

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04779

研究課題名(和文) 偏心圧縮材を座屈補剛材として用いた新形式の補剛法による耐震改修方法の構築

研究課題名(英文) Seismic Retrofit Method by a New Type of Stiffening Method with Eccentric Compression Members Used as Buckling Stiffeners

研究代表者

熊谷 知彦 (Kumagai, Tomohiko)

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号：70376945

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、偏心圧縮材を補剛材として用いた新形式の座屈補剛による耐震改修方法の開発および接着剤を用いた簡便な補剛材接合方法の構築である。圧縮軸力を受ける部材では終局状態において曲げ座屈を発生する。座屈荷重の増大のため、様々な座屈補剛形式が考案されている。しかし、これらの補剛形式は、補剛すべき部材の座屈変形を他の部材を支点とした部材を追加して反力を得る形式である。そのため、独立した部材には適用できない。そこで本研究では、補剛の対象となる部材に別の部材(補剛材)を沿わせて材端のみを接着剤で接合するのみで構成可能な座屈補剛形式を提案した。さらに、既存建築物の補強方法としての適用性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、補剛の対象となる部材に補剛材を沿わせて材端のみを接着剤で接合するのみで構成可能な座屈補剛形式を提案した。本補剛形式は、災害時に避難所等として使用される大空間構造物の部材の耐震補強を目的として提案された。基本的に軸力により力を伝達することで構造を成立させる大空間を覆う建築物であるシェル・空間構造物では、補剛材が反力を得るための部材が存在しないことがほとんどである。本研究における耐震補強方法のように他部材からの反力を必要とせず、さらに簡便な接合方法によって大きな座屈荷重を実現する補剛形式より、災害時に防災拠点として健全に使用することのできる大空間構造物の実現が可能となる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a new method of seismic retrofitting by buckling stiffening using eccentric compression members as stiffening members and to construct a simple method of joining stiffening members using adhesives. Members subjected to compressive axial forces will occur a bending buckling at the ultimate state. To increase the buckling load, various buckling stiffening methods have been devised. However, these stiffening methods are those in which the buckling deformation of the member to be stiffened is reacted to by adding a member with another member as a fulcrum. Therefore, they cannot be applied to independent members. In this study, we proposed a buckling stiffening method that can be constructed by simply placing another member (stiffening material) along the member to be stiffened and bonding only the ends of the members with adhesive. Furthermore, the applicability as a method of reinforcing existing buildings was examined.

研究分野：建築構造，鋼構造，シェル・空間構造

キーワード：座屈補剛 軸力材 偏心圧縮材 座屈解析 座屈実験 変形制御機構 異種材料 接着接合

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

主として軸力を受ける部材における座屈の発生は、建築物の崩壊につながる。座屈の発生を抑制するため、座屈補剛についての研究が数多くなされ、それらで提案された形式が実構造物に採用されている。これら既往の補剛形式では、補剛材が補剛すべき部材（主材）の座屈を拘束するために主材以外から反力を得る必要がある。このような補剛形式で耐震補強を行う場合、軸力を受ける部材である柱が並んでいる一般的な重層構造物では、比較的容易に適用が可能である。一方で、基本的に軸力により力を伝達することで構造を成立させる大空間を覆う建築物であるシェル・空間構造物では、補剛材が反力を得るための部材が存在しないことがほとんどである。そのため、実際の耐震補強においては、屋根を支持する下部構造のみを補強し、屋根部材には手を加えない事例が多い。新築の設計においても、部材断面を大きくすることで部材自体の座屈荷重を大きくして対処することがほとんどである。しかし、下部構造を耐震補強した場合にも、近年多発している大地震等の際に、下部構造でのエネルギー吸収が減少し、屋根部の振動が増大することで屋根構造部材に座屈や破断を発生し、避難所としての使用が不可能と判断されたものが数多く存在する。以上より、本研究における耐震補強方法のように他部材からの反力を必要とせず、さらに簡便な接合方法によって大きな座屈荷重を実現する補剛形式は、貴重な提案となる。本研究の成果によって、大地震時においても防災拠点として健全に使用することのできる空間構造物や重要建築物の実現が可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、偏心圧縮材を補剛材として用いた新形式の座屈補剛による耐震改修方法の開発および接着剤を用いた簡便な補剛材接合方法の構築である。本補剛形式が提案されることで、反力を取ることができないために座屈補剛（耐震補強）できなかった構造においても座屈補剛が可能となる。さらには、鉄骨を主材として用いながら、補剛材として異種材料である木材等を利用することで、外面に木材以外が見えない形式の部材を作成することも可能となる。

