

特 別 講 演

UDC 624.132 : 669.14.018.256 : 669.14.018.298

建設機械用鋼材について*

田 口 一 男**

Steels for Construction Machinery

Kazu TAGUCHI

1. 建設機械の種類と生産額

建設機械はわが国ではふつう表1のように分類されている。この表は通産省の機械統計年表によつたものである。建設機械の生産額は年々大きなのびを示しており、昭和41年の1450億円から45年の4200億円まで、4年間で約3倍にふえている。

表1で見ると、トラクタが全生産額の半分強をしめている。トラクタの大部分は履帯をつけた装軌式トラクタ (Crawler Tractor) であり、ブルドーザと積込機 (Loader) に分類される。

写真1は40トンクラスの大型ブルドーザである。ブルドーザは履帯と地面との間の摩擦力によつて生ずる大きなけん引力により、ブレードで土を削り、押し動かす。また後方にとりつけたリッパ装置により岩盤を破碎する。写真2はブルドーザのリッパ作業を示す。

表 1 建設機械の種類とその生産額 (1970)

種 類	生産額 (億円)	比 (%)
1. トラクタ	2145	51.1
(1) 装軌式トラクタ	(1900)	(45.3)
ブルドーザ	(1012)	(24.1)
積込機	(888)	(21.2)
(2) 装輪式トラクタ	245	(5.8)
2. 掘さく機械	1361	32.4
(1) ショベル系掘さく機	(809)	(19.3)
トラッククレーン	(552)	(13.1)
3. コンクリート機械	310	7.4
4. 整地機械	217	5.2
5. アスファルト舗装機械	98	2.3
6. 基礎工事用機械	68	1.6
合 計	4200	100

装軌式トラクタは、タイヤをつけた装輪式トラクタにくらべて接地圧が小さく、軟弱地での作業が可能であり、また凹凸の多い土地や傾斜地での作業もできるので、最も汎用性に富んでいる。

