

ノンスリップ型露出柱脚を有する架構の損傷分布について

山西 央朗*

(令和7年10月31日受付)

Distribute of damage for steel structure with non-slip-type exposed column-base

Teruaki YAMANISHI

(Received October 31, 2025)

Abstract

Anchor-bolt-yield-type exposed column-bases exhibit slip behavior in their elasto-plastic hysteresis, which may promote plasticity at the top of the first-story columns. In contrast, a non-slip-type exposed column-base equipped with a wedge device suppresses the loosening caused by the plastic elongation of anchor bolts. By eliminating slip behavior, this type of column base is expected to enhance the energy dissipation efficiency of the first story and reduce deformation responses after yielding.

In this study, time-history response analyses are conducted on four-story frames incorporating either non-slip-type exposed column-bases or anchor-bolt-yield-type exposed column-bases. The effectiveness of the non-slip-type in mitigating plasticity at the top of the first-story columns is examined through comparisons of the required column-to-beam strength ratio at the first-story upper joint as well as the overall damage distribution of the frame.

Key Words: *exposed column-base, non-slip-type, double-flag-type, Distribute of damage*

1 序論

アンカーボルト降伏型露出柱脚は、弾塑性領域の履歴形状がダブルフラッグ型を示す。このような履歴形状により、第一層上節点における梁降伏型を実現するための必要柱梁耐力比が増加する傾向にあることが、時刻歴応答解析結果に基づいて説明されてきた^{例え1, 2)}。

また著者は、弾塑性領域の除荷時履歴形状に着目し、露出柱脚の最大耐力に対する付加曲げ耐力の比が大きいほど、第一層柱上端の塑性化が助長される可能性があることを、力学的観点に基づいて説明している³⁾。これは、鋼構造物の柱および梁の紡錘型履歴形状と、露出柱脚のダブルフラッグ型履歴形状の差異に起因して生じる。

一方、著者はアンカーボルト降伏型露出柱脚に楔デバイスを設置し、アンカーボルトの塑性伸びに伴う緩みを抑制することでスリップ現象（弾塑性領域載荷時に現われる著しい耐力劣化）を解消した”ノンスリップ型露出柱脚”の研究も行っている^{例え4)}。ノンスリップ型露出柱脚は、スリップ現象を解消することで第一層のエネルギー吸収効率が向

上すること、塑性化した後の変形応答低減が期待できる⁵⁾。

この様に、ノンスリップ型露出柱脚は履歴形状の違いにより、アンカーボルト降伏型露出柱脚と比較して明らかに構造的な性能が向上することが期待できる。そこで、本論文ではノンスリップ型露出柱脚の優位点を更に追跡することを目的として、第一層上節点における必要柱梁耐力比との相関関係を検討する。

具体的には、ノンスリップ型露出柱脚、およびアンカーボルト降伏型露出柱脚を有する4層架構の時刻歴応答解析を行い、第一層上節点の必要柱梁耐力比、または架構全体の損傷分布を比較することで、ノンスリップ型露出柱脚による影響を検討する。

2 ノンスリップ型露出柱脚の履歴形状

図1にノンスリップ型露出柱脚とアンカーボルト降伏型露出柱脚の履歴形状の模式図を示す。

図1(a)より、ノンスリップ型露出柱脚は塑性化を被った後においても、載荷時にスリップ現象が現われることが無い。このため、載荷時は常に同一の軌跡を辿ることになる。但し、弾塑性域の除荷時においては、アンカーボルト

* 広島工業大学 工学部建築工学科 准教授・博士(工学)

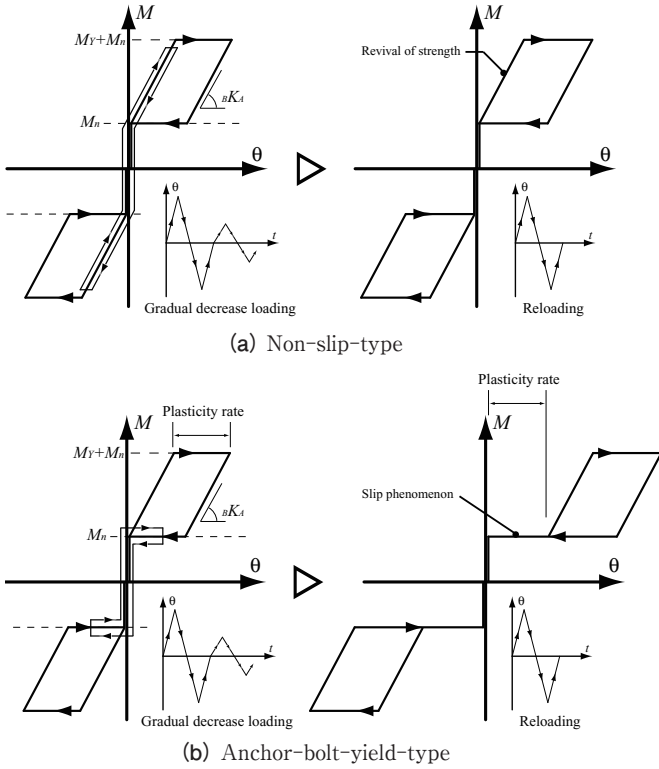


Fig.1 Hysteresis shaped of column-base

降伏型柱脚を同じくスリップ現象が生じる。

図1 (b) より、アンカーボルト降伏型露出柱脚では塑性化を被ると、塑性率に応じて荷重時にスリップ現象が現われる。このため、塑性率によって荷重時の耐力劣化=スリップ現象の領域が進展していく。このため、例えば、ノンスリップ型露出柱脚と同一のエネルギー吸収を果たそうとする場合、ノンスリップ型露出柱脚より大きなベースプレート回転角を要することになる。

