

青藏公路多年冻土地区 修筑沥青路面时的路基稳定问题

交通部青藏公路科研组·

青藏公路是由内地通往西藏的主要交通干线之一。由于交通量日益加大，1973年起开始加铺沥青路面。该路行经多年冻土地区六百多公里，如何保证路基稳定是关系到工程质量的一个关键问题。

据初步调查，该段公路沿线地下冰发育的地段在二百公里以上，防止由地下冰融化引起的热融病害乃是首要问题。其次，老路病害90%以上是由于路基高度不够和排水不良引起的，确定合理的路基高度，防治翻浆和冻胀也是很重要的。几年来，我们在这两方面作了一些工作，现将一些体会概述于下，不妥之处，敬希指正。

一、保护冻土问题

根据冰川冻土所等单位的研究，青藏公路沿线的多年冻土大多处于相对稳定阶段，工程设计应采用保护冻土原则。即使在南段多年冻土呈岛状分布的地区和融区附近，冻土温度较

· 执笔人朱学文

间凹地、洪积扇下部及其它低平位置则发育着冰椎、冰丘、热融沉陷、热融湖等冻土现象。

参 考 文 献

- [1] 王家澄、王绍令、邱国庆：青藏公路沿线的多年冻土，《地理学报》，第34卷，第1期，1979.3.
- [2] R. J. E. Brown Comparison of Permafrost Conditions in Canada and the USSR. Polar Record 13 1967.

高，由于这些地方或则地下水位高，或系沼泽湿地，综合考虑路基的稳定问题，也仍以采取保护冻土原则进行路基设计为宜。

1. 热融病害及公路路段按保护冻土要求的分类

在地下冰发育的地方修筑公路，如不注意保护冻土就会引起热融沉陷、热融翻浆、融冻泥流、滑坍和边坡陷裂等病害（照片1、2、3、4）。因此，路线及路基设计，除少冰冻土地段外均应遵守宁填不挖的原则，并尽可能不破坏天然地表植被。新修路基时应在修成一、二年后再作沥青路面。



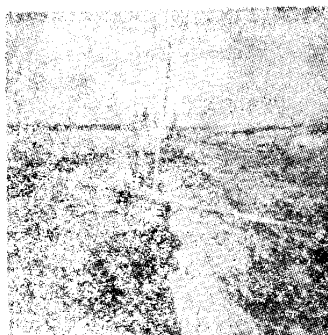
照片1 由开挖路堑引起的
边坡滑塌



照片2 由开挖路堑引起的
热融翻浆



照片3 由水流引起的
边坡坍塌及边沟的热融沉降



照片4 由取土坑距路基太近及
路旁积水引起的边坡陷裂

冻土作为公路的地基具有足够的强度，但它融化后却因其含水量不同而工程性质有很大差异。公路的多年冻土工程分类是以其总含水量为基础来划分的。在公路的设计与施工中，根据当地多年冻土上限处的冻土类别（一般以上限以下一米以内的冻土总含水量划分，特殊地段另定）来划分路段，对不同路段分别提出不同的保护冻土要求（见表1）。这样，对地下冰发育的地段要求严格保护冻土以保证工程质量；对融区及冻土含冰量少的地段，则允许

表 1 公路路段按保护冻土要求分类

路段分类	上限处冻土类别		保 护 冻 土 要 求
	工程分类名称	融沉系数A。(%)	
I	少冰冻土 多冰冻土	< 5	可按一般季节性冰冻地区设计与施工。
II	富冰冻土	5—10	1. 一般不设路堑，必须设置时应放缓边坡并加强基础； 2. 允许设低路堤； 3. 取土坑距路基坡脚的距离不小于5米。
III	饱冰冻土	10—40	1. 路堤应保证按保护冻土要求的高度； 2. 一般不设路堑及低于按保护冻土要求高度的低路堤，必须设置时应采取措施保证基底及边坡的稳定性； 3. 原则上不得破坏路侧10米以内的天然地面； 4. 取土坑距路基坡脚的距离不小于10米，取土深度应小于当地上限的80%。
IV	含土冰层	> 40	1. 路堤应保证保护冻土要求的高度； 2. 原则上不准设路堑，难以避免时按III类路段同样处理并加大安全系数； 3. 不得破坏路侧10米以内的天然地面，并不在路侧取土，难以避免时按III类路段同样处理并做好侧向保护及排水； 4. 拦截地面水宜用挡水埝代替截水沟，避免沿路侧设平行于公路的排水沟。

