

青藏铁路沿线冻土场地地震动特征研究

吴志坚^{1,2}, 孙军杰^{1,3}, 王兰民¹, 程国栋², 徐舜华^{1,3}

(1. 中国地震局 兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局 地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于对青藏铁路沿线多年冻土区的现场地质考察、14个典型钻孔的地质编录以及现场测试, 获取了青藏铁路沿线多年冻土区土层波速的基本特征。而后结合室内动三轴有关冻土动强度的试验结果, 使用该地区50a超越概率为62.5%, 10.0%和2.0%的人造基岩地震波输入, 通过土层地震反应计算, 分析研究青藏铁路沿线冻土区10个冻土地震动的加速度时程与加速度反应谱的基本特征及其影响因素, 同时, 统计研究地温对场地的地震动加速度反应谱的影响。结果表明, 青藏铁路沿线多年冻土区土层波速及横波与纵波之波速比值较非冻土区大, 地震强度对冻土区场地的地震动加速度幅值具有决定性影响, 冻土区典型地震动加速度反应谱的中、短周期成分所占比例较大, 冻土地震动的加速度反应谱的幅值随地温的降低而普遍减小。

关键词: 土力学; 青藏铁路; 多年冻土; 波速; 地震动; 地温

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2007)12-2466-07

STUDY ON CHARACTERISTICS OF GROUND MOTION AT PERMAFROST SITES ALONG QINGHAI—TIBET RAILWAY

WU Zhijian^{1,2}, SUN Junjie^{1,3}, WANG Lanmin¹, CHENG Guodong², XU Shunhua^{1,3}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou, Gansu 730000, China;
2. Lanzhou Creative Base of Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Lanzhou, Gansu 730000, China;
3. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Based on the field geological investigation at permafrost regions, geological description and field test of waves velocities at 14 typical boreholes distributing in permafrost areas along the Qinghai—Tibet Railway, elementary characteristics of wave velocities of soils at the permafrost regions are presented. And then, combining the results of dynamic triaxial test, using three time histories of ground motion acceleration with the exceedance probabilities 62.5%, 10.0% and 2.0% in 50 years related to the research area, the characteristics of ground motion are analyzed for the 10 permafrost profiles by an equivalent linearization method to estimate the seismic response of frozen soil ground. Moreover, the influence of earth temperature on seismic acceleration response spectrum for permafrost sites is studied. Consequently, the following conclusions can be drawn. (1) Under the similar conditions, the wave velocities of frozen soils along the Qinghai—Tibet Railway are greater than those of other non-frozen soils areas; and the velocity ratio between the shear wave and compression wave does the same. (2) Earthquake intensity is a critical factor to influence the acceleration amplitude of ground motion at permafrost regions, e.g. with the decrease of earthquake intensity, the acceleration amplitude of the ground motion reduces gradually. (3) The proportion of the moderate and the short periods of seismic acceleration response spectrum in

收稿日期: 2007-05-18; **修回日期:** 2007-07-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50534040); 青藏铁路建设总指挥部专项基金项目; 中国地震局预测研究所基本科研业务费资助项目

作者简介: 吴志坚(1974-), 男, 博士, 1995年毕业于西安地质学院应用地球物理学专业, 现任副研究员, 主要从事岩土工程地震与寒区冻土工程等方面的研究工作。E-mail: zhjianlz@163.com

permafrost regions is primary. (4) The amplitude of acceleration response spectrum of ground motion decreases distinctly while earth temperature of frozen soils reduces. The research should contribute to earthquake disaster prevention of engineering structures in permafrost areas on Qinghai—Tibet Plateau.

Key words: soil mechanics; Qinghai—Tibet Railway; permafrost; wave velocity; ground motion; earth temperature

1 引言

我国的多年冻土分布面积约占世界多年冻土分布面积的 10%，占国土面积的 21.5%^[1]，其中，大部分多年冻土分布在中低纬度、号称世界第三极的青藏高原上。同时，青藏高原属于构造活动强烈区，地震活动频繁，强震较多。作为我国强震多发区，1980~2006 年间，青藏高原及其周边地区曾发生过 33 次 6.0~6.9 级地震、3 次 7.0~8.5 级地震(见图 1)。其中，最为引人瞩目的是 2001 年 11 月 14 日发生于昆仑山口西的 8.1 级地震。虽然此次地震发生在无人区，未造成实质性的经济损失和人员伤亡，但是地震在冻土区形成了大规模的地表破坏，这次地震让人们意识到了地震对青藏高原多年冻土地区的构筑物存在着极大潜在危害。

