

列車風が保守作業員に及ぼす影響の推定

遠藤 広晴* 小美濃 幸司** 白戸 宏明**

澤 貢** 種本 勝二*** 武居 泰#

Estimation of the Effects of Train Draft on Maintenance Workers

Hiroharu ENDOH Koji OMINO Hiroaki SHIROTO

Mitsugu SAWA Katsuji TANEMOTO Yasushi TAKEI

The author conducted wind tunnel experiments to study the effects of train-induced drafts on track maintenance gang waiting at a sidetrack in a brace position, the posture either squatting or holding to a handrail. Based on the experimental results, we clarified the relationship between a wind speed and the postural stability of the workers in the brace position, and then proposed a model to predict the dynamic effects due to the transient wind on them. In this paper, we also discussed the range of wind speed where the men in the brace position would be able to maintain their postures.

キーワード：安全，人間工学，労働科学，保守作業，新幹線／列車風，風速，退避姿勢，姿勢安定性，風洞試験

1. はじめに

列車の速度向上に伴い空気力学的な現象が顕著になる傾向にあり，列車通過の際に発生する列車風が，ホーム上の旅客や保守作業用通路で退避している作業員の安全に影響を及ぼさないよう，対処する必要がある。

このため鉄道事業者は，ホーム柵を設置したり，退避姿勢を指導したりするなどの安全対策を実施している。また，JR旅客鉄道会社などでは，ホーム上および保守作業用通路それぞれに風速の目安値を設け，この目安値を超えないように対策を行っている。これら目安値は，ビューフォート風力階級を根拠として国鉄時代に設定されたもので，たとえば，保守作業用通路の列車風の目安値は，同階級7（歩行に不自由を感じる）を参考として17.0m/sとされている¹⁾。これまでの実績から安全の確保に貢献していると考えられる一方で，ビューフォート風力階級は自然風の10分間以上の平均風速を対象とした記述であり，これを列車風のような短時間の風に適用することの妥当性検証が課題となっている。

筆者らは先行研究において，列車風がホーム上の旅客に及ぼす影響に関する検討を行った^{2), 3)}。一方，退避姿勢をとる保守作業員への影響に関しては，これまでに詳細な実験検討は行われておらず，現状の目安値がどの程

度の安全余裕を持っているかも不明である。そこで，本研究では，列車風が退避姿勢をとる保守作業員に及ぼす影響を明らかにすることを目的として，新幹線保守作業用通路の列車風の計測，および風洞試験による風速の体感試験を実施し，主に力学的な観点から風速と人への影響に関する検討を行った。なお，本稿での「退避姿勢」とは，しゃがんだ状態で手すりにつかまる姿勢を指すものとする。

2. 保守作業用通路の列車風

新幹線保守作業用通路の列車風の性状を把握するため，新幹線明かり区間の高架橋内保守作業用通路において，列車風の計測を実施した。計測例を図1に示す。線路直角方向成分は通路側を正方向，線路方向成分は列車進行方向を正方向とした。最下段の合成風速は，これら2つの成分を合成したものである。計測点は車両側面からの離れ1.28m，通路からの高さ0.8m，列車編成は12両，通過速度は261km/h，使用した風速計は3次元超音波風速計（カイジョー，SAT-550）である。なお，高架橋は高さ2mの直壁防音壁の内側が保守作業用通路となっている。図1より，以下のことが確認できる。

- ・ 主に線路方向の風速成分が大きく，線路直角方向に大きな風速は見られない。
- ・ 線路方向では，先頭部通過時にパルス状の変動風が発生し，列車通過中から後尾部通過後数秒間にかけて，風速が正方向（列車進行方向）に緩やかに増大している。