(注) 融区按I类路段考虑。

按一般季节性冰冻地区设计与施工，从而达到节约人力、物力和投资的目的。

2. 修筑沥青路面时的路堤最小高度

沥青路面较砂石路面具有更高的吸收太阳幅能的性能，因而在原有公路上加铺沥青路面会引起路基土的早融、迟冻和融冻线加深(图1)。如果原上限以下的冻土含冰量较大，就会因为上限的下降引起热融沉降(图2)。1973年我们修的试验路，有的路段就因保护冻土措施不够产生比较严重的热融沉降(最大沉陷量达24厘米)，而不得不在1976年重修路面。

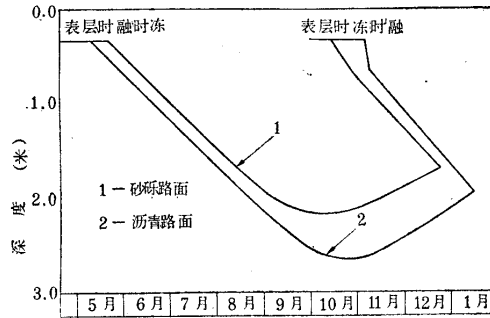


图 1 沥青路面与砂砾路面下路基土的融冻过程

我们在可可西里山的观测资料说明，提高路基以防止因修筑沥青路面引起的热融沉降是切实可行的。但在高原严寒缺氧而取土困难条件下，过多的提高路基不仅增加造价而且会给施工带来很多困难，因此需要确定既经济又能保证路基稳定的最小路堤高度。

修筑路堤后，多年冻土上限上升，路基中心处上升的高度可用经验公式估算。修筑沥青

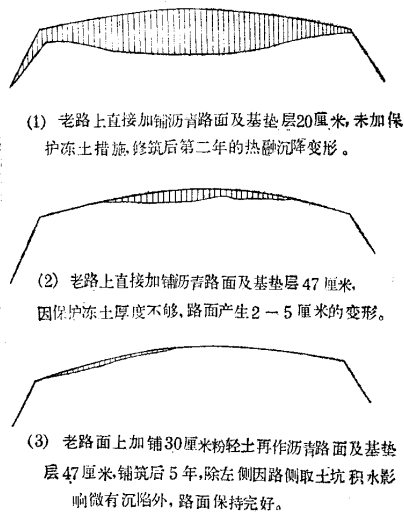


图2 地下冰发育地段因修筑沥青路面引起的热融沉降

米。与铁路部门测得的黑色表面对上限影响的资料相比,我们的数值偏大,这是因为他们是在小面积的观测场上同一气候条件下测得的,而我们则是在已修筑的公路上同一点不同年份测得。我们的数值实际上还包括了气温变化的影响在内。

天然上限为多年平均气温影响下形成的。试验路所在地区的多年平均气温为 -5.7°C ,而观测年份内最高年平均气温为 -5.1°C ,如以20年一遇的最热年平均气温 -4.8°C 计算,预计的影响还要再加大9—11厘米。因此,考虑气温变化的影响在内,沥青路面对多年冻土上限的影响可取52厘米(粉轻土)¹⁾。为了使修筑沥青路面后多年冻土上限保持不变,对于基本上是零填的老路,路堤应加高0.70米(粉轻土)。如用砂砾材料填筑路堤时,应乘以填土材料系数1.3,即为0.91米。

修筑新路时,可以采取可可西里山观测场的资料再加上行车压密作用的影响,路堤最小高度应取0.90米(粉轻土)。

根据在楚玛尔河平原修筑的试验路的资料,当上限处冻土总含水量为25%时,该处上限下降了40厘米,路面中心沉降量仅为3.2厘米,同断面不均匀沉降值不超过2厘米,路拱保持完好,并不影响沥青路面的实际使用效果。因此,对富冰冻土地段可以允许多年冻土上限稍许下降,而采用较低的路堤高度。

基于以上的分析,初步提出了按冻土上限处的不同冻土类别推荐的路堤高度建议值,

路面后则上限下降,呈碟状,如图3所示。以下我们只讨论路面中心处的变化。

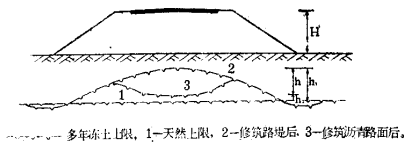


图3 修筑公路后多年冻土上限的变化

为了弄清修筑沥青路面对多年冻土上限的影响,在可可西里山、楚玛尔河、五道梁等地修筑了试验路及观测场,进行了连续三至五年的观测,求得各观测点上限的变化如表2。从表2可以看出修筑沥青路面后,多年冻土上限较相邻的砂石路面下降了65—90厘米;计入路基高度的影响以及路面和各种不同填土材料导热性能的差别,求得路面中心处多年冻土上限的下降值(折算成中等湿度的粉质轻亚粘土的厚度)应为39—43厘米。

