XI. 結 論

八幡製鐵所平爐天井用煉瓦として原石の粉碎法、混練の仕方、製型及び焼成を丸窯にした場合とトンネル窯に依る場合これ等の条件を変へた場合珪石煉瓦の品位が如何に変わるかを研究せんがために各種物理試験を施行したり。就中珪石煉瓦として最も重要な熱間の粘りや腰の強さ等の性質に就ては特に意を注ぎ軟化切落試験として實際作業に最も近き試験方法を採用して本研究を遂行せり。次に本研究の結果を條項的に列記せんに：—

(1) 珪石煉瓦の良焼、不良焼と眞比重 珪石煉瓦の品位は焼成の如何に依り良焼、不良焼と云ふ言葉で明瞭に判定區別し得られる。眞比重の點より云へば 2.35 以下は良焼で 2.35 以上は不良焼である。

(2) 良焼、不良焼煉瓦と使用した窯の關係 本研究に使用した焼成窯は丸窯とトンネル窯で良焼煉瓦は丸窯焼成に依り不良焼煉瓦はトンネル窯焼成品であつた。但し焼成方法の如何に依り兩者の反對となることも考へられること勿論なり。

(3) 珪石煉瓦用原料が同じなれば粉碎方法に依つては珪石煉瓦の品質には大した優劣を生じない。焼成方法が著しき結果を招く。

(4) 珪石煉瓦を 1700° 迄加熱せる際の組織の變化と轉移異常膨脹 良焼煉瓦では基地部の Tridy. から Crist. 組織に變化する時その温度 1500~1600° に於て急激なる轉移膨脹を示さず、且つその Crist. は主に樹枝狀 Crist. 組織に轉移する。即ち良焼煉瓦は 1710° (SK. 32) の熔融する迄急激な異常膨脹性なし。従つて天井に使用した場合龜裂等なくして粘く飴の如く滑かに垂下する結果となる。不良焼煉瓦はこの 1500~1600° の附近に於て基地部の Tridy. 組織から Crist. に變化する際先づ龜裂分散して球狀 Crist. に變化するため(樹枝狀 Crist. にならず)非常に急激にして且つ大なる膨脹を生ず。而して 1710° の耐火度温度迄樹枝狀 Crist. に轉移することなし。不良

焼珪石煉瓦のこの熔融點直前の急激なる膨脹が龜裂折損に依る消耗の原因となりて所謂粘り度なき珪石煉瓦となるものなり。

(5) 珪石煉瓦は腰の強いこと 試験せる珪石煉瓦の耐火度は SK. 32 (1710°) より僅か 10° 低い 1700° に於て一時間加熱保留するも膨脹實驗に於て大した變形を認めず 1710° に於て初めて變形を認めたり。又 5 kg/cm² の加重の下に於ては軟化點測定試験に於ける結果として良焼煉瓦では最盛軟化温度 1620° 内外にして不良焼煉瓦のそれは 1650° 内外なり。不良焼煉瓦の軟化點高く出るは上述の轉移膨脹の存するが爲なり。粘土煉瓦は腰弱く耐火度 SK. 33 (1730°) も普通 1200° 内外にて軟化は始發す。

(6) 軟化切落試験と粘り及び腰の強さ 軟化切落試験の結果から珪石煉瓦の品位判定は實際作業に適應する豫想を與ふるものにしてこの實驗より珪石の粘り度及び腰の強さが判定せらる。即ち丸窯焼成の良焼煉瓦は熱間の粘り大にして腰の強さも一般に大なり。且つ製品に均一性がある。従つて天井に使用した場合飴の如く粘く垂れ下る特質を有す。又不良焼煉瓦は 1500~1600° の間で Tridy. 組織から Crist. に轉移する時急激な轉移膨脹のため龜裂折損の缺點を有し所謂粘り度少なくして消耗早き結果となることが推定せらる。即ち原料は同じでも焼成方法如何に依りこれ等珪石の重要性が支配せられることが證明せられる。

(7) 良焼珪石煉瓦と不良焼珪石煉瓦の侵蝕試験 平爐滓に依る侵蝕試験結果は丸窯の良焼煉瓦は均一に侵蝕され反之不良焼煉瓦は侵蝕度大にして且つ不均一に侵蝕せられる。

(8) 本邦獨特の赤白珪石が何故に優良珪石として尊重せられるかを膨脹測定結果から説明した。此處に本稿を擱くに當り試料の提供と共に深甚なる後援を與へられたる八幡製作所河内技師に對し深く感謝と敬意を表すると同時に研究所に於て終始熱心に研究に従事されたる職員並に技工員各位に感謝の意を致す。

金屬材料の振り耐久限度に及ぼす靜引張應力の影響*

西 原 利 夫** 河 本 實**

Toshio Nishihara and Minoru Kawamoto : The Effect of Static Tension on the Torsional Fatigue Strength of Metals. The strength of metals under combined stress, that is, static tension and repeated torsion, has been investigated. K. Hohenemser and W. Prager experimented on mild steel under this stress condition. From their experiments it can be deduced that static tension has an injurious effect on the fatigue strength for torsion. But, considering the combined stress condition theoretically, authors could suppose that,

* 京都帝國大學工學部機械工學科

** この研究は昭和 16 年 11 月本會第 10 回仙臺大會に發表した。

static tension has no effect on the torsional fatigue strength of materials which was, fatigued by shear stress, but it has an injurious effect on those which was fatigued by direct stress. To ascertain the supposition, we made experiments for several materials, that is, mild, medium and hard steels, a cast iron and a duralumin. Mild steel, medium steel and duralumin are materials which are considered to be fatigued by shear stress and cast iron is, on the contrary, fatigued by direct stress approximately, while hard steel is a neutral material of the both two. From our experiments, the following results has been obtained. As we expected, static tension has no effect on mild and medium steels, a very injurious effect on cast iron, and a somewhat injurious effect on hard steel. For mild and medium steels the torsional fatigue limits are even slightly elevated by static tension when the specimens yield by the combined stress of tension and torsion, though the diameters of specimens reduce by yielding. Failed specimen of each material shows a very interesting fracture according to the magnitude of static tension.

(Received February 12, 1942)

I. 緒 言

繰返振り應力を受ける材料が同時に引張應力を静的に受けて居るとき、その引張應力に依つて振りに耐する疲労強さが如何なる影響を受けるかを求めた。

軟鋼(炭素量 0.1%)の管状試験片を用ひて行はれた従来の実験結果に依れば⁽¹⁾、繰返振り應力と静引張應力とを同時に受けるときの耐久限度は單に繰返振り應力のみが作用する場合の耐久限度と單に静引張應力のみが作用する場合の強さ即ち抗張力とをそれぞれ主半径とする橢圓に依つて表はされて居る。即ち静引張應力が作用しない場合振り耐久限度を τ_w 、抗張力を σ_B とすれば、静引張應力が σ なる場合の振り耐久限度 τ は次の關係に依つて表はされる。

$$\frac{\tau}{\tau_w} + \frac{\sigma}{\sigma_B} = 1 \quad (1)$$

但し静引張應力の大きさがその材料の引張試験の際の降伏點を超過するときは、振り耐久限度はこの橢圓に依つて表はされる値よりも少し高くなるといふのである。即ちこの結果に依れば振り耐久限度は静引張應力により影響を受け低くなることになる。

然るに後に述べる如く静引張應力と繰返振り應力とを組合せた場合の應力状態を考案するに、疲労が繰返剪断應力に依て起るものと假定すれば振り耐久限度は静引張應力に依つて影響を受けず、一方疲労が繰返垂直應力によつて起るものと假定すれば振り耐久限度は静引張應力によつて影響を受け低くなるであらうと推察される。依つて疲労が剪断應力によつて起ると考へられる材料或は垂直應力によつて起ると考へられる材料等數種の材料につき静引張應力と繰返振り應力とを組合せた疲労試験を行つて静引張應力が振り耐久限度に如何なる影響を與へるかを明かにした。

II. 組合應力の考察

先づ静引張應力と繰返振り應力とを組合せた場合の應

(1) K. Hohenemser, W. Prager, Metallwirtsch., 12 (1933), 342.

