

連携記事

建設機械の発展に寄与する高性能鋼板

High Performance Steel Plates that Contribute to the Development of Construction Machinery

都築岳史

Takeshi Tsuzuki

新日鐵住金(株)

厚板技術部 厚板商品技術室

1 諸言

土木・建築の工事に使われる建設機械は、油圧ショベル、ブルドーザー、クレーン車、ダンプトラック、ロードローラー、コンクリートポンプ車など多岐に渡っており、社会インフラ整備に欠かせない機械である。日本国内でも、いたるところで工事をしており、街中で見かけない日はないが、発展途上国においても、作業の効率化を図るため、建設機械はなくてはならない存在になりつつある。また、東日本大震災後の復旧においても、いまだに、がれき処理をはじめ、多くの建設機械が活躍しているのを目にしている。さらに、物を直接建設するのが目的ではないが、鉱山の採掘に用いる大型の油圧ショベル、ダンプなどの鉱山用機種も、建設機械の範疇であり、資源需要の高まりから、生産量が伸びている。

これら建設機械の分野では、大型化が進んでいる。クレーンは大型建設物の吊上げに対応するため、200トンを超える吊上げ能力のある大型機種も建造されている。また、鉱山の大量の鉱石を効率よく採掘するため、自重300トンを超える油圧ショベルや積載重量90トンを超える大型ダンプも生産されるようになってきている。それに伴い鋼材に対する要求もより高強度化、厚手化などが求められている。今回は、建設機械の高度化に答える鉄鋼材料を紹介する。

2 建設機械に要求される鉄鋼材料

2.1 建設機械用一般鋼板

建設機械に使われる足回り部材等の基礎構造部品に対しては、普通鋼と呼ばれる引張強さ400N/mm²級鋼、490N/mm²級鋼の使用が中心で、特に、軟鋼である引張強さ400N/mm²級鋼がほとんどを占める。軽量化を目的とする高張力化が進まないのは、初期コストの抑制ニーズが高いこと、世界中どこでも調達が可能なこと、車体と作業機のバランス上、下部

構造には重量が必要な部分があること、高強度化しても溶接部の疲労強度が上がらないということなどが、理由と考えられる。これら一般鋼材に要求される品質は、基本材質を除けば、主に外観と平坦度である。建設機械においても使用前の外観が重視される傾向にあり、特に日本ではその傾向が顕著である。建設機械の塗装膜厚が薄くなってきているとともに、高鮮鋭な塗装に変わってきており、塗装後でも鋼材の表面性状がそのまま目立つようになったが、人の目に触れる部分には疵やあばた状の凹凸は許されないため、鋼板製造段階でも厳しい管理が要求される。また、平坦度に関しては、組立精度に影響するため、鋼板切断後の部材形状が厳しく管理されている。このため、母材に対しては、初期の平坦度はもちろん、切断後形状が悪化しないことも必要である。また、切断精度と切断効率の点から、従来のガス切断に代わり、レーザー切断される場合も増え、レーザー切断しやすい鋼板が要求されることもある。

さらに、超大型機種の足回りでは、板厚250mmという極厚鋼材も使われる。このような鋼板は、製造途中工程での矯正が難しいので、製鉄所出荷段階の母材の平坦度にも配慮して製造することが必要である。また、溶接線を減らすために、面積の大きい鋼板が要求されることもある。このため、幅4mを超える鋼板や、1枚20トンを超える重量の鋼板が使用されることもある。

日本で製造される厚鋼板は、一般鋼材についても、これらの厳しい国内のお客様の要求に答えている。

2.2 高強度鋼板

前項の一般鋼材に対し、油圧ショベルの作業機部分やクレーン車のブーム材、コンクリートポンプ車のブーム材などを中心に、軽量化のため、高強度鋼材のニーズは高い。上部構造が軽量化されると、足回りを含め建設機械全体が軽量化できて稼働効率が上がるのに加え、クレーンのブーム材では、

吊荷重を上げることが可能になる。クレーンのブーム材では、引張強さ780N/mm²級鋼や950N/mm²級鋼、さらには、引張強さ1180N/mm²級鋼も適用されている。高張力化は、建設機械の移動時の重量規制に対応するための軽量化にもつながる。

