

文章编号: 1000-7598 (2010)增刊 2-0335-07

多年冻土区路基调查中瞬态面波勘探方法应用研究

吴志坚¹, 车爱兰², 马 巍³, 冯少孔⁴, 石 航¹

(1. 中国地震局 兰州地震研究所, 兰州 730000; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030;
3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; 4. 日本中央开发株式会社, 日本 东京 169-8612)

摘 要: 多年冻土地区铁路路基的振动与环境变化对路基稳定性的影响问题日益突出, 为了评价这种影响引起的青藏铁路多年冻土区冻土的变化状况, 首次应用了一种简便、高效、环保的瞬态面波勘探方法对其天然地表和典型结构路基及其下部多年冻土层进行了勘探。试验数据良好、频散特征显著, 通过反演分析得到了青藏高原多年冻土地区天然地表和典型结构路基下部土体的剪切波速度剖面和多年冻土的分布。勘探结果表明, 青藏铁路北麓河试验段勘探区内多年冻土上限一般为 2 m, 层厚为 20 m 左右, 多年冻土层 V_s 平均为 600 m/s 以上。该结果与该区地质钻探编录和钻孔波速测试结果较为一致, 说明瞬态面波勘探在自然环境严峻的青藏高原多年冻土地区有着良好的适用性。

关 键 词: 瞬态面波探测; 青藏铁路; 路基; 多年冻土

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Application study of transient surface wave survey on embankment in permafrost regions

WU Zhi-jian¹, CHE Ai-lan², MA Wei³, FENG Shao-kong⁴, SHI Hang¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;
2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;
3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. Chuo Kaihatsu Corporation, 3-13-5, West Waseda, 169-8612, Tokyo, Japan)

Abstract: It's an increasingly serious problem that the influences of vibration and environmental changes on the stability of railroad embankment in permafrost regions. The maintenance of the railroad and assessment for the influence of the railway on the permafrost requires investigation and monitoring the changes of the embankment and the permafrost layer. We firstly applied a field experiment on applicability of transient surface wave survey on natural ground and railroad embankment together with permafrost investigation. The experiment data were good and the dispersion characteristics distinct. The V_s profiles of the natural ground, embankment, and their permafrost layers underground were obtained through dispersion analysis and inversion. Moreover, the result gave very clear boundary of the table and bottom of the permafrost layer underground at the Beilu River test segment of the Qinghai-Tibet Railroad. The table of permafrost is around 2m in deep; the thick of permafrost layer is about 20m; and their average V_s are above 600m/s, which is coincident with the borehole data and wave velocity test in this area. It demonstrates that the transient surface wave survey is effective for permafrost investigation in Qinghai-Tibet plateau.

Key words: transient surface wave survey; Qinghai-Tibet Railroad; roadbed; permafrost

1 引 言

青藏铁路穿越连续多年冻土区的长度为 546 km, 其中高温多年冻土分布总里程为 416 km, 占多年冻土分布的 77%, 高含冰量多年冻土分布为 310 km,

占多年冻土分布的 57%^[1]。近数十年来由于全球气候变暖, 青藏高原年平均气温普遍上升 0.2~0.4 °C, 气温年较差逐年减小^[2], 该区多年冻土多呈区域性退化状态。青藏高原地区影响路基稳定性的最大因素是冻土问题, 工程实践和相关研究表明, 负温值

收稿日期: 2010-07-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40902094); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费资助项目; 中国科学院西部行动计划(二期)项目课题(No. KZCX2-XB2-10); 中国科学院冻土工程国家重点实验室开放基金课题(No. SKLFSE200801)。

第一作者简介: 吴志坚, 男, 1974 年生, 博士, 副研究员, 主要从事冻土工程与岩土工程地震领域的研究工作。E-mail: zhijianlz@163.com

是决定冻土强度也是决定冻土用作构筑物基础时承载力的最重要因素^[3]。随着青藏铁路 2006 年 7 月 1 日的开通运营,每天往返青藏铁路的列车达数十趟。根据作者 2009 年 7 月现场地温监测发现,列车通过时,因机车振动机械能部分转换为热能的原因,导致路基填土温度有约 0.03℃ 的上升。在气候变暖和人为工程扰动的前提下,多年冻土会发生退化,强度会降低,特别是抗压强度和剪切强度将会降低更多^[4-5]。因此,由于全球变暖、人为工程施工热扰动和机车振动等因素对多年冻土这一特殊承载土体的多重影响,使得该区域路基的设计、施工和维护面临着很大的难度。