写真3に示すのは装軌式積込機 (ドーザショベル) である。車体はブルドーザと共通で、土砂や碎石をバケットですくい取り、ダンプトラックなどに積込む作業をする。

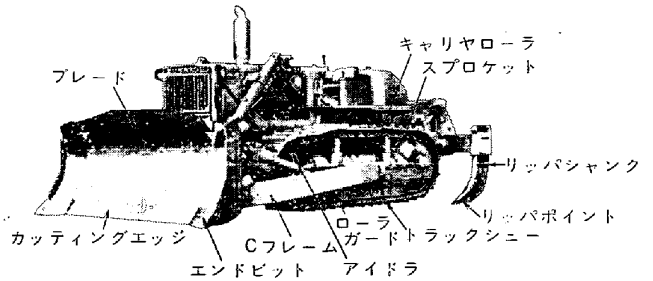


写真 1 大型ブルドーザ

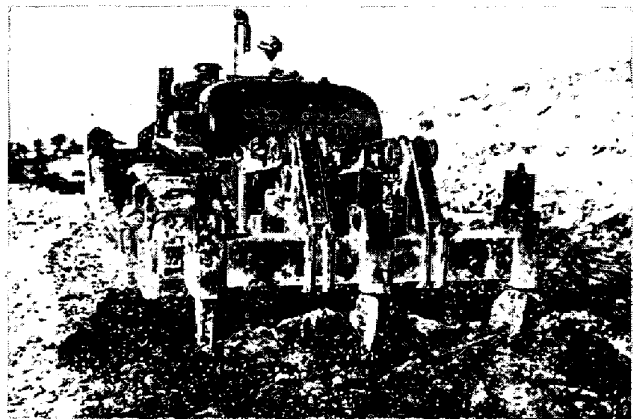


写真 2 大型ブルドーザのリッパ作業

* 昭和46年10月 本会講演大会における特別講演にて発表

昭和46年11月26日受付

** (株)小松製作所 技術研究所

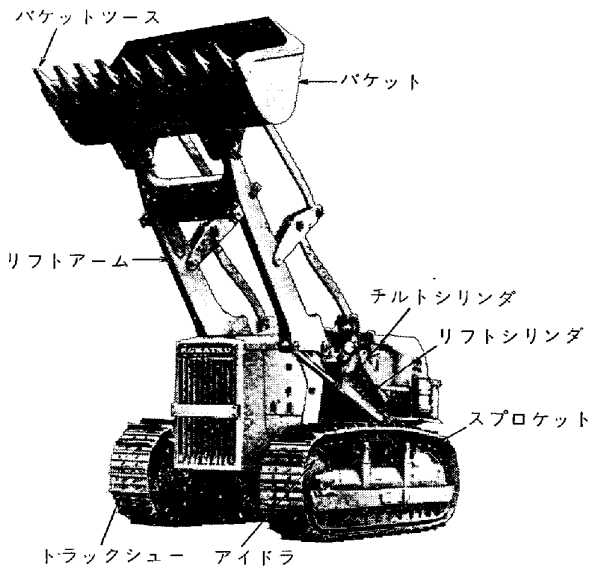


写真 3 ドーザショベル

タイヤをつけた装輪式トラクタは、走行スピードが装軌式 (13 km/hr) にくらべて大きく (40 km/hr)、機動性に富んでいる。

トラクタの次に生産額の多いのが掘さく機械である。

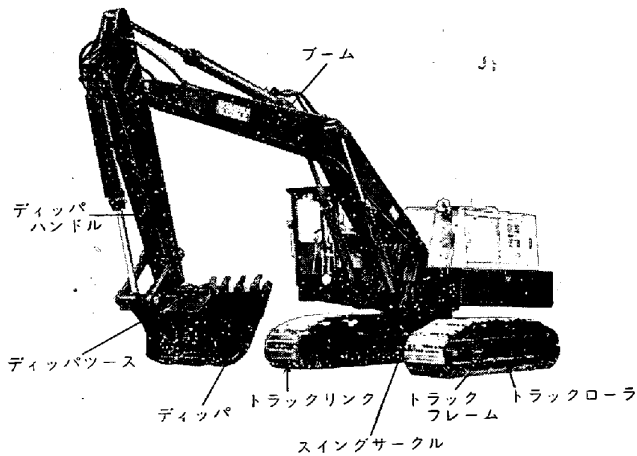


写真 4 油圧式パワーショベル (バックホー)

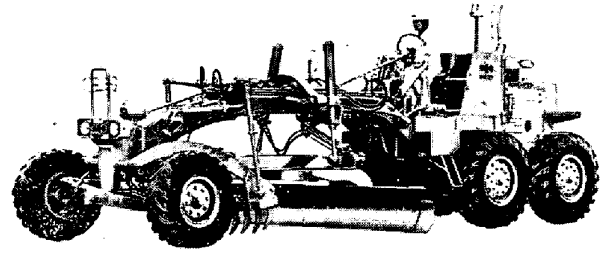


写真 5 モータグレーダ

その代表的なものはパワーショベルであり、ロープをドラムで巻取る機械式と、油圧駆動の油圧式パワーショベルとに分類される。写真4はバックホータイプの油圧式パワーショベルを示す。

写真5は整地機械に属するモータグレーダである。カッティングエッジで土を削り取り整地を行なう。整地機械にはこのほかに、ロードローラ、ソイルコンパクタや土を削り取りボールに積みこんで運搬するモータスクレーパーなどがある。

2. 建設機械用材料に要求される諸性質

建設機械用材料にとくに要求される性質は表2に示すようなものであろう。

建設機械は土砂を相手にする機械であるから、土砂に対する耐摩耗性は最も重要な性質である。とくにブルドーザ、ドーザショベルなどは、自身走行しつつ重作業をするので、トラックシュー、スプロケット、アイドラ、ローラなどの足回り部品 (写真1) は最も苛酷な土砂摩耗にさらされる。しかも足回り部品は価格が高く、交換に時間がかかるので、その耐久性は建設機械の最も重要な品質特性の一つである。

次の疲労強度であるが、建設機械は通常相当荒つばい作業をするので、各強度メンバーに発生する実働応力の範囲が広く、また衝撃的荷重をうけることが多い。この

表 2. 建設機械用材料に要求される諸性質

性 質	対 象 部 品
1. 耐 摩 耗 性 (耐土砂摩耗性)	トラックシュー、トラックローラ、キャリアローラ、スプロケット、アイドラ、ブレード、バケット、リップポイント
2. 疲 労 強 度 (高サイクルおよび低サイクル)	メインフレーム、トラックフレーム、Cフレーム、リフトアーム、イクオリザバー、リップビーム、バケット、ブレード、トラックシュー、トラックリンク、軸類、歯車
3. 表面疲労強度	歯車、軸受
4. 低 温 靱 性	Cフレーム、ストレートフレーム、メインフレーム、トラックフレーム、リップビーム、リフトアーム、ブーム

ため疲労強度，とくに低サイクル疲労強度が重視される。

第3の表面疲労強度は，主として高負荷の歯車と軸受に要求される性質である。

最後の低温靱性は，最近多くなつた酷寒地で使用される建設機械にとくに要求される性質である。

3. 建設機械の材料使用量の内訳

図1は中型ブルドーザの一例であるが，鋼材が全重量の $\frac{2}{3}$ をしめている。鍛鋼品は鋼材中に含めた。鋳鋼品は以前にくらべると，溶接構成品，鍛造品に転換し減少

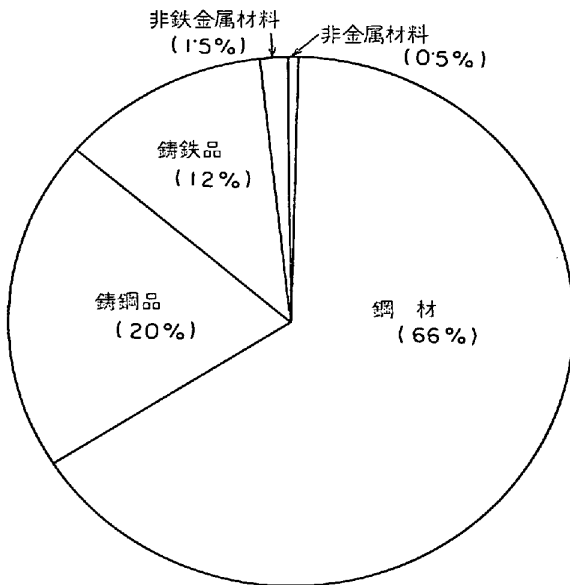


図1ブルドーザ使用材料の内訳の一例 (重量比)

