

干湿交替环境中混凝土的性能研究*

The Study of Performance of Concrete in Dry-wet Cycle Environment

乔宏霞¹,何忠茂²,周茗如¹,杜雷²

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃土木工程科学研究院, 兰州 730020)

摘要:以内掺粉煤灰制成的高性能混凝土和普通硅酸盐水泥及抗硫酸盐水泥制成的高性能混凝土作为研究对象,在硫酸钠溶液和水中进行干湿循环后,通过测量相对动弹性模量损失率,说明掺加粉煤灰的高性能混凝土对硫酸盐侵蚀有较好的抵抗性能。

关键词:混凝土;干湿循环;硫酸盐

中图分类号:TU528.31 文献标识码:A 文章编号:1005-8249(2008)01-0003-04

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050,

2. Gansu Science Research Institute of Civil Engineering, Lanzhou 730020)

Abstract: This paper describes a study carried out to examine the performance of various high performance concrete in sulfate environment, such as high performance concrete inside fly ash, and portland cement concrete, and resist-sulfate cement concrete. They experienced dry-wet cycle in sodium sulfate solution and in water. The parameters in the durability performance of concrete were loss ratio of relative dynamic modulus of elasticity. They said that high performance concrete inside fly ash has better repellence to sulfate corrosion.

Key words: concrete; dry-wet cycle; sulfate

干湿交替的自然条件在我国西部盐渍土地区对工程材料的腐蚀性是材料耐久性的重要研究领域^[1]。由于硫酸盐的存在,在工业民用建筑中已产生了巨大的破坏。本文采用兰州地区的原材料,用快速破坏试验研究混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能。通过其在硫酸盐侵蚀条件下相对动弹性模量损失率的变化,提供混凝土抗硫酸盐性能定性鉴定方法的理论数据。

1 试验原材料及试验方案

1.1 原材料

水泥(祁连山牌 32.5 级普通硅酸盐水泥、525 号中抗硫酸盐水泥和 525 号高抗硫酸盐水泥,性能指标见表 1,化学成分见表 2)、细骨料(粗砂细度模数 3.52,级配良好,堆积密度 1 533kg/m³,表观密度 2 594 kg/m³,含泥量 0.38%)、粗骨料(石子粒径为 5mm~31.5mm,连续级配,其余各项指标见表 3)、I 级粉煤灰

(性能指标见表 4,化学成分见表 2)、自来水。

表 1 水泥的各项性能指标

	细度/ 0.075mm 筛余量/ %	标准稠 度用水 量/mL	凝结时间 /h:min		安定 性/煮 沸法	抗压强度 /MPa		抗折强度 /MPa	
			初凝	终凝		3d	28d	3d	28d
普硅 水泥	8.8	127	1:25	2:38	合格	18.0	50.5	4.68	8.07
中抗 硫水泥	3.6	121	1:58	4:55	合格	24.0	54.98	4.6	8.60
高抗 硫水泥	0.8	122	2:36	4:11	合格	29.35	56.23	4.75	7.88

(普通硅酸盐水泥性能检验标准为 GB175-1999;抗硫酸盐水泥性能检验标准为 GB748-1996)

表 2 水泥、粉煤灰的化学成分 /%

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C ₃ A	烧失量
普硅水泥	30.54	3.78	4.16	54.25	1.43	2.83	—	1.67
中抗硫水泥	29.98	4.57	3.96	56.51	3.98	1.72	2.74	0.71
高抗硫水泥	23.80	4.88	3.67	58.69	3.18	1.79	1.45	0.85
粉煤灰	46.91	12.64	24.52	9.94	1.66	0.80	—	—

* 基金项目:科技部社会公益研究专项资金项目(2000D1B10077)

收稿日期:2007-05-17

试验研究

表3 粗骨料性能指标

针片状含量 /%	压碎指标 /%	堆积密度 /kg/m ³	表观密度 /kg/m ³	含泥量 /%
3.84	5.8~12	1670	2699	0.2~1.0

表4 粉煤灰性能指标 /%

	细度	烧失量	需水量比	SO ₃ 含量	28d 抗压强度比	质量等级
GB1596-91	≤12	≤5	≤95	≤3	≥75	I级
实测结果	8.8	3.70	91	0.8	77	I级

