

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

中原 浩之*, 川添 法明**, 廣田 周一郎**

Test on Frictional Connection between Steel Plates by Vise with High Hardness Screw Bolt

by

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

An experimental study has been conducted for the strength and the behavior of frictional connection between steel plates by a vise made of high hardness metal screw bolts. There are some difficulties to connect steel members by bolts, because the connection by the bolts needs to make accurate holes for the bolts. On the other hands, the vices are very convenient connecting devices for steel members, but there are uncertainties to use the vise for building structure contemporary due to the relaxation of the joint under large deformation, repetitive load and long term periods. A simple tensile test has been conducted to investigate the basic performance of the connection of the vise. Also cyclic loading test and relaxation test have been done to check the long term properties of the vise. The test results show that the connection by the vise possesses sufficient structural properties as good as normal joint by bolts.

Key words : *hardhead screw bolts, tensile test, cyclic loading test, relaxation test*

1 はじめに

鋼構造の構造性能を発揮させるためには、接合部の強度及び剛性を保証することが重要である。鋼構造の接合には、溶接接合またはボルト接合が使用される。

前者は、施工コストの削減要求、技能者の減少、品質管理の点から、現場での採用は少なくなっている。これに代わり、高力ボルト摩擦接合が多用されている。溶接接合にせよボルト接合にせよ、大規模な鋼構造物の施工の際には、その接合部において、母材の位置関係を慎重に管理する必要がある。例えば、高力ボルト摩擦接合の場合、ボルト孔どうしのずれは、厳しい制限があり（例えば、標準孔径 $d+3.0\text{mm}^1$ ）、結果的に施工誤差の許容値は著しく小さく施工の作業効率を低下させている。

こうした、鋼構造の接合の施工性を向上させること目指し、図1に示すような、接合金物が開発されており、既に仮設架構に利用されている²⁾。

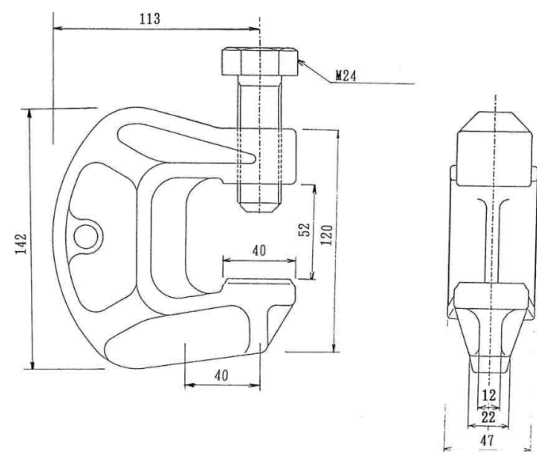


図1 接合金物の外観

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

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

図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で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ところにある。しかしながら、このねじ込み式挟締器具接合は、現在のところ仮設構造物に使用に限られ、その利便性を充分活用できていない。

本研究では、図1のねじ込み式挟締器具による基本的な接合強度を調べる一軸引張試験、長期的な使用が可能かを調べる多数回の繰返し載荷試験、リラクセーション試験を行い、各種の性能を調べる。

2 一軸引張試験

2.1 試験体

図2(a)-(d)に試験体形状、表1に試験体一覧、図3に試験体名称を示す。実験変数は試験体の板厚、表面加工の種類、ねじ込み式挟締器具使用個数である。各変数は、板厚が11mm, 16mm, 19mmの3種類、表面加工が無加工、錆加工、ショットブラスト加工の3種類、挟締器具使用個数を1個, 2個の2種類とした。錆, ショットブラスト加工は、図2のハッチ掛けをした50×180mmの部分に施すものとする。実験は16mm同士, 19mm同士, 11mmと16mmの同じ板厚と異なった板厚を組み合わせた試験体でそれぞれ3種類の表面加工を施して実施した。引張力が真っ直ぐ伝達されるように装置で固定する部分の板厚を、16mm同士の試験体は32mm, 19mm同士の試験体は38mm, 11mmと16mmの試験体は27mmとなるように製作した。

