様に分布するものとすれば h の値は当然結晶粒の大きさにならなければならない。第 6 図は本実験に使用した鋼材の顕微鏡写真であるが、ここに求めた h の値は結晶粒の寸法に比較して数倍の大きさになっている。鋼材中の真の応力分布は微細に見ればきわめて不規則なものであろう。したがって弾性理論によって与えられる最大応力が実際に生じているものとは考えられない。応力は実際には結晶粒の大きさを周期とする凸凹な分布をなすものと考えの方がむしろ妥当であろう。弾性理論上からは応力が一樣な分布をするものと考えられる場合でも、微小部分について考えるときは全く同様なことが言える。

我々は更にこのような応力の凸凹分布が材質の破壊に及ぼす影響は、微小部分について考える限り、理論的応力分布が一樣であると否とは関係しないものと便宜上仮定したのである。このような考え方にしたがって一定距離間の応力の平均値を取り上げ、実験的に

その平均値を取るべき距離を決定したのである。

終りに臨み、本研究に関しては、文部省科学研究費の補助を得たことを附記すると共に、この研究に助力した随松恒雄教官および板垣栄子研究補助に対して感謝の意を表する。

注：—

- (1) 昭和 26 年 4 月 3 日 第 28 期定時總會講演會において講演、原稿受付 昭和 26 年 4 月 10 日。
- (2) 正員、東北大學高速度力学研究所。
- (3) 南大路、大久保、機械學會論文集、12 卷 42 號(昭 21—10) 84、または J. Franklin Inst., Vol. 249, No. 1 (1950) 49。
- (4) H. Okubo, Quart. Journ Mech. Appl. Math., Vol. 3, Pt. 2 (1950) 162。
- (5) H. Love, The Mathematical Theory of Elasticity, 4th edition (1927) 312。
- (6) みぞのない丸棒の場合には h 間の應力の平均値は最大應力の値と餘り變らないので、疲れ限度として應力の最大値を採った。
- (7) H. Neuber, Kerbspannungslehre (1937) 142。

539.4.013.3+016.3:669.14

き 裂 を 持 つ 丸 棒 の 強 さ⁽¹⁾

石 橋 正⁽²⁾

Strength and Deformation of Low Carbon Steel Bars with a Roundcrack under statical and repeated Loads

by Tadasi ISIBASI

With round-cracked specimens prepared by making a circumferential crack at the root of a round machined notch, statical bending and tension tests were carried out at room as well as low temperature (about -10°C). Rotary bending fatigue strength was also measured.

It was found that, under statical load, considerable plastic deformation takes place at the root of a crack; that a crack deepens discontinuously; that statical crack strength increases as the depth of the crack penetration deepens; that the low temperature annealing (about 600°C) to relieve the residual stress of a member with crack makes its fatigue strength decrease considerably. The conditions of brittle fracture and the factor of stress concentration due to a shallow crack are discussed.

1. 一 般 事 項

この研究の第 1 の目的は溶接部は溶接後焼なましすることが必要であるか否かと言うことに関連したものである。すなわち溶接のために小さいクラックが生じている部材は、残留応力除去の目的で、 600°C 程度に焼なましした場合その静ならびに疲れ強さはどのように変化するかを研究することである。第 2 の目的は溶接船に起るいわゆる脆性破壊の機構に関連したもので鋼材においてクラックから破壊が進行する場合クラック底附近にはどの程度の伸び(塑性)が起るか、またクラックの拡大、進行状態はどのようなものであるかを研究す

ることである。けだしクラック底では応力の triaxial ratio⁽³⁾ が大きいため破壊時の伸びが小さいと予想されるからである。

第 1 図 試 験 片 の 形

このため低炭素鋼丸棒の中央に鋭い V みぞを作り(第 1 回)これに回転曲げ応力を繰返してみぞ底に棒断

面とはほぼ同心円のクラックを作った試験片についてその強度を測定した。またクラック底の塑性変形と試験温度との関係を研究するため静引張試験においてはドライアイスで -10°C 程度に冷却した冷蔵庫に試験片を入れて実験した。試験片は始め直径 100 mm の丸棒から直径約 21 mm の丸棒に鍛造した後 830°C で 30 分間焼なましし第 1 図の形に仕上げた。

試験料を破壊することなしにクラックの深さを推定するには疲れ試験機に取り付けた状態で一定荷重に対する試験片中央のたわみをダイヤルゲージで測定することによったが、このような方法では正確なクラックの深さを求めることはむづかしい。したがってクラックを入れた後試験片はいずれも約 250°C に 20 分程度炉中で加熱し疲れでできたクラックの部分に薄い酸化膜を作り試験後試験片を破断して酸化部の深さを測りこれを始めのクラックの深さとした。第 1 表は使用材料の焼なまし状態における性質である。

第 1 表 使用材料の性質

化 学 成 分 %					機 械 性 質 $\text{kg/mm}^2, \%$				
C	Mn	Si	P	S	下降 伏点	引張 強さ	真破断 応力	伸び	絞り
0.180	0.41	0.240	0.030	0.03	23.2	40.3	81.0	47	23.5

2. 引 張 試 験

引張試験においてはクラックを含む 50 mm 間の伸びを測定してその見掛上の弾性係数を求めると共に破断に至る間の荷重と伸びとの関係を求めた (第 2 図)。また引張試験の途中においてクラックの部分に約 26 倍に拡大しそれを印画紙に焼付け、荷重の増加と共にクラック底の変形ならびにその進行状態を観測した。

