

波状磨耗レールが受ける衝撃の測定

正 員 小 野 一 良*

MEASUREMENTS FOR IMPACT LOADS CAUSED BY CORRUGATIONS IN RAIL SURFACES

By Dr. Eng., Kazuyoshi Ono, C.E. Member

Synopsis : The author has measured the shape of the corrugated wear in the rail surface of the sub-urban railroad and has found that the wave length of the corrugation ranges from 40 to 50 cm, and that the phase difference between the corrugations in the left and the right rails is equal to 180°. Then he has measured the bending stresses and depressions in the rail developed under running vehicles. These records show

- (a) that the stresses and depressions in the rail have many peaks and that the number of the peaks coincides with that of the waves of corrugations over which the wheels run,
- (b) that the system composed of the unsprung weight of the vehicles and the track is forced to vibrate when the vehicles run over the corrugation,
- (c) that the wheels of the electric locomotives, the passenger cars and the motor cars impose far greater impact loads on the rail compared with those imposed by the goods wagons,
- (d) that the impact increases with the speed of the vehicles when they run at the speed over 30 km per hour and reach their maximum at the speed 50 km per hour,
- (e) and that the friction between the plates of the laminated car spring has a damping effect on the vibrations caused by the corrugation.

要 旨 大都市付近の国鉄電車運転区間に発生した波状磨耗レールについて、その形状ならびに走行車両によつて軌道に生ずる衝撃および振動を測定した。これより波状磨耗の形状と車両のばね下重量の振動との関連を求め、かつ車両の型式ならびに列車速度が振動振幅ならびに衝撃の大きさに及ぼす影響を調査した。

1. 緒 言

著者はさき北陸線に発生した波状磨耗レールについてその形状ならびに走行車両によつてレールに生ずる衝撃を測定した。その結果、波状磨耗の波長は 30~40 cm となること、左右のレールに生ずる波状磨耗の位相はほぼ 180° 異なること、波状磨耗レールが受ける衝撃は機関車、客車、空貨車において大きく、積載貨車において小さいことを発見し、土木学会論文集第 24 号（以下前論文と称す）に発表した¹⁾。北陸線は汽車運転区間であつて 37 kg レールが敷設されているが、大都市付近の電車運転区間の 50 kg レールに発生した波状磨耗においても同様な状態にあるかどうかを確かめ、かつ列車速度と衝撃との関連を知るために本研究を行った。

2. 波状磨耗の形状

大都市付近の電車運転区間のレールには各所に波状磨耗が発生しているが、特に中央線 中野—高円寺間 15.800~15.850 km 間下り線には顕著な波状磨耗が発生していた。この区間には 1934 年 6 月製造の 50 kg 25 m レールを昭和 15 年に敷設したが、昭和 22, 23 年頃から波状磨耗の発生を認め、最近 2~3 年の間（昭和 28 年以降）に急に進行した。レール頭部の磨耗量は 15.800~15.825 km 間において 6~7 mm に達し、15.825~15.850 km 間において 2~4 mm に達していた。マクラ木 39 丁配置、A 型タイプレート敷設、螺釘使用、ふるい砂利道床であつて路盤の振動が著しいため道床の法肩は崩れ、マクラ木はその下面近くまで露出していた。この区間は高さ 1~2 m の築堤である。

15.800~15.825 km 間下り線の左右レールに発生した波状磨耗の形状を 図-1 に示した。左右レールともに顕著な波状磨耗が発生しており、左右レールの波状磨耗の位相がほぼ 180° 異なることが認められる。15.825~15.850 km 間においては左側レールだけに顕著な波状磨耗が認められ、その一部を 図-2 に示した²⁾。これらの図から認められるごとく波状磨耗の波長は 40~50 cm となり、深さは 0.8~1.2 mm に達している。

