

トンネル内圧力変動に関する数値計算結果

山内 雄記* 齊藤 実俊* 梶山 博司*

Numerical Calculation Results of Pressure Variation in a Railway Tunnel

Yuki YAMAUCHI Sanetoshi SAITO Hiroshi KAJIYAMA

The air pressure in a tunnel changes significantly with time when a train is running in the tunnel at high speed. It is necessary to predict the maximum positive pressure or the maximum negative pressure when planning the speed-up of the Shinkansen or the installation of new equipment in tunnels. The maximum positive pressure or the maximum negative pressure depends on a number of parameters such as train speed, train length, tunnel length, the ratio of the cross-sectional area of the train to that of the tunnel, etc. This paper presents the maximum positive pressure and the maximum negative pressure under a variety of conditions by using a numerical calculation.

キーワード：トンネル内圧力変動，シミュレーション，最大正圧，最大負圧

1. はじめに

新幹線のような高速鉄道ではトンネル内走行時に大きな圧力変動が発生する。トンネル内における圧力変動の主な原因は、列車のトンネル突入・退出時に発生する圧力波が両坑口や列車端で反射しトンネル内を往復することである。その圧力変動は、列車やトンネル覆工、トンネル内設備等に影響を与える。そのため、新幹線速度向上時やトンネル内設備新設時には、列車やトンネル内設備にかかる圧力の最大値・最小値（以下、それぞれ最大正圧・最大負圧と呼ぶ）を予測する必要がある。

数値シミュレーションによるトンネル内圧力変動の予測に関する研究は山本¹⁾ 2) 3) により始められた。その研究に伴って開発されたプログラムでは、トンネル内の流れを非定常1次元圧縮性流れと仮定しているが、多数の現車試験結果との比較により妥当性が検証されている。その後、複数列車の取り扱いが可能なよう拡張⁴⁾ され、さらに地下駅や枝坑を有するトンネルについても計算できるよう改良が行われている⁵⁾。そのいずれも現車試験結果に裏付けされた信頼性の高いものである。

最大正圧・最大負圧は、列車速度、列車長、トンネル長、列車・トンネル断面積比等、多数のパラメータに依存するため、これまでは特定の条件ごとに上記のプログラムを使用しシミュレーションを実行してきた。しかし、代表的な条件における結果をまとめたものがあると、シミュレーションを行わずとも目安値を推算できる。そこで、本報告では、最大正圧・最大負圧の目安値を迅速かつ容易に調べられるようにするため、単独列車走行の場合に、列車側面に作用しうる最大正圧・最大負圧、トンネル内で発生しうる最大正圧・最大負圧をまとめた。

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

2. 計算方法

計算に使用したプログラムで使用されている基礎方程式や境界条件等の詳細については文献4) 5) を参照のこと。

2.1 変更パラメータ

トンネル内圧力変動に大きく影響すると考えられる、列車速度 v 、列車長 l 、トンネル長 L 、列車・トンネル断面積比 R の4個の項目を変化させ計算を行った。各パラメータの設定値は表1の通りであり、計288種類の条件でシミュレーションを行った。

2.2 計算条件

前項のパラメータ以外の諸元を表2に示す。列車側面摩擦係数 μ' は、凹凸の少ない最近の新幹線車両に相当する値である。なお、列車の断面積はトンネル断面積と列車・トンネル断面積比の積から求めた。列車の水力直径 d' は、同じ断面積 A' を有する車体幅 $b = 3.38$ m の長方形と仮定し、以下の式による計算値を使用した。

$$d' = \frac{4 \times (\text{流路断面積})}{(\text{流路周長})} = \frac{2A'b}{A'+b^2} \quad (1)$$

また、風速と圧力の初期値はそれぞれ 0 m/s, 0 Pa (ゲージ圧) とした。

なお、本プログラムでは枝坑、列車速度変化、すれ違いなど複雑な条件を考慮できるが、今回は列車本数1本、列車速度一定、単一トンネルの場合を計算した。

3. 計算結果

全種類の計算結果をもとに、列車前頭部側圧の最大正

表1 変更パラメータ

項目名	記号	設定値
列車速度	v (km/h)	260, 280, 300, 320, 340, 360
列車長	l (m)	200, 400
トンネル長	L (km)	0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100
列車・トンネル 断面積比	R (-)	0.150, 0.175, 0.200

