

DOI: 10.7672/sgjs2026100025

大型停车场楼面板聚丙烯纤维掺量优化与应用^{*}

童占国, 黄永根

(陕西建工集团股份有限公司, 陕西 西安 710082)

[摘要] 针对大型停车场金刚砂楼面板的抗裂与力学性能需求, 设计不同聚丙烯纤维掺量的 C25 混凝土配合比, 开展抗压强度、抗折强度及干缩抗裂性能试验。结果表明, 当聚丙烯纤维掺量为 $1.3\text{kg}/\text{m}^3$ 时, 混凝土综合性能最优, 28d 抗压强度达 30.9MPa , 较基准组提高 9.6% ; 抗折强度达 7.3MPa , 提高 25.9% ; 裂缝首次出现时间延长至 7d, 28d 最大裂缝宽度仅 0.06mm , 抗裂性能显著提升。基于最优掺量, 结合某机场停车场工程, 构建 80mm 厚聚丙烯纤维-金刚砂复合楼面板施工技术体系, 应用检测表明, 楼面板表面平整, 无有害裂缝; 现场取芯抗压强度、抗折强度均优于试验值, 满足大型停车场长期高负荷使用要求。

[关键词] 混凝土; 聚丙烯纤维; 金刚砂; 楼面板; 抗裂性能; 抗折强度; 施工技术

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0025-05

Optimization and Application of Polypropylene Fiber Content in Large Parking Floor Panel

TONG Zhanguo, HUANG Yonggen

(Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710082, China)

Abstract: According to the requirements of crack resistance and mechanical properties of emery floor panel in large parking lot, the mix ratio of C25 concrete with different polypropylene fiber content was designed, and the tests of compressive strength, flexural strength and dry shrinkage crack resistance were carried out. The results show that when the content of polypropylene fiber is $1.3\text{kg}/\text{m}^3$, the comprehensive performance of concrete is the best, and the compressive strength of 28d is 30.9MPa , which is 9.6% higher than that of the reference group. The flexural strength reached 7.3MPa , increased by 25.9% . The first occurrence time of cracks is extended to 7d, and 28d maximum crack width is only 0.06mm , and the crack resistance is significantly improved. Based on the optimal dosage, combined with an airport parking lot project, the construction technology system of 80mm thick polypropylene fiber-rigid sand composite floor panel is constructed. The application test shows that the surface of the floor panel is flat and there are no harmful cracks. The compressive strength and flexural strength of the on-site coring are better than the test values, which meet the requirements of long-term high-load use of large parking lots.

Keywords: concrete; polypropylene fiber; diamond sand; floor panel; crack resistance performance; flexural strength; construction

0 引言

随着我国城市化进程的加速和汽车保有量的持续攀升, 大型停车场作为重要的交通基础设施, 其建设规模日益扩大, 使用频率与荷载等级不断提高^[1-2]。这类结构的面板系统长期承受着车辆往复

冲击、环境温湿度交变及混凝土自身收缩等多重复杂作用^[3], 传统混凝土楼面板易出现早期开裂、表面剥落、耐磨性不足等病害, 严重影响其使用功能、结构耐久性及整体美观, 且维护成本高昂^[4]。因此, 开发兼具高抗裂性、优异抗冲击能力和良好耐久性的混凝土楼面板材料与结构体系, 成为停车场工程领域亟待解决的关键难题之一。

为改善混凝土的脆性及抗裂性能, 纤维增强技

^{*} 陕西省重点研发计划(2020SF-373)

