



CFD 在隧道安全中的应用

一、简介：

在早年的隧道设计中，通风工程师们主要关注于一些普通的通风问题。然而近十年来，随着机动车排放物的明显减少以及安全意识的提高，他们的注意力逐渐转向了隧道中的防火安全问题。而这种趋势更是由于几场灾难性隧道火灾事件的发生变得越发强烈。这里，我们只列举其中最严重的几场事故：Mont Blanc (1999 年 3 月 24 日)；Tauern (1999 年 5 月 29 日)；Kitzsteinhorn funicular Kaprun (2000 年 11 月 11 日)。

显然，隧道通风问题是使隧道设计达到足够安全水准要求的关键性因素之一。通风工程师必须要设计出一种符合安全要求的，配备一系列其他设施的通风系统。传统的设计方法是基于零维或一维的稳态法，这些方法已被证明能够估算出满足设计要求的隧道通风情况。但是这些方法不能够回答一些与安全问题有关的问题，例如烟气的层化现象、能见度范围以及热传导等情况。与一些技术性比较强的行业（如航空、旋转机械等领域）相比，在隧道安全工程中使用 CFD 工具与方法还仅是一个开始。在经过了一段验证发展期后，CFD 已经成熟，并且已经可以应用于隧道问题的研究中。如果应用恰当，CFD 将在工程设计阶段以及设计验证阶段具有很大的潜力，使我们能够获得对问题重要而深入的观察以及对物理问题更好的理解。

本文将展示 HBI(作者所在单位)应用 CFD 模拟所作的一些基本工作，并描述近来在隧道安全工程的一些典型应用。

二、CFD 在隧道安全问题中的应用

在公路和铁路隧道中发生的与安全有关的事故中，火灾占据了主要地位。在发生火灾的情况下，人们的安全主要依赖于一系列隧道设备和安全保障系统，尤其是通风和排烟系统。这主要取决于系统能否为以下两种情况提供最好的可能条件：一是人们在火灾发生的第一时间内得以疏散；二是随后赶到的消防队进入现场灭火。进一步说，在涉及到对其它基础设施的保护问题上，远不如安全问题重要。通风系统的基本功能是确保能够对烟气进行有效的处理控制。几种基本的隧道通风系统如下：

1. 自然通风，没有影响烟气传播的可能行
2. 纵向通风，可以控制纵向的烟气传播，不能将烟气抽出
3. 局部抽烟的通风，通常是通过独立的排烟管和远程控制的气流调节器来实现的

对特定隧道的通风系统的选取取决于隧道的特点，尤其是隧道的长度、坡度和交通状况等因素。

在隧道通风的设计中有很多工具可以使用，根据不同的目的和用途，选用不同的 0~3 维的工具，具体情况见表 1。由于 3 维分析所耗费的时间太多，设计过程中使用的工具大多为 0 维和 1 维工具。

CFD 在设计验证阶段非常有用，对设计效果和几种可选排烟控制系统的相对优点进行估测时它对我们的帮助作用是无可比拟的。CFD 分析将对以下问题获得深入的了解：

- 能见度情况
- 烟气和有害气体浓度



- 温度和辐射
同时 CFD 对特定部件或新的通风概念进行分析方面的作用也是非常重要的。

Tools	Design	Design Verification	Basic Development
0D			
1D steady			
1D unsteady			
(2D) - 3D			

表1 隧道通风问题中的常用工具，黑色代表一般方式，灰色代表使用频率在增加

三、计算方法

3.1 简介

CFD 在隧道安全工程中的应用通常需要很短的时间给出结果。而另一方面，其精度的要求比其他领域的应用要低。这是由于，在计算中需要输入一些重要参数，如：交通情况，而这些参数根据不同的情况会有很大的差异，因此要对每种情况都进行模拟的话，计算所需要的时间将会是一个天文数字。

3.2 计算区域

在大多数情况下并不需要将整个隧道都作为计算域。因为隧道极大的长宽比将导致巨大的网格数量，根据实际情况，计算中只需要将隧道中的某一段作为计算域即可，计算的边界条件(一般来说是非稳态的)由一维工具得到，这一点已经得到 SPRINT[1];THERMOTUN[2] 的验证。