建設機械用を想定したこれらの強度レベルの鋼材は、JISに規格化されておらず、鉄鋼各社の独自規格または建設機械メーカーと鉄鋼メーカーとの間の特別仕様が適用されている。(一社)日本鉄鋼連盟により、クレーン構造用鋼材分類基準¹⁾は作られたが、規格として作られたものではない。クレーン構造用鋼材分類基準の抜粋と新日鐵住金の高張力規格の例を、表1、2に示す。引張強さ1180N/mm²級鋼はクレー

ン構造用鋼材分類に入らない独自のものである。

一般に、590N/mm²級鋼以上の高強度材では、従来圧延後に再加熱焼入れと焼戻しをする調質熱処理を行って、強度と靱性のバランスを確保してきた。しかし、最近では、制御圧延(Controlled Rolling)と加速冷却(Accelerated Cooling)およびこれらを組み合わせた図1²⁾に示すTMCP(加工熱処理または熱加工制御)によって製造され、オフラインの焼入れ熱処理は行わないものが多い。TMCPには様々な製造方法があり、例えば590N/mm²級鋼では、低温での制御圧延(CR)によるTiCの析出強化を利用した非調質タイプのものや、制御圧延と加速冷却のみでオフラインでの焼戻し熱処理を省略する製造プロセスのものもあり、従来よりも生産性が高く、溶

表1 クレーン構造用鋼材分類基準抜粋(鋼板)

分類	規格の引張強さ 下限値 (N/mm ²)	適用厚さ (mm)	降伏点 又は耐力 (N/mm ²)	炭素当量(%)		伸び(%)			曲げ性		
				厚さ(mm)		厚さ(mm)	試験片 (JIS)		曲げ角度	内側半径	試験片(JIS)
PS-1	350以上450未満	1.6~100	215以上	50以下	≤0.45	20以下	5号	≥21	180°	厚さの1.5倍	1号
						16以下	1A号	≥17			
				50超	≤0.50	16を超えるもの	1A号	≥21			
PS-2	450以上550未満	1.6~100	255以上	50以下	≤0.50	20を超えるもの	4号	≥23	180°	厚さの2.0倍	1号
						20以下	5号	≥19			
				50超	≤0.55	16以下	1A号	≥14			
PS-3	550以上650未満	1.6~100	390以上	50以下	≤0.50	16を超えるもの	1A号	≥17	180°	厚さの2.0倍	1号
						20を超えるもの	4号	≥21			
				50超	≤0.55	6以下	5号	≥17			
PS-4	650以上750未満	1.6~100	530以上	50以下	≤0.55	9以下	5号	≥18	180°	厚さの2.0倍	1号
						16以下	5号	≥19			
				50超	≤0.60	16を超えるもの	5号	≥26			
PS-5	750以上850未満	1.6~100	665以上	50以下	≤0.60	20を超えるもの	4号	≥20	180°	厚さの2.0倍	1号
						6以下	5号	≥15			
				50超	≤0.63	9以下	5号	≥16			
PS-6	850以上950未満	1.6~100	765以上	50以下	≤0.60	16以下	5号	≥17	180°	厚さの2.0倍	1号
						20を超えるもの	5号	≥25			
				50超	≤0.65	6以下	5号	≥14			
PS-7	950以上1050未満	1.6~100	865以上	50以下	≤0.65	9以下	5号	≥15	180°	厚さの2.0倍	1号
						16以下	5号	≥16			
				50超	≤0.70	16を超えるもの	5号	≥24			
				50以下	≤0.65	20を超えるもの	4号	≥16	180°	厚さの2.5倍	1号
						6以下	5号	≥11			
				50超	≤0.65	9以下	5号	≥13			
				50以下	≤0.60	16以下	5号	≥14	180°	厚さの2.5倍	1号
						20を超えるもの	5号	≥21			
				50超	≤0.65	6以下	5号	≥14			
				50以下	≤0.65	9以下	5号	≥11	180°	厚さの2.5倍	1号
						16以下	5号	≥11			
				50超	≤0.70	16を超えるもの	5号	≥19			
				50以下	≤0.65	20を超えるもの	4号	≥12	180°	厚さの2.5倍	1号
						6以下	5号	≥8			
				50超	≤0.70	9以下	5号	≥11			