[作者简介] 童占国, 高级工程师, E-mail: 626855880@qq.com

[收稿日期] 2026-03-15

术被广泛研究与应用。其中,聚丙烯纤维因其质轻、耐碱、分散性好、成本相对较低等优势,成为一种重要的混凝土增韧材料^[5]。国内外学者已围绕聚丙烯纤维混凝土的基本性能开展了大量研究。许颖等^[6]通过聚丙烯纤维混凝土预制裂缝梁的断裂试验与数值模拟,揭示了纤维掺量与长径比对断裂韧性的影响规律。黄华等^[7]通过研究镀铜钢纤维与聚丙烯纤维对地聚物混凝土的增韧效果,发现纤维通过桥接作用可有效抑制裂缝的发展,其中层布式钢纤维能形成网状协同结构,在显著提升力学性能的同时降低纤维用量。在应用层面,元星等^[8]研究发现,掺入聚丙烯纤维能通过纤维的桥接与分散作用,显著增强水泥加固粉质黏土的结构整体性与抗冲刷能力,为边坡防护提供有效加固方案。石振武等^[9]基于响应面分析法,建立了钢纤维混凝土耐磨性的优化模型,揭示了钢纤维长径比、掺入率与水胶比对其耐磨性的协同影响规律,为提升路面混凝土耐久性提供了理论依据。现有研究多集中于纤维对混凝土常规力学性能或单一工程应用的探讨,针对大型停车场对楼面板同时提出的抗车辆冲击、抗裂、耐磨等综合性能的协同提升研究仍显不足^[10-11]。

本研究旨在系统探究聚丙烯纤维掺量对混凝土抗压强度、抗折强度及抗裂性能的影响规律,通过对比试验确定适用于大型停车场 80mm 厚金刚砂耐磨楼面板的最优纤维掺量。结合某机场停车场实际工程,系统阐述聚丙烯纤维-金刚砂复合楼面板的关键施工技术,并通过现场检测评估其外观质量与力学性能,以验证该技术的应用效果。

1 原材料

选用 P·O 42.5 普通硅酸盐混凝土;细骨料采用中砂,细度模数为 2.8~3.1,含泥量 $\leq 1\%$,泥块含量 $\leq 0.5\%$;粗骨料选用碎石,粒径 15~25mm,针片状颗粒含量 $\leq 10\%$,压碎值 $\leq 16\%$;外加剂选用 CSP-11 缓凝型高效减水剂,用于改善混凝土工作性能,减少泌水与离析,同时避免早期开裂,水采用自来水。聚丙烯纤维选用束状纤维,长 3mm,直径 16 μm ,线密度 0.91g/cm³,拉伸屈服强度 560MPa,断裂伸长率 23.8%。

2 混凝土配合比设计

为研究聚丙烯纤维掺量对混凝土受力性能的影响,设置不同纤维掺量梯度的对比试验,筛选适配大型停车场 80mm 厚金刚砂楼面板的最优掺量。试验以常用 C25 混凝土配合比为基准,不添加粉煤灰,控制石子总用量 $\geq 1\,100\text{kg}/\text{m}^3$ 。各组配合比除

聚丙烯纤维掺量外,其余原材料用量保持一致,确保单一变量控制,水泥、中砂、细石、碎石、矿粉、减水剂和水的用量分别为 315,774,300,833,20,6.9,150kg/m³。不掺加聚丙烯纤维的为 1 号基准组,对照组组号为 2~4,聚丙烯纤维用量分别为 0.8,1.3,1.8,2.3kg/m³。

制作过程中,先将水泥、骨料、矿粉干拌均匀,再加入溶解后的减水剂水溶液搅拌,最后按设计掺量加入聚丙烯纤维,延长搅拌时间 30s,确保纤维分散均匀。采用边长 150mm 立方体试件用于抗压强度测试,100mm $\times$ 100mm $\times$ 400mm 棱柱体试件用于抗折强度与抗裂性能测试,浇筑后用振动台振捣密实,刮平表面。试件成型后在温度(20 $\pm$ 5) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 90\%$ 的环境中静置 24h 拆模,转入标准养护室养护至规定龄期后进行性能测试。材料选用及混凝土试块制作如图 1 所示。