地基本震动特征的研究，已是当务之急。

作者以青藏铁路建设总指挥部项目为依托，于 2004 年 7 月~2005 年 6 月，在青藏铁路沿线冻土区典型地段开展了场地波速和地脉动的现场测试工作。随后，利用土层地震反应的等效线性化解法^[6]，结合本次野外测试所得的基础资料，研究了青藏高原冻土区场地的地震动特征及其可能影响因素。以下即是对本项研究获得的主要结果的总结，有望为今后我国多年冻土地区震害区划和防震减灾提供参考。

2 青藏铁路多年冻土区场地土层波速

本文研究涉及的冻土区范围为青藏铁路沿线 DK1004+000~DK1509+500 之间的广大区域，该范围基本上涵盖了分布在青藏铁路沿线的多年冻土区(见图 2，其中，MAGT 为冻土年平均地温)。

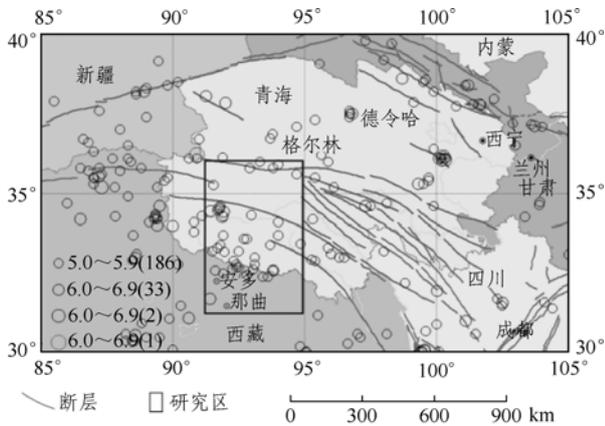


图 1 青藏高原地区震中分布图(1980 年 1 月 1 日~2006 年 7 月 31 日)

Fig.1 Distribution of epicenters at and around the Qinghai—Tibet Plateau between Jan. 1 1980 and July 31 2006

开展青藏高原冻土区抗震设防研究工作的基础，是对该区冻土地震动的特征有所了解。由于青藏高原极端恶劣的自然环境，使得在此处实施相关研究工作相当困难。截至目前，与青藏高原冻土地震动的特征相关的研究资料^[2~5]尚嫌缺乏，远不能满足青藏高原冻土区重要基础设施和重大工程项目抗震设防的要求。鉴于此，深入开展青藏高原冻土区抗震设防研究，尤其是冻土场

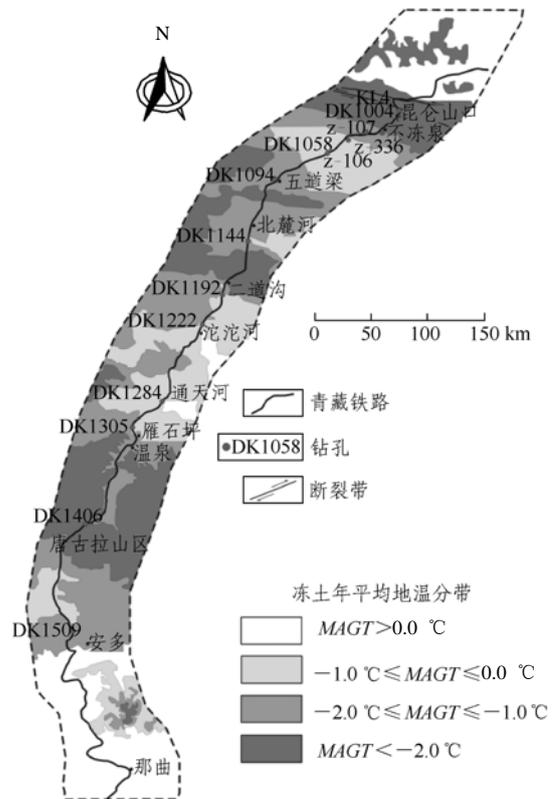


图 2 青藏铁路沿线冻土地震地温和钻孔分布图

Fig.2 Distribution of earth temperature and boreholes along Qinghai—Tibet Railway

