

# スレッドローリングねじで接合された継手の強度 に関する実験的研究

Experimental study on strength of joints connected with thread forming screws

鈴木博之\*

Hiroyuki Suzuki

\*工博, 明星大学教授, 理工学部総合理工学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1)

suzukihi@ar.meisei-u.ac.jp

One of the methods of connecting steel members is a screw. Since screws do not use nuts, it can work from one side. By the way, there is a screw called a thread forming screw. It is a screw itself fabricates an internal thread to steel members, and it connects members. No research on strength of joints connected with thread forming screws in the field of steel structures of civil engineering has been reported, as far as an author gets to know. In this paper, the static tensile strength of the tensile joints connected with the thread forming screw is first investigated. Next, the static tensile strength and fatigue strength of lap joints connected with the thread forming screw are investigated. Finally, fatigue strength of joints in case a thread forming screw does not penetrate steel members is investigated.

*Key Words: thread forming screw, strength of joints, tensile joints, bearing joints*

キーワード: スレッドローリングねじ, 継手強度, 引張接合継手,  
支圧接合継手

## 1. まえがき

土木鋼構造物の部材の連結には、ほとんどの場合、高力ボルトあるいは溶接が用いられている<sup>1)</sup>。一般に、高力ボルト接合継手の施工の場合、高力ボルトをボルト孔に挿入し、反対側からナットをかけてナットを締めつける作業となるので、少なくとも二人の作業員を必要とする。片側から施工可能な高力ボルト(ブラインドボルト、あるいはワンサイドボルトと呼ばれる)やスタッドボルトもあり、一人で作業できる場合もあるが、広く使用されているわけではなく、現状では、この高力ボルトの使用はやむを得ない場合に限定されているようである<sup>2)6)</sup>。高力ボルト接合継手の品質は次に述べる溶接接合継手ほど作業員の技量に左右されることは少ないと考えられている。一方、溶接接合継手の施工の場合、両側から施工する場合もあるが、片側からの施工も可能である。しかしながら、特に手溶接の場合、継手の品質は溶接作業員の技量に左右されやすく、資格を有する作業員を作業に従事させることは当然としても

継手品質の確保に十分配慮する必要がある。

ところで、近年、急増している補修・補強工事においては、交通規制をできるだけ避ける、狭隘な空間で反対側に作業員が入れないなどの制約から片側からの施工が望まれている<sup>7)</sup>。

高力ボルト、溶接のほかに鋼部材を連結する方法にねじがある。ねじはナットを使用しないので、片側からの作業が可能である。一般に、鋼部材同士をねじで接合するためには鋼板に孔をあけた後にタップを加工する必要があるが、スレッドローリングねじといわれるねじ自身が鋼部材にめねじを成形して部材同士を接合するねじがある。JIS B 0101:2013「ねじ用語」によれば、スレッドローリングねじは、「おねじ自身でメートルねじのめねじを塑性変形によって成形し、締め付けるねじの総称。スレッドフォーミングねじともいう。」と記されている<sup>8)</sup>。タッピングねじという用語もあるが、JIS B 0101:2013「ねじ用語」によれば、タッピングねじとは、「ねじ自身でねじ立てができるねじの総称。」とあり、スレッドローリングねじはタッピングねじの一種であると理解される<sup>9)</sup>。

スレッドローリングねじで接合される部材は、ねじの呼び径より小さい孔をあけた下板と、下板の孔径と同じかあるいはそれ以上の大きさの孔をあけた上板からなり、ねじが下板の孔に（上板の孔径がねじの呼び径より小さい場合は上板の孔にも）めねじを成形しながら進み、上板と下板を接合する。本研究で対象としているスレッドローリングねじは炭素鋼に熱処理を施したものである。

スレッドローリングねじを土木鋼構造物の構造部材に適用した事例あるいは調査研究は、著者の知る範囲においては、未だ報告されていない。適用実績がないの理由の一つは現在市販されているスレッドローリングねじの呼び径が8、10、12mmと小さいためであると考えられるが、片側施工が可能というメリットを考えると、継手の性能を調査し、実用の可能性を検討することは重要であると考えられる。

本研究では、スレッドローリングねじで接合された引張接合継手の静的引張強度、ならびに重ね接合継手の静的引張強度、疲労強度について実験的に調査する。重ね接合継手のスレッドローリングねじは鋼部材を貫通しているが、スレッドローリングねじが鋼部材を貫通していない継手も考えられるので、この継手の疲労強度についても調査する。

## 2. 引張接合継手

### 2.1 実験方法

本実験ではねじ径が $\phi=8\text{mm}$ と $\phi=10\text{mm}$ のスレッドローリングねじを用いた。図-2.1にねじの基本寸法を示す。図中のカッコ内の数字は $\phi=8\text{mm}$ のねじの寸法である。 $\phi=8\text{mm}$ 、 $\phi=10\text{mm}$ のスレッドローリングねじの引張強度（カタログ値）はそれぞれ39.7kN、51.0kNである。試験体は、図-2.2に示すような九つの円孔をあけた正方形の部材2枚を図-2.3のように45°ずらして組み合わせ、中央の円孔にスレッドローリングねじを挿入し接合したものである。スレッドローリングねじの締付けには最大締付トルク165N・mのインパクトレンチを使用した。使用した鋼材はSS400である。図-2.2における $\phi=13\text{mm}$ 、 $\phi=8\text{mm}$ の円孔は、図-2.4に示す荷重治具のための

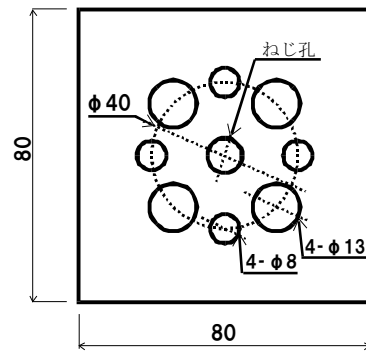


図-2.2 鋼部材

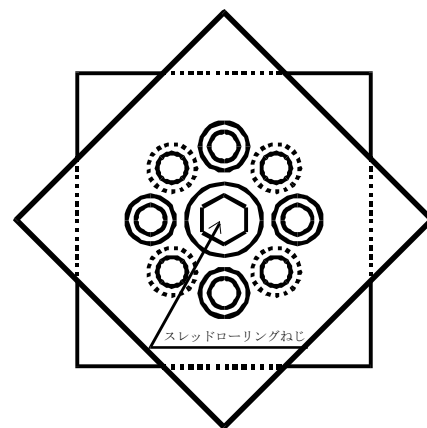


図-2.3 試験体

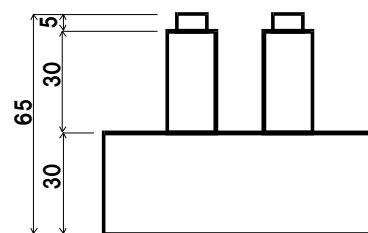
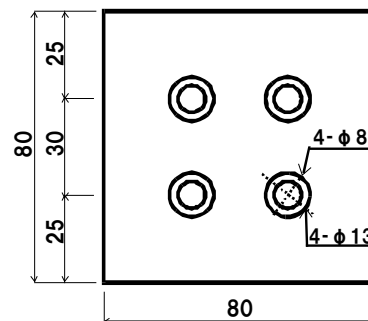


図-2.4 荷重治具

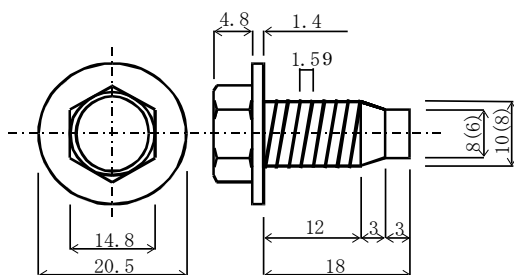


図-2.1 ねじ寸法

ものである。一对の荷重治具が試験体を上下から挟み込み、上（下）の荷重治具の足が上（下）板の $\phi=13\text{mm}$ の円孔を通り、下（上）板の $\phi=8\text{mm}$ の円孔近傍を押すことで二枚の板が上下に押し、スレッドローリングねじに引張荷重が作用するようにし

