

# 論文 鋼材ダンパーを設置した6層鉄筋コンクリート造ピロティ架構のサブストラクチャ擬似動の実験

菅野 秀人\*<sup>1</sup>・寺本 尚史\*<sup>2</sup>・西田 哲也\*<sup>3</sup>・小林 淳\*<sup>4</sup>

**要旨:**鋼材ダンパーを設置した6層鉄筋コンクリート造ピロティ架構を対象とし、1階側柱2本と制振ダンパーを試験体とした3体同時加力によるサブストラクチャ擬似動の実験を行い、ダンパーを設置したピロティ架構の地震応答性状について、特にエネルギー応答に着目して検討を行った。その結果、比較的大きな入力レベルの地震動とその後の余震動に対して、ダンパーの振動抑制効果がよく発揮できていることが確認された。エネルギー応答性状については、瞬間最大入力エネルギーと最大応答変位とのよい相関が確認され、各吸収エネルギーの消費割合は応答レベルに依らない結果となった。

**キーワード:**ピロティ架構, 鋼材ダンパー, サブストラクチャ擬似動の実験, エネルギー応答

## 1. はじめに

建物の1階部分を壁を設けず柱だけのオープンスペースとするピロティ建築は、その建築計画的な利便性から需要が高い。しかし一般にピロティ階の水平剛性は上層階に比べて低くなる傾向があり、大地震時に損傷集中が生じやすく、大地震における特徴的被害のひとつにあげられている。1995年兵庫県南部地震においてピロティ建物に多くの被害が生じ<sup>1)</sup>、その後の耐震設計法の見直しに至っている。現在の耐震設計法においては、ピロティ構造は「避けるべき構造」として認識されている。

ピロティ架構の地震被害を低減する方法の一つとして、ピロティ階の剛性および耐力を増大させて上層との不連続性を軽減する方法が挙げられる。この場合、当該階の柱のみを大きくすると柱主筋の配置が上層階との間で不連続になるなどの問題を含んでいる。一方で、ピロティ階がソフトストーリーとなっていることを利用し、変形をソフトストーリーに集中させて、ダンパーなどのエネルギー吸収部材などを用いて積極的にエネルギー吸収を行う提案もなされている<sup>2),3)</sup>。

筆者らはこれまでに、サブストラクチャ擬似動の実験手法を用いて、鉄筋コンクリート(RC)造架構の地震時挙動について研究を行ってきた<sup>4),5)</sup>。この実験手法は、試験体に架構全体の挙動を考慮した载荷を行える利点を有しており、これまでに地震時の軸力変動の性状把握を目的としたRC造柱2試験体の同時加力を行うサブストラクチャ擬似動の実験などを実施してきた。本研究では、RC造ピロティ架構を対象とし、1階側柱2本と制振ダンパーを試験体とした3体同時加力によるサブストラク

チャ擬似動の実験を行い、ダンパーを設置したピロティ架構の地震応答性状について、特にエネルギー応答に着目して検討を行った。

## 2. 実験方法

本研究で設定したRC造ピロティ架構を図-1に示す。建物は6階建てRC造集合住宅を想定して、1階をピロティとした。建物規模は桁行き方向28m(7m×4スパン)、張間方向9m(9m×1スパン)とし、張間方向の2階以上の各スパンに戸境壁があるモデルである。この張間方向中央1構面を本研究の対象とし、張間方向のみの地震時応答性状を検討した。1階は耐震壁のない純ピロティ架構となっており、上層は厚さ150mmの連層耐震壁を配置し、ベースシア係数を0.45(Ds=0.3, Fs=1.5)として設計した。架構の弾性一次固有周期は0.22秒である。この架構モデルのピロティ層に鋼材ダンパーを設置する。本研究では、ダンパーの取付部材の剛性はピロティ層の剛性に対して十分に剛であると仮定し、また柱の軸変形による曲げ挙動は水平変位に比べて小さいと考え、ダンパーに作用する曲げは無視して、ピロティ層の層間変形の水平成分のみが直接作用するものとした。

