

# 柱脚復元力特性に着目した鉄骨ラーメン架構の地震応答解析

高松 隆夫\*・山西 央朗\*\*・玉井 宏章\*\*\*・石津 祐二\*\*\*\*

(平成27年10月30日受付)

## Earthquake response analyses of steel rigid frame with various restoring force characteristics of column base

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI, Hiroyuki TAMAI and Yuji ISHIZU

(Received Oct. 30, 2015)

### Abstract

Earthquake response analyses of one-story and one-span rigid frames with various restoring force characteristics of column base are carried out to clarify the influence of the characteristics on response behavior of the frames. The effect of an axial compressive force restricts the yielding moment of the column base and additional bending resistance of axial compression is considered to analyze frames with non-negligible vertical weight.

Analytical results show that the maximum responses of the frames are approximately constant but residual deformation is affected slightly by axial compression.

**Key Words:** column base, earthquake response analyses, restoring force characteristics, rigid frame

### 1. はじめに

現在、鉄骨ラーメン架構の柱脚には、埋込形式柱脚、根巻形式柱脚、露出形式柱脚が多用されており、それに加えて筆者らが提案している、アンカーボルト塑性伸びによって、ベースプレートとアンカーボルトナット間に生じるクリアランスを、楔デバイスによって吸収する事でスリップ現象を生じないノンスリップ型露出柱脚<sup>1)</sup>など、様々な形式の柱脚が存在する。

これらの柱脚はそれぞれ、完全弾塑性型、除荷点指向型、スリップ型、ノンスリップ型の復元力特性を示し、架構全体に与える影響も異なることが考えられる。

本報告では、それぞれの柱脚形式における復元力特性モデルを変数とすることで、柱脚復元力特性がラーメン架構に与える影響を明らかにすることを目的とする。

先ず、2章では、R seriesとして、各柱脚形式を想定した柱脚復元力特性モデルを、回転バネとして柱下端部に配置した1層1スパンラーメンの振動解析を行い、各柱脚形式の復元力特性がラーメン架構に与える影響を示す。3章では、N seriesとして、軸力の影響によって生じるノンスリップ型、スリップ型の柱脚復元力特性の変化がラーメン架構に与える影響を示し、4章に各知見をまとめるものとする。

### 2. 解析概要 (R series)

本解析では、柱脚復元力特性が鉄骨ラーメン架構に与える影響を明らかにするため、各柱脚形式の復元力特性を変数として与えた、1層1スパンラーメン架構モデルの振動解析を行う。

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 広島大学大学院工学研究科

\*\*\* 長崎大学工学部工学科

\*\*\*\* 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

図1に本解析モデルを、図2に今回用いた柱脚復元力特性モデルの模式図を、それぞれ、示す。

解析モデルは、柱に先行して柱脚部と梁端部が曲げ降伏するように設計を行った。さらに、柱脚降伏耐力と比較して梁降伏耐力を小さくし、なおかつ1層1スパンラーメン架構(固有周期 $T=0.385$  s)とすることにより、柱脚復元力特性の影響が大きく現れるようにした。

変数とする柱脚復元力特性は、図2に示すように、柱下端部が塑性化する埋込形式柱脚を想定した完全弾塑性型(P型)、柱下端部には塑性ヒンジを形成せずに根巻コンクリートが曲げ降伏する根巻形式柱脚を想定した除荷点指向型(D型)、アンカーボルトが柱下端部に先行して降伏する露出形式柱脚を想定したスリップ型(S型)、S型と同様にアンカーボルトが先行降伏するノンスリップ型露出柱脚を想定したノンスリップ型(NS型)、の4種類とした。なお、P型、D型は本来、適切な設計を行った場合において、柱脚回転剛性を固定とみなして設計を行うことが出来るものであるが、本解析では、柱脚復元力特性に着目した知見を蓄

積するために、柱脚回転剛性 $K_{BS}$ を全ての柱脚復元力特性で同一の値に設定している。柱脚降伏耐力 $M_y$ も同様の理由により、同一とした。

入力地震波は、EL Centro NS波、Hachinohe NS波、Taft EW波の最大速度を0.5 m/sに基準化したものを用いる。また、全ての柱脚復元力特性モデルにおいて、降伏後の二次勾配は一律に、柱脚回転剛性 $K_{BS}$ に係数0.01を乗じた値とし、減衰は瞬間剛性比例型とし、減衰定数を0.02とした。

