

板厚の異なる材片を接合した高力ボルト摩擦接合継手の滑り耐力

Slip Resistance of High Strength Bolted Connections with Different Thicknesses of Base Plates

宮崎 晴之*、黒田 充紀**、田中 雅人***、森 猛****

Haruyuki MIYAZAKI, Mitsutoshi KURODA, Masato TANAKA, Takeshi MORI

- * 正会員 三井造船(株) 千葉鉄構工場 製造部 (〒290-8601 千葉県市原市八幡海岸通り 1)
 ** 工 博 足利工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒326-0845 栃木県足利市大前町 268-1)
 *** 工 博 (株)東京鉄骨橋梁 取手工場 工務部 (〒302-0038 茨城県取手市下高井 1020)
 **** 工 博 法政大学教授 工学部土木工学科 (〒184-0002 東京都小金井市梶尾町 3-7-2)

Slip resistant type of high strength bolted connections have a function to transfer load by frictional forces acting on contact surfaces between base plates and splices, so the joints are specified to have no gap there. However, it may be necessary to connect members of different dimensions. In this case, the gap of joints is apt to appear and it is usually filled out by means of filler plates. Because of saving construction works and/or avoiding corrosion problems, it is sometimes requested to connect those without filler plates. In this study, slip resistance of high strength bolted connections with different thicknesses of base plates are experimentally examined, and influences of some factors on it are also investigated. Pressure stresses between base plates and splices are paid attention and are analyzed by using finite element methods.

Keywords : high-strength bolted connection, slip resistance, different thickness, gap

1. はじめに

高力ボルト摩擦接合継手は、ボルトを締め付けることにより添接板と母材の間に所定の圧縮力を導入し、その間の摩擦抵抗によって応力を伝達する機能を有する。そのため、道路橋示方書¹⁾ではそれらの間に肌隙があってはならないとしている。しかし実際には板厚公差や設計上の制約から接合する2つの材片の板厚が異なることもある。この場合には、フィラーを挿入する、あるいは板継ぎ溶接を行うことにより、接合部で肌隙が生じないような工夫がなされてきた。一方、道路橋示方書では2mm以下の厚さのフィラーは防錆対策上から使用しない方がよいともされている。また、鋼橋製作の合理化や省力化を目指した要求の中には、薄板フィラーの使用および板継ぎ溶接を避けて、板厚が異なったまま接合してはどうかとの意見もある。そのためには、板厚差のある材片間の摩擦接合継手の滑り耐力を明らかにする必要があることは言うまでもない。また、最近改定された道路橋示方書¹⁾では、フィラーの材質は母材の材質によらず一般構造用鋼材でよいとされているが、それ以前は母材の材質と合せるべきとされてきた。しかし、薄い高張力鋼の板を入手することは難しく、またそれを加工するには多大な手間を必要とする。そのため、フィラーの材質につい

ても検討すべきとの要求も高かった。

建築構造物では型鋼が用いられることも多く、板厚公差が発生する割合が高いためか、板厚差を有する継手の滑り耐力に関する研究²⁾が行われてきた。その結果に基づき、建築学会の高力ボルト接合設計指針³⁾では1mmまでの板厚差であれば、そのまま接合してもよいとしている。これは等厚の継手の滑り耐力の90%を確保すればよいとの考え方に基づいている。しかし、その検討で用いられた継手は厚さ6~12mm程度の比較的薄い板を用いたものであり⁴⁾、橋梁の分野にそのまま用いるには検討の余地がある。

滑り耐力がクーロンの摩擦則に従うとすれば、それは添接板と母材間の摩擦係数と圧縮力に直接的に依存する。板厚差がある場合には、薄板側に肌隙が生じ、ボルト軸力がそのまま添接板と母材との間の圧縮力とはならないことは容易に想像できる。この圧縮力に対しては、先に挙げた母材の厚さ(添接板の厚さ)に加えて、その材質、ボルト列数、ボルト間隔などの影響も大きいと考えられる。

本研究は、橋梁で使用されることの多い板厚25mm程度の母材を対象に、板厚差が1~4mm程度生じた場合の高力ボルト摩擦接合継手の滑り耐力について、上記の因子に配慮しながら実験的に調べるとともに、その向上策

について検討したものである。その際、添接版と母材間の接触圧およびそれに多大な影響を及ぼすボルト軸力についても注目した。さらに、単純化したモデルを用いた弾塑性有限要素解析^{5) 6)}を行うことにより、解析的にも接触圧について検討した。

2. 試験体および試験方法

2. 1 供試鋼材

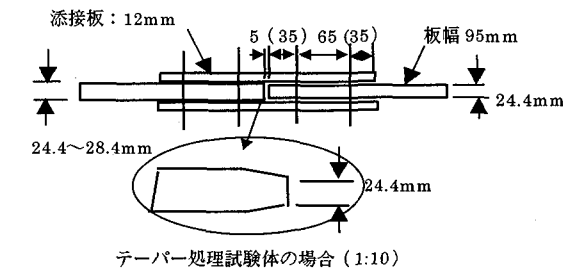
試験体の母材・添接板とも、SM490Y と SM570 を基本とし、添接板については SS400 も使用した。フィラー材は、SM490Y、SM570、SS400 に加えて無規格材もその材料とした。試験に用いた材料の機械的性質および板厚等を表一に示す。

表一 試験体材料と材料降伏点(N/mm²)

区 分		SM570	SM490Y	SS400
母 材	基準 24.4	525	461	—
CASE1-4	厚板側	513	427	—
添接板	CASE1	593	433	—
12mm	CASE3	585	438	245
Fill-PL	3.2mm	593	433	325
・ CASE1:縁端固定試験/CASE3:縁端拡大試験 ・ 厚板側母材板厚；25.4/26.4/27.4/28.4mm (t=30.4mm 材より機械切削) ・ FILL-PL 無規格材強度(降伏点)：340N/mm ²				

継手については、2種類の試験体を用いている。すなわち、板厚差 7mm の継手に 3.2mm のフィラーを 2 枚挿入したものと、等厚の継手に 3.2mm のフィラーを添接板全面（突合せ部で分割）に渡って挿入したものである。また、規格材を用いたフィラーは、厚板から 3.2mm に機械切削し、無規格材は購入板厚（3.2mm）のまま使用した。