1.2 试验方案

试验所用高性能混凝土由 32.5 级普通硅酸盐水泥, 525 号中抗硫酸盐水泥和高抗硫酸盐水泥, I 级粉煤灰, 粗砂和碎石配制而成。混凝土配合比见表 5。

表5 混凝土配合比设计 /kg/m³

编号	水泥品种	水泥	粉煤灰	石子	砂子	用水量	W/C
C-1	普硅水泥	400	—	1122	748	180	0.45
C-2	高抗硫水泥	400	—	1122	748	180	0.45
C-3	普硅水泥	360	40	1122	748	180	0.45
C-4	中抗硫水泥	400	—	1122	748	180	0.45
C-5	普硅水泥	340	60	1122	748	180	0.45
C-6	普硅水泥	320	80	1122	748	180	0.45

(复合减水剂用量在试验中根据保持各混凝土流动性在 180mm~200mm 的范围具体确定)

试样尺寸 100mm×100mm×400mm, 选用硫酸钠侵蚀液离子浓度: 饮用水(A), [SO₄²⁻]=5 000mg/L (B 溶液质量浓度 0.49%), [SO₄²⁻]=5 000mg/L (C 溶液质量浓度 4.9%), 共 3 组浸泡液。确定 3 种浓度溶液的原因是: 普通抗硫酸盐水泥只适用于 2 500 mg/L 以下的溶液, 不用再进行比较, 因此选用高于 2 500mg/L 的溶液。5 000mg/L 以下溶液地下水较常见^[2], 但无国家标准, 为实用起见, 选用此浓度; 对于 50 000mg/L 的溶液, 主要是考虑加速试验进程。同时, 由于沿海和个别地区, 地下水或盐渍土含量在 50 000mg/L 以下, 因此, 选用此浓度^[3]。对于饮用水, 主要是考虑对比。

利用干湿循环进行物理腐蚀检测, 将混凝土养护 28d 后, 先测试件浸水饱和后的基准动弹性模量, 然后在 A, B, C 3 种溶液中进行干湿循环耐久性试验。试件在 A, B, C 浸泡液中分别浸泡 12h, 然后在烘箱中(100

±5)°C 烘干 12h, 确定经 20, 40, 60, 80, 100 次循环后试件浸泡饱和的耐久性能指标。

根据以上试验, 测定试件动弹性模量, 采用相对动弹性模量损失率作浸泡效果分析。通过掺加粉煤灰混凝土与普通硅酸盐混凝土和抗硫酸盐水泥混凝土的横向对比, 以及同一配比混凝土不同循环次数的纵向对比, 分析各种混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能。

2 试验结果与数据分析

2.1 普通抗硫酸盐混凝土的研究

在一般的硫酸盐侵蚀环境中, 人们往往采用抗硫酸盐水泥来配制混凝土^[4], 抗硫酸盐水泥制作过程中污染较大, 成本较高, 且在干湿循环的环境中不能很好地发挥其性能。本论文研究的是在干湿循环的水侵蚀和硫酸盐侵蚀环境中, 普通硅酸盐水泥混凝土和中抗硫酸盐水泥以及高抗硫酸盐水泥混凝土的耐久性能。试验选用表 5 中的混凝土 C-1、C-2、C-4 来研究。

2.1.1 混凝土在 A 溶液中干湿循环试验研究 图 1 表明: 3 种混凝土的动弹性模量损失率均随着循环时间的进行不断增加, 变化趋势相同; 在循环后期, 动弹性模量损失达到 40%, 丧失耐久性; 混凝土 C-2 的动弹性模量损失在循环过程中缓慢增加; 混凝土 C-1 的动弹性模量损失在循环过程中缓慢增加, 幅度较小。在水中进行干湿循环时, 中抗硫酸盐水泥混凝土 C-4 的动弹性模量损失最为严重, 可见抗硫酸盐水泥混凝土在水侵蚀的干湿交替环境中, 耐久性能不好。普通硅酸盐水泥混凝土 C-1 的动弹性模量损失率低于其他 2 种混凝土, 说明在水侵蚀的干湿交替环境中, 其耐久性能略优于抗硫酸盐水泥混凝土。

