(昭和 14 年 4 月 2 日造船協會講演會に於て講演)

推進軸鞘金下に發生する罅裂の原因と其對策

准員 工學士 宇 野 九 十 九*

Abstract.

On the Cause of and a Preventative Measure for the Cracks developed on the Propeller Shaft underneath the Sleeve.

By T. Uno, *Kogakusi, Associate.*

During the repair of propeller shafts of a certain ship, which were docked in Nagasaki Works, Mitubisi Zyukogyo K. K. last year, many fine cracks were found out around the shaft surface coming into contact with the propellerboss in the vicinity of its fore end. As the results of investigation, these cracks were considered to be caused by neither ordinary corrosion nor fatigue, but by rubbing action with metal on metal, and it suggested the similar cracks hidden underneath the after end of the gun-metal sleeve. Therefore the after ends of the sleeve were removed for a few centimeters, and, as was expected, the similar cracks as above were discovered.

In this paper, the author explained that, judging from the peculiarity of these cracks, their cause should be attributed to the combined action of repeated rubbing and stresses, and proposed a method to prevent such cracks developing on the shaft.

I. 緒 言

最近當三菱長崎造船所に於て修理の爲め某船の推進器を取外したるに、推進器ボスと推進軸との接觸面の前端に軸の全圓周に沿ふて微小なる罅裂の多數發生せることを發見した。調査の結果此の疵は單なる疲勞や腐蝕に依るものでなく、後述する如き理由でボスと軸との摩擦に關係するものと推測されたので、若し然りとすれば鞘金下にも發生してゐるのではないかと考へ、鞘金を後端より約 24 mm だけ切削せし所、果して鞘金と軸との接觸面の後端に上述の如き微小罅裂の多數發生せることを認めた。本文は之等の疵の發生狀況より見て、其の原因が繰返し摩擦と繰返し應力との相互作用に在りとなし、其の對策として一防止方法を提案せるものである。

II. 罅 裂 發 生 の 狀 況

第 1 圖は罅裂發生狀況の展開圖、第 2 圖は其の擴大寫眞である。第 1 圖に於て、線にて表はしたる疵は問題の罅裂にして、點狀のものは腐蝕疵である。點狀腐蝕疵は鞘金後端より 16~18 mm の範圍の帶狀部分に在り、恰度鞘金と推進器ボス前端との間に在る幅約 20 mm のゴム環の下に相當し、ゴ

* 三菱重工業株式會社社長崎造船所技師、材料實驗場

第 1 圖 推進軸腐蝕及び罅裂頭出状態展開図

(a)

D×3

(b)

第 2 圖 點狀腐蝕疵及び線状罅裂 (研磨後エッチングせるもの)

ム環の外に發生してゐないことから見てゴム環と推進軸との間に海水が浸入した爲の腐蝕疵であると察せられる。線狀罅裂はボス前端より 2~6 mm 内側に在り、第 2 圖に見る如く點狀腐蝕疵とは其の位置を異にし、最長 14 mm 最深 3~4 mm に及び、圓周方向に相平行して散在せるものが多い。尙第 3 圖に示される如く此の罅裂がキー溝又はキーの下に延びずに、却てキーを避けて直角に曲れることは注意すべき點である。次に鞘金を後端より 24 mm だけ切削せし跡に發見された線狀罅裂は、鞘

(a) 全、體、面

(b) 擴大寫眞 A 部 (D×3)

第 3 圖 キー溝附近の罅裂

金後端より約 2~4 mm の帶狀部分に、ボス前端の穴れと全く同様の形狀を呈して現はれてゐる。

上記調査の後、今一船に於ても殆んど同様の罅裂を發生せることを知つた。兩船共就航以來約 8~9 年になるものにして、其の推進軸は炭素鋼、推進器は N.M. ブロンズ、鞘金は砲金を以て作られたものである。

III. 罅裂發生の原因

さて斯くの如き線狀罅裂は一見腐蝕疲勞に依るものと如き外觀を呈するのであるが、決して單なる腐蝕疲勞に基づくものでないことは之等の罅裂が腐蝕の最も起り易いゴム環下に生ぜず、推進器ボス及び鞘金と推進軸との接觸面に於て端より數 mm 内寄りの箇所にてのみ現はれてゐること、並びに前述の如くキー溝及キーの下に延びずキーを距る數 mm の所に於て、之を避けて直角に曲れること等より見て明瞭である。而して線狀罅裂が接觸面端に近き所にのみ現はれる理由に就いて考へるに、此の部は捻り力が推進器より軸に又は軸より鞘金に傳はる爲に接觸面に於ける剪應力が著しく高まる箇所に相當し、鞘金側に於ける狀況を略圖示すれば第 4 圖の如くなる。即ち鞘金後端に於ける剪應力は急激なる上昇を示し、捻り力の變動に伴ふ該剪應力の變動が接觸圧力に依る摩擦力を凌駕すれ