* 前 人間科学研究部（人間工学）

** 人間科学研究部（人間工学）

*** 環境工学研究部（空気力学）

構造物技術研究部（建築）

特集：ヒューマンファクター

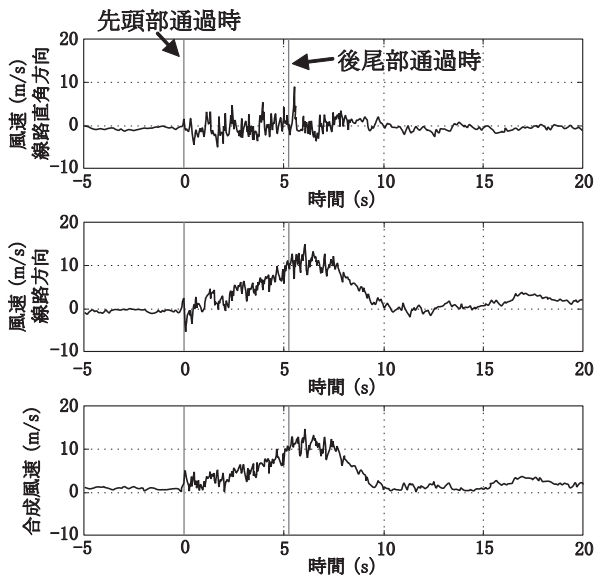


図1 新幹線保守作業用通路の列車風波形例

3. 風洞試験方法

退避姿勢時における、風速と姿勢安定性の関係、および風速と人の受ける力の関係を調査するため、定常風の体感試験を実施した。また、前章の列車風計測で確認した、パルス状の短時間に変動する風速や、緩やかに増大する風速が退避姿勢に及ぼす力学的影響を把握するため、変動風の体感試験を実施した。なお、保守作業用通路の列車風の主成分は線路方向（列車進行方向）であったことや、壁面の手すりにつかまった場合、姿勢の向きは線路直角方向となることから、通路上で退避姿勢をとる作業員は、風を主に側面から受けると考えられる。そこで、いずれの試験においても、被験者は退避姿勢をとり、風を側面から受けるようにした。試験は鉄道総研の所有する大型低騒音風洞を利用して実施した。

3.1 定常風試験

(1) 風速と姿勢安定性の関係調査

被験者に当てる定常風の風速は、0m/sから緩やかに上げていき、途中5m/sごとに20秒間、風速を一定に保つようにした。なお、安全のために、実験での風速の上限を35m/sとした。被験者は、風速を上げていく途中で姿勢を保持できなくなった場合、手すりに取り付けられたボタンを押して、自己申告をした。また、最終風速の35m/sにおいても姿勢を保持できた場合、姿勢の余裕度（5段階評価：「1. かなり余裕がある」、「2. 比較的余裕がある」、「3. 少し余裕がある」、「4. 保持できるが余裕はない」、「5. 姿勢を保持できない」）について回答した。試験に参加した被験者は健康な成人男性16名で、年齢は18～53歳（平均32.3歳）、身長は160～183cm（平均172.6cm）、体重は50.5～98.2kg（平均65.9kg）であった。試験の様子を

図2に示す。

(2) 抗力係数の推定

一般に、風速と物体が受ける力の関係は、以下の式で表される。

$$F_u = \frac{1}{2} \rho C_D S_u U^2 \quad (1)$$

ただし、 F_u ：物体が受ける力 (N)、 U ：風速 (m/s)、 S_u ：風速方向の投射面積 (m²)、 ρ ：空気密度 (kg/m³)、 C_D ：抗力係数。ここで、抗力係数は物体の風速方向に対する形状により決定されるもので、たとえば立位姿勢時と退避姿勢時とはその値が異なる。抗力係数が明らかになれば、人の体格に応じて、風速により受ける力を推定することが可能となる。立位姿勢時の抗力係数は、風を背面から受けた場合、先行研究により約1.0であることが知られているが^{4), 5)}、退避姿勢時のように、しゃがんだ状態で側面から風を受けた場合の抗力係数に関する報告はない。そこで、退避姿勢時の抗力係数を明らかにするための試験を実施した。被験者に当てる定常風の風速は0m/sから緩やかに上げていき、途中10m/sから30m/sまで5m/sごとに、数十秒間風速を一定に保つようにした。試験に参加した被験者は健康な成人男性10名で、年齢は21～51歳（平均38.5歳）、身長は169～183cm（平均173.1cm）、体重は65.0～83.0kg（平均70.9kg）であった。

