

フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動について

Slippage-behavior Characteristics of Bolted Joints with a Filler Plate

宮地 真一*, 小枝 芳樹**, 望月 秀之***

Shin-ichi MIYACHI, Yoshiki KOEDA and Hideyuki MOCHIZUKI

- * 工修 川田工業株式会社技術開発本部技術研究室, 係長 (〒550 大阪市西区北堀江 1-22-19)
 ** 川田工業株式会社技術開発本部技術研究室 (〒550 大阪市西区北堀江 1-22-19)
 *** 川田工業株式会社技術開発本部技術研究室 (〒550 大阪市西区北堀江 1-22-19)

This paper deals with the slippage-behavior characteristics of friction-type joints using high-strength bolts with a filler plate which is inserted into the frictional area. Static tests were carried out with painted frictional surfaces. The test parameter was the thickness of the filler plate. It was noted from the test results that the thickness of the filler plate could be one of the significant factor on the slippage-behavior at the critical state just prior to the start of actual slippage.

Key Words : friction-type joint, high-strength bolt, slippage-behavior, filler plate

1. まえがき

鋼I桁橋では製作コストの低減に向けた合理化手法の一つとして、主桁ブロックを一定断面として継手間における部材の板継ぎ溶接を不要とする、いわゆる一部材一断面構造¹⁾の考え方が普及しつつある。なお、この場合、ボルト継手部では母材の断面変化による板厚差に対応すべく、フィラー(板厚が薄い側の母材と添接板の間に挟み込む鋼板)が設置されることとなる。

フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手においては、板間摩擦による軸力伝達が適切に行われれば十分なすべり強度を期待でき、かつ、フィラーの厚みはすべり挙動に有意な影響を及ぼさないというのが一般的な見方である²⁾。これに対し、西川らの報告³⁾では、フィラーを有する試験体ですべり強度が幾分小さめに現れる結果となっており、その一つの原因として、フィラーの存在に起因した添接板への荷重伝達の偏りが、すべり挙動に影響を及ぼしたとの考察がなされている。一方、亀井ら⁴⁾は、継手部の限界状態や部分すべり現象に及ぼすフィラーそのものの材質や板厚の影響を明らかにすべく、弾塑性有限要素解析による詳細な検討を実施している。このような状況のもと、フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手に対する合理的な設計方法を確立するにあたっては、継手部のすべり挙動や軸力伝達に及ぼすフィラーの影響について、さらに具体的な議論が必

要と考えられる。

ところで、今後は継手部の維持管理を軽減するなどの目的で、摩擦面に塗装処理を施すケースが増加することも予想される。ここに、防錆材として厚膜型無機ジンクリッチペイントを用いる条件のもと、フィラーの無い2面摩擦の高力ボルト継手においては多列配置の場合も含め、実用上十分なすべり強度を有することが既に報告されている^{5), 6)}。

以上のような観点から、本研究では、摩擦面を上記の塗装仕様(厚膜型無機ジンクリッチペイント)としたフィラーを有する高力ボルト継手のすべり挙動特性に着目し、著者らが最近行ったすべり試験⁷⁾のデータをもとに具体的な考察を試みることにした。その結果、①フィラーの存在に起因した母材から添接板への軸力伝達の偏りとその影響、②母材・添接板間の相対ずれ特性とフィラーの板厚との関連性、さらには、③継手コバ面で確認された特徴的なひずみ性状と軸力伝達の概念など、継手部のすべり挙動に及ぼすフィラーの影響を議論する上で注目すべきと思われる幾つかの特性が確認された。なお、ここでは、1行2列なる単純な添接継手を対象に、摩擦面の条件を厚膜型無機ジンクリッチペイント処理と限定した中で考察を行っているが、得られた知見は一般のフィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動にも応用できると考えられ、ここにその結果を報告するものである。

