

多列厚板高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動に関する研究

橋梁工学分野 彭 雪

Abstract

近年、板厚75mmを超えるフランジの継手が増加しているが、その接合方法として溶接継手とする場合が多い。しかし、品質管理や現場工期に問題があり、施工性や経済性に優れた高力ボルト摩擦接合の適用が望まれている。高力ボルト摩擦接合では、連結板の初期不整の影響、ボルト列数の多列化に伴うすべり係数の低下など、継手部の力学的挙動に不明な点も多く、極厚鋼板の現場接合法としてあまり採用されていない。本研究は、現状を踏まえ、実物を用いる高力ボルト摩擦接合継手の引張試験およびFEM解析で、ボルト列数、板厚、すべり/降伏耐力比、肌隙および軸力のばらつきの影響を検討している。その結果、各比較項目がすべり係数およびすべり挙動に与える影響を明らかにした。

1. 研究背景および目的

近年、鋼橋の分野では、その製作合理化の観点から、これまでにあまり使用されたことのない75mmを超える鋼板を採用する事例が見られる。現在、このような極厚鋼板の現場接合法は高力ボルトの列数の制限などから、主として溶接接合法が用いられている。しかし、極厚鋼板を現場で溶接接合する場合、その品質の確保がコストアップの要因となり、問題とされている。一方、もう一つの代表的な現場接合法である高力ボルト摩擦接合では、高力ボルトのリラクゼーション特性、連結板の初期不整の影響、ボルト列数の多列化に伴うすべり係数の低下など、継手部の力学的挙動に不明な点も多く、極厚鋼板の現場接合法としてあまり採用されていないのが現状である。道路橋示方書¹⁾では、ボルト列数を8列あるいは12列に制限してより、すべり係数については、0.4を確保することが規定されている。さらに、実際のすべり係数に関わらず、すべり係数0.4を用いて算定される許容量が規定されている。ISO²⁾では、ボルト列数に制限を与えるのではなく、継手長さがボルト孔径の15倍以上の継手に対して支圧耐力を低減させている。また、すべり係数は接合面の処理方法に応じて変化させている。このように、高力ボルト摩擦接合の厚板への適用については未解明な点が多く、ボルト列数、すべり/降伏耐力比、肌隙がすべり係数に及ぼす影響を明らかにする必要がある。本研究では、実験およびFEM解析を行い、すべり係数への影響を検討する。

2. 実物モデルを用いる鋼板多列高力ボルト摩擦接合継手の引張試験

2.1 実験概要

本実験は実物の継手構造を模擬し、M22高力ボルトで母板厚さが75mmの高力ボルト摩擦接合継手を設定した上で、各供試体のすべり耐力にあわせて、土木研究所が所有のしている3000t大型構造部材万能試験機あるいは100t疲労試験機を用いる。試験機の様子を写真-1に示す。

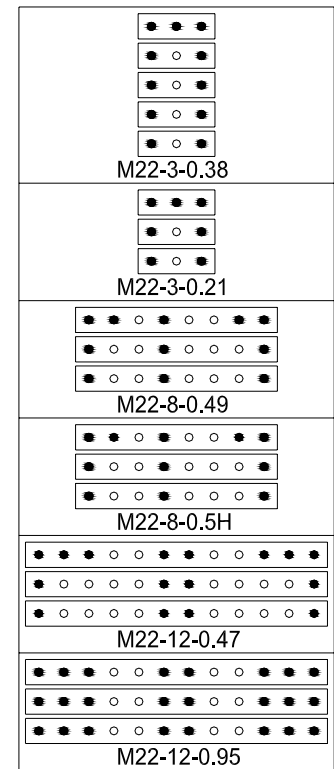
実験は、母板と連結板を高力ボルトで締付け、摩擦接合とした後、母板の両端に引張荷重を載荷する。載荷速度は0.15mm/minとし、すべり先行型では、荷重の低下、試験体側面の罫書き線のずれ、あるいはすべり音の発生など、すべり挙動の確認後に試験を終了する。降伏先行型では、すべり挙動、あるいは局所的な母材降伏の確認後に試験を終了する。



