一体型クランク軸の強度に関する研究 (第3報)

正員		Щ	田	Æ	郎*

永

斋

An Investigation on the Statical Strength of Solid Crankshafts

(The 3rd Report)

By Shoichiro Yamada, Member Hideomi Matsunaga, Member

松

正員

Abstract

This third report describes the effect of overlap of crankpin and journal on the bending strength and the effect of web dimensions on the torsional strength.

The results are as follows :

(1) The stress concentration factor in bending is maximum at about S=0 and decreases as |S| increases, where S is the amount of the overlap of crankpin and journal.

(2) In torsion, the maximum shearing stress in the crankpin fillet occurs in the plane about 50° to the plane of the crankthrow.

(3) The stress concentration factor in torsion is much smaller than that in bending.

(4) Web dimensions have greater effect on stress concentration factor in case of bending than in torsion, but fillet radius has approximately same effect both in bending and in torsion.

1. 緒 言言

本報告においては、第1報⁽¹⁾、第2報⁽²⁾にひきつづき一体型クランク軸の静的曲げ強度を検討するとともに、 ねじり強度についても実験研究を行つた。

クランク軸スミ肉部の応力集中に影響を与える要素として、クランク腕の寸法、スミ肉の形状およびピンとジャーナルとの overlap 等が考えられるが、曲げについての腕の寸法およびスミ肉の形状の影響については第1 報および第2報で明らかにされた。よつて、本報告においては腕およびその他の寸法を一定にして、ピンとジャ ーナルとの overlap の量のみが異なるいくつかの1スロークランク軸について従来と同様な静荷重実験を行い、 overlap がスミ肉の応力集中に与える影響について検討を加えた。

また、クランク軸においてはねじりに対する強度も重要な問題であるので、数本のクランク軸についてねじり 実験を行い、主として腕の寸法がねじり強度におよぼす影響を調査した。

2. クランクピンとジャーナルとの overlap の影響

クランク軸の腕およびその他の寸法が一定であつても、クランクピンとジャーナルとの overlap の量(S)が 異なればスミ肉の応力集中の様子は当然違つてくる。第1報および第2報においては overlap の量は一定として クランク腕の寸法の影響を検討してきたので、本実験では腕の寸法を一定にして overlap の量を種々変えて実験 を行つた。使用したクランク軸の各部の寸法をクランク軸径(d) との比で示すと次の通りである。**

腕の厚さ: t/d=0.45

腕の幅: b/d=2.04

スミ肉半径: R/d=0.097

クランク支持距離: L/d=2.9

ひずみ測定には従来と同様、標点距離 9mm の抵抗線ひずみ計を使用した。

原稿受付 昭和 34 年 1 月 10 日

* 日本海事協会技術研究所

臣*

:302

造船協会論文集 第105号



第1報,第2報と同様,クランクピンス ミ肉部の応力とピン中央部の応力との比 ▶ を応力集中係数と定義し、曲げ荷重試験と 腕開閉試験における k と overlap の量 S (S=d-r, r は クランク半径) との関係を求めると第1図に示すようになる。この場 合Sが正であるということはピンとジャー ナルとが重なつていることであり、負であ るということは離れている場合のことであ る。第1図によれば、曲げ荷重試験の場合 も腕開閉試験の場合も overlap の量 S/d が0の附近で応力集中係数 k は最大とな り, S/d が正負いずれにしてもこれより大 きくなるにしたがつて応力集中係数は小さ くなる。これは S/d > 0 の場合には、 overlap の量が大きくなるにつれてピンから ジャーナルえの応力の流れの曲がりが少な くなるため応力の集中が緩かになるからと 考えられ、一方、S/d<0 の場合にはクラ ンク腕の弾性が増大するからスミ肉部の応 力集中が緩和されるためと考えられる。

曲げ荷重試験と腕開閉試験とでは曲線の 形状が若干異なる結果を得ているが,荷重 方法の違いによるもので, k が最大となる 位置もややずれている。

なお,第1図と同様な実験結果はG. Stahl 氏によつても報告されている⁽⁸⁾。

3. ね じ り 実 験

3.1 実験装置及び方法

実験に使用したクランク軸は曲げ試験に用いたと同様な1スローー体型のもの5種類で、第1表にその寸法を示す。すなわち、No.5-T クランクの他はすべてクランクピン直径は 155 mm で、No.1-T と No.2-T クランクはクランク腕の幅のみが異なり、No.2-T, No.3-T および No.4-T クランクは腕の厚さのみが異なる。

