

耐震要素としてブレース型ダンパーが取り付いた RC 造骨組及び取付部に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON RC FRAMES AND CONNECTIONS WITH BRACED DAMPERS USED AS SEISMIC ELEMENTS

大月智弘^{*1}, 太田行孝^{*2}, 竹中啓之^{*3}, 釣賀達稀^{*4}
 OTSUKI Tomohiro, OOTA Yukitaka, TAKENAKA Hiroyuki and TSURUGA Tatsuki

The purpose of this study is to assess the structural performance of the PC steel bar crimping method and the steel bar anchorage method as the means of attaching braced dampers to RC frames. First, we conducted elemental experiments on the attachment joints, by subjecting 10 specimens to loading. Subsequently, we performed structural experiments on the framework with braced dampers to examine the damage conditions at the attachment joints for the two methods. We then carried out a plane frame analysis to simulate a structural experiment, and compared the experimental and analytical results to investigate the effect of misalignment displacement of the attachment on the behavior of the braced damper. As a result, the following findings were obtained.

1. The elemental experiments found that the shear capacity of the attachment joints exceeded the calculated values.
2. The structural experiments showed stable properties with almost no reduction in bearing capacity up to large deformations.
3. Based on a comparison between the experimental data and the analytical results, it was inferred that the effect of misalignment displacement of the attachment on the behavior of the braced damper was small.

Keywords : Brace-type Damper, PC Steel Bar Crimping Method, Rebar Fixing Method, Hinge-Relocation
 ブレース型ダンパー, PC 鋼棒圧着方式, 鉄筋定着方式, ヒンジリロケーション

1. はじめに

国内において建設された超高層鉄筋コンクリート造(以下、RC 造)建物は、設計情報が公開された建物だけでも600棟を超えており¹⁾、長周期地震動に対する耐震性能は十分に把握されておらず、応答変形が従来の設計目標値を上回ることが危惧されている。長周期地震動への対策方法の一つとして、ブレースタイプの制振装置(以下、ブレース型ダンパー)を附加することが考えられるが(図1)、RC骨組との取付部は異種部材の接合となり、取付部の変形や強度が耐震性能に影響するため、取付方法の検討が必要である(図2)。この取付方法について、毎田らは、突起付き鋳鉄製ガセットプレートを圧着接合する方法を用いることでブレース型ダンパーの挙動に影響を及ぼすような取付部のずれや浮き上がりを抑えることができると報告している²⁾。

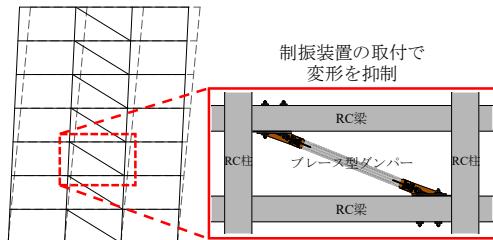


図1 概念図

本研究では、鋼製ガセットプレートをPC鋼棒により圧着接合する方式(以下、PC鋼棒圧着方式)と、鋼製シヤーキーおよび定着鉄筋付きガセットプレートにより接合する方式(以下、定着鉄筋方式)を対象に要素実験を行い、取付部の耐力および変形等を確認する。次に、これらの方を用いてブレース型ダンパーを附加したRC骨組の構造実験を行い、その耐震性能を確認する。さらに、ブレース型ダンパーを附加したRC骨組の構造実験を模擬した平面フレーム解析を行い、その適用性と取付部のずれ変形が与える影響について検討を行う。

2. ブレース型ダンパー取付部要素実験

本章では、スタブと鋼板の取付部に、PC鋼棒圧着方式と、定着鉄筋方式を用いた要素実験試験体の他、鋼製シヤーキーのみを用いた要素実験試験体に対して構造実

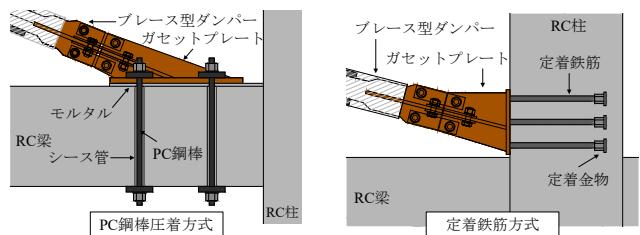


図2 ブレース取付方法例

* 1 戸田建設(株)技術研究所 修士 (工学)

* 2 戸田建設(株)構造設計部 博士 (工学)

* 3 戸田建設(株)技術研究所 博士 (工学)

* 4 戸田建設(株)構造設計部 修士 (工学)

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

Structural Design Department, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

Structural Design Department, TODA CORPORATION, M.Eng.

