

ブレースと水平変位拘束要素を有した露出柱脚の弾塑性挙動

山西 央朗*

(令和7年10月31日受付)

Elasto-plastic behavior of exposed column-base with brace & shear counter element

Teruaki YAMANISHI

(Received October 31, 2025)

Abstract

Response control dampers are structural devices that achieve displacement response reduction in high-rise and super high-rise buildings. In the future, the installation of such dampers in low to mid rise steel structures is expected, aiming to ensure higher seismic performance. On the other hand, exposed column bases are commonly employed in low- to mid-rise steel buildings. When dampers are installed at exposed column bases, additional components that resist shear forces are typically incorporated.

In this study, seismic response analyses were conducted for low-rise steel frames equipped with both dampers and shear-resisting components. The seismic response characteristics and the design considerations of column bases are discussed based on the analytical results.

Key Words: *exposed column-base, shear counter element for column-base, hysteresis damper, column-base working stress, rotational spring*

1 序論

中低層鋼構造物に利用される露出柱脚における、構造形式と考慮すべき存在応力に対する設計思想を簡潔に述べると以下となる。

- ・ ラーメン架構：アンカーボルト降伏型、柱降伏型の2種類の設計が日本建築学会の設計指針¹⁾に示されており、構造物自重による圧縮軸力を考慮した曲げ耐力を算定する。
- ・ ブレース架構：構造物自重とブレースの鉛直成分の総和、ブレースの水平成分を考慮した上で、柱脚の弾塑性挙動によりブレースの構造性能が著しく阻害されない²⁾。

このように、架構の形式によって検討すべき事項、ならびにその設計思想は異なる。

一方、高層・超高層建築物を中心に制振ダンパー（以後、ダンパー）を用いた制振設計による耐震安全性の高さが実証されており、今後、中低層鋼構造物においても高い耐震安全性を確保するために制振設計や、それによる耐震改修が実施されることが予想される。

一般に制振ダンパーには、抵抗効率の観点から、完全弾塑

性型や紡錘型の履歴形状を実現できるものが採用される³⁾。制振設計を施した架構は、ラーメン架構に減衰効果を付与するためのダンパーを設置したものであるが、ダンパーには抵抗効率が高いブレース型が採用されることが多い。従って、その存在応力はラーメン架構とブレース架構との組合せ応力を考えるべきである。具体的には、露出柱脚は架構からの曲げ変形と共に、ダンパー軸力の鉛直・水平成分がそれぞれ軸力とせん断力として作用する。ダンパーが引張軸力を発揮する場合、これをほぼ全てアンカーボルトが負担する可能性がある。

従って、期待するダンパーの性能を得るには、これらの作用応力に対して弾性状態を保持する柱脚設計を施すことが望ましい。これを実現するため、アンカーボルトの耐力増大を目的としたアンカーボルト径または本数の増大、ベースプレートの拡張が考えられる。しかし、ディテールの拡張、要素が増えることにより、その抵抗機構を捕らえることは難しく、更に研究を深める必要がある。