1) 根据气象部门的研究资料,百年内青藏高原上的气温变化趋向于变冷。因此以20年一遇的最热年平均气温作为沥青路面使用年限内的不利条件是适宜的。

表 2 修筑沥青路面后多年冻土上限的变化

测点编号	路基路面结构	上限处冻土含水量 %	修筑当年冻土上限(米)	修筑后多年冻土上限(米)	修筑前老路或相邻老路多年冻土上限(米)	填土及路面厚度(厘米)	路基提高后以经验公式推算上限值 h_1	各测点上升(+)或下降(-)值 h_2 (厘米)	修筑后上限下降值 $h-h_1-h_2$ (厘米,粉轻土)	备注
1	老路上加铺砂砾、水泥砂砾43厘米, 沥青路面4厘米	>70	2.50	2.65	2.00	36	20	-15	35*	有2至5厘米的沉降变形
2	老路上加铺砂砾、水泥砂砾56厘米, 沥青路面4厘米	>70	2.60	2.70		46	29	-10	39*	
3	老路上填粉轻土33厘米, 砂砾、水泥砂砾54厘米	>70	3.00	3.00		74	55	0	55**	无明显变形
4	老路上填粉轻土25厘米, 砂砾、水泥砂砾、沥青路面47厘米	>70	2.80	2.80		61	43	0	43	
5	老路上填砂砾石土60厘米, 砂砾、碎石、沥青路面57厘米	>70	3.50	3.15	2.25	94	74	+35	39	无明显变形
6	老路上填粉轻土50厘米, 砂砾、碎石、沥青路面94厘米	>70	3.55	3.00		122	101	+55	46**	
7	老路上填砂砾75厘米, 上作沥青表面处治	>70	3.00	3.00		58	40	0	40	无明显变形
8	老路整平后加铺灰土砂砾21厘米, 上作沥青表面处治	25	3.00	3.40	2.70	23	7	-33	40	中心沉降3.2厘米
9	老路整平后加铺土含砂砾23厘米, 上作沥青表面处治	50	3.10	3.40		30	14	-23	37*	中心沉降6.9厘米
10	去草皮, 换填砂砾20厘米, 上作砂砾基层15厘米, 沥青路面4厘米	>70	1.65	1.75		0	0	-35	35*	反拱形变形, 中心最大沉降量25厘米
11	草皮上填粉轻土50厘米, 上作砂砾基层15厘米, 沥青路面4厘米	>70	2.10	2.05		65	47	+5	42	无变形

(注) №1—9号为试验路观测点, №10—11为观测场观测点, 无行车作用。

* 因含土层融化, 上限下降值偏小。

** 因冬季有水渗入(路旁积水), 上限下降值偏大。

如表 3。

表 3 按不同冻土类别的路堤高度建议值(米)

上限以下 1米以内的冻土类别	填筑路堤用的土壤		粉、粘性土	砂土、砂性土	砂砾、碎石土
	富冰冻土	冰冻土	土	0.5~0.8	0.5~0.8
饱冰冻土	冰冻土	土	0.8~1.0	0.8~1.1	0.8~1.2
含土冰层	土冰层	冰层	1.0~1.2	1.1~1.3	1.2~1.4

注: 1.表中数值考虑了路面作为保护冻上层的一部分;
2.同一类冻土,含冰量(或总含水量)大的取较高值,含冰量小的取较低值。

二、冻胀、翻浆及其防治

本区主要土壤可大致分为三类,即砾石土、砂性土和粉性土。

我们于青藏公路老路选择了12个典型路段,并修筑了两个观测场,进行了连续三年的调查和观测工作。调查资料说明,干燥路段的砾石土,没有聚水及冻胀现象;由于本区冻结层上的地下水水位在10月以后逐日下降,砂性土(细亚砂土、粉质砂土)的中湿、潮湿路段,路基土在冻结过程中仅有轻微的聚水现象,冻胀量也很小(不大于2厘米)。它的不利季节

