

電車荷重によるレールの衝撃応力に関する 実験的研究¹⁾

正 員 小 林 勇*
准 員 後 藤 尙 勇**
准 員 三 輪 利 英***

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE IMPACT STRESS IN RAIL DUE TO ELECTRIC CAR LOAD

(JSCE May 1952)

Isamu Kobayashi, C.E. Member, Hisao Goto, C.E. Assoc. Member,
and Toshihide Miwa, C.E. Assoc. Member.

Synopsis This paper describes especially the impact coefficient for rail stress, as a part of the fundamental dynamic research on the rationalization of track construction. The velocity-stress curve, that is, the impact-stress of rail in electric car line is deduced from the measurements by means of electric resistance strain gage, and the impact coefficient for practical use is discussed.

要旨 本文は軌道構造の合理化に関する動力学的な基礎研究の一部として、特に衝撃係数を実験的に研究したものである。すなわち電気抵抗線歪計を用いて電車軌道でレールの速度-応力曲線従つて衝撃応力を測定して実験式を算出し、これから実際に採用すべき衝撃係数について論及した。

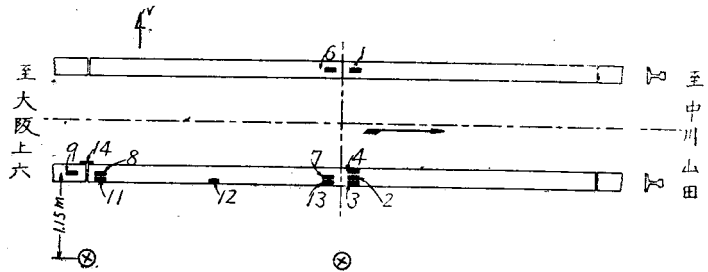
1. 緒 言

鉄道車輛の重量化、高速化及び運転回数の増加に対応して軌道の強化、合理化が要求されているが、これと同時に動力学的な立場からの計算の裏付けが要望されている。ところが走行車輛による複雑な軌道の振動は理論的な研究のみではその正体を把握することができないので、実験的な研究が同時に実施されねばならない。しかも動力学的な研究は静力学的な研究に基礎をおき、動的な値に対する比を解明するところに意義がある。こうしたことから実際軌道でレールの速度-応力曲線を測定して、これから衝撃係数の実験式を算出し、あわせてレール振動の基礎をなす道床路盤の振動をも測定考究したわけである。

2. 測定実施の概要

(1) 測定の現地 近畿日本鉄道大阪線三本松-赤目口両駅間の下り線、大阪上六駅起点 62.985 km の直

図-1 測定現地の見取図
Sketch of the measuring site



註：歪計 1~13 はレール底に、歪計 14 は継目板に貼り付けたことを示し、×は C 型歪計設置点を示す。歪計 5, 10 はカブリレーションに用いた (図-3)。

線平坦軌道の地点でこの測定現地の略図は 図-1(註-1) に示す。

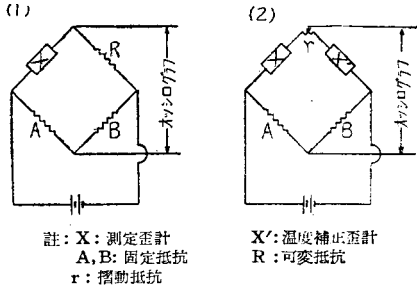
(2) 測定の装置 歪に基く電気抵抗の変化を利用したいわゆる電気抵抗線歪計を用いたが、既に発表したもの²⁾を種々改良した。すなわち歪計自身を小形化し装置全般を詳細に検討改良して記録の感度を4倍程度高めた³⁾。測定装置主要部の電気回路は図-2(1)のように歪計 X (Active gage) を用いるが、実際には図-2(2)のように温度補正用の歪計 X' (Dummy gage) を用いる。記録にはすべて電磁オシログラフを用いた⁴⁾。

(3) 測定の実施 昭.26.3.21~28 の間、図-1 に示す計測点で、現地レールには実際に如何なる大いさの応力が生じているかを実測するために常時運転速度

* 京都大学教授, 工学部土木工学教室
** 同 講師, " "
*** 同 助手, " "

