

企口接缝在刚性道面横向施工缝中应用的可行性研究

江圣泽¹, 盛昀²

(1.民航机场建设工程有限公司, 天津 300456; 2.中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307)

摘要:以某4F机场三期扩建工程机坪联络道道面为例,基于Winkler地基理论分别建立企口接缝和传力杆接缝形式的混凝土板有限元模型,分析道面板在不同温度和不同基层顶面反应模量下不同接缝形式的传荷系数,研究企口接缝在刚性道面横向施工缝中应用的可行性。结果表明,在不考虑温度变化的条件下,两种构造形式接缝在不同基层顶面反应模量下的传荷系数均大于规范要求,荷载传递能力为“优”;考虑温度的条件下,增大基层顶面反应模量并不会对传荷系数产生较大影响,企口形式接缝同样具有较好的传荷能力;对于非主轮作用区道面,横向施工缝采用企口接缝构造可达到良好的传荷效果。

关键词:公路;刚性道面;企口接缝;横向施工缝;传荷系数;机场道面

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)01-0072-05

机场道面是飞行区供飞机起降、滑行、停放的重要载体。对于刚性水泥混凝土道面,板块在飞机运行过程中的传荷能力是评价道面结构性能的重要参数^[1-2]。传荷能力决定受荷载板体向未受荷载相邻板体传递应力的能力^[3-4]。与普通水泥公路不同,飞机接地后其前后起落架沿跑道和滑行道中心线滑行,不可随意转向和变道。飞机主起落架对板块产生的荷载影响范围随机型大小和起落架构型发生变化,受荷仓位板块直接承受飞机荷载,而受荷仓位外侧非荷载影响区域板体均不直接承受机轮的冲击和碾压。

道面荷载主要通过接缝传递。道面接缝分为横向接缝和纵向接缝。现有机场刚性道面纵向接缝采用设置拉杆企口接缝和不设拉杆企口接缝两种形式,横向接缝为道面浇筑完成后由切缝机切割产生的假缝和施工时产生的施工缝。横向施工缝多采用设置传力杆的构造形式,依靠钢筋本身抗拉的力学性能使板块之间保持密闭的工作状态^[5],保障道面板受飞机荷载时的传荷能力。

李晔等使用ANSYS软件对机场道面企口接缝应力进行分析,发现当企口接缝紧密结合时,道面板受力均匀,企口在板与板之间起活性铰的作用,将荷载作用均匀传向相邻板体,应力水平均匀分布,在企口接缝槽口部位不会出现弯拉应力集中现象^[6]。徐

祥瑞认为企口接缝紧密结合的情况下,企口接缝是一种良好的结构形式^[7]。Tabatabaie-Raissi A. M.、Rice J. L.、Novak J.等认为企口接缝是一种能较好传递荷载的接缝形式^[8-10]。上述研究表明,企口接缝拥有良好的传荷能力。

由于跑道中受起落架荷载直接作用区域外的刚性道面板不直接承受机轮冲击和碾压,非主轮作用区域的道面板在满足飞机运行要求的情况下相邻板体间具有足够的荷载传递能力即可,该区域的道面横向施工缝不必采用同主轮直接作用区相同的构造设计。另外,企口接缝因为其构造特点,施工时无须设置传力杆,可节省钢筋材料,节约施工成本。本文对企口接缝在非主轮作用区域道面横向施工缝中的应用进行可行性研究。

1 研究思路

使用有限元分析软件建立刚性道面混凝土板三维实体模型,模型尺寸参照某4F机场三期扩建工程机坪联络道道面结构尺寸,材料参数由工程实验室根据规范要求通过试验获取。模型建立2种接缝形式的道面板体,分别为企口接缝和传力杆接缝。

根据道面使用过程中的实际情况对模型施加荷载。该机场三期扩建工程新建机坪联络道宽度为107.5 m,设计最大运行机型为B747。文献[11]的

研究表明,B747 机轮荷载对道面产生的最大位移断面弯沉影响区域在 50 m 范围内。因此,以 50 m 范围为界限,将宽度为 107.5 m 的机坪联络道划分为机轮荷载作用区和非荷载作用区(见图 1)。

