

新藏公路新疆段多年冻土特征及其灾害初探

马东涛¹, 张金山¹, 王蒙², 赵杰², 高巍²

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中交第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710068)

摘 要: 新藏公路新疆段沿线海拔高, 气候干冷, 第四纪松散堆积层厚, 在高山区和山原河谷盆地区发育了多年冻土。勘查研究表明: 多年冻土分布于 K306+ 000~ K310+ 000 和 K515+ 000~ K705+ 00 间 191. 6 km 路段上, 属高原片状连续多年冻土。沿线个别路段含冰量较高, 为多冰- 富冰冻土, 中冻胀中融沉; 绝大部分路段以少冰多年冻土为主, 弱冻胀弱融沉。现有公路主要冻土灾害有涎流冰、路基融沉、路面翻浆、冻胀破坏、冻融滑塌和冻融泥流等。随着整治改建工程的实施, 多年冻土原有的水热平衡的破坏, 冻土灾害将趋于严重。根据沿线多年冻土的特征, 提出施工和运营中应采取保护冻土的设计原则, 通过改线避让、抬高路基、提高路基强度及完善截排水系统等 5 条措施以减少公路工程对多年冻土的扰动和破坏。

关键词: 新藏公路; 多年冻土; 发育环境; 特征; 冻土灾害

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

国道 219 线新藏公路起于新疆叶城县, 止于西藏拉孜县, 大体呈南北走向, 全长 2 143 km, 其中新疆境内段路线长 705 km, 西藏境内线路长 1 438 km, 是新疆西南地区通往藏西北、藏西南的主要通道, 也是祖国西南、西北边陲最重要的国防干线公路。新藏公路新疆段北起叶城县, 南至新藏两区交界处。由于沿线海拔高, 气温低, 气候寒冷, 第四纪松散堆积物较厚, 地下水埋藏浅, 在高山区和山原盆地广泛发育了多年冻土。受公路建设和环境变化之影响, 沿线冻土分布区段常发生涎流冰、路面翻浆、路基融沉、边坡滑塌、冻胀等灾害, 年年阻车断道, 使公路长期以来处于半运行、半瘫痪的运营窘境, 严重影响沿线交通运输和社会各项事业的发展^[1]。

1 多年冻土的发育环境背景

青藏高原是北半球中低纬度地带多年冻土分布

面积最广、厚度最大和温度最低的地区^[2]。新疆段多年冻土分布在柯克阿特达坂 K306+ 000 至区界龙木错 K705+ 000 间的青藏高原西北缘的西昆仑山区, 长 399 km, 属新藏公路北段, 地理坐标介于 77°40'~ 80°17' E 和 34°30'~ 36°27' N, 行政隶属新疆喀什地区叶城县及和田地区皮山县、和田县。

1.1 气象气候

研究区位于西昆仑高山区, 属高原亚寒干旱气候。高山区及山原湖盆区以固态降水为主, 毗邻的西藏日土县年降水量为 80 mm, 短期观测取得的天文点(5 100 m)及神仙湾(5 370 m)年降水量依次为 54. 6 mm 和 67. 7 mm, 推算沿线年降水量 60~ 80 mm。狮泉河(4 278. 8 m)年平均气温仅 0. 4 °C, 极端最低气温- 34. 6 °C, 年平均地温 5 °C, 最低地温- 7. 2 °C, 甜水海附近年平均气温为- 4. 42 °C, 年平均地温- 3. 5 °C^[3]。沿线年平均相对湿度 < 40%, 年蒸发量约 2 000~ 2 500 mm, 具备冻土生成的水热条件。

收稿日期(Received date): 2004- 05- 11; 改回日期(Accepted): 2004- 07- 20。

基金项目(Foundation item): 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所人才引进项目“西部山区重大道路工程对环境的影响”(Y₁006)资助。[Supported by the IMDE, CAS (No. Y₁006).]

