

1. はじめに

長大吊橋などに生じる大きな角折れを通過する車両の走行性については、実車試験、模型試験などにより調査され、その結果は鉛直角折れに対しては理論的にも良く説明されている。しかし、水平角折れに対しては理論的解析が不十分なため、その許容限度を求めることが困難となっている。ここでは二軸貨車について水平、鉛直角折れ軌道上の走行性に関する運動方程式を誘導し、シミュレーションを実施して、実車試験結果との比較検討を行ないモデルの妥当性を検証するとともに、現象を支配するパラメータについて検討した。

2. 解析の概要

力学モデルは図1に示すように、車輪と車体が上下、左右、前後方向のばねにより結合されたものである。車体の自由度は、上下 Z_B 、左右 Y_B 、ピッチング θ_B 、ローリング ϕ_B 、ヨーイング ψ_B の5つ、輪軸の自由度は左右 Y_{wi} 、鉛直軸のまわりの回転 ψ_{wi} の2つで、車両全体としては9自由度を有するモデルである。

角折れ軌道の形状は図2に示すとおりである。 α_H と α_E はそれぞれ水平角折れ度と鉛直角折れ度、 X_c は角折れ部の曲線区間長である。この曲線は2次曲線もしくは正弦曲線により

近似した。この軌道を車両が一定速度 V で走行するものとした。

運動方程式を誘導する際に最も重要となるのは、車輪とレールとの接触面に作用する力のモデル化である。ここでは以下の二つの事柄を仮定した。第一に、車輪とレールとは一定勾配 γ を有する通常路面で常に接触し、接触面には線型クリープ理論に基づくクリープ力が働くこと。第二に、レールに対する輪軸の偏倚が大きくなり、車輪フランジとレール側面とが接触した場合、フランジには頭面において K_p なるばね定数を有するレールからレール小返りにともなう横圧が作用することである。クリープ力は図1に示すように横方向クリープ力 H_{ci} と輪軸の重心を通る鉛直軸まわりのモーメント $T_{\psi i}$ に分解され、動輪重に対するクリープ係数を $C_{\gamma i}$ 、横方向と縦方向のすべり率をそれぞれ $S_{\gamma i}$ と $S_{\psi i}$ とすると次式により与えられる。

$$H_{ci} = \pm C_{\gamma i} \cdot S_{\gamma i} \quad (1) \quad T_{\psi i} = b \cdot (C_{\gamma ia} + C_{\gamma ib}) \cdot S_{\psi i} \quad (2)$$

ここで $S_{\gamma i}$ と $S_{\psi i}$ は公称半径を r 、実質半径を $r_{\gamma i}$ とすると次式により与えられる。

$$S_{\gamma i} = \{ \dot{y}_{wi} + (\dot{y}_{ia} - \dot{y}_{ib}) \cdot r / 2b - V \cdot \psi_{wi} \} / V \quad (3) \quad S_{\psi i} = \{ \dot{\psi}_{wi} - (\dot{y}_{ib} - \dot{y}_{ia}) \cdot V / 2br \} \cdot b / V \quad (4)$$

さらに $C_{\gamma i}$ は静輪重 V_s に対するクリープ係数を C_r 、輪重変動を $V_{\gamma i}$ とすると次式により与えられる。

$$C_{\gamma i} = C_r \cdot \{ (V_s + V_{\gamma i}) / V_s \}^{3/2} \quad (5)$$

すべり率が大きくなると完全なすべりに移行し、クリープ力は摩擦力になる。ここでは摩擦係数を0.25と仮定し

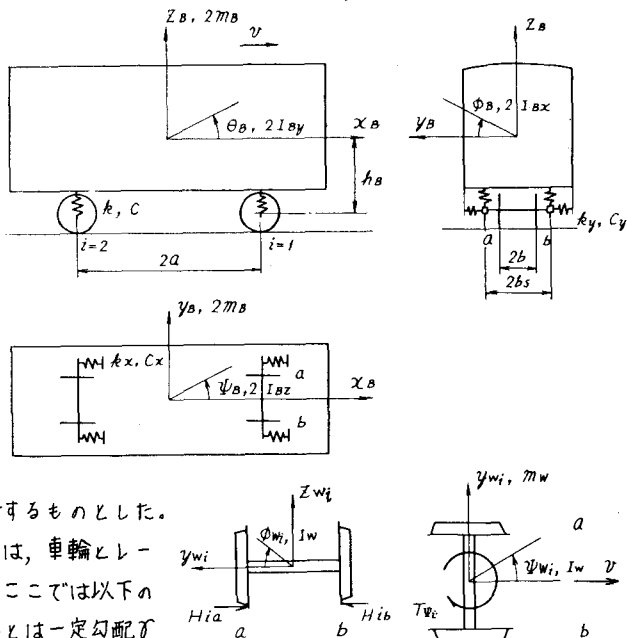


図-1 車両モデル

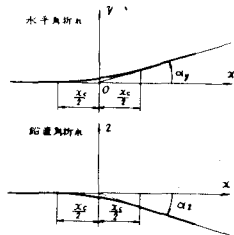


図-2 角折れ軌道形状

クリープ力の上限值を求めた。式(1)の横方向クリープ力とフランジに作用する横圧を合計すると全体の横圧を得る。

以上のモデルと仮定を用いて9つの自由度について運動方程式を導き、ルンゲ・クッタ・ギル法による数値積分を実行して、横圧、輪重変動、脱線係数、車体振動加速度など、必要な物理量を計算した。