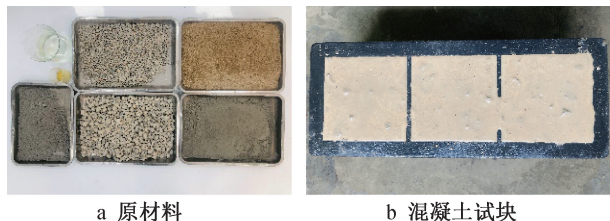


图 1 材料选用及混凝土试块制作
Fig. 1 Material selection and concrete test block fabrication

3 试验结果分析

3.1 聚丙烯纤维掺量对混凝土抗压强度的影响

不同聚丙烯纤维掺量下混凝土的抗压强度测试结果如图 2 所示。由图 2 可知,聚丙烯纤维对混凝土抗压强度有一定提升作用,且随掺量增加呈先升后降的趋势。当掺量为 1.3kg/m³时,28d 抗压强度达到最大值 30.9MPa,较基准组提高 9.6%;当掺量超过 1.3kg/m³后,抗压强度逐渐下降,但仍高于基准组。分析认为适量聚丙烯纤维在混凝土内部可均匀分布,能填充水泥石中的微小孔隙,减少内部缺陷,同时在受压过程中,通过纤维的桥接作用传递应力,抑制微裂缝的萌生与扩展,从而提高抗压强度。当纤维掺量过高时,纤维在混凝土中易发生团聚,导致搅拌不均匀,形成局部薄弱区域,降低了混凝土密实度,影响了混凝土抗压强度。

3.2 聚丙烯纤维掺量对混凝土抗折强度的影响

不同聚丙烯纤维掺量下混凝土抗折强度测试结果如图 3 所示。由图 3 可知,纤维掺量与抗折强度呈显著相关性。当掺量为 1.3kg/m³时,7,28d 抗折强度均达到最大值,分别为 5.2,7.3MPa,其中

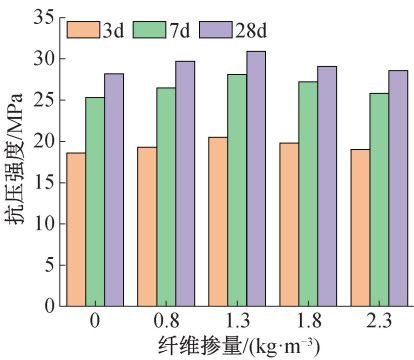


图2 不同聚丙烯纤维掺量下混凝土抗压强度

Fig.2 Compressive strength of concrete under different polypropylene fiber content

28d 抗折强度较基准组提高 25.9%, 增强效果最优。掺量低于或高于 1.3kg/m³ 时, 抗折强度提升幅度均有所降低, 但均高于基准组。分析认为混凝土的抗折性能取决于其抵抗裂缝萌生与扩展的能力, 聚丙烯纤维在混凝土内部形成三维乱向分布的纤维网络, 当混凝土受弯时, 纤维能通过界面黏结作用跨越裂缝两端, 形成桥接效应, 可有效传递拉力, 阻止裂缝进一步扩展。同时, 纤维还能延缓裂缝的萌生时间, 减少裂缝数量和降低裂缝宽度, 从而提高混凝土的抗折强度, 该特性对承受车辆冲击荷载的停车场楼面板至关重要。

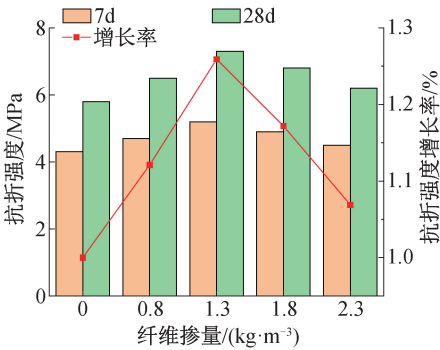


图3 不同聚丙烯纤维掺量下混凝土抗折强度

Fig.3 Flexural strength of concrete under different polypropylene fiber content

3.3 聚丙烯纤维掺量对混凝土抗裂性能的影响

为定量分析聚丙烯纤维掺量对混凝土干缩抗裂性能的影响, 采用 100mm×100mm×500mm 棱柱体试件进行干缩裂缝观测试验, 每组配合比制作 3 个平行试件, 试件的制作与养护同抗压试验和抗折试验一致。待试件拆模转入标准养护室后, 开始持续观测记录, 观测周期为 28d, 分别记录裂缝出现的初始时间, 并在 28d 采用裂缝宽度尺、钢卷尺实测统计裂缝数量、最大裂缝宽度及总裂缝长度, 取试件平均值作为最终试验结果, 具体结果如表 1 所示。

表1 不同聚丙烯纤维掺量下混凝土干缩裂缝试验结果

Table 1 Dry shrinkage crack test results of concrete different fiber content under polypropylene