### 2.1 解析結果 (R series)

図3に最大変位応答値を、図4に最大速度応答値を、図5に最大加速度応答値を、図6に残留変位を、図7にEL Centro NS波による絶対加速度応答時刻歴を、図8にEL Centro NS波による変位応答時刻歴を、図9にエネルギー

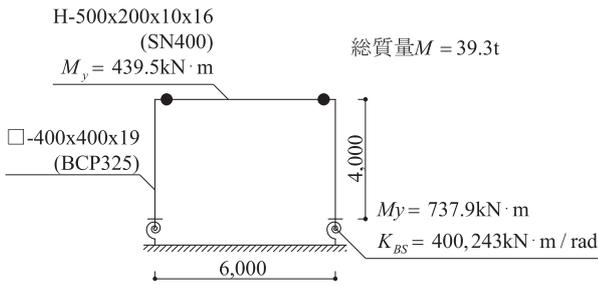


図1 解析モデル

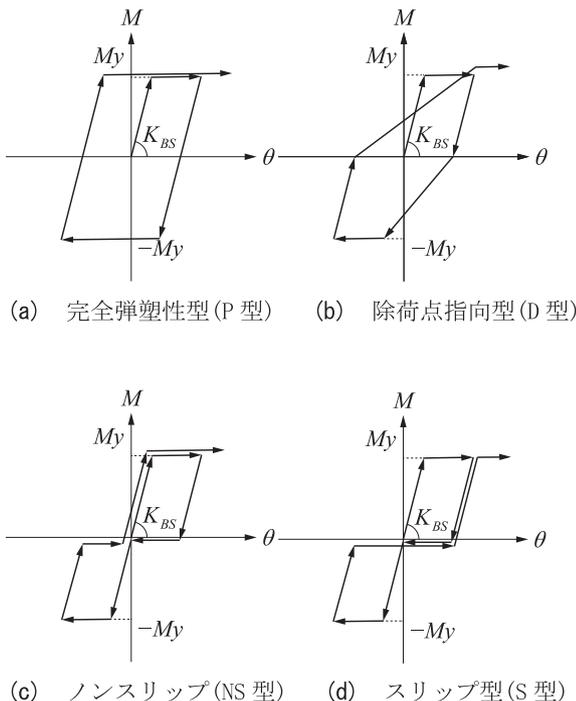


図2 柱脚復元力特性

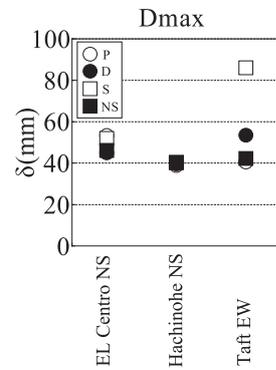


図3 最大変位応答値

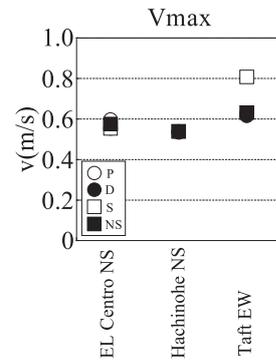


図4 最大速度応答値

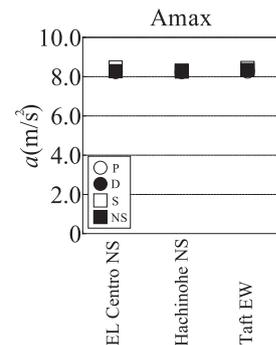


図5 最大加速度応答値

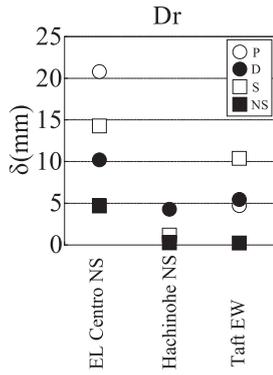


