

文章编号:1006-2106(2007)03-0029-04

青藏铁路多年冻土区路基结构的动力分析^{*}

李 涛^{**}

(上海铁路城市轨道交通设计研究院, 上海 200070)

摘要:研究目的:本文对青藏铁路冻土路基在列车荷载下的结构动力进行了分析研究,为多年冻土区路基工程设计和铁路运营安全分析提供了依据。

研究方法:以青藏铁路清水河多年冻土区试验段路基结构为工程背景,利用列车——轨道二维动力模型得到的道床底部列车荷载激励曲线,对冻土路基结构进行有限元时程反应分析,探讨冻融状态下路基的列车振动荷载效应。

研究结论:无论是暖季融化还是寒季冻结状态,列车振动荷载产生的土体压应力都大大高于静荷载,车速对土体动应力反应有明显影响;冻结状态下,路基中下部土体的动力反应较大,而暖季融化时路基顶部土体对动应力有较显著的放大作用,因此,在工程设计和运营养护时应有针对性地对结构进行加强。

关键词:青藏铁路;路基;冻土

中图分类号:U416 **文献标识码:**A

Dynamic Analysis of Subgrade Structure of Qinghai – Tibet Railway in Permafrost Region

LI Tao

(Urban Mass Transit Design and Research Institute of Shanghai Railway, Shanghai 200070, China)

Abstract: Research purposes: The analysis and research were done on the structural dynamics of the subgrade of Qinghai – Tibet Railway in permafrost region under the load of train for the purpose of providing the basis for design of subgrade in permafrost region and making analysis of railway operation.

Research methods: Taking the subgrade structure in test section of Qinghai – Tibet Railway in Qingshuihe permafrost region as object, the finite element time – histories reactive analysis was done by using the excited curves of roadbed bottom under train load obtained from two dimensional dynamic model, and the exploration was made on the subgrade effects to the train vibration load under freeze – thawing condition.

Research conclusions: No matter whether under the thawing condition in warm season or under freezing condition in cold season, the pressure stress of soil body caused by train vibration load is much higher than that under static load and the stress of soil body influences the train speed obviously. Under freezing condition, the soil body in middle and bottom parts of subgrade has a larger dynamic effect, but under thawing condition in warm season, the soil body on the subgrade has obvious amplification effect to dynamic stress. Therefore, the structure should be reinforced correspondently in engineering design and maintenance.

Key words: Qinghai – Tibet Railway; subgrade; frozen soil

^{*} 收稿日期:2006-08-02

^{**} 作者简介:李涛,1957 年出生,男,教授级高级工程师,现任上海铁路城市轨道交通设计研究院副总工程师。

随着青藏铁路的建成通车,标志着我国科技界在攻克多年冻土区修筑工程这一世界性难题已取得了重大进展,目前,国内外学者对冻土路基结构的地温场机理仿真计算进行了深入研究,取得了大量的成果。但应该看到,与冻土温度场密切相关的冻土路基结构应力和应变才是工程建设者最终关心和需要研究解决的重要问题,至今为止还缺乏系统的研究。在冻土的动力特性方面,一些学者进行了研究。俄罗斯学者崔托维奇^[1]对冻土的动力性质进行了研究;我国何平^[2]研究了饱和冻结粉土的动力特性;刘建坤等^[3]模拟计算了多年冻土路基上列车振动波沿地表面传播的衰减情况,但尚未见到研究列车振动荷载影响冻土路基结构应力变化方面的有关文献。

本文以青藏铁路清水河多年冻土区试验段路基结构为工程研究背景,利用列车-轨道二维动力模型,得到作用于道床底部的列车荷载激励曲线,将其作为动力荷载施加到冻土路基结构模型上,应用有限元方法进行时程反应分析。计算中分别考虑了暖季和寒季条件,按不同的列车速度分析路基及地基各部位土体的动力响应;与列车静活载作用相比,给出了冻土路基动力反应的有关结果,为工程设计和铁路运营安全分析提供了依据。

