HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	平面曲げによる鋼板の残留応力変化
Author(s)	土肥, 修; Doi, Osamu; 鵜飼, 隆好 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 89, 37-41
Issue Date	1978-11-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41505
Type	departmental bulletin paper
File Information	89_37-42.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第89号(昭和53年)

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University, No. 89 (1978)

平面曲げによる鋼板の残留応力変化

土肥　修* 鵜飼隆好* 亀畑智弘**

(昭和53年3月31日受理)

Transition of Residual Stress in Steel Plate due to Plane Bending

Osamu DOI　Takayoshi UKAI　Tomohiro KAMEHATA

(Received March 31, 1978)

Abstract

The authors measured by X-ray method the change of surface residual stress and half-value breadth of the X-ray diffraction curve of worked layer in steel plate arising from plane bending, and classified the process of change into the following two types.

In the first type, the surface residual stress in bending direction decreases after the first single cycle of bending and the transverse residual stress does not change, when the sum of the initial residual stress and stress amplitude exceed its yield point. In the second type where the stress amplitude is over the fatigue limit, the surface residual stress and half-value breadth in both directions decrease gradually due to fatigue.

1. 緒　言

各種構造物の常温における破損の大半は疲労破壊によることがよく知られており，材料の疲れ強さに及ぼす残留応力の影響は重要である。一般的に繰返し応力をうける部材表面に圧縮残留応力が存在するときその部材の疲れ強さは向上し，反対に引張残留応力のときは低下するといわれている。また，機械部品の疲労寿命が予想より短いと，有害な残留応力の影響であろうという推測もよく行われる。

しかし，部材に存在する有害あるいは有益な残留応力が，繰返し応力の作用下で維持されるとは限らず，故意に与えた残留応力が消滅することも考えられる。

本研究では，圧延により付加された表面と断面内の残留応力が，平面曲げ応力の繰返しによって変化する過程をX線で測定追跡し，併せて回折プロフィルから半価幅を求めて部材の組織的な変化も明らかにしようとした。

2. 実験方法

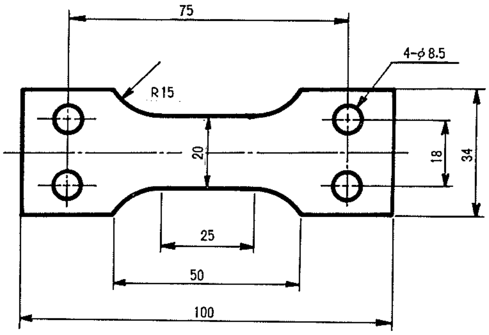
2.1 試験片

実験に使用した材料は市販の機械構造用炭素鋼板S 50 C，板厚4.6 mmである。材料の圧延方向に採取し，真空電気炉を用いて620°Cの光輝応力除去焼鈍を施したJIS 1号引張試験片に

* 機械設計学講座
** (株) 日本鉱業

表—1　機械的性質

上降伏点	kg/mm²	42.7
下降伏点	kg/mm²	41.4
引張強さ	kg/mm²	70.1
ポアソン比		0.29
縦弾性係数	kg/mm²	2.1×10^4



図—1　試験片形状寸法

よる機械的性質を表-1に示す。なお，引張試験片の表面残留応力はたかだか ±1 kg/mm² 以内であった。平面曲げ試験片は図-1の形状寸法に加工して板厚 4.2 mm まで研削し，上記と同条件の光輝焼鈍を行った後，残留応力を与えるため，長手方向に4回，更に曲りを矯正するため最後に横方向に2回冷間圧延を施した。圧下率 3.6%，最終的な板厚 4.0 mm である。

2.2　平面曲げ試験

平面曲げにはシェンク式繰返し疲労試験機を使用し，両振り応力振幅 $\sigma_a=\pm20$, ±30, ±40, ±50 kg/mm² の4種類とした。各作用応力の設定は，同形の標準試験片を用い，その両面に貼布した歪ゲージから別々に測定される歪によって行った。

