

第3章 板厚差を有する摩擦接合継手の試験

第2章研究方法に基づいた試験研究のうち、試験体の製作から試験実施の結果については、本章の3.1項より、3.3項に記載する。なお、解析関係、ならびに滑り耐力改善の研究については、各々第4章、第5章に記載する。

3.1 試験概要

「板厚差のある高力ボルト摩擦接合継手の性能」の研究における試験要領は、「第2章・研究方法」により以下に示す具体的方法にて、小型滑り試験体を作成し滑り試験を実施した。

(1) 試験体製作概要

予備的試験に用いた試験体の材質は、近年の橋梁工事での使用頻度（量）最多のSM490Y材で実施した。材料は在庫材としたため、材料の機械的性質を把握するために使用材全ての機械試験を実施した。

また、本試験ではSM490Y以外に、一般橋梁工事での最強度鋼であるSM570も使用した。試験材は試験用として新たにニューロールした。これらの機械的性質は表-7に示す。なお、試験体の母板厚については、使用材質で使用頻度の高い板厚とした。試験体の設計においては、材料降伏を伴う滑り試験では、板厚差が摩擦接合継手の性能に与える影響がつかみづらいため、母材および添接板は弾性域で滑りが発生するような板厚、ボルト列、ボルトの種類を決定した。

試験体寸法ならびにボルト数量については、試験機能力の関係で小型試験体とし、高力ボルトはF10T-M20HTBの1行2~4列までの試験体とし、「予備試験」での母材板厚は23mm、本試験は24mm（実測24.4）、添接板は予備試験で14mm、本試験で12mmとした。またボルトの配置は予備試験では道路橋示方書の最小基準寸法とし、縁端距離40mm、ボルトピッチ65mmとした。本試験では、M22高力ボルトの最小配列とほぼ相似であるM20の最小配列とし、縁端距離35mmでボルトピッチ65mmとした。

なお、板厚差は予備試験では傾向を把握する試験とし、0mm、2mm、3mmで各1体とした。またテーパ効果を確認するため厚板母材側に1：5のテーパ加工を行った試験も実施した。本試験では、板厚差は機械加工で厳密に1mm刻みで4mmまで削り出した試験体とした。試験体数は各3体でテーパ効果確認試験体のテーパは1：10とした。

試験体形状および詳細は図-3、-4および表-5参照。

(2) 試験体概要

予備試験ならびに本試験に用いた試験体概要を図-3, -4, 表-5に示す。なお、フィラー試験は3.2(2)項に示す。

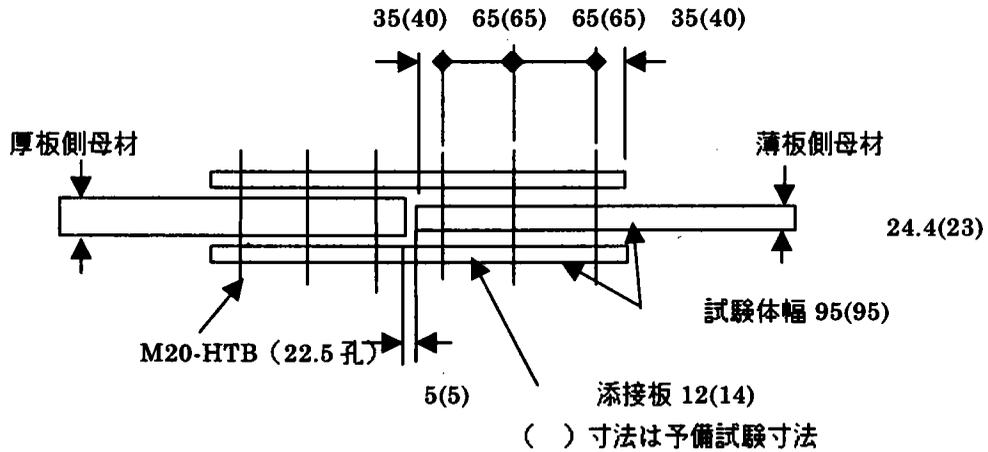


図-3 3列試験体寸法(2列、4列も同様)

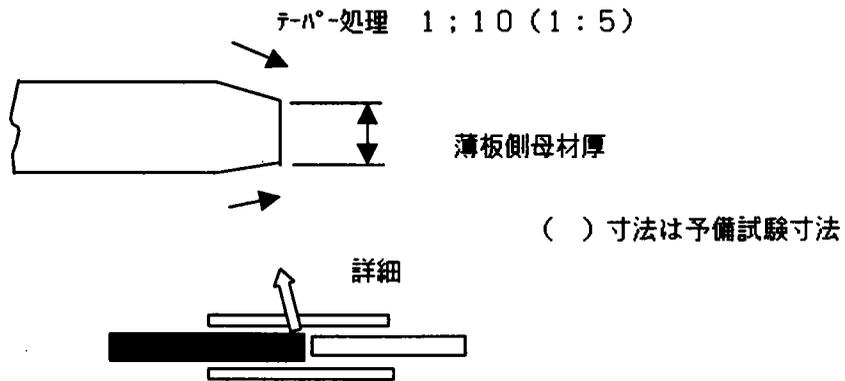


図-4 テーパー処理試験体

表-5 実験概要一覧表

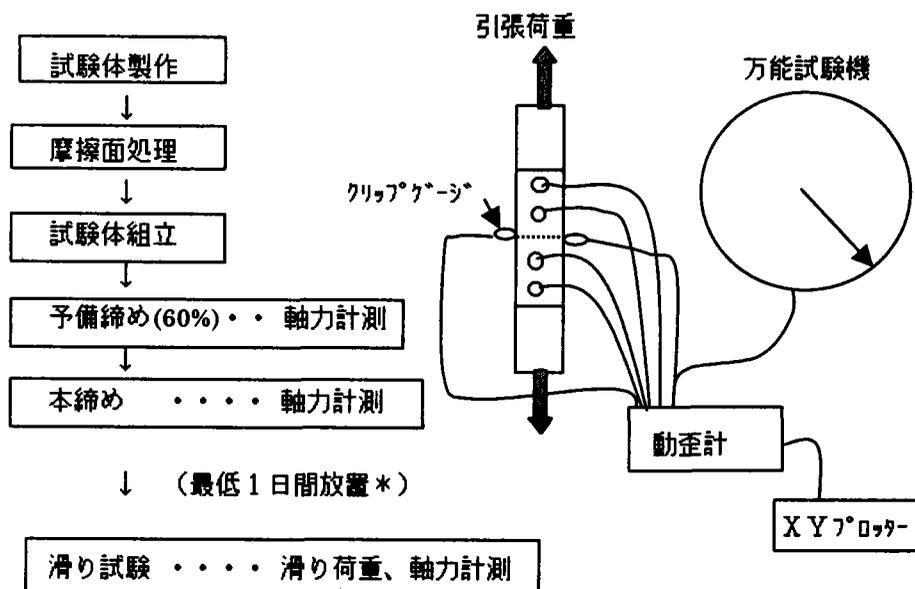
母材板厚：薄板側板厚

単位：mm

| 区分 | 名称 | 材質 | 板厚 | ボルト列 | 板厚差 | テーパ-試験 | 備考 |
|------|-----|--------|------|-------|-----------|--------|---------------|
| 予備試験 | 母材 | SM490Y | 23 | 2,3 | 0,2,3 | 有り | 表面処理 無錆 |
| | 添接板 | | 14 | | | | |
| 本試験 | 母材 | SM490Y | 24.4 | 2,3,4 | 0,1,2,3,4 | 有り | 表面処理 無錆/赤錆 |
| | 添接板 | | 12 | | | | |
| | 母材 | SM570 | 24.4 | 2,3,4 | 0,1,2,3,4 | 有り | |
| | 添接板 | | 12 | | | | |

(3) 試験フロー及び試験概要

予備試験、ならびに本試験の試験フローと、試験概要を図-5に示す。



* : ボルト締め付け後の初期のリラクゼーションを終了させる目的

図-5 滑り試験フローと試験概要図

(4) 摩擦面処理

滑り試験体の材料については、ミルメーカーにてショットブラスト及びプライマーが施工された鋼材を使用した。試験体の摩擦面処理は、試験体製作後摩擦面のみショットブラスト（鋼球）と、グリットブラストの2種類とした。また、最大表面粗度は50S以上とし、本試験では一般的に摩擦係数が向上する赤錆（グリットブラスト後）面も採用した。これらの表面処理結果を表-6に示す。

表-6 表面処理方法と最大粗度 単位：μ

| 試験ロット | 予備試験 | | 本試験 | | | | | | 備考 |
|------------------|-----------|-----|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|
| | *1 | *2 | *3 | *4 | *5 | *6 | *7 | *8 | |
| ショットブラスト (無錆) | 68 (*) | | | | | | | | プライマー鋼板 |
| グリットブラスト (無錆) | | 138 | 95 ~ 119 | 122 ~ 138 | 127 ~ 139 | 136 ~ 149 | | | |
| グリットブラスト (赤錆) | | | | | | | 116 ~ 130 | 154 ~ 186 | |

(*1) : プライマー除去約4割

試験体ロットは3. 2「試験体組合せ」の項参照

(5) 高力ボルト

高力六角ボルトは、数度の使用を考慮し、滑り発生でもゲージ損傷を与えないように、ボルト軸を18φに切削し、2枚のストレインゲージを貼り付けたものを使用した。またTCボルトは1回使用のみのため、ボルト軸に直接2枚のストレインゲージを貼り付けたボルトを使用した。

なおボルトの使用に先立ち、ボルト軸力と歪みの関係を試験確認し、各試験体へのボルト軸力導入時の歪み量を決定し、軸力導入を行った。

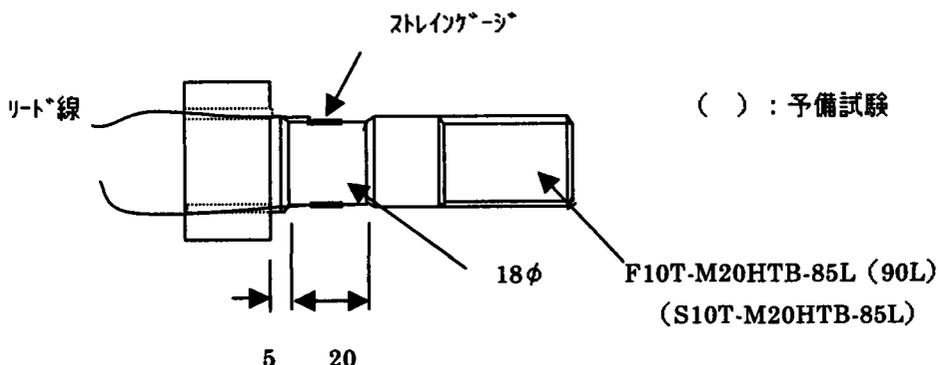


図-6 高力ボルト形状(六角HTB)

(6) ボルトの締め付け

高力ボルトは、試験体継手中央部より両端部側に交互に締め付けが基本であるが、板厚差がある場合、締め付け順序による滑り耐力の違いの有無を本試験に折り込んだ。

高力ボルトの締め付けは、トルクレンチにて所定の軸力の60%で予備締め後、同様の締め付け要領にて本締め軸力を導入した。なお、締め付け軸力は予備試験では、締め付け軸力(設計軸力×1.1)とし、本試験では4列継手母材の降伏を考慮して、設計軸力(設計軸力×1.0)とした。