力状態を考察して、静引張應力が振り耐久限度に如何なる影響を及ぼすかを應力の上から理論的に考察して見る。そこで今疲労を起す原因となる應力が剪断應力なる場合と垂直應力なる場合とに分けて各場合に就き考察する。

(1) 疲労が剪断應力によつて起る場合

剪断應力によつて疲労する場合といふのは粘い材料例へば軟鋼の如きものに大體あてはまるものである。

假りに試験片に繰返振り應力のみが作用する場合を考へると、この場合試験片内に生ずる剪断應力が最大になるのは試験片の軸方向及びこれに直角な方向の二つの断面に於てである。即ち剪断應力が疲労を左右するものとすればこの二つの断面が最も危険な断面である。ところで繰返振り應力と同時に静引張應力が試験片に作用する場合を考へるに、静引張應力が作用しても上記の二つの断面に於ける剪断應力には何等影響を及ぼさないことは明である。従つて試験片の軸方向或はこれに直角な方向に於て疲労が起るものとすれば静引張應力は振り耐久限度に何等影響を及ぼさないであらうと推察される。

然らば上記の二つの方向以外の断面に於て疲労が起るものとすれば静引張應力は振り耐久限度に如何なる影響を及ぼすかを考へて見よう。今試験片にかゝる繰返振り應力を τ_a 、静引張應力を σ_{st} とすれば、試験片の直角断面と α なる傾きを有する断面に作用する剪断應力 τ' は次の式によつて表はされる。

$$\tau' = \frac{1}{2} \sigma_{st} \sin 2\alpha + \tau_a \cos 2\alpha \quad (2)$$

σ_{st} は静的に作用してゐる應力であるから右邊第 1 項は時間的に變化しない値である。これに反し τ_a は正負等大値間に繰返される應力であるから右邊第 2 項は又正負等大値間に繰返される應力である。従つて τ' は上式の第 1 項を平均應力とし第 2 項を振巾應力とする様な繰返應力である。故に τ' の平均應力を τ'_m 、振巾應力を τ'_a とすれば、

$$\tau'_m = \frac{1}{2} \sigma_{st} \sin 2\alpha \quad (3)$$

$$\tau'_a = \tau_a \cos 2\alpha \quad (4)$$

この振巾應力 τ'_a を見るに $\cos 2\alpha$ は勿論常に 1 より小なる値であるから τ_a は常に τ_a より小となる。換言す

れば試験片の軸方向と任意の傾きをなす方向に生ずる剪断應力の應力振巾は試験片の軸方向或はそれと直角な方向に起る剪断應力の振巾應力即ち τ_a より常に小である。(勿論そのとき平均應力が起つてゐるから最大應力は大きな値となる。) 然るに從來行はれた實驗結果によれば、繰返振り試験に於て平均應力を與へたる場合の耐久限度に於ける振り應力振巾は平均應力を與へない場合の耐久限度に於ける振り應力振巾に比し殆んど減少しないといふ結果になつて居る。然るに試験片の軸方向と任意の角 α なる傾きを有する断面に於ては上述の如く振巾應力が τ_a より常に小さくなるのであるから結局その断面は試験片の軸方向或はそれに直角な方向の断面より却つて丈夫なことが解る。故にやはり試験片の軸方向及びそれに直角な方向の断面が最も危険な断面となり、その断面に於ては上述の如く静引張應力によつて何等剪断應力が起らない。結局疲勞が剪断應力によつて起る場合は静引張應力は振り耐久限度に影響を及ぼさないことが推察される。

繰返振り應力と静引張應力とを組合せた場合の試験片内の色々な断面に於ける剪断應力の状態をもう少し詳しく考へて見る。今假りに振り應力振巾 τ_a を一定値に保つたまゝとし静引張應力 σ_{st} を漸次 0 より大きくして行つたときの各断面に於ける平均應力 τ'_m と振巾應力 τ'_a

Fig. 1 The relation of mean and amplitude of shear stress at various section of a specimen, when repeated torsional stress τ_a is constant and static tensile stress σ_{st} varies.

張應力 σ_{st} の如何に拘らず一定なる故圖中水平直線にて表はされる。又静引張應力 σ_{st} が或る一定値なるとき種々の傾き角をなす断面上に於ける平均應力 τ'_m と振巾應力 τ'_a との関係は (3) 及び (4) 式より α を消去すると、

$$\frac{\tau_m'^2}{\left(\frac{\sigma_{st}}{2}\right)^2} + \frac{\tau_a'^2}{\tau_a^2} = 1 \quad (5)$$

となり圖中に橢圓で示した如き關係となる。又最大剪断應力の起る面内に就て考へると平均應力 τ'_m と振巾應力

τ'_a との關係は圖中 τ_{max} として記した如き曲線にて與へられる。この曲線は σ_{st} が一定なるときの關係を表はす橢圓上の切線が横軸と 45° の傾きをなす如き點を過ぎることは勿論である。

假りに疲勞が常に最大剪断應力の生ずる面内にて起るものとし、且つ静引張應力を與へたる場合の耐久限度に於ける剪断應力振巾は常に一定値、即ち静引張應力を與へない場合の振り耐久限度 τ_w に等しいものとして、静引張應力が振り耐久限度に及ぼす影響を求めてみよう。静引張應力 σ_{st} が作用するときの振り耐久限度を τ'_w とす。然らばそのとき任意の角 α なる傾きを有する断面に起る剪断應力振巾を τ'_a とせば、

$$\tau'_a = \tau_w \cos 2\alpha \quad (6)$$

最大剪断應力の生ずるのは

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\sigma_{st}}{2\tau_w} \quad (7)$$

なる断面に於てあるから、その α の値を (6) 式に代入すると、

$$\tau'_a = \frac{2\tau_w^2}{\sqrt{\sigma_{st}^2 + 4\tau_w^2}}$$

上記の假定により τ'_a を τ_w に等しく置き τ'_w を求めると、

$$\tau_w'^2 = \frac{1}{2} \tau_w^2 \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{st}}{\tau_w} \right)^2} \right\} \quad (8)$$

この式より静引張應力 σ_{st} とそのときの振り耐久限度 τ'_w との關係を求め圖示すると Fig. 2 の如くなる。即ち振り耐久限度は静引張應力の爲に圖の如く上昇することになる。

Fig. 2 Torsional Fatigue Limit under Static Tension Calculated from Equation (8)

σ_{st} = static tensile stress
 τ_w = torsional fatigue limit
 τ'_w = torsional fatigue limit under static tension

(2) 疲勞が垂直應力によつて起る場合

垂直應力によつて疲勞する場合といふのは鑄鐵の様な脆い材料に於て大體あてはまるものである。

假りに試験片に繰返振り應力のみが作用する場合を考へると、試験片内に生ずる垂直應力が最大になるのは試験片の軸方向に 45° の傾きをなす断面に於てある。ところで今同時に静引張應力が作用するものとする、この静引張應力のために 45° の傾きをなす断面に垂直應力が起ることは明である。従つてこの場合は剪断應力によつて疲勞する場合と趣が異なる。

