

寒区硫酸盐侵蚀环境下混凝土配合比优化及性能试验

武英杰

新疆维吾尔自治区水利水电科学研究院

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6796

[摘要] 本文针对阜康地区土壤及地下水中硫酸盐浓度高($\text{SO}_4^{2-} > 4000\text{mg/L}$)、混凝土易受侵蚀的工程难题,结合项目实际需求,提出两种混凝土配合比方案:方案1为高抗硫酸盐水泥复掺粉煤灰,方案2为普通硅酸盐水泥复掺粉煤灰并掺加4%YK-III抗侵蚀外加剂。通过力学性能、抗氯离子渗透、抗冻及抗硫酸盐侵蚀等试验,系统对比两方案的可行性与综合性能。结果显示,方案2表现优异,28d抗压强度达38.5MPa,56d电通量为510C,250次冻融循环后相对动弹性模量维持91%,150次硫酸盐干湿循环后耐蚀系数达93%。各项关键性能均优于或持平方案1,且单方成本降低30%以上,实现高性能与低成本统一,可为寒区强硫酸盐侵蚀环境混凝土选型及配合比设计提供理论依据与工程参考。

[关键词] 寒区工程; 硫酸盐侵蚀; 配合比优化; YK-III抗侵蚀外加剂; 耐久性

中图分类号: P578.7 **文献标识码:** A

Mix Proportion Optimization and Performance Tests of Concrete under Sulfate Attack in Cold Regions

Yingjie Wu

Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research

[Abstract] Aiming at the engineering challenge of high sulfate concentrations ($\text{SO}_4^{2-} > 4000\text{mg/L}$) in soil and groundwater in the Fukang area of Xinjiang, which causes severe sulfate attack on concrete, this study proposes two concrete mix design schemes based on practical project requirements. Scheme 1 uses sulfate-resisting Portland cement blended with fly ash, while Scheme 2 uses ordinary Portland cement blended with fly ash and 4% YK-III anti-erosion admixture. The feasibility and comprehensive performance of the two schemes were systematically compared through tests including mechanical properties, chloride ion penetration resistance, frost resistance, and sulfate attack resistance. The results show that Scheme 2 exhibits excellent performance: the 28-d compressive strength reaches 38.5 MPa, the 56-d electric flux is 510 C, the relative dynamic elastic modulus remains 91% after 250 freeze-thaw cycles, and the corrosion resistance coefficient reaches 93% after 150 sulfate wet-dry cycles. All key performance indicators are superior to or equivalent to those of Scheme 1, and the unit cost is reduced by more than 30%, achieving a balance between high performance and low cost. This study provides theoretical basis and engineering reference for concrete selection and mix design in cold regions under strong sulfate attack conditions.

[Key words] cold region engineering; sulfate attack; mix proportion optimization; YK-III anti-erosion admixture; durability

引言

新疆作为我国干旱区核心,盐碱地占全疆面积26%,土壤及地下水中 SO_4^{2-} 浓度常超4000mg/L,部分区域突破10000mg/L,属IV-V类严酷硫酸盐侵蚀环境^[1]。此类环境中,混凝土易受侵蚀破坏:硫酸盐与水泥中 C_3A 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成钙矾石、石膏,膨胀应力引发开裂; Mg^{2+} 等与C-S-H凝胶反应致水泥石脱钙失强^[2],寒区低温更催生碳硫硅钙石加剧劣化^[3]。硫酸盐侵蚀本质是化学侵蚀驱动的物理破坏,两类劣化耦合加速结构损伤^[4],需从材

料源头防控。高抗硫酸盐水泥($\text{C}_3\text{A} \leq 3\%$)常用但价格达900-1800元/吨,普通硅酸盐水泥(300-500元/吨)价格便宜但抗蚀不足^[5]。本文结合新疆阜康市核心水利工程,该项目需满足C30F250W6等级要求,区域 SO_4^{2-} 浓度普遍 $> 4000\text{mg/L}$,局部达8000-12000mg/L^[6]。通过引入YK-III型外加剂,构建复合胶凝体系并与传统方案对比,旨在为寒区严酷环境混凝土提供技术经济性更优的配合比方案。

1 原材料选择

1. 1 水泥

试验用水泥均为阜康天山水泥厂生产的P·042.5和P·HSR 42.5水泥。其物理力学性能符合GB175-2007《通用硅酸盐水泥》和GB748-2023《抗硫酸盐硅酸盐水泥》标准规定要求。

1. 2 粉煤灰

本试验中所使用粉煤灰为阜康市联众新型建材厂生产的II级灰,其技术性能检测指标符合GB/T1596-2017《用于水泥和混凝土中粉煤灰》标准规定要求。

1. 3 外加剂与YK-III

试验用高性能减水剂、引气剂均由新疆五家渠格辉科技有限公司生产,技术性能符合《混凝土外加剂》GB8076-2008要求。YK-III高耐久性矿物外加剂为新疆研科节能科技有限公司自研,具有超高细度与活性,掺量为胶凝材料质量的3%-6%。

