

鋼の限界應力に就て

(日本鐵鋼協會 第9回講演大會講演)

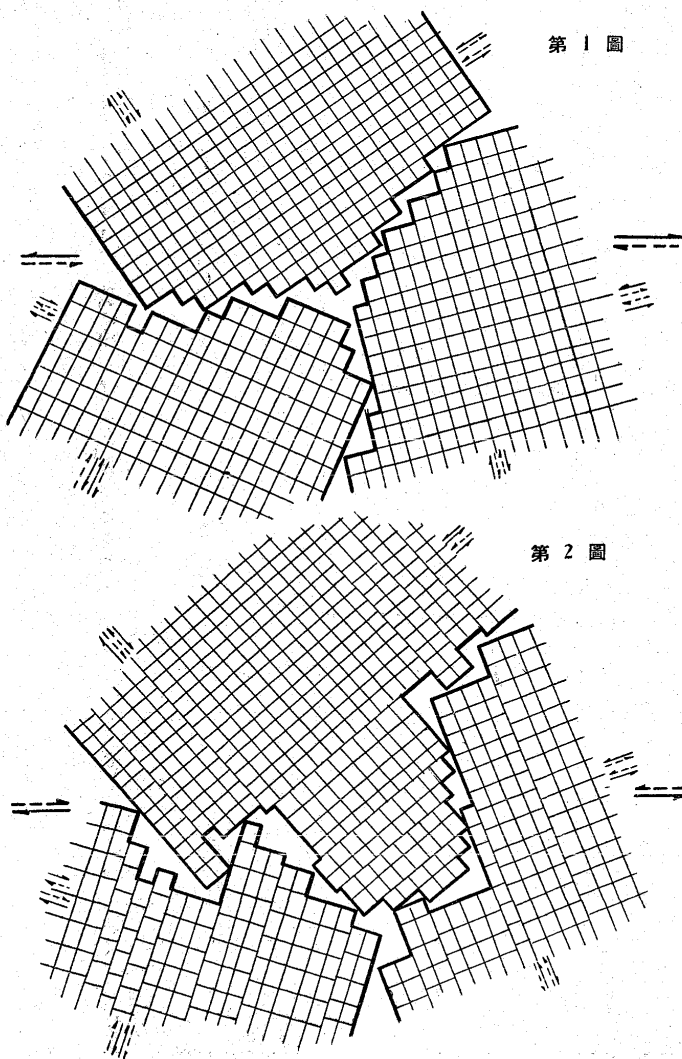
藤井 寛^{*1}

小林 幸一^{*2}

限界應力よりも大なる力の繰返をうけるときは鋼は遂に破壊し且破壊迄に至らぬものでも非常に脆く例ばシャルピー衝撃試験を行つて見ると元の材料より著しく破壊し易い且近來種々の研究家によつて發表せられた報告によると所謂限界應力以下の繰返でも脆くなるのみでなく他の物理的並に化學的性質に於ても元の材料と較べて著しく異つて居る。換言すると限界應力なるものは工業上は或意味を持つかも知れぬが材料の本質上には意味のはいものと考へら

れ自分等の行つた二三の實驗結果は益此考を確めるに至つた。

疲勞機構 鋼の各結晶粒が第1圖の如く立方體の分子の集合であるとし或三結晶粒が同圖の様に遭遇して居るとしたとき矢の様に引張及壓縮が交番に繰返されたとする。此引張及壓縮が限界應力以上の場合は勿論縱令以下であつても Ewing, Humfrey, Gough, Hanson 諸氏の實驗したところによつて知られる通り研磨面に辻面が現はれるのである。若し結晶粒に一の辻が起つたとすると次の引張及壓縮の際には此辻面は最も容易に切り且其結果當てらざる面には其れにかゝる荷重の負擔が増して切る可能性が増加し段々多くの面で切ることになり第2圖の様に各結晶粒の分子排列が變る。最後には最早や新に切る面を残さない状態迄進んで行く可きで且其状態では續て前同様の引張及壓縮が繰返されたとするとき辻程度は前より著しく増大する筈である。第2圖を第1圖と比較すると各結晶粒は相互に克く噛合つて材質の強化が起るが其間の空隙は所々で前より大となり材質上の缺陷を生ずるであらう。而て斯の如き空隙が出来たとすると此部分には他の部分に較べて著しく大なる應力が働くことは公知の事柄であつて此は辻面の増加を助けることは疑ふ餘地のないところである。然し各結晶粒は相互に克く噛合つて居り前より一層多數の點にて相接觸し試料全體としての至は繰返數と共に次第に増加するも或程度以下の應力の下では一定以上に上らぬ譯である Bairstow 氏の實驗に見る様に限界應力以下で繰返すとき繰返數の増加と共に至は僅に増加し其後一定となり又歪應力履歴線の幅は減少して零となるといふ結果に到達することがあり得る。譯である斯くて外力に抵抗して見掛の變形は或程度に止つて進捗せず一見無限に荷重の繰返に耐える様なことになるであらうが各結晶粒内には依然として辻が起つて居つて所々にある空隙は大きく且斯様な空隙の數