3.3 物理模型

燃烧过程

燃烧过程强烈依赖于燃烧车辆及其车载货物的实际情况，而且每一处火苗都有其运动方式，这种运动方式又依赖于火源、隧道和交通事故情况。所以工程师不应该只建立单个火源的模型。一种更有用的假设认为在处理火源时，把其处理为指定热释放率的热源，也就是说在一段时间内热源每秒钟所散发出的热量是一个恒定值。燃烧过程中在建模的时候，火源成为一个指定质量和能量密度的热的燃烧产物形成的源。其他的假设在这里仍然可以使用(如涡耗散模型，壁面为热流密度或定温的假设等)。

比较典型的例子是在隧道中机动车着火时的发热率[4]，具体情况如下：

- 轿车 2.5-5MW
- 空公共汽车 15-20MW
- 载着燃烧货物的卡车 20-30MW
- 载着危险货物的卡车 100MW



湍流模型

数值模拟中得到的一个重要的结果，就是根据温度和浓度分布得到高温气体的层化情况，在这个方面湍流 k- 模型得到的结果中烟气和空气的高温混合层的厚度很大，不适合在这里使用。根据得到的实验数据，我们选用考虑浮升力的 RNG k- 模型作为我们的湍流模型。

辐射

隧道火灾中的辐射一般都是局部问题，它很大程度上依赖于火的情况和局部的隧道情况。经验表明大概有 20%-50% 的热能以辐射的形式传给隧道壁面。根据应用情况，通常情况下我们在计算时不考虑辐射换热，而是通过降低发热率和热边界条件来代替辐射能，降低的热量一般假设为 30% 的辐射换热量。

能见度

可见度通过质量光学密度 D_m 来估计[6]，当 $D_m=0.25\text{m}^2/\text{g}$ 的时候认为可见度的临界值。

对有害气体的暴露程度

一些其它的估计危害用的工程模型见[7]

四、验证

目前为止，关于隧道火灾实验做的最好，数据最完整的是 1995 年在 Memorial 隧道内所做的实验，验证过程将以举例的方式进行。

在分析排烟管理系统时，我们发现其中一个非常重要的问题就是，在隧道内有烟的逆流，也就是说烟气的流动方向与隧道通风的主方向相反。这种情况在复线、长通道内的烟气流动问题变得更加重要。