註-1) 歪計は終電直後同時に数箇宛貼り付けたが歪計1, 2, 6, 7, 12, 13を貼り付けた直後、臨時電車通過のため固着不完全で記録が不良となつた。

図-2 測定回路
Circuit of measurement

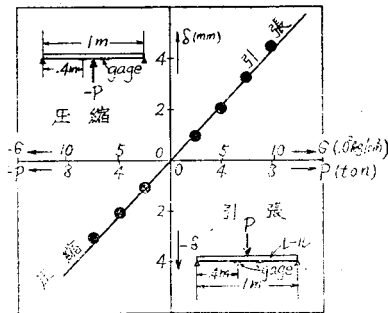


で走行する営業電車による測定を行い、また電車線路では如何なる衝撃係数を採用すべきかの具体的な資料をうるため、特に試験電車を 0~115km/hr の速度で走行せしめて約 10km/hr 毎の記録をとつた。また道床路盤の振動は図-1 の C 型振子設置点で走行電車による上下方向の加速度を測定した。この場合図-1 のように貼り付けた歪計 2 箇、C 型振子 1 箇の合計 3 成分による記録を電磁オシログラフで同時記録させた(1-2)。

3. レール応力の測定とその結果

(1) カリブレーション(註-1) 現地と同一状態で行うため図-3 に示すようにスパン 1m の ASCE 37kg レールについて Lasenhausen 繰返荷重試験機で曲げ試験を行つた。荷重 P とオシログラフ記録紙上の振れ δ との関係は図-3 のようになり、図示の単純梁の荷重状態から計測点の曲げモーメントを求め、レール底応力 σ を計算すると、 $\sigma = 122.8\delta$ (kg/cm²)、 P : ton となるので δ - σ 関係が求まる。 δ - σ 関係は直線とな

図-3 カリブレーション (曲げ試験)
Calibration (bending test)



註: 左右両歪計の値は殆んど一致している。

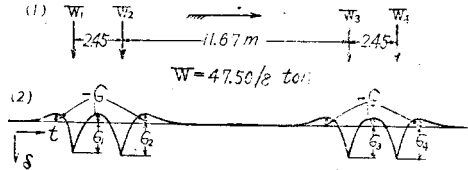
り図より $\delta = 1\text{mm}$ は $\sigma = 220\text{kg/cm}^2$ であることがわかる。なお単純引張及び圧縮試験も行つたが同様な結果となつた。

註-2) 測定装置の詳細は 5. (1) に示す

註-3) 一般には gage factor で計算するが装置の関係上図-3 のようにした。

(2) 測定記録 現地における実測記録はたとえば図-4(1)の走行電車荷重に対して図-4(2)のように δ - t 曲線として得られる。これを図-3 の δ - σ 線で、 δ , $1\text{mm} = \sigma$, 220kg/cm^2 であることから δ - t 曲線を σ - t 曲線として読みとる。ところが電車速度 V の変化によつて図-4(2)の σ - t 曲線で W_1 - W_2 及び W_3 -

図-4 試験電車荷重とその記録
Test car load and its record



W_4 の荷重作用速度が変化するので、これと同様の荷重作用速度を図-3 で $P \sin \omega t$ として与えてみると ω の変化によつて図-3 の δ - σ 線はその傾きが若干変動した³⁾。そこで実際には走行速度 V に応ずる $P \sin \omega t$ による δ - σ 線を用いて図-4 の記録を読みとつた。図-4 で $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ はそれぞれ第 1, 2, 3, 4 輪が計測点直上に来たときのレール底引張応力を示し、 $-\sigma$ はこの間に表われる圧縮応力を示している。

(3) 試験電車による記録 3月 25, 28 両日の未明営業最終電車通過後から始発電車走行前に至る夜間営業休止中概ね午前 1時から同 5時の間に 0~115km/hr の広範囲な速度変化を図-4(1)に示す試験電車に与えて測定したがその結果は次のようである。*

a) レール中央点: 図-1 に示すレール中央点で歪計 4 で内縁応力、歪計 3 で外縁応力を同時測定した。速度 V と内外縁応力 σ_A, σ_B との関係を図-5 (1) (2) に示す。これらの図から $V=0$ すなわち静的な場合には内縁応力は $750 \sim 850\text{kg/cm}^2$ 、外縁応力は $850 \sim 950\text{kg/cm}^2$ 程度であり、いずれも V の上昇につれて σ の測定値は初めやや減少して後次第に増大する傾向を示している。

