

竖井型公路隧道自然通风过程的实验研究*

东南大学 南京工业大学 童 艳[☆]

东南大学 施明恒

解放军理工大学 茅靳丰

中铁二院工程集团有限公司 钟星灿

南京工业大学 龚延风

东南大学 李铁柱

摘要 采用量纲分析法得到竖井型公路隧道自然通风相似性准则。采用近似模拟的方法,在 1:10 缩尺模型隧道内进行了车辆单向运动实验。测试表明,进入自模区所要求的最小风速为 0.33 m/s,达到最小风速要求的 3 种有效车况为 $f0.8v_11.6$, $f0.8v_12$ 和 $f1.3v_12$ 。通过量纲一化的测试数据与理论计算结果的比较,验证了准则的正确性。

关键词 隧道 自然通风 相似理论 模型实验 风速

Experimental study of natural ventilation for road tunnels with shafts

By Tong Yan[★], Shi Mingheng, Mao Jinfeng, Zhong Xingcan, Gong Yanfeng and Li Tiezhu

Abstract Obtains a similarity criterion for natural ventilation in road tunnels with shafts by a dimensional analysis. With approximate modeling method, carries out experiments with unidirectional-moving vehicles in a 1:10 scale model tunnel. Testing results indicate that the required minimum air velocity is 0.33m/s for the self-simulating zone, and three effective vehicle-conditions are $f0.8v_11.6$, $f0.8v_12$ and $f1.3v_12$ for the minimum air velocity. Verifies the similarity criterion by comparing the dimensionless tested data with dimensionless theoretical results.

Keywords tunnel, natural ventilation, similarity theory, model experiment, air velocity

★ Southeast University, Nanjing, China

0

0 引言

市政公路隧道以浅埋短长度为特征,考虑将其设为多竖井型(顶部开口与外界相通),而仅利用车辆运动产生的交通风力在隧道出入口与竖井开口处形成自然风压,达到通风换气稀释内部污染空气的目的,如运营中的南京龙蟠中路隧道。

与无竖井自然通风公路隧道相比,多竖井的存在使得隧道更多地受到外界大气压力与风速的影响,形成自然风压的多样性,造成各竖井风速、各竖井间隧道主体风速均有所不同。由于该模式已逐

渐在国内出现,但如何合理设计与评价,相关的规范^[1]与研究成果不足以借鉴。进行隧道的现场实测往往难度很大,因此开展模型实验与理论计算的研究就成为必然。

1 模型实验的相似理论

1.1 导出相似准则

◎童艳,女,1973年9月生,博士研究生,副教授
210009 南京中山北路200号南京工业大学城市建设与安全
工程学院暖通工程系

(0) 13915964436

E-mail: tongyan_email@sina.com

收稿日期:2008-12-01

一次修回:2009-03-04

二次修回:2009-08-07

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50778041)

相似准则的导出主要有定律分析、方程分析、量纲分析 3 种方法^[2]。基于目前尚未掌握影响竖井型公路隧道自然通风现象的物理定律,同时缺乏对车况影响气流的机理的充分认识,故本文将采用量纲分析法导出竖井型公路隧道自然通风现象的相似准则以及确定原型与模型之间流动参数的换算关系。选用量纲分析法中具有普遍意义的 π 定理方法^[2]。实验研究建立在汽车行驶状况恒定、隧道内外无温差且气流一维不可压缩的基础上,主要研究车辆形状、速度及车间距对隧道主体及各竖井内气流运动状况的影响。记任意相邻两竖井间隧道主体为一段,则主体各段与各竖井的气流运动状况存在“耦合”现象^[3]。根据质量守恒原理,各竖井流速由其左右两侧的隧道主体流速决定,故实验中主要测试隧道主体各段气流速度 u_i 。