多年冻土区的铁路建设及运营对自然环境特别是冻土的影响值得关注,为了解和评价环境气温变化和机车长期疲劳荷载对其路基和下部多年冻土层稳定性的影响,为铁路的安全运营和线路维护提供科学依据,需要一种简单、便捷、环保的无损探测手段。表面波是沿介质表层传播的一种弹性波,其传播速度与材料密度、强度等具有良好的相关性,用它来勘探结构的力学性能及存在的缺陷具有重要意义,在地基及结构的无损检测、勘探等方面已得到了较多的重视和应用。本文在青藏高原多年冻土地区首次利用表面波勘探方法,对该区域典型结构铁路路基及其下部多年冻土层进行了勘探,准确把握了其路基和下部土层的剪切波速度剖面。测试结果与该区钻探地质编录和钻孔波速测试较为一致,表明表面波勘探有着精度高、操作方便的特点,在自然环境严峻的青藏高原多年冻土地区有着良好的适用性。

2 现场试验概况

北麓河试验段为青藏铁路正线路基,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,海拔高程在 4 620~4 640 m 之间。该段全长约 14 km,处于青藏高原多年冻土带的中间区域,整个试验段多年冻土上限附近富含厚层地下冰,且多年冻土地温空间分布状态差异较大,地温分区从 I 区到 III 区,根据冻土工程地质评价,该段为不良和极差的工程地质地段。试验段内地层主要为上第三系湖相沉积及第四系全新统冲洪积层。该段地下冰分布广泛,根据钻探资料,该试验段全范围内均有含土冰层分布,其体积含冰量大于 50%,多为悬浮状构造,主要分布在冻土上限以下 1~3 m 范围内,厚度一般为 1~3 m。冻土上限一般为 2~3 m,最深可达 3.4 m,最浅为 1.7 m。除个别点外,该试

验段多年冻土的年平均地温为 -1.8~-0.4℃。

为保护路基下部多年冻土层,铁路采取了大量保护多年冻土的工程结构形式,北麓河试验工程涵盖了青藏铁路全部路基工程结构措施,其中包括块、碎石路基、通风管路基、保温材料路基、热棒路基、块石、碎石护坡路基、遮阳板护坡、边坡防护工程、合理路基高度、拼装式涵洞基础等等。本文对其中的块石路基、通风管路基、保温材料路基和素土路基开展了表面波的应用勘探研究。

图 1(a)~(d) 为该试验段 4 种典型路基横断面结构图。DK1142+700 断面为块石路基和块石护坡复合结构路基,其中块石粒径约为 30~40 cm;底部块石厚约 1.5 m,左、右护坡厚分别为 1.6 m 和 1.0 m (图 1(a))。DK1142+480 断面为素土路基,其右护坡为铁路运营后补强的厚 1.0 m 块石护坡,左、右护道(素土)宽分别为 2.0 m 和 1.4 m (图 1(b))。DK1141+070 断面为通风管结构路基。该路基结构为在路堤中部横向埋设直径 40 cm 混凝土管,通风管距路肩 2 m 左右,横向间距为 0.8 m (图 1(c))。DK1139+670 断面为保温材料结构路基。该路基为在天然地表以上 0.5 m 高铺设 0.10 m 厚的 EPS 保温材料,路基左右两侧分别铺设不同厚度的碎石护坡和护道,并且在路肩两侧对称埋设热棒(图 1(d))。

3 高密度面波勘探方法及其原理

3.1 面波勘探的原理

面波只在介质的表面传播,但其传播速度却与介质内部构造有着密切的关系。以瑞利面波为例,如图 2 所示,其振幅从介质表面沿深度方向快速衰减,大约在半个波长以内约集中了全部能量的 80% 以上,在一个波长以内则集中了全部能量的约 95% 以上。因此,瑞利面波的传播速度主要由从介质的表面到半个波长的深度范围内的介质决定,而几乎与超过 1 个波长以上深度的介质无关。显而易见,高频面波波长较短,只能穿透表面附近很浅的范围内的介质,因而其传播速度只反映浅层介质的变化;低频面波波长很大,能穿透从表面到深处的地层,因而其传播速度能反映从表面到深层的介质内部构造的综合影响^[6-8]。