写真-1 試験機

表-1 試験体の内訳

試験体No.	1	5	6	7	15	12
試験ケース名	M22-3-0.38	M22-3-0.21	M22-8-0.49	M22-12-0.47	M22-12-0.95	M22-8-0.5H
試験体数	5	3	3	3	3	3
ボルト M22(F10T) 孔径 24.5mm	本数	3	3	8	12	8
	軸力(kN/本)	205	205	205	205	205
	すべり耐力 _{0.4} (kN)	492	492	1312	1968	1968
	すべり耐力 _{0.8} (kN)	984	984	2624	3936	3936
母材 SM490Y	板厚(mm)	38-38		75-75		75-74
	純断面積1(mm ²)	3629	7163	7913	12413	6188
	降伏点1(mm ²)	355	335	335	335	335
	降伏耐力1(kN)	1288	2399	2651	4158	2073
	純断面積2(mm ²)	3629	7163	7913	12413	6188
	降伏耐力2(kN)	1288	2399	2651	4158	2615
連結板 SM490Y	板厚(mm)	2*20	2*38	2*38	2*38	2*38
	純断面積(mm ²)	3820	7258	8018	12578	6270
	降伏耐力(kN)	1356	2577	2846	4465	2226
試験体幅(mm)	120	120	130	190	107	130
$\beta_{0.4}$	0.38	0.21	0.49	0.47	0.95	0.5
$\beta_{0.8}$	0.76	0.41	0.99	0.95	1.9	1
接合面の合計膜厚	180					
備考	すべり先行			母材降伏	肌隙	



(a) ボルトの測定位置

表-2 供試体の比較項目のまとめ

試験ケース名	M22-3-0.38	M22-3-0.21	M22-8-0.49	M22-12-0.47	M22-12-0.95	M22-8-0.5H
ボルト列数の影響	●	●	●	●		
母材降伏影響				●	●	
肌隙の影響			●			●

2.2 実験供試体

2.2.1 供試体の設計

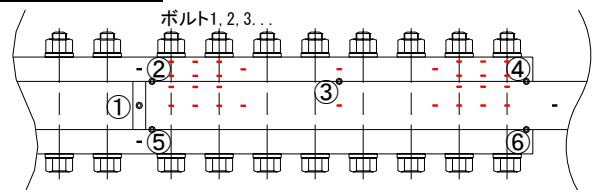
表-1に、供試体の内訳および構造諸元を示す。供試体名の最初の英数字はボルトの呼び径を、次の数字が列数を、そして、最後の数字がすべり/降伏耐力比 β を表している。例えば、M22-3-0.38は、呼び径 M22 のボルトが 3 列配置され、すべり/降伏耐力比 β が 0.38 であることを表している。なお、供試体名の最後の数字に英字が付く場合がある。その場合の英字 H は肌隙があることを示している。表-2 に、本実験で設定した 3 つの比較項目に対する供試体間の関係を示す。

2.2.2 供試体の計測

本試験における計測項目は、接合面粗さと塗膜厚、ボルト軸力、相対変位、母板と連結板のひずみおよび引張荷重とした。ボルト軸力とひずみについても詳細計測ケースと基本計測ケースに分けて計測を行う。計測場所を図-1に示す。図-1(a)には、●が各ケースの計測ボルトを示した。図-1(b)には、基本測定ケースにおいて、①～⑥のグリッパ変位計および母板と連結板の黒い点のひずみであり、詳細ケースにおいて、基本ケースの計測項目に加え母板と連結板の赤い点のひずみである。

2.2.3 供試体の製作

表-1に従って供試体を製作した。使用鋼材の



(b) 相対変位およびひずみの測定

図-1 測定位置

使用実態を考慮して SM490Y である。接合面処理は無機ジンクリッチペイント塗装とし、膜厚合計 180 μ m を管理した。ボルトの締付けは手動検査用トルクレンチを用い、軸力とトルク係数の関係を調べて上で、締付けトルクを設定し、トルク管理によって軸力を管理した。

2.3 実験結果

2.3.1 塗膜厚の計測結果

図-2 に母板と連結板の合計塗膜厚を示す。図より、合計塗膜厚は 160 μ m～200 μ m の範囲内変動するため、高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)³⁾を参考して、すべり係数が 0.45 以上になることが確認できる