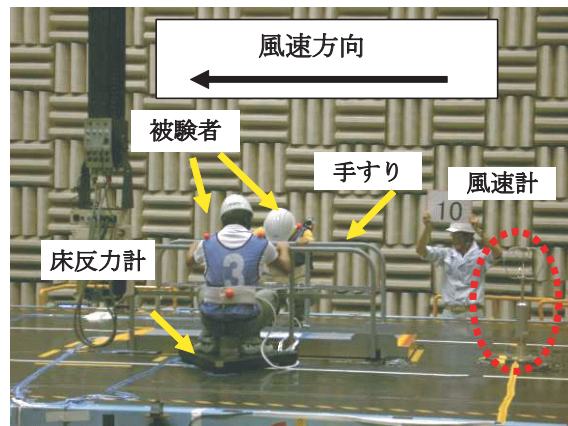


図2 定常風試験風景

3.2 変動風試験

20枚の羽根からなる回転式のルーバーを電動モーターで駆動する変動風発生装置（図3）を風洞内に設置した。風洞には定常風を吹かせ、ルーバーの開閉時間を制御することで変動風を発生させた。定常風の風速を10m/sから5m/s刻みで25m/sまで4段階設定し、風速を上げていきながら、各段階で4種類の作用時間（0.4s, 1.0s, 2.0s, 4.0s）を持つ三角波風速、および2種類の立上り時間（0.5s, 2.0s）と約5秒の定常区間を持つ台形波風速を発生させた。試験に参加した被験者は成人男性14名で、年齢は20～54歳（平均32.2歳）、身長は159.1～180.3cm

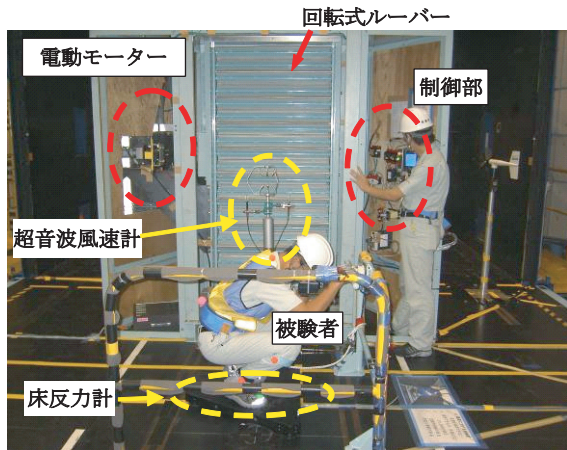


図3 変動風試験風景

(平均171.5cm)、体重は44.1～86.3kg(平均64.2kg)であった。

3.3 風速と人への影響の計測

定常風試験, 変動風試験ともに, 被験者より風上側に超音波風速計(カイジョー, SAT-550)を設置し, 風速を計測した。また, 両試験において, 人への影響を把握するために, 床反力計(アニマ, MG100)による身体重心変位, 床荷重の風速方向成分, および3分力計(共和電業, LSM-B-SA1)付きの手すりによる手すり荷重を計測した。ここで, 計測した荷重は, 風から受ける力(抗力)と, 人の動揺により生じる力を含んでおり, 被験者はこの荷重に相当する力で踏ん張っていることになる。ただし, 定常風を受けている場合は, 人の動揺による成分は定常不規則信号と見なせるため, 計測された荷重の時間平均をとることで同成分はほぼ打ち消され, 抗力の成分のみが残る。

本研究では, 定常風試験での「風速と姿勢安定性の関係調査」に関しては, 身体の高つき等, 姿勢状況を反映する身体重心変位に着目し, 定常風試験での「抗力係数の推定」, および変動風試験に関しては, 風速の力学的影響を反映する荷重に着目する。なお, 本稿では, 単に「荷重」と記述した場合は, 風速方向の床荷重と手すり荷重の合力を意味するものとする。