表 1 要素試験体概要

試験体名	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10		
接合方式	PC 鋼棒圧着		シヤーキーのみ		定着鉄筋							
仕様	4-φ17 (PC 鋼棒 C 種 1 号)						4-D16 (SD390)					
シヤーキー	無		150mm×150mm×25mm		無							
F _c (σ _B) [N/mm ²]	40 (44.6)	20 (21.6)	60 (64.1)	20 (21.6)	40 (44.6)	60 (64.1)	20 (21.6)	40 (44.6)	60 (64.1)			
加力方式	単調	繰返			単調							

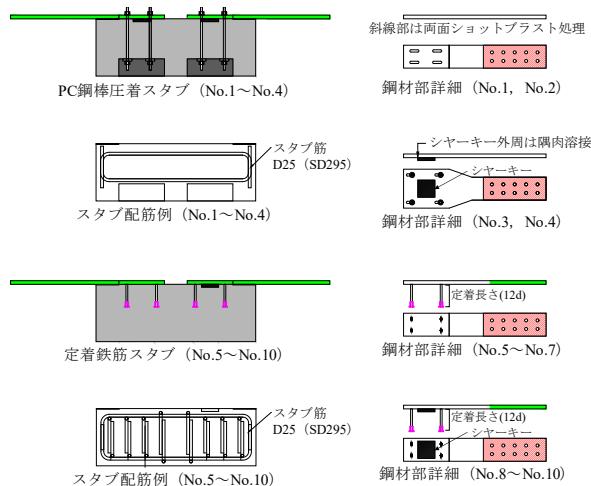


図 3 要素実験試験体図

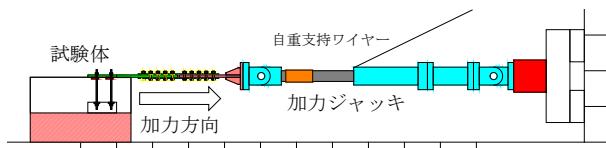


図 4 要素実験装置図

験を行い、取付部のせん断耐力および変形性状について検討を行う。

2.1 実験計画

要素実験試験体の概要を表 1 および図 3 に示す。試験体の縮尺は実大の取付部の1/2程度とした。No.1とNo.2試験体はPC鋼棒圧着方式とし、パラメータは載荷方法とした。圧着は4本のPC鋼棒（Φ17C種1号）で行い、1本につき許容緊張荷重195kNを導入した。No.1は単調な引張載荷、No.2は100kNずつ載荷荷重を漸増させ、載荷と除荷を2回ずつ行う繰返載荷とした。No.3とNo.4試験体はシヤーキー単体の耐力および変形性状を把握する

ことを目的とするため、PC鋼棒（Φ17C種1号）を4本設けているが、導入する緊張力を許容緊張荷重の10分の1とした。また、パラメータはスタブのコンクリート強度とした。No.5～No.10試験体は定着鉄筋方式とし、パラメータはシヤーキーの有無とスタブのコンクリート強度とした。定着鉄筋にはD16のねじ節鉄筋を用い、鋼板から12d離れた末端を機械式定着とした。図4に載荷装置を示す。スタブコンクリートを反力床に緊結し、鋼材の高さに設置した油圧ジャッキにより鋼材を水平に引張ることで加力した。

2.2 実験結果

実験試験体の水平荷重と水平ずれ変形との関係を図5に示す。図5(a)は、No.1試験体およびNo.2試験体の結果であり、図中の点線は、圧着に用いたPC鋼棒のひずみから算出した緊張力に、摩擦係数として0.6を乗じた最大静止摩擦力の計算値を示している。試験体No.1とNo.2では、両者ともに0.1mm程度のずれ変形で水平荷重が計算値を上回った。また、0.1mm程度のずれ変形時に両試験体は同程度の水平荷重で滑り出しており、明確な差は見られなかった。図5(b)は、No.3およびNo.4試験体の結果であり、図中の点線は、式(1)により算出した各試験体の支圧耐力の計算値³⁾を示している。いずれの試験体においても、0.1mm以下の水平ずれ変形で水平荷重が計算値を上回った。

$$Q = h \cdot b \cdot \sigma_B \quad (1)$$

ここで、 h ：シヤーキー高さ、 b ：シヤーキー幅

図5(c)は、No.5～No.7試験体の結果であり、図中の点線は、鋼・コンクリート機械的ずれ止め構造設計指針⁴⁾を参考に、式(2)および式(3)から算出したせん断耐力の計算値 Q_u を示している。いずれの試験体も水平荷重は計算値を上回ったが、水平荷重が計算値を上

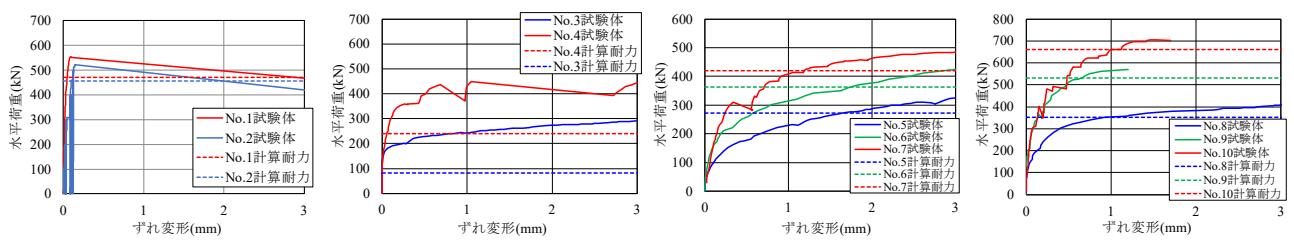


図 5 要素実験試験体の水平荷重と水平変形との関係

回る時点の水平ずれ変形は1mm～2mm程度であった。

$$Q_u = h_s n \cdot h_s \phi \cdot h_s q_u \quad (2)$$

$$h_s q_u = 2.75 h_s a (cE \cdot F_c)^{0.3} \sqrt{\frac{h_s L}{h_s d}} \quad (3)$$

