

桥面铺装用低水泥用量玄武岩纤维高性能水泥混凝土设计方法研究

陆宇卿¹ 毛安静² 程伟³

1. 江苏科维工程管理有限公司, 中国·江苏 常州 213000
2. 江苏森森工程质量检测有限公司, 中国·江苏 镇江 212000
3. 中铁四局集团有限公司, 中国·安徽 合肥 230022

摘要: 本文聚焦于桥面铺装用低水泥用量玄武岩纤维高性能混凝土的设计方法。首先分析了桥面铺装对混凝土性能的特殊要求以及低水泥用量与玄武岩纤维在提升混凝土性能方面的作用。通过系统的试验研究, 探讨了原材料特性、玄武岩纤维掺量、配合比参数等对混凝土工作性能、力学性能和耐久性的影响规律。在此基础上, 提出了一套适用于桥面铺装的低水泥用量玄武岩纤维高性能混凝土的设计方法, 并结合实际工程案例验证了该设计方法的可行性与有效性, 为推广此类混凝土在桥面铺装工程中的应用提供了理论与实践依据。

关键词: 桥面铺装; 低水泥用量; 玄武岩纤维; 高性能混凝土; 设计方法

Study on the design method of basalt fiber high-performance cement concrete with low cement dosage for bridge deck pavement

Lu Yuqing¹, Mao Anjing², Cheng Wei³

1. Jiangsu Kewei Engineering Management Co., Ltd., China Jiangsu Changzhou 213000
2. Jiangsu Senmiao Engineering Quality Inspection Co., Ltd., China Jiangsu Zhenjiang 212000
3. China Railway Fourth Engineering Group Co., Ltd., China Anhui Hefei 230022

Abstract: This paper focuses on the design method of basalt fiber high-performance concrete with low cement dosage for bridge deck pavement. Firstly, the special requirements of bridge deck pavement and the role of low cement dosage and basalt fiber in improving concrete performance are analyzed. Then, the effects of the properties of raw materials, the mixture of basalt fiber and the mix ratio parameters are studied. On this basis, a set of design method of low cement dosage basalt fiber high performance concrete suitable for bridge deck pavement is proposed, and the feasibility and effectiveness of the design method are verified combined with actual engineering cases, which provides theoretical and practical basis for promoting the application of such concrete in bridge deck pavement engineering.

Keywords: Bridge deck pavement; Low cement dosage; Basalt fiber; High performance concrete; Design method

0 引言

桥面铺装作为桥梁结构的重要组成部分, 直接承受车辆荷载的反复作用以及环境因素的侵蚀, 其性能优劣对桥梁的使用寿命和行车安全有着至关重要的影响。传统的桥面铺装混凝土在长期使用过程中, 常因水泥用量较高导致水化热大、收缩开裂等问题, 进而影响其耐久性。同时, 随着环保要求的日益提高, 减少水泥用量成为混凝土行业可持续发展的重要方向。

玄武岩纤维作为一种新型高性能纤维材料, 具有高强

度、高模量、耐高温、耐腐蚀等优异性能。将其掺入混凝土中, 能够有效改善混凝土的力学性能和耐久性。因此, 研究桥面铺装用低水泥用量玄武岩纤维高性能混凝土的设计方法, 对于提高桥面铺装质量、降低工程成本、推动绿色环保材料的应用具有重要的现实意义。

国外在低水泥用量高性能混凝土以及纤维增强混凝土方面的研究起步较早, 取得了一系列成果。一些研究通过优化配合比和添加矿物掺合料, 在降低水泥用量的同时保证了混凝土的性能。对于玄武岩纤维增强混凝土, 也有较

多研究关注其在不同工程领域的应用效果和增强机理。

国内在这方面的研究也在不断深入,部分学者对玄武岩纤维混凝土的基本性能进行了研究,分析了纤维掺量对混凝土工作性能、力学性能和耐久性的影响。然而,针对桥面铺装用低水泥用量玄武岩纤维高性能混凝土的系统研究相对较少,尚未形成一套成熟的设计方法。

