

氏名(本籍)	沢木洋三(宮城県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博第273号
学位授与年月日	昭和46年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)機械工学第二専攻
学位論文題目	機械構造用鋼およびその溶接部の疲労強度と 微視組織に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 川崎 正 教授 横堀 武夫 教授 渥美 光 教授 萱場 孝雄 教授 須藤 一

論文内容要旨

第1章 緒 論

科学技術の急速な進歩発展に伴ない各種の機械、橋梁、船舶、圧力容器等多くの構造物や装置はその効率、性能の向上と経済性の点からますます大型化、高速化並びに軽量化が重大な意義をもつようになり、機械構造用鋼およびその溶接部の疲労が重要な問題となってきている。

そもそも材料の強度特に疲労強度はいわゆる組織敏感な性質であるから、疲労強度と組織との関連性を明らかにすることは強度設計上重要な問題であるが、この問題は必ずしも明らかにされていない。

そこで本論文は従来の材料力学的概念に材料の顕微鏡組織因子を導入した材料強度学の概念にも

とづいて機械構造用鋼およびその溶接部の疲労強度と微視組織との関連性を数量的に解析し安全性の高い設計応力の選定の基礎をうることを目的としたもので、全文6章より成る。

第2章 鋼材の平滑疲労強度と微視組織

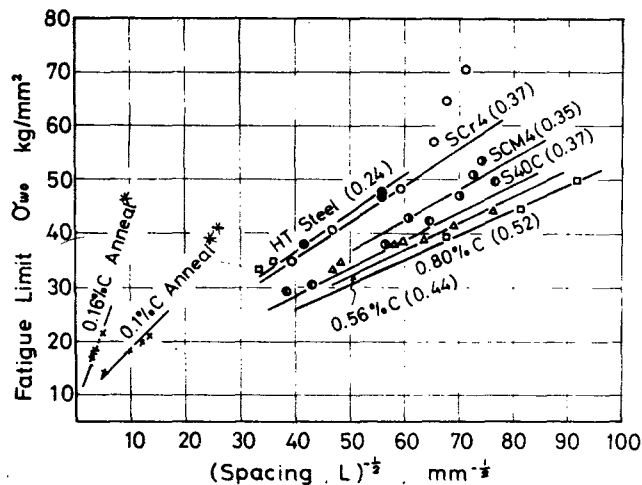
鋼材の微視組織を数量的に表示することは必ずしも容易なことではないが比較的高温度で焼き戻しを行った調質鋼の組織はほぼフェライト母地に球状炭化物が分散析出した組織でありその強度を支配する主なる組織因子は、平均炭化物大きさ、 L' 、とその平均間隔、 $2L$ 、であってこれらは Fullman の方法により比較的簡単に測定することができる。

そこで、比較的高温度(500℃以上)での焼き戻しにより、種々の組織に調質した機械構造用炭素鋼、調質型高強度鋼および構造用合金鋼の組織因子を電子顕微鏡で測定し、強度との関連性を調べた。

静的機械的性質(降伏応力、 σ_y 、引張強さ、 σ_B)と組織パラメータ、 $1/\sqrt{2L}$ 、との関係は、鋼種によらずほぼ一本の直線で示される。

平滑耐久限、 σ_{w0} 、と組織パラメータとの関係を第1図に示す。図中の抓弧内の数値は、組織パラメータ $\sqrt{L'/L}$ の値を示したものであるがこの値が同じものでは σ_{w0} と $1/\sqrt{L}$ との間に直線関係があることがわかる。また $\sqrt{L'/L}$ の値の小さいもの程直線の勾配は大きく、 L および L'/L の値の小さいもの程 σ_{w0} は高くなり、 σ_{w0} は次式で示される関係があることがわかる。

$$\sigma_{w0} = \frac{b/\sqrt{L} + \tau_i}{a \sqrt{L'/L} + 1/2} \quad (1)$$



第1図 平滑耐久限 σ_{w0} と組織パラメータ

* T. Yobori et al.: Tech. Rep. Tohoku Univ., 28-1 (1963), 65.
 ** M. Klesnil et al.: J. I. S. I., 7 (1967), 254.

