ずい道内の腐食環境とレールの腐食疲労*

小 瀬 豊** 露 木 昭 治**

Corrosive Environment in Tunnel and Corrosion Fatigue of Rail

Yutaka Kose and Shoji Tsuyuki

The life of rail in tunnel is very short compared with that out of the tunnel itself. A serious problem hereby is that acidic gas from steam locomotives creates a corrosive condition which attacks rail and develops cracks in rail joint areas.

To solve problems of rail joint failure due to corrosion, a fatigue test was conducted by dripping on the specimen some corrosive liquids—neutral tap water or tap water+H₂SO₄ (pH 3.5 and 2.2). The results show that the endurance limit decreases rapidly with decreasing value of pH.

1. ま え が き

一般の路線においてはレールは平均 30 年近くも使用されるが、ずい道内では平均 5～6 年程度で交換される。レールが使用に耐えなくなるのは 1) 列車の走行による頭部の摩耗 2) 主として腐食と摩耗による断面積の減少(衰損) 3) 亀裂、きずなどの発生(き損) などによるものである¹⁾。一般には 1), 2) により交換されることが多いが、ずい道内では 3) が多い。レールき損は始めから存在する欠陥によることもあるが、ずい道内においては疲労亀裂と見られるものが多く、使用し始めてからある年数経過してからき損が顕発するようになる。この年数はずい道により相違するが経験的に知られており、き損が顕発する前に交換してしまう。

道ほど煙の滞留がながく、また乾燥し難いなど腐食の条件がきびしいためと考えられる。

このようにずい道内では比較的短期間でレールを交換しているにもかかわらず、レールき損の件数は軌道 100 km 当り年間 150～200 件に達し、これはずい道外の数倍である。

ずい道内のレールがずい道外に比較して大きな応力を受けるという理由はありません。き損の多いのはレールの強度特に荷重の繰返しによる疲労強度が低下していると考えるのが妥当と思われる。腐食が疲労強度を低下させることについては腐食疲労として多くの研究がある。しかしながら淡水あるいは塩水による腐食が多く、酸性の腐食についてはほとんどない。

今回、ずい道内の腐食環境を調査し、ずい道内外での腐食環境(主として pH)の相違がレールの疲労強度に及ぼす影響を小野式回転曲げ疲労試験機により実験室的に検討した。

2. ずい道内の腐食環境

疲労亀裂の現われるのはレール継目のボルト孔に多く、蒸気区間では特に著しい。蒸気区間のずい道では蒸気機関車より排出される酸性ガスのため、レール表面の水分が酸性化することが考えられるので、レール、タイプレート、大釘などの表面付着物、あるいはずい道側壁のすすなどを採取して pH を測定した。表 2 に測定結果の一部を示す。レール、タイプレートなどの付着物は主として腐食生成物であるが、すす、機関車からの撒砂(空転防止のための)、ブレーキブロックの摩耗粉などが混入する。また表 2 において電食生成物としてあるのはレールとタイプレートのすき間、レールと大釘との接触部などに見られる泥状のものである。pH の測定法としては試料 1 g に蒸留水約 0.5 cc を加え、バックマンガラス電極 pH 計を使用して測定した。通常の試料はか

表 1 主要ずい道におけるレールの耐用年限

耐用年限	蒸 気 区 間			電 気 区 間		
	ずい道数	軌道延長 m	ずい道長 平均 m	ずい道数	軌道延長 m	ずい道長 平均 m
10	76	35,298	464	22	6,070	276
9	25	13,294	532	5	1,320	264
8	44	29,236	664	12	13,522	1,127
7	55	32,212	586	15	4,073	272
6	78	56,887	729	18	9,314	517
5	43	41,155	957	9	19,498	2,266
4	33	37,435	1,134	10	25,943	2,594
3	17	15,992	941	3	4,565	1,522
2	—	—	—	1	1,047	—
1	—	—	—	1	1,056	—
1～10 yr 累 計	371	261,509	705	96	86,408	900
	平均耐用年限 6.4 yr			平均耐用年限 5.6 yr		
1～5 yr 累 計	93	94,582	1,017	24	52,109	2,171
	平均耐用年限 4.3 yr			平均耐用年限 4.2 yr		