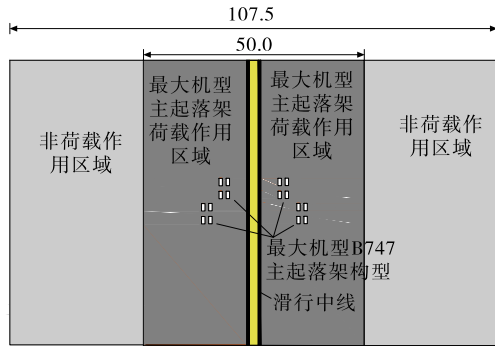


图 1 机轮荷载作用区域划分(单位:m)

所研究的板体位于主起落架直接冲击和碾压以外的区域,考虑到机场运行保障车辆不会行驶在该区域的板面上,主要考虑大自然变化下的温度应力,即对模型施加温度荷载。若企口形式横向接缝的传荷能力与传力杆接缝的传荷能力一致或优于传力杆接缝,则说明非主轮直接作用区域横向施工缝设置企口接缝可行。

接缝传荷能力是水泥道面结构设计和性能评价的关键指标之一^[12-13]。采用《民用机场道面评价管理技术规范》中评价混凝土道面传荷能力的方法,在模型板边设置直径为 30 cm 圆形区域,通过模拟落锤式弯沉仪的落锤冲击道面产生的弯沉值,由式(1)计算受荷板体与未受荷板体间的弯沉比传递系数,评价接缝的荷载传递能力,分析企口形式接缝在道面横向施工缝中应用的可行性,并对企口接缝进行优化设计。

$$C_{LTE\delta} = \frac{D_{unload}}{D_{load}} \quad (1)$$

式中: $C_{LTE\delta}$ 为弯沉比传递系数(%); D_{unload} 、 D_{load} 分别为未受荷板、受荷板距离接缝 150 mm 处传感器的实测弯沉(μm)。

2 数值仿真分析

基于 Winkler 地基理论建立有限元模型,整体结构为两块相接的混凝土板,板体尺寸为 5 m × 5 m,相邻板块接缝形式为企口接缝和传力杆接缝(见图 2、图 3)。企口尺寸与传力杆尺寸参照设计图纸选取。

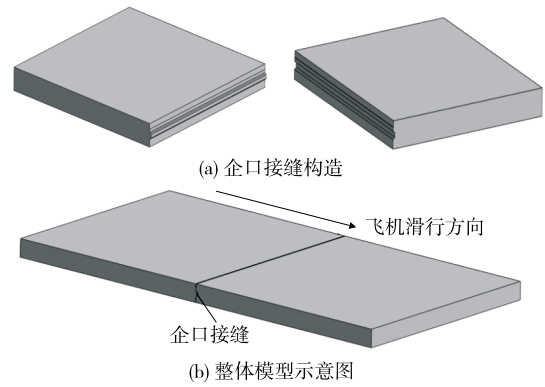


图 2 企口接缝示意图

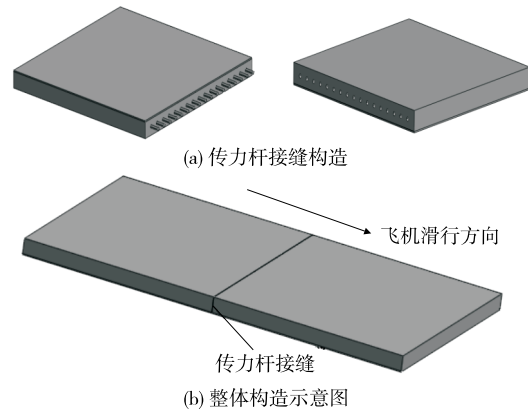


图 3 传力杆接缝示意图

建模时,假设两种模型计算所用材料均为线弹性材料,混凝土弹性模量为 40 GPa,泊松比为 0.2,线膨胀系数为 $1.05 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,导热系数为 $1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;传力杆采用直径 38 mm 的钢筋,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.15,线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,导热系数为 $45 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;嵌缝材料弹性模量为 10 MPa,泊松比为 0.4,线膨胀系数为 $0.25 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,导热系数为 $0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

