

# 硬度の高いボルトを有する挟締器具を用いた鋼構造接合部の摩擦接合強度に関する実験的研究

中原浩之\*・陳逸鴻\*・下村崇人\*\*・石川晃規\*\*\*・川野桃熙\*\*\*

## Experimental Study of Frictional Connections by Vises with High Hardness Screw Bolts

by

Hiroyuki NAKAHARA\*, Iathong CHAN\*, Takato SHIMOMURA\*\*,  
Koki ISHIKAWA\*\*\* and Toki KAWANO\*\*\*

The authors have been studying for a seismic retrofit for steel structures by adding a knee brace which is jointed to the existing structures by vises made of high hardness metal screw bolts. The retrofitting method, which was proposed and published by the authors in 2019, was able to provide the easy set up and decrease the cost of the retrofitting construction. An experimental study has been conducted for steel frames retrofitted by the knee braces. The knee brace was jointed to the frame by the vises. The connection between the end plate of the knee brace and steel beam was subjected to frictional force and tensile or compressive force simultaneously under some earthquake motions. In order to clarify the strength against two different forces, two basic tests have been conducted. The simple frictional strength was studied through tensile test of two steel coupons connected by the vises. The yield strength of the end plate or flange of the beam or column with the out-of-plane deformation was studied through the test of split-T specimens connected by the vises. Based on these studies, the relations between the connecting strength and slipping displacement under actual deformation was investigated. The strength of the connection was estimated safely by the calculated strength by simple equation. The strength of the connection increased gradually after attaining the calculated strength. From the observation of no drop and no loose of the vises in the test, the structural performance of the connections by the vises was confirmed experimentally.

**Key words :** *frictional strength, slipping displacement, out-of-plan deformation, seismic retrofit.*

### 1. はじめに

著者らは、図1に示すような、万力金物を用いた鋼構造の接合法についての研究<sup>1)</sup>を行っている。この金物の特徴は、ねじ先端部の硬度を上げ、これを接合部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、接合部材間の摩擦力が一定に保たれる。以降、この万力金物を「ねじ

込み式挟締器具」と呼ぶ。著者らは、この挟締器具を用いて方杖材を既存鋼構造骨組に追加することで耐震補強を行うことを提案している。

図2に、文献2)で提案されている方杖ダンパー付きの鉄骨建物を示す。これは、地震力が作用した場合、図のように対称に配置された方杖ダンパーを、それぞれ圧縮降伏と引張降伏させることにより、地震エネルギー

令和3年12月20日受理

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

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

\*\*\* 工学部 (School of Engineering)

ギヤを吸収して、主架構の損傷を防ぐことが意図されている。本研究は、既存純ラーメン鉄骨建物に、方杖を追加することで、図2のような構造をつくり、耐震性能を向上させることを目的としている。方杖の接合部は、ねじ込み式挟締器具を用いて取付け、優れた施工性を有する耐震補強を実現する。

本研究では、この挟締器具を用いた鋼構造物の耐震補強の実現を目指し、その接合性能を3通りの実験により調べる。

一つ目は、単純な摩擦接合強度を確認するための一軸引張試験である。二つ目は、図2の方杖材に引張力が作用した場合、方杖材のエンドプレートもしくは、接合された梁または柱の面外変形による破壊性状を調べるための、スプリットティ接合<sup>3)</sup>試験体を用いた引張試験である。