土层波速是计算土层地震反应的重要参数。此次野外波速测试选用的仪器包括：(1) 中国科学院武汉岩土力学研究所生产的 FDP204PDA 掌上动测仪；(2) 南京伟雄电器设备厂制造的 CJ2000 系列三分量井下检波器。据此，获取了青藏铁路沿线 14 个典型冻土地层的土层波速资料。

多年冻土地层剖面特点鲜明，上部为活动层，下部为多年冻土层。活动层的地温和冻融状态受气温季节性变化影响很大，多年冻土层的地温受外界气温变化影响较小且常年保持冻结状态。一般而言，青藏高原多年冻土区活动层以下至 10 m 深度土层的地温变化较深度 10~15 m 之间土层的地温变化为大，深度 15 m 以下的冻土地温则基本保持不变。活动层的深度(多年冻土上限)随海拔高度、地质条件以及地表植被覆盖等环境的不同而变化，青藏铁路沿线多年冻土区的活动层深度一般为 1~4 m。根据 14 个测试冻土地层剖面的剖面特征，统计了这些场地 4 种典型冻土层(粉质亚黏土、泥灰岩、泥岩和细砂土)的波速随深度的变化特征(见表 1)，具体包括以下几点：

表 1 青藏铁路沿线钻孔波速测试结果(2004 年夏)

Table 1 Measuring results of wave velocities in boreholes along Qinghai—Tibet Railway(in summer of 2004)

岩性	埋深/m	类型	波速/(m·s ⁻¹)	
			V _p	V _s
粉质亚黏土	0~4	未冻土	230~368	150~242
		冻土	305~590	206~420
黏土	4~10	未冻土	564~1 050	395~740
		冻土	1 026~1 368	780~943
泥岩	0~4	未冻土	330~541	216~328
		冻土	395~730	296~532
	4~10	未冻土	770~1350	545~869
		冻土	1 489~1 620	910~1 043
泥灰岩	0~4	未冻土	812~904	526~644
		冻土	1 020~1 332	750~890
	4~10	冻土	1 377~1 592	878~1 050
细砂土	10~15	未冻土	1 579~1 653	1 121~1 184
		冻土	189~367	120~263
	0~4	未冻土	189~367	120~263
		冻土	278~562	204~400
4~10	未冻土	382~643	251~456	
	冻土	632~765	465~550	

(1) 青藏铁路沿线冻土区岩土体波速比(横波/纵波)多为 0.7 左右，较以往的经验值或其他地区为

大，这可能与冻结状态下土体的抗剪强度显著增加有关。

(2) 青藏铁路沿线冻土区岩土体波速普遍较非冻土区大，这说明，冻结使土体自身强度有所提高。从此方面来讲，冻土本身有利于抗震^[7]。但当地温升高时，随着冻土的退化^[8~11]，其本身的强度要比土体未冻结时的强度低很多^[12, 13]。

(3) 随含冰量、土体温度的不同(冻结状态下)，冻土波速差异明显。如在 DK1058+100, DK1087+750 和 DK1131+000 三个钻孔剖面均可见到的粉质亚黏土，由于 DK1087+750 处的冻结更加显著，该处钻孔波速数据普遍大于其他两处；DK1131+000 剖面处，4.8~7.0 m 深处的土体波速低于 DK1087+750 处相近深度同类土体的波速，前后两地波速的比值达到了 1.3；而 DK1058+100 剖面处，10.3~18.0 m 深处的土体波速高于 DK1131+750 处相近深度同类土体的波速，这与后者土体呈现软塑状一致。

(4) 粉质亚黏土、泥灰岩、泥岩和细砂土 4 类青藏铁路沿线永久冻土区典型冻土波速观测值见表 1。从表中观测数据可以看到：相同深度、相同岩性土层的波速处于一个较大的波动范围。这是因为冻土波速不仅随土层本身的性质差异而变化，而且受到冻土含冰量和地温的影响。