* 工学博士、金沢大学教授、工学部土木工学教室

図-1 中央線下り線 15.800~15.825 km 間波状磨耗

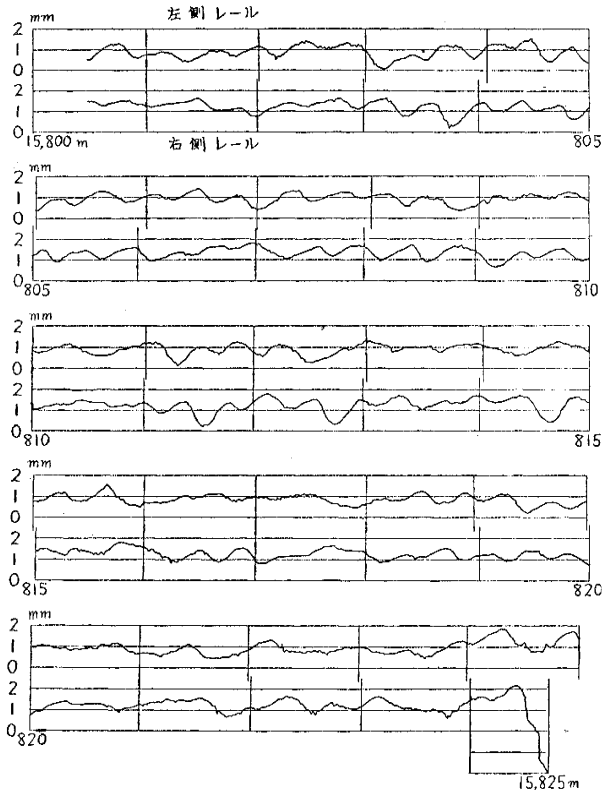
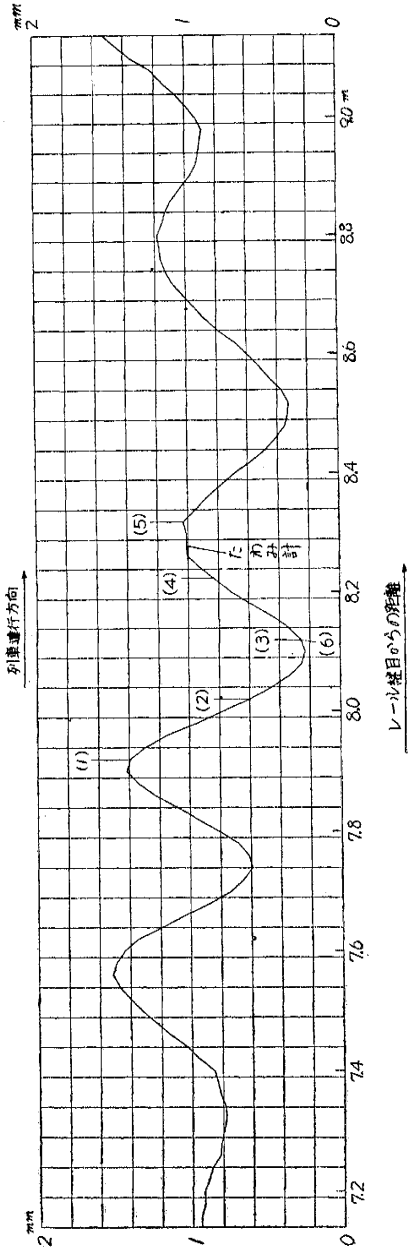


図-2 中央線 中野-高円寺間 15.833 km 付近波状磨耗 (下り線, 左側レール)



3. 曲げ応力の測定

波状磨耗レール底部の軌間外側面または軌間内側面にワイヤストレインゲージを貼りつけて列車通過時における曲げ応力を測定した。図-2における(1), (2), (3), (4), (5)は軌間外に取りつけたゲージの位置であり, (6)は軌間内に取りつけたゲージの位置である。測定記録の数例を図-3~6に示した。

図-3, 4, 5は貨物列車による記録の一部である。図-3においてゲージ(1), (5)は各車輪の通過によって大きな山1コとその両側に続く小さな山とを生じている。これに対してゲージ(3)は各車輪の下においてほぼ同じ大きさの山が2コならんでいる。これは波状磨耗の山においては図-7(a)に示すごとく静的曲げ応力の山と衝撃による曲げ応力の山とが重なり、

波状磨耗の谷においては図-7(b)に示すごとく静的曲げ応力の山と衝撃による曲げ応力の谷とが重なっていることを示す。ゲージ(1)の記録に較べてゲージ(5)の記録における中央の山が低い理由は図-2に示すごとくゲージ(1)の位置における波状磨耗の山に較べてゲージ(5)の位置における山が低いためと考えられる。ゲージ(2)と(4)にはゲージ(1), (3), (5)の中間の過程があらわれている。

図-6は電車による記録の一部であるが, このときにはゲージ(4)の記録が図-7(a)に相当し, ゲージ(2)の記録が図-7(b)に相当している。すなわち波状磨耗の上り掛りにおいて静的曲げ応力の山と衝撃による曲げ応力の山とが重なり, 下り掛りにおいて静的曲げ応力の山と衝撃による曲げ応力の谷とが重なっていることを示している。このような差を生じた原因を考察すると機関車においては特に衝撃が大きく, 車輪は波状磨耗の山から山へ飛び移り, 波状磨耗の谷には接触しないためと考えられる。これに対して電車の車輪は軸ばねの伸縮に伴う摩擦抵抗が小さいため波状磨耗の谷にも接触して波状磨耗の上り掛りにおいてレールに最大の衝撃を加えるた

