

圧力変動の非定常性を考慮したトンネル内設置物への 空気力算出法

齊藤 実俊*

Estimation Method of Aerodynamic Load on Equipment in Tunnel Considering the Unsteady of Pressure Variation

Sanetoshi SAITO

When a train travels through a tunnel at high speed, large pressure variations are generated in the tunnel. Because they act on equipment inside tunnel as aerodynamic force, it is necessary to estimate their magnitude for the design of equipment. The pressure variations mainly occur during train passage and pressure wave propagation. The pressure variations during the train passage includes high frequency components whose length is shorter than that of equipment. In this paper, a estimation method taking account of the influence of high frequency components of the pressure variations on the aerodynamic force is proposed.

キーワード：トンネル内圧力変動，トンネル内列車風，圧力波，高速鉄道

1. はじめに

列車がトンネル内を走行するとトンネル内の圧力，流速は大きく変動する（以降，圧力変動，流速変動¹⁾）。そのためトンネル内のさまざまな設備（常設の機器収納箱や仮設の器具箱，各種標識，側溝の蓋など）には空気力による変動荷重が作用する。設置強度以上の空気力が作用すると構造物は移動し，場合によっては大きく飛散する可能性がある。また，箱状の設備（機器箱や器具箱）の場合，内外差圧に起因する圧縮，膨張荷重が作用し，設計強度以上の荷重が作用すると塑性変形の発生や破損の可能性がある。したがって，トンネル内設備の設置強度や本体強度を検討するために，トンネル内圧力変動・流速変動による空気力を正確に見積もる必要がある。

トンネル内圧力変動の代表的な波長は数十 m オーダーであり，一般的なトンネル内設備の長さ比べて十分に長く，これまでは圧力変動が設備の外面に一様に，すなわち等分布荷重として作用すると仮定して，設備表面の代表点における圧力最大値（正圧最大値，負圧最大値）をもとに空気力を算出していた。しかし，列車通過中の流れには乱れ成分が含まれており，測定される圧力変動には高周波成分（短い波長成分）を含むことがある。高い周波数で変動する，すなわち空間波長の短い成分を含む圧力変動に上記の仮定を適用する場合，高周波成分による瞬間的な値を圧力最大値として用いることになる。しかし，高周波成分の波長は設備の代表長さより短く，前述した仮定のように一様に設備に作用することはないため，瞬間的な圧力最大値によって空気力を算出す

ることは過大評価となる。列車速度が低い場合には作用荷重も小さく，過大評価を行っても安全側評価であることから実用上問題はなかったが，現在のように列車速度が300km/hを超えるようになると，設備に要求される強度も大きくなり，過大評価による予測では必要とされる強度が非現実的な数値となる可能性がある。

そこで，本報告では，トンネル内設備に作用する空気力について整理するとともに，圧力変動の非定常性，すなわち高周波成分の影響を適切に考慮した簡便な空気力の算出方法を提示する。

2. トンネル内圧力・流速変動

列車がトンネル内を走行するときに発生する圧力変動の主要因を図1に示す。圧力変動の要因には列車先頭部または後尾部がトンネルに突入あるいは退出したときに発生し，トンネル坑口や列車端で反射することでトンネル内を往復する圧力波によるもの（図1(a)），走行する列車先頭部・後尾部によるトンネル内流れの流路縮小・拡大にともなう圧力降下・上昇（図1(b)），走行する列車先頭部・後尾部周りの圧力場の移動（図1(c)）によるものがある。

平面波である圧力波や，流路縮小効果による圧力変動はトンネル断面内で一様であるが，図1(c)に示した先頭部周りの圧力場の移動に伴う圧力変動は列車からの距離に依存する三次元的な現象である。これらの圧力変動の波長は一般的なトンネル内設備より大きく，空気力は設備に一様に作用すると考えられる。

列車がトンネル内を走行中に発生する列車風の概略図を図2に示す¹⁾²⁾。図2に示した実線矢印はトンネル断面内の平均風速の方向を示している。列車の前後ではビ

* 環境工学研究部

ストン効果により列車進行方向に流れるが、列車側面では先頭部から後尾部に向けて流れが回り込むため、進行方向と逆方向の流れとなる。実際には列車表面付近では列車進行方向に流れ、また、地面やトンネル壁面付近では流速は0であるためトンネル断面内の風速分布は複雑であるが、平均風速としては列車進行方向と逆向きになる。

