

課題番号	Q19T-05
課題名（和文）	初期剛性付与型変位制御型ブレースの簡易モデルでの効果測定および接合部検証実験
課題名（英文）	Measurement of effect on simple model of displacement-restraint steel bar brace with initial stiffness and verification test of joint connection
研究代表者	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 東京電機大学未来科学部建築学科 准教授 氏名 朝川 剛
共同研究者	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 東京理科大学工学部建築学科 教授 氏名 山川 誠
	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 東京電機大学大学院未来科学研究科建築学専攻 元大学院生（現合田工務店） 氏名 小早川 裕太
	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 東京電機大学大学院未来科学研究科建築学専攻 大学院生（修士課程一年） 氏名 下瀬 誠希
	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 東京電機大学未来科学部建築学科 客員教授 氏名 深澤 協三

研究成果の概要（和文）

鉄骨造の中高層建築物において、大地震時など大きな層間変形が生じた場合に層剛性が付与される変位制御型ブレースが提案されている。その端部にプレストレスを与えた皿ばねを設けることにより初期剛性を付与し、その初期剛性とブレースが完全に作用する初期変位をパラメータとすることで地震時の応答制御と残留変形の抑制ができることを示した。また、準静的載荷試験によるブレース端部の挙動と衝撃荷重が作用しないことを示し、さらに終局載荷試験により PC 鋼棒ブレースが破断に至るまでの挙動と端部の設計の妥当性について確認を行った。

研究成果の概要（英文）

Displacement Restraint PC steel bar Brace (DRB) has been proposed, which gives story shear stiffness to steel-framed buildings when large story deformation occurs during a large earthquake. The results of numerical response analyses show that the DRB with initial stiffness using disc springs prestressed at the end of DRB can effectively reduce not only the maximum story deformation but also the concentration of deformations and the residual deformations into local stories. In addition, quasi-static loading tests and ultimate strength loading tests clarify the behavior of the brace end and show that the impact force at the end of DRB is sufficiently small when the DRB come into contact from a separated state.

1. 研究開始当初の背景

鉄骨構造の中高層建築物等において、地震時に梁降伏型の全体崩壊メカニズムを生じさせる設計が一般に行われているが、現行の法体系の想定を超える地震力が作用した場合に、特定層への変形集中が生じる危険性があるため、構造物の降伏後剛性の必要性が指摘されている。降伏後剛性を確保するためには、大変形時にも十分な剛性を有する弾性（心棒）要素が有効であり、連層 PC 鋼棒ブレース（弾性（心棒）要素）を有する制振構造物（履歴型および粘弾性型のダンパーを有する）においてもその効果は実証されている。また、この連層 PC 鋼棒ブレースは、弾性（心棒）要素として微小変形から効果を発揮するため、大地震後の残留変形を抑制する効果も有している。

一方、この連層 PC 鋼棒ブレースは、想定を超える地震力が作用した場合の大変形時に、降伏す

る可能性がある。そこで、より大きな変形に対して弾性剛性を確保するために、ワイヤブレース構造や図 1~3 に示す PC 鋼棒ブレース端部に初期変位を設けた変位制御型 PC 鋼棒ブレース (DRB: Displacement Restraint PC steel bar Brace) が提案され、制振構造と組み合わせることにより、想定される大地震に対して高い性能を有するばかりでなく想定を超える地震力が作用した場合に冗長性を有することも示されている。ただし、これらは初期剛性を有しないため、大地震後の残留変形を抑制する効果はなく、大地震後の復旧性に課題を残している。

2. 研究の目的

図 4 に示すように皿ばねを DRB 端部に設け、プリテンションを導入した状態を初期状態とすることにより、図 5 に示す初期剛性を有しかつ想定を超える地震力が作用した大変形時において