作者简介(Biography): 马东涛(1965-), 男, 陕西杨陵人, 副研, 博士, 主要从事山地灾害减灾理论研究和工程防治。[MA Dongtao (1965-), male, Born in Yangling of Shaanxi, associate professor, major in mountain hazards mitigation theories and engineering control. E-mail: dtma@imde. ac. cn; dtma106@163. com.]

1.2 冰川水文

昆仑山是我国大陆性冰川最为发育的地区,共有冰川7 465条,冰川面积12 082.95 km²,占全国冰川面积的20.4%。据对叶尔羌河径流组成及季节变化的研究,冰川融水占55.7%,季节降雪及降雨占18.3%,地下水占26.0%。一年中,夏、秋季水量占85%以上,冬、春季仅占15%^[4]。沿线以奇台达坂为界,其北坡属内陆水系塔里木河流域,为和田河支流喀拉喀什河及叶尔羌河上游区;其南坡属于青藏高原内陆高山湖的甜水海、阿克塞钦湖、红山湖、泉水湖和龙木措流域,湖水含盐量较高,均为咸水湖,主要补给源为湖盆周围高山冰雪融水,大气降水和地下水补给较少。

1.3 地形地貌

沿线最低点海拔为3 610 m,位于赛图拉K354+300;最高点海拔为5 342.5 m,位于界山达坂K688+500,高差1 732.5 m。绝大部分路段属于高山山岭、宽阔河谷和山原盆地地貌,平均海拔4 500 m以上。K515+000以后多年冻土分布区均在4 800 m以上,地势平缓开阔,河谷宽500~5 000 m,山原湖盆宽3~50 km。沿线多为山地荒漠和高寒荒漠景观,以高山草原、草甸为主,部分地段发育湿地、沼泽,植被稀疏^[4],地下水位较高,含盐量大,路基潮湿,地表积盐积水严重,长期处于地下水浸泡之下和毛细水上升带内,多年冻土发育。

1.4 地质构造

沿线在大地构造位置上处于塔里木板块与伊朗—冈底斯山板块的接合部位的昆仑山构造区。强烈的构造运动使昆仑山地槽内的岩层褶皱隆起,一系列NW—SE走向断裂决定了山脉及内陆断陷盆地的走向和形态,沿山间断陷盆地发育了众多的山原湖泊。晚近地质时期的喜山运动使昆仑山强烈隆起而抬升,内陆湖盆下沉幅度加大,沉积了厚达上千m松散第四系堆积物,如湖相、沼泽相、河流冲积相、洪积相、冰水相沉积物,为多年冻土的发育提供了基底。本区地处西昆仑山地震带的东南段,地震烈度在Ⅵ度—Ⅷ度间。

1.5 人为工程活动

沿线绝大多数路段为无人区,人类活动相对较弱。新藏公路1954—01测设,1958—09竣工。建设之初,受当时经济和技术条件所限,设计标准低,线路多采用低线位,线路多布设在宽谷和湖盆槽谷的中央部位,部分线路布设在湖盆边缘,公路路基

低,缺乏桥涵、截排水沟、路基护坡等工程防护构造物,公路承灾能力极差。40余年来,由于各类冻土病害频频发生,许多路段没有路基,路面低于地面,乱挖排水沟、排水不当、就地取土填高路基、兴修便道、破坏地表植被等对线路周围环境带来严重破坏,导致局部地段冻土融化。

2 冻土类型及分布

2.1 季节冻土

沿线气候寒冷,季节性冻土广泛分布于全路段,类型为季节融化层,与下覆多年冻土呈衔接关系。据有关资料,该段年平均气温约为-5.0℃,最大季节融化深度1~3 m;钻探揭示沿途最大季节融化深度一般为1~3 m,个别路段因受河流、湖泊、岩土类别及地形朝向的影响,最大季节融化深度可达4~5 m,基本与多年冻土上限一致,故可以认为多年冻土上限即为最大季节融化深度。沿线大部分路基土为碎石土、角砾土,细粒土含量小,冻胀融沉不大;但在山间河谷盆地、湖盆底部,如康西瓦达坂~大红柳滩、奇台达坂以北、甜水海、泉水沟和界山达坂分水岭顶部等路段,堆积了厚层的湖相、沼泽相沉积物和泥岩风化层堆积物,细粒土含量高,地表排水不畅,地下水位较高,季节冻土冻胀融沉作用强烈,由于基底和承载力不足引进路基变形破坏、路面沉陷、翻浆等病害(图1)。