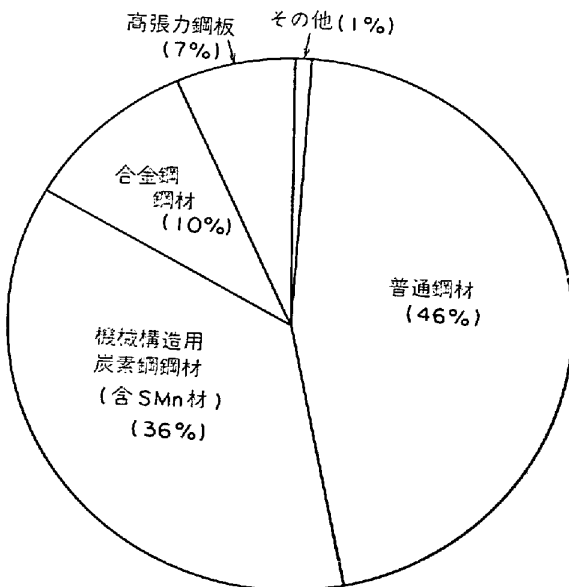


図2建設機械使用鋼材の内訳の一例 (重量比)

したが，中型以下では相当多量に使用されており，スプロケット，アイドラ，ブレースなどに，また鋼板と溶接していわゆる cast-weld construction として用いられる。パワーショベルでは，トラックリンク，ディップ，歯車などにも合金鋼鋳鋼品が相当用いられている。

鋳鉄品は大部分がエンジン用鋳物である。

図2は使用鋼材の内訳の一例である。普通鋼材は主として SS 41 P, SM 41 B などの溶接用鋼板である。SC 材および SMn 材の増加は最近の顕著な傾向であり，主として合金鋼および鋳鋼品からの転換の結果である。

高張力鋼板は 60 キロ級以下が大部分であるが，建設機械の軽量化の強い要請と，大型化にともなう設計応力値の上昇により増加の傾向にある。合金鋼のうち最も多いのは歯車用肌焼鋼である。

4. 足回り，土工機などの耐摩耗鋼材

土砂摩耗 (abrasive wear) はふつう表3に示すように，3つのタイプ²⁾，すなわち，岩石などで金属片が削り取られる gouging abrasion, 金属の間に砂粒などをかみこんですりつぶす grinding abrasion およびさらさらした土砂の中を金属がかきわけてゆく scratching abrasion に分類される。この中で最も摩耗速度の大きいのは gouging abrasion であり，scratching abrasion が最も軽度の摩耗である。

しかしいずれのタイプの摩耗でも，耐摩耗性の第一の必要条件は金属のかたさであることは疑問の余地がない。

図3³⁾は筆者の研究室で行なつたガウジング摩耗試験の結果である。摩耗比は H_RC 50に焼もどした S 45 C の摩耗量を1とした場合の各鋼種の摩耗量である。かたさの上昇とともに摩耗比はほぼ直線的に減少する。

ここで注目すべきことは，S 30 C は同じかたさに焼もどした S 45 C よりはるかに摩耗比が小さいことである。C 量の低い S 30 C のほうが S 45 C より耐摩耗性がすぐれ

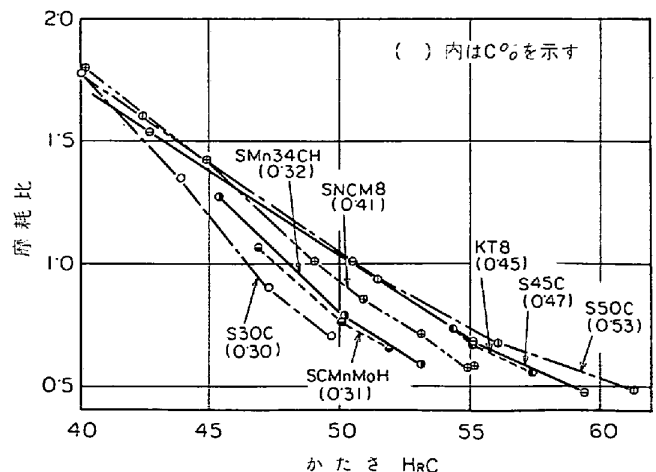

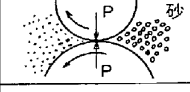



図3種々の鋼のかたさと摩耗比との関係

表 3 土砂摩耗 (Abrasion Wear) のタイプ

タイプ		摩耗部品
ガウジング摩耗		カッティングエッジ リップポイント、シュー バケットティース
グラインディング摩耗		スプロケット トラックブッシュ トラックローラー トラックリンク
スクラッチング摩耗		カッティングエッジ