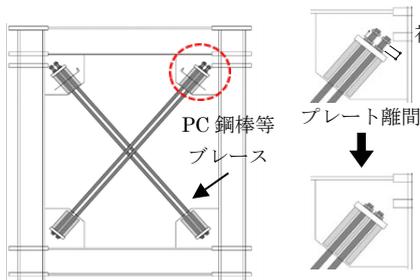


図 1 変位制御型 PC 鋼棒ブレース

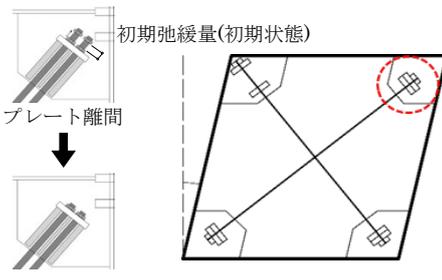


図 2 変形状態

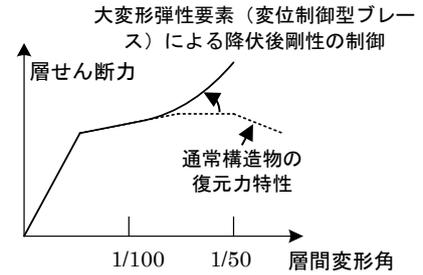


図 3 層の復元力特性

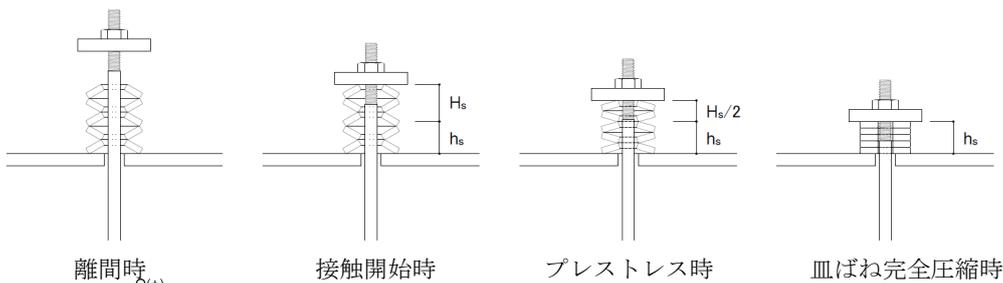


図 4 皿ばねを用いた PC 鋼棒等のブレース端部

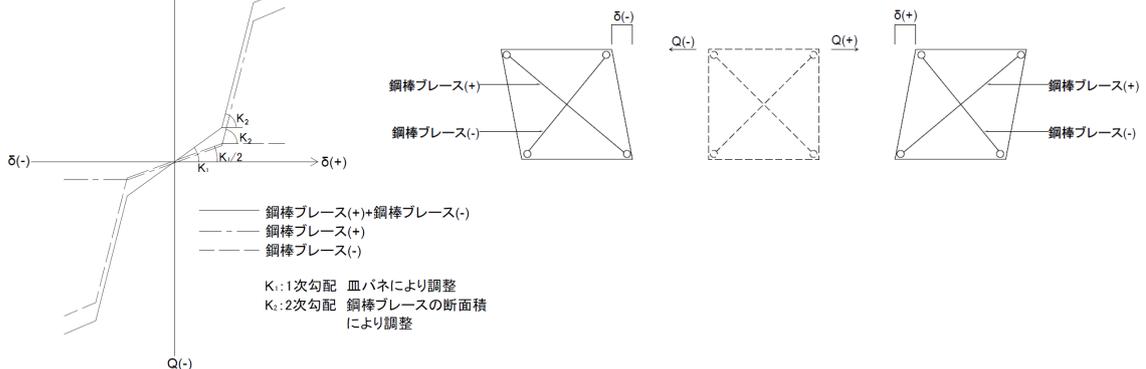


図 5 初期剛性付与型変位制御ブレースの履歴

K₁: 1次勾配 皿ばねにより調整
K₂: 2次勾配 鋼棒ブレースの断面積により調整

高い弾性剛性を確保するシステムを設定することができる。

本研究では、本システムの実用化に向け、地震時などの大変形時に端部に生じる可能性がある衝撃力とブレース端部の挙動を確認することを第一の目的とし、次にこのシステムにおいて初期剛性を付与することの有用性を解析的に示すことを第二の目的とする。

これらの成果により初期剛性付与型 DRB による新たな制振構造の可能性を示すことができ、実務上も有用な学術的基盤を形成することを本研究の目標とする。

3. 研究の方法

第一の目的のため、変位制御型 PC 鋼棒ブレースの地震時の挙動（端部の衝撃力など）を確認するための準静的载荷試験と終局段階の挙動を確認する終局载荷試験を実施する。

第二の目的のため、簡易な多層モデルにおける時刻歴応答解析を通じて、DRB の初期変位と初期剛性を変数とするパラメータスタディを行い、最大層間変形角、特定層への損傷の集中の程度を示す変動係数、各質点の応答加速度、全体および特定損傷層のエネルギー吸収量を比較検討する。

4. 研究成果

(1) 準静的载荷試験

① 試験体

DRB の地震時を想定した端部挙動の確認および PC 鋼棒端部に生じる衝撃荷重を確認するため、実物大の 1/3 の大きさ（PC 鋼棒直径および水平方向と高さ方向の寸法）になるように設計した

