

## 高速鉄道トンネル内における圧力波の距離減衰の評価

東海旅客鉄道 正会員 山崎幹男 大崎総合研究所 正会員 ○若原敏裕  
 正会員 永長隆昭 正会員 鈴木 誠  
 正会員 加藤 寛 正会員 野澤剛二郎

**1. はじめに** 高速鉄道車両のトンネル突入・退出に伴う圧力波（=突入波・退出波）は、トンネル構造や地下駅部の構造部材への影響が大きく、設計荷重としての評価方法が望まれている。これらの圧力波は、音速で伝播、坑口で反射し、トンネル内での重ね合わせが観測されている<sup>1)2)</sup>。本報告では、トンネル構造や地下駅部の構造部材に対して外力となる圧力変動の設定に重要なパラメータである圧力波の距離減衰の評価を行う。

**2. 波動方程式** トンネル内を伝播する圧力波に関する基礎方程式は、トンネル断面積が変化しないと考えれば、1次元問題として取り扱うことができ、以下のように表すことができる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $u$ は流速、 $p$ は圧力変動、 $\rho$ は空気密度、 $t$ は時間変数、 $x$ はトンネルの軸方向に沿って圧力波の伝播方向を正とする位置変数である。また、 $f$ は空気とトンネル壁面の摩擦力を表し定常摩擦項と非定常摩擦項からなる<sup>3)</sup>。ここで、上式(1)(2)に対し圧力変動  $p$ が大気圧  $p_0$ と比較して十分小さいという条件から線形化を行い、流速  $u$ に関する項を消去すると以下のような圧力変動  $p$ に関する波動方程式を得ることができる。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c_0^2 \left( 2\xi \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、式(3)では空気とトンネル壁面の摩擦力  $f$ を圧力変動  $p$ に比例する形で  $f=2\rho\xi p$ とし、この  $\xi$ をトンネル内圧力波の距離減衰係数(1/km)と呼ぶことにする。なお、式(3)の  $c_0$ は静止気体中の音速でありトンネル内の圧力波の伝播速度を意味する。式(3)の解は、次式のように表すことができる。

$$p(x, t) = e^{-\xi x} \{ p^-(x - c_0 t) + p^+(x + c_0 t) \} \dots\dots\dots (4)$$

これより、式(4)で得られた圧力変動  $p$ に関する線形解：進行波  $p^-(x - c_0 t)$ は、トンネル坑口付近で生じた圧力波がトンネル内を正の方向に伝播しつつ、 $e^{-\xi x}$ で指数関数的に減衰することを表している。

**3. 圧力変動測定の概要** トンネル内圧力波の距離減衰係数  $\xi$ を求める目的から、図-1に示すような3つのトンネルと2つの中間緩衝工からなる総延長約10km（内空断面積74m<sup>2</sup>）のトンネルにおいて、列車高速走行（300km/h、400km/h、450km/h、500km/h）に伴う圧力変動の測定を絶対圧計により実施している<sup>4)</sup>。

**4. 距離減衰係数  $\xi$  の評価** 以下のようにして、距離減衰係数  $\xi$ を定める。

- 1) トンネル坑口に近い圧力計P01の正圧最大値で各圧力測定点の最大正圧を基準化する。
- 2) 2つの中間緩衝工と中間部の横坑による圧力損失分を考慮し、最大正圧を補正する。
- 3) 各々の測定点での圧力比を指数関数で関数近似することにより距離減衰係数  $\xi$ を求める。