* 1-2 大阪工業大學

は増加しながら各粒の接觸點は多くなり組織的には破れが出来るであらう。則ち疲勞の状態とならう。此状態に達することは遲速の差こそあれ所謂疲勞限界の上下を問はず同様であらう。且此状態では分子並に分子相互間には異常なる狀況に措かれるから位置のエネルギーの増加があるものと考へられる。

若し鋼滓、氣泡等が存在するならば其處には結晶粒間よりも一層大なる空隙が存在する丈破の出来ることは後者よりも一層著しい筈である。鍛造用心金鋼材、軸類等の疲勞破面に鋼滓、夾雜物、氣泡等を核とし其周圍に段々と進行した幾多の破の痕が波紋狀を呈して居るのを見るが之は明に上の事實を證するものである。

之を要するに應力の繰返に依て先づ表面を生じ試料の表面、結晶粒の境界、鋼滓、氣泡等材質の均等でない場所では凸凹が段々甚しくなるとか空隙が益々大きくなつて或程度以上の應力の下では夫が初期破となつて終に決定的破となる譯である。従て破の進路は一般に上述の如き鋼質の缺陷を縫ふて含るべきであるが著者の一人の實驗でも將に其を裏書して居る。(本誌第12年第2號及水曜會誌第5卷3號)

疲勞鋼材の諸性質 疲勞鋼材の元の夫に較べて色々性質が異つて居ることを次の試験に依て確め上述の疲勞機構の適當な考へ方であり且疲勞限界なるものは材料の本質上意味のないものであることを推論して見よう。

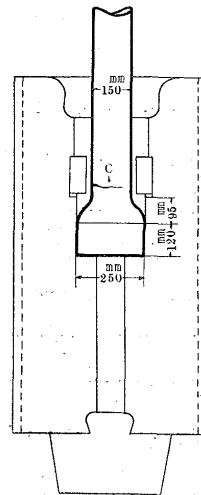
イ) 熱處理の影響 疲勞鋼を熱處理すると其溫度及時間が適當であると元の状態を恢復することは前掲二雜誌に發表した如くであるが之は熱處理に依て活潑な原子運動が誘起せられ異常状態より元の夫に復歸する則ち第2圖の如き状態より第1圖の夫の方に還元する爲めであると考え。

ロ) 引張試験成績 疲勞が起つて結晶粒が第1圖の状態より第2圖の夫に變つて居るものとする引張を行つた時に各結晶粒は辻らんとするに當つて之に嚙合つて居る結晶粒の干涉をうけるが元の材料の場合に較べて多くの點で嚙み合つて居る丈幾分多くの抵抗を感じる理窟である。併し疲勞の際に起つた程度の辻では比較的大なる辻の起る引張試験の際餘り著しい影響はない。就中降伏點は應力の繰返回數の程度によつては寧ろ高くなることすらあり得ることは鋼を降伏點以上に引張つて常溫に一晝夜許り放置し後引張を行つたとき降伏點の上昇する事實より推定せられるところである。實際疲勞した鋼材の引張試験成績を見ると元

の儘のものに較べて殆ど變らないか時には降伏點及破斷力が幾分上昇する例のあることは自分等の經驗したところである。

ハ) 衝擊抗力 疲勞した材料は一般に甚だ脆い之は第2圖の如く空隙が大きくなつて其に依る刻目の影響が著しくな

第3圖



つて居るから破が空隙の部に生じ易いものと分子及分子相互間に歪が出来て居つて位置のエネルギーが多くなつて居る結果であらう。

C 0.15%, Si 0.12%, Mn 0.4%, P 0.034%, S 0.017% なる化學成分の軟鋼で作つた汽槌ピストンロッドが鋼塊鍛造に數ヶ月使用せられた後破壊した例がある。其材料は使用前焼鈍せられて居つたか又標準組織のものであつたか其點明瞭でないが兎に角兩者の内何れかの状態にあつたものであるが破壊した場所は第3圖Cの位置であつ

