

露出柱脚付低層鋼構造物の地震時応答性状と柱脚挙動について

その 4 柱軸力に関する因子と影響について

山西 央朗*

(令和 3 年 11 月 9 日 受付)

A SEISMIC RESPONSE OF FRAME & COLUMN-BASE FOR LOW-RISE STEEL STRUCTURE WITH EXPOSED COLUMN-BASE

part 4 - Effectivity & factor for column axial force

Teruaki YAMANISHI

(Received Nov. 9, 2021)

Abstract

Exposed column-base had double flag type restoring force characteristics, and its strength, rotational rigidity & hysteresis were affected by the column axial force. These characteristics were understood from partial frame experiment. Moreover, the influence of these characteristics on steel structure seismic response was examined by time history analysis of steel structure with rotational spring, that rotational spring had double flag type restoring force characteristics.

However, partial frame experiment was no agreement boundary condition of column-base in structure on ground motion, and rotational spring was no agreement influence of axial force. Therefore, seismic response & working stress of exposed column-base with steel structure included many uncertainty about building structural design.

The author discussed exposed column-base behavior and structure response on ground motion, that uses seismic response analysis results obtained from low-rise steel structure with model that can reproduce the column-base behavior.

In this paper, exposed column-base around plastic deformation are unaffected by up-down acceleration of earthquake. On the other hand, gravity acceleration are very important consideration in its understanding.

Key Words: exposed column-base, column-base axial force, rotational spring

1. 序論

露出柱脚では、地震時の曲げ応力によりベースプレートが基礎から回転離間すると、柱図心と露出柱脚の回転中心に乖離が生じる (図 1 参照)。このため、回転離間時には

柱軸力による偏心曲げが発生し (これは付加曲げと呼ばれている。以後、付加曲げと記す。)、露出柱脚の曲げ耐力、降伏耐力発現時の割線回転剛性、履歴形状が変化することが知られている。従って、これら露出柱脚の構造的特徴を理解する上で柱軸力は厳密に理解すること、そして露出柱

* 広島工業大学 工学部建築工学科

准教授・博士 (工学)

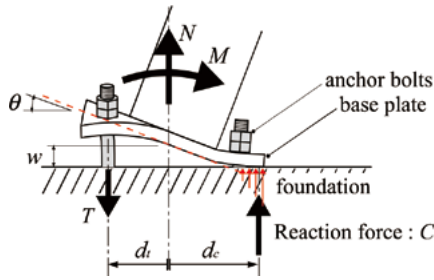


Fig. 1 Resisting mechanism of column-base

脚の構造的特徴を精確に評価、表現することが望ましい。

しかし一方で、構造物の地震時応答や周辺部材への影響を理解する場合、露出柱脚の構造的特徴は特に重力加速度による柱軸力を加味した最大曲げ耐力を把握できれば良いことが指摘されている。著者も既報の文献¹⁾にて、柱・柱脚耐力比の変化に伴う露出柱脚回転剛性の変動幅は、架構の層剛性に与える影響と言う観点から小さいことを力学モデルの結果を用いて明らかにしている。また、時刻歴応答解析結果から、柱軸力に支配的な影響を与える地震動の鉛直加速度を加味しても、露出柱脚自体の塑性変形量に影響しないことを示している。

但し、露出柱脚に作用する柱軸力は、重力加速度、鉛直地震動に基因したもののみではなく、梁のせん断力差やブレース軸力鉛直成分等の周辺部材の抵抗に基因したもの、そして回転離間の後にベースプレートが基礎に再接触する際に生じる衝撃力に基因するものと多岐に渡る。先に述べたように、これらの内多くは地震時の構造物全体挙動を理解する上で重要ではないが故に、追跡が及んでいない部分である。ここでは、露出柱脚または当該仕組みに類似した構造要素が潜在的に有する特徴の理解を深めると言う観点から、柱軸力を発生させる因子について検討を行う。

本来、上記の柱軸力を発生させる因子を独立して抽出することは困難である。本研究では、後述する二つの構造モデルを用いることで、できる限り各々の因子を独立して抽出し、それぞれが保有する特徴、そして地震時の構造物に与える影響について検討を行う。

2. 露出柱脚の構造モデル¹⁾

露出柱脚は、図1に示すようにベースプレートと基礎の間で接触・離間する構造である。これは、柱軸力により付加曲げ抵抗 M_n が生じる構造となる。このため、図2に示すように柱軸力が変動する場合は比例的に柱脚耐力も増減する。このような露出柱脚の履歴を模式的に表すと図3となる。図3中において、付加曲げ抵抗に達するまでは剛性は K_n を示し、その後アンカーボルトの伸び変形に基因した剛性 K_A を示した後、降伏を迎える。

この抵抗状態を表現するため図4(a)に示す構造モデルを構築する。柱下端にベースプレート(剛性)を設置し、

その先端にアンカーボルトの抵抗および基礎との接触による抵抗を表現するための軸バネを設置する。図4(b)に示すように、曲げモーメントが作用すると回転しながら基礎との接触、アンカーボルトの回転離間に対する抵抗を表現する。また、柱軸力の影響等を検討するため、図4(c)に示すように回転バネによって柱脚挙動を表現するモデルも構築する。この場合、露出柱脚の曲げ抵抗は回転角 θ によってのみ生じるため、柱軸力からは独立した耐力を示す。すなわち、図2中における青色破線のように、柱軸力の変動が生じても曲げ抵抗力が変化しないモデルとなる。

3. 時刻歴応答解析¹⁾

図4に示す2つの構造モデルを用い、柱軸力や各バネに設定する特徴を変数として時刻歴応答解析を実施する。変数に対する名称の例を図5に示す。変数は、図4に示した露出柱脚の構造モデルの種類、鉛直方向加速度の設定、そして回転バネの場合においては回転剛性と曲げ耐力を変数とする。具体的には、図6に示すものとなる。図6(a)より、A-UDは軸バネを用いて鉛直方向加速度に重力加速度と鉛直地震動を累加した加速度を入力したもの、A-Gは軸バネを用いて重力加速度のみ入力したもの、A-0は軸バネを用いて鉛直方向加速度を入力しないものである。また、図6(b)より、R-G-Sは曲げ耐力を重力加速度による付加曲げ耐力を採用し剛性を図3に示す原点と降伏点を結んだ割線回転剛性 K_S を採用したもの、R-G-Eは曲げ耐力を重力加速度による付加曲げ耐力を採用し剛性をアンカーボルトの伸び変形に基因した回転剛性 K_A を採用