備考1: 必要に応じて上記以外の合金元素を添加することができる。
備考2: 炭素当量の計算式は、次による。Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14
備考3: 受渡し当事者間の協定により、曲げ試験を省略することができる。
備考4: 厚さ8mm以下の曲げ試験片は3号試験片とすることができる。

表2 高張力鋼の仕様例

Grade	引張試験					曲げ試験			衝撃試験		
	降伏点または 0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び		試験片	角度 (°)	内側半径		板厚 (mm)	温度 (°C)	吸収エネルギー(J)
			板厚 (mm)	最小 (%)			板厚 (mm)	半径			
HT780級	≥685(t≤50) ≥665(50<t)	780-930(t≤50) 760-910(50<t)	t≤16 16<t 20<t	16 24 16	5号 5号 4号	180	t≤32 32<t	1.5t 2.0t	12<t	-15	47
HT950級	≥885(t≤50) ≥865(50<t)	950-1250(t≤50) 930-1230(50<t)	t≤16 16<t 20<t	13 19 13	5号 5号 4号	180	t≤32 32<t	2.0t	12<t	-20	47
HT1180級	≥1100	≥1180	t≤16 16<t 20<t	9 17 11	5号 5号 4号	180	t≤25	4.0t	12<t	-20	47

接性にも優れた590N/mm²級鋼の供給も可能になっている。

引張強さ950N/mm²級鋼、1180N/mm²級鋼という高強度材では、基本的に鋼材の組織は、強度靱性バランスに優れた焼戻しマルテンサイトや下部ベイナイトである。その強度を確保するための強化機構として、これらの組織制御に加えて、粒子分散強化（析出強化）、結晶粒微細化強化が駆使されている。特に圧延や熱処理によってMo₂CやNb（CN）などの微細な析出物を制御するマイクロアロイ技術は、組織微細化や効果的な析出強化を実現する重要な技術となっている。このような組織を造り込むのに、従来ではやはり圧延後に再加熱焼入れ―焼戻し熱処理（RQ-T）を行う製造プロセスが主であったが、1980年代以降TMCP技術の開発とともに、再加熱焼入れを省略した直接焼入れ―焼戻し熱処理（DQ-T）が多く用いられている。この技術により、合金元素の削減と工期の短縮（熱処理の簡素化）が達成されている。合金元素の削減は、溶接性にとっても有利に働き、予熱温度の低減などに寄与している。

靱性に関しては、高強度鋼になる程作用応力が増加し、脆性破壊の危険が増えるため、むしろより低温での靱性を要求される。ここでもTMCP技術による組織微細化や、最近の製鋼技術の発達による偏析や不純物の低減により、高靱性の板の供給が可能となっている。

外観に関しては、見た目を重視して表面性状が規制されるのに加え、クレーンのブームなどは、応力集中を回避する点からも表面の疵等は厳しく管理される。

平坦度に関しても、ブームの伸縮時の、摺動性を良くするためや、溶接部の開先精度確保のため、薄手材についても厳しい管理を要求される。

ブームに使われる高張力鋼は曲げて使用されることが多く、曲げ性も重要である。高張力になるほど、伸びが減少する傾向にあり、曲げに対しては難しくなるが、板厚の2倍程度の曲げ半径を想定して開発されている場合が多い。より高強度の引張強さ1180N/mm²級鋼では、もう少し緩和した曲げを想定している。

建設機械の溶接に関しては、厚板の使用される分野の中では、部材が小さく、溶接長が比較的短いのが特徴である。溶接方法としては、炭酸ガス溶接などの隅肉溶接が中心である。最近では、ロボットによる自動化が進んでおり、予熱なしで溶接できることも重要である。クレーンのブームは、建設機械の中では例外的に溶接長が長く、10mを超えるものもある。従来は4枚の板を組み合わせ、隅肉溶接で四角断面を形成していたが、最近ではコの字やUの字に曲げた鋼板を組み合わせ、断面形状を形成し、2枚を突き合せ溶接で繋ぐ形になってきた。これらの、溶接後の強度靱性に対する配慮、溶接施工のしやすさも鋼材開発の重要な要素である。

2.3 耐摩耗鋼板

ブルドーザーの排土板、ダンプの荷台部分（ベッセル）、油圧ショベルやホイールローダーのショベル部分のバケットなど、使用中に土砂や岩石、岩盤などからの衝撃を受けて摩耗