3. 研究の方法

本研究では研究期間の3年間で数値解析および座屈実験により以下のことを明らかにした。

- 1) 補剛すべき部材である主材と補剛材を軸方向中央部において一体化する機構の開発・提案
- 2) 主材と補剛材（木材、鋼材等）の接合方法として接着剤を用いた場合の補剛効果の検討
- 3) 種々の材料（鋼材、木材等）を使用した場合の補剛効果の検討
- 4) 本補剛形式の既存の部材への耐震補強としての適用方法の提案

本研究の初年度である2020年度では、上記1)について開発・提案を進め、2)のための数値解析による検討および予備実験を実施した。具体的には下記の通りである。1)については、鋼製の主材の軸方向中央部に鋼棒を溶接し、その鋼棒にコイルバネを巻き付けることで、鋼棒により主材と補剛材からなる断面の一体化を図り、コイルバネにより補剛材拡幅方向への変形を補助する機構を提案し、その有効性について確認した。2)については、主材に平鋼、補剛材にベイマツを用いた試験体の接合にエポキシ樹脂接着剤を使用して接合した場合の補剛効果を座屈実験により検討した。

2年目の2021年度においては、2)について2020年度の予備実験結果に基づいた本試験を実施した。具体的には下記の通りである。主材に平鋼、補剛材にベイマツを用いた試験体の接合部に鋼棒を挿入したエポキシ樹脂接着剤による接合方法および具体的な変形制御機構を提案し、主材のみ、本補剛形式、本補剛形式+変形制御機構（コイルバネなし）の3種類の座屈実験を実施し、座屈性状を比較した。

3年目の2022年度においては、2年目までに得られた知見を元に1)~3)について更に改良し、鋼製の主材の軸方向中央部に鋼棒を溶接し、その鋼棒にコイルバネを巻き付けることで、鋼棒により主材と補剛材からなる断面の一体化を図り、コイルバネにより補剛材拡幅方向への変形を補助する機構の効果を座屈実験により検証した。

4. 研究成果

3.に記載した研究の方法に基づいて実施された研究の具体的な成果を以下に示す。

(1) 偏心圧縮材で補剛された軸力材への変形制御機構の導入による最適曲げ剛性比の検討（研究成果1）

研究成果1)では、バネと鋼棒を併用した変形制御機構(図1-1)によって軸力負荷時の変形を制御し、更なる座屈荷重の増加を目指すとともに、これまでに検討されていない変形制御機構が最適曲げ剛性比へ与える影響について数値解析によって分析している。

数値解析には、汎用有限要素法解析プログラムANSYS2020R1を用いる。解析方法は幾何学的非線形を考慮した静的弾塑性解析である。釣合経路の探索には弧長法を採用する。図1-2に解析モ

デル, 表 1-1 に解析モデル諸元を示す。 R_f^S は主材と補剛材の曲げ剛性の比(式(1)), R_f^L は主材と補剛材の曲げ剛性の和に対する繋ぎ材の曲げ剛性の比(式(2))である。解析モデルは ES モデル, バネと鋼棒による変形制御機構を有する ES_{sp+sr} モデルである。ここでは, 主材, 補剛材, 繋ぎ材の材料は鋼材とする。コイルバネには初期縮み d_0 を付与することでプレストレス F_p を