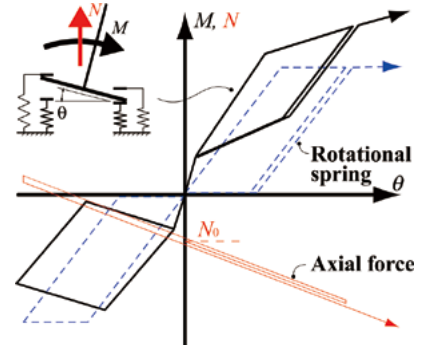


Fig. 2 Hysteresis of variable axial force with exposed column-base

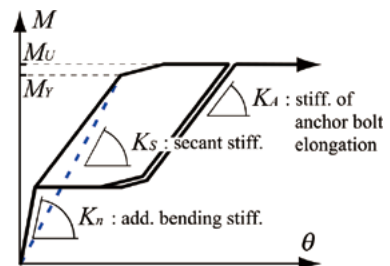


Fig. 3 Define of rotational stiffness for anchor bolt yield type

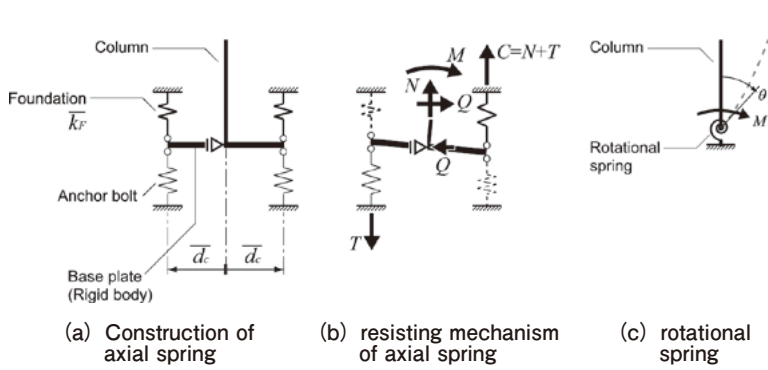


Fig. 4 Exposed column-base structural model

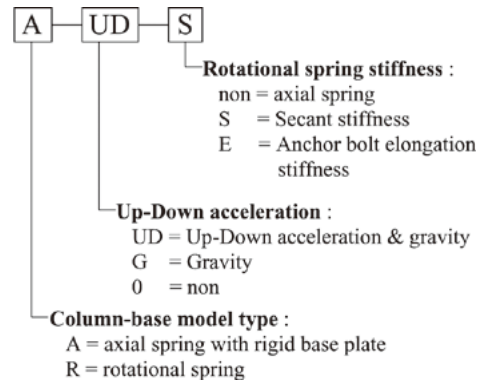


Fig. 5 Code of analysis parameter

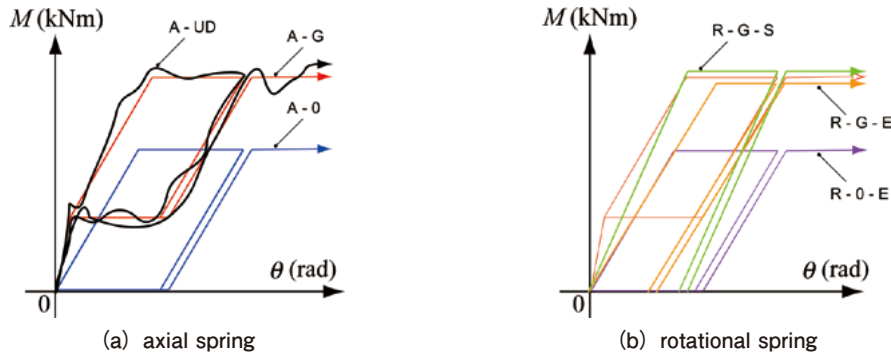


Fig. 6 Restoring force characteristics of exposed column-base

Table 1 Strength ratio, each value for modeling, each strength and stiffness for column-base

α	column	Anchor bolt (A_A mm ²)	d_{BP} mm	d_c mm	\bar{K}_F kN/mm	$\bar{\sigma}_{y-\alpha}$ N/mm ²	$\bar{\sigma}_{y-\beta}$ N/mm ²	$L_{A-\alpha}$ mm	$L_{A-\beta}$ mm	M_U kNm	K_A kNm/rad	K_S kNm/rad	K_n kNm/rad
0.7	C2	M45 (1370)	55	288	11,460	384	358	1,935	1,694	1,558	160,016	220,213	1,899,150
	C3	M42 (1180)	45	219	9,533	391	358	1,313	1,451	944	114,567	139,149	914,819

$n_\alpha = 3, n_\beta = 2, E = 205,000 \text{ N/mm}^2$

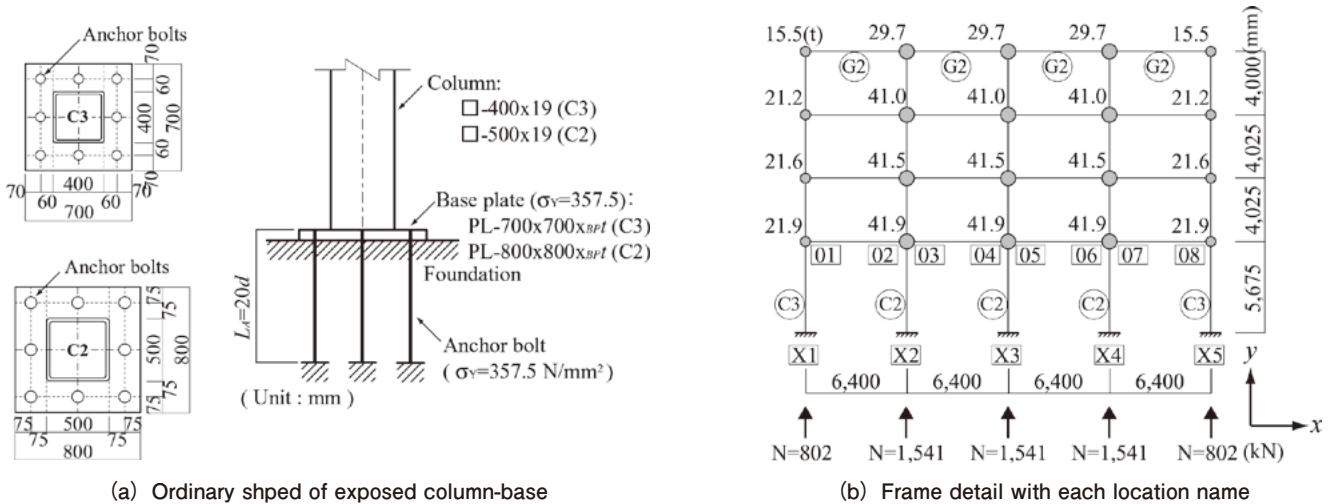


Fig. 7 Analysis target frame

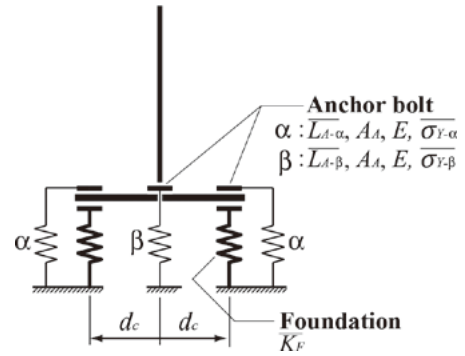


Fig. 8 Each value with model

Tabel 2 Member list of analysis target frame

(a) Coumn (BCP-325)

position-layer	section shaped (mm)	E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)
C2 - 4	□ - 400 x 16	205,000	357.5
C2 - 3	□ - 450 x 19	205,000	357.5
C2 - 2	□ - 450 x 19	205,000	357.5
C2 - 1	□ - 500 x 19	205,000	357.5
C3 - 4	□ - 350 x 16	205,000	357.5
C3 - 3	□ - 350 x 16	205,000	357.5
C3 - 2	□ - 400 x 19	205,000	357.5
C3 - 1	□ - 400 x 19	205,000	357.5

