

電気鉄道（走行シミュレーション）

列車は抵抗に打ち勝って走りますが、ではどのような条件で動くのでしょうか。

1) 列車抵抗

列車が出発する時の抵抗は、一般に出発抵抗 R_s 、走行抵抗 R_r 、勾配抵抗 R_g 、曲線抵抗 R_c 及び加速度抵抗 R_a に分けられる。単位は $[kg/t]$

(1) 出発抵抗 R_s 、

停止中の列車が出発の際に生じる抵抗で、列車を長く止めておくと、主電動機の電機子などの軸受けと軸間の潤滑油膜が切れ、始動の瞬間にかなり大きな抵抗が生じる。

但し、潤滑油膜形成後は零となり、以後走行抵抗に移行する。

尚、最近はコ口軸受けが大半となり、抵抗が小さく、大きな問題とならない。

「閑話休題」

かつて2軸貨車等は、軸受けがホワイトメタルで、停止中は金属同士が接触し、軸の回転によってやっと、油膜が形成され、抵抗がなくなりました。

このような状況では起動抵抗が大きく、機関車の起動に際し、車両と運転方法に工夫が見られます。

まず停車する時、最後に機関車単独にブレーキをかけ連結器間に遊びをなくします。

次に起動する時、電気機関車は捨てノッチと称し、一気に起動するのではなく、ゆっくり、連結器を引っ張って連結器の遊びを利用して順順に起動し各軸受けの油膜が形成されます、現在ではベアリングが殆どになり、密着連結器を取り付けた車両では、こうした運転上の工夫も不要になりました。

キハ181系の場合 $4 kg/t$

(2) 走行抵抗 R_r

列車が平坦直線上を一定速度で走行する場合に、列車の進行と反対方向に作用する抵抗で外輪とレールとのころがり、車軸受部及び車両の動揺などによって生じる各種摩擦、車輪が回転して進行する際に生じるレールの湾曲、凹凸に起因する抵抗と、列車と空気との摩擦及び空気圧などによる空気抵抗の和であり、一般に実験式で表され、厳密には車両形式ごとに求める。

$$\text{電車} \quad R_r = 1.32 + 0.0164V + \{0.0280 + 0.0078(n-1)\} \frac{V^2}{W} \left[\frac{kg}{t} \right]$$

$$\text{新幹線電車} \quad R_r = 1.60 + 0.035V + \{0.0197 + 0.00241n\} \frac{V^2}{W} \left[\frac{kg}{t} \right] \quad (0 \text{系})$$

$$\text{気動車} \quad R_r = 2.5 + 0.0186V + \{0.0269 + 0.0079(n-1)\} \frac{V^2}{W} \left[\frac{kg}{t} \right] \quad (181 \text{系})$$

貨車 $R_f = 1.6 + 0.00077V^2 [kg/t]$

凡例 V速度 [km/h], W重量 [ton], n編成両数[両]

(3) 勾配抵抗 R_g

勾配を $g [x/1000]$ とし、重量を $W [kg]$ とすれば、勾配抵抗 $R_g [kg]$ は

$$R_g = W \sin \theta = W \tan \theta = W \left(\frac{g}{1000} \right) [kg]$$

重量 $W [kg] = W \times 10^3 [t]$ であるので、1 t 当たりの勾配抵抗 $R_g [kg/t]$ は

$$R_g = \frac{r_g}{W \times 10^{-3}} = \frac{W(g/1000)}{W \times 10^{-3}} = g [kg/t] \quad \text{いわば、勾配(パーミル)その数値が勾配抵抗となる。}$$

(4) 曲線抵抗 R_c

列車が曲線を通行する際、遠心力に抗して方向を変える時に生じる、外方レールと車輪フランジとの摩擦、及び内側レールが外側レールより短く内外車輪移動距離の差によって生じる摩擦などによる抵抗で、国鉄では簡単な算式が用いられている。

