

# 方杖材をねじ込み式挟締器具で接合する 鋼構造建物の耐震補強法の開発に関する研究

中原 浩之\*, 川添 法明\*\*, 廣田 周一郎\*\*

## Development on Seismic Retrofitting Method for Steel Building by Knee Braces Jointed by Vise with High Hardness Screw Bolt

by

Hiroyuki NAKAHARA \*, Noriaki KAWAZOE \*\* and Shuichiro HIROTA \*\*

The authors have developed a new method of seismic retrofit for steel structures by adding a knee brace which is jointed to the existing structures by vices made of high hardness metal screw bolts. The strength and behavior of the connection by the vice had been already studied in our previous paper. The features of the connection by the vice are easy set up and providing the strength as much as by the normal bolts joint. An experimental study has been conducted for the specimens of steel frames retrofitted by the knee braces. The knee brace was jointed to the specimen by the vices. Two types of failure modes were investigated. The former was slipping behavior of the connection and the later was buckling at the knee braces. The strengths of the specimens were estimated by the simple calculations for the two types of failure modes.

**Key words :** *frictional strength, buckling strength, combined stress states, seismic reinforcement,*

### 1 はじめに

著者らは、鋼構造の接合の施工性を向上させること目指し、写真1に示すような、接合金物の基本性能を調べてきている<sup>1)</sup>。写真1の金物は、一種の万力であり、接合する材同士を挟んで締めることにより、摩擦による応力伝達を確保するものである。この金物の特徴は、ねじ先端部の硬度を上げて、これを接合対象材に食い込ませることで、一体化させるところにある。これによりねじの緩みがなくなり、接合材間の摩擦力が一定に保たれる。以降、この接合金物を「ねじ込み式挟締器具」と呼ぶ。これまでの研究では、ねじ込み式挟締器具による接合部の挙動を調べるために、一軸引張試験、多数回繰返し載荷試験、リラクセーション試験を実施した<sup>2)</sup>。実験により、ねじ込み式挟締器具は、実用に足る構造性能と施工性能を有していることが明らかとなっている。



写真1 接合金物の外観

\* システム科学部門 (Division of System Science)

\*\* 工学研究科 (Graduate School of Engineering)

この接合の利点は、ボルト孔が不要なため、ボルト孔の削孔作業がなくなることと施工誤差の許容値が上がる事が挙げられ、簡易な接合を実現できる。本研究では、方杖材をねじ込み式挟縮器具により柱梁に取り付けることで、鉄骨骨組の耐震性能を簡易に向上させる補強法の提案を行う。阪神淡路大震災においては、写真 2、3 (文献 2) と 3) から引用) に示すような、梁の下フランジの破断現象が発生し、建物に大きな被害をもたらされている。本研究では、既存鉄骨建物に方杖材を追加設置して、このような接合部破壊を防ぎつつ、建物の水平剛性を高めることを提案する。

方杖材を用いた鉄骨骨組の耐震性能改善効果について調べた先行研究として、文献 4)、5) が挙げられる。図 1 に先行研究で提案されている、方杖材を持つ鉄骨骨組<sup>4)</sup>を示す。この研究では、柱梁をあえて剛接合せずに、応力集中が懸念される下フランジの破壊を避けている。また、柱梁接合部に方杖材を設け、これを積極的に降伏させることで、履歴ダンパーとして機能させ、当該建物の耐震性能を向上させようとするものである。

2 設計法の提案

図 2 にねじ込み式挟縮器具を用いた耐震補強の施工例を示す。図のように荷重が加わると、方杖材は梁接合部の接合面に水平方向のせん断力と鉛直方向の引張力が作用する。

ここで、引張力  $T$  とせん断力  $Q$  の载荷条件での、接合面のせん断強度  $Q_{cal}$  の計算値は次式のように予想できる。

まず、ボルト軸力から引張力を引いたものにすべり係数を掛けると、接合面に発生しているせん断力が求められる、次式のように表すことができる。

$$(B - T)\mu = Q \tag{1}$$

ここで、方杖材が梁との角度  $\theta$  で固定されているとすると、梁接合部が受ける引張力とせん断力に  $T = Q \tan \theta$  という関係が成り立つ。これを式(1)に代入すると、接合面のせん断強度  $Q_{cal}$  が次式のように求められる。