ば、茲に繰返し相對り運動起ると考へられる。

Peterson,¹⁾ Kühnel,²⁾ 竝に永島菊三郎氏³⁾等⁴⁾は焼き嵌め又は力嵌めした機械部分を有する回轉軸の繰返し曲げ疲勞試験を行ひ、その疲勞限度が回轉軸のみの場合の約 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ に低下することを認め、その原因を接觸面端に於ける應力集中及び該部に生じた繰返し相對りに依る腐蝕が疲勞を促進した爲であるとなし、斯かる腐蝕を Peterson 等は rubbing corrosion と呼んでゐる。上述の場合と本推進軸の

場合とを比較考察するに、本推進軸に於ては捻り力の變動に伴ふ剪應力の繰返し範圍の疲勞に對する安全係数は 7~8 にして、上述の回轉軸の場合に比して應力遙かに低く、接觸面端に於ける應力の集中を考慮するも到底應力集中のみに依つて疲勞破損を生ずるものとは考へられない。又腐蝕に依つて疲勞が促進されたるものとするも罅裂が腐蝕の最も甚だしいゴム環下に發生せず腐蝕度の遙かに少い鞘金下及び推進器ボス下に現出したことより見て、疲勞を促進せるものは腐蝕よりも寧ろ繰返し相對り其のものであると察せられる。即ち Peterson 其の他の諸氏に依つて行はれた實驗に於ては接觸面端に於ける應力集中と腐蝕に依る疲勞促進とが主であつて、rubbing は寧ろ腐蝕を促進するもので疲勞に對しては間接的作用をなすものと見られぬことはないが、本推進軸の場合に於ては却つて rubbing が疲勞促進の有力原因なる如く察せられる。斯くの如き意味に於て本推進軸に現はれた罅裂發

第 4 圖 鞘金と推進軸との接觸面に於ける剪應力の分佈

第 5 圖 キイの構造

するものと察せられる。

從來鐵道車輛の車軸と車輪との力嵌め部に於て轂の端より稍、内寄りの箇所で車軸の折損する實例^{2) 3)}は屢々見る所にして、その原因の一は勿論 rubbing fatigue に歸すべきものであるが、推進軸に於ける此の種の實例は今日迄知られてゐない様である。思ふに推進軸に於ける斯くの如き原因に依る罅裂の發生は必ずしも本船のみに限られたことではなく、從來の多くの船舶に於ても殆ど同様な現象が起つてゐる筈であるが、これ等は恐らく普通の腐蝕又は腐蝕疲勞と見做されてゐたものであらう。推進器ボス又は鞘金と推進軸と接觸する隅角部に腐蝕が起ると云ふことは殆ど常識的なことであるか。

生の原因は rubbing fatigue とも稱すべきものであらう。而して問題の罅裂が此の現象に依るものであると考へれば、第 3 圖に示す如くキーの附近に於て線狀疵が直角に曲ることも容易に解釋出来る。即ちキーと推進軸との間には第 5 圖に示す如き若干の隙間が存在する爲、罅裂はキーの下に侵入するに到らず、又キーの極く附近では推進器ボスは局部的に軸方向に關係を繰返してゐる爲、線狀疵も此處で直角に屈曲

ら、詳細なる調査が行はれてゐなかつたものと察せられる。殊に鞘金下の罅裂は鞘金を切削して見ないと發見されないものであるから、實際に起つて居ても氣付かれない場合が多いであらう。而して罅裂が發生せるまゝ之れに氣付かずして繼續使用して行けば、次第に進展して遂に推進軸が折損するに至るや否やの問題に就いては、明答を與ふべき資料を持たないのであるが、今回の調査結果に徴するに罅裂は多數發生せるにも拘らず其の深さは 3~4mm 以上に達するものなきことは此の種の罅裂が必ずしも恐るべき進展性を有するものでないことを示すものであらう。察するに rubbing の影響は微小罅裂を發生するまでの現象であつて、それ以後の罅裂の進展は専ら疲勞に依るものであるから、推進軸の捻り應力が著しく小にして罅裂を進展せしめるに足らない場合は罅裂は或る程度以上には進展せず、その反對に應力が相當大なる場合には次第に進展して遂に推進軸が切斷されるに至るものであらう。例へば H. J. Gough⁵⁾ が推進軸の腐蝕疲勞の實例として擧げてゐるものゝ如きも破面の位置より察して上記現象に依るものかと思はれる。

