

高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する覆工の挙動把握

- トンネル内圧力変動解析 -

東海旅客鉄道	正会員	渡瀬 久	鉄道総合技術研究所	非会員	前田 達夫
	正会員	山崎 幹男		非会員	梶山 博司
	正会員	梶川 徹		正会員	上野 眞

1. はじめに 高速鉄道におけるトンネル通過では、突入時に圧縮・膨張波（以降、突入波と呼ぶ）が発生し、列車側面には強い圧力低下が生じる。このため、トンネル覆工構造の安全性を確認する目的で覆工に作用する圧力変動を予測する必要がある。これまでは圧力現象がトンネル断面に対して一様と考え、変動を1次的に扱う方法が主に取られてきたが、近年の計算機能力の発達により数値解析(CFD)で3次元解析を行うことが可能となっている¹⁾²⁾。また、突入時の急激な圧力変動を緩和するための緩衝工を設置することによる効果を測るためには、3次的に緩衝工の形状を再現することが必要となる。本研究では、トンネル覆工に作用する圧力変動を予測することを目的として3次元CFD解析を行う。ただし、長大編成や2列車のすれ違い等の計算を行うには膨大な計算容量を必要とするため、ここでは1列車によるトンネル突入と、トンネル内の通過の計算を行い、それらの結果を用いて長大編成やすれ違い時のトンネル内最大圧力を予測する。

2. CFD解析の概要 ここでは、3両編成と16両編成のトンネル内定常計算と、3両編成によるトンネル突入時の3次元CFDを行う。圧縮性の粘性流体に対する離散化の取り扱いにはOgawaらの方法¹⁾を用いている。列車ならびにトンネル形状を一般座標系を用いた差分格子により再現しているが、差分格子の作成を容易にするため、領域分割法により4つの領域に分けて計算を行っている。物体壁面ではすべり無しの条件とし、トンネル出入口の遠方境界では、計算領域から外部へ伝播する波が透過する無反射境界条件²⁾を用いている。

解析モデルは山梨実験線のトンネルを対象としている。図-1に突入計算の解析領域と計算格子の一例を示す。列車長は3両編成で約80m、16両編成で約400mである。列車断面積とトンネル断面積の比は0.12、列車速度は550km/hで一定とした。トンネル内の定常計算では、無限長のトンネルを仮定し、列車と同じ速度で移動する座標系により計算を行う。この方法により列車は静止し、静穏時のトンネル内の空気とトンネル壁面が列車と逆方向に速度を持つことになる。ここで扱う圧力変動 ΔP は、大気圧 P_0 に対する変動分を大気圧で無次元化したものである。

3. 解析結果 図-2に列車通過時のトンネル壁面の圧力変動を示す。3両、16両編成ともに列車後尾近くのトンネル側面で最大負圧となっており、両者の値はほぼ同じとなった。これは、列車後尾の付近で、列車側面の境界層の発達による圧力低下と、列車の前後にある台車部分で局所的な負圧が発生するためである。また、列車の前後には差圧が生じており、その差圧は16両編成の方が大きくなっている。一方、トンネル突入時には圧縮波により最大正圧が生じているが、緩衝工がある場合の方が、圧力勾配も緩やかとなり最大値も小さくなっている（図-3）。これは、緩衝工部分で発生する圧縮波と膨張波の圧力勾配が緩やかなためである。

図-4はCFD解析で得られた圧力変動と実測結果を比較したものである。突入波、列車通過時の圧力低下とともに、CFD解析結果と実測結果は良く一致している。ただし、CFD解析では列車速度550km/hのみで計算しているため、異なる速度に対しては、CFD解析結果により補正した理論解³⁾を用いて算定した。