根据文献[14]的研究成果,模型荷载施加区域网格尺寸取 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$,其余区域网格尺寸取 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$,可保证计算精准度和效率。模拟单元采用八节点六面体单元,模型边界条件参照规范将板边设置为自由边界,板底边界参照 Winkler 地基弹性薄板设置。

由于刚性道面在温度变化条件下传荷能力会发生变化,对模型考虑两种情况:1) 考虑到《民用机场道面评价管理技术规范》并未明确要求落锤式弯沉检测应考虑温度变化对道面传荷系数的影响,不考虑温度变化,模拟计算接缝的传递系数。2) 随着一年四季的温度变化,实际刚性道面板体由于热胀冷

缩与相邻板体之间的传荷系数发生变化,对模型板体表面分别施加 7 种温度荷载,分别为 0℃、10℃、20℃、30℃、40℃、50℃、60℃,计算温度变化时接缝的传荷系数。

对于第二种情况,随着温度的增加,道面板逐渐产生翘曲应力^[15-17],板体之间相互挤压,传荷系数发生变化。板内翘曲应力按式(2)计算^[18]。

$$\sigma_{tm} = \frac{E\alpha h T_g}{2} B_x \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; α 为线膨胀系数; h 为道面板厚度; T_g 为道面温度梯度,按式(3)计算; B_x 为综合温度翘曲应力和内应力作用的温度应力系数。

$$T_g = \frac{T(0,t) - T(h,t)}{h} \pi \quad (3)$$

式中: $T(0,t)$ 为某时刻路表面的温度; $T(h,t)$ 为某时刻路面下深度 h 处的温度; h 为路面某一点沿深度方向与路表面的距离。

表 1 为机场刚性道面的最大温度梯度标准值。该机场位于中国中部地区,属于 II 区域,最大温度梯度取 88℃/m。

表 1 各地区机场刚性道面的最大温度梯度标准值

公路自然区划	最大温度梯度/(℃·m ⁻¹)
Ⅶ	93~98
Ⅵ、Ⅳ	86~92
Ⅲ	90~95
Ⅱ、Ⅴ	83~88

3 不同接缝形式对比分析

考虑地基承载力在机场运行后期的变化,结合温度变化情况,在基层顶面反应模量分别为 80 MN/m³、90 MN/m³、100 MN/m³、110 MN/m³ 和 120 MN/m³ 的条件下进行分析。图 4 为不考虑温度变化时不同形式接缝传荷系数随基层顶面反应模量的变化。由图 4 可知:1) 采用企口接缝构造的相邻板块之间传荷系数最小为 88%,最大为 89%;采用传力杆接缝构造的相邻板块之间传荷系数最小为 88%,最大为 89%。两种构造形式接缝在不同基层顶面反应模量下的传荷系数均大于规范要求(80%),荷载传递能力属于“优”。2) 传荷系数随基层顶面反应模量的增大而减小,但反应模量增大对传荷系数并不会产生较大影响,企口接缝和传力杆接缝在不考虑温度时都具有较好的传荷能力。