トンネル内風速の最大値は通常、列車後尾部通過直後に発生する。その大きさは列車からの距離に依存し、列車に近いほど流速は大きくなる。実トンネルにおける測定結果では、中央通路付近やトンネル壁側の地面付近でも列車速度の60～70%程度に達している²⁾³⁾。列車通過中の流れは十分に発達した乱流であり、多くの乱れ成分を含んでいることから、列車通過中にトンネル内設備に作用する圧力も高周波成分を多く含むことになる。

このように、列車がトンネル内を走行すると圧力および風速が大きく変動し、トンネル内設備にはそれぞれに起因する空気力が作用することになる。

3. トンネル内設備に作用する空気力

3.1 圧力変動に起因するもの

圧力変動によって作用する空気力は設備の設置方法に

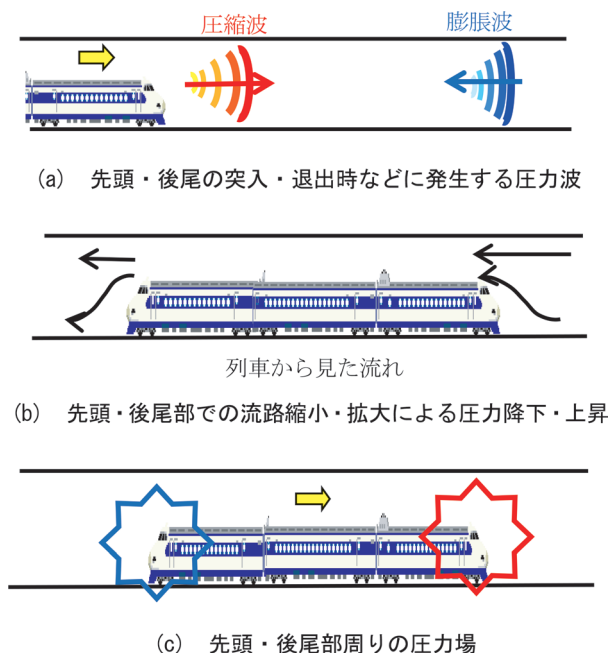


図1 トンネル内圧力変動の主要因

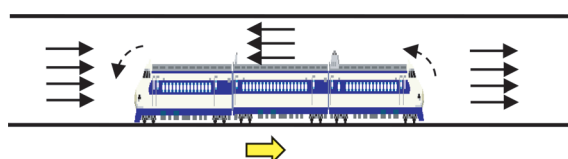


図2 トンネル内列車風（断面内平均風速）

よって異なり、大別するとトンネルの地面や壁面に直接置かれている場合と地面・壁面から浮いた状態で設置されている場合とに分けられる。図3にそれぞれの状況における圧力変動と空気力の作用状況を示す。図3における圧力変動（赤両矢印）は大気圧との差であるゲージ圧を示しており、正負に変化する。前述のようにトンネル内圧力変動の主要因は圧力波と列車先頭部・後尾部周りの圧力場であるが、それらの波長のオーダーは $10^0 \sim 10^1$ m程度と一般的なトンネル内設備の代表長さ（ 10^0 m程度）か、あるいはそれ以上であり、一般には設備外表面全体に同じ圧力が同時に作用すると考えて良い。

図3左図のように地面から浮いて設置されている設備、たとえば、機器箱などの場合、対向する外表面に作用する圧力変動が互いに相殺されるため、支持部材には空気力は作用しない（圧力変動に起因するもの。3.2節で述べる流速変動に起因する空気力は作用する）。一方、図3右図のように地面に直置きされた機器箱や、トンネル壁面に貼り付けた板状、シート状設備など、地面・壁面に接触して設置されている設備の場合、接触面には圧力変動が作用しない（大気圧で一定の圧力）。このため、設備全体としては上面に作用する圧力変動によって接触面に垂直な方向に空気力が作用し、正圧が作用するときには地面（または壁面）に押しつける力が、負圧が作用するときには地面や壁から引き離す力が支持部材に作用する。なお、実際には設備下部の微小な隙間に圧力が回り込むため、圧力変動は設備下面にも作用すると考えられるが、隙間は微小であり、圧力損失が大きく変動量が小さくなること、回り込みの時間遅れのために上面の圧力変動に追従できないことなどから、下面に作用する圧力は大気圧で一定と仮定して差し支えない。