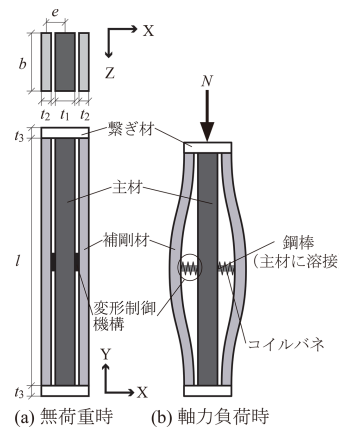


図 1-1 座屈補剛形式の概要

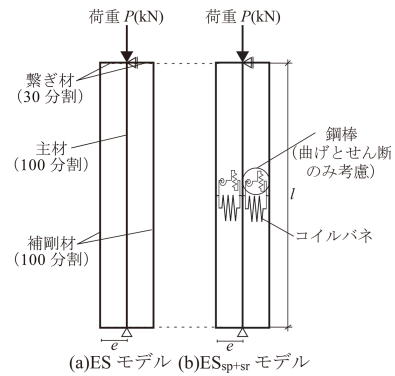


図 1-2 解析モデル(梁要素)

発生させ, 主材と補剛材の間隙が拡幅する形状に初期形状を調整する。文献 1) を参考に, $F_p = 2500 \sim 13000\text{N}$, バネ剛性 $k = 500 \sim 2100\text{N/mm}$ とする。また, 鋼棒は M24 寸切りボルト(以下, ボルト)を想定し, これを数値解析においてモデル化する際は, ボルトのせん断剛性および曲げ剛性を有し, かつ, バネへの影響が小さくなるように軸剛性を小さく設定した円形鋼管を, 材軸中央断面における主材と左右の補剛材の間隙において剛接合とすることで表現する。

図 1-3 にプレストレス $F_p = 2500\text{N}$ においてバネ剛性 k を変化させた場合の荷重変位関係を示す。縦軸は荷重 P を主材の座屈荷重 $P_{cr(\pm)}$ で除す。主材細長比 $\lambda_1 = 74.2$ の場合, $R_f^S = 0.1$ では k が大きいほど主材と補剛材の間隙が小さくなり, 変形制御機構の導入により座屈荷重は最大 1.2 倍に増加する。一方, $R_f^S = 0.2$ では変形制御機構の導入による座屈荷重への影響は小さい。 $\lambda_1 = 148.5$ でも, 変形制御機構の導入により座屈荷重は最大 1.2 倍となる。また, ES モデルでは座屈後に主材と補剛材の間隙の拡幅方向に変形が進むのに対し, ES_{sp+sr} モデルでは座屈後に主材と補剛材が同方向に変形が進む。

最後に, 最適な曲げ剛性比 R_f^S を主材と補剛材および繋ぎ材の等価面積比 A_1/A_{ave} を考慮した補剛効率 E_S により検討する。図 1-4 に E_S^{max} と R_f^S の関係を示す。変形制御機構の導入により, E_S^{max} は 1.14 ~ 1.28 倍に増加する。 F_p が大きいほど E_S^{max} は大きい, $R_f^S = 0.9$ 以上では F_p の違いによる差は小さくなる。以上より, 適切なバネ剛性を付与することで各 R_f^S に対して E_S を最大化できる。

(2) 木製の偏心圧縮材により補剛された鋼製軸力材の座屈実験 (研究成果 2)

研究成果 2) では, 接着剤による接合を用いた木製の偏心圧縮材により補剛された鋼製軸力材の座屈性状と変形制御機構を組み込んだ際の座屈性状を座屈実験により明らかにしている。

試験体は図 2-1 のように接着剤による接合とし, 主材を補剛材で挟み込む座屈補剛形式とする。接合部詳細を図 2-2 に示す。主材は平鋼 FB-16×38 とし, 補剛材, 繋ぎ材にはベイマツを使用する。変形制御機構は, 図 2-3 の主材の材軸中央に溶接した寸切りボルトを補剛材の材軸中央