ねじ込み式挟締器具の取り付け位置について、1個締めの場合にはハッチ掛けした部分の中央とし、2個締めの場合は、ハッチ掛けした部分を1/3に等分した箇所とした。

2.2 試験方法

図4に載荷方法を示す。一軸引張試験では、2枚の鋼材を、ねじ込み式挟締器具を用いて接合した試験体を鉛直方向に引張り、引張荷重、ずれ変位、ひずみを測定する。ずれ変位は、クリップゲージを図のように試験体の両側に設置したコマに取り付け計測する。

なお、ねじ込み式挟締器具は、トルクレンチを用いて試験前に300Nmで締め付け、試験後に残留トルクを測定する。この部分は、全ての実験で共通している。

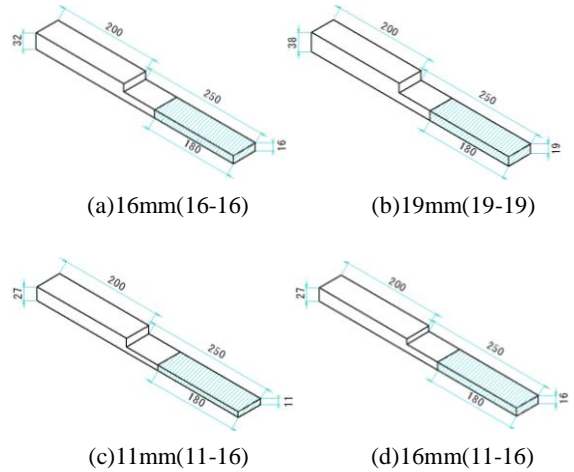


図2 試験体形状

表1 試験体一覧

試験体名	板厚 (mm)		表面加工	挟締器具使用個数
16-16N-1	16	16	無加工	1
16-16N-2				2
16-16R-1			錆加工	1
16-16R-2				2
16-16B-1			ショットブラスト加工	1
16-16B-2				2
19-19N-1	19	19	無加工	1
19-19N-2				2
19-19R-1			錆加工	1
19-19R-2				2
19-19B-1			ショットブラスト加工	1
19-19B-2				2
11-16N-1	11	16	無加工	1
11-16N-2				2
11-16R-1			錆加工	1
11-16R-2				2
11-16B-1			ショットブラスト加工	1
11-16B-2				2