た其處でCの下方膨らんだ部分から縦横兩方から多數の引張及衝擊試験材を採り半數は其儘残りは第1表の如く熱處理した。先づ引張試料に就き破斷力、降伏點、伸長及斷面收縮を求めたところが熱處理したものでも焼鈍したものは其儘のものと殆ど同等の成績を示した。次に衝擊試料に就て試験した結果は第1表の如く其儘のものゝ抗力は縦横兩方向共甚小さいのに對して熱處理したものゝ夫は遙に大であつた。元來此種ピストンロッドで破れたC部より上の方では決して折れるものでないことは經驗上分つて居り従てC部より下の方が折れるといふことはないし又左様なことは考へられぬ。夫にも係はらず上記の様に脆いといふことは何を物語るであらうか。恐らくCより下方は限界應力

第1表 アイゾッド衝擊試験

熱處理		縱(kgm/cm ²)	横(kgm/cm ²)
1	行はず	0.53	0.53
2		0.62	0.59
3		0.50	0.66
4		0.58	0.82
1	850°加熱爐中冷却	7.86	5.88
2	850°加熱空中冷却	12.20	7.49
3	(850°加熱油中冷却)	13.72	7.73
4	(650°加熱反滓)	13.30	8.32

以下で荷重せられ所謂永久に破れぬ筈のところであらう。之から考へると限界應力又は夫以下の應力繰返には永久に耐えるとしても既に相當多くの繰返を受けた後には衝擊に

依て容易に破れる脆質となつて居るであらうことが考へられる。

次に焼鈍軟鋼試料 ($C\ 0.19\%$, $Si\ 0.08\%$, $Mn\ 0.41\%$, $P\ 0.04\%$, $S\ 0.03\%$, $Cu\ 0.22\%$) の引張又は壓縮をやつた後衝撃試料を作りアイソツド試験機で試験して第2表の結果を得た。

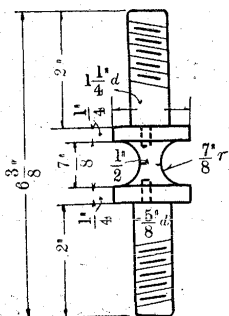
第 2 表

應力 kg/mm^2	衝撃抗力 (kg/mm^2)		備 考
	第 1 次	第 2 次	
0	12.5 ($12^\circ C$)	14.5 ($32.5^\circ C$)	第1次及第2次試験に於て室内温度は夫々 12° 及 32.5° であつた 壓縮降伏點 $24\ kg/mm^2$
壓縮 10	13.2 (")	14.2 (")	
" 20	14.6 (")	14.3 (")	
" 30	3.5 (")	11.4 (")	引張降伏點 $27.3\ kg/mm^2$ 破斷力 $36.9\ kg/mm^2$ 伸長 42.6% ($d\ 16mm$, $l\ 64mm$) 斷面收縮 63%
引張 10	14.2 (")		
" 20	13.6 (")		
" 30	5.8 (")		

則ち降伏點に達する迄は衝撃抗力は殆ど變化をうけぬが此點を超えると抗力は甚しく減少する。併し其割合は疲勞材の如く著しくない。其理由は降伏點を超えた場合では Lunder's lines に見る如く歪をうけた部分は左様でない部分で取圍まれて居る故其影響は前者に見る如く均等に組織的變化を起した場合に及ばぬのであらう。

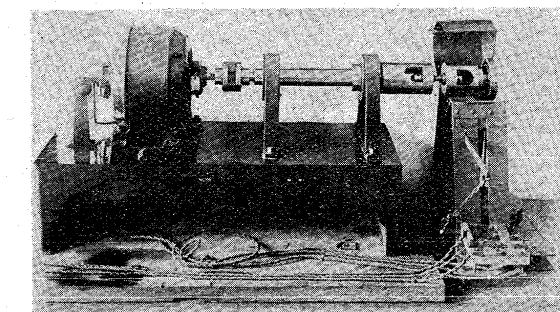
更に自分等は第4圖に示す回轉屈曲試験を用ひ同圖の形

第 4 圖



狀の焼鈍軟鋼試料 ($C\ 0.1\%$, $Si\ 0.13\%$, $Mn\ 0.5\%$, $P\ 0.032\%$, $S\ 0.044\%$, $Cu\ 0.1\%$) に就て荷重を段々増加して試験したところが或荷重に達すると 900 萬近くの回轉數で破壊した。再び其より稍小さい荷重で回轉した結果 1 億を算