これらの基礎的な実験を踏まえて、方杖補強鉄骨骨組の実験を実施して、方杖材の接合部の強度を調べる。

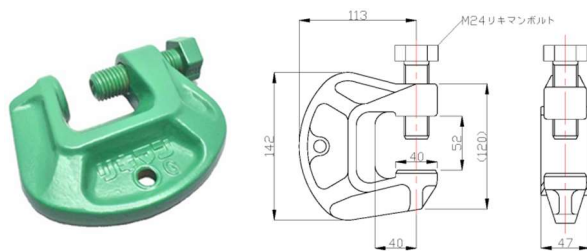


図1 万力金物の形状および寸法図

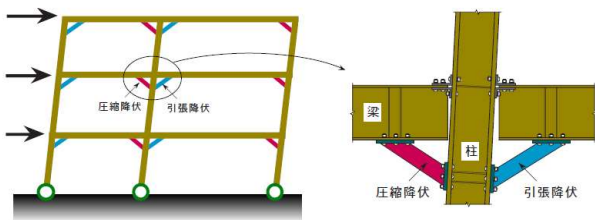


図2 方杖ダンパー付き鉄骨建物の構造

## 2. 一軸引張試験

### 2.1 実験概要

表1に試験体一覧を示す。本研究における実験変数は、鋼材の鋼種、板厚、ねじ込み式挟締器具の個数であり、試験体は同じ条件のものを各2体ずつ用意する。1個締め、2個締めの試験体は過去の結果<sup>1)</sup>と比較する。本研究では、使用上限数を検討するため、4個締めの試験体を3体ずつ用意した。挟締器具同士の間隔は60mmとした。表面状態は、自然発錆による赤錆のみとした。錆の発錆期間を過去の試験<sup>1)</sup>では1か月と

表1 試験体一覧

鋼種	板厚(mm)		挟締器具 個数	試験体数	トルク (Nm)	表面加工
SS400	6	6	1	1	300	赤錆
			2	1		
	6	12	1	2		
			2	2		
	12	12	1	2		
			2	2		
	16	16	4	3		
	16	19		3		
19	19	3				
SM490	6	6	1	2		
			2	2		
	6	12	1	2		
			2	2		
	12	12	1	2		
			2	2		

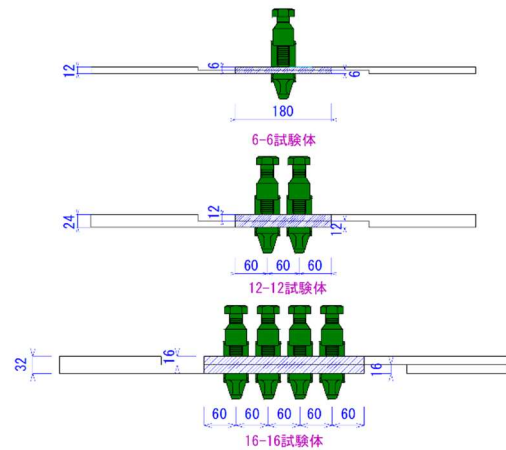
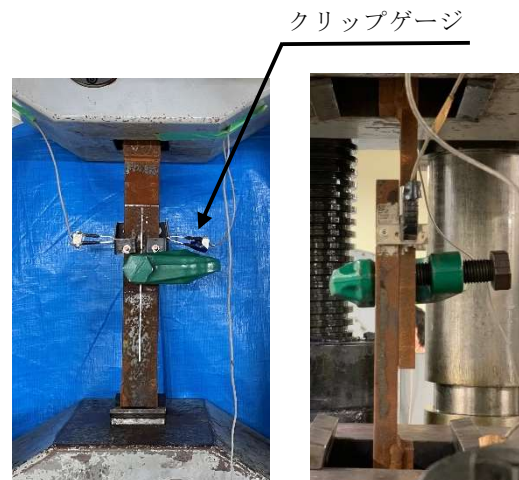


図3 試験体接合図



(a) 正面図

(b) 側面図

写真1 一軸引張試験外観

していたが、土木学会の資料<sup>4)</sup>では、錆の発錆期間は2か月から4か月が適切とあり、今回の試験は発錆期間を3か月とした。

引張試験は図3のように、2枚の鋼材をねじ込み式締結器具で接合した試験体を鋼材軸方向に引張り、引張荷重、接合部ずれ変位を測定する。写真1に一軸引張試験外観を示す。接合部ずれ変位を測定するためのクリップゲージの検長は57mmとした。ねじ込み式挟締器具は、すべてトルクレンチを用いて300Nmで締め付けた。