3.2 流速変動に起因するもの

図2に示したように列車がトンネル内を走行すると、トンネル内には長手方向（レール方向）の風（列車風）が発生する。列車先頭部および後尾部が通過する際にはトンネル長手方向だけでなく上下、左右（マクラギ）方向にも流れが発生し三次元的な流れ場となるが、主要な

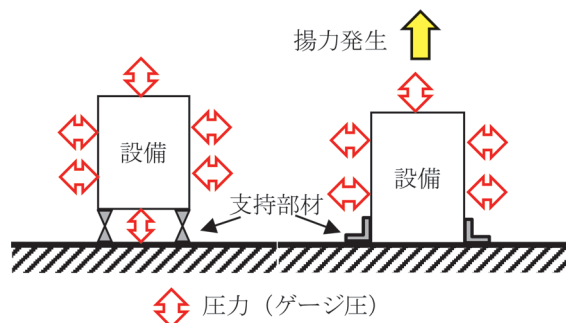


図3 トンネル内設備に作用する圧力変動

流れはトンネル長手方向である。列車風がトンネル内設備に作用した状況の模式図を図4に示す。図4のように、列車風によって設備上流側と下流側には動圧差による前後力が作用する。また、厚み（高さ）のある設備の場合、図4の青線のように流れが変化することで設備上面側に負圧領域が生じ、揚力が発生する。すなわち、壁面に平行に設置された薄い設備（トンネル壁面に貼り付けた板やシート状の設備など）を除いた全てのトンネル内設備には列車風により前後力と揚力が作用し、その大きさは風速のほかに設備の形状に強く依存する。

4. 空気力の算出

4.1 圧力変動に起因するもの

本節では圧力変動に起因する空気力について、圧力波や先頭・後尾部による圧力変動だけでなく、列車通過中の高周波成分を含んだ圧力変動の影響を考慮した空気力の算出方法について述べる。

4.1.1 圧力波によるもの

図3に示したように、圧力波のような波長の長い変動による揚力は、地面や壁に接触して設置された設備で発生する。前述のとおり、実際には地面との間には凹凸によるわずかな隙間が存在し、圧力変動が多少回り込む可能性があるが、揚力を低減させる方向に作用するので、ここでは安全側評価として、設備下面には圧力変動が作用せず、大気圧で一定であると仮定する。

図5(a)のように設備が地面や壁面に接触して設置されている場合、設備下面には圧力変動が作用しないため、上面に作用する圧力変動が揚力の要因となる。この揚力が自重より大きい場合（支持部材等で地面に固定されている場合はその取り付け強度が加味される）、設備は浮き上がることになる。設備が浮き上がり、設備下面～地面・壁面間に隙間ができると、図5(b)のように瞬間的に（正確には音速で）設備下側に圧力が回り込み、設備上面と同じ大きさの圧力変動が下面にも作用する。その結果、地面から浮いた状態で設置された設備（図3左）と同様、上下面の圧力が相殺されて揚力はなくなり、地面（水平面）に設置されている設備の場合、重力によって再着地する（地面以外の壁や天井面に接触して設置された設備については後述）。

