

# 論文 レンズ型ダンパーを取付けた RC 造間柱の構造性能に関する研究

山崎 康雄\*1・小山 大樹\*2・新保 拓海\*2・北嶋 圭二\*3

**要旨:** レンズ型ダンパーは、1 枚の鋼材板中央部の両面に凹型レンズ形状の加工を施した履歴型ダンパーである。本報では、レンズ型ダンパーの RC 造間柱への取付け方法として、PC 鋼棒を用いる案と間柱にはめ込む案の 2 案を考案し、実大静的加力実験により、その構造性能を確認した。目標とした層間変位に対して、PC 鋼棒案は RC 造間柱部にひび割れは生じなかったが、はめ込み案はひび割れが確認された。しかしながら、両取付け案の間柱全体の荷重変位関係は安定した履歴ループを描き、等価剛性および等価粘性減衰定数にも顕著な差がみられず、両取付け案はレンズ型ダンパーの性能を十分に発揮できることが確認された。

**キーワード:** 制振間柱, 実大静的加力実験, 低降伏点鋼, 履歴型, せん断パネル, レンズ型ダンパー

## 1. はじめに

建物の耐震性能の向上を目的とし、様々なエネルギー吸収デバイスが開発され、各デバイスの設計法の提案や、実建物への適用事例について報告されている<sup>1)2)</sup>。その中で、レンズ型ダンパー (Lens Shear Panel Damper: LSPD) は、1 枚の鋼材板中央部の両面に凹型レンズ形状の加工を施し、フランジを不要とした履歴型ダンパーである。また、LSPD 単体の基本的な構造性能は、各種実験により確認されている<sup>3)</sup>。

デバイスの取付け方法についても、様々な方法が提案されているが、間柱型は、デバイスを建物の間柱に取付けることで、開口部を遮ることなく設置でき、制振効果により、耐震性能が向上する方法である (図-1)。LSPD を取付けた S 造間柱は、実験により構造性能は確認されており、実建物へも適用されている<sup>4)5)</sup>。

本報は、LSPD を取付けた RC 造間柱の実建物への適用に向け実施した実験結果について記す。LSPD の取付け方法はボルト接合によるため、RC 造間柱に取付ける場合、鋼材を介して取付ける必要がある。そこで、LSPD の性能を十分に発揮できる取付け方法を考案し、その構造性能を実大静的加力実験により確認した。

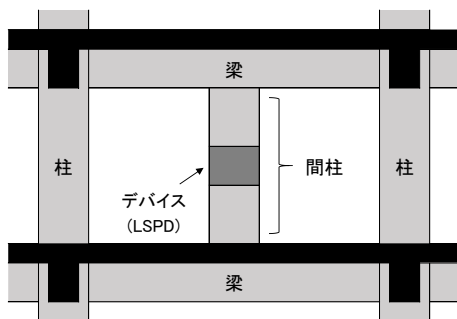


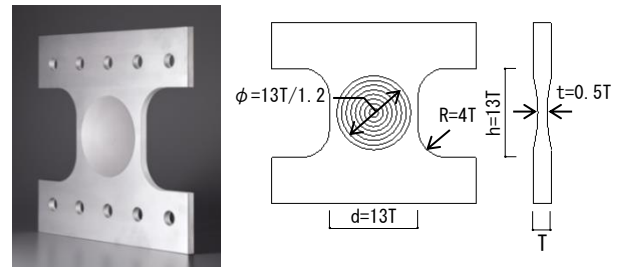
図-1 間柱型の取付け方法

## 2. LSPD の概要

LSPD の形状を図-2 a) に示す。LSPD は、板材中央部の凹型レンズ形状の加工により、板材の中央部が塑性化し易くなり、ひずみがパネル全体に分散することで、繰り返しの変形に有効な履歴型ダンパーである。

LSPD の鋼材は、地震エネルギーを効率的に吸収することができる低降伏点鋼 (LY100, LY225) を使用している。

LSPD 各部の寸法は、図-2 b) に示すように板厚 (T) と比例関係にあり、相似則が成立することが実験により確認されている<sup>3)</sup>。LSPD の板厚は、12~24 mm がラインアップされ、必要耐力に応じた配置計画が可能である。また、板厚が薄いため間柱への取付けが可能である。



a) LSPD 形状      b) LSPD 各部の寸法関係

図-2 LSPD の概要

## 3. 試験概要

### 3.1 試験体概要

LSPD を RC 造間柱に取付ける場合、鋼材を介して取付ける必要があるため、取付け方法を考案し、3 体の試験体を計画した。本報では、紙面の都合上、その内の 2 体について記す。試験体は、PC 鋼棒を用いる案 (RCT 試験体) と間柱にはめ込む案 (RCA 試験体) とし、計画時の共通事項とそれぞれの特徴を以下に示す。