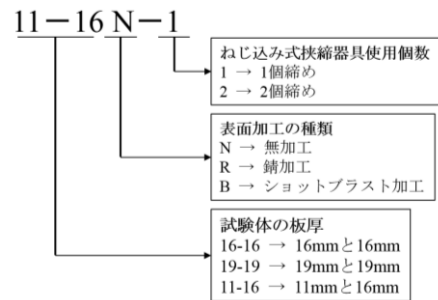


図3 試験体名称

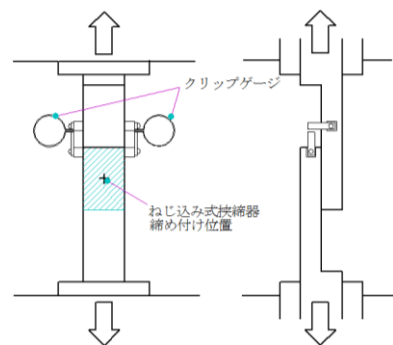


図4 載荷方法

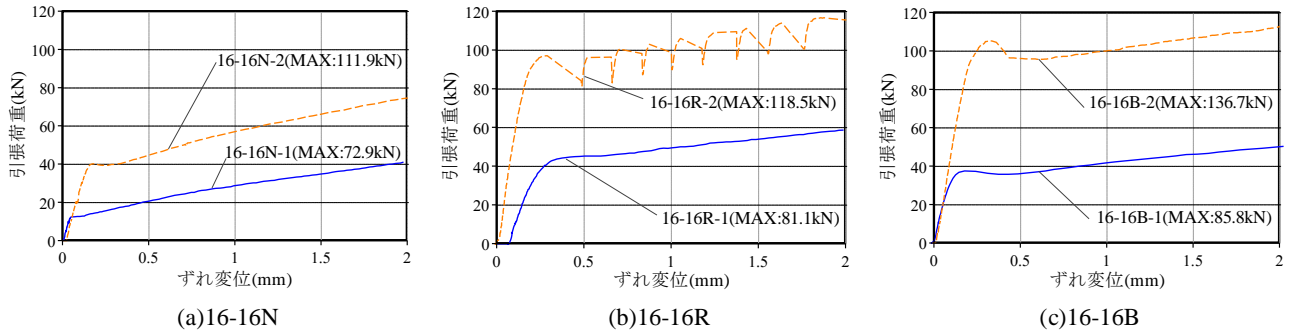


図 5 引張荷重—ずれ変位関係

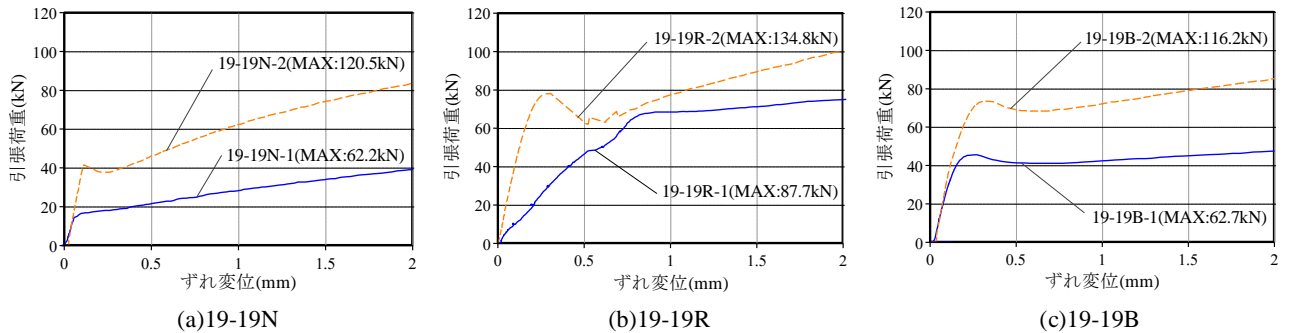


図 6 引張荷重—ずれ変位関係

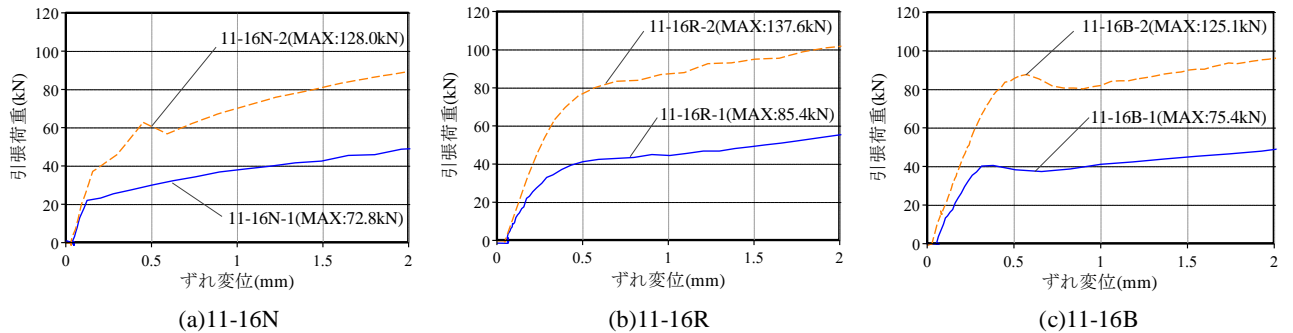


図 7 引張荷重—ずれ変位関係

2.3 実験結果

図 5(a)-(c)にそれぞれ板厚が 16mm 同士の試験体の無加工、錆加工、ショットブラスト加工についての引張荷重-ずれ変位関係を示す。同様に図 6(a)-(c)に 19mm 同士の試験体、図 7(a)-(c)に 11mm と 16mm の試験体を示す。図の縦軸は載荷した引張加重、横軸は試験体のずれ変位を両側でクリップゲージにより計測した値の平均値である。

図 5-図 7 では、すべり量が増大したのちに、ねじ込み式挟締器具が食い込み、緩むことなく荷重が安定して漸増する。

本実験では、ボルト接合のように両者の母材間をつなぐ材がないため、摩擦力を上回る引張力が作用した場合、そのまま滑ってしまい引張力を保持することが難しいことが予想された。