負荷方法は第2図に示すように、クランク軸両端に長さ 21の腕をクランク腕に対して直角方法に水平にとり つけ、その一端 B,B'を支え、他端 A,A' に loading bar LL'を介して W/2 なる荷重を加えることにより クランク軸にねじりモーメント $M_t = W \cdot I$ を与えた。このようにすればクランク軸には純粋なねじりモーメン トを与えることができる。第3図の写真は実験の状況を示し、荷重の大きさはループダイナモメーターで読むよ うにした。

上記のようにしてクランク軸にねじりモー メントを加えると腕には曲げモーメントが発 生し、応力状態は非常に複雑になり主応力方 向を予測することが困難であるので、3方向 のひずみを実測してそれから主応力の大きさ および方向を算出した。使用したひずみ計は 、電気抵抗線ひずみ計(3軸格子型、標点距離 19mm、抵抗120 オーム)である。

舟」友 供訊軸の引は	第1	し表	供試	、軸の	寸法
------------	----	----	----	-----	----

クランク推制	ビン連任 d (mm)	Zp'(mm)	<u>スミ肉半催</u> R(mm)	胞の厚こ † (mm)	純 の市 b (mm)	t/d	b/d	Zw'(mm)
NO.I - T	155	0.7310	20,15	86	317	0.56	204	1.44Ö
NO.2-T	155	0.731	20,15	86	206	0.56	133	0608
NQ.3-T	155	0731	15,10	78	206	0.50	1.33	0.552
NO.4-T	155	0.731	10	70	206	Q45	1.33	0.495
NQ5-T	190	1.347	15	86	387	0.45	204	2.147

世 Zp'= 売替 Zw'= 時 r = 190 mm (クランク半任)

一体型クランク軸の強度に関する研究



第2図 ねじり負荷方法

3·2 実験結果

応力測定はクランクピンおよびジャーナルのスミ肉部ならびに平行 部およびクランク腕側面について行つた。スミ肉部についてはクラン ク軸中心面上の点(第15図において $\theta=0^\circ$ の点)と、軸心を含みそ れと 45°をなす平面上の点($\theta=\pm45^\circ$)について測定を行つた。それ は後述のごとく、スミ肉部においては最大せん断応力がこの位置の附 近で最大となるからである。なお、No.5-T クランクのスミ肉部につ いてのみ詳細な測定を行い、応力分布状態を検討した。



第3図

第4図ないし第 11 図は各クランク軸のクランクピンおよびジャーナルスミ肉部における主応力の大きさおよ びその方向の実測結果を示したもので、いずれもクランクピンが上死点にある場合の位置を示す。また、クラン



第4図 スミ肉部応力分布 (No.1-T クランク, R=20)



第5図 スミ肉部応力分布 (No.1-T クランク、R=15)

303





第8図 スミ肉部応力分布 (No.3-T クランク, R=15)

クピンおよびジャーナル平行部の実測値を第2表にまとめて示した。丸軸がねじりモーメントのみを受ける場合 最大および最小主応力は軸方向と 45°をなす方向にあり、その大きさの絶対値は等しく τ_n=16 M_t/πd³ で与え

NII-Electronic Library Service

一体型クラクン軸の強度に関する研究



第 10 図 スミ肉部応力分布 (No.4-T クランク, R=10)



第 11 図 スミ肉部応力分布 (No.5-T クランク, R=15)

られる。しかるに、クランク軸の場合には軸両端に加えられたねじりモーメントはそのままクランク腕の曲げモ ーメントとして作用するので、クランクピンおよびジャーナルのスミ肉部にはねじりと曲げが重なり合つた状態 で作用する。このため2つの主応力の絶対値は等しくなく、その方向も軸方向に対して 45°とはならない。この

305

306

造船協会論文集 第105号

第2表 クランク軸平行部の応力

クランク 🏎		۲ • .	ソエイ	nj	ピンド側			ジャーナル		
騺 別	(tan-m)	б,	б2	α	ر ک	62	α	бı	<u>б</u> 2	α
NO.I-T	2.4	3.39	-3.01	45°	324	-3.39	45°	3.40	-3.18	45•
NO.2-T	2.4	3.30	-3.10	44•	3.20	-353	45°	3.36	-3.27	45°
NO.3-T	24	3.01	-301	45°	3.21	-3.44	46°	3.21	-3.20	44•
NO.4-T	2.4	3.37	-296	42•	3.08	-3.35	46°	3.36	-321	45 •
NO.5-T	3.6	2.66	-278	46 °	2.83	-292	45°	2.78	-2.78	45°
NO.5-T	3.6 大主応力	2.66 (ht/mm²	<u>–278</u>	46 ⁰ ▶小主廊	2.83	(292 (m ²) 0	45° (: クラング	2.78 補助向と	-2.78 6i 2 0 5	4 す角