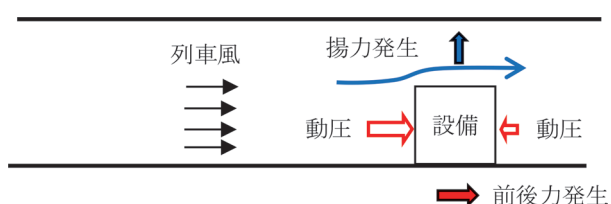


図4 列車風による空気力

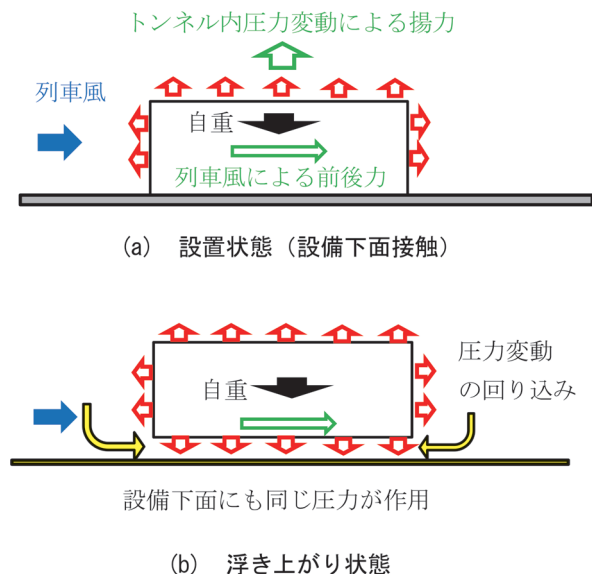


図5 地面に接した設備に作用する空気力

設備が浮き上がっている間は地面と設備間の摩擦力がなくなるため、作用時間が長い場合、列車風による前後力（4.2.1項）によって前後方向に大きく移動（飛散）する可能性がある。本節では揚力が作用している間（すなわち、圧力が回り込むまでの間）の浮き上がり量と前後力による移動量の算出方法を示す。

圧力の回り込みに要する時間（揚力の作用時間）のオーダー Δt_L は設備の下面寸法の短い方を音速で除した程度、すなわち $\Delta t_L \sim \min(w, l)/c$ 程度と考えられる（ w ：設備の幅、 l ：設備の長さ、 c ：音速）。一般的な設備の幅や長さのオーダーは 10^0m 程度であり、圧力変動の波面幅はこれより十分長く、設備上面に作用する圧力変動の大きさは一定であると仮定できる。また、揚力作用時間 Δt_L は ms オーダーであり非常に短いことから、圧力変動は時間的にも一定であると仮定する。よって、設備上面に作用する圧力変動による揚力 F_L (N) は、圧力変動負圧最大値に設備上面の表面積を乗じることで求まる。一般に、測定結果から求めた圧力変動負圧最大値はばらつきが大きいため、標準偏差を考慮した評価値（たとえば、評価値 = 平均値 + 3 × 標準偏差など）を負圧最大値とすることが多い。

時間 $t = \Delta t_L$ までは揚力が作用するが、その後、 $t > \Delta t_L$ においては自重による重力のみが作用するので、設備はしばらくの間は慣性によって上昇を続けるがその後下降到転じ、最終的には地面に再着地する。このときの最大浮き上がり量 h (m)（上昇速度がゼロになるまでの地面からの鉛直距離）は以下の式で示される。

$$h = \frac{1}{2} \frac{F_L - mg}{m} \Delta t_L^2 + \frac{1}{2g} \left(\frac{F_L - mg}{m} \Delta t_L \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 m ：設備の質量 (kg)、 g ：重力加速度 (m/s^2) である。

浮上中の時間を $\Delta t_h (> \Delta t_L)$ とすると、流速に起因する前後力 F_D (4.2.1 節) によって移動する距離 x は以下の式で求まる。

$$x = \frac{1}{2} \frac{F_D}{m} \Delta t_h^2 = \frac{1}{2} \frac{F_D}{m} \left(1 + \frac{\alpha}{g} + \sqrt{\frac{\alpha}{g} + \left(\frac{\alpha}{g}\right)^2} \right)^2 \Delta t_L^2$$

$$\alpha = \frac{F_L - mg}{m} \quad (2)$$

以上をまとめると、実験などから得られた圧力変動の負圧最大値に設備の上面の面積を乗じることで揚力 F_L を求め、式 (1) を用いることで設備の浮き上がり量が求まる。また、後述の式 (10) によって前後力 F_D を求め、式 (2) を用いることで、その際の前後方向の移動量を求めることができる。

なお、壁面や天井面など地面 (水平面) 以外に接触して設置された設備の場合、揚力 (ここでは設置面に垂直な方向の力と定義) によって一旦壁面や天井面から離れると、自重が鉛直下向きに作用しているため、元の壁面や天井面に戻ることはなく自由落下する。したがって、壁面や天井面に設置されている設備については揚力 (設置面鉛直方向) と自重による垂直抗力との差、 $F_L - mg \cos \theta$ (θ ：取り付け面と地面のなす角) より大きな取り付け強度が必要となる。

4.1.2 列車通過中の圧力変動によるもの

列車通過中の圧力変動を図 6 に示す。列車先頭部・後尾部通過時 (図 6 点線間) には図 1 に示したように流路縮小効果による圧力変動と、先頭部・後尾部の断面形状変化による流れの偏位によって形成される圧力場の移動による圧力変動が生じる (図 6 下の黒線)。