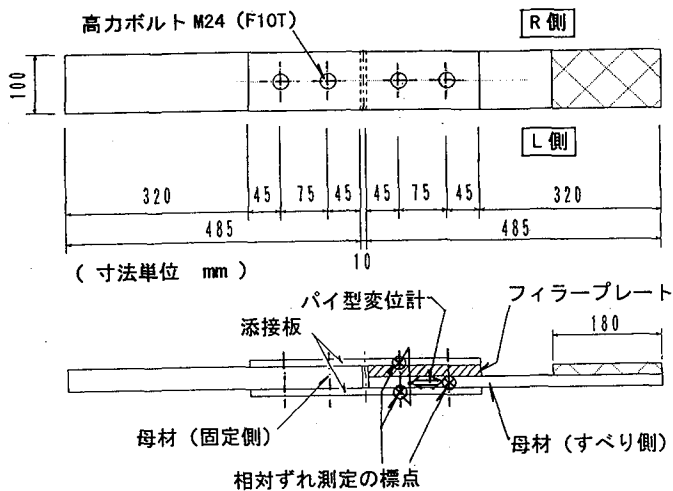


図-1 試験体の形状

表-1 試験体の諸元

タイプ	板厚 t (mm)				すべり強度・降伏強度比 β (公称値比)	
	母材 (固定側)	母材 (すべり側)	フィラー	添接板	母材	添接板
A	38	38	-	12	0.38	0.60
B	38	19	19	12	0.76	0.60
C	38	25	13	12	0.58	0.60
D	38	32	6	12	0.45	0.60

2. 試験の概要

(1) 設定条件

本すべり試験を実施するにあたり、設定した条件は以下のとおりである。

- ① ボルト配列；1行2列
- ② 使用ボルト；M24 (F10T)，防錆処理仕様
- ③ 導入軸力；設計軸力 (目標値 23.8 tf)
(引張試験は本締めの7日後に実施)
- ④ 使用鋼材；SM490Y (母材，添接板)
SS400 (フィラー)
- ⑤ フィラーの板厚；19mm，13mm および 6mm
- ⑥ 摩擦面塗装；厚膜型無機ジンクリッチペイント
- ⑦ 塗膜厚；目標値 75 μm

本検討の対象とした試験体の形状を図-1に、また、そのモデル諸元を表-1に示す。なお、図-1に示すように、母材が薄い側の試験体端部 (チャックで挟み込む部分) には、引張荷重の偏心の影響を少なくするためにフィラーと同厚のカバープレートを溶接している。また、表-1に付記したように、対象とした全てのモデルについて、母材や添接板の純断面降伏強度公称値に対するすべり強度公称値の比が1.0を大きく下回る条件⁸⁾とし、母材や添接板の引張降伏に対しすべりが先行して現れるよう配慮した。

表-2 すべり係数

タイプ	試験体	ボルト軸力(すべり側2本の平均)			すべり荷重 P (tf)	すべり係数	
		本締直後 N1 (tf)	試験直前 N2 (tf)	減少率 (%)		μ1 (N1で算出)	μ2 (N2で算出)
A	No.1	23.5	22.1	6.0	55.8	0.594	0.631
	No.2	24.0	22.6	5.8	57.0	0.594	0.631
	No.3	24.1	22.7	5.8	55.7	0.578	0.613
	平均			5.9		0.588	0.625
B	No.1	23.4	22.1	5.6	53.0	0.566	0.600
	No.2	23.4	22.0	6.0	53.5	0.572	0.608
	No.3	23.2	21.6	6.9	54.8	0.591	0.634
	平均			6.1		0.576	0.614
C	No.1	23.5	22.2	5.5	60.0	0.638	0.676
	No.2	23.5	22.0	6.4	52.6	0.560	0.598
	No.3	23.5	21.5	8.5	53.4	0.568	0.621
	平均			6.8		0.589	0.631
D	No.1	23.3	21.8	6.4	59.0	0.633	0.677
	No.2	23.4	21.7	7.3	57.2	0.611	0.659
	No.3	23.3	21.7	6.9	56.4	0.605	0.650
	平均			6.9		0.616	0.662

(2) 試験方法

ボルトの締付け軸力はトルク法で管理し、すべり側のボルトについては設計軸力を、また、固定側のボルトについては設計軸力の2割増しを管理目標値とした。なお、すべり側のボルトについては、軸部の表面に貼り付けたひずみゲージによって、導入軸力値を直接確認することとした。

試験体は各タイプで3体ずつ製作し、それらの全てについてすべり荷重の測定を行った。なお、そのうち1体については母材と添接板の間にずれ測定用のパイ型変位計を取り付け (図-1 参照)、さらに、継手中心とすべり側ボルト間のコバ面にはひずみゲージを貼付した。また、コバ面の適当な位置には野書き線を入れ、試験終了後にすべり面の位置を視覚的に確認できるようにした。

