

高烈度地震区冻土公路隧道结构动力特性研究

田敏哲

(中铁十一局集团第二工程有限公司, 湖北 十堰 442013)

摘要: 为揭示高烈度地震区冻土公路隧道震动特性,借助有限元软件分别研究了多年冻土隧道在全冻、1~10 m 融化圈以及季节性冻土隧道在全融、1~10 m 冻结圈状态下,围岩与结构地震加速度、位移等动力时程响应特性。结果表明:多年冻土隧道随着融化圈深度的增加,地表及洞顶的地震加速度、位移响应均逐渐增大。融化圈为1 m 时地震影响最小,与全冻冻结状态下相比,洞顶加速度减小约9%,洞顶位移减小约22%,即适当厚度的融化圈具有一定的减震作用;季节性冻土隧道随着冻结深度的增加,地表及洞顶的地震加速度、位移响应均逐渐减小。冻结深度为10 m 时,地表及洞顶加速度达到最小值,全融状态下,地表及洞顶加速度达到最大值。此外,全冻状态下地表及洞顶位移小于全融状态,即全冻状态下地震作用时,破坏作用较全融状态下小。

关键词: 公路隧道;地震;动力响应;多年冻土

高烈度地震作用下,公路隧道极易产生衬砌开裂、洞口滑塌等病害,尤其在多年冻土、季节性冻土区,公路隧道围岩与结构动力响应机制尚不明确,缺乏结构抗震设计依据,隧道工程施工问题尤为突出。国外学者开展隧道抗震研究,多围绕区间隧道、地下车站,分析研究震害类型和原因。20世纪90年代,中国修建南昆铁路时西南交大、铁二院等基于面波、体波提出了抗震验算方法,该法改进了洞室结构计算惯性力法,即改进了围岩阻尼惯性力法,指出洞口设置抗震缝以应对隧道纵向抗震,建议隧道裂缝段纵向抗震计算选用Schukla法。目前,原型观测和模型试验研究在应用中不可避免地会有代价昂贵的问题,鉴于高烈度震区隧道结构动力复杂,分析研究中存在不能获取解析解的问题,目前国内外对隧道结构抗震、防震研究以基于有限元的数值方法为主。

客观来讲,行业内针对地下隧道结构的抗震分析尚未形成全面系统的理论体系。由于支配地下隧道结构地震响应的控制因素是地基变形,静力法不甚合理。基于动力有限元分析,理论体系比较全面,但计算过程中计算模型、参数确定非常困难,直接导致分析结果的准确性。在运用动力有限元分析时,需考虑多年冻土层的厚度及其冻融变化对隧道结构的影响。

综上所述,为了明确高烈度地震区公路隧道震动

特性,给出合理设计参数,该文借助有限元软件分别对多年冻土隧道全冻、1~10 m 融化圈,以及季节性冻土隧道全融、1~10 m 冻结圈状态下,围岩与结构的地震加速度、位移等动力时程响应特性进行研究。

1 动力有限元本构方程

任一地震时点,若结构体系发生虚位移 $\{\delta_f\}$,结构体系内部虚应变 $\{\delta\epsilon\}$ 对应发生,基于已知瞬态应力 $\{\sigma\}$,给定瞬时的应变能增量计算如下:

$$\delta U = \iiint_V \{\delta\epsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (1)$$

按有限元的集合办法,最终整个体系的动平衡方程为:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = [F] \quad (2)$$

动力平衡方程经简化为:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = -[M]\{\ddot{\mu}_g\} \quad (3)$$

2 计算模型

依托工程为G214线共和至结古公路段的鄂拉山隧道、姜路岭隧道,隧道所在的地区中高山脉终年霜雪

收稿日期:2019-01-10(修改稿)

基金项目:国家科技支撑计划项目(编号:2014BAG05B05)

作者简介:田敏哲,男,大学本科,高级工程师。E-mail:401150223@qq.com

不断,无绝对无霜期,全年冰冻期长达 7 个月,年平均气温 $-10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-48.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。隧道全线设计行车速度 60 km/h ,净宽 10.25 m ,净高 7.15 m ,隧道建筑限界高 5.00 m 。

经中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室试验测定,研究区冻土物理力学性质指标如表 1 所示。季节性冻土的物理力学参数根据文献资料取值。衬砌采用 C45 混凝土。