\*1 西松建設 (株) 技術研究所 (正会員)

\*2 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻 博士前期課程(学生会員)

\*3 日本大学 理工学部海洋建築工学科教授 博士(工学) (正会員)

(1) 試験体の共通事項

試験体の共通事項として、RC 造間柱の断面は、共同住宅のバルコニー側への設置を想定し、250 mm×1100 mm、コンクリート設計基準強度は  $F_c=33 \text{ N/mm}^2$  とし、LSPD は鋼材 LY225、板厚  $T=12 \text{ mm}$ 、中央部厚さ  $t=6 \text{ mm}$  の Type12-6 を使用した。試験区間は上下スタブ間とし、内法高さ(間柱高さ)は 2000 mm とした。コンクリート材料試験結果を表-1 に、鉄筋材料試験結果を表-2 に、鋼材試験結果を表-3 に示す。

表-1 コンクリート材料試験結果

試験体名	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	割裂引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
RCT	38.8	4.7
RCA	36.8	2.9

表-2 鉄筋材料試験結果

種類	鉄筋	降伏応力 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 [ $\times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ]
SD295A	D10	397.3	508.6	18.27
	D13	361.7	497.1	17.68
SD345	D19	388.6	579.2	17.47
	D25	406.1	598.2	19.24

表-3 鋼材試験結果

種類	材料名	降伏応力 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	破断伸び [%]
PC鋼棒	SBPR1080/1230	1181.7	1267.6	10.9
レンズダンパー	LY225	220.0	307.5	66.2

(2) RCT 試験体

RCT 試験体図を図-3 に示す。RCT 試験体は、上下間柱をそれぞれ 2 本の PC 鋼棒により、スタブ端から鉄骨ブラケット(SS400)を締付けた。LSPD は、鉄骨ブラケットに高力ボルト摩擦接合により取付けた。PC 鋼棒は 1 本当たり 457 kN(定着時緊張力)の軸力を与え、LSPD の設計用最大水平荷重(340 kN)に対して RC 造間柱のひび割れを許容しない試験体とした。RC 造間柱部の主筋は、4-D19(SD345)とした。

(3) RCA 試験体

RCA 試験体図を図-4 に示す。RCA 試験体は、RC 造間柱に埋め込まれた支圧板(SS400)に LSPD をはめ込み、六角ボルトで取付けた。支圧板は、頭付きスタッドとシヤキーにより定着した。設計用最大水平荷重に対して RC 造間柱のひび割れを許容したが、フランジを不要とする LSPD の特徴を活かした試験体である。上下間柱間の隙間を短くし(30 mm)、断熱性および遮音性に配慮した。RC 造間柱部の主筋は、20-D25(SD345)とした。

3.2 加力方法及び計測項目

加力装置を図-5 に示す。加力装置は、日本大学理工学部大型構造物試験センターに設置されている通称建研式加力装置を用いた。水平加力は、反力壁に取付けた静的能力+2000 kN、-800 kN(正負方向は、図中矢印参照)の