IV. 對 策

罅裂の發生原因が上述の如くであるとすれば、之を防止する唯一の對策は接觸面間の迂りを除去することであつて、之が爲には接觸面に於ける捻りに依る剪應力の最大値をして焼き嵌め又は力嵌めの接觸圧力に依る摩擦力よりも小ならしめる事を必要とする。然るに焼き嵌め又は力嵌めの圧力を高めることは材質又は寸法の變更を必要とし、實際上困難なる場合が多いから、出來得れば簡單なる方法に依つて接觸面に於ける剪應力の集中を輕減することが最も望ましい。以下鞘金側に就いて其の具體的方法を説明しよう。

さて第 4 圖に示す如く鞘金を單に其の儘推進軸に焼き嵌めした場合には鞘金と推進軸との接觸面の後端即ち B 點は丁度切缺きの底の如き位置となり、若し全然迂りが起らぬものとすれば理論上剪應力は無限大となる筈である。これに反し第 6 圖に示す如く推進軸に段を設ければ接觸面に於ける剪應力の集中は著しく緩和されることは想像に難くない。尙又同圖に示す如く鞘金に適當なる溝を作れば B 點附近に於ける剪應力の集中を緩和するに、一層有效なることは同圖の應力曲線の傾向に依つても容易に推察出来る。又第 6 圖の各型に就き接觸面上の剪應力の分布を求めれば第 7 圖の如くなる。

第 6 圖各型の應力曲線竝に應力分布は共に後述する如き假定の下に數値計算に依つて求めたもので、此の方法に依れば綿密に計算さへすれば任意の形狀に就き望み通りの精度を得ることが出来るが、甚だ煩雜なる手数を要するのみならず、實際の設計に際しては何回も計算を試みなければ適當なる寸法を決定し難い。

依つて第二の計算方法として第 8 圖の如き簡單なる形狀に就き次の如き計算を試みる。即ち今眞の鞘金の厚さに對して、鞘金材と推進軸材とを同一と見做した時の鞘金の等値厚さを h_1 とし、此 h_1 と推進軸の段の高さ h_2 との比と共に同圖 E 點に生ずる剪應力が如何に變るかを求めたるに次式の

(I)

(II)

(III)

(IV)

第 6 圖 應 力 曲 線
(鋼金と軸との弾性係数の比=1:2)

第 6 圖 応力曲線

(鋼金と軸との弾性係数の比=1:2)

表 8 番

表 9 番 鞘金后端と推軸との接觸處に於ける応力集中係数

如くなる。

$$\frac{\tau_{rE}}{\tau_0} = \sqrt{\frac{1-t}{1+t}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\sqrt{1-t^2} + \cos^{-1} t}{\pi - (\sqrt{1-t^2} + \cos^{-1} t)} \dots\dots\dots (2)$$

但し $h_1 = \left(\frac{\text{鞘金の弾性係数}}{\text{推進軸の弾性係数}} \right) \times h$

τ_{rE} = 接觸面端 E 點の剪應力

τ_0 = 鞘金端より充分隔りたる點の最大剪應力

にして、 t は $-1 < t < 1$ なる媒介變數である。

之を圖示すれば第9圖の如くなる。圖に於て點 I, II, III, IV は第7圖より得られた鞘金接觸面端の剪應力集中係數即ち τ_r/τ_0 の最大値を各々の場合に相當する h_1/h_2 に対してプロットしたものである。之等の點と曲線とを比較するに大體に於て良く一致してゐる。元來推進軸の段に丸みを附すれば E 點の剪應力は高まり、鞘金に溝を設ければ減少する筈であつて、上述の如く良く一致した結果が得られたのは上記2つの影響が相殺した爲であると考へられる。何れにせよ此の結果より判斷すれば、煩雜なる第一計算法を行はずして、直ちに第9圖曲線より E 點の剪應力の大體の値を知ることが出来る。