b) 継目部附近: 図-1 に示すように歪計 8, 9, 11 を用いて歪計 3, 8, 歪計 3, 11 歪計 8, 9 の同時記録をとつて継目部の衝撃応力を比較しようとした。ところが継目部の構造上歪計はいずれも継目から第 1, 第 2 挺目の枕木間隔中央のレール底に貼り付けたのでこの点のレール底応力の測定ということになつた。測定値は静応力が $700 \sim 800\text{kg/cm}^2$ で衝撃による応力の増大は殆んど見受けられなかつた。

(4) 営業電車による記録 現地線路における営業電車の常時運転速度は $80 \sim 100\text{km/hr}$ で、したがつて測定記録も $60 \sim 110\text{km/hr}$ の範囲内であつた。この

図-5(1) 試験電車による速度 V と内縁応力 σ_A との関係
Relation between the velocity V and the inner fiber stress σ_A due to the test car, Gage 4

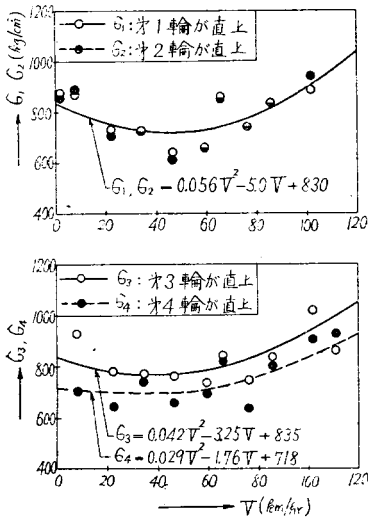
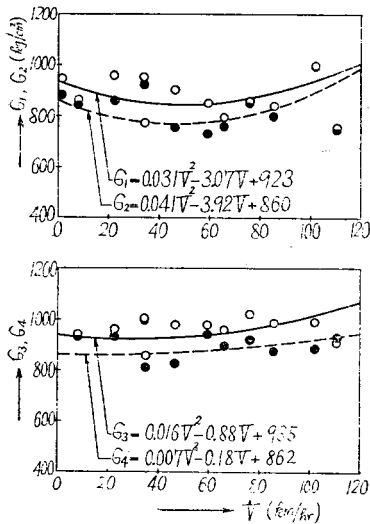


図-5(2) 試験電車による速度 V と外縁応力 σ_B との関係
Relation between the velocity V and the outer fiber stress σ_B due to the test car, Gage 3



範囲内では $V-\sigma$ 関係は試験電車による場合と類似でレール底引張応力は $600 \sim 1000 \text{ kg/cm}^2$ であった。

(5) レール底圧縮応力 図-4 (2) に示す $-\sigma$ であるが、この値は記録全般を通じて $100 \sim 400 \text{ kg/cm}^2$ 程度であり V と $-\sigma$ 間には一様な関係はなかつた。

4. レールの速度-応力曲線の計算

図-5(1)(2)は図-4(1)に示す試験電車荷重による測定結果で車輛重量 W が常に一定であるので応力 σ は速度 V の函數 $f(V)$ と考えてよい。そうすると σ は V の冪級數に展開されるが實質的にその第3項までとつて、

$$\sigma = f(V) = \sigma_0 + aV + bV^2 \dots\dots\dots(1)$$

で表わされる。 σ_0 は静応力で常數 a, b を最小自乗法で決定することによつて $V-\sigma$ 曲線が計算される。

(1) 内外縁応力 図-5(1)(2)の測定値 σ を式(1)の形で表わして a, b を決定し $V-\sigma$ 曲線を計算した結果はそれぞれ同図中に記入した。

(2) 中心応力及び横応力 内外縁応力を σ_A, σ_B とすると中心応力 σ_C , 横応力 σ_H は、

$$\sigma_C = \frac{1}{2}(\sigma_A + \sigma_B), \quad \sigma_H = \frac{1}{2}(\sigma_B - \sigma_A) \dots\dots(2)$$