金属組織を連続的に制御する TMCP

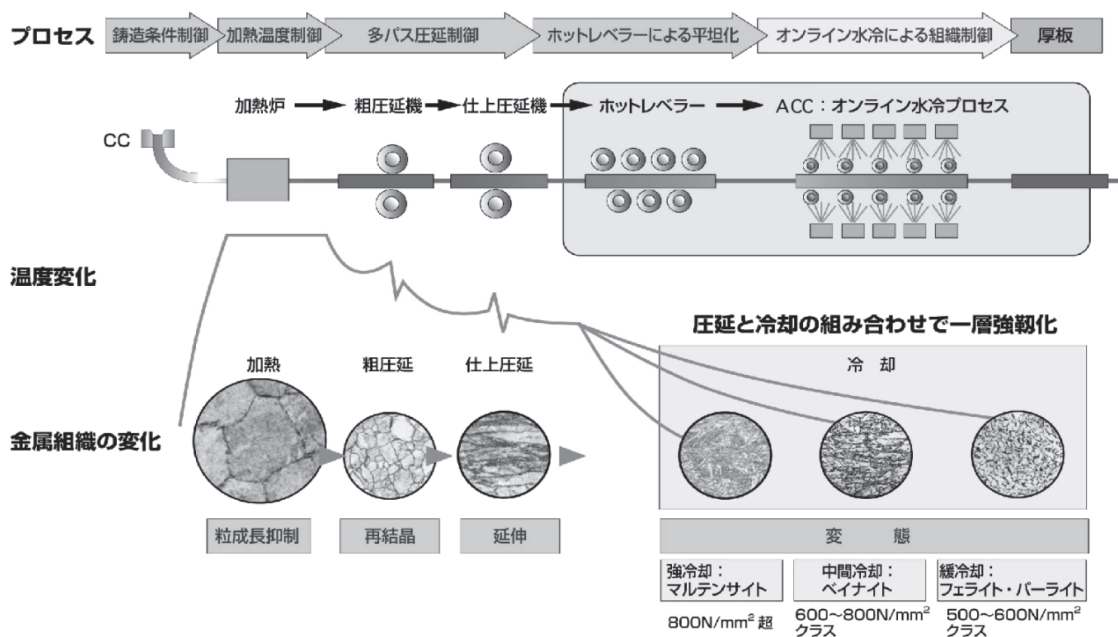


図1 厚板製造プロセスにおけるTMCPの説明図²⁾

する部材には、部材の軽量化や鋼板の交換頻度を減らすために、一般鋼材に比べ摩耗量が少ない高硬度の耐摩耗鋼板が使用される。

鋼板の耐摩耗性は、鋼板の表面硬さと強い相関があり、図2に示すように、基本的には鋼材の硬さが高くなるに従い、摩耗量が減る傾向になるため³⁾、表面硬さを基準にグレードを決定することが多い。この際、表面硬さの測定には通常ブリネル硬さが適用される。

耐摩耗鋼も、JISなど公式の規格がないため、各社独自規格を設定している。新日鐵住金の規格の例を表3に示す。最も使用量の多いのはHB400クラスで、耐摩耗鋼全体のおよそ70%を占める。さらに用途に応じて、HB450、HB500が使用され、最も硬さの高いHB600クラスまでである。

簡便かつ経済的に鋼板硬さを高くする方法は、焼入れ熱処理によってマルテンサイト組織とすることである。マルテンサイトの硬さは炭素量で決まる⁴⁾。耐摩耗鋼の鋼材規格は一般に表面硬さで規定されるが、摩耗がある程度進んだところでの耐摩耗性の確保も必要になるため、できるだけ鋼板の内部まで高い硬さを有するよう、板厚によって焼入れ性を調整する。

焼入れ性の指標としては、(1)式に示す焼入れ性指数(DI)が用いられ⁵⁾、これを目安として硬さグレードや板厚に応じて、Cr、Mn、Mo、Bなど焼入れ性を高める合金元素が添加される。特にBは焼入れ性向上の効果が顕著であり、耐摩耗

