疲労の進行に伴う炭素鋼の遷移点の変化と超音波減衰*

榎 木 義 一** 明 石 一**
寺 石 稔** 藤 井 太 一***

Change of Transition Temperature of the Ultrasonic Attenuation in Carbon Steel due to Repeated Stress Cycles

by

Yoshikazu SAWARAGI, Hajime AKASHI, Minoru TERAISHI

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

and Taichi FUJII

(Faculty of Engineering, Osaka City University, Osaka)

It is well known that almost all the b. c. c. metals show brittleness at low temperature. This property means that viscosity falls with decrease in temperature. It is expected from this that there is a change of ultrasonic attenuation in the metal at the transition region from ductile to brittle property. In our previous investigation, attenuation in carbon steels at low temperature decreased suddenly in a way similar to the notched-bar impact value under similar condition.

In the present paper is reported the change of transition temperature of the ultrasonic attenuation in S20C carbon steel with the number of repeated stress cycles within the range of -20°C to room temperature. The relation is explained by Orowan's theory.

The results are summarized as follows:

(1) The transition temperature rises with increase in the number of repeated stress cycles, and the rising rate depends on the amplitude of repeated stress.

(2) The transition region becomes small with increase in the number of repeated stress cycles.

(3) The model which had been conceived previously for the relation between attenuation and fatigue of carbon steel, has been adapted to the fatigued S20C carbon steel at the region from ductile to brittle property.

(Received Oct. 28, 1968)

1 緒 言

一般に体心立方型の金属では、低温ぜい性を示すものが多いが、このぜい性という性質は粘りが少なくなること、すなわち粘性がなくなることを意味している。したがって、もし低温ぜい性の存在する金属材料に超音波を入射すれば、粘性の変化によって減衰が変わることが期待される。

すでに著者らが行った実験によれば、焼なましをした炭素鋼中の超音波減衰と温度との関係は、ちょうど衝撃値が示す遷移温度と同様に、 $-40 \sim -80^{\circ}\text{C}$ 付近において減衰定数は急激に減少する傾向を示し、衝撃値と超音波減衰とは密接な関係にあることが確かめられた。

また、炭素鋼の衝撃値による遷移温度は、繰返し応力や、繰返し衝撃によって、高温側に移動することが

報告されている^{2,3)}。そこで、もしこれを超音波減衰によって調べるならば、温度変化に対して連続的に測定することが可能であり、同一試験片を非破壊的に測定できるのでたいへん便利であり、その上精度もよくなるはずである。

したがって、本研究ではS20C炭素鋼に片振引張繰返し応力を加えた場合、超音波減衰の遷移温度の変化に対して、繰返し応力がどのような影響を与えるかを調べ、その結果、疲労とぜい性破壊がどのような関係にあるかを考察した。

2 実験方法

試験片としては市販のS20C炭素鋼を素材のまま 885°C で1時間焼なましを行ない、炉中冷却後 Fig. 1に示すように中央平行部の直径 $13\text{mm}\phi$ 、長さ 120mm のものを用意し、これに片振引張繰返し応力を加えた。最大応力としては、44, 40, 36および 32kg/mm^2 で、ローゼンハウゼンの引張圧縮疲労試験機により、それぞれの試験片に対し、Fig. 2に示す繰返し数だけ加え

* 原稿受理 昭和43年10月28日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 正 会 員 大阪市立大学工学部 大阪市住吉区杉本町

Fig. 1. Dimension of test piece.

Fig. 2. Number of stress cycles at which the attenuation was measured.

て後、中央平行部より 100 mm の長さのものを切り出し、両端面をエメリーパーで仕上げ、常温より -120°C の範囲で超音波減衰を測定した。

超音波としては、周波数 3 Mc の縦波で、直径 10 mmφ の X-カット円板水晶により、シリコンオイルを接触媒質として試験片中に入射した。なお、温度変化により円板水晶と試験片の接触状態が変わらないようにあらかじめ固定し、液体酸素中で十分に冷却した後、魔法びんの中で徐々に温度を上げ、試験片中央部における温度を、鉄-コンスタンタン熱電対により測定しながら、 5°C 間隔でブラウン管上の超音波パルス図形を写真に撮影し、その図形より neper/cm の単位で減衰定数を求めた。

3 実験結果

以上のような方法によって求めた超音波減衰が、それぞれの応力および繰返し数に対して、温度とどのような関係にあるかを調べるために、縦軸に減衰定数を、横軸に温度をとり、応力の繰返し数をパラメータにしてプロットしたものを、最大応力 44, 40, 36 および 32 kg/mm^2 に対し、それぞれ Fig. 3, 4, 5 および 6 に示す。

これらによれば、いずれもある温度範囲で急激に変化する遷移領域が存在し、応力繰返し数の増加に伴って少しずつ高温側へ移動するとともに、減衰定数の変化量が少なくなっていることがわかる。この減衰定数の変化量が減少していることは、言い替えれば遷移領域が狭くなっていることを意味している。

これらのある繰返し数に対する減衰定数と温度との関係のみに注目してみると、近似的に

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{2} \{ \tan h \{ k(\theta - \theta_t) \} - 1 \} \quad (1)$$

 Fig. 3. Relation between attenuation and temperature with the number of stress cycles as a parameter for 44 kg/mm^2 .