曲げ繰返しは，$N=10^2$ まで手回し，それ以上は 510 cycle/min であり，全て室温で行った。

2.3　残留応力，半価幅の測定

(1)　表面残留応力の測定　　所定の繰返し回数で試験片を取り外し，平行部中央表面で長手及び横方向残留応力をX線平行ビーム型歪測定装置を用いて測定した。測定条件を表-2に示す。応力値算出は $\sin^2\psi$ 法を用い，X線入射角は 0, 15, 30, 45° の4点とし $2\theta-\sin^2\psi$ 線図の直線性を検討しながら行った。

表—2　X線測定条件

特性X線	Cr-Kα	時定数	16 sec
回折面	(211)	走査速度	1°/min
管電圧，電流	28 kV, 7 mA	カウントレンジ	1000 c/sec
フィルタ	V	照射面積	3×7 mm²
スリット	0.68°	ピーク位置決定	半価幅法

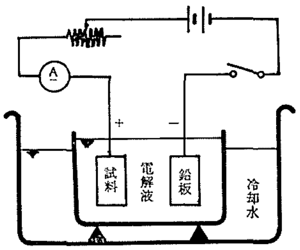
(2)　断面残留応力分布の測定　　X線による測定は非破壊法であるため，測定値は表面における値に限られ，内部の残留応力分布を知りたい場合には，表面から電解研摩などにより薄層を除去し，除去表面にX線を照射して残留応力を測定し，土肥[1)]らが提唱した全断面残留応力測定理論式により，初期状態における断面残留応力分布を計算する。実験に使用した電解条件を表-3，電解装置を図-2に示す。なお，この方法は破壊測定法であるため，断面残留応力分布測定は

表—3　電解条件

電解液組成	$FeCl_2$ 300 g $CaCl_2$ 335 g H_2O 1 ℓ	液温 °C	15～18
		電流密度 A/dm²	70

2.1に示す条件と同一条件で冷間圧延を施し，同程度の表面残留応力値を与えた試験片に所定の条件で平面曲げを加えたものについて行った。

(3) 半価幅の測定　X線入射角 $\psi_0=0°$ における回折プロフィルの半価幅を角度で測定した。



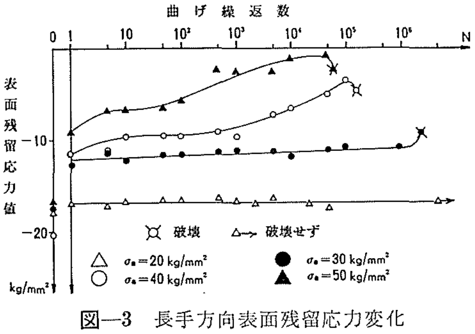
図—2　電解装置

3. 実験結果

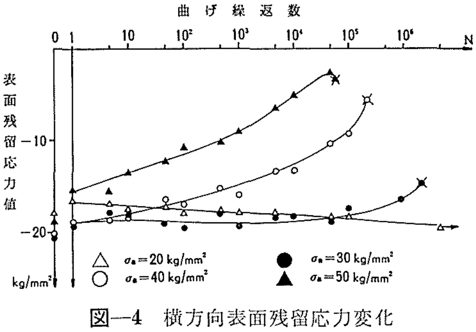
3.1 平面曲げによる表面残留応力の変化

冷間圧延により試験片の長手・横方向にはそれぞれ圧縮残留応力が付加されている。図-3は両振り応力振幅 $\sigma_a=20$, 30, 40, 50 kg/mm² に対する試験片中央長手方向表面残留応力の変化を示す。圧縮側降伏点を引張側と等しいと仮定すると，$\sigma_a=20$ kg/mm² の場合，初期残留応力と応力振幅の和は，降伏応力（圧縮側）以下であり $N=10^7$ 程度の曲げ繰返し数において，残留応力はほとんど変化しない。一方，$\sigma_a=30$ kg/mm² の場合は初期残留応力と応力振幅の和が降伏応力以上となり，最初の1回の曲げで残留応力は大きく減少するが，その後残留応力はほぼ一定の値を保ち，応力振幅が明らかに試験片の耐久限度以上の $\sigma_a=40$, 50 kg/mm² の場合には，残留応力は徐々に減少し破断に至る。応力振幅が耐久限度以上の場合，応力振幅が大きいほど残留応力の変化率は大きい。