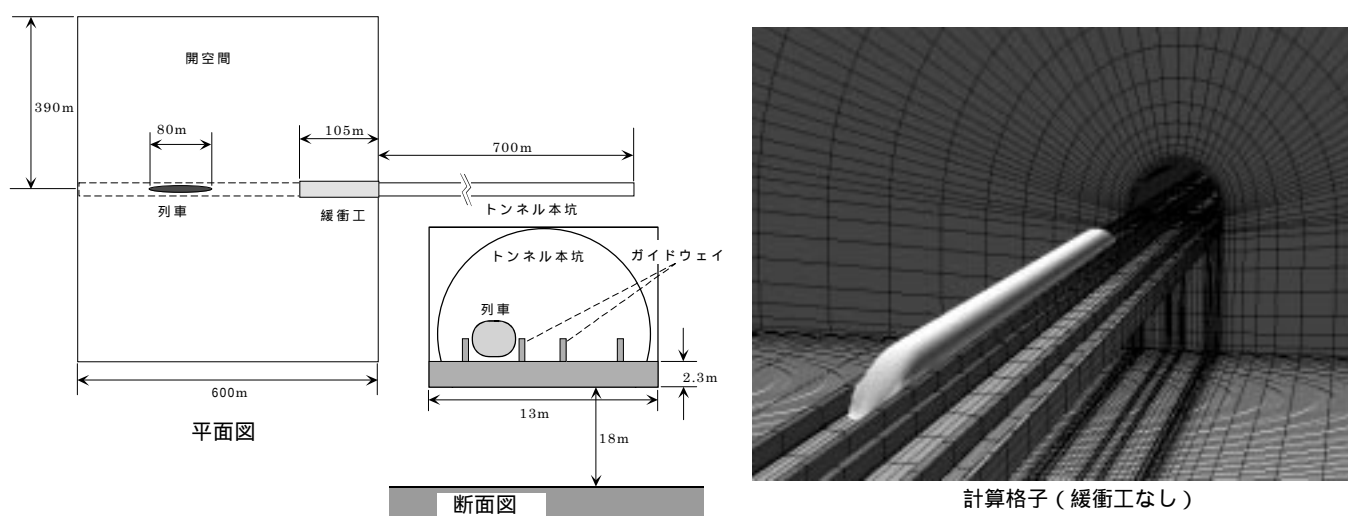


図-1 突入計算の計算領域と計算格子

keywords: 高速鉄道、数値解析、トンネル、覆工、圧力変動、圧縮性流体

連絡先: 〒103-8288 東京都中央区八重洲1-6-6 八重洲センタービル8F, TEL03-3274-9545, FAX03-3274-9550

4. トンネル内最大圧力 上記で得られた圧力変動量を基にして、16両編成の列車がトンネルを通過する際に発生する最大圧力を推定する。ここでは、1列車走行(550km/h)と2列車がトンネル内ですれ違う場合(500km/h)を考える。ただし、最大圧力変動を安全側に予測するため、緩衝工が無い場合について検討する。トンネル内最大圧力を求めるには、複数の圧力変動現象の重畳を考える必要がある。そこで、圧力波の重ね合わせは特性曲線法に基づいて単純和とし、列車通過時の圧力低下は圧力波の前後で生じる風速にのみ依存して、圧力の変動の影響は受けないものとする。突入波のトンネル端部での減衰や、距離による減衰は無視し、列車の退出時の圧力変動(退出波)は突入波と同じものとして計算する。図-5に最大圧力を発生するときの状況をダイアグラムによって示す。1列車では、退出波と突入波がトンネルの出入口で2回反射したものが重なったときに最大正圧($0.109P_0$)となっている。また、突入波の1回反射と列車の通過が重なったときに最大負圧($-0.114P_0$)を生じる。2列車では、突入波の2回反射と2列車の退出波が重なったときに最大正圧($0.146P_0$)となり、2列車の通過と突入波の反射波が2つずつ重なった時に最大負圧($-0.188P_0$)が生じる。

5. 結論 トンネル覆工構造の安全性を検討するため、トンネルを通過する高速列車まわりの流れのCFD解析を行い、その結果を用いて長大編成の列車がトンネル内を通過、すれ違ったときに発生するトンネル壁面の最大正圧、最大負圧を算定した。列車突入時の圧力変動や列車側面の圧力低下に関するCFD解析は、実測結果と良く一致していた。また、これらの結果を用いてトンネル内で発生する最大正圧、最大負圧を算定したところ、2列車走行時に最大正圧 $0.146P_0$ 、最小負圧 $-0.188P_0$ となった。

謝辞 本研究を行うにあたり、(株)大崎総合研究所 野澤氏に多くのご指導、ご協力を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献 1) Ogawa, T. and Fujii, K. "Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel", Computers and Fluids, Vol.26, No.6, pp.565-585, 1997. 2) 大津山澄明、楊笑風、岡島厚、「トンネル走行時の列車周りの流れの数値解析」第2回応用力学シンポジウム、1999. 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.

