

基于抗渗要求的高强纤维混凝土性能优化及抽水蓄能隧洞二衬应用研究

薛立萍¹ 霍应聪¹ 王强斌² 邱浩² 张京亮²

1.华电永昌抽水蓄能有限公司 甘肃 金昌 737299

2.中国水利水电第十四工程局有限公司 云南 昆明 650041

【摘要】：抽水蓄能隧洞工作环境恶劣，混凝土容易出现使用寿命降低问题，进而对其抗渗及力学提出更高的要求。文章围绕提高混凝土防渗能力进行分析，通过正交试验，分析不同配比对工作及机械性质的影响，利用极差和变异数对设计进行优化，旨在大幅提高混凝土密实性，改善抗渗性能，有效提高隧道二衬在复杂条件下的服役性能，从而为类似工程提供参考。

【关键词】：高强纤维；混凝土；性能优化；抽水蓄能；隧洞二衬

DOI:10.12417/2811-0528.26.08.090

抽水蓄能电站作为新型能源体系的主要调控源，担负着削峰填谷和紧急后备双重职能。隧道是引水工程中的重要组成部分，二衬在地下水冲刷等环境因素综合影响下，混凝土面临巨大压力。以往混凝土材料存在空隙大等不足，导致其在长时间运行发生渗水等现象，从而降低结构安全性。

1 高强纤维混凝土配合比设计与力学性能优化

1.1 试验材料及方案

原料选择包括水泥、细砂、聚丙烯纤维等（如图1）。为综合考虑多个因素的交互作用，通过四因素三水平的正交试验设计，选择硅灰、钢纤维等参数为变量，设定不同因素，进行梯度水平测试。实验包括工作和机械特性等，其中，工作特性是以坍落度和膨胀率作为衡量混合状况的指标，试验龄期均以28d为宜。通过正交试验，增加相同掺量、不同种类钢纤维制作对照，研究不同结构形式的钢纤维制得的差别。通过对混凝土结构设计等过程分析，保证结果的准确性和可靠性，为混凝土设计提供理论基础。



图1 材料示意图

1.2 工作性能影响规律分析

掺入不同类型的矿物外加剂及加入比例，将会对混凝土的粒子分布及内摩擦状况产生重要的作用，从而对工作特性造成影响。形态统一的矿渣粉颗粒，在一定掺量下，混合料流动性能得到提高。硅灰具有细小尺寸和较高比表面积，可以填补粉体空隙，但添加量过大，会引起需水量增加，降低流动性。由于纤维存在，混凝土中存在着大量孔隙网络，从而增大摩擦，导致混凝土流动性能下降。钢纤维束刚性越大，对流场阻流效果越显著^[1]。聚丙烯纤维组织结构较为松软，分散均匀，其流动性能的变化较为缓慢。由于两种或多种形式混合，在混凝土中存在着互相制约效应，使得胶凝性得到改善，而膨胀率降低。采用分差分析可知，各因素对混凝土工作特性的作用大小由大至小顺序为：（1）钢纤维；（2）硅粉；（3）聚丙烯纤维；（4）矿渣微粉。

1.3 力学性能影响规律分析

利用矿渣微粉和硅粉混合，既能充分利用超细颗粒的充填效果，又能产生二次水化，从而使得基质变得更为紧密，有助于增强混凝土的抗压强度。硅粉对混凝土的增强作用更为明显，但其掺量也增大内在收缩危险性。钢纤维通过桥连效应，可以有效地提高材料的抗拉和弯曲性能，从而有效地防止裂纹的发展，改善材料的力学性能。聚丙烯纤维的主要功能是抑制材料的初期开裂，抑制其内部的裂纹扩展，从而提高材料的长期机械性能。由于钢纤维布的表层形貌和锚钉性能的差异，使得同一含量的钢纤维布具有明显的增强效应。剪切型钢纤维对基体的咬合力较大，拉伸和弯曲性能提高较大。通过正交试验，得出各个参数对材料宏观力学性质的作用大小有较大差异，并且对于最优化的抗压和抗拉强度的设计也没有统一观点。结合