図6 残留変位

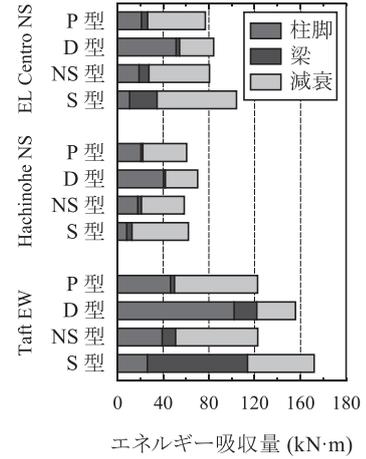


図9 エネルギー吸収量

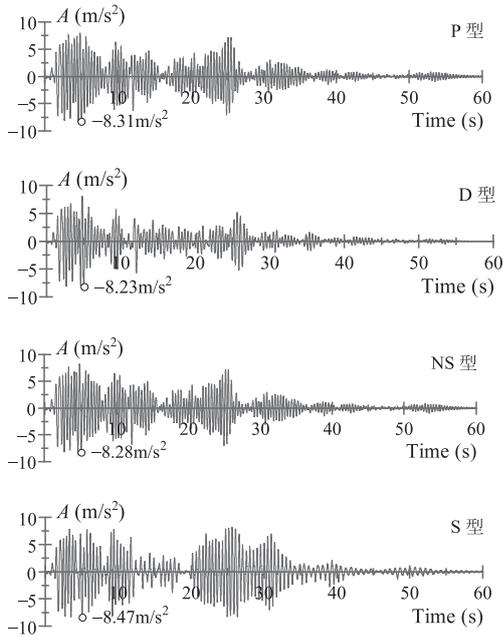


図7 絶対加速度応答時刻歴

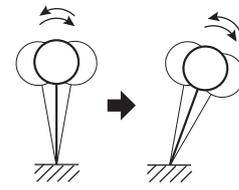


図10 振動状態概略図

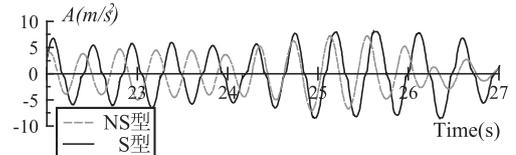


図11 NS型, S型絶対加速度応答時刻歴 (22 s~27 s)

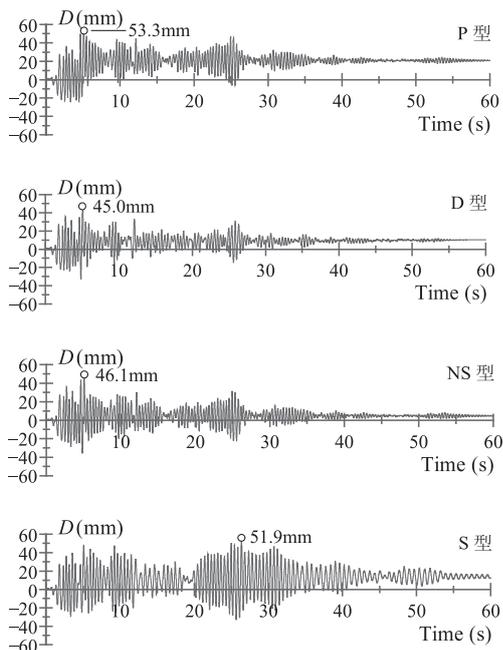


図8 変位応答時刻歴

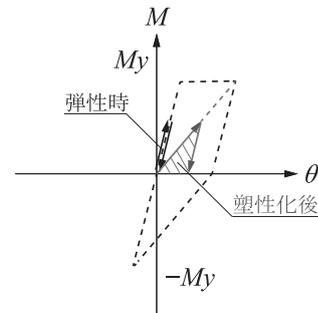


図12 D型小振幅時模式図

吸収量を、図10に架構傾斜時の振動状態概略図を、図11に図7より抜き出した22~27sの応答性状を、図12にD型の小振幅時における復元力特性模式図を、それぞれ、示す。