2.3.2 母板と連結板そり量の結果

各ケースにそり量を測定し、そり量の変動範囲は 0～4.36mm である。連結板のそり量の一例を図-3 に示す。○に測定場所を示し、赤い線下の短線がそり量を示す。

2.3.3 材料試験

供試体に用いた鋼材の材料試験を行い、結果を表-3に示す。表より、いずれの材料もJIS規格を満足していることが確認できる。

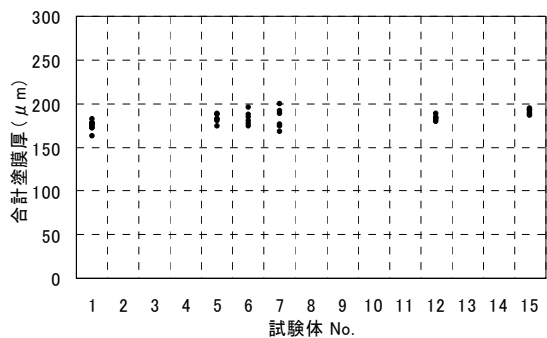


図-2 母板と連結板の合計塗膜厚

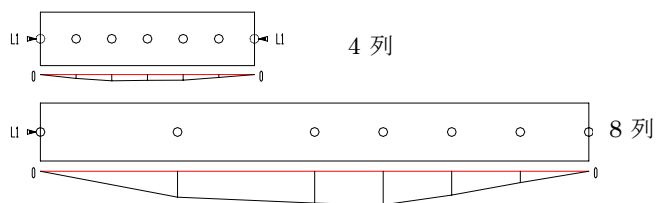


図-3 連結板のそり量

表-3 材料試験の結果

鋼種	板厚mm	降伏点 σ_y	引張強度 σ_u	降伏比 σ_y/σ_u	ポアソン比
SM490Y	75	382.07	547.50	0.70	0.28
		385.75	549.07	0.70	0.28
		365.76	542.80	0.67	0.28
	75	377.86	546.46	0.69	0.28
SM490Y	38	382.59	534.8	0.72	0.27
		398.16	538.0	0.74	-
		385.72	534.5	0.72	-
	38	388.82	535.75	0.73	0.27

2.3.4 ボルト軸力のリラクゼーション

ボルト締付けから1週間後のボルト軸力の低下を計測した。導入軸力が一定でないものの、ボルトの位置による差異はほとんどなく、全てのボルトの軸力が約1週間程度で止まっており、傾向はほぼ一定と言える。図-4に試験体1例のボルト軸力リラクゼーションの低下を示す。なお、各試験体のボルトリラクゼーションによる低下率が導入から約1週間時間で4%~10%の低下を確認できた。

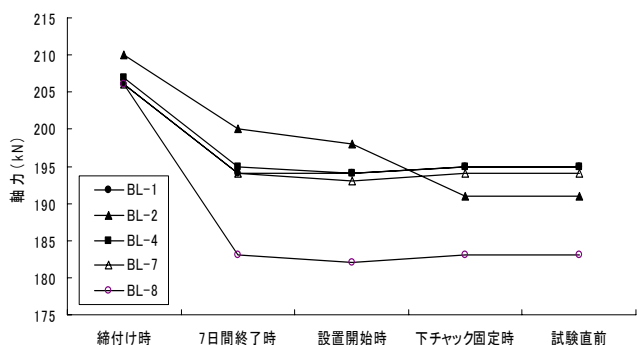


図-4 軸力と時間の関係

南ら⁴⁾はM22高力ボルト首下長さ85mmのものと150mmのものとでリラクゼーション試験を行った。それによると、軸力導入から12時間後の低下率は首下長さ85mmで約15%、首下長さ150mmでは約10%の低下がそれぞれみられた。しかし、本実験で得た結果はこれよりもさらに軸力低下量が少ないことを確認している。これは本実験で使用している高力ボルトM22で首下長さが190mmであるためと考えられる。

2.3.5 すべり試験結果

表-4には、引張载荷試験の結果のまとめを示す。表中の値は各体値と平均値を示している。

表-4 実験結果のまとめ

ケース名	すべり耐力		すべり係数		軸力低下率	
	各体値	平均値	各体値	平均値	各体値	平均値
M22-3-0.38	1	794	0.646	0.673	0.07	0.083
	2	827	0.672		0.06	
	3	822	0.668		0.12	
	4	869	0.707		-	
	5	-	-		-	
M22-3-0.21	1	658	0.535	0.528	0.03	0.035
	2	623	0.507		-	
	3	665	0.541		0.04	
M22-8-0.49	1	2276	0.694	0.710	0.07	0.074
	2	2381	0.726		0.08	
	3	2328	0.71		0.07	
M22-12-0.47	1	-	-	0.702	-	0.085
	2	3529	0.717		0.09	
	3	3375	0.686		0.08	
M22-12-0.95	1	2975	0.605	0.602	0.38	0.390
	2	2705	0.599		0.40	
	3	-	-		-	
M22-8-0.5H	1	2024	0.617	0.629	0.27	0.195
	2	2103	0.641		0.12	
	3	-	-		-	