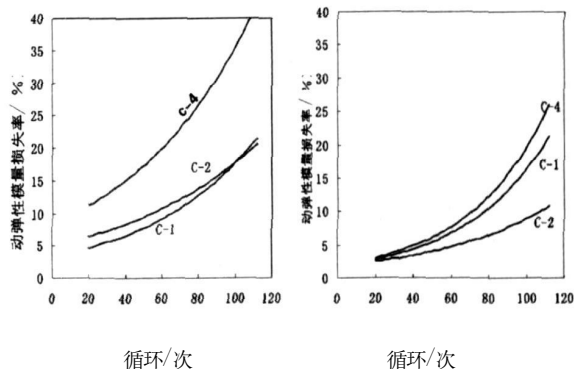


图1 A 溶液中抗硫混凝土性能 图2 B 溶液中抗硫混凝土性能

2.1.2 混凝土在 B 溶液中干湿循环试验研究 混凝土在硫酸盐溶液中进行干湿循环时, 由于硫酸盐与石

试验研究

灰反应产生的石膏晶体引起的 G 盐腐蚀和钙矾石引起的 E 盐腐蚀,会导致混凝土体积膨胀,内部疏松,动弹性模量降低。图 2 表明,3 种混凝土动弹性模量损失率变化趋势相同。混凝土 C-1 的动弹性模量损失率随着循环时间的进行不断增加。混凝土 C-2 的动弹性模量损失率在循环过程中缓慢增加,说明试件遭到一定程度的破坏。混凝土 C-4 的动弹性模量损失率在循环过程中一直在增加。可见在 5 000mg/L 的硫酸钠环境中进行干湿循环时,混凝土 C-4 的动弹性模量损失最为严重,混凝土 C-1 的动弹性模量损失率居于混凝土 C-4 和混凝土 C-2 之间。可见在干湿循环的硫酸盐侵蚀环境中,抗硫酸盐水泥混凝土的耐久性能并不比普通硅酸盐水泥混凝土好。

2.1.3 混凝土在 C 溶液中干湿循环试验研究 图 3 可见,3 种混凝土的动弹性模量损失率变化趋势非常一致,均随着循环时间的进行损失率不断增加。混凝土 C-4 的动弹性模量损失率随着循环时间的进行不断增加,在循环结束的时候达到和接近界定值,可见其不宜用于该恶劣环境。混凝土 C-1 的动弹性模量损失率在循环过程中不断增加,增加量低于混凝土 C-4,在循环结束的时候动弹性模量损失率超过 30%,可见其耐久性能也不是很好。混凝土 C-2 的动弹性模量损失率随着循环时间的进行而不断增加,在循环结束的时候动弹性模量损失率低于 20%,可见在该环境中有一定的抵制侵蚀性能。

在 50 000mg/L 的硫酸钠溶液中进行干湿循环时,混凝土的损伤程度均较严重。3 种混凝土在该环境中的耐久性能依次为:C-2>C-1>C-4,可见在高硫酸盐浓度中,高抗硫酸盐水泥混凝土的抵制硫酸盐侵蚀性能优于普通硅酸盐水泥混凝土和中抗硫酸盐水泥混凝土。

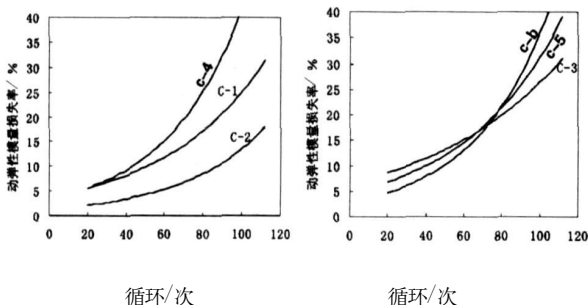


图 3 C 溶液中抗硫混凝土性能 图 4 A 溶液中粉煤灰混凝土性能

2.2 粉煤灰掺量对混凝土耐侵蚀性能影响

粉煤灰是混凝土的一种重要组分,使用粉煤灰不仅可以减少水泥用量,而且可以提高混凝土的某种或某些重要性能^[5],这取决于粉煤灰的性能和掺量。本试验粉煤灰选用 3 种掺量:10%、15%、20%,分别为表 5 中的混凝土 C-3、C-5、C-6,主要研究粉煤灰掺量的变化引起的性能改变,选择最佳掺量。

