

高速鉄道トンネル内に発生する圧力波の距離減衰の把握

大崎総合研究所 正会員 ○ 新美勝之・若原敏裕・野澤剛二郎
 東海旅客鉄道 正会員 加藤 覚・山崎幹男・梶川 徹
 鉄道総合技術研究所 正会員 上野 眞・前田達夫・梶山博司

1. はじめに 高速鉄道車両がトンネル内を走行する際には、列車の突入に伴う圧力波(=突入波)、通過やすれ違いに伴う圧力低下(=通過波)あるいは退出に伴う圧力波(=退出波)などが生じ、これらの圧力変動は音速(突入波と退出波)もしくは列車走行速度(通過波)で伝播、坑口で反射し、トンネル内で複雑に重ね合わされる¹⁾。本報告では、トンネル覆工構造に外力として作用するこれらの圧力変動評価に重要なパラメータとなる圧力波(突入波・退出波)のトンネル内伝播に伴う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、 ρ 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²⁾。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。

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

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 ξ 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（進行する）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 ξ を求める目的から、図-1に示すような2つのトンネル（トンネル長約4km、内空断面積74m²）において、列車高速走行に伴う圧力変動の測定をトンネル軸方向（Kトンネル：圧力測定点-北側11点、Tトンネル：圧力測定点-南側2点）に配置した絶対圧計により実施している。

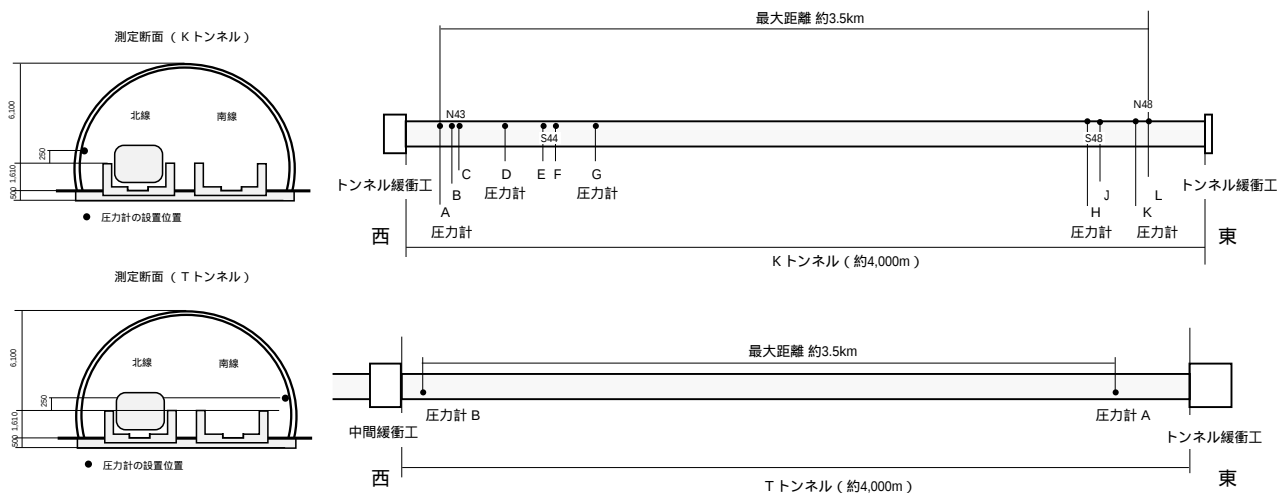


図-1 トンネル内圧力変動測定概要

キーワード：高速鉄道，トンネル，圧力波，圧力変動，覆工構造，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

3. 距離減衰係数 ξ の評価 圧力波の値は波動の伝播（進行距離）に伴い、 $e^{-\xi x}$ で指数関数的に減衰する．このことから、以下のようにして、その係数（距離減衰係数 ξ ）を定める．

- 1) トンネル坑口に近い圧力計A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) 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減衰係数 ξ を求める．

上記の操作を、突入速度500km/h、450km/h、400km/h、300km/h、200km/hの5パターンの場合の圧力測定結果について実施する．

図-2は、各トンネル坑口付近（測定点A）で得られた最大圧力と突入速度の関係を示したものである．

図-3は、各トンネルにおける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減少することがわかる．図-3には、各々のトンネルに対する距離減衰係数 ξ (1/km) の関数近似結果を示している．両トンネルにおける距離減衰係数は、同じ突入速度ながら、Kトンネルで $\xi=0.088$ であり、Tトンネルで $\xi=0.077$ となる．

