

基于结构力学力法的地铁联络通道冻结壁厚度设计研究^{*}

方亮文^{1,2} 李方政² 崔 灏² 丁 航²

(1. 煤炭科学研究总院, 100013, 北京; 2. 北京中煤矿山工程有限公司, 100013, 北京//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 介绍了人工冻结法的基本原理以及人工冻结法中选用合适冻结壁厚度的重要性。现有的冻结壁厚度设计方法无法适用于地铁联络通道冻结壁厚度设计计算, 因此结合地铁联络通道的实际受力特点, 提出采用结构力学力法设计冻结壁厚度。建立了新的冻结壁结构计算模型, 求解冻结壁各截面内力; 再利用冻结壁应满足的应力强度条件推导出冻结壁厚度与任意截面所受内力的关系式, 计算联络通道的冻结壁设计厚度; 利用推导出的冻结壁厚度计算公式, 结合哈尔滨地铁联络通道的冻结法施工案例, 计算出该联络通道冻结壁设计厚度取 2.0 m; 利用 ANSYS 数值分析软件验证了该种冻结壁厚度设计方法满足设计要求。

关键词 地铁; 联络通道; 冻结壁厚度; 结构力学力法

中图分类号 U231.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.03.027

Research on Freezing Wall Thickness Design of Metro Cross Passage Based on Structural Mechanics Method

FANG Liangwen, LI Fangzheng, CUI Hao, DING Hang

Abstract The basic principle of the artificial freezing method and the importance of selecting the appropriate frozen wall thickness in the artificial freezing method was introduced. The current design method for frozen wall thickness can not be applied to the calculation of the frozen wall thickness of metro cross passage. Therefore, combined with the actual force characteristics of the metro cross passage, the structural mechanics method is proposed for designing the frozen wall thickness. New calculation model of the frozen wall structure was established, solving the internal forces of each section of the frozen wall. Then by using the stress intensity conditions that the frozen wall should satisfy, the relationship between the frozen wall thickness and the internal force of any section was derived to calculate the frozen wall thickness of the cross passage. Combining the derived formula for calculating the frozen wall thickness and the freezing method construction case of the Har-

bin metro cross passage, calculation results have shown that the theoretical frozen wall thickness of the cross passage should be 2.0 m. ANSYS numerical analysis software was adopted to verify that the proposed design method of the frozen wall thickness could meet the design requirements.

Key words metro; cross passage; frozen wall thickness; structural mechanics method

First-author's address China Coal Research Institute, 100013, Beijing, China

0 引言

人工冻结法最早应用于我国煤矿立井施工中, 20 世纪 70 年代开始应用于地铁联络通道施工中, 是克服复杂地质水文条件的一种重要方法^[1-2]。人工冻结法就是利用人工制冷方法形成一个封闭的冻结壁, 用以隔绝地下水和抵抗地层的水土压力, 施工在冻结壁的保护下进行。冻结法施工时, 如果冻结壁较薄, 则无法承载水土压力; 如果冻结壁较厚, 则土体冻结体量增大, 冻胀难以控制, 且经济效益差。因此, 冻结壁的厚度设计至关重要。国内外有关冻结壁厚度设计方法研究成果主要可分为以下几种:

1) 将立井冻结壁假设为无限长弹性、弹塑性厚壁圆筒计算, 分别得到了拉麦公式、多姆克公式; 将立井冻结壁假设为有限长塑性(或粘塑性)厚壁圆筒计算, 得到了里科尔曼公式和维亚洛夫公式^[3]。

2) 通过冻土的蠕变变形试验, 根据冻结壁变形规律, 文献[4]推导出了冻结壁厚度设计计算公式。

3) 文献[5]通过总结我国立井冻结壁厚度设计和施工经验, 利用数理统计方法得到了冻结壁厚度设计计算公式。

4) 文献[6]根据冻结法施工实践中测温孔数据, 推导出了内、外侧冻结壁厚度设计计算公式。

^{*} 国家自然科学基金项目(51774183); 天地科技重点项目(2018-TD-ZD004); 天地科技面上项目(2018-MS-024)

