

間接連結を適用したフィラー付高力ボルト摩擦接合継手の力学的挙動に関する解析的検討

大阪市立大学大学院
学生員 〇藤原 眞幸

大阪市立大学大学院
高田機工（株）

正会員 山口 隆司
正会員 古財 千寿

1. 研究背景および目的

平成 29 年に道路橋示方書¹⁾が改訂され、限界状態設計法に移行した。高力ボルト摩擦接合継手では、すべり後についても耐荷性能照査を要求する体系となった。

一般に、高力ボルト摩擦接合継手はすべり後、支圧状態に移行する。そのため、支圧接合継手の規定は十分参考になり得る。フィラーを有する高力ボルト支圧接合継手では、フィラーの板厚によってボルトの割増しやフィラーを連結板外に延長して母板と連結する（以下、間接連結）規定がある。一方、間接連結を摩擦接合継手に適用した事例は確認されておらず、その力学的挙動は明らかでない。

そこで、文献 2)では、フィラー厚や割増しボルトの連結方法をパラメータとしたすべり先行型の高力ボルト摩擦接合継手を対象に引張試験を行い、その力学的挙動について検討している。しかし、詳細な荷重伝達機構の解明やその定量的評価には至っていない。また、一般の継手で存在する降伏先行型継手については検討の余地がある。

本研究では、すべり先行型に加え、降伏先行型のフィラー付高力ボルト摩擦接合継手を対象に FEM 解析を行い、間接連結を適用した場合の力学的挙動について検討した。

2. 解析概要

すべり先行型継手は文献 2)の試験体、降伏先行型継手は実橋図面を参考に、図 1 のように対称性を考慮してモデル化した。対象としたすべり先行型継手、降伏先行型継手の構造諸元と解析ケースを表 1、表 2 にそれぞれ示す。解析ケース名は順に、ボルト本数、接合方法（NF：フィラーなし，SF：フィラーあり，LF：間接連結適用），厚板側母板厚に対するフィラー厚（以下、断面変化率 α ）とした。

すべり先行型継手におけるすべりは継手内側の母板縁端より 10mm 位置の母板と連結板の接合面における相対変位が 0.2mm に達した時点、ボルトのせん断強度はボルトのせん断面の要素すべてが引張強度に達した時点とした。降伏先行型継手における母板の純断面降伏は母板孔壁から板幅方向の要素が連続的に降伏応力に達した時点、純断面破断耐力は引張強度に達した時点とした。

3. 解析結果と考察

すべり先行型継手の解析結果を表 3 に示す。最大荷重はボルトのせん断破断により決定された。n3-NF（フィラーなし）に対する n3-SF（フィラーあり）と n3-SF に対す

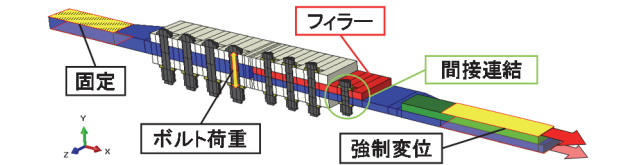


図 1 解析モデル

表 1 すべり先行型継手

(a) 構造諸元						
軸平行部径	ボルト孔径	被接合部材 総厚	連結板厚	端しあき 距離	ピッチ	標準 ボルト軸力
d (mm)	d_o (mm)	t_{mf} (mm)	t_{spl} (mm)	e_f (mm)	p (mm)	N_d (kN)
16	18	28	19	40	55	116.6

(b) 解析ケース								
解析 ケース	ボルト 本数 n	板幅 w (mm)	すべり 側 母板厚 t_{ms} (mm)	フィ ラー 厚 t_{fp} (mm)	断面 変化率 α (%)	すべり 係数 μ	間接 連結 有無	すべり/ 降伏 耐力比 β
n3-NF	3	80	28	-	0	0.79	-	0.84
n3-SF20	3	125	22	6	21	0.78	-	0.55
n4-LF20	4					0.78	あり	0.55
n3-SF30	3	140	19	9	32	0.90	-	0.66
n4-LF30	4					0.90	あり	0.66
n3-SF50	3	180	14	14	50	0.84	-	0.64
n4-LF50	4					0.84	あり	0.64

