解析時間における、振り角  $\theta$  の時刻歴を示す。全解析ケースで、BRB-type は、解析開始・終了時ともに  $\theta$  が0であり、一方、NC-type では、漸増振り変形が生じて

いる。 $\alpha_x$  時刻歴 (図7) の全解析ケースにおいて、応答低減していた時間領域で  $\theta$  が漸増していることから、地震応答低減が漸増振り変形による弾性ひずみエネルギー蓄積に起因したものであることが分かる。

$R_{ey} = 0.15, 0.30$  のケースにおいて、NC-type は漸増振り変形するとともに、振り振動が生じている。また、両者は  $R_{ey}$  が大きくなるにつれ、振り振動の大きさは増大している。Taft,  $R_{ey} = 0.30$  の解析ケースは、BRB-type の最大の  $\theta$  が  $0.0010 \text{ rad}$ 、NC-type の最大の  $\theta$  が  $0.0021 \text{ rad}$  であり、NC-type における  $\theta$  の最大値は漸増振り変形により大きくなるが、相対的な振り振動の大きさとしては、BRB-type と概ね等しいことが分かる。

#### 4.3 $R_{ey}$ が $\theta$ (e) に与える影響

表3に、地震後における振り角  $\theta$  (e (=end)) と地震後の  $Y_i$  構面のブレース負担水平力  ${}_bQ_{Yi}(e)$  を示す。また、同表に  $Y_i$  構面のブレース負担水平力の和  $\sum_b Q_{Yi}(e)$  ( ${}_bQ_{Y1}(e) + {}_bQ_{Y2}(e)$ ) を示す。

$\theta$  (e) は、各地震波で大きさがばらついているが、 $R_{ey}$  の値により、大きさに差はないことが分かる。また、 ${}_bQ_{Yi}(e)$

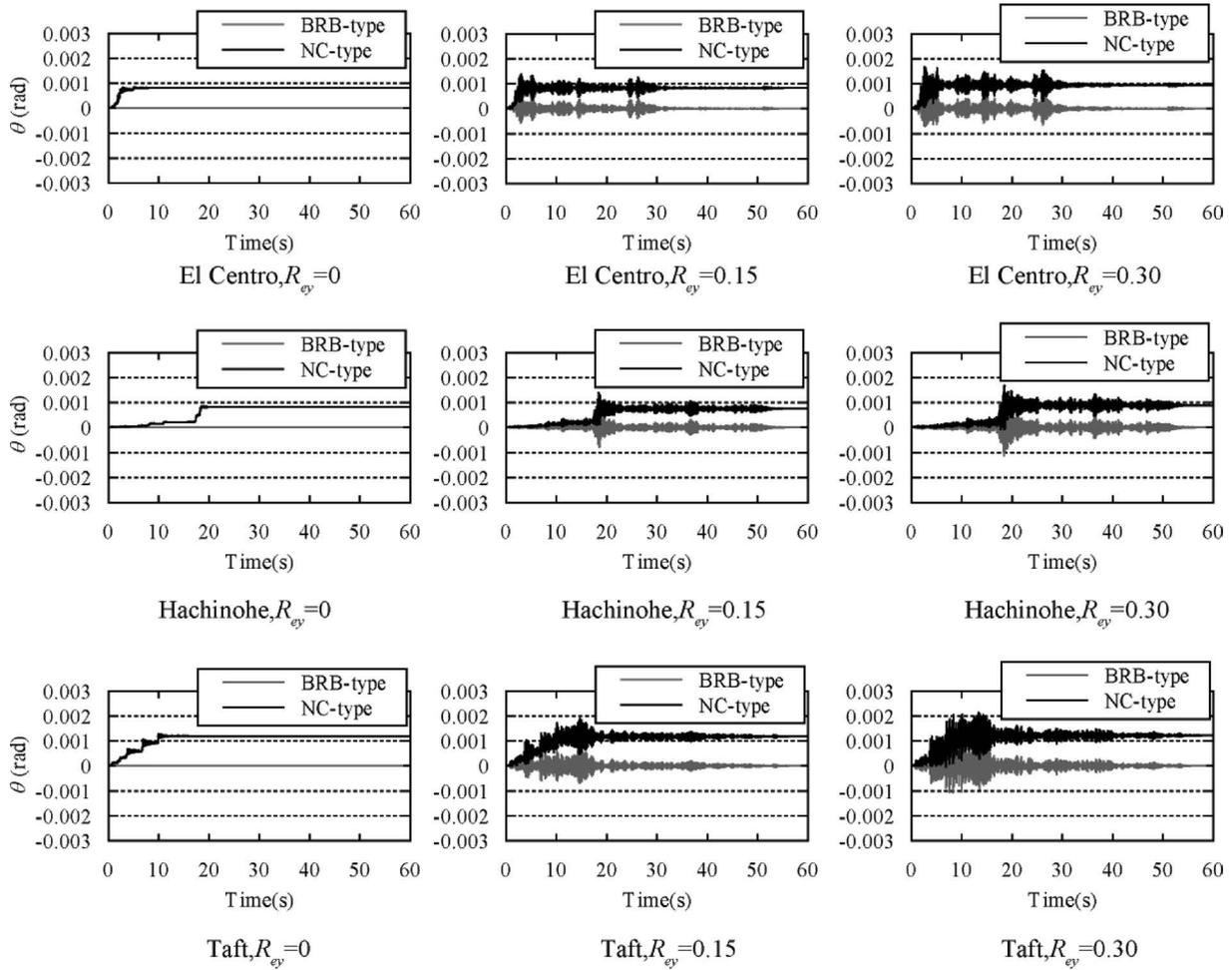


図9 振り角 $\theta$ 時刻歴

表3 振り角とブレース負担水平力の関係

地震波	El Centro			Hachinohe			Taft		
	$R_{ey}$	$\theta(e)$ (rad)	${}_bQ_{Y1}(e)$ (kN)	$R_{ey}$	$\theta(e)$ (rad)	${}_bQ_{Y1}(e)$ (kN)	$R_{ey}$	$\theta(e)$ (rad)	${}_bQ_{Y1}(e)$ (kN)
	0	0.00081	49.0	0	0.00082	44.7	0	0.00120	66.5
	0.15	0.00083	52.3	0.15	0.00075	42.8	0.15	0.00118	72.2
	0.3	0.00095	65.5	0.3	0.00089	56.6	0.3	0.00122	79.0
			${}_bQ_{Y2}(e)$ (kN)			${}_bQ_{Y2}(e)$ (kN)			${}_bQ_{Y2}(e)$ (kN)
	0	41.4	41.4	0	46.4	46.4	0	66.4	66.4
	0.15	40.2	40.2	0.15	41.2	41.2	0.15	58.9	58.9
	0.3	40.2	40.2	0.3	42.5	42.5	0.3	56.4	56.4
			$\Sigma {}_bQ_{Yi}(e)$ (kN)			$\Sigma {}_bQ_{Yi}(e)$ (kN)			$\Sigma {}_bQ_{Yi}(e)$ (kN)
	0	90.4	90.4	0	91.2	91.2	0	132.9	132.9
	0.15	92.5	92.5	0.15	84.0	84.0	0.15	131.1	131.1
	0.3	105.7	105.7	0.3	99.0	99.0	0.3	135.4	135.4

は、 $R_{ey}$ が大きくなるにつれ、Y1構面が大きく振られるため、 ${}_bQ_{Y2}(e)$ は小さく、 ${}_bQ_{Y1}(e)$ は大きくなり、差が生じる。しかし、 $\Sigma {}_bQ_{Yi}(e)$ に、顕著な差が無く、偏心したことによる、Yi構面ブレースに保持される水平力の大きさ、つまり、式(1)より、 $M_T$ の大きさが顕著に変化しないことから、 $\theta(e)$ への影響は少なく、偏心が無い場合と同様であると評価できる。

#### 4.4 最大構面変位

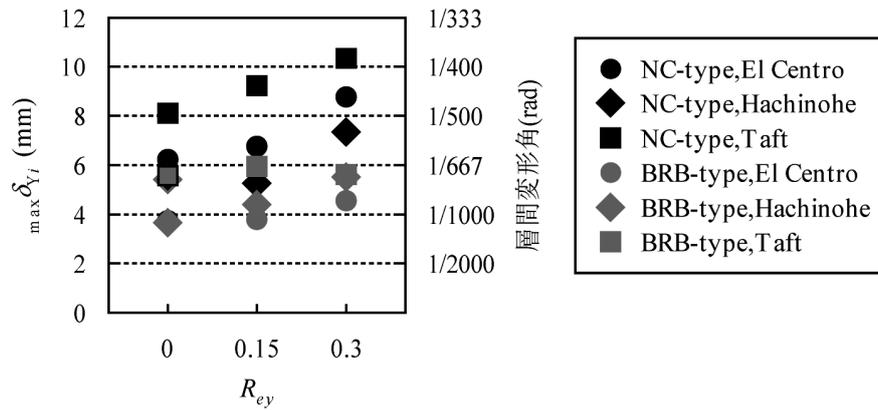
図10に、地震時における外周構面の最大変位 $\max \delta_{Yi}$ を示す。

NC-typeの $\max \delta_{Yi}$ は、 $R_{ey}$ が大きくなることで増大するケー

ス(Hachinohe,  $R_{ey}=0.15$ の解析ケースは小さくなった)が多く、また、外周構面の変位が漸増する機構から、BRB-typeに比べ、絶対的に大きくはなっているが、層間変形角は、 $R_{ey}=0.3$ においても、 $1/200$  rad以内に収まっている。よって、一方向入力のみに基づく知見ではあるが、偏心している場合でも、弾性設計を意識した $0.25 \text{ m/s}^2$ 入力において、仕上げ材の損傷が問題になることはないと言える。

#### 5. まとめ

本研究では、一軸質量偏心を有した非対称Z型NCブレース架構の一方向入力における、弾性地震応答解析を行った。解析結果から得られた知見を、以下に示す。

図10 最大構面変位  $\max \delta_{Yi}$ 

1) NC-type は地震時、振り振動するとともに漸増振り変形する。

2) BRB-type に比べ NC-type の最大の  $\alpha_x$  は弾性ひずみエネルギー蓄積により低減される。

3) 非対称 Z 型 NC ブレース架構は、偏心したことによる  $\theta$  (e) への影響は、少なく、偏心を有する場合でも適用可能である。

4)  $\max \delta_{Yi}$  は  $R_{ey}$  の増大により偏心が過大になった場合でも、 $0.25 \text{ m/s}^2$  入力では、 $1/200 \text{ rad}$  以内に収まることから、仕上げ材の損傷は問題とはならない。

#### 今後の課題

本研究では、最も単純な一軸偏心を有する架構の一方向地震入力により、検討を行った。今後は、二方向入力、二軸偏心の場合について検討するとともに、偏心を有する場合の漸増振り変形機構を構築する。

#### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、広島工業大学教授 高松隆夫先

生には、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。また、大学院生の方々には、細かな点まで適切に、且つ親切に対応をして頂いたことにつきまして、ここに感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 山田哲, 和田智子, 薩川恵一, 前澤将男, 北村春幸, 和田章: 履歴ダンパーが耐力・剛性偏心して取り付けられた 1 層鋼構造骨組の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第590号, pp. 111-119, 2005.4
- 2) 山田哲, 藤井賢志, 和田智子, 和田章: 履歴ダンパーの耐力・剛性偏心が損傷制御構造の耐震性能に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第596号, pp. 125-132, 2005.10
- 3) 小松真吾, 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗: 1 層非対称 Z 型 NC ブレース架構の地震応答解析に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第705号, pp. 1677-1685, 2014.1
- 4) 建設省住宅局建築指導課: 構造計算指針・同解説1988年版, 1988.5.20