(5) 含冰量和地温是影响冻土波速的重要因素。含冰量越高，土体冻结强度越大，波速值越高；冻土本身的温度降低，土体冻结强度亦愈高，冻土层波速也会相应增大。

3 多年冻土地震震动特征

根据在中国科学院冻土工程国家重点实验室的 MTS-800 试验机上进行的动三轴试验和现场测试得到的不同地温下的冻土剪切模量比、阻尼比^[14, 15]和剪切波速资料，利用青藏铁路地震危险性分析得到的基岩输入波，通过土层地震反应分析计算^[6]，研究了青藏铁路沿线 10 个剖面(剖面位置见图 2)处不同地温下冻土地震震动的加速度及其反应谱特征。

3.1 冻土分层依据

冻土地层典型剖面依照现场钻孔岩性资料划分。青藏铁路沿线多年冻土层的上限埋深为 1~4 m。根据已有的地温测试结果，给出了研究区多年冻土层温度随冻土分布、季节变化和深度的变化规律。研究区多年冻土层的地温在地表下 4~20 m 时基本

上稳定在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 m 以上的活动层受外界气温的影响较大。

表 2 为典型剖面 DK1144+000 处土体的有关物性参数。根据现场测试结果和冻土室内土工试验数据, 分别对 10 个典型冻土剖面进行了计算土层划分。同时, 考虑地温变化对冻土强度及其动力特性的深刻影响和深度 15 m 以下冻土层的地温基本保持不变的事实, 为了对地温变化时冻土地震动的地震动特征有所涉及, 土层地震反应分析计算时, 地震波输入界面的深度选择为 15 m。

表 2 典型剖面 DK1140+000 处土体的有关物性参数(2004 年 8 月 9 日)

Table 2 Related physical parameters of soils at typical section DK1144+000(data acquired at the field on Aug. 9, 2004)

土类	含冰量 /%	地温 / $^{\circ}\text{C}$	埋深 /m	厚度 /m	密度 / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$V_s /(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
壤土	0	0.30	1.80	1.80	2.28	172
细砂	0	-0.41	2.20	0.40	0.99	194
含土冰层	>50	-1.25	3.30	1.10	1.16	370
含土冰层	>50	-1.44	4.00	0.70	1.63	387
粉砂	45	-1.52	4.70	0.70	1.89	530
粉细砂	15~20	-1.60	6.00	1.30	2.34	529
粉质黏土	30	-1.56	7.50	1.50	1.96	543
黏土	<20	-1.49	9.00	1.50	2.00	558
强风化黏土岩	<25	-1.45	10.50	1.50	2.35	509
强风化夹黏土岩的粉砂岩	10~20	-1.43	12.00	1.50	2.11	760
强风化夹粉砂岩的黏土岩	10~20	-1.42	13.00	1.00	2.29	766
强风化黏土岩	10	-1.38	15.20	2.20	2.14	754
强风化黏土岩	<10	-1.38	18.00	2.80	2.14	822

3.2 输入模拟地震波

在多年冻土地震反应分析计算中, 根据研究区的地震动强度、历史震害以及冻土分布厚度等特点, 选取了中国地震局李小军研究员提供的 50 a 超越概率为 62.5%, 10.0% 和 2.0% 的青藏铁路冻土工程区的人造地震波(见图 3)作为输入地震动。通过地震反应分析来判断在某一超越概率危险水平的可能地震作用期间, 研究区在不同地震烈度下的地震反应, 从而对该场地的地震动特性做出评价。

土层地震反应计算时, 原则上将冻土温度变化深度下限 15 m 当作地震反应计算的基岩输入面。

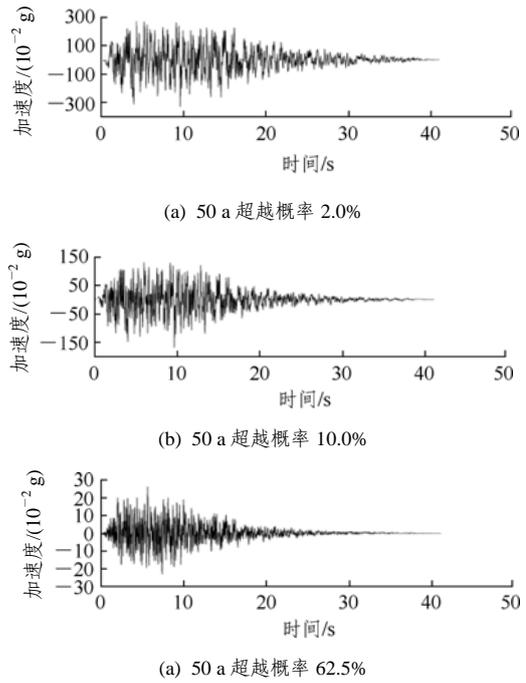


图 3 计算采用的人造地震动加速度时程

Fig. 3 Artificial acceleration time histories of ground motion used in calculation

