変動振幅応力に対する疲労損傷度モニタリングセンサーの適用性

法政大学　学生会員　○小高　弘行　正会員　森　猛
（株）ビーエムシー　正会員　公門　和樹　フェロー　阿部　允
（株）川鉄テクノリサーチ　正会員　成本　朝雄

１．はじめに

低コストでしかも容易に疲労損傷度をモニターするために、亀裂を有するステンレス鋼板を実橋に貼り付け、亀裂の進展量で疲労損傷度を計測するシステムが開発されている。これを疲労損傷度モニタリングセンサーと呼ぶ。図１に示すような、等厚で長さ 2H のセンサーの一定振幅応力下での応力拡大係数範囲ΔK は近似的に式(1)で与えられ、亀裂進展量Δa と疲労損傷度Δσ³・N の関係は式(2)で与えられることが確かめられている。本研究では、変動振幅応力下での疲労損傷度計測に対するセンサーの適用性について検討する。

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{H}\left(\Delta\sigma：公称応力範囲\right) \qquad (1)$$

$$\Delta a = 3.0\times10^{-13} H^{3/2}\Delta\sigma^{3}N \qquad (2)$$

$$H：mm,\quad \Delta a：mm,\quad \Delta\sigma：\mathrm{N}/mm^{2}$$

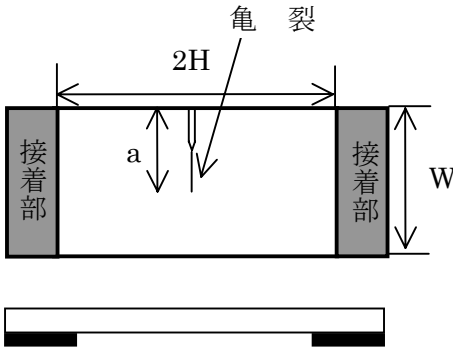

図１ 等厚センサー

２．応力範囲頻度分布

ここでは、応力範囲頻度分布表すために、式(3)で示される 2 母数 Weibul 分布を用いる。図 2 は実橋で測定された応力範囲頻度分布と Weibul 分布を示している。

$$Q\left(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{\max}\right)=\exp\left[-\left(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{\max}\right)^{h}\bullet\ln\left(N_0\right)\right] \qquad (3)$$

$Q\left(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{\max}\right)$：累積密度関数

N_0: 総繰返し数，　$\Delta\sigma_{\max}$: 最大応力範囲

h ：累積分布の形状を表わすためのパラメータ

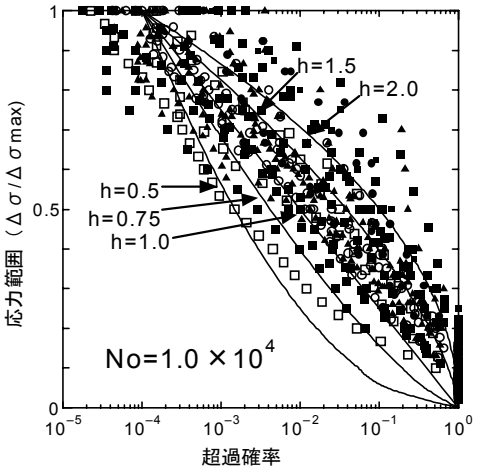

図２ 応力範囲累積頻度分布

この分布のパラメータ h を 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0、N_o を 10^5, 10^6, 10^7, 10^8、Δσmax を 50, 75,100(N/mm²)とし、これらを組み合わせた 60 種類の応力範囲頻度分布を以下の検討に用いる。

３．変動振幅応力下の疲労寿命評価

変動振幅応力下の疲労寿命評価は一般に線形累積被害則を用いて行われる。線形累積被害則では応力範囲頻度分布を構成する応力範囲成分をΔσi、その頻度を ni、Δσi のみが作用した際の疲労寿命を Ni とし、Σ(ni/Ni)=1 となったときに疲労破壊が生じるとするものである。これを書き直せば、$\sum\left(\Delta\sigma_i^{3}\bullet n_i\right)=C$ となる。C は継手の強度等級ごとに与えられる定数である。代表的な線形累積被害則としては、修正 Miner の方法、Haibach の方法と JSSC 指針の方法がある。これらはΔσi に対する Ni の求め方、すなわち基準となるΔσ-N 関係が図 3 に示すように異なるだけである。センサーを用いた場合にはΔσth（センサーの打切り限界 $=\Delta K_{th}/\sqrt{H}$ ）以下の応力