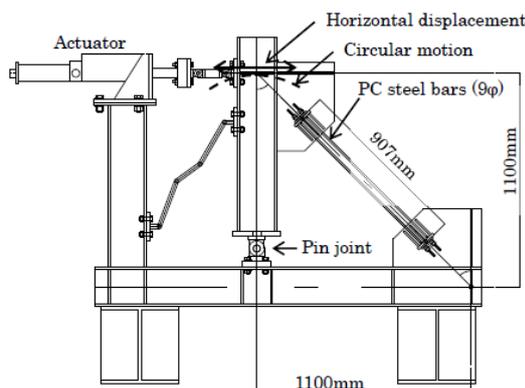
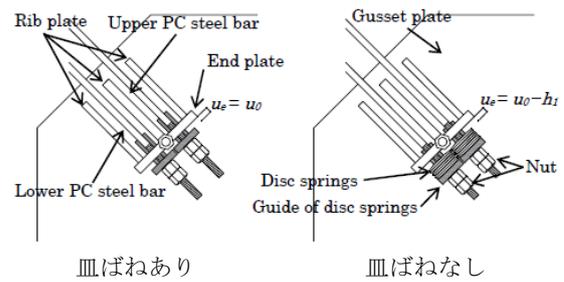


図 6 試験体



皿ばねあり 皿ばねなし
図 7 実験における DRB 端部詳細

図 6 に示す試験体を用いて実験を行う。

柱と梁は H-200×200×8×12 (SM400) とし、端部のガセットプレートとリブプレート (SM490A) を介してブレースとなる直径 9mm の PC 鋼棒 (SBPR1080/1230) 4 本を前後および上下に設置している。ガセットプレートとリブプレートは、PC 鋼棒が終局耐力 ($\sigma_u = 1230\text{N/mm}^2$) に達した時、弾性範囲に留まるように設計する。ガセットプレートの厚さは 12mm、リブプレートの厚さは中央が 12mm、両側は 9mm とする。

② 実験方法

測定箇所は、水平変位およびブレース方向の PC 鋼棒軸変位（下部エンドプレート端部から上部エンドプレート端部までの変位）、上下 2 本の鋼棒に生じるひずみ（鋼棒の上部、中央、下部の平均値を結果に示す）をそれぞれ測定する。sin 波を用いて 3 サイクルの加振を行い、ブレースの端部に皿ばねを設け、衝撃荷重を確認する。また、皿ばねにはブレースが接触しない状態において孔径とブレース軸径の差による乱れを防ぐために皿ばねガイドを設けている。図 7 に DRB 端部詳細を示し、下部エンドプレート端部のブレース下部にのみ設ける離間距離寸法 u_e を記す。また、アクチュエータの性能は最大荷重が 30kN、最大変位が 100mm、最大速度が 15cm/s 以内に制限され、その制限内となるように準静的载荷試験を行う。離間距離寸法 u_e は 0mm（初期変位なし）と層間変形角がある値に達した時にブレースが作用するように想定し、3.9mm (1/200)、5.2mm (1/150)、7.8mm (1/100) の 4 ケースを設定した。

表 1 に実験ケース、図 8 に皿ばねの組合せを

表 1 実験ケース

	Gap of end plate u_e or initial displacement u_0	With or without disc springs
Case1	$u_e = u_0 = 0\text{mm}$, 3.9mm, 5.2mm, 7.8mm	Without disc springs
Case2	$u_e = 0\text{mm}$, 3.9mm, 5.2mm, 7.8mm	Combination 1*1
Case3	$u_e = 0\text{mm}$, 3.9mm, 5.2mm, 7.8mm	Combination 2*1
Case4	$u_e = 0\text{mm}$, 3.9mm, 5.2mm, 7.8mm	Combination 3*1
Case5	$u_0 = h_1$	Combination 1*1, 2
Case6	$u_0 = h_1$	Combination 2*1, 2
Case7	$u_0 = h_1$	Combination 3*1, 2