図-3 波状磨耗レールに生ずる曲げ応力

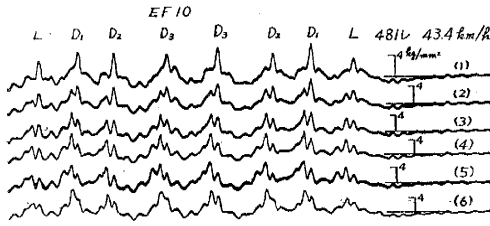


図-4 同左

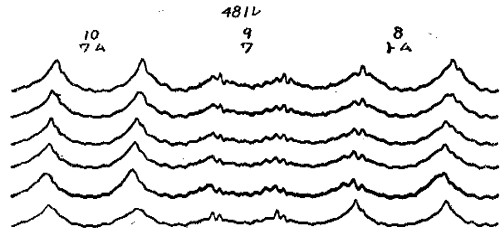


図-5 同上

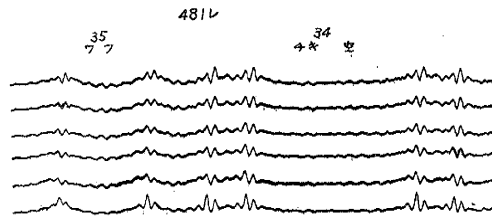


図-6 同上

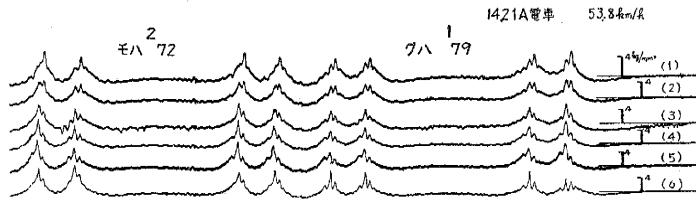
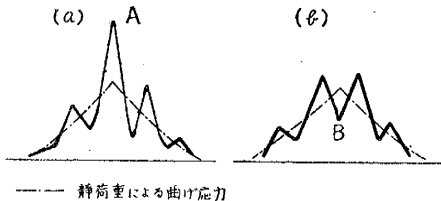


図-7 静的曲げ応力と衝撃による曲げ応力との関連



めと考察される(前論文の計算例参照)。

図-4, 5には各種の貨車によってレールに生ずる曲げ応力を示した。軸重の大きなトム、ワムによる衝撃が少なく、軸重の小さなワ、チキ、ワフによる衝撃の大きいことがあらわれている。特にチキにおいてはゲージ(1)より(5)に至るすべての記録の上に振幅の大きな2コの波が並んでいる。これは軸重が小さく、担ばねの摩擦抵抗が少ないため特に衝撃が大きくなったこと、および

図-2に示すごとくゲージを貼りつけた近くにおける波状磨耗の傾斜がその前後に較べて急であつたためと考えられる。

図-7(a)のA点の曲げ応力と図-7(b)のB点の曲げ応力との和の1/2をもつて静荷重による曲げ応力とし、差の1/2をもつて衝撃による曲げ応力とした。ほぼ同一速度にある貨物列車および電車について静的応力と衝撃応力との関連を求め、これを図-8に示した。この図によれば電動車および電気機関車の各車輪によって生ずる衝撃が最も大きく、衝撃による曲げ応力が 2 kg/mm^2 を超えるものがあることが認められる。これに続いて制御車、付随車および空の2軸ボギー貨車による衝撃が大きく、積載貨車による衝撃が最も小さい。この順序は車体を支えるばね装置の摩擦抵抗が小さい程衝撃応力大きいことを示し、前報告で示した計算結果によく一致している。

つぎに電車について列車速度と静的応力または衝撃応力との関連を求め、これを図-9, 10に示した。これらの図によれば速度 40 km/h 以上においては静的応力、衝撃応力ともに列車速度との関連は認められない。 40 km/h 以下においては衝撃応力が急に減ると想像されるが、実験記録のないのは残念である。静的応力、衝撃応力ともに電動車によって生ずる曲げ応力が、制御車および付随車による曲げ応力より大きいことが認められる。