次に鞘金の厚さ h に就いて考へるに、 h が大なる程焼き嵌め圧力に依る摩擦力が大となるが、 h_2 が一定ならば第9圖より明らかなる如く E 點の剪應力も h_1 即ち h と共に増加する故、 h の値を如何に選ぶべきかに就いて考へるに、鞘金の焼き嵌めの結果生ずる摩擦力 f は

$$f = \mu p \dots\dots\dots (3)$$

但し μ = 摩擦係數 p = 接觸圧力

にして鞘金の厚さが軸徑に比して充分小なるときは、焼き嵌めに依りて鞘金に生ずる圓周方向の應力 σ_t は近似的に

$$\sigma_t \cong \frac{R}{h} p \dots\dots\dots (4)$$

但し R = 鞘金の平均半徑

(3)、(4)兩式より

$$f = \frac{\mu \sigma_t h}{R} \dots\dots\dots (5)$$

依つて今(1)式で示された τ_{rE} と上式の f との比を求むれば

$$\frac{\tau_{rE}}{f} = \frac{\tau_0 R}{\mu \sigma_t h} \sqrt{\frac{1-t}{1+t}} \dots\dots\dots (6)$$

上式中 μ , σ_t は共に材質に依つて定まる定數であり、 τ_0 , R は h が變化すれば多少増減するが其の

程度は小なりと考へられるから矢張り之を定數と考へる。又 t は(2)式に示す如く h_1/h_2 の函數なる故結局

$$\frac{\tau_{rE}}{f} \propto F\left(\frac{h_1}{h_2}\right), \quad F\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \frac{h_2}{h_1} \sqrt{\frac{1-t}{1+t}}$$

となる。依つて $F\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$ を計算すれば第 10 圖の如くなり、 h_1/h_2 が増すに従つて F は減少する故、

第 10 圖

接觸面に於て迂りを起させない爲には出来るだけ h_1 即ち h を大に取る方が望ましい。故に設計の順序としては先づ他の事情の許す限り h を大なる値に決定し、然る後に第 9 圖の曲線を用ひて τ_{rE} を f より小ならしむる様 h_2 を選ぶべきである。

V. 附 録

(a) 第 6 圖に示す應力曲線の求め方 (第一の計算方法)

鞘金と推進軸との接觸面に於て全然迂りが起らぬものと假定すれば、應力分布は單に可變斷面の圓柱の捻りの問題に歸着する。第 8 圖に示す如く中心軸を含む斷面に作用する z 方向及び r 方向の剪應力を夫々 τ_z , τ_r とすれば、鞘金又は推進軸の同一材質内に於ては之等は次式に依つて與へられる。

$$\tau_z = \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \tau_r = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (7)$$

$$\text{但し} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{3}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0 \quad (8)$$

さて鞘金の厚さは推進軸の半徑に比して非常に薄いので、接觸面に近い部分の應力のみを取扱ふ場合は上式を次の如く書いて差支へない。

$$\tau_z = c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2}, \quad \tau_r = -c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \quad (7')$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0 \dots\dots\dots (8')$$

さて式(8')に示されたる Laplace の方程式は與へられたる境界條件の下に之を數值的に解くことが可能であることは、既に砂谷、根來兩氏⁶⁾に依つて、解明せられた所である。依つて此の方法に従つて問題を解くのに次の如く境界條件を定めた。即第 11 圖に於て境界 $ABCDGH$ を取り、 A 及 D を B より充分遠く、 HG を $ABCD$ に充分近からしめる。然る時は

第 11 圖

(1) ψ は $ABCD$ 上に於て一定。

(2) HG は $ABCD$ に充分近いから近似的に AH, FG 上に於て ψ は直線の分布と取ると考へてよい。依つて AH, FG 上の $\frac{\partial \psi}{\partial r}$ の値を夫々 A 點及推進軸上の F 點の應力に比例する如く取る。又 DF 上に於ては $\frac{\partial \psi}{\partial r}$ を鞘金上の F 點の應力に比例する如く取る。

(3) EF 上に於ては鞘金側と推進軸側に於て ψ は相等しく、 $\frac{\partial \psi}{\partial r}$ は兩者の彈性係數の比に等しからしめる。

上述の如く境界に於ける ψ の値を定めるときは式(8')より任意の點の ψ の値を數值的に計算することが出来るから、この ψ の値の等しき點の軌跡を求むれば之が即ち應力曲線となる。

