

文章编号: 1671-6612 (2021) 03-395-06

隔墙对城际铁路地下车站压力波的影响

方 谊 王宏林 毕海权

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 为了研究在城际铁路地下车站设置隔墙对列车越行时产生的压力波的影响,以某城际铁路地下车站的建筑物为参考,对设置隔墙和不设置隔墙的工况进行了对比分析。首先使用 CFD 软件建立了数值计算模型,并通过对比不同网格尺寸的数值模拟结果验证了网格尺寸对本文数值计算的无关性;然后分析了设置隔墙后列车高速通过车站时车身不同位置处的压力变化;最后对比了设置隔墙的计算工况和不设置隔墙的工况在隧道内、咽喉区以及屏蔽门处测点的压力幅值变化。研究结果表明:车站内设置隔墙后,列车在通过地下车站时车身的压力幅值会增加,正压幅值可增加 792 Pa;在车站内设置隔墙对隧道内的压力动态变化基本无影响;咽喉区处正压幅值变化较小,负压幅值变化较大,有隔墙工况比无隔墙工况最多增加 96.69%;屏蔽门处压力幅值波动较大,正压幅值相较无隔墙工况增大 132.4%,负压幅值增大 121.7%。

【关键词】 空气动力学;地下车站;隧道;屏蔽门;隔墙

中图分类号 U292.91+4/U453.4 文献标识码 A

Influence of Partition Wall on Pressure Waves of Intercity Railway Underground Station

Fang Yi Wang Honglin Bi Haiquan

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 To study the influence of the partition wall on the pressure wave when the intercity train passes through the underground station, taking the building structure of an underground intercity railway station as a reference, the working condition with partition wall and the working condition with non-partition wall are compared and analyzed. Firstly, the computational model is established by using CFD software, and different grid sizes are set to verify that the grid size has nothing to do with the calculation; secondly, the pressure changes of the train body when the train passes through the station at a high speed after the partition wall is set; finally, the pressure amplitude changes of the measuring points in the tunnel, throat area and platform screen door under the calculation condition with and without partition wall are compared. The results show that: after the partition wall is set in the station, the train body's pressure amplitude will increase, and the maximum positive pressure amplitude can increase by 792 Pa. The results show that there is no influence on the dynamic change of pressure in the tunnel when the partition wall is set in the station; the amplitude of positive pressure in the throat area changes little, while the amplitude of negative pressure changes greatly, and the pressure amplitude with partition wall increases by 96.69% compared with that without partition wall; the pressure amplitude at the platform screen door fluctuates greatly, and the maximum positive pressure amplitude increases by 132.4% compared with that without partition wall, and the maximum negative pressure amplitude increases by 121.7%.

【Keywords】 Aerodynamics; Underground station; Tunnel; Platform screen door; Partition wall

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (51808460); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2682019CX32)

作者简介: 方 谊 (1994-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: fy21@foxmail.com

通讯作者: 毕海权 (1974-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2021-01-04

0 引言

近年来,越来越多的城市规划或修建了地下高铁车站或城际车站,不同于地上车站,地下车站由于内部空间封闭,会产生很多地上车站没有的空气动力学问题。在高速列车从外界驶入隧道并通过地下车站的过程中,列车车头在隧道入口会产生一个压缩波,并且以当地声速向隧道出口传播,到达隧道出口时由于空间突然变大,压缩波会在隧道出口处转换成膨胀波沿反方向以当地声速向隧道入口传播;列车车尾在进入隧道时产生的膨胀波也会以同样的速度传播到隧道出口,并转换成压缩波沿反方向传播回隧道入口^[1]。这些压缩波和膨胀波在隧道内来回传播,就形成了隧道内的压力波。国内外学者对于压力波已经做了很多研究,国外学者 UYSTEPRUYST 等^[2]提出了一种计算高速列车隧道气动效应的三维数值模拟方法,节省了计算时间。CROSS 等^[3]通过数值模拟计算研究了改变阻塞比对列车通过隧道时的压力波的影响。KHAYRULLINA 等^[4,5]采用大涡模拟 (LES) 方法,求解了三维可压缩湍流的非定常 RANS 方程和能量方程,使用动态网格技术研究了地铁隧道和车站内的列车运动,分析了列车周围的瞬态流场。国内学者梅元贵等^[6,7]对初始压缩波形成机理和长大隧道压力波进行了研究,李人宪等^[8]对单车过隧道和隧道内会车压力波进行了探讨。相较于对隧道内的压力波的研究,现阶段对地下车站压力波的研究还是较少。地下车站由于结构复杂,对于屏蔽门和隧道内结构(例如隔墙)等的承压限制有更高的要求。本文以某地下城际车站为参考,通过数值模拟方法建立计算模型,研究了在地下车站咽喉区及车站设置隔墙后隧道及车站内的压力波变化规律,希望能为未来地下车站的结构设计提供理论依据。

