

隧道冻害等级的划分

罗彦斌^{1,2}, 陈建勋^{1,2}, 王梦恕¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;

2. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 西安 710064)

摘要: 为了给隧道冻害防治提供基本依据,通过分析隧道冻害发生的条件,选取气候和地下水条件作为等级划分的主要因素。在划分气候的寒冷程度和地下水危害程度的基础上,采用综合评判的方法,对隧道冻害等级进行划分。结果表明,气候和地下水条件是影响隧道冻害程度的最主要因素;气候条件选取最冷月平均气温和冻结深度2个控制指标,将隧道所处地区的寒冷程度划分为5级;地下水条件选取赋存与补给形式和渗入隧道情况2个指标,将地下水的危害程度划分为5级;综合考虑气候和地下水条件对隧道冻害程度的影响,将隧道冻害等级划分为5级;全多年冻土隧道的气候条件虽然更加恶劣,但是隧道处于含冰围岩中,常年处于冻结状态,冻害现象并不严重,只是在隧道开挖过程中人为影响或暖季促使围岩融化,冻害等级可划分为Ⅱ级。

关键词: 隧道工程; 冻害; 综合评判

中图分类号: U 457.2

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2010)04-0458-05

隧道冻害等级的划分,不仅便于隧道冻害防治措施的制定,而且可以为寒区隧道工程的设计和施工提供指导。然而,在国家颁布的有关隧道设计与施工的规范中,寒区隧道的内容十分欠缺。《青藏铁路高原冻土区工程设计暂行规定》中只根据青藏高原多年冻土的特点,对多年冻土地区的隧道工程设计和施工进行了一般说明。《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)^[1]中规定:寒冷和严寒地区有地下水的隧道,最冷月份平均气温低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,应采用深埋中心水沟;最冷月份平均气温低于 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,应在隧道下设防寒泄水洞。这些规范根本不能满足寒区隧道设计的需要,无法正确指导工程技术人员进行设计与施工,因此,迫切需要对隧道冻害程度进行分级,以便制定相应的防冻措施。

目前,对于隧道病害等级划分^[2]的研究很多,已经由定性划分向定量划分、单因素划分向多因素综合划分的方向发展,但是对于隧道冻害的分类、分级研究相对较少。铁道部第二勘察设计院根据最冷月平均温度和最大冻结深度对寒区铁路隧道进行了划分^[3],但是,仅仅从气候条件这个单一因素对冻害等级进行了划分,而影响隧道冻害发生的因素很多,其中最主要的就是温度和水,因此,有必要在综合考虑气候和地下水条件的基础上,对寒区隧道冻害进行等级划分。作者首先采用最冷月平均气温和冻结深度2个指标对寒冷程度进行划分;然后,采用地下水的赋存与补给形式和渗入隧道的情况2个指标对地下水的危害程度进行划分;最后,在综合考虑气候和地下水条件对隧道冻害影响的基础上,采用综合评判的方法对隧道冻害等级进行划分。

1 冻害产生的原因

目前,通过对大量寒区隧道的调查研究发现,在寒冷或严寒地区,发生“冻融”或“冻胀”现象是正常的,也是客观存在的,其主要表现可分为6类^[4]:隧道衬砌漏水、挂冰;隧道底部冒水、积水、冻胀;隧道衬砌开裂、酥碎、剥落;隧道洞门墙开裂;地表截排水沟、出水口冻结;隧道洞口处热融滑塌。

收稿日期: 2009-04-18.

基金项目: 国家西部交通建设科技资助项目(200731881267);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-07-0118).

作者简介: 罗彦斌(1980—),男,陕西干阳人,博士研究生.

