

第 I 部門

フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり後挙動を考慮した解析的研究

大阪市立大学工学部

学生員 ○藤原 眞幸

大阪市立大学大学院

正会員 山口 隆司

高田機工 (株)

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においては、すべり後についても耐荷性能を照査する必要性が生まれた。

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ことから、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本数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。しかし、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はない。

そこで、文献 2)では、フィラー厚や連結方法をパラメータとした高力ボルト摩擦接合継手の引張試験を行い、フィラーが力学的挙動に与える影響および間接連結の役割について明らかにした。しかし、荷重伝達機構の解明や十分な定量的評価には至っていない。

本研究では、引張試験を対象としたフィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手の FEM 解析を行うことで、その荷重伝達機構を解明し、ボルトの割増しや間接連結の適用効果について定量的に検討することを目的としている。

2. 解析概要

継手の形状は文献 2)の試験体に準じ、対称性を用いてモデル化を行った。表 1 に材料特性、表 2 に構造諸元、表 3 に解析ケース、図 1 に解析モデルの一例を示す。解析ケース名の最初の項はボルト本数、次いで接合方法（NF：フィラーなし、SF：フィラーあり、LF：フィラーおよび間接連結あり）、後続は厚板側母板厚に対するフィラー厚の百分率（以下、断面変化率 a ）を表す。なお、すべり係数は試験すべり荷重より算出した値（試験ケースになかった n3-SF については n4-LF と同値）を用いたため、すべり降伏耐力比 β は各ケースで異なる。すべり判定は、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 に到達した時点とした。また、ボルトのせん断破断判定はボルトのせん断面すべてが引張応力付近の 1046N/mm² に到達した時点とした。

表 1 材料特性

(a) 鋼板

使用部材	鋼種	板厚 t (mm)	弾性係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 μ	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	材料パラメータ				
							E/E_{st}	E_{st}/E	ξ	$1/\xi$	ϵ_{st}/ϵ_y
フィラー	SM490YA	6	215,797	0.280	408.3	570.9	35	0.029	0.080	12.5	8.0
フィラー	SM490YA	9	214,841	0.283	400.0	519.4	45	0.022	0.090	11.1	15.0
フィラー母板	SM490YA	14	210,558	0.278	401.3	531.6	45	0.022	0.085	11.8	11.5
母板連結板	SM490YB	19	210,949	0.283	412.9	557.5	40	0.025	0.085	11.8	9.0
母板	SM490YB	22	210,991	0.286	424.1	563.1	60	0.017	0.080	12.5	10.0
母板	SM490YB	28	209,472	0.281	376.7	525.4	45	0.022	0.060	16.7	11.0

構成則はマルチリニア型とし、降伏後の応力およびひずみについては材料試験結果より右式および表中パラメータを用いて算出した。

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} \left\{ 1 - e^{-\xi \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_y} - \frac{\epsilon_{st}}{\epsilon_y} \right)} \right\} + 1$$

(b) 高力ボルトセット

使用部材	鋼種	弾性係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 μ	降伏応力 σ^* (N/mm ²)	塑性ひずみ ϵ_p^* (N/mm ²)
				908	0.00432
				1047	0.04107
固定側	S14T	200,000	0.3	1200	0
				1400	0.1

表 2 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	端しき距離	ピッチ	標準ボルト軸力
d (mm)	d_0 (mm)	t_{mf} (mm)	t_{spl} (mm)	e_l (mm)	p (mm)	N_d (kN)
16	18	28	19	40	55	116.6

表 3 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 a (%)	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-SF20	4					0.75	なし	0.70
n4-LF20	4	140	19	9	32	0.78	あり	0.55
n3-SF30	3					0.90	-	0.66
n4-SF30	4					0.82	なし	0.80
n4-LF30	4					0.90	あり	0.66
n3-SF50	3	180	14	14	50	0.84	-	0.64
n4-SF50	4					0.77	なし	0.79
n4-LF50	4					0.84	あり	0.64

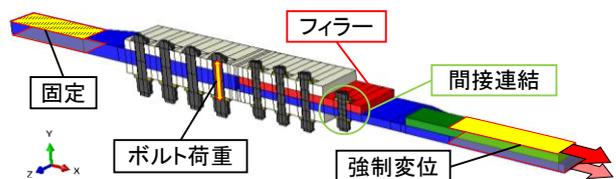


図 1 解析モデル

Masaki FUJIWARA, Takashi YAMAGUCHI, Senju KOZAI

fujiiwara@brdg.civil.eng.osaka-cu.ac.jp

3. 解析結果と考察

解析結果のまとめを表4に示す。最大荷重はボルトのせん断破断により決定した。n3-NF（フィラーなし）に対するn3-SF（フィラーあり）とn3-SFに対するn4-SF（フィラーあり、ボルト割増し）およびn4-LF（フィラーあり、割増しボルトに間接連結を適用）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、母板間の軸線のずれによって偏心が生じ、図3(a)のようにフィラーおよびフィラー側連結板の作用力（母板とフィラー間の摩擦力）が薄板母板側連結板の作用力（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、ボルトを1本割増したn4-SFのすべり荷重および最大荷重は約3割上昇した。一方、割増したボルトを間接連結とした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、フィラー挿入による各荷重の低下をおおそ抑制できた。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、母板とフィラーの一体化によって、図3(b)、図5(c)のように偏心の影響や支圧応力分布が改善されるためと考えられる。