我们做了几种测试来验证“肯尼迪”公式，这个公式是在计算 Memorial 隧道内的临界速度时所使用的一个简单的表达式。通过再现结果，我们可以

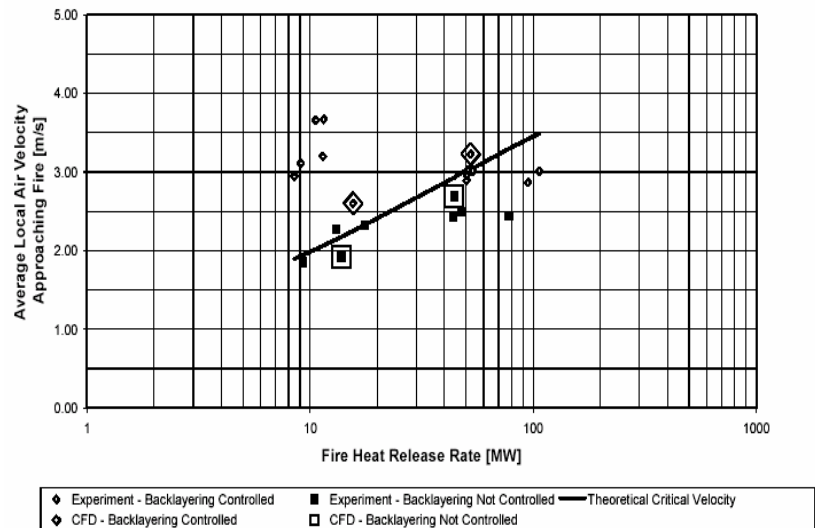


图1 临界速度-实验解[3]，“肯尼迪”公式[5]以及数值计算结果的比较，火焰强度为15-50MW，大致范围包括小车的燃烧及载重货车的燃烧

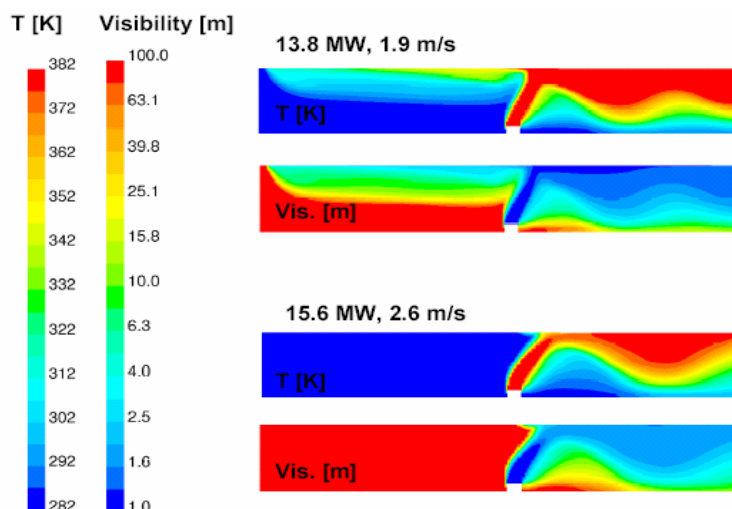


图 2 在两种15MW的情况下，温度及可见度分布状况，通风方向从左至右，在图示中垂直方向以水平方向2w.r.t的倍数增加



进一步对公式和数值计算结果进行验证。再现的结果表示在图1、2中，在实验中得到的结果可以被很好的再现出来。

五、应用

使用CFD来模拟隧道的安全问题越来越受到人们的欢迎，我们举其中几个例子来描述一下CFD的应用范围。

- 在隧道中纵向通风的排烟管理系统
- 分析在隧道交叉口烟的传播
- 铁路隧道中防火的通风系统
- 火车站的防火安全方法
- 公路隧道安全中的应用

六、公路隧道安全中的应用

6.1 纵向通风中的排烟控制

在纵向通风系统中的一个关键问题就是要估计控制烟气逆流的临界速度，如果超过了临界速度，烟气将与通风方向相反进行传播。一般来说在隧道内部通风方向的上游比较安全，可以进行人员疏散，以及便于消防队员进行救火，如果发生烟的逆流，上游也会发生危险。临界速度的近似值可以根据工程师们普遍接受的公式[5][4]计算得到。

目的

这次研究的目的是验证一个特殊隧道内的临界速度，隧道位于韩国的Yosu城，隧道名称为Su Chun公路隧道。

该隧道的有关参数如下：

隧道长度：	2000m，分为两条通路
隧道斜度：	10%
隧道交叉口：	68m ²
交通情况：	复线，两条车道
通风情况：	纵向通风（机械）

临界速度：

根据“肯尼迪”公式得到的该通道内的临界速度显示与图3中

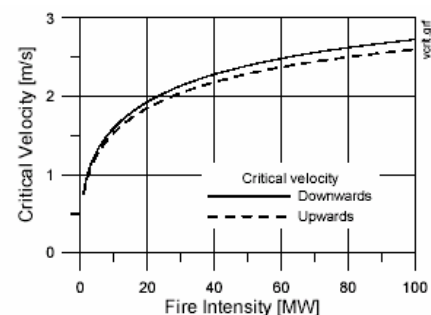


图3 向上及向下的临界速度

计算设置

计算中的一些设置以及边界条件的设定如下：

- 进口的位置在 $z=-100\text{m}$ 的地方，规定一定的速度值，湍流强度以及温度值
- 载重货车的尺寸为 $3 \times 4 \times 10\text{m}$ ，位置位于 $z=0\text{m}$ 的右手方向的车道上
- 流动的出口位置位于 $z=100\text{m}$ 的地方
- 所有的隧道表面都是绝热的



- 燃烧火焰的强度为：30 和 100MW
- 没有考虑辐射的影响，根据经验火焰热量的 1/3 会直接辐射到隧道的墙壁上。
- 纵向通风，通风速度为 1.8 和 2.5m/s

网格

我们建立了数量为 81410 的非结构化，四边形网格来进行模拟。网格示意图见图 4，在临界区域的网格数量局部细化，加密，这样既可以得到合理的解，由可以节省网格数目和计算时间。