2.2 多年冻土

经初步勘察,该路段多年冻土类型属高原片状连续多年冻土。多年冻土分布于K306+000~K310+000和K515+000~K705+000间,分布路段长191.6 km,但在K556+500~K558+900间未见多年冻土,该段应属多年冻土融区。赛里亚克达坂海拔4 962 m,应有多年冻土存在,但未有钻探资料,难以证实。多年冻土温度、厚度、上限主要受海拔高度和纬度控制,冻土上限与微地貌、朝向、地表及地下水、岩土性质、密度、含盐量和植被等相关^[2]。多年冻土分布的纬度介于34°30′~36°27′N,海拔在4 700~5 342.5 m间,平均海拔>4 900 m(图1)。研究发现,微地貌为封闭或半封闭洼地,地形相对低洼(或平坦),地表排水通畅,松散岩土中细粒含量高,地形朝向背阴的地方,冻土上限较浅;反之,微地貌为斜坡,坡面地形平整,地表排水顺畅,岩土颗粒较粗,地形朝向向阳的地方,冻土上限较深。如在甜

由于海拔高, 气候干燥寒冷, 蒸发量大, 水体排泄不畅, 湖泊多为咸水湖, 在湖盆周围及甜水海等干涸湖盆区域, 如 K545+000~K560+000、K570+000~K580+000 和 K604+000~K605+000 等 3 个路段, 地表盐渍严重, 形成盐壳、盐滩, 盐渍化现象明显。盐渍土路段的冻土病害远较其他路段为严重, 从盐渍化程度及形态推断, 该段可能为硫酸盐类, 如硫酸钙、硫酸镁等, 其对混凝土的腐蚀性有待今后化验证实。

3 多年冻土特征及公路工程对其的影响

3.1 多年冻土特征

我国是世界上中低纬度地带多年冻土最为发育的地区, 长期以来多年冻土勘察和研究多集中在青藏公路沿线和东北中纬度地区^[2,5,7], 对新藏公路冻土研究最早始于 1986 年的叶尔羌河冰川溃决洪水研究^[4]。此后, 相继开展了中日合作西昆仑山冰川考察(1987 年)、青藏高原冰冻圈研究计划(1997 年)^[3]、新藏公路整治改建工程方案研究^[1,6]。由于目的所限, 这些考察和研究时间较短、内容单一, 缺乏深入的勘察、观察和分析。根据以上研究, 结合 2003 年勘测资料, 对该段公路多年冻土的特征简述

如下。

沿线多年冻土的分布纬度及海拔高度与青藏公路大致相当, 年平均气温和年平均地温也基本一致(表 2)。与青藏公路相比, 沿线气候的大陆性更强一些, 降水量少, 空气干燥, 植被稀疏, 荒漠化程度高, 岩土体颗粒粗、含水量低、含盐量较高。因此, 除甜水海、泉水湖、界山达坂和龙木错等路段多年冻土含冰量较高, 为多冰-富冰冻土, 中冻胀中融沉外, 其余绝大多数路段含冰量较低, 均属少冰冻土, 融冻胀弱融沉, 其冻融强度均较青藏、中尼和牙林线低(表 1)。由于钻孔数量较少, 多数未能钻穿冻土层, 钻孔深仅 7.15~25.05 m, 多年冻土上限 1.2~5.4 m, 冻土厚度最大>21.25 m, 最小>5.95 m。K646+920 的钻孔钻穿冻土层, 该钻孔深 22.9 m, 地下水埋深 3.2 m, 多年冻土上限 5.4 m, 下限 15 m, 冻土厚度 9.6 m, 钻孔剖面及冻土上、下限详见图 2。李树德 1987 年 7、8 月份在西昆仑甜水海多年冻土区布设了 2 号钻孔, 并进行了短期气温和地温观测, 资料表明当时的多年冻土上限为 1.5 m, 下限 14.8 m, 冻土厚度 13.3 m(图 3)。由以上对比可见, 新藏公路新疆段沿线冻土厚度远小于青藏公路及青藏高原其他地区, 其多年冻土对气候变化和人类工程活动的反应更为敏感。