载荷荷重と母板と連結板間の相対変位の関係の一例を、供試体シリーズごとに図-5に示す。図の縦軸は载荷荷重 P をすべり耐力 P_{sl} で無次元化した値 P/P_{sl} を、横軸はクリップ式変位計で計測した相対変位量をそれぞれ示している。相対変位の測定位置は図-1(b)に示した①~⑥である。

すべり発生は、相対変位において、大きなすべり量が生じた時、主すべりと定義した。図-4より、荷重-相対変位の関係は、すべり先行型と降伏先行型で大きく異なっていることが分かる。すなわち、すべり先行型の場合、著しい荷重低下とともに変位が大きく増加しており、ここで主すべりが発生したことがわかる。一方、降伏先行型の場合、母板および連結板の局部降伏が進展し、相対変位が大きくなるとともに、ある荷重レベルで相対変位が大きく増加しており、ここで主すべりが発生したと判断できる。

すべり先行型の供試体における列数の比較については、8列と12列の供試体では、3列の場合に見られるようなほぼ同じ相対変位量ではなく、相対変位③の変位量が小さくなっているが、母板の相対変位①の変位量が大きくなっている。

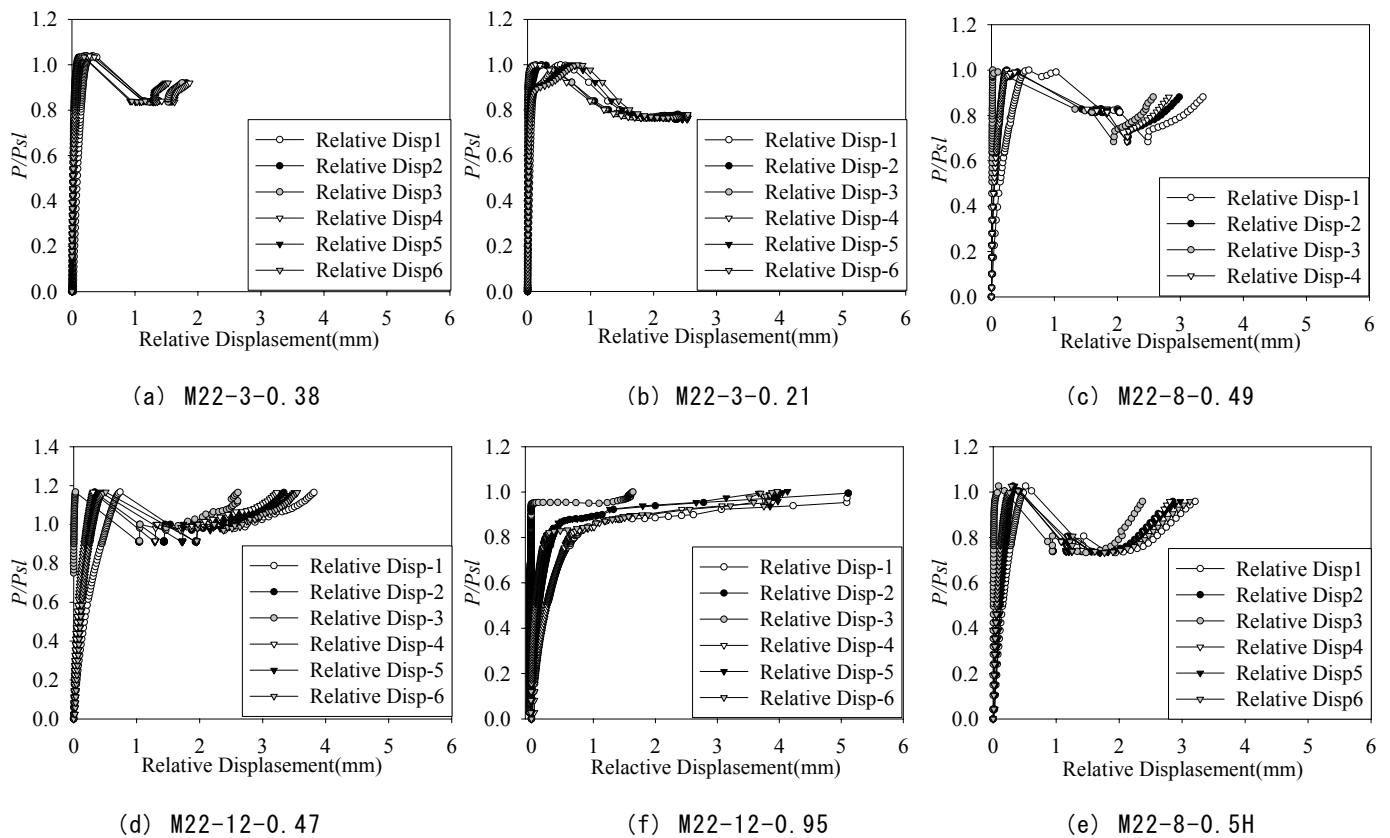


図-5 荷重-相対変位関係

これは、列数が多い場合、荷重が大きくなっていくことため、相対変位量も大きくなったと考える。しかし、列数の増加につれて、荷重伝達が継手全体で均等に行われなくなるため、相対変位③の変位量が小さいと判断できる。

肌隙を着目する供試体 M22-8-0.49 と M22-8-0.5H を比較する。表-4 より、肌隙がある供試体 M22-8-0.5H のすべり係数が 11%程度下がったことが分かる。