3. 結果

対象とした車両は積車状態のワライ形二軸貨車である。クリープ係数 C_r 、レール小返りばね定数 K_p 、緩和長 X_c 、走行速度 V については、表1に示す値を標準値として定め、解析の中心とした。

表1 主要パラメータの標準値

C_r	356000 kg
K_p	1.5×10^6 kg/m
X_c	2 m
V	75 km/h

(1) 横圧と輪重変動の波形例 一例として5%の水平角折れに対する横圧と輪重変動の波形は図3に示すとおりである。前輪軸角折れ外軌側車輪に作用する横圧(H1B)は、角折れ部緩和区間の最終端付近から急激に立上がり、約2に達してから徐々に減少する。狩勝実験線の突車試験結果と比較すると、突車試験では角折れ進入時に既に0.5^tの横圧を生じている点を除けば、比較的よく一致している。輪重変動については、左右の輪重が時間軸に対して正負対称になっており、明らかに角折れ通過にもなる車体のローリングの影響と考えられる。横圧、輪重変動とも、前輪軸と後輪軸とで顕著な差はない。

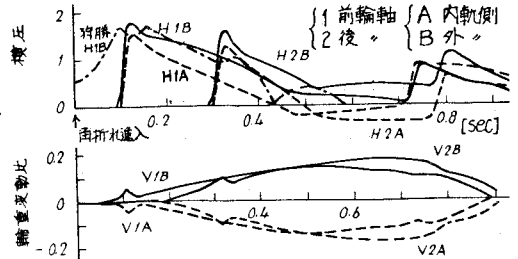


図-3 横圧と輪重変動の波形例

車両の走行安全性を検討する際、横圧、脱線係数、輪重減少比の最大値を判断の基準にしているが、上記の結果に基づき、横圧と脱線係数は前輪軸外軌側車輪、輪重減少比は前輪軸内軌側車輪のそれぞれ第一波の最大値に着目した。

(2) 主要パラメータの影響 C_r , K_p , X_c , V を表1の標準値を中心に一つずつ変化させて、5%の水平角折れに対する車両応答に及ぼす影響を調べた。この内、 C_r , X_c の影響はさほど鋭敏ではない。 K_p の影響は図4に示すように顕著である。これは、 K_p が大きくなると横圧には周期の非常に短い大きな振動成分が発生するためである。しかし、実在範囲ではそのような現象はなく問題はない。 V が増加すると、横圧、脱線係数、輪重減少比の最大値は単調増加するので、最高速度について検討しておけばよい。

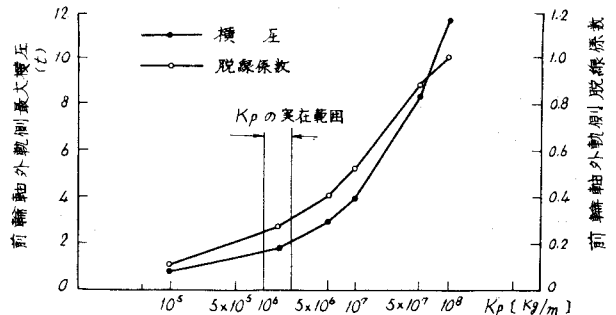


図-4 レール小返りばね定数 K_p の影響 ($\alpha_y = 5\text{‰}$, $\alpha_z = 0\text{‰}$)

(3) 角折れ度の影響 水平角折れが単独に存在する場合、および10%の鉛直角折れが併存する場合について、水平角折れ度と横圧、脱線係数、輪重減少比の最大値との関係を調べた。結果は図5に示すとおりである。これは角折れの許容限度を決定する際の一つの資料となるものである。

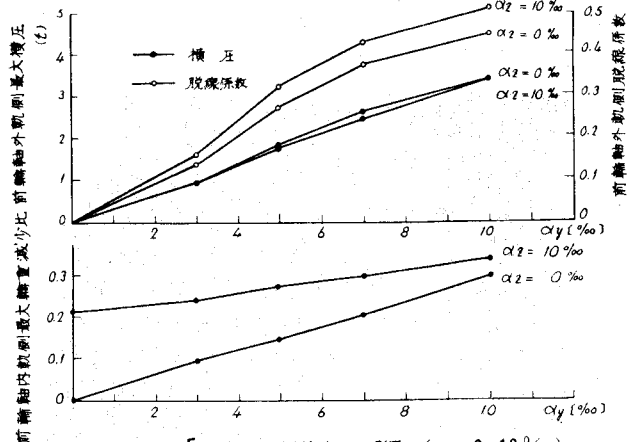


図-5 水平角折れ度 α_y の影響 ($\alpha_z = 0, 10\text{‰}$)

なお、本研究は本州四国連絡橋公団の依頼により行なわれたものである。