列車ブレーキの減速パターンの乗り心地に関する考察

○小美濃幸司, 遠藤広晴, 島宗亮平, 中井一馬, 村越暁子 (財鉄道総合技術研究所)
Study on Braking Patterns in terms of Ride Comfort

Koji Omino, Hiroharu Endoh, Ryohei Shimamune, Kazuma Nakai ,
Akiko Murakoshi(Railway Technical Research Institute)

1. はじめに

鉄道のサービス向上として、列車速度を上げて到達時間を短縮することが考えられる。その際、ブレーキ減速度を高めることが求められるが、乗り心地にも配慮が必要となる。そこで最高速度を向上することを想定し、その速度から一定速度に減速するブレーキにおいても、なるべく乗り心地を損なわないような、最適減速パターンを検討した。また、この減速パターンを営業列車に適用する際の確認のため、シミュレータを用いた実験による方法について検討した。

2. 最適な減速パターン

ブレーキ時の乗り心地には、減速度とジャーク（減速度の変化率）が影響することが知られている。筆者らは先行研究¹⁾で、ブレーキの減速度とジャークを精度よく制御し、乗り心地への影響を調査した。ブレーキ時の乗り心地の悪さを「乗り心地として許容できない」とする人の割合と考え、これを減速度とジャークを説明変数とする次の乗り心地指標 z で表した。ただし、ブレーキの減速波形は図1に示す減速度 β とジャーク j により決定される等脚台形を仮定した。また、多様な乗車姿勢が考えられる中で、ブレーキ時の乗り心地として不利な乗車姿勢である、列車進行方向を向いて立ち、手すりにつかまらない姿勢を対象とした。

$$z = \frac{100}{1 + e^{a\beta + bj + c}} \cdots (1)$$

ここで a および b は負定数、 c は正定数であり、 $a/b = 0.67$ を満たす。

以下、ブレーキの乗り心地を損ねないという観点から、式(1)の z を最小とする減速パターンを最適な減速パターンと考え、これを実現する減速度 β とジャーク j の組み合わせを推定する。ここで、制約条件として4つの「仮定」をおく。
(i) ブレーキ減速度は図1の等脚台形とする。

図1 ブレーキの減速度波形

- (ii) 最高速度 v_0 (m/s)の走行中に、運転士が減速信号（または、注意信号）を確認し ($t=0$)、ブレーキノッチを入れる。列車は一定時間空走し、 $t=t_0$ において減速が開始する。
- (iii) $t=t_0$ から減速度が一定のジャーク j で $t=t_0+t_1$ まで増加する。以降 $t=t_0+t_2$ まで一定の減速度となる。
- (iv) 走行速度が目標速度 v_e (m/s)まで減速したのを確認し、ブレーキノッチを解除する ($t=t_0+t_2$)。運転士が信号を確認してから、ブレーキノッチを解除するまでの間 ($t=0 \sim t_0+t_2$) に x_0 (m)移動しているとする。なお、この解除タイミングの仮定は、通常、運転士が目標速度への減速を確認した後、ブレーキノッチを解除することが多いことによる。

上記仮定(i)～(iv)を整理すると、次式(2)～(4)が得られる。また、「(1)の最小化」と条件式(5)は同値であることから、式(2)～(5)の解が最適減速パターンを与える減速度 β とジャーク j ということになる。ただし、解析的に解くことはできないため、ここでは数値解析的に解を求める必要がある。

$$\left(v_0 t_0 + \frac{v_0^2 - v_e^2}{2\beta} - x_0 \right) j^2 + \frac{v_0 \beta}{2} j - \frac{\beta^3}{24} = 0 \cdots (2)$$

$$\frac{v_0^2 - v_e^2}{2(x_0 - v_0 t_0)} < \beta < \frac{2(2v_0 + v_e)(v_0 - v_e)}{3(x_0 - v_0 t_0)} \cdots (3)$$