$$Q_{cal} = \frac{B\mu}{1 + \mu \tan \theta} \tag{2}$$

ここに、 $B$ :ボルト導入軸力 (1 本あたり 75kN)、 $\mu$ :赤錆表面の摩擦係数 (0.45) である。これらの値の根拠は、文献 1) を参照されたい。図 2 は、方杖材が引張力を負担する場合について示しており、上記と同様な考え方で、方杖材が圧縮力を負担する場合のせん断強度も計算できる。



写真 2 鉄骨建物の地震被害 2)



写真 3 鉄骨建物の地震被害 3)

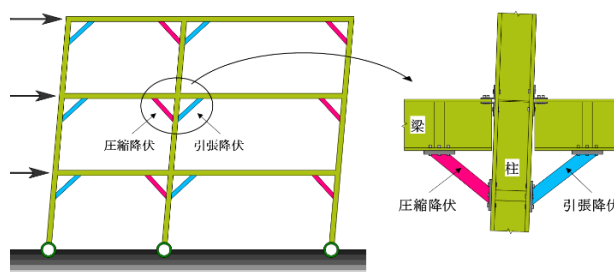


図 1 提案されている方杖付き骨組鉄骨

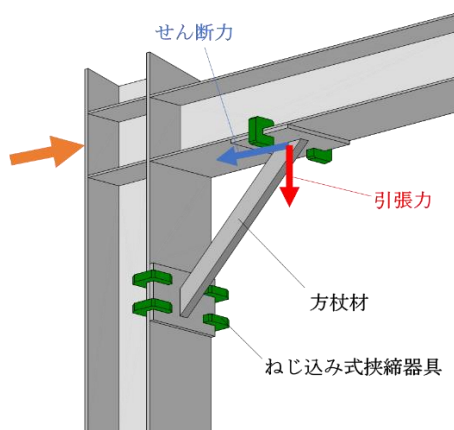


図 2 耐震補強施工例

### 3 接合性能実験

#### 3.1 実験概要

##### ○試験体及び試験装置

図3に試験体の方杖部の形状を示す。方杖材は長方形の鋼材の端部を $\pi/4$ の角度でカットして、エンドプレートを溶接した。エンドプレートの表面は錆加工を施している。方杖材及びエンドプレートは同一のSM400を使用している。

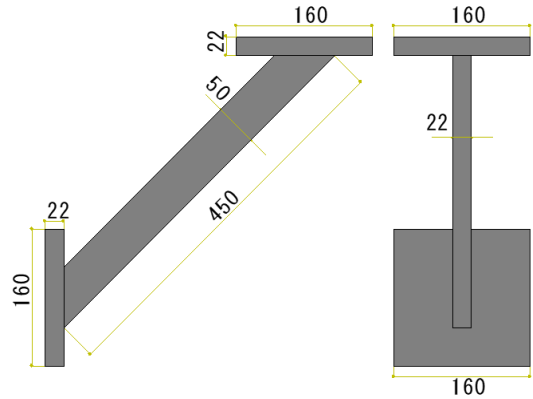


図3 試験体形状

図4に試験装置を示す。試験装置は門型ラーメンを半分にしたもので、柱と梁をピン結合としており、梁接合部にねじ込み式挟締器具を2個、柱接合部に4個用いて方杖材を角度 $\theta=\pi/4$ で固定する。梁と柱の接合面にも錆加工を施している。