これに対し、せん断力に対する補強要素を追加することで従来の露出柱脚のディテールを利用しながら先の目標は満足

* 広島工業大学 工学部建築工学科 准教授・博士（工学）

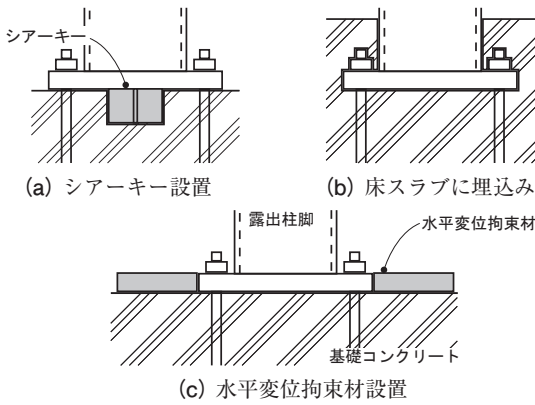


図1 露出柱脚のせん断力に対する補強要素の例

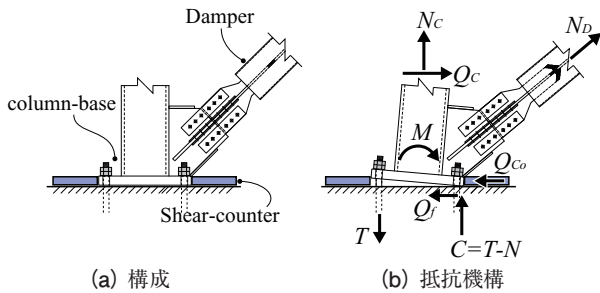


図2 補強要素を設置したダンパー付き露出柱脚

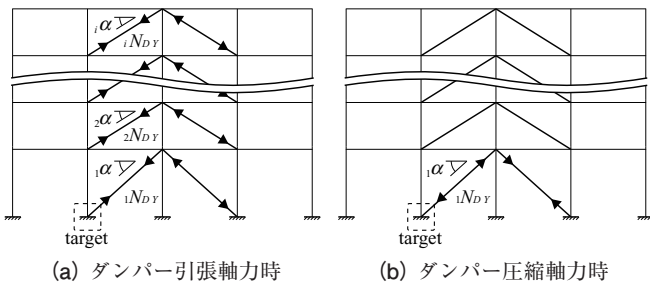


図3 柱脚の応力

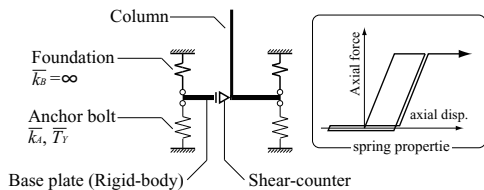


図4 露出柱脚のモデル化

でき、本論文ではこちらを中心に議論する。代表的な補強要素を図1に示すが、シアーキー⁴⁾や、床スラブとして配置された鉄筋コンクリート⁵⁾があり、また著者が提案しているような水平変位拘束材⁶⁾もこれにあたる。各研究では、抵抗機構とせん断力に対する限界耐力を評価しており、せん断力に対する設計についての知見が蓄積されている。

以上の研究知見を用い、せん断力に対する適切な抵抗要素を設置できれば、露出柱脚は曲げモーメントと軸力に対してのみ設計すれば良い。一方、柱脚部には軸力に対して独立した挙動を有する簡易な復元力特性モデル(柱脚曲げモーメント-回転角関係を表現)が設置されているが、ダンパーが設置された構面の露出柱脚では軸力の変動が大きく、同モデルの適用性を検討する必要がある。

このような背景の下、露出柱脚にせん断力に対する補強

要素(以後、補強要素)を設置した場合の時刻歴応答解析を行い、応答性状と設計について議論する。

2 ダンパーが取り付く露出柱脚と補強要素

図2に、ダンパーが取り付く露出柱脚と補強要素の一例として水平変位拘束材を設置したものを示す。

露出柱脚にダンパーが直接取り付くことで、ダンパー軸力は柱脚のせん断力 Q と軸力 N として作用する。補強要素は柱脚に作用するせん断力を負担する機能を有するが、基礎とベースプレート間の接触反力 C による摩擦力 Q_f もせん断力を負担する因子となるため、補強要素の負担せん断力 Q_{Co} は、

$$Q_{Co} = Q - Q_f = Q_C + Q_D - C \cdot \mu \quad (1)$$

となる。一方、その最大値を議論するために、図3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)これに取り付くダンパーが引張の場合は連層のダンパー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、第一層以外のダンパー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_{Co}^{+max} 、 Q_{Co}^{-max} として、ダンパー降伏軸力 N_{DY} で表現すると、

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

$$\text{但し、} \sum_i N_{DY} \cdot \sin_i \alpha + N_C \leq 0$$

$$Q_{Co}^{-max} = Q_C + {}_1N_{DY} \cdot \cos \alpha + \left({}_1N_{DY} \cdot \sin \alpha + N_0 \right) \cdot \mu \quad (3)$$

となる。ここで、 Q_C :柱せん断力、 N_0 :構造物自重による軸力、 ${}_1N_{DY} \cdot \cos \alpha$:第一層のダンパー降伏軸力水平成分、 $\sum_i N_{DY} \cdot \sin_i \alpha$:全層のダンパー降伏軸力鉛直成分の総和、 μ :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。

また、当該柱脚はせん断力を補強要素が負担するため、引張側の柱脚降伏軸力 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、 σ_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。

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

次に、このような露出柱脚挙動を表現するため、図4のモデルを構築する。当該モデルは、ベースプレート縁端上下に引張力にのみ抵抗する軸バネを設置し、鉛直下向きの力を上側のバネ(基礎)が、鉛直上向きへの変形を下側のバネ(ア

ンカーボルト) が引張抵抗する。また、バネは塑性化に伴いスリップ現象を示すことで、露出柱脚挙動を実現している。

更に、柱脚のせん断力については、柱とベースプレートの交点に設けたピンローラー支持が負担し、また、ベースプレートには無限大と見なせる曲げ剛性を入力して剛体的に挙動させる。

3. 地震応答解析概要

解析には「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、時間刻み 0.005 秒、減衰定数はレーリ型で $h=0.02$ とする。

図 2、表 1 に本論文で検討対象とする構造物の概要を示す。解析モデルは、梁中立軸を構造階高とするフレームモデルとし、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 倍とし、各質量は柱梁接合部に集約して配置する。