しかし、実験からは著しい耐力低下が見られず、予想とは異なる優れた接合性能を発揮した。

引張荷重-ずれ変位関係を見ると、実験では、引張力を摩擦伝達している領域とそれ以降では異なる挙動を示していることが分かる。前者の最大値を「すべり荷重」と定義する。明瞭な主すべりがない場合は、0.5mm のすべり量に対する荷重をすべり荷重とした³⁾。実験は 5mm を目標最大変位として実施しており、変位が 5mm に達したときの荷重を「最大荷重」とした。しかしながら装置の都合上、変位が 5mm に到達するまでに終了した試験体については最大の変位を生じた荷重を最大荷重として、その際の変位とともに示すこととする。

表2に、各試験体のすべり荷重、その時の変位、最大荷重、残留トルクを示す。また、表3に表面加工を施した試験体の挟締器具1個当たりのすべり荷重を示す。挟締器具1個当たりのすべり荷重は錆加工において平均43.1kN、ショットブラスト加工において平均42.8kN、全体で平均42.9kNとなった。表3より、表面加工を施せば、すべり荷重は少なく見積もってもねじ込み式挟締器具1個あたり35kN以上が期待できる。これが長期の許容強度に相当するものと考えられる。短期許容強度は、長期の1.5倍あればよい。最大荷重がすべり荷重の1.5倍に達していない試験体もあるが、これらであってもその後変形が大きくなるにつれて荷重が漸増することが確認されている。以上のことから、この接合の短期性能は、十分に保証されていると考えられる。

ここで、すべり荷重の比較を行う。図8(a)-(c)に、同じ表面加工の試験体において、ねじ込み式挟締器具の使用個数の差がすべり荷重にどれ程影響を与えるのかを示した。16mm同士の試験体では、2個締めは1個締めに対し、無加工の試験体において約3.24倍、錆加工の試験体において約2.15倍、ショットブラスト加工の試験体において約2.80倍増加した。平均すると、すべり荷重は2個締めにすることにより約2.73倍に増加した。

19mm同士の試験体では、無加工の試験体において約1.56倍、錆加工の試験体において約1.68倍、ショットブラスト加工の試験体において約1.61倍増加した。平均すると、約1.62倍に増加した。

11mmと16mmの試験体では、無加工の試験体において約1.75倍、錆加工の試験体において約1.84倍、ショットブラスト加工の試験体において約2.16倍増加した。平均すると、約1.91倍に増加した。

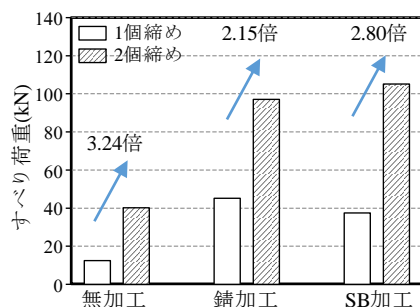
16mm同士の試験体と11mmと16mmの試験体では表面加工を施せば、挟締器具を1個から2個にした場合、すべり荷重は1.8倍以上増加しているが、19mm同士の試験体では錆加工とショットブラスト加工どちらも1.8倍に達していない。このことから、板厚が大きいものを接合した場合、板厚が小さいものに比べて、挟締器具を1個から2個にしたときのすべり荷重の増加する割合は小さくなる傾向がある。

表2 すべり荷重, 変位, 最大荷重, 残留トルク

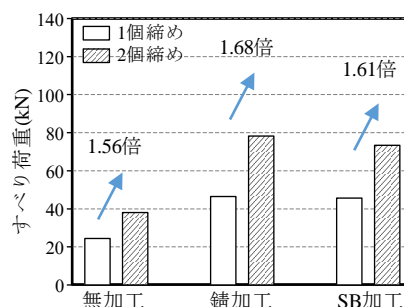
試験体名	すべり荷重 kN	変位 mm	最大荷重 kN	残留トルク Nm
16-16N-1	12.4	0.05	72.9	-
16-16N-2	40.2	0.18	111.9	120
16-16R-1	45.2	0.50	81.1	-
16-16R-2	97.1	0.29	118.5(2.11mm)	235
16-16B-1	37.5	0.18	85.8	150
16-16B-2	105.1	0.34	136.7	205
19-19N-1	24.4	0.50	62.2	235
19-19N-2	38.1	0.16	120.5	195
19-19R-1	46.5	0.50	87.7	330
19-19R-2	78.2	0.31	134.8	285
19-19B-1	45.6	0.27	62.7	105
19-19B-2	73.4	0.34	116.2	150
11-16N-1	22.0	0.12	72.8	270
11-16N-2	38.5	0.18	128.0	248
11-16R-1	41.3	0.50	85.4	235
11-16R-2	75.8	0.48	137.6	265
11-16B-1	40.5	0.38	75.4	245
11-16B-2	87.7	0.57	125.1	215