3 必要柱梁耐力比³⁾

露出柱脚の除荷時の履歴形状に着目した、必要な柱梁耐力比を表した一般式を以下に示す。

まず、図2 に弾塑性領域の除荷時履歴形状を示す。a は露出柱脚、b は第一層柱上端、c は第二層柱下端、そしてd は第一層上梁の履歴形状である。除荷点を原点とする座標系を設けて、この履歴形状の変化による影響を、図3 に示す単一柱モデル⁶⁾を用いて追跡すると、第一層上における梁降伏条件式は以下となる。

$$M_{1-R-P} < \frac{1}{4} \cdot \left(1 + \frac{\bar{M}_{2-B}}{M_{1-T}}\right) \cdot \left[(\bar{M}_{1-T} + M_{1-PC}) \cdot M'_{1-T} \right] + \frac{1}{2} \cdot M'_{1-R} \quad (1)$$

$$\bar{M}_{1-T} = 12 \cdot \frac{W}{\sum_{n=1}^j \bar{K}_{sys-1}} \cdot \frac{1}{H_1} \cdot \frac{1}{\frac{4}{k_{1-C}} + \frac{12}{k_{1-T}}} \quad (2-a)$$

$$\bar{M}_{2-B} = M_{2-B} \quad (2-b)$$

$$M'_{1-T} = (M_U - M_n) \cdot \frac{\frac{1}{2} + \frac{1}{k_{1-C} + k_A}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{k_{1-C} + k_{1-T}}} \quad (2-c)$$

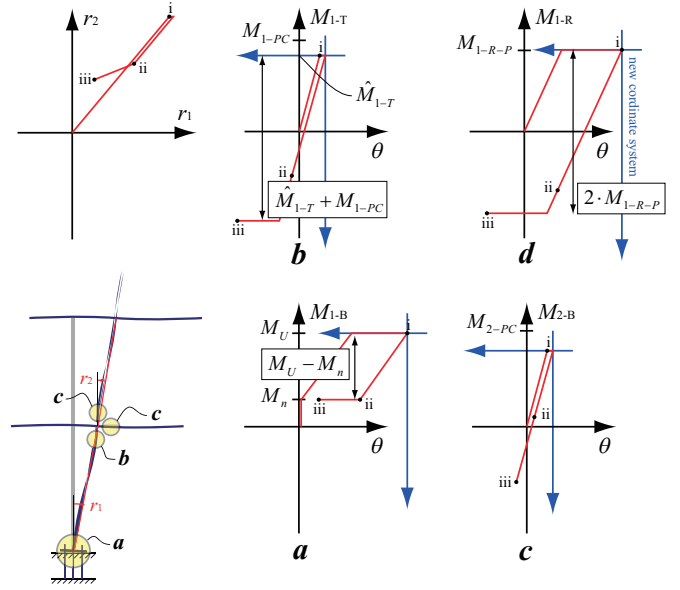


Fig.2 Hysteresis of column-base, beam column on elasto-plasticity region

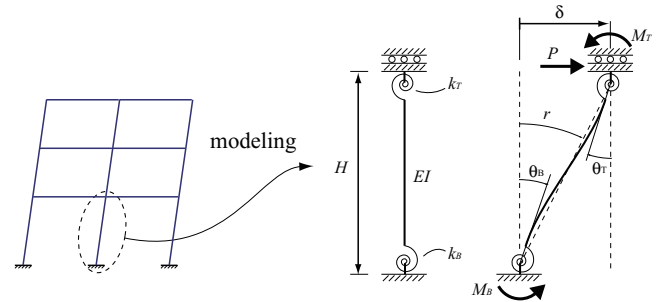


Fig.3 Abbreviated calculation model & geometry symbols

$$M_{1-T} = \frac{Q_{0-1}}{\sum_{n=1}^j n K'_{sys-1}} \cdot \frac{1}{H_1^2} \cdot \frac{\frac{1}{2} + \frac{1}{k_C + k_A}}{\frac{1}{12} + \frac{1}{k_C^2 + k_C \cdot k_A} + \frac{1}{3} + \frac{1}{k_C \cdot k_T} + \frac{1}{k_A \cdot k_T}} \quad (2-d)$$

$$M'_{1-R} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{M_{2-B}}{M_{1-T}}\right) \cdot (M_U - M_n) \cdot \frac{\frac{1}{2} + \frac{1}{k_{1-C} + k_A}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{k_{1-C} + k_{1-T}}} \quad (2-e)$$

ここに、H: 階高、 k_C : 柱の曲げ剛性を材長で除した値 (= EI/H)、 Q_{0-1} : 層せん断力の分布比 ($Z \cdot R_1 \cdot C_0$ で除して基準化)、 K_{layer} , K_{sys} : 層、単一柱モデルの水平剛性、 θ_T , θ_B : 回転バネ回転角、 α_F : 節点の上柱下端、下柱上端の存在応力比の比率、 M_{1-R-P} , M_{1-PC} : 節点の右梁 (または左梁)、第一層柱の全塑性耐力、 M_{1-B-Y} : 柱脚の曲げ降伏耐力、 M'_{1-T} : 柱脚降伏時柱上端の存在応力、 M_{1-T} , M'_{1-R} : 柱脚曲げ降伏時の第一層柱上端および右梁端の存在応力、 \bar{M}_{1-T} , M_{2-B} : 柱脚降伏後の層剛性変化を考慮した第一層柱上端および右梁端の応力増分値、 \bar{K}_{sys} : 柱脚降伏後の水平剛性 k_A : アンカーボルトの伸び剛性に基因した回転剛性、 $n K'_{sys-1}$: 第一層の水平剛性を $k_B \Rightarrow k_A$ として算出した値である。