尚、ここでは露出柱脚挙動に着目するため、梁および第二層よりも上層階の柱においては、 $M-N$ 耐力相関関係を加味しないモデルを採用する。

3.1 ダンパーおよび露出柱脚の設定

ダンパーは、図 5 に示すように X2-X3, X3-X4 間に連層配置する。表 2 に配置するダンパーの容量を示すが、一般的な容量を標準タイプ (D-1.0) とする。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、ダンパー容量を 1.5 倍 (D-1.5), 2.0 倍 (D-2.0) としたものも採用する。なお、ダンパーには 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。

図 6 に露出柱脚形状、表 3 にアンカーボルトリストを示す。アンカーボルト断面を調整して、柱脚耐力比 α が 0.5, 0.8, 1.2 としたものを採用する。これら、ダンパーおよび露出柱脚の組合せに対して、図 7 のように架構名称を定める。

次に、図 8 に式 (4), (5) から算出した最大・最小柱軸力の範囲と柱脚降伏軸力を示す。図中、 $\alpha=0.5 - D-1.5$, $\alpha=0.5 - D-2.0$, $\alpha=0.8 - D-2.0$ を除くものは、最大軸力が柱脚降伏軸力未満である。

3.2 解析変数

解析モデルには、3.1 節で設定した架構の条件に対して柱脚部を、図 4 に記した詳細なモデル (accurate)、図 9 の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)、そして固定端としたモデル (fixed) を採用する。

表 4 には図 9 の条件を満足するように定めた簡易復元力特性モデルの諸量を、表 5 には各解析モデルの固有周期を示す。固有周期は、柱脚部のモデルによらず、ダンパー容量に依存している。

最後に、表 6 に入力した水平加速度を示す。一般的な記録波を用いているが、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 150kine となるように加速度を基準

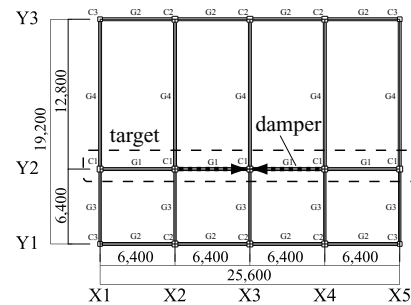
表 1 部材リスト
(a) 柱材 (BCP-325)

position	size (mm)	E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)
C1-4	□ - 400 x 16	205000	357.5
C1-3	□ - 450 x 19	205000	357.5
C1-2	□ - 450 x 22	205000	357.5
C1-1	□ - 500 x 22	205000	357.5

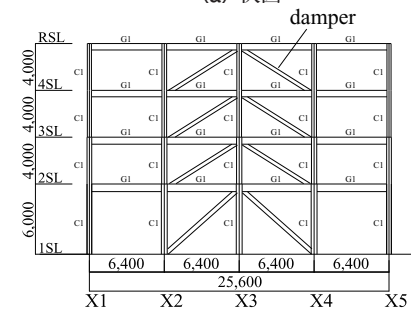
(b) 梁材 (SN490B)

position	size (mm)	E* (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)
G1-R	H - 550 x 200 x 9 x 16	410000	357.5
G1-4	H - 550 x 250 x 9 x 19	410000	357.5
G1-3	H - 600 x 250 x 12 x 22	410000	357.5
G1-2	H - 650 x 250 x 12 x 25	410000	357.5

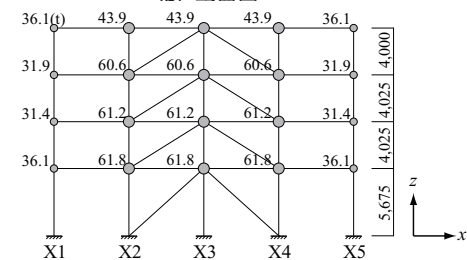
*beam : Effect from concrete slab = 2.0 x E



(a) 伏図



(b) 立面図



(c) 解析モデル

図 5 解析対象構造物

化している。更に、各解析には鉛直方向加速度として、重力加速度も同時に入力し、露出柱脚に柱軸力による付加曲げ抵抗力を発生させている。

以上、架構の条件: 9 ケース、柱脚部のモデル: 3 ケース、入力波: 3 ケースを変数とした、計 81 ケースの解析を実施する。

4. 解析結果と考察

解析結果として、図 10 に最大応答時の変形状態と最大・最小層間変形角分布を、図 11 に露出柱脚図心位置の鉛直変位 - ベースプレート回転角関係を、図 12 にエネルギー

表2 ダンパー容量

(a) 2倍の断面を有するタイプ (D-2.0)

dampner	A_D mm ²	N_{DY} kN	K_D kN/mm
4th	4,240	954	198.6
3rd	10,800	2,430	504.9
2nd	13,040	2,934	609.6
1st	20,700	4,658	855.3

(b) 1.5倍の断面を有するタイプ (D-1.5)

dampner	A_D mm ²	N_{DY} kN	K_D kN/mm
4th	3,180	716	148.9
3rd	8,100	1,823	378.7
2nd	9,780	2,201	457.2
1st	15,525	3,493	641.5