図-2および図-3において、同一の列車突入速度でありながら、トンネル坑口付近での最大圧力値や距離減衰係数が異なる原因として、各々のトンネルにおける緩衝工の長さの違い（Kトンネル=100m、Tトンネル=200m）が考えられる．

図-4は、各トンネルの測定点A（トンネル坑口付近）における最大正圧（圧縮波の最大値）と距離減衰係数の関係を示したものである．最大正圧と距離減衰の関係は、トンネルの違いによる差異はなく、ほぼ線形関係にあり、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．

$$\xi = 0.04 + 0.98 \frac{\Delta P_{\max}}{P_0} \dots\dots\dots (5)$$

これより、列車550km/h突入の場合の距離減衰係数は緩衝工無で $\xi=0.097$ 、緩衝工有で $\xi=0.087$ である．なお、距離減衰係数 ξ 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 トンネル覆工構造に対する正確な外力評価（圧力変動の値）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、トンネル内の圧力波は伝播距離に対し、 $e^{-\xi x}$ で指数関数的に減衰し、列車550km/h突入の場合の圧力波の距離減衰係数は $\xi=0.097$ であることが分かった．すなわち、波動伝播距離1kmにつき、基準とする圧力波のピーク値が9%程度づつ減少することが判明した

参考文献

- 1) 渡瀬，山崎，梶川，前田，梶山，上野；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) 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．

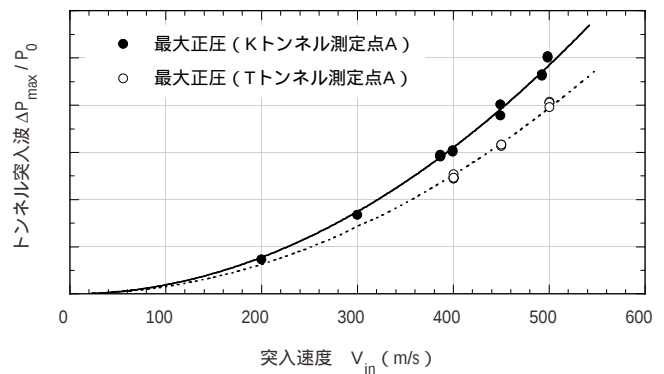


図-2 トンネル坑口近傍での最大圧力比と突入速度の関係

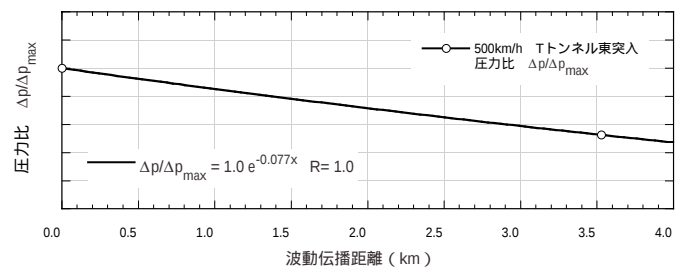
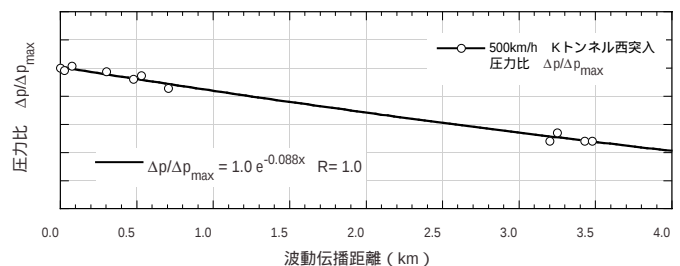


図-3 列車突入時の圧力比と波動伝播距離の関係（3両編成 500km/h突入時）

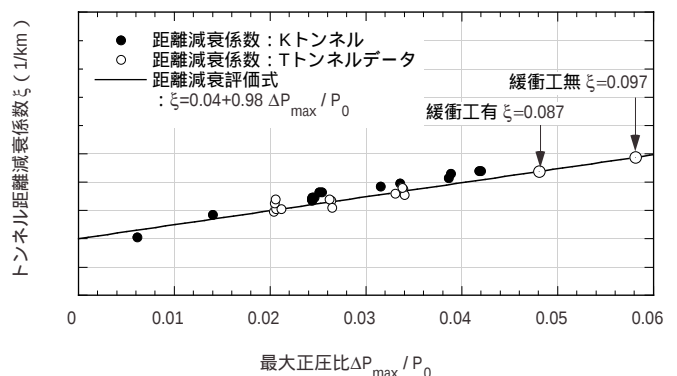


図-4 トンネル内圧力波の距離減衰係数