図-8 波状磨耗レールの受ける衝撃

中央線 中野-高円寺間 15.833 km, 481レ 43.4 km/h, 1407 B 電車 43.7 km/h, 1956. 5. 23

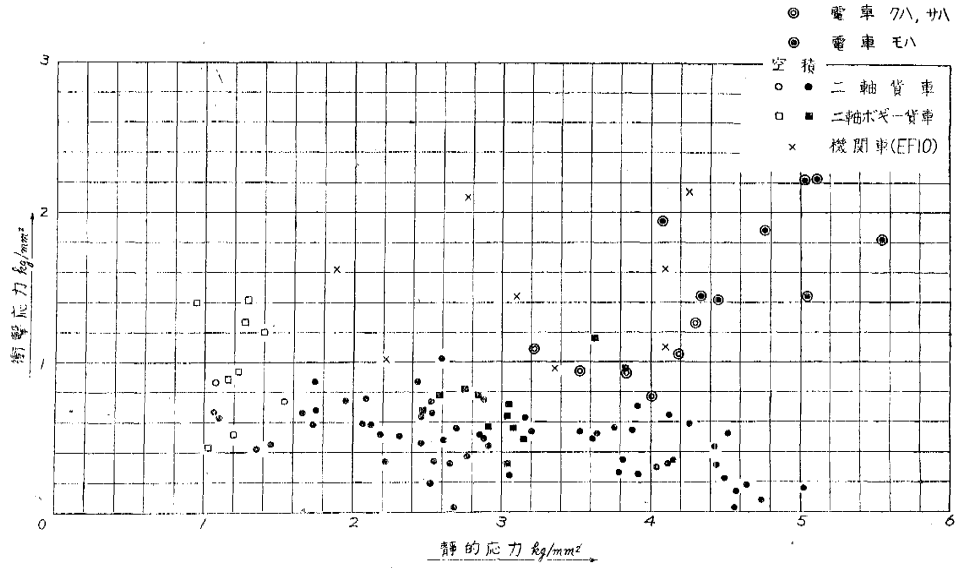


図-9 静荷重による曲げ応力

中央線 中野-高円寺間 15.833 km, 1956. 5. 23

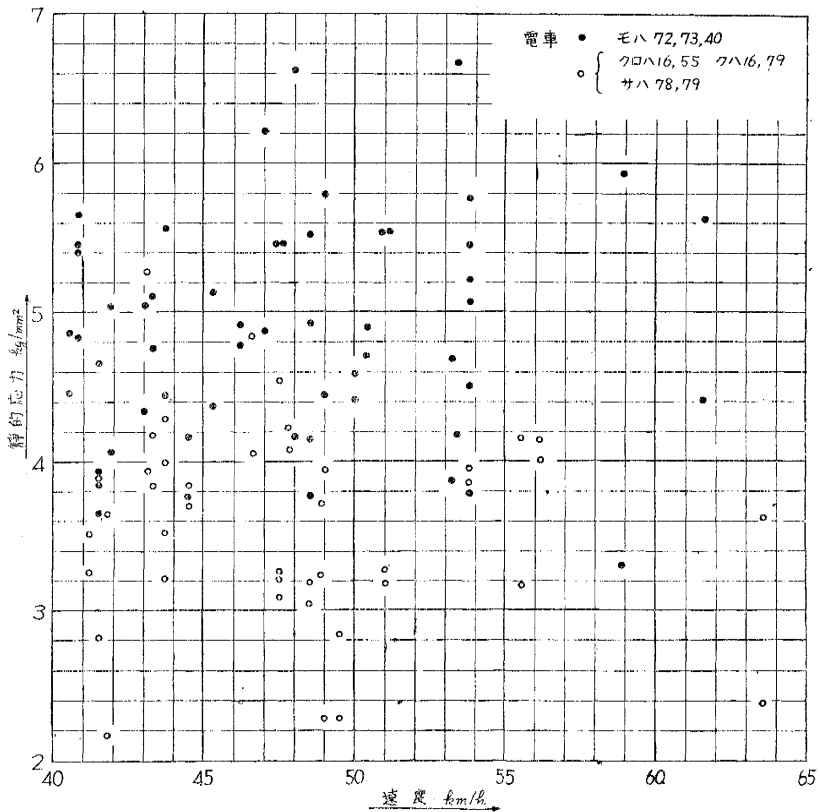


図-10 波状磨耗レールの受ける衝撃

中央線 中野-高円寺間 15.833 km, 1956. 5. 23

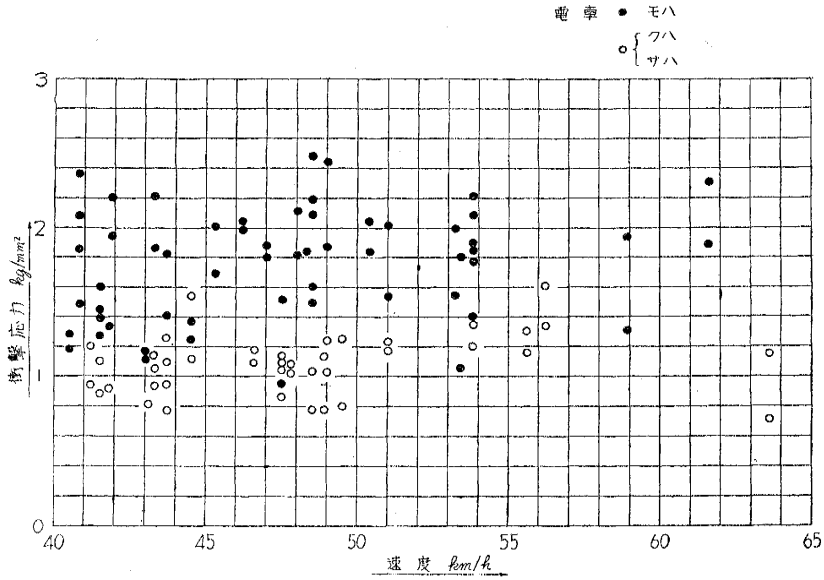


図-11 波状磨耗レールのたわみ

15km833m 1956-7-19
415V 50km/h

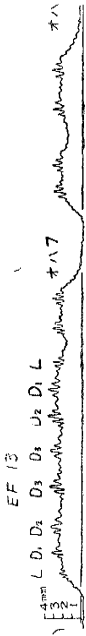


図-12 同上

15km833m 1956-7-19
407V 52km/h

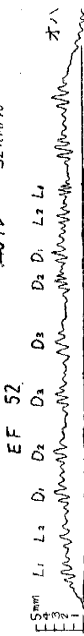
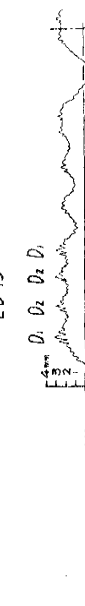