表 1 は日本国有鉄道における主要ずい道内のレール耐用年限を集計したものである。蒸気、電気区間とも長いずい道ほど耐用年限の短い傾向にある。これは長いずい

* 昭和 35 年 2 月 腐蝕防止第 97 委員会において発表

** 鉄道技術研究所(東京都北多摩郡国分寺町)

表 2 レール表面付着物その他の pH

場 所	試 料	pH	場 所	試 料	pH
蒸気区間 ずい道	石 北 レール頭部	3.8	熊 坂	レール頭部	3.4
	レール腹部	4.3		レール腹部	4.8
	大 沢 田 レール腹部	4.2	葉 原	レール頭部	3.9
	タイプレート	3.5		側壁のすす	2.3
	矢 引 レール腹部	4.4	第 3 湯 槽	タイプレート*	6.4
	側壁のすす	3.3		タイプレート*	2.1
	第 2 塚 山 レール継目部	4.8	第 4 湯 槽	レール腹部	8.5
	側壁のすす	3.0		レール継目部	8.0
	冠 着 レール頭部	3.1	日 本 坂	大 釘 頭部*	1.9
	継目板内側	3.9		レール底部	7.7
	勝 山 レール頭部	3.7	丹 那	タイプレート*	6.4
	レール底部	3.8		タイプレート*	2.1
交流電気区 間ずい道	子 不 知 レール頭部	3.1	深 坂	レール頭部	8.9
	側壁のすす	2.9		ばねクリップ	7.0
	レール腹部	2.9	葉 原	レール頭部	7.6
	レール底部	4.0		レール腹部	6.0
親 不 知	レール頭部	4.0	親 付 近	レール腹部	5.2
	レール底部	4.0		レール腹部	5.5
くりから	レール頭部	3.7			
	タイプレート	2.8			
	レール底部	3.7			

* 電食生成物

なりの水分 (20~27%) を含んでいるのでそのままでも pH の測定が可能であったが、中に水分の少ない試料もあり電導度が低い状態のままの状態でも pH を測定することが困難であったので、どの試料にも蒸留水を加えて測定することとした。従って蒸留水による希釈のため測定値は若干高く出てくると思われる。

これらの試料の一部につき青山²⁾は SO_4^{2-} , Cl^- などの化学分析を行ない、また X 線回折、電子回折により結晶構造を検討した。

これらの結果を総合すると次の通りである。

1) レール、タイプレートその他の付着物の pH は蒸気区間では 2.5~5.0 の程度で、いずれの部分もかなり強い酸性を示す。酸性の程度はずい道によっても相違するが、一つのずい道においても場所により相違する。たとえば漏水箇所上で上から水が滴下しているような場所では水のアルカリ度により酸性が中和されるためか、若干 pH が高い傾向にある。また側壁のすすは他より pH が少しく低い。

2) 電気区間での pH は 6~8 の中性付近のものと、2~3 程度の強い酸性のものとに分けられる。後者は電食生成物である。電食生成物が強い酸性を示すのは電食により生じた Fe^{++} によるものと考えられる。この場合電食のカソード部分は非常に離れた所に存在するから、これよりの OH^- の補給がない。従って Fe^{++} の当量に近い H^+ が生ずることになる。このように電食部分では電食の他に酸性腐食も同時に伴って非常に腐食が促進されることは注目すべきことである。交流電気区間は深坂ずい道を調査しただけであるが、電食生成物は認められず付着物も強い酸性を示さなかった。

3) 蒸気区間ずい道の付着物は SO_4^{2-} を平均 0.2% 程度含み Cl^- は微量であるのに反し、電食生成物では Cl^- が多い。すなわち蒸気区間では主として硫酸酸性であるが電食生成物は塩酸性である。

4) 付着物の X 線回折、電子回折の結果では蒸気区間の腐食生成物には主として $\alpha\text{FeO}\cdot\text{OH}$ が多く現われ、電食生成物には $\gamma\text{FeO}\cdot\text{OH}$, $\alpha\text{FeO}\cdot\text{OH}$ の外 $\beta\text{FeO}\cdot\text{OH}$ が現われる。このことは上記の硫酸酸性と塩酸性の相違と関連するものと考えられる。

5) レール腹部に $50\times 30\times 4\text{ mm}$ のレール材試験片を取りつけ、約 4 ヶ月にわたる暴露試験を行なった結果、石北ずい道では 36~59、冠着ずい道では 23~48 $\text{mg}/\text{dm}^2\cdot\text{day}$ の腐食速度が得られた。

3. 腐食疲労の実験方法

(1) 疲労試験機

小野式回転曲げ疲労試験機を使用し、回転数は 1,520 ~ 1,530 rpm で行なった。回転曲げがレールの疲労強度を推定する目的に最も適しているとは思われないが、従来の腐食疲労の研究はほとんど回転曲げで行っており結果の比較に都合がよい。また実際のレールにかかる応力波形はかなり複雑なものであろうから、疲労試験機で正確に再現させることは困難と考えられる。

試験片に腐食液を滴下しながら疲労試験を行なう場合 (wet) には試験片にアクリル樹脂製の円板を取りつけ (図 1)、同じくアクリル樹脂製のセルの中で回転させ腐食液が飛散して試験機を傷めることを防止した (図 2)。

