

耐 H A Z 軟化ハイテンプロペラシャフト用鋼管

High Strength Pipe for Automotive Prop Shaft
with Resistance to Softening of Welded Zone

田 邊 弘 人^{*(1)} 宮 坂 明 博^{*(1)} 穴 井 功^{*(2)} 谷 岡 慎 悟^{*(3)}
Hiroto TANABE Akihiro MIYASAKA Isao ANAI Shingo TANIOKA

抄 録

プロペラシャフト用電縫鋼管は、両端に部品を溶接接合された後に、車両の加減速時に発生するトルクを繰返し受けるため、溶接接合部も含めた耐疲労強度の必要な部材である。そこで、現状よりプロペラシャフトを軽量化するためには、鋼管素材の高強度化のみならず、溶接接合部の疲労特性をも改善できる鋼管が必要であり、溶接熱影響部においても高疲労強度を有するハイテン鋼管を開発した。この鋼管は、同部品の低騒音化を達成できるとして注目されている摩擦圧接加工にも適する。

Abstract

Electric resistance welded (ERW) pipe for automotive prop shaft is such a member as required a fatigue resistant strength including parts at its welded connection, since, after being welded to join the parts at its both sides, it receives repeated torques generated when accelerating and decelerating car. Therefore, in order to make the prop shaft more lightweight, it is necessary to develop not only a green pipe material with high strength but its fatigue property at the welded connection part can be improved. On viewing this, the high strength pipe with high fatigue strength even at the heat affected zone by welding has been developed. This pipe is also fit for friction welding which draws attention to attain prevention against noise and vibration of the welded parts.

1. 結 言

近年自動車は、地球環境問題への対応及び経済性の観点から、軽量化による燃費向上を達成するための開発が精力的に進められている。プロペラシャフト（自動車推進駆動軸）においても加速性能、静粛性といった機能を満たしつつ、軽量化を進めるべく引張強さ 440～540N/mm²級から 690～780N/mm²級の高強度鋼管¹⁻³⁾を適用した細径、薄肉による軽量化⁴⁻⁶⁾が進みつつある。本報告ではプロペラシャフトの概要、軽量化のために必要な溶接部疲労特性向上対策、若干の利用加工技術を含めた新日本製鐵の電縫鋼管の品質特性を紹介する。

2. プロペラシャフトの概要

プロペラシャフトはフロントエンジンリヤドライブ式車両の推進駆動軸であり、路面の衝撃や荷重の変化による軸方向の伸縮、角度の変動に対応しながら、絶えず変動するエンジントルクを受けつつ高速回転をする重要保安部品で、車両の仕様構造にて多岐にわたる部品から構成される。一般には軸の固有の特性で決まる共鳴振動域を常用回転域より高くするため、質量に比べねじりや曲げ剛性の高い中空の炭素鋼管とスプラインシャフト、ユニバーサルジョイント、

センターベアリングなどから構成される⁷⁾。

図 1 に自動車メーカー各社で実施されている代表的なプロペラシャフトの製造工程を示す⁷⁾。太線で示しているのが新日本製鐵の電縫鋼管がたどる工程である。所定の長さに切断後ジョイントヨークと溶接された後、各種部品を組み込み、回転の振れ回りが調整される。組立品として静的、動的に必要なトルクに耐えること、バランスのよいことなどが求められる。鋼管のせん断応力 ($\tau_{0.2}$) あるいは降伏トルク ($T_{0.2} = \tau_{0.2} \times Z_p$) は図 2 のごとく素材の降伏強度に比例する。写真 1 (a) の静ねじり試験後の外観のように、最大ねじりトルクは鋼管部分の座屈で決定される。従って、静的ねじり強度を向上させるためには、素材鋼管の強度を高めることが効果的である。一方、写真 1 (b) にねじり疲労試験後の破断状況を示すごとく、動的ねじり強度はジョイントヨークとの溶接継手部の疲労破壊強度で決定される。そこで、軽量化のためには素材強度の向上に加えて、溶接部の疲労強度を含めた高強度化が必要である。

ところで、最近このジョイントヨークと鋼管の接合方法として、従来のアーク溶接に代わり摩擦圧接が注目されている。それは、接合加工精度が良いため高速回転時のバランス性能が良好で車内騒音が低い^{4,5)}からである。摩擦圧接は厚肉の鋼管では容易に適用されてきたが、プロペラシャフト用鋼管のように薄肉の場合は、接合が困