鋼にはBが添加されていることが多い。

焼入れ性指数DI (inch) = $D_{IC} \sqrt{C} (1 + 0.86Si) (1 + 3.3Mn) (1 + 2.3Cr) (1 + 0.36Ni) (1 + 3.2Mo)$ (1)

D_{IC} : cとオーステナイト結晶粒度の関数
各元素: wt%

炭素量や、その他の合金量添加量が多くなると、溶接性が低下する。特にHB500クラス以上の耐摩耗鋼では遅れ割れが問題になることがある。遅れ割れは溶接時、あるいは鋼板の使用中に生じる水素起因の割れであり、①鋼板の遅れ割れ感受性と、②溶接残留応力および使用中の外部応力、③拡散性水素量の3つ要因が影響して発生する。溶接残留応力が高い場合や、鋼板表面の腐食により水素が侵入する場合などは特に注意を要する。組織制御などによって遅れ割れ感受性を抑制した耐摩耗鋼材も近年製造されている。特に遅れ割れ感受性が高いHB600クラスでは、溶接を避けてボルト等で固定される場合もある。また、オーステナイト系の溶材を使用することにより、水素の鋼材への侵入を少なくして、遅れ割れを抑制することができる。

建設機械では、鋼材がかなりの衝撃を受けるような使い方も想定され、特に寒冷地での使用が想定される場合には、靱性に対する配慮が必要である。硬さの上昇に伴って靱性が低下するのが一般的であるが、合金添加や組織の調整により靱性を高めた耐摩耗鋼材も製造されている(表3)。

高張力鋼と同様に、最近では耐摩耗鋼の製造にも直接焼入れの技術が適用されることも多い。この技術により、合金元素の削減と工期の短縮(熱処理の省略)が達成される。合金元素の削減は、溶接性にとっても有利に働き、予熱温度の低減などに寄与する。

3 建設機械に適用される溶接材料

高張力鋼は、溶接により構造物として組み立てられる。溶接構造物に外力が働き、変位が生じた場合、その変位は母材

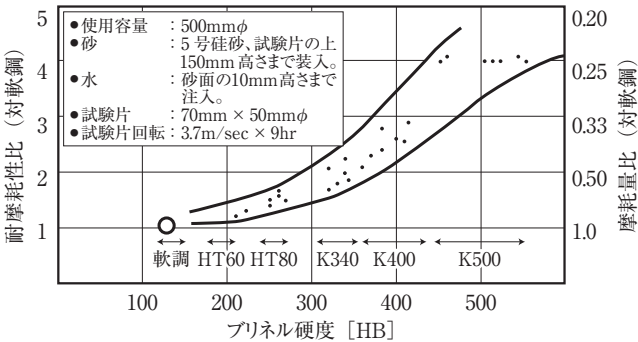


図2 砂砂による摩耗試験結果³⁾

表3 耐摩耗鋼の仕様例

タイプ	硬さレベル	厚さ(mm)	ブリネル硬さ		シャルピー衝撃試験(L方向)	
			狙い	保証	試験温度(℃)	吸収エネルギー(J)
標準	HB400	6~100	400	360~440	—	—
	HB450	6~50	450	410~490	—	—
	HB500	6~50	500	450~550	—	—
	HB600	6~25	600	550~650	—	—
高靱性	HB400	6~60	400	360~440	-40	≥27
	HB450	6~25	450	410~490	-40	≥27
	HB500	6~25	500	450~550	-40	≥21

部の弾性変形で吸収するように設計されるので、高張力鋼の溶接に用いられる溶接材料には、通常はその鋼材の強度と同程度の強度を有することが求められる。

引張強さ780N/mm²級以上の高張力鋼の溶接構造物では溶接施工時の割れが問題となる。なかでも低温割れに関しては、1990年代、スイスのクルゾン・ディクソン発電所の水圧鉄管用引張強さ950N/mm²級鋼で、製作時の溶接施工不良が原因と思われる低温割れにより大規模な事故となった事例もあり、高強度鋼の溶接に際しては特に注意が必要である。

低温割れは①溶接部の硬化組織、②溶接部の拡散性水素、③拘束応力の3つの要因が重畳することによって生じるとされている。これを防止するためには、拡散性水素の外部への放出促進と溶接組織の硬化抑制を目的として溶接前に予熱を実施するのが一般的である。その場合、割れが防止できる最も低い予熱温度がどの程度なのかが、実施工上重要となる。