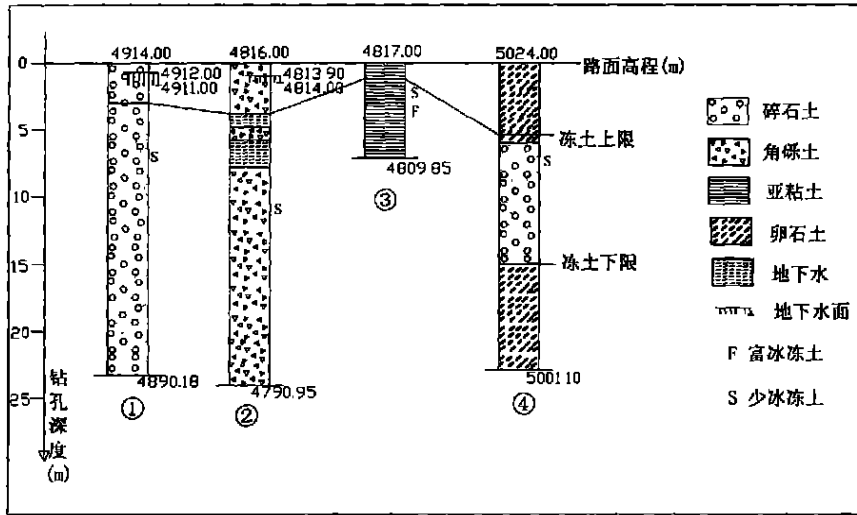
表 2 沿线与其他线路多年冻土比较表
Table 2 Comparisons of permafrost in the highway and other regions

区域	年平均 气温(℃)	海拔(m)	纬度(N)	年平均 地温(℃)	多年冻 土厚度(m)	资料来源
甜水海(新藏公路, 新疆)	-4.42	4832	35°30′	-3.5	13.3	1987 年, 2003 年勘查、调查
红土达坂(新藏公路, 西藏)	-5.0	5284	34°10′	-2.0~-3.5	>20	2002 年勘查、调查
五道梁(青藏公路)	-2.5~-6.5	>4600	35°17′	-2.8~-4.0	>65	参考文献[2, 5]
东昆仑山(青藏公路)	-5.0~-5.7	>4700	33°57′	-1.0~-3.5	80~120	参考文献[2, 5]
大兴安岭(牙林铁路)	-1.1~-5.8	860	51°12′	-0.5	>30	参考文献[7]
嘉措拉山(中尼公路)	-3.5	5220	29°02′	-1.0	<20	2001 年勘查、调查

3.2 整治改建工程对多年冻土的影响

青藏高原多年冻土是第四纪地质历史时期气候和环境长期作用的产物, 地表形态和下覆多年冻土处于相对的水热平衡状态, 多年冻土区特殊的自然环境及地质-水文地质环境异常脆弱。因此, 多年冻土区自然环境变化和人类工程活动, 必然会对多年冻土的分布、性质和特征等产生一系列的影响, 进而对公路、铁路和其他建筑物产生影响和危害。沿

