

文章编号:1671-8879(2017)04-0067-09

地震作用下高原多年冻土区高填方路基动力响应

汪水银¹,沙爱民¹,穆柯²,朱东鹏²,金龙²

(1. 长安大学公路学院,陕西西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西西安 710068)

摘要:针对青藏高原多年冻土区路基在地震作用下出现大量破坏这一实际问题,以 G214 公路工程地质条件为基础,以西宁台站、大武台站、都兰台站等实测地震加速度数据作为边界条件,建立有限元模型,计算地震荷载下多年冻土区路基动力学响应。计算了 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年平均地温工况下路基动力响应,并以此为基础研究温度对路基动力响应影响;以 1、4、7、10 月温度场计算结果为依托,计算了不同季节工况对路基动力响应影响;以 5、10、15 m 高填路基为样本,通过动力分析,确定填方高度对路基动力响应影响;同时考虑阴阳坡效应对路基稳定性影响,对比分析阴阳坡侧动力响应差异,并对对比分析各因素对路基动力稳定性影响权重,确定其中主要因素。研究表明:地震荷载作用下,填土高度对路基稳定性的影响大于季节及温度的影响;受路基阴阳坡效应的影响,阳坡侧路基位移峰值大于阴坡侧,路肩处阳坡侧水平位移峰值比阴坡侧高 42.9%,阳坡侧坡脚水平位移比阴坡侧高 42.8%;10 月份为路基体受力及变形最不利季节,冻土地温越高,路基顶面及坡脚点位移幅值越大,且地温对坡脚点位移的影响大于路基中心点;在地震作用下,有明显阴阳坡效应的多年冻土路基坡脚位移差别较大,路基阳坡侧较阴坡侧有更高的失稳风险。

关键词:道路工程;多年冻土;有限元法;地震;高填方路基;动力响应

中图分类号:U416 **文献标志码:**A

Dynamic response of high filled embankment under earthquake in plateau permafrost areas

WANG Shui-yin¹, SHA Ai-min¹, MU Ke², ZHU Dong-peng², JIN Long²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: Aiming at the problem that embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau was severely damaged under earthquake action, dynamic response model was established based on engineering geological conditions of G214 Highway, and the measured earthquake acceleration data of Xining station, Dawu station, Dulan station were collected as boundary conditions. The dynamic response of embankment under average annual ground temperature of $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ were calculated. Based on this, the influence of temperature on embankment dynamic response was studied. Based on the temperature field calculation results of January, April, July and, October, influence of different seasons on dynamic response of embankment was calculated. 5, 10 and 15 m

收稿日期:2017-01-13

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG05B01,2014BAG05B03);交通运输部重大科技专项项目(2013 318 490 010);交通运输部科技项目(2012 319 495 030)

作者简介:汪水银(1978-),男,安徽潜山人,工学博士研究生,E-mail:770850587@qq.com.

通讯作者:沙爱民(1964-),男,安徽宣城人,教授,博士研究生导师,E-mail:158479508@qq.com.

filled embankment were taken as samples, the dynamic response of embankment is analyzed with dynamic response. At the same time, considering the effect of cold and hot slope on embankment stability, the dynamic response differences between cold and hot slopes were compared. The influence weights of various factors on the dynamic stability of embankment were compared and analyzed, and the main factors were determined. The results show that the influence of filling height on stability of embankment is greater than that of season and temperature conditions. Peak value of hot slope side displacement is greater than that of cold side because of cold and hot slope effect. Horizontal displacement at road shoulder in hot side is 42.9%, which is larger than that of cold shoulder, and horizontal displacement at slope toe in hot side is 42.8%, which is larger than that of cold side. October is the most unfavorable season for strength and deformation of road base. The higher temperature in permafrost, the larger the peak value of displacement of subgrade top and slope toe, and the effect in slope is remarkable than the center point. Cold and hot slope embankment has obviously difference displacement in hot and cold slope under action of earthquake, and the hot slope side has higher instability risk than cold side. 6 tabs, 11 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; permafrost; FEM; earthquake; high filled embankment; dynamic response

0 引言

青藏高原平均海拔 4 500 m 以上,大气含氧量低,冰冻期长,年平均气温低,在独特的自然地理环境中孕育了大片连续、岛状多年冻土,面积约 $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。同时,青藏高原也是中国强地震多发区域之一。1980~2010年,该地就发生过 14 次 6.0~6.9 级地震、3 次 7.0~8.5 级地震。2001 年 11 月 14 日在青藏高原昆仑山地区发生的 8.1 级地震使得途经地震区的青藏公路多处震裂。2010 年 4 月 14 日,青海省玉树地区发生里氏 7.1 级特大浅表地震,导致区内路基多处出现沉陷、滑塌,桥梁受损,造成通往玉树地震灾区的道路交通中断,直接影响灾后救援、抢险及重建工作,进而加重了地震所带来的人员伤亡及经济损失。位于青藏高原腹地的青藏公路(G109)穿越多年冻土区 624 km^[1-2];青藏铁路穿越多年冻土区约 550 km^[3];1985~2012 年,位于青藏高原东缘的青康(西宁—玉树,G214)公路冻土勘察和地温监测资料表明,沿线分布连续和不连续多年冻土累计里程约 232.4 km^[4-5]。在地震与多年冻土双重影响下,该地区路基尤其是高填方路基的稳定性是不容忽视且亟待解决的重要问题之一。然而,由于多年冻土独特的热物理力学性质和复杂的动力特性,现有国内外研究较少,且多从试验和数值分析两方面研究。试验研究方面:Vinson 等通过试验分别研究了冻结黏土和冻结砂土的动力特性^[6-7];