試験体表面は、グリッドブラスト工法にて 50S 以上の粗度とした後、すぐに試験に供した無錆状態と、屋外に約 2 週間程放置した赤錆状態の 2 種類とした。使用ボルトは軸力導入管理のためにボルト軸にストレインゲージを対称に 2 枚貼り付けた F10T-M20 の高力六角ボルトとした。表一に試験体の種類を示す。各試験体とも一部を除き 3 体ずつ用意した。



図一 試験体の概要（CASE1）

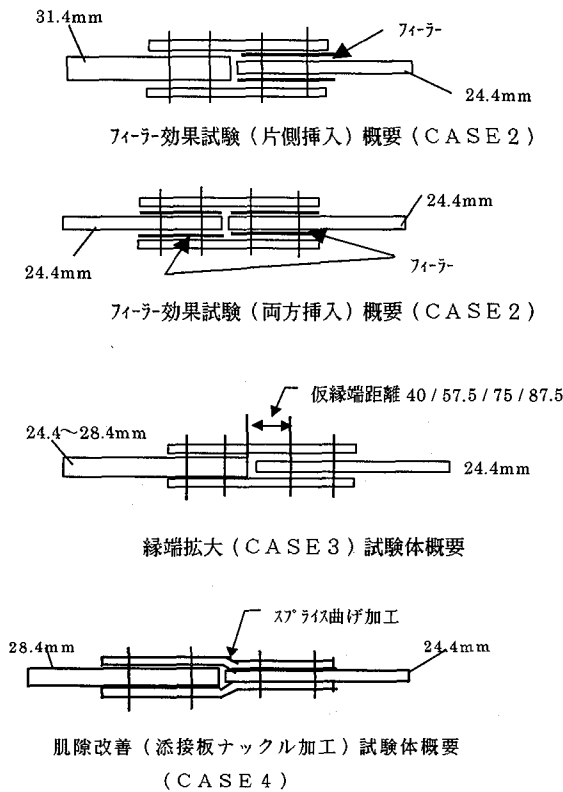
2. 2 試験体

試験体(CASE1)の形状・寸法を図一に示す。母材縁端距離を 35mm、ボルトピッチを 65mm とし、継手中央部には滑り確認の為にクリップゲージを挿入するために 5mm の隙間を設けている。これらの寸法は、道路橋示方書に示されている最小設計寸法を参考に決めたものである。母材と添接板の寸法は、滑りが生じるまでそれらが弾性範囲にあるように設計している。この試験では薄板側母材の厚さを 24.4mm（実測値）で固定し、厚板側母材の厚さを 1mm ピッチで 24.4~28.4mm まで変化させている。なお、これらの板は厚さ 31.4mm の板から機械加工したものである。添接板は公称板厚 12mm（実測値 12.0~12.3mm）のものを使用した。

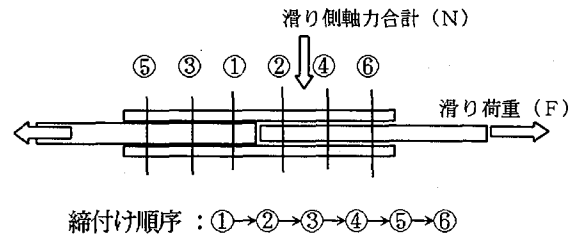
滑り係数低下の抑制方法を検討することを目的とした試験においては、図一の厚板側母材継手部縁端を 1:10 にテーパ処理加工した試験体のほか、図二に示すように肌隙を無くす目的でフィラーを挿入した試験体（CASE2）、厚板側先端から薄板側 1 列目ボルト孔中央までの寸法（以後、仮縁端距離と呼ぶ）を 40mm~87.5mm まで拡大変化した試験体（CASE3）、そして肌隙を無くす目的で添接板をプレスにてナックル加工した試験体（CASE4）を用いた。なお、フィラープレートを用意する

表二 試験体の種類（各ケース 3 体）

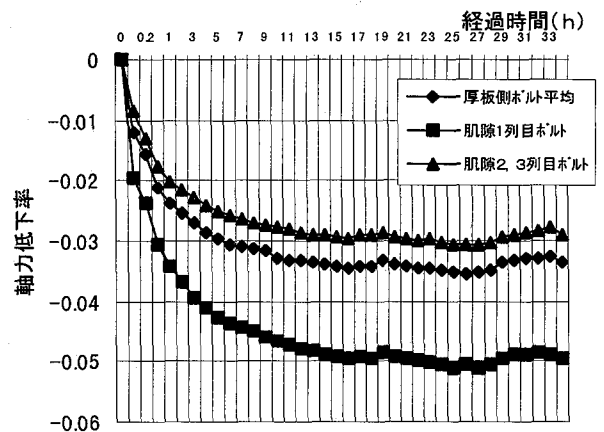
材質－板厚差(mm) (ケース)	ボルト列	縁 端 (mm)	表面 処理	
SM490Y (CASE1)	0,1,2,3,4	2,3,4	35	無錆
	2,3,4	2,3	〃 (T)	
	0,1,2,3,4	2,3	35	赤錆
SM570 (CASE1)	0,1,2,3,4	2,3,4	35	無錆
	0,1,2,3,4	2,3,4	〃	赤錆
SS400* (CASE4)	4→0 添 接板 KL	2	35	赤錆
SS400* (CASE3)	0,1,2,3,4	2	40～87.5* (仮縁端)	赤錆
SM490Y (CASE3)	0,1,2,3	3	〃	〃
SM570 (CASE3)	0,1,2,3	3	〃	〃
SM570 (CASE2)	F(0.67)	2	35	赤錆
	F(0.00)	2	〃	
(T) : 厚板側母材縁端のテーパ処理(1:10) SS400* : 添接板のみ SS400/母材 SM490Y F(0.67) : 板厚差 0.67mm のフィラー試験体 F(0.00) : 〃 0mm 〃 (数量は表－4 参照) 40～87.5* : 仮縁端距離 (実縁端距離+5mm ギャップ)				



図一2 試験体の概要 (滑り耐力改善対策)



図一3 試験体組立 (3列継手例)