1 计算方法

1.1 控制方程

列车在隧道内运行时,隧道内的空气流动是三维、粘性、可压缩、非定常的湍流流动。通用控制方程如下所示^[9]:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varphi U) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad } \varphi) + S_\varphi \quad (1)$$

式中, φ 是通用变量, S_φ 是广义源项, Γ 是广义扩散系数, t 是时间, ρ 和 U 分别是气流的密

度和速度。 φ 、 S_φ 以及 Γ 分别取不同的值,即可得到相应的控制方程。例如当 $\varphi=1$, $\Gamma=0$, $S_\varphi=0$ 时,式(1)成为连续性方程;当 $\varphi=u, v, w$ 时,式(1)变为动量方程;当 $\varphi=\epsilon$ 时,式(1)即为能量方程等。

使用基于雷诺时均 $N-S$ 方程 (Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations)^[10,11] 的 Realizable K-Epsilon two-layer 湍流模型来对隧道内的空气流动进行模拟。在本研究中,当使用动态网格技术对列车运动进行模拟时,流场控制方程中需要考虑网格运动对气流的影响,则通用控制方程可表示为如下形式:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}[\rho\varphi(U-U_g)] = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad } \varphi) + S_\varphi \quad (2)$$

式中, U_g 为迁移速度,其他符号同前。

1.2 计算模型

本文以某地下城际车站建筑结构为参考,建立了在咽喉区及车站设置隔墙和未设置隔墙两种数值计算模型,图1为设置了隔墙的隧道—车站—隧道计算模型总体示意图,无隔墙工况计算模型除了不设置隔墙以外,结构尺寸与有隔墙工况计算模型保持一致。设置隔墙工况的数值计算模型中包括小里程端隧道、小里程端咽喉区、车站站房、车站屏蔽门、大里程端咽喉区以及大里程端隧道等结构。数值计算模型中的小里程端的隧道长度为 1750m,大里程端的隧道长度为 200m,均为双线隧道,隧道净空面积约为 103.3m²;车站两侧咽喉区长度均为 137m,中间被隔墙分隔,小里程端咽喉区隔墙两侧净空面积约为 70m²~245.1m²;车站有 4 条单线隧道,依次为上行到发线隧道、上行越行线隧道、下行越行线隧道和下行到发线隧道,各隧道线净空面积均为 41m²左右;大里程咽喉区长度为 137m,净空面积约为 245m²~70m²;大里程端隧道同为双线隧道,长度为 210m。在小里程端隧道口和大里程端隧道口分别设置了空气计算域。

