

## 第2章 拡大孔を有する高力ボルト摩擦接合継手の引張試験

### 2-1 試験体

ここでは、2シリーズの試験体を製作した。シリーズⅠは溶接構造用圧延鋼材 JIS G3106 SM400A を材料として製作した2列ボルト試験体、シリーズⅡは SM490Y を材料として作製した3列ボルト試験体である。

#### 2-1-1 シリーズⅠ試験体

供試鋼材は、板厚 8, 9, 12, 14, 16, 20, 25mm の SM400A である。板厚 14, 16, 20, 25mm の鋼材から幅 90mm・長さ 475mm の母板(Plate1)と幅 90mm・長さ 550mm の母板(Plate2)を、板厚 8, 9, 12, 14mm の鋼材から幅 90mm・長さ 475mm の添接板(Plate3)をガス切断により加工した。母板に用いた鋼材の機械的性質と化学成分を表 2.1 に示す。なお、鋼材表面の黒皮はショットブラストを行うことにより除去している。

Plate1 には、孔径 24.5, 26.5, 28.5 あるいは 30.5mm の円孔を2つ、もう一方の plate2 では孔径 24.5mm の円孔を3つ設けている。添接板については Plate1 側で 24.5, 26.5, 28.5mm の3種類、Plate2 側では 24.5mm の孔を設けている。各材片の形状・寸法を図 2-1(a)に示す。

母板(plate1)孔径と添接板(plate3)孔径の組合せは、両孔径とも 24.5, 26.5, 28.5mm としたもの、そして添接板孔径を 24.5mm とし、母板孔径を 28.5, 30.5mm としたものの5種類とした。これらを各母板厚ごとに3体ずつ15体の試験体を製作した。試験体の孔径の組合せを図 2-2(a)に示す。母板の板厚は 14, 16, 20, 25mm の4種類である。このように、合計60体の試験体を製作した。母板の厚さは、設計上のすべり/降伏耐力比が  $\beta = 0.8, 1.0, 1.2, 1.4$  程度となるように設定したものである。試験体の板厚と設計上のすべり/降伏耐力比の関係を表 2.2(a)に示す。

引張試験に用いる試験体は、母板 Plate1 と Plate2 を突き合わせ、添接板 Plate3 を2枚用いた両面添接の突き合わせ継手である。この試験体で、すべりの発生する Plate1 側の2本のボルトには、軸力を測定できるひずみゲージを貼付した摩擦接合用高力ボルト F10T-M22 のセットを使用した。このボルトのセットの外観を写真 2.1 に示す。Plate2 側の3本のボルトには、通常の F10T-M22 のセットを使用した。なお、いずれの試験体に対してもボルトを添接板の円孔中心と母板の円孔中心が一致するようにした。

ドリフトピンを用いて母板と添接板の位置を決め、Plate2 側で所定の軸力(201.1kN)の6割程度を導入した後、ボルトのリラクゼーションを考慮して、所定の値を1割増した軸力が導入されるようにトルクレンチを用いてボルトを締め付けた。Plate1 側では、ボルト軸の軸力とひずみ値の関係を利用して、ひずみ値からボルト軸力を管理して Plate2 と同様に仮締めした後、本締めを行った。ボルトの締め付ける順序は Plate2 外, Plate1 外, Plate2 中, Plate1 内, Plate2 内とした。継手試験体の形状・寸法を図 2-3(a)に示す。

#### 2-1-2 シリーズⅡ試験体

供試鋼材は、板厚 9, 10, 12, 13, 16, 19, 22, 25mm の SM490Y である。これらの鋼材の機械的性質と化学成分を表 2.1 に示す。板厚 16, 19, 22, 25mm の鋼板はボルト継手試験体の母板に、9, 10, 12, 13mm の鋼板は添接板に用いた。母板は幅 90mm・長さ 550mm の Plate1 と、幅 90mm・長さ 625mm の Plate2 からなっている。添接板(Plate3)の幅は 90mm、長さは 625mm である。なお、これらの板の加工は、95mm 幅にガス切断で切り出したのち、両側面を 2.5mm づつフライス加工することにより行い、所定の幅寸法(90mm)とした。高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の値は接触面の処理状態によって大きく異なる事が知られているが、道路橋示方書では黒皮を除去して粗面とする場合に対し、0.4 の値が規定されている。黒皮を除去する方法としてグラインダ処理やブラスト処理があるが、ここではグリッドによる手動ブラストにより供試鋼材の黒皮を除去している。

引張試験に用いる試験体は、母板 Plate1 と Plate2 を突き合わせ、添接板 Plate3 を 2 枚用いた両面添接の突き合わせ継手である。Plate1 には孔径 24.5, 26.5 あるいは 28.5mm の円孔を 3 つ、もう一方の Plate2 には同じ孔径で 4 つ設けている。添接板は母板との孔径が一致するように円孔を設けている。母板と添接板の形状と寸法を図 2-1(b)に示す。なお母板の板厚は、設計上のすべり/降伏耐力比  $\beta$  がおよそ  $\beta = 0.8, 1.0, 1.2, 1.4$  となるように設定した。試験体の板厚と設計上のすべり/降伏耐力比の関係を表 2.2(b)に示す。2 つの母板で円孔の数を変えているのは、すべりが生じる母板を特定するためである。すなわち、円孔の数を 3 つとした Plate1 が着目する母板となる。以上の母板と添接板を組み合わせて、表 2.3 に示す 6 タイプ 18 種類の高力ボルト摩擦接合継手試験体を作成した。同表に示すように、母板厚 16, 19, 22, 25 の継手試験体には、それぞれ 9, 10, 12, 13mm の添接板を用いている。Type 1 はボルト孔を標準の 24.5mm (ボルト径 22mm+2.5mm) とした試験体である。Type 2 ではボルト径を現行の道路橋示方書で許容されている 26.5mm (ボルト径 22mm+4.5mm)、Type 3 ではさらに 2mm 大きくしてボルト孔径を 28.5mm とした試験体である。なお、F10T-M22 のボルト頭やナット、そしてワッシャの寸法を考慮すると、28.5mm がボルト孔の物理的限界と考えられる。すなわち、これ以上ボルト孔径を大きくすると、ボルトが添接板のボルト孔に対して偏って挿入された場合に、円孔の一部が表面に開口する恐れが高くなる。Type4、Type5、Type6 はボルト孔径を 28.5mm とした試験体である。Type4 は円孔に対してボルトをずらして設置している。ボルトの設置は、まずボルトが円孔の中心にあるときの位置を添接板に印し、その後ボルトを外側に所定の分だけずらし、ボルト位置を定めた。Type5 は Plate1 を添接板に対して内側にずらしたもので、Type6 は Plate1 を添接板に対して Type5 の場合と逆側にずらしたものである。Type5、Type6 の母板の位置は、クリップゲージを用いて母板を所定の分だけずらし、母板の位置を決定した。図 2-2(b)に Type1~6 試験体のボルト孔とボルトの位置関係、図 2-3(b)に継手試験体の形状・寸法を示す。

すべりが先に発生する Plate 1 側には軸力を測定できるひずみゲージ付きボルト・摩擦接合用高力ボルト F10T-M22 を使用した。固定側である Plate2 側のボルト 4 本には通常の F10T-M22 の高力ボルトを使用した。ボルトの締め付けは、ドリフトピンを用いて添接板の円孔中心を母板の円孔中心に一致させた後、所定の軸力(201.1kN)の 1 割増しの軸力が導入されるようにボルトの締め付けを行った。締め付けは、最初に小型レ

ンチで仮締め(導入軸力の約5%)を行い、ボルト位置を固定し、その後トルクレンチを用いて所定の軸力の60%、所定の軸力がボルト軸に導入されるように行った。その際の設計ボルト軸力は225.5kNとなる。Plate1側ではボルト軸の軸力とひずみ値の関係を利用し、ひずみ値からボルト軸力を管理して締め付けを行った。ボルトの締め付けは、Plate2側の外、Plate1側の外というように外側のボルトから内側のボルトに向けてPlate1・Plate2を交互に行った。

## 2-2 摩擦係数の測定

高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力を支配する主要因子の一つである鋼板間の摩擦係数を以下のように測定した。すなわち、試験体を2枚重ね、下板の端部をジャッキで徐々に上げ上板が滑り出すときの下板端部の高さを測ることによって摩擦係数を算出した。シリーズIの鋼板とシリーズIIの鋼板に対して、それぞれ上下板セット3本を8回ずつ、計24回行った。測定結果を表2.4に示す。摩擦係数の平均値は、シリーズIで0.46、シリーズIIで0.58であった。

## 2-3 残留応力の測定

シリーズIの鋼板の加工は、ガス切断により行われている。ガス切断により母板端部は高熱となるためその熱履歴により大きな残留応力が生じているとも考えられる。その恐れを軽減するために、シリーズIIでは、ガス切断後に切断面から約2.5mmの範囲をフライスで削り、試験板の幅を所定の寸法(90mm)とした。

ここでは、シリーズIの板厚20mmのPlate1とシリーズIIの板厚16mmと25mmの鋼板を対象として残留応力の測定を行った。シリーズIIの鋼板の残留応力測定に用いた試験体の形状・寸法を図2-4に示す。板厚16mm、25mmの試験体とも、それぞれ2体の試験体を用意している。残留応力測定は測定箇所にはひずみゲージを貼付し、その周囲を切断し、その時に開放されるひずみを測定する切断法で行った。残留応力の値は、試験体切断前後のひずみ変化に鋼材のヤング率を乗じることにより求めている。ゲージ添付位置を図2-5(a),(b)に示す。なお、いずれの試験体とも、表裏面にひずみゲージを貼付している。

シリーズIの試験体の残留測定結果を図2-6に示す。試験体の端部には、100~250N/mm<sup>2</sup>の引張残留応力が生じており、中央付近にはそれと釣合うように圧縮残留応力が生じている。

図2-7(a)にシリーズIIの板厚16mmの試験体の残留応力測定結果を示す。試験体1では、こば面に10N/mm<sup>2</sup>程度の引張残留応力、板表裏面には30N/mm<sup>2</sup>程度の圧縮残留応力が生じている。試験体2についても同様である。この程度の残留応力は未加工の鋼板でも見られるものであり、フライス加工によりガス切断による残留応力は開放されているといえる。図2-7(b)は板厚25mmの試験体の残留応力測定結果を示したものである。試験体1のこば面には、250N/mm<sup>2</sup>程度の高い引張残留応力が生じており、板中央に近づくにしたがってその値は小さくなっている。また、円孔の近くでは板側面の引張残留応力と釣合うように150N/mm<sup>2</sup>程度の圧縮残留応力が生じている。試験

体 2 も同様である。このように板厚 25mm の試験体ではガス切断による残留応力が顕著に認められた。これは、板が厚いほどガス切断に要する熱量が高くなり、フライスで 2.5mm 程度削っただけでは熱変形の影響を取りきれなかったためと考えられる。板厚 19mm と 22mm の鋼板については残留応力測定を行なっていないが、それらの残留応力は、板厚 16mm と板厚 25mm の試験体の間にあるものと予想される。

#### 2-4 リラクゼーション試験

シリーズⅡ板厚 25mm の type1~5 の継手試験体を対象とし、ボルト軸力の減少をひずみ測定器を用いて測定した。この試験では温度変化によるボルト軸力変動を防止する目的で恒温室にて行った。恒温室の室温は 20℃、湿度は 60% である。また、測定期間は 34 日とした。

リラクゼーション試験の結果の例を図 2-8(a)~(d)に示す。他の試験体の結果については、付録に示している。図 2-8(b)は板厚 25mm で円孔径 26.5mm の試験体(Type2)のリラクゼーション試験結果を示したものである。ボルト締め付け直後には軸力抜けの大きさにばらつきが生じているが、時間が経過するとばらつきの程度が小さくなり、3 孔ともほぼ同じ軸力変動を示している。他の試験体でも、一例を除き、時間の経過とともに軸力がほぼ一定となるという結果が得られた。また、円孔径やボルト位置の違いによる軸力減少の相違は見られなかった。34 日目での軸力の減少の平均は、type1 で 3.2%、type2 で 2.2%、type3 で 2.7%、type4 で 1.1%、type5 で 3.2%であった。

#### 2-5 引張試験方法

引張試験を行うに先立ち、組立て時のボルトひずみ値と試験開始直前（組立て後 12~24 時間）のボルトひずみ値を測定することにより、ボルトのリラクゼーションを調べた。

引張試験には、荷重能力 1960kN(200tf)の万能試験機 UH-200A を用いた。引張試験は、試験体のすべりと全断面降伏の双方が生じるまで実行した。その際、シリーズⅠの試験体については、残留応力の影響を考慮して弾性域内である 196kN(20tonf)まで予め荷重を与え、荷重を 0 に戻した後に試験を開始した。引張試験の様子を写真 2.2(a)(b)に示す。

引張試験中、弾性域では 50kN 毎、降伏荷重またはすべり荷重に近づくと 20kN、あるいは 10kN 毎にデータロガーを用いて荷重、Plate1 と Plate2 間の開口変位、各点でのひずみ、ボルト軸力の測定を行った。また、降伏が生じた後は、Plate1 側のボルト外側（母板こぼ面）のひずみを目安にし、測定を行った。

Plate1、Plate2 の母板間の開口変位はクリップゲージを用いて測定を行った。また、ひずみゲージは円孔を含む母板の側面に貼り、母板の降伏状況を測定できるようにした。ゲージ貼付位置は、図 2-9(a)~(c)に示すように、試験体シリーズによって変えている。引張試験は、一種類の試験体につき、3 体の試験を行っている。シリーズⅡの試験体の引張試験では、3 体中 1 体は添接板への応力の流れを調べる目的でひずみゲージを Plate1 側の添接板円孔周辺こぼ面と母板円孔周辺にも貼付した（図 2-9(c)）。

## 2-6 引張試験結果

### 2-6-1 ボルトのリラクゼーション

継手試験体を組立ててから 12~24 時間後に、引張試験を行った。組立て時のボルトひずみ値と試験開始直前のボルトひずみ値を測定することにより、ボルトのリラクゼーションを求めた。シリーズ I の継手試験体の組立て時に測定したボルト軸力と試験開始前に測定したボルト軸力を表 2.5 に示す。試験開始直前の平均ボルト軸力は 239kN であり、所定のボルト軸力よりも約 20%高い軸力が導入されている。平均の軸力減少率は 1.6%であった。シリーズ II の継手試験体の組立て時に測定したボルト軸力と試験開始前のボルト軸力を表 2.6(a)~(d)に示す。試験開始直前の平均ボルト軸力は 224kN であり、所定のボルト軸力よりも約 10%高い軸力が導入されている。平均の軸力減少率は 1.8%であった。これらの中には、ボルト軸力が増加している試験体が見られた。これは、試験体製作時と引張試験開始時の気温や湿度の変化により生じたものと考えられる。

### 2-6-2 荷重 - 変位関係

#### (1) シリーズ I 試験体

図 2-10(a)~(d)に、ここで測定した荷重と Plate1 と Plate2 間の開口変位との関係の例を示す。開口変位は試験体の左右で測定しているが、ここではその平均値を示している。他の試験体の結果については、付録に示している。

図 2-10(b)は母板厚 16mm で標準孔と有する試験体(type1-2)での荷重 - 開口変位の関係を示したものである。荷重が増すにしたがって、開口変位もそれに比例して大きくなっている。この状態では、母板と添接板間のすべりも生じず、単に母板と添接板の弾性変形により開口変位が生じていると考えられる。荷重が 300 kN 程度に達すると、荷重 - 開口変位関係の傾きが緩やかとなっている。これは、微小なすべりあるいは、母板・添接板の塑性変形によってこのような挙動が生じたものと考えられる。荷重が 370 kN 程度でピーク値を示しており、このとき Plate1 側ですべりが生じ、1.5mm 程度の開口変位が生じている。その後、徐々にすべりが生じている。ボルト孔のクリアランスは、母板・添接板とも 2.5mm であるため、単純に考えて Plate1 側が支圧状態となるまで 2.5mm のすべりが生じることになる。開口変位が 5.5mm となった時に再び大きなすべりが生じている。これは、Plate2 側のすべりと考えられる。すべての試験で同様の荷重 - 開口変位関係が認められた。

#### (2) シリーズ II 試験体

図 2-11(a)~(d)に、測定した荷重と Plate 1 ・ Plate2 間の開口変位との関係の例を示す。開口変位は試験体の左右で測定しているが、ここではその平均値を示している。他の試験体の結果については、付録に示している。

図 2-11(a)は、板厚 19mm で円孔径 28.5mm の拡大孔を有する試験体(Type3-3)での荷重 - 開口変位の関係を示したものである。荷重が増すにしたがって、開口変位もそれに

比例して大きくなっている。この状態では、母板と添接板間のすべりは生じず、単に母板と添接板の弾性変形により開口変位が生じたと考えられる。荷重が480kN程度ですべりが生じ、2mm程度の開口変位が生じている。その後、数回のすべりを繰り返しながら、開口変位が増加している。ボルト孔のクリアランスは、母板・添接板とも6.5mmであるため、単純に考えてPlate1側が支圧状態となるまで6.5mmのすべりが生じることになる。しかし、クリアランスの大きさと同じ開口変位が生じた後も、徐々に荷重と開口変位が増加している。これは、Plate2側の母板と添接板の弾性変形によるものと、Plate1側でボルトが円孔壁にくいこんだ分だと考えられる。開口変位が7mm程度のところから荷重が急増していることから、上記の推定は妥当と考えられる。

### 2-6-3 ボルト軸力-荷重の関係（シリーズII試験体）

図2-12(a)～(d)にシリーズII試験体を用いた各試験で得られたボルト軸力と荷重の関係の例を示す。ここでのボルト軸力はひずみゲージつきボルトのひずみ測定結果を利用して求めている。また、図2-13(a)～(d)は初期導入軸力を用いて無次元化し、荷重との関係の例を示したものである。他の試験体の結果については、付録に示している。

図2-12(a)と図2-13(a)は、板厚16mmで円孔径26.5mmの試験体(Type2-1)での軸力-荷重関係を示したものである。荷重が増すに従って軸力が減少し、荷重が490kN程度で外側のボルト軸力が急激に減少し始めている。これは、外側円孔付近で母板が降伏したことにより板厚が減少し、軸力抜けが大きくなったためと考えられる。その後、すべりが生じる時も同様に軸力抜けが著しい。このように降伏先行型の継手においては外側のボルト軸力が母板降伏による板厚減少によって、急激に下がるという現象が多く見受けられた。これが降伏先行型の典型的な軸力-荷重関係である。

図2-12(d)と図2-13(d)は、板厚25mmで円孔径26.5mmの試験体(Type2-3)での軸力-荷重関係を示したものである。このときも、荷重が増すに従って軸力が減少していく。すべり直前の軸力の減少は著しいものとなり、そして継手にすべりが生じる。その後数回すべりを繰り返し、母板・ボルト外こぼ面位置での降伏が近づくに従って、軸力の減少は著しいものとなる。これがすべり先行型の典型的な軸力-荷重関係である。

### 2-6-4 荷重 - ひずみ関係(一般部)（シリーズII試験体）

図2-14(a)～(d)に、シリーズII試験体を用いた各試験で得られた荷重と添接板の外側の母板こぼ面(一般部)で測定したひずみの関係の例を示す。なお、ひずみは左右のこぼ面で測定しているがここで示すひずみはそれらの平均値である。他の試験体の結果については、付録に示している。

図2-14(a)は板厚16mmの試験体(Type1-3)での荷重-ひずみ関係(一般部)を示したものである。このタイプに限らず、すべての試験体の一般部において線形を保っている。ただし、板厚25mmの一部では非線形性が認められるが、これは、残留応力の影響によるものと考えられる。すべりが生じた時、ひずみは一時的に減少するものの再び荷重が加えられれば、荷重 - ひずみ関係は線形を保っている。これは、ここで行った試験の範囲内では一般部に降伏が生じないことを示している。

## 2-6-5 荷重 - ひずみ関係(ボルト外)

### (1) シリーズ I 試験体

荷重と Plate1 外側の円孔を含む断面のこば面でのひずみとの関係の例を図 2-15(a)～(d)に示す。なお、ここで示すひずみは左右のこば面で測定したひずみの平均値である。他の試験体の結果については、付録に示している。

図 2-15(a)は、板厚 14mm で母板 Plate1 の円孔径を 30.5mm、添接板の円孔径を 24.5mm とした継手試験体(type5-1)の結果を示したものである。荷重 200kN 程度まで、荷重 - ひずみの関係はほぼ線形となっており、その後徐々に非線形の程度が大きくなり、母板に塑性変形が生じている。先に述べたように母板のこば面には引張残留応力が生じているため、どの荷重で母板が全断面降伏したかをここでのひずみからだけで判断することは難しい。そのため、ここでは除荷ひずみが 2000 $\mu$  となった時の荷重で全断面降伏が生じたかと仮定した。すなわち、この荷重を降伏耐力と定義した。荷重が増すにしたがって、ひずみはさらに大きくなり、荷重が約 300kN の時点でひずみが約 8000 $\mu$  となっている。このとき、すべりが生じ、荷重が 120kN 程度まで減少している。その後、ひずみは荷重 250kN 程度まで弾性挙動を示し、その後再び塑性変形が生じている。平滑鋼材で引張試験を行うと、荷重を下げた後の荷重 - ひずみ関係は、元の荷重まで弾性挙動を示すことが知られている。しかし、ここでの関係はこれと異なり、元の荷重よりも 50kN 程度小さい荷重から塑性変形挙動を示すことは注目に値する。これが、降伏がすべりに対して先行する継手の典型的な荷重 - ひずみ関係である。

図 2-15(b)は、板厚 25mm でボルト孔を母板・添接板とも 26.5mm とした継手(type2-1)の荷重 - ひずみ関係を示している。この試験体では荷重が 370kN となった時に Plate1 側のすべりが生じている。この図では、判断しにくいものの、すべりに伴う荷重減少のために、ひずみも減少している。この時点では、荷重 - ひずみ関係がほぼ直線であり、ひずみは弾性挙動を示している。また、すべり後の荷重 - ひずみ関係も、荷重 400kN 程度までは線形を保っている。その後、塑性ひずみが生じ、母板が降伏している。これが、すべり先行型の典型的な荷重 - ひずみ関係である。