前と同様に繰返振り應力を τ_a 、静引張應力を σ_{st} とすれば、試験片の直角断面と α なる傾きを断面に作用する垂

直應力 σ' は次の式によつて表はされる。

$$\sigma' = \frac{1}{2}\sigma_{st}(1 + \cos 2\alpha) + \tau_a \sin 2\alpha \quad (9)$$

σ' は上式の第 1 項を平均應力とし、第 2 項を振り應力とする様な繰返應力である。故に σ' の平均應力を σ'_m 、振り應力を σ'_a とすれば、

$$\sigma'_m = \frac{1}{2}\sigma_{st}(1 + \cos 2\alpha) \quad (10)$$

$$\sigma'_a = \tau_a \sin 2\alpha \quad (11)$$

假りに振り應力振り τ_a を一定値に保つたままとし、 σ_{st} を 0 より漸次大きくして行つたとき、各断面に於ける平均應力 σ'_m と振り應力 σ'_a との値を求めその関係を圖示すると、Fig. 3 の如くなる。即ち例へば α が 45° の断面にては振り應力 σ'_a は静引張應力には無関係に常に τ_a に等しく、平均應力 σ'_m は $\frac{1}{2}\sigma_{st}$ に等しい。 σ_{max} と記

Fig. 3 The relation of mean and amplitude of direct stress at various section of a specimen, when repeated torsional stress τ_a is constant and static tensile stress σ_{st} varies.

した曲線は最大主應力の生ずる面内に於ける関係を表はしたものである。ところが従来の實驗結果により、繰返引張壓縮試験に於て平均應力を與へたる場合の耐久限度は耐久限度線圖に於て、平均應力を與へない場合の耐久限度を表はす點と眞破斷力(引張試験に於て破斷時に於ける荷重を破斷面積にて除したるもの)を表はす點とを結ぶ直線にて與へられることを知る。即ち平均應力を與へると耐久限度に於ける振り應力は減少する。以上のことより静引張應力は振り耐久限度を下げるであらうといふことが推察される。

然らば静引張應力は振り耐久限度を如何程下げるであらうかといふことを考へて見よう。今平均應力が無い場合の引張壓縮耐久限度を σ_w とし、眞破斷力を σ_T とする。疲労が垂直應力によつて起る様な脆性材料では眞破斷力 σ_T と抗張力 σ_B とは大體等しいと見做すことが出来る。

従つて耐久限度線圖は Fig. 4 に示す如くなる。平均應

Fig. 4 Fatigue Limit under Various Stress Range of Brittle Material

σ_B = ultimate tensile strength
 σ_w = fatigue limit at zero mean stress

力 σ_m 及びそのときの耐久限度に於ける振り應力 σ'_w を變數と考へ、耐久限度線圖を表はす直線を方程式で表はせば、

$$\frac{\sigma'_m}{\sigma_B} + \frac{\sigma'_w}{\sigma_w} = 1 \quad (12)$$

そこで σ_w と σ_B との関係を次の如く置く、

$$\sigma_w = k \cdot \sigma_B \quad (13)$$

k は材料に関する常數で引張壓縮疲労試験によつて求められる値である。(13) 式を (12) 式に代入すると、

$$k \cdot \sigma'_m + \sigma'_w = k \cdot \sigma_B \quad (14)$$

前と同様静引張應力 σ_{st} が作用するときの振り耐久限度を τ'_w とすると、そのとき任意の角 α なる傾きを有する断面に起る垂直應力振り σ'_w は (11) 式と同じ関係により

$$\sigma'_w = \tau'_w \sin 2\alpha \quad (15)$$

(10) 及び (15) 式を (14) 式に代入すると、

$$\frac{k}{2} \sigma_{st} (1 + \cos 2\alpha) + \tau'_w \sin 2\alpha = k \sigma_B \quad (16)$$

この式によつて静引張應力 σ_{st} とそのときの振り耐久限度 τ'_w との関係が求められる。今例へば疲労が常に最大主應力の生ずる断面にて起るものと假定して求めて見よう。最大主應力の生ずるのは、

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau'_w}{\sigma_{st}} \quad (17)$$

なる断面に於てあるから、この α の値を (16) 式に代入すると、

$$\frac{k}{2} \sigma_{st} \left(1 + \frac{\sigma_{st}}{\sqrt{\sigma_{st}^2 + 4\tau_w'^2}} \right) + \frac{2\tau_w'^2}{\sqrt{\sigma_{st}^2 + 4\tau_w'^2}} = k \sigma_B$$

これより τ'_w を求めると、

$$\tau_w'^2 = \frac{k}{8} \left\{ (k-2)\sigma_{st}^2 - 4k\sigma_{st}\sigma_B + 4k\sigma_B^2 + \sqrt{(k-2)^2\sigma_{st}^4 - 8(k^2-2k+2)\sigma_{st}^3\sigma_B + 8(3k^2-2k+2)\sigma_{st}^2\sigma_B^2 - 32k^2\sigma_{st}\sigma_B^3 + 16k^2\sigma_B^4} \right\} \quad (18)$$

Fig. 5 Torsional Fatigue Limit under Static Tension Calculated from Equation (18)

σ_{st} = static tensile stress

τ_w = torsional fatigue limit

τ'_w = torsional fatigue limit under static tension

この式より種々の k の値に對して σ_{st} と τ'_w との関係を求め圖示すると Fig. 5 (内側の曲線より $k=1$, $k=1/1.5$, $k=1/2$, $k=1/2.5$, $k=1/3$ の如くなる。即ち振り耐久限度は静引張應力の爲に圖の如く下ることになる。

III. 実験材料

実験に供したる材料は次の5種類である。即ち剪断應力に依つて疲労すると見做される材料の例として軟鋼、中炭素鋼、デュラルミンに就て、垂直應力によつて疲労すると見做される例として鑄鐵に就いて實驗した。又兩者の中間の場合として硬鋼に就いても實驗した。

これらの材料の化學成分及び熱處理を Table 1 に示す。Table 2 にこれら各材料につき靜引張試験をした結果を示す。軟鋼及び中炭素鋼は日本鋼管製のもので、硬鋼は瑞典鋼であつた。デュラルミンは住友伸銅所の寄贈によるものである。鑄鐵は實驗室に於て鑄込んだ鼠鑄鐵で Fig. 6 にその鑄型の寸法及び鑄型より取り出したまゝのものゝ寫眞を示す。

片で F がはずみ車である。偏心裝置によりクランク C に與へられた振動が試験片を通じてはずみ車 F に振動を起させその振巾を測定して試験片に加はる繰返振り應力

Fig. 6

Table 1 Chemical Composition and Heat Treatment of Test Materials.

Materials	Heat Treatment	Chemical Composition in %							
		C	Mn	S	P	Si	Fe	Mg	Cu
Mild Steel	As received	0.10	0.50	0.040	0.033	0.14			
Medium Steel	Annealed from 850 deg. C	0.34	0.48	0.028	0.016	0.24			
Hard Steel	As received	0.72	0.22	0.011	0.22	0.27			
Cast Iron	As cast								
Duralumin	Extruded, quenched		0.46			0.34	0.43	0.46	3.92

Table 2 Mechanical Properties of Test Materials.

Materials	Upper Yield Point kg/mm ²	Lower Yield Point kg/mm ²	Ultimate Strength kg/mm ²	Breaking Stress on Final Area kg/mm ²	Elongation %	Reduction of Area %
Mild Steel	26.5 30.1	22.6 22.7	38.2 38.1	83.5 83.3	44.4 41.6	68.0 67.7
Medium Steel	29.8 29.7	28.7 28.5	53.3 52.9	83.7 78.7	31.5 30.5	45.4 44.8
Hard Steel	35.4 37.0	— —	79.3 78.3	101.3 102.7	19.0 21.0	27.0 27.9
Cast Iron	— —	— —	15.6 (63.2*) 15.5	— —	— —	— —
Duralumin	25.5 25.3	— —	41.3 40.2	61.9 —	25.1 21.0	39.6 —

Two specimens were tested for every material.