5) 文献[7]通过分析联络通道受力状态,结合结构力学方法知识,推导出了联络通道冻结壁厚度设计计算公式。

将冻结壁假设为无限长弹性、弹塑性及有限长塑性厚壁圆筒得到的冻结壁厚度设计方法,以及利用数理统计方法得到的冻结壁厚度设计计算公式,适用于冻结距离长、深度超过 100 m 的立井,无法适用于冻结距离短、埋深浅的地铁联络通道水平冻结工程。通过冻土蠕变变形试验得到的冻结壁厚度设计方法,计算参数较多,计算参数的选取对计算结果影响大。利用测温孔温度数据得到的冻结壁厚度计算公式,不适用于设计阶段冻结壁厚度的计算。利用现有结构力学方法求解联络通道冻结壁厚度,主要是将冻结壁简化成直墙拱形计算模型,该类模型未考虑地铁联络通道开挖后底板向上变形,将对底板产生土体反力。本文将结合地铁联络通道的实际受力情况,建立新的计算模型,根据结构力学方法设计冻结壁厚度。

1 地铁联络通道冻结壁厚度力学计算

1.1 计算模型

地铁联络通道冻结壁的主要受力为顶板土压力 P_t 、冻结壁侧壁顶部土压力 $P_{c,1}$ 、冻结壁侧壁底部土压力 $P_{c,2}$ 和底板土体反力 P_d 。根据地铁联络通道受力特征,建立如图 1 a) 所示的计算模型。由于地铁联络通道结构对称,采用半结构模型进行分析计算,简化后的计算模型如图 1 b) 所示。

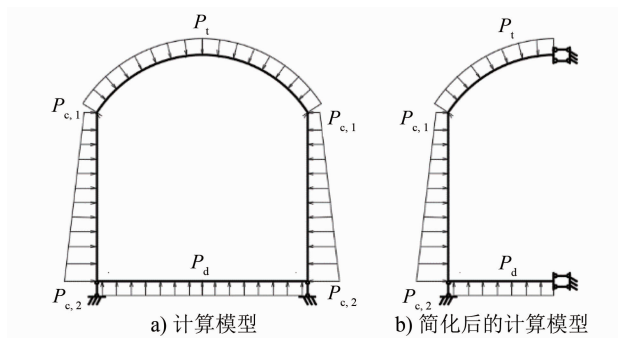


图 1 联络通道冻结壁结构力学计算模型

1.2 荷载计算

根据简化后的冻结壁计算模型,结合土力学相关知识,将冻结壁顶板承受的土压力按静止土压力计算,将侧壁承受的水土压力按静止侧压力系数取 0.7 计算,将底板承受的水土压力按主动土压力计算,计算公式为:

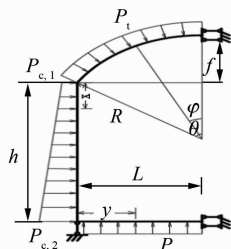
$$\begin{cases} P_t = \gamma H + q \\ P_{c,i} = K_0(\gamma H + q) \\ P_d = \gamma H K_a - 2c\sqrt{K_a} + \gamma_w H_w \end{cases} \quad (1)$$

式中:

- γ ——土体平均重度;
- H ——上覆土体厚度;
- $P_{c,i}$ ——侧壁任意位置土压力;
- K_0 ——静止侧压力系数,取 0.7;
- K_a ——主动土压力系数;
- c ——黏聚力;
- γ_w ——水的重度,取 10 kN/m³;
- H_w ——地下水位以下冻结壁深度;
- q ——地面活载,取 20 kN/m²。

1.3 冻结壁内力计算

根据结构力学方法将地铁联络通道冻结壁结构计算模型进行简化,计算简图如图 2 所示。



注: y ——冻结壁底板长度 L 内从侧壁起算的任意一点的长度;
 x ——冻结壁侧壁高度 h 内从顶部起算的任意一点的高度;
 f ——冻结壁拱墙段高度; R ——冻结壁拱墙段半径;
 θ ——冻结壁拱墙段夹角; φ —— θ 内从联络通道中心线起算的拱墙段上任意一点的夹角

图 2 联络通道冻结壁结构力学计算简图

计算模型简化后的冻结壁各部位内力如下:

1) 冻结壁侧壁任意截面 x 处的内力:

$$\begin{cases} M_x = (f + x)X_1 + X_2 - P_t R(1 - \cos \theta)(R + x) - \frac{P_{c,1}x^2}{2} - \frac{\Delta P_c x^3}{6h} \\ Q_x = -X_1 + P_t R(1 - \cos \theta) + P_{c,1}x + \frac{\Delta P_c x^2}{2h} \\ N_x = -P_t R \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中:

M_x, Q_x, N_x ——分别为冻结壁侧壁任意截面 x 处的弯矩、剪力和轴力;

X_i ——第 i 个多余未知力, $i=1, 2$;

ΔP_c ——冻结壁侧壁顶部与底部土压力差值。

2) 冻结壁拱墙段任意夹角 φ 处的内力:

$$\begin{cases} M_{\varphi} = X_1 R(1 - \cos\varphi) + X_2 - P_1 R^2(1 - \cos\varphi) \\ Q_{\varphi} = -X_1 \sin\varphi + P_1 R \sin\varphi \\ N_{\varphi} = -X_1 \cos\varphi - P_1 R(1 - \cos\varphi) \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$M_{\varphi}, Q_{\varphi}, N_{\varphi}$ ——分别为冻结壁顶部拱墙段任意夹角 φ 处的弯矩、剪力和轴力。

3) 冻结壁底板任意截面 y 处的内力:

$$\begin{cases} M_y = -(f+h)X_1 - X_2 + P_1 R(1 - \cos\theta)(R+h) + \frac{P_{c,1}h^2}{2} + \frac{\Delta P_c h^2}{6} - \frac{P_d y^2}{2} \\ Q_y = -P_d(L-y) \\ N_y = X_1 - P_1 R(1 - \cos\theta) - P_{c,1}h - \frac{\Delta P_c h}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

M_y, Q_y, N_y ——分别为冻结壁底板任意截面 y 处的弯矩、剪力和轴力。

根据结构力学方法知识,建立立方方程如下:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1,p} = 0 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2,p} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

δ_{ij} ——单位多余未知力 $X_j = 1$ 单独作用时产生的沿 X_i 方向的位移, $j=1,2$;

$\Delta_{i,p}$ ——其余已知荷载单独作用时产生的沿 X_i 方向的位移。

求解式(5)可得:

$$\begin{cases} X_1 = \frac{\delta_{12}\Delta_{2,p} - \delta_{22}\Delta_{1,p}}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}^2} \\ X_2 = \frac{\delta_{12}\Delta_{1,p} - \delta_{11}\Delta_{2,p}}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}^2} \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} \delta_{11} = \sum \int \bar{M}_1^2 \frac{ds}{EI} \\ \delta_{22} = \sum \int \bar{M}_2^2 \frac{ds}{EI} \\ \delta_{12} = \delta_{21} = \sum \int \bar{M}_1 \bar{M}_2 \frac{ds}{EI} \\ \Delta_{1,p} = \sum \int \bar{M}_1 M_p \frac{ds}{EI} \\ \Delta_{2,p} = \sum \int \bar{M}_2 M_p \frac{ds}{EI} \end{cases} \quad (7)$$

式中:

E ——冻土弹性模量;

I ——截面惯性矩;

\bar{M}_1 ——单位多余未知力 $X_1 = 1$ 单独作用时对结构产生的弯矩;

\bar{M}_2 ——单位多余未知力 $X_2 = 1$ 单独作用时对结构产生的弯矩;

M_p ——其余已知荷载单独作用时对结构产生的弯矩;

s ——任意截面处所取的微元段。

将式(6)得到的计算结果代入式(2)一式(4),即可得到地铁联络通道冻结壁各部位的内力。

1.4 冻结壁厚度计算

根据结构力学方法方程,求解出冻结壁任意截面的内力后,即可求解得到冻结壁任意截面处的应力,计算公式为:

1) 压(拉)应力 σ 为:

$$\sigma = \frac{M}{W} \pm \frac{N}{A} \quad (8)$$

式中:

M ——任意截面的弯矩;

W ——截面抗弯模量;

