

SUS316L 製ステンレス高力ボルトの下 R 部とねじ部の応力集中に関する解析的検討

大阪公立大学大学院 学生員 ○小村 政孝
 日本鋼構造協会 正会員 志村 保美
 浜中ナット株式会社 非会員 香月 学

大阪公立大学大学院 正会員 山口 隆司
 大阪公立大学大学院 正会員 林 巖

1. 研究背景と目的

現在、実用化されているステンレス高力ボルトは SUS630 を材料とするもののみである。そこで、SUS630 材料より過酷な腐食環境下への適用に向け、より耐食性に優れた SUS316L を材料として、JIS B1186¹⁾に準拠した M16 ステンレス高力ボルト(以下、SUS316L-HTB) が製作された。SUS316L-HTB は、冷間鍛造の加工硬化により強度を確保し、成型後の熱処理は施していない。そのため、加工硬化の影響が断面内で異なり、機械的性質も異なる。例えば、ボルト軸部の弾性係数の直径方向分布は、中心から表面にかけて低下している²⁾。

本稿では、弾性有限要素解析により、上記の性質を有する SUS316L-HTB のねじ部および首下 R 部の応力集中係数を評価した。

2. 解析モデルおよび解析ケース

解析には汎用解析コード Abaqus を用いた。軸対称モデル(以下、2D 解析モデル)より、首下 R 部とねじ部の応力集中を評価し、1/2 モデル(以下、3D 解析モデル)より軸部断面における応力分布を評価する。軸部断面の弾性係数を変化させた SUS316L-HTB と、それを一定とした高力ボルト (HTB) を比較する。解析ケースを表-1 に示す。図-1 から図-3 に示す 2D 解析モデルのメッシュサイズは、0.5mm を基本として、首下 R 部とねじ部のみ 0.05mm の 3 節点低減積分要素を用いた。図-4 から図-6 に示す 3D 解析モデルは、ねじ部を省略し、ボルト、座金、ナットに対称条件を与えた。ボルト頭部は 4 節点低減積分ソリッド要素、首下 R 部と軸部は 8 節点低減積分ソリッド要素を用いた。メッシュサイズは 0.6mm を基本とし、首下 R 部と座部は 0.15mm とした。軸力は、図-1(b)、図-4(b)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、M16 (F10T)の設計軸力 106kN を導入した。ナット-座金間、頭部-座金間および 2D 解析モデルのねじ部の接触条件は、摩擦係数 0.1 のクーロン摩擦とした。

SUS316L-HTB 円筒部の弾性係数は、図-1 および図-

表-1 解析ケースと材料特性

Case	次元	ねじ	領域(r:半径(mm))	弾性係数(GPa)	ポアソン比
ステンレス高力ボルト (SUS316L-HTB)	2D	有り	芯($0 \leq r < 3$)	180.8	0.3
			中層($3 \leq r < 7$)	174.3	
			表層($7 \leq r \leq 8$)	151.0	
			その他	200.0	
高力ボルト (HTB)			全体	200.0	0.3
ステンレス高力ボルト (SUS316L-HTB)	3D	無し	芯($0 \leq r < 3$)	180.8	0.3
			中層($3 \leq r < 7$)	174.3	
			表層($7 \leq r \leq 8$)	151.0	
			その他	200.0	
高力ボルト (HTB)			全体	200.0	0.3