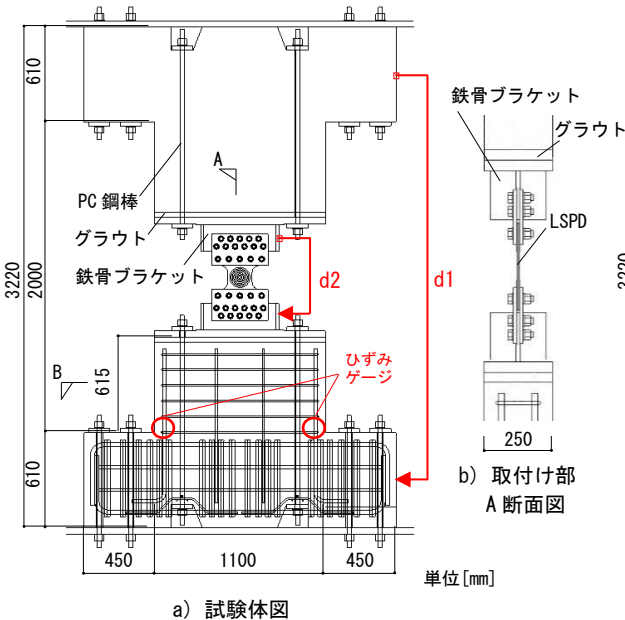


図-3 RCT 試験体図

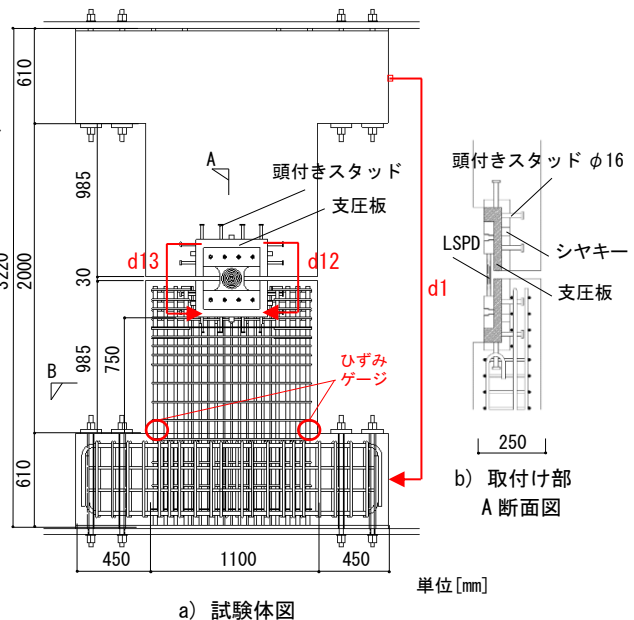


図-4 RCA 試験体図

水平油圧ジャッキ(図中 A)による変位制御とし、鉛直加力(軸力)は、加力フレーム内の静的能力+2000 kN、-1000 kNの鉛直油圧ジャッキ(図中 B)により軸力が 0 kN になるよう荷重制御で載荷した。なお、鉛直油圧ジャッキの上にはスライド支承(図中 C)を設け、軸力は試験体の水平変位に追従し、常に試験体柱頭圆心位置に作用させた。また、パンタグラフ(図中 D)によって L 字ビーム(図中 F)を平行に維持した。

変位計取付け位置と主なひずみゲージの貼り付け位置を図-3、4中に示す。計測項目は水平荷重、鉛直荷重、試験体各変位およびひずみとした。荷重は、水平および鉛直油圧ジャッキに組み込まれたロードセルにより計測し、各変位は、ストローク式変位計および巻き取り式変位計により測定した。試験体の柱頭柱脚間の層間変位は、試験体側面に取付けた測定治具を用いて計測し、変位計 d1 が試験体全体の層間変位を示し、LSPD の水平変位は RCT は d2, RCA は d12 と d13 の平均とした。ひずみゲージは RCT に 107 点, RCA に 115 点を貼付し計測した。

### 3.3 加力サイクル

加力サイクルを図-6に示す。各試験体とも、初めに LSPD の弾性域である±100 kN まで荷重制御で 1 サイクル加力した後、変位制御で正負交番により加力を行った。層間変位を試験体部材角 R で規定し、 $R=1/1333$  rad から  $1/500$ ,  $1/200$ ,  $1/133$ ,  $1/100$ ,  $1/67$  rad と漸増加力を行った。ここで、25 cm/sec 相当の中小地震が繰り返し作用する場合を想定し、 $R=1/200$  rad の加力サイクルを 10 サイクルと他のサイクルよりも多く加力する計画とした。また、大地震後の性能確認のため、 $R=1/67$  rad の加力サイクルの後に、 $R=1/200$ ,  $1/100$  rad の加力も行った。ただし、本報では、設計時に検討される範囲( $R=1/100$  rad 程度)での構造性能の確認を主目的としていたため、以降の検討は  $R=1/100$  rad (22 サイクル目)までを対象とする。

## 4. 実験結果

実験結果として、図-7 a)に RCT の間柱全体の荷重変位関係、b)にひび割れ図、c)に LSPD の最終状況を、図-8 a)~c)に RCA のそれらを示す。なお、荷重変形関係については、 $R=1/67$  rad の結果も参考に点線で示す。LSPD の降伏荷重は、水平荷重と LSPD の水平変位の関係より 0.03%オフセット耐力で評価した。