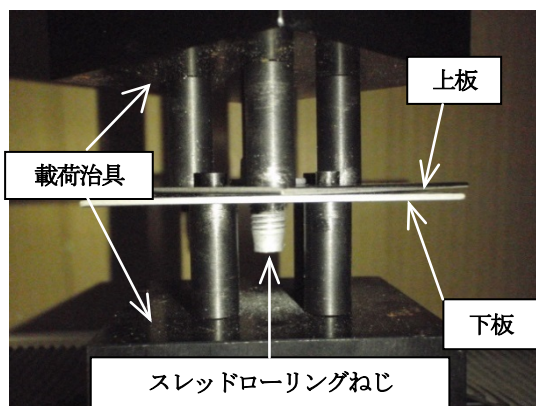


写真-2.1 実験状況

表-2.1 実験ケース

試験体番号	ねじ径 (mm)	下板のねじ孔径 (mm)	上板のねじ孔径 (mm)	板厚 (mm)	本数
T08316	8	7.3	9	1.6	25
T08323				2.3	
T08332				3.2	
T08345				4.5	
T08360				6.0	
T08516	8	7.5	9	1.6	25
T08523				2.3	
T08532				3.2	
T08545				4.5	
T08560				6.0	
T08716	8	7.7	9	1.6	25
T08723				2.3	
T08732				3.2	
T08745				4.5	
T08760				6.0	
T10316	10	9.3	11	1.6	25
T10323				2.3	
T10332				3.2	
T10345				4.5	
T10360				6.0	
T10516	10	9.5	11	1.6	25
T10523				2.3	
T10532				3.2	
T10545				4.5	
T10560				6.0	
T10716	10	9.7	11	1.6	25
T10723				2.3	
T10732				3.2	
T10745				4.5	
T10760				6.0	

た. 载荷速度は 10mm/min とした. 写真-2.1 に実験状況を示す.

## 2.2 実験条件

本実験に使用した 2 種類 ( $\phi=8\text{ mm}$ ,  $\phi=10\text{ mm}$ ) のスレッドローリングねじの下板のねじ孔径の設計値は (ねじ径-0.5mm) である. しかしながら, 実施工においては製作誤差を避けることはできないので,  $\pm 0.2\text{ mm}$  の製作誤差の影響を調査することにした. したがって, 下板のねじ孔径は  $\phi=7.3\text{ mm}$ ,  $7.5\text{ mm}$ ,  $7.7\text{ mm}$  ならびに  $\phi=9.3\text{ mm}$ ,  $9.5\text{ mm}$ ,  $9.7\text{ mm}$  とし, 上板のねじ孔径は (ねじ径+1.0mm) の  $\phi=9\text{ mm}$ ,  $11\text{ mm}$

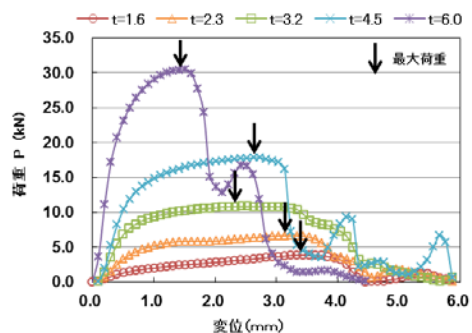


図-2.5 ねじ径 $\phi=8\text{ mm}$ , 下板のねじ孔径 $\phi=7.3\text{ mm}$ の荷重-変位曲線

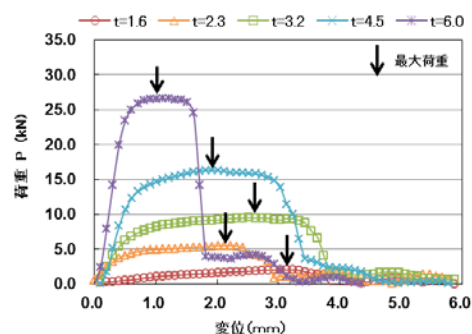


図-2.6 ねじ径 $\phi=8\text{ mm}$ , 下板のねじ孔径 $\phi=7.5\text{ mm}$ の荷重-変位曲線

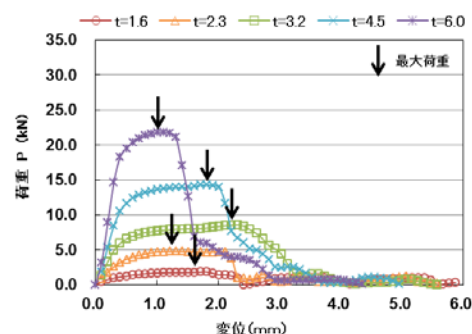


図-2.7 ねじ径 $\phi=8\text{ mm}$ , 下板のねじ孔径 $\phi=7.7\text{ mm}$ の荷重-変位曲線

とした. 鋼板の板厚は  $t=1.6\text{ mm}$ ,  $2.3\text{ mm}$ ,  $3.2\text{ mm}$ ,  $4.5\text{ mm}$ ,  $6.0\text{ mm}$  とし, 上板と下板は同じ板厚とした.

実験ケースを表-2.1 に示す. 表中の試験体番号の欄の記号, 例えば, T08316 における T は次章の試験体との区別を意味し, 数字 08 はねじの呼び径, 3 は下板のねじ孔径の小数第 1 位, 16 は (上板, 下板の板厚 $\times 10$ ) を表している. 試験体は各実験ケースに対してそれぞれ 25 体用意した.

## 2.3 実験結果及び考察

図-2.5~2.10 に (ねじ径と下板のねじ孔径) 別に荷重 - 変位曲線を示す. 縦軸は作用荷重であり, 横軸はクロスヘッド間の変位である. 図には各実験ケースの試験体 25 体のなかの代表的な 1 体の荷重 - 変

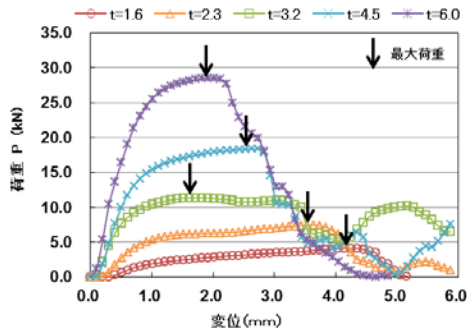


図-2.8 ねじ径 $\phi=10\text{mm}$ , 下板のねじ孔径 $\phi=9.3\text{mm}$ の荷重-変位曲線

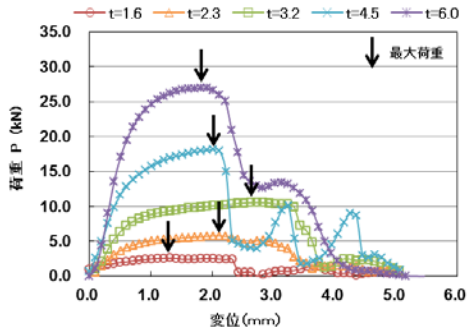


図-2.9 ねじ径 $\phi=10\text{mm}$ , 下板のねじ孔径 $\phi=9.5\text{mm}$ の荷重-変位曲線

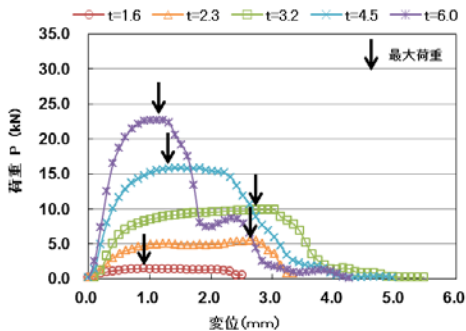


図-2.10 ねじ径 $\phi=10\text{mm}$ , 下板のねじ孔径 $\phi=9.7\text{mm}$ の荷重-変位曲線

位曲線を示した。図中の矢印は各曲線の最大荷重点を示している。

これらの図より、最大荷重に対応する変位には特記するような傾向は認められないが、最大荷重は板厚  $t$  が厚くなるにつれて大きくなっていることがわかる。板厚が厚くなるとねじのはめあい部の長さが長くなるため最大荷重が大きくなることは容易に理解される。

写真-2.2、2.3にねじ径 $\phi=10\text{mm}$ , 下板のねじ孔径 $\phi=9.5\text{mm}$ , 板厚 $t=4.5\text{mm}$ の試験体の破壊後の下板とスレッドローリングねじを示す。下板の孔にはめねじが、スレッドローリングねじの下板とのはめあい部分にはおねじがなく、お互いに相手方のねじを削り取っていることがわかる。しかしながら、すべての試験体においてスレッドローリングねじのねじ山

