

# 砂砾土地基道面结构不均匀冻胀防治

龙小勇<sup>1</sup>, 岑国平<sup>1</sup>, 蔡宛彤<sup>1</sup>, 张昊<sup>2</sup>, 吕勃<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 94608 部队, 南京, 210000)

**摘要** 为有效解决砂砾土地基道面结构不均匀冻胀问题,分析了道面结构冻胀防治现状及其问题,以及不均匀冻胀问题产生的主要原因;对果洛机场现场试验段的土质进行了颗粒分析试验,对天然砂砾土和表层细粒土的冻胀敏感性进行了评价。实测了现场土基的含泥量和含水率,设计了 5 种道面结构方案,并评价了各自的优缺点,优选出了跑道与道肩一体化方案,并对该最优方案进行了抗冻性验算和成本费用分析,最后对应用效果进行了验收评价。结果表明该方案不仅能够有效避免不均匀冻胀,且满足抗冻性要求,同时具有一定的经济适用性。根据实际工程反馈该方案冻胀防治效果良好。根据分析、试验、实测及验算等研究成果和工程实际情况,总结性地提出了工程措施建议。

**关键词** 不均匀冻胀防治;砂砾土;道面结构;抗冻性验算;成本费用分析;工程评价

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.01.017

**中图分类号** TU399 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)01-0097-07

## Prevention of Uneven Frost Heave of Pavement Structure on Gravel Soil Foundation

LONG Xiaoyong<sup>1</sup>, CEN Guoping<sup>1</sup>, CAI Wantong<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>2</sup>, LYU Bo<sup>2</sup>

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 94608, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** In order to prevent the uneven frost heave deformation of pavement structure of gravel soil subgrade, this paper presets the condition and reasons for the occurrence on the uneven frost heave of pavement structure. According to the grain size analysis test and the measured value of silt content and moisture, the paper designs five schemes of pavement structure and compared them, then put forward a new anti-freezing design measurement. Based on checking computation of frost resistance, the cost analysis and the actual application effect, the optimization program of integration of runway and the shoulder not only avoid the damage of uneven frost heave, but also meet the needs of frost resistance, and simultaneously have a certain economic applicability. Finally, the results show that actual measurement, checking computation and engineering practice, engineering measures are put forward. The result shows that the effectiveness of the practical application is good.

**Key words:** Prevention of uneven frost heave; gravel soil; pavement structure; checking computation of frost resistance; cost analysis; project evaluation

**收稿日期:** 2017-05-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(51578540);民航科研专项基金(MHRD20140216)。

**作者简介:** 龙小勇(1990—),男,湖南耒阳人,博士生,主要从事机场道面材料与结构防冻研究。E-mail:18509270709@163.com

**引用格式:** 龙小勇,岑国平,蔡宛彤,等.砂砾土地基道面结构不均匀冻胀防治[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(1):97-103. LONG Xiaoyong, CEN Guoping, CAI Wantong, et al. Prevention of Uneven Frost Heave of Pavement Structure on Gravel Soil Foundation [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(1): 97-103.

砂砾土等粗粒土在自然界分布广泛,储量丰富,并且具有压实性能好、透水性强、抗剪强度高、在动荷载作用下不易产生液化等优良的工程特性,因此,在工程建设中被普遍用作地基填料。而地基冻胀是寒区工程中经常发生的现象。传统的冻胀研究认为:粗粒土的粒径较大,其颗粒表面能较小,亲水性较弱,没有或持有很少的结合水膜,同时由于其孔隙率较大,毛细现象并不明显,大部分孔隙液态水原地凝结成冰,孔隙中自由水冻结后,不会发生水分的迁移积聚,因而不会发生冻胀。因此,粗粒土通常被认定为冻胀不敏感材料<sup>[1]</sup>。然而,根据哈大高速铁路基粗颗粒填料状况及冻胀量监测<sup>[2]</sup>和果洛机场砂砾土冻胀室内试验<sup>[3]</sup>等相关研究表明,粗粒土在一定细粒含量、水分、温度等因素的组合下也会产生明显的冻胀现象,尤其是当这些因素分布不均匀时,所产生的不均匀冻胀现象更加明显。此外,根据相关工程实际反馈,在寒冷地区尤其是季冻区,机场、公路和铁路等构筑物的局部地基均出现了不同程度的冻胀,直接影响使用安全,其危害已不容忽视,特别是对于有严格变形要求的机场跑道而言,不均匀冻胀所产生的局部变形对跑道平整度影响较大,对飞机使用安全存在较大隐患。因此探索便捷有效的针对不均匀冻胀的防治方法是十分必要的。