ここで、 $h_s n$ ：定着鉄筋本数、 $h_s \phi$ ：耐力低減係数（＝

表2 各試験体の実験結果の一覧

試験体	最大水平荷重 (kN)	計算耐力 (kN)	水平ずれ変形が 2mmまでにおける 最大水平荷重 (kN)	計算耐力に達し た水平ずれ変形 (mm)
No.1	552	470	552	0.05
No.2	522	456	522	0.12
No.3	443	81	273	0.01
No.4	599	240	448	0.06
No.5	353	272	289	1.65
No.6	480	363	381	1.85
No.7	494	420	463	1.19
No.8	424	353	383	0.98
No.9	570	530	570	0.66
No.10	705	660	705	0.99

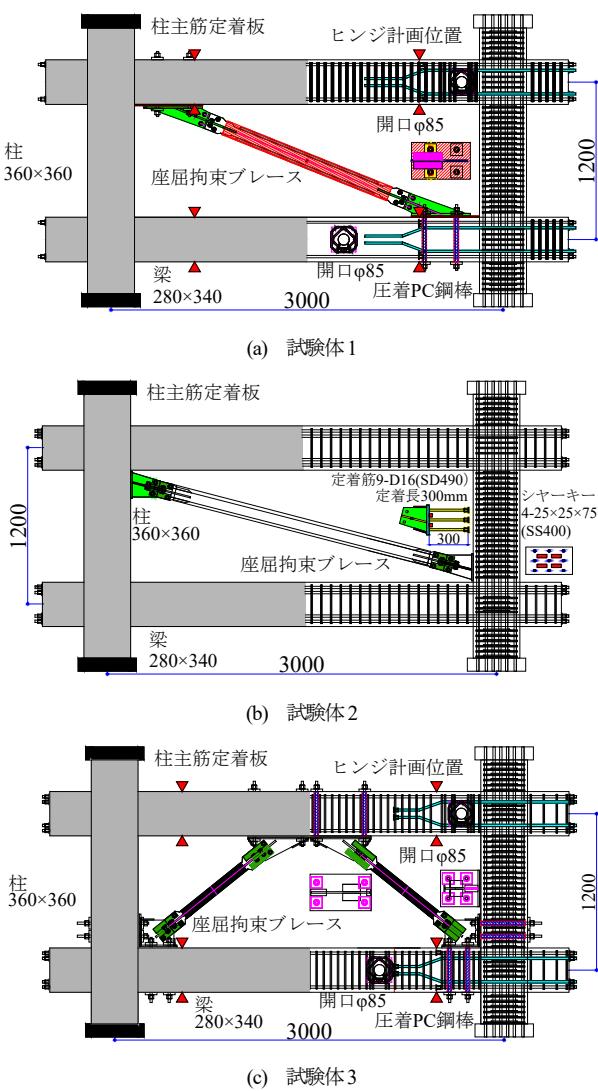


図6 骨組試験体図

0.85), $h_s q_u$ ：定着鉄筋1本あたりの終局せん断耐力, $h_s a$ ：定着鉄筋1本あたりの断面積, cE ：コンクリートのヤング係数, F_c ：コンクリートの設計基準強度, $h_s L$ ：定着鉄筋の長さ ($8h_s d$ を超える場合は $8h_s d$), $h_s d$ ：定着鉄筋の直径

図5(d)は、No.8～No.10試験体の結果であり、図中の点線は、式(1)により求めたシヤーキーによる支圧耐力と式(2)および式(3)により求めた定着鉄筋によるせん断耐力を単純累加して算出した計算値を示す。いずれの試験体においても、水平ずれ変形が1mm以下で水平荷重が計算値を上回った。

各試験体の実験値結果の一覧を表2に示す。いずれの試験体においても最大水平荷重は計算値を上回った。また、部材性能に影響しないずれ変形として2mm程度³⁾を限界と考えた場合、ずれ変形が2mmまでにおける水平荷重についても、計算耐力を上回った。特に、複数のせん断抵抗要素をもつNo.8～10試験体では、各抵抗要素の耐力の単純累加により、取合部のせん断耐力を評価できることがわかる。また、定着鉄筋のみで接続した場合、計算耐力に達した時点におけるずれ変形が他の抵抗要素と比較して大きくなるため、定着鉄筋に加えてシヤーキーを取付けることが有効だと考えられる。

3. ブレース型ダンパー付きRC造骨組実験

本章では、前章で確認した2つの接合方式を用いて、RC造骨組にブレース型ダンパーを取り付けた試験体を対象に構造実験を行い、その耐震性能を確認する。ブレースを取り付けないRC造骨組の載荷実験を実施したのち、同試験体にブレースを取り付けて載荷実験を実施する。

