

機関番号：14401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760374

研究課題名 (和文) 鋼構造露出柱脚に適用する鋼管ダンパーの開発

研究課題名 (英文) Development of a Tubular Damper for Use in Exposed Bases of Steel Moment Frames

研究代表者

向出 静司 (MUKAIDE SEIJI)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：20423204

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、鋼構造骨組の柱脚部に適用するために新たに考案された制振ダンパーの開発に向けた基礎研究である。まず、鋼管状のダンパー単体を対象とした多数の載荷実験により基本的な構造性能や設計条件を検討した上で、柱脚部にダンパーを適用した部分架構の載荷実験により同柱脚部が想定した挙動を示すことを確認した。また、本工法を適用した鋼構造骨組の地震応答解析により、上部構造の損傷が効果的に低減できることが確認された。

研究成果の概要 (英文)：

In order to adapt to exposed bases in steel moment frames, we have devised a hysteretic damper of tubular shaped steel for use in a bolt joint. Loading tests are conducted in order to investigate the structural performance of the damper. In addition, seismic response analyses of steel moment frames with the damper system are conducted. The results reveal that the damper system effectively decreases damage of the frames under earthquake.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：制振構造,

## 1. 研究開始当初の背景

平成17年9月にエネルギーの釣合いに基づく耐震計算法が施行されたことで、エネルギー吸収部材の性能を陽に評価した建築物の設計に対する法整備が進んだ。これを契機として、超高層建築だけではなく、一般の中低層建築にもエネルギー吸収部材を用いた制振構造の普及が期

待されている。現在、エネルギー吸収部材として実用化されている制振ダンパーは、繰返し塑性変形することで地震入力エネルギーの多くを吸収し、建築物の主架構の塑性変形を緩和できることが知られている。ただし、制振ダンパーを用いても、最下層の柱材および柱脚部には、大きな応力が作用しやすく、

大地震時にこれらを弾性に保つことは難しい。

中低層の鋼構造骨組においては、露出柱脚が採用されることが多い。地震時の変形がその保有変形性能を下回れば、一度の地震に対する耐震安全性が確保されることになる。しかしながら、柱材先行降伏型およびアンカーボルト先行降伏型のどちらの場合も、いずれかの部位が塑性化すると、その後の補修は容易ではない。

以上の背景から、鋼構造露出型柱脚において、大地震後も柱材やアンカーボルトなどを弾性に留めつつ、補修が容易な履歴型ダンパーが開発されれば、より耐震安全性の高い柱脚が実現できると考えられる。

## 2. 研究の目的

研究代表者は、露出型柱脚に適用する履歴型ダンパーとして、アンカーボルトの外側に鋼管を挿管することで構成されるダンパー（以下、単に鋼管ダンパーと呼ぶ）を考案した。この概要を図 2.1 に示す。本鋼管ダンパーは、単に挿管されるだけでなく、ナットおよびベースプレートの両方に接合される。具体的な接合詳細は、鋼管とベースプレートあるいはナットの間でねじなどにより機械的に接合されるか溶接により接合されることを想定している。柱脚部に曲げモーメントが作用すると、曲げ引張側アンカーボルトに挿管された鋼管ダンパーには圧縮力が、曲げ圧縮側アンカーボルトに挿管された鋼管ダンパーには引張力が、それぞれ作用し、これらが繰り返し塑性変形することで地震エネルギーを吸収する。以上の構成により、柱脚部の固定度（回転剛性）を一定量確保しつつ、鉄骨柱および露出柱脚を構成する各部（アンカーボルトやベースプレート）を弾性に保持することが可能となる。

以上のような鋼管ダンパーを適用した露出柱脚に大きな回転角が生じると、鋼管ダンパーには圧縮方向に相当大きな変形が生じる。つまり、局部座屈により耐力低下した後もさらに変形する領域まで繰り返し変形が生じて安定したエネルギー吸収性能を確保する必要がある。

本研究の目的は、局部座屈を伴いながら圧縮方向に超大変形域まで変形する鋼管ダンパーを露出柱脚に適用するにあたり、所要の性能を確保するための設計法を構築するとともに、同露出型柱脚を有する骨組の地震応答性状を把握することである。