TCボルトの軸力コントロールは、ボルト自身の物理的性質とチップの断面積等で決定されるため、実際の板厚差のある継手に採用した場合の問題点を、六角と比較する為に予備試験で実施した。

なお、TCボルトもストレインゲージ付きボルトを採用し、予備締めまではトルクレンチにて軸力導入を行い、本締めは専用のレンチでボルトチップが切断するまでとした。

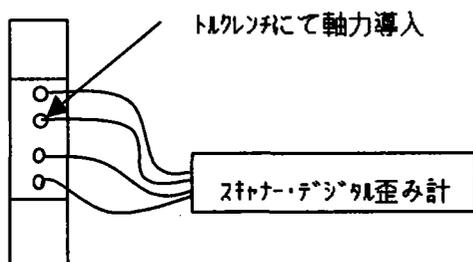


図-7 軸力導入要領図

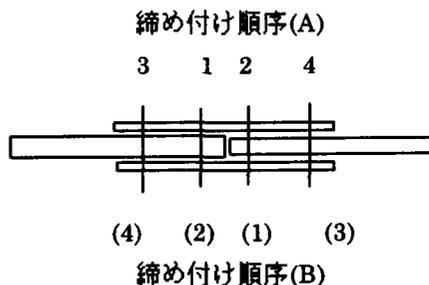


図-8 ボルト軸力導入順序

(7) リラクゼーション

ボルト締め付け直後の初期のリラクゼーションは、約1日経過させれば収束することが実験結果で確認出来たので、滑り試験はボルト軸力導入後全て1日以上経過させてから、試験することにした。なお、各試験体のボルトは、締め付け後のリラクゼーションを計測する目的で、定期的(1h毎)にボルト軸力を自動記録した。

(8) 感圧紙による接触圧観察

板厚差のある継手に、軸力を導入した際の摩擦面における接触圧分布について、代表的なケースについて感圧紙を用いて接触圧の観察を行った。

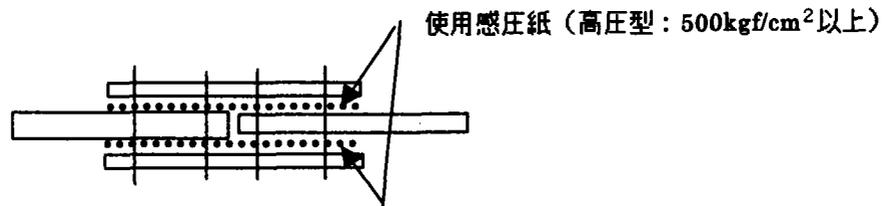


図-9 感圧紙による接触圧確認要領図

(9) 滑り試験

滑り試験は、100t万能試験機にて試験体を引張り実施した。試験中の各ボルト軸力変化は、ボルトに貼り付けたストレインゲージで行い、滑りは継手中央の隙間両端に挿入したクリップゲージにて確認する方法とし、引張荷重、ボルト軸力、そして滑り変位を動歪み計で検出するようにした。図-5参照。

なお、滑り係数(μ)の算出に用いるボルト軸力(N)は、滑り試験開始直前の滑り側継手の合計ボルト軸力(N)とした。

$$\text{滑り係数}(\mu) = \text{滑り側ボルト合計軸力}(N) * 2 / F$$

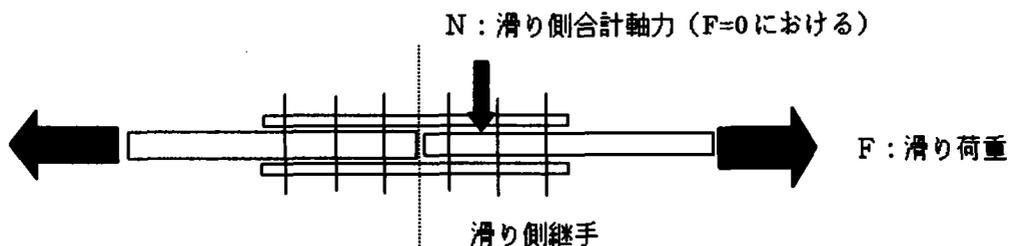


図-10 滑り係数算出要領

3. 2 試験体材料・試験体組み合わせ

(1) 板厚差を有する滑り試験

本試験で使用した材料および試験体概要を表一七、一八に示す。

表一七 使用材料一覧表

| ロット | 用途 | 材質 | 板厚 mm | 降伏点 N/mm ² | 備考 |
|-----------------|------|---------|----------|--------------------------|---|
| 予備試験 | 母材 | SM490YB | 23 | 426 | 薄板側母材 |
| | | SM490YB | 25 | 416 | 厚板側母材 |
| | | SM490YB | 26 | 428 | |
| | 添接板 | SM490YA | 14 | 395 | 2列継手 |
| | | SM490YA | 14 | 399 | 3列継手 |
| 本試験 (SM490Y) | 母材 | SM490YB | 24.4 | 461 | 薄板側母材 |
| | | SM490YB | 25.4 | 427 | 板厚 31.4mm の板より薄板 母材厚と 1mm ピッチになる よう削りだし |
| | | | 26.5 | | |
| | | | 27.4 | | |
| | 28.4 | | | | |
| | 添接板 | SM490YA | 12.0 | 433 | |
| 本試験 (SM570) | 母材 | SM570 | 24.4 | 525 | 薄板側母材 |
| | | SM570 | 25.5 | 513 | 板厚 31.4mm の板より薄板 母材厚と 1mm ピッチになる よう削りだし |
| | | | 26.5 | | |
| | | | 27.5 | | |
| | 28.5 | | | | |
| | 添接板 | SM570 | 12.0 | 593 | |

表一八 試験体組み合わせ

*: テーパ-処理試験体

| 試験 | ボルト種 一列数 | 材質 | 表面 処理 | 板厚差 (mm) / 試験体数 (組) | | | | | 備考 |
|------|-------------|--------|----------|---------------------|---|------|------|------|-------------|
| | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 予備試験 | F-2 | SM490Y | * 1 | 1 | | 1 | 1+1* | | TC ボルト試験 |
| | F-3 | | | 1 | | 1 | 1+1* | | |
| | S-2 | SM490Y | * 1 | 1 | | 1 | 1+1* | | |
| | S-3 | | | 1 | | 1 | 1+1* | | |
| | F-2 | SM490Y | * 2 | 1 | | 1 | 1+1* | | |
| | F-3 | | | 1 | | 1 | 1+1* | | |
| 本試験 | F-2 | SM490Y | * 3 | 3 | | 3+3 | | | 締め付け順序決定用試験 |
| | F-3 | | | 3 | | 3+3 | | | |
| | F-2 | SM490Y | * 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| | F-3 | | | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| | F-2 | SM490Y | * 4 | 3 | 3 | 3+3* | 3+3* | 3+3* | |
| | F-3 | | | 3 | 3 | 3+3* | 3+3* | 3+3* | |
| | F-4 | | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| | F-2 | SM490Y | * 赤錆 | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| | F-3 | | | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| | F-2 | SM570 | * 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| | F-3 | | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| | F-4 | | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| | F-2 | SM570 | * 赤錆 | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| | F-3 | | | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| F-4 | 3 | | | 3 | 3 | 3 | | | |

F : F10T 六角ボルト / S : S10TT C ボルト

(2) フィーラー試験

本試験で採用するフィーラー試験の薄板フィーラー(3.2mm)は、規格が限られ(通常無規格もしくはSS400相当)のため、SS400,SM490Y,SM570材のフィーラーは、厚板の規格材より試験板厚に機械削りを行い製作した。フィーラーは母材片側の両面に挿入する事としたが、母材板厚公差が0.67mmあったため、図-11に示すように板厚差がある片側フィーラー試験体と、板厚公差を無くした両側フィーラー試験体の2種類で試験を実施した。また、滑り試験に使用した材料の材質ならびに試験明細を、表-10に示す。

表-9 フィーラー試験材料明細

| | 用途 | 材質 | 板厚 mm | 降伏点 N/mm ² | 備考 |
|----------------------|-------|---------|----------|--------------------------|-----------------------|
| 2列試験体 及び 3列試験体 | 母材 | SM570 | 31.4 | 513 | 3.2mm購入材 在庫材より削りだし |
| | | | 24.4 | 525 | |
| | 添接板 | SM570 | 12.0 | 593 | |
| | フィーラー | 無規格 | 3.2 | 340 | |
| | | SS400 | 3.2 | 285~325 | |
| | | SM490YA | 3.2 | 433 | |
| SM570 | | 3.2 | 593 | | |

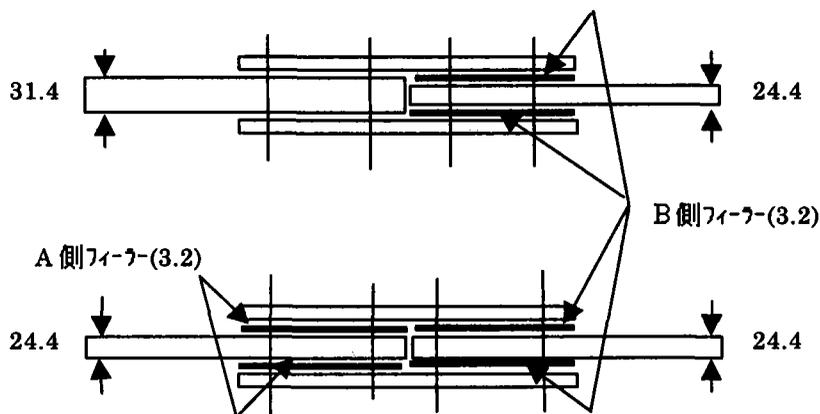


図-11 フィーラー挿入試験体(下側:板厚公差0mm)

表-10 フィーラー試験体組み合わせ

| 区分 | 母材 添接板 | ボルト列 | A側 フィーラー | B側フィーラー(試験体数) | | | | | 表面処理 |
|-----------------|-----------|------|-------------|---------------|----|-------|------------|-----------|------|
| | | | | 無し | 無機 | SS400 | SM 490Y | SM 570 | |
| 公差有 * | SM570 | 2 | / | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | *4 |
| | | 3 | | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| 板厚公差 0 mm | SM570 | 2 | フィラー無 | 3 | | | | | *6 |
| | | | 無規格 | | | 3 | 3 | 3 | |
| | | | SS400 | | | | 3 | 3 | |
| | | | SM490Y | | | | | 3 | |
| | | 3 | フィラー無 | 3 | | | | | |
| | | | 無規格 | | | 3 | 3 | 3 | |
| | | | SS400 | | | 3 | 3 | | |
| | | | SM490Y | | | 3 | | | |