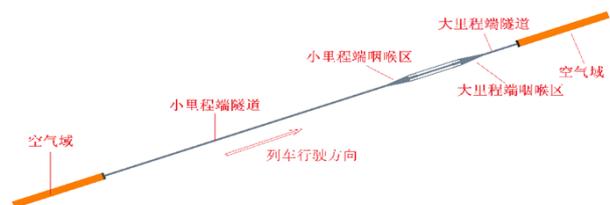


图1 设置隔墙的车站计算模型总体示意图

Fig.1 Calculation model of station with partition wall

如图 2 所示, 车站内部共有四条线路, 中间正线被岩墙分隔为两个隧道, 两侧为到发线隧道。隔墙两侧为两个站台区域, 均设置全封闭屏蔽门, 屏蔽门均为关闭状态。

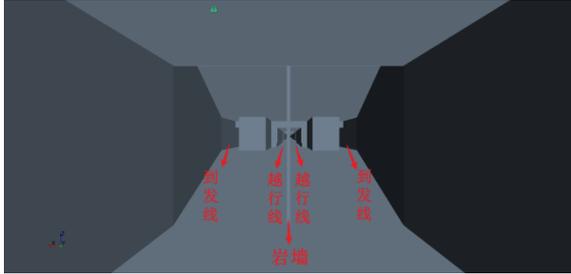


图 2 设置隔墙的车站计算模型内部示意图

Fig.2 Schematic diagram of station interior

列车计算模型以标准 CRH6 型动车组列车外形为参考, 忽略转向架、受电弓、车体连接部位等细部结构, 建立有一定表面粗糙度的光滑车体模型。如图 3 所示, 列车模型长度为 210.4m, 横截面积为 12.738 m²。数值计算过程中列车从列车小里程端隧道外启动, 以 160km/h 的速度驶入隧道并越行通过车站。

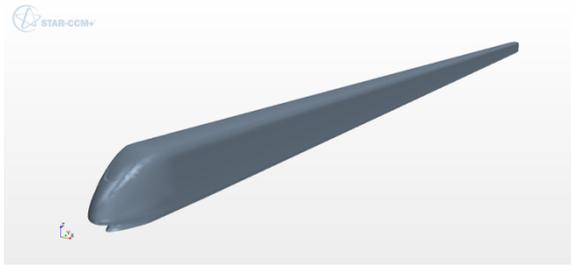


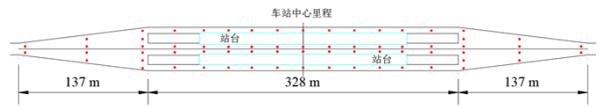
图 3 列车计算模型

Fig.3 Train calculation model

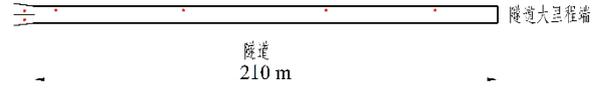
图 4 为本文计算模型所设置的压力监测点, 其中小里程端隧道测点分别设置于距隧道入口处 10m、200m、850m、1550m 及 1740m 处; 咽喉区测点分别设置于咽喉区净空面积为 80m²、162m² 及 244m² 处; 屏蔽门处测点分别设置于距车站中心里程 -100m、-75m、-50m、-25m、0m、25m、50m、75m 及 100m 处; 大里程端隧道内测点分别设置于距隧道出口 200m、100m 及 10m 处。



(a) 小里程端隧道



(b) 咽喉区及车站



(c) 大里程端隧道

图 4 隧道及车站测点布置示意图

Fig.4 Layout of measuring points in tunnel and station

1.3 网格无关性验证

为了排除网格划分对于计算结果的影响, 本节分别以三种不同的网格基础尺寸对数值模型的计算区域进行了划分, 具体各个区域的网格基础尺寸如表 1 所示。

表 1 不同计算区域网格尺寸参数

Table 1 Mesh size parameters of different calculation areas

区域	网格基础尺寸/m×m×m		
	工况 1	工况 2	工况 3
空气域	0.72×0.72×0.72	0.8×0.8×0.8	1.2×1.2×1.2
小里程端隧道	0.72×0.72×1.44	0.8×0.8×3.2	1.2×1.2×4.8
咽喉区	0.36×0.36×0.36	0.4×0.4×0.4	0.6×0.6×0.6
车站及岩墙	0.36×0.36×0.36	0.4×0.4×0.4	0.6×0.6×0.6
大里程端隧道	0.36×0.36×0.36	0.4×0.4×0.4	0.6×0.6×0.6
列车经过区域	0.18×0.18×0.18	0.2×0.2×0.2	0.3×0.3×0.3
列车及重叠网格	0.18×0.18×0.18	0.2×0.2×0.2	0.3×0.3×0.3