図-4は同じく試験片中央横方向表面残留応力の変化を示す。初期残留応力と応力振幅の和が試験片の降伏応力以上となっても，最初の1回の曲げで残留応力が長手方向の様に大きく減少することはない。$\sigma_a=20$ kg/mm² の場合，残留応力はほとんど変化しないが，明らかに耐久限度以上の $\sigma_a=40$, 50 kg/mm² では徐々に減少する。横方向には作用応力の繰返しはないが，最初の1回の曲げ以外は長手方向とほぼ同様な表面残留応力変化を示す。



図—3　長手方向表面残留応力変化

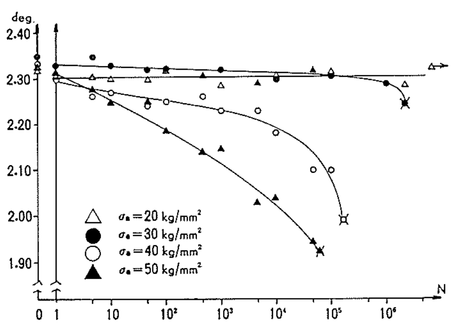


図—4　横方向表面残留応力変化

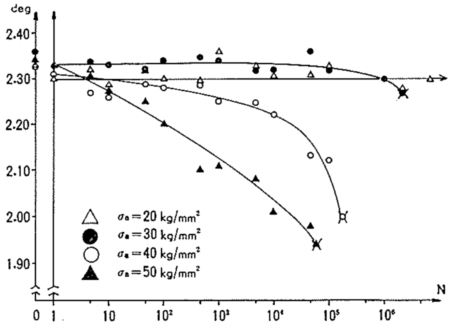
3.2 平面曲げによる半価幅の変化

X線回折プロフィルの半価幅の広がりは，結晶粒間の不均一な歪状態を表す。応力除去焼鈍された部材に冷間圧延を施すと半価幅は広がるが，これは圧延を受けることによって結晶粒が不均一な歪を生じたためと考えられている。加工を受けた試験片の半価幅が平面曲げの繰返しによってどの様な変化を示すかは，残留応力変化同様興味ある問題である。

図-5は2.1の条件で冷間圧延を施した試験片の長手方向半価幅変化を示す。耐久限度以下の $\sigma_a=20$ kg/mm² の場合，$N=6\times10^6$ 程度ではほぼ初期値を保ち試験片の組織的な変化はみられない。明らかに耐久限度以上の $\sigma_a=40$, 50 kg/mm² では半価幅は長手方向表面残留応力変化の様に最初の曲げで大きく減少することはなく徐々に減少し，さらに破断直前では大きく減少する。



図—5　長手方向半価幅変化



図—6　横方向半価幅変化

応力振幅が大きい程変化の度合が大きく結晶の内部的変化が著しいと考えられる。

図-6は横方向半価幅の変化を示し，長手方向と同様，$\sigma_a=40$, 50 kg/mm^{2}では破断直前で大きく減少する。残留応力変化と異なり，半価幅の変化は長手・横方向とも同様の傾向を示す。