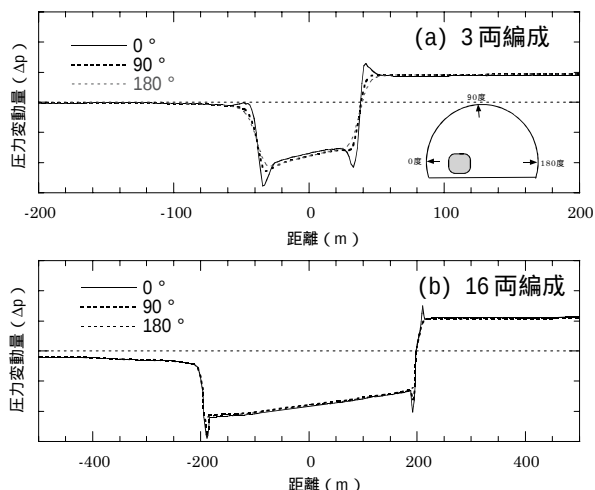


図-2 列車通過時のトンネル壁面の圧力変動

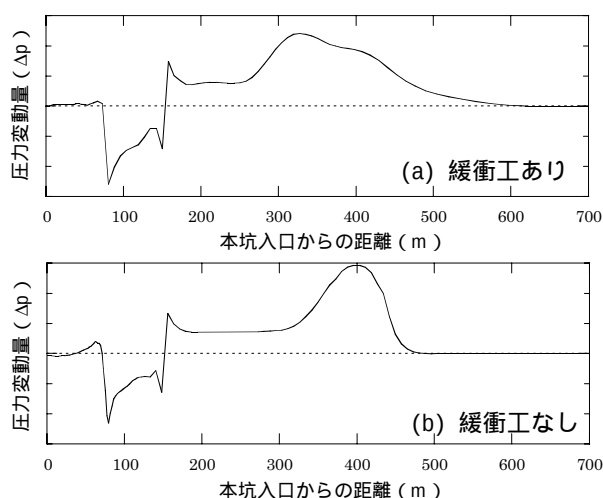


図-3 突入時のトンネル壁面の圧力変動

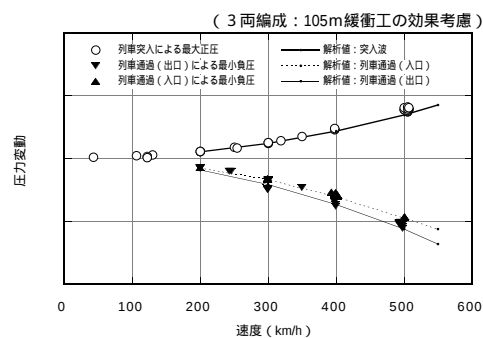


図-4 トンネル内圧力変動の実測との比較(3両編成)

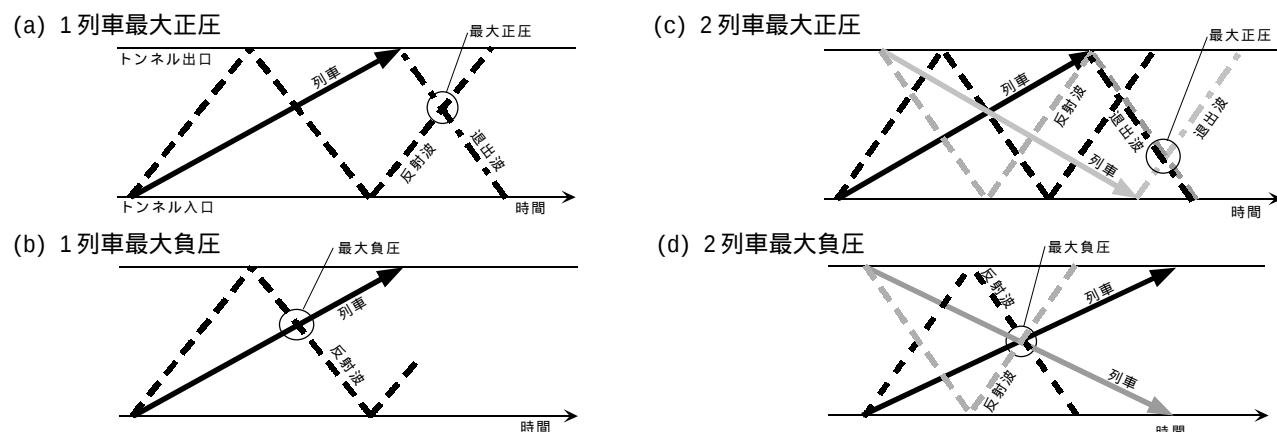


図-5 トンネル内の最大圧力算定の組み合わせ