该物理现象受如下 13 个变量的综合影响:车辆速度 v_t 、汽车等效阻抗面积 A_m 、车间距 f 、车长 p 、各竖井当量直径 d_j 与高度 l_j 、隧道主体各段长度 L_i 与气流速度 u_i 、隧道主体当量直径 D 、空气运动黏度 ν 与密度 ρ 、隧道壁面粗糙度 K 、自然风作用引起的洞内风速 v_n ^[1],其中 $j=1,2,\dots,n,i=1,2,\dots,n+1,n$ 为竖井个数; v_n 并非洞外大气自然风速,它随时间和自然风向的变化而经常变动^[1]。函数关系式为

$$f(v_t, A_m, f, p, d_j, l_j, L_i, u_i, D, \nu, \rho, K, v_n) = 0 \quad (1)$$

这 13 个量中包含了几何学、运动学与动力学三类量纲,选几何学量 D 、运动学量 v_t 、动力学量 ρ 作为独立变量,则 π 项有 $13-3=10$ 个。根据量纲和谐原理,导出: $\pi_{1i} = u_i/v_t, \pi_2 = A_m/D^2, \pi_3 = f/D, \pi_4 = p/D, \pi_{5i} = L_i/D, \pi_{6j} = d_j/D, \pi_{7j} = l_j/D, \pi_8 = \nu/(v_t D), \pi_9 = K/D, \pi_{10} = v_n/v_t$ 。即

$$f(\pi_{1i}, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_{5i}, \pi_{6j}, \pi_{7j}, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}) = 0 \quad (2)$$

式中 $\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_{5i}, \pi_{6j}, \pi_{7j}, \pi_9$ 均为几何相似数, π_8 为以车辆速度 v_t 为特征速度的雷诺数 Re_{v_t} 的倒数。以 π_{1i} 作为待定准则数组, $\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_{5i}, \pi_{6j}, \pi_{7j}, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}$ 作为定型准则数群,则

$$\frac{u_i}{v_t} = f(\text{几何相似数}, Re_{v_t}, \frac{v_n}{v_t}) \quad (3)$$

在保证原型与模型几何相似的前提下,只要做到两型 Re_{v_t} 与 v_n/v_t 分别相等,则模型与原型 u_i/v_t 值相等。借助 u_i/v_t 可方便地将模型的流动参数

换算至原型参数。

1.2 近似模拟

采用缩小比尺的模型实验中,几何相似容易满足,但要使模型与原型的 Re_{v_t} 保持相等却很难,例如在几何相似比达到 1:10 的情况下,空气运动黏度 ν 近似不变,则模型车辆速度要求达到原型车辆速度的 10 倍,这很难做到。当以管内气体流速 u 为特征速度的 Re_u 大于某临界值 Re_c (通常称为第二临界值)的时候,流体进入充分发展的湍流粗糙区,其流动状态和流速分布已不再随 Re_u 的增大而改变^[4]。沿程阻力系数 λ 不再与 Re_u 有关,而只取决于相对粗糙度 K/D ,此时沿程阻力损失只与流速的平方成正比,即流动进入“第二自模区”。同时,除自然风外,车辆运动是产生竖井型自然通风隧道气流运动的另一根本原因。只要车况(车型、车速、车间距)能够保证隧道各段气流恒定处于自模区,则模型与原型相似并不要求 Re_{v_t} 相等^[5-6]。在自模区,式(3)演变为

$$\frac{u_i}{v_t} = f(\text{几何相似数}, v_n/v_t) \quad (4)$$

原型隧道断面尺寸大,且运动的车辆对气流产生较大扰动,可判定气流均处于自模区状态^[1]。而在缩小比尺的模型中,为确保自模区状态,正式实验前可实际测试出模型进入自模区所需的最小风速^[7]。实验中测试出符合最小风速要求的车况,测试出符合车况下的流动参数,作为有效数据留待相似分析。这样在原型与模型几何相似的前提下,车况实验保证了模型进入自模区的要求,当两型 v_n/v_t 相等时, u_i/v_t 应自动相等,两型流动参数的换算亦可实现。

