

急冷方法による残留応力分布の違いとき裂進展速度への影響

近畿大学大学院 システム工学研究科 正会員 ○ 王 虹翕
 近畿大学 工学部 土居 駿輔
 近畿大学 工学部 正会員 崎野良比呂

1. 目的

近年、鋼構造物に多数の疲労き裂が見つかり、疲労強度強化の重要性が広く認識されてきている。そこで、様々な疲労強度改善手法が試みられており、その中には各種ピーニングにより圧縮残留応力を生成することにより疲労強度向上を図るものもある。しかしながら、残留応力の分布の違い、特に板厚方向分布の違いが疲労強度に及ぼす影響は明らかではない。そこで本報では、残留応力の板厚方向分布をコントロールする方法として急冷に注目し、急冷方法によって残留応力をコントロールできるか否か、生成された残留応力の深さ方向分布の違いが疲労き裂進展に影響を及ぼすか検討した結果を報告する。

2. 残留応力生成確認実験

まず、急冷による残留応力の生成を確認するための実験を行った。試験体には、 $50 \times 40 \times 11.5$ (mm) の HT780 を用いた。本実験では、最高温度を 650°C として小型マッフル炉で加熱し、1 時間保持した後に冷媒に浸すことで急冷した。その後、X 線源として Cr-K α (17 kV, 2.0 mA) を用いた X 線回折法による残留応力測定と解研磨を交互に繰り返すことにより残留応力の深さ方向分布を推定した。実験パラメータは冷媒である水の温度 (-18°C 、 8°C 、 25°C 、 100°C) とした。 -18°C は塩を入れて冷却した。試験体の温度変化から、水温が低いほど、試験体の冷却速度が速い傾向が見られた。また、 25°C 水を試験体に流す方法 (流水冷却: Flushing) と、浸した後に攪拌する方法 (攪拌冷却: Stir) でも実験を行った。

残留応力深さ分布の測定結果を図 3-8 に示す。 100°C の場合、試験体にほぼ圧縮残留応力が生成されなかった。 8°C と 25°C では表面で -350MPa 程度の圧縮残留応力が生成され、圧縮残留応力の深さ方向分布も 800 まではほぼ同じであった。 -18°C の場合、試験体表面に -500MPa 程度の大きな圧縮残留応力が生成され、生成深さも 8°C より深いと推定される。この様に、冷媒の温度が低く、冷却速度が低いほど、表面圧縮残留応力が大きく、圧縮残留応力の生成深さも深くなる傾向にあった。

流水冷却と攪拌冷却の場合、同じ水温である 25°C で浸した場合よりも表面圧縮残留応力が大きく、圧縮残留応力の生成深さも深くなる傾向にあり、 -18°C の場合とほぼ同程度であった。ただし、攪拌冷却では表面残留応力が小さい傾向があった。

3. き裂進展実験

急冷による残留応力分布のコントロールの可能性が示されたため、疲労き裂進展に及ぼす影響を調べる実験を行った。試験体の形状・寸法を図 2 に示す。試験体としては $150 \times 40\text{mm}$ 、板厚 12mm の SM490 を用いた。板の中央部には直径 5mm の貫通孔が空けてあり、そこから板幅方向に 5mm ずつ $\Phi 0.2\text{mm}$ のワイヤカットによる初期き裂を入れている。熱処理に大型マッフル炉を用いた以外の実験

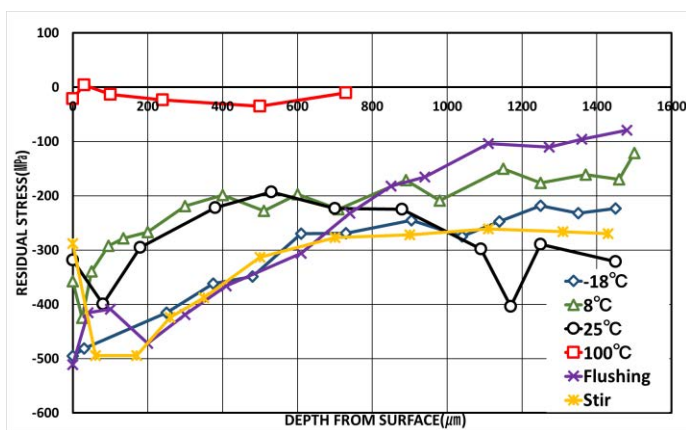


図 1 残留応力の深さ分布結果(生成確認実験)

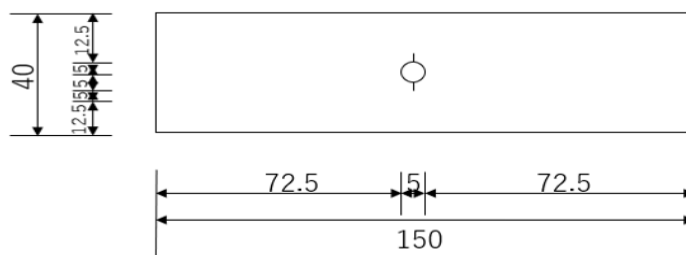


図 2 疲労試験用試験体の形状・寸法

キーワード 残留応力, 板厚方向分布, 疲労き裂進展, 急冷, X 線回折

連絡先 〒739-2116 広島県東広島市高屋うめの辺 1 番 近畿大学工学部建築学科 TEL 082-434-7000 (406)