全体架構のうち1階の両側柱2本と鋼材ダンパー1体を試験体とした。RC造柱試験体の諸元を表-1に示す。試験体の縮尺は3/8で、断面寸法は300×300mm、内法高さは1,050mmである。材料試験から得られた試験体の使用材料強度は、主筋(SD295)およびせん断補強筋(KSS785)の降伏強度がそれぞれ377N/mm<sup>2</sup>, 1,100N/mm<sup>2</sup>、コンクリートの圧縮強度が38.8N/mm<sup>2</sup>であった。

\*1 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 准教授 博士(工学)(正会員)

\*2 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 助教 博士(工学)(正会員)

\*3 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 教授 博士(工学)(正会員)

\*4 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 教授 博士(工学)(正会員)

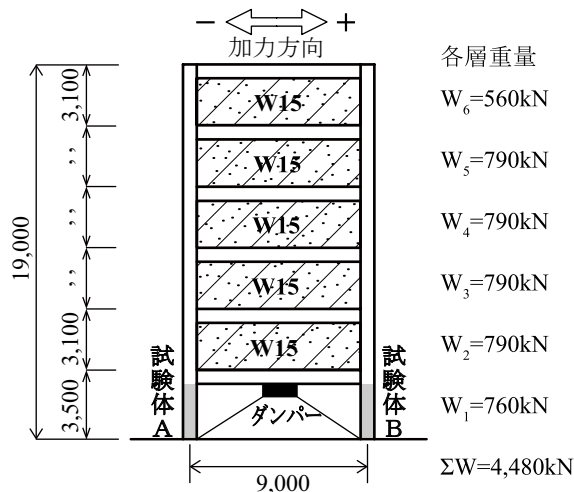


図-1 実験対象架構

表-1 RC造柱試験体諸元

	断面寸法	300×300mm
	内法高さ	1,050mm
	主筋 ( $p_l$ )	10-D13 (0.56%)
	せん断補強筋 ( $p_w$ )	4-S6@50 (0.85%)

柱の長期軸力に対する軸力比は0.1である。正加力時の変動軸力は図-1中の試験体Aが引張側、試験体Bが圧縮側となる。

ダンパー試験体の形状を図-2に示す。ダンパーは低降伏点鋼(SLY120)を用いたパネル型鋼材ダンパーとした。対象架構1構面に対して、減衰定数10%相当となるようにパネル形状を設計しており、パネル寸法は262×262mm、板厚は6mmである。パネル両側には板厚6mm(幅100mm)のフランジ(SN400B)、パネル部には面外座屈拘束用のリブ(板厚6mm, SN400B)を十字形に設けてある。材料試験結果より、パネル鋼材の降伏強度は154N/mm<sup>2</sup>であった。

実験にはサブストラクチャ擬似動の実験法を用いた。文献4)で示すとおり、全体架構解析により求めた1階側柱柱頭部の水平変位、回転角、軸変形を図-3a)の加力装置を2組用いてRC造柱試験体に強制し、そこで得られた復元力を架構解析にフィードバックする。ダンパーには、図-3b)のようなせん断加力装置を用いて、水平変形のみを強制し復元力を得ることとした。

2階以上の連層壁部分の解析モデルには、両側柱付き耐震壁としてMulti Springモデルを採用した。なお、境界梁については十分剛なものと仮定して架構解析を行った。数値積分は文献4)と同じくオペレータ・スプリッティング法を用い、時間刻みは0.01秒とした。粘性減衰はレーリー型( $h=0.03$ )とした。

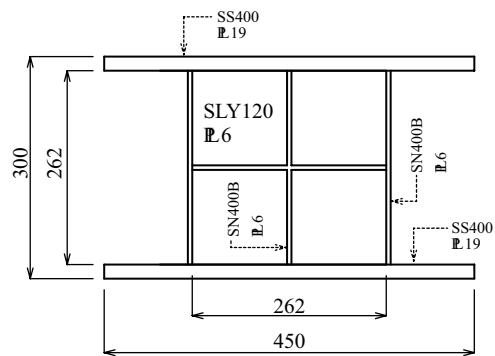
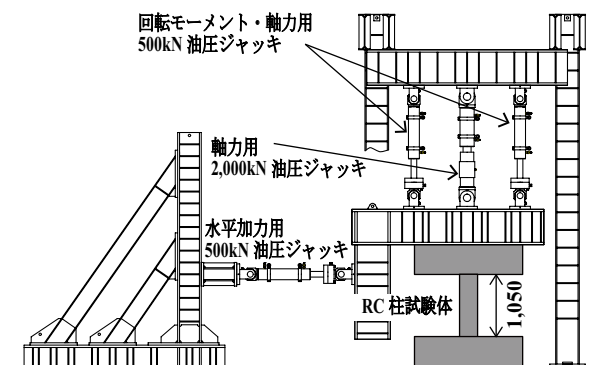
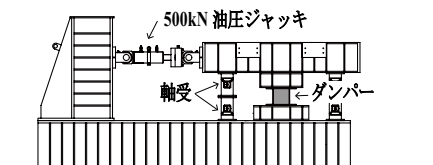