N ——任意截面的轴力;

A ——截面面积。

2) 剪应力 τ 为:

$$\tau = 1.5Q/A \quad (9)$$

式中:

Q ——任意截面的剪应力。

根据土体的强度控制标准,冻结壁任意截面处的应力应符合应力强度标准,即:

$$\begin{cases} \sigma_1 \leq [\sigma_1]/k_1 \\ \sigma_3 \leq [\sigma_3]/k_2 \\ \tau \leq [\tau]/k_3 \end{cases} \quad (10)$$

式中:

σ_1, σ_3, τ ——分别为冻结壁抗压、弯拉和抗剪截面应力;

$[\sigma_1], [\sigma_3], [\tau]$ ——分别为冻结壁的抗压、弯拉和抗剪强度标准;

k_1, k_2, k_3 ——为安全系数,分别满足于抗压、弯拉和抗剪强度。

将式(10)代入式(8)和(9),即可得冻结壁厚度应满足的条件如下:

$$\begin{cases} h_1 \geqslant \frac{\sqrt{k_1^2 N^2 + 24k_1[\sigma_1]|M|} + |N|k_1}{2[\sigma_1]} \\ h_2 \geqslant \frac{\sqrt{k_2^2 N^2 + 24k_2[\sigma_3]|M|} - |N|k_2}{2[\sigma_3]} \\ h_3 \geqslant \frac{1.5k_3 Q}{[\tau]} \end{cases} \quad (11)$$

式中：
 h_1, h_2, h_3 ——分别为满足抗压、弯拉和抗剪强度的最小冻结壁壁厚。
则联络通道冻结壁的厚度 h 为：

$$h = \max \{ h_1, h_2, h_3 \} \quad (12)$$

2 工程算例

2.1 工程概况

哈尔滨地铁 2 号线工程大耿家站至龙川路站区间 2 号联络通道左、右线盾构隧道中心里程分别为 XK6+099.801 和 SK6+100.000, 隧道中心间距为 14.000 m。此联络通道主要位于粉质黏土层中, 土层含水量大, 地下水位高。因此, 采用冻结法加固地层, 矿山暗挖法开挖, 冻结壁的平均设计温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。联络通道的开挖轮廓高为 4.083 m, 宽为 3.360 m, 上覆土体深度为 18.119 m。联络通道冻结孔布置如图 3 所示。

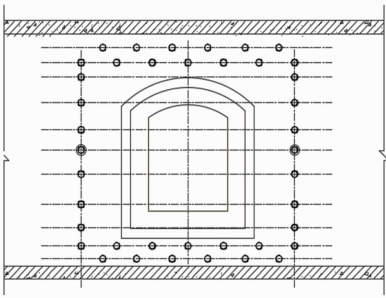


图 3 联络通道冻结孔布置示意图

2.2 荷载计算

该工程中联络通道顶部埋深为 18.119 m, 上覆土体的平均重度取 18.5 kN/m^3 。联络通道开挖边界顶部与隧道中心线的距离为 2.013 m, 开挖边界顶部到底部的距离为 5.343 m。根据人工冻土三轴剪切试验, 得到该土层的黏聚力为 3.28 MPa, 内摩擦角为 16° 。将数据代入式(1), 即可得该联络通道顶板土压力 $P_1 = 323.75\text{ kPa}$, 侧壁底部及底部土压力分别为 $P_{c,1} = 274.71\text{ kPa}$ 、 $P_{c,2} = 317.83\text{ kPa}$, 底板土体反力 $P_d = 322.08\text{ kPa}$ 。

2.3 冻结壁内力计算

该联络通道冻结壁设计平均温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 各计算参数如表 1 所示。

表 1 联络通道冻结壁内力计算参数

参数	取值
h/m	4.454
R/m	3.430
L/m	2.680
f/m	1.290
$\theta/(^{\circ})$	51.500
P_1/kPa	323.750
$P_{c,1}/\text{kPa}$	274.710
$P_{c,2}/\text{kPa}$	317.830
P_d/kPa	322.080
E/MPa	200.000

根据以上计算参数, 带入式(5)一式(7)解得：
 $X_1 = 944.42\text{ kN}$, $X_2 = 3.6\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