図-6 に荷重段階ごとの高力ボルトの軸力低下率の変化を示す。横軸はボルト番号を表している。ボルト番号は、図-1(b)に示すように中央部から外側に順番に 1~12 としている。

図より、列数の増加につれて、ボルト軸力の低減率も大きくなっていく傾向が分かる。すべり先行型の供試体 M22-3-0.21, M22-8-0.49, M22-12-0.47 の計測ボルトの軸力低下率の平均値はそれぞれ 3.4%, 7.1%, 7.7%となっている。また、降伏先行型の供試体 M22-12-0.95 計測ボルトの軸力低下率の平均値は 28.9%となっている。

肌隙の影響に注目すると、供試体 M22-8-0.5H の計測ボルトの軸力低下率が 7.7%となっている。図-6 (e)より、供試体 M22-8-0.5H の第 1 ボルトの低減率が大きくなっている。

図-7 にボルト列数とすべり係数の関係を示す。縦軸は載荷実験から得られたすべり係数 μ_e を 3 列の供試体である M22-3-0.38 の載荷実験から得られたすべり係数 μ_{e3} で無次元化した値であり、横軸は列数を表している。すべり係数には、設計軸力 106kN で評価したものである。図より、板厚 75mm の供試体を評価する場合、列数の増加により、すべり係数が上がっていくが、8 列と 12 列のすべり係数がほぼ一致になっている。しかし、3 列のすべり係数が 20%程度低下することが分かった。肌隙がある供試体 M22-8-0.5H に対して、すべり係数が約 7%低下している、これは、軸力を導入しているが、母板と連結板の間の隙間があるため、接触圧が小さくなっていると考えられる。