引張り試験は、三星産業(株)所有の200 tfアムスラー試験機によって行った。なお、荷重の載荷はすべり発生までとし、主すべり発生に至るまでの最大荷重をすべり荷重として評価することとした。また、すべり係数μは以下に示す式(1)で算出した。

$$\mu = P / (m \times n \times N) \quad (1)$$

ここに、Pはすべり荷重 (tf)、mはボルト本数 (2本)、nは摩擦面の数 (2面)、Nはボルト軸力 (tf) であり、本検討では、本締直後と試験直前 (本締7日後) のボルト軸力を、それぞれすべり係数μの算出に用いることとした。

なお、今回、摩擦面を塗装仕様とすることで、ボルト軸力が塗膜のクリープによって幾分減少したが、本締め後4~5日で6~7%程度の減少率にほぼ落ち着く傾向が認められたことを付記しておく。また、長期にわたるボルト軸力減少率を把握すべく、リラクセーション計測を実施中であり、その結果については別の機会で報告することとしたい。

3. すべり試験結果

(1) すべり係数

フィラーの厚みを種々変化させた B～D タイプの試験体について、すべり荷重とボルト軸力（本締直後と試験直前）の測定結果よりすべり係数 μ を算出し、フィラーの無い A タイプと比較して表-2 に示す。なお、ここに示した全ての試験体について、前述したようにフィラーの材質を SS400 で統一しており、摩擦面にはブラスト処理後に厚膜型無機ジンクリッチペイント（目標膜厚 $75\ \mu\text{m}$ ）を塗布している。

表-2 より、本試験ではフィラーの厚みを種々変化させた B～D の全タイプにおいて、フィラーの無い場合（A タイプ）とほぼ同等のすべり係数（ $\mu=0.6$ 程度以上）が確保される結果となっていることがわかる。

(2) 添接板軸力の偏りとすべり面の位置

フィラーの無い A タイプ、および、フィラーの厚みを種々変化させた B～D タイプのそれぞれ No.1 試験体について、継手中心における添接板側面のひずみ測定結果（図-1 に示した R・L 両コバ面の平均値）を図-2～図-5 に示す。なお、それらの図中には、参考までに、主すべり発生時のすべり面の位置（波線にて表示）も併記している。

まず、図-2 を見ればわかるように、フィラーの無い

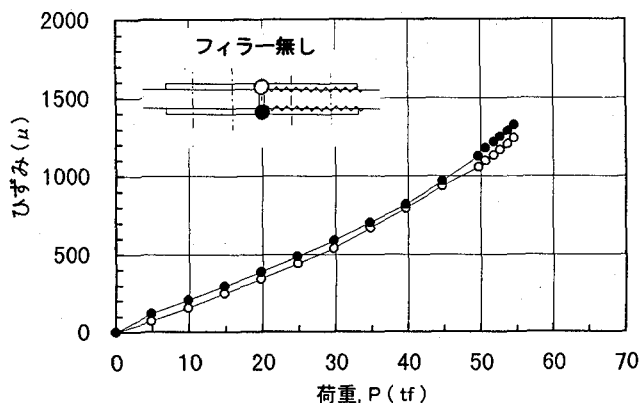


図-2 添接板のひずみ（A タイプ，No. 1）

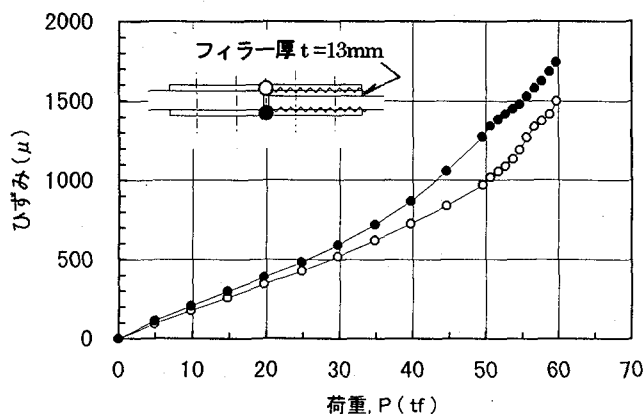


図-4 添接板のひずみ（C タイプ，No. 1）

A タイプでは、母材を挟んだ両側の添接板で発生ひずみがほとんど一致している。

これに対し、継手部に $t=19\text{mm}$ なるフィラーを有する B タイプでは、図-3 に示すようにフィラーの有る側と無い側で添接板側面の発生ひずみに明確な差異が現れており、ここに、母材からの軸力伝達がフィラーの無い側の添接板に幾分偏ったことが考えられる。なお、B タイプではフィラーと母材の境界面がすべり面となっており、主すべりに際し、フィラーとそれに面する添接板が一体となって挙動したことがわかる。また、フィラーに面した添接板のひずみ（図中の○印）に注目すれば、最大荷重の手前で引張りひずみの増加割合が大きくなっており、後述するフィラーのひずみ特性に関連した現象と推察された。

