

董连成,徐禛,师黎静,等.多年冻土区青藏铁路列车荷载作用下路基振动响应研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1153-1160.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1153

DONG Liancheng, XU Zhen, SHI Lijing, et al. Vibration Response Analysis of Embankments in Permafrost Regions along the Qinghai—Tibet Railway Subjected to Train Loads[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1153-1160. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1153

多年冻土区青藏铁路列车荷载作用下 路基振动响应研究

董连成¹, 徐 禛¹, 师黎静², 胡新福¹, 高德领¹

(1. 黑龙江科技大学建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027;

2. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对多年冻土区青藏铁路列车荷载振动作用下的动稳定性, 通过对北麓河和二道沟三个典型铁路路基横断面振动响应的二分量加速度观测, 对比分析客运列车和货运列车引起的路基振动特性和衰减规律, 研究不同防护形式路基的列车振动响应。结果表明, 路基上的振动作用主要集中在40~80 Hz频率范围内; 防护形式对路基的列车动力响应有明显影响, 热棒加碎石路基动力响应最小, 其次为碎石防护路基, 未采取任何防护的路基铁轨上的动力响应最大, 建议对未采取防护的路基进行防护。分析结论为青藏铁路列车作用下的路基动稳定性评估提供实测依据, 对多年冻土区的路基稳定性研究提供参考。

关键词: 青藏铁路; 列车振动观测; 振动衰减; 数据频谱分析; 多年冻土区

中图分类号: P 315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)06-1153-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1153

Vibration Response Analysis of Embankments in Permafrost Regions along the Qinghai—Tibet Railway Subjected to Train Loads

DONG Liancheng^{1,2}, XU Zhen¹, SHI Lijing², HU Xinfu¹, GAO Deling¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: To analyze the dynamic stability of embankments along the Qinghai—Tibet railway in permafrost regions under train loads, a two-component acceleration observation of vibration responses at three typical railway subgrade sections in Beiluhe and Erdaogou were performed. The vibration attenuation law and vibration characteristics of the subgrade induced by passenger trains and freight trains were analyzed and compared. The vibration response of subgrades to trains with differing protection forms are dis-

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAK17B01); 黑龙江省自然科学基金项目(E201227, E2015068); 黑龙江科技大学青年才俊培养计划

第一作者简介: 董连成(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为岩土地震工程。E-mail: dongliancheng@163.com。

cussed. The results suggest that the frequencies of vibration on the subgrade mainly focus on the range of 40 to 80 Hz. The dynamic response of the subgrade is affected, apparently, by the subgrade protection form. The dynamic response of thermosyphon and crushed-rock subgrades is at the minimum, followed, increasingly, by the crushed-rock subgrade and the subgrade without any protection. It is therefore suggested that the subgrade should be protected. This study can provide a measured basis for dynamic stability evaluations of subgrade under train loads of the Qinghai—Tibet railway, and the conclusions can provide a reference for analyzing the dynamic stability of subgrade in permafrost regions.

Keywords: Qinghai—Tibet railway; train-induced vibration observation; vibration attenuation; frequency spectrum analysis for data; permafrost region

0 引言

我国的多年冻土分布面积约为世界多年冻土面积的 10%, 占我国国土面积的 21.5%^[1], 居世界的第三位, 主要集中在我国的西北和东北地区, 而青藏高原作为我国的第一阶梯, 多年冻土的分布最为广泛。青藏铁路是世界上海拔最高和线路最长的高原铁路, 从格尔木到拉萨段穿越了长达 546.41 km 的多年冻土路段, 工程地质条件复杂。铁路施工和运营对冻土区的人为扰动成为关注的焦点。在我国寒区大量铁路交通中, 轮轨系统面临着日益加剧的动荷作用和动态效应, 冻土地铁路路基的振动与动力稳定问题日益突出^[2-3], 尤其是在长期的列车动荷载作用下, 其列车运营安全性和路基稳定性备受关注。张建明等^[1]运用青藏铁路试验段冻土路基沉降数据进行了未来 50 年内北麓河冻土路基的总沉降量预测, 并建议为保护冻土路基稳定性需要采取降低路基温度的工程措施。近年来由于温室效应, 导致全球气候逐渐变暖, 与 20 世纪 70 年代相比, 近数十年来青藏高原的年平均气温普遍上升了 0.2~0.4 °C^[4], 使得青藏高原的多年冻土区域逐渐退化, 因此给青藏铁路路基的养护和长期运营带来了很大的挑战。

青藏铁路自开通以来发挥了重要作用, 每天运行的旅客列车(客车)和货物列车(货车)达数十列。频繁的列车荷载对多年冻土路基的稳定性造成了很大影响, 如何进一步评价列车长期作用下的多年冻土路基稳定性成为迫切需要解决的问题, 这也是青藏铁路正常运营的关键因素之一, 对青藏铁路路基稳定性的研究一直受到国内学者的关注。有学者通过对冻土路基的现场地温和变形观测研究, 认为冻土路基的变形主要为沉降, 随时间的推移, 沉降趋于稳定^[5-6], 有砟路基和热棒路基更利于冻土路基的稳定^[7-8]。根据计算分析结果, 应力波在软土中的衰减要大于在硬土中的衰减^[9-11], 列车行驶引起的路基振动应引起重视。通过长周期荷载蠕变试验, 冻土

