

机场沥青基隔离层性能试验及应用效果研究

席逸元, 黄崇伟, 张其星亮

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年11月7日; 录用日期: 2023年12月31日; 发布日期: 2024年1月9日

摘要

本文基于机场刚性道面研发了一种新型隔离层材料, 以同步碎石封层和微表处(稀浆封层)组成的沥青基隔离层, 对该隔离层的表现性能和施工方法进行研究, 利用ABAQUS软件进行三维有限元建模及数值模拟, 明确沥青基隔离层在道面工程中的应用对结构产生的效应。结果表明当使用本文提出的材料设计和施工方法进行水稳沥青基隔离层的铺设, 当荷载作用于板边临界荷位时, 设置沥青基隔离层可使板底脱空时的面层拉应力降低2.6%~4.5%; 当荷载作用于板角荷位时, 最大拉应力的减小百分比可达20%以上, 大大降低了道面产生断裂的可能。

关键词

机场刚性道面, 沥青基隔离层, 面层拉应力

Performance Test and Application Effect Study of Airport Asphalt-Based Isolation Layer

Yiyuan Xi, Chongwei Huang, Qixingliang Zhang

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Nov. 7th, 2023; accepted: Dec. 31st, 2023; published: Jan. 9th, 2024

Abstract

In this paper, a new type of isolation layer material is developed based on the rigid pavement of the airport, which is composed of an asphalt-based isolation layer composed of a synchronous gravel sealing layer and a micro-surface (slurry sealing layer). The apparent properties and construction methods of the isolation layer are studied, and the three-dimensional finite element modeling and numerical simulation are carried out by using ABAQUS software to clarify the effect

of the application of the asphalt-based isolation layer in pavement engineering on the structure. The results show that when the material design and construction method proposed in this paper are used to lay the water-stabilized asphalt-based isolation layer. When the load acts on the critical load of the slab edge, the asphalt-based isolation layer can reduce the tensile stress of the surface layer when the bottom of the slab is hollowed out by 2.6%~4.5%. When the load acts on the angular load of the plate, the maximum tensile stress can be reduced by more than 20%, which greatly reduces the possibility of fracture on the pavement.

Keywords

Rigid Airport Pavement, Asphalt-Based Isolation Layer, Surface Tension

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

以碎石为基层、混凝土为面层的道路结构在机场中受到了普遍应用，但因其传统的隔离层材料易受剪切力破坏和抗冲刷性较差等原因，本文研发一种新型隔离层材料用于机场刚性道面中，可提高道面使用性能，有效增加道路的使用寿命。

国内外对隔离层进行了大量的研究。欧美国家于 1920 年前后开始铺设隔离层[1]。Goldbeck、Friberg、Timms 等[2] [3] [4]学者发现双层土工膜的层间摩擦力最小，并总结了位移 - 摩擦力曲线典型形式。之后，Lee、Lim、Jeong 等[5] [6] [7]专家获得不同剪切次数下的层间相对滑移 - 摩擦力曲线结果。国际机场也开始接近于在设置一层隔离层[8]。Dulce 和 Jeffery [9]依托丹佛机场 NAPDF 现场足尺试验，创新性地以 IP 表征层间结合状态的强弱。

目前，国外将隔离层作为一种层间处治方式；在国内机场水泥道面设计中，通常不能达到预期，且研究以公路水泥路面领域为主，关于机场水泥道面隔离层的研究还很匮乏。

本文针对目前设置隔离层的结构力学分析缺少现场实证性研究与模型可靠度不高等问题，通过明确沥青基隔离层的施工工艺技术要求(包括同步碎石封层中的乳化沥青和碎石洒布量、稀浆封层/微表处层的配合比等)。进行稀浆封层配合比设计试验后，初步拟定工艺技术标准，在现场对实体工程标段进行沥青基隔离层工程效果的检测和评价，从而对施工工艺技术指标提出要求。

2. 沥青基隔离层施工方法确定

在机场正式施工前，需要进行沥青基隔离层试验段的铺筑工作，本研究中采用高压水除胶车进行试验测试，为某机场的隔离层施工提供技术支撑。现场试验方法如下：

- 1) 确定高压水除胶车冲刷喷头与地面的距离、除胶压力以及除胶车的行走速度；
- 2) 根据统一标准对隔离层表面以及水稳碎石基层表面进行冲刷试验，目视对比冲刷前后的破化情况。

3. 试验区以及某机场飞行区的施工工艺

在实验室内进行过渡层和上表层配合比设计试验，得到初步的配合比。其中，碎石满铺率约取了百分之六十和百分之八十两种。铺设完成后，采用胶轮压路机进行两遍碾压。上表层和过渡层采用微表处结构，材料施工配合比参考试验结果，并根据现场石料进行微调，如下表 1 所示。