概要は生成確認実験と同様である。実験パラメータは、電気炉での保持温度と冷却水の温度および冷却方法とした。650°Cから0°Cの冷水で急冷したのち再度650°Cまで加熱してその後炉内で焼鈍した1体(650-焼鈍)と650°Cから0°Cの冷水に漬けて急冷した1体(650-0°C)、650°Cから0°Cの冷水を流して急冷した1体(650-0°C流水)、350°Cから0°Cの冷水に浸けて急冷した1体(350-0°C)の計4体とした。冷却時の温度履歴の比較を図3に示す。熱処理後、疲労試験体には、き裂の先端に最初のグリットが来るようにグリット幅0.5mmのクラックゲージを貼付し、4点曲げ疲労試験に供した。疲労試験には100kN疲労試験機を用いた。応力振幅は板厚最外縁での応力で $\Delta\sigma=150\text{MPa}$ 、応力比は $R=0.1$ 、試験の打ち切り限界は 5×10^6 回とした。

残留応力の板厚方向分布を図4に示す。650-0°Cと650-0°C流水を比較すると650-0°Cの方が表面圧縮残留応力は大きい。圧縮残留応力の生成深さは同程度であると推測できる。650-0°Cと350-0°Cを比較すると350°C-0°Cは表面残留応力および圧縮残留応力の生成深さともに小さいことがわかる。

疲労試験の実験結果を表-1に示す。き裂が進展した試験体はすべて、圧縮側表面(裏面)には疲労き裂は達していなかった。よって、貫通き裂にはならず破断に至った。破断寿命で見ると、650-焼鈍は 8.7×10^5 回で破断したのに対し、650-0°Cでは 11.8×10^5 回で破断、650-0°C流水では 5.0×10^6 回の打ち切り限界に達し、350-0°Cでは 15.9×10^5 回で破断した。650-焼鈍の破断寿命を1とすると、破断寿命は650-0°Cで1.4倍、650°C-流水では5.8倍以上、350-0°Cでは1.8倍となっている。

すべての圧縮残留応力が生成した試験体で、圧縮残留応力を生成していない焼鈍試験体よりも破断寿命が延び、き裂進展速度も遅くなった。よって、圧縮残留応力はき裂の進展に大きな影響を及ぼしているといえる。しかし、650-0°Cと650°C-0°C流水を比較すると圧縮残留応力生成深さはほぼ同じであるが、表面圧縮残留応力の小さい650-0°C流水の方はき裂が進展せず、大きなき裂進展防止効果を示している。650-0°Cと350-0°Cを比較すると、350-0°Cは表面残留応力および圧縮残留応力の生成深さともに小さいにもかかわらず、650-0°Cよりも破断寿命が長く、平均進展速度も遅い。この様に、本研究では当初の予想と逆の結果を示した。

4. まとめ

(1) 最高温度や冷却水の温度で冷却速度を変えることにより、鋼材の圧縮残留応力分布をコントロールする可能性が示唆された。

(2) 生成された圧縮残留応力分布の違いが疲労き裂の進展挙動に影響を及ぼすことが実験的に明らかとなった。

今後さらに実験数を増やすと共に焼き入れ時効の影響も検討する予定である。

謝辞 本研究の一部は、JFEスチール(株)スチール研究所の補助を受けた。ここに記して感謝いたします。

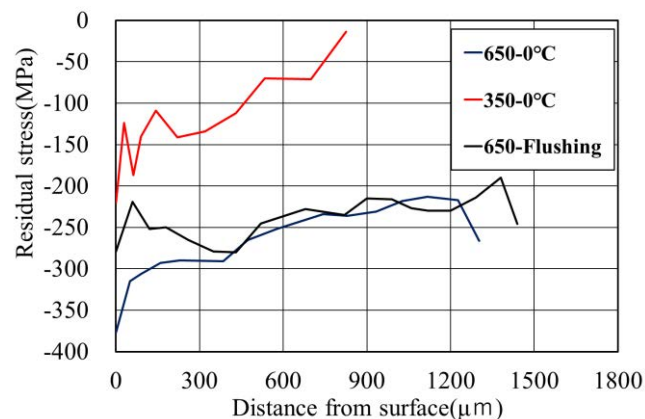


図3 冷却時の温度履歴の比較

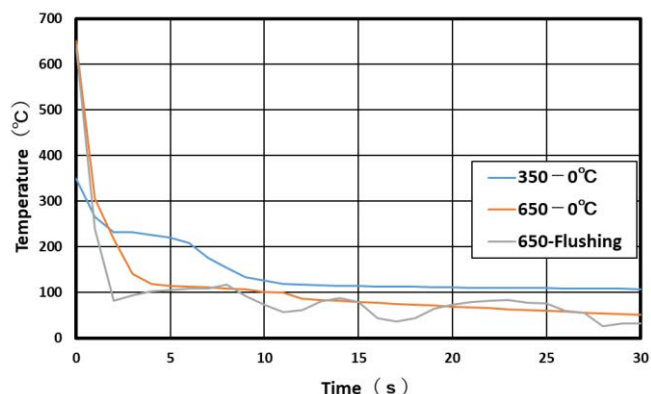


図4 残留応力の板厚方向分布(進展実験)

	$\Delta\sigma=150\text{MPa}$		
	fatigue life (cycles)	/焼鈍	Average propagation speed (mm/cycles)
650-焼鈍	868,069	1.0	5.8×10^{-5}
650-0°C	1,184,911	1.4	3.4×10^{-5}
650-Flushing	>5,000,000	5.8	0
350-0°C	1,585,792	1.8	4.7×10^{-5}

表-1 疲労試験結果(破断寿命と平均進展速度)