表 1 冻土物理力学指标

土的类型	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水量/ %	最大动剪切 模量/ kPa	动泊 松比
多年冻土	19.4	21.5	2.36×10^6	0.35
融土	17.8	31	1.67×10^5	0.48
季节性冻土	17.8	26	1.97×10^5	0.40
衬砌	27	—	3.37×10^7	0.20

模型中,土体本构模型采用 Mohr—Coulomb 模型(图 1)。考虑水平和竖向地震波影响,计算模型侧面人工边界距地下结构为 3 倍地下结构水平有效宽度,底面人工边界取至地震作用基准面。为解决有限截取模型边界上波的反射问题引起波震荡,边界条件采用黏—弹性吸收边界,不仅可较好地模拟地基的辐射阻尼,也能模拟远场地球介质的弹性恢复性能,具有良好的低频稳定性。

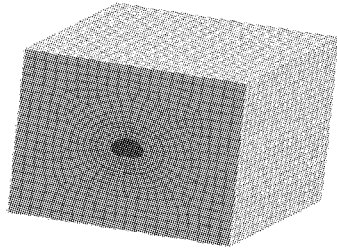


图 1 冻土隧道地震分析模型

采用埃尔森特洛(EI Centro,峰值加速度 3.569 m/s^2 ,持续时间 53.72 s)地震波数据建立结构抗震有限元耦合分析模型,其地表加速度时程如图 2 所示。

3 多年冻土隧道结构动力响应分析

随着地震作用力的施加,多年冻土不同融化圈厚度下围岩与结构加速度、位移、相对加速度时程将产生较大动力响应变化(表 2、3、4),进而影响高烈度区公路隧道多年冻土段结构安全。通过建立不同融化圈隧

道结构模型,然后输入地震波数据,进行隧道结构抗震耦合的时程分析。

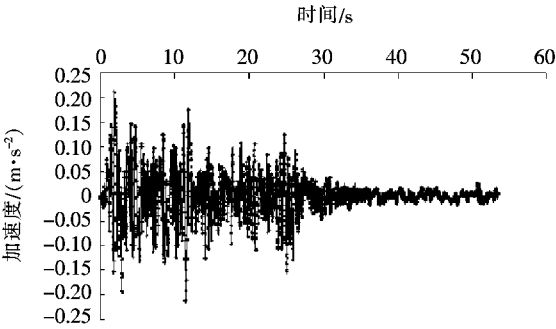


图 2 EI Centro 加速度时程曲线

表 2 各地层地表及洞顶加速度值

融化圈深度/ m	地表加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	洞顶加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
全冻	6.551 80	5.827 80
1	5.857 77	5.302 90
2	5.897 89	5.328 38
3	5.899 88	5.372 15
4	6.047 43	5.610 56
6	6.075 63	5.725 83
8	6.161 59	5.742 24
10	6.534 86	6.224 88

表 3 地表及洞顶位移

融化圈深度/m	地表位移/m	洞顶位移/m
全冻	0.049 501	0.044 960
1	0.041 715	0.037 367
2	0.042 140	0.037 686
3	0.042 651	0.038 633
4	0.045 412	0.042 722
6	0.047 251	0.044 068
8	0.047 423	0.045 434
10	0.049 480	0.048 024

表 4 拱顶相对加速度

融化圈深度/m	相对加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	发生时刻/s
全冻结	2.560	4.3
1	2.440	4.3
2	2.460	4.3
3	2.464	4.3
4	2.468	4.3

续表 4

融化圈深度/m	相对加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	发生时刻/s
6	2.534	4.3
8	2.563	4.3
10	2.571	4.3

由表 2 可知:多年冻土隧道随着融化圈深度的增加,地表及洞顶加速度逐渐增加。融化圈为 1 m 时,地表及洞顶加速度达到最小值,分别为 $5.857\ 77$ 、 $5.302\ 9\ \text{m/s}^2$ 。融化圈为 10 m 时,地表及洞顶加速度达到最大值,分别为 $6.534\ 86$ 、 $6.224\ 88\ \text{m/s}^2$,与全冻结状态下的数值相近。总体而言,融化圈为 1 m 时地震影响最小,与全冻结状态下相比,洞顶加速度减小约 9%,可见适当厚度的融化圈有一定的减震作用。