国内外关于粗粒土的冻胀防治研究主要围绕着影响冻胀的三大因素,即土质、水分和温度展开。通过改良土质进行冻胀防治的实质是改变土的颗粒级配和矿物组分,减少颗粒持水量,从而减少水分迁移量。李世芳<sup>[4]</sup>认为风积沙具有透水性好、强度高、毛细作用弱等的优点,可作为隔断层用来防治冻胀。围绕水分因素的主要防治措施是采取有效的工程排

水和隔水措施,防止地下水和雨水入侵地基,减小冻结过程中水分补充,减少水分迁移积聚,从而达到减小冻胀量的目的。夏琼等<sup>[5]</sup>利用软式透水管进行了有效的冻胀防治试验。围绕温度因素的主要防治措施是设置隔热层,减少地基与环境的热传递,使土体温度低于起始冻结温度,从而防止冻胀现象的产生。日本学者 Kubo 等<sup>[6]</sup>通过试验和模拟研究表明在路基层铺设保温板绝热板能有效防治路基冻胀。Humphrey 等<sup>[7]</sup>利用废旧轮胎碎片作为路基绝缘板,通过阻隔热量达到防治冻胀的目的。

综上所述,目前国内外学者关于粗粒土冻胀防治开展了大量的工作,并取得了一定应用效果。然而大部分研究主要针对铁路和公路路基等方面<sup>[8-15]</sup>,关于机场道面结构地基冻胀防治的研究较少<sup>[16-17]</sup>;且大部分研究忽视对不均匀冻胀防治的研究,粗略地从整体上对冻胀进行防治,效果不尽人意。因此,本文以位于季节性砂砾冻土地区的果洛机场道面结构工程作为研究对象,系统地针对道面结构不均匀冻胀防治问题进行研究,力求探索有效的解决措施和方案,为相关工程冻胀防治尤其是不均匀冻胀防治提供有价值的建议。

## 1 道面结构冻胀防治现状及其问题

目前,我国道面结构冻胀防治的主要措施是设置防冻层,其方法通常是采用不易冻胀的级配碎石或级配砂砾等材料置换冻深范围内容易发生冻胀的一定厚度的土基,以减小总冻胀量,同时也起一定的隔温作用及缓冲不均匀冻胀力的作用。在季冻区,道面结构防冻层厚度应满足表 1<sup>[18]</sup>和表 2 等相关规定。

表 1 民用机场道面最小防冻害层厚度

Tab. 1 The minimum thickness of anti-freezing layer of civil airport pavement

土壤干湿类型	土基土质	当地最大冻深/m			
		0.50~1.00	1.01~1.50	1.51~2.00	>2.00
中湿地段	低、中、高液限粘土	0.30~0.50	0.40~0.60	0.50~0.70	0.60~0.95
	粉土,粉质低、中液限粘土	0.40~0.65	0.50~0.80	0.60~0.95	0.70~1.20
潮湿地段	低、中、高液限粘土	0.40~0.65	0.50~0.80	0.60~1.10	0.75~1.30
	粉土,粉质低、中液限粘土	0.50~0.80	0.60~0.90	0.80~1.20	0.90~1.50

根据季冻区实际工程反馈,尽管在设计中满足了相关规范的要求,但仍然出现了冻胀问题,尤其是不均匀冻胀问题。经调查分析认为,主要原因如下:

1) 含泥量分布不均匀,且局部地区过大。由于低估了砂砾土的冻胀敏感性,人们在砂砾土地基设计机场时,往往不设防冻垫层或取较小的防冻垫层

厚度。且在施工过程中,往往忽视了对含泥量的严格控制,表层细粒土容易不均匀地夹杂在砂砾土中,导致局部含泥量增大,有的甚至在砂砾土层中出现细粒土透镜体。砂砾土的冻胀量随含泥量的增大而增大<sup>[19]</sup>。如果局部范围含泥量过大,将使该区域的冻胀量与周围出现明显差异,使道面面层不均匀隆

起或错台,影响飞行安全。目前的规范通常只以总冻胀量作为防冻层厚度设计的控制指标,而忽略不均匀冻胀问题。实际上,如果道面结构均匀冻胀,并

不会对机场使用安全产生明显影响,关键是冻胀差。因此严格控制冻深范围内土质的均匀性,是防止出现不均匀冻胀问题的关键。

表 2 军用机场道面最小防冻害层厚度

Tab. 2 The minimum thickness of anti-freezing layer of military airfield pavement

冻深/m	0.6 以下	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0 以上
允许冻胀/mm	15	20	25	30	35	40	45	50
最小 防冻层 厚度/m	干燥	0.5~0.6	0.5~0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
	中湿	0.6~0.7	0.6~0.7	0.7~0.8	0.7~0.8	0.7~0.8	0.6~0.7	0.6
	潮湿	0.7	0.8~0.9	0.8~0.9	0.8~1.0	0.8~1.0	0.8~1.0	0.8~1.0
	过湿	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5	1.5

2) 含水率分布不均匀,且局部地区过大。由于受地形、地下水位等各种条件的影响,土中的含水率往往不均匀,局部地段会出现潮湿甚至过湿的情况。在设计中一般只根据平均湿度情况选择防冻层厚度,因此会造成局部防冻层厚度不足,出现不均匀冻胀。另外,在一般的道面结构设计中,道肩厚度小于跑道厚度,且其混凝土质量要求也低于跑道。施工时往往在跑道完成后再进行道肩施工,大量的跑道施工养护用水以及雨水渗入道肩下的土基中,使其含水率明显大于跑道区土基,造成道肩的总冻胀量大于跑道的总冻胀量,严重时产生跑道与道肩错台破坏,这一现象在季冻区机场非常普遍。

不均匀冻胀系数较大,反映了其中间颗粒的缺失,而在实际施工过程中,表层细粒土往往容易被掺杂在砂砾土中,使砂砾土的细粒含量增加,不均匀系数减小,级配趋于不良,冻胀敏感性增强,因此导致实际工程中砂砾土地基的冻胀现象更加明显。

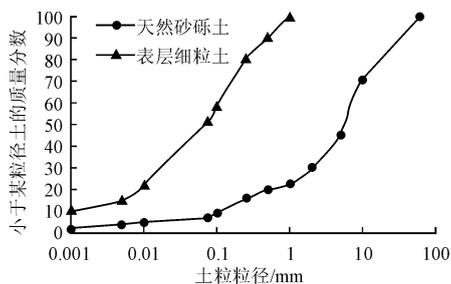


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 The grading curve

表 3 颗粒级配指标

Tab. 3 The grain composition indexes

土样	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
天然砂砾土	47	2.1
表层细粒土	25	1.4

3) 施工质量问题。在砂砾土地区修建机场时,为了节约成本和方便起见,建设单位或施工单位常用天然砂砾土替换设计要求的级配碎石或级配砂砾垫层,并且缺乏对含泥量和含水率进行严格控制,实际上难以起到防冻层的作用。

