

超重荷载厂区道路水泥混凝土路面改造探讨

庄一春¹, 吴涛², 赵勇杰²

[1. 上海振华重工(集团)股份有限公司南通分公司, 江苏 南通 226017; 2. 南通市规划设计院有限公司, 江苏 南通 226001]

摘要: 以上海振华重工(集团)股份有限公司南通分公司厂区道路为研究对象, 针对现有24 cm厚水泥混凝土路面在1 000 kN超重荷载作用下的严重损坏问题, 提出了维修加固方案。通过理论分析和计算, 评估了现有路面的承载能力, 设计了钢筋混凝土路面结构, 并对比了高强度混凝土和钢纤维混凝土的性能, 同时提出了注浆封固技术以修复板下脱空问题。研究表明, 采用钢筋混凝土路面结构可显著提高路面的承载能力和使用寿命, 掺加钢纤维的混凝土路面性价比更优。

关键词: 超重荷载; 水泥混凝土路面; 钢筋混凝土; 钢纤维混凝土; 注浆封固; 路面设计

中图分类号: U416.2; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0039-05

Discussion on Reconstruction of Cement Concrete Pavement for Overloaded Industrial Plant Roads

ZHUANG Yichun¹, WU Tao², ZHAO Yongjie²

[1. Nantong Branch of Shanghai Zhenhua Heavy Industries (Group) Co., Ltd., Nantong 226017, China; 2. Nantong Planning and Design Institute Co., Ltd., Nantong 226001, China]

Abstract: Taking the plant roads in the Nantong Branch of Shanghai Zhenhua Heavy Industries (Group) Co., Ltd. as the research object, aiming at the severe damage of the existing 24-cm thick cement concrete pavement under an overweight load of 1,000 kN, the repair and reinforcement schemes are proposed. Through the theoretical analysis and calculations, the load bearing capacity of the existing pavement is evaluated, and a reinforced concrete pavement structure is designed. And the performances of high-strength concrete and the steel fiber concrete are compared. At the same time, the grouting sealing technology is proposed to fix the problem of voids under the plate. The results show that the use of reinforced concrete pavement structure can significantly improve the bearing capacity and service life of the pavement. The concrete pavement with added steel fibers offers better cost performance.

Keywords: overload; cement concrete pavement; reinforced concrete; steel fiber concrete; grouting sealing; pavement design

0 引言

随着工业生产的快速发展, 厂区内重载车辆的使用日益频繁, 对厂区道路造成了一定破坏, 特别是抬车荷载高达1 000 kN的超重车辆对路面的破坏尤为严重。以上海振华重工(集团)股份有限公司南通分公司厂区道路作为典型案例, 其24 cm厚水泥混凝土路面已出现多处开裂, 严重影响道路的使用和安全。本研究旨在分析现有路面病害原因, 提出有效的维修加固方案, 以提高路面的承载能力和使用

寿命。

国内外学者对超重荷载路面的研究主要集中在材料性能改进和结构设计优化两个方面。国外研究多侧重于新型复合材料在路面中的应用, 而国内研究则更多关注传统材料的性能提升和结构优化。本研究结合国内外研究成果, 针对具体工程问题, 提出了切实可行的解决方案。

1 现状分析

上海振华重工南通分公司厂区现有路面为24 cm厚水泥混凝土结构, 基层为30 cm二灰碎石, 在长期承受超重荷载作用下已出现严重损坏。路面多处开裂(见图1、图2), 特别是板缝开裂现象突出, 这些裂缝不仅影响路面美观, 更降低了路面的整体强度和稳定性。

收稿日期: 2025-03-28

作者简介: 庄一春(1995—), 男, 学士, 工程师, 从事工程设计及管理工作。

通信作者: 吴涛(1974—), 男, 学士, 正高级工程师, 从事道路与桥梁工程设计工作。电子邮箱: 562539293@qq.com



图1 现状水泥混凝土路面现场照片



图2 抬车现场照片

通过现场调查和数据分析,发现主要问题在于现有路面强度、厚度不足以承受频繁的超重荷载^[1]。单个抬车荷载高达1 000 kN,两个车轴,单轴500 kN,每个轴各两个实心橡胶轮胎,每个轮胎接触面约0.2 m×0.6 m。以此估算压应力为 $(500/2)/(0.2 \times 0.6) = 2\,083$ kPa。这种极高的局部压力和剪切力导致路面损坏加速。