### 4.1 RCT 試験体(図-7)

RCT は、2 サイクル目の正側( $R=1/1333$  rad)の水平荷重 147 kN 時に LSPD がせん断降伏した。部材角  $1/500$  rad 以降では、水平荷重は変位漸増および繰り返し載荷に伴うひずみ硬化の影響から徐々に上昇する傾向を示した。部材角  $1/200$ ,  $1/133$  rad では、安定した履歴ループを描いた。また、17 サイクル目負側( $R=1/133$  rad)で最大水平荷

A : 水平油圧ジャッキ B : 鉛直油圧ジャッキ C : スライド支承  
D : パンタグラフ E : キャタピラ F : L 字ビーム

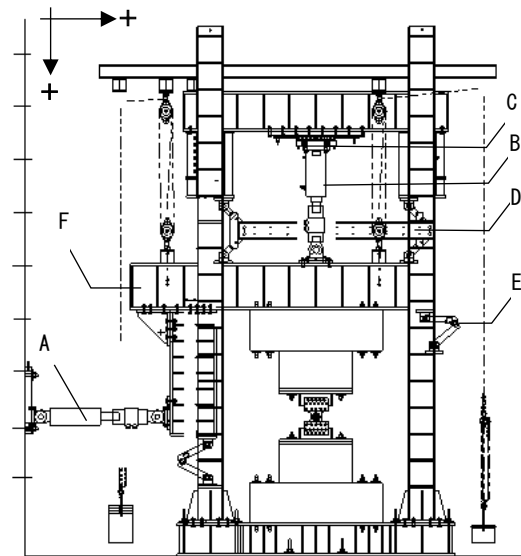


図-5 加力装置

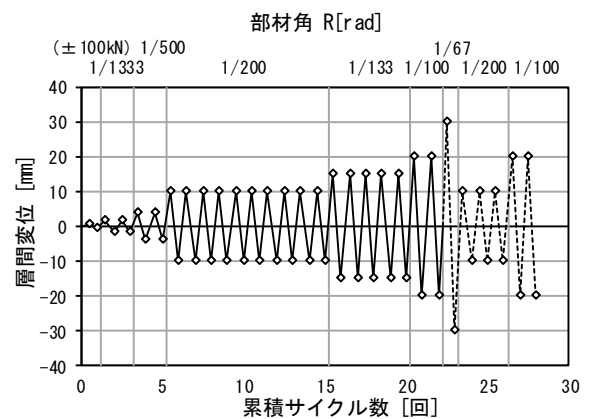


図-6 加力サイクル

重-266 kN に達し、20 サイクル目の負側( $R=1/133$  rad)で LSPD に面外変形が生じ始めたが、水平荷重の低下は見られなかった。21 サイクル目の負側( $R=1/100$  rad)で LSPD 右下フィレットに亀裂が生じ、徐々に水平荷重が低下し始めたが履歴ループの形状は維持していた。なお、23 サイクル目の負側( $R=1/67$  rad)で、最大荷重に対し 40%低下したが、間柱部にひび割れは確認されていない。

### 4.2 RCA 試験体(図-8)

RCA は、2 サイクル目の正側( $R=1/1333$  rad)の水平荷重 132 kN 時に LSPD がせん断降伏した。2 サイクル目(LSPD 降伏時)に下間柱端部と支圧板の隅に、ひび割れが目視により確認された。9 サイクル目の正側( $R=1/200$  rad)と 18 サイクル目の負側( $R=1/133$  rad)で下間柱、16 サイクル目正側( $R=1/133$  rad)では上間柱に、せん断ひび割れが確認されたが、安定した履歴ループを描いた。また、20 サイクル目の負側( $R=1/133$  rad)で LSPD に面外変形が生じ始めたが、水平荷重の低下は見られなかった。22 サ

イクル目の負側( $R=1/100$  rad)で、最大水平荷重-266 kNに達し、LSPD左上フィレットに亀裂が生じた。なお、23サイクル目( $R=1/67$  rad)でも荷重は低下せず、履歴ループの形状を維持していた。

## 5. 実験結果の検討

### 5.1 間柱部のひび割れ

RCTとRCAの下間柱脚部の曲げモーメント $M$ と曲率 $\phi$ の関係を図-9に示す。曲率は、主筋に貼付したひずみゲージより求めた。また、上間柱は、下間柱と同様の挙動のため、ここでは割愛する。