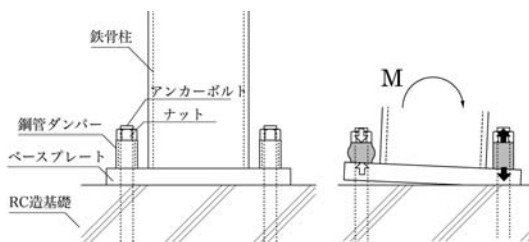


図 2.1 鋼管ダンパーを適用した露出柱脚

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の 3 つの検討を実施した。鋼管状のダンパー単体を対象とした要素実験、ダンパーを適用した露出柱脚載荷実験、本工法を適用した鋼構造骨組の地震応答解析である。

### (1) 要素実験

#### ① 実験計画

本実験では、正負交番載荷実験により、鋼管ダンパーを繰り返し塑性変形させた時の鋼管の変形性能およびエネルギー吸収性能について検討する。

鋼管ダンパーの試験体形状の概要を図 3.1.1、試験体の一覧を表 3.1.1 に示す。試験体は、塑性変形が生じる鋼管ダンパー部と治具に接合するための端部のねじ部からなり、鋼管部とねじ部を溶接接合した試験体（以下、鋼管溶接型試験体）および、極厚鋼管から機械加工により切削することでダンパー部より厚く加工された部分でねじ接合するよう製作されている試験体（以降、機械加工型試験体）を設定する。主なパラメータは、ダンパー部の径厚比  $D/t$  ( $D$ : 外径,  $t$ : 径厚比) および長さ  $L$  に加え、溶接方法を変化させた試験体を設定する。材質は、溶接接合試験体の鋼管部については、一般構造用炭素鋼管 (STK400)、圧縮配管用炭素鋼管 (STPG370) を用いる。機械加工試験体については機械構造用炭素鋼管 (STKM 13A) の  $\phi 76.3 \times 25$  から機械切削により製作する。

オイルジャッキにより軸方向正負交番繰り返し載荷を行う。試験体には軸方向のみに変形を与えるよう、リニアスライダにより拘束されている。柱脚が曲げモーメントを受け変形する際、鋼管は大きな圧縮変形を受けるとともに、ベースプレートのコンクリートへのめり込みによって僅かな引張変形を受ける。この状況を表現するためにダンパーの圧縮変形と引張変形の比を 8:1 と仮定し、載荷履歴を設定している。なお、次式の局部座屈波長計算値  $L_b$  を載荷履歴の目標変位の基準として用いる。

#### ② 実験結果

実験結果から得られた軸圧縮力  $P$  - 軸縮み

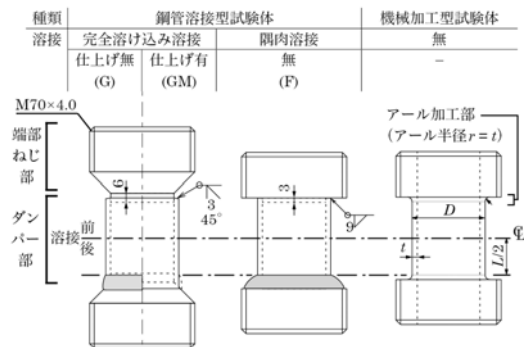


図 3.1.1 要素試験体の概要

量  $\delta$  関係を図 3.1.2 に示す。実験結果の一覧は表 3.1.1 に併記している。

(a) 荷重-変形関係および破壊性状の概要

$P - \delta$  関係の履歴ループ形状には、試験体の種別（鋼管溶接型か機械加工型）や長さの影響があまり見られず、径厚比によって異なる傾向が見られる。圧縮側載荷時、引張降伏耐力計算値  $cP_y$  と同程度の圧縮力により降伏した後、局部座屈が発生しつつも耐力が上昇する。径厚比が小さいほど、最大耐力までの上昇率  $P_{max}/cP_y$  が大きく、最大耐力到達後の耐力低下が緩やかになる。繰り返し塑性変形を受けて局部座屈が進行すると、やがて試験体は引張側載荷時に急激な耐力低下を伴う大きな亀裂が発生するか、試験体によっては全断面破断に至る（図 3.1.2 中のプロット）。

