

## 2層非対称Z型NCブレース架構の応答低減に関する研究

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

(平成25年10月30日受付)

### Study on response reduction of two-story anti-symmetric Z-type NC braced frame

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI and Shingo KOMATSU

(Received Oct. 30, 2013)

#### Abstract

New structural system of anti-symmetric Z-type NC brace is proposed by the authors. This system possesses reduction capacity of earthquake response due to elastic strain energy absorption of distortion of the structure. Numerical analysis of two-story space frame is carried out to extend the study on the single-story frame. Elastic and elastic-plastic behavior of the two-story structure is examined efficiency of the system in comparison with the structure with hysteretic dampers.

**Key Words:** NC brace, Anti-symmetric Z-type, Numerical analysis, Response reduction

#### 1. 序

兵庫県南部地震の被害を経験して、建築物には大地震後においてもその機能を失うことなく、継続的な使用を可能とするだけの性能が要求され始めた。このような構造物を実現させるために、地震時に主架構（柱および梁）を弾性に留め、ダンパーのみに地震エネルギーを吸収させる、いわゆる制振構造<sup>1)</sup>の研究、開発が現在まで行われてきた。

一方で、著者等は、楔デバイスを用いることで従来の引張ブレースの耐震性能を大きく改善し、履歴ダンパーとして有効に機能するNC（ノンコンプレッション）ブレース<sup>2)3)</sup>を開発した。本研究では、全く新しい性能を有した制振構造として、NCブレースを立体架構の各構面にZ型配置する非対称Z型NCブレース架構<sup>4)5)</sup>を提案しており、このシステム概要を図1に示す。本システムは、各構面に配置されたZ型NCブレースが変形漸増特性<sup>6)</sup>を示すことで、構造物が最大弾性応答を生じるまで主架構が漸増振り変形

して弾性ひずみエネルギーを蓄え、地震応答を低減できるという特徴を有している。したがって、地震入力開始から地震応答低減効果が発揮されるとともに、構造物が弾塑性状態となる地震入力下においては、NCブレースのエネルギー吸収効果が期待できるため、従来の履歴ダンパーを塑

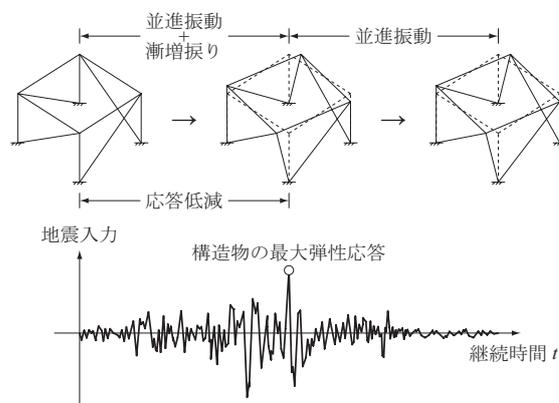


図1 非対称Z型のシステム概要

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 長崎大学工学部工学科

\*\*\* 広島大学大学院建築学専攻

\*\*\*\* 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

性化させるまでは応答低減されない制振構造物と比較して、有効に地震応答を低減することができると考えられる。

また、建築物の応答低減に関する主な研究としては、鋼材履歴ダンパー等のエネルギー吸収で応答を低減する制振構造物に関するもの<sup>7)</sup>、地震時に構造物のロッキングを許容して、地震エネルギーを柱脚部ダンパーの塑性化により吸収、および上下方向のエネルギーに置換することで、地震応答を低減する研究<sup>8)</sup>等が挙げられる。しかしながら、弾性ひずみエネルギー蓄積により地震応答を低減する研究は、本研究を除いては行われていないため、今後より一層研究知見を蓄積する必要がある。

本論においては、文献4)、5)の1層非対称Z型の研究を多層に拡張するために2層実大モデルでブレースの配置方法、および地震入力を変数とした数値解析を行い、弾性時および弾塑性時の最大応答を鋼材履歴ダンパー付架構と比較する。また、層毎でブレース配置を変化させたときの振り挙動についても言及する。