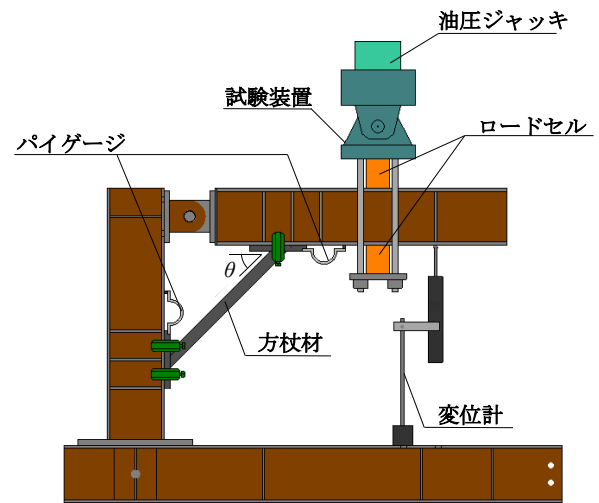


図4 試験装置

この実験では、梁接合部のねじ込み式挟締器具使用個数を2個にすることにより、方杖材を降伏させることなく梁接合部がすべるような設計になっている。すなわち、梁接合部に水平方向のせん断力と鉛直方向の引張りまたは圧縮力の組み合わせ応力が作用した状態での接合性能を調べる。

表1に試験体及び試験装置に用いた鋼材の機械的性質を示す。表1の、 $t$ は板厚、 $\sigma_y$ は降伏応力、 $\sigma_u$ は引張強さ、 $\epsilon_{st}$ は加工硬化開始歪を示す。

##### ○載荷方法

載荷方法は、図4に示す油圧ジャッキにより上下方向に正負交番繰返し載荷を行う。

##### ○計測方法

載荷位置に設置している200kNロードセルにより引張荷重と圧縮荷重を計測する。方杖材の梁接合部と柱接合部にパイゲージを設置しており、これらより接合部のずれ変位を計測する。また、方杖材に一軸ひずみゲージを4枚貼り付けて、方杖材の軸方向ひずみを計測する。

表1 機械的性質

	鋼種	t(mm)	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{st}$ (%)
試験体	SM400	21.8	279	428	1.89
載荷梁	SM490	8.9	392	520	2.83
柱, 反力梁	H-SA700	9.0	795	862	—

\*柱、梁のtはフランジ厚さを示す。

#### 3.2 実験結果

図4のように設置した方杖材は、地震応答時には、引張り力と圧縮力が繰返し作用することになる。従って、その接合部では、引張り力下でのせん断力によるずれ変形と、圧縮力下でのせん断力によるずれ変形について観察する必要がある。

図5に繰返し載荷を実施した際の接合面のせん断力 $Q$ —ずれ変位関係を示す。図の縦軸は梁接合部に作用するせん断力、横軸は方杖材と梁接合部に設置している2個のパイゲージにより測定したずれ変位の平均を示している。せん断力は、方杖材が引張となるとときに正、圧縮になるとときに負で表示している。

図5のせん断力は、2通りの方法で求めた方杖材の負担軸力から算出して示している。青実線が、ひずみゲージに軸剛性をかけて求めたもので、赤破線は、ロードセルで計測した荷重から求めたものである。

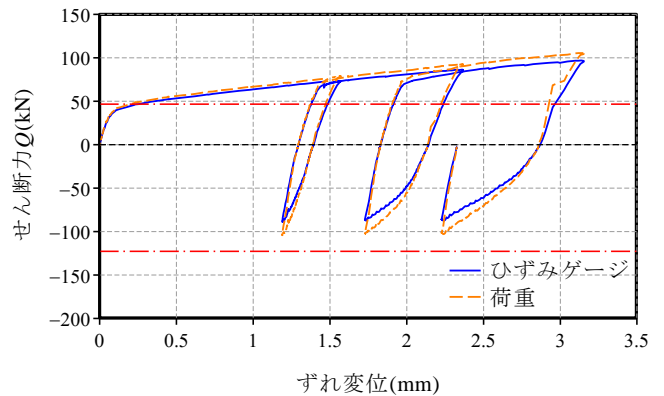


図5 せん断力 $Q$ -ずれ変位関係

外力  $P$  とせん断力  $Q$  の関係は以下のように表される。

まず、図 6 のように引張力とせん断力を受ける場合、次式のようにピン位置の力のモーメントが 0 となることより、接合部せん断力  $Q$  が算出される。

$$M_{\theta} = QL_2 + Q\frac{D}{2} - PL_1 = 0 \quad (3)$$

圧縮力とせん断力を受ける場合は、図 7 のように方杖材が曲げ抵抗することにより、方杖材の軸力は引張+せん断の場合よりも小さくなる。すなわち、ピン位置での力のモーメントは、次式のようになる。

$$M_{\theta} = -QL_2 - Q\frac{D}{2} + PL_1 - M_k = 0 \quad (4)$$

ここで、エンドプレートの回転抵抗は、

$$\frac{\Delta_p}{L_1} = \int_0^{L_3} \frac{M_k \bar{M}}{EI} dx = \frac{M_k}{EI} L_3 \quad (5)$$