ていることは、一見奇異の感を与える。しかしこのことは、同じかたさに焼もどした S 30C と S 45C の加工硬化指数 n をくらべると、S 30C のほうが n が大きいという事実によつて説明できる。摩耗比はかたさと加工硬化指数を 2 つの変数とする次の 1 次式であらわすことができる。

$$\text{摩耗比} = 5.55 - 0.081H_{RC} - 16.6n$$

現在カッティングエッジやトラックシューには、靱性をもたせるために焼入焼戻しをした SMn 1 (0.30~0.36% C) などが広く使用され、すぐれた耐摩耗性を示しているが、この実験結果はそれをよく裏づけするものといえよう。

次に、相手の岩石や土砂の性質によつて、摩耗速度は

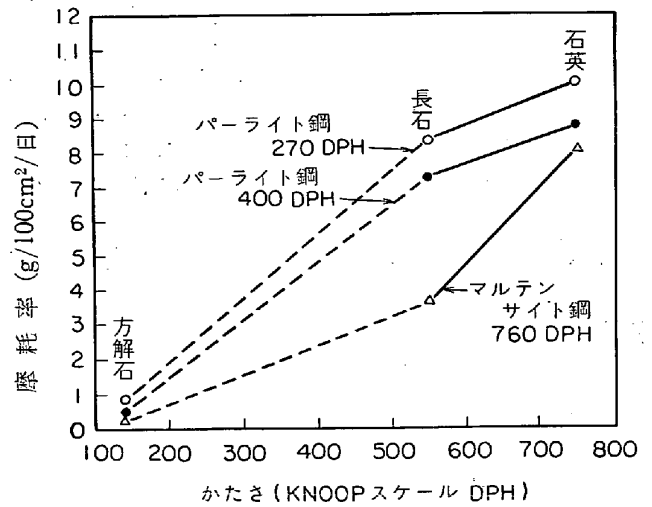


図 4 3 種類のかたさの 0.80% C 鋼グラインディングボールの摩耗率におよぼす鉱物のかたさの影響

どのような影響をうけるであろうか。図 4) は Climax Molybdenum Co. のボールミルによる大規模なテストの結果である。岩石のかたさが高くなるほど、当然摩耗速度は大きくなる。また長石のような中程度のかたさの岩石の場合、マルテンサイト鋼とパーライト鋼では摩耗速度に顕著な差があるが、かたい石英ではその差はわずか

表 4 ブルドーザ、ドーザショベルの耐摩耗部品の材料と熱処理法の例

No	部 品 名	摩耗のタイプ ※	材 料		熱 処 理 法	か た さ
			鋼 種	化学成分 (%)		
1	i シュー	GO. SC.	SMn 1H (圧延材)		水噴射焼入焼もどし	グロウサ部 H_{RC} 42 プレート部 BHN311
	ii リンク	GR. GR.	SMn 3H 鍛造品 SCM 3 鍛造品		水焼入焼もどし) 踏面高周波焼入 油焼入焼もどし)	踏面 H_{RC} 56 素地 BHN 285
	iii ブッシュ	GR.	SCM 21H (鋼管)		浸炭焼入焼もどし	内外表面 H_{RC} 62
2	スプロケット	GR.	SMn 1H 鍛造品 SiMn 鋳鋼品	0.44C, 0.50Si, 1.10Mn	水噴射焼入焼もどし	表面 H_{RC} 52
3	アイドラ	GR.	SiMn 鋳鋼品	0.44C, 0.50Si, 1.10Mn	焼ならし後踏面高周波焼入	踏面 H_{RC} 58
4	トラックローラー	GR.	SMn 3H 鍛造品		水噴射焼入焼もどし	表面 H_{RC} 58
5	カッティングエッジ	GO. SC.	高炭素鋼板 SMn 1H 圧延材	0.90C, 0.80Mn	油焼入焼もどし 水焼入焼もどし	表面 H_{RC} 42 表面 H_{RC} 48
6	エンドビット	GO. SC.	高 Si 鋼鍛造品 Mn Mo 鋳鋼品	0.44C, 2.20Si, 1.0Cr 0.31C, 1.40Mn, 0.25Mo	油焼入焼もどし 水噴射焼入焼もどし	垂面 H_{RC} 54 表面 H_{RC} 51
7	バケットティース	GO. SC.	低 Mn 鋳鋼品	0.34C, 1.60Mn	水噴射焼入焼もどし	表面 H_{RC} 53
8	リップポイント	GO.	MnCrMo 鋳鋼品	0.30C, 1.45Mn, 0.45Cr, 0.50Mo	焼ならしフレーム焼入焼もどし	表面 H_{RC} 51

GO.: Gouging Abrasion, GR.: Grinding Abrasion, SC.: Scratching Abrasion

である。いかえると、非常にかたい岩盤地帯におけるシビアな摩耗条件では、高価な材料をつかつてかたさを少々あげても、コストアップに見合うだけの顕著な効果は得られないことが多い。このような場合には、部品の厚さを増すとか、交換を容易にして休止時間を短縮するとかしたほうが、結局ユーザーコストの点から賢明な対策といえよう。