纤维掺量/ (kg · m ⁻³)	裂缝出现 时间/d	28d 裂缝 数量/条	28d 最大裂 缝宽度/mm	28d 总裂缝 长度/mm
0(基准组)	3	8	0.25	126
0.8	5	4	0.12	58
1.3	7	2	0.06	23
1.8	6	3	0.09	41
2.3	4	5	0.15	72

基准组 28d 最大裂缝宽度达 0.25mm, 总裂缝长度 126mm, 已达到影响结构耐久性的有害裂缝级别。而 1.3kg/m³ 掺量组最大裂缝宽度仅 0.06mm, 总裂缝长度 23mm, 分别较基准组减少 76%, 82%, 裂缝处于无害范围。当掺量低于或高于 1.3kg/m³ 时, 裂缝宽度与长度均有所增加, 但仍显著优于基准组。基准组混凝土在养护 3d 后因干缩出现裂缝, 而掺入聚丙烯纤维后, 裂缝出现时间均有所延长。其中 1.3kg/m³ 掺量组效果最优, 裂缝出现时间延长至 7d, 较基准组延长 133%, 为混凝土早期强度发展和应力释放提供了充足的时间。随着纤维掺量的增加, 28d 裂缝数量先大幅减少后略有回升。1.3kg/m³ 掺量组 28d 裂缝数量仅 2 条, 较基准组(8 条)减少 75%。即使是掺量最高的 2.3kg/m³ 组, 裂缝数量仍低于基准组, 表明纤维的存在能有效抑制裂缝的多点萌生。分析认为混凝土干缩裂缝的产生源于水泥水化过程中水分蒸发导致的体积收缩, 而早期混凝土抗拉强度较低, 无法抵抗收缩应力。聚丙烯纤维在混凝土内部形成三维乱向分布的纤维网络, 一方面通过纤维与水泥石之间的界面黏结力限制混凝土的自由收缩, 分散收缩应力, 避免应力集中产生裂缝; 另一方面, 当混凝土内部出现微裂缝时, 纤维能桥接在裂缝两端, 通过自身抗拉强度传递应力, 阻止微裂缝进一步扩展为宏观裂缝。同时, 纤维还能改善混凝土内部孔隙结构, 降低水分蒸发速率, 减少干缩变形的累积, 从而从“延缓萌生”和“抑制扩展”两方面提升混凝土抗裂性能^[12]。

综合纤维作用机制与试验数据, 1.3kg/m³ 为聚丙烯纤维在本试验 C25 混凝土中的最佳抗裂掺量。该掺量下聚丙烯纤维能在混凝土内部实现三维乱向均匀分散, 未出现因掺量过高(1.8, 2.3kg/m³) 导致的纤维团聚现象, 避免了团聚区域形成的微孔隙、微裂缝等结构缺陷, 保证了混凝土基体的密实性, 减少了裂缝萌生的点位。

综上所述, 聚丙烯纤维掺量为 1.3kg/m³ 时, 混凝土抗压强度、抗折强度及抗裂性能均达到最优水

平,能满足大型停车场 80mm 厚金刚砂楼面板对抗压、抗折、抗裂的工程要求。

4 聚丙烯纤维-金刚砂楼面板施工技术

4.1 工程概况

以某机场停车场工程为应用实例,停车场主体结构金刚砂楼面板主要承担旅客及员工车辆的停放与通行功能,车流量密集、使用频率高,且部分区域为开敞式设计,楼面板需长期承受车辆冲击荷载与环境温、湿度变化的双重作用,为争创优质工程,要求楼面板满足长期使用无开裂、无空鼓的耐久性要求。楼面板采用 80mm 厚 C25 细石混凝土金刚砂耐磨结构,禁止添加粉煤灰,聚丙烯纤维掺量采用试验确定的 $1.3\text{kg}/\text{m}^3$ 。同时配置 $\phi 8$ 螺纹钢筋锚钩(植筋深度 50~60mm,外露 35mm),搭配 $\phi 6.5$ 螺纹钢筋网片(间距 200mm 单层双向布置,设于混凝土中下 1/3 处)进一步增强其抗裂性能。为增加停车场的耐磨性,耐磨层采用撒布量 $5\text{kg}/\text{m}^2$ 的金刚砂,表面形成 2~3mm 厚耐磨层,分缝宽度 5mm、深度不小于地坪厚度 1/3、间距 3~4m,缝内填充聚氨酯密封胶。金刚砂楼面板结构如图 4 所示。