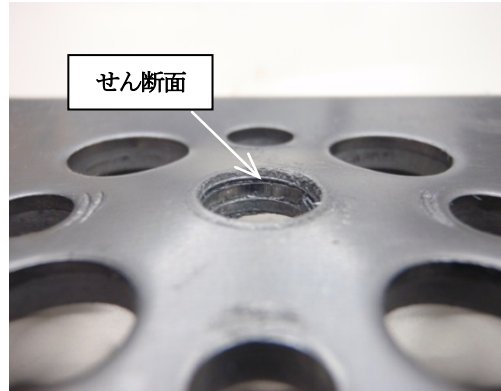


写真-2.2 ねじ径 $\phi=10\text{mm}$ , 下板のねじ孔径 $\phi=9.5\text{mm}$ , 板厚 $t=4.5\text{mm}$ の試験片の破壊後の下板



写真-2.3 ねじ径 $\phi=10\text{mm}$ , 下板のねじ孔径 $\phi=9.5\text{mm}$ , 板厚 $t=4.5\text{mm}$ の試験片の破壊後のねじ

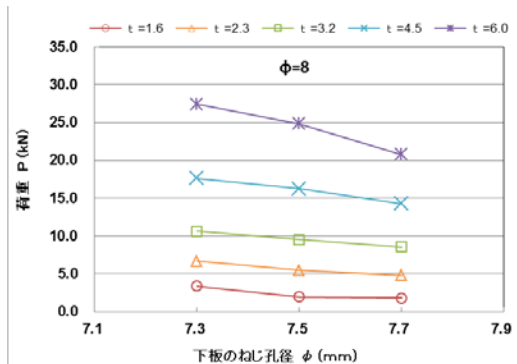


図-2.11 最大荷重と下板のねじ孔径の関係 (ねじ径 $\phi=8\text{mm}$ )

が削り取られていたわけではなく、ねじ山が削り取られていない試験体もあった。

次に各実験ケースの最大荷重と下板のねじ孔径の関係を図-2.11, 2.12に示す。最大荷重は25体の平均値である。部材締め付けの不具合(例えば、ねじが斜めに入ってしまった)により除外した試験体があり、24体の平均になっている実験ケースもあるが、実験結果に影響を及ぼすものではないと考えている。図-2.11, 2.12よりねじ径 $\phi=8\text{mm}$ ,  $\phi=10\text{mm}$ ともに

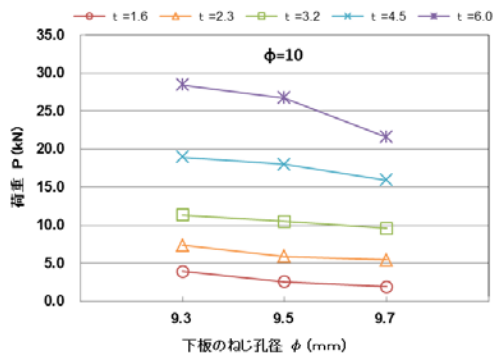


図-2.12 最大荷重と下板のねじ孔径の関係 (ねじ径  $\phi=10\text{mm}$ )

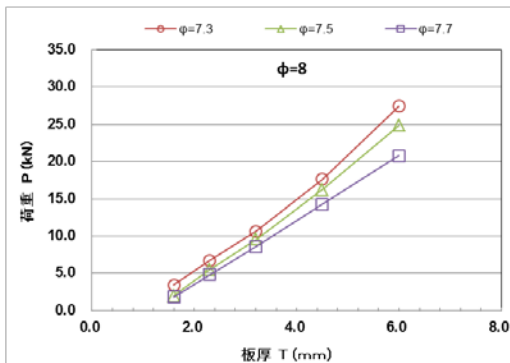


図-2.13 下板の板厚と最大荷重の関係 (ねじ径  $\phi=8\text{mm}$ )

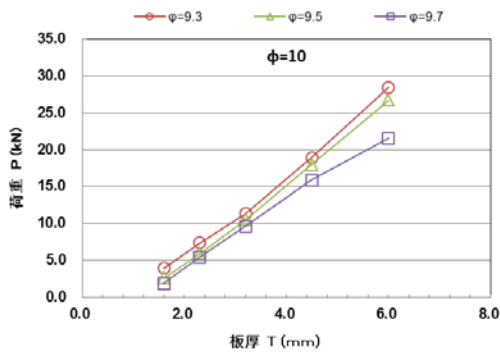


図-2.14 下板の板厚と最大荷重の関係 (ねじ径  $\phi=10\text{mm}$ )

下板のねじ孔径が大きくなるにつれて最大荷重が減少していることがわかる。これは下板のねじ孔径が大きいとスレッドローリングねじと下板とのはめあいが浅くなるためである。

図-2.13, 2.14 に下板の板厚と最大荷重の関係を示す。最大荷重は 25 体の平均値である。一部、24 体の平均になっている実験ケースもある。ねじ径  $\phi=8\text{mm}$ ,  $\phi=10\text{mm}$  とともに板厚  $t$  が厚くなると最大荷重が増加していることがわかる。これは板厚  $t$  が厚くなるとスレッドローリングねじと下板のはめあい部の長さが長くなるためである。

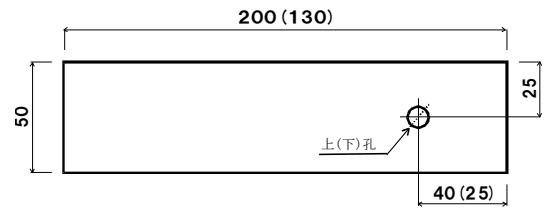


図-3.1 鋼板部材

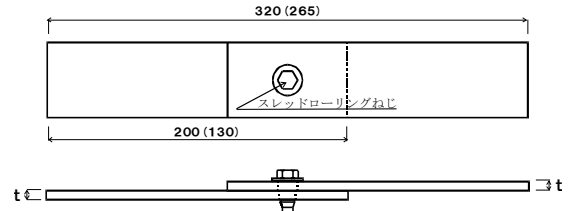


図-3.2 試験体

ねじ径  $\phi=8\text{mm}$  と  $\phi=10\text{mm}$  の最大荷重を比較すると、板厚  $t \leq 3.2\text{mm}$  では  $\phi=8\text{mm}$ ,  $\phi=10\text{mm}$  の最大荷重に有意差は認められないが、板厚  $t=4.5\text{mm}$ ,  $6.0\text{mm}$  では  $\phi=10\text{mm}$  のほうが明らかに大きくなっている。これはねじ径が大きくなることではめ合い部のねじの接触面積が大きくなるためである。

### 3. 重ね接合継手

#### 3.1 重ね接合継手の引張強度

##### 3.1.1 実験方法

実験には引張接合継手の場合と同様ねじ径  $\phi=8\text{mm}$  と  $\phi=10\text{mm}$  のスレッドローリングねじを用いた (図-2.1 参照)。 $\phi=8\text{mm}$ ,  $\phi=10\text{mm}$  のスレッドローリングねじのせん断強度 (カタログ値) はそれぞれ  $25.5\text{ kN}$ ,  $29.6\text{ kN}$  である。試験体は、図-3.1 に示すような円孔をあけた長方形の鋼板 2 枚を、図-3.2 のように互い違いに重ね合わせ、スレッドローリングねじで接合した一面せん断継手とした。鋼板の長さは  $\ell=200\text{mm}$  と  $130\text{mm}$  の 2 種類であり、 $\ell=200\text{mm}$  の場合は円孔を縁端から  $40\text{mm}$  のところに設け、 $\ell=130\text{mm}$  の場合は円孔を縁端から  $25\text{mm}$  のところに設けた。スレッドローリングねじの締付けには最大締付トルク  $165\text{N}\cdot\text{m}$  のインパクトレンチを使用した。鋼板の板厚は、 $t=1.6\text{mm}$ ,  $2.3\text{mm}$ ,  $3.2\text{mm}$ ,  $4.5\text{mm}$ ,  $6.0\text{mm}$  とした。板厚  $t=6.0\text{mm}$ ,  $4.5\text{mm}$  の試験体については、試験機に試験体を取り付ける際に試験機の掴み具に無理がかからないように試験体と同じ厚さの小片をスペーサーとして使用したが、板厚  $t=3.2\text{mm}$ ,  $2.3\text{mm}$ ,  $1.6\text{mm}$  の試験体においてはスペーサーを使用しなかった。写真-3.1 に実験状況を示す。