1. 4 骨料与水

骨料为阜康中沐砂场天然料,细骨料选用II区中砂,粗骨料5-40mm,性能均符合《水工混凝土施工规范》SL677-2014。拌合水采用乌鲁木齐地下水,水质优良,满足《混凝土用水标准》JGJ63-2006。

2 配合比设计

2. 1 试验思路与方案

本研究以C30泵送混凝土为设计强度等级,构建两种配合比方案:方案1为“抗硫酸盐硅酸盐水泥+粉煤灰”体系,方案2为“普通硅酸盐水泥+粉煤灰+YK-III抗侵蚀外加剂”体系。配合比设计严格遵循《水工混凝土试验规程》(SL/T352-2020),具体参数见表1。

表1 两种体系配合比方案

编号	水泥厂家及强度等级	强度等级	级配	水胶比	砂率 (%)	粉煤灰 (%)	水泥	水	YK-III (%)	外加剂品种及用量
G-1	高抗硫酸盐水泥 42.5	C30F250W6	二	0.28	36	20	400	138	/	高性能减水剂 1.5%、引气剂 2.5%/万
G-2				0.31	38	20	346	132	/	高性能减水剂 1.4%、引气剂 1.5%/万
G-3				0.34	39	20	306	130	/	高性能减水剂 1.5%、引气剂 2.5%/万
P-1	普通硅酸盐水泥 42.5	C30F250W6	二	0.27	33	20	455	154	4	高性能减水剂 2.0%、引气剂 5.5%/万
P-2				0.30	36	20	362	136	4	高性能减水剂 1.9%、引气剂 4.5%/万
P-3				0.34	38	20	320	136	4	高性能减水剂 2.0%、引气剂 4.5%/万

2. 2 试验方法

依据SL/T352-2020设计高抗硫酸盐水泥(方案一)、普通硅酸盐水泥(方案二)体系,经28天抗压强度试验确定C30F250W6泵送混凝土最优配合比,再对其开展抗硫酸盐侵蚀、抗氯离子渗透及抗冻性能测试,具体方法如下:

2. 2. 1 抗硫酸盐侵蚀试验

参照SL/T352-2020,试件规格为100mm×100mm×100mm的立方体。在25℃~30℃的5%Na₂SO₄溶液进行干湿循环(浸泡15h+80℃烘干6h+冷却2h),干湿循环次数达到150次,测试混凝土耐蚀系数。

2. 2. 2 抗氯离子渗透性试验(电通量法)

依据SL/T352-2020,成型Φ100mm×50mm圆柱体试件,标准养护至56d后进行真空饱水处理(1~5kPa真空度保持3h,注水淹没浸泡1h,再常压续浸18h±2h)。密封后置于两极电解池间,正极盛0.3mol/LNaOH溶液、负极盛3%NaCl溶液,60V恒定电压下测试6h电量,参照SL654-2014规范评价渗透性。

2. 2. 3 混凝土抗冻性能

按照SL/T352-2020,试件规格为100mm×100mm×400mm的棱柱体。拆模后放入标准养护室养护到28d龄期,测定相对动弹性模量及混凝土质量损失率。

3 试验结果及分析

3. 1 抗压强度

两种方案混凝土的7d、28d抗压强度测试结果见表2。

表2 抗压强度试验结果

类型	编号	7d	28d
高抗硫酸盐水泥 42.5	G-1	41.8	55.7
	G-2	29.4	40.7
	G-3	23	33.5
普通硅酸盐水泥 42.5	P-1	37.4	46.5
	P-2	32.7	41.7
	P-3	27.2	35.1

表3 两种方案最优配合比推荐用量

编号	水泥强度等级	强度等级	水胶配	含气量 (%)	坍落度 (mm)	砂率 (%)	每立方米混凝土各项材料用量(kg)									
							水	粉煤灰	YK-III	砂	小石	中石	水	外加剂品种及用量		
G-1'	高抗硫酸盐水泥 42.5	C30	0.32	4.1	210	38	325	81	/	677	670	447	130	高性能减水剂 1.4%、引气剂 1.5%/万		
P-1'	普通硅酸盐水泥 42.5	F200 W6	0.31	4.5	200	36	351	88	18	625	674	449	136	高性能减水剂 1.9%、引气剂 4.5%/万		

3. 2 抗硫酸盐侵蚀(干湿循环法)

达150次硫酸盐干湿循环后,测试抗压强度耐蚀系数,结果见图1。对比不同循环次数数据可知,120次及150次循环后,方案二(P-1')耐蚀系数均显著高于方案一(G-1')。YK-III矿物外加剂比表面积大、活性强,与水泥水化产物Ca(OH)₂二次水化反应充分,生成C-S-H凝胶,既减少Ca(OH)₂,又填充孔隙提升密实度,从而改善硫酸盐环境下混凝土耐久性^[7]。