傾向は軸径に対してクランク腕の寸 法が小さいものほどいちじるしい。 しかしながら、クランクピンおよび ジャーナル平行部においては第2表 に示すように純粋なねじりに近い状 態が現出していることがわかる。

最大および最小主応力を σ_1, σ_2 とす れば最大せん断応力は $\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_1)$

ーσ2) で与えられるが、スミ肉部において τ_{max} が最大となる位置はクランク軸中心面上ではない。一例として、 No.5-T クランクのピンスミ肉部の最大せん断応力の分布を示すと第 12 図のようになる。すなわち、応力測定 点とクランク軸中心面とのなす角を θ とすれば、 θ が ±50°の附近において τ_{max} は最大となる。そこで曲げ 荷重試験の場合と同様、クランクピンスミ肉部の最大せん断応力 τ_{max} と公称最大せん断応力(公称応力と実測 応力はほとんど一致しているから、ここでは公称応力 τ_n をとる)との比をねじりにおけるせん断応力集中係数 k_t と呼ぶことにし、 $\theta = \pm 45^\circ$ の位置で τ_{max} が最大となると仮定すれば、

$$k_t = \frac{\tau_{\max}}{\tau_n} (\theta = \pm 45^\circ$$
 において)

と定義することができる。また,従来の習 慣としてピン下側のスミ肉部の値を用いて

 $k_{i'} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{R}} (\theta = 0^{\circ}) において)$

と置き, k: と k: の実測値を第3表に示 した。

せん断応力集中係数も曲げ試験の場合と 同様クランク腕の寸法およびスミ肉半径の 函数とみることができるが、第3表からわ かるようにその大きさは曲げ荷重の場合に 比してかなり小さく、標準寸法よりも極端 に腕の寸法を小さくした No. 4-T クランク の場合もせいぜいその大きさは1.7 で、曲

クランク R			公務	ピッ	スミー	肉 部	応力集中係数		
	Mt	Tn	(max (Kg/mm [#])			kť kt		t	
1 1	(mm)	(10n-m)	(Kg/mm#)	θ = 0 °	0 ≖45°	0 ₌-45°	θ = 0°	0 =45°	0= -45
NÓI-T	20	24	328	3.41	3.76	3.82	1.04	1.15	1.16
	15	£_, -7	0.20	3.92	4.24	4.19	1.19	1.29	1.28
NO2-T	20	24	328	3.67	4.13	4.20	1.12	1.26	1.28
	15	67	0.20	4.03	4.68	4.78	1.23	1.43	1.45
N03-T	15	24	328	3.93	4.61	4.56	1.20	1.41	1.39
	10	6	5.20	4.23	5.14	5.38	1.29	1.56	1.64
NQ4-T	10	2.4	3.28	4.25		5.70	1.30	_	1.74
NO5-T	15	3:6	2.67	3.63	3.98	4.06	1.36	1.49	1.52

第3表 最大せん断応力及び応力集中係数

[$\hat{s}\hat{z}$] Tmax \hat{x} 24/1 \hat{u} , Tn = 16Mt/ π d* Rt or Rt' = Tmax/Tn



第 12 図 クランクピンスミ肉部の最大せん断応力分布 (No.5-T クランク, M:=3.6 ton-m)

一体型クランク軸の強度に関する研究

げ荷重の場合よりもはるかに小さい。このことはクランク軸の折損事故の大部分がスミ肉部から曲げによつて起るという経験的事実と一致する。なお、ひずみ測定には標点距離 9 mm のゲージを用いたので、実際には応力 集中係数の値は第3表の値よりも若干大きくなると思われるが、曲げ試験の結果から推してその増加割合はせい ぜい 10% 程度と予想される。

次に、せん断応力集中係数 ki におよぼすクランク腕の寸法の影響を検討してみよう。まず腕の幅(b) に関し ては、b の 35% の減少に対して ki は約 10% 増加する。これは曲げ荷重に対する応力集中係数の増加割合よ りもやや少ない。(曲げの場合、同じ幅の減少率に対して k の増加は約 15% である。第2報参照)次に、幅を 一定にして腕の厚さ(t) を減じた場合の ki の変化はごくわずかで、通常用いられるクランク腕寸法の範囲内 においては ki の値は一定とみてよい。第2報で述べたように、曲げ応力集中係数に与えるクランク腕の寸法の 影響は幅よりも厚さの方が大きく、上述のねじりの場合と異なるが、このことは曲げ荷重とねじり荷重に対する 腕の断面係数がそれぞれ b・t², b²・t に比例することを考えれば当然である。