1 有限元动力分析模型

1.1 试验段概况

青藏铁路清水河多年冻土工程试验段^[4]位于高温冻土细粒土地区,属青藏高原冰雪型气候区,气候干燥、低温。一年分为寒季(月平均气温为负值)和暖季(月平均气温为正值)。冻结期为9月至次年4月。本地段出露地层主要为第四系冲、洪积砂粘土、砾砂及风积细砂。由地质钻孔资料可知,多年冻土上限为地面下3 m左右,年平均地温 $-0.91\text{ }^{\circ}\text{C} < T < -0.70\text{ }^{\circ}\text{C}$,属高温不稳定区。

1.2 计算模型

采用铁路里程DK 1 025+600处普通路基为计算模型,路基高度6.3 m,顶面宽度8.0 m。路基断面及地质情况见图1和表1。采用有限元分析程序ANSYS进行静、动力计算,轨道-路基系统的分析模型见图2,采用二维平面应变模型,共有2 298个节点,2 174个四边形单元。路基两侧地基的计算宽度取值范围为30 m,深度的取值范围为20 m,以减少边界效应。

1.3 计算参数选择

有限元分析时采用的容重 γ 、弹性模量 E 和泊松比 μ 等路基填料和地下土层计算参数取值见表1。为

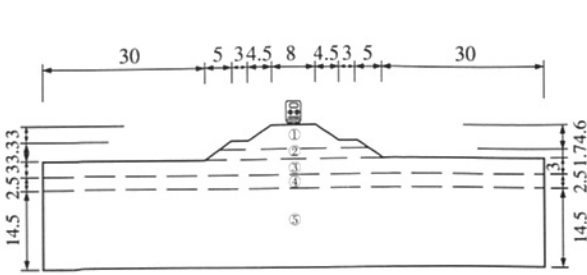


图1 路基断面及地质分层情况(单位:m)

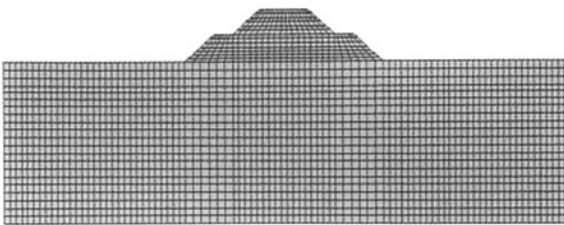


图2 轨道-路基系统有限元分析模型

减少复杂因素,假定材料始终保持弹性状态,阻尼比取0.05。

表1 路基填料和地下土层的计算参数

层号	材 料	$\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	E / kPa		μ	
			(冻结 状态)	(融化 状态)	(冻结 状态)	(融化 状态)
1	粗砂填料	18.7	120×10^6	2.5×10^6	0.20	0.35
2	粗砂填料	18.7	560×10^6	2.5×10^6	0.21	0.35
3	细 砂	18.0	258×10^6	3.0×10^6	0.23	0.33
4	砾 砂	17.0	540×10^6	540×10^6	0.22	0.22
5	泥灰岩	18.9	1200×10^6	1200×10^6	0.22	0.22

2 列车-轨道系统动力模拟荷载

2.1 列车-轨道二维动力模型

列车-轨道系统动力分析模型是由列车模型、轨道模型及轮轨间的耦合关系组成的体系(图3)。列车模型为多节车体、转向架、轮对、二系弹簧和阻尼减振器组成的多自由度振动系统。轨道模型为3层质量-弹簧-阻尼器系统支持的弹性长梁,其中弹性长梁按有限元处理,模拟钢轨;3层质量-弹簧-阻尼器系统分别模拟轨下垫层、轨道和道床。

利用该系统模型在计算机上进行模拟分析,得到作用于道床底部的列车荷载激励曲线^[5],将其作为动力荷载作用在路基结构有限元模型上。图4为DF4型内燃机车加挂8节货车重车以60 km/h速度通过时的道床底部列车激振力时程曲线。