図一4 3列ボルト試験体のリラクゼーション例

2. 3 試験方法

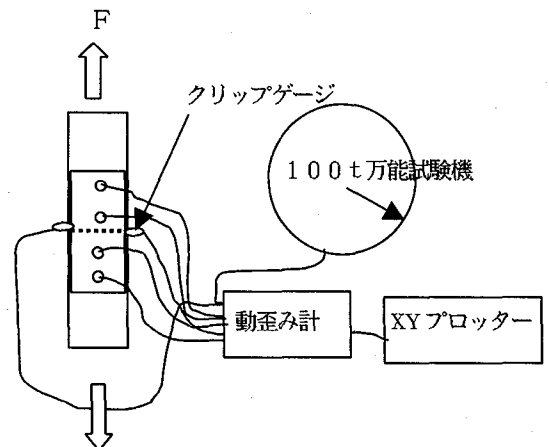
試験体へのボルト軸力の導入順序は以下の通りである (図一3参照)。継手中央側から継手両端側 (厚板側から薄板側と交互に) に、トルクレンチにて設計軸力の 60% の軸力を予備締めとして導入後、同様な順序にて設計軸力 (16.5t) を導入した。なお、滑り試験は、締付けから約 1 日程度経過させて締付け直後のリラクゼーションがほぼ終了した後に実施した。図一4に3列継手ボルトのリラクゼーションの様子を示すが、板厚差があれば、母材薄板側 1 列目の摩擦面に肌隙が発生し、この箇所のボルトのリラクゼーションは他のボルトに比べ若干大きくなっている。

滑り試験は図一5に示すように継手中央部の隙間にクリップゲージを挿入し、その隙間の变化から滑りを検知するとともに、滑るまでの各ボルト軸力の変化を動歪み計により記録した。その例を図一6に示す。

滑り係数 μ は、締付け時点での滑る側ボルト軸力 (N) と、滑りが生じた荷重 (F) を基に算出した。

$$\text{滑り係数} = F / (N \times 2)$$

摩擦接合面の接触圧分布状態を確認するため、CASE1 では無錆表面をもつ試験体について、また CASE3 では赤錆表面をもつ試験体について、高圧型 (49~127Mpa) の感圧紙を接触面に挿入し、接触圧の分布状態を調べた。



図一5 滑り試験要領 (2列継手例)

* 本論でいう「滑り係数」とは材料の摩擦則を記述するための摩擦係数のことではなく、あくまでもここに定義するみかけの滑り係数のことである。

3. 板厚差を有する継手の滑り係数

板厚差のある摩擦接合試験体の滑り試験の結果、その滑り耐力は摩擦接合面の表面処理に大きく左右されることがわかった。そのため、同じ表面処理の試験ケース毎に、板厚差 0mm での滑り係数を基準として、それに対する各試験体の滑り係数の割合を滑り係数比と定義し、以後の検討を行った。

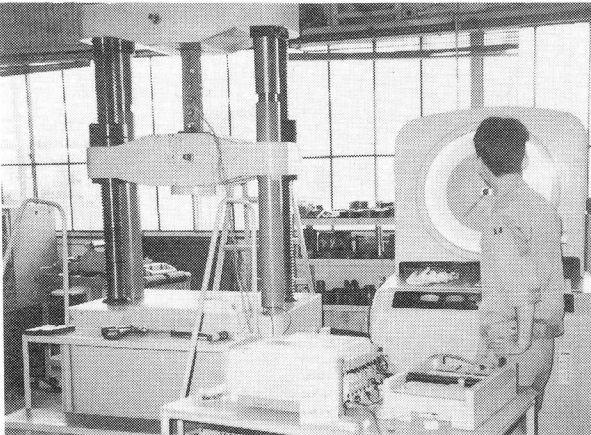
3. 1 板厚差の影響

母材に板厚差がある場合には継手中央から薄板側母材 1 列目ボルトの間に、添接板と母材間で目視可能な肌隙が発生する。その量は板厚差に比例して大きくなる。添接板の材質による違いは、目視では認められなかった。テーパ加工したものは若干小さめとなるが、肌隙の傾向は変わらない。また、ボルトのリラクゼーションは、図－4 で示したように肌隙部のボルトで他のボルトに比べて約 2%程度大きくなっていることがわかった。

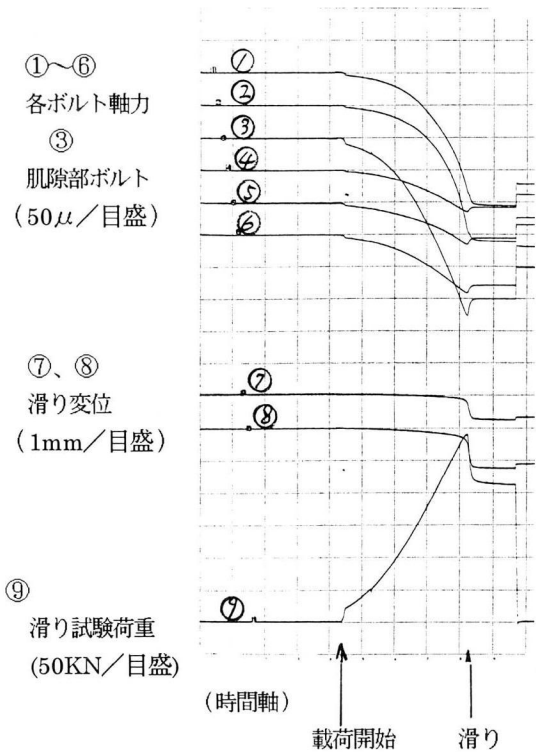
図－6 に 3 列継手板厚差 4mm (SM570、無錆) の滑り試験で測定したボルト軸力、クリップゲージで測定した滑り変位の例を示す。荷重の増加 (引張荷重) とともに、各ボルトとも軸力が低下している。板厚差がある場合には、薄板側肌隙部のボルトで軸力低下が最も大きく、肌隙側は平均で 8～15%程度低下する。厚板側のボルトでは 3～8%程度の軸力低下が生じる。

滑り試験結果 (CASE1) を表－3 および図－7 に示す。なお、図－7 中のマークは試験体 3 体で得た結果の平均値を示している。摩擦面の処理が無錆状態では板厚差 0 mm の基準試験体で、滑り係数は 0.40～0.47 程度となり、赤錆状態では 0.62～0.72 程度と大きくなった。また板厚差があれば、その板厚差に比例し滑り耐力は大きく低下している。この傾向は、継手の材質や表面の処理状態によらない。