表 1-1 数値解析モデル

主材細長比 λ_1	74.2									148.5										
R_f^S	0.1	0.2	0.3	0.45	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.1	0.2	0.3	0.45	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
主材厚さ t_1 [mm]	140									70										
補剛材厚さ t_2 [mm]	65.0	81.9	93.7	53.6	55.6	59.0	62.2	65.0	67.6	70.0	65.0	81.9	93.7	53.6	55.6	59.0	62.2	65.0	67.6	70.0
幅 b [mm]	150																			
部材長さ l [mm]	3000																			
限界細長比 λ	106.0																			
R_f^L	100																			

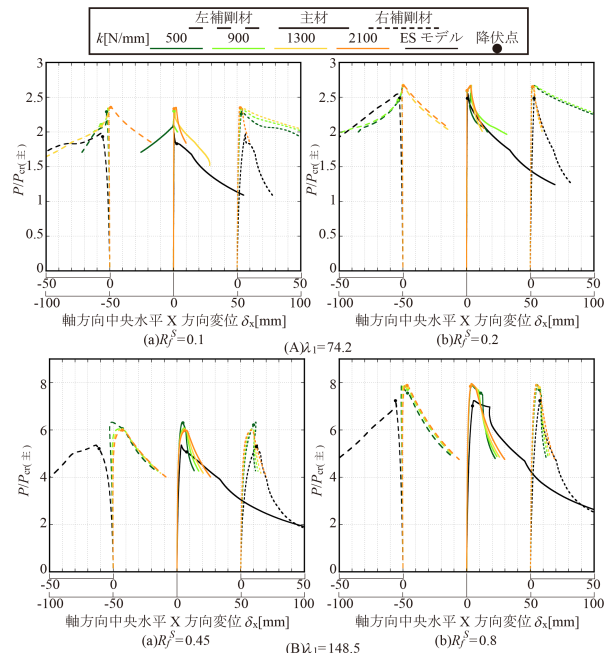


図 1-3 バネ剛性の違いによる荷重変位関係 (Fp=2500N)

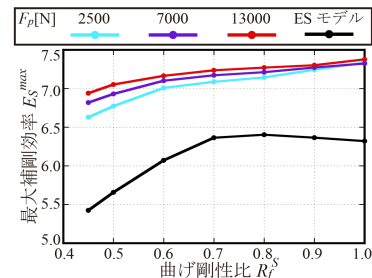


図 1-4 最大補剛効率 E_S^{max} と R_f^S の関係 ($\lambda_1 = 148.5$)

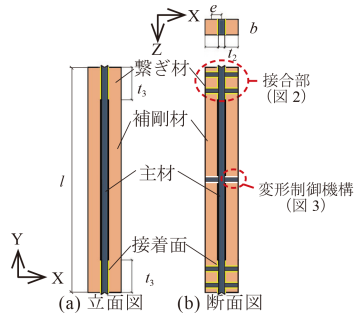


図 2-1 試験体概要

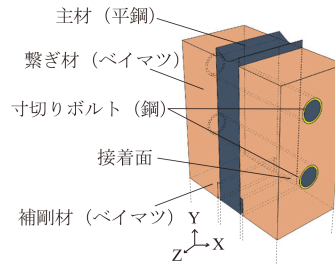


図 2-2 接合部の拡大図

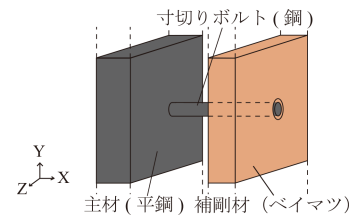


図 2-3 変形制御機構の拡大図



写真 2-1 試験体および荷重装置全景 (ES^{Ge}-160-0.45)