穆柯等研究了冻土的动力特性及其参数确定方法^[8];王兰民等考察了地温对冻土动力特性及其场地地震动参数的影响^[9];Ting 等研究了冻结砂土的动强度特性^[10];Finn 等研究了冻土中融溶层黏性土的地震液化作用^[11]。数值分析方面:李双洋等针对青藏铁路的冻土路基动力分析模型及地震灾害进行了评估^[12];王丽霞等分析了多年冻土地路基地震加速度反应谱特性和地震动位移性状^[13-14]。综上,冻土路基的地震响应问题是一个复杂的热力相互作用问题,从地震对冻土路基的危害来看,地震对高填方路基的破坏作用最显著。

为研究地震作用下高填方路基的动力学响应规律,以 G214 沿线地质条件为例,建立了路基动力响应计算模型。以西宁台站、大武台站、都兰台站等实测地震加速度数据为基础,通过滤波处理并输入计算模型,计算不同季节、温度等工况下路基的动力响应特征,并提取其不同时刻剪应力及位移计算数据,以分析研究高填方路基的地震动力响应,为预测地震作用下路基病害特征提供依据。

1 理论分析

1.1 动力学基本理论

假设多年冻土区路基、地基材料均质且各向同性,各点应力应变满足线弹性变形假设及牛顿第二定理,由弹性理论得出冻土路基动力响应控制方程为

$$\begin{cases} (\lambda+G)\frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x}+G\nabla^2 u=\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (\lambda+G)\frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial y}+G\nabla^2 v=\rho\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ (\lambda+G)\frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial z}+G\nabla^2 w-\rho g=\rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\lambda=\frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$

$$\bar{\epsilon}=\epsilon_x+\epsilon_y+\epsilon_z$$

$$G=\frac{E}{2(1+\mu)}$$

式中: λ 为常数; $\bar{\epsilon}$ 为土体积应变; t 为时间; $u、v、w$ 分别为微六面体沿 $x、y、z$ 正方向的位移分量; ρ 为土层密度; G 为剪切模量; E 为弹性模量; μ 为泊松比; ∇ 为拉普拉斯算子。

假定单自由度系统阻尼为 ζ ,自振角频率为 ω_0 ,输入地面运动加速度时程为 $a(t)$,单自由度系统的相对位移、相对速度、相对加速度分别为 $x(t)、x'(t)、x''(t)$,根据动力平衡方程可得

$$x''(t)+2\omega_0\zeta x'(t)+\omega_0^2 x(t)=-a(t) \quad (2)$$

将式(2)离散化,取离散间隔为 Δt ,用 a_{j-1} 表示 $t=(j-1)\Delta t$ 时刻的输入加速度采样值, $x_{j-1}、x'_{j-1}、x''_{j-1}$ 分别为 $t=(j-1)\Delta t$ 时刻系统的相对位移、相对速度、相对加速度, j 为地震反应的采样点, $j=1,2,\dots,N(N$ 为样点数)。则式(1)的离散形式为

$$x''_{j-1}+2\zeta\omega_0 x'_{j-1}+\omega_0^2 x_{j-1}=-a_{j-1} \quad (3)$$

1.2 计算参数选取

在温度计算的基础上进行动力分析,共需传热学、动力学 2 种计算参数。冻土路基温度计算中,在沥青路面边界、边坡、地表施加的气温 T 为^[15-18]

$$T=T_0-A\sin(2\pi t/8\ 640+\pi/3)/2 \quad (4)$$

式中: T_0 为平均地温($^{\circ}\text{C}$); A 为气温年度振幅($^{\circ}\text{C}$)。

边界拟合公式如表 1 所示。

表 1 温度边界条件

Tab. 1 Temperature boundary conditions

附面层	拟合公式
路面	$T=5.5+16.5\sin(2\pi t/8\ 640+\pi/2)$
天然地表	$T=-0.5+10.5\sin(2\pi t/8\ 640+\pi/2)$
阳坡边界	$T=2.3+14.5\sin(2\pi t/8\ 760+\pi/2)$
阴坡边界	$T=-1.8+14.5\sin(2\pi t/8\ 760+\pi/2)$

参考相关技术规范和研究成果,各层材料参数如表 2 所示^[19-23]。其中: $C_u、C_f$ 分别为融土、冻土的比热容; $\lambda_u、\lambda_f$ 分别为融土、冻土的热导率。

以传热学理论为基础,选取表 2 中的参数进行

表 2 传热计算参数

Tab. 2 Heating transfer calculation parameters

结构层	$C_u/(MJ\cdot(kg\cdot^{\circ}C)^{-1})$	$C_f/(MJ\cdot(kg\cdot^{\circ}C)^{-1})$	$\lambda_u/(J\cdot(m\cdot s\cdot^{\circ}C)^{-1})$	$\lambda_f/(J\cdot(m\cdot s\cdot^{\circ}C)^{-1})$
路基填料	2.12	1.85	1.48	1.64
黏土	2.31	1.74	1.72	1.85
碎石土	1.98	1.80	1.42	1.65
泥炭层	2.22	1.84	1.21	1.47

数值建模,以 G214 公路沿线地质条件为例,地表以下 1 m 统一划定为草皮土,2~10 m 为粉土,10 m 以下土层认为已完全固结,受路基影响很小,统一考虑为卵石土^[24-25]。路基实体路段温度场计算工况如表 3 所示。

