

1. まえがき

一般に温度上昇により軸圧力を受ける軌道の横変形については、これをモデル的に描くと図1に示す関係があるとされている。

国鉄において現在用いられている座屈理論は、座屈後の変形を解析することにより軌道構造と図の③点の極小値との関係を求め軌道の安定性を確保することを目標としたものであり、③点に相当する軸圧力を最低座屈強さと呼んでいる¹⁾。

一方、④点に相当する座屈発生軸圧力は軌道構造のほか、初期軌道狂いあるいは軌道の線形によって大きく影響されることが知られているが、その定量的な解明は十分にはなされていない。

この報告は、軸圧力の増大に伴う軌道の横変形の成長過程から座屈発生に至る過程について解析するとともに、奥羽大軌道で座屈実験を実施した結果について報告するものである。

2. 座屈発生過程の理論解析

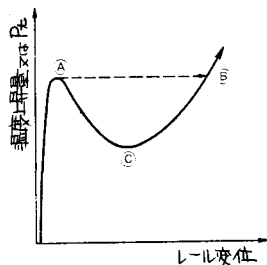


図1 温度上昇量とレール変位

2.1 基本的な考え方

理論解析に際して次の条件を設けた。

(1) 軌道は直線とし、レールの初期変形は図2に示す $y_0 = \frac{C_0}{2} (1 + \cos \frac{\pi}{l} x)$ で与えられるものとする。

(2) 軸圧力の増大に伴う付加変位は $y_1 = \frac{C_1}{2} (1 + \cos \frac{\pi}{l} x)$ で与えられるものとする。

(3) 道床横抵抗力 r (kgf/cm) は一定な等分布抵抗力とし、隣接領域においてのみ作用するものと考え、変形時における軸圧力分布を図2のように表わす。

(4) 道床横抵抗力はまくらぎの変位に応じ $q = q_0 \tanh \mu y$ (kgf) とする。

(5) レール締結装置回転抵抗力は、締結毎に $T = T_0 \sqrt{\theta}$ (kgf·cm) で表わす。

以上の設定から、温度換算軸圧力 P_t ($= E \alpha \theta$; kgf) における任意の付加変位量 C_i (cm) に対し、次のエネルギーおよび仕事量が求められる。

$$(1) \text{ 軸歪エネルギー; } U_1 = \frac{P_t^2 l}{2EA} - \frac{(P_t - \bar{P})^2 l}{2EA} - \frac{(P_t - \bar{P})^2 (2R + \bar{P})}{6rEA}$$

$$(2) \text{ 曲げ歪エネルギー; } U_2 = \frac{\pi^4 E I C_1^2}{16 l^3}$$

$$(3) \text{ } r \text{ に対する仕事; } U_3 = \frac{(P_t - \bar{P})^3}{6rEA}$$

$$(4) \text{ } q \text{ に対する仕事; } U_4 = \frac{q_0}{2\mu} \log(\cosh \mu y_{1,1}) + \frac{q_0}{\mu} \sum_{i=2}^n \log(\cosh \mu y_{1,i})$$

$$(5) \text{ } T \text{ に対する仕事; } U_5 = \frac{2}{3} T_0 \sum_{i=2}^n \left(\frac{dy_i}{dx} \right)_i^{\frac{3}{2}}$$

ここで、 $y_{1,i}$, $(\frac{dy_i}{dx})_i$ は中央のまくらぎ番号を1としたそれぞれのまくらぎ位置における変位あるいは回転角である。さらに、変形から求める伸び $\lambda_1 = \frac{\pi^2}{16 l^2} (C_1^2 + 2C_0 C_1)$ と軸力分布から求める伸び $\lambda_2 = \frac{(P_t - \bar{P}) l}{EA} + \frac{(P_t - \bar{P})^2}{2rEA}$ が等しいことから、 $\bar{P} = P_t + r l - \sqrt{r^2 l^2 + \frac{\pi^2 r EA}{8 l^2} (C_1^2 + 2C_0 C_1)}$ が得られる。

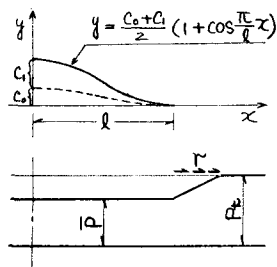


図2 レール変位と軸圧力分布

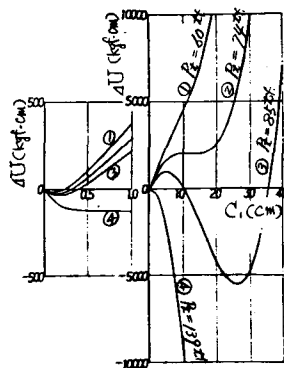


図3 付加変位とエネルギー変化

これらを用いて、それぞれの温度軸圧力 P_t に対して任意の付加変位 C_1 を考えた場合のエネルギーの総和 $U (= \sum U_i)$ を求めることにより、その変化から軸圧力と均衡変位の関係を求めることができる。