The diameter of tensile specimen was 14 mm and gauge length was 50 mm.

For duralumin the yield point was decided as the point of 0.2 per cent permanent set.

* : Ultimate compressive strength.

IV. 試験機及び試験片

実験に使用した試験機は本實驗の爲に特に設計したもので西原式繰返振り試験機に於て試験片に繰返振り應力と同時に引張應力を靜的に加へ得る如く改造したものである。大體の構造を説明すれば Fig. 7 に於て S が試験

の値が解る。靜引張應力は重錘 W による荷重を槓杆 L にて 10 倍に増大して鋼索 R を通じてはずみ車軸の右端 B を引張ることにより試験片に與へられる。B の部分はずみ車の振動と共に極く僅か振動するが鋼索 R のためにその振動は槓杆 L には傳はらない。尙試験片によりクランク軸に與へられる推力は推力軸受 T によつ

て支へられて居る。Fig. 8 に試験機の寫眞を示す。試験機の運轉速度は鋼及び鑄鐵の場合毎分 1020 回轉で、デュラルミンの場合は毎分 860 回轉であつた。

Fig. 7 General Arrangement of Combined Stress (Static Tension and Repeated Torsion) Fatigue Testing Machine.

Fig. 8 Combined Stress Fatigue Testing Machine.

試験片の取付けは單に繰返振り應力のみを受ける場合と異り軸推力をも受けなければならないから Fig. 9 に

Fig. 9 Test Specimen and Section of Chucks.

Fig. 10 Specimens for Combined Stress (Static Tension and Repeated Torsion) Fatigue Test.

試験片の形状及び寸法を Fig. 10 に示す。軟鋼及び硬鋼の試験片は全然同一寸法で直径 7.5mm であるが中

炭素鋼の場合は直径は 8mm で丸味半径も前者に比し小さかつた。鑄鐵及びデュラルミンに於ては各々直径 14 及び 13mm とした。尚鑄鐵の場合のみ平行部分を取り他は總て平行部分のない形の試験片とした。

Fig. 11 Reduction of Diameter of Mild Steel
 σ_{st} = static tensile stress in kg/mm^2
 τ_a = repeated torsional stress in kg/mm^2

V. 實驗結果

Fig. 12 Stress-Endurance Curves for Mild Steel.

實驗は靜引張應力を種々に變へ各々の靜引張應力の下に於て種々の大きさの繰返振り應力振巾を與へて實驗し 10^7 回の繰返數を與へても破壊しない限度を求めたのである。

(1) 軟鋼

軟鋼についての實驗結果を Table 3 に示す。靜引張應力は 0, 5, 10, 15, 20, 25 kg/mm^2 の 6 種類の場合につき實驗した。靜引張應力を與へたる場合は應力が或る程度より大であると試験片の直径が細くなるので實驗の途中時々

試験機を止めて直径の変化をマイクロメーターにて測定した。Fig. 11 に種々の静引張応力 σ_{st} 及び種々の繰返振り応力 τ_a を與へて實驗した場合繰返数が増すに従つて直径が細くなる状態の一例を圖示した。この圖よりも解る如く静引張応力も繰返振り応力も共に非常に大なる二三の場合を除けば直径の減少は常に繰返数の初期に於て急激に起り以後は殆んど認められない。Table 3 には各試験片の最初の直径及び試験開始後細くなつた終局に於ける直径及びその直径の減少の百分率等をも併

せて記した。尙静引張応力及び繰返振り応力は最初の直径に就いて計算した値を一定に保つたのであるから直径の細くなつた場合は實際の応力は最初の応力よりも大きくなつて居る筈である。Table 3 には細くなつた終局に於ける直径について計算した応力の値をも併記した。Fig. 12 に応力-繰返数曲線を示す。圖の白丸は最初の直径について計算した値で黒丸は細くなつた終局に於ける直径について計算した値である。實線は白丸に對して引いたもので點線は黒丸に對して引いたものである。

Table 3 Test Results on Mild Steel.

No.	Diameter of Specimen				Static Tensile Stress		Repeated Torsional Stress		Number of Repetitions, $N \times 10^6$	Estimated Fatigue Limit, τ_w kg/mm ²	Angle of Fracture Plane
	At the Beginning of Test, d mm	After Test Began, d' mm	$d-d'$ mm	$\frac{d-d'}{d} \times 100$ %	At the Beginning of Test, σ_{st} kg/mm ²	After Test Began, σ'_{st} kg/mm ²	At the Beginning of Test, τ_a kg/mm ²	After Test Began, τ'_a kg/mm ²			
TL 35	7.50	7.50	0	0	0	0	17.0	17.0	0.102 B	12.0	90°
TL 1	7.50	7.50	"	"	"	"	16.0	16.0	0.351 B		0°, 90°, 45°
TL 2	7.51	7.51	"	"	"	"	15.0	15.0	0.620 B		90°, 45°
TL 13	7.52	7.52	"	"	"	"	14.0	14.0	1.003 B		0°, 90°, 45°
TL 14	7.55	7.55	"	"	"	"	13.0	13.0	3.088 B		45°
TL 15	7.53	7.53	"	"	"	"	12.5	12.5	4.401 B		45°
TL 16	7.55	7.55	"	"	"	"	12.0	12.0	10.421 U		—
TL 36	7.52	7.50	0.02	0.27	5	5.03	17.0	17.13	0.141 B	12.2	0°
TL 26	7.53	7.51	"	"	"	"	16.0	16.13	0.150 B		"
TL 5	7.52	7.50	"	"	"	"	15.0	15.12	0.749 B		0°, 45°
TL 6	7.54	7.52	"	"	"	"	14.0	14.12	1.286 B		"
TL 7	7.44	7.43	0.01	0.13	"	5.01	13.5	13.55	5.298 B		90°, 45°
TL 12	7.53	7.52	"	"	"	"	13.0	13.05	3.997 B		0°, 45°
TL 17	7.51	7.51	0	0	"	5.00	12.5	12.50	4.574 B		"
TL 8	7.52	7.52	"	"	"	"	"	"	14.493 U		—
TL 18	7.54	7.54	"	"	"	"	12.0	12.00	10.128 U		—
TL 42	7.50	7.43	0.07	0.93	10	10.18	17.0	17.47	0.080 B	12.5 (12.6*)	0°
TL 21	7.54	7.48	0.06	0.80	"	10.15	15.0	15.36	0.226 B		"
TL 24	7.53	7.50	0.03	0.40	"	10.08	14.5	14.68	0.751 B		"
TL 9	7.43	7.40	"	"	"	"	13.5	13.67	2.523 B		0°, 45°
TL 10	7.51	7.49	0.02	0.27	"	10.05	13.0	13.10	5.940 B		"
TL 28	7.49	7.47	"	"	"	"	"	"	4.502 B		—
TL 19	7.53	7.51	"	"	"	"	12.5	12.60	10.355 U		—
TL 27	7.51	7.49	"	"	"	"	"	"	11.063 U		—
TL 37	7.50	7.38	0.12	1.60	15	15.48	15.0	15.72	0.144 B	12.0 (12.1*)	0°
TL 32	7.51	7.41	0.10	1.33	"	15.40	14.0	14.55	0.560 B		"
TL 29	7.53	7.47	0.06	0.80	"	15.24	13.0	13.30	1.462 B		0°, 45°
TL 30	7.53	7.50	0.03	0.40	"	15.11	12.5	12.65	4.444 B		—
TL 20	7.50	7.48	0.02	0.27	"	15.08	12.0	12.10	10.496 U		—
TL 45	7.49	7.30	0.19	2.54	20	21.00	15.5	16.70	0.010 B	12.0 (12.44*)	0°
TL 34	7.52	7.39	0.13	1.73	"	20.70	14.0	14.75	0.361 B		"
TL 33	7.50	7.39	0.11	1.47	"	20.59	13.0	13.57	1.124 B		"
TL 31	7.50	7.40	0.10	1.33	"	20.52	12.5	13.01	5.546 B		"
TL 22	7.50	7.41	0.09	1.20	"	20.49	12.0	12.44	10.327 U		—
TL 43	7.38	7.10	0.28	3.79	25	27.03	14.5	16.30	0.219 B	12.0 (13.07*)	0°
TL 44	7.49	7.22	0.27	3.60	"	26.90	14.0	15.62	0.281 B		"
TL 40	7.49	7.31	0.18	2.40	"	26.25	12.8	13.77	2.052 B		"
TL 41	7.52	7.31	0.21	2.79	"	26.45	12.0	13.07	10.297 U		—