工程实践证明,围岩发生冻害是需要条件的,首先环境温度需在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,而且低温的时间要足够长;二是要有水的存在,围岩中需要有足够的含水量;三是围岩性质必须能允许冻胀发生,例如岩层和粗粒土一般是不会冻胀的;四是基础资料不准确,设计和施工中对防冻问题没有考虑或考虑不周全,治水措施不当,施工不规范,防排水材料及混凝土施工质量存在缺陷,导致冻害发生。

分析以上4个冻害发生的条件,温度和水是必要条件,可以说所有的冻害现象都与这2个因素相关。围岩性质和施工措施是冻害发生的充要条件,当围岩性质具有冻胀特性时会发生冻胀破坏,当施工措施不当时会恶化冻害情况,但衬砌挂冰、路面结冰、出水口冻结等冻害现象显然不是由围岩的冻胀性和施工措施不当引起的。由此可见,温度和水是隧道冻害发生的必要条件,可以说是缺一不可的。

因此,对于隧道冻害等级的划分,应该选取气候和地下水条件作为其影响因素。

2 气候对隧道冻害的影响

气候是隧道冻害产生的基本条件之一,只有气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,才会有冻害发生的可能性。在寒区隧道中常用的气候参数有年平均气温、年平均地温、最冷月平均气温、冻结指数、冻结深度和冻结时间等。

对于隧道工程,最直观的就是地温,只有地温低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,才会具备出现冻害的基本条件,但地面温度的取得比气温难得多,而且精度往往达不到要求,因此,通常采用气温参数。研究表明,隧道的冻害程度随着气温的降低而加重,最冷月平均气温是低温状态的特征值,可以直观地体现工程所处地区的寒冷程度。

围岩的冻结深度和冻结持续时间是外界气候条件与土层内在性质、表面性质共同作用的综合反映。研究表明,冻土类型及冻结深度给寒区工程所造成的冻害程度是有差异的,多年冻土区冻害发生最为严重,季节冻土区冻害比多年冻土区轻。季节冻土区内冻害的发生频率及程度,从区域来看,一般是随冻结深度增大而明显增强。通过调查发现,在季节性冻土地区,最冷月平均气温越低,冻结深度越大,冻结深度随着最冷月平均气温的降低呈线性增长的趋势。

气候条件选取最冷月平均气温和冻结深度2个控制指标,对隧道的寒冷程度进行划分,由轻到重共划分为5级,如表1所示。

表1 隧道的寒冷程度
Table 1 The cold level in tunnel

寒冷程度		最冷月平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	冻结深度/m
0	温	> -5	0.2 ~ 0.7
1	冷	$-5 \sim -10$	0.7 ~ 1.3
2	寒	$-10 \sim -15$	1.3 ~ 1.8
3	重寒	$-15 \sim -25$	1.8 ~ 2.9
4	严寒	< -25	> 2.9

注:对于多年冻土隧道,极限最大冻结深度可达7 m,最冷月平均气温更低。

3 地下水对隧道冻害的影响

隧道冻害产生的基本条件除了气候以外,还有水的存在。如果围岩处于干燥状态,即使温度很低,也基本上不存在冻害问题。水,包括液相水与固相冰,是造成工程病害的主要因素,这个问题在寒区隧道中显得尤为重要,特别是在隧道运营阶段,基本病害几乎离不开水的因素。

一般来说,隧道围岩的含水量与围岩的透水性和地下水位有关。围岩发生冻结的过程是地下水不断被吸收的过程,围岩的透水性和地下水位对围岩的冻结速度影响极大,围岩的冻结速度与围岩的渗透系数成正比,与冻结线到地下水面之间的距离成反比。

因此,引入地下水赋存与补给形式来描述隧道围岩的地下水位,用地下水渗入隧道情况来描述隧道围岩的渗透系数.从定性角度,将地下水对隧道的危害程度划分为5级,如表2所示.

表2 地下水对隧道的危害程度

Table 2 The harm degree of groundwater in tunnel

危害程度		地下水赋存与补给条件	地下水渗入隧道情况
0	无	干燥隧道	无
1	轻	含少量水隧道,无补给	少量渗、滴水
2	中	含水隧道,无补给	渗、涌水
3	重	含水隧道,水平补给	持续涌水
4	严重	含水隧道,水平和垂直补给	常年渗、涌水

注:对于全多年冻土隧道,全部处于含冰围岩中,在开挖过程中由于人为影响或暖季促使围岩融化,有少量滴水现象,冻害程度轻微,在划定时另作处理.