表2 計算諸元

項目名	記号	設定値
空気密度	ρ	1.23 kg/m ³
音速	a_0	340 m/s
列車側面摩擦係数	λ'	0.01
列車圧力損失係数	C_{Dp}	0.1
トンネル摩擦係数	λ	0.02
トンネル断面積	A	63.4 m ²
トンネル水力直径	d	8.1 m

圧、列車後尾部側圧の最大負圧、トンネル内の最大正圧、トンネル内の最大負圧を、それぞれトンネル長と列車速度で整理した結果を図1に示す。なお、最大負圧に関しては、後述するトンネル長 $L = L_{ba}$ で別途計算した値も同時に載せている。

全体的に見ると、列車速度 v や列車・トンネル断面積比 R が大きいほど、発生する圧力（の絶対値）は大きくなるのがわかる。トンネル長 L や列車長 l に対する依存性については次節以降で詳しく説明する。

3.1 列車側面最大正圧³⁾

トンネル坑口を通過中、列車側面の静圧は、列車側面の摩擦およびトンネル壁面の摩擦によりトンネル内を進むに連れ上昇する。また、トンネル内走行中の列車側面の圧力分布は、列車側面の摩擦により後尾に向かって一様に低下する。したがって、特にトンネルが短く圧力波のダイアグラムが複雑な場合を除き、列車側面の最大正圧は列車前頭部で得られる。そこで、列車前頭部側圧の最大正圧を列車側面が受ける最大正圧とみなすことにする。

図2に圧力の最大値が発生しうる位置とそのパターン記号を記した $x-t$ 線図を示す。横軸 x はトンネル入口からの距離、縦軸 t は列車先頭のトンネル入口突入時刻を0としたときの時間を表す。また、実線（赤）は圧縮波、点線（青）は膨張波を表す。特殊な条件下を除き、列車前頭部で正圧が最大となるのは初めて膨張波と交差する直前である。そのため、トンネルが短い場合は **B** で、一定以上長い場合は **A** で正圧は最大となる。今回のシ

ミュレーションにおいては、どの列車速度 v 、列車長 l 、列車・トンネル断面積比 R においても、あるトンネル長以下では **B** で、それ以上では **A** で正圧は最大となった。また、**B** と **A** の境目となるトンネル長を L_{BA} とすると、 $L \leq L_{BA}$ ではトンネルが長くなるにつれ正圧最大値は大きくなるが、 $L \geq L_{BA}$ では一定であった。なお、 L_{BA} は、**A** と **B** が同時に起こる状況を考え、以下の式で表される。

$$L_{BA} = \frac{a_0(a_0 + v)}{2v(a_0 - v)} l \quad (2)$$

すなわち、列車は、 $L \geq L_{BA}$ のトンネルを走行するときに **A** で起こりうる最大の正圧を受ける。

3.2 列車側面最大負圧³⁾

最大正圧が列車前頭部で得られるのとは逆に、特にトンネルが短い場合を除き、列車側面の最大負圧は列車後尾部で得られる。そこで、列車後尾部側圧の最大負圧を列車側面が受ける最大負圧とみなすことにする。

列車後尾部で負圧が最大となるのは、列車後尾部がいずれかの圧縮波と交差する直前であり、概ねトンネル長が短い場合は **b**、特に長い場合は **h**、その間では **a** で負圧は最大となる。また、**b** と **a** の境目となるトンネル長を L_{ba} とすると、 $L \leq L_{ba}$ ではトンネルが長くなるにつれ負圧最大値は大きくなり、 $L \geq L_{ba}$ ではトンネルが長くなるにつれ負圧最大値は小さくなる。なお、 L_{ba} は、**a** と **b** が同時に起こる状況を考え、以下の式で表される。

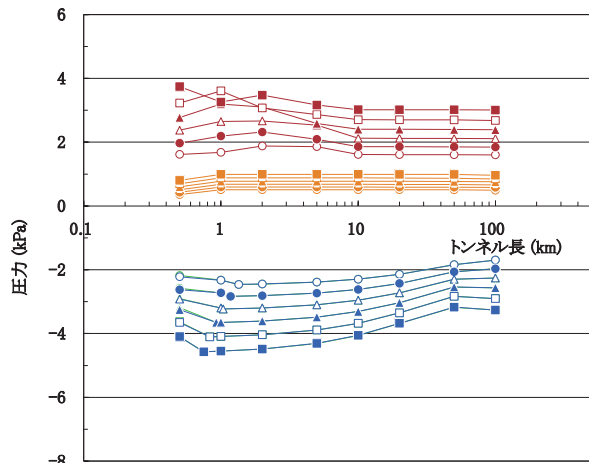
$$L_{ba} = \frac{a_0(a_0 + v)}{4v^2} l \quad (3)$$