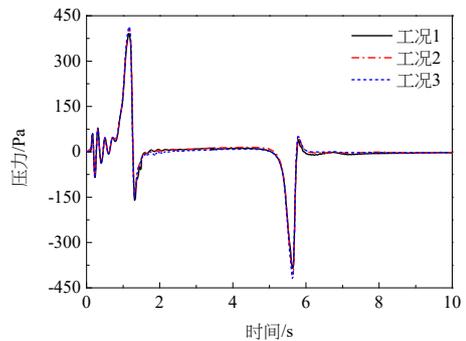


图 5 网格无关性验证结果对比

Fig.5 Comparison of grid independence verification results

以小里程端隧道内距隧道入口 10m 处测点数据为例, 对比以上三种工况下的计算结果, 结果如图 5 所示。工况 1、工况 2 和工况 3 下所得到的初始压缩波幅值分别为 392Pa, 411Pa, 415Pa, 以工况 2 数据为基准, 工况 1 和工况 3 与工况 2 的误差分别为-4.6%和 0.97%。可以看出, 不同尺寸的网格划分方式对数值模型的计算结果影响较小。

2 计算结果及分析

2.1 列车车身处压力动态变化分析

列车通过隧道时会产生连续变化的隧道压力波, 在隧道压力波的作用下, 列车受到的气动作用力也要发生改变。为了研究设置隔墙后对于列车受到的气动作用力的变化, 分别在列车的车头鼻尖、车尾鼻尖和车身中心位置处表面设置了压力测点。图 6 为列车在隧道内运行时车头及车尾处的压力变化分析, 图中上部分为车头鼻尖处测点的压力动态变化曲线, 中间部分为隧道内压力波传播轨迹及列车运动轨迹图, 底部为车尾鼻尖处测点压力动态变化曲线。在压力波传播轨迹及列车运动轨迹图中, 蓝色和红色实线分别表示列车车头和车尾的运动轨迹; 来回反射的实线和虚线分别表示隧道内来回反射的压缩波和膨胀波, 其中黑色的线表示列车车头产生的初始压缩波反射引起的压力波动, 红色的线表示列车车尾产生的初始膨胀波反射引起的压力波动。从图 6 可以看出, 在点 8 之前, 设置隔墙的计算工况中列车车头及车尾压力变化曲线和未设置隔墙的计算工况中基本一致, 而在点 8 之后两种工况的车身处压力幅值产生了较大的变化, 这是因为点 8 处恰好为列车车头到达小里程端咽喉区起点处 (即隔墙起点处), 在设置隔墙后, 咽喉区净空面积会减小, 因此点 8 车头到达此处时正压会明显增大, 而当车尾到达小里程咽喉区起点处, 由于净空面积突然减小的原因, 也出现了负压增大的现象。可以看出, 设置隔墙后列车运行到设置隔墙区域是车头处压力的变化幅度明显大于未设置隔墙时的车头处压力变化, 其中设置隔墙工况的正压幅值比未设置隔墙的工况增加 437Pa; 车尾处测点的压力变化规律与车头处类似, 在设置隔墙区域, 设置隔墙的工况中车尾处负压幅值比未设置隔墙的工况增加 577Pa。