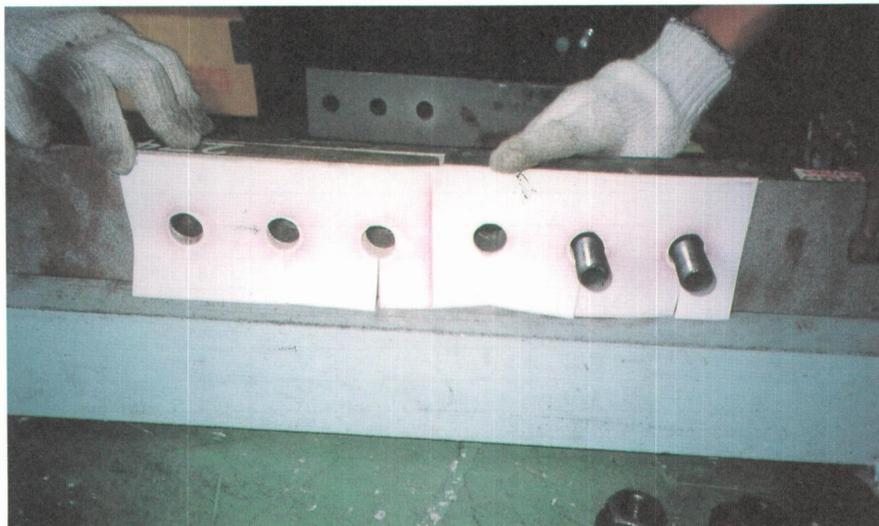
*: 板厚公差有り: 0.67mm (B側が薄い)



写真一 1 試験体組立状況



写真一 2 試験体軸力測定状況



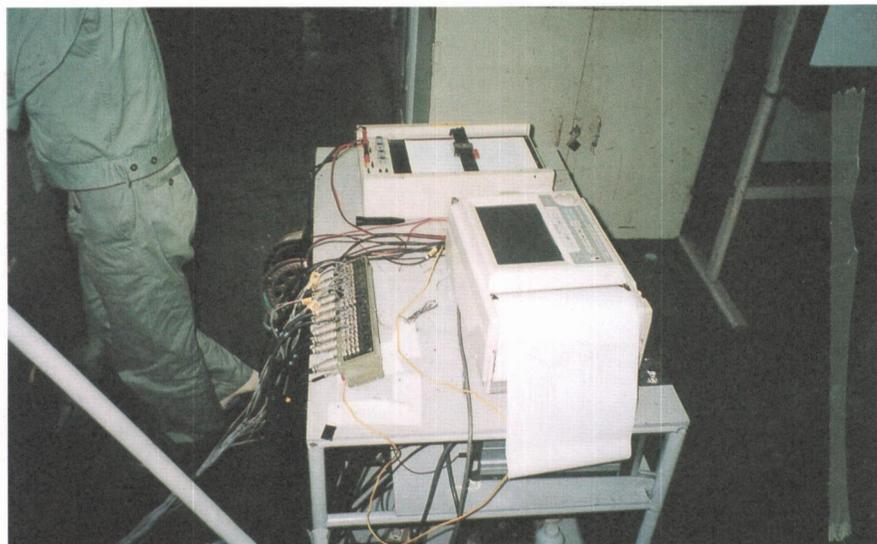
写真一 3 接触厚測定状況 (感圧紙)



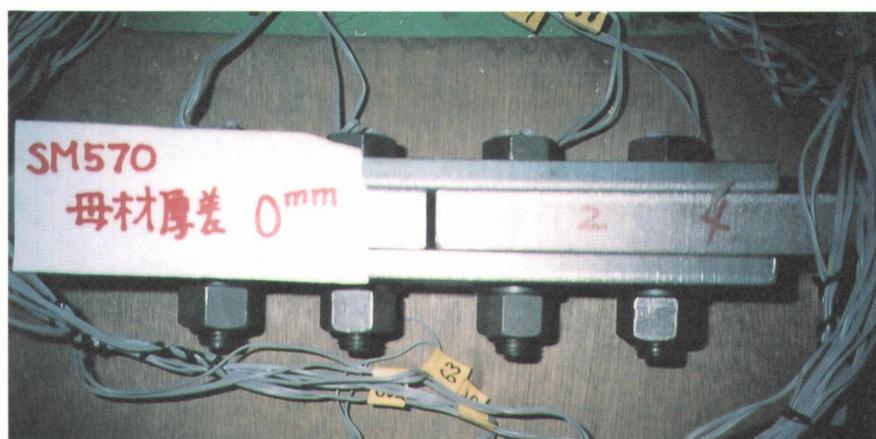
写真一 4 試験体（滑り試験開始前）



写真一 5 滑り試験状況



写真一 6 滑り試験アウトプット機器



写真一7 試験体写真 (SM570 : 板厚差 0mm)



写真一8 試験体写真 (SM570 : 板厚差 3mm)



写真一9 試験体写真 (SM570 : 板厚差 4mm)

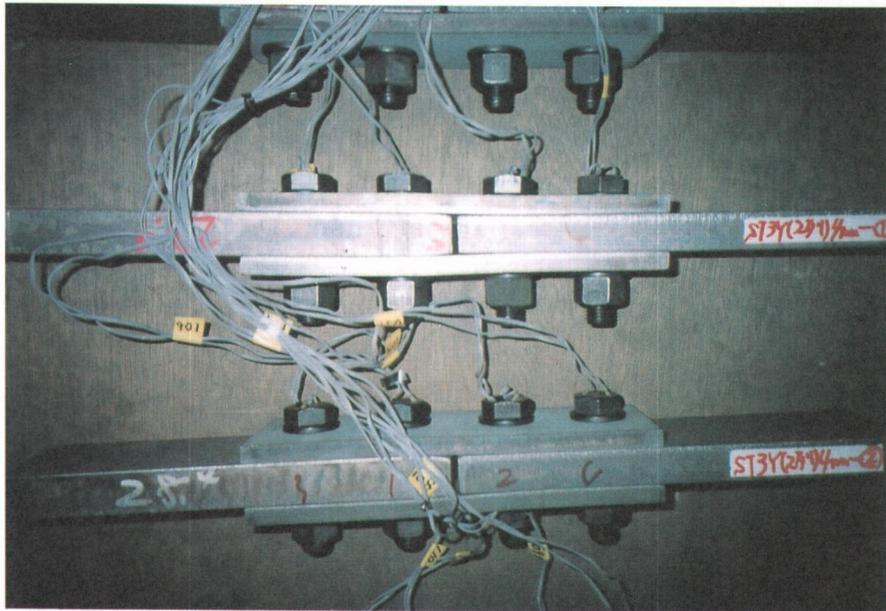


写真-10 試験体写真 (SM490Y: 板厚差 4mm テーパー加工)



写真-11 試験体写真 (フィーラー挿入試験)



写真一12 試験結果 (SM490Y : 板厚差 0mm 赤錆)



写真一13 試験結果 (SM490Y : 板厚差 2mm 赤錆)



写真一14 試験結果 (SM490Y : 板厚差 4mm 赤錆)

3. 3 試験結果

予備試験および本試験結果を、それぞれの要素項目毎に以下の(1)～(12)項に整理し報告する。

(1) 板厚差と肌隙および接触圧

板厚差のある継手に発生する肌隙は、目視計測とした。予備試験では、板厚差2mmと3mmであり、板厚差有り及びテーパ加工試験体の側面端部の肌隙状況は、継手中央の厚板縁端より薄板母材側の第1列目ボルトの中心程度まで肌隙が発生することが目視にて確認出来た。なお、テーパ試験体では若干肌隙が小さくなった。計測結果を表-11に示す。

本試験においては、1mmから4mmまでの板厚差のある継手の観察を行ったが、観察結果はほぼ予備試験同様である。また肌隙は板厚差に比例し大きくなる。1mmでも若干肌隙が発生し、肌隙側1列目のボルトワッシャの端くらいまで発生している様子が確認できた。

また、材質による違いは目視では区別がつかなかったが、感圧紙による観察では降伏点の高いSM570材が肌隙の範囲が広がっている。この現象がM490YとSM570の試験結果の違いに現れた。

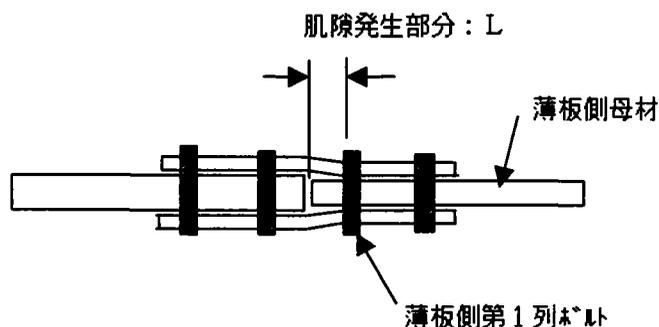


図-12 肌隙発生状況図

表-11 肌隙区間の計測結果(予備試験)

| 板厚差 | 肌隙長：L (mm) | 備考 |
|---------|-------------|------------------------|
| 等厚 | 0 | 縁端距離：40mm (*)：テーパ加工 |
| 2mm差 | 28 ~ 41.5 | |
| 3mm差 | 33.5 ~ 46.5 | |
| 3mm差(*) | 32.5 ~ 39.5 | |

(2) 接触圧分布状況の確認（感圧紙方法）

高圧タイプ感圧紙による接触圧の分布（圧力 500kgf/cm² 以上）観察によると、肌隙のないボルト接合部分の摩擦面には、ボルト孔を中心にワッシャ 径×1.5 倍 程度の広がりがあり、板厚差がある場合には肌隙側の薄板側ボルト 1 列目の接触圧の分布は、2 列目側の方向側のみ分布することがわかった。なお、板厚差が 3mm 以上になった場合、SM490Y に比較して SM570 では添接板の降伏点が高い為か、肌隙部 1 列面近傍には接触圧が全く分布していないことが確認出来た。

またこの肌隙部のボルト軸力は、添接板を介して厚板側継手の縁端に大きな反力となって働いており、これらの圧力分布状況概念図を、図-13 に示す。なおボルト列が 3 列になっても肌隙の影響はボルト 1 列目のみであることも感圧紙の結果から確認できた。なお、追加試験で実施した板厚差、材質、そして各縁端距離毎の接触圧分布状況を、巻末の添付資料-6 に示す。