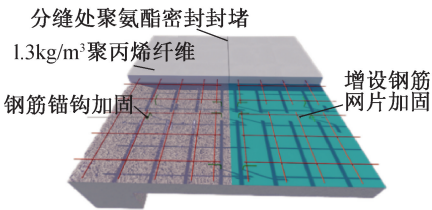


图 4 金刚砂楼面板结构

Fig. 4 Emery floor panel structure

4.2 施工工序

结合工程实际,优化形成 80mm 厚聚丙烯纤维-金刚砂复合楼面板施工技术体系。

聚丙烯纤维-金刚砂复合楼面板施工流程为:基层处理→测量放线→锚钩施工与钢筋网片绑扎→基层扫浆→混凝土浇筑(掺聚丙烯纤维)→金刚砂分 2 次撒布与磨光→养护→切缝与填缝。先对基层进行铣刨、清洗与湿润处理,确保基层坚实洁净并具备良好黏结条件。随后开展测量放线定位,精准布设钢筋锚钩与钢筋网片,保障增强体系位置准确。基层处理与增强布设完成后,进行基层扫浆以提升新旧混凝土黏结性,浇筑掺加 $1.3\text{kg}/\text{m}^3$ 聚丙烯纤维的 C25 细石混凝土,确保混凝土浇筑密实、标高达标。待混凝土初凝后,分 2 次在垂直方向撒布金刚砂并配合磨光机完成磨光作业,形成均匀耐磨面层。最后养护达到规定时间后进行切缝施工,缝内填充聚氨酯密封胶完成收尾。

1) 基层处理

采用机械铣刨基层混凝土,铣刨深度 $\geq 5\text{mm}$,墙根、柱根等设备无法顾及部位采用花锤补充处理。铣刨后用高压水枪清洗,清除松动杂物,浇筑前保持基层湿润,湿润时间 $\geq 8\text{h}$,确保基层充分吸水,提升新旧混凝土黏结性。

2) 测量放线

基层处理完成后进行测量放线,施工前需将建筑 1m 线精准引测至施工区域的框架柱上,以此为基准,结合楼面板分缝设计要求,按框架柱轴线位置精准放出地面切割缝控制线,同时明确钢筋锚钩的布设点位与分布间距,为后续锚钩植筋、钢筋网片绑扎及切缝施工提供定位依据,确保各工序施工符合设计规范。

3) 锚钩施工与钢筋网片绑扎

钢筋锚钩采用长 150mm 的 $\phi 8$ 螺纹钢筋加工,植筋深度为 50~60mm,外露 35mm,锚钩在预切缝及界面交接位置分布,主梁区域间距 1 000mm,其余切缝位置间距 1 500mm(折算含量约 $1.5\text{根}/\text{m}^2$)。钢筋网片采用 $\phi 6.5$ 螺纹钢筋,间距 200mm 单层双向绑扎,设置于混凝土中下 1/3 处,采用 20mm 厚钢筋垫块支撑,确保位置准确,增强新旧混凝土拉结强度,抑制空鼓。

4) 支模施工与基层扫浆

模板采用可调支模系统按设计标高支设模板,模板下部用砂浆严密封堵防止漏浆,方柱、墙边采用聚苯板、圆柱采用 4mm 防水卷材进行隔断处理,确保模板牢固、顺直且标高准确。同时完成基层扫浆处理,采用地坪胶与水泥按比例拌制的黏结剂均匀涂刷,形成 3mm 厚黏结层以增强新旧混凝土黏结性能。

5) 聚丙烯纤维掺加与混凝土浇筑

聚丙烯纤维按 $1.3\text{kg}/\text{m}^3$ 掺量计量,采用干拌分散+延长搅拌时间工艺,先将纤维与水泥、骨料等干料混合均匀,再加入水溶液搅拌,总搅拌时间较普通混凝土延长 30s,确保纤维在混凝土中均匀分布,避免团聚。混凝土严格按试验确定的配合比拌制,坍落度控制在 $(140\pm 20)\text{mm}$,现场禁止加水。采用地泵浇筑,一次浇筑至设计标高,局部未达标处用混凝土补齐振捣,严禁使用砂浆修补。采用平板振动器振捣密实,柱、边角等部位用手持式振捣棒辅助,配合人工拍浆,确保混凝土表面水泥浆浮出至少 3mm 厚,为金刚砂黏结提供基础。

