高速鉄道トンネル内に発生する退出波と反射波の三次元 CFD 解析

東海旅客鉄道	正会員	加藤	覚	大崎総合研究所	正会員	若原	敏裕
	正会員	山崎	幹男		正会員	新美	勝之
	正会員	梶川	徹		正会員	野澤岡	山二郎
		山本	敦仁				

1.はじめに

列車が高速でトンネル内を通過する際に大きな圧力変動がトンネル覆工に作用するが、その主な圧力変動として、 列車のトンネル突入時に発生する圧縮・膨張波(以降、突入波と呼ぶ)や列車側面の負圧力の他に、退出時に発生す る退出波、突入波がトンネル出口で反射する反射波について配慮する必要がある.昨年度の検討¹⁾では、退出波と反 射波は突入波と同じ大きさであるとして、トンネル内に発生する最大圧力を算定していた.しかし、突入と退出では 圧力波の発生機構が異なるほかに、トンネル出口で突入波が反射するときに一部はパルス状の圧力波となってトンネ ルの外に放出されるため、圧力変動量は反射の前後で異なると考えられる²⁾.そこで、本研究ではトンネル内に発生 する圧力変動量の予測の精度向上を目的として、列車がトンネルから退出するときに発生する退出波の解析、ならび にトンネル出口での突入波の反射解析を3次元数値流体解析(CFD)により行う.さらに、突入波の圧力変動量に対す る比をそれぞれ求めて、実トンネルにおける計測結果と比較する.

2.CFD 解析の概要

退出と反射の3次元 CFD は圧縮性の粘性流体を対象としており,離散化の取り扱いには Ogawa らの方法³⁾を用いている.図-1に突入計算の解析領域を示す.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,領域分割法により開空間,トンネル,列車まわり,列車近傍の4つの領域に分けて計算を行っている.物体表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.列車は3両編成で長さ約80m 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.

退出と反射のCFD解析は以下の方法により行う.(1)昨年度実施した列車の突入解析を行い(図-2.1a) 突入波が十 分に発達するまでトンネル内を伝播させる(b).(2)トンネル内についてのみ解析領域を反転させる(c).(3)突入波のト ンネル坑口での反射解析を行い(d),その大きさを算定する.(4)反射波が列車の十分後方に行った後,列車をトンネ ルより退出させて退出波を発生させる(e).(5)退出波が十分に発達した後,退出波の大きさを算定する.

3. 解析結果

ここで扱う圧力変動量ΔPは突入波の大きさΔP₄で基準化しており,大気圧P₄はゼロとなる.図-3に退出波や反射



keywords: 高速鉄道,数値解析,トンネル,反射波,退出波,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 波の瞬間的なトンネル軸方向の圧力分布(天頂部)を示す.(a)ではトンネル出口(距離0m)に突入波(正圧)が音速で向かうと同時に,後方から列車がトンネル出口方向に進んでいる.突入波の圧力変動の大きさは ΔP_A となる.その後,突入波はトンネル出口で反射することで位相が反転し, 負圧となってトンネルの奥に向かって進行する(b)反射波の圧力変動量 は ΔP_B に対応する.さらに,反射波と列車がすれ違い,大きな負圧が生じ る(c)列車がトンネル出口から退出することで,正圧の退出波が発生し, 音速でトンネル奥に向かっている.退出波の圧力変動量は ΔP_c で表される.

4. 計測結果との比較

CFD解析で得られた退出波と反射波の圧力変動量の突入波に対する割 合を実際のトンネルで計測された結果と比較する 突入波については昨年 度の検討結果を用いる.また,列車速度550km/hでCFD解析を行ってい るため,異なる列車速度に対しては,CFD解析結果により補正した理論 解⁴⁾を用いて算定した.退出波の圧力変動量ΔP_cについては,実測と解析 結果で良く一致しており,突入波と比べて若干小さくなる傾向にある.一 方,突入波の反射による圧力の低減率は次式のように定義される.

反射低減率: $K_{p} = (\Delta P_{A} - \Delta P_{B})/\Delta P_{A}$

CFD解析による反射低減率を上式から求めると約5%となり,実測結果の 回帰式を外挿して求めた値(約8%)と比べるとわずかに過少評価してい る.つまり,反射された圧力変動量を過大に評価していることになる.こ れは緩衝工細部の形状に対する再現性や突入波の性状の違いが影響し ているものと考えられる.CFD解析では約1km伝播した突入波が反射し ているのに対して,実測では数km伝播したものが退出している.突入波 は伝播に伴ってその性状を変化させていることから,突入波の伝播距離の 違いが反射低減率に影響している可能性がある.

5. まとめ

トンネル出口での列車の突入波の反射や列車退出時の圧力変動を定量的 に把握するためにCFDにより三次元解析を行った.その結果,退出波の 圧力変動の大きさは突入波と同程度であり実測結果とも良く一致してい た.また,突入波の反射低減率は約5%であり,実測値約8%と比べてわ ずかに過少評価している.

参考文献 1) 渡瀬久他,「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 - 」第55回土木学会年次学術講演会概要集,III-B088, 2000.2) 松尾一泰,「圧縮性流体力学」理工学社,1998.3) 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. 4) 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 - 4 退出時の圧力変動量の突入波,実測との比較



図-3 トンネル内圧力変動の時間変化



図-5 反射時の圧力低減量の実測との比較