## 2. NC ブレース

### 2.1 NC ブレースの特徴

NC ブレースは、ブレース一端部に図2に示す楔デバイスを実装している。楔デバイス側接合部においては、ブレース端部の楔受けと楔台との間に楔を噛ませることで間接的

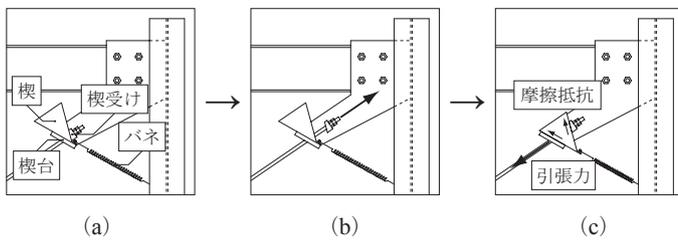


図2 楔デバイスの作動概念

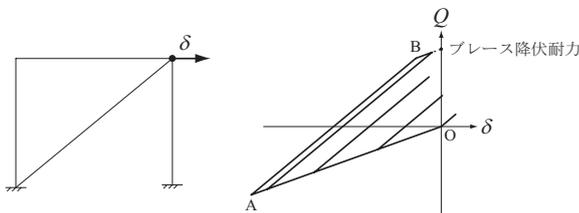


図3 Z型NCブレース架構とその復元力特性

な接合がされている。そのため、引張力に対しては楔と楔受けおよび楔台との摩擦抵抗<sup>2)3)</sup>により抵抗するが、圧縮力に対しては楔と楔受けとが離間することで抵抗せず、離間した隙間にはバネの復元力により楔が逐次貫入する。したがって、性能をまとめると、1) ブレースは引張力のみ抵抗する。2) いかなる状況下においても引張方向の変形増分に対して直ぐに抵抗する。3) 上記によりスリップ現象を生じない。

### 2.2 Z型NCブレース架構の特徴

平面Z型NCブレース架構とその層せん断力 $Q$ -層間変位 $\delta$ 関係を図3に示す。ブレース圧縮方向の地震外力作用時において、楔デバイス端部が離間してからの線分OA上の架構の変形が、外力除荷時にはブレース抵抗により線分ABに平行な線を通ることで元の位置に戻らず、繰返し外力を受けることで架構の変形は一方方向に漸増していく。したがって、条件の定義は後ほど与えるが、NCブレースを立体架構に非対称Z型配置すれば、漸増振り変形を生じる。

### 2.3 多層非対称Z型NCブレース架構の力学モデル

図4(a)の $n$ 層非対称Z型モデルを用いてブレースの復元力特性モデルならびに漸増振り変形について述べる。以下、層番号を $i$ 、構面番号を $j$ 、柱番号を $k$ と定義する。また、ブレースの材料特性は完全弾塑性モデルと仮定する。