## 2.2 最大応答 (R series)

まず、図3、図4、図5より、いずれの柱脚形式においても最大変位応答値、最大速度応答値、最大加速度応答値は概ね等しい値を示す傾向があることがわかる。既往の研究においては、除荷点指向型とスリップ型の復元力特性の違いによって架構の応答性状に影響を与えない事が明らか

にされている<sup>2)</sup>が、本解析結果より、P型、NS型においても、柱脚降伏耐力と柱脚回転剛性が等しいことによって、同様の結果が得られることが分かる。なお、Taft EW波を入力したS型の最大変位応答値のみ、他の柱脚復元力特性と比較して突出して大きな値を示していたが、これは、柱脚が降伏した際、図10に簡単な1質点系モデルで示すように、架構全体が大きく傾斜したまま、その地点で振動を行ったためであると考えられる。

柱脚が塑性変形を生じる以前の挙動は、柱脚回転剛性 $K_{BS}$ 、柱脚降伏耐力 $M_y$ が等しく、架構の構成も等しいために全ての解析モデルで違いはない。しかしながら、図7より、最大絶対加速度応答値を示した5s付近以降においては、P型とNS型は概ね等しいものの、D型及びS型の応答性状には明瞭な違いが現れている。

この理由として、P型及びNS型については、柱脚が大きな塑性変形を生じた後においても、柱脚の載荷時の回転剛性は初期剛性 $K_{BS}$ と等しいために、架構全体の挙動もほとんど同じものとなった。

これに対し、D型は柱脚塑性化後の載荷時の回転剛性が除荷点を指向するために、初期剛性 $K_{BS}$ と比較して低い剛性を示すこととなる。S型においては、柱脚塑性化後は、一度塑性化した区間においてはスリップ現象を生じるために、ピン柱脚と同様の挙動を示し、回転剛性が0となる。これらの柱脚復元力特性の違いによって、柱脚固定度が低下することで、架構全体の剛性が変化し、挙動に差が生じたものと考えられる。

また、図8より、P型、D型、NS型は、絶対加速度応答値を示した5s付近で最大変位応答値を示しているのに対し、S型のみ26s付近で最大変位を示している。これは、上述した柱脚塑性化後に生じるスリップ現象によって、柱脚固定度が低下し、図11に示すように架構の固有周期が長くなる事によるものである。本解析モデルのように固有周期が短く、柱脚固定度による剛性の低下が想定され、主要動が複数ある地震が生じた場合では、架構の固有周期が地震波の持つ卓越周期に近づくために、大きな応答が生じたと考えられる。

### 2.3 エネルギー吸収量

次に、エネルギー吸収量について述べる。図9は、各地震波入力終了後の柱脚及び、梁のひずみエネルギー吸収量、解析モデルの減衰エネルギー量を示したものである。

柱脚及び梁のひずみエネルギーの合計としては、D型が最も大きい結果となった。D型が、P型、NS型と比較してひずみエネルギー吸収量が大きくなる理由は、柱脚復元力特性に因るものだと考えられる。

D型の柱脚復元力特性は、図12に示すように、弾性時に

においては載荷剛性と除荷剛性が等しいものの、一度塑性化すると、載荷時の回転剛性は除荷点を指向するために、初期剛性とかわらない剛性を常に有している除荷剛性と差が現れ、P型、NS型の柱脚や梁が弾性に保たれる小さな振動時においても、D型は履歴面積を生じ、ひずみエネルギーを吸収する。このため、D型のひずみエネルギー吸収量が一番大きくなったと考えられる。

S型においては、柱脚の塑性化後はスリップ現象によって履歴面積を生じず、他の柱脚復元力特性と比較して効率よくひずみエネルギー吸収を行うことが出来ない。そのため、S型は他の柱脚形式と比較して、柱脚ひずみエネルギー吸収量が小さくなり、梁に大きな塑性変形が生じる傾向が見られた。

P型と比較し、NS型を用いたモデルのひずみエネルギー吸収量は、架構の挙動は等しいものの、梁が吸収したエネルギーの割合が増加していた。これは、NS型の柱脚復元力特性モデルは第2、4象限において履歴面積を生じず、除荷が終了した地点から原点に戻るまでは柱脚は抵抗しないために、柱脚のひずみエネルギー吸収量がP型と比べて小さくなり、梁のエネルギー吸収の割合が増加したものと考えられる。

