

1800メガパスカル級超高強度ボルトの開発に成功 ― 超高強度で壊れにくい ―

新構造材料センター 金相グループ 材料信頼性萌芽ラボ インテンス研究グループ
主幹研究員 木村 勇次 主幹研究員 井上 忠信

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）の新構造材料センター（センター：津崎 兼彰）の木村 勇次主幹研究員と材料信頼性萌芽ラボ（ラボ長：原田 幸明）の井上 忠信主幹研究員は、株式会社共和工業所、扶桑機工株式会社と共同で、強くてかつ壊れにくい超高強度ボルトの開発に成功した。

2. 構造材料で要求される基本性能は大きな荷重を支えること（強度）と粘り強く壊れにくいこと（靱性）¹⁾である。これまで、物質・材料研究機構では、少量の合金元素を添加した鋼材の金属組織を制御することで、低温でも壊れにくい超高強度鋼を開発してきた。（Science, 320 (2008), p. 1057, 2008年5月23日付けプレスリリース）

3. 今回、先に開発した低温でも壊れにくい超高強度鋼材を用いて、従来のボルトの冷間成形（室温近傍）よりも高い温度域（500～700℃）で鋼材をボルトに成形する、いわゆる温間成形技術確立することで従来にない概念の超高強度ボルトを実現した。1800メガパスカル（MPa/1MPa=断面積1mm²あたり1N（およそ0.102kgf））の超高強度において、従来法で作製されたボルトは引張試験で図1（b）のように容易に破断してしまうのに対し、開発したボルトは図1（a）のように木を引きちぎった時のような破壊形態を示して容易には壊れない。すなわち、1800MPa級の超高強度でボルトの安全性を大幅に高めた。



図1（a）
開発した六角ボルト（M12）
ボルト製品の引張強度＝1848MPa



図1（b）
従来法（焼入れおよび焼戻し処理）で作製した六角ボルト（M12）
ボルト製品の引張強度＝1833MPa

これまで、ボルトの強度特性は頭部からネジ部にかけて均一であった。これに対し、開発ボルトは、首下円頭部から頭部にかけて強度（硬さ）が傾斜的に低くなる分布を持っている。（図2）。日本独自の優

れた鉄つくりの技術を凝縮した強くて折れにくい日本刀は、炭素量の多い硬い鋼が炭素量の少ない軟かくて粘りのある鋼を包み込んだ複合組織構造からなる。一種の傾斜機能材料であり、一見、開発ボルトと類似した傾斜機能を有する（図2）。ところが、日本刀の刃先は硬くてもろいが、開発したボルトのネジ部は開発鋼を素材としているため、硬くても壊れにくい。すなわち、従来とはまったく異なる設計思想によってボルトは創製された。

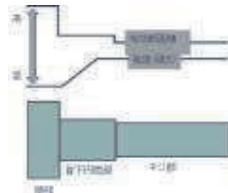


図2 開発したボルトの強度（硬さ）分布の模式図

4. 近年、省資源化、省エネルギー化、そしてCO2排出量削減を目的とした輸送機の更なる軽量化や次世代鋼構造物の実現を目指し、鉄鋼材料のより一層の高強度化が求められている。その中で、鋼板や形鋼の高強度化と同時に、高強度鋼材の接合に用いられるボルトの高強度化も切望されている。強くて壊れにくいボルトの実現は、高強度鋼材の利用域拡大に大きく貢献するものと期待する。

研究の背景

鋼構造物の柱と梁などの部材を接合させるうえで、高力ボルト接合は溶接とともに重要な接合法である。溶接と比べて、高力ボルト接合では高度な技能を必要とせず容易に所定の品質が確保できる利点がある。例えば、土木建築分野では引張強さ²⁾が1000MPa級の高強度ボルトが用いられている。最近では、超高層建築物をはじめとする部材の厚肉化や高強度化に対してより一層のボルトの高強度化が求められており、建築分野では引張強さ1400MPa級超高強度ボルトが製品化されその利用実績が増えている。さらに、超高強度のボルトが実用化されれば、接合部の更なるコンパクト化が可能となり、鋼構造物のデザインも変革できる。

ボルトの素材に要求される機械的特性は、①成形・加工が容易であること、②耐遅れ破壊性³⁾に優れていること、③環境などの影響により材質劣化のないこと、④耐衝撃性に優れていることなどがあげられる。しかし、これらの特性は強度上昇と相反関係にある。引張強さが1200MPaを超える鋼材では遅れ破壊が深刻な問題であり、高力ボルト高強度化の大きな妨げとなっている。遅れ破壊とは、大気腐食によって水素が発生し、鋼材中に侵入して鋼材が脆化する結果、起こる破壊で、時間遅れ破壊の略称である。室温において鋼中で拡散集積する水素が遅れ破壊の原因である。この遅れ破壊のため、

1990年代後半に1400MPaの超高強度ボルトが開発されるまでの約30年間、土木建築用高力ボルトの高強度化は引張強さが1100MPaまでで頭打ち状態であった。

当機構では、強度2倍・寿命2倍の超鉄鋼材料の実現を目指し、超鉄鋼プロジェクト⁴⁾を1997年度から2005年度まで推進した。その中の研究テーマのひとつとして耐遅れ破壊性、疲労特性に優れた1500MPa超級低合金鋼⁵⁾の開発、および低合金鋼を用いた超高強度ボルトの創製を試行した。しかし本プロジェクトで開発した1700MPa級超高強度ボルトの靱性は極めて低く、大気環境における遅れ破壊も未だ克服できていなかった。