試験結果の滑り係数だけに注目すれば、グリッドブラストし赤錆状態であれば、SM490Y では 4mm の板厚差があっても、道示の規定値である滑り係数 0.40 を満足している。



写真－1 滑り試験状況



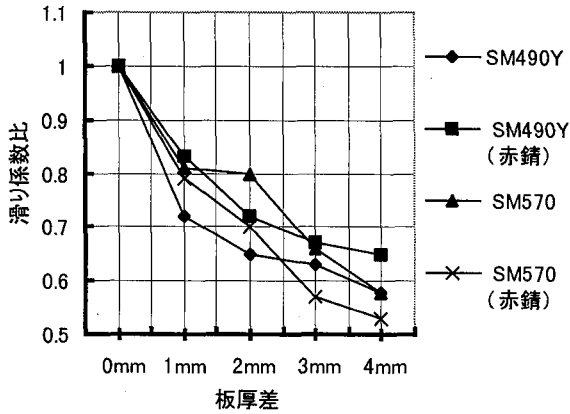
- 1)ボルト軸力は 16.5 t (3092μ)
- 2)各ボルト軸力低下および滑り変位は座標をシフトして出力

図－6 滑り試験状況例 (荷重－変位－ボルト軸力)

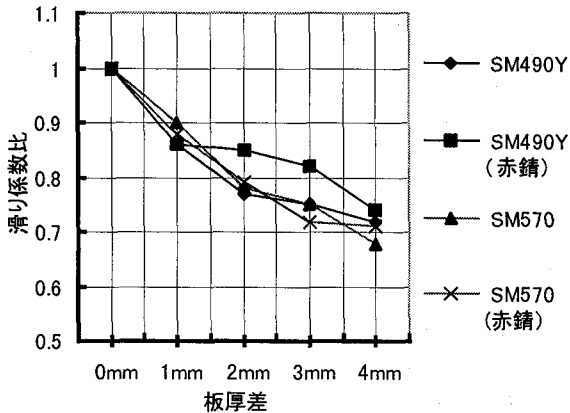
表－3 滑り試験結果 (CASE1:滑り係数)

材質－板厚差 (mm)	2 列継手	3 列継手	4 列継手
SM490Y (無錆)	0 .47/.46/.46	.42/.44/.44	.43/.42/.44
	1 .32/.35/.33	.35/.41/.36	.38/.37/.36
	2 .29/.31/.31	.33/.34/.33	.38/.37/.36
	3 .29/.31/.27	.34/.32/.32	.35/.35/.34
	4 .29/.25/.27	.31/.32/.31	.37/.35/.34
テーパ 試験	2 .35/.34/.35	.37/.37/.35	—
	3 .35/.34/.33	.37/.36/.36	—
	4 .36/.35/.35	.38/.39/.36	—
SM490Y (赤錆)	0 .69/.72/.71	.68/.66/.69	母材降伏の 可能性より 中止
	1 .64/.58/.53	.61/.59/.54	
	2 .50/.52/.51	.59/.60/.54	
	3 .48/.50/.44	.57/.54/.55	
	4 .47/.46/.44	.52/.52/.47	
SM570 (無錆)	0 .42/.42/.40	.42/.42/.41	.40/.41/.42
	1 .32/.33/.34	.37/.38/.37	.40/.38/.38
	2 .34/.32/.32	.33/.34/.31	.35/.36/.35
	3 .31/.24/.26	.31/.32/.31	.34/.35/.35
	4 .25/.25/.21	.30/.28/.27	.31/.30/.31
SM570 (赤錆)	0 .67/.68/.69	.64/.61/.65	母材降伏の 可能性より 中止
	1 .52/.57/.52	.55/.57/.56	
	2 .42/.53/.45	.50/.51/.49	
	3 .39/.35/.42	.48/.51/.39	
	4 .36/.35/.38	.46/.45/.44	

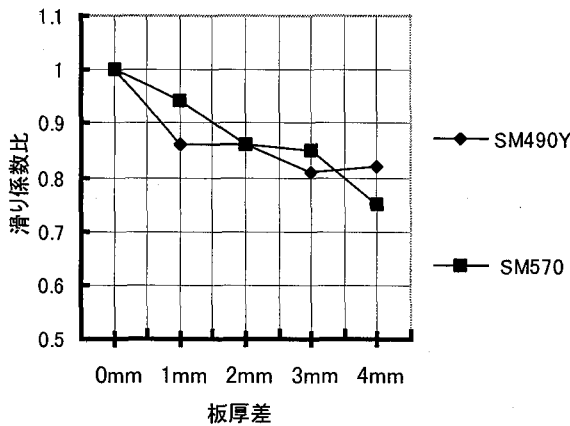
によらず同様な結果が得られることを確認した。



(a) 2列継手



(b) 3列継手

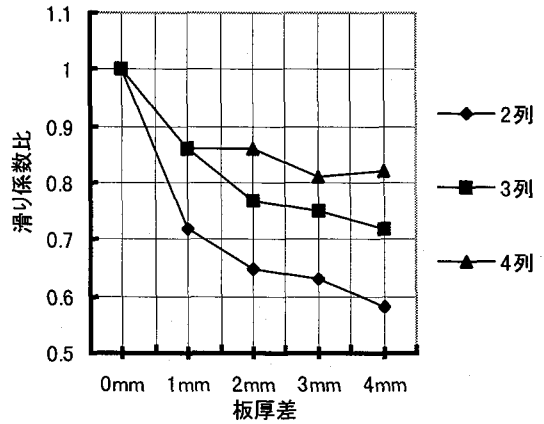


(c) 4列継手

図一七 板厚差と滑り係数低下比

3.2 ボルト列数の影響

ボルト列数毎に滑り係数比と板厚差の関係を整理した例を図一八に示す。継手部母材に板厚差がある場合、すべり耐力に主として影響を与えるのは薄板母材側1列目ボルトであると考えられる。この影響はボルト列数の加に伴って小さくなっていくと予想されたが、ここでの結果はそれを裏付けている。なお、鋼種、摩擦面処理状態



図一八 ボルト列の影響 (SM490Y: 無錆)