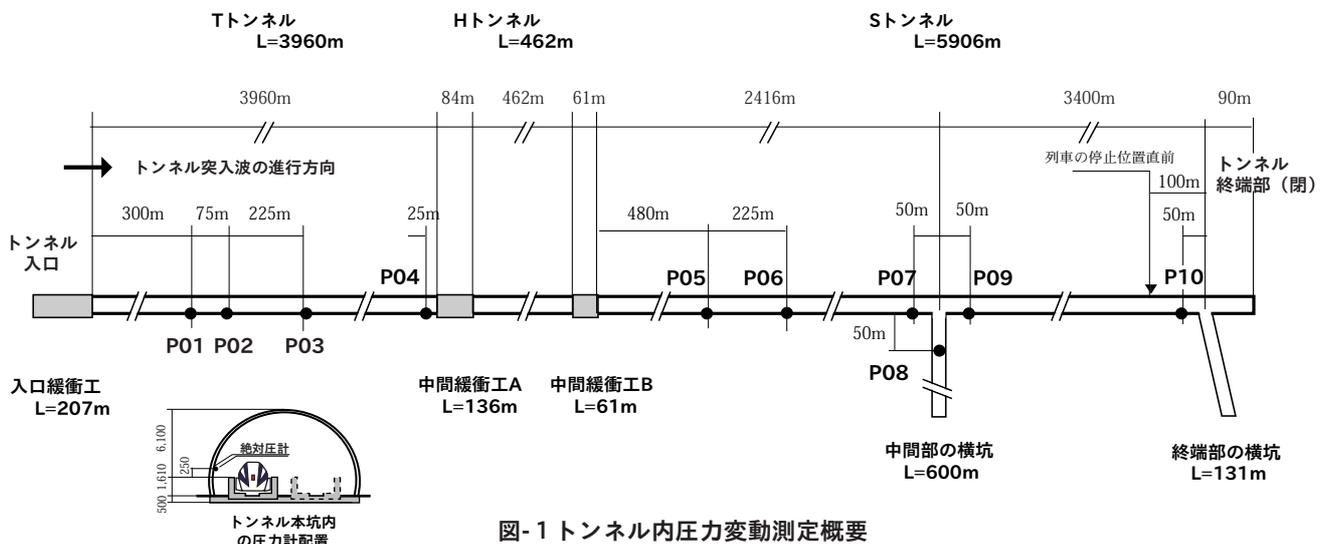


図-1 トンネル内圧力変動測定概要

キーワード：高速鉄道、トンネル、圧力波、圧力変動、距離減衰

連絡先：〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル27F TEL：03-(3508)-8011, FAX：03-(3508)-2196

突入速度300km/h, 400km/h, 450km/h, 500km/hの場合の圧力測定結果について距離減衰係数の評価を行った。

図-2は、一例として500km/h突入時の測定結果に基づき、トンネル坑口（測定点P01）で得られた最大圧力で各測定点の圧力を基準化し、中間緩衝工損失2回分40%（ $=1-0.78 \times 0.78$ ）の圧力損失と横坑通過による17%（ $=1-0.83$ ）の圧力損失<sup>4)</sup>を補正し（中間緩衝工ならびに横坑での圧力損失の詳細は文献<sup>4)</sup>参照）、約10km相当のトンネルとして見た場合の圧力波の伝播特性を表したものである。

図-3は、500km/h突入時の圧力（最大圧力比）と波動伝播距離の関係を示したものである。図示した結果から、波動の伝播距離に伴いトンネル内の圧力波は、徐々に減少することがわかる。また、図-3には、トンネルに対する距離減衰係数 $\xi$  (1/km)の関数近似結果を示している。総延長約10km（内空断面積74m<sup>2</sup>）のトンネルにおける距離減衰係数は、 $\xi=0.047$ となる。

図-4は、トンネル坑口（測定点P01）付近における最大正圧（突入波の最大値）と距離減衰係数の関係を示したものである。距離減衰係数は、列車トンネル突入時の列車速度、すなわち、坑口近傍での突入波の値によって異なる結果となっている。図より、突入波の最大正圧と距離減衰の関係は、ほぼ線形関係にあり、突入速度が増加し、突入波の最大値が増大すると、距離減衰もわずかに増加する。

距離減衰係数とトンネル坑口での突入波の関係は、図-4に示すように、以下の線形1次式で関数近似することができる。

$$\xi = 0.04 + 0.29 \frac{\Delta P_{\max}}{P_0} \quad (1/\text{km}) \quad (5)$$

この式を用いた場合、列車500km/h突入波の距離減衰係数は、 $\xi=0.05$ となる。

なお、距離減衰係数 $\xi$ の値が圧力依存性を持つ原因として、圧力波の波動方程式を導く段階で、基礎方程式(1)(2)の非線形項を無視し線形化を行ったことが考えられる。