(b) Beam (SN490B)

position-floor	section shaped (mm)	E^* (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)
G2 - R	H - 550 x 200 x 9 x 16	307,500	357.5
G2 - 4	H - 550 x 250 x 9 x 19	307,500	357.5
G2 - 3	H - 600 x 250 x 12 x 22	307,500	357.5
G2 - 2	H - 650 x 250 x 12 x 22	307,500	357.5

*beam : Effect from concrete slub = 1.5 x E

Tabel 3 Acceleration list

(a) Horizontal values

earthquake	direction	max. acc. gal	note
El Centro	NS	765	for 75 kine

(b) Vertical values

code	earthquake	direction	max. acc. gal	note
UD	El centro	UD	1443	for 75 kine
G	Gravity	UD	981	constant
0	-	UD	0	-

したものの、R - 0 - Eは曲げ耐力も剛性も柱軸力による影響を無視した値を採用したものである。

このような変数を採用し、ここではアンカーボルト降伏型となる場合を採用する。このため、柱脚・柱耐力比は0.7を採用する。具体的な架構及び柱脚の形状等は、図7～8、表1～2に示す。

また、入力する加速度を表3に示す。水平加速度はいずれもEl centro NS波を最大速度が75kineとなるように加速度に倍率を乗じて基準化したものである。鉛直加速度は、UDが重力加速度に鉛直地震動を水平加速度と同じ倍率を乗じて基準化した物を累加した加速度、Gは重力加速度一定、0は入力を行わない。

4. 解析結果と考察

解析結果を図9～22に示す。

図9には第一層層せん断力-層間変形角関係を、図10には第一層層間変形角時刻歴を、図11には最大層間変形角と残留層間変形角の分布を、図12には解析終了時の各層エネ

ルギー吸収量の分布を、図13には最大加速度の分布を、図14には最大層せん断力の分布を、図15には2層～4層の層せん断力-層間変形角関係を、図16には2層～4層の層間変形角時刻歴を、図17には柱脚曲げモーメント-ベースプレート回転角関係を、図18には柱軸力-ベースプレート回転角関係を、図19にはベースプレート回転角時刻歴を、図20には柱脚曲げモーメント時刻歴を、図21には柱軸力時刻歴を、図22にはアンカーボルト負担せん断力-ベースプレート回転角関係を、それぞれ示す。

図中、黒線でA - UD、赤線でA - G、青線でA - 0、緑線でR - G - S、橙線でR - G - E、紫線でR - 0 - Eを表現している。また、履歴や時刻歴は大きく応答した1.5 (s)～16 (s)のみ描画している。

尚、図22においては軸バネモデルの結果のみを示しているが、これは、回転バネでは基礎との反力を算出できずベースプレートと基礎間に生じる摩擦力を算定できないためである。そして、軸バネモデルにおいて、アンカーボルトに作用するせん断力は直接的には算出できない。ここでは、

実際の抵抗状態、並びに設計指針での扱いを鑑みて、柱脚に作用する水平方向の反力 R_x を、以下のように Q_f または Q_s として読み替える。

$$Q < Q_f = C \cdot \mu \Rightarrow R_x = Q_f \quad (1.a)$$

$$Q_f \leq Q \Rightarrow R_x = Q_s \quad (1.b)$$

ここに、 C ：基礎とベースプレート間の接触力、 μ ：ベースプレートと基礎間の摩擦係数である（=0.4を採用）。

本研究で採用している変数において、軸バネにより柱軸力の影響を考慮しかつ地震動鉛直加速度を入力した A - UD が実際の構造物における挙動に最も近いと考え、これを実構造物の挙動に据えて議論する。

4.1 第一層応答

図9, 図10より、第一層の層せん断力や層間変形角を追跡する上において、A - G（軸バネにより柱軸力の影響を表現すると共に重力加速度を入力する）により、ほぼ齟齬無く第一層の応答を追跡できることが分かる。 r の時刻歴において4秒以降のピーク時において若干の差異はあるものの構造物の変形および強度が表現できている。一方、同じく強度を再現している R - G - S および R - G - E は初期の降伏時（約2.5秒）までは整合しているが、柱脚が正負両方向で降伏した3秒以降は、明らかに差異が大きくなっている。更に、8秒～12秒の間においては、層間変形角の応答に位相差が生じており降伏後の構造物固有値が追跡できていないことが伺える。そして、A - 0 および R - 0 - E も柱脚が両方向で降伏した3秒以降は構造物の応答を追跡できていない。以上のように、弾塑性領域で第一層の応答を追跡するためには、軸バネモデルのように柱軸力の影響を追跡できるように工夫する必要がある。但し、例えば A - UD と R - G - S 間には、スリップ区間の曲げ抵抗の差異も含まれており、回転バネによりこの強度を表現できれば、それ程大きな差異は生まれないとの見解もある。

これは、A - 0 と R - 0 - E との間で、それなりに整合が取れていることから伺える。この変数間の差異は、梁のせん断力差を主として生じる柱軸力の変動で抵抗力が増減する点である（図18参照）。この差異があるにもかかわらず、極端に差異が生じていないのは、上述の柱軸力の変動による抵抗力の差異が層の挙動に与える影響が少ないと判断できる結果と整合する。

4.2 全体応答

図11～14より、全体の最大応答等を比較した時に、柱脚の曲げ抵抗がほぼ表現できている A - G, R - G - S そして R - G - E は極端な差異無く各値を得ることができている。特に、2層以降の応答においては、変数間の差異が小さくなっており、露出柱脚の影響は第一層に顕著に現われ、か

つ最大応答を追跡する場合には支配的な影響を与えない場合もあることが確認できた。

但し、これは初期の降伏時で最大応答が決定する場合に対応するものである。図10, 図16において、初期降伏後の各層の応答を比較すると、第一層と同様に3秒以降には追跡できない様子が散見される。従って、構造物の最大応答ではなく、塑性化後の応答も詳細に追跡するためには、4.1で議論した内容を踏襲する必要がある。

尚、R - G - S と R - G - E は柱脚の回転剛性に5割程度の差異があるが、構造物の固有値に支配的な影響を受ける加速度の応答においても大きな違いは生じていない。また、図15, 図16においてもそれなりに整合している。このことから、柱脚の回転剛性の影響は全体応答に与える影響は小さいことが伺える。