$$R_c = \frac{800}{r} [kg/t] \text{ 但、 } r : \text{ 曲率半径 [m]}$$

(5) 加速度抵抗 R_a

$m [kg]$ の重量のものが、加速度 $[m/s^2]$ で運動する時の加速力 $F [N]$ は

$$F = m [N]$$

重量 $W [t] = W \times 10^3 [kg]$ の列車を加速度 $[km/h/s]$

$= \times 10^3 / 3600 [m/s^2] = / 3.6 [m/s^2]$ で加速するのに必要とする加速力 $F [kg]$ は

$$F = W \times 10^3 \times \frac{1}{3.6} [N] = \frac{W \times 10^3}{9.8 \times 3.6} [kg]$$

$$= 28.35 W [kg]$$

1 t 当たりの加速度抵抗 $R_a [kg/t]$ は $R_a = 28.35 [kg/t]$

電車列車の場合は電動機、歯車等の回転部分を有しているため、回転加速に対する慣性も考慮しなければならないので、一般的に見かけ上、列車重量が増加したものとして扱う。

$$R_a = 28.35 W (1+X) [kg/t]$$

閑話休題

厳密には下記の慣性係数を考慮する必要があるが、一般的に電車では $28.35(1+X)$ を 31 として算出されている。(MT比によっても変わってくるが)

回転部分の慣性係数

種別	慣性係数 X
電気機関車	0.15
電動車	0.10
新幹線電車	0.11
付随車	0.05
客貨車	0.05

尚、新幹線電車は計画値

2) 列車抵抗と引張力との関係

引張力 $F[kg]$ は

$$F = (R_s + R_r \pm R_g + R_c + R_f) W \quad [kg]$$

ただし、 W : 列車の重量 [t]

3) 列車抵抗と粘着力との関係

電気車は、主電動機の電機子に発生するトルクによって引張力・牽引力を生じる。

実際に動輪に生じる引張力を動輪周引張力と言い、動輪周とレールとの間の摩擦力を利用する。従って、最大の引張力は動輪上の重量がレール面を押す圧力 $W[t]$ 、すなわち粘着重量と動輪とレールとの間の摩擦係数、すなわち粘着係数 μ との積で定まる。

この最大動輪周引張力を粘着引張力と言う。

$$F = 1000 \mu W \quad [kg] \quad (R_s + R_r \pm R_g + R_c + R_f) W \quad [kg]$$

もし $F \geq \mu W$ であれば動輪は空転し、動輪は粘着せず回転する。

4) 電動機の出力、トルク回転速度の関係

半径 $r[m]$ の円周上に作用する引張力を $F = [kg]$ とすれば、1回転する場合の仕事は $9.8F \times 2\pi r [J]$ 従って、 $n [rpm]$ 回転で1秒間になす仕事 P は

$$P = \frac{9.8F \times 2\pi r n}{60} \left[\frac{J}{S} \right] = \frac{2}{60 \times 10^2} Frn \quad [kw]$$

$T = Fr[kg \cdot m]$ であるから

$$P = \frac{9.8 \times 2}{60} n T \left[\frac{J}{S} \right] = \frac{9.8}{60} \times 2 n T \times 10^{-3} [kw] = \frac{Tn}{975} [kw]$$

5) 電車の速度、出力、引張力の関係

$$\text{速度 } V \left[\frac{km}{h} \right] \text{ は } V \left[\frac{km}{h} \right] = V \times 10^3 \left[\frac{m}{3600s} \right] = \frac{V}{3.6} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$F [kg] = 9.8 [n]$ であるので、1 秒間当たりの仕事 P は

$$P = \frac{9.8F \times V}{3.6} \left[\frac{J}{S} \right] = \frac{F \times V}{367} [kw]$$