また、**a** と **h** の境目となるトンネル長を L_{ah} とすると、 $L \geq L_{ah}$ ではトンネルが長くなるにつれ負圧最大値が大きくなる傾向を示しているが、 $L = 100$ km における負圧最大値でも $L = L_{ah}$ における負圧最大値より小さい。すなわち、列車は、 $L = L_{ah}$ のトンネルを走行するときに **a** (= **b**) で起こりうる最大の負圧を受ける。

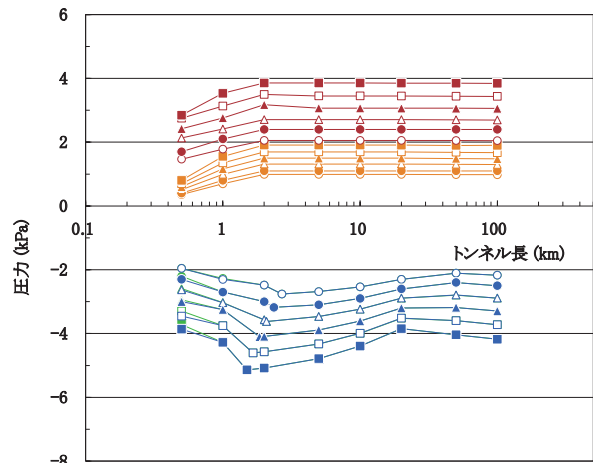
3.3 トンネル内最大正圧

図1を見るとわかるように、トンネル内の最大正圧は列車側面の最大正圧よりはるかに大きい。その差の主な原因は、列車先頭がトンネル突入の際に発生した圧縮波による圧力上昇である。その圧縮波は列車前方を音速で進行するため、列車側面ではその圧力上昇はないが、トンネル内ではその分圧力が上昇する。なお、本資料では載せていないが、トンネル内最大正圧は列車岐点圧よりは小さい。

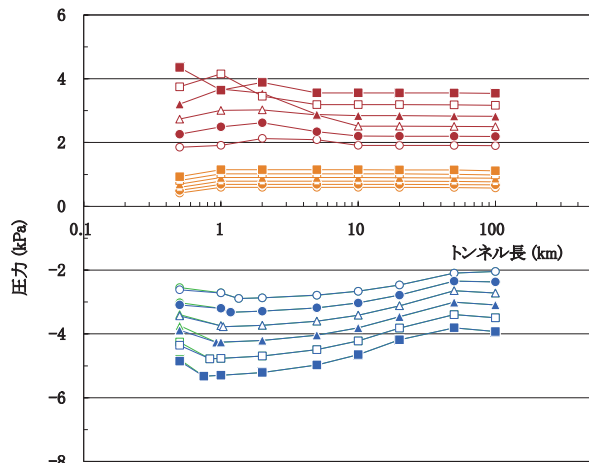
図1を見ると、まず、列車長 $l = 400$ m では列車側面正圧と同じようなトンネル長依存性を持っており、ある一定値 (= L_{BA}) より長いトンネルでは正圧最大値は一定となっている。一方、列車長 $l = 200$ m ではトンネル長が約 10 km 以上では圧力は一定であるが、トンネル



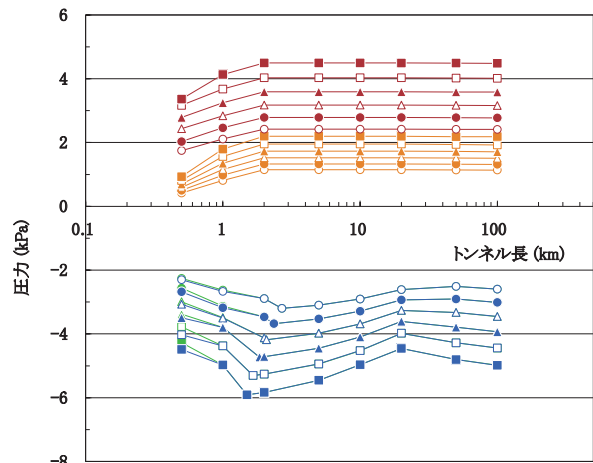
(a) 列車長 $l=200$ m,
列車・トンネル断面積比 $R=0.150$



