

車両のトンネル突入時に形成される圧縮波に関する三次元模型実験

環境工学研究部 騒音解析

研究員 斎藤英俊

1. はじめに

高速鉄道の沿線環境問題の一つにトンネル微気圧波¹⁾がある。微気圧波の現象解明および低減対策法の検討においては、車両のトンネル突入時にトンネル内に形成される圧縮波形を定量的に予測する必要がある、その手法の一つに模型実験がある。

鉄道総研ではこれまで、軸対称の車両模型および軸対称または三次元形状（馬蹄形）のトンネル模型を用い、車両の走行中心とトンネル模型の中心軸をずらすことにより、車両の偏心走行を模擬する模型実験を実施してきた。この方法はこれまで、車両先頭部形状の検討やトンネル緩衝工の開口部の検討に用いられており、微気圧波の低減対策法の検討に対して有用なものである。

しかしながら縮尺が 1/100 オーダーの軸対称の車両模型を用いる模型実験は、現地測定結果と比較すると誤差が大きい場合があり、その要因として車両周りの流れの三次元性や離れの影響が考えられる。そこで、本研究では、流れの三次元性の影響を調べるため、三次元形状の車両およびトンネル模型（以下、三次元形状模型と言う）を用いた実験を行い、軸対称形状の車両およびトンネル模型による実験結果との比較を行った。

2. 実験概要

2.1 想定した車両

本実験で想定した車両の先頭部形状（実スケール）を図 1 に示す。先頭部長さ、幅、高さは、一般的な新幹線電車の車両諸元と同じとした。先頭部形状は、二次元くさび型とし、大きな流れのはく離を防ぐため、エッジ部には実寸で半径 0.5 m の丸みをつけた。

2.2 軸対称形状模型

図 2（左）に示す様に軸対称形状模型は、回転体の車両模型と円管のトンネル模型を用いており、車両模型の先頭部の断面積変化は想定した車両（図 1）と相似である。地面の効果は鏡像法を用いて模擬しており、車両とその鏡像を合わせて回転体で置き換え、車両底面と地面の間の空間の流れは無視している。軸対称形状模型の縮尺は新幹線トンネル（断面積 61.9m²）に対して 1/125.5 である。

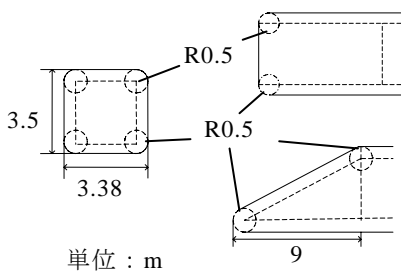


図 1 想定車両の先頭部形状

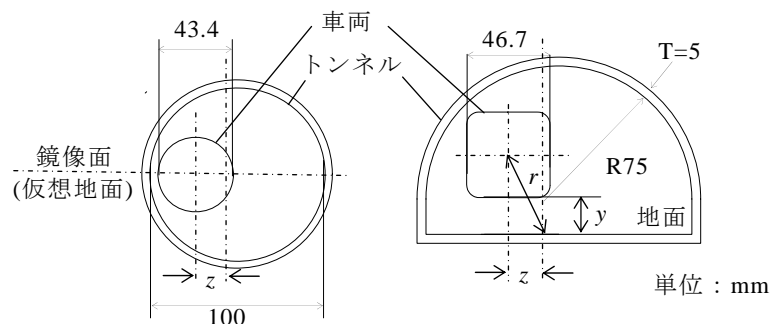


図 2 軸対称（左）および三次元形状模型（右）の断面図

2.3 三次元形状模型

図2(右)に示す様に三次元形状模型は、図1の想定した車両と先頭部が相似な車両模型および実物に近い断面形状である馬蹄形のトンネル模型を使用している。地面の効果は、地面板により模擬しており、車両底面と地面の間にはクエット流的な流れが存在している。模型の縮尺は、トンネル模型と実トンネルの等価半径の比より、 $1/72.3$ である。