## 2 果洛机场土质分析

### 2.1 颗粒分析试验

本文依托果洛机场作为研究背景,果洛机场地处青藏高原季节性砂砾冻土地区,其土壤主要由天然砂砾土和表层细粒土组成,其中细粒土不均匀地分布在砂砾土中。已有研究表明,土的细颗粒含量和颗粒级配对冻胀有着明显的影响<sup>[3]</sup>。从试验现场取一定量的天然砂砾土和表层细粒土土样,通过颗粒分析试验得到二者的颗粒级配曲线图 1 和表 3。由图 1 可知,天然砂砾土中细颗粒含量较少,粗颗粒含量较多,表层细粒土的土粒粒径均小于 1 mm。由表 3 可知,砂砾土的不均匀系数和曲率系数均大于细粒土,显然砂砾土的颗粒级配较细粒土更加良好,砂砾土的冻胀敏感性较细粒土更弱。砂砾土的

### 2.2 实测土基含泥量和含水率

果洛机场跑道大部分区段为填方区,为了确定道面结构土基含泥量和含水率的实际水平,在已经完成施工的土基层及砂砾垫层中,选取了东端 2 个、中部 2 个和西端 2 个总共 6 个具有代表性的点,在每个点的 20 cm 深处(设计的级配砂砾垫层)和 60 cm 深处(土基层)取样实测含泥量和含水率,结果见表 4。从实测结果来看,无论是在级配砂砾垫层内,还是在土基层内,各点的含泥量和含水率差异较大,个别点的数值过大,这充分验证了细粒土不均匀分布在砂砾土中这一现象,土基层的平均含水率略大于级配砂砾垫层的平均含水率,充分说明外部水分入渗对道面结构下的水分分布产生了一定的影响。

表4 实测含泥量和含水率

Tab.4 The measured silt content and moisture content

测点 序号	深 20 cm		深 60 cm	
	含泥量/%	含水率/%	含泥量/%	含水率/%
1	14.4	8.4	8.4	5.9
2	7.9	6.5	6.8	5.7
3	8.8	7.7	9.5	6.3
4	6.1	6.4	15.9	8.9
5	10.4	8.6	12.7	7.9
6	8.0	6.2	4.6	5.5
平均值	9.3	7.3	9.7	6.7