3.2 高密度面波勘探方法

二维高密度面波勘探如图 3 所示,由数据采集、波形处理、频散分析和构造分析 4 部分组成^[9-10]。

数据采集:面波勘探的数据采集首先是将多个弹性波检波器按一定的间隔设置在一条测线上,然

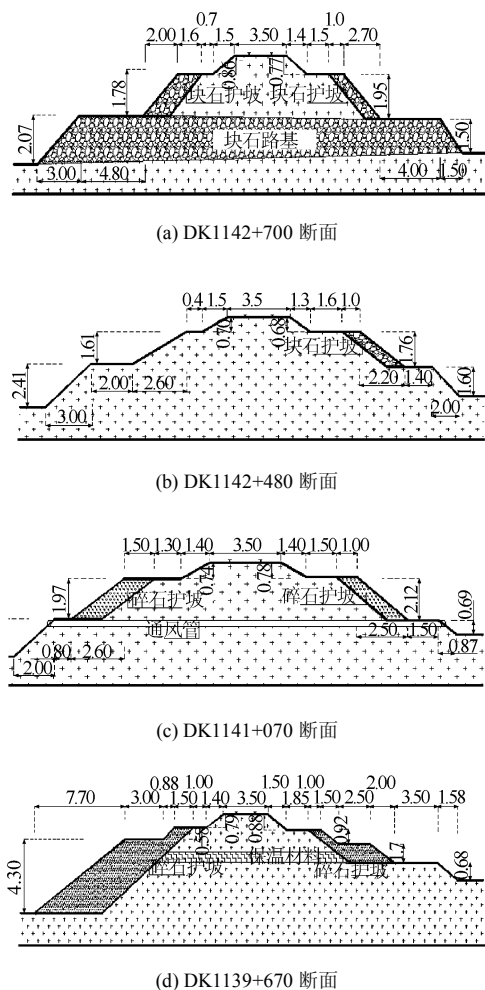


图 1 试验段典型路基结构截面 (单位: m)
Fig.1 Typical structures of roadbed of the test segment (unit: m)

后在测线的延长线上通过人工方法激振,并用记录仪记录由检波器接收到的地面振动。检波器采用固有频率 4.5 Hz 以下的速度型垂直动圈检波器;人工震源则采用锤击方法;记录仪采用有 24 位模/数转换器和 2 Hz 以下低截频的多道数字记录仪。检波器采用 12 个,震源到最近的检波器之间的距离大于或等于设计勘探深度(一般为 10~20 m),检波器之间的距离采用 1 m。

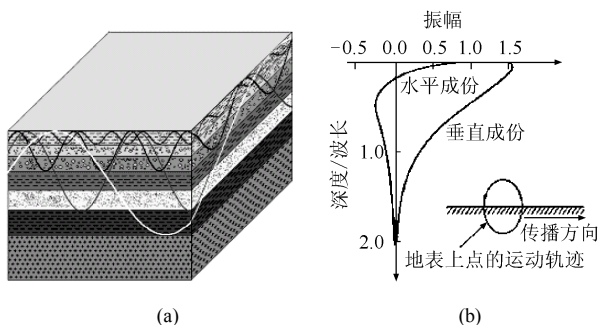


图 2 面波用于介质内部检测的原理
Fig.2 Principle of high density surface wave detection

波形处理: 为保证浅层信息的获得,在波形处理时进行各种滤波,包括时窗和叠加处理以提高数据的信噪比。除了在数据采集时通过多次叠加和选择操作时间等方法来尽量压制噪音外,在数据处理时要利用数字滤波技术再一次压制噪音以提高数据质量,通过各种处理手段滤掉噪音而只保留有用的面波信息。另外,现场记录的地震数据一般不含检波器坐标等数据处理所必需的位置信息。在波形处理之前,应首先整合检波器和震源的位置信息和地震数据。

频散分析: 对经过波形处理抽取的面波信号,通过数学分析计算出面波的频散曲线,即面波的各个频率成分的相位传播速度。通常所用的方法有速度扫描法和各种频率-波数谱法(F-K法)。