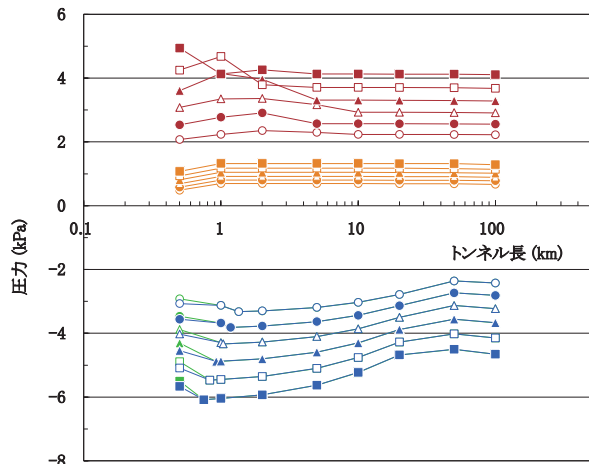
(d) 列車長 $l=400$ m,
列車・トンネル断面積比 $R=0.150$



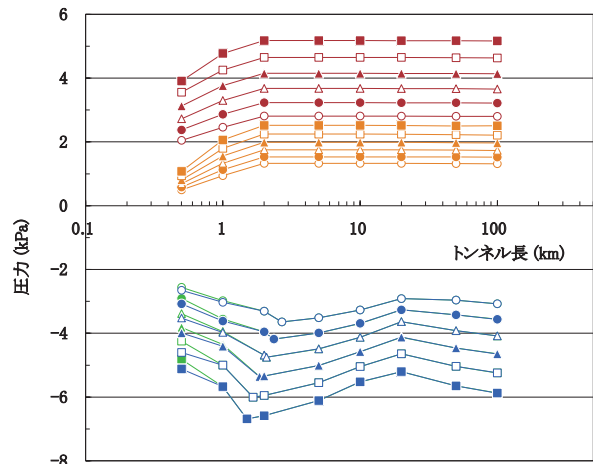
(b) 列車長 $l=200$ m,
列車・トンネル断面積比 $R=0.175$



(e) 列車長 $l=400$ m,
列車・トンネル断面積比 $R=0.175$



(c) 列車長 $l=200$ m,
列車・トンネル断面積比 $R=0.200$



(f) 列車長 $l=400$ m,
列車・トンネル断面積比 $R=0.200$

列車側面	最大正圧:	$v=260$ km/h	$v=280$ km/h	$v=300$ km/h	$v=320$ km/h	$v=340$ km/h	$v=360$ km/h
	最大負圧:	$v=260$ km/h	$v=280$ km/h	$v=300$ km/h	$v=320$ km/h	$v=340$ km/h	$v=360$ km/h
トンネル内	最大正圧:	$v=260$ km/h	$v=280$ km/h	$v=300$ km/h	$v=320$ km/h	$v=340$ km/h	$v=360$ km/h
	最大負圧:	$v=260$ km/h	$v=280$ km/h	$v=300$ km/h	$v=320$ km/h	$v=340$ km/h	$v=360$ km/h

図1 列車長に対する最大正圧・最大負圧

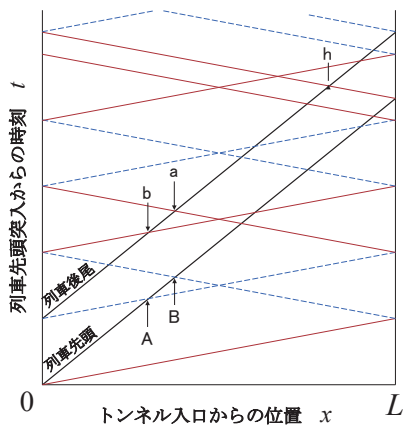


図2 圧力の最大値が発生する位置とそのパターン記号

が短い場合の方が高い圧力を示している。この原因は、トンネル内での最大正圧の発生パターンが列車側面最大正圧の発生パターン（A または B）と異なり、列車通過後の圧縮波が連続して通過する場所で圧力が大きくなっているからである。このように、列車やトンネルが短い場合では、A や B よりも列車通過後に圧力が大きくなる可能性がある。