静的強度と組織パラメータ, $1/\sqrt{2L}$, との関係は鋼種によらずほぼ一本の直線として示すことができたが, 耐久限は L のみならず L'/L の値にも依存し, 疲労強度は静的な強度に比してより組織敏感であることがわかる。

引張強さ, σ_B , および耐久限, σ_{w0} と組織パラメータとの関係から, σ_{w0} と σ_B との関係式として次式が得られた。

$$\sigma_{w0} = \frac{1}{\sqrt{L'/L} + 1} (0.8\sigma_B - 9.0) \quad (2)$$

従来, 耐久限を静的な強度から推定しようとする多くの試みがあるが, それらはいずれも組織因子が考慮されていないためある特定の組織や特定の強度レベルの鋼に対してはあながち, 普遍的な関係式となっていない。しかし以上の結果から組織因子を考慮に入れて導かれた(2)式はこれまでに提案されている多くの実験式を包括する普遍的な式であり, 静的な強度と耐久限との関係, 例えば耐久比等が鋼種や熱処理によって広範に変化する根拠も明らかにされた。

第3章 鋼材の切欠疲労強度と微視組織

第2章で用いた法則を切欠材の場合に発展させ切欠耐久限と微視組織との関係を示す次式を導いた。

き裂発生に対する耐久限, σ_{w1}

$$\sigma_{w1} = \frac{b/\sqrt{L} + \tau_i}{aK_t \sqrt{L'/L} + K_t'/2} \quad (3)$$

鋭い切欠をもった試験片の破断に対する耐久限, σ_{w2}

$$\sigma_{w2} = \frac{c/\sqrt{L} + 2\tau_i}{1+d} \quad (4)$$

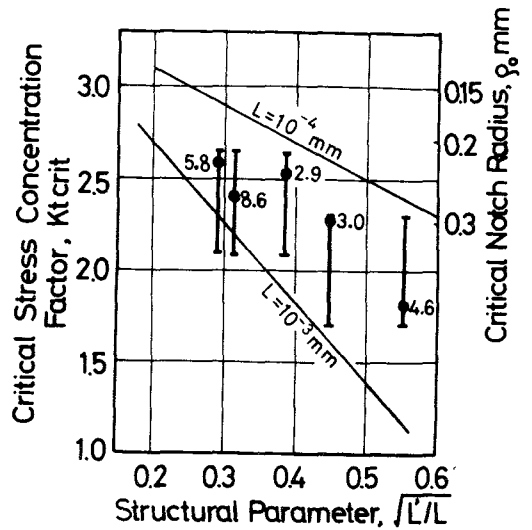
これらの式から計算によって求めた切欠耐久限や切欠係数の値は実測値と比較してよい一致が得られ, 切欠の幾何学的形状のみならず材料の組織にも依存するものであって, 一般に L および L'/L の小さい組織の鋼材ほど切欠疲労強度は高くなる。

また切欠底に停留き裂を発生するか否かの限界の形状係数, すなわち, いわゆる分岐点は次の条件が満足される場合に対応することがわかった。

$$G_0 = (1 - 2Ka \sqrt{L'/L})/x \quad (5)$$

すなわち分岐点は切欠の幾何学的形状にはかわりなく、切欠底における応力勾配がそれぞれの組織のみによって定まるある一定値 G_0 に等しい場合である。

実験結果との比較を第2図に示す。太い実線で分岐点に対応する応力集中係数の範囲を示し、(5)式より計算によって求めた分岐点の値を黒丸で示したが両者の一致は良好である。また図中の数字は組織パラメータ L の値を示したものである。(単位は 10^{-4} mm)。これより L および L'/L の値の小さいもの程分岐点は高く切欠が鋭くなっても停滞き裂は発生しにくい事を明らかにした。

