

(解説)

非調質ボルト用線材

Non Heat-treated Cold Heading Wire Rod for Bolts



鹿磯正人
Masato Kaiso



千葉政道(理博)
Dr. Masamichi Chiba

The usage of non heat-treated steels which can eliminate quench and temper heat treatment has increased steadily for many applications because environmental advantages, energy savings and manufacturing cost reductions. However, die life during cold heading of bolts requires improvement. Research has been carried out to decrease flow stress during cold heading in such a way to improve die life. As a result, JIS 8.8 class non-heat-treated steel was developed; it has the same flow stress properties as spheroidized steel.

まえばき = 80年代初頭、オイルショックを契機に省エネルギーのニーズが高まり、調質処理を省略できる非調質鋼が開発された。近年、この非調質鋼が、工程省略によるコストダウンや環境への負荷低減などを目的として、自動車部品をはじめ各種締結部品に実用化され、着実にその適用範囲が広がっている^{1),2)}。

当社では、ボルトをはじめ各種冷間鍛造部品の要求特性に応じて、基本型に加え、冷圧性重視型や高靱性型などの非調質線材を開発し、KNCH シリーズ (Kobe Non Heat Treatment Wire Rod, 以下 KNCH 線材と表記) として商品化している。

本稿では、非調質ボルト用線材の適用拡大にあたり、最大の技術課題であった冷間鍛造性の向上に取組み、工具寿命を大幅に改善した JIS 強度 8.8 級非調質線材 (KNCH8S) の考え方と特性、さらなる高強度化への取組みについて述べる。

1. 非調質ボルト用線材の特徴

図 1 に、非調質ボルトと調質ボルトとの工程比較を示す。非調質ボルトでは、冷間圧造前の球状化焼鈍の省略や伸線回数の削減など、工程の大幅な簡略化ができ、コストダウンにとどまらず、リードタイムの短縮や作業環境の改善に大きく貢献できる。

しかし上記の利点を有する一方で、非調質ボルトは冷間圧造前の伸線材強度によって製品強度を確保するため工具負荷が大きく、調質ボルトに比べ工具寿命が低下する短所を有する。また、冷間圧造のまま使用されることから、調質ボルトに比べて延性や靱性が低下する傾向にあり、圧造段階で調質材よりも更に微細な組織が求められる。このような要求を満足するため、非調質ボルト用線材では、適用部品の強度や形状に合わせて最適な成分と加工条件を選定することが極めて重要となる。

表 1 に各 KNCH 線材の適用強度と機械的性質を、図 2 に適用例を示す。ボルト強度の上昇に伴い、ボルトへの加工性と工具寿命は低下するが、現在、JIS 強度 8.8 級までの六角フランジボルトの成形が可能であり、実用に供されている。また、JIS 強度 12.9 級についても、主に、Uボルト、スタッドボルトとして実用化が検討されている。