### 3 道面结构方案设计与评价

#### 3.1 方案设计

根据相关标准规范和果洛机场实际情况,设计了以下几种道面结构方案。

1)方案 A:传统道面结构方案。跑道水泥混凝土面层与道肩水泥混凝土面层不等厚,跑道面层先于道肩面层施工,见图 2。

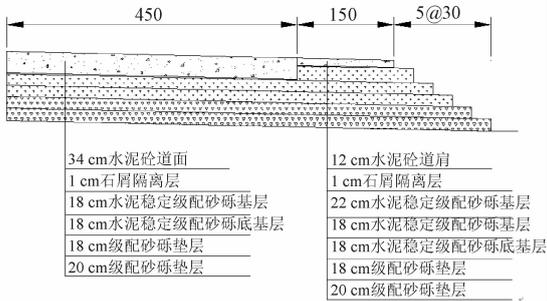


图2 道面结构方案 A

Fig.2 Plan A of pavement structure

2)方案 B:跑道与道肩一体化。跑道的构形同方案 A,道肩各结构层厚度与跑道一致,横向分仓为 4 m,见图 3。

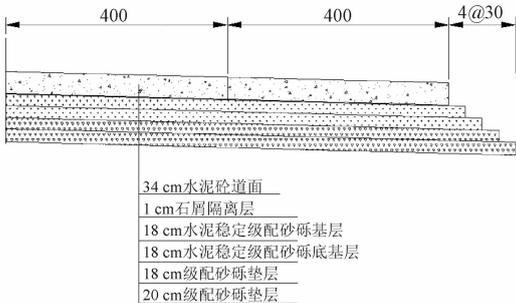


图3 道面结构方案 B

Fig.3 Plan B of pavement structure

3)方案 C:加铺不透水土工膜。在方案 A 的基础上,沿道肩水泥混凝土面层的下边缘铺设不透水土工膜,延伸至道肩外 3.5 m,见图 4。

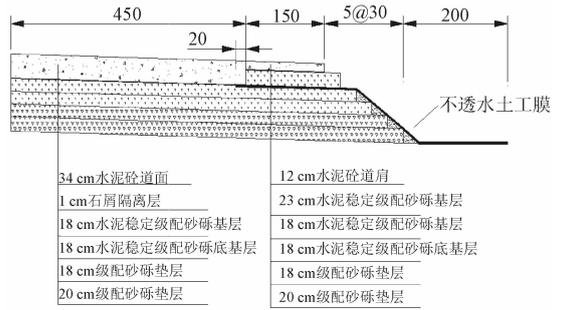


图4 道面结构方案 C

Fig.4 Plan C of pavement structure

4)方案 D:增加垫层厚度。为提高防冻层厚度,增加级配砂砾垫层厚度,使道面结构的总厚度达到 1.5 m,见图 5。

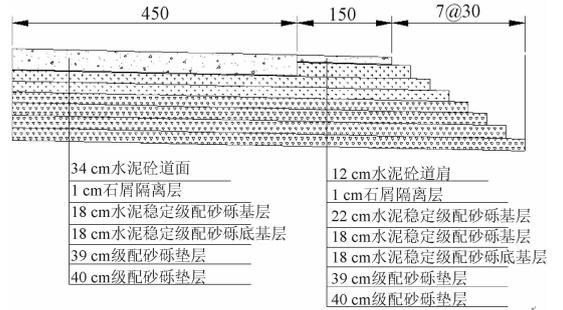


图5 道面结构方案 D

Fig.5 Plan D of pavement structure

5)方案 E:跑道与道肩一体化+铺设不透水土工膜。在方案 B 的基础上,沿道肩水泥混凝土面层的下边缘铺设不透水土工膜,延伸至道肩外 3.5 m,见图 6。

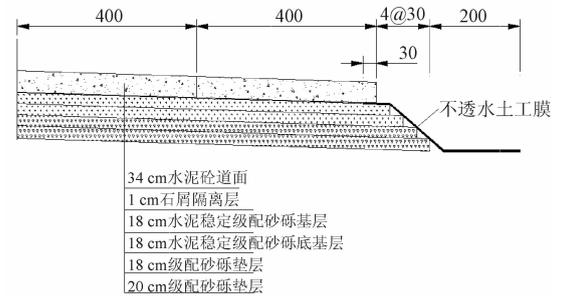


图6 道面结构方案 E

Fig.6 Plan E of pavement structure

#### 3.2 方案评价

方案 A 面临的主要问题是道肩的含水率的控制。根据目前的施工方法,当跑道与道肩不等厚时,一般先施工跑道,后施工道肩,在施工过程中养护用水、切缝水都会流到道肩部位,如果不采取防水措

施,道肩区土基的含水率将大于其他区域,容易产生不均冻胀现象。

方案 B 的优点有:①边界板与中间板的结构相同,可以先铺筑边界板或按正常顺序施工,便于在边界板外侧设置临时排水沟,避免了大量施工水和雨水从边界板边缘渗入土基。②面层表面的养护用水和雨水到达第一条纵缝所流经的距离比较远(横向分仓为 4 m),因此纵缝附近的含水率不会很大,冻胀差也较小,不易引起纵缝两侧面板错台。③边界板与其他面板结构一致,基层和面层均可整体施工,质量和均匀性可以保证,能有效避免产生不均匀冻胀。一体化施工不需要专门制作道肩模板,既节约成本也便于施工。

方案 C 的优点是防水效果好。缺点是铺设土工膜时,道槽宽度需要增加,增加了土方工程量。另外道肩区的土工膜暴露时间比较长,需要采取保护措施,否则容易破损而导致渗水。

方案 D 的优点是可以减小跑道和道肩的总冻胀量,对土基含水率、含泥量的控制要求可适当降低。缺点是成本较高。

方案 E 的优点是防水效果好、能有效防止不均匀冻胀。缺点是人工和经济成本较高。

通过分析比较,初步建议一般地段采用方案 B;在土基含泥量特别大,含水率不易控制地段,可采用方案 E。

### 3.3 跑道与道肩一体化方案的抗冻性验算

相关规范对冻胀量限值作了规定:水泥混凝土的高速公路、一级公路的路基总冻胀量不得大于 20 mm<sup>[20]</sup>,假定机场道面总冻胀量也服从该规定,基于该假定对跑道与道肩一体化方案 B 进行抗冻性验算。我们先按照方案 A 分别计算跑道与道肩的冻胀量,因方案 B 的整体冻胀量肯定不超过方案 A 的跑道冻胀量,所以若后者满足抗冻要求,则前者必然也满足。具体验算过程如下:

道面结构多年最大冻深按下式计算:

$$Z_{\max} = abcZ_d \quad (1)$$

式中: $Z_{\max}$ 为从道面中线顶面至冻结线处的多年最大冻深; $a$ 为跑道、道基材料的热物性系数,水泥混凝土道面 1.4,水泥稳定砂砾 1.4,含细粒土质砂砾 1.35,级配碎石 1.45; $b$ 为路基湿度系数,干燥 1.0,中湿 0.95,潮湿 0.9,过湿 0.8; $c$ 为路基断面形式系数,地面 1.0,填方大于 1,挖方小于 1; $Z_d$ 为大地标准冻深。

查阅当地气象资料可知果洛机场标准冻深为 2.46 m;跑道、基层和土基的热物性系数平均取 1.38,湿度系数跑道下取中湿, $b=0.95$ ,道肩下取潮

湿, $b=0.9$ ;跑道大部分区域为填方,取  $c=1.1$ ,将以上数值代入式(1),计算得到跑道区最大冻深为 3.548 m,道肩区最大冻深为 3.361 m。考虑到实际工程中,人们在砂砾土地基道面施工时,由于忽视砂砾土的冻胀敏感性,往往不单独设置级配砂砾防冻垫层,直接在砂砾土基层上铺设水泥稳定基层和水泥混凝土面层,本着取最不利条件验算的原则,本文将砂砾级配垫层和砂砾土基层统一当作冻结土层进行计算,故除去 0.71 m 厚的水泥混凝土面层和水泥稳定基层,则跑道区冻结土层的有效冻深为 2.838 m,道肩区冻结土层的有效冻深为 2.651 m。

砂砾冻土的冻胀率预测模型<sup>[3]</sup>按下式计算:

$$\eta = 0.147651\omega_w + 0.121521\omega_s - 0.00208\omega_s^2 - 0.04818K + 0.000323K^2 - 0.00274P \quad (2)$$

式中: $\omega_w$ 为质量含水率,%; $K$ 为压实度,%; $\omega_s$ 为含泥量,%; $P$ 为上覆荷载,kPa。

由表 4 可知,级配砂砾垫层和砂砾土基层的平均含水率为 7%,因果洛机场地下水位较低,故忽略地下水的影响,取跑道区土基的平均含水率为 7%;道肩面层因后于跑道面层施工,易入渗更多的面层施工养护用水和雨水,参考相关实际工程监测数据<sup>[2]</sup>,取道肩区土基的平均含水率为 10%。压实度取为实际值 98%,取表 1 中所有测点的实际含泥量水平的平均值 9.5%作为本文的计算值,因为不单独考虑级配砂砾垫层,故本文上覆荷载只取水泥混凝土面层和水泥稳定基层的自重荷载之和,经计算,跑道区上覆荷载为 16.16 kPa,道肩区的上覆荷载为 15.83 kPa。将以上数值代入式(2),计算得到跑道的冻胀率为 0.34%,道肩的冻胀率为 0.78%。

结合前文冻深的计算结果,可得跑道冻胀量为 9.6 mm<冻胀量限值 20 mm,满足要求;道肩冻胀量为 20.7 mm>冻胀量限值 20 mm,不满足要求。所以可得出结论,传统的道面结构方案 A 的道肩冻胀量超过了规定,不满足抗冻要求,且容易产生跑道与道肩错台破坏;若采用跑道与道肩一体化方案 B,则整体冻胀量将不会超过的单独的道面冻胀量 9.6 mm,不仅避免了错台破坏,也满足抗冻要求。