4. 風洞試験結果

4.1 定常風試験

(1) 風速と姿勢安定性

各段階の風速に対する身体重心変位の平均値, およびpp値(両振幅)について, 全被験者分プロットしたものをそれぞれ図4, 図5に示す。ただし, 両図とも横軸は各段階での5秒間の平均風速を意味し, 図4, 図5の縦軸はそれぞれ風速と同一区間の身体重心変位の平均値, およびpp値を意味する。風速の増大に対応して重心変位の

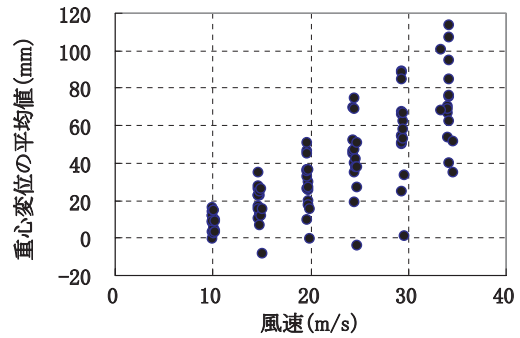


図4 定常風速と重心変位の平均値の関係

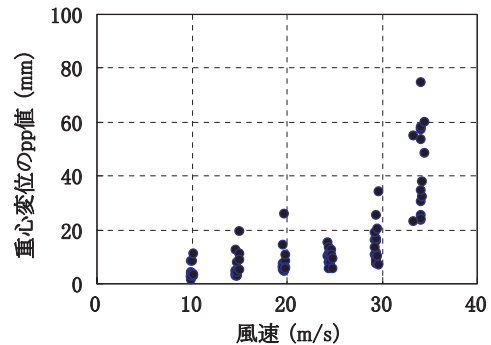


図5 定常風速と重心変位のpp値の関係

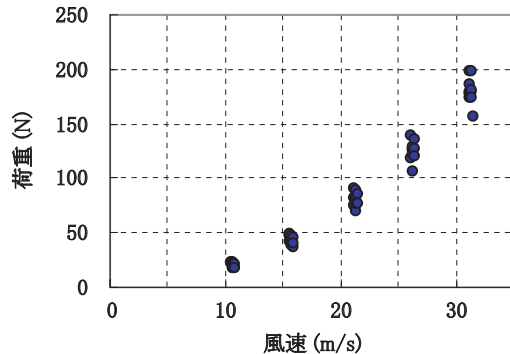


図6 定常風速と荷重の関係

平均値は増大する傾向にあり, 風速35m/sで全ケースの最大値113mmを記録した。重心変位のpp値は風速30m/sまでは, ほぼ全てのケースで30mm以内であったが, 風速35m/sにおいて急激に増大し, 最大で74.5mmであった。

今回の試験では, 30m/sまでは姿勢を保持できない被験者はいなかった。姿勢を保持できなかった被験者は16名中2名で, どちらも30～35m/sの領域においてであった。また, 35m/sで姿勢を保持できた被験者の「姿勢の余裕度」の回答結果は, 全て「4. 保持できるが余裕はない」であった。以上の結果より, 退避姿勢で側面から定常風を受ける場合, 30m/s～35m/sに姿勢が不安定となる臨界点があると考えられる。

(2) 抗力係数

図6に風速と荷重の関係を示す。荷重は風速に対してほぼ二乗に比例している。式(1)を仮定し, 抗力係数 C_D

特集：ヒューマンファクター

を回帰分析により推定した結果、0.82 ($R^2=0.97$) と推定された。ただし、空気密度 ρ は 1.23kg/m^3 、風速 U には各条件での10秒間の平均風速、抗力 F_u には風速と同一区間の平均荷重とした。なお、被験者の投射面積 S_u は $0.332 \sim 0.409\text{m}^2$ (平均 0.361m^2) であった。推定精度を表す決定係数 R^2 が 0.97 と非常に高く、式(1)で定常風風速に対して人が受ける力を精度良く推定できることが示唆された。