Table 1. The construction matching ratio of the micro-surface layer material
表 1. 微表处层材料施工配合比

组分	百分数, % (质量比)
干骨料	100
硅酸盐水泥	1.0
水	4.0
乳化沥青	12.0

某机场跑道工程课题依托标段中所采用的乳化沥青喷布量、同步碎石喷布量、微表处层配合比如下表 2、表 3 所示。

Table 2. The flight area of an airport is based on the actual measurement results of emulsified asphalt spreading in the tender section

表 2. 某机场飞行区课题依托标段乳化沥青洒布量实测结果

托盘尺寸(m)	托盘重(kg)	托盘 + 乳化沥青重(kg)	乳化沥青撒布量(kg/m ²)
0.35*0.26	0.480	0.630	1.65

Table 3. The standard topic of the flight area of an airport relies on the micro-surface layer matching ratio of the tender section

表 3. 某机场飞行区标课题依托标段现场微表处层配合比

集料	集料掺配比例(质量比)
0-5 玄武岩	100
水	10
乳化沥青	13
石灰	0.5
水泥	0.05

4. 飞机荷载模型建立

Table 4. Representative model load parameters

表 4. 代表机型荷载参数

机型	最大起飞重量/kN	主起落架荷载系数	主起落架荷载/kN	轮胎接地压力/MPa	轮印面积/m ²
B737-800	790.04	0.950	187.6	1.47	0.128
B767-300	1597.50	0.950	189.7	1.38	0.137
B777-200	2993.70	0.954	238.0	1.28	0.186

为确保沥青基隔离层的材料设计与施工工艺的合理性，明确沥青基隔离层对结构产生的效应，本文通过在工程现场埋设传感器，利用 ABAQUS 软件进行三维有限元建模，分析得到沥青基隔离层的工程应用效果。选取 B737-800、B767-300、B777-200 三种代表机型作为计算荷载，三种代表机型的荷载参数总结如表 4。计算方法如下：

$$L = \sqrt{\frac{A}{0.5227}}, \quad a = 0.8712 L, \quad b = 0.6 L;$$

- A——飞机单轮轮印面积(m²);
- L——组合型轮印的长度(m);
- a——矩形轮印长度(m);
- b——矩形轮印宽度(m)。

5. 板底冲刷下沥青基隔离层对结构荷载响应的影响

5.1. 沥青基隔离层对面层拉应力的影响分析

板角和板边是冲刷脱空的敏感区域，在板底设置沥青基隔离层可以提高基层的抗冲刷性能，避免冲刷脱空病害。基于此，计算三种机型设置沥青基隔离层与无隔离层时面层的最大拉应力。

为了更直观地分析设置前后受力产生的效果，计算设置前后面层最大拉应力的减小百分比，结果如图 1 和图 2 所示。

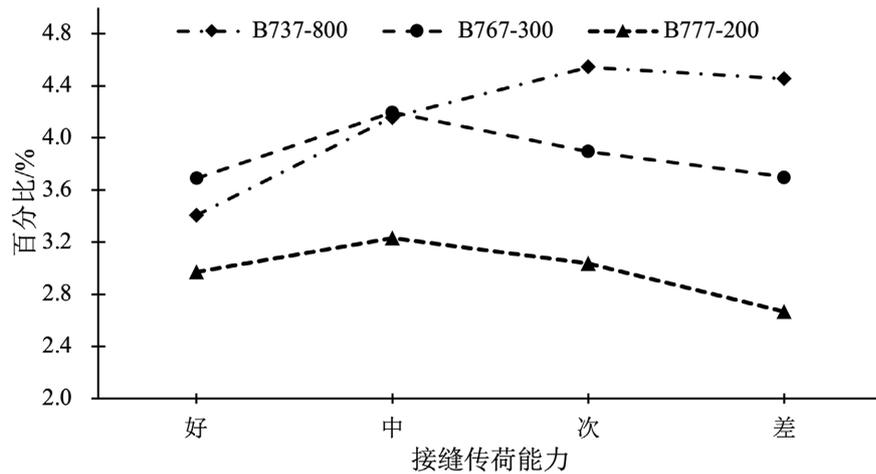


Figure 1. Percentage reduction of maximum tensile stress in the surface layer with asphalt-based barrier installed at the critical load level at the slab edge relative to the de-embedded case
图 1. 板边临界荷位下设置沥青基隔离层相对于脱空情况面层最大拉应力减少百分比