それでは過去、第二種電気主任技術者第一次試験において出された問題を、現実の列車の数値にアレンジして見てみると。

例題 1

電気機関車の重量 96 t (動輪上) 曲線半径 400 m、20% の勾配を一定速度で上る時の機関車が引っ張りうる貨車の最大重量を求む。

但し、粘着係数 0.207、曲線抵抗は $800/r [kg/t]$ 、走行抵抗 $3.5 kg/t$ とする。

解答

電気機関車の最大引張力、すなわち粘着引張力は $\mu = 0.207$ 、 $W_t = 96 [t]$ であるから

$$F_m = 1000 \times 0.207 \times 96 = 19872 \text{ kg}$$

機関車重量 $W_t = 96$ トン、引っ張りうる貨車重量を $W_c [t]$ とすると、列車抵抗はそれぞれ

$$\text{勾配抵抗: } R_g (W_t + W_c) = 20 (96 + W_c) [kg]$$

$$\text{曲線抵抗: } R_c (W_t + W_c) = \frac{800}{400} (96 + W_c) [kg]$$

$$\text{走行抵抗: } R_r (W_t + W_c) = 3.5 (96 + W_c) [kg]$$

列車が一定速度で走行中は、引っ張り力と走行抵抗が等しく

$$F_m = (R_g + R_c + R_r) (W_t + W_c)$$

であるから $19872 = 25.5 (96 + W_c)$ 従って

$$W_c = \frac{19872}{25.5} - 96 = 683 [t]$$

閑話休題

粘着係数は天候等の外的要因によって時時刻刻変化するもので、数値は絶対的なものではなく、経験則として、選定されています。

国鉄時代の直流機関車(直流電動機)
で計算されています。

交流機関車(直流電動機)では下記を目安とし

$$\text{直流機関車 } \mu = 0.265 \times \frac{1+0.403V}{1+0.522V}$$

$$\text{交流機関車 } \mu = 0.326 \times \frac{1+0.279V}{1+0.367V}$$

例題1に当てはまる線区として、上越線(水上～石打)があるが、電気機関車EF64単機では引張力は別にして20%の勾配を1100トンを牽引する事は、粘着上からも無理な事が分かる。又このことから、主要幹線では一部を除いて勾配を10%に留めています。

資料のよればEF64の定格引張力は20350kgであり、上記と粘着係数を同程度確保出来る事を念頭に計画されています、また粘着引張力を定格引張力20350kgに置き換えると、702トン(45km/h)で牽引出来ることになる。

因みに、最新の電気機関車EH200で計算すると

1、粘着引張力

機関車重量 $W_t = 134.4$ トン、粘着係数は最近のインバーター制御によって改善されると仮定し0.30とすると

$$F_m = 1000 \times 0.30 \times 134.4 = 40320 \text{ kg}$$

$$W_c = \frac{40320}{25.5} \times 134.4 = 1446 \text{ [t]}$$

2、粘着引張力を定格引張力27755kgに置き換えると、(勾配20%)

$$W_c = \frac{27755}{25.5} \times 134.4 = 954 \text{ トン牽引出来ることになる、ただし定格速度(58.4 km/h)}$$

付近の速度を出せると仮定した場合で、もう少し低い速度の場合は954トンより多く牽引できる、引張力が急激に変化するいわゆる肩の点(47km/h)で39300kgの引張力があり

$$W_c = \frac{39300}{25.5} \times 134.4 = 1406 \text{ [t]}$$

3、勾配を25%とすると(粘着牽引重量)

走行抵抗が増加し30.5kg/t となり、粘着牽引重量は1187トンとなる、(粘着係数0.3と仮定した場合)

4、勾配を25%とし、定格速度(58.4km/h)付近の速度を出せると仮定した場合
定格引張力は27755kg であり、勾配25%での牽引重量は775トンに急減する。

5、引張力が急激に変化するいわゆる肩の点(47 km/h)では引張力は39300 kgで

$$W_c = \frac{39300}{30.5} \cdot 134.4 = 1154 \text{ [t]} \text{ となり、JR貨物が勾配25\%に於いて1100}$$

トン牽引可能と称することと合、逆にいえば47 km/h程度の速度しか出ないことになる。

例題2

次の文章は、電車用電動機に関する記述である、次の()の中に当てはまる数値を記入せよ

総重量40 tの電車が25/1000の上り勾配で、曲線半径400 mの軌道を時速65 km/hの等速度で走行している。

勾配抵抗 R_g は $R_g = (25)$ [kg/t]で、

曲線抵抗 R_c は $R_c = (2.0)$ [kg/t]

加速度抵抗 F_a は $F_a = (0)$ [kg/t]となる。電車の総重量 $W_t = 40$ tであるので全列車抵抗 R_t は $R_t = (1320)$ [kg]となり、

全電動機の出力 P_M は $P_M = (246.1)$ [KW]となる。

但、走行抵抗：6 kg/t 動力伝達効率：0.95

曲線抵抗：800/r [kg/t] (但 r：曲線半径[m])