6) 金刚砂撒布与磨光

分 2 次撒布金刚砂,脚踩混凝土下沉 3~5mm

时进行第 1 次撒布,撒布量为总用量的 2/3 (3.33kg/m²),优先撒布墙、柱、模板等边线处。待纤维混凝土表面水分蒸发至适宜状态,脚踩面层不下陷时,进行第 2 次撒布 (1.67kg/m²),撒布方向与第 1 次垂直。磨光采用双盘坐式磨光机,初期转速控制在 600~1 000r/min,与地面夹角 15°左右。中期粗研和后期精磨阶段转速提高至 1 200~1 500r/min,磨光机放平,纵横向交错作业≥3 次,边角处用人工配合木抹子处理,确保表面平整,平整度控制在 2m 内。

7) 养护与切缝
采用棉毡+塑料布养护,夏季、秋季先覆盖棉毡浇水湿润,再覆盖塑料布。冬季先浇水湿润,覆盖塑料布后再覆盖棉毡,养护时间≥14d。养护 48h 后进行切缝施工,按预设放线位置切割,确保切缝整齐顺直,切缝后立即浇水封闭,避免空气进入导致干缩裂缝。切缝完成后,缝内填充聚氨酯密封胶,增强密封性与伸缩性能。

5 楼面板施工效果检测

5.1 外观质量检测

采用目测观察与尺量复核相结合的方式,以每 10m² 为 1 个检测单元,每个单元随机抽检 3 处。检查表面状态、裂缝情况及分缝质量,使用裂缝宽度尺实测裂缝宽度,记录超标缺陷的位置与数量。本次检测覆盖工程总施工面积的 30%,共划分 86 个检测单元,抽检 258 处点位。结果显示,所有抽检区域表面状态良好,色泽均匀一致,无起砂、起皮等缺陷,分缝顺直度达标,密封胶填充饱满,表面平整度偏差均≤1.5mm/2m,满足合格标准。裂缝检测中,仅 3 处点位发现细微裂缝,最大宽度 0.04mm,未超过 0.06mm 的控制值,无宽度≥0.15mm 的有害裂缝,裂缝控制效果与试验结论一致,表明 1.3kg/m³ 聚丙烯纤维掺量能有效抑制混凝土表面裂缝萌生与扩展。

5.2 力学性能检测

抗压强度测试采用回弹法普查,同时每 1 000m² 抽取 3 个芯样,共抽取 6 组芯样进行抗压强度验证,芯样标准养护 28d 后测试。抗折强度测试每 2 000m² 抽取 3 个 100mm×100mm×400mm 棱柱体试件,共抽取 3 组,标准养护 28d 后进行抗折试验。6 组芯样 28d 抗压强度实测值在 31.2~33.5MPa,平均值为 32.3MPa,最小值为 31.2MPa,均高于试验最优值 30.9MPa 及基准组 28.2MPa,抗压强度提升效果稳定。3 组抗折强度实测值分别为 7.4、7.6、7.5MPa,平均值 7.5MPa,高于试验最优值

7.3MPa,满足车辆冲击荷载要求,证实聚丙烯纤维可有效增强混凝土的抗折强度。

6 结语

1) 试验研究发现,当聚丙烯纤维掺量为 1.3kg/m³ 时,混凝土 28d 抗压强度提升 9.6%,抗折强度提升 25.9%,最大裂缝宽度降至 0.06mm,总裂缝长度减少 82%。纤维在混凝土内部能有效抑制微裂缝萌生与扩展,并通过界面黏结传递应力,提升混凝土的韧性和抗裂能力。

2) 基于试验确定的 1.3kg/m³ 最优纤维掺量,成功构建了适用于大型停车场的聚丙烯纤维-金刚砂复合楼面板施工技术体系。该体系涵盖基层处理、增强布设、纤维混凝土浇筑、金刚砂撒布、养护与切缝等关键工序,工艺合理、操作性强。