由表 3 可知:多年冻土隧道随着融化圈深度的增加地表及洞顶位移呈逐渐增加的趋势。融化圈为 1 m 时,地表及洞顶位移达到最小值,分别为 $0.041\ 715$ 、 $0.037\ 367\ \text{m}$ 。融化圈为 10 m 时,地表及洞顶位移达到最大值,分别为 $0.049\ 48$ 、 $0.048\ 024\ \text{m}$,与全冻结状态下的数值相近。总体而言,融化圈为 1 m 时地震影响最小,与全冻结状态下相比,洞顶位移减小约 22%,可见适当厚度的融化圈有一定的减震作用。

由表 4 可知:多年冻土隧道随着融化圈深度的增加,地震作用下隧道顶、底相对加速度呈逐渐增加的趋势,但变化幅度很小,相对加速度值均在 $2.5\ \text{m/s}^2$ 左右,发生时刻基本不变;融化圈 1 m 时,相对加速度值达到最小;融化圈 10 m 时,相对加速度值达到最大;全冻结状态下相对加速度值较 1 m 融化圈大,这与 1 m 融化圈的减震效果有关。

4 季节冻土隧道结构动力响应分析

建立有限元分析模型,分析季节性冻土段全融、冻结 1、2、3、4、6、8、10 m 共 8 种工况,地表及洞顶加速度、位移及相对加速度时程曲线的变化特征。首先建立不同冻结圈隧道结构模型,然后输入地震波数据,进行隧道结构抗震耦合的时程分析,得到分析结果如图 3~5 所示。

由图 3~5 可知:季节性冻土隧道随着冻结深度的增加地表及洞顶加速度、位移及相对加速度均呈逐渐减小的趋势。冻结深度为 10 m 时,地表及洞顶加速度、位移及相对加速度达到最小值;全融状态下,地表及洞顶加速度、位移及相对加速度达到最大值。总体

而言,冻结深度为 10 m 时与全融状态相比,洞顶加速度、位移及相对加速度减小约 12.7%、42%、23%,可见季节性冻土隧道围岩冻结对结构减震具有一定作用。

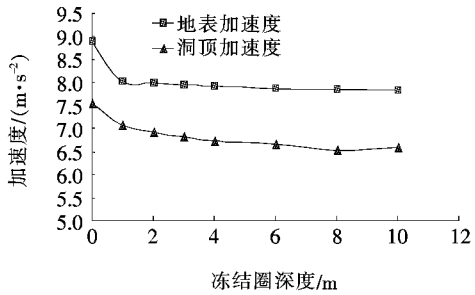


图 3 地表及洞顶加速度曲线

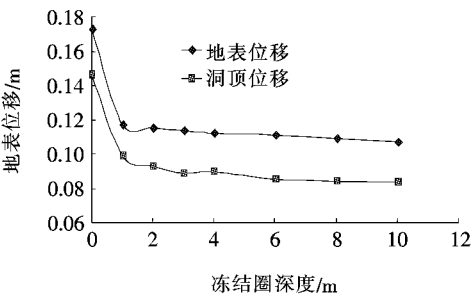


图 4 地表及洞顶位移曲线

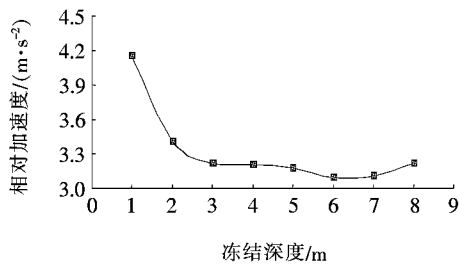


图 5 相对加速度曲线

为揭示地层冻融条件对隧道地震响应的影响,建立围岩全冻、全融状态下结构动力响应模型。全冻、全融是冻土隧道围岩的两种极端冻融条件,这种极端的围岩状态受到地震作用时隧址区地表及洞顶位移、围岩与结构加速度、拱顶拱底相对加速度变化规律将影响冻土区隧道的结构设计。地震响应结果见表 5。