将计算结果代入式(2)一式(4), 即可得到该联络通道冻结壁各部位出的内力值, 如表 2 所示。

表 2 联络通道冻结壁各部位内力值

内力	顶板		侧壁		底板	
	$\varphi = 0^{\circ}$	$\varphi = 51.5^{\circ}$	$x = 0$	$x = h$	$y = 0$	$y = L$
$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	3.60	-207.78	-207.78	-730.90	-730.90	-425.75
Q/kN	0	129.74	-527.00	792.58	-863.17	0
N/kN	-944.42	-1 006.83	-867.65	-867.65	-792.58	-792.58

根据该联络通道内力计算结果, 可绘制该联络通道冻结壁各部位内力图, 如图 4 所示。

2.4 冻结壁厚度计算

该联络通道冻结壁厚度计算参数如表 3 所示。

表 3 联络通道冻结壁厚度计算参数

参数	取值
$M_{\max}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	0.73
Q_{\max}/kN	0.87
N_{\max}/kN	1.01
$[\sigma_1]/\text{MPa}$	3.60
$[\sigma_3]/\text{MPa}$	2.00
$[\tau]/\text{MPa}$	1.50
k_1	2.00
k_2	3.00
k_3	2.00

注： $M_{\max}, Q_{\max}, N_{\max}$ ——分别为冻结壁最大的弯矩、剪力 and 轴力

将表 3 中的计算参数代入式(11), 可得该联络通道冻结壁厚度应满足条件为： $h_1 \geqslant 1.87\text{ m}$, $h_2 \geqslant 1.92\text{ m}$, $h_1 \geqslant 1.74\text{ m}$ 。

该联络通道冻结壁结构力学力法设计厚度为：
 $h = \max \{ 1.87, 1.92, 1.74 \} = 1.92\text{ m}$ 。

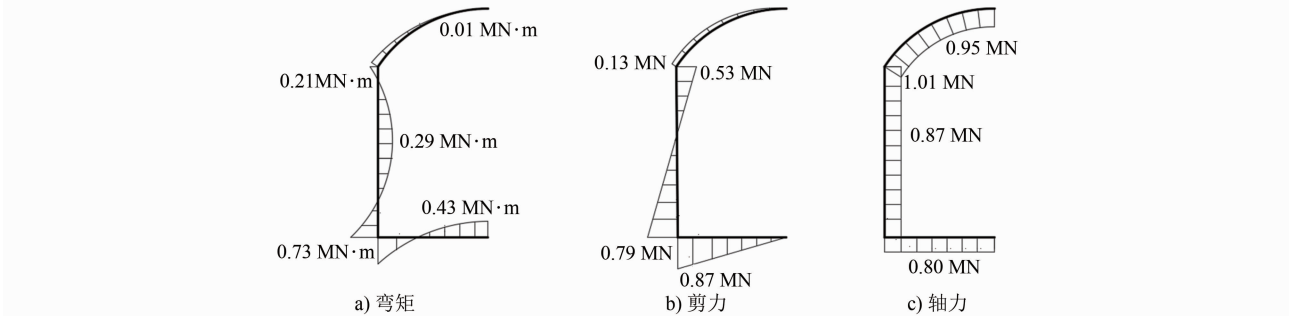


图4 联络通道冻结壁各部位内力图

由冻结壁厚度计算结果可知,哈尔滨地铁2号线工程大耿家站至龙川路站区间2号联络通道的冻结壁厚度最小值为1.92 m,因此,取冻结壁设计厚度为2.0 m,冻结壁设计平均温度为-10 ℃。

2.5 冻结壁承载力验算

本文在冻结壁结构计算模型建立过程中进行了一些简化,故应该对上述公式推导出的冻结壁设计厚度进行验证。采用ANSYS数值分析软件,模拟联络通道冻结壁实际承载情况,分析冻结壁有效厚度为2.0 m时冻结壁是否满足承载力要求。

地铁联络通道冻结壁利用ANSYS数值分析时采用均质线弹性模型,参数选用哈尔滨地铁2号线工程大耿家站至龙川路站区间2号联络通道的工程实际数值。数值分析得到的该联络通道冻结壁的承载情况如图5至图7所示。表4为该联络通道冻结壁的数值分析应力计算值、设计承载强度指标和安全应力值对比表。