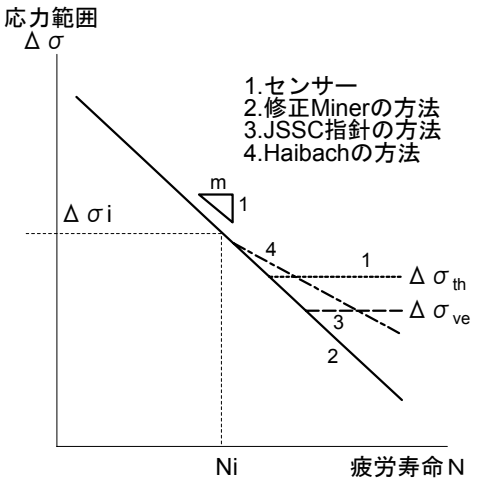

図３ 各評価法のΔσ-N 関係

キーワード　応力拡大係数、疲労損傷度比、変動振幅応力
連絡先　住所　〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2　法政大学工学部　電話番号 042-387-6279

範囲成分が疲労損傷度に寄与しない評価方法となる。したがって$\Delta\sigma_{th}$が JSSC で設定されている$\Delta\sigma_{ve}$と同じであれば、センサーの$\Delta\sigma$ - N 関係は、JSSC 指針の方法から求められる$\Delta\sigma$ - N 関係と一致することになる。$\Delta\sigma_{th}$とセンサーの長さ H の関係を図 4 に示す。センサーの現実的長さ（25～100mm）を考えれば$\Delta\sigma_{th}$は強度等級 F～H の$\Delta\sigma_{ve}$に対応する。

４．変動振幅応力下でのセンサーの適用性の検討

現在、上記で取り上げた 3 つの評価方法の内、どれが実現象を反映した最も優れた評価方法であるか不明であるものの、センサーから求められる疲労損傷度と各評価方法から求まる疲労損傷度を比較することは有用である。ここでは Weibul 分布のパラメータに加えてセンサーの長さ H と疲労強度等級（E、F、G、H）をパラメータとして、センサーから求まる疲労損傷度と各被害則から求まる疲労損傷度の比（疲労損傷度比）を求めた。疲労損傷度比が 1 を超えれば、センサーを用いた評価は線形累積被害則から求まる疲労損傷度を過大に評価することになる。

図 5～9 に疲労損傷度比と h、N_0、$\Delta\sigma_{max}$、強度等級、H の関係を示す。h が大きくなれば、相対的に高応力範囲成分が大きくなるため、疲労損傷度比はいずれの疲労寿命評価法についても 1 に近づいている。同じ理由で、$\Delta\sigma_{max}$が大きくなるにしたがって、またN_0が増大するにしたがって疲労損傷度比は 1 に近づいている。このように、低応力成分が比較的多い場合に各評価法による疲労損傷度が異なる。図 8 に示すように、強度等級が低くなると、疲労損傷度比が 1 に近づく傾向が認められる。JSSC 指針の方法に対しては H 等級で疲労損傷度比が 1 以下となっているが、これは$\Delta\sigma_{ve}$が$\Delta\sigma_{th}$よりも低くなったためである。図 9 に示すようにセンサーの長さ H が大きくなるにしたがって、$\Delta\sigma_{th}$低くなるため、修正マイナー則に対しては疲労損傷度比が 1 に近づき、JSSC 指針の方法と Haibach の方法に対しては疲労損傷度比が 1 よりかなり大きくなっている。