表 3 路基温度场计算工况

Tab. 3 Calculation conditions of embankment temperature field

路基高度/m	桩号	实体路基土质
5	K562+468	1 m 草皮,9 m 黏粉土、卵石土
10	K572+750	
15	K570+203	

在温度场计算的基础上进行动力响应分析,由于不考虑滑坡等塑性破坏问题,计算模型采用线弹性参数(表 3),阻尼根据瑞利阻尼计算方法取 0.03,计算参数如表 4 所示。

表 4 动力响应计算参数

Tab. 4 Calculation parameters for dynamic response

土层	温度状态	密度/ $(10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比
路基	冻土	1.95	1.1×10^4	0.30
	融土		6.0×10^3	0.30
填土	冻土	1.75	3.0×10^3	0.35
	融土		1.0×10^3	0.40
草皮土	冻土	1.70	7.0×10^3	0.30
	融土		3.0×10^3	0.30
粉土	冻土	1.70	8.0×10^3	0.30
	融土		8.0×10^3	0.30
卵石土	冻土	1.70	8.0×10^3	0.30
	融土		8.0×10^3	0.30

为了在减少计算量的同时,使计算结果更具代表性,选取当地地震台监测典型地震波进行计算,该段曲线包含加速度峰值,同时为排除信号干扰,突出主震频率对路基的影响,对其进行滤波处理,滤波后的纵波、横波如下页图 1 所示。

将滤波后的纵波、横波加速度曲线作为边界条件,输入动力计算模型进行计算,并提取左侧边坡数据 L1、L2,路中计算数据 M1、M2,右侧边坡数据 R1、R2 进行分析,数据点分布如下页图 2 所示。

1.3 几何模型及边界条件

依托 G214 工程,采用 ABAQUS 软件建立高填方路基热传导计算有限元模型,并采用显式积分进

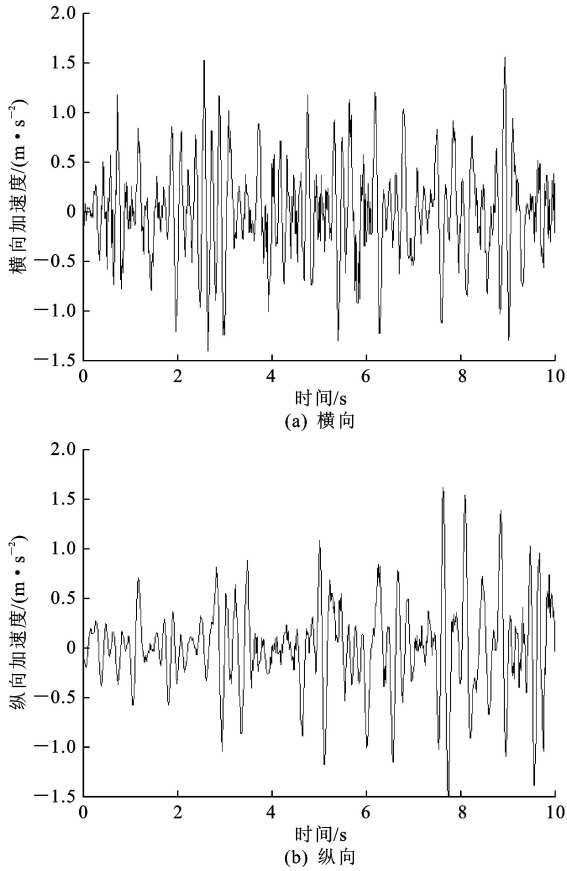


图1 滤波后加速度波

Fig. 1 Acceleration waves after filter

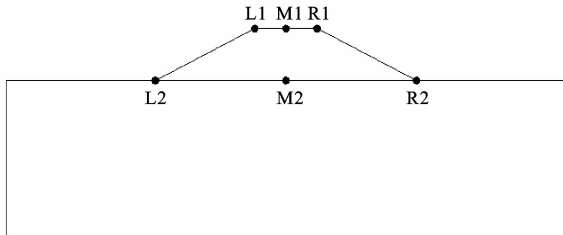


图2 数据点位置

Fig. 2 Positions of data points

行分析,根据前人研究成果,计算模型在 x 、 y 方向与地表及坡脚的距离均为 30 m,坡比 1:2,通过试验计算发现该尺寸既可满足计算精度要求,又可对模型进行缩尺,减小计算工作量。当填土路基高度大于 8 m 时,采用分级缓坡,剖分网格后的 5、10 m 路基传热有限元模型如图 3 所示。

自地表 30 m 以下指向地表的垂直方向,距坡脚 30 m 指向坡脚位置水平方向,采用缩尺模型进行网格划分,网隔尺寸比 1.2,最大网格尺寸 2 m,最小网格尺寸 10 cm,路基体及其上限位置网格局部加密,既可减小计算量,又能提高计算精度。根据传热计算理论,路基模型底部及两侧热量流入与流出