传统的水泥桥面铺装采用与桥面板相同强度等级的混凝土,一般为 C40~C50 混凝土,施工图纸对混凝土无抗渗要求。但是在拼宽公路桥梁中,由于该混凝土有抗渗要求,且由于常规混凝土配置时,考虑较大的标准差,配置强度要求为设计强度的 115%,致使混凝土中水泥用量将加大,成本将大幅增多。

本研究旨在提出一种低水泥用量高强度玄武岩纤维混凝土配合比,具有强度高、环境耐腐蚀性、抗渗透性等优良性能。是将常规配置的混凝土中水泥总量减少,以粉煤灰和硅粉代替,然后将经表面处理后的短切玄武岩纤维加入至混凝土中,使混凝土的强度、抗渗透性提高,从而降低工程成本,提高工程质量。

通过试验研究表明,低水泥用量高强度玄武岩纤维混凝土具有如下性能:

- (1) 所研究的玄武岩纤维配合比混合料拌和均匀性好。在合理的玄武岩纤维掺量情况下,混凝土拌和物中纤维不会产生结团、不均匀等现象,因此具有良好的均匀性。

- (2) 经表面处理后的短切玄武岩纤维与混凝土的结合性优良,与混凝土能紧密咬合,具有很好的抗折强度和阻止裂缝甚至极微小的裂缝产生。

- (3) 经研究,合适配比的玄武岩纤维混凝土能有效阻止外界物质渗透,提高抗渗透性。

- (4) 传统的水泥混凝土每立方米的用量高达 480kg 以上,而本混凝土水泥用量只有 382kg。

1 设计配合比

1.1 设计配合比原则

设计桥面铺装用低水泥用量高强度玄武岩纤维混凝土配合比时,需综合多方面因素遵循一系列原则。

工作性能方面,要依据桥面铺装的具体施工工艺来确保混凝土拌合物具备适宜的工作性能。若采用泵送施工,混凝土坍落度宜控制在 120mm~160mm,以保障其在管道中顺利输送,避免堵塞。同时,混凝土拌合物必须有良好的粘聚性和保水性,防止运输和浇筑过程中出现离析、泌水现象,以免影响桥面铺装的平整度与耐久性。

力学性能上,所设计的配合比要使混凝土满足桥面铺

装设计规定的抗压强度和抗弯拉强度标准。一般桥梁桥面铺装的抗压强度等级多为 C40 - C50,抗弯拉强度也有相应具体数值要求,以此承受车辆荷载的反复作用。此外,掺入玄武岩纤维旨在提高混凝土的韧性和抗冲击性能,降低脆性破坏风险,延长桥面铺装使用寿命。

耐久性同样不容忽视。桥面长期受自然环境影响,混凝土需具备高抗渗性,一般抗渗等级不低于 P8,防止水分和有害离子侵入内部,引发钢筋锈蚀和混凝土性能劣化。在寒冷地区,要根据当地气候条件确定合适防冻等级,如 F150、F200 等,以抵抗冻融循环破坏。同时,考虑到桥面可能接触除冰盐等化学物质,混凝土还应具备一定抗化学侵蚀能力,保障结构长期稳定。

在低水泥用量与经济性方面,要在满足混凝土性能要求的基础上,尽可能降低水泥用量。这既能减少水泥生产的碳排放,又能降低材料成本。可通过合理使用粉煤灰、矿粉等矿物掺合料部分替代水泥来实现。并且要综合考虑原材料价格、运输成本等因素,选择经济合理的原材料组合,优化配合比设计,有效控制工程造价。

针对玄武岩纤维,要保证其与混凝土体系具有良好的相容性,使纤维在混凝土中均匀分散,并与水泥基体良好粘结,充分发挥增强增韧作用。这可能需要对纤维进行表面处理或添加合适外加剂。同时,通过试验研究确定最佳纤维掺量,因为掺量过低无法明显增强效果,过高则可能影响工作性能、增加成本,还可能导致纤维团聚,降低混凝土性能。