2.2.1 混凝土在水中干湿循环试验研究 图 4 表明:混凝土的动弹性模量损失率变化趋势非常一致,均随着循环时间的进行不断增加。在循环前期,动弹性模量的损失随着粉煤灰掺量的增加而减小,在循环 80 次以后,这种规律发生了变化,动弹性模量的损失率随着粉煤灰掺量的增加而增加,在试验结束的时候,粉煤灰掺量最高的混凝土 C-6 的动弹性模量损失率接近 40%,粉煤灰掺量最低的混凝土 C-3 动弹性模量损失率略高于 30%。可见干湿交替的环境对混凝土的动弹性模量损伤非常严重;在水中进行干湿循环时,粉煤灰掺量较低的混凝土较为有利。

2.2.2 混凝土在中等浓度盐溶液中干湿循环试验研究 图 5 表明:混凝土的动弹性模量损失率变化趋势均随着循环时间的进行损失率不断增加。在循环 70 次以前,混凝土动弹性模量损失率随着粉煤灰掺量的增加而减小,说明在循环前期粉煤灰的加入可以减少

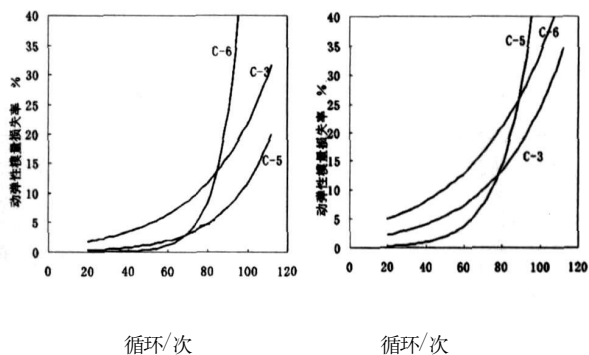


图 5 B 溶液中粉煤灰混凝土性能 图 6 C 溶液中粉煤灰混凝土性能

水泥中 C₃A 的水化产物,从而减少硫酸盐与该水化产物的反应,降低其化学腐蚀和物理腐蚀的程度;在循环后期,这种规律有所改变。混凝土 C-3 的动弹性模量损失率在循环过程中一直增加,在循环 105 次左右损失率略高于 30%;混凝土 C-5 的动弹性模量损失率在循环过程中一直缓慢增加,在循环结束的时候损失率达到 20%;混凝土 C-6 的动弹性模量损失率在循环前

试验研究

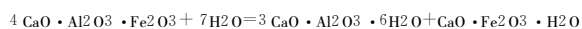
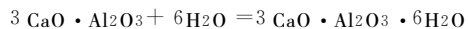
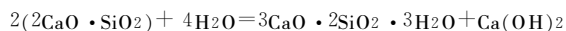
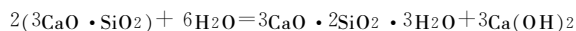
期较其他两种混凝土低,在循环进行到 80 次以后损失率迅速增加,很快达到界定值,丧失耐久性。可见在 5 000mg/L 的硫酸钠溶液中进行干湿循环,3 种混凝土在该环境中的耐久性依次为 C-5>C-3>C-6。