## 2.2 実験結果

実験で得られた引張荷重-ずれ変位関係を図4に示す。図では、高力ボルト接合の実験で見られるような明瞭なすべり挙動は見られず、冷間成型鋼管の引張試験にみられるようなランドハウス型の荷重-変形関係となっている。高力ボルト摩擦接合の場合、現行規準<sup>5)</sup>の「すべり荷重」は、「0.2mmまでに明瞭な主すべりが生じた場合は、その主すべり荷重、明瞭な主すべりが生じない場合は、すべり量が0.2mm時に対応する荷重とする。」とある。本研究における「すべり荷重」も現行規準に準拠する。実験のずれ変位の測定検長間においては、鋼材の弾性変形による伸びも含まれている。そのため、計測変位から計算した弾性変形を除いた値をずれ変位とした。表2に同一の鋼種、板厚で行った過去の試験から得られた挟締器具1個あたりのすべり荷重の平均と標準偏差を示す。表3に今回の試験で得られた、ねじ込み式挟締器具の1個あたりのすべり荷重の平均と標準偏差を示す。過去の実験のすべり荷重の平均は26.2kNである。一方、本実験の平均は、34.2kNとなった。過去の結果に比べて今回の結果が大きく出た理由としては、錆の発錆期間を1か月から3か月に変更したため、すべり係数が大きくなったことが原因だと考えられる。また、今回の試験では、図4に示すような、0.2mmを超えて明瞭なすべりが生じる試験体が多く、どの試験体も明瞭なすべりが生じた後、荷重が漸増していることが分かった。

そのため、現行規準の0.2mm時の荷重を採用すれば、安全側にすべり荷重を評価していることになる。また、すべり荷重が満たなかった試験体も、0.2mm以上の変形を許容すれば、すべて平均を上回る荷重を負担できる。従って、実験の平均をすべり荷重と定義して、耐震補強設計に採用する。

次に、図5、表4にSS400-16-16の結果を4個締め例として載せる。4個締めでも、1個締め、2個締めのグラフと同様に、0.2mm以降で明瞭なすべりが生じ、その後荷重が漸増している。SS400の1個締め、2個締め、4個締めの挟締器具個数によるすべり荷重の変化

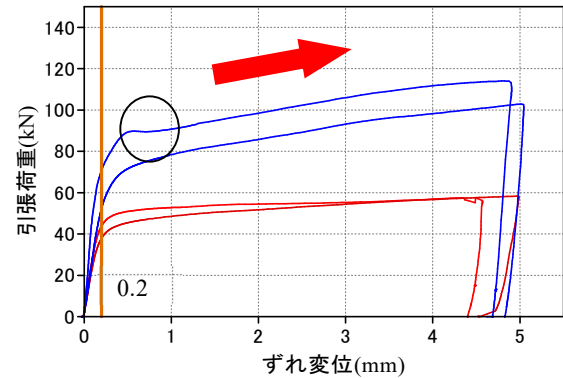


図4 引張荷重-ずれ変位

表2 平均すべり荷重と標準偏差（過去データ）

鋼種	挟締器具の個数	試験体数	挟締器具1個あたりの平均すべり荷重 [kN]	平均 [kN]	標準偏差
SS400	1	6	25.6	25.4	3.49
	2	6	25.2		
SM490	1	6	25.3	26.9	6.76
	2	6	28.4		

表3 平均すべり荷重と標準偏差（今年度データ）

鋼種	挟締器具の個数	試験体数	挟締器具1個あたりの平均すべり荷重 [kN]	平均 [kN]	標準偏差
SS400	1	5	37.3	32.8	5.22
	2	5	28.3		
SM490	1	6	40.0	35.7	5.29
	2	6	32.0		

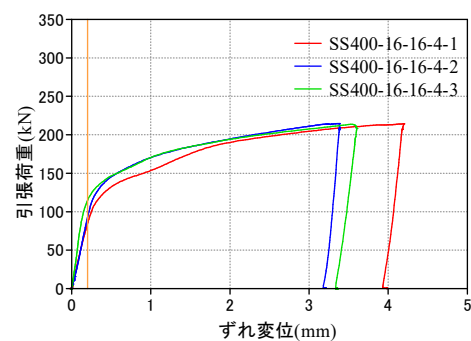


図5 引張荷重-ずれ変位

表4 平均すべり荷重と標準偏差

鋼種	板厚(mm)	試験体数	挟締器具1個あたりの平均すべり荷重 [kN]	平均 [kN]	標準偏差
SS400	16-16	3	24.1	26.8	2.98
	16-19	3	27.4		
	19-19	3	28.8		

を図 6 に示す．これから分かるように，挟締器具の個数が増えていくごとに，挟締器具 1 個当たりのすべり荷重が減少した．これは，近接する挟締器具のボルトに圧縮力が加わると母材が板厚方向に僅かに縮み，初期導入していた圧縮力が低下することが原因と考えられる．