#### 2.3.1 復元力特性モデル

地震外力を受けて $i$ 層のブレースが弾塑性となる場合を考え、 $Yj$ 構面ブレース水平力 ${}_bQ_{Yj}$ と $x$ 方向重心位置の変

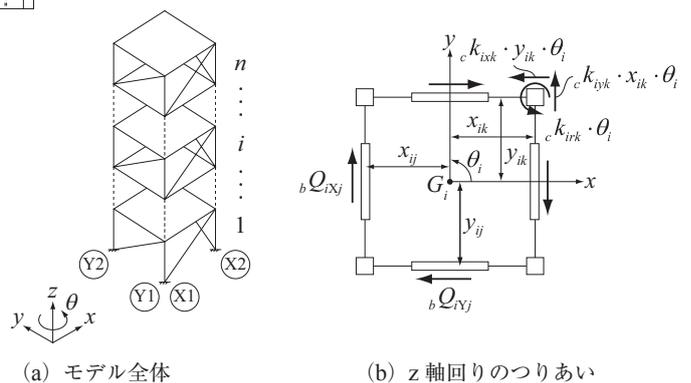


図4 多層非対称Z型モデル

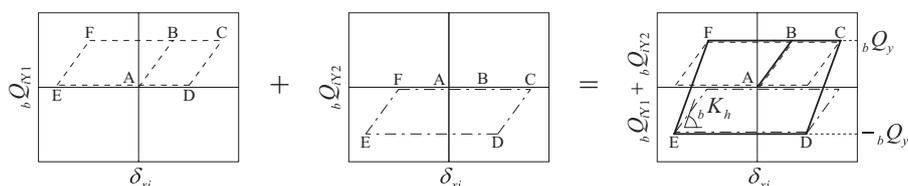


図5 ブレースの復元力特性モデル

形  $\delta_{xi}$  の関係をモデル化したものを図5に示す (y方向についても同様である)。NCブレースは、引張力のみ抵抗するため、各ブレースの引張領域のみに履歴が現れている。A→B→Cの経路においては、Y1構面ブレースのみが抵抗するが、C点において地震外力が除荷され始めると、Y2構面ブレースが引張変形して抵抗を開始するため、C→Dの経路においては両ブレースともに等しい剛性を発揮して振りは問題とならない。また、A→Bのような弾性時においても、いずれかのブレースが除荷を経験することで両ブレースが等しい剛性を発揮するため、弾性、弾塑性を通して振りは問題にならないと考えられる。したがって、両ブレースを足し合わせたブレース系においては、完全弾塑性型の復元力特性が得られ、ブレース降伏水平力  ${}_bQ_y$  および弾性水平剛性  ${}_bK_h$  はそれぞれ以下の式で評価できる。

$${}_bQ_y = \sigma_y \cdot {}_bA \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$${}_bK_h = \frac{2E \cdot {}_bA}{{}_bI} \cos^2 \theta \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_y$ :降伏応力度、 ${}_bA$ :ブレース断面積、 $\theta$ :ブレース設置角度、 $E$ :ヤング係数、 ${}_bI$ :ブレース有効長さである。

### 2.3.2 多層構造物の漸増振り変形

多層モデルの  $i$  層における回転角  $\theta_i$  は、1層非対称Z型NCブレース架構の場合<sup>5)</sup>と全く同様に、重心位置  $G_i$  において全てのブレースが剛性を発揮した状態でのつりあい状態 (図4 (b)) を考えることにより次式により与えられる。

$$\theta_i = \frac{{}_bM_i}{K_{ri}} = \frac{\sum_j ({}_bQ_{iyj} \cdot y_{ij} + {}_bQ_{ixj} \cdot x_{ij})}{\sum_k ({}_c k_{ixk} \cdot y_{ik}^2 + {}_c k_{iyk} \cdot x_{ik}^2 + {}_c k_{irk})} \quad (3)$$

ここに、 ${}_c k_{ixk}$ 、 ${}_c k_{iyk}$ 、 ${}_c k_{irk}$ :  $i$  層における柱  $k$  の  $x$  方向剛性、 $y$  方向剛性、個材の振り剛性である。 $\theta_i$  はブレース内力のモーメント  ${}_bM_i$  によって生じているため、外力として振りモーメントが作用した場合とは取り扱いが異なり、 $i-1, \dots, 1$  層のつりあいにおいては、 ${}_bM_i$  の影響を直接的に受けない (厳密に言えば、 $i$  層の漸増振り変形により生じた各部材端の曲げモーメントが他層に分配されることで、 $i$  層と同一方向の漸増振りが他層にも生じる)。  $x$  方向における  ${}_bM_i$  増加の条件は、ある時刻において Yj 構面ブレースが負担する水平力の絶対値  $|{}_bQ_{iyj}|$  がそれ以前の時刻でブレース系が負担した最大水平力の絶対値  $\max\{|{}_bQ_{iy1}|, |{}_bQ_{iy2}|\}$  を超えることであり (y方向も同様)、図5においてこの条件を満たすのは A→B の経路上のみで、更に、いずれかのブレース耐力が最大耐力に達したときが  ${}_bM_i$  の

上限であることが分かる。また、引張側であったブレースの水平力が除荷により減少しても、その対となるブレースが直ぐに抵抗を開始することからも明らかなように、 ${}_bM_i$  は減少することなく、繰返し外力下において単調に増加する。