2. 非調質ボルト用線材の冷間鍛造性向上のための考え方と特性評価方法

2.1 冷間鍛造性向上の考え方

ボルト圧造時の工具寿命は、線材圧縮時の変形抵抗と強い相関があることが知られている。変形抵抗を最小化

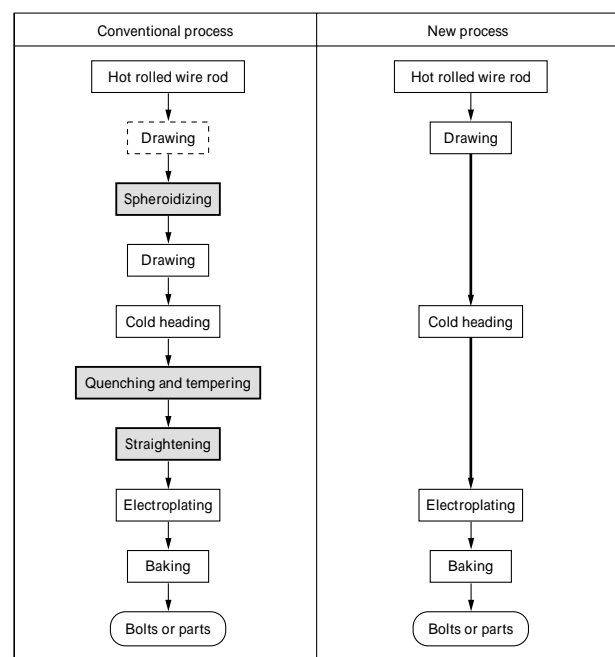


図 1 冷間圧造部品の製造工程
Fig. 1 Manufacturing process of cold headed bolts or parts

表1 非調質ボルト用線材のメニューと機械的性質の例

Table 1 Steel grades of non heat treatment wire rod and examples of mechanical properties of bolts

Type	Steel grade	Class	Reduction of area in drawing (%)	Diameter of bolt (mm)	Examples of mechanical properties		
					0.2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%) GL = 5D
Basic	KNCH7	(7T)	min. 20	-	min. 490	min. 686	min. 15
	KNCH8	8.8	min. 20	max. 16	min. 640	min. 800	min. 12
				over 16	min. 660	min. 830	
High cold headability	KNCH7S	(7T)	min. 25	-	min. 490	min. 686	min. 15
	KNCH8S	8.8	min. 25	max. 16	min. 640	min. 800	min. 12
				over 16	min. 660	min. 830	
High toughness	KNCH8P	8.8	min. 20	max. 16 over 16	min. 640 min. 660	min. 800 min. 830	min. 12
High tensile strength and high toughness	KNCH10	10.9	min. 20	-	min. 940	min. 1 040	min. 9
	KNCH12	12.9	min. 20	-	min. 1 100	min. 1 220	min. 8

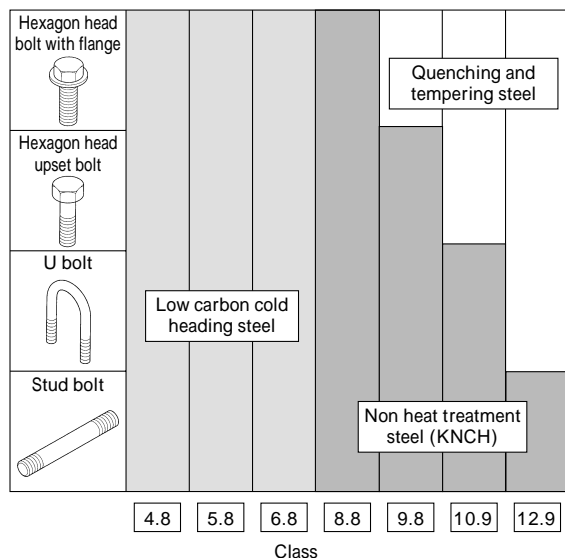


図2 非調質ボルト用線材 (KNCH) の適用範囲
Fig. 2 Application of non heat treatment cold heading wire rod (KNCH)

するための考え方として、次の3点が挙げられる。

- 加工硬化係数の低減 Si 低減³⁾
- 歪み時効の制御 N 低減, Al 増量⁴⁾
- 伸線加工によるバウシング効果の活用 伸線減面率の適正化²⁾

上記の考え方により冷間鍛造性を向上させた JIS 強度 8.8 級の新鋼種 KNCH8S (開発鋼) と、従来型の非調質ボルト用鋼 KNCH8 (基本型) 及び代表的な強度 8.8 級の調質鋼として KCH45KT-W について、線材特性とそのボルト特性を以下に述べる。また、これら鋼種の化学成分を表2に示す。開発鋼 KNCH8S では、基本型 KNCH8 に比べて Si 添加量を低減し、Al 量と N 量の比 Al/N が約2倍になるように調整した。調質鋼については、球状化処理材を比較材とした。いずれの鋼種も、転炉で溶製した後、線材圧延を行った。

