

第 I 部門

圧縮残留応力を考慮した応力拡大係数による疲労き裂発生条件の定量的評価

京都大学 学生会員 ○玉手 鶴丸, 正会員 松本 理佐, 服部 篤史, 河野 広隆

1. はじめに

鋼部材の疲労き裂を防止する対策として、溶接部を打撃し、圧縮応力を導入するピーニング処理(以下、HP 処理)が提案されている。HP 処理は、数多くの実験結果により疲労強度向上効果は明らかにされているが、HP 処理時の疲労限は定量的に評価できていない。このため、ピーニングの設計基準を策定できず、本技術の積極的な活用に至っていない現状にある。

そこで本研究では、溶接部近傍の母材に打撃する ICR 処理を準用した HP 処理(図-1)に着目し、その疲労限を圧縮残留応力を考慮した応力拡大係数(K_n)によって定量的に評価することを目的とする。

2. 疲労試験概要

本研究では、板曲げ疲労試験および引張疲労試験を行い、HP 処理時の疲労限を明らかにした。試験に用いた試験体を図-2 に示す。HP 処理は無荷重条件下で施工した。3 章で述べるが、曲げ疲労試験では、応力比 0 ではき裂が発生しなかったため、応力比を変化させ、疲労限の試験結果を得た。試験要因は表-1 に示すとおりである。AW は溶接まま、P は HP 処理を施工した試験体を表している。

3. 疲労試験結果

疲労試験結果を図-3, 4 に示す。図-3 からわかるように、曲げ試験、応力比 0 では応力範囲 230N/mm^2 でもき裂が発生しなかった。応力比 0.25 では応力範囲 180N/mm^2 で、応力比 0.5 では応力範囲 150N/mm^2 でそれぞれき裂が発生した。

図-4 からわかるように、応力比 0 で実施した引張試験では、応力範囲 160N/mm^2 でき裂が発生した。

4. 圧縮残留応力を考慮した応力拡大係数 K_n (a) K_n の概念

本研究では、溶接止端に微小な初期き裂を仮定し、初期き裂が進展することを「き裂の発生」とする。き裂の進展速度は応力拡大係数に依存し、応力拡大係

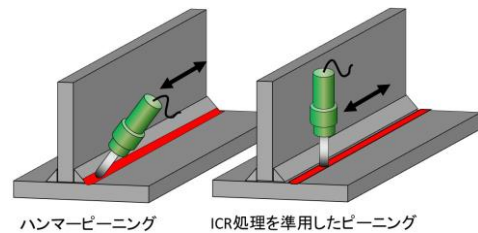
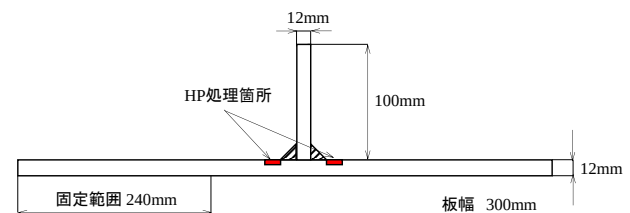
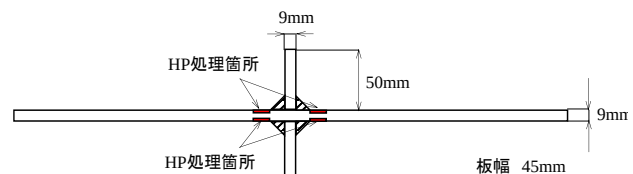


図-1 ICR処理を準用したピーニング



(a) 曲げ試験体



(b) 引張試験体

図-2 試験体

表-1 曲げ疲労試験の試験要因

試験体名	HP 処理	応力比
AW(R=0)	無	0
P(R=0)	有	0
P(R=0.25)	有	0.25
P(R=0.5)	有	0.5

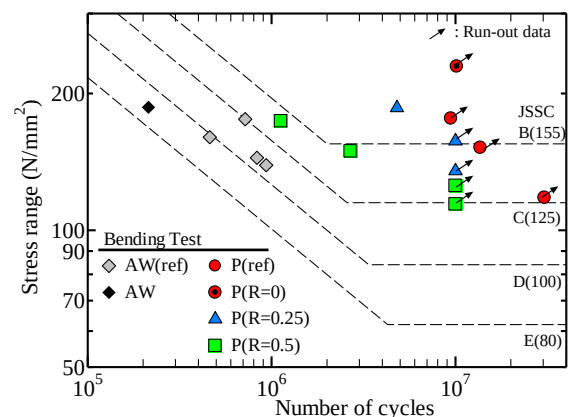


図-3 曲げ疲労試験の結果

数範囲 ΔK が下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} より小さい場合にき裂が停滞すると考える。