对于0级危害程度,隧道处于干旱地区或无水岩层中,且无补给来源,此时基本上不发生冻害;对于1级和2级危害程度,隧道基本上无地下水补给,其渗水量随着时间的推移会逐渐减少,直至完全消失;对于3级危害程度,隧道处于含水岩层中,山体上部属于不透水岩层或者处于冻结状态,没有直接大气降水的垂直补给,只有水平方向地下水补给,此时隧道内若有持续涌水,冻害情况将比较重;对于4级危害程度,隧道围岩既接受大气降水、地表水的直接垂直渗入补给,同时又有稳定的深部地下水补给(即所谓的水平补给),若有大量的渗、涌水常年侵入隧道,冻害情况将会特别严重;对于含冰隧道,常发生在全多年冻土隧道中^[5],在等级划分时需另作处理.

4 隧道冻害等级的划分

通过分析气候和地下水条件对隧道冻害的影响,分别划分了隧道的寒冷程度和地下水的危害程度,如表1和表2所示.而在实际工程中,往往是气候和地下水双重条件的作用,因此有必要综合考虑这2个因素,对隧道冻害等级进行划分.

由于气候和地下水作为冻害产生的基本条件,具有同等重要的地位,而且两者之间没有必然的联系,即没有相关性,因此,假定其对隧道冻害等级划分的影响相互独立,且权重相等.

$$V = \{v_1, v_2\} \quad (1)$$

$$U = \{u_1, u_2\} \quad (2)$$

式中, V 、 U 分别表示隧道冻害等级和等级划分的全部因素; v_1 、 u_1 分别表示隧道的寒冷程度和对应的等级划分因素; v_2 、 u_2 分别表示地下水对隧道的危害程度和对应的等级划分因素.

v_1 包含“温”、“冷”、“寒”、“重寒”和“严寒”5个等级, v_2 包含“无”、“轻”、“中”、“重”和“严重”5个等级,对应的 u_1 和 u_2 也包含了5个划分因素.对 u_1 和 u_2 中的因素进行组合,会出现25种情况,采用综合评判中的加权平均法^[6],结合实际情况对隧道冻害等级进行划分,详细的划分如表3所示.

对于隧道所处地区最冷月平均气温在 $-5\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,且冻结深度小于 0.7 m 的情况,无论隧道含水与否,基本上都不会发生冻害,冻害等级划分为I级;对于干燥隧道,无论隧道所处地区气温条件多么严寒,基本上也不会发生冻害,冻害等级划分为I级;其余各种情况,根据加权平均法,划分为轻、中、重和严重4个等级;对于全多年冻土隧道,气候条件虽然更加恶劣,但是隧道处于含冰围岩中,常年处于冻结状态,冻害现象并不严重,在开挖过程中人为影响或暖季促使围岩融化,隧道内有轻微渗漏水,冻害等级可划分为II级.

根据表3划分的冻害等级,结合公路隧道的工程实际,作者给出具体的冻害特征^[7-9],如表4所示.

表3 隧道冻害等级划分

Table 3 Classification of frost damage in tunnel

气候条件		地下水对隧道的危害程度				
		无	轻	中	重	严重
		0	1	2	3	4
温	0	0	0	0	0	0
冷	1	0	2	3	4	5
寒	2	0	3	4	5	6
重寒	3	0	4	5	6	7
严寒	4	0	5	6	7	8

注:0为I级(冻害微);2、3为II级(冻害轻);4为III级(冻害中);5、6为IV级(冻害重);7、8为V级(冻害严重)。

表4 隧道冻害特征

Table 4 Characteristics of frost damage in tunnel

冻害等级		冻害特征
I	微	无
II	轻	轻微,不影响交通
III	中	衬砌层冻裂,洞内渗水挂冰,路面结冰,冻害发生于12月至翌年2月
IV	重	衬砌破裂较严重,含水围岩较大面积发生渗漏,较大范围挂冰,路面冻冰,冻结期大于4个月
V	严重	衬砌层破裂严重,大面积渗漏水,挂冰严重,路面结冰,排水系统出现冰塞,冻结期大于5个月