例題3

次の文章は、電車用電動機に関する記述である。()の中に当てはまる数値を記入せよ

重量160 tの電気列車が、曲線半径500 m、上り勾配20/1000の線路を

60 km/hの等速度で400 m走行している。但 走行抵抗は8 kg/t、曲線抵抗は800/r [kg/t] (rは曲線半径mを表す)、動力伝達効率は0.95、

電動機効率は0.9とする。

列車重量160 tであるから、走行抵抗 R_r [kg]は、 $R_r = 8 \times 160 = 1280$ kg

となり、 $r = 500$ mであるから、曲線抵抗 R_c [kg]は $R_c = 800 / 500 \times 160 = 256$ kgとなる。勾配抵抗 $R_g = (3200)$ [kg]となるので、

列車抵抗 $R = (4736)$ [kg]となる。

1秒間当たりの仕事 $P_0 (774)$ [kw]となり、電動機入力 $P_i = (906)$ [kw]となる。

以上

電力応用の計算練習(電験問題研究会・電気書院)をアレンジ

地下鉄の非常時対応

1、まえがき

地下鉄は車両限界と建築限界の差が片側40cmしかなくこの為、非常時側扉をあけて退避する事が出来ず、最後の手段は編成の前後にある扉を倒して脱出するしかありません。ただこの方法はパニックに至る恐れが多分にあります。

この為、非常時はあらゆる手段を使って最寄りの駅に横付けする事を基本としています。では、勾配途中で車両故障を起こし起動不能になった場合はどうなるのでしょうか。

2、勾配起動

その線区の最急勾配において、先行の電車が故障した場合、後続の電車と連結し、後続の電車のみで推進できる能力を要求されています。(両編成満車の状態)

それでは千代田線に乗り入れてしている、電車で検証して見ます。

曲線半径400m付帯の3.5%上り勾配に於いて、限流値を「増」とすることにより両車満車(荷重各車20トン)の状態でも起動出来ることが要求され、重い203系8M2T(518トン)を、最新の209系1000代6M4T(463トン)で推進出来る事を検証してみます。

列車抵抗

列車が出発する時の抵抗は、一般に出発抵抗 R_s 、走行抵抗 R_r 、勾配抵抗 R_g 、曲線抵抗 R_c

及び加速度抵抗 R_f に分けられる。単位は[kg/t]

(1) 出発抵抗

4kg/tonとすると、2編成分981トンで3924kgとなる

(2) 勾配抵抗

勾配を $g = \left[\frac{x}{1000} \right]$ とし、重量を W [kg]とすれば、勾配抵抗 R_g [kg]は

$$R_g = W \sin \theta = W \tan \theta = W \left(\frac{g}{1000} \right) \quad [kg]$$

重量 W [kg] = $W \times 10^{-3}$ [t]であるので、1t当たりの勾配抵抗 R_g $\left[\frac{kg}{t} \right]$ は

$$R_g = \frac{r_g}{W \times 10^{-3}} = \frac{W (g/1000)}{W \times 10^{-3}} = g \quad [kg/t]$$

勾配3.5%であり、 $3.5 \times 981 = 3433.5$ kgとなる

(3) 曲線抵抗

半径400mで $800 \div 400 = 2$ kg/トン $2 \times 981 = 1962$ kgとなる。

勾配3.5%半径400m曲線上において2編成起動時の抵抗合計は40221kgとなる
(尚、停止状態であり走行抵抗 R_r は加算しない。では速度に依存しない定数部分は、どうなのかという疑問が残るが、出発抵抗が3km/h程度で消滅するので、通常この勾配起動には加算しない)

このときに勾配起動させる場合、どれくらいの加速度が得られるか。

5ノッチの起動時引張り力は6Mで55100kgとなり

$$= \frac{F - R}{31W} = \frac{F - R}{31W} = \frac{55100 - 40221}{31W} = 0.489 \text{ (km/h/s}^2\text{)}$$

凡例

ただし、W：列車の重量 [t]

209系1000代の編成自重は263トン+乗客200トン=463トン

203系1000代の編成自重は318トン+乗客200トン=518トン

2編成合計981トン