### 2.4 残留変位

次に、残留変位について述べる。図6より、P型、D型の残留変位が最も大きく、NS型が最も小さいという傾向が見られた。

露出柱脚はスリップ型の復元力特性を示し、回転角を0とするのに荷重を必要としないため、一般には残留変位の低減に有利であるとされている。しかし、S型柱脚復元力特性モデルは、柱脚塑性化後はスリップ現象によってモーメントに抵抗できず、ピン柱脚として挙動する。そのため、架構の残留変位量は梁の変形量に依存しやすく、本解析モデルのような梁に塑性ヒンジを形成するモデルにおいては残留変位にばらつきが生じた。

P型、D型は塑性変形が一方向に偏る場合、大きな残留変位を生じる傾向にあった。これは、柱脚復元力特性の性質上、柱脚回転角が0に戻るような挙動を示すことはなく、一度一方向に塑性変形を生じた場合、柱脚はその地点を原点として振動を行うためである。

NS型は図2に示す柱脚復元力特性の $M-\theta$ グラフでみると、復元力特性の性質上、第1象限に履歴面積を生じた後に第3象限へと向かう際に、一度原点に戻った後に抵抗を開始する。そのため、正負交番載荷時において、NS型は常に原点を指向し、原点を中心として振動を行う。そのため、本解析モデルのような梁が損傷する場合であっても、架構は大きな残留変位を生じにくいといえる。

### 3. 解析概要 (N series)

本章では、軸力による付加曲げの影響を考慮したNS型柱脚復元力特性とS型柱脚復元力特性を用いて2章と同様な振動解析を行い、軸力による柱脚復元力特性の変化が、架構の応答性状に与える影響を検討する。

図13に付加曲げを考慮した柱脚復元力特性モデルを示す。

S型とNS型は軸力の影響によって生じる付加曲げ抵抗により、柱脚復元力特性が大きく変化する。この柱脚復元力特性の変化が架構の応答性状に与える影響を調べることを、本解析の目的とする。そのため、軸力による付加曲げモーメント  $M_N$  が柱脚降伏耐力  $M_y$  を占める割合を変数とする。なお、付加曲げモーメント  $M_N$  が柱脚降伏耐力  $M_y$  を占める割合を  $\alpha$  とし、 $\alpha=0.00, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40$  として、次式によって柱脚降伏耐力の内訳をそれぞれ求める。

$$M_y = M_N + M_y' \quad (1)$$

$$M_N = \alpha \cdot M_y \quad (2)$$

$$M_y' = (1-\alpha) \cdot M_y \quad (3)$$

$M_y$ : 付加曲げの影響を考慮した柱脚降伏耐力 (kN.m)

$M_N$ : 柱脚付加曲げ抵抗 (kN.m)

$M_y'$ : アンカーボルトにのみ起因する柱脚降伏耐力 (kN.m)

本解析の柱脚復元力特性モデルは、軸力による柱脚への影響を柱脚復元力特性の変化に限定するために、図13に示すように、2章と同様に柱脚降伏耐力  $M_y$  を全てのモデルで同一の値とし、原点から柱脚アンカーボルト降伏点までを結んだ割線剛性が、全ての柱脚復元力特性で等しくなるように調整を行った。なお、入力地震波、減衰定数等も R series と同様である。

#### 3.1 解析結果 (N series)

図14に最大変位応答値を、図15に最大速度応答値を、図16に最大加速度応答値を、図17に残留変位を、図18に  $\alpha =$

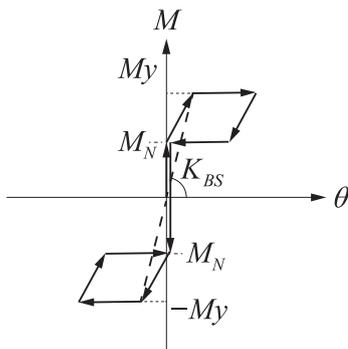


図13 柱脚復元力特性モデル

0.10, 0.40とした場合の絶対加速度応答時刻歴を、図19に  $\alpha=0.10, 0.40$ とした場合の変位応答時刻歴を、図20に柱脚部と質点位置のモデルを、それぞれ、示す。