2.2 非調質ボルト用線材の特性評価方法

本稿で述べるボルト用線材の評価方法について、以下

表2 供試材の化学成分
Table 2 Chemical compositions of steels used in this study

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	N	Al/N	Remark
KNCH8S	0.29	0.02	1.45	0.005	0.007	0.10	0.045	0.0032	14.1	New non heat treatment steel
KNCH8	0.30	0.24	1.51	0.011	0.010	0.05	0.033	0.0045	7.3	Non heat treatment steel
KCH45KT-W	0.45	0.18	0.72	0.015	0.018	0.15	0.024	0.0046	5.2	Quenching and tempering steel

に記す。

2.2.1 変形抵抗

鋼材の変形抵抗を測定するため、端面を拘束した冷間での据え込み試験を行った。据え込み試験の模式図を図3に示す。変形抵抗は、据え込み率 60% (= 1.08) のときの荷重から計算を行って求めた⁵⁾⁶⁾。

非調質ボルト用線材は、線径 13.0mm の圧延線材を用いて、減面率 10 ~ 67% の範囲で伸線を行い、実験に供した。従って、据え込み試験に供した試験片の線径 D は、12.3 ~ 7.4mm の範囲で変化しており、試験片高さ L との比 L/D を 1.5 一定とした。

2.2.2 工具寿命

ボルト圧造時の工具寿命は、多段ホームを用いて図4に示す M12 フランジボルトを圧造速度 60 個/分で圧造したときの工具の摩耗状況で評価した。実験に用いた供試材は、表3に示す減面率で伸線を行った。表3には供試材の機械的性質も同時に示す。

20 × 30L Upset ratio (%) = 100 (H₀ - H) / H₀

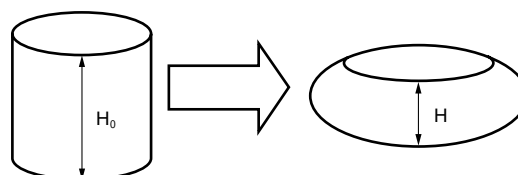


図3 冷間据え込み試験の模式図
Fig. 3 Schematic illustration of upset test

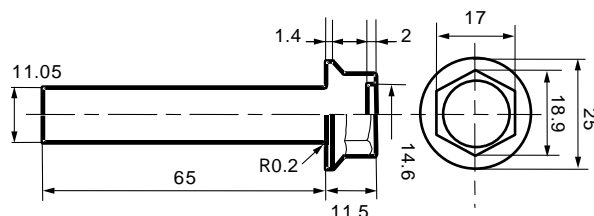


図4 試作ボルト形状
Fig. 4 Shape and dimension of bolts used in this study

表 3 供試材の伸線条件と伸線材の機械的性質

Table 3 Drawing conditions and mechanical properties of drawn wire

Steel	Drawing conditions			Mechanical properties of drawn wire			
	Diameter of wire rod (mm)	Reduction of area in drawing (%)	Diameter of drawing wire (mm)	0.2% proof strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation GL = 5d (%)	Reduction in area (%)
KNCH8S	13.0	30	10.85	757	860	15.5	65.7
	14.0	40		791	898	15.6	64.6
	19.0	67		826	1 007	13.7	58.0
KNCH8	13.0	30		791	881	14.8	62.1

2.2.3 ボルトとしての諸特性

ボルトとして必要な特性として JIS に規定のある下記 3 項目の評価試験を、ボルト圧造試験で得られたボルトを用いて行った。いずれのボルトも降伏比向上と永久伸び低減を目的として、ベーキング処理を行ったものと圧造ままボルトを使用した。

頭部打撃試験 (図 5 判定基準:首下 R 部割れなし)

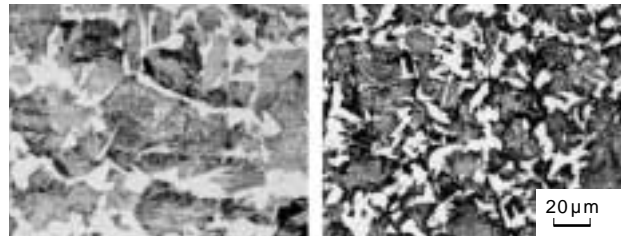
くさび引張試験 (図 6 判定基準:8.8級 800N/mm², 9.8 級 900N/mm² 以上)