のように計算できる。

図 5 の赤破線は、式(3)-(5)の計算により算出した結果を示している。ロードセルとひずみゲージから得られる独立した観測データから、ほぼ一致したせん断力  $Q$ -ずれ変位関係が得られ、実験の精度を保証している。

ここで、式(2)よりせん断強度の計算を行う。実験の梁接合部に用いている挟締器具は 2 個であることからボルト軸力は 150kN、 $\theta=\pi/4$  なので  $\tan\theta=1$  として計算することになり、計算強度は  $Q_{cal}=46.6\text{kN}$  となる。

実験のせん断力は、計算強度  $Q_{cal}$  の 46.6kN を上回る結果が得られた。また、図 5 では荷重が反転して、圧縮力  $C$  とせん断力  $Q$  の載荷条件での挙動も観察でき、式(2)より、計算強度  $Q_{cal}$  は 122.7kN となる。実験では、これに達するまでの実験は実施していないが、引張+せん断時の 2 倍以上の荷重に耐えることが分かる。

方杖材を用いた耐震補強の場合の接合部設計は、引張+せん断時において行えばよく、本研究の結果から、式(2)の提案計算法で設計可能であることが示された。

## 4 方杖の繰返し載荷解析

### 4.1 解析概要

前節では、提案する耐震補強材の接合性能とその設計法を検討するために、接合部の滑り破壊が先行する試験体を作製し、実験を実施した。しかしながら、実構造物に、この耐震補強材を設置する場合、方杖材の破壊を先行させる設計となることが予想される。方杖材は、引張力を受ける際に降伏し、圧縮力を受ける際に座屈し、これを繰返す複雑な挙動を示す。本節では、この挙動を確認するため FEM 解析を実施し、方杖材の繰返し軸方向力載荷下での荷重-変形関係について調べる。