由表 5 可见:① 全冻状态下地表及洞顶位移小于全融状态,其中地表位移减小 71.4%,洞顶位移减小 69.2%;② 全冻状态下地表及洞顶加速度值均较全融状态小,洞顶、洞底相对加速度值也有同样的规律。可见,全冻状态下地震作用时,破坏作用较全融状态下小,即可认为同等条件下,多年冻土段隧道抗震性能显著优于季节性冻土段。

表 5 全冻、全融地层隧道地震响应

状态	位移/m		加速度/(m·s ⁻²)		相对加速度/ (m·s ⁻²)
	地表	洞顶	地表	洞顶	
全冻	0.049 501	0.044 960	6.551 80	5.827 80	2.570
全融	0.172 956	0.145 829	8.886 79	7.555 76	4.154

5 结 论

(1) 多年冻土段隧道随着融化圈深度的增加地表及洞顶加速度、位移呈逐渐增加的趋势;融化圈为 1 m 时地震影响最小,与全冻结状态下相比,洞顶加速度减小约 9%,洞顶位移减小约 22%,可见适当厚度的融化圈有一定的减震作用。

(2) 季节性冻土隧道随着冻结深度的增加地表及洞顶加速度、位移呈逐渐减小的趋势;冻结深度为 10 m 时与全融状态相比,洞顶加速度减小约 12.7%,洞顶位移减小约 42%,可见季节性冻土隧道围岩冻结对结构抗震具有一定作用。

(3) 全冻状态下地表及洞顶位移、加速度均小于全融状态,其中位移减小 71.4%、69.2%,且加速度值也有同样的规律,可见全冻状态下地震作用时,破坏作用较全融状态下小,即同等条件下,多年冻土段隧道抗震性能显著优于季节性冻土段。

参考文献:

[1] 朱元林,何平,等.冻土的动力学特性研究新进展[Z].中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室年报(第六卷),1996.

[2] American Railway Engineering Association. Seismic Design for Railway Structure (Manual for Railway Engineering)[Z],1996.

[3] 李涛,魏庆朝,刘林.青藏铁路多年冻土区桥梁地基融化时的抗震安全性分析[J].铁道学报,2005(4).

[4] 晏启祥,马婷婷.圆形隧道抗震分析若干近似解析方法比较研究[J].西南交通大学学报,2011(1).

[5] 谷栓成,朱彬,杨荣尚.地下结构动力响应分析中人工边界的影响[J].辽宁工程技术大学学报,2007(3).

[6] Liu J B, Wang Y. A 1D Time-Domain Method for In-Plane Wave Motions in A Layered Half-Space[J]. Acta Mechanica Sinica, 2007, 23(6): 673-680.

[7] Avram Sidi, Dan Givoli. Stability and Accuracy of Optimal Localnon-Reflecting Boundary Conditions[J]. Applied Numerical Mathematics, 2000(33): 327-340.

[8] 陈国兴,左熹,杜修力.土-地下结构体系地震反应的简化分析方法[J].岩土力学,2010(z1).

[9] 杨林德,王国波,郑永来,等.地铁车站结构振动台试验及地震响应的三维数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2007(8).

[10] 蒋昱州,徐卫亚,王瑞红,等.水电站大型地下洞室长期稳定性数值分析[J].岩土力学,2008(S1).

[11] 丁伯阳,宋新初,袁金华.饱和土隧道内集中荷载作用下振动位移反应的 Green 函数解答[J].工程力学,2009(6).

[12] 苗天德,朱久江,丁伯阳.对饱和多孔介质弹性波动问题中本构关系探讨[J].力学学报,1995(5).

[13] 刘银斌,李幼铭,吴如山.横向各向同性多孔介质中的地震波传播[J].地球物理学报,1994(4).

[14] 毕继红,张鸿,邓芑.基于耦合分析法的地铁隧道抗震研究[J].岩土力学,2003(5).

[15] 王丽霞,凌贤长.多年冻土地路基地震加速度反应谱特性研究[J].岩石力学与工程学报,2004(8).

[16] 高峰,陈兴冲,严松宏.季节性冻土和多年冻土对场地地震反应的影响[J].岩石力学与工程学报,2006(8).

[17] 刘顾楠.山岭隧道洞门段衬砌结构动力响应及震害机理研究[J].中外公路,2017(2).

[18] 凌燕婷,高波.高烈度地震区双线公路隧道减震措施研究[J].隧道建设,2008(4).