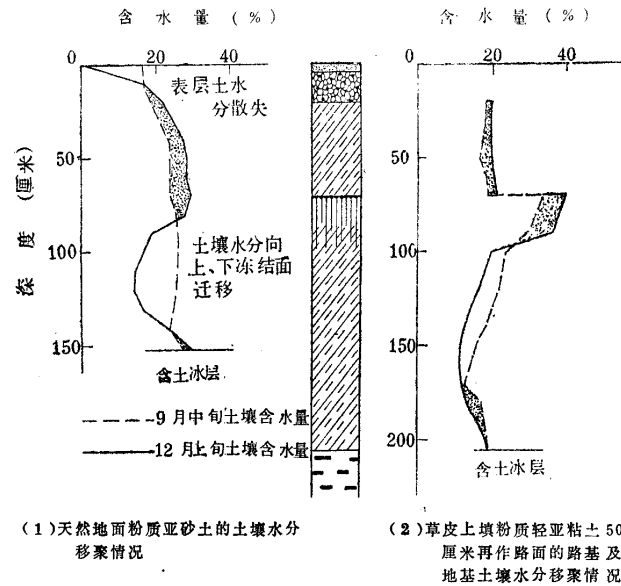


图 4 在冻结过程中无外界水供给条件下的土壤水分移聚图

在融季连续降雨后地下水位达到最高并持续若干天的时候，一般是在九月中、下旬，如某年雨量比较集中在六、七月，七月也可能是不利季节(如1975年)。粉性土的路基在冻结过程中聚水是明显的，它的不利季节是在初融的六月，路基土融化深度为60—70厘米的时候；另一不利季节则在初冻的九月下旬至十月上旬，此时路基上部处于时冻时融的状况，已有冻结聚水现象发生，如果中间出现气温回升，表土融化就会出现路基湿软甚至翻浆现象。修筑沥青路面后此时在路面与基层的界面处会形成薄冰(或水膜)，同时基层上部湿度增加，如基层材料抗冻性差，在反复冻融作用下强度就会明显降低，这些都可使路面开裂破坏。

调查资料还说明，天然地面，在无外界水(地面或地下水)供给的条件下，冻期内整个活动层土壤的含水量基本不变；上、下层土产生聚水，中间土层变干，如图4(1)。路基土的聚水情况因采用的路基路面结构而异，其基本图式则与天然地面相类似。

图4(2)表示不去草皮，填粉质轻亚粘土50厘米再作路面的情况。草皮层上的填土及草皮层均有聚水，但主要聚水带则在草皮层。最大冻胀发生在12月中旬(图5)，与当年降水量有关，但即使在降水最多的1977年，总冻胀量也不超过4厘米(表4)。因此，如能保证路基在冻结过程中无外界水供给，可以不必采取专门的防冻胀措施。

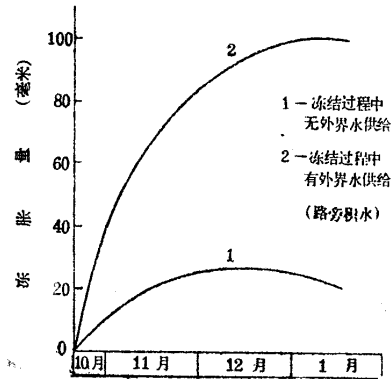
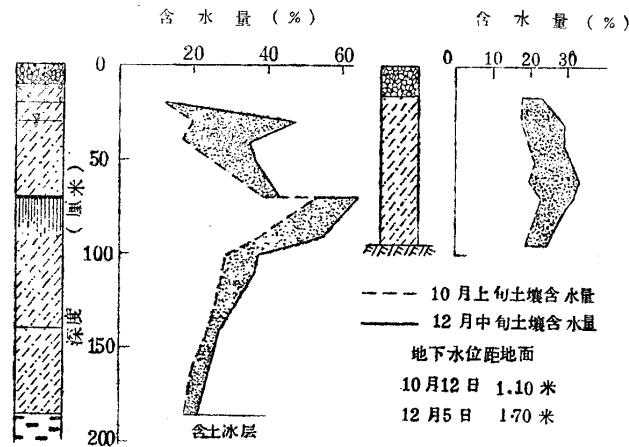


图5 不同供水条件下粉性土路基冻胀量与时间关系



(1)路旁长期积水的粉质亚砂土低路堤 (2)冻前地下水位较高的粉质亚砂土低路堤

图6 冻结过程中有外界水供给条件下的路基土壤水分变化图

在有水供给的情况下(图6),无论有无草皮整个路基土的湿度都有明显增加。冻胀一

表4 不同年降水量时的路基冻胀量

年 别	1975	1976	1977
年降水量(毫米)	248	278	316
最大冻胀量 (毫米)	图(1) 23	图(2) 101	27 131

直延续到上、下冻结面相连的一月上、中旬,而冻胀量则明显地与冻前地下水位或路旁积水水位有关(见表5),已经观测到最大冻胀量达到13.1厘米,因而必须采取措施来防治冻胀。¹⁾

目前采取的防治冻胀、翻浆的措施有:

(1)改善路基排水,使路基在冻结过程中处于无外界水供给的情况。为防表面水

类翻浆及冻胀,要求沥青路面具有良好的不透水性,加固路肩并作好路肩排水。

表5 不同供水条件下公路的最大冻胀值

(根据1975~1977观测资料)

路段编号	路面结构	路基土壤	冻结过程中供水情况	路侧积水冻前水位距路基边缘高度(米)	地下水冻前水位距路基边缘高度(米)	最大冻胀值(毫米)
1	砂砾路面 8cm	粉质亚砂土,40—70cm 为草皮	有水供给	0.3—0.4		131
2	砂砾路面 10cm	粉质亚砂土,30—50cm 为草皮	有水供给	0.5	0.9	74
3	砂砾路面 10cm	粉质亚砂土	初期有水供给	1.25		62
4	无路面	粉质亚砂土	初期有水供给	0.50 0.85 1.25		110 97 82
5	砂砾路面 10cm	粉质亚砂土,70—99cm 为草皮	初期有水供给	1.4	2.0	58
6	砂砾路面 15cm	粉质亚砂土	初期有水供给		1.4 1.7	85 73
7	沥青路面4cm +砂砾15cm	粉质轻亚粘土,草皮层 上填土50厘米	无水供给			33
8	沥青路面4cm +砂砾35cm	粉质轻亚粘土,去草皮, 未提高路基	无水供给			47

1) 试验路资料说明,当路面最大冻胀量达8.7厘米,平均冻胀值为6.6厘米,不均匀冻胀值达2.5厘米以上时,沥青碎石路面出现严重开裂并破坏。最大冻胀值小于4厘米,不均匀冻胀值小于2厘米时,路面保持完好。

(2) 提高路基, 使路基边缘距地下水位和路侧积水水位的高度不小于表 6 的数值。表中含粗粒土(砂、砾石)多的取较低值, 含粗粒土少的取较高值; 括弧内系指粉性土路基

表 6 路基最小高度值(米)

路基土壤	路基边缘高于路侧积水水位的最小高度	路基边缘高于地下水位的最小高度
	砂性土	0.7—1.0
粉性土	(1.4—1.6)	(2.0—2.2)

可以采用防冻结稳定层最小厚度的路基高度; 地下水位, 对砂性土采用7—9月平均水位, 对粉性土采用冻前即10月上旬的水位; 路侧长期积水的路基最小高度系指积水坑距路基坡脚 ≥ 5 米的情况, 如积水坑就在路基坡脚, 则路基边缘距长期积水水位的最小高度应与高于地下水位的高度相同。

通常粉性土地段的地下冰也比较发育, 因此, 路基高度必须同时满足保护冻土及防治冻胀、翻浆的需要。由于这些地段取土困难, 大多是由保护冻土的要求控制路基高度, 而采用砂砾垫层来防治冻胀、翻浆。

(3) 设砂砾垫层。砂砾垫层对路基下的土基具有明显的疏干作用。本区砂砾材料比较丰富, 采用砂砾垫层即可作为路面结构层的一部分, 又可改善路基的工作状况, 是一种就地取材经济适用的结构。这时, 砂砾垫层的厚度一般由路面强度计算控制。

当路基高度不能满足要求, 为保证路基稳定而设砂砾垫层时, 砂砾垫层的厚度不应小于20厘米, 宜作成全断面的型式, 如作槽式时应加作排水盲沟。对粉性土路基, 路面总厚度(包括砂砾垫层在内)不得小于表 7 防冻稳定层的厚度。

表 7 防冻稳定层厚度建议值

路基高度(米)		防冻稳定层厚度(厘米)	
高于路侧积水水位	高于冻前地下水位	沥青混凝土路面	其他沥青路面
1.4—1.6	2.0—2.2	60	45
1.1—1.4	1.7—2.0	70	50
0.8—1.1	1.4—1.7	80	60

(上接第38页)

$$M_{\text{高变}} = \frac{m\beta}{\rho''} \cdot D \quad (10)$$

又知, 010与030经纬仪 $m\beta$ (中误差)分别为 $\pm 10''$ 和 $18''$ 。代入公式(10), 对010和030经纬仪来说 $M_{\text{高变}}$ 分别为:

$$M_{\text{高变}} = \frac{1}{20000} \cdot D \quad (11)$$

$$M_{\text{高变}} = \frac{1}{12000} \cdot D \quad (12)$$

这就是说, 当流速点距观测基线一公里时用010经纬仪观测, 高程变化误差为 ± 5 厘米; 用030经纬仪观测, 高程变化误差为 ± 8 厘米。