低温割れ防止に必要な予熱温度を推定する方法として、以下の(2)、(3)式で表される炭素当量(CEN)を鋼組成の割れ感受性の指標として、板厚、溶接方法、拡散性水素量、入熱量などを考慮するCENチャート方式がある^{6,7)}。

$$\text{CEN}(\%) = \text{C} + \text{A}(\text{C}) \left[\frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cu}}{15} + \frac{\text{Ni}}{20} + \frac{(\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V} + \text{Nb})}{5} + 5\text{B} \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{A}(\text{C}) = 0.75 + 0.25 \tanh \{ 20 (\text{C} - 0.12) \} \dots\dots\dots (3)$$

各元素：wt%

例えば、CENが0.4%、板厚が30mmの高張力鋼の場合、必要予熱温度は図3から100℃と推定される(拡散性水素量(Hd)：5ml/100g、入熱量：1.7kJ/mm、外気温度：10℃の場合)。低温割れの起こりやすさは、拡散性水素量、溶接の入熱

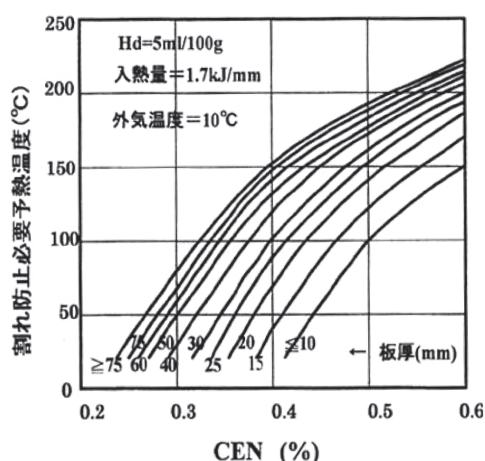


図3 CENチャート方式（基本チャート）

量、外気温度によっても大きく変化するが、これらの影響はCENを補正する形で取り入れる。一般的に高強度であるほど合金元素が多く、CEN値が高くなるので、図4に示すように必要な予熱温度は高くなる傾向がある。予熱温度を低くするためには、鋼材のCENはできるだけ低くすることが望ましい。

建設機械の溶接方法は炭酸ガス溶接が最も多く、ソリッドワイヤ溶接材料が用いられることが多いが、できるだけ溶接時の侵入水素量を少なくするために、溶接材料に塗布する潤滑油の量を厳しく管理するなどの方法もとられている。それでも引張強さ780N/mm²級以上の高張力鋼の溶接施工では、板厚の薄い場合を除き予熱が必須であり、予熱温度を低減できる溶接材料が強く求められている。

さらに特に現地溶接などでは、全姿勢溶接が必要となり、また溶接時に発生するスパッタの低減など、溶接施工しやすく高能率溶接が可能な溶接材料が求められる。引張強さ780N/mm²級高強度鋼用で、スパッタ抑制や全姿勢溶接の要求に応えられる溶接材料として、例えば日鐵住金溶接工業製YP690N/mm²級全姿勢フラックス入りワイヤ(SF-80A)などが開発されている。通常、フラックス入りワイヤは溶接金属の拡散性水素が高く、高強度鋼では低温割れを抑制するために実施する予熱が高温化するなど、高強度鋼へのフラックス入りワイヤの適用は困難であった。日鐵住金溶接工業では、フラックス入りワイヤの製造工程でワイヤにフラックスを充填した後、ワイヤ外皮を高周波電縫溶接することで隙間をなくし、フラックスを完全に密閉する技術(シームレスフラックス入りワイヤ)を有している。これによりワイヤの高温脱水素処理ができ、溶接金属の低水素化を達成し、高強度鋼であっても予熱作業の負荷を軽減することを可能としている。また、フラックス入りワイヤは、ビード外観・形状が良いことから、塗装後の美観にも優れる。