2.2 列车静活载

列车静活载按中-活载考虑,机车单轮轴重为110 kN。

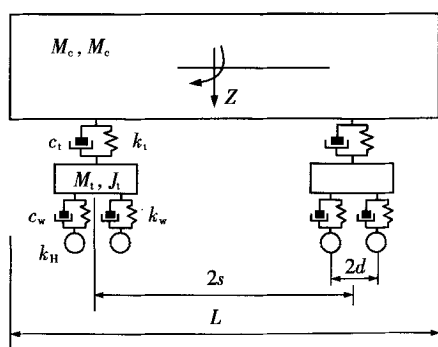


图3 列车-轨道系统二维动力模型

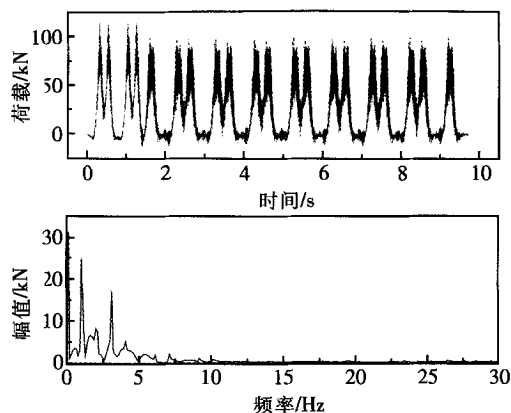


图4 车速60 km/h时道床底部列车激振力时程曲线

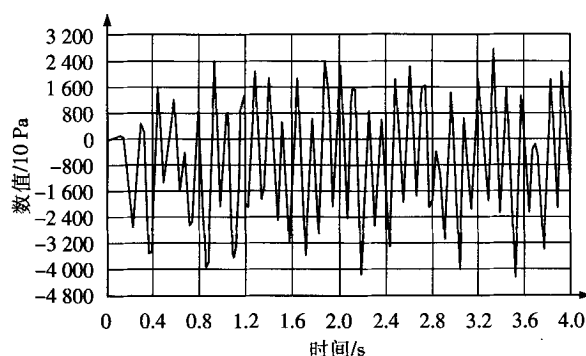


图5 车速60 km/h时路底部动应力时程曲线

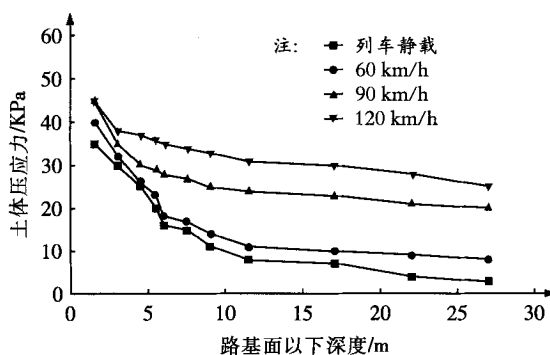


图6 冻结时路基面下不同深度处土体压应力

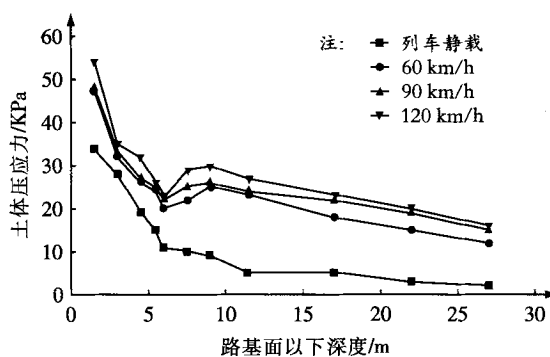


图7 融化时路基面下不同深度处土体压应力

3 主要计算结果

分别考虑路基结构处于冬季冻结和暖季融化状态,在60 km/h、90 km/h、120 km/h 3种车速以及列车静活载情况下,观察路基及地基土体沿路基深度方向的应力变化,有以下主要特征:

3.1 列车静活载下土体应力等压线为钟形曲线,接近德、日等国的实测线^[6]。冻结时比融化状态稍大,例如在路基中心顶面下1.5 m处为33.4~34.2 kPa,相差不到3%。