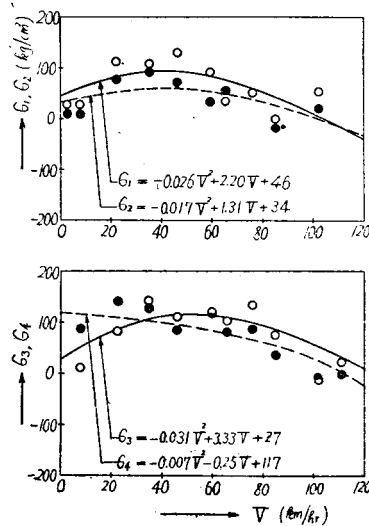
で与えられる。式(2)によつて図-5(1)の σ_A , (2)の σ_B より σ_C を求め式(1)の形に書いて計算すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{C,1} &= 0.046 V^2 - 4.46 V + 886 \\ \sigma_{C,2} &= 0.043 V^2 - 3.98 V + 841 \\ \sigma_{C,3} &= 0.022 V^2 - 1.74 V + 902 \\ \sigma_{C,4} &= 0.038 V^2 - 2.61 V + 817 \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

また σ_H は図-6 に示す通りとなる。

図-6 試験電車による速度 V と横応力 σ_H との関係

Relation between the velocity V and the lateral fiber stress σ_H due to the test car, Gage 3 & 4



(3) 静応力 σ_0 の計算値 標準軌間 1.435m ASCE 37 kg レール, 枕木寸法 $244 \times 23 \times 15 \text{ cm}$, 枕木間隔 71 cm の軌道条件に対して 図-4(1)の試験電車荷重

表-1

道床係数 K , kg/cm ³	2	6	10	14
国鉄計算法 σ , kg/cm ²	987	806	761	718
AREA 計算法 σ , kg/cm ²	799	730	678	617

による静応力の計算値は表-1に示す通りである。

5. 道床路盤の振動測定

(1) 測定装置 測定実施の概略は 2. (3) に示した通りである。電磁オシログラフの検流計及び C 型振子の自己振動数は 15 サイクルに設計されているが、検定結果の振動数 ω と倍率 f との特性曲線は図-7 に示す通りである⁶⁾。これより f が過大であるので短絡抵抗 $s=0.95\Omega$ を並列に用いると絞り係数 $\beta=21.06$ となる^{註-4)}。これより記録振巾を A' とすると、 $A=\beta/f \cdot A'$ より実振巾が計算される。記録振動を正

図-7 電磁オシログラフ検流計による C 型振子の振動数特性曲線

Frequency-characteristic curve of the C type pick up being measured with the galvanometer of the electromagnetic oscillograph recorder

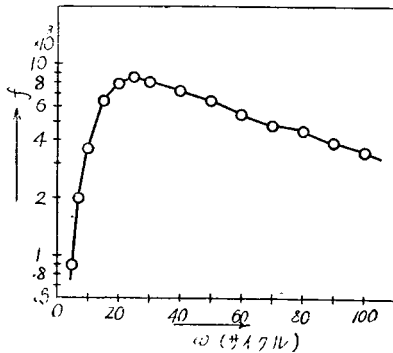
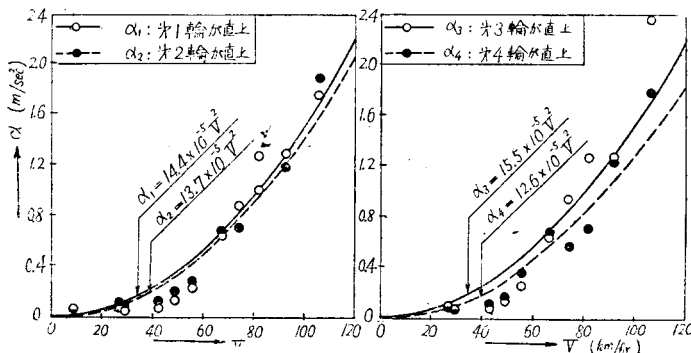


図-8 試験電車による速度 V と道床路盤の最大上下加速度 α との関係 (レール中央点)
Relation between the velocity V and the max. vertical acceleration α of ballast and road bed due to the test car