表3 挟締器具1個当たりのすべり荷重

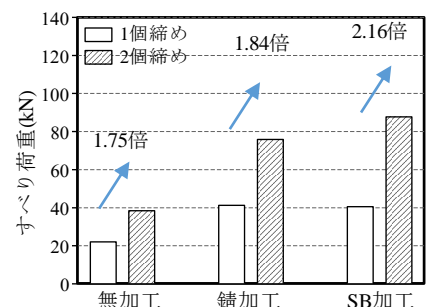
試験体名	すべり荷重 kN	挟締器具1個当たりのすべり荷重 kN	平均 kN
16-16R-1	45.2	45.2	43.1
16-16R-2	97.1	48.6	
19-19R-1	46.5	46.5	
19-19R-2	78.2	39.1	
11-16R-1	41.3	41.3	
11-16R-2	75.8	37.9	
16-16B-1	37.5	37.5	42.8
16-16B-2	105.1	52.6	
19-19B-1	45.6	45.6	
19-19B-2	73.4	36.7	
11-16B-1	40.5	40.5	
11-16B-2	87.7	43.9	



(a)16-16



(b)19-19



(c)11-16

図8 1個締めと2個締めの比較

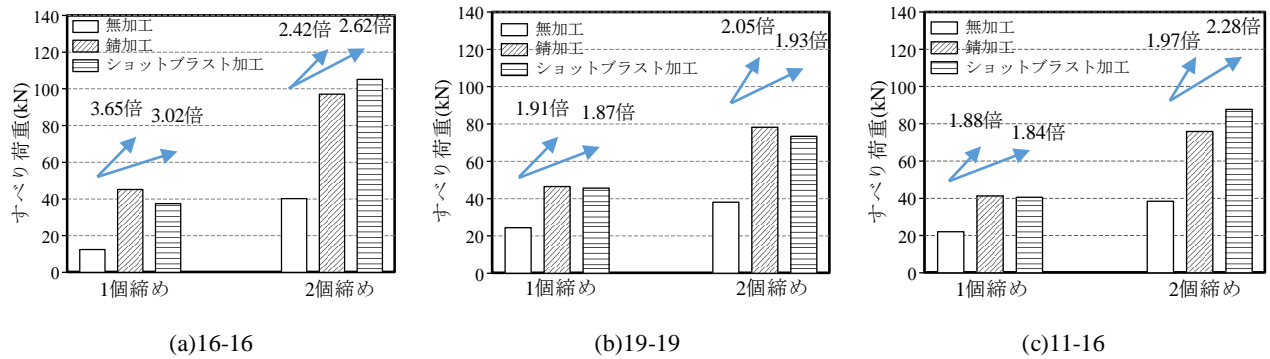


図 9 無加工と鋳・SB加工の比較

また、図 9(a)-(c)に、無加工から表面加工を施すとすべり荷重にどれ程影響を与えるのかを示した。無加工の試験体と比較すると、16mm 同士の試験体では、鋳加工を施した試験体が 1 個締めと 2 個締めを平均して約 3.04 倍、ショットブラスト加工を施した試験体が約 2.82 倍、すべり荷重が増加した。これにより、無加工から表面加工を施すことで平均して約 2.93 倍、すべり荷重が増加した。

19mm 同士の試験体では、鋳加工を施した試験体が 1 個締めと 2 個締めを平均して約 1.98 倍、ショットブラスト加工を施した試験体が約 1.90 倍、すべり荷重が増加した。平均して約 1.94 倍増加した。

11mm と 16mm の試験体では、鋳加工を施した試験体が 1 個締めと 2 個締めを平均して約 1.93 倍、ショットブラスト加工を施した試験体が約 2.06 倍、すべり荷重が増加した。平均して約 2.00 倍増加した。