4.2 変動風試験

図7に、三角波風速試験における計測結果の例を示す。風速体感中は、風速に対応して荷重も増大しているが、その後は若干振動を伴いながら零に落ち着いている。作用時間条件 0.4s 、 2.0s とともに、同程度の風速ピーク値であるが、前者では後者よりも荷重ピーク値は小さく、風速の力学的影響を検討する際には、風速ピーク値だけでなく、風速波形も考慮する必要があることが示唆された。

図8に、台形波風速試験における計測結果の例を示す。ただし、風速立上り付近の6秒間を示した。立上り 2.0s 条件では、荷重は緩やかに増大するのにに対し、 0.5s 条件では、一旦オーバーシュートした後、振動しながらある一定の値に収束している。

図9に、三角波風速試験における風速ピーク値と荷重ピーク値の関係を示す。荷重ピーク値は風速ピーク値の二乗に比例する傾向が見られた。また、作用時間 0.4s 条件は、他の条件と比較して同程度の風速ピーク値に対する荷重ピーク値が小さかった。

三角波風速試験、台形波風速試験ともに、全ての条件において姿勢を保持できない被験者はいなかった。

5. 考察

5.1 変動風が退避姿勢に及ぼす力学的影響予測

退避姿勢をとる人が定常風により受ける力は、式(1)の抗力係数を推定できたことで予測可能となった。ここでは、より一般的に、列車風のような変動風により受ける力の予測モデルの作成を試みる。予測対象とする物理量は荷重とする。3.3節で前述したように、荷重は、風速が人に及ぼす力学的影響を反映することから、列車風の安全性評価の際に有効な指標になると考えられる。

(1) 予測モデルの設定とモデルパラメータの同定

図8で確認したように、立上りの鋭い台形波風速に対する荷重の応答波形は、一旦オーバーシュートした後、振動しながらある一定の荷重値に収束しており、風速に対する応答モデルとして減衰振動系の近似が可能であることが示唆された。また、図9では、荷重は風速ピーク

$$F(s) = K \frac{(2\pi f_n)^2}{s^2 + 4\zeta\pi f_n s + (2\pi f_n)^2} U_2(s) \quad (2)$$

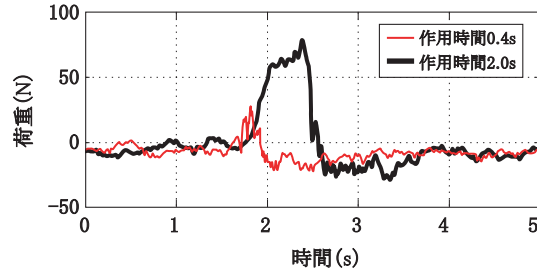
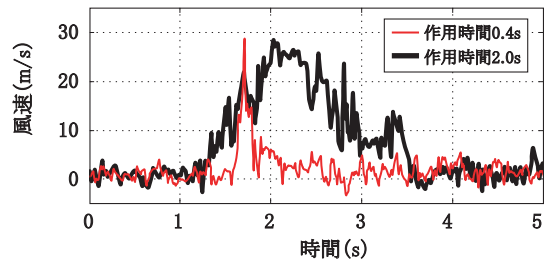


図7 三角波風速試験の計測結果例

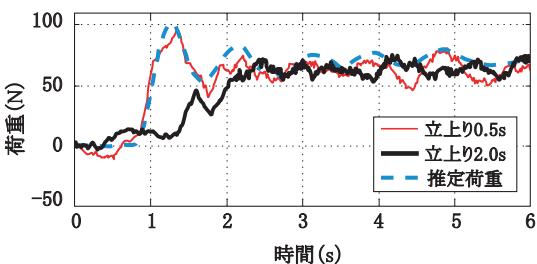
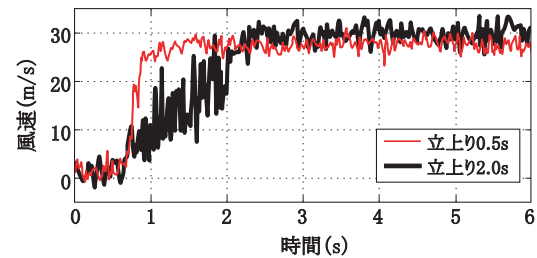