构造分析: 又称为相速度反演分析或逆解析。把地下构造假设为平行层状模型,然后计算该模型的理论频散曲线;比较理论频散曲线和实测频散曲线之差,并按一定的算法修改构造模型;重复上述过程直至模型的理论频散曲线与实测频散曲线之差足够小为止,这时即认为所得到的模型代表调查点处的地下构造。

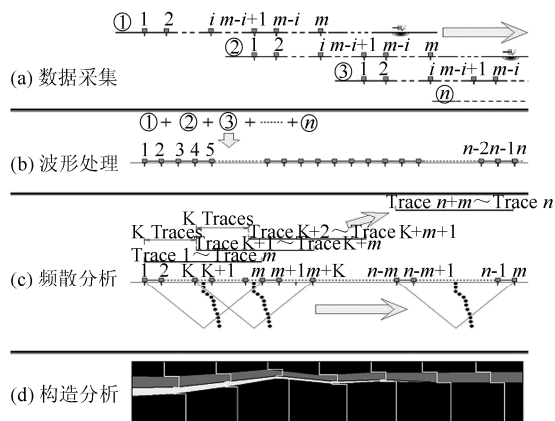


图 3 高密度面波勘探的数据采集和记录数据示意图
Fig.3 Sketch of data acquisition and recording of high density surface wave survey

4 高密度面波勘探

本次测试在不同路基结构的右侧路肩及 DK1141+070 断面附近地表布设表面波勘探测线,利用表面波勘探方法获取各种路基及其下部浅层土体的 S 波速度等基础数据。本次勘探设备使用日本应用地质(株)制造的 McSeis-SX 改造型 24 通道面波仪,检波器为固有频率 4.5 Hz 速度型垂直动圈检波器,为高原操作方便采用 12 通道探测。

4.1 测线布置与数据采集操作

测线布设：图 4 为面波勘探测线布置位置图。共设置测线 5 条。其中，DK1139+670（测线 1）、DK1141+070（测线 2）、DK1142+480（测线 3）、DK1142+660 与 DK1142+700（测线 4）4 条高密度面波勘探测线分别布置在各段路基的右路肩上，其目的是获取路基各部分的剪切波速度构造。测线 5 布置 DK1141+070 断面的天然地表上，目的是把握多年冻土层的横波速度构造。路基和天然地表勘探测线布置见图 5。

检波器设置：在各路基结构阴坡路肩处及天然地表，沿与列车运行方向水平方向每间隔 1 m 布置一个检波器，共 12 道。将检波器垂直地插入地中

激发：激发前先用工具将地面平整，用质量约 10 kg 的混凝土块夯击地面作为震源。

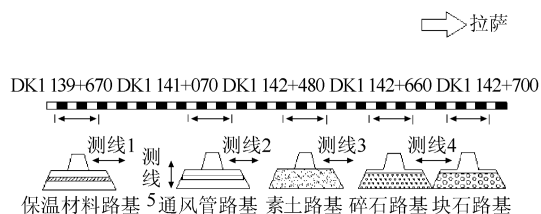


图 4 面波检测测线布置测试位置图

Fig.4 Layout of surface wave survey line

4.2 面波数据分析

面波数据分析流程如图 6 所示。面波数据分析可分预处理，波形处理，相速度分析和构造分析 4 大部分^[11-12]。

相速度分析就是从实测面波波形数据提取面波频散曲线，能否得到高精度的频散曲线直接关系到勘探结果的可靠性。相速度分析的算法采用了速度谱法，通过对每一个频率成分的信号进行速度扫描，得到一个最佳速度，从而求取面波的相速度曲线。本次勘探工程采用参数频率范围为 0~60 Hz，速度范围为 0-350 m/s，频率间隔为 0.488 5 Hz。

地下构造分析又称为反演分析，即由瑞利面波的频散曲线推测地下的横波速度构造。采用遗传算法和最小二乘法的混合算法，由频散曲线自动生成模型搜索范围，得到的模型具有客观性。采用多模态的分析方法，反演分析考虑高次模态的数据质量，基本模态、1 次模态、2 次模态的权重采用 0.6、0.3、0.1。遗传算法的地下构造层数为 3 层，模型个数为 50 个/代，遗传代数 50 个或误差小于 3%，重复计算 5 次，得到 50 次叠代后的平均值作为分析结果。



