

第 I 部門

加工硬化によるステンレス高力ボルトの製法が弾性係数に与える影響

大阪市立大学工学部 学生員 ○小村 政孝
 大阪市立大学大学院 正会員 林 厳

大阪市立大学大学院 正会員 山口 隆司
 光精工株式会社 非会員 星本 成律
 浜中ナット株式会社 非会員 香月 学

1. 研究背景および目的

ステンレス部材の高力ボルト摩擦接合には、異種金属接触腐食防止の観点から、SUS630 製の高力ボルトが実用に供されているが、厳しい腐食環境下では耐食性に懸念が残る。そこで、本研究では耐食性に優れた SUS316L および SUS329J4L に着目し、これらを材料とするボルト製造工程中の処理が、ボルトの物性値に及ぼす影響を検討した。

2. 試作ボルトおよび試験ケース

試作ボルトは、熱処理を行わず、伸線処理中の断面減少率を調整することにより、F10T または F8T 相当の力学的特性を満足させた。これらのボルトの引張試験結果を表-1 に示す。試作ボルトの弾性係数は、材料状態（伸線処理および熱処理前）よりも低くなった。

そこで、ボルト製造工程の塑性加工が弾性係数へ及ぼす影響について検討することを目的とし、表-2 に示す試験ケースに対して、引張・圧縮試験を実施した。試験体は、図-1 に示す形状とし、SUS316L および SUS329J4L 製の試作ボルトと、それぞれの成型前の材料特性を再現したボルトの計 4 種類のボルトの軸部の図-2 に示す位置から製作した。成型前の材料特性は、成型後のボルトに対して、固溶化熱処理を施すことで、転位を解消して再現した。ケース名 a は軸部の表面から 1mm までの範囲、ケース名 b, c はそれぞれ表面から D/4 位置、D/2 位置の弾性係数を計測するものである。試験体数は各ケース 3 体とし、ケース名の-ST は固溶化熱処理を施したことを表す。引張試験体は JIS Z2201 の 14 号 A 試験片に従った形状及び寸法とした。材料試験により得た応力-ひずみ関係より、原点から 0.2%オフセット耐力の 70%までの範囲で弾性係数を算出した。

3. 材料試験結果

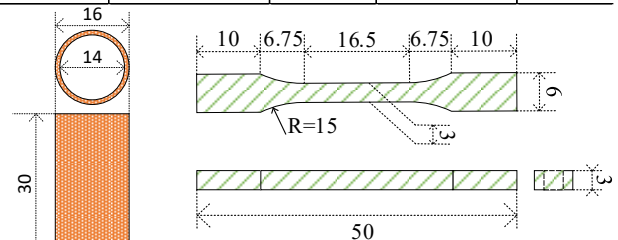
ボルト軸部の表面、D/4 位置、D/2 位置における弾性係数の平均値を表-3 に示す。SUS316L に着目すると、

表-1 SUS316L/SUS329J4L の弾性係数 (単位 : GPa)

SUS316L		329J4L	
材料状態	試験結果	材料状態	試験結果
192	181.3	196	162.2

表-2 試験ケース

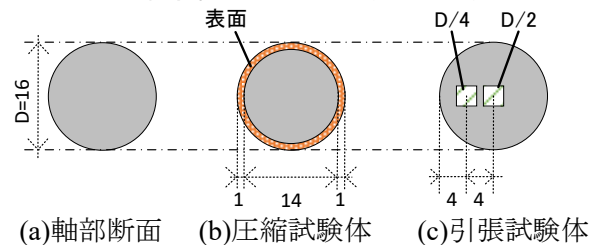
Case	試験片採取位置	材料	熱処理の有無	試験方法
a-316L(-ST)	表面	SUS316L	無印：無 (-ST)：有	圧縮試験
b-316L(-ST)	D/4			引張試験
c-316L(-ST)	D/2			引張試験
a-329J4L(-ST)	表面	SUS329J4L		圧縮試験
b-329J4L(-ST)	D/4			引張試験
c-329J4L(-ST)	D/2			引張試験



(a) 圧縮試験体

(b) 引張試験体

図-1 試験体の形状と寸法 (単位 : mm)



(a) 軸部断面 (b) 圧縮試験体 (c) 引張試験体

図-2 試験体採取位置 (単位 : mm)

表-3 軸部各位置における弾性係数の平均値 (単位 : GPa)

位置	SUS316L		SUS329J4L	
	成型前	成型後	成型前	成型後
表面	181.0	151.0	160.7	157.3
D/4	192.2	174.3	162.8	159.3
D/2	208.0	180.8	149.9	151.9

弾性係数は、成型前より成型後の方が低いことがわかる。これは塑性加工による転位増加が弾性係数を低下させていると考察される。また、D/2 位置(以下、芯)と表面の弾性係数に差が見られることから、塑性加工の影響には偏りがあると考えられる。伸線処理を施した線材は硬化し、芯よりも表面の方が硬いという報告があり¹⁾、硬度は引張強度と正の相関がある²⁾。したがっ

て、伸線処理により 0.2%オフセット耐力は上昇し、芯よりも表面の方が上昇量は大きい。この傾向は、試験結果の弾性係数の低下傾向と類似していることから、伸線処理が弾性係数の低下に関与していると推察される。