*1: 図 8 に示す皿ばねの組合せ

*2: 図 4 に示す PC 鋼棒両端の皿ばねにプレストレス導入

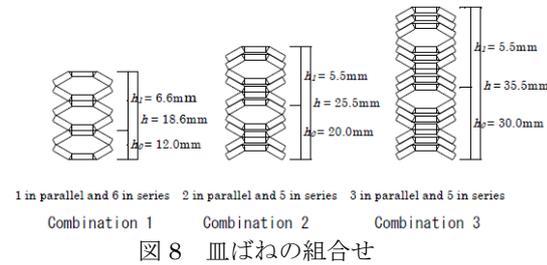


図 8 皿ばねの組合せ

示す。皿ばねは、所定の枚数を直列または並列に組み合わせることで、初期剛性を調整することができる。DRB（初期剛性無）となる皿ばねを設けない場合は $u_e = u_0$ となり、皿ばねを設ける場合は離間距離寸法 u_e を設けた Case2~4（皿ばねはブレース下端部 4 箇所）とプレストレスを加えた DRB（初期剛性有）となる Case5~7（皿ばねはブレース上下端部 8 箇所）の実験を行う。Case2~4 は、端部の衝撃荷重の緩和を確認するために行い、ブレース剛性 K_1 となる変位を初期変位 u_0 とすると、 $u_e = u_0 - h_1$ の関係が成立する。

③結果および考察

図 9、11 に PC 鋼棒に生じるひずみの時刻歴を示す。図 9 では、上下 2 つの鋼棒のひずみ（軸力）が異なる結果となり、特に初期変位があり端部に皿ばねがないものにおいて軸力差が顕著になっている。鋼棒にかかる軸力が不均等になるのは、試験体による円運動（図 6）により変形を加えた際に上下鋼棒間で斜めに移動する距離が違うため、プレートが接触する時間差が生じることが主な原因であると考えられるが、実験の層間変形への追従においてもこのような軸力の不均等は生じる

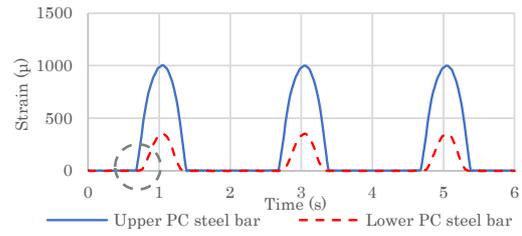


図 9 PC 鋼棒の歪（Case1, $u_0 = 5.2\text{mm}$ ）

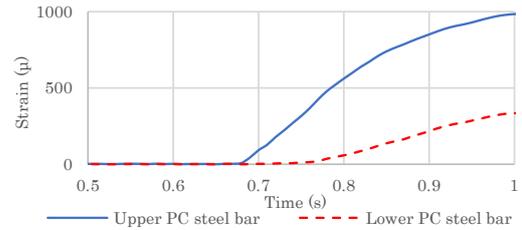


図 10 図 9 における接触時の拡大図

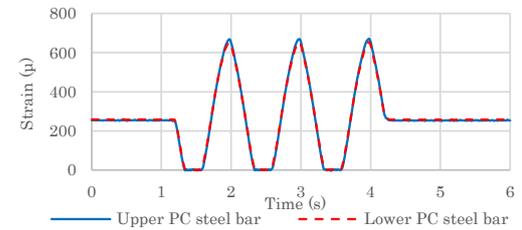


図 11 PC 鋼棒の歪（Case5）

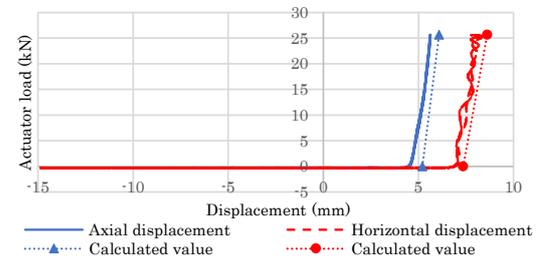


図 12 アクチュエータ荷重－変形関係（Case1, $u_0 = 5.2\text{mm}$ ）

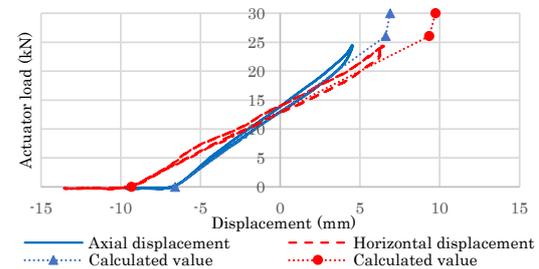


図 13 アクチュエータ荷重－変形関係（Case5）

可能性がある。また、図 11 より、皿ばねにプレストレスを加えた場合は、上下 2 つの鋼棒のひずみ（軸力）の誤差が他のケースに比べ小さいことが確認できた。これは、円運動で生じる変位差による軸力の差が、初期剛性があることにより小さくなるためだと考える。

図 10 に最初に接触した時の拡大図を示す。下端部によるプレート接触時の衝撃による歪の急変は、皿ばねがない場合でも確認されなかった。

図 12 に DRB (初期剛性無)、図 13 に DRB (初期剛性有) の PC 鋼棒軸変位と水平方向変位の履歴を示す。概ね計算した通りの履歴特性を確認できる。

