

# 水平変位拘束材付露出柱脚を有する低層ブレース架構 の崩壊機構に関する研究

清水 齊\*・山西 央朗\*・郷原 良太\*\*

(平成30年11月1日受付)

A study on collapse mechanism of low story steel structure with brace and exposed column-base with horizontal displacement constraint plate

Hitoshi SIMIZU, Teruaki YAMANISHI and Ryota GOHBARA

(Received Nov. 1, 2018)

## Abstract

The authors show that clarifying the resistance mechanism of exposed column-base by installing a member restraining the horizontal displacement of the base plate on the exposed column-base with brace. In this paper, we performed a time history response analysis of a low-rise steel structure with an exposed columned brace with a horizontal displacement restraint, called horizontal displacement constraint plate, and based on the results, the columned-base yields with axial force only except for the collapse mechanism, we clarified that the displacement response of the low-rise steel structure can be expressed. Furthermore, the bearing shear of the horizontal displacement constraint plate can be obtained.

**Key Words:** exposed column-base, brace, time history response analysis, horizontal displacement constraint plate

## 1. はじめに

中低層鋼構造物に多く採用される露出柱脚のアンカーボルトにせん断力が作用した場合、その抵抗機構を捉えることは難しく、更に研究を深める必要がある。また、鋼構造制振設計指針<sup>1)</sup>において、露出柱脚にブレースを用いる場合、柱脚にはずれ変形を抑えるせん断抵抗機構を付与することが望ましいとされている。

これに対し、著者等はベースプレート水平変位を拘束する部材(以後、水平変位拘束材)を設置することによって抵抗機構を明快化できることを示している<sup>2-3)</sup>。せん断力に対する適切な抵抗要素を設置することで、ラーメン架構における露出柱脚と同様に曲げモーメントと軸力に対してのみ設計すれば良いため、極めて簡便な設計が可能となる。但し、前述にあるブレースを設置した露出柱脚にせん断抵

抗機構を付与した場合、特に、露出柱脚の塑性化を伴う場合における応答に対する検討はほぼなされておらず、当該柱脚に対する留意点等も明らかにする必要がある。

次に、柱脚部には簡易な復元力特性モデル(回転剛性および曲げ耐力を与えた回転ばね)を用いて研究・設計が行われることが多く、実務設計等を考えた場合、簡易な復元力特性モデルの適用限界を明らかにする必要もある。

そこで、本論文では、露出柱脚に水平変位拘束材を設置した架構の地震応答性状および柱脚設計方法について議論することを目的とする。方法としては、柱脚強度、ブレース強度を変数とし、低層ブレース架構に水平変位拘束材付露出柱脚を設置した平面架構モデルによる時刻歴応答解析を行い、柱脚とブレース強度比による架構の崩壊機構の変化を示し、柱脚に作用する応力に着目した崩壊機構決定要因等を明示する。

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 広島工業大学大学院建設工学専攻

## 2. ブレースが取り付く露出柱脚と補強要素

図1に、ブレースが取りつく露出柱脚に水平変位拘束材を設置したものを示す。

露出柱脚にブレースが直接取り付けば、ブレース軸力は柱脚のせん断力  $Q$  と軸力  $N$  として作用する。水平変位拘束材は  $Q$  を負担する機能を有するが、接触反力  $C$  による摩擦力  $Q_f$  も  $Q$  を負担する因子となるため、水平変位拘束材の負担せん断力  $Q_H$  は、ブレースからのせん断力  $Q_D$  を用いて表せば、

$$Q_H = Q - Q_f = Q_D - C \cdot \mu \quad (1)$$

となる。一方、その最大値を議論するために、図2の状況を検討する。図中、対象としている柱脚に着目すると、(a) のように取り付くブレースが引張の場合は連層のブレースが全て引張力で抵抗している条件が最も負担が大きい。また、(b) のように圧縮の場合は、第一層以外のブレースは抵抗していない条件が最も負担が大きい。それぞれを  $Q_{H \max}^+$ 、 $Q_{H \max}^-$  として、ブレース降伏軸力  $N_{BY}$  で表現すると、

$$Q_{H \max}^+ = {}_1N_{BY} \cdot \cos \alpha + \left( \sum_i N_{BY} \cdot \sin_i \alpha + N_0 \right) \cdot \mu \quad (2)$$

$$\text{但し、} \sum_i N_{BY} \cdot \sin_i \alpha + N_0 \leq 0$$

$$Q_{H \max}^- = {}_1N_{BY} \cdot \cos_1 \alpha + ({}_1N_{BY} \cdot \sin_1 \alpha + N_0) \cdot \mu \quad (3)$$

となる。ここで、 $N_0$ ：自重による軸力、 ${}_1N_{BY} \cdot \cos_1 \alpha$ ：第

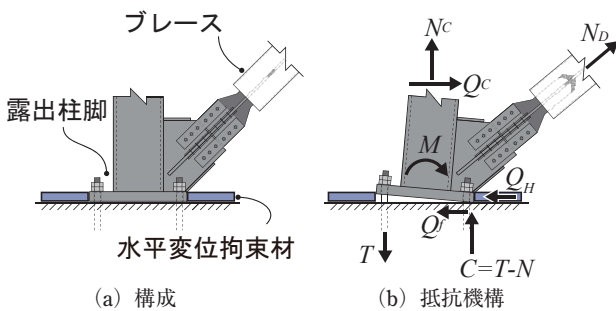


図1 水平変位拘束材を設置したブレース付露出柱脚

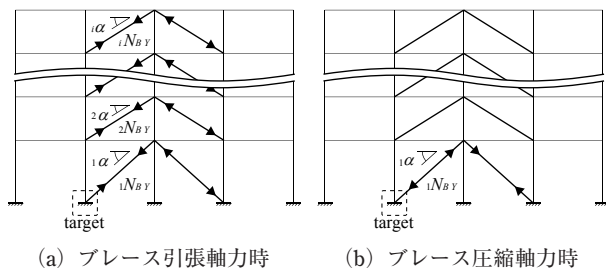


図2 ブレースの抵抗状態

一層のブレース降伏軸力水平成分、 $\sum_i N_{BY} \cdot \sin_i \alpha$ ：全層のブレース降伏軸力鉛直成分の総和、 $\mu$ ：基礎とベースプレート間の摩擦係数である。但し、いずれの軸力も引張側を正 (+) とする。ここでは柱せん断力はブレース軸力水平成分に対し、十分小さく考慮しない。