各主要性能参数的变化, 提出能保证强度的合理设计方案。

1.4 综合性能最优配合比

结合工作和机械特性测试数据, 利用多目标均衡分析方法, 优选出最佳配合比。工作特性上, 要确保混凝土具有较好的流动强度和胶凝性, 以适应隧道二衬混凝土泵送振捣需要。机械性质上, 必须兼顾抗压等设计要求, 以确保该建筑具有一定的承载力^[2]。采用正交试验方法, 对各组合件工作状态和机械参数进行加权, 得出综合得分较高的组合(如表1)。这种混合料具有很好的流态化和强度均衡性, 适用于以后的抗渗和各种复杂条件下的测试。

表1 不同配合比材料成本表

组次	矿物掺合料	纤维	单位成本 (元/m ³)	综合 评分
1组	30%矿渣粉 5%硅灰	0.8%钢纤维 0.1%聚丙烯纤维	496	82
2组	25%矿渣粉 6%硅灰	0.6%钢纤维 0.12%聚丙烯纤维	462	91

2 高强纤维混凝土抗渗性能试验与评价体系研究

2.1 抗渗性能多指标综合评价体系构建

采用单一的防渗性能指标很难完全反映复杂水体中混凝土的渗流特性, 需要构建多维度综合评估方法。渗透率是指流体在水力压力下穿过岩石内部的困难, 是衡量防渗性能的直观标志。氯离子渗透性是反映地下水中腐蚀性离子的侵蚀作用, 并与结合耐久性紧密相关^[3]。电场强度可以通过强度变化来直接反映材料的致密状况和贯通情况, 具有快速可重复特点。吸水性可以用来衡量多孔介质中开放孔的数目和吸附容量, 可以作为辅助的衡量密度的指标。多个指标分别从不同方面反映混凝土渗透性能和内在的组织特性, 彼此互补, 构成综合评估系统。实验中, 将试件固化体系和荷载状态进行统一, 保证各指标的可比较性。

2.2 宏观抗渗试验结果与分析

依据宏观渗透特性分析, 掺加适量的矿物外加剂和纤维, 对混凝土的防渗能力均有提高作用。利用矿渣微粉和硅粉进行混合, 能使孔隙率变小, 从而减小渗透率。硅粉的微细骨料作用和二次水合生成反应, 更好地填补界面过渡带, 增加基质的密实程度, 大幅度减小材料渗透性。由于纤维加入, 既能有效地控制混凝土的初期塑性开裂, 又能有效地减小因开裂而导致的应力集中泄漏。复合后的钢纤维与聚丙烯纤维, 对混凝土的

抗裂作用更为显著, 且比单一复合纤维的抗裂作用要大得多。阻盐和电通率测定也表现出类似的变化, 最优的材料电流流量有明显下降, 表明材料密度得到改善。随着外加剂和纤维用量的增加, 材料的吸水性先是减小, 然后逐渐保持不变, 表明材料最佳用量范围。

2.3 微观孔隙结构与界面特征分析

微观结构是影响材料宏观防渗能力的本质因素, 通过对孔隙结构的观察和界面特征的分析, 可以阐明增强机理。通过添加不同类型的矿物添加剂, 可以明显地减小孔隙结构的总孔隙度, 减少不利孔隙的比例, 使得孔隙在无害孔隙区域内的空间分布更为均匀^[4]。同时添加适量的矿渣和硅粉, 可使其粒度分布更为合理, 充填效应更为显著, 且具有较好的细孔效应。复合材料在扩散通道由不同材料组成, 通过合理设计, 可以有效减少空隙率, 改善材料的致密程度。钢纤维具有良好的刚性和与基质的咬合关系, 对裂纹形成和发展起到很好的抑制作用。聚丙烯纤维材料质地松软, 分散均匀, 在微观上可以堵塞孔隙的贯通。依据微观结果分析, 混合纤维呈立体无序的结构, 对孔隙和裂隙起到了多种阻滞的效果。其内部孔隙连通率减小, 从而防止水和侵蚀性离子进入, 提高材料的整体渗透性。

