高強度鋳鋼クランクスロー用材料の研究*

牧 岡 稔** 辻 本 信 行** 渡 辺 佳 英**

概 要

最近の舶用機関の大出力化は、クランク軸の強度上の要求を一層きびしいものになっている。

この論文は、鋳鋼製大形クランクスローの材料強度を現状の引張り強さ 44 kg/mm^2 レベルから 56 kg/mm^2 レベルに向上させた新材料の研究に関するものである。

はじめに、別鑄込み試験材を用いて調査した新材料の強度特性、溶接性について述べ、次いで、現在、最大クラスの鑄込み重量をもつ B & W K90GF クランクスローを試作し、実体各部の材料強度、並びにピン部の疲労強度を調査した結果を述べている。

Study on the High Strength Cast Steel Crank Throw
for Marine Diesel Engine

By Minoru Makioka
Nobuyuki Tsujimoto
Yoshiteru Watanabe

Abstract

On the recent development of power up of 2 cycle diesel engine, it is observed to have a tendency to increase the " P_{me} ", without changing the length of engine, instead of the usual method of enlarging the cylinder diameters. As a result of this, the crankshaft for such engine are subject to higher stress and more severe operation.

Corresponding to this trend, it is investigated to increase the strength of the material for large cast steel crank throw.

At the first, a study has been made of the mechanical properties and weldability of the new material using keel blocks. Then, we have manufactured for trial one of the largest cast steel crank throw, B & W K90GF type, for the purpose of researching into its internal strength, soundness and fatigue strength. This report describes the result of these investigations.

1. ま え が き

従来、機関の大出力化の要求を満たすには、主として、シリンダ径を大きくすることによって対処されてきた。しかし、更に機関の高性能化を計るため、最近 P_{me} を上昇させ、機関全長を変えずに全出力の増大が計られるようになってきた。そのため、クランク軸に対する強度上の要求が一層きびしくなってきた。

このような動向に対して、すでにロール加工した強化形クランク軸が開発され、エンジンの高出力化の要求を満たす努力がなされている。

この実験は、使用材料の高力化の要求に対し、新たに

56 kg/mm^2 ベースの鋳鋼クランクスローを試作し、本体強度レベルと健全性について調査したものである。

2. クランクスロー用高強度材料の選定とその特性

引張り強さ 56 kg/mm^2 以上、しかも、溶接が現用材料より困難にならない範囲の成分が好ましいので、C 量は現用材同様、 $0.19/0.24\%$ とし、焼入れ性を改善させるために Mn, Ni, Cr, Mo は現用材より高目とした表 1 の成分を選定した。そして実体スローの確性試験に先立って、選択した成分の熱処理特性、及び溶接性について検討を加えた。

2.1 強度特性 現在、鋳鋼スローは、焼ならし、焼もどし処理によって強靱性が付与されている。この場合、鋳鋼スローの焼ならし温度からの冷却速度を 900

* 原稿受付 昭和 50 年 2 月 6 日

昭和 49 年秋季学術講演 (昭和 49 年 11 月 14 日)

** (株) 神戸製鋼所高砂工場 (高砂市荒井町新浜 2 丁目)

表1 化学成分(%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
目標範囲	0.21/0.25	0.30/0.50	0.80/1.20	<0.020	<0.025	<0.15	0.35/0.45	0.30/0.40	0.15/0.25	0.05/0.10
出鋼分析	0.23	0.41	1.00	0.012	0.012	0.02	0.41	0.36	0.20	0.08

注) $[P] = T(20 + \log t) \times 10^{-3}$ 但し, $T = ^\circ\text{K}$, $t = \text{hrs}$

図1 引張り強さ特性

注) $[P] = T(20 + \log t) \times 10^{-3}$ 但し, $T = ^\circ\text{K}$, $t = \text{hrs}$

図2 降伏点特性

~500℃ 間で実測すると, 1~10℃/min の範囲にある。したがって, 前述の組成をもつ 30口×170mm の試験材に 900~500℃ 間平均冷却速度 1℃/min と 10℃/min の 2 とおりの冷却速度を与えた後, 焼もどし処理を行ない, 引張り強さ特性を調べた。図1~2は, 強度特性を示すもので, 横軸に焼もどし温度・時間をパラメータ $[P]$ で表示している。同図には, 比較のため現用鋼の値も併記した。