的动强度随荷载振动次数的增加而衰减^[12-13]。

为了研究列车动荷载作用下青藏铁路多年冻土路基的动力响应, 2012 年 5 月在青藏铁路北麓河多年冻土路段选取了热棒防护路基、碎石防护路基和素土路基的 3 个典型路段, 通过暖季列车作用下的路基振动和地脉动台阵观测, 研究多年冻土区青藏铁路路基在列车动荷载作用下的动力响应。

1 现场观测

1.1 观测场地概况

由于青藏铁路线路较长, 观测时选取了具有代表性的多年冻土地地区北麓河路段。北麓河位于青藏高原可可西里与风火山之间, 属北麓河冲、洪积高平原地貌, 地势开阔, 地表有较好的植被发育, 覆盖率一般为 10%~50%, 土质主要为黏土和粉砂, 属于不良地基用土。据北麓河气象站资料, 该地区年最低气温为 -37.7 °C, 最高气温为 23.2 °C, 年平均气温为 -3.8 °C, 地下冰层较厚, 天然冻土上限为 1.5~2.0 m, 地表年平均气温为 -1.4~-1.6 °C, 一年内冻结期长达 7~8 个月, 从 9 月到次年的 4 月, 最大积雪厚度 14 cm, 属青藏高原干旱气候区, 寒冷干旱, 四季不明, 空气稀薄, 气压较低, 蒸发量远大于降水量, 为低温多年稳定冻土区^[14]。图 1 为天然场地冻土上限及年平均地温。

2.2 野外现场观测

2012 年 5 月 23—5 月 25 日进行了暖季野外现场观测, 监测内容包括列车作用下路基上、中、底部不同位置的振动加速度响应。

3 个典型断面分别为: 断面 I: DK1139+820 断面, 保温材料路基(后加“碎石护坡、热棒”补强), 所有测点布设在线路往拉萨方向的左侧; 断面 II: DK1142+655 断面, 块石路基(后加“块石护坡、碎石护坡”补强), 所有测点布设在线路往拉萨方向的右侧; 断面 III: DK1166+550(二道沟)断面, 普通素

土路基(无补强措施),所有测点布设在线路往拉萨方向的右侧。断面Ⅰ和断面Ⅱ生态脆弱,采取了补强措施,降低路基内的温度;断面Ⅲ天然场地保存较为完整,路基沉陷不明显,没有采取补强措施,在整个青藏铁路沿线非常罕见。

在钢轨所在路基横断面上布设 M1、M2 和 M3 共 3 个测点,布置情况如图 2。

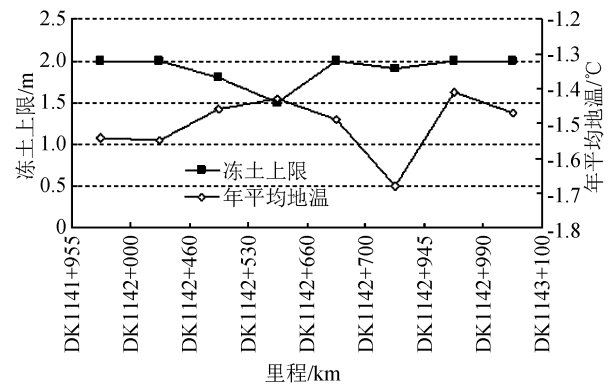


图 1 青藏铁路沿线天然场地冻土上限及平均气温 (Dk1141+955—Dk1143+100)

Fig.1 Permafrost table and average temperature for natural sites along the Qinghai—Tibet railway (from Dk1141+955 to Dk1143+100)

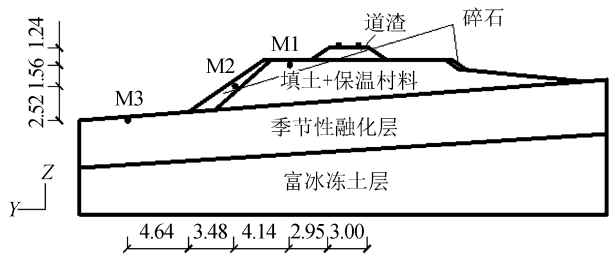


图 2 观测仪器布设及路基形式(DK1142+655 断面,单位:m)

Fig.2 Layout of monitoring instruments and subgrade form (DK1142+655 section,unit:m)

观测中在轨枕对应横断面共布设 3 个测点,同时监测路堤上部、中部、底部不同位置的列车作用下的地表振动加速度反应。

现场监测列车振动产生的加速度反应。路基测点采用中国地震局工程力学研究所研制开发的 891-2 型测振仪,通频带 0.5~80 Hz,加速度分辨率 $1 \times 100\,000$ 。采集设备用中国东方振动和噪声技术研究所研制的 INV360u 信号采集与分析系统。在观测时各测点均观测二分量的加速度记录,根据加速度传感器的布置定位,定义空间坐标方向:垂直于铁路延伸的水平向为横向(y 向),垂直于铁路延伸