図 2-15(b)に板厚 16mm で標準孔を有する継手(type1-2)で測定した荷重 - ひずみ関係を示す。この継手では荷重 370kN 程度ですべりが生じ、すべり後は 330 kN 程度で 2500 $\mu$  程度のひずみが生じている。また、すべり荷重と等しい 370kN に再び荷重を上昇させた時のひずみは 7500 $\mu$  となっている。また、すべり発生前にも荷重 - ひずみ関係の傾きが異なっている部分が認められる。このように、すべりと降伏のどちらが先に生じたか判断しにくい場合もあった。

### (2) シリーズ II 試験体

荷重と Plate 1 外側の円孔を含む断面のこば面でのひずみとの関係の例を図 2-16(a)～(d)に示す。なお、ここで示すひずみは左右のこば面で測定したひずみの平均値である。また、降伏を判断する 0.2% 耐力線と母板の有効断面積を総断面積・純断面積で考えた時の荷重-ひずみ関係も示した。この総断面積と純断面積の荷重-ひずみ関係を示す事により、その位置での添接板の荷重分担がある程度推定できる。他の試験体の

結果については、付録に示している。

図 2-16(a)は、板厚 16mm で円孔径 24.5mm の標準孔を有する継手試験体(Type1-3)の荷重-ひずみの関係を示したものである。荷重 460kN 程度まで、荷重-ひずみ関係はほぼ線形となっている。その後、母板に降伏が生じている。荷重が増すにしたがって、ひずみはさらに大きくなり、荷重が 510kN 程度ですべりが生じ、荷重が 400kN 程度まで減少している。これが、降伏がすべりに対して先行する、降伏先行型の典型的な荷重-ひずみ関係である。また、弾性域での荷重 - ひずみ関係の傾きは、純断面を想定して計算した傾きよりも大きくなっている。このことは、この位置での見かけ上の断面積が添接板との摩擦により母板総断面積以上となっていることを意味している。この傾向はすべての試験体で同じであった。

図 2-16(d)は、板厚 25mm で円孔径 26.5mm の拡大孔を有する継手試験体(Type2-3)の荷重-ひずみ関係を示したものである。この試験体では荷重が 580kN となった時に Plate1 側のすべりが生じている。このすべりにより、荷重とひずみはともに減少している。この時点では、荷重-ひずみ関係はほぼ直線であり、ひずみは弾性挙動を示している。また、すべり後の荷重-ひずみ関係も荷重 600kN 程度までは線形を保っている。その後塑性ひずみが生じ、母板が降伏している。これがすべり先行型の典型的な荷重-ひずみ関係である。

#### 2-6-6 すべり荷重と降伏荷重

すべり荷重と降伏荷重は以下のように定義した。継手部が滑った時に大きな音が発生し荷重が下がる挙動をすべりと判断し、その時の試験機の最大荷重をすべり荷重と定義する。降伏荷重については、Plate1 側のボルト外側（母板こぼ面）での荷重-ひずみ関係グラフに 0.2%ひずみの点から曲線の初期勾配で平行線を引き曲線と交わった点を降伏荷重と定義した。

##### (1) シリーズⅠ試験体

表 2.7 に引張試験で得られたすべり荷重と降伏荷重を示す。なお、板厚 14mm の Type1 ~ Type4 の試験体については、データ管理に問題が生じたため、降伏荷重は示していない。表には、すべり先行(○)、降伏先行(●)、すべり・降伏同時(▲)と分類した。降伏耐力は母板の降伏応力から求めた計算値である。設計上のすべり/降伏耐力比  $\beta \approx 1.0$  となる板厚 16mm の継手では、両側面のひずみゲージで降伏とすべりがほぼ同時に生じることが多く、すべり先行と降伏先行の判別が困難であった。板厚 14mm の継手は降伏先行、板厚 20mm と板厚 25mm の継手では、すべり先行であった。

##### (2) シリーズⅡ試験体

表 2.8 に引張試験で得られたすべり荷重と降伏荷重を示す。表中には、各鋼材の降伏応力(ミルシート値)と孔を控除した純断面積から求められる降伏耐力の計算値を示している。表にはすべり先行型(○：白塗り)、降伏先行型(●：黒塗り)、すべり・降伏同時型(▲：三角黒塗り)と分類した。降伏荷重は、先述のように 0.2%除荷ひずみに対応する位置の荷重と定義しているが、この点の前で明らかにすべりが生じれ

ばすべり先行型、この線の後方で明らかに降伏が生じれば降伏先行型と分類した。板厚 16mm の試験体については降伏先行型、板厚 25mm の試験体についてはすべり先行型と判別が出来た。設計上のすべり／降伏耐力比  $\beta \approx 1.0$  の板厚 19mm と 22mm は判断が困難なものとするべり先行型の二つに分かれるが、両側面のひずみゲージで降伏とすべりがほぼ同時生じることが多く、判断が困難であった。

#### 2-6-7 添接板の荷重 - ひずみ関係 (シリーズII 試験体)

図 2-17(a)~(d)は荷重と添接板の側面で測定したひずみとの関係の例を示したものである。図中の●印は、継手の中心に最も近い円孔を有する断面(内側)、■印は継手中心から最も遠い円孔を有する断面(外側)の添接板こぼ面のひずみ測定結果を示している。これらの2つの円孔の間の円孔を含む断面の添接板こぼ面でのひずみ測定結果を示したのが□印である。なお、ここで示すひずみの値は左右のこぼ面で測定したひずみの平均値である。他の試験体の結果については、付録に示している。

図 2-17(a)(b)は、板厚 16mm で円孔径 28.5mm の拡大孔を有する継手試験体(Type3-3)の Plate1 側添接板における荷重-ひずみ関係を示したものである。荷重が 450kN あたりまでは線形的な挙動を示しているが、この試験体の降伏荷重にあたる 457kN になると添接板の外側・中側のひずみが減少しているのがわかる。これは、母板の3孔外側こぼ面において降伏が始まり、板厚減少が生じたことで、添接板と母板の接触圧が低くなり、添接板の応力分担が減少してひずみも減少したと考えられる。3孔内側は母板が降伏した時にもひずみが減少せずにそのまま線形を保っている。これが降伏先行型の典型的な添接板の荷重-ひずみ関係である。

図 2-17(c)(d)は、板厚 25mm で円孔径 24.5mm の継手試験体(Type1-3)の Plate1 側添接板における荷重-ひずみ関係を示したものである。すべり荷重である 570kN までは3孔外側・中側・内側ともに線形的な挙動を示している。すべりが生じたときは、多少のひずみの減少が見られるが再び荷重を加えていくと、再び添接板のひずみは弾性挙動を示しているのがわかる。その後、降伏荷重である 630kN 付近に来ると3孔中側・外側のひずみはあまり変化せずに弾性挙動を示し続けているとみられるが、内側のひずみだけが大きく上昇し始めている。これがすべり先行型の典型的な添接板の荷重-ひずみ関係である。降伏先行型の場合、降伏時は添接板のひずみが減少したのに対し、すべり先行型では母板降伏時にその挙動がみられない。これは、すべり先行型の継手の降伏時には、すべりによってボルトと母板の円孔壁面とがぶつかり支圧状態になっているため、ひずみがあまり減少せずに荷重とともに増加していると考えられる。

#### 2-6-8 母板円孔側面での荷重 - ひずみ関係 (シリーズII 試験体)

図 2-18(a)~(d)は、荷重と母板の円孔を有する断面の側面で測定したひずみの関係の例を示したものである。図中の●印は、継手の中心に最も近い円孔を有する断面(内側)、■印は継手中心から最も遠い円孔を有する断面(外側)の母板こぼ面のひずみ測定結果を示している。これらの2つの円孔の間の円孔を含む断面の母板こぼ面でのひずみ測定結果を示したのが□印である。なお、ここで示すひずみの値は左右のこぼ面で測定

したひずみの平均値である。他の試験体の結果については、付録に示している。

図 2-18(a)は、板厚 16mm で円孔径 28.5mm の拡大孔を有する継手試験体(Type3-3)の母板における荷重-ひずみ関係を示したものである。荷重ひずみ関係の勾配は内側のボルト断面の側面で最も高く、内側で低い。これは、添接板の荷重分担によるものである。いずれの位置においても、荷重が 450kN あたりまでは荷重-ひずみ関係が線形的な挙動を示している。この試験体の降伏荷重にあたる 457kN になると、外側ボルト位置でのひずみが急増し、それに伴い内側と中間のボルト断面側面のひずみも増加している。これは、母板が降伏したことにより板厚が減少し、添接板と母板との接触圧が低くなり添接板の応力分担が小さくなったためと考えられる。このように母板の降伏により母板の応力は上昇し始め、添接板への応力は小さくなっていく挙動が多く見られた。これが、降伏先行型の典型的な母板の荷重-ひずみ関係である。

図 2-18(d)は、板厚 25mm で円孔径 24.5mm の継手試験体(Type1-3)の Plate1 側母板における荷重ひずみ関係を示したものである。荷重が 570kN あたりですべりが生じているが、母板 3 孔断面の側面のひずみは多少減るものの弾性域であるため大きな変化はみられない。その後、外側の断面で降伏が始まりひずみが増しているのがわかる。また、内側と中側の断面では、降伏時になってもひずみは線形を保っている。これが、すべり先行型の典型的な母板の荷重-ひずみ関係である。

#### 2-6-9 試験終了後の試験体

試験後、ボルト継手を解体し、母板の表面状況を観察した。それらのいくつかの例を写真 2.3(a)～(d)に示す。試験後の試験体には、すべり時の摩擦による傷が円孔周辺にだけ見られた。これは、ボルト軸力がボルト孔周辺の圧縮力の原因となり、摩擦抵抗は主としてこの部分で行われていたことを示していると考えられる。

#### 2-7 すべり耐力に対する拡大孔の影響

すべり耐力の検討を、すべり係数を用いて行う。すべり係数とは、ボルト継手のすべり荷重と総設計軸力  $\times$  摩擦面数 (2) の比と定義されている。

図 2-19(a)-(c)にシリーズ I 試験体のすべり係数とボルト孔径の関係を示す。これらは、母板、添接板とも同じ径の円孔を有する試験体の結果である。図(a)はすべり先行型、図(b)は同時型、(c)は降伏先行型の継手の結果を示している。すべり先行型、同時型、降伏先行型の継手とも、孔径によるすべり係数の顕著な変化は認められない。しやがって、28.5mm までの拡大孔を用いてもすべり係数に特に問題は生じないと言える。すべり先行型の継手については、道路橋示方書で規定されているすべり係数 0.4 を満たしている。同時型についても同様であるが、降伏先行型の継手では、多くの試験結果が 0.4 以下となっている。これは、降伏による板厚減によりボルト軸力が低下したためと考えられる。なお、継手の機能から考えて、降伏後の継手にすべり耐力を期待することはない。

シリーズ II 試験体について、すべり係数とボルト孔径の関係を示したのが図 2-20(a)～(c)である。すべり・降伏同時型の継手で、ボルト孔径が大きくなるにしたがってす

べり耐力が若干低くなるような傾向が認められるものの、そのような傾向はすべり先行型の継手では見られない。

図 2-21 は、添接板のボルト孔径は 24.5mm で一定として、母板のボルト孔径のみ 28.5mm、30.5mm と大きくしたシリーズ I 試験体のすべり係数と母板ボルト孔径の関係を示したものである。すべり先行型、同時型、降伏先行型、いずれの継手においてもすべり係数に対する母板ボルト孔径の影響は認められない。

図 2-22 は、シリーズ II の試験体を用いた試験から、孔ずれあるいはボルトずれがすべり係数に及ぼす影響を検討した結果を示している。図(a)では、ボルト孔径 28.5mm で、母板と添接板のボルト孔を一致された type3 の継手のすべり係数の平均値と孔をずらした type5 の継手のすべり係数を母板の板厚ごとに比較している。母板厚 16mm と 19mm の継手で、孔ずれがある場合に、若干すべり係数が大きいになっているものの、板厚 22mm と 25mm の継手では、そのような傾向は認められない。図(b)は、母板厚 25mm の継手について、孔ずれとボルトずれがすべり係数に及ぼす影響を調べる目的で、type3 の継手のすべり係数を type4、type5、type6 の継手のすべり係数を比較したものである。すべり係数は、試験体のタイプによらず、ほぼ一定となっている。

以上のように、すべり係数に対する拡大孔や、それに伴う穴ずれ・ボルトずれの影響は考慮する必要はないと考えられる。

## 2-8 降伏耐力に対する拡大孔の影響

シリーズ I の試験体、シリーズ II の試験体の降伏耐力(降伏荷重)とボルト孔径の関係を、それぞれ図 2-23、図 2-24 に示す。これらは、母板、添接板とも同じ径の円孔を有する試験体の結果を示している。なお、シリーズ I ・母板厚 14mm の試験体については、多くの場合に降伏耐力を求めることができなかつたため、その結果を図 2-23 では示していない。これらの図では、母板厚ごとに試験結果を示しているが、多くの場合にボルト孔径が大きくなるにしたがって、降伏耐力が低下する傾向が認められる。

図 2-25(a)~(c)にシリーズ I の試験体について、降伏耐力比とボルト孔径の関係を整理した結果を示す。降伏耐力比とは、継手の降伏耐力を母板の降伏応力に純断面積を乗じて求めた降伏耐力で無次元化した値である。本年 3 月に改訂出版された道路橋示方書では、純断面積を 10% 増しして、降伏耐力の照査を行ってもよいと規定されたが、降伏耐力比が 1.1 であれば、この規定の裏づけとなる。図(a)はすべり先行型、図(b)は同時型、図(c)は降伏先行型の継手の結果を示している。降伏先行型と同時型の継手では、降伏耐力比が 1~1.2 とばらついているものの、その平均は約 1.1 であり、新道路橋示方書の規定は妥当と言える。また、降伏耐力比に対するボルト孔径の影響は認められない。図(c)に示すすべり先行型の継手でも、降伏耐力比に対するボルト孔径の影響は認められないものの、その値はほぼ 1 となっている。このことは、摩擦による添接板の力の分担が行われていないことを意味している。

図 2-26(a)~(c)は、シリーズ II の試験体について、図 2-25 と同様の整理を行ったものである。降伏先行型、同時型、すべり先行型、いずれの継手においても、降伏耐力比に対するボルト孔径の影響は認められない。このことは、ボルト孔径に応じて降伏耐力が変化することを意味している。図(a)に示す降伏先行型、図(b)に示す同時型の継

手での降伏耐力比は、シリーズ I の継手と同様にほぼ 1.1 となっている。図(c)に示すすべり先行型の継手においては、図(a)、(b)に比べてばらつきが大きくなっているものの、シリーズ I の継手とは異なり、1 よりも大きくなっている。3 例ボルトと 2 列ボルト継手の違い、あるいは材質 (SM490Y と SM400) の違いのいずれによって、このような差が生じたかは不明であるが、シリーズ II の継手においてすべり後のボルト軸力の低下がシリーズ I に比べて小さかったことが原因と考えられる。

図 2-27(a)~(c)は、添接板のボルト孔径は 24.5mm で一定として、母板のボルト孔径のみ 28.5mm、30.5mm と大きくしたシリーズ I 試験体の降伏耐力比と母板ボルト孔径の関係を示したものである。すべり先行型、同時型、降伏先行型で、特に一定の傾向は認められないが、拡大孔を用いることで、降伏耐力比が減少するような傾向は認められない。

図 2-28 は、シリーズ II の試験体を用いた試験から、孔ずれあるいはボルトずれが降伏耐力比に及ぼす影響を検討した結果を示している。図(a)では、ボルト孔径 28.5mm で、母板と添接板のボルト孔を一致された type3 継手の降伏耐力比の平均値と孔をずらした type5 の継手の降伏耐力比を母板の板厚ごとに比較している。母板厚 25mm の継手で、孔ずれがある場合に、若干降伏耐力比が低くなっているものの、板厚 16mm、19mm と 22mm の継手では、そのような傾向は認められない。図(b)は、母板厚 25mm の継手について、孔ずれとボルトずれが降伏耐力比に及ぼす影響を調べる目的で、type3 の継手の降伏耐力比を type4、type5、type6 の継手のすべり係数を比較したものである。降伏耐力比は、試験体のタイプによらず、ほぼ一定となっている。

以上のように、降伏耐力に対する拡大孔の影響は、母板の純幅を用いることで考慮でき、また降伏耐力に対する穴ずれ・ボルトずれの影響は考慮する必要はないと考えられる。

表 2.1 供試鋼材の機械的性質と化学成分

試験体	板厚 (mm)	材質	機械的性質			化学成分(%)				
			降伏点	引張強さ	伸び	C	Si	Mn	P	S
			(N/mm <sup>2</sup> )		(%)	×100			×1000	
シリーズ I	14	SM400A	305	448	33	17	14	73	17	3
	16		301	450	28	16	16	73	17	8
	20		287	434	34	15	18	78	24	2
	25		288	430	35	14	18	79	12	4
シリーズ II	9	SM490YA	463	566	23	13	30	137	19	6
	10		382	551	25	17	32	126	22	3
	12		457	573	22	14	30	142	21	9
	13		463	556	24	13	30	134	13	8
	16	431	569	23	18	38	127	13	1	
	19	SM490YB	427	546	47	13	30	139	18	4
	22		389	539	27	16	45	146	16	4
	25		381	537	26	17	35	129	20	5

表 2.2 (a) 設計上のすべり・降伏耐力比 (シリーズ I)

母板板厚 (mm)	添接板板厚 (mm)	type	板幅 (mm)	純断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏応力 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏耐力 (kN)	すべり/降 伏耐力比β	βの平均
14	8	1	90	917	305	279685	1.1493	1.2096
		2		889		271145	1.1855	
		3		861		262605	1.224	
		4		861		262605	1.224	
		5		833		254065	1.2652	
16	9	1	90	1048	301	315448	1.019	1.0725
		2		1016		305816	1.0511	
		3		984		296184	1.0853	
		4		984		296184	1.0853	
		5		952		286552	1.1218	
20	12	1	90	1310	287	375970	0.855	0.8998
		2		1270		364490	0.8819	
		3		1230		353010	0.9106	
		4		1230		353010	0.9106	
		5		1190		341530	0.9412	
25	14	1	90	1637.5	288	471600	0.6816	0.7174
		2		1587.5		457200	0.7031	
		3		1537.5		442800	0.7259	
		4		1537.5		442800	0.7259	
		5		1487.5		428400	0.7503	

すべり耐力: 321440N (摩擦係数: 0.4)

表 2.2 (b) 設計上のすべり・降伏耐力比 (シリーズII)

母板板厚 (mm)	添接板板厚 (mm)	type	板幅 (mm)	純断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏応力 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏耐力 (kN)	すべり/降 伏耐力比 $\beta$	$\beta$ の平均
16	9	1	90	1048	431	451688	1.0685	1.1117
		2		1016		437896	1.1022	
		3		984		424104	1.138	
		5		984		424104	1.138	
19	10	1	90	1244.5	427	531401.5	0.9082	0.9449
		2		1206.5		515175.5	0.9368	
		3		1168.5		498949.5	0.9673	
		5		1168.5		498949.5	0.9673	
22	12	1	90	1441	389	560549	0.861	0.8958
		2		1397		543433	0.8881	
		3		1353		526317	0.917	
		5		1353		526317	0.917	
25	13	1	90	1637.5	381	623887.5	0.7736	0.8112
		2		1587.5		604837.5	0.798	
		3		1537.5		585787.5	0.8239	
		4		1537.5		585787.5	0.8239	
		5		1537.5		585787.5	0.8239	
		6		1537.5		585787.5	0.8239	

すべり耐力: 482640N (摩擦係数:0.4)

表 2.3 試験体の種類 (シリーズII)

母板厚 (mm)	添接板厚 (mm)	Type1	Type2	Type3	Type4	Type5	Type6
		24.5 $\phi$	26.5 $\phi$	28.5 $\phi$	28.5 $\phi$	28.5 $\phi$	28.5 $\phi$
16	9	3	3	3	ボルトすれ	3	逆孔すれ
19	10	3	3	3		3	
22	12	3	3	3		3	
25	13	4(※1)	4(※1)	4(※1)	4(※1)	4(※1)	4(※1)

表 2.4 摩擦係数測定結果

試験体		摩擦係数( $\mu$ )									3体の平均
		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	平均	
シリーズ I	1体目	0.5167	0.4330	0.4402	0.4623	0.4455	0.4265	0.4645	0.4194	0.4510	0.4607
	2体目	0.4977	0.4648	0.4245	0.4175	0.4597	0.4323	0.4656	0.4260	0.4485	
	3体目	0.4439	0.4554	0.5024	0.4709	0.5226	0.5265	0.4478	0.4913	0.4826	
シリーズ II	1体目	0.5696	0.5614	0.6237	0.5431	0.5844	0.6129	0.5491	0.5860	0.5788	0.58437
	2体目	0.6789	0.6348	0.4655	0.6152	0.6427	0.6063	0.5183	0.4905	0.5815	
	3体目	0.6098	0.6522	0.5246	0.4892	0.5681	0.6433	0.5989	0.6565	0.5928	

表 2.5 試験時のボルトのリラクセーション (シリーズ I)