(2) 終局載荷試験

準静的載荷試験と同じ試験体を用いた終局載荷試験では、図 14 に示す履歴特性が得られた。1 度目の引張側への載荷 (水平荷重 182kN で除荷) において荷重-変位の関係の線形性が緩やかに失われ残留変形が生じることが確認された。しかし、2 回目の引張側への載荷において水平荷重 207.8kN、層間変位 23.55mm (層間変形角約 1/50 相当) の際に鋼棒 3, 4 の上側ネジ部 (端部プレート付近) が破断する結果となった。

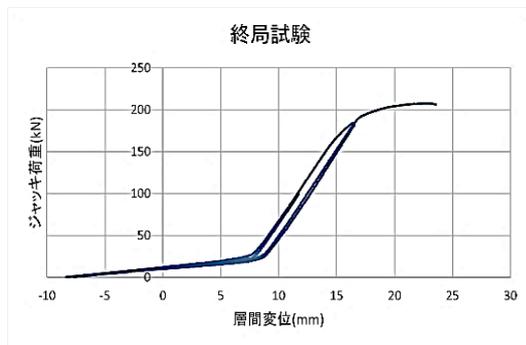


図 14 終局載荷試験における履歴特性

(3) 時刻歴応答解析による検証

9 質点の等価せん断型モデルによる時刻歴応答解析を実施した。BCJ-L2 において地震波倍率 1.0、 $bK_I = 0.3bK_I$ の時の結果を比較する。ここでは、 $\delta_0 = H/200$ に固定し初期剛性 bK_0 の違いによる傾向を確認する。

図 15 に各層の最大層間変形角を示す。DRB (初期剛性有) は、低層階の変形を抑えることができる。図 16 に最大層間変形角と変動係数の相関関係を示す。最大層間変形角が一番抑えられるのは、 $bK_0 = 0.5bK_I$ の時で、各層の層間変形角の変動係数も最も小さく、変形と変形集中を抑制できている。

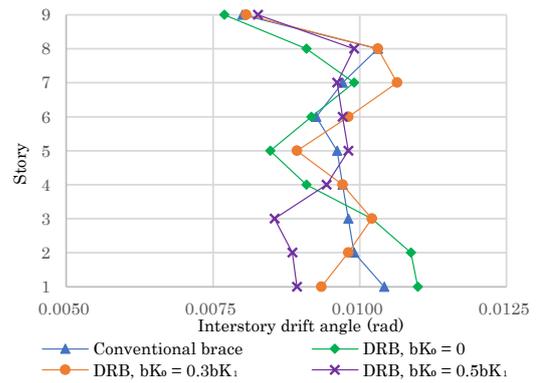


図 15 最大層間変形角
(BCJ-L2×1.0, $bK_I = 0.3bK_I$, $\delta_0 = H/200$)

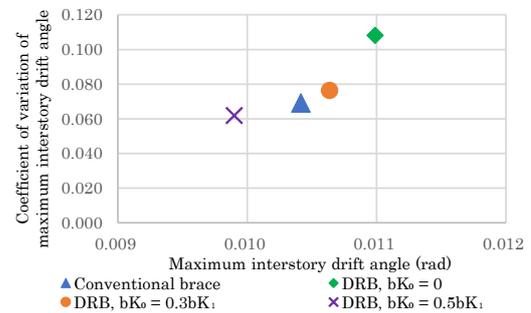


図 16 最大層間変形角変動係数
(BCJ-L2×1.0, $bK_I = 0.3bK_I$, $\delta_0 = H/200$)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、共同研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 小早川裕太, 朝川剛, 深澤協三, 宮津裕次, 山川誠: 準静的載荷試験による変位制御型 PC 鋼棒ブレースの端部挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-III, pp. 1035-1036, 2020. 9. 査読なし。
 - ② 下瀬誠希, 朝川剛, 深澤協三, 小早川裕太, 宮津裕次, 山川誠: 変位制御型 PC 鋼棒ブレースの終局耐力載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021. 9, 2021. 4 投稿. 査読なし。
 - ③ 朝川剛, 小早川裕太, 宮津裕次, 深澤協三, 山川誠: 皿ばねを用いた初期剛性を有する変位制御型ブレースの応答制御, 日本建築学会構造系論文集, 2021. 3 投稿 (査読中: 参考) [学会発表] (計 2 件)
- 上記①は 2020 年 9 月日本建築学会大会にて発表予定であったが中止され、上記②は 2021 年 9 月日本建築学会大会にて発表予定。