1.2 粉煤灰和硅灰的加入

本研究主要是在传统混凝土配合比条件下,减少水泥用量,这就需要加入其他活性材料,拟加热粉煤灰和硅灰。

粉煤灰颗粒多呈球形,表面光滑,在混凝土中可起到“滚珠轴承”的作用,减少颗粒间的摩擦,增加混凝土拌和料的流动性。同时,它还能提高混凝土的粘聚性和保水性,使混凝土在运输和浇筑过程中不易出现离析、泌水现象,便于泵送和浇筑成型,并可减少坍落度的经时损失。掺加粉煤灰后可减少水泥用量,且粉煤灰水化放热量很少,从而减少了混凝土的水化放热量。这对于大体积混凝土工程特别有利,能明显减少温度裂缝的产生。粉煤灰具有一定的活性,在水泥水化产生的碱性环境中,能与氢氧化钙等发生二次水化反应,生成更多的凝胶物质,填充混凝土内部孔隙,增强混凝土的结构。因此,掺用粉煤灰的混凝土后期强度能得到较大提高。

由于二次水化作用,混凝土的密实度提高,界面结构

得到改善。同时，二次反应使得易受腐蚀的氢氧化钙数量降低，可提高混凝土的抗渗性、抗硫酸盐腐蚀性和抗镁盐腐蚀性等。此外，粉煤灰比表面积巨大，吸附能力强，能吸附水泥中的碱，并与碱发生反应消耗碱的数量，游离碱数量的减少可以抑制或减少碱集料反应。

粉煤灰的减水效应使得粉煤灰混凝土的干缩及早期塑性干裂与普通混凝土基本一致或略低，但劣质粉煤灰会增加混凝土的干缩。而且粉煤灰混凝土的徐变低于普通混凝土。

在等强度等级的条件下，掺加粉煤灰可以减少水泥用量约 10% - 15%，因而可降低混凝土的成本。

硅灰颗粒极细，平均粒径为 $0.1\mu\text{m}$ 左右，能够填充水泥颗粒间的孔隙，使混凝土的微观结构更加密实，提高混凝土的密实度和抗渗性。硅灰具有很高的火山灰活性，能与水泥水化产物氢氧化钙迅速反应，生成大量的凝胶物质，显著提高混凝土的抗压、抗折、抗渗、防腐、抗冲击及耐磨性能。在配置高强度、高性能混凝土时，硅灰常作为重要的掺合料使用，可有效提高混凝土的强度和耐久性。硅灰具有保水、防止离析、泌水的作用，能够提高混凝土的粘聚性和稳定性。同时，它还可以大幅降低砼泵送阻力，改善混凝土的可泵性，使混凝土在泵送过程中更加顺畅。

1.3 短切玄武岩纤维

为提高玄武岩纤维与混凝土的粘结力，需通过表面物理化学处理改善纤维表面性能。物理处理方法可采用喷砂或酸刻蚀工艺，通过机械磨削或化学腐蚀在纤维表面形成微观粗糙结构，增大表面积并增强机械啮合效应。使用粒径 $50\text{--}100\mu\text{m}$ 的氧化铝砂粒在 $0.3\text{--}0.5\text{MPa}$ 气压下对纤维表面进行均匀喷砂处理，可形成深度 $10\text{--}20\mu\text{m}$ 的沟槽结构；或采用浓度 5% - 10% 的盐酸溶液在 $60\text{--}80^\circ\text{C}$ 下浸泡纤维 10 - 15 分钟，通过化学反应溶解表面杂质并形成微孔结构。

采用硅烷偶联剂溶液对纤维进行表面改性。将 γ -氨丙基三乙氧基硅烷 (KH550) 与无水乙醇按体积比 1:9 配制成溶液，调节 pH 值至 4 - 5 后，将纤维浸泡其中 30 分钟，取出后于 $100\text{--}120^\circ\text{C}$ 烘箱中固化 2 小时。偶联剂分子可通过水解反应生成硅羟基，与纤维表面的羟基形成共价键，同时另一端的氨基可与混凝土中的水泥水化产物发生化学结合，从而在纤维与基体间形成化学键合。此外，采用高锰酸钾氧化处理也能有效引入极性基团，将纤维浸泡于 $0.1\text{--}0.5\text{mol/L}$ 的高锰酸钾溶液中 30 分钟，经水洗干净后表面含氧官能团含量显著增加，可提高纤维与水泥基体的界面相容性。