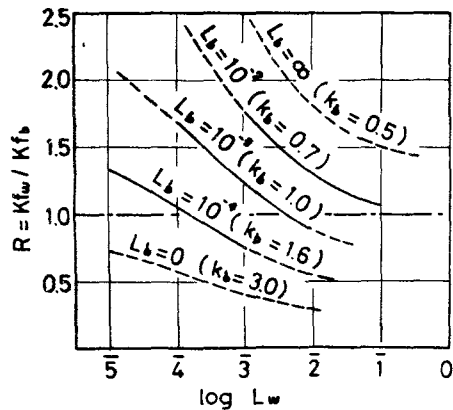


第2図 分岐点と組織パラメータ

第4章 鋼材の突合せ溶接継手の疲労強度

この章では第2章および第3章で得られた結果を溶接部の疲労強度の解析に適用し、溶接組織と疲労切欠感受性について調べた。

第2章および第3章で導かれた耐久限の式は溶接部においても適用されるが、式中の定数の値は溶接によって母材とは異った値をとる事が実験的に明らかにされ、これより母材の切欠係数、 K_{fb} と溶接材の切欠係数、 K_{fw} との比、 R 、と組織パラメータとの関係が第3図のように解析された。



第3図 $R (=K_{fw}/K_{fb})$ と組織パラメータ

この図より例えば、母材の組織パラメータ、 L_b が 10^{-4} mmの鋼材（ほぼ調質型高強度鋼に相当）を溶接すると、溶接部の組織パラメータ、 L_w は、 10^{-4} mm前後の値となるが、この時 R の値は1前後、すなわち K_{fb} と K_{fw} はほぼ等しく、このような鋼材では溶接によって切欠感受性は母材のそれに比して著しく変ることはない。 L_w の値が母材の L_b よりも大きくなると $R < 1$ ($K_{fw} < K_{fb}$)となりむしろ切欠感受性は母材のそれよりも低くなる。

一方 L_b が 10^{-2} mmの鋼材（ほぼ軟鋼に相当）では必ず $R > 1$ ($K_{fw} > K_{fb}$)であって切欠感受性は溶接によって著しく高くなる。

従来の研究によれば、疲労切欠感受性は軟鋼では溶接によって著しく高くなり、一方高張力鋼では溶接によって変化しないという報告もあって、その原因が不明であったが組織と切欠係数との関係を解析する事により、母材並びに溶接部の組織によって切欠感受性は高くなったり低くなったりすることがありうる事を明らかにした。

第5章 切欠鋼材および鋼の溶接継手の疲労破壊の統計的性質

この章では疲労破壊をいくつかの種類に異なった確率過程の継続事象であると考え、第3章の考察から各過程の確率の大小関係を調べ疲労寿命のばらつきと組織との関係を検討した。

その結果応力集中係数を増すにつれて寿命のばらつきを支配する主因は限界形状係数を境にしてき裂の発生過程からき裂の伝播過程へと変わることまたこれらは組織に大いに関係し、組織因子 L および L/L の大きいものほど寿命のばらつきは小さくなることがわかった。この結果は溶接部においても同じであって組織因子 L の大きくなるような溶接をすると疲労強度は多少低下するが寿命のばらつきおよび第4章でのべた切欠感受性の点からより信頼性の高い継手となる。

第6章 結 論

材料強度学の概念にもとづいて機械構造用鋼およびその溶接部の疲労強度と微視組織との関係について研究し、従来必ずしも明らかにされていなかったいくつかの問題点を明らかにすることができた。

鋼材の疲労強度は静的な強度に比してより組織敏感なものであり、疲労強度と静的な強度との関係、例えば耐久比などが鋼種や熱処理によって広範に変化する根拠を明らかにした。