RCTの $M-\phi$ 関係は弾性の挙動を示しており、材料試験結果より算出した弾性剛性と概ね一致している。よって、内部などの目視できないひび割れも、発生していないと考えられる。

RCAの $M-\phi$ 関係は、材料試験結果より算出した弾性剛性と初期では一致しているが、早期に非線形の挙動を示しており、その等価剛性は、材料試験結果から算出した弾性剛性より低下し、その後一定値を保っている。よって早期にひび割れが生じ剛性が低下したが、その後最終加力まで著しい影響はみられない。

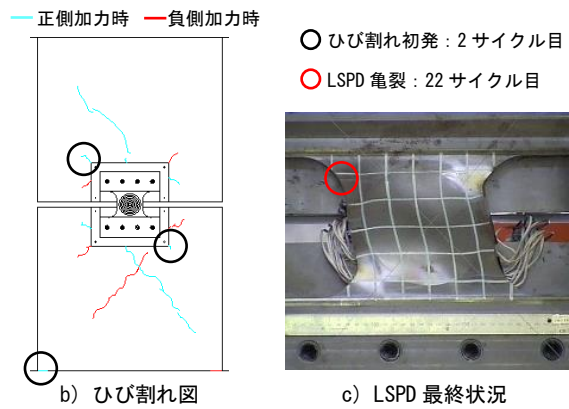
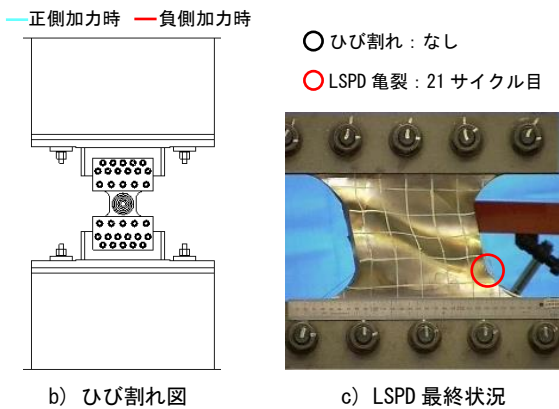
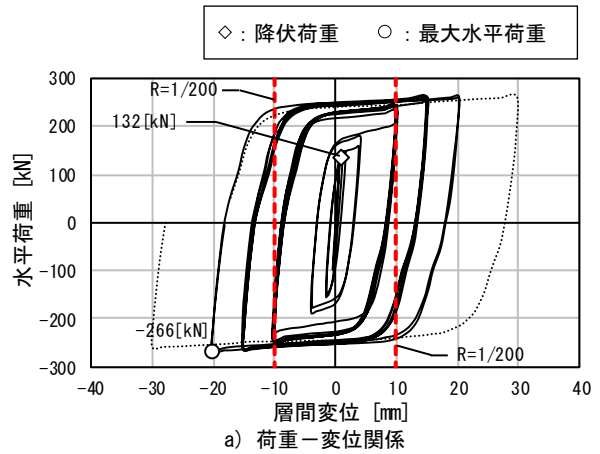
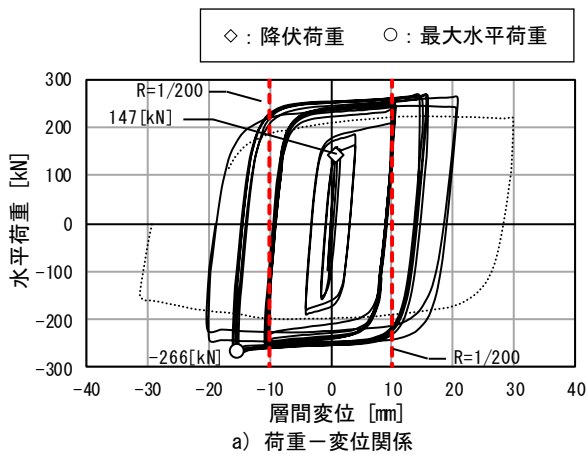