一方、図-4、-5 を見ればわかるように、フィラーの板厚が $t=13\text{mm}$ なる C タイプや $t=6\text{mm}$ なる D タイプでは、添接板側面ひずみの差異が B タイプと比べてかなり小さくなっており、母材から添接板への軸力伝達の偏りは微小であったものと考えられる。ここに、C タイプではフィラーの添接板側がすべり面であったのに対し、D タイプでは B タイプと同様にフィラーの母材側にすべり面が現れており、本試験ではフィラーの板厚に対応した添接板軸力の偏りが、すべり面の発生位置を直接支配するものとはなっていないことがわかる。また、以上の結果と表-2 との対比から、すべり先行型

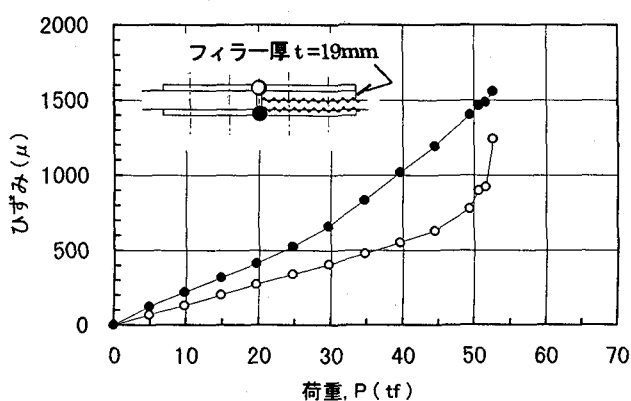


図-3 添接板のひずみ（B タイプ，No. 1）

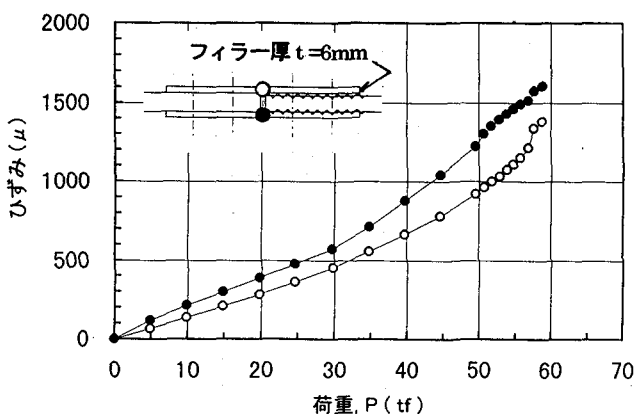


図-5 添接板のひずみ（D タイプ，No. 1）

継手ではフィラーを挿入していない側の添接板に幾分偏って軸力伝達が行なわれても、すべり耐力に著しい変化が現れる可能性は少ないと考えられる。

(3) 母材・添接板間の相対ずれ性状

フィラーの無い A タイプ、ならびに、継手部にフィラーを有する B、C および D タイプのそれぞれ No.1 試験体について、母材と添接板の相対ずれの発生状況（荷重－相対ずれ曲線）を表－3 に示す。

表－3 からわかるように、フィラーの無い A タイプでは最大荷重に至る直前まで、母材・添接板間の相対ずれがほぼ直線的に増加している。これに対し、フィラーを有する 3 種類の試験体では、フィラーの板厚に対応した個々のすべり荷重より若干低い荷重ですべり挙動に著しい変化が現れ、作用荷重増分に対する相対ずれの増加の割合が非常に大きくなっている。ここでは、荷重－ずれ曲線の傾きが急変する、いわゆる線形限界とも言うべき荷重値を、以下に“線形限界荷重”と呼ぶこととする。なお、これらの試験体では比較的緩やかなすべりが発生しており、最大荷重のみを測定した他の 2 体の試験体（No.2 と No.3）を含め、すべり発生時において明確な衝撃音の発生はほとんど認められなかったことを付記しておく。