しかし、実際には A や B での圧力の方が大きくなる可能性が高い。なぜなら、本計算プログラムではトンネル内の流れを 1 次元流れと仮定しているため、圧力波の伝播・反射における 3 次元的な影響を無視しており、計算では実際よりも圧力波の減衰を過小評価している²⁾からである。そのため、実際には、列車通過後の圧力は計算値よりもさらに減衰し小さくなっていると考えられる。一方、A や B における圧力の計算値は、圧力波の伝搬距離が比較的短く圧力波の反射も少ない段階であるため、実際の圧力値と精度良く一致する³⁾。以上より、トンネル内最大正圧の発生パターンは列車側面最大正圧の発生パターンと同じと考えられる。すなわち、トンネル内の圧力に関しては、 $L \geq L_{BA}$ のトンネルにおいて A で起こりうる最大の正圧が発生する。

3.4 トンネル内最大負圧

トンネルが短い ($L = 0.5 \text{ km}$) 場合では、トンネル内で発生する最大負圧は、列車側面が受ける最大負圧とは発生パターンが違い、絶対値はトンネル内最大負圧の方がわずかに大きい。一方、トンネル長 $L = 1 \text{ km}$ 以上では、値、発生パターンともに列車側面最大負圧とほぼ等しい。すなわち、列車後尾部通過時にトンネル内の最大負圧が発生している。全体的な傾向としては、列車側面最大負圧と同じである。すなわち、 $L = L_{ba}$ のトンネルにおいて、 $a (=b)$ で起こりうる最大の負圧が発生する。

3.5 列車側面に作用する最大圧力

計算結果から、ある列車が様々な長さ ($0.5 \sim 100 \text{ km}$) のトンネル内を走行したときに受ける最大の圧力を調べる。3.1, 3.2 節で示したことをまとめると以下のことがいえる。

- ・ 列車は、 $L \geq L_{BA}$ のトンネルを走行するときに A で起こりうる最大の正圧を受ける。
- ・ 列車は、 $L = L_{ba}$ のトンネルを走行するときに $a (=b)$ で起こりうる最大の負圧を受ける。

以上をもとに、列車に作用する圧力最大値をまとめた結果を図 3 (a) に示す。同図での値は、正圧はトンネル長 $L = 2 \text{ km}$ での値を、負圧はトンネル長 $L = L_{ba}$ での値を使用した。図からわかるように、列車速度や列車・トンネル断面積比が大きいほど、最大正圧・最大負圧ともに大きくなる。また、列車が長い方が最大正圧・最大負圧ともに大きい。

例として、最大正圧・最大負圧を受ける条件 ($v = 360 \text{ km/h}$, $l = 400 \text{ m}$, $L = 1499 \text{ m}$, $R = 0.200$) における $x-t$ 線図を図 4 に示す。なお、 $L = 1499 \text{ m}$ は $v = 360 \text{ km/h}$, $l = 400 \text{ m}$ における L_{ba} である。また、そのときの列車前頭部側圧・列車後尾部側圧の時系列波形を図 5 (a), (b) に示す。同図に示した通り、最大正圧は ΔP_1 、最大負圧は $-\Delta P_2 - \Delta P_3 - \Delta P_4$ で表される。このうち、 ΔP_2 は列車後尾部のトンネル突入により発生した膨張波による圧力変化量であり、 ΔP_3 は列車前頭部のトンネル突入により発生した圧縮波がトンネル出口で反射し戻ってきた膨張波による圧力変化量である。これらのような列車前頭部や後尾部のトンネル突入により発生する圧力波に起因する圧力変化量 ΔP_r には、列車マッハ数が小さい場合、次式の関係がある⁶⁾。

$$\Delta P_r \approx \frac{1}{2} \rho v^2 \frac{2R - R^2}{(1 - R)^2} \quad (4)$$

また、 ΔP_1 は列車がトンネル入口通過中に列車表面の摩擦により連続的に発生する圧縮波に起因する圧力変化量であり、 ΔP_4 はその圧縮波がトンネル出口で反射し戻ってきた膨張波による圧力変化量である。これらのような列車表面の摩擦による圧力変化量 ΔP_f には、列車マッハ数が小さい場合、次式の関係がある¹⁾。

$$\Delta P_f \approx \frac{1}{2} \rho v^2 \frac{R}{(1 - R)^3} \frac{\lambda' l}{d'} \quad (5)$$

以上のように、列車マッハ数が小さい場合、 ΔP_r および ΔP_f のどちらも列車速度の 2 乗に比例すると近似できることから、列車の受ける最大正圧 ($\approx \Delta P_1$)・最大負圧 ($\approx -\Delta P_2 - \Delta P_3 - \Delta P_4$) の値も列車速度の 2 乗に比例すると考えられる。