また、当該柱脚はせん断力を水平変位拘束材が負担するため、柱脚降伏軸力  $N_Y$  は、以下となる。

$$N_Y = n_{all} \cdot A \cdot \sigma_Y \quad (4)$$

ここで、 $n_{all}$ ：単一の柱脚に設置されているアンカーボルトの総数、 $A$ ：アンカーボルト断面積、 $\sigma_Y$ ：アンカーボルト降伏応力度である。

更に、柱脚に作用する最大・最小軸力は、以下となる。

$$N_{\max}, N_{\min} = N_0 \pm \sum_i N_{BY} \cdot \sin_i \alpha \quad (5)$$

## 3. 解析概要

### 3.1 架構全体の解析モデル

図3に解析対象構造物を、表1に部材リストを、表2にブレース諸元を、それぞれ示す。

解析は、「任意平面骨組みの複合非線形解析プログラム CLAP.f」を用いた地震応答解析とし、時間刻み0.005秒、減衰定数はレーリー型として  $h=0.02$  とする。

解析対象は、参考文献<sup>1)</sup>に示されている4層架構とする。解析モデルは表1に示す部材の断面諸量を入力する。また、床スラブの合成効果を再現するために梁のヤング係数を2.0倍<sup>1)</sup>とし、各質量は柱梁接合部に集約して配置する。

表2にブレースの諸元を示す。ブレースは図3に示すようにX2-X3、X3-X4間に連層配置する。参考文献<sup>1)</sup>と同様の諸元(軸耐力・剛性)としたものを標準タイプ(D-1.0)とし、柱脚が柱軸力のみで降伏する場合の挙動を検討するため、ブレース諸元を標準タイプの1.25倍(D-1.25)、1.5倍(D-1.5)としたものを採用する。さらにブレースには低降伏点鋼であるLYP-225を想定した降伏応力度と、引張圧縮抵抗する完全弾塑性型履歴モデルを与えている。

### 3.2 柱脚部の解析モデル

図4に露出柱脚形状を、図5に露出柱脚のモデルを、図6に  $M$ - $\theta$  関係におけるモデル間の違いを、図7に架構名称を、図8に最大・最小柱軸力と柱脚の降伏軸力を、表3にアンカーボルトリストを、表4に簡易復元力特性モデルの諸量を、それぞれ示す。解析では図4に示すディテールの露出柱脚とし、柱脚せん断抵抗要素として水平変位拘束材を有するものとする。露出柱脚のモデル化として図5 (a) および (b) を採用する。(a) の詳細モデル (accurate) はベースプレート縁端上下に図中に示す復元力特性を有する

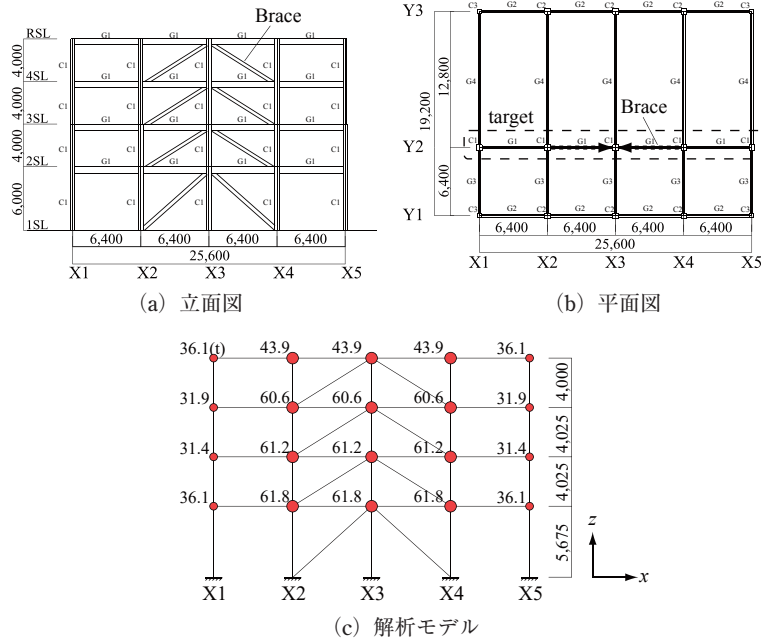


図3 解析対象構造物

表1 部材リスト

柱	size (mm)	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_Y$ (N/mm <sup>2</sup> )
C1-4	□ - 400×16	205000	357.5
C1-3	□ - 450×19	205000	357.5
C1-2	□ - 450×22	205000	357.5
C1-1	□ - 500×22	205000	357.5

梁	size (mm)	$E^*$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_Y$ (N/mm <sup>2</sup> )
G1-R	H×550×200×9×16	410000	357.5
G1-4	H×550×250×9×19	410000	357.5
G1-3	H×600×250×12×22	410000	357.5
G1-2	H×650×250×12×25	410000	357.5