2.4 実験方法

実験は、鉄道総研のトンネル微気波模型実験装置²⁾を使用して行った。模型実験の諸元を表1に、実験の概要を図3に示す。緊張したピアノ線で案内された車両模型を高速回転する3対(6個)の車輪の摩擦駆動によって打ち出し、トンネル模型内に突入させる。トンネル内で発生する圧縮波は、突入坑口から1m離れた箇所に設置された圧力変換器により測定する。

鉄道総研では、回転車輪方式による三次元車両模型の発射は今回の実験が初めてであり、車両模型をロール方向に回転させずに、所定の速度で打ち出すことが重要な課題であった。そこでこの課題を解決するために、三次元車両模型の先端から400mmを断面が矩形の三次元形状とし、残り600mmを円筒形状とした。つまり、矩形部が模型発射装置の回転車輪に挟みこまれ、接触する際に、模型のロール方向のずれが自動的に修正され車両模型のロール方向への回転防止となる。また、円筒形状部が回転車輪と広い面積で接することにより、車両模型と回転車輪の間の滑りを抑え、車両模型の高速発射が可能になることを狙っている。

トンネル模型の突入坑口手前に設置された高速度カメラにより突入の様子を撮影し、走行安定性を確認した。発射速度は三次元および軸対称車両模型ともに260 km/hまでとした。トンネル模型内における軸対称および三次元形状模型の位置関係を図2に示す。 z は各々の車両模型の中心軸とトンネル模型断面中心軸との距離で水平方向の偏心量を表し、 y は鉛直面内における車両の垂直方向の位置(車両底面と地面の間隔)を表し、 r は車両中心とトンネル底面中心の距離を表わしている。車両の水平方向の偏心が圧縮波の形成に及ぼす影響を調べるために z を変化させた実験を軸対称形状模型と三次元形状模型の両方で実施した。このとき、三次元車両模型の場合、車両の垂直方向の位置は実車相当($y/R=0.09$ 、 R :トンネル等価半径)とした。また、車両の垂直方向の位置が圧縮波の形成に及ぼす影響を調べるため、トンネル断面中心軸上で y を変化させた実験も三次元形状模型では実施した。

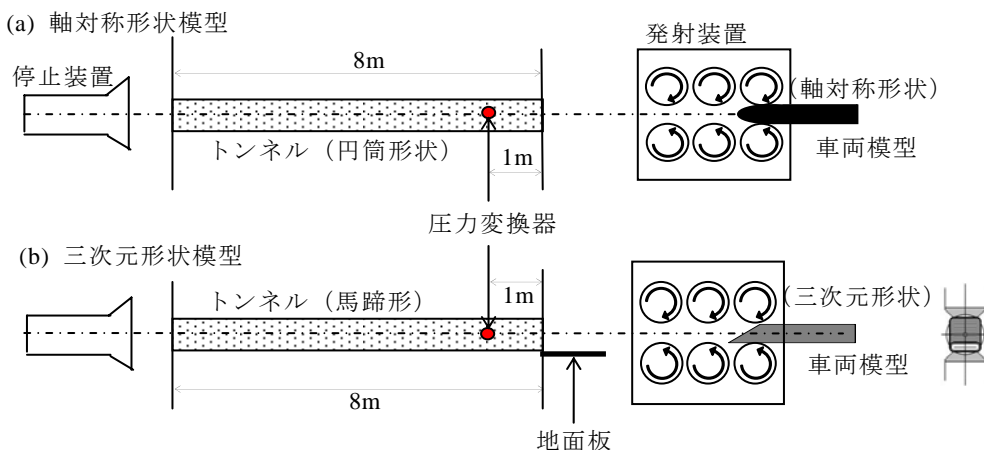


図3 トンネル微気圧波模型実験装置

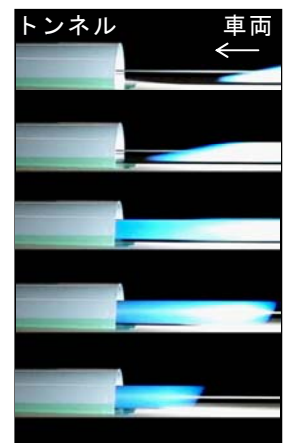


図4 走行安定性の確認
(260km/h)