(a) 路基结构测线布置



(b) 天然地表测线布置

图 5 面波检测测线布置现场工作图

Fig.5 Layout of surface wave survey on site

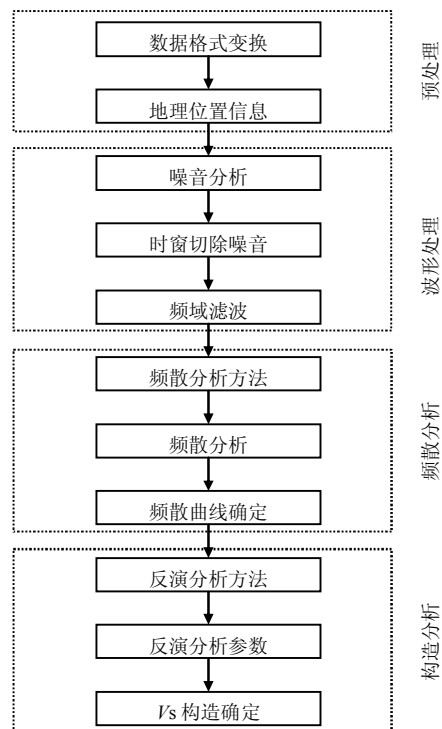


图 6 面波数据分析流程

Fig.6 Procedures of data analysis of surface wave survey

4.3 天然地表地基面波数据分析

图 7 为天然地面原始波形图例，天然地表由于

受到暖季冻土融化和鼠洞的影响, 部分数据频散分析存在困难, 但整体评价数据可信度较高。如图所示, 随着距震源距离的增加, 信号衰减不显著。这意味着地基刚度较大, 这也是面波信号的特点。

为保证勘探深度, 把 60 m 测线的全部数据进行叠加, 如图 8 所示。利用所有通道的数据进行频散分析, 得到图 9 的相速度曲线。图 9 中的背景代表相速度谱的能量, 深色表示能量大, 浅色表示能量小, 黑色表示能量团的最大值。各频率点的能量团的最大值对应的速度即为该频率的相速度。由图可看出, 该测线能量分布非常集中, 频散曲线光滑, 无噪音, 显示了频散分析结果的高精度和可靠性。基本模态的相速度在 80 Hz 附近间断, 2 次模态原始数据的离散性较大, 精度较低, 仅作为参考。与普通土质地基相比, 得到的相速度频率范围较高。

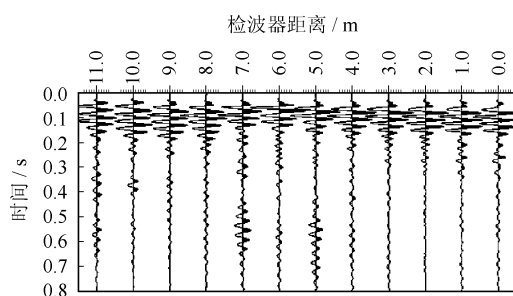


图 7 天然地表测线面波波型例
Fig.7 Surface wave form of nature ground

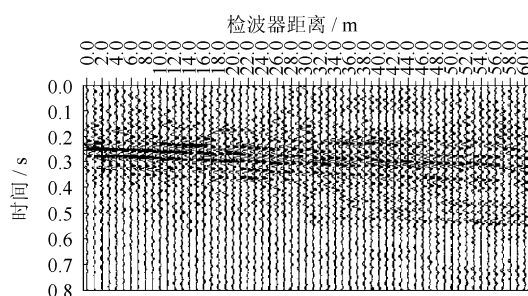


图 8 天然地表全部数据的叠加结果
Fig.8 Stacking results of all data of nature ground

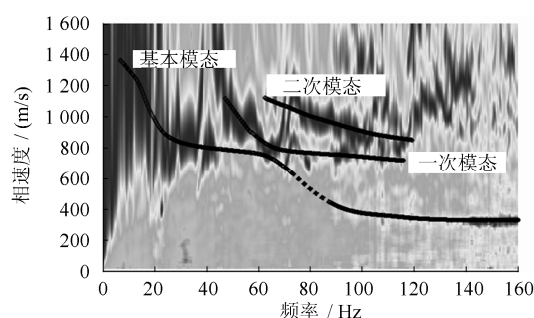


图 9 天然地表多年冻土相速度分析结果
Fig.9 Analysis results of phase velocity of permafrost under nature ground