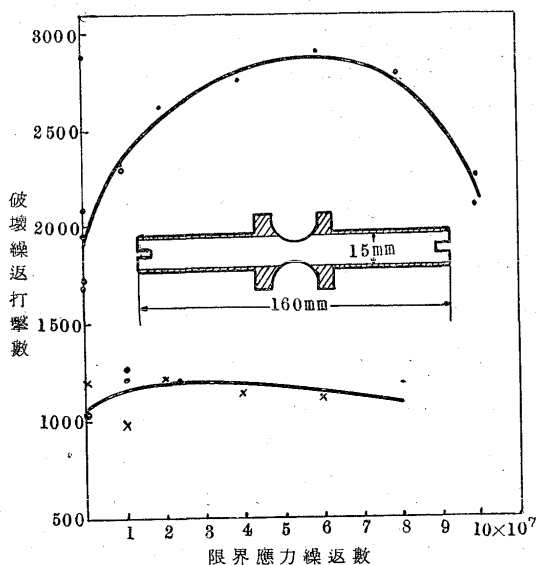
するも破壊しない點を得た若し試料の中央附近



が圓壙狀を呈し所謂平行部であつたとすると試料中央で $\pm 18.5\ kg/cm^2$ の應力を受ける譯であるが此試料は同圖にある様に中央より左右に次第に徑が増大して居る關係上中央部の應力は其以上になつて居る。併し上述の最後の荷重の下では大體限界應力か又は夫より僅に小さい値であること

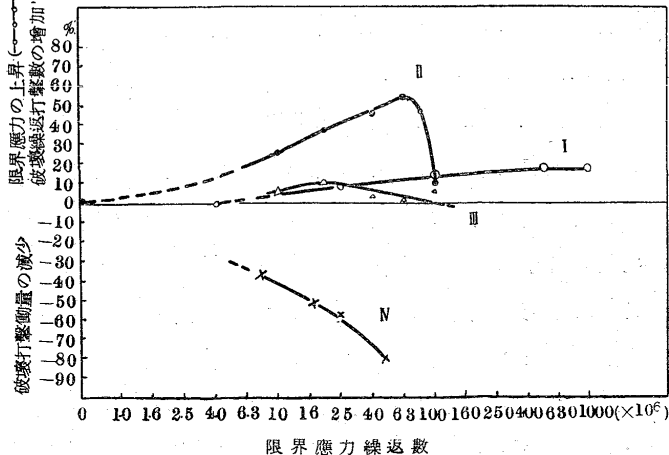
が分つた。其處で此應力の下に $10^7, 2 \times 10^7, 4 \times 10^7, 6 \times 10^7, 8 \times 10^7, 10 \times 10^7$ 回轉した後松村式繰返打撃試験機で 30 及 50 $kg \cdot cm$ の働量的で試験したところが夫々第5圖上及下曲線の様な結果を得た。但繰返回轉試料を繰返打撃するときは同圖になる様に銹は勿論影線を施した部分を削り取り兩端は機械にかゝる様に $3mm \times 8mm$ の切目を附けた。又同圖で 50 kg/cm 働量的で試験した結果を示すに ● 又は × を以てしたのは試験温度が夫々約 20° 及 10° であつたから参考に資する爲めである。30 $kg \cdot cm$ 働量的の下では

第 5 圖 限界應力繰返數の破壊繰返打撃數に及ぼす影響

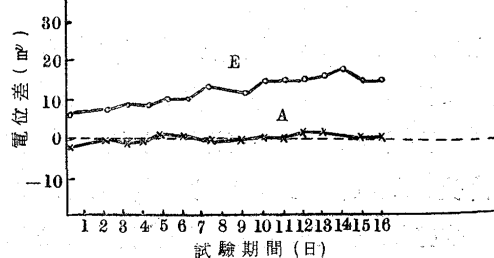


約 25° で試験した。之に依ると回轉數が増加すると打撃數が増加するが其は程度問題で或度を超える

第 6 圖 限界應力繰返の影響



第 7 圖 0.5% 硫酸液に於ける電位差



と却て減少することが分る。此關係を回轉數と繰返打撃數の増加(%)との關係で表すと第6圖 II 及 III の様になる。

同圖 I は Moore 氏の試験結果で $C0.49\%$ 炭素鋼を限界應力に近い應力の下で回轉した場合に回轉數の増加と共に限界應力の高まる割合を示して居る。但茲には $C0.49\%$ 炭素鋼の場合のみを引用したが同氏の報告によると他の鋼の試験でも大體同様の傾向を示して居る。則ち繰返數約 5×10^8 に至ると限界應力遞増傾向が歇んで 10^9 迄殆ど變りがないから此附近で極大増加を示し其以上回轉數を増すと増加率は寧ろ減少する様に考へられる