的铅垂向为竖向(z 向),对多列客运客车和货运列车进行了观测。

2 观测数据分析

在现场观测过程中测试场地气候多变,日平均气温 $-15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,路基表层 0.3 m 左右为未冻结砂夹石外,0.3 m 以下均为冻结层。三个断面共测试了青藏铁路上的 11 列客运列车、9 列货运列车和 1 列单机车车头,共 21 个数据包,315 条加速度记录,为下一步分析提供了宝贵的数据资料。测试中采用 6 000 的采样率,列车的速度为 76~120 km/h,均为双机头,机头的型号为 NJ2,铁轨的型号为 YZ25T。于 2012 年 5 月 23—25 日进行了现场测试工作。

2.1 列车荷载作用下路基振动加速度衰减规律

列车行驶铁路振动是一种频率与振幅均相当复杂的随机复合振动。由列车行驶产生的路基振动加速度在轨道附近的变化特征具有周期性,为了了解这种反应特性,赋予加速度特征值两种定义:一为绝对加速度最大值,记录同一测点各时刻加速度绝对值的最大值,来描述列车通过时测点时刻振动加速度幅值的最大值,y、z 方向分别记为 $|a_y|_{\max}$ 、 $|a_z|_{\max}$,见式(1);二为绝对加速度平均值,记录同一测点各时刻加速度绝对值的平均值,用来描述列车通过时测点平均振动加速度幅值的大小,y、z 方向分别记为 $|a_y|_{\text{vir}}$ 、 $|a_z|_{\text{vir}}$,如式(2)。

$$|a_i|_{\max} = \max\{|a_{ij}|\} (i = x, y, z; j = 1, 2, 3, \dots, N) \tag{1}$$

$$|a_i|_{\text{vir}} = \frac{\sum_{j=1}^N |a_{ij}|}{N} (i = x, y, z) \tag{2}$$

式中: $i = x, y, z$ 代表空间向量; a_{ij} 为某列车通过该断面时采集的 i 方向的第 j 个加速度记录; N 为此次列车通过该断面时记录的加速度个数。这两个加速度特征值物理概念明确且具有统计意义,能表达列车通过时振动加速度反应的变化规律与衰减特性。表 1 和表 2 为观测记录统计得到的加速度特征值统计结果。

由统计结果可以看出:

(1) 断面Ⅲ测点 1 的竖向振动及水平向振动比较大,在货车荷载作用下,竖向振动最大值达到 2.657 m/s^2 ;在 T166 次客车的作用下,水平向振动最大值可达 2.054 m/s^2 。

(2) 竖向振动的最大值要整体大于水平向振动,故路基的振动以竖向为主,在进行铁路路基设计时需考虑竖向振动为主要因素。

表 1 观测段路基振动响应绝对加速度平均值统计(单位:m/s²)

Table 1 Statistics of the average absolute acceleration values of the subgrade vibration responses (Unit:m/s²)

编号	测试 断面	车型	列车 编号	测点 M1		测点 M2		测点 M3	
				$ a_z _{vir}$	$ a_y _{vir}$	$ a_z _{vir}$	$ a_y _{vir}$	$ a_z _{vir}$	$ a_y _{vir}$
QZ7	I	客车	K918	0.121	0.054	0.052	0.032	0.016	0.010
QZ8		货车		0.153	0.092	0.076	0.055	0.017	0.014
QZ9		客车	T24	0.136	0.078	0.050	0.042	0.016	0.015
QZ10		客车	T166	0.156	0.081	0.034	0.033	0.012	0.013
QZ11		客车	T28	0.155	0.082	0.064	0.040	0.014	0.012
QZ13	II	客车	T165	0.152	0.071	0.062	0.039	0.015	0.013
QZ14		货车		0.132	0.072	0.051	0.042	0.017	0.016
QZ15				0.120	0.063	0.045	0.036	0.012	0.010
QZ16		货车		0.161	0.081	0.055	0.036	0.017	0.014
QZ17		货车		0.150	0.083	0.072	0.037	0.015	0.013
QZ18	III	客车	K918	0.148	0.071	0.053	0.045	0.017	0.014
QZ19		客车	T166	0.152	0.080	0.065	0.045	0.016	0.013
QZ20		客车	K9816	0.139	0.070	0.052	0.031	0.015	0.013
QZ21		客车	T266	0.142	0.072	0.042	0.031	0.014	0.012
QZ22		货车		0.113	0.084	0.048	0.040	0.016	0.015
QZ23		货车		0.141	0.065	0.060	0.037	0.018	0.014
QZ24		客车	T23	0.156	0.091	0.076	0.034	0.018	0.010
QZ25		客车	T165	0.191	0.084	0.081	0.028	0.017	0.013
QZ26		货车		0.162	0.074	0.053	0.040	0.015	0.015
QZ27		单车头		0.109	0.067	0.034	0.021	0.014	0.010
QZ28		货车		0.181	0.079	0.081	0.042	0.019	0.015