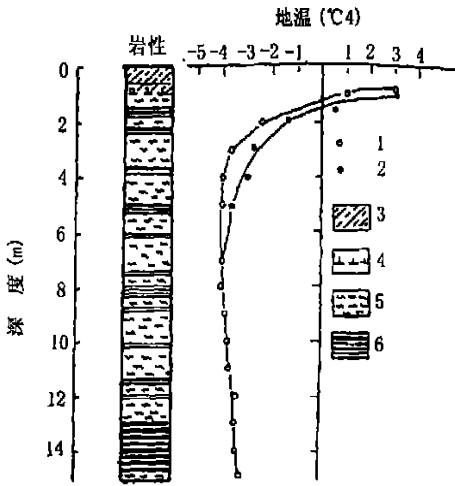
线大部分路段在天然地表上, 路面为砂砾石、粉沙土和亚粘土等就地压实而成。路面与原始地表齐平, 路基低, 在相同地形地貌、岩性条件下, 路基以下的人为多年冻土上限与天然上限基本一致, 多年冻土较为稳定。但在甜水海附近 K570+000~K575+500 约 5.5 km 路段上, 由于地势低洼, 路基回填就地取土, 开挖排水边沟, 引起多年冻土融化, 冻土上限下降 1~1.5 m。随着新藏公路整治改建工程的



①K539+ 935 钻孔; ②K554+ 968 钻孔; ③K570+ 000 钻孔; ④K649+ 920 钻孔

图 2 新藏公路新疆段沿线多年冻土钻孔剖面对比图

Fig. 2 Comparison of profile of permafrost drill holes along Xinjiang Tibet Highway Line, Xinjiang



1. 1987. 7. 28. 测温; 2. 1987. 8. 21. 测温;

3. 亚粘土; 4. 冻土上限; 5. 含土冰层; 6. 纯冰层

图 3 甜水海(4 832 m) 多年冻土钻孔剖面及地温曲线图
(据 Li Shude and He Yixian, 1989)

Fig. 3 Profile of permafrost drill hole and ground temperature curve in Tianshuihai Lake (4 832 m), Xinjiang

免。同时新修的施工便道和施工人员搭建的工棚等, 将破坏原有地表稀疏的植被, 改变多年冻土的水热状况。部分亚粘土、粉沙土路段, 将采取置换粗填料的办法, 挖取软土和回填碎石土亦将打破冻土的水热平衡, 引起地下冰融化和冻土退化^[5,7]。

4 主要冻土灾害

沿线冻土地区的主要道路病害有涎流冰、地面及路基融化下沉、路面翻浆、冻胀破坏、冻融滑塌、冻融泥流和沙化等。

4.1 涎流冰

是冻土地区常见的一类灾害, 主要分布在 509 道班至龙木错间的山原河谷及盆地区内, 尤以 K511 + 600~ + 700、泉水沟、红山湖、泉水湖等路段为严重, 共有 10 段, 危害公路 1 km。依据成冰原因可分为河流冰雍塞上路、冰水沟冰雍塞上路和内侧山坡地下水结冰漫流上路三种类型。其多发生在冬季, 主要由于路基低, 桥涵净空不足, 边沟、盲沟等排水设施及容量不足, 导致水流排泄不畅, 形成冰流, 雍塞漫流上路, 阻碍交通, 春季涎流冰融化也常常引起路面翻浆。

4.2 路面翻浆

主要分布在柯克阿特达坂、康西瓦达坂南侧、奇台达坂北侧、甜水海、界山达坂和龙木错等湖盆及河谷中部或冲洪积扇前缘等低洼处, 危害线路长近 10 km。其中, 甜水海和界山达坂属重度翻浆, 其余路

实施, 黑色路面的铺筑, 车流量的增加, 黑色路面吸收太阳辐射量的增加、路面和路基压力的增加以及路堤形成后路基周围地表和大气间的热交换条件的改变等, 导致路基下多年冻土中的地下冰融化, 路基下沉, 多年冻土上限将会下移^[5,6]。部分越岭路段由于开挖路堑, 将引起冻土融化路基下沉和边坡滑塌、冻融泥流。沿线大部分路段将改建为填方高路堤, 大量的开挖土石方对多年冻土的破坏将在所难