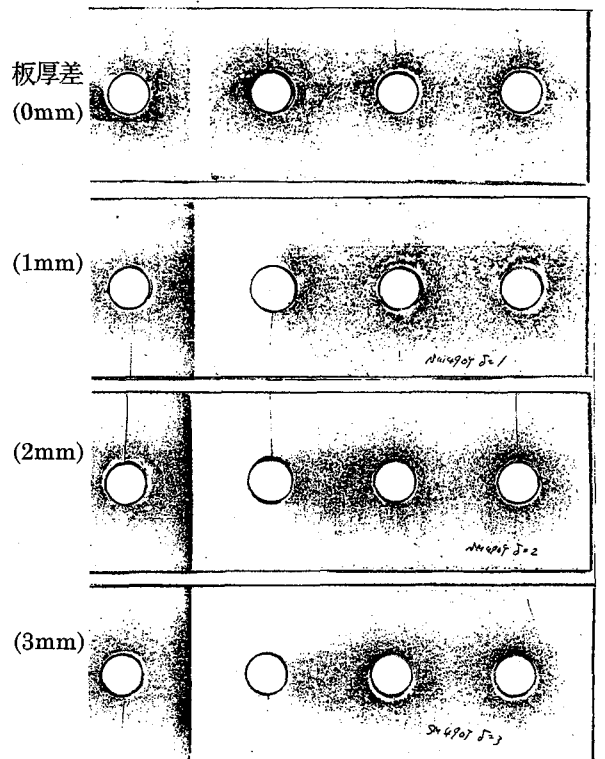
3.3 接触圧力

(1) 感圧紙による測定

摩擦接合面に感圧紙を挿入し、試験体に所定の軸力を導入した際の感圧紙の状況の例を図一九に示す。板厚差を有する場合には、厚板縁端部に大きな接触圧が生じており、薄板側の1列目のボルト近傍には接触圧が有効に働いていないことがわかる。すなわち薄板側に発生する合計の接触圧は大幅に減少している。

(厚板側)

(薄板側)



図一九 接触圧の分布状況 (SM490Y: 0, 1, 2, 3mm)

(2) 接触圧力の数値解析と滑り耐力の数値解析的予測

接触面の滑りに対していわゆるクーロン摩擦則が成り立つとすると、締付け時の接触圧を求めることにより、継手の滑り耐力を推定することができる。母材に板厚差がある継手の場合には、薄い方の母材にどの程度の接触圧が生じるかを求めることができれば、滑り耐力の予測が可能となる。すなわち、これらの接触圧に摩擦係数を乗じたもの（摩擦面が2つある継手ではその2倍）が滑り耐力となる。

ここでは、2次元平面ひずみ条件下の弾塑性有限要素法を用いて、接触圧の解析を行った。継手のモデル化手法、接触問題の扱いなどは文献6)と同様である。弾塑性論としては等方硬化を仮定したJ2流れ理論を用いた。生じるひずみは微小であり降伏棚の範囲であることを考慮して、硬化モデルとしてはバイリニアモデルを用いた。初期降伏応力は表1のとおりとし、初期降伏後の塑性硬化係数はヤング係数の1/2000とした。用いた要素は定ひずみ三角形要素であり、接点数は約2300、要素数は約4500である。接触圧の算出にあたっては、有効板幅を試験体の母材幅(95mm)と一致させた。

接触圧分布についての解析例(SM490Y、3列ボルト、2mm差)を図-10に示す。図-9の感圧紙による測定結果と同様に、厚板側の先端部に大きな接触圧の集中部がみられ、薄板側の1列目のボルト直下に接触圧が生じていないことが捉えられている。さらに詳しくみると、厚板側母材1列目のボルト近傍で、解析結果は実験結果と若干異なっている。これは、実験では予備締め時に生じた圧力をも測定するためと思われる。

図-11に、SM490Yの解析による滑り耐力低下の予測結果を実験結果と比較して示す。解析結果は薄板側の接触圧の積分値を全初期導入ボルト締付け力(3列なら3本分の合計)で除したものである。上述のようにクーロン則が成り立つものとすれば、これが板厚差なしの継手を1.0としたときの滑り係数比に相当する。予測結果は板厚差4mmで多少差があるものの、実験結果の傾向とよく類似しており、このような比較的簡易な解析でも、かなりの精度で滑り耐力の予測を行うことができると言えよう。

3.4 材質の影響

滑り係数比と板厚差の関係を添接板の材質によってマークを変えて図-12に示す。添接板の静的強度が高いものほど板厚差による滑り係数の低下が大きくなっている。これは、添接板の降伏点が大きくなるほどボルト締付け時の曲げ塑性変形が小さくなり、薄板側ボルト1列目近傍の接触圧が小さくなるためと考えられる。感圧紙の試験結果でも、また解析でもその傾向が確認された。

なお、図中のSS400は添接板のみSS400とした試験(CASE3で縁端距離同等、母材はSM490Y)結果である。

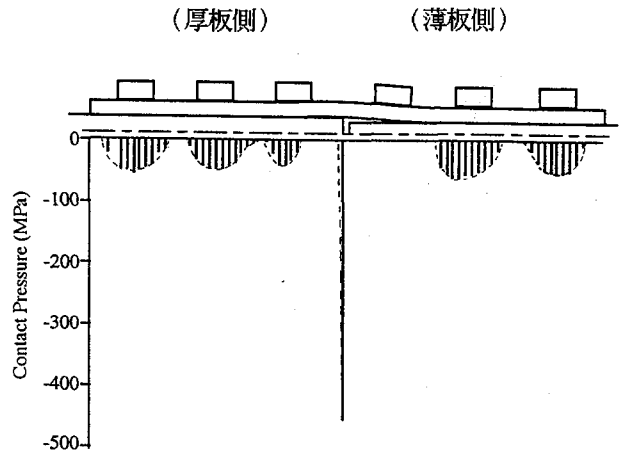


図-10 接触圧分布状態

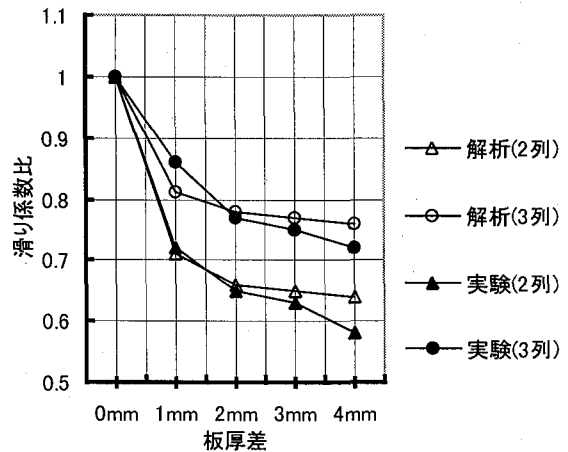


図-11 実験結果と解析結果の比較 (SM490Y: 無鍍)