表 2 观测段路基振动响应绝对加速度最大值统计(单位:m/s²)

Table 2 Statistics of the maximum absolute acceleration values of the subgrade vibration responses (Unit:m/s²)

编号	测试 断面	车型	列车 编号	测点 M1		测点 M2		测点 M3	
				$ a_z _{max}$	$ a_y _{max}$	$ a_z _{max}$	$ a_y _{max}$	$ a_z _{max}$	$ a_y _{max}$
QZ7	I	客车	K918	2.101	0.998	0.552	0.231	0.178	0.098
QZ8		货车		2.425	1.074	0.577	0.440	0.198	0.101
QZ9		客车	T24	2.106	1.078	0.414	0.416	0.184	0.121
QZ10		客车	T166	2.140	1.384	0.692	0.324	0.141	0.092
QZ11		客车	T28	2.121	1.075	0.438	0.263	0.158	0.085
QZ13	II	客车	T165	2.152	1.071	0.513	0.407	0.146	0.099
QZ14		货车		2.331	1.167	0.623	0.484	0.197	0.118
QZ15				1.340	1.073	0.415	0.352	0.167	0.096
QZ16		货车		2.040	1.216	0.512	0.462	0.183	0.103
QZ17		货车		2.182	1.383	0.585	0.465	0.189	0.124
QZ18	III	客车	K918	2.201	1.069	0.527	0.269	0.182	0.106
QZ19		客车	T166	1.854	2.054	0.511	0.298	0.108	0.117
QZ20		客车	K9816	2.030	1.230	0.703	0.347	0.181	0.106
QZ21		客车	T266	1.742	0.978	0.601	0.261	0.173	0.131
QZ22		货车		2.105	1.223	0.714	0.487	0.217	0.131
QZ23		货车		2.108	1.117	0.593	0.512	0.165	0.147
QZ24		客车	T23	2.023	1.376	0.512	0.322	0.204	0.096
QZ25		客车	T165	1.923	1.162	0.456	0.318	0.197	0.104
QZ26		货车		1.983	1.252	0.622	0.438	0.187	0.098
QZ27		单车头		1.010	0.812	0.396	0.235	0.137	0.067
QZ28		货车		2.657	1.083	0.625	0.456	0.196	0.116

(3) 断面Ⅲ各测点的振动明显大于前两个断面相应测点的振动,原因是该路段未采取任何加固降温措施。

(4) 路基上的振动随距铁轨距离的增加呈现衰减趋势,以竖向衰减最快。货车的振动情况区别很

大,与货车的行驶速度及货车的载重量有关系。由于货车的随机性比较大,观测时没有货车通过时的列车资料,因此这一部分还需要细致的研究。

根据表 1 和表 2 计算的青藏铁路振动加速度幅值统计如表 3 所列。

表 3 青藏铁路客车与货车行驶路基振动加速度幅值统计(单位:m/s²)

Table 3 Acceleration amplitude statistics of subgrade vibration induced by passenger and freight trains on the Qinghai—Tibet railway

断面号	统计值	路基(M1)		路基(M2)		路基(M3)	
		$ a_z _{\text{vir}}$	$ a_y _{\text{vir}}$	$ a_z _{\text{vir}}$	$ a_y _{\text{vir}}$	$ a_z _{\text{vir}}$	$ a_y _{\text{vir}}$
I	客车 max	2.117	1.134	0.524	0.309	0.165	0.099
	客车 vir	0.142	0.074	0.050	0.037	0.014	0.012
II	货车 max	2.184	1.255	0.573	0.470	0.190	0.115
	货车 vir	0.148	0.079	0.060	0.038	0.016	0.014
III	客车 max	1.796	1.145	0.551	0.303	0.174	0.110
	客车 vir	0.155	0.078	0.062	0.037	0.016	0.012
	货车 max	2.213	1.169	0.639	0.473	0.191	0.123
	货车 vir	0.149	0.075	0.061	0.040	0.017	0.015

以测点到钢轨之间的直线距离为横坐标,将表 3 中两监测断面的加速度特征值绘制成衰减曲线(图 3 和图 4)。路基各测点振动的衰减规律可用指数函数 $|a|_{\text{max}}、|a|_{\text{vir}}=e^{A+Bx+Cx^2}$ 拟合,拟合参数 A、B、C 详列于表 4。

2.2 实测数据频谱分析

选用断面 I 和断面 III 观测数据分析 T166 次列车通过时各测点的振动反应。列车在观测点 M1、M2 和 M3 的竖向方向加速度时程曲线和频谱图如图 5~图 7。