図-5 に溶接止端部の応力状態の概要図を示す。HP 処理後は溶接止端部には圧縮応力が残留する(図-5 左)。HP 処理後、繰返し荷重が作用すると、溶接止端には作用荷重に起因する弾性応力が作用する(図-5 右)。作用応力が応力比 0 以上で、溶接部近傍の応力が降伏応力に達しない場合、溶接部近傍の応力状態は、図-5 左図の状態と図-5 右図の状態の足し合わせとなる。

そこで、圧縮残留応力を考慮した応力拡大係数 K_n は次式で算出した。

$$K_n = K_{load} + K_{res} \quad (1)$$

$$K_{load} = F \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$K_{res} = 2 \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^a \frac{\sigma_{res}}{\sqrt{a^2 - x^2}} dx \quad (3)$$

ここで、 K_{load} は作用荷重に起因する応力拡大係数、 K_{res} は HP 処理による圧縮残留応力に起因する応力拡大係数、 F は補正係数、 a は初期き裂長($a=0.1\text{mm}$)、 σ は作用応力、 σ_{res} は HP 処理後の残留応力である。今回、 σ_{res} は X 線残留応力計測器による計測値を用いた。

また、圧縮残留応力を考慮した応力拡大係数範囲 ΔK_n は、次式で算出した。これは、 $K_{n,min}$ の場合はき裂が閉口し、き裂の進展に寄与しないことを意味している。

$$\Delta K_n = \begin{cases} K_{n,max} - K_{n,min} & \text{when } K_{n,min} \geq 0 \\ K_{n,max} & \text{when } K_{n,min} \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

(b) ΔK_n によるき裂発生条件の定量的評価

疲労試験で求めた疲労限と ΔK_n の計算値の比較を表-2、3 に示す。表-2、3 では、き裂が発生した試験体を赤字で示している。また、 ΔK_n 算出時の σ_{res} は、曲げ試験体で -190N/mm^2 、引張試験体で 260N/mm^2 である。表-2 からわかるように、曲げ試験体では、応力比に関わらず、 ΔK_n が $150\text{N/mm}^{3/2}$ 以上になると、き裂が発生した。引張試験体でも、 ΔK_n が $150\text{N/mm}^{3/2}$ 以上になると、き裂が発生した。このように、载荷形態や応力比に関わらず、 ΔK_n の指標を用いると、統一的に疲労限を評価できる可能性が示唆された。また、この値は溶接ままの鋼板の下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th}=76\text{N/mm}^{3/2}$ よりも大きな値となった。これは HP

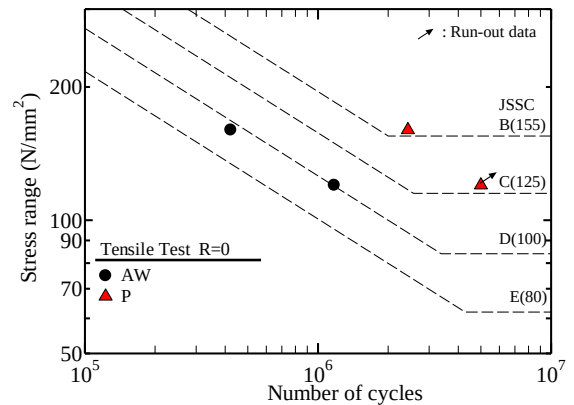


図-4 引張疲労試験の結果

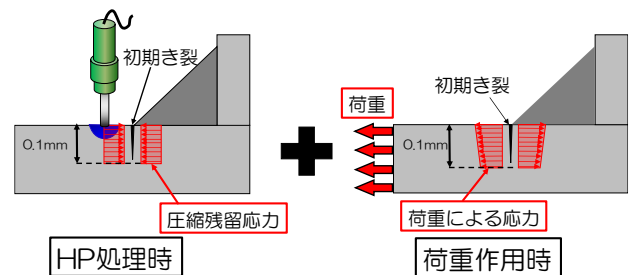


図-5 想定する応力状態

表-2 曲げ疲労試験結果と ΔK_n (赤字はき裂発生)

応力比	応力範囲 (N/mm²)	ΔK_n (N/mm ^{3/2})
0	230	148
0.25	157	126
0.25	186	168
0.5	125	135
0.5	149	162

表-3 引張疲労試験結果と ΔK_n (赤字はき裂発生)

応力比	応力範囲 (N/mm²)	ΔK_n (N/mm ^{3/2})
0	120	114
0	160	152

処理によって初期き裂近傍が加工硬化したことが影響していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、疲労試験で求めたピーニングの疲労限を、有限要素解析や残留応力計測の結果から求められる K_n によって評価することで、ピーニング処理の疲労強度向上効果を定量的に評価した。その結果、圧縮残留応力を考慮した応力拡大係数範囲 ΔK_n によって、疲労限を評価できる可能性が示唆された。