3.3 地震峰值加速度和持时特征

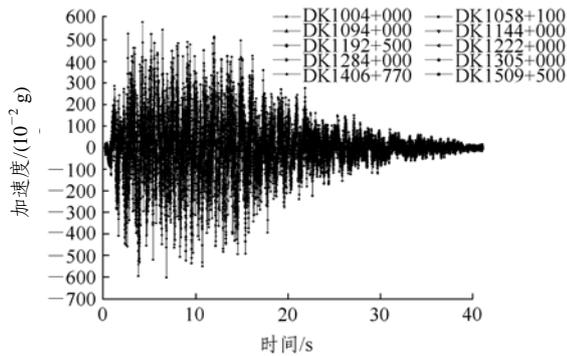
图 4 为土层地震反应计算所获得的加速度时程曲线。对比 2.0%, 10.0% 和 62.5% 三种超越概率下的加速度时程曲线可见, 地震强度对冻土地震动的幅值有着决定性的影响, 其所对应的峰值加速度和持时随着地震强度的减弱而锐减。

这三组时程曲线的包络线以超越概率为 62.5% 时最为接近线性关系, 超越概率为 10.0% 时次之, 超越概率为 2.0% 对应的包络线因其较大的加速度和持时的增长, 表现出较为强烈的非线性, 这可能与大能量容易导致非线性较强的大变形有关。

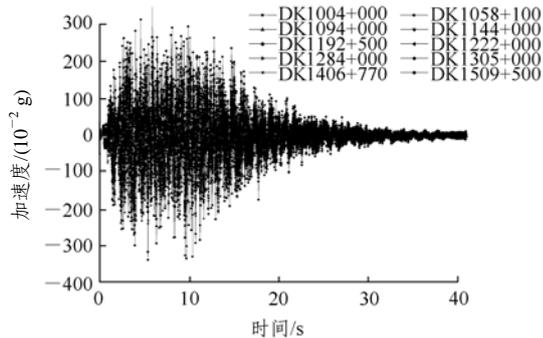
计算结果还表明, 50 a 超越概率为 62.5%, 10.0% 和 2.0% 时, 其对应的场地放大系数分别为 2.7, 3.2 和 4.3, 这说明青藏铁路沿线典型冻土地震动的放大系数随着地震强度的增大而减小。该现象当与冻土地震具有较低的固有周期、输入地震波的频谱成分以及场地对输入地震动的响应存在极限值有关。

3.4 地震动加速度反应谱特征

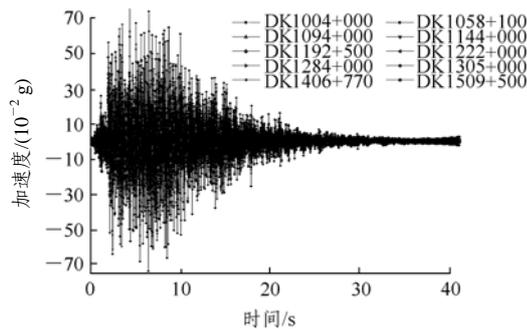
如图 5 所示, 与超越概率为 10.0% 和 62.5% 情形时相比较, 超越概率为 2.0% 时的加速度反应谱幅值最大, 且中长周期成分愈发丰富。从图中可以明显看出, 各断面不同温度下最大加速度反应谱幅值之间的差异不尽相同, 这也反映了场地特点对计算结果的影响。