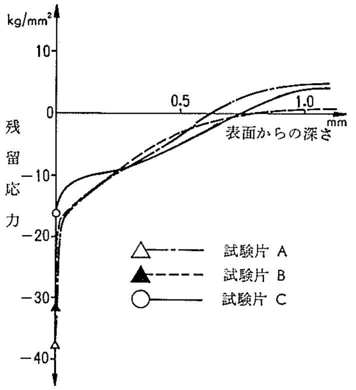
3.3　平面曲げによる断面残留応力分布の変化

表-4に断面残留応力分布の変化を測定した試験片の平面曲げ条件と表面残留応力の変化を示す。表-4の条件で平面曲げを与えた後の断面残留応力分布を図-7, 8に示す。

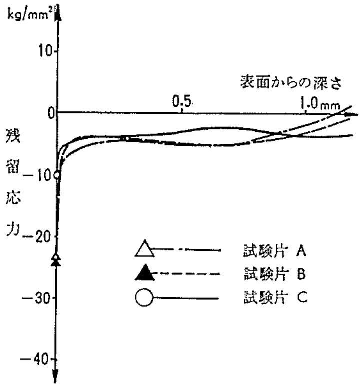
図-7における各試験片の差異は冷間圧延条件の微妙な差によるものであり，極表層部（0.01 mm 以内）を除き同様な傾向の分布と考えてよい。平面曲げを施すと表面残留応力は表-4に

表—4　表面残留応力変化

試験片	圧延後の表面残留応力 (kg/mm^2)	平面曲げ条件	平面曲げ後の表面残留応力 (kg/mm^2)
A	長手　−38.0 横　−23.5	圧延のまま	
B	長手　−34.8 横　−25.1	$\sigma_a=30$ kg/mm^2 $N=1$	長手　−31.8 横　−24.6
C	長手　−38.0 横　−19.6	$\sigma_a=50$ kg/mm^2 $N=6\times10^4$	長手　−16.3 横　−9.8



図—7　長手方向断面残留応力分布



図—8　横方向断面残留応力分布

示す様に減少し，極表層部の応力勾配は減少するが，σ_a=50 kg/mm² 程度では内部の残留応力分布はほとんど変化しないと考えられる。σ_a=50 kg/mm², $N=6\times10^4$ の平面曲げを行った後の極表層部の応力勾配は他に比較して著しく小さいが，それより内部では他と同様な分布を示す。

図-8についても試験片 A, B の極表層部の応力勾配は極めて大きい。σ_a=50 kg/mm², $N=6\times10^4$ の平面曲げを行った後は長手方向同様，極表層部の応力勾配は他に比較して著しく小さいが，それより内部では他と同様な傾向である。

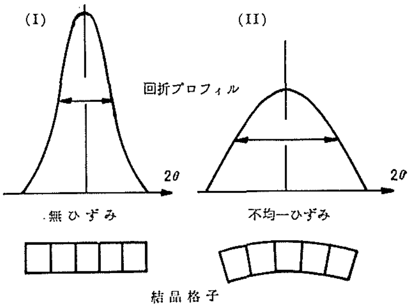
4. 考　察

本実験の結果，単一及び繰返し平面曲げによる鋼板の残留応力変化の形を次の二つに分類した。

(1) 初回の曲げによる表面残留応力の減少

初期残留応力と応力振幅の和が材料の降伏点を越す場合で，初回の両振り曲げにより作用応力方向の表面残留応力は減少し，直角方向はほとんど変化しない。極表層部は内部よりも加工の影響が著しいため，断面の残留応力の勾配は極めて大きく内部に比較して特異な状態にある。そのため初回の両振り曲げ応力の作用により，極表層部はより安定な状態に移り，表面残留応力が減少するものと考えられる。

(2) 微視的残留応力の変化



図—9　結晶格子と回折プロフィル

応力振幅が耐久限以上の場合で，曲げ繰返し数の増加に伴って疲労が進行し，作用応力方向・直角方向ともに表面残留応力は徐々に減少する。多結晶金属が圧延により塑性的に変形されると結晶粒子は圧延方向に引伸ばされて偏平となるが，結晶の相互作用により自由な変形が拘束された状態にある。多結晶金属において，歪の無い状態の回折プロフィルは図-9の(I)の様に鋭い。実験に用いた試験片は冷間圧延の影響で焼鈍材に比べて回折プロフィルは大きな広がりを示すが，疲労の進行に伴い半価幅が減少することから微視的残留応力が解放され，その結果表面残留応力が減少するものと考えられる。しかしこの変化は極表層部のみに限られ，σ_a=50 kg/mm² 程度の応力振幅では内部の残留応力及びその分布はほとんど変化していない。

文　献

1) 土肥　修，佐藤恭博："X線による平板の全断面残留応力測定法"．日本機械学会論文集，36-289 (昭45-9), p. 1413.