図-7 RCT 実験結果

図-8 RCA 実験結果

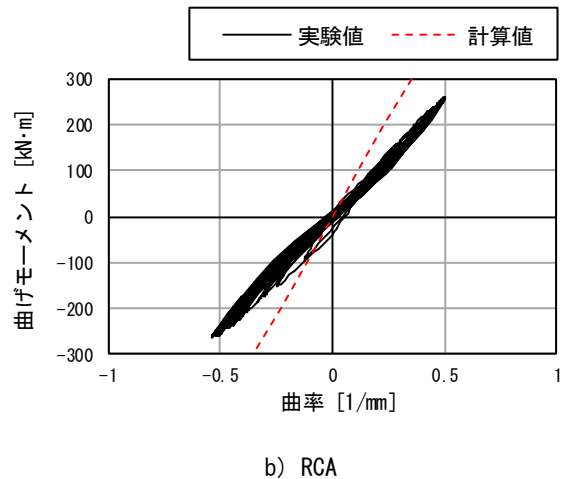
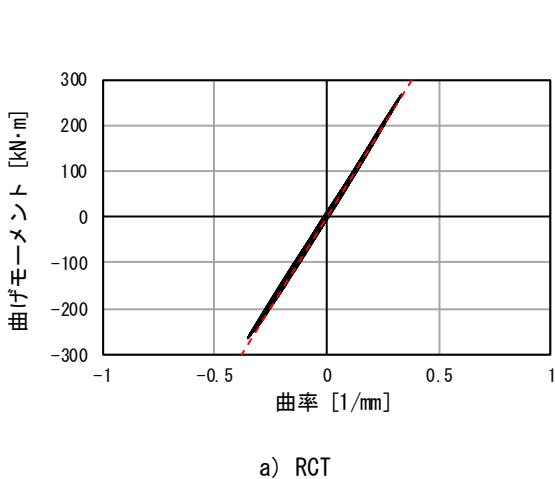


図-9  $M-\phi$ 関係

## 5.2 変形割合の推移

LSPD の変形成分が間柱全体変形(層間変位)に占める割合の推移を図-10に示す。ここでは、各サイクルの荷重 0 kN からピークまでの LSPD の増分変位量を、層間変位の増分変位量で除して割合を算定した。

RCT と RCA の LSPD の変形割合は、±100 kN の正負ピーク時に LSPD の変形成分が全体変形のうち約 4 割を占めている。LSPD の降伏後、徐々に LSPD の変形成分の割合が増え、R=1/200 rad 以降は約 9 割を占めている。両取付け案は、各サイクルで同様の傾向を示している。RCA は、実験全体を通して間柱にひび割れが生じたが、LSPD の変形成分は高い割合を維持している。

## 5.3 等価剛性

±100 kN 加力後の RC 造間柱全体の等価剛性の推移を図-11に示す。等価剛性は、式(1)に示すように、各サイ

クルの水平荷重と、層間変位の正負最大値を結ぶ直線の勾配とする。

$$K_{eq} = \frac{P_{max}^+ - P_{max}^-}{\delta_{max}^+ - \delta_{max}^-} \quad (1)$$

$K_{eq}$  : 等価剛性

$P_{max}^+, P_{max}^-$  : 1 サイクルの正負最大水平荷重

$\delta_{max}^+, \delta_{max}^-$  : 1 サイクルの正負最大層間変位

RCT と RCA の等価剛性は、4 サイクル目 (R=1/500 rad) までは共に低下するが、5 サイクル目 (R=1/500 rad) においては共に、その値は大きくなっている。これは、履歴型ダンパーの特性であるひずみ硬化の影響であると考えられる。R=1/200 rad 以降も共に、各サイクルで同様の推移を示しており、その値も概ね等しい。