(c) 標準の断面を有するタイプ (D-1.0)

dampner	A_D mm ²	N_{DY} kN	K_D kN/mm
4th	2,120	477	99.3
3rd	5,400	1,215	252.4
2nd	6,520	1,467	304.8
1st	10,350	2,329	427.7

表3 アンカーボルトリスト

α	size (mm) (A_t mm ²)	d_c mm	σ_y N/mm ²	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 簡易モデルの弾性回転剛性, 最大耐力

α	Ext (X1, X5)		Int (X2, X3, X4)	
	K (kN-m)	M (kN-m)	K (kN-m)	M (kN-m)
0.5	275,000	874	381,000	1,190
0.8	337,000	1,540	392,000	1,850
1.2	409,000	2,480	423,000	2,800

表5 固有周期リスト

frame type	natural period (s)		
	model type		
	accurate	simple	fixed
α -1.2 - D-2.0	0.347	0.350	
α -0.8 - D-2.0	0.347	0.350	0.346
α -0.5 - D-2.0	0.347	0.350	
α -1.2 - D-1.5	0.377	0.380	
α -0.8 - D-1.5	0.377	0.379	0.376
α -0.5 - D-1.5	0.377	0.379	
α -1.2 - D-1.0	0.428	0.429	
α -0.8 - D-1.0	0.428	0.428	0.425
α -0.5 - D-1.0	0.428	0.428	

表6 入力波リスト

earthquake	direction	max. acc. gal	note
El centro	NS	1530	for 150 kine
Hachinohe	EW	717	for 150 kine
Taft	EW	1476	for 150 kine

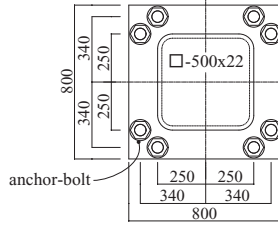


図6 露出柱脚形状

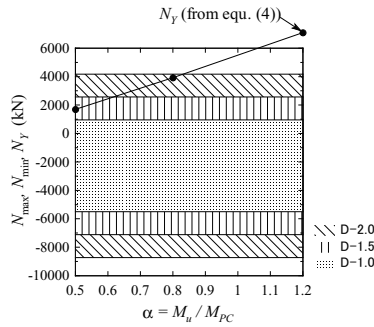


図8 最大・最小柱軸力と柱脚の降伏軸力

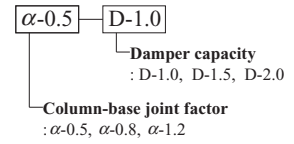


図7 架構名称

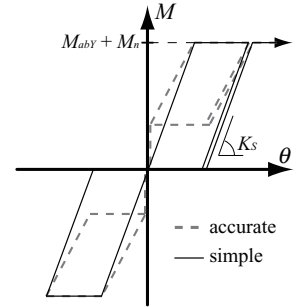


図9 簡易復元力特性モデル

吸収量分布を、図13に層せん断力-層間変形角関係、図14に層間変形角時刻歴を、図15に第一層ダンパー軸力-層間変形角関係を、図16に第一層ダンパー軸伸縮-層間変形角関係を、図17に補強要素負担最大せん断力を、図18に補強要素負担せん断力とダンパー力の相互関係検討するための図を、それぞれ示す。

なお、いずれの入力波でも同一の傾向が見られたので、図10～16, 18にはEl centro NS波を入力した場合の結果を示している。更に、図10, 12～14には崩壊機構の違いによる影響を議論するための代表値として α -0.5- D-1.0, α -0.5 - D-2.0, α -1.2 - D-2.0を、図11には柱脚挙動を議論するための代表値として α -0.5- D-1.0, α -0.5 - D-2.0を、図15, 16にはダンパー機能の効率を議論するための代表値として α -0.8 - D-1.5, α -0.5 - D-2.0を、図18には補強要素の存在応力を議論するための代表値として α -0.8 - D-1.5を示す。

また、図10, 12～14には、柱脚に簡易復元力特性モデルを適用したモデル(simple)と固定端としたモデル(fixed)を、図16にはダンパーが理想的に機能する理想曲線(架構は水平方向のみにせん断変形する)も併せて示す。

4.1 崩壊機構と全体応答

図10より、(b), (c), (f)はダンパーが配置された架構(X2 - X4間)がロッキングを起こすような崩壊となる。これは、 $N_{max} > N_Y$ の関係にある架構では柱脚が柱軸力のみで降伏状態となり、柱脚の引抜き変形により崩壊機構が形成されるためである。

これは、図11から読み取ることができ、(b)では鉛直変位はベースプレート回転に伴う変位量(0.02rad時に6mm)に対して10倍以上の変位が生じており、柱脚の引