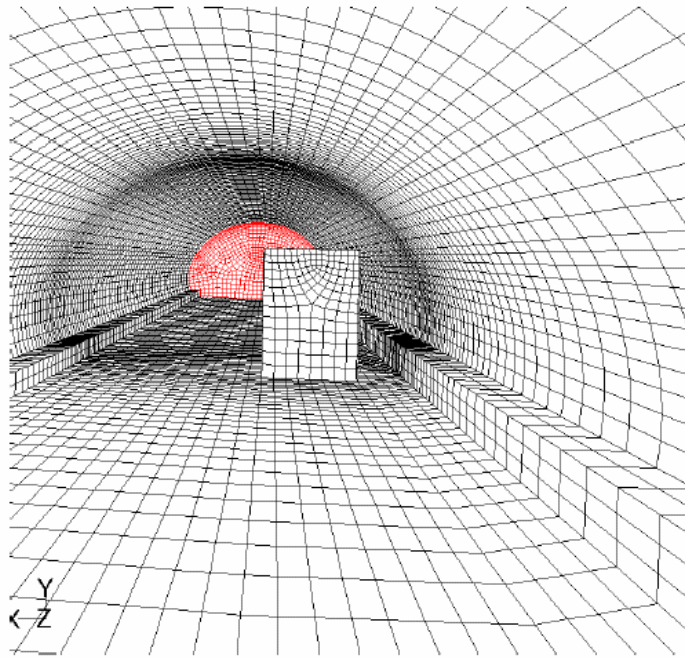


图 4 计算网格，在计算区域内部所看到的表面网格（顺着车流方向看去）

结果与分析

从排烟管理的角度来看，向下的方向一般是最危险的。图 5 所时的结果中我们可以看到，在 30MW 的燃烧情况，通风速度分别为 1.8 和 2.0m/s 时，都有一些轻微的逆流出现，但是在通风速度为 2.5m/s 的时候，逆流得到了完全控制。接下来的模拟中我们得到在 100MW 的燃烧情况下，通风速度为 2.5m/s 时，也只有一些轻微的逆流。因此图 3 中所示的结果得到了验证。另外我们还发现了一个有趣的结果，在通风速度为 2.5m/s 时，在下游的高热燃烧产物能够形成一个合理的热层次。

于是通风系统的设计在通风速度为 2.5m/s 的基础上进行，这样就可以对烟的逆流进行完全的控制，从而使得上游方向的人可以得到安全的疏散，而不会被下游形成的火和烟所伤害。

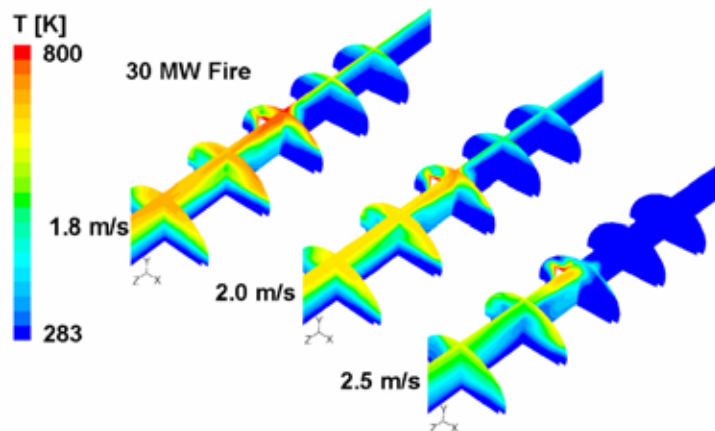


图 5 纵向通风速度为 1.8，2.0，2.5m/s 时，燃烧为 30MW 的情况下，沿车行路线的向下方向上的温度分布（K），分段区的选取为 $z=-20, -10, 0$ （着火点位置）， $10, 20m$

6.2 在隧道交叉口防止烟的扩散

了解两条管路的隧道对于隧道安全问题来说尤其重要。在两条管路的隧道交叉口处，一般配备有基本的安全设施，从而可以使人们在紧急的情况下通过交叉口从危险的管路进入另一条平行的安全管路，每组交叉口的距离一般为 200-300 米。在交叉口处一般设有隔热门。



当步行者或车辆穿过交叉口的時候，門會被打開，這時就要求在安全隧道管路里面的壓力應該足夠的高，這樣就可以阻止煙氣向安全的管路擴散。因為這是一個有關安全的基本部分，而這一部份又缺乏工程上的關聯式可以計算，我們在這裡只有使用 CFD 工具才可以進行模擬。同時因為供步行者通過的區域，其危險性較車輛通過區域的危險性來的小，我們只對車輛通過的交叉部分進行研究。