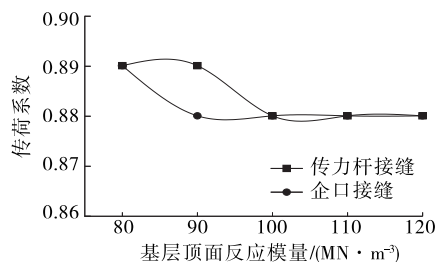


图 4 不考虑温度变化时接缝传荷系数随基层顶面反应模量的变化

图 5、图 6 为考虑温度荷载时不同基层顶面反应模量下两种构造形式接缝传荷系数的变化。

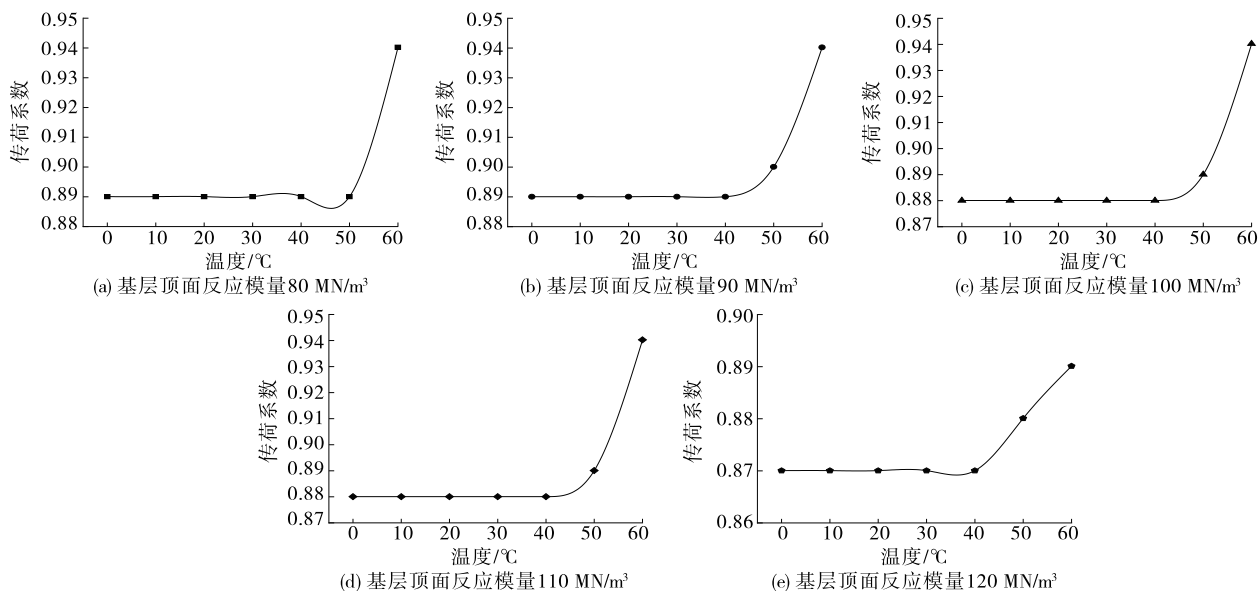


图 5 考虑温度荷载时不同基层顶面反应模量下传力杆接缝的传荷系数

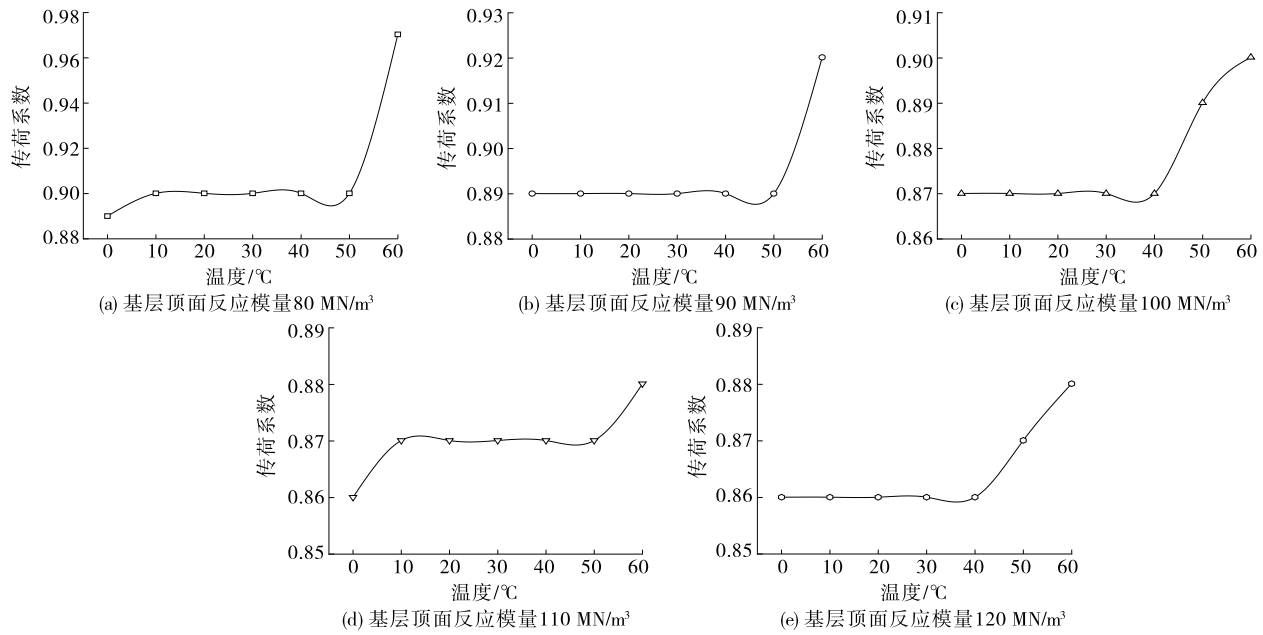


图 6 考虑温度荷载时不同基层顶面反应模量下企口接缝的传荷系数

由图 5、图 6 可知:板面温度为 0~40 °C 的条件下,基层顶面反应模量为 80 MN/m³时,传力杆接缝的传荷系数约为 0.89,企口接缝的传荷系数约为 0.89;基层顶面反应模量为 90 MN/m³时,传力杆接缝的传荷系数约为 0.89,企口接缝的传荷系数约为 0.89;基层顶面反应模量为 100 MN/m³时,传力杆接缝的传荷系数约为 0.88,企口接缝的传荷系数约为 0.87;基层顶面反应模量为 110 MN/m³时,传力杆接缝的传荷系数约为 0.88,企口接缝的传荷系数约为 0.87;基层顶面反应模量为 120 MN/m³时,传力杆接缝的传荷系数约为 0.87,企口接缝的传荷系数约为 0.86。板面温度为 50~60 °C 的条件下,基层顶面反应模量为 80 MN/m³时,传力杆接缝最低传荷系数和最高传荷系数分别为 0.89、0.94,企口接缝最低传荷系数和最高传荷系数分别为 0.90、0.97;基层顶面反应模量为 90 MN/m³时,传力杆接缝最低传荷系数和最高传荷系数分别为 0.90、0.94,企口接缝最低传荷系数和最高传荷系数分别为 0.89、0.92;基层顶面反应模量为 100 MN/m³时,传力杆接缝最低传荷系数和最高传荷系数分别为 