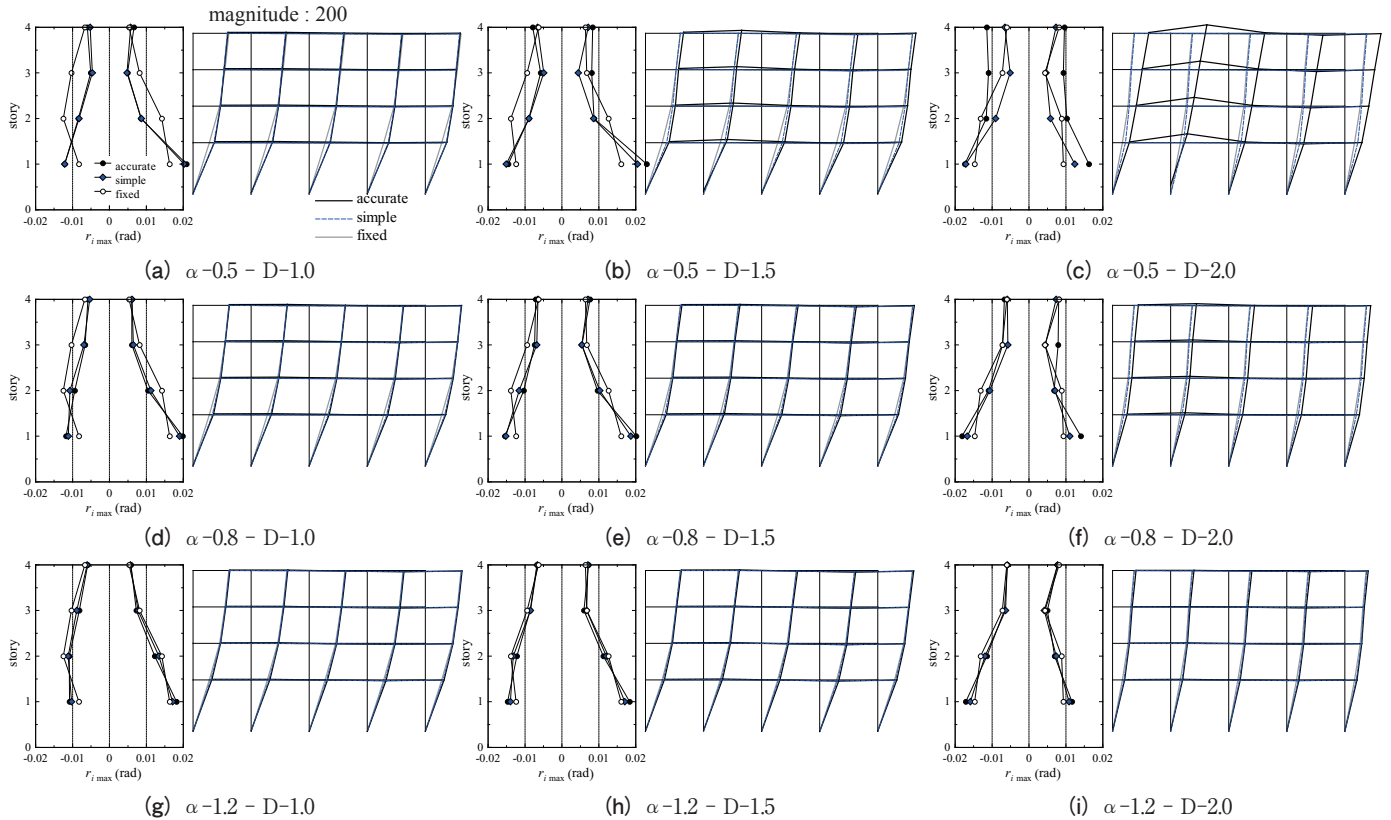


図 10 最大・最小層間変形角分布と崩壊形

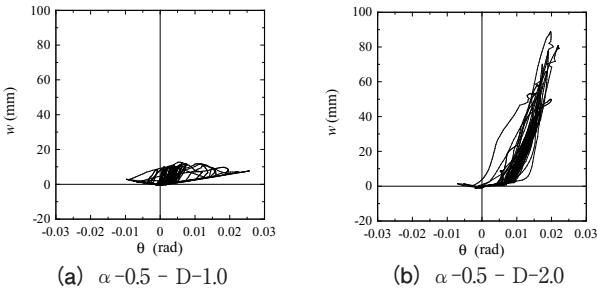


図 11 柱断面図心位置鉛直変位 - ベースプレート回転角関係

抜き変形により崩壊機構が定められていることがわかる。

次いで、図 12～14 より (a) では、柱脚に簡易復元力特性モデルを設置した解析モデルによって露出柱脚を有する架構のエネルギー吸収量分布、各層の荷重 - 変形関係や層間変形角の時刻歴挙動を追跡できることがわかる。一方、(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_Y と N_{max} の大小関係により判断できる。