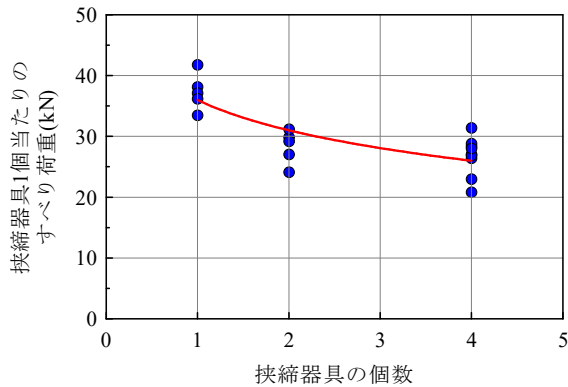


図 6 挟締器具個数によるすべり荷重の変化

### 3. スプリットティ試験体の引張試験

#### 3.1 実験概要

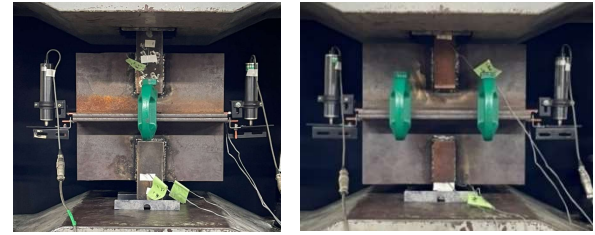
写真 2 に示すように，H 形鋼 (H-350×175×7×11) をウェブで半分に切断したもの (スプリットティ) を 2 つ用意して，これらのフランジをねじ込み式挟締器具で接合したものを試験体とした．ねじ込み式挟締器具の個数を 2 個，4 個，8 個と変化させたものをそれぞれ 2 体ずつ試験した．

実験は，H 形鋼のウェブに試験機に固定するための鋼棒を溶接し，これらを上下方向に引張ることで，接合部を離間する方向に変形させて，破壊性状を観測した．また，接合部の開いた距離 (あき変位) を両端に取付けた変位計で測定した．破壊機構は，挟締器具の個数により変化する．それぞれの破壊機構に対応する強度を計算し，結果を表 5 に示す．破壊機構は，文献 3) を参照して，図 7 に示す 3 通りを仮定している．

機構 1 は，ボルトが引張降伏する機構である．機構 2 はスプリットティのフランジの曲げ降伏と，ボルトのくぎ抜き降伏によるものである．機構 3 はスプリットティのフランジに 2 つの曲げヒンジが発生する機構である．

#### 3.2 実験および解析結果

図 8～10 に実験の荷重－変位関係，表 5 に示した計算荷重，解析結果を示す．実験では，表 5 の異なる 3 種類の破壊機構のうち最小の強度のモードで破壊するため，これらの最小値を図に示している．挟締器具の個数を 2 個，4 個，8 個と増やすと，接合強度は上昇し，表 5 の手法で破壊強度を推定できているといえる．



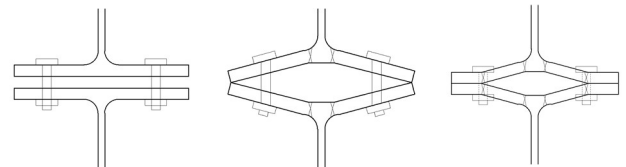
(b) 2 個

(a) 4 個

写真 2 かさおれ試験

表 5 機構の種類及び荷重 [kN]

器具個数	機構1	機構2	機構3
2個	150	128	239
4個	300	173	239
8個	600	262	239



(a) 機構 1

(b) 機構 2

(c) 機構 3

図 7 破壊機構

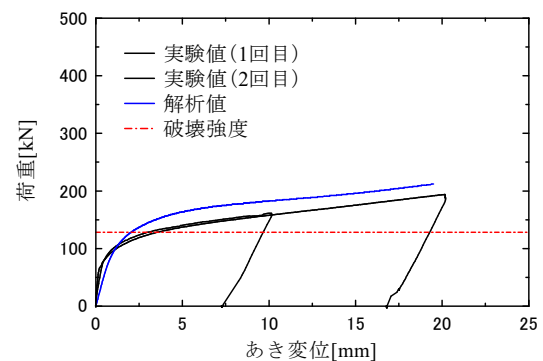


図 8 荷重－変位関係 (2 個)