列車中間車の通過中や後尾部通過直後の伴流領域では列車速度程度の非常に速い流れが生じる。これらの流れは十分に発達した乱流で多くの乱れ成分を含んでいることから、圧力変動には高周波成分が重畳することになる (図 6 下の赤線)。

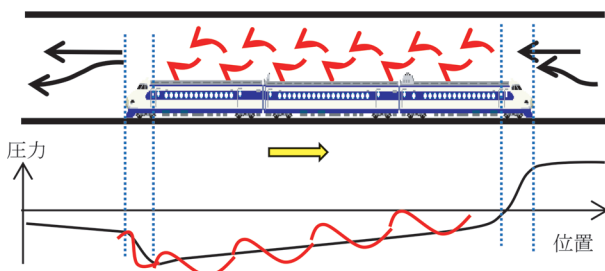


図 6 列車通過中の圧力分布模式図

図 1 に示したようにアングル材や支持部材によって地面や壁から浮いて設置され、設備下面に隙間がある場合、列車先頭部・後尾部による低周波な圧力変動は上下両面に同時に逆方向に作用するので揚力は発生しない。しかし、設備の下の隙間は一般に 10cm 程度以下と狭く、その流れは遅いために乱れは小さいと考えられる。そのため、列車通過中に発生する高周波圧力変動は設備下面にはほとんど作用せず、上面に作用する圧力の高周波成分によって揚力が発生することになる。4.1.1 項で示した圧力波に起因する揚力算出の際は、圧力最大値 (正圧最大値, 負圧最大値) が一定であると仮定していたが、ここでは揚力を時間の関数として、以下の式から求める。

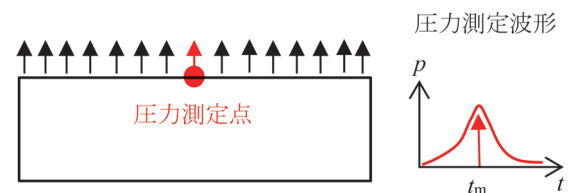
$$F_L(t) = blp(t) \quad (3)$$

ここで、 b ：設備の幅 (m)、 l ：設備の長さ (m)、 p ：設備上面に作用する圧力 (Pa)、 t ：時間 (s) である。

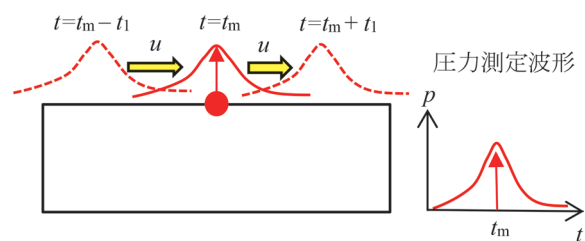
これまで用いてきた算出方法では圧力が設備全体に一樣に作用すると仮定していた (図 7(a))。しかし、圧力変動の高周波成分の要因である大小様々な渦は流れに乗って移動しているため⁴⁾、設備表面に一樣に作用するわけではない (図 7(b))。したがって、一樣に圧力が作用するとの仮定から算出される揚力は実際より大きくなり、過大評価となる。

設備長さ l の中央点で得られた圧力測定波形を $p_0(t)$ とする。圧力変動の要因となる乱れ (渦) が流速 u に乗って移流していると仮定すると、設備上面における位置 x (長手方向中央からの距離で $-l/2 \leq x \leq l/2$) における圧力値 $p(t, x)$ は以下の式で求まる。

$$p(t, x) = p_0(t - x/u) \quad (4)$$



(a) 圧力変動が一樣に作用すると仮定した場合



(b) 高周波の圧力変動の移流を考慮した場合

図 7 圧力高周波成分による作用力

圧力は設備の幅方向（まくらぎ方向）には一様であると仮定すると、設備上面全体の揚力 $F_L(t)$ は以下のように示される。

$$F_L(t) = b \int_{-l/2}^{l/2} p(t, x) dx \quad (5)$$

$$= b \int_{-l/2}^{l/2} p_0(t - x/u) dx$$

よって、サンプリング間隔 Δt で収録された圧力波形 p_i (i : データ番号) から揚力波形 $F_{L,i}$ は以下の式で求まる。

$$F_{L,i} = bu\Delta t \sum_{m=-N/2}^{N/2} p_{i-m} = \frac{bl}{N+1} \sum_{m=-N/2}^{N/2} p_{i-m} \quad (6)$$