综合处理工艺可结合物理刻蚀与化学接枝，先通过喷砂形成粗糙表面，再经偶联剂溶液处理，使机械啮合与化学键合协同作用，显著提升界面粘结强度。实际应用中需根据纤维直径（通常为 $10\text{--}20\mu\text{m}$ ）和混凝土配合比调整处理参数，建议处理后纤维表面接触角降低至 60° 以下，表面能提高至 50mN/m 以上，以确保最佳界面粘结效果。

1.4 配合比确定

本研究在传统水泥混凝土配合比的基础上进行改进，以减少水泥用量。

原 C50 普通水泥混凝土配合比每立方米材料用量比例情况如下。

水泥：砂：碎石：水：外加剂 = $493\text{kg} : 730\text{kg} : 1192\text{kg} : 170\text{kg} : 4.05\text{kg}$

现加入粉煤灰和硅灰，对配合比进行优化。

水泥：粉煤灰：硅灰：砂：碎石：玄武岩纤维：水：外加剂 = $382\text{kg} : 75\text{kg} : 36\text{kg} : 705\text{kg} : 1102\text{kg} : 2.5\text{kg} : 170\text{kg} : 4.05\text{kg}$

保证了水灰比不变。

2 低水泥用量高强度混凝土性能试验

2.1 试件制作

(1) 按上述配合比称取各材料；

(2) 将全部的玄武岩纤维与一半的水泥、粉煤灰、硅灰、碎石、砂、纤维放入拌和机进行预拌，确保纤维均匀分散；

(3) 将剩余的水泥、粉煤灰、硅灰、砂石材料、外加剂和纤维加入搅拌机中，与预拌料混合均匀；

(4) 加入水和外加剂（聚羧酸系减水剂）、甲基硅酸钠材料，进行充分搅拌，不少于 120s，直至混凝土浆体均匀、无结块；

2.2 工作性能

普通高强度混凝土拌和物（不加入粉煤灰和硅灰）与加入了粉煤灰、硅灰的高强度玄武岩纤维混凝土拌和物工作性存在显著差异。

普通高强度混凝土拌和物为实现高强度，通常水胶比较低且水泥用量相对较多。这使得拌和物粘性较大，内部颗粒间摩擦力显著增加。在搅拌环节，需要更大的搅拌功率才能使各组份均匀混合；运输过程中，其流动阻力大，难以顺利输送；浇筑时，若采用泵送施工，需要较高的泵送压力才能推动混凝土通过管道，而且极易出现堵管现象，严重影响施工效率和质量。相比之下，加入粉煤灰、硅灰的高强度混凝土拌和物的流动性得到明显改善。粉煤灰的

球形颗粒形态使其在混凝土中如同“滚珠轴承”，极大地降低了颗粒间的摩擦阻力，显著提升了拌和物的流动性。硅灰虽比表面积大、需水量大，但与粉煤灰等配合使用，并在高效减水剂的协同作用下，能进一步优化拌和物的流动性。这种混凝土在泵送过程中更加顺畅自如，可有效降低泵送压力，大大减少堵管风险，尤其适用于长距离泵送和大体积混凝土的浇筑施工，能更好地满足复杂施工条件的需求。

普通高强度混凝土拌和物因水泥用量较高，内部凝聚力较大，具备一定的粘聚性。然而，其粘聚性主要依靠水泥浆的粘结作用，这种单一的粘聚方式相对脆弱。在受到外力扰动，如振捣过程中，粗骨料容易出现下沉现象，导致混凝土内部结构不均匀，各部位性能出现差异，影响混凝土整体质量。而加入粉煤灰、硅灰的高强度混凝土拌和物的粘聚性得到显著增强。粉煤灰的球形颗粒和硅灰的高活性使其与水泥浆体之间产生更为复杂且稳定的相互作用，形成一种更加稳固的结构体系。在搅拌、运输和振捣等各个施工环节中，这种结构能够使混凝土的各组分始终保持均匀分布，有效避免了离析现象的发生，确保了混凝土整体的均匀性和稳定性，为施工质量提供了有力保障。