(a) 50 a 超越概率 2.0%

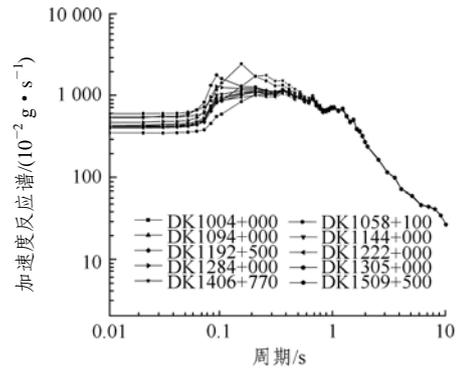


(b) 50 a 超越概率 10.0%

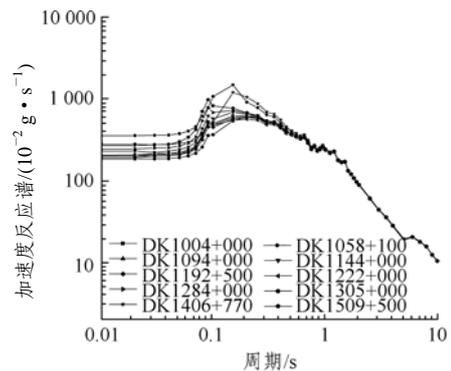


(c) 50 a 超越概率 62.5%

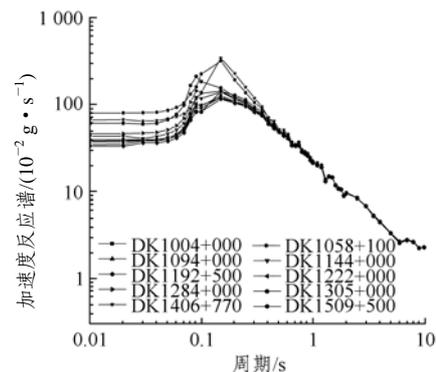
图4 不同超越概率时冻土地震加速度时程曲线
Fig.4 Acceleration time-history curves of ground motion at different exceedance probabilities



(a) 50 a 超越概率 2.0%



(b) 50 a 超越概率 10.0%



(c) 50 a 超越概率 62.5%

图5 不同超越概率时冻土地震加速度反应谱
Fig.5 Acceleration spectra of ground motion at different exceedance probabilities

冻土地层土层的含冰量及地温对土体强度的影响具有相似的机制，土体含冰量越高或土体地温越低，都意味着冻土的冻结强度越大，使得相比于含冰量较低或地温较高的冻土，前者的土体强度更高。冻土强度的增大，同样反映在土体波速、剪切模量比和阻尼比等工程力学特性之上。

10 个土层地震反应分析断面的计算结果显示反应谱的细部略显不同，这体现了各地土层相关物性指标以及含冰量、地温等的差异。土层物性指标以及含冰量、地温等直接影响反应计算中的波速、剪切模量、阻尼比和密度等参数的选取数值，这将影响计算所得的加速度时程曲线和加速度反应谱的变化细节。

与普通融土区典型地震动加速度反应谱相比较，冻土区典型地震动的加速度反应谱的中短周期成分所占比例较大，并且地震影响系数和特征周期较小。另外，特征周期之后的反应谱曲线下下降较融土区相应的加速度反应谱快，而反应谱曲线的上升段则比融土区的要早、迅速。这种变化特征与冻土、融土自身固有周期之间的差别有关。