表－3 に示す荷重－ずれ曲線より、上記の“線形限界荷重”は、 $t=19\text{mm}$ なるフィラーを有する B タイプで約 50tf 、フィラーの板厚が $t=13\text{mm}$ なる C タイプでは約 53tf 、さらに $t=6\text{mm}$ なる D タイプでは約 55tf と、フィラーが薄くなるに従って大きな値を示す結果となっていることがわかる。

(4) 継手コバ面のひずみ性状

継手部にフィラーを有する B、C および D タイプのそれぞれ No.1 試験体について、すべり側連結部のボルト間における継手側面（L 側コバ面）のひずみ測定結果を図－6～図－8 に示す。これらの結果から、フィラーの板厚によらず、主すべりが発生する手前においてひずみ性状が大きく変化する特性が認められる。なお、具体的には、前項に示した“線形限界荷重”の近傍を境として、

- ① 作用引張荷重の増加に対し、フィラーの引張ひずみ（図中の△印）が著しく減少する。
- ② 現象①の性状に反し、フィラーに面した添接板では引張ひずみ（図中の○印）の増加割合が大きくなる。
- ③ フィラーとは反対側の添接板（図中の●印）と母材（□印）のひずみ差が急増する。

などの特徴的な現象が現れている。

図－6～図－8 に共通して言えることであるが、作用荷重が $P=20\sim30\text{tf}$ 程度を若干上回る領域でフィラーの引張ひずみ（図中の△印）が一旦最大値を示し、その後緩やかに減少する傾向が認められる。ここに、フィラーの引張ひずみが頭打ちの性状を呈した要因として、フィラー・母材間あるいはフィラー・添接板間の摩擦面で微小な部分すべりが発生し、引張荷重の増加とともに徐々に進行したことが考えられる。

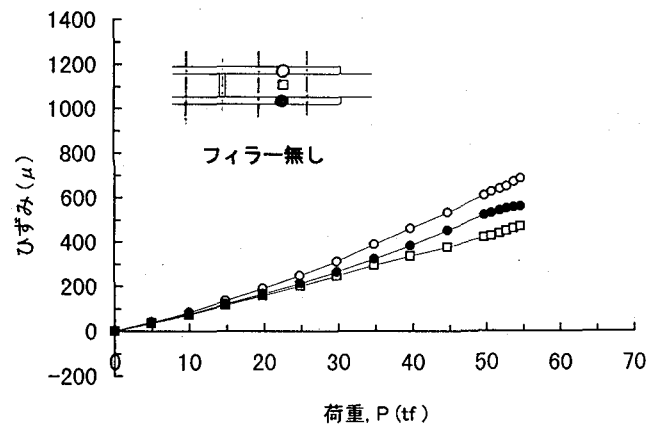
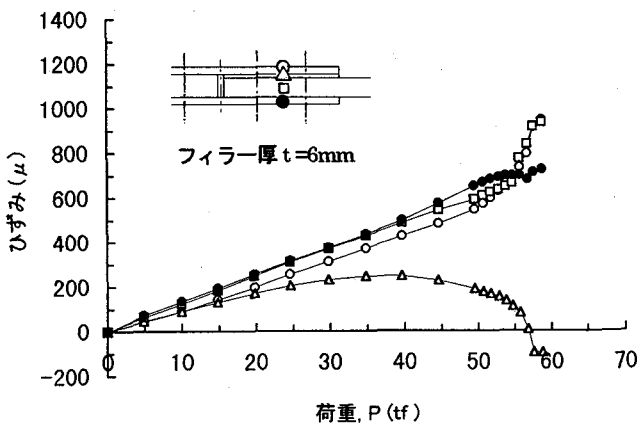
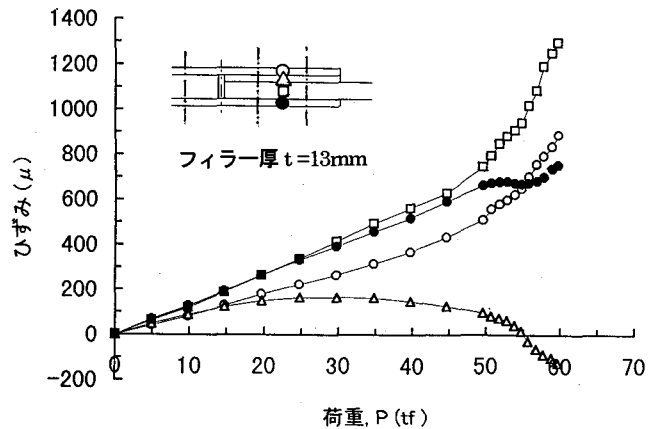
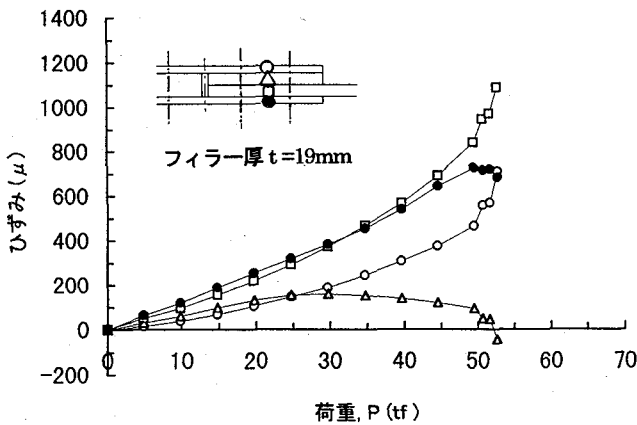
次に、上記の現象③について、たとえば図－7 に注目すれば、作用荷重が上記の“線形限界荷重”（C タイプでは約 53tf ）に達した後は添接板・母材間のひずみ差（図中の●印と□印の差）が急増している。ここに、フィラーが挿入されていない側の添接板・母材間において顕著な部分すべりが発生し、軸力伝達に大きな変化が現れたことが考えられる。そこで、上記の現象①、②に目を向ければ、“線形限界荷重”に達した以降すべり限界に至