3. 実験結果

3.1 三次元車両模型の発射状況

三次元車両模型が 260km/h でトンネル模型に突入する様子を図 4 に示す。高速度カメラで撮影した結果、実験を行った全ての速度で三次元車両模型はロール方向に大きな回転を生じず、ほぼ水平に、所定の速度でトンネル模型内に突入することが確認できた。

表 1 模型実験の諸元

	三次元形状模型	軸対称形状模型
車両模型形状	くさび型形状	軸対称の回転体
車両模型等価半径(mm)	37.8(鏡像を考慮)	21.7
トンネル形状	馬蹄形	円筒形状
トンネル等価半径 R (mm)	86.8(鏡像を考慮)	50
※ アスペクト比	3.3	3.3
車両・トンネル断面積比	0.19	0.19
縮尺	1/72.3	1/125.5
発射速度 (km/h)	160, 180, 200, 220, 240, 260	
車両の水平偏心： z/R	0, 0.12, 0.24, 0.3, 0.34	
車両の垂直方向の位置： y/R	0.09, 0.12, 0.14 0.23, 0.27, 0.31	
地面模擬方法	地面板	鏡像法

※ アスペクト比：車両先頭部長さと列車模型等価半径との比

3.2 トンネル内で発生する圧縮波

3.2.1 先頭部形状の三次元性の影響

図 5 に軸対称車両模型 ($z/R=0$) および三次元車両模型 ($y/R=0.09$, $z/R=0$) がトンネルに突入した際の圧力および圧力勾配波形を示す。図 5 より軸対称車両模型による圧縮波と三次元形状模型による圧縮波の圧力波形はほぼ一致していることがわかる。また圧力勾配波形を比較すると、両者はほぼ相似であるが、三次元形状模型のピーク値と軸対称形状模型のピーク値の差は 10%程度である。

3.2.2 車両模型の走行位置による影響

図 6 に三次元形状模型の鉛直面内における走行位置を水平および垂直方向に移動させた場合の圧力上昇量と圧力勾配最大値を示す。ここでグラフの縦軸は、中心走行している軸対称形状模型

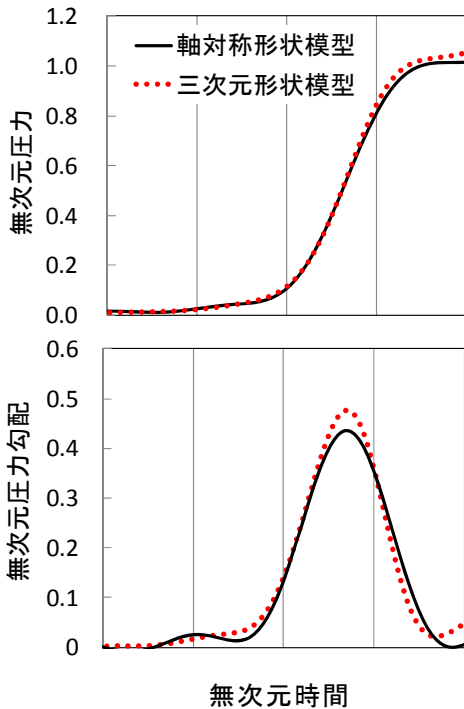


図 5 トンネル突入時圧縮波の無次元波形 (三次元形状模型 260km/h、 $y/R=0.09$)