図-2 ダンパー試験体形状



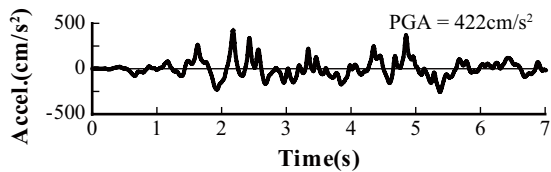
a) RC造柱試験体加力装置



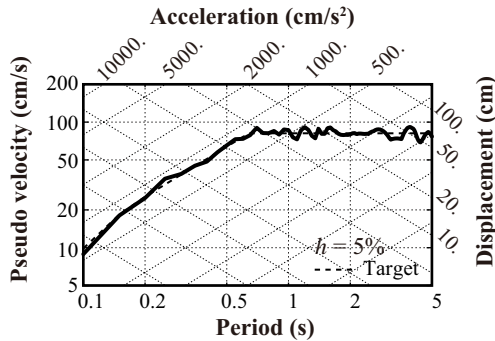
b) ダンパー試験体せん断加力装置

図-3 加力試験装置

入力地震波は、スペクトル特性において固有周期の影響が応答性状に大きく反映しないケースを検討するため告示波を採用した。位相特性にはEl Centro (1940) NS観測波を使用した。継続時間60秒の模擬地震動を作成し、実験では主要動部分を含む7秒間の波形を抜き出して入力地震波とした。図-4に、最大地動速度50cm/sに基準化した入力地震動波形とその応答スペクトルを示す。入力レベルは最大地動速度を25, 50, 75cm/sに基準化したRUN1~RUN3の3段階の実験を行った。さらに2011年東北地方太平洋沖地震でも見られた本震後の比較的規模の大きい余震動に対する応答性状を検討するため、RUN3の後にさらに最大地動速度を50cm/sに基準化した地震動を入力した(RUN4)。以上の計4段階の実験を、対象架構へダンパーを設置しない場合(以後、ダンパーなし)とダンパーを設置した場合(以後、ダンパー設置)の2ケースの実験を行った。



(a)地動加速度時刻歴



(b)応答スペクトル

図-4 入力地震波

### 3. 実験結果の概要

各 RUN における 1 層の最大層間変位（試験体縮尺 3/8 の値）と変形角（内法高さ 1,050mm で除した値）を表-2 に示す。また図-5 には、ベースシアと層間変形角の関係を示す。なお図中の縦軸は層せん断力を負担重量 ( $\Sigma W$ ) で除した値としている。

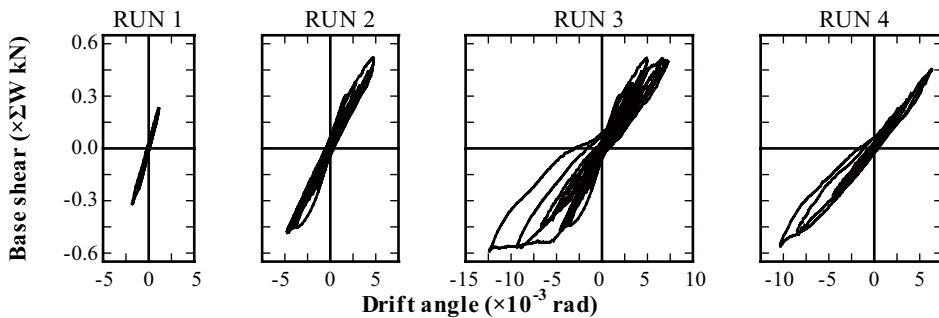
ダンパーなしでは、RUN1 で RC 造柱試験体にはほとんどひび割れは発生しなかった。RUN2 において柱試験体 A,B の両方の柱頭柱脚部に曲げひび割れが発生し、最大応答時付近で、引張側柱の主筋が降伏した。RUN3