5 结论

1) 根据最冷月平均温度和冻结深度2个控制指标,可以将隧道所处地区的寒冷程度划分为5级;根据地下水的赋存与补给形式,结合地下水渗入隧道的情况,可以将地下水对隧道的危害程度划分为5级。

2) 通过综合考虑气候的寒冷程度和地下水的危害程度,采用综合评判法,结合实际情况,将隧道冻害等级划分为5级。

3) 全多年冻土隧道的气候条件虽然更加恶劣,但是隧道处于含冰围岩中,常年处于冻结状态,冻害现象并不严重,由于隧道开挖过程中人为影响或暖季促使围岩融化,冻害等级可划分为II级。

参考文献:

- [1] 重庆交通科研设计院. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 罗鑫,夏才初. 隧道病害分级的现状及问题[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(5):877-880.
LUO Xin, XIA Cai-chu. Current situation and problems of classification of tunnel diseases [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(5): 877-880. (in chinese)
- [3] 铁道部第二勘测设计院. 铁路工程设计技术手册:隧道[M]. 北京:中国铁道出版社,1995:240-245.
- [4] 田俊峰,杨更社,刘慧. 寒区岩石隧道冻害机理及防治研究[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(8):1484-1489.
TIAN Jun-feng, YANG Geng-she, LIU Hui. Study on the freezing damage mechanism and its prevention in cold region rock tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(8): 1484-1489. (in chinese)
- [5] 张德华,王梦恕. 青藏高原永久冻土区隧道施工新技术[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(24):4234-4237.
ZHANG De-hua, WANG Meng-shu. New technology for tunneling in permafrost in qinghai-tibet plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4234-4237. (in chinese)
- [6] 周泰文,王晓星,刘后. 模糊数学基础简明教程[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1993:165-186.
- [7] 陈建勋. 公路隧道冻害防治技术[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(4):68-70.

CHEN Jian-xun. Technique of preventing frost damage in highway tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 68-70. (in Chinese)

[8] 陈建勋, 罗彦斌. 寒冷地区隧道温度场的变化规律[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 44-48.

CHEN Jian-xun, LUO Yan-bin. Changing rules of temperature field for tunnel in cold area [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 44-48. (in Chinese)

[9] 陈建勋, 罗彦斌. 寒冷地区隧道防冻隔温层厚度计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 76-79.

CHEN Jian-xun, LUO Yan-bin. Calculation method of antifreezing layer thickness in cold region tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 76-79. (in chinese)

Classification of Frost Damage Grades in Tunnel

LUO Yan-bin^{1,2}, CHEN Jian-xun^{1,2}, WANG Meng-shu¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to supply basic principles for preventing frost damage in tunnels, through analyzing the conditions of frost damage occurred in tunnels, climate and groundwater were chosen as main influencing factors to grading. On the basis of partition for climate cold level and groundwater harm degree, the classification of frost damage in tunnels is partitioned with a comprehensive evaluation method. The results show that the climate and groundwater are main influencing factors of frost damage; The cold level is partitioned into five grades by the control indicators of climate including the average temperature of the coldest month and the freezing depth; The harm degree of groundwater is partitioned into five grades by the control indicators of groundwater including the form of groundwater occurrence, supplying and the situation of groundwater spreading into tunnel. The classification of frost damage in tunnels is divided into five grades according to the influencing factors of climate and groundwater for frost damage levele; In permafrost, although the climate is cold in extreme, frost damage happens less seriously in the tunnels where surrounding rocks are freezing all the year round. The frost damage of permafrost tunnels is classified as grade II while the ice on the surrounding rocks melts by the impacting of human activities in excavation or warming.

Key words: tunnelling; frost damage; comprehensive evaluation

(责任编辑 梁洁)