普通高强度混凝土拌和物由于水胶比较低，水泥浆体相对浓稠，具有一定的保水能力。但在长时间运输或振捣过程中，水分仍可能从水泥浆中被挤出，进而在混凝土表面出现泌水现象。泌水不仅会在混凝土表面形成一层不利于强度发展的水膜，影响混凝土表面的强度和外观质量，还可能导致混凝土表面因水分快速散失而出现干缩裂缝，降低混凝土的耐久性。与之不同的是，加入粉煤灰、硅灰的高强度混凝土拌和物在保水性上表现出色。粉煤灰的颗粒结构具有吸附水分的特性，硅灰因其高比表面积也具备很强的保水能力。二者相互配合，能够有效束缚混凝土中的水分，大大减少了泌水现象的发生。这使得混凝土在整个施工过程中能够保持良好的水分状态，有利于混凝土的充分水化反应，提高混凝土的成型质量，减少因泌水引发的各种质量问题，提升了混凝土结构的长期稳定性。

普通高强度混凝土拌和物在运输和等待浇筑的过程中，由于水泥的水化反应持续进行，水分不断被消耗，且缺乏能够有效延缓水化反应的成分，导致其坍落度损失相对较快。这就对施工过程提出了严格要求，必须精确控制运输时间和浇筑速度。一旦运输时间过长或浇筑速度过慢，混凝土坍落度可能会损失过大，使其无法满足施工要求，

难以振捣密实，影响混凝土的成型质量。而加入粉煤灰、硅灰的高强度混凝土拌和物在这方面具有明显优势。粉煤灰中的活性成分与水泥水化产物的反应相对较为缓慢，硅灰虽然活性较高，但在与其他材料共同作用时，能够调节混凝土内部的化学反应进程，减缓水泥的水化速度。同时，它们的存在优化了混凝土的微观结构，使水分在拌和物中分布更加均匀且稳定，不易散失。因此，这种混凝土的坍落度损失相对较小，在施工过程中为运输和浇筑操作提供了更充裕的时间，降低了因坍落度损失而导致的施工风险，提高了施工的灵活性和可控性。

2.3 混凝土抗压强度

按上述原配合比和优化配比分别制作试件，其中每种混凝土制作 3 组，每组 3 只，试件制作好以后，放入标准养生室养生 28d，然后进行抗压强度试验，计算强度平均值、标准差、变异系数。数据汇总见表 1。

表1 两种配合比混凝土强度试验结果

配合比	强度平均值 (MPa)	标准差 (MPa)	变异系数 (%)	试件制作时，拌和物外观情况
原配合比	55.2	4.11	7.4	较均匀
优化后的玄武岩纤维混凝土	58.6	1.10	1.9	均匀

从表 1 情况看，优化后的混凝土强度增大，均匀性提升，变异系数降低。

2.4 钢筋与混凝土粘结强度试验

分别按原配合比和优化后的玄武岩纤维混凝土配合比制作试件，并将光圆钢筋埋入其中，标准条件下养生 28d 后进行钢筋拉拔试验。试验结果如下表 2。

表2 两种配合比钢筋拉拔拔出力

配合比	拉拔力 (KN)
原配合比	5.1
优化后的玄武岩纤维混凝土	7.6

从表 2 中可以看出，优化后的玄武岩纤维混凝土与钢筋的粘结能力明显增强，表面玄武岩纤维和混凝土配合后更具良好的粘结性能。

2.5 渗水性能试验

按《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)给出的《水泥混凝土抗渗性试验方法》(T 0568—2005)试验方法制作混凝土试件，进行混凝土抗渗等级试验。