3.6 トンネル内で発生する最大圧力

トンネル壁面やトンネル内設備が受ける最大の圧力を

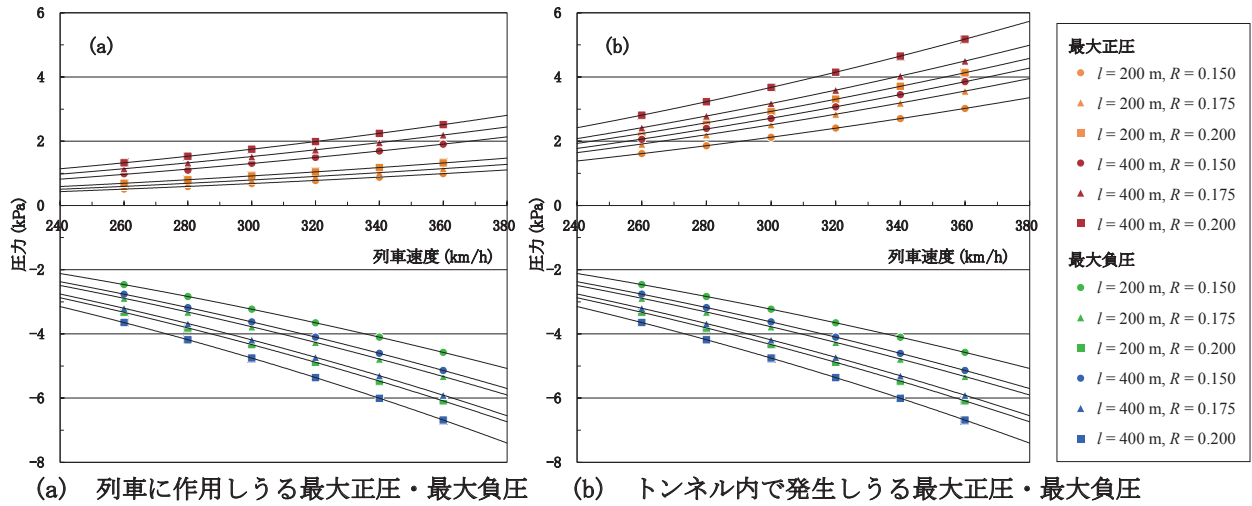


図3 列車速度に対する最大正圧・最大負圧

表3 圧力最大値の回帰式

	列車側面		トンネル内	
	最大正圧 (kPa)	最大負圧 (kPa)	最大正圧 (kPa)	最大負圧 (kPa)
$l = 200 \text{ m}, R = 0.150$	$7.6 \times 10^{-6} v^2$	$-3.6 \times 10^{-5} v^2$	$2.3 \times 10^{-5} v^2$	$-3.6 \times 10^{-5} v^2$
$l = 200 \text{ m}, R = 0.175$	$8.8 \times 10^{-6} v^2$	$-4.2 \times 10^{-5} v^2$	$2.8 \times 10^{-5} v^2$	$-4.2 \times 10^{-5} v^2$
$l = 200 \text{ m}, R = 0.200$	$1.0 \times 10^{-5} v^2$	$-4.8 \times 10^{-5} v^2$	$3.2 \times 10^{-5} v^2$	$-4.8 \times 10^{-5} v^2$
$l = 400 \text{ m}, R = 0.150$	$1.5 \times 10^{-5} v^2$	$-4.0 \times 10^{-5} v^2$	$3.0 \times 10^{-5} v^2$	$-4.0 \times 10^{-5} v^2$
$l = 400 \text{ m}, R = 0.175$	$1.7 \times 10^{-5} v^2$	$-4.6 \times 10^{-5} v^2$	$3.5 \times 10^{-5} v^2$	$-4.6 \times 10^{-5} v^2$
$l = 400 \text{ m}, R = 0.200$	$2.0 \times 10^{-5} v^2$	$-5.2 \times 10^{-5} v^2$	$4.0 \times 10^{-5} v^2$	$-5.2 \times 10^{-5} v^2$

* v : 列車速度 (km/h)