\*梁：床スラブの合成効果=2.0×E

表2 ブレース諸元

	$A_B$ mm <sup>2</sup>	$N_{BY}$ kN	$K_B$ kN/mm
D-1.5			
4 th	3,180	716	148.9
3 rd	8,100	1,823	378.7
2 nd	9,780	2,201	457.2
1 st	15,525	3,493	641.5
D-1.25			
4 th	2,650	596	124.1
3 rd	6,750	1,519	315.6
2 nd	8,150	1,834	381.0
1 st	12,937.5	2,911	534.6
D-1.0			
4 th	2,120	477	99.3
3 rd	5,400	1,215	252.4
2 nd	6,520	1,467	304.8
1 st	10,350	2,329	427.7

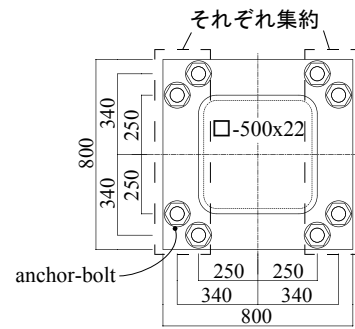
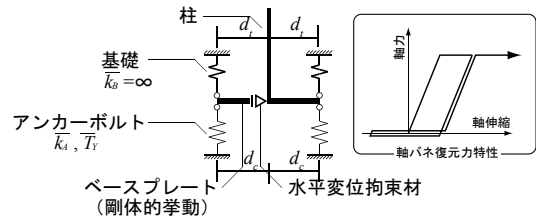


図4 露出柱脚形状



(a) 詳細モデル (accurate)



(b) 簡易復元力特性モデル (simple)

図5 露出柱脚のモデル

軸ばねを設置することで、柱軸力による付加曲げ耐力を再現する。圧縮合力点位置  $d_c$  は簡単のために固定値 (=300 mm) とし、更に  $d_c = d_t$  とする。アンカーボルトは、バー

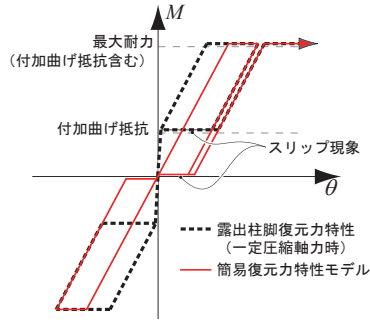


図6 M-θ 関係におけるモデル間の違い

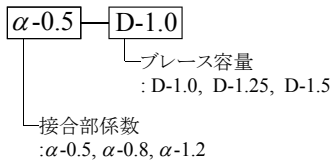


図7 架構名称

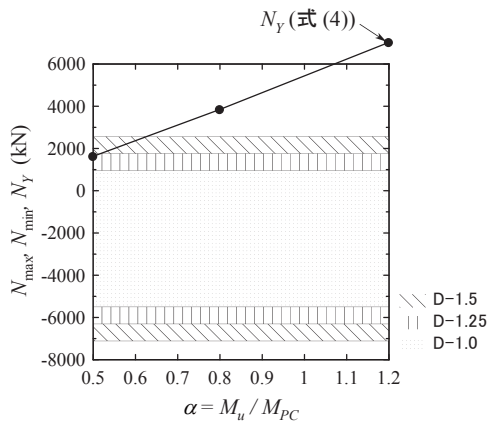


図8 最大・最小柱軸力と柱脚の降伏軸力

表3 アンカーボルトリスト

α	サイズ (A <sub>A</sub> mm <sup>2</sup> )	d <sub>c</sub> mm	σ <sub>y</sub> N/mm <sup>2</sup>	L mm
0.5	M30 (594)	300	357.5	600
0.8	M45 (1,370)	300	357.5	900
1.2	M60 (2,480)	300	357.5	1,200

表4 簡易復元力特性モデルの弾性回転剛性・最大曲げ耐力

α	隅柱 (X1, X5)		中柱 (X2, X3, X4)	
	K (kN・m)	M (kN・m)	K (kN・m)	M (kN・m)
0.5	275000	874	380628	1187
0.8	337000	1536	392300	1853
1.2	409000	2482	422811	2796

スプレート隅角部にある2本のアンカーボルトを、1つのバネに集約し、詳細モデルに入力している。以上のように露出柱脚挙動を再現するモデルとしている<sup>4~8)</sup>。尚、水平変位拘束材については、水平方向の変位が生じないピンローラーにて表現している。これは既往の研究<sup>9)</sup>において、水平変位拘束材の変形剛性を導入した結果より、当該水平剛性は十分に高く、ピンローラーによって表現できることを確認している。(b)は図6のように柱脚軸力による付加曲げ抵抗を再現しない簡易復元力特性モデル (simple) を用いる。表4に示す弾性回転剛性および最大曲げ耐力を与え、それぞれモデル化を行う。

また、d<sub>t</sub>およびd<sub>c</sub>を固定値とする一方で、アンカーボルト断面およびアンカーボルト有効長さを調整して柱脚接合部係数αを得ている。採用した柱脚接合部係数αは0.5, 0.8, 1.2である。

更に、前項で決定したプレース容量および露出柱脚接合部係数の組み合わせに対して、図7のように架構名称を定める。

最後に、図8に式(4)、(5)より算出した最大・最小柱軸力の範囲と柱脚降伏軸力を示す。図より、α-0.5-D-1.25, α-0.5-D-1.5は柱脚に作用する最大軸力が降伏軸力を超過していることが分かる。