3.1 実験計画

(1) 試験体

試験体の概要を図6および表3に示す。試験体は1層1スパンのRC造骨組試験体で、縮尺を1/2.5とし、3体とする。

試験体1ではブレース型ダンパーを取り付けるためのガセットプレートを梁端部に取付ける。ガセットプレートは、あらかじめ梁にシース管を埋め込んでおき、コンクリートの打設後にPC鋼棒で梁に圧着する。圧着は4本のPC鋼棒(Φ17C種1号)で行う。梁端部をヒンジ計画位置とした場合、圧着力の緩みが懸念されるため、大梁はY字方式の梁端ヒンジリロケーション梁⁵⁾とする。また、梁端ヒンジリロケーション梁の梁端部曲げ余裕度は1.37とし、梁端部とY字筋の先端付近にΦ85の開孔を開けた。

試験体2では、ガセットプレートを柱端部に取付け、柱コンクリート打設時にセットする。試験体2のガセットプレートの定着は、引張力に対してベースプレート裏に溶接した定着版付き鉄筋で処理し、せん断力は裏面に溶接した鋼製のシヤーキーで対応する。

試験体3では、ガセットプレートを梁中央および柱

表3 骨組試験体概要

	鉄筋		コンクリート $F_c(\sigma_b)$ (N/mm ²)	梁開孔	ガセットプレート	プレース
試験体1	梁主筋	一般部 一段筋 4-D16 (SD390) 補強部 一段筋 4-D16 (SD390) +1-D16 (SD490)	梁 42 (48.0)	$\phi 85$	GPL12 (SN490B) BPL (SN490B) 補強リブ PL9 (SS400) PC鋼棒C種1号4-φ17	座屈拘束プレース 芯材: SS400 (12×70)
		二段筋 3-D16 (SD490) +2-D16 (SD295)				
		あばら筋 6-D6 (UHY685) @75	柱 60 (69.3)			
	柱主筋	20-D16 (SD490)	グラウト 80 (91.7)			
		帯筋 6-D6 (UHY685) @50				
試験体2	梁主筋	5 +2-D16 (SD490)	梁 42 (48.8)	無	GPL12 (SN490B) BPL (SN490B) 補強リブ PL9 (SS400) 定着鉄筋9-D16 (SD490) シヤーキー4-25×25×75 (SS400)	座屈拘束プレース 芯材: SS400 (12×70)
	あばら筋	6-D6 (UHY685) @75	柱 60 (70.4)			
	柱主筋	20-D16 (SD490)	グラウト 80 (101.5)			
	帯筋	6-D6 (UHY685) @50				
試験体3	梁主筋	一般部 一段筋 4-D16 (SD390) 補強部 一段筋 4-D16 (SD390) +1-D16 (SD490)	梁 42 (44.3)	$\phi 85$	GPL12 (SN490B) BPL (SN490B) 補強リブ PL9 (SS400) PC鋼棒C種1号4-φ17	座屈拘束プレース 芯材: SN400B (12×70)
		二段筋 3-D16 (SD490) +2-D16 (SD295)				
		あばら筋 6-D6 (UHY685) @75	柱 60 (64.4)			
	柱主筋	20-D16 (SD490)	グラウト 80 (101.5)			
		帯筋 6-D6 (UHY685) @50				

表4 骨組試験体の主要な鋼材の材料試験結果

	降伏強度	引張強度
鉄筋	D16 (SD390)	461.2
	D16 (SD490)	518.3
	D16 (SD295)	353.1
	D6 (UHY685)	683.7
芯材	t12 (SS400)	311.3
		447.2

梁接合部に取り付ける。取付方法はPC鋼棒圧着形式とし、試験体1と同様にコンクリートの打設後にPC鋼棒で圧着する計画で、大梁はヒンジリロケーション梁とした。プレースはK形に2本配置し、梁中央から柱梁接合部にかけて対称に配置する。

いずれの試験体も、RC造骨組は梁降伏が先行し、層せん断力が概ね同等となるように計画した。プレース型ダンパーには座屈拘束プレース⁶⁾を使用し、過去の設計事例を参考として実大での最大減衰力が1000kNとなるように耐力を設定した。試験体1の取付部のせん断耐力はプレース耐力のせん断方向分力に対し2.3倍、試験体2の取付部の引張耐力はプレース耐力のせん断方向分力に対し21.3倍、垂直方向分力に対し2.1倍となっている。試験体3の取付部のせん断耐力はプレース耐力のせん断方向分力に対して1.8倍となっている。各取付部に対する力の方向は図7に示す。試験体の主要な鋼材の材料試験結果を表4に示す。

(2) 加力計画

実験装置の概要を図8に示す。加力の制御は骨組の層間変形角(以下、R)で行う。いずれの試験体についても、プレース取付前後の変化を確認するため、まず最初に座屈拘束プレースを取付けない状態でR=1/800radを1回、1/400radを2回、1/200radを2回、1/100radを2回の正負交番繰り返し加力を行う。次に、座屈拘束プレー