保証荷重試験 (判定基準:永久伸び 12.5mm 以下)

3. 開発鋼の特性評価

3.1 伸線材の機械的性質と冷間据え込み試験による変形抵抗評価

開発鋼 KNCH8S と既存鋼 KNCH8 のミクロ組織を写真



(a) KNCH8 (b) KNCH8S

写真 1 既存鋼と開発鋼のミクロ組織

Photo 1 Microstructure of non heat treatment steel in wire rod condition

1 に示す。開発鋼は、既存鋼に比べて微細な組織を有することがわかる。これは、線材圧延時に制御圧延を採用した成果である。図 7 に、これら供試鋼について伸線加工硬化挙動を示す。開発鋼は既存鋼に比べて伸線前、伸線後ともほぼ同程度の強度差が得られている。一方、絞りは開発鋼の方が向上しており、既存鋼に比べて強度 - 延性バランスに優れているといえる。この図からわかるように、開発鋼を 20% 以上の減面率で伸線することによって、8.8 級以上のボルト用としての強度を満足できる。

このようにして得られた伸線材を用いて、冷間据え込み試験による変形抵抗測定を行った。その結果を図 8 に示す。開発鋼及び既存鋼ともに伸線減面率が 30% 程度で変形抵抗の極小値が得られ、それ以上の伸線減面率の領域では伸線材の強度上昇に伴い、徐々に変形抵抗が上昇した。このような現象は、伸線加工と据え込み加工では