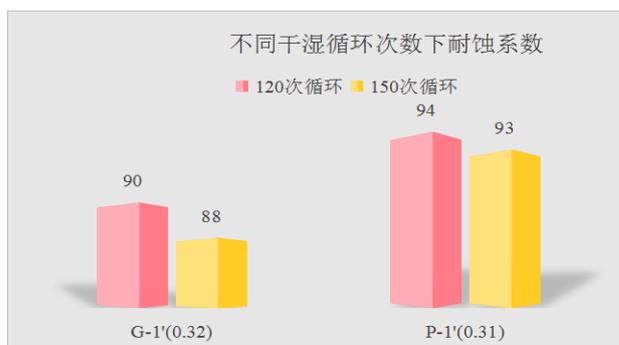


图1 混凝土抗硫酸盐侵蚀试验结果

3.3 抗氯离子渗透性(电通量法)

56d龄期电通量测试结果见图2。方案二(P-1')电通量为510C,显著低于方案一(G-1')的780C,两组均满足III-V类严酷腐蚀环境 ≤ 800 C的要求。这一结果表明,YK-III外加剂可优化孔结构、降低孔隙率及连通孔隙,阻断氯离子迁移通道,显著提升抗氯离子渗透性能^[8]。



图2 混凝土电通量试验结果

3.4 抗冻性能(快速冻融法)

试件达28d龄期后开展快速冻融试验,以每50次冻融循环为一个测试周期,分别测定其质量损失率与相对动弹性模量,试验结果如图3所示。结果表明,历经250次快速冻融循环后,两种方案试件相对动弹性模量均高于88%,质量损失率均低于0.9%,均满足F250级混凝土抗冻技术要求。对比可见,方案二(P-1')抗冻性能略优于方案一(G-1'),主要因为YK-III组分的掺入优化了混凝土内部孔结构,降低孔隙连通性,抑制孔隙水结冰膨胀对基体的损伤,进而提升抗冻能力。

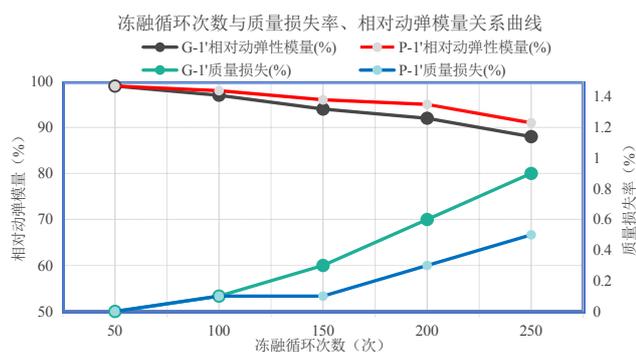


图3 混凝土抗冻性能试验结果

4 结论

(1)本研究提出的“普通硅酸盐水泥+20%粉煤灰+4%YK-III抗侵蚀外加剂”配合比方案(方案2),28d抗压强度达38.5MPa,可满足C30F250W6等级混凝土的工程技术要求。相较于传统“高抗硫酸盐水泥+20%粉煤灰”方案(方案1),方案2单方混凝土成本降低30%以上,经济性优势显著。(2)方案2关键耐久性指标表现优异:56d电通量为510C,250次冻融循环后相对动弹性模量维持在91%,150次硫酸盐干湿循环后耐蚀系数达93%。各项指标均优于方案1(对应值分别为780C、88%、88%),在抗氯离子渗透、抗冻及抗硫酸盐侵蚀性能上优势明显。(3)构建的“普通硅酸盐水泥+粉煤灰+YK-III抗侵蚀外加剂”复合胶凝体系,实现了混凝土高性能与低成本的有机统一。研究成果可为新疆及其他寒区严酷硫酸盐侵蚀环境下的水利工程提供可靠技术支撑与实践参考,具备广阔工程应用前景。

[基金资助项目]

水利部水库大坝安全重点实验室开放基金(YK324014);新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2025D01A8)。

[参考文献]

- [1]高琳,谢卓斌.新疆典型硫酸盐和碳酸盐型盐湖嗜盐细菌群落特征及酶活特性[J].微生物学报,2025,65(6):2499-2513.
- [2]谷洪斌.硫酸盐侵蚀环境下混凝土劣化机理分析[J].水利技术监督,2026,(01):211-215.
- [3]张丽静.冻融循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下水工混凝土力学性能分析[J].黑龙江水利科技,2022,50(09):43-45+58.
- [4]王慕涵,刘程博,王蒙.硫酸盐侵蚀作用下水化硅酸钙分子结构演变及劣化机理[J/OL].硅酸盐学报,1-10[2026-01-06].
- [5]王彦超.我国水泥行业减污降碳协同路径及成本效益研究[D].吉林大学,2025.
- [6]中华人民共和国水利部.水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范:SL654—2014[S].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [7]刘赞群.混凝土硫酸盐侵蚀基本机理研究[D].中南大学,2010.
- [8]商庆平,黄志文.锂渣粉对超高性能混凝土力学性能及抗氯离子渗透性的影响[J].城市建筑,2025,22(22):204-207.

作者简介:

武英杰(1979--),女,汉族,山东泰安人,研究生,新疆维吾尔自治区水利水电科学研究院,高级工程师,研究方向:结构材料。