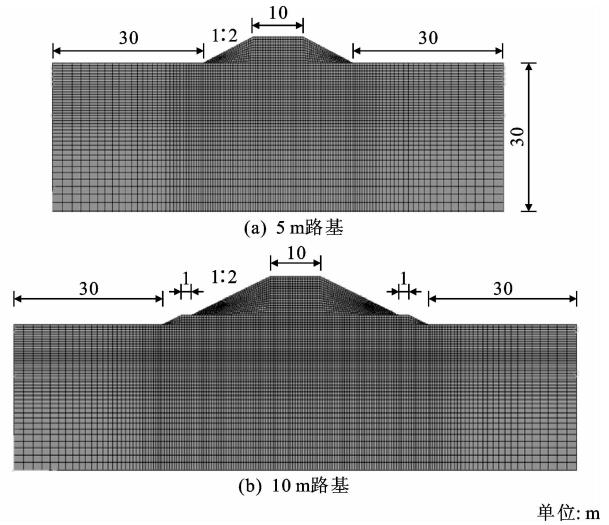


图3 路基温度场计算模型

Fig. 3 Calculation models of embankment temperature field

平衡,在路面、天然地表、阴坡、阳坡等处施加相应的周期函数,热传导单元采用 DC2D4 等参单元。采用热力耦合分析方式进行计算,首先根据地温、地质情况进行温度场分析,确定不同填高、季节及年平均地温工况下高填方路基的温度场分布特征,随后将各节点计算所得温度数据导入力学计算模块进行二次分析,确定路基的动力学响应。

2 数值计算结果

2.1 不同年平均地温工况下高填方路基动力响应

为研究不同年平均地温工况下高填方路基的地震动力响应,以 10 月份温度场计算结果为基础,将滤波处理后的地震加速度数据输入动力计算模型,进行数值分析。以 10 m 路基为例,由于年平均地温的改变使得路基融化深度增加,融化形态并未发生本质变化,因此不同地温工况下,路基顶面及坡脚处位移曲线变化一致。同时,路基在动力荷载作用下,最大竖向位移出现在路基顶面中点 M1 处,最大水平位移出现在左侧坡脚 L2 处。因此,分别提取地温为 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,监测第 1、5、10 年时 10 月份测点 M1 的竖向位移和 L2 的水平位移进行分析。 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下第 10 年的分析结果如下页图 4 所示。

为研究不同年平均地温工况下路基的动力响应,分别以 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下第 10 年计算结果为基础,对其进行动力分析,同样提取路基顶面中点、坡脚点位移,并与 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况进行对比,结果如下页图 5、图 6 所示。

由图 5、图 6 可知:当年平均地温由 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低至 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其位移曲线幅值呈不

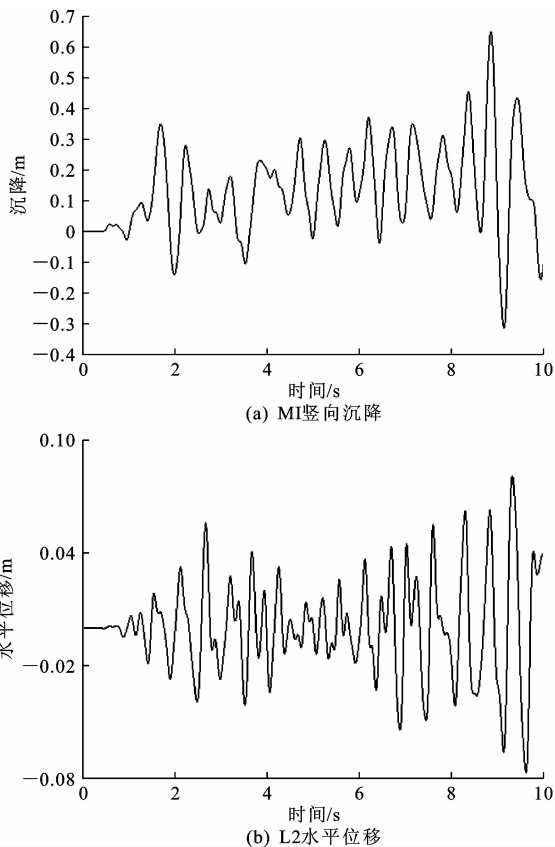


图 4 -0.2 °C 工况下路基位移

Fig. 4 Displacements of embankment under condition of -0.2 °C
 断下降趋势,路基顶面中点竖向沉降幅值分别下降 3.0、6.5 cm,下降比例分别为 4.6%、9.7%;路基坡脚点水平位移幅值分别下降 0.6、1.4 cm,下降比例分别为 6.9%、16.3%。由此可知,温度的降低有利于路基抗震性能的提高。

从沉降量级上分析,路基主要以竖向变形为主;从振幅下降比例上分析,年平均地温对坡脚的影响大于路基顶面中心。分析其原因为:温度的降低导致路基、天然地表上限抬升;对于路基顶面点,由于路基填料是合理的级配材料,在最佳含水率下人工振动压实,其冻结与融化状态下土体力学的性能改变不大;对于坡脚点,由于临近天然地表,G214 沿线植被发育良好,天然地表上覆盖有约 1 m 厚的腐殖层,其含水率较高,冻结与融化状态下土体力学性能改变较大。因此,当地温工况改变时,坡脚的力学响应变化显著。

为研究不同地温工况下路基动力响应的变化规律,分别提取第 1、5、10 年的路基动力计算结果,并对比路基顶面中点竖向位移、坡脚水平位移幅值的峰值,结果如表 5 所示。