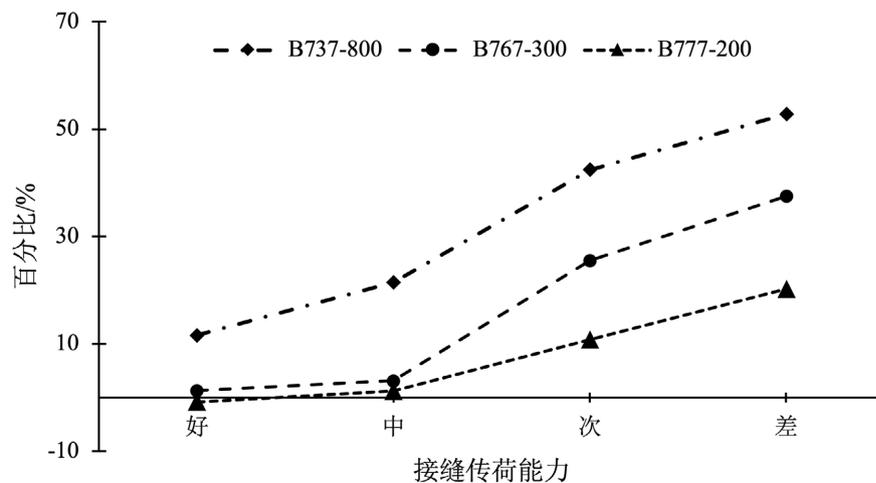


Figure 2. Percentage reduction of maximum tensile stress in the surface layer with asphalt-based barrier installed at the slab angle loading level relative to the devoided case
图 2. 板角荷位下设置沥青基隔离层相对于脱空情况面层最大拉应力减少百分比

根据上图的结果，可以得出以下结论：设置沥青基隔离层可以显著降低底层的最大拉伸应力，降幅受荷位和接缝传荷能力的影响。

当负荷作用于板的边缘处时，设置沥青基隔离层可使在底层脱空的情况下，表层的拉伸应力降低 2.6% 到 4.5%。

当负荷作用于板的角部时，设置沥青基隔离层对表层的最大拉伸应力减小幅度受接缝传荷能力的影响较大：如果接缝传荷能力较好，那么最大拉伸应力的减小幅度较小；而如果接缝传荷能力较差，最大拉伸应力的减小幅度可达 20% 以上。

此外，当底层出现脱空并且接缝传荷能力差时，在 B737-800 飞机轮胎荷载作用下，板的角部最大拉伸应力可达 3.371 MPa；在 B767-300 飞机轮胎荷载作用下，板的角部最大拉伸应力可达 3.297 MPa。但是，设置沥青基隔离层能够避免底层脱空，使 B737-800 和 B767-300 飞机轮胎荷载作用下板的角部最大拉伸应力分别降至 1.59 MPa 和 2.062 MPa，从而降低了道路出现断裂的可能性。

5.2. 沥青基隔离层对板顶弯沉的影响

底层脱空会导致底板失去支撑，从而增加了板顶在荷载作用下的弯曲。假设混凝土板的接缝挠度传荷能力不受结构参数和荷载参数的影响，更大的板顶弯曲表示受荷板和相邻非受荷板之间的弯曲差异更大。这种差异增大意味着接缝承受的剪切力也更大，在反复荷载的情况下，接缝传荷能力会更快地减小。此外，相邻板之间的弯曲差异增大，当机轮荷载从受荷板移动到非受荷板时，产生的冲击力也会更大，这更容易导致板边接缝的破裂和板角的剥落损害。计算设置沥青隔离层与无隔离层且板底冲刷脱空时板边中部和板角处在 B737-800 主起落架作用下的板顶最大弯沉值，结果如表 5 所示。

Table 5. Maximum bending subsidence of the top of the plate under the action of the main landing gear of B737-800 (mm)
表 5. B737-800 主起落架作用下板顶最大弯沉(mm)

荷位	接缝传荷能力	无隔离层 + 脱空	设置沥青基隔离层	板底脱空
横缝	好	0.495	0.500	0.513
	中	0.528	0.540	0.567
	差	0.583	0.601	0.650
	次	0.607	0.626	0.688
纵缝	好	0.452	0.456	0.468
	中	0.484	0.494	0.512
	差	0.526	0.541	0.580
	次	0.546	0.563	0.609
板角	好	0.566	0.579	0.628
	中	0.656	0.676	0.917
	差	0.780	0.844	1.573
	次	0.831	0.905	1.884

为了更直观地分析飞机荷载下设置沥青基隔离层对板顶最大弯沉的影响，计算设置沥青基隔离层与无隔离层、无隔离层且板底脱空相比，板顶最大弯沉的增加和减小百分比，结果如表 6 所示。

Table 6. Percentage increase in maximum bending subsidence at the top of the slab by installing an asphalt-based barrier (%)
表 6. 设置沥青基隔离层对板顶最大弯沉增大百分比(%)