## 3. 実大2層構造物の数値解析

本章では、非対称Z型NCブレース架構の漸増振り変形による応答低減効果を示すために、実構造物を想定した2層1スパン立体架構による数値解析を行う。

### 3.1 解析モデル

解析モデルは、柱に  $\square$ -450x450x25 (BCP325) を、梁に H-588x300x12x20 (SN490B) を用いた2層1スパン立体架構である (図6)。材料はいずれも  $\sigma_y=358\text{N/mm}^2$ 、 $E=205,000\text{N/mm}^2$  としている。また、主架構の性能は表1に示す通りであり、1次固有周期  $T_1=0.800\text{s}$ 、2次固有周期  $T_2=0.294\text{s}$  となっている。

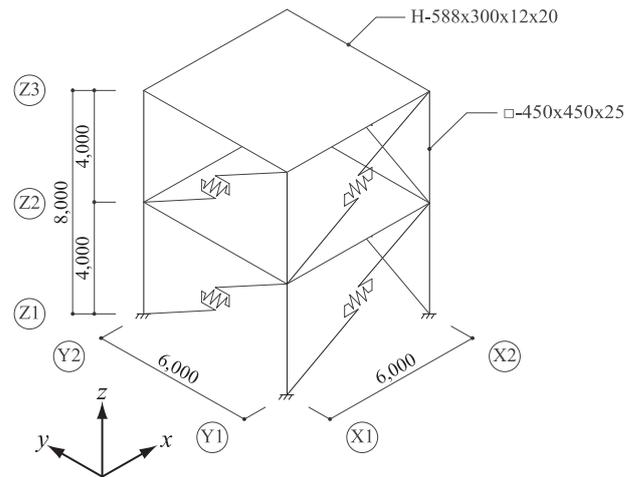


図6 数値解析モデル (Type)

#### 3.1.1 解析変数

本解析における解析変数は、ブレース種類および配置、入力地震波を変化させたときの各応答値を比較すること、また、弾性入力時と弾塑性入力時の挙動を比較することを目的として、以下のように設定する。

##### [1] ブレース種類および配置

1層、2層ともZ型NCブレースを同一回転方向配置する Style、Style の2層における各構面のブレースを逆に配置して全体の振りを制御した Ctype、また、引張、圧縮ともに有効な鋼材履歴ダンパー (ブレース系の性能を等しくするために、NCブレースの1/2の降伏耐力に設定) を Style 同様に配置する Htype の4種類である。

[2] 入力地震波

入力地震波は, ElCentro, Taft, Hachinohe の3波である。解析モデルの  $x$  方向に NS 成分を,  $y$  方向に EW 成分をそれぞれ入力する。解析時間はいずれも 60s とする。

[3] 入力レベル

入力レベルは, プレースが僅かな損傷を生じる程度の弾性入力とプレースが大きく損傷する弾塑性入力の2つを設定する。弾塑性入力においては, 振りを生じない Htype の入力エネルギーの速度換算値  $V_E$  が 150kine となるように各地震波の倍率を調整し, Stype, Ctype にも同倍率の地震波を入力する。弾性入力の  $V_E$  は弾塑性入力の 1/5 の 30kine とする。各地震波の諸元を表2に示す通りである。

3.1.2 プレースモデル

プレースは, 主架構の剛性を  $K_f$  としたときに各層で  $bK_h/K_f=4.0$  となるように剛性ならびに耐力を調整し, また, ひずみ硬化による耐力上昇を無視して完全弾塑性型の復元力特性モデルを設定した。各プレースの諸元を表3に示す。NC プレースにおいては, 圧縮降伏耐力を 0.001kN とし, 端部が離間して圧縮力には抵抗しないという特性を再現し

表1 解析モデル諸元

解析モデル	$K_1$ (kN/mm)	$K_2$ (kN/mm)	$m_1$ (t)	$m_2$ (t)	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)
プレース架構	401	234	310	430	0.358	0.131

$K_i$ :  $i$  層の剛性  
 $m_i$ :  $i$  層の質量

表2 入力地震波

地震波	成分	最大加速度		継続時間 (s)
		$V_E=30kine$	$V_E=150kine$	
El Centro	NS	102	407	53.74
	EW	62.6	250	53.46
Taft	NS	45.4	269	54.36
	EW	52.2	309	54.38
Hachinohe	NS	60.6	353	50.98
	EW	47.6	277	50.98