表-2 最大層間変位 (mm)

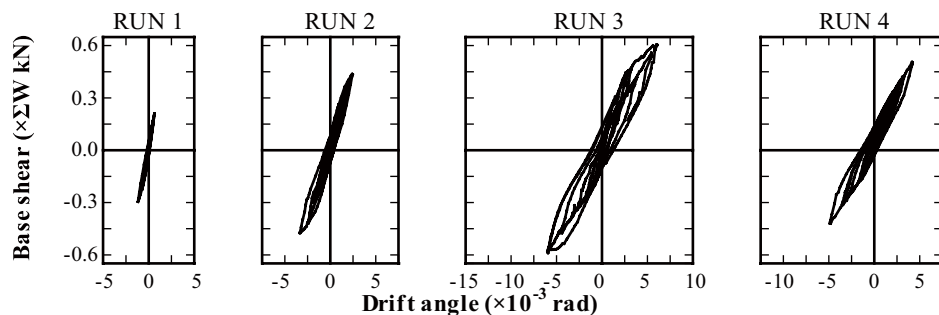
実験ケース	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4
ダンパーなし (変形角 $\times 10^{-3}$ rad)	1.90 (1.81)	5.10 (4.86)	13.25 (12.62)	10.67 (10.16)
ダンパー設置 (変形角 $\times 10^{-3}$ rad)	1.24 (1.18)	3.52 (3.35)	6.83 (6.50)	5.13 (4.89)

において応答がさらに増大すると部材全体にわたり曲げひび割れが生じ、最大応答時（1 層層間変形角約 1/80）までに全柱主筋が降伏した。RUN3（75cm/s 入力）後の RUN4（50cm/s 入力）では、RUN2（50cm/s 入力）に比べて最大層間変形角が約 2 倍になっている。履歴形状は RUN2 が両振幅型の傾向を示しているのに対し、RUN3、4 ではやや片振幅型寄りの傾向を示している。

ダンパー設置ではどの RUN も、ダンパーなしに比べて応答変位が小さく抑えられている。特に入力レベルの大きな RUN3 では、ダンパーなしに比べて最大層間変形角が約 1/2 になっている。RUN3 では最大応答時付近で引張側柱主筋の一部が降伏しており、その後の RUN4 では RUN2 に比べて最大応答が増大しているが、増大の程度はダンパーなしに比べて小さく抑えられている。履歴形状を比較すると、ダンパーなしでは最大応答後の除荷時において荷重 0 付近でスリップ型の傾向を示しているのに対し、ダンパー設置ではダンパーのせん断力負担（本実験でダンパーの降伏せん断力は約 300kN で負担率は 12% 程度）により紡錘形に近い履歴形状となっている。



(a)ダンパーなし



(b)ダンパー設置

図-5 層せん断力-層間変形角関係

図-6には、柱試験体Bのせん断力と軸力の関係を示す。ここで縦軸は、軸力(N)を柱断面積(bD)で除した値(図左軸)とさらにコンクリート強度( $\sigma_B$ )で除した軸力比(図右軸)で表し、横軸はせん断力(Q)を柱断面積(bD)で除した値で表している。なお、同図には累加強度として算出した計算値(点線)と外力分布を等分布と仮定して算出した略算値(実線)を重ねて示す。また図中の一点鎖線は長期軸力の値を示している。これらを見るとダンパーの設置の有無にかかわらず変動軸力が圧縮側では、せん断力と軸力変動がおおむね線形となっており、せん断力のピークと軸力ピークがほぼ一致した結果となっている。なお、本実験における最大軸力比は0.2程度となった。変動軸力が引張側においてはやや非線形的な挙動も見られる。また外力分布を等分布と仮定した略算値ともよい対応を示していることが確認できる。なおダンパーなしのケースにおけるRUN2では他ケースと異なり、変動軸力の略算値(図中実線)に対して大きく下回る軌跡が確認できるが、これは軸方向加力の誤制御によるものと考えている。また、図-6は柱試験体Bの結果のみであるが、柱試験体Aも同様の傾向を示している。