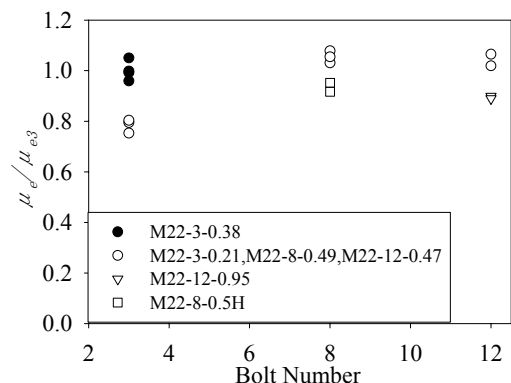


図-7 列数とすべり係数低下率の関係

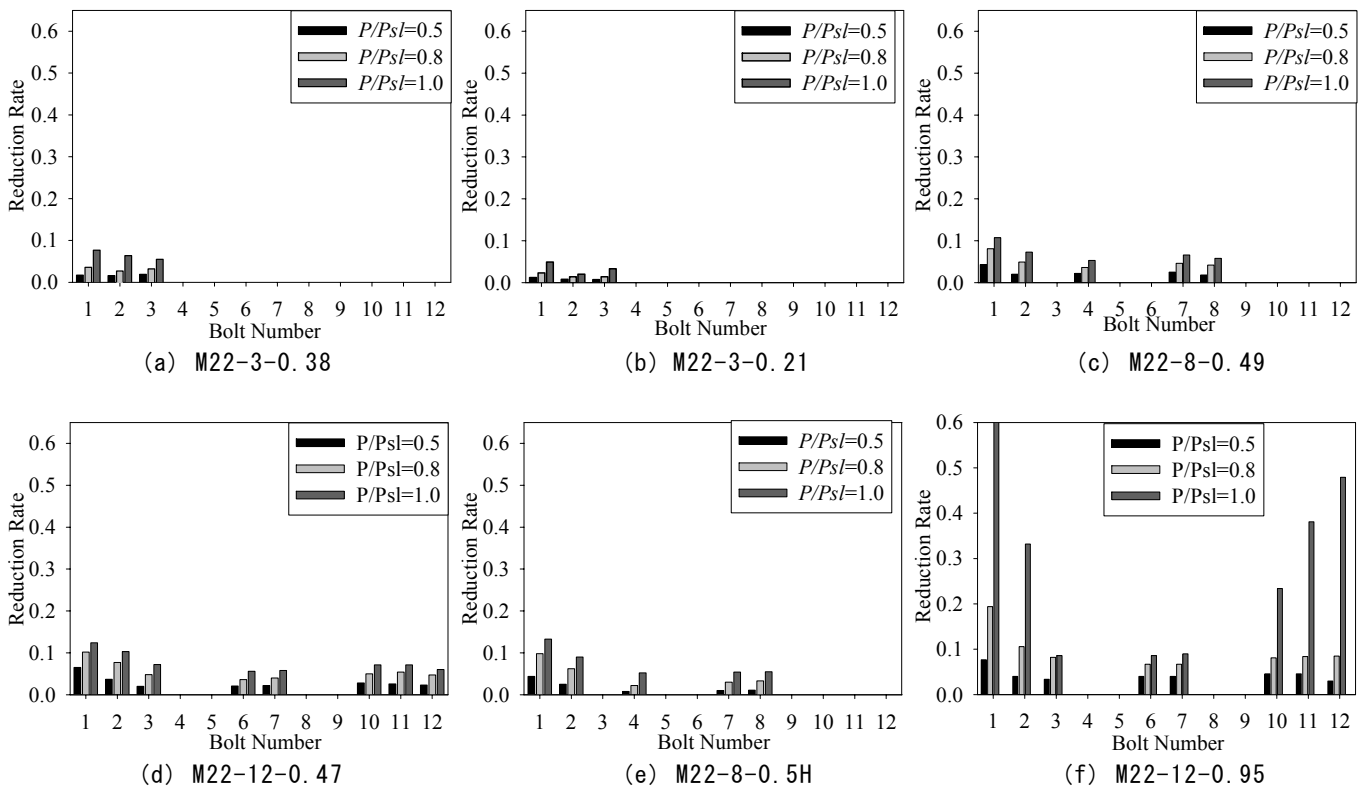


図-6 高力ボルトの軸力低下率の変化
していない。

3. 高力ボルト摩擦接合継手の解析

3.1 解析モデル

実物を用いる鋼板多列高力ボルト摩擦継手の引張試験を行って、すべり係数について評価した。しかし、ボルトの計測データから、ボルトの導入軸力がばらついていることが分かった。本解析は、導入軸力に着目して、すべり係数の変動率を考察するために行った。

解析対象は図-1に示す模型継手の8分の1とした。解析では、母板と連結板、ボルト孔とボルト軸部、高力ボルトと座金、および座金と連結板の間には接触、すべり、および離間を考慮できる接触境界を設定している。それぞれの接触境界に設定した静止摩擦係数は0.5, 0.5, 1.0, 0.5である。母板、連結板、座金は8節点ソリッド要素を、ボルトは6節点および8節点ソリッド要素を用いた。有限要素解析コードはABAQUSである。

解析で仮定した母板、連結板および高力ボルトの応力-ひずみ関係を図-8に示している。解析諸元を表-5に示す。例えば、M16-3-0.72-(1)は、呼び径M16のボルトが3列配置され、すべり/降伏耐力比 β が0.72であることを表している。あるケース名の最後に(1)は、120%設計軸力を導入したボルトの番号が1であることを表している。表より、合計は22ケースである。なお、本解析では、初期不整（初期たわみ、残留応力）は考慮し