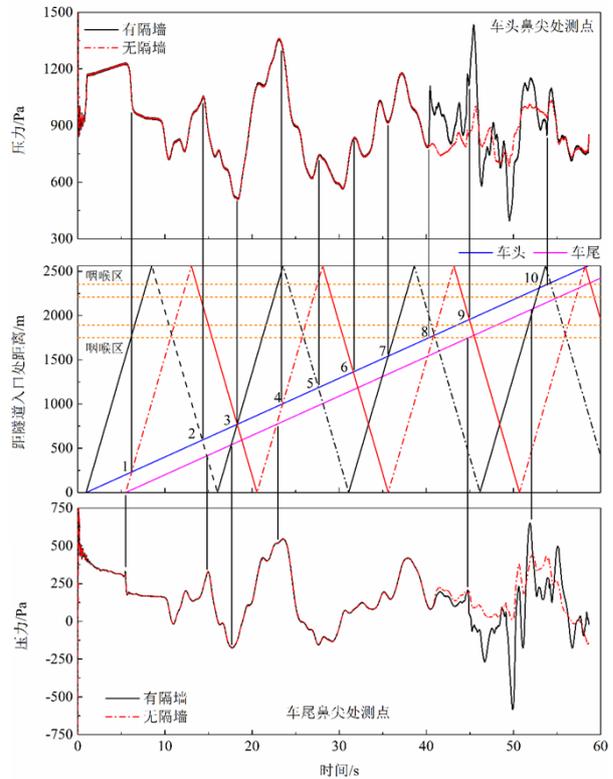


图 6 车头及车尾鼻尖处压力动态变化分析

Fig.6 Dynamic analysis of pressure at nose tip of front and rear of the train

图 7 为车身中点处压力动态变化曲线图, 可以看出, 在列车到达咽喉区之前, 设置隔墙的工况和未设置隔墙的工况车身中点处压力变化规律基本一致, 压力幅值也基本一致; 当列车在咽喉区及车站区域运行时, 设置隔墙的工况车身中点处的负压幅值比未设置隔墙的工况增加了 792Pa。

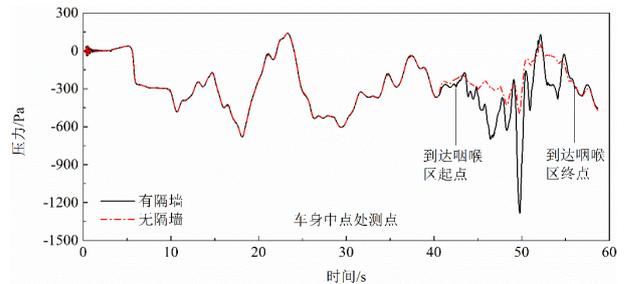


图 7 车身中点处的点压力动态变化曲线

Fig.7 Diagram of pressure change at the midpoint of the train's body

2.2 隧道内压力波传播规律分析

为了研究在咽喉区及车站设置隔墙后隧道内的压力变化规律, 对距离小里程端隧道入口处 10m、850m 以及距离大里程端隧道出口处 200m 处

的压力变化进行分析。列车在进入隧道时所产生的初始压缩波和膨胀波是隧道内压力波动的主要原因之一, 图 8 所示为列车通过距隧道入口 10m 处的位置的过程中所产生的压力变化, 列车通过该位置处过程中压力变化仅受到初始压缩波和膨胀波的影响, 不受反射波的影响。图中可以看出, 咽喉区及车站设置隔墙对初始压缩波和膨胀波的变化没有影响。

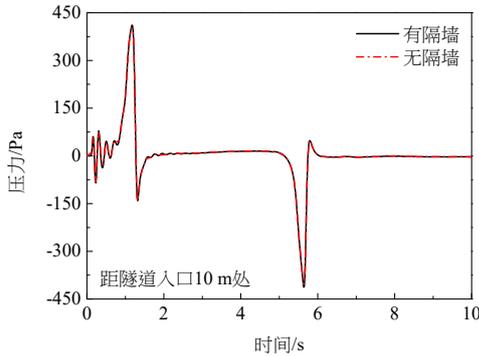


图 8 距隧道入口 10 m 处测点压力动态变化曲线对比
Fig.8 Comparison of pressure changes at measuring points 10 m away from the tunnel entrance

当列车完全进入隧道内后, 由于初始压缩波和膨胀波在隧道内来回反射, 所以隧道内各处均产生了压力变化。图 9 为距小里程端隧道入口 850m 处的压力动态变化曲线, 由图中可知, 在设置隔墙后, 该位置处的压力变化规律与不设置隔墙的工况基本一致, 正压幅值和负压幅值也和未设置隔墙的工况差别较小。