B: Broken specimen

U: Unbroken specimen

*: On reduced diameter

Table 4 Test Results on Medium Steel.

No.	Diameter of Specimen				Static Tensile Stress		Repeated Torsional Stress		Number of Repetitions, $N \cdot 10^6$	Estimated Fatigue Limit, τ_w kg/mm ²
	At the Beginning of Test, d mm	After Test Began, d' mm	$d-d'$ mm	$\frac{d-d'}{d} \times 100$ %	At the Beginning of Test, σ_{st} kg/mm ²	After Test Began, σ'_{st} kg/mm ²	At the Beginning of Test, τ_a kg/mm ²	After Test Began, τ'_a kg/mm ²		
55	7.94	7.94	0	0	0	0	12.5	12.5	5.06 B	12.0
62	7.98	7.98	..	..	..	..	12.0	12.0	10.03 U	
54	7.79	7.79	0	0	5.0	5.0	12.5	12.5	3.08 B	12.0
68	8.04	8.04	..	..	..	..	12.0	12.0	10.17 U	
59	8.01	8.01	0	0	7.5	7.5	12.5	12.5	3.20 B	12.0
53	8.02	8.02	..	..	..	..	12.0	12.0	10.05 U	
61	8.02	8.02	0	0	10.0	10.0	12.5	12.5	4.68 B	12.0
69	8.00	8.00	..	..	..	..	12.0	12.0	10.13 U	
80	8.00	—	—	—	12.5	—	13.0	—	2.12 B	12.5 (12.65*)
63	8.01	7.98	0.03	0.37	..	12.6	12.5	12.65	11.41 U	
77	7.96	7.91	0.05	0.63	15.0	15.2	13.0	13.25	2.42 B	12.5 (12.69*)
64	7.98	7.94	0.04	0.50	..	15.15	12.5	12.69	10.75 U	
86	8.00	—	—	—	17.5	—	13.0	—	3.67 B	12.5 (12.72*)
65	8.01	7.965	0.045	0.56	..	17.7	12.5	12.72	10.32 U	
78	8.00	—	—	—	25.0	—	13.0	—	6.87 B	12.5 (12.83*)
75	7.98	0.913	0.067	0.84	..	25.4	12.5	12.83	10.00 U	
73	7.94	7.83	0.11	1.39	30.0	30.85	12.5	13.03	4.89 B	12.0 (12.41*)
83	8.04	7.95	0.09	1.12	..	30.7	12.0	12.41	10.59 U	

B : Broken specimen U : Unbroken specimen * : On reduced diameter

Table 5 Test Results on Hard Steel.

No.	Diameter of Specimen				Static Tensile Stress		Repeated Torsional Stress		Number of Repetitions, $N \cdot 10^6$	Estimated Fatigue Limit, τ_w kg/mm ²
	At the Beginning of Test, d mm	After Test Began, d' mm	$d-d'$ mm	$\frac{d-d'}{d} \times 100$ %	At the Beginning of Test, σ_{st} kg/mm ²	After Test Began, σ'_{st} kg/mm ²	At the Beginning of Test, τ_a kg/mm ²	After Test Began, τ'_a kg/mm ²		
T 20	7.52	7.52	0	0	0	0	24	24	0.354 B	20
T 34	7.55	7.55	..	..	..	..	23	23	0.404 B	
T 19	7.51	7.51	..	..	..	..	22	22	0.750 B	
T 22	7.53	7.53	..	..	..	..	21	21	1.151 B	
T 37	7.49	7.49	..	..	..	..	20	20	10.983 U	
T 31	7.56	7.53	0.03	0.40	10	10.08	23	23.3	0.266 B	20
T 32	7.57	7.55	0.02	0.26	..	10.05	22	22.2	0.388 B	
T 27	7.55	7.54	0.01	0.13	..	10.03	21	21.1	1.016 B	
T 23	7.54	7.53	..	..	..	..	20	20.1	10.023 U	
T 26	7.52	7.47	0.05	0.66	20	20.3	21	21.4	0.332 B	17
T 24	7.48	7.44	0.04	0.54	..	20.2	20	20.3	0.492 B	
T 25	7.45	7.41	..	..	..	..	19	19.3	2.711 B	
T 36	7.56	7.54	0.02	0.26	..	20.1	18	18.1	5.098 B	
T 39	7.55	7.53	..	..	..	..	17	17.1	10.248 U	
T 33	7.54	7.44	0.10	1.33	35	36.0	21	21.9	0.114 B	16
T 30	7.56	7.47	0.09	1.19	..	35.9	20	20.7	0.460 B	
T 29	7.56	7.50	0.06	0.79	..	35.6	19	19.5	1.148 B	
T 35	7.56	7.49	0.07	0.93	..	35.7	18	18.5	1.270 B	
T 28	7.57	7.51	0.06	0.79	..	35.6	17	17.4	3.005 B	
T 38	7.52	7.47	0.05	0.665	..	35.5	16	16.3	10.114 U	

B : Broken specimen U : Unbroken specimen * : On reduced diameter

(2) 中炭素鋼

実験結果を Table 4 に示す。静引張応力は 0, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 25 及び 30 kg/mm² の 9 種類の場合につき実験した。この場合は静引張応力が 10 kg/mm² 以下のときは試験片の直径の減少は認められなかつた。静引張応力が 12.5 kg/mm² 以上の場合は繰返数の進むに従つて試験片の直径は細くなる。その細くなる状態の一例を Fig. 13 に示した。圖の如く静引張応力の小さいと

Fig. 13 Reduction of Diameter of Mild Steel
 σ_{st} = static tensile stress in kg/mm²
 τ_a = repeated torsional stress in kg/mm²

きは試験開始後極めて短時間内に急激に直径の減少を來し、以後直径の變化は認められない。然るに静引張応力の大きいときは応力繰返数の初期に於て急激に直径の減少を來し以後漸次緩になり一定値に達する。Table 4 には細くなつた終局に於ける直径及びそれより計算した応力の値をも併記した。

(3) 硬鋼

実験結果を Table 5 に示す。静引張応力は 0, 10, 20

Fig. 14 Reduction of Diameter of Mild Steel
 σ_{st} = static tensile stress in kg/mm²
 τ_a = repeated torsional stress in kg/mm²

Fig. 15 (a) Stress-Endurance Curves for Hard Steel, (calculated from the initial diameter).

及び 35 kg/mm² の 4 種類の場合につき実験した。繰返数の進むに従ひ直径の減少する状態を Fig. 14 に示した。この場合は軟鋼及び中炭素鋼の場合とは異り応力の

Fig. 15 (b) Stress-Endurance Curves for Hard Steel, (calculated from the reduced diameter).

