ARモデルを用いた一過性変動風に対する人の姿勢安定性に関する考察

○遠藤 広晴, 小美濃 幸司, 澤 貢, 島宗 亮平 (鉄道総合技術研究所)

Study on Stability of Human Postural Dynamics under Transient Wind Disturbance
by Using Autoregressive Model

Hiroharu Endoh, Koji Omino, Mitsugu Sawa, Ryohei Shimamune
(Railway Technical Research Institute)

1. はじめに

列車が駅を通過する際、ホーム上には列車が引き起こす風が吹く。このような通過列車の近傍で生じる風を列車風と呼ぶ。列車風には、列車先頭部通過時や後尾部通過時において、短時間のパルス状の波形 (以後、「一過性変動風」と記述する) が見られ、列車速度が高い場合、比較的大きな風速ピークを持つ。したがって、列車風に関して、旅客の安全性を検討する際には、列車風の特徴的な要素である一過性変動風が人に及ぼす影響を把握する必要がある。

筆者らは先行研究において、人が姿勢を保持できる限界風速 (姿勢保持限界風速) に関して、特に風速ピーク値と作用時間に着目した詳細な検討を行った¹⁾。一方、心理的な許容限界は、姿勢保持限界風速よりも低い結果となり²⁾、姿勢を保持できる風速領域内においても、姿勢安定性の詳細な分析が必要であることが示唆された。この場合、風速ピーク値、作用時間のほかに、風速の周波数成分も大きく影響すると考えられる。本稿では、風洞試験で得られた風速と人の重心動揺データを基に、風速に対する人の動特性を推定し、姿勢安定性に関する検討を行う。

2. 風洞試験概要

鉄道総研が所有する大型低騒音風洞において、一過性変動風の体感試験を実施した。試験方法の概要を以下に記す。

装置: 図1のようなルーバーを風洞内に設置し、この開閉によって列車風にみられる一過性変動風を被験者が体験できるようにした。試作したルーバーは、20枚のハネが手動式の操作ハンドルに連動して一斉に開閉するリンク機構を備えている。初期状態では風洞に定常風を吹かせ、ルーバーは閉じている。ルーバーが45°回転すると全開し、90°回転すると再び完全に閉じる。この間にルーバーの隙間を通る風が被験者に当たる1回分の試験風となる。

風速条件: 被験者に作用させる風速のピーク値は、風洞の定常風と連動して変化する。定常風の風速は、5m/s刻みで、30m/sまでの6段階設定した。

姿勢: 被験者は足を肩幅程度に開き、手は体側にたらし、視線を水平前方に向け、自然に立った。一般に人は横方向よりも前後方向の力に対して姿勢安定性が低い。そこで、安全側での検討を行うため、背後から風を受けるようにした。

計測項目: 被験者の風上側に超音波風速計 (カイジョー, SA200) を設置し、風速を計測した。また、被験者の重心動揺を床力計 (アニマ, MG100) により計測した。

図1 一過性変動風発生用のルーバー

3. 多変量ARモデルによる一過性変動風に対する人の動特性の推定

一過性変動風に対する人の重心動揺は短時間で減衰する。このような短時間データから動特性を精度よく推定する方法として、多変量ARモデルの有効性が示されている³⁾。

k次元離散時間時系列データのn個目のデータを $X(n) = (x_n(1), \dots, x_n(k))^T$ とするとき、多変量ARモデルは以下の式で表される⁴⁾。

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m)X(n-m) + U(n) \quad (1)$$

$\mathbf{A}(m)$ は $k \times k$ 行列の自己回帰係数行列、 $\mathbf{U}(n)$ は k 次元正規白色雑音である。このとき、 $k \times k$ 行列のクロススペクトル行列 $\mathbf{P}$ は以下のように表される。

$$\mathbf{P}(f) = \mathbf{A}(f)^{-1} \boldsymbol{\sigma} (\mathbf{A}(f)^{-1})^* \quad (2)$$

$$\mathbf{A}(f) = \sum_{m=1}^M \mathbf{A}(m) \exp(-j2\pi fm) \quad (3)$$

$\boldsymbol{\sigma}$ は正規白色雑音 $\mathbf{U}$ の共分散行列である。本稿では、 $k=1$ を風速の二乗値、 $k=2$ を重心動揺として、2変量ARモデルを適用した。風速の二乗値を用いたのは、風による抗力が風速の二乗に比例することによる。なお、多変量ARモデルの次数はAICを最小とするものを選択した。上記(2)を基に、風速による抗力と重心動揺間の伝達関数 $H(f)$ およびコヒーレンス $coh(f)$ は以下のように計算できる。

$$H(f) = \frac{P_{12}(f)}{P_{11}(f)} \quad (4) \quad coh(f) = \frac{|P_{12}(f)|^2}{P_{11}(f)P_{22}(f)} \quad (5)$$

P_{11} 、 P_{22} はそれぞれ風速による抗力、重心動揺のパワースペクトルであり、 P_{12} は両者のクロススペクトルである。

4. 結果と考察

試験で計測された風速波形、重心動揺波形の例を図2に示す。また、図2のデータに対して、風速による抗力から重心動揺への伝達関数およびコヒーレンスを計算した結果を図3に示す。なお、この場合のAICを最小とする次数は9であった。計測された重心動揺波形は風速波形に対して、なだらかな形状をしており、受風後はしばらく振動していることが確認できる。また、計算された伝達関数は1.1Hzにピークを持ち、それ以降は減衰する形状となった。コヒーレンスは3Hz程度までは高い値を示していることが確認できる。他の被験者に対して伝達関数を計算した結果も同様となり、0.5Hz～1Hz付近にピークを持ち、その後減衰するものが多かった。これは、立位状態の人に床面から振動加速度を作用させた場合、共振周波数が1Hz付近にあることと一致する。鉄道における振動乗り心地の分野では、振動に対する人の物理特性を基に、乗り心地の評価に関する研究が進んでいるが、今回の結果は、これら評価手法を風速の評価にも応用できることを示唆している。今後、試験データの分析を進めていくと共に、人の姿勢

への影響という観点から、振動乗り心地の評価手法を風速の評価へ応用する方法に関して検討を進めていきたい。

図2 風速と重心動揺波形の例

図3 伝達関数とコヒーレンスの例

参考文献

- 1) 遠藤広晴：一過性変動風の人体に対する力学的影響に関する研究，日本人間工学会第48回大会講演集，pp.228-229，2007
- 2) 小美濃幸司：駅ホームの旅客に及ぼす列車風の影響，鉄道総研報告，Vol.20，No.3，pp.41-46，2006
- 3) 相馬仁：AR法による車両横風動特性の同定，自動車技術会学術講演回前刷集，No.911，pp.235-238，1991
- 4) 赤池弘次：ダイナミックシステムの統計的解析と制御，サイエンス社，1972