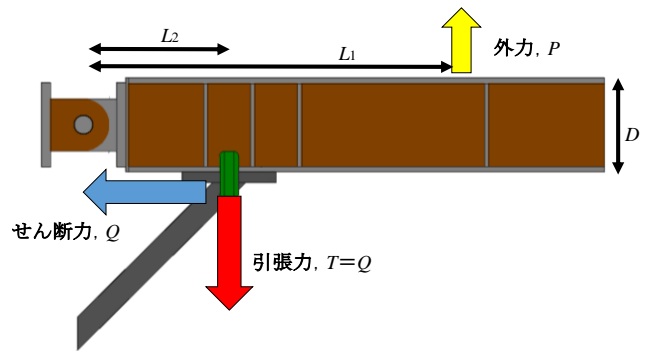


図 6 引張時にかかる力

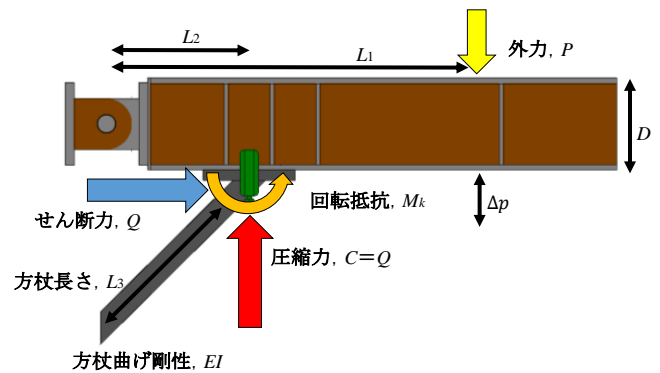


図 7 圧縮時にかかる力

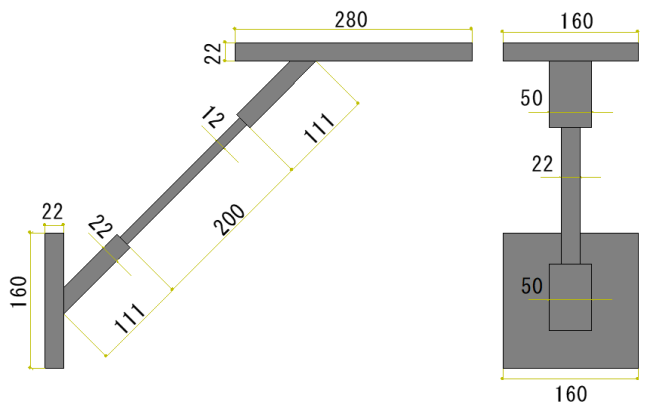


図 8 試験体形状

解析は、材料および幾何非線形を考慮できる有限要素法解析プログラム Marc を用いて解析を実行する。解析は、降伏や座屈を表現でき、鋼材ダンパーの実験の荷重-変形関係を精度よく模擬できることが著者らの研究において既に明らかとなっている<sup>6)</sup>。

解析の概要について以下に示す。

#### ○解析モデル

解析を行う試験体形状については、図8のように想定した。すべて溶接接合とし、エンドプレートと斜材の角度は $\pi/4$ と想定した。

図9に解析モデルについて示す。解析モデルには、10節点四面体要素を採用している。1節点は、並進と回転の計6自由度を有している。

柱、梁接合部には、4点のみを挟締器具により締め付けた固定端と想定し、全自由度を固定した。梁接合部では、Rigid Linkを用いて加力芯に設けた代表節点と結合した。代表節点では、方杖材の軸方向に強制変位を与え、その他の自由度を固定した。尚、降伏条件には図10に示すMisesの降伏条件を採用している。

○载荷プログラム

図11に载荷プログラムを示す。軸方向に引張方向から計10サイクル実施する。

○真応力—対数塑性歪関係

本実験の方杖材は、载荷による大変形が予想されるため、正確な挙動を把握する必要がある。そこで、解析には真応力—対数塑性歪関係を採用し、解析モデルには以下の  $n$  乗硬化則を用いた。

降伏棚を除く加工硬化領域における真応力—対数塑性歪関係は、次式の  $n$  乗硬化則が良好に成立することが知られている。

$$\epsilon_p^* \geq \epsilon_{pst}^* \text{ のとき, } \sigma^* = \sigma_y^* \cdot C \cdot (\epsilon_p^* - \epsilon_0^*)^n \quad (6.a)$$

ここに、 $\sigma_y^*$ : 降伏応力、 $\epsilon_p^*$ : 塑性歪、 $\epsilon_0^*$ : 修正歪、 $\epsilon_{pst}^*$ : 加工硬化開始歪の塑性成分

また、降伏棚の領域は次式より表せる。

$$0 \leq \epsilon_p^* \leq \epsilon_{pst}^* \text{ のとき, } \sigma^* = \sigma_y^* \quad (6.b)$$

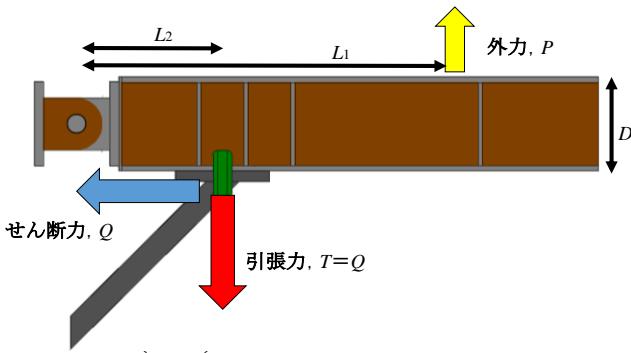


図6 引張時にかかる力  $\epsilon^* = \ln(1 + \epsilon)$  (8.b)