大小に拘らず常に直径の減少は試験開始後急激に起り以後直径の減少は全然認められなかつた。Fig. 15 に硬鋼の場合の応力-繰返数曲線を示す。Fig. 15 (a) は最初の直径より計算した応力の値を取つて引いたもので、(b) は試験開始後の直径より計算した応力の値を取つて引いたものである。

(4) 鋳鉄

実験結果を Table 6 に示す。静引張応力は 0, 2.5, 5, 7.5 及び 10 kg/mm² の 5 種類の場合につき実験した。直径の減少は Table 6 中に示した如く静引張応力が 7.5 及び 10 kg/mm² の場合にのみ多少認められたが、その量は直径に比し極く僅であるから減少後の直径について応力の値を計算してもその差は僅少である。Fig. 16 に應

Fig. 16 Stress-Endurance Curves for Cast Iron.

力-繰返数曲線を示す。静引張応力 σ_{st} が 5 kg/mm² 及び 7.5 kg/mm² の場合の応力-繰返数曲線は一致して居る。

(5) チュラルミン

実験結果を Table 7 に示す。静引張応力は 0, 2.5, 5, 7.5, 及び 10 kg/mm² の 5 種類の場合につき実験した。

Table 6 Test Results on Cast Iron.

No.	Static Tensile Stress, σ_{st} kg/mm ²	Repeated Torsional Stress, τ_a kg/mm ²	Number of Repetitions, N 10 ⁶	Estimated Fatigue Limit, τ_w kg/mm ²	Measured Angle between Fracture Plane and Transverse Section of Specimen, θ deg.	Calculated Angle between Direction of Maximum Principal Stress and Transverse Plane θ' deg.	Reduction of Diameter, mm
1	0	7.0	0.591 B	5.7	42	45	
2	"	6.0	3.684 B		45	45	
25	"	5.7	11.820 U		—	—	
3	"	5.5	10.192 U		—	—	
10	2.5	6.0	0.114 B	4.5	32	39	
11	"	5.0	0.508 B		30	38	
12	"	4.8	2.093 B		29	38	
15	"	4.5	10.027 U		—	—	
5	5.0	5.0	0.092 B	3.2	27	32	
6	"	4.0	0.356 B		23	29	
7	"	3.5	3.518 B		13	27	
14	"	3.2	10.903 U		—	—	
8	"	3.0	10.165 U		—	—	
17	7.5	4.0	0.402 B	3.2	4	23	0.05
18	"	3.5	2.856 B		15	22	0.02
27	"	3.2	10.018 U		—	—	0.01
16	"	3.0	12.977 U		—	—	0.01
19	10.0	3.5	0.144 B	2.7	4	18	0.03
20	"	3.0	1.442 B		5	16	0.01
21	"	2.7	10.681 U		—	—	0.01

B : Broken specimen U : Unbroken specimen

Table 7 Test Results on Duralumin.

No.	Static Tensile Stress, σ_{st} kg/mm ²	Repeated Torsional Stress, τ_a kg/mm ²	Number of Repetitions to Fail, N 10 ⁶	Estimated Fatigue Limits, τ_w kg/mm ²			
				10 ⁵	5×10 ⁵	10 ⁶	2×10 ⁶
D25- 1	0	14.0	0.992 B	13.9	11.1	9.9	8.6
D25- 2	"	11.5	0.370 B				
D25- 4	"	9.0	1.668 B				
D25-11	2.5	13.0	0.054 B	12.0	9.5	8.4	7.3
D25-12	"	9.0	0.592 B				
D25-10	"	8.0	1.401 B				
D25- 5	5	11.0	0.084 B	10.4	8.2	7.3	6.4
D25- 6	"	9.0	0.318 B				
D25- 7	"	7.0	1.250 B				
D25-15	"	6.0	1.688 B				
D25-13	7.5	9.0	0.184 B	9.9	7.8	6.9	6.0
D25-20	"	7.5	0.520 B				
D25-14	"	6.0	2.524 B				
D25-18	10	9.0	0.136 B	9.4	7.4	6.5	5.6
D25- 8	"	7.0	0.750 B				
D25- 6	"	6.0	1.072 B				
D25-19	"	5.0	3.323 B				

B : Broken specimen U : Unbroken specimen

この程度の静引張應力では直径の減少は全然認められなかつた。Fig. 17 に應力-繰返數曲線を示す。實はこの實驗は附隨的に行つたもので静引張應力の大きさも又繰返數も充分大きな値ではなかつた。

Fig. 17 Stress-Endurance Curves for Duralumin.

VI. 實驗結果の考察

(1) 軟鋼及び中炭素鋼

軟鋼についての種々の静引張應力の下に於ける應力-繰返數曲線を一まとめにして示すと Fig. 18 (a) 及び (b)

Fig. 18 (a) Stress-Endurance Curves for Mild Steel, (calculated from the initial diameter).

Fig. 18 (b) Stress-Endurance Curves for Mild Steel, (calculated from the reduced diameter).

の如くなる。(a) は最初の直径より計算した應力の値を取つたもの即ち Fig. 12 の實線のみをまとめて示したので、(b) は細くなつた終局に於ける直径より計算した應力の値を取つたもの即ち Fig. 12 の破線のみをまとめて示したものである。Fig. 19 は軟鋼の實驗結果に於て静引張應力が振り耐久限度に及ぼす影響を圖示したものである。これらの圖より静引張應力を與へても振り耐久限

度は決して最初の耐久限度よりは下らないことが解る。寧ろ或る場合は却つて幾分高くなつて居り、殊に試験片の直径が細くなる場合細くなつてからの直径より計算し

Fig. 19 Effect of Static Tensile Stress on Torsional Fatigue Limit of Mild Steel.

静引張應力が 25 kg/mm² のときは約 9% 高くなつて居る。

中炭素鋼に就いての實驗結果を静引張應力及び振り耐久限度をそれぞれ兩軸に取つて圖示したものが Fig. 20 である。この場合静引張應力を與へないときの振り耐久限度は 12 kg/mm² でこれに静引張應力を加へてもそれが 10 kg/mm² 或はそれ以下のときは耐久限度に変化が

Fig. 20 Effect of Static Tensile Stress on Torsional Fatigue Limit of Medium Steel.

ない。然るに静引張應力を 12.5 kg/mm² に上げると試験片は降伏して細くなり同時に耐久限度は少し上昇して 12.5 kg/mm² となる。而して静引張應力を 12.5 kg/mm² まで上げても耐久限度は 12.5 kg/mm² のまゝであつて変化がない。静引張應力を 30 kg/mm² まで上げると耐久限度は少し下つて 12 kg/mm² となる。以上は最初の直径より計算した應力に就いてであるが減少した後の直径より計算した値を取つても軟鋼の場合程大きな相違はなく静引張應力が 30 kg/mm² のとき振り耐久限度は約 3.4% 高くなる。

これら軟鋼及び中炭素鋼は何れも剪断應力によつて疲労すると見做される材料である。従つて静引張應力を與へても振り耐久限度は害されないであらうと想像される。事實以上の實驗結果よりも静引張應力は決して振り耐久限度を下げないことが明かとなつた。のみならず静引張應力が大きくなつてその爲材料が降伏して細くなる様になると却つて耐久限度は幾分上昇する。而して静引張應力が引張試験の際の降伏點附近まで高くなつても

振り耐久限度は静引張應力が作用しない場合の耐久限度より低くはないことが解る。Fig. 19 及び 20 に於て圖中に矢印で示した降伏點といふのは引張試験をしたときの降伏點で Table 2 に示した値である。今の疲労試験の場合実際に試験片の降伏するのは静引張應力と繰返振り應力との組合せによるのであるから矢印で示した降伏點よりも遙かに低い引張應力にて既に降伏して居る。即ち軟鋼のときは静引張應力が 10 kg/mm^2 、中炭素鋼のときは 12.5 kg/mm^2 のとき既に降伏して居るのである。そのことは試験開始後試験片が急に細くなることによつて明かである。

(2) 鑄 鐵

鑄鐵は垂直應力によつて疲労すると見做される材料であるから静引張應力によつて振り耐久限度は低められるのであらうと考へられるものであるが實驗結果よりもその考への正しいことが證明せられた。以下鑄鐵の實驗結果につき考察して見よう。Fig. 21 に静引張應力が振り

Fig. 21 Effect of Static Tensile Stress upon Torsional Fatigue Limit of Cast Iron.