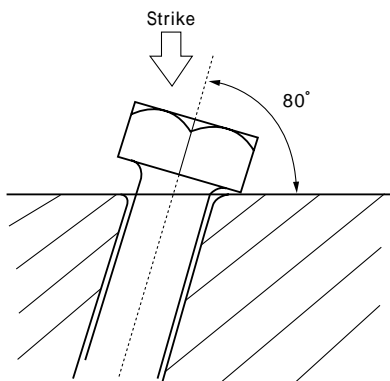


図 5 頭部打撃試験の模式図

Fig. 5 Schematic illustration of head strike test

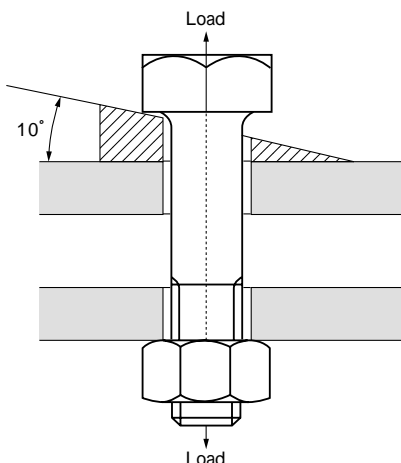


図 6 くさび引張試験の模式図

Fig. 6 Schematic illustration of wedge loading test

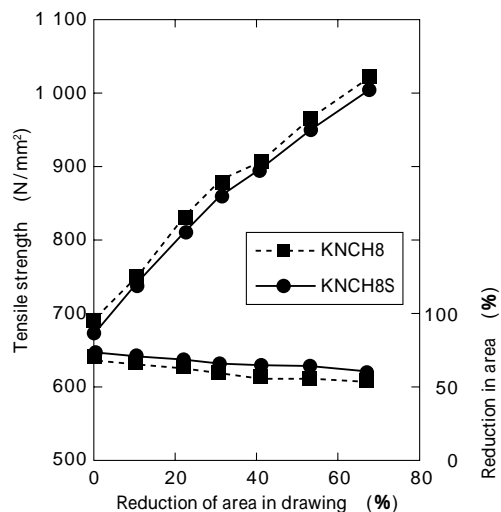


図 7 伸線材の機械的性質

Fig. 7 Mechanical properties of wire drawn in various reduction of area

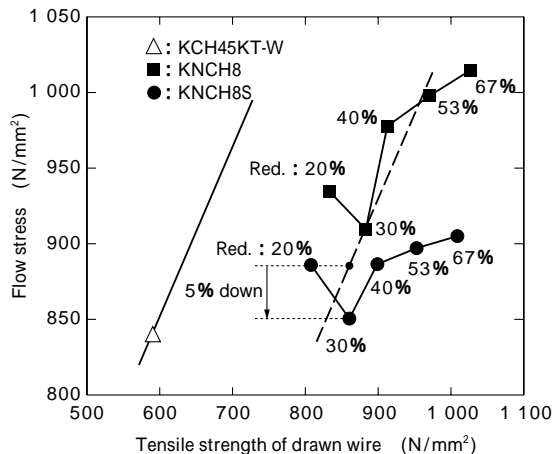


図8 伸線材の引張強さと変形抵抗の関係
Fig. 8 Relationship between tensile strength and flow stress of drawn wire

歪みの加わる方向が異なるために生じる一種のパウシंगा効果が原因と思われる^{1),2)}。

一般的には引張強さが低ければ変形抵抗も低くなることはよく知られている。図8中の実線()は球状化材における引張強さと変形抵抗の関係である。破線は既存鋼KNCH8を30%伸線した線材の点まで平行移動させた線である。開発鋼KNCH8Sは既存鋼KNCH8に比べて、同一強度で比較しても、5%程度の変形抵抗低減が可能であることがわかる。また、伸線減面率30%で比較すると、伸線材の強度低下による効果以上の変形抵抗低下が認められる。

これらの結果、開発鋼に30%の伸線加工を加えてパウシंगा効果を利用することによって、調質ボルト用鋼KCH45KT-Wの球状化材とほぼ同等の変形抵抗が得られた。さらに、大きな伸線加工を加えても、変形抵抗の上昇を低く抑えることができる高強度伸線材が得られる可能性がある。

3.2 据え込み試験による変形抵抗とボルト圧造工具寿命の関係

上述した変形抵抗測定実験より得られた結果から、表3に示す強度クラス8.8級非調質ボルト用伸線材4種類と、調質ボルト用球状化処理材の合計5種類のボルト圧造実験を行った。加工条件は、開発鋼KNCH8Sで最も変形抵抗が低く調質ボルト用KCH45KT-W球状化材とほぼ同等であった伸線減面率30%と、既存鋼KNCH8の30%伸線材とほぼ同等の強度であった開発鋼の伸線減面率40%、さらに、強度クラスが8.8級の上限強度が得られる開発鋼の67%伸線材を選択した。

図9に各供試材の工具寿命と伸線減面率の関係を、図10に工具寿命と図8に示した変形抵抗の関係を示す。図9から開発鋼KNCH8Sに減面率30%の伸線加工を施した場合、ボルト圧造工具の寿命は調質ボルト用KCH45KT-W球状化材とほぼ同等まで向上することができた。しかし、減面率40%、67%の伸線加工を施すと、そこまでの工具寿命改善は図れなかったが、いずれも既存鋼KNCH8の30%伸線材より工具寿命が優れる結果が得られた。

図10の変形抵抗と工具寿命の関係から、強度クラス8.8級では、既存鋼KNCH8に対して化学成分を改善し、ボルト圧造前の伸線減面率を適正化することによって開発鋼の変形抵抗を低下させることができ、結果的に既存鋼に比べて3倍程度の工具寿命改善を図ることができた。さらに、強度クラス8.8級非調質ボルトの上限強度であっても、既存鋼より工具寿命が改善できる可能性があることがわかった。したがって、開発鋼KNCH8Sの伸線減面率を適正化することにより、強度クラス8.8級の上限強度、すなわち9.8級非調質ボルトの中央強度程度まで製造できる可能性がある。