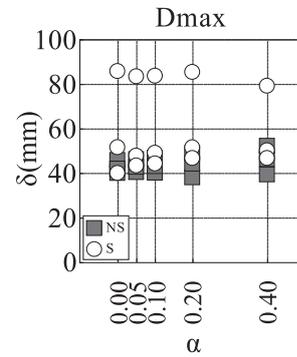


図14 最大変位応答値

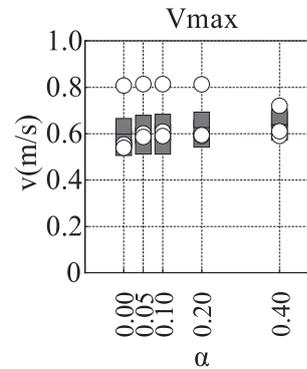


図15 最大速度応答値

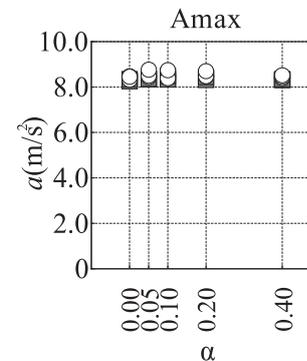


図16 最大加速度応答値

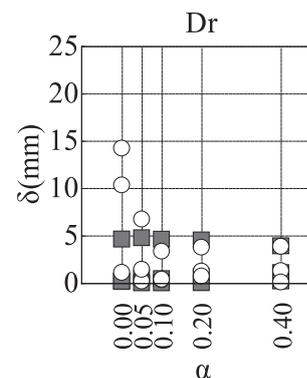


図17 残留変位

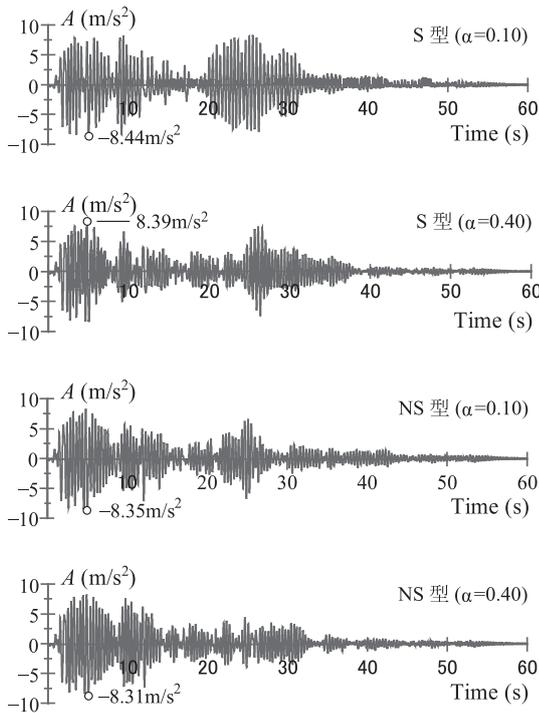


図18 絶対加速度応答時刻歴 ( $\alpha=0.1, 0.4$ )

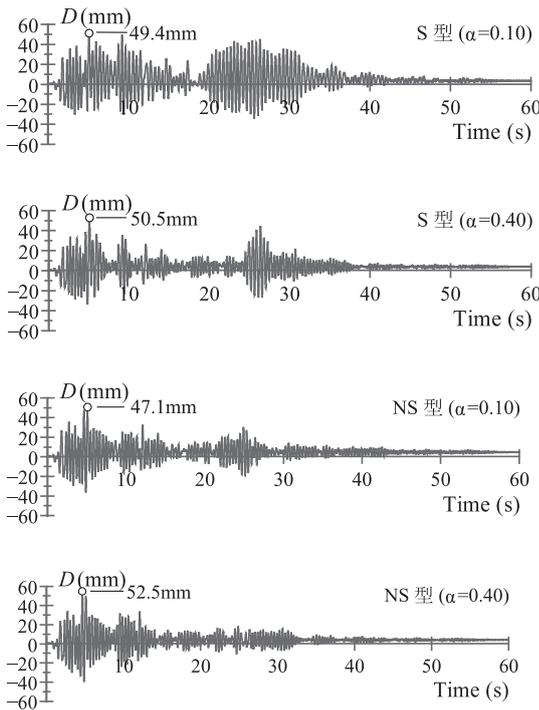


図19 変位応答時刻歴 ( $\alpha=0.1, 0.4$ )