スミ肉半径がせん断応力集中係数におよぼす影響は曲げ荷重の場合と同様にいちじるしく、 $k_t \propto \left(\frac{1}{R/d}\right)^{6.5}$ 程 度の影響がみられる。なお、この結果を段付き丸軸の場合⁽⁴⁾と比較すると第 13 図のようになる。

以上はクランクピンスミ肉部における応力集中について検討したが、ジャーナルスミ肉部における応力集中係 数についてもピンスミ肉部のそれとほとんど同じで、上に述べたと同様な結果を得た。

つぎに,第 14 図に No. 3-T クランクの腕側面の曲げ応力分布を示す。これによると引張り側と圧縮側とはま つたく対称的に分布し,絶対値の大きさも等しく,腕の中央部附近にて最大となる。各クランクについて腕側面中 央部の実測応力を第4表に示す。腕のピン側(内側)とジャーナル側(外側)とでその大きさが少し異なるのは,腕 の変形によつてわずかではあるがクランク軸方向に曲げモーメントが生ずるためと思われる。これらの平均値を とつてクランク軸垂直面内の曲げ応力と考えると,腕の寸法が小さい場合には単純はりの理論値 σw=6Mt/b²·t



^{3.3} スミ肉部応力分布について

前節で述べたように、クランク軸がねじり荷重を受ける場合、スミ肉部に生ずる最大せん断応力が最大となる のはクランク軸中心面とある角度をなす位置である。これはクランク腕に曲げモーメントが加わるためで、クラ ンクスミ肉部が軸平行部のねじりと腕の曲げの重なり合つた状態にあるためと考えられる。 M

M

308

.ar

造船協会論文集 第105号





そこでスミ肉部の応力分布の傾向を知るために、 簡単のため形状係数を1とし、第15 図に示すよ うにスミ肉部がクランク軸平行部の純粋なねじり と腕の曲げとの単純な組合せの応力状態にあると 仮定して、M_t なるねじりモーメントを加えた場 合の主応力の大きさ、方向および最大せん断応力 を求めると次のようになる。すなわち、第15 図 に示すように記号を定め、角度は左周りを正とし、

$$\sigma_a = -\sigma_b = \tau_n = \frac{16M_t}{\pi d^3}$$
$$\sigma_{w\theta} = \frac{6M_t}{h^2 \cdot t} \cdot \frac{d}{h} \cdot \sin \theta$$

とすれば、ねじりと曲げの組合せによる主応力 $\sigma_{1t}, \sigma_{2t}(\sigma_{1t} > \sigma_{2t})$ ならびに $\sigma_{1t} \ge 0$ ランク軸方向

(OIII) とのなす角 a: はそれぞれ次式で与えられる。

第 15 図

$$\sigma_{1l} = \frac{1}{2} \sigma_{w\theta} + \sqrt{\left(\tau_n + \frac{1}{2} \sigma_{w\theta} \cdot \sin 2\theta\right)^2 + \left(-\frac{1}{2} \sigma_{w\theta} \cdot \cos 2\theta\right)^2}$$
(1)
$$\sigma_{2l} = \frac{1}{2} \sigma_{w\theta} - \sqrt{\left(\tau_n + \frac{1}{2} \sigma_{w\theta} \cdot \sin 2\theta\right)^2 + \left(-\frac{1}{2} \sigma_{w\theta} \cdot \cos 2\theta\right)^2}$$
(2)

$$\alpha_{t} = 45^{\circ} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{-\frac{1}{2} \sigma_{w\theta} \cdot \cos 2\theta}{\tau_{n} + \frac{1}{2} \sigma_{w\theta} \cdot \sin 2\theta} \right)$$
(3)

したがつて、最大せん断応力は

$$\tau_{\max t} = \frac{1}{2} (\sigma_{1t} - \sigma_{2t})$$

$$= \sqrt{\left(\tau_n + \frac{1}{2} \sigma_{w\theta} \cdot \sin 2\theta\right)^2 + \left(-\frac{1}{2} \sigma_{w\theta} \cdot \cos 2\theta\right)^2}$$
(4)

となる。一例として、No.5-T クランクについて上式から計算した主応力ならびに最大せん断応力とひずみ計に

よる実測値とを比較してみると第 16 図のよう になる。最小主応力はすべて負になるが、図で は便宜上絶対値で示した。上記の計算には応力 集中を考慮していないから実測値とは大きさが 異なるが、曲線の傾向はほぼ相似形である。最 大せん断応力が最大となるのは $d_{\text{Tmax}}/d\theta=0$ を満足する位置で計算値ではほぼ $\theta=\pm55^\circ$ の 点で、実測結果と大体一致している。