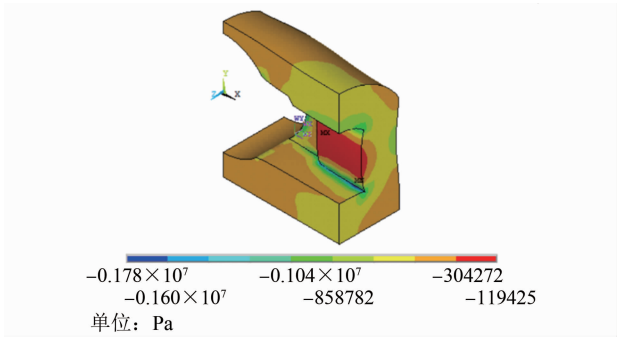


图5 联络通道冻结壁最大主应力云图

由表4所示的冻结壁设计承载强度指标和数值分析的应力计算结果可知,冻结壁的数值分析应力计算值远小于设计承载强度指标,同时满足安全值要求。因此,此工程中冻结壁厚度满足冻结壁整体承载要求,验证了本文冻结壁厚度设计方法的可靠性。

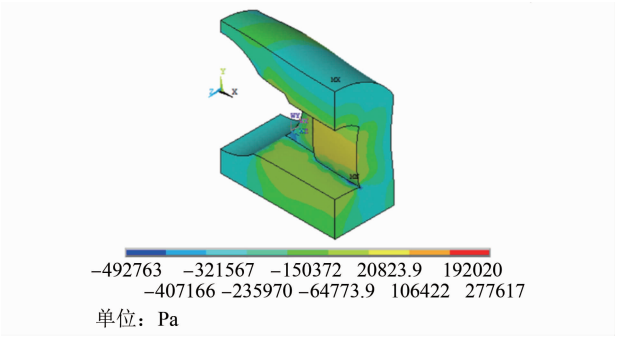


图6 联络通道冻结壁最小主应力云图

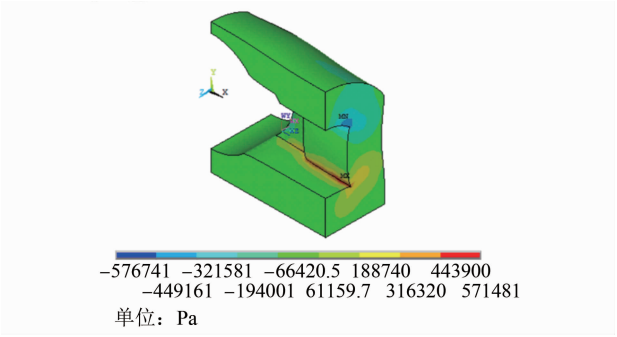


图7 联络通道冻结壁剪应力云图

表4 联络通道冻结壁应力及安全值

项目	σ_1	σ_3	τ
数值分析应力计算值/MPa	1.78	0.49	0.58
设计承载强度指标/MPa	3.60	2.00	1.50
安全值/MPa	2.02	4.08	2.59

3 结语

本文结合地铁联络通道的实际受力特点,提出了采取结构力学力法设计冻结壁厚度的方法,建立了新的冻结壁结构计算模型;根据新的冻结壁结构计算模型,利用结构力学力法知识简化后建立力法方程,求解出冻结壁各截面的内力;再利用冻结壁应满足的应力强度条件推导出冻结壁厚度与任意截面所受内力的关系式,求得了地铁联络通道的冻结壁设计厚度。

(下转第126页)

1) 站外出入口楼扶梯设置。本着“以人为本”的原则,为确保出入口扶梯故障情况下乘客正常进、出站,每个出入口均应在一部自动扶梯发生故障或检修时,仍能确保乘客进、出站。为此,当出入口仅设置 2 部上、下行自动扶梯时,该出入口应增设楼梯;当出入口设置有 3 部及以上数量的楼扶梯时,该出入口无需增设楼梯。