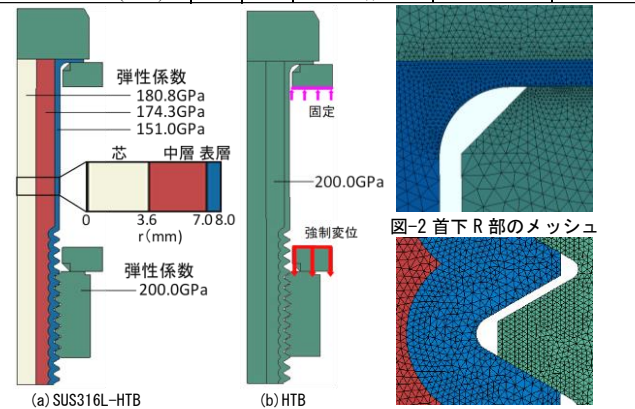


図-1 2D 解析モデル

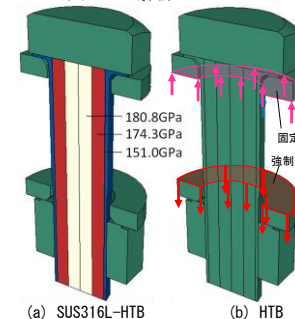


図-4 3D 解析モデル

図-2 首下 R 部のメッシュ

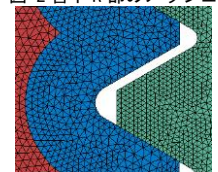


図-3 ねじ部のメッシュ

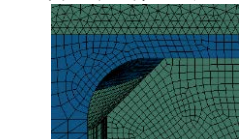


図-5 首下 R 部(正面)のメッシュ



図-6 首下 R 部(側面)のメッシュ

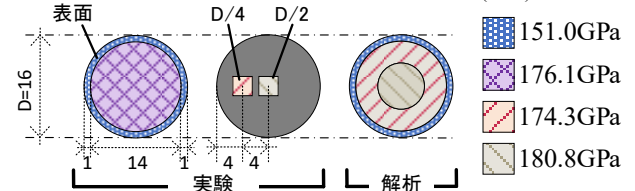


図-7 SUS316L 製高力ボルト軸部断面の弾性係数分布

4 に示す $0 \leq r < 3.6$ を芯、 $3.6 \leq r < 7$ を中層、 $7 \leq r \leq 8$ を表層として、それぞれに材料試験から得られた弾性係数²⁾を与えた。実験から得られた弾性係数と解析モデルの弾性係数の分布を図-7 に示す。中層と表層の境界は試験片の境界面であり、芯と中層の境界は、図-7 に示す実験値を各領域の代表値として一様に分布すると仮定し、断面積比を考慮した平均弾性係数が、芯および表層の実験値である 176.1GPa と一致するように設定した。

キーワード 高力ボルト 応力集中 弾性係数 SUS316L
 連絡先 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138 大阪公立大学大学院 工学研究科 都市系専攻 TEL&FAX 06-6605-2765

3. 結果と考察

首下 R 部とねじ部の応力集中係数を図-8 に示す。ここで、応力集中係数はボルトのねじ谷における最大発生 Mises 応力を、平均軸方向応力で無次元化して算出した。ねじ番号は図-9 に示す通りである。

図-8 より、SUS316L-HTB、HTB とともに応力集中係数の最大値はねじ番号 5 に、次にねじ番号 1 に生じた。ねじ番号 2 から 4 においては、応力集中係数はほぼ一定となった。ねじ番号 5 における SUS316L-HTB の応力集中係数は、HTB と比較して 6.7% 小さくなった。首下 R 部においても、応力集中係数は、HTB より SUS316L-HTB の方が 13% 小さい。応力集中係数の最大値がねじ番号 5 になるのは、ナットかかり部であるねじ番号 5 近傍が反力の大半を負担しているためと考えられる。

図-10 にねじかかり部（ねじ番号 5）軸断面における軸方向応力のコンターを示す。図中には、軸方向応力から算出したその断面の軸力分担率を併記している。

図-10 より、HTB に対する SUS316L-HTB の軸力分担率は、表層において 3.2% 小さく、芯および中層において、それぞれ 0.7%、2.5% 大きくなった。図-11 に示す首下 R 部における軸力分担率においても同様の傾向がみられる。以上より、SUS316L-HTB は弾性係数の高い芯および中層の軸力分担率が大きく、HTB よりもねじ部表面の応力集中が緩和されると考えられる。

図-8 より、SUS316L-HTB と HTB の応力集中係数の差に着目すると、ナット嵌合部より遊びねじ部の方が大きくなった。図-11、図-12 より、ナット嵌合部では、表層の発生応力および軸力分担が大きく、遊びねじ部では、芯と中層のそれが大きくなっていることが分かる。すなわち、ナット嵌合部から遊びねじ部にかけて、軸力分担が表層から軸中心に移動している。したがって、遊びねじ部では、表層の軸力分担率の低下に伴って、弾性係数の影響が現れるため、応力集中係数の差が大きくなったと考えられる。