2 实验方案与过程

在多方参与下,解放军理工大学工程兵学院 2007 年 8—12 月负责组织实施了模型实验。

2.1 模型制作

实验原型为单向行驶的三车道隧道,截面尺寸为 12 m×5 m。本模型实验采用 1:10 的几何相似比,选用透明的 PS 有机塑料板,制作成截面尺寸为 1.2 m×0.5 m 的模型隧道。另外,原型车辆等效阻抗面积为 2.1 m²,车长 2.4 m,实验选用了诸多尺寸为 14 cm×15 cm×24 cm 的遥控汽车。为保证有车辆不断在模型隧道内行驶,采用胶合板及铁皮制作了三条穿越隧道主体的轨道回路,并按

照车间距的要求,将车辆逐一排列在轨道上。借助遥控器的指挥,所有车辆会循环不断地依次进入隧道并离开,如图 1 所示。



图 1 模型隧道实体

原型隧道每个竖井长 8 m,宽 3 m,高 4 m,且内部沿长度方向均匀设置 3 个隔板。按几何比例尺 1:10 的要求,将有机塑料板制作成多个长 0.3 m,宽 0.2 m,高 0.4 m 且一端留有法兰的模型竖井。在模型隧道顶部表面相应于原型隧道竖井的位置,切割出截面尺寸为 0.3 m×0.2 m 的矩形,靠法兰将模型竖井安放在切割处上方,并用胶带固定,如图 2 所示。每 4 个模型竖井紧密相靠形成一组,以模型竖井的长度 0.3 m 对应原型竖井的宽度 3 m,以 4 个模型竖井的总宽度 0.8 m(4×0.2 m)对应原型竖井的长度 8 m,这样一组模型竖井



图 2 模型竖井实体

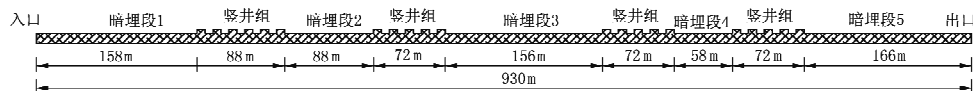


图 4 原型隧道纵向布置图

限于场地,模型隧道长度只能做到 40 m,与 930 m 原型隧道相比,不符合 1:10 的长度比例要求。但对按 1:10 比例缩小后的 93 m 模型隧道,本实验首先将其划分为 4 段,起止点如图 5 所示,各段长度均小于或近似等于 40 m;然后分别制作这 4 段模型隧道,布置风速探头于各暗埋段及相邻两竖井间的隧道主体断面,测试多种车况下 4 段隧道各断面风速值,称为分段实验,如实验 1、实验 2、实验 3、实验

就对应一个原型竖井。

2.2 模型自模区沿程阻力系数的测定

采用变频风机对一段无分支模型隧道吹风,通过不断改变风机频率,在隧道内引起速度不同的风,记录风速 u 改变时长 l 的隧道两端的压差 Δp ,经由达西公式 $\Delta p = \lambda(l/D)(\rho u^2/2)$ 计算得到沿程阻力系数 λ 。整理出 $Re-\lambda$ 的关系曲线,如图 3 所示。

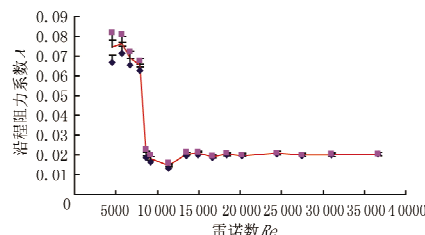


图 3 模型隧道的 $Re-\lambda$ 关系曲线

由图 3 可见,当雷诺数大于 15 000 后, λ 趋于不变,恒为 0.021,表明模型隧道内气流已进入自模区且 $Re_c=15\ 000$,同时计算得到主体各段进入自模区所需的最小风速 $v_c=0.33\text{ m/s}$ 。分析可见,模型材料虽为粗糙度较小的有机玻璃板,但内部轨道与连接件对气流产生扰动,造成模型在较小的雷诺数时便已进入自模区;模型隧道与混凝土壁面的原型隧道 $\lambda^{[1]}$ 相等,均为 0.021,则两者平均相对粗糙度 K/D 达到相等,亦即实现了完全的几何相似。