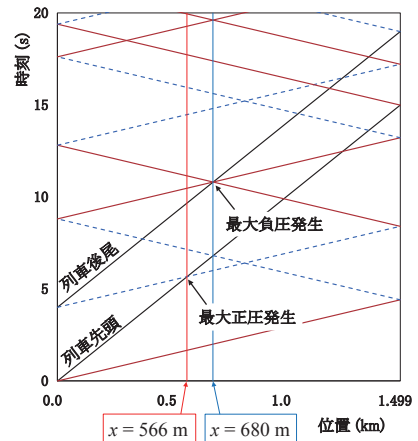
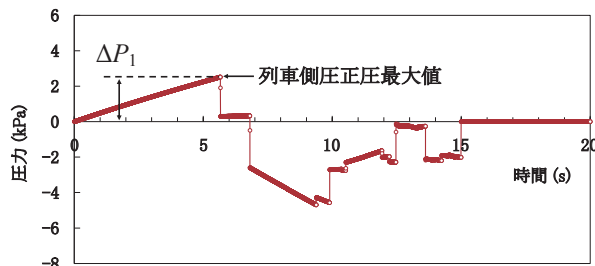
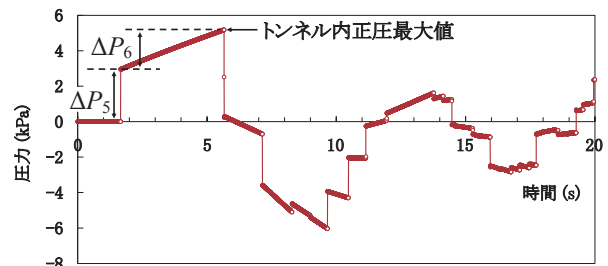


図4 $x-t$ 線図

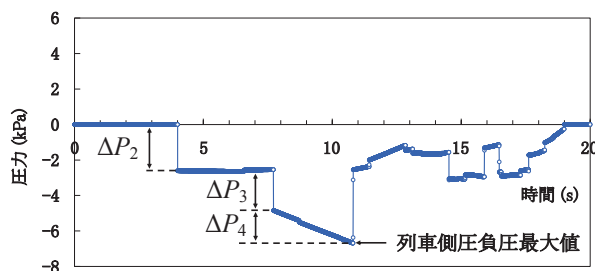
($v = 360 \text{ km/h}, l = 400 \text{ m}, L = 1499 \text{ m}, R = 0.200$)



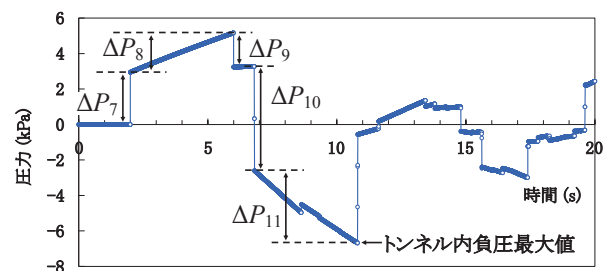
(a) 列車前頭部側圧



(c) トンネル内正圧最大値 ($x = 566 \text{ m}$)



(b) 列車後尾部側圧



(d) トンネル内負圧最大値 ($x = 680 \text{ m}$)

図5 圧力の時系列波形

求めるため、ある列車が様々な長さ (0.5 ~ 100 km) のトンネル内を走行したときに、トンネル内で発生する最大の圧力を調べる。3.3, 3.4 節で示したことをまとめると以下のことがいえる。

- ・ $L \geq L_{BA}$ のトンネルにおいて、A で起こりうる最大の正圧が発生する。
- ・ $L = L_{ba}$ のトンネルにおいて、 $a (= b)$ で起こりうる最大の負圧が発生する。

以上をもとに、トンネル内で発生しうる圧力最大値をまとめた結果を図 3 (b) に示す。同図表での値は、正圧はトンネル長 $L = 2 \text{ km}$ での値を、負圧はトンネル長 $L = L_{ba}$ での値を使用した。列車側面にかかる圧力と同様に、列車速度や列車・トンネル断面積比が大きいほど、最大正圧・最大負圧ともに大きくなる。また、列車が長い方が最大正圧・最大負圧ともに大きい。列車側面にかかる圧力と異なるのは、最大正圧の大きさであり、全体的にトンネル内の最大正圧の方が大きい。