段属轻度翻浆。2001—05—06,沿线连续遭受雨雪侵袭,甜水海—界山达坂多处路基沉陷、路面翻浆,堵陷车辆 300 余台,受困人员 500 余人,中断交通 9 d,兰州军区出动大批军车和官兵,才使受困车辆及人员得以解救。这些路段由于路基土中粉粘粒含量高,地下水位高,地形低洼,微地貌半封闭,地表水排泄不畅,多年冻土埋藏浅,地下冰受热易融化,在多年冻土层(隔水层)上形成上层滞水,加之季节冻土的冻融作用和水的浸泡作用强,最终形成翻浆,路基软弹、路面泥泞、波浪起伏、车辙陷车等。

4.3 冻胀破坏

主要发生在甜水海湖盆区段。由于路面以下多年冻土层上部潜水在冻结过程中发生聚冰作用,导致路基产生不均匀冻胀;在融化季节又产生热融下沉,反复的冻融循环最终造成路面起伏和破损。2003—09—03 调查时发现, K570+000~K575+500 间公路两侧有数十个高 0.5~1.5 m,直径数米至 10 m 多的冻胀丘,其表面布满了冻胀裂缝。部分爆炸性冻胀丘“爆裂”后,其中厚层的地下冰融化,形成热融湖塘及洼地,即热喀斯特现象。如青藏公路 K3395+000 处,1990—06—07 路面突然隆起而发生“爆裂”,形成直径 6 m,深 3 m 的水坑,严重威胁行车安全^[5]。

4.4 路基融沉

是多年冻土地区道路病害的主要类型。路基融沉主要分布在柯克阿特达坂、奇台达坂、甜水海、635 道班和界山达坂等路段。40 余年来,路基下人为上限较天然冻土上限下降 1~3 m,路基沉降 0.5~1.5 m,其中甜水海和界山达坂路面低于原地面近 2.0 m。以上路段多年冻土为多冰—富冰冻土,含冰量高,冻土天然上限较低,地下水丰富。由于路面吸热和行车振动,路面下冻土融化速度比天然地面大,形成岛状融化盘或融化夹层,融化盘或融化夹层内的水分在冻胀和融化作用下发生迁移,进而导致路基不均匀下沉变形,产生路面反拱、凸凹不平,甚至出现积水坑^[5,6]。

4.5 冻融滑塌和冻融泥流

冻融滑塌和冻融泥流主要集中分布在柯克阿特达坂越岭段东西两侧山坡上。前者位于达坂西坡叶城侧,桩号 K303+650~K308+850,共有 3 处滑塌,滑塌共穿越和埋压 8 段线路,危害线路长 790 m。滑塌体体积在 $7.5\sim 34\times 10^4\text{ m}^3$,厚度 5~10 m,宽度 40~150 m,长度 30~50 m 间,冻土层与地下

冰层为滑动面,系因人工开挖多年冻土由边坡冻融失稳引起,对公路的危害表现为埋没路面、路基沉陷外移和翻浆等,危害十分严重;后者位于东坡狮泉河侧,桩号 K309+600~K309+900,呈蠕动状态,表现为路基内外边坡缓慢位移,对公路为害较小。

4.6 沙化

由于沿线气候干冷,风力强劲,植被稀疏,丰富的第四纪堆积物在风力作用下搬运、堆积,形成沙丘、沙垄、沙链等,埋没公路。沙化是新藏公路沿线多年冻土地区较特殊的一类灾害,其主要分布在奇台达坂北侧、甜水海、阿克赛钦湖、红山湖、泉水湖以及龙木错等宽谷、湖盆地带。在公路整治改建中,大量的取土及弃土,亦将加剧荒漠化的程度。而风沙堆积物覆盖地表后,将使下覆的多年冻土层升温,引起地下冰融化和路基融沉。调查中发现,凡是沙化严重的路段,多年冻土埋藏深,冻土厚度小,稳定性亦差,灾害较严重。