2.3 模型的分段与缝合

原型隧道纵向布置如图 4 所示,全长 930 m,由 5 个暗埋段与 4 组竖井组成,沿行车方向竖井组个数分别为 6,5,5,5,共 21 个,每组竖井中相邻两个竖井间距 8 m。各竖井将隧道主体分割为 22 段。

4. 4 组实验形成 8 个出入口,造成全长模型隧道气流较多地受到外界大气压力与风速影响,影响测试结果的准确性。为削弱影响,相邻两组实验均有部分段长重合,如实验 1 的后半段为实验 2 的前半段;最后将每组实验的测试风速组合成长模型隧道风速,由于重合段风速均存在两次测试值,且本实验研究数据表明重合段风速在各组实验中相差不大,故将其算术平均值作为最终结果,称为缝合。

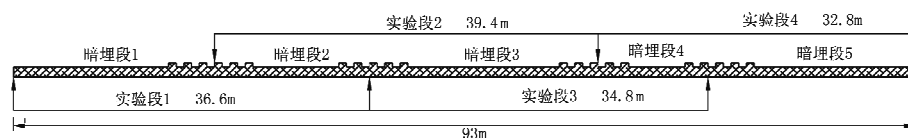


图5 模型隧道轴向分段实验图

2.4 自模区车况的测试

测试目的是获得模型隧道各段气流进入自模区所需车况。实验分别对 0.8 m 与 1.3 m 两种车间距及 1.6 m/s 与 2 m/s 两种车速,共 4 种车况进行测试。图 6 为 4 种车况下缝合后的 93 m 模型隧道各段断面风速。

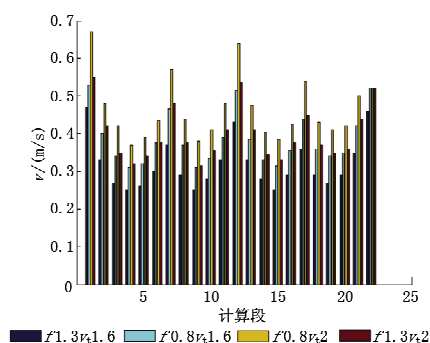


图6 93 m 模型隧道 4 种车况下各断面风速

由图 6 可见, $f1.3v1.6$ 车况的车间距最大而车速最小,交通风力不足,造成隧道某些段气流速度低于 0.33 m/s,不满足近似模拟的条件,不能留作相似分析的有效数据。 $f0.8v2$ 车况的车间距最小而车速最大,造成全隧道各段气流速度均最大。 $f0.8v1.6$, $f0.8v2$, $f1.3v2$ 三种车况下的全隧道各段气流速度均大于 0.33 m/s,表明近似模拟的条件已达到可保留。