3.3 ボルト特性評価

非調質ボルト用線材を用いてボルト圧造工具寿命試験を行い試作したM12フランジボルトを用いて、JISに規定のある頭部打撃試験、くさび引張試験、保証荷重試験を行った。また、ボルトからJIS 14A号試験片を切出し、引張試験による機械的性質と硬さも調査した。

引張試験結果と硬さ測定結果を表4に示す。その結果、ベーキングを行わない場合は降伏比YP/TSが規格を満足できないが、200以上のベーキングを施すことによって、強度8.8級ボルトとしての規格を満足することがで

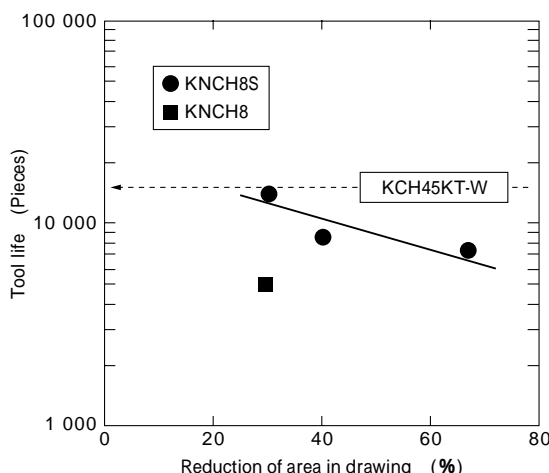


図9 各伸線材の工具寿命評価結果
Fig. 9 Results of tool life test of various drawn wire

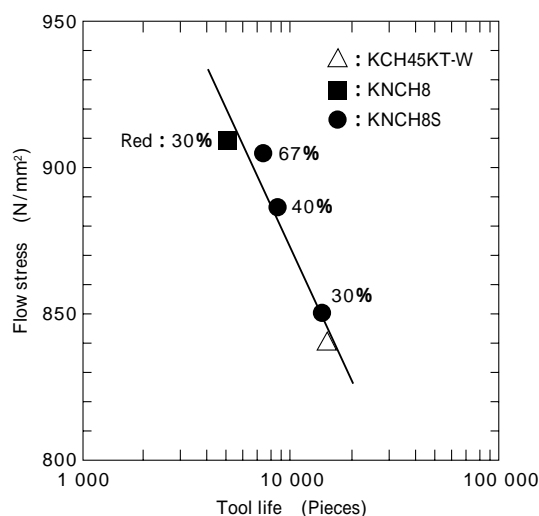


図10 変形抵抗と工具寿命の関係
Fig.10 Relationship between the flow stress and the tool life of the drawn wire

表 4 強度クラス 8.8 級非調質ボルトの機械的性質、硬さ

Table 4 Mechanical properties and hardness of 8.8 class non heat treated bolt

Steel	Reduction of area in drawing (%)	Baking conditions	0.2%PS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YP/TS	El./5d (%)	Hardness (HV)	
KNCH8S	30	None	580	785	0.74	21.9	247	
		200 × 4.0h	693	842	0.82	18.9	266	
		400 × 0.5h	703	853	0.82	18.8	270	
	40	None	595	820	0.73	21.3	259	
		200 × 4.0h	758	864	0.88	18.9	274	
		400 × 0.5h	766	873	0.88	20.8	277	
67	200 × 4.0h	936	996	0.94	12.0	315		
KNCH8	30	None	601	818	0.73	18.2	258	
		200 × 4.0h	790	886	0.89	18.3	281	
		400 × 0.5h	793	900	0.88	17.4	286	
KCH45KT-W	Quenched and tempered		794	871	0.91	17.9	273	
JIS specification			8.8 class	min. 640	min. 800	min. 0.8	min. 12	250 ~ 320
			9.8 class	min. 720	min. 900	min. 0.8	min. 10	290 ~ 260