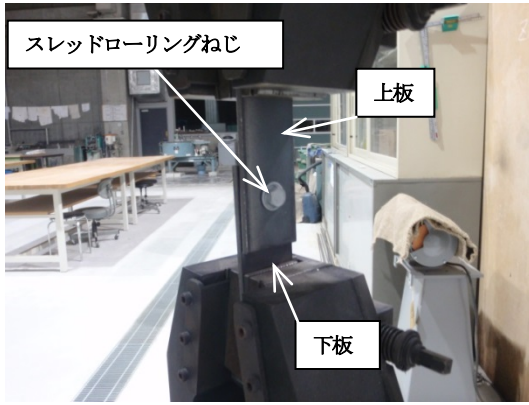


写真-3.1 実験状況

表-3.1 実験ケース

試験体番号	ねじ径 (mm)	下板のねじ孔径 (mm)	上板のねじ孔径 (mm)	板厚 (mm)	本数
S08316	8	7.3	9	1.6	25
S08323				2.3	
S08332				3.2	
S08345				4.5	
S08360				6.0	
S08516	8	7.5	9	1.6	25
S08523				2.3	
S08532				3.2	
S08545				4.5	
S08560				6.0	
S08716	8	7.7	9	1.6	25
S08723				2.3	
S08732				3.2	
S08745				4.5	
S08760				6.0	
S10316	10	9.3	11	1.6	25
S10323				2.3	
S10332				3.2	
S10345				4.5	
S10360				6.0	
S10516	10	9.5	11	1.6	25
S10523				2.3	
S10532				3.2	
S10545				4.5	
S10560				6.0	
S10716	10	9.7	11	1.6	25
S10723				2.3	
S10732				3.2	
S10745				4.5	
S10760				6.0	

### 3.1.2 実験条件

本実験に使用した二種類 (ねじ径  $\phi=8\text{ mm}$ ,  $\phi=10\text{ mm}$ ) のスレッドローリングねじの下板のねじ孔径の設計値は (ねじ径 $-0.5\text{ mm}$ ) である。しかしながら、実施工においては製作誤差を避けることはできないので、 $\pm 0.2\text{ mm}$  の製作誤差の影響を調査することにした。よって下板のねじ孔径は  $\phi=7.3\text{ mm}$ ,  $7.5\text{ mm}$ ,  $7.7\text{ mm}$  ならびに  $\phi=9.3\text{ mm}$ ,  $9.5\text{ mm}$ ,  $9.7\text{ mm}$  とし、上板のねじ孔径は (ねじ径 $+1.0\text{ mm}$ ) の  $\phi=9\text{ mm}$ ,  $11\text{ mm}$  とした。

実験ケースを表-3.1 に示す。表中の試験体番号の欄の記号、例えば、S08316 における S は前章の試験

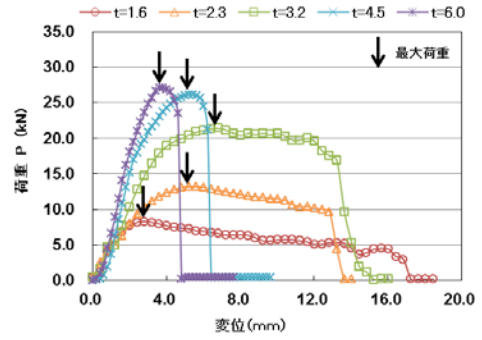


図-3.3 ねじ径  $\phi=8\text{ mm}$ , 下板のねじ孔径  $\phi=7.3\text{ mm}$  の荷重-変位曲線

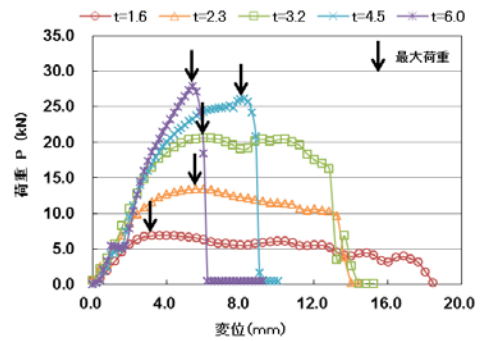


図-3.4 ねじ径  $\phi=8\text{ mm}$ , 下板のねじ孔径  $\phi=7.5\text{ mm}$  の荷重-変位曲線

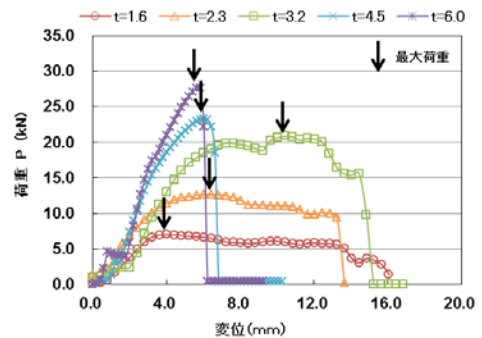


図-3.5 ねじ径  $\phi=8\text{ mm}$ , 下板のねじ孔径  $\phi=7.7\text{ mm}$  の荷重-変位曲線

体との区別を意味し、数字 08 はねじの呼び径、3 は下板の孔径の小数第 1 位、16 は (上板、下板の板厚  $\times 10$ ) を表している。試験体は各実験ケースに対してそれぞれ 25 体用意した。

### 3.1.3 実験結果及び考察

図-3.3~3.8 に荷重-変位曲線を (ねじ径と下板のねじ孔径) 別に示す。縦軸は作用荷重であり、横軸はクロスヘッド間の変位である。図には各実験ケースの試験体 25 体のなかの代表的な 1 体の荷重-変位曲線を示した。図中の矢印は各曲線の最大荷重点を示している。

これらの図より、最大荷重に対応する変位には特記するような傾向は認められないが、最大荷重は板

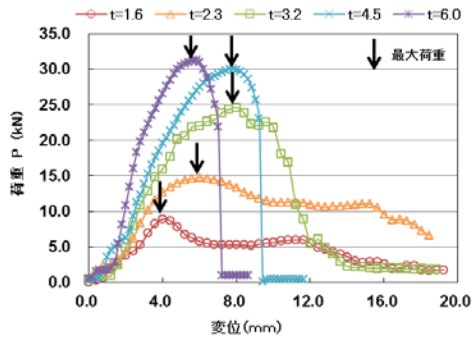


図-3.6 ねじ径 $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径 $\phi=9.3\text{mm}$ の荷重-変位曲線

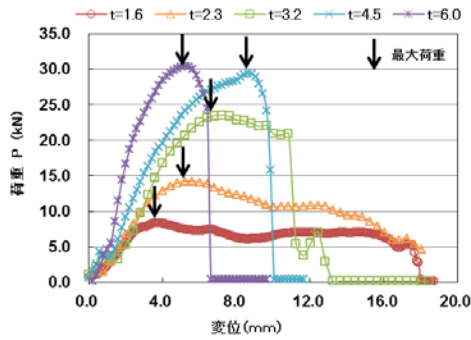


図-3.7 ねじ径 $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径 $\phi=9.5\text{mm}$ の荷重-変位曲線

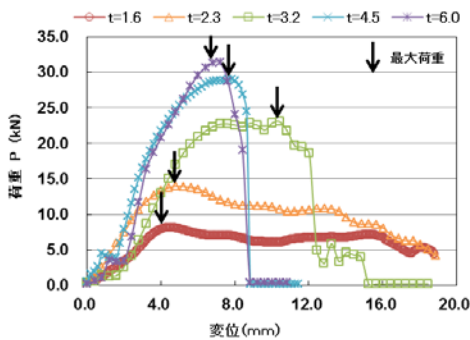


図-3.8 ねじ径 $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径 $\phi=9.7\text{mm}$ の荷重-変位曲線

厚  $t$  が厚くなるにつれて大きくなっていることがわかる。また、いずれの図においても板厚  $t=6.0\text{mm}$ 、 $4.5\text{mm}$  では荷重は、最大値を示した後、急激に減少している。これに対して、板厚が  $t=3.2\text{mm}$ 、 $2.3\text{mm}$ 、 $1.6\text{mm}$  と薄くなるにつれて荷重は、最大値を示した後、緩やかに低下している。

次に各実験ケースの下板のねじ孔径と最大荷重の関係を図-3.9、3.10に示す。最大荷重は25体の平均値である。部材締め付けの不具合（例えば、ねじが斜めに入ってしまった）により除外した試験体があり、24体の平均になっている実験ケースもあるが、実験結果に影響を及ぼすものではないと考えている。図-3.9、3.10より、ねじ径 $\phi=8\text{mm}$ の板厚 $t=1.6\text{mm}$ 、