4.3 露出柱脚周り挙動

図17～21より、露出柱脚の変形を追跡する上では A - G は有用である。図20, 図21から分かるように瞬時的な曲げ応力、柱軸力を判断する上では UD を入力しなければならないことは明らかであるが、一方で、図19のベースプレート回転角は追跡できている。これは、UDによる柱軸力の増減が構造物の応答に比較して高周波であるため変形応答に与える影響が小さくなったのではないかと推測している。

次に、R - G - S および R - G - E は、柱軸力が変動する側柱 (X1) において、大きな差異が生じている。上述のように瞬時的な値が表現できていないのではなく、平均的な強度に明確な差異が生じている。梁のせん断力差による柱軸力の変動自体が表現できることは、図21の4秒付近までの対応が取れていることから読み取れるが、X1において同領域でも明らかに差異が生じている。これは、柱軸力による付加曲げ抵抗が表現できていないために柱脚が発現する強度に明確な齟齬が生じることに基因する。このため、梁のせん断力差による柱軸力変動のように、構造物応答と同位相で値の変動が生じる場合には、強度のみではなく、ベースプレート回転角の表現ができないことに留意が必要である。

柱軸力の変動であるが、鉛直地震動による影響が顕著に現れており、柱軸力の値自体を詳細に追跡する場合は UD を入力しなければならない。

基礎とベースプレート間の再接触時に生じる衝撃力は軸バネでのみ表現できる。この影響は、A - 0, R - 0 - E の中柱 (X3) に着目して検討する。図10より6秒までは第一層間変形角がほぼ対応しており、図19のベースプレート回転角も同様にほぼ対応している。柱軸力および曲げ耐力としては、図20, 図21に見られるように、再接触による柱軸力の発生、これに伴う曲げ耐力の増減が高周波で生じ

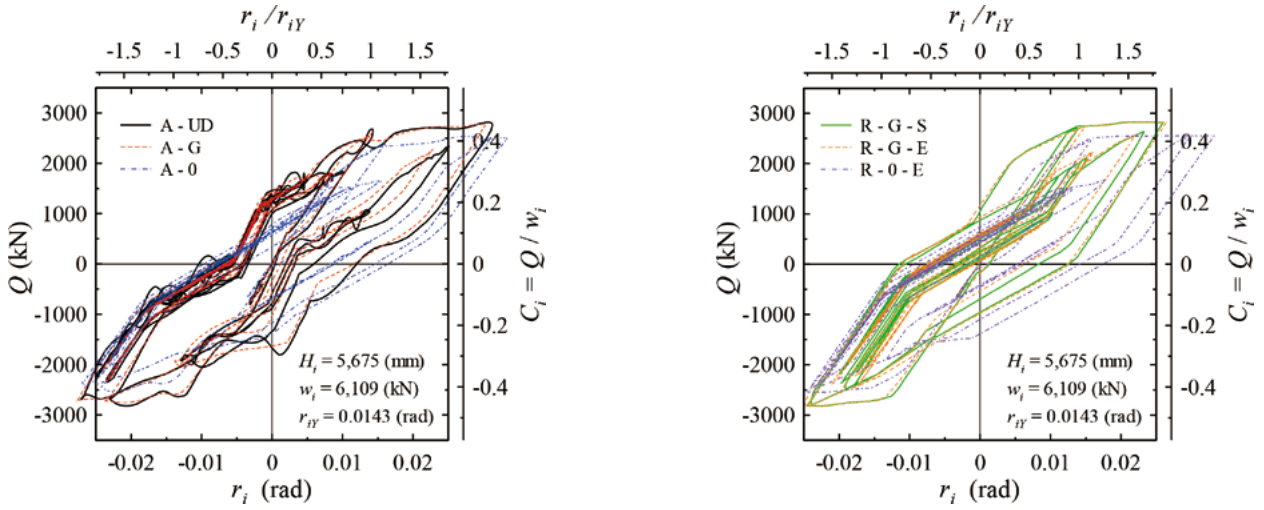


Fig. 9 Story shear force - story drift angle relation (1st story)

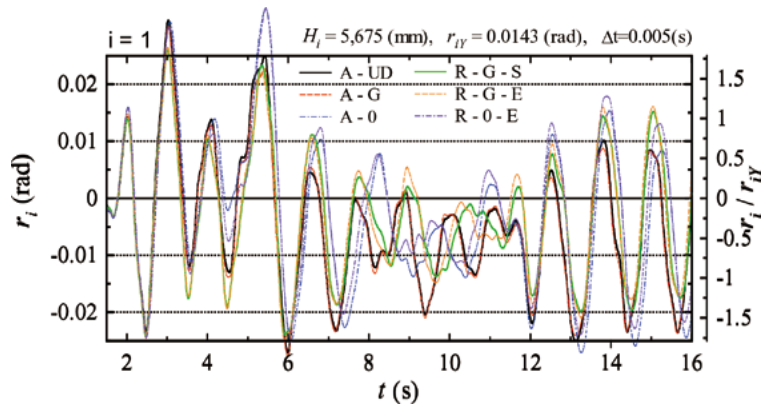


Fig. 10 Story drift angle timehistory (1st story)