板厚 (mm)	試験体	位置	初期導入軸力(kN) (試験体製作時)	初期導入軸力(kN) (試験開始時)	減少率(%)
14	type1-1	外側	241.89	235.38	2.69
		内側	247.21	241.65	2.25
	type1-2	外側	241.65	234.74	2.86
		内側	242.69	241.10	0.65
	type1-3	外側	243.56	234.18	3.85
		内側	239.98	233.55	2.68
	type2-1	外側	239.90	235.61	1.79
		内側	245.47	240.70	1.94
	type2-2	外側	245.15	241.33	1.56
		内側	242.21	237.84	1.80
	type2-3	外側	246.98	244.12	1.16
		内側	245.70	241.02	1.91
	type3-1	外側	241.73	240.14	0.66
		内側	247.21	239.98	2.92
	type3-2	外側	244.67	238.24	2.63
		内側	242.69	236.41	2.59
	type3-3	外側	238.79	236.17	1.10
		内側	252.14	247.37	1.89
	type4-1	外側	238.95	236.33	1.10
		内側	247.21	243.88	1.35
	type4-2	外側	244.51	239.11	2.21
		内側	244.27	239.27	2.05
	type4-3	外側	240.38	233.95	2.68
		内側	239.27	232.60	2.79
	type5-1	外側	242.29	240.14	0.89
		内側	241.97	239.51	1.02
	type5-2	外側	243.88	237.44	2.64
		内側	242.76	240.86	0.79
type5-3	外側	245.31	241.33	1.62	
	内側	232.52	231.72	0.34	
16	type1-1	外側	261.98	254.40	2.89
		内側	260.55	248.59	4.59
	type1-2	外側	261.65	255.67	2.29
		内側	255.33	247.24	3.17
	type1-3	外側	254.40	251.37	1.19
		内側	249.94	243.03	2.76
	type2-1	外側	245.30	244.21	0.45
		内側	252.63	251.96	0.27
	type2-2	外側	258.95	258.11	0.33
		内側	259.29	257.86	0.55
	type2-3	外側	254.91	254.32	0.23
		内側	258.02	257.69	0.13
	type3-1	外側	256.17	231.07	9.80
		内側	252.46	249.68	1.10
	type3-2	外側	255.41	252.04	1.32
		内側	253.39	249.18	1.66
	type3-3	外側	256.76	255.67	0.43
		内側	253.90	253.73	0.07
	type4-1	外側	254.32	253.81	0.20
		内側	263.92	263.84	0.03
	type4-2	外側	259.29	256.34	1.14
		内側	255.24	254.99	0.10
	type4-3	外側	252.97	252.46	0.20
		内側	251.03	249.09	0.77
	type5-1	外側	257.52	255.58	0.75
		内側	249.09	248.34	0.30
	type5-2	外側	260.80	257.43	1.29
		内側	251.28	245.05	2.48
type5-3	外側	253.39	247.66	2.26	
	内側	267.71	262.66	1.89	

板厚 (mm)	試験体	位置	初期導入軸力(kN) (試験体製作時)	初期導入軸力(kN) (試験開始時)	減少率(%)
20	type1-1	外側	231.14	231.14	0.00
		内側	231.14	231.14	0.00
	type1-2	外側	231.14	231.14	0.00
		内側	231.14	231.14	0.00
	type1-3	外側	231.14	231.14	0.00
		内側	231.14	231.14	0.00
	type2-1	外側	233.57	220.52	5.59
		内側	224.77	215.28	4.22
	type2-2	外側	221.35	227.05	2.57
		内側	277.91	224.92	2.15
	type2-3	外側	248.23	232.06	1.89
		内側	185.29	228.79	1.95
	type3-1	外側	236.08	226.51	4.05
		内側	228.11	223.40	2.06
	type3-2	外側	228.87	226.89	0.86
		内側	232.28	228.64	1.57
	type3-3	外側	234.33	232.44	0.81
		内側	234.79	234.11	0.29
	type4-1	外側	236.61	236.46	0.06
		内側	242.99	241.47	0.62
	type4-2	外側	238.58	236.00	1.08
		内側	240.94	233.80	2.96
	type4-3	外側	236.69	234.94	0.74
		内側	237.60	233.57	1.69
type5-1	外側	236.08	232.89	1.35	
	内側	238.58	233.80	2.00	
type5-2	外側	237.45	232.06	2.27	
	内側	240.33	237.29	1.26	
type5-3	外側	252.86	252.48	0.15	
	内側	244.20	241.32	1.18	
25	type1-1	外側	245.55	236.29	3.77
		内側	227.49	225.78	0.75
	type1-2	外側	239.63	224.07	6.49
		内側	237.53	231.54	2.52
	type1-3	外側	239.56	232.09	3.12
		内側	234.42	228.27	2.62
	type2-1	外側	239.09	234.11	2.08
		内側	237.77	233.02	2.00
	type2-2	外側	237.61	231.31	2.65
		内側	240.80	235.98	2.00
	type2-3	外側	237.92	234.19	1.57
		内側	234.58	228.97	2.39
	type3-1	外側	241.42	240.49	0.39
		内側	240.96	239.25	0.71
	type3-2	外側	247.03	243.37	1.48
		内側	242.36	240.65	0.71
	type3-3	外側	242.90	240.80	0.87
		内側	241.74	238.86	1.19
	type4-1	外側	240.49	235.28	2.17
		内側	233.33	229.60	1.60
	type4-2	外側	243.06	240.02	1.25
		内側	236.13	230.76	2.27
	type4-3	外側	240.26	237.07	1.33
		内側	238.47	233.64	2.02
type5-1	外側	239.01	234.42	1.92	
	内側	236.37	231.23	2.17	
type5-2	外側	239.01	234.50	1.89	
	内側	239.71	237.14	1.07	
type5-3	外側	244.46	241.58	1.18	
	内側	235.20	234.97	0.10	
	総平均		243.33	239.26	1.60

表 2.6 試験時のボルトのリラクセーション (シリーズⅡ)

板厚 (mm)	試験体	位置	初期導入軸力(kN) (試験体製作時)	初期導入軸力(kN) (試験開始時)	減少率(%)
16	type1-1	内側	224.84	220.15	2.08
		中側	225.66	224.51	0.51
		外側	226.73	226.08	0.29
	type1-2	内側	236.44	234.79	0.70
		中側	228.38	226.73	0.72
		外側	232.08	229.78	0.99
	type1-3	内側	226.82	255.84	-12.80
		中側	222.38	252.72	-13.65
		外側	223.94	249.43	-11.38
	type2-1	内側	221.39	184.30	16.75
		中側	229.36	202.48	11.72
		外側	223.03	194.91	12.61
	type2-2	内側	231.26	207.24	10.38
		中側	226.16	202.80	10.33
		外側	229.28	200.75	12.44
	type2-3	内側	237.01	208.64	11.97
		中側	231.83	213.41	7.95
		外側	226.49	197.38	12.85
	type3-1	内側	225.25	224.43	0.37
		中側	232.49	232.08	0.18
		外側	233.07	232.16	0.39
	type3-2	内側	224.18	222.70	0.66
		中側	222.21	221.55	0.30
		外側	224.18	223.03	0.51
	type3-3	内側	226.32	224.92	0.62
		中側	227.56	228.62	-0.47
		外側	217.36	213.08	1.97
	type5-1	内側	231.26	226.98	1.85
		中側	225.34	218.59	2.99
		外側	225.25	219.66	2.48
type5-2	内側	229.04	221.06	3.48	
	中側	230.35	222.87	3.25	
	外側	227.56	222.13	2.39	
type5-3	内側	228.13	224.02	1.80	
	中側	220.81	189.89	14.0	
	外側	223.69	221.14	1.14	
19	type1-1	内側	242.88	239.29	1.48
		中側	225.40	220.13	2.34
		外側	235.70	231.39	1.83
	type1-2	内側	221.97	219.81	0.97
		中側	227.88	225.08	1.23
		外側	228.04	224.92	1.37
	type1-3	内側	230.35	227.56	1.21
		中側	241.93	240.65	0.53
		外側	228.60	226.36	0.98
	type2-1	内側	222.77	215.74	3.15
		中側	227.88	220.61	3.19
		外側	225.40	220.45	2.20
	type2-2	内側	223.41	213.91	4.25
		中側	225.80	220.13	2.51
		外側	230.67	225.64	2.18
	type2-3	内側	224.84	225.64	-0.36
		中側	213.27	212.39	0.41
		外側	227.48	225.40	0.91

板厚 (mm)	試験体	位置	初期導入軸力(kN) (試験体製作時)	初期導入軸力(kN) (試験開始時)	減少率(%)
19	type3-1	内側	227.56	224.60	1.30
		中側	223.65	222.21	0.64
		外側	216.62	208.00	3.98
	type3-2	内側	223.33	219.10	1.89
		中側	230.67	226.60	1.77
		外側	233.78	227.96	2.49
	type3-3	内側	221.17	215.34	2.63
		中側	225.64	221.33	1.91
		外側	230.75	224.44	2.73
	type5-1	内側	221.49	219.81	0.76
		中側	225.56	225.48	0.04
		外側	222.93	222.13	0.36
	type5-2	内側	226.04	225.08	0.42
		中側	228.04	227.24	0.35
		外側	234.98	222.93	5.13
	type5-3	内側	221.33	221.89	-0.25
		中側	222.05	221.33	0.32
		外側	216.14	216.86	-0.33
22	type1-1	内側	229.41	224.08	2.32
		中側	223.60	217.79	2.60
		外側	232.12	226.39	2.47
	type1-2	内側	227.10	223.12	1.75
		中側	233.63	231.24	1.02
		外側	224.88	221.53	1.49
	type1-3	内側	231.72	226.23	2.37
		中側	230.13	226.71	1.49
		外側	223.92	221.69	0.99
	type2-1	内側	223.36	219.78	1.60
		中側	229.17	228.61	0.24
		外側	236.65	231.72	2.08
	type2-2	内側	224.24	232.19	-3.55
		中側	225.11	236.01	-4.84
		外側	221.29	229.49	-3.70
	type2-3	内側	229.89	241.27	-4.95
		中側	227.42	232.27	-2.13
		外側	222.73	233.79	-4.97
	type3-1	内側	225.27	223.76	0.67
		中側	225.11	218.99	2.72
		外側	227.50	225.59	0.84
	type3-2	内側	221.37	219.62	0.79
		中側	226.23	225.11	0.49
		外側	227.02	224.16	1.26
	type3-3	内側	226.78	218.67	3.58
		中側	232.83	228.93	1.67
		外側	228.22	223.60	2.02
type5-1	内側	221.37	215.88	2.48	
	中側	223.20	219.78	1.53	
	外側	221.77	215.88	2.65	
type5-2	内側	225.67	220.18	2.43	
	中側	380.90	376.60	1.13	
	外側	222.81	217.40	2.43	
type5-3	内側	226.71	225.67	0.46	
	中側	228.61	229.17	-0.24	
		外側	225.35	223.92	0.64

板厚 (mm)	試験体	位置	初期導入軸力 (kN) (試験体製作時)	初期導入軸力 (kN) (試験開始時)	減少率 (%)
25	type1-1	内側	222.17	225.09	-1.31
		中側	234.78	226.90	3.36
		外側	235.09	244.94	-4.19
	type1-2	内側	223.12	221.31	0.81
		中側	225.48	223.59	0.84
		外側	225.48	225.24	0.10
	type1-3	内側	222.64	208.70	6.26
		中側	224.38	279.76	-24.7
		外側	223.59	221.54	0.92
	type2-1	内側	228.16	221.46	2.94
		中側	222.64	223.20	-0.25
		外側	225.17	221.86	1.47
	type2-2	内側	226.27	222.57	1.64
		中側	241.79	237.30	1.86
		外側	224.06	220.28	1.69
	type2-3	内側	223.98	220.68	1.48
		中側	221.78	217.29	2.02
		外側	226.19	219.18	3.10
	type3-1	内側	222.09	207.91	6.39
		中側	223.04	206.10	7.59
		外側	221.78	204.60	7.74
	type3-2	内側	229.42	228.71	0.31
		中側	223.91	217.68	2.78
		外側	222.57	216.03	2.94
	type3-3	内側	225.72	205.23	9.08
		中側	224.06	218.78	2.36
		外側	227.69	223.83	1.70
	type4-1	内側	222.41	219.26	1.42
		中側	221.46	214.21	3.27
		外側	224.61	218.63	2.67
	type4-2	内側	224.30	234.15	-4.39
		中側	223.67	222.41	0.56
		外側	225.17	218.39	3.01
	type4-3	内側	232.26	229.50	1.19
		中側	228.55	180.57	21.0
		外側	223.67	221.38	1.02
	type5-1	内側	225.88	228.87	-1.33
		中側	224.22	225.88	-0.74
		外側	222.72	224.14	-0.64
	type5-2	内側	223.12	225.72	-1.17
		中側	221.78	225.01	-1.46
		外側	223.59	222.33	0.56
	type5-3	内側	223.12	219.57	1.59
		中側	223.98	217.68	2.81
		外側	224.38	221.38	1.33
	type6-1	内側	223.43	221.07	1.06
		中側	222.80	219.89	1.31
		外側	223.28	219.81	1.55
type6-2	内側	223.67	222.80	0.39	
	中側	223.59	222.09	0.67	
	外側	224.46	222.49	0.88	
type6-3	内側	225.40	223.04	1.05	
	中側	222.01	215.71	2.84	
	外側	226.90	220.75	2.71	

表 2.7 降伏荷重とすべり荷重  
(シリーズ I)

板厚 (mm)	試験体	分類	すべり荷重 (実験値)	降伏荷重 (実験値)	降伏耐力*
14	type1-1	●	297.73	-----	279.69
	type1-2	●	298.71	-----	
	type1-3	●	305.58	-----	
	type2-1	●	290.38	-----	
	type2-2	●	291.36	-----	
	271.15	type2-3	●	290.87	-----
		type3-1	●	290.87	-----
		type3-2	●	298.71	-----
		type3-3	●	295.77	-----
		type4-1	●	277.62	-----
	262.61	type4-2	●	281.55	-----
		type4-3	●	289.40	-----
		type5-1	●	284.98	268.19
		type5-2	●	290.38	263.01
		type5-3	●	293.32	253.86
16	type1-1	▲	369.84	325.73	315.45
	type1-2	▲	359.05	344.86	
	type1-3	●	315.88	320.40	
	type2-1	▲	355.12	327.85	
	type2-2	▲	356.10	329.15	
	305.82	type2-3	▲	361.01	361.01
		type3-1	●	361.01	359.69
		type3-2	●	352.18	350.55
		type3-3	▲	348.75	359.56
		type4-1	▲	363.95	363.95
	296.18	type4-2	▲	359.54	373.53
		type4-3	●	314.90	301.07
		type5-1	●	358.07	354.67
		type5-2	▲	346.29	354.63
		type5-3	●	364.44	369.11
20	type1-1	○	360.52	386.42	375.97
	type1-2	○	379.16	367.23	
	type1-3	○	370.82	368.37	
	type2-1	○	379.65	381.88	
	type2-2	▲	390.44	362.24	
	364.49	type2-3	○	367.38	373.49
		type3-1	○	361.50	362.91
		type3-2	○	382.59	371.96
		type3-3	○	371.31	369.33
		type4-1	○	361.50	374.74
	353.01	type4-2	○	371.80	360.56
		type4-3	○	372.29	368.74
		type5-1	○	353.65	327.18
		type5-2	▲	371.31	382.00
		type5-3	○	362.48	336.66
25	type1-1	○	500.80	457.09	471.60
	type1-2	○	420.36	472.23	
	type1-3	○	348.26	480.69	
	type2-1	○	368.37	448.75	
	type2-2	○	366.89	453.48	
	457.20	type2-3	○	380.63	471.96
		type3-1	○	382.10	443.26
		type3-2	○	392.40	437.94
		type3-3	○	386.51	428.48
		type4-1	○	413.98	447.94
	442.80	type4-2	○	395.83	425.85
		type4-3	○	373.76	427.23
		type5-1	○	386.02	430.99
		type5-2	○	390.44	408.86
		type5-3	○	408.59	432.52
428.40					

\* 降伏耐力 = 鋼材の降伏応力(ミルシート値) × 純断面積

表 2.8 降伏荷重とすべり荷重  
(シリーズ II)

板厚 (mm)	試験体	分類	すべり荷重 (実験値)	降伏荷重 (実験値)	降伏耐力*	
16	type1-1	●	525.28	506.80	451.69	
	type1-2	●	513.03	485.70		
	type1-3	●	509.11	493.40		
	type2-1	●	566.44	485.00		
	type2-2	●	523.81	481.20		
	437.90	type2-3	●	537.04	487.50	
		type3-1	●	468.44	451.30	
		type3-2	●	483.14	458.20	
		type3-3	●	529.20	465.70	
		type5-1	●	509.60	487.50	
	424.10	type5-2	●	505.68	485.00	
		type5-3	●	502.25	474.80	
		type1-1	▲	564.48	565.20	531.40
		type1-2	○	524.79	541.30	
		type1-3	▲	541.45	575.90	
type2-1	○	504.70	559.10			
type2-2	▲	529.69	584.10			
515.18	type2-3	○	514.50	561.70		
	type3-1	▲	517.93	545.80		
	type3-2	▲	514.01	525.60		
	type3-3	○	477.75	512.90		
	type5-1	○	512.54	561.20		
498.95	type5-2	○	516.95	563.70		
	type5-3	▲	543.41	551.00		
	type1-1	▲	589.96	605.70	560.55	
	type1-2	▲	571.83	617.70		
	type1-3	○	559.09	645.00		
type2-1	▲	561.54	584.00			
type2-2	○	539.49	608.00			
543.43	type2-3	○	544.39	596.00		
	type3-1	▲	547.82	576.80		
	type3-2	▲	538.02	581.00		
	type3-3	▲	532.14	573.20		
	type5-1	▲	545.86	586.60		
526.32	type5-2	○	533.61	543.30		
	type5-3	▲	548.80	601.80		
	type1-1	○	576.24	633.10	623.89	
	type1-2	○	576.73	648.80		
	type1-3	○	573.79	637.90		
type2-1	○	599.27	617.70			
type2-2	○	575.75	624.70			
604.84	type2-3	○	582.61	647.50		
	type3-1	○	534.10	665.90		
	type3-2	○	563.50	623.00		
	type3-3	○	559.58	612.00		
	type4-1	○	548.31	616.60		
585.79	type4-2	○	542.43	619.58		
	type4-3	○	526.26	617.10		
	type5-1	○	500.29	612.80		
	type5-2	○	558.60	628.90		
	type5-3	○	531.65	610.00		
587.79	type6-1	○	499.80	616.40		
	type6-2	○	560.56	610.30		
	type6-3	○	555.17	606.00		

\* 降伏耐力 = 鋼材の降伏応力(ミルシート値) × 純断面積



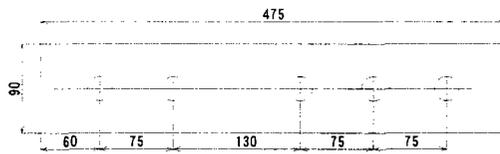
Plate1

板厚：t=14.0, 16.0, 20.0, 25.0  
 孔径：φ=24.5, 26.5, 28.5, 30.5  
 単位：mm



Plate2

板厚：t=14.0, 16.0, 20.0, 25.0  
 孔径：φ=24.5  
 単位：mm



添接板

板厚：t=8.0, 9.0, 12.0, 14.0  
 孔径：φ=24.5, 26.5, 28.5  
 30.5 (plate1 側)  
 φ=24.5 (Plate2 側)

図 2.1 (a) 試験体材片の形状・寸法 (シリーズ I)

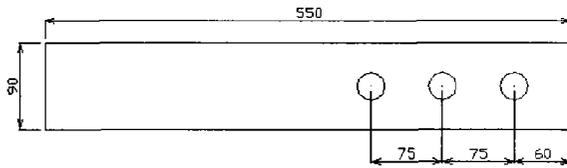


Plate1

板厚：t=16.0, 19.0, 22.0, 25.0  
 孔径：φ=24.5, 26.5, 28.5  
 単位：mm

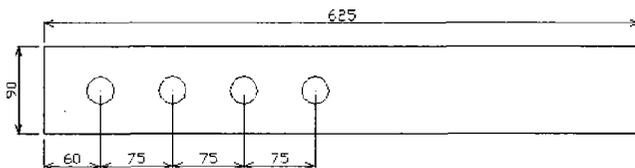
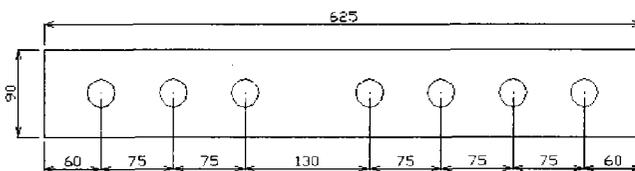


Plate2

板厚：t=16.0, 19.0, 22.0, 25.0  
 孔径：φ=24.5  
 単位：mm



添接板

板厚：t=9.0, 10.0, 12.0, 13.0  
 孔径：φ=24.5, 26.5, 28.5 (plate1 側)  
 φ=24.5 (Plate2 側)  
 単位：mm

図 2.1 (b) 試験体材片の形状・寸法 (シリーズ II)

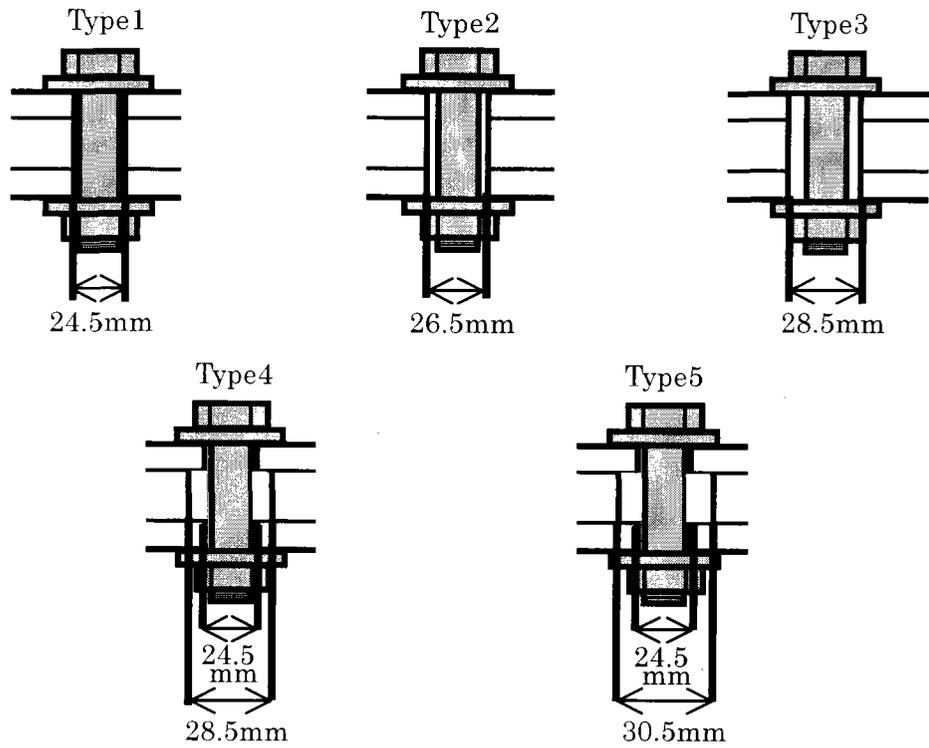


図 2.2 (a) ボルト孔の組合せ (シリーズ I)