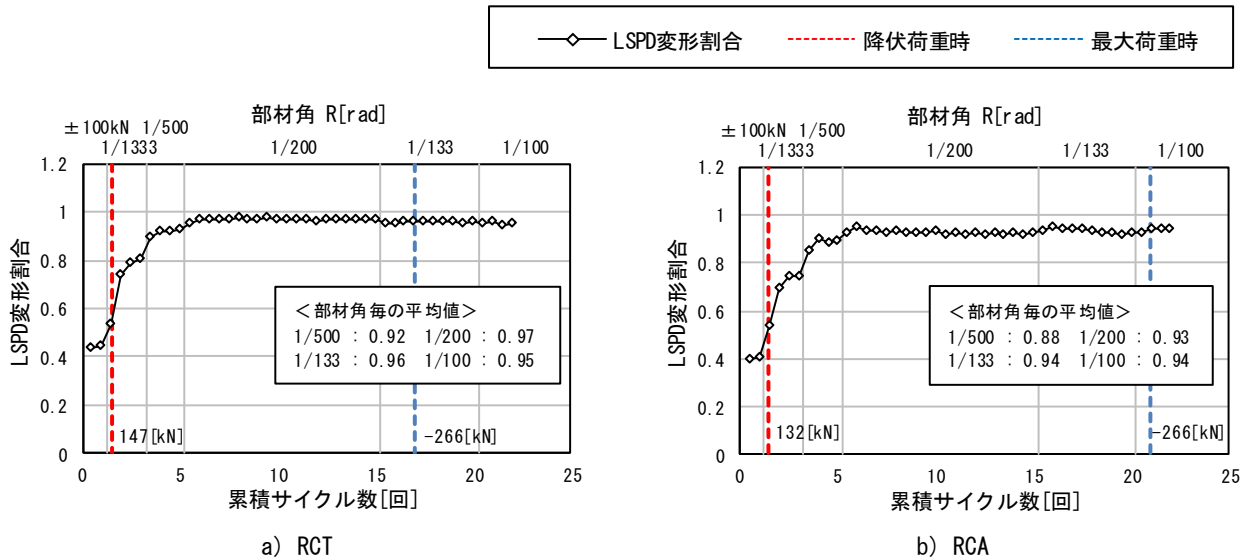


図-10 LSPD の変形成分が間柱全体変形に占める割合の推移

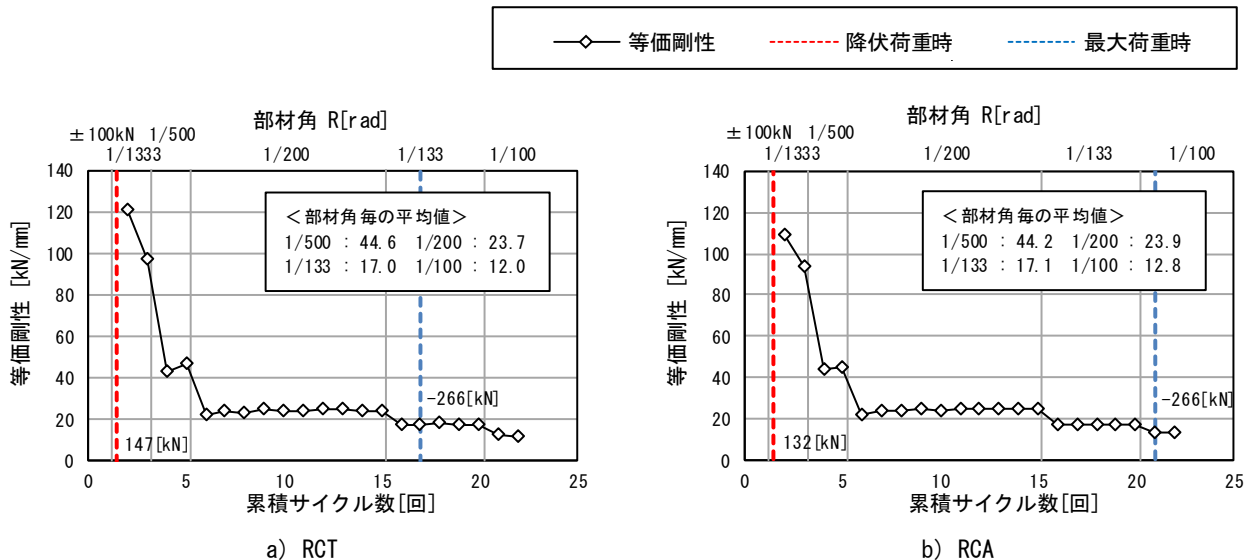


図-11 RC 造間柱全体の等価剛性の推移

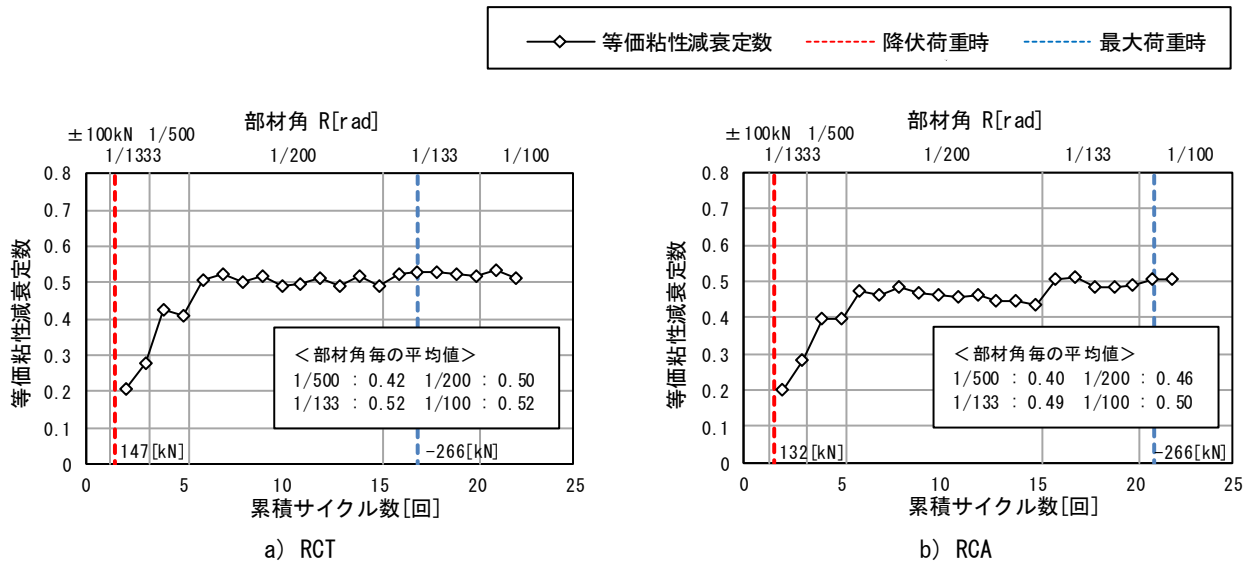


図-12 RC造間柱全体の等価粘性減衰定数の推移

#### 5.4 等価粘性減衰定数

±100 kN 加力後の RC 造間柱全体の等価粘性減衰定数の推移を図-12 に示す。等価粘性減衰定数は、式(2)、(3) に示すように、ポテンシャルエネルギーを、式(1)の等価剛性を用いて算出した。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (2)$$

$$W = \frac{K_{eq}}{2} \left( \frac{\delta_{max}^+ - \delta_{max}^-}{2} \right)^2 \quad (3)$$

$h_{eq}$ : 等価粘性減衰定数,  $\Delta W$ : 1 サイクルの履歴面積  
 $W$ : ポテンシャルエネルギー

RCT と RCA の等価粘性減衰定数は、5 サイクル目 (R=1/500 rad) まで共に増加し、その後は 0.5 程度と高い値を維持している。R=1/200 rad で RCT は概ね一定であるが、RCA はサイクル数に応じて若干減少する。R=1/133 rad 以降、両取付け案の推移は若干異なるが、その値に顕著な差はみられない。

#### 6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) RCT は、LSPD に亀裂が生じ水平荷重が低下したが履歴特性は維持し、間柱にひび割れは生じなかった。
- 2) RCA は、間柱にひび割れが生じたが、最大水平荷重経験後も安定した履歴特性が得られた。
- 3) RCT と RCA は共に、最大水平荷重に達するまで安定した履歴特性が得られ、LSPD に面外変形が生じても水平荷重の低下は見られなかった。