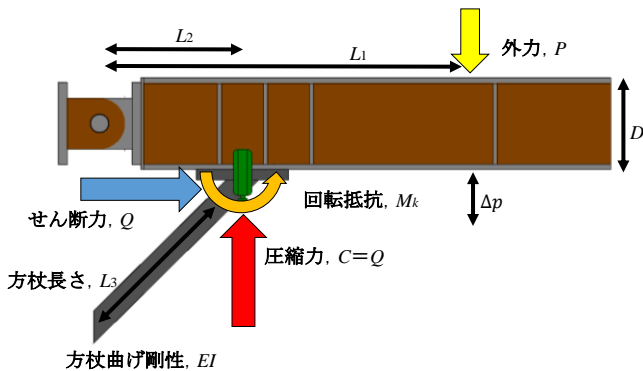


図7 圧縮時にかかる力

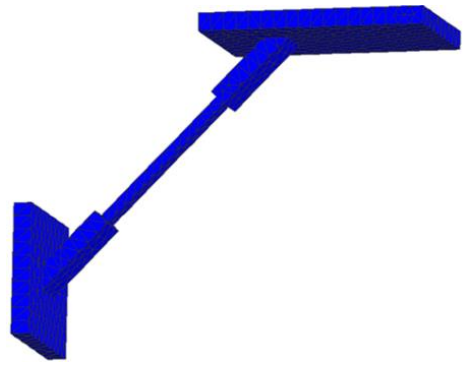


図9 要素分割解析モデル

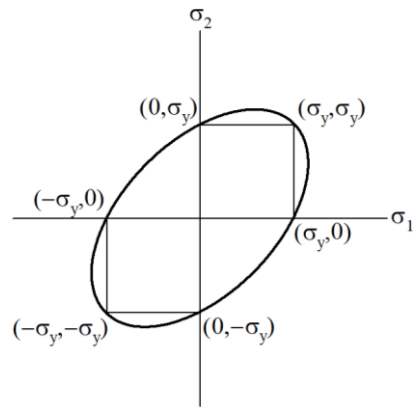


図10 Mises の降伏条件

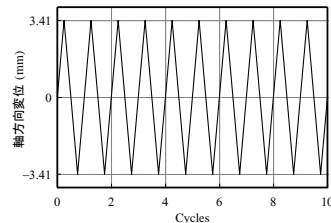


図11 载荷プログラム

表2 解析用の  $n$  乗硬化則

板厚	部位	鋼種	$\sigma_y$	$\epsilon_{pst}^*$	$\epsilon_0^*$	$m$	$C$	$n$
			(N/mm <sup>2</sup> )	-	-	-	(N/mm <sup>2</sup> )	-
21.8	試験体	SM400	300	0.017	0.015	3.0	2.221	0.145

$$C = \frac{\exp(n + \epsilon_0^*)}{\frac{\sigma_y}{\sigma_u} \cdot n^n} \quad (9.b)$$

修正歪  $\epsilon_0^*$  は、材料試験をもとに次式で与える。

$$\epsilon_0^* = \epsilon_{pst}^* - m \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (9.c)$$

ここに、 $m$ : 修正係数

表2に解析に用いた真応力—対数塑性歪関係の  $n$  乗硬化則モデルの諸定数を示す。



### 4.3 結果及び考察

#### ○軸力—軸方向変位関係

図12に解析による方杖材の軸力—軸方向変位関係を示す。図より、FEM解析は方杖材の引張降伏や座屈による耐力低下、さらにバウシinger効果等を表現できている。

図12では、引張側と圧縮側でエネルギー吸収能力に大きな差がある。しかし、方杖材を構造物に適用する際には図1のように対で取り付けるので、補強骨組としての応答性状は、図12のような非対称の荷重-変形関係にはならない。

図13に図12と、圧縮力から载荷した場合の軸力—軸方向変位関係を足し合わせた方杖材2つの性能を示す。図13より、破断現象が起こらない軸ひずみ範囲内においては、圧縮側を引張側が補完することになり、作用外力の方向に左右されない履歴性能が期待できることが分かる。