一方、SUS329J4L では、ボルト成型の前後や位置の違いによる弾性係数の大きな差は見られない。ボルト成型の前後のケースで差が見られない原因として、熱処理で成型前が再現できていないことが考えられる。

次に、図-3 に示す各ケースの $D/4$ 位置における応力-ひずみ関係に着目すると、伸線処理による断面減少率が高い SUS316L は 0.2%オフセット耐力が 157%向上している。一方で、断面減少率が低い SUS329J4L は、0.2%オフセット耐力の向上が 12.5%と低い。このことから、伸線処理による断面減少率と転位増加量に正の相関があると考えられる。また、SUS329J4L は試験体採取位置が異なっても弾性係数の差が小さかった。これは伸線処理の断面減少率が低いことが原因と考察される。

4. FE 解析による軸部表面のひずみに関する検討

ボルト軸部における芯と表面の弾性係数に差がある場合、ボルトの引張試験から計測した表面のひずみは、断面の平均ひずみと差があると考えられる。これについて FE 解析で検証を行った。FE 解析は、材料試験をもとに SUS316（成型後）の弾性係数を与えた不均質モデルと、均質に弾性係数を与えた均質モデルとし、平均ひずみに対する表面のひずみの大きさを比較した。図-4 に示す解析モデルは対称性を考慮した 1/2 モデルとし、ボルト、ナット、座金に対称条件を与えた。また、使用要素は主に 8 節点低減積分ソリッド要素を用い、メッシュサイズは主に 1mm とした。軸力導入は図-5 に示すように、頭側の座金を固定し、ナット側の座金に強制変位を与え、その大きさは F10T の設計軸力相当とした。解析ケースと材料特性を表-4 に示す。ボルトの引張試験でひずみを計測した箇所の軸部断面のひずみのコンターを図-6 に示す。不均質モデルの断面の平均ひずみに対する表面のひずみの割合は、均質モデルと比較して 7.3%低い結果となった。これは、弾性係数の高い芯に応力が分配されていることが原因であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、加工硬化で強度を上昇させたステンレスボルトの性質について実験及び解析的に検討した。得られた結果を以下に示す。

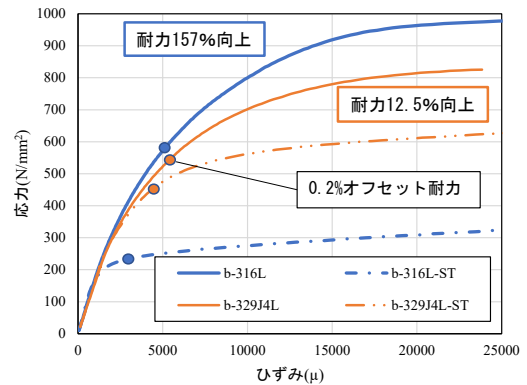


図-3 $D/4$ 位置における各ケースの応力-ひずみ関係

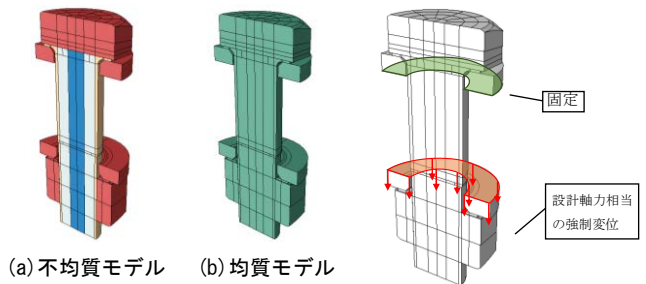
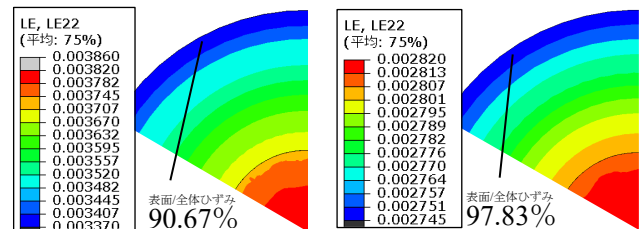


図-4 解析モデル

図-5 軸力導入方法

表-4 材料特性

Case	部位 (r : 半径 (mm))	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
不均質モデル	表面 ($7 \leq r \leq 8$)	151.0	0.3
	中間 ($3 \leq r < 7$)	174.3	
	芯 ($0 \leq r < 3$)	180.8	
	その他	200.0	
均質モデル	全体	200.0	0.3



(a) 不均質モデル

(b) 均質モデル

図-6 軸部の軸方向ひずみ分布図

- 1) ステンレス高力ボルト製造工程中の、伸線処理による加工硬化によって、ボルト軸部の弾性係数は低下し、芯よりも表面の方が弾性係数は低くなる。
- 2) 伸線処理による断面減少率が高いほど、表面と芯の弾性係数の差は大きい。そのため、加工度に応じて軸部断面内で弾性係数に分布が生じる。
- 3) 伸線処理の影響を考慮したボルトの FE 解析の結果、表面ひずみは平均ひずみより 9.3%小さかった。

謝辞

本研究は日本鋼構造協会の委員会で行っており、関係各位から数々のご意見、ご助言を賜りました。ここに記して心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木弘：塑性加工改訂版，東京裳華房，1993。
- 2) 吉沢武男：硬さ試験法とその応用，裳華房，1967。