

634 残留応力の中性子回折による測定と有限要素法による計算

龍谷大理工 ○井上和子 中村宏 堀川武 河嶋壽一 辻上哲也
原研先端基礎研 皆川宣明

1. はじめに

1～2 Å程度の波長を持つ中性子ビームは、材料内部に数cmの深さまで侵入出来るので、中性子回折は材料内部の残留ひずみを非破壊で測定する大変有用な手段である。

この研究では、以下の材料の内部の残留ひずみを中性子回折を用いて測定した。(1) 疲労した炭素鋼丸棒の切欠底、(2) 熱処理後の油井用シームレス鋼管 (3) 燃焼合成法で作製した3層構造の傾斜機能材料[WC-10mass%Ni]-[Ni]-[WC-10mass%Ni]の複合材料部分[WC-10mass%Ni]のWCとNi、および中間層の[Ni]。測定した各場所の3方向の残留ひずみから、残留応力を求めた。

一方、上記(2)および(3)については、有限要素法解析(FEM)により残留応力の計算を行い、中性子回折による測定結果と比較検討を行った。

2. 実験

中性子回折には、日本原子力研究所の改3号炉(JRR-3M)に設置された残留応力測定用中性子回折装置RESAを用いた。RESAに試料を取り付けた状態を図1に示す。

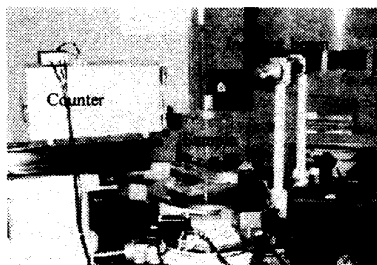


Fig. 1. Residual stress analyzer, RESA. On the right side is the incident beam line and on the left are the reflected beam line and the detector.

(1) 直径8mmの切欠底を持ったS55C炭素鋼丸棒試験片を図2に示す。応力集中計数は、 $\alpha=1.6$ である。疲労試験は、15Hz、応力比-1の条件で、172MPa、 10^7 cyclesで試験後、更に196MPa、 2.5×10^5 cyclesで行った。中性子回折測定は、入射、反射とも2mm直径のビームを使って、切欠底の1mmおき

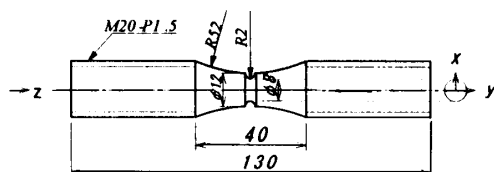


Fig. 2. Fatigue tested specimen.

のメッシュポイントで行った。

(2) 油井用13%Cr鋼管は、外径73mm、肉厚5.51mmであった。1173Kで熱処理後、外表面に303Kの水を30sの間スプレイし、空気中で常温まで冷却した。冷却過程に、 $M_s=563K$ でマルテンサイト変態が起こっている。この鋼管を測定用に155mmの長さに切り出し、切断面から62mmの位置で、肉厚方向に1mmステップで中性子回折測定を行った。

(3) 3層構造の傾斜機能材料[WC-10mass%Ni]-[Ni]-[WC-10mass%Ni]は、図3上部に示すように、直径37.2mm、厚さ12.4mmの円柱状であり、各層の厚さは約4mmである。[WC-10mass%Ni]層のSEM写真を図3下部に示す。測定は、2mm×10mmのスリットを用いて、試料中心から半径方向の各位置で、3層すべてからの反射が観測出来る状態で行った。

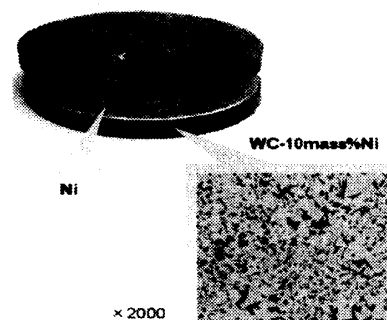


Fig. 3. Shape of the three layers sample and the SEM image of the composite material, [WC-10mass%Ni].

3. 実験結果と有限要素法解析結果

(1) 中性子回折によって得られた炭素鋼丸棒疲労試験片の切欠底における残留応力分布を、図4に示す。図2に示したように、軸方向にz軸、切欠底面上にx,y軸がとってある。最大残留応力は、x方向に0.817GPa、y方向に0.673GPa、z方向に0.422GPaで、いずれも引張応力であった。この材料の引張強度が0.786GPaであることを考慮すると、これ等の値は、理にかなっている。また、これ等の最大応力は、いずれも切欠底の外表面上にあり、疲労による破断が切欠底の外表面から始まるという実際に起こる現象と矛盾していない。

(2) 油井用13%Cr鋼管の肉厚方向に1mmおきに測定した残留応力を図5(a)に、また、有限要素法による解析結果を図5(b)に示す。実験から得られた最大引張応力は、536MPaで外表面の管軸方向にある。一方、最大圧縮応力は、内表面の管軸方向にあり、およそ-500から-600MPaの間にあると思われる。