4 地温对场地加速度反应谱的影响

图6展示了相似条件下3个典型冻土地场计算

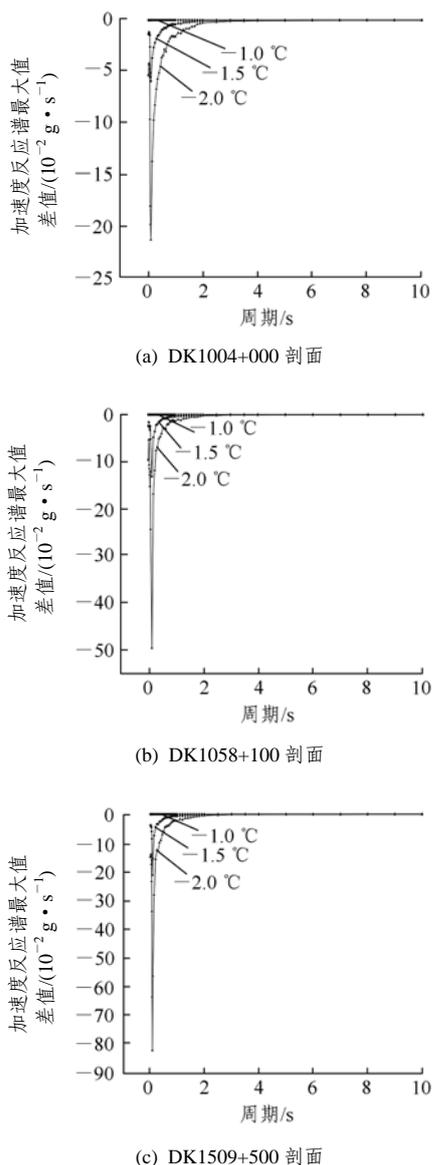


图 6 50 a 超越概率 2% 时不同地温冻土地地震动加速度反应谱最大值差值变化特征

Fig.6 Difference change characters of the maximum value of acceleration response spectrum with exceedance probability of 2.0% in 50 years

剖面(DK1004+000, DK1058+100, DK1509+500) 加速度反应谱最大值差值的对比。

由图 6 可见, 随着温度的降低, 加速度反应谱最大值的差值普遍降低。融土地区加速度反应谱特征的相关研究表明, 与强度较高的土体相比, 强度较低的土体对地震具有更高的放大作用, 即加速度反应谱的幅值更大。冻土地温降低时, 土体强度有所增加, 与融土区土层相似, 这一较高强度对应较低的加速度反应谱幅值。各断面不同温度下最大加速度反应谱幅值之间的差异不尽相同, 反映了场地特点对计算结果的影响。

5 结 论

通过开展的针对青藏铁路沿线多年冻土区的现场波速测试、室内试验和冻土层地震反应分析计算等研究工作, 对青藏铁路沿线冻土地地震动的特征得出如下结论:

(1) 青藏铁路沿线多年冻土区土体波速较非冻土区大, 波速比(横波/纵波)较以往的经验值或其他地区为大, 这当与冻结状态下土体的抗剪强度显著增加有关。含冰量和地温是影响冻土区土体波速的重要因素, 土体含冰量越高或土体地温越低, 都意味着冻土的冻结强度越大, 使得相比于含冰量较低或地温较高的冻土, 前者的土体强度更高。冻土强度的增大, 同样反应在剪切模量比和阻尼比等工程力学特性之上。

(2) 对实测的多年冻土地剖面地震反应计算结果表明, 地震强度对冻土区场地的地震动幅值具有决定性影响。随着地震强度的减弱, 对应的地震动峰值加速度幅值和持续时间逐渐减小。超越概率为 62.5%, 10.0% 和 2.0% 时, 冻土地放大系数分别为 2.7, 3.2 和 4.3, 这说明青藏铁路沿线典型冻土地场的放大系数随着地震强度的增大而减小。该现象当与冻土地具有较低的固有周期、输入地震波的频谱成分以及场地对输入地震动的响应存在极限值有关。

(3) 与普通融土区典型地震动加速度反应谱相比较, 冻土区典型地震动的加速度反应谱的中短周期成分所占比例较大, 并且地震影响系数和特征周期较小。另外, 特征周期之后的反应谱曲线下降较融土区相应的加速度反应谱快, 而反应谱曲线的上升段则比融土区的要早、迅速。这种变化特征与冻土、融土自身固有周期之间的差别有关。

(4) 地温对青藏铁路沿线多年冻土区地震动参数有着较大影响。土层地震反应分析计算结果的统计表明, 随着温度的降低, 加速度反应谱的幅值普遍降低。融土地区加速度反应谱特征的相关研究表明, 与强度较高的土体相比, 强度较低的土体对地震具有更高的放大作用, 即加速度反应谱的幅值更大。冻土地温降低时, 土体强度有所增加, 与融土区土层相似, 这一较高强度对应较低的加速度反应谱幅值。各断面不同温度下最大加速度反应谱幅值之间的差异不尽相同, 反映了场地特点对计算结果的影响。

参考文献(References):