現用大形铸鋼スローの焼もどしパラメータは $[P] = 19.5$ 付近に相当するので, この $[P]$ 値で新材料の強度特性を評価すると次のごとくなる。

- (1) 引張り強さは 56~60 kg/mm² で, 現用鋼 (47~49 kg/mm²) に比べて約 10 kg/mm² 高い。
- (2) 質量効果は現用鋼に比べるとやや大きく, 冷却速度 1℃/min と 10℃/min 間では, 引張り強さは 4 kg/mm² 程度の差がある。
- (3) 降伏点は, 現用鋼が 31~33 kg/mm² であるのに対し, 少なくとも, 36 kg/mm² 以上が得られると推定される。しかし, 焼ならし処理時の冷却速度が 10℃/min (小形铸鋼スロー) の場合は, 45 kg/mm² 程度の高い降伏点が得られる。

2.2 溶接性 新材料の溶接性, 並びに溶接部の性状を知るため, 単埋め溶接試験, 突き合せ溶接部の材料試験, 斜め y スリット溶接割れ試験の 3 種の溶接性試験を行なった。溶接条件を表2に示す。

表2 溶接条件

項 目	溶 接 条 件
(1) 使用溶接棒	神 鋼 製 LB-62
(2) 使用溶接機	AC 形アーク溶接機
(3) 棒径・電流	1層目 4φmm 150 A 2層目以降 5φmm 200 A
(4) 予熱温度	50, 100, 150, 200℃; 単埋め溶接試験 斜め y スリット溶接割れ試験
(5) 後熱温度	200~250℃; 突き合わせ溶接部の材料試験 640℃×7hr, 但し, 斜め y スリット溶接割れ試験は後熱処理なし
(6) 運棒・姿勢	ストレート・下向き
(7) 溶 接 者	JIS-A-2F 以上の有資格者

2.2.1 単埋め溶接試験 図3に示す3種の凹みを作り, 単埋め溶接を行なった。

後熱処理は 640℃×7hr とした。溶接後, 表面及び A-A 断面での染色浸透探傷試験, サルファープリント, マクロ腐食試験を行なった。いずれの場合も欠陥は認められなかった。溶接後表面の染色浸透探傷試験結果の例

溶接部表面の染色浸透探傷結果
予熱温度 50, 100, 150, 200℃の場合
写真1 溶接後表面ダイチェック試験結果

を写真 1 に示す.

図4は、後熱処理温度・時間を変えた場合の溶着金属部、及び熱影響部の硬さの変化を焼もどしパラメータ〔P〕で整理したものである。

熱影響部の最高硬さは、焼もどしパラメータ〔P〕=19.0~19.5で、Hv=220~240、溶着金属部のそれは、Hv=185~200で母材よりやや高い硬さを示した。

2.2.2 突き合せ溶接部の機械的性質 溶接部の材料試験結果を表3に、また、試験後の外観を写真2に示す。

(1) 溶接部の引張り強さは 58 kg/mm^2 ，降伏点は 42 kg/mm^2 であった。

(2) 衝撃値(溶接熱影響部, U-5mmノッチ)は10kg-m

注) $[P] = T(20 + \log t) \times 10^{-8}$ 但し, $T = ^\circ\text{K}$, $t = \text{hrs}$

図4 巢埋め溶接部の硬さとPWHT条件との関係

表3 溶接部の材料試験結果

T_1, T_2	引張試験片 2本 14φ mm×55
B_1	裏曲げ試験片 1本
B_2	表曲げ試験片 1本 25×15×250mm $D=3t, 180^\circ$
$C_1 \sim C_3$	衝撃試験片 KCU 5mm Uノッチ, 常温
H	硬度分布 マクロ・ミクロ

	降 伏 点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸 び %	絞 り %	破断位置	曲げ試験結果	衝 撃 値 ・ 常 温
							U-5mm ノッチ kg-m/cm ²
T-1	42	58	21A	74	Depo	B ₁ (裏曲げ) 良	C ₁ = 11.1 C ₂ = 11.1 C ₃ = 10.1
T-2	42	58	20A	72	Depo	B ₂ (表曲げ) 良	(ノッチは HAZ)