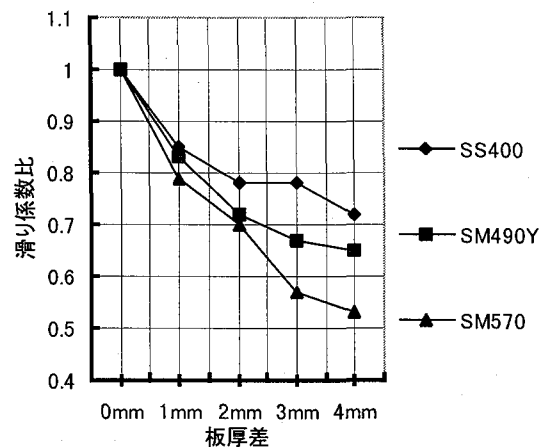


図-12 材質の影響 (2列: 赤錆)

4. 滑り係数の改善方法

摩擦接合継手に、板厚差がある場合には肌隙を無くす目的で、板厚差分についてフィラーを挿入し等厚にするケースが一般的である。しかしながら薄板のフィラーは規格材料の入手に問題があるため、ここではフィラー材質と滑り耐力の関係を調べる事とした。

フィラーを用いない場合の肌隙と滑り耐力の改善方法として、a) 厚板側母材にテーパ加工する方法と、b) 添接板を曲げ加工し母材と密着させる方法、c) 厚板母材から薄板側1列目までの距離(仮縁端距離)を大きくする方法などが考えられる。ここではこれらの方法の効果について検討する。

4. 1 フィラープレートの効果

母材と添接板にSM570を用いた試験体(CASE2)に、板厚3.2mmの無規格材と、SS400、SM490Y、SM570のフィラーを母材の両摩擦面に挿入し、滑り試験を実施した。試験要領は、板厚差0(フィラー無し)の基準試験体との滑り係数の比較とした。なお、前述のようにこの試験では2種類の試験体(図-2参照)を用いているが、薄板側にのみフィラーを挿入した場合には、実測で0.67mmの板厚差が生じていた。そのため、等厚継手の添接板全面(突合せ部で分割)に渡ってフィラーを挿入した試験体も作成している。

実験結果を表-4、図-13に示す。板厚差が0.67mmでもあれば、滑り係数の低下は母材の板厚差がある場合と同様に、2列継手で15~22%程度、3列で2~21%程度の顕著な低下がみられた。また、その低下はフィラー材が高強度になるほど大きくなった。板厚差0の場合、高強度のフィラーほど滑り係数の低下率が若干大きくなっているものの、フィラーの材質による差はさほどない結果となっている。

表-4 フィラー挿入滑り試験結果(CASE2)

区 分	フィラー材質	2列継手	3列継手
フィラー無：基準			
フィラー(0.67)		.52/.48/.49	.49/.46/.46
フィラー(0.67)	無規格	.41/.43/.43	.46/.48/.44
	SS400	.41/.40/.39	.43/.42/.40
	SM490Y	.35/.41/.39	.41/.41/.37
	SM570	.40/.37/.38	.37/.38/.36
フィラー(0.0)			
フィラー(0.0)	無規格	.49	—
	SS400	.48	.50
	SM490Y	.48	.50/.48
	SM570	.46/.48/.47	.45/.49/.46
() : フィラー挿入後の板厚差 mm (0.0)の試験数は本表の通り。			

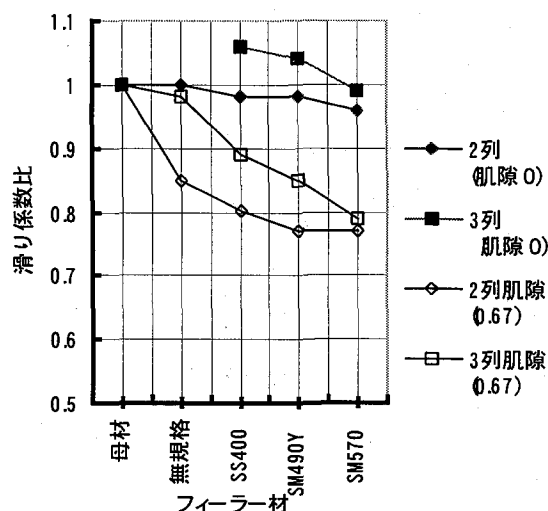


図-13 フィラー材質の影響

4. 2 ナックルプレートの効果

試験体は母材(SM490Y)間の板厚差を4mmで、添接板(SS400)を継手中央部でプレスにてナックル加工させた2列継手(CASE4)のみとし、滑り試験結果は板厚差0の基準試験体の滑り係数平均 $\mu=0.55$ に比べ、 $\mu=0.46, 0.41, 0.42$ と低下した。滑り係数比は $0.43/0.55=0.78$ であり、2列継手における板厚差1.5mm相当であることが図-7より見て取れる。このように板厚差0mmの継手と同じまで改善されない理由として、ナックルプレートでは見かけの肌隙は改善されるものの、添接板をプレス作業で精度良く加工する事が困難であり、若干の曲がりが発生したり、厚板母材の縁端部に添接板のナックル部分が干渉したりして肌隙が発生したことが考えられる。なお、肌隙が生じていたことは感圧紙試験でも確認された。

この他に、この継手の問題点として、引張荷重が作用すると、幾何学的な形状が原因で添接板と母材間の肌隙が大きくなることもある。

4. 3 テーパー効果

厚板側母材(SM490Y)先端部の両側に、図-1に示すように、1:10のテーパ加工を施した板厚差2mmから4mmの2列、および3列の試験体による滑り試験を実施した。表-3、図-14にそれらの結果を示す。2列継手、3列継手ともテーパを付けることにより、滑り係数は10%程度改善されている。これは添接板変形の起点が厚板縁端からテーパ開始部に移行し、添接板が変形しやすくなり、薄板側1列目のボルト孔近傍での接触圧力が大きくなるためである。