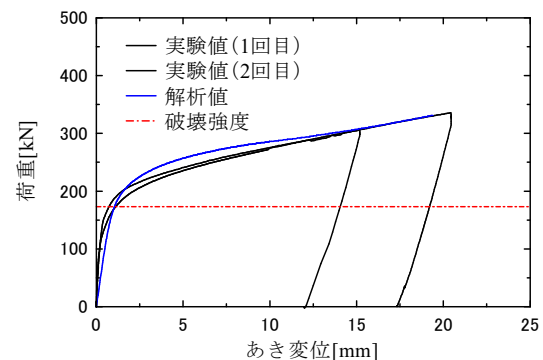


図 9 荷重－変位関係 (4 個)

また、実験では、計算した破壊強度を超えても、荷重が漸増するという挙動が見られる。2通りの異なる破壊モードで接合材が降伏しても、挟締器具の脱落は起こらなかった。

同図には、非線形有限要素法解析プログラム Marc を用いて解析結果をのせている。分割要素は四面体メッシュを採用し、ポアソン比を 0.3，ヤング係数は素材試験より  $208 \text{ kN/mm}^2$  とした。なお、挟締器具による接合部分は完全固定とし、実験と同様に、加力用鋼棒部分に、強制変位を与えた。

解析は、若干過大評価の傾向があるものの、実験の荷重-変形関係をおおむね良好に追跡できている。しかしながら、接合部分のモデル化には、実情と異なる部分があり、さらなる改善が必要で、今後の課題としたい。

#### 4. 骨組実験

##### 4.1 実験概要

図 11 は、実際の鉄骨骨組に提案する方杖材を取り付けた場合を模擬した試験体である。柱は H-340×250×9×14、梁は H-250×250×9×14 で、鋼種はともに SS400 とし、両者をピンで接合している。これの梁の接合部におけるすべり破壊を先行させる実験を実施した。

耐震補強用の部材は、H-400×200×8×13 から切り出したスプリットティに、方杖の軸材として板厚 13mm の鋼材を 2 枚溶接して作成した。つまり、梁のフランジ厚 14mm と方杖材のエンドプレート 13mm を挟締器具で接合している。

実験変数は、梁と方杖材の接合に使用したねじ込み挟締器具の個数で、2 体とした場合と、4 体とした場合の 2 種類を用意した。

式(1)は接合部のすべり荷重  $Q_A$  の算定式<sup>6)</sup>である。 $Q_A$  は、方杖材が引張力を負担している場合と、圧縮力を負担している場合で、右辺分母の  $\pm \mu \tan \theta$  の符号が変化する。前者の状態では、接合面の接触圧が小さくなるため、 $Q_A$  は小さくなる。従って、本研究の接合部設計では方杖材が引張力を負担している場合が主となる。

$$Q_A = \frac{nB\mu}{1 \pm \mu \tan \theta} \quad (1)$$

ここで、挟締器具数を  $n$ 、ボルト軸力を  $B$ 、赤錆の摩擦係数を  $\mu$ 、梁と方杖ダンパーとの角度を  $\theta$  とする。 $B$  は 75kN、 $\mu$  は 0.45、 $\theta$  は  $\pi/4$  を採用している。

また、挟締器具の終局強度  $Q_U$  を式(2)より算出する。

$$Q_U = Q_A + n \times \frac{N_d}{3} \quad (2)$$

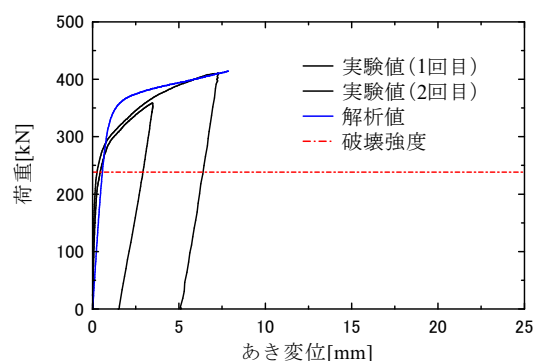


図 10 荷重-変位関係 (8 個)