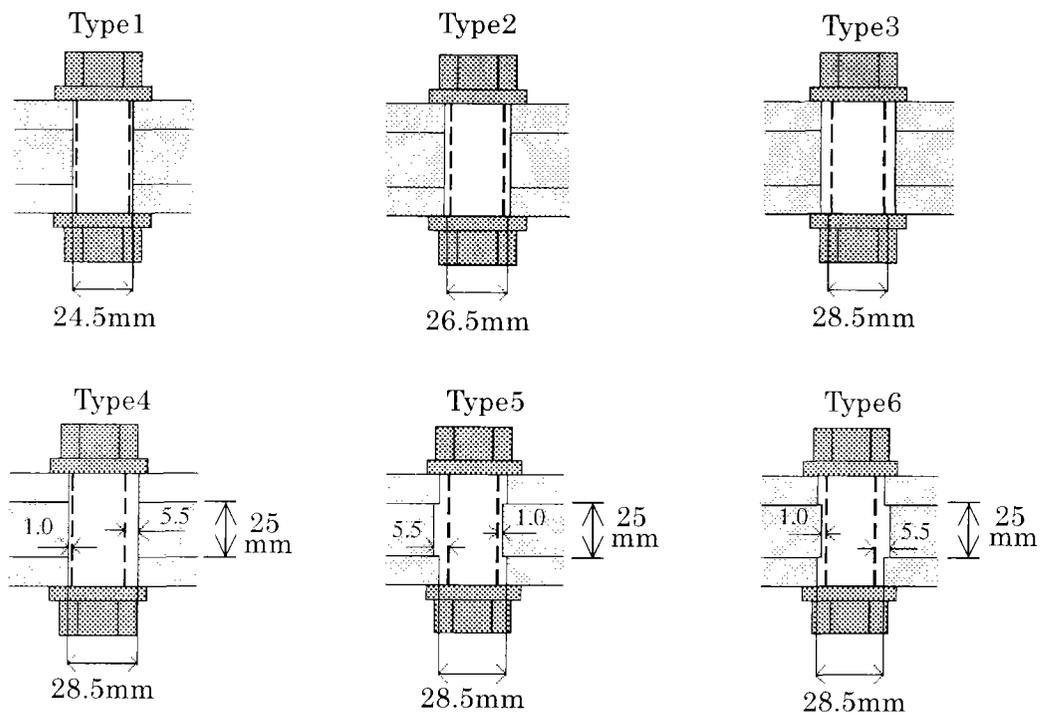


図 2.2 (b) ボルト孔の組合せ (シリーズ II)

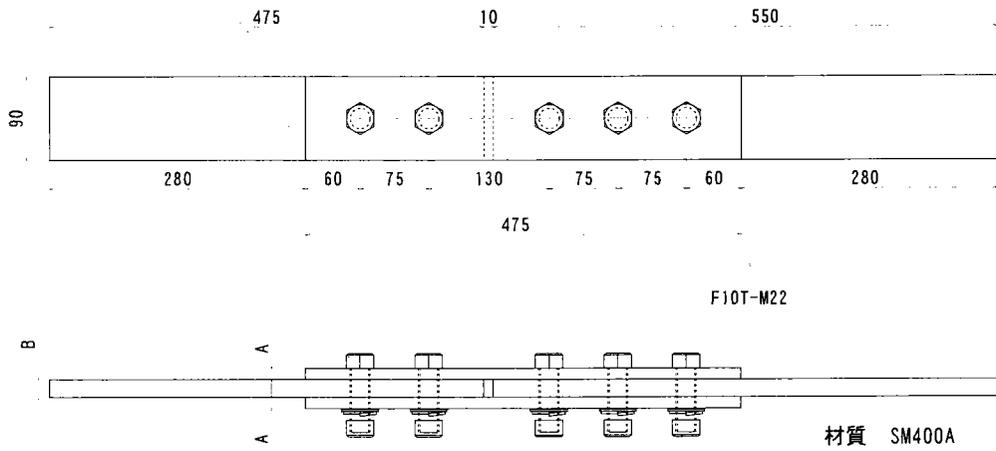


図 2.3(a) 試験体の形状・寸法 (シリーズ I)

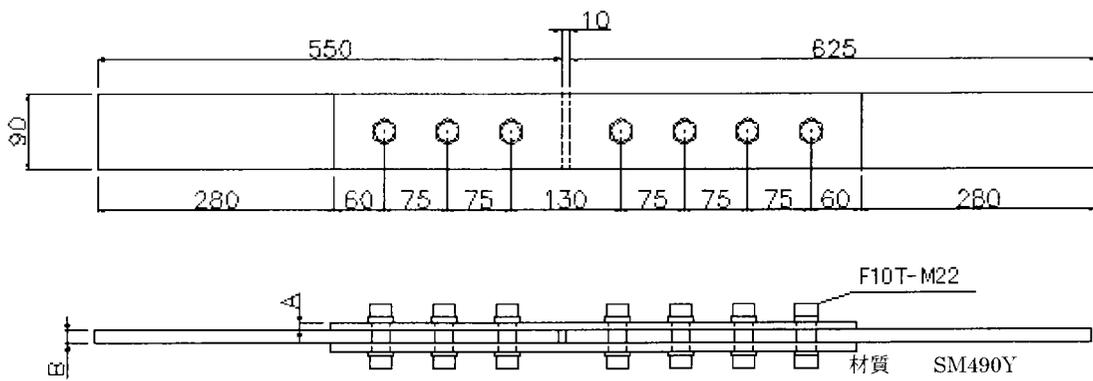
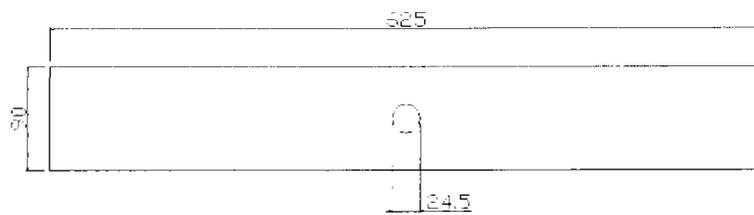


図 2.3(b) 試験体の形状・寸法 (シリーズ II)



板厚 :  $t=16.0, 25.0$

孔径 :  $\phi=24.5$

単位 : mm

図 2.4 残留応力、降伏耐力測定用試験体 (シリーズ II)

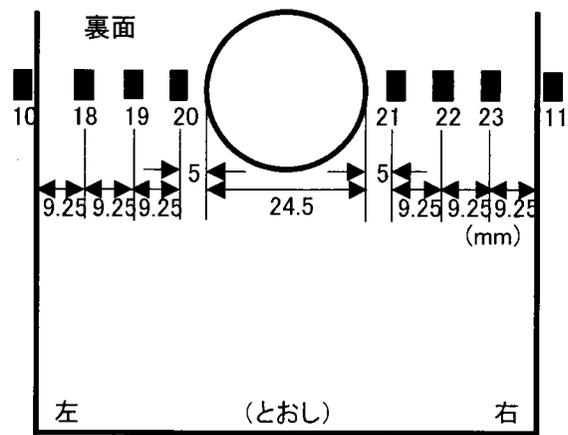
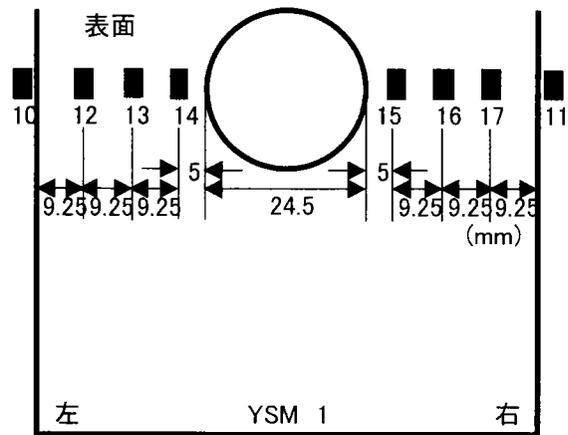


図 2.5 (a) 残留応力測定用ひずみゲージ添付位置 (シリーズ I)

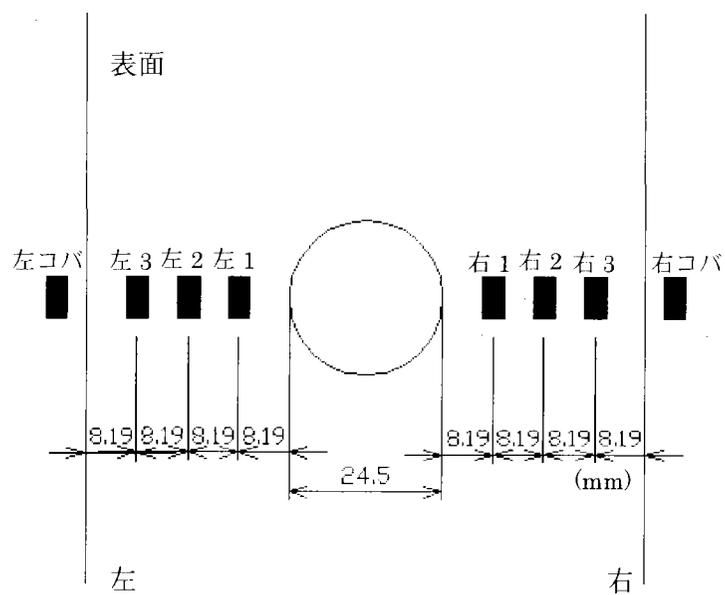


図 2.5 (b) 残留応力測定用ひずみゲージ添付位置 (シリーズ II)

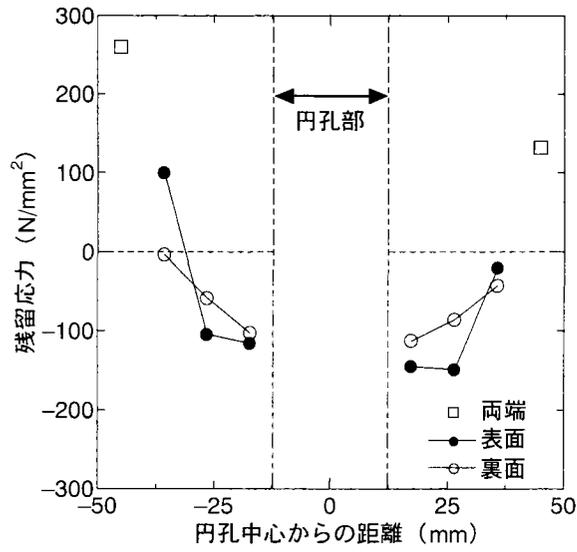


図 2.6 残留応力測定結果 (シリーズ I)

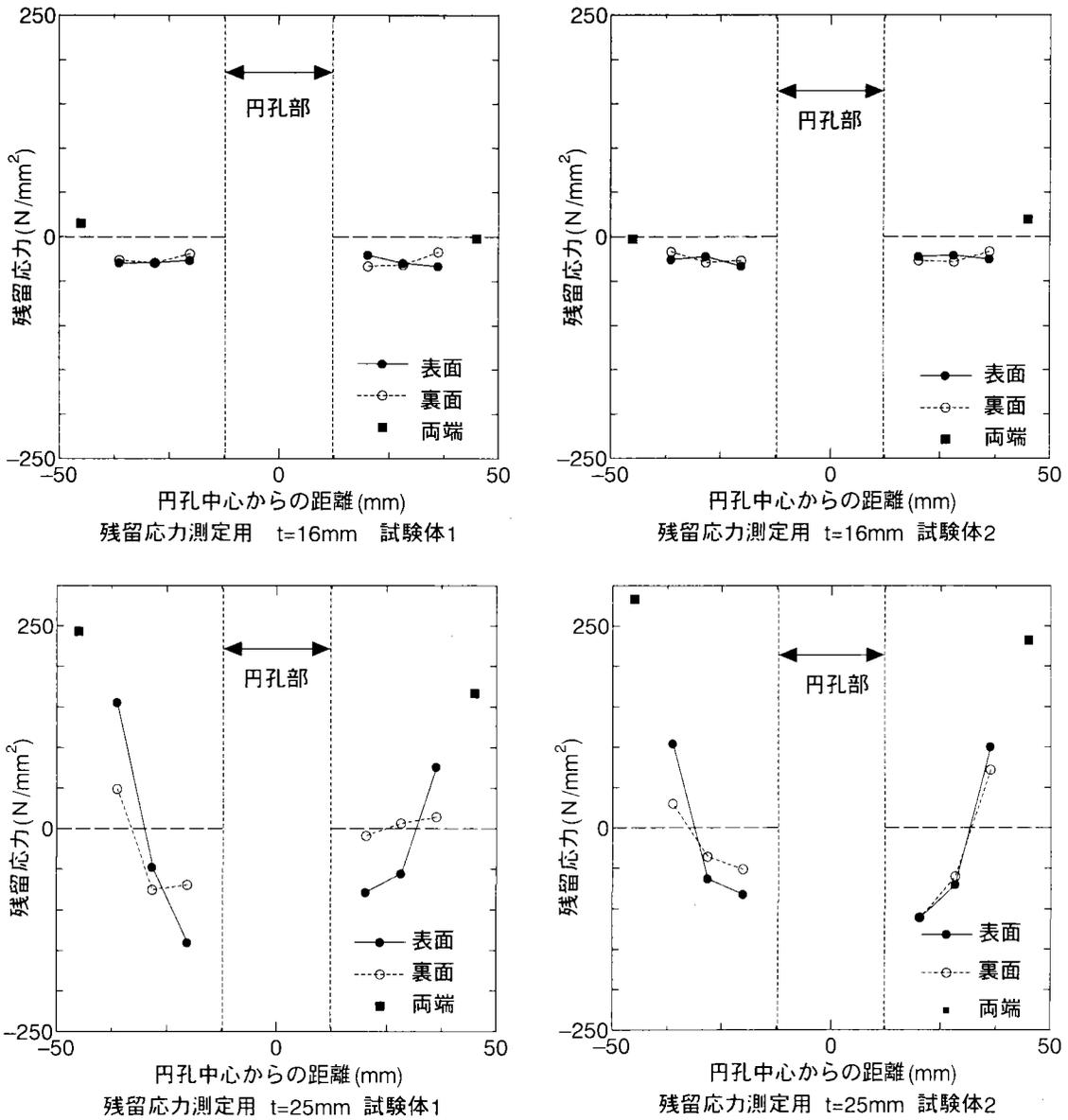
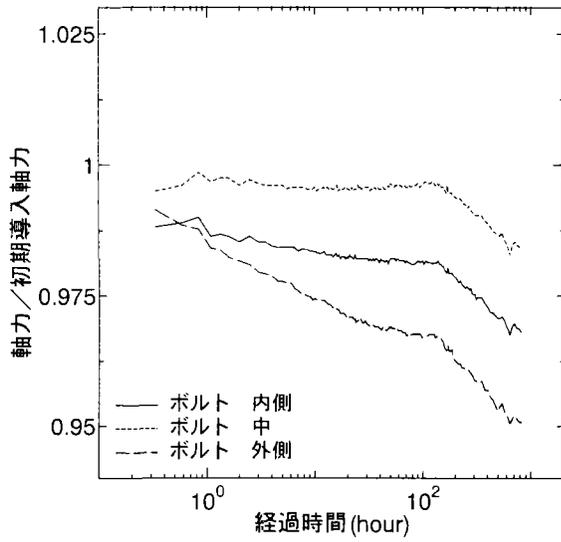
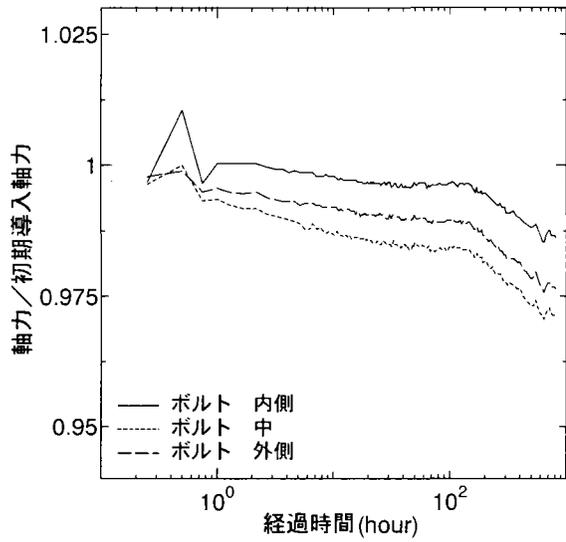


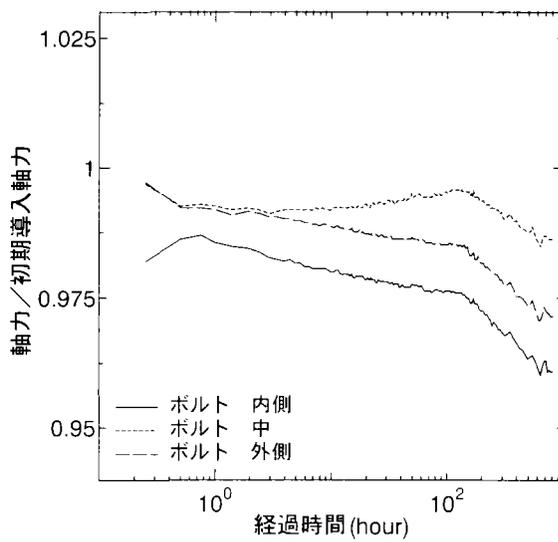
図 2.7 残留応力測定結果 (シリーズ II)



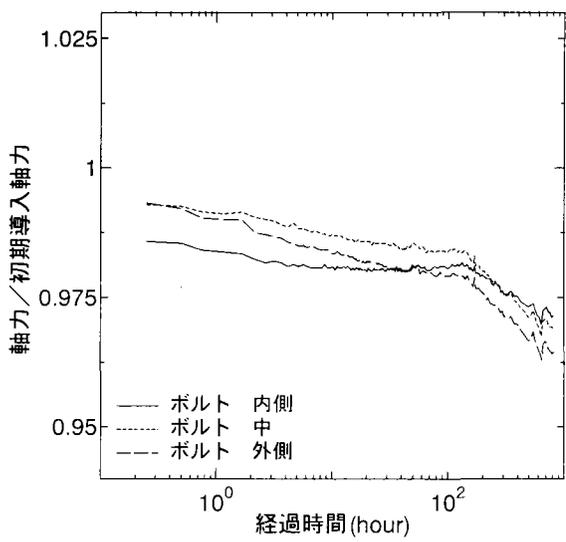
(a)板厚 25mm type1



(b)板厚 25mm type2



(c)板厚 25mm type3



(d)板厚 25mm type5

図 2.8 ボルトのリラクゼーション測定結果

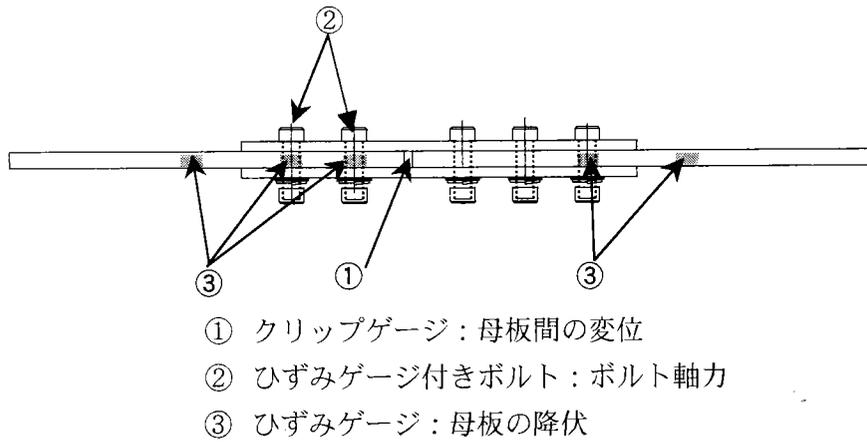


図 2.9 (a) ひずみゲージ添付位置 (シリーズ I)