16mm 同士の試験体、19mm 同士の試験体、11mm と 16mm の試験体それぞれが 1.8 倍以上であることから、無加工から表面加工を施すとすべり荷重は 1.8 倍以上の増加を期待できる。

3 多数回繰返し载荷試験

3.1 試験体

図 10 に試験体の全体図、図 11 に接合時の試験体の中央での断面図、図 12 に H 形鋼の寸法を示す。試験体は、H 形鋼 (H200×200×8×12) のフランジの中央を 50mm 切断し、切断した箇所を鋼の板材で橋渡しして、両端をねじ込み式挟締器具を用いて接合したものとする。

試験に用いる H 形鋼のフランジ厚は 11mm、接合に使用する鋼材の板厚は 16mm としている。試験体は、支点での変形を防ぐために、H 形鋼の支点位置にスティフナを溶接して取り付ける。

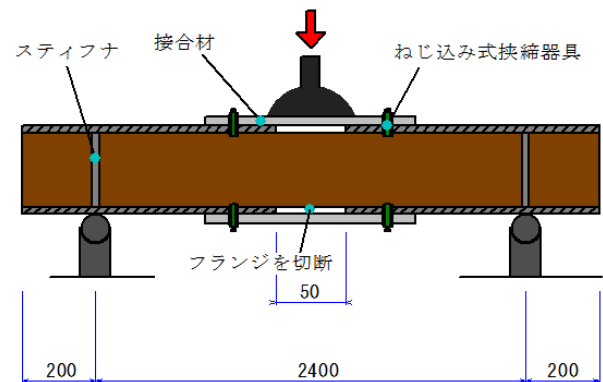


図 10 繰返し载荷試験の試験体形状

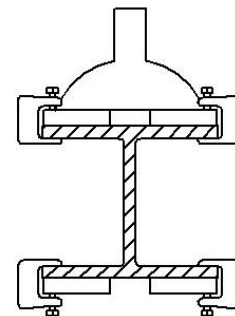


図 11 試験体の断面図

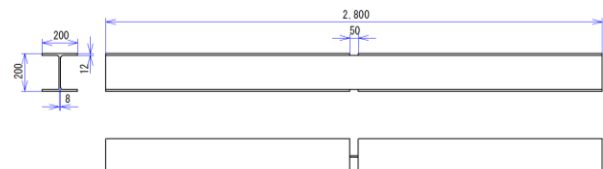


図 12 H 形鋼の寸法

図 13 に接合に用いる鋼材の形状を示す。接合材はフランジと接する面に鍍加工を施し、図 10, 11 のように計 4 ヶ所に取り付ける。

多数回繰返し载荷試験では、表面加工を鍍加工、各接合部での挟締器具の使用個数を 1 個とする。

3.2 試験方法

ねじ込み式挟締器具の長期的な使用の可能性を検討するために、多数回繰返し载荷試験を行う。図 14 に試験に用いる疲労試験機を示す。

多数回繰返し载荷試験では、図 14 の疲労試験機を用いて繰返し载荷を行い、ずれ変位とひずみを測定する。ずれ変位は、各接合部に取り付けた計 8 ヶ所のパイゲージを用いて測定する。ひずみは、H 形鋼のウェブの中央（裏表両面）に貼付した計 2 ヶ所のひずみゲージ（二軸）と、各接合材の中央の位置に貼付した計 4 枚の一軸ひずみゲージを用いて計測するものとする。

前述の一軸引張試験の結果から表面が鍍加工の場合、16-16R-1, 19-19R-1, 11-16R-1 のすべり荷重を平均して、約 44kN が期待できる。接合材は上下に 2 本ずつ取り付けるため、図 15 上に示す引張もしくは圧縮力 $T=C=88\text{kN}$ に達しないような荷重 P は 31.7kN となる。従って、本試験では、最大荷重を 30kN と設定した。通常の交通振動を模擬して载荷速度を 3Hz とした。繰返し回数は、1000 回、1 万回、10 万回とし、接合材とフランジとの間でずれが生じないことを確認する。