例として、図 4 と同条件 ($v = 360 \text{ km/h}$, $l = 400 \text{ m}$, $L = 1499 \text{ m}$, $R = 0.200$) におけるトンネル内最大正圧・負圧発生位置 (それぞれ $x = 566, 680 \text{ m}$) の圧力の時系列波形を図 5 (c), (d) に示す。同図に示した通り、最大正圧は $\Delta P_5 + \Delta P_6$ 、最大負圧は $\Delta P_7 + \Delta P_8 - \Delta P_9 - \Delta P_{10} - \Delta P_{11}$ で表される。 ΔP_5 と ΔP_7 は列車前頭部のトンネル突入により発生した圧縮波による圧力変化量であり ΔP_r (式 (4)) で表される。 ΔP_6 と ΔP_8 は列車がトンネル入口通過中に列車表面の摩擦により連続的に発生する圧縮波に起因する圧力変化量であり ΔP_f (式 (5)) で近似される。 ΔP_9 は列車後尾部のトンネル突入により発生した膨張波による圧力変化量であり ΔP_r で近似される。 ΔP_{10} は列車前頭部のトンネル突入により発生した圧縮波がトンネル出口で反射し戻ってきた膨張波による圧力変化量と、列車先頭通過による圧力変化量が重ね合わさったものであり、 $2\Delta P_r$ で近似される。 ΔP_{11} は列車がトンネル入口通過中に列車表面の摩擦により発生した圧縮波がトンネル出口で反射し戻ってきた膨張波に起因する圧力変化量と、列車通過にともなう列車表面の摩擦による圧力変化量が重ね合わさったものであり、 $2\Delta P_f$ で近似される。以上により、トンネル内における最大正圧 ($\approx \Delta P_r + \Delta P_f$)、最大負圧 ($\approx \Delta P_r + \Delta P_f - \Delta P_r - 2\Delta P_r - 2\Delta P_f = -2\Delta P_r - \Delta P_f$) の値は列車速度の 2 乗に比例すると考えられる。

3.7 圧力最大値の予測式

3.5, 3.6 節で示したように、列車側面に作用しうる最大正圧・最大負圧、トンネル内で発生しうる最大正圧・最大負圧は列車速度の 2 乗に比例すると考えられる。図 3 (a), (b) に黒の実線で示した近似曲線は、列車速度 v (km/h) の 2 乗を独立変数にとり回帰分析した結果であり、それぞれの回帰式を表 3 に示す。図 3 (a), (b)

より、回帰式は計算結果と一致しており、360 km/h 程度までの速度域では、列車側面に作用しうる最大正圧・最大負圧、トンネル内で発生しうる最大正圧・最大負圧の値は表 3 に示した回帰式を使用して予測できる。

4. おわりに

すれ違いのない場合について、列車速度、列車長、トンネル長、列車・トンネル断面積比の 4 つのパラメータを変化させトンネル内圧力変動シミュレーションを行い、トンネル内走行時に列車およびトンネル内が受ける最大正圧・最大負圧を図 1 にまとめた。また、様々な長さのトンネル内を走行する際に、列車に作用しうる最大正圧・最大負圧の値を図 3 (a) に、トンネル内で発生しうる最大正圧・最大負圧の値を図 3 (b) にまとめた。さらに、それらは列車速度の 2 乗で整理でき、表 3 の式を使用して概算できることを示した。

なお、今回の計算では 1 列車のみの場合を想定したが、2 列車がトンネル内ですれ違う場合はさらに大きな圧力変動が発生する。その際に考慮すべき圧力は、1 列車のみの場合に発生しうる圧力の 2 倍以上になる場合もあるので注意が必要である。

また、今回使用したプログラムでは、列車速度が音速より十分小さいという近似を取り入れており、列車がより高速になった場合には、計算結果に誤差が生じる可能性がある。同近似を用いないシミュレーションプログラムは別途開発されており⁷⁾、複数列車の取り扱いには対応していないものの、新幹線程度の列車・トンネル断面積比において 360 km/h 以上を想定した圧力変動のシミュレーションには同プログラムを使用する必要がある。

文献

- 1) 山本彬也: トンネルに突入する列車の摩擦による圧力上昇, 鉄道技術研究報告, No. 666, 1969
- 2) 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
- 3) 山本彬也: 列車とトンネルの空気力学, 鉄道技術研究報告, No. 1230, 1983
- 4) 飯田雅宣, 前田達夫: トンネル内圧力変動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol. 4, No. 7, 1990
- 5) 梶山博司, 飯田雅宣, 前田達夫: 大深度地下鉄道の空気流動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol. 7, No. 7, 1993
- 6) 原朝茂: 列車が高速で隧道に突入する場合の流体力学的諸問題, 鉄道技術研究報告, No. 153, 1960
- 7) 斎藤実俊, 飯田雅宣, 梶山博司: 鉄道トンネル内における 1 次元非定常圧縮性流れの数値シミュレーション, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 75, No. 760, pp. 2430-2439, 2009