$$\frac{\beta^2}{2(v_0 - v_e)} < j \cdots (4)$$

$$\max_{\beta, j} [a\beta + bj + c] \quad \dots(5)$$

3. 実験的検証に関する考察

このように理論的には、上記最適減速パターンによるブレーキが最も乗り心地を損ねないと考えられる。一方、営業列車では線区の状況やブレーキ制御技術のレベルなどの現実上の要因に影響を受け、その最適値がずれたりすることなどが考えられる。さらに、現在の最高速度を超える速度でのブレーキの確認を営業線で行うことはすぐにはできない。以上のことから、鉄道総研が所有する走行する列車の車内環境を模擬できる車内快適性シミュレータ(図2左)を用いた、最適減速パターンの確認実験を試み、その問題点などを探った。

図2 車内快適性シミュレータ外観と減速パターン発生方法

3.1. 実験方法

ここでは仮に最高速度を 140km/h に上げた 2 つのブレーキ条件を想定する。

[条件①]: 最高速度 140km/h から目標速度 55km/h に減速

[条件②]: 最高速度 140km/h から目標速度 75km/h に減速

条件①は、最高速度から注意信号による減速を、条件②は、最高速度から減速信号による減速を想定した。式(2)~(5)より、最適減速パターンは、条件①では減速度 1.67 m/s^2 、ジャーク 0.35 m/s^3 、条件②では減速度 1.41 m/s^2 、ジャーク 0.29 m/s^3 と推定された。

シミュレータ実験では、最適減速パターンを含め、条件①、条件②を満たす β と j の組み合わせの減速パターン、それぞれ 7 パターンずつを作成し、再現した。シミュレータの水平方向の可動範囲に制約があるため、シミュレータ

を傾斜させて重力加速度を利用し、各条件のブレーキを模擬した(図2右)。ブレーキ減速度に重ねて列車走行中の左右、上下振動を発生させ、体感上営業列車に近い状況とした。また窓を塞ぎ、走行音を入れない条件とした。これらのパターンを 48 名の被験者が体感し、官能評価を行った。なお、ここでは乗り心地に関する評価として、次の結果について 2 項目に関する結果について報告する。

評価項目 c-1: 駅停車時のブレーキとして許容できないとした人の割合

評価項目 c-2: 運転中の最も強いブレーキとして許容できなとした人の割合

3.2. 結果と考察

2 つの評価項目の結果はほぼ同じ傾向を示し、次のことがわかった。減速度とジャークの組み合わせによって乗り心地が変わり、実験上最適な組み合わせの減速パターンがあることが示唆された。実験上最適な減速パターンは、条件①では理論的に推定された最適減速パターンを含む減速度 $1.55 \sim 1.67 \text{ m/s}^2$ 、ジャーク $0.35 \sim 0.48 \text{ m/s}^3$ の領域に存在することが確認された。条件②では推定された最適減速パターンを含む減速度 $1.30 \sim 1.60 \text{ m/s}^2$ 、ジャーク $0.22 \sim 0.42 \text{ m/s}^3$ の領域に存在することが確認された。ただし、今回のシミュレータ試験では、ジャークがブレーキとしての許容不可率に及ぼす影響が、実際よりも小さく現れる傾向にあった。これは、ブレーキの減速度を車体床面を傾けることで模擬していることに原因があると考えられた。試験後の自由記述欄にみられた被験者の記述にも、この傾向を裏付ける意見がみられた。さらに、実験上の最適減速パターンの推定に幅が生じたのも、ジャークの影響が不明瞭となったことが一因と考えられた。

以上のことから、シミュレータ実験ではブレーキのジャークの影響が小さく評価されるため、この影響を考慮した精度範囲で、減速パターンの乗り心地確認が可能であると考えられた。

参考文献

- 1) 小美濃幸司他:「乗り心地に配慮したブレーキパターン」, 人間工学, Vol.42, No.3, 164-171, 2006