目的

這次研究的對象是韓國的另一條隧道，位於 JeonJu-Ham Yang 高速公路旁的 Chin-Gok 公路隧道，研究的目的是得到為了阻止煙氣通過開著的門進入平行安全隧道管路，所要達到的一些必要情況。

隧道的相关参数如下：

- 隧道长度：2750m,两个管路
- 隧道斜度：0.4%
- 交叉口：73m²
- 交通情况：复线，两条车道
- 通风情况：纵向通风（机械）

计算设置

这里的计算设置与上一个计算中的基本相同，有所不同的是，交叉口位于燃烧着的车辆的下游方向 25m 远处。燃烧强度 30MW，燃烧隧道管路内的通风速度为 2.5m/s，正如上一个算例中得到的结果一样，这个速度值可以完全控制烟的逆流。

网格

这一次非结构化的网格数量为 93057 个，网格形状有四边形和三角形两种，见图 6.A。在交叉口处采用三角形网格是为了更好的符合和体现交叉口处的几何形状。

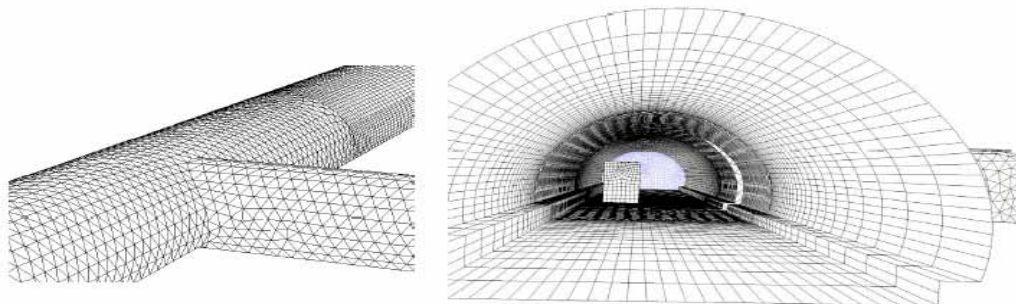


图6 表面网格

结果与讨论

计算所采用的燃烧强度为 30 和 100MW，30MW 情况下的结果示于图 7 中。

正如图 7 中所示，在 30MW 的情况下，当交叉口处的风速为 2m/s 的时候，通过交叉口处的烟气可以被完全控制，1m/s 的时候则不行。当燃烧强度为 100MW，（结果没有图示出来）交叉口的风速为 2m/s 的时候，烟气被控制的比较好，在风速为 2.5m/s 的时候烟气可以得到完全的控制。

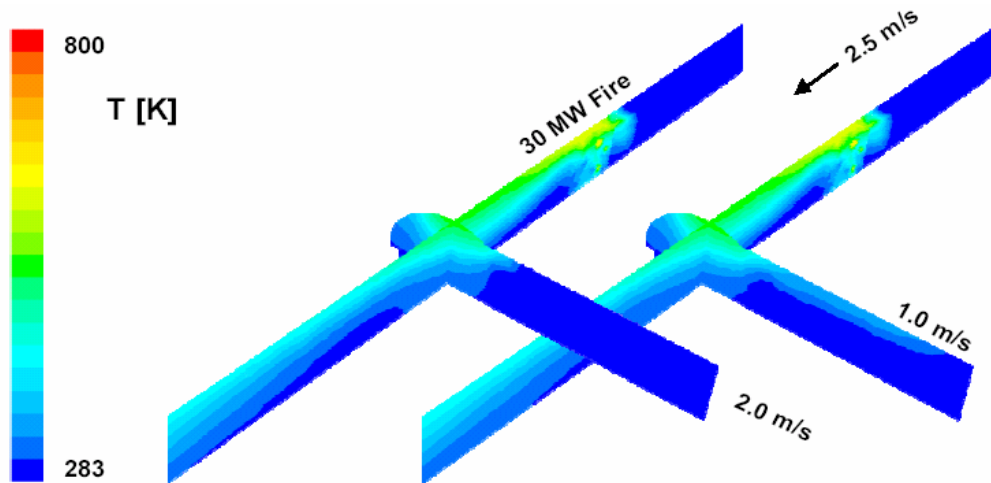


图7 交叉口处的回流控制图,30MW 强度,隧道内的风速为2.5m/s 交叉口处的风速分别为1.5和2m/s

七、铁路隧道安全问题中的应用

7.1 铁路隧道防火通风

在铁路隧道中的安全问题与公路隧道中的安全问题有着显著的不同。一个非常特殊的问题就是铁路隧道中要疏散的人群数目远远大于公路隧道中的人群数目。所以在铁路隧道安全问题中在疏散路线上保证烟气的控制就变得尤为重要。