荷位	接缝传荷能力	设置隔离层/无隔离层	设置隔离层/无隔离层 + 脱空
横缝	好	1.06	-2.50
	中	1.90	-3.75
	差	2.83	-7.09
	次	3.06	-8.21
纵缝	好	1.17	-2.42
	中	2.16	-5.04
	差	3.05	-8.10
	次	3.23	-9.81
板角	好	2.35	-8.53
	中	3.10	-35.61
	差	8.07	-86.42
	次	8.93	-108.15

根据上表的计算结果,可以得出以下结论:与没有隔离层的情况相比,仅当板角承受负荷并且接缝传荷能力较差时,设置沥青基隔离层会导致板顶的最大弯曲增加约 8%,在其他情况下,增加幅度小于 3.5%。这表明设置隔离层对板顶的弯曲影响较小。相对于没有隔离层并且底部出现脱空情况的情况,设置沥青基隔离层会导致板顶的最大弯曲减小幅度普遍在 5%以上,在板角部位接缝传荷能力较差时,减小幅度高达 35%至 108%。

基于以上分析,可以得到以下两点结论:当接缝传荷能力较好时,无论是否存在底部脱空情况,设置沥青基隔离层对板顶的弯曲影响微弱。然而,当接缝传荷能力较差且底部存在冲刷脱空情况时,设置沥青基隔离层由于避免了底部脱空,可以显著减少板角部位的板顶最大弯曲值。在实际道路使用中,接缝能力的丧失和底部脱空通常同时发生,因此在道路结构中设置沥青基隔离层可以有效避免板角部位因弯曲量过大而导致的接缝传荷能力进一步丧失和非受荷板的板角部位在车轮荷载冲击下的颗粒脱落现象。

综合以上内容,采用研究中提出的材料设计和施工方法进行水稳沥青基隔离层的铺设可以取得良好的工程效果,进一步证明了研究中提出的材料和施工技术标准的合理性。

6. 结论

本论文旨在为沥青基隔离层的工程应用提供技术支撑,重点对沥青基隔离层的材料和施工方法展开研究。通过室内试验,明确了沥青基隔离层的材料特性、表观性能,进而提出了隔离层原材料的技术指标和具体要求,给出了详细的施工方法。再利用 ABAQUS 软件进行三维有限元建模及数值模拟,探究了沥青基隔离层对道面结构产生的效应,进一步确保了研究中所提出的材料设计与施工方法的合理有效性。结果发现:

1) 当考虑板底冲刷脱空时,设置沥青基隔离层可以显著改善道面混凝土面层拉应力,降低板角部位脱空断裂的风险,减少板边接缝处产生破碎的可能性。

2) 以课题中提出的材料设计和施工方法进行水稳沥青基隔离层的铺设,能够取得较好的工程效果,研究中提出的材料和施工技术标准具有合理性。

参考文献

- [1] 余四新. 设层间功能层的水泥混凝土路面基层应力分析与结构设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2009.
- [2] Goldbeck, A.T. (1917) Friction Tests of Concrete on Various Sub-Bases. *Journal of Agricultural Research*, **13**, 239-245. <https://doi.org/10.14359/15878>
- [3] Friberg, B.F. 1954Frictional Resistance under Concrete Pavements and Restraint Stress in Long Reinforced Slabs. *Proceedings of the Thirty-Third Annual Meeting of the Highway Research Board*, Washington, DC, 12-15 January 1954, 33.
- [4] Timms, A.G. (1964) Evaluation Subgrade Friction-Reducing Mediums for Rigid Pavements. *Highway Research Record*, **47**, 28-38.
- [5] Lee, S.W. (2000) Characteristics of Friction between Concrete Slab and Base. *Ksce Journal of Civil Engineering*, **4**, 265-275. <https://doi.org/10.1007/BF02823975>
- [6] Lim, J.S., Park, M.G., Nam, Y.K., *et al.* (2009) Investigation of Friction Characteristics between Concrete Slab and Subbase Layers. *Bmc Veterinary Research*, **10**, 123-123.
- [7] Jeong, J.H., Park, J.Y., Lim, J.S., *et al.* (2014) Testing and Modelling of Friction Characteristics between Concrete Slab and Subbase Layers. *Road Materials & Pavement Design*, **15**, 114-130. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.863161>
- [8] 燕翔. 机场刚性道面水稳沥青基隔离层施工技术研究[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(16): 57-58.
- [9] Rufino, D. and Roesler, J. (2006) Effect of Slab-Base Interaction on Measured Concrete Pavement Responses. *Journal of Transportation Engineering*, **132**, 425-434. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:5\(425\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:5(425))