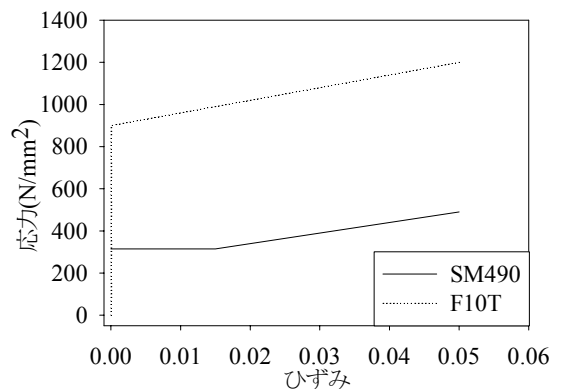


図-8 応力-ひずみ関係

表-5 解析諸元

ケース名	M16-3-0.72-(1,2,3)	M16-4-0.72-(1,2,4)	M16-8-0.72-(1,2,4,8)	M16-12-0.72-(1,2,6,12)	M16-8-1.3-(1,4,8)
ボルト	等級	F10T	F10T	F10T	F10T
	孔径(mm)	18.5	18.5	18.5	18.5
	耐力(N/mm ²)	900	900	900	900
母板	降伏点(N/mm ²)	315	315	315	315
	引張強度(N/mm ²)	490	490	490	490
	板厚(mm)	50	50	50	50
	幅(mm)	42.2	50.18	81.84	113.52
連結板	降伏点(N/mm ²)	315	315	315	315
	引張強度(N/mm ²)	490	490	490	490
	板厚(mm)	28	28	28	28
	幅(mm)	42.2	50.18	81.84	113.52
導入軸力(kN)	106	106	106	106	106
摩擦係数	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

図-9 に解析モデル全体図を示す。境界条件についてはX軸Y軸Z軸の拘束を3面で行った。解析は、ボルトに軸力を導入する段階と、軸力導入後に載荷位置に強制変位を与える段階の2段階で行っている。

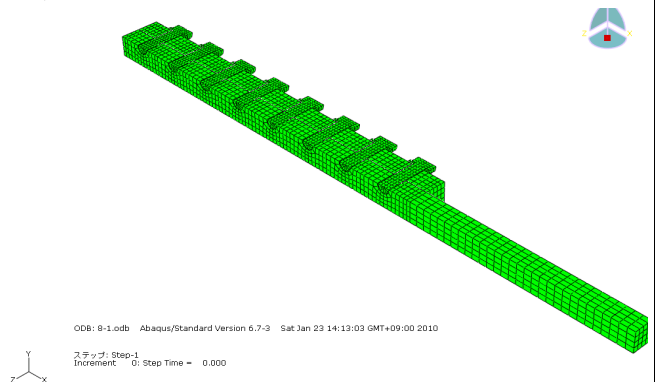


図-9 解析モデル

表-7 ボルト軸力の低下率

ケース名	ボルト1	ボルト2	ボルト3	ボルト4	ボルト6	ボルト8	ボルト12
M16-3-0.72	4.3	3.4	2.7	-	-	-	-
M16-3-0.72-1	4.6	3.5	2.9	-	-	-	-
M16-3-0.72-2	4.7	3.3	2.8	-	-	-	-
M16-3-0.72-3	4.6	3.8	2.4	-	-	-	-
M16-4-0.72	4.8	3.9	-	3.1	-	-	-
M16-4-0.72-1	4.5	4	-	3.3	-	-	-
M16-4-0.72-2	5.1	3.6	-	3.3	-	-	-
M16-4-0.7-4	4.2	4	-	2.8	-	-	-
M16-8-0.72	5.9	5.1	-	4.8	-	4.1	-
M16-8-0.72-1	5.6	5.2	-	4.9	-	4.2	-
M16-8-0.72-2	6.2	4.7	-	4.9	-	4.2	-
M16-8-0.72-4	6.1	5.3	-	4.2	-	4.2	-
M16-8-0.72-8	6.1	5.3	-	4.9	-	3.6	-
M16-12-0.72	6	-	-	4.9	4.6	-	4
M16-12-0.72-1	5.7	-	-	4.9	4.7	-	4.1
M16-12-0.72-4	6.1	-	-	4.2	4.7	-	4.1
M16-12-0.72-6	6.1	-	-	5	4	-	4.1
M16-12-0.72-12	6.1	-	-	5	4.7	-	3.5
M16-8-1.3	48.9	-	-	6.9	-	15.5	-
M16-8-1.3-1	50.4	-	-	7.0	-	16.1	-
M16-8-1.3-4	56.8	-	-	6.4	-	16.2	-
M16-8-1.3-8	57	-	-	7.1	-	14.8	-