図 1 疲労試験片

図 2 腐食疲労試験装置

(2) 試験片

長さ 290 mm, 直径 15 mm の丸棒で中央部約 30 mm は直径 10 mm にしてある (図 1)。試験レールは表 3 に

表 3 試験レール

レール種別	50 kg レール		
製 造 者	F 社 (釜石)		
Charge No.	5181		
製 造 年 月 日	1958-2-15		
化 学 組 成 (%)	C 0.69, Si 0.08, Mn 0.75	P 0.006, S 0.019	
引張強度 (kg/mm ²)	(素材) 84.5, (鍛造) 75.6	(素材) 86.5, (鍛造) 73.0	平均 85.5, 平均 74.3
硬 度 (HB)	(素材) 255, (鍛造) 201	(素材) 262, (鍛造) 192	平均 259, 平均 197

示した 50 kg レールで、頭部より次の 2 種類の試験片を製作した。

素材： レール頭部より上記の寸法に削り出したもの。

鍛造： レール頭部を鍛造して直径 17~18 mm の丸棒とし、900~950°C に加熱、灰冷した後削り出したもの。

鍛造したのは多数の試験片を必要としたので試験片の製作を容易にするためである。鍛造試験片は引張強度、硬度とも素材に比較して低下しているが、これは鍛造後の熱処理の影響と考えられる。

これらの試験片は試験前に最終 04 の研磨紙で研磨しマイクロメーターで直径を測定した。試験片に加わる応力の計算はいずれも試験前の直径により行なった。Wet で試験を行なう場合、腐食速度が大であると試験中に直径が減少して試験片に加わる応力は変化するが、これについては後述する。

試験片は腐食液を滴下せずに疲労試験を行なう場合 (dry) には防錆油を塗布し、wet で行なう場合は溶剤で

表 4 浸漬試験
試験片 レール頭部 50×30×4 mm

腐 食 液	液の pH	浸漬時間 hr	腐食減量 mg		腐 食 速 度 mg/dm ² ·day
			測定値	平 均	
水 道 水	始 7.62 終 7.67	168	44.4 41.9	43.2	17
水道水+H ₂ SO ₄	始 3.51 終 3.85	6	3.0 3.1	3.1	34
水道水+H ₂ SO ₄	始 2.20 終 2.38	6	47.4 43.4	45.4	500

表 5 水道水の分析値 ppm

性	状	無 色 透 明
溶 解 固 形 分	pH	7.2
硫酸イオン	イオン	87
塩素イオン	イオン	6.8
シリカ	イオン	5.1
M アルカリ度	イオン	9.0
総カルシウム	イオン	37.9
マグネシウム	イオン	41.3
採取年	硬 度	37.0
	硬 度	4.3
	硬 度	1960-2-16

十分洗浄した。

(3) 腐 食 液

腐食液は表 4 に示すような 3 種類で、東京都の水道水およびこれに硫酸を加え pH を 3.5±0.1, 2.2±0.1 に調整したものである。腐食液はガラス製の流量計を通して、毎分 3.5~5.0 cc の割合で試験片に滴下した。

表 4 はこれらの腐食液について同じレール頭部より製作した 50×30×4 mm の試験片を浸漬して腐食減量を求めた結果である。表 5 に水道水の分析値を示す。pH は季節により 7.0~7.6 の範囲で変化した。疲労試験、腐食試験とも室温で行なわれた。

4. 腐食疲労の実験結果と考察

図 3 に実験結果を示す。縦軸に応力、横軸に破断までの繰返数の常用対数をとって、S-N 線図として示した。プロットに矢印をつけたものは繰返数が 10⁷ をこえても破断しなかったもので、その回数で試験を中断したものである。素材の wet の試験は応力の低い場合だけ行ない S-N 曲線は省略した。

素材：□ dry □ 水道水 ⊗ 水道水+H₂SO₄
pH 3.5 ■ 水道水+H₂SO₄ pH 2.2
⊠ dry, 短試験片
鍛造：○ dry ○ 水道水 ⊗ 水道水+H₂SO₄
pH 3.5 ● 水道水+H₂SO₄ pH 2.2

図 3 レール材の疲労試験の結果

は この影響がかなり大きくなるので、試験後切欠試験片用のマイクロメーターで最少直径を求め、応力の変化をプロットよりの点線で示した。直径の減少が 0.1 mm 以下のものは応力変化が 3% 以下であるから省略した。

以上のように直径減少による応力変化を参考のために示したが、実際にはあまり考慮しなくてよいように思わ

れる。なんとすれば、疲労亀裂が比較的初期にすでに発生し始めると考えれば、亀裂が発生する時期における応力は試験前の直径より算出した応力、すなわちプロットの応力とみて大差ないからである。