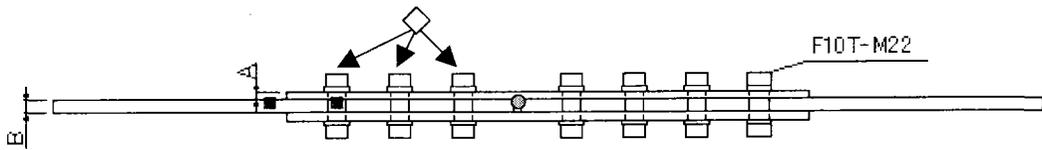
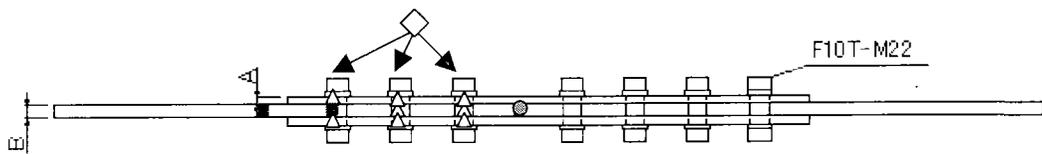
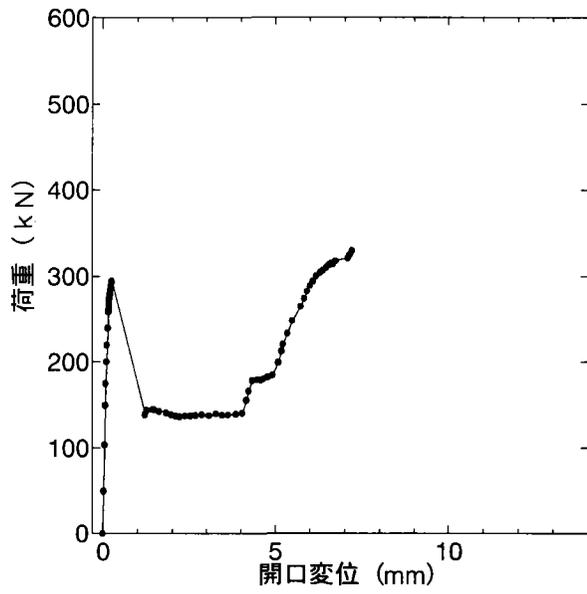


図 2.9(b) ひずみゲージ添付位置 (シリーズ II、その 1)

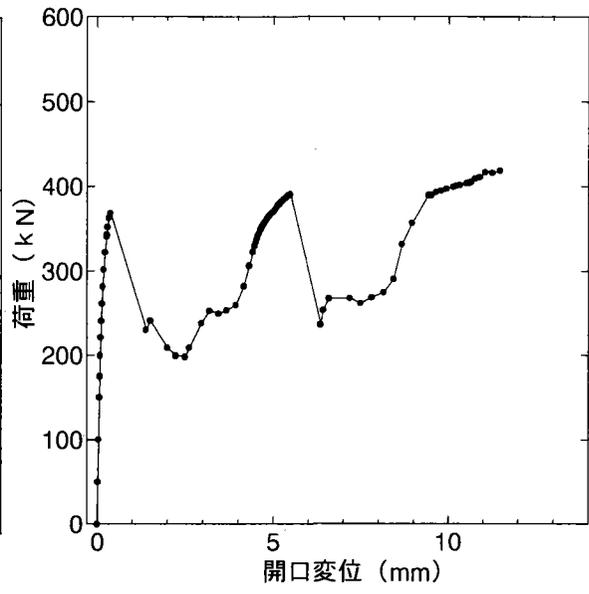


- クリップゲージ：母板間の変位
- ひずみゲージ付きボルト：ボルト軸力
- ひずみゲージ：母板の降伏
- + ひずみゲージ：添接板の荷重分担

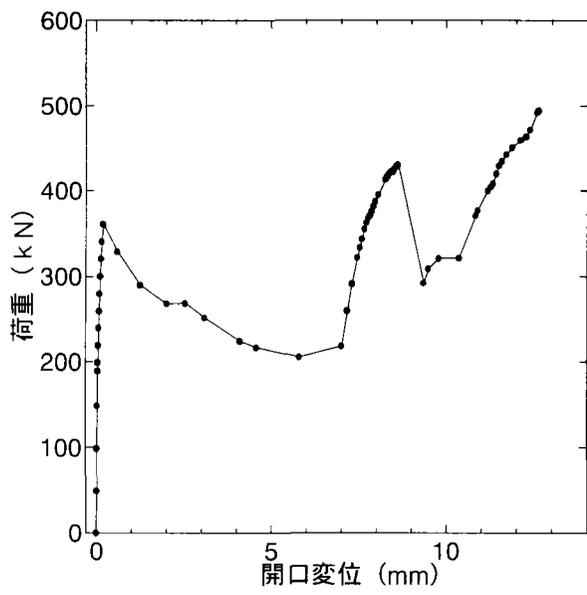
図 2.9 (c) ひずみゲージ添付位置 (シリーズ II、その 2)



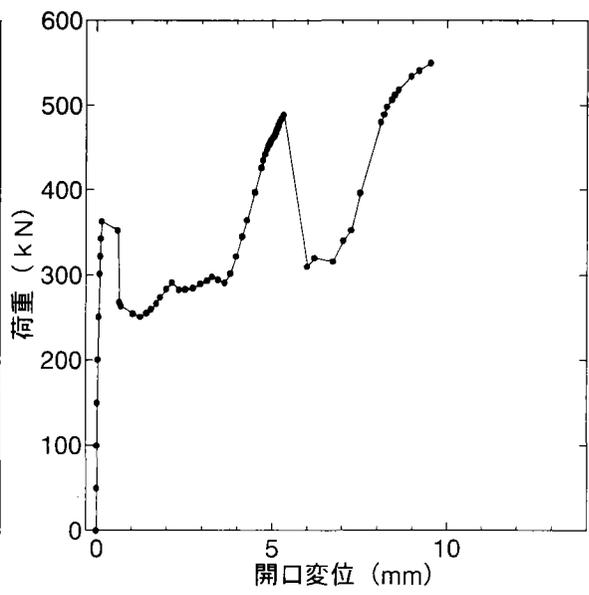
(a)板厚 14mm type5-2



(b)板厚 16mm type1-2

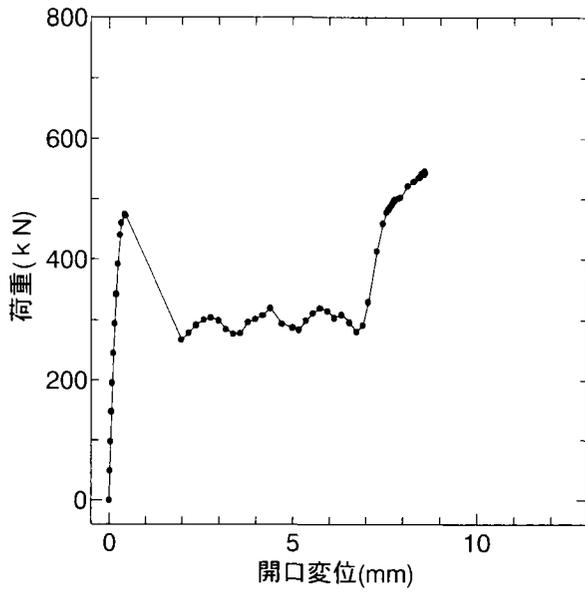


(c)板厚 20mm type3-1

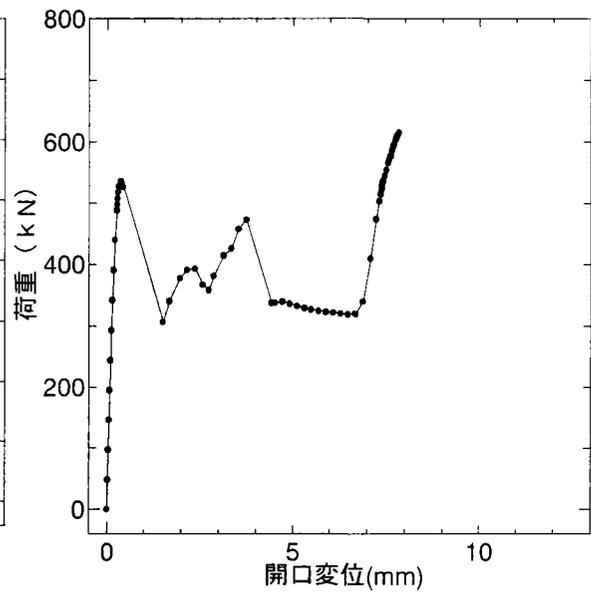


(d)板厚 25mm type2-2

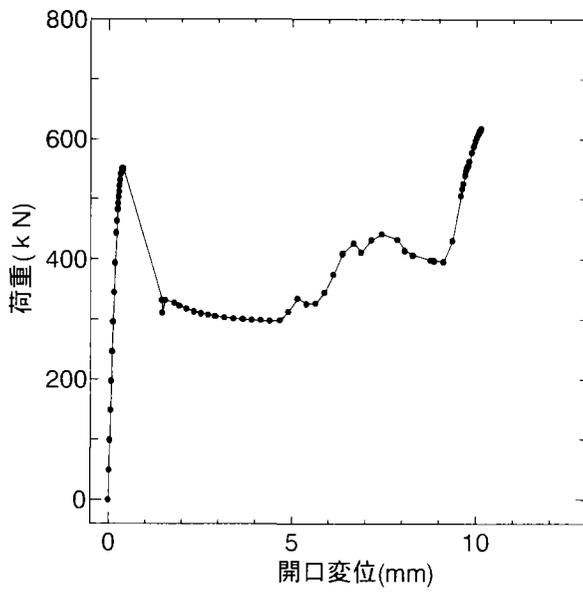
図 2.10 荷重－開口変位関係（シリーズ I）



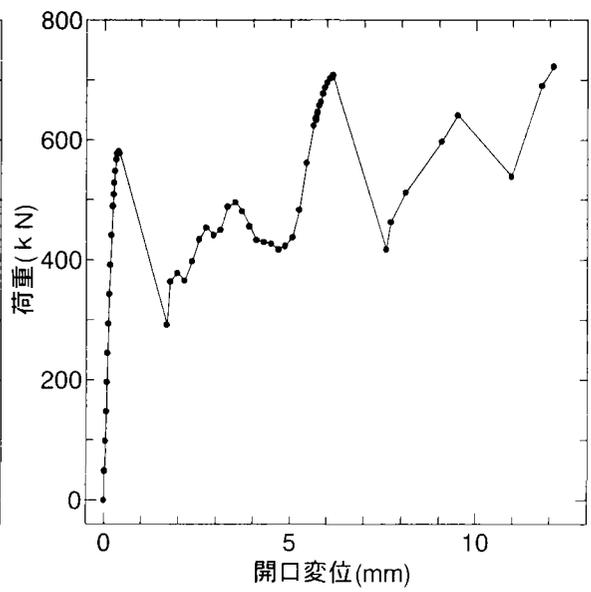
(a)板厚 19mm type3-3



(b)板厚 22mm type3-2

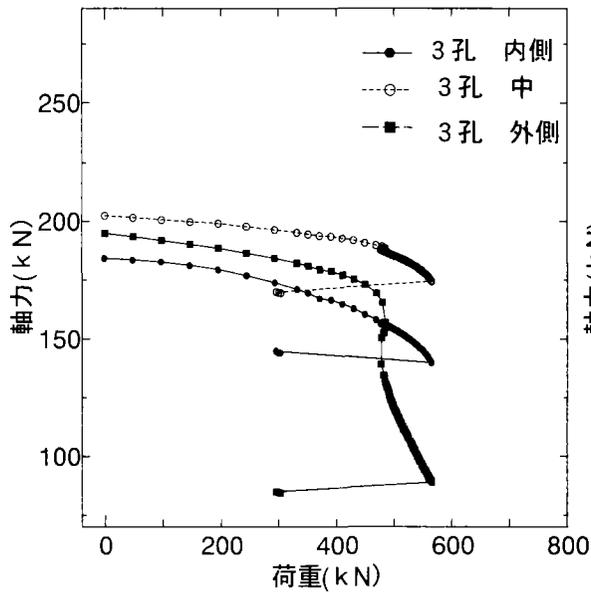


(c)板厚 22mm type5-3

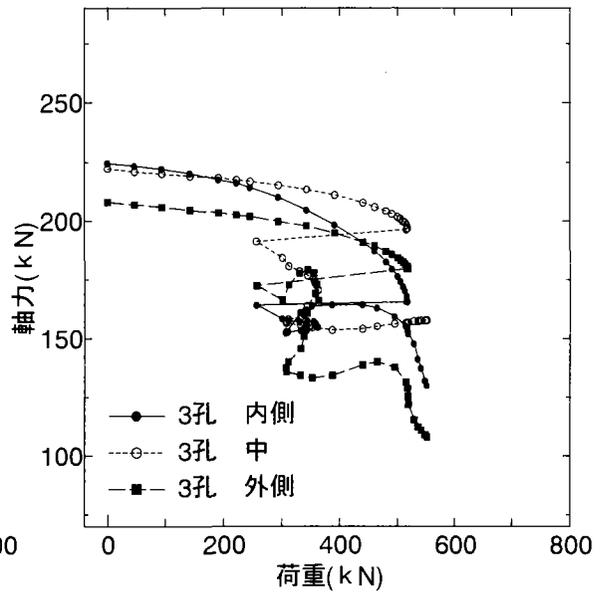


(d)板厚 25mm type2-3

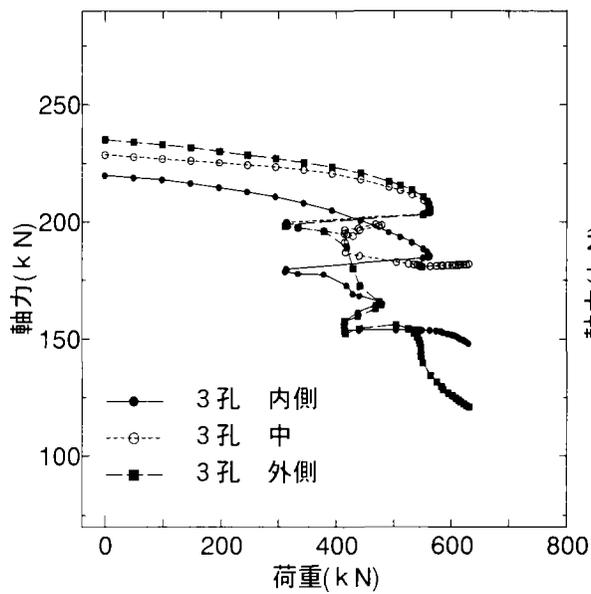
図 2.11 荷重-開口変位関係 (シリーズII)



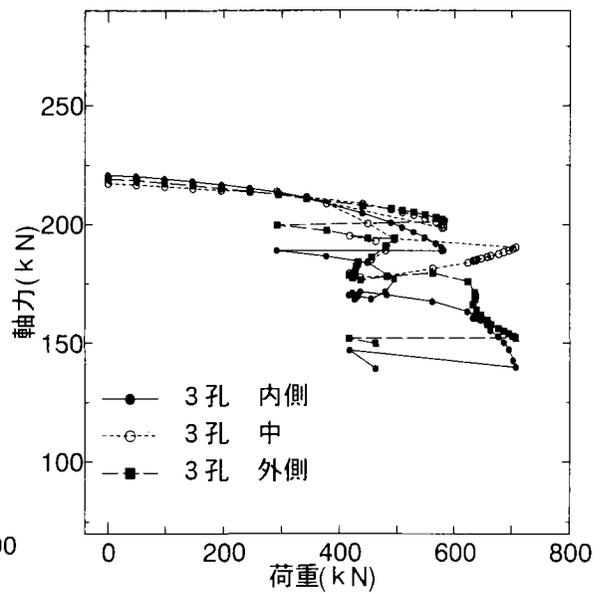
(a)板厚 16mm type2-1



(b)板厚 19mm type2-1

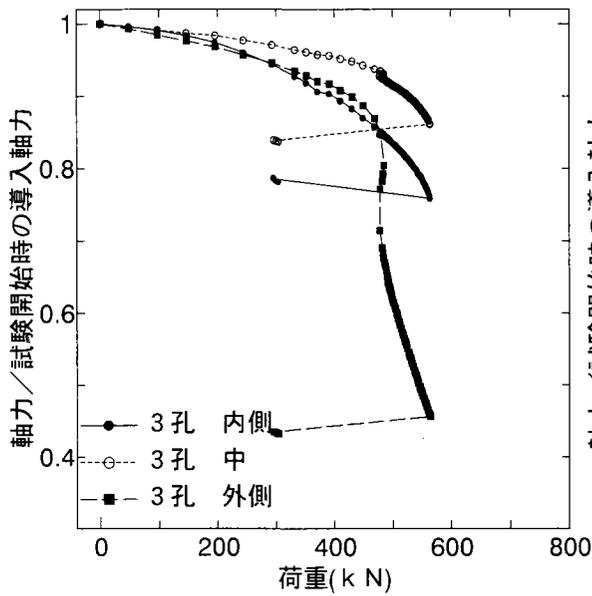


(c)板厚 22mm type2-1

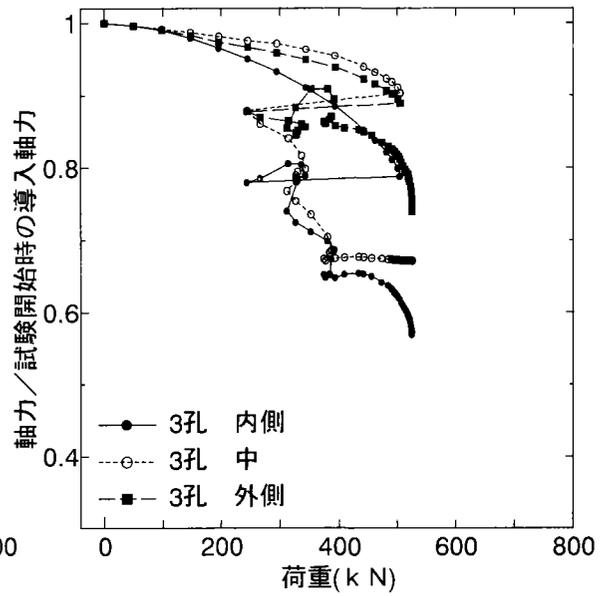


(d)板厚 25mm type2-3

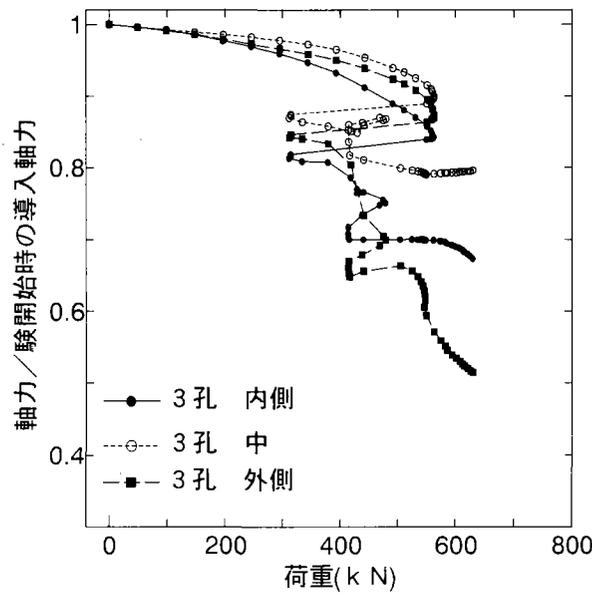
図 2.12 ボルト軸力—荷重関係 (シリーズII)



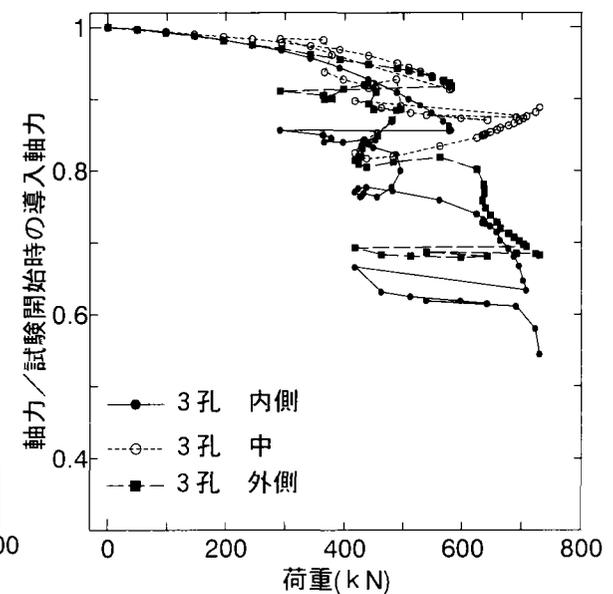
(a)板厚 16mm type2-1



(b)板厚 19mm type2-1

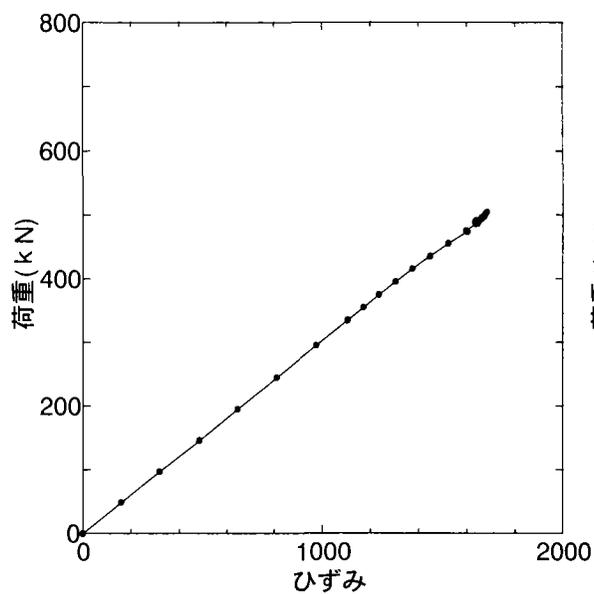


(c)板厚 22mm type2-1

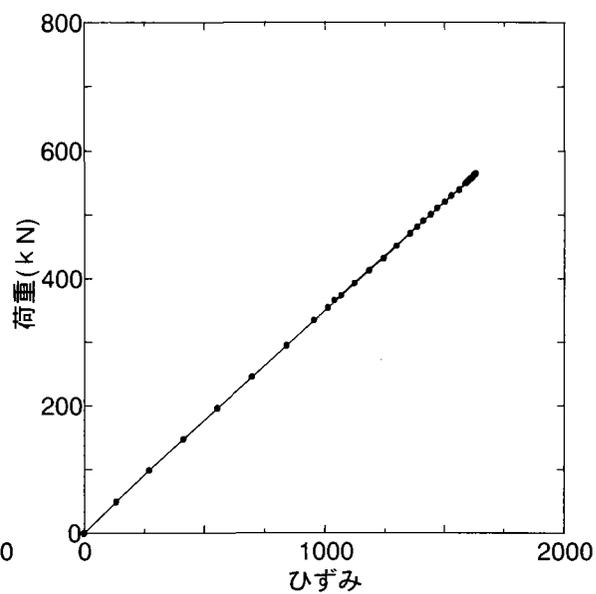


(d)板厚 25mm type2-3

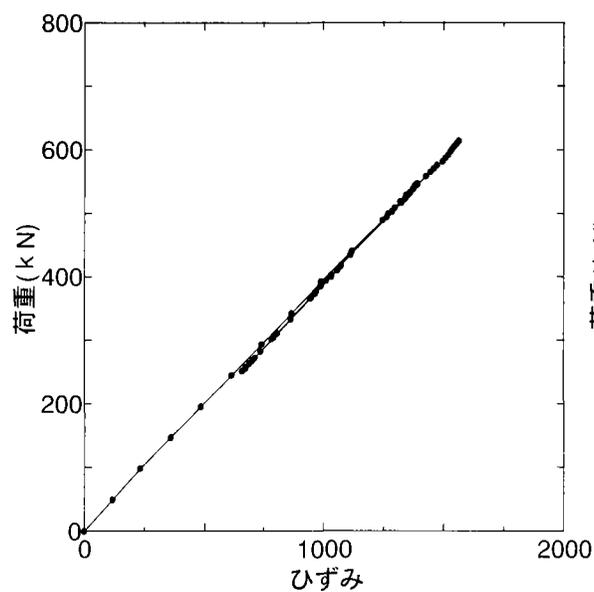
図 2.13 ボルト軸力比—荷重関係 (シリーズII)