5 冻土灾害的防治对策

冻土灾害是多种自然因素和人为工程活动相互作用的结果,在这些因素中温度和水分的的作用至关重要,温度是地下冰融化和冻胀的主要营力,水分(地下冰、地下水)是引进冻土变形的关键因素。因此,在制定冻土灾害防治对策时,应充分考虑人为工程活动因素和冻土环境因素之间的关系,查明成灾机理、冻土特征及活动规律,以确定防灾原则和技术措施。通常采用的防灾原则有保护冻土、控制冻土融化和允许冻土融化(预先融化和施工运营中逐渐融化)等。沿线的多年冻土属连续、片状、稳定(较稳定)多年冻土。因此,无论在设计、施工和运营过程中均应采取保护冻土的原则,以减少工程对多年冻土的扰动^[8]。主要的措施有:

5.1 改线避让

沿线柯克阿特达坂和界山达坂越岭段以及奇台达坂北侧、甜水海、635 道班和宽谷、湖盆中央病害严重路段,均可考虑改线或绕避,从缓坡及河流阶地、冲洪积扇缘等多年冻土较稳定、排水条件良好的地段通过,减轻线路对冻土环境的影响。

5.2 抬高路基,设置保温护道

沿线路基低是涎流冰、路基融沉的主要原因。根据青藏公路、牙林铁路的实践经验,通过采用抬高路基填土高度,将路基高度提高到多年冻土临界填

土高度以上,并在路基边坡以外设置保温护道、片块石路基和护坡等保温措施,就能最大限度减少公路工程对冻土环境的影响和破坏^[7,8]。部分病害严重路段,可采用人工制冷的热棒技术、EPS 隔热材料和人工土工布,增加地基的冷能储量,防止多年冻土层升温 and 地下冰融化。

5.3 提高路基强度,完善截排水系统

对部分严重翻浆路段,应清除粉沙土、亚粘土等软弱层,置换水稳性良好的砂砾料,掺灰、改变路基填料,提高路基强度。在路基两侧设置防水保温护道,布设排水沟、截水和排水盲沟,将积水引排出路基影响区之外。同时,应增设桥涵等排水构造物,设置挡冰墙或积冰坑,防止水流和涎流冰漫溢上路。

5.4 合理设置取、弃土场

施工过程中应尽量减少因取土、弃土和搭建工棚、修建施工便道对多年冻土环境的影响。取土场应设在远离公路、少冰冻土、植被稀疏的洪积扇、河滩或河流阶地上,严禁在路旁取土和随意开辟运土便道,避免在多冰-富冰冻土地带取土,取土结束后应及时回填取土坑,尽量恢复到原有状态,避免地下冰融化后形成热融湖塘,破坏冻土环境。

5.5 加强科学研究与工程监测

沿线基本属于科研空白区,相关的调查、勘查及研究工作很少,缺少多年冻土的地温、含冰量、水质、含盐量、岩土性质等基础资料。因此,应尽快开展相关的科研和分析测试工作,为下一步施工设计提供技术支持。同时,要加强工程对冻土环境影响的监测,在公路沿线设置气温、地温、活动层和位移等监测点,进行长期跟踪监测,以查清多年冻土对工程响应的规律,及时调整设计方案和技术措施。

参考文献(References):

[1] Ma Dongtao, Cui Peng, Yang Kun, *et al.* The Roadbed Hazards and Their Formational Causes along the Xinjiang Tibetan Highway in Xinjiang[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 93~

98. [马东涛,崔鹏,杨坤,等.新藏公路(新疆境内)沿线道路病害及成因初析[J].自然灾害学报,2003,12(3):93~98.]

[2] Tong Bailiang, Li Shude. Some Characteristics of Permafrost on Qinghai Tibet Plateau and a Few Factors Affecting Them[A]. *Professional Papers on Permafrost Studies of Qinghai Tibet Plateau* [C]. Beijing: Science Press, 1983. 1~ 11. [童伯良,李树德.青藏高原多年冻土的某些特征及其影响因素[A].青藏高原冻土研究论文集[C].北京:科学出版社,1983.1~11.]