^{*(1)} 技術開発本部 名古屋技術研究部 主任研究員

^{*(2)} 名古屋製鐵所 品質管理部 掛長

^{*(3)} 名古屋製鐵所 厚板・鋼管部 部長代理

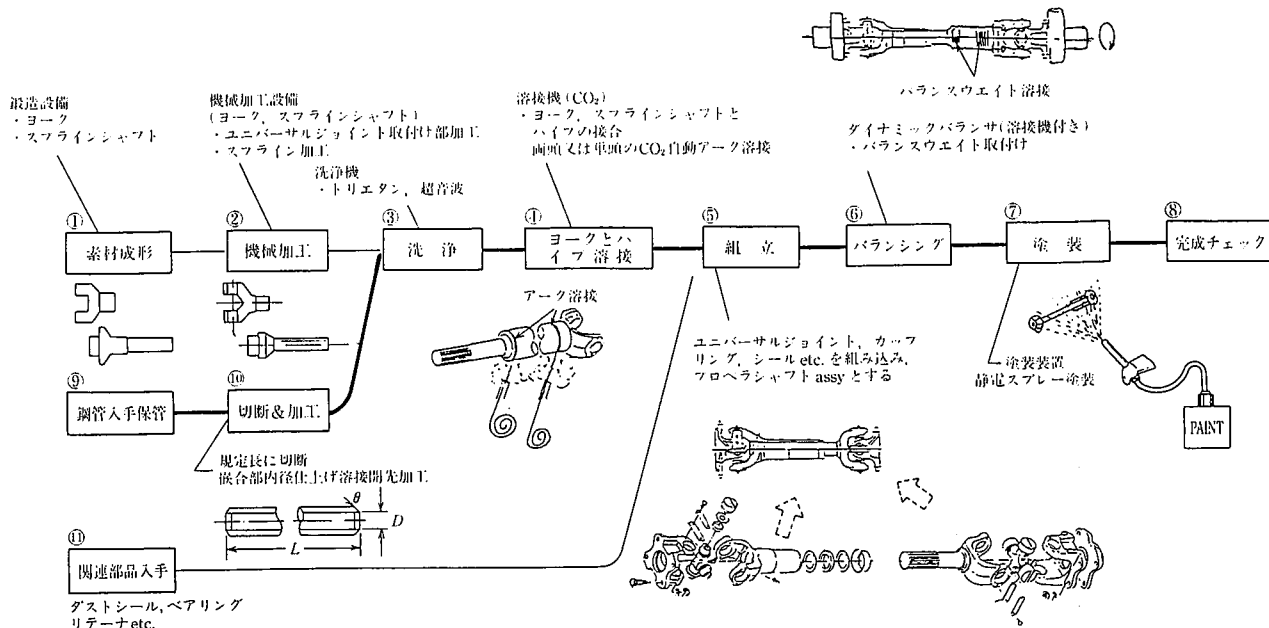


図 1 プロペラシャフトの代表的な製造工程⁷⁾

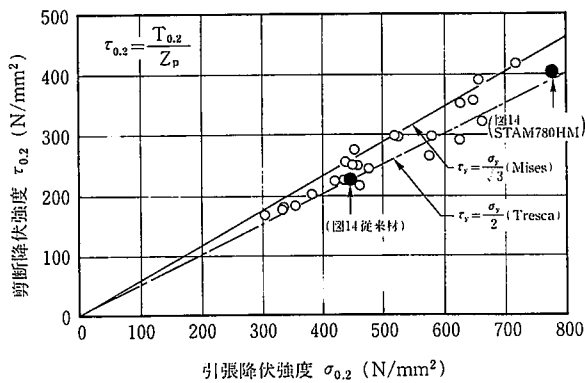


図 2 各種鋼管の引張強度と剪断強度(ねじり)の関係

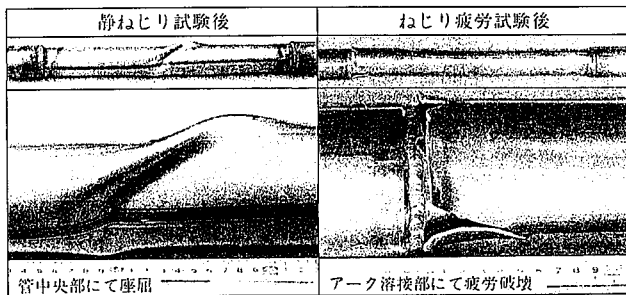


写真 1 ねじり試験後のサンプル外観(75.0mm ϕ ×1.6mm^t)