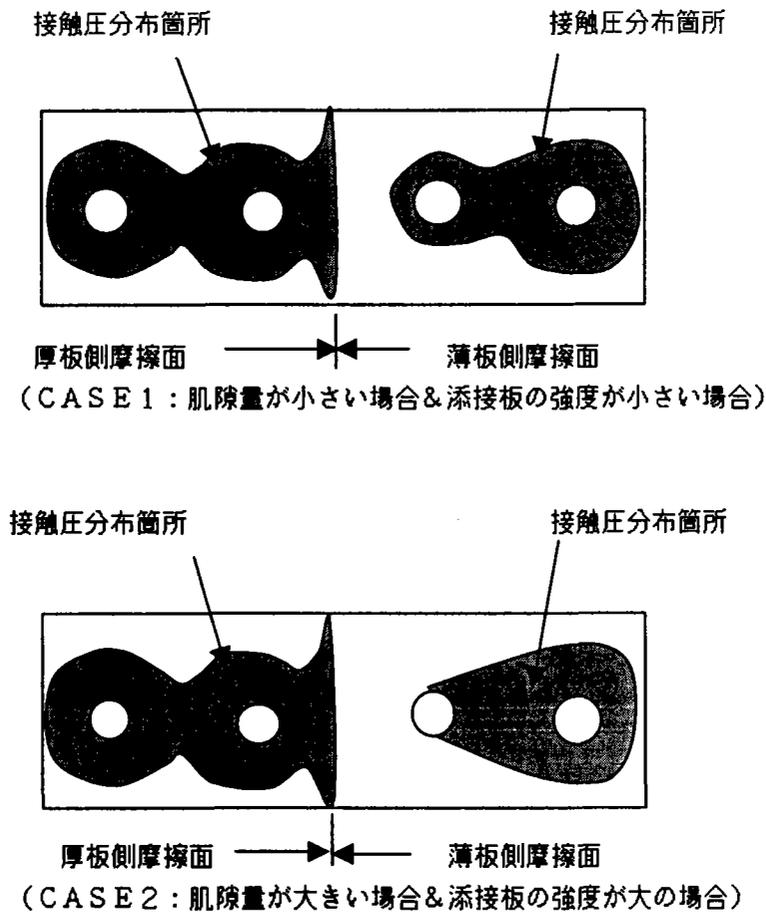


図-13 摩擦面の接触圧分布概念図（2列ボルト）

(3) ボルトのリラクゼーション

試験体ボルト全量の予備締め後の、各ボルト1本毎の本締め直後からのボルトリラクゼーションは、本締め直後から約4～6時間で急激に低下し、昼夜での温度変化等で若干の変動が認められるが、約1日で2.5%程度まで低下収束する。その後はほとんど変化はみられないため、全ての試験は約1日経過させて実施するようにした。

肌隙部ボルトのリラクゼーションは締め付け順序や、ボルト列が多少影響を及ぼすようであるが、薄板1列目が最大で、約2倍の5%程度で発生することが確認された。なお、この量は板厚差1mmから4mmでも、ほぼ同様な結果となった。これは予備締めの効果と考えられる。

図-14に板厚差3mm-SM490Y-3列継手における、代表的な厚板側平均ボルトのリラクゼーションと、薄板側1列面および2列と3列の平均の例を示す。なお、詳細は巻末の添付資料-4、5に本試験、ならびに追加試験における全試験体の各ボルトの締め付け直後の軸力(歪み)と、滑り試験直前の軸力(歪み)の欄参照のこと。

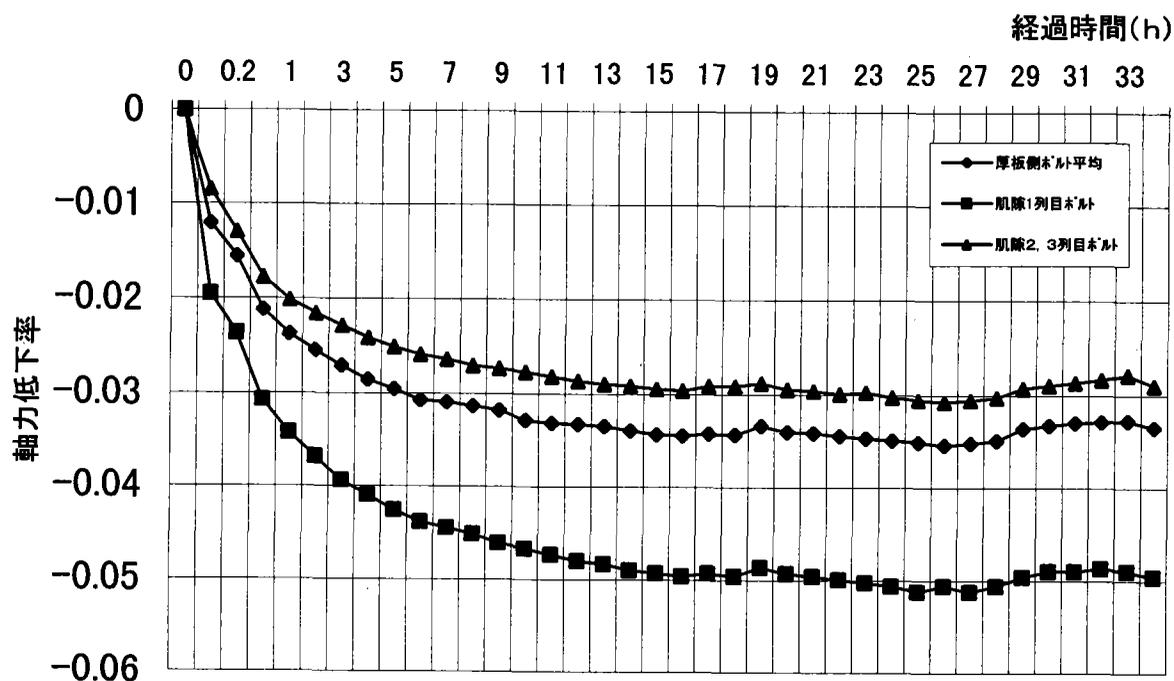


図-14 3列ボルト継手のリラクゼーション例 (SM490Y-板厚差 3mm)

(4) 締め付け順序

板厚差のある試験体における高力ボルトの締め付け順序の違い（図一七）による影響は、2列ではAおよびBとも殆ど差はなく、3列では若干Aが高めになった。しかしながらその違いは微少であり、特に影響はないといえる。試験結果を表一12に示す。

よって、今後の滑り試験体の締め付け順序は、締め付け作業が良好な（厚板側中央側から、薄板側中央側→厚板外側→薄板外側・・・の順序）Aにて行う事にした。

| 締め付け方法 | 板厚差 | 2列継手 | 3列継手 | 備考 |
|--------|-----|--------------|--------------|----|
| — | 0 | 0.520(1.000) | 0.527(1.000) | |
| A | 2mm | 0.400(0.769) | 0.433(0.827) | |
| B | 2mm | 0.407(0.783) | 0.420(0.797) | |

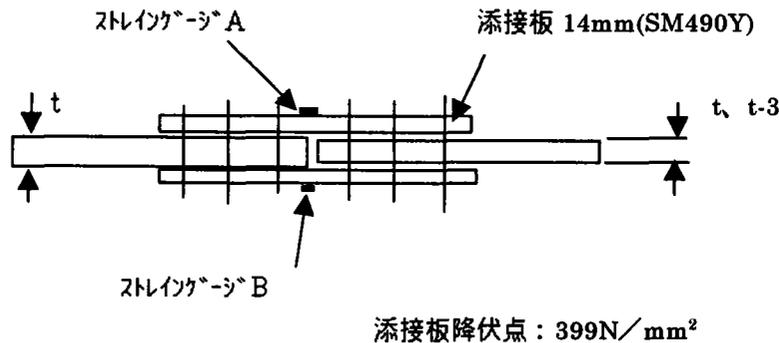
A：厚板中央→薄板中央→厚板外側→薄板外側

B：薄板中央→厚板外側→薄板外側→厚板外側

(5) 板厚差と添接板外面の曲げひずみ

板厚差がある継手の場合、厚板側縁端位置の添接板外面側に、ボルト締め付け時の添接板曲げによる引張りひずみが発生する。予備試験において、3列の六角ボルトとTCボルトの2種類で、添接板外面にストレインゲージを貼り付け、本締め時ならびに、本締め後（約2日経過）、そして滑り試験時の滑り発生直前の歪みの計測を行った。ちなみに添接板降伏ひずみ量は計算上1938 μ である。

計測結果、等板厚でも継手中央部に350～580 μ 程度の引張りひずみが発生する事が確認出来た。また、SM490Y板厚14mmの添接板で、板厚差2mmでは、添接板表面は締め付け軸力のみで降伏に達することがわかった。また滑り試験において、板厚差2mmまでは添接板のひずみは、ほぼ線形で増加していることがわかったが、3mm差では測定機器の設定が不十分のため、計測不能となった。これらの計測結果を表一13に示す。



図一15 添接板外面ひずみ計測要領図

表-13 母材に板厚差がある場合の添接板最大曲げひずみ量

| 種類 | 板厚差 | 添接板表面ひずみ (μ) : A上段/B下段 | | | 滑り荷重 t | 滑り試験時 の歪み |
|----|--------|------------------------------|-------|--------|-----------|--------------|
| | | 軸力導入時 | 滑り試験前 | 滑り荷重直前 | | |
| 六角 | 0mm | 489 | 487 | 1037 | 37.1 | 550 |
| | | 582 | 577 | 1147 | | 570 |
| 3列 | 2mm | 8315 | 8273 | 9273 | 29.2 | 1000 |
| | | 12574 | 12621 | 12681 | | 70 |
| | 3mm | 19201 | 19227 | ? | 27.0 | |
| | | 18102 | 18118 | ? | | |
| | 3mm(T) | 19619 | 19655 | ? | 27.8 | |
| | | 14729 | 14715 | ? | | |
| TC | 0mm | 351 | 349 | 799 | 36.1 | 450 |
| | | 494 | 483 | 1183 | | 700 |
| 3列 | 2mm | 10253 | 10264 | 10464 | 31.4 | 200 |
| | | 6476 | 6507 | 7407 | | 900 |
| | 3mm | 20325 | 20452 | ? | 30.7 | |
| | | 11760 | 11951 | 13651 | | 1700 |
| | 3mm(T) | 20425 | 20541 | ? | 31.6 | |
| | | 11615 | 11676 | 12876 | | 1200 |

添接板 : SM490YA / t=14mm (降伏点=399N/mm²)