2 路面结构计算

2.1 路面结构设计方法

根据厂区实际情况,单日抬车交通量计2次,不考虑增长,设计使用年限为20 a。

若按水泥混凝土路面疲劳断裂理论设计^[2-4],需要将实际轴载换算为标准轴载(100 kN),再计算累计交通量。换算公式为:

$$N = \sum (P_i / P_0)^m \times n_i$$

式中: P_i 为实际轴载; P_0 为标准轴载(100 kN); m 为轴载换算指数(取16); n_i 为实际轴载作用次数。

计算得20 a累计交通量达 10^{15} ,这显然不符合实际交通荷载对路面的破坏作用。实际抬车荷载很大,但作用次数很少,因此还需要结合考虑混凝土路面的强度破坏才更符合实际情况^[3-4]。

部分材料参数见表1。

2.2 应力计算

(1)按《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)附录B.2.4、B.2.2的方法^[5]计算荷载应力

表1 部分材料参数表

结构层	厚度/cm	回弹模量/MPa	泊松比
面层(C50)	32	34 000	0.15
基层(C15)	10	22 000	0.20
底基层(注浆)	30	1 500	0.35
路床顶		100	

混凝土面层板的截面弯曲刚度为 $D_c = E_c h_c^3 / 12(1 - \nu^2) = 34\,000 \times 0.32^3 / 12(1 - 0.15^2) = 94.98$ MN·m。

按公式(B.2.4-1)至(B.2.4-4)计算板底综合回弹模量:

$$E_x = \sum_{i=1}^n (h_i^2 E_i) / \sum_{i=1}^n h_i^2$$

$$= (0.3^2 \times 1\,500 + 0.1^2 \times 22\,000) / (0.3^2 + 0.1^2)$$

$$= 3\,550 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 0.86 + 0.26 \ln h_x = 0.86 + 0.26 \times \ln(0.3 + 0.1) = 0.62$$

$$E_t = \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^\alpha E_0 = (3\,550 / 100)^{0.62} \times 100 = 914 \text{ MPa}$$

混凝土面层板的相对刚度半径为:

$$r = 1.21 (D_c / E_t)^{1/3} = 1.21 \times (94.98 / 914)^{1/3} = 0.57 \text{ m}$$

设计轴载在四边自由板临界荷位处产生的荷载应力为:

$$\sigma_{ps} = 1.47 \times 10^{-3} r^{0.70} h_c^{-2} P_s^{0.94} = 1.47 \times 10^{-3} \times 0.57^{0.70} \times 0.32^{-2} \times 500^{0.94} = 3.34 \text{ MPa}$$

标准轴载在四边自由板临界荷位处产生的荷载应力为:

$$\sigma_{ps} = 1.47 \times 10^{-3} r^{0.70} h_c^{-2} P_s^{0.94} = 1.47 \times 10^{-3} \times 0.57^{0.70} \times 0.32^{-2} \times 100^{0.94} = 0.73 \text{ MPa}$$

按附录B.2.6的方法计算,最重轴载在四边自由板临界荷位处产生的荷载应力为:

$$\sigma_{p, \max} = k_f k_c \sigma_{ps} = 0.87 \times 1.15 \times 3.34 = 3.34 \text{ MPa}$$

(2)按《公路水泥混凝土路面设计规范》附录B.2.1的方法计算荷载疲劳应力

在面层板临界荷位处产生的荷载疲劳应力(标准轴载累计交通量以极重 $N_e = 2.5 \times 10^8$ 计),计算 $k_f = N_e^{0.057} = 3.01$ 。

$$\sigma_{pr} = k_f k_c \sigma_{ps} = 0.87 \times 3.01 \times 1.0 \times 0.73 = 1.91 \text{ MPa}$$

(3)按《公路水泥混凝土路面设计规范》附录B.3.3及B.3.2的方法计算最大温度应力

$$\text{参数 } t = L / 3r = 6 / (3 \times 0.57) = 3.57。$$

混凝土面层板的温度翘曲应力系数 C_L 为:

$$C_L = 1 - (\sinh t \times \cosh t + \cosh t \times \sinh t) / (\cosh t \times \sinh t + \sinh t \times \cosh t) =$$

$$1 - (\sinh 3.57 \times \cosh 3.57 + \cosh 3.57 \times \sinh 3.57) / (\cosh 3.57 \times \sinh 3.57 + \sinh 3.57 \times \cosh 3.57) = 1.07$$