3 高强纤维混凝土抗冻性能及损伤演化规律

3.1 抗冻性能试验方案

寒冷地区抽水蓄能工程隧道处于长期冻融环境中, 其抗冻性对隧道的服役寿命有重要的影响。实验以快速冻结方法进行, 并参考有关规范进行冻融测试。选择300次冻融周期为结点, 测定主要参数包括抗压抗腐蚀性能等。质量损失是材料表层剥离和内部破坏情况, 以材料相对移动弹性模量来致密状况, 而材料抗压强度则用来材料力学特性衰退。研究组采用优化后高强纤维混凝土, 对照组采用常规混凝土, 在各周期节点, 进行性能检测和微观测试。通过对材料性质持续跟踪, 全面反映冻融环境下的破坏演变规律。对试样进行饱水处理, 以确保试样中含有足够的含水量, 从而能更好地发挥冻胀效应, 从而增加测试数据的真实性和可比性。

3.2 冻融循环下性能衰减规律

冻融作用下, 常规混凝土力学性质迅速衰退, 且由于其内部的孔隙水的多次冻胀, 使得裂纹持续扩大。材料质量损耗不断增加, 动态弹性模数也有较大降低。高强纤维混凝土因其内部组织较密实, 抗冻融性能显著提高。利用钢渣和硅粉改善基质的孔隙结构, 减小孔内水分含量。纤维在混凝土中形成立体止裂体系, 可以有效吸收冻胀力, 从而阻止裂纹发展。结果发现, 经过300次冻融周期试验, 优化混凝土重量损失比常规构件小, 动态模量基本维持在很高范围, 其抗压和防腐性能均达

到设计指标。

3.3 冻融劣化微观机制分析

较低温度下,由于水分冻结,孔中水发生体积扩张,使孔壁受到拉伸,从而使孔扩展和贯通出现裂纹。常规混凝土具有大的孔结构和高度连通性,冻融会快速出现破坏。外加剂可以使孔隙变细,可冻水量减小,从而减小冻胀的推动力。二次水合生成的产物可以有效地填补材料的孔洞和界面,增强材料的抗形变性能。混凝土冻融循环中,纤维起到桥梁作用,可以抑制裂纹的发展,从而减缓混凝土破坏。钢纤维具有很高的刚性,因此可以承受很大的拉伸压力,而聚丙烯纤维对微裂纹的抑制更为灵敏。复合纤维在多个尺度上协同工作,构成多级阻隔系统。微观观察结果发现,经过冻融处理的优化混凝土试样,内部裂纹数目和裂纹的宽度均较小,其孔结构较为完好。

3.4 寒区隧洞二衬混凝土抗冻设计依据

根据试验结果,可为寒冷地区混凝土设计提供理论。选材

上,为改善基质的密实度和孔道的最优性,建议选用钢渣和硅粉双掺系统。纤维体系可以选用钢纤维布和丙纶混合模式,可以强化材料宏观阻裂和微观裂纹防治。采用最佳抗冻性配合比,提高混凝土强度和抗渗性。施工注意养护,以减少混凝土早期开裂,改善整体密实度,以此提高混凝土的使用寿命。

4 结论与展望

综上,文章以抗渗性能为切入点,对高强纤维混凝土配比等特性进行分析。采用正交试验方法,获得综合工作和性能最佳配比,阐明外加剂和纤维对材料的作用机理,阐明孔隙精细加工机理和界面优选机理,最终形成水力时效耦合的动力预报模式。经优化后的高强纤维混凝土,可以适应各种复杂条件,可以达到抽水蓄能隧洞二衬的服役需求。未来可探讨在线检测和物理场耦合作用下混凝土服役寿命,推进智能感知和纳米化修饰在水工领域的发展,为隧道建设优质发展提供支持。

参考文献:

- [1] 蒋京泰,李地元,汪小东,等.钢纤维混凝土力学性能优化与裂纹扩展特性试验研究[J].实验力学,2023,38(04):455-466.
- [2] 王进,李国强,张博.透水沥青混凝土材料的改性设计及性能优化[J].粘接,2025,52(10):86-89.
- [3] 董家兴,张龙,张琰,等.抽蓄隧洞自适应衬砌结构应力特性及调压构件开启压力差取值[J].昆明理工大学学报(自然科学版),1-13.
- [4] 王小强.某抽水蓄能电站大体积混凝土温度裂缝控制措施[J].四川水力发电,2025,44(04):50-54.