最後に、図 10、12～14 から、柱脚耐力比 α が 0.5、0.8 では固定端の結果と整合しているとは言えないが、接合部係数を 1.2 とし場合には崩壊機構や最大層間変形角分布等は、固定端とした場合とほぼ整合する結果が得られている。

4.2 ダンパー挙動

図 15 より、(a) では完全弾塑性型の履歴形状が得られており、ダンパーが効率よく抵抗していることがわかる。一方、(b) では履歴形状が崩れている。これは、ダンパーが

効率よく抵抗できていないことを示しており、図 10 (c) の崩壊機構、図 16 (b) の理想曲線から軌跡が逸脱から、柱脚部の引抜き変位が大きくなることに起因したものであることがわかる。

4.3 柱脚のせん断力に対する補強要素の存在応力

図 17 より、補強要素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。まず、図 3 (a) に示したダンパーの応力状態は、対象架構のように低層鋼構造物で生じやすいものである。一方、図 3 (b) のように、第一層のみダンパーが降伏軸力を発揮している状態は、図 18 に記した point a のように、第一層ダンパーが降伏軸力を発揮して間もない時に、位相差で上層のダンパーがほぼ軸力 0 の状態となり現われる。

従って、ダンパーが引張側に抵抗する向きと共に、ダンパーが圧縮側に抵抗する向きにも補強要素が必要であることが分かる。

5 結論

せん断力を負担する要素を設置した露出柱脚を有する、制振鋼構造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が低く設計していても、ブレースは健全に機能する。

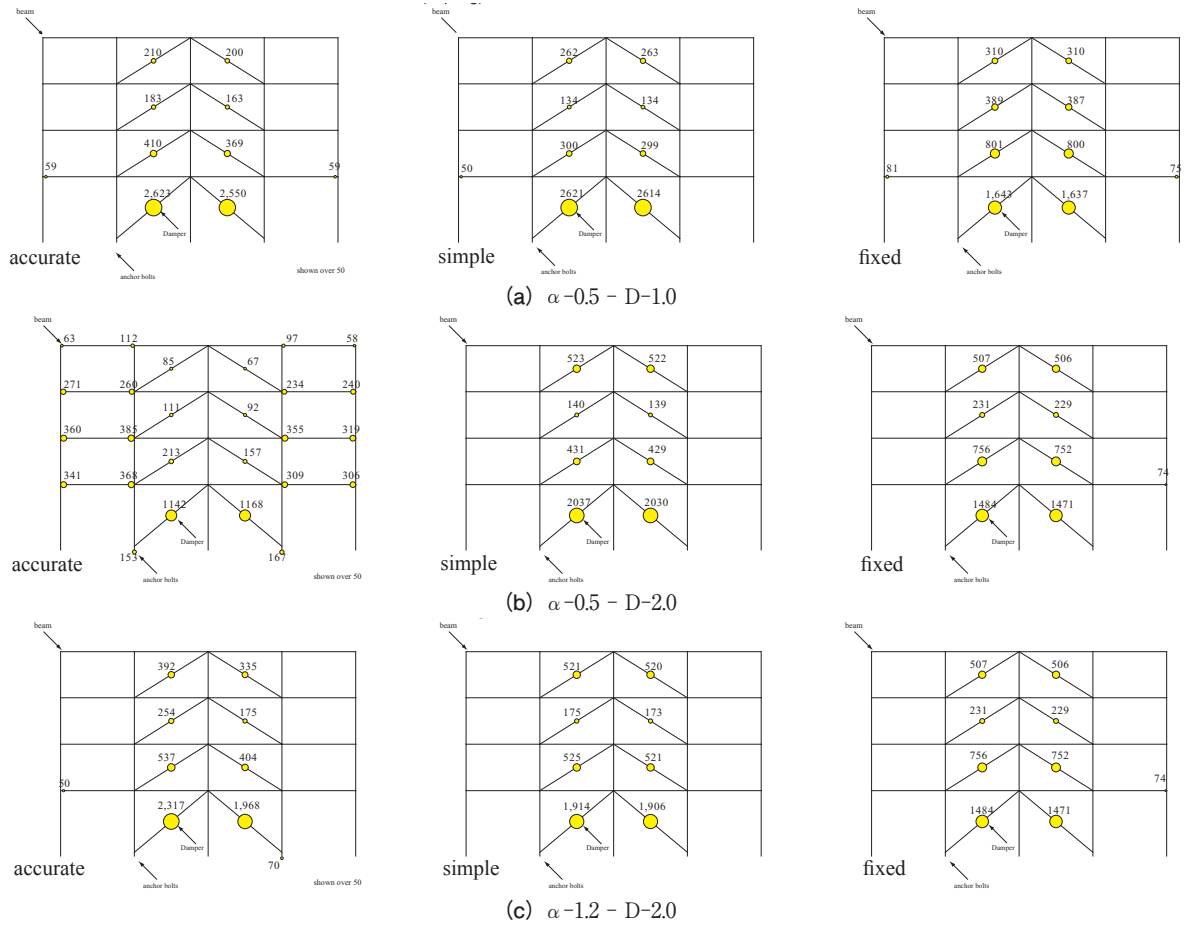


図 12 エネルギー吸収分布 (解析終了時)