写真2 突き合わせ溶接部の材料試験後破断状況

予熱温度	ダイアモンド試験結果	マクロ腐食試験結果
50℃		
100℃		
150℃		
200℃		

写真3 斜めyスリット溶接割れ試験結果

／cm²であった。

(3) 表・裏曲げ試験片とも良好な延性を示した。

2.2.3 斜めyスリット溶接割れ試験結果 予熱温度を50℃, 100℃, 150℃, 200℃に変化させ, JIS Z 3158に従って, 斜めyスリット溶接割れ試験を行なった。その結果を写真3に示す。

予熱温度50℃で, ルート割れ, クレータ割れなどは認められず, 割れ感受性は低いと考えられる。

3. 試作鋳鋼スローの実体確性試験

3.1 高強度大形鋳鋼スローの試作 鋳込み重量としては最大クラスであるB&WK 90 GF形スローを新材料で製作した。B&WK 90 GFの諸元を表4に示す。

鋳造方案は, 現在, 44 kg/mm² ベースのスローに採用しているものと同じ方法をそのまま適用した。試作スローは製造工程に従って, 均質化焼ならし1030℃×18 hr AC, 焼ならし930℃×18 hr AC, 焼戻し660℃×18 hr ACの熱処理を行ない, 仕上寸法に機械加工後, 確性試験に供した。試作品の化学成分を表5に示す。

表5 試作クランクスローの化学成分(%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
目標範囲	0.21/0.25	0.30/0.50	0.80/1.20	< 0.020	< 0.025	< 0.15	0.35/0.45	0.30/0.40	0.15/0.25	0.05/0.11
出鋼分析	0.24	0.43	1.02	0.016	0.012	0.06	0.39	0.36	0.21	0.08

表4 B & WK 90 GFスローの諸元

諸元	形式	B & WK 90 GF
シリンダー直径 mm		900
ピストンストローク mm		1800
ピン直径 mm		700
軸直径 mm		835
鋳込重量 ton		36
仕上重量 ton		15

3.2 試作スロー表面の非破壊検査 試作スローの鋳はだ面は磁粉探傷試験を行なった。また, ピン部, 及び軸穴部の機械加工面は超音波探傷, 並びに染色浸透探傷試験, サルファープリント試験を行なった。それらの成績は, 現在製作している44 kg/mm² ベースの鋳鋼スローと同等レベルの品質にあり, 高強度材料としたことによる品質上の差異は認められなかった。

3.3 クランクスローピン部断面の性状

ピン部の内部品質を確かめるために図5に示すA-A, B-B, C-Cの各断面について品質調査を行なった。ピン横断面, 縦断面のサルファープリントを写真4に示す。ピン縦断面でみるとピンTOP側に, そしてピン横断面でみるとウェブ外周, 及び軸穴内周に沿ってサルファの偏析模様が認められるが, この状況は現用スローの場合と同様である。

図5 ピン部各断面の位置

3.4 本体各部の機械的性質 クランクピンの各部, 及び腕部軸穴周辺の機械的性質を表6~7に示す。

この表から, 試作スロー本体の強度は, 降伏点37~43 kg/mm², 引張り強さ55~62 kg/mm²の範囲にあり, ほぼ予想通りの強度が得られた。降伏点, 及び引張り強さについて試作鋼と現用スロー(44 kg/mm² ベース)

写真4 クランクピン部各断面のサルファープリント試験結果

とを比較すると表8のようになる。

現用スローに対し、伸び、絞り、衝撃値は同程度であるが、降伏点、及び引張り強さは約 10 kg/mm^2 高くなっており、強度レベルは一段階上昇している。

図6は、試作スロー本体各部の引張り強さをC当量($C + Mn/6$)で整理したものである。

ピン部、腕部とも、引張り強さが $4 \sim 5 \text{ kg/mm}^2$ パラツているが、このパラツキは図が示すようにC当量と引張り強さとがほぼ直線関係を成していることから、熱処理による質量効果というよりも、むしろ本体各部の成分偏析によると考えられる。