综合温度翘曲应力和内应力的温度应力系数 B_L 为:

$$B_L = 1.77e^{-4.48h_c C_L} - 0.131 (1 - C_L) = 1.77e^{-4.48 \times 0.32 \times 1.07} - 0.131 (1 - 1.07) = 0.46$$

最大温度梯度时混凝土面层板最大温度应力为:

$$\sigma_{t, \max} = \alpha_c E_c h_c T_g B_L / 2 = 9 \times 10^{-6} \times 34\,000 \times 0.32 \times 85 \times 0.46 / 2 = 1.91 \text{ MPa}$$

(4) 按《公路水泥混凝土路面设计规范》附录 B.3.4 及 B.3.1 的方法计算温度疲劳应力(回归系数按 II 类公路自然区划选取)

温度疲劳应力系数为:

$$k_t = (f_r / \sigma_{t, \max}) \times [a_t \times (\sigma_{t, \max} / f_r)^{b_t} - c_t] = (5.0 / 1.91) \times [0.828 \times (1.91 / 5.0)^{1.323} - 0.041] = 0.50$$

在面层板临界荷位处产生的温度疲劳应力为:

$$\sigma_{tr} = k_t \sigma_{t, \max} = 0.50 \times 1.91 = 0.95 \text{ MPa}$$

2.3 荷载组合及结论

荷载疲劳应力与温度疲劳应力之和 $1.91 + 0.95 = 2.86 \text{ MPa}$, 小于混凝土弯拉强度标准值, 符合规范要求; 最大荷载应力与最大温度应力之和与可靠度的乘积 $(3.34 + 1.91) \times 1.1 = 5.77 \text{ MPa}$, 显示这种组合下荷载对路面的破坏作用更大, 有必要加大混凝土面板厚度或提高混凝土弯拉强度标准值, 以满足最大荷载应力与最大温度应力组合要求。

32 cm 厚度水泥混凝土面层已是较大尺寸, 一味地增加厚度对施工要求很高; 采用双层双向配筋的钢筋混凝土结构或考虑在水泥混凝土中掺入钢纤维, 可以显著提高路面的抗拉强度和韧性。

3 水泥混凝土路面边、角破坏理论研究及处治方法

3.1 边角破坏机理

水泥混凝土路面的边角区域由于受到较大的集中应力和剪切力, 容易产生破坏^[6]。边角破坏的主要机理包括:

(1) 集中应力: 在荷载作用下, 边角区域应力集中, 导致局部应力超过混凝土的抗拉强度, 产生裂缝。

(2) 剪切力: 边角区域受到较大的剪切力, 容易产生剪切裂缝。

(3) 温度应力: 温度变化引起的收缩和膨胀应力在边角区域集中, 导致裂缝产生。

3.2 边角破坏防治措施

(1) 加强边角区域的配筋: 通过增加边角区域的钢筋配置, 提高其抗拉和抗剪能力。

(2) 优化边角设计: 采用圆角或倒角设计, 减少应力集中。

(3) 提高混凝土强度: 采用高强度混凝土, 提高边角区域的抗拉和抗剪强度。

3.3 角隅钢筋加固的理论研究

角隅钢筋加固是通过在路面的角隅区域增加钢筋配置, 提高其抗拉和抗剪能力。角隅钢筋加固的理论研究主要包括:

(1) 应力分析: 通过有限元分析, 研究角隅区域的应力分布和集中情况。

(2) 钢筋配置: 根据应力分析结果, 确定角隅钢筋的配置方案。

3.4 角隅钢筋加固的实际方法

(1) 钢筋布置: 在角隅区域布置双层扇形钢筋(见图3)。

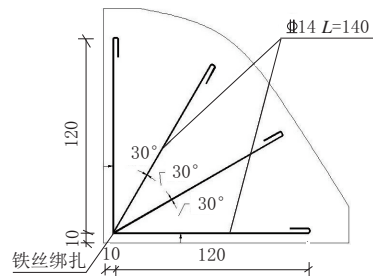


图3 角隅钢筋布置图(单位:cm)