表3 プレース諸元

プレース	$bK_p/2(i=1)$ (kN/mm)	$bK_p/2(i=2)$ (kN/mm)	$bQ_y(i=1)$ (kN)	$bQ_y(i=2)$ (kN)
NC プレース	160	93.6	1489	870
鋼材ダンパー	160	93.6	745	435

$bK_p/2$ : プレース 1 本当たりの剛性

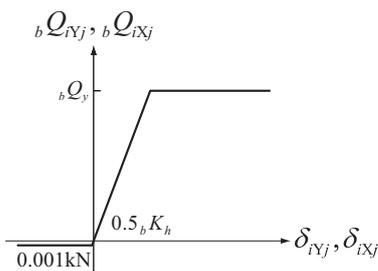


図7 プレースモデル

ている (図7)。

3.2 解析方法

解析における諸条件を以下に示す。

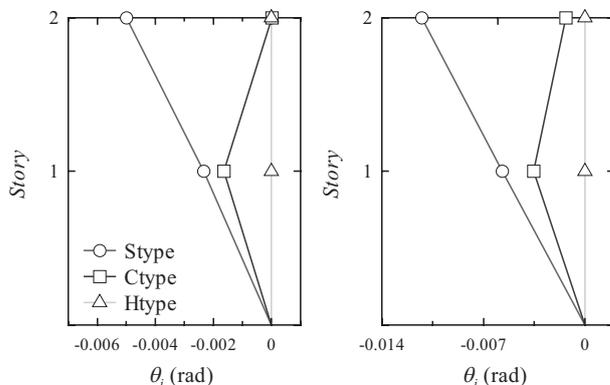
- [1] 数値解析のプログラムには, 「SNAP」を用いる。
- [2] 数値積分方法は, Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=0.25$ ) を用いる。
- [3] 数値積分の時間刻みは, 1/250s とする。
- [4] 減衰は, 1 次固有周期に比例する初期剛性比例型とし, 減衰定数は全ての解析モデルに共通して 0.02 とする。

3.3 解析結果

Stype, Ctype の応答が, 振りを全く生じない Htype のものよりも小さければ応答低減効果が発揮されていると定義する。本節では, まず, 応答低減効果が著しかった Hachinohe 波入力で 2 層構造物の場合の振り変形状, 弾性時のエネルギーと応答低減の関係について述べ, 最後に弾性, 弾塑性の各地震波を入力した際に生じる最大応答値の関係を示す。

3.3.1 入力終了後の振り変形状

Hachinohe 波入力終了後における解析モデルの各層の回転角を高さ方向に累積したものを図8に示す。地震波入力終了後は, 弾性入力, 弾塑性入力にかかわらず, Stype は 1, 2 層とも同一回転方向へ漸増振り変形しており, 構造物全体が大きく振れているが, Ctype は 1, 2 層が互いに逆方向へ漸増振り変形を生じて全体の振り変形が制御されている。また, Stype よりも Ctype の方が, 各層の相対的な振り変形が小さくなっているが, これは 2.3.2 項で述べたように, ある層の漸増振り変形によって生じた  $i$  層の従属的な振り変形が,  $bM_i$  と逆方向に生じて見かけ上の振り剛性が大きくなるためである。



(a) 弾性入力後 (b) 弾塑性入力後

図8 入力終了後の回転角

3.3.2 エネルギーと応答低減効果

図9に Hachinohe 波弾性入力時の 15s から 25s において,

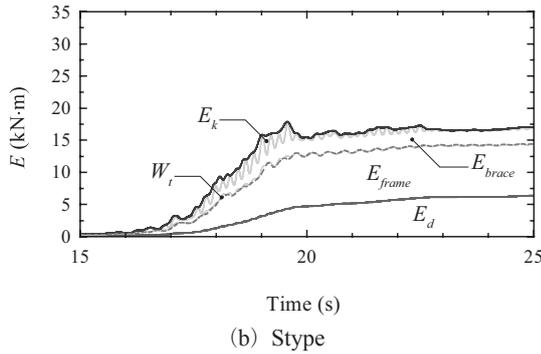
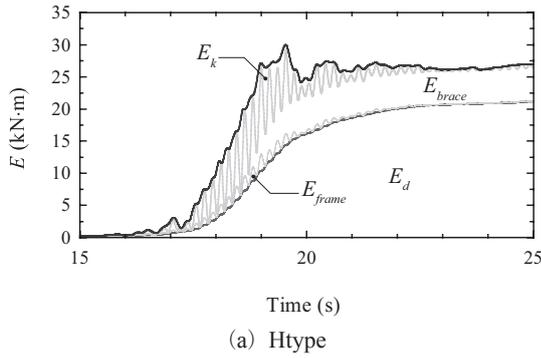