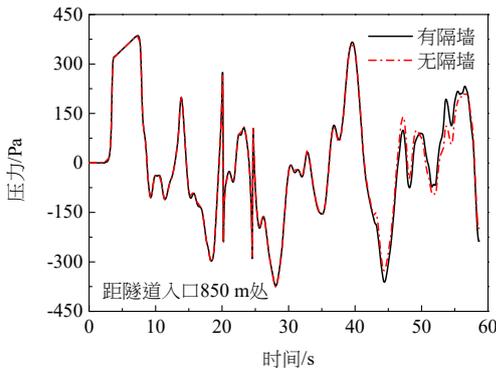


图 9 距隧道入口 850m 处测点压力动态变化曲线
Fig.9 Comparison of pressure changes at measuring points 10 m away from the tunnel entrance

图 10 为距大里程端隧道出口 200m 处的压力动态变化曲线, 在设置隔墙后, 该位置处的压力变化规律与不设置隔墙的工况也基本一致, 正压幅值

和负压幅值也和未设置隔墙的工况差别较小。综上所述可知, 在咽喉区内及车站设置隔墙后对于隧道内位置的压力变化影响较小。

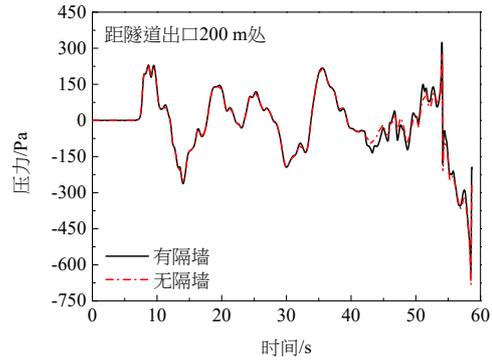


图 10 距隧道出口 200 m 处测点压力动态变化曲线
Fig.10 Comparison of pressure changes at measuring points 10 m away from the tunnel entrance

2.3 咽喉区及屏蔽门压力幅值变化分析

为了研究设置隔墙后咽喉区内的压力变化规律, 分析了咽喉区内净空面积为 80m² 处的压力变化。图 11 为两种工况下该位置处压力动态变化对比图, 可以看到, 在列车车头到达咽喉区之前, 是否设置有隔墙对于咽喉区内的压力变化影响不大; 但是在列车经过咽喉区的过程中, 设置隔墙的工况咽喉区处的压力幅值明显要比未设置隔墙的工况大。在列车通过咽喉区的过程中, 设置隔墙的工况咽喉区内净空面积为 80m² 的正压幅值为 315Pa, 负压幅值为 -750Pa, 对比未设置隔墙工况, 正压幅值增加了 314Pa, 负压幅值增加了 372Pa。

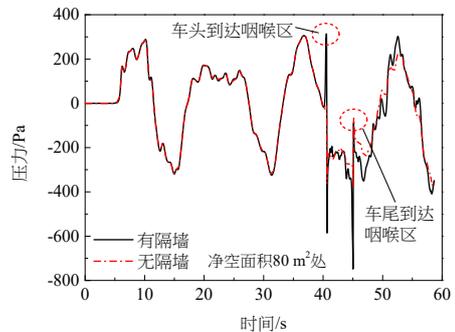


图 11 咽喉区测点压力动态变化曲线
Fig.11 Comparison of pressure changes at measuring points on the throat of the station

图 12 为设置隔墙的工况和未设置隔墙的工况咽喉区内不同净空面积处的压力幅值对比。图中可以看出, 咽喉区及车站设置隔墙后, 对于咽喉区内不同位置处的正压幅值影响较小, 但是对于负压

幅值影响较大, 最高可增加 96.6%。

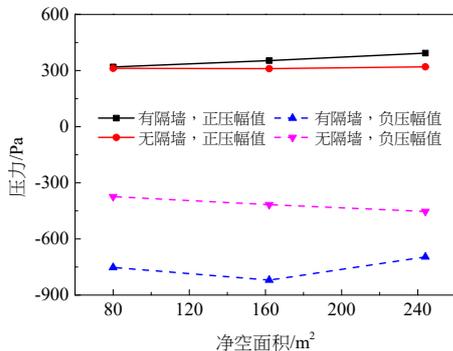


图 12 咽喉区各测点压力幅值对比

Fig.12 Comparison of pressure amplitude of different measuring points on the throat of the station