(2) 钢筋连接: 采用焊接或绑扎方式, 确保钢筋连接牢固。

(3) 混凝土浇筑: 在钢筋布置完成后, 进行混凝土浇筑, 确保混凝土的密实度和强度。

4 基层整体性、刚度对荷载作用下水泥混凝土路面弯拉应力的影响研究

4.1 基层整体性和刚度的影响

基层的整体性和刚度对水泥混凝土路面的弯拉应力有显著影响。基层的整体性和刚度越高, 路面弯拉应力就越小, 路面承载能力越强。

4.2 基层补强的重要性

(1) 提高整体性: 通过注浆补强, 提高基层的整体性, 减少基层的局部沉降和变形。

(2) 提高刚度: 通过增加基层的厚度和强度, 提高基层的刚度, 减少路面的弯拉应力。

(3) 延长使用寿命: 基层补强可以有效延长路面的使用寿命, 减少维修频率和成本。

4.3 注浆封固技术可靠性分析

(1) 注浆材料选择

采用水泥浆和聚合物浆液混合注浆材料,其中聚合物浆液性能为:固含量40%,黏度500 mPa·s。

(2) 注浆工艺

钻孔:孔径50 mm,孔距1.5 m,梅花形布置(见图4)。

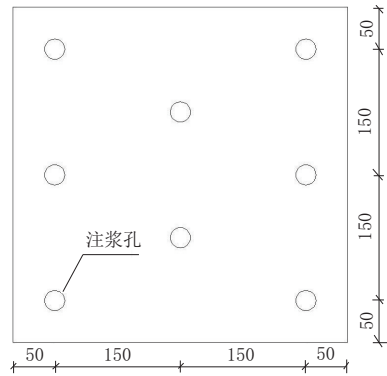


图4 注浆孔布置图(单位:cm)

注浆压力:0.5~1.0 MPa。

注浆量:每孔10~15L。

(3) 可靠性分析

通过工程经验和数值模拟,注浆封固技术可有效填充板下空隙,提高路面整体强度。试验结果表明,注浆后路面弯沉值降低20%以上,承载力提高30%以上。

5 钢筋混凝土路面与钢纤维混凝土路面性能比较

5.1 钢筋混凝土路面性能

钢筋混凝土路面通过在混凝土中配置钢筋,显著提高了路面的抗弯拉强度和整体性。其主要性能特点如下:

(1) 抗弯拉强度:钢筋混凝土路面的抗弯拉强度主要取决于钢筋的配置和混凝土的强度,通过合理设计,能够有效抵抗超重荷载引起的弯曲应力。

(2) 抗裂性能:钢筋的加入显著提高了路面的抗裂性能。钢筋能够有效分散和传递荷载,减少裂缝的产生和扩展。即使在荷载作用下产生微小裂缝,钢筋也能限制裂缝的进一步发展,保持路面的整体性。

(3) 耐久性:钢筋混凝土路面具有良好的耐久性。钢筋的保护层厚度和混凝土的密实度是影响耐久性的关键因素。通过合理设计和施工,钢筋混凝土路面能够抵抗环境侵蚀和化学腐蚀,延长使用寿命。

(4) 施工工艺:钢筋混凝土路面的施工工艺相对成熟,主要包括钢筋绑扎、混凝土浇筑和养护等环

节。施工过程中需要严格控制钢筋的位置和保护层厚度,确保路面的整体性能。

5.2 钢纤维混凝土路面性能

钢纤维混凝土路面通过在混凝土中掺入钢纤维,显著提高了路面的抗拉强度和韧性。其主要性能特点如下:

(1) 抗弯拉强度:通过合理设计,能够有效抵抗超重荷载引起的弯曲应力。

(2) 抗裂性能:钢纤维能够有效分散和传递荷载,减少裂缝的产生和扩展。即使在荷载作用下产生微小裂缝,钢纤维也能限制裂缝的进一步发展,保持路面的整体性。

(3) 耐久性:钢纤维混凝土可以提高混凝土的韧性和延展性,改善其抗裂性能;可以提高混凝土抗疲劳性,延长其使用寿命。

(4) 施工工艺:钢纤维混凝土使用强制式混凝土拌和机进行拌和;纤维的加入通过摇筛或涣散机进行,确保纤维能在混凝土中均匀涣散;拌和后,纤维混凝土的流动性会随着纤维掺量增加而显著下降,因此,拌合料从拌和机中卸出到浇筑完毕所需时间不宜超过30 min;浇筑过程中严禁加水;使用振动台或外表振动器进行振捣,内部振动器则不适用,振捣时间应适当延长^[7]。