表－3 母材と添接板の相対ずれ

タイプ フィラー厚	A (No.1) —	B (No.1) 19 mm	C (No.1) 13 mm	D (No.1) 6 mm
荷重-相対ずれ曲線				
すべり荷重, P	55.8	53.0	60.0	59.0
ボルト軸力, N2 (試験直前)	22.1	22.1	22.2	21.8
μ 2 (試験直前軸力使用)	0.631	0.600	0.676	0.677

表-4 フィラーを有する継手部における軸力伝達概念

	継手部のひずみ特性と部分すべり(推測)	母材から添接板への力の流れ(推測)	軸力伝達概念
state-1	概念図 1-A 	概念図 1-B 	概念図 1-C
state-2	概念図 2-A 	概念図 2-B 	概念図 2-C
備考	 state-1: 母材・フィラー・添接板が一体となって、スムーズな軸力伝達がなされたと思われる。 state-2: 継手内の力の流れ性状が大きく変化。このとき、フィラーには圧縮作用が、それに面した添接板には引張作用が働いた。		



るまで、フィラーの引張ひずみ(図中の△印)が著しく減少し、逆に、フィラーに直接面した添接板では引張ひずみ(図中の○印)の増加割合が大きくなっている。

上記の特徴的なひずみ性状に対し、摩擦面における部分すべりの発生を考慮した継手内の力の流れ性状や軸

力伝達の考え方について、著者なりの推測に基づいて概念図を作成し、表-4の中に提示した。ここに、state-1は部分すべりが無い状態を、また、state-2は部分すべりが顕著に現れた状態を、それぞれ想定したものである。この中で特にstate-2に着目し、部分すべりを伴った継

手内の力の流れ性状等について、概念的ではあるが、以下のように考察を加えておきたい。

- ・概念図 2-A に示す部分すべり位置で摩擦抵抗力が低下したと仮定すれば、継手内の力の流れは概念図 2-B に示すような性状を呈したものと推測される。
- ・概念図 2-B で表すように、母材からフィラーに面した添接板へ引張軸力を伝達する過程において、フィラーには圧縮作用が働いたものと考えられる。
- ・上記のような軸力伝達性状については、添接板 (2 枚) とフィラーをバネに置換した概念図 2-C の考え方で説明が可能である。

ところで、図-9 はフィラーの無いモデル A のひずみ測定結果であるが、図-6~図-8 に示したフィラーを有する場合の結果とは異なり、最大荷重 (主すべり発生荷重) に至るまでコバ面のひずみがほぼ直線的に増大している。すなわち、前述した①~③なる現象はフィラーを有する場合の特異的なものであったと理解でき、ここに、フィラーの存在に起因した摩擦面の部分すべりが、継手部のすべり挙動や軸力伝達に対し、少なからず影響を及ぼしていたと考えられる。