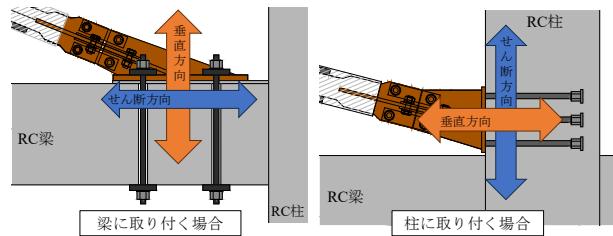


図7 取付部の力の方向

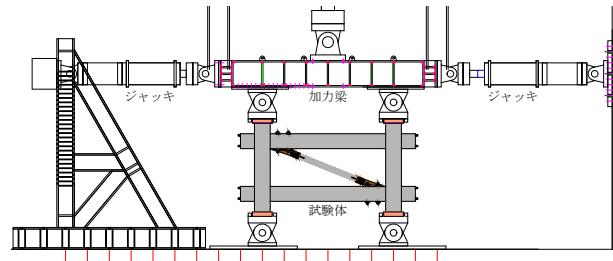


図8 骨組実験の加力装置図

スを取り付けて、R=1/800radを1回、1/400radを2回加力した後、1/200rad、1/150rad、1/100radを10回繰り返す。次に1/67radを3回繰り返した後、1/50rad、1/33radを10回繰り返し、最後に1/25radの加力をを行う。試験体3については、1/800rad、1/400rad、1/200rad、1/150radを1回ずつ、1/100radを10回繰り返し、1/67radを3回、1/50radを6回、1/33radを3回、1/25rad、1/20radを2回繰り返す加力とする。

3.2 骨組実験結果

(1) 荷重変形関係

層せん断力と層間変形角の関係を図9に示す。図中、青線は座屈拘束プレースを取り付けない状態でR=1/100rad

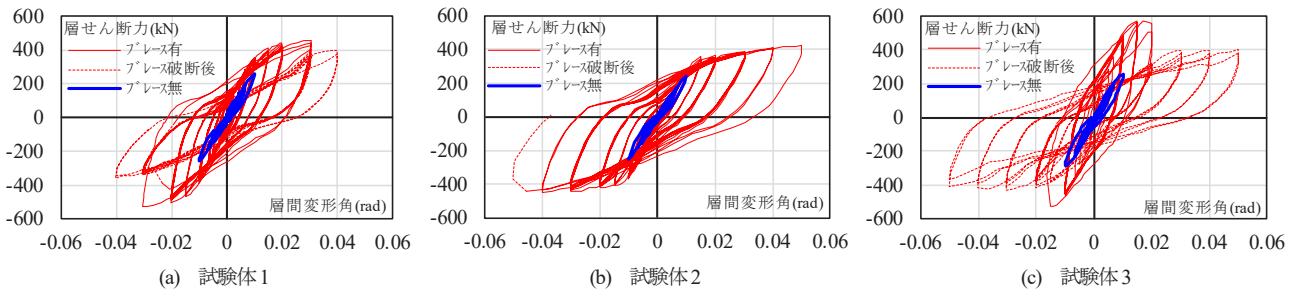
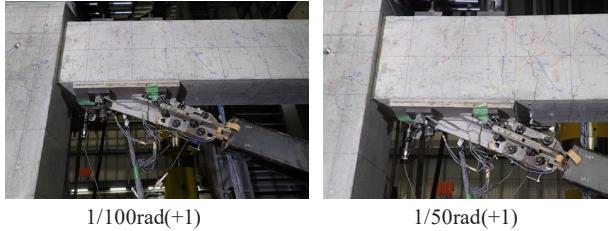
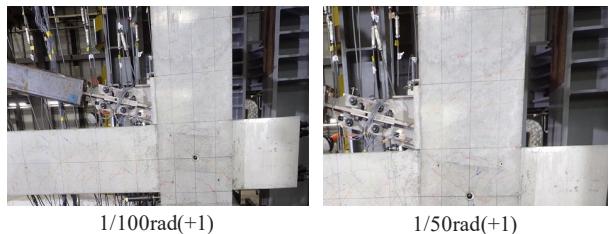