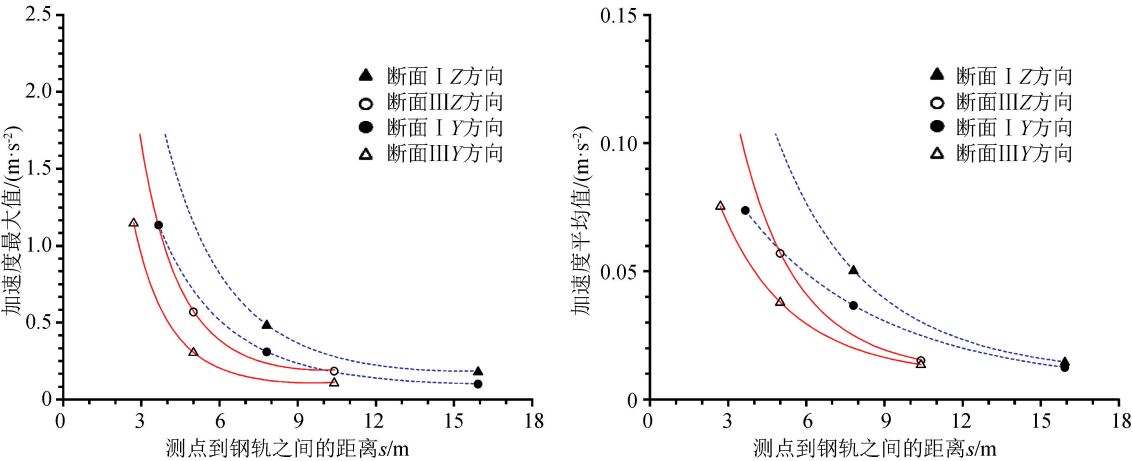


图 3 断面 I、III 客车加速度衰减关系拟合

Fig.3 Acceleration attenuation fitting induced by passenger trains at section I and III

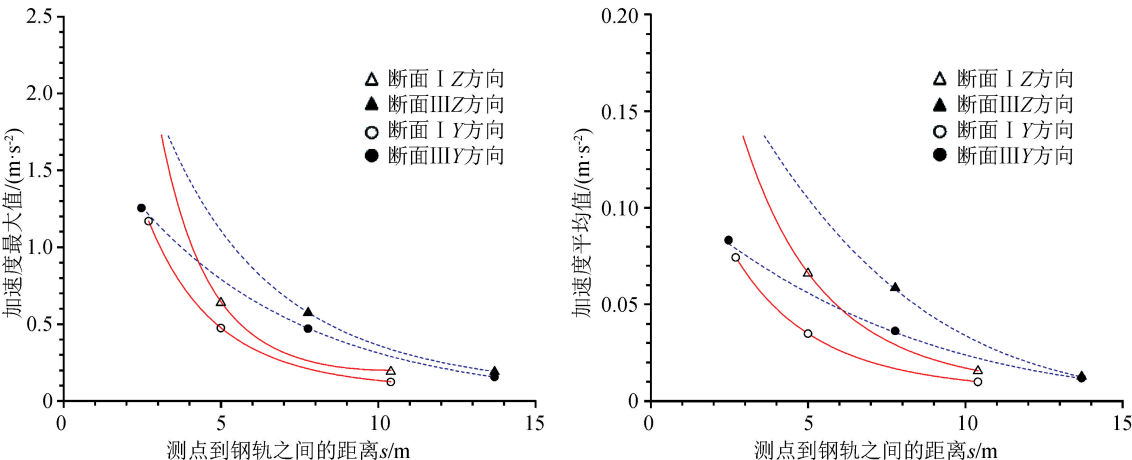


图 4 断面 II、III 货车加速度衰减关系拟合

Fig.4 Acceleration attenuation fitting induced by freight trains at section II and III

表 4 青藏铁路客车行驶路基振动衰减函数关系拟合参数

Table 4 Fitting parameters of subgrade vibration attenuation function in Qinghai—Tibet railway induced by passenger trains

断面编号	统计值	竖向(Z)			横向(Y)		
		A	B	C	A	B	C
I	客车 max	2.332	−0.524	0.017	1.678	−0.476	0.014
	客车 vir	−0.803	−0.342	0.008	−1.909	−0.201	0.003
II	货车 max	1.517	−0.313	0.006	0.689	−0.184	−1.560
	货车 vir	−1.582	−0.129	−0.004	−2.286	−0.106	−0.003
III	客车 max	2.764	−0.885	0.044	2.371	−0.963	0.050
	客车 vir	−0.580	−0.560	0.021	−1.589	−0.407	0.014
	货车 max	2.810	−0.858	0.042	1.469	−0.537	0.019
	货车 vir	−0.569	−0.547	0.020	−1.657	−0.377	0.01
拟合公式		$ a_z _{\max}=e^{A+Bx+Cx^2}$			$ a_y _{\max}=e^{A+Bx+Cx^2}$		
		$ a_z _{\text{vir}}=e^{A+Bx+Cx^2}$			$ a_y _{\text{vir}}=e^{A+Bx+Cx^2}$		