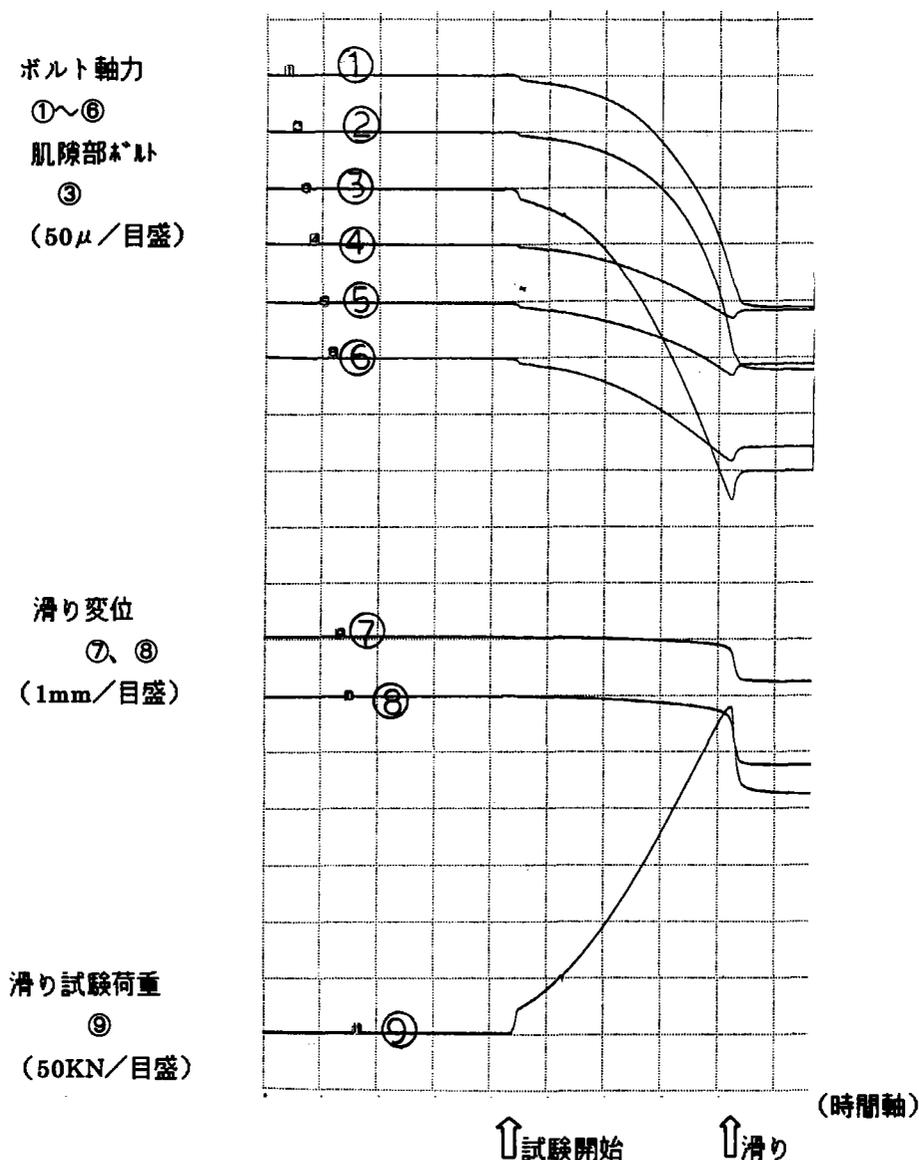
* μ 軸力 : 締付け軸力 (18.15t)

? : 計器の設定条件を越え計測不能であった。

(6) 滑り試験時におけるボルト軸力の低下

滑り試験時の各ボルト軸力は、荷重（引張）増加に伴い、継手母材ならびに添接板の弾性変形の影響でボルト軸力の低下が発生する。図-16に SM570 板厚差 4mm（無錆）の試験体における各ボルト軸力と変位を、座標をシフトして出力した滑り試験結果を示す。

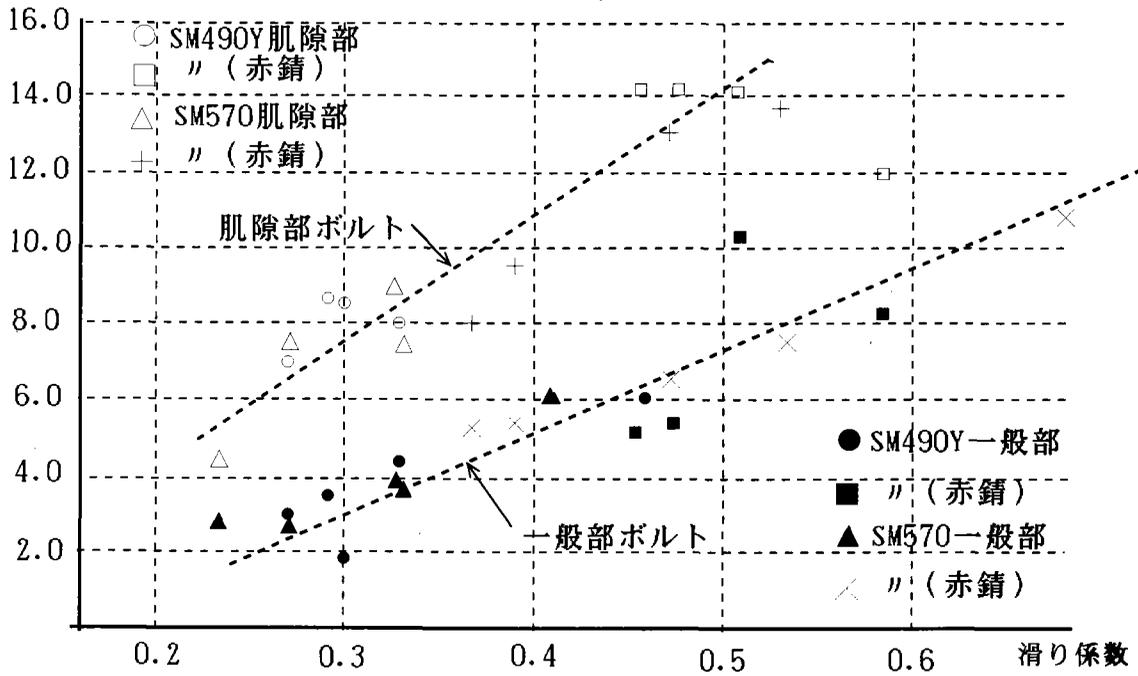
なお、肌隙部のボルトは一般部のボルトに比べ軸力低下が顕著であることが確認された。これらの結果を肌隙部ボルトと、それ以外のボルト軸力の低下率を、横軸に滑り係数、縦軸に軸力低下率としてまとめると図-17に示す結果となり、滑り係数 0.4 では一般部ボルトで 5% 程度で、肌隙部ボルト部では約 2 倍の 11% 程度と予想される。



- ・ボルト軸力は 16.5t 導入 (3092μ)
- ・各ボルト軸力低下および滑り変位は座標をシフトして出力した。

図-16 滑り試験時の荷重・変位・ボルト軸力例 (SM570-4mm 差)

軸力低下 (%)



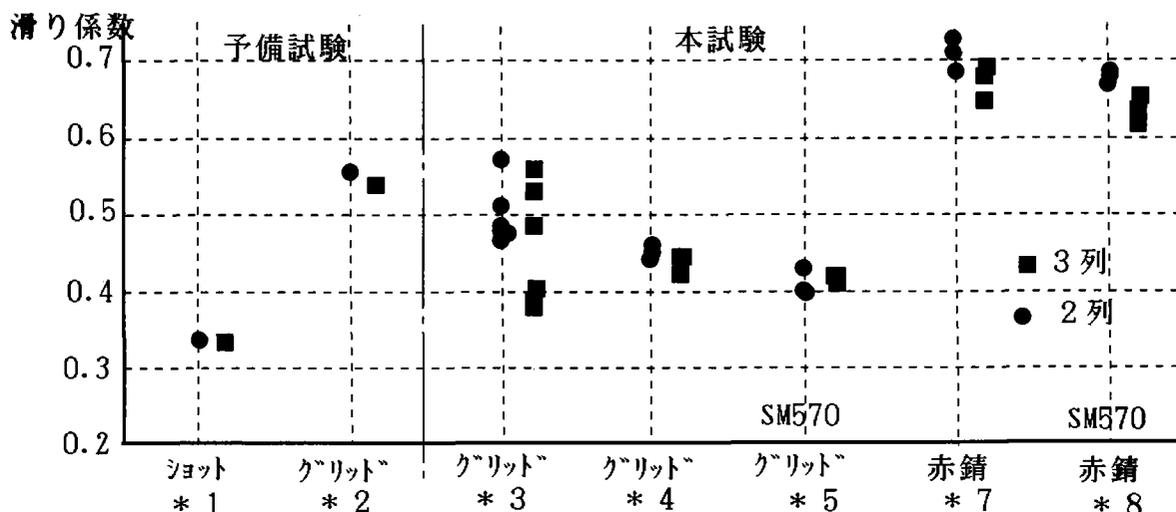
図一17 滑り係数と軸力低下 (本試験2列継手)

(7) 表面処理方法と表面粗度ならびに滑り係数

予備試験の結果、プライマー鋼板の場合にはショット（鋼球）ブラスト工法ではプライマーの除去率が悪くなり、滑り係数の極端な低下を招き、プライマー除去に適したグリッドブラスト工法によると滑り係数は大幅に向上することが確認された。

本試験でもプライマー鋼板を用いた為、予備試験を踏まえグリッドブラストのみの表面処理としたが、試験体数が多いため、試験ロット毎に表面処理を行った。表面処理の結果を表一6に示す。また摩擦面が無錆状態と、一般的な現状の摩擦面に近い状況の赤錆状態の2ケースとした。赤錆面はグリッドブラストした後、屋外で2週間程暴露し、赤錆を発生させた。結果は10～20%程度向上することがわかった。ちなみに板厚差0mmの基準試験体の滑り係数値を、図一18に示す。

一方、摩擦面処理時の表面粗度は、ブラスト工法の種類等で表面粗度は大きく異なるが、滑り係数との関係は今回の実験ではわからなかった。なお、同じ表面処理状態（無錆状態、赤錆状態、表面粗度状態にかかわらず）では、板厚差をパラメーターにした場合、滑り係数比はほぼ同様な結果を示すことも判明した。図一20, 21, 22参照。



図一18 表面処理と滑り係数の分布（板厚差0mm試験体）

(8) 滑り試験結果

1. 予備試験結果

滑り試験結果は、ショットブラストでは粗度（50S以上）は満足するものの、プライマーの完全除去が困難な原因で板厚差0mmでも道示の基準を下回った。グリッドブラストでは一般的な摩擦面係数0.54～0.56（板厚差0mm）を得る事ができた。これら各板厚差の滑り係数結果を、板厚差0mm（基準）の滑り係数で除した「滑り係数比」とを表一14に示す。

これらの結果より2mmの板厚差がある場合、滑り係数比は0.75～0.82程度、3mm差では3列グリッドが高めになったほかは、全て更に5～10%程度低下した。テーパー処理ではショット2列を除き多少の滑り係数が改善されることがつかめた。また、図一19のグラフは、試験体1体毎の試験結果のため、誤差が大き目に現れていると思われるが、おおむね滑り係数比は表面処理方法によらず「板厚差」と「ボルト列」がパラメーターである事が把握できた。

表-14 予備試験滑り試験結果

A: 締め付け順序

| 試験ロット | 材質 | 締付 一板厚差 | 表面 | 2列継手 | 3列継手 | 備考 |
|------------|--------|------------|----|----------------|----------------|---------------------------|
| | | | | 滑り係数— 滑り係数比 | 滑り係数— 滑り係数比 | |
| 六角 ショット | SM490Y | A-0mm | *1 | 0.34—1.00 | 0.34—1.00 | 3*mm はT _H °-処理 |
| | | A-2mm | | 0.26—0.76 | 0.27—0.79 | |
| | | A-3mm | | 0.23—0.68 | 0.24—0.71 | |
| | | A-3*mm | | 0.22—0.65 | 0.25—0.74 | |
| TC ショット | SM490Y | A-0mm | *1 | 0.25—1.00 | 0.33—1.00 | 2列基準 0mm が低い |
| | | A-2mm | | 0.25—1.00 | 0.28—0.85 | |
| | | A-3mm | | 0.24—0.96 | 0.25—0.76 | |
| | | A-3*mm | | 0.28—1.12 | 0.27—0.82 | |
| 六角 グリット | SM490Y | A-0mm | *2 | 0.56—1.00 | 0.54—1.00 | |
| | | A-2mm | | 0.42—0.75 | 0.44—0.81 | |
| | | A-3mm | | 0.41—0.73 | 0.44—0.81 | |
| | | A-3*mm | | 0.43—0.77 | 0.45—0.83 | |