$$= \frac{A}{N+1} \sum_{m=-N/2}^{N/2} p_{i-m}$$

ここで、 A : 設備上面の面積 (m^2) ($=bl$)、 N : 分割数で偶数、 $l=(N+1)u\Delta t$ である。式 (6) より、時刻 t (データ番号 i) の揚力は圧力測定データを前後 $N+1$ 点の移動平均を行い、それに設備面積を乗じることで求まることがわかる。さらに、式 (6) によって求めた揚力 $F_{L,i}$ から以下の式を用いて変位量（浮き上がり量） h_i の時間変化が求まる。

$$h_i = h_{i-1} + v_{i-1}\Delta t + \frac{1}{2} \frac{F'_{L,i-1}}{m} \Delta t^2 \quad (7)$$

ただし、 $h_i < 0$ なら $h_i = 0$

$$v_i = v_{i-1} + \frac{F'_{L,i-1}}{m} \Delta t \quad (8)$$

ただし、 $h_{i-1} = 0$ かつ $v_{i-1} < 0$ なら $v_i = 0$

$$F'_{L,i} = F_{L,i} - mg \quad (9)$$

ここで、 h_i : 変位量 (m)、 v_i : 変位速度 (m/s) である。本方法では揚力の算出に圧力変動の移流速度 u が必要となる。流速データがある場合や複数点での圧力測定データがある場合など、設備付近の u が推定できる場合は問題ないが、流速データがない場合や圧力データから移流速度が推定できない場合は安全側評価として列車速度を用いる (4.2.3 項参照)。

前節で示した地面や壁面に接した設備に対しても高周波成分が大きい場合には、本節の算出方法を元に、前節の圧力回り込みの考え方を導入することで揚力や浮き上

がり量、変位量を求めることができる。

複線トンネルにおけるすれ違い時の最大揚力を求めるためには、両列車によって発生する最大負圧を測定する必要があるが、列車や圧力波の通過のタイミングの影響で、実際に最大負圧を測定することは困難である。一般にすれ違い時の最大負圧は単独列車走行時の2倍程度と近似できるので¹⁾、簡便な方法としては発生揚力を単独列車走行時の2倍程度として見積もる。

4.2 流速変動による揚力

4.2.1 前後力

設備前後の圧力を測定することで前後力を求めることができるが、ここではトンネル内列車風から前後力を算出する方法について述べる。風速変動による前後力 F_D (N) は以下の式で示される。

$$F_D = C_D A' \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (10)$$

ここで、 C_D : 抗力係数、 A' : 設備の上流側端面の投影面積 (m^2)、 ρ : 空気密度 (kg/m^3)、 u : トンネル内風速 (m/s) である。

C_D 値は物体形状に依存するがトンネル内設備の一般的な形状は直方体や薄板であり、概ね $C_D = 1.0 \sim 1.3$ 程度である⁵⁾。 C_D 値の代表例を表1に示す。

4.2.2 揚力

地面や壁面に平滑に設置されている板状設備（側溝の蓋やコンクリート防護シートなど）では風速による揚力は問題とならないが、箱状設備など地面や壁面から一定の高さを有する設置物の場合には風速変動によって揚力が作用する (図4)。二次元角柱の単位幅当たりの揚力 P_L (N/m) は以下の式で示される⁶⁾。

$$P_L = C_L l \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (11)$$

ここで、 C_L : 揚力係数、 l : 設備の長さ (m) である。実際の箱状設備に対する揚力 F_L は式 (11) の P_L に設備の幅 b を乗じることで近似的に求めることができる。

式 (11) に示した C_L 値は地面との隙間や、設備の高さと長さの比に依存する。地面との隙間がない場合は

表1 代表的な C_D 値⁵⁾

形状	C_D 値
正方形薄板	1.05
長方形薄板；縦横比1.0～8.0	1.10～1.20
直方体 ($d \times d \times l$) ; $l/d = 0 \sim 5.0$	1.25～0.95

$C_L=0.6$ 程度であり、物体下面の隙間が大きくなるにしたがって揚力係数は急激に減少し、隙間が物体高さの0.2~0.3倍より大きくなると揚力係数は負となり設備にはダウンフォースが発生する⁶⁾。よって、最大の揚力が発生するのは隙間がない場合である。