註-4) 抵抗を直並列に用いると一層良好となる。

弦動とみなして加速度を算出した。

(2) 測定結果 図-1に示すレール中央部計測点(レールより 1.15m の距離)における上下方向加速度の最大値 α と速度 V との関係は図-8 に示す。 α はほぼ V^2 に比例し常数を決定した実験式は同図中に記入したが、 α の最大値は 110km/hr で約 0.25g である。なお振動周期は V に殆んど無関係に 0.03~0.06 sec であつた。また図-1 に示す継目部の α は中央部より更に大となつているが、車輪の継目通過時には $V=60$ km/hr までは 0.02 sec の衝撃波があらわれるが、 $V=60$ km/hr 以上となると中央部と同様 0.03~0.06 sec の振動が主要部を占めている。

6. 衝撃係数の実験式

図-5 及び式(3)に示す $V-\sigma$ 曲線はいずれも類似であるが、その中衝撃の大きいものを考える。図-5 (1) の $\sigma_{A.4}$ は

$$\sigma_{A.4} = 0.029V^2 - 1.76V + 718, \sigma_0 = 718$$

これより

$$1+i = \frac{\sigma_{A.4}}{\sigma_0} = 1 + \frac{V^2}{24760} - \frac{V}{408} \dots\dots (4)$$

図-5(2) の $\sigma_{B.2}$ 、式(3)の $\sigma_{C.4}$ も同様にして

$$1+i = \frac{\sigma_{B.2}}{\sigma_0} = 1 + \frac{V^2}{20520} - \frac{V}{220} \dots\dots (5)$$

$$1+i = \frac{\sigma_{C.4}}{\sigma_0} = 1 + \frac{V^2}{21500} - \frac{V}{313} \dots\dots (6)$$

となる。また本実験中最大の衝撃値を示したものは歪計 3,8 を同時に用いたとき歪計 3 で計測されたが、その結果は

$$1+i = \frac{\sigma_{B.2}}{\sigma_0} = 1 + \frac{V^2}{33940} + \frac{V}{1826} \dots\dots (7)$$

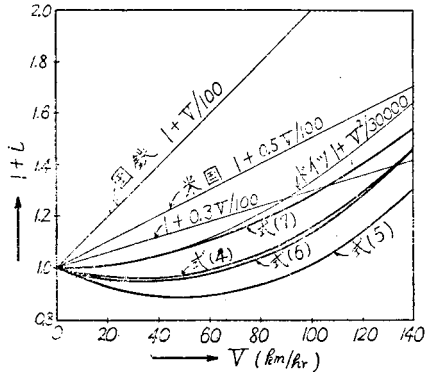
いまこれらの実験式の結果を図示し、現行の代表的な $1+i$ の値と比較すると図-9 のようになる。図-9 より本実験を通じて最大の衝撃値を示した式 (7) は i の値が 2 次式のドイツ国鉄の値並びに 1 次式のわが国鉄の値の 30% よりもなお小であることがわかる。

7. 測定結果の考察と結言

以上の測定結果より次の諸点が考察される。

1. 図-5 では若干 $\sigma_1 > \sigma_2, \sigma_3 > \sigma_4$ であるが、 $V-\sigma_1, \dots, \sigma_4$ 関係はいずれも V の増大とともに一時降下して後上昇しているが、同様の傾向を示した文献もある⁷⁾。
2. 図-6 で横応力は $V=50$ km/hr