第 2 表はクラックの深さと棒の見掛上の弾性係数、(すなわち棒を直径 17 mm の一様断面丸棒と考えた場合の弾性係数)を示す。この表を見れば浅いクラックを持つ棒の弾性係数はクラックが無い棒のそれとほぼ同じであるから浅いクラックを持つ棒の引張剛性はほとんどクラックの影響を受けないと言える。このことは注意すべきことである。

第 2 表 浅いクラックを持つ棒の弾性係数

番 号	クラックの 深さ mm	見掛の弾性 係数 10^4 kg/mm^2	E/E_0
21	0.58	2.01	0.94
23	0.49	2.10	0.98
53	0.33	"	"
54	0.43	"	"

ただし $E_0 = 2.146 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ で材料の弾性係数

第 2 図 応力ひずみ線図

試験片に加わる引張荷重を P とすれば $dP < 0$ ならば引張状態は不安定と言える。この不安定な状態が始まる $dP = 0$ から試験片の破断までのクラックの進行速度はいわゆる脆性破壊と深い関係があるように思われる。

引張試験の結果疲れによって生じたクラックは試験片に加わる荷重が増加すると共にクラック底に塑性伸びが起りクラックの深さは増さず幅のみが増加する。そしてある幅に達して初めて新しいクラックが古いクラックの底に発生することがわかった。このような過程を繰返してクラックは進行する。

進行状態中のクラックの寸法を測定すればクラック

第 3 図

クラック底の伸びと応力との関係 (いずれも横断面に対する平均値)

クが深くなればクラック底の平均強さは増加することがわかる。

3. 疲 れ 試 験

繰返し応力によってクラックが拡大するに必要な応

底における試験片の軸方向の塑性伸び (断面に対する平均値) ϵ_p を求めることができる。第 3 図はその一例である。図中の黒丸はクラックを入れた後引張試験を行前酸化を防ぎつつ 600°C で 20 分間焼なましました試験片に対するもので、このような焼なましは静強度にはほとんど影響しないことがわかる。しかし焼なましすると否にかかわらずクラック

第 4 図 浅いクラックを持つ試験片の S-N 曲線

第 5 図 クラックの深さと疲れ限度との関係

力は静荷重の場合に比してはるかに小さい。たとえば Moore⁽⁴⁾ はクラックを持った車軸鋼の回転曲げ疲れ限度は、処女材の疲れ限度の約半分であると言っている。

丸棒の曲げの場合に棒に加わる曲げモーメントを M とすれば $dM > 0$ なる条件が満たされる間はたとえクラックは発生してもそのままの荷重では進行しない。したがって鋭い切欠を持つ試験片の疲れ試験においてはクラックは疲れ限度以下の応力でも発生するが、その応力を繰返ししても必ずしも試験片は破壊するとは限らない⁽⁵⁾。このことは著者も時々経験した。

さてクラックを持つ試験片の疲れ試験において始めに入れたクラックの正確な長さは試験が落ちて後試験片を余り変形させずに破壊して測定せねばならないことは前に述べた通りである。疲れ試験においてはほとんど変形せずに破壊するからこの点幸都合である。かつ始めのクラックの部分は酸化着色してあるから破面を見ればその後新に発達したクラックの部分は明瞭に識別できる。

第 4 図は初めのクラックの長さが約 0.5 mm である試験片についての S-N 曲線である。図中の黒丸はクラックを入れた後 600°C で 30 分間酸化を防ぎつつ加熱焼なまししたものでこのような加熱（すなわち応力除去に用いられる加熱）の結果疲れ限度が著しく低下したことが認められるがこのことは注目に値する。このような強度低下の原因はクラック発生の際クラックの先端附近の材料に生じた高度の加工層が加熱により軟化するためである⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

第 5 図は始めのクラックの深さと疲れ限度との関係を示すものでクラックが深くなれば疲れ限度は幾分増加することを示しているがこの点に関してはなお研究の余地があるように思われる。

4. 結 論

繰返し応力によってできたクラックを持つ低炭素鋼試験片について室温ならびに -10°C 程度の温度で静引張試験を行いまた室温で回転曲げ疲れ試験を行って次の結論を得た。

- 1) 上記の温度における静引張荷重ではクラック底には著しい塑性伸びが起る。
- 2) クラックは連続的に進行するものでなく不連続すなわち段階的に進行する。
- 3) クラックの拡大抵抗（クラック底の残部面積当りの平均応力で表わす）はクラックの深さと共に増加する。
- 4) クラックを持つ試験片を 600°C 程度に加熱すれば 200~250°C 程度に加熱したのに比しその疲れ限度ははなはだしく低下する。しかし静荷重に対する強さには変化はない。すなわち溶接部を応力除去の目的で 600°C 程度に加熱した場合、もしその部分に小さいクラックが存在する場合にはその部分の疲れ強さははなはだしく低下することを覚悟せねばならない。
- 5) その他。

なお詳細は紙面の都合で九州大学工学部紀要に発表する予定である。

注：—

- (1) 昭和 25 年 11 月 25 日 東京臨時大会講演會において講演、原稿受付 昭和 26 年 2 月 10 日。
- (2) 正良，九州大学工学部。
- (3) G. Vedler, Engg., 167, (1949), p. 289.
- (4) H. F. Moore, Illinois Bulletin, No. 165, (1927).
- (5) J.M. Lessells, H.E. Jacques, Journ. Am. Weld. Soc., 29 (1950), 74-S.
- (6) 石橋正，九州大学工学部紀要，11, (1948), 1 ページ。
- (7) 石橋正，爪生恒美，九州大学塑性工学研究報告，7, 1950, 1 ページ。