高強度鋳鋼クランクローの強度上の信頼性を更に向上させるため、フィレット部の冷間ロール加工を行ない、

その状況を調査した。図7にフィレット部の硬化状況等を硬度曲線で示す。

加工硬化はフィレット部全域に及んでおり、母材硬度 $Hv=165$ に対し、表面の最高硬さは $Hv=210 \sim 220$ 、硬化深さは約 30 mm (ピン径の $1/26$) に達している。

3.5 疲労強度 試作スロー実体から $10 \phi \text{ mm}$ 小野式、及び $70 \phi \text{ mm}$ 大形回転曲げ疲労試験片を図8の要領で採取した。

3.5.1 小野式回転曲げ疲労試験結果 図9は $10 \phi \text{ mm}$ 小野式回転曲げ疲労試験片による $S-N$ 曲線を示す。疲労限は、 $19.5 \sim 21.0 \text{ kg/mm}^2$ と推定された。疲労限/引張り強さは、 $0.33 \sim 0.35$ であった。

3.5.2 大形回転曲げ疲労試験結果 図10は、 70

表6 クランクピン各部の機械的性質

試験片位置		降 状 点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸 び % <i>L</i> = 5 <i>d</i>	絞 り %	衝 撃 値 （ 平 均 ） U ノ ッ チ 5mm kg・m/cm ²	
ピン部 （軸方向）	内股中心	A	39.3	57.5	29A	59	10.6, 10.1, 10.6, 11.1, 10.6 (10.6)
	下 形	B	40.0	55.9	25A	61	10.1, 8.7, 10.6, 3.9, 10.1 (8.7)
		C	40.0	56.9	26A	65	8.7, 8.7, 8.3, 7.8, 7.8 (8.3)
		D	40.3	56.9	23B	63	9.2, 7.8, 3.9, 5.9, 8.3 (7.0)
	ピン頂部	E	43.2	59.1	24A	61	8.7, 6.4, 8.7, 7.3, 7.3 (7.7)
	上 形	F	40.0	59.1	24B	45	3.9, 10.1, 9.7, 5.9, 8.7 (7.7)
		G	41.9	59.8	24B	50	7.8, 8.7, 8.3, 8.3, 10.1 (8.6)
		H	40.3	59.5	25B	44	10.1, 9.2, 7.8, 7.3, 8.3 (8.5)
	ピン中心	I	40.3	56.9	28A	59	8.3, 9.2, 9.2, 9.7, 10.6 (9.4)
フィレット部	内股中心	F ₁	37.4	57.5	18B	36	7.8, 8.7, 9.2, 9.7, 7.8 (8.6)
	45° 方向	F ₂	37.0	58.5	19A	37	10.1, 10.1, 9.7, 7.3, 10.6 (9.6)

表7 軸孔周辺各部の機械的性質

押湯側

試験片位置		降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	衝撃値 (平均) Uノッチ5mm kg-m/cm ²	
軸孔周辺部	ピン側中央	J ₁	40.3	58.5	29A	62	8.3, 8.7, 8.3, 7.3, 7.8 (8.1)
	下形	J ₂	41.9	62.4	20A	38	5.5, 7.3, 5.9, 7.3, 6.4 (6.5)
		J ₃	41.6	61.4	24B	51	6.4, 3.1, 5.5, 5.9, 6.4 (5.5)
		J ₄	41.6	60.1	21A	50	5.9, 5.5, 7.8, 5.5, 3.9 (5.7)
	ピン反対側中央	J ₅	41.6	58.5	26A	61	2.7, 8.3, 8.7, 7.8, 5.5 (6.6)
	上形	J ₆	39.0	56.5	27A	62	7.8, 8.3, 7.8, 8.3, 9.2 (8.3)
		J ₇	40.0	58.2	27A	59	8.3, 8.3, 9.2, 8.3, 9.2 (8.7)
		J ₈	40.0	57.8	29A	58	9.2, 5.1, 9.7, 9.7, 8.7 (8.5)
	径方向	J ₉	40.3	56.9	26A	56	6.9, 6.9, 6.9, 7.3, 6.4 (6.9)
	下形	J ₁₀	40.9	58.5	21B	46	5.9, 8.3, 5.1, 8.3, 7.3 (7.0)
	上形	J ₁₁	40.0	57.2	26A	61	8.3, 8.3, 9.7, 8.3, 8.7 (8.7)
		J ₁₂	40.3	56.2	21A	58	10.1, 9.2, 8.7, 8.7, 8.7 (9.1)
腕中部	下形	J ₁₃	38.7	54.9	28A	58	8.7, 9.2, 8.3, 9.7, 8.3 (8.9)
		J ₁₄	38.0	55.2	26B	62	9.7, 9.2, 8.7, 9.2, 8.3 (9.0)
		J ₁₅	38.7	56.2	27A	60	9.7, 8.7, 8.3, 8.7, 8.7 (8.8)
	ピン反対側中央	J ₁₆	42.2	59.8	24B	61	8.7, 5.9, 7.8, 8.3, 8.3 (7.8)
	上形	J ₁₇	38.0	56.2	25A	49	6.9, 7.8, 5.5, 6.4, 6.4 (6.6)
		J ₁₈	40.3	59.8	20B	41	8.3, 8.7, 7.8, 10.6, 9.2 (8.9)
		J ₁₉	39.6	57.5	24B	59	10.1, 10.1, 9.2, 9.7, 10.1 (9.8)