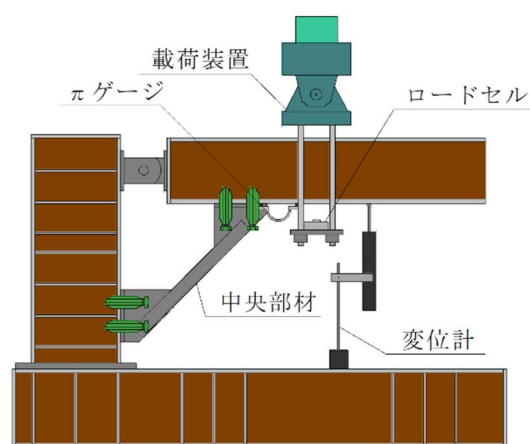


図 11 荷重-変位関係 (4 個)

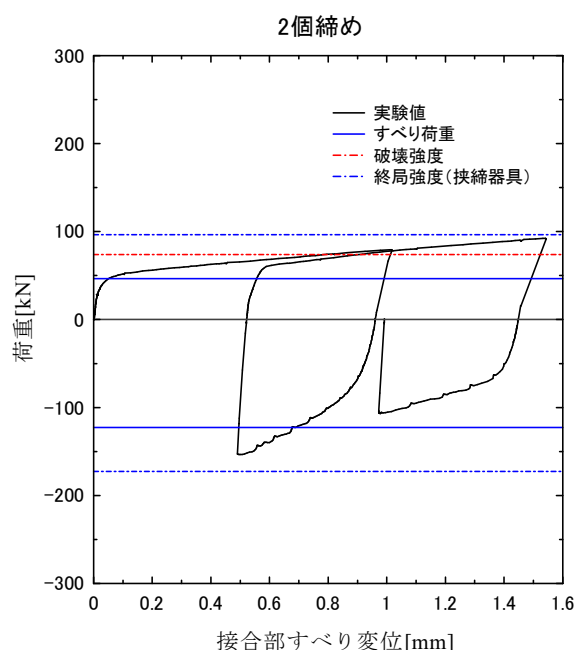


図 12 荷重-変位関係 (2 個)



ここで、 $n$  は挟締器具数、 $N_d$  は掘り起し強度  $\eta$  であり 75kN となる。

## 4.2 実験結果

図 12, 13 に実験の荷重-変位関係を示す。図の縦軸は、方杖材の軸力の鉛直成分を示しており、正側が引張、負側が圧縮である。これらの値は、接合面のせん断強度と同じである。横軸は、図 11 に示す  $\pi$  ゲージで計測した接合部のずれ変位である。これらの図には、摩擦接合面のすべり強度  $Q_A$  と終局強度  $Q_u$  に加えて、方杖材のエンドプレートの破壊荷重をのせている。これらの値は、表 6 に纏めている。

図 12 は、挟締器具を 2 個使用した場合の結果について示している。方杖材が引張となる方向から加力を開始し、すべり荷重に達している。実験のすべり荷重は、 $Q_A$  で精度よく予測できている。その後も荷重は漸増し、方杖材のエンドプレートが破壊強度に達している。エンドプレート降伏後も荷重は漸増している。その後、荷重を反転させ、方杖材が圧縮となる方向に加力した。実験値は、圧縮側の  $Q_A$  をやや下回る値で軟化を開始するが、結果的に計算値に達した。その後、再び方杖材が引張を負担すると、処女載荷時の荷重-変形関係に合流している。すべり変位が、1.5mm を超えると、 $Q_u$  に達することが予測される。

図 13 は、挟締器具を 4 個使用した場合の結果について示している。表 6 から分かるように、この試験体は、すべり荷重に達するとほぼ同時にエンドプレートが降伏する。実験の荷重は、 $Q_A$  に達しており、接合されるエンドプレートが局所変形を起こしても、接合強度が保たれていることが分かる。なお、その後も荷重が漸増している。また、荷重を反転させ、方杖材が圧縮となる方向に加力したところ、実験値は、圧縮側の  $Q_A$  を上回った。これらの実験では、挟締器具のゆるみや脱落は観測されていない。以上のことから、本研究で使用している挟締器具は、接合される材が降伏しても接合強度を失うことなく使用可能であることが実験的に示された。