(b) 局部座屈の発生状況

表 3.1.1 要素実験の諸元一覧

試験体	パラメータ		計算値				実験結果				
	断面寸法 (径厚比 $D/t$ )	長さ $L$ (mm)	溶接 詳細	$L/l_b$	$P_y$ (kN)	$cP_y$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	局部 座屈 モード			
DW17-0.75-G	$\phi 48.6 \times 2.9$ (16.8)	30	G	1.03	162	234	219	mode-Is			
DW17-0.75-GM		31	GM	1.07			222	mode-Is			
DW17-0.75-F		36	F	1.24			223	mode-Is			
DW17-1.00-G		45	G	1.55			230	mode-II			
DW17-1.00-GM		43	GM	1.48			225	mode-II			
DW17-1.00-F		49	F	1.69			217	mode-II			
DW17-1.25-G		58	G	2.00			215	mode-II			
DW17-1.50-G		69	G	2.38			212	mode-II			
DW10-1.00-G		$\phi 48.6 \times 4.9$ (9.9)	39	G			1.03	209	421	347	mode-Is
DW10-1.25-G			50	G			1.33			353	mode-Ia
DM17-0.75	$\phi 48.6 \times 2.9$ (16.8)	36	-	1.24	112	187	197	mode-Is			
DM17-1.0		49	-	1.69			194	mode-Ia			
DM17-1.25		61	-	2.10			195	mode-II			
DM12-0.6	$\phi 48.6 \times 4.0$ (12.2)	29	-	0.85	151	294	294	mode-Is			
DM12-0.7		34	-	1.00			301	mode-Is			
DM12-0.8		39	-	1.14			303	mode-Is			
DM12-0.9		44	-	1.29			315	mode-Ia			
DM12-1.0		49	-	1.44			313	mode-II			
DM12-1.1		54	-	1.58			307	mode-II			
DM12-1.2		59	-	1.73			301	mode-II			
DM10-0.7		$\phi 48.6 \times 4.9$ (9.9)	34	-			0.90	181	395	376	mode-Is
DM10-0.8			39	-			1.03			372	mode-Is
DM10-0.9			44	-			1.17			396	mode-Is
DM10-1.0	49		-	1.30	407	mode-Ia					
DM10-1.1	54		-	1.43	417	mode-Ia					
DM10-1.2	59		-	1.56	386	mode-II					
DM10-1.3	63		-	1.67	382	mode-II					
DM8-0.8	$\phi 48.6 \times 6.0$ (8.1)		39	-	0.93	216	532			469	mode-Is
DM8-0.9			44	-	1.05					491	mode-Is
DM8-1.0			49	-	1.17					500	mode-Is
DM8-1.1		54	-	1.29	509			mode-Ia			
DM8-1.2		59	-	1.41	499			mode-II			
DM8-1.4		69	-	1.65	460			mode-II			
DM8-1.6		78	-	1.87	454			mode-II			
DM8-1.8		88	-	2.11	453			mode-II			
DM8-2.0		98	-	2.35	486			mode-II			
DM8-2.2		108	-	2.59	448			mode-II			



図 3.1.3 実験後の変形状況

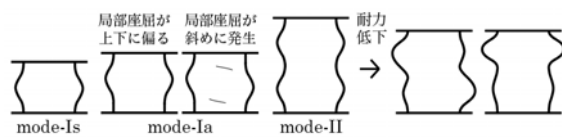


図 3.1.4 局部座屈モードの概要

実験終了後の変形状況を図 3.1.3 に示す。これらより、実験終了時の試験体の状態を見ると、長さの変化に伴い局部座屈モードの変化が見られる。これらは図 3.1.4 に示すように、局部座屈が中心に 1 つ形成される場合 (mode-Is)、非対称な局部座屈が形成される場合 (mode-Ia)、両端に 2 つの局部座屈が形成される場合 (mode-II)、の 3 種類の局部座屈モードに大別される。長さ  $L$  が長くなるにつれ、mode-Is  $\rightarrow$  mode-Ia  $\rightarrow$  mode-II と変化し、各モードの境界は径厚比にかかわらず  $L/l_b$  で概略区分することができる。すなわち、mode-Is と mode-Ia の境界は  $L/l_b$  が 1.2 程度、mode-Ia と mode-II の境界は  $L/l_b$  が 1.4 程度となっている。mode-II では最大耐力以降、2 つの局部座屈のうちどちらかに変形が集中するか、2 つの局部座屈が非対称に変形する場合も見られた。