3) 工程实践表明,某机场停车场楼面板施工后,外观质量检测表明表面平整、无有害裂缝,最大裂缝宽度仅 0.04mm;力学性能检测显示 28d 抗压强度平均值达 32.3MPa,抗折强度平均值达 7.5MPa,均满足设计及使用要求。

综上所述,聚丙烯纤维掺量为 1.3kg/m³ 时,可显著提升混凝土的抗压、抗折与抗裂性能,适用于大型停车场金刚砂楼面板工程,具有良好的技术可行性与工程应用价值。

参考文献:

[1] 章明,莫羚卉子,秦曙.城市基础设施复合化策略研究与实践路径——以深圳龙城公园活力谷为例[J]. 风景园林,2024,31(8):37-46.
ZHANG M, MO L H Z, QIN S. Strategy research and practice approach for urban infrastructure integration: a case study of vitality valley in Shenzhen Longcheng Park [J]. Landscape architecture, 2024, 31(8): 37-46.
[2] 戴维,刘洋,陈玉发,等.敏感环境条件下地铁停车场桥基施工对下伏高铁隧道群的扰动效应研究[J]. 公路工程,2020,45(1):12-17,104.
DAI W, LIU Y, CHEN Y F, et al. Disturbance effect of pile foundation construction in metro parking yard on subjacent high-speed rail tunnel groups under sensitive environment [J]. Highway engineering, 2020, 45(1): 12-17, 104.
[3] 谭奇峰.预留上盖物业开发条件的市域铁路地下车辆基地结构设计[J]. 城市轨道交通研究,2025,28(1):73-78.
TAN Q F. Structural design of city railway under-ground depot with reserved conditions for overlying property development[J]. Urban mass transit, 2025, 28(1): 73-78.
[4] 李雨航,邓扬,李爱群.基于频率变化的混凝土楼板损伤评价研究[J]. 防灾减灾工程学报,2021,41(5):1028-1036.
LI Y H, DENG Y, LI A Q. Research on damage identification of concrete slab based on frequency change[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2021, 41(5): 1028-1036.

参考文献:

[1] 胡双平,杨勇,徐龙康. 我国地铁车站工业化建造技术应用与研究进展[J]. 工业建筑,2025,55(6):84-95.
HU S P, YANG Y, XU L K. Advances in the application and research of industrialized construction techniques for underground urban railway stations in China[J]. Industrial construction,2025,55(6):84-95.

[2] 邵莹,胡双平,高志宏,等. 装配式混凝土地下车站结构应用与研究进展[J]. 铁道工程学报,2023,40(4):89-93,104.
SHAO Y, HU S P, GAO Z H, et al. Applications and investigations of precast concrete structures for underground metro station[J]. Journal of railway engineering society,2023,40(4):89-93,104.

[3] 刘芬. BIM 技术在地铁装配式车站的应用[J]. 智能建筑与智慧城市,2025(7):71-73.
LIU F. The application of BIM technology in subway assembled station[J]. Intelligent building & smart city,2025(7):71-73.

[4] 李鹏,刘杨. BIM 技术在无锡至江阴城际轨道交通工程中的应用[J]. 现代城市轨道交通,2025(6):86-92.
LI P, LIU Y. Application of BIM technology in Wuxi-Jiangyin intercity rail transit project[J]. Modern urban transit,2025(6):86-92.

[5] 张乾锋,胡春林,张涛,等. BIM+装配式施工技术在地铁机电工程中的应用[J]. 安装,2025(4):65-68.
ZHANG Q F, HU C L, ZHANG T, et al. Application of BIM + assembled construction technology in metro electromechanical engineering[J]. Installation,2025(4):65-68.

[6] 范军. 预制装配式地铁车站施工技术研究[J]. 北方建筑,2025,10(2):74-77.
FAN J. Research on construction technology of prefabricated subway station[J]. Northern building,2025,10(2):74-77.

[7] 刘豪,李培卿,黄美群. 青岛地铁 6 号线预制装配式车站研究与应用[J]. 隧道建设(中英文),2025,45(3):604-612.
LIU H, LI P Q, HUANG M Q. Research and application of prefabricated stations on Qingdao metro line 6 [J]. Tunnel construction,2025,45(3):604-612.