表 2-1 試験体諸元

モデル名	ES-120	ES ^{Ge} -120-0.45	ES ^{Ge} _{sr} -120-0.45	ES ^{Ge} -120-0.45	ES-160	ES ^{Ge} -160-0.45
平鋼寸法 (mm)	FB-16 × 38					
主材細長比 λ_1	120			160		
曲げ剛性比 R_f^C	0.45			0.45		
接合方法	主材のみ	GIR 端部		GIR 全面	主材のみ	GIR 端部
変形制御機構	×		○	×		
曲げ剛性比 R_f^C			80			80
主材長さ l(mm)	554			740		
幅 b(mm)	38					
主材厚さ t_1 (mm)	16					
補剛材厚さ t_2 (mm)			32			32
繋ぎ材厚さ t_3 (mm)			80			73
偏心距離 e(mm)			26			26
実施年	2020,2021	2020	2021	2021	2021	2021

にあけた孔に通す形式とする。主材と繋ぎ材の接合は、平鋼に溶接された寸切りボルトを介した鋼棒挿入接着接合（以下、GIR）とする。表 2-1 に試験体諸元を示す。

写真 2-1 に試験体および荷重装置全景を示す。荷重には 1000kN アムスラー型万能試験機を使用する。境界条件は、ナイフエッジを用いたピン支持とする。計測は、ひずみをひずみゲージ、変位を非接触画像処理変位計（以下、MC）により行う。MC には Nobby Tech 社製 モーションキャプチャーシステム VENUS3D R(prime17w) を使用する。

図 2-4 に荷重-水平変位関係を示す。荷重は主材のみの座屈荷重で無次元化する。主材のみの座屈荷重に対する座屈荷重の割合 $P_{cr}/P_{cr(主)}$ は、主材細長比 λ_1 の大きい ES^{Ge}-160-0.45 で最大の 3.33 倍となる。 $\lambda_1=120$ の $P_{cr}/P_{cr(主)}$ は、本補剛形式を採用した ES^{Ge}、ES^{Ge}_{sr} モデルで約 2.0、全面接着した ES^{Ge} モデルで 2.32 倍となる。ES^{Ge}、ES^{Ge}_{sr} モデルでは座屈以前に、特に左補剛材が拡幅方向へ変形する。一方で、ES^{Ge}_{sr} モデルでは右補剛材の変形が抑えられている。ES^{Ge}_{sr} モデルの $P_{cr}/P_{cr(主)}$ は ES^{Ge} モデルと同程度であるが、これは寸切りボルトを通すための孔による有効断面積の減少によるものである。なお、ES^{Ge}、ES^{Ge}_{sr} モデルの座屈後の最初の破壊は、繋ぎ材の繊維方向への割裂であった。

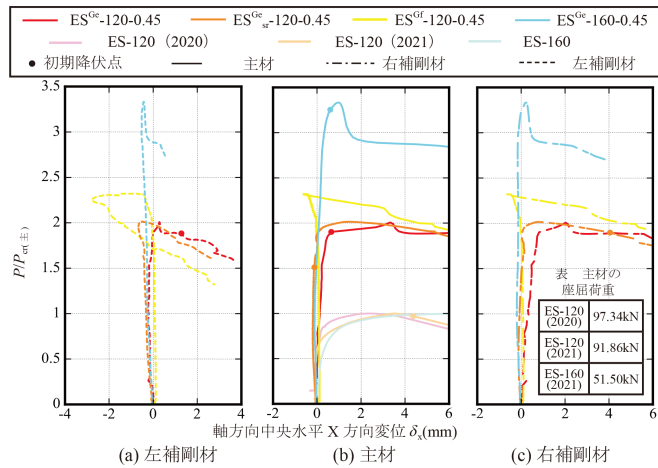


図 2-4 荷重-水平変位関係

(3) 変形制御機構を組込んだ木製偏心圧縮材により補剛された鋼製軸力材の座屈実験（研究成果 3）

研究成果 3) では、接着接合を用いて木製偏心圧縮材により補剛された鋼製軸力材に補剛材の拡幅変形誘導のための変形制御機構を組込んだ際の座屈性状を座屈実験と数値解析により明らかにする。