建設機械の摩耗部品は耐摩耗性と同時に相当の靱性をそなえていなければならない。この両者のかねあいが材料選択に当たつて最も苦心するところである。古くから広く使用されている高マンガン鋼は、衝撃や加圧によつて表面が著しい加工硬化をおこし、しかも心部はオーステナイトであるから、耐摩耗性と靱性を兼備した耐摩耗鋼である。以前はブルドーザのシューも高マンガン鋼の一体製造品を使用していた。しかし高マンガン鋼は降伏点が低くて変形しやすく、また表面が十分硬化しないうちに土砂で削りとられるので、耐久性は満足すべきものではなかつた。現在は前述したように SMn 1 などの圧延材の水焼入したものを使用されている。

表 4 に示すように、ブルドーザの耐摩耗部品には 0.30~0.40% C の炭素鋼または低マンガン鋼が多く使用されている。現在経済的に使用しうる鋼材のうち、耐土砂摩耗性と靱性（または衝撃値）という相反する性質を同時に相当程度満足する鋼材は、低温焼もどしした中炭素マルテンサイト鋼であるといふことができる。

またリップポイントやカッティングエッジは岩石との摩擦により表面温度は往々 500°C をこすと推定され、焼もどされて軟化した状態で削り取られている。焼戻し軟化抵抗を増すためには、Cr, Mo, Si が有効である。表 4 中のエンドビット（図 1 参照）に高 Si 鋼がつかわれているのはこのためである。

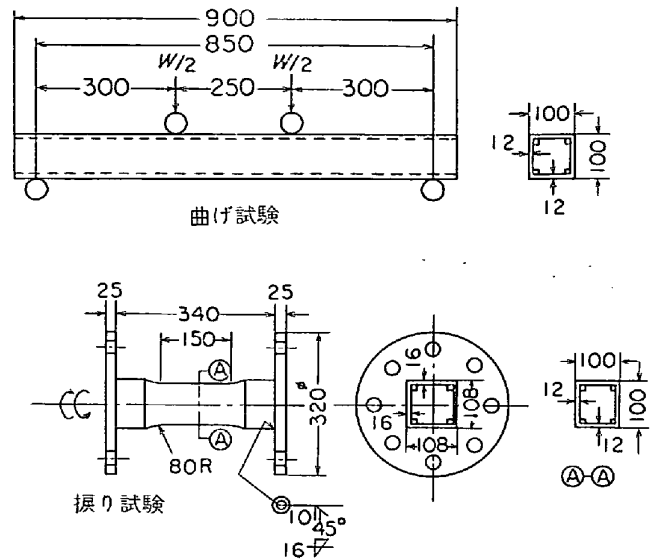
5. 溶接構造用鋼板

建設機械には、フレーム類、ディップ、バケットなど多くの溶接構成品が強度メンバとして使用されている。これらの部品にもつとも必要な性質は疲労強度である。

溶接用鋼板は SS 41 P, SM 41 B などの軟鋼板が多いが、前述したように高張力鋼板の使用量が増加しつつある。今までのところ大部分が 60 キロ級どまりで、80 キロ級以上は比較的少ない。

次にのべるのは、当社で数年前ブルドーザの C フレーム（図 1 参照）に 60 キロハイテンを採用した際におこなつた一連のテストである。

図 5⁵⁾ は溶接箱形試験片の寸法と試験方法を示す。C フレームはこのような箱形をした溶接構成品である。図 6⁶⁾ は曲げ疲労試験の結果を示す。溶接は 4 すみの内面に裏当金を仮付溶接し、レ開先の CO₂ 溶接 2 層盛でおこなつた。No 1 は仮付ビードを曲げ応力の高い位置においたもので、仮付ビードからクラックが発生し、ハイ



	曲げ試験	振り試験
荷重方法	片振り	両振り
繰返し速度 $\frac{\text{サイクル}}{\text{分}}$	300	200
応力 kg/mm^2	3~30	±13

図 5 溶接箱形試験片の疲労試験

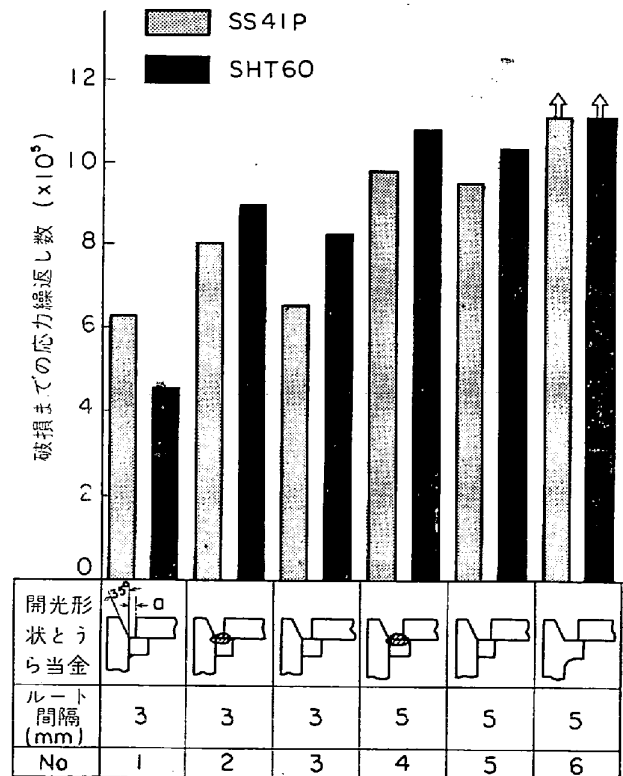


図 6 溶接箱形試験片の曲げ疲労試験結果

テンは軟鋼より弱い。切欠による応力集中があると、ハイテンは決してすぐれた耐久性を示さないことがわかる。

No 2 は開先内に仮付ビードを置いて、ノッチ効果を少くしたものの、No 3 は仮付ビードを試験片の端近くの応力の低い位置においたもので、いずれもハイテンは軟鋼よりすぐれた耐久性を示す。