图 10 为反演分析后得到的该测线地下剪切波 V_s 速度剖面, 实线为最佳拟合速度模型。图 11 为地下速度构造理论的近似拟合, 图中圆圈点为相速度数据点。从图 11 可以看到, 勘探相速度的基本模态与 1 次模态的拟合精度相当良好。2 次模态的拟合误差较大, 同前述因原始数据的离散性过大所致。

通过上述分析, 可以认为, V_s 为 340 m/s 的土层为未冻结土层; V_s 为 900 m/s 的土层为永久冻结土层, V_s 为 1 640 m/s 的土层为永久冻结土层下部的基岩层。因此, 多年冻土上部活动层厚约 2.0 m, 底面深度 22.8 m。该结果与本区已有的钻孔勘探数据吻合较好。

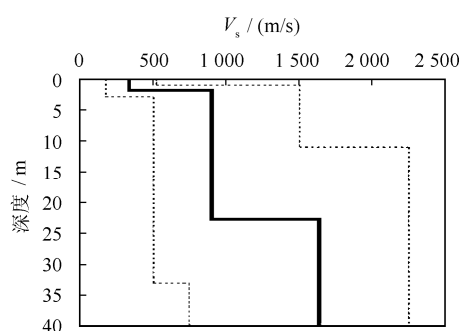


图 10 多年冻土地区 V_s 地下构造
Fig.10 V_s structure of soil layers at permafrost area

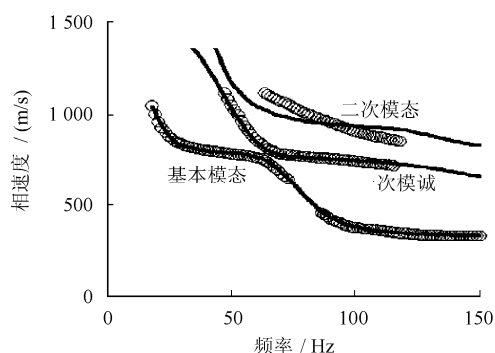


图 11 多年冻土地区频散特征
Fig.11 Dispersion characteristics of permafrost area

4.4 路基面波数据分析

图 12 是通过对各路基测线反演分析结果处理生成的各测线沿深度方向分布的 V_s 构造。由图中可以看出, DK1139+670 断面路基的内部 V_s 剖面可分为 3 层: 180 m/s 以下的表层(厚约 2.2 m); 200~300 m/s 保温材料附近层; 大于 300 m/s 的路基下部土层, 该层有明显的水平成层构造, V_s 随深度增加而增大(图 12(a))。DK1141+070 断面路基的内部 V_s 剖面可分为 4 层: V_s 分别为 180 m/s 以下的薄表层土(厚约 0.5 m); 表层下部 V_s 为 200~300 m/s 的路基上部土层; V_s 为 300~400 m/s 的通风管