座屈補剛は接着接合を用いて主材を補剛材で挟み込む形式で行う（図 3-1）。主材は平鋼 FB-25 × 50 とし、補剛材、繋ぎ材にはベイマツを使用する。接合部詳細を図 3-2 に示す。寸切りボルトを介して木材と接着する鋼棒挿入接着接合（以下、GIR）とする。変形制御機構詳細を図 3-3 に示す。主材の材軸中央に溶接した寸切りボルトを曲げ変形を制御するコイルバネの変形誘導および平面保持機構とし、補剛材軸中央の孔に通す。その孔に鋼管を組込むことで補剛材の断面欠損を補強する。表 3-1 に試験体諸元を示す。写真 3-1 に試験体および荷重装置全景を示す。試

験方法および計測方法については研究成果 2) に準じる。

実験では計測が難しい部分のひずみ度、応力度の観点から座屈性状を分析するために数値解析を行う。図 3-4 に解析モデルを示す。解析モデル諸元は表 3-1 に示す。数値解析には汎用有限要素法プログラム ANSYS2022 R2 を用いる。その他の解析手法については研究成果 1) に準じる。

図 3-5 に荷重 $P/P_{cr(主+補)}$ - 軸方向中央水平 X 方向変位 δ_x 関係を示す。荷重はそれぞれの $P_{cr(主+補)}$ で無次元化する。主材の初期降伏時の変位は、実験と解析ではほぼ同じである。一方、座屈時の変位は、部材によらず解析に比べ実験において大きい。また、補剛材では解析の剛性が実験に比べて大きく、特に右補剛材において顕著である。これには、主材と繋ぎ材の接合部における接着剤の剥がれが関係していると考えられる。座屈荷重 P_{cr} は、実験値、解析値によらず、 $P_{cr(主+補)}$ を超えている。また、変形制御機構にバネを導入 (ES_{sp+sr} モデル) することで P_{cr} が増加する。 P_{cr} は解析値の方が実験値より大きく、バネ導入による P_{cr} の増加率は実験値の方が大きい。以上より、変形制御機構の導入により座屈荷重は、座屈実験では 1.12~1.13 倍、数値解析では 1.03~1.05 倍に増加する。また、解析におけるバネ剛性、プレストレスの違いによる座屈荷重の変化は小さいが、実験では左右補剛材の軸力差が小さいほど座屈荷重は大きい。

【参考文献】

1-1) 奈良憲行, 杉崎友哉, 熊谷知彦: 座屈荷重増加を目的とした偏心圧縮材で補剛された軸力材における軸力負荷時の変形制御機構, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp. 1039-1040, 2018. 9

【研究成果】

1) 鬼頭将輝, 鈴木優花, 熊谷知彦: 偏心圧縮材で補剛された軸力材への変形制御機構の導入による最適曲げ剛性比の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp. 737-738, 2021. 9
 2) 伊藤颯馬, 木本多美, 石井舜, 熊谷知彦: 木製の偏心圧縮材により補剛された鋼製軸力材の座屈実験 (その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp. 661-664, 2022. 9
 3) 伊藤颯馬, 伊藤弘皓, 森下捷, 熊谷知彦: 変形制御機構を組み込んだ木製偏心圧縮材により補剛された鋼製軸力材の座屈実験, (その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (2023. 9 掲載予定)