## 5. まとめ

- 1) 挟締器具 1 個当たりのすべり荷重は、1 個締めで 38.7kN, 2 個締めで 30.1kN, 4 個締めで 26.8kN となった。
- 2) ねじ込み式挟締器具は、使用個数が増えるごとに挟締器具 1 個当たりのすべり荷重が低下することが分かった。
- 3) 引張荷重-ずれ変位関係において、すべりが生じた後も引張荷重が漸増し、0.2mm 以上のずれ変形を許容できれば、全ての試験体ですべり荷重の平均を上回る。つまり、実験の平均値はすべり荷重

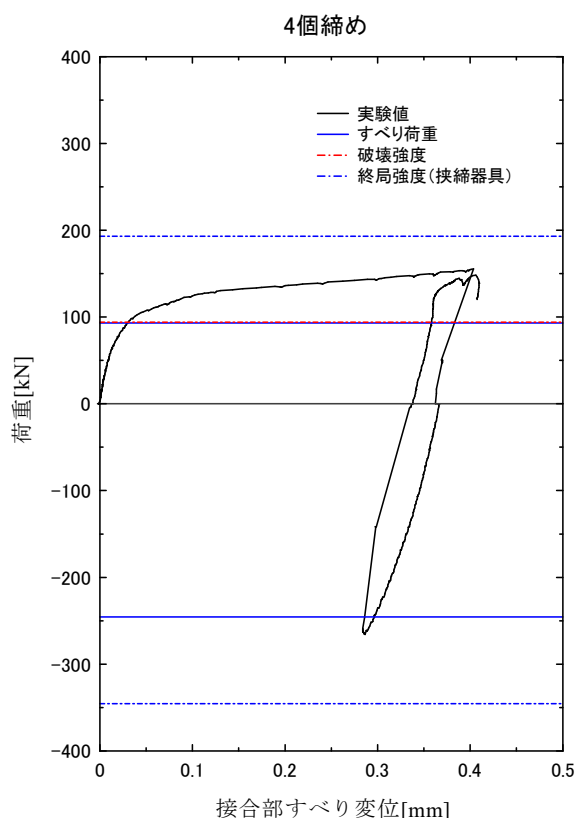


図 13 荷重-変位関係 (4 個)

表 6 計算強度の一覧 [kN]

器具個数	破壊強度	引張側		圧縮側	
		すべり荷重	終局強度	すべり荷重	終局強度
2個	73.9	46.6	96.6	122.7	172.7
4個	94.0	93.1	193.1	245.5	345.5

を評価するにあたり安全側の値となり、実験の平均値を耐震補強設計に採用できる。

- 4) スプリットティ引張試験では、2 通りの破壊形式が観測され、これらの破壊強度を既往の式で評価可能であることが示された。計算の破壊強度を超えても、荷重は漸増し、挟締器具のゆるみや脱落は観測されなかった。
- 5) 耐震補強した骨組の方杖材のエンドプレートの降伏とエンドプレートと梁間のすべり破壊が生じる実験を実施した。すべり荷重に達した後も荷重は漸増し、接合性能は保持されることが実験的に示された。
- 6) 接合部分が局所変形するような場合でも、式(1)で、すべり荷重を予測可能であることが示された。

謝辞：本研究の実験には，長崎大学技術職員の岡本健太氏の協力を得た．ここに記して，謝意を表する．

#### 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，長崎大学大学院工学研究科研究報告，第 49 巻第 93 号，2019
- 2) 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.
- 3) 井上一郎，吹田啓一郎：建築鋼構造－その理論と設計－，鹿島出版会，pp.4-93，2007.12
- 4) 森猛，南邦明：赤錆面を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験，構造工学論文集 A, 53A 巻，pp.1305-1312，2007
- 5) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，p. 381，2012
- 6) 中原浩之，陳逸鴻，川添法明，下村崇人：鋼構造建物における方杖材を用いた簡易耐震補強の開発に関する実験的研究，長崎大学大学院工学研究科研究報告，第 50 巻 95 号，pp.27-34，2020.7
- 7) 宇野暢芳，井上一郎，志村保美，脇山広三：硬さが異なる鋼材間の摩擦係数に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 494 号，pp. 123-128，1997