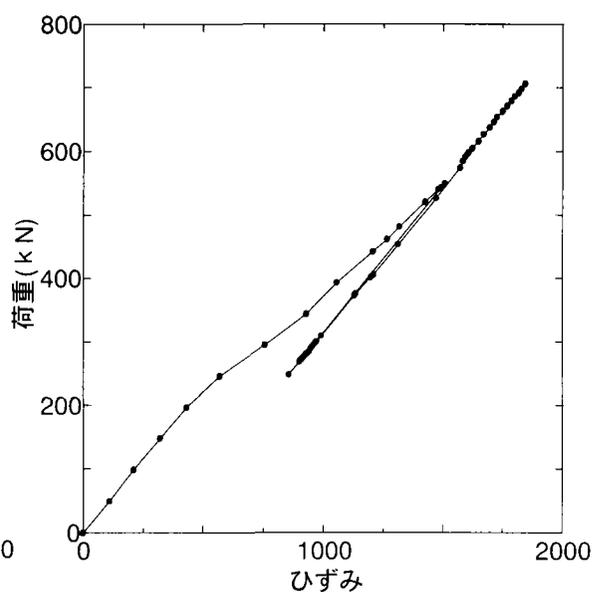
(a)板厚 16mm type1-3



(b)板厚 19mm type1-1

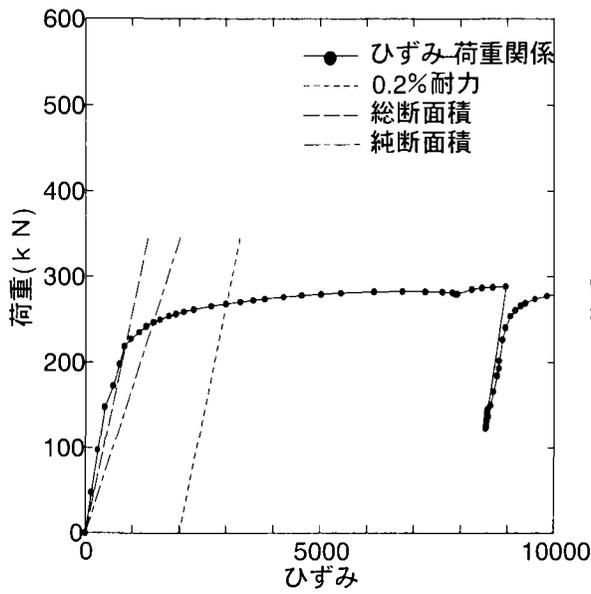


(c)板厚 22mm type3-1

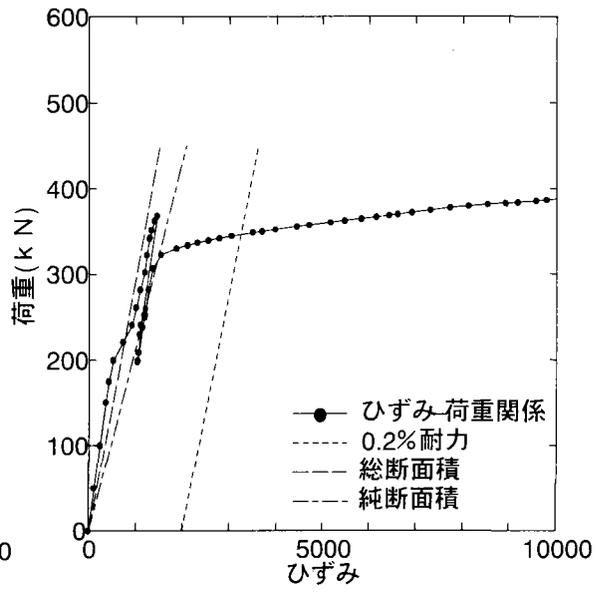


(d)板厚 25mm type4-1

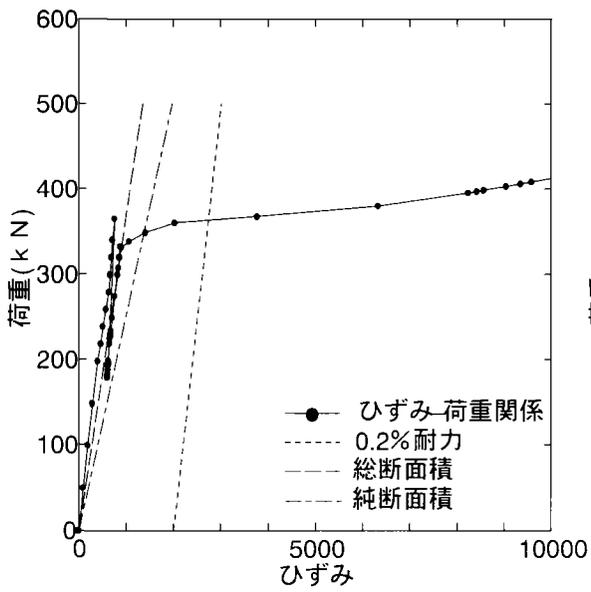
図 2.14 荷重—ひずみ関係 (シリーズII、一般部)



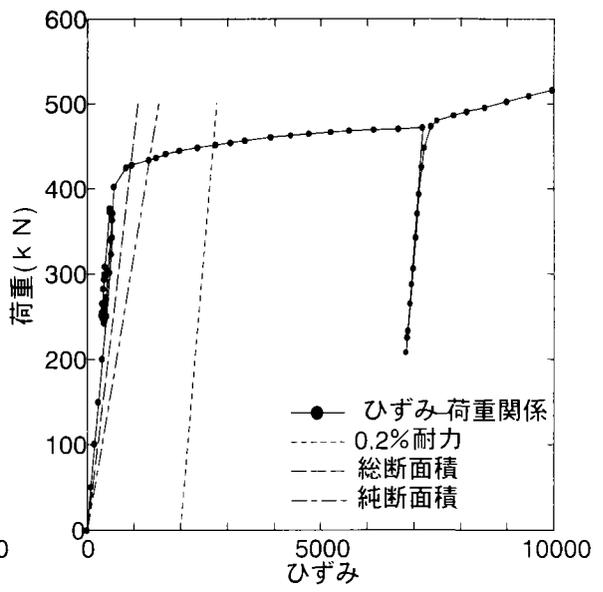
(a)板厚 14mm type5-1



(b)板厚 16mm type1-2

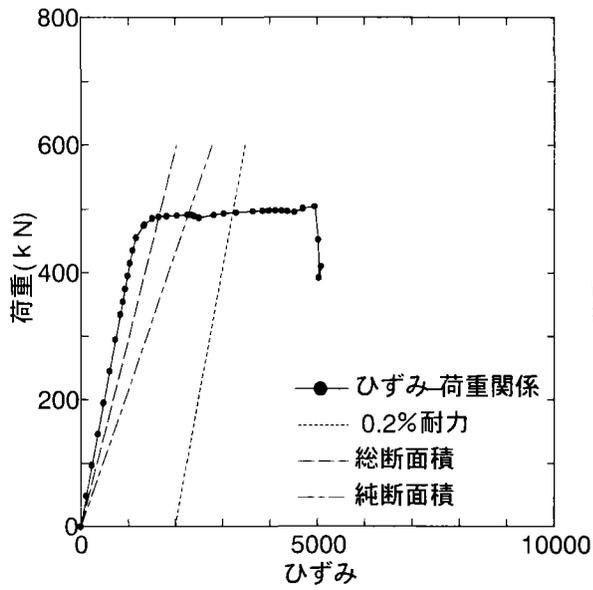


(c)板厚 20mm type4-2

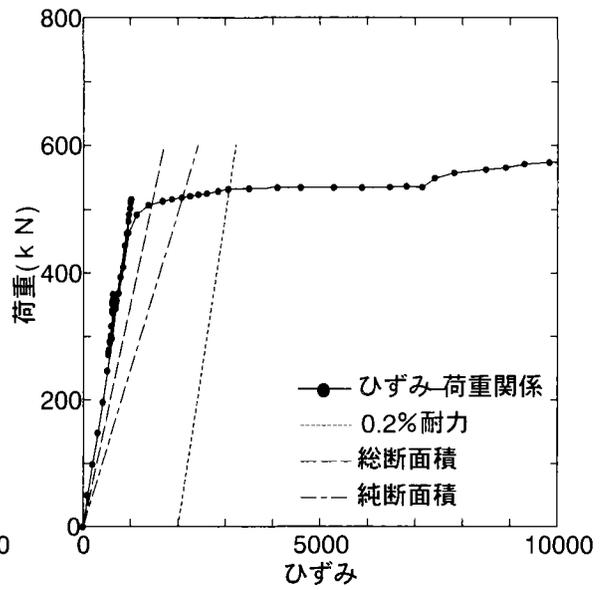


(d)板厚 25mm type2-1

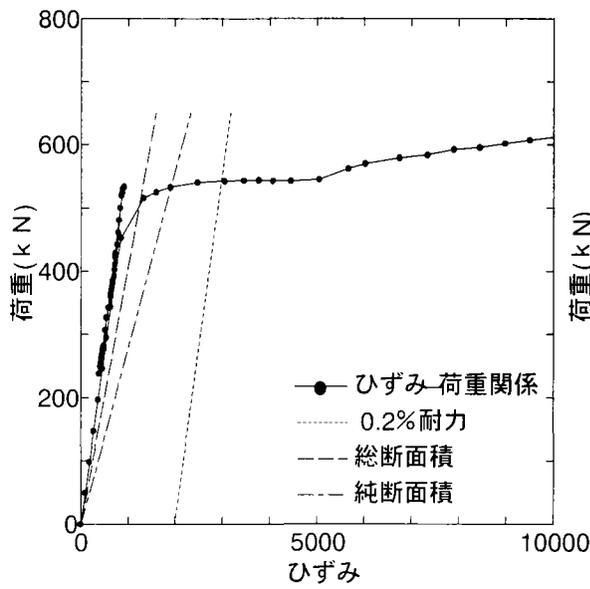
図 2.15 荷重—ひずみ関係 (シリーズI、ボルト外)



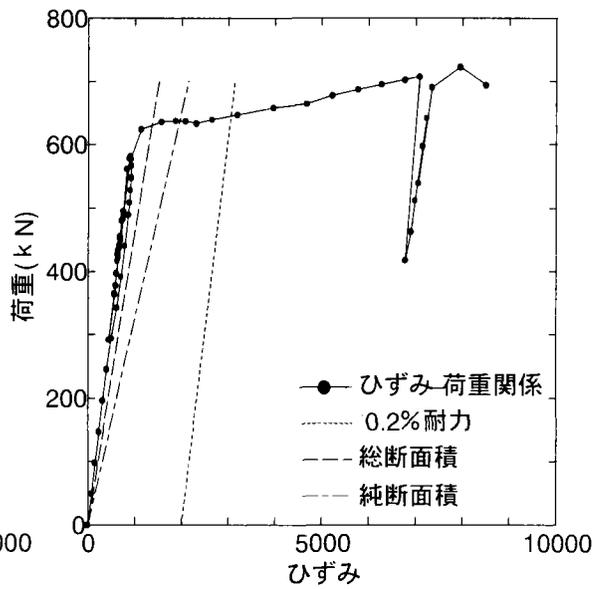
(a)板厚 16mm type1-3



(b)板厚 19mm type2-3

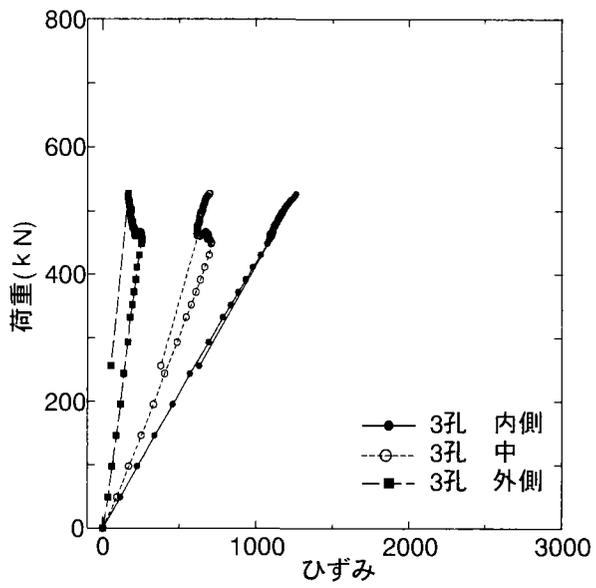


(c)板厚 22mm type5-2

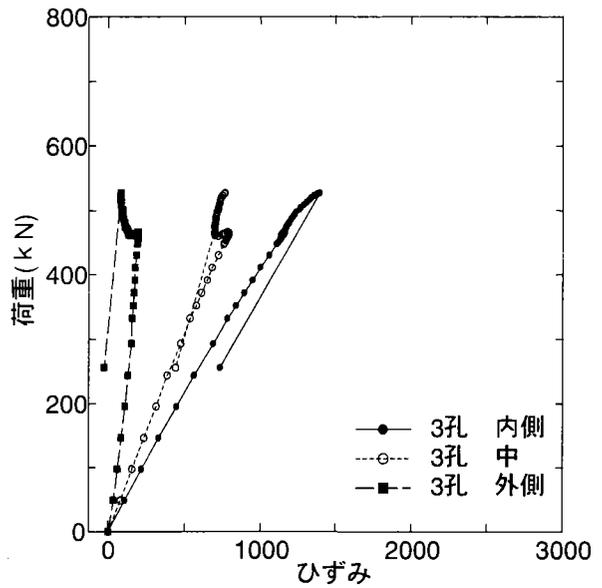


(d)板厚 25mm type2-3

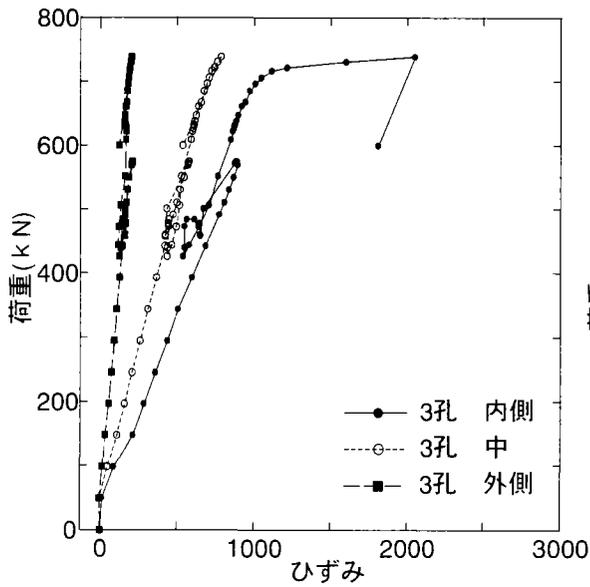
図 2.16 荷重—ひずみ関係 (シリーズII、ボルト外)



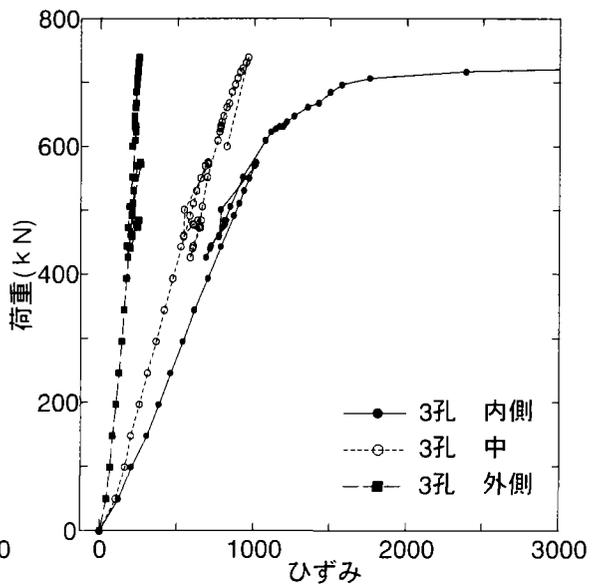
(a)板厚 16mm type3-3 ナット側



(b)板厚 16mm type3-3 ボルト頭側

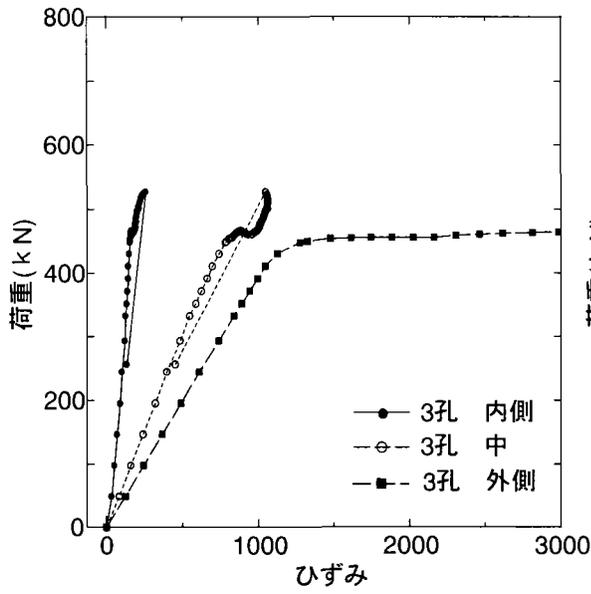


(c)板厚 25mm type1-3 ナット側

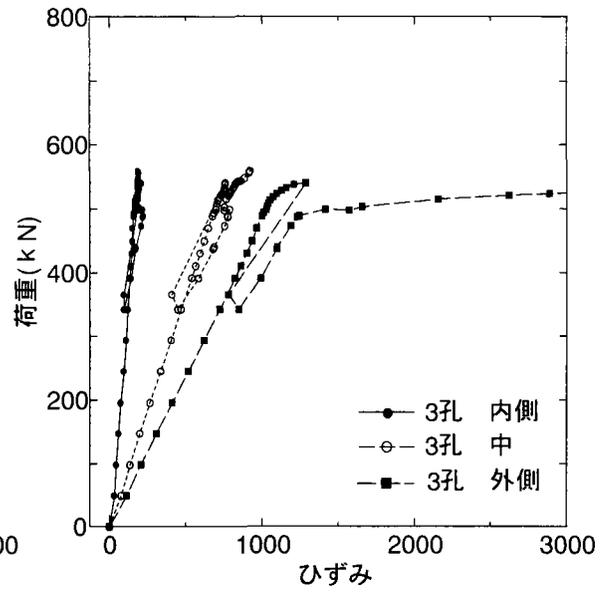


(d)板厚 25mm type1-3 ボルト頭側

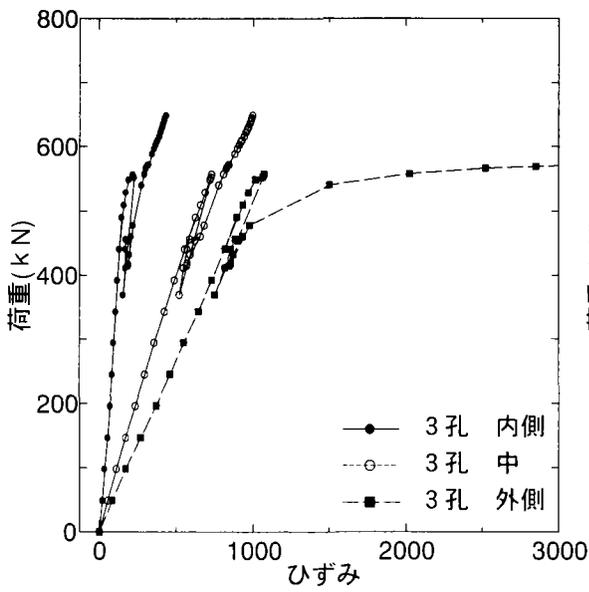
図 2.17 荷重—ひずみ関係 (シリーズII、添接板)