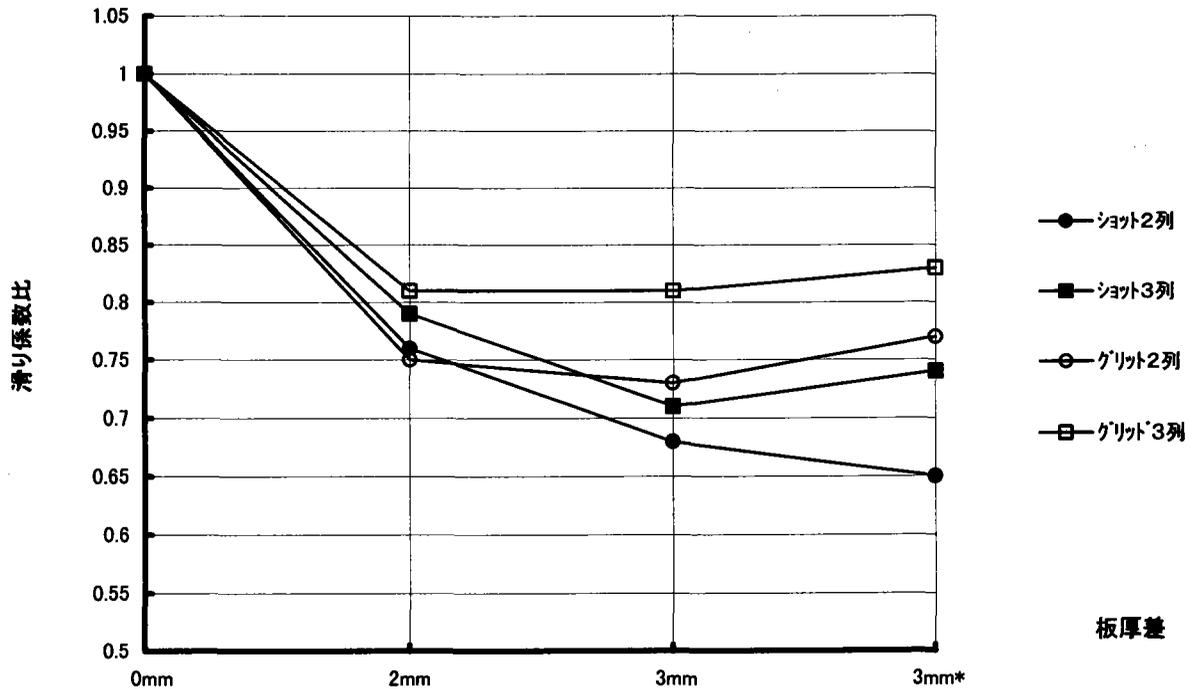


図-19 予備試験結果 (SM490Y)

2. 本試験結果

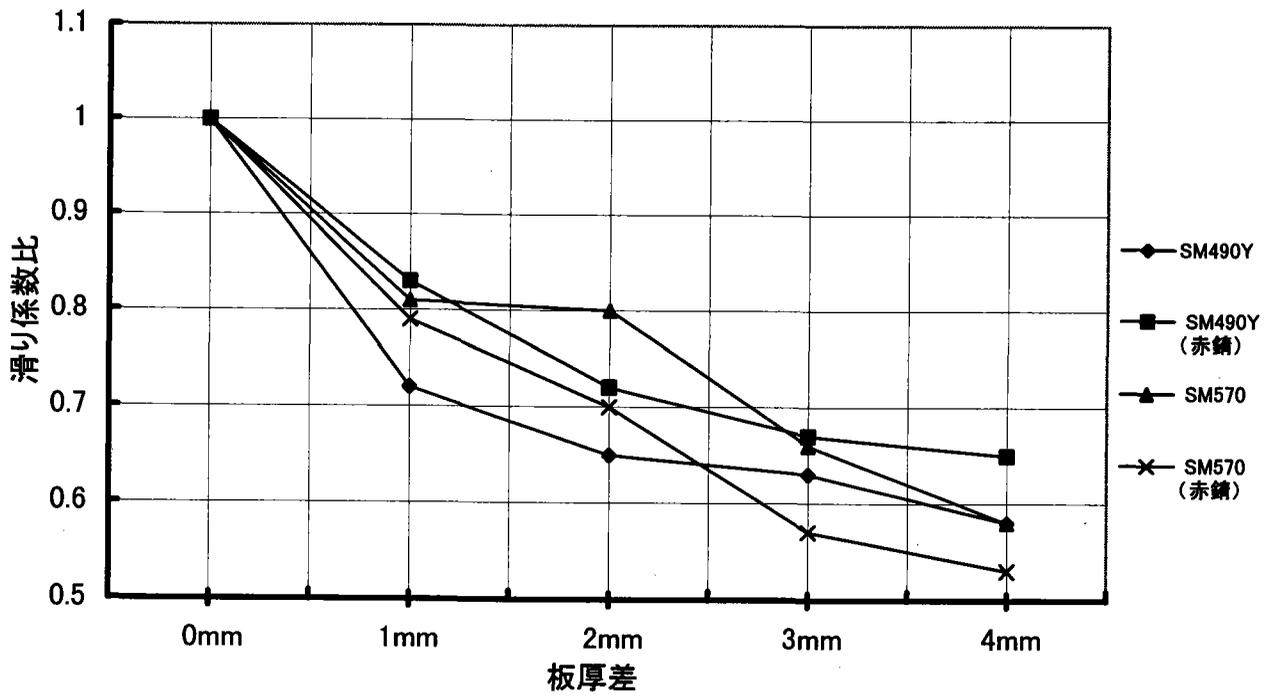
試験体各3組による滑り試験結果を表-15に示す。なお、これらの結果を各板厚差と滑り係数比でまとめたグラフを図-20~22に、ボルト列(2列~4列)の影響を図-23に、そして各材質の影響の関係を図-24にまとめて表示する。なお、SS400のグラフ(図-24)は追加試験における同等の縁端距離の結果を採用表示している。

これらの結果より、滑り係数は摩擦面処理方法に大きく依存するものの、滑り係数比での比較で、「板厚差」と「ボルト列」、そして「材質」が影響を及ぼすパラメーターであることがより明確となった。具体的には、添接版が高級材であるほど、またボルト列が少なくなるほど低下率が大となり、これらは母材板厚差に比例する事が確認された。なお、当初の目標としていた滑り係数低下比0.9は、4列ボルト1mm板厚差の場合でクリアーするのみである。