**5. まとめ** トンネル構造や地下駅部の構造設計を行うため、トンネル内に生じる圧力波の距離減衰の評価を行った。その結果、トンネル突入波は波動伝播距離に対し、 $e^{-\xi x}$ で指数関数的に減衰し、列車500km/h突入の場合の圧力波の距離減衰係数は $\xi=0.05$ であることが分かった。すなわち、波動伝播距離1kmにつき、基準とする圧力波（坑口での突入波）のピーク値が5%程度の比率で減少することが判明した。

**参考文献**

- 1) 渡瀬久，他；高速鉄道のトンネル内圧力変動に対する覆工の挙動把握 - 圧力変動解析 - ，土木学会第55回年次学術講演会，平成12年9月。
- 2) 加藤覚，他；高速鉄道のトンネル内に発生する退出波と反射波の3次元CFD解析，土木学会第56回年次学術講演会，平成13年9月。
- 3) 前田；列車の空気力学的特性およびトンネル微気圧波低減法に関する研究，鉄道技術論文誌 鉄道総研報告，特別第20号，（財）鉄道総合技術研究所，1998年4月。
- 4) 永長隆昭，他；高速鉄道トンネル内における圧力波の局部損失と分岐性状の評価，土木学会第57回年次学術講演会（投稿中）

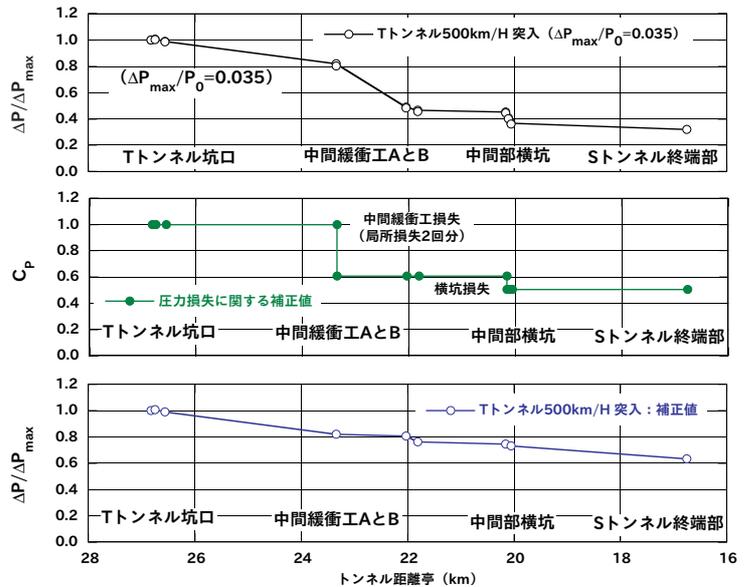


図-2 トンネル突入波（500km/h）の規準化と中間緩衝工および横坑での圧力補正

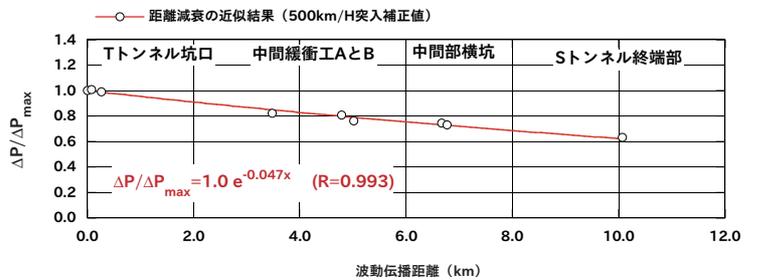


図-3 列車突入時の圧力比と波動伝播距離の関係（500km/h突入時）

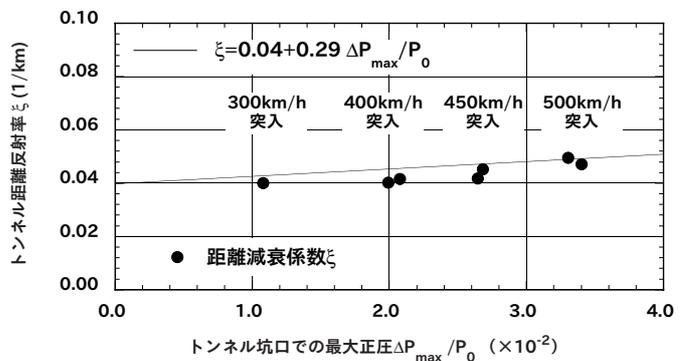


図-4 トンネル突入波の距離減衰係数