

Table 7. Welding conditions (Manual arc welding).

Electrodes	Welding current A.	Arc voltage	Welding speed mm/mm	Layer	Preheat
MU-3 (4mm $\phi$ )	120~130	20~30	150~200	4	—
INCO-A (5/32" $\phi$ )	D.C.R.P. 90~130	20~30	150~200	4	—

Table 8. Results of transverse tensile and bending tests of 9% Ni steel weldments.

Electrodes	Condition	T.S. kg/mm <sup>2</sup>	Y.S. 0.2% offset kg/mm <sup>2</sup>	E in 2" %	Face bend		Root bend
					D = t	D = 3 t	D = 3 t
MU-3	As welded	65.83	45.25	8.4	180° crack	Good	70° fail
	580°C × 2 h F.C.	65.00	39.50	10.2	120° //	//	Good
INCO-A	As welded	71.64	40.88	9.2	180° //	//	90° fail
	580°C × 2 h F.C.	69.81	40.14	13.2	180° //	//	Good

Table 9. Results of V-Charpy impact test with 9% Ni steel weldments. (kg-m/cm<sup>2</sup>)

Electrodes	Test temp. °C	As welded					580°C × 2 h F.C.	
		Weld metal (A)	Boundary of (A) and (B)	Heat affected zone (B)	Boundary of (B) and (C)	Base metal (C)	Boundary of (A) and (B)	
MU-3	R.T.	11.8	8.0	9.9	17.8	11.3	9.3	
		13.8	10.1	10.5	16.4	11.5	10.5	
	-100	9.1	7.0	10.0	13.0	9.3	9.3	
		8.3	6.9	10.0	14.9	9.3	9.8	
	-140	8.1	5.0	8.8	8.5	9.5	3.4	
		8.5	5.0	9.9	11.8	9.5	3.5	
	-183	5.3	4.0	5.9	7.3	6.8	1.4	
5.9		4.4	6.4	8.9	6.9	2.0		
INCO-A	R.T.	11.0	7.3	12.5	20.0	11.4	10.8	
		11.4	7.4	13.0	20.5	12.8	11.4	
	-100	9.8	8.9	9.5	11.3	10.9	10.6	
							10.6	
	-140	10.3	8.3	7.5	9.5	9.6	6.9	
							7.9	
	-183	9.9	6.8	6.8	8.3	6.8	5.8	
9.5		7.3	8.5	9.9	6.9	5.9		

が、INCO-A は応力除去焼鈍後も比較的高い強度を保持している。伸び、曲げ性質は応力除去焼鈍により相当に改善される。なお伸びの数値不足が目立つが、これは塑性変形過程において破断箇所である溶着金属の破断応力が母材の降伏点に達しないために起る母材伸びの協調不足によるもので、溶着金属自体の延伸性は相当にあると推測される。

切欠靱性に関しては溶着金属と熱影響部の境界にその低下が、熱影響部と母材の境界に上昇が見られる。前者は融合拡散による異種合金相の生成によると考えられ、とくに MU-3 の場合応力除去焼鈍によりさらに劣化の傾向が大である。後者は母材焼戻温度以上の焼戻軟化による効果と考えられる。MU-3 と INCO-A の比較としては、後者が全体的にすぐれた結果を示している。

### (101) 軌条の残留応力におよぼす 曲り量、矯正量の影響

八幡製鉄所技術研究所

青木宏一・木村 勲・○伊藤昭典

Effect of the Curvature after Rolling and Straightening on Residual Stress of the Rail.

Kohichi AOKI, Isao KIMURA  
and Akinori ITOH

#### I. 緒 言

軌条は圧延後の冷却過程で変態応力と熱応力が重畳して曲りが生じるが、これをローラー矯正した場合、長さの減少するところから、矯正時の塑性変形により軌条内部の残留応力が変動することを示している。かかる残留

Table 1. Ladle analysis.

Charge	C	Si	Mn	P	S	Remarks
A	0.72	0.13	0.76	0.017	0.025	Rail specimen of larger curvature.....No. 1~4
B	0.61	0.11	0.76	0.014	0.032	Rail specimen of smaller curvature...No. 5~8

応力が使用中の軌条製品にどのような影響をおよぼすかは未だ明らかでないが、最近曲り量、矯正量と軌条頭表面の残留応力について若干の検討を試みたので報告する。

軌条の残留応力測定方法には未だ満足すべきものがないが、H. MEIER の切出しによる方法<sup>1)</sup>、M. HELENYI らの X 線による方法<sup>2)</sup>がある。前者は長さ方向のみの測定が可能であり、かつ巨視的な平均値がわかるにすぎないが、後者は方向に制限はないが、微視的にすぎるし、測定方法に熟練を要する。本報告では軌条の頭頂面に strain gauge を貼付け、その左右に長さ方向に直角な切込みを入れた場合の歪の変化から定性的な頭頂面残留応力を測定した結果を、圧延後の曲り量、矯正量と結びつけて考察した。また一部実物軌条の繰返し曲げ疲労試験を行ない、残留応力との関係を検討した。