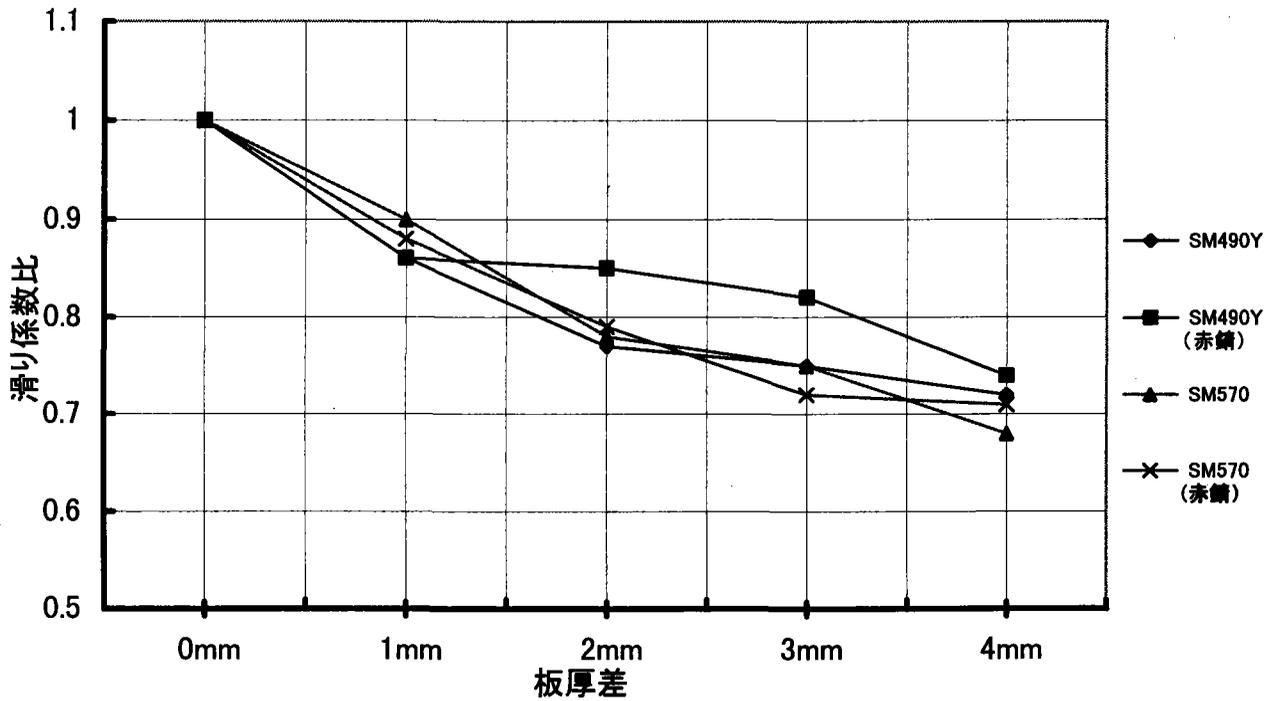
試験時の詳細データは、添付資料-4「本試験データ」を参照。

表-15 滑り試験結果(本試験) A: 締め付け順序

| 試験ロット | 材質 | 締付- 板厚差 | 表 面 | A: 締め付け順序 | | |
|----------------|--------|------------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | | 2列継手 滑り係数-平均-比率 | 3列継手 滑り係数-平均-比率 | 4列継手 滑り係数-平均-比率 |
| STEP-1 | SM490Y | A-0mm | *3 | .57/.48/.51-.52-1.00 | .53/.56/.49-.53-1.00 | - |
| | | A-2mm | | .39/.41/.40-.40-0.77 | .43/.43/.44-.43-0.82 | - |
| | | B-2mm | | .40/.45/.37-.41-0.78 | .43/.40/.43-.42-0.80 | - |
| STEP-2 | SM490Y | A-0mm | *3 | .49/.47/.48-.48-1.00 | .39/.38/.40-.39-0.89 | - |
| | | A-1mm | | .38/.39/.38-.38-0.80 | .34/.36/.34-.35-0.89 | - |
| | | A-2mm | | .31/.38/.32-.34-0.70 | .33/.33/.32-.33-0.84 | - |
| | | A-3mm | | .30/.31/.35-.32-0.67 | .34/.32/.33-.33-0.85 | - |
| | | A-4mm | | .32/.31/.32-.32-0.66 | - | - |
| STEP-2 (再) | SM490Y | A-0mm | *4 | .47/.46/.46-.46-1.00 | .42/.44/.44-.43-1.00 | .43/.42/.44-.43-1.00 |
| | | A-1mm | | .32/.35/.33-.33-0.72 | .35/.41/.36-.37-0.86 | .38/.37/.36-.37-0.86 |
| | | A-2mm | | .29/.31/.31-.30-0.65 | .33/.34/.33-.33-0.77 | .38/.37/.36-.37-0.86 |
| | | A-3mm | | .29/.31/.27-.29-0.63 | .34/.32/.32-.33-0.75 | .35/.35/.34-.35-0.81 |
| | | A-4mm | | .29/.25/.27-.27-0.58 | .31/.32/.31-.31-0.72 | .37/.35/.34-.35-0.82 |
| STEP-3 テ-パ- | SM490Y | A-0mm | *4 | STEP-2(再)-.46-1.00 | STEP-2(再)-.43-1.00 | - |
| | | A-2mm | | .35/.34/.35-.35-0.75 | .37/.37/.35-.36-0.84 | - |
| | | A-3mm | | .35/.34/.33-.34-0.73 | .37/.36/.36-.36-0.84 | - |
| | | A-4mm | | .36/.35/.35-.35-0.76 | .38/.39/.36-.38-0.87 | - |
| STEP-2 | SM570 | A-0mm | *5 | .40/.42/.40-.41-1.00 | .42/.42/.41-.42-1.00 | .40/.41/.42-.41-1.00 |
| | | A-1mm | | .32/.33/.34-.33-0.81 | .37/.38/.37-.37-0.90 | .40/.38/.38-.39-0.94 |
| | | A-2mm | | .34/.32/.32-.33-0.80 | .33/.34/.31-.33-0.78 | .35/.36/.35-.35-0.86 |
| | | A-3mm | | .31/.24/.26-.27-0.66 | .31/.32/.31-.31-0.75 | .34/.35/.35-.35-0.85 |
| | | A-4mm | | .25/.25/.21-.24-0.58 | .30/.28/.27-.28-0.68 | .31/.30/.31-.31-0.75 |
| STEP-6 赤錆 | SM490Y | A-0mm | *7 | .69/.72/.71-.71-1.00 | .68/.66/.69-.68-1.00 | - |
| | | A-1mm | | .64/.58/.53-.58-0.83 | .61/.59/.54-.58-0.86 | - |
| | | A-2mm | | .50/.52/.51/.51-0.72 | .59/.60/.54-.58-0.85 | - |
| | | A-3mm | | .48/.50/.44-.47-0.67 | .57/.54/.55-.55-0.82 | - |
| | | A-4mm | | .47/.46/.44-.46-0.65 | .52/.52/.47-.50-0.74 | - |
| STEP-7 赤錆 | SM570 | A-0mm | *8 | .67/.68/.69-.68-1.00 | .64/.62/.65-.64-1.00 | - |
| | | A-1mm | | .52/.57/.52-.54-0.79 | .55/.57/.56-.56-0.88 | - |
| | | A-2mm | | .44/.53/.45-.47-0.70 | .50/.51/.49-.50-0.79 | - |
| | | A-3mm | | .39/.35/.42-.39-0.57 | .48/.51/.39-.46-0.72 | - |
| | | A-4mm | | .36/.35/.38-.36-0.53 | .46/.45/.44-.45-0.71 | - |



図一20 板厚差と滑り係数低下比 (2列継手)



図一21 板厚差と滑り係数低下比 (3列継手)

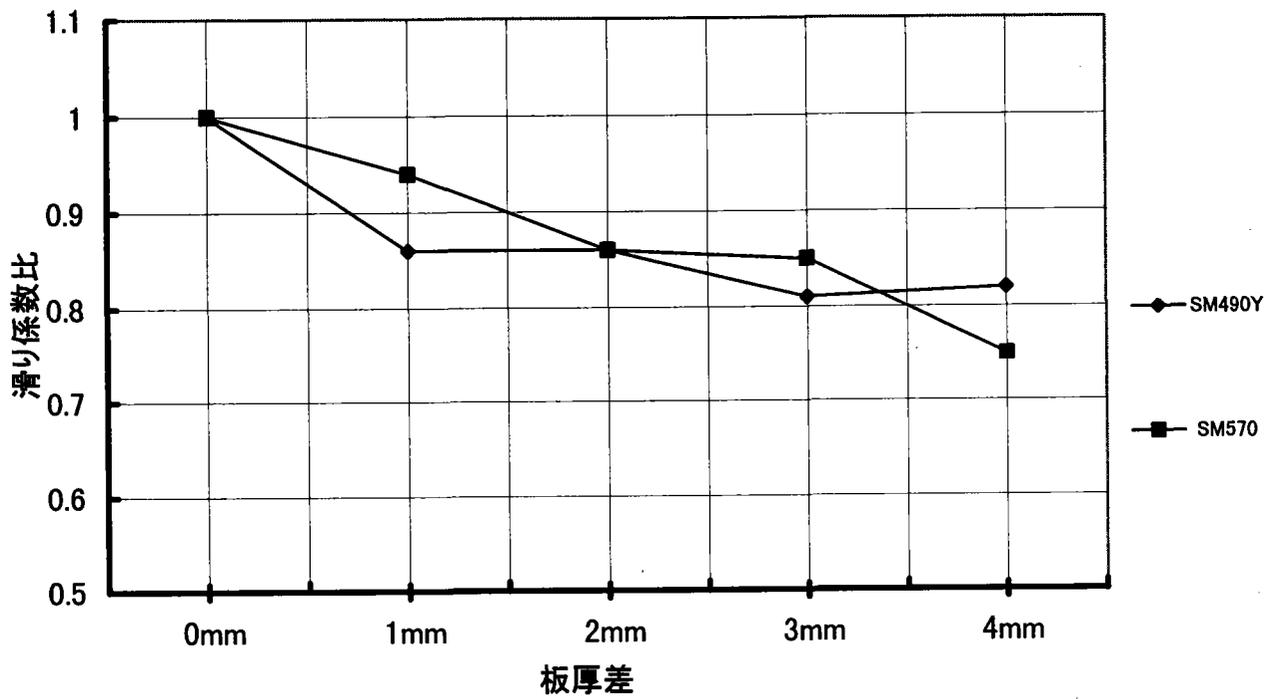


図-22 板厚差と滑り係数低下比 (4列継手)

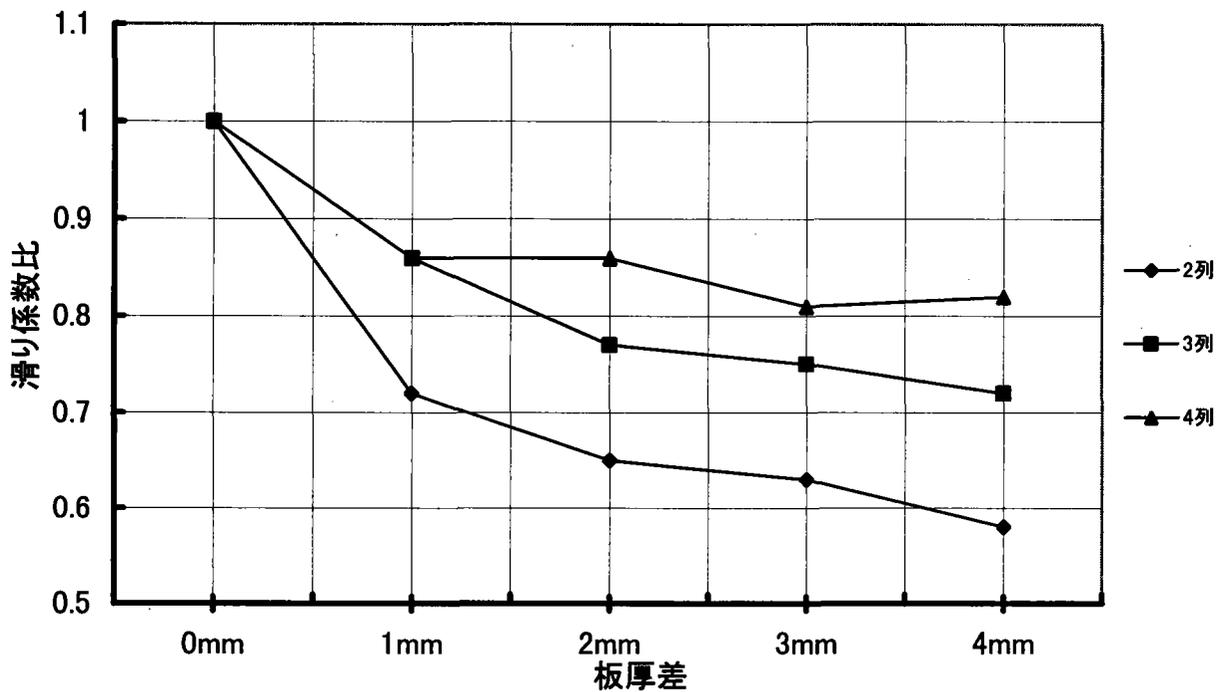
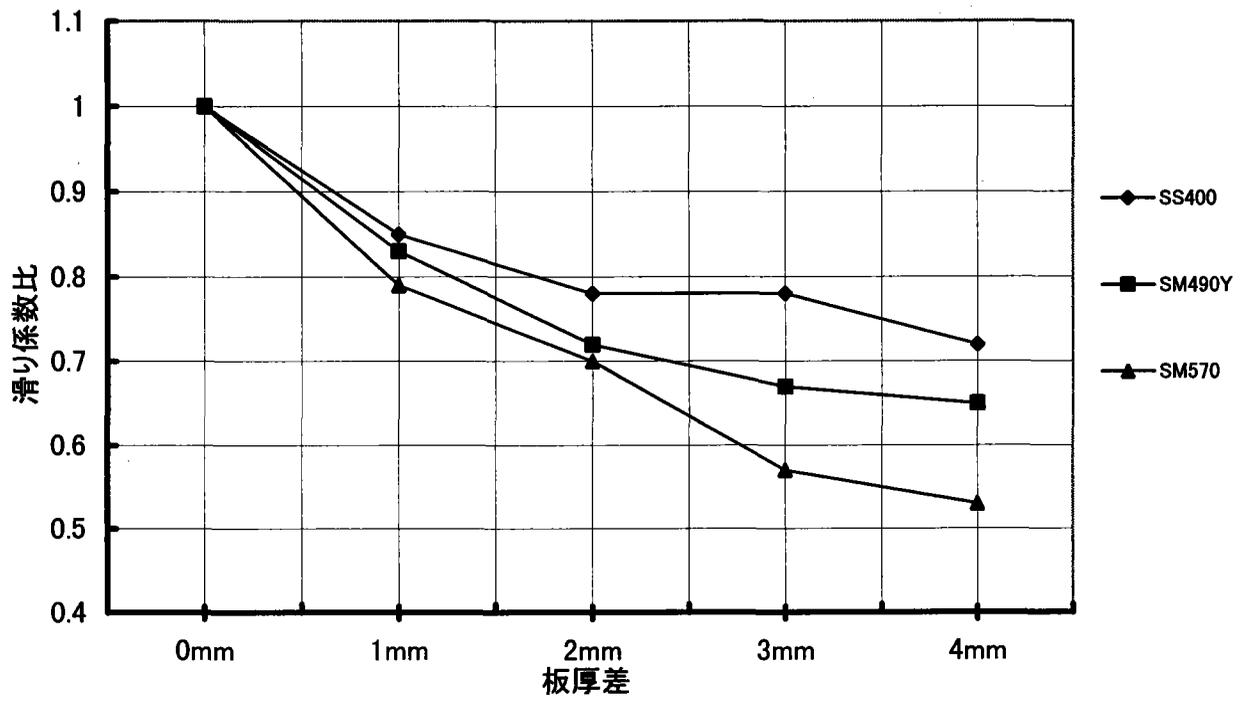