### 3.3 解析変数

表5に固有周期を、表6に入力波リストを、それぞれ示す。

解析変数として、柱脚のモデル化、プレース諸元、露出

表5 固有周期

解析変数	固有周期 (s)		
	モデル		
	accurate	simple	fix
α-1.2-D-1.5	0.378	0.377	
α-1.8-D-1.5	0.378	0.378	0.375
α-0.5-D-1.5	0.378	0.378	
α-1.2-D-1.25	0.398	0.399	
α-0.8-D-1.25	0.399	0.399	0.396
α-0.5-D-1.25	0.399	0.399	
α-1.2-D-1.0	0.427	0.427	
α-0.8-D-1.0	0.427	0.427	0.424
α-0.5-D-1.0	0.428	0.427	

表6 入力波リスト

earthquake	direction	max. acc. gal	note
BCJ-L2	X	1068	for 150 kine
Gravity	Z	981	constant

柱脚接合部係数の組み合わせとする。

柱脚部解析モデルには、図5に示した詳細モデル、軸力による付加曲げ抵抗を再現しない簡易復元力特性モデルを、そして固定端としたモデル (fixed) を採用する。

表5に示す各解析モデルの固有周期を見ると、同一ブレース容量である場合においては柱脚を固定端とした場合においても固有周期がほぼ等しいことが分かる。これより、架構の固有周期は柱脚部のモデルおよび接合部係数によらず、ブレース諸元に依存しているといえる。

最後に、表6に入力する加速度を示す。本論文ではBCJ-L2の1波にて解析を行った。制振架構の崩壊時の挙動を追跡することを目的に、最大速度が150 kineとなるように加速度を基準化している。更に、各解析には、鉛直方向加速度として重力加速度をも同時に入力し、露出柱脚に柱軸力による付加曲げ耐力を発現させている。

以上、柱脚の条件：3、ブレースの容量：3、柱脚のモデル：3、入力波：1を変数とした、計27ケースの地震応答解析を実施する。

#### 4. 数値解析結果

図9～図19に解析結果および崩壊機構を示す。図9は最大応答時の変形状態と最大・最小層間変形角分布を、図10は第一層層せん断力 $Q$ -層間変形角 $r$ 関係を、図11は第一層