(c) 変形性能

ここでは、ダンパーの耐力低下を伴う亀裂が発生するまでの累積塑性変形  $\Sigma \delta p$  を変形性能の指標として考察する。試験体累積塑性変形  $\Sigma \delta p$  と  $L/l_b$  の関係を図 3.1.5 に示す。同図より、鋼管溶接型試験体 (DW シリーズ) の変形性能は、機械加工型試験体 (DM シリーズ) に比べて、半分程度からせいぜい同程度となっている。

機械加工型試験体を対象に長さによる影

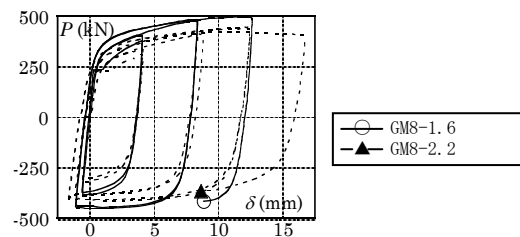
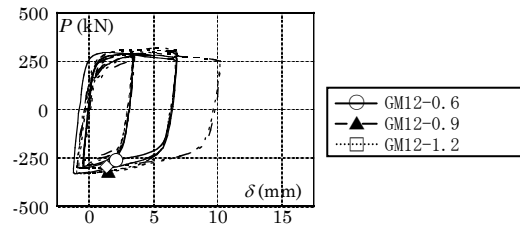
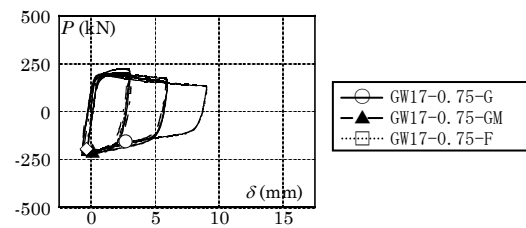


図 3.1.2  $P - \delta$  関係

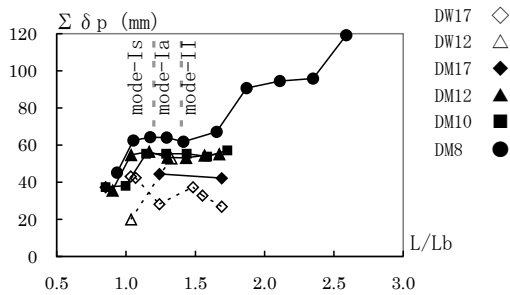


図 3.1.5 累積塑性変形

響を考察する。mode-Ia を形成する場合、 $L/L_b$  が 1.0 を下回ると、短い試験体ほど  $\Sigma \delta p$  が低くなる傾向がある。mode-Ia を形成する場合、 $L/L_b$  にかかわらず、破断時期が 5 サイクル目 ( $L_b$  の 0.3 倍の圧縮変形を経験した後の引張時) で、 $\Sigma \delta p$  が概ね一定となる。

mode-II を形成する場合、径厚比が 8.1 (DM8 シリーズ) では、破断するまでほとんど耐力低下しないため、2 つの局部座屈の両方とも変形し続けて塑性歪が分散され、高い変形性能が得られる。一方、径厚比が概ね 10 以上 (DM17, DM12, DM10 シリーズ) では、局部座屈が 2 つ発生しても、比較的早い段階で耐力低下する。その理由は、局部座屈のどちらか一方に変形が集中するか、非対称な変形が生じるためである。

### ③ ダンパーの設計条件

本鋼管ダンパーを設計するに際して、変形性能を確保することが最も肝要となる。このため、鋼管溶接型は不適と判断し、機械加工型のみを採用する。この他の設計条件を設定するにあたっては、以下の通り、標準的なものと、変形性能がより高いもの 2 種類の仕様が考えられる。

標準タイプの設計条件：

- ・径厚比を 12 程度以下とする。
- ・長さを局部座屈波長計算値の 1.2~1.4 倍の範囲とする。

高性能タイプの設計条件：

- ・径厚比を 8 程度とする。
- ・長さを局部座屈波長計算値の 2.6 程度とする。

## (2) 露出柱脚載荷実験

### ① 実験計画

本実験で用いる鋼管ダンパーは、要素実験同様  $\phi 76.3 \times 25$  の鋼管 (STKM13A) から機械切削により製作している。ダンパーの形状は、要素実験に基づき、標準タイプ (DM12-0.9, DM8-1.0) と高性能タイプ (DM8-2.2) を採用している。試験体は、図 3.2.1 に示すように、1 つの柱に 4 つのダンパーが組み込まれている。基礎には鋼製基礎梁を用い、基礎梁とベースプレートの間にはグラウトを打設している。