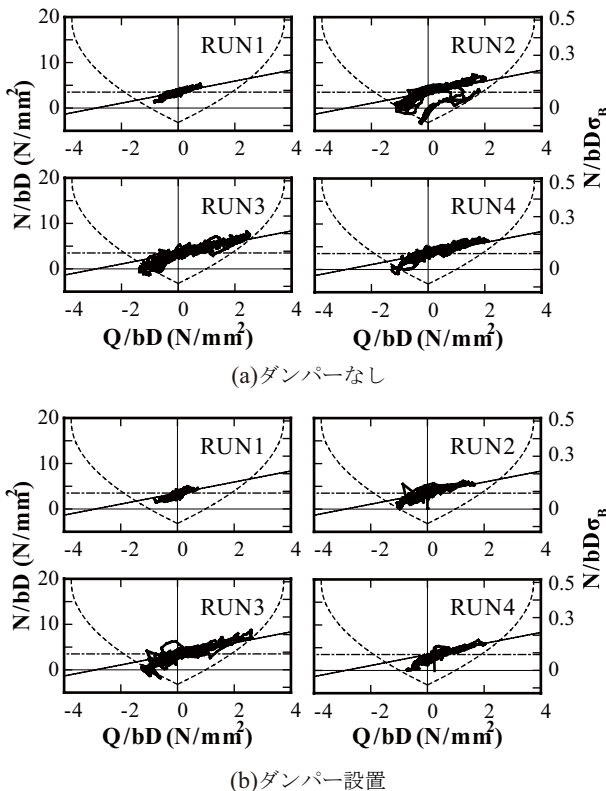


図-6 せん断力-軸力関係

文献5)に示したとおり、ピロティ架構では一般にピロティ層に変形が集中する振動モードとなるため高次モードの影響が比較的小さい。図-7には各RUNにお

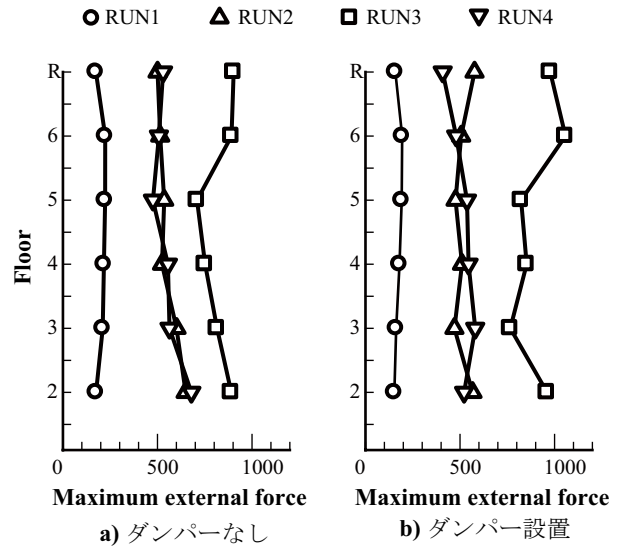


図-7 最大外力分布

ける最大外力分布を示す。ここで最大外力の値は対象架構の実スケール値で表している。ダンパー設置の有無にかかわらず最大外力分布はおおむね等分布となっていることが確認でき、前述の柱試験体Bのせん断力と軸力の関係とも整合している。

#### 4. エネルギー応答

ピロティ階がソフトストーリーとなっていることを利用し、変形をソフトストーリーに集中させて、ダンパーで積極的にエネルギー吸収を行う場合、そのダンパーの仕様を決定するための設計クライテリアには、架構の最大層間変形を用いることが一般的であり、各地震動に対する最大応答変位を簡便に推定することが有用である。簡易な最大応答推定手法としては応答スペクトル法やエネルギー応答に着目した推定法<sup>6)</sup>などが提案されている。本研究では今回実験結果を踏まえて、応答推定の観点からピロティ架構のエネルギー応答性状について考察を行った。