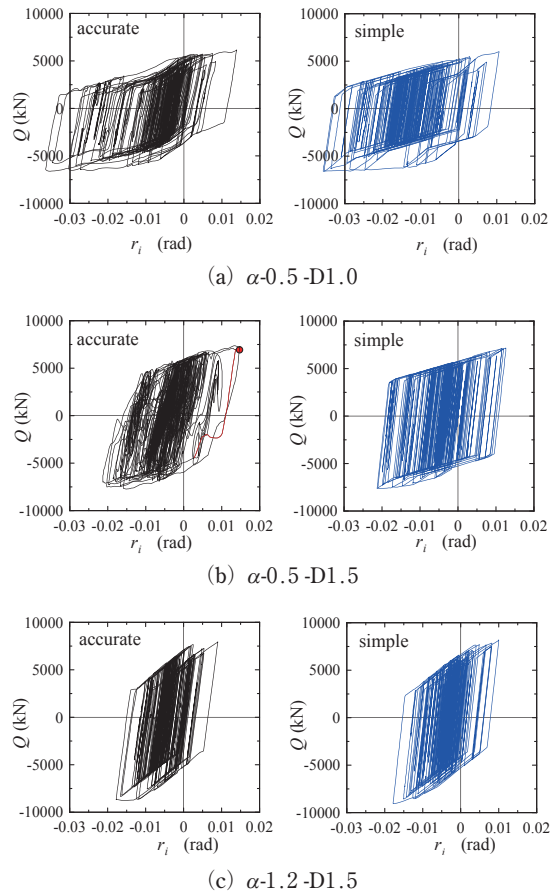


図10 第一層層せん断力 $Q$ -層間変形角 $r$ 関係

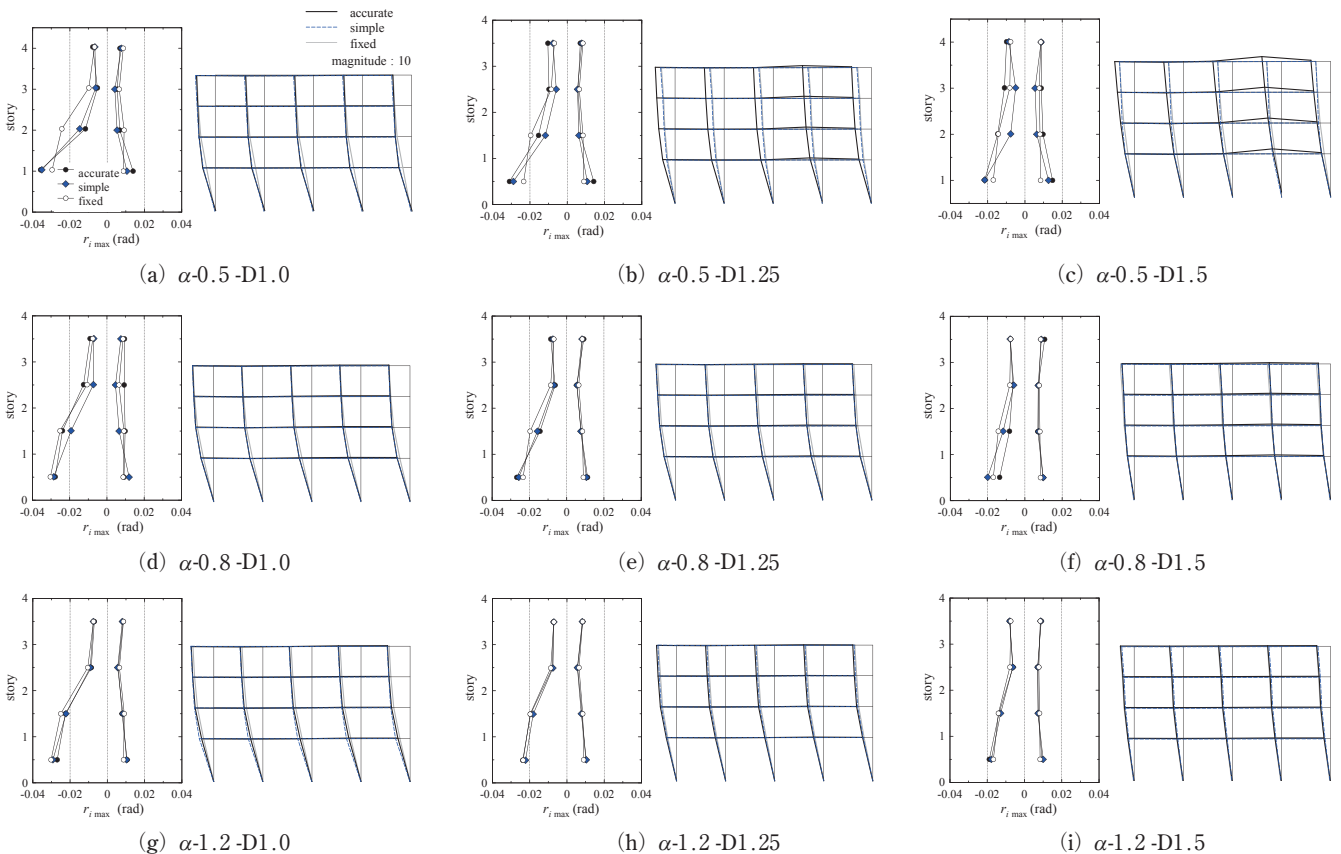
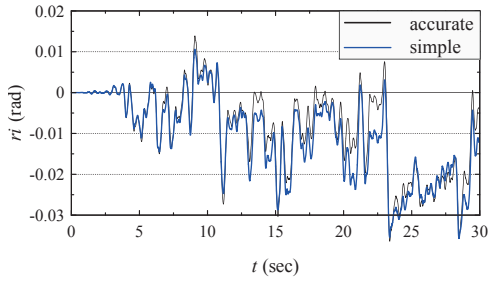
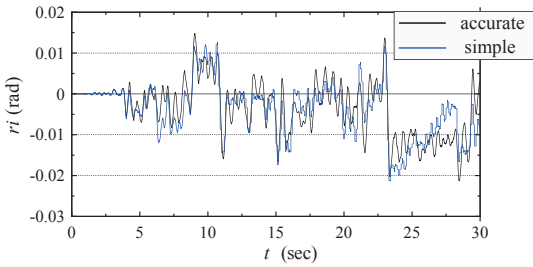


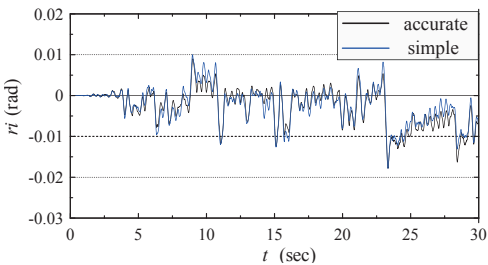
図9 最大応答時の変形状態と最大・最小層間変形角分布



(a)  $\alpha$ -0.5-D1.0

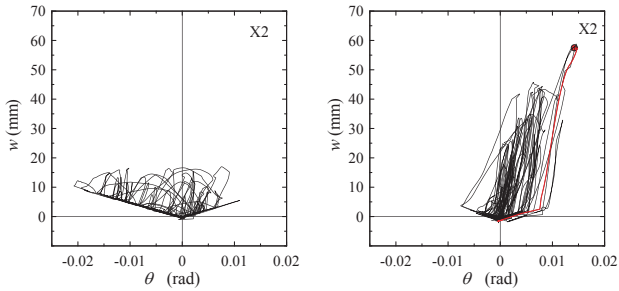


(b)  $\alpha$ -0.5-D1.5



(c)  $\alpha$ -1.2-D1.5

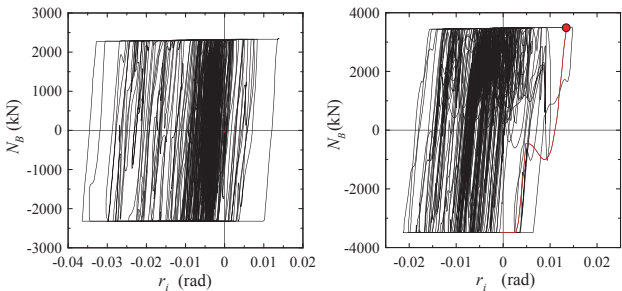
図11 第一層せん断力  $Q$  時刻歴



(a)  $\alpha$ -0.5-D1.0

(b)  $\alpha$ -0.5-D1.5

図12 露出柱脚圆心位置の鉛直変位  $w$ -ベースプレート回転角  $\theta$  関係 (accurate)



(a)  $\alpha$ -0.5-D1.0

(b)  $\alpha$ -0.5-D1.5

図13 第一層ブレース軸力  $N_B$ -層間変形角  $r$  関係 (accurate)