[8] 毕烁烁,王玉东,雷军,等. 我国装配式地铁车站施工面临的挑战及相关对策[J]. 现代城市轨道交通,2025(3):13-17.
BI S S, WANG Y D, LEI J, et al. Challenges and related countermeasures in the construction of prefabricated metro stations in China[J]. Modern urban transit,2025(3):13-17.

[9] 姜浩,万佳晨. 浅谈装配式冷水机房施工在深圳地铁中的应用[J]. 广州建筑,2024,52(1):70-72.
JIANG H, WAN J C. Discussion on the application of prefabricated chiller room construction in Shenzhen metro [J]. Guangzhou architecture,2024,52(1):70-72.

[10] 席斌,朱和和,易家松,等. BIM 技术在建筑给排水设计中的应用与思考——以浙江农林大学茶文化学院为例[J]. 给水排水,2025,51(4):103-110.
XI B, ZHU H H, YI J S, et al. Application and reflection on BIM technology in building water supply and drainage design: taking College of Tea Science and Tea Culture, Zhejiang A & F university as an example [J]. Water & wastewater engineering,2025,51(4):103-110.

[5] 汪学清,李永超,张雪瑞,等. 轴压下含裂隙聚丙烯纤维混凝土裂纹扩展及损伤演化研究[J]. 硅酸盐通报,2024,43(7):2404-2414.
WANG X Q, LI Y C, ZHANG X R, et al. Crack propagation and damage evolution in polypropylene fiber reinforced concrete with cracks under axis compression [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society,2024,43(7):2404-2414.

[6] 许颖,樊悦,王青原,等. 聚丙烯纤维混凝土断裂韧度试验与数值分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2024,54(10):2884-2896.
XU Y, FAN Y, WANG Q Y, et al. Experiment and numerical analysis on fracture toughness of polypropylene fiber reinforced concrete [J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition),2024,54(10):2884-2896.

[7] 黄华,郭梦雪,于基宁,等. 纤维增韧地聚物混凝土力学性能与微观结构[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(4):12-23.
HUANG H, GUO M X, YU J N, et al. Mechanical properties and microstructure of fiber reinforced geopolymer concrete [J]. Journal of architecture and civil engineering,2023,40(4):12-23.

[8] 亢星,杨浪,刘焕,等. 聚丙烯纤维水泥加固土质边坡的抗冲刷有效性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2025,36(1):84-91.
QI X, YANG L, LIU H, et al. Analysis of the anti-erosion effectiveness of polypropylene fiber (PPF) cement-reinforced soil for slope protection [J]. The Chinese journal of geological hazard

and control,2025,36(1):84-91.

[9] 石振武,解飞. 基于响应面分析法的钢纤维混凝土耐磨性试验研究[J]. 公路交通科技,2015,32(7):23-27.
SHI Z W, XIE F. Experimental research of abrasion resistance of steel fiber reinforced concrete based on response surface analysis method [J]. Journal of highway and transportation research and development,2015,32(7):23-27.

[10] 王瑞燕,吴国雄,韩春云. 金刚砂混凝土配合比设计及力学性能研究[J]. 公路,2004(7):145-149.
WANG R Y, WU G X, HAN C Y. A study on mixture ratio design and mechanics performance of emery concrete [J]. Highway,2004(7):145-149.

[11] 景宏君,贺一嵘,赵林飞,等. 沥青路面美化涂层配方设计及路用性能[J]. 西安科技大学学报,2025,45(6):1100-1110.
JING H J, HE Y R, ZHAO L F, et al. Formulations design and road performance of asphalt pavement aesthetic coating [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2025,45(6):1100-1110.

[12] 杜腾飞,折帅,王吉鹏,等. 聚乙烯醇和玄武岩混掺纤维增强再生骨料透水混凝土性能研究[J]. 施工技术(中英文),2026,55(4):14-19,55.
DU T F, ZHE S, WANG J P, et al. Performance study of pervious recycled aggregate concrete reinforced with hybrid polyvinyl alcohol and basalt fibers [J], Construction technology,2026,55(4):14-19,55.

(上接第 29 页)