3.3 実験結果

図 16 に荷重-繰返し回数関係を示す。実線は载荷装置にて設定した荷重条件プログラムであり、プロットしてある点は実験値である。多少のばらつきはあるものの、目標の最大荷重 30kN を繰返し载荷できていることが確認できる。表 4 に実験結果をまとめる。これを見ると、繰返し回数を増やすと、わずかに、ずれが蓄積しているように見えるが、10 万回载荷後（合計で、13 万 3 千回）でも、0.02 mm 以下のずれ変位であり、実用上の問題が発生するには至らない量と判断できる。すべりを生じると予測される荷重 31.7kN に対して、繰返し载荷荷重は、30kN を設定しており、比較的厳しい試験条件下での長期使用の可能性を示したといえる。

表 4 繰返し回数とずれ変位

繰返し回数	ずれ変位 (mm)			
	1回目	2回目	3回目	平均
1000回	-0.000227	-0.001158	-0.000486	-0.000624
1万回	-0.003729	0.0002298	-0.000214	-0.001238
10万回	-0.01891			-0.01891

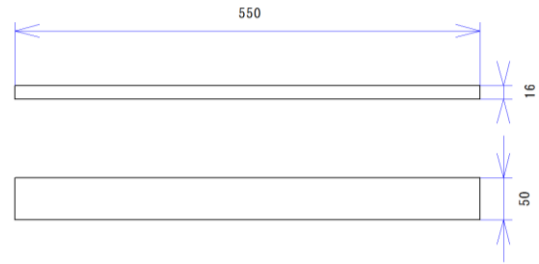


図 13 接合材の形状

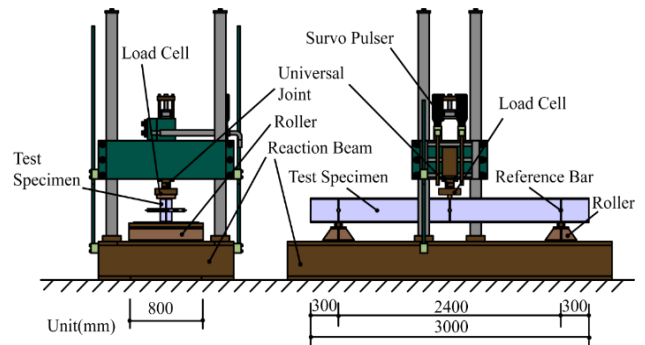


図 14 疲労試験機

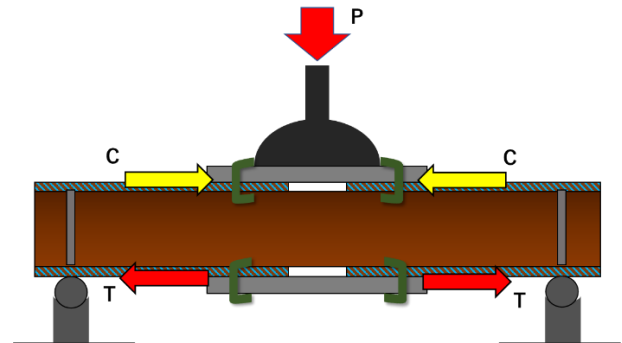


図 15 試験体にかかる力

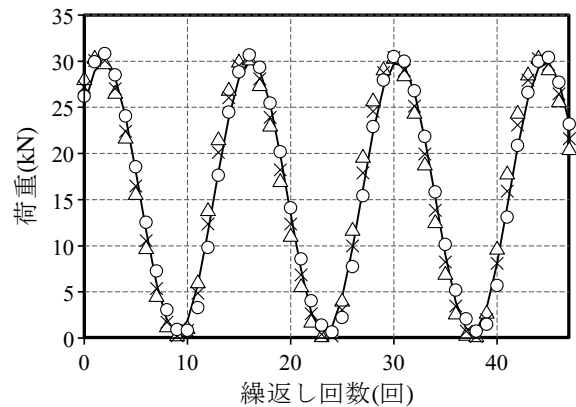


図 16 荷重-繰返し回数関係

4 リラクゼーション試験

4.1 試験体

ボルト接合の場合、時間の経過とともにボルトが緩み、接合強度が低下することがないかが確認される⁴⁾。鋼材には時間依存ひずみは生じないとされているが、これを確認するためのリラクゼーション試験が行われる。本研究でも、このリラクゼーション試験を実施した。リラクゼーション試験では、30.5×30.5mm（試験体1）と30.7×30.7mm（試験体2）の断面を持つ板厚33mmのほぼ立方体に近い小型試験体を2体用意して、これらの4面にひずみゲージを貼付し、所定のトルクを導入したのち、およそ3ヶ月間のひずみ計測を行った。