本研究ではピロティ架構のエネルギー応答をピロティ階側柱の水平変形による履歴吸収エネルギー、軸変形による履歴吸収エネルギー、上層連層壁の水平変形による履歴吸収エネルギー、粘性減衰による吸収エネルギー、そしてダンパー設置のケースについてはダンパーの履歴吸収エネルギーに分けて検討を行った。また地震動入力エネルギーは地盤に対する各層の相対速度と各層質量を用いて次式のように定義した。

$$E_I(t) = - \int_0^t \{\ddot{x}_0\}^T [M] \{\dot{x}\} dt \quad (1)$$

$t = 0 \sim T$   $T$ : 地震動の継続時間

$E_I$ : 地震動入力エネルギー  $\{\ddot{x}_0\}$ : 地動加速度

$[M]$ : 質量マトリクス  $\{\dot{x}\}$ : 相対速度

ここで、比較的簡易にエネルギー応答を把握するため、回転変位については水平成分のみを考慮して検討を行った。このため各吸収エネルギーの総和と地震動入力エネルギーは厳密な意味で釣合っていない。

地震時のエネルギー応答について井上ら<sup>9)</sup>は、瞬間的なエネルギーの釣合に着目し、鉄筋コンクリート造のように地震応答性状が非線形挙動を示す場合には、地震動全継続時間での総入力エネルギーよりも瞬間的なエネルギー応答性状の方が、最大応答値に対し相関性が高いとしている。本研究では文献6)を参考に、瞬間入力エネルギー ( $\Delta E$ ) を1層の速度が0から再び0になるまでの1/2サイクル時間 ( $\Delta t$ ) に入力されるエネルギーと定義して検討を行った。

図-8に応答が最も大きいRUN3について、ダンパーなし、ダンパー設置の両ケースでの1層層間変位時刻歴、瞬間入力エネルギーの時刻歴、各エネルギー応答の時刻歴を比較して示す。なお、瞬間入力エネルギー時刻歴に

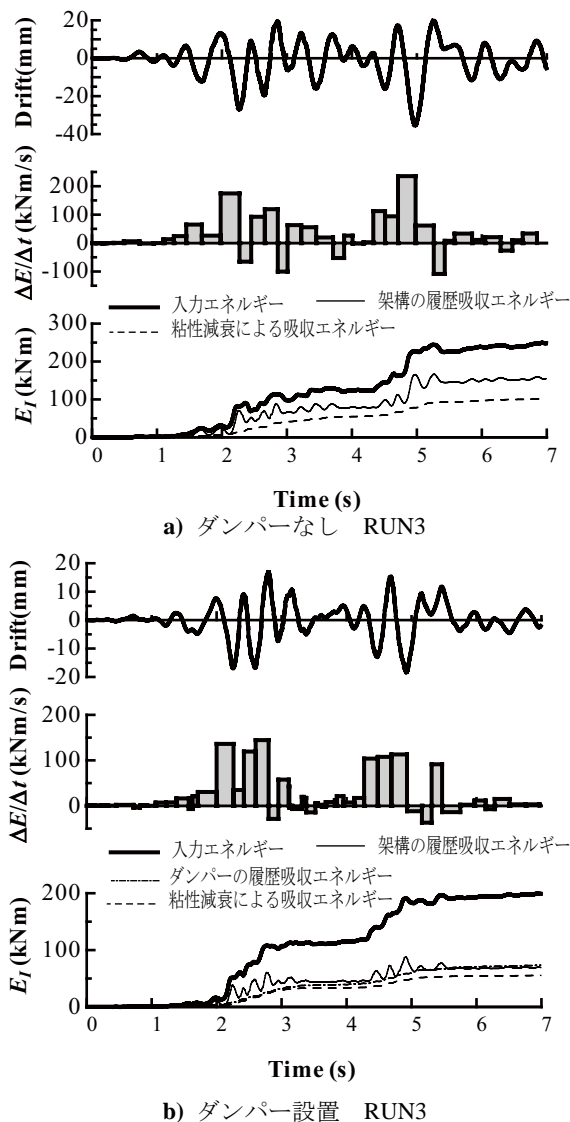


図-8 層間変位と各エネルギー応答時刻歴

ついては、縦軸を1/2サイクル時間で除した値 ( $\Delta E/\Delta t$ ) としており、各矩形の面積が当該サイクルでの瞬間入力エネルギーを表している。なお入力エネルギーと層間変位の値は対象架構の実スケール値である。これを見ると、瞬間入力エネルギーが大きな値を示している時刻では応答層間変位も大きくなっている。ここではRUN3の結果のみを示しているが、他の入力レベルにおいてもダンパー設置の有無に関わらず同様の傾向を示している。