0.89、0.95,企口接缝最低传荷系数和最高传荷系数分别为 0.89、0.90;基层顶面反应模量为 110 MN/m³时,传力杆接缝最低传荷系数和最高传荷系数分别为 0.89、0.94,企口接缝最低传荷系数和最高传荷系数分别为 0.87、0.88;基层顶面反应模量为 120 MN/m³时,传力杆接缝最低传荷系数和最高传荷系数分别为

0.88、0.89,企口接缝最低传荷系数和最高传荷系数分别为 0.87、0.88。混凝土道面板在气温升高时板体受热膨胀,相邻板体间的贴合程度增强,荷载传递效率提高。企口接缝形式板块在不同基层顶面反应模量下的传荷系数均随着温度的升高而增大。而基层顶面反应模量提高会使道面结构支撑得到加强,板底弯拉应力和板面弯沉值减小,从而降低受荷板与未受荷板之间的位移差,两种接缝形式的板体传荷系数减小。企口接缝在不同温度和不同基层顶面反应模量下的传荷系数均大于规范要求,传荷效果良好。

综上,不考虑温度的条件下,企口接缝的传荷效率良好;考虑温度的条件下,企口接缝同样具有良好的传荷效率;两种环境下,基层顶面反应模量变化对道面接缝传荷系数的影响均较小。对于该机场非主轮直接作用区混凝土板体,可采用企口接缝作为施工横缝。

4 结论

本文参照某 4F 机场飞行区三期扩建工程机坪联络道道面结构,分别建立企口接缝和传力杆接缝形式的混凝土板有限元模型,通过改变板面温度,分析道面板在 5 种基层顶面反应模量下的传荷系数,研究企口接缝应用于机场刚性道面横向施工缝的可行性。结论如下:

(1) 在不考虑温度的条件下,采用企口接缝构

造,相邻板块之间的传荷系数最小为 88%,最大为 89%;采用传力杆接缝构造,相邻板块之间的传荷系数最小为 88%,最大为 89%。两种接缝构造在不同基层顶面反应模量下的传荷系数均大于规范要求(80%),荷载传递能力属于“优”。基层顶面反应模量增大对接缝传荷系数并不会产生较大影响,企口接缝在不考虑温度时具有较好的传荷能力。