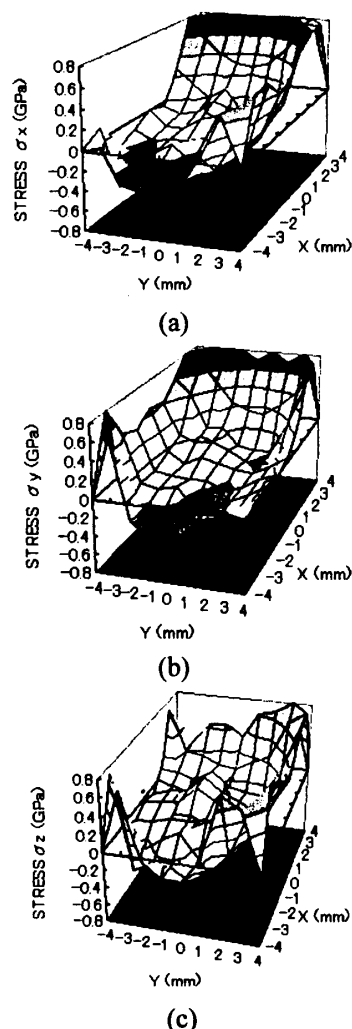


Fig. 4. Contour of the residual stress on the notch root of round fatigued steel bar. The shape of the notch root is an inscribed circle with a diameter of 8 mm.

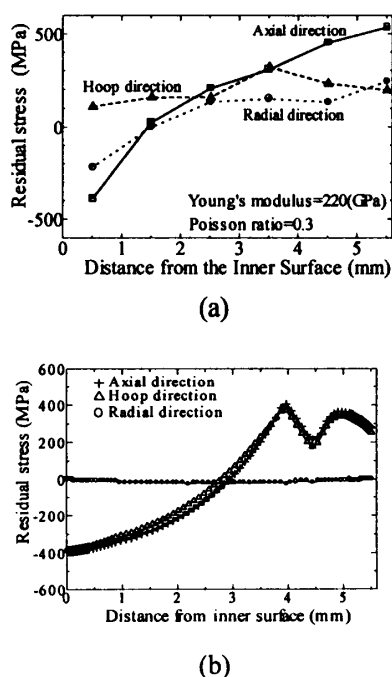


Fig. 5. Residual stress distribution of the pipe for oil wells, (a) estimated from the neutron diffraction data and (b) calculated by FEM.

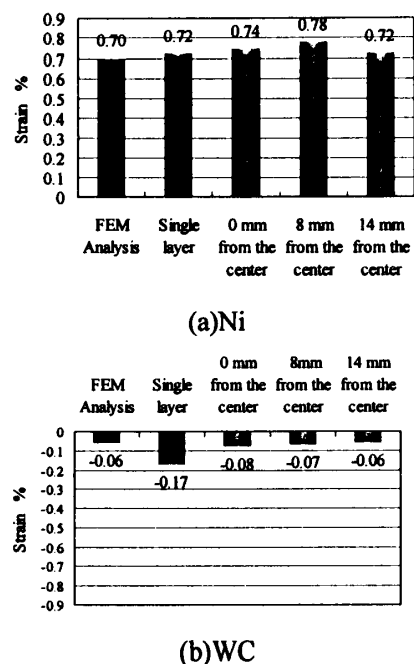


Fig. 6. Strain of (a) Ni and (b) WC in composite [WC-10 mass % Ni], obtained by neutron diffraction for single layer specimen and for three layers one. The results of FEM analysis are also shown.

(3) 3層構造の傾斜機能材料の複合材料部分[WC-10mass%Ni]のNiおよびWCの残留ひずみを図6(a), (b)に示す。図において左側から、SEM像を元にFEMで求めた複合材料の残留ひずみの計算値、[WC-10mass%Ni]1層のみの材料の残留ひずみの実験値、3層材料の[WC-10mass%Ni]層部分の中心から各位置における残留ひずみの実験値の順に示してある。各値はよい一致を示し、何れもNiが約0.7%にも及ぶ大きな引張ひずみを受け、WCが小さい圧縮ひずみを受けていることを示している。なお、実験により、3層構造の中間層[Ni]には、ほとんどひずみが入っていないことが確認された。

4. 結果の検討および考察

図5に示すように、油井用鋼管については、管軸方向以外では、実験結果と有限要素解析結果とが一致しない部分があった。シームレス鋼管を形成するために心金棒の周りで圧延ロールをする際の塑性ひずみが、その後の熱処理で完全には取り去られていなかったことが原因ではないと思われる。

3層の傾斜機能材料の複合材料部分[WC-10mass%Ni]のNiおよびWCの残留ひずみは、3層構造にしたことの影響をほとんど受けておらず、FEMによる単なる複合材料としての計算結果および単層の実験結果とよい一致を示した。中間の[Ni]層には、実験的に殆どひずみが無かったことから、高温で燃焼合成後、3層はそれぞれ独自に収縮した後、接合したのではないと思われる。