(b) 第 8 圖 E 點の剪應力の求め方 (第二の計算方法)

$$\frac{\tau_z}{c^2} = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \frac{\tau_r}{c^2} = \frac{\partial \phi}{\partial r} = -\frac{\partial \psi}{\partial z} \dots\dots\dots (9)$$

$$\zeta = z + ir, \quad w = \phi + i\psi \dots\dots\dots (10)$$

と置いて等角寫像法に依り問題を解くこととする。第 12 圖の ζ 平面の圖形は次の如き Schwarz-Christoffel の變換に依つて t 平面の實軸上に移すことが出来る。

$$\zeta = A \int \frac{\sqrt{t+1}}{\sqrt{t-1}} dt + B = A\sqrt{t^2-1} + A \cosh^{-1} t + B$$

ζ 平面に於て C 點を原點に、 CD を z 軸に取れば

z - 平面 t - 平面 w - 平面

第 12 圖

B 點では $\zeta = -li, \quad t = -1$

C 點では $\zeta = 0, \quad t = 1$

となる故に之より A, B を定むれば

$$A = -\frac{l}{\pi}, \quad B = 0$$

を得る。故に

$$\frac{\zeta}{l} = -\frac{1}{\pi} \{ \sqrt{1-t^2} + \cosh^{-1} t \} \dots\dots\dots (11)$$

次に

$$w = Dt$$

なる關係に依りて t 平面を w 平面に變換すれば D は次の如くして定められる。

$$\frac{dw}{d\zeta} = \frac{dw}{dt} \frac{dt}{d\zeta} = -D \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{t-1}{t+1}}$$

然るに $t \rightarrow \infty$ にては $\frac{dw}{d\zeta} = \frac{\tau_0}{c^2}$ なる故、上式より

$$D = -\frac{l}{\pi} \frac{\tau_0}{c^2}$$

故に

$$\frac{dw}{d\zeta} = \frac{\tau_0}{c^2} \sqrt{\frac{t-1}{t+1}} \dots\dots\dots (12)$$

BC' 上の任意の點 E に於ける剪應力 τ_{rE} は

$$\left[\frac{dw}{d\zeta} \right]_{BC} = i \frac{d\phi}{dr} = i \frac{\tau_{rE}}{c^2}$$

なる故(12)より

$$\frac{\tau_{rE}}{\tau_0} = \sqrt{\frac{1-t}{1+t}}, \quad -1 < t < 1 \dots\dots\dots (1)$$

而して E 點の位置は(11)より次の如くして定められる。

$$-\frac{ih_1}{l} = -\frac{i}{\pi} \{ \sqrt{1-t^2} + \cosh^{-1} t \} \quad \text{at} \quad -1 < t < 1$$

$$\therefore \quad \frac{h_1}{l} = \frac{1}{\pi} \{ \sqrt{1-t^2} + \cosh^{-1} t \}$$

$l = h_1 + h_2$ なる故に之を變形すれば

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\sqrt{1-t^2} + \cosh^{-1} t}{\pi - (\sqrt{1-t^2} + \cosh^{-1} t)}, \quad -1 < t < 1 \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2) 兩式より t を媒介變數として h_1/h_2 に對して τ_{rE}/τ_0 を求めることが出来る。斯くして第 9 圖の曲線が得られる。

(最後に御指導を賜つた三菱長崎造船所鈴木技師、奥田技師に深く感謝する。)

文 献

- 1) Journal of Applied Mechanics, 1935, Vol.2-No. 1, p. A-1.
- 2) Stahl u. Eisen, 40, (1932), S. 965.
- 3) 日本機械學會論文集、昭和 14 年 2 月、80 頁。
- 4) Journal of Applied Mechanics, 1936. Vol.3-No.3, p. A-91, V. D. I., 77, 31, (5 Aug. 1933), S. 851.
- 5) Autumn Lecture, Jour. Inst. Met., Vol.127, p. 17 (1932).
- 6) 東北帝大工學報告、第 12 卷、第 3 號、339 頁。

討 論

○座長(元良信太郎君) 只今の御講演に對し御質問又は御討論が御座いましたら御述べを願ひます。誰方が同じ様な御経験を御持ちの方は御座いませんか。別段御發言が無い様ですから私から一言

御禮申し上げます。此の講演は全然實際に起きた現象に基き御研究なされ、其の對策に就いて發表なされましたもので、大變興味深く承りました。此の現象が常に shaft に起るものか或はたまたま此の船に起きたものか、はつきり致しませんが、益々其の方面に御研究なされて、其の結果を御報告下されば幸と存じます。此の御講演に對し、皆様と共に茲に拍手を以て御禮申し上げ度いと存じます。
(一同拍手)