実験結果を要約すれば、

1) Dry の疲労試験では素材、鍛造試験片とも $N=10^6$ 付近より $S-N$ 曲線が水平となり、明らかな疲労限を示す。疲労限は素材で 32.5, 鍛造で 27.5 kg/mm² を示した。鍛造試験片の疲労限が素材より低いのは鍛造後の熱処理の影響とみられる。また素材の dry についての実験では一部に長さ 200 mm の短い試験片を使用した、当然のことながら試験片の長さは結果にほとんど影響を与えない。

2) 鍛造試験片の wet の結果は dry に比較し $S-N$ 曲線全体が下がり、 $N=10^7$ の付近でも水平とならず明らかな疲労限を示さない。この傾向は pH の低いほど著しい。

$N=10^7$ での応力すなわち時間疲労限は中性で 19.0, pH 3.5 で 14.5, pH 2.2 で 10.0 kg/mm² であり、それぞれ dry の 27.5 kg/mm² に対し 69, 53, 36% である。

3) 素材試験片の wet の結果は $S-N$ 曲線は求められていないが、 $N=10^7$ での時間疲労限は中性では鍛造試験片より若干高く、酸性では鍛造試験片とあまり変らない。dry での疲労限が鍛造試験片より大きいことを考慮すれば、dry に対する割合は中性では同じ程度で、酸性では鍛造試験片よりさらに小さくなる。

以上の実験結果を文献に表われた結果と比較してみれば、岡本、北川³⁾らはレール材について井戸水を噴霧させて回転曲げ疲労試験を行なった結果、dry の疲労限 34.5 に対し wet では 25 kg/mm² ($N=10^7$) を得ている。また Jensen⁴⁾はレール腹部より T 型断面の試験片を取り、水道水に硫酸を加えた腐食液 (pH 5.4) を用いて両振曲げ疲労試験を行なった結果、dry の疲労限 23.1 に対し wet では 16.8 kg/mm² の値を得ている。本実験の結果はこれらの文献に表われた傾向と一致している。

前述のようにずい道内外での腐食環境の大きな相違は pH にある。水道水を腐食液とした中性の場合はずい道外に相当し、pH 3.5 の場合は腐食速度よりみれば蒸気

ずい道の平均的な条件と考えられ、場所によってはさらに強い腐食条件を考慮する必要がある。図 3 における素材の $N=10^7$ における時間疲労限は水道水の場合は 22 kg/mm², pH 3.5 では 14 kg/mm² 程度で約 2/3 である。実際のレールに加わる応力の繰返数は車輪の通過する回数とみられるから、たとえば通トン 2,000 万 t/yr 程度のレールでは毎年約 2.5×10^6 回の繰返しを受けることとなり、比較的短期間で $N=10^7$ に達する。さらに図 3 の $S-N$ 曲線で留意しなければならないのは、中性では $N=10^7$ 付近でかなり水平に近くなっているが、酸性では下降の傾向をもっていることで、 $N=10^7$ の時間疲労限以下の応力でもかなり影響を与えることである。以上のように本実験の結果は蒸気区間ずい道内でレールき損の起きやすいことを定性的に説明し得るものと考ええる。

なお本実験における試験片は研磨した表面をもつものであり、実際のレールでは長期の腐食によりかなり凹凸のある表面をもつ。このような表面状態の影響は当然考慮しなければならない。この点については今後引き続いて検討致したい。

5. ま と め

ずい道内のレールが非常に短命であるのでその原因を検討しあわせて対策を樹立するため、ずい道内の腐食環境を調査しレール材について腐食疲労の実験を行なった。その結果、蒸気区間ずい道内では主として機関車よりの酸性ガスによる腐食のため、レールの疲労強度が低下して短命となるものとみられる。

終りにずい道の調査に当り御協力いただいた各鉄道管理局保線課ならびに保線区の関係者、疲労試験について種々御助言を受けた当研究所榎本信助、中村林二郎、山中芳夫の諸氏、試験片の製作にあたられた当研究所試作工場、金属材料研究室の方々に深く感謝の意を表する。

(昭和 35 年 11 月 16 日受理)

文 献

- 1) 沢田、字塚:「新軌道材料」(鉄道現業社)(1960)
- 2) 青山:第 6 回腐食防食討論会予稿, p. 137 (1959)
青山:理化学研究所報告, 36, No. 2, 256 (1960)
- 3) 岡本、北川:「腐食レールの疲労強度に関する研究報告書」日本保線協会 (1959)
岡本、北川:「レールの腐食疲労強度の研究報告書」日本保線協会 (1960),
- 4) R. S. Jensen: A. R. E. A., Bull., 51, 640 (1950)
R. S. Jensen: *ibid.*, 52, 680 (1951)