4.2 試験方法

リラクゼーション試験では、ひずみゲージを貼付した鋼材をねじ込み式挟締器具ではさみ、ひずみゲージの変遷を観察する。また、温度のひずみへの影響も考慮し、常に一定の温度を保つように試験体をクーラーボックスに入れた状態で計測を行った。試験は長期間の計測の中で、ひずみの変化が見られないことを確認でき次第、計測を終了する。

4.3 試験結果

図17に約3ヶ月間の計測を行った2つの試験体のひずみ μ -時間関係を示す。試験体は、2体あるので、それぞれの値を載せている。試験体ごとの変動傾向は同じで、最大で9 μ の伸びが観測されている。非常に小さい値での変動に留まっており、挟締器具が時間の経過とともに緩んでいるとは考えられない。細かく見ると、計測開始から1カ月は伸びが観測されているが、以降はこの伸びが解消される傾向がみられる。この理由については、よくわかっていないが、ねじの緩みのような力学的な要因でないことは推察できる。図18に図17の平均の変動状況載せる。このようなスケールでみれば、実用上の問題はないことが分かる。

5 まとめ

本研究では、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、リラクゼーション試験を実施した。得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 一軸引張性状は、引張荷重-ずれ変位関係において、すべり荷重発生までの小変形時とそれ以上の変形時では、異なるメカニズムにより抵抗していることが明らかとなった。
- 2) 上記の荷重-変形関係における前者は摩擦接合領域、後者はボルトの食い込み領域に大別される。

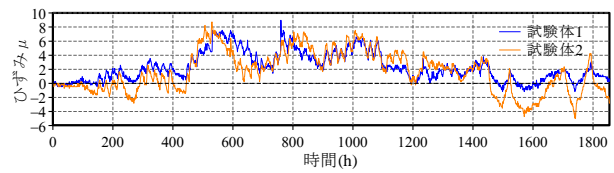


図17 ひずみ μ -時間h関係

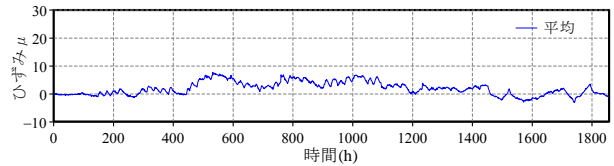


図18 各試験体の平均の変動状況

- 3) 摩擦接合領域における最大値を「すべり荷重」と定義してこれを評価したところ、同じ板厚の場合でも、異なる板厚の場合でも、鋼材の表面加工に大きく影響される。
- 4) 同じ板厚の場合でも、異なる板厚の場合でも、鋼材の表面加工を施せば、挟締器具一個あたりのすべり荷重は少なくとも35kN（長期強度）を見込める。
- 5) 挟締器具を2個締めると1個締めと比べ、16mm以下同士の板厚であれば、すべり荷重は1.8倍以上増加する。
- 6) 鋼材の表面に錆、ショットブラスト加工を施すと無加工の場合と比べ、すべり荷重は1.8倍程度増加する。
- 7) ほとんどの試験体において、最大荷重はすべり荷重の1.5倍を超えその後も耐力を漸増させることから、すべり荷重を長期強度として定義した場合の短期強度は担保されているものと考えられる。
- 8) 1000回、1万回、10万回の繰返し載荷において、各条件において、ずれ変位は確認されなかった。
- 9) 約3ヶ月の計測において、ボルトの緩みのような力学的経時変化は確認されなかった。

謝辞

本研究の実験実施にあたって、岡本健太技術職員の多大なるご助力を得た。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 高力ボルト接合設計施工指針, 1993
- 2) 日本建築学会, 乗り入れ構台設計・施工指針, 2014
- 3) 日本建築学会, 鋼構造接合部設計指針, 2006
- 4) 渡辺和志, 檜山裕二郎, 吉岡智和, ローレット形状を有するアルミニウム合金製押出型材の高力ボルト摩擦接合部リラクゼーション特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1291-1292, 2012.9