表 5 強度クラス 8.8 級非調質ボルトのくさび引張試験結果

Table 5 Results of wedge loading test of 8.8 class non heat treated bolt

Steel	Reduction of area in drawing (%)	Baking conditions	Breakage strength (N/mm ²)
KNCH8S	30	None	786
		200 × 4.0h	843
		400 × 0.5h	865
	40	None	813
		200 × 4.0h	867
		400 × 0.5h	881
67	200 × 4.0h	1 000	
KNCH8	30	None	832
		200 × 4.0h	889
		400 × 0.5h	903
JIS specification			min. 800

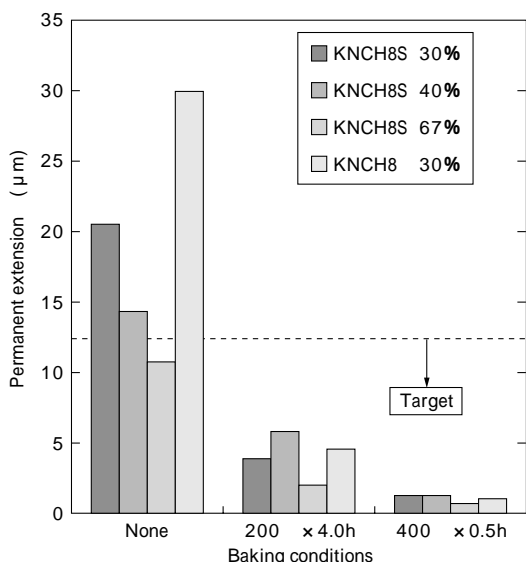


図11 強度クラス 8.8 級非調質ボルトの保証荷重試験結果

Fig.11 Effect of baking condition on permanent extension of 8.8 class non heat treated bolts (Proof load : 48 900N)

きた。

頭部打撃試験では首下の割れなどの異常は認められなかった。くさび引張試験(表5)では破断荷重規格を満足し、頭飛びなどの異常破断も認められなかった。保証

荷重試験における永久伸びに関しては JIS 規格に「永久伸びは生じてはならない」とあるが、測定誤差範囲が「± 12.5 μm 以内」とあるため、目標を 12.5 μm 以下とした。その結果、図 11 に示すように、ベーキングを施すことによって永久伸びが著しく減少し、目標を満足することができた。くさび引張試験に関しては、すべての条件で頭飛びが発生せず、正常な破断形態であった。

以上のことから、開発鋼 KNCH8S を用いて試作した非調質ボルトは、強度クラス 8.8 級の規格上限強度まで JIS に規定のあるボルト特性を満足することがわかった。

むすび = 非調質ボルト用鋼における問題点の一つであるボルト圧造工具の寿命向上について、化学成分とボルト圧造前の伸線減面率に着目して検討した結果を概説した。

鋼の化学成分面では、Si 量低減、N 量低減と Al 量増加による Al/N 比の増大によって、さらに加工面では、伸線減面率を約 30% 程度に最適化することによって、開発鋼を使用したボルトでは工具寿命の大幅な改善が実現でき、調質ボルト用鋼 KCH45KT-W の球状化材と同等の工具寿命が得られた。

また、開発鋼を使用したボルトは、ベーキングを施すことによって、JIS 規定の強度クラス 8.8 級のボルトとして必要な特性を満足した。本稿では M12 フランジボルトを対象に検討を行ったが、今後はほかのボルトや鍛造部品への適用、さらには部品の高強度化を行っていききたい。

参考文献

- 1) 中村芳美ほか：神戸製鋼技報，Vol.31, No.4 (1981), p.34.
- 2) 蟹澤秀雄ほか：日本金属学会会報，Vol.30, No.6 (1991), p.557.
- 3) 山田凱郎ほか：(社)日本塑性学会 冷間鍛造分科会 第 13 回冷間鍛造実務講座 (1982), p.15.
- 4) 三好栄次ほか：塑性と加工，Vol.12, No.122 (1971), p.167.
- 5) 浅川基男ほか：塑性と加工，Vol.38, No.440 (1997), p.787.
- 6) 黒田浩一ほか：塑性と加工，Vol.38, No.440 (1997), p.834.