4. まとめ

本論文は、摩擦面に塗装 (厚膜型ジンクリッチペイント) を施す条件のもと、フィラーの板厚を種々変化した高力ボルト摩擦接合継手モデルの、本締め 7 日後のすべり試験結果をもとに、すべり挙動や軸力伝達性状について具体的な考察を行ったものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 母材降伏を伴わないすべり先行型継手の条件では、フィラーを挿入していない側の添接板 (母材に接する添接板) に幾分偏って軸力伝達がなされても、すべり強度に著しい変化が現れる可能性は少ないと考えられる。
- (2) 本研究の対象としたフィラーを有する 3 種類の試験体では、すべり荷重の半分程度と比較的小さい引張荷重において、フィラーのコバ面で測定した引張ひずみが一旦最大値を示し、荷重の増加とともに緩やかに減少する傾向が認められた。ここに、フィラー・母材間あるいはフィラー・添接板間の摩擦面において微小な部分すべりが発生し、引張荷重の増加とともに徐々に進行したことが考えられる。
- (3) また、それらの試験体ではフィラーの板厚によらず、主すべりが発生する手前において、作用荷重増分に対する母材・添接板間の相対ずれの増加割合が非常に大きな特性が現れた。ここに、荷重-相対ずれ曲線の傾きが著しく変化する、いわゆる“線形限界”とも言うべき引張荷重については、フィラーの板厚が薄いほど大きな値を示す結果となった。
- (4) 作用引張荷重が上記の“線形限界”を上回る状態に

において、母材とそれに接する添接板のひずみ差が急増しており、フィラーを挿入していない側の摩擦面で部分すべりが比較的顕著に現れたものと推察された。また、それと同時に、フィラーの引張ひずみが著しく減少し、逆に、フィラーに面した添接板では引張ひずみの増加割合が大きくなるという、きわめて特徴的なひずみ性状が確認された。ここに、摩擦面の部分すべりの影響で、継手部の軸力伝達が少なからず変化していると考えられる。

(5) 本検討で確認された相対ずれ特性やひずみ特性に対し、摩擦面の部分すべりが比較的顕著に現れた場合の継手部の力の流れを推測し、その軸力伝達性状について、概念的ではあるが若干の考察を試みた。

以上のように、フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手では、摩擦面の部分すべりが継手部のすべり挙動や軸力伝達に対し、少なからず影響を及ぼしていると考えられる。なお、フィラーの存在に起因した部分すべりについては継手長さにも密接に関連していると思われ、多列ボルト配置に対する同様の検討が重要な課題であると認識している。今後、本研究で得られた知見や上記の課題等を踏まえ、フィラーを有する高力ボルト継手部のすべり挙動や軸力伝達のメカニズムを明らかにすべく、さらに詳細な検討を実施していく所存である。

参考文献

- 1) 建設省：鋼橋設計ガイドライン (案)，1995 年 10 月。
- 2) たとえば、Geoffrey L. Kulak, John W. Fisher and John H. A. Struik : Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, John Wiley & Sons, pp.186~193, 1987.
- 3) 西川和廣・村越 潤・佐々木靖雄：省力化鋼 I 桁橋のフランジ現場継手大型試験体の引張試験，土木学会第 49 回年次学術講演会概要集，pp.220~221，1994 年 9 月。
- 4) 亀井義典・池端文哉・西村宣男：低材質フィラープレートを用いた高力ボルト摩擦接合継手の限界状態，土木学会構造工学論文集 Vol.43A, pp.65~72, 1997 年 3 月。
- 5) 馬場賢三・田島二郎・平野 茂：太径多列高力ボルト摩擦継手試験，橋梁と基礎，pp.8~14, 1985 年 10 月。
- 6) 大志万和也：摩擦接合面の塗装について，阪神高速道路公団技報 (1981)，pp.78~83.
- 7) 金野千代美・高田嘉秀・小枝芳樹・水野 浩：フィラープレートを用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験，土木学会平成 9 年度関西支部年次学術講演会概要集，I-44-1,2, 1997 年 5 月。
- 8) 秋山寿行・西村宣男・亀井義典・池端文哉：高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態の区分，鋼構造年次論文報告集第 3 巻，pp.16~23, 1995 年 11 月。

(1997 年 9 月 26 日受付)