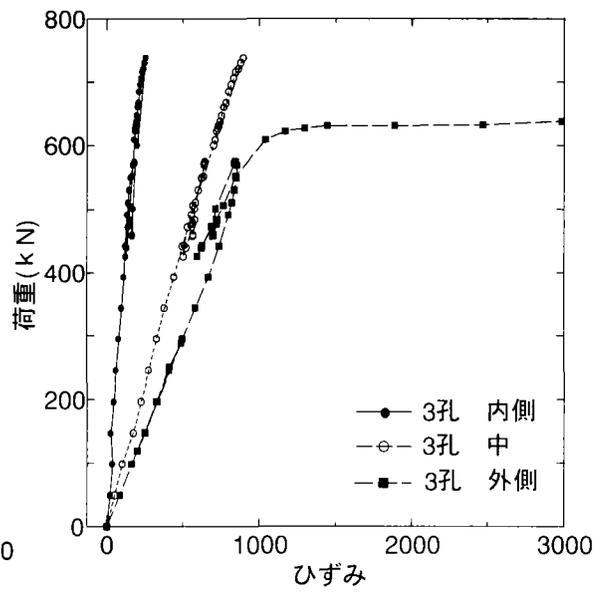
(a)板厚 16mm type3-3



(b)板厚 19mm type1-3

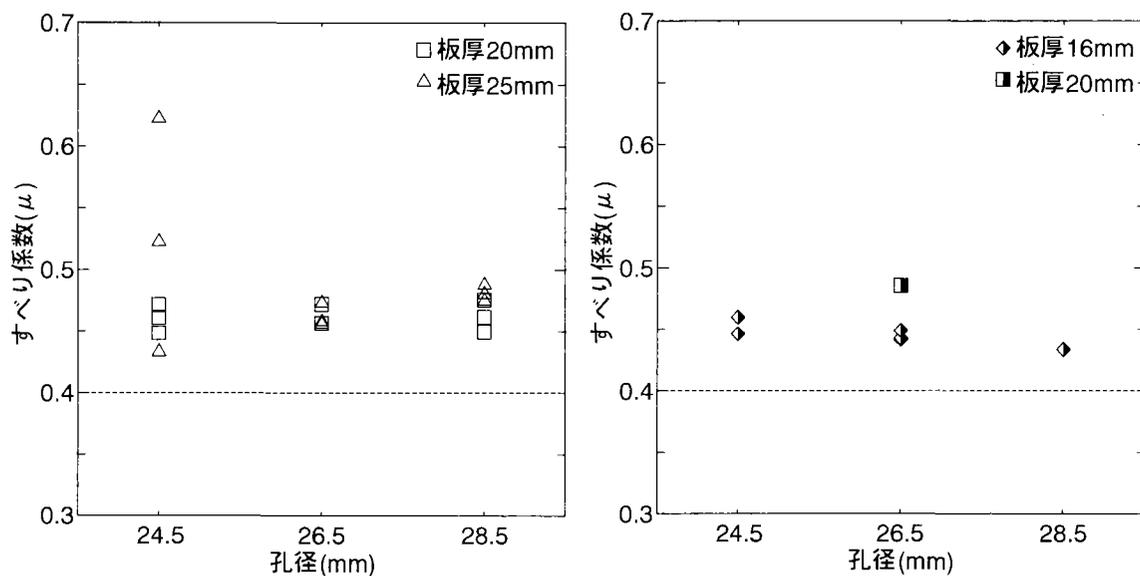


(c)板厚 22mm type1-3



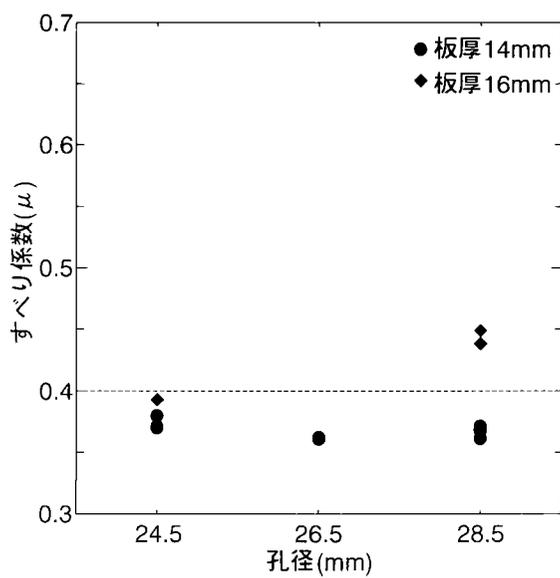
(d)板厚 25mm type1-3

図 2.18 荷重—ひずみ関係 (シリーズII、母板部)



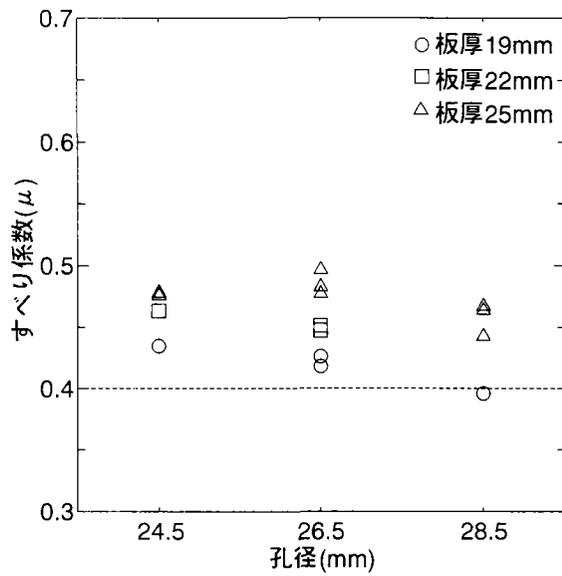
(a)すべり先行型

(b)同時型

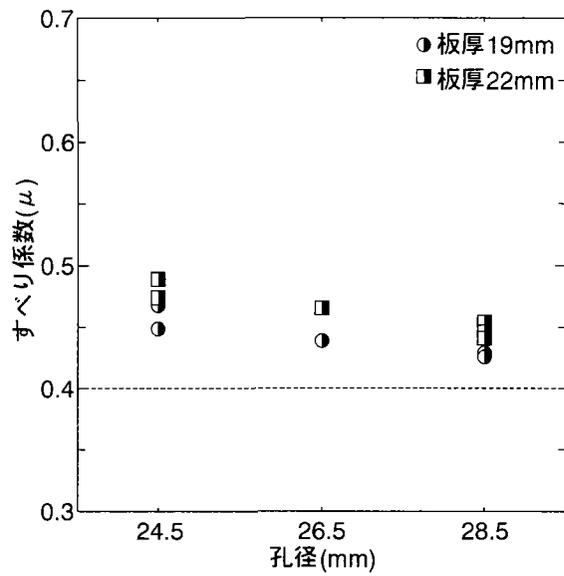


(c)降伏先行型

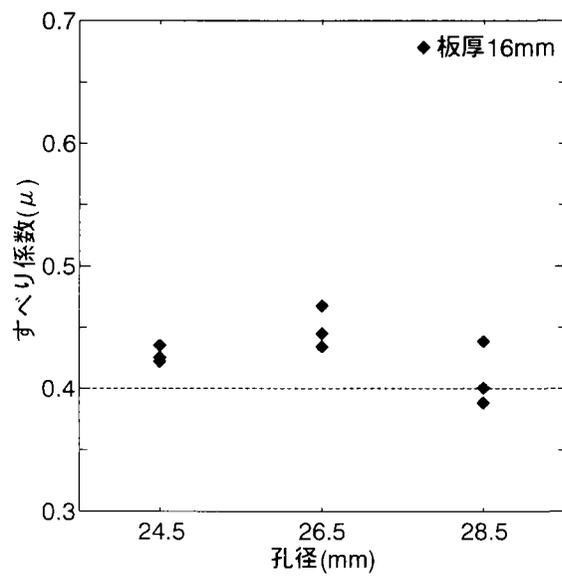
図 2.19 すべり係数とボルト孔径の関係 (シリーズ I)



(a)すべり先行型

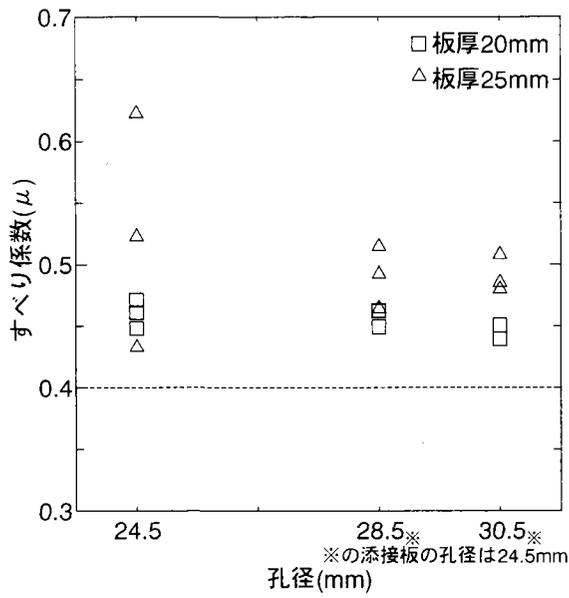


(b)同時型

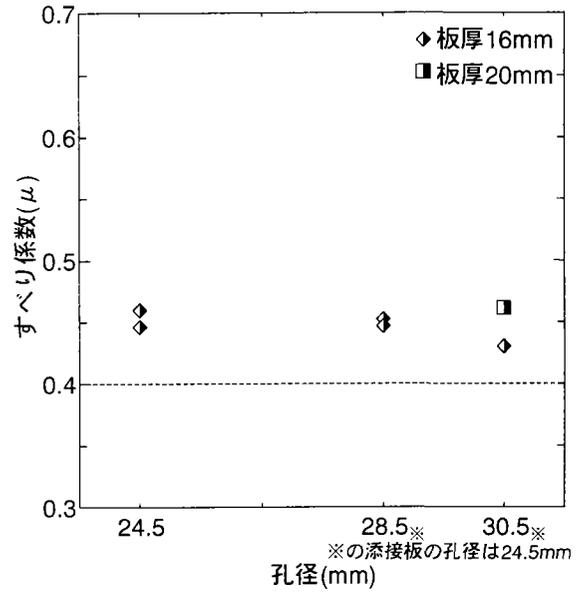


(c)降伏先行型

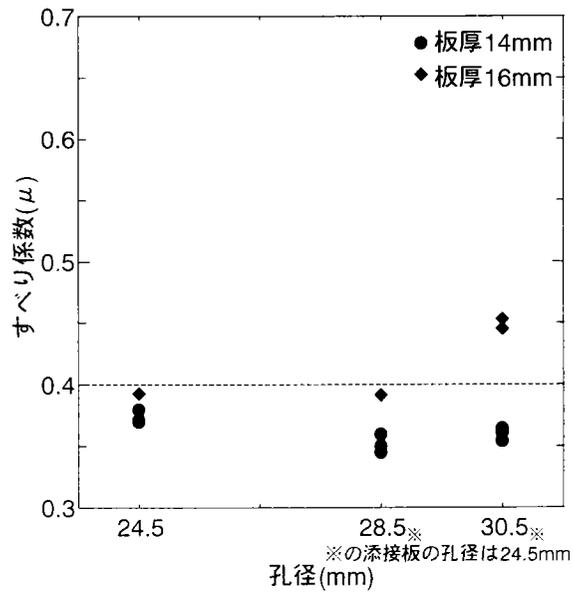
図 2.20 すべり係数とボルト孔径の関係 (シリーズII)



(a)すべり先行型

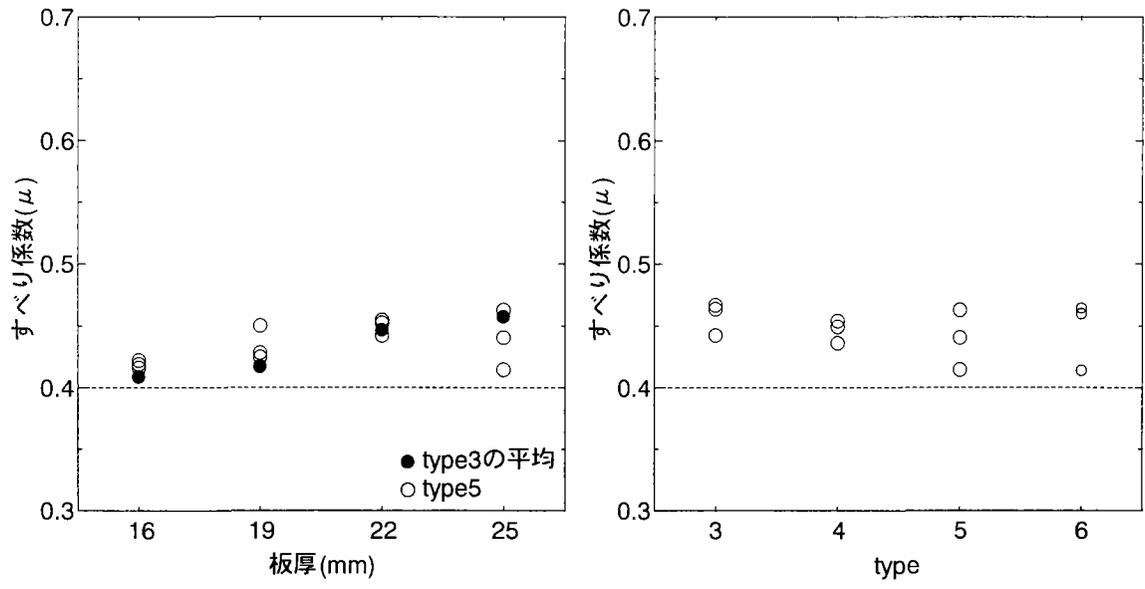


(b)同時型



(c)降伏先行型

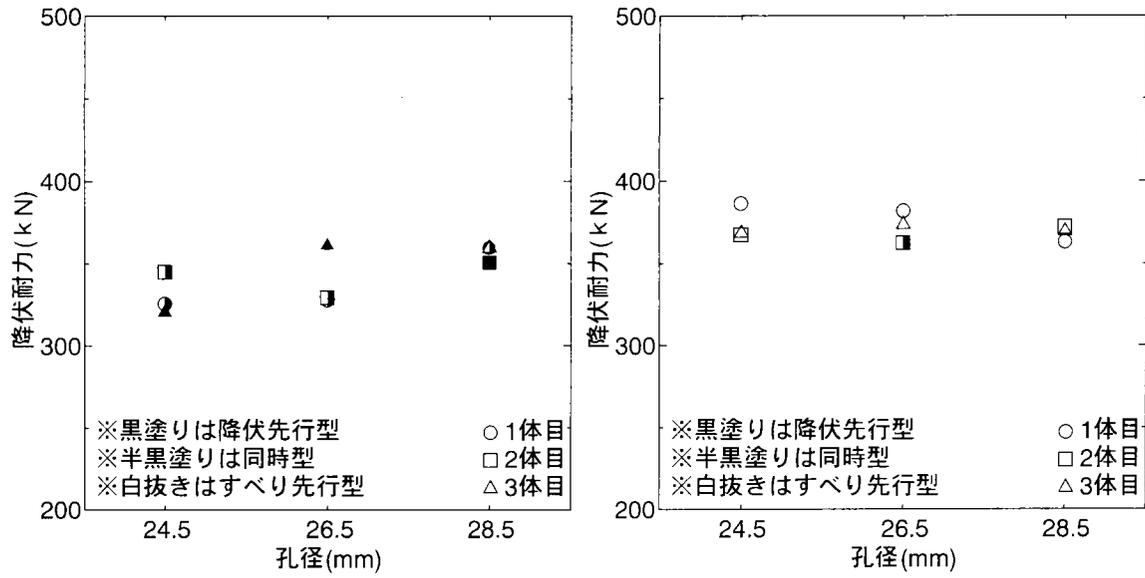
図 2.21 すべり係数とボルト孔径の関係 (シリーズ I、母板のみ拡大孔)



(a)板厚ごと

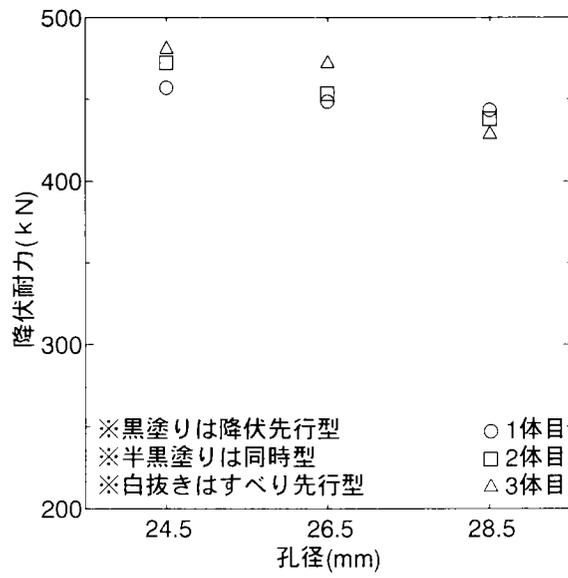
(b)type ごと(板厚 25mm)

図 2.22 すべり係数に及ぼすボルトずれ、孔ずれの影響



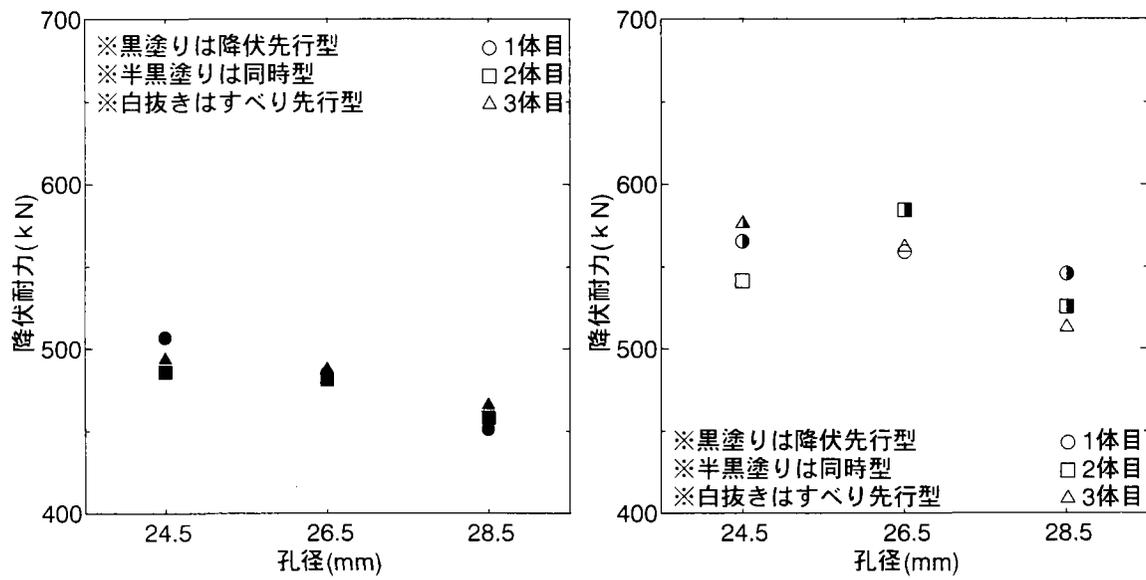
(a)板厚 16mm

(b)板厚 20mm



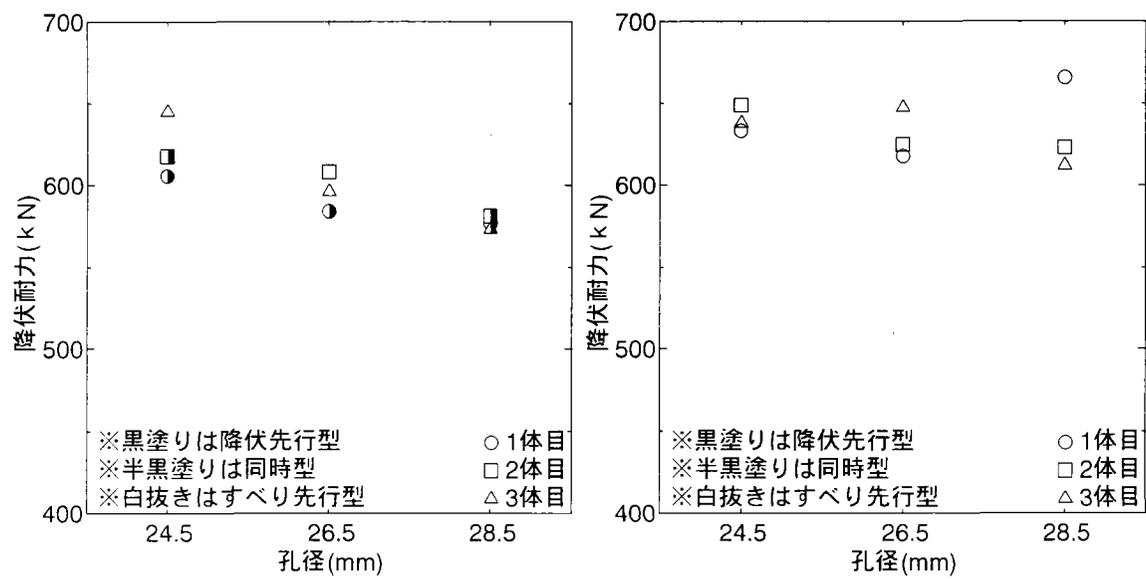
(c)板厚 25mm

図 2.23 降伏耐力—ボルト孔径関係 (シリーズ I)