4 時刻歴応答解析

4.1 露出柱脚のモデル化

次に、露出柱脚は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 が生じる構造となり、その履歴は図1に示すダブルフラッグ型と呼ばれる軌跡を描く。付加曲げ抵抗 M_n に達した後にアンカーボルトの伸び変形に基因した剛性 K_A を示し、その後以降伏を迎える。

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(弾性体)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、ノンスリップ型、アンカーボルト降伏型を表現するために、図5に示すようにアンカーボルトの抵抗特性を調整する。これにより、図5(a)を有する場合は図1(a)、図5(b)を有する場合は図1(b)の履歴形状を示す。

4.2 解析変数

次に、図6に示す構造モデルを対象とし、柱脚の履歴形状、柱梁耐力比、水平加速度を変数として時刻歴応答解析を実施する。尚、柱脚の構造性能は1条件に限定し、その代表的な値を表1に示す。柱脚耐力比を0.7とするディテールを採用している。次に、構造モデルの部材リストを表2に示す。当該部材配置であれば、柱梁耐力比が概ね1.5となる。また、地域係数 $Z=1.0$ 、振動特性係数 $R_t=1.0$ 、標準せん断力係数 $C_0=0.2$ とし、固有値解析から求めた1次固有周期 $=0.724$ (s) により A_1 分布を算出して得た層間変形角 r 、剛性率 R_s を表3に示す。層間変形角は1/200未満であり、かつ剛性率は0.6以上を示している。1次設計の範囲から見ると層間変形角が抑えられており、かつ最上層の剛性率が1.24と高く、やや過剰設計ではあるが、極端にバランスの崩れた構造物ではないことが分かる。

当該構造物に対して、全柱の降伏応力度を一律に定数倍することで柱梁耐力比を調整している。変数の割り振りは、柱梁耐力比 $=1.0 \sim 2.0$ 間を0.1刻みとしている。

また、水平加速度は表3に示すものを入力する。また、鉛直加速度として重力加速度を一定として入力している。

露出柱脚は、ダブルフラッグ型の履歴形状を表現するために図7の構造モデルを用いる。

4.3 解析諸条件

解析には「任意形状立体フレームの弾塑性解析ソフト SNAP Ver.6.0」を用い、時間刻み0.005秒、減衰定数はレーリー型で $h=0.02$ とする。表2に示す部材の断面積、断面二次モーメント、塑性断面係数を入力する。尚、2次勾配

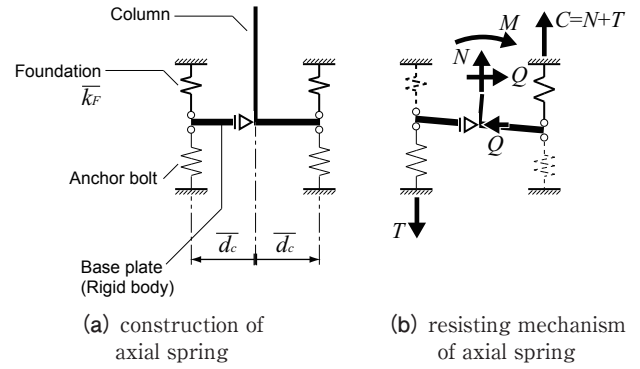


Fig.4 Exposed column-base structural model

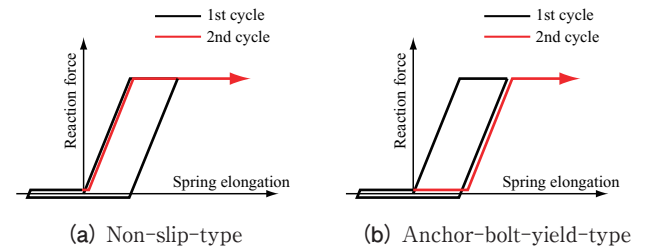


Fig.5 Spring properties

を1/100とする移動硬化則が再現されている。また、床スラブの合成効果を表現するために梁のヤング係数を1.5倍とし、各質量は柱梁接合部に集約して配置する。

5 解析結果と考察

解析結果として中柱 X3 の値、柱梁耐力比 1.4 を代表値として示す。図8に第一層層せん断力 - 層間変形角関係と露出柱脚の復元力特性を、図9に最大せん断力、層エネルギー吸収量の分布を、図10に構造物全体のエネルギー吸収分布の一例を、図11に最大層間変形角分布の変遷を、図12、13に第一層上節点における第一層柱上端の地震終了時エネルギー吸収量に対する同一節点に取り付く部材の全エネルギー吸収量の比(以後、第一層柱のエネルギー吸収比) - 耐力比 - 第一層最大層間変形角の偏差を標準偏差で除した値(以後、標準化偏差)関係を、図13、14には柱塑性化の時刻における柱脚、第一層柱上端、第二層柱下端、第一層上梁の復元力特性を示す。