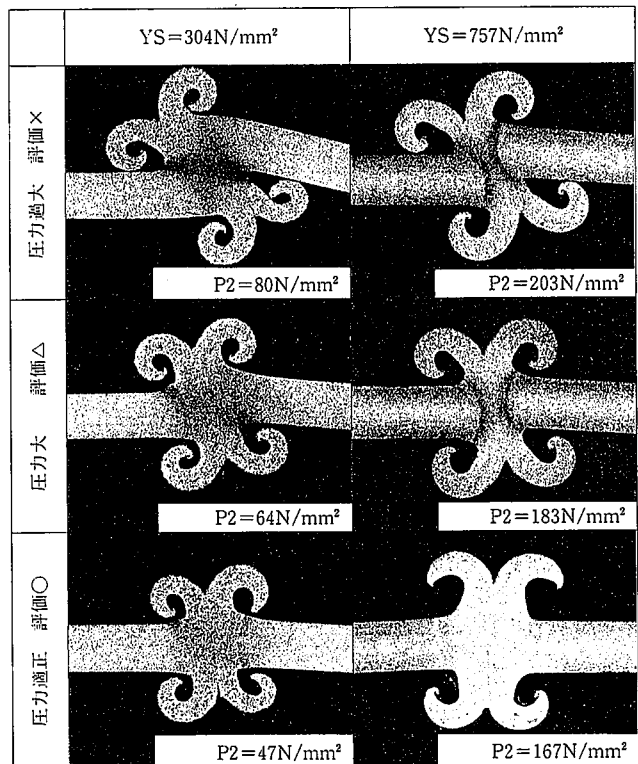


写真 2 薄肉鋼管の摩擦圧接部断面形状
(75.0mm ϕ ×1.6mm^t, t/D=0.021)

難とされていた⁸⁾。

強度の違う薄肉(低 t/D)電縫鋼管同志を摩擦圧接した場合の接合部の断面形状を写真 2 に示す。鋼管は管端部を 10mm 突出した状態でコレット式のチャックで把握し、摩擦圧力(P1)とアプセット圧力(P2)の比を 0.5(P1/P2=1/2)に固定してアプセット圧力を変化させ

た。摩擦寄り代は 3.0mm に固定したため、全寄り代(UT)は実績で 6.0~12.0mm である。写真 2 の下段に示した低アプセット圧力の場合には接合精度が良好であるのに対して、アプセット圧力を高くした中段の条件では鋼管外表面に段差を生じ、接合部界面が傾斜している。これは良好な接合状態を得るための上限のアプセット圧力である。

上段は更に圧力を増した場合で、段差はさらに大きく、圧接ばりが鋼管周方向に蛇行するとともにばり直近部が楕円化し、接合精度が著しく低下する。写真2の左右は鋼管の降伏強度の違いを示すが、接合精度を低下させないための上限のアプセット圧力に違いが生じている。

写真2のような、各種強度の摩擦圧接試験の結果、得られた摩擦圧接形状安定性に対するアプセット圧力と材料強度の効果を図3に示す。降伏強度が低い場合には、アプセット圧力が小さくても接合精度が低下しているのに対して、ハイテン材を用いると高面圧側に形状の良好な範囲が広がる。発熱の安定性、摩擦圧接装置の低推力制御限界等を加味すると、摩擦圧力は数十 N/mm^2 以上が良好⁹⁾であるため、プロペラシャフトのような薄肉材を摩擦圧接する場合は使用する材料強度に下限値が存在する。そして比較的薄肉の場合でもハイテン材を用いることにより摩擦圧接できる。

3. 溶接接合部分の疲労特性

一般に、構造物を軟鋼から高張力鋼に変える場合には、溶接構造部分の疲労について十分な配慮が必要とされている¹⁰⁾。図4に突合わせ溶接継手の片振り引張疲労強度を示す¹⁰⁾。材料強度を440~540 N/mm^2 から高くしても溶接継手部の疲労強度は容易には高くない。これは継手部の応力集中、残留応力、材質変化等の影響であると考えられる¹⁰⁾。図5に低強度材と高強度材の突合わせ溶接部の断面硬さ分布の比較を示す。低強度材では母材と比較した溶接熱影響部