図8 台形波風速試験の計測結果例

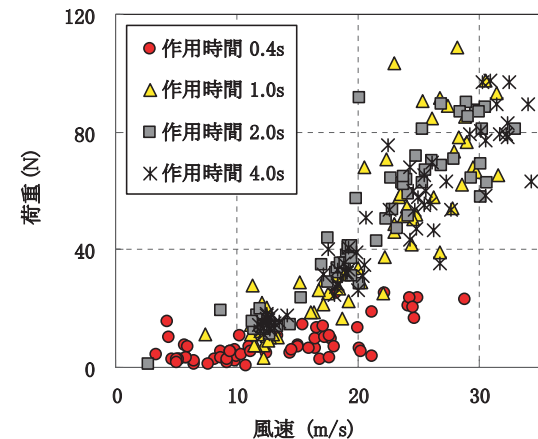


図9 三角波風速試験における風速ピーク値と荷重ピーク値の関係

の二乗に比例することを確認した。以上の知見を基に、ここでは、風速に対する荷重の応答として、風速の二乗値を入力とした式(2)の標準2次伝達関数モデルを仮定する。

ただし、 F ：荷重水平成分のラプラス変換、 U_2 ：風速の二乗のラプラス変換、 K ：ゲイン、 ζ ：減衰比、 f_n ：固有周波数 (Hz) である。風速に対する荷重の推定には、このモデル中の3つのパラメータ K 、 ζ 、 f_n が確定すればよい。パラメータの同定方法は、式(2)に実測風速の二乗値を入力し、推定された荷重と実測荷重を比較した際に、その残差が最小となるパラメータを探索する方法とした。同定には、立上り時間0.5s条件の台形波風速（風速条件は15m/s、20m/s、25m/s）における、風速立上り付近の6秒間のデータを使用した。荷重の計算は、式(2)を状態空間表現に変換し、連立1次方程式を4次のルンゲ・クッタ法により数値計算した。なお、残差最小値の探索に当たり、局所最適解に陥ることを回避するため、大域的最適解の探索に有効とされる粒子群最適化法 (PSO法) を適用した。

同定による荷重波形のフィッティング結果を図8に示す。式(2)により、概ねフィッティングできていることが確認できる。図10に ζ と f_n の同定結果を示す。 f_n は1.0～2.0Hz、 ζ は0.1～0.6付近に分布した。図11にゲイン K に関して、各風速条件で同定された値の平均値の分布を、被験者の投射面積との関係を含めて示す。なお、被験者の投射面積は0.286～0.410m²(平均0.346m²)であった。ゲイン K は投射面積に比例する傾向を示しており、前述した式(1)の特性に一致している。ただし、ゲイン K と式(1)の U^2 の係数は同程度の値となるはずであるが、たとえば、投射面積が0.379m²の被験者に関して、前者は0.118、後者は0.191となり、前者がより小さい推定結果となった。この原因の一つとして、定常風試験では、計測された風速はほぼ一様に分布していると考えられるのに対し、変動風試験では、ルーバーの存在等により部分的に風速が低くなり、計測された風速よりも低い風速を被験者が受けていた可能性が考えられる。したがって、実際の列車風に対する安全性評価において式(2)のモデルを利用する際には、風速に対して遮蔽物の存在しない状況を想定し、定常風試験で得られた式(1)の U^2 の係数をゲイン K とすることが妥当であると考えられる。

(2) モデルの予測精度の検証

同定した予測モデルの有効性を検証するために、パラメータ同定の際に使用していない三角波風速に対する荷重の推定を行った。ただし、荷重推定の際、パラメータ f_n 、 ζ 、 K は被験者ごとに全風速条件の平均値を使用した。推定ピーク値と実測ピーク値の関係を図12に示す。説明変数 x を推定荷重ピーク値、被説明変数 y を実測荷重ピーク値として回帰分析した結果、 $y=1.02x$ ($R^2=0.87$) と推定された。これより、プロットがほぼ対角線付近に分布しており、適用した予測モデルにより、変動風速により生じる荷重をよく推定できることが示唆された。