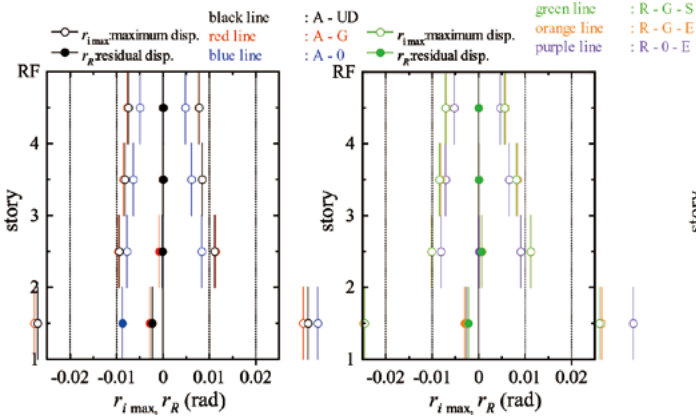


Fig. 11 Maximum story drift angle plot

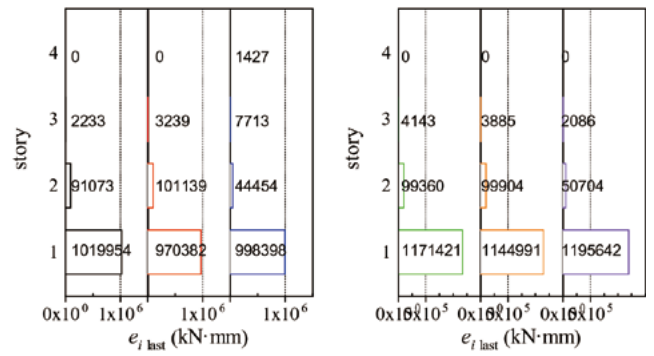


Fig. 12 Energy absorption plot

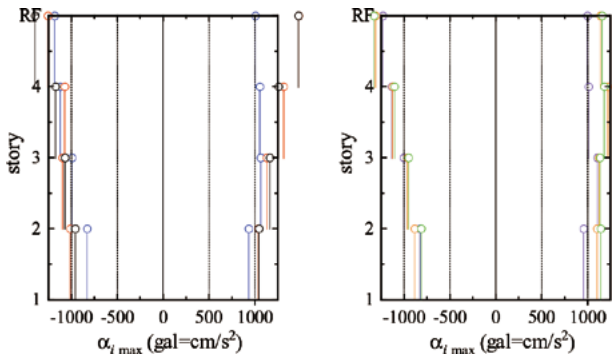


Fig. 13 Maximum acceleration plot

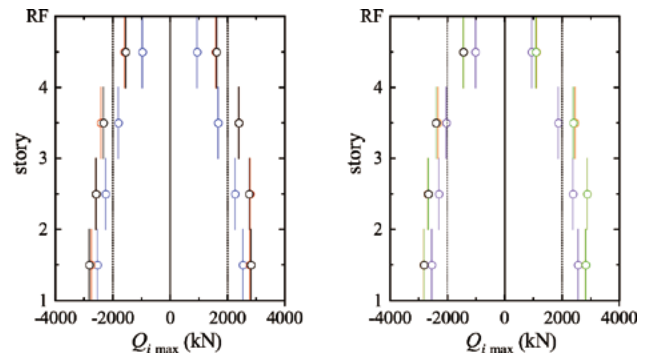
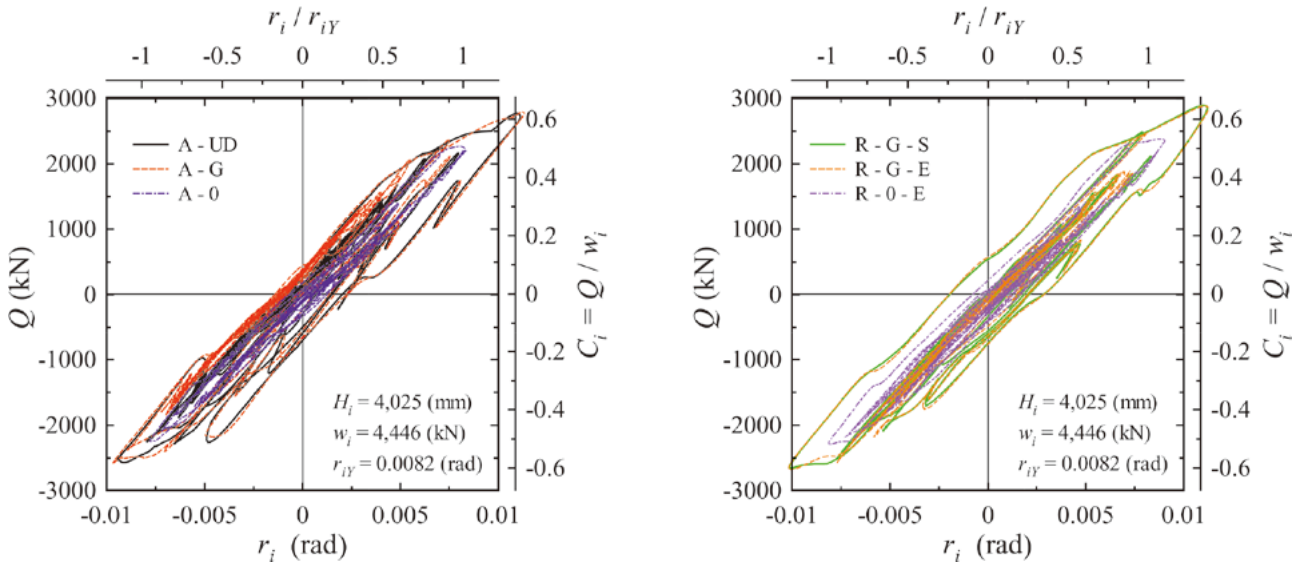
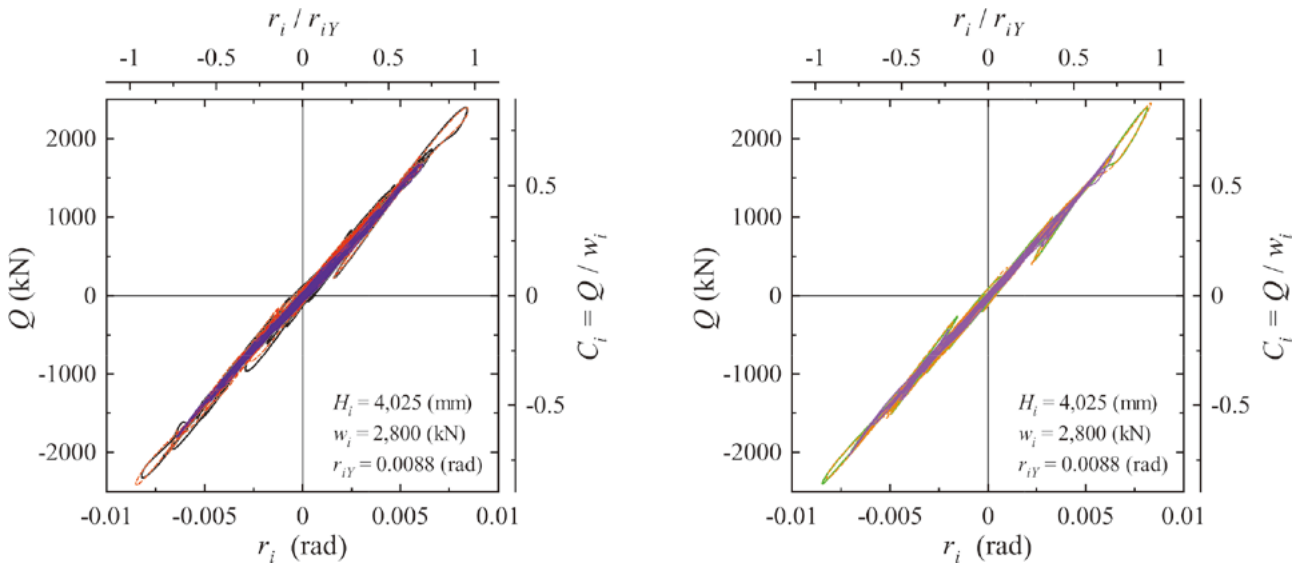