### 3.4 跑道与道肩一体化方案的成本费用分析

方案 A 改为方案 B 所增加的成本费用计算见表 5。

由表 5 可知,一体化方案较传统方案的成本增加了 65.28 万元,但由于节省了额外制作道肩模板的成本,提高了施工效率,故实际成本增加较少。

若采用方案 D:增加厚 0.41 m、宽 51 m 的级配砂砾垫层,则整条跑道需要增加的级配砂砾总体积为 79 458 m<sup>3</sup>,若每立方米级配砂砾与天然砂砾的差

价按 20 元计算,则方案 D 比方案 A 增加总成本 158.92 万元。

以上分析表明,跑道与道肩一体化方案较其他方案更具经济适用性。

表 5 成本费用计算

Tab. 5 The cost calculation

变动项	增减量
道肩面层的厚度/m	$0.34 - 0.12 = 0.22$
每延米面层的混凝土体积/m <sup>3</sup>	$0.22 \times 3 = 0.66$
每延米面层的成本/元	$0.66 \times 500 = 330$
水稳基层的厚度/m	-0.22
每延米水稳基层的体积/m <sup>3</sup>	$-0.22 \times 3.6 = -0.791$
每延米水稳基层的成本/元	$-0.791 \times 200 = -158.2$
每延米道面结构的总成本/元	$330 - 158.2 = 171.8$
整条跑道的总成本/万元	$3\ 800 \times 171.8 = 65.28$

## 4 应用效果验收评价

果洛机场于 2015 年 9 月份建成并投入使用,基于本课题所提供的建议,其道面结构采用了跑道与道肩一体化的方案,并且在施工过程中,严格控制了施工及养护用水渗入土基,并在雨期做了良好的防水措施,对部分含水率和含泥量过大的区域进行了回填整改措施。到 2016 年 9 月份,果洛机场已历经一个冻融循环周期,从实际情况反馈来看,道面结构的水泥混凝土面层表面并未出现错缝或者错台现象,说明其冻胀防治初步效果,尤其是不均匀冻胀防治的效果较好。另外实际成本费用增加了 70 万元,与本文成本费用分析预算额 65.28 万元相差不大,考虑到一体化方案为后期冻胀破坏维修和治理节约了部分费用,因此实际成本增加较少。综合来说,本文道面结构不均匀冻胀防治研究成果在果洛机场的初步应用效果较为良好,其长期效果有待更长应用周期的检验。

## 5 结论

本文针对季冻区机场普遍反馈的道面结构不均匀冻胀问题进行了系统的防治研究,得到以下结论:

1) 跑道与道肩一体化的道面结构方案不仅能有效地避免不均匀冻胀问题,而且满足抗冻性要求,同时具有良好的经济适用性,建议在季冻区机场工程中推广使用。

2) 严格控制土基含泥量和含水率的大小和均匀

性,尤其注意防止局部地区过大,是有效防治道面结构不均匀冻胀的关键。

3) 在施工及养护过程中,应做好防排水措施,尽量避免水分渗入土基。

## 参考文献(References):

- [1] 李安原,牛永红,牛富俊,等.粗颗粒土冻胀特性和防治措施研究现状[J].冰川冻土,2015,37(1):202-210.  
LI A Y, NIU Y H, NIU F J, et al. Research Status of Frost Heaving Properties and Controlling Measures of Coarse Grained Soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 202-210. (in Chinese)
- [2] SHENG D, ZHANG S, NIU F J, et al. A potential New Frost Heave Mechanism in High-Speed Railway Embankments [J]. Geotechnique, 2013, 64(2): 144-154.
- [3] 岑国平,龙小勇,洪刚,等.青藏高原季冻区砂砾土冻胀特性试验[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):53-59.  
CEN G P, LONG X Y, HONG G, et al. Frost Heaving Properties of Gravel Soil in Seasonal Frozen Region of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Harbin Institute of Technology. 2016, 48(3): 53-59. (in Chinese)
- [4] 李世芳.新疆兵团垦区公路冻胀与防治[J].公路,2008(10):237-239.  
LI S F. The Solution of Frost Heaving in Highway of the Corps of Xinjiang Reclamation Region [J]. Highway, 2008(10): 237-239. (in Chinese)
- [5] 夏琼,杨有海,窦顺.兰新铁路路基冻胀特征及冻害整治措施研究[J].冰川冻土,2011,33(1):164-170.  
XIA Q, YANG Y H, DOU S. Frost Heaving Characteristics of Lanzhou-Xinjiang Railway Subgrade and the Treatment of Frost Damage [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(1): 164-170. (in Chinese)
- [6] KUBO H, SAKAUE H. Control of Frost Penetration in Road Shoulders with Insulation Boards [M]. Geotechnical Engineering, Washington, DC: Transportation Research Record, 1986: 132-137.
- [7] HUMPHREY D N, EATON R A. Tire Chips as Subgrade Insulation: Field Trial [C]//Symposium on Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and By-Products for Construction of High-Way Facilities. Denver, Colorado, 1993: 1-15.
- [8] BENSON C H, ABICHOU T H, OLSON M, et al. Winter Effects on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering,