- [1] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1 - 8.(ZHOU Youwu, GUO Dongxin, QIU Guoqing, et al. Chinese permafrost[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1 - 8.(in Chinese))
- [2] 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, 25(8): 1 639 - 1 644. (GAO Feng, CHEN Xingchong, YAN Songhong. Influence of permafrost and seasonally frozen soil on seismic responses of sites[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 639 - 1 644.(in Chinese))
- [3] 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): 1 330 - 1 335. (WANG Lixia, LING Xianchang, XU Xueyan, 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): 1 330 - 1 335.(in Chinese))
- [4] 徐学燕, 徐春华, 李晓雅. 冻土地地震加速度反应谱研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 680 - 683.(XU Xueyan, XU Chunhua, LI Xiaozhi. Research on earthquake acceleration response spectrum of frozen soil ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 680 - 683.(in Chinese))
- [5] 陆鸣, 李小军. 青藏铁路四座主要桥梁工程场地地震安全性评价报告[R]. 哈尔滨: 中国地震局工程地震研究中心, 2001.(LU Ming, LI Xiaojun. Report of seismic security estimation on engineering site of four bridges in Qinghai—Tibet Railway[R]. Harbin: Research Center of Seismic Engineering, China Earthquake Administration, 2001.(in Chinese))
- [6] 廖振鹏, 李小军. 地表土层地震反应的等效线性化解法[C]// 地震小区划——理论与实践. 北京: 地震出版社, 1989: 141 - 153. (LIAO Zhenpeng, LI Xiaojun. An equivalent linearization method to estimate seismic response of soils at ground surface[C]// Seismic Micro-zoning—Theory and Practice. Beijing: Earthquake Press, 1989: 141 - 153.(in Chinese))
- [7] WANG L M, ZHANG D L, WU Z J. The influence of earth temperature on dynamic characteristics of frozen soil and the parameters of ground motion on the sites of permafrost[C]// Proceedings of the 16th ICSMGE. Osaka, Japan: [s. n.], 2005: 2 733 - 2 736.
- [8] 崔托维奇. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林译. 北京: 科学出版社, 1985.(CYTOVICH N A. Mechanics of frozen soil[M]. Translated by ZHANG Changqing, ZHU Yuanlin. Beijing: Science Press, 1985.(in Chinese))
- [9] 徐敦祖, 王嘉诚, 张利新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.(XU Xiaozu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Physics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2001.(in Chinese))
- [10] 王昭令. 冻土退化与青藏高原冻土环境问题探讨[C]// 第5届全国冰川冻土大会论文集. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 11 - 17. (WANG Zhaoling. An approach on permafrost degradation and environmental problems in the Qinghai—Tibet Plateau[C]// Proceedings of the 5th Chinese Conference on Glaciology and Geocryology. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996: 11 - 17.(in Chinese))
- [11] 王国尚, 金会军, 林清. 青藏公路沿线冻土自然环境及工程环境的变化[C]// 第5届全国冰川冻土大会论文集. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 43 - 50.(WANG Guoshang, JIN Huijun, LIN Qing. Changes of natural and engineering environments in permafrost regions along the Qinghai—Tibet Highway[C]// Proceedings of the 5th Chinese Conference on Glaciology and Geocryology. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996: 43 - 50.(in Chinese))
- [12] 张鲁新. 青藏铁路高原冻土区地温变化规律及其对路基稳定性影响[J]. 中国铁道科学, 2000, 21(1): 37 - 47.(ZHANG Luxin. Regularity of ground temperature variation in Qinghai—Tibet Plateau permafrost region and its effect on subgrade stability[J]. China Railway Science, 2000, 21(1): 37 - 47.(in Chinese))
- [13] 程国栋. 用冷却地基的方法修建青藏铁路[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(3): 1 - 4.(CHENG Guodong. Taking a cooling foundation method to construct Qinghai—Tibet Railway[J]. China Railway Science, 2003, 24(3): 1 - 4.(in Chinese))
- [14] 王大雁, 朱元林, 马巍, 等. 冻土超声波波速与冻土物理力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 837 - 1 840. (WANG Dayan, ZHU Yuanlin, MA Wei, et al. Testing study on relationship between ultrasonic wave velocities and physico-mechanical property of frozen soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 837 - 1 840.(in Chinese))
- [15] 吴志坚, 马巍, 王兰民, 等. 地震荷载作用下温度和围压对冻土强度影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 648 - 652.(WU Zhijian, MA Wei, WANG Lanmin, et al. Laboratory study on the effect of temperature and confining pressure on strength of frozen soil under seismic dynamic loading[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 648 - 652.(in Chinese))