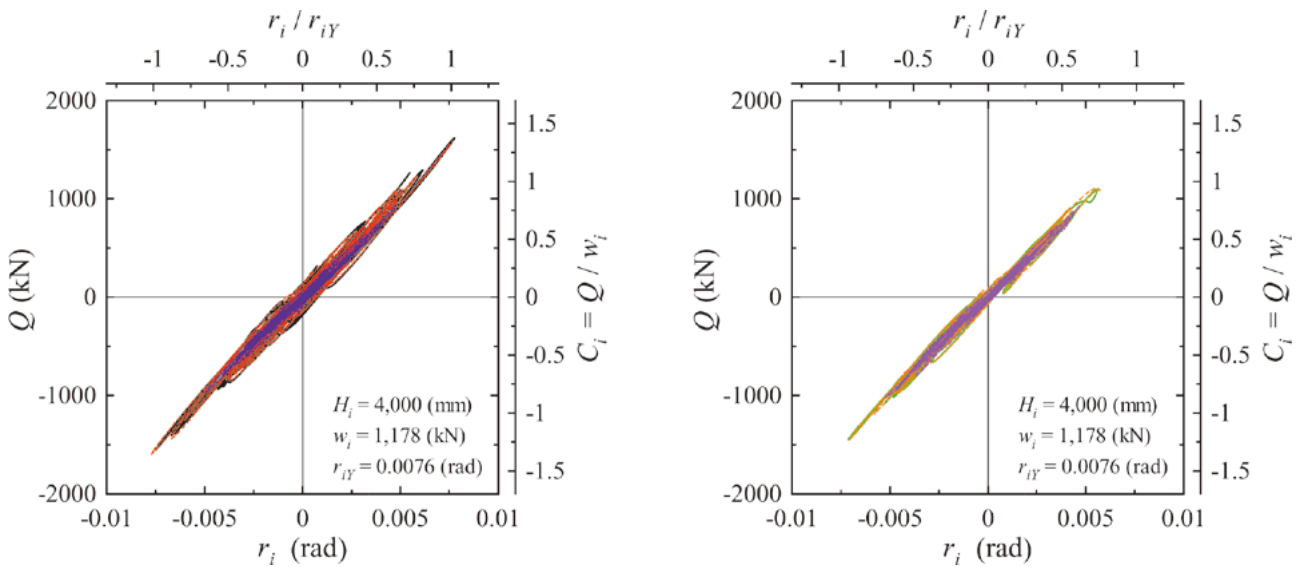
Fig. 14 Maximum story shear force plot



(c) 4th story



(b) 3rd story



(a) 2nd story

Fig. 15 Story shear force - story drift angle relation

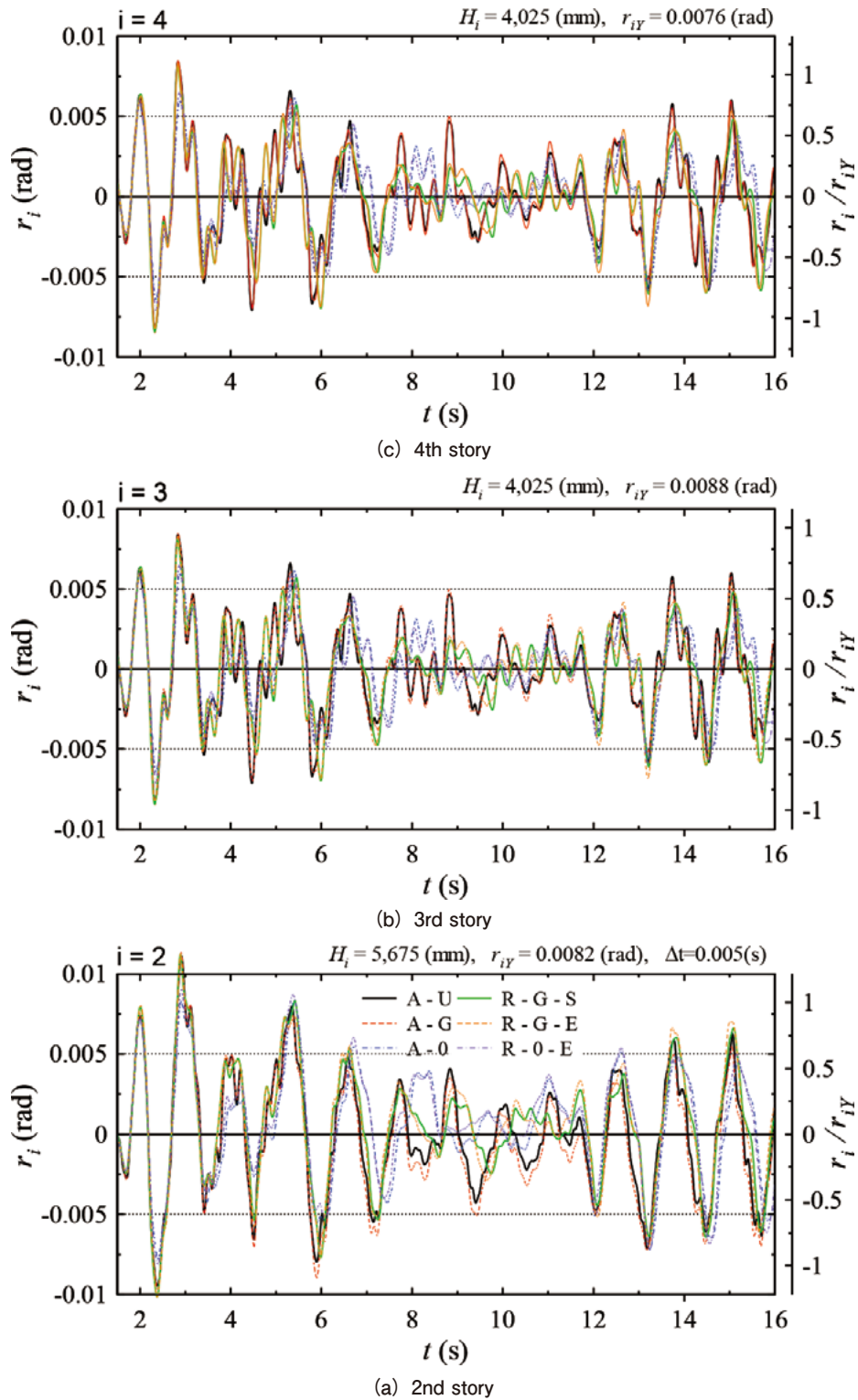


Fig. 16 Story drift angle timehistory

ている。しかし、上記のようにベースプレート回転角が支配的な影響を受け無いと判断できる。これは、UDの影響においても議論したが、柱軸力の増減が構造物の応答に比較して高周波であるため変形応答に与える影響が小さくなったのではないかと、同じく推測している。

最後に、図22よりアンカーボルトに作用するせん断力について検討を行う。まず、軸バネを採用しているため、A - 0

も描画しているが、接触反力を正確に表現しなければならない本議論において、重力加速度を入力していない同結果はかけ離れた軌跡を示している。このため、 Q_s を議論するのであれば、重力加速度の影響を必ず表現しなければならないことが伺える。そして、重力加速度のみを表現したA - Gであるが、側柱の最大値こそ近い値を示すものの、その軌跡はA - UDとは対応していない。これは、UDに