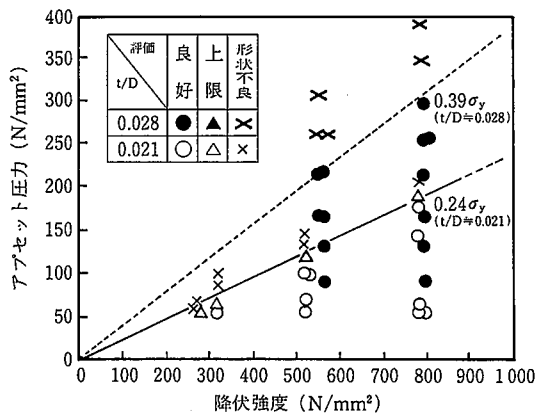


図3 摩擦圧接安定性と素材強度の関係

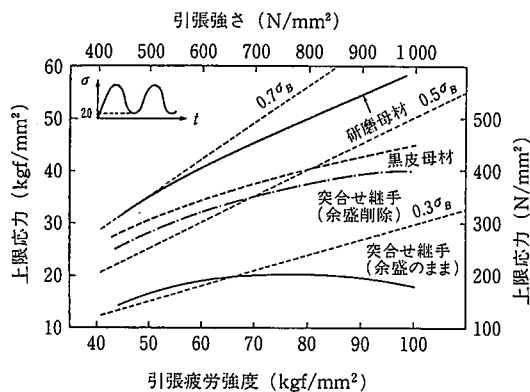


図4 溶接用各種鋼材の母材および突合せ溶接継手の片振り引張疲労強度 (2×10^6)¹⁰⁾

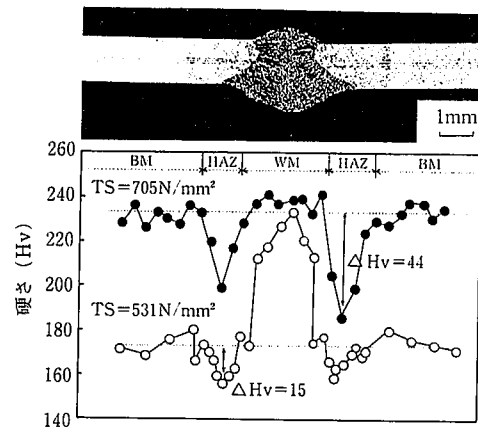


図5 アーク溶接部の硬さ分布

の硬さ低下は小さいのに対し、高強度材は硬さが大きく低下し、溶接熱影響部では低強度材に近い硬さとなる場合がある。特に、アズロール型電線鋼管の場合には、成形歪（転位）の導入による強化の寄与が不可避であるが、この成形歪導入による強化は溶接熱影響部の強度低下の原因となり易いという問題がある。

そこで、溶接部耐疲労強度に対する材料側の要因について検討する目的で、図6に示すような溶接熱影響部の硬さ低下度の違う電線鋼管を用いて図7に示すプロペラシャフトを試作し、ねじり疲労（両振）強度を評価した。その結果を最軟化部硬さと疲労限の関係として図8に示す。A、Bの電線鋼管は母材硬さはいずれも $Hv=250$ 程度と高強度である。しかし、摩擦圧接（F.W.）、アーク溶接（A.W.）のいずれの接合方法においても、熱影響部軟化の大きなBの電線鋼管においては母材硬さに相当した疲労強度は得られなかった。一方、溶接部の軟化を軽減したAの電線鋼管では図8のごとく、 10^6 回時間強度 (τ_{10^6}) が軟化部の硬さに比例し、高いねじり疲労強度が得られた。