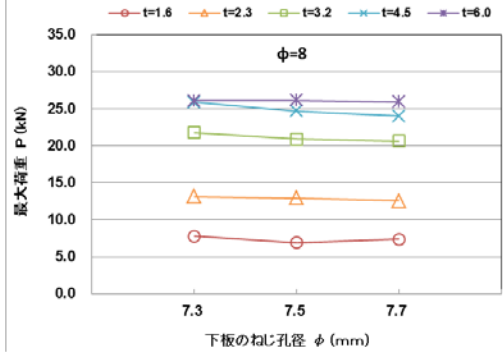


図-3.9 下板のねじ孔径と最大荷重の関係（ねじ径 $\phi=8\text{mm}$ ）

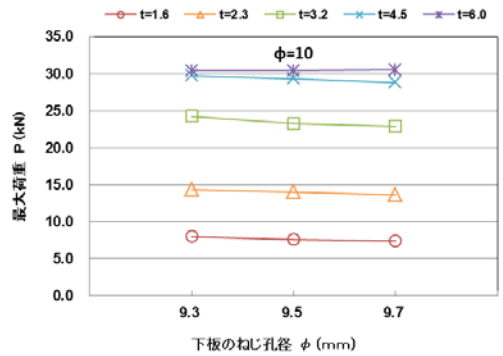


図-3.10 下板のねじ孔径と最大荷重の関係（ねじ径 $\phi=10\text{mm}$ ）

$6.0\text{mm}$ 、およびねじ径 $\phi=10\text{mm}$ の板厚 $t=6.0\text{mm}$ 以外は下板のねじ孔径が大きくなるにつれ、最大荷重は減少していることがわかる。これは下板のねじ孔径が大きいとねじの支圧力が集中する下板の孔の上円部が変形したときにねじと鋼板部材のはめ合いが浅くなるためである。ねじ径 $\phi=8\text{mm}$ の板厚 $t=1.6\text{mm}$ については下板のねじ孔径 $\phi=7.5\text{mm}$ の最大荷重が小さめに評価されているのではないかと考えている。下板のねじ孔径が大きくなっても板厚 $t=6.0\text{mm}$ の最大荷重に有意な差が現れていないことについては後述する。

ねじ径 $\phi=8\text{mm}$ と $\phi=10\text{mm}$ の最大荷重を比較すると、板厚 $t=1.6\text{mm}$ では $\phi=8\text{mm}$ 、 $\phi=10\text{mm}$ の最大荷重に有意な差は認められない。しかし板厚 $t=2.3\text{mm}$ 、 $3.2\text{mm}$ 、 $4.5\text{mm}$ 、 $6.0\text{mm}$ では $\phi=10\text{mm}$ の方が $\phi=8\text{mm}$ より明らかに大きくなっている。これはねじ径が大きくなることではめ合い部分のねじの接触面積が大きくなるためである。

図-3.11、3.12に下板の板厚と最大荷重の関係を示す。最大荷重は25体の平均値である。一部、24体の平均になっている実験ケースもある。これらの図よりねじ径 $\phi=8\text{mm}$ 、 $\phi=10\text{mm}$ ともに板厚 $t$ が厚くなると最大荷重が増加していることがわかる。しかし、板厚 $t=1.6\text{mm}$ 、 $2.3\text{mm}$ 、 $3.2\text{mm}$ の最大荷重と板厚 $t=4.5\text{mm}$ 、 $6.0\text{mm}$ の最大荷重は異なる傾きを示し

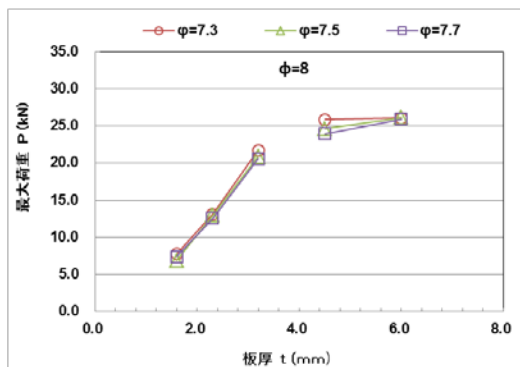


図-3.11 下板の板厚と最大荷重の関係 (ねじ径  $\phi=8\text{mm}$ )

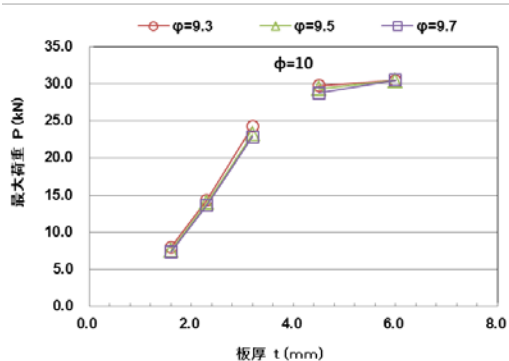


図-3.12 下板の板厚と最大荷重の関係 (ねじ径  $\phi=10\text{mm}$ )

ている。この原因をねじ径  $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径  $\phi=9.5\text{mm}$  の試験体の破壊モードから考察する。

ねじ径  $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径  $\phi=9.5\text{mm}$  の試験体は板厚の違いにより異なる破壊モードとなった。

**写真-3.2** にねじ径  $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径  $\phi=9.5\text{mm}$ 、板厚  $t=2.3\text{mm}$  の破壊後の試験体を示す。スレッドローリングねじが下板のねじ孔の上円部をめぐりあげ、ねじがねじ孔から抜けてしまったように破壊している。板厚  $t=1.6\text{mm}$  の試験体も同様の破壊モードであった。しかしながら、ごく少数ではあるが次に述べる**写真-3.3** に示す破壊モードを示したのものもあった。

**写真-3.3** にねじ径  $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径  $\phi=9.5\text{mm}$ 、板厚  $t=3.2\text{mm}$  の破壊後の試験体を示す。**写真-3.2** と同じように、スレッドローリングねじが下板のねじ孔の上円部をめぐりあげてはいるがその程度は小さい。また、スレッドローリングねじのねじ山が削り取られているのが見てとれる。**写真-3.2** ではねじ山は削り取られることはなく残っている。ねじ径  $\phi=10\text{mm}$ 、板厚  $t=3.2\text{mm}$  の試験体は、すべてこの破壊モードであったが、ねじ径  $\phi=8\text{mm}$ 、板厚  $t=3.2\text{mm}$  の試験体では、**写真-3.2** に示す破壊モードを示したものもあったし、次に述べる**写真-3.4** に示す破壊モードを示したものもあった。

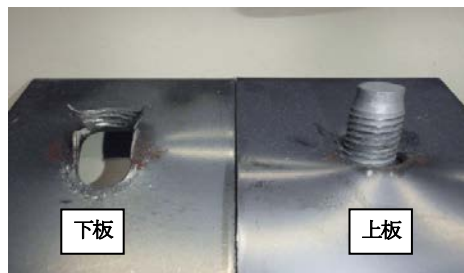


写真-3.2 ねじ径  $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径  $\phi=9.5\text{mm}$ 、板厚  $t=2.3\text{mm}$  の破壊後の試験体

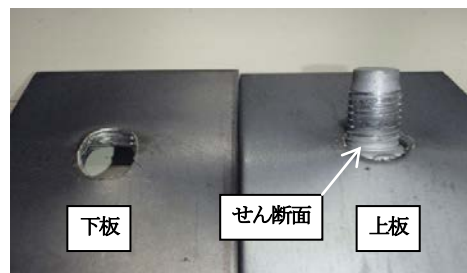


写真-3.3 ねじ径  $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径  $\phi=9.5\text{mm}$ 、板厚  $t=3.2\text{mm}$  の破壊後の試験体



写真-3.4 ねじ径  $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径  $\phi=9.5\text{mm}$ 、板厚  $t=4.5\text{mm}$  の破壊後の試験体

**写真-3.4** にねじ径  $\phi=10\text{mm}$ 、下板のねじ孔径  $\phi=9.5\text{mm}$ 、板厚  $t=4.5\text{mm}$  の破壊後の試験体を示す。スレッドローリングねじが上板と下板の間でせん断破壊している。ねじ径 ( $\phi=8\text{mm}$ 、 $10\text{mm}$ )、下板のねじ孔径 ( $\phi=7.3\sim 7.7\text{mm}$ 、 $9.3\sim 9.7\text{mm}$ ) によらず、板厚  $t=4.5\text{mm}$ 、 $6.0\text{mm}$  の試験片のすべてが同様の破壊モードであった。