以上のように、疲労強度評価法により推定される疲労損傷度は大きく異なる。センサーを用いて疲労損傷度を評価する場合には、このような違いに注意する必要がある。

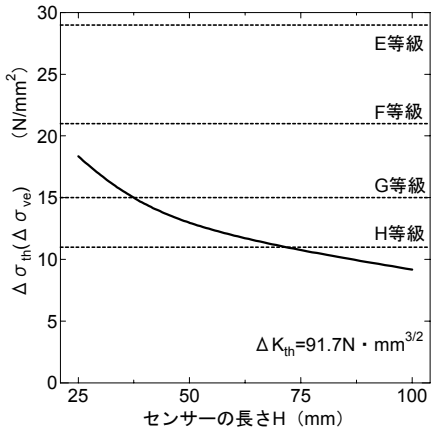

図 4　$\Delta\sigma_{th}$（$\Delta\sigma_{ve}$）－H 関係

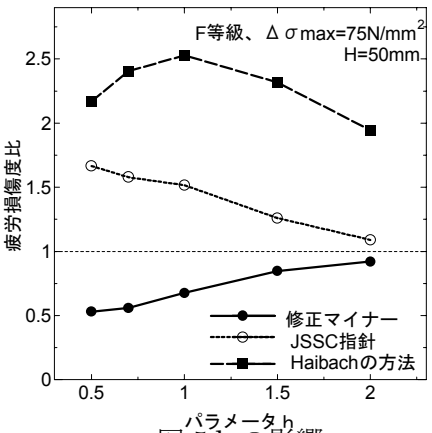

図 5 h の影響

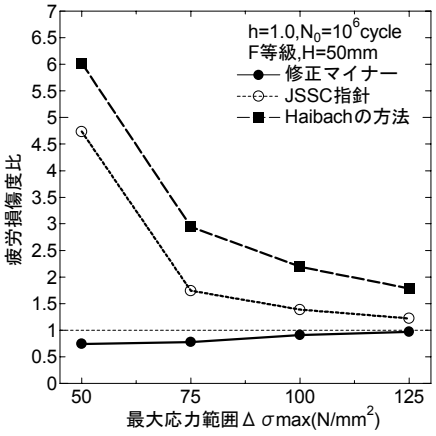

図 6　$\Delta\sigma_{max}$の影響

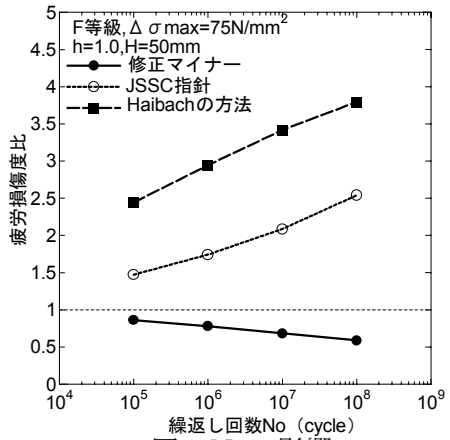

図 7 N_0の影響

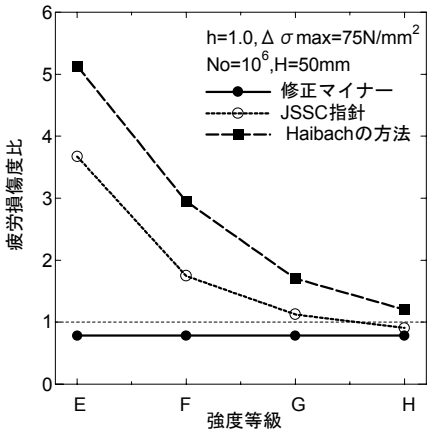

図 8 強度等級の影響

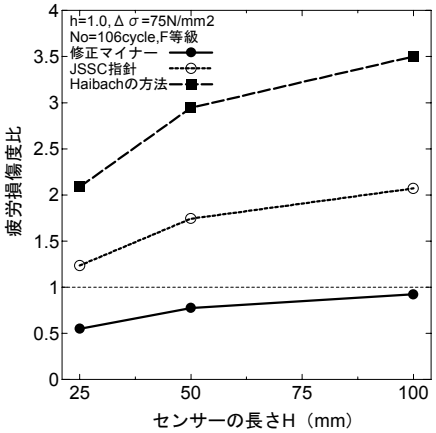

図 9 H の影響