目的

在先使用一维工具进行推导研究以后,我们使用 CFD 来得到更加详细的有关隧道内的温度,烟气的浓度、及可见度的情况,研究的目的是得到在逃生、灭火过程中更加有价值的预测。

隧道描述

铁路隧道的有关参数如下:

- 隧道内的两根管路由带应急门的隔离墙隔开,隔离墙的长度为 150m,火车的两边均有逃生道。
- 长度 7160 米
- 每个管路的空闲区域为 49 平方米
- 在隧道管路内配有排风扇及感应装置
- 在相隔分布近 2000 米的地方有三个应急舱

紧急情况及计算设定

紧急情况下,我们假设有一辆燃烧的列车以 300m/s 的高速进入管路,然后紧急刹车启动,在减速到接近 1.1m/s 的时候列车停止在隧道的中央,乘客离开列车通过应急门逃入安全的管路,或者更远一点的应急舱。



模拟随列车进入隧道开始,过程大概经历 8 分钟,这其中包括乘客的疏散时间。

列车及火焰的有关参数如下:

- 列车长度 400 米
- 火焰总强度 40MW, 其中对流部分大概为 30MW
- 着火部分长 25 米, 一节车厢, 位于列车的中部
- 列车容量 600 人
- 计算域为 800 米长

速度边界条件使用图 8 中的数据, 最终的速度值为 3.4m/s

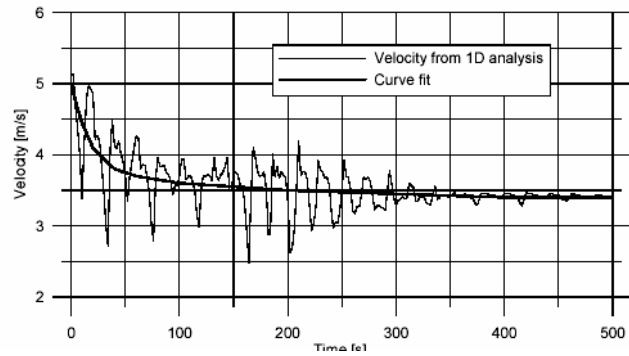


图8 速度随时间的变化曲线

网格

网格为四面体网格数量在 105000 左右, 见图 9。