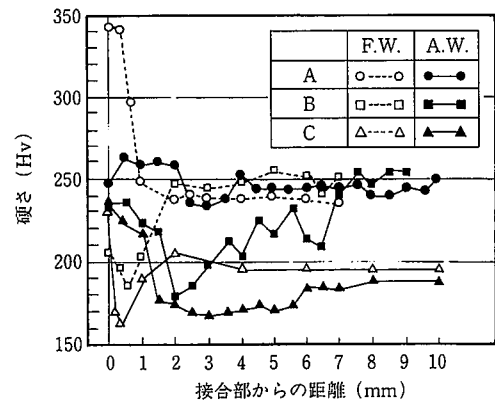


図6 鋼管接合部の硬さ分布

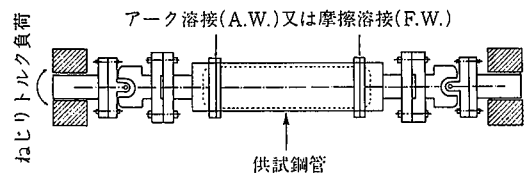


図7 接合部も含めたプロペラシャフト用鋼管ねじり疲労試験方法

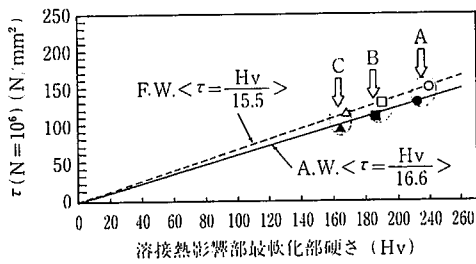


図 8 最軟化部硬さと疲労限の関係

4. 耐HAZ軟化性ハイテンプロペラシャフト用電縫鋼管

新日本製鐵 名古屋製鐵所では、銑鋼一貫生産による良質な素材と優れた電縫鋼管製造技術すなわち、製鋼技術の向上と熱間圧延でのTMC P (Thermo Mechanical Control Process)の活用、電縫溶接部の健全性の著しい向上、内面ビード切削技術の向上などの製造技術と、品質検査体制の整備により、プロペラシャフトのような自動車、車両の重要な部品用の鋼管を生産している。

特に溶接部熱影響部の軟化を軽減し、図8Aのごとく溶接部疲労強度を高めた耐HAZ軟化ハイテン鋼管は、溶接熱影響部での鋼の強化機構に着目し、製鋼段階での微量元素の成分調整、熱延でのTMC P、造管時のロール成形パターンでの最適化等の技術を利用して、生産している。以下に780N/mm²級の耐HAZ軟化ハイテン鋼管(STAM780HM)の諸特性について紹介する。

4.1 ミクロ組織及び硬さ

写真3に本鋼管のC断面顕微鏡組織を示す。(a)は電縫部近傍の低倍率、(b)は同部位の高倍率、(c)は高倍率の母材の各組織である。母材部は細粒のフェライトパーライト組織で、電縫溶接部は電縫溶接の際の熱履歴により板厚程度の幅の熱影響部を生じているが、母材と同じく細粒組織である。又、電縫部の中心部分にはフェライトに

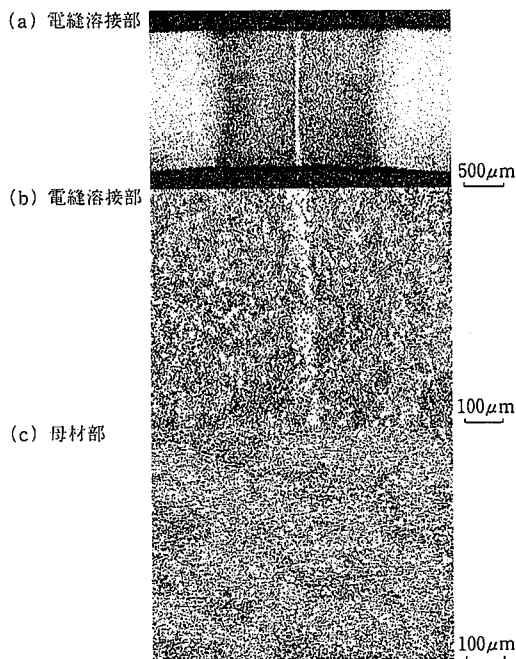


写真3 耐HAZ軟化ハイテン鋼管のミクロ組織
(STAM780HM, 65.0mm^φ×1.6mm^t)

富むボンド部が形成されているが、これは電縫溶接の際の融溶接が行われている痕跡である。

図9に電縫溶接部を中心に母材組織に至る範囲の硬さ分布を示す。電縫溶接熱影響部で母材部以上の硬さが保たれており、逆に母材より硬くなっている部位でも最大で370程度である。

4.2 引張強度

JIS11号試験片を用いて引張試験した結果の例を図10に示す。図中には規格値を矢印で示した。例えば引張強度については規格値である780N/mm²以上が安定して得られている。