図-9 衝撃係数の実験
Experimental formulas for the impact coefficient



註：米鉄では一定せず概ね $0.5V/100$ 前後が用いられている。ドイツの値は中欧諸国 (V.M.E.V.) でも用いられている。

附近で最大となつているが、反対側レール (図-1の歪計1, 6貼り付けレール) の記録がとれなかつたので、車輛の蛇行によるものであるかどうかはわからない。

3. 歪計8, 9間の継目は相当強固な構造であるが、測定記録全般よりするとこの継目が鉸に近い状態の作用をしており、歪計14の応力は $500\sim 700\text{kg/cm}^2$ である。
4. 図-8は図-1に示す計測点の値で $V-\sigma$ 関係は2次ないし3次であらわされる。その後はレール直下の道床路盤の振動を測定している。
5. 図-9でわが国鉄の i は狭軌軌道の蒸気又は電気機関車による測定値から決められた値であり、式(4)~(7)は標準軌道の電車による実測値であるため両者を直ちに比較することはできない。
6. i については各種線路で数多くの測定を実施してこれらの結果を総合検討して決定しなければならないが、近鉄線における本実験結果では $i=0.003V$ 又は $i=V^2/30000$ 以下であるということになる。
7. 最近 i の実測値が非常に小さいこと、又は V のある範囲内ではむしろ負の傾向さえあるということは八十島、小野両氏及びわが国鉄、AREA等の結果⁹⁾等でも示され、これらは本文の結果と同様である。
8. 国鉄でも $i=0.01V$ の過大なことが認められて最近研究された結果、レールの沈下(撓度計, $V=40\sim 70\text{km/hr}$) レールの応力(磁歪計, $V=30\sim 60\text{km/hr}$) では i が認められず、道床路盤の振動(加速度計, $V=30\sim 70\text{km/hr}$) において衝撃が大きく表われることが指摘されたが⁹⁾、これらも本文と同様な傾向である。

9. 本実験装置を逐次改良して国鉄東海道本線瀬田川橋梁上り線開通時 (昭.26.5.26), 国鉄奈良線木幡一新田間 (昭.26.10.2~6) 及び京阪電鉄宇治線黄栗一三室戸間 (昭.26.10.5) でそれぞれレール応力を測定したが、営業列車のため $V-\sigma$ 関係は十分確かめられなかつた。

本文では電気抵抗歪計を用いて電車軌道でレールの衝撃応力を測定し衝撃係数決定のための一資料を提供したもので、軌道の強化合理化、軌道の保守労力の節減上寄与するところは少くないものと思う。終りに本実験に絶大な援助を与えられた近鉄当局安藤土木部長、井上、牧尾両技師及び直接協力を頂いた京大土木教室の学生諸君の各位に深謝の意を表する次第である。

参考文献その他

- 1) レールの衝撃応力に関する実験的研究 (第7回年次講演会, 昭.26.5.27) 電車荷重によるレールの速度-応力曲線について (第4回関西工学連合講演会, 昭.26.10.14) の結果をとりまとめたものである。
- 2) 筆者: 電気抵抗の変化によるレール応力の測定, 土木学会誌 36-7, 昭.26.7 pp17~21
- 3) (1) ではコンスタンタン抵抗線 $\phi 0.09\text{mm} \times$ 全長 $130\text{cm}=90\Omega$, 電源 2Volt D.C. であつたものを $\phi 0.05\text{mm} \times$ 有効長 $50\text{cm}=90\Omega$, 4Volt D.C. を用い、バランスに摺動抵抗を用いた結果、(1) では $\delta=1\text{mm}$ が $\sigma=920\text{kg/cm}^2$ (図-3) となつた。歪計の抵抗線は更に細いものを用うべきでその後は $\phi 0.03\text{mm}$ 以下のものを用いている。
- 4) 電磁オシログラフレコーダーは京都大学理学部佐々博士設計の弾性波式地下探査用のもので $1 \times 10^{-7}\text{mm amp.}$ で $\delta=1\text{mm}$ という高感度のため増巾器は必要としない。
- 5) 測定の原理としてはこのようなことはないはずであるが、オシログラフ検流計の感度曲線の影響及び歪計固有抵抗値の不足 (動的には $300\sim 500\Omega$ を用いる) が主原因と考えられ改良している。
- 6) この電磁オシログラフ検流計と C 型振子とは1体として使用するよう佐々博士によつて設計されたものである。道床路盤の振動週期が $0.03\sim 0.06\text{sec}$ であるので図-7の $15\sim 30$ サイクルという高感度のところを用いたことになる。なお検流計のみの検定では 25 サイクル以上が flat となつている。
- 7) Robert Hanker: Die Entwicklung der Oberbauherrechnung, Organ f. F. E, 1. Feb. 1938, Heft 3 S. 45-60
- 8) 八十島義之助: 土木学会誌 35-9, 小野一良: 土木学会論文集, 第5号, 国鉄次掲 (9), AREA, Bulletin AREA 1940-1945.
- 9) 鉄道技術研究所, 軌道速度衝撃, 第1報, 昭.26.11及び重要幹線の軌道構造の強化について (昭.26.12.15)