試験体一覧を表 3.2.1 に示す。試験体のパラメータは、ダンパーの形状 (表 3.2.1 に示す G12-0.9, G8-1.0, G8-2.2)、シアキーの有無、

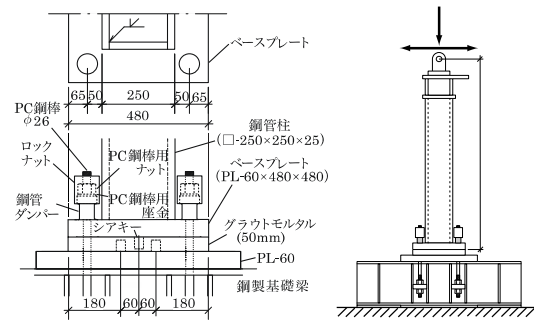


図 3.2.1 露出柱脚試験体

表 3.2.1 実験パラメータ

試験体名	ダンパー形状	シアキー	軸力
BM1209-N	DM12-0.9	×	0
BM1209-K	DM12-0.9	○	0
BM1209-K-01	DM12-0.9	○	$4 P_y$
BM810-K	DM8-1.0	○	0
BM822-K	DM8-2.2	○	0
BM822-K-01	DM8-2.2	○	$4 P_y$

柱軸力の有無とする。柱軸力は使用するダンパー 1 本の降伏耐力  $P_y$  の 4 倍 (柱軸力比に換算すると大略 0.1 程度) を導入する。

載荷方法は、図 3.2.1 に示すように、柱に一定の圧縮軸力を与えつつ柱頭部に水平荷重を作用させる。載荷履歴は、柱脚回転角  $\theta_b$  により変位制御し、 $\pm (0.005, 0.015, 0.025, 0.035 \dots)$  rad をそれぞれ 2 サイクルずつ与える正負交番繰り返し載荷とする。

### ② 実験結果

図 3.2.2 に実験から得られた  $M_b - \theta_b$  関係を示す。ただし、図中の◇印は耐力低下を伴う亀裂がダンパーに入った時点を、△印はダンパーが完全に破断した時点を示す。また、4 つあるダンパーのうちのいずれかに初めて亀裂が生じる時点より前を太線で、それより後を細線で表す。

図 3.2.2 より、軸力無しの試験体においては、ダンパーに亀裂が入るまでは柱脚が紡錘形の履歴挙動を示し、すべてのダンパーが破

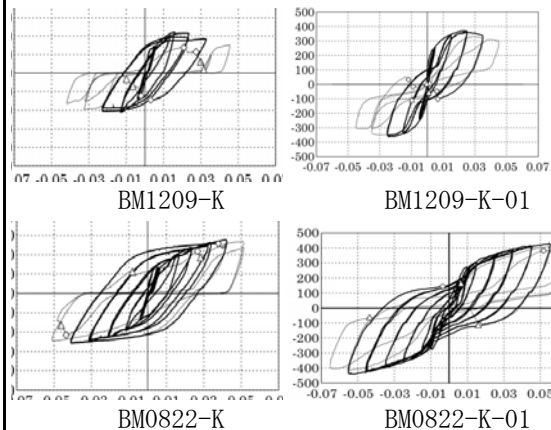


図 3.2.2  $M - \theta_b$  関係



断すると、アンカーボルト先行降伏型の露出柱脚に見られるスリップ型の挙動に移行することがわかる。また、軸力有りの試験体においては、ダンパーに亀裂が入るまでは柱脚がややくびれた紡錘形の履歴挙動を示すことがわかる。除荷後、 $\theta_b$  が小さい領域で、曲げ耐力が一旦横ばいとなるのは、曲げ圧縮側の鋼管ダンパーが塑性化するためである。その後、浮き上がっていたベースプレートがグラウトと接触すると、再度、耐力が上昇し、曲げ引張側のダンパーが塑性化することで終局状態となる。すべてのダンパーが破断すると、軸力が作用するアンカーボルト先行降伏型の露出柱脚に見られるフラッグ型の挙動に移行することがわかる。