2) 站厅至站台楼扶梯设置。根据地铁运营管理模式及客流特点,为确保乘客分散进出站,避免造成客流拥堵,站内至少应提供 $M/3$ (M 为列车编制数量) 处进出站点数。因此,站内楼扶梯设置是否需要增设楼梯并非控制性要素,只要站内楼扶梯设置能够确保在出现 1 台自动扶梯故障或检修情况下仍能满足 $M/3$ 处进、出站点数即可。

9 关于中间风井与市政道路衔接的问题

9.1 相关条文及问题分析

根据列车运行速度及区间长度,当列车在区间的运行时间大于行车间隔时,区间存在列车追踪情况。为确保火灾情况下尽快排放烟气,尽量为乘客提供更好的疏散条件,一般在区间中部设置中间风井。设置中间风井可以增加隧道换风次数,降低区间温度,而且还可以减少区间空气压力波的影响。根据 GB 51298—2018《地铁设计防火标准》5.4.5 条规定及其条文解释,中间风井亦作为区间乘客疏散路径。部分中间风井设置在山区,与市政道路无法连接。设计人员在设计过程中对高架车站及车辆段(停车场)需要设置消防车道有明确的认识,但由于 GB 51298—2018《地铁设计防火标准》、GB 50157—2013《地铁设计规范》对中间风井是否与市政道路衔接没有明确规定,设计人员往往会忽略该方面的问题。

(上接第 121 页)

利用推导出的冻结壁厚度计算公式,结合哈尔滨地铁联络通道的冻结法施工案例,计算出该联络通道冻结壁设计厚度取 2.0 m。通过对该联络通道冻结壁的承载力进行三维有限元数值计算,验证了工程中冻结壁厚度满足冻结壁整体承载要求。

参考文献

- [1] 李方政.市政冻结技术的应用与展望[J].建井技术,2017(4): 55.
- [2] 王鹏.地铁施工中冻结法地基加固可行性研究[J].城市轨道交通

9.2 解析及建议

中间风井为地铁工程的重要组成部分,中间风井内设置有 TVF(区间隧道风机)风机及变电所等设施,同时还兼作区间人员疏散通道。中间风井的相关设置,需要考虑平时工作人员的检修维护,以及火灾工况下消防人员的进出。为此,中间风井需要与市政道路衔接,以确保车辆能够到达中间风井处。

10 结语

本文针对 GB 51298—2018《地铁设计防火标准》中部分有争议或是笔者认为值得探讨的条文,分析了争议点所在及笔者的修订建议。文中观点仅代表笔者个人意见,最终应按当地应急管理部门、规范编制组解释进行执行。希望设计人员在遵守相关规范、标准的同时,能够认真分析规范、深究规范条文的真实含义,而非教条般地套用规范。也正是这种敢于质疑的钻研精神,才有助于设计人员知识的积累和技术水平的提升。同时,也希望本文能够起到抛砖引玉的作用,有助于 GB 51298—2018《地铁设计防火标准》在修订时完善相关条文。

参考文献

- [1] 中华人民共和国公安部.地铁设计防火标准:GB 51298—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [3] 中华人民共和国公安部.建筑设计防火规范(2018 年版):GB 50016—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [4] 深圳市消防监督管理局.地铁地下车站防火分区、烟气控制与人员疏散系统设计导则:SZDB/Z 100—2014[S].深圳:深圳市消防监督管理局,2014.

(收稿日期:2019-01-10)

交通研究,2007(2): 44.

- [3] 沈国富,苏立凡.弹塑性冻结壁厚度的计算[J].煤炭科学技术,1977(12): 41.
- [4] 陈湘生.我国人工冻结粘土蠕变数学模型及应用[J].煤炭学报,1995(4): 399.
- [5] 沈慰安,王建州.深厚表土层冻结壁厚度计算方法研究[J].中国工程科学,2011(11): 89.
- [6] 周晓敏,张绪忠.冻结器内测温判定冻结壁厚度的研究[J].煤炭学报,2003(2): 162.
- [7] 胡双平,张晓峰,胡智民,等.富水卵砾石地层地铁联络通道冻结壁厚度设计研究[J].公路,2019(5): 272.

(收稿日期:2019-11-01)