为了研究咽喉区及车站设置隔墙后屏蔽门表面的压力变化规律, 分析了列车行驶隧道内的屏蔽门表面的压力幅值变化。图 13 为不同工况下列车行驶隧道内的屏蔽门表面不同位置处压力幅值对比图, 可以看出, 设置隔墙后对于屏蔽门上的压力幅值有较大影响, 距车站中心里程 75m 处的正压幅值比未设置隔墙的工况增加了 421Pa, 增幅达到了 132.4%; 设置隔墙的工况车站中心里程处的负压幅值比未设置隔墙的工况增加了 736Pa, 增幅达到了 121.7%。由此可知, 在咽喉区及车站设置隔墙后, 由于列车经过时的净空面积减小, 阻塞比增大, 使得在列车经过车站时的压力幅值急剧升高, 因此会对屏蔽门的承压极限有更高的要求。

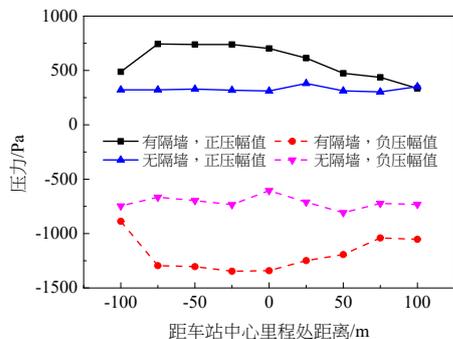


图 13 屏蔽门各测点压力幅值对比

Fig.13 Comparison of pressure amplitude of different measuring points on the platform screen door

3 结论

基于 CFD 软件对某城际铁路地下车站是否设置隔墙进行了数值模拟, 对比了设置隔墙和不设置隔墙两种工况的计算结果, 得到的主要结论如下:

(1) 当咽喉区及车站设置隔墙后, 列车通过地下车站过程中, 列车车头鼻尖处正压幅值比未设置隔墙的工况增加了 437Pa, 车尾鼻尖处负压幅值增加了 577Pa, 车身中点处负压幅值增加了 792Pa。

(2) 咽喉区及车站设置隔墙后, 列车通过地下车站过程中对于隧道内压力波动影响较小。

(3) 设置隔墙后, 列车通过地下车站产生的气动效应对屏蔽门有很大影响, 正压幅值最大增加了 132.4%, 负压幅值最大增加了 121.7%。

参考文献:

- [1] 李人宪. 高速列车气动影响[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016:80-89.
- [2] UYSTEPRUYST D, WILLIAM-LOUIS M, CREUSE E, et al. Efficient 3D numerical prediction of the pressure wave generated by high-speed trains entering tunnels[J]. Computers & Fluids, 2011,47(1):165-177.
- [3] CROSS D, HUGHES B, INGHAM D, et al. A validated numerical investigation of the effects of high blockage ratio and train and tunnel length upon underground railway aerodynamics[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015,146:195-206.
- [4] KHAYRULLINA A, BLOCKEN B, JANSSEN W, et al. CFD simulation of train aerodynamics: Train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015,139:100-110.
- [5] IZADI T, MEHRABIAN MA, ABOUALI O, et al. 3-D numerical analysis of train-induced flow inside four ventilated underground subway stations and connecting tunnels[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019,193:103974.
- [6] 梅元贵, 王瑞丽, 许建林, 等. 高速列车进入隧道诱发初始压缩波效应的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2016, 33(1):95-102.
- [7] 周丹. 长大隧道、隧道群空气动力效应算法研究及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [8] 李人宪, 袁磊. 高速列车通过隧道时的压力波动问题[J]. 机械工程学报, 2014,50(24):115-121.
- [9] 赵有明, 马伟斌, 程爱君, 等. 高速铁路隧道气动效应[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.

(下转第 460 页)