2.2.3 混凝土在高浓度盐溶液中干湿循环试验研究

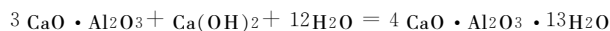
图 6 表明:混凝土的动弹性模量损失率变化趋势非常一致,均随着循环时间的进行不断增加,最终达到或接近界定值。混凝土 C-5 在循环前期动弹性模量损失率较低,循环到 70 次左右,损失率迅速增加,很快达到界定值 40%。混凝土 C-6 的动弹性模量损失率在循环 100 次左右达到 40%,丧失耐久性。混凝土 C-3 的动弹性模量损失率随着循环时间的进行而增加,在循环 110 次时损失率达到 35%。在 50 000mg/L 的硫酸钠溶液中进行干湿循环时,几乎所有的混凝土均破坏严重,较快丧失耐久性;混凝土 C-3 的动弹性模量损失率比其他两种混凝土的损失率低,可见其耐久性略优于混凝土 C-5 和 C-6。

3 硫酸盐侵蚀机理分析

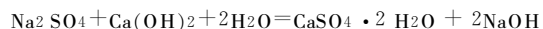
在循环初期,普通硅酸盐水泥发生水化反应:



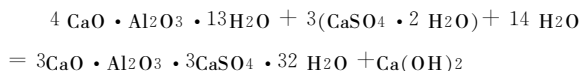
在液相中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度达到饱和时,铝酸三钙依下式水化:



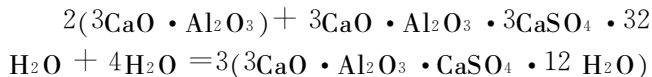
在 Na_2SO_4 溶液中,水化物中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生置换反应:



当石膏存在时,普通硅酸盐水泥混凝土中水化铝酸四钙发生如下反应:

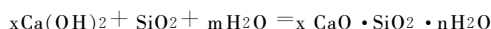
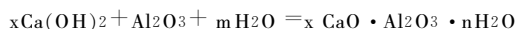


生成高硫型水化硫铝酸钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$),又称钙矾石^[6],即 AFt 相,体积增大 1.5 倍以上,称为 E 盐腐蚀;当石膏消耗尽的时候,铝酸三钙还会与钙矾石生成单硫型水化硫铝酸钙,即 AFm 相,使体积增大导致混凝土破坏,属于化学侵蚀:



在抗硫酸盐水泥混凝土中,由于铝酸三钙含量较低,置换反应生成的 CaSO_4 直接在孔隙中结晶成二水石膏,使体积膨胀,从而导致混凝土破坏,属于物理侵蚀,称为 G 盐腐蚀,这种侵蚀在 CaSO_4 浓度较高时,对普通硅酸盐水泥混凝土也存在。

在加入粉煤灰的混凝土中,由于粉煤灰能取代一部分水泥,从而减少了水泥中带入的铝酸三钙含量,相应减少一部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成;同时粉煤灰中的活性成分 SiO_2 和部分 Al_2O_3 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应:



生成大量的 C-S-H 无定性凝胶,填充了混凝土中的孔隙,使混凝土更加致密,从而提高混凝土抗硫酸盐侵蚀能力。

4 结论和建议

(1)混凝土的相对动弹性模量损失率能够较好的反映混凝土的性能,可作为一项混凝土耐侵蚀性能指标。(2)在干湿交替的环境条件下,抗硫酸盐水泥混凝土的耐久性能并不比普通硅酸盐水泥混凝土的耐久性能好。(3)在硫酸盐干湿交替侵蚀的环境中,可以选用掺加适量粉煤灰的水泥混凝土代替抗硫酸盐水泥混凝土。(4)在干湿循环的水环境中,合理掺量的粉煤灰混凝土具有良好的水中耐久性。

参 考 文 献

- [1] 周亮臣. 西北地区黄土状盐渍土对建筑物的损害[J]. 石油规划设计, 1992, 3(4): 16~18
- [2] 戴剑锋, 刘晓红, 郑克宇等. 盐湖地区混凝土的腐蚀和防治[J]. 甘肃工业大学学报, 2002, 28(2): 100~102
- [3] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999
- [4] 亢景富. 硫酸盐侵蚀研究中的几个基本问题[J]. 混凝土, 1995, 3: 9~17
- [5] 覃立香, 胡曙光, 马保国. 粉煤灰对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 1997, 5: 15~18
- [6] 湖南大学等合编. 建筑材料[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988, 33~35