3.2 解析結果

各ケースのすべり係数およびすべり係数の増加率を表-6, 図-10 それぞれに示している。図より、すべり先行型のすべり係数の増加率は7.2%~1.7%であるが、多列の場合に、すべり係数の増加率が小さいことがわかった。

表-6 解析結果

ケース名	すべり係数 μ_1	120%設計軸力を導入したケースのすべり係数 μ_2	すべり係数増加率(%)
M16-3-0.72	0.483	0.518	7.2
M16-4-0.72	0.48	0.505	5.2
M16-8-0.72	0.476	0.488	2.5
M16-12-0.72	0.477	0.485	1.7
M16-8-1.3	0.43	0.435	1.2
備考	すべり係数増加率=(μ_2/μ_1-1)*100		

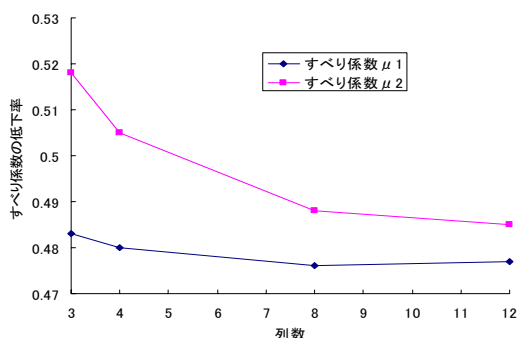


図-10 すべり係数の増加率

軸力の低下率を表-7 に示す。表の通り、120%設計軸力を導入したボルトの低下率が大きくなっている。また、降伏先行型において、すべりの増加率が約1.2%であるが、軸力低下率の変動率がすべり先行型より著しく大きくなっている。

4. まとめ

- (1) 板厚の影響を評価する場合、3列の板厚35mmの供試体のすべり係数と比べて、同じ列数の板厚75mm供試体のすべり係数が約20%下がった。これは、板厚が増えることで連結板の初期不整の影響が大きくなるためと考えられる。一方、板厚75mmの8, 12列の供試体のすべり係数があまり変わっていない原因は、厚板の初期不整の影響を分担するボルト列数が多いため、すべり係数が増加すると考えられる。
- (2) 肌隙の影響に与えるすべり係数が下がっている原因は、ボルト軸力の一部が母板と連結板の接合に使われるため、母板と連結板間の接触力が小さくなると考えられる。
- (3) 軸力のばらつきによる影響に着目する場合、列数が増加するにつれて、すべり係数の増加率が小さくなっている。これは、列数が多いほど軸力のばらつきの影響が相殺されるためと考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2003
- 2) ISO/TC 167/SC 1-Steel Structures, Material and Design, 1997.
- 3) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），2006.
- 4) 南邦明・森猛・堀川秀信：50mm厚鋼板を用いた太径ボルト（M36）継手のすべり耐力試験，土木学会論文集A, Vol. 62, No. 2, pp. 267-278, 2006.4.

討 議 等

◆ 討議 [東田 淳教授]

板厚が大きいと初期たわみがすべり係数に与える影響が大きくなる原因は何か。

◆ 回答：ボルトに導入した力は初期たわみを元に戻すことおよび母板と連結板を接合することに使われている。初期たわみが同じであれば、板厚が大きいほど、初期たわみを元に戻すために使われる力が大きくなる。よって、板厚が大きいほど母板と連結板の接合用に使われる力が小さくなり、すべり係数が低下する。

◆ 討議 [山口 隆司教授]

接触圧の合計は板厚に関係なく、同じではないか。

◆ 回答：板厚によって、接触圧の分布はそれぞれ異なっているが、合計は同じである。

◆ 討議 [角掛 久雄助教]

解析における摩擦係数の設定根拠は何か。

◆ 回答：高力ボルト摩擦接合継手引張実験の結果をもとに、式(1)により計算した値を解析に用いた。

$$u = P_{SL} / n \cdot m \cdot N_{SL} \quad (1)$$

ただし、

u ：摩擦係数， m ：接合面の数， n ：ボルト本数，

N_{SL} ：すべり発生時の軸力，