尚、エネルギー吸収量については、復元力特性の履歴面積を積分して算出している。

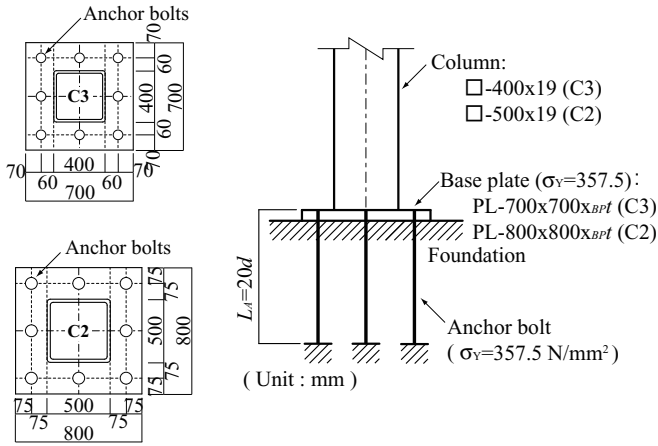
また、図12、13には式(1)を用いて算出した、各条件下の梁降伏条件³⁾(柱塑性化条件)を併記している。

図8より、柱脚の履歴形状は図1に示したものと対応しており、ノンスリップ型、アンカーボルト降伏型露出柱脚の特徴が見て取れる。また、層せん断力 - 層間変形角関係において、概形は近いが、ノンスリップ型は X 軸切片周りの履歴形状がアンカーボルト降伏型に比較して直線的な軌跡を描いており、エネルギー吸収効率が良いことが読み取れる。

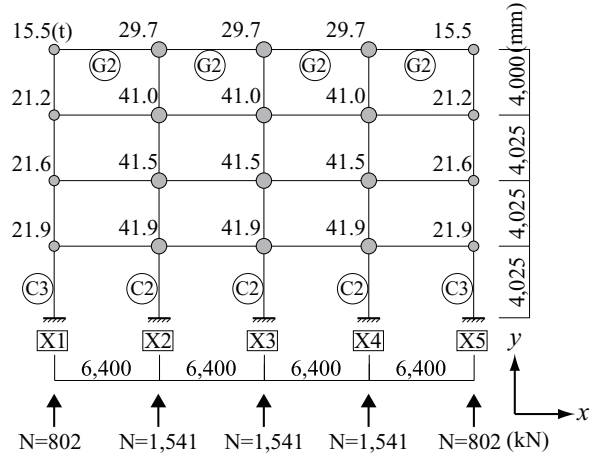
Table 1 Strength ratio, each value for modeling, each strength and stiffness for column-base

α	column	Anchro bolt (A_A mm ²)	BPF	d_c	\overline{K}_F	$\overline{\sigma}_{Y-\alpha}$	$\overline{\sigma}_{Y-\beta}$	$\overline{L}_{A-\alpha}$	$\overline{L}_{A-\beta}$	M_U	K_A	K_S	K_n
			mm	mm	kN/mm	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm	kNm	kNm/rad	kNm/rad	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

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



(a) Ordinary shaped of exposed column-base



(b) Frame detail with each location name

Fig.6 Analysis target frame

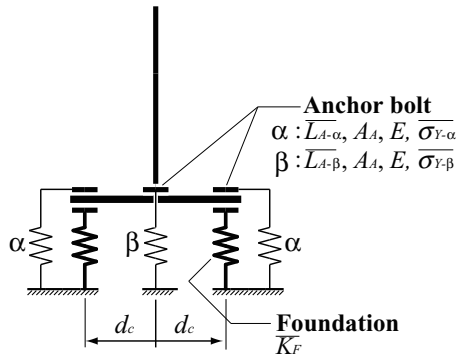


Fig. 7 Each value with model

図9より、最大層せん断力の分布は、柱脚、および水平加速度の違いによらず概ね一定である。一方、架構全体のエネルギー吸収量はアンカーボルト降伏型に比較して、ノンスリップ型はほぼ等しいか、7割程度に低減している。これは、柱脚塑性化後の固有値と入力波の卓越周期の対応によるものと考えている。層方向の分布傾向は、アンカーボルト降伏型においては第一層への損傷集中が顕著であるが、ノンスリップ型はこれを若干低減できている。

図10より、入力波によることなく、ノンスリップ型においては第一層柱上端のエネルギー吸収量が明確に低減していることが読み取れる。更に、柱脚のエネルギー吸収量はノンスリップ型が増大しているものの、その他の部位は、概ねノンスリップ型が低減している。これは、柱脚においてはスリップ現象を解消したことによるエネルギー吸収効率の向上により増大し、またスリップ現象を解消したこと

Table 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 slab = 1.5 x E

Table 3 Calculation results

	A_i (-)	Q_i (kN)	$K_{\text{layer-}i}$ (kN/mm)	r_i (rad)	R_{si} (-)
F4	1.95	2,299	48.4	0.0024	1.24
F3	1.46	4,103	68.3	0.0030	0.99
F2	1.20	5,348	84.0	0.0032	0.93
F1	1.00	6,109	85.7	0.0035	0.83

Table 4 Acceleration list

earthquake	level m/s	max. acc. gal	note
El Centro NS	0.75	765	-
Hachinohe EW	0.75	359	-
Gravity	-	981	UD, constant