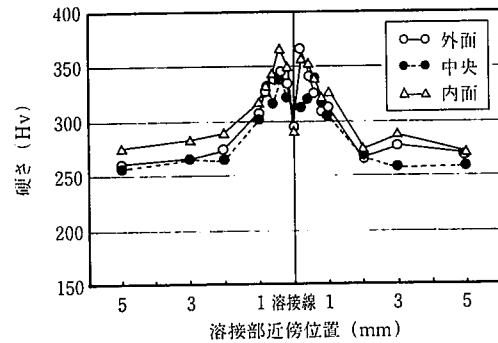


図 9 電縫溶接部の硬さ分布

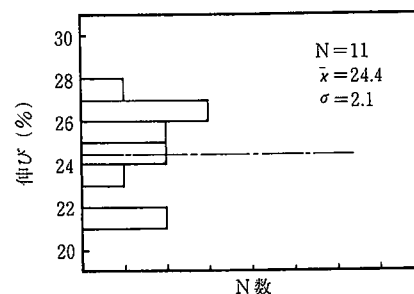
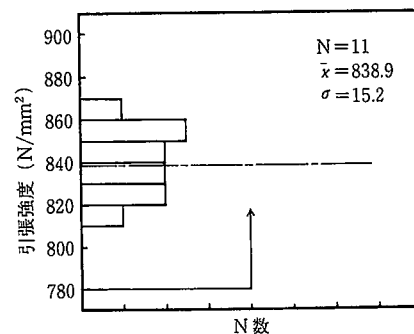
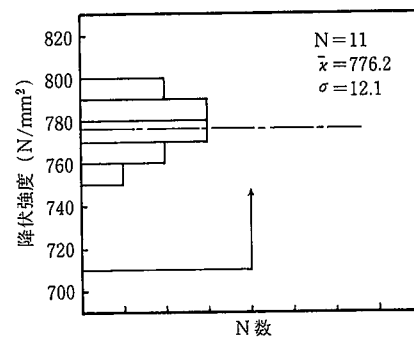


図 10 引張試験結果例
(STAM780HM, 65.0mm^φ×1.6mm^t)

4.3 アーク溶接部特性

板厚2.6mmの電縫鋼管をジョイントヨーク相当部品(S35C)に周方向アーク溶接(YM-80C, 1.2mmφ, 3.2kJ/cm)した場合の断面組織を写真4に、硬さ分布を図11にそれぞれ示す。溶接熱影響部においても母材相当の硬さを保っていることがわかる。

4.4 摩擦圧接部特性

板厚1.6mmの電縫鋼管をジョイントヨーク相当部品(S35C, 2.2mmφ)に摩擦圧接合($P_1/P_2=0.5$, $P_2=100\text{N/mm}^2$, $UT=10\text{mm}^3$),

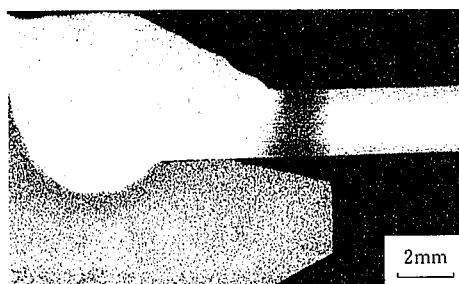
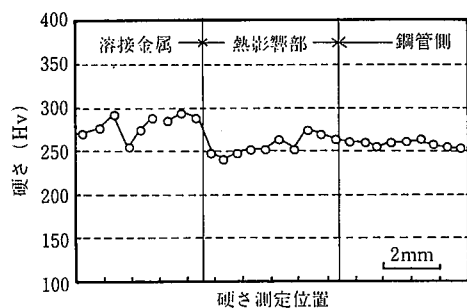
写真4 アーク溶接部断面($t=2.6\text{mm}$)

図11 アーク溶接部の硬さ分布

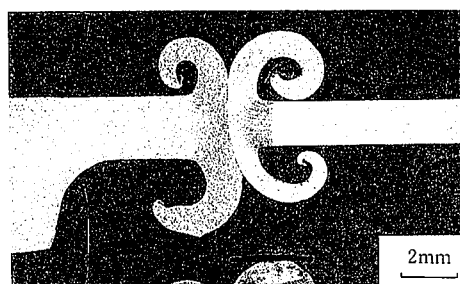
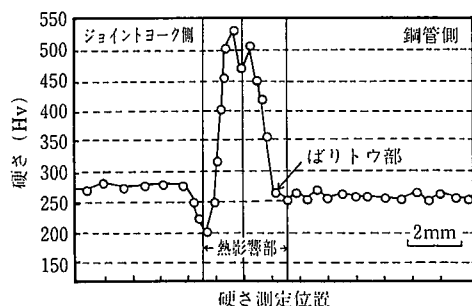
写真5 摩擦圧接部断面($t=1.6\text{mm}$)

図12 摩擦圧接部の硬さ分布

外面をそろえる)した場合の接合部断面組織を写真5に、硬さ分布を図12に示す。摩擦接合面近くは鋼管側とジョイントヨーク側いずれも同程度の硬さ上昇を示しているが、鋼管側ばりトウ部の硬さ低下は少なく、鋼管母材と同程度の硬さが保たれていることが分かる。