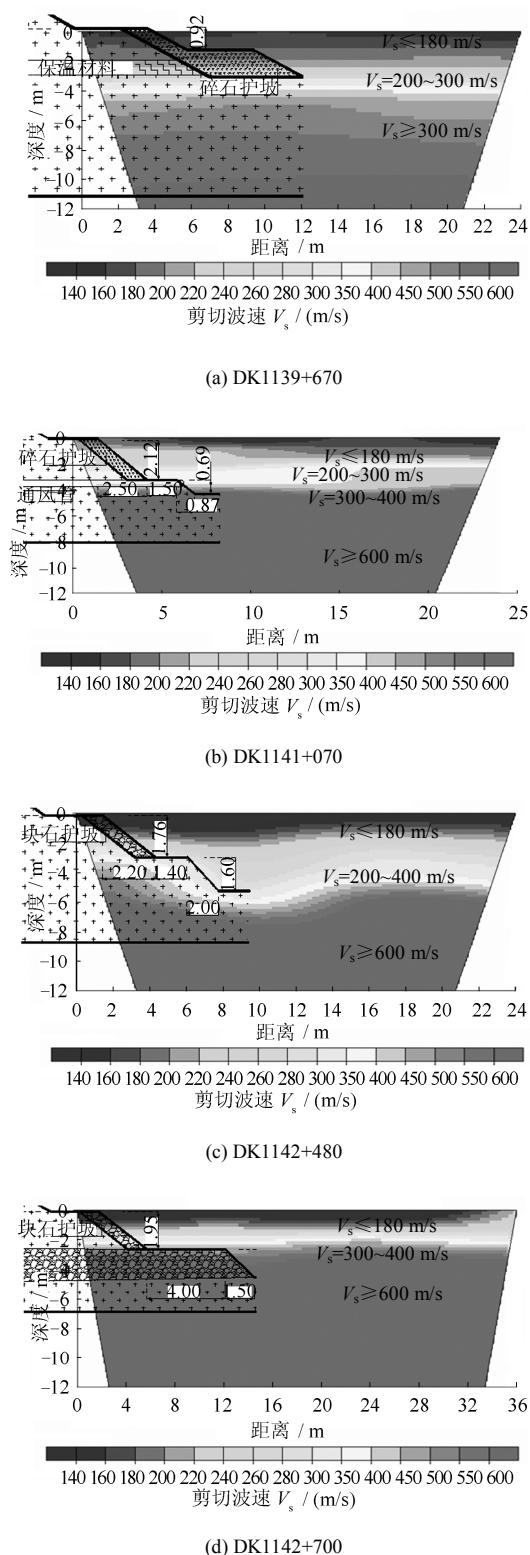


图 12 各测线横波速度构造图
Fig.12 V_s structure of the typical railroad roadbed segments

附近土层（该层由于通风管结构的存在使其附近土层 V_s 增加）、600 m/s 以上的路基下部土层，该土层结构均一、密实（图 12 (b)）。DK1142+480 断面路基的内部 V_s 剖面可分为 3 层： V_s 为 180 m/s 以下的表层土（厚约 2 m）； V_s 为 200~400 m/s 的路基中

部土层（该层土与下部坚硬路基土体间存在明显的界面起伏，可以认为，由于未采取主动保护多年冻土措施，该段路基中部土层受外界温度季节性变化的影响较大）； V_s 为 600 m/s 以上的路基深部土层，该层土体结构均一、密实（图 12(c)）。DK1142+700 断面路基内部 V_s 剖面可分为 3 层： V_s 为 180 m/s 以下的表层（厚约 2 m）； V_s 为 300~400 m/s 碎石（块石）层（该层由于其碎石或块石的结构致使其 V_s 激增，该层土与下部坚硬路基间没有明显的界面起伏，呈水平成层构造）； V_s 为 600 m/s 以上的路基下部土层，该土层结构均一、密实（图 12 (d)）。将以上各个断面的 V_s 勘探结果与各断面钻孔测温资料对比分析可知， V_s 大于 600 m/s 的土层的温度小于 0℃，为冻土层。

5 结 论

(1) 表面波勘探是一种高精度的评价地层构造的勘探方法，可以获得多年冻土的上限、厚度及其 V_s 剖面。通过该方法勘探，得到青藏铁路北麓河试验段多年冻土上限一般为 2 m，层厚为 20 m 左右，多年冻土层剪切波速 V_s 平均为 600 m/s 以上。

(2) 12 通道的面波探测有着简单、快捷的优势，该方法可以较好地把握多年冻土地区不同结构铁路路基的结构特点，在青藏高原多年冻土地区的地层勘探中可以展开深入和广泛的应用。

(3) 考虑多年冻土的特点及青藏高原的环境问题，进行同样勘探时须考虑检波器的固有频率、设置方法等具体试验手段。

参 考 文 献

- [1] 张鲁新. 青藏铁路高原冻土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 Lu-xin. Regularity of ground temperature variation in Qinghai-Tibet plateau permafrost region and its effect on subgrade stability[J]. *Journal of China Railway Science*, 2000, 21(1): 37—47.
- [2] 秦大河, 丁一汇. 中国西部环境演变评估(第二卷), 中国西部环境变化的预测[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] 吴志坚, 张鲁新, 马巍, 等. 青藏铁路冻土区土体冷生过程对路基变形影响分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1309—1314.
WU Zhi-jian, ZHANG Lu-xin, MA Wei, et al. Influence of soil's cryogenic course on deformation of roadbed in permafrost region of Qinghai-Tibet Railway[J]. *Rock*