 Fig. 4. Relation between attenuation and temperature with the number of stress cycles as a parameter for 40 kg/mm^2 .

 Fig. 5. Relation between attenuation and temperature with the number of stress cycles as a parameter for 36 kg/mm^2 .

Fig. 6. Relation between attenuation and temperature with the number of stress cycles as a parameter for 32 kg/mm².

によって表現される。ただし

α_0 : 常温 (延性領域) における減衰定数

α_1 : 常温 (延性領域) および低温 (ぜい性領域) における減衰定数の差

k : 定数

θ : 温度

θ_t : 遷移温度

である。次に上述の結果をもう少し詳細に調べるために、減衰定数と温度との関係の図の水平部分の延長線と変曲点に引いた接線との交点の範囲、すなわち Fig. 7 に矢印で示した範囲 $\theta_1 \sim \theta_2$ を遷移領域として、この領域と応力繰返し数との関係を、それぞれの繰返し応力に対して矢印でプロットしたものを Fig. 8 に示す。

これによれば明らかに応力繰返し数が増大するほど、また最大応力が大きいほど遷移領域が高温側に移動していることがわかる。いま遷移領域における中央の点、すなわち変曲点を遷移温度とすれば、この遷移温度と応力繰返し数との関係は

$$\theta_t = \theta_0 + \theta_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \left(\frac{N}{N_0} \right) \quad (2)$$

によってよい近似をうる。すなわち $\theta_0 = -60^\circ\text{C}$, $\theta_1 = 50^\circ\text{C}$ としたときの計算値が Fig. 8 の太線である。

Fig. 7. Definition of temperatures θ_1 and θ_2 representing the transition region of the attenuation.

Fig. 8. Change of transition temperature with the number of stress cycles for S20C.

ただし

θ_0 : 繰返し数 0 のときの遷移温度

θ_1 : 定数

σ : 応力

σ_0 : 耐久限度

N : 繰返し数

N_0 : 破壊までの繰返し数

である。結局この曲線の上側は延性領域を、下側はぜい性領域を表わしている。また、遷移領域は繰返し数が増加するに従って、狭くなっていることを示している。

4 考 察

鋼材がぜい性破壊に対して示す遷移現象およびそれに対応する遷移温度としては、本質的に延性遷移温度、破面遷移温度および停止遷移温度の 3 種類が考えられており、またこれらも、さらに実験方法や試験片の形状あるいはその観点により、遷移温度の定義が細分されている⁴⁾。しかしながら、これらの定義は大部分が切欠きぜい性に関するものであり、本研究のように炭素鋼に対する切欠きなしの場合の超音波減衰による遷移温度が、どれに対応するかは明らかではないが、ここではぜい性破壊そのものを扱っているのではないので、おそらく延性遷移温度の範囲にはいるのではないかとと思われる。

次に疲労の進行に伴ういろいろな機械的性質のうち、衝撃値は低下し、降伏点は上昇することが知られており、また、Orowan によれば遷移温度は Fig. 9 に示すように、温度に対する降伏応力の曲線 Y と、ぜい性破壊応力の曲線 B との交点で与えられている。ところが、疲労の進行に伴って、曲線 Y が Y' へ、曲線 B が B' へと変化するから、遷移温度 θ_{t1} は θ_{t2} へと上昇することがわかる。

そこで、すでに著者らが報告した炭素鋼の片振引張繰返し応力による疲労と超音波減衰との関係に対する模型を本研究に拡張して考えてみる。その模型の要素

Fig. 9. Explanation of the change of transition temperature caused by fatigue in carbon steel.

はFig. 10に示すように k_1 , k_2 はスプリングで結晶粒子内の弾性率の異方性を表わし, F は異なる粒子間の弾性率の相違により生ずるすべりの微視的なクーロン摩擦を表わしている. そしてこの要素の荷重-変位線図はFig. 11に示すとおりで, 変位 x_m に相当する荷重の点を降伏点と考え拡張する.

実際の模型はFig. 10の要素のうち F の最大値 $F_{\max}$ のみをことにするものを n 個並列にしたものを考えているが, $F_{\max}$ の大きさは x_m で決まるから, これの分布を x_{m1} , x_{m2} , ..., x_{mi} に対応するスライダがそれぞれ s_1 , s_2 , ..., s_i 個あるとする. 今簡単のために $x_{m1} = x_{m2} = \dots = x_{mi} = x_m$, かつ $s_i = s/i$ であるとすれば, $4x$, $24x$, $34x$, ... においてすべり出すスライダがそれぞれ s , $s/2$, $s/3$, ... 個存在することになる.