No 4, No 5 はルート間隔を 3 mm から 5 mm にひろげたもので、耐久性はさらに向上する。No 6 は裏当金を用いず、異形型钢を用いたもので、ノッチの減少のためにきわめて良好な成績を示している。

図 7⁵⁾ に示すように、振り試験でもハイテンは軟鋼にくらべてすぐれた耐久性を示している。

以上のような疲労試験の結果にもとづいて、数種の断面の中型ブルドーザの C フレームを試作し、実物の疲労試験を行なった。この試験はブレードの一端に 40 cm の高さの台をかませて、油圧シリンダでブレードを押し下げ、C フレームに曲げ応力と振り応力を発生させる低サイクルの疲労試験である。C フレームに発生する応力は、実機の苛酷な作業において測定した応力と同程度となるように押し下げ力を設定した。

図 8⁶⁾ はこの疲労試験の結果を示す。No 1 の SS 41 P の標準品にくらべて、ハイテンを用いて板厚をうすくした No 2, No 3 はすみの溶接部から破損して寿命は標準品より短い。No 4 は裏当金を用いないもので寿命は最も短い。No 5 は標準品と同一寸法で 60 キロハイテンを用いたもので寿命は軟鋼の 1.7 倍になった。No 6 は同一板厚で寸法をコンパクトにしたもので、標準品の 1.5 倍の寿命を示した。

以上のべた試験の結果により、ブルドーザの C フレームには現在 60 キロハンテンが使用されており、ある機

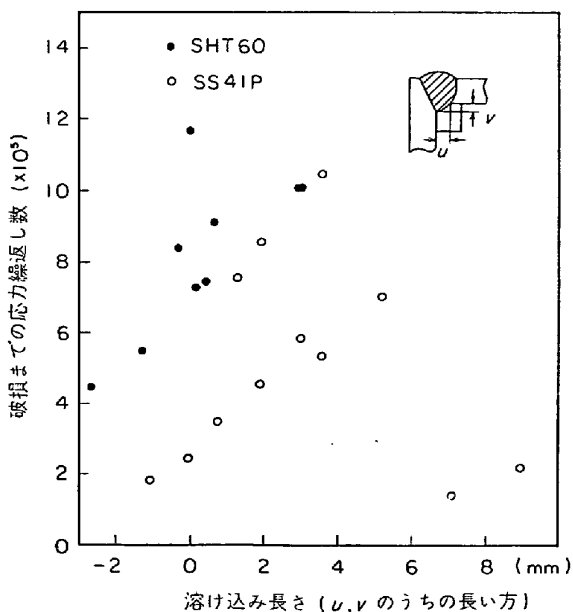


図 7 溶接箱形試験片の振り疲労試験結果

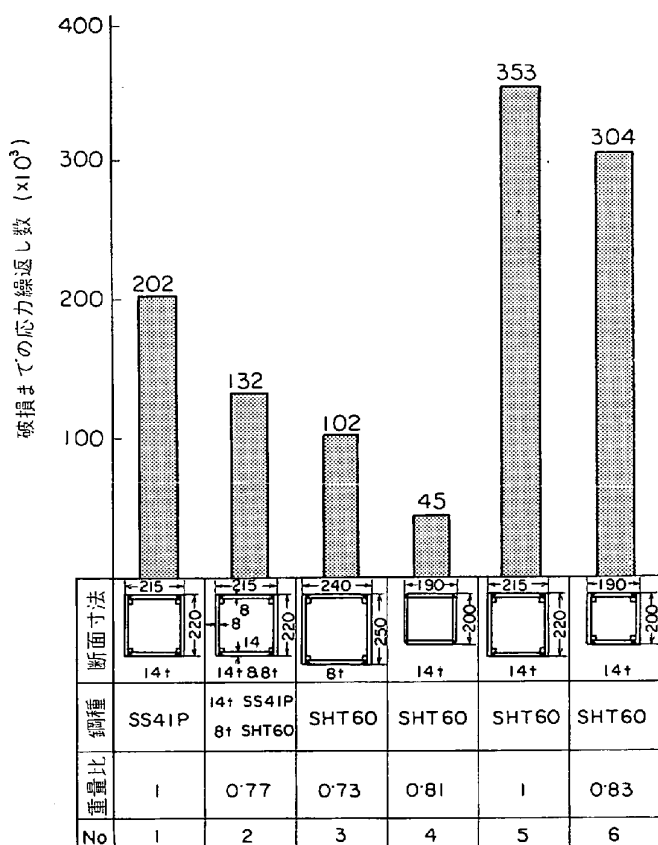


図 8 ブルドーザ C フレームの疲労試験結果

種では軽量化が実現し、また他の機種ではその耐久性が大幅に向上した。

図 9 に示すのはブルドーザのブレードの断面で、土砂と摩擦する前面板にハイテンを使用している。これはハイテンの疲労強度よりもその耐摩耗性と耐凹み性を利用した例で、60 キロ級では不十分であり、100 キロ級以上