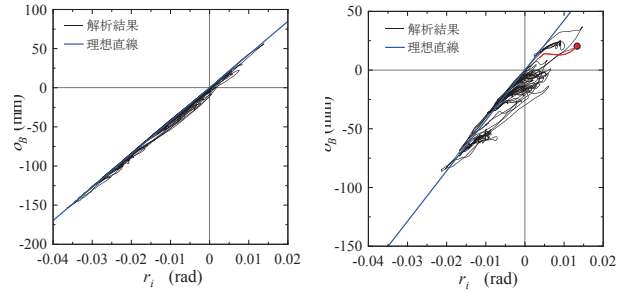
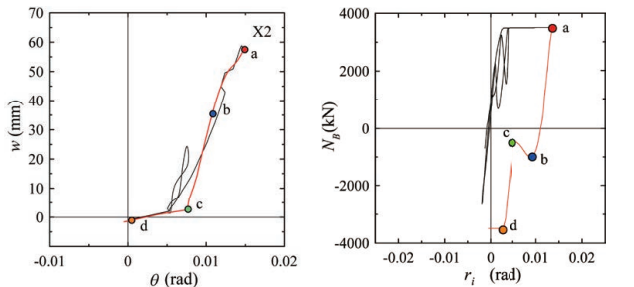
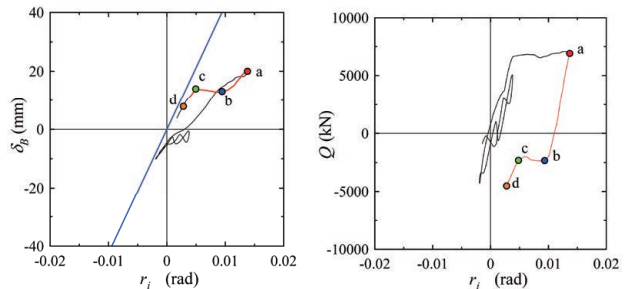


図14 第一層ブレース軸伸縮  $\delta_B$ -層間変形角  $r$  関係 (accurate)



(a)  $w$ - $\theta$  関係

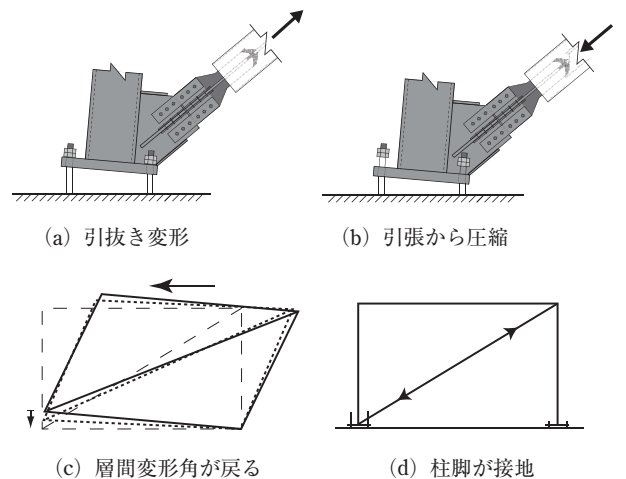
(b)  $N_B$ - $r$  関係



(c)  $\delta_B$ - $r$  関係

(d)  $Q$ - $r$  関係

図15  $\alpha$ -0.5-D1.5履歴形状 (accurate)



(a) 引抜き変形

(b) 引張から圧縮

(c) 層間変形角が戻る

(d) 柱脚が接地

図16 引抜き変形時の架構の挙動

せん断力  $Q$  時刻歴を、図12は露出柱脚圆心位置の鉛直変位  $w$ -ベースプレート回転角  $\theta$  関係を、図13は第一層ブレース軸力  $N_B$ -層間変形角  $r$  関係を、図14は第一層ブレース軸伸縮  $\delta_B$ -層間変形角  $r$  関係を、図15は  $\alpha$ -0.5-D1.5履歴形状

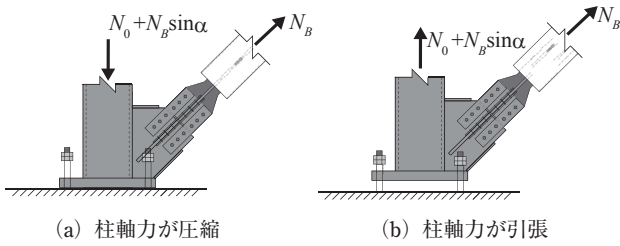


図17 アンカーボルト塑性化後の挙動

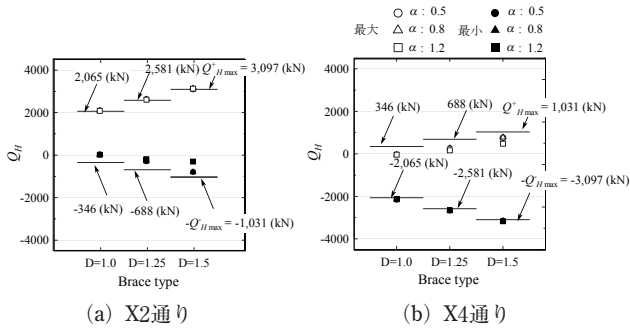
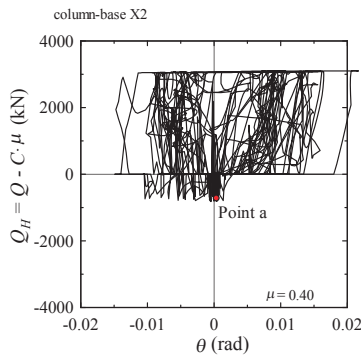
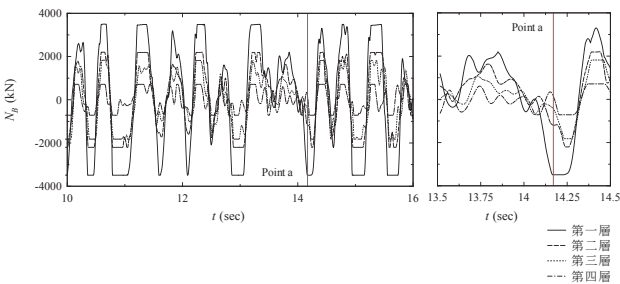