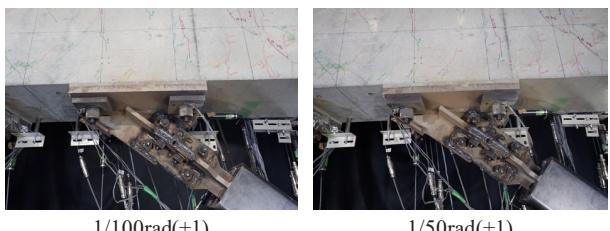
図9 骨組試験体の荷重変形関係



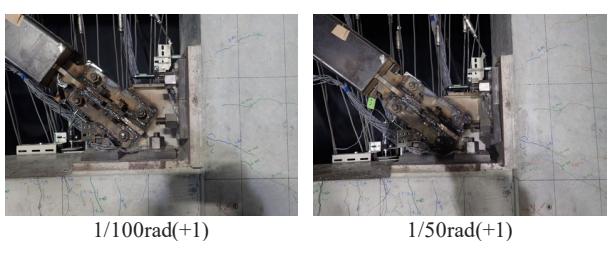
(a) 試験体1



(b) 試験体2



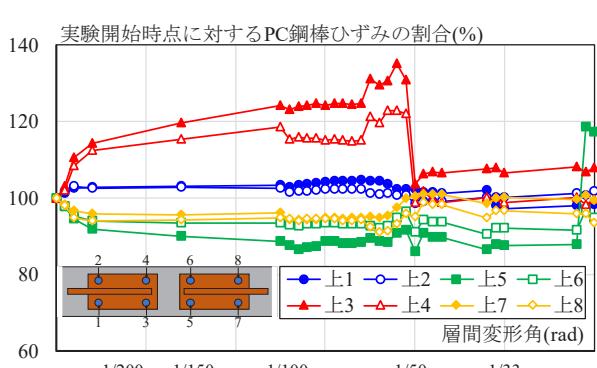
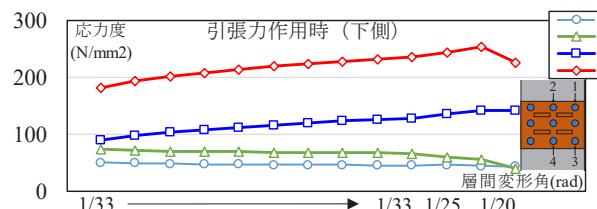
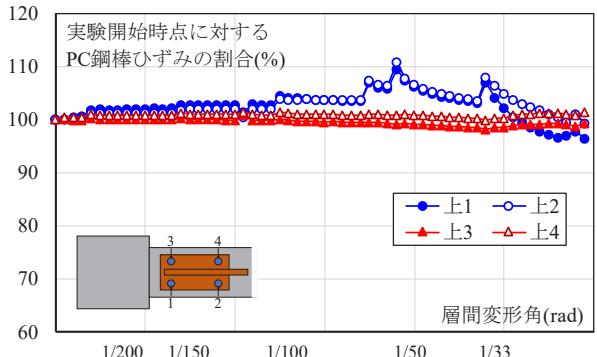
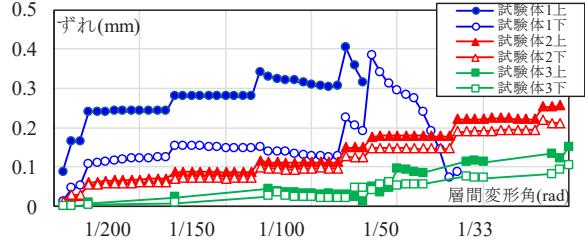
(c) 試験体3(上)



(d) 試験体3(下)

図10 ブレース取付部の状況

まで加力した加力サイクルの実験値、赤線はRC造骨組に座屈拘束ブレースを取付けた加力サイクルの実験値をそれぞれ示す。また、ブレースの芯材が破断した以降の荷重変形関係を点線で示している。ガセットプレート取付部付近のRC部の状況を $R=1/100\text{rad}$ （1回目）と $R=1/50\text{rad}$ （1回目）について図10に示す。試験体1では $1/33\text{rad}$ （2回目）でブレースが破断したことで大きく耐



力低下した。試験体2では $1/20\text{rad}$ でブレースが破断した。試験体3では $1/67\text{rad}$ (2回目)でブレースが破断したことで大きく耐力低下した。ブレース有の荷重変形角関係はブレースが破断する大変形時まで安定した履歴を示した。また、ガセットプレート取付部付近のRC部の損傷に着目すると、試験体1の梁では、ガセットプレート取付部近傍の損傷が小さいことがわかる。また、試験体2の柱についても、取付部近傍の損傷が小さいことがわかる。試験体3は梁および接合部への取付けとなるが、いずれも損傷が小さいことがわかる。

(2) 取付部の状況

ガセットプレートの取付面方向のずれ変形の推移を図11に示す。両試験体とも大変形に至るまでずれ変形は 0.4mm 程度以下であり、小さい。試験体1について、ガセットプレートを圧着しているPC鋼棒のひずみの推移

◎曲げばね 〽せん断ばね 〽軸ばね □□□ ファイバー

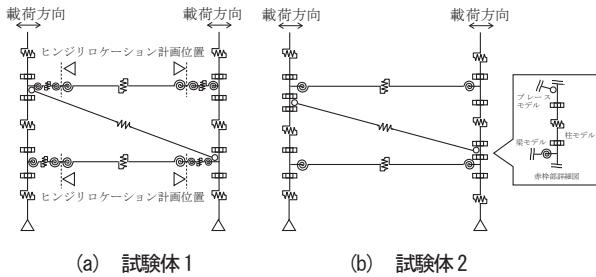


図15 解析モデル

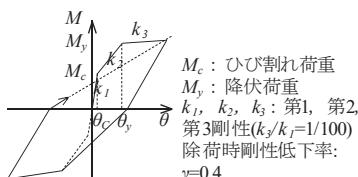


図16 Takeda モデル

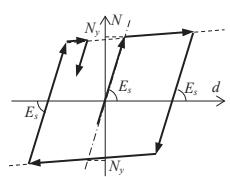
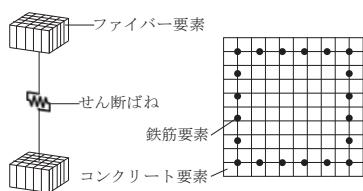
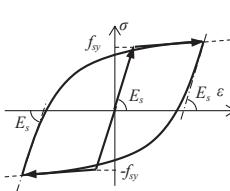