表 2 降伏先行型継手

(a) 構造諸元						
軸平行部径	ボルト孔径	被接合部材 総厚	端しあき 距離	ピッチ	設計 ボルト軸力	設計 すべり係数
d (mm)	d_o (mm)	t_{mf} (mm)	e_f (mm)	p (mm)	N_d (kN)	μ
22	24.5	40	40	75	205	0.45

(b) 解析ケース								
解析 ケース	ボルト 本数 n	板幅 w (mm)	すべり 側 母板厚 t_{ms} (mm)	フィ ラー 厚 t_{fp} (mm)	連結板 厚 t_{sp} (mm)	断面 変化率 α (%)	間接 連結 本数 n_l	すべり/ 降伏 耐力比 β
n5-NF	3	80	40	-	25	0	-	1.17
n5-SF25	3	100	30	10	20	25	-	1.15
n6-LF25	4						1	
n7-LF25	3						2	
n5-SF50	4	140	20	20	50	50	-	1.12
n6-LF50	3						1	
n7-LF50	4						2	

表 3 すべり先行型継手の解析結果

解析 ケース	すべり 荷重 (kN)	最大 荷重 (kN)	フィラーの挿入の影響		間接連結の適用効果	
			対 n3-NF 変化率 $\delta_{P_{0.2}}$ (%)		対 n3-SF 変化率 $\delta_{P_{0.2}}$ (%)	
			すべり荷重	最大荷重	すべり荷重	最大荷重
n3-NF	536	873				
n3-SF20	531	822	0.4	-5.9		
n4-LF20	532	867			0.0	5.5
n3-SF30	603	810	-1.4	-7.3		
n4-LF30	612	868			1.5	7.3
n3-SF50	546	749	-4.3	-14.2		
n4-LF50	564	822			3.4	9.8

キーワード フィラー、高力ボルト摩擦接合継手、間接連結、すべり後挙動

連絡先 〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138 大阪市立大学大学院 橋梁工学研究室 TEL06-6605-2765

る n4-LF (間接連結適用) のすべり荷重および最大荷重の変化率 δ_P と断面変化率 α の関係を図 2 に示す。

図 2(a) より, フィラーを挿入した n3-SF のすべり荷重および最大荷重は断面変化率が大きくなるほど低下した。すべり荷重の低下率は 5%未満とわずかであった一方, 最大荷重のそれは 5%から 15%と大きくなった。すべり荷重が低下したのは, 図 3(a) からわかるように, 母板中心軸のずれによって偏心が生じ, 母板とフィラー間の摩擦力が母板と連結板間の摩擦力に対して小さくなるためと考えられる。最大荷重が低下したのは, 支圧状態に移行後, 図 4 のようにフィラーが抵抗断面として機能せず, ボルト軸部の支圧応力分布が図 5(b) のようになり, せん断破断面が 2 面から 1 面に減少するためと考えられる。図 2(b) より, 間接連結を適用した n4-LF はすべり荷重は 5%未満, 最大荷重は 5%から 10%の上昇率を示し, n3-NF (フィラーなし) と同程度まで回復した。間接連結によってすべり荷重および最大荷重が上昇するのは, 母板とフィラーが一体化され, 図 3(b), 図 5(c) のように偏心の影響の緩和や支圧応力分布の改善が成されるためと考えられる。

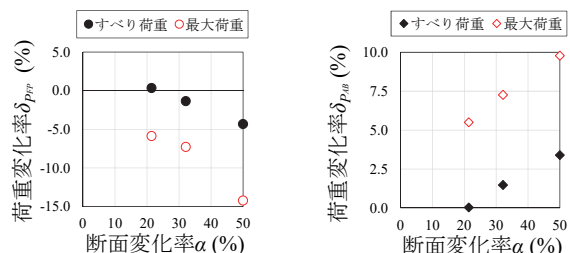
降伏先行型継手の解析結果を表 4 に示す。最大荷重は母板の純断面破断により決定された。n5-NF (フィラーなし) に対する n5-SF (フィラーあり) と n5-SF に対する n6-LF (間接連結 1 本適用), n7-LF (間接連結 2 本適用) の降伏荷重および最大荷重の変化率 δ_P を図 6 に示す。