- 1995, 121(1): 69-79.
- [9] RUI D H, SUZUKI T, KIM Y. Frost Heave Force of Natural Ground and Countermeasure for Damage of Structures [J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 2007, 23(5): 43-51.
- [10] RUI D H, SUZUKI T. Protection Against Frost Heave of L-Type Retaining Walls in Cold Regions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 4(32): 612-618.
- [11] ISHIKAWA T, TOKORO T. Influence of Freeze-Thaw Action on De-Formation-Strength Characteristics and Particle Crushability of Volcanic Coarse-Grained Soils [J]. Soils and Foundation, 2011, 51(5): 785-799.
- [12] ZHOU J Z, WEI C F, WEI H Z, et al. Experimental and Theoretical Characterization of Frost Heave and Ice Lenses [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014: 76-87, 104-105.
- [13] ROY L P, BURN C R. A Modified Landform Development Model for the Topography of Drained Thermokarst Lake Basins in Fine-Grained Sediments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41: 1504-1520.
- [14] HENDRY M T, ONWUDE L U, SEGO D C. A Laboratory Investigation of the Frost Heave Susceptibility of Fine-Grained Soil Generated from the Abrasion of A Diorite Aggregate [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 123: 91-93.
- [15] WANG T F, LIU J K, TIAN Y D, et al. Frost Jacking Characteristics of Screw Piles by Model Testing [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 138: 98-107.
- [16] 杨锐, 王肖戎, 许金余. 高寒地区机场道面基层底面冻胀应力的计算 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2007, 8(3): 16-18.
- YANG R, WANG X R, XU J Y. Calculation of Frost Heave Stress on the Airport Pavement Base Bottom in Frigid Area [J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2007, 8(3): 16-18. (in Chinese)
- [17] 邢耀忠, 郝友诗. 机场刚性道面结构防冻厚度设计探讨 [J]. 华东公路, 2010, 4: 52-53.
- XING Y Z, HAO Y S. The Airport Frost Thickness of Rigid Pavement Structure Design [J]. East China Highway, 2010, 4: 52-53. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国行业标准. 民用机场水泥混凝土道面设计规范(MHJ 5004-2010)[S]. 北京: 中国民用航空总局, 2010.
- Industry Standard of the People's Republic of China. Civil Airport Cement Concrete Pavement Design Specifications(MHJ 5004-2010) [S]. Beijing: The Civil Aviation Administration of China, 2010. (in Chinese)
- [19] 岑国平, 龙小勇, 洪刚, 等. 含泥量对砂砾土冻胀特性的影响 [J]. 科技导报, 2015, 5(33): 78-82.
- CEN G P, LONG X Y, HONG G. et al. Influence of Silt Content on Frost Heaving Properties of Gravel Soil [J]. Science and Technology Review, 2015, 5(33): 78-82. (in Chinese)
- [20] 吉林省交通厅. 公路工程抗冻设计与施工技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- Communications Department of Jilin Province. Technology Guide for Frost-proof Design and Construction of Highway Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)