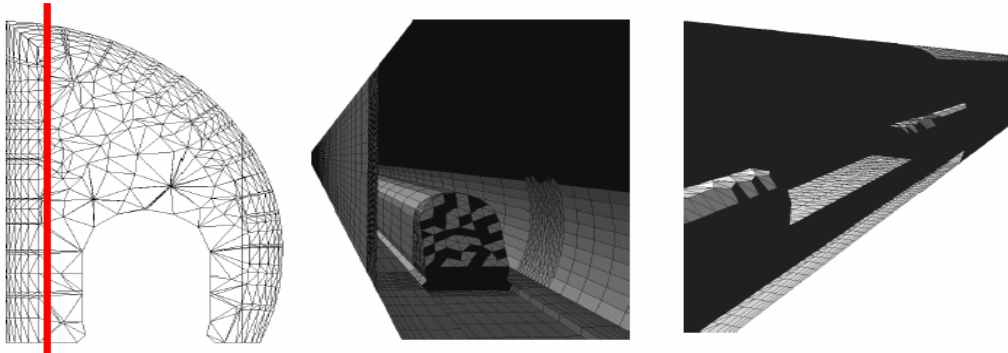


图9 计算网格, 位于从左至右的横断面上, 另外两图为火车末尾的视图及着火车厢的视图

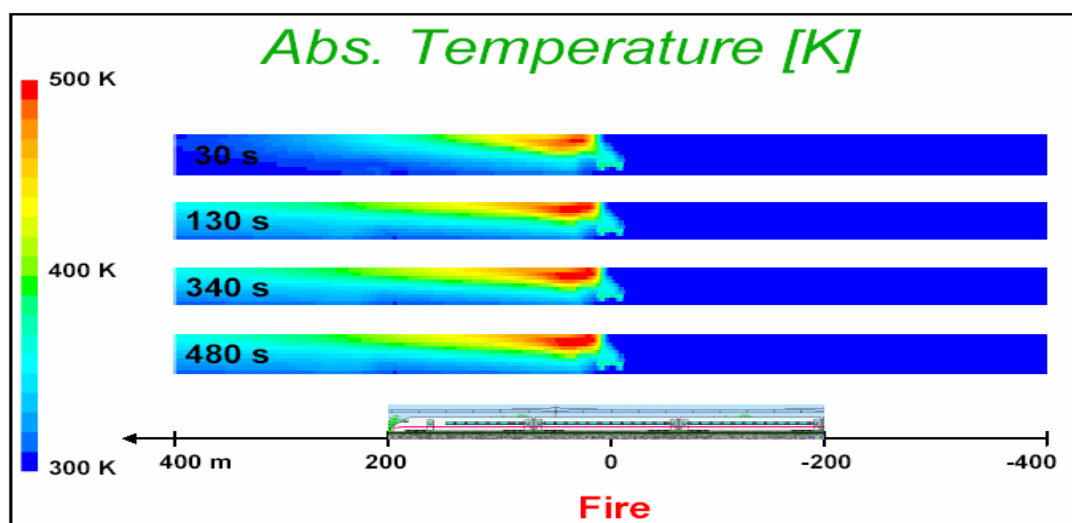


图10 随时间变化的温度分布

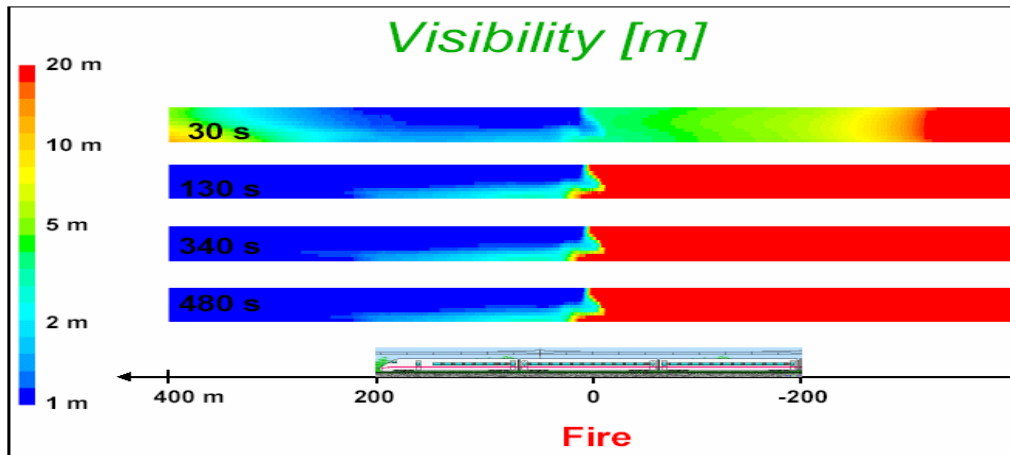


图 11 随时间变化的可见度分布

结果与分析

我们在一个横断面上展示结果，该面位于列车和隔离墙之间（图 9 中的左图），展示的时刻如下（列车在 0 秒的时候停止）：

- 30s 第一个乘客离开列车
- 130s 应急门打开
- 340s 最后一个乘客离开列车后的 10 秒钟
- 480s 最后一个乘客离开出事管路

一些有关温度和可见度的结果示于图 10，11 中。

从本次研究中得到的结论大致可以归结为以下几点：

- 在火焰的上游方向，通风系统可以提供足够的安全系数。从列车进入出事通道后，乘客在一定时间内可以到达应急门。
- 在火焰的下游方向，形成的热层足够在出事管路较低的位置形成温度较低的分层，其高度大约为 2-3 米。这个位置的温度大于为 50 摄氏度，可见度大约为 2 米。在更远的下游，可见度降为 1 米，这时候乘客就会由于可见度的下降而受浓烟的伤害，而导致生命危险。
- 稳态的情况在 2-3 分钟以后达到。