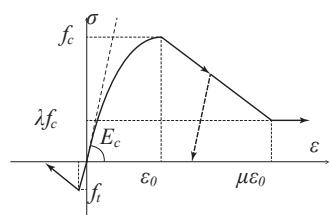
図17 バイリニアモデル



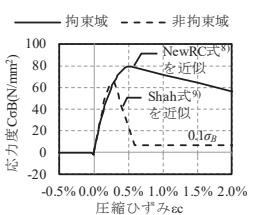
(a) ファイバーモデル



(b) 鉄筋要素復元力特性



(c) コンクリート要素復元力特性



(d) ひずみ軟化域

図18 柱ファイバーモデル

を図12に示す。大変形時まで緊張力の低下はほとんど見られなかった。試験体2について、ガセットプレートのベースに溶接した定着鉄筋の応力度の推移を $R=1/33\text{rad}$ 以降について図13に示す。ひずみ値から推定される定着鉄筋に作用する応力は $R=1/25\text{rad}$ で降伏応力の50%程度であった。試験体3について、ガセットプレートを圧着しているPC鋼棒のひずみの推移を図14に示す。ひずみは90%程度に低下している箇所もあるが、試験体1に比較して取付け角度の違いからブレース軸力の鉛直成分が大きいためと考えられる。

4. 骨組モデル解析

本章では、ブレース型ダンパー付き骨組の試験体1および試験体2を対象として、骨組モデルを構築して静的弾塑性解析を実施し、実験結果と比較することにより、骨組モデルの適用性について検討する。

4.1 解析計画

図15に構築した骨組解析モデルを示す。各モデルの梁および座屈拘束ブレースには弾塑性ばねモデルを、柱にはファイバーモデルをそれぞれ用いる。座屈拘束ブレースの取付部はピン接合とする。

梁の曲げばねの履歴モデルには、Takedaモデルを用いる(図16)。座屈拘束ブレースの軸ばねの履歴モデルには、バイリニア型を用いる(図17)。柱のファイバーモデル(図18(a))の復元力特性は、コンクリートには曲線剛性遞減型⁷⁾を、鉄筋には修正Ramberg-Osgood型⁷⁾をそれぞれ用いる(図18(b))。コンクリートの応力ひずみ関係は、図18(c)および図18(d)に示すように横補強筋によるひずみ軟化域を変えて用いる^{8,9)}。柱および梁のせん断ばねは弾性とする。

4.2 解析結果

座屈拘束ブレースを取付けない状態で $R=1/100\text{rad}$ まで加力したサイクルにおける層せん断力と層間変形角との関係の比較を図19および図20に示す。試験体1, 2ともに実験値と解析値とは良好に対応していることがわかる。次に、座屈拘束ブレースを取付けた状態で加力したサイクルにおける層せん断力と層間変形角との関係および等価粘性減衰の推移の比較を図21および図22に示す。座屈拘束ブレースを取付けた状態で加力したサイクルにおいても実験値と解析値とは良好に対応していることがわかる。本解析では水平ずれ変形を模擬したばね等は考慮していないが、実験値と解析値が良好に対応していることから、ずれ変形が座屈拘束ブレースの挙動に与える影響は小さいと考えられ、PC鋼棒圧着方式および定着鉄筋方式による取付け方法が有効であることがわかる。