4.2.3 トンネル内風速

トンネル内風速はトンネル壁面や地面付近では境界層のために小さいが、ある程度離れると大きくなる。そのため、トンネル内設備に作用する風速は地面やトンネル壁面からの距離によって異なる。したがって理想的には設備設置位置における風速を測定することが望ましいが、設備ごとに現地で測定することはコストがかかり、また、場所によっては流速計を設置することが困難な場合もある。

過去の実測例によると、列車速度300km/hに対し、トンネル壁側の地面付近で最大60m/s以上（列車速度の70%以上）の流速が計測されている（風速計の測定レンジオーバー³⁾）。トンネル地面付近であるにもかかわらず列車速度の70%以上の風速が発生していることから、実際に設備が設置されているトンネル壁面など列車に近い位置や地面・トンネル壁面から離れた場所ではさらに高速であると考えられる。したがって、空気力を算出する際に、測定値やシミュレーションによる計算値がない場合は、 u として列車速度を用いることが妥当である。本手法を用いることで、圧力や風速を測定しなくてもおおよその空気力を推定することが可能となる。

トンネル内列車風の最大値が発生する列車後尾付近の流れ場については未解明な部分も多く、風速最大値の定量的評価については今後の課題である。

なお、トンネル内ですれ違いがある場合、上下両列車の列車風は相殺されることから、最大でも単独列車通過時を超えることはないと考えられる。したがって、複線トンネルにおいても単独列車走行について評価すればよい。

5. まとめ

列車のトンネル内通過時に発生する圧力変動・風速変動によってトンネル内設備に作用する空気力の簡便な算出方法を示した。結果を以下にまとめる。

- (1) 地面や壁に接触した設備に作用する、圧力波に起因する揚力については、圧力変動が設備上面に一樣に作用すると仮定し、負圧最大値と設備上面の面積を乗じた値から自重を差し引くことで求めた揚力最大値と、音速と設備の代表寸法から求めた設備下面に圧力が回り込む時間から浮き上がり量と移動量を算出する(式(1)(2))。なお、揚力最大値として、測定のばらつきを考慮し、標準偏差を用いて決定することが多い(たとえば、評価値=平均値+3×標準偏差)。

表2 トンネル内の主な設備と考慮すべき空気力

設備		空気力
設置状況	代表例	
板状設備で地面・壁面に平行なもの	壁面パネル 剥落防止板 側溝の蓋	圧力変動 4.1.1, 4.1.2
板状設備で地面・壁面に垂直なもの	標識 信号	列車風 (前後力のみ) 4.2.1
箱状設備	器具箱 保安器箱 消火器箱	圧力変動 4.1.1, 4.1.2 列車風 4.2.1, 4.2.2

準備差)。

- (2) 列車通過中の高周波成分を多く含んだ圧力変動によって作用する揚力は、設備上面と下面の差圧波形に対して設備代表長さと同代表流速から決まる点数によって移動平均処理を行った揚力波形を数値積分することで浮き上がり量が求まる(式(6)-(9))。
- (3) 物体に作用する前後力は、トンネル内風速を列車速度と想定し、物体の抗力係数を用いることで概算することができる。同様に揚力係数を用いることで上下力を概算することができる(式(10)(11))。

なお、箱状の構造物については本報告で示した取り付強度に対する検討だけでなく、圧力変動(図3)によって発生する箱の内外差圧に起因する箱本体の変形についても評価する必要がある。

参考としてトンネル内における主な設備について考慮すべき空気力を表2にまとめておく。

文献

- 1) 山本彬也：新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気，鉄道技術研究報告，No.871，1973
- 2) 土屋恂，広田和樹：列車風に関する現地試験，鉄道技術研究所速報，No.81-68，1981
- 3) 斎藤英俊，小村啓太，齊藤実俊，斎藤寛之：高速列車通過時におけるトンネル内部の側溝蓋等に作用する圧力，第20回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.199-202，2013
- 4) 大熊武司，神田順，田村幸雄：建築物の耐風設計，鹿島出版会，p.83，1996
- 5) Robert D. Blevins, "Applied Fluid Dynamics Handbook," Krieger Publishing Company, p.335, 1992.
- 6) 谷口清一，宮越勝美，堂田誠治：平面壁と二次元角柱との干渉，日本機械学会論文集(B編)，Vol.49, No.447, pp.2522-2529, 1983