表8 試作スローと現用スローとの実体強度の比較

	区分	降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²
試作スロー	ピン部	37 ~ 43	56 ~ 60
	腕部	39 ~ 42	55 ~ 62
現用スロー	ピン部	27 ~ 31	45 ~ 51
	腕部	29 ~ 34	48 ~ 51

図6 C当量と引張り強さの関係

φmm平滑疲労試験片による回転曲げ疲労試験結果と現用スローから切り出した同じ直径をもった平滑疲労試験片の試験結果である。

写真5aは高強度鋳鋼スローから切り出した大形疲労試験片の試験前の平行部の染色浸透探傷試験結果を示す。そして、同図bは破断後の状況の代表例を示す。

疲労限は16~16.5kg/mm²であった。破壊起点とな

図7 フィレット部ローラー加工断面の硬度分布

図8 小野式および大形疲労試験片採取位置

図9 小野式疲労試験材のS-N曲線

写真5 70φ疲労試験片の破断状況

70φmm平滑疲労試験片に含まれる欠陥の種類、大きさも同様と考えられる。したがって、鋳鋼品においても、引張り強さの向上に比例して、疲労限も向上すると考えられる。

4. む す び

機関の高性能化の要望を満たすため、現用スローより一段階高い強度の得られる材料を開発し、現在、最大重量級の鋳鋼製クランクスロー B & WK 90 GF を試作した。そして、実体の内部品質、及びスロー各部の強度レベルの調査を行ない、更に小野式回転曲げ、並びに大形回転曲げ疲労試験を行なった。

その結果、当初の小試験材から予想されたとはほぼ同じ強度レベルをもった大形鋳鋼スローの製作が可能なることを確かめた。また、新しい材料の溶接性についても調査し、良好な結果を得た。

参 考 文 献

- (財団法人)日本船用機器開発協会, 大形鋳鋼クランク軸のフィレット部ロール加工による強度実験事業報告書。(昭和44年3月)
- 西原, 河野, 牧岡ら, 大形鋳鋼クランク軸の回転曲げ疲れ強さについて。日本船用機関学会誌, 第2巻第2号抜刷。(昭和42年4月)
- 日本鋳鋼会, 船用鋳鋼品に現われる欠陥と非破壊検査による探傷結果との関連調査研究事業報告。第1報～第3報。(昭和39～昭和41年)
- 藤田秀雄, 最近の船用大形低速ディーゼル機関の発達動向。内燃機関, 第13巻10号。(昭和49年9月)

数字は起点となった疵の大きさ

( ) は表面下の疵が起点となったもの

試作鋼はB & WK 90 GF クランクスロー, 現用鋼はB & W 984-VT 2BF 180 クランクスロー

図10 大形試験片でのS-N曲線

った欠陥の大きさは1.0～2.0mmであった。

この値を現用スローの実績値13～13.5kg/mm²と比較すると、試作高強度スローの疲労限は約3kg/mm²向上したことになる。

両者の鋳造方案, その他の製造条件はほぼ同一であり,