ところで、第2章にて述べたごとく摩擦圧接接合は接合加工精度が良好なため、低騒音対応として注目を集めている^{4,5)}。そこで、耐H A Z 軟化ハイテン鋼管の接合部形状について紹介する。接合部形状は主にアプセット圧力(P_2)により決定される。写真5の条件に対して P_2 を変化させた場合の P_2 と接合面積比 (t_w/t_0)、ばりトウ部曲率半径 (ρ)、全寄り代、摩擦圧接接合部から10mm位置の鋼管部にて検出された回転振れ量の関係を図13に示す。アプセット圧力の増大にともない、接合面積比は増大し、ばりトウ部曲率半径は減少している。そして、接合面積比の増大及びばりトウ部曲率半径の減少は、いずれもアプセット圧力約100N/mm²にて勾配が変化している。そこでアプセット圧力は100N/mm²程度を境に、アプセット時の変

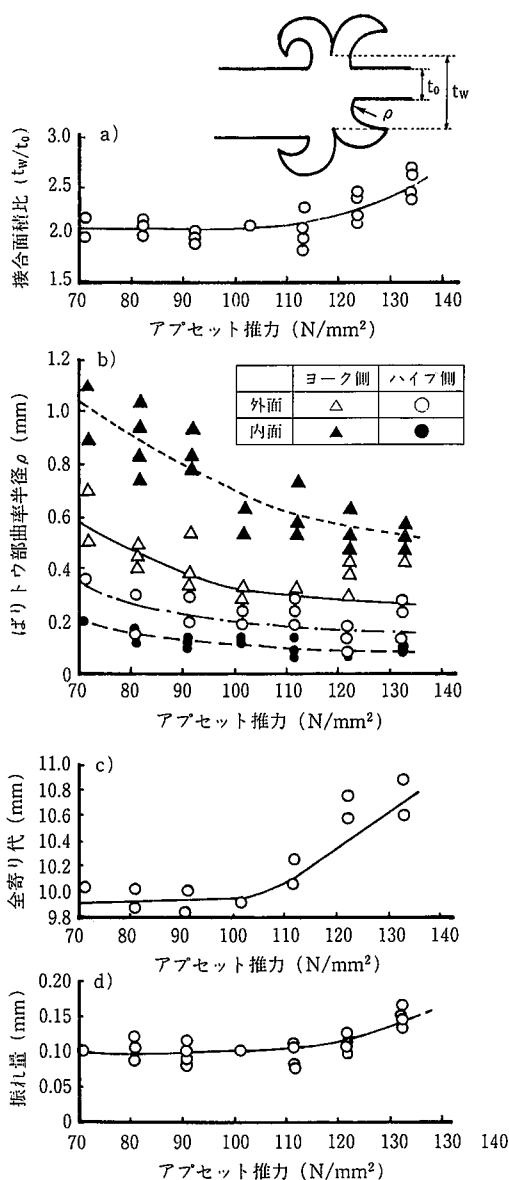


図13 アプセット圧力と摩擦圧接部形状との関係

形を主にH A Z部の変形（ばりトウ部曲率半径が減少）で吸収する圧力範囲と、主に接合部界面の変形（接合面積比が増大）にて吸収する圧力範囲に分けられる。そして、この約100N/mm²を超える領域から全寄りが増加すると共に、振れ量が緩やかに増大していることから、アプセット推力を100N/mm²程度より低く設定するのが好ましい。逆に、アプセット推力を低く制御することにより、回転振れを0.15mm以下にできる。

又、ばりトウ部形状が疲労に対する影響を推定するため、FEM計算にてばりトウ部の応力集中係数を求めたが、良好な接合精度が得られたアプセット圧力70～100N/mm²の範囲では約1.4程度⁹⁾であった。この範囲では応力集中係数に対するアプセット圧力の影響は小さい。

4.5 静ねじり強度

図14に従来鋼と比較した開発鋼管(STAM780HM)の静ねじり試験結果を示す。いずれの鋼管も鋼管長手方向中央部が座屈するまで、ねじりトルクが上昇する。図中には矢印で降伏トルク($T_{0.2}$)を示す。材料強度の上昇に相当してねじり強度が上昇している。又、降伏トルクから求めたせん断降伏強度と、引張降伏強度の関係は図2に示したものと一致していた。