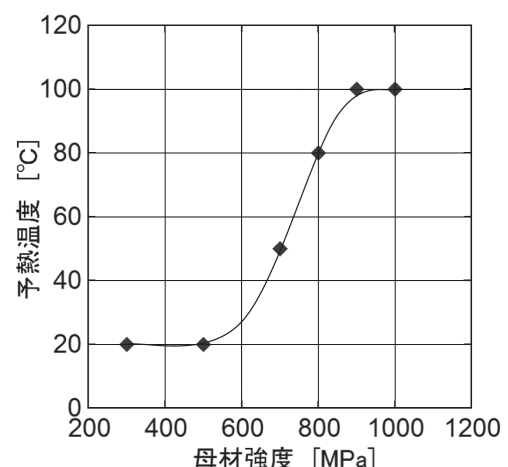


図4 母材強度と予熱温度の関係

4 疲労特性改善技術

建設機械、特に、油圧ショベルの作業機などでは、設計された疲労強度よりも過剰な力で操作される場合がありうるため、繰り返しの使用で機器に疲労き裂が入る場合がある。このような、疲労き裂に対する対策も、いろいろ検討されている。現在よく知られている方法には、例えばグラインダーで溶接止端部を滑らかに仕上げて応力集中を低減させる方法や、ピーニング処理と呼ばれる溶接止端部の残留応力を緩和する方法などがある。これに対し、鉄鋼分野では、疲労対策としていくつかの新しい技術が生まれつつある。

ひとつは、高疲労強度鋼と呼ばれるもので、母材そのものの亀裂進展速度を抑制するものである。この鋼材は、鋼中に硬い第二相を分散させ、疲労亀裂を迂回させることで、亀裂の進展を遅らせるものである⁸⁾。これらの鋼材はすでに造船分野では採用されており、今後、建設機械分野への拡大も期待されるところである。

また、UIT技術と呼ばれる方法は、超音波振動を利用して溶接止端部を金属ピンにより連続的に打撃することにより、溶接止端部の曲率を大きくして応力集中を低減させるとともに、溶接止端部に圧縮残留応力を付与し、さらに処理表面の結晶粒の微細化や硬度上昇効果を得るものであり、簡便な作業だけで、溶接ままに比べて10倍以上の疲労寿命向上効果がある^{9,10)}。この技術も造船分野や橋梁分野で適用が拡大しつつあり、今後、建設機械分野への適用も期待されるところである。

さらに、溶接材料の特性を利用して疲労特性を向上させるものとして、LTT (低温変態) 溶接材料がある¹¹⁾。一般的な溶接材料では、引張残留応力が溶接金属部および溶接止端部に生じて疲労特性を低下させるのに対し、LTT溶接材料はMs点を350℃程度まで低温化し、そのマルテンサイト変態膨張により、溶接金属部および溶接止端部に圧縮残留応力を生じさせることで疲労特性の向上を図るものである。例えば、溶接止端部に付加ビードとして溶接することによってもその効

果が期待できる。

鋼材、施工技術、溶接材料の最適な組み合わせによるトータルの疲労ソリューション技術により、建機分野高張力鋼の疲労特性の向上が期待される。

5 結言

以上、建設機械に使用される鋼材については、お客さんの厳しい要求に答えるべく、多くの技術開発がなされてきた。今後も更なる性能向上、品質向上に向けて、鋼材開発のみならず、溶接部も含めた総合的な技術開発により、一層の進展が望まれる。

参考文献

- 1) 相良直哉：クレーン，34 (1996) 8, 31.
- 2) 吉江淳彦：鉄の薄板，厚板がわかる本，日本実業出版社，(2009)，66.
- 3) 川畑友弥，大西一志，前田隆雄：建設機械，8 (2003)，44.
- 4) G.Krauss：AIME, Warrendale, PA, (1978)，229.
- 5) M.A.Grossmann：Trans. Metall. Soc. AIME., 150 (1942)，227.
- 6) N.Yurioka and T.Kasuya：溶接学会論文集，13 (1995)，347.
- 7) N.Yurioka, H.Suzuki and S.Ohshita：Welding J., 62 (1983)，147.
- 8) 誉田登，有持和茂，稲見彰則，大西一志，勝元弘：ふえらむ，16 (2011) 6, 364.
- 9) 野瀬哲郎：溶接学会誌，77 (2008) 3, 210.
- 10) 大川鉄平，島貫広志，野瀬哲郎，鈴木環輝：溶接構造シンポジウム講演論文集，(2009)，483.
- 11) 糟谷正：溶接学会誌，78 (2009) 4, 244.

(2012年12月6日受付)