以上より、試験体の板厚  $t=1.6\text{mm}$ 、 $2.3\text{mm}$  の破壊モードは**写真-3.2** に示すスレッドローリングねじの引き抜けであり、板厚  $t=4.5\text{mm}$ 、 $6.0\text{mm}$  の破壊モードは**写真-3.4** に示すスレッドローリングねじのせん断破壊であると理解される。板厚  $t=3.2\text{mm}$  の場合は、**写真-3.2~3.4** に示す3種類の破壊モードが混在してはいたが、大半は**写真-3.3** に示す破壊モードであり、**図-3.11**、**3.12** において板厚  $t=3.2\text{mm}$  の実験結果が板厚  $t=1.6\text{mm}$ 、 $2.3\text{mm}$  の延長線上にあることから、スレッドローリングねじの引き抜けと判断してよいものと思われる。板厚  $t$  がある一定以上の厚さになると破壊モードがスレッドローリングねじの引き抜けからスレッドローリングねじのせん断破壊に変化する

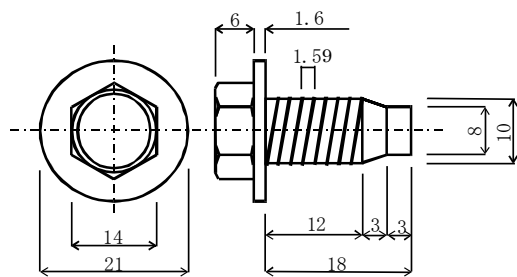


図-3.13 ねじ寸法

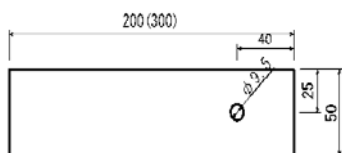


図-3.14 鋼板部材

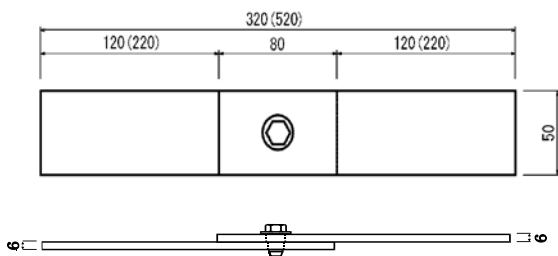


図-3.15 試験片

表-3.2 実験条件

試験片番号	$P_{max}$ (kN)	$P_{min}$ (kN)	$\Delta P$ (kN)
TP0-1	11	1	10
TP0-2	15	1	14
TP0-3	16	1	15
TP0-4	15	1	14
TP0-5	14	1	13
TP0-6	13	1	12
TP0-7	12	1	11
TP0-8	13	1	12
TP0-9	16	1	15
TP1-1	16	1	15
TP1-2	15	1	14
TP1-3	14	1	13
TP1-4	13	1	12
TP1-5	12	1	11
TP1-6	11	1	10

るため最大荷重の増加傾向が変化したものと理解される。

### 3.2 重ね接合継手の疲労強度

#### 3.2.1 実験方法

実験に使用したスレッドローリングねじの寸法を図-3.13に示す。使用したスレッドローリングねじは $\phi=10\text{mm}$ である。スレッドローリングねじの締付けには最大締付トルク  $165\text{N}\cdot\text{m}$  のインパクトレンチを使用した。試験片は、図-3.14に示すように $\phi=9.5\text{mm}$ の円孔をあけた長方形の鋼板2枚を、図-3.15のように互い違いに重ね合わせ、スレッドローリングねじで接合した一面せん断継手である。本実験では上板

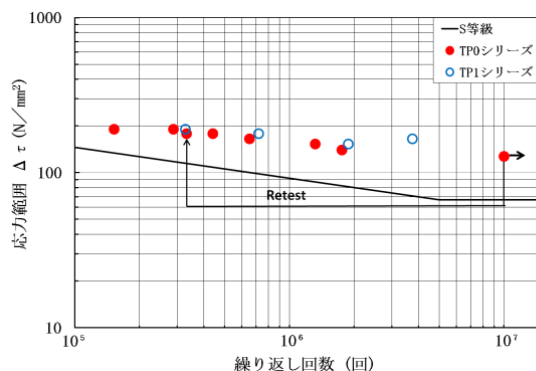


図-3.16 ねじ破断した継手のS-N線図

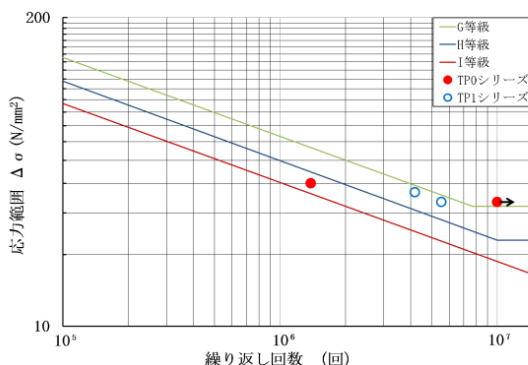


図-3.17 鋼板破断した継手のS-N線図

の孔径も下板の孔径と同じ $\phi=9.5\text{mm}$ とした。図-3.14の鋼板部材の板厚は $t=6\text{mm}$ であり、長さは材料手配の関係で $l=200\text{mm}$ 、 $300\text{mm}$ の2種類となった。したがって、図-3.15の試験片の全長 $L$ は $L=320\text{mm}$ と $L=520\text{mm}$ の2種類となった。 $L=320\text{mm}$ の試験片をTP0、 $L=520\text{mm}$ の試験片をTP1と呼ぶこととする。材質はSS400である。

試験片組立後、隙間ゲージを用いて上板と下板の間、上板とスレッドローリングねじの間を測定した。また、実験中のスレッドローリングねじと上板とのズレを確認する為にねじ頭と上板にマーキングを施した。

試験機に試験片を取り付ける際、厚さ6.0mmのスペーサーをチャックと試験片との間に入れることで取り付け時に接合部に局部曲げモーメントが生じないようにした。

疲労試験における繰返し数の上限は1,000万回とし、周波数は5Hzとした。実験条件を表-3.2に示す。最小荷重は $P_{min}=1\text{kN}$ とした。

#### 3.2.2 実験結果及び考察

スレッドローリングねじが破壊した試験片の実験結果を図-3.16に、鋼板が破壊した試験片の実験結果を図-3.17に示す。TP0-6、TP1-5、TP1-6は鋼板が破壊し、それ以外の試験片はスレッドローリングねじが破壊した。図中には「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」に与えられている疲労強度等級も示した<sup>9)</sup>。今回の試験片は重ね継手であるので、当然、面外変

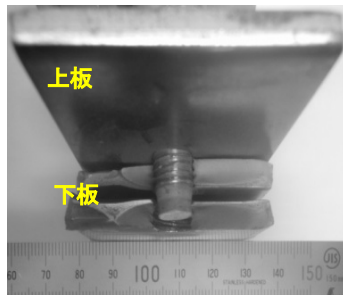


写真-3.5 TPO-6

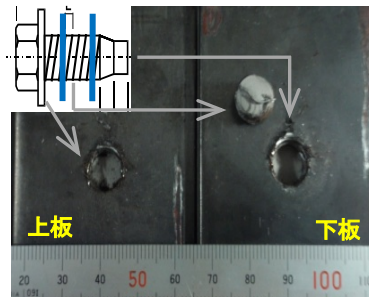


写真-3.6 TPO-7

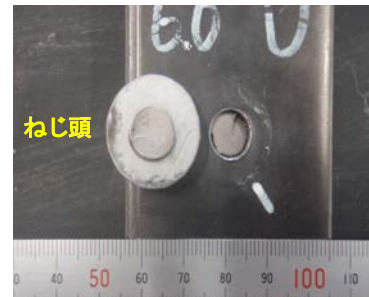
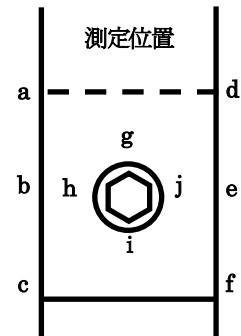