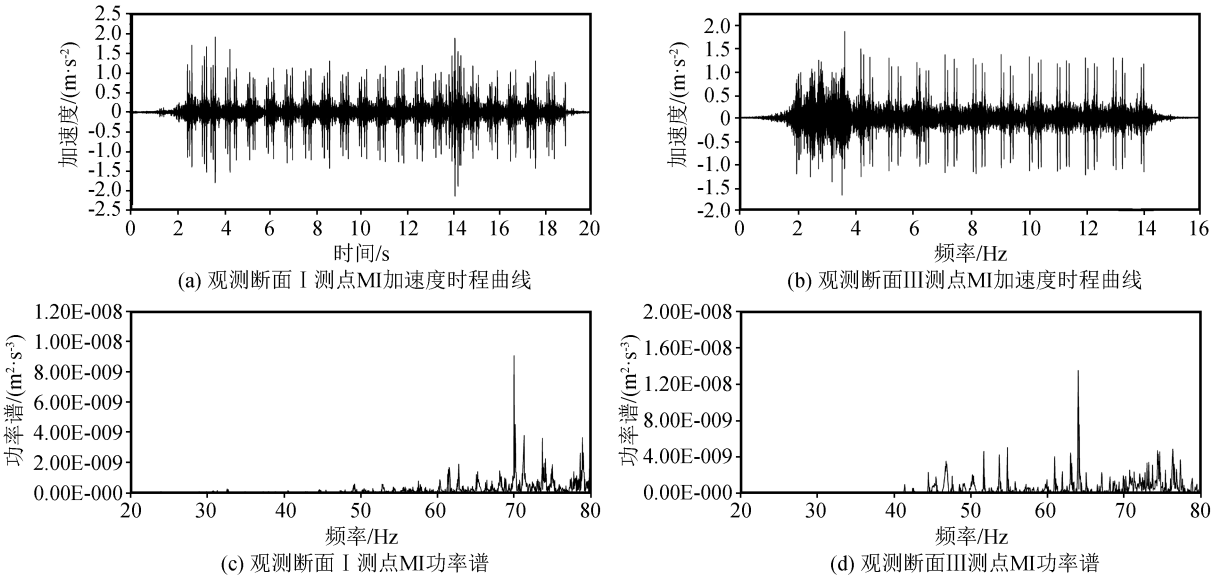


图 5 观测点 M1 竖向加速度时程曲线与频谱曲线

Fig.5 Vertical acceleration time-history curves and frequency spectra at point M1

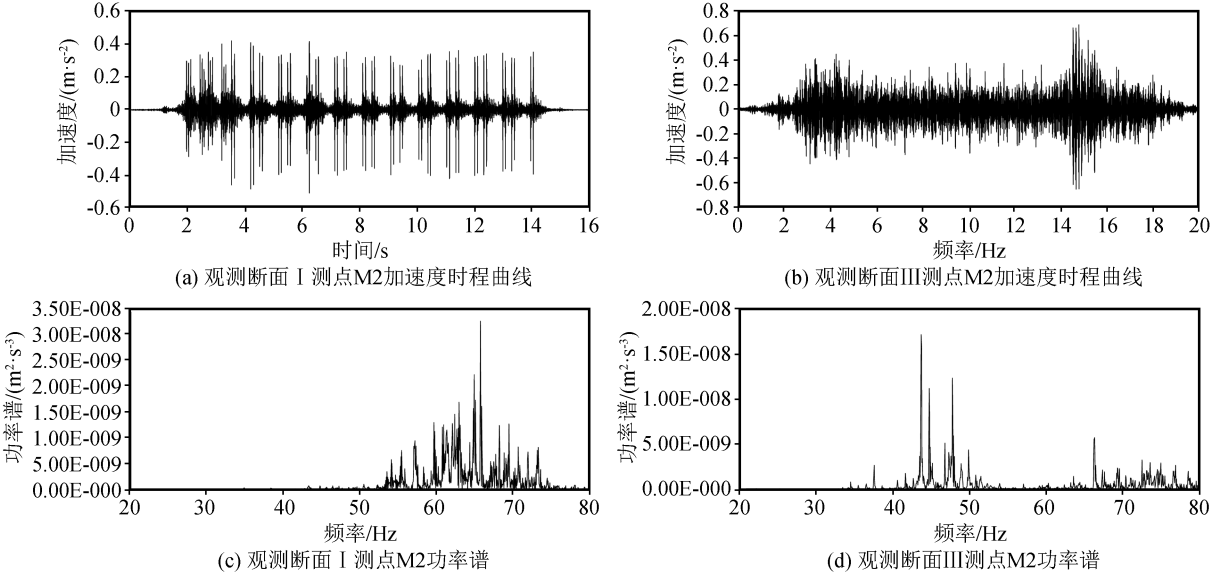


图 6 观测点 M2 竖向加速度时程曲线与频谱曲线

Fig.6 Vertical acceleration time-history curves and frequency spectra at point M2