- and *Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1309—1314.
- [4] 程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(6): 602—607.
- CHENG Guo-dong. Effect of partial factors on permafrost distribution and its suggest on the Qinghai-Xizang railway design[J]. *Science in China: Series D*, 2003, 33(6): 602—607.
- [5] 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 Zhi-jian, MA Wei, WANG Lan-min, 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.
- [6] PARK C B, MILLER R D, XIA J. Multi-channel analysis of surface wave[J]. *Geophysics*, 1999, (64): 800—808.
- [7] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [8] 王振东. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [9] HAYASHI K, SUZUKI H. CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data[J]. *Exploration Geophysics*, 2004, (35): 7—13.
- [10] FENG S, SUGIYAMA T, YAMANAKA H. Effectiveness of multi-mode surface wave inversion in shallow engineering site investigations[J]. *Exploration Geophysics*, 2005, (36): 26—33.
- [11] 崔占荣, 张世洪, 张俊喻. 瞬态瑞雷波勘探中一些问题的讨论[J]. *物探与化探*, 1995, 19(5): 267—274.
- CUI Zhan-rong, ZHANG Shi-hong, ZHANG Jun-yu. A discussion on some problems in transient state rayleigh wave exploration[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1995, 19(5): 267—274.
- [12] 刘云祯, 王振东. 瞬态面波法的数据采集处理系统及其应用实例[J]. *物探与化探*, 1996, 20(1): 28—34.
- LIU Yun-zhen, WANG Zhen-dong. Data collection and processing system of transient surface wave method and examples of its application[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1996, 20(1): 28—34.

上接第 307 页

- 场监测分析研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(1): 44—50.
- XIA Cai-chu, GONG Jian-wu, TANG Ying, et al. Study on site monitoring of large-section highway tunnels with small clear spacing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1): 44—50.
- [8] 张国华, 陈礼彪, 钱师雄, 等. 大断面小净距大帽山隧道现场监控量测及分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(2): 489—496.
- ZHANG Guo-hua, CHEN Li-biao, QIAO Shi-xiong, et al. On-site supervision measure and analysis of Damaoshan tunnels with large section and small clear- distance[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 489—496.
- [9] 申玉生, 高波. 双连拱隧道施工偏压力学特性的监测与分析研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(1): 1733—1739.
- SHEN Yu-sheng, GAO Bo. Site monitoring and analytical research on mechanical characteristics under construction partial press in double-arch tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 1733—1739.
- [10] 刘志春, 李文江, 朱永全. 淤泥质地层地铁隧道施工地表沉降预测及分析[J]. *岩土力学*, 2005, 26(10): 1681—1684.
- LIU Zhi-chun, LI Wen-jiang, ZHU Yong-quan. Forecast and analysis of surface subsidence of metro tunnel construction in mucky ground[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(10): 1681—1684.
- [11] 中铁第四勘察设计院. 福建省永安至宁化(闽赣界)高速公路工程永宁 A09 标段两阶段施工图设计[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院, 2008.
- [12] 皇甫明, 孔恒, 王梦恕, 等. 核心土留设对隧道工作面稳定性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(3): 521—525.
- HUANG Fu-ming, KONG Heng, WANG Meng-shu, et al. Effect of keeping core soil on stability of tunnel working face[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(3): 521—525.
- [13] 姚勇, 何川, 谢卓雄. 双线小净距隧道中岩墙力学特征及加固措施研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1883—1888.
- YAO Yong, HE Chuan, XIE Zhuo-xiong. Study of mechanical behavior and reinforcing measures of middle rock wall of parallel tunnel with small interval[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1883—1888.
- [14] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术[M]. 北京: 科学出版, 2002.
- [15] 袁勇, 王胜辉, 杜国平, 等. 双连拱隧道支护体系现场监测试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(3): 480—485.
- YUAN Yong, WANG Sheng-hui, DU Guo-ping, et al. In-situ testing study on lining system of double-arched tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(3): 480—485.