2.2 計算例

50 N レール軌道で、 $r = 8$ (kgf/cm), $g = 240 \tanh 4y$ (kgf), $\tau = 32000 \sqrt{\theta}$ (kgf/cm), まくらぎ間隔 60 cm とし、 $l = 480$ (cm), $C_0 = 2$ (cm) の初期軌道狂いを考えた場合の計算結果を図3に示す。ここでは、前述の U_1 における $\frac{P_t^2 l}{2EA}$ が変位が成長しないとした場合の軸全エネルギーであることより、これを除いた値 $4U (= U - \frac{P_t^2 l}{2EA})$ により表示した。

図によれば、軸圧力の増大に伴ない $4U$ が極小値となる 1~3 mm の微小変位が成長していくこと、 $P_t = 74$ tf においては $C_1 = 15$ cm 付近に停留値が出現し、さらに軸圧力が増大するとこれが極大値と極小値に分離し、 $P_t = 139$ tf においては極大値が上記の微小変位における極小値と合致し、ついに増減することが理解される。

$C_0 = 0, 1, 3$ (cm) の場合も含め、このような極値をとる変位 (均衡変位) を抽出して図示したものが図4である。

この図は、図1にモデル的に示した現象を具体的に示している。また、図1の①点に相当する値は 70~80 tf の範囲にあり、初期軌道狂いの値によってそれほど影響されないのに対し、④点に相当する値は $C_0 = 3$ cm の場合に約 100 tf, $C_0 = 2$ cm の場合に約 140 tf であり、 $C_0 = 1$ cm では 200 tf 以上となり、 $C_0 = 0$ cm では無限大になるというように、初期軌道狂いの影響が大きいことを示している。

3. 車軸軌道座屈実験

座屈実験は国鉄・鉄道技術研究所の構内に設けられた延長 65 m の車軸軌道座屈実験装置により実施した。

試験はまくらぎ間隔 58 cm の 50 N レール・PC 3号まくらぎ軌道に $l = 522$ cm, $C_0 = 3.0$ cm の前記の形状の初期軌道狂いを設定して、3回実施した。試験結果を図5に示す。それぞれの座屈発生時における温度換算軸圧力は 114 tf, 87 tf, 105 tf であった。

また、別に実施した試験により明らかになった試験軌道の特性値 ($g = 190 \tanh 2y$, $\tau = 32000 \sqrt{\theta}$) を用いて前述の手法により解析した結果を図6に破線を示す。なお、 $r = 8$ kgf/cm とした。

実験値と理論値を比較すると、理論値では座屈発生軸圧力が 86 tf と求められるのに対し、実験値はいずれもこれより大きな値となっている点と、初期の変位の増大が実験では少ない点と異なっている。この理由としては、理論計算では軌道の初期狂いをレールくせによるとしているのに対し、実験ではこれを弾性的に生じさせたことと道床横曲抗力等座屈阻止抵抗力の実態が理論式におけるものと異なっていることが考えられるが、ここに述べた理論計算値は安全側になっている。

4. あとがき

以上の解析により、軌道の座屈発生過程の追跡の可能性とともに、今後の解析におけるポイントが明らかになったものと考えらる。

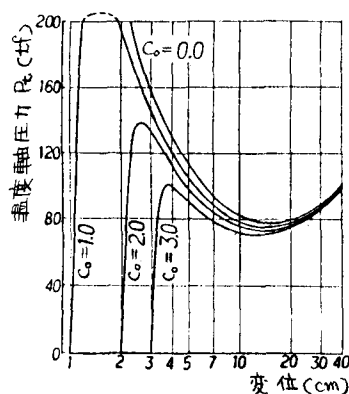


図4 軸圧力と均衡変位

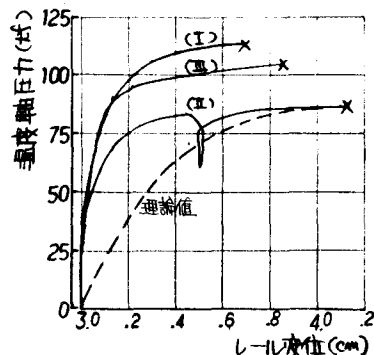


図5 実験値と理論値の比較