7.2 火车站的防火安全观念

有效的设置应急逃离站要求更加深入的应用 CFD 的模拟。相关的例子我们可以参见 Tarada 等人[9]所作的模拟，他们对于一个 16.3 公里长的铁路隧道进行了模拟。

这个火车站的设计见图 12。在着火的情况下，烟从出事的隧道中散出，新风从旁边一条安全的隧道进入，用来控制烟气的扩散。乘客可以通过 8 个交叉口逃向安全的隧道。模拟中燃烧强度为 10MW，排烟通风量为 250 立方米每秒。

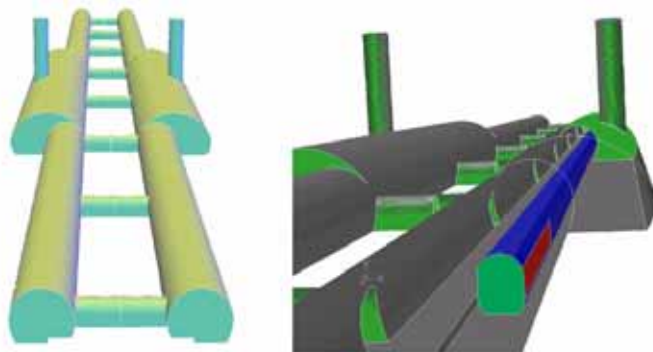


图 12 带由交叉回路火车站设计情况



研究的结果表明,排烟系统工作良好,可以避免烟气通过交叉口的传播进入安全隧道。这个研究的详细情况列在文献[9]中。

八、结论

经过一系列的修正,CFD 已经到达了成熟期,并且可以应用于模拟隧道通风问题。事实上,CFD 工具在发现新问题和提供更好的物理问题理解上具有更大的潜力。同时也可以用在设计和设计较验阶段。如果使用正确的话,CFD 将会对隧道安全问题做出更大的贡献。

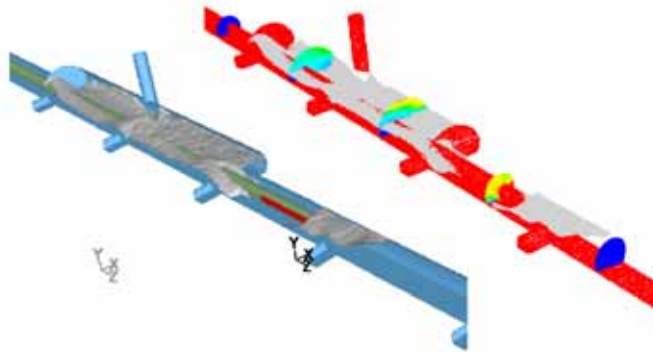


图13 在带有交叉回路火车站内的烟气传播,左图为烟的控制(可见度限制在5米);右图为可见度分布(蓝色表示好,红色表示很差)

参考文献：

- [1] I. Riess, M. Bettelini, R. Brandt: SPRINT - a design tool for fire ventilation. 10th international symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Boston, USA, 1-3 November 2000.
- [2] Alan E. Vardy: THERMOTUN/5 - User Manual. October 1998.
- [3] Bechtel/Parson Brinckerhoff: Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program – Test Report. November 1995.
- [4] AIPCR/PIACR: Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 1999.
- [5] William D. Kennedy: Critical Velocity: Past, Present and Future. Seminar Smoke and Critical Velocity in Tunnels, London, UK, 2 April 1996.
- [6] George W. Mulholland: Smoke production and properties. In SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edition, 1995. NFPE Publication 95-68247, Section 2 / Chapter 15.
- [7] David A. Purser, 1995: Toxicity Assessment of combustion products. In SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edition, 1995. NFPE Publication 95-68247, Section 2 / Chapter 8.
- [8] Jochen Schabacker, Marco Bettelini, Christoph Rudin: CFD study of temperature and smoke distribution in a Railway Tunnel with Natural Ventilation System. Paper to be presented at the tunnel Fires Conference, ITC, Washington, 22-25 October 2001.
- [9] Fathi Tarada, Rudolf Bopp, Samuel Nyfeler, Kwang-Soo Jegal, Deog-Su Kim: Ventilation and Risk Control of the Young Dong Rail Tunnel in Korea. Paper presented at the first International Conference on Major Tunnel and Infrastructure Projects, 22-24 May 2000, Taipei, Taiwan.