その他、各パラメータの影響を以下に示す。  
 ○シアキーの影響：BM1209-Nは、シアキーを取り付けていないため、ベースプレートが他の試験体と比べて大きく水平移動し、ダンパーの水平方向の変形も大きくなった。これに対し、BM1209-Kはシアキーを取り付けたため、柱脚回転角が大きくなっても、柱脚全体での水平移動量はBM1209-Nに比べて数割程度と小さくなり、変形性能が向上した。

○鋼管部の径厚比の影響：ダンパー形状としてG8-1.0・G8-2.2を用いた場合、G12-0.9を用いた場合とは異なり、ダンパーに亀裂が入るまでは、サイクルを重ねても各サイクルでの耐力がほとんど低下しない点である。これは、要素実験と同様である。

○鋼管部の長さの影響：ダンパー形状がDM8-1.0とDM8-2.2では、要素実験の結果と同様、局部座屈波数が1波と2波で異なり、DM8-2.2で高い変形性能が確認された。これにより、BM0822-KとBM0822-K01では、 $\theta_b$ の値が0.035rad程度でも亀裂が生じず、大きなエネルギーを吸収する。

### (3) 地震応答解析

#### ① 解析モデルの検討

鋼管ダンパーを適用した露出柱脚を数値解析で表現するための力学モデルを検討する。前節の試験体を対象に、実験をシミュレートする。

提案する解析モデルを図3.3.1に示す。各要素を線材に置換する。柱材は弾塑性棒とする。ベースプレートは、柱せいの範囲内は剛棒、それ以外は弾塑性棒とする。RC基礎は弾塑性圧縮バネとする。アンカーボルトは、ダンパーを適用することにより、引張だけでなく圧縮にも抵抗できる。そこで弾塑性引張圧縮バネとする。ダンパーはベースプレートとアンカーボルトに剛接合された弾塑性材とする。

解析結果として、図3.3.2に柱脚のモーメント $M_b$ -柱脚回転角 $\theta_b$ 関係を示す。図中の黒色線は解析結果、赤色線は実験結果である。実験結果を見ると、柱軸力無しのB-G1209-Kが紡錘形の履歴挙動を示すのに対し、柱軸力有りのB-G1209-K-01がややくびれた紡錘形の履歴挙

動を示す実験時の挙動を解析で表現できていることが確認できる。また、解析結果を実験結果と比較すると、2体のどちらの柱脚においても最大耐力は概ね良い対応を示していることが分かる。

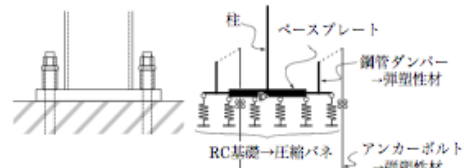
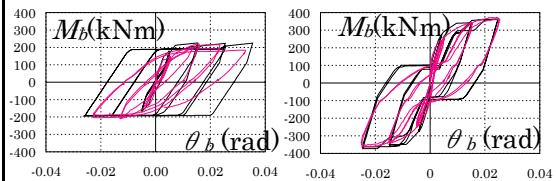


図 3.3.1 解析モデル



(a) BM1209-K (b) BM1209-K-01

図 3.3.2  $M_b$ - $\theta_b$ 関係

#### ② 地震応答解析

本節では4層のラーメン骨組について、柱脚を、固定柱脚、露出柱脚、鋼管ダンパーを適用した露出柱脚とし、それぞれの場合の地震応答性状を比較することによって、地震時の骨組の挙動へのダンパーによる影響について検討する。