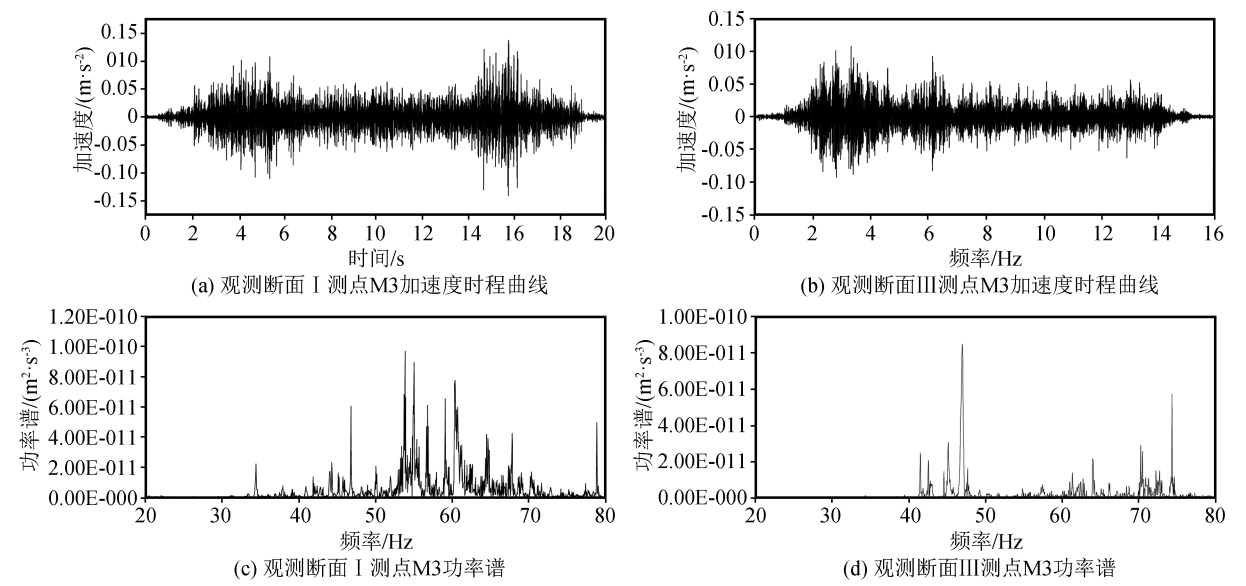


图 7 观测点 M3 竖向加速度时程曲线与频谱曲线

Fig.7 Vertical acceleration time-history curves and frequency spectra at point M3

从图 5~图 7 中可看出,对于观测断面 I,在观测点 M1 和 M2 的加速度时程曲线具有一定的规则性,与列车的振动频率较为吻合,其能量峰值分别出现在 70.0 Hz 和 65.8 Hz 处,能量的频率分布分别在 60~80 Hz 和 50~70 Hz 处,高频衰减较为明显。对于观测断面 III,观测点 M1 处的时程曲线与列车振动频率符合,但 M2 点的时程曲线不规则,是由于振动在土基内反射和折射的结果。两个观测点的能量峰值分别出现在 63.9 Hz 和 43.7 Hz 处,均比观测断面 I 峰值出现的早,其能量范围分别出现在 50~80 Hz 处和 40~75 Hz 处,比断面 I 相应测点的能量范围宽,原因是由于振动在土层中传播的结果,且其高频也逐步衰减。对于两个断面的观测点 M3,加速度时程曲线均无规律,说明振动进一步在土层中传播,其最大能量峰值分别出现在 53.8 Hz 和 47.1 Hz 处,出现的位置较为接近,能量主要分布在 50~70 Hz 和 40~50 Hz 处,说明土层对振动的作用更加明显,能量范围进一步变小,并且注意到观测断面 III 的 M3 点的峰值频率比 M2 点大,应该是土层作用的结果。随着观测距离距铁轨距离的增加,高频能量逐步衰减,路基上振动高频进一步增加,并随观测距离的增加高频逐步衰减,长周期开始占优势,说明土层振动比较缓慢。

3 结语

列车的振动作用影响冻土路基的稳定性,通过对青藏铁路多年冻土区 3 个断面的现场观测,研究

- 路基的振动和衰减情况,取得了以下结论:
- (1) 列车的动力作用随距离轨道增加呈指数的衰减形式,货车衰减比客车衰减快。
 - (2) 路基的振动频率与列车的行驶速度有关,热棒路基路段的振动和普通路基路段振动存在区别,需要进一步观测和研究。
 - (3) 路基上的振动作用随距铁轨距离的增加而衰减,从 60~80 Hz 的高频逐渐衰减到 40~50 Hz 范围内,高频成分逐渐减少,长周期开始显现优势,体现了土层的振动特性。
 - (4) 路基防护形式对路基上的竖向和水平振动影响大,热棒加碎石的路基防护形式效果好,其次为碎石防护路基,未采取任何防护的路基振动明显加大,其加速度时程曲线较为复杂。在 T166 次列车的作用下,碎石防护路基的竖向加速度值较热棒加碎石的路基防护形式衰减更快,故建议对未采取防护的路基进行防护。
 - (5) 列车的轴重对路基的振动作用大,在相同速度行驶条件下,重载货车的作用比客车大,由于货车编组及所载货物的不确定,需要对货车的动力响应进行深入研究。