3 实验结果与理论计算结果的比较

3.1 实验结果

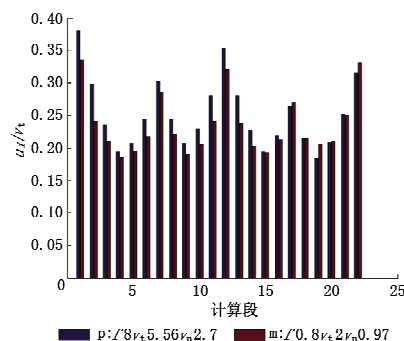
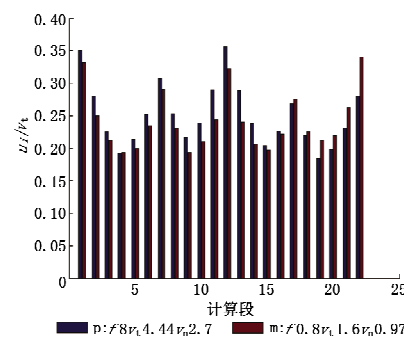
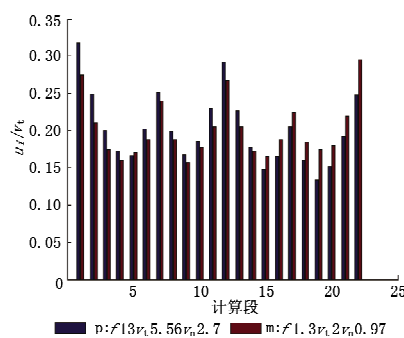
对图 5 所示的模型隧道,将图 6 中 $f0.8v1.6$, $f0.8v2$, $f1.3v2$ 三种车况下隧道各段风速整理成 u_i/v_t 的形式,见图 7~9。其中 m 表示模型实验。实验中外界环境风速的测试平均值为 0.2 m/s,隧道内风速 v_n 的测试平均值为 0.97 m/s。

3.2 理论计算原理与方法

单向行驶隧道内,汽车产生的交通风(活塞风)力 Δp_{ti} 由下式计算^[1]:

$$\Delta p_{ti} = \frac{A_m}{A_r} \frac{\rho}{2} h_i (v_t - u_i) |v_t - u_i| \quad (5)$$

式中 Δp_{ti} 为隧道 i 段交通风力, N/m²; A_r 为隧道

图7 原型 $f8v1.56v_n2.7$ 与模型 $f0.8v1.6v_n0.97$ 下的 u_i/v_t 图8 原型 $f8v1.44v_n2.7$ 与模型 $f0.8v1.6v_n0.97$ 下的 u_i/v_t 图9 原型 $f13v1.56v_n2.7$ 与模型 $f1.3v1.6v_n0.97$ 下的 u_i/v_t

净空断面积, m²; 令 u_i 沿行车方向为“+”, 反之为“-”; h_i 为 i 段车辆数, 辆, $n_i = nL_i / \sum L_i$, 其中 n 为全隧道车辆数, $n = (\sum L_i + f) / (p + f)$; 将行车方向取为“+”, 则 u_i 可能为“+”, 也可能为“-”, 为体现 Δp_{ti} 的方向性, 将文献[1]中的 $(v_t -$

$u_i)^2$ 改写为 $(v_t - u_i) |v_t - u_i|$ 。另外,外界环境风力作为逆向阻力,它所引起的车道风速 v_n 通常为 $2 \sim 3 \text{ m/s}^{[1]}$ 。

根据质量守恒原理,对 i 段有

$$u_i A_r = u_{i-1} A_r + v_{i-1} f_0 \quad (6)$$

式中 f_0 为开孔面积, m^2 ; v_{i-1} 为 $i-1$ 段竖井内气流速度,当气体流出开孔时, v_{i-1} 取“—”,反之取“+”。

又根据能量守恒原理,对全隧道有

$$\sum_{i=1}^m \Delta p_{ti} + \sum_{i=1}^m (\Delta p_{yi} + \Delta p_{ji}) = 0 \quad (7)$$

式中 Δp_{yi} 为 i 段沿程阻力, $\Delta p_{yi} = \lambda_i \frac{l_i}{d_e} \frac{\rho}{2} (u_i |u_i| + v_n^2)$; Δp_{ji} 为 i 段局部阻力, $\Delta p_{ji} = \zeta_i \frac{\rho}{2} (u_i |u_i| + v_n^2)$; d_e 为隧道断面当量直径; λ_i, l_i, ζ_i 分别为 i 段的沿程阻力系数、长度、局部阻力系数。

i 竖井与隧道主体交界处总压力 Δp_{zi} 等于从隧道入(出)口处算起到该处的所有交通风力与流动阻力的叠加,即

$$\Delta p_{zi} = \sum_{k=1}^i \Delta p_{tk} + \sum_{k=1}^i (\Delta p_{yk} + \Delta p_{jk}) \quad (8)$$