図-13 同上

15km833m
479V 47km/h



F206 H208 H208 H208 H208 H208 H208 H208

08 1526.18 1.18 02.24 H.24 H.24 1.4.40 1.7.26 1.7.26 1.10. 1.4.2

1.4.24 1.4.24 1.4.24 1.4.24 1.4.24 1.4.24 1.4.24 1.4.24

1.4.24 1.4.24 1.4.24 1.4.24 1.4.24 1.4.24 1.4.24 1.4.24

図-14 波状磨耗レールのたわみ
477L ED242

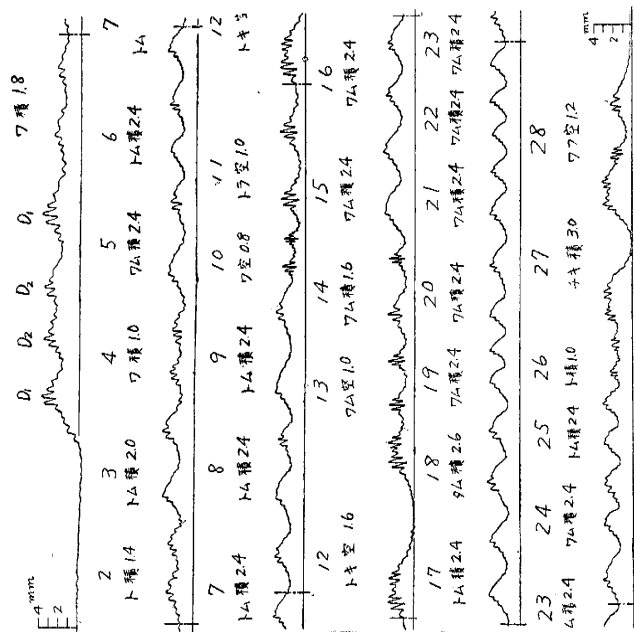


図-15 同上

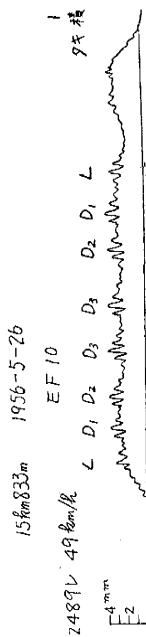


図-16 同上

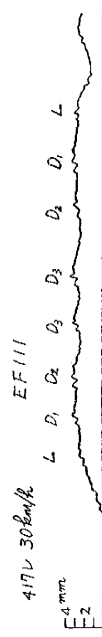


図-17 波状磨耗レールのたわみ

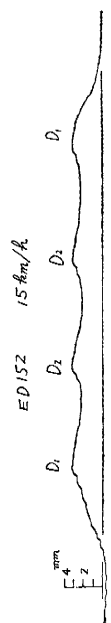


図-18 同上

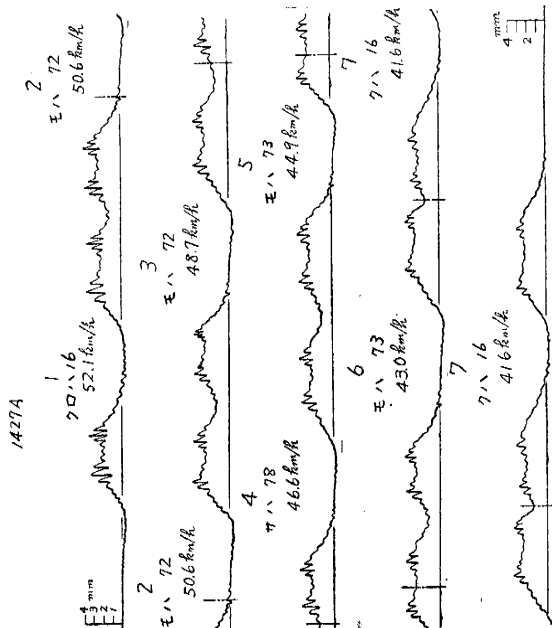


図-19 同上

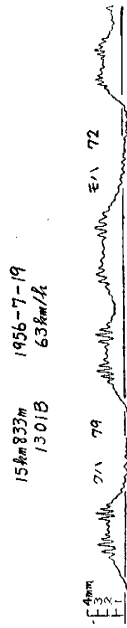


図-20 波状磨耗レールのたわみ

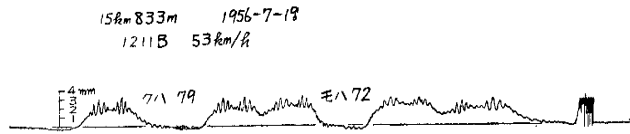


図-21 同上

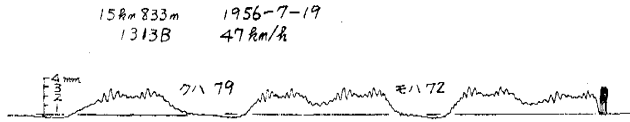


図-22 同上

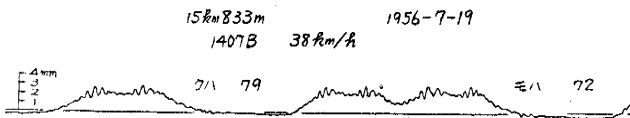


図-23 同上

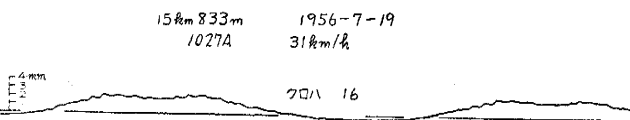
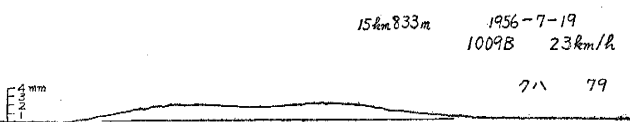


図-24 同上