研究成果の内容

従来、高力ボルトなどの高強度部品は、成形前に素材を熱処理によって軟かく（焼なまし）した後に冷間（室温近傍）で部品形状に圧造成形し、その後、焼入れおよび焼戻しするという加工熱処理によって作製される。これに対して、開発したボルトは、先に開発した超微細結晶粒組織を有する鋼を素材にして、圧造が困難な頭部を700℃付近の高温で成形後、ネジ部を500℃付近で転造するという焼なまし処理省略型の新しい製造方法を開発した。なお、ボルトの成形は既存の圧造設備で行い、形状はJIS規格の六角ボルトに準じる。ボルトの破壊で最弱点となるねじ部には開発鋼の超微細結晶粒組織を維持することで高強度高靱性を維持し、ボルト首下円筒部から頭部にかけては傾斜的に強度を低くすることで靱性の低下を抑制した（図2）。首下円頭部から頭部にかけて強度が低くなるが、ボルト断面の有効径はねじ部より首下円頭部と頭部で大きいことから、ボルト全体としては強度のバランスが保たれている。その結果、1800MPa級の強度でも健全にねじ部で破断し、しかも従来ボルトよりも壊れにくいボルトが作製できた。

今後の展開

耐力⁶⁾が1500MPa以上の超高強度を達成できる鉄鋼材料では、素材の冷間鍛造、焼入れおよび焼戻しなどの従来プロセスで「複雑な形状をした部品」に所定の特性を持たせることの難しさがシーズの発掘と実用化を阻んできた。本成果は、金属組織制御と同時に複雑形状の部品への成形法のブレークスルーを達成したもので、超高強度材料とその部材の実用化に道を拓くものと考ええる。今後は、ボルトの量産性を念頭に置いてプロセス開発研究へと展開して行く予定である。

用語解説

1) 靱性

粘り強く、衝撃破壊を起こしにくいかどうかの程度。工業的にはシャルピー衝撃試験などで評価される。シャルピー衝撃試験では、シャルピー衝撃試験機を用い、試験片を40mm隔たっている二つの支持台で支え、かつ切欠き部を支持台間の中央において切欠き部の背面をハンマーによって1回だけ衝撃荷重を与えて試験片を破断して、衝撃吸収エネルギー、脆性破壊面、延性脆性遷移温度などを測定する試験。

2) 引張強さ

引張試験の経過中、試験片の耐えた最大荷重を試験片の平行部の原断面積で除した値。

3) 遅れ破壊

工業的には、大気、川水、海水などの比較的腐食性の弱い自然環境下で、高強度合金が引張強さ以下の負荷応力のもとで、ある時間後に破壊される現象。

4) 研究プロジェクト

●「新世紀構造材料（超鉄鋼材料）プロジェクト」
希少合金元素を使わずに、普通の合金元素の組成だけで、強さ2倍かつ寿命2倍という卓越した性能を持つ超鉄鋼材料を開発することを目的として、1997年度から開始された。

●「安全で安心な社会・都市新基盤実現のための超鉄鋼研究プロジェクト」新世紀構造材料（超鉄鋼材料）プロジェクト」の第Ⅱ期に当たり、2002年度から2005年まで行われた。第Ⅰ期で得られた超鉄鋼に関する基礎基盤技術を応用展開させ、超鉄鋼材料の大型化、構造化技術の開発、さらに設計・構造関係者との連携を深め超鉄鋼材料を利用した革新的構造物の提案を行っている。

●「ナノミクロ組織制御による構造材料の高性能化技術の構築プロジェクト（新構造成用プロジェクト）」

新構造材料センターが2006年度より開始した研究プロジェクト。結晶方位配向制御や結晶粒超微細化などのナノミクロの階層的な金属組織制御によって、金属系構造物やその継ぎ手の高性能化（高耐久性・高成形性・高靱性）を達成することを目指している。これによって、メンテナンスフリーの耐食材料、従来よりも高温で長時間使用できる耐熱材料、さらなる軽量化を達成する高比強度材料など、輸送機器の小型軽量化やプラントの長寿命化を可能とする構造成材料や部材の開発を目指している。

5) 低合金鋼

鋼の性質を改善、向上させるため、又は所定の性質をもたせるために合金元素を1種または2種以上含有させた鋼。それぞれの元素添加量については下限が定められており、FeとC以外の元素いずれかがその下限に満たないものは、合金鋼と呼ばない。このような鋼は炭素鋼と呼ぶ。

ISOでの下限は、次のようになっている。

Al: 0.1、B: 0.0008、Co: 0.1、Cr: 0.3、Cu: 0.4La: 0.05、Mo: 0.08、Nb: 0.06、Ni: 0.3、Pb: 0.4Se: 0.1、Te: 0.1、Ti: 0.05、V: 0.1、W: 0.1、Zr: 0.05 [mass%]

これらの合金元素の合計量が5[mass%]以下ならば低合金鋼、5～10[mass%]ならば中合金鋼、10[mass%]以上ならば高合金鋼と呼ぶ。

6) 耐力

引張試験において、規定された永久伸びを生じるときの荷重を平行部の原断面積で除した値。JISでは、とくに規定のない場合は、永久伸びの値を0.2%とする。