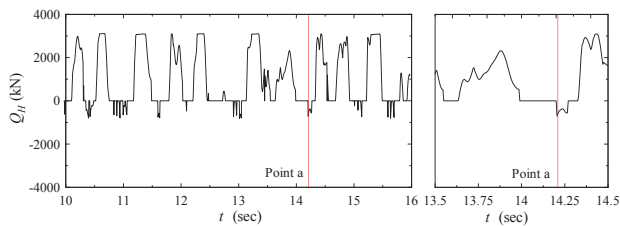
図18 水平変位拘束材最大負担せん断力



(a) 水平変位拘束材最大負担せん断力  $Q_H$ -ベースプレート回転角  $\theta$  関係



(b) ブレース軸力  $N_B$  時刻歴



(c) 水平変位拘束材負担せん断力  $Q_H$  時刻歴

図19 水平変位拘束材最大負担せん断力とブレース軸力の相互関係 ( $\alpha=0.8$ -D1.5)

を、図16は引抜き変形時の架構の挙動を、図17はアンカーボルト塑性化後の挙動を、図18は水平変位拘束材最大負担せん断力を、図19は水平変位拘束材最大負担せん断力とブレース軸力の相互関係 ( $\alpha=0.8$ -D1.5) を、それぞれ示す。

図9には柱脚に簡易復元力特性モデル (simple) と固定端としたモデル (fixed) を、図10および図11には簡易復元力特性モデルを、図13にはブレースが理想的に機能する理想直線も併せて示す。

#### 4.1 崩壊機構と全体応答

図9よりいくつかの解析モデルを除いて簡易復元力特性モデルを用いた解析モデルは、詳細モデルを用いた各層の最大層間変形角を追跡出来ていることがわかる。

まず、簡易復元力特性モデルが詳細モデルと対応しており、かつ柱脚接合部係数  $\alpha$  が1.0を下回る (a), (d), (e), (f) に着目して検討を行う。これらは、柱脚が降伏する、すなわちアンカーボルトが弾塑性伸び変形をしており、柱脚の引抜き変形が生じる状態にある。これは、厳密にはブレースの抵抗効率を損なうものの影響は小さく、ブレースは健全に機能している判断ができる結果が得られている。一方、図9 (b), (c) に示す最大応答時の変形を見ると、ブレースが設置された架構 (X3-X4間) がロッキングを起こすような崩壊となっていることがわかる。これは、図8に示すように柱脚アンカーボルト降伏軸力の総計  $N_Y < \text{最大引張柱軸力 } N_{max}$  の関係にある架構では柱脚が柱軸力のみで降伏し、柱脚の引抜き変形によって崩壊機構が形成されるためである。

また、図9の簡易復元力特性モデルの最大・最小層間変形角分布において、それぞれ接合部係数が等しいモデルにて比較するとブレース諸元が大きいものほど最大・最小層間変形角が小さい。これは、ブレース諸元が大きいものほど、ブレースが負担する水平力が大きくなり、構造物全体の変形量が小さくなるためである。

次に柱脚が引抜き変形による崩壊機構を示した  $\alpha=0.5$ -D1.5に着目する。図12より  $N_{max} < N_Y$  を満たし、ロッキングを起こすような崩壊となっていない (a)  $\alpha=0.5$ -D1.0 が 0.01 rad 時に 5 mm 程度であるのに対して、(b)  $\alpha=0.5$ -D1.5では、10倍以上の鉛直変位が生じており、柱脚の引抜き変形によって崩壊機構が定められていることがわかる。

次いで、図10 (a) (c), 図11 (a) (c) より第一層層せん断力-層間変形角関係や層間変形角の時刻歴挙動などは概ね対応しており、既報の研究<sup>10)</sup>より簡易復元力特性モデルで表現できない柱脚付加曲げ耐力の増減が架構の挙動に与える影響は小さく、簡易復元力特性モデルでも架構の応答を概ね表現できていることが分かる。

一方、図10 (b)、図11 (b) に示すように、 $\alpha=0.5$ -D1.5では簡易復元力特性モデルは第一層層せん断力-層間変形角関係は追跡出来ていないことがわかる。これらより、図12 (b) のように柱脚の引抜き変形で崩壊機構が形成される場合は、簡易復元力特性モデルによっては追跡できない。

前述したように、これらは式 (4)、(5) により算出できる  $N_{max}$  と  $N_Y$  の大小関係から求められる。

## 4.2 ブレース挙動

図13より、(a) ではブレース軸力-層間変形角関係は完全弾塑性型の履歴形状を得られているのに対し、柱脚部に引抜き変形が生じた (b) では履歴形状が完全弾塑性型ではなく、弾性領域で線形性が著しく失われている。(以下、乱れると表現する)

さらに、図14 (a) ではブレース軸変形と層間変形角がほぼ比例的に推移しており、層間変形角が生じる度にブレースが抵抗していることがわかる。一方、柱脚に引抜き変形が生じた (b) では層間変形角が生じているにも関わらず、ブレース軸変形が生じていない区間が生じている。また、ブレースが理想的に抵抗した示す挙動と比較した場合においても (a) が概ね対応しているのに対して (b) は理想的な直線から逸脱している。

ここで引抜き変形が生じたポイントに着目する。図15 (a)~(d) は図中の赤線、aからd ( $t=22.995\sim 23.120$  sec) において、それぞれ対応している。図16に示すように、柱脚の引抜き変形を図15から考察することができる。