[3] Li Shude, He Yixian. Features of Permafrost in the Western Kunlun Mountains[A]. *Glaciological studies in Western Kunlun Mountains* 1987[M]. Published by Nagaya University of Japan, March 1989, 167~ 174.

[4] Zhang Xiangsong, Zhou Yuchao. Glaciology and Environment of Yarkant River in Karakorum Mts[M]. Beijing: Science Press, 1991. 19~ 26. [张祥松,周寿超.喀拉昆仑山叶尔羌河冰川与环境[M].北京:科学出版社,1991.19~26.]

[5] Tong Changjiang, Wu Qinglai, Liu Yongzhi *et al.* Assessment of Environmental Engineering Geology and Measures for Frozen Ground Along the Qinghai Tibet Highway [A]. *Proceedings of the 5th Chinese Conference on Glaciology and Geocryology* [C]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996, 365~ 372. [童长江,吴青柏,刘永智,等.青藏公路沿线冻土环境工程地质评价及冻土工程处理[A].第五届全国冰川冻土学大会论文集[C].兰州:甘肃文化出版社,1996,365~372.]

[6] Li Tiefeng, Liu Changbin, Li Xin. Geological Hazards Evaluation of Xinjiang Tibet Highway Project[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazards and Control*. 2003, 14(4): 26~ 29. [李铁锋,刘长兵,李欣.国道219线新藏公路改建工程地质灾害评价[J].中国地质灾害与防治学报,2003,14(4):26~29.]

[7] Wang Wenbao. Control of Embankment Settlement at Yar Lin Railway Line 323Km in Permafrost Zone of Daxinganling Mts[A]. *Proceedings of the Symposium on Glaciology and Geocryology by Geographical Society of China(Geocryology)*. [C]. Beijing: Science Press, 1982. 167~ 170. [王文宝.大兴安岭牙林线323Km多年冻土地区路基下沉的整治[A].中国地理学会冰川冻土学术会议论文选集(冻土学)[C].北京:科学出版社,1982.167~170.]

[8] Zhu Linnan, Wu Ziwan, Zang Enmu. Permafrost Degradation and Highway Engineering [A]. *Proceedings of the 5th Chinese Conference on Glaciology and Geocryology* [C]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996, 333~ 340. [朱林楠,吴紫汪,臧恩穆.冻土退化与道路工程[A].第五届全国冰川冻土学大会论文集[C].兰州:甘肃文化出版社,1996,333~340.]

Characteristics and Hazards of Permafrost along the Xinjiang Tibetan Highway, Xinjiang

MA Dongtao¹, ZHANG Jinshan¹, WANG Meng², ZHAO Jie², GAO Wei²

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China*; 2. *The First Highway Survey and Design Institute of China, Xian 710068, China*)

Abstract: Permafrost is widespread developed on alpine mounds, central plateau valleys and lake basins along the Xinjiang-Tibetan Highway in Xinjiang due to high altitude, cold and arid climate and deeply loose Quaternary deposits. Permafrost distributes continuously between K306+ 000~ K310+ 000 and K515+ 000~ K705+ 000 with the length of 191.6Km. Most of permafrost belongs to low ice content type with characteristics of weak frozen bulge and thawing settlement, only few segments belong to rich ice content type with characteristics of medium frozen bulge and thawing settlement. The roadbed and surface are threatened by permafrost such as salivary ices, thaw settlement, frost swelling, aqueous slurry, thaw slumping, gelifluction and desertification. With highway reconstruction and hazards mitigation, the water and heat balance of former permafrost will be destroyed by highway engineering activities, degradation and hazards of permafrost become worse in near future. The designing principle of permafrost protection is put forward based on characteristics of regional permafrost, countermeasures such as avoiding permafrost, elevating roadbed height, paving thermal insulation pavement, improving drainage system, optimizing earth field and monitoring permafrost variation are put forward to reduce destabilization and destruction by engineering works.

Key words: Xinjiang-Tibetan Highway; permafrost; developing environment; characteristics; permafrost hazards