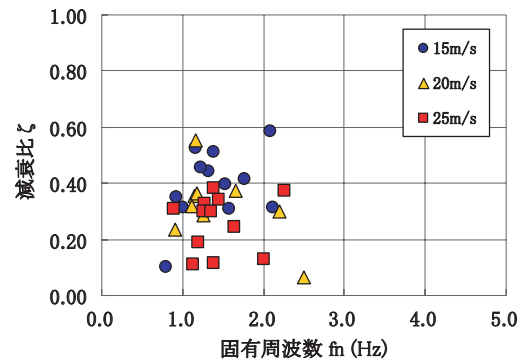


図10 パラメータ f_n と ζ の同定結果

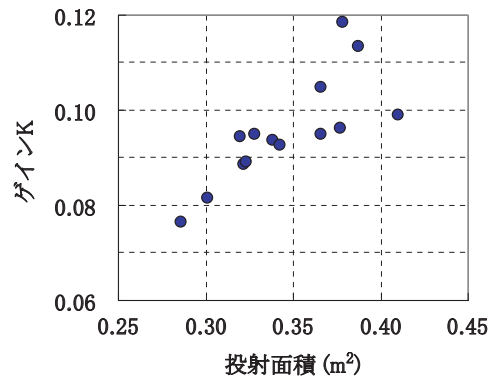


図11 パラメータ K と投射面積の関係

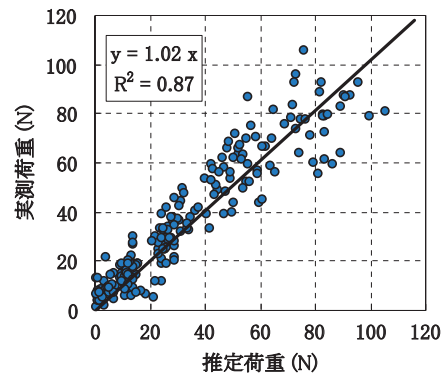


図12 推定荷重と実測荷重

5.2 現行の目安値と姿勢安定性

図1に示した現地試験での計測結果より、保守作業用通路の列車風の特徴として、先頭部通過時のパルス状の風速波形と、列車通過中から通過後に持続的に増大する風速波形が確認された。前者は0.5s以下、後者は7～10s程度の作用時間を持つ三角波と概ね近似できる。ここでは、このような風速波形に対して、退避姿勢をとる人がどの程度の風速ピーク値まで姿勢を保持できるかを推定し、現行の目安値の安全余裕について検討する。

4.1節の定常風試験での結果より、定常風に関しては退避姿勢時の姿勢安定性という観点からは、30m/sから35m/sに臨界値があることが示唆された。また、図6よ

特集：ヒューマンファクター

り、30m/sではほぼ全ての被験者が150N以上の力を受けていることから、退避姿勢をとった場合、少なくとも150Nまでは姿勢を保持できると考えられる。

変動風試験に参加した全被験者について、150Nの荷重を受けるような三角波風速の風速ピーク値と作用時間を式(2)により求めた結果を図13に示す。ただし、パラメータ f_n 、 ζ は被験者ごとに全風速条件の平均値を使用し、ゲイン K は式(1)の U^2 の係数を使用した。これより、列車先頭部に見られた0.5s以下の三角波風速に対しては、少なくとも30m/sまでは姿勢を保持できると考えられる。また、作用時間が2.0sを超えると、該当する風速ピーク値がほとんど変わらないことから、列車通過中から通過後に見られる持続的に増大する風速に対しては、少なくとも27m/s程度までは姿勢を保持できると考えられる。なお、図13は作用時間が0.5s以下になると、急激に人への影響が小さくなることを示唆しているが、これは4.2節の図7、図9の結果と一致している。

以上より、保守作業用通路の列車風で見られる風速波形に関しては、退避姿勢時では少なくとも風速ピーク値27m/s～30m/sまでは姿勢を保持できると考えられる。したがって、退避姿勢における列車風風速の現行の目安値17m/sは、姿勢安定性という観点から考えた場合、10m/s程度の安全余裕を見込んだ値とみなすことができる。