写真-3.7 TPO-3

表-3.3 測定結果

試験片番号	単位(mm)									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	i
TP0-1	0.00	0.12	0.16	0.00	0.00	0.10	-	-	-	-
TP0-3	0.11	0.17	0.00	0.00	0.02	0.90	-	-	-	-
TP0-4	0.15	0.11	0.10	0.05	0.00	0.40	-	-	-	-
TP0-5	0.00	0.00	0.00	0.09	0.08	0.10	0.15	0.24	0.00	0.00
TP0-6	0.01	0.07	0.01	0.01	0.05	0.03	0.50	0.49	0.01	0.01
TP0-7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TP0-8	0.10	0.10	0.01	0.01	0.01	0.06	0.00	0.00	0.06	0.68
TP0-2	0.06	0.11	0.11	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.39	0.60
TP1-1	0.05	0.11	0.20	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.20	0.30
TP1-2	0.11	0.11	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.22
TP1-3	0.00	0.08	0.08	0.00	0.15	0.20	0.00	0.01	0.60	0.26
TP1-4	0.04	0.12	0.11	0.00	0.01	0.11	0.28	0.16	0.00	0.00
TP1-5	0.00	0.00	0.01	0.05	0.06	0.10	0.10	0.19	0.00	0.00
TP1-6	0.00	0.10	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	0.05	0.02



形が生じ、スレッドローリングねじには曲げモーメントが作用するが、実験結果の整理には、この曲げモーメントを考慮しないで、図-3.16の縦軸の応力 $\Delta\tau$  (N/mm<sup>2</sup>)は(3.1)式を用いて求めた。

$$\Delta\tau = \frac{\Delta P}{A_s} \quad (3.1)$$

ここに、 $\Delta P$ : 荷重範囲 (N)、 $A_s$ : スレッドローリングねじの公称直径から求めた断面積 (mm<sup>2</sup>)

図-3.17の縦軸の応力 $\Delta\sigma$  (N/mm<sup>2</sup>)は(3.2)式を用いて求めた。

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P}{A_g} \quad (3.2)$$

ここに、 $\Delta P$ : 荷重範囲 (N)、 $A_g$ : 鋼板の総断面積 (mm<sup>2</sup>)

図-3.16より、スレッドローリングねじで接合された継手がねじで破壊した場合の継手の疲労強度は、本実験の範囲においては「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」に与えられているS等級を満たしていることがわかる。また、試験片の長さの違いによる疲労強度の差異はないといえる。

図-3.17より、限られた結果ではあるが、スレッドローリングねじで接合された継手が鋼板で破壊した場合の継手の疲労強度は、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」に与えられているI等級を満たしていることがわかる。また、試験片の長さが長いTP1試験片に着目すると、TP1試験片はH等級を満たしており、疲労強度に試験片の長さの違いが影響しているようにも思われる。しかしながら、実験点が非常に少なく、限られた

結果であるので、ここでは鋼板で破壊した継手もあったことを示すにとどめることとする。

TP0-6は写真-3.5に示すように鋼板で破断した。TP1-5、6も同様であった。写真-3.5からき裂は上板と下板の接触面の下板のねじ端から発生し、下板の板厚方向、板幅方向に進展し破断に至っていることがわかる。TP0-7は、写真-3.6に示すように上板、下板の板厚内でそれぞれねじが破断した。TP0-3は写真-3.7に示すようにねじ頭直下で破断した。これら以外のすべての試験片は上板と下板の接触面でねじが破断した。

本実験に用いた試験片は重ね継手であり、当然、内外変形が生じ、スレッドローリングねじには局部曲げモーメントが作用する。この曲げモーメントは上板と下板の接触部が最も大きく、したがって、ねじに作用する引張応力も上板と下板の接触部が最も大きくなる。さらに上板と下板の接触部にスレッドローリングねじのねじ谷が位置した場合は応力集中によって引張応力は増大する。上板と下板の接触部には局部曲げモーメントによる引張応力とせん断応力が同時に作用するので、14体中9体が上板と下板の接触部で破壊したことは容易に理解される。

TP0-6、TP1-5、TP1-6、TP0-7、TP0-3の破壊位置が異ったのは、組み立て精度、試験片の取付け時の初期不整、材料のばらつきなどが考えられるが、これらについては今後の研究課題としたい。

試験片組立後に隙間ゲージを用いて上板と下板の間、ならびに上板とスレッドローリングねじの間を測定した結果を表-3.3に示す。a~fでは上板と下板の間を、g~jでは上板とスレッドローリングねじの間を測定し

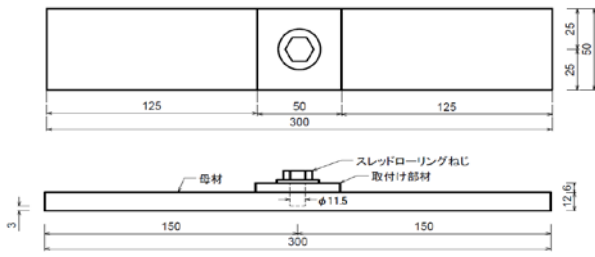


図-4.1 試験片

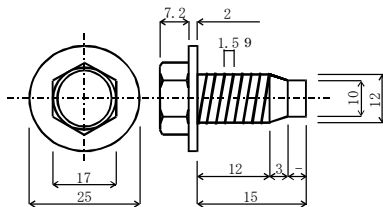


図-4.2 ねじ寸法

表-4.1 実験条件

試験片番号	$P_{max}$ (kN)	$P_{min}$ (kN)	$\Delta P$ (kN)
TP1-1H	94	1	93
TP1-2H	151	1	150
TP1-3H	151	1	150
TP1-4H	139	1	138
TP1-5H	127	1	126
TP1-6H	115	1	114
TP1-7H	115	1	114
TP1-8H	103	1	102

た。TP0-1、TP0-3、TP0-4 においては  $g \sim j$  を測定しなかった。TP0-3 の  $f$  と TP1-2 の  $c$  で 0.90mm の隙間があり、これが最大であるが、TP0-3、TP1-2 はいずれもねじ破断であり、図-3.16 に特異点が認められないことから、疲労試験結果に影響を与えてははいないものと思われる。また、上述の破壊位置と表-3.3 の測定結果に関係は認められない。

スレッドローリングねじのねじ頭と上板のマーキングを実験中、実験後に目視調査したが、これらの間にズレは確認されなかった。

#### 4. 埋め込み型継手の疲労強度

「3.2 重ね接合継手の疲労強度」で用いた試験片はスレッドローリングねじが鋼部材を貫通しているが、スレッドローリングねじを鋼部材を貫通させないで使用することも考えられる。本章ではこのようにスレッドローリングねじを鋼部材に埋め込んだままの継手の疲労強度について調査することとし、構造部材に別の鋼部材をスレッドローリングねじで取付けた継手を想定した。このような継手は「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」の継手の強度等級分類表に与えられておらず、疲労強度を調査しておく必要がある<sup>9)</sup>。

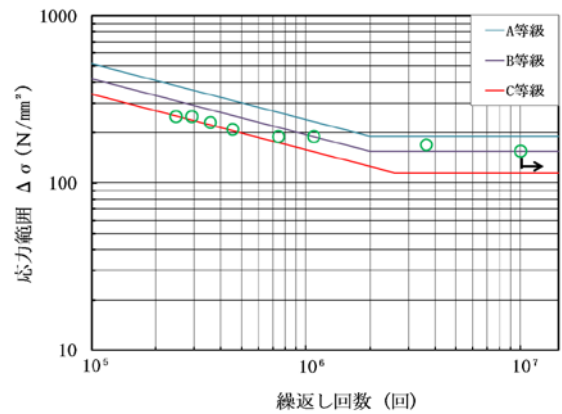


図-4.3 埋め込み型継手のS-N線図



写真-4.1 TP1-6H

#### 4.1 実験方法

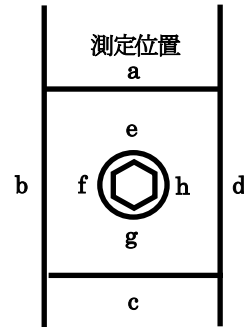
試験片を図-4.1に示す。取付け部材の材質はSS400、母板の材質はSM490YBである。本実験には図-4.2に示すねじ径 $\phi=12\text{mm}$ のスレッドローリングねじを用いた。本実験では取付け部材、母板の孔径はどちらも $\phi=11.5\text{mm}$ とし、取付け部材は貫通孔、母板は深さ9mmの非貫通孔とした。スレッドローリングねじの締付けには最大締付トルク  $165\text{N}\cdot\text{m}$  のインパクトレンチを使用した。スレッドローリングねじ施工時に母板の孔底にスレッドローリングねじが当たらないように、孔の深さを測定しねじ先端をベルトサンダーで削り、孔底とねじ先端が接触することを防いだ。実験中のスレッドローリングねじ、取付け部材、および母板のズレを確認するため、ねじの頭と取付け部材表面、ならびに取付け部材と母板の側面にマーキングを施した。疲労実験における繰返し数の上限は1,000万回とし、周波数は5Hzとした。実験条件を表-4.1に示す。最小荷重は $P_{min}=1\text{kN}$ とした。