5. まとめ

PC鋼棒圧着方式および定着鉄筋方式によるブレース型ダンパーとRC造骨組との取付方式を対象とした構造実験および解析を行い、本研究の範囲内ではあるが、以

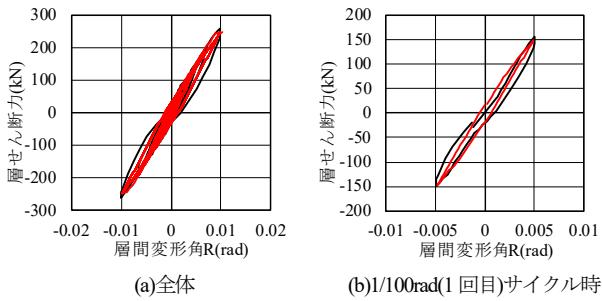


図 19 試験体 1 の解析モデルの荷重変形関係

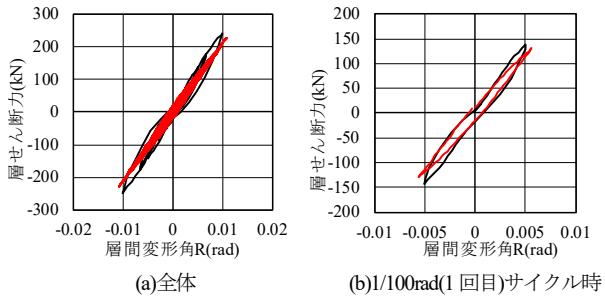


図 20 試験体 2 の解析モデルの荷重変形関係

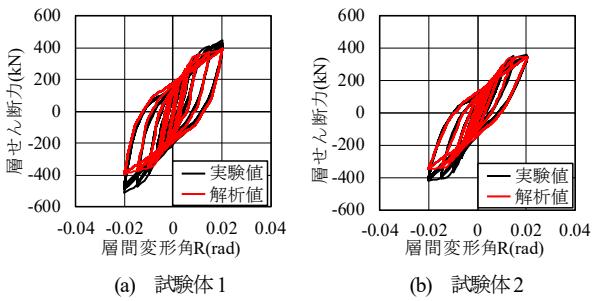


図 21 座屈拘束ブレースを取付けた加力における荷重変形関係の実験値と解析値との比較

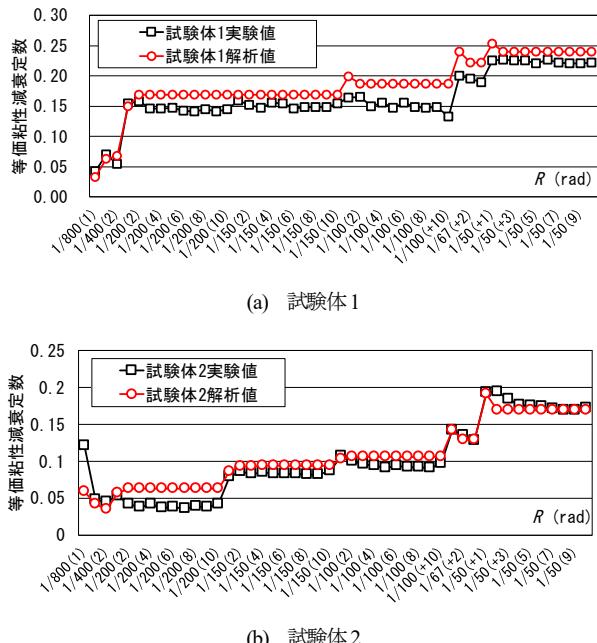


図 22 座屈拘束ブレースを取付けた加力における等価粘性減衰定数の実験値と解析値との比較

下の知見を得た。

- 1) PC 鋼棒圧着方式および定着鉄筋方式による要素実験では、取付部のせん断耐力は計算値を上回った。
- 2) 定着鉄筋のみとした要素実験では、計算値に達する時点の水平変位が1mm～2mm程度であった。
- 3) 複数のせん断抵抗要素をもつ要素実験では、実験時の最大耐力が各抵抗要素の耐力の計算値を単純累加した値を上回った。
- 4) PC 鋼棒圧着方式および定着鉄筋方式によるブリース型ダンパー付 RC 骨組の構造実験では、大変形に至るまでブリース耐力を発揮し、耐力低下がほとんど生じない安定した履歴性状を示した。
- 5) ブリース型ダンパー付 RC 骨組を対象とした骨組モデル解析は、実験結果と比較的良い対応を示した。
- 6) 実験結果と解析結果の比較から、取付部のずれ変形がブリース型ダンパーの挙動に与える影響は小さいと推測される。

参考文献

- 1) 每田悠承、薄田峻介、仁科智貴、和泉信之：耐震・制振・免震構造に分類した既存超高層 RC 造建築物の構造特性、日本建築学会技術報告集、第24巻、第56号、pp.171-176、2018.2
- 2) 每田悠承、坂田弘安、島崎和司、和泉信之、竹中啓之、渡辺亨、佐伯英一郎、渋田敬一郎：突起付き鍛鉄製プレート圧着接合を用いたダンパー接合部設計法の提案とダンパーを組み込んだ RC フレーム実験による検証、日本建築学会構造論文集、第85巻、第770号、pp.563-573、2020.4
- 3) 中野克彦、松崎育弘：ブレキキャスト RC 部材接合面におけるせん断抵抗要素の耐力累加方法、日本建築学会構造系論文集、第550号、2001.12、pp.151-158
- 4) 日本建築学会：鋼・コンクリート機械的ずれ止め構造設計指針、2022.2
- 5) 太田行孝、竹中啓之、和泉信之：Y字筋を用いた梁端ヒンジリロケーション RC 造梁に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.65B、pp.365-373、2019.3
- 6) 平井宏幸、中原理揮、菊田繁美、竹中啓之、川又哲也、本多仁、傳野悟史、小谷野一尚、岩田衛：座屈拘束ブリースに関する実験的研究その1耐震ブリースの実験概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1187-1188、2017.07
- 7) 構造システム（株）：SNAP Ver.8 テクニカルマニュアル、2022.3
- 8) (財) 国土開発技術研究センター：平成4年度 NewRC 研究開発概要報告会、1993.3
- 9) 長沼一洋：三軸圧縮化のコンクリートの応力～ひずみ関係、日本建築学会構造系論文集、第474号、pp.163-170、1995.8