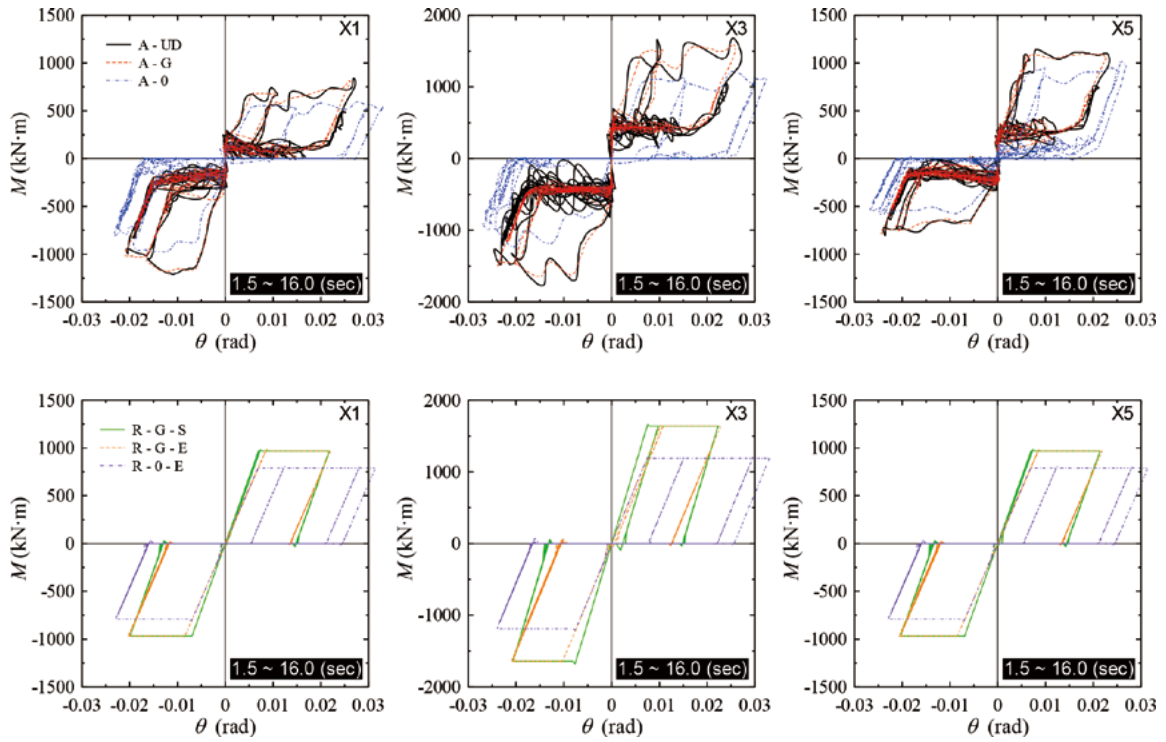


Fig. 17 Column-base moment - base plate rotation relation

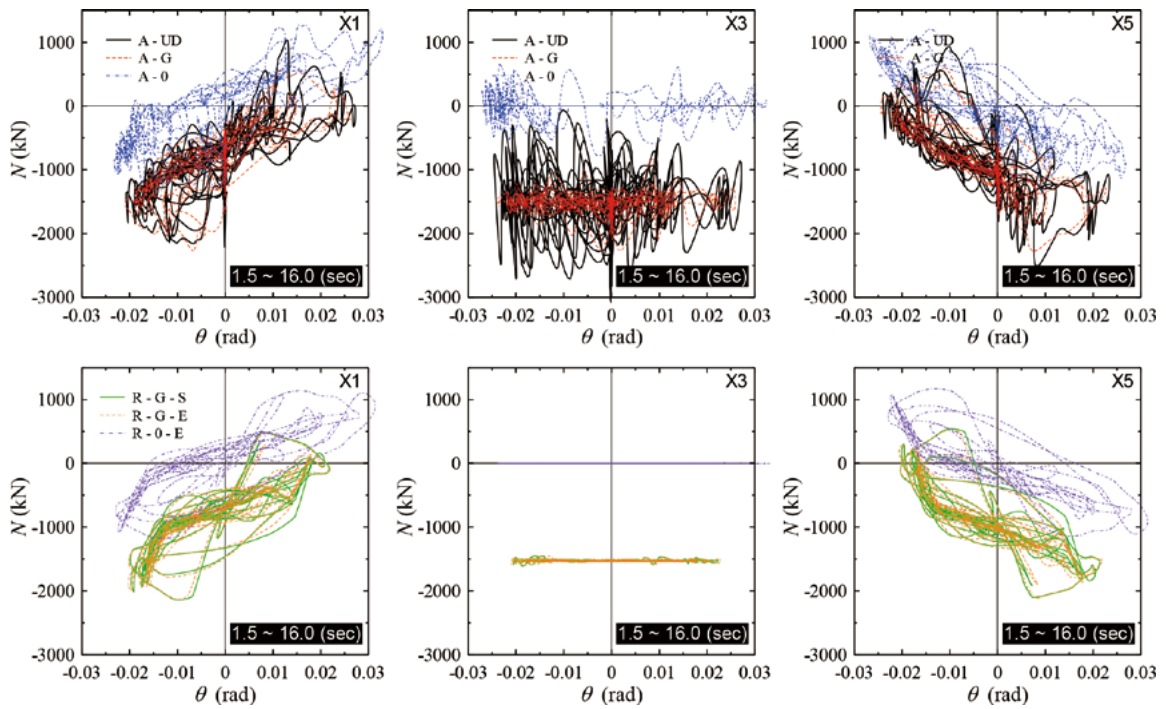


Fig. 18 Column axial force - base plate rotation relation

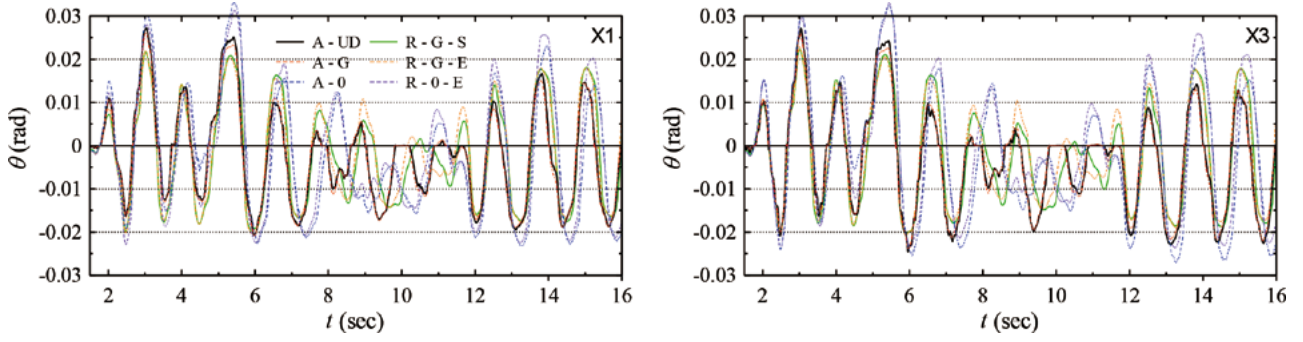


Fig. 19 Base plate rotation timehistory

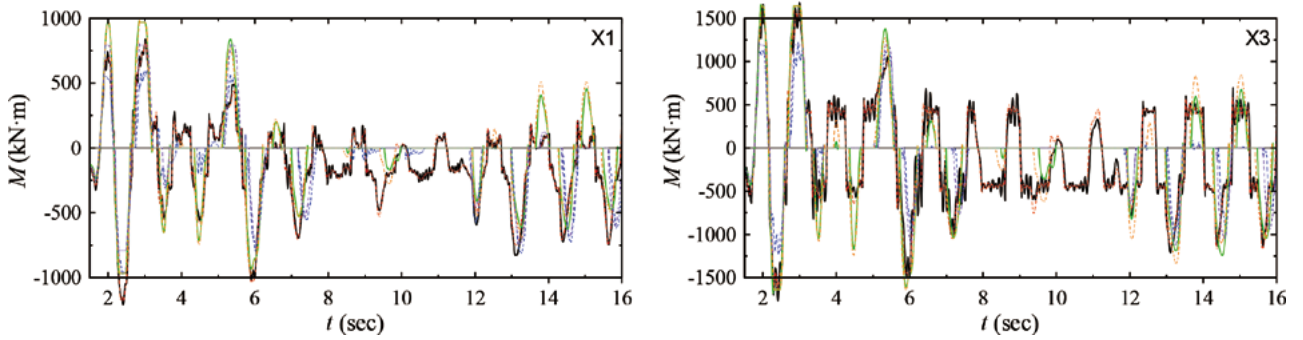


Fig. 20 Column-base moment timehistory

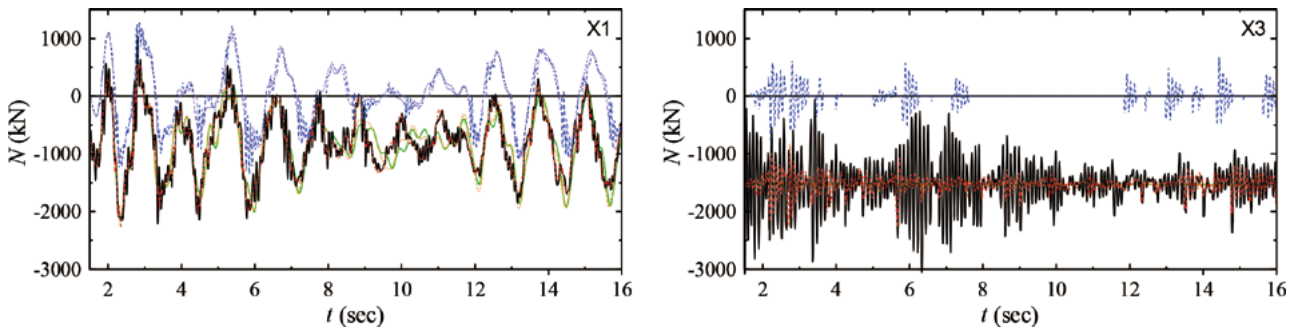


Fig. 21 Column axial force timehistory

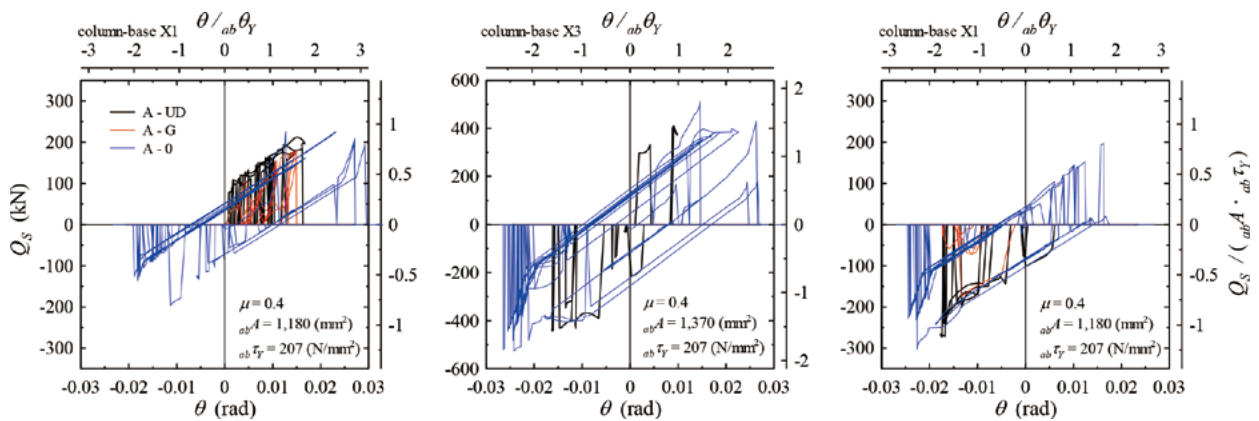


Fig. 22 Anchor bolt shear force - base plate rotation relation

より随時柱軸力が変動し、瞬間的にアンカーボルトにせん断力が作用することを表現できていないためである。この度の露出柱脚のように、一般的な多層鋼構造物では相応の強度を持つ露出柱脚の設計が必要となり、結果として本結果に見られるように作用するせん断力に対してアンカーボルトの降伏せん断力で支持できるような結果が得られているものの、同値が卓越するような場合においてはUDを表現しなければならないことが示唆される結果となっている。

5. 結論