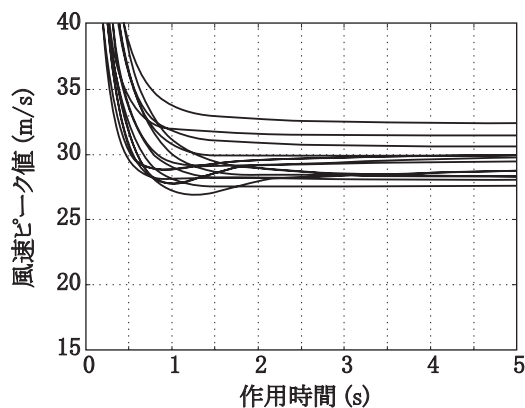


図13 退避姿勢をとる人が150Nの荷重を受けるような三角波風速のピーク値と作用時間の関係

6. まとめ

本研究では、列車風が退避姿勢（しゃがんだ状態で手すりにつかまる姿勢）をとる保守作業員に及ぼす影響を明らかにするために、新幹線保守作業用通路の列車風の性状を把握するとともに、大型風洞による定常風および変動風の体感試験を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

(1) 新幹線保守作業用通路の列車風は、主に線路方向の風速成分が大きく、先頭部通過時にパルス状の変動風が発生し、列車通過中から後尾部通過後数秒間に

かけて、風速が正方向（列車進行方向）に緩やかに増大する傾向が確認された。

- (2) 定常風試験により、退避姿勢時の抗力係数は0.82と推定された。これより、定常風から受ける荷重を体格（風速方向の投射面積）に応じて予測することが可能となった。
- (3) 変動風により受ける荷重を予測するモデルとして2次伝達関数モデル（式(2)）を提案した。台形波風速試験での計測データを基に、パラメータの同定を行った結果、固有周波数 f_n は1.0～2.0Hz、減衰比 ζ は0.1～0.6付近に分布した。ゲイン K に関しては、投射面積に比例する傾向が見られた。
- (4) 退避姿勢をとった場合、定常風では、30m/s～35m/sに姿勢が不安定となる臨界点があることが確認された。また、変動風では、少なくとも風速27m/s程度までは姿勢を保持できることが推定された。これらの結果より、現行の目安値17m/sには、姿勢安定性という観点からは10m/s前後の安全余裕があると見込まれる。

本研究で提案した予測モデルにより、列車風が退避姿勢をとる保守作業員に及ぼす影響を、力学的な観点から定量的に評価することが可能となった。このモデルを利用することで、列車風の安全性評価において、これまでのような目安値と風速ピーク値との単なる比較ではなく、人への力学的影響データに基づいた定量評価が可能になると考えられる。今後は、提案した予測モデルの信頼性向上を図るとともに、退避姿勢時に受ける荷重と姿勢安定性との関係分析を深度化し、列車風の安全性評価の開発を進めていきたい。

文献

- 1) 土屋 恂, 堀江 篤, 本間 則男, 広田 和義: 列車風に関する現地試験と風洞実験, 鉄道技術研究所速報, No.A-83-99, 1983
- 2) 小美濃 幸司, 白戸 宏明, 遠藤 広晴, 種本 勝二, 武居 泰, 石井 圭介: 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) 遠藤 広晴, 小美濃 幸司, 白戸 宏明, 澤 貢, 種本 勝二, 武居 泰: 列車風に対する姿勢保持限界風速の推定, 鉄道総研報告, Vol.22, No.7, pp.21～26, 2008
- 4) 村上 周三, 出口 清孝, 小峯 裕己: 抗力からみた風の人間に及ぼす影響に関する風洞実験, 第6回風工学シンポジウム論文集, No.6, pp.115～122, 1980
- 5) 小美濃 幸司, 遠藤 広晴, 種本 勝二, 白戸 宏明, 澤 貢, 武居 泰, 齊藤 寛之: 定常風の風速が立っている人へ与える影響, 人間工学, vol.45, No.2, pp.126～134, 2009