耐久限度に及ぼす影響を圖示した。圖の如く静引張應力が 5 kg/mm^2 までは振り耐久限度は殆んど直線的に減少する。而してその直線は静引張應力が 0 のときの振り耐久限度を表はす點とその二倍に等しく横軸上に取つた點とを結ぶ直線と殆んど一致して居る。従つて静引張應力が 0 のときの振り耐久限度を τ_w とすれば静引張應力 σ_{st} を與へたる場合の振り耐久限度 τ_w は次式にて表はされる。

$$\tau_w = \tau_w - 1/2 \sigma_{st} \quad (19)$$

但し $\sigma_{st} < 5 \text{ kg/mm}^2$

ところが静引張應力を 7.5 kg/mm^2 に上げると振り耐久限度は静引張應力が 5 kg/mm^2 の場合と全く一致して居り更に 10 kg/mm^2 に上げると耐久限度は稍々低くなるが何れも (19) 式より得られる値よりも遙に大である。而して静引張應力が 7.5 及び 10 kg/mm^2 のときは Table 6 に示した如く試験開始と同時に試験片の直径が僅か減少する。従つて鑄鐵の様な材料では降伏點といふものは無い筈であるがやはり炭素鋼の場合の降伏に似た現象が起つて居るのではないかと考へられる。かく考へるならば

静引張應力が 7.5 及び 10 kg/mm^2 のときの耐久限度が (19) 式より得られる値より大きくなるといふことは上述した如く炭素鋼の場合降伏が起り始めると振り耐久限度が少し上昇するといふことと同じ現象ではなからうかと想像される。Fig. 22 にこの鑄鐵を引張試験したときの應

Fig. 22 Result of Static Tension Test of Cast Iron.

力-歪曲線を示す。縦軸には引張應力及び試験片内に生ずる最大剪断應力(引張應力の $1/2$ に等しい)の値を尺度に取つて示した。ところで静引張應力 7.5 kg/mm^2 繰返振り應力 3 kg/mm^2 のとき最大剪断應力は 4.8 kg/mm^2 となりこのとき上述の如く試験片の直径が細くなつたのであるから降伏が起つて居るものと考へ且つ假りに剪断應力の大小のみが降伏を左右するものとすれば、この鑄鐵の引張試験に於ても最大剪断應力 4.8 kg/mm^2 即ち引張應力が 9.6 kg/mm^2 の附近に降伏點に相當した現象が存在するのでは無からうかと考へられる。

鑄鐵の實驗結果と (18) 式より得られる値とを比較するために假りに k の値を 0.8 として (18) 式の表はす關係を圖示すると Fig. 21 に細線で示した如き曲線となり静引張應力が 5 kg/mm^2 以下のときは大體實驗結果と一致して居る。 k の値を 0.8 と取することは鑄鐵に對するものとして不適當な値ではない。

(3) 硬 鋼

前述の如く硬鋼は最大剪断應力説に従ふ材料と最大主應力説に従ふ材料との中間のものと考へられるものである。Fig. 23 に實驗の結果得られた静引張應力と振り耐久限度との關係を圖に示した。圖の如く静引張應力が 0 のときと 10 kg/mm^2 のときとは耐久限度に何等變りがない。然し注意すべきことは Fig. 15 より解る如く兩者の場合の應力-繰返數曲線は一致して居ない。即ち耐久限度には變りはないが耐久限度以上にては静引張應力を受けた爲に破壊までの繰返數は減少して居る。次に静引張應力を 20 kg/mm^2 に上げると耐久限度は相當低く

なり、 35 kg/mm^2 まで上げると更に少し減少する。後者の場合は引張試験の際の降伏点に近い値である。勿論組合応力による降伏は静引張応力が 10 kg/mm^2 のとき既に起つて居た。尚注意すべきことは静引張応力が大となると應力-繰返数曲線の折点即ち

Fig. 23 Effect of Static Tensile Stress upon Torsional Fatigue Limit of Hard Steel.

る點が繰返数の大なる方へ移ることである。今の場合實驗は繰返数が 10^7 までしか行はず従つて應力-繰返数曲線も 10^7 附近で水平となるものと見做したのであるが、これが正しいか否かを知るには更に大なる繰返数を與へた實驗を行ふ必要あるものと認められる。要するに硬鋼の場合の實驗結果は豫想通り静引張應力に依つて振り耐久限度は低くなるが鑄鐵の場合程その影響が大ききくはないことが明かとなつた。Fig. 23 に細線で示した曲線は(1)式によつて與へられる楕圓を描いたもので、これは實驗結果とは全然合はない。

(4) デュラルミン

最後にデュラルミンの實驗結果につき述べる。この場合は應力繰返数は 2×10^6 程度までしか實驗しなかつたので満足し得る結果を得ることは出来なかつたが、假りに繰返数 N が 10^5 , 5×10^5 , 10^6 , 2×10^6 等を限度としたときの疲労強さを求め静引張應力との關係を圖示すると Fig. 24 の如くなる。即ち静引張應力の爲に耐久限度が著しく減少して居る。然るに筆者等がかつて行つた組合曲げ振り疲労試験の結果によれば⁽²⁾、デュラルミンの疲労は大體最大剪断應力説に従ふものと考へられる。従つて實驗結果は最初の豫想と合はないことになる。このことは次の如く説明し得るものと思ふ。即ちデュラルミンの如き材料ではもつと多い繰返数のところまで實驗しなければ眞の疲労を論ずることは出来ない。かくすれば Fig.

Fig. 24 Effect of Static Tensile Stress upon Torsional Fatigue Strength of Duralumin.

料ではもつと多い繰返数のところまで實驗しなければ眞の疲労を論ずることは出来ない。かくすれば Fig.