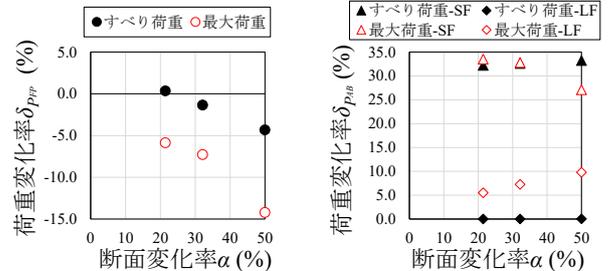
4. まとめ

本研究では、フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手の荷重伝達機構を解明し、間接連結の適用効果について定量的に検討することを目的にFEM解析を行った。

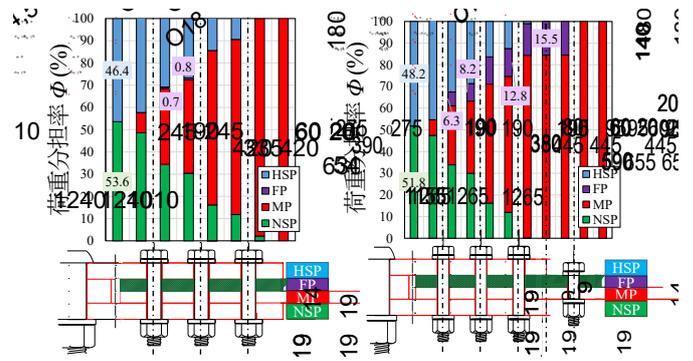
- (1) フィラーの挿入により、最大荷重は5%から15%程度低下したが、すべり荷重の低下は5%未満であった。
- (2) すべり荷重の低下は、作用線の偏心によって各接合面の摩擦力が不均一となることが原因と考えられる。
- (3) 最大荷重の低下は、ボルトの支圧応力分布が変化し、せん断破断面が減少することが原因と考えられる。
- (4) ボルトを1本割増すと、すべり荷重および最大荷重は約3割上昇し、フィラー挿入前より大きくなった。
- (5) 割増しボルトを間接連結とすると、偏心の影響や支圧応力分布が改善され、すべり荷重および最大荷重はフィラー挿入前と同程度まで回復した。

表4 解析結果のまとめ

解析ケース	すべり荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	フィラーによる影響		ボルトの割増し効果	
			対n3-NF変化率 δ_{PM} (%)		対n3-SF変化率 δ_{PM} (%)	
			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-SF20	675	1097			32.2	33.5
n4-LF20	532	867			0.0	5.5
n3-SF30	603	810	-1.4	-7.3		
n4-SF30	728	1075			32.6	32.8
n4-LF30	612	868			1.5	7.3
n3-SF50	546	749	-4.3	-14.2		
n4-SF50	666	952			33.2	27.1
n4-LF50	564	822			3.4	9.8



(a) フィラーによる影響 (b) ボルトの割増し効果
図2 すべり荷重/最大荷重変化率と断面変化率の関係



(a) フィラー入 (n3-SF50) (b) 間接連結 (n4-LF50)
図3 各部材の荷重分担率 (すべり荷重時)

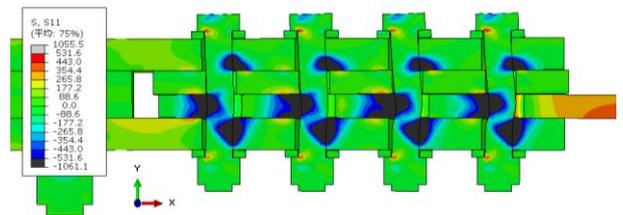
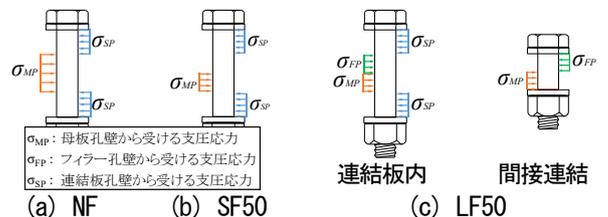


図4 橋軸方向応力コンター (支圧状態移行後)



(a) NF (b) SF50 (c) LF50
図5 ボルト軸部に作用する支圧応力分布

<参考文献>

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 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.