(2) 考虑温度的条件下,两种接缝的传荷系数随基层顶面反应模量的增大略微减小,但反应模量增大对传荷系数并不会产生较大影响,企口接缝具有较好的传荷能力。企口接缝的力学性能与传力杆接缝相近,均可达到良好的传荷效果,非主轮作用区道面的横向施工缝可采用企口接缝构造。

(3) 该机场机坪联络道中非主起落架荷载作用区可采用企口接缝作为横向施工缝。

参考文献:

- [1] ZHANG J, XU W, GAO P W, et al. Full-scale test on emergency pavement repair under aeroplane loading[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2022, 1-13.
 - [2] WANG K F, WANG K, ZHU Y S, et al. Study of structural characteristics of asphalt overlays on airport pavement with damaged load transfer efficiency of joints[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2022, 2676(4): 27-40.
 - [3] 张献民, 李梦晓, 陈宇, 等. 考虑接缝传荷作用的机场水泥道面板边应力折减分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(6): 61-66.
 - [4] SADEGHI V, HESAMI S. Investigation of load transfer efficiency in jointed plain concrete pavements (JPCP) using FEM[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 11(3): 245-252.
 - [5] 高玉换. 基于机场水泥混凝土道面板传荷性能的传力杆设计研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2015.
 - [6] 李晔, 姚祖康, 孙旭毅, 等. 水泥混凝土机场道面企口接缝应力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 697-701.
 - [7] 徐祥瑞. 机场刚性道面接缝设计研究[J]. 技术与市场, 2017, 24(3): 49-51.
 - [8] TABATABAIE-RAISSI A M. Structural analysis of concrete pavement joints[M]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1978.
 - [9] RICE J L. Keyed joint performance under heavy load aircraft[J]. Transportation Engineering Journal of ASCE, 1972, 98(4): 931-939.
 - [10] NOVAK J, KOHOUTKOVÁ A, KRÍSTEK V, et al. Precast concrete pavement-systems and performance review[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 236: 012030.
 - [11] 张献民, 董倩, 吕耀志. 飞机主起落架构型对道面力学响应的影响[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 675-681.
 - [12] 谈至明, 赵鸿铎, 张兰芳. 机场规划与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
 - [13] 杨爱军, 朱立国. 温度对机场水泥道面接缝传荷能力的影响实测分析[J]. 城市道桥与防洪, 2018(12): 168-170+22.
 - [14] 杨永刚. 水泥混凝土修补道面结构参数敏感性分析[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 79-84.
 - [15] 曾惠珍. 温度作用下水泥面板的应力特征[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2020, 33(1): 60-66.
 - [16] 杨飞, 陈家豪. 太阳光反射涂层对水泥路面温度特性及城市环境影响[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 37-41.
 - [17] 高伟, 李秀凤, 崔巍. 基于多板协同受力的前嫩公路水泥混凝土路面应力有限元分析[J]. 公路交通科技, 2019, 36(4): 1-7+14.
 - [18] 林佛光. 机场新旧道面衔接处技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- 收稿日期: 2023-03-08
- *****
- (上接第 71 页)
- [4] 何俊辉, 陈海涛, 赵艳娜, 等. 基于灰关联法的沥青路面抗滑性能影响因素研究[J]. 中外公路, 2020, 40(6): 47-52.
 - [5] 植豪文. 基于级配设计的沥青路面抗滑性能影响因素研究[J]. 公路与汽运, 2017(3): 73-75+79.
 - [6] 陈伟娣, 肖秋明. 基于灰色理论的山区高速公路造价估算[J]. 公路与汽运, 2019(4): 172-176.
 - [7] 朱洪洲, 廖亦源. 沥青路面抗滑性能研究现状[J]. 公路, 2018, 63(1): 35-46.
 - [8] 黄伟. 湿热环境下超薄磨耗层配比设计及抗滑性能研究[J]. 公路与汽运, 2021(1): 87-90.
- 收稿日期: 2023-01-16