24 の曲線も繰返数 N が大となるに従ひ漸次水平直線に近づいて来て結局静引張應力によつて耐久限度が影響を受けない様になるのではなからうかと思ふ。事實軟鋼の場合に於ても Fig. 18 を見ても明かなる如く、静引張應力を受けても振り耐久限度が下らないといふのは耐久限度附近の應力のときにこそ言へるのであつて耐久限度より相當高い繰返應力の場合は静引張應力のない場合が最も強く静引張應力を與へると常に弱くなつて居るのである。

VII. 疲労破面に就て

破壊した試験片につき各材料の疲労破面を觀察するに、静引張應力の大小に應じて各特徴ある破面を呈して居た。

(1) 炭素鋼

軟鋼の疲労破面の方向が試験片の軸方向となす角を測定した。その結果を Table 3 に附記した。破面は大體に於て試験片の直角断面の方向、軸方向及びこれらに 45° をなす方向の破面の三つに分けることが出来る。それらを各 0° , 90° 及び 45° として表中に記した。二つ以上を同時に記入したものは一つの試験片にそれらの破面が共に認められたものである。繰返振り應力のみに對して考へれば、 0° 及び 90° の破面は最大剪断應力による破面で 45° の破面は主應力による破面である。Table 3 に示した結果を見て破面に關し結局次のことが言へる。即ち静引張應力が作用しない場合は繰返應力が大なるときは剪断應力によつて破壊し、繰返應力が小なるときは主應力によつて破壊し、又繰返應力がその中間のときは兩者の破面が同時に現はれる。次に静引張應力を $5 \sim 15 \text{ kg/mm}^2$ に上げると繰返應力が大なるときは剪断應力によつて破壊することには變りはないが繰返應力を下げて耐久限度近くにしても 45° の破面のみで破壊した様な試験片は得られなかつた。次に静引張應力を $20 \sim 25 \text{ kg/mm}^2$ に上げると繰返應力の大小に拘らず常に試験片の軸に直角に破壊した。要するに軟鋼の振り疲労破面は繰返應力の低いときのみ 45° の方向に起るのであるが静引張應力を大きくするに従つてそういふ破面は漸次認められなくなる。

次に硬鋼の疲労破面の寫眞を Fig. 25 に示した。この寫眞に見られる如く硬鋼にては静引張應力が無い場合は繰返振り應力が相當高くても常に破面は 45° の方向に起る。然るに静引張應力を漸次大きくするに従つて繰返應力が大なるときは試験片に直角に小なるときは 45° の方向に壊れる様になる。即ち静引張應力の異なる場合の硬鋼の破面は軟鋼の振り疲労破面と良く似た結果となる。このことは應力-繰返数曲線に關する次の事實と考へ合

(2) 西原、河本、本誌、5 (1941)、110.

Fig. 25 Failed Specimens of Hard Steel.

せるとき甚だ興味あることである。即ち一般に軟鋼の疲労試験に於ける應力-繰返数曲線の折点(水平となり始める点)は硬鋼のそれよりも右へ即ち繰返数の大なる方へ寄るものであるが(例へば本実験に於て Fig. 12 と Fig. 15 とを比較しても明かである)硬鋼の場合でも静引張應力を大にすると應力-繰返数曲線の折点は繰返数の大なる方へ寄り即ち軟鋼の場合に似て来るといふことである。

(2) 鑄 鐵

鑄鐵の破壊した試験片につき疲労破面の方向と試験片の直角断面とのなす角 θ を測定した結果を Table 6 に示した。静引張應力のない場合は大體 45° の方向に破壊するが静引張應力を増すに従つて角 θ が漸次小さくなることが解る。これらの方向と理論的に計算した最大主應力の方向とを比較するため最大主應力が試験片の直角断面との爲す角 θ' を計算した。その値をも同表に示した。これらの値を比較するに一般に θ は θ' よりも小であるが静引張應力の余り大きくない範囲に於ては實際の破面は最大主應力の方向と略々一致するといへよう。

Fig. 26 に鑄鐵の破壊した試験片の寫眞を示した。寫眞と對照の爲、Fig. 26 の左下に鑄鐵の疲労試験の結果を示した。黒丸は破壊したもので白丸は破壊しなかつたものである。黒丸の右に書いた數字はその試験片の番號を示す。尙圖中放射方向に引いた線は理論的に計算した最大主應力の方向を示す線であつて、圖の如く静引張應力と繰返振り應力とを兩軸に取つて表はした圖上に於ては角 θ' が一定なる如き點は一つの放射線上に在る。

(3) デュラルミン

Fig. 26 Failed Specimens of Cast Iron.

デュラルミンの疲労破面は静引張應力の如何に拘らず常に試験片の軸に直角の方向に起つて居た。その破壊した試験片の寫眞を Fig. 27 に示した。同圖中破面の切口を示した寫眞に於て白く見えて居る部分が疲労によつて破壊した部分で、レンズ状に黒く見えて居る部分が静引張應力にて破壊した部分である。静引張應力が増すに従つて圖の黒く見える部分の面積が漸次大きくなつて居りこの部分の面積を測定しそのときの静引張應力をこの面積で割つた値を求めると常に略々このデュラルミンの抗張力に等しくなつ

Fig. 27 Failed Specimens of Duralumin.

て居る。これは當然のことであつてデュラルミンの場合に限らず炭素鋼や鑄鐵にても疲労による破面の部分と静的な破面の部分とを判別して同様な計算をするならば全く同様な関係が成立するであらう。唯デュラルミンの場合は上述の如く疲労による破面の部分は試験片の軸に直角に非常に滑かな破面を呈して居り、静的な破面の部分は軸に45°の方向にこれも又滑かな破面を呈して居たので疲労による部分と静的な部分とが特に明瞭に識別せられた。

VIII. 結 論

(1) 静引張應力と繰返振り應力とを組合せた場合の應力状態を考察した結果、剪断應力によつて疲労するが如き材料では静引張應力は振り耐久限度に影響を及ぼさず、垂直應力によつて疲労する如き材料では静引張應力は振り耐久限度に影響を及ぼしこれを低下せしめるであらうと豫想することが出来た。

(2) これを實驗によつて確めるため、剪断應力によつて疲労する例として軟鋼、中炭素鋼及びデュラルミンを取り、又垂直應力によつて疲労する例として鑄鐵を取り、その中間の材料として硬鋼を取つて静引張應力と繰返振り應力とを組合せた疲労試験を行った。その結果は豫想通り剪断應力によつて疲労するものでは静引張應力によつて振り耐久限度は害されず、垂直應

力によつて疲労するものでは害され、又硬鋼の如き兩者の中間のものでは中間の結果即ち鑄鐵ほど著しくはないが幾分害を受けるといふ結果を得た。

(3) 剪断應力によつて疲労する材料にては静引張應力を大きくして繰返振り應力との組合應力のために試験片が降伏する如くなると試験片の直径は細くなるにも拘らず振り耐久限度は下らず或る場合は却つて幾分高くなる。而して静引張應力を引張試験の際の降伏點附近まで加へても振り耐久限度は静引張應力を與へない場合の振り耐久限度より低くはならない。

(4) 静引張應力によつて振り耐久限度が害されない場合でもそのことは耐久限度の値に對してのみ成立することであつて静引張應力を與へた爲一般に破壊までの應力繰返數が増加するとは言へない。

(5) 各材料の破壊試験片は静引張應力の大小に應じ各々特徴ある破面を呈して居た。

第 11 回 大 會 講 演 概 要 (III)

(17) ヒドロナリウムを心材とする合せ板に就て (第 2 報)

古河電氣工業株式會社日光電氣精銅所

工 學 士 松 岡 新

アルミニウム-マグネシウム系合金は耐蝕性合金として知られてゐる。マグネシウム含有量多き MG 7, MG 9 等は強力にして耐蝕性であり且つ熔接も利き又資源的に見ても我國として重要な合金である。しかし本材は周知の如く粒界腐蝕を起し特に焼入後焼戻せる材料の耐蝕性は著しく悪く時期割れの傾向さへも現れる。

著者は第 1 報 (昭和 16 年春期大會) に於てかゝるヒドロナリウム板の缺點は亜鉛 2% を含むアルミニウム合金にて被覆すれば完全に除かれ、著しくその耐蝕性が向上することを報告し且つ合せ板の耐蝕性は表材自體の耐蝕性よりも寧ろ心材は表材との電浴壓着に密接なる関係があることを指摘した。

該實驗は腐蝕液を 3% 食鹽水 + 0.1% 過酸化水素とせる乾濕式であつたが今回は同様の腐蝕方法に依り更に次の二點に就て觀察した結果を報告する。

(イ) 應力腐蝕

(ロ) 表材に添加すべき亜鉛量の影響