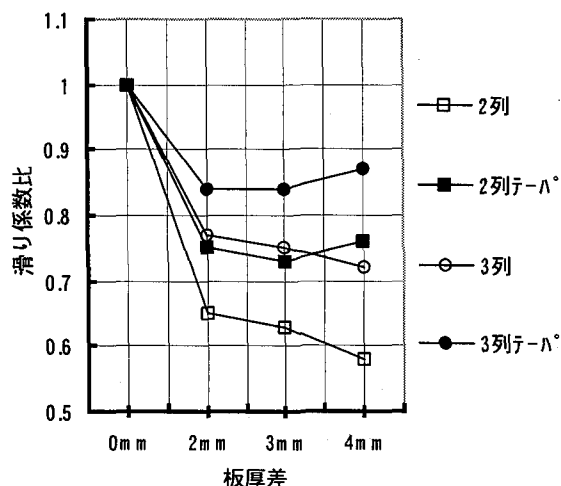


図-1 4 テーパー効果試験 (SM490Y)

表-6 仮縁端距離(CASE3)と滑り試験結果

板厚差-縁端 (mm) (mm)	SS400 2列継手	SM490Y 3列継手	SM570 3列継手
0-40*	.58/.58/.49	.63/.59/.57	.64/.63/.52
1-40	.48/.49/.43	.51/.54/.44	.52/.53/.49
2-40	.45/.45/.39	.51/.51/.49	.47/.50/.42
3-40	.45/.46/.38	.48/.52/.45	.47/.48/.40
4-40	.39/.43/.37	—	—
1-57.5	.49/.52/.44	.55/.58/.56	.57/.54/.57
2-57.5	.49/.49/.43	.55/.57/.46	.53/.52/.43
3-57.5	.45/.51/.43	.54/.56/.43	.50/.52/.44
1-75	.51/.56/.48	.58/.56/.51	.59/.58/.51
2-75	.51/.54/.48	.55/.56/.45	.59/.56/.49
3-75	.56/.55/.45	.53/.52/.46	.55/.53/.48
1-87.5	.61/.60/.51	.60/.60/.59	.62/.62/.48
2-87.5	.57/.57/.48	.56/.56/.51	.61/.60/.51
3-87.5	.52/.54/.47	.59/.56/.51	.58/.59/.53

* : 滑り係数基準値
各欄の3番目が感圧紙試験を実施した試験体

4. 4 縁端距離の効果

SM490Y と SM570 の2種類の試験体については、3列継手で母材実縁端を 35mm とし、薄板側添接板の孔位置を 40mm～87.5mm まで段階的(仮縁端距離)に変化させた。また添接板のみ SS400 (母材は SM490Y) とした試験体は、添接板材料の降伏の可能性より2列の試験とした。

解析と実験の比較(3列 2mm 差: SM490Y) 例を表-5 に、感圧紙による接触圧の状況例を図-15 に、また実験結果全体を表-6 ならびに図-16 に示す。感圧紙による接触圧を測定した試験体を再度組み立てた試験体(表-6 の各試験結果の3番目)は、摩擦面状態(赤錆)の変化が生じた結果と思われる原因で、滑り係数の低下が大半のケースで発生した。よって、図-16 ではこの感圧紙を除いた2体の平均値を示している。

いずれの継手においても仮縁端距離が大きくなるにしたがって滑り係数比は 1.0 に近づいている。これは、テーパーの効果と同様に、仮縁端距離が大きくなるにしたがって添接板が変形しやすくなり、図-15 でも明らかに薄板側1列目のボルト孔近傍での接触圧力が大きくなるためである。

表-5 滑り係数比の比較(実験とFEM解析)

仮縁端	40mm	57.5mm	75mm	87.5mm
解析結果	0.786	0.846	0.887	0.911
実験結果	0.840	0.920	0.920	0.920
試験及び解析モデル: SM490Y/板厚差:2mm				

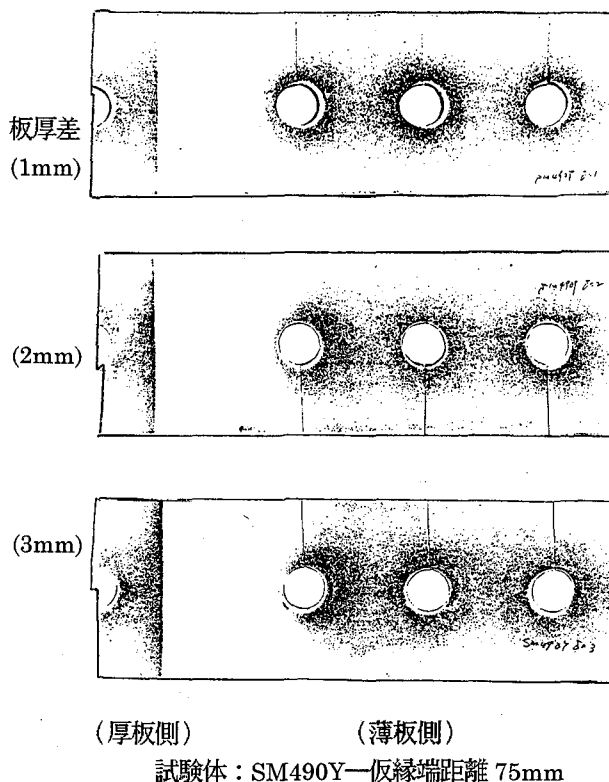
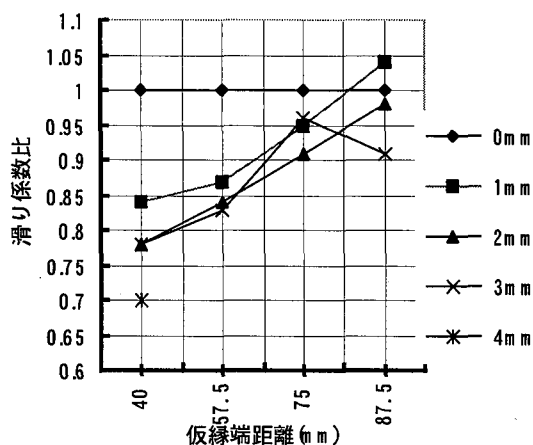
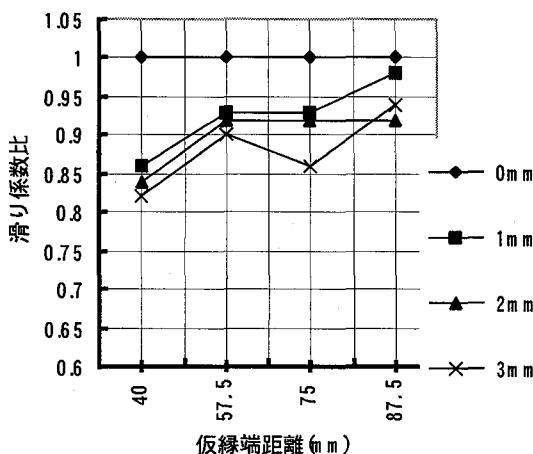