実験を簡単にするためここでは $\theta = \pm 45^{\circ}$ の 位置の最大せん断応力をもつて応力集中係数 k_i を定義したが,第16 図にみられるように最 大値との誤差はわずかである。

なお、各クランク相互間の比較をなすのに便 宜上 $\theta=0^{\circ}(2)$ (クランクピンスミ肉下側)の位置





の応力集中係数 k_i' を用いたが、 k_i と k_i' との比を p とすれば

$$p = \frac{k_t}{k_t'} = \frac{(\tau_{\max})_{\theta = \pm 45^\circ}}{(\tau_{\max})_{\theta = 0^\circ}}$$

またりの計算値をかとすれば,

The Society of Naval Architects of Japan

一体型クランク軸の強度に関する研究

$p_t = \frac{(\tau_{\max t})_{\theta = \pm 45^{\circ}}}{(\tau_{\max t})_{\theta = 0^{\circ}}}$

ここで **T**maxt は前記(4)式で与えられる。

第5表は $p \ge p_i$ の値の比較を示したもので、No.2-T および No.3-T クラ ンクでは $p \ge p_i$ の値はやや異なるがその他のクランクでは実測値と計算値とが よく一致している。クランク腕の寸法が小さくなる $\ge p$ は大きくなるが、実際 に使用されるクランク軸では $p=1.1\sim1.2$ とみてよい。

以上スミ肉部の応力分布について簡単な理論的考察を加えたが、実際には腕の 変形はより複雑で、正確な解を求めることは難かしい。しかし、大よその傾向を 知ることができたと考える。

クランク種別	R (mm)	ρ	Pt
NO I-T	20	1.11	100
10.1-1	15	1.08	1.09
NO 2- T	20	1.14	1 32
140.2-1	.15	1.17	1.52
NO 3-T	15	1.17	1 35
10.5-1	10	1.24	1.55
NO.4-T	10	1.34	1.39
NO.5-T	15	1.11	1.11

第5麦

4. 結 营

今回の実験では、クランク軸の静的曲げ強度におよぼすピンとジャーナルとの overlap の影響およびクランク 軸の静的ねじり強度について考察を行つたが、得られた結果の主なものは次の通りである。

(1) 腕の寸法が同じクランク軸では、曲げに対する応力集中係数はピンとジャーナルとの overlap の量 (S) が 0 の附近で最大となり、正 (S>0)、負 (S<0) いずれの場合もその量が大となるにしたがつて応力集中係数 は減少する。

(2) クランク軸がねじり荷重を受ける場合には、スミ肉部の最大せん断応力はクランク軸中心面と約 50°の 位置に生ずる。

(3) ねじりによるせん断応力集中係数(k)は曲げ応力集中係数よりもいちじるしく小さい。

(4) クランク腕の寸法の大きさを変えた場合のせん断応力集中係数の変化の割合は曲げ応力集中係数の場合 よりも小さく、曲げの場合とは逆に腕の厚さよりも幅の方が影響が大きい。

(5) スミ肉半径がスミ肉部のせん断応力集中係数におよぼす影響は曲げ応力集中係数とほぼ同じである。

以上第1報以降第3報により、1 スロークランク軸の静的強度(曲げおよびねじり荷重)におよぼす腕の寸法, スミ肉半径,軸受距離等の影響が明らかにされた。特に,本実験の主目的であるクランク腕の寸法の影響につい ては従来概念的にのみ論ぜられていたが,より具体的につかめ得たと考える。

しかし、実際機関では多スロークランク軸であるため、クランク軸に発生する応力状態は上記の影響の他に各 軸受の影響が入り非常に複雑な様相となる。よつて、本実験の結果を用いて、次報に多スロークランク軸の応力 状況を解析したいと考えている。

参考文献·

- (1) 山田,松永:一体型クランク軸の強度に関する研究(主として腕の寸法の影響について),造船協会論 文集第 102 号,昭和 33 年 2 月
- (2) 山田,松永:一体型クランク軸の強度に関する研究(第2報),造船協会論文集第104号,昭和34 年1月
- (3) G. Stahl: Der Einfluß der Form auf die Spannungen in Kurbelwellen, Konstruction 10, (1958) Heft 2
- (4) R.E. Peterson: Stress Concentration Design Factors, 1953

309