切欠底に停留き裂を発生させるか否かの限界の形状係数は切欠底での応力勾配が材料の組織のみによってきまるある一定値の場合である。

溶接部の切欠感受性は母材並びに溶接部の組織によって高くなったり低くなったりする。

限界形状係数を境としてばらつきの主因はき裂の発生からき裂の伝播へと変わり、またこれらは

組織に大いに関係する。

これらの結論より、組織因子 L および L/L の小さいものほど平滑疲労強度、切欠疲労強度共にすぐれた鋼材であって、この鋼材を溶接する場合には組織因子 L を母材のそれよりも大きくなるような溶接条件を選ぶことによって疲労強度は多少低下するが切欠感受性並びに寿命のばらつきの点からより信頼性の高い継手が得られる。

本研究に関し終始御親切な御指導と御鞭撻を賜りました指導教官川崎 正教授に深く感謝致します。材料強度ならびに統計的問題の基礎について格別御懇篤なる御指導、御教示を賜りました横堀 武夫教授に深く感謝致します。また有益な御教示を賜りました渥美 光教授、萱場 孝雄教授、須藤 一教授の諸先生方に深く感謝致します。

審 査 結 果 の 要 旨

近時鋼構造物の飛躍的發展に伴い、機械構造用鋼およびその溶接部の疲労が重要な問題となり、特にその微視組織は疲労強度の重要因子となっている。一方において疲労強度を規定する疲労破壊法則としては、これまでに数多くのものが提案されてきたが、その何れもが、ある実験にはよく合うが別の実験には合わないといったものばかりである。

そこでこの論文は顕微鏡組織的パラメータをとり込んで、その上で巨視力学的な解析の可能な形にした法則を鋼材だけでなくその溶接部に対しても適用し得るように発展させ、かつ実験的にこれを確かめたほか、この方面で多くの新しい知見を得たものであり、全文6章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では機械構造用炭素鋼、調質型高強度鋼および焼入焼戻処理をした低合金鋼の静的強度および平滑材の疲労強度と微視組織との関係をしらべている。平均炭化物間隔 L および平均炭化物粒径 l をパラメータとし、これら各種組織の鋼の耐久限は L および l/L の値の小さいほど向上すること、また疲労強度は静的な強度に比して遙かに組織敏感であることを明らかにしている。さらにこれらの組織パラメータをとり入れて疲労強度を静的強度から推定できる実験式を提案している。

第3章では前章で用いた法則を切欠材の場合に発展させて、切欠疲労強度および疲労切欠係数と微視組織との関係の説明を与えている。さらに切欠底に停留き裂の発生の限界切欠形状係数；すなわち、いわゆる分岐点は、切欠底における応力勾配が組織だけによってきまるある一定の値をとる場合に対応することを見出し、 L 及び l/L の値が小さい鋼では停留き裂が発生しにくいことを明らかにしている。

第4章では第2章及び第3章で得られた結果に基づいて高強度鋼の溶接部の疲労強度並びに疲労切欠感受性と微視組織との関係を解明し、母材の組織パラメータと溶接部のパラメータとの相互関係によって、疲労切欠感受性は溶接によって向上ないしは低下するものであることをしめし、従来疑問とされていた点に対して明確な結論を導いている。

第5章においては疲労破壊を継続確率過程事象として寿命のばらつきと組織との関係をしらべている。さらに母材および溶接部のいずれの場合にも、 L および l/L の値が大きい程、鋼の疲労強度は低下するけれども寿命のばらつきはかえって小さくなることを明らかにしている。その結果溶接設計において安全性の観点から、疲労強度を多少低下させても、寿命のばらつきの小さい組織を得るように適切な溶接条件を選ぶべきであることをしめしている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は機械構造用鋼およびその溶接部の疲労強度と微視組織との関係を明らかにし、強度設計に対して有効な指針を与えているものであり、機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。