また図-9には最大層間変位と総入力エネルギーと瞬間入力エネルギーの最大値である瞬間最大入力エネルギー ( $\Delta E_{max}$ ) の関係を示す。瞬間最大入力エネルギーと最大応答変位とはよい相関を示している。このことはダンパー設置の有無にかかわらず、累積的な損傷を評価する総入力エネルギーよりも、地震応答経過中で大きな変形を生じさせるようなエネルギー入力の激しさを表す指標である瞬間入力エネルギーの方が、最大応答値の評価に対しては有用であることを意味する。今回の実験ではダンパー設置では大きな応答レベルとなるような実験を行っていないため、最大層間変位角1/150程度までの傾向となるが、最大層間変位と入力エネルギーとの関係におけるダンパー設置有無の影響は、総入力エネルギーよりも瞬間最大入力エネルギーの方が小さい。

各RUNにおける総入力エネルギーと瞬間最大入力エネルギーの両入力エネルギーに対する、架構およびダンパーの各履歴吸収エネルギーならびに粘性減衰による吸

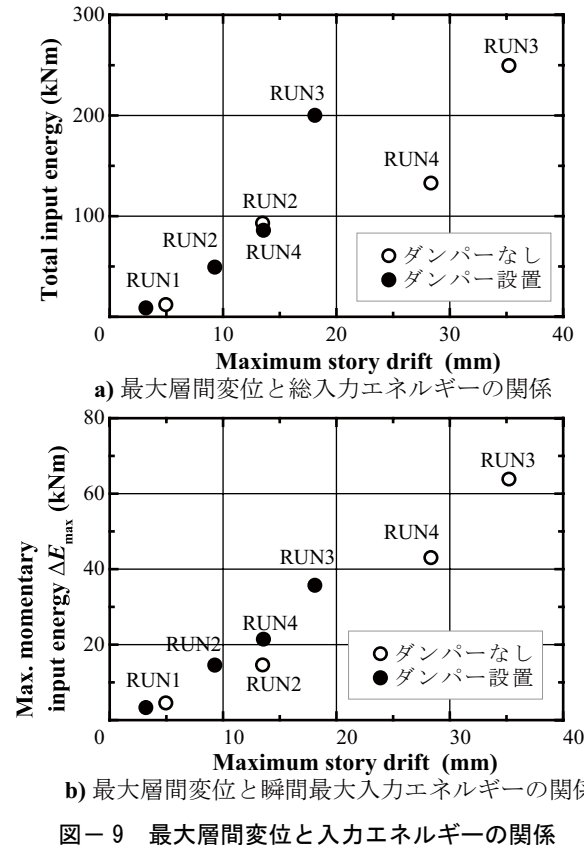


図-9 最大層間変位と入力エネルギーの関係

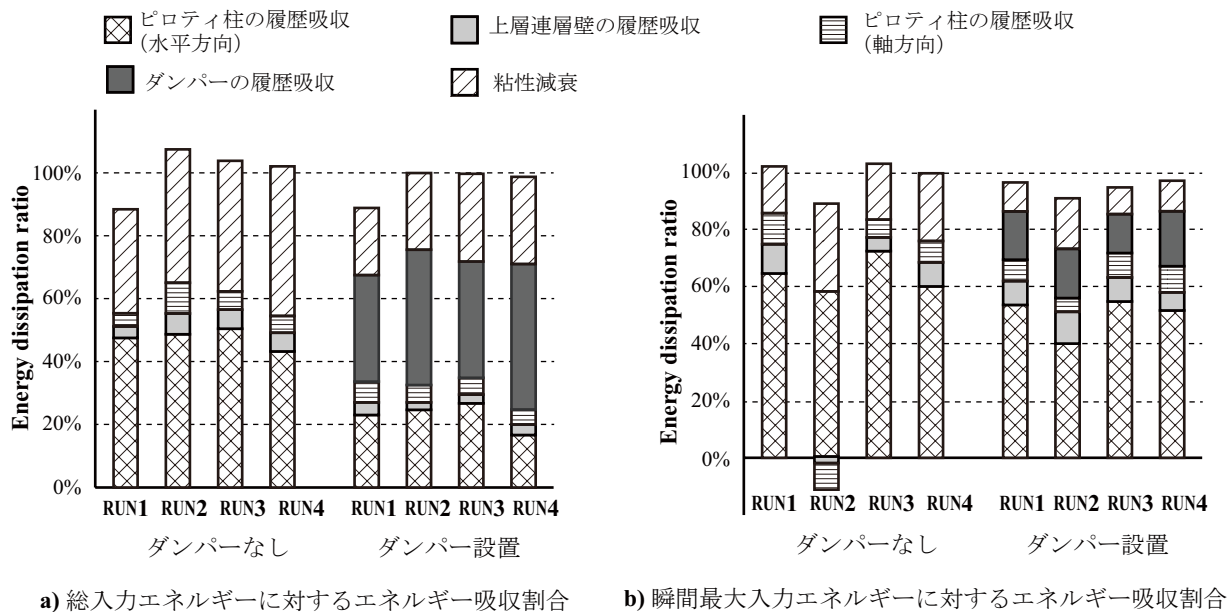


図-10 入力エネルギーに対するエネルギー吸収割合

取エネルギーの割合を図-10に比較して示す。ここで各吸収エネルギーの総和が100%とならないのは、前述のとおり回転変位のうち水平成分しか考慮していないことや本実験における架構解析では、数値積分で生じる不釣合力に対処していないことなどが考えられるが、本論では最終的な結論には至っていない。

総入力エネルギーに対する柱部材の履歴吸収はダンパーなしではおよそ50%となっているのに対して、ダンパー設置ではおよそ30%弱となっている。またダンパーの履歴吸収は総入力エネルギーに対しては30%前後であるのに対し、最大瞬間入力エネルギーに対しては20%弱となっている。また柱の軸変形による履歴吸収、上層連層壁の履歴吸収はダンパー有無によらずおよそ10%前後となっている。これらの傾向は各RUNでおおむね同様の傾向を示している。本検討範囲においては、各吸収エネルギーの負担割合は応答レベルに依らない結果となった。