みを測定した記録を示す。低速度においては波状磨耗による振動が非常に小さくなっている。

図-18 に電車が波状磨耗レールを走行するときのたわみ測定記録を示す。先頭の車両の速度が 52 km/h であり、これより順次速度が低くなるに従って振動振幅も小さくなることが認められる。

図-19~24 に各種の速度で電車が走行するときのたわみ測定記録を示す。電車の速度が 50 km/h より低下すると振動振幅は急に減少して速度 20 km/h ではほとんど振動を生じていない。

これらのたわみ測定記録において波状磨耗による振動の山と谷との中間をもつて静荷重によるたわみとし、振動振幅をもつて衝撃によるたわみとした。しかして電車の速度と静荷重によるたわみとの関連および衝撃によるたわみとの関連をそれぞれ 図-25, 26 に示した。図-25 によれば、静荷重によるたわみは電車の速度に関係なくほぼ一定である。しかして電動車によるたわみは制御車および付随車に較べて大きい。しかるに 図-26 によれば衝撃によるたわみは列車速度 20 km/h においてほぼ 0 となり、これより速度 50 km/h に至る間において直線的に増大する。速度 50 km/h を超えた後はほぼ一定とみなされる。一般に制御車および付随車による振動振幅は電動車による振幅より大きく、図-10 に示した衝撃応力と逆になつている。速度 50 km/h 以上においては振動振幅が 0.8 mm となり、全振幅 1.6 mm を超えるものが多数ある。これは波状磨耗の深さ 1 mm に較べてはなほ大きく、共振に近い状態に達していると考えられる。

この区間におけるレールは 1956 年 12 月 10 日新品レールに交換された。その後同一地点においてレールのたわみを測定した記録を 図-27, 28 に示した。当然のことながらレールは各車輪の通過ごとに、なめらかなたわみ変化を生じている。ただし 図-27 において機関車の最後の車輪が通過するとき小さな振動が認められる。このような振動を発生した理由は不明である。