又同圖 IV は淺川勇吉氏の實驗結果で $C0.3$ 炭素鋼を限界應力より遙に小い應力の下で回轉した場合に回轉數の増加と共に衝擊抗力が減少することを示して居る。之によると I の場合は回轉後比較的低い應力を加へる試験であるから非常に大なる回轉數迄所謂嚙合による材質強化の影響が現はれ其後強化則ち嚙合に伴ふ材質の缺陷の惡影響が現はれる様に思はれる。II. III も打撃による應力が大となると強化に伴ふ材質的缺陷の惡影響が段々早く現はれ従て繰返打撃抗力も早く頂上に達し其後漸次脆性が増して居る。IV に於ては嚙合に伴ふ缺陷のみが現はれて居るが著者の一人の實驗に依ると斷面 20 mm 角で刻目なき試料を松村式打撃試験機で 30 kg.cm より稍小い働量的下で約 $1,000$ 回繰返打撃し其中心より採りたる試料は此取扱を行はぬものよりアイゾツド衝擊抗力が大であるといふ結果を得て居る。従て衝擊試験でも強化則ち嚙合による衝擊抗力の増加はあるものと見るべきであつて只此場合には缺陷による惡影響が極めて早く現はれる點が異なるのみである。

斯様な關係は第1圖の組織が第2圖の夫に轉移することに依て説明することが出来る。

二) 腐蝕性 第4圖の機械を使つて限界應力が寧ろ其より僅に小い應力で $10^7, 2 \times 10^7, 4 \times 10^7, 6 \times 10^7, 8 \times 10^7, 10 \times 10^7$ 回繰返し荷重した後之を元の儘の試料と對比して溶解電壓の差を求めたが硫酸鐵、鹽化鐵、食鹽、硫酸等の液で何れも前者の方が溶け易いことを確めた。第7圖は其一例である。圖中 F 線は 0.5% 硫酸液の中で元の儘の試料の溶解電壓より繰返荷重した試料の夫を引いた値である。之は疲勞材に於ては結晶粒内各分子が殆ど到るところで亡つて居つて何の部分を見ても均等に溶解し易くなつて居る爲めである。

然るに引張で降伏點以上に力を加へた試料又は屈曲した試料の溶解電壓を元の儘の試料の夫から引くと同圖 A の様になる。即ち前者の電壓が低いこともあれば又高いこともある。然るに腐蝕試験をして見ると明に前者の方が溶け易いことは事實であるから其間に矛盾がある様に見える。翻て仔細に研究すると屈曲又は引張を行つた試料の比較的電壓が高く見える原因が別にある。則ち例ば屈曲部に於ては或局部は歪み他部分は歪んで居らぬことは Lüders' lines の周圍に歪まない部分のあるので首肯できる事柄であつて此兩局部間に局部電流が流れて試料全體としては溶解せぬ様な傾向を示すに對し元の儘の材料は液に對し相當の溶解電壓を示す故前者の溶解電壓が高い様に見える外溶液の濃淡、試料の物理的並に化學的状況等の複雑な原因に支配せられ疲勞材の様に決定的に低い電壓を示さないのである。

結論 鋼材に於ては所謂限界應力以下の應力でも繰返を或程度以上に行ふと衝擊抗力は減少し且腐蝕性は増加する而て此等の現象を説明するには前記の様な疲勞機構を考へることが最も適當であると考へる。要するに限界應力は材質を一面から見た便宜の名稱であつて本質的には意味のないものである。

附記 鋼に繰返荷重をするとき數百萬の繰返にて破壊せぬときは其荷重で無限に繰返しても亦破壊せぬ、換言すると鋼では限界應力の決定に當り餘り多くの繰返を行つて見る必要はないと言はれて居る。反之デユラルミン、モネルメタル、ニツケル銅合金、黃銅、青銅等に於ては數千萬の繰返後破壊する、換言すると此等の合金では限界應力の決定に非常に多くの繰返を要するか寧ろ限界應力が見出されて居らない。且銅、黃銅等に就て知られるところに依ると荷重繰返後衝擊抗力が下降せぬのみか寧ろ上昇する。

腐蝕作用に關してはアルミニウム合金類は腐蝕に對して弱いとして其使用が危まれて居るが鋼の場合でも腐蝕に基いて材質の衝擊抗力が下降して材料が危險に曝される恐れが多いことが注目せられるに至つた。之は鋼材をアルミニウム合金類の代用とするときは前者の抗張力が大なる關係上其斷面を比較的小さくする丈腐蝕により一種の刻目を生じ此惡影響は斷面の大なる場合よりも著いと考へられる爲めであらうが寧ろ本文に陳べた様な意味の脆弱化と腐蝕性の増進とが重大なる原因であると考へるべきであらう。(終)