#### ○終局変形性状

図14に解析終了時の方杖材の変形性状について示す。解析前に予測された通り、方杖材の弱軸方向に曲げ座屈が発生していることが確認できた。

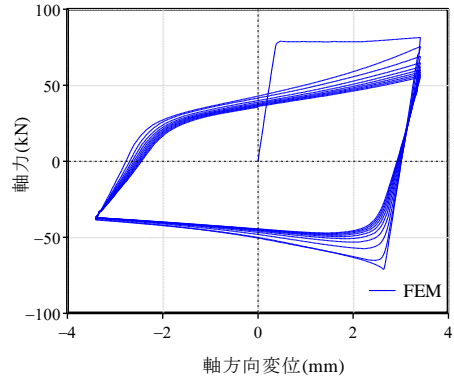


図 12 軸力—軸方向変位関係

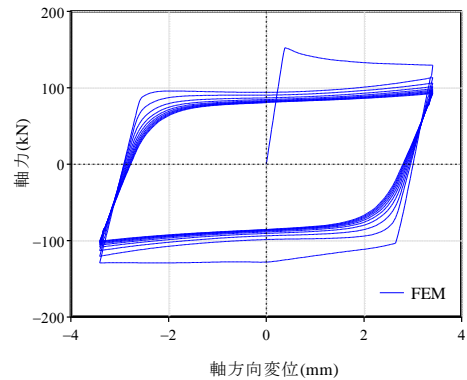


図 13 足し合わせた軸力—軸ひずみ関係

### 5 まとめ

- 1) 方杖材と梁接合部に引張力+せん断力が载荷される条件において接合部がすべり破壊する際のせん断力  $Q$  は、計算強度  $Q_{cal}$  を上回った。
- 2) 方杖材を用いた耐震補強の場合の接合部は、提案した計算法で設計可能である。
- 3) 実際の耐震補強時に予想される方杖材の破壊が先行する場合の荷重-変形関係を FEM 解析により予測した。
- 4) 繰返し軸方向载荷下における方杖材は、引張力を受ける際に降伏し、圧縮力を受ける際に座屈し、これを繰返す複雑な挙動を示した。
- 5) 方杖材は、対で使用されることを考慮すると、圧縮側の不安定な座屈挙動を引張側が補完し、地震エネルギーの吸収性能を確保することが可能であることを例示した。

#### 参考文献

- 1) 中原浩之, 川添法明, 廣田周一郎: ねじ込み式挟締器具を用いた摩擦接合性能に関する実験的研究, 長崎大学工学研究科研究報告, 投稿中
- 2) 建築震災調査委員会, 平成7年阪神・淡路大震災建築震災調査委員会報告書—集大成版—, 1996
- 3) 日本建築学会, 阪神・淡路大震災調査報告, 共通編—1 (総集編), 2000

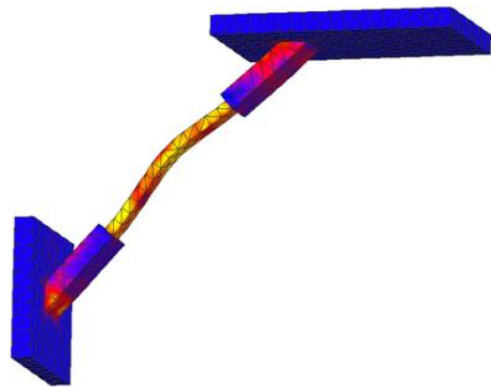


図 14 解析後変形状況

- 4) 聲高裕治, 安藤正和, 百野泰樹, 吹田啓一郎, 井上一郎: 方杖ダンパーを用いた柱梁高力ボルト接合構造の実大骨組実験, 日本建築学会構造系論文集第 595 号, pp.109-116, 2005.09
- 5) 吹田啓一郎, 井上一郎, 竹内一郎, 宇野暢芳: 座屈拘束された方杖ダンパーによる柱梁高力ボルト接合構造の力学挙動, 日本建築学会構造系論文集第 571 号, pp.153-160, 2003.09
- 6) 中原浩之, 伊藤優佑, 廣田周一郎, 楠本美里: 普通鋼を用いた履歴型ダンパーの塑性変形性能に関する解析的研究, 長崎大学工学研究科研究報告, 第 49 卷 92 号, pp.35-42, 2019