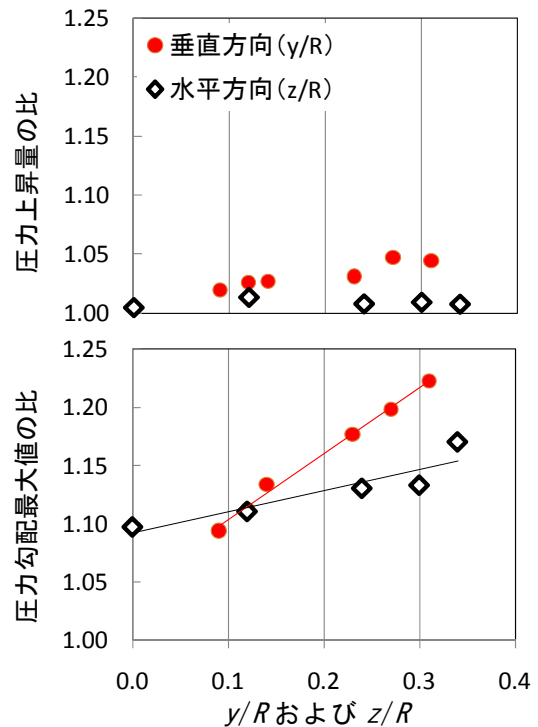


図 6 三次元形状模型の走行位置の変化に伴う圧力上昇量(上)と圧力勾配最大値(下)

の結果を1とした場合の比を表わしている。図6より、車両模型の走行位置が圧力上昇量に与える影響は小さいことがわかる。一方、圧力勾配最大値は、車両模型が水平および垂直方向にトンネル底面中心からずれるにしたがって、ほぼ一定の割合で増加していくことがわかる。

複線トンネルを走行している新幹線に相当する分 ($z/R=0.34$) だけ車両模型を水平方向へ偏心させた場合、圧力勾配最大値は、車両を偏心させない場合 ($z/R=0$) に比べて約7%大きくなっている。これは今回および過去の軸対称形状模型による実験結果³⁾と同様の結果となっている。一方、垂直方向位置へ $y/R=0.31$ だけ車両を移動させた場合、圧力勾配最大値は、実車相当 ($y/R=0.09$) に比べて約10%大きくなっている。これらより、車両模型の垂直方向への移動量の方が水平方向の移動量よりも圧力勾配最大値に与える影響は大きいことがわかる。ここで、図7に車両中心とトンネル底面中心の間の距離 r (図2) と圧力勾配最大値の関係を示す。図7より、車両の鉛直面内の走行位置の移動方向にかかわらず、車両中心とトンネル底面中心の距離 r が大きくなるにつれて、圧力勾配最大値は一定の割合で大きくなることがわかる。このことから車両の水平方向の偏心だけではなく、垂直方向の走行位置についても考慮することにより、模型実験による圧縮波の予測精度を向上させることができると考えられる。

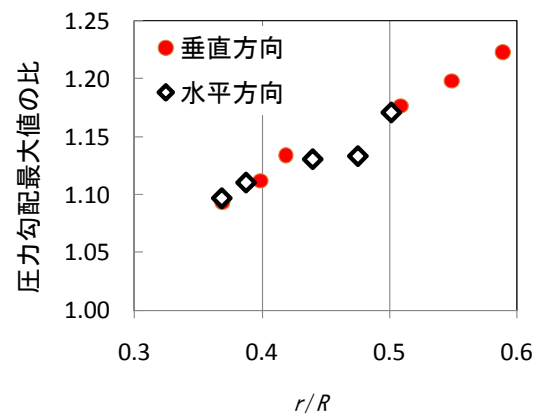


図7 車両中心とトンネル底面中心の距離 r と圧力勾配最大値の関係

4. おわりに

車両がトンネルに突入するとき生じる圧縮波の波形の予測精度向上を目的に、三次元車両模型の回転車輪方式による発射実験を行った。三次元車両模型の断面形状を矩形部と円筒形状部の組み合わせとすることにより、安定した発射が可能になった。また、圧縮波の波形は、鉛直面内における車両の水平方向の位置だけでなく、垂直方向の位置の影響を受けることが明らかになった。したがって、車両の水平方向の偏心だけではなく、垂直方向の走行位置を考慮することにより、模型実験による圧縮波の予測精度を向上させることができると考えられる。今後は、実車と相似な形状の模型を用いた実験を実施し、現地測定結果との比較・検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 小沢智：トンネル出口微気圧波の研究、鉄道技術研究報告、No.1121、1979
- 2) 福田傑、飯田雅宣：列車・トンネル系の空気力学に関する模型実験、日本音響学会誌、63巻9号、2007
- 3) 田中靖幸、飯田雅宣、菊地勝浩：単純な形状の模型を用いてトンネル突入時の圧縮波形成を模擬する方法、日本機械学会論文集 (B編)、69巻683号、2003、pp.1607~1614