3.2 列车振动荷载产生的土体压应力明显高于静活载(图6、图7),车速越高,差别越大。在路基中心顶面下1.5 m处,比静活载增大17%~31%(冻结状态)和37%~59%(融化状态);在路基中心顶面下6.3 m处(路基底),增大7%~130%(冻结状态)和87%~120%(融化状态);在地基深处增大数倍。

3.3 列车振动荷载产生的土体压应力沿深度分布规律为:在路基结构内的变化规律与静活载基本一致,但在路基底以下则衰减很慢,与静活载相比出现很大反差,说明地基土对列车振动荷载的动力反应明显。

3.4 车速对土体动应力反应有明显影响,车速越高,应力值越大。例如在路基中心顶面下3.0 m处,

120 km/h、90 km/h 车速产生的动应力分别比60 km/h 车速增大13%~21%(冻结状态)和4%~6%(融化状态)。

3.5 路基中下部土体在冬季冻结状态时的动力反应要大于暖季融化状态,此时车速变化也加大了动应力变化的幅度。例如在路基底,融化状态下3种车速产生的应力变化范围为11%,而冻结状态下则增大为118%,这主要是由于冻结状态下土体的弹性模量和刚度增大,自振周期改变,导致动力反应明显的原因。

3.6 融化状态下,列车动载产生的应力在路基顶部明显增大,但随深度增加又逐渐衰减,表明融化时的路基顶部土体对动应力有放大作用,因此,在工程设计时应

给予足够的重视,对结构进行必要的加强。

4 结论

本文建立了多年冻土路基结构有限元模型,利用道床底部的列车荷载激励曲线,进行时程反应分析。结果表明:在暖季融化和寒季冻结条件下,考虑列车静载时,多年冻土区土体压应力未出现明显变化;列车振动荷载产生的土体压应力明显高于静荷载,车速越高,差别越大,在天然地面以下则衰减很慢,与静活载应力急剧下降相比出现很大反差;在冻结状态时路基中下部土体的动力反应明显大于融化状态,车速对土体动力反应有明显影响;暖季融化状态下,路基顶部土体的动力反应较大。该结论可为工程设计和铁路运营安全分析提供依据。

参考文献:

- [1] 崔托维奇. 冻土力学[M]. 北京:科学出版社,1985:1-464.
- [2] 何平. 饱和冻结粉土的动力特性[D]. 兰州:中国科学院兰州冰川冻土研究所,1993.
- [3] 刘建坤,等. 青藏热水煤矿多年冻土区列车引起的地面振动检测与模拟[J]. 冰川冻土,2004,26(2):177-180.
- [4] 铁道第一勘察设计院,等. 路基石结构-片石通风路堤试验研究[R]. 2004.
- [5] 王逢朝,夏禾,等. 列车震动对环境及建筑物的影响分析[J]. 北方交通大学学报,1998,22(8):13-17.
- [6] 郝赢. 铁道工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1994:180-186.

(编辑 慕成娟)

(上接第 11 页)

匀性有关。原状黄土在其受荷过程中,结构可稳性的丧失伴随着结构可变性的发挥,从静三轴剪切试验来看,可稳性主要在荷载增长的前期起作用,可变性则在荷载增长的后期起作用。没有可稳性的丧失,就不会有可变性的发挥。可稳性的丧失是一个损伤过程,其结果是初始结构由调整到破坏;可变性的发挥是一个愈合过程,其结果是次生结构的形成和发展。

在作用力未达到初始的联结强度以前,主要是初始结构性的自我调整过程,变形很小,表现为应力与应变之间的线性关系;当作用力达到结构强度时,土的初始结构大部分被破坏,力的微小增量会引起变形的较大增长;当作用力超过土的结构强度而继续增长时,随着变形的增长,被破坏的土的结构又会逐渐趋于新的稳定,使次生结构逐渐形成,并且在次生结构形成的强度增长不足以弥补外荷应力增长的速率时,出现土的最终破坏。

5 结论

本文以扫描电镜及静三轴剪切试验为研究手段,对 Q_3 、 Q_2 原状黄土的结构性及其强度变形特性进行了分析,得到如下结论:

5.1 随着埋藏深度的增大,结构特征由支架大孔微胶结结构变为镶嵌微孔半胶结结构,支架大孔孔隙发育变为粒间孔隙发育,再为微孔孔隙发育,而胶结物的多寡则与沉积的历史环境相关。

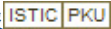
5.2 在主应力差与轴向应变关系曲线中,各层黄土都表现出强烈的结构性。黄土 L_1 、 L_2 可稳性较大,可变形较小,应力应变曲线呈弱软化型,而黄土 L_3 、 L_4 在低围压下其可稳性大,应力应变曲线呈弱软化型,而高围压下可变性大,呈弱硬化型;各层黄土随围压的增大,其峰值强度随之增大,且体变由剪胀性向剪缩性转变。

5.3 黄土的强度变形特性在其结构联结没有遭到破坏以前主要表现为,其维持结构可稳性的能力和颗粒联结特性与稳定性有关;在结构联结遭到破坏以后表现为,结构可变性的能力和颗粒的排列特性与均匀性有关。

参考文献:

- [1] Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: Weley. 1943.
- [2] 胡再强,沈珠江,谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,6(19):775-779.
- [3] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报,2001,1(23):3-13.
- [4] 李兰. 黄土微结构的试验研究[J]. 水文地质工程地质,2004(3):17-20.
- [5] 邵生俊,周飞飞,龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量参数研究[J]. 岩土工程学报,2004,4(26):531-536.

(编辑 慕成娟)

作者: [李涛](#), [LI Tao](#)
作者单位: [上海铁路城市轨道交通设计研究院, 上海, 200070](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2007, 24(3)
被引用次数: 1次

参考文献(6条)

1. [崔托维奇](#) [冻土力学](#) 1985
2. [何平](#) [饱和冻结粉土的动力特性](#) 1993
3. [刘建坤](#) [青藏热水煤矿多年冻土区列车引起的地面振动检测与模拟](#)[期刊论文]-[冰川冻土](#) 2004(02)
4. [铁道第一勘察设计院](#) [路基新结构-片石通风路堤试验研究](#) 2004
5. [王逢朝](#); [夏禾](#) [列车震动对环境及建筑物的影响分析](#)[期刊论文]-[北方交通大学学报](#) 1998(08)
6. [郝赢](#) [铁道工程](#) 1994

本文读者也读过(6条)

1. [常利武](#), [徐艳杰](#), [Chang Liwu](#), [Xu Yanjie](#) [高温冻土路基动力响应的数值模拟研究](#)[期刊论文]-[路基工程](#)2007(4)
2. [李双洋](#), [张明义](#), [张淑娟](#), [黄志军](#), [LI Shuang-yang](#), [ZHANG Ming-yi](#), [ZHAO Shu-juan](#), [HUANG Zhi-jun](#) [列车荷载下青藏铁路冻土路基动力响应分析](#)[期刊论文]-[冰川冻土](#)2008, 30(5)
3. [李涛](#), [魏庆朝](#), [刘建坤](#) [列车振动荷载下多年冻土区路基结构的动力响应探讨](#)[会议论文]-2005
4. [施烨辉](#) [动荷载作用下高温冻土路基动力响应分析](#)[学位论文]2006
5. [古海东](#), [汤爱平](#), [杨敏](#) [交通荷载作用下冻土路基动力反应分析](#)[期刊论文]-[低温建筑技术](#)2010, 32(8)
6. [李双洋](#), [张淑娟](#), [赵德安](#), [杨玉贵](#), [LI Shuang-yang](#), [ZHANG Shu-juan](#), [ZHAO De-an](#), [YANG Yu-gui](#) [冻土路基动力分析模型及青藏铁路地震灾害评估](#)[期刊论文]-[岩土力学](#)2010, 31(7)

引证文献(1条)

1. [董城](#), [郑祖恩](#), [李志勇](#), [高琼](#) [基于路基路面协调变形的水泥混凝土路面设计研究](#)[期刊论文]-[公路工程](#) 2012(5)

引用本文格式: [李涛](#), [LI Tao](#) [青藏铁路多年冻土区路基结构的动力分析](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2007(3)