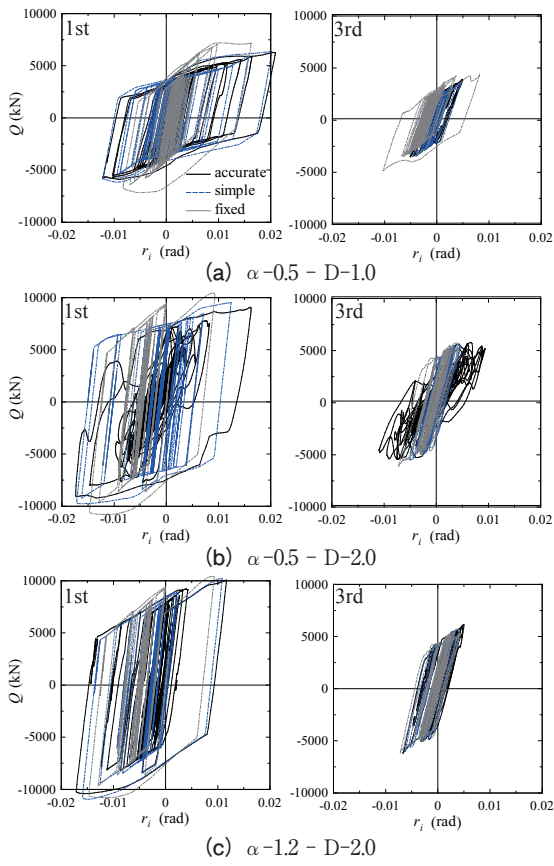


図 13 層せん断力 - 層間変形角関係

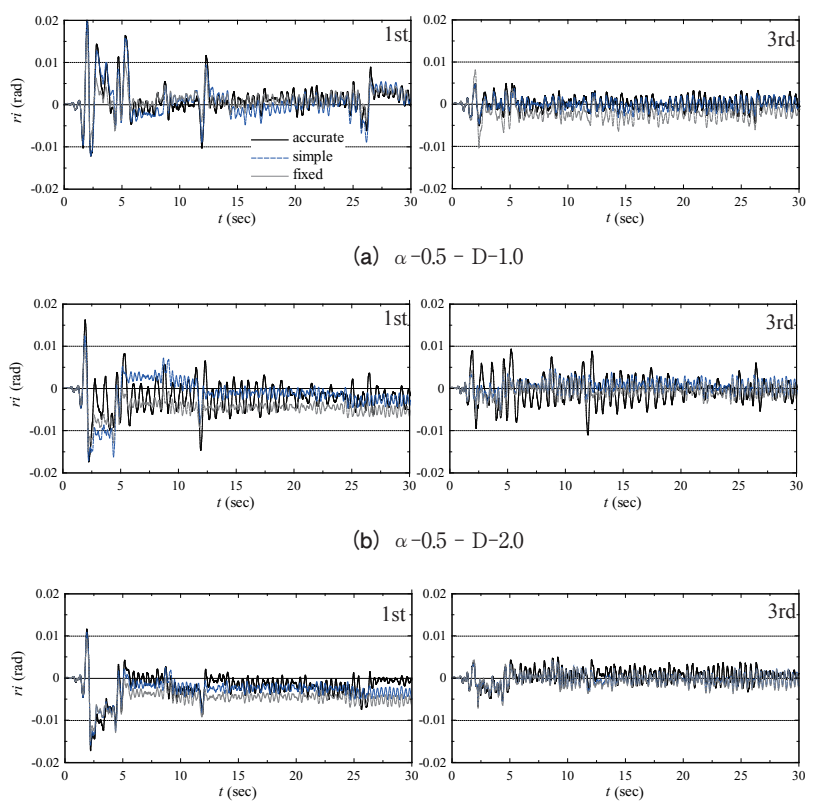


図 14 層間変形角時刻歴

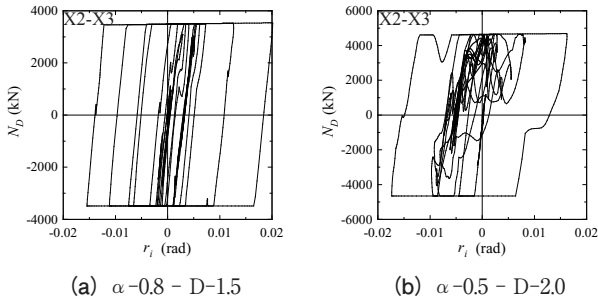


図 15 第一層ダンパー軸力 - 層間変形角関係

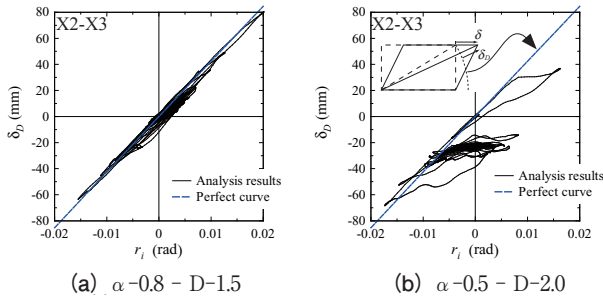


図 16 第一層ダンパー軸伸縮 - 層間変形角関係

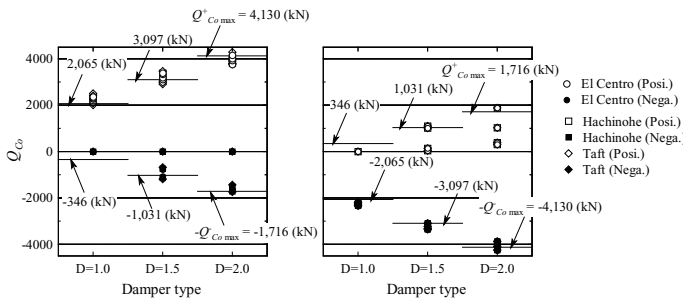
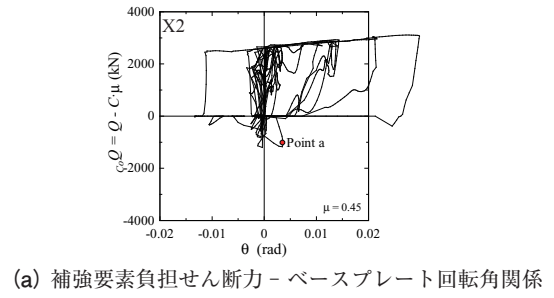
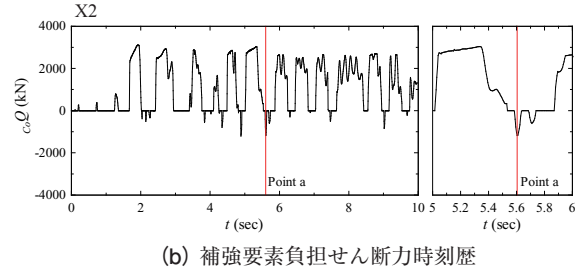


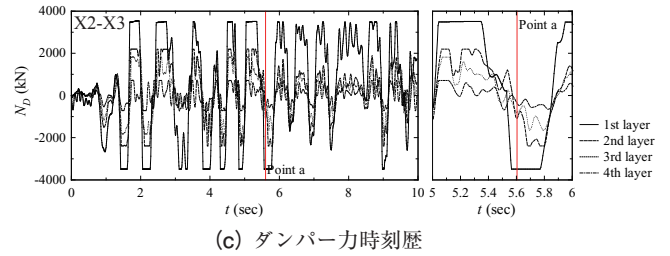
図 17 補強要素負担最大せん断力



(a) 補強要素負担せん断力 - ベースプレート回転角関係



(b) 補強要素負担せん断力時刻歴



(c) ダンパー力時刻歴

図 18 補強要素負担最大せん断力とダンパー力の相互関係 (alpha=0.5 - D-1.5)

参考文献

- 1) 日本建築学会、鋼構造接合部設計指針、第3版、2012.3.
- 2) 日本建築学会、鋼構造制振設計指針、第1版、2014.11.
- 3) 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.
- 4) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計、技報堂出版、1985.3.
- 5) 山本遼太、倉田真宏、長江拓也、寺田岳彦、吹田啓一郎、中島正愛、繰返し載荷実験と最大耐力評価法、浅い埋込み柱脚の弾塑性挙動と保有性能 その1、日本建築学会構造系論文集、第613号、pp.147-153、2007.3.
- 6) 山西央朗、高松隆夫、玉井宏章、竹本泰聖、松尾彰、ブレース軸力を受ける露出柱脚の補強工法に関する実験的研究、日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集、第19巻、pp.133-140、2011.11.

従って、制振設計を施す場合のダンパーの適用限界は、柱脚の全アンカーボルトの降伏軸力とダンパー容量により決定することが望ましい。

2. 柱脚が軸力のみで降伏する崩壊形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架構の層間変位応答を表現できる。

3. 柱脚が弾性範囲に留まる設計を施していても、柱脚は直接取り付くダンパー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、ダンパー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、せん断力に対する抵抗要素は、ダンパーが圧縮軸力となる側にも設置する必要がある。