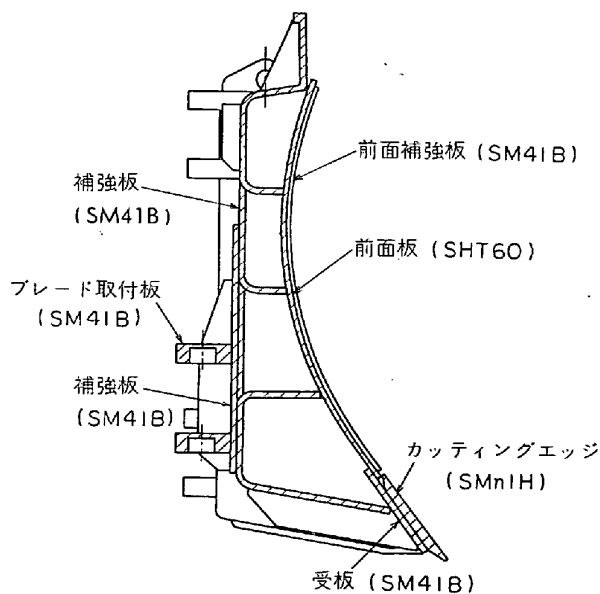


図 9 ブルドーザブレード

のハイテンを使用したいところである。

現在建設機械において、80キロ級以上の調質高張力鋼板の使用量が比較的少ないのは次の2つの理由による。

その一つは、降伏点または疲労強度の上昇による板厚軽減を考慮に入れてもなおかつ80キロ級以上のハイテンは60キロハイテンよりコストアップをもたらすことが多い。他の理由は80キロ級以上のハイテンは溶接の際に予熱を必要とし、これが生産性を著しく阻害することである。この二つの点が改善されれば、建設機械への80キロ級以上のハイテンの使用量は大幅にのびると思われる。また80キロ級以上のハイテンは、強度と靱性を要する強度メンバー用と、耐摩耗性と耐凹み性を重視した鋼種と両方の仕様を設ける必要がある。

6. 歯車用鋼材

建設機械の中でも、装軌式トラクタは岩石との衝突、リップ作業などの重作業を行ない、また片側履帯を停止して急旋回を行なうので、とくに終減速歯車の負荷が大きい。このため設計ヘルツ面圧は200 kg/mm²をこえることがある。そこでピッチングやスポーリングなどの歯面損傷に対して十分の対策が必要となる。

ピッチングやスポーリングは歯表面または表皮直下におこる疲労亀裂であることが確認されており、その第一の対策は歯面の硬度の上昇である。このため、現在の建設機械用高負荷歯車はほとんどが浸炭歯車または高周波焼入歯車である。

歯車用肌焼鋼として多く使用されているのはSCM21, 22, SNCM 23, SAE 8822, SAE 8620などである。過去数年間の歯車用肌焼鋼の世界的趨勢はいわゆるLean alloy (低合金) への傾向である。たとえば5% NiのSAE 2517, 3.5% NiのSAE 3310は規格から姿を消した。

この傾向は一つにはNi資源の問題もあるが、浸炭焼入技術の進歩と、歯面疲労に対する研究の成果がその背景をなしている。高周波焼入歯車には、S43C, S45Cなどの一発焼入が多く用いられている。

数年前から真空脱ガス鋼が歯車のピッチング防止に効果のあることが認められ、現在では建設機械用歯車にも用いられている。介在物減少による疲労クラックの開始および伝播の防止がそのねらいである。

7. 低温用鋼材

最近建設機械はカナダ、アラスカまたはシベリヤなど-50°Cに達する酷寒地で盛んに使用される。このため低温における脆性破壊対策が必要となる。脆性破壊は拘束の大きい大型溶接構成品にとくに起こりやすい。10mm未満の薄い板や小物部品にはそのおそれはほとんどない。

鋼の脆性破壊は、まず溶接欠陥などの切欠先端部に塑性変形が起こり、それがある限界値に達すると突然急激

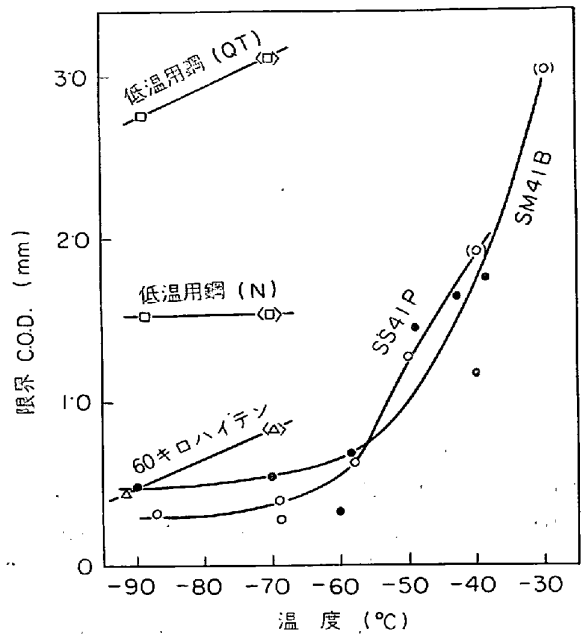


図 10 各種鋼材の限界 C.O.D. (< >印は応力最大となつたときの C.O.D. を示す)