- 1) 引抜き変形発生 (a)
  - 2) ブレース軸力が引張から圧縮に転じる (b)
  - 3) 柱脚は引抜きの状態のため接触反力が発生しないまま、層間変形角が戻る (c)
  - 4) 柱脚が接地し、ブレースに降伏圧縮軸力が発生 (d)
- また、図17より、アンカーボルト塑性化後、ブレース軸力の鉛直成分に抵抗する要素は構造物自重に起因する柱軸力一定となるために、柱軸力が引張となった段階でブレースの軸変形の進展が終了し、層間変形角のみが増大するためブレースの挙動が乱れている。これらのことからブレースの履歴形状が層せん断力-層間変形角関係にも現れ、柱脚部の引抜き変形が大きくなるとブレースの抵抗効率が架構の挙動に大きく影響を与えていることが分かる。

## 4.3 水平変位拘束材の存在応力

図18より、水平変位拘束材に作用する最大せん断力は、式 (2)、(3) より算出した値とほぼ整合していることがわかる。

ブレースが引張状態となった図18 (a) の白抜きシンボル、および図18 (b) の黒塗りシンボルであるが、どちら

も図2 (a) のブレース抵抗状態を考慮して式 (2) によって算出した値と対応している。これは、図2 (a) に示すブレースの応力状態は対象架構のように低層鋼構造物とした場合、その振動モードは一次モードとなり易いためである。

続いて、ブレースが圧縮状態となった場合であるが、図19 (a) に示す X2通りの水平変位拘束材が負担するせん断力にも現れているように、摩擦係数を0.40程度見込んだ場合においても、ブレース軸力が圧縮状態でも水平変位拘束材が負担するべきせん断力が発生している。また、図19 (b) に示したブレース軸力時刻歴をみると、第一層ブレースが降伏して間もないときに位相差によって上層にブレースがほとんど抵抗していない point a が存在している。

このように、水平変位拘束材の負担せん断力がもっとも大きくなる図2 (b) に示したブレースの応力状態と同様な応力状態が発生したために、図19に示すようにブレース圧縮抵抗時においても式 (3) によって概ね評価出来ることがわかる。

従って、ブレースが引張側に抵抗する向きと共に、ブレースが圧縮側に抵抗する向きにも水平変位拘束材を設置する必要があることがわかる。

## 5. 結 論

水平変位拘束材を設置したブレース付露出柱脚を有する低層鋼構造物の地震応答解析を実施し、以下の知見を得た。

1. 柱脚に作用する引張軸力が、柱脚に設置された全アンカーボルトの降伏軸力を超過しない場合、曲げに対する柱脚接合部係数を低く設計しても、水平変位拘束材を設置した場合のブレースは健全に機能する。従って、ブレース適用限界は、柱脚の全アンカーボルトの降伏軸力とブレース諸元により判断できる。
2. 柱脚が軸力のみで降伏する崩壊機構を形成する場合を除き、柱脚に簡易復元力特性モデルを設置した解析モデルで低層鋼構造物の変位応答を表現できる。
3. 柱脚は直接取り付くブレースの水平成分に対して、十分抵抗可能な抵抗要素を設置する必要がある。また、ブレースが圧縮力を負担する場合においても、摩擦力で負担できないせん断力は十分大きな値を示す。このため、せん断力に対する水平変位拘束材は、ブレースが圧縮軸力となる側にも設置する必要がある。
4. 水平変位拘束材が負担するせん断力は図2に示す応力状態に対して検討することによって求めることが可能である。

## 文 献

- 1) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針，2014
- 2) 松下貴雄，高松隆夫，山西央朗，石津祐二：ベースブ



- レート水平変位拘束材に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術梗概集, 構造Ⅲ, pp. 645-646, 2015.9
- 3) 竹本泰聖, 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: ブレース軸力を受ける露出柱脚の補強に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第34巻, pp. 153-156, 2011.3
  - 4) 高松隆夫, 山西央朗, 玉井宏章, 石津祐二: 水平変位拘束材を設置したブレース付露出柱脚を有する門型架構に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第40巻, pp. 323-326, 2017.3
  - 5) 山西央朗, 笠井和彦, 玉井宏章, 高松隆夫: 露出柱脚付低層鋼構造物の地震応答性状と柱脚の挙動 - その1 モデル化と解析変数 -, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第37巻, pp.201-204, 2014.3
  - 6) 深澤拓馬, 山西央朗, 笠井和彦, 高松隆夫, 玉井宏章: 露出柱脚付低層鋼構造物の地震応答性状と柱脚の挙動 - その2 解析結果と考察 -, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第37巻, pp. 205-208, 2014.3
  - 7) 山西央朗, 笠井和彦, 玉井宏章, 高松隆夫: 露出柱脚付低層鋼構造物の地震応答性状と柱脚の挙動 - その3 柱脚の存在応力 -, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第38巻, pp. 133-136, 2015.3
  - 8) 山西央朗, 笠井和彦, 玉井宏章, 高松隆夫: 露出柱脚付低層鋼構造物の地震応答性状と柱脚の挙動 - その4 露出柱脚挙動による全体応答への影響 -, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第38巻, pp. 137-140, 2015.3
  - 9) 郷原良太, 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 石津祐二, 松下貴雄: 接着接合された水平変位拘束材を有するブレース付き露出柱脚に関する基礎的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第40巻, pp. 339-342, 2017.3
  - 10) 田中秀宣, 三谷勲, 嶋村洋子, 伊藤倫夫: 変動軸力を受ける露出型柱脚を有する鋼構造骨組の弾塑性挙動, 鋼構造論文集, 第12巻, 第45号, pp. 171-184, 2005.3