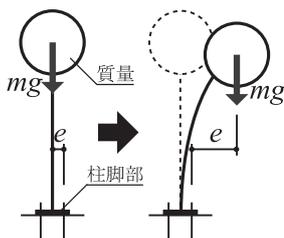


図20 柱脚, 質点モデル

### 3.2 最大応答 (N series)

図14, 図15, 図16より, 軸力による付加曲げによって生じる柱脚復元力特性の変化の大小に関わらず, 最大変位応答値, 最大速度応答値, 最大加速度応答値は概ね等しいことがわかる。これは, 2章において述べた, 柱脚復元力特性の差異は架構の最大応答値には大きな影響を与えることはないという結果と同様に, 軸力による柱脚復元力特性の変化を考慮せずとも, 柱脚回転剛性, 柱脚降伏耐力が等しい場合の最大応答値は, 常に一定であるといえる。なお, 図14中にてS型の1つが突出して大きい値を示しているが, これは入力地震波を Taft EW 波としたモデルであり, 2章にて述べた架構が傾斜した状態で振動を行ったことによって生じたものである。

最大応答値が柱脚復元力特性に関わらず, 一定であるという知見から, 振動解析の目的のひとつである最大応答値を求めるために必要な柱脚の設定は, 柱脚回転剛性, 柱脚降伏耐力を適切に評価することが必要であるといえる。逆説的に述べると, 柱脚回転剛性, 柱脚降伏耐力さえ適切に評価が出来れば, 簡便な柱脚復元力特性を用いた場合においても, 最大応答値を求めることが出来るといえる。ただし, 本解析では変動軸力によって柱脚が引張領域となる際に生じる復元力特性の変化による影響などを考慮しておらず, 柱脚復元力特性が架構に与える影響を網羅したとは言えないため, 更に詳細な検討が必要となる。

図18より, 付加曲げの影響の大きさを表す  $\alpha$  が0.10である場合は, S型, NS型ともに, 図7と比較して明瞭な違いは現れなかった。しかし,  $\alpha$  を0.40として付加曲げの影響が大きくなった場合では, 特に最大加速度応答値を示した後のS型の応答は明らかに低減された。これは, 付加曲げ領域が広がったことによって, 柱脚降伏後に生じるスリップ現象による柱脚固定度の低下が抑えられたことに起因すると考えられる。NS型は  $\alpha$  を0.40とした場合においても, 応答性状に大きな変化は見られない。これは, NS型は付加曲げの影響を考慮しない場合においてもスリップ現象を生じず, 回転剛性  $K_{BS}$  を有し続けるために, 付加曲げを考慮したことにより生じる, 付加曲げ領域内における剛性の上昇による影響が現れにくいためである。

付加曲げの影響を考慮し, 原点から等しい回転剛性を有している場合においても S型と NS型の応答性状は差が生じている。これは, 柱脚の付加曲げ領域を超えない振動範囲であれば柱脚回転剛性は等しく, 同様の挙動を示すと考えられるが, 付加曲げ領域を逸脱すると S型はスリップ領域へと達するために, 架構の剛性が低下して応答性状が異なると考えられる。

図19より, 最大変位応答値は全ての解析モデルにおいて 5 s 付近で示している。最大加速度応答値も, 図18より, 5

s付近で生じており、最大加速度を示した時間と最大変位を示した時間は、概ね一致しているといえる。R seriesでは最大加速度を示した時間と異なる時間で最大変位を生じていたが、付加曲げの影響を考慮することによって、柱脚固定度の低下を抑えることとなり、柱脚塑性化後に生じる架構の剛性の低下を和らげることが出来ることがわかる。