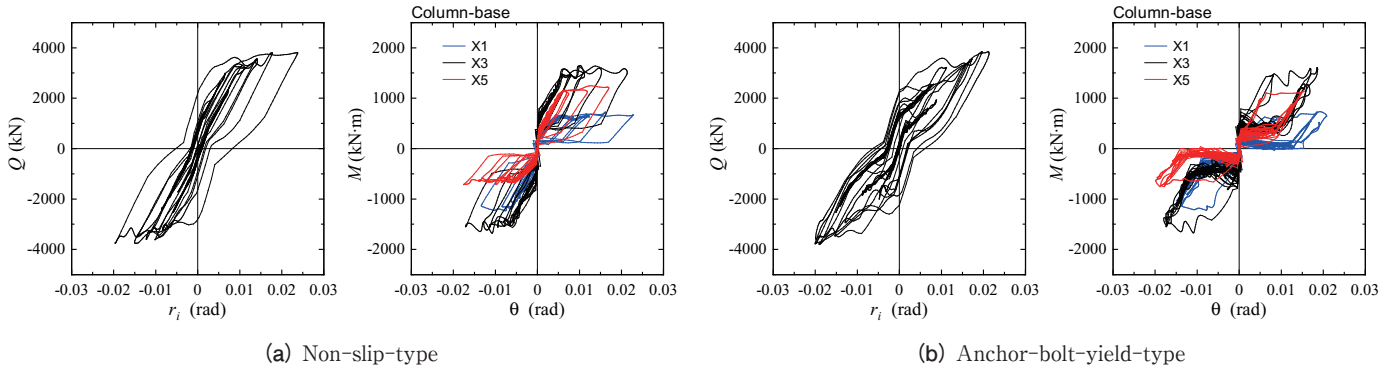


Fig.8 Hysteresis of 1st story shear force v.s. story drift angle and restoring force characteristics of column-base for El centro NS

により変位応答が低減したことにより、その他の部位のエネルギー吸収量を低減させることができたと考えている。

次に、図 11 には耐力比を変化させたときの最大層間変形角分布の推移を示しているが、赤が耐力比 1.0, 青が耐力比 2.0 の値である。当然、耐力比が増大するに従って最大応答は低減する傾向にあるが、一定の耐力比に到達すると低減が緩慢になる、または低減が止まる。全体の傾向として、若干ではあるがノンスリップ型の最大応答が低減されている。

図 12 より、ノンスリップ型はアンカーボルト降伏型よりも早期に柱の塑性化が解消されており、すなわち式 (1) より算出した耐力比より低い値で梁降伏型が実現できていることが読み取れる。標準化偏差の収束位置は明確な優位性は見られないが、アンカーボルト降伏型よりも低い値を示す傾向にあり、第一層の変形集中が緩和できていることが読み取れる。

図 13, 14 より、ノンスリップ型とアンカーボルト降伏型の差異は、スリップ現象の有無であるが、それぞれの (a) は概ねスリップ現象が現われておらず、このため第一層柱上端の履歴形状も近い軌跡を示す。一方、(b) ではスリップ現象の有無により、柱脚の履歴形状が大きく異なっている。これに伴い、第一層柱上端の履歴形状は明らかに異なり、アンカーボルト降伏型では大きく塑性変形が進展している。