5. 考察ならびに結論

大都市における国鉄の電車運転区間に敷設した 50 kg レールに発生した波状磨耗についてその形状を観測し、

4. レールたわみの測定

図-2 に示すごとく波状磨耗の山に相当する位置にレールたわみ計を取り付けて列車通過時におけるレールのたわみを測定した。たわみの測定にはマクラ木間の道床内に 45 cm 打込んだ杭を基準としてたわみ計を取りつけた。杭も路盤とともにいくぶん沈下するのでレールたわみの正確な値は不明だが、たわみの概要を知ることができたと考えられる。図-11~24 にたわみ測定記録を示す。

図-11, 12 は旅客列車通過時のたわみの記録であり、機関車および客車の各車輪が波状磨耗の山を越すごとにレールに上下振動を起している。しかして振動の全振幅が 2 mm 近くに達するものがあり、波状磨耗の深さが 1 mm であることに較べればこれらの車輪はレールとともに共振に近い状態で振動していると考えられる。

図-13, 14 は貨物列車通過時のたわみの記録であり、機関車および軸重の小さい貨車が波状磨耗を通過するときレールは激しい上下振動を起している。しかし軸重の大きな貨車による振動振幅は小さい。

図-15, 16, 17 に各種の速度で機関車が走行するときレールに生ずるたわ

図-25 静荷重によるたわみ 中央線 中野-高円寺間 15.833 km, 1956. 7. 19

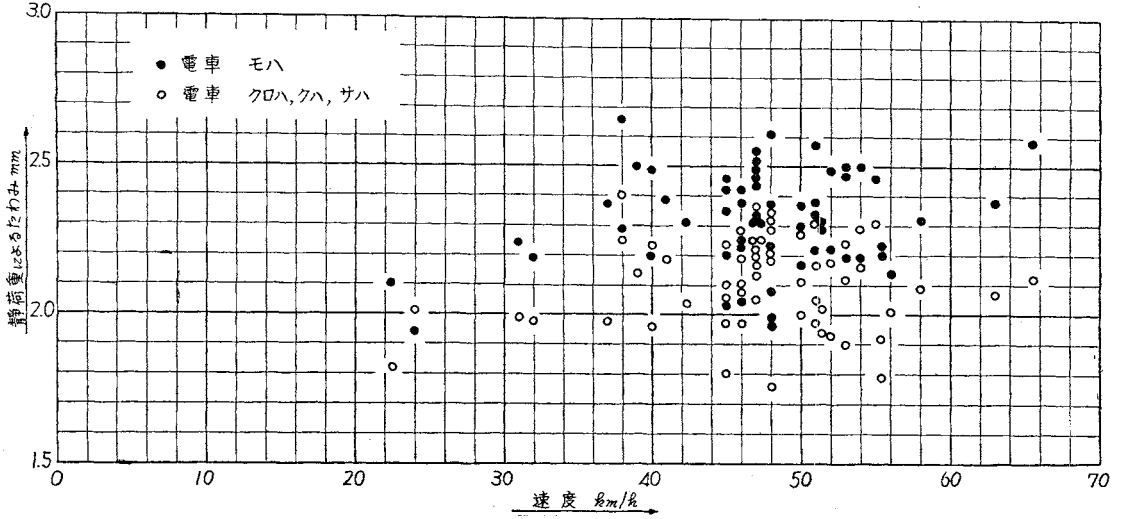


図-26 衝撃によるたわみ 中央線 中野-高円寺間 15.833 km, 1956. 7. 19

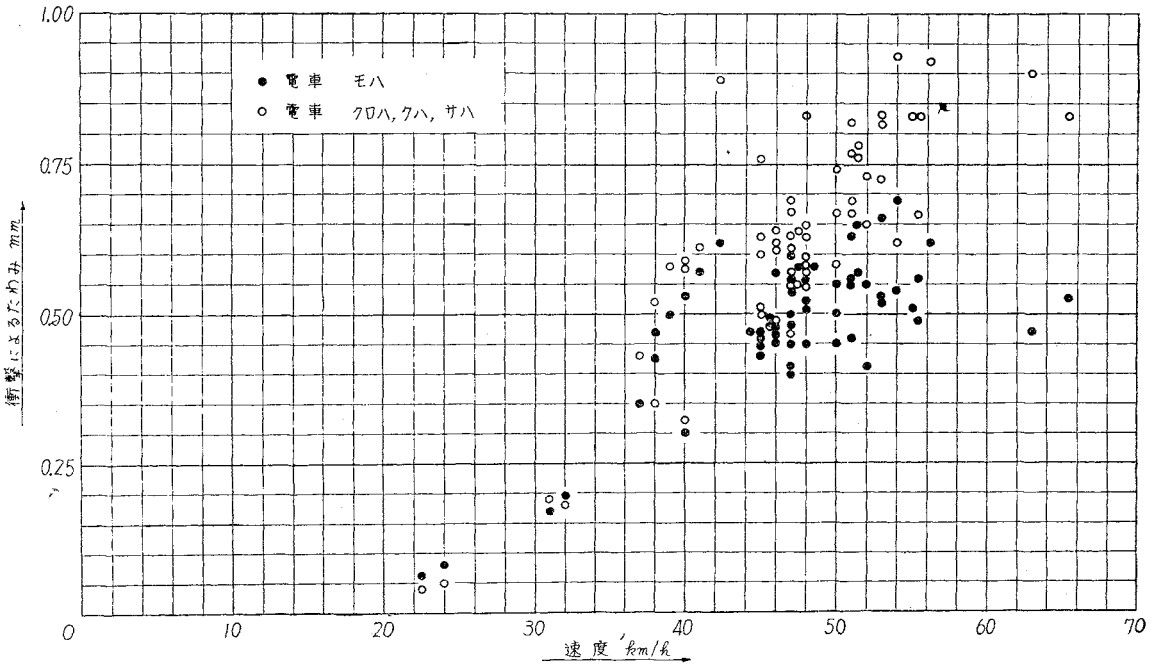


図-27 新品レールのたわみ

1957-4-2 15km 833m

413V EF13 53km/h

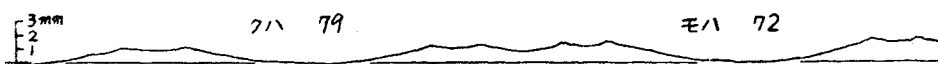
3mm
2
1 L D₁ D₂ D₃ D₂ D₁ L



図-28 同上

1957-4-2 15km 833m

1093A 50km/h



かつ各種の列車が通過するとき波状磨耗レールに生ずる曲げ応力ならびにたわみを測定した。その結果つぎの各項が判明した。

(a) 波状磨耗の波長は40~50 cmとなり、左右のレールに発生した波状磨耗の位相はほぼ 180° ずれている。