(a)板厚 16mm

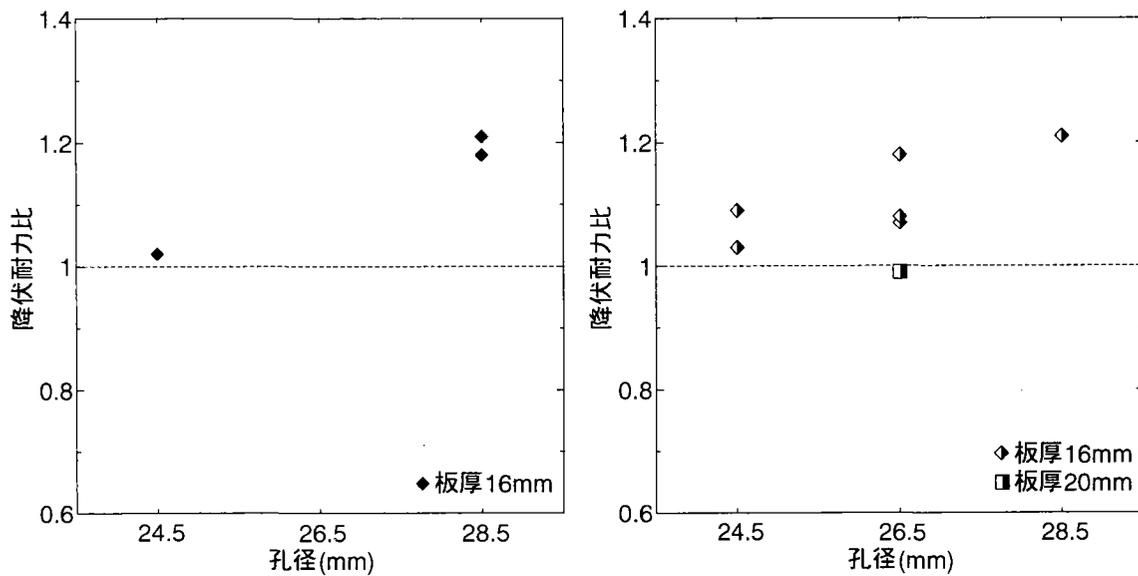
(b)板厚 19mm



(c)板厚 22mm

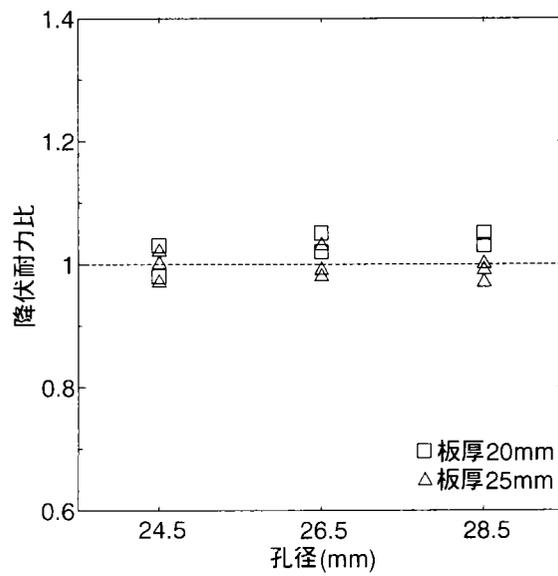
(d)板厚 25mm

図 2.24 降伏耐力ーボルト孔径関係 (シリーズII)



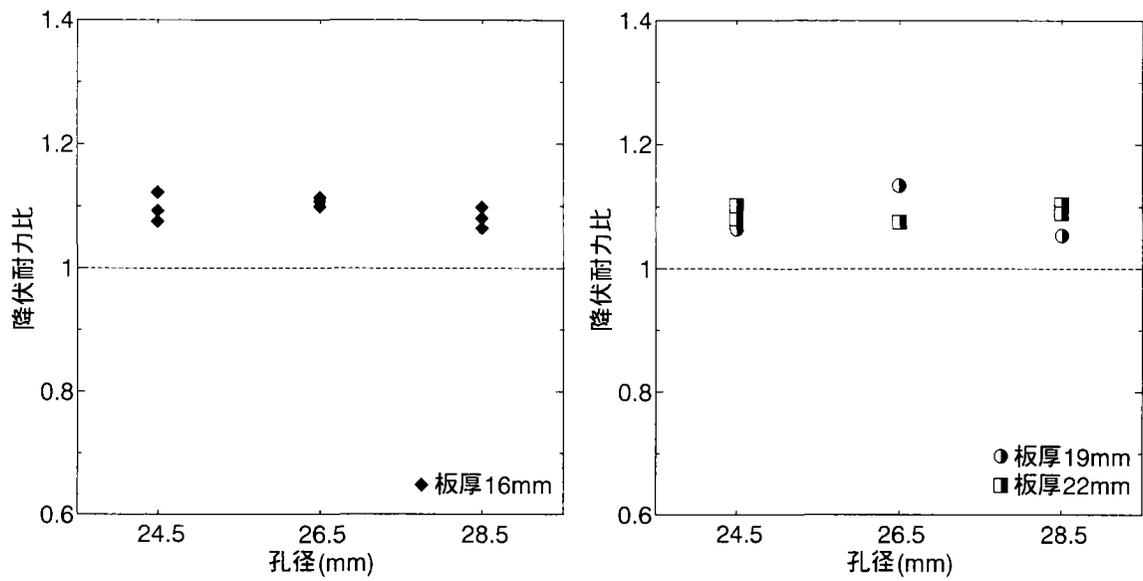
(a)降伏先行型

(b)同時型



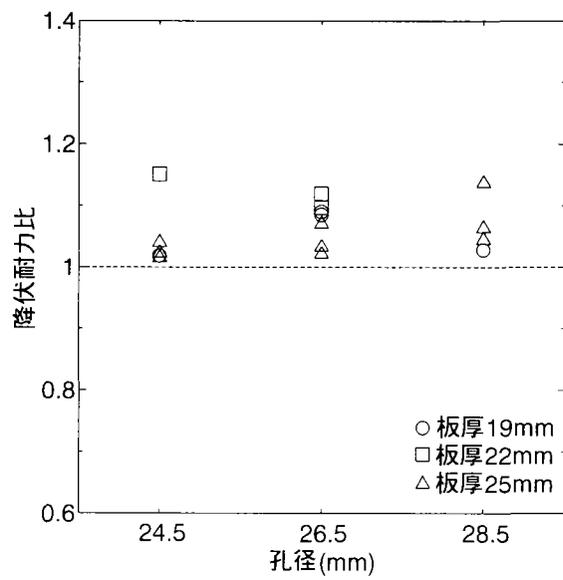
(c)すべり先行型

図 2.25 降伏耐力比—ボルト孔径関係 (シリーズ I)



(a)降伏先行型

(b)同時型



(c)すべり先行型

図 2. 26 降伏耐力比—ボルト孔径関係 (シリーズII)

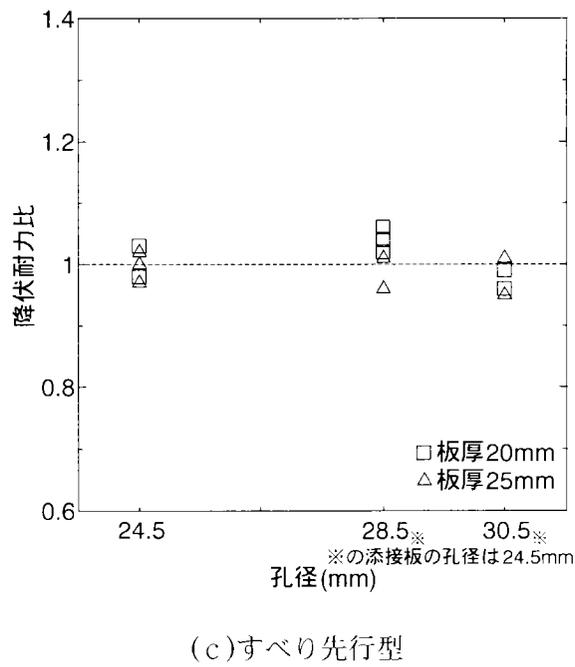
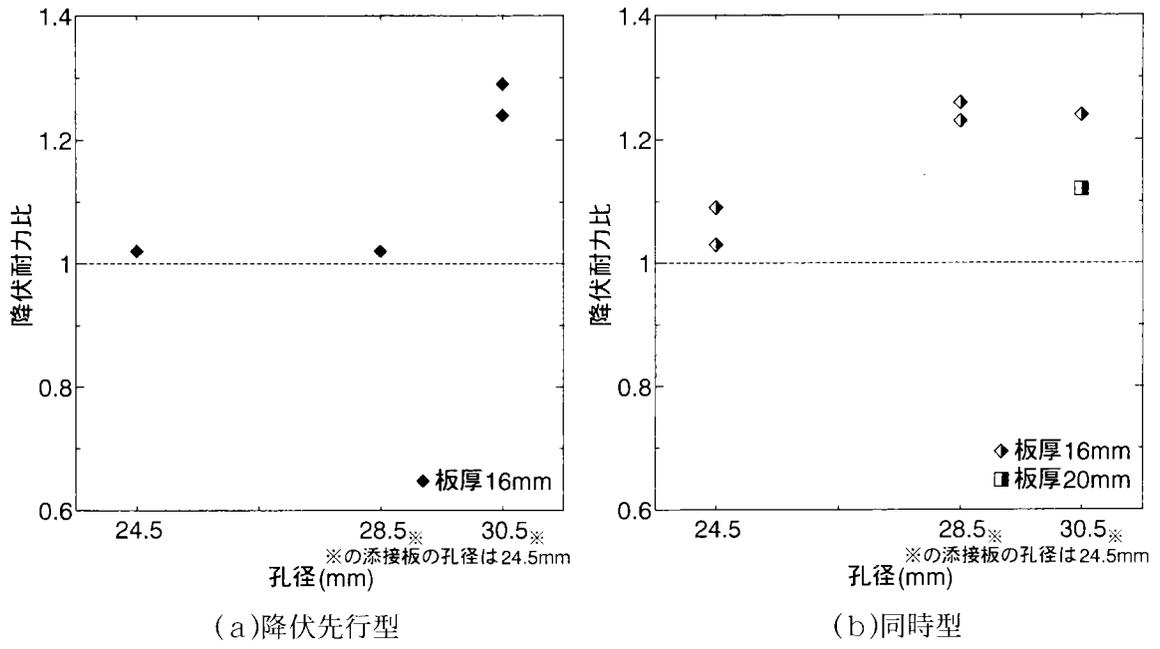
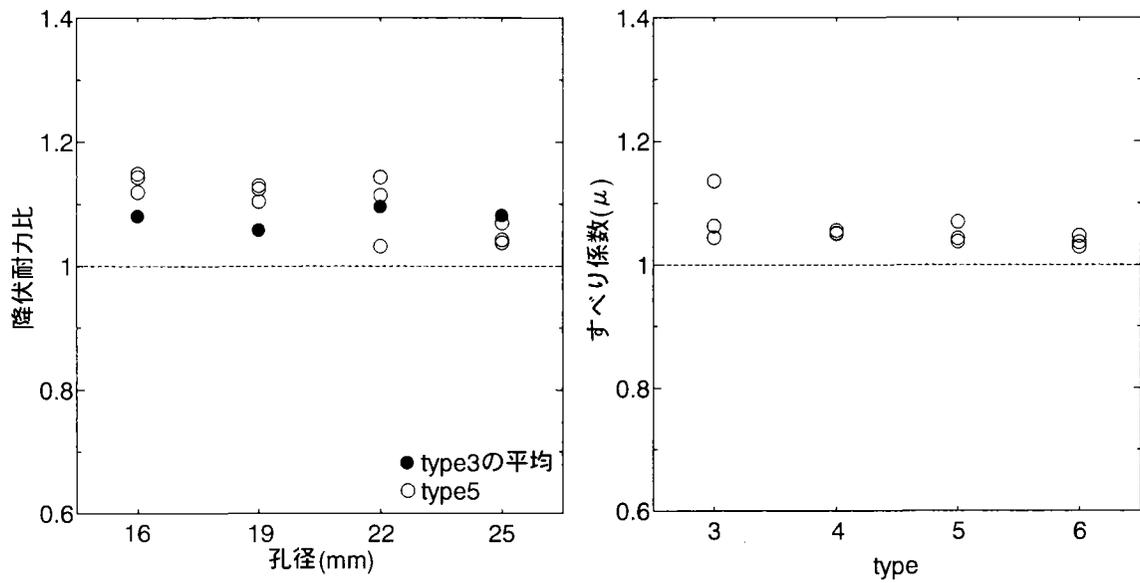


図 2.27 降伏耐力比—ボルト孔径関係 (シリーズI、母板のみ拡大孔)



(a)板厚ごと

(b)type ごと(板厚 25mm)

図 2.28 降伏耐力比に対するボルトずれ、孔ずれの影響

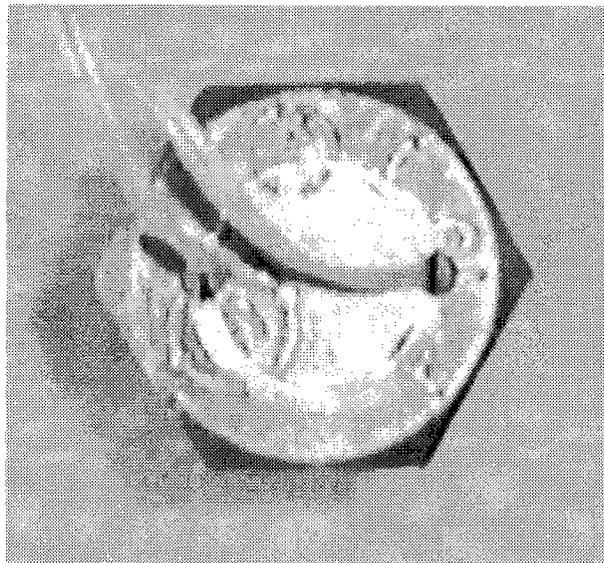
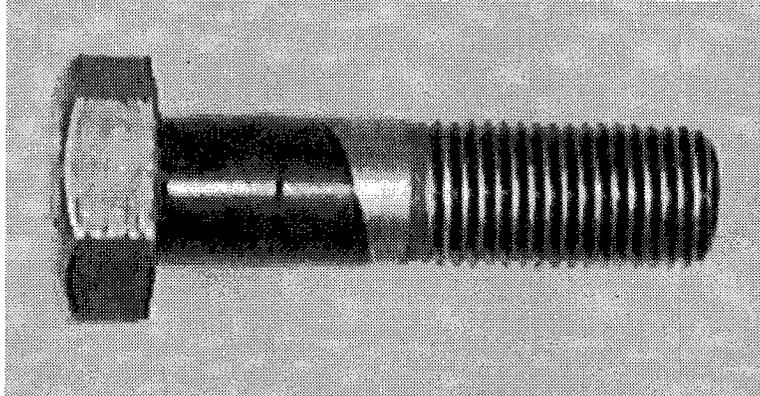


写真 2.1 ひずみゲージつきボルト

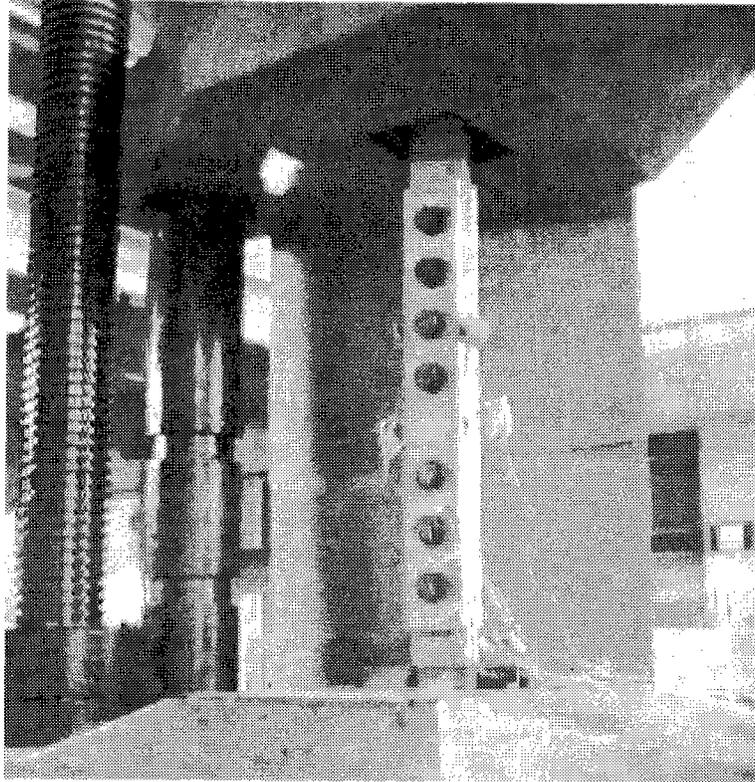
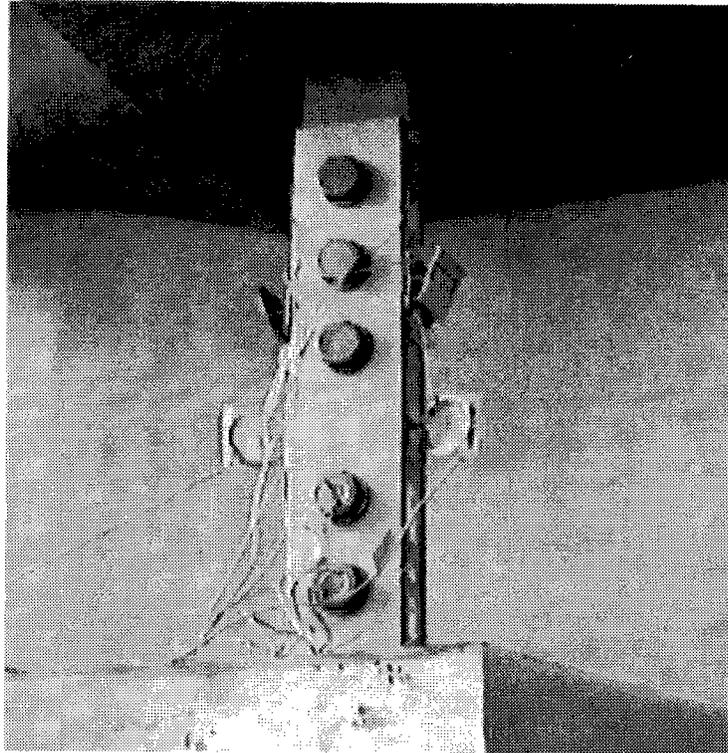
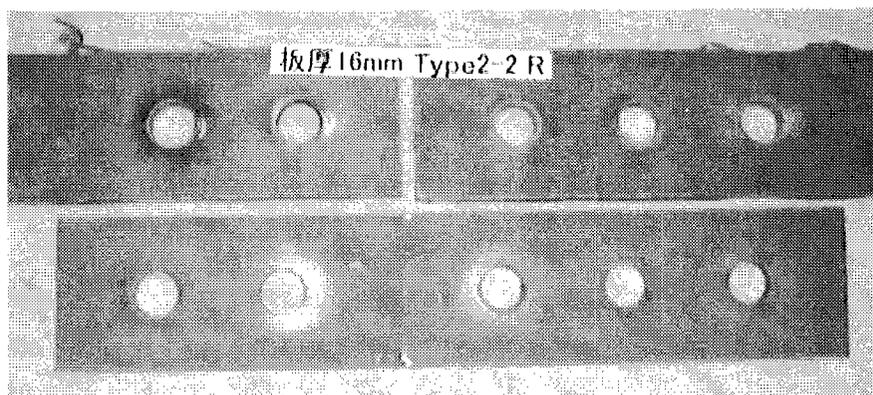
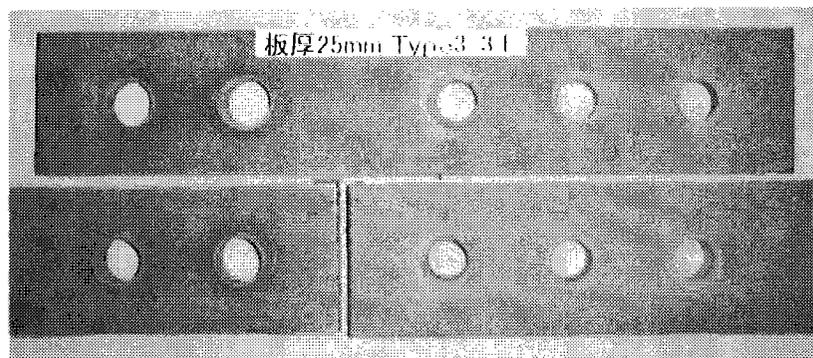


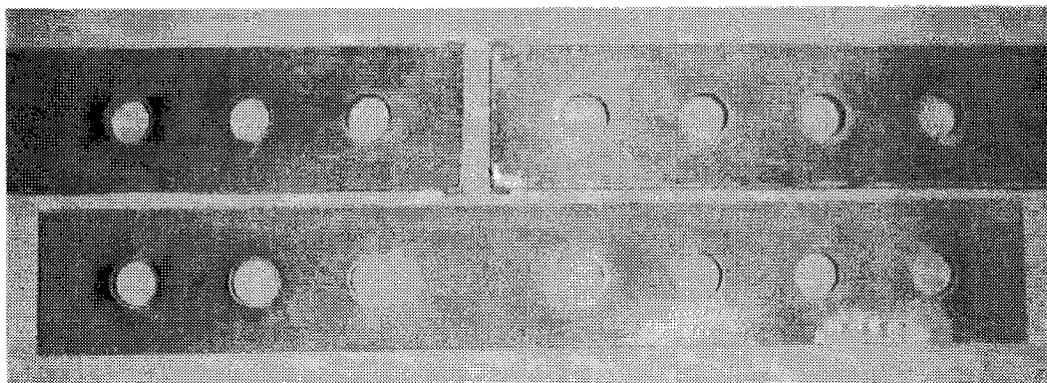
写真 2.2 引張試験の状況



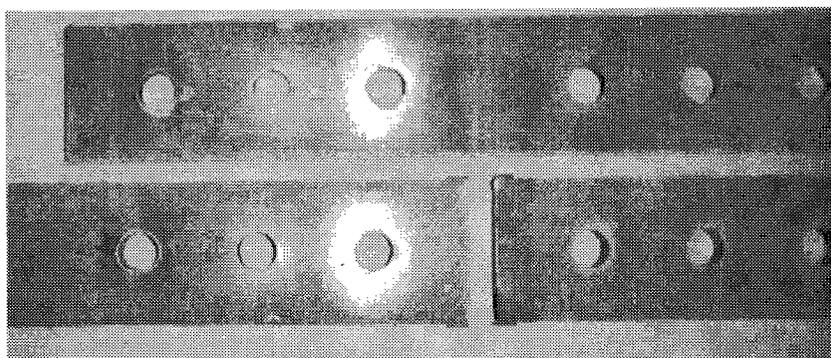
(a)シリーズ I 試験体 板厚 16mm type2-2



(b)シリーズ I 試験体 板厚 25mm type3-3



(c)シリーズ II 試験体 板厚 16mm type3-2



(d)シリーズ II 試験体 板厚 22mm type1-1

写真 2.3 試験終了後の試験体摩擦面の状況