図 6(a) より, フィラーを挿入した n5-SF の降伏荷重および最大荷重は断面変化率が大きくなるほど低下したが, その程度はいずれも 5%未満とわずかであった。図 6(b) より, 間接連結を適用した n6-LF, n7-LF は n5-SF に対し, 降伏荷重および最大荷重が 2%から 6%程度低下した。

4. まとめ

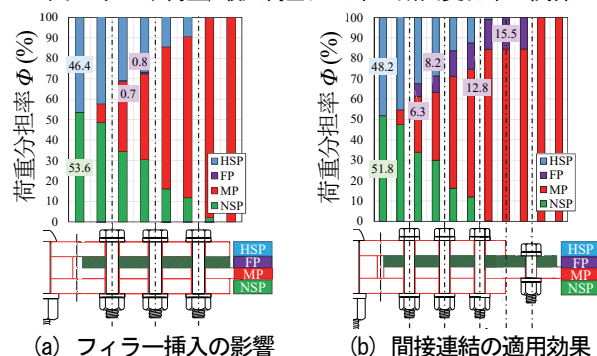
本研究では, 間接連結を適用したフィラー付高力ボルト摩擦接合継手の力学的挙動について検討することを目的に FEM 解析を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) すべり先行型継手では, フィラーの挿入によりせん断破断面が減少し, 最大荷重が 5%から 15%程度低下したが, すべり荷重の低下は 5%未満とわずかであった。一方, 間接連結を適用すると, すべり荷重, 最大荷重はフィラーのない場合と同程度まで回復した。
- (2) 降伏先行型継手では, フィラーの挿入による降伏荷重および最大荷重 (母板の純断面破断荷重) の低下は 5%未満とわずかであった。また, 間接連結を適用すると, 降伏荷重および最大荷重はさらに低下した。



(a) フィラー挿入の影響 (b) 間接連結の適用効果

図 2 すべり荷重/最大荷重変化率と断面変化率の関係



(a) フィラー挿入の影響 (b) 間接連結の適用効果

図 3 各部材の荷重分担率 (すべり荷重時)

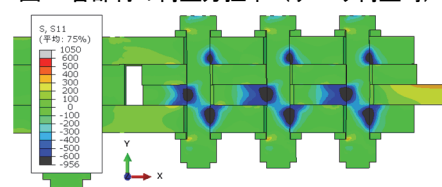


図 4 橋軸方向応力コンター (支圧状態移行後)

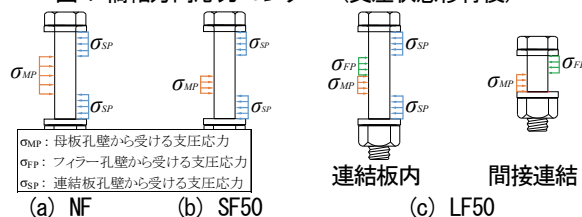
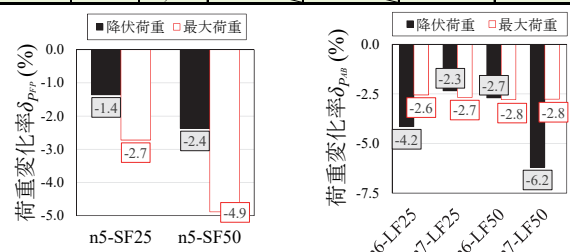


図 5 ボルト軸部に作用する支圧応力分布モデル

表 4 降伏先行型継手の解析結果

解析ケース	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	フィラー挿入の影響		間接連結の適用効果	
			対 n5-NF 変化率 δ_P (%)		対 n5-SF 変化率 δ_P (%)	
			降伏荷重	最大荷重	降伏荷重	最大荷重
n5-NF	870	1,044				
n5-SF25	876	1,036	-1.4	-2.7		
n6-LF25	840	1,010			-4.2	-2.6
n7-LF25	855	1,008			-2.3	-2.7
n5-SF50	884	1,033	-2.4	-4.9		
n6-LF50	860	1,004			-2.7	-2.8
n7-LF50	829	1,005			-6.2	-2.8



(a) フィラー挿入の影響 (b) 間接連結の適用効果

図 6 降伏荷重/最大荷重変化率

<参考文献>

- 1) 公益社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017.11.
- 2) 古財千寿, 山口隆司, 高井俊和, 森山仁志: 間接連結を適用したフィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべりおよびすべり後挙動に関する実験的研究, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, I-426, 2019.9.