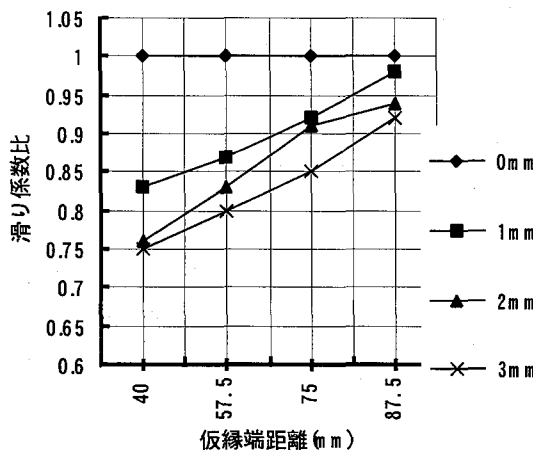
図-1 5 接触圧の分布状況(縁端距離拡大)



(a) SS400/2列継手



(b) SM490Y/3列継手



(c) SM570/3列継手

図一16 縁端距離拡大効果

5. まとめ

接合する材片間に板厚差のある高力ボルト摩擦接合継手の滑り係数、およびそれに対するいくつかの因子の影響について実験的に検討し、以下の結果を得た。

- (1) 板厚差に応じて滑り係数が低下する。これは、薄板側に肌隙が生じ、そこでの接触圧が板厚差に応じて減少するためである。なお、この際の接触圧力の減分は、厚板側の材片の縁端で補完される。
- (2) 添接板に用いる鋼材の降伏点応力が高くなるにしたがって、板厚差による滑り係数の低下は顕著となる。
- (3) ボルト列数が増すにしたがって、板厚差による滑り係数の低下は希薄となる。

さらに、いくつかの滑り係数改善策を考え、その効果についても実験的に検討し、以下の結果を得た。

- (4) フィラープレートを利用して、肌隙を完全になくすことが可能であれば、滑り係数は等厚の継手と同程度となる。その際、母材に比べて低強度のフィラープレートを用いても、滑り係数が低下することはない。
- (5) 薄板側のボルトの縁端距離を大きくすることにより、添接板は変形しやすくなってボルトの締め付けに起因する薄板側の接触圧力が大きくなるため、滑り係数は改善される。
- (6) 厚い方の母材にテーパを設けることにより、滑り係数は改善される。これは、添接板変形の起点がテーパ開始部となり、添接板が変形しやすくなるためである。すなわち、テーパの効果は縁端距離の効果と同じである。
- (7) 添接板に曲げ加工を施すことにより、見かけ上は肌隙をなくすることができるが、実際には若干の肌隙が生じ、滑り係数はさほど改善されない。

また、2次元モデルを用いた比較的簡易な弾塑性有限要素解析でも、板厚差のある摩擦継手の滑り耐力を十分に予測することができることもわかった。

6. 今後の課題

今回の研究では試験機容量の制約で M20 ボルトを用いたが、実際の鋼橋では M22 ボルトが多用されている。M22 ボルトを使用し全ての寸法がほぼ 1.1 倍された相似形の試験片を考えれば、本研究で得た滑り係数比の数値はそのまま M22 ボルト継手の数値と見てよい。

より汎用性のある結果を得るためには、他の寸法パラ

メーターについて広く検討する必要があるが、これに対しては、本研究で示したような数値解析が有効な手段になると考えている。

今回の実験に用いた試験体のプロポーシオンは、母材と添接板が弾性変形している間に滑りが生じるように設計した。しかし、実際の継手は滑り耐力と、母材・添接板の降伏が同時に生じるように設計されている。このような条件で試験を行った場合には、材料降伏も滑りの原因となるため、板厚差0での滑り係数が低くなり、板厚差のある場合の滑り係数比は高くなると考えられる。このように、本試験で用いた条件は板厚差の影響が顕著に現れるように決めたものである。この問題についてはさらに検討が必要と考えている。

最後に、板厚差がある場合には根本的に肌隙を無くすことは困難なことも明らかになったため、これらの防錆処理方法も今後の重要な課題と考えている。

謝 辞：本研究は鋼橋技術研究会・施工部会の活動の一部として行ったものである。同部会員には有益な助言を多数頂いた。日本橋梁建設協会には研究費の補助金を頂いた。また、本研究を遂行するに当たり三井造船(株)の堀 渡、桜沢一朝の両氏、そして平成7年度と8年度の足利工業大学土木工学科構造工学系卒業研究生には多大なる協力を頂いた。ここに記して、関係各位に深謝する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、平成8年12月
- 2) 日本鋼構造協会・鋼材倶楽部：鋼構造接合資料集成、1977
- 3) 日本建築学会：高力ボルト接合設計指針、1972
- 4) 安田誠宏：摩擦接合部に板厚差による間隔を生じる場合の摩擦抵抗への影響について、1973
- 5) 宮崎晴之、森 猛、黒田充紀、田中雅人：母材に板厚差のある高力ボルト摩擦接合の実験および数値解析、土木学会第51回年次学術講演会、1996.9
- 6) 黒田充紀、増田陳紀、皆川勝、西脇威夫：接触面平坦度を考慮したスプリット・テーパー接合部挙動の解析的検討、土木学会論文集、第416号/I-13、1990
- 7) 日本建築学会：土木工事標準示方書
- 8) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説、技報堂、1966
- 9) 建設省：鋼道路橋設計ガイドライン(案)、1995
(1998年9月26日受付)