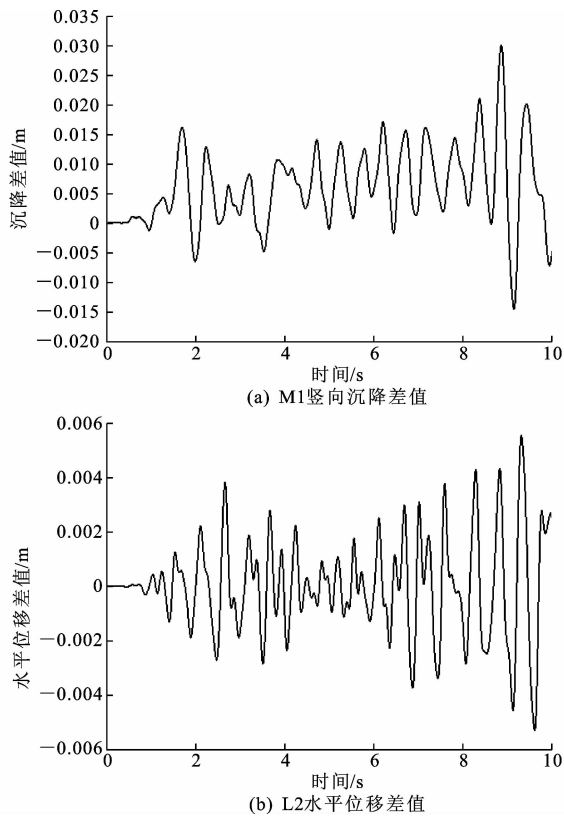


图 5 -0.2 °C 与 -0.5 °C 工况下路基沉降差值

Fig. 5 Displacement differences of embankment between conditions of -0.2 °C and -0.5 °C

表 5 平均地温工况路基顶面中点及坡脚位移幅值对比

Tab. 5 Displacement amplitude comparisons between midpoint of embankment top and slope toe under average temperature conditions

对比工况	年限/年	位移幅值降低比率/%	
		路基顶面中点	坡脚
-0.2 °C 与 -0.5 °C 对比	1	2.1	3.3
	5	3.1	4.2
	10	4.6	6.9
-0.2 °C 与 -0.8 °C 对比	1	5.7	9.1
	5	7.1	12.4
	10	9.7	16.3

由表 5 可知,随着温度的降低,路基顶面中点及坡脚的位移幅值均呈下降趋势,这种下降趋势随着时间的增长不断累积,且相同时段内,温度对坡脚的影响大于路基顶面中点。

2.2 不同季节工况下填方路基动力分析

为研究不同季节工况下高填方路基动力响应特征,以 10 m 填方路基为例,在其第 10 年的 1、4、7、10 月温度场计算结果的基础上选取路基顶面中点 M1、左侧路肩 L1、左侧坡脚 L2 处的位移进行动力分析。

根据融化夹层形态划分:1、4 月为冷季,融化形

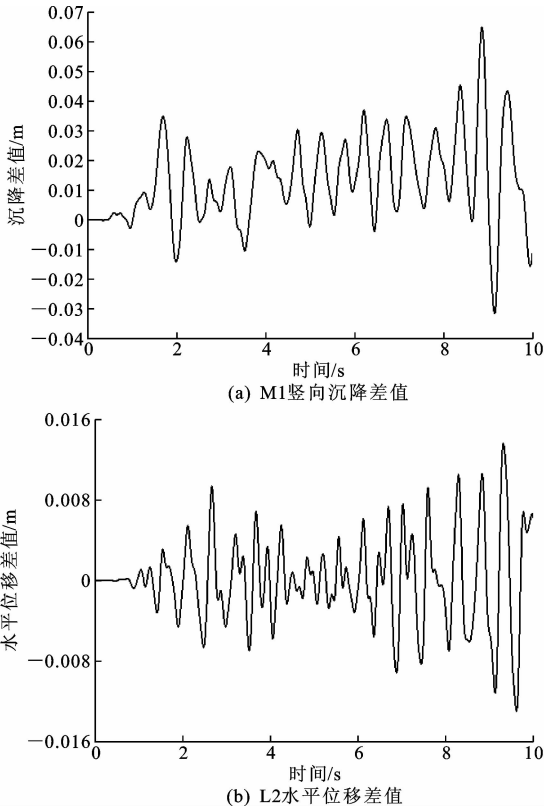
图6 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下路基沉降差值

Fig. 6 Displacement differences of embankment between conditions of $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$

态为路基体内有未完全回冻的融化夹层;7、10月为暖季,融化形态为“凸”形融化盘。在此基础上分别研究其在地震作用下的应变分布状态,结果如图7~图9,表6所示。

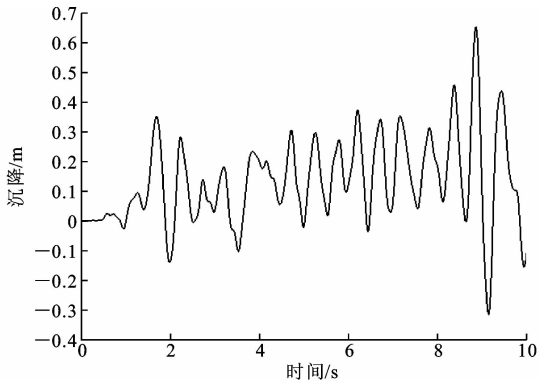


图7 10月份M1竖向沉降

Fig. 7 Vertical displacement of M1 at October

由图7~图9和表6可知,10月份为路基受力及变形最不利季节,4月份为路基体受力最有利季节。冷季1月份与4月份、暖季7月份与10月份之间路基的位移差值很小,仅为1 cm,但暖季与冷季路基位移差别较大。10月份M1、L1、L2的位移均处于最大值,其中M1的最大位移为0.65 m,比4