## II. 実験経過並びに考察

### (1) 試験試料

試験軌条の化学成分(取鍋分析)は Table 1 に示す。

試験材は 25m の 50K 軌条について圧延後の曲りの大きいもの(符号 1~4)、小さいもの(符号 5~8) 各 4 本をえらび、また別に 25m レール 1 本を用い、残留応力測定と同時に実物繰返し曲げ疲労試験を行なった。

### (2) 残留応力の測定

試料は曲り量、矯正量のそれぞれ異なる 25m 軌条から採取した 1m 長さの軌条で、頭頂面中心部に strain gauge を貼付け、これを中心に 100mm 間隔の切欠きを軌条長さ方向に直角に 0~36mm 深さまで入れたときの歪の変化を測定した。切欠き深さを順次増すときの歪の変化を Fig. 1 に示した。全般に切欠きが深くなるほど、歪量は連続的に大きくなるが、36mm 程度(軌条のアゴの線近く)になるとほとんど飽和する傾向がみえる。また矯正前の軌条は歪 ( $\Delta l/l$ ) が正であり、残留応力は圧縮であるが、これを矯正すると、歪 ( $\Delta l/l$ ) は負となり、残留応力は引張に変わる。この点は H. MEIER の結果<sup>1)</sup>とまったく一致している。この場合の残留応力の大きさは、連続的な歪の変化の飽和する所(切欠き深さ約 36mm 程度)で始めて頭頂面は拘束から解放されたと考え、 $\sigma_{mean} = 2.1 \times 10^4 \times \Delta l/l$  から縦軸に示すような頭頂部における平均残留応力が求められる。すな

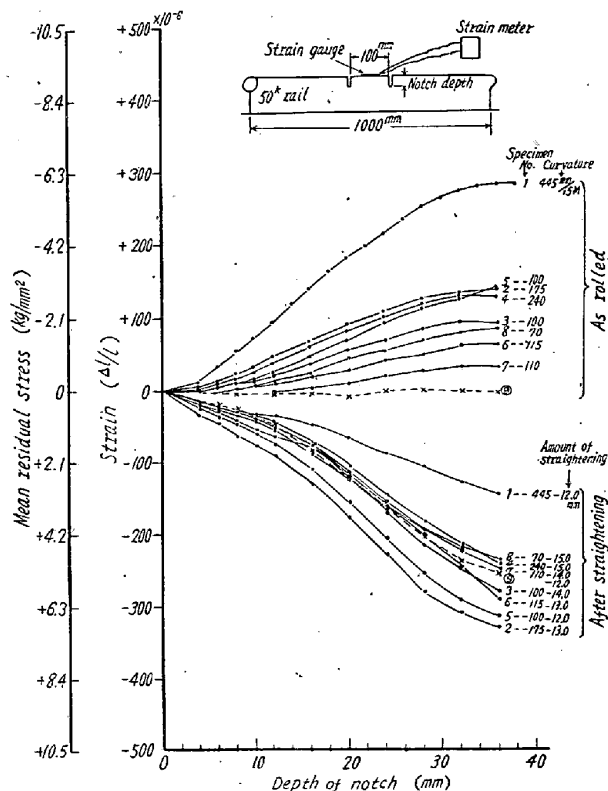


Fig. 1. Continuous change of the strain on the surface of the rail head with increasing notch depth.

わち切欠き深さ 36mm に対応する平均残留応力をみると矯正前で最大  $-6.3 / \text{kg mm}^2$  程度の圧縮残留応力、矯正後では  $+7.0 \text{ kg/mm}^2$  程度の引張残留応力が存在する。

つぎに矯正前の軌条について、圧延後の曲り量と歪または残留応力の関係を見ると Fig. 2 に示すように、圧延後の曲り量が大きいほど、頭頂部の歪または圧縮残留応力は大きくなる傾向がみえる。この場合についても、切欠き深さ 36mm に対応する残留応力をみると、曲り量が  $445 \text{ mm}/15 \text{ m}$  と非常に大きい場合は大体  $-6.0 \text{ kg/mm}^2$  程度の圧縮応力があるが、多くは  $200 \sim 250 \text{ mm}/15 \text{ m}$  以下の曲り量であつて、この場合は大体  $-2.0 \sim 3.0 \text{ kg/mm}^2$  以下の圧縮残留応力を示している。

また矯正後の歪または残留応力と矯正前の曲りの関係を示すと、Fig. 3 のように曲りが  $445 \text{ mm}/15 \text{ m}$  の場合(符号 1)は歪あるいは引張残留応力はむしろ小さく、 $250 \text{ mm}/15 \text{ m}$  以下になると、むしろ歪あるいは引張残留