试验结果如下表 3。

表3 三种配合比混凝土抗渗性试验

配合比	第三个试件渗水时的水压力 (MPa)	抗渗等级
原配合比	0.9	P8
优化后的玄武岩纤维混凝土配比	1.1	P10

2.6 抗气体渗透性能试验

按《混凝土气体渗透性能测试方法》(JCT 2758-2023)给出的方法进行混凝土抗气体渗透性能试验。

得到两种配合比气体渗透系数。见表4。

表4 两种配合比混凝土气体渗透系数

配合比	气体渗透系数/ ($\times 10^{-18}m^2$)
原配合比	312
优化后的玄武岩纤维混凝土配比	196

2.7 模拟海水自然碳化试验

制作的原配合比混凝土和优化后的玄武岩纤维混凝土配合比,制作尺寸为 60cm×60cm×7cm 的混凝土试件。

试件制作完成后,在标准养护条件下(温度为 20℃±3℃,相对湿度为 90%)养生 7d,然后浸入到模拟海水条件下,浸泡 28d,保持模拟海水的温度为 25℃±5℃。模拟海水配比见表5。

表5 模拟海水的配合比(质量比) 单位: kg

食盐	氯化镁	硫酸钙	氯化钾	碳酸氢钠	自来水
160	20	6.0	3.2	1.1	4202

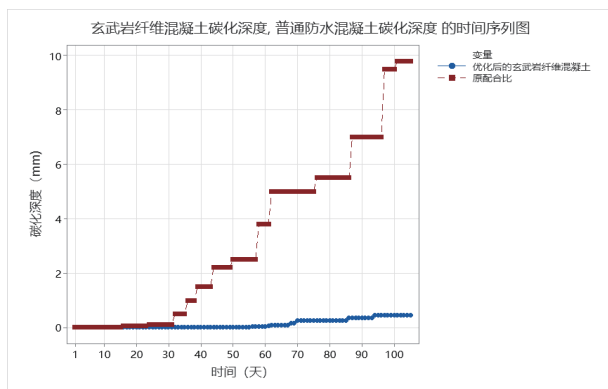


图1 碳化深度检测结果时间序列图

然后,放入到自然环境中后,每30d进行观察和试验,包括外观和碳化深度,持续观测36期,即3年。碳化深度检测结果见图1。

从图1中,我们发现,优化后的玄武岩纤维混凝土碳化速度极慢且均匀。证明了其强度和抵抗侵蚀的能力强。

3 结语

从上述试验我们发现,将原配合比进行优化,减少水泥用量,用粉煤灰和硅灰代替水泥,同时增加玄武岩纤维,能够在降低水泥用量的条件下保持混凝土的高强度和高效能。

- (1) 能显著提高了混凝土的抗渗性,使得优化后的玄武岩纤维混凝土抗外界物质渗透方面具有明显优势。
- (2) 具有良好的工作性能,新拌混凝土中纤维分布均匀,无结团和纤维上浮与下沉现象。
- (3) 使用了低用量的水泥,节省了成本,同时在力学性能方面又获得了高强度和高抗渗性能。
- (4) 使用了经表面处理的短切混凝土纤维,增加了纤维与混凝土的粘结性能,提高了混凝土的抗折强度和抵抗裂缝的能力。

参考文献:

- [1] 王建雷,郝相雨,籍凤秋. 钢纤维对RPC混凝土力学性能影响研究[J]. 低温建筑技术, 2008, 30(3):18-20.
- [2] 梁咏宁,陈宝春,季韬等. 砂胶比、水胶比和钢纤维掺量对RPC性能的影响[J]. 福州大学学报, 2011(5):748-753.
- [3] 刘斯凤,孙伟,张云升等. 新型超高性能混凝土的力学性能研究及工程应用. 工业建筑, 2002, 32(6):1-3.
- [4] 季韬,陈宝春,庄一舟等. 活性粉末混凝土抗裂性能试验研究[J]. 福州大学学报, 2011(3):434-437.
- [5] 姚志雄,周健,周瑞忠. 活性粉末混凝土断裂性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(6):654-659.

作者简介:陆宇卿(1998.11-),男,江苏常州人,本科,助理工程师,研究方向:公路与桥梁施工与检测技术。