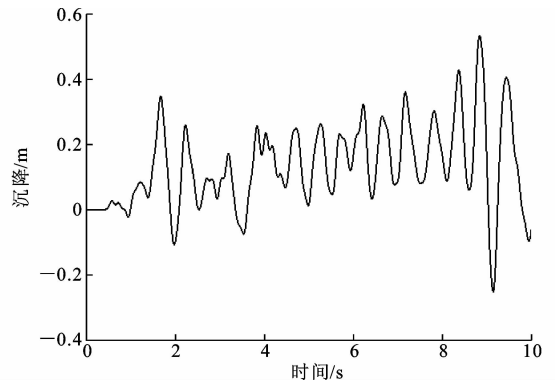


图8 10月份L1竖向沉降

Fig. 8 Vertical displacement of L1 at October

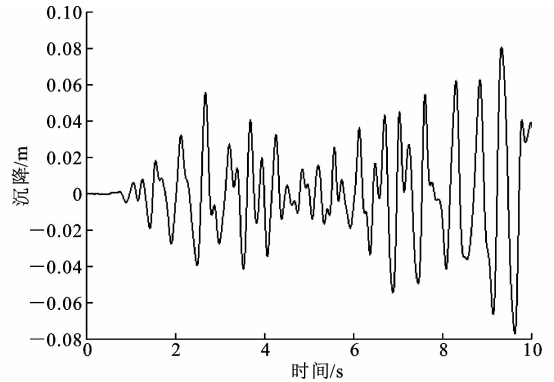


图9 10月份L2竖向沉降

Fig. 9 Vertical displacement of L2 at October

表6 各测点10月与1、4、7月沉降峰值差

Tab. 6 Displacement differences between October,

January, April, July

m

测点	$S_{10}-S_1$	$S_{10}-S_4$	$S_{10}-S_7$
M1	0.060	0.061	0.010
L1	0.050	0.048	0.005
L2	0.015	0.016	0.005

注: S_1 、 S_4 、 S_7 、 S_{10} 分别为1、4、7、10月份的沉降峰值。

月份大0.061 m,提升幅度为10.4%;L1最大位移为0.53 m,比4月份大0.051 m,提升幅度为10.7%;L2最大位移为0.077 m,比4月份大0.016 m,提升幅度为26.2%。

由此可知:在暖季与冷季各自季节周期内,位移振幅差值不明显;路基受力、变形最不利和最有利季节分别为10、4月;季节变化对路基坡脚及边坡的影响大于路基中部。

2.3 不同填方高度工况下路基动力分析

为研究地震作用下不同填方高度路基动力响应特性,分别对5、10、15 m高度填方路基进行动力学分析,在第10年10月、年平均地温 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度场计算结果的基础上,对不同高度填土动力响应进行

计算,并分别提取 M1、L1、L2 处的位移结果,如图 10 所示。

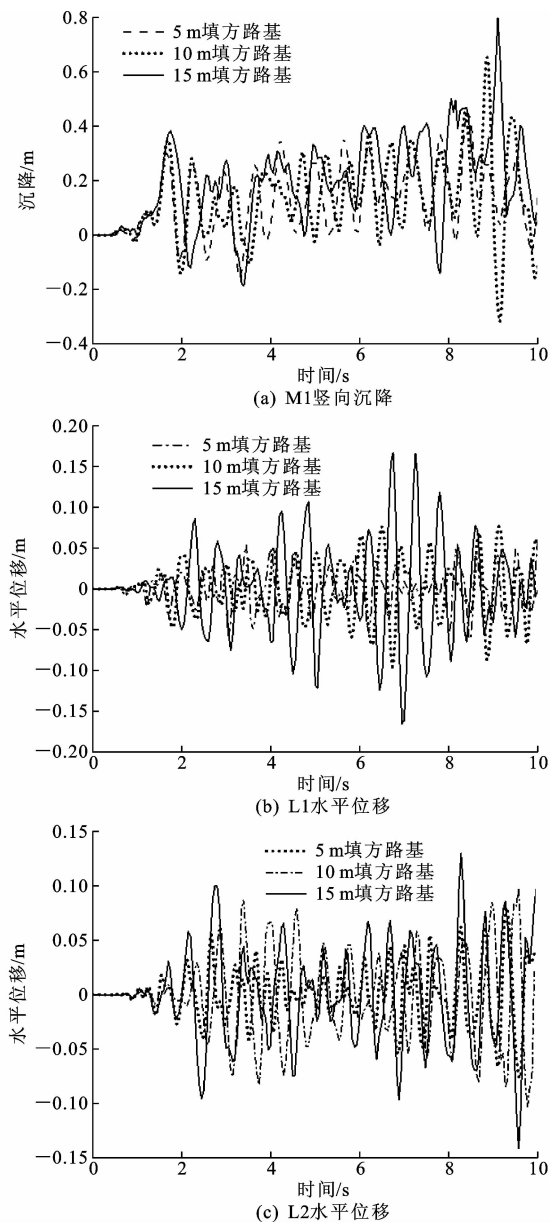


图 10 不同填方高度工况下路基位移

Fig. 10 Embankment displacements under different fill height conditions

由图 10 可知,填土高度的变化完全改变了 M1、L1、L2 处的位移曲线线形。就大部分位移历程而言,15 m 填土路基振幅略高,10 m 路基次之,5 m 路基偏低,但局部时间段内 5、10、15 m 路基的位移幅值排列并不完全遵循该规律;填土高度从 5 m 增大到 10、15 m 的过程中,M1 竖向沉降峰值分别增大了 44.4%、77.8%,L1 水平位移分别增大了 35.1%、193.0%,L2 水平位移分别增大了 19.8%、60.5%。填土高度变化对路基稳定性的影响大于季