### 3.3 残留変位 (N series)

次に、図17より、残留変位は、付加曲げの影響によって生じる柱脚復元力特性の変化を考慮した場合、考慮しない場合と比較して大幅な低減が見られた。S型は、付加曲げ抵抗の柱脚降伏耐力を占める割合が増加するにつれて残留変位が低減されたが、付加曲げ抵抗  $M_N$  を柱脚降伏耐力  $M_y$  の1割とした以降のモデルではほぼ一定の値を示した。文献3では軸力の影響による残留変位の影響はないと示されているが、本解析モデルのように元々大きな残留変位を示す架構に対しては、明確に残留変位の大小に影響した。この理由として、S型は付加曲げの影響を考慮しない場合においてはスリップ現象を生じ、原点から即座に抵抗することは出来ないものの、付加曲げの影響を考慮することで柱脚回転角0の状態から抵抗する挙動を示す事となるため、残留変位が小さくなったと考えられる。

また、NS型においては付加曲げの影響による柱脚復元力特性の変化によらず、残留変位はほぼ一定の値を示した。これは、NS型は、軸力を考慮しない場合においても振動によって原点に常に戻り、再載荷時には即座に抵抗するために、付加曲げの影響を加味しても大きな変動は見られなかった。

これらの事から、柱脚に生じる軸力による柱脚復元力特性の変化は残留変位に大きな影響を示し、大きな軸力が生じる架構では単にS型とした場合に対して架構の残留変位は小さい結果が得られた。

ただし、上部架構から生じる軸力が小さい場合、付加曲げ抵抗が柱脚復元力特性に与える影響も、当然、小さいために、軸力が小さい低層鋼構造物などに対してはNS型の復元力特性を示す柱脚を用いる事が望ましい。

また、過度に大きな変位応答を生じる場合には、図20に示すように、軸力の作用位置が一方に偏ることで柱脚回転中心位置を超過し、軸力による付加曲げモーメントが柱脚回転角の増大を助長することも考えられるため、常に残

留変位低減に効果的であるとは言えない。

## 4. まとめ

柱脚復元力特性を変数とした1層1スパンラーメン架構の振動解析を行い、以下の知見が得られた。

1. 最大応答値は、いずれの柱脚復元力特性を用いた解析モデルにおいても、ほぼ等しい値を示した。これは、軸力を考慮したS型、NS型についても同様であり、解析モデルの柱脚部は、柱脚降伏耐力  $M_y$ 、柱脚回転剛性  $K_{BS}$  を適切にモデル化して振動解析を行うことで、簡便な柱脚復元力特性モデルを用いても架構の最大応答値を概ね評価する事が出来る。
2. 最大応答値を示した後の応答性状は、各柱脚復元力特性によって異なった。これは、柱脚固定度の低下によって架構全体の剛性が低下することによるものであり、柱脚回転剛性の低下が著しいものである場合においては、最大加速度応答値と最大変位応答値が生じる時間に差が生じており、小さな加速度でも架構は大きな応答を示す可能性がある。
3. 残留変位は、NS型が一番小さく、P型、D型、S型は大きくなる傾向にあったが、軸力を考慮した場合、S型は残留変位の低減が見られ、NS型と同等の残留変位量となった。ただし、この知見は軸力による付加曲げの影響が十分に大きい場合の知見であり、低層鋼構造物などの場合、軸力による付加曲げを考慮出来ない場合もあるため、ノンスリップ型の復元力特性を示す柱脚を採用することが望ましいといえる。

## 文 献

- 1) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗: ノンスリップ型鉄骨露出柱脚の復元力特性モデル, 構造工学論文集, Vol. 51B, pp. 293-302, 2005.4
- 2) 河野昭雄, 松井千秋: 柱脚の復元力特性の違いがはり降伏型鉄骨ラーメンの地震応答性状に与える影響について, 日本建築学会構造系論文集, 第507号, pp. 139-146, 1998.5
- 3) 河野昭雄: 露出柱脚に作用する一定柱軸力の大きさが鋼ラーメン骨組の残留変位に与える影響, 日本建築学会九州支部研究報告, 第45号, pp. 461-464, 2006.3