5.3 钢纤维混凝土中钢纤维掺加比例

钢纤维混凝土中钢纤维的掺加比例对混凝土的性能有显著影响。根据相关研究和工程实践,钢纤维的掺加比例一般为:体积掺量0.5%~2.0%。

(1) 对于超重荷载路面,建议采用较高的钢纤维掺加比例,一般为1.5%~2.0%。

(2) 在施工条件允许的情况下,尽量采用较高的钢纤维掺加比例,以提高混凝土的性能。

(3) 在满足性能要求的前提下,尽量采用较低的钢纤维掺加比例,以降低材料成本。

5.4 路面性能对比

查阅钢筋混凝土和钢纤维混凝土的相关研究资料^[7-8],对比抗弯拉、抗裂等性能指标(见表2)。

表2 性能指标比较		
性能指标	钢筋混凝土	钢纤维混凝土
抗弯拉强度/MPa	11	17
抗裂性能	优良	优良
耐久性	优良	优良

5.5 路面经济性对比

根据南通市当地材料及人工机械价格,对比钢

筋混凝土和钢纤维混凝土的综合成本(见表3)。

表3 综合成本比较

项目	钢筋混凝土	钢纤维混凝土
材料成本/(元·m ³)	800	1 200
施工成本/(元·m ²)	200	200
使用寿命/a	15	20
全寿命周期成本/(元·m ²)	1 500	1 600

5.6 小结

综合考虑性能和经济性,采用钢纤维混凝土方案,其在抗裂性能和耐久性方面更具优势,且全寿命周期成本仅高出 6.7%。

6 结 语

本研究通过理论分析和计算,提出了针对上海振华重工南通分公司厂区超重荷载路面的维修加固方案。主要结论如下:

(1)24 cm 厚现状水泥混凝土路面在 1 000 kN 超重荷载下已严重损坏,需要进行加固改造。先注浆加固道路底基层,再破除路面至设计标高,加铺基层、铺设钢筋混凝土(钢纤维混凝土)路面。

(2)大间距接缝连续配筋混凝土路面可以实现超重轴载和环境荷载作用下混凝土路面不开裂的目标^[8]。

(3)注浆封固技术可靠性高。注浆补强基层后,路面弯沉值降低 20%,承载力提升 30%。

(4)钢纤维混凝土性价比更优。与钢筋混凝土相比,钢纤维混凝土的抗裂性能、韧性及使用寿命更优,全寿命周期成本仅增加 6.7%。

尽管本研究提出了针对超重荷载路面的优化方案,但仍需要在以下方向开展深入研究:

一是超重荷载水泥混凝土路面应力分布。通过有限元模拟和实际应力测试,明确超重荷载下路面

的三维应力分布特征,为结构设计提供更精准的理论依据^[9]。

二是超重荷载水泥混凝土路面破坏形式研究。系统分类不同荷载组合下的破坏模式(如剪切破坏、疲劳断裂等),分析其成因及演化规律,提出针对性防治措施^[10]。

三是简单地以规范公式将超重荷载换算成标准轴载的作用次数不符合实际工况,这种工况下的标准轴载换算方法应予修正^[11]。

四是动态荷载与震动效应的影响。研究超重车辆动态荷载及震动对路面的累积损伤效应,提出动态荷载下的设计修正系数。

参考文献:

[1] 宋长柏,魏连雨.超重交通对道路破坏作用及对轴重限值的探讨[J].河北工业大学学报,2002,31(1):24-26.

[2] 刘伯权,姚祖康.水泥混凝土路面设计理论与方法[M].北京:人民交通出版社,2010.

[3] 黄晓明,朱照宏.水泥混凝土路面设计[M].北京:人民交通出版社,2011.

[4] 田波,姚祖康,赵队家,等.承受特重车辆作用的水泥混凝土路面应力分析.中国公路学报,2000,13(2):4-7.

[5] JTG D40—2011,公路水泥混凝土路面设计规范[S].

[6] 史据峰.基于可靠度的水泥混凝土路面超载轴重研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(9):102-105.

[7] 孙伟,高建明.钢纤维混凝土的性能及其在路面工程中的应用[J].建筑材料学报,2005,8(2):123-128.

[8] 杨泽亮,连井龙,罗辉.大间距接缝配筋水泥混凝土路面技术[J].土木工程与管理学报,2020,37(5):9-12.

[9] 沈凯仁,陈先华,周杰,等.基于半解析有限元的水泥路面荷载响应分析[J].工程力学,2020,37(2):134-144.

[10] 王祥.重载交通条件下的市政道路路面设计研究[J].江西建材,2024(4):244-246.

[11] 李巧茹,李国强,魏连雨.超载车辆弯沉等效换算方法研究[J].河北工业大学学报,2017,46(3):45-50.