4. まとめ

- (1) 軸部の芯から表面にかけて弾性係数が低下する SUS316L-HTB は、その低下に応じて表層の軸力分担率が低下する。そのため、首下 R 部およびねじ部における最大応力集中係数は高力ボルトに比べてそれぞれ 12.8%、6.7% 低下した。
- (2) SUS316L-HTB および HTB のねじ谷における応力集中係数の差に着目すると、遊びねじ部と比較

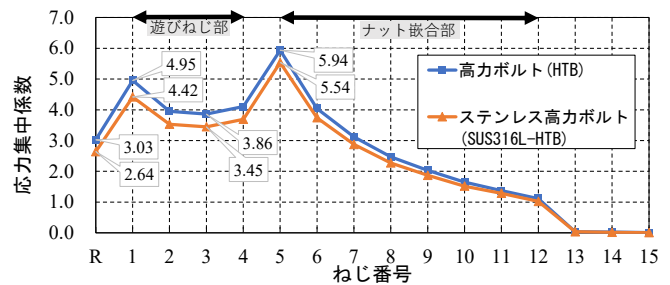


図-8 首下部とねじの応力集中係数

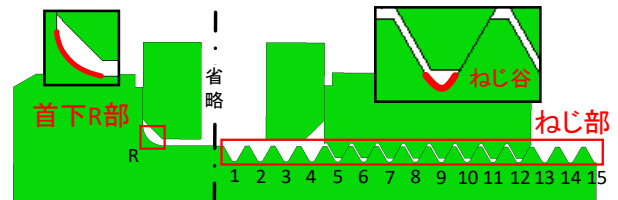


図-9 ねじ番号

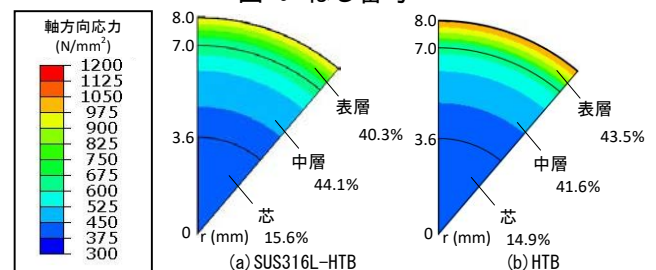


図-10 ねじかかり部断面の軸方向応力コンター

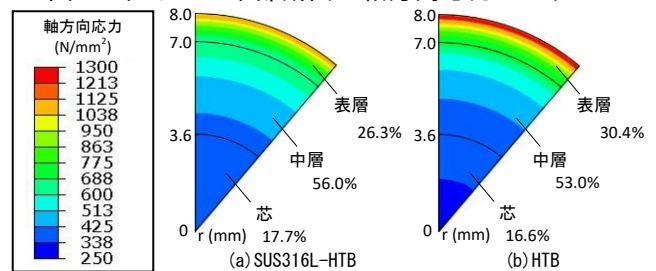
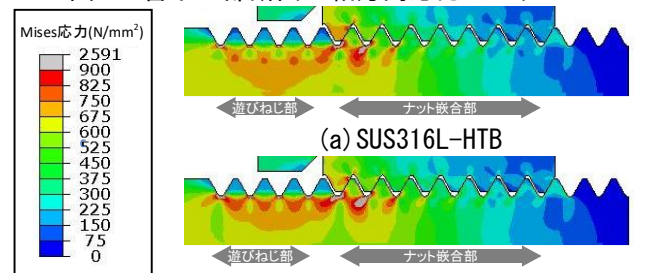


図-11 首下 R 部断面の軸方向応力コンター



(b) HTB

図-12 Mises 応力コンター

してナット嵌合部は、その差が小さい。

- (3) SUS316L ステンレス高力ボルトは、高力ボルトよりも、ねじ部および首下 R 部における応力集中が緩和された。今後は解析モデルにおける弾性係数の境界面の位置や、領域の分割数による違いについて検討する必要がある。

謝辞

本研究は日本鋼構造協会の委員会で取り組んでおり、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) 日本産業標準調査会：JIS B1186 摩擦接合用高力ボルト・六角ナット・平座金のセット、日本規格協会、2013。
- 2) 小村政孝、山口隆司、林巖、星本成律、香月学：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、令和4年度土木学会関西支部（投稿中）