## 5. まとめ

鋼材ダンパーを設置した6層RCピロティ架構のサブストラクチャ擬動的実験を行い、ダンパー設置の有無による応答性状の比較とエネルギー応答に対する考察を行った。その結果、ダンパー設置により、特に大レベルの地震動入力（本研究ではRUN3）およびその後の最大余震レベルの地震動入力（RUN4）において振動抑制効果がよく発揮できていることが確認された。エネルギー応答性状については、瞬間最大入力エネルギーと最大応答変位との相関関係を確認し、各吸収エネルギーの負担割合が応答レベルに依らない結果となった。

## 謝辞

本実験で鋼材ダンパーとして使用した低降伏点鋼（SLY120）については、（株）免制震デバイス、住金関西工業（株）にご協力を頂き、住友金属工業（株）より材料提供を頂きました。ここに付記し謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：「1995年兵庫県南部地震災害調査速報」, 1995.3
- 2) 本間誠, 堀則男, 井上範夫：ソフトストーリーを活用して地震時損傷を制御するRC建物の設計手法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.3, pp.1087 - 1092, 2008.7
- 3) 福山洋, 岩渕一徳：空間の確保と損傷の防止を目的とした既存ピロティ建築物の地震応答制御, 日本建築学会構造系論文集, No.580, pp.105 - 112, 2004.6
- 4) 寺本尚史, 西田哲也, 小林淳：サブストラクチャ擬動的実験手法を用いた12層RC架構1階側柱の2体同時加力実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.2, pp.217 - 222, 2006.7
- 5) 郡司康浩, 寺本尚史, 西田哲也, 小林淳：12層RC造ピロティ建築物の1階側柱を対象としたサブストラクチャ擬動的実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.3, pp.181 - 186, 2008.7
- 6) 中村孝也, 堀則男, 井上範夫：瞬間入力エネルギーによる地震動の破壊特性評価と応答変形の推定, 日本建築学会構造系論文集, No.513, pp.65 - 72, 1998.11