由于在多年冻土区青藏铁路现场测试较为艰苦,取得测试数据非常宝贵,在以后的工作中还要有针对性地进行测试工作,以进行规律性的研究工作。

致谢:在此特别感谢中国科学院寒区旱区环境工程研究所孙志忠副研究员和中国地震局工程力学研究所王兆荣处长、马树林研究员、高峰副研究员及

中国科学院冻土工程国家重点实验室青藏高原研究基地的工作人员在观测时的帮助, 特别感谢孙志忠副研究员提供了观测现场的场地资料。

参考文献(References)

- [1] 张建明, 刘端, 齐吉琳. 青藏铁路冻土路基沉降变形预测[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 12-17.
ZHANG Jianming, LIU Duan, QI Jilin. Estimation on the Settlement and Deformation of Embankment Along Qinghai—Tibet Railway in Permafrost Regions[J]. China Railway Science, 2007, 28(3): 12-17.
- [2] 何振强. 列车荷载对冻土路基动力响应分析[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(3): 73-75.
HE Zhenqiang. Train Loads of Permafrost Subgrade Dynamic Response Analysis[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(3): 73-75.
- [3] 王子玉, 凌贤长, 慧舒清, 等. 深季节冻土区列车行驶路基振动数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(1): 1-6.
WANG Ziyu, LING Xianzhang, HUI Shuqing, et al. Numerical Simulation of Vibration Response of Railway Subgrade of Passing Train in Deep seasonal Frozen Soil Region[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(1): 1-6.
- [4] 陈拓, 吴志坚, 车爱兰, 等. 机车动荷载作用下多年冻土区铁路路基动力响应的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(1): 168-173.
CHEN Tuo, WU Zhijian, CHE Ailan, et al. Test Study on Dynamic Responses of Railroad Embankments in Permafrost Regions under Train Dynamic Loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(1): 168-173.
- [5] 马巍, 刘端, 吴青柏. 青藏铁路冻土路基变形监测与分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 571-579.
MA Wei, LIU Duan, WU Qingbai. Monitoring and Analysis of Embankment Deformation in Permafrost Regions of Qinghai—Tibet Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 571-579.
- [6] 王小军, 米维军, 魏永梁, 等. 青藏铁路多年冻土区路基人为上限的变化特点及其与稳定性的关系[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5): 1-7.
WANG Xiaojun, MI Weijun, WEI Yongliang, et al. The Change Characteristics of Artificial Upper Limit of the Roadbed and Its Relationship with Stability for Qinghai—Tibet Railway in the Permafrost Region[J]. China Railway Science, 2010, 31(5): 1-7.
- [7] 陈拓, 吴志坚, 林碧苍, 等. 青藏高原多年冻土地区铁路路基工程动力稳定性分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 939-945.
CHEN Tuo, WU Zhijian, LIN Bicang, et al. Dynamic Stability Analysis of Railway Embankment Engineering in Permafrost Regions of the Qinghai—Tibet Plateau[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 939-945.
- [8] 王启云, 张家生, 孟飞, 等. 高速铁路路基模型列车振动荷载模拟[J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 43-72.
WANG Qiyun, ZHANG Jiasheng, MENG Fei, et al. Simulation of Train Vibration Load on the Subgrade Testing Model of High-speed Railway[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(6): 43-72.
- [9] 王子玉, 凌贤长, 慧舒清, 等. 季节冻土区铁路路基振动加速度现场监测[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1591-1598.
WANG Ziyu, LING Xianzhang, HUI Shuqing, et al. Field Monitoring of Vibration Response of Subgrade in a Seasonally Frozen Region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1591-1598.
- [10] 陈建国, 夏禾, 陈树礼, 等. 运行列车引起的周围地面振动规律研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 98-103.
CHEN Jianguo, XIA He, CHEN Shuli, et al. Investigation on Running-train-induced Ground Vibrations Near Railway[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 98-103.
- [11] 李佳, 高广运, 赵宏. 基于 2.5 维有限元法分析横观各向同性地基上列车运行引起的地面振动[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 78-87.
LI Jia, GAO Guangyun, ZHAO Hong. Study of Ground Vibration Induced by Train Load in Transversely Isotropic Soil Using 2.5D Finite Element Method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 78-87.
- [12] 赵淑萍, 马巍, 焦贵德, 等. 长期动荷载作用下冻结粉土的变形和强度特征[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 144-151.
ZHAO Shuping, MA Wei, JIAO Guide, et al. The Features of Strain and Strength of Frozen Silt under Long-time Dynamic Loading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(1): 144-151.
- [13] 田立慧, 凌贤长, 王立娜, 等. 季节冻土区冬季列车行驶路基振动反应研究[J]. 世界地震工程, 2014, 30(4): 34-40.
TIAN Lihui, LING Xianzhang, WANG Lina, et al. Study on Vibration Response of Railway Subgrade in Seasonally Frozen Region Induced by Train-steering in Winter[J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(4): 34-40.
- [14] 孙志忠, 马巍, 温智, 等. 青藏铁路多年冻土区普通路基地温检测极其预测分析[J]. 铁道学报, 2010, 32(3): 71-76.
SUN Zhizhong, MA Wei, WEN Zhi, et al. Experimental and Numerical Analyses on Traditional Embankment of Qinghai—Tibet Railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(3): 71-76.