このような結果は、図 2 および式 (1) のみでは説明ができないため、今後、継続してノンスリップ型の履歴形状に着目して追跡を行っていく。

尚、第一層柱上端以外の履歴形状は、ほぼ差異が無く、柱脚の影響は第一層柱上端に色濃く現われる傾向にあることも読み取れる。

6 結論

柱脚にノンスリップ型、アンカーボルト降伏先行型を採用し、それぞれの履歴形状が架構の損傷分布に与える影響について検討を行った。得られた知見を以下に示す。

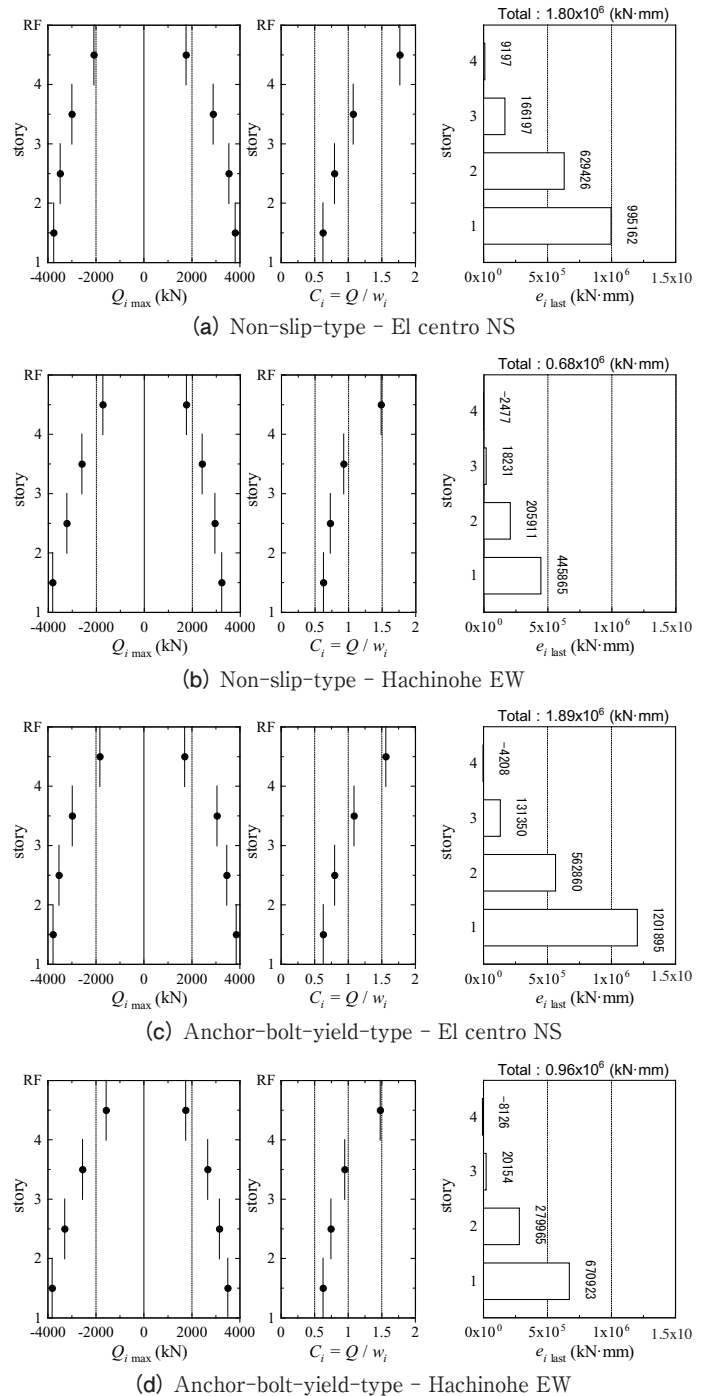
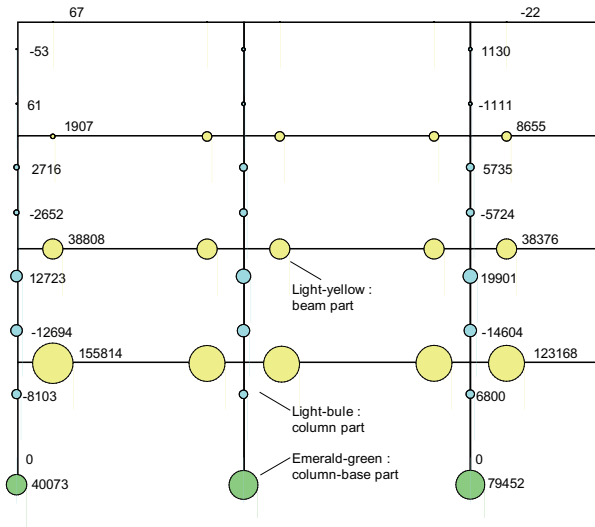
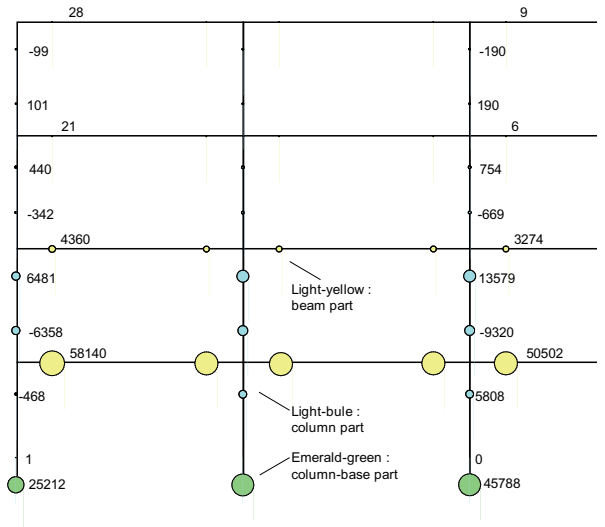


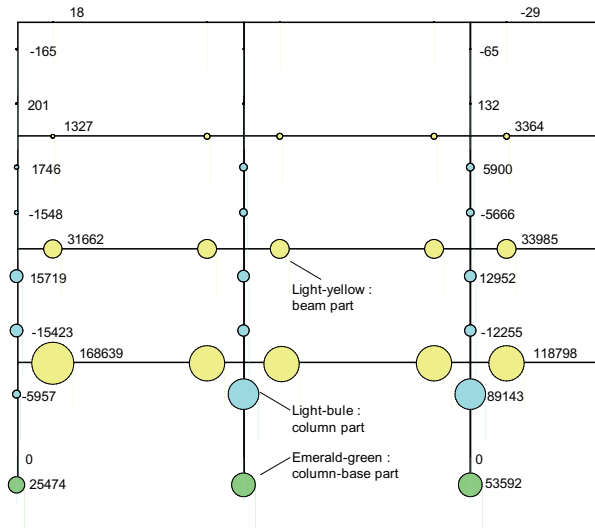
Fig.9 Maximum story shear force plot and story energy absorption plot