図-23 ボルト列の影響 (SM490Y: 無焼)



図一24 材質の影響(2列赤錆)

(9) テーパー加工効果

板厚差のある場合、厚板側縁端にテーパー加工を施すことにより、肌隙の改善効果で薄板側肌隙部の接触圧が改善され、滑り係数の改善が期待される。1:5のテーパー処理を用いた予備試験では、あまり効果は確認出来なかったが、1:10を用いた本試験のSM490Yの結果では、板厚差2mm、3mm、4mmともテーパーを施せばほぼ同様な滑り係数となり、またテーパー処理を行うことにより約10%程度改善されることが確認された。表-15のテーパー試験結果および図-25参照。

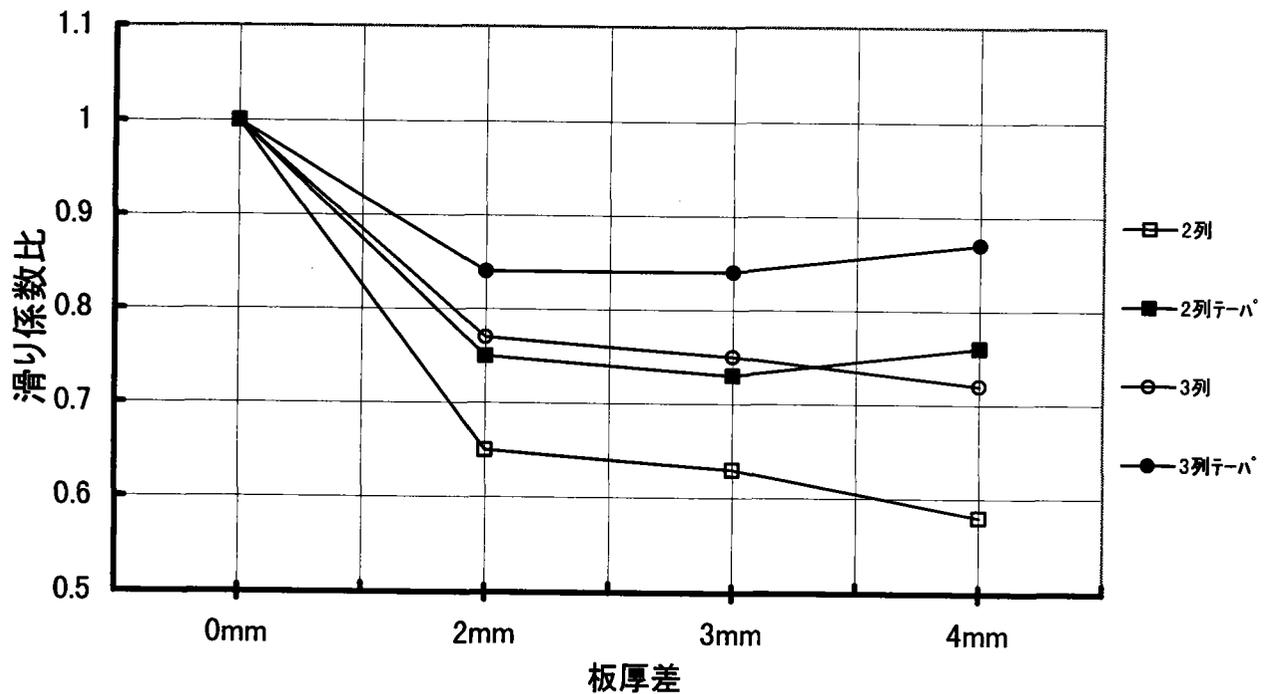


図-25 テーパー加工効果確認試験 (SM490Y)

(10) フィーラー滑り試験結果

SM570材の滑り試験体に対しての、各材質フィーラーを板厚差に挿入した滑り試験結果は、板厚公差等で肌隙が発生する場合と、そうでない場合大きな違いが発生することがわかった。フィーラー挿入後の合計板厚差が0mmの場合には、滑り係数の低下は無視できる範囲であるが、若干の板厚差（今回0.67mm発生）が生じた場合、滑り係数の低下が大きくなり、材質によっては無視できないほど低下することが確認された。またフィーラー材質の強度が高くなるにつれ低下の傾向が大である結果となった。試験結果を表-16、17に、フィーラー材と滑り係数比の関係を図-27に示す。

表-16 フィーラー滑り試験結果（本試験STEP-4） 板厚差フィラー側0.67mm薄

| ボルト列 | 母材・添接板材質 | フィーラー3.2mm | 表面処理（無錆） | 滑り係数・滑り面 | 備考 |
|------|----------|------------|----------|-------------------|----------------------------|
| 2列 | SM570 | 無規格 | *5 | .41①④/.43②③/.43②④ | フィーラー側 実測板厚差 -0.67mm |
| | | SS400 | | .41①④/.40①④/.39①④ | |
| | | SM490Y | | .35①④/.41①③/.39①③ | |
| | | SM570 | | .40①③/.37②③/.38①④ | |
| 3列 | SM570 | 無規格 | *5 | .46①④/.48②③/.44①③ | |
| | | SS400 | | .43①③/.42②④/.40②③ | |
| | | SM490Y | | .41②④/.41①④/.37①③ | |
| | | SM570 | | .37②③/.38②③/.36①④ | |

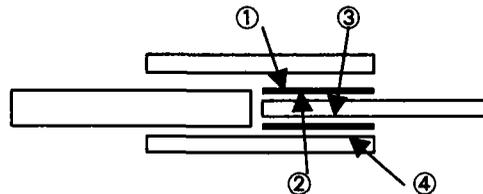


図-26 滑り試験時の滑り面記号

表-17 フィーラー滑り試験結果（本試験STEP-5） 板厚差0mm

| ボルト列 | 母材・添接板材質 | A-フィーラー3.2mm | B-フィーラー3.2mm | 表面処理（無錆） | 滑り係数-滑側-滑り面 | 備考 |
|-------|----------|--------------|--------------|-----------|----------------|----|
| 2列 | SM570 | なし | なし | *6 | 0.52/0.48/0.49 | 基準 |
| | SM570 | 無規格 | SS400 | | 0.49-A-②④ | |
| | | | SM490Y | | 0.48-B-①③ | |
| | | | SM570 | 0.46-B-①③ | | |
| | SM570 | SS400 | SM490Y | *6 | 0.48-A-②④ | |
| | | | SM570 | 0.48-B-①③ | | |
| SM570 | SM570 | SM570 | *6 | 0.47-A-②④ | | |
| 3列 | SM570 | なし | なし | *6 | 0.49/0.46/0.46 | 基準 |
| | SM570 | 無規格 | SS400 | *6 | 0.50-B-①④ | |
| | | | SM490Y | 0.50-B-①③ | | |
| | | | SM570 | 0.45-B-①④ | | |
| | SM570 | SS400 | SM490Y | *6 | 0.48-B-②④ | |
| | | | SM570 | 0.49-B-①③ | | |
| | SM570 | SM570 | SM570 | *6 | 0.46-A-未確認 | |

滑り面記号は図-26に倣う

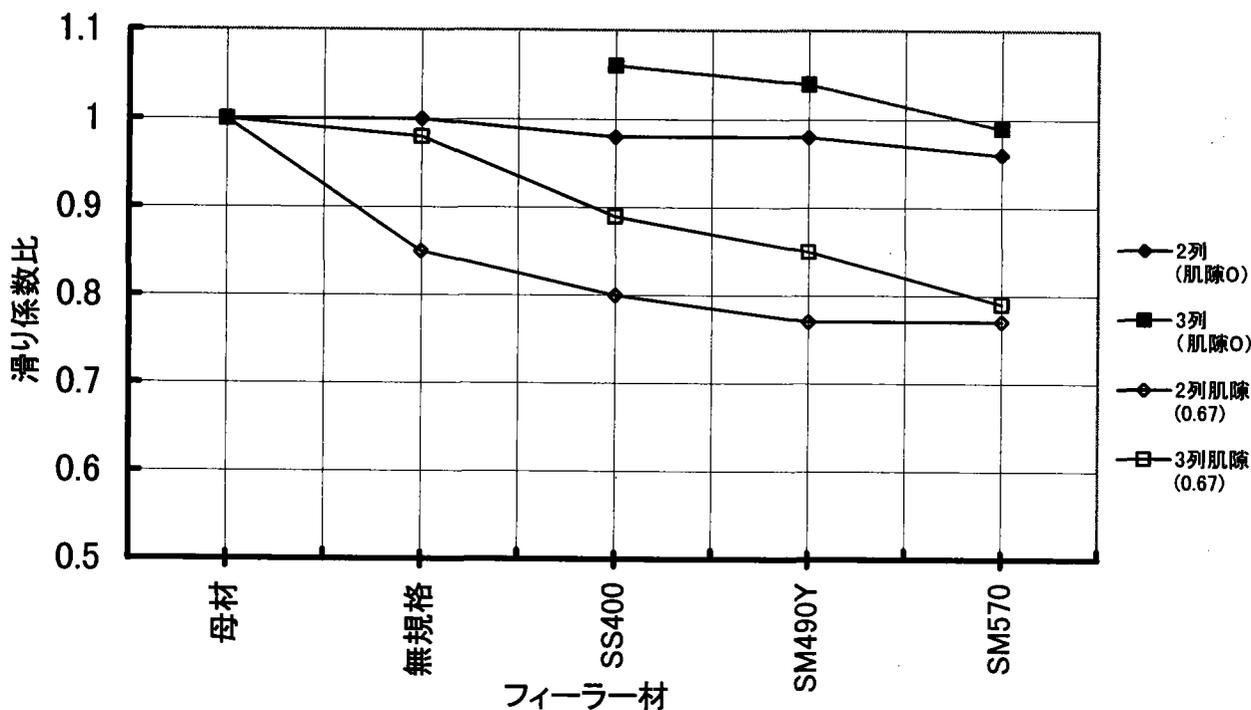


図-27 フィラー挿入滑り試験結果

(11) TCボルト

TCボルトの軸力コントロールは、ボルトの物理的性質に依存し人為的なコントロールが出来ないボルトのため、ストレインゲージにて軸力を正確に導入する六角ボルトとの継手性能を比較するため、同様の組立要領にて予備締め後、専用シャーレンチで軸力を導入し滑り試験等を実施した。

試験結果は1体だけの試験であり、誤差が等厚の試験（2列）に発生したと考えられる低い滑り係数が発生したが、その他の板厚差のある試験体については、六角とほぼ同等以上の結果となった。試験結果を、表-14に示す。

また、TCボルトの軸力導入において、個々のボルトの締め付け軸力が六角に比べ全般的に大きかった為に、滑り耐力では六角より大きめになったが、前述したように同様な滑り係数を示し、TCボルト特有の問題は特になかった。