(b) 波状磨耗レールの底部に生ずる曲げ応力を測定した結果によれば車輪が波状磨耗の山を越すごとに軌道に大きな衝撃を加えること、衝撃の大きさは電動車および電気機関車において最も大きく、これに続いて制御車、付随車および空の2軸ボギー貨車による衝撃が大きく、積載貨車による衝撃が最も小さいことが判明した。

(c) レールのたわみを測定した結果によればレールは車輪とともに激しい上下振動をすることが認められた。この振動振幅と車両の種類との関係は曲げ応力の測定結果とほぼ同様であった。なお電気機関車および電車 の速度と振動振幅との関係を調べた結果によれば速度20 km/hに達するまでは振動振幅はほぼ0であるが、これより速度50 km/hに至るまでの間に急激に増加し、その後はほぼ一定となっていた。電車の速度が40 km/hを超えると振動の全振幅が波状磨耗の深さを越える場合が多く、特に制御車および付随車においてはなほ大きい。

(d) 以上の測定結果はすべて北陸線の37 kgレールに発生した波状磨耗について測定した結果に一致している。従つて各種の車両が波状磨耗レールを通過するときには、車両のばね下重量と軌道および路盤とよくなる体系が車軸の中心を通り、レールと平行な軸のまわりに回転振動を生じ、この振動の固有周期と車輪が波状磨耗の山を越す周期とがほぼ等しいときに共振に近い振動を生じて軌道に大きな衝撃を加えると考えられる。しかし2軸貨車のごとく担ばねに重ね板ばねを使用した場合にはばねのたわみ変化に伴つて摩擦抵抗が作用し、特にばね下重量が大きいときには摩擦抵抗も増大して振動を減衰する作用が大きくなる。これは実験結果をよく説明することができる。

(e) 波状磨耗によつて軌道が大きな衝撃を受けるときには、この衝撃が原因となつて、さらに波状磨耗を発達させると考えられる。よつて電車または客車の軸ばねに並列して制振装置を取りつけ、または道床および路盤に制振作用の大きい材料を使用すれば波状磨耗によつて生ずる衝撃を軽減する上に有効であるばかりでなく、波状磨耗の発達を防止する効果も期待される。

終りに本研究の現場測定に当つて国鉄津田沼線路試験区ならびに三鷹保線区の諸氏より多大の御協力を受けたことを記し、ここに厚く感謝の意を表する。

参考文献その他

- 1) 小野一良：波状磨耗レールが走行車両より受ける衝撃，土木学会論文集第24号，昭和30年4月
- 2) 下記の講演概要において著者は中央線下り線15.828 km付近に発生した波状磨耗の形状ならびに同位置で測定した曲げ応力およびたわみの記録を示した。
小野一良：波状磨耗レール(50 kg, 電車運転区間)が受ける衝撃の測定，土木学会第12回年次学術講演会講演概要

(昭.32.8.1)