同时, Δp_{zi} 作用在交界处,提供空气流入(出) i 竖井的动力,与竖井内空气流动的总阻力损失相平衡。 $\Delta p_{zi} > 0$, 空气流出; $\Delta p_{zi} < 0$, 空气流入。即

$$\Delta p_{zi} = - \frac{\rho}{2} v_i |v_i| \left(\lambda_{si} \frac{h_{si}}{d_{si}} + \zeta_{si} \right) \quad (9)$$

式中 $\lambda_{si}, h_{si}, d_{si}, \zeta_{si}$ 分别为 i 竖井沿程阻力系数、高度、当量直径、包括出口损失在内的局部阻力系数。在已定隧道结构与车况下,联立式(5)~(9)即可建立以 u_i 为求解变量的 m 个方程构成的方程组。上述方程组高度非线性,可采用拟牛顿法求其一组实数解^[8]。

针对本文原型隧道与原型车辆,取 $v_n = 2.7 \text{ m/s}$, $\lambda_i = \lambda = 0.021$, 计算了 $f8v_4.44, f8v_5.56, f13v_5.56$ 三种车况下全隧道各段气流流速,并整理成 u_i/v_t , 见图 7~9。其中“p”表示对原型的模拟计算。

3.3 比较与分析

各图中的原型与模型均几何相似,同时 v_n/v_t 相等,气流同时进入自模区,相似的充分条件成立;各图中两型待定准则 u_i/v_t 基本一致,相似的必要

条件达到。

图 7~9 中的 u_i/v_t 均为正且大小呈现出周期性的波动现象;图 7,8 具有相同的车间距比例,但图 7 的 v_n/v_t 略小,各段 u_i/v_t 亦略小;图 7,9 具有相同的 v_n/v_t ,但图 7 的车间距比例较小,活塞效应较强,表现为隧道各段 u_i/v_t 较大。

由于理论计算时 v_n, ζ 恒定,造成计算结果与实验值有一定偏差;模型实验的分段与缝合造成测试值与实际值有一定偏离,亦与理论计算结果产生偏差。

4 结论

4.1 采用量纲分析法得到竖井型公路隧道自然通风相似性准则为:自模区下, $u_i/v_t = f(\text{几何相似数}, v_n/v_t)$ 。

4.2 研制了 1:10 缩尺模型隧道与模型车辆单向运动系统。实际测试出模型主体各段进入自模区所需的最小风速为 0.33 m/s 。开展了 $f1.3v_1.6, f0.8v_1.6, f0.8v_2, f1.3v_2$ 四种车况实验,风速测试结果表明 $f0.8v_1.6, f0.8v_2, f1.3v_2$ 车况均能保证模型主体各段进入自模区。

4.3 建立了竖井型公路隧道自然通风理论计算原理与方法,对比了模型实验结果与理论计算结果,两者吻合较好,表明本文所确定的相似准则正确。

参考文献:

- [1] 交通部重庆公路科学研究所. JTJ 026.1—1999 公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2000
- [2] 徐挺. 相似方法及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995
- [3] 钟星灿,高慧翔,龚波. 交通风力自然通风作用原理探析[J]. 铁道工程学报,2006(8)
- [4] 周谟仁. 流体力学泵与风机[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,1990
- [5] 王英学,骆建军,李伦贵,等. 高速列车模型试验装置及相似特征分析[J]. 西南交通大学学报,2004(2)
- [6] 王英学,高波,赵文成,等. 高速列车进出隧道空气动力学特征模型实验分析[J]. 流体力学实验与测量,2004(9)
- [7] 钟星灿,龚延风,童艳. 公路隧道自然通风模型实验相似性研究[J]. 暖通空调,2008,38(5):13-17,64
- [8] 徐士良. 常用算法程序集(C语言描述)[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2004