节及温度工况的影响。

3 阴阳坡效应下路基动力分析

为研究地震作用下阴阳坡效应对路基动力响应及变形的影响,仍以 10 m 路基为例,以 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为年均地温计算边界条件,在第 10 年 10 月温度场计算的基础上进行动力计算,并提取左右路肩 L1、R1,左右坡脚 L2、R2 水平位移进行对比,其中 L1、L2 位于阴坡侧,R1、R2 位于阳坡侧,计算结果如图 11 所示。

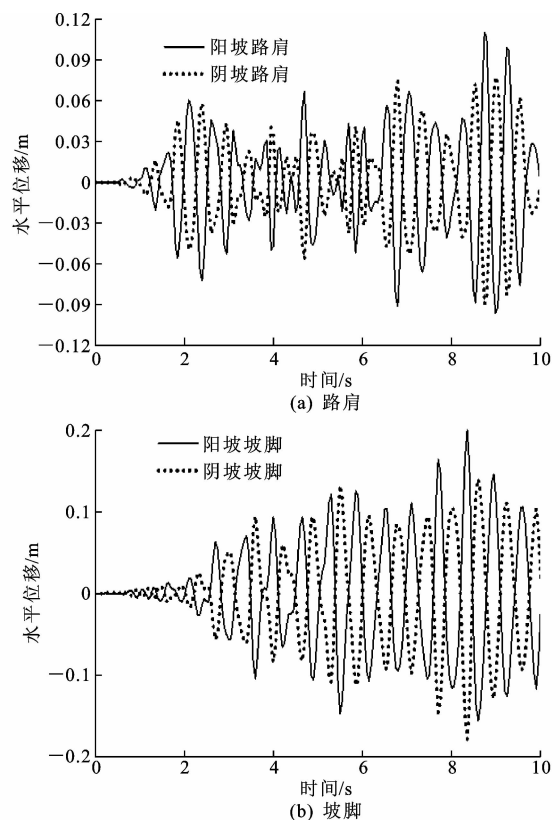


图 11 阴阳坡效应下路基水平位移

Fig. 11 Embankment vertical displacements under effect of hot and cold slope

由图 11 可知,在地震作用下,路基受阴阳坡效应影响,左右路肩及坡脚处位移历程曲线线形差别较大。总体上看,阳坡侧路基位移振幅大于阴坡侧,但局部时间段内位移差值并不完全遵循该规律;阳坡侧路肩位移峰值为 0.11 m,比阴坡侧(0.077 m)大 42.9%,阳坡侧坡脚水平位移峰值为 0.20 m,比阴坡侧(0.14 m)大 42.8%,对于受阴阳坡效应影响的路基,阳坡坡脚易成为路基病害的始发点。

4 结语

(1)随着年平均地温的降低,路基顶面及坡脚位

移均呈不断下降的趋势,这种下降趋势随时间的增长不断累积,在相同时段内,温度下降对坡脚的影响大于路基中点。

(2)在暖季(7、10月)与冷季(1、4月)各自季节周期内,位移差值不明显,但暖季路基变形明显大于冷季,10月份为路基受力与变形的最不利季节。在地震加速度较小的情况下,路基变形区域主要分布在坡脚10~15m的范围内,加速度较大时,路基边坡附近亦会出现较大变形。

(3)填土高度的变化完全改变了路基各点的位移曲线线形,15m填土路基位移幅值最大,10m路基次之,5m路基偏低,但局部时间段内位移幅值并不完全遵循该规律,且填土高度变化对路基稳定性的影响大于季节、温度工况影响。

(4)多年冻土高填方路基阴阳坡效应显著,坡脚位移大于路基位移,阳坡坡脚位移大于阴坡坡脚位移,在地震作用下,路基阳坡侧较阴坡侧具有更高的失稳风险。

(5)本文对不同季节、年平均地温、填方高度和阴阳坡效应下的高填方路基动力响应问题进行数值分析,为多年冻土路基抗震设计提供了依据。但本文结论的得出大多依赖数值计算,缺乏相应的室内试验验证。下一步将开展不同融化条件下的冻土路基振动台试验,从试验角度对计算结果进行验证,增强结论可靠性。

参考文献:

References:

[1] 陈建兵,汪双杰,章金钊,等. 青藏公路高路基病害的形成及其机理[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(6):30-35.
CHEN Jian-bing, WANG Shuang-jie, ZHANG Jin-zhao, et al. Formation and mechanism of high subgrade diseases of Qinghai-Tibet Highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008,28(6):30-35.

[2] 窦明健,胡长顺,何子文,等. 青藏公路多年冻土段路基病害分布规律[J]. 冰川冻土,2002,24(6):780-784.
DOU Ming-jian, HU Chang-shun, HE Zi-wen, et al. Distributing regularities of embankment diseases in permafrost section of the Qinghai-Tibetan Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002,24(6):780-784.

[3] CHENG Guo-dong, SUN Zhi-zhong, NIU Fu-jun. Ap-

plication of the roadbed cooling approach in Qinghai-Tibet Railway engineering[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008,53(3):241-258.