#### 4.2 実験結果および考察

実験結果を図-4.3に示す。図中には「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」に与えられている疲労強度等級も示した<sup>9)</sup>。図-4.3の縦軸の応力 $\Delta\sigma$  ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )は(4.1)式を用いて求めた。

表-4.2 測定結果

試験片番号	単位 (mm)							
	a	b	c	d	e	f	g	h
TP1-1H	0.00	0.00	0.27	0.58	0.00	0.00	0.33	0.43
TP1-2H	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
TP1-3H	0.00	0.00	0.03	0.00	0.40	0.00	0.00	0.56
TP1-4H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	0.60
TP1-5H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
TP1-6H	0.00	0.00	0.02	0.00	0.10	0.00	0.00	0.20
TP1-7H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.01	0.00	0.00
TP1-8H	0.08	0.00	0.01	0.07	0.54	0.08	0.00	0.11



$$\Delta \sigma = \frac{\Delta P}{A_g} \quad (4.1)$$

ここに、 $\Delta P$ ：荷重範囲 (N)、 $A_g$ ：鋼板の総断面積 ( $\text{mm}^2$ )

図-4.3 において、応力範囲  $\Delta P=150\text{kN}$  ( $\Delta \sigma = 250\text{N/mm}^2$ ) を作用させた試験片 TP1-2H は  $24.7 \times 10^4$  回で破断した。 $\Delta \sigma = 250\text{N/mm}^2$  に対する C 等級の繰返し数は  $25.0 \times 10^4$  回であり、TP1-2H の寿命は C 等級の 99% に相当するが、これをわずかに満たさなかった。確認のため同一条件で再実験 (TP1-3H) したところ、TP1-3H は  $29.3 \times 10^4$  回で破断し、C 等級を満たした。この 2 体に作用させた応力範囲  $\Delta \sigma = 250\text{N/mm}^2$  は実用の範囲を大きく超えており、本実験で使用した継手は C 等級を満たしていると判断してもよいように思われたが、本実験の範囲においては、応力範囲  $\Delta \sigma = 230\text{N/mm}^2$  以下では C 等級を満たしていると判断することとした。

写真-4.1 に破断後の試験片の例を示す。写真-4.1 より、き裂は孔底と孔側面の角から発生し、取付け部材の反対側に進展していることがわかる。取付け部材の反対側に進展したき裂はその後開口し、表面き裂となり、板幅方向に進展して破断に至ったものと理解される。今回の試験片は孔底と孔側面を直角に加工したので、この部位の応力集中が大きかったものと思われる。したがって、この部位をテーパ加工あるいはアール加工することによって疲労強度を改善させることが可能ではないかと考えられる。

試験片組立後に隙間ゲージを用いて取付け部材と母板、ならびに取付け部材とスレッドローリングねじの間を測定した結果を表-4.2 示す。a~d では取付け部材と母板の間を、e~h では取付け部材とスレッドローリングねじの間を測定した。TP1-4H の h の隙間が 0.60mm で、これが最大であるが、疲労試験結果に影響を与えてはいないものと思われる。

スレッドローリングねじのねじ頭と取付け部材表面、ならびに取付け部材と母板の側面のマーキングを実験中、実験後に目視調査したが、これらの間にズレは確認されなかった。

## 5. まとめ

本研究では、スレッドローリングねじで接合された引張接合継手の静的引張強度、ならびに重ね接合継手の静的引張強度、疲労強度について実験的に調査した。また、構造部材に別の鋼部材をスレッドローリングねじで取付けた継手を想定し、スレッドローリングねじが鋼部材に埋め込まれたままの継手の疲労強度についても調査した。

引張接合継手の実験結果から本研究の範囲においては以下の結果が得られた。

- 1) ねじ径  $\phi = 8\text{mm}$ ,  $\phi = 10\text{mm}$  の継手のいずれにおいても下板のねじ孔径が大きくなるにつれて最大荷重は低下した。
- 2) ねじ径  $\phi = 8\text{mm}$ ,  $\phi = 10\text{mm}$  の継手のいずれにおいても継手の板厚  $t$  が厚くなるにつれて最大荷重は増加した。
- 3) 継手の板厚  $t \leq 3.2\text{mm}$  ではねじ径  $\phi = 8\text{mm}$ ,  $\phi = 10\text{mm}$  の継手の最大荷重に有意な差は認められなかったが、板厚  $t \geq 4.5\text{mm}$  ではねじ径  $\phi = 10\text{mm}$  の継手の最大荷重の方がねじ径  $\phi = 8\text{mm}$  の継手の最大荷重より大きかった。

重ね接合継手の実験結果から本研究の範囲においては以下の結果が得られた。

- 1) 継手の板厚  $t \leq 4.5\text{mm}$  の場合、ねじ径  $\phi = 8\text{mm}$ ,  $\phi = 10\text{mm}$  の継手のいずれにおいても下板のねじ孔径が大きくなるにつれて最大荷重は減少した。
- 2) ねじ径  $\phi = 8\text{mm}$ ,  $\phi = 10\text{mm}$  のいずれの場合も継手の板厚により継手の破壊状況が異なった。
- 3) 継手の板厚  $t = 1.6\text{mm}$  の場合、ねじ径  $\phi = 8\text{mm}$ ,  $\phi = 10\text{mm}$  の最大荷重に有意な差は認められなかったが、板厚  $t \geq 2.3\text{mm}$  ではねじ径  $\phi = 10\text{mm}$  の継手の最大荷重の方がねじ径  $\phi = 8\text{mm}$  の継手の最大荷重より大きかった。
- 4) ねじ径  $\phi = 10\text{mm}$  のスレッドローリングねじ 1 本で接合された幅 50 mm、板厚 6mm、長さ 320mm (または 520mm)、ねじ孔径  $\phi = 9.5\text{mm}$  の重ね継手の疲労

強度は S 等級を満たしていた。

埋め込み型継手の疲労試験結果から本研究の範囲においては以下の結果が得られた。

1) 幅 50 mm、板厚 12mm、長さ 300mm、ねじ孔径  $\phi = 11.5$  mm の母板に、幅 50 mm、板厚 6mm、長さ 50mm、ねじ孔径  $\phi = 11.5$  mm の取付け部材をねじ径  $\phi = 12$  mm のスレッドローリングねじ 1 本で接合した埋込み型継手の疲労強度は、応力範囲  $\Delta \sigma = 230$  N/mm<sup>2</sup> 以下では C 等級を満たしていた。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，平成 24 年 3 月。
- 2) 鈴木博之，川邊裕一，藤井克紀，中島一浩：高力ワッ்சァイドボルト一面摩擦接合継手のすべり試験，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，939-940，2010。
- 3) 鈴木博之，中島一浩，佐藤浩明，藤井克紀：高力ワッ்சァイドボルトを用いた遅れ破壊ボルトの取替え施工試験，土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集，

509-510，2011。

- 4) 大山貴之，鈴木博之ほか：高力ワッ்சァイドボルトを用いた遅れ破壊ボルト取替え工事報告，土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集，511-512，2011。
- 5) 田畑晶子，青木康素，小野秀一，山口隆司：Uリブ鋼床版のスタッドボルトを用いた補強方法の提案，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，931-932，2014。
- 6) 青木康素，田畑晶子，小野秀一，渡辺真至，馬場敏，山口隆司：スタッドボルトを用いてあて板したUリブ鋼床版の載荷試験，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，933-934，2014。
- 7) 鋼橋技術研究会 維持管理部会報告書 (No.073)，平成 22 年 3 月。
- 8) 日本規格協会；JIS B 0101「ねじ用語」平成 25 年 4 月 22 日。
- 9) 日本鋼構造協会編；鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012 年 6 月。

(2014 年 9 月 24 日受付)

(2015 年 2 月 1 日受理)