アンカーボルト降伏型露出柱脚において、柱軸力による影響追跡するため、軸バネで付加曲げ抵抗を表現した柱脚モデル、回転バネで付加曲げ抵抗を表現できない柱脚モデルを作用し、各モデルに変数を割り振って柱軸力が発生する各因子に着目した検討を行った。得られた知見を以下に示す。

1. 柱軸力による付加曲げ抵抗を表現できない場合においても、初期降伏時に各層の最大応答が決定するのであれば、構造物各層の最大応答を表現できる。しかし、初期降伏後の応答は追跡できず、更に、初期降伏後に大きく塑性変形が進展する場合には最大応答も表現できないことが示唆された。但し、重力加速度を考慮していない場合の軸バネと回転バネの応答はせほぼ整合しており、先の結果は梁の

せん断力差による影響によらないと判断される。このため、本研究では検討できていないが、回転バネであってもスリップ区間の付加曲げ抵抗が表現できるモデルであれば、初期降伏後における応答も追跡できることが予想される。

2. 露出柱脚周りの挙動を得る場合、梁のせん断力差による柱軸力の変動はベースプレート回転角に支配的な影響を与える。このため、ベースプレート回転角を正確に追跡するためには、付加曲げ抵抗による影響を考慮しなければならない。
3. 鉛直地震動および基礎とベースプレート間の再接触時に生じる柱軸力は、柱軸力や柱脚曲げ耐力等の存在応力や強度に支配的な影響を与えるが、ベースプレート回転角にはほぼ影響しない。これは、構造物の形応答に比較して高周波であるためと推測している。
4. アンカーボルトに作用するせん断力を追跡するためには、鉛直地震動を入力しなければならない。

参考文献

- 1) 山西央朗, 露出柱脚付鋼構造物の地震応答時における柱脚部存在応力と変形挙動 - 4層平面ラーメン架構の時刻歴応答解析結果に基づいて -, 日本建築学会構造系論文集, 第86巻, 第784号, pp. 967-978, 2021.6.