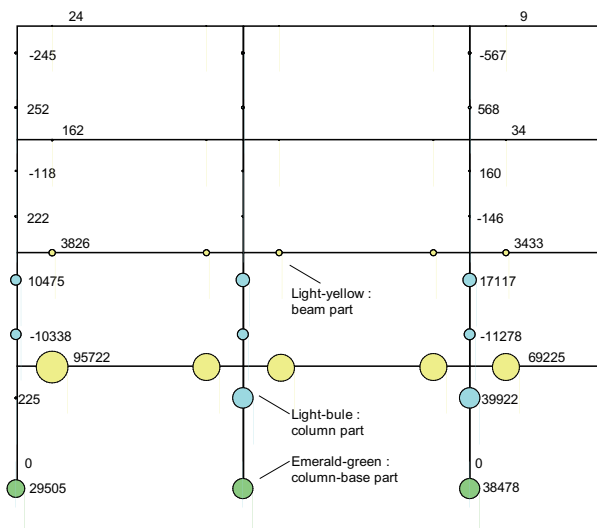
(a) Non-slip-type - El centro NS



(b) Non-slip-type - Hachinohe EW

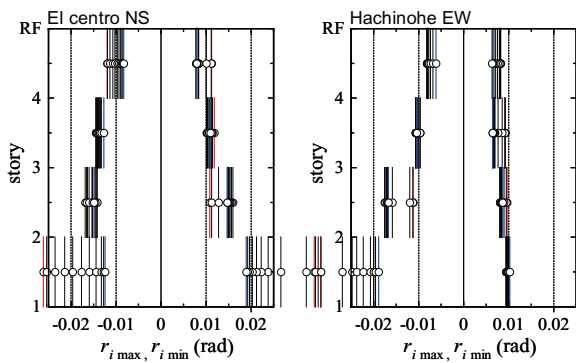


(c) Anchor-bolt-yield-type - El centro NS

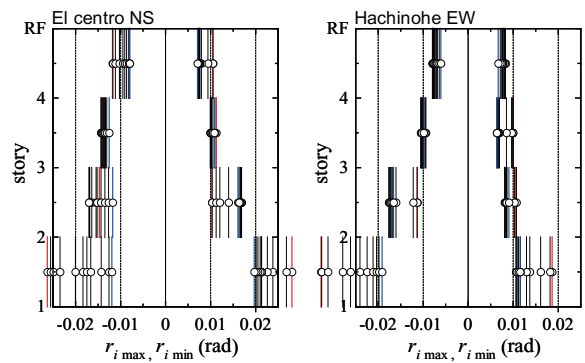


(d) Anchor-bolt-yield-type - Hachinohe EW

Fig. 10 Energy absorption plot



(a) Non-slip-type



(b) Anchor-bolt-yield-type

Fig.11 Maximum story drift angle plot

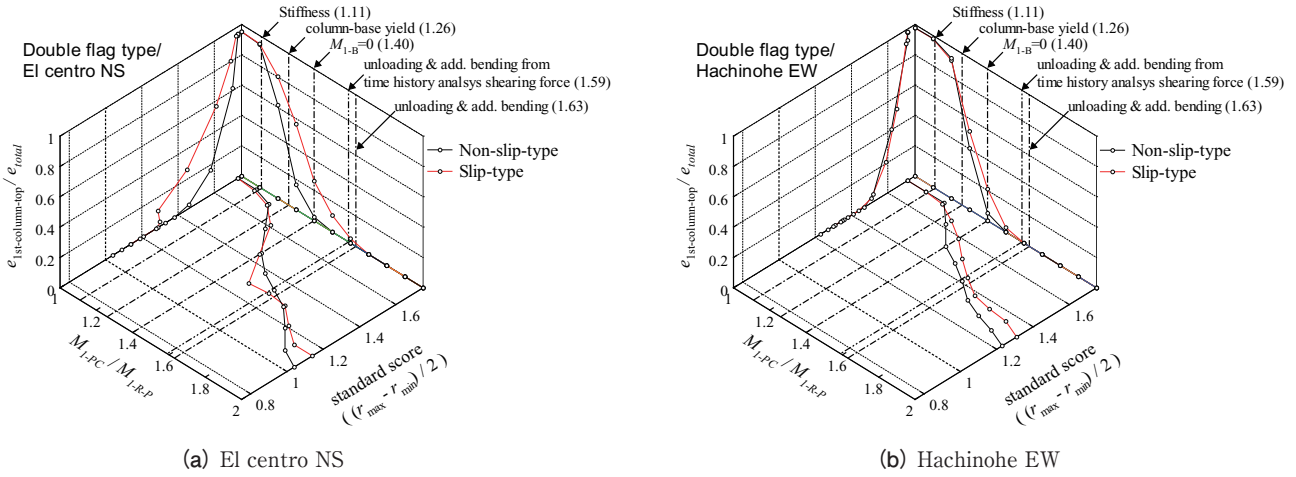


Fig.12 Energy absorption ratio v.s. strength ratio v.s. standard score

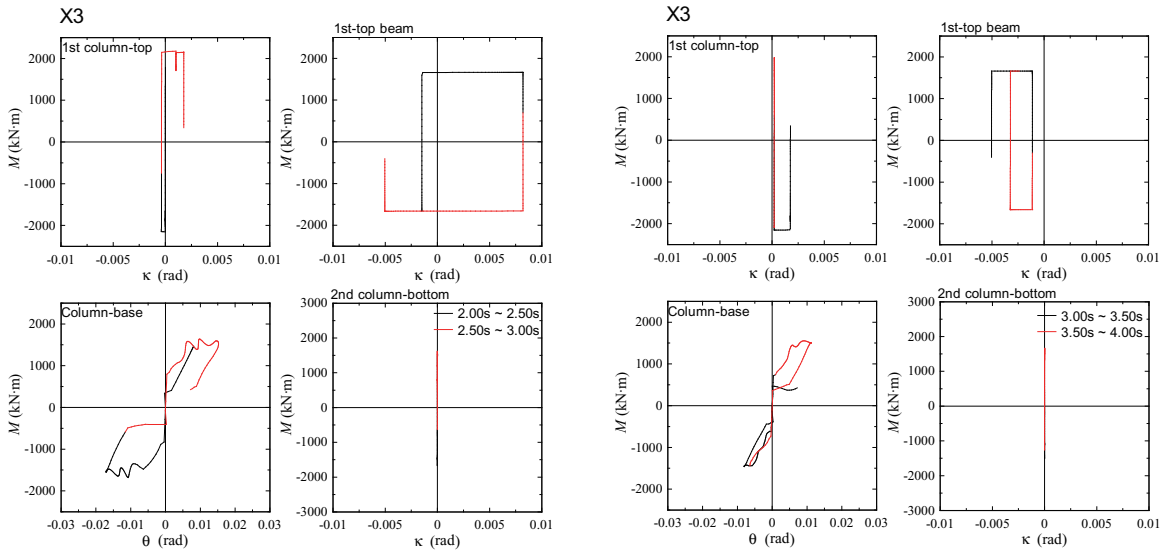


Fig.13 Restoring force characteristics of 1st layer member & 2nd layer column bottom on X3 for Non-slip-type

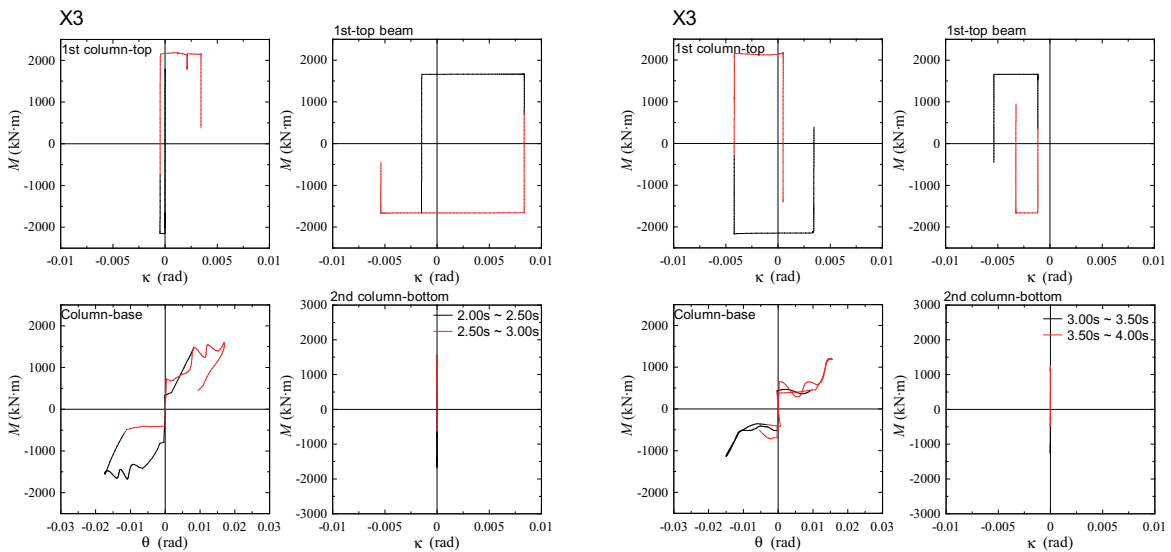


Fig.14 Restoring force characteristics of 1st layer member & 2nd layer column bottom on X3 for Anchor-bolt-yield-type

1. ノンスリップ型露出柱脚を用いることで、架構全体の損傷が低減する傾向にある。また、アンカーボルト降伏型露出柱脚を有する場合に顕著に見られる、第一層への損傷集中を緩和する効果も期待できる。
2. アンカーボルト降伏先行型露出柱脚を用いる場合、第一層柱上端に塑性ヒンジが形成され易い傾向にあるが、ノンスリップ型露出柱脚を採用することにより、これを明確に緩和することができる。