な不安定破壊にうつる現象である。このときの公称応力は多くの場合降伏点以下である。

従来低温靱性の指標として広く用いられているのはシャルピー衝撃値であるが、シャルピー値は脆性クラックの開始に対する抵抗性よりもむしろ伝播に対する抵抗性の指標と考えられている。建設機械においては脆性クラックの開始に対する抵抗性がより重視される。クラック開始に対する抵抗性の指標として最近 C.O.D. (Crack Opening Displacement) が注目されるようになった。

図 10) に示すように低温用 Al キルド鋼は SS41P や SM41B にくらべて大きな限界 C.O.D. を示す。しかし溶接構造物の脆性クラックはほとんどすべて溶接部から開始する。そこでこれらの鋼板を市販の CO₂ 溶接ワイヤを用いて溶接し、その溶着金属の C.O.D. を測定

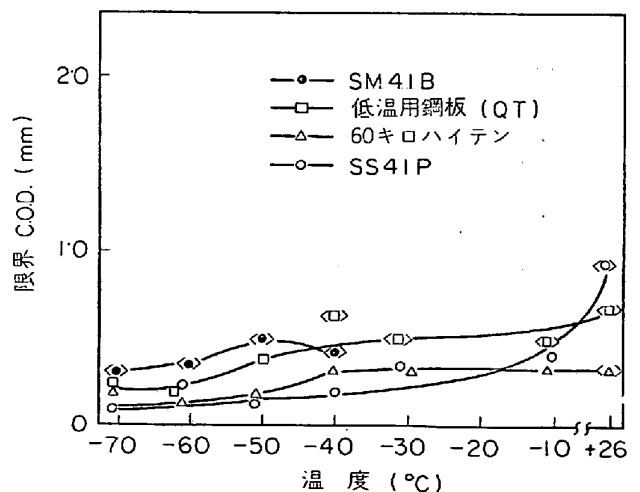


図 11 溶着金属の限界 C.O.D.

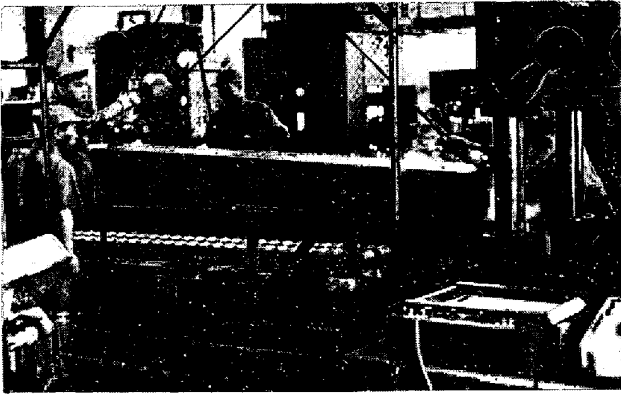


写真 6 大型試験片の低温破壊試験

すると図 11⁷⁾に示すように母材より相当低い値を示す。したがって、母材の低温靱性を生かす CO₂ 溶接ワイヤの開発が望まれる。

溶接構造物の脆性破壊には、拘束度や溶接残留応力が大きく影響するので、筆者の研究室では板厚 19 mm, 300 mm×300 mm×2,500 mm の大型の溶接箱形試験片を用いて低温破壊試験を行なっている。写真 6 に示す試験片には中央下面の両隅角部に 2 段切欠をつけてある。この切欠は母材と溶着金属にまたがって切りこまれているので、C. O. D. 値は靱性の低い溶着金属の性質に支配される。このテストで明らかになったことは、溶接線に

沿つて軸方向に 38 kg/mm² におよぶ大きな残留応力が発生しており、これを焼鈍によつて除去すると低温靱性が著しく改善されることである。

このように溶接構成品の脆性破壊の防止には、鋼板だけでなく、溶着金属の靱性、残留応力除去がきわめて重要である。

8. む す び

以上建設機械用鋼材について、耐摩耗性、疲労強度、耐ピッチング性および低温靱性の点から概観をおこなつた。またあわせて鋼材や溶接棒に対する 2, 3 の希望をのべさせていただいた。建設機械用鋼材について関心をもつていただく一助ともなれば幸いである。

文 献

- 1) H. S. AVERY: *Wear*, **4** (1961), p. 427~449
- 2) 田口: *潤滑*, **14** (1969) 8, p. 441~443
- 3) 中西, 植田: 第 15 回材料研究連合講演会, 1971. 9.9.
- 4) T. E. NORMAN: *Trans. Amer. Found. Soc.*, **66** (1958), p. 187~196
- 5) 佐竹: 小松製作所社内資料
- 6) 小松製作所社内資料
- 7) 小形, ほか: *鉄と鋼*, **57** (1971) 11, p. 154