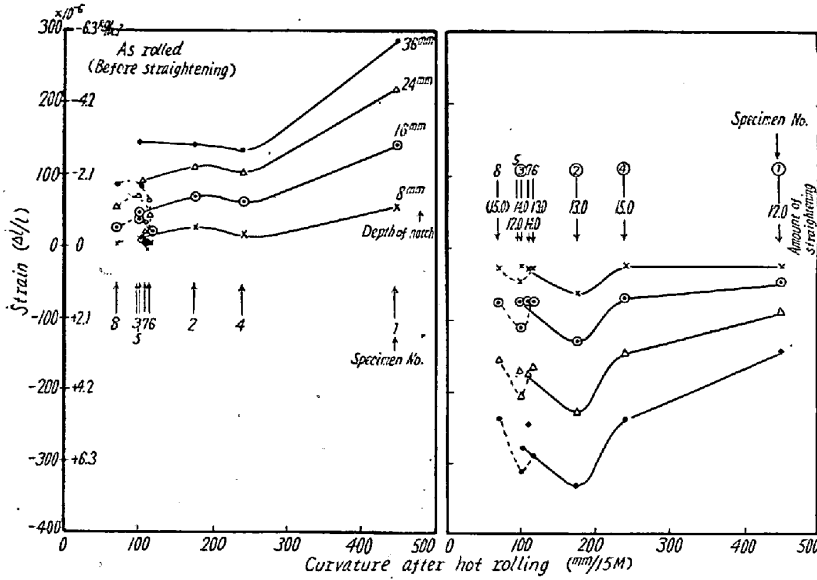
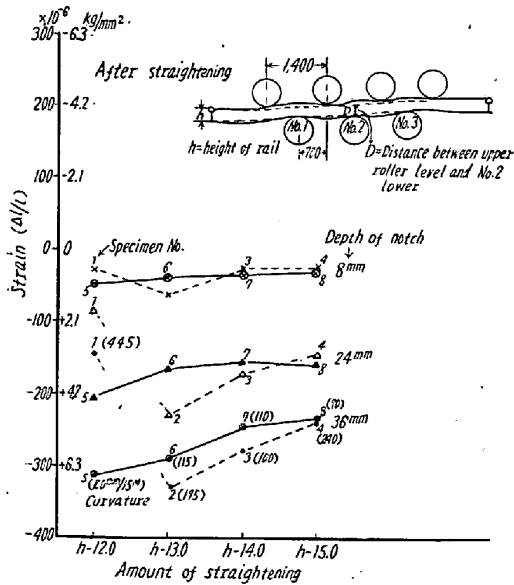


Fig. 2. Effect of curvature after hot rolling on the strain or residual stress of the rail before straightening.

Fig. 3. Effect of curvature after rolling on the strain or residual stress of the rail after straightening.



(Distance between upper roller level and No. 2 lower)  
Fig. 4. Effect of straightening on the strain or the residual stress on the surface of the rail head.

応力は大きくなる傾向が見える。ただし図中に記入したように矯正量がそれぞれ異なるので、これの影響を考慮する必要がある。

すなわち Fig. 4 は矯正量と歪または残留応力の関係を検討したもので、試料 5, 6, 7, 8 は曲り量が 100 mm/15m 前後で比較的似かよつた値を示すので、これと矯正量の間をみると矯正量の大きくなるほど、むしろ歪あるいは引張残留応力は小さくなる傾向が見える。

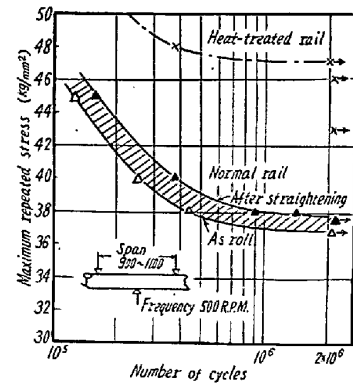


Fig. 5. Results of the bending fatigue test of the rail. (S-N curve)

すなわち矯正量  $h-12.0\text{mm}$  の場合の頭頂部平均残留応力は  $+6.4\sim 6.5\text{kg/mm}^2$  に対し、 $h-15.0\text{mm}$  の場合は  $+5.3\sim 5.4\text{kg/mm}^2$  とわずかながら小さくなつている。また試料 2~4 はこれらよりさらに

に曲り量が大きいものであるが、同様に矯正量が大きくなるほど、歪または引張残留応力は小さくなる傾向が見える。しかし試料 1 の 445mm/15m と曲りがけたはずれに大きいものはこれらの傾向とはずれて、矯正後の残留応力は可成り小さい結果を示す。

かかる矯正前後の軌条試験片 (試料 9) について pulsator による実物軌条の片振り曲げ疲労試験を行なつた。Fig. 5 はこの結果を示したもので、図には参考までに焼入軌条の結果も併せて示した。これから判るように、矯正前 (圧延まま) の軌条も、矯正後の軌条も実物の曲げ疲労強度は  $37\sim 38\text{kg/mm}^2$  と大差のない結果を示しており、矯正前の頭頂部の圧縮応力、あるいは矯正後の引張応力の影響はほとんど現われていない。また参考値として示した焼入軌条の疲労強度は  $46\sim 47\text{kg/mm}^2$  を示し約  $10\text{kg/mm}^2$  程度高い。

文 献

- 1) H. MEIER: "Eigenspannungen in Eisenbahnschienen" VDI Zeitschrift, 81 (1937) 12, p. 362~363
- 2) M. HELENYI: "Handbook of Experimental Stress Analysis", p. 512~513