- 4) RCT と RCA は共に、LSPD の変形成分が全体変形の約 9 割を占め、RCA では RC 造間柱にひび割れが

生じたが LSPD の変形成分は高い割合を維持した。

- 5) RCT と RCA の等価剛性および等価粘性減衰定数の各サイクルの推移は概ね一致している。

よって、実施した実験の範囲ではあるが、両取付け案は、LSPD の性能を十分に発揮できることが確認された。

#### 謝 辞

本研究は、レンズダンパー推進協議会(日本 Casting, 飛島建設, 鉄建建設, 青木あすなる建設, 東亜建設工業, 西松建設)の一環で実施した成果の一部である。また、本報は文献 6) を基に再構成し、新たな知見を追記した。ここに記し、関係各位に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 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 3 版, 2013.11
- 2) 日本建築学会: 鋼構造制振設計指針, 2014.11
- 3) 名取祥一ほか: レンズ形状を有するせん断パネルダンパーの開発(その 1~4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.835-842, 2013.8
- 4) 山崎信宏ほか: レンズ形状を有するせん断パネルダンパーの開発(その 5~11), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.851-864, 2014.9
- 5) 山崎信宏ほか: 間柱型せん断パネルダンパーに関する実験的研究(その 1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.115-120, 2016.8
- 6) 小山大樹ほか: レンズダンパーを取り付けた RC 造間柱の構造性能に関する実験的研究(その 1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.575-578, 2017.8