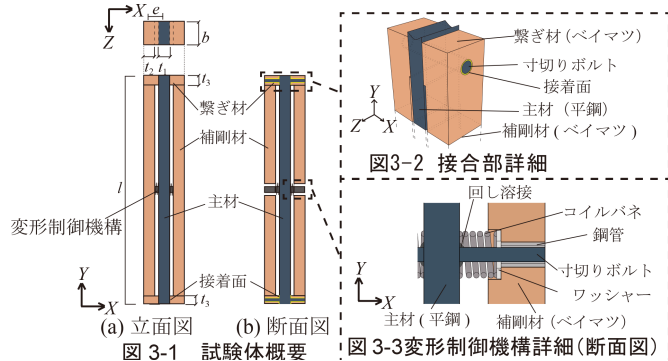


表 3-1 試験体および解析モデル諸元

モデル名	ES _c -160	ES _{sp+sr} -160-25.7	ES _{sp+sr} -160-50.6	解析モデル	
平鋼寸法	FB-25 × 50				
主材細長比 λ_1					
曲げ剛性比 R_f^s	左補剛材	0.34	0.21	0.34	0.34
	右補剛材	0.21	0.21	0.34	0.34
変形制御機構	鋼棒のみ	鋼棒 + バネ		バネのみ	
バネ剛性 k [N/mm]		25.7	50.6	実験モデル同様	
バネ自然長 h [mm]		34	34		
バネ外径 R_{out} [mm]		33	33		
曲げ剛性比 R_f^c	左上繋ぎ材	4.82	3.22	2.75	4.46
	右上繋ぎ材	2.97	3.22	4.46	4.46
	左下繋ぎ材	4.82	3.22	2.75	4.46
	右下繋ぎ材	2.97	5.23	4.46	4.46
主材長さ l [mm]	1155				
幅 b [mm]	50				
主材厚さ t_1 [mm]	25				
補剛材厚さ t_2 [mm]	40				
繋ぎ材厚さ t_3 [mm]	40				
偏心距離 e [mm]	52.5				



写真 3-1 試験体& 荷重装置全景 (ES_{sp+sr}-160-25.7)

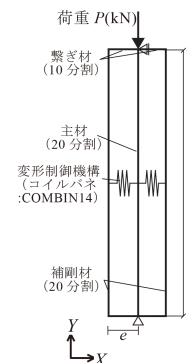


図 3-4 解析モデル (梁要素)

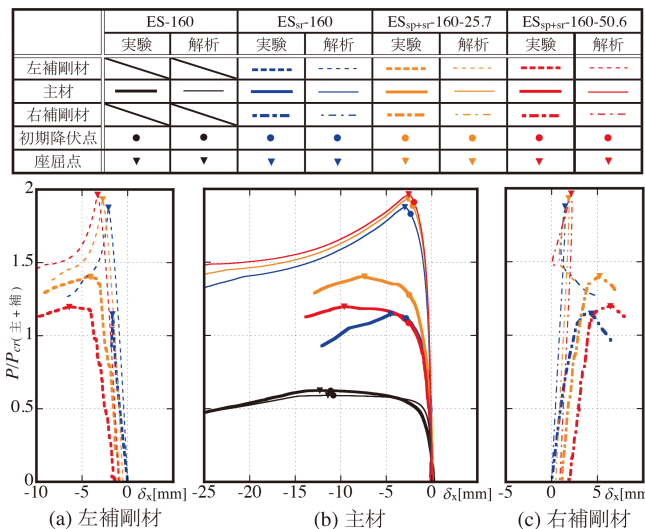


図 3-5 荷重-水平変位関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鬼頭将輝, 鈴木優花, 熊谷知彦
2. 発表標題 偏心圧縮材で補剛された軸力材への変形制御機構の導入による最適曲げ剛性比の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鬼頭将輝, 杉崎友哉, 熊谷知彦
2. 発表標題 偏心軸力を受ける木材により補剛された鋼製軸力材の座屈荷重
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木本多美, 伊藤颯馬, 石井舜, 熊谷知彦
2. 発表標題 木製の偏心圧縮材により補剛された鋼製軸力材の座屈実験 - その1 載荷実験による座屈性状の分析 -
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤颯馬, 木本多美, 石井舜, 熊谷知彦
2. 発表標題 木製の偏心圧縮材により補剛された鋼製軸力材の座屈実験 - その2 有限要素法解析による座屈性状の分析 -
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤颯馬, 伊藤弘皓, 森下捷, 熊谷知彦
2. 発表標題 変形制御機構を組込んだ木製偏心圧縮材により補剛された鋼製軸力材の座屈実験 - その1 載荷実験・有限要素法解析の概要 -
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤弘皓, 伊藤颯馬, 森下捷, 熊谷知彦
2. 発表標題 変形制御機構を組込んだ木製偏心圧縮材により補剛された鋼製軸力材の座屈実験 - その2 載荷実験・有限要素法解析による座屈性状の分析 -
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関