- [4] 陈继,冯子亮,盛煜,等. 214国道沿线的多年冻土及其工程地质条件评价[J]. 冰川冻土,2014,36(4):790-801.
CHEN Ji, FENG Zi-liang, SHENG Yu, et al. Permafrost along National Highway 214 and its engineering geological condition evaluation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014,36(4):790-801.
- [5] 王绍令,林清. 青康公路(国道214线)沿线的多年冻土[J]. 干旱区地理,1999,22(2):42-49.
WANG Shao-ling, LIN Qing. Permafrost along the Qingkang Highway (National Highway No. 214)[J]. Arid Land Geography, 1999,22(2):42-49.
- [6] VINSON T S, CHAICHANAVONG T, CZAJKOWSKI R L. Behavior of frozen clay under cyclic axial loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1978,104(7):779-800.
- [7] TOKIMATSU K, TAYA Y, SUZUKI Y, et al. Correlation of CPT data with static and dynamic properties of in-situ frozen samples[C]//Swedish Geotechnical Society. Proceedings of International Symposium on Cone Penetration Testing. Linkoping: Swedish Geotechnical Society, 1995:323-328.
- [8] 穆柯,袁堃,金龙,等. 高寒高海拔多年冻土区拓宽路基差异沉降[J]. 交通运输工程学报,2016,16(4):68-77.
MU Ke, YUAN Kun, JIN Long, et al. Differential settlement of widened subgrade in cold and high-altitude permafrost regions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016,16(4):68-77.
- [9] 王兰民,张冬丽,吴志坚,等. 地温对冻土动力特性及其场地震动参数的影响[J]. 中国地震,2003,19(3):195-205.
WANG Lan-min, ZHANG Dong-li, WU Zhi-jian, et al. The influence of earth's temperature on dynamic characteristics of frozen soil and the parameters of ground motion on the sites of frozen soil[J]. Earthquake Research in China, 2003,19(3):195-205.
- [10] TING J, MARTIN R T, LADD C C. Mechanisms of strength for frozen sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983,109(10):1286-1302.
- [11] FINN W D L, YONG R N Y. Seismic response of frozen ground[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978,104(10):1225-1241.
- [12] 李双洋,张淑娟,赵德安,等. 冻土路基动力分析模型及青藏铁路地震灾害评估[J]. 岩土力学,2010,31

- (7):2179-2187,2201.
- LI Shuang-yang, ZHANG Shu-juan, ZHAO De-an, et al. Dynamical analysis model for frozen embankment and seismic hazard assessment of Qinghai-Tibet Railway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2179-2187, 2201.
- [13] 王丽霞, 凌贤长, 徐学燕, 等. 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, 23(8):1330-1335.
- WANG Li-xia, LING Xian-zhang, XU Xue-yan, et al. Study on response spectrum characteristics of earthquake acceleration for roadbed on permafrost site[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8):1330-1335.
- [14] 王丽霞, 凌贤长, 刘红艳, 等. 多年冻土地路基地震动位移性状研究[J]. *世界地震工程*, 2004, 20(2): 112-116.
- WANG Li-xia, LING Xian-zhang, LIU Hong-yan, et al. A study of seismic displacement characteristic of roadbed on permafrost site[J]. *World Earthquake Engineering*, 2004, 20(2):112-116.
- [15] 汪双杰, 陈建兵, 金龙, 等. 冻土路基热收支状态的尺度效应[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(12):9-16.
- WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing, JIN Long, et al. Scale effect of thermal budget of permafrost embankment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(12):9-16.
- [16] 董元宏, 朱东鹏, 张会建, 等. 应用于冻土路基的XPS保温板力学性能[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(12): 64-68.
- DONG Yuan-hong, ZHU Dong-peng, ZHANG Hui-jian, et al. Mechanical properties of XPS thermal insulation board applied in permafrost embankment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(12):64-68.
- [17] 陈建兵, 刘志云, 崔福庆, 等. 青藏高原工程走廊带多年冻土辨识及年平均地温预估模型[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(12):33-41, 56.
- CHEN Jian-bing, LIU Zhi-yun, CUI Fu-qing, et al. Permafrost identification and annual mean ground temperatures prediction model for Qinghai-Tibet Engineering Corridor[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(12):33-41, 56.
- [18] 刘戈, 汪双杰, 袁堃, 等. 尺度效应下冻土路基结构适应性及优化[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(12): 17-25.
- LIU Ge, WANG Shuang-jie, YUAN Kun, et al. Adaptability and optimization of permafrost embankment structure under scale effect[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(12):17-25.
- [19] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(5):80-84.
- XU Xue-yan, ZHONG Cong-li, CHEN Ya-ming, et al. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(5):80-84.
- [20] JIN Long, WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing, et al. Study on the height effect of highway embankments in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 83:122-130.
- [21] PENG Hui, MA Wei, MU Yan-hu, et al. Impact of permafrost degradation on embankment deformation of Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions[J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(3): 1079-1086.
- [22] 汪双杰, 陈建兵, 黄晓明. 热棒路基降温效应的数值模拟[J]. *交通运输工程学报*, 2005, 5(3):41-46.
- WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing, HUANG Xiaoming. Numerical simulation of cooling effect for heat pipe subgrade[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2005, 5(3):41-46.
- [23] SONG Yi, JIN Long, ZHANG Jin-zhao, et al. In-situ study on cooling characteristics of two-phase closed thermosyphon embankment of Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 93:12-19.
- [24] 姚济敏, 谷良雷, 赵林, 等. 多年冻土区与季节冻土区地表反照率对比观测研究[J]. *气象学报*, 2013, 71(1):176-184.
- YAO Ji-min, GU Liang-lei, ZHAO Lin, et al. Comparatively observation study of the surface albedo between the permafrost region and the seasonally frozen soil region[J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2013, 71(1):176-184.
- [25] GU Liang-lei, YAO Ji-min, HU Ze-yong, et al. Comparison of the surface energy budget between regions of seasonally frozen ground and permafrost on the Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 153:553-564.