検討対象建物の梁伏図を図3.3.3に示す。解析モデルはこの建物の柱脚を以下のものとした3種類とする。

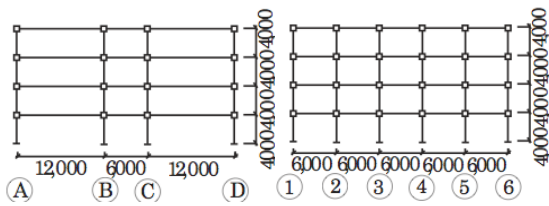
- ・モデルE08 (従来型露出柱脚)  
柱脚の最大曲げ耐力 $M_p$ 、1階柱の全塑性モーメント $M_{pc}$ について、 $M_u \approx 0.8 M_{pc}$ とし、アンカーボルト降伏先行型としたモデル
- ・モデルD08 (ダンパー付き露出柱脚)  
 $M_u \approx 0.8 M_{pc}$ となるようダンパーの断面積を定めたモデル
- ・モデルD06 (ダンパー付き露出柱脚)  
 $M_u \approx 0.6 M_{pc}$ となるようダンパーの断面積を定めたモデル

なお、前節の解析と同様に、ダンパー部は径厚比が12、長さ径比が0.9となるよう、寸法を決定している。図3.3.3に上部構造の解析モデルを示す。

図3.3.4に柱脚及び各階のエネルギー吸収量を示す。図より、骨組全体のエネルギー吸収量に対する柱脚のエネルギー吸収量の割合は、モデルD06が他の2モデルに比べかなり高く、上部構造の損傷を大きく低減していることが分かる。

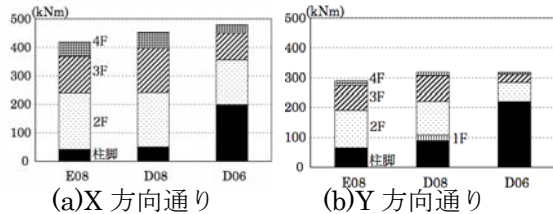
#### 4. 研究成果

本研究により得られた知見を列挙する。  
 要素実験：



(a)X 方向通り (b)Y 方向通り

図 3.3.3 解析モデル



(a)X 方向通り (b)Y 方向通り

図 3.3.4 柱脚及び各階のエネルギー吸収量

主に径厚比・長さをパラメータとした鋼管状ダンパーの軸方向繰り返し載荷実験を通して、より高い変形性能が得られるための設計条件を明らかにした。

柱脚載荷実験：

本鋼管ダンパーを適用した露出柱脚の載荷実験を行い、本工法の制振システムの実現性について、実験的に確認した。

地震応答解析：

本制振システムを適用した鋼構造ラーメン骨組の地震応答解析を行い、本制振システムを用いることで、上部構造の損傷低減効果が得られることを確認した。

以上の知見より、鋼構造露出柱脚部に適用することが可能な制振ダンパーが実現可能であることが確認された。これらの成果は既に学会等で発表済みであり、これまでの研究成果をまとめて論文誌にも投稿予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

- 1) 長山暢宏, 向出静司, 井本大貴, 多田元英, 森田時雄：ボルト接合部に適用する鋼管ダンパー開発のための追加要素実験 その 1 実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp.855-856, 2010.9.9, 富山県富山市
- 2) 井本大貴, 向出静司, 長山暢宏, 森田時雄, 多田元英：ボルト接合部に適用する鋼管ダンパー開発のための追加要素実験 その 2 実験結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp.857-858, 2010.9.9, 富山県富山市
- 3) 井本大貴・向出静司・多田元英・森田時雄・長山暢宏：ボルト接合部に適用する

鋼管ダンパー開発のための要素実験 (その 2 追加実験), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 50 号, 構造系, pp.225-228, 2010.6.20, 大阪府大阪市

- 4) 井本大貴, 向出静司, 多田元英, 森田時雄：ボルト接合部に適用する外挿型鋼管ダンパー開発のための要素実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp.935-936, 2009.8.28, 宮城県仙台市
- 5) 井本大貴・向出静司・多田元英：ボルト接合部に適用する外挿型鋼管ダンパー開発のための要素実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 49 号, 構造系, pp. 373-376, 2009.6.20, 大阪府大阪市

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

向出 静司 (MUKAIDE SEIJI)  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号：20423204

(2) 連携研究者

多田 元英 (TADA MOTOHIDE)  
大阪大学・工学研究科・教授  
研究者番号：90216979

(3) 研究協力者

井本 大貴 (IMOTO DAIKI)  
大阪大学・工学研究科・大学院生 (2009～  
2010 年度当時, 2008 年度は学部生)

長山 暢宏 (NAGAYAMA NOBUHIRO)  
大阪大学・工学研究科・大学院生