ここで x_m の分布を連続的とし, $n, s \rightarrow \infty, s/n \rightarrow f (= \text{const.})$ とすると, この模型の等価粘性減衰係数は

Fig. 10. An element of the model.

Fig. 11. Load-deflection diagram of the model element.

$$C = \frac{f}{\pi \omega} \cdot \frac{(k_2 - k_1)^2}{k_1 + k_2} \quad (3)$$

となる. ただし ω は角周波数である.

温度の低下によって降伏点が増加することは, $F_{\max}$ が增大することに対応するので, スライダの数 n 個のうち同じ荷重に対して実際にすべり出す数 s は少なくなるから, (3)式の f は減少する. また, 温度の低下によって弾性率が增大することは, k_1 , k_2 が增大することに対応する. したがって, もし k_1 , k_2 が同じだけ温度の低下によって増大すれば, (3)式の k_i に関する項は減少する. 結局, 温度の低下によって等価粘性減衰係数は減少し, 模型を低温領域にまで拡張できることがわかる. したがって, すでに行なった片振引張繰返し応力による疲労と等価粘性減衰係数との関係は

$$C = A \cdot B \cdot e^{b \left\{ \frac{a^2}{\log_e N} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^2 + \log_e N \right\}} \quad (4)$$

であるから, これを減衰定数 α と等価粘性減衰係数 C との関係

$$\alpha = \frac{\omega^2 C}{2c^3 \rho} \quad (5)$$

を用いて, α の式に書き改めると, ある ω に対しては $\omega^2/2c^3 \rho$ は一定であるから, $A \cdot B$ は $A' \cdot B'$ となり, それと(2)式を(1)式に代入すると

$$\begin{aligned} \alpha = & A' \cdot B' \cdot e^{b \left\{ \frac{a^2}{\log_e N} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^2 + \log_e N \right\}} \\ & + \frac{\alpha'_1}{2} \left(\xi - \frac{N}{N_0} \right) \left[\tan h \left\{ \frac{k'}{\xi - \frac{N}{N_0}} \right. \right. \\ & \left. \left. \times \left(\theta - \theta_0 - \theta_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \left(\frac{N}{N_0} \right) \right) \right\} - 1 \right] \quad (6) \end{aligned}$$

となる. ただし

c : 試料中を伝ばする音速

ρ : 密度

a, b : 定数

ξ : $\xi \geq 1$ なる定数

$\alpha'_1 = \alpha_1/\xi$

$k' = k\xi$

であり, $(\xi - N/N_0)$ は繰返し数の増加とともに遷移領域が狭くなることを考慮したものである. 結局(6)式は, ある周波数に対して片振引張繰返し応力による疲労の進行と, 常温より -120°C の範囲の温度を考慮した減衰定数の実験式を表わす. そして第1項は常温における疲労と超音波減衰の関係を示し, 第2項は疲労した試料に対する温度の影響を表わす.

5 結 言

以上のように S20C 炭素鋼に片振引張繰返し応力を加えた場合, 超音波減衰による遷移温度と疲労の程度との関係を調べた結果, 次のようなことが判明した.

(1) 疲労の進行に伴って遷移温度は上昇し, その上

昇の割合は(2)式に示すように応力が大きいほど大きい。

(2) 遷移領域は疲労の進行に伴って狭くなる。

(3) すでに行なった疲労と超音波減衰との関係に対するモデルを、疲労したS20Cの常温より -120°C の延性領域からぜい性領域にまで拡張できる。

これらのことから、充分その傾向を表現できる実験式を導いた。

今後さらに詳細な実験を積重ねることにより、それぞれの鋼材に対する定数を求めておけば、それを基準にして超音波減衰を測定することによって、非破壊的に鋼材の疲労によるぜい性破壊を未然に防止する可能性を示唆するものである。

(昭和43年9月3日 第12回材料研究連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 榎木義一, 藤井太一, 明石 一, 寺石 稔, 材料試験, **6**, 535 (1957).
- 2) 上田太郎, 田中政夫, 材料試験, **11**, 233 (1962).
- 3) 遠藤吉郎, 永井欣一, 材料試験, **8**, 143 (1959).
- 4) 金沢 武, “金属材料の強度と破壊”, 日本金属学会編, p.200 (1964) 丸善
- 5) 川田雄一, “金属の疲労と設計”, オーム文庫, p.27 (1962) オーム社
- 6) 横堀武夫, “材料強度学”, p.120 (1959) 技報堂
- 7) 榎木義一, 藤井太一, 明石 一, 寺石 稔, 日本機械学会論文集, **24**, 161 (1958).
- 8) Konishi, I., Y. Sawaragi, T. Fujii, H. Akashi, and M. Teraishi, Proc. of the First Japan Congress on Testing Materials-Metallic Materials, p.41 (1959).