3. 最大層間変形角の分布については、ノンスリップ型露出柱脚において明らかな優位性を示せるほどの影響は無いが、第一層への変形集中は若干低減できる傾向にある。

参考文献

- 1) 石田孝徳, 山田哲, 久保田航平, 露出柱脚を有する鋼構造剛接骨組の D_s 値最評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 720 号, pp.357-367, 2016.2
- 2) 向出静司, 中野駿一, 鋼構造ラーメン骨組における露出柱脚の復元力特性が損傷分布に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 関東, 構造-III, pp.1117-1118, 2020.9
- 3) 山西央朗: 露出柱脚付低層鋼構造物の地震時応答性状と柱脚の挙動 - その 8 第一層上梁の降伏条件 -, 日本建築学会, 中国支部研究報告集, 第 48 巻, pp.263-266, 2025.3.
- 3) 山西央朗: 露出柱脚付低層鋼構造物の地震時応答性状と柱脚の挙動 - その 8 第一層上梁の降伏条件 -, 日本建築学会, 中国支部研究報告集, 第 48 巻, pp.263-266, 2025.3.
- 4) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: アンカーボルトを多数配列したノンスリップ型露出柱脚の復元力特性 - 無軸力下の場合のセルフセンタリング性能 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 621 号, pp.155-162, 2007.11.
- 5) 澤田樹一郎, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰, 山西央朗: 地震応答解析によるノンスリップ型露出柱脚付鋼構造骨組のセルフセンタリング性能と累積損傷応答評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 629 号, pp.1151-1157, 2008.7.
- 6) 山西央朗: 単一柱モデルによる多層架構の水平剛性評価精度に関する一考察 - 構造要素・抵抗機構提案型研究 その 6 -, 日本建築学会, 中国支部研究報告集, 第 48 巻, pp.255-258, 2025.3.