4.6 ねじり疲労強度

アーク溶接型、あるいは摩擦圧接接合型のプロペラシャフト相当部品を試作し、図7の要領にてねじり疲労強度を評価した。溶接熱影響部における硬さ低下を低減したことにより、図15に示すごとく高い疲労強度が得られた。アーク溶接型及び摩擦圧接型試験片の疲労破壊起点部近くの断面組織をそれぞれ写真6、7に示す。いずれの場合も、従来材と同じくアーク溶接トウ部あるいは摩擦圧接ばりトウ部から割れが発生する。

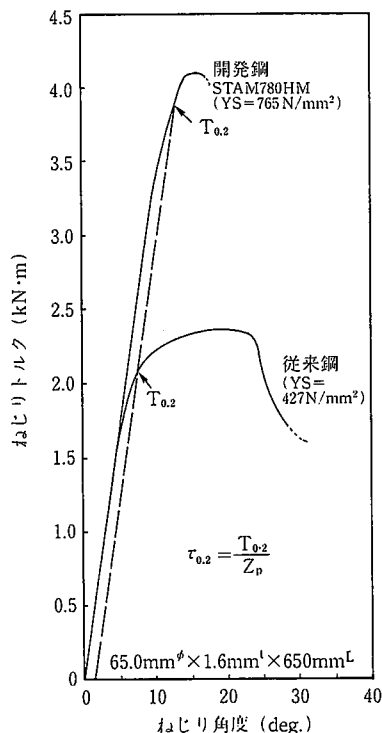


図14 開発鋼と従来鋼の静ねじり特性の比較

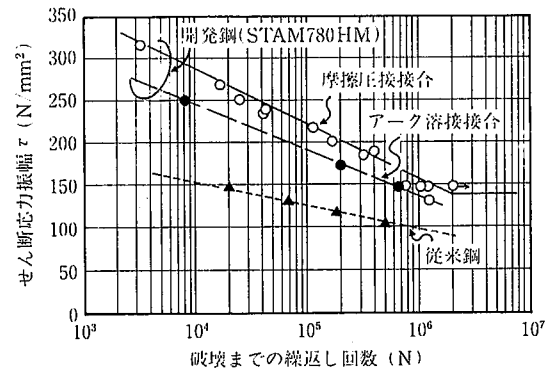


図15 試作プロペラシャフトのS-N曲線

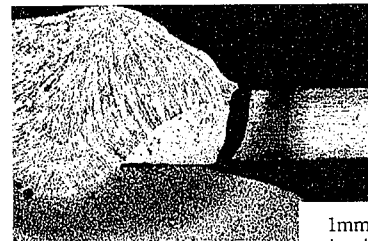


写真6 アーク溶接部疲労破断状況

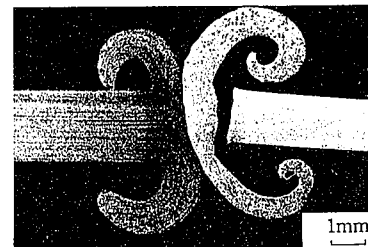


写真7 摩擦圧接部疲労破断状況

6. 結 言

溶接熱影響部の軟化を低減するように開発された耐H A Z 軟化ハイテン鋼管を用いることにより、従来難しいとされた溶接ままの継手部の疲労特性の改善効果が得られることを紹介した。又、プロペラシャフトの製造工程として注目されている摩擦圧接についても継手部の寸法精度が良く、高い疲労強度が得られることを示した。この耐H A Z 軟化ハイテン鋼管は、溶接継手部の疲労が軽量化の限界となっている場合のプロペラシャフトの軽量化に有効である。

参 照 文 献

- 1) 田邊弘人 ほか：材料とプロセス。2, p.1794(1989)
- 2) 田邊弘人, 山崎一正：材料とプロセス。3, p.1465 (1990)
- 3) 田邊弘人, 宮坂明博：材料とプロセス。6 p.1842 (1993)
- 4) 日刊工業新聞 1988.11.3, p.14
- 5) 小林克之 ほか：トヨタ技術。39, p.126 (1989)
- 6) 日経メカニカル。1990.12.10 p.32
- 7) 千葉重郎 ほか：自動車技術ハンドブック。第4編。初版, 東京, 社団法人自動車技術会, 1991, p.233
- 8) 蓮井淳 ほか：摩擦圧接。初版, 東京, コロナ社, 1979, p.11
- 9) 蓮井淳 ほか：摩擦圧接データシート集。初版, 東京, 摩擦圧接協会, 1992, p.146
- 10) 鉄鋼便覧V I。第3版, 東京, 丸善株式会社, 1982, p.703