図9 エネルギー時刻歴

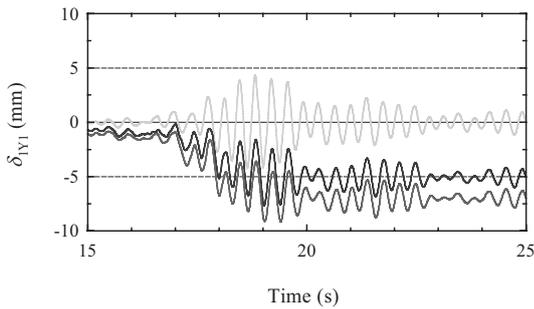


図12 構面の変形（1層Y1構面）

Htype と Stype の各エネルギーを比較したものを示す。図中、 $E_d$  は減衰エネルギー、 $E_{frame}$ 、 $E_{brace}$  はそれぞれ主架構、ブレースのひずみエネルギー、 $E_k$  は運動エネルギーであり、これらの総和は地震入力エネルギー  $E_i$  に等しい。Htype の場合、ブレースが僅かに損傷したため、ブレースがエネルギーを吸収しているものの、 $E_i$  のうちのほとんどが  $E_d$  によって消費されている。一方、Stype の場合には、Htype と比較して、 $E_d$ 、 $E_{brace}$ 、 $E_k$  が減少している。また、 $E_{frame}$  については増加しており、その量は次式により定義される各層で  ${}_bM_i$  のした仕事の合計  $W_i$  に一致する。

$$W_i = \sum_i \int_0^t {}_bM_i \frac{d\theta_i}{dt} dt \quad (4)$$

すなわち、漸増振り変形によって主架構にはエネルギー  $W_i$  が蓄積されており、これがもたらす効果は、Stype の振動エネルギーに関わる  $E_k$  が Htype よりも小さくなっていることから明らかのように、地震応答低減である。こ

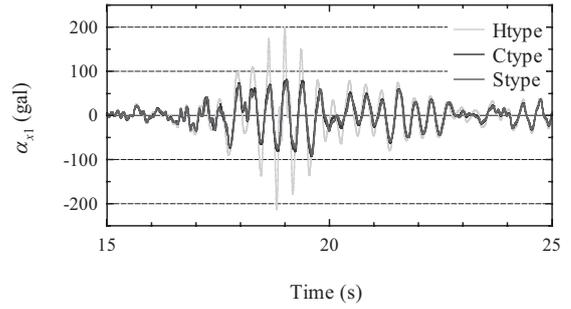


図10 絶対加速度応答（1層x方向）

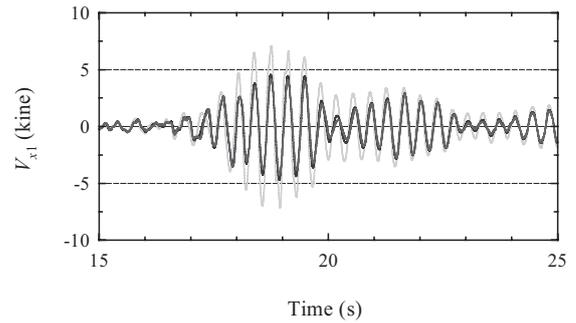


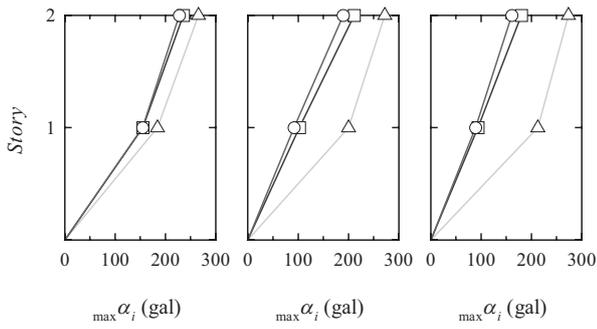
図11 速度応答（1層x方向）

の効果を図10、11、12の1層x方向の絶対加速度応答時刻歴、速度応答時刻歴、Y1構面の変形時刻歴により示す。これらのHtypeとStypeの応答を比較すれば、図9において  $W_i$  の増加する時間帯でStype、Ctypeには顕著な応答低減効果が見られる。また、図11のように各構面では変形が漸増するが、応答低減効果によってHtypeよりも振幅が小さくなっている。

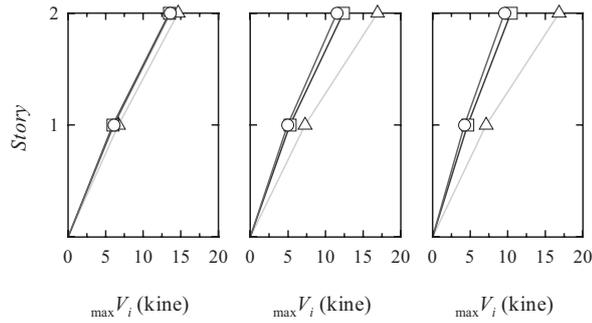
### 3.3.3 各最大応答の比較

図13（弾性入力）、図14（弾塑性入力）はx、y方向で生じた絶対加速度、速度、変形のうち、最大の値を層毎にプロットしたものである。なお、変形は地盤面からの絶対量である。図13の弾性入力時において、Stype、Ctypeの最大絶対加速度応答、最大速度応答は各層いずれもHtypeのものより小さくなっており、漸増振り変形によるエネルギー蓄積により、各層各方向の応答がHtypeの4割から8割程度まで低減されている。この低減効果は、本解析においては、Hachinohe、Taft、ElCentroの順に顕著に現れており、したがって、どれだけの低減効果が得られるかは入力地震波の周期特性に大きく依存するものと思われる。また、最大変形は、Stypeの場合、1層、2層とも同一回転方向に漸増振りして大きくなっているが、Ctypeの場合には層ごとの振り変形が小さくなる。1層と2層構面の変形方向が互いに逆であるといった理由により、Stypeと比較して制御されている。

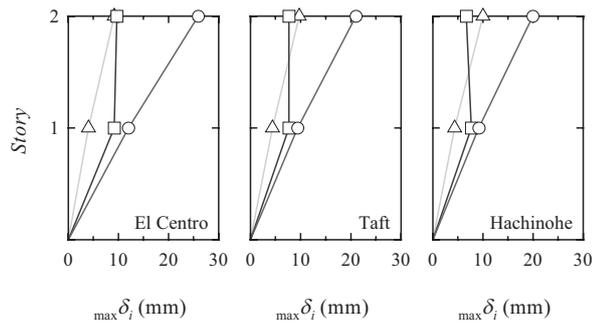
図14の弾塑性入力時においては、構造物が最大の応答を生じる以前に各方向のブレースが降伏耐力に達してお



(a) 最大絶対加速度応答

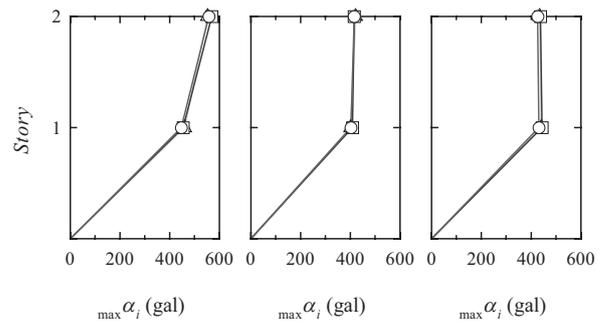


(b) 最大速度応答

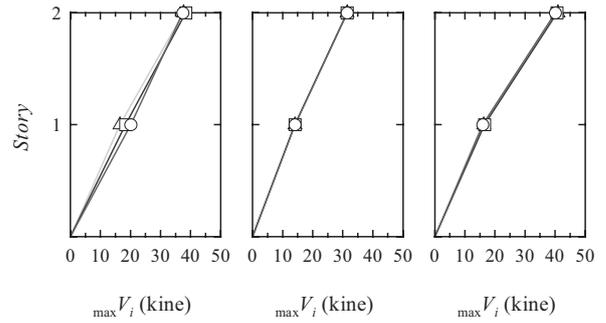


(c) 最大変形

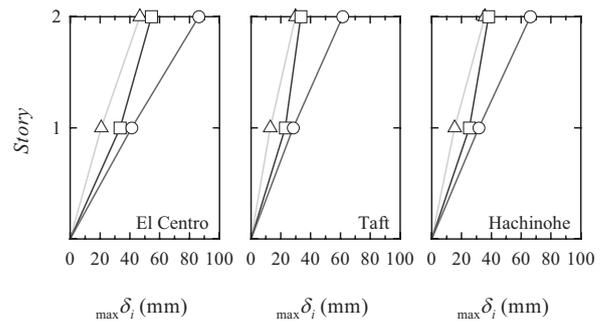
図 13 最大応答 (弾性入力)



(a) 最大絶対加速度応答



(b) 最大速度応答



(c) 最大変形

図 14 最大応答 (弾塑性入力)

り、Stype, Ctype ではこれ以上漸増振り変形を生じない。プレース降伏以降は、NC プレースが完全弾塑性型復元力特性を有する履歴ダンパーとして機能するため、Stype, Ctype の最大絶対加速度応答、最大速度応答は Htype のものとほぼ等しい。また、最大変形は、Ctype の場合には 1 層目が Htype よりもやや大きめであるものの、2 層目は大差ないことが分かる。

#### 4. 結

数値解析結果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 多層非対称 Z 型 NC プレース架構は、プレース配置により層毎に任意の方向への漸増振り変形を生じる。
- 2) 非対称 Z 型配置の場合、漸増振り変形によって主架構に蓄えられる弾性ひずみエネルギー  $W_e$  は、(4) 式で評価できる。
- 3) 主架構へのエネルギー蓄積によって、地震時の応答を低減することができる。

4) 弾塑性時には、Stype, Ctype の最大応答は、Stype における最大変形を除いては Htype とほぼ等しい。

#### 今後の課題

今後の課題としては、漸増振り変形の弾性ひずみエネルギー蓄積によって得られる応答低減効果の機構を解明することが挙げられる。

#### 謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者高松隆夫教授)のプロジェクト研究の一環として実施されました。ここに記して、感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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2版, 2007.7

- 2) 玉井, 高松, 松尾: ノンコンプレッションブレースの耐震性能向上について, 日本建築学会構造系論文集, 第595号, pp.131-138, 2005.9
- 3) H. Tamai, T. Takamatsu: Cyclic loading tests on a non-compression brace considering performance-based seismic design, Journal of Constructional Steel Research, No.61, pp.1301-1317, 2005
- 4) 小松, 高松, 玉井, 山西: 非対称Z型ノンコンプレッションブレース架構の振動台実験, 鋼構造年次論文報告集, 第20巻, pp.447-454, 2012.11
- 5) 小松, 高松, 玉井, 山西: 非対称Z型NCブレース架構の応答低減に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第21巻, 掲載決定, 2013.11
- 6) 澤田, 高松, 玉井, 松尾, 山西, 三好, 荊尾: 振動台実験と時刻歴応答解析によるZ型NCブレース付き鋼構造骨組の一方向変形漸増性能と累積塑性エネルギー吸収量評価, 日本建築学会構造系論文集, 第656号, pp.1883-1890, 2010.10
- 7) 笠井, 伊藤: 弾塑性ダンパーの剛性・降伏力・塑性率の調整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595号, pp.45-55, 2005.9
